

Tema 4 – Ondas

4.1 Tipos de ondas. Función de ondas.

4.2 Ondas armónicas.

4.3 Ondas electromagnéticas. Densidad de energía. Intensidad.

4.4 Espectro electromagnético.

4.5 Polarización. Pantallas de cristal líquido.

4.6 Reflexión y refracción. Fibras ópticas.

4.7 Interferencias.

4.8 Láser.

Introducción

La teoría de ondas se conforma como una característica rama de la física que se ocupa de las propiedades de los fenómenos ondulatorios independientemente de cual sea su origen físico.

Una peculiaridad de fenómenos ondulatorios es que a pesar de que el estudio de sus características no depende del tipo de onda en cuestión.

Por ejemplo, la acústica se diferencia de la óptica en que las ondas sonoras están relacionadas con aspectos más mecánicos que las ondas electromagnéticas.

4.1 Tipos de ondas. Función de ondas.

En física, una onda consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio implicando un transporte de energía sin transporte de materia.

- Ej. de perturbaciones, en: **densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético**
- Ej. del medio: **aire, agua, un trozo de metal e, incluso, inmaterial como el vacío.**

Tipos de ondas

Ondas Mecánicas:

- Transversales
- Longitudinales
- Superficiales

Ondas Electromagnéticas:

- Transversales



Ondas Mecánicas

Ondas Mecánicas:

Estas son las ondas que necesitan un medio material para transportarse, como el agua, el aire, el resorte o la cuerda.

Hay tres tipos de ondas Mecánicas:

- Transversales
- Longitudinales
- Superficiales

Ondas Transversales

Ondas Transversales:

Estas ondas hace que las partículas del medio oscilen perpendicularmente a la dirección de la propagación de la onda.

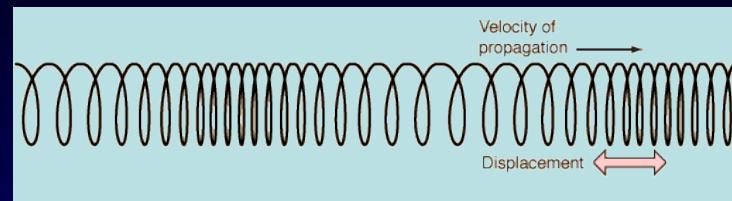


La onda se mueve a lo largo del resorte hacia la derecha, pero el resorte mismo se desplaza hacia arriba y hacia abajo formando ángulos rectos respecto al movimiento de la onda.

Las ondas en un piano y en las cuerdas de una guitarra son ejemplos representativos de ondas transversales.

Ondas Longitudinales

Ondas Longitudinales:



Estas Ondas hacen que las partículas del medio se muevan paralelamente a la dirección de propagación de la onda.

El desplazamiento del resorte están en la misma dirección del movimiento de la onda.

Un ejemplo de este tipo de ondas es el sonido, algunas ondas sísmicas generadas en un terremoto, un muelle que se comprime.

Ondas Superficiales

Ondas Superficiales:

Estas ondas son una mezcla de ondas longitudinales y transversales.

Es decir cuando las ondas profundas en un lago o en el océano son longitudinales, pero en la superficie del agua las partículas se mueven tanto paralela como perpendicularmente a la dirección de la onda.

Ondas Electromagnéticas

Ondas Electromagnéticas:

Estas ondas no necesitan un medio para su movimiento, y viajan a través del espacio con la velocidad de la luz, 299 792 458 m/s.

Sus características no pueden ser observadas directamente por lo que se estudian las ondas mecánicas, como un modelo para estudiar el comportamiento de las ondas electromagnéticas.

Tipos en función de propagación.

El frente de onda *está formado por puntos que comparten la misma fase.*

Tipos de ondas en función de frente de onda:

- Ondas unidimensionales.
- Ondas bidimensionales o superficiales
- Ondas tridimensionales o esféricas

Ondas unidimensionales

Ondas unidimensionales: son aquellas que se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio

Ej.: las ondas en los muelles o en las cuerdas.

Si la onda se propaga en una dirección única, sus frentes de onda son planos y paralelos.

Ondas bidimensionales

Ondas bidimensionales o superficiales: son ondas que se propagan en dos direcciones.

Pueden propagarse, en cualquiera de las direcciones de una superficie, por ello, se denominan también ondas superficiales.

Un ejemplo son las ondas que se producen en una superficie líquida en reposo cuando, por ejemplo, se deja caer una piedra en ella.

Ondas tridimensionales

Ondas tridimensionales o esféricas: son ondas que se propagan en tres direcciones.

Las ondas tridimensionales se conocen también como ondas esféricas, porque sus frentes de onda son esferas concéntricas que salen de la fuente de perturbación expandiéndose en todas direcciones.

El sonido es una onda tridimensional.

Son ondas tridimensionales las ondas sonoras (mecánicas) y las ondas electromagnéticas.

Tipos en función de periodicidad

Tipos de ondas en función de la periodicidad

Ondas periódicas: la perturbación local que las origina se produce en ciclos repetitivos por ejemplo una onda senoidal.

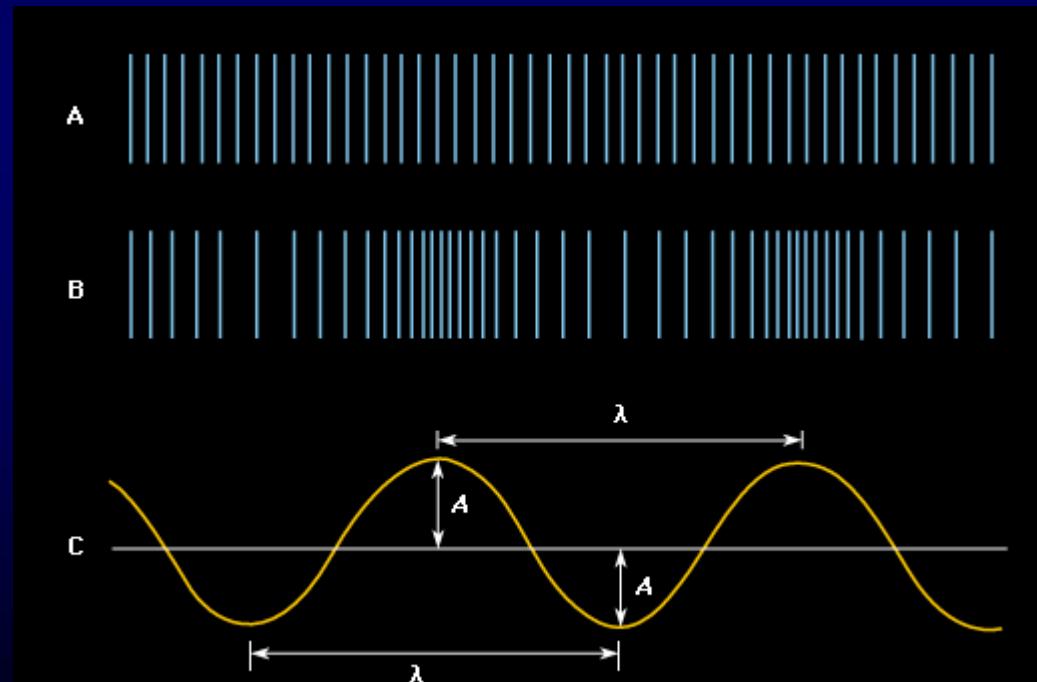
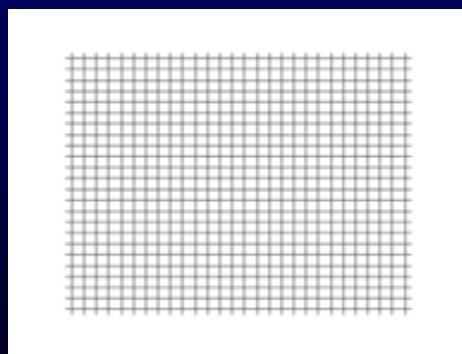
Ondas no periódicas: la perturbación que las origina se da aisladamente o, en el caso de que se repita, las perturbaciones sucesivas tienen características diferentes.

Las ondas aisladas también se denominan pulsos.

Ondas acústicas

El sonido audible consiste en ondas sonoras que producen oscilaciones de la presión del aire,

La propagación del sonido es similar en los fluidos, donde el sonido toma la forma de fluctuaciones de presión.

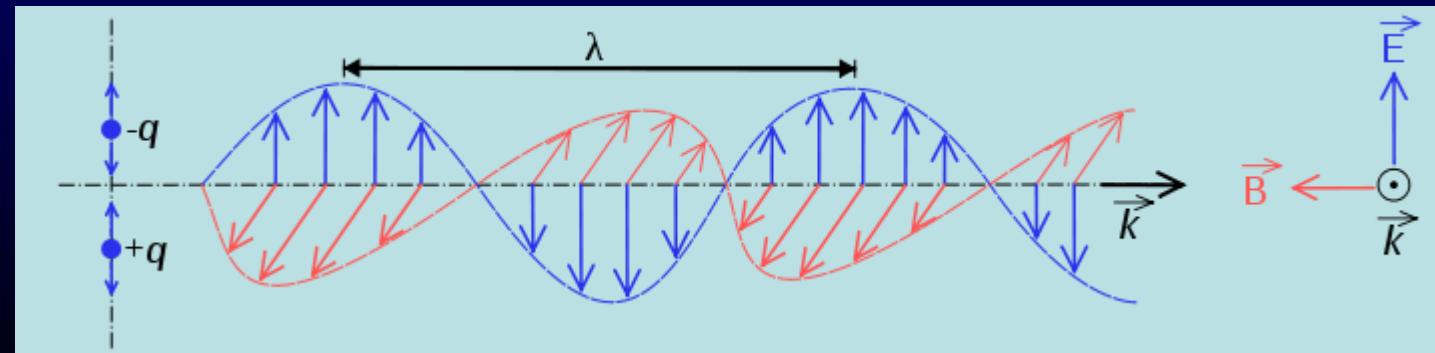


Ondas electromagnéticas

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio.

Las ondas electromagnéticas son transversales; las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación.

Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse; es decir, pueden desplazarse por el vacío.



Tren de ondas

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-on-a-string>

4.2 Ondas armónicas.

Una onda armónica unidimensional es aquella que propagándose en una dimensión puede ser descrita mediante una función sinusoidal (seno o coseno).

Esta ecuación se utiliza para el movimiento armónico simple en el foco:

$$f(t) = A \sin(2\pi ft)$$

La ecuación se utiliza en el movimiento armónico simple en el punto situado a distancia :

$$f(t) = A \sin(2\pi f(t - t_x))$$

Ecuaciones

En el retardo o desfase de cada partícula respecto a la anterior depende de la velocidad de propagación v del sonido. Dado que "espacio = velocidad · tiempo" (suponemos la velocidad constante en el medio elegido), tenemos que:

$$x = vt_x$$

A la distancia que hay entre una partícula y la más próxima "en fase" se le denomina longitud de onda λ . Según la ecuación anterior, tenemos la relación:

$$\lambda = vT$$

Ecuaciones

El movimiento ondulatorio, es decir, el de todas las partículas a la vez, vendrá expresado por la función en dos variables (tiempo y distancia al foco):

$$f(x, t) = A \sin(2\pi f(t - t_x))$$

Utilizando las anteriores identidades, puedes comprobar fácilmente que esta función también se puede escribir así:

$$f(x, t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$$

Frecuencia

Ecuación de una onda

$$f(x, t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right]$$

se transforma in

$$f(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

donde

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

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

Elementos de una onda periódica

Período: El periodo es el tiempo que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente.

Amplitud: La amplitud es la distancia vertical entre una cresta y el punto medio de la onda.

Frecuencia: Número de veces que es repetida dicha vibración por unidad de tiempo.

Longitud de onda: Es la distancia que hay entre el mismo punto de dos ondulaciones consecutivas, o la distancia entre dos crestas consecutivas.

Nodo: es el punto donde la onda cruza la línea de equilibrio.

Frente de onda

Se denomina frente de onda al lugar geométrico en que los puntos del medio son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda.

Dada una onda propagándose en el espacio o sobre una superficie, los frentes de onda pueden visualizarse como superficies o líneas que se desplazan a lo largo del tiempo alejándose de la fuente sin tocarse.

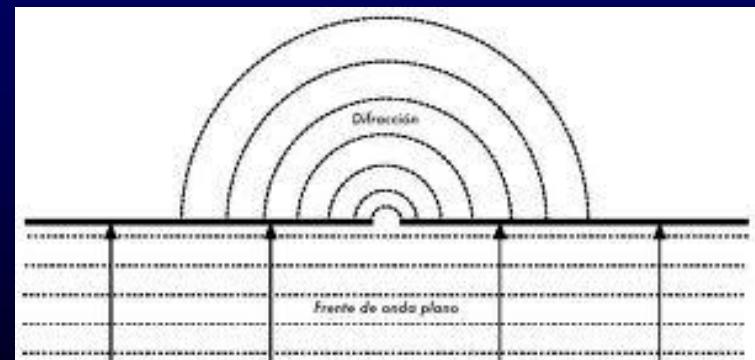


Figura 2.6: Difracción a través de una ranura pequeña.

Frente de onda

Si función de onda es $y(x, t) = f(kx - \omega t)$

El frente de onda está formado por puntos que comparten la misma fase, por tanto en un instante dado t un frente de onda está formado por el lugar geométrico (superficie o línea) de todos los puntos cuyas coordenadas satisfacen la relación:

$$kx - \omega t = \text{const}$$

Dirección de la onda unidimensional

Cuando el tiempo t y la posición x son de signos diferentes

$$f(x, t) = f(x - Vt)$$

la onda propaga hacia la derecha.

Cuando el tiempo t y la posición x son del mismo signo

$$f(x, t) = f(x + Vt)$$

la onda propaga hacia la izquierda.

Velocidad de fase

La velocidad de fase de una onda es la tasa a la cual la fase de la misma se propaga en el espacio.

Ésta es la velocidad a la cual la fase de cualquier componente en frecuencia de una onda se propaga (que puede ser diferente para cada frecuencia).

La velocidad de fase está dada en términos de la velocidad angular de la onda ω y del vector de onda k por la relación:

$$v_p = \omega/k$$

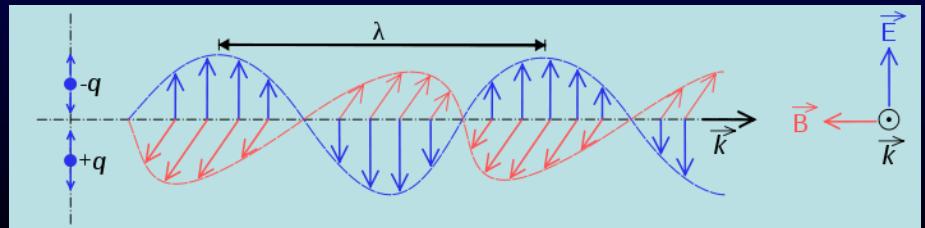
Problemas 1, 3

4.3 Ondas electromagnéticas. Densidad de energía. Intensidad.

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio.

Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse; es decir, pueden desplazarse por el vacío.

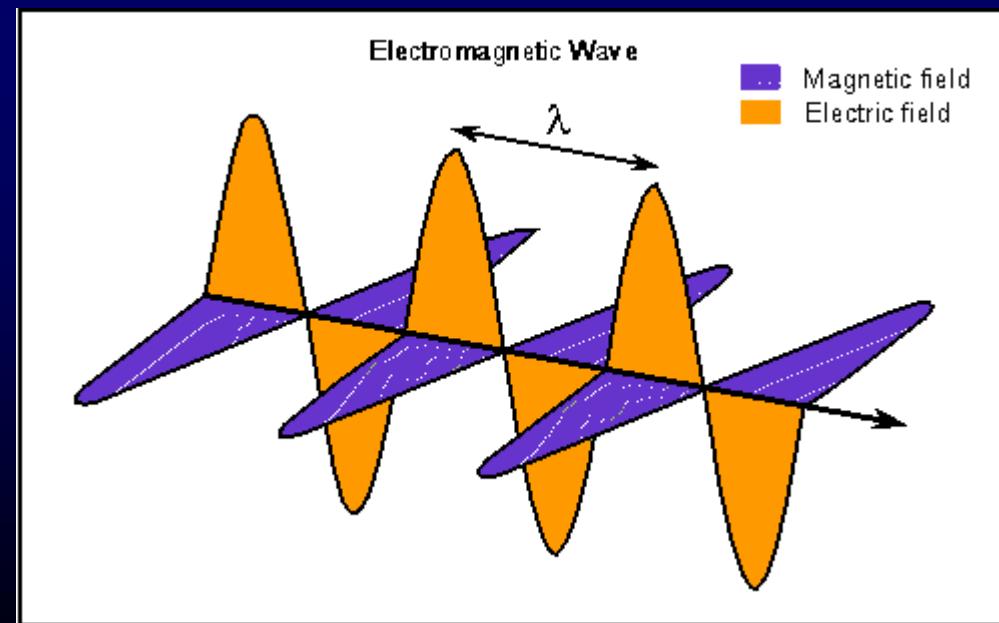
Las ondas luminosas son ondas electromagnéticas cuya frecuencia está dentro del rango de la luz visible.



Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son transversales; las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación.

Los aspectos teóricos están relacionados con la solución en forma de onda que admiten las ecuaciones de Maxwell.



Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro ecuaciones que describen por completo los fenómenos electromagnéticos.



Lo que para la Mecánica Clásica significan las Leyes de Newton lo son las Ecuaciones de Maxwell para los fenómenos Eléctricos y Magnéticos.

James Clerk Maxwell
1831 – 1879

Ecuaciones de Maxwell

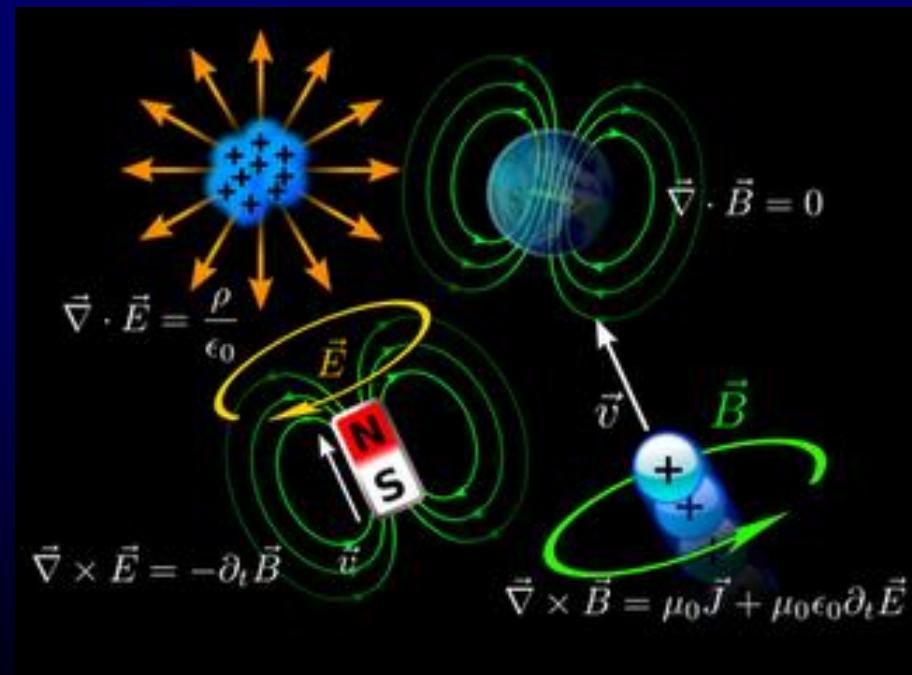
Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro ecuaciones que describen por completo los fenómenos electromagnéticos.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho/\epsilon_0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

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

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



Permeabilidad eléctrica

La permeabilidad eléctrica es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de los campos eléctricos.

La permeabilidad absoluta ϵ está dada por la relación entre desplazamiento eléctrico D en el material y la intensidad de campo eléctrico E que aparece en el interior de dicho material

$$\epsilon = D / E$$

La constante dieléctrica (permeabilidad del vacío ϵ_0) es:

$$\epsilon_0 = 8.85... \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de los campos magnéticos.

La permeabilidad absoluta μ está dada por la relación entre la inducción magnética B en el material y la intensidad de campo magnético H que aparece en el interior de dicho material.

$$\mu = B / H$$

La constante magnética (permeabilidad del vacío μ_0) es:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$$

Velocidad de la luz

La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal de valor 299 792 458 m/s (suele aproximarse a $3 \cdot 10^8$ m/s).

- **Se simboliza con la letra c, proveniente del latín *celeritas* (en español celeridad o rapidez).**
- **Es la velocidad máxima a la que toda la energía, materia, y puede viajar la información en el universo.**
- **Es la velocidad de todas las partículas sin masa y campos asociados — incluyendo radiación electromagnética como la luz, en el vacío, y se prevé la teoría actual que la velocidad de la gravedad (es decir, las ondas gravitacionales)**

Relación entre constantes

- la velocidad de la luz c ,
- la permitividad eléctrica ϵ_0 ,
- la constante magnética del vacío μ_0

están relacionadas por la fórmula

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

Ecuación de onda para campo eléctrico

La ecuación diferencial de para el campo eléctrico E se puede obtener desde ecuaciones de Maxwell y es

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

En un caso de propagación de una onda plana en una dirección (el eje x) la ecuación diferencial es

$$\frac{\partial^2 \vec{E}(\mathbf{x}, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2}$$

con su solución

$$\vec{E}(\mathbf{x}, t) = \vec{E}_0 \sin(kx \pm \omega t + \delta)$$

Ecuación de onda para campo magnético

La ecuación diferencial para el campo magnético B se puede obtener desde ecuaciones de Maxwell y es

$$\nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

En un caso de propagación de una onda plana en una dirección (el eje x) la ecuación diferencial es

$$\frac{\partial^2 \vec{B}(\mathbf{x}, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2}$$

con la solución

$$\vec{B}(\mathbf{x}, t) = \vec{B}_0 \sin(kx \pm \omega t + \delta)$$

Onda plana

Una onda plana, es una onda de frecuencia constante cuyos frentes de onda (superficies con fase constante) son planos paralelos de amplitud constante normales al vector velocidad de fase.

- es decir los campos dependen de una única coordenada espacial

Polarización lineal

Polarización de ondas planas:
la onda del campo eléctrico puede tener dos componentes vectoriales perpendiculares (transversales) a la dirección de propagación.

Las dos componentes vectoriales transversales varían su amplitud con el tiempo, y la suma de ambas va trazando una figura geométrica. Si dicha figura es

- **una recta, la polarización se denomina lineal;**
- **un círculo, la polarización es circular**

• polarización lineal: los campos se propagan manteniendo su dirección vectorial.

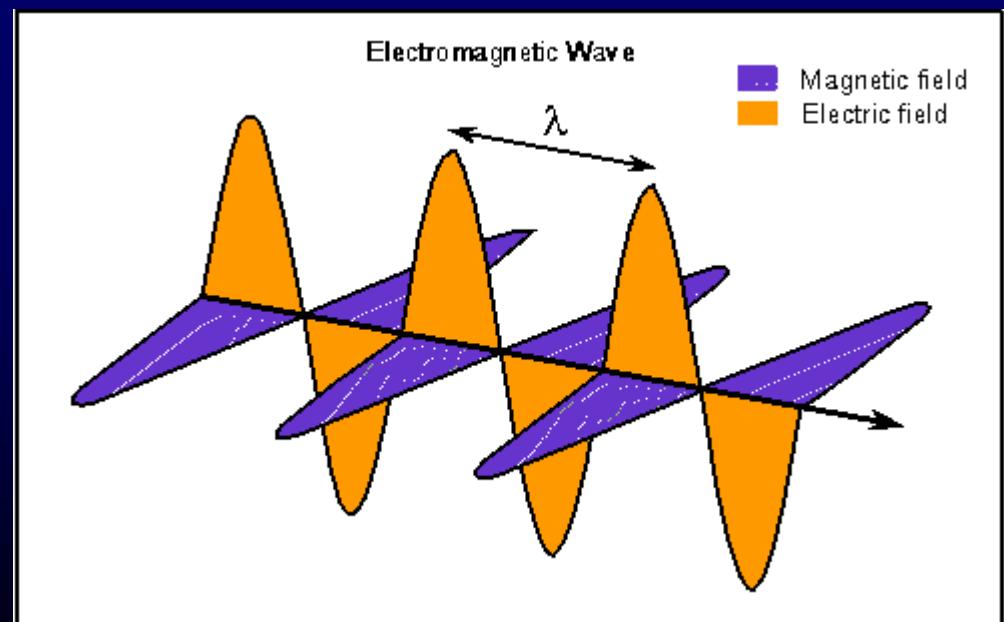
Relación entre E y B

Las funciones de onda de campos eléctrico y magnético de propagación de una onda plana en una dirección (el eje x) son

$$\vec{E}(\mathbf{x}, t) = \vec{E}_0 \sin(kx \pm \omega t + \delta)$$

$$\vec{B}(\mathbf{x}, t) = \vec{B}_0 \sin(kx \pm \omega t + \delta)$$

Los campos eléctrico y magnético son mutuamente perpendiculares y vibran en fase.

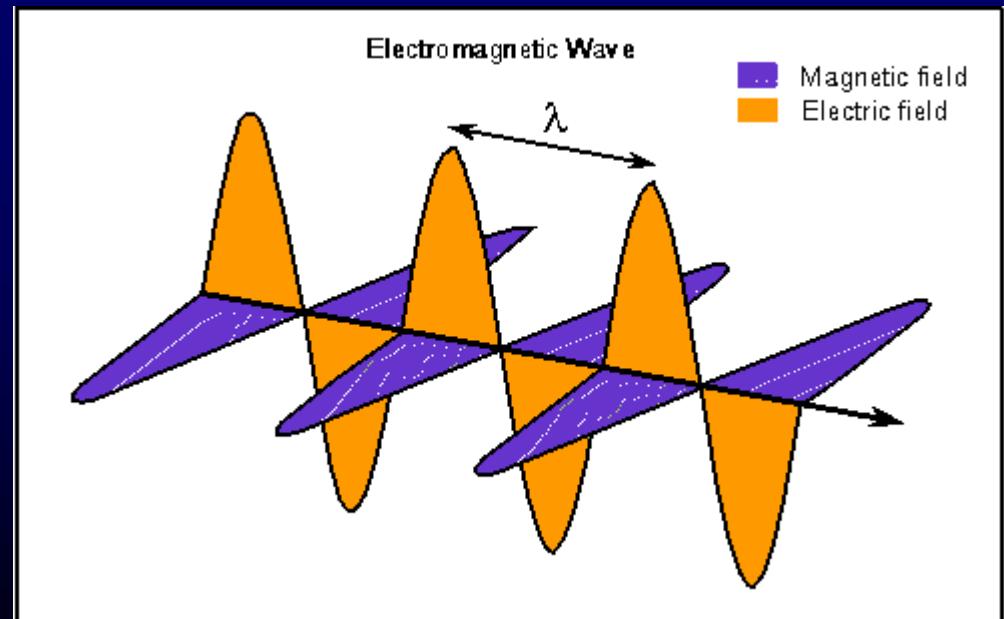


Relación entre E y B

Los módulos de campos eléctrico y magnético son linealmente proporcionales

$$|\vec{E}| = c|\vec{B}|$$

con el coeficiente de proporción dado por la velocidad de la luz c .



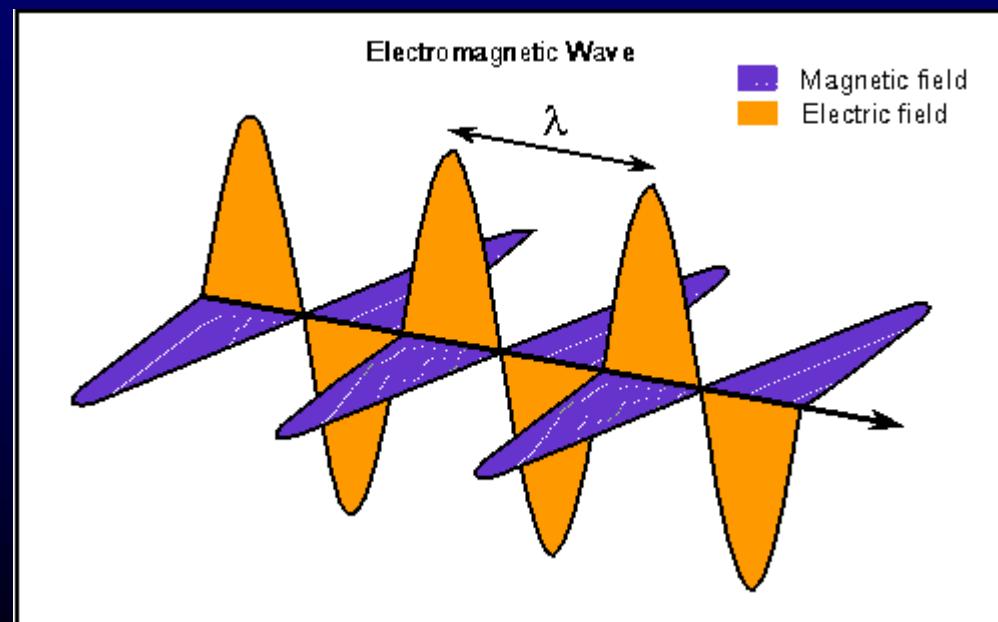
Relación entre E y B

Las ondas electromagnéticas son transversales, es decir los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación.

Si el vector u es paralelo a aquella dirección tenemos

$$\vec{B} = \frac{1}{c} [\vec{u} \times \vec{E}]$$

$$\vec{E} = c [\vec{B} \times \vec{u}]$$



Producto vectorial

El producto vectorial es una operación binaria entre dos vectores de un espacio euclídeo tridimensional que da como resultado un vector ortogonal a los dos vectores originales.

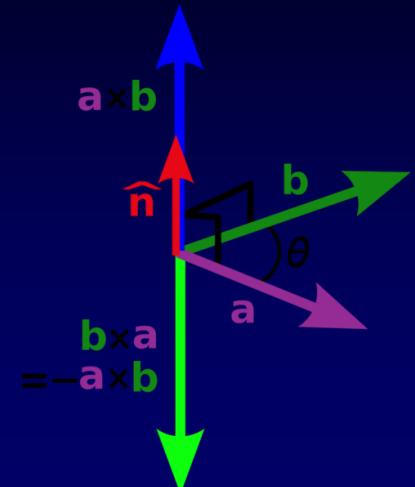
$$\vec{c} = [\vec{a} \times \vec{b}]$$

- El módulo de c está dado por

$$c = ab \sin \theta$$

donde θ es el ángulo entre los vectores a y b .

- La dirección del vector c , que es ortogonal a a y ortogonal a b , está dada por la regla de la mano derecha.

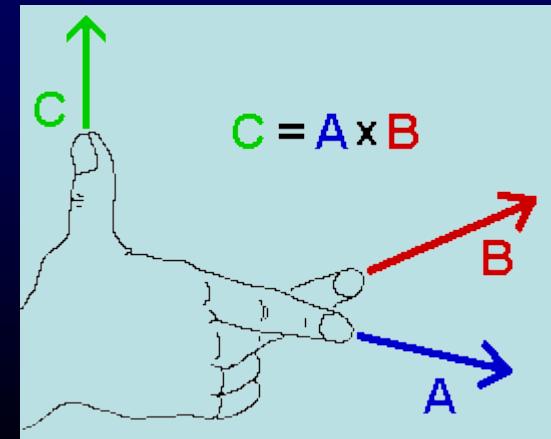


Regla de la mano derecha

Usamos los tres dedos consecutivos de la mano derecha, empezando con el pulgar, índice y, finalmente, el dedo medio, los cuales se posicionan apuntando a tres diferentes direcciones perpendiculares.

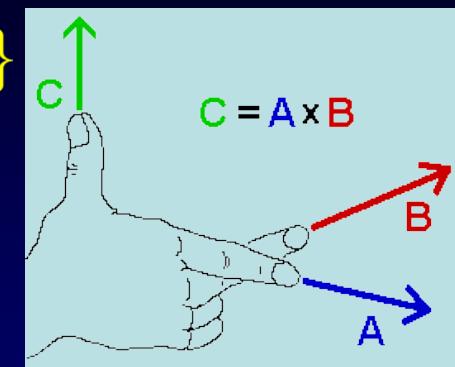
- el pulgar determina la primera dirección vectorial
- el índice la segunda
- el corazón nos indicará la dirección del tercero

$$\vec{c} = [\vec{a} \times \vec{b}]$$



Bases ortonormales y producto vectorial

Sea un sistema de referencia $S = \{O; \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}\}$ en el espacio vectorial. Se dice que es una base ortonormal derecha si cumple con las siguientes condiciones:



1) los tres vectores son ortogonales entre sí.

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = 0$$

2) los vectores son vectores unitarios

$$|\mathbf{i}| = |\mathbf{j}| = |\mathbf{k}| = 1$$

3) los vectores cumplen la regla de la mano derecha

$$\mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k},$$

$$\mathbf{j} \times \mathbf{k} = \mathbf{i},$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{i} = \mathbf{j}$$

Energía instantánea del campo

Un campo almacena energía.

La densidad instantánea de un campo eléctrico es

$$\eta(x, t) = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \varepsilon_0 E^2 = \varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kx \pm \omega t + \delta)$$

- La densidad de energía instantánea asociada con el campo magnético de una onda electromagnética es igual a la densidad de energía instantánea asociada con el campo eléctrico
- Las unidades son de energía por unidad de volumen [J/m^3]

Energía media del campo

La densidad instantánea de un campo eléctrico es

$$\eta(x, t) = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \varepsilon_0 E^2 = \varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kx \pm \omega t + \delta)$$

La densidad media es

$$\eta = \langle \eta(x, t) \rangle = \varepsilon_0 E_0^2 \langle \sin^2(kx \pm \omega t + \delta) \rangle = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} \frac{B_0^2}{\mu_0}$$

Intensidad

La intensidad instantánea que posee una onda electromagnética, es decir, la energía que por unidad de tiempo atraviesa la unidad de superficie, colocada perpendicularmente a la dirección de propagación es:

$$I(x, t) = \frac{P}{S} = c\eta(x, t) = c\varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kx \pm \omega t + \delta)$$

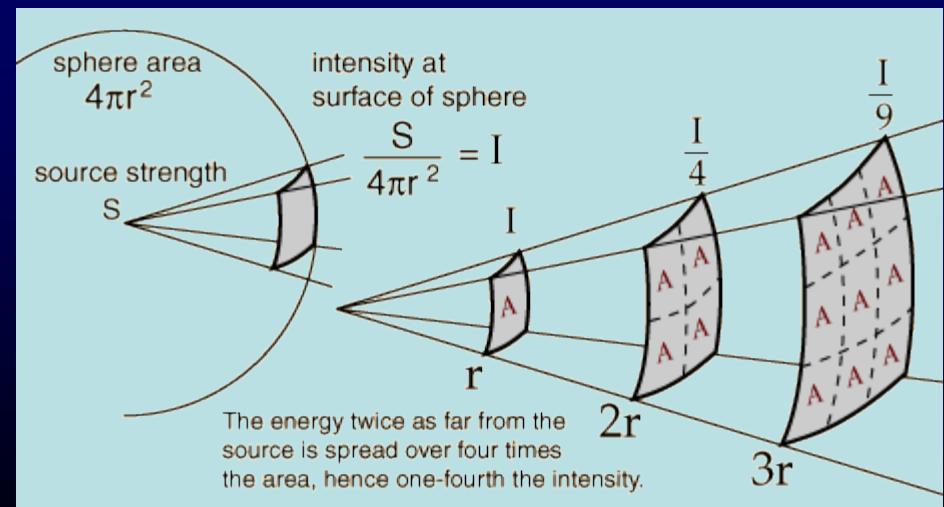
intensidad media que se propaga

$$I = \langle I(x, t) \rangle = \frac{1}{2}c\varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} \frac{cB_0^2}{\mu_0}$$

Ley de la inversa del cuadrado

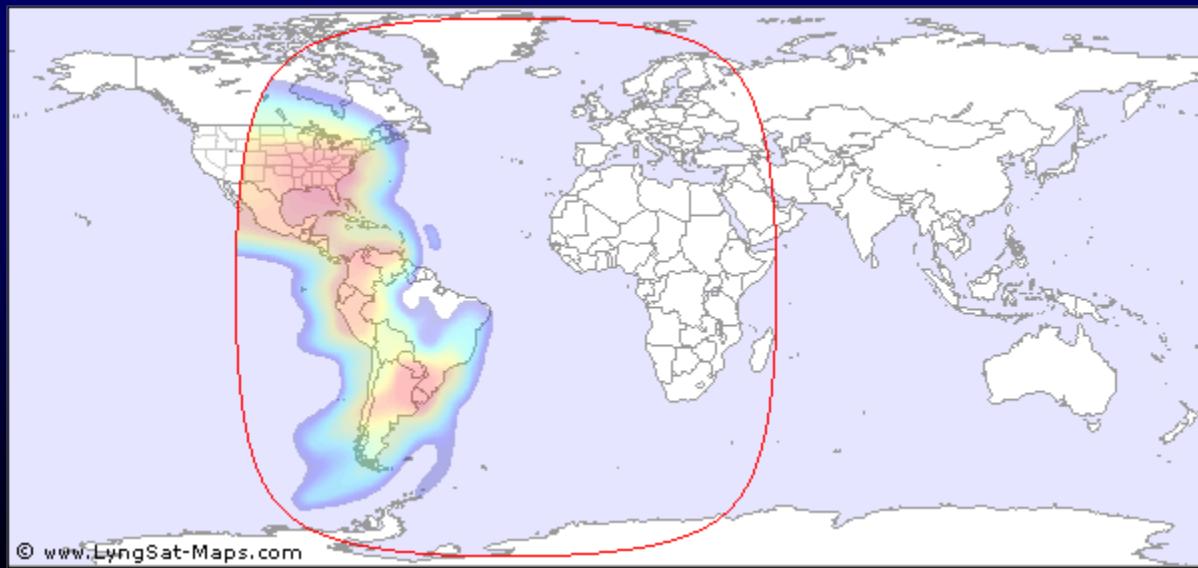
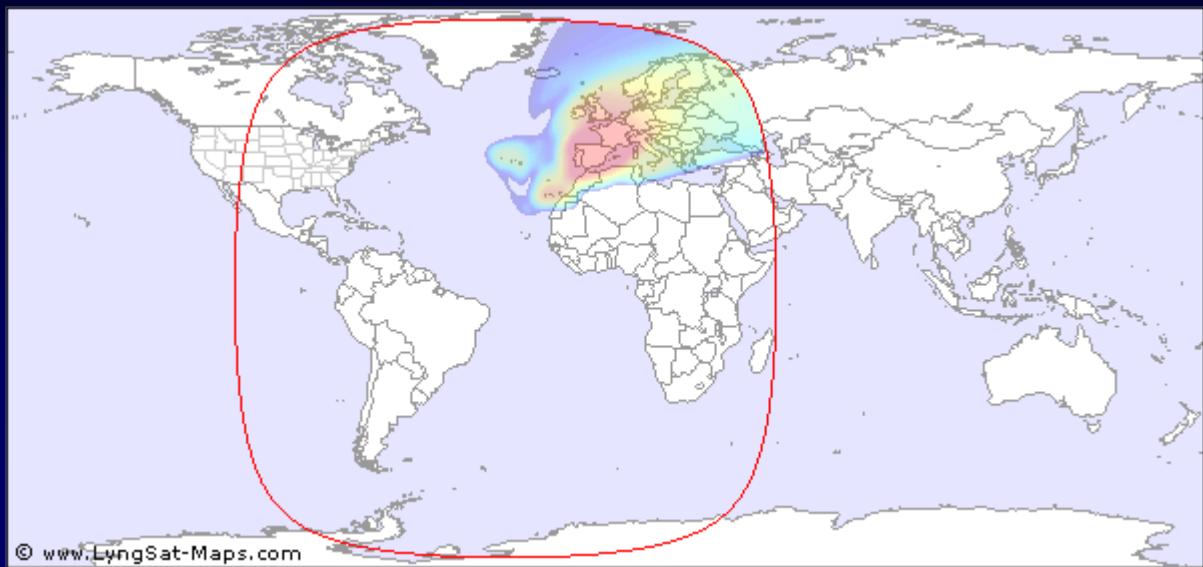
En mecánica ondulatoria la ley de la inversa del cuadrado establece que para una onda como, por ejemplo, el sonido o la luz, que se propaga desde una fuente puntual en todas direcciones por igual, la intensidad de la misma disminuye de acuerdo con el cuadrado de la distancia a la fuente de emisión.

$$I = \frac{P}{S} = c\eta(x, t) = \frac{P}{4\pi r^2}$$



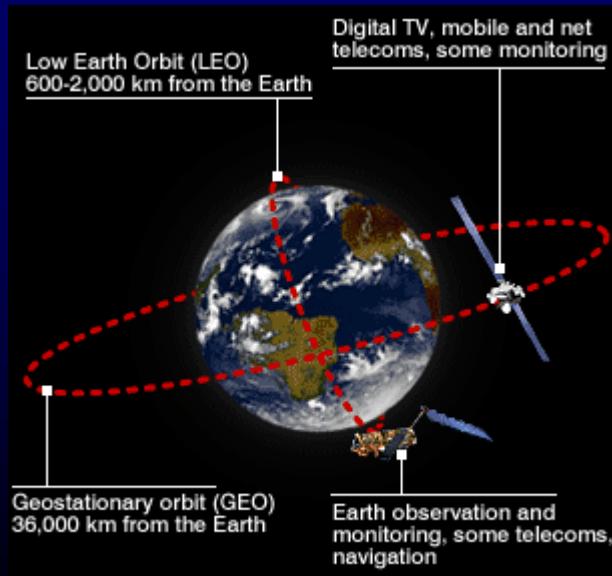
Problemas 7, 8, 12

Problema 12



Órbita geoestacionaria

Una órbita geoestacionaria o GEO es una órbita geosíncrona directamente encima del ecuador superficial terrestre.



Problema 12

[Hispasat 1C/1D/1E](#) | [Hispasat 1C](#) | [Hispasat 1D](#) | [Hispasat 1E](#)

Azimuth & elevation in Barcelona, Spain: 223.6° & 32.1°

The EIRP values are for Spain

Hispasat 1C/1D/1E © LyngSat, last updated 2012-05-17 - http://www.lyngsat.com/Hispasat-1C-1D-1E.html								
Freq. Tp	Provider Name Channel Name	System Encryption	SR-FEC SID-VPID	ONID-TID APID Lang.	Beam EIRP (dBW) C/N lock	Source Updated		
10730 H tp 145	 RRsat Global Communications Network	A U	DVB-S	27500-3/4	1388-1388	Europe 54-55.5 5.5	T Viererbe 120309	
	Fashion TV	A F		1 2001	3001			
	BabyFirst TV	A	Viaccess 2.5 Viaccess 2.6 Viaccess 4.0	2 2002	3002 E 4002 F			
	High TV	A	MPEG-4/HD/3D	3	2003 3.03 E			
	Ru TV	A S F		4	2004 3004 R			
	God TV UK	A S F	MPEG-4	5	2005 3005 E			
	Fox Sports Middle East	A	MPEG-4/HD BISS	7	2007 3007 E			
10770 H tp 146	 RRsat Global Communications Network	A U	DVB-S	27500-3/4	1389-1389	Europe 54-55.5 5.5	N Schlammer 110702	
	[RRsat test card]			1 2001	3001			
	RRsat promo	A		2 2002	3002 E			
10810 H tp 147	JEDI		DVB-S2	30000-3/4 8PSK	1-1	Europe 54-55.5 7.9	N Schlammer 120330	
	JEDI promo		MPEG-4/HD/3D	42 42	43 Sp			
	JEDI promo		MPEG-4/HD/3D	61 61	62 Sp			
10850 V tp 142	[test card]		DVB-S2	30000-4/5 QPSK 5 - 301	1-1 259	Europe 54-55.5 4.7	T Viererbe 120120	
	 TSA Europa TV	A	DVB-S	27500-3/4	2-15			
	Record Europa	A F		1 4113	4114 P			

4.4 Espectro electromagnético.

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas.

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como

- los rayos gamma y
- los rayos X,

pasando por la

- luz ultravioleta,
- la luz visible y

• los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como

- las ondas de radio.

Parametros del espectro

El espectro electromagnético se puede expresar en función de

- La frecuencia f de onda, $f=1/T$
- La longitud λ de onda, $\lambda = c T$
- La temperatura T de emisión del cuerpo negro

Cuerpo negro

Un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él.

A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro.

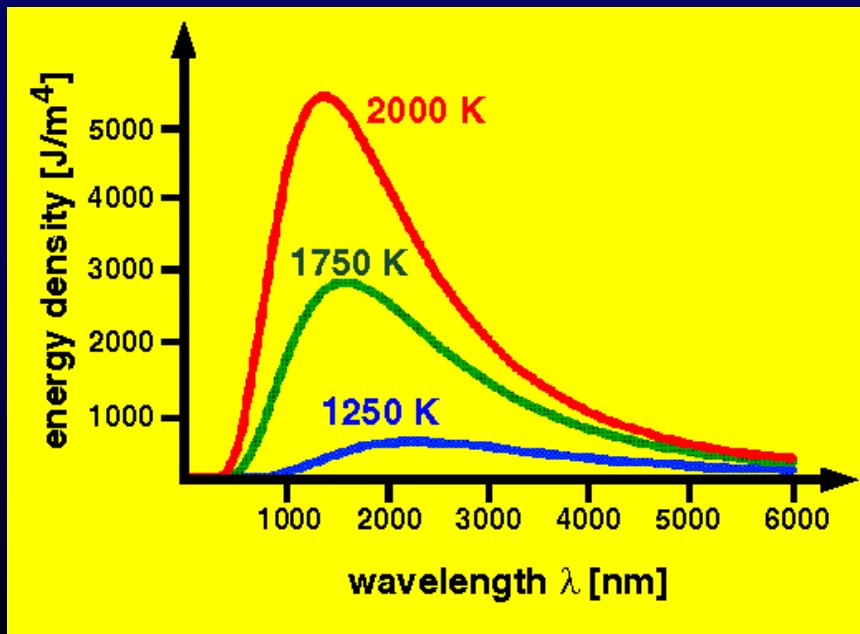
La energía radiante emitida por un cuerpo a temperatura ambiente es escasa y corresponde a longitudes de onda superiores a las de la luz visible.

Los cuerpos de color negro son buenos absorbentes.

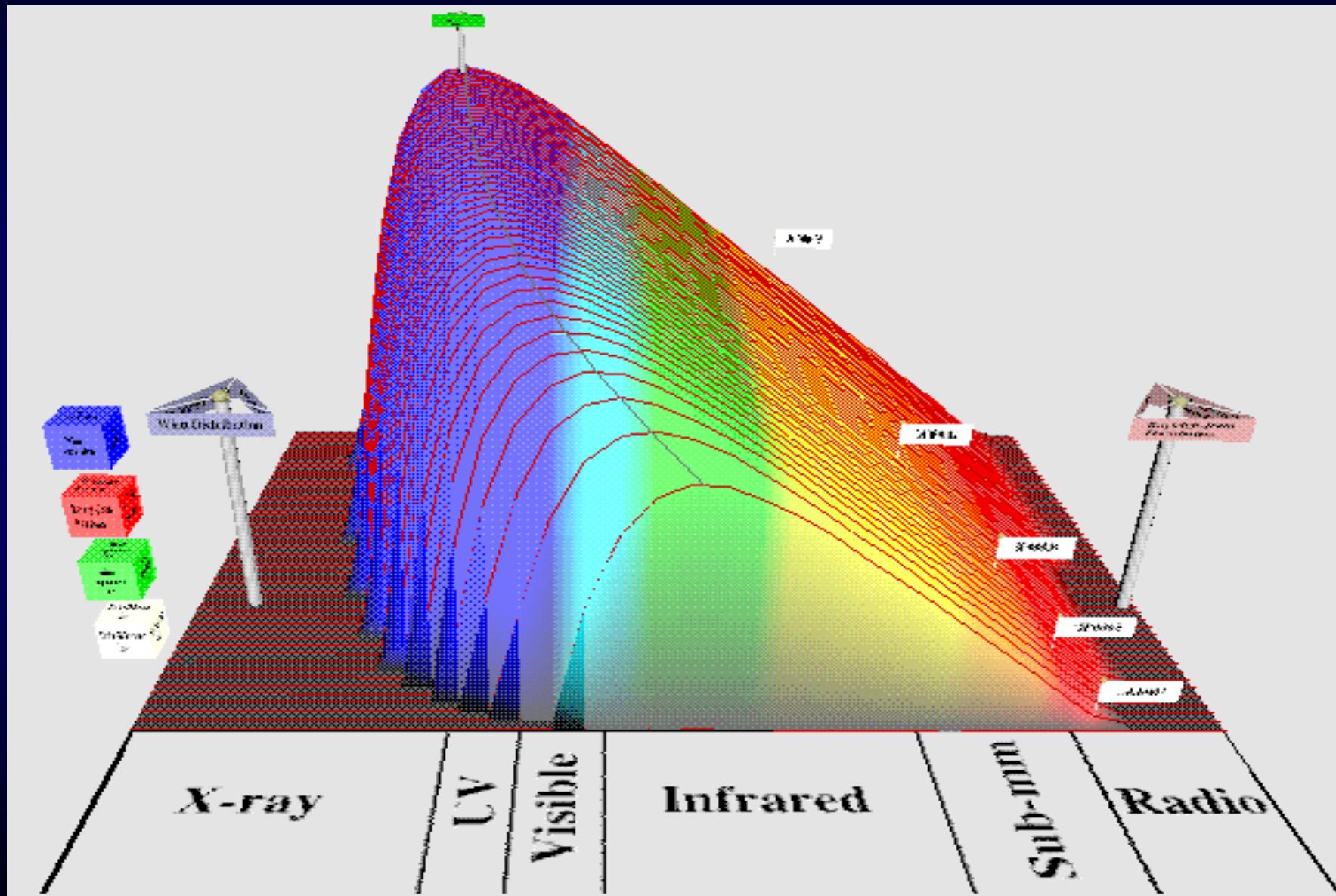
Radiación de cuerpo negro

La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro, con una temperatura en la frecuencia, viene dada por la ley de Planck:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left\{\frac{h\nu}{kT}\right\}-1}$$



Radiación de cuerpo negro



La temperatura de color

- La temperatura de color es el método usado para cuantificar el color de la luz.
- Se expresa en Kelvins (K).
- La luz cálida tiene una temperatura de color baja, este es el caso del atardecer, que tiene alrededor de unos 4.000K.
- La luz fría tiene una temperatura de color más alta.
- Por tanto, cuanto más cálida sea la luz (amarillo-rojo) más baja será la temperatura de color y cuanto más fría (azul), más alta la temperatura de color.



Dónde se encuentran las ondas e/m

- ondas de radio y TV



- radiación láser



- microondas



- rayos X



- radiación térmica



- rayos gamma



Ondas de radiofrecuencia

Frecuencia de onda $f \in [1 \text{ Hz}, 10^9 \text{ Hz}]$

Longitud de onda $\lambda \in [1 \text{ km}, 0.3 \text{ m}]$

- Ondas emitidas y captadas por los circuitos eléctricos

- radio de frecuencia ultraalta

$0.3 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ m}$ (UHF $> 0.3 \text{ GHz}$)

- radio de frecuencia muy alta

$1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$ (VHF $> 30 \text{ MHz}$)

- ondas cortas y medias de radio AM

$10 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ km}$ (MHz)

- ondas largas de radio

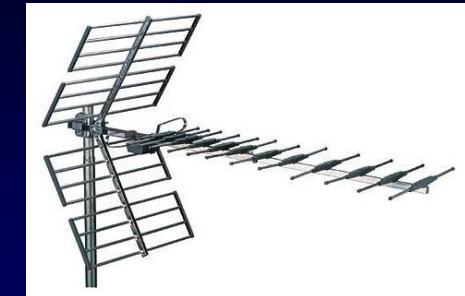
$\lambda > 1 \text{ km}$ (kHz)



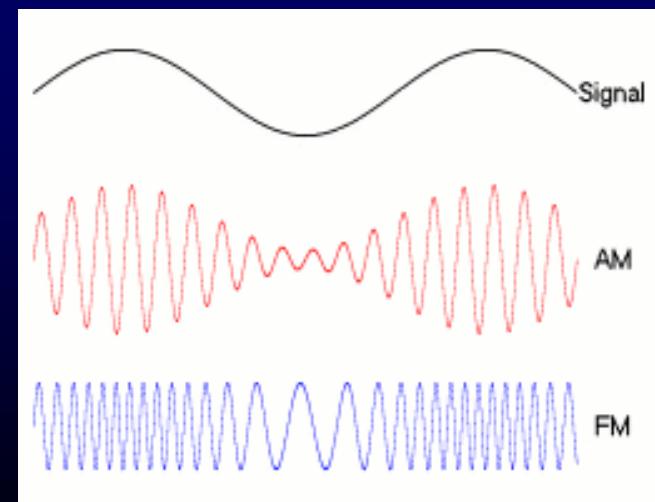
Senales radio AM / FM

- **AM ≡ Modulación de amplitud:**

La onda portadora de alta frecuencia ≈ MHz cambia la amplitud de acuerdo con la señal de la información (música o video) de bajes frecuencias (20 kHz-0.1 kHz)



- **FM ≡ Frecuencia modulada:**
La frecuencia de la onda portadora cambia segundo la señal de baja frecuencia



Microondas

Frecuencia de onda $f \in [10^9 \text{ Hz}, 10^{11} \text{ Hz}]$

Longitud de onda $\lambda \in [0.1 \text{ cm}, 30 \text{ cm}]$



- Las frecuencias de los microondas coinciden con la frecuencia de vibración de las moléculas de agua de 2.45 GHz -> Esta es la base de los hornos microondas.
- Radares detectan objetos por la reflexión
- Utilidad en radioastronomía
- GPS (1.2 GHz - 1.6 GHz)



Ondas infrarrojas

Longitud de onda se divide en subintervalos

- IR cercano: 780 nm-3000 nm
- IR intermedio: 3000 nm-6000 nm
- IR lejano: 6000 nm-15000 nm
- IR extremo: 15000 nm-1 mm

Frecuencia de onda $f \in [10^{11} \text{ Hz}, 10^{14} \text{ Hz}]$

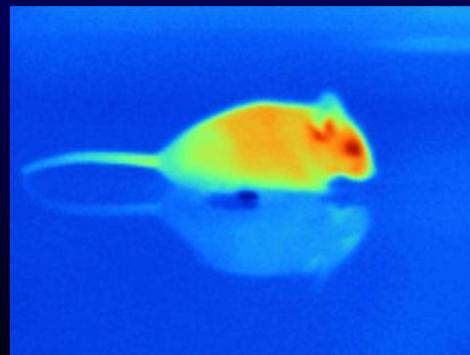


- Cualquier molécula por encima de cero absoluto radiará en el IR (por agitación térmica).
- Aproximadamente la mitad de la energía electromagnética del Sol es IR.
- Mandos a distancia



Ondas infrarrojas

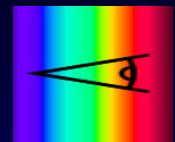
- Los cuerpos calientes radian IR en un espectro continuo (por ejemplo un radiador).
- El cuerpo humano también radia IR (esta emisión se utiliza para visión nocturna).
- Algunos animales pueden ver en infrarrojo (ej. serpientes, algunos peces, mosquitos, etc.)



NASA/IPAC

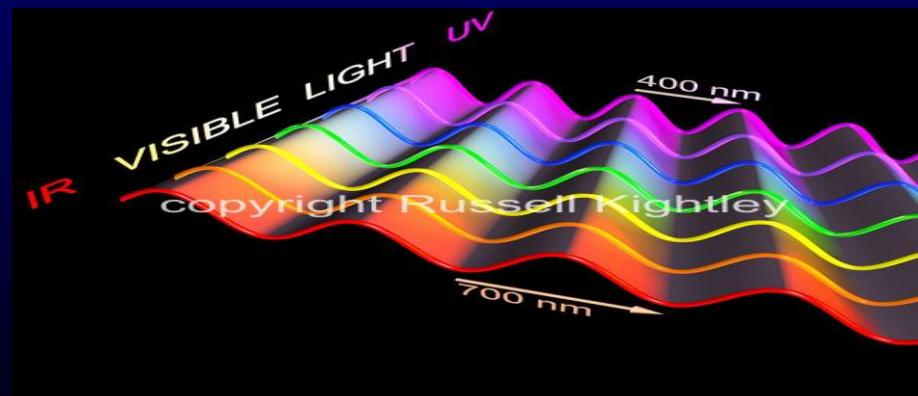
La luz visible

- **Sensibilidad del ojo humano:** $\lambda \in [400\text{nm}, 700\text{nm}]$
- **Frecuencia de onda** $f \in [4 \times 10^{14} \text{ Hz}, 8 \times 10^{14} \text{Hz}]$
- **Newton fue el primero en reconocer que la luz blanca es mezcla de todos los colores del espectro visible.**
- **El color no es una propiedad de la luz en sí misma, sino una manifestación de nuestro sistema de percepción**
- **La luz no es amarilla, la vemos amarilla, ya que con distintas mezclas de distintas longitudes de onda podemos obtener la misma respuesta a nuestro ojo.**



La luz visible: colores puros

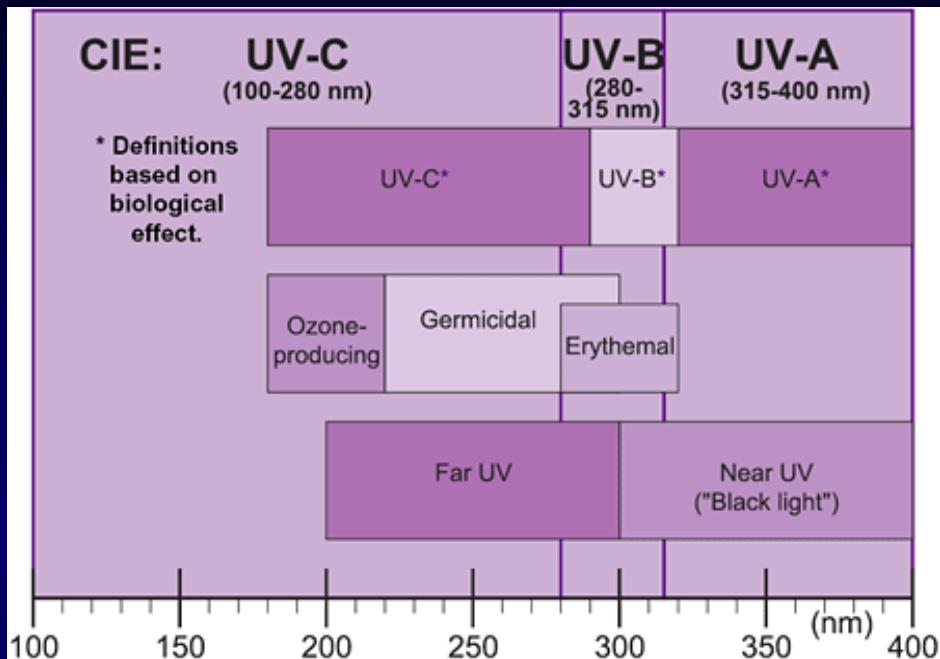
Color	Wavelength interval	Frequency interval
violet	~ 430 to 380 nm	~ 700 to 790 THz
blue	~ 500 to 430 nm	~ 600 to 700 THz
cyan	~ 520 to 500 nm	~ 580 to 600 THz
green	~ 565 to 520 nm	~ 530 to 580 THz
yellow	~ 590 to 565 nm	~ 510 to 530 THz
orange	~ 625 to 590 nm	~ 480 to 510 THz
red	~ 740 to 625 nm	~ 405 to 480 THz



Ondas ultavioletas

Longitud de onda
 $\lambda \in [10\text{nm}, 400\text{nm}]$

Frecuencia de onda
 $f \in [7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}, 3 \times 10^{16} \text{ Hz}]$



- Los rayos UV del Sol ionizan los átomos de la atmósfera superior y así se crea la ionosfera. El ozono absorbe estos rayos en la atmósfera.
- Los seres humanos no ven los UV porque los absorbe la córnea y el cristalino.

Rayos X

- Descubiertos por Röntgen (1845-1923)
- Frecuencia de onda $f \in [3 \times 10^{16} \text{ Hz}, 3 \times 10^{19} \text{ Hz}]$
- Longitud de onda $0.1 \text{ \AA} < \lambda < 100 \text{ \AA}$
- Energía $0.124 \text{ keV} < E < 124 \text{ keV}$ (muy energético y peligroso)
- Son las frecuencias de transición entre capas de átomo.
- Se utilizan en medicina para radiodiagnóstico.
- Existen microscopios de rayos X.

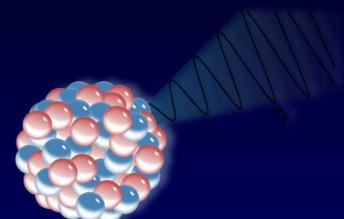


Hard X	$0.1 - 1 \text{ \AA}$
Soft X	$1 - 100 \text{ \AA}$

Rayos gamma



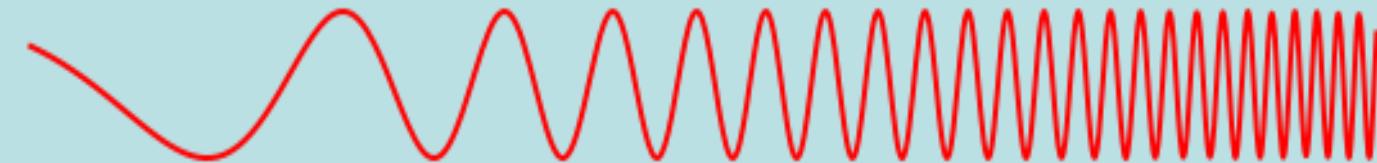
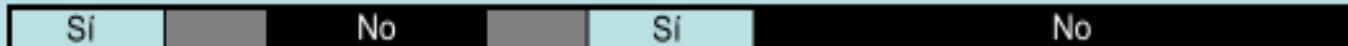
Frecuencia de onda $f > 3 \times 10^{19}$ Hz



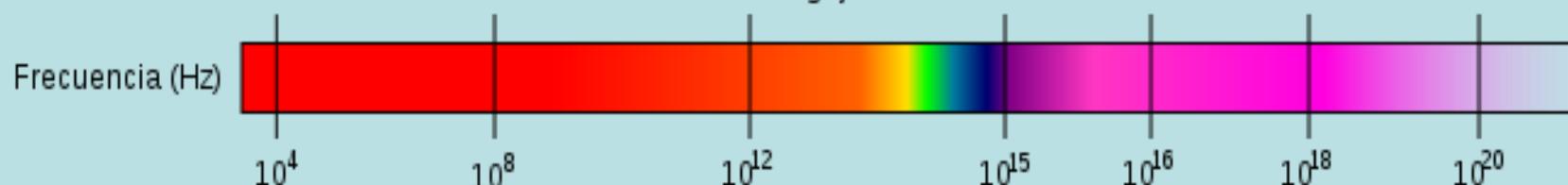
- Longitud de onda $\lambda = c/f < 10^{-11} m = 0.1 \text{ \AA}$, comparable con el radio de Bohr (dimensión típica de un átomo!) $a_0 = \hbar^2 / k m_e e^2 = 0.52 \times 10^{-10} \text{ m}$
- Energía $E = hf > 0.124 \text{ MeV}$ (muy energético y peligroso)
- Son emitidas por partículas que están sujetas a transiciones dentro del núcleo atómico.
- Es muy difícil observar fenómenos ondulatorios en esta parte del espectro electromagnético.

Diagrama del espectro

¿Penetra la atmósfera terrestre?



Tipo de radiación	Radio	Microondas	Infrarrojo	Visible	Ultravioleta	Rayos X	Rayos gamma
Longitud de onda (m)	10^3	10^{-2}	10^{-5}	$0,5 \times 10^{-6}$	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}



Temperatura de los objetos en los cuales la radiación con esta longitud de onda es la más intensa

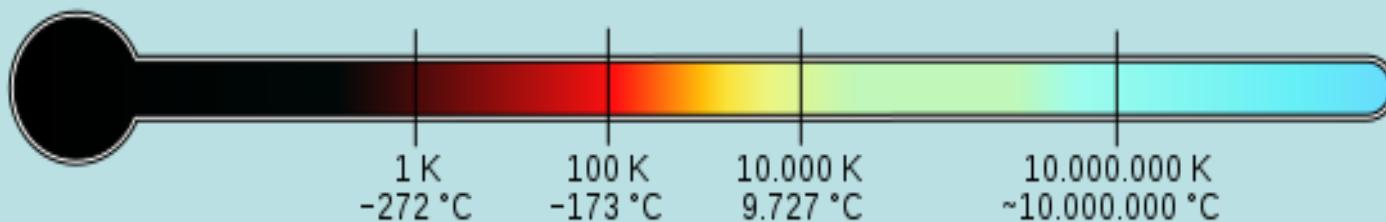
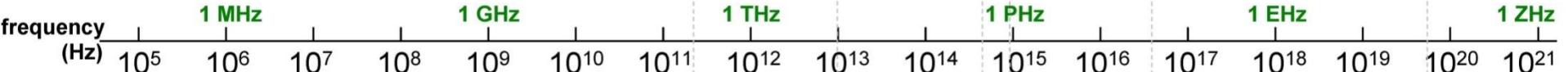
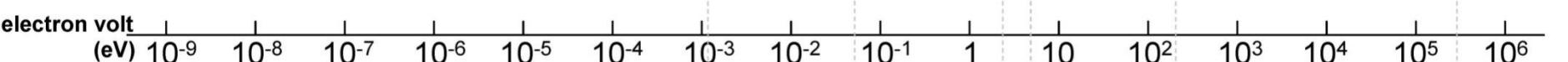
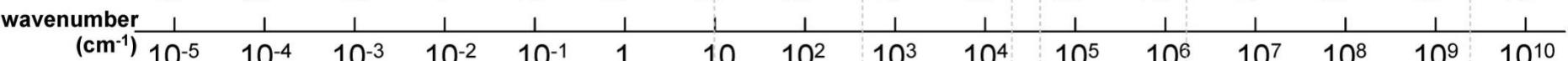
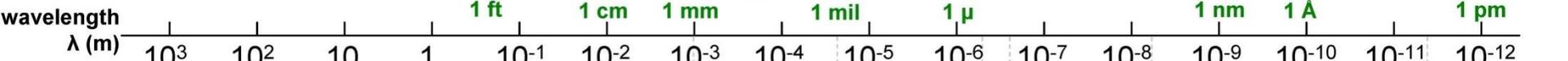


Chart of the Electromagnetic Spectrum

Size reference



Sources and Uses of Frequency Bands



AM radio
600kHz-1.6MHz



FM radio
88-108 MHz



Mobile Phones
900MHz-2.4GHz



Radar
1-100 GHz



TV Broadcast
54-700 MHz



Wireless Data
~ 2.4 GHz



Ultrasound
1-20 MHz



Microwave Oven
2.4 GHz

electronics



Bio imaging
1-10 THz



Screening
0.2-4.0 THz
"mm wave"
"sub-mm"

optics



Fiber telecom
0.7-1.4 μ



Visible Light
425-750THz
700-400nm



Remotes
850 nm



Night Vision
10-0.7 μ



Suntan
400-290nm

λ = 3x10⁸/freq = 1/(wn*100) = 1.24x10⁻⁶/eV



Dental Curing
200-350nm



Medical X-rays
10-0.1 Å



Baggage screen
10-1.0 Å



PET imaging
0.1-0.01 Å

Crystallography
2.2-0.7 Å



cells
bacteria



viruses



water molecule



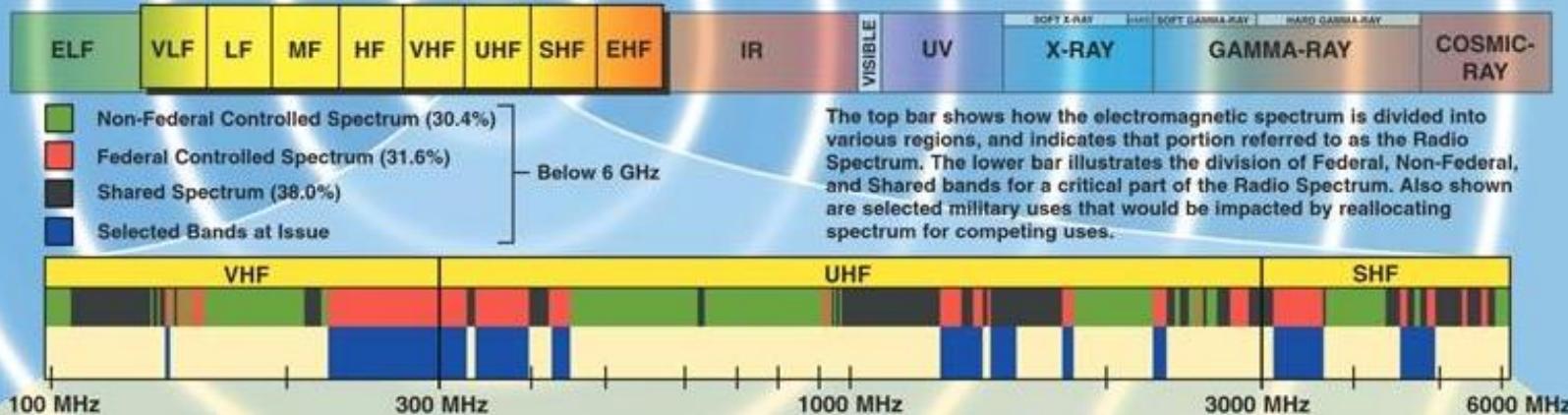
atom



subatomic particles →

Electromagnetic Spectrum

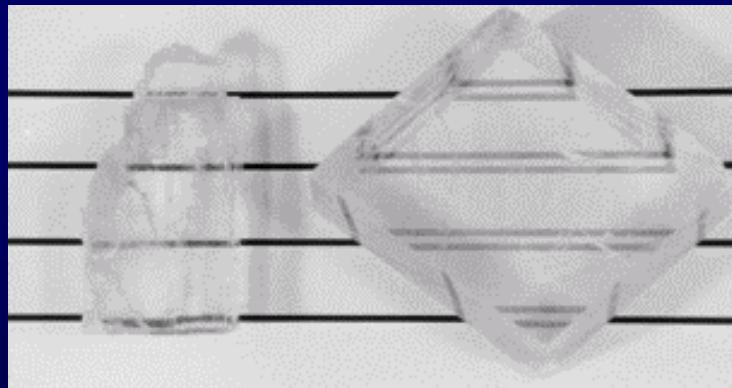
THE RADIO SPECTRUM



Problema 10

4.5 Polarización. Pantallas de cristal líquido.

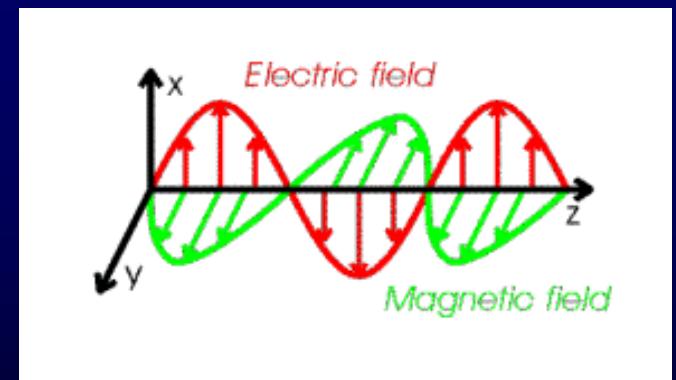
Un fenómeno que comprueba la naturaleza ondulatoria de la luz es el fenómeno de la polarización.



Ondas transversales y polarización

- Cuando una onda es longitudinal, las partículas vibran en la misma dirección de propagación de la onda; tal es el caso del sonido.
- Si el movimiento ondulatorio es transversal, las partículas vibran perpendicularmente en cualquiera de las direcciones de propagación de la onda.

- Onda **electromagnética** es una onda transversal.



- Si se logra que todas las partículas vibren en una misma dirección, se dice que el movimiento ondulatorio transversal está polarizado linealmente.

Campo eléctrico

El campo eléctrico de una onda plana es de la forma:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega \cdot t)}$$

- Se puede descomponer la amplitud de la onda como suma de un vector paralelo al plano de incidencia y otro vector perpendicular a dicho plano:

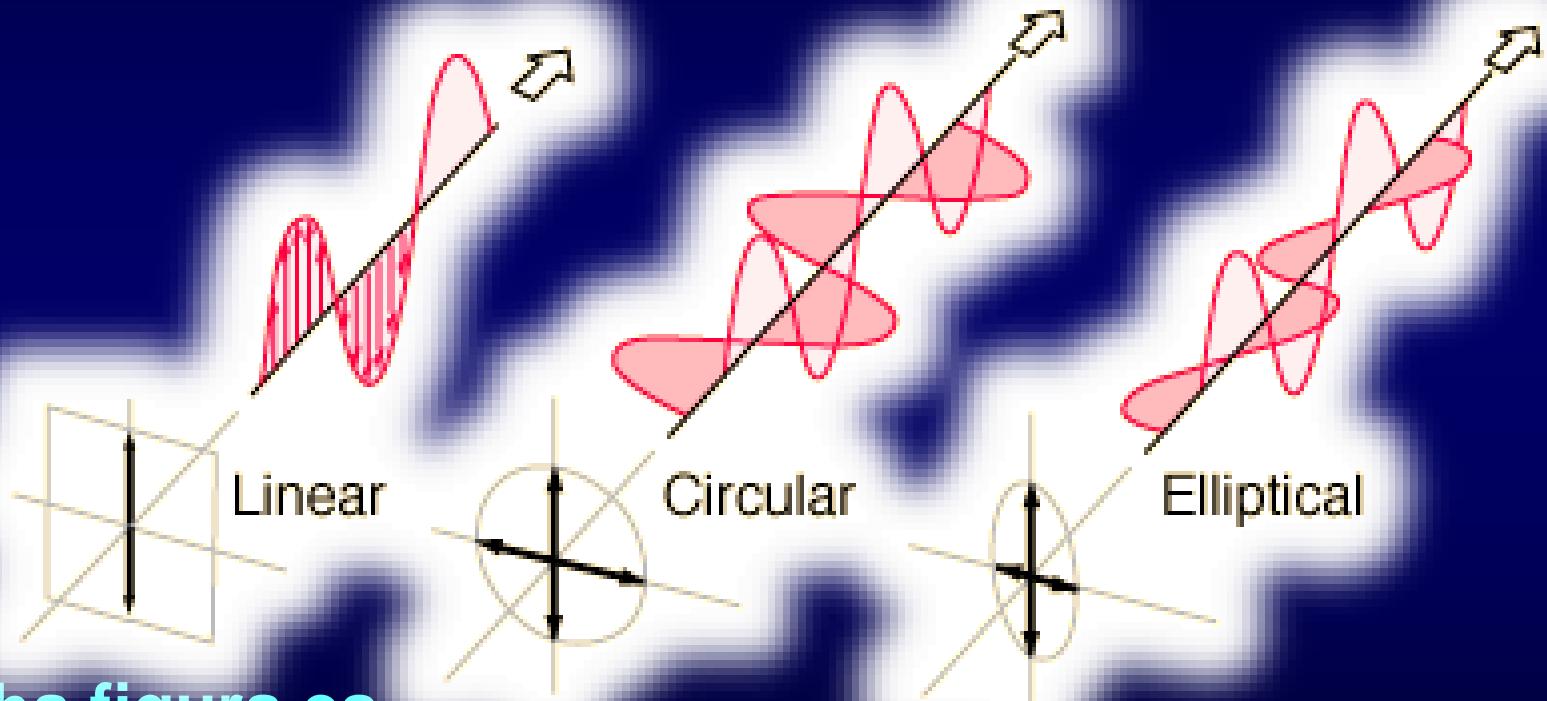
$$\vec{E}_0 = E_{0\parallel} \cdot e^{i \cdot \theta_{\parallel}} \cdot \vec{u}_{\parallel} + E_{0\perp} \cdot e^{i \cdot \theta_{\perp}} \cdot \vec{u}_{\perp}$$

Según el valor de la diferencia de fase $\Delta\theta = \theta_{\parallel} - \theta_{\perp}$:

- Polarización lineal si la diferencia de fase es 0 o π
- Polarización circular si la diferencia de fase es $\pi/2$ o $3/2 \pi$ y, además, $E_{0\parallel} = E_{0\perp}$
- Polarización elíptica en el resto de casos

Tipos de polarización

Las dos componentes vectoriales transversales varían su amplitud con el tiempo, y la suma de ambas va trazando una figura geométrica.

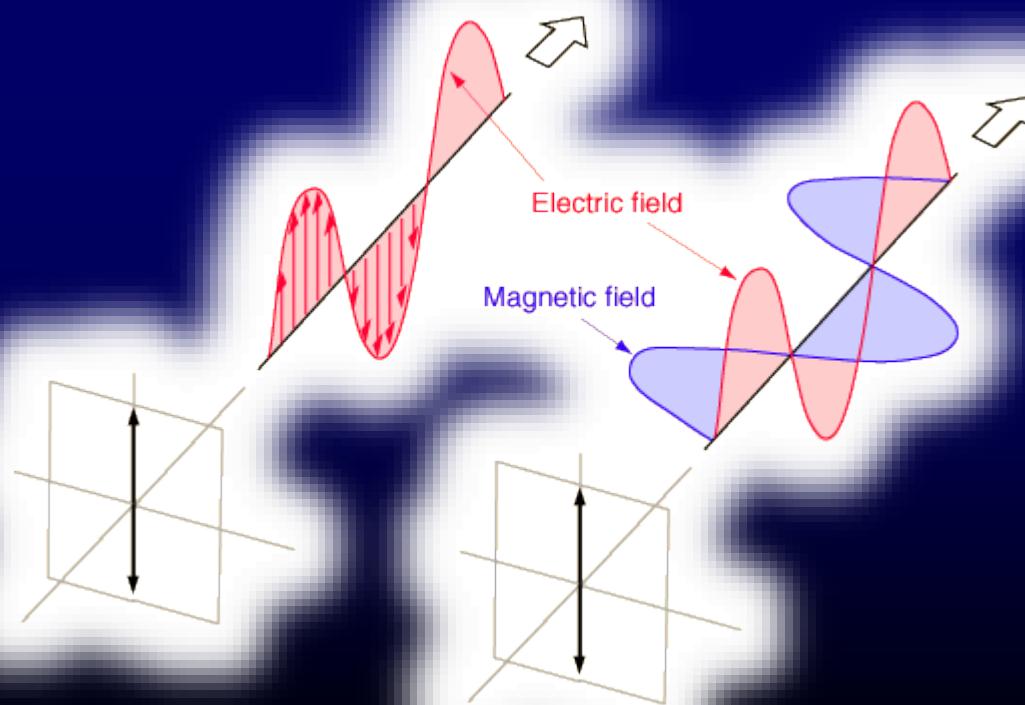


Si dicha figura es

- una recta, la polarización se denomina lineal
- un círculo, la polarización es circular
- una elipse, la polarización es elíptica

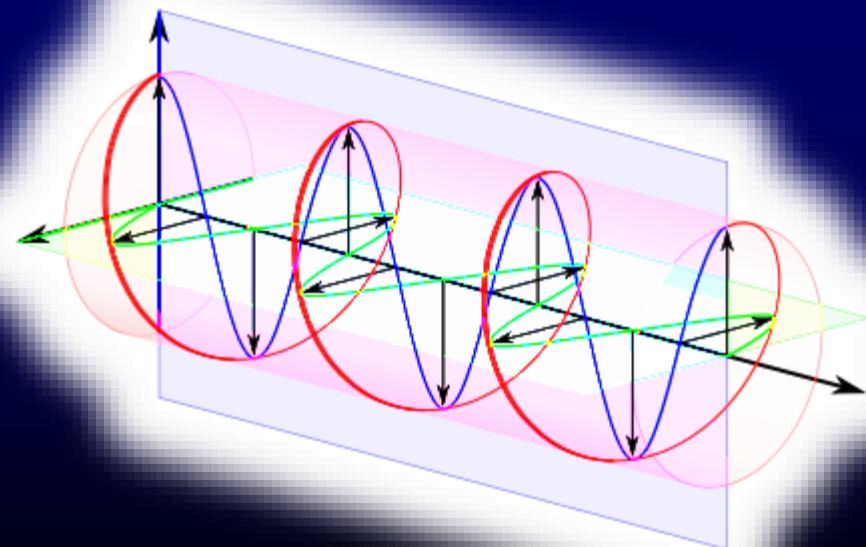
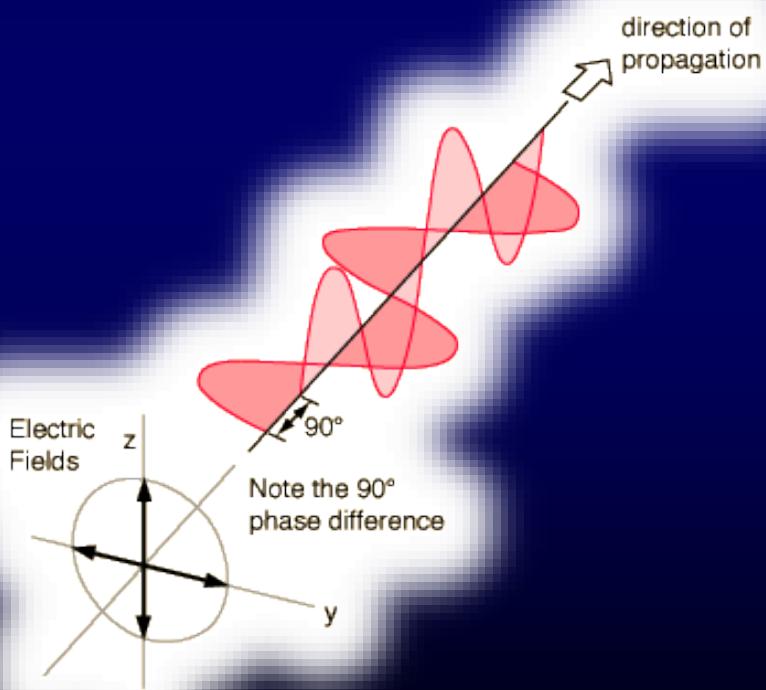
Polarización lineal

- Polarización lineal: los campos se propagan manteniendo su dirección vectorial.
- El campo magnético oscila en la dirección perpendicular respecto la del campo eléctrico



Polarización circular

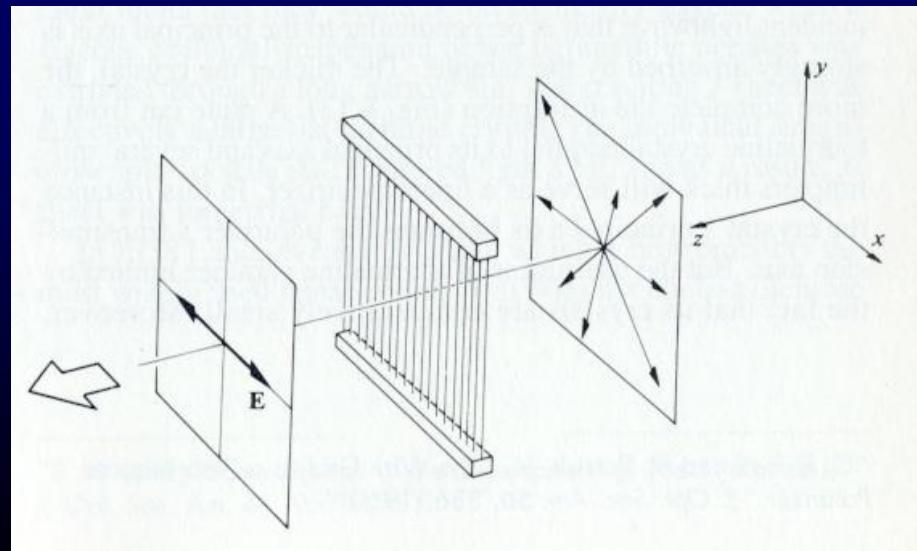
En un caso especial, cuando la trayectoria trazada en el plano por la punta del vector de campo eléctrico tiene la forma de una circunferencia, por lo que en este caso se habla de polarización circular.



Filtros de polarización lineal: concepto

Al colocar una reja de madera como la marcada con el número uno, las rejillas verticales sólo permitirán el paso de las vibraciones que van de arriba hacia abajo;

- La onda se ha convertido en polarizada plana, pues todas sus vibraciones están en un solo plano y en nuestro caso es el vertical.
- Cuando la vibración pasa a la reja número dos de rejillas horizontales, el movimiento deja de ser ondulatorio.



Filtros de polarización lineal: uso

La luz se puede polarizar por

- reflexión,
- doble refracción
- absorción selectiva.

Ejemplo: la luz reflejada por la arena de una playa se encuentra parcialmente polarizada en el plano horizontal, poniendo un filtro polarizador se puede suprimir los rayos que están polarizados horizontalmente.

Los filtros polarizados pueden impedir el deslumbramiento reflejado en las carreteras o en el pavimento.

Efecto del primer polarizador

Consideramos un filtro polarizador orientado en la dirección horizontal. El filtro deja pasar solo la componente horizontal de una onda eléctrica:

$$\vec{E}_{out} = \vec{E}_{||}$$

- La onda en la entrada puede ser descompuesta en la dirección paralela y perpendicular al filtro:

$$\vec{E}_{in} = E_{||} \cdot \vec{u}_{||} + E_{\perp} \cdot \vec{u}_{\perp}$$

- En el caso $E_{||} = E_{\perp}$ la amplitud en la entrada es

$$E_0 = \sqrt{E_{||}^2 + E_{\perp}^2} = \sqrt{2}E_{||}$$

- La amplitud disminuye de factor $\sqrt{2}$

- La energía $\eta = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_0^2$ disminuye de factor $1/2$

Efecto del segundo polarizador

Cuando una luz polarizada pasa por un polarizador ese deja pasar solo la componente de la misma dirección

$$\vec{E}_{out} = \vec{E}_{||}$$

- Se el ángulo entre el eje del polarizador y el eje de polarización de la luz incidente es α

$$\vec{E}_{in} = E_0 \cos(\alpha) \cdot \vec{u}_{||} + E_0 \sin(\alpha) \cdot \vec{u}_{\perp}$$

- La amplitud del campo eléctrico disminuye de factor $|\vec{E}_{out}/\vec{E}_{in}| = \cos(\alpha)$
- La energía del campo disminuye de factor $\eta_{out}/\eta_{in} = \cos^2(\alpha)$

Ley de Malus

- un rayo de luz polarizado linealmente, que atraviesa un polarizador perfecto
- la intensidad de un rayo de luz polarizado linealmente, que atraviesa un polarizador perfecto equivale

$$I_{out} = I_{in} \cos^2(\alpha)$$

- Tiene nombre de Ley de Malus
- Descubierta por el físico francés Étienne-Louis Malus
- En un campo aleatorio $I_{out} = I_{in} \langle \cos^2(\alpha) \rangle = \frac{1}{2} I_{in}$

Efecto de N polarizadores

- un rayo de luz polarizado linealmente, que atraviesa N polarizadores perfectos cada de cual gira la luz del ángulo $90 / N$
- la intensidad de la luz en la salida

$$I_{out} = I_{in} \cos^{2N}(90/N)$$

- Limite de N grande

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \cos^{2N}(const/N) = 1$$

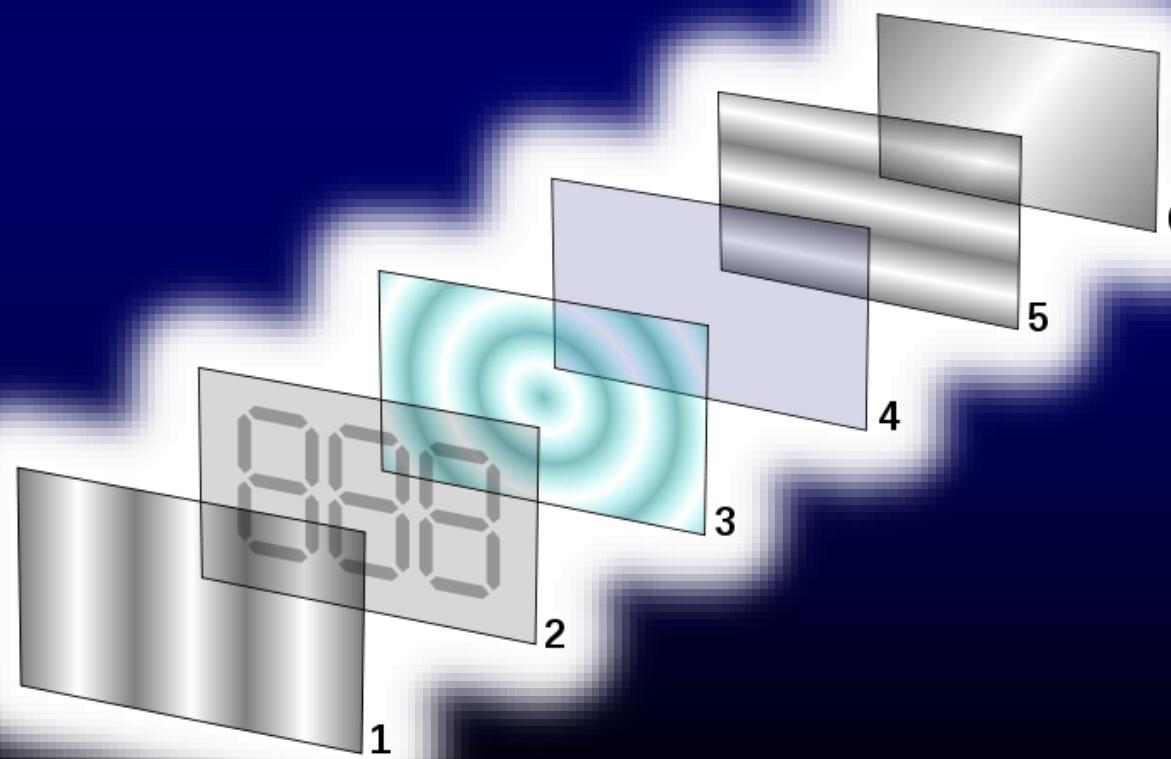
- Se puede girar la polarización sin perdidas en la intensidad!

$$I_{out} = I_{in}$$

Problemas 14, 15

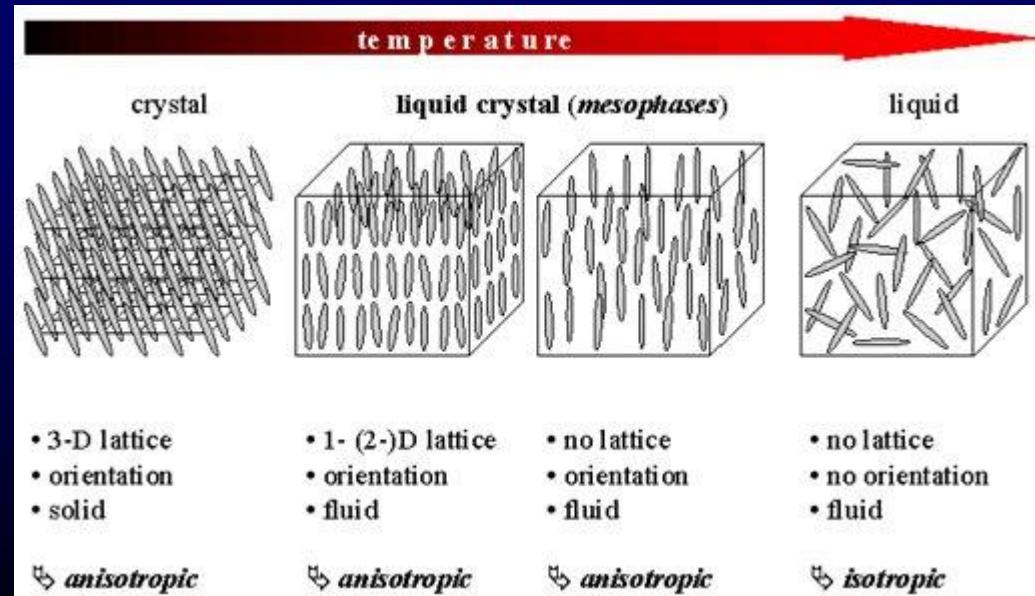
Pantallas de cristal líquido

Una pantalla de cristal líquido o LCD (sigla del inglés *liquid crystal display*) es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora



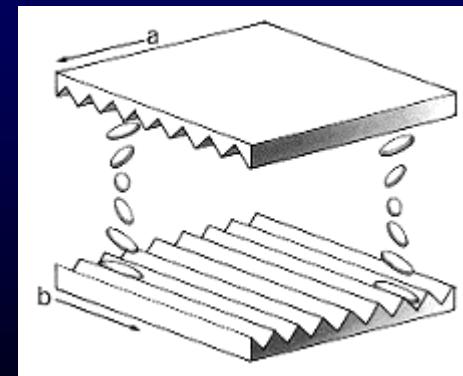
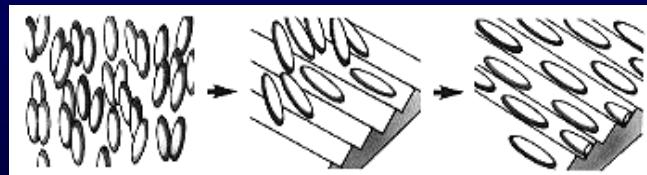
Cristales líquidos

- En el estado sólido, las moléculas tienden a mantener su orientación y posición siempre de la misma forma.
- El estado líquido se caracteriza porque las moléculas cambian su orientación y se mueven a través del líquido.
- En el cristal líquido, las moléculas mantienen su orientación pero se pueden mover a otras posiciones.



Pantallas de cristal líquido

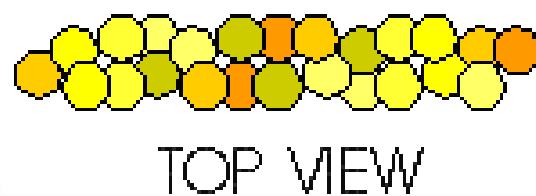
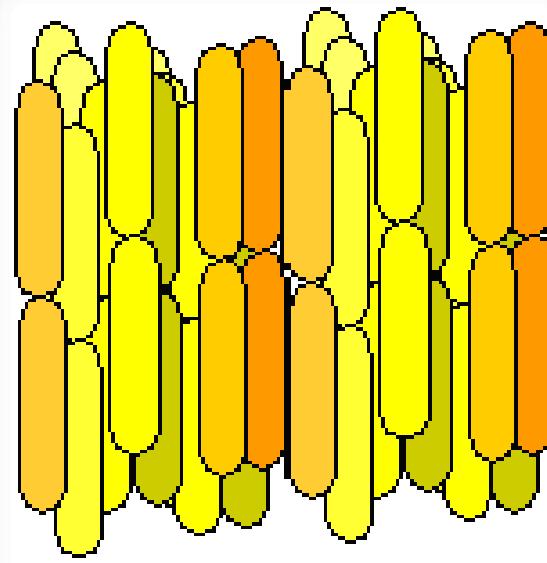
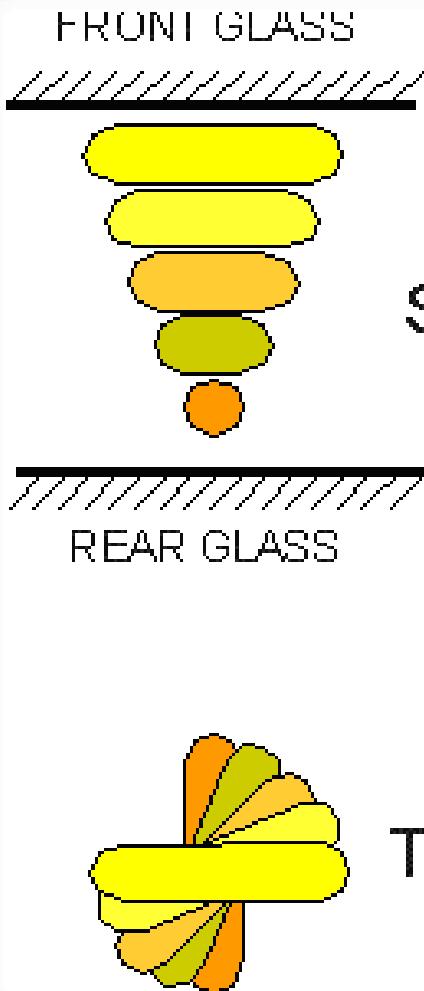
- Las moléculas de cristal líquido necesitan ser alineadas para permitir que la luz se refracte a lo largo de la cadena y alcanzar el otro lado.
- Mediante el anclaje de las moléculas del cristal a cada lado de la pantalla mediante canales en el vidrio, su estado natural crea las alineaciones necesarias.



Pantallas de cristal líquido

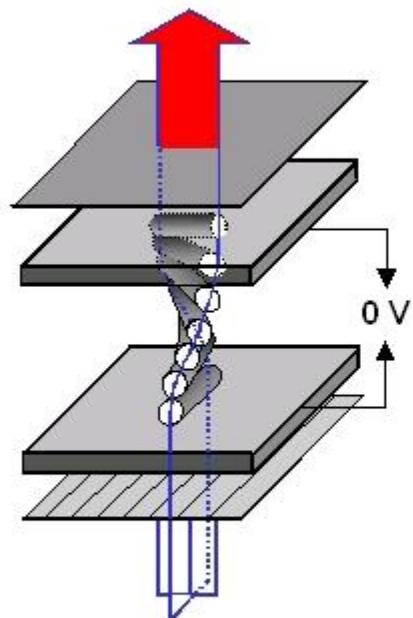
- Cuando se aplica una corriente a cualquier elemento de la pantalla, las moléculas pierden la alineación necesaria, de forma que cualquier luz es bloqueada por el polarizador opuesto.
- El color se produce de forma similar a los CRTs, con celdas individuales de cristal líquido para el rojo, verde y azul.
- A diferencia con el fósforo, que emite luz, el cristal líquido filtra la luz, permitiendo el paso sólo a los colores correspondientes.

Pantallas de cristal líquido

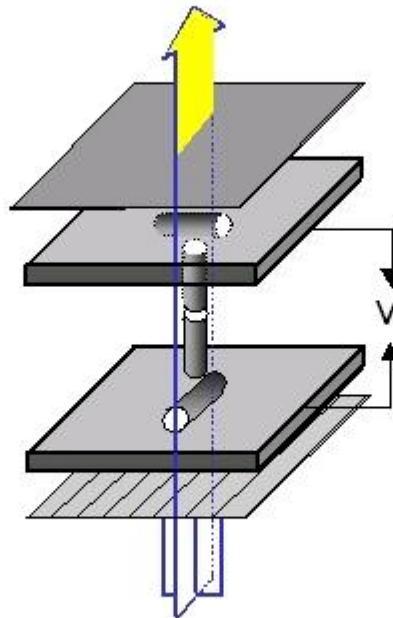


Pantallas de cristal líquido

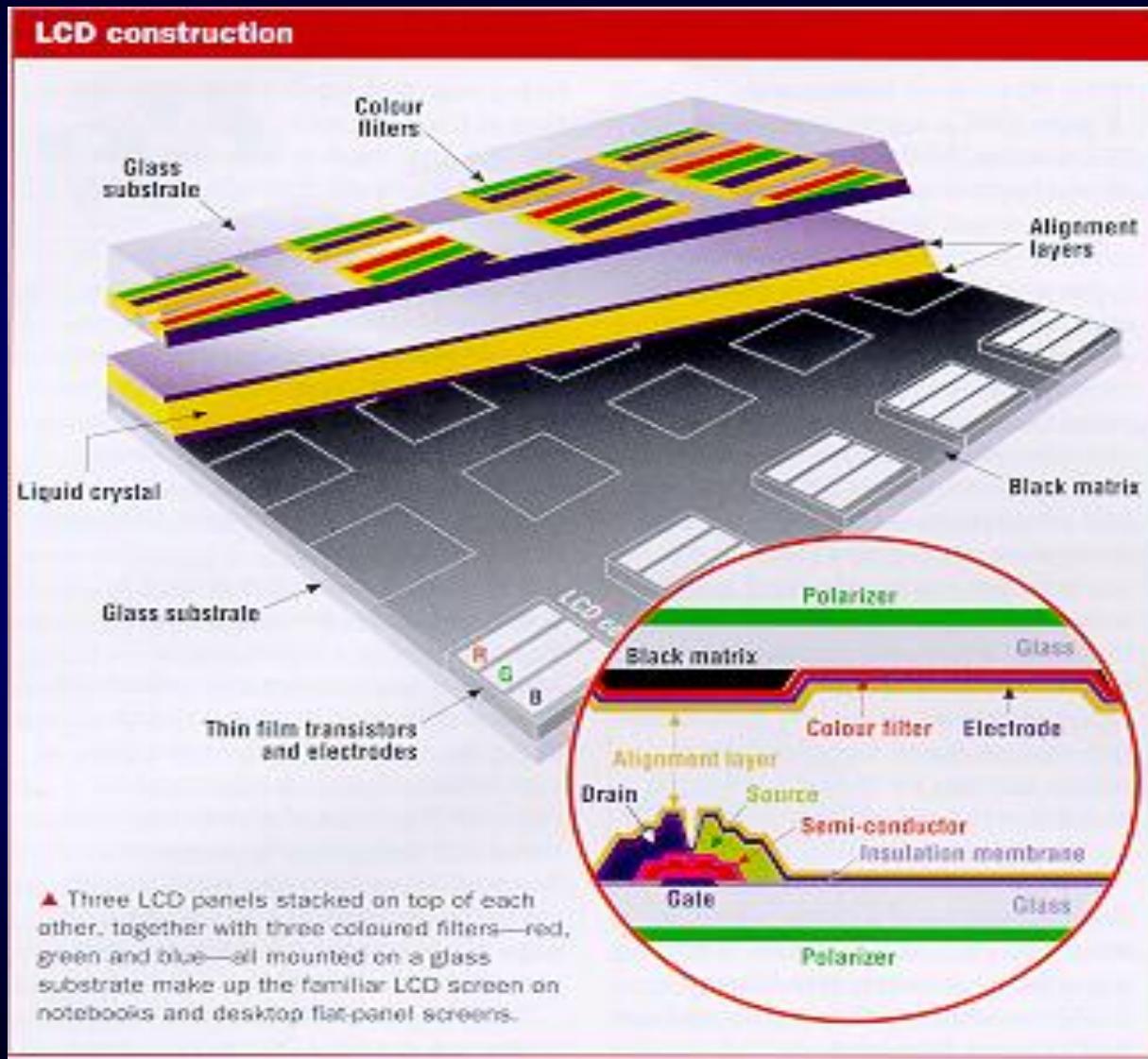
Light transmission



Light transmission



Pantallas de cristal líquido

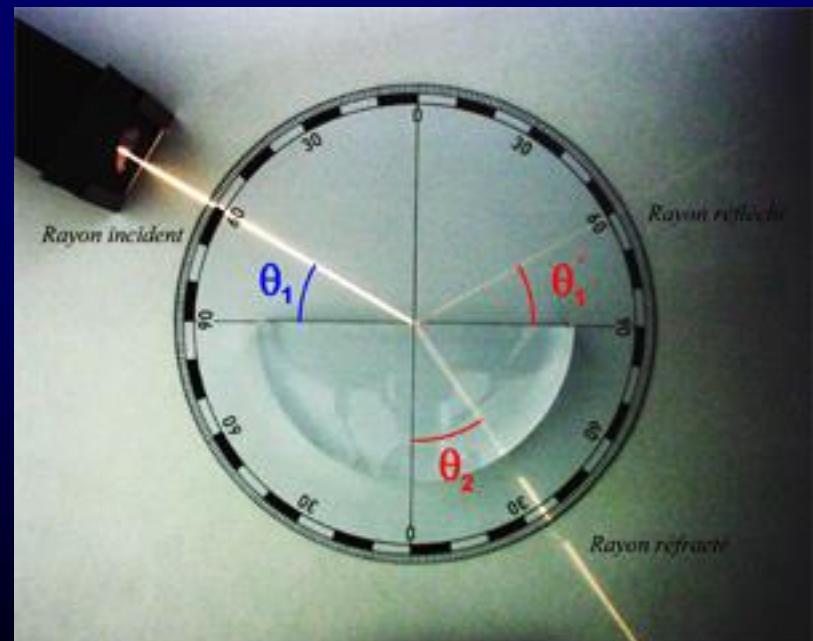


Problema 3 de exam. parcial 10.01.2012

4.6 Reflexión y refracción. Fibras ópticas.

Cuando una onda alcanza la superficie de separación de dos medios de distinta naturaleza se producen, en general, dos nuevas ondas,

- una que retrocede hacia el medio de partida
- otra que atraviesa la superficie límite y se propaga en el segundo medio.
- El primer fenómeno se denomina reflexión
- y el segundo recibe el nombre de refracción.



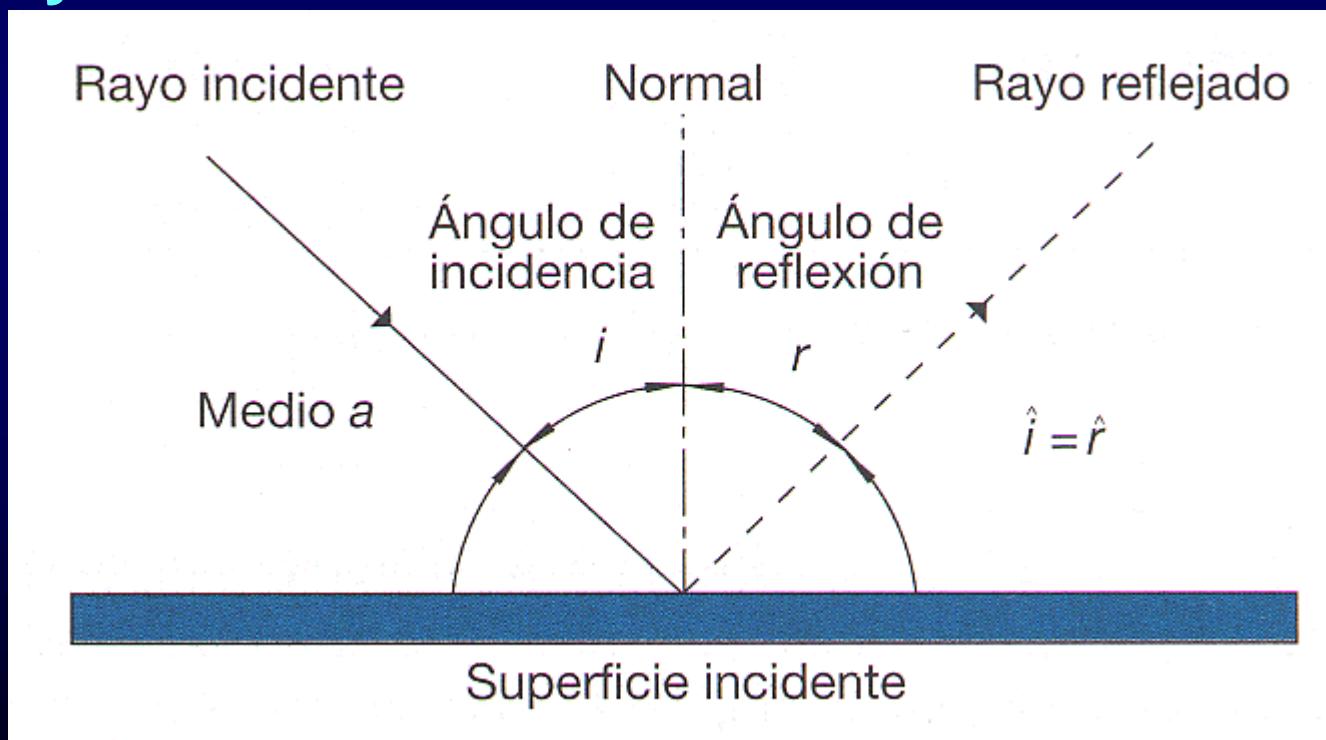
Reflexión

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.

- **Se llama plano de incidencia al formado por el rayo incidente justo antes de la superficie de separación y la normal en el punto de incidencia.**
- 1) Los rayos reflejado y refractado se encuentran en el plano de incidencia.**
 - 2) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.**

Reflexión

- El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal.
- El ángulo de reflexión es el que forma entre el rayo reflejado y la normal.



El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Reflexión



Índice de refracción

El índice de refracción ***n*** es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo.

- está definido como el cociente de la velocidad ***c*** de un fenómeno ondulatorio como luz o sonido en el de un medio de referencia respecto a la velocidad de fase ***V*** en dicho medio.

$$n = V / c$$

Índice de refracción

El índice de refracción n es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo.

- está definido como el cociente de la velocidad c de un fenómeno ondulatorio como luz o sonido en el de un medio de referencia respecto a la velocidad de fase V en dicho medio.
- Homogéneos e isótropos $n - const \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Vacío} \\ \text{Lentes ópticas} \\ \text{Cristales cúbicos} \end{array} \right.$
- Anisótropos n , depende de la dirección \rightarrow cristales
- Heterogéneos n varía de un punto a otro \rightarrow aire

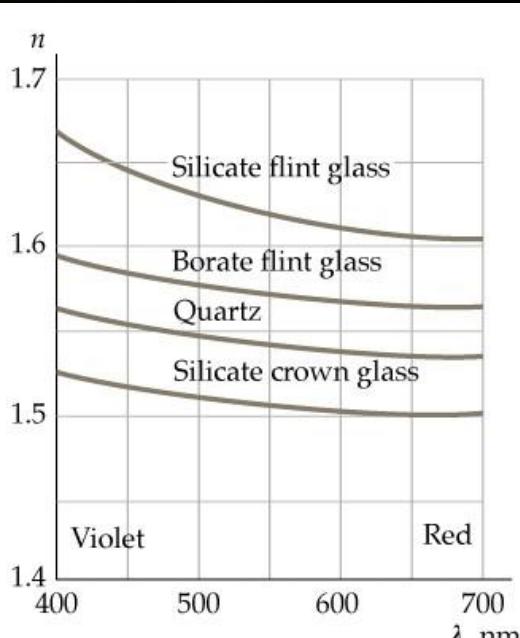
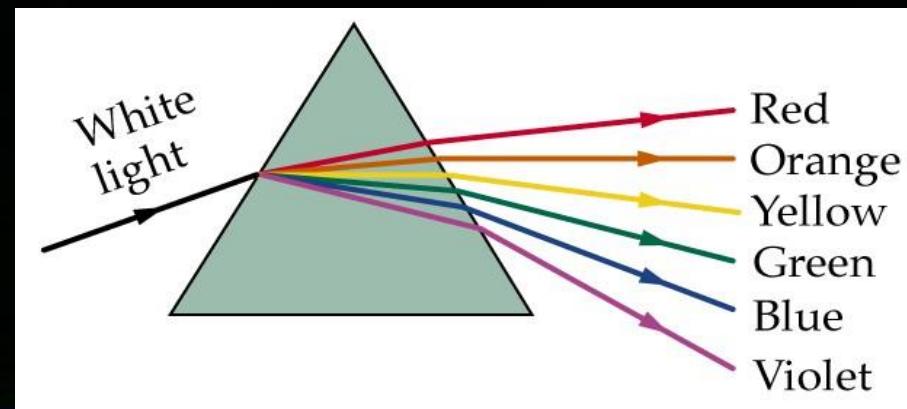
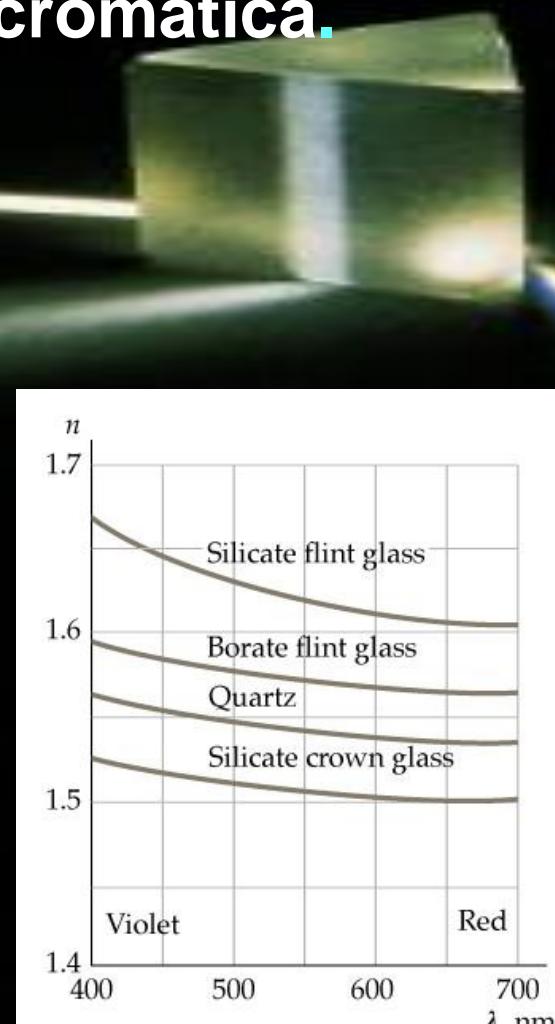
Dependencia del medio

El índice de refracción depende del medio transparente por donde viaja la luz.

Medium	Refractive index
Vacuum	1
Air	1.00
Water	1.33
Alcohol	1.36
Sugar solution (80%)	1.49
Perspex	1.50
Glass	1.50–1.70
Diamond	2.42

Dependencia de la frecuencia

El índice de refracción depende de la longitud de onda de la luz y este hecho se conoce como dispersión cromática.



Atravesando de un medio a un otro.

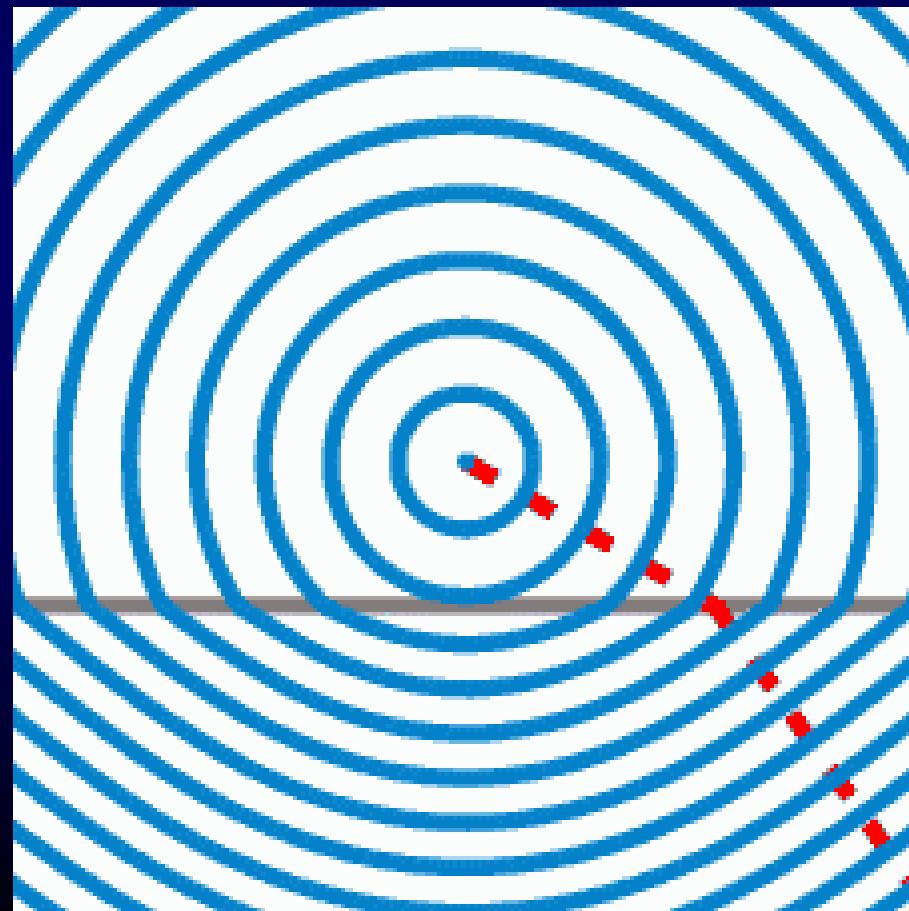
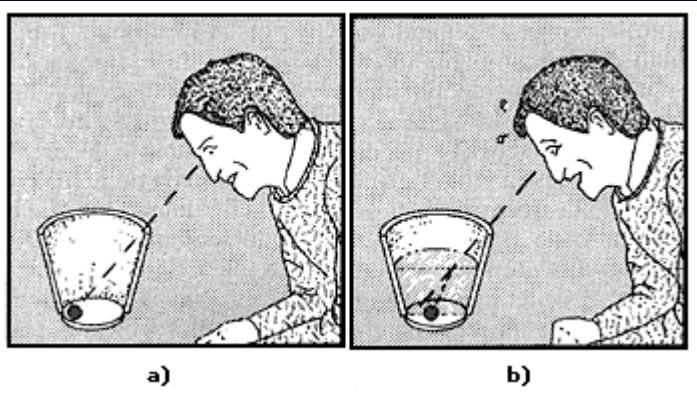
Una onda (o luz) cruzando la frontera con otro medio cambia algunas características y mantiene otras:

- f – frecuencia (color) se mantiene
- $T=1/f$ – periodo se mantiene
- V – velocidad de la onda (o luz) cambia.
Entrando desde el vacío (velocidad de luz c) cambia $n=c/V$ veces (velocidad en medio más lenta).
- $\lambda' = V T = (c T) / n = \lambda / n$ – longitud de onda cambia $n=c/V$ veces (longitud en medio más pequeña).

Problema 17

Refracción

La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a un otro de distinta densidad óptica.

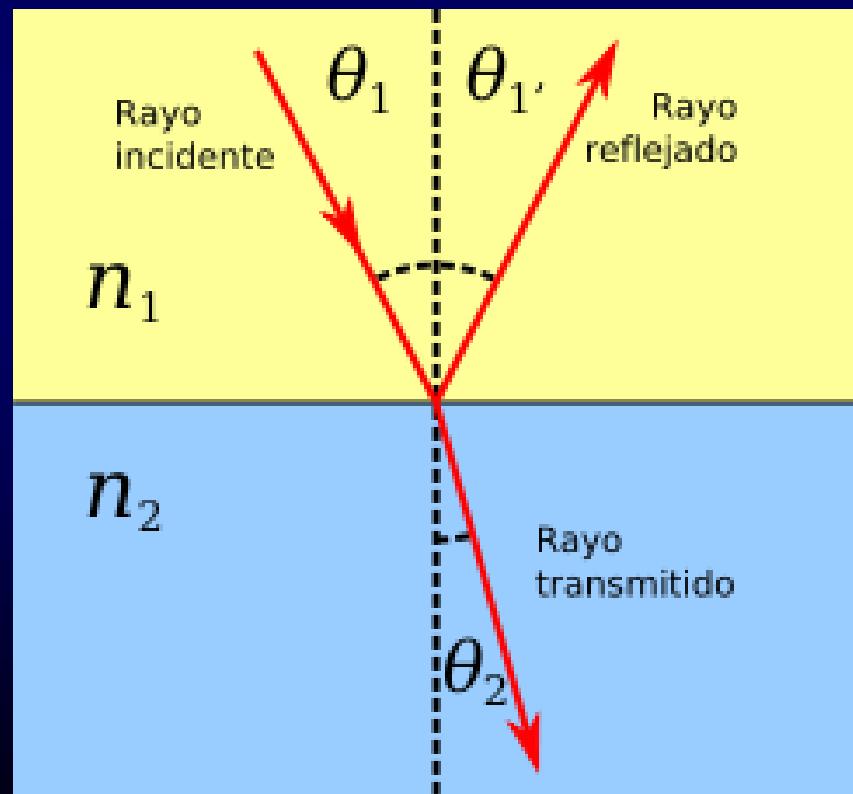


Leyes de la refracción

- 1) El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en un mismo plano.
- 2) La refracción cumple la ley de Snell:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

- θ_1 - ángulo incidente
- θ_2 - ángulo transmitido
- n_1 - índice de refracción del primer medio.
- n_2 - índice de refracción del segundo medio.



Reflexión interna total

Reflexión interna total es el fenómeno que se produce cuando un rayo de luz, atraviesa un medio de índice de refracción n_2 menor que el índice de refracción n_1 en el que éste se encuentra, se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente.

- solo se produce para ángulos de incidencia superiores a un cierto valor crítico, θ_c .
- La reflexión interna total solamente ocurre en rayos viajando de un medio de alto índice refractivo hacia medios de menor índice de refracción.



Ángulo crítico

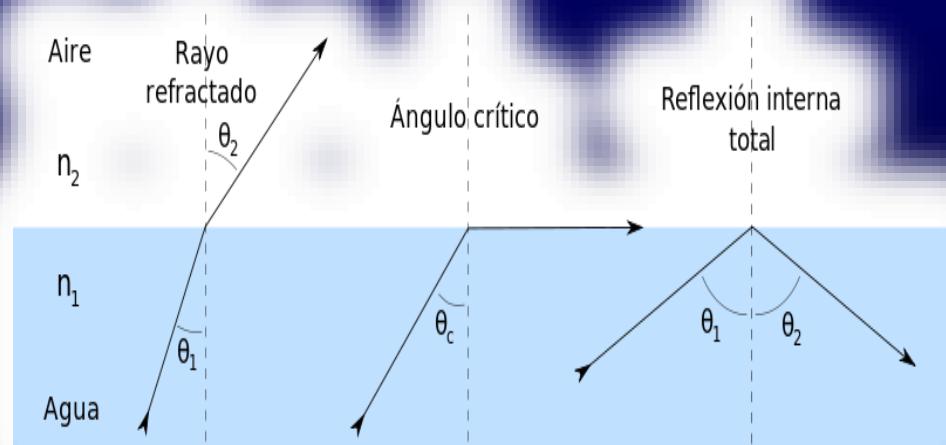
El ángulo crítico o ángulo límite también es el ángulo mínimo de incidencia en el cual se produce la reflexión interna total.

El ángulo crítico viene dado por:

$$\theta_c = \arcsin (n_2 / n_1),$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios con $n_2 < n_1$.

Esta ecuación se obtiene desde la ley de Snell por el ángulo de refracción de 90°.



Fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos

- un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir.
- El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el interior de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell.
- La fuente de luz puede ser láser o un LED.

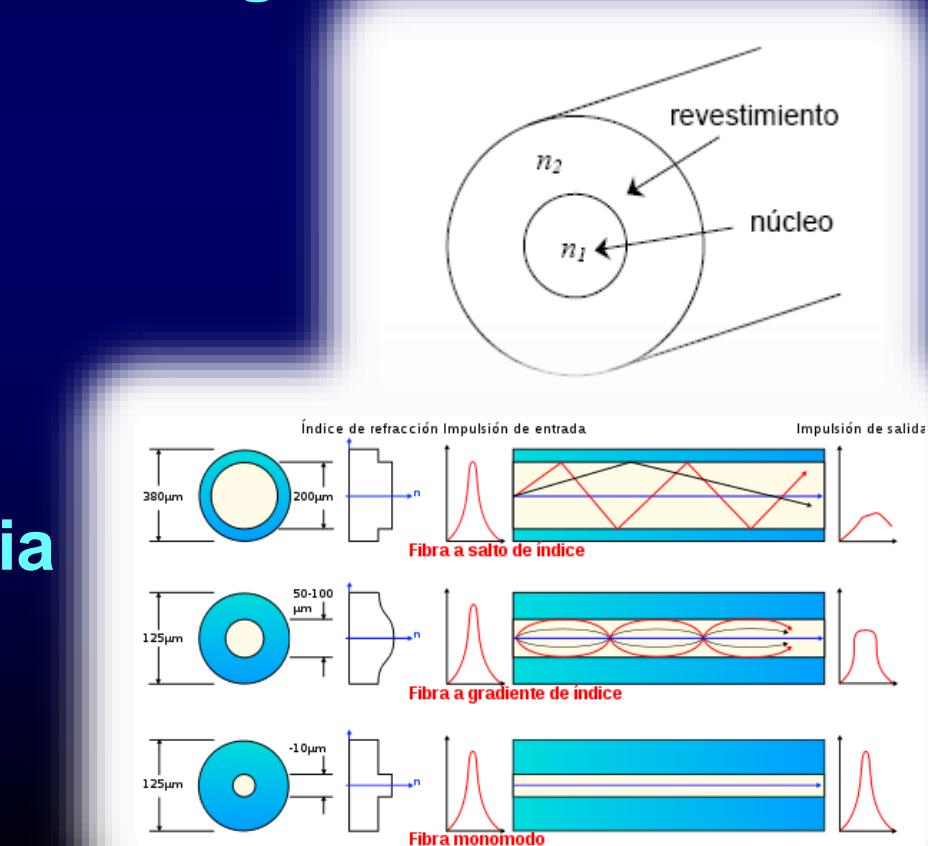


Fibra óptica: características

Cada filamento consta de un núcleo central de plástico o cristal (óxido de silicio y germanio) con un alto índice de refracción, rodeado de una capa de un material similar con un índice de refracción ligeramente menor.

Cuando la luz llega a una superficie que limita con un índice de refracción menor.

Cuanto el ángulo de incidencia es grande, se habla entonces de reflexión interna total.



Fibra óptica: ventajas

- Una banda de paso muy ancha, lo que permite flujos muy elevados (del orden del GHz).
- Pequeño tamaño, - ocupa poco espacio.
- Gran flexibilidad, el radio de curvatura puede ser inferior a 1 cm, - facilita la instalación enormemente.
- Gran ligereza, el peso es del orden de algunos gramos por kilómetro, - unas nueve veces menos que el de un cable convencional.
- Inmunidad total a las perturbaciones de origen electromagnético, - una calidad de transmisión muy buena, ya que la señal es inmune a las tormentas, chisporroteo...
- No produce interferencias.
- Resistencia al calor, frío, corrosión.
- Con un coste menor respecto al cobre.

Fibra óptica: desventajas

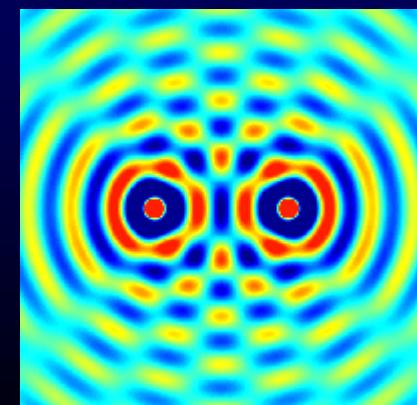
- La alta fragilidad de las fibras.
- Necesidad de usar transmisores y receptores más caros.
- Los empalmes entre fibras son difíciles de realizar, especialmente en el campo, lo que dificulta las reparaciones en caso de ruptura del cable.
- No puede transmitir electricidad para alimentar repetidores intermedios.
- La necesidad de efectuar, en muchos casos, procesos de conversión eléctrica-óptica.
- La fibra óptica convencional no puede transmitir potencias elevadas.
- No existen memorias ópticas.

Problema 21

4.7 Interferencias

La interferencia es un fenómeno en el que dos o más ondas se superponen para formar una onda resultante de mayor o menor amplitud.

- **puede ser observado en cualquier tipo de ondas, como luz, radio, sonido, ondas en la superficie del agua, etc.**



Dos ondas de la misma frecuencia

En la superposición de ondas con la misma frecuencia el resultado depende de la diferencia de fase.

Dos ondas de misma dirección, polarización y frecuencia:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 \sin(kx_1 - \omega t + \varphi_1) = \vec{E}_0 \sin \phi_1$$
$$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 \sin(kx_2 - \omega t + \varphi_2) = \vec{E}_0 \sin \phi_2$$

El principio de superposición:

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2\vec{E}_0 \cos\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)$$
$$= 2\vec{E}_0 \cos\left(\frac{k(x_2 - x_1) + \varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \sin\left(k\frac{(x_1 + x_2)}{2} - \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)$$

Dos ondas de la misma frecuencia

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2\vec{E}_0 \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(k\frac{(x_1+x_2)}{2} - \omega t + \frac{\varphi_1+\varphi_2}{2}\right)$$

La superposición de dos ondas corresponde a propagación de una onda con:

- **la distancia** $\frac{(x_1+x_2)}{2}$
- **la fase** $\frac{\varphi_1+\varphi_2}{2}$
- **la amplitud** $E'_0 = 2E_0 \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)$
- **donde** $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = k(x_2 - x_1) + \varphi_2 - \varphi_1$ **es la diferencia de fase**

La intensidad: proporcional al cuadrado de la amplitud

$$I = \frac{c\varepsilon_0 E'^2_0}{2} \propto 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = 4E_0^2 \frac{(1+\cos \Delta\phi)}{2} = 2E_0^2(1 + \cos \Delta\phi)$$

- **Cambio en la intensidad depende de la diferencia de fase** $I = 2I_0(1 + \cos \Delta\phi)$

Dos ondas de la misma frecuencia

$$I = 2I_0(1 + \cos \Delta\phi)$$

La diferencia de fase está debida a

- **diferencia de fases iniciales** $\Delta\varphi = \phi_2 - \phi_1$
- **diferencia de camino óptico** $\Delta x = x_2 - x_1$

$$\Delta\phi = k\Delta x + \Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} + \Delta\varphi = \frac{2\pi n\Delta x}{\lambda_0} + \Delta\varphi$$

donde

- **n es el índice de refracción del medio**
- **λ_0 es la longitud de la onda en vacío**

Diferencia de fase cambia la amplitud desde

- **$I = 0$ mínima (coseno igual a -1)**
- **$I = 4I_0$ máxima (coseno igual a +1)**

Interferencia constructiva

La interferencia constructiva es una superposición de dos o más ondas de frecuencia diferentes, los cuales al interferirse crean un nuevo patrón de ondas de mayor intensidad (amplitud) .

- La intensidad máxima $I = 4I_0$

- diferencia de fase

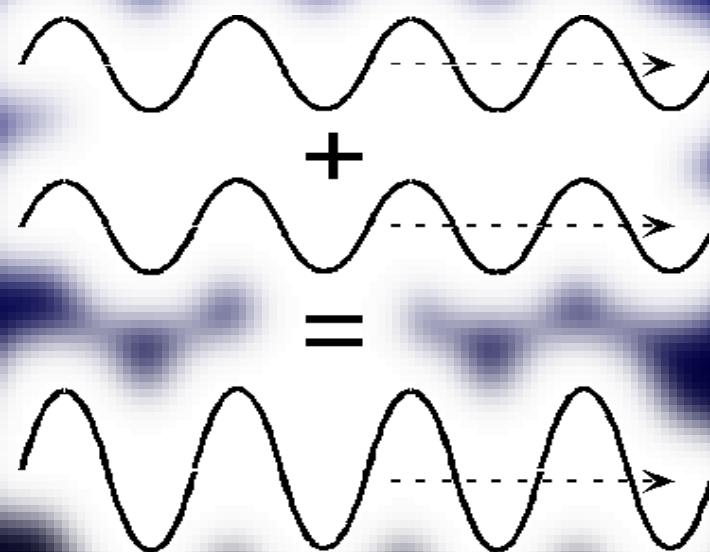
$$\cos \Delta\phi = 1$$

$$\rightarrow \Delta\phi = 2\pi m, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- se fases iniciales son iguales

$$\Delta\varphi = 0$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} = 2\pi m \rightarrow \Delta x = m\lambda$$



Interferencia destructiva

La interferencia destructiva es una superposición de dos o más ondas de frecuencia idéntica o similar que, al interferirse crean un nuevo patrón de ondas de menor intensidad (amplitud) en un punto llamado nodo.

- La amplitud mínima $I = 0$

- diferencia de fase

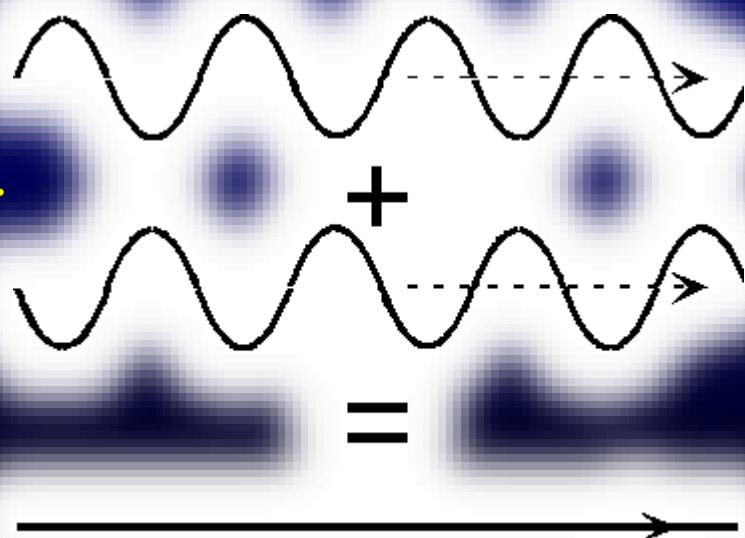
$$\cos \Delta\phi = -1$$

$$\rightarrow \Delta\phi = 2\pi m + \pi, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- se fases iniciales son iguales

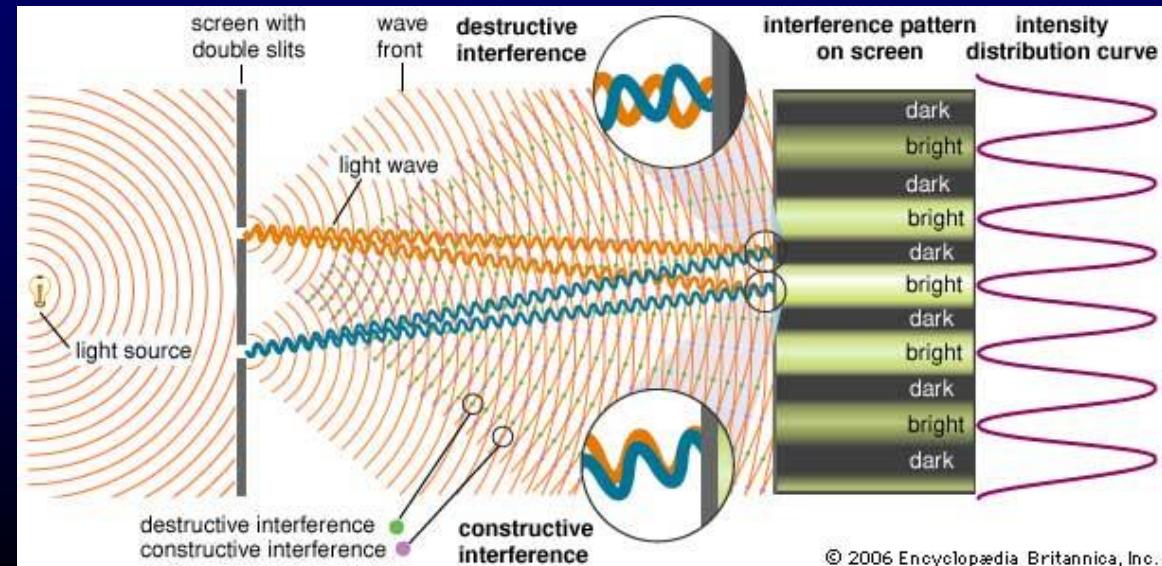
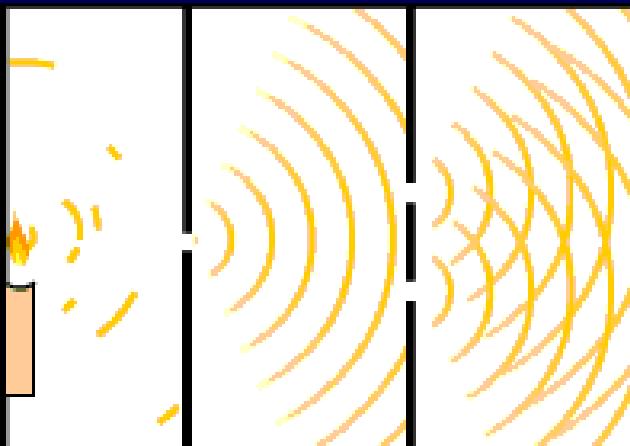
$$\Delta\varphi = 0$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} = \pi(2m + 1)$$
$$\rightarrow \Delta x = (m + 1/2)\lambda$$

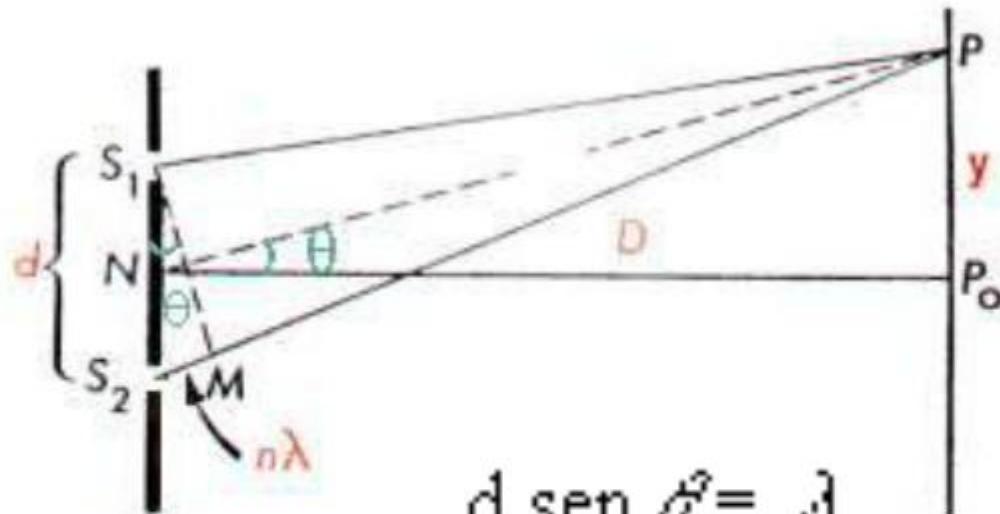


Experimento de la doble rendija

El experimento de Young fue realizado en 1801 por Thomas Young, en un intento de discernir sobre la naturaleza corpuscular u ondulatoria de la luz. Young comprobó un patrón de interferencias en la luz procedente de una fuente lejana al difractarse en el paso por dos rejillas, resultado que contribuyó a la teoría de la naturaleza ondulatoria de la luz.



Experimento de la doble rendija



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

$$d \tan \theta = \lambda$$

$$d \frac{y}{D} = \lambda$$

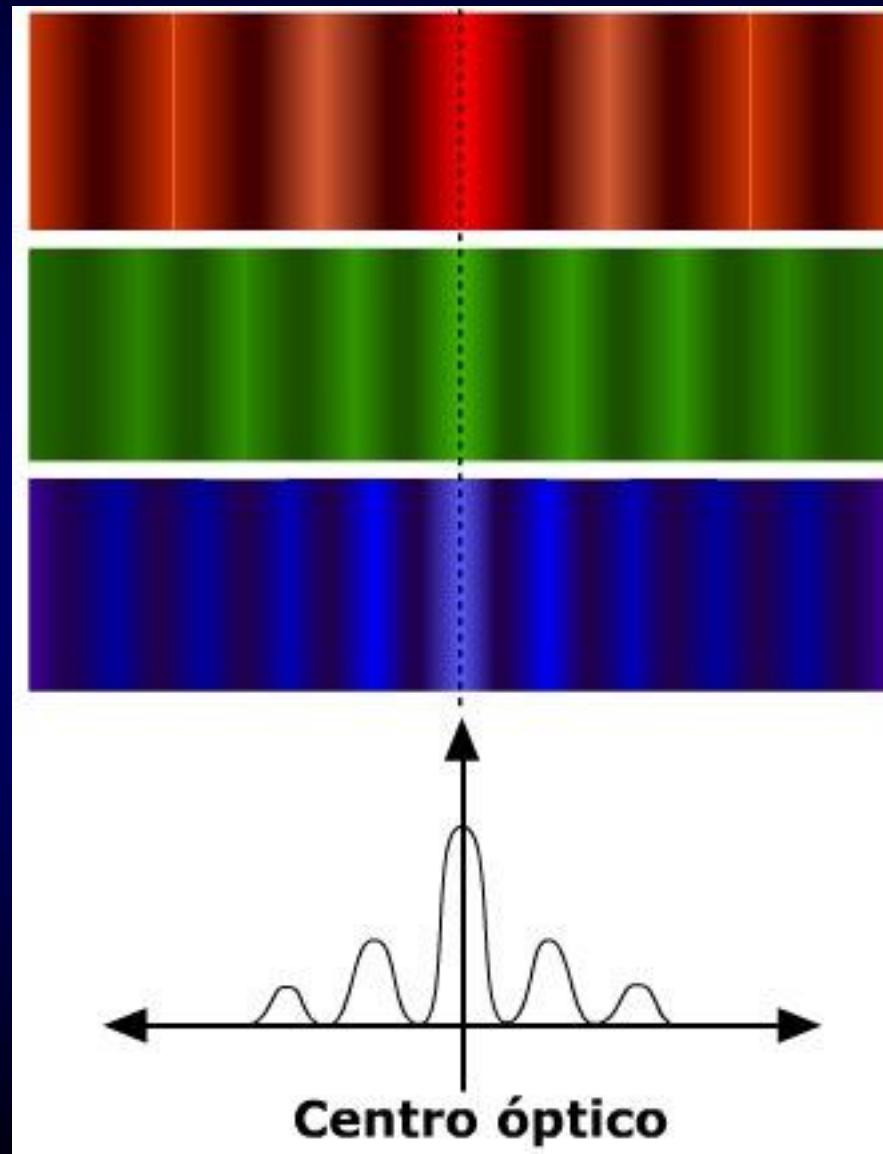
1.Triangulo

$$\tan \theta = \frac{\Delta r}{d} = \frac{\lambda}{d}$$

2.Triangulo

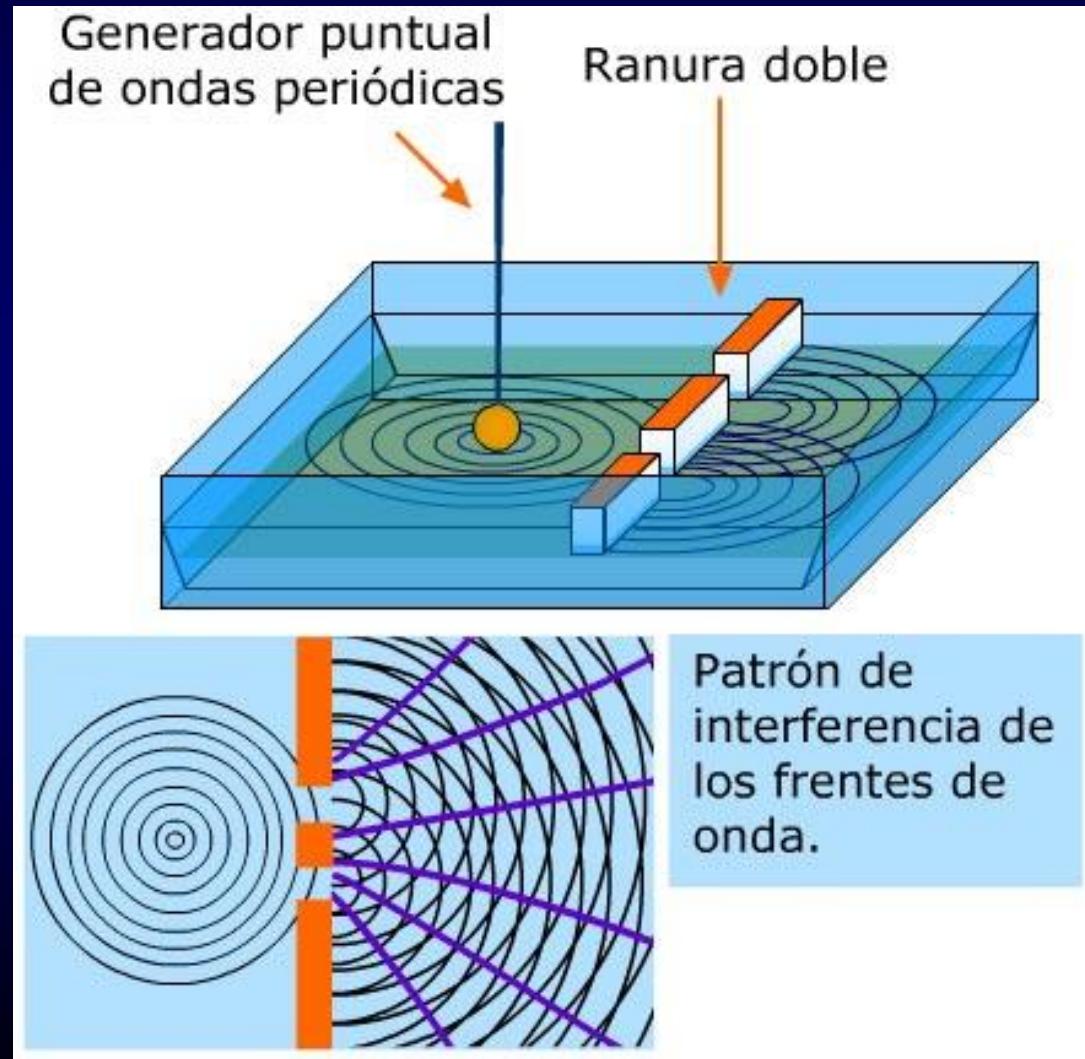
$$\tan \theta = \frac{y}{D}$$

Patrones de interferencia



Interferencia en un sistema mecánico

Modelo ondulatorio de la luz: comparación con un sistema mecánico

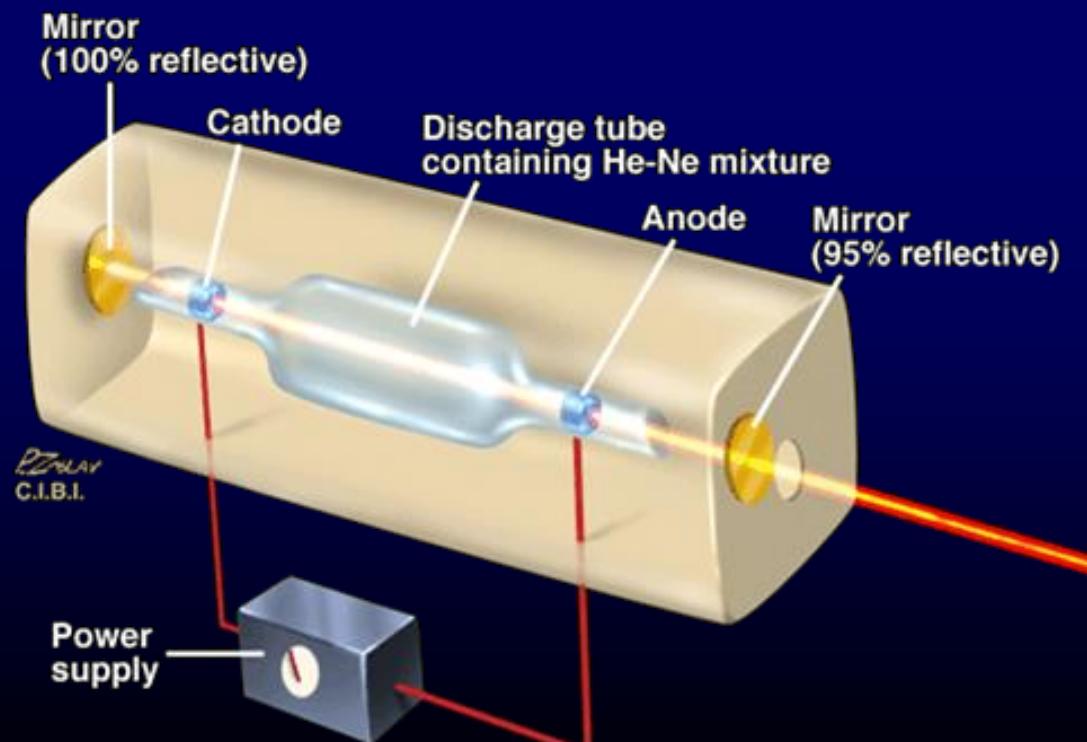


Problema 23-26

4.8 Láser

Un láser (del inglés *light amplification by stimulated emission of radiation*) es un dispositivo que utiliza un efecto de la emisión estimulada para generar un haz de luz coherente.

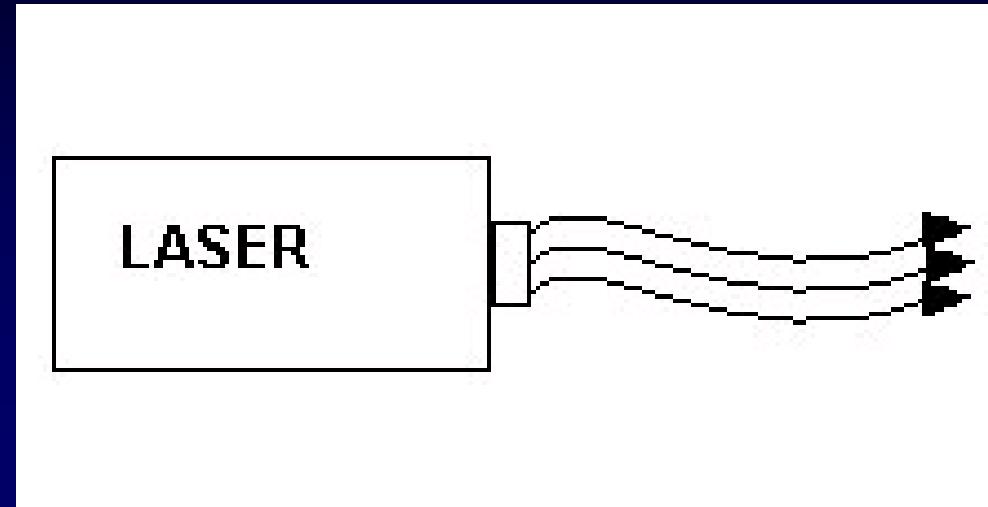
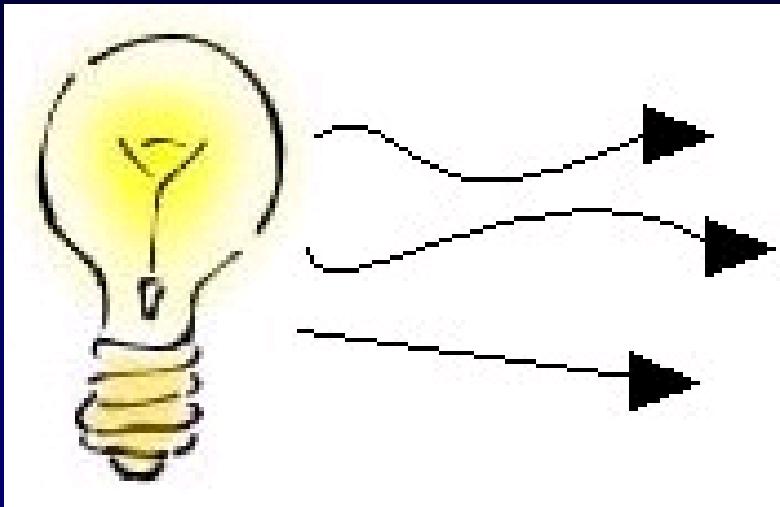
The He-Ne Laser



Propiedades del láser

- La luz emitida desde un láser es monocromática, es decir, que es de un color / longitud de onda.
 - En contraste, la luz blanca ordinaria es una combinación de muchos colores (o longitudes de onda) de luz.
-
- Los láseres emiten luz que es muy direccional, es decir, la luz del láser es emitida como un rayo relativamente estrecho en una dirección específica.
 - La luz ordinaria, como la de una bombilla, se emite en muchas direcciones de distancia de la fuente.
-
- La luz de un láser se dice que es coherente, lo que significa que las longitudes de onda de la luz del láser están en fase en el espacio y tiempo. • La luz ordinaria puede ser una mezcla de muchas longitudes de onda.

Comparación: luz de láser o incandescente



Luz incandescente:

- 1) de muchos longitudes de onda
- 2) multidireccional
- 3) incoherente

Luz de láser:

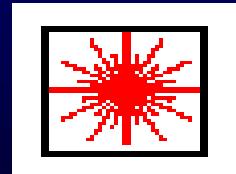
- 1) monocroma
- 2) direccional
- 3) coherente

Componentes de un láser

Medio activo El medio activo puede ser cristales sólidos tales como rubí o Nd: YAG, colorantes líquidos, gases como el CO₂ o helio / neón o semiconductores tales como GaAs. Medios activos contienen átomos cuyos electrones pueden ser excitados a un nivel de energía metaestable por una fuente de energía.

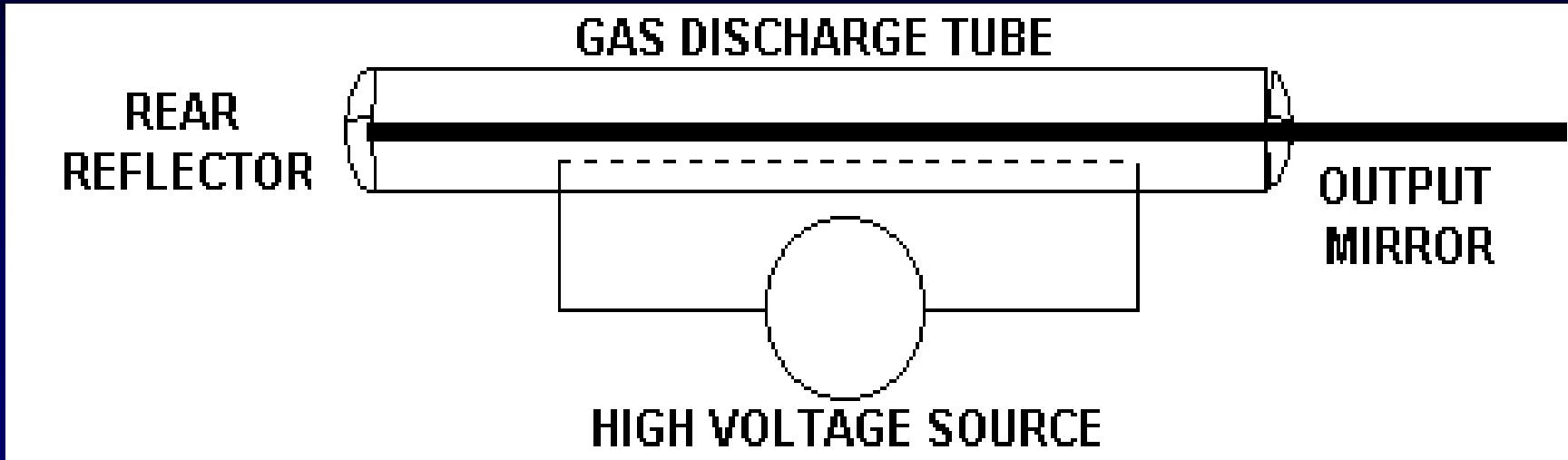
Mecanismo de excitación Mecanismos de excitación bombean energía en el medio activo por una o más de los tres métodos básicos; óptica, eléctrica o química.

Espejo de alta reflectancia Un espejo que refleja esencialmente 100% de la luz láser.



Espejo parcialmente transmisivo Un espejo que refleja menor que 100% de la luz láser y transmite el resto.

Componentes de un láser



- Láseres de gas tienen un tubo lleno de gas colocado en la cavidad láser.
- Un voltaje (la fuente de bombeo externo) se aplica al tubo para excitar los átomos en el gas a una inversión de población.
- La luz emitida desde este tipo de láser es normalmente de onda continua (CW).

Funcionamiento de un láser

- 1 La energía se aplica a un medio de elevar los electrones a un nivel de energía inestable.
- 2 Estos átomos decaen de manera espontánea a un nivel metaestable, de una energía menor y tiempo de vida relativamente largo.
- 3 Una inversión de población se logra cuando la mayoría de los átomos han alcanzado este estado metaestable.
- 4 Un efecto de lasing se produce cuando un electrón vuelve espontáneamente a su estado fundamental y produce un fotón.
- 5 La energía de este fotón estimulará la producción de otro fotón de la misma longitud de onda y que resulta en un efecto cascada.
- 6 El espejo altamente reflectante y un espejo parcialmente reflectante continua la reacción por la dirección de fotones de vuelta a través del medio a lo largo del eje longitudinal del láser.
- 7 El espejo parcialmente reflectante permite la transmisión de una pequeña cantidad de radiación que se observa como el "haz".
- 8 La radiación láser continuará mientras la energía se aplica al medio de acción láser.

Diagrama de un láser

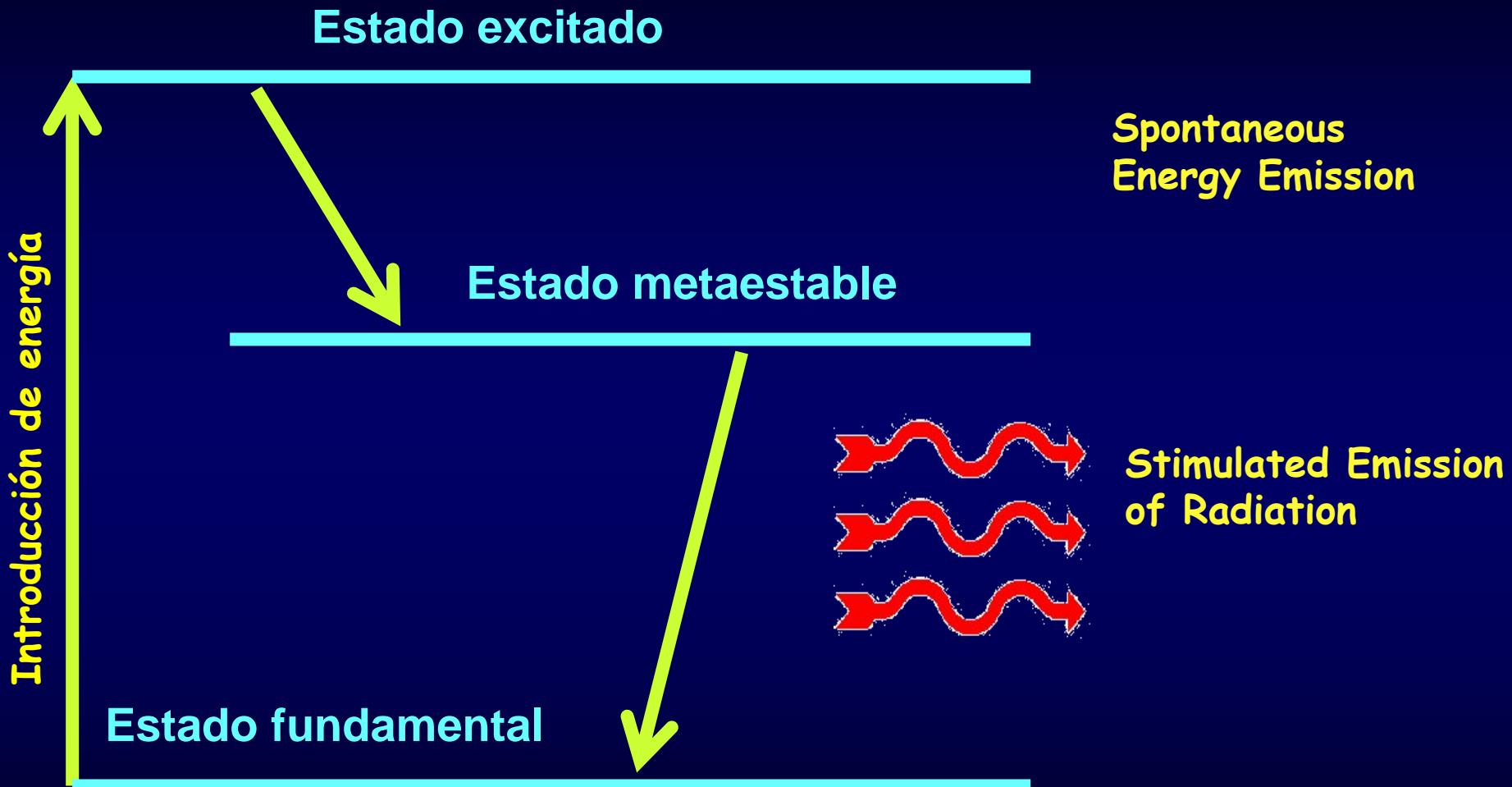


Diagrama de un láser

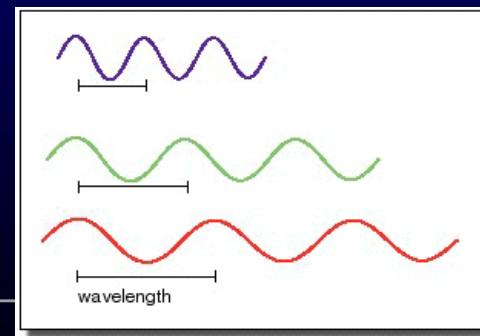
Tipo de láser

Argon fluoride (Excimer-UV)	0.193
Krypton chloride (Excimer-UV)	0.222
Krypton fluoride (Excimer-UV)	0.248
Xenon chloride (Excimer-UV)	0.308
Xenon fluoride (Excimer-UV)	0.351
Helium cadmium (UV)	0.325
Nitrogen (UV)	0.337
Helium cadmium (violet)	0.441
Krypton (blue)	0.476
Argon (blue)	0.488
Copper vapor (green)	0.510
Argon (green)	0.514
Krypton (green)	0.528
Frequency doubled Nd YAG (green)	0.532
Helium neon (green)	0.543
Krypton (yellow)	0.568
Copper vapor (yellow)	0.570

Key: UV = ultraviolet (0.200-0.400 μm)
VIS = visible (0.400-0.700 μm)
NIR = near infrared (0.700-1.400 μm)

Longitud de onda

Helium neon (yellow)	0.594
Helium neon (orange)	0.610
Gold vapor (red)	0.627
Helium neon (red)	0.633
Krypton (red)	0.647
Rohodamine 6G dye (tunable)	0.570-0.650
Ruby (CrAlO ₃) (red)	0.694
Gallium arsenide (diode-NIR)	0.840
Nd:YAG (NIR)	1.064
Helium neon (NIR)	1.15
Erbium (NIR)	1.504
Helium neon (NIR)	3.39
Hydrogen fluoride (NIR)	2.70
Carbon dioxide (FIR)	9.6
Carbon dioxide (FIR)	10.6



HR

High Reflector
(Totally Reflecting)

OC

Output Coupler
(Partially Reflecting)

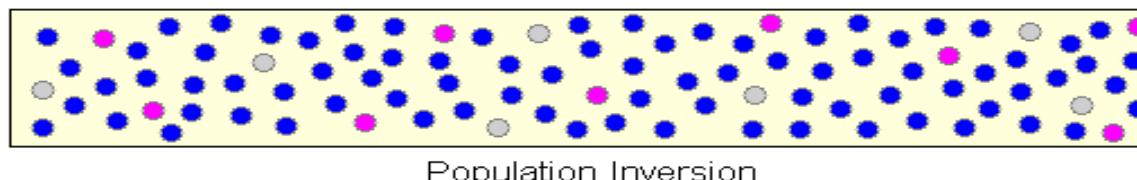
1

Laser Resonator consists of Lasing Medium (gas, liquid, or solid) between HR and OC Mirrors.

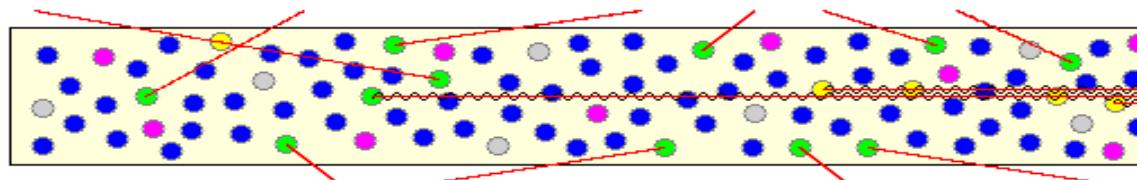


2

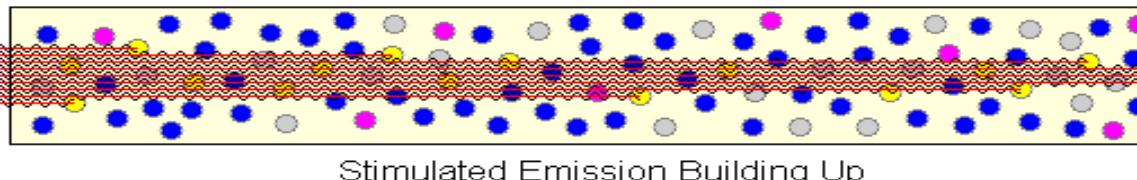
Pump Energy (Electrical, Optical, Chemical, etc.)



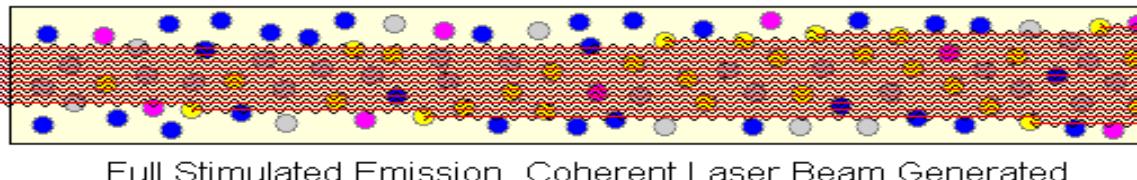
3



4



5



Legend:

- Ground State
- Energy Level 1
- Energy Level 2
- Spontaneous Emission
- Stimulated Emission

The ● are atoms, ions, or molecules depending on lasing medium.

Basic Laser Operation

Fotón

El fotón es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético.

- **Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética.**
- **El fotón tiene la masa invariante cero, y viaja en el vacío con la velocidad de la luz c .**
- **El fotón presenta tanto propiedades corpusculares como ondulatorias ("dualidad onda-corpúsculo")**

Energía de un fotón

La energía E y el momento lineal p de un fotón dependen únicamente de su frecuencia f o, lo que es equivalente, de su longitud de onda λ (relacionado por $f = c/\lambda$)

$$E = hf$$

donde $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ es la constante de Planck. También se usa la expresión con la frecuencia angular ω : $E = \hbar\omega$ con $\hbar = 1.0546 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ la constante reducida de Planck.

El momento lineal es $E = \hbar k$

Número de fotones

Para transferir la energía E con la luz de frecuencia f sirven N fotones, con la relación:

$$E = N h f$$

o número de fotones

$$N = E / (h f)$$

Material adicional

Title

- $a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

text *formula*

Tipos de LCD: matriz pasiva

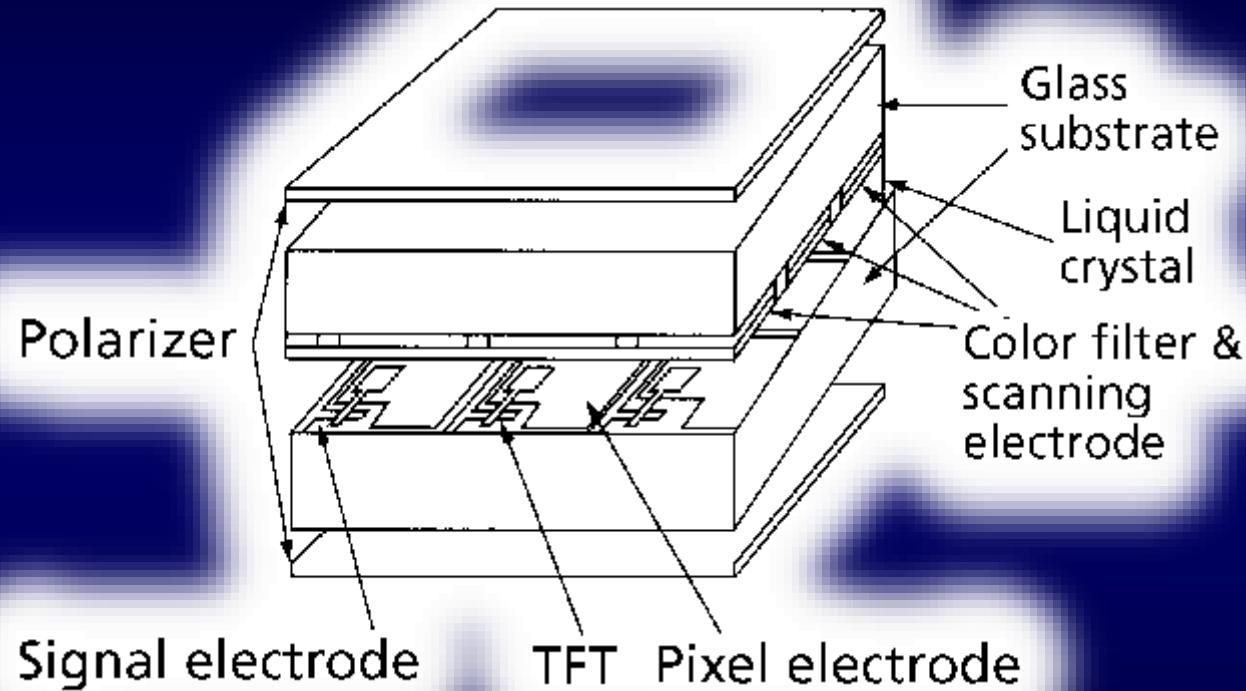
- la matriz se refiere a la capa situada por debajo de los conductores, utilizada para activar los elementos de la pantalla.
- La matriz pasiva, suele estar construida de una base de tiras conductoras dispuestas de borde a borde de la pantalla.
- Puesto que las tiras son relativamente largas, el tiempo empleado para activar cada elemento es mayor que en los modelos de matrices activas. Esto significa que se tarda mas en refrescar la pantalla, esto se incrementa con el aumento de la pantalla

Tipos de LCD: matriz activa - TFT

Matriz activa - TFT (Thin Film Transistor)

- Usa una matriz de elementos conductores mucho más compleja, basada en una rejilla de transistores independientes que descansan en una capa situada por debajo de los elementos de la pantalla.
- Más complicada de fabricar, pero mas rápida porque se direccionan independientemente las celdas de cristal líquido.
- El ángulo de visión es más ancho y puesto que la posición de los transistores obstruyen menos la iluminación trasera que las tiras conductoras.
Más caras.

Tipos de LCD: matriz activa - TFT



LCD (Liquid Crystal Display)

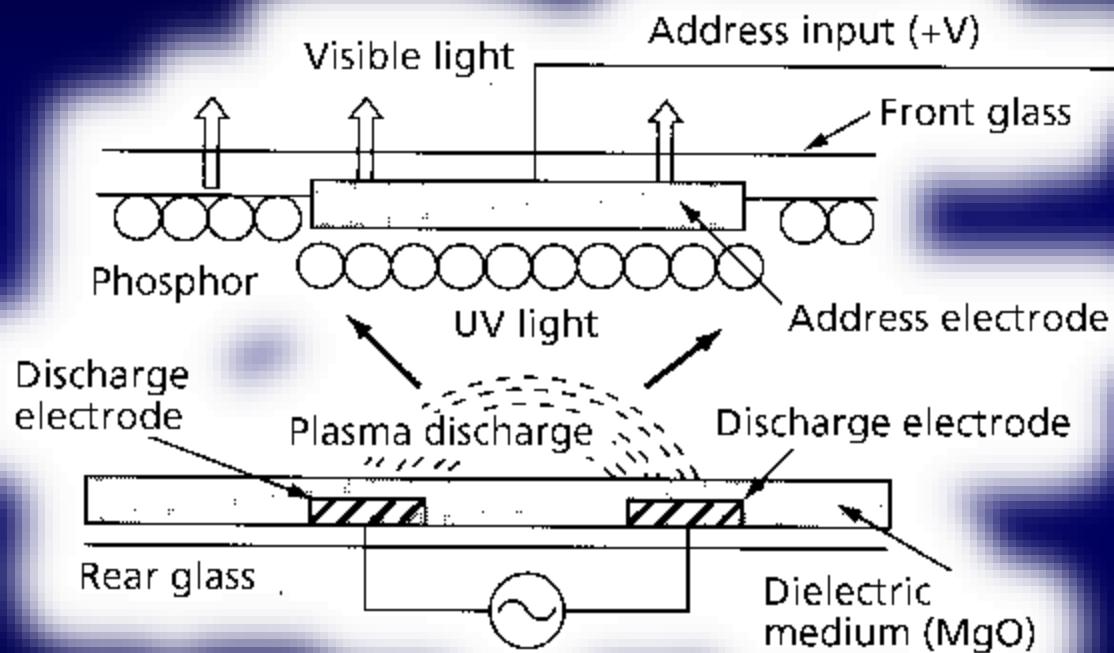
Ventajas

- **Ligeras lo que las hace útiles para portátiles**
- **Tecnología digital**

Desventajas

- **Hasta ahora más caras (pero por poco tiempo)**
- **Peor resolución**

Tipos de LCD: matriz activa - TFT



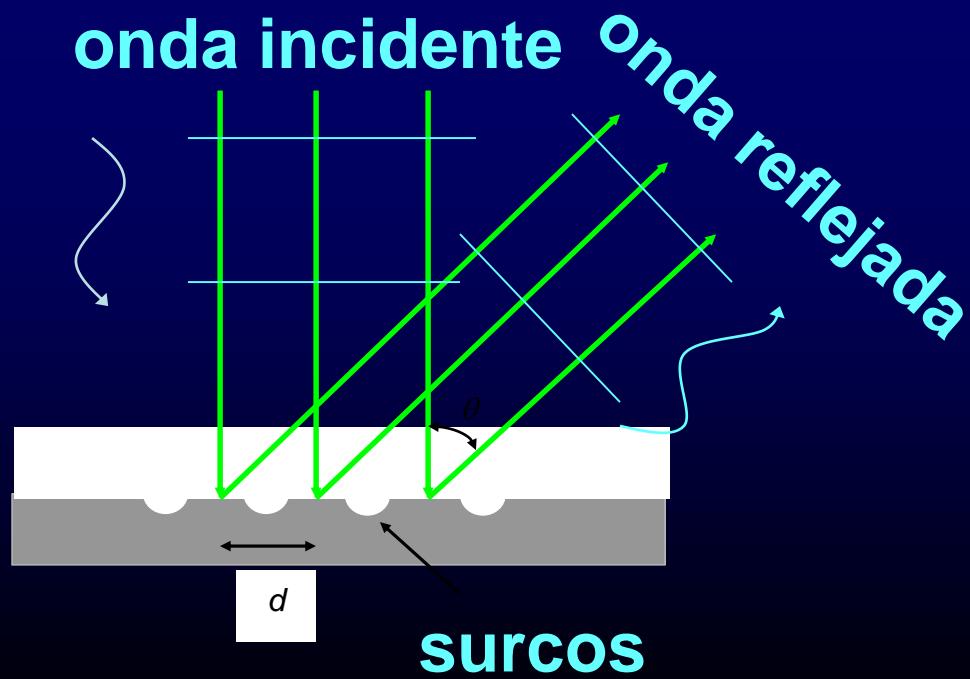
PDP (Plasma Display Panels)

- Basadas en el principio de que ciertos gases emiten luz cuando son sometidos a corriente eléctrica.
- Las PDP modernas contienen una mezcla de gases que emiten ultravioleta en lugar de luz visible, esta radiación se utiliza para excitar una capa de fósforo de forma semejante al haz de electrones en las CRT. Esto suministra una gran precisión a la imagen resultante manteniendo el brillo y velocidad de la imagen original.
- El resultado es que además de ofrecer un alto nivel de resolución las pantallas son incluso mas brillantes.

Interferencia en un sistema mecánico

Modelo ondulatorio de la luz: comparación con un sistema mecánico

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{d}$$



Material adicional

Wikipedia!

<http://www.gfc.edu.co/estudiantes/anuario/2003/sistemas/victor/ondas/Ondas/node5.html>

http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_onda_electromagn%C3%A9tica

Experimento de Young

http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CFAQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.educarchile.cl%2Fpsu%2FResources%2Fmapas%2Fluz%2520natural.ppt&ei=vd_FT7OWOqub1AXrzqH6BQ&usg=AFQjCNGxxftHIPNbdfoUeB6S-WKZBhpgVQ&sig2=59Iz2YlbYGYaRNHkMWeU-Q

Material adicional

Video de ondas X

www.youtube.com/watch?v=MDUzdZ58WXc

Ultraviolas

www.youtube.com/watch?v=Dnbij_ZpHPc

Ley de Snell

<http://www.humbertomosquera.com/clases/reflexionrefraccion.pdf>

Láser

http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CFMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.research.usf.edu%2Fcs%2Frad%2FLASERS.ppt&ei=z0LFT-PdNeWb1AXyzliYCg&usg=AFQjCNFGahXFpX0mQebea30Tz67nu5X4Jg&sig2=GUDvTPHpXM_c8QNPhp8ZhQ