



ANIVERSARIO

75

**NOTAS PARA EL CURSO
“FÍSICA II”
DIVISIÓN DE CIENCIAS
BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD**


**Dr. Mario Enrique Alvarez Ramos
(Responsable)**

**Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano
Dr. Santos Jesús Castillo
M.C. Beatriz G. Zaragoza Palacios**

**© 2017 Departamento de Física
Universidad de Sonora**

TEMARIO

Introducción

1. Cargas eléctricas y Ley de Coulomb.
 2. Campo eléctrico y Ley de Gauss.
 3. Potencial Eléctrico.
 4. Capacitancia.
 5. Corriente eléctrica y resistencia.
 6. Campo magnético.
 7. Propiedades magnéticas de la materia.
 8. Naturaleza y propagación de la luz.
 9. Leyes de reflexión y refracción.
 10. Óptica geométrica
 11. Difracción
 12. Polarización óptica
 13. Propiedades ópticas de la materia.
- 

Introducción

Cargas eléctricas y Ley de Coulomb.



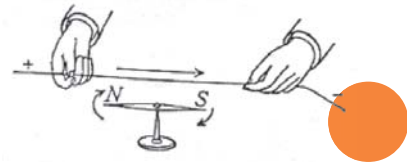
NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Antecedentes.

Desde la antigua Grecia, los filósofos de la época ya conocían la existencia del ámbar y que al frotarlo este atraía trocitos de ámbar.

En 1820, Hans Christian Oersted encontró que al pasar una corriente eléctrica por un alambre este desviaba la aguja magnética de una brújula.

Entre 1831 y 1879 se introducen los conceptos de carga eléctrica, fuerza electromagnética, campo, corriente, energía potencial electrostática, etc.



NATURALEZA DE LAS CARGAS.

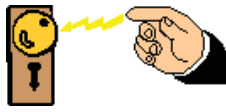
Antecedentes.

En 1873 James Clerk Maxwell unificó las ideas de la electricidad y el magnetismo, prevalecientes hasta entonces, en lo que se conoce como las ecuaciones de Maxwell.

Esta teoría sugirió la posibilidad de generar ondas electromagnéticas en el laboratorio, hecho que corroboró Heinrich Hertz en 1887, ocho años después de la muerte de Maxwell, y que posteriormente supuso el inicio de la actual era de la comunicación rápida a distancia.



NATURALEZA DE LAS CARGAS.



Fuentes y tipos de carga eléctrica

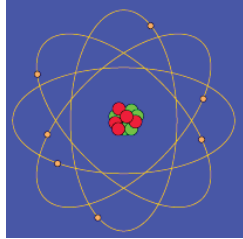
Existen dos tipos de carga eléctrica:

positiva

protones

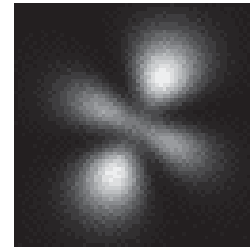
negativa

electrones



Modelo atómico de Bohr

<http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/bohr.html>



Modelo de la mecánica cuántica

<http://www.physics.ucla.edu/~dauger/orbitals/>

Los materiales con carga positiva y negativa igual se llaman **eléctricamente neutros**.

En la naturaleza los objetos son eléctricamente neutros

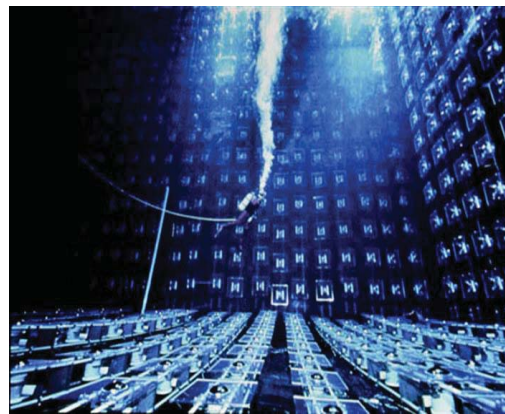
NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Propiedades de la Carga Eléctrica

- La carga eléctrica se conserva.

Lo que implica que "La carga no se crea ni se destruye, sólo se transfiere"

- entre átomos
- entre moléculas
- entre cuerpos



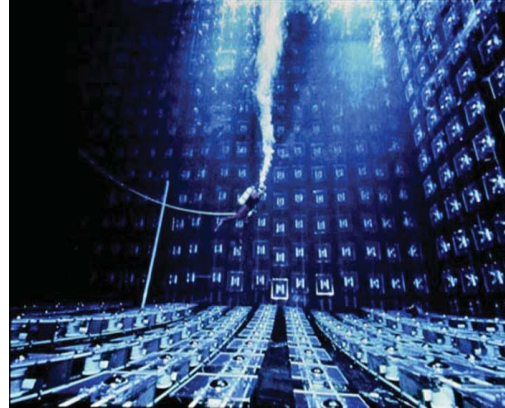
- En el sistema SI la unidad de carga es el Coulomb (C).
- En un átomo neutro, las cargas positiva y negativa tienen la misma magnitud.

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Propiedades de la Carga Eléctrica

- La carga esta cuantizada y su unidad fundamental es e , cuyo valor en el SI es $1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$.

Lo que implica que "La carga de un cuerpo siempre se puede expresar como un múltiplo entero de la carga fundamental", es decir



$$Q = Ne$$

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

La carga eléctrica en la materia

Z = número electrones = número protones

A = número protones + neutrones



Elemento



Isótopo

- Si un átomo tiene el mismo número de electrones que de protones entonces es **neutro**

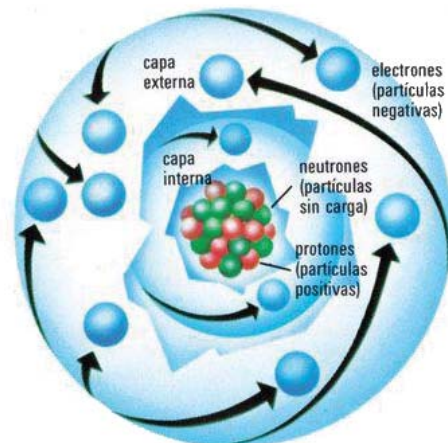
$$Q = Z \cdot q_p - Z \cdot q_e = 0$$

- **Ión positivo** : le faltan electrones

$$Q = +n_e \cdot q_e$$

- **Ión negativo**: tiene electrones añadidos

$$Q = -n_e \cdot q_e$$



número atómico = número de protones

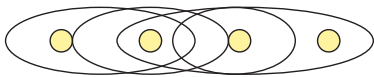
masa atómica ≈ número de protones + número de neutrones

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Conductores y aislantes

Dependiendo de los mecanismos de transporte de cargas, los materiales se clasifican en tres categorías: Conductores, Aislantes (o no conductores) y Semiconductores

Conductores



Los electrones son libres de moverse en el material

Ejemplos de conductores son los metales, ya que en ellos los electrones tienen libertad de movimiento al encontrarse débilmente ligados al núcleo.



NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Conductores y aislantes

Dependiendo de los mecanismos de transporte de cargas, los materiales se clasifican en tres categorías: Conductores, Aislantes (o no conductores) y Semiconductores

Ejemplos de no conductores o aislantes son, por ejemplo, la madera, el plástico, el vidrio, etc.

Aislantes



Los electrones están ligados a los átomos por lo que no se mueven (no conducen).



NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Conductores y aislantes

Dependiendo de los mecanismos de transporte de cargas, los materiales se clasifican en tres categorías: Conductores, Aislantes (o no conductores) y Semiconductores

Semiconductores

Los semiconductores son un tipo especial de materiales debido a que presentan la característica de que se pueden comportar como conductores o como aislantes, dependiendo de las condiciones en que se utilicen.



NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Conductores y aislantes

Dependiendo de los mecanismos de transporte de cargas, los materiales se clasifican en tres categorías: Conductores, Aislantes (o no conductores) y Semiconductores

Conductores

(Sí conducen)

Aislantes

(No conducen)

Semiconductores

(A veces conducen)



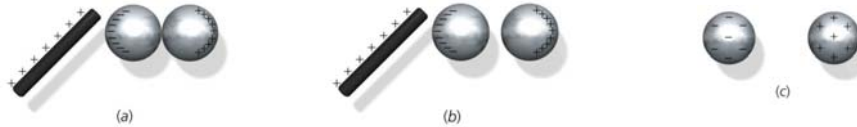
NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Carga por inducción

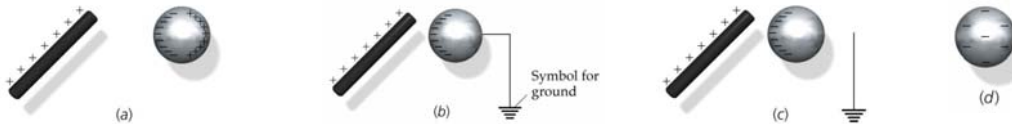
Cargar eléctricamente un objeto por inducción implica que se induce en el cuerpo una carga sin necesidad de tocarlo.

Este proceso aplica (principalmente) para materiales conductores

1. Cargando por inducción (dos conductores aislados)



2. Cargando por inducción (1 conductor a tierra)



Este mecanismo se fundamenta en que en los materiales conductores es factible que la carga se mueva físicamente de un lugar a otro.

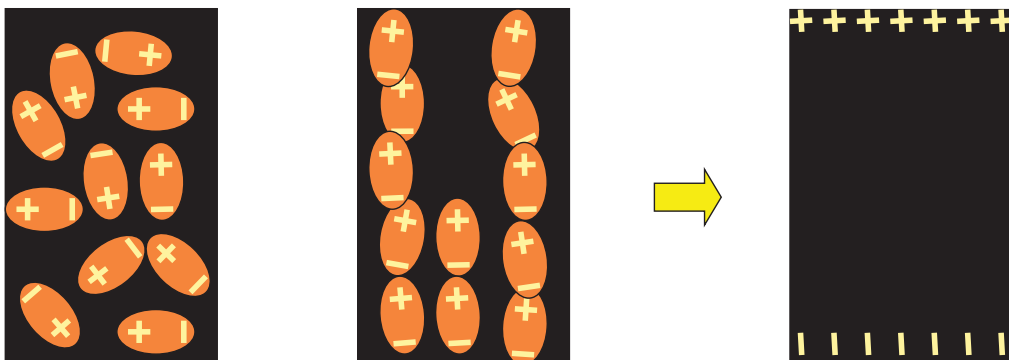
NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Carga por inducción

Cargar eléctricamente un objeto por inducción implica que se induce en el cuerpo una carga sin necesidad de tocarlo.

Un proceso similar aplica para materiales aislantes

3. Cargando por inducción a un no conductor.



Al principio los átomos libres están orientados al azar en el "bulto" del material

Al acercar un objeto cargado, las cargas atómicas se alinean, consiguiendo un efecto de carga sobre las superficies.

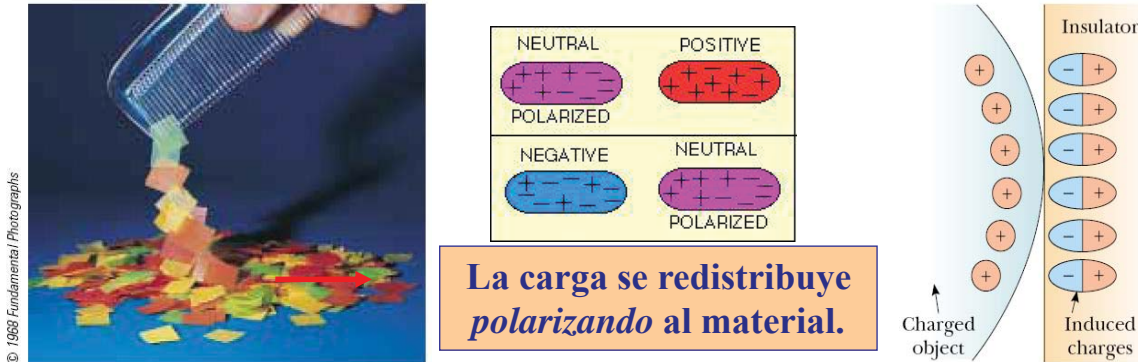
NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Carga por inducción

Cargar eléctricamente un objeto por inducción implica que se induce en el cuerpo una carga sin necesidad de tocarlo.

Un proceso similar aplica para materiales aislantes

3. Cargando por inducción a un no conductor.



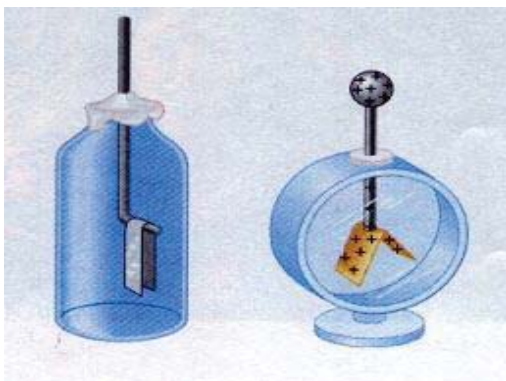
En este caso no hay movimiento de cargas de un lugar a otro, sino sólo un reacomodo alrededor de la posición de equilibrio, lográndose una carga efectiva en las capas superficiales del aislante, lo que se conoce como polarización.

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

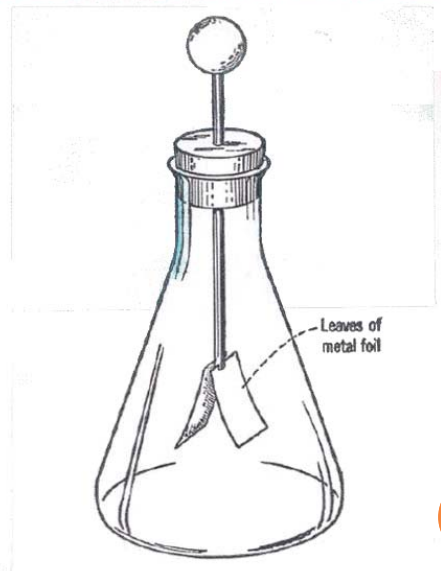
Carga por inducción

El electroscopio es un dispositivo empleado para detectar la existencia de carga eléctrica en un cuerpo.

Al acercar un cuerpo cargado, por inducción, las láminas adquieren carga y se separan.



The Electroscopio Detects Electric Charge

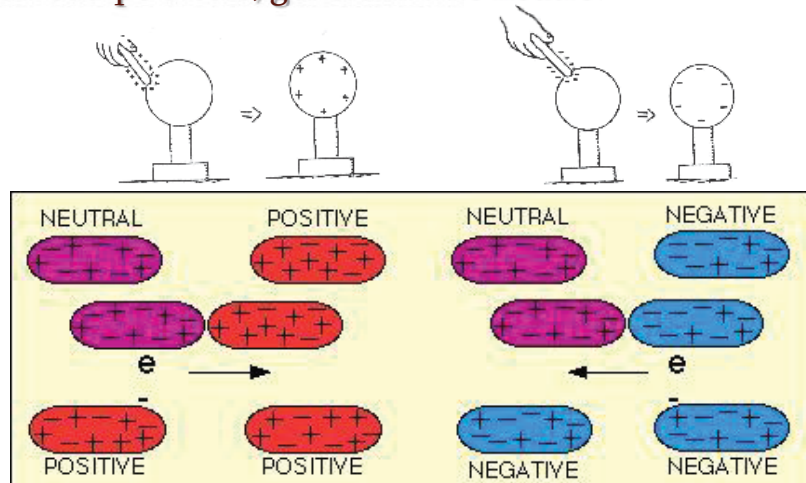


NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Carga por contacto

Cargar eléctricamente un objeto por contacto implica que se transfiera la carga de un cuerpo a otro, generalmente neutro.

En todo momento, la suma algebraica de carga antes y después DEBE ser la misma, como consecuencia de la conservación de carga.

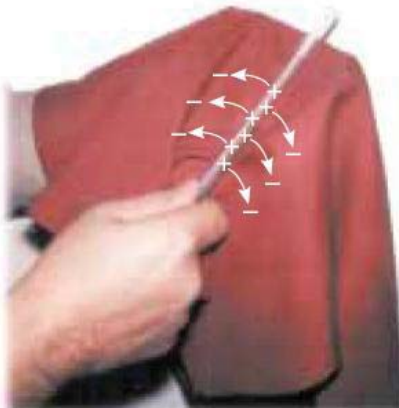


En este caso hay transferencia de carga de un objeto cargado a uno inicialmente neutro, obteniendo al final dos cuerpos cargados con el mismo tipo de carga, ya que el exceso de carga se distribuye en ambos cuerpos.

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Carga por frotamiento

Cargar eléctricamente un objeto por frotamiento implica que en este caso se transfiera carga entre dos cuerpos inicialmente neutros, pero que terminan cargados.



La conservación de la carga nos permite escribir, antes

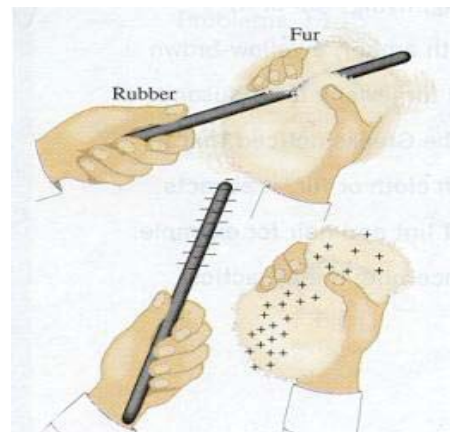
$$Q_i = Q_{1i} + Q_{2i} = 0$$

y después

$$Q_f = Q_{1f} + Q_{2f} = 0$$

De donde

$$Q_{1f} = -Q_{2f}$$

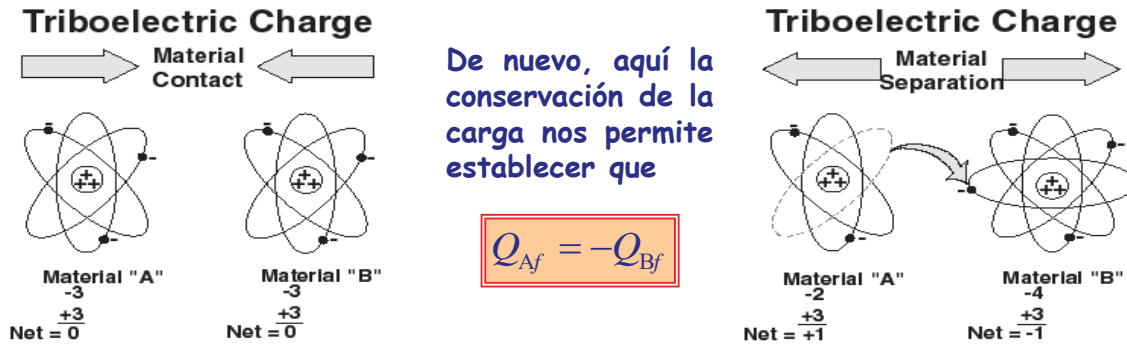


Como en este caso hay transferencia de carga entre dos cuerpos inicialmente neutros (la carga total es cero), al final los cuerpos terminan cargados con la misma cantidad de carga, pero de signos opuestos.

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Carga por frotamiento

Un mecanismo similar al frotamiento es el conocido como efecto triboeléctrico, en el cual los cuerpos entran en contacto, se presionan y finalmente se separan de nuevo.

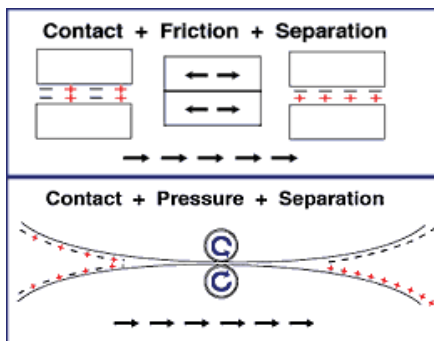


Como en este caso hay transferencia de carga entre dos cuerpos inicialmente neutros (la carga total es cero), al final los cuerpos terminan cargados con la misma cantidad de carga, pero de signos opuestos.

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Carga por frotamiento

A continuación se presentan algunos valores típicos de carga obtenida por el mecanismo triboeléctrico, muy común en nuestra vida diaria.



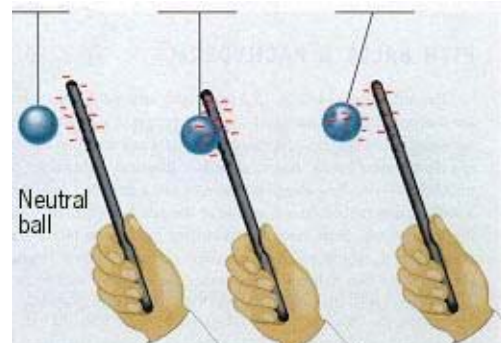
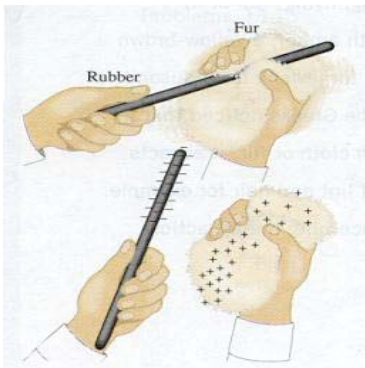
Medios de generación estática triboeléctrica	Voltajes electrostáticos típicos	
	10%-20% humedad	65%-90% humedad
Caminar sobre un tapete.	35,000V	1,500V
Caminar sobre un piso vinílico.	12,000V	250V
Una persona sentada en un banco.	6,000V	100V
Bolsas de polietileno tomadas de un escritorio.	20,000V	1,200V
Sentarse en una silla con espuma de poliuretano	18,000V	1,500V



NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Interacción entre cargas

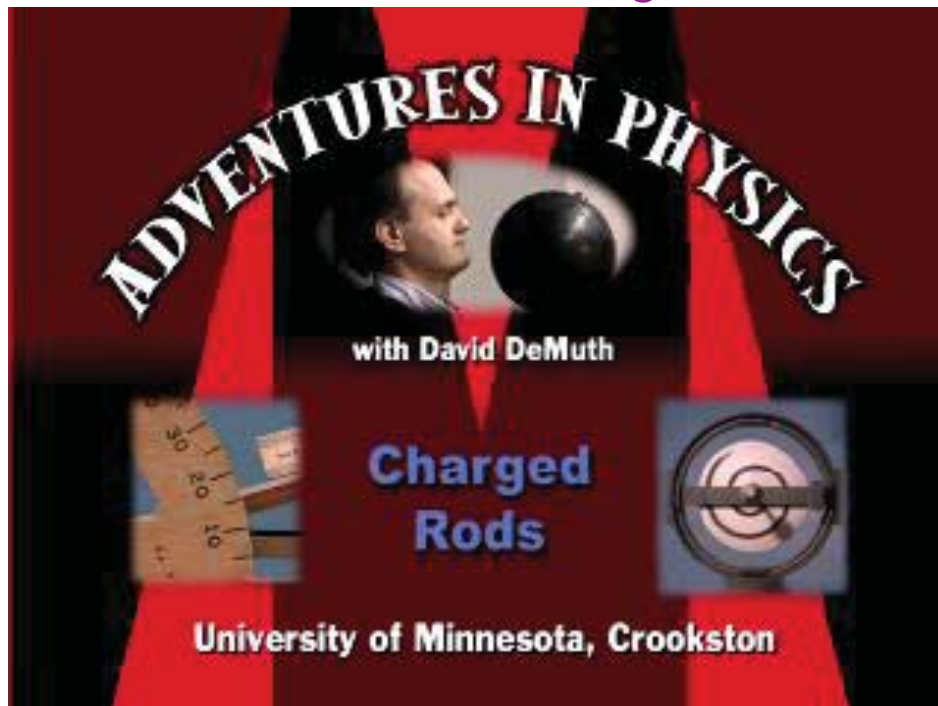
Para cargar una varilla se debe frotar con un material adecuado, para transferir cargas entre ellos. Sin embargo, para saber si está cargado es necesario que interactúe con otro cuerpo y ver el efecto de dicha interacción.



En la figura se muestra una bola, inicialmente neutra, al ser tocada se carga por contacto e inmediatamente hay una repulsión entre los cuerpos. Lo anterior permite establecer que **“cargas de igual signo se repelen”**, de manera similar se puede mostrar que **“cargas de signos opuestos se atraen”**.

NATURALEZA DE LAS CARGAS.

Interacción entre cargas



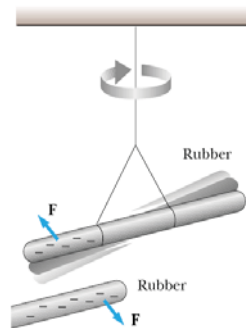
FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

Antecedentes.

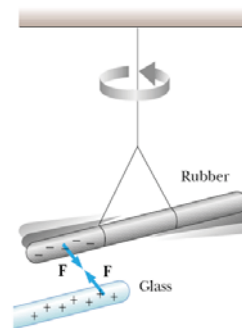
La existencia de las cargas eléctricas permite que exista el comportamiento de atracción y repulsión. En este punto, vale la pena mencionar que en el caso de la fuerza gravitacional, solamente se presenta el fenómeno de atracción, en ese caso, entre las masas.

La regla fundamental y básica que subyace a todo fenómeno eléctrico nos dice que:

"LAS CARGAS ELÉCTRICAS DE IGUAL SIGNO SE REPELEN"

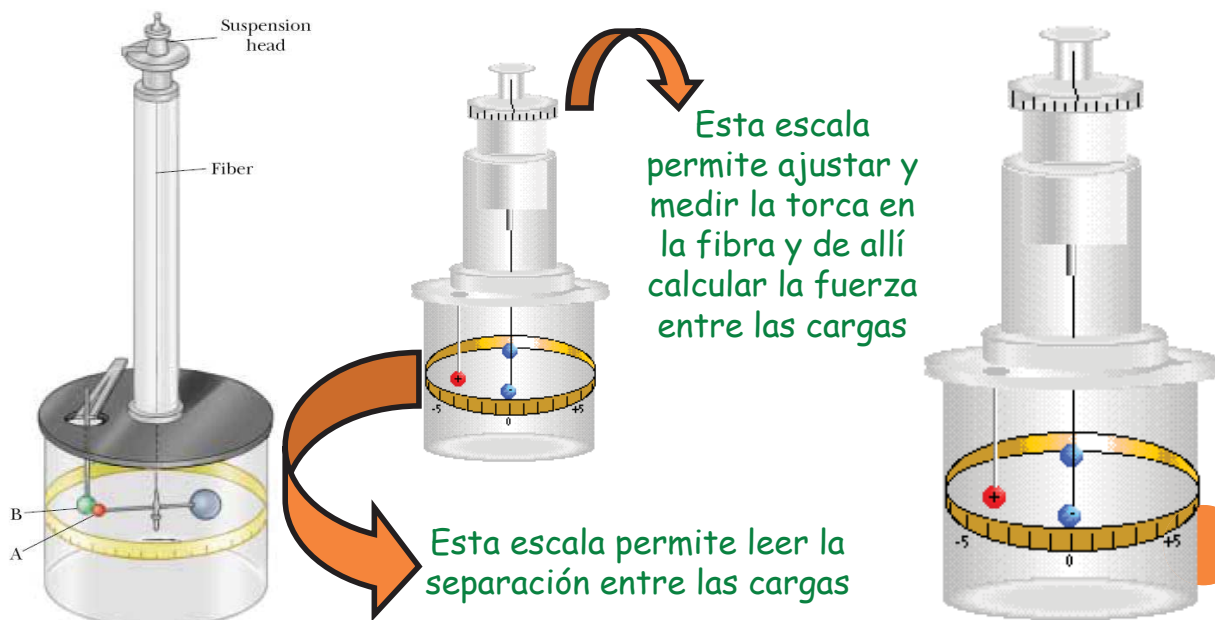


"LAS CARGAS DE SIGNOS OPUESTOS SE ATRAEN"



FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

El Experimento: Balanza de Torsión de Coulomb



FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

Conclusiones del Experimento de Coulomb

A partir del experimento de Coulomb se puede concluir que la fuerza ejercida por una carga puntual sobre otra

- está dirigida a lo largo de la línea que las une;
- es repulsiva si las cargas tienen el mismo signo y atractiva si tienen signos opuestos;
- varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa las cargas; y
- es proporcional al valor de cada una de ellas.

FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

Enunciado de la Ley de Coulomb



Charles-Augustin de Coulomb
(1736-1806).

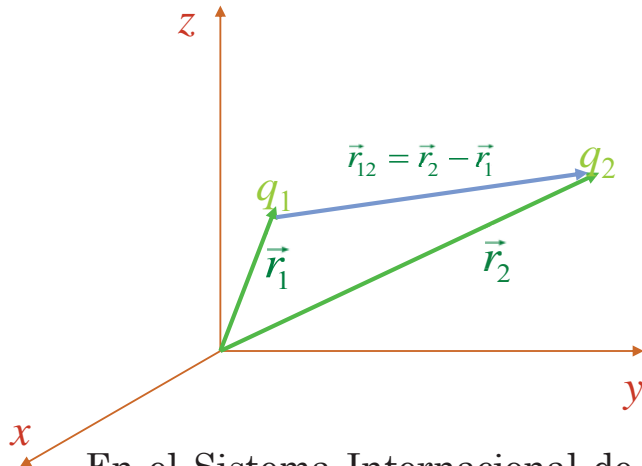
Físico e ingeniero militar francés

“La fuerza existente entre dos cargas puntuales está dirigida a lo largo de la línea que las une, es proporcional al producto de ellas y varía inversamente con el cuadrado de la separación entre ellas, siendo de carácter repulsivo si las cargas tienen el mismo signo y atractivo si tienen signos opuestos”

FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

Expresión matemática de la Ley de Coulomb

Como la fuerza es una cantidad vectorial es importante mencionar que la forma vectorial de la Ley de Coulomb es



$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12}$$

donde k_e es la llamada Constante de Coulomb, cuyo valor depende del sistema de unidades y del medio en el que trabajemos.

En el Sistema Internacional de Unidades (SI) el valor de la Constante de Coulomb en el vacío es $k_e = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$

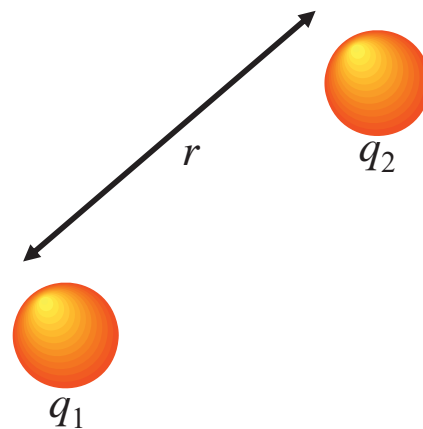
FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

Expresión matemática de la Ley de Coulomb

Para el caso en que tenemos solamente dos cargas puntuales y nos interesa conocer la magnitud de la fuerza podemos considerar que

$$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

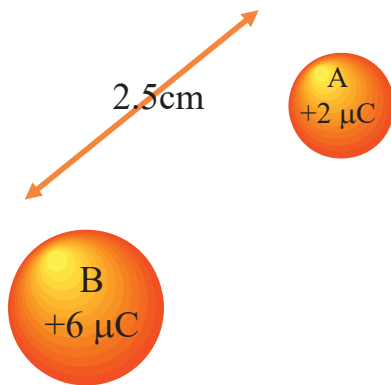
donde k_e es la Constante de Coulomb, q_1 y q_2 son las cargas interactuantes y r es la separación entre ellas.



FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

Un ejemplo de la Ley de Coulomb

El objeto A tiene una carga $+2\mu\text{C}$ y el objeto B tiene una carga de $+6\mu\text{C}$. Si la separación entre ellas es de 2.5cm, (a) ¿cuál es el valor de la fuerza? (b) ¿Es atractiva o repulsiva?



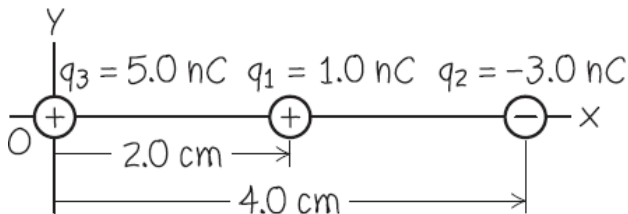
a) $F = 172.8\text{N}$

b) Como las cargas son de igual signo, el valor de F es positivo, lo que significa que es una fuerza repulsiva.

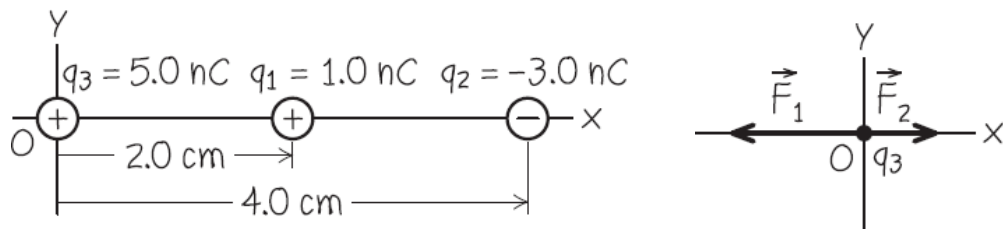
Si el valor de F hubiese sido negativo tendríamos una fuerza atractiva.

FUERZA ELÉCTRICA Y LEY DE COULOMB.

Dos cargas puntuales se localizan en el eje $+x$ de un sistema de coordenadas. La carga $q_1 = 1.0\text{ nC}$ está a 2.0 cm del origen, y la carga $q_2 = -3.0\text{ nC}$ está a 4.0 cm del origen. ¿Cuál es la fuerza total que ejercen estas dos cargas sobre una carga $q_3 = 5.0\text{ nC}$ que se encuentra en el origen? Las fuerzas gravitatorias son despreciables.



$$\vec{F}_{Total} = \sum_i \vec{F}_i = \sum_i k \frac{q_i q_0}{r_i^2} \vec{r}_i$$



$$F_{1 \text{ sobre } 3} = (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.0 \times 10^{-9} \text{ C})(5.0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0.020 \text{ m})^2}$$

$$= 1.12 \times 10^{-4} \text{ N} = 112 \mu\text{N}$$

Esta fuerza es repulsiva por lo que tiene una componente negativa (-x)

$$F_{2 \text{ sobre } 3} = (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(3.0 \times 10^{-9} \text{ C})(5.0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0.040 \text{ m})^2}$$

$$= 8.4 \times 10^{-5} \text{ N} = 84 \mu\text{N}$$

Esta fuerza es atractiva por lo que tiene una componente positiva (+x), entonces, la suma de todas las fuerzas es:

$$F_x = -112 \mu\text{N} + 84 \mu\text{N} = -28 \mu\text{N}$$

Campo eléctrico y Ley de Gauss.

Potencial Eléctrico.

Capacitancia.



CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Antecedentes.

En física, el campo eléctrico \mathbf{E} es un ente físico (de carácter vectorial) que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica, de tal forma que la fuerza eléctrica (o de Coulomb) \mathbf{F} experimentada por una carga q está relacionada con el campo eléctrico \mathbf{E} mediante la expresión

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Esta definición general indica que el campo eléctrico no es directamente medible, sino a través de la fuerza actuante sobre alguna carga.

La unidad del campo eléctrico en el SI es N/C, V/m o, en unidades básicas: $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$.

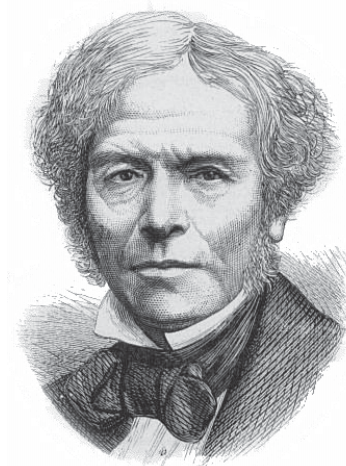
CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Antecedentes.

La idea de campo eléctrico fue propuesta por Faraday al demostrar el principio de inducción electromagnética en el año 1832.

El campo eléctrico asociado a una carga aislada o a un conjunto de cargas es aquella región del espacio en donde se dejan sentir sus efectos.

Así, si en un punto cualquiera del espacio en donde está definido un campo eléctrico se coloca una carga de prueba o carga testigo, se observará la aparición de fuerzas eléctricas, es decir, de atracciones o de repulsiones sobre ella.



CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

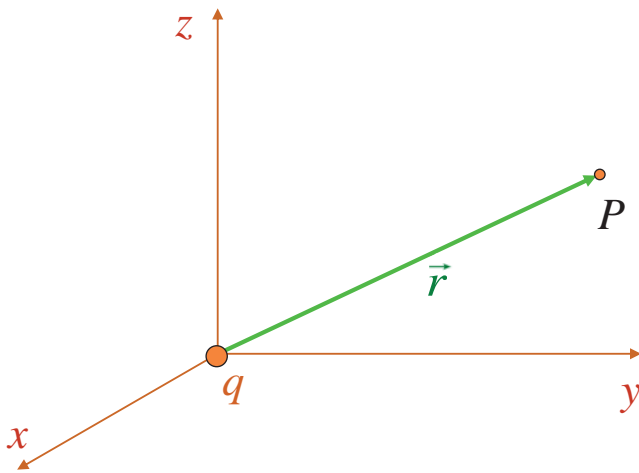
Campo eléctrico a partir de la Ley de Coulomb

Conocida la expresión para la fuerza eléctrica, usamos la definición de campo eléctrico, a saber

$$\vec{E} \equiv \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_e}{q_0}$$

de donde podemos escribir la expresión vectorial para el campo eléctrico en el punto P , a una distancia r de la carga puntual q , como

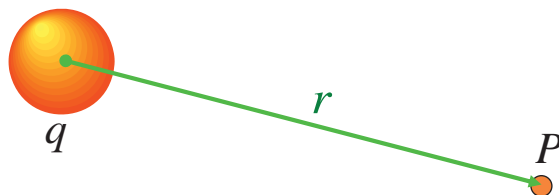
$$\vec{E}_P = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r}$$



CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

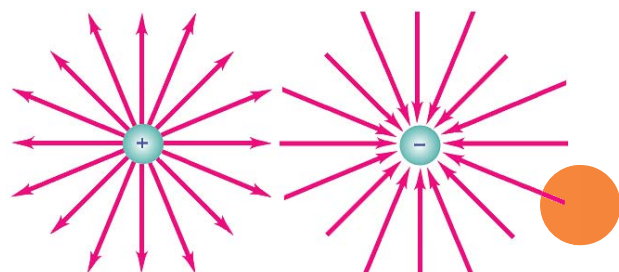
Campo eléctrico a partir de la Ley de Coulomb

Para el caso en que nos interesa conocer el valor del campo eléctrico a una distancia r de una carga q usaremos



$$E_P = k_e \frac{q}{r^2}$$

Si la carga es positiva, el campo eléctrico apunta en la dirección de "alejamiento"; mientras que si la carga es negativa, el campo apunta en la dirección de "acercamiento"



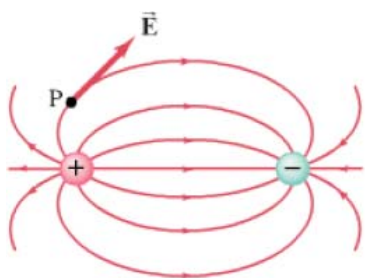
CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Las líneas de campo son una manera de poder visualizar la distribución de un campo eléctrico en una región del espacio. Las reglas para construir las líneas de campo son las siguientes:

1. Las líneas deben empezar en cargas positivas y terminar en cargas negativas.
2. Las líneas se dibujan de tal forma que a mayor densidad de líneas, mayor intensidad (magnitud) del campo eléctrico.
3. Las líneas NO se cruzan, porque en cada punto el valor del campo es único y un cruce significaría que existen dos valores para el campo total.

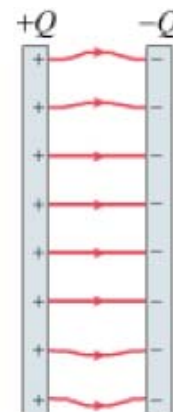
CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Líneas de campo eléctrico

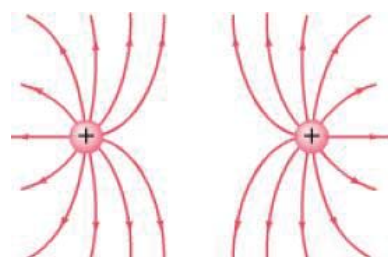


Cargas opuestas

dipolo eléctrico (formado por dos cargas: positiva y negativa de igual magnitud)



Placas cargadas



Cargas iguales

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Ejemplos de cálculo de Campo eléctrico a partir de la Ley de Coulomb

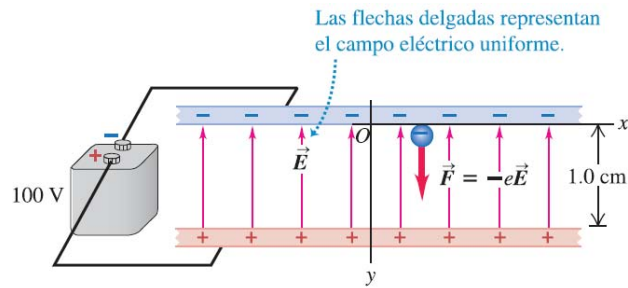
Calcular la magnitud del campo eléctrico producido por una carga $q_1 = 7\mu\text{C}$ en un punto situado a una distancia r .

$$k_e = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

$$E_p = k_e \frac{q}{r^2}$$

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Cuando la terminal de una batería se conecta a dos placas conductoras, grandes y paralelas, las cargas resultantes en las placas originan un campo eléctrico \vec{E} en la región entre ellas, que es casi uniforme. las placas son horizontales y están separadas por 1.0 cm y se conectan a una batería de 100 volts, la magnitud del campo es $E = 1.00 \times 10^4$ N/C. Suponga que la dirección de \vec{E} es vertical hacia arriba, como se ilustra con los vectores en la figura 21.20. a) Si un electrón en reposo se libera de la placa superior, ¿cuál es su aceleración? b) ¿Qué rapidez y qué energía cinética adquiere el electrón cuando viaja 1.0 cm hacia la placa inferior? c) ¿Cuánto tiempo se requiere para que recorra esa distancia? Un electrón tiene una carga $-e = -1.60 \times 10^{-19}$ C y masa $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg.



$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad a_y &= \frac{F_y}{m} = \frac{-eE}{m} = \frac{(-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.00 \times 10^4 \text{ N/C})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \\
 &= -1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b)} \quad v_y^2 &= v_{0y}^2 + 2a_y(y - y_0) \\
 |v_y| &= \sqrt{2a_y y} = \sqrt{2(-1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2)(-1.0 \times 10^{-2} \text{ m})} \\
 &= 5.9 \times 10^6 \text{ m/s} \\
 K &= \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(5.9 \times 10^6 \text{ m/s})^2 \\
 &= 1.6 \times 10^{-17} \text{ J}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c)} \quad t &= \frac{v_y - v_{0y}}{a_y} = \frac{(-5.9 \times 10^6 \text{ m/s}) - (0 \text{ m/s})}{-1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2} \\
 &= 3.4 \times 10^{-9} \text{ s}
 \end{aligned}$$

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Energía potencial eléctrica y potencial eléctrico

La energía potencial eléctrica de un sistema formado por dos cargas q_1 y q_2 situadas a una distancia r una de la otra es igual a

$$U_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r}$$

donde k_e es la constante de Coulomb introducida con anterioridad.

Una definición de energía potencial eléctrica sería la siguiente: *“La energía potencial eléctrica es la cantidad de trabajo que se necesita realizar para acercar una carga puntual q_1 (de masa nula) con velocidad constante, desde el infinito hasta una distancia r de una carga q_2 , la cual utilizamos como referencia.”*

En el infinito la carga de referencia ejerce una fuerza nula.

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

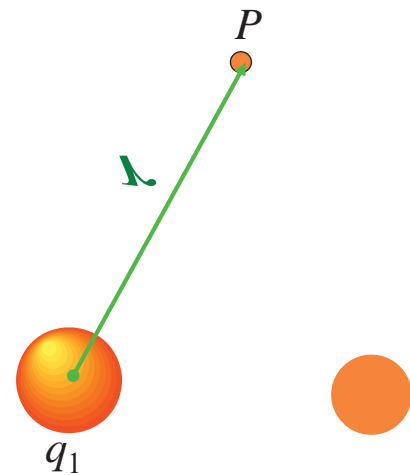
Energía potencial eléctrica y potencial eléctrico

A partir de la expresión anterior para la energía potencial eléctrica se define el potencial eléctrico V producido por la carga q_1 , en el punto de ubicación de la carga de referencia q_2 , como

$$V = k_e \frac{q_1}{r} = \frac{U}{q}$$

donde k_e es la constante de Coulomb, q_1 es la carga que produce el potencial eléctrico en un punto P a una distancia r .

En honor a Alessandro Volta, la unidad del potencial eléctrico, en el SI, es el Volt (V).

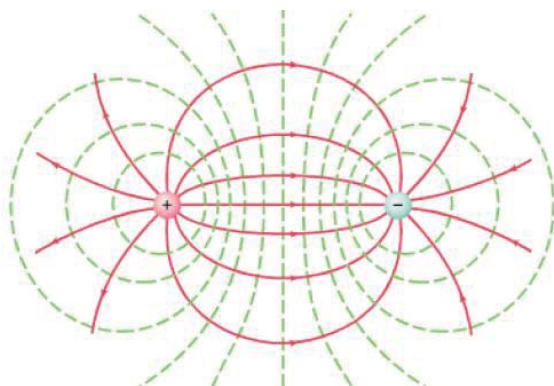


CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

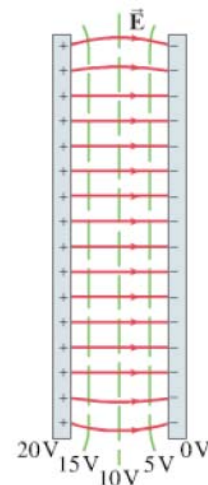
Líneas de potencial eléctrico

El nombre de superficie equipotencial es dado a cualquier superficie formada por una distribución continua de puntos que tienen el mismo potencial eléctrico.

Una característica fundamental de las superficies equipotenciales es que en cualquier punto son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico.



Dipolo eléctrico



Placas cargadas

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA. EJERCICIO

20. Dos cargas puntuales $Q_1=+5.00\text{nC}$ y $Q_2=-3.00\text{nC}$, están separadas 35.0cm . (a) ¿Cuál es la energía potencial del par? (b) ¿Cuál es el potencial eléctrico en el punto medio entre las cargas?

$$U_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r} = \boxed{-3.86 \times 10^{-7} \text{ J}}$$

$$V = k_e \frac{q_1}{r_1} + k_e \frac{q_2}{r_2} = \boxed{103 \text{ V}}$$

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA. EJERCICIO

EXAMPLE 17-2 Electron in TV tube. Suppose an electron in the picture tube of a television set is accelerated from rest through a potential difference $V_b - V_a = V_{ba} = +5000 \text{ V}$ (Fig. 17-4). (a) What is the change in electric potential energy of the electron? (b) What is the speed of the electron ($m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$) as a result of this acceleration?

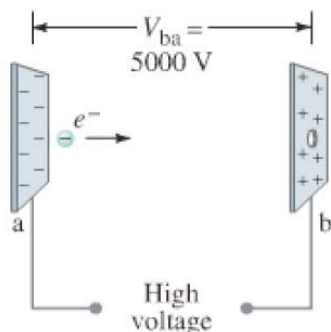


FIGURE 17-4 Electron accelerated in TV picture tube. Example 17-2.

Inicialmente tenemos:

$$U = qV$$

$$K = 0$$

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA. EJERCICIO

SOLUTION (a) The charge on an electron is $q = -e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Therefore its change in potential energy is

$$U = qV_{ba} = (-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(+5000 \text{ V}) = -8.0 \times 10^{-16} \text{ J}.$$

The minus sign indicates that the potential energy decreases. The potential difference, V_{ba} , has a positive sign since the final potential V_b is higher than the initial potential V_a ; negative electrons are attracted toward a positive electrode and repelled away from a negative electrode.

(b) The potential energy lost by the electron becomes kinetic energy KE. From conservation of energy $\Delta K + \Delta U = 0$

$$\begin{aligned} \Delta K &= -\Delta U \\ \frac{1}{2}mv^2 - 0 &= -q(V_b - V_a) = -qV_{ba}, \end{aligned}$$

where the initial kinetic energy is zero since we are given that the electron started from rest. We solve for v :

$$v = \sqrt{-\frac{2qV_{ba}}{m}} = \sqrt{-\frac{2(-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(5000 \text{ V})}{9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 4.2 \times 10^7 \text{ m/s}.$$

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Capacitancia

Los capacitores son dispositivos usados comúnmente en una gran variedad de circuitos eléctricos.

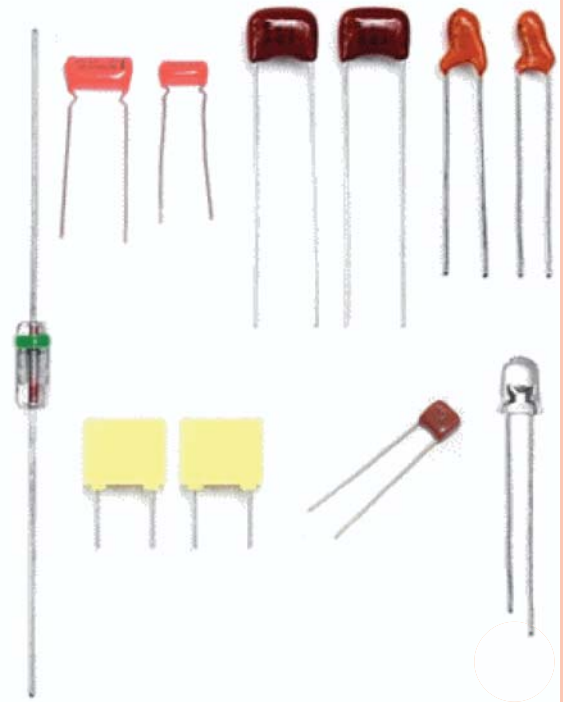
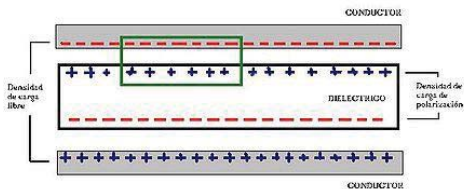
Se usan, por ejemplo, para ajustar la frecuencia de recepción de señales de radiofrecuencia, como filtros en fuentes de poder, para eliminar el ruido en los sistemas de encendido de los automóviles, para hacer funcionar las lámparas de destello ("flashes") de las cámaras fotográficas, etc.



CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Capacitancia

Un capacitor consiste de dos conductores separados por un aislante y su capacidad depende de la geometría y del material (llamada dieléctrico) que separa los conductores.



CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Capacitancia

La capacitancia es una propiedad de los condensadores o capacitores que relaciona la diferencia de potencial (o voltaje) existente entre las placas del capacitor y la carga eléctrica almacenada en este, mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Q}{V}$$



donde C es la capacitancia, medida en faradios (en honor al físico experimental Michael Faraday) siempre que Q esté en Coulombs y V en Volts.

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Capacitancia

El farad (F) es una unidad relativamente grande por lo que suelen utilizarse submúltiplos como el microfaradio (μF) o picofaradio (pF).

Cabe destacar que la capacidad es siempre una cantidad positiva y que depende de la geometría del capacitor considerado (de placas paralelas, cilíndrico, esférico).



CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Una aplicación de la capacitancia: el Desfibrilador



Print this page!

Physical principles of defibrillators <http://www.frca.co.uk/article.aspx?articleid=100392>

Defibrillation is the application of a preset electrical current across the myocardium to cause synchronous depolarization of the cardiac muscle with the aim of converting a dysrhythmia into normal sinus rhythm. Over 135,000 people die annually following acute myocardial infarction. The main cause of sudden death is ventricular fibrillation; the only effective treatment for which is early defibrillation. The defibrillator was invented in 1932 by Dr William Bennett Kouwenhoven.

Capacitors

The most important component of a defibrillator is a capacitor that stores a large amount of energy in the form of electrical charge, then releases it over a short period of time. A capacitor consists of a pair of conductors (e.g. metal plates) separated by an insulator (called a dielectric). Conductors lose and gain electrons easily, and therefore allow current to flow; whereas insulators do not lose their electrons, and hardly allow any current to flow. The maximum working voltage is the voltage that when exceeded causes the dielectric to break down and conduct, often with catastrophic results.

The unit of electric charge (Q) is the coulomb (C). 1 coulomb is the quantity of electricity transported in 1 s by a current of 1 ampere (A) and is equivalent to 6.24×10^{18} electrons (Figure 1).

CAMPO, POTENCIAL Y CAPACITANCIA.

Un ejemplo del cálculo de capacitancia.

(a) ¿Cuánta carga almacena un capacitor de 3.3nF si se conecta a una batería de 6V ? (b) Una vez cargado el capacitor se modifica su geometría, de tal forma que su nueva capacitancia es de $2.5\mu\text{F}$, ¿qué voltaje aparece en sus terminales? (Considere que el cambio de geometría no modifica la carga en las placas que forman el capacitor)

a) Despejamos Q de la fórmula para la capacitancia, y obtenemos:

$$Q = CV = (3.3 \times 10^{-9} \text{ F}) 6\text{V} = 19.8 \times 10^{-9} \text{ C}$$

b) Para este caso, la carga se mantiene igual pero cambian la capacitancia y el voltaje. Ahora despejamos V :

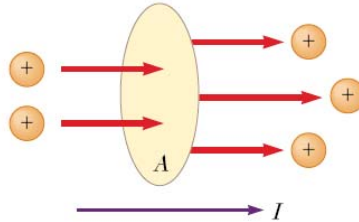
$$V = \frac{Q}{C} = \frac{19.8 \times 10^{-9} \text{ C}}{2.5 \times 10^{-6} \text{ F}} = 7.92 \text{ V}$$

Corriente eléctrica y resistencia.



CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

Siempre que cargas eléctricas del mismo signo están en movimiento, se dice que existe una *corriente*. La corriente es la rapidez con la que fluye la carga a través de una superficie determinada.



Si ΔQ es la cantidad de carga que pasa a través de esta área en un tiempo Δt , la *corriente promedio* I_p es igual a la razón de carga en el intervalo de tiempo:

$$I_p = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

Si la rapidez con la que fluye la carga varía con el tiempo, la corriente también varía, esta corriente se conoce como *corriente instantánea* I y está dada por:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \longrightarrow \quad I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

La unidad SI de la corriente es el **ampere** (A), donde:

$$1\text{A} = 1\text{C/s}$$

Un ampere de corriente equivale a un coulomb de carga que pasa a través de la superficie en 1 segundo. En la práctica se utilizan unidades más pequeñas de corriente, tales como el miliampere (mA) y el microampere (μA).

CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

Considerando un conductor con área transversal A con una corriente I . La **densidad de corriente** J en un conductor se define como la corriente por unidad de área:

$$J = \frac{I}{A}$$

donde J tiene unidades SI de A/m^2

Una densidad de corriente J y un campo eléctrico E se establecen en un conductor cuando una diferencia de potencial se mantiene a través del conductor. Si la diferencia de potencial es constante, la corriente en el conductor será también constante. Con frecuencia, la densidad de corriente en un conductor es proporcional al campo eléctrico en el conductor:

$$J = \sigma E$$

Ley de Ohm

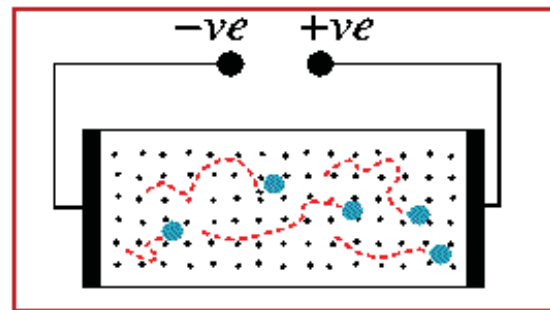
CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.



La Ley de Ohm afirma que para muchos materiales, “*la razón de la densidad de corriente al campo eléctrico es una constante, σ (conductividad del material), y que es independiente del campo eléctrico que produce la corriente*”.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \Rightarrow \frac{\|\vec{J}\|}{\|\vec{E}\|} = \sigma$$

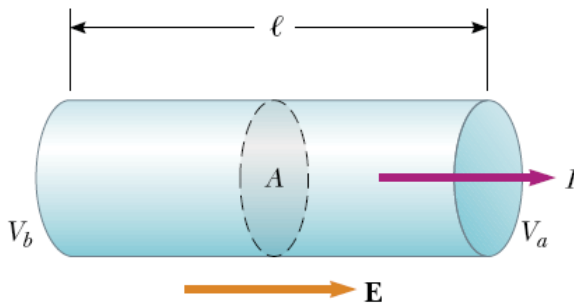
Los materiales que obedecen a la *Ley de Ohm* por presentar un comportamiento lineal entre J y E , se les conoce como *óhmicos*, y los que no la obedecen se dicen *no óhmicos*.



CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

Una forma más práctica de esta Ley se aprecia si se considera un alambre de área transversal A y longitud l . Una diferencia de potencial ΔV a través del alambre crea un campo eléctrico y una corriente. Si se supone que E es uniforme, $\Delta V = V_a - V_b$ se relaciona con el campo eléctrico como sigue:

$$V = E \cdot l$$



De lo anterior, se obtiene que puede expresarse la magnitud de la densidad de corriente como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right)$$

CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

Tomando en cuenta que la densidad de corriente $J = I / A$, podemos sustituirla en la relación anterior para obtener la cantidad $I / \sigma A$, a la que se le llama **resistencia R** del conductor:

$$\frac{I}{A} = \frac{\sigma V}{l} \Rightarrow R \equiv \frac{l}{\sigma A} = \frac{V}{I}$$

De lo anterior se ve que la resistencia tiene unidades SI de volts por ampere. Un volt dividido por un ampere se define como un **ohm (Ω)**

$$1 \Omega = 1 \text{ V} / \text{ A}$$

Esto significa que si al aplicar una diferencia de potencial de 1 volt, a través de un conductor, se produce una corriente de 1 A, entonces la resistencia de tal conductor es de 1 Ω .

CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

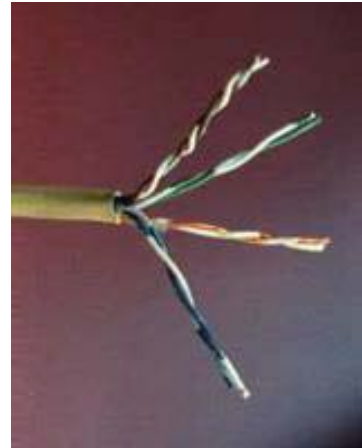
El inverso de la conductividad de un material se le llama **resistividad** ρ y está dada por

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Los buenos conductores eléctricos tienen muy baja resistividad (o alta conductividad), y un buen aislante tiene alta resistividad (baja conductividad).

Con esto, la resistencia de un conductor de largo l , sección transversal A y resistividad ρ , puede expresarse como:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$



CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA. EJEMPLO

Un alambre de cobre del número 18 (el calibre que por lo general se utiliza en los cables para lámparas), tiene un diámetro nominal de 1.02 mm. Conduce una corriente constante de 1.67 A para alimentar una bombilla de 200 watts. La densidad de electrones libres es de 8.5×10^{28} electrones por metro cúbico. Determine las magnitudes de a) la densidad de corriente

$$J = \frac{I}{A}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1.02 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 8.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{1.67 \text{ A}}{8.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 2.04 \times 10^6 \text{ A/m}^2$$

CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA. EJEMPLO

El alambre de cobre calibre 18 del ejemplo anterior tiene un diámetro de 1.02 mm y sección transversal de $8.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2$. Transporta una corriente de 1.67 A. Calcule *a*) la magnitud del campo eléctrico en el alambre, *b*) la diferencia de potencial entre dos puntos del alambre separados por una distancia de 50.0 m; *c*) la resistencia de un trozo de 50.0 m de longitud de ese alambre.

resistividad del cobre = 1.72×10^{-8}

$$a) \quad E = \rho J = \frac{\rho I}{A} = \frac{(1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m})(1.67 \text{ A})}{8.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 0.0350 \text{ V/m}$$

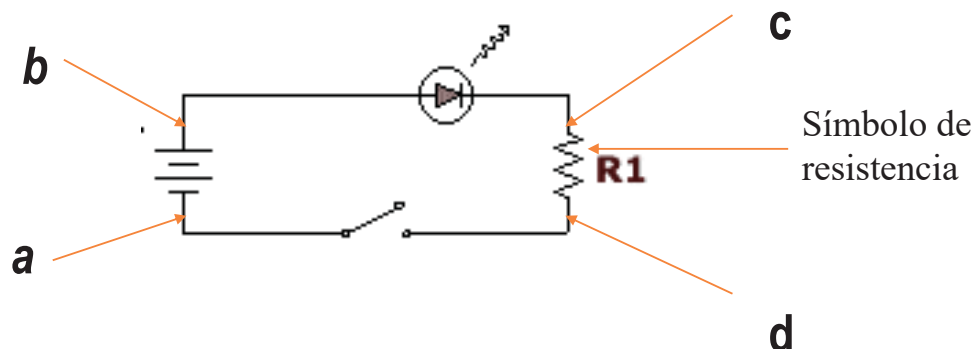
$$b) \quad V = EL = (0.0350 \text{ V/m})(50.0 \text{ m}) = 1.75 \text{ V}$$

$$c) \quad R = \frac{V}{I} = \frac{1.75 \text{ V}}{1.67 \text{ A}} = 1.05 \Omega$$

CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

Si una batería se utiliza para establecer una corriente eléctrica en un conductor, existe una transformación continua de energía química almacenada en la batería a energía cinética de los portadores de carga. Esta energía se pierde rápido por las colisiones de los portadores de carga. La energía química almacenada en la batería es continuamente transformada en energía térmica.

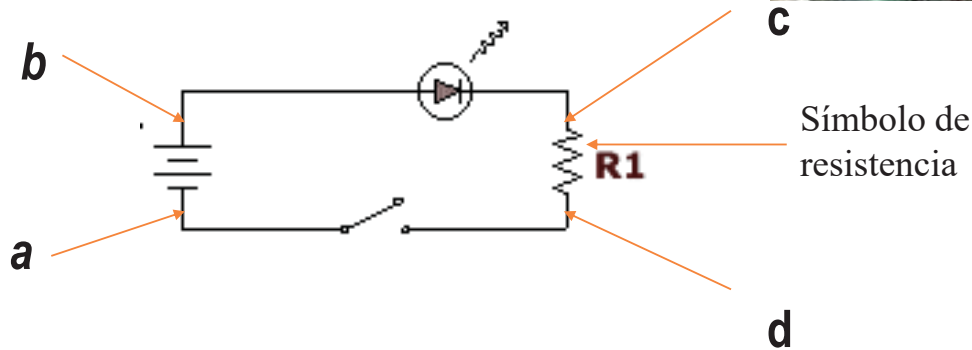
Si se considera una carga positiva Q moviéndose de la terminal negativa a la positiva en un circuito cuyas terminales están conectadas a una resistencia R y regresa al punto de partida, de *a* a *b*



CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

Conforme la carga Q se mueve desde a a b a través de la batería, su energía potencial eléctrica aumenta en una cantidad QV , mientras que la energía potencial química en la batería disminuye por la misma cantidad.

Pero cuando la carga se mueve desde c hasta d a través de la resistencia, pierde esta energía potencial eléctrica por las colisiones con los átomos de la resistencia, produciendo energía térmica.



CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

La rapidez con la que la carga pierde energía potencial cuando pasa a través de la resistencia está dada por:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{(\Delta Q)V}{\Delta t} = IV$$

donde I es la corriente en el circuito.

Como la rapidez con que la carga pierde la energía es igual a la potencia perdida en la resistencia, tenemos:

$$P = IV$$

Esta ecuación puede ser utilizada para determinar la potencia transferida a cualquier dispositivo que lleve una corriente I , y tenga una diferencia de potencial V entre sus terminales.

CORRIENTE Y RESISTENCIA, POTENCIA ELÉCTRICA.

A partir de la ecuación anterior, y empleando la ley de Ohm, se obtienen diferentes expresiones de potencia, entre ellas:

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

La unidad SI de potencia es el Watt. La energía calorífica perdida se conoce como *calor de Joule*.

Cualquier dispositivo que produzca energía eléctrica se llama *fuerza electromotriz*, por lo general referida como *fem*. La fuerza electromotriz no se refiere a una fuerza, sino a una diferencia de potencial en volts y responsable del movimiento de los electrones en un conductor.



Campo magnético.

Propiedades magnéticas de la materia



CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.



CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

El magnetismo.

Hoy en día sabemos que el magnetismo y la electricidad se relacionan estrechamente al producirse como consecuencia de la existencia de cargas, y dependiendo de su estado de movimiento dan lugar a uno o a otro fenómeno. Sin embargo, esta relación fue descubierta hasta el siglo XIX, mediante una serie de experimentos realizados por diversos científicos, que culminan hacia 1873 con el trabajo de J.C. Maxwell, que postuló las leyes del electromagnetismo que actualmente se conocen como *Ecuaciones de Maxwell*.

La historia del magnetismo comienza con las civilizaciones de Asia Menor, ya que fue en una región de Asia Menor conocida como magnesia donde se encontró algunas rocas que se atraían entre sí. A estas rocas se les llamó “magnetos”, en alusión al lugar de su descubrimiento.

CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

El estudio de la interacción entre cuerpos cargados ha sido descrito en términos del *campo eléctrico*, el cual rodea a cualquier carga eléctrica, ya sea en reposo o en movimiento.

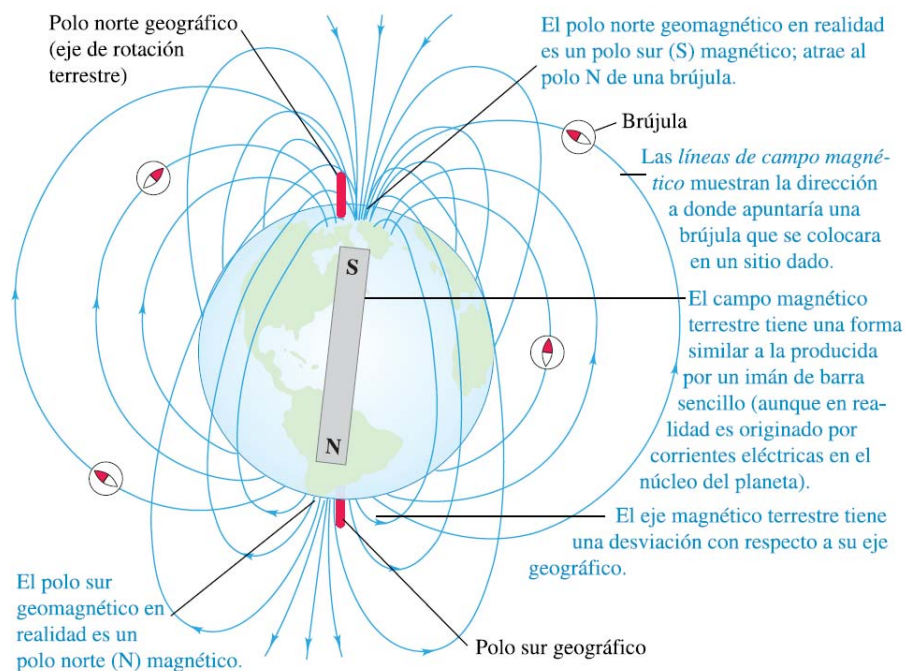
Además de un campo eléctrico, la región que rodea a una carga eléctrica móvil también contiene un *campo magnético*; de hecho todas las sustancias magnéticas, como los imanes, están rodeadas por un campo magnético.

Históricamente se ha usado el símbolo \vec{B} para representar el campo magnético, debido a que es una cantidad vectorial, y está dado en teslas.



La dirección del campo magnético en un punto dado está en la dirección en que apunta la aguja de una brújula en dicha ubicación.

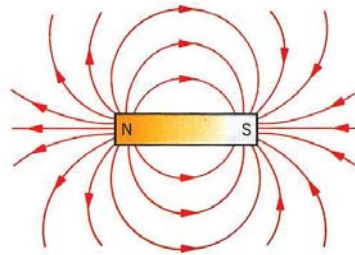
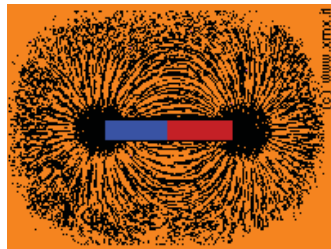
CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.



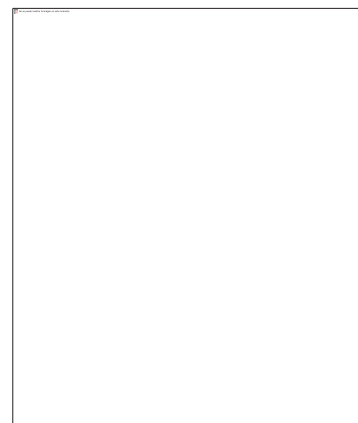
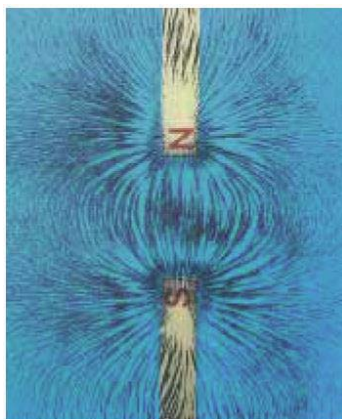
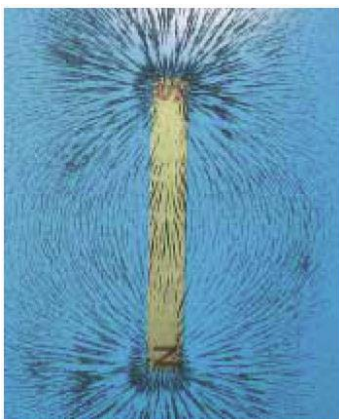
CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

Líneas de campo magnético.

Experimentalmente, se encuentra que las sustancias magnéticas presentan dos polos, que se denominan polo norte y polo sur. Lo anterior se puede visualizar mediante pequeñas limaduras de hierro, tal como se muestra en la siguiente imagen de un imán en forma de barra.



CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.



Es importante mencionar que **no hay evidencia de la existencia de polos magnéticos de manera aislada**, ya que siempre han sido encontrados ambos polos en todas las sustancias magnéticas.

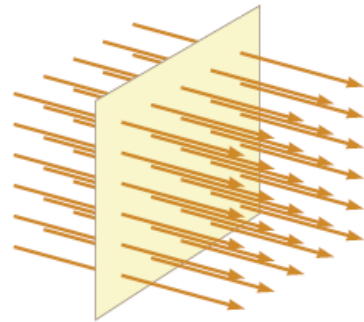
CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

Flujo magnético.

El campo magnético puede ser descrito *cualitativamente* mediante el uso de líneas de campo; sin embargo, también podemos hacerlo *cuantitativamente*, para ello es preciso definir el concepto de *flujo magnético* (ϕ_B)

Para tener una idea más clara del concepto de flujo, consideremos la figura siguiente:

Las líneas de campo B penetran una superficie rectangular de área A perpendicular a tales líneas; considerando que el número líneas es proporcional a la magnitud de B , se tiene que el número de líneas que atraviesan la superficie es proporcional al producto BA .



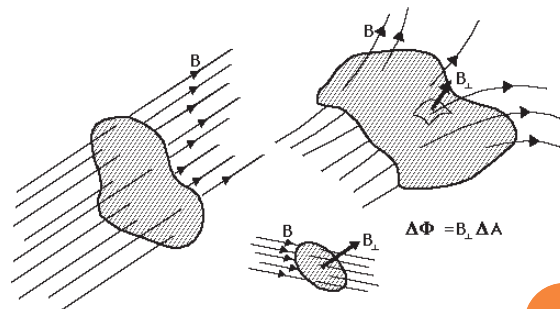
CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

Este producto de la magnitud de B y el área A de la superficie perpendicular al campo es llamado **flujo magnético** (Φ_B), es decir

$$\Phi_B = BA$$

En el SI la unidad de flujo magnético es $T \cdot m^2$, que se define como *weber* ($1Wb=1T \cdot m^2$).

El flujo magnético es proporcional al número de líneas de campo magnético que penetran una superficie arbitraria perpendicular al propio campo B .



CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

Generalmente se define el campo magnético en un punto del espacio en términos de la fuerza magnética (F_B) que experimenta una carga de prueba q , moviéndose con una velocidad v , al ubicarse en dicho punto.

Los experimentos realizados considerando el movimiento de partículas cargadas, en presencia de campos magnéticos, arrojan los siguientes resultados:

- La magnitud de la fuerza F_B ejercida sobre la partícula es proporcional a la carga q y a la rapidez v de la partícula.
- La magnitud y dirección de la fuerza F_B depende de la velocidad v de la partícula y de la magnitud y dirección del campo magnético B .
- Cuando una partícula cargada se mueve paralela al vector de campo magnético, no hay fuerza magnética.

CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

También se tiene que:

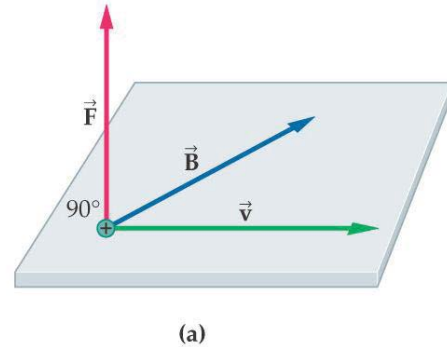
- Cuando la velocidad de la partícula forma un ángulo distinto de cero con el campo magnético, la fuerza magnética actúa en una dirección perpendicular tanto a v como a B .
- La fuerza magnética ejercida sobre una partícula cargada positivamente está en dirección opuesta a la ejercida sobre una partícula cargada negativamente.
- La magnitud de la fuerza magnética es proporcional al seno del ángulo formado entre la dirección del campo magnético B y la dirección del movimiento de la partícula cargada.

CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

Los resultados anteriores se pueden resumir en la siguiente expresión:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

donde F_B está en la dirección del producto vectorial $\vec{v} \times \vec{B}$ si q es positiva. Por definición del producto vectorial (o producto cruz), la fuerza magnética es perpendicular al plano formado por los vectores \vec{v} y \vec{B} .



Se puede considerar a la anterior expresión como una definición operacional del campo magnético.

CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

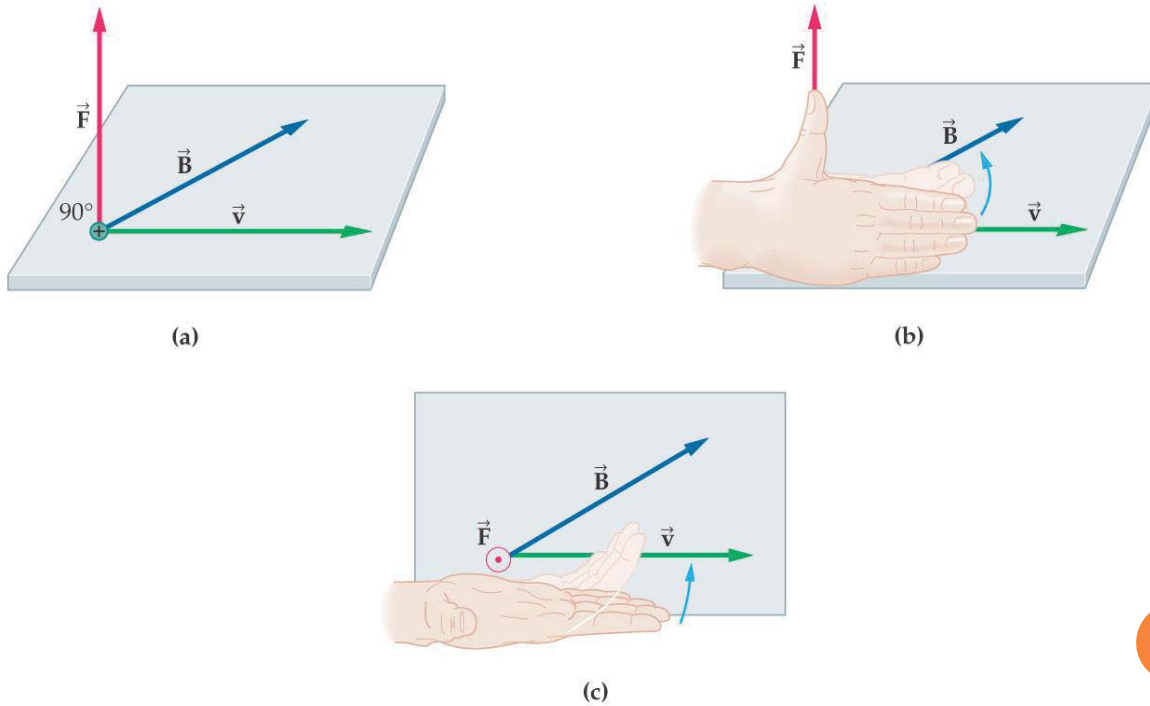
Hay varias diferencias importantes entre las fuerzas eléctrica y magnética:

- La fuerza eléctrica actúa en dirección del campo eléctrico, en tanto que la fuerza magnética es perpendicular al campo magnético
- La fuerza eléctrica actúa sobre una partícula cargada independientemente de si la partícula está en movimiento o no, mientras que la fuerza magnética actúa sobre una partícula cargada **sólo** cuando esta se encuentra en movimiento.
- La fuerza eléctrica efectúa trabajo al desplazar a la partícula cargada, en tanto que la fuerza magnética asociada con un campo magnético estable no realiza trabajo cuando se desplaza una partícula.

Esto último permite concluir que *el campo magnético puede alterar la dirección del vector velocidad de una partícula pero no puede cambiarle su magnitud*, por lo que la energía cinética no cambia para una partícula cargada que se mueve con una velocidad \vec{v} a través de un campo magnético \vec{B} .

CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

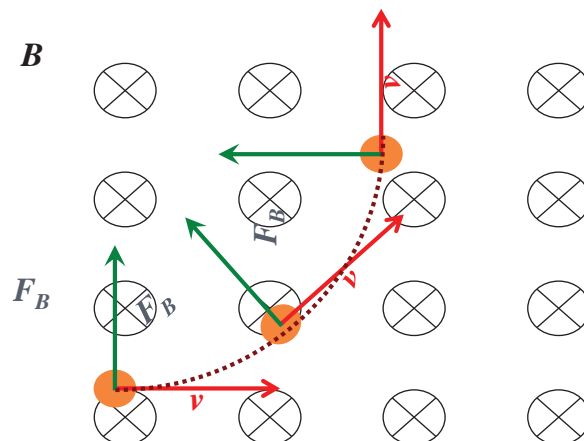
Regla de la mano derecha



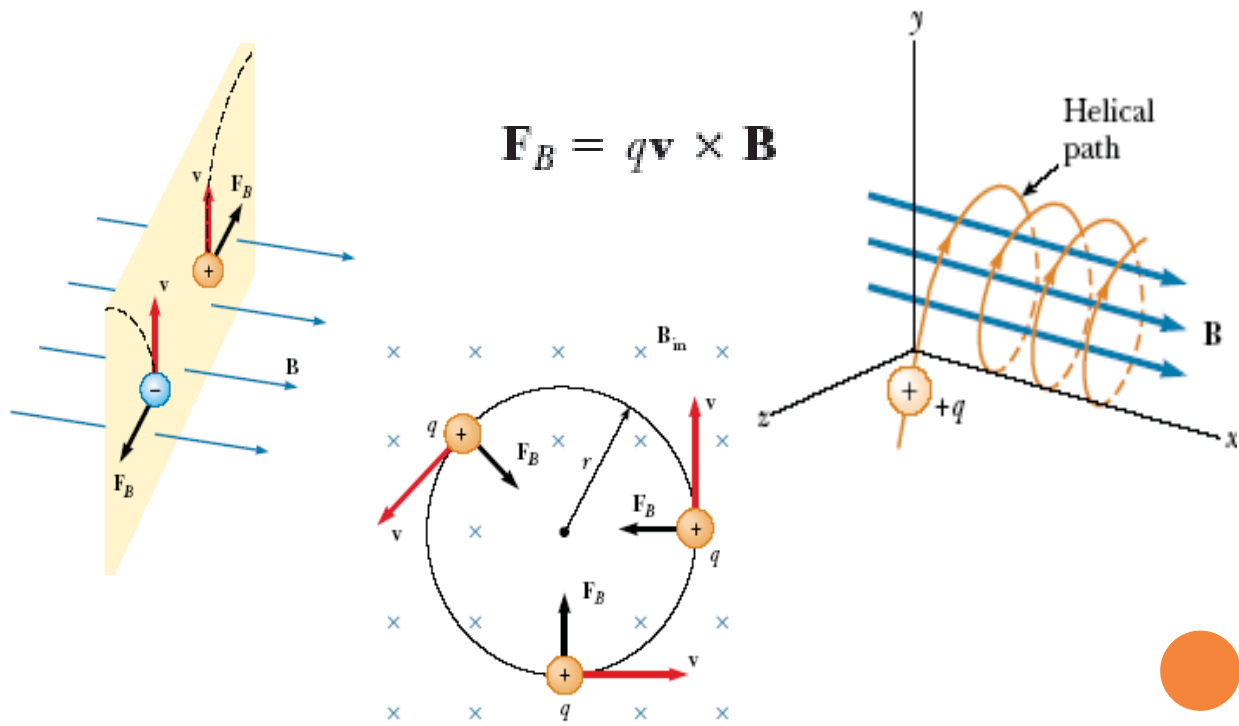
CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

Una vez conocida la fuerza magnética, se puede analizar el movimiento de una partícula cargada a través de un campo magnético. Para ello se considera una partícula que penetra moviéndose perpendicularmente a un campo magnético uniforme \mathbf{B} .

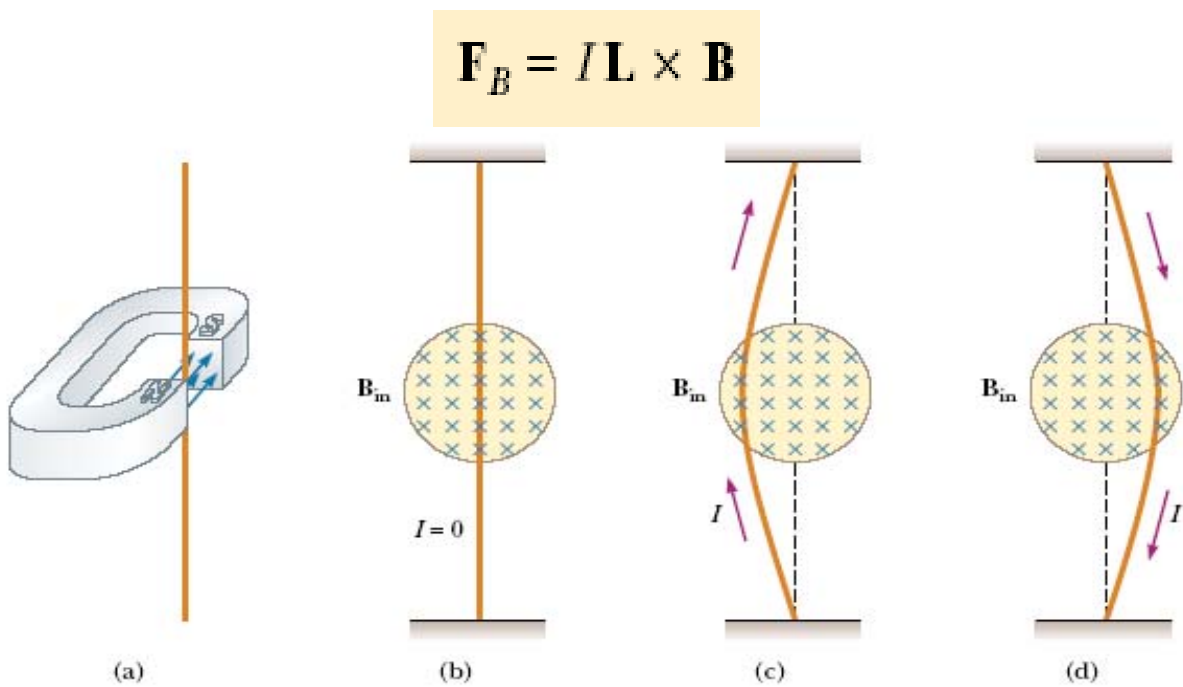
Entonces la partícula desarrollará un movimiento circular.



EFFECTOS DE \mathbf{B} SOBRE CARGAS ELÉCTRICAS EN MOVIMIENTO



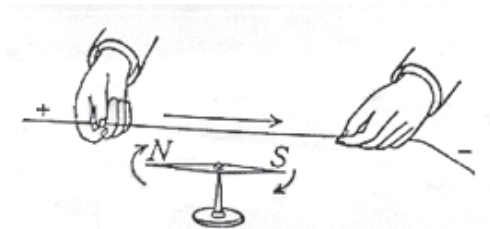
EFFECTOS DE \mathbf{B} SOBRE CORRIENTES ELÉCTRICAS



CAMPO MAGNÉTICO Y CORRIENTE ELÉCTRICA.

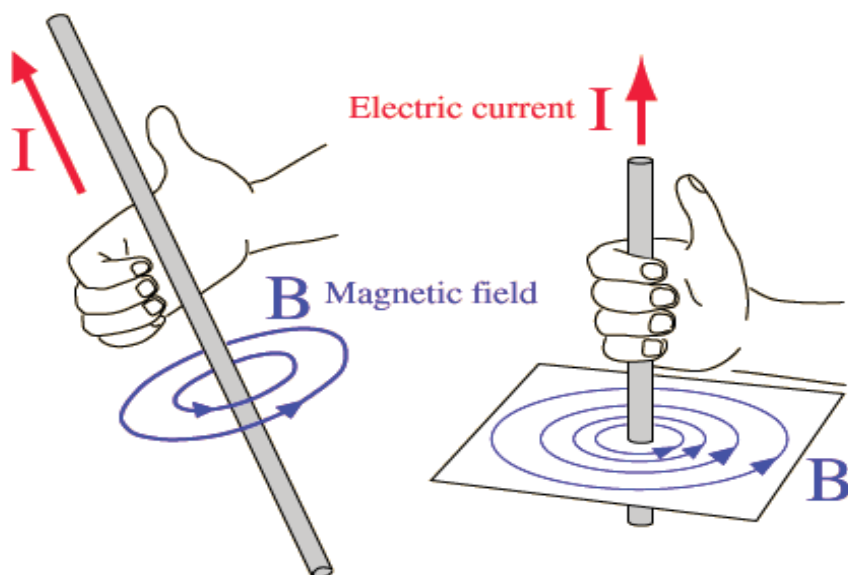
El experimento de Oersted.

En 1820 H. Oersted descubrió la relación entre la electricidad y el magnetismo en un experimento que hoy se nos presenta como muy sencillo, y que llevó a cabo ante sus alumnos.



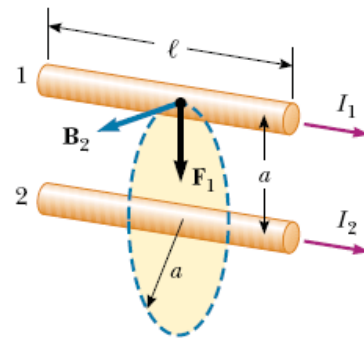
En su experimento demostró empíricamente que un hilo conductor de corriente podía mover la aguja imantada de una brújula, de tal forma que ésta se orientaba perpendicularmente al alambre.

DIRECCIÓN DE **B** USANDO LA REGLA DE LA MANO DERECHA

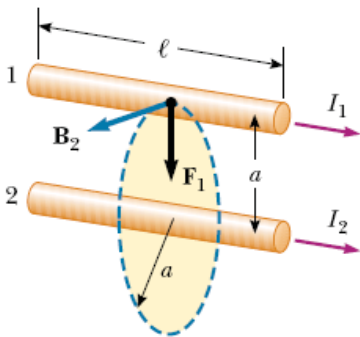


Fuerza entre dos alambres

Consideremos dos alambres rectos de largo l , por los que circulan corrientes I_1 e I_2 , y separados una distancia a . Si analizamos el cable con corriente I_2 , vemos que este produce un campo \mathbf{B}_2 tal como se muestra. En particular, vemos que en la posición del alambre 1 (con corriente I_1) el campo \mathbf{B} es perpendicular a esta corriente I_1 , de tal forma que si calculamos la fuerza que se ejerce sobre el alambre 1 encontramos que esta apunta hacia el alambre 2.



Fuerza entre dos alambres paralelos

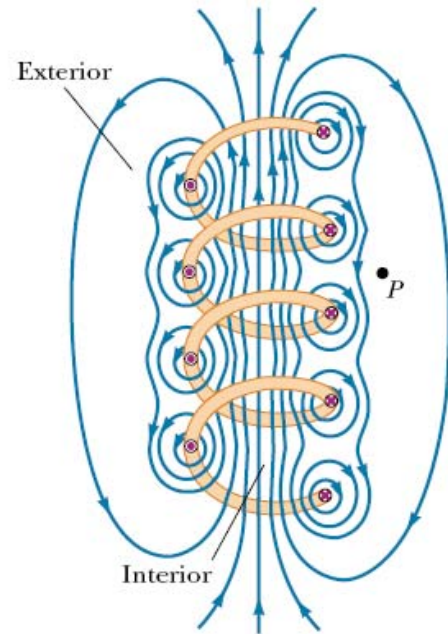


Si usamos la regla de la mano derecha para el caso en que las corrientes vayan en direcciones opuestas, encontraremos que la fuerza \mathbf{F}_1 está dirigida en dirección opuesta, es decir, alejándose del alambre 2. Esto permite concluir que:

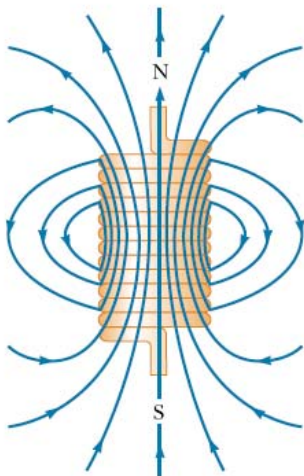
Dos alambres paralelos que conducen corrientes en la misma dirección se atraen entre sí, mientras que dos conductores con corrientes en direcciones opuestas se repelen.

CAMPO MAGNÉTICO DE UN SOLENOIDE

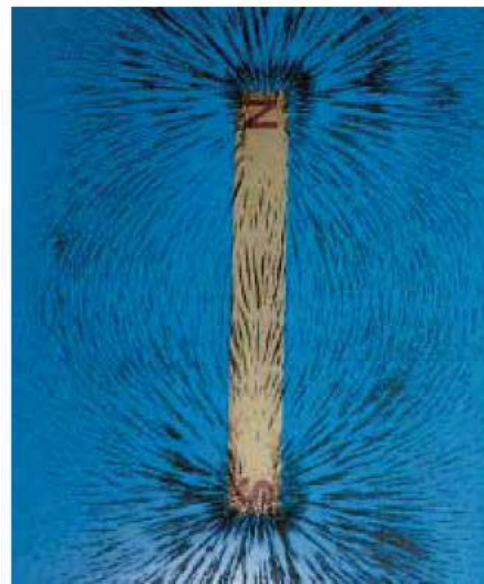
Un solenoide es un alambre largo enrollado en forma de hélice. Con este arreglo se logra un campo magnético razonablemente uniforme en el espacio delimitado por las espiras de alambre, lo que podríamos llamar el *interior* del solenoide, tal como se muestra en el esquema siguiente



CAMPO MAGNÉTICO DE UN SOLENOIDE



Líneas de campo magnético de un solenoide con las espiras completamente adyacentes

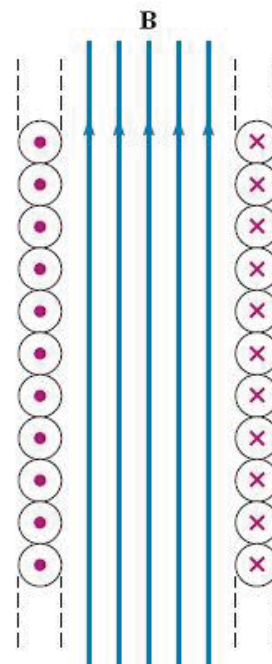


Campo magnético de un imán en forma de barra, visualizado mediante limaduras de hierro.

CAMPO MAGNÉTICO DE UN SOLENOIDE

Un solenoide ideal se forma conforme las espiras están cada vez menos espaciadas, el largo crece y el radio de las espiras disminuye. En tal caso las líneas de campo magnético en el interior son cada vez más uniformes, mientras que el campo en el exterior es cada vez más débil.

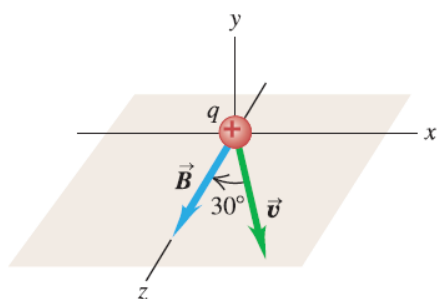
En este caso, podemos esquematizar un corte del solenoide tal como se muestra en la figura adjunta.



CAMPO MAGNÉTICO DE UN SOLENOIDE. UN EJEMPLO.

Un haz de protones ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C) se mueve a 3.0×10^5 m/s a través de un campo magnético uniforme, con magnitud 2.0 T dirigido a lo largo del eje z positivo, como se indica en la figura 27.10. La velocidad de cada protón se encuentra en el plano xz con un ángulo de 30° con respecto al eje $+z$. Calcule la fuerza sobre un protón.

27.10 Direcciones de \vec{v} y \vec{B} para un protón en un campo magnético.

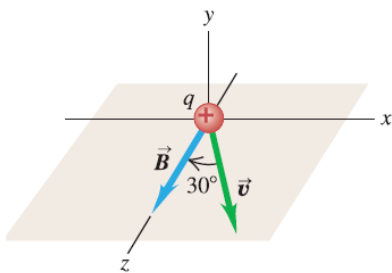


$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$F_B = qvB \text{Sen}\phi$$

CAMPO MAGNÉTICO DE UN SOLENOIDE. UN EJEMPLO.

Un haz de protones ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C) se mueve a 3.0×10^5 m/s a través de un campo magnético uniforme, con magnitud 2.0 T dirigido a lo largo del eje z positivo, como se indica en la figura 27.10. La velocidad de cada protón se encuentra en el plano xz con un ángulo de 30° con respecto al eje $+z$. Calcule la fuerza sobre un protón.

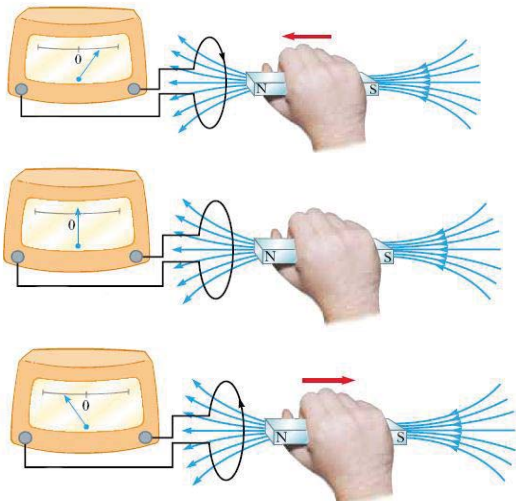


$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \phi \\ &= (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(3.0 \times 10^5 \text{ m/s})(2.0 \text{ T})(\sin 30^\circ) \\ &= 4.8 \times 10^{-14} \text{ N} \end{aligned}$$

Esta fuerza está en dirección negativa del eje y . En caso de que el haz fuera de electrones, la fuerza estaría dirigida hacia el lado positivo del eje y .

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Experimentalmente se encuentra que (la variación del flujo de) un campo magnético induce una corriente en una espira cerrada, como se muestra en las siguientes figuras.

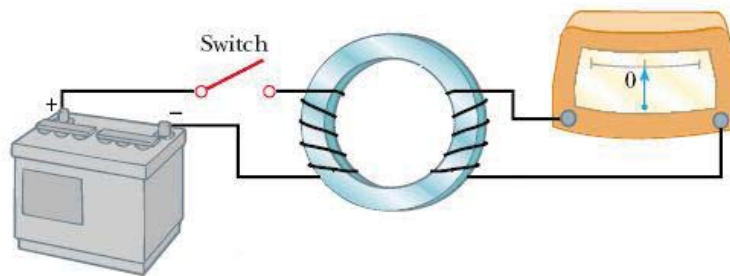


(c)

Es importante notar que no es necesaria la existencia de una batería para producir una corriente en la espira, por lo que se dice que tenemos una *corriente inducida* en la espira como producto de la presencia de un flujo magnético

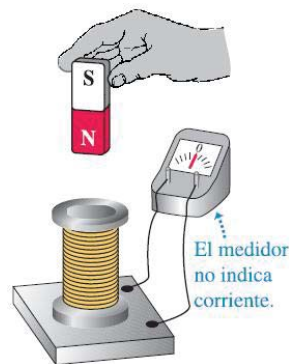
INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

También se encuentra que si colocamos dos espiras cercanas, una de ellas conectada a una batería y la otra a un galvanómetro, al momento de cerrar el circuito hay un registro en el galvanómetro, pero ese desaparece hasta que se abre el circuito.

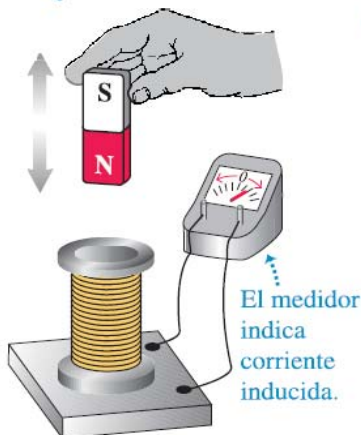


De nuevo, en la espira secundaria NO hay conectada una batería para producir una corriente en la espira, por lo que se dice que tenemos una *corriente inducida* en la espira como producto de la presencia de un flujo magnético, en este caso, producido por la corriente en la espira primaria.

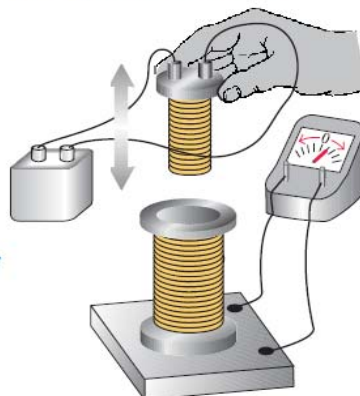
a) Un imán fijo NO induce una corriente en una bobina.



b) Mover el imán acercándolo o alejándolo de la bobina.



c) Mover una segunda bobina que conduce corriente, acercándola o alejándola de la primera.



d) Variar la corriente en la segunda bobina (cerrando o abriendo el interruptor).



*Provocan que el campo magnético a través de la bobina cambie.

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Como resultado de estas observaciones, Faraday concluyó que “es posible inducir una corriente eléctrica en un circuito mediante variaciones en (el flujo de) el campo magnético”.

En general, es costumbre enunciar la Ley de Faraday en términos de una fuerza electromotriz (*fem*) \mathcal{E} , en vez de una corriente.

Con lo anterior, establecemos que “*la fem inducida en una espira es proporcional al cambio temporal del flujo magnético ϕ_B a través de ella*”, lo que se escribe como

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

donde $\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ es el flujo magnético a través de la espira, que se calcula en cada punto considerando el producto escalar entre el campo magnético \mathbf{B} y un vector $d\mathbf{A}$ que tiene como magnitud dA y dirección perpendicular a la superficie delimitada por la espira.

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

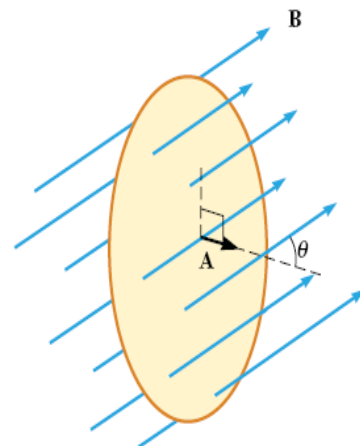
Si en vez de tener una espira, tenemos una bobina formada por N espiras (todas de la misma área) podemos generalizar la Ley de inducción de Faraday como

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Para el cálculo del flujo magnético a través de la espira, podemos considerar el esquema anexo.

En este caso, el flujo magnético resulta ser $BA \cos \theta$, lo que permite escribir a la ley de inducción de Faraday como

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} (BA \cos \theta)$$



INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Retomando esta última expresión

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} (BA \cos \theta)$$

Podemos advertir que se induce una corriente en una espira (o bobina) mediante:

1. una variación temporal de la magnitud de campo magnético B, o
2. una variación temporal del área encerrada por la espira, o
3. una variación temporal entre la dirección del campo magnético B y la normal a la espira, o
4. una combinación de cualquiera de ellas.

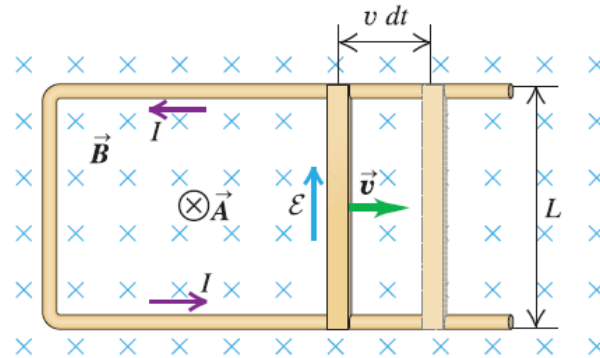
Aplicaciones de la Ley de Faraday

La Ley de inducción tiene un amplio rango de aplicaciones, entre las que podemos mencionar:

1. Los transformadores de voltaje, que emplean variaciones en la magnitud de B.
2. Los generadores de electricidad, que emplean variaciones en el ángulo entre el campo y la normal a la espira.
3. Micrófonos, pastillas magnéticas, agujas de tocadiscos, etc., también son ejemplos de aplicaciones de la ley de Faraday.
4. Etc.....

fem de movimiento

Una situación en la que podemos considerar el cambio del área de la espira aparece cuando consideramos una barra en movimiento.



fem de movimiento

En la situación mostrada, podemos considerar que B y θ no cambian, de tal forma que sólo el área $A = lx$ varía con el tiempo, de tal forma que

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(Blx) = -Bl \frac{dx}{dt}$$

De donde la fem que se induce, y que se conoce como *fem de movimiento*, está dada por

$$\mathcal{E} = -Blv$$

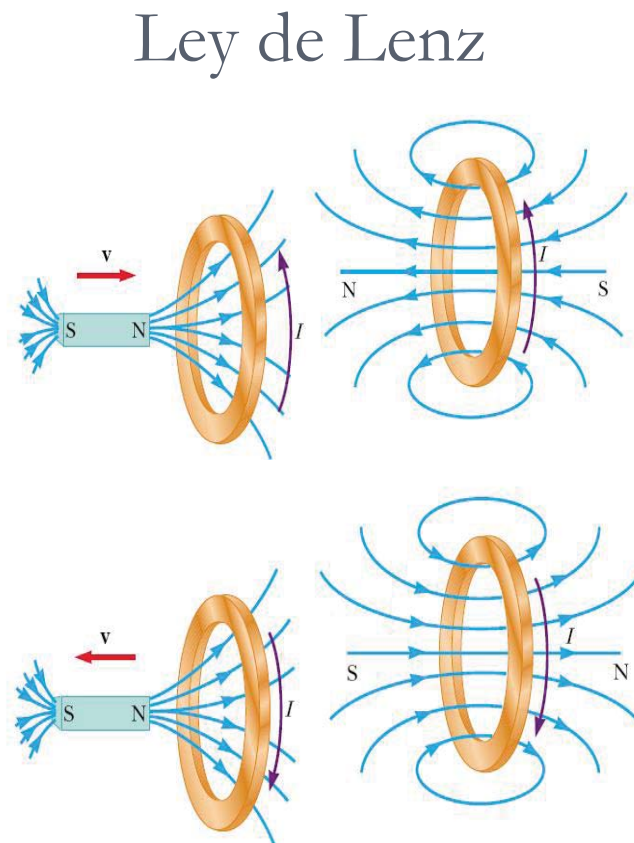
Ley de Lenz

La ley de Faraday indica que el cambio de flujo magnético tiene *signo opuesto* a la fem inducida, este resultado experimental se conoce como Ley de Lenz, la cual establece:

“La polaridad de la fem inducida en una espira es tal que tiende a producir una corriente que crea un flujo magnético, el cual se opone al cambio del flujo magnético a través del área encerrada por la espira de corriente”

Lo anterior se puede resumir en la siguiente regla:

- Si el flujo magnético aumenta, la dirección del campo magnético inducido es opuesta a la dirección del campo magnético externo.
- Si el flujo magnético disminuye, la dirección del campo magnético inducido es la misma que la dirección del campo magnético externo.



Naturaleza y propagación de la luz.



VELOCIDAD DE LA LUZ.

Antecedentes.

Se ha demostrado teórica y experimentalmente que la luz tiene una velocidad finita.

La primera medición con éxito fue hecha por el astrónomo danés Ole Roemer en 1676 y desde entonces numerosos experimentos han mejorado la precisión con la que se conoce el dato.

Actualmente el valor exacto aceptado para la velocidad de la luz en el vacío es de 299'792,458m/s, el puede tomarse como aproximado a 3×10^8 m/s.



VELOCIDAD DE LA LUZ.

Antecedentes.

La velocidad de la luz al propagarse a través de la materia es menor que a través del vacío y depende de las propiedades dieléctricas del medio y de la energía de la luz.

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad en un medio (v) se denomina índice de refracción (n) del medio, tal que

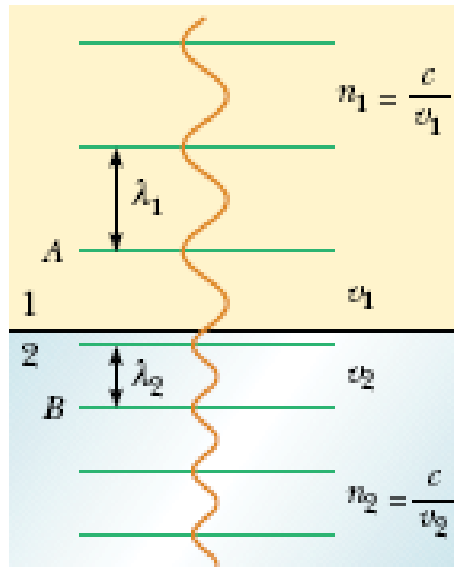
$$n = \frac{c}{v}$$

Dado que la velocidad de la luz al atravesar un medio es menor que c , se tiene que n siempre es mayor o igual a 1 (en el caso de que el medio sea el vacío).

VELOCIDAD DE LA LUZ.

Antecedentes.

Cuando la luz pasa de un medio material a otro, cambia solo la longitud de onda y no su frecuencia.



Velocidad de la luz. Ejercicio.

EXAMPLE 23-5 Light's speed in diamond. Calculate the speed of light in diamond.

APPROACH We use Eq. $n = \frac{c}{v}$, finding from Table 23-1 that $n = 2.42$ for diamond.

SOLUTION The speed of light traveling inside a diamond is

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{2.42} = 0.413c$$

or

$$\begin{aligned} v &= \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.42} \\ &= 1.24 \times 10^8 \text{ m/s.} \end{aligned}$$

Leyes de reflexión y refracción.



INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Antecedentes.

En el contexto de la óptica geométrica, la propagación de la luz en un medio (o incluso el vacío) se da en términos de rayos que viajan en línea recta a partir de una fuente luminosa.

Sin embargo, surgen algunas interrogantes:

- ¿cambia su dirección cuando incide sobre una superficie de un medio cualquiera?
- ¿qué pasa cuando se propaga en un medio uniforme y pasa a otro medio diferente?

La primera pregunta la resuelve la *primera ley de Snell* (o de la reflexión), mientras que la segunda se resuelve con la *segunda ley de Snell* (o de la refracción).

INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Reflexión.

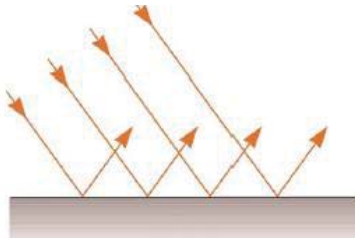
La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. Ejemplos comunes son la reflexión de la luz en una superficie pulida, el sonido en una pared (formando el eco), etc.



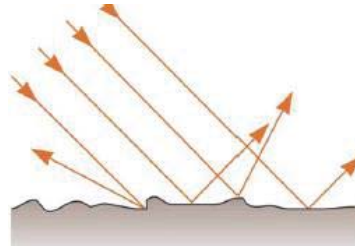
INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Tipos de reflexión.

Dependiendo de la superficie en que se de la reflexión, esta puede ser: especular o difusa



Reflexión Especular:
cuando la superficie es lisa los rayos reflejados viajan en direcciones paralelas

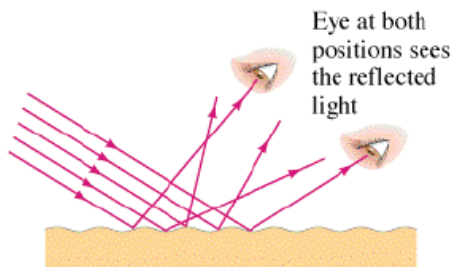


Reflexión difusa:
en cualquier superficie áspera los rayos reflejados viajan en direcciones al azar

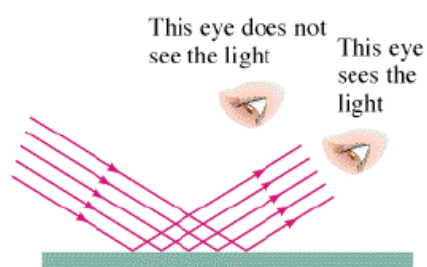
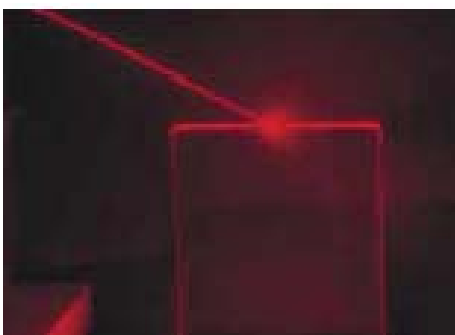
NOTA: se utiliza el termino de reflexión como sinónimo de reflexión especular

INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

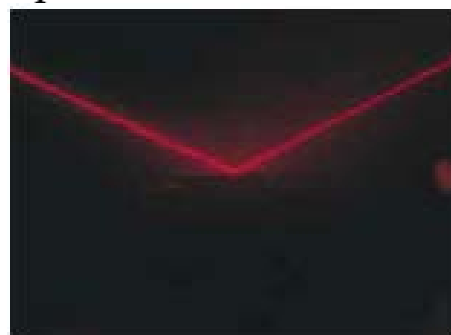
Tipos de reflexión.



Diffusive reflection



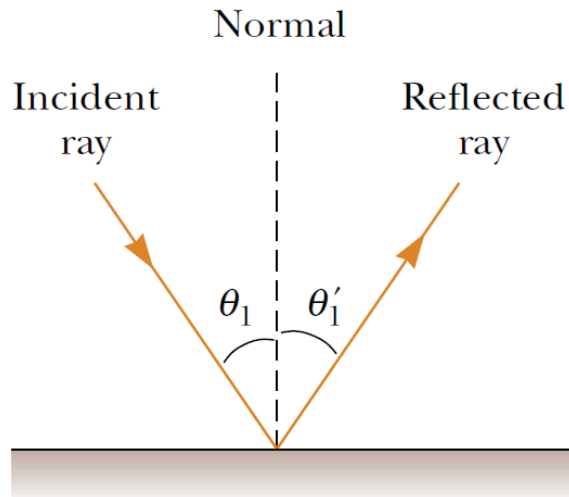
Specular reflection



INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Ley de reflexión o Primera Ley de Snell.

Establece que *el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.*



Los ángulos de incidencia θ_1 y de reflexión θ_1' se miden a partir de la normal.

Normal: es la línea trazada en dirección perpendicular a la superficie, en el punto donde hace contacto el rayo incidente.

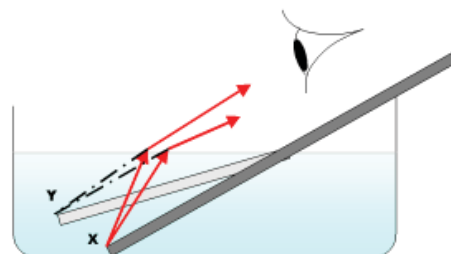
INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Refracción.

La refracción es el cambio de dirección que experimenta la luz al pasar de un medio material a otro.

Sólo se produce si la incidencia es oblicua con relación a la superficie de separación de los dos medios, y si éstos tienen índices de refracción distintos.

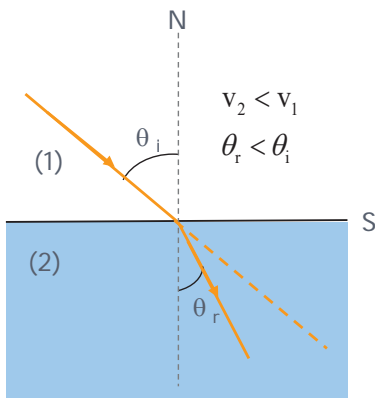
Se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda.



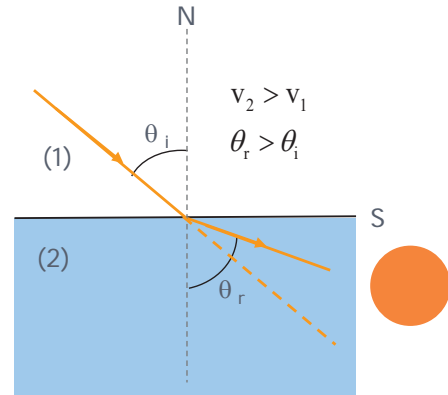
INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Ley de refracción o Segunda Ley de Snell.

La relación entre la dirección en que se propagan las ondas incidentes y las refractadas viene dada a través de la Segunda Ley de Snell que establece que *el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es constante*, es decir

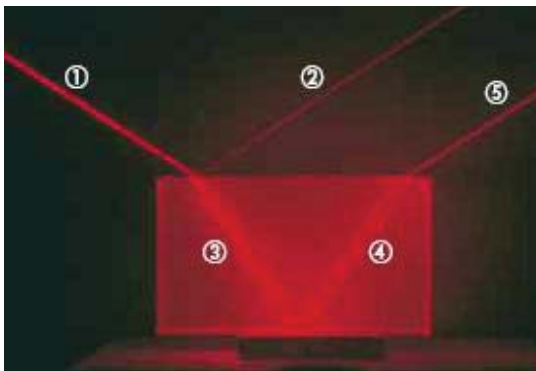


$$\frac{\text{Sen } \theta_i}{\text{Sen } \theta_t} = \frac{v_i}{v_t}$$



INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Ley de refracción o Segunda Ley de Snell.



1. Rayo incidente
2. Rayo reflejado
3. Rayo refractado
4. Rayo (3) reflejado
5. Rayo (4) refractado



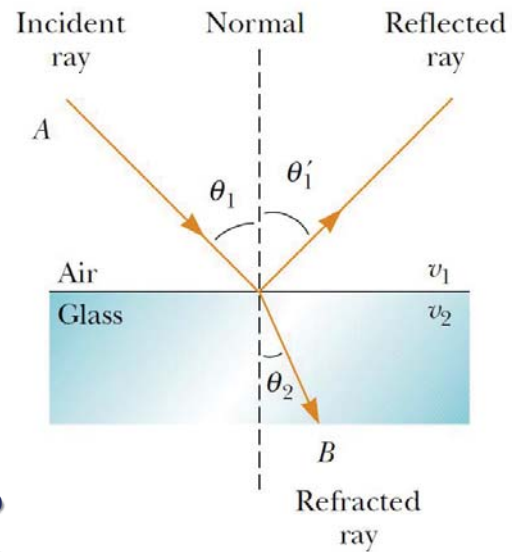
INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

Ley de refracción o Segunda Ley de Snell.

Si hacemos uso de la definición de índice de refracción (n), la Segunda Ley de Snell se puede escribir como

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

Las direcciones de incidencia, refracción y reflexión se encuentran en un mismo plano perpendicular a la superficie de separación



INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.

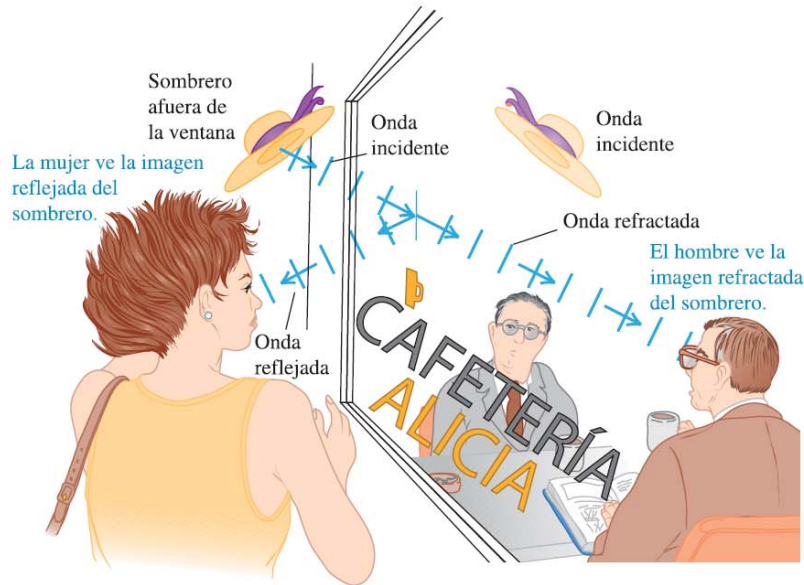
Indices of Refraction^a

Substance	Index of Refraction	Substance	Index of Refraction
<i>Solids at 20°C</i>		<i>Liquids at 20°C</i>	
Cubic zirconia	2.20	Benzene	1.501
Diamond (C)	2.419	Carbon disulfide	1.628
Fluorite (CaF ₂)	1.434	Carbon tetrachloride	1.461
Fused quartz (SiO ₂)	1.458	Ethyl alcohol	1.361
Gallium phosphide	3.50	Glycerin	1.473
Glass, crown	1.52	Water	1.333
Glass, flint	1.66		
Ice (H ₂ O)	1.309	<i>Gases at 0°C, 1 atm</i>	
Polystyrene	1.49	Air	1.000 293
Sodium chloride (NaCl)	1.544	Carbon dioxide	1.000 45

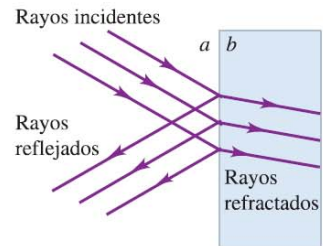
^a All values are for light having a wavelength of 589 nm in vacuum.

Reflexión y refracción

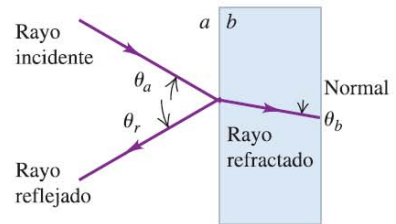
a) Ondas planas reflejadas y refractadas en una ventana



b) Las ondas en el aire del exterior y el vidrio representadas por rayos



c) Representación simplificada para ilustrar sólo un conjunto de rayos

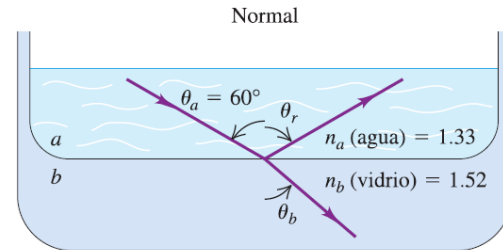


INTENSIDAD. REFLEXIÓN. REFRACCIÓN.
EJEMPLOS.



Reflexión y refracción. Ejercicio.

En la figura mostrada, el material **a** es agua y el material **b** es un vidrio. Si el rayo incidente forma un ángulo de 60° con la normal, determinar los ángulos de reflexión y refracción (θ_r y θ_b).



La primera ley de Snell o Ley de Reflexión nos dice que el ángulo de incidencia es igual al ángulo reflejado, por lo tanto:

$$\theta_r = \theta_a$$

Para encontrar el ángulo de refracción utilizamos la segunda ley de Snell, por lo tanto:

$$n_a \sen \theta_a = n_b \sen \theta_b$$

$$\sen \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \sen \theta_a = \frac{1.33}{1.52} \sen 60.0^\circ = 0.758$$

$$\theta_b = 49.3^\circ$$

Ejercicio.

La longitud de onda de la luz roja de un laser de helio-neón es de 633nm en el aire, pero de 474nm en el humor acuoso del globo ocular por lo que el índice de refracción en éste es de $n=1.34$. Calcular la rapidez y frecuencia de la luz en esta sustancia.

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.34} = 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2.25 \times 10^8 \text{ m/s}}{474 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Ejercicio.

33.6. Luz de cierta frecuencia tiene una longitud de onda de 438 nm en el agua. ¿Cuál es su longitud de onda en el benceno?

$$n_{\text{water}} = 1.333 \text{ and } n_{\text{benzene}} = 1.501$$

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \lambda n = \lambda_0$$

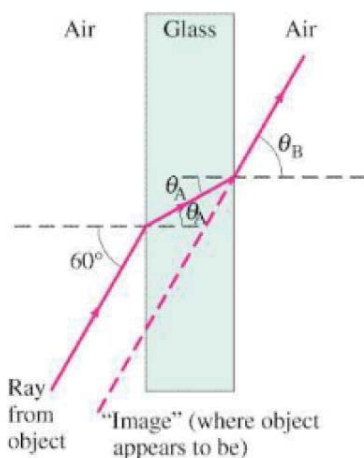
Lo cual se cumple tanto para el agua como para el benceno, por lo que:

$$\lambda_{\text{agua}} n_{\text{agua}} = \lambda_0 = \lambda_{\text{benceno}} n_{\text{benceno}}$$

$$\lambda_{\text{benceno}} = \lambda_{\text{agua}} \frac{n_{\text{agua}}}{n_{\text{benceno}}} = 389 \text{ nm}$$

Ejercicio.

Un rayo de luz que viaja en el aire hace contacto con una pieza plana de vidrio en un ángulo incidente de 60° . Si el índice de refracción del vidrio es de $n_v = 1.5$ a) ¿Cuál es el ángulo de refracción θ_1 en el vidrio? b) ¿Cuál es el ángulo θ_2 con el que emerge el rayo del vidrio?



a) Aplicamos la ley de Snell, primero para calcular el ángulo con que se refracta en el vidrio.

$$\text{Sen} \theta_1 = \frac{1.0}{1.5} \text{Sen} 60^\circ = 0.577$$

por lo tanto $\theta_1 = 35.26^\circ$.

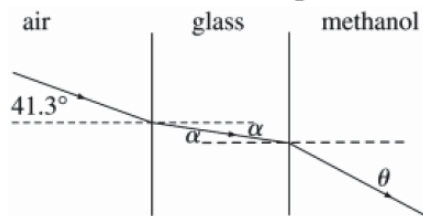
b) Volvemos a aplicar la ley de Snell, para calcular el ángulo con que se refracta del vidrio al aire.

$$\text{Sen} \theta_2 = \frac{1.0}{1.5} \text{Sen} 60^\circ = 0.577$$

por lo tanto $\theta_2 = 35.26^\circ$.

33.10. a) Un tanque que contiene metanol tiene paredes con espesor de 2.50 cm hechas de vidrio con índice de refracción de 1.550. Luz procedente del aire exterior incide en el vidrio a un ángulo de 41.3° con la normal al vidrio. Calcule el ángulo que forma la luz con la normal en el metanol. b) El tanque se vacía y se vuelve a llenar con un líquido desconocido. Si la luz que incide al mismo ángulo que en el inciso a) entra en el líquido del tanque a un ángulo de 20.2° con respecto a la normal, ¿cuál es el índice de refracción del líquido desconocido?

$n = 1.329$ for the methanol.



a) Aplicando la ley de Snell a la primera interface y después a la segunda, encontramos:

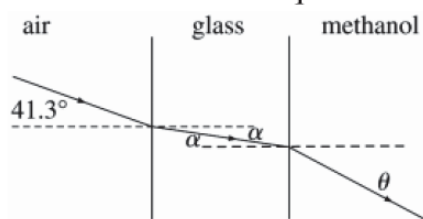
$$n_{\text{aire}} \text{Sen} \theta_{\text{aire}} = n_{\text{vidrio}} \text{Sen} \theta_{\text{vidrio}} = n_{\text{metanol}} \text{Sen} \theta_{\text{metanol}} \quad \Rightarrow \quad n_{\text{aire}} \text{Sen} \theta_{\text{aire}} = n_{\text{metanol}} \text{Sen} \theta_{\text{metanol}}$$

$$\text{Sen} \theta_{\text{metanol}} = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{metanol}}} \text{Sen} \theta_{\text{aire}} = \frac{1.0}{1.329} \text{Sen} 41.3^\circ = 0.4966$$

por lo tanto $\theta_v = 29.78^\circ$.

33.10. a) Un tanque que contiene metanol tiene paredes con espesor de 2.50 cm hechas de vidrio con índice de refracción de 1.550. Luz procedente del aire exterior incide en el vidrio a un ángulo de 41.3° con la normal al vidrio. Calcule el ángulo que forma la luz con la normal en el metanol. b) El tanque se vacía y se vuelve a llenar con un líquido desconocido. Si la luz que incide al mismo ángulo que en el inciso a) entra en el líquido del tanque a un ángulo de 20.2° con respecto a la normal, ¿cuál es el índice de refracción del líquido desconocido?

$n = 1.329$ for the methanol.



b) De nuevo aplicamos la ley de Snell a la primera interface y después a la segunda y encontramos que:

$$n_{\text{aire}} \text{Sen} \theta_{\text{aire}} = n_{\text{vidrio}} \text{Sen} \theta_{\text{vidrio}} = n_{\text{líquido}} \text{Sen} \theta_{\text{líquido}} \quad \Rightarrow \quad n_{\text{aire}} \text{Sen} \theta_{\text{aire}} = n_{\text{líquido}} \text{Sen} \theta_{\text{líquido}}$$

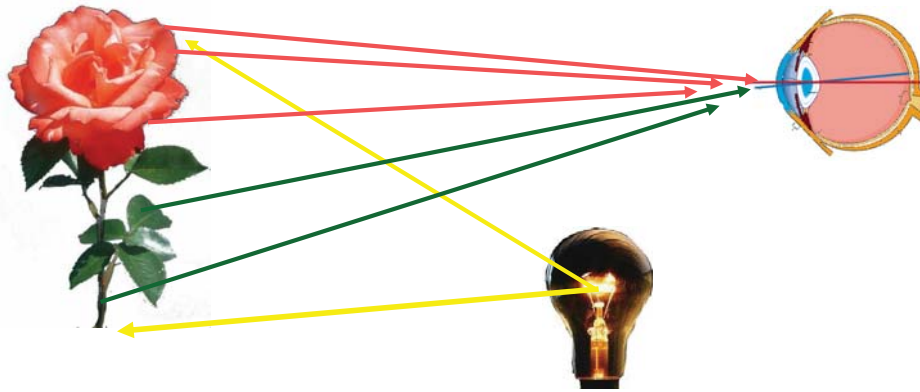
$$n_{\text{líquido}} = n_{\text{aire}} \frac{\text{Sen} \theta_{\text{aire}}}{\text{Sen} \theta_{\text{líquido}}} = 1.0 \frac{\text{Sen} 41.3^\circ}{\text{Sen} 20.2^\circ} = 1.91$$

Óptica geométrica



Reflexión en superficies planas y esféricas.

Óptica geométrica



Formación de imágenes mediante el empleo de rayos

Reflexión en superficies planas y esféricas.

Óptica geométrica y óptica física

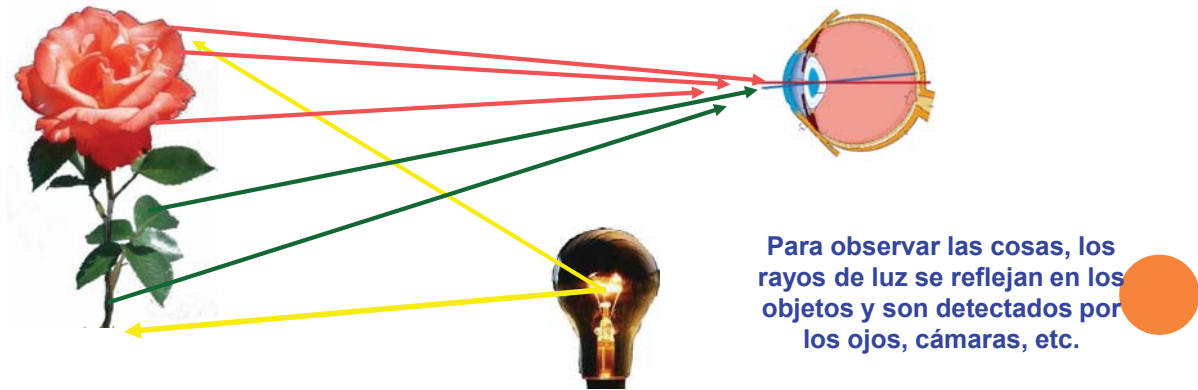
- La **Óptica Física** toma en cuenta el carácter ondulatorio de la luz y es necesaria para explicar fenómenos como son la interferencia y la difracción de la luz, entre otros.
- La **Óptica Geométrica**, por otro lado, no toma en cuenta la naturaleza ondulatoria de la luz y la representa o considera como un haz de rayos, siendo muy útil en el trazo de diagramas para la formación de imágenes en los instrumentos ópticos

Esta aproximación usada por la óptica geométrica es válida siempre que la longitud de onda de la luz es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos o discontinuidades a través de los cuales se propaga, lo cual se cumple para los instrumentos ópticos más comunes.

Reflexión en superficies planas y esféricas.

Principios de la Óptica Geométrica

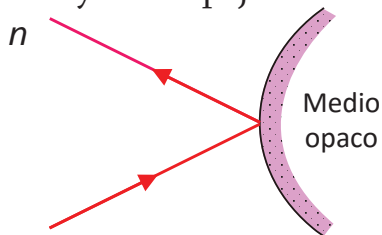
- Trayectorias rectilíneas en medios homogéneos e isotropos.
- Se cumple la ley de la reflexión
- Se cumple la ley de la refracción
- Rayo incidente, refractado y reflejado están en un mismo plano.
- Las trayectorias de la luz son reversibles.



Reflexión en superficies planas y esféricas.

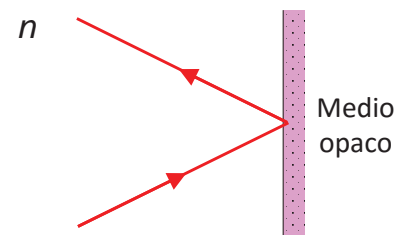
Elementos básicos

Espejo. Cuando la superficie límite de un medio es totalmente reflejante constituye un espejo.



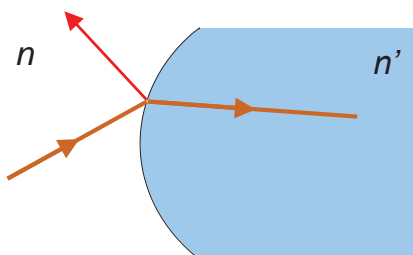
Espejo esférico

Solamente se presenta el fenómeno de reflexión.



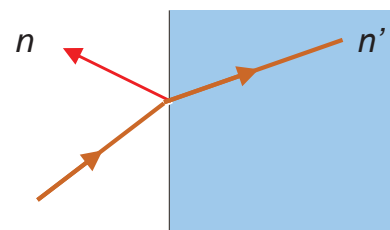
Espejo plano

Dioptrio. Formado por dos medios de distinto índice de refracción con una superficie de separación perfectamente definida.



Dioptrio esférico

Se presenta el fenómeno de reflexión y refracción

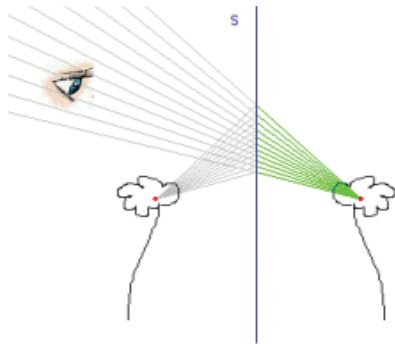


Dioptrio plano

Reflexión en superficies planas y esféricas.

Espejos planos

Un espejo plano es una superficie plana muy pulida que puede reflejar la luz con una capacidad reflectora de la intensidad de la luz incidente de alrededor del 95%.



Los espejos planos se utilizan con mucha frecuencia. Son los que usamos cada mañana para mirarnos.

En ellos vemos nuestro reflejo, una imagen que no está distorsionada.

Reflexión en superficies planas y esféricas.

Espejos planos

¿Cómo se hacen?

Los espejos comunes y corrientes son placas de vidrio plateadas. Para construir un espejo se limpia muy bien un vidrio y sobre él se deposita plata metálica por reducción del ion plata contenido en una disolución amoniacal de nitrato de plata. Después se cubre esta capa de plata con una capa de pintura protectora.

¿Qué tipo de imágenes forman?

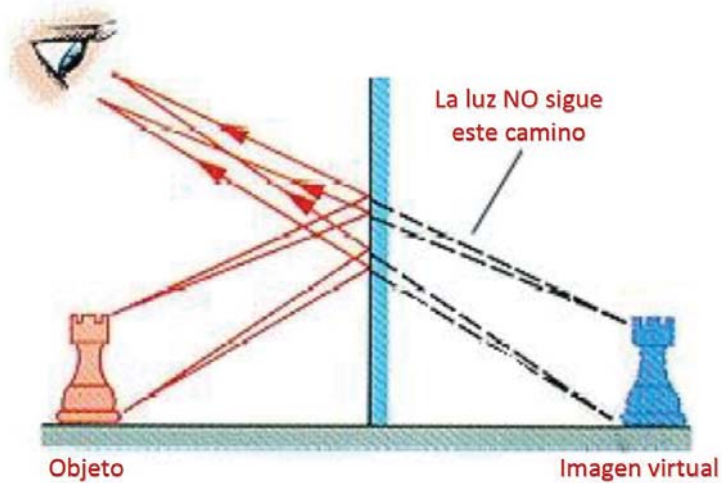
Una imagen en un espejo se ve como si el objeto estuviera detrás y no frente a éste ni en la superficie. La imagen obtenida en un espejo plano no se puede proyectar sobre una pantalla, colocando una pantalla donde parece estar la imagen no recogería nada.

Es, por lo tanto **virtual**, una copia del objeto "que parece estar" detrás del espejo. El espejo sí puede reflejar la luz de un objeto y recogerse sobre una pantalla, pero esto no es lo que queremos decir cuando decimos que la imagen virtual no se recoge sobre una pantalla.

Reflexión en superficies planas y esféricas.

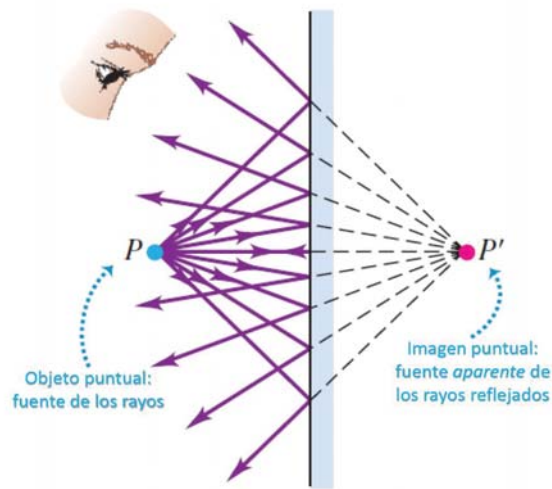
Características de la imagen formada en un espejo plano

- **Simétrica**, porque aparentemente está a la misma distancia del espejo
- **Virtual**, porque se ve como si estuviera dentro del espejo, no se puede formar sobre una pantalla pero puede ser vista cuando la enfocamos con los ojos.
- **Del mismo tamaño que el objeto**, es decir, la **magnificación** en un espejo plano es 1.
- **Derecha**, porque se mantiene la misma orientación que el objeto.



Reflexión en superficies planas y esféricas.

Reflexión de rayos de luz un espejo plano



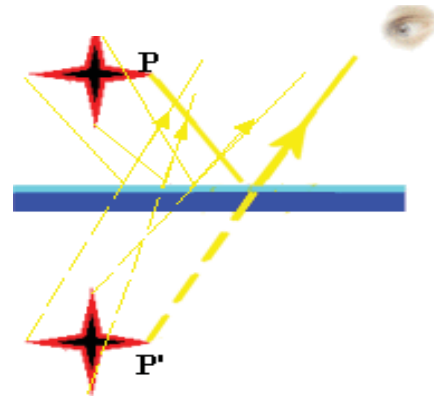
Reflexión en superficies planas y esféricas.

Formación de imágenes en un espejo plano

La formación de imágenes en los espejos son una consecuencia de la reflexión de los rayos luminosos en la superficie del espejo.

La óptica geométrica explica este familiar fenómeno suponiendo que los rayos luminosos cambian de dirección al llegar al espejo siguiendo las leyes de la reflexión.

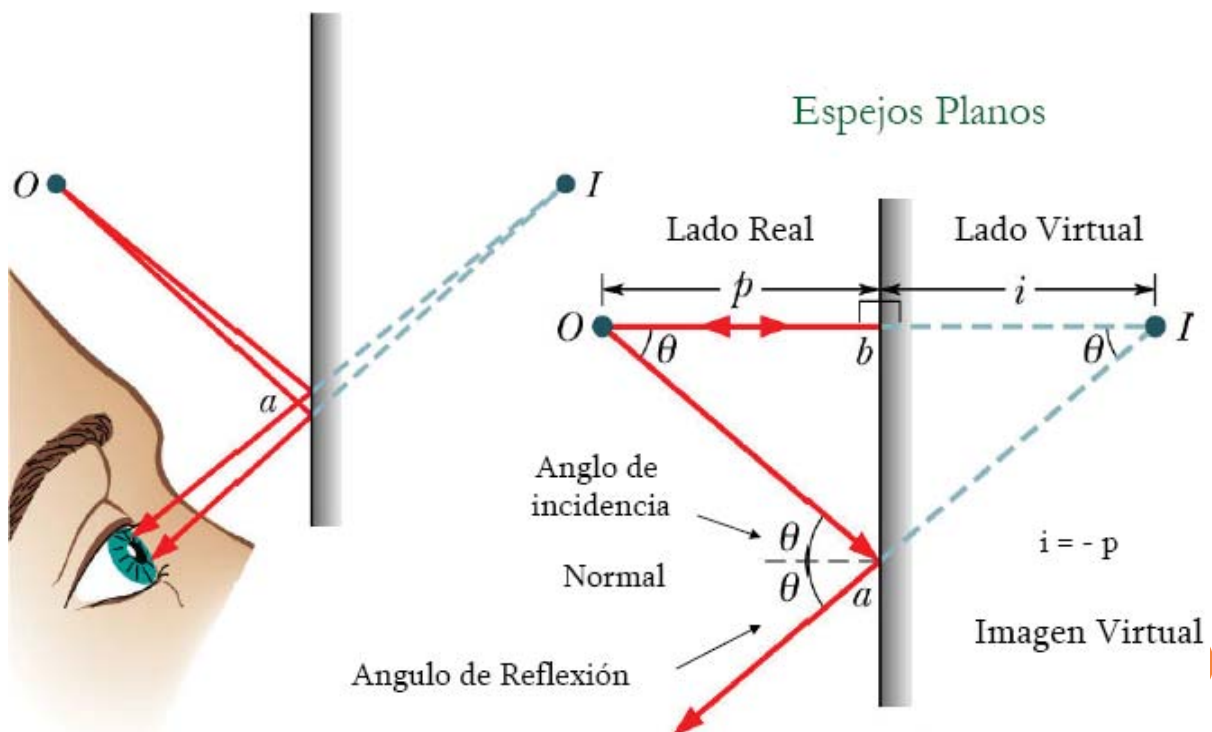
Suponiendo un punto **P**, que emite o refleja la luz, y que está situado frente a un espejo. En el contexto de la óptica geométrica, se dice que de este punto emergen rayos que se reflejan en el espejo (cumplen las leyes de la reflexión) y divergen. El punto simétrico respecto al espejo es el punto imagen **P'**.



El ojo capta los rayos, y con la ayuda de la córnea y del cristalino (lentes), los hace converger en la retina. Al cerebro, al interpretarlos, parece que le llegan todos los rayos desde un punto **P'** situado detrás del espejo.

Reflexión en superficies planas y esféricas.

Formación de imágenes en un espejo plano

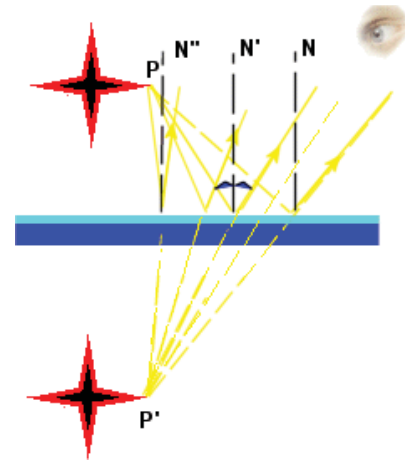


Reflexión en superficies planas y esféricas.

Trazo de rayos en un espejo plano

Para construir la trayectoria de los rayos procedemos de la siguiente manera:

- Para cada punto del objeto hallamos su simétrico (imagen) respecto al espejo: del punto P obtenemos el punto P'.
- Trazamos rayos desde P hasta el espejo. Los rayos reflejados se obtienen prolongando la recta de unión de P' con el punto de impacto del rayo que va de P al espejo.
- El rayo incidente y el rayo reflejado forman el mismo ángulo con la normal

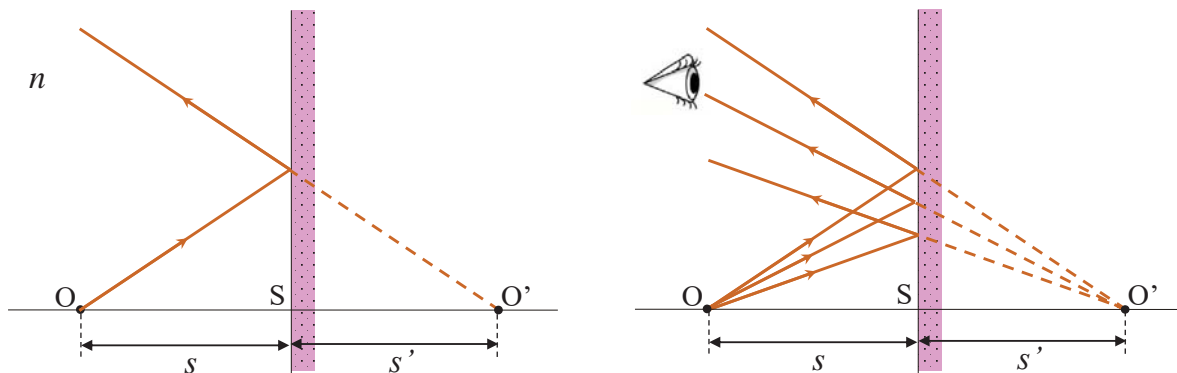


Los rayos siguen, desde el objeto hasta el ojo el camino más corto, por lo que emplean un tiempo mínimo (Principio de Fermat). De la misma manera construimos imágenes de los demás puntos de un objeto material.

Reflexión en superficies planas y esféricas.

Relación entre puntos conjugados

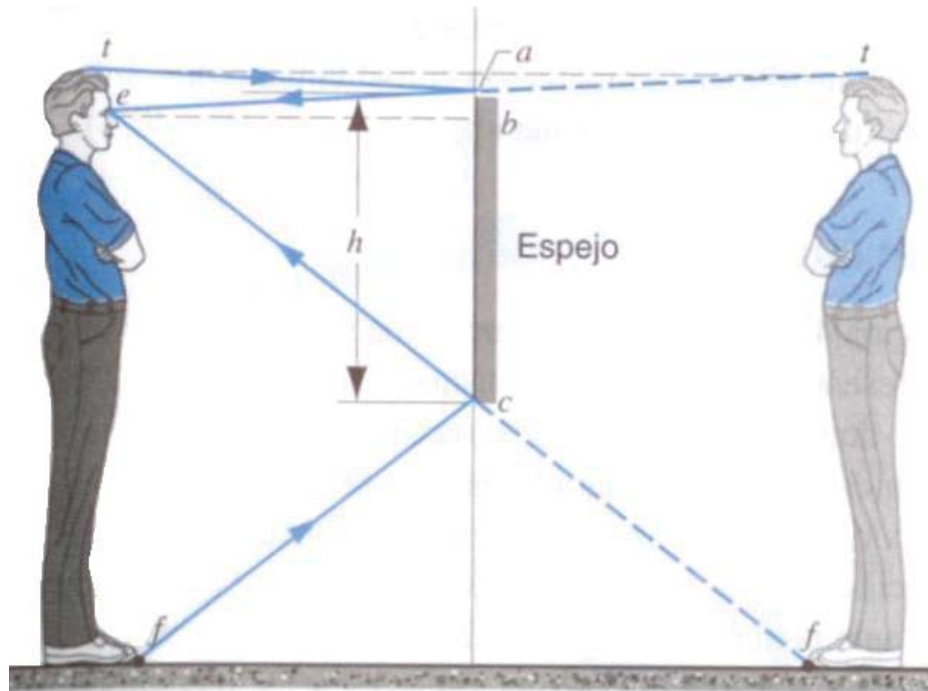
$$s' = -s$$



La imagen ofrecida por un espejo plano es virtual.

Reflexión en superficies planas y esféricas.

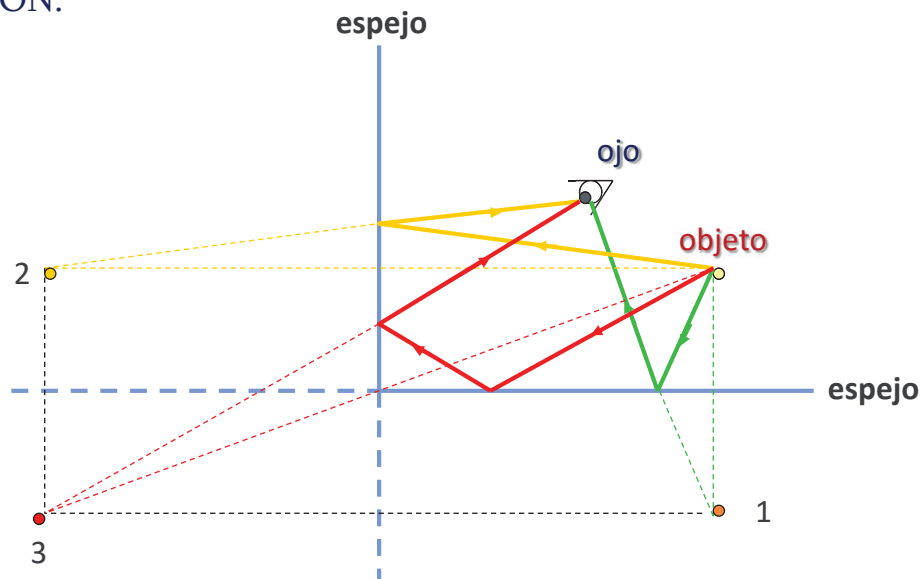
Formación de una imagen completa



Reflexión en superficies planas y esféricas. Ejemplo.

Dos espejos planos forman un ángulo de 90° . ¿Cuántas imágenes existen para un objeto colocado entre los espejos?

SOLUCIÓN:



Reflexión en superficies planas y esféricas. Ejemplo.

Imágenes en espejos planos angulares

Se conoce como espejos angulares a aquellos espejos planos que se encuentran formando cierto ángulo entre ellos. Si se ponen dos espejos planos juntos, formando un ángulo entre sí, y entre ambos se coloca un objeto, este se va a reflejar varias veces, dependiendo de lo que mida el ángulo formado por los espejos. Mientras más pequeño sea el ángulo, más veces se va a reflejar el objeto.

El número de reflexiones del objeto se puede determinar mediante la siguiente fórmula:

$$n + 1 = \frac{360^\circ}{\theta}$$

donde n es el número de veces que se refleja el objeto; y θ es el ángulo formado por los objetos.

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Espejos curvos

Según la forma de la superficie pulimentada de los espejos curvos, estos pueden ser esféricos, parabólicos, etc.



Espejos cóncavo curvo



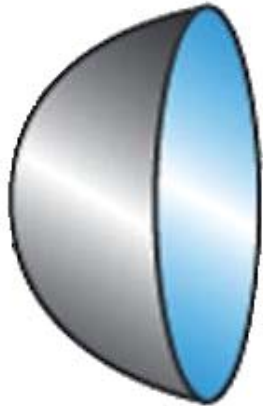
Espejo convexo curvo

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Espejo Esférico

Los espejos esféricos tienen forma de casquete, como una parte de una esfera hueca pueden ser cóncavos o convexos.

El espejo es **cóncavo** si la superficie reflejante es la interior del casquete y es **convexo** si la superficie reflejante es la exterior al casquete.



Espejos cóncavo



Espejo convexo



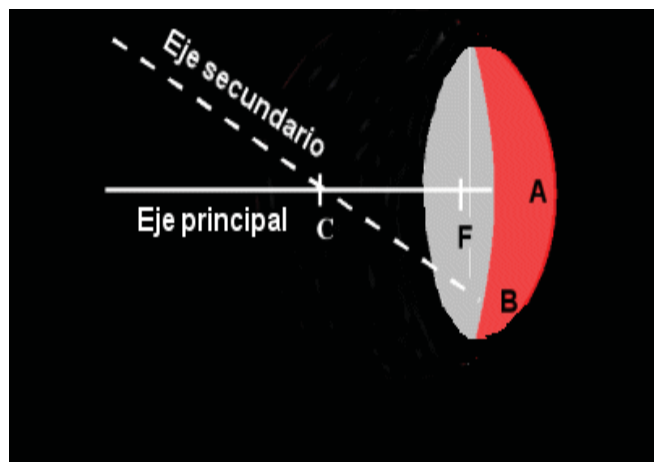
Imágenes formadas por espejos esféricos.

Espejo Esférico

En un espejo esférico podemos definir las siguientes partes:

Centro de curvatura del espejo. Es el centro de la esfera a la que pertenece el casquete espejo. En la figura es el punto C.

Centro de figura del espejo. Es el polo o centro geométrico del casquete. El punto A de la figura



Eje principal. Es la recta que pasa por el centro de curvatura del espejo y por el centro de figura. Queda definido por la recta CA mostrada en la figura.

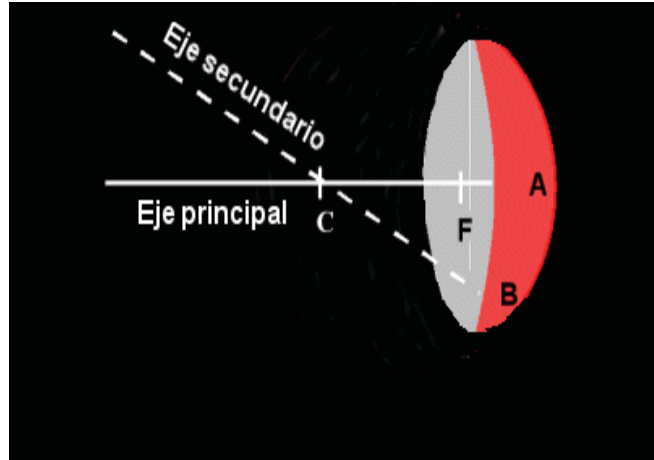


Imágenes formadas por espejos esféricos.

Espejo Esférico

En un espejo esférico podemos definir las siguientes partes:

Eje secundario. Es cualquier recta que pasa por el centro de curvatura. Existen infinitos ejes secundarios. En la figura se ve el marcado por la recta CB.



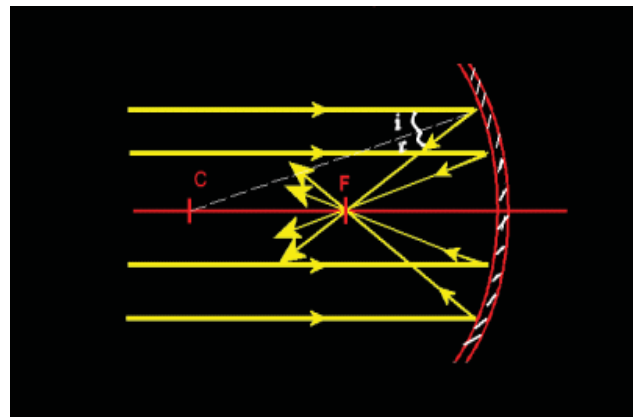
Foco principal del espejo. Es un punto del eje principal en el que se cortan, una vez reflejados, los rayos que llegan al espejo paralelos al eje principal



Imágenes formadas por espejos esféricos.

Espejo Esférico

Para espejos esféricos de radio de curvatura pequeño (es decir, muy cerrados), el foco principal se encuentra a la mitad de la distancia entre el centro de curvatura y el de la figura. Señalado con la letra F en la figura.



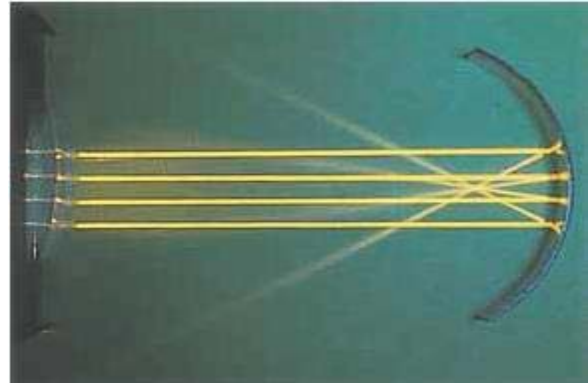
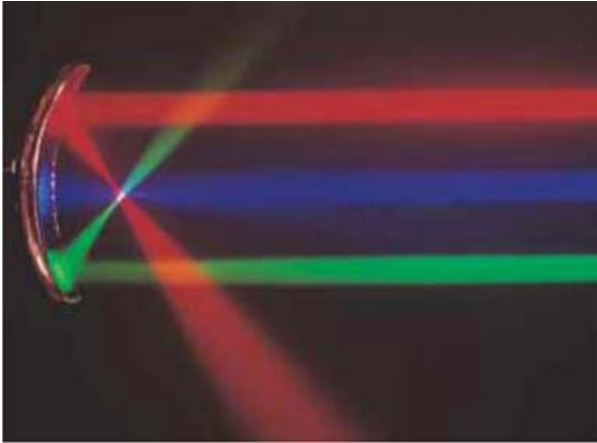
El espejo cóncavo es un dispositivo óptico que puede formar imágenes sobre una pantalla debido a la reflexión de la luz que procede de la superficie de un objeto.

En cambio, el espejo convexo solamente forma imágenes virtuales, es decir, que no pueden recogerse en una pantalla.



Imágenes formadas por espejos esféricos.

Trayectorias de rayos en espejos curvos



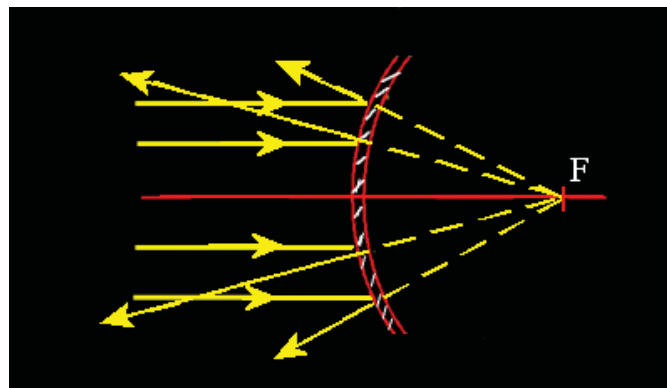
Los rayos rojo, azul y verde reflejados en un espejo curvo, note el color blanco en el foco



Imágenes formadas por espejos esféricos.

Imagen formada en un espejo convexo

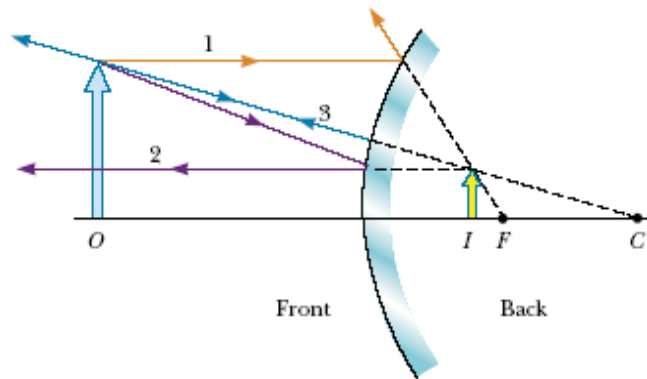
En los espejos convexos el **foco es virtual** (está situado a la derecha del centro del espejo distancia focal positiva). Los rayos reflejados divergen y solo sus prolongaciones se cortan en un punto sobre el eje principal.



Los espejos ofrecen frente a las lentes una serie de ventajas que permiten usarlos en determinados instrumentos ópticos: no muestran aberración cromática y solo es preciso pulir una superficie curva (mientras que en las lentes deben pulirse dos).

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Imagen formada en un espejo convexo

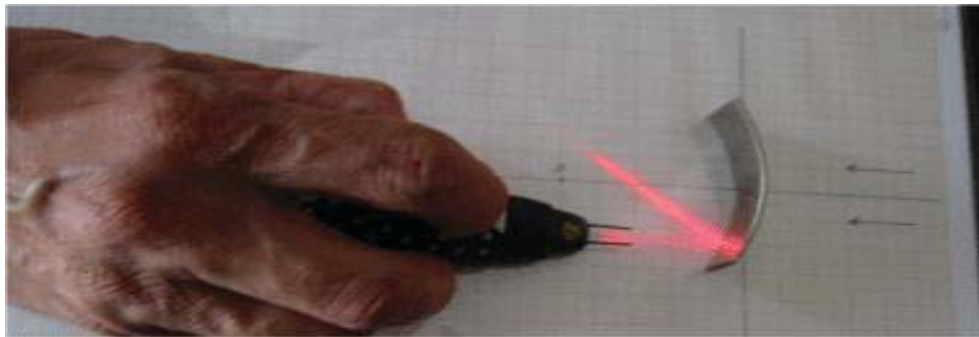


Los rayos reflejados no convergen en ningún punto, rebotan en el espejo y divergen, y por lo tanto no pueden formar una imagen sobre una pantalla.

La imagen es virtual ya que **está** detrás del espejo

Imágenes formadas por espejos esféricos.

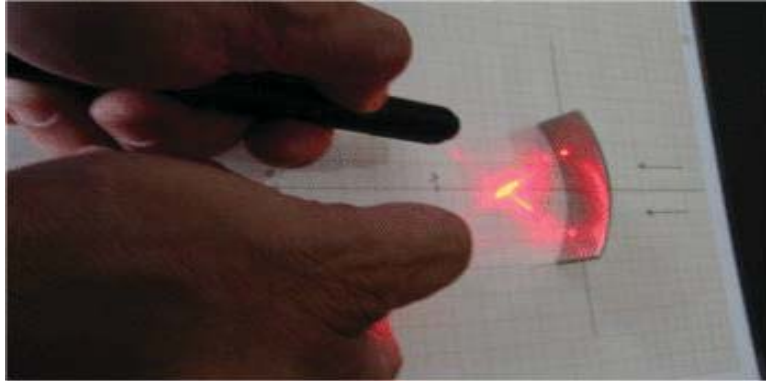
Cálculo del radio de curvatura de un espejo curvo con la ayuda de un apuntador láser



- Traza dos ejes perpendiculares en una hoja de papel milimétrico, o por lo menos de papel cuadriculado.
- Coloca el espejo en el papel tal como se ve en la foto y envía hacia él un rayo láser paralelo a uno de los ejes.
- Observa como se refleja. Marca el punto donde el rayo corta al eje y mide la distancia desde el centro del espejo hasta ese punto: esa será la distancia focal. El radio de curvatura es el doble de esa distancia

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Localización del foco de un espejo curvo con la ayuda de un (o dos) apuntador (es) láser



- Con la ayuda de uno o dos apuntadores láser realiza lo mostrado en la imagen.
- Verás que todos los rayos paralelos al eje principal se reflejan y se cortan en un mismo punto: ese punto es el FOCO del espejo.
- En un espejo convexo puedes construir los rayos divergentes y a partir de sus prolongaciones buscar el foco.

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Formación de imágenes en un espejo cóncavo esférico

Para abordar la formación de imágenes en los espejos esféricos es necesario ver primero las reglas del trazo de rayos reflejándose en espejos cóncavos.

Las de imágenes formadas en estos espejos pueden ser reales o virtuales, invertidas o derechas, dependiendo de la ubicación del objeto frente al espejo.



Imagen invertida



Imagen derecha

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Reglas para el trazado de rayos en los espejos esféricos



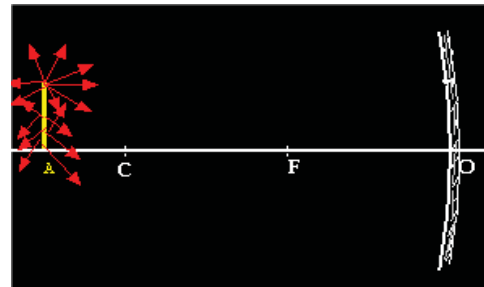
Desde cualquier punto de un objeto iluminado salen infinitos rayos en todas las direcciones.

No solo salen de la punta del dedo, sino también de todos los puntos del cuerpo, en todas las direcciones del espacio.

Salen radialmente, no solamente en un plano, como si el objeto fuera el centro de una esfera que emite luz.

Para saber dónde se forma la imagen de los rayos que recoge el espejo y construir con ellos el esquema, escogemos solamente algunos rayos situados en un plano.

Seleccionamos solamente algunos de la infinidad de rayos que salen del objeto (varilla amarilla).

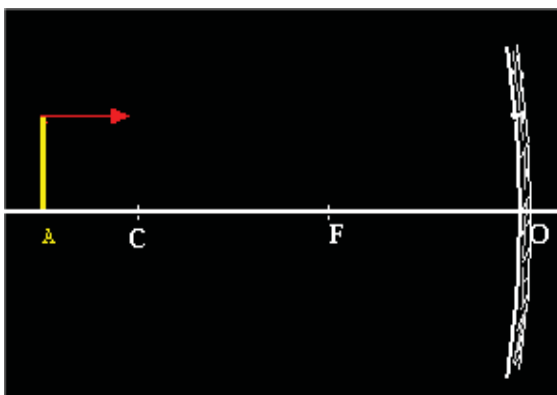


Imágenes formadas por espejos esféricos.

Reglas para el trazado de rayos en los espejos esféricos

Recordando que la trayectoria de los rayos al incidir en el espejo cumple las leyes de la reflexión, escogemos tres rayos:

- uno que sale paralelo al eje principal,
- otro que va hacia el foco y
- otro que va hacia el centro de curvatura

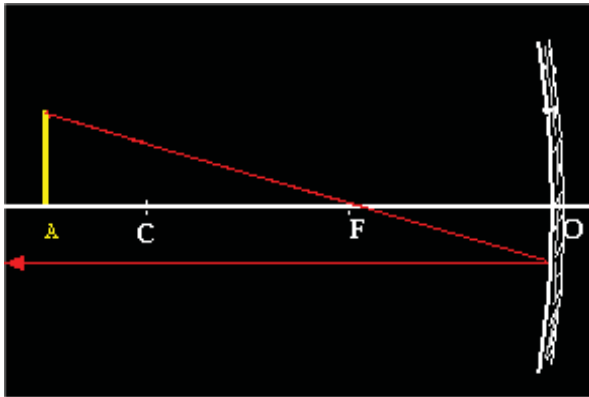


Todo rayo paralelo al eje principal se refleja pasando por el foco.



Imágenes formadas por espejos esféricos.

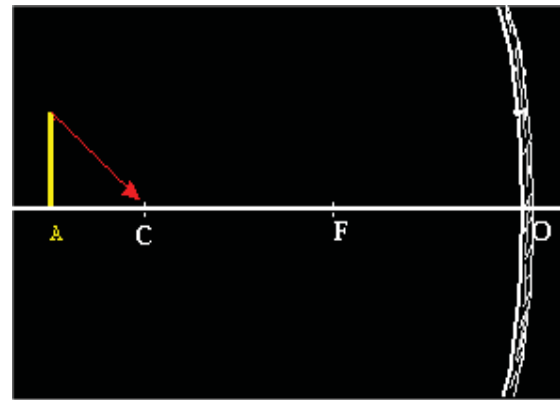
Reglas para el trazado de rayos en los espejos esféricos



Todo rayo que pasa por el foco se refleja paralelo al eje principal.

Todo rayo que pasa por el centro de curvatura C, se refleja en la misma dirección, pero en sentido contrario.

¡Su dirección coincide con la normal en el punto de impacto!

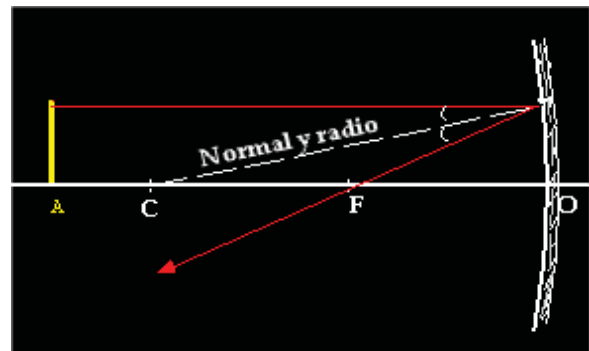


Imágenes formadas por espejos esféricos.

Reglas para el trazado de rayos en los espejos esféricos

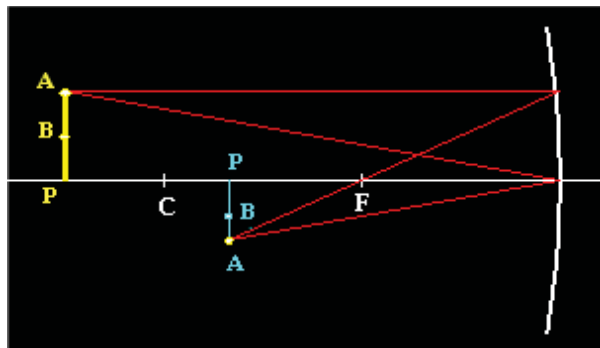
El rayo que incide en el espejo forma con la normal en ese punto un ángulo igual al que forma el que se refleja.

La normal de cada punto del espejo coincide con el radio de curvatura



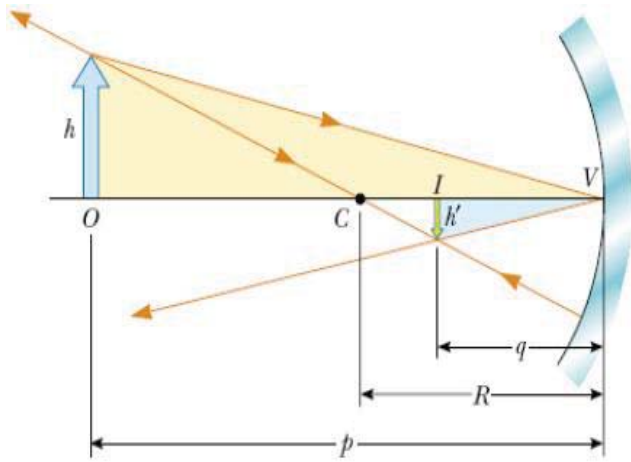
Siguiendo las reglas anteriores desde el punto P solo se pueden trazar tres rayos:

- Rayo que pasa por C (que se refleja sobre si mismo).
- Rayo que pasa por F (va paralelo al eje principal y se refleja pasando por F); y
- Rayo que pasa por F (que sale paralelo al eje principal).



Imágenes formadas por espejos esféricos.

Convenio de signos



Como origen de coordenadas se toma el vértice V del espejo, cuyo centro de curvatura es el punto C.

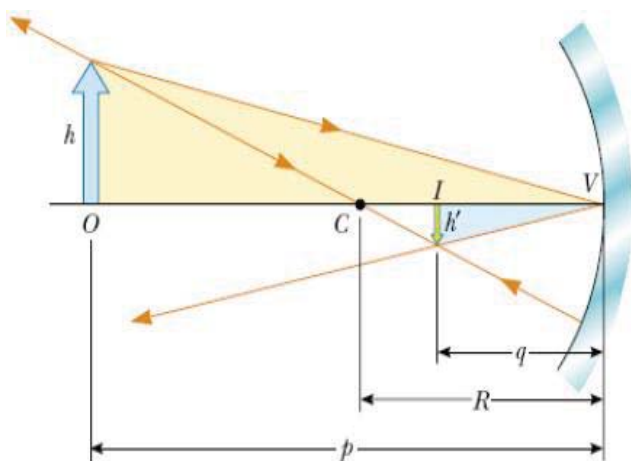
Todos los puntos situados **frente al espejo** tienen abscisa **positiva**, y los situados **detrás del espejo** tienen abscisa **negativa**.

Todos los puntos situados por **encima** del eje principal poseen ordenada **positiva**, y los situados por **debajo** tienen ordenada **negativa**.

El radio de curvatura R será **positivo** si el centro se encuentra **frente** al espejo (lo que ocurre con los espejos **cóncavos**) y será **negativo** si está **detrás** del espejo (lo que ocurre con los espejos **convexos**).

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Convenio de signos



Considerando que

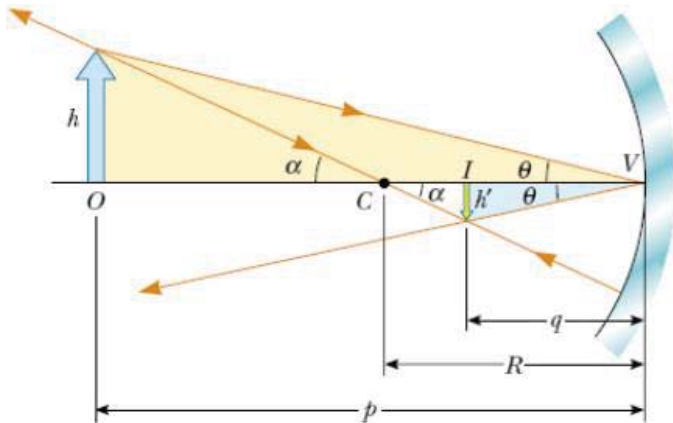
- p es la distancia del objeto al vértice;
- q es la distancia de la imagen al vértice; y
- R es el radio de curvatura (igual al doble de la distancia focal f).

Podemos resumir la convención de signos en la figura anexa

Frente, lado real	Detrás, lado virtual
p, q, R positivos	p, q, R negativos
luz incidente →	no hay luz
← luz reflejada	

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Magnificación



Se define la **magnificación** M de un espejo como la relación entre los tamaños de la imagen (h') y del objeto (h), es decir

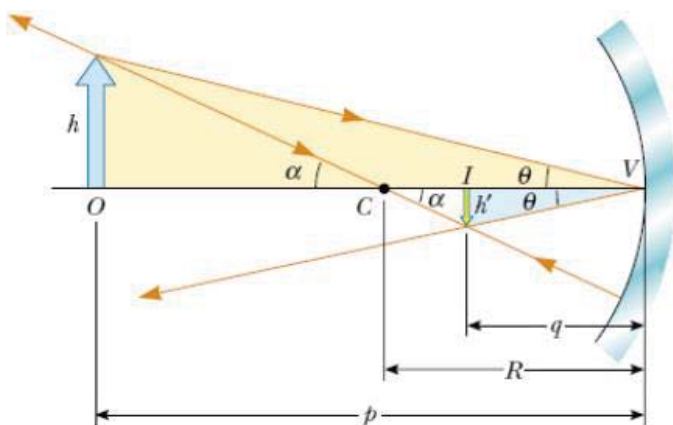
$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$

Una magnificación mayor que 1 significa una amplificación, mientras que si M es menor que 1 tenemos una reducción en el tamaño.

El signo de M también es importante, si M es positiva entonces la imagen está derecha, mientras que una M negativa significa que la imagen está invertida.

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Ley de los espejos



Si nos ayudamos de los ángulos α de la figura, es posible deducir la llamada **ecuación de los espejos**, que nos da una relación entre p , q y R (o f), a saber

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

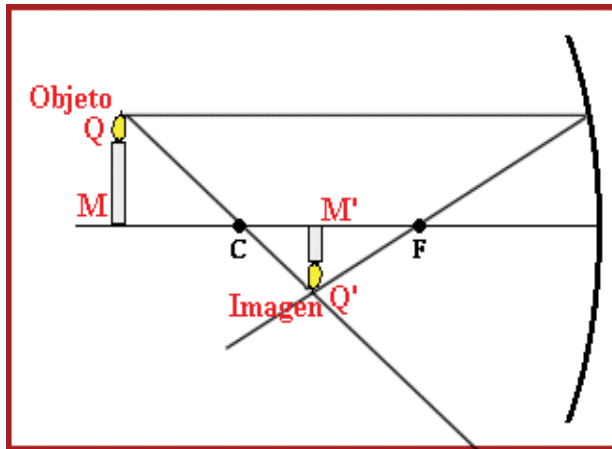
o

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Al emplear la ecuación anterior es sumamente importante tomar en cuenta la convención de signos establecida previamente para las cantidades involucradas (p , q y f).

Imágenes formadas por espejos esféricos.

Trazo de rayos para la formación de imágenes



Un objeto iluminado o que emite luz (como la punta de una vela) se considera un **Objeto** en óptica geométrica.

Colocando un objeto delante de un espejo cóncavo este formará una **Imagen** real de ese objeto

Debido a que la imagen se puede formar sobre una pantalla, se le denomina imagen real.

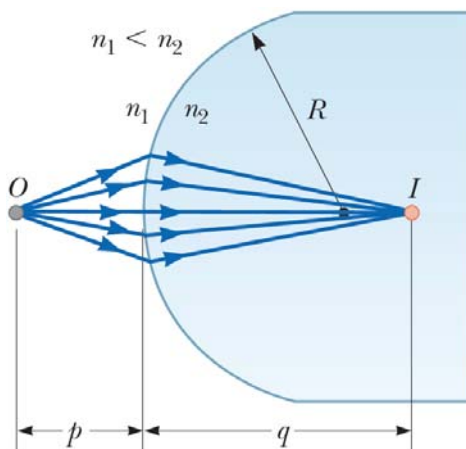
Sugerencia: Ver video en <https://www.youtube.com/watch?v=xiluPZq1QUs>

Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Refracción en una superficie esférica

Una vez estudiada la formación de imágenes mediante la reflexión en superficies planas y curvas, pasemos a analizar cómo se forma la imagen cuando la luz es refractada al pasar de un medio a otro.

Para ello consideremos una frontera esférica de radio R , entre dos medios con índices de refracción n_1 y n_2 , tal como se muestra en la figura.



El objeto se coloca en el medio de menor índice de refracción, a una distancia p de la superficie, y la imagen se forma a una distancia q de la superficie.

Las distancias p y q se relacionan por la siguiente ecuación

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

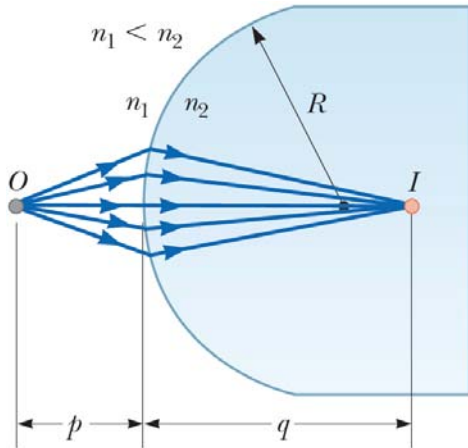
Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Refracción en una superficie esférica

La ecuación

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

es la llamada **Ecuación fundamental de la refracción en una superficie esférica**.



Esta ecuación permite conocer la posición de la imagen si previamente conocemos la posición del objeto y las características de la superficie esférica.

Solamente es válida para los rayos paraxiales (aquellos rayos que se separan poco del eje principal) y que convergen en el punto I.

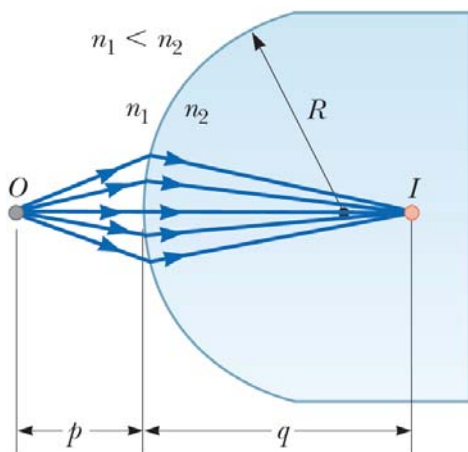
Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Convenio de signos

Convención de signos para la ecuación

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Es importante recordar que el objeto se sitúa en el medio de menor índice de refracción (n_1) de tal forma que n_2 es mayor a n_1 .

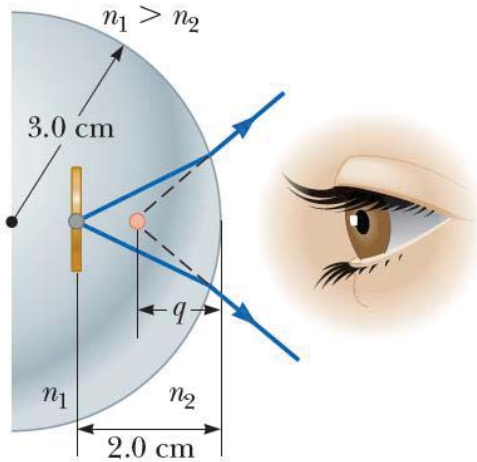


- p es **positivo** si el objeto está **frente a la superficie** (objeto real), y **negativo** si está **detrás de la superficie** (objeto virtual)
- q es **positivo** si la imagen está **detrás de la superficie** (imagen real), y **negativo** si está **frente a la superficie** (imagen virtual).
- R es **positivo** si el centro de curvatura está **detrás** (**superficie convexa**), y **negativo** si está **enfrente** (**superficie cóncava**).

Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Ejemplo. Refracción en una superficie esférica

Una moneda está incrustada en una bola de plástico ($n_1 = 1.50$) tal como se muestra en la figura. Si la moneda se encuentra a 2.0cm desde el borde de la esfera, ¿a que profundidad se ubica la imagen de la moneda?



SOLUCIÓN.

Usando $\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$ tenemos

$$\frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} - \frac{n_1}{p}$$

es decir

$$\frac{1.00}{q} = \frac{1.00 - 1.50}{-3.0\text{cm}} - \frac{1.50}{2.0\text{cm}}$$

de donde

$$q = -1.7143\text{cm}$$

La imagen es virtual, es decir está del lado del objeto.

Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Ejemplo. Refracción en una superficie plana

Cuando la superficie refractante es plana se tiene que R es infinito y entonces la ecuación

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

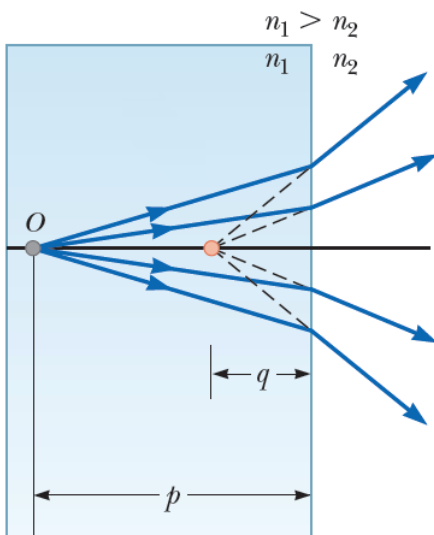
Se reduce a

$$\frac{n_1}{p} = -\frac{n_2}{q}$$

de donde

$$q = -\frac{n_2}{n_1}p$$

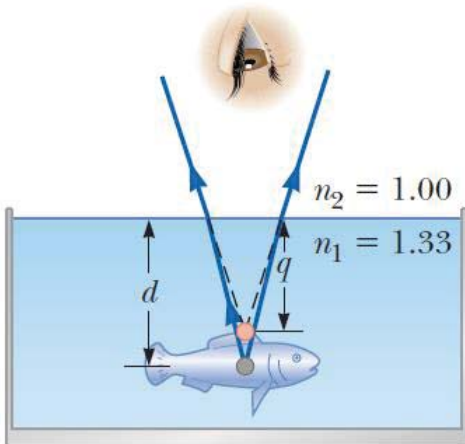
El signo menos significa que, acorde a la convención de signos, la imagen es virtual y se ubica del mismo lado que el objeto, tal como se muestra en la figura.



Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Ejemplo. Profundidad aparente

¿Cuál es la profundidad aparente de un pez en una pecera cuando se le mira directamente desde arriba? Considere que $d = 10.0\text{cm}$.



SOLUCIÓN:

Partiendo de la relación

$$q = -\frac{n_2}{n_1}p$$

podemos escribir

$$q = -\left(\frac{1.00}{1.33}\right)10\text{cm}$$

de donde $q = -7.5188\text{cm}$.

La profundidad aparente del pez es de 7.52cm

!! El signo “-” significa que la imagen y el objeto están del mismo lado !!

Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

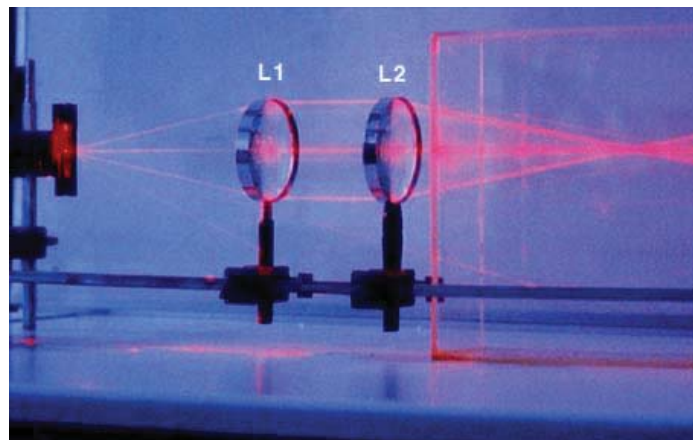
Pero... ¿qué son las lentes delgadas?

Una lente es un sistema óptico centrado y formado por dos superficies, (por lo menos una suele ser esférica) y los medios externos que limitan la lente y tienen el mismo índice de refracción.

Su utilidad es la formación de imágenes usando la propiedad de la refracción de la luz.

Las lentes se emplean para muy diversos fines.

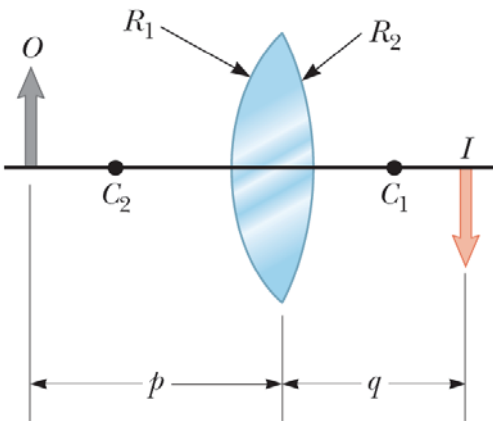
Podemos encontrarlas en las gafas (o anteojos), en las lupas, en los prismáticos, en los microscopios, en los objetivos de las cámaras fotográficas, en proyectores de diapositivas, etc.



Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Pero... ¿qué son las lentes delgadas?

Se considera una **lente delgada** cuando las dimensiones y espesor t de una lente, son pequeñas comparadas con los radios de curvatura R_1 y R_2 .



Así que considerando lo anterior, para el caso de una lente delgada podemos encontrar una relación entre las distancias objeto p e imagen q con los radios R_1 y R_2 .

Para lograrlo, y tomando en cuenta la convención de signos para la formación de imágenes en superficies refractantes, vamos a considerar que la lente tiene un índice de refracción n y que está rodeada de aire ($n = 1$).

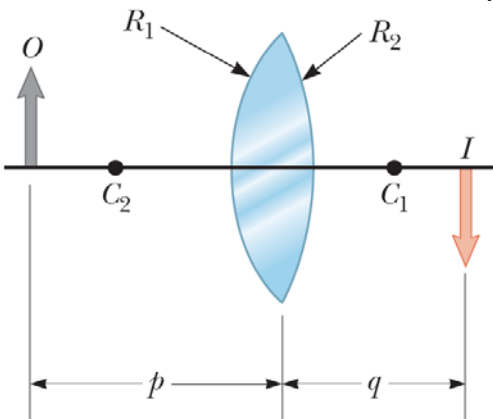
Con lo que tenemos

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Pero... ¿qué son las lentes delgadas?

La distancia focal corresponde a la distancia imagen q cuando el objeto frente a la lente se ubica en infinito ($p = \infty$), por lo que usando esto en la ecuación anterior, obtenemos que



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

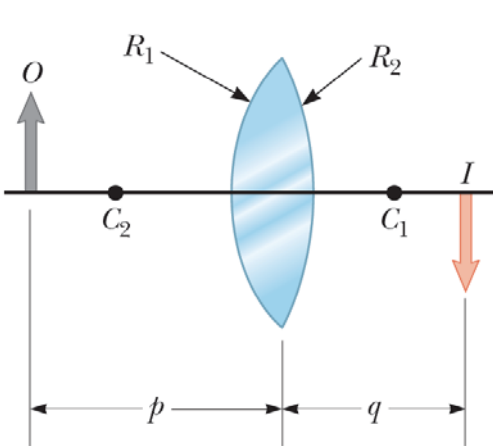
Esta ecuación se conoce como la **Ecuación del fabricante de lentes**, porque da una relación entre los radios que permiten obtener la distancia focal requerida en una lente.

En esta ecuación se considera que n es el índice de refracción del material con el que se fabricará la lente, considerando que estará rodeado de aire. En caso de que tenga que ser sumergida en algún material, entonces n será la razón del índice del material de la lente entre el índice del material que rodeará a la lente.

Concepto de lente delgada. Ecuación de las lentes delgadas.

Pero... ¿qué son las lentes delgadas?

Igualando la ecuación que nos relaciona las distancias objeto (p) e imagen (q) con las dimensiones de la lente



$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

con la ecuación del fabricante de lentes

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

encontramos la ecuación de las lentes y que será la que usaremos para la formación de imágenes

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de las lentes delgadas

Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Tipos de lentes

Hay, básicamente, dos tipos de lentes delgadas: las convergentes y las divergentes, o combinaciones de ambas.



Lente convergente

Los rayos paralelos que llegan a una lente convergente se refractan y se cruzan en el foco posterior; de allí el nombre, ya que los rayos convergen.

Mientras que en una lente divergente los rayos al refractarse aparentan salir del foco ubicado antes de la lente; de allí el nombre, los rayos divergen o se separan.

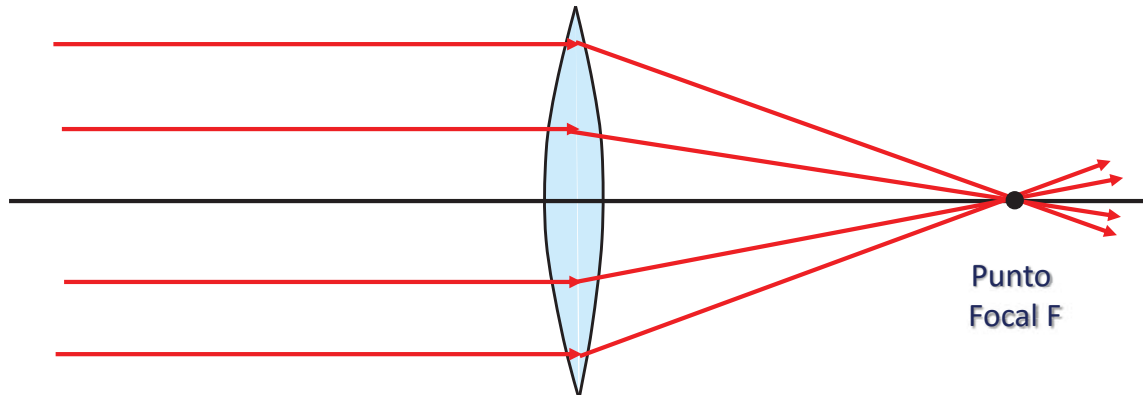


Lente divergente

Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Tipos de lentes: Lente convergente

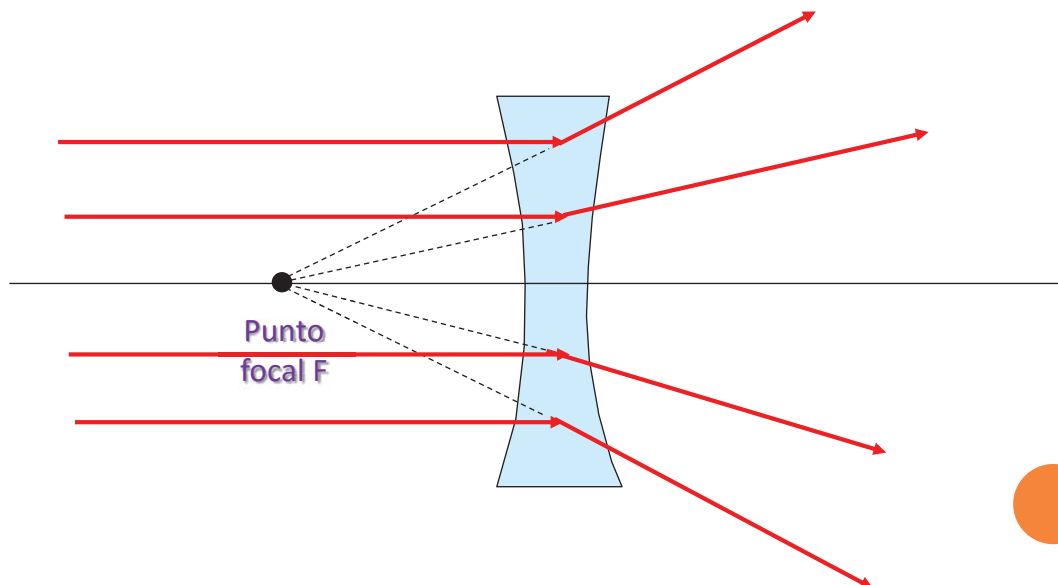
Una lente convergente enfoca los rayos paralelos en un punto (posterior a la lente) llamado Punto Focal o Foco de la lente.



Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Tipos de lentes: Lente divergente

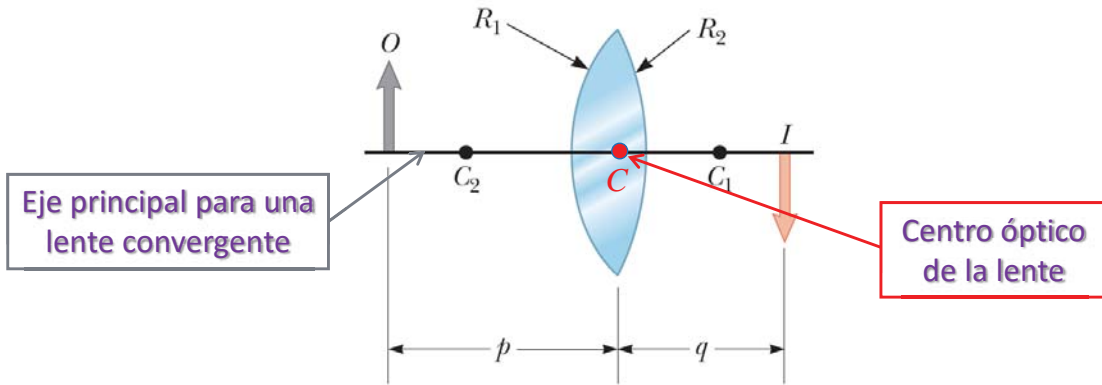
Una lente divergente hace que los rayos paralelos diverjan y aparenten emerger desde el punto focal F (anterior a la lente).



Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Elementos de las lentes

Como se mencionó anteriormente, una lente está compuesta por dos superficies esféricas, cada una con su centro de curvatura, así que la línea que une ambos centros de curvatura se llama **eje principal**.



El centro geométrico de la lente es el **centro óptico C** y se tomará como el origen de coordenadas para medir las distancias objeto e imagen, p y q .

Todas las rectas que pasan por el centro óptico son **ejes secundarios**.

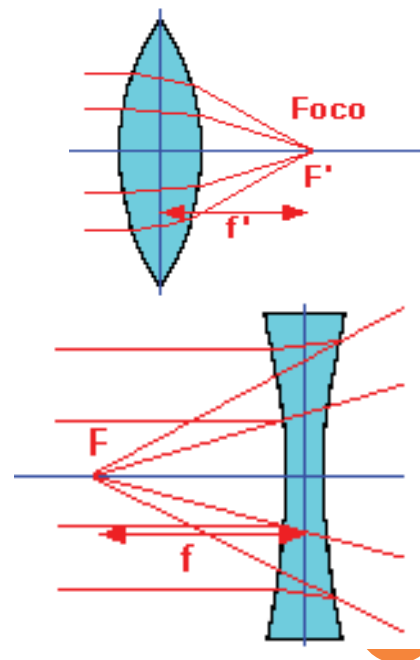
Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Elementos de las lentes

Se llama **foco principal imagen** al punto F' en que convergen los rayos paralelos que cruzan una lente convergente, y el cual se ubica posterior al centro óptico de la lente.

Mientras que para el caso de una lente divergente el **foco principal imagen** es el punto F del cual aparentan emerger los rayos paralelos que atraviesan a la lente, y el cual se ubica antes del centro óptico.

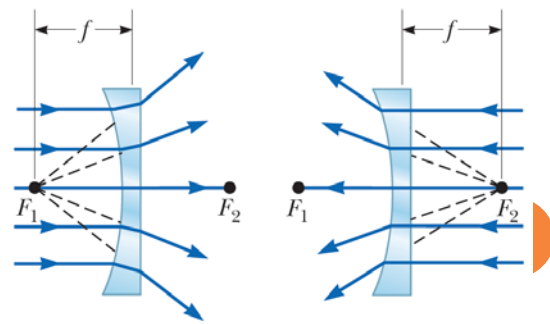
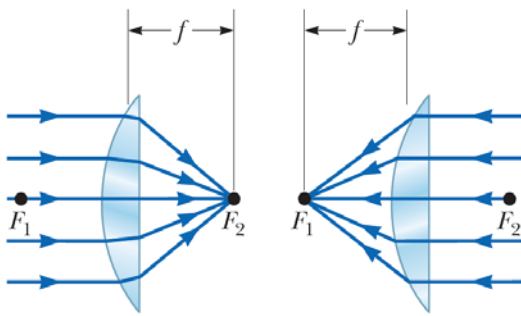
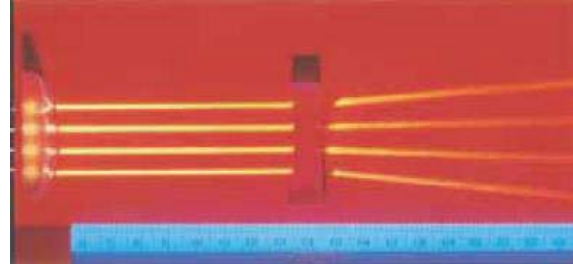
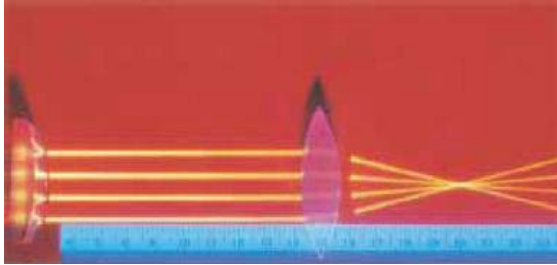
En ambos casos, el foco principal imagen se ubica sobre el eje principal de la lente.



Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Elementos de las lentes

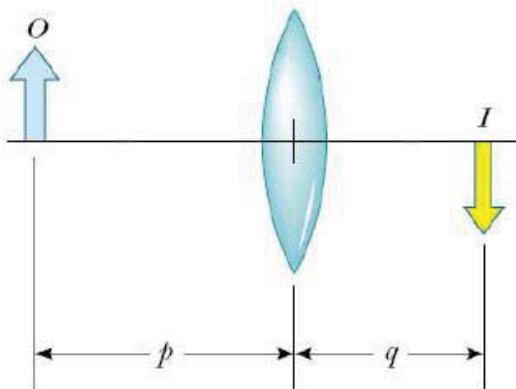
La **distancia focal f** es la distancia entre el foco principal y el centro óptico.



Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Convención de signos

Para la formación de imágenes en lentes (convergentes o divergentes) se toma como centro de coordenadas al centro geométrico de la lente, y a través de él se traza el eje principal, el cual pasa por los centros de curvatura de la lente.



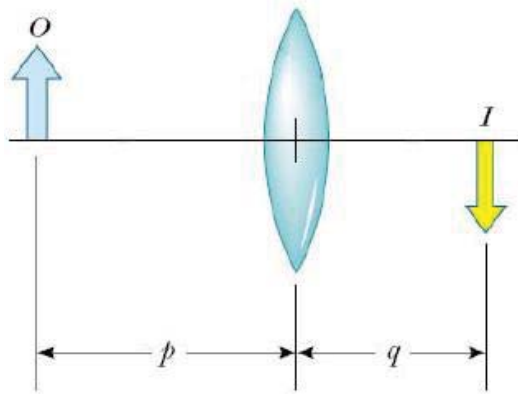
Todos los puntos situados **frente** a la lente tienen **abscisa positiva**, y los situados **detrás** tienen abscisa **negativa**.

Todos los puntos situados **por encima del eje principal** tienen **ordenada positiva**, y los situados **debajo** tienen ordenada **negativa**.

La **distancia focal f** será **positiva** para las lentes **convergentes** y será **negativa** para las lentes **divergentes**.

Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Convención de signos



Considerando que

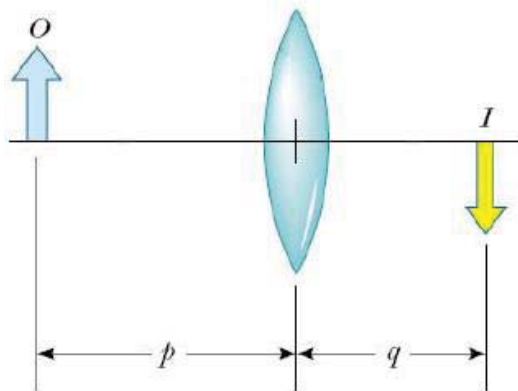
- p es la distancia del objeto al centro óptico de la lente;
- q es la distancia de la imagen al centro óptico de la lente; y
- f es la distancia focal de la lente.

Podemos resumir la convención de signos en la figura anexa



Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Magnificación



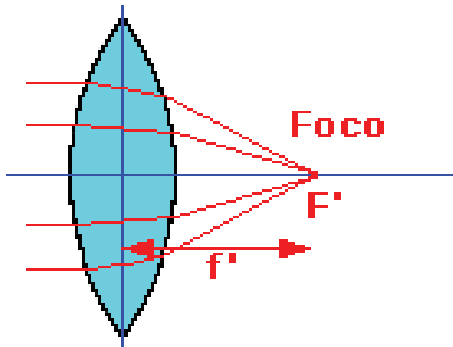
De manera análoga a como se hizo para los espejos, se define la **magnificación M** de una lente como la relación entre los tamaños de la imagen (h') y del objeto (h), es decir

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p}$$

Una magnificación mayor que 1 significa una amplificación, mientras que si M es menor que 1 tenemos una reducción en el tamaño. De nuevo, el signo de M también es importante, si M es positiva entonces la imagen está derecha, mientras que una M negativa significa que la imagen está invertida.

Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Potencia de una lente



La potencia P de una lente es la inversa de su distancia focal, es decir

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

La unidad de la potencia P es m^{-1} y se llama **dioptría**.

Una dioptría es la potencia de una lente que tiene una distancia focal imagen de $1m$.

El signo de la potencia es el mismo que el de la distancia focal imagen por lo que, siguiendo las convención de signos, la potencia de una lente convergente es positiva, mientras que para una lente divergente es negativa.

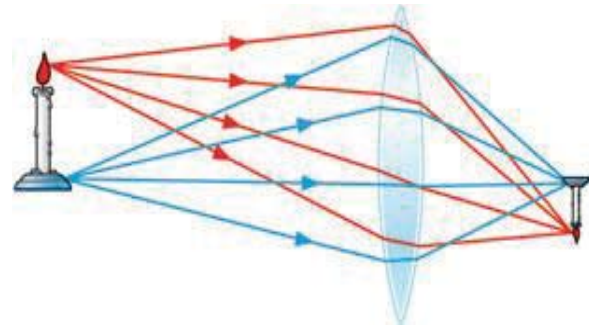
$$f = +0.20 \text{ m} \rightarrow P = +5.0 \text{ dioptrías}$$

$$f = -0.40 \text{ m} \rightarrow P = -2.5 \text{ dioptrías}$$

Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Formación de la imagen según la posición del objeto

Las imágenes de objetos extendidos se encuentra mediante el trazo de rayos que emergen desde la parte alta y baja del objeto.



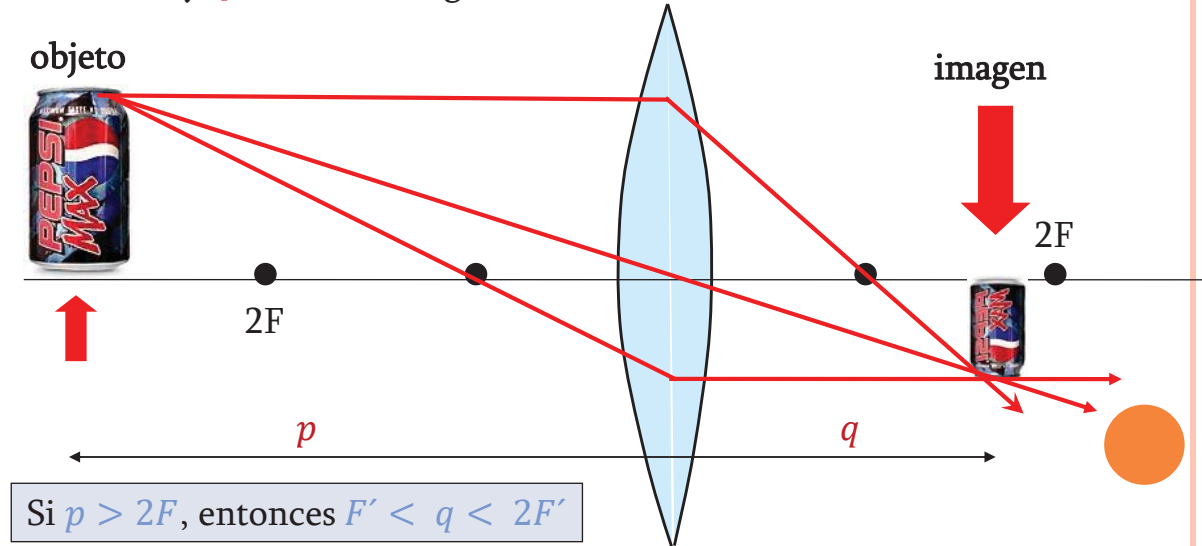
**Existen diferentes situaciones que veremos
a continuación**

Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Formación de la imagen según la posición del objeto

Si el objeto está situado entre $2F$ y el infinito, la imagen estará entre F' y $2F'$ y será invertida, real y más pequeña.

Llamemos p a la distancia del objeto a la lente
y q a la de la imagen a la lente.

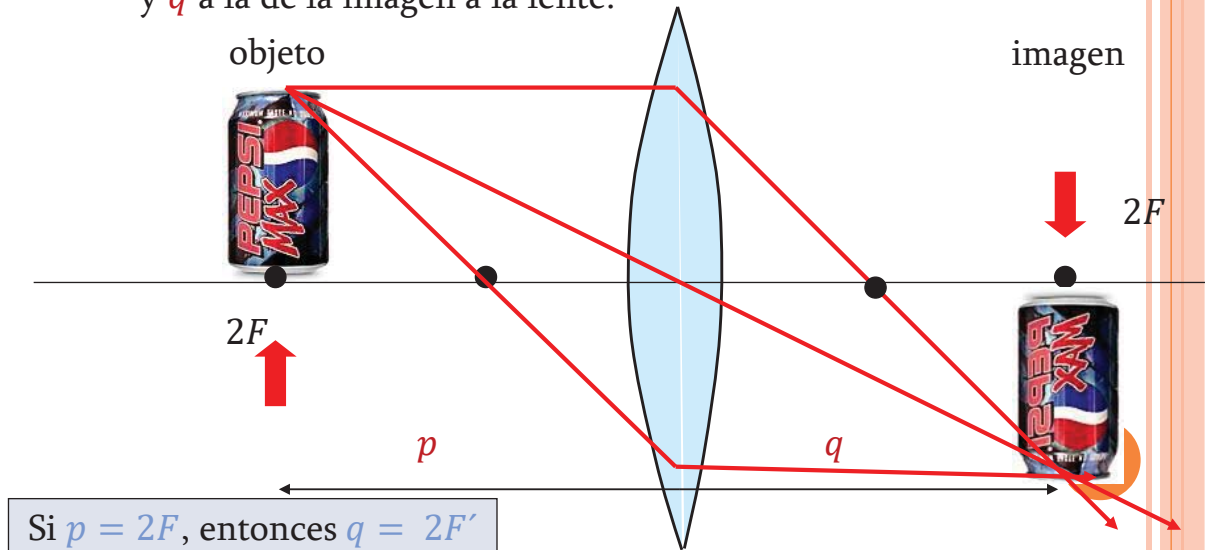


Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Formación de la imagen según la posición del objeto

Si el objeto está situado en $2F$, la imagen estará en $2F'$, y será de igual tamaño, invertida y real.

Llamemos p a la distancia del objeto a la lente
y q a la de la imagen a la lente.

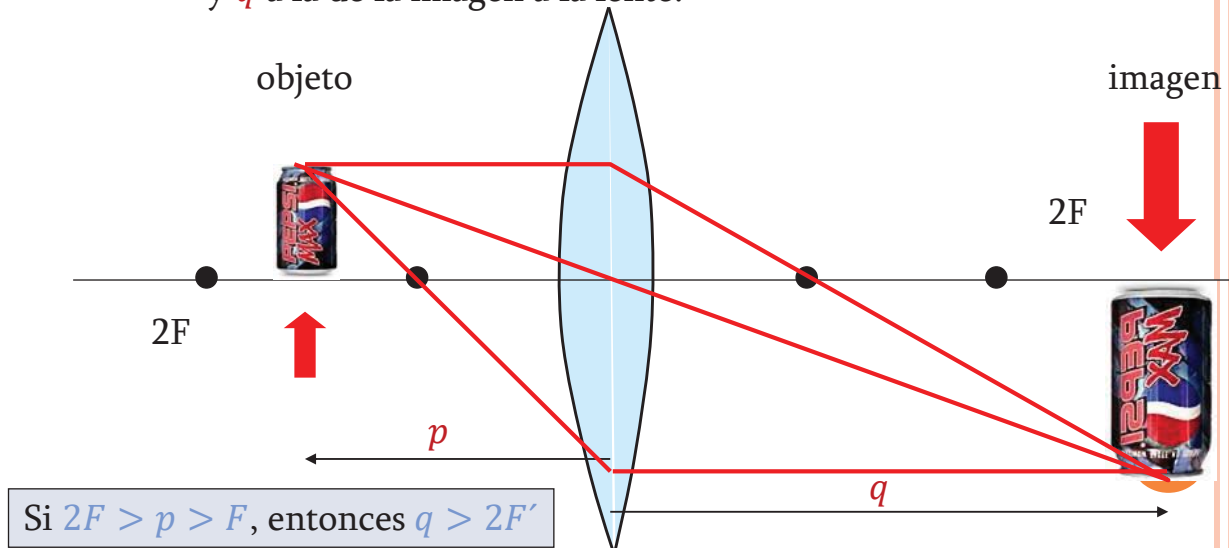


Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Formación de la imagen según la posición del objeto

Si el objeto está situado entre $2F$ y F , la imagen estará situada más allá de $2F'$ y será de mayor tamaño, invertida y real.

Llamemos p a la distancia del objeto a la lente
y q a la de la imagen a la lente.

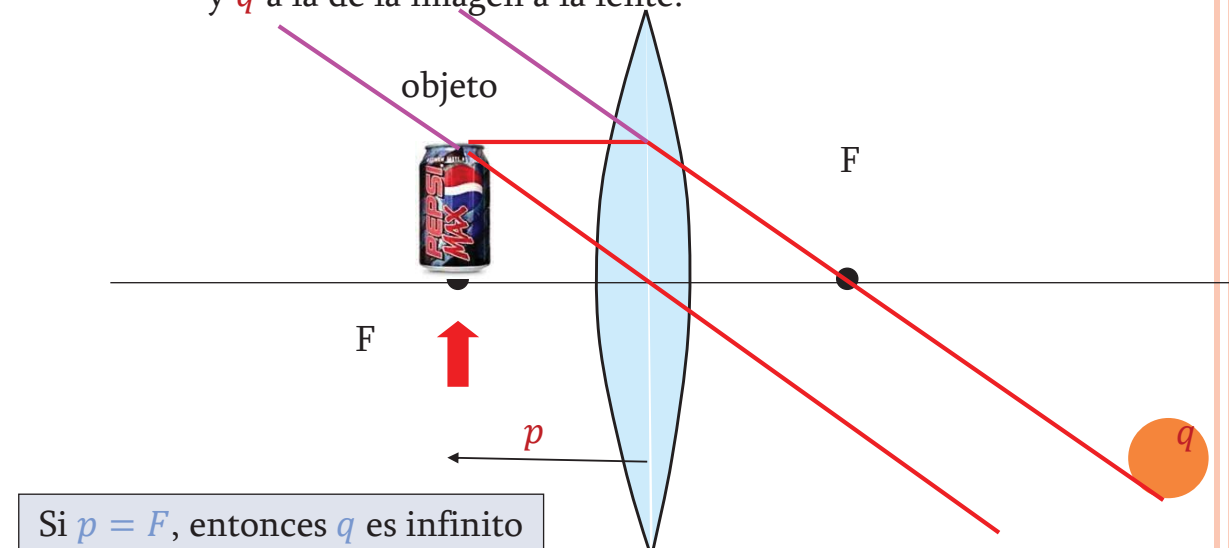


Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Formación de la imagen según la posición del objeto

Si el objeto está situado en F la imagen no se forma ya que las líneas no se cruzan (las líneas paralelas no se cruzan, excepto en el infinito).

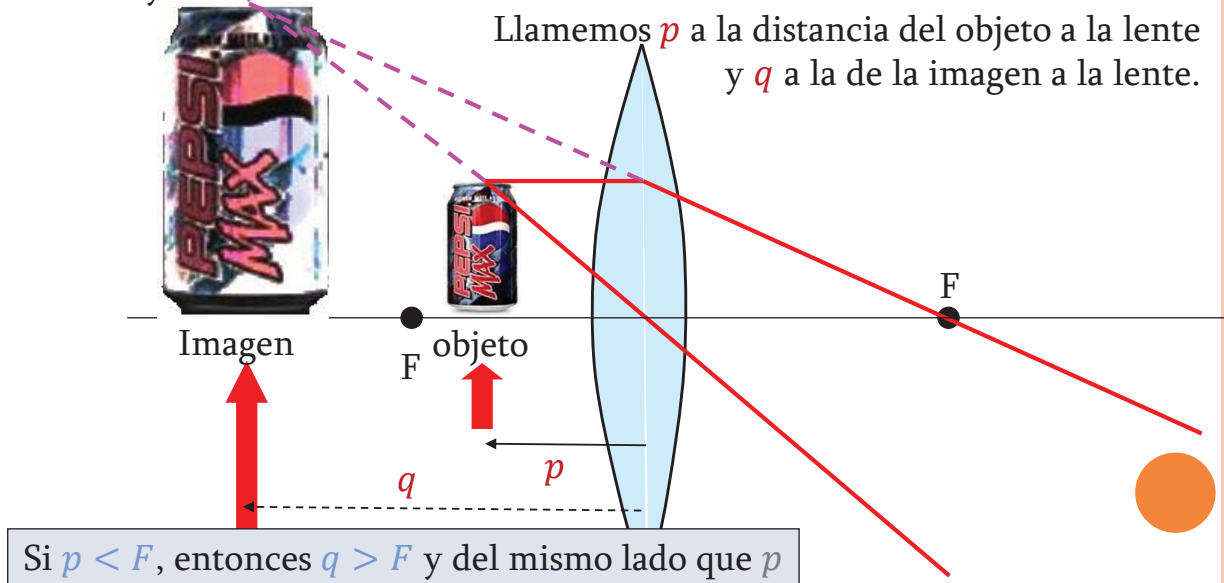
Llamemos p a la distancia del objeto a la lente
y q a la de la imagen a la lente.



Imágenes formadas por lentes esféricas: Convergentes y divergentes.

Formación de la imagen según la posición del objeto

Si el objeto está situado entre F y la lente, la imagen estará entre F y el infinito y será virtual (la forman las prolongaciones de los rayos), de mayor tamaño y derecha.



Difracción



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Óptica ondulatoria.

Una vez que hemos estudiado los fenómenos ópticos desde el punto de vista de la óptica geométrica (que considera a la luz como rayos que se propagan en línea recta mientras no existe un cambio en las condiciones del medio de propagación), en esta segunda parte nos vamos a dedicar a estudiar la luz considerándola como una onda, con las implicaciones que conlleva.

La **óptica ondulatoria** estudia los fenómenos en los cuales la naturaleza ondulatoria de la luz es fundamental, ejemplo de ello son: la interferencia, la difracción y la polarización de la luz.

En lo que sigue daremos un recorrido por cada uno de ellos, en el orden en que han sido mencionados:

- interferencia;
- difracción; y
- polarización.



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Óptica ondulatoria.

Uno de los principios fundamentales que rigen el movimiento ondulatorio es el llamado **principio de superposición**, que expresa que dos o más ondas pueden viajar por la misma región del espacio en forma completamente independiente, de tal forma que el desplazamiento total se obtiene por la adición directa de los desplazamientos que produciría cada una de las distintas ondas en ausencia de las demás.

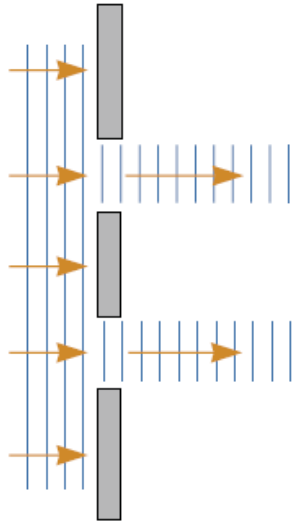
En el caso de las ondas electromagnéticas, como la luz, lo que se tiene son campos eléctricos y magnéticos propagándose en una región dada, de tal forma que al aplicar el principio anterior, el campo resultante es la suma (vectorial) de los campos de cada una de las ondas presentes.

La superposición de ondas puede resultar en una onda duplicada (interferencia constructiva) o anulada (interferencia destructiva), lo cual está condicionado por el valor de la fase ϕ entre las ondas.



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

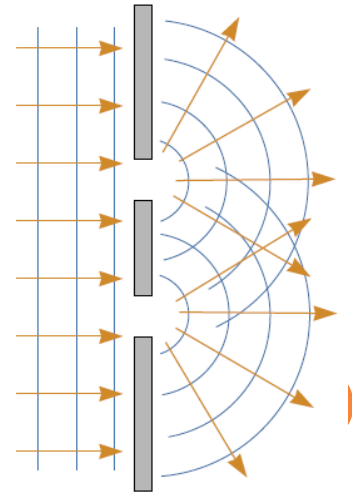
Introducción a la difracción.



Cuando las ondas luminosas pasan por una pequeña abertura se observa un patrón de interferencia en vez de un punto definido de luz, lo que indica que la luz se dispersa mas allá de la trayectoria definida por la abertura.

En lugar de tener dos sombras, se tiene un patrón de difracción

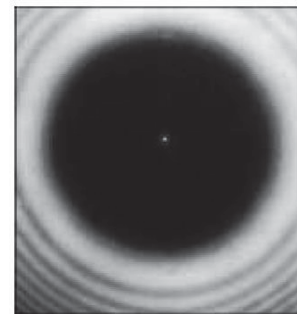
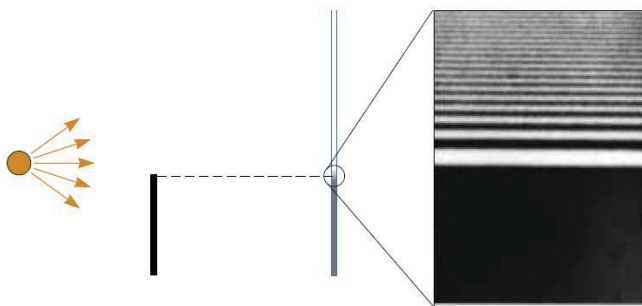
Este fenómeno se conoce como difracción y sólo puede explicarse con un modelo ondulatorio de la luz.



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Introducción a la difracción.

La difracción se presenta cuando las ondas pasan por pequeñas aberturas, alrededor de obstáculos o por bordes afilados, originando que no existan fronteras definidas entre una región sombreada y una región iluminada.

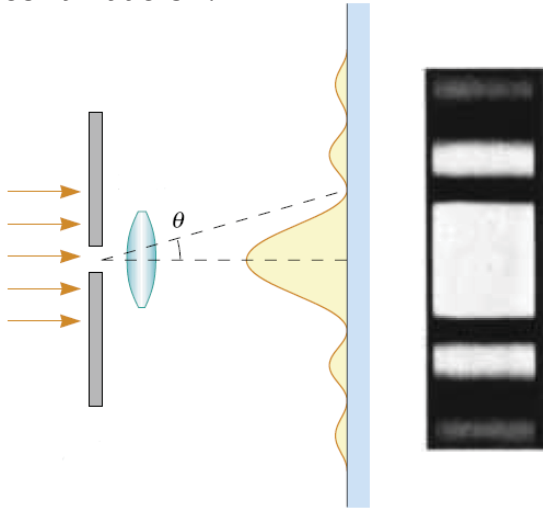


En la segunda imagen se presenta el *patrón de difracción* de una moneda pequeña colocada a la mitad entre la fuente de luz y la pantalla, es interesante notar que el punto brillante al centro del patrón sólo se puede explicar mediante la óptica ondulatoria que predice interferencia constructiva en ese punto.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Introducción a la difracción.

En lo que sigue nos enfocaremos en la llamada difracción de Fraunhofer, la cual ocurre, por ejemplo, cuando los rayos que pasan a través de una rendija angosta son casi paralelos entre sí, tal como se muestra a continuación.



Experimentalmente, esto se logra colocando la pantalla lejos de la abertura usada para crear la difracción, o usando una lente convergente para enfocar los rayos una vez que estos han atravesado la abertura.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Introducción a la difracción. Condiciones para la interferencia.

Dada la rapidez de oscilación de la luz (del orden de $10^{-8}s$), no es posible observar el fenómeno de interferencia de manera generalizada; de tal forma que se deben satisfacer ciertas condiciones para tener interferencia (constructiva y/o destructiva).

Las condiciones para tener interferencia son dos:

1. Las fuentes deben ser coherentes, es decir, deben mantener una fase constante ϕ una respecto a la otra.
2. Las fuentes deben ser monocromática, es decir, de una misma longitud de onda, λ .

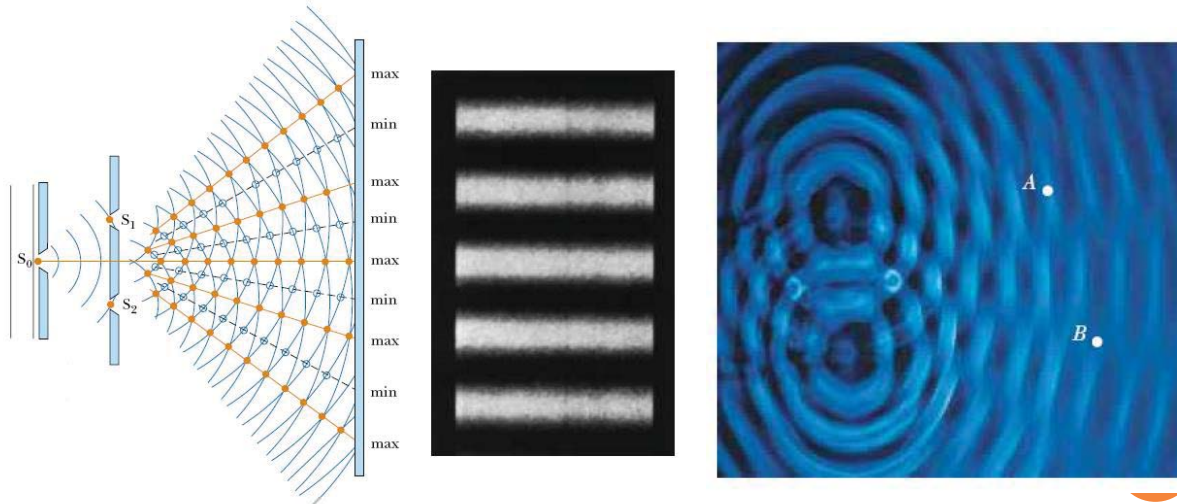
La pregunta que uno se hace es ¿cómo lograr estas dos condiciones de manera sencilla?

Una respuesta a esta interrogante la dio el físico inglés Thomas Young (1773–1829) en 1801.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

Hacia 1801, Young demostró la existencia de interferencia para el caso de la luz; para ello empleó un arreglo experimental formado por dos rejillas, tal como se esquematiza en la siguiente figura.



Interferencia de luz visible y patrón de interferencia

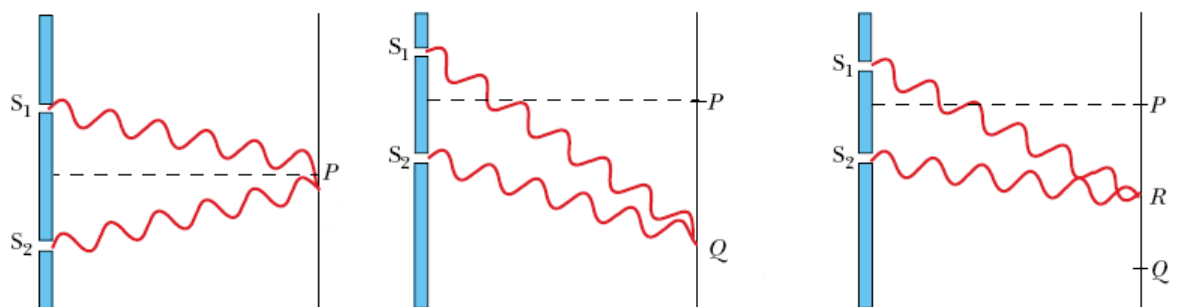
Ondas en un estanque

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

¿Cómo podemos explicar el patrón de difracción?

De manera cualitativa, mediante el siguiente esquema podemos visualizar las superposiciones que dan lugar a interferencia constructiva (franjas brillantes) e interferencia destructiva (franjas oscuras)



Interferencia constructiva en P y Q

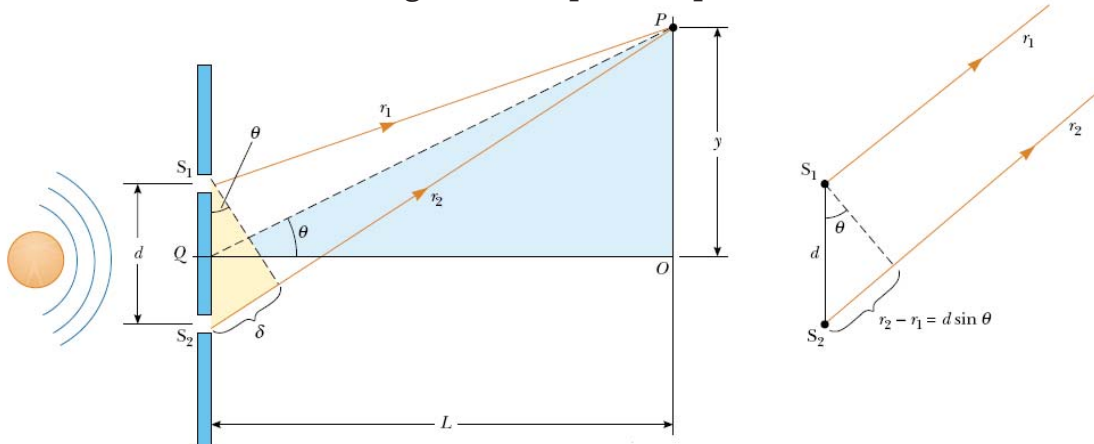
Interferencia destructiva en R

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

El experimento también acepta una explicación cuantitativa.

Para ello auxiliémonos del siguiente esquema (que no está a escala):



En este esquema, la diferencia de trayectorias ($\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta$) permite explicar el fenómeno de la interferencia, dependiendo si δ es o no, múltiplo de la longitud de onda de la luz considerada en el experimento.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

El valor de δ determina si las dos ondas están, o no, en fase cuando arriban al punto P.

Si δ es cero o un **múltiplo entero de la longitud de onda**, entonces estarán en fase y tendremos una interferencia constructiva (franja brillante), lo anterior permite escribir a la **condición de interferencia constructiva** como

$$\delta = d \sin \theta = m\lambda, \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

donde m recibe el nombre de **número de orden**.

La franja central (que corresponde a $m = 0$) recibe el nombre de **máximo de orden 0**, mientras que las siguientes dos franjas (a cada lado del máximo de orden 0), y que corresponden a $m = +1$ y $m = -1$, se llaman **máximos de orden 1**, y así sucesivamente.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

El valor de δ determina si las dos ondas están, o no, en fase cuando arriban al punto P .

Si δ es un **múltiplo impar de una media longitud de onda**, las ondas presentarán un desfase de 180° y entonces tendremos una interferencia destructiva (franja oscura), lo anterior permite escribir a la **condición de interferencia destructiva** como

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

donde m recibe el nombre de **número de orden**.



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Experimento de la doble rendija.

En este tipo de experimentos es usual obtener expresiones para la posición de las franjas, en este caso la distancia y del punto P , respecto al máximo de orden cero (la franja brillante, justo frente al centro de ambas rendijas).

Si consideramos que

$$L \gg d$$

y

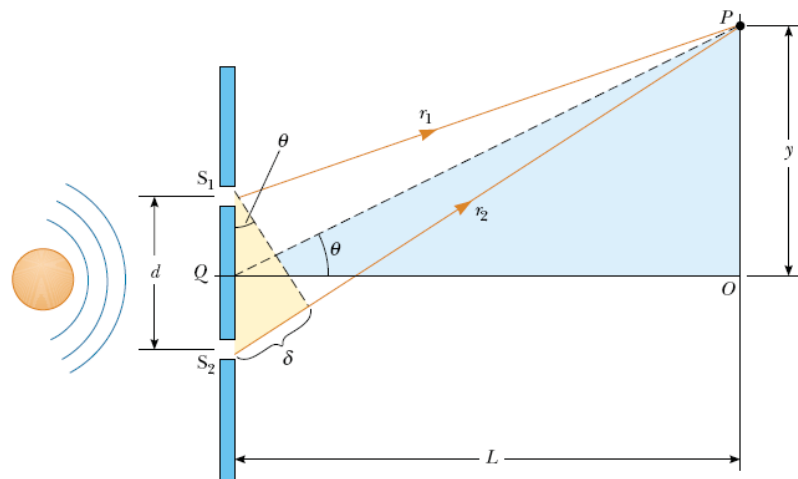
$$d \gg \lambda$$

encontramos que

$$y_{\text{brillante}} = \frac{\lambda L}{d} m$$

y

$$y_{\text{oscuro}} = \frac{\lambda L}{d} \left(m + \frac{1}{2}\right)$$



Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer. Ejemplo.

Experimento de la doble rendija.

Ejemplo. Se produce un patrón de interferencia mediante luz de una fuente distante, cuya longitud de onda es de 580nm , que incide sobre dos ranuras paralelas idénticas separadas por una distancia (entre centros) de 0.530mm . Si las ranuras son muy angostas, ¿cuál sería la posición angular de los máximos de interferencia de primero y de segundo órdenes de dos ranuras?

Solución.

Considerando que estamos interesados en los máximos de interferencia, partimos de

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ con } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

y despejando θ tenemos

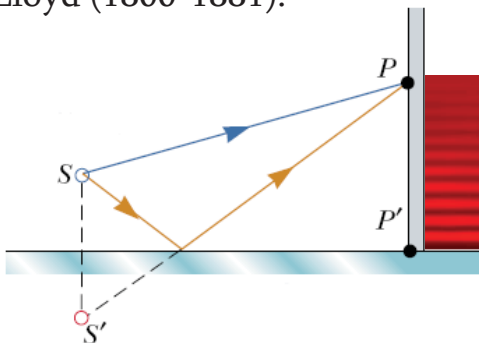
$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right)$$

de donde $\theta_1 = \pm 0.0627^\circ$ y $\theta_2 = \pm 0.1254^\circ$.

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

Cambio de fase por reflexión.

Un arreglo sencillo, pero ingenioso, para producir interferencia con una fuente luminosa (análogo al experimento de Young) es el llamado **espejo de Lloyd** empleado por primera vez en 1837 por el físico irlandés Humphrey Lloyd (1800-1881).

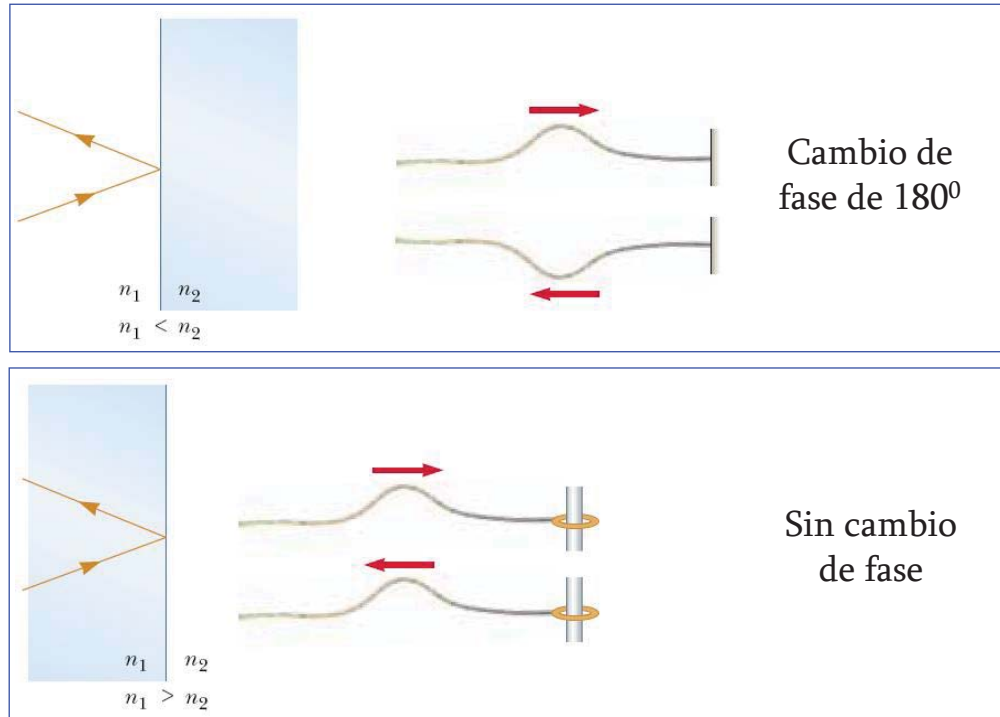


En este experimento se encuentra también un espectro de interferencia como en el experimento de doble rendija, pero con el patrón invertido, es decir, donde había zona brillante ahora aparece zona de oscuridad.

Por ejemplo en P' se tiene una zona de oscuridad, lo que permite concluir que **una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión de un medio que tiene mayor índice de refracción que el medio en el cual está viajando la onda.**

Introducción a la difracción. Difracción de Fresnel y de Fraunhofer.

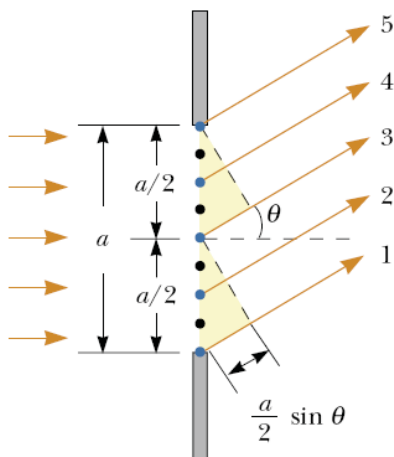
Cambio de fase por reflexión.



Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.

Difracción de rendijas angostas.

Para estudiar la difracción de una rendija angosta podemos hacer uso del esquema mostrado, para analizar cuál es la condición requerida para tener interferencia destructiva.



Si dividimos la rendija en dos mitades se encuentra que esta condición está dada por

$$\frac{a}{2} \text{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

si dividimos la rendija en cuatro partes iguales se encuentra que la condición es

$$\frac{a}{4} \text{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

y si la dividimos en $2m$ partes, encontramos que la condición es

$$\frac{a}{2m} \text{sen} \theta = \frac{\lambda}{2}$$

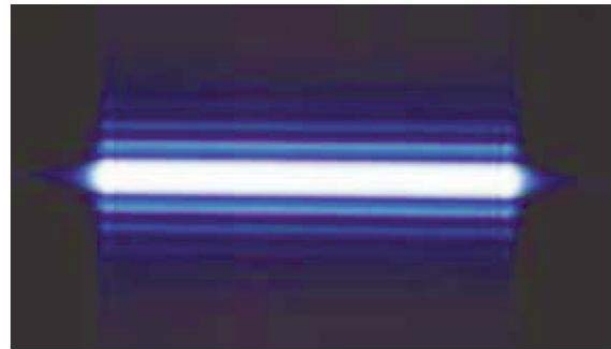
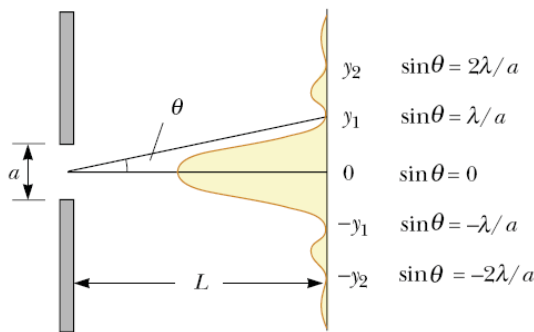
Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.

Difracción de rendijas angostas.

Generalizando el resultado anterior, podemos escribir la condición para interferencia destructiva como

$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{a} \quad \text{con } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Lo anterior se puede esquematizar en la siguiente figura que muestra el patrón de difracción de Fraunhofer de una rendija de ancho a .

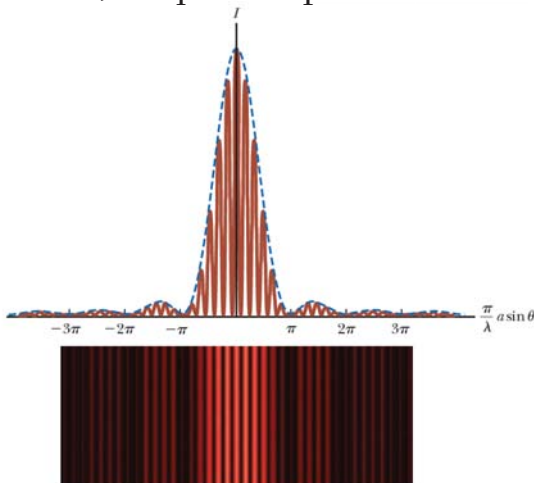


Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.

Difracción de rendijas angostas.

Es importante mencionar que cuando tenemos más de una rendija se deben considerar dos efectos: la difracción recientemente expuesta y la interferencia de las ondas que vienen de diferentes rejillas.

Las expresiones resultante son más complicadas y los espectros también lo son, así que sólo presentaremos el patrón obtenido para dos rejillas.



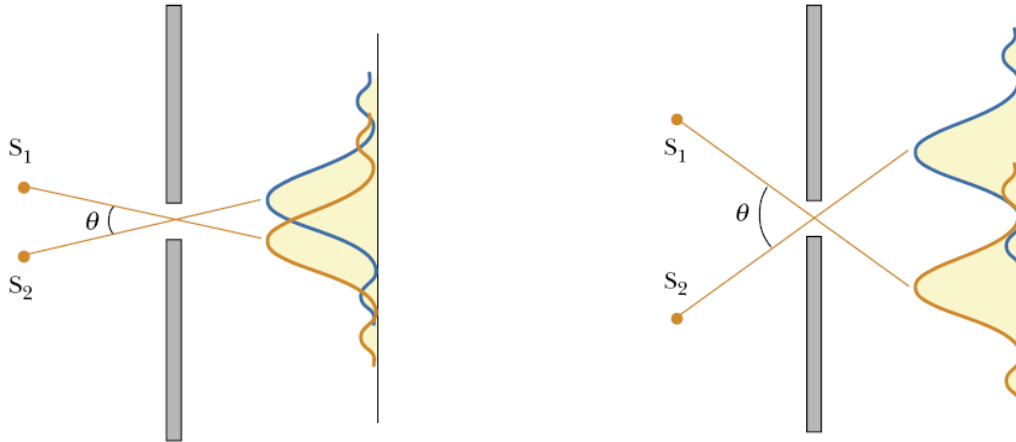
En la figura se muestra el patrón para ondas luminosas de 650nm que pasan por dos rendijas de $3.0\mu\text{m}$ y que están separadas $18\mu\text{m}$.

La envolvente (en color azul) representa el efecto de la difracción, mientras que las líneas naranjas corresponden a las franjas de interferencia.

Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.

Resolución de abertura circular.

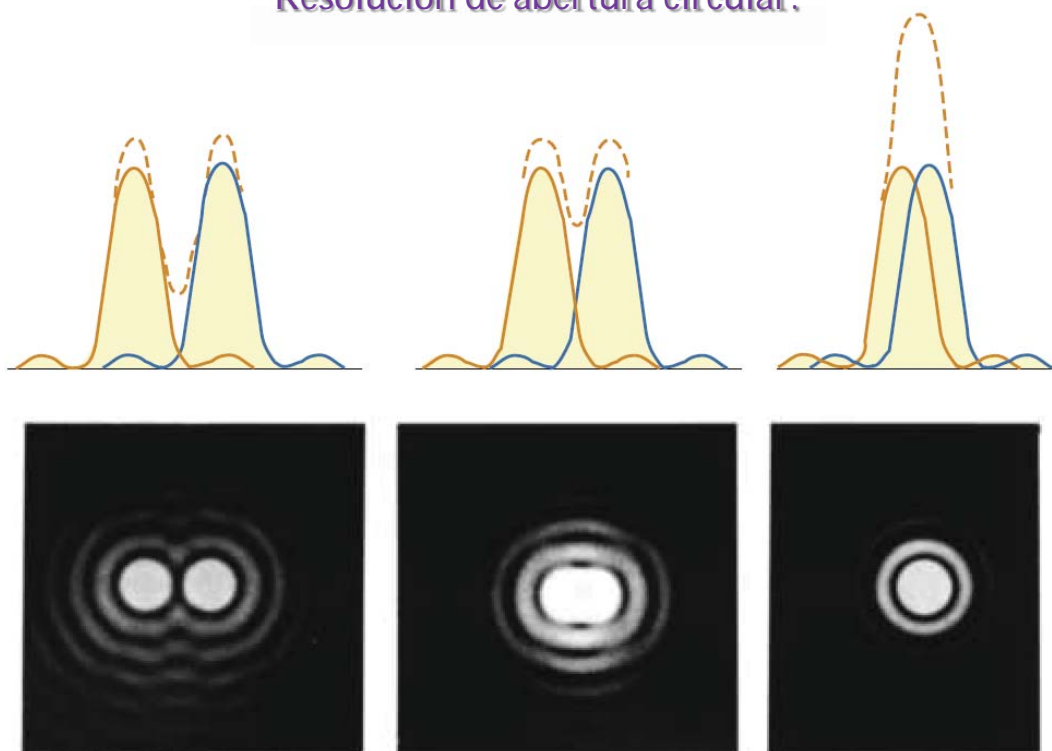
La capacidad de los sistemas ópticos para distinguir entre objetos muy próximos es limitada debido a la naturaleza ondulatoria de la luz.



Dos fuentes muy cercanas producen patrones de difracción con sus máximos traslapados, mientras que dos fuentes no tan cercanas permiten la formación de patrones cuyos máximos no se traslapan, permitiendo la formación de dos imágenes resueltas.

Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.

Resolución de abertura circular.



Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular.

Resolución de abertura circular.

El **criterio de Rayleigh** establece que una imagen está resuelta si el máximo central de una imagen cae sobre el primer mínimo de otra imagen.

Así que la condición para tener una imagen resuelta en una rendija de ancho a , empleando luz de longitud de onda λ , es

$$\theta_{min} = \frac{\lambda}{a}$$

donde θ se expresa en radianes.

Muchos de los sistemas ópticos emplean aberturas circulares, en vez de rendijas.

Para estos sistemas, se ha encontrado que la condición es

$$\theta_{min} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

donde D es el diámetro de la abertura.

Difracción de rendijas estrechas. Resolución de abertura circular. Ejemplo.

Resolución de abertura circular.

Ejemplo. Si puede leer el renglón más bajo del diagrama de agudeza visual de su médico, su ojo tiene un poder de resolución de un minuto de arco (equivalente a $1/60$ de grado). Si este poder resolutivo está limitado por la difracción, ¿a qué diámetro efectivo del sistema óptico de su ojo corresponde este valor? Aplique el criterio de Rayleigh y suponga que $\lambda = 550nm$.

Solución.

Considerando que el ojo tiene abertura circular, en vez de rendijas, la resolución está dada por el criterio de Rayleigh, a saber

$$\theta_{min} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

de donde D está dado por

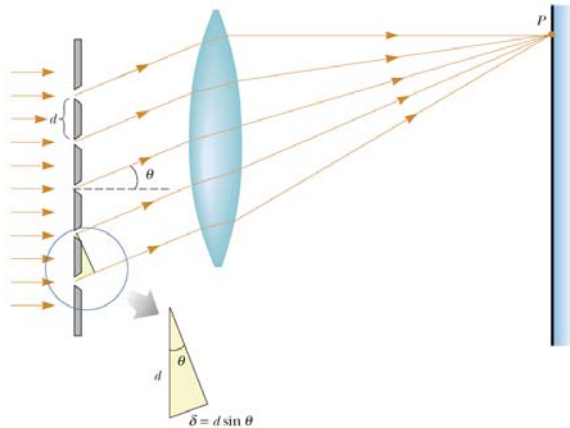
$$D = \frac{1.22\lambda}{\theta_{min}} = \frac{1.22(550 \times 10^{-9}m)}{2.908882 \times 10^{-4}rad} = 2.306728mm$$

La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

La rejilla de difracción.

Un dispositivo muy útil para analizar fuentes luminosas es la *rejilla de difracción* que consiste de un gran número de rendijas paralela igualmente espaciadas, y pueden ser de transmisión o de reflexión.

Las rejilla de difracción se logran cortando líneas paralelas sobre una placa de vidrio (rejilla de transmisión) o sobre un material reflejante (rejilla de reflexión), mediante una máquina de rayado de precisión.



La diferencia de caminos δ es la responsable de los fenómenos de difracción e interferencia, así que la condición para el máximo de interferencia de una rejilla es

$$d \sin \theta = m\lambda$$

con $m = 0,1,2,3, \dots$

La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

La rejilla de difracción.

Por ejemplo, los reflejos de colores del arco iris que se ven en la superficie de un CD son efectos de la rejilla de reflexión (en este caso).

Los surcos microscópicos en la superficie de un disco compacto actúan como una rejilla de difracción y dividen la luz blanca en los colores que la componen.

Los “surcos” o pistas son diminutos canales de 100nm de profundidad en la superficie del disco, con un espaciado radial uniforme $d = 1.60\mu\text{m} = 1600\text{nm}$.

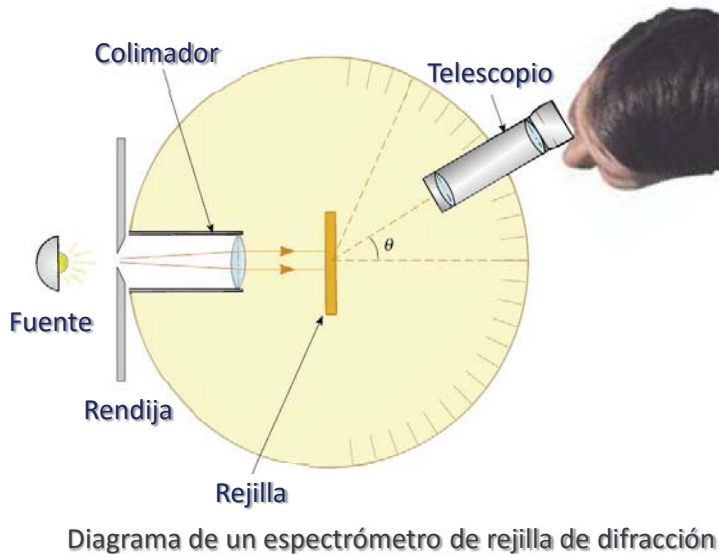
La información se codifica en el CD haciendo variar la longitud de los fosos; el aspecto de rejilla de reflexión del disco es tan sólo una ventaja estética colateral.



La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

Espectrómetros de rejilla.

Las rejillas de difracción se utilizan extensamente para medir el espectro de la luz que emite una fuente, mediante un procedimiento que se conoce como **espectroscopia** o **espectrometría**. La luz que incide en una rejilla de espaciado conocido d se dispersa para formar un espectro.



Se miden entonces los ángulos de desviación de los máximos y se calcula la longitud de onda usando la ecuación

$$d \sin \theta = m\lambda$$

Conforme aumenta el número de ranuras en la rejilla se puede medir con mayor precisión el ángulo de desviación y, por lo tanto, la longitud de onda.

La rejilla de difracción. Espectrómetros de rejilla.

Espectrómetros de rejilla.

Ejemplo. En un espectrómetro incide luz de manera normal sobre su rejilla de difracción que tiene 5000 ranuras/cm. (a) ¿Cuál es la longitud de onda que se desvía un ángulo de 13.5° en el primer orden? (b) ¿Cuál es la desviación de segundo orden de esta longitud de onda?

Solución.

Partiendo de que los ángulos de desviación de los máximos están dados por la ecuación

$$d \sin \theta = m\lambda$$

$$(a) \quad \lambda_1 = d \sin \theta = \left(\frac{0.01m}{5000} \right) \sin 13.5^\circ = 4.6689 \times 10^{-7}m = 466.89nm$$

$$(b) \quad \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{d} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{2(4.6689 \times 10^{-7}m)}{\left(\frac{0.01m}{5000} \right)} \right) = 27.8326^\circ$$

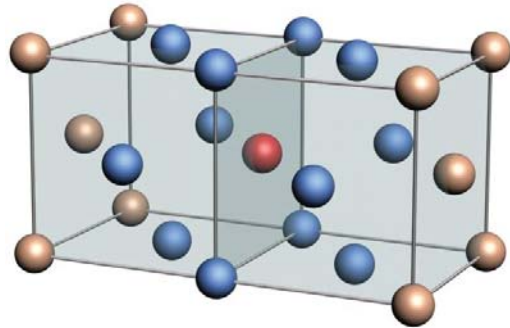
Difracción de rayos X mediante cristales.

Antecedentes

La idea de que los cristales son una repetición periódica de un grupo de moléculas ya existía anteriormente a que Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) descubriera los rayos X en 1895.

Aunque las distancias típicas entre los planos de la red cristalina se desconocían, se sabía que debían ser muy pequeñas comparadas con la longitud de onda de la luz visible.

Esto le dio al físico alemán Max von Laue (1879-1960) la idea de utilizar cristales de sulfato de cobre para determinar si los rayos X se componían de partículas u ondas: dedujo que, si fueran ondas, deberían generar un patrón de difracción al atravesar los cristales.

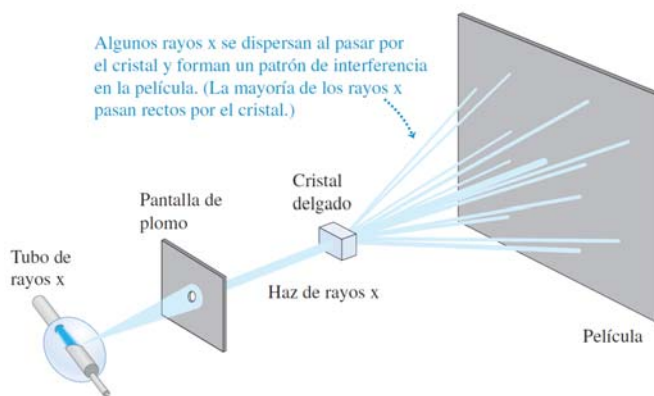


Difracción de rayos X mediante cristales.

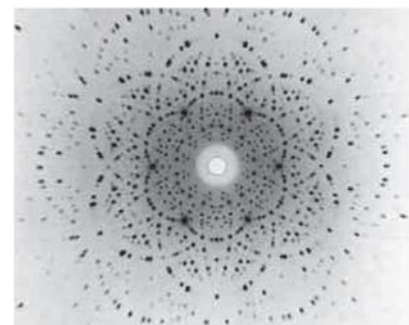
El experimento de Von Laue

Con la idea anterior, los primeros experimentos de difracción de rayos X fueron realizados en 1912 por Von Laue, con la ayuda de Walter Friedrich y Paul Knipping, empleando el sistema experimental bosquejado en la figura.

Los rayos X dispersados formaron un patrón de interferencia, el cual se registró en una película fotográfica.



Esquema del Experimento de Von Laue



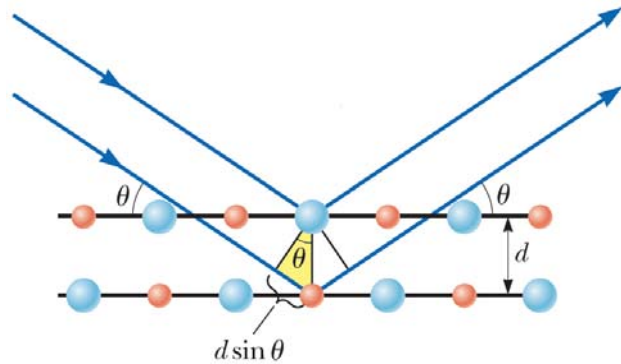
Patrón de Von Laue de un cristal de berilio mineral. Cada punto representa un punto de interferencia constructiva



Difracción de rayos X mediante cristales.

La ley de Bragg

Cuando un haz de rayos X incide sobre un cristal con un cierto ángulo θ (con respecto a un plano del cristal), tal como se muestra en la figura, se observa un fenómeno de difracción.



La difracción en una dirección dada se debe esencialmente a la relación entre las fases de todas las ondas reflejadas por cada celda unitaria del cristal en esa dirección.

La condición para que las ondas estén en fase es que la diferencia de sus caminos ópticos sea cero o un múltiplo entero n de la longitud de onda λ .

En un cristal, la diferencia en el camino óptico entre átomos situados en posiciones equivalentes en distintas celdas unitarias es $2d \sin \theta$, donde d es la distancia entre los planos de la red cristalina, tal como se muestra.

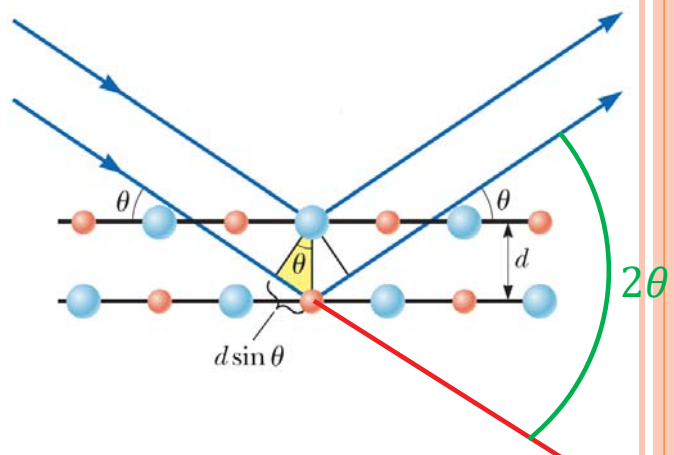
Difracción de rayos X mediante cristales.

La ley de Bragg

Con lo anterior, para que se observe interferencia constructiva de rayos X a un ángulo de observación 2θ respecto a la dirección de incidencia, se debe cumplir que

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Esta relación se conoce como
Ley de Bragg



Con estos experimentos se comprobó que los rayos X son ondas, o al menos tienen propiedades ondulatorias, y también que los átomos están dispuestos conforme a una distribución regular. A partir de entonces, la difracción de rayos X ha probado ser una herramienta de investigación muy valiosa, tanto para medir longitudes de onda de rayos X como para estudiar la estructura de cristales y moléculas complejas, como el ADN por ejemplo.

Difracción de rayos X mediante cristales.

La ley de Bragg. Un ejemplo

Ejemplo. Los átomos de un cristal dispersan rayos X con una longitud de onda de 0.0850nm . El máximo de segundo orden de la reflexión de Bragg se presenta cuando el ángulo θ es de 21.5° . ¿Cuál es la separación entre planos atómicos adyacentes en el cristal?

Solución.

Considerando como punto de arranque la Ley de Bragg tenemos que

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

de donde

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

Es decir

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{2(0.0850 \times 10^{-9}\text{m})}{2(\sin 21.5^\circ)} = 2.31923 \times 10^{-10}\text{m} = 2.32\text{\AA}$$

Polarización óptica

Propiedades ópticas de la materia.



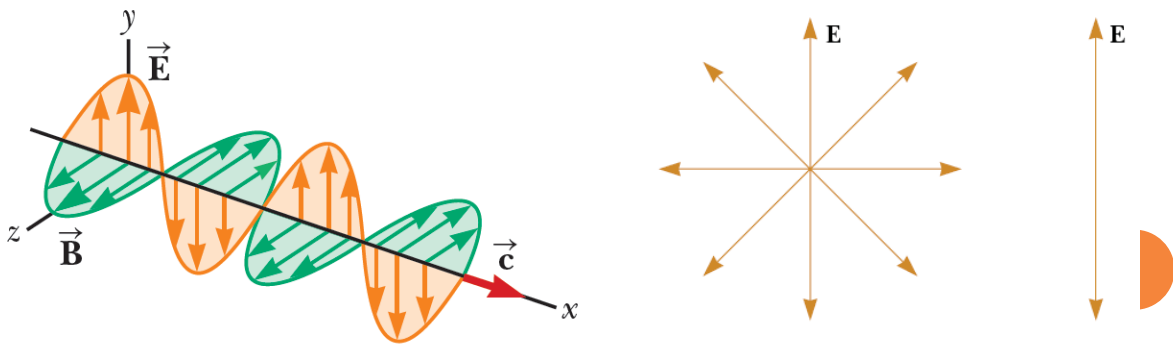
Polarización de la luz. Filtros polarizadores.

Polarización de la luz.

Un haz ordinario de luz consta de un gran número de ondas electromagnéticas emitidas por los átomos de una fuente de luz, cada una con su propia orientación en la que vibran sus campos \vec{E} y \vec{B} .

La **dirección de polarización** de cada onda individual está definida como la dirección en la cual el campo eléctrico está vibrando.

Se dice que **una onda está polarizada linealmente** si el campo eléctrico \vec{E} vibra en la misma dirección **todo el tiempo** en un punto en particular.



Polarización de la luz. Filtros polarizadores.

Filtros polarizadores

La forma de polarizar un haz luminoso consiste en eliminar todas las ondas del haz, excepto aquellas cuyos vectores de campo eléctrico oscilan en un mismo plano.

Los filtros polarizadores son los instrumentos ópticos que permiten seleccionar una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de la luz.



Polarización de la luz. Filtros polarizadores.

Procesos o formas de polarizar la luz.

Existen varias formas de polarizar un haz luminoso, entre estos procesos podemos considerar los siguientes:

- Polarización mediante absorción selectiva
- Polarización por reflexión
- Polarización por doble refracción
- Polarización por dispersión

En lo que sigue haremos una breve descripción de cada uno de los procesos mencionados, quedando para el estudiante revisarlos con mayor profundidad.

Para concluir, también revisaremos la llamada actividad óptica que consiste en girar la dirección de polarización de la luz producido por la llamada **quiralidad** que presentan algunas moléculas, como el azúcar.

Polarización mediante absorción selectiva.

Absorción selectiva y el polaroide

En 1928, el químico estadounidense Edwin Herbert Land (1909-1991) descubrió un material al que llamó **polaroide** y el cual se fabrica en láminas delgadas de hidrocarburos en cadenas largas.

Este descubrimiento fue la base para que en 1932 Land, junto a su profesor de Física, George Wheelwright III, establecieran en Boston los Laboratorios Land-Wheelwright (con la finalidad de continuar su trabajo de investigación) y que más tarde se convertirían en la compañía Polaroid.

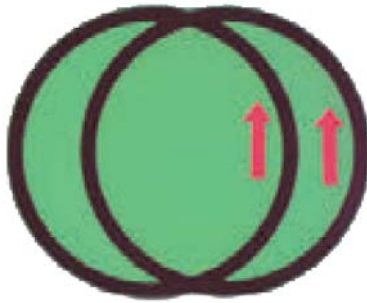


En este proceso, las láminas son estiradas durante su fabricación, de modo que las moléculas se alineen en cadenas largas; posterior a una inmersión en una solución que contiene yoduro, las moléculas vuelven buenos conductores, principalmente a lo largo de la cadena de hidrocarburos. De tal forma que absorben la luz en esa dirección y permiten el paso de aquella que viaja en forma perpendicular a su longitud.

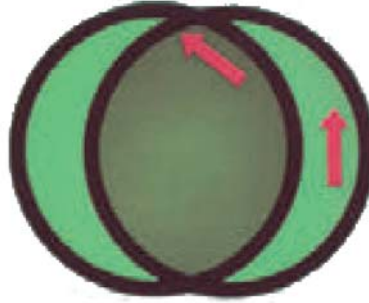
Polarización mediante absorción selectiva.

Absorción selectiva y el polaroide

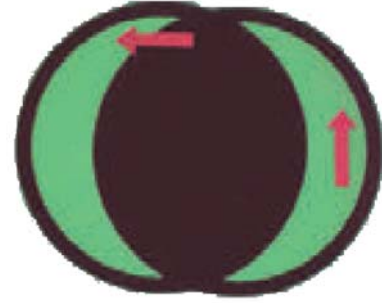
Es común referirse a la dirección perpendicular a las cadenas moleculares como el eje de transmisión.



Cuando los ejes de transmisión están alineados la intensidad de luz transmitida tiene un valor máximo



Conforme los ejes de transmisión dejan de estar alineados la intensidad de luz transmitida empieza a disminuir

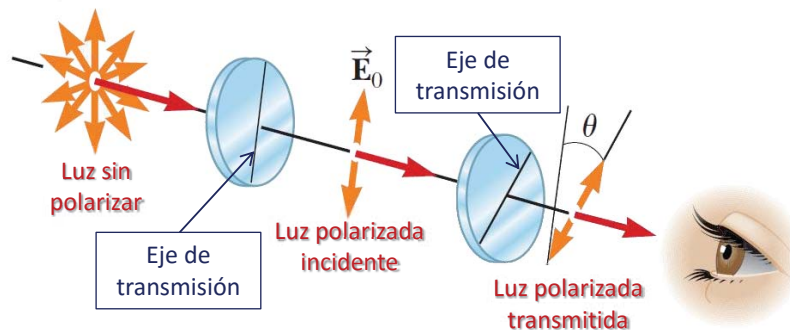


Cuando los ejes de transmisión están perpendiculares la intensidad de luz transmitida tiene un valor mínimo

Polarización mediante absorción selectiva.

Ley de Malus.

Se puede relacionar el giro de los ejes de transmisión con la intensidad de luz que se transmite, para ello consideremos el siguiente esquema.



La relación de intensidades entre el haz transmitido (I_{max}) cuando los polarizadores están alineados ($\theta = 0$) y el haz que se transmite (I) al girar el polarizador un ángulo θ satisfacen la **Ley de Malus** que se escribe como

$$I = I_{max} \cos^2 \theta$$

Polarización mediante absorción selectiva.

Ley de Malus. Ejemplo.

Ejemplo. Se hace pasar luz no polarizada a través de dos hojas Polaroid. Si el eje de transmisión de la primera hoja está vertical, y el eje de la segunda hoja forma un ángulo de 30° con la vertical, ¿qué fracción de la luz incidente se transmite?

Solución.

A partir de la Ley de Malus

$$I = I_{max} \cos^2 \theta$$

podemos escribir la fracción transmitida como

$$\frac{I}{I_{max}} = \cos^2 \theta$$

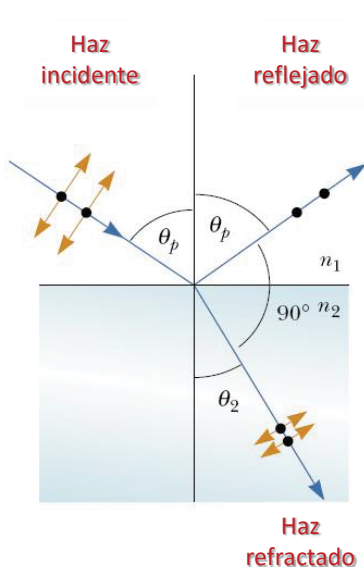
Por lo que

$$\frac{I}{I_{max}} = \cos^2 30^\circ = 0.75$$

Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

Ángulo de polarización y la Ley de Brewster

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada puede ser completamente polarizada, parcialmente polarizada o no polarizada, lo cual depende del ángulo de incidencia.



El ángulo al cual ocurre la polarización total se le conoce como **ángulo de polarización θ_p** , y está dado por la Ley de Brewster que se escribe como

$$n = \tan \theta_p$$

donde n es el cociente entre los índices de refracción, es decir $n = n_2/n_1$.

Es importante recordar que para una sustancia n varía con la longitud de onda, por lo que el ángulo de polarización o de Brewster también es una función de la longitud de onda.

Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

Angulo de polarización y la Ley de Brewster

El fenómeno de polarización por reflexión es muy común, la luz solar reflejada por el agua, el vidrio y la nieve, por ejemplo, está parcialmente polarizada por la superficie de tales materiales.

Si la superficie es horizontal, el campo eléctrico de la luz reflejada tiene una fuerte componente horizontal, por lo que se usan lentes polarizados para reducir este reflejo.

Los ejes de transmisión de estos lentes deben estar orientados verticalmente para que absorban esta componente horizontal de la luz polarizada reflejada.



Fotografía tomada sin filtro polarizador (izquierda) y con filtro polarizador (derecha).

Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

Angulo de polarización y la Ley de Brewster. Un ejemplo

Ejemplo. El ángulo de incidencia sobre una superficie reflejante cambia de manera continua para un haz de luz sin polarizar. El rayo reflejado en aire está completamente polarizado cuando el ángulo de incidencia es de 48.0° . ¿Cuál es el índice de refracción del material reflejante?

Solución.

A partir de la Ley de Brewster

$$\frac{n_2}{n_1} = \tan \theta_p$$

Podemos despejar el índice de refracción del material (n_2):

$$n_2 = n_1 \tan \theta_p$$

Con lo que

$$n_2 = (1.00) \tan 48.0^\circ = 1.11$$

Polarización por reflexión. Ley de Brewster.

Angulo de polarización y la Ley de Brewster. Ejercicio

Ejercicio. ¿A qué ángulo sobre el horizonte se encuentra el Sol si la luz reflejada en la superficie de un lago, en una tarde agradable, está completamente polarizada?

Solución.

A partir de la Ley de Brewster el ángulo de polarización θ_p está dado por

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

con lo que

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{1.33}{1.00} \right) = 53.06^\circ$$

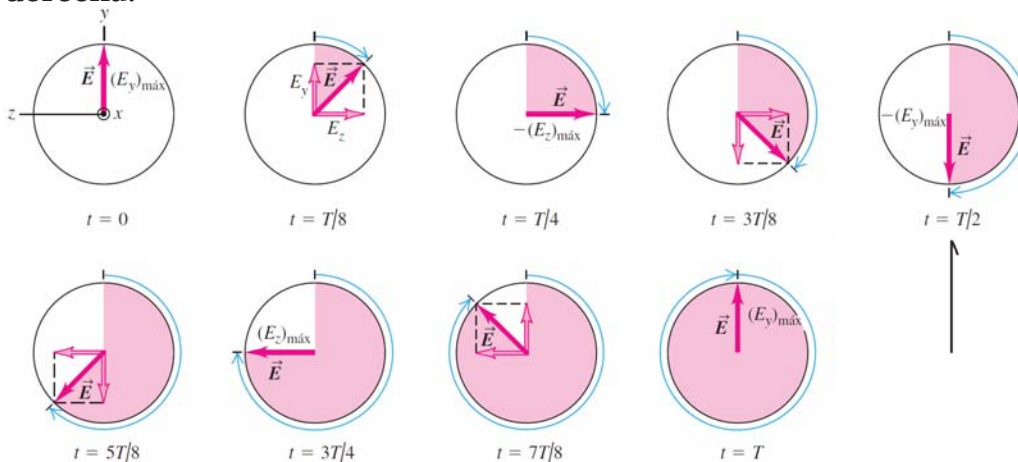
Así que el ángulo sobre el horizonte es 36.94° .

Polarización circular y elíptica.

Superposición de dos campos linealmente polarizados

La superposición de dos ondas linealmente polarizadas se llama **polarización circular** si las amplitudes de ambas ondas son iguales, sus ejes de polarización son perpendiculares y están desfasadas un cuarto de ciclo.

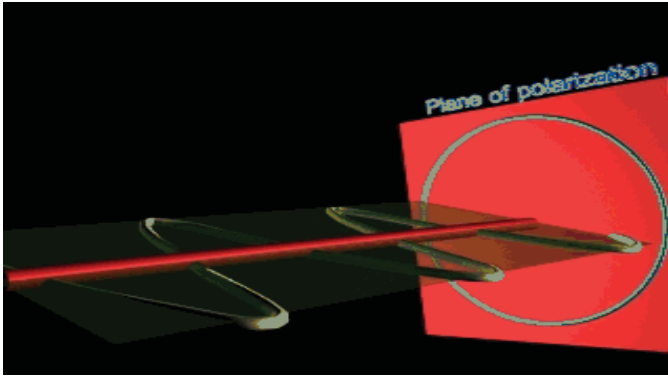
En el esquema mostrado, la onda resultante se propaga en dirección $+x$ (saliendo de la pantalla) y se dice que está polarizada circularmente por la derecha.



Polarización circular y elíptica.

Superposición de dos campos linealmente polarizados

Por convención, se dice que la onda está circularmente polarizada por la derecha cuando el sentido del movimiento del plano de la onda resultante, para un observador que mira hacia atrás a lo largo de la dirección de propagación, es el sentido horario; y se dice que la onda está circularmente polarizada por la izquierda si el sentido del movimiento es el inverso.



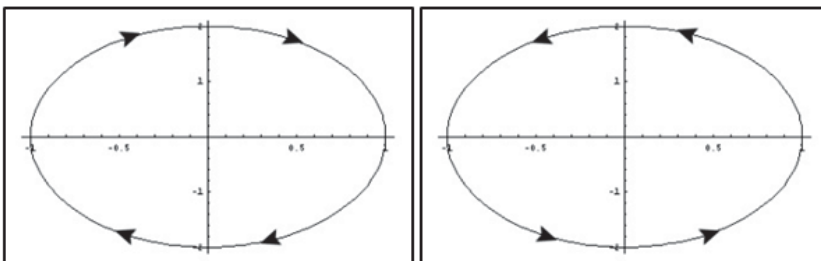
Si en la animación consideramos que la onda polarizada circularmente se propaga hacia la derecha, entonces hablamos de tener una onda circularmente polarizada por la derecha.

En cambio, si en la animación la propagación es a la izquierda, hablamos de una onda circularmente polarizada por la izquierda.

Polarización circular y elíptica.

Superposición de dos campos linealmente polarizados

Si la diferencia de fase entre las dos ondas componentes es distinta de un cuarto de ciclo, o si las dos ondas componentes tienen amplitudes diferentes, entonces cada punto de la cuerda ya no traza un círculo, sino que ahora sigue el trazo de una elipse. En este caso, se dice que la onda está **elípticamente polarizada**.



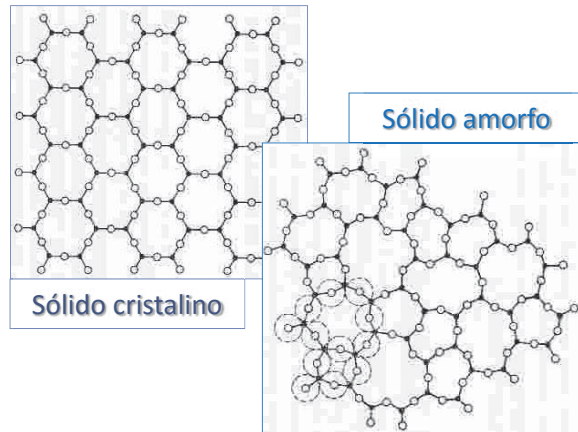
En el caso de ondas electromagnéticas con frecuencias de radio, se puede crear una polarización circular o elíptica mediante dos antenas situadas en ángulo recto alimentadas por el mismo transmisor, pero con un circuito que introduce la diferencia de fase apropiada.

Polarización por doble refracción.

Sólidos cristalinos y amorfos

Los sólidos pueden clasificarse en cristalinos y amorfos dependiendo de su estructura interna.

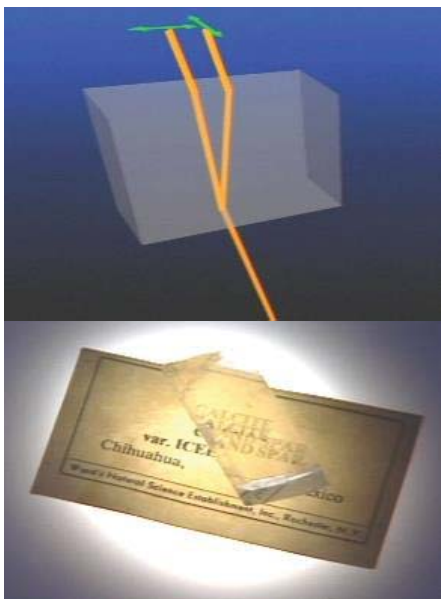
Los sólidos cuyos átomos se acomodan en un orden específico se llaman **sólidos cristalinos**, o simplemente cristales; mientras que aquellos sólidos en los que los átomos se acomodan de forma aleatoria son llamados **sólidos amorfos**.



Cuando la luz viaja a través de un sólido amorfo, como el vidrio, lo hace con una rapidez que es la misma en cualquier dirección por lo que el índice de refracción es el mismo y se dice que es un **material isotrópico**. En cambio, para ciertos materiales cristalinos (como la calcita y el cuarzo), la rapidez de la luz no es la misma en todas las direcciones, es decir, la transmisión de luz no es isotrópica y se tiene un **material anisotrópico**.

Polarización por doble refracción.

Sólidos cristalinos y la birrefringencia



Los sólidos cristalinos que presentan dos valores diferentes para el índice de refracción dependiendo de la dirección de propagación se les llama **birrefringentes**.

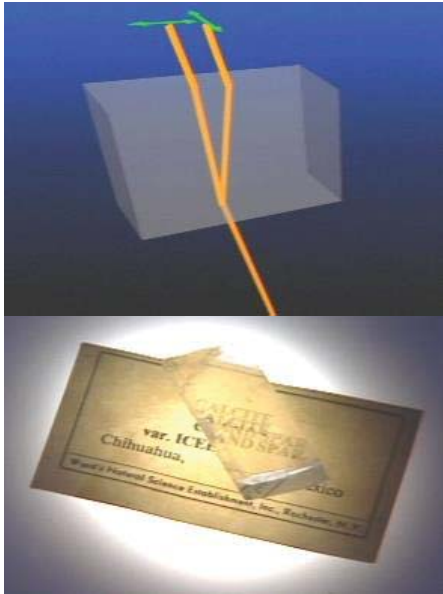
Como se mencionó anteriormente, la calcita es un material con esta característica de birrefringencia.

Cuando entra luz sin polarizar a un material birrefringente, esta se divide en dos rayos (ordinario y extraordinario) que poseen polarizaciones lineales mutuamente perpendiculares y que viajan a diferentes rapidezces.

Si el cristal tiene el espesor justo para introducir una diferencia de fase de un cuarto de ciclo, entonces el cristal convierte la luz linealmente polarizada en luz circularmente polarizada.

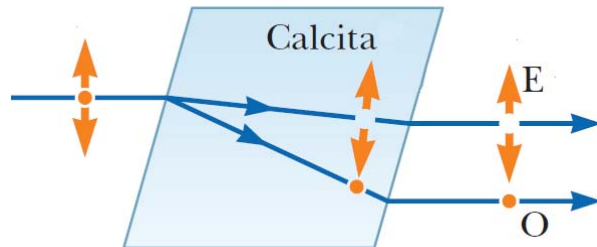
Polarización por doble refracción.

Sólidos cristalinos y la birrefringencia



Hay una dirección, llamada eje óptico, a lo largo de la cual, los rayos ordinario (O) y extraordinario (E) tienen la misma rapidez.

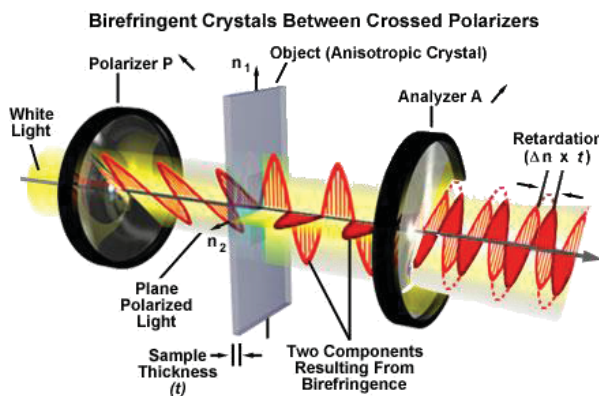
Sin embargo, la existencia de estos dos rayos en estos materiales es la responsable de que se forman dos imágenes: la del rayo ordinario (O) y la del rayo extraordinario (E).



Ambas están linealmente polarizadas, aunque en planos diferentes. La imagen del rayo ordinario está fija, mientras la del extraordinario cambia de posición al rotar el cristal (eje óptico).

Polarización por doble refracción.

Sólidos cristalinos y la birrefringencia



Los rayos ordinario (O) y el extraordinario (E) al atravesar un material anisotrópico de espesor d quedan desfasados una fase δ dada por

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_E - n_O)d$$

donde n_E es el índice de refracción para el rayo extraordinario; y n_O es el índice de refracción para el rayo ordinario.

Incidencia normal formando un cierto ángulo α con el eje óptico, paralelo a la superficie del cristal y perpendicular a la dirección de propagación

Índices de refracción para cristales birrefringentes ($\lambda = 589.3nm$)

Crystal	n_O	n_E	n_O/n_E
Calcite ($CaCO_3$)	1.658	1.486	1.116
Quartz (SiO_2)	1.544	1.553	0.994
Sodium nitrate ($NaNO_3$)	1.587	1.336	1.188
Sodium sulfite ($NaSO_3$)	1.565	1.515	1.033
Zinc chloride ($ZnCl_2$)	1.687	1.713	0.985
Zinc sulfide (ZnS)	2.356	2.378	0.991

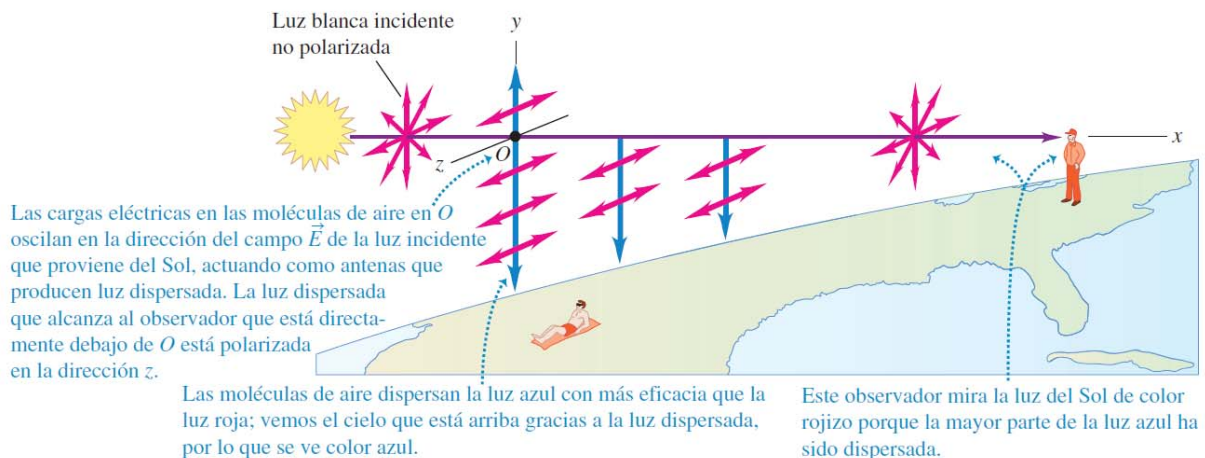
Polarización por dispersión.

¿Por qué el cielo es azul?

- Las moléculas de aire son centros de dispersión para la luz solar. → La molécula absorbente actúa como una antena dipolar → emite luz polarizada en su plano de vibración.
- El análisis detallado del proceso de dispersión revela que la intensidad de la luz dispersada por las moléculas del aire se incrementa en proporción a la cuarta potencia de la frecuencia. Así, la razón de la intensidad para los dos extremos del espectro visible es $(700nm/400nm =)$ 9.4. En términos generales, la luz dispersada contiene nueve veces más luz azul que roja, y por eso el cielo es azul.
- Por otro lado, las nubes contienen una gran concentración de gotas de agua o cristales de hielo, que también dispersan la luz. Como esta concentración es elevada, la luz que pasa a través de una nube tiene muchas más oportunidades de dispersarse que la luz que pasa a través de un cielo despejado. En consecuencia, luz de todas las longitudes de onda termina por ser dispersada fuera de la nube, y por eso la nube es de color blanco.

Polarización por dispersión.

¿Por qué el cielo es azul?



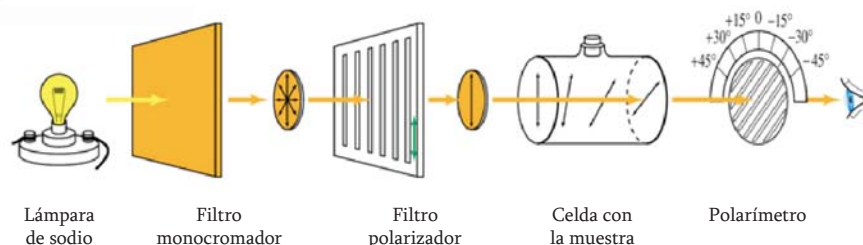
Cuando la persona que toma el sol a la izquierda de la ilustración mira hacia arriba, ve la luz solar polarizada, de color azul, que ha sido dispersada por las moléculas de aire.

El observador a la derecha ve luz rojiza, no polarizada, si mira hacia el Sol.

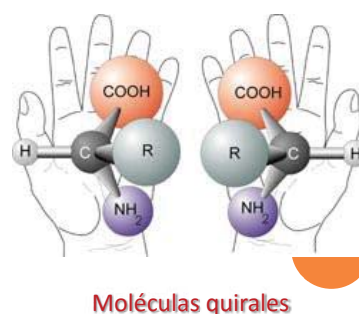
Actividad óptica de moléculas.

Quiralidad de moléculas

La actividad óptica es la rotación de la polarización lineal de la luz cuando viaja a través de ciertos materiales. Se mide usando un aparato llamado **polarímetro**.



Es un fenómeno que ocurre en soluciones que contienen **moléculas quirales** tales como el azúcar, sólidos con planos cristalinos rotados, tales como el cuarzo, y en la polarización circular de gases atómicos o moleculares.

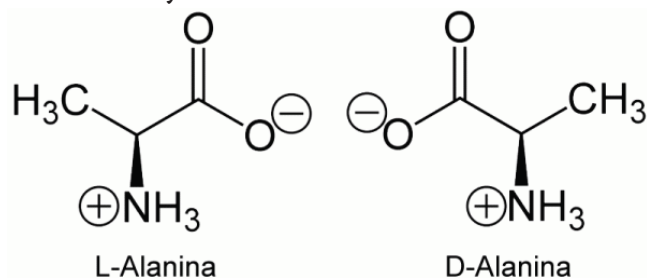


Actividad óptica de moléculas.

Quiralidad de moléculas

A las moléculas que poseen quiralidad se les antepone una letra (*L* ó *D*) para indicar el giro que poseen: *L* – para indicar quiralidad izquierda o levógira; y *D* – para indicar quiralidad derecha o dextrógira.

Por ejemplo, L-Alanina y D-Alanina.

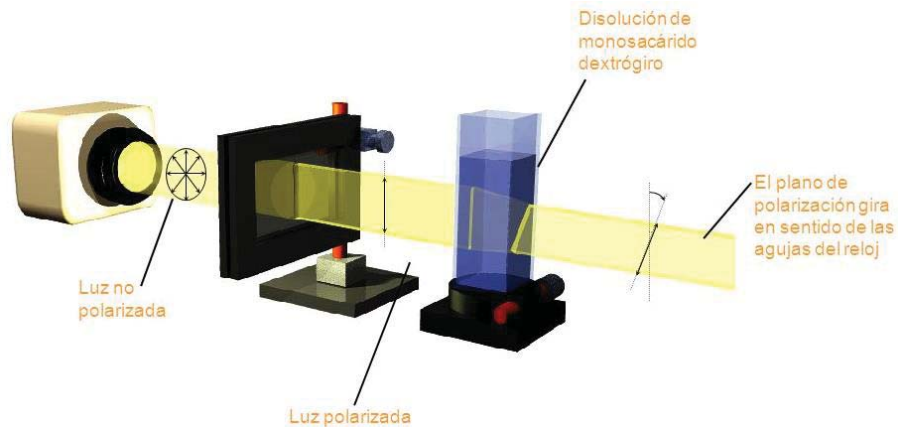


Este fenómeno, observado por primera vez en 1811 en el cuarzo por el físico francés François Jean Dominique Arago (1786–1853), es ampliamente usado hoy día; por ejemplo, se emplea en la industria de elaboración de azúcar para medir la concentración de azúcares, en óptica para manipular la polarización, en química para caracterizar sustancias en solución acuosa, entre otras aplicaciones.

Actividad óptica de moléculas.

Quiralidad de moléculas. Resumiendo

- Algunas sustancias son capaces de rotar el plano de polarización de la luz incidente (dextrógiras y levógiras)
- Pueden presentar actividad óptica sólo en estado sólido: cuarzo, benzil.
- En todos los estados: azúcar, alcanfor, ácido tartárico.
- Puede depender de la concentración: ácido láctico, levulosa, dextrosa.



Actividad óptica de moléculas.

Esquema para observar la actividad óptica

