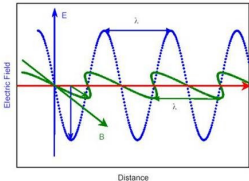


11. Ondas electromagnéticas

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz.
2. Ondas electromagnéticas.
 - 2.1 Introducción a la teoría general de ondas.
 - 2.2 Teoría electromagnética.
 - 2.3 Ondas electromagnéticas en el vacío.
 - 2.4 Espectro electromagnético.
 - 2.5 Luz visible: visión y color.
3. Ondas electromagnéticas en la materia.
 - ↳ Índice de refracción



1. Introducción. Naturaleza dual de la luz

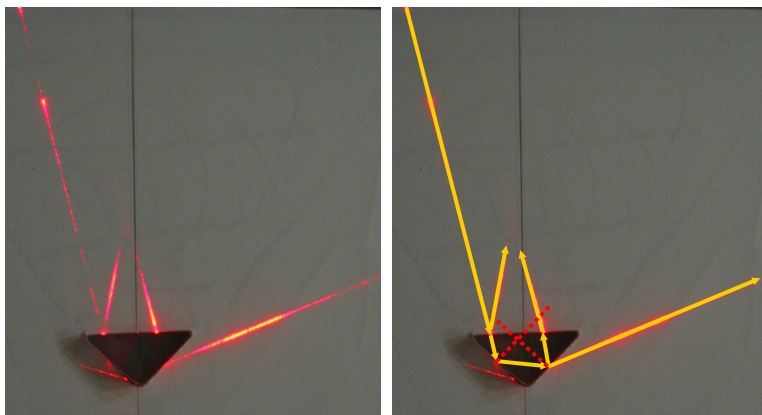


Isaac Newton (1642-1727)
Luz: partículas en movimiento rápido



Huygens (1629-1695)
Luz: ondas que se desplazan a velocidad alta

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz



Reflexión y refracción

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz

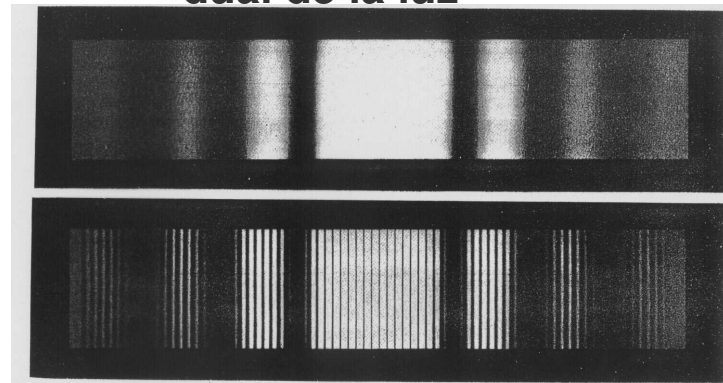


Fig. 10.17 Patrones de Fraunhofer para una y dos rendijas. El dibujo muy débil de líneas cruzadas aparece enteramente en el proceso de impresión. [Fotos cortesía de M. Cagnet, M. Francon, y J. C. Thierr: *Atlas Optischer Erscheinungen*, Berlin-Heidelberg-Nueva York: Springer, 1962.]

Interferencia y difracción

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz

Teoría de la luz

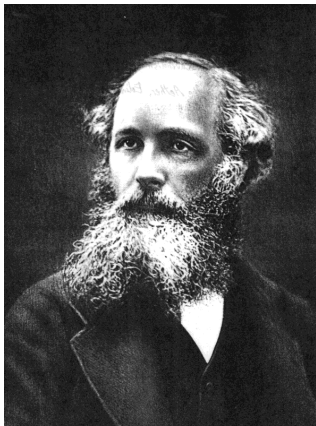
- S. XVIII
 - Snell: leyes empíricas de reflexión y refracción
 - Hooke: modelo ondulatorio de la luz, ondas de alta velocidad
 - **Newton**: partículas en movimiento
 - **Huygens**: teoría ondulatoria, velocidad inferior en la materia, modelo de la refracción
- S. XIX
 - Fresnell: teoría ondulatoria para interferencia y refracción
 - 1849: medida de la velocidad de la luz (Huygens tenía razón)
 - Faraday: interrelación electromagnetismo-luz.
 - Maxwell: ondas electromagnéticas $v=c$
 - Hertz: comprobación experimental de que la **luz es una onda electromagnética**
- S. XX
 - Einstein: las ondas electromagnéticas en el vacío

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz

Óptica

- 1950
 - Análisis de Fourier
 - Computadoras
 - Nuevas técnicas de pulido de lentes
 - Fibra óptica
 - Nuevos materiales (polímeros)
 - Láser (1960)
 - Holografía
- Medicina
 - Medio ambiente
 - Electrónica
 - ...

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz



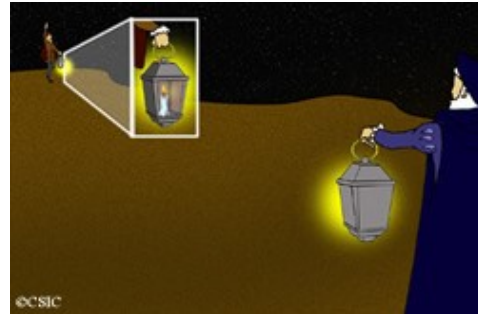
Maxwell (1831-1879)

ondas electromagnéticas

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

Velocidad de la luz

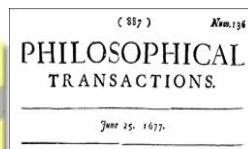
Galileo Galilei (1563-1642)



"En realidad, no he ensayado el experimento sino a distancia breve, de menos una milla; por lo cual no he podido averiguar a punto fijo si la aparición de la otra luz era o no instantánea. Pero de no ser instantánea, es extraordinariamente rápida, momentánea, por decirlo así."

Velocidad de la luz

El procedimiento de Roemer (1676)

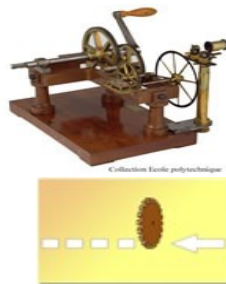
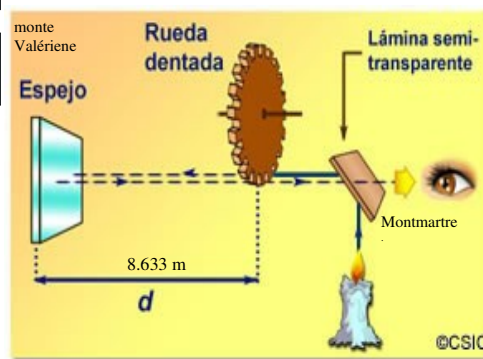


Aunque en el trabajo en el que hizo públicas sus observaciones nunca calculó el valor de la velocidad de la luz, si se emplean los datos obtenidos a partir de sus tablas y las distancias que se manejaban en ese momento se obtiene una velocidad de unos 215.000 kilómetros por segundo

$$c = \frac{d}{(t' - t)} = \frac{129 \cdot 10^9}{600} = 2,15 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Velocidad de la luz

Medida de Fizeau (1849)



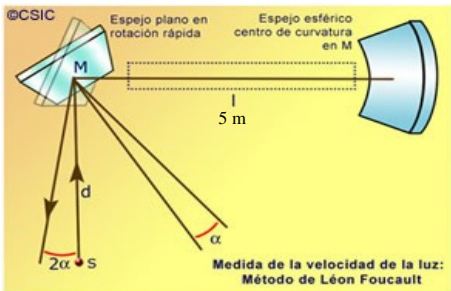
720 dientes
12,6 revoluciones por segundo

313.000 kilómetros por segundo

Velocidad de la luz

Medida de Foucault (1850, publicado en 1862)

400 revoluciones por segundo



Velocidad de la luz en el aire = 300.000 km/seg
Velocidad de la luz en el agua = 226.000 Km/seg

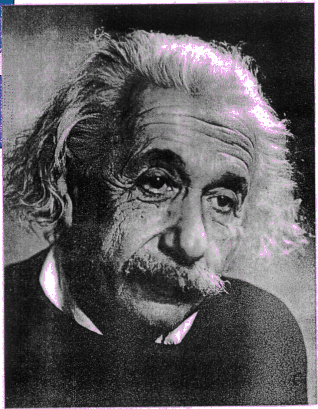
Velocidad de la luz

La velocidad de la luz en el vacío es por definición una constante universal de valor 299.792.458 m/s

Definición de metro:

La distancia recorrida por la luz en 1/299.792.458 s

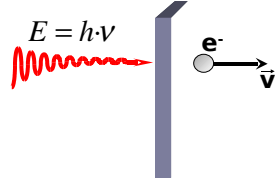
1. Introducción. Naturaleza dual de la luz



Planck
Fotón: partículas de energía

$$E = h\nu$$

efecto fotoeléctrico (Einstein)



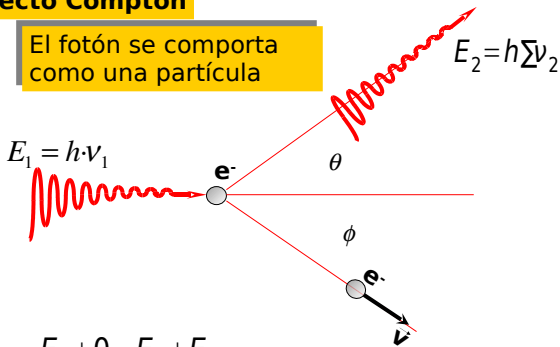
$$\frac{1}{2}(m\nu^2) = h\nu - \phi$$

Un electrón absorbe un fotón

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz

efecto Compton

El fotón se comporta como una partícula



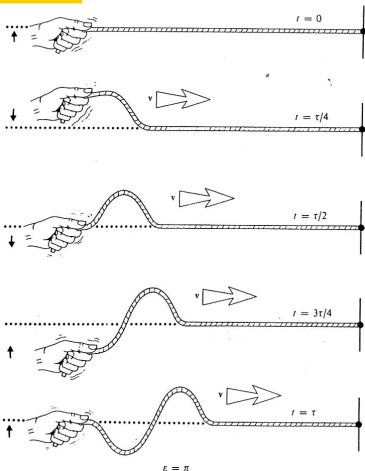
$$E_1 + 0 = E_2 + E_e$$

$$\vec{p}_1 + 0 = \vec{p}_2 + \vec{p}_e$$

El choque de un fotón y un electrón conserva la energía y la cantidad de movimiento

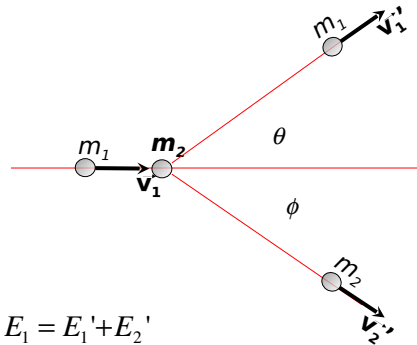
2.1. Introducción a la teoría general de ondas

ondas:



Onda: perturbación que se propaga por el espacio y que se produce como consecuencia de alguna variación de una magnitud física (temperatura, presión...), de un campo eléctrico, de un campo magnético o simplemente por una deformación etc.

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz



$$E_1 = E_1' + E_2'$$

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2'$$

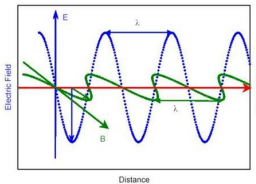
El choque de partículas conserva la energía y la cantidad de movimiento

11. Ondas electromagnéticas

1. Introducción. Naturaleza dual de la luz.

2. Ondas electromagnéticas.

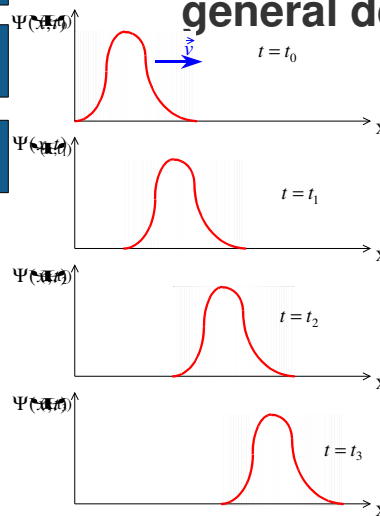
- 2.1 Introducción a la teoría general de ondas.
- 2.2 Teoría electromagnética.
- 2.3 Ondas electromagnéticas en el vacío.
- 2.4 Espectro electromagnético.
- 2.5 Luz visible: visión y color.



3. Ondas electromagnéticas en la materia.

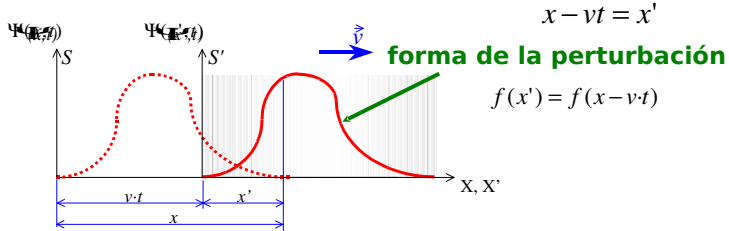
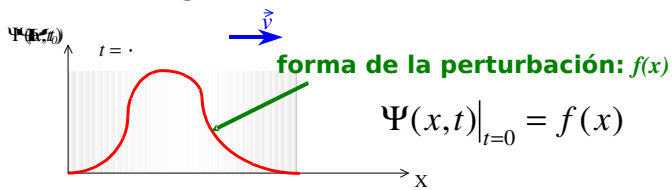
♦ Índice de refracción

2.1. Introducción a la teoría general de ondas



Onda que no cambia su forma mientras avanza a través del espacio

2.1. Introducción a la teoría general de ondas



$$\Psi(x, t) = \Psi(x', t) = f(x') = f(x - vt)$$

2.1. Introducción a la teoría general de ondas

Ecuación de ondas

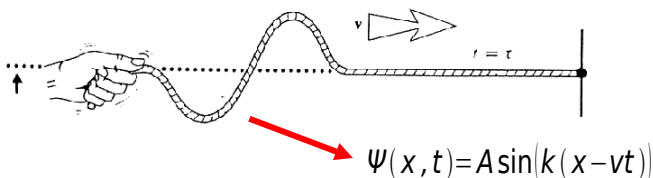
$$t = \text{cte} \rightarrow \frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'}$$

$$x = \text{cte} \rightarrow \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} = -v \frac{\partial f}{\partial x'}$$

$$x - vt = x'$$

$$\frac{\partial x'}{\partial t} = \frac{\partial (x - vt)}{\partial t} = -v$$

$$\frac{\partial f}{\partial x'} = \mp \frac{1}{v} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \rightarrow \mp \frac{1}{v} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$



Dos constantes: Ecuación diferencial de segundo orden

2.1. Introducción a la teoría general de ondas

$$\mp \frac{1}{v} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

ecuación diferencial de onda

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}$$

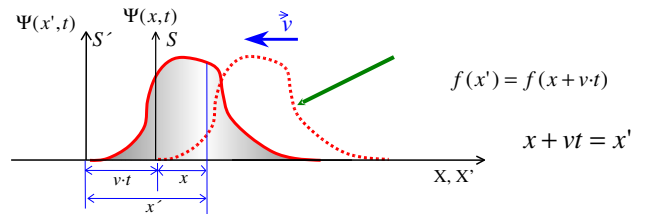
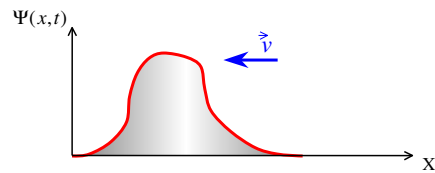
solución de la ecuación de onda

$$\Psi = \sum_i C_i \cdot f_i(x - vt)$$

misma velocidad

2.1. Introducción a la teoría general de ondas

Ecuación de ondas



$$\Psi(x, t) = \Psi(x', t) = f(x') = f(x + vt)$$

$$v = |\vec{V}| > 0$$

2.1. Introducción a la teoría general de ondas

Ecuación de ondas

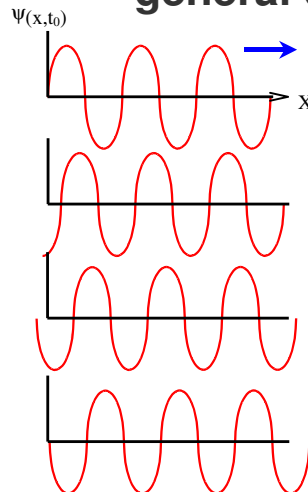
$$t = \text{cte} \rightarrow \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = \frac{\partial x'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{\partial f}{\partial x'} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$$

$$x = \text{cte} \rightarrow \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t} \right) = \frac{\partial x'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x'} \left(\mp v \frac{\partial f}{\partial x'} \right) = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x'^2}$$

ecuación diferencial de onda

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \rightarrow \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}$$

2.1. Introducción a la teoría general de ondas



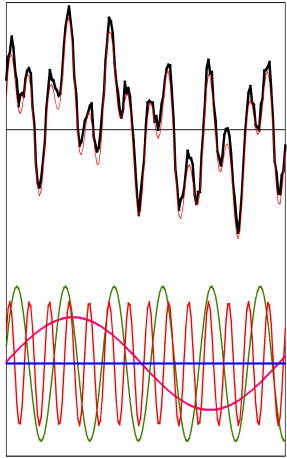
Onda armónica:

$$\Psi(x, t) = A \sin(k(x - vt))$$

A: amplitud de la onda

k: número de propagación

2.1. Introducción a la teoría general de ondas

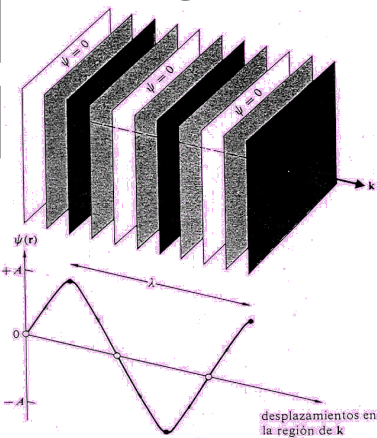


$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(m \cdot kx) + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin(m \cdot kx)$$

$$A_m = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\lambda} f(x) \cos(m \cdot kx) dx$$

$$B_m = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\lambda} f(x) \sin(m \cdot kx) dx$$

2.1. Introducción a la teoría general de ondas



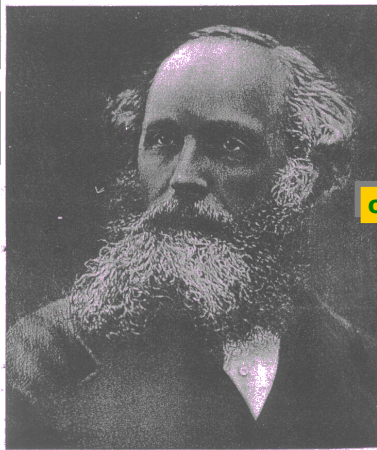
Onda plana:

$$\Psi(x, y, z, t) = A \sin(k(x - vt) + \epsilon)$$

frente de onda:
 $\phi = cte$

Fig. 2.11 Frentes de onda para una onda plana armónica.

2.2. Teoría electromagnética

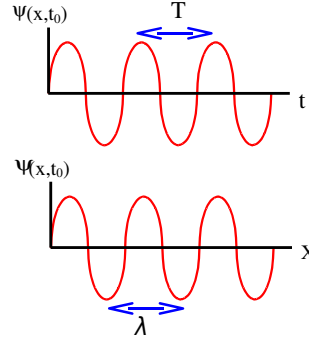


ondas electromagnéticas

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

Maxwell (1831-1879)

2.1. Introducción a la teoría general de ondas



Onda armónica

$$\psi(x, t) = A \sin k(x - vt)$$

longitud de onda [m]

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

periodo [s]

$$T = \frac{2\pi}{kv} = \frac{\lambda}{v}$$

número de onda [m⁻¹]

$$c = \frac{1}{\lambda}$$

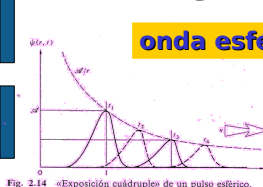
pulsación [radianes · s⁻¹]

frecuencia [s⁻¹]

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} = 2\pi \frac{v}{\lambda} = kv$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda} = \frac{kv}{2\pi}$$

2.1. Introducción a la teoría general de ondas



onda esférica: $\Psi(r, t) = \left(\frac{A}{r}\right) \cos(k(r \mp vt))$

ecuación diferencial de onda

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 (r \Psi)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 (r \Psi)}{\partial r^2}$$

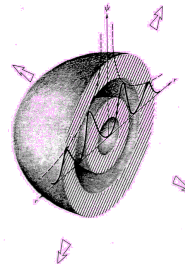


Fig. 2.15 Frentes de onda esféricos.

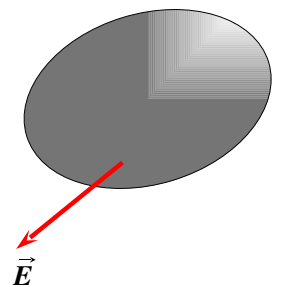
onda plana

2.2. Teoría electromagnética

Ecuaciones de Maxwell

1ª Ecuación.- Teorema de Gauss

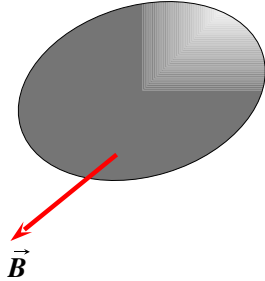
$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0}$$



2.2. Teoría electromagnética

2ª Ecuación.-

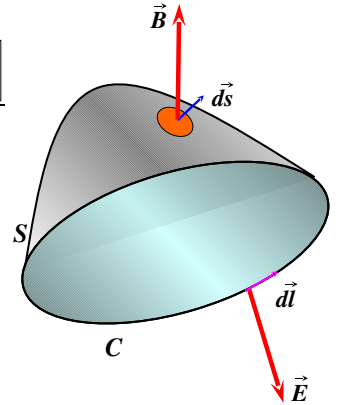
$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$



2.2. Teoría electromagnética

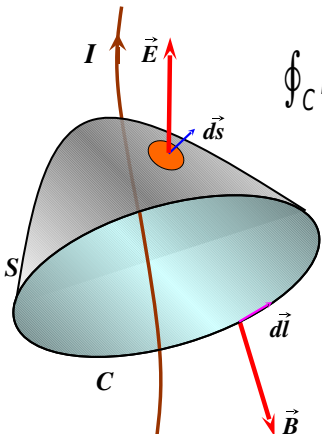
3ª Ecuación.- Ley de Faraday

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d \left[\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \right]}{dt}$$



2.2. Teoría electromagnética

4ª Ecuación.- Ley de Ampere



$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d \left[\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} \right]}{dt}$$

Corriente de desplazamiento de Maxwell

2.2. Teoría electromagnética

Ecuaciones de Maxwell

1ª Teorema de Gauss

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0}$$

2ª

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

3ª Ley de Faraday

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d \left[\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \right]}{dt}$$

4ª Ley de Ampere

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d \left[\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} \right]}{dt}$$

2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

Condiciones del estudio:

$$\vec{E} = \vec{E}(x, t)$$

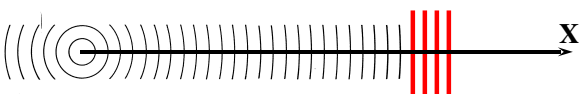
$$Q = 0$$

$$\vec{B} = \vec{B}(x, t)$$

$$I = 0$$

ondas planas

Espacio libre



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

Condiciones del estudio:

$$\vec{E} = \vec{E}(x, t)$$

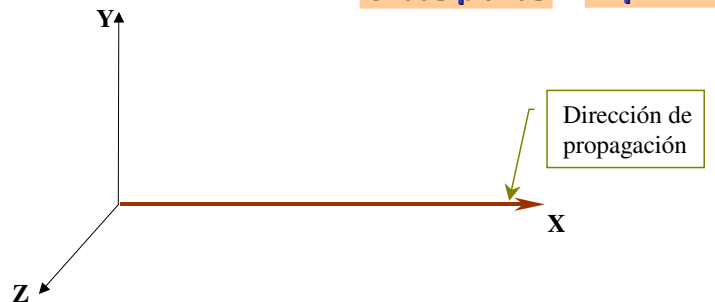
$$Q = 0$$

$$\vec{B} = \vec{B}(x, t)$$

$$I = 0$$

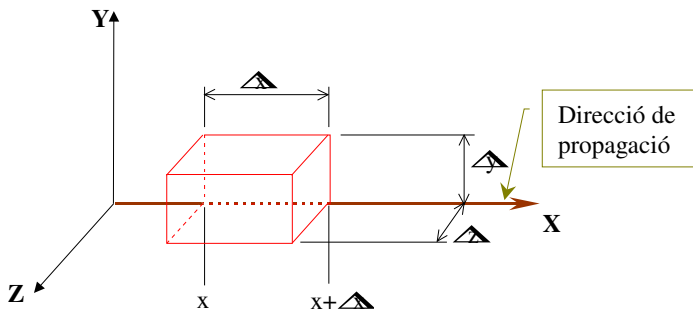
ondas planas

Espacio libre



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

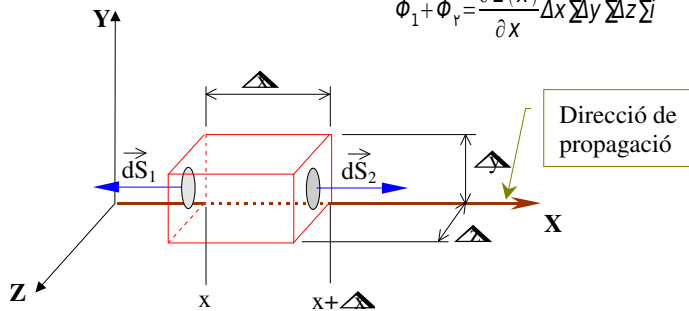
$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} = 0$$



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} = 0$$

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \vec{E}(x) \cdot d\vec{s}_1 = \vec{E}(x) \cdot \Delta y \Delta z \vec{-i} \\ \phi_2 &= \vec{E}(x+\Delta x) \cdot d\vec{s}_2 = \left(\vec{E}(x) + \frac{\partial \vec{E}(x)}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \vec{j} \\ \phi_1 + \phi_2 &= \frac{\partial \vec{E}(x)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \vec{j} \end{aligned}$$

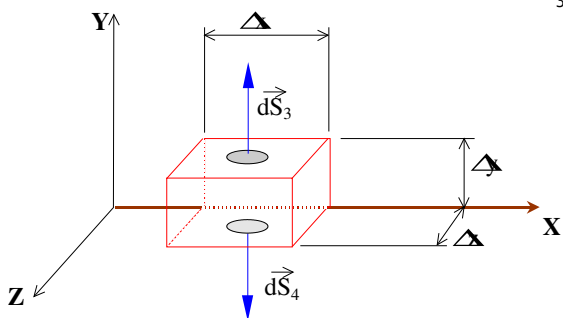


2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} = 0$$

$$\begin{aligned} \phi_3 &= \vec{E}(x) \cdot d\vec{s}_3 = \vec{E}(x) \cdot \Delta x \Delta z \vec{j} \\ \phi_4 &= \vec{E}(x) \cdot d\vec{s}_4 = \vec{E}(x) \cdot \Delta x \Delta z \vec{-j} \end{aligned}$$

$$\phi_3 + \phi_4 = 0$$

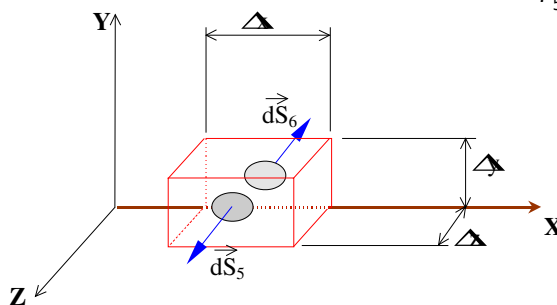


2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} = 0$$

$$\begin{aligned} \phi_5 &= \vec{E}(x) \cdot d\vec{s}_5 = \vec{E}(x) \cdot \Delta x \Delta y \vec{k} \\ \phi_6 &= \vec{E}(x) \cdot d\vec{s}_6 = \vec{E}(x) \cdot \Delta x \Delta y \vec{-k} \end{aligned}$$

$$\phi_5 + \phi_6 = 0$$



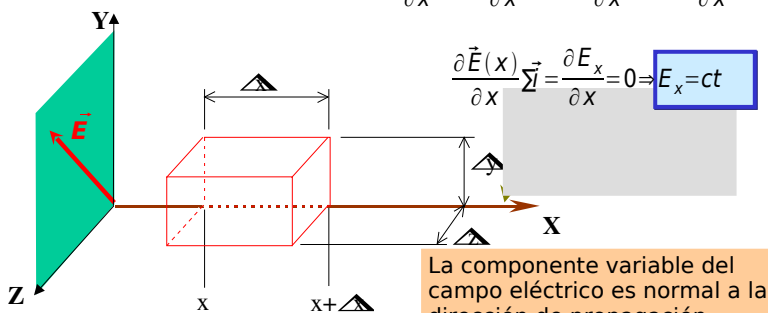
2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} = 0$$

$$\phi = \frac{\partial \vec{E}(x)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \vec{j} \quad \frac{\partial \vec{E}(x)}{\partial x} \vec{j} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{E}(x)}{\partial x} = \frac{\partial E_x(x)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial E_y(x)}{\partial x} \vec{j} + \frac{\partial E_z(x)}{\partial x} \vec{k}$$

$$\frac{\partial \vec{E}(x)}{\partial x} \vec{j} = \frac{\partial E_x}{\partial x} = 0 \Rightarrow E_x = ct$$



La componente variable del campo eléctrico es normal a la dirección de propagación

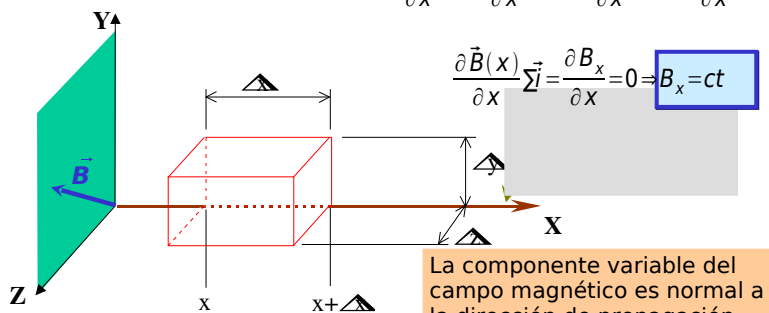
2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\phi = \frac{\partial \vec{B}(x)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \vec{j} \quad \frac{\partial \vec{B}(x)}{\partial x} \vec{j} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{B}(x)}{\partial x} = \frac{\partial B_x(x)}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial B_y(x)}{\partial x} \vec{j} + \frac{\partial B_z(x)}{\partial x} \vec{k}$$

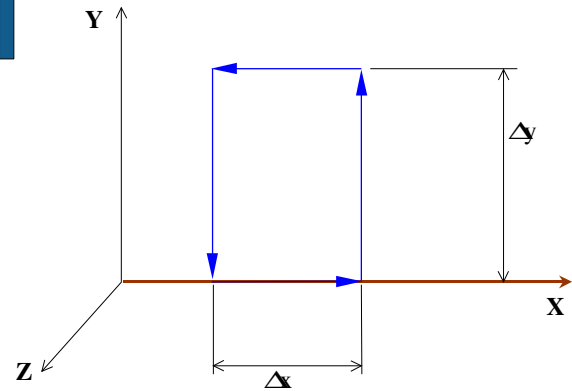
$$\frac{\partial \vec{B}(x)}{\partial x} \vec{j} = \frac{\partial B_x}{\partial x} = 0 \Rightarrow B_x = ct$$



La componente variable del campo magnético es normal a la dirección de propagación

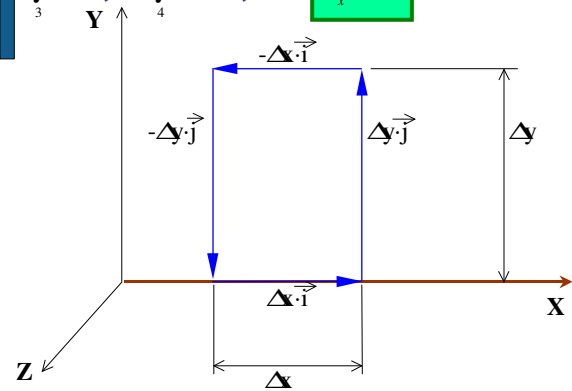
2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\left[\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}\right]}{dt}$$



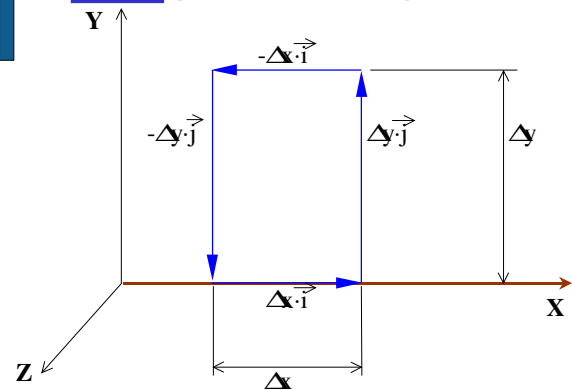
2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = [E(x+\Delta x) \cdot \Delta y j] + [E(x) \cdot \Delta y (-j)] + \int_3 E(x) dx i + \int_4 E(x) dx (-i) \quad E_x = ct$$



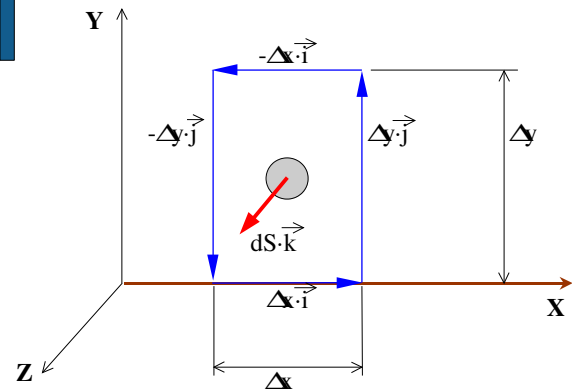
2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \left[\vec{E}(x) + \frac{\partial \vec{E}(x)}{\partial x} \Delta x \right] \Delta y \vec{j} + [\vec{E}(x) \Delta y (-\vec{j})] = \frac{\partial E_y(x)}{\partial x} \Delta x \Delta y$$



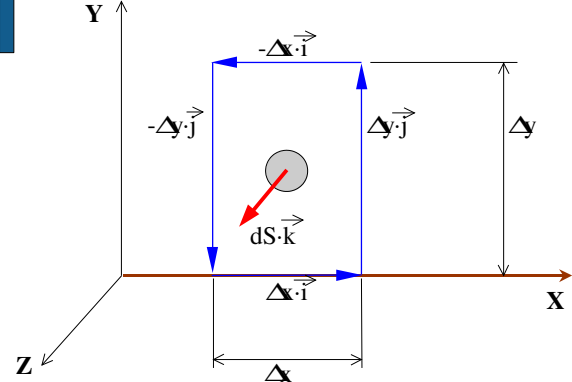
2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_S \vec{B} \cdot ds \vec{k} = B_z \Delta x \Delta y \quad \frac{d\left[\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}\right]}{dt} = \frac{d|B_z| \Delta x \Delta y}{dt}$$



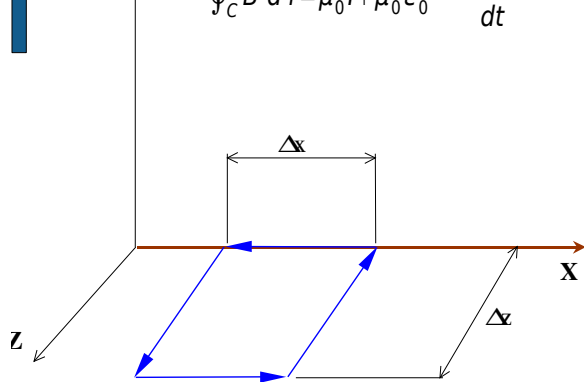
2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\left[\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}\right]}{dt} \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

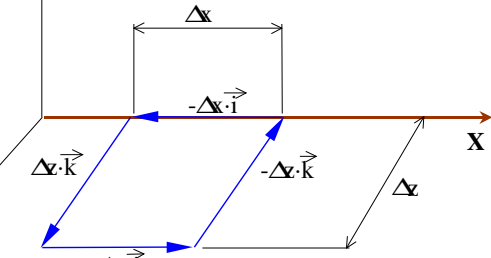
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\left[\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}\right]}{dt}$$



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = [B(x+\Delta x) \cdot (-\Delta z \vec{k})] + [B(x) \cdot \Delta z \vec{k}] + \int_3 B(x) \cdot dx \vec{i} + \int_4 B(x) \cdot dx (-\vec{i})$$

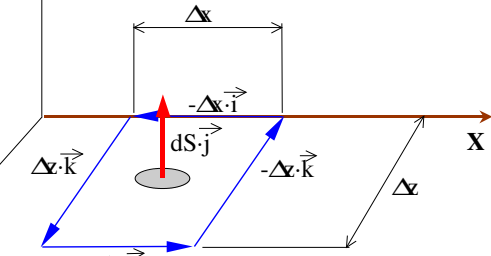
$$B_z = ct$$



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_S E_y \Delta x \Delta z$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \left[\int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} \right] \quad \frac{\partial B_z}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B_y}{\partial t^2}$$

ecuación diferencial de onda

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \text{ C}^2/\text{m}^2\text{N}$$

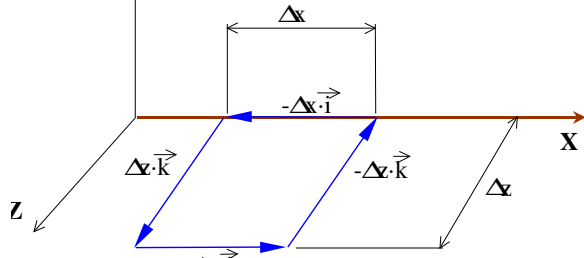
velocidad de la luz medida
c = 2.998 · 10⁸ m/s

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = c$$

La luz es una onda electromagnética

2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \left[\vec{B}(x) + \frac{\partial \vec{B}(x)}{\partial x} \Delta x \right] \Delta z \vec{k} + [\vec{B}(x) \Delta z \vec{k}] = -\frac{\partial B_z}{\partial x} \Delta x \Delta z$$



2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{\partial B_y}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad \frac{\partial B_y}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} \right) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial B_z}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \right) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \right) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial E_y}{\partial t} \right) =$$

$$-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial B_z}{\partial t} \right) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B_z}{\partial t^2}$$

2.3. Ondas electromagnéticas en el vacío

$$E_y(x, t) = E_{y0} \sin(kx - \omega t) \quad \omega = k \cdot c$$

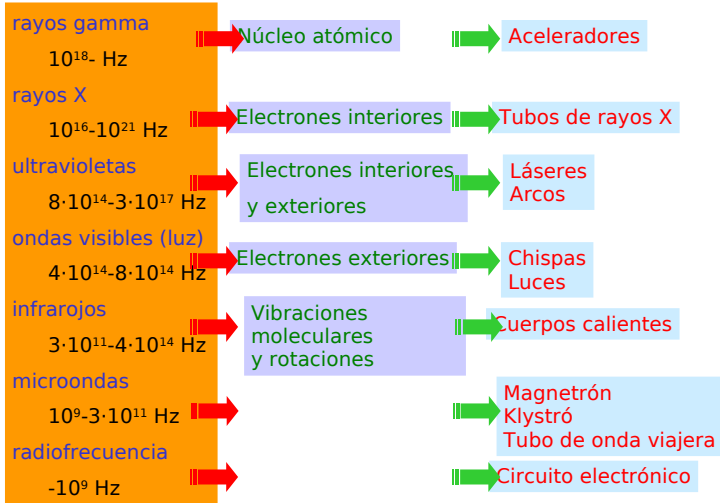
$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = k E_{y0} \cos(kx - \omega t) = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

$$B_z = -\int k E_{y0} \cos(kx - \omega t) dt = \frac{k}{\omega} E_{y0} \sin(kx - \omega t) + ct$$

$$B_z = B_{z0} \sin(kx - \omega t) = \frac{k}{\omega} E_{y0} \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_{y0}}{B_{z0}} = c$$

2.4. Espectro electromagnético



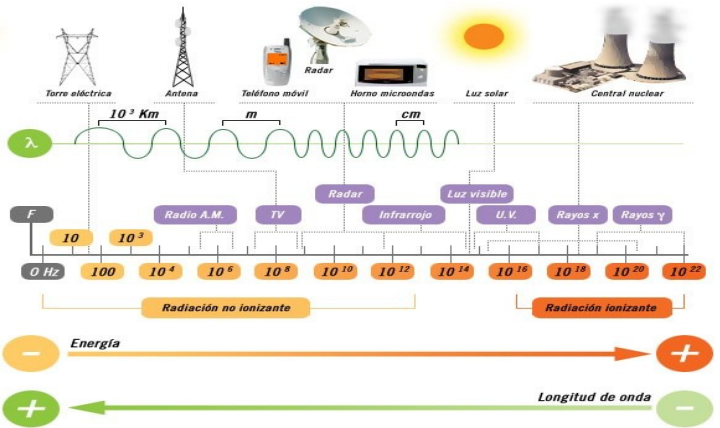
2.4. Espectro electromagnético

Aplicaciones:

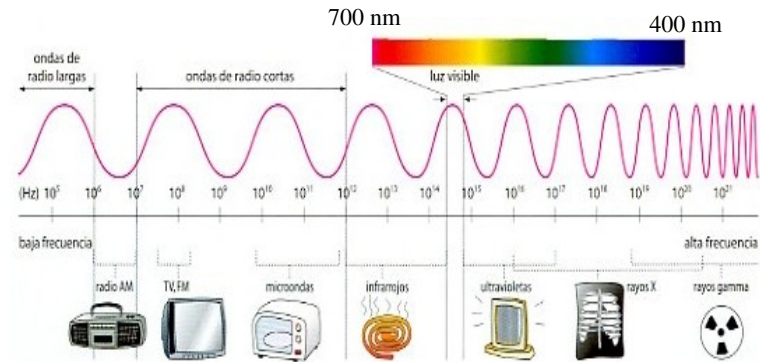
- **Ondas de radio** → Comunicaciones
- **Microondas** → Radar. Medicina. Telefonía móvil
- **Infrarojos** → Medicina. Fotografía
- **Ondas visibles** → Color
- **Ultravioletas** → Iniciador de reacciones químicas. ☹ Nocivos.
- **Rayos X** → Medicina, estado sólido. ☹ Muy peligrosos.
- **Rayos gamma** → Física nuclear. ☹ Muy peligrosos.

2.4. Espectro electromagnético

El espectro de frecuencias.

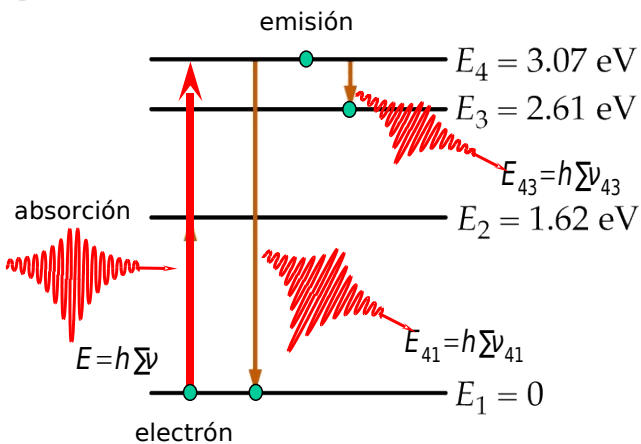


2.5. Luz visible. Visión y color



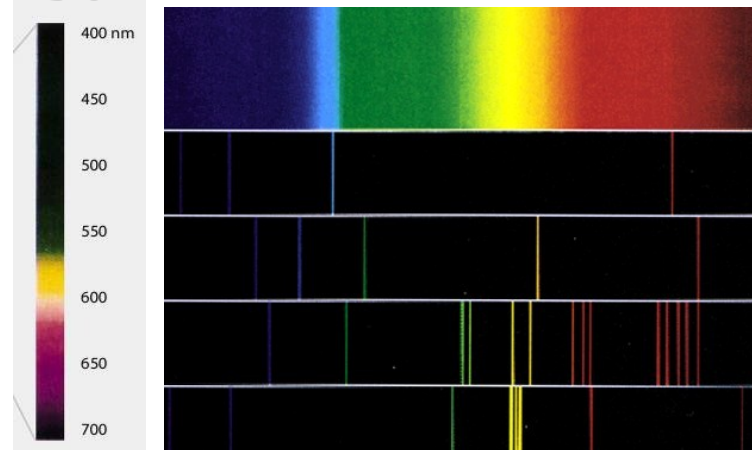
2.5. Luz visible. Visión y color

visión:

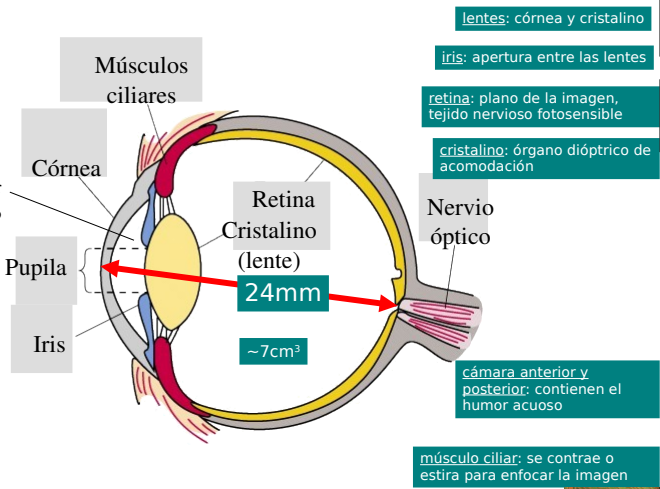


2.5. Luz visible. Visión y color

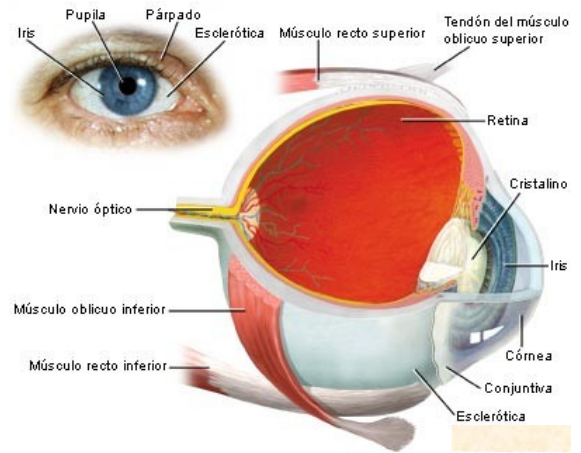
visión:



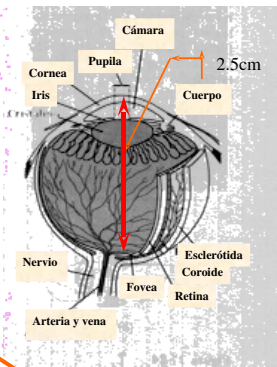
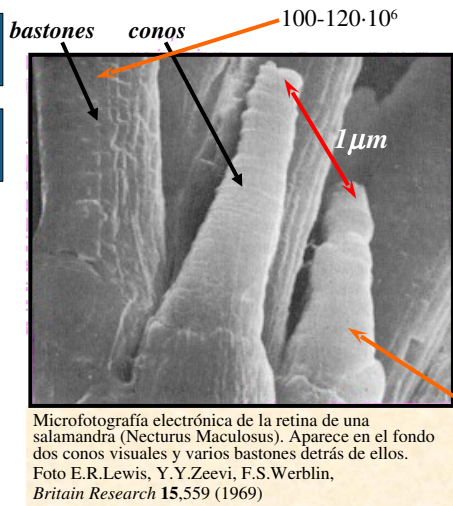
2.5. Luz visible. Visión y color



2.5. Luz visible. Visión y color

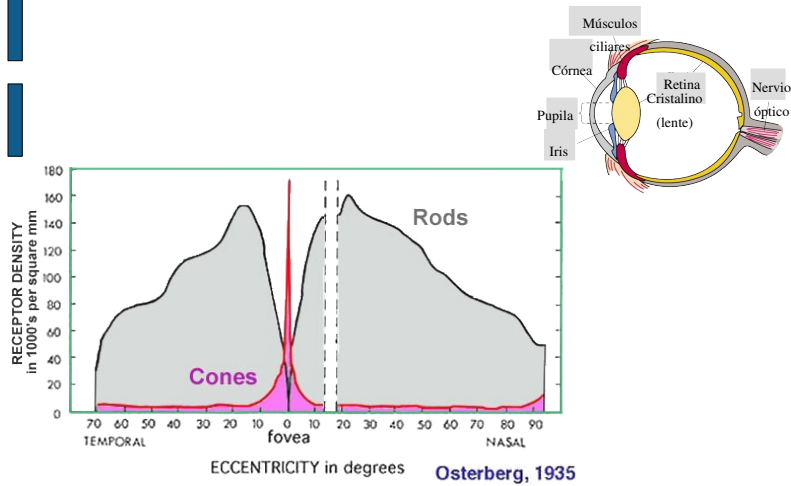


2.5. Luz visible. Visión y color

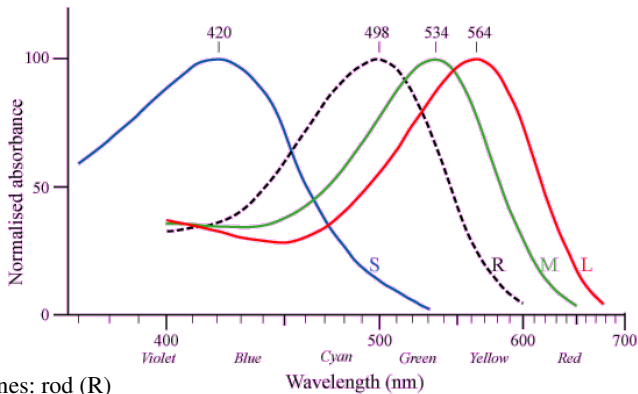


7-8·10⁶

2.5. Luz visible. Visión y color



2.5. Luz visible. Visión y color

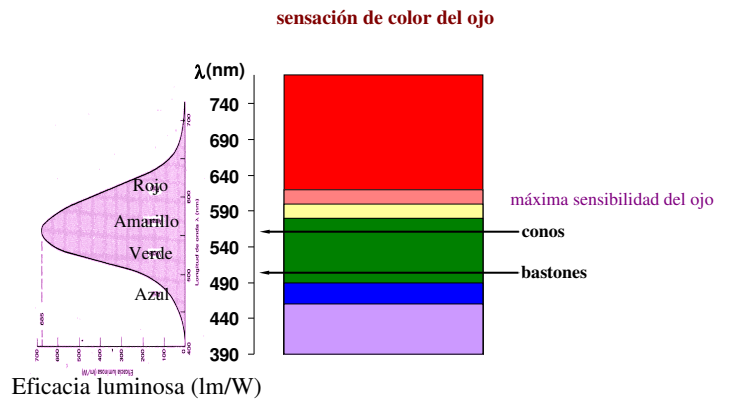


Bastones: rod (R)

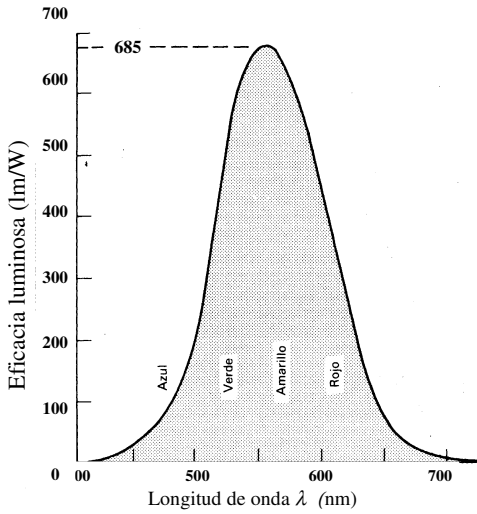
Conos: longitud de onda corta, (short, S), media (medium, M) y larga (large, L)

Bowmaker J.K. and Dartnall H.J.A., "Visual pigments of rods and cones in a human retina." *J. Physiol.* 298: pp501-511 (1980).

2.5. Luz visible. Visión y color



2.5. Luz visible. Visión y color



"Defectos" del sentido de la visión en la percepción de colores y movimiento

Generación artificial de colores

Colores básicos



Generación artificial de movimiento

Persistencia retiniana



Efecto Phi



3. Ondas electromagnéticas en la materia

Ondas electromagnéticas en la materia

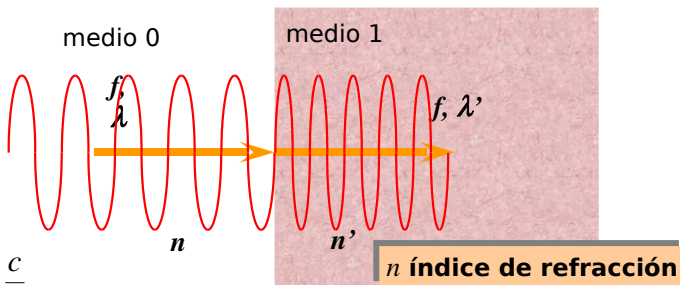
medio dieléctrico $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} = c \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

índice de refracción $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$

3. Ondas electromagnéticas en la materia



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

$$v = \lambda \cdot f \rightarrow v' = \lambda' \cdot f$$

$$n < n' \Rightarrow \lambda > \lambda'$$

$$\frac{v}{v'} = \frac{c/n}{c/n'} = \frac{n'}{n} = \frac{\lambda}{\lambda'} \rightarrow \lambda \cdot n = \lambda' \cdot n'$$

3. Ondas electromagnéticas en la materia

Gases a 0°C y 1atm

Sustancia	n
Aire	1,000293
Helio	1,000036
Hidrógeno	1,000132
Bióxido de carbono	1,00045

Líquidos a 20°C

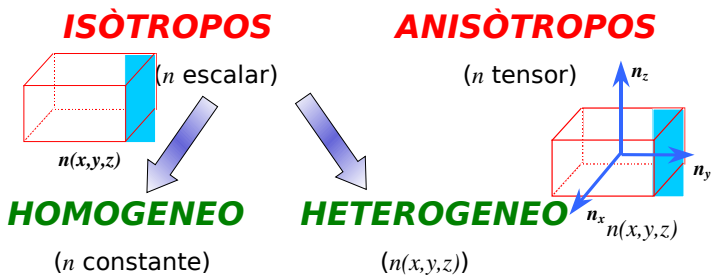
Benceno	1,501
Agua	1,333
Alcohol etílico (etanol)	1,361
Tetracloruro de carbono	1,461
Bisulfuro de carbono	1,628

Sólidos a temperatura ambiente

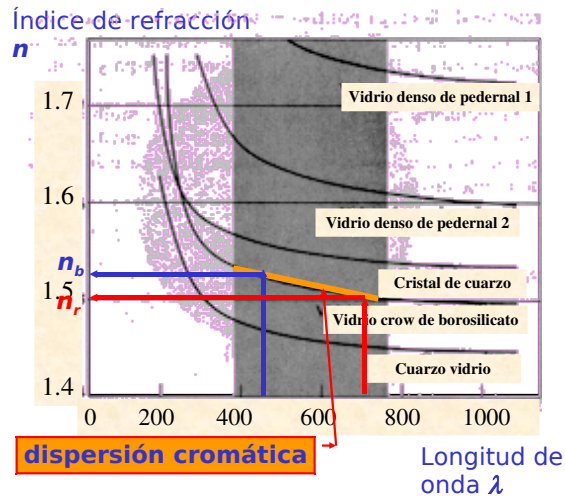
Diamante	2,419
Ambar	1,55
Sílice fundida	1,458
Cloruro sódico	1,50

3. Ondas electromagnéticas en la materia

CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

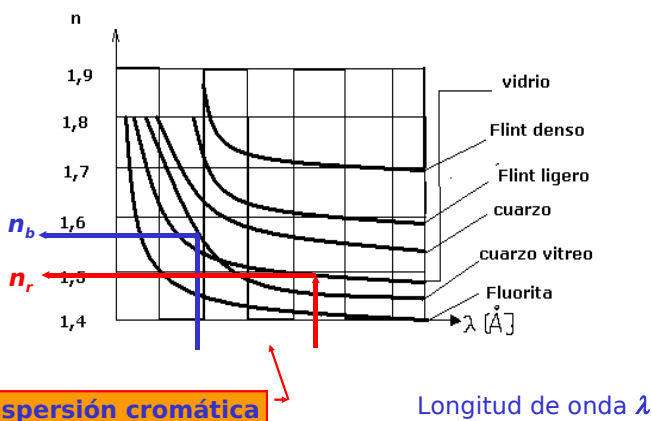


3. Ondas electromagnéticas en la materia



3. Ondas electromagnéticas en la materia

Figura 8



3. Ondas electromagnéticas en la materia



4. Fibra óptica

Ley de la refracción o ley de Snell (1621):

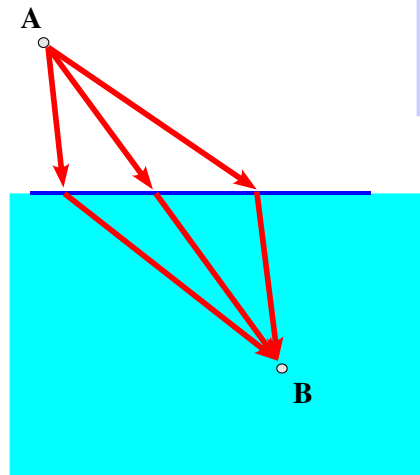


REFRACCIÓN: Fenómeno por el cual una onda electromagnética modifica su dirección de propagación al atravesar la superficie de separación entre dos medios con índice de refracción diferente.

4. Fibra óptica

Principio de Fermat (1657)

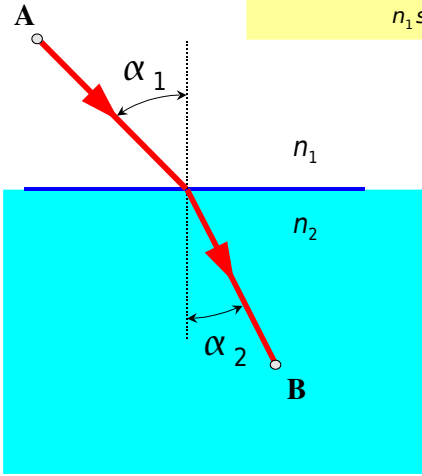
La trayectoria real de la luz al propagarse entre dos puntos es tal que el tiempo empleado es mínimo.



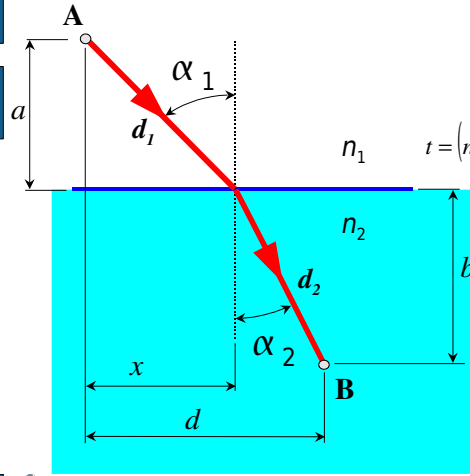
4. Fibra óptica

Ley de la refracción o ley de Snell (1621):

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$



4. Fibra óptica



$$t_1 = \frac{d_1}{v_1} = \frac{d_1 \cdot n_1}{c}; t_2 = \frac{d_2}{v_2} = \frac{d_2 \cdot n_2}{c}$$

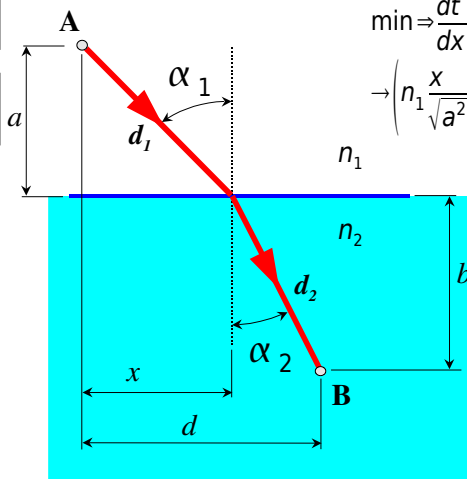
$$t = t_1 + t_2 = (d_1 \cdot n_1 + d_2 \cdot n_2) \frac{1}{c}$$

$$t = (n_1 \sqrt{a^2 + x^2} + n_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}) \frac{1}{c}$$

Fermat

Tiempo mínimo

4. Fibra óptica



$$\min \Rightarrow \frac{dt}{dx} = 0$$

$$\rightarrow \left(n_1 \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - n_2 \frac{d-x}{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}} \right) = 0$$

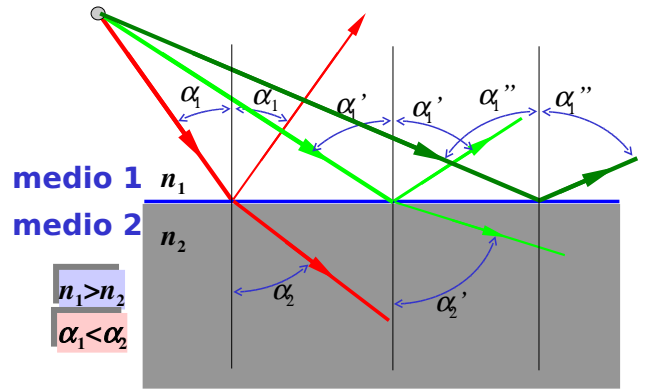
$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Fermat

Tiempo mínimo

4. Fibra óptica

Ángulo crítico



medio 1 n_1

medio 2 n_2

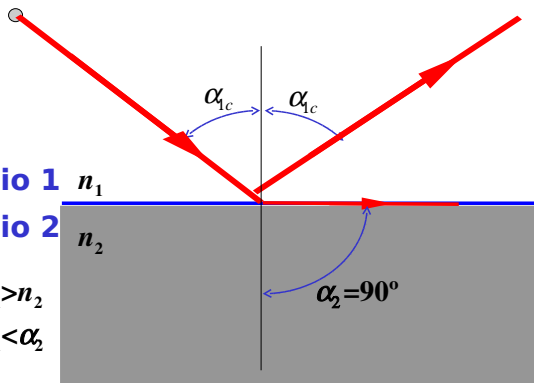
$$n_1 > n_2$$

$$\alpha_1 < \alpha_2$$

Reflexión total

4. Fibra óptica

Ángulo crítico



medio 1 n_1

medio 2 n_2

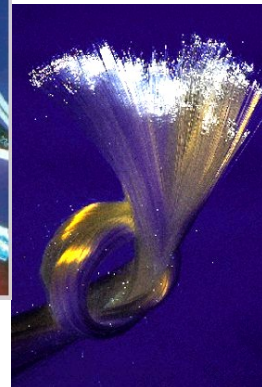
$$n_1 > n_2$$

$$\alpha_1 < \alpha_2$$

$$\alpha_2 = 90^\circ = \arcsin \left(\frac{n_1 \cdot \sin \alpha_{1c}}{n_2} \right) \rightarrow \frac{n_1 \cdot \sin \alpha_{1c}}{n_2} = 1$$

$$\alpha_{1c} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

4. Fibra óptica

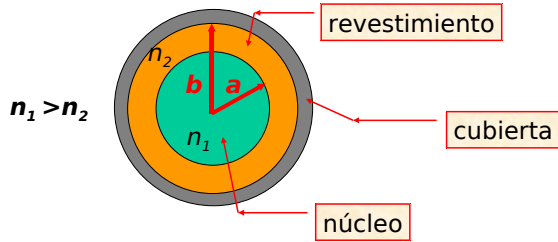
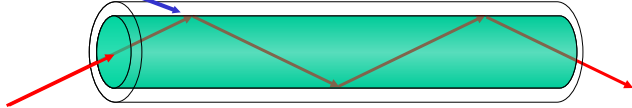


Ángulo crítico

$$\alpha_{1c} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

4. Fibra óptica

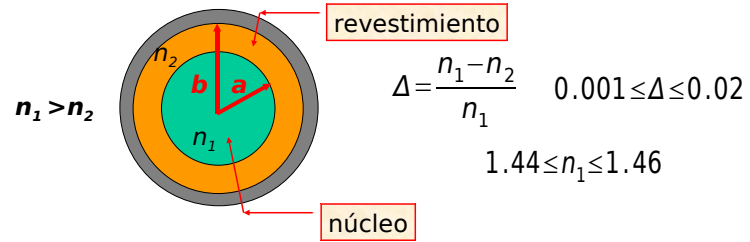
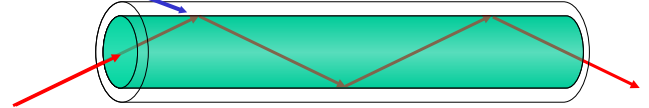
reflexión total



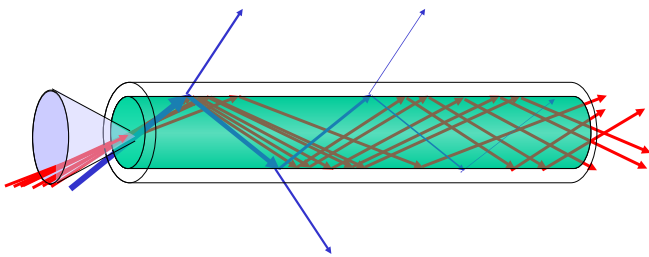
4. Fibra óptica

reflexión total

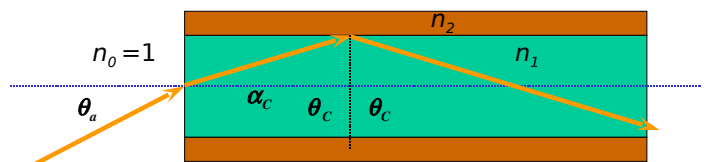
$$\frac{2a}{rb} = 8/125, 50/125, 62.5/125, 85/125, 100/140 \text{ } (\mu\text{m}/\mu\text{m})$$



4. Fibra óptica



4. Fibra óptica



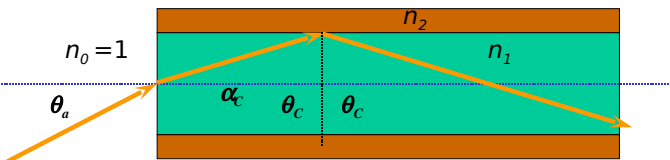
$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad \sin \alpha_c = \cos \theta_c = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

$$n_0 \cdot \sin \theta_a = n_1 \cdot \sin \alpha_c = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

$$AN = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{apertura numérica}$$

Los rayos que entran con ángulos de incidencia inferiores al dado por la apertura numérica no sufren refracción al avanzar por la fibra.

4. Fibra óptica



$$n_1 = 1.45 \quad AN = \sin \theta_a = \sqrt{1.45^2 - 1.42^2} = 0.086$$

$$n_2 = 1.42 \quad \theta_a = \arcsin(0.086) = 4.9^\circ$$

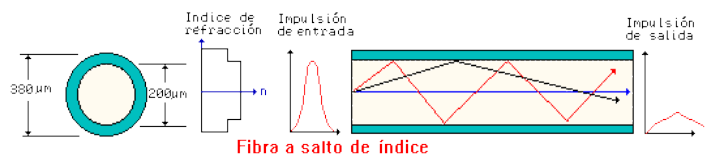
$$AN = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{apertura numérica}$$

Los rayos que entran con ángulos de incidencia inferiores al dado por la apertura numérica no sufren refracción al avanzar por la fibra.

4. Fibra óptica

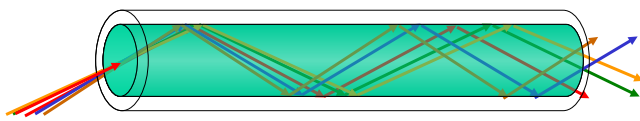
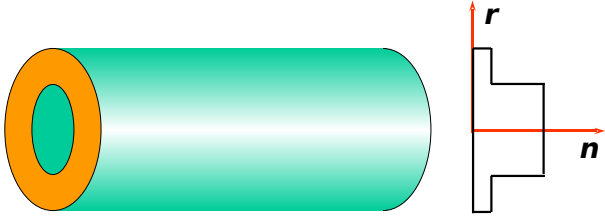
fibra multimodo de salto de índice

En el cual la transmisión de la luz va chocando continuamente contra las paredes del revestimiento siendo reflejada de nuevo hacia el núcleo, es el más económico pero también es el que más pérdidas tiene y ancho de banda más estrecho.



4. Fibra óptica

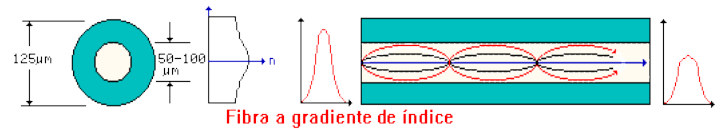
fibra multimodo de salto de índice



4. Fibra óptica

fibra multimodo de gradiente de índice

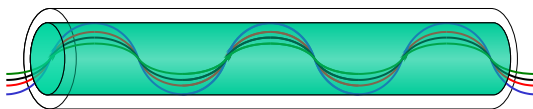
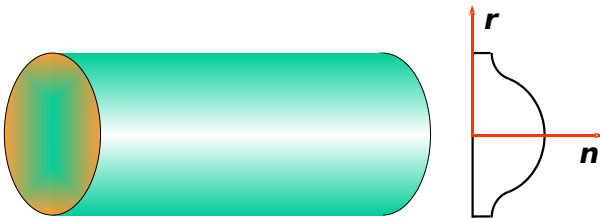
En este tipo de fibras el revestimiento no mantiene un índice de refracción constante, sino que va aumentando progresivamente desde el centro del núcleo hacia fuera, ésta técnica produce una refracción gradual a medida que los rayos van penetrando en el recubrimiento, presenta un mayor ancho de banda y menor pérdida de información que la anterior.



Fibra a gradiente de índice

4. Fibra óptica

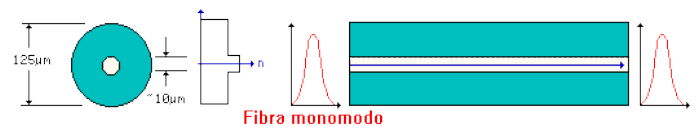
fibra multimodo de gradiente de índice



4. Fibra óptica

fibra mono-modo

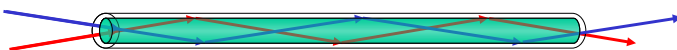
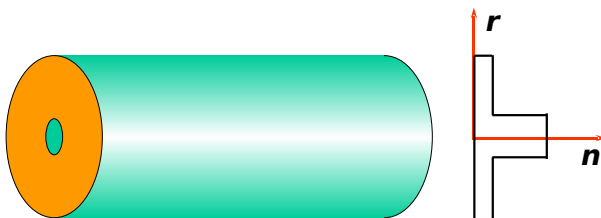
Consiste en hacer el núcleo tan fino que sólo un rayo de luz viaje a través de la fibra, es el más caro, tiene mayor ancho de banda que los dos anteriores, y como es evidente posee pérdidas menores.



Fibra monomodo

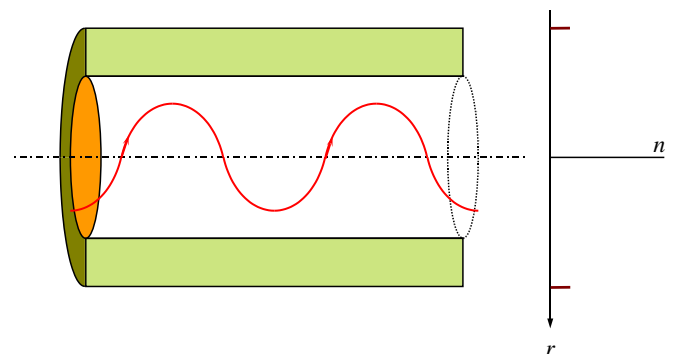
4. Fibra óptica

fibra mono-modo

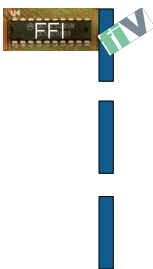


4. Fibra óptica

variación de índice gradual



4. Fibra óptica



4. Fibra óptica

