

# OSCILACIONES, ONDAS Y TERMODINÁMICA

## MÓDULO 2: ONDAS

Figuras cedidas por W.H. Freeman/Worth, que pertenecen al libro  
“Física, 4a. Ed.”, P.A. Tipler, Ed. Reverté

# Módulo 2: Ondas

## Lección 5. Movimiento ondulatorio. Ondas en una cuerda.

- 5.1 Introducción al mov. ondulatorio  
Definiciones.
- 5.2 Función de onda.
- 5.3 Ondas armónicas.
- 5.4 Velocidad de propagación.
- 5.5 Energía de la onda.
- 5.6 Ondas en medios absorbentes.  
Atenuación.
- 5.7 Reflexión y transmisión de ondas.
- 5.8 Superposición de ondas en una cuerda  
Ondas estacionarias.

## Lección 6. Ondas sonoras. Acústica.

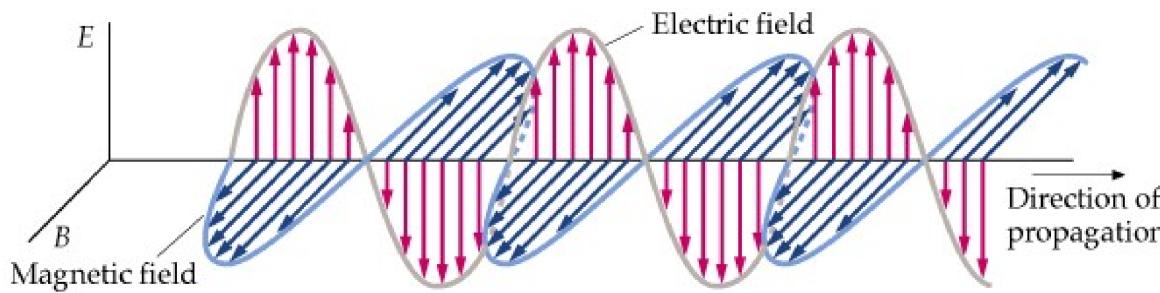
- 6.1 Ondas elásticas en sólidos y fluidos
- 6.2 Potencia e intensidad de la onda.  
Densidad de energía.
- 6.3 Percepción del sonido. Decibelios.
- 6.4 Transmisión y reflexión de ondas sonoras
- 6.5 Superposición de ondas sonoras.
- 6.6 Efecto Doppler
- 6.7 Cualidades del sonido.

## Lección 7. Óptica Física

- 7.1 Ondas electromagnéticas. Espectro.
- 7.2 Principio de Huygens-Fresnel.
- 7.3 Reflexión y refracción.
- 7.4 Dispersión. Velocidad de grupo.
- 7.5 Polarización.
- 7.6 Interferencias.
- 7.7 Difracción.

## 7.1. Ondas electromagnéticas (OEM). Espectro.

**Ondas electromagnéticas:** una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio transportando energía.



Eq. de Maxwell  $\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$  donde  $\nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2}$

• Considerando que E y B sólo varian en la dirección x:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (\text{ecuación de onda})$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad \epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^2$$
$$\mu_0 = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{C}^{-2}$$

**Solución de las ecuaciones de Maxwell:**

Onda de campo E y de campo B que se desplazan con velocidad  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$\vec{E}(x,t) = E(x,t) j \quad E(x,t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \delta)$$

$$E_0 = c B_0$$

$$\vec{B}(x,t) = B(x,t) k \quad B(x,t) = B_0 \cos(\omega t - kx + \delta)$$

E y B en fase

## 7.1. Ondas electromagnéticas (OEM). Espectro.

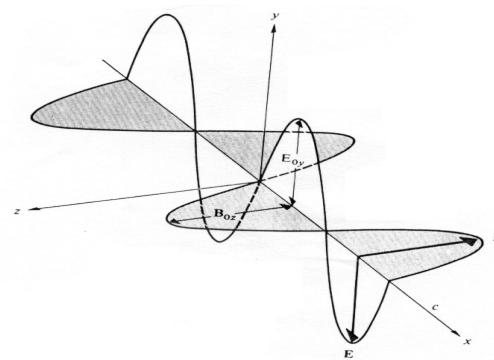
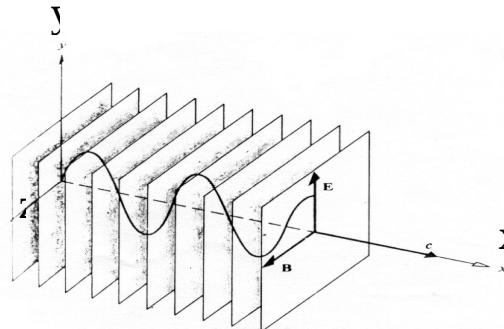
• Considerando que  $E$  y  $B$  se extienden en las tres dimensiones  $x, y, z$ :

Podemos tener varias soluciones, algunas complejas otras más sencillas:

### • Onda plana

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

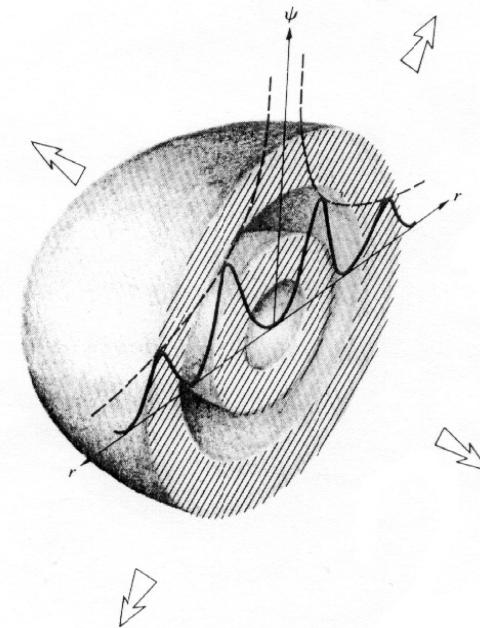
$$E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - k x + \delta)$$



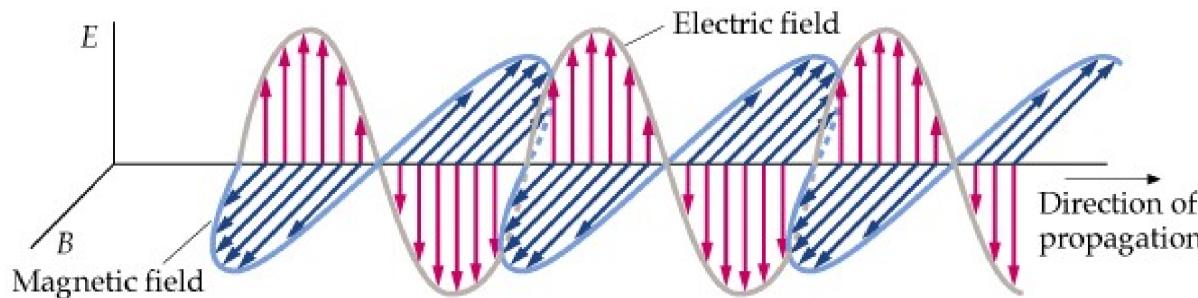
### • Onda esférica

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E(\vec{r}, t) \hat{u}_\theta$$

$$E(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \delta)$$



## 7.1. Ondas electromagnéticas (OEM). Espectro.



### Ondas electromagnéticas:

- son ondas transversales ( $E$  y  $B$  oscilan perpendicularmente al vector  $k$ )
- no necesitan un medio material para propagarse (se pueden propagar en el vacío)
- viajan a través del vacío a la velocidad  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- viajan a través de un medio transparente a la velocidad  $v = \frac{c}{n}$  donde:  
•  $n$  es el **índice de refracción** (constante del material)

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

Para materiales no magnéticos  $\mu_r = 1$   $n = \sqrt{\epsilon_r}$

Aire (0°C, 1 atm)	1,000293
Hidrogen (0°C, 1 atm)	1,000132
Aigua (20°C)	1,333
Benzè (20°C)	1,501
etanol (20°C)	1,361
Silici (20°C)	1,458
Clorur de sodi (20°C)	1,5
Vidre	1,5 -1,7
Dioxid de titani	2,4

## 7.1. Ondas electromagnéticas (OEM). Espectro.

- la intensidad:  
$$I = \frac{1}{2} \frac{c}{n} \epsilon_0 E^2$$
  
$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm}$$
 permitividad del vacío  
$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

## 7.1. Ondas electromagnétiques (OEM). Espectro.

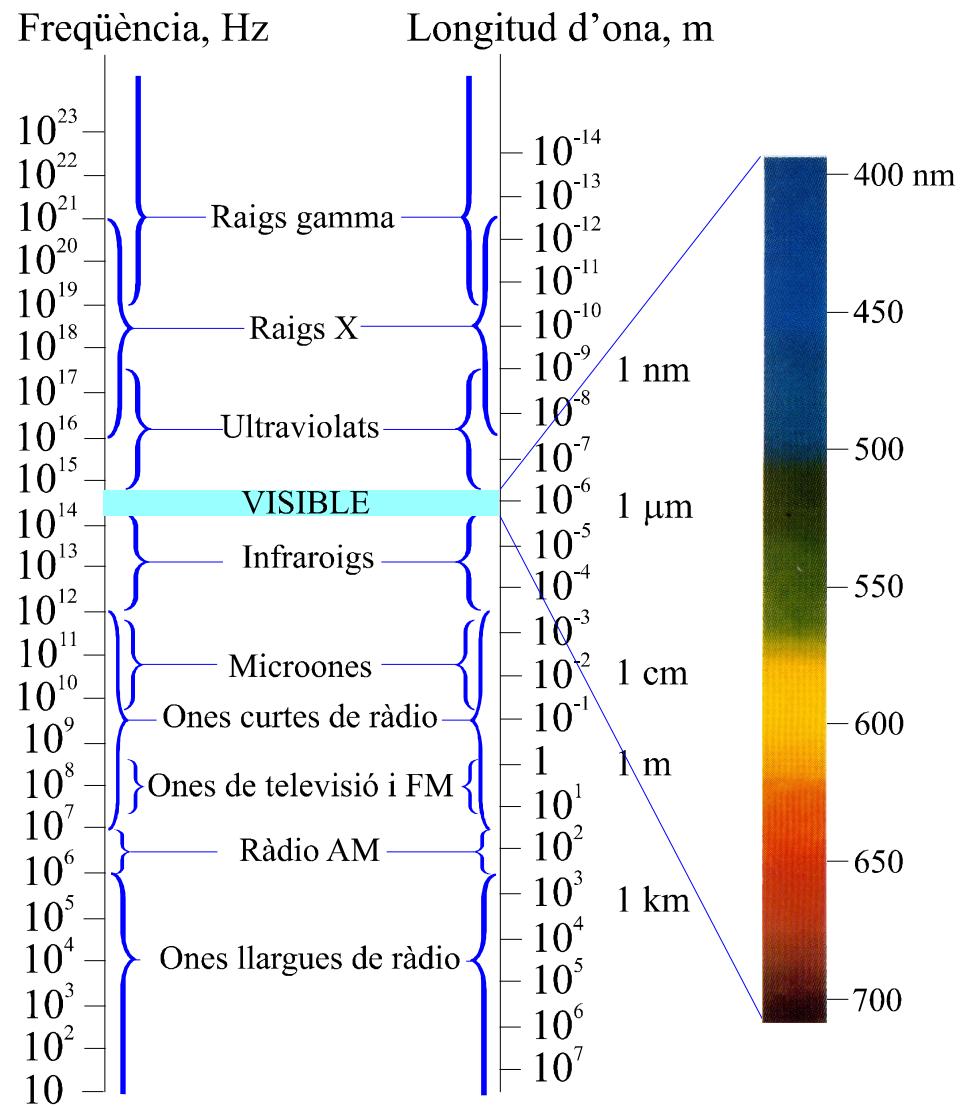
$$E(\vec{r}, t) = E_0 \cos(k r - \omega t)$$

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

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

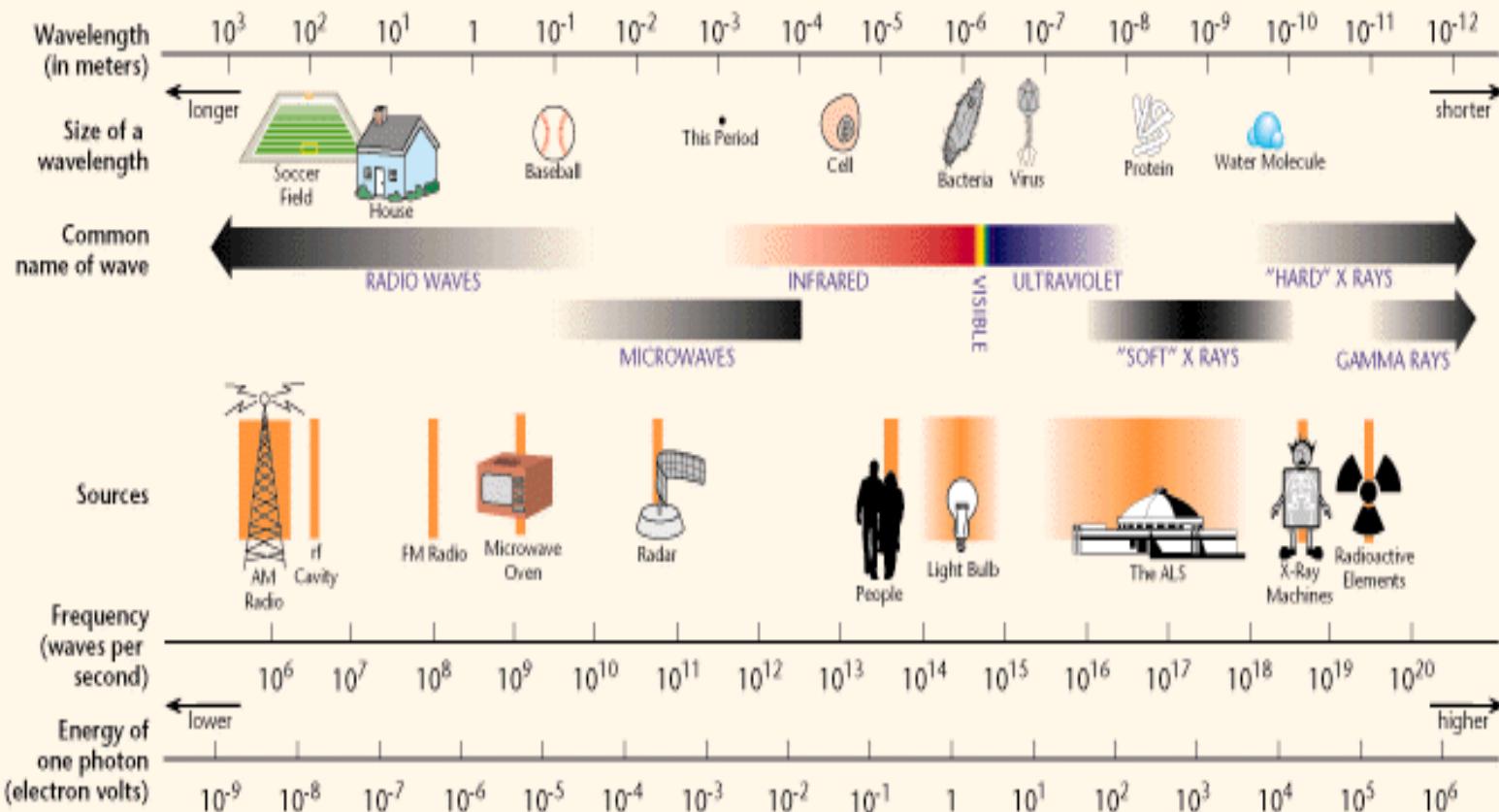
$$\lambda = v T \Rightarrow \lambda f = v$$

$v=c$  en el buit



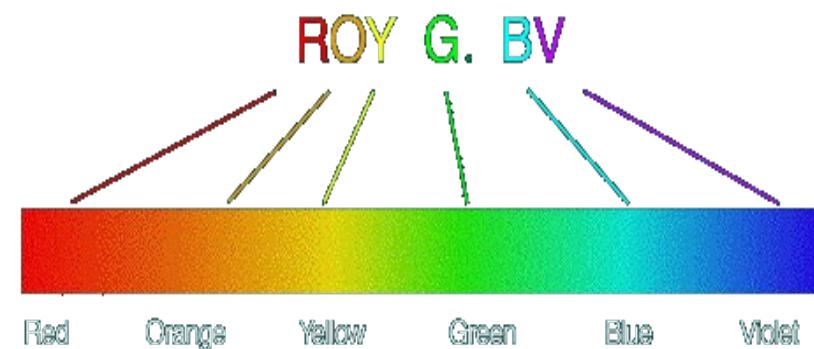
## 7.1. Ondas electromagnéticas (OEM). Espectro.

### THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

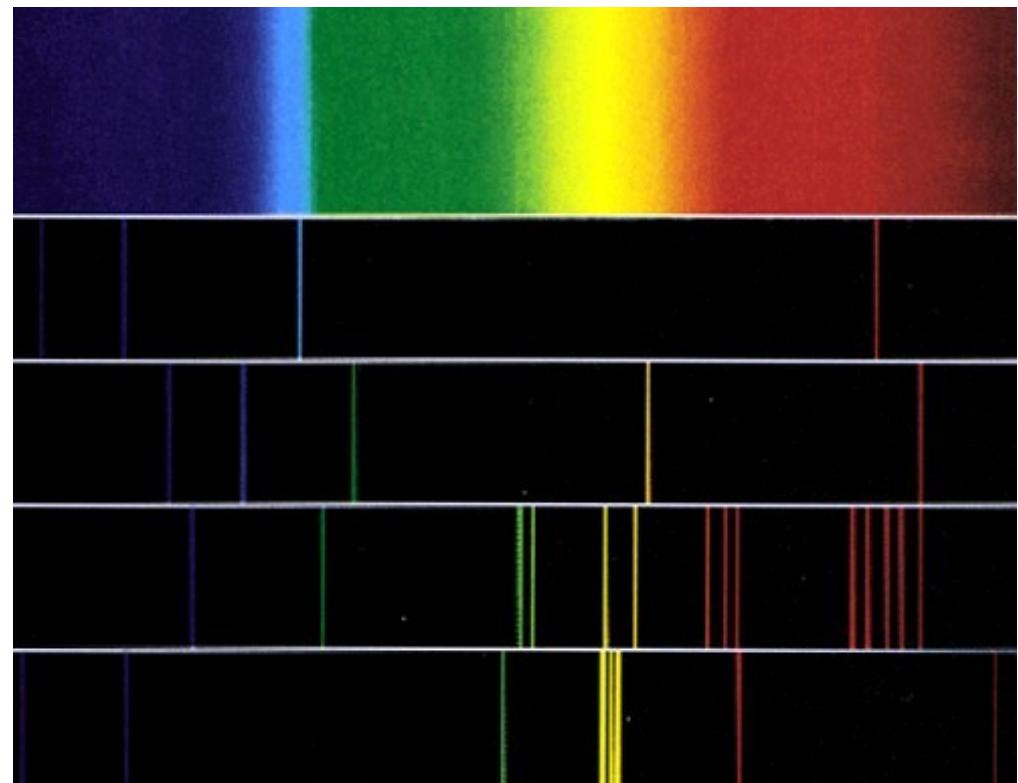


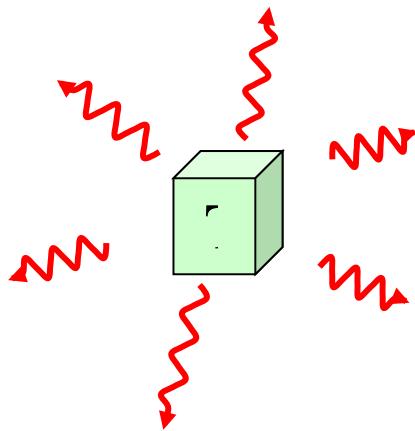
## 7.1. Ondas electromagnéticas (OEM). Espectro.

Espectro continuo



Espectro de líneas o de rayas





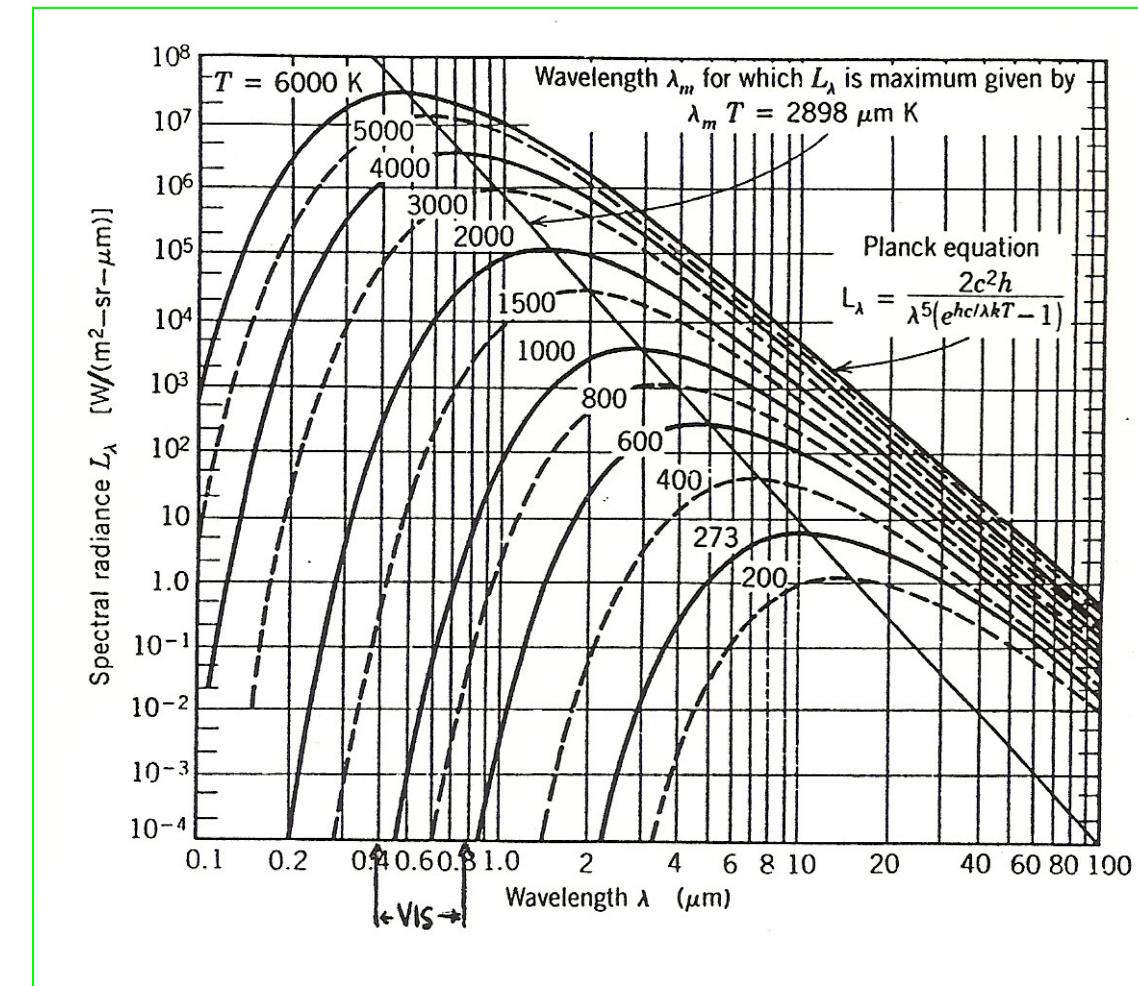
- Very large spectral bandwidth:
- PLANCK's Law (blackbody)
- STEFAN-BOLTZMANN's Law:

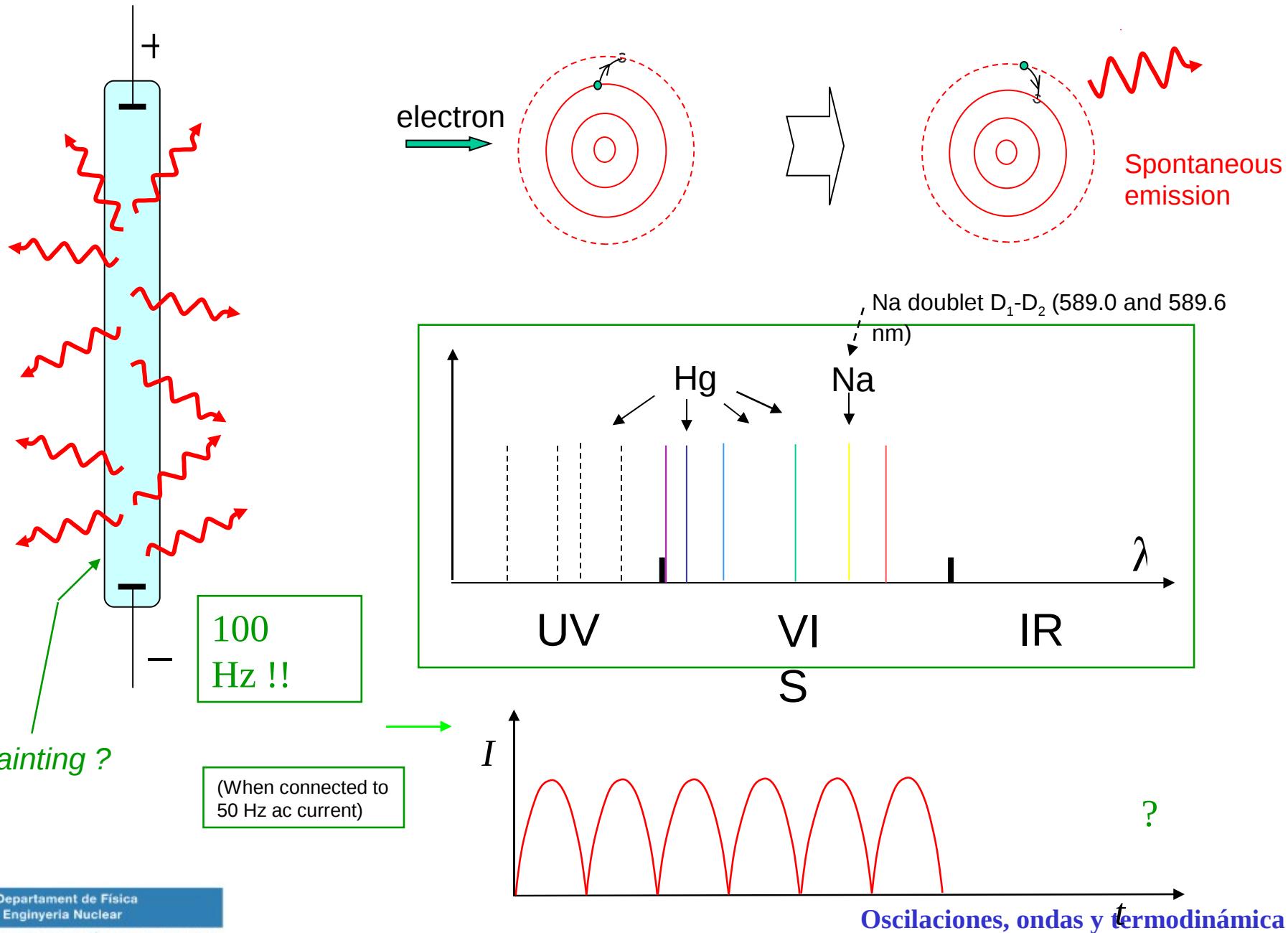
$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

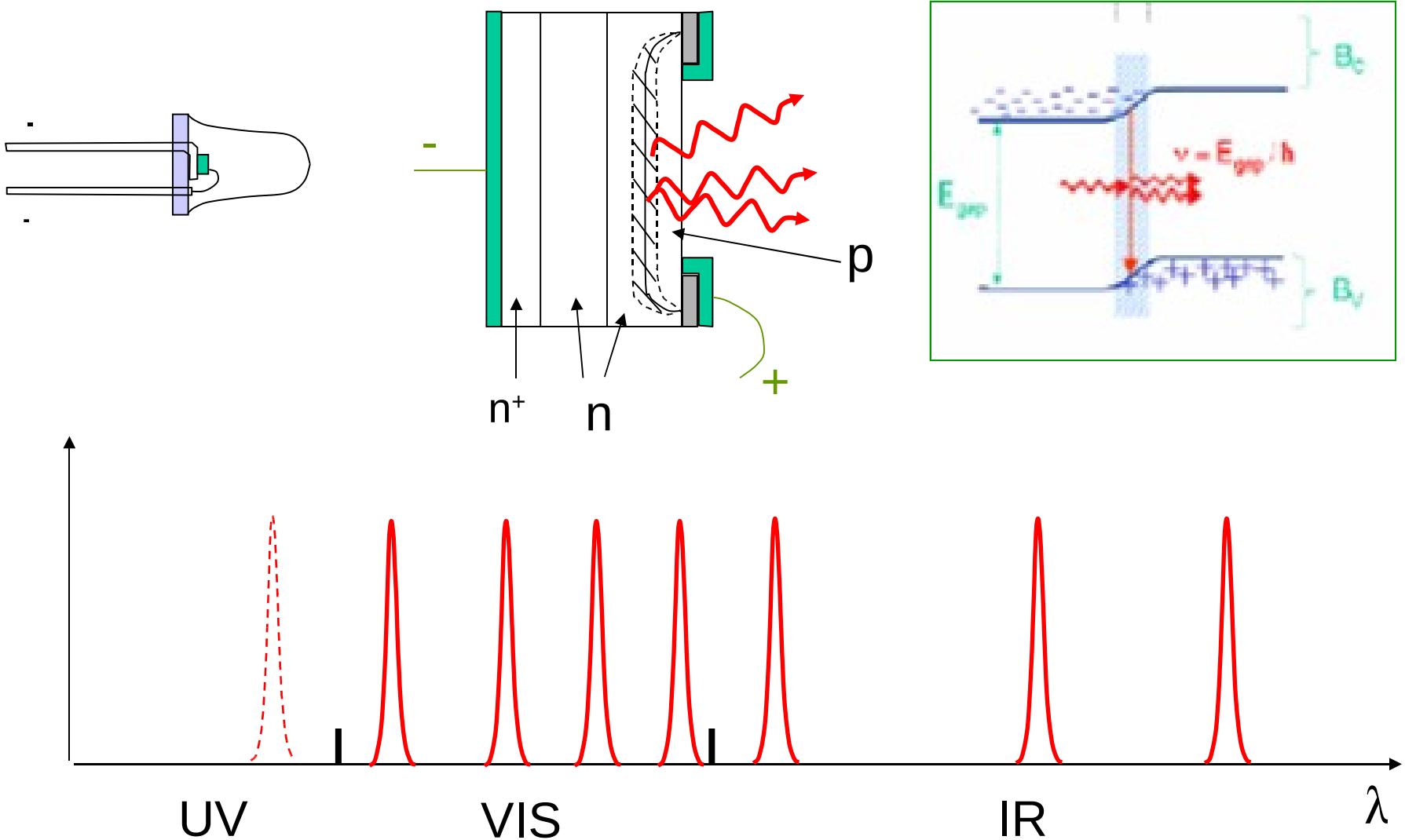
M = emittance,  $\epsilon$  = emissivity

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{T}^4$$

**Applications:** remote sensing of: human-body temperature (non-contact thermometers, mappings of illnesses,...), iron foundry or smelting plants temperature, earth temperature or humidity (from satellite), ...

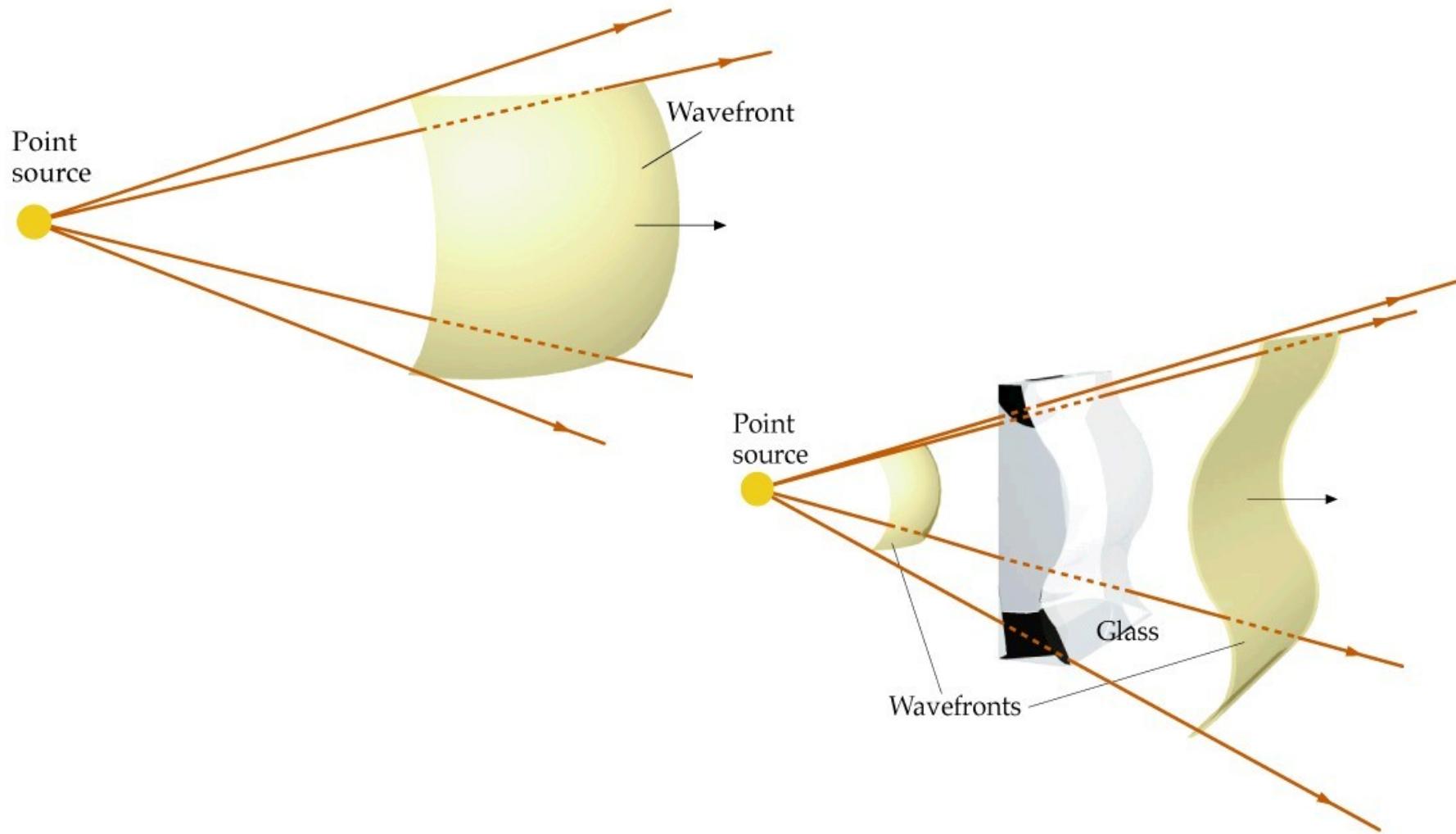






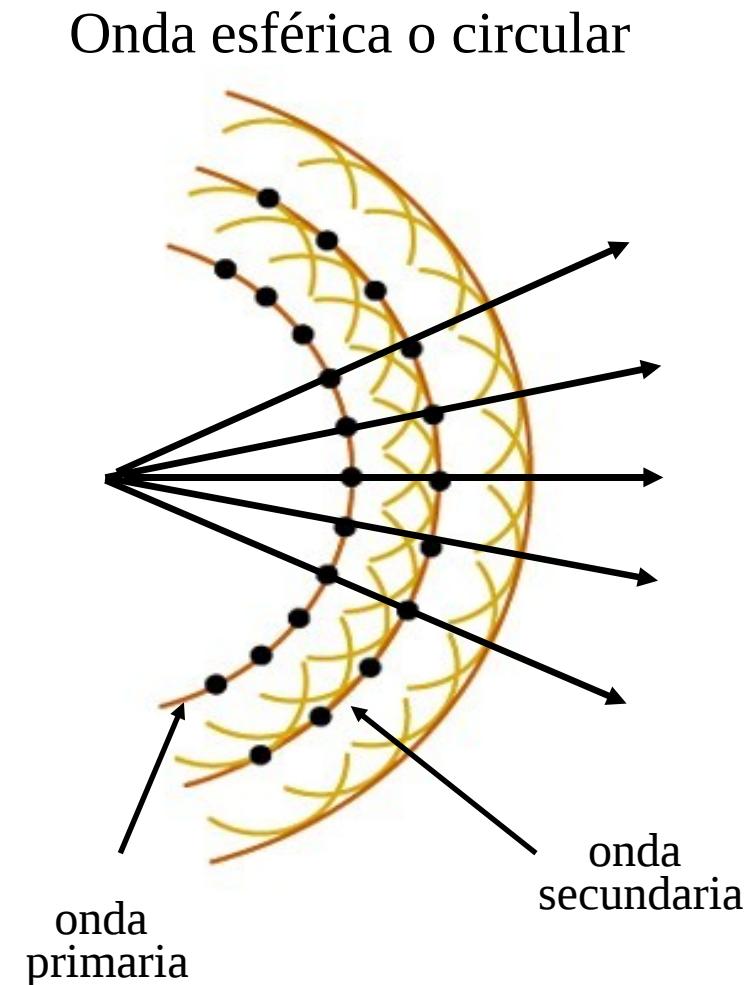
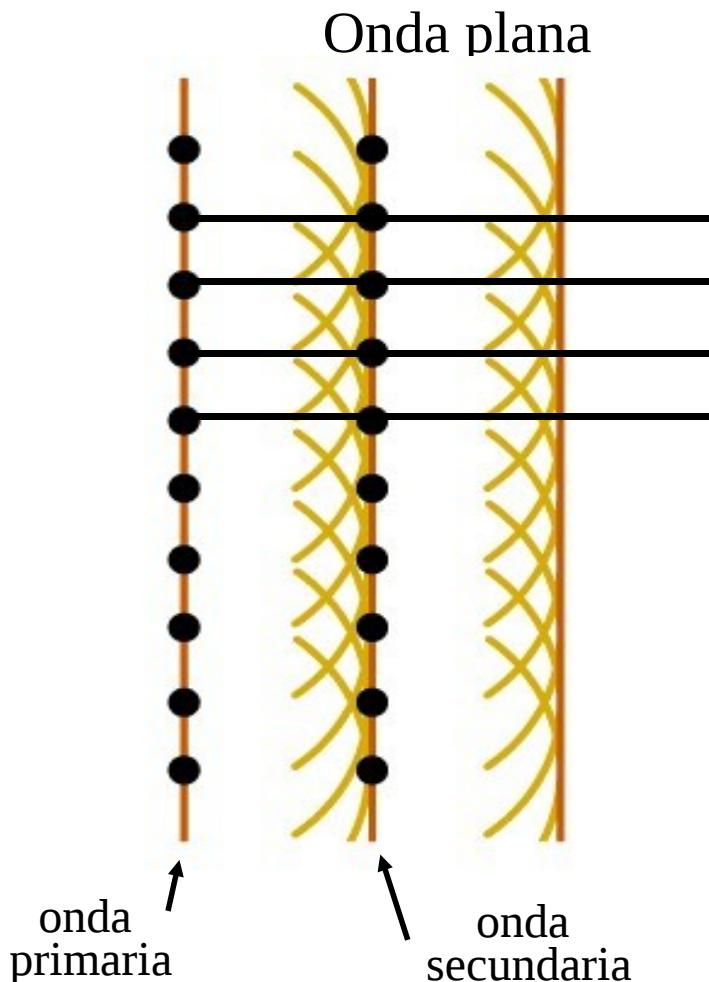
## 7.2. Principio de Huygens-Fresnel

### Propagación de la luz

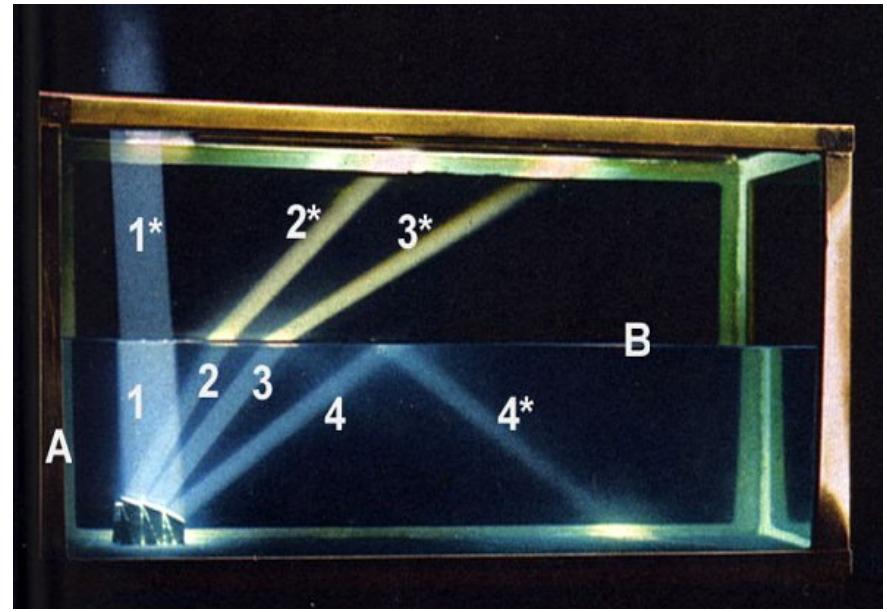


## 7.2. Principio de Huygens-Fresnel

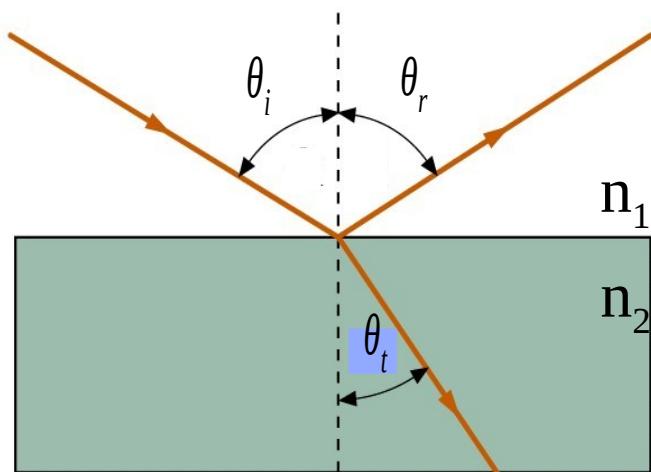
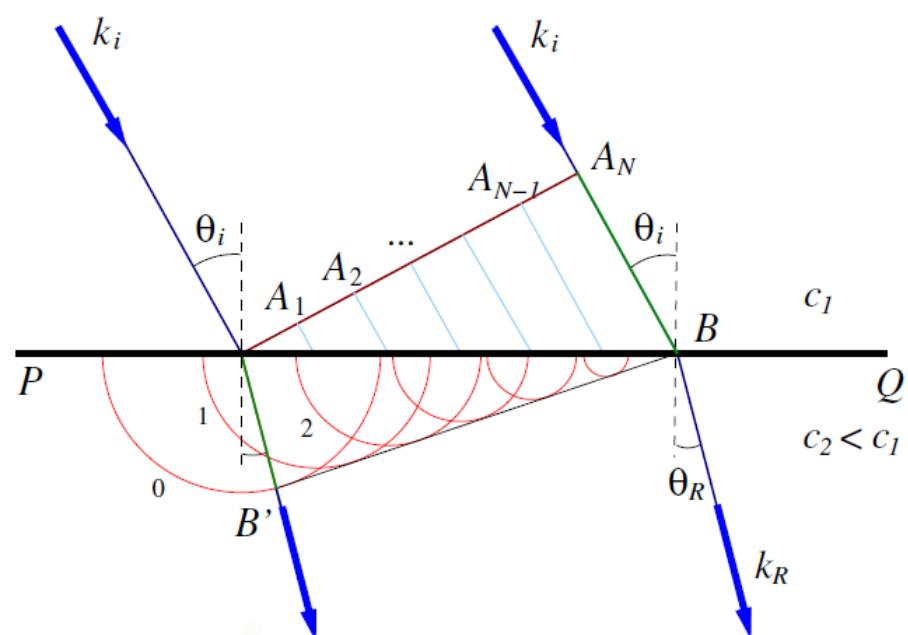
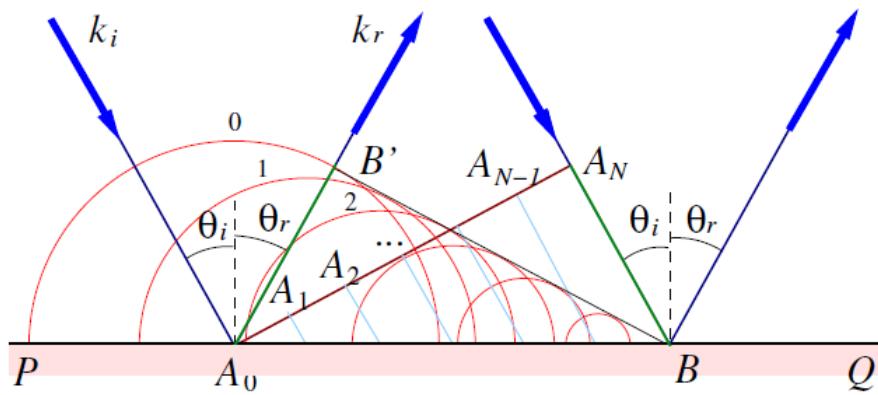
*Todos los puntos de un frente de onda pueden considerarse como centros emisores de ondas esféricas secundarias, cuya envolvente nos da el avance del nuevo frente de onda*



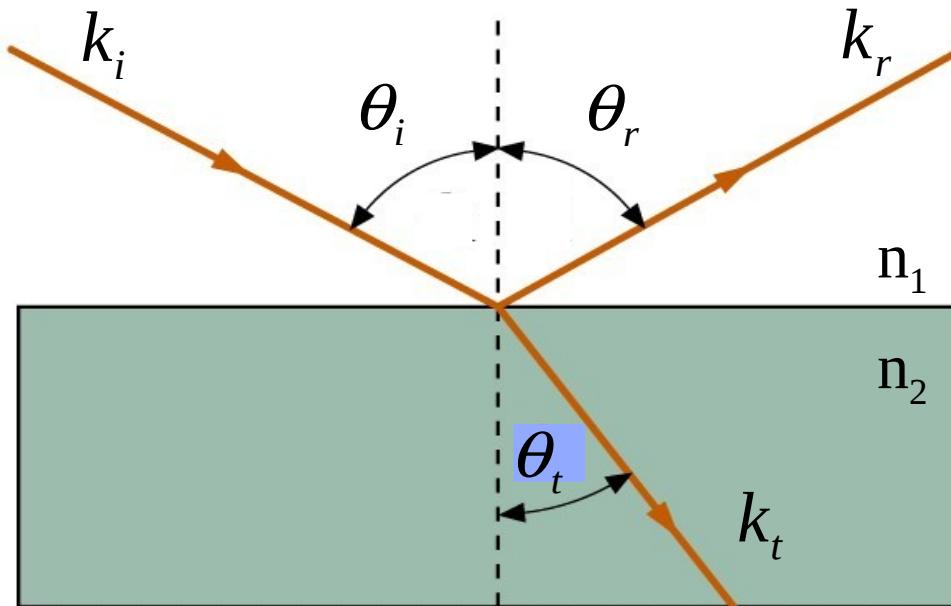
## 7.3. Reflexión y transmisión de ondas



## 7.3. Reflexión y transmisión de ondas



## 7.3. Reflexión y transmisión de ondas



### Las leyes de la reflexión

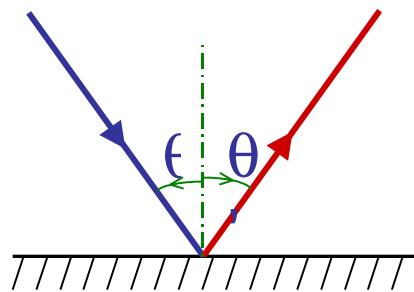
- el rayo incidente, reflejado, transmitido y la normal a la superficie están en el mismo plano
- $\theta_i = \theta_r$

### La ley de Snell (de refracción)

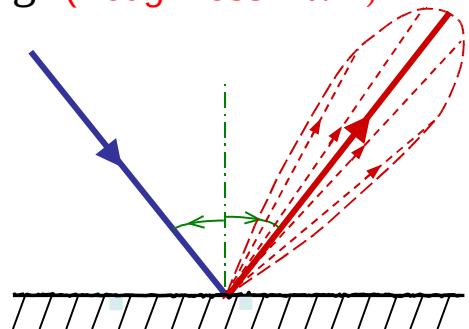
$$\begin{aligned} &\rightarrow n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \\ &\rightarrow v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r \\ &v_2 > v_1 \dots \hat{t} > \hat{r} \\ &v_2 < v_1 \dots \hat{t} < \hat{r} \end{aligned}$$

## 7.3. Reflexión y transmisión de ondas

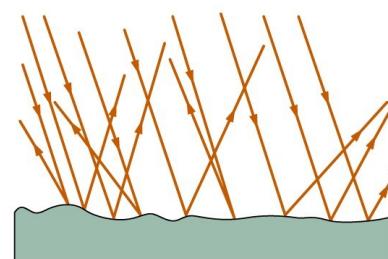
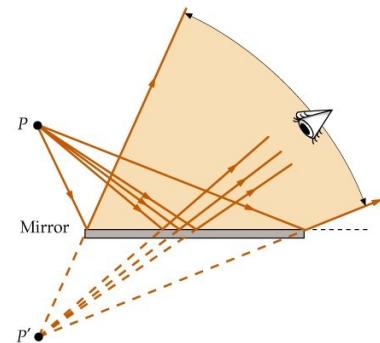
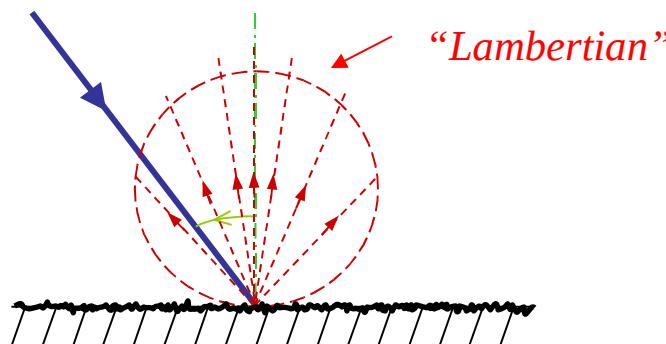
reflexión especular (*Roughness*  $\ll \lambda$ )



scattering (*Roughness*  $< \lambda$ )



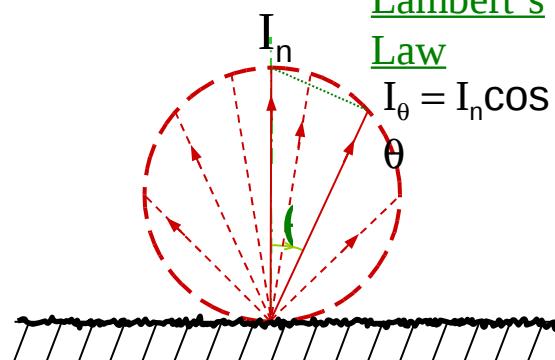
reflexión difusa (*Roughness*  $> \lambda$ )



(a)



Lambert's Law  
 $I_\theta = I_n \cos \theta$





## 7.4. Dispersión

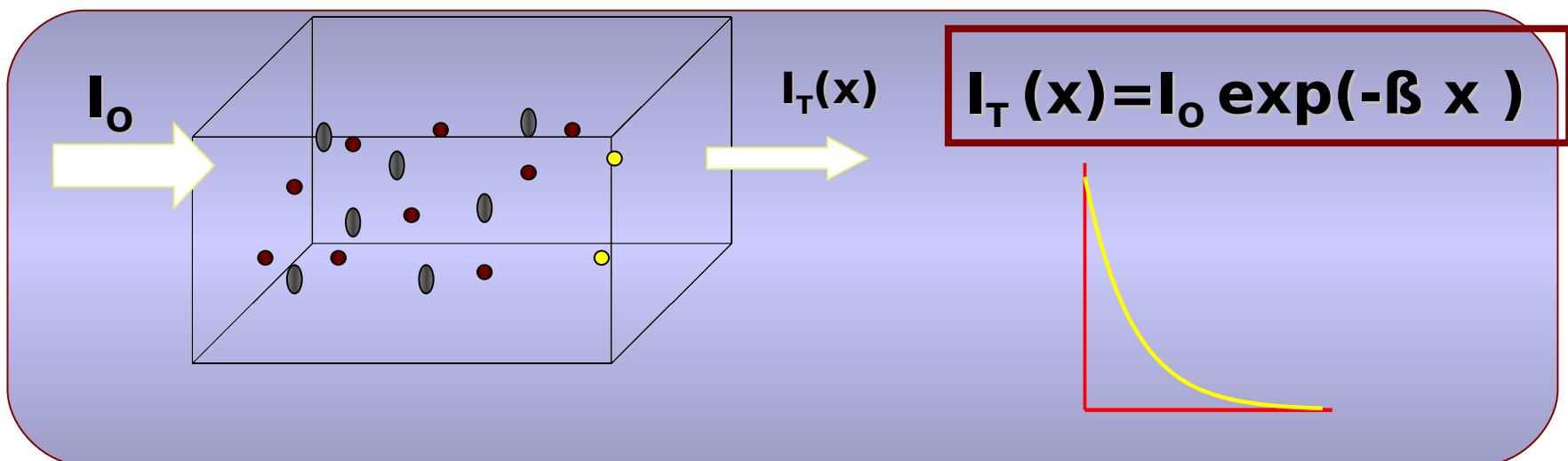
A l'atmosfera hi ha un nombre molt gran de partícules:

Tipus partícules:

- .- Molècules aire
- .- Pols
- .- Gel

- .- Aerosol
- .- Vapor d'aigua i aigua
- .- Altres...

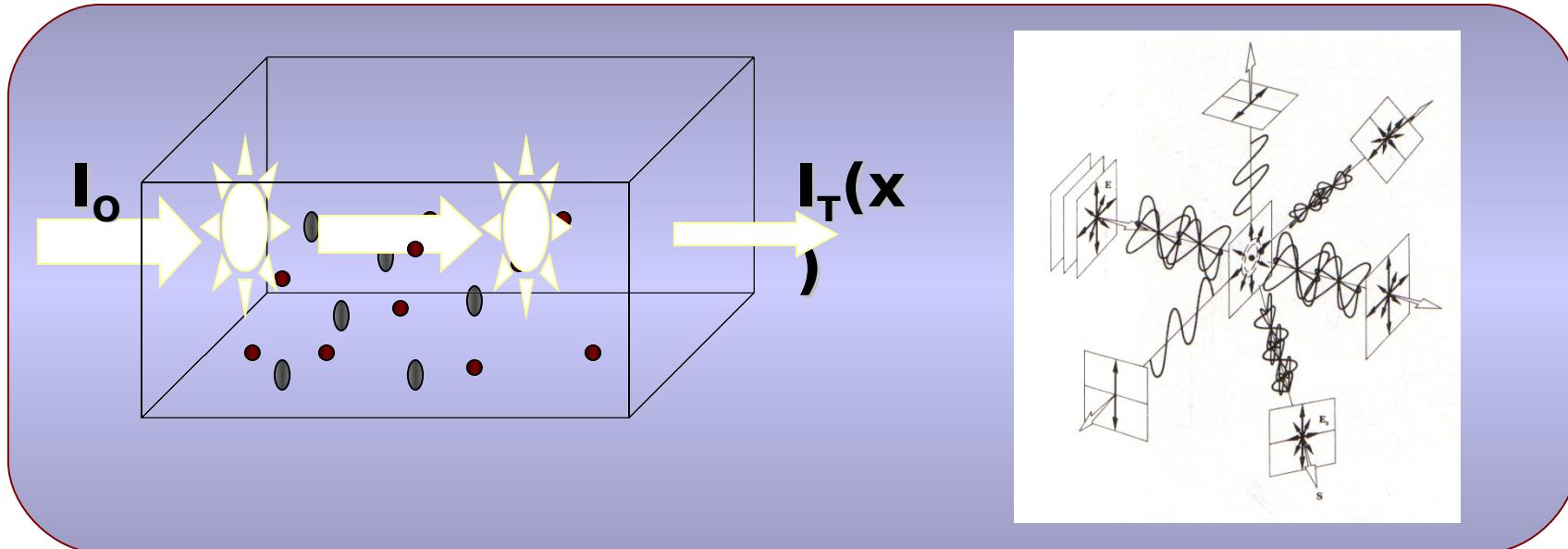
Es produeix la transmissió atenuació i dispersió de l'ona



$$I_0 = I_T(x) + I_{abs}(x) + I_{disp}(x)$$

## 7.4. Dispersión

**Dispersió:** La llum incident sobre una partícula la far vibrar. Aquesta emet llum en totes les direccions.



Podem distingir diversos casos en funció dels centres dispersors:

**1.-  $d \ll 0.1$  micres (Dispersió Rayleigh)**

Partícules més petites que la longitud d'ona

**2.-  $0.3 < d < 1$  micra**

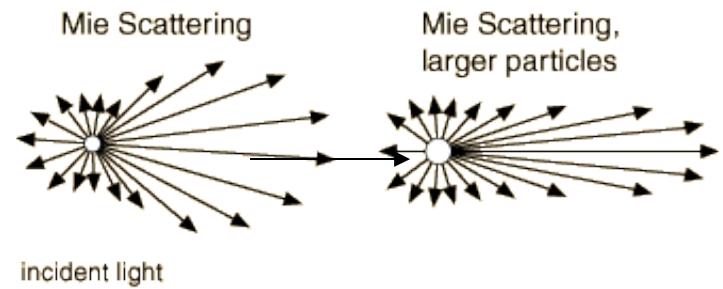
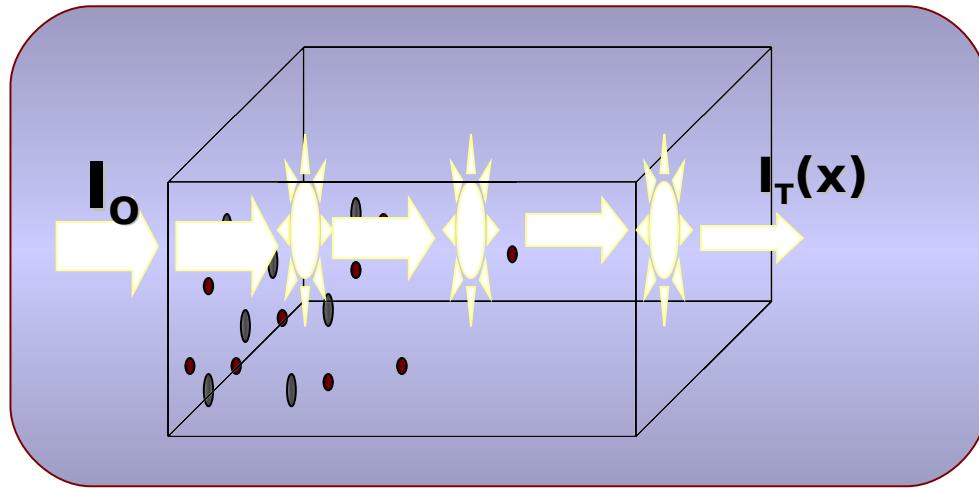
Partícules de grandària semblant a la longitud d'ona

**3.-  $d > 1$  micra (Dispersió Mie)**

Partícules més grans que la longitud d'ona

## 7.4. Dispersión

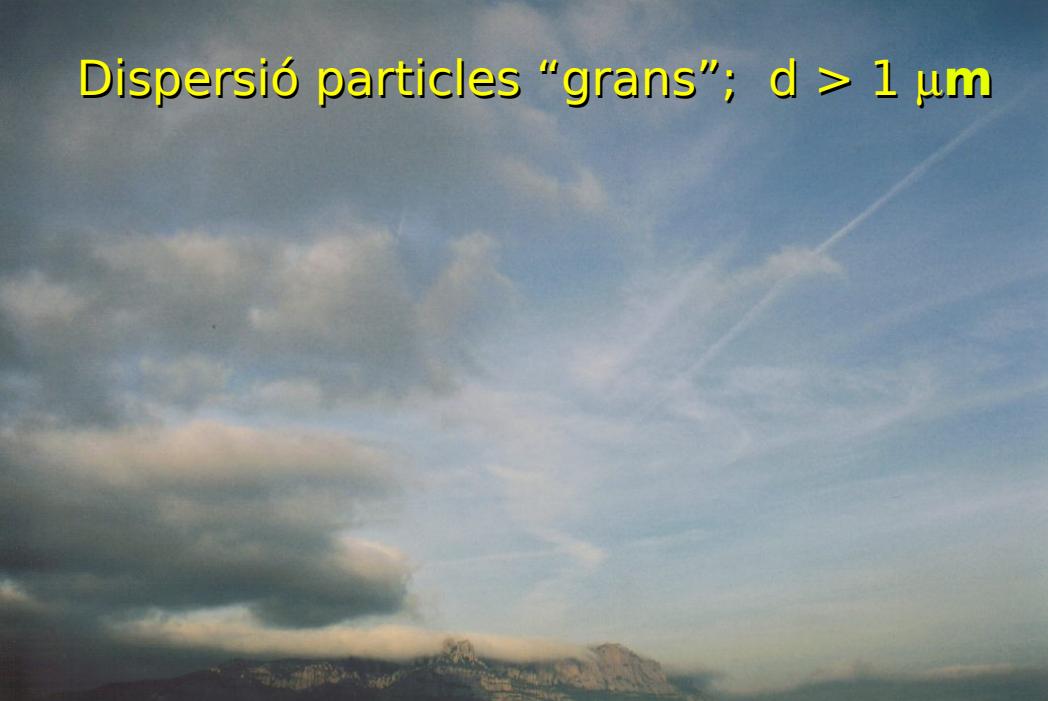
Dispersió de partícules més grans que la longitud d'ona ( $d > 1 \mu \text{ m}$ )



La dispersió és igual per totes les longituds d'ona i més important 'cap a davant' .

El “color” de la radiació dispersada és igual al “color” de la radiació incident .

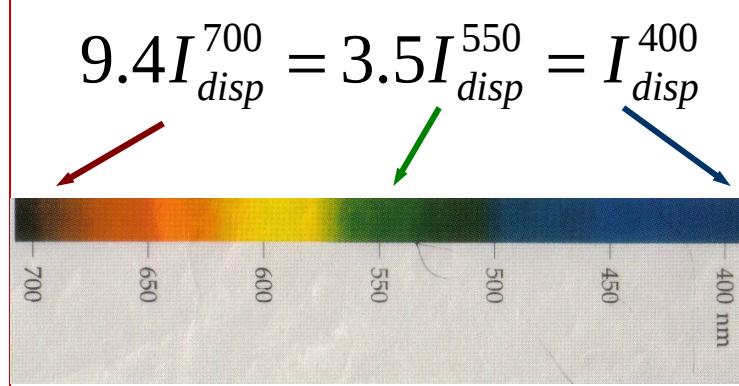
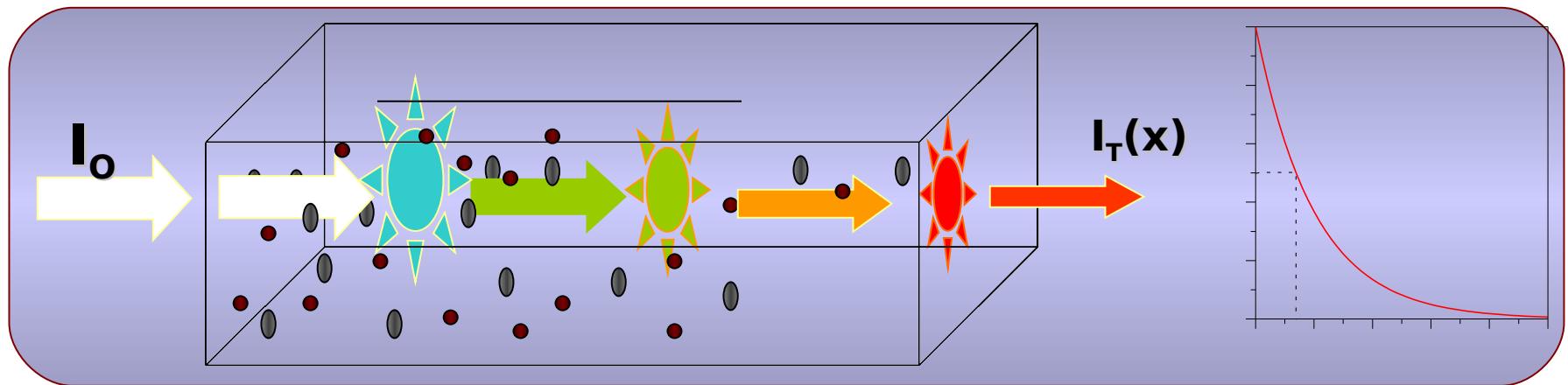
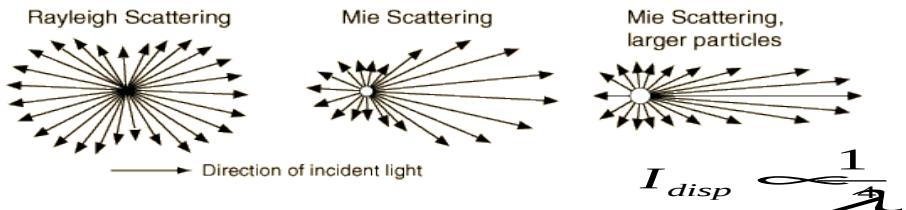
Dispersió particles “grans”;  $d > 1 \mu\text{m}$



## 7.4. Dispersión

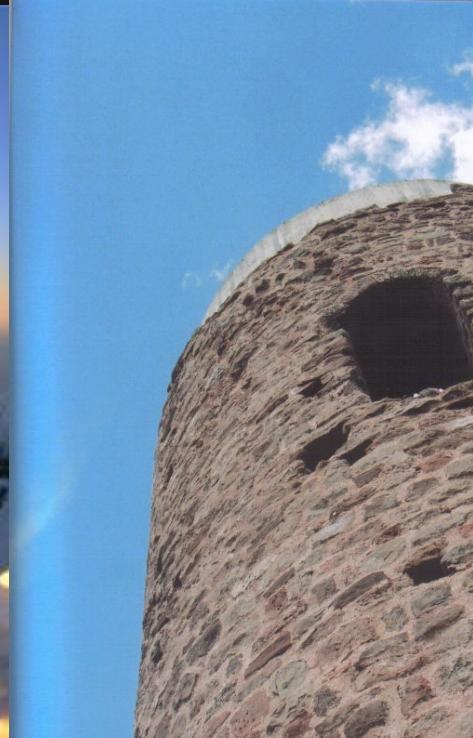
### Dispersio Rayleigh : $d \ll 0.1$ micres

La Intensitat de llum  
dispersada depèn  
de la longitud d'ona



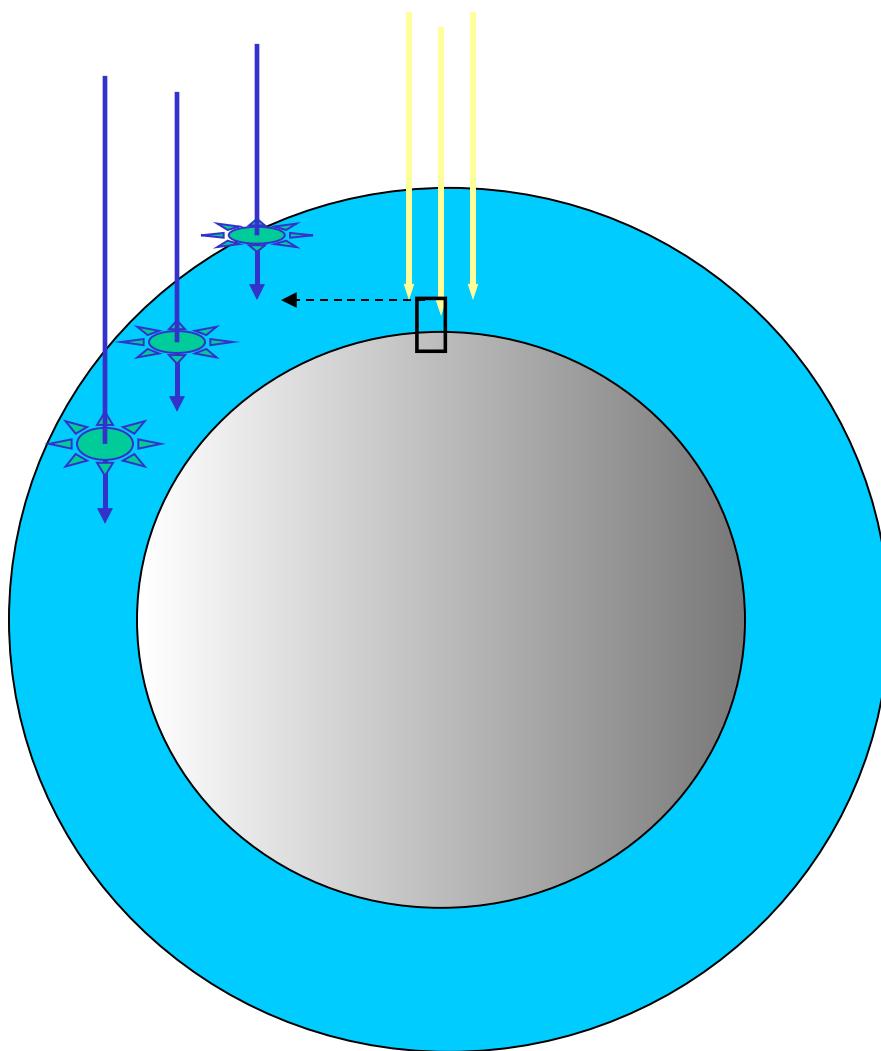
$\lambda$ (nm)	Distància (Km)
Blau    400 nm	21
Verd    500 nm	53
Vermell    700 nm	130

Dispersió Rayleigh    $d \ll \lambda$   
(molècules aire)



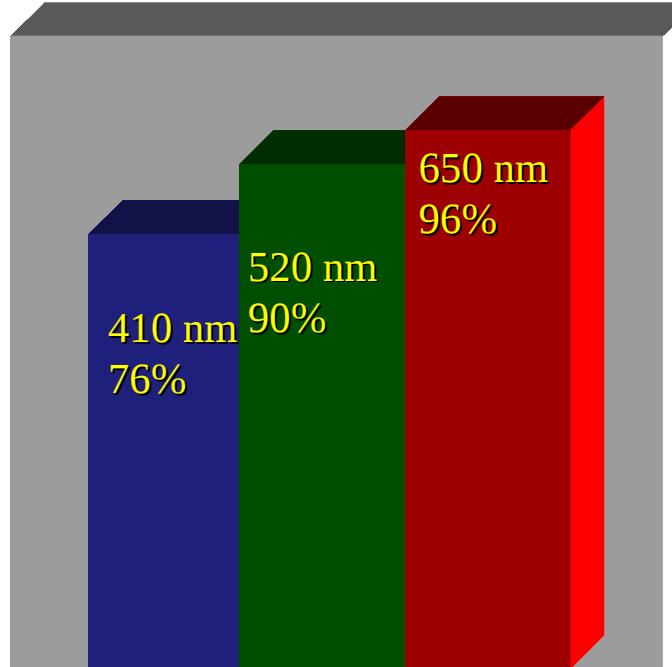
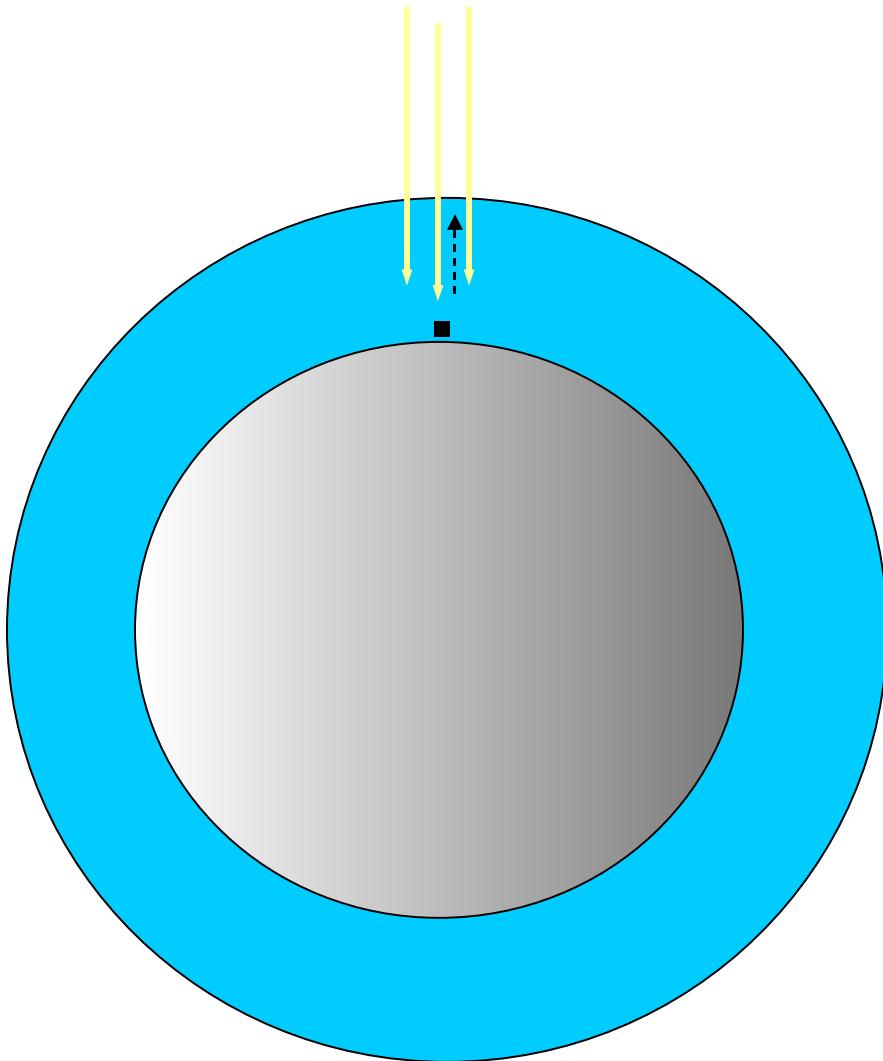
## 7.4. Dispersión

El color del Cel:



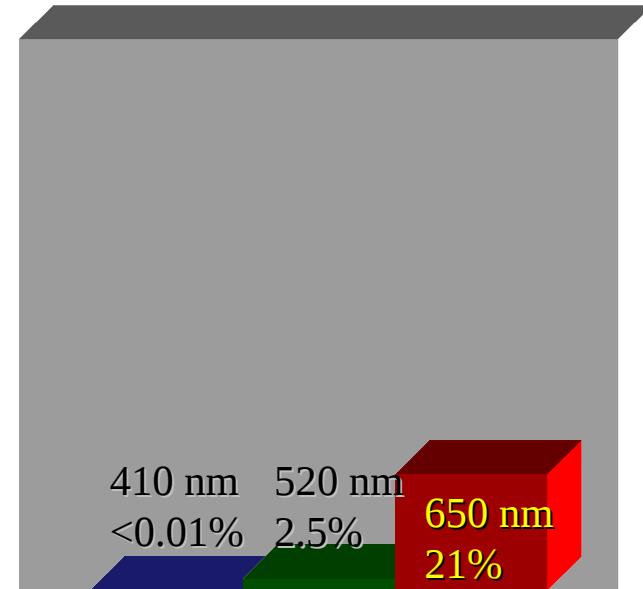
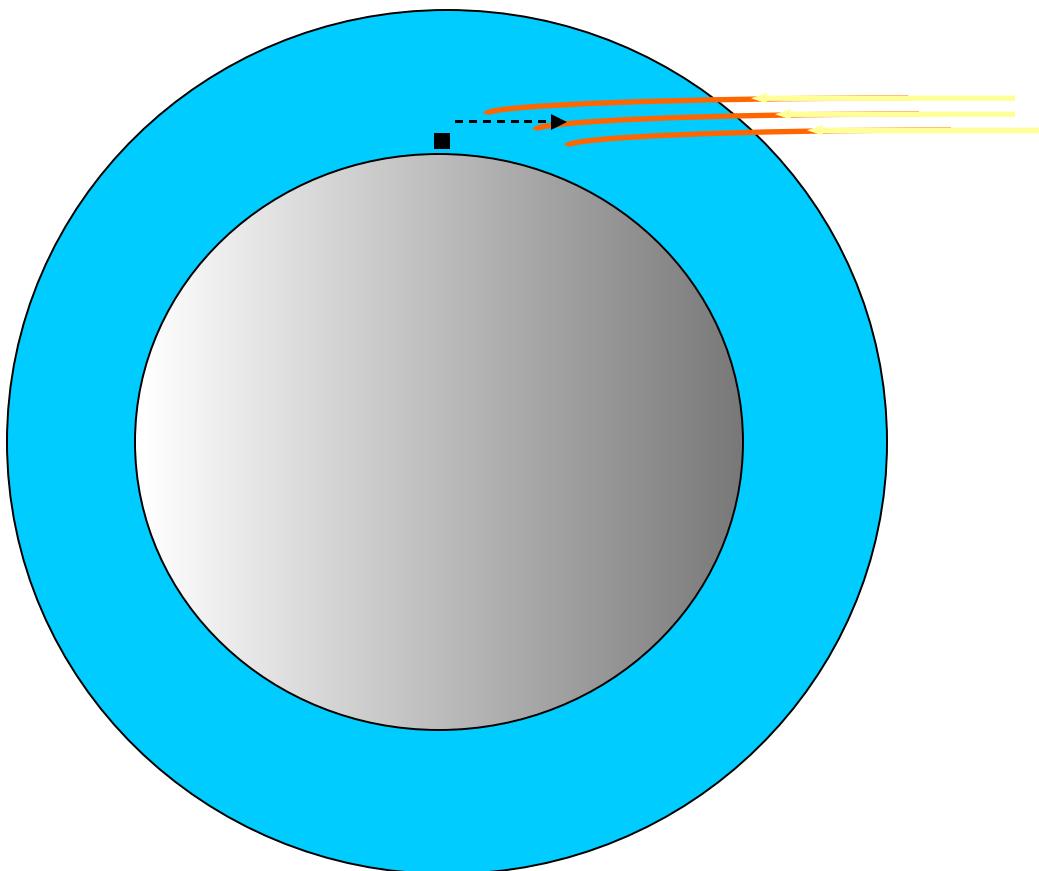
## 7.4. Dispersión

El color del Sol:



## 7.4. Dispersión

El color del Sol:



Oscilaciones, ondas y termodinámica

# El color del cel i del sol



Per efecte de la dispersió de les molècules d'aire, el color del cel és blau. La llum transmesa, sense el component blau, apareix de color groc-vermell

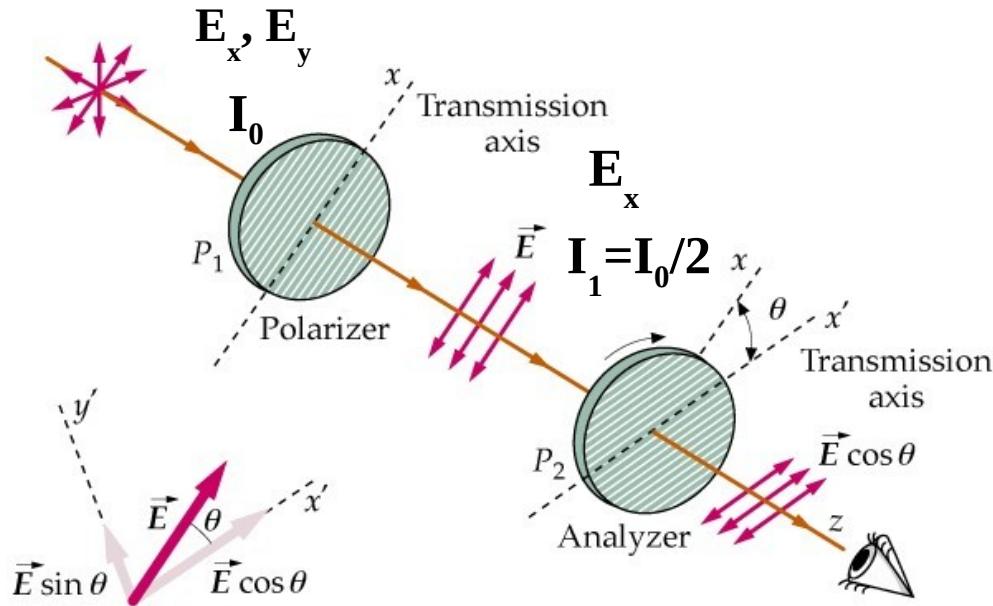
## 7.5. Polarización

$$E_0 = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

$$I_0 \approx E_0^2 = 2E_x^2$$

$$E_1 = E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$$

$$I_1 \approx E_x^2 \approx \frac{I_0}{2}$$



$$E_x \cos \theta$$

$$I_2 = I_0/2 \cos^2 \theta$$

I

$$E_2 = E_x \cos \theta$$

$$I_2 \approx E_2^2 \approx \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

$$E = E_x \cos \theta$$

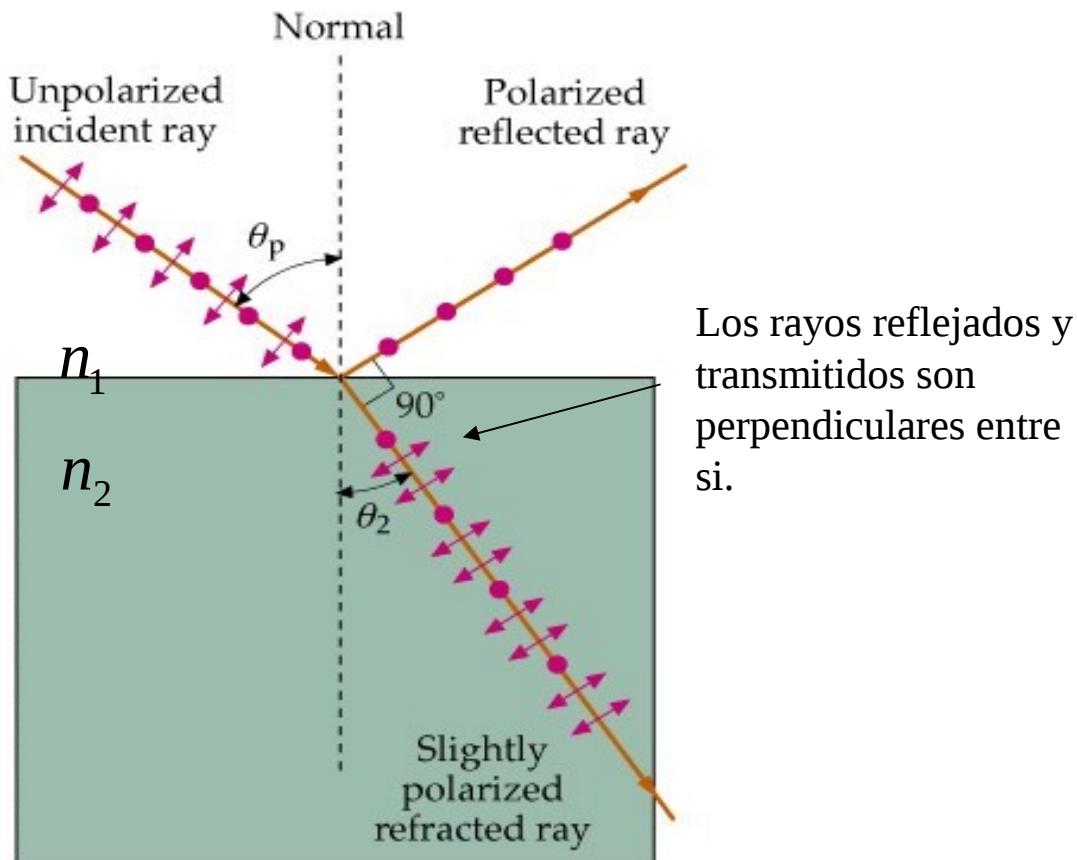
$$I \propto E^2$$

$$\left. \begin{array}{l} E = E_x \cos \theta \\ I \propto E^2 \end{array} \right\} \rightarrow I = I_1 \cos^2 \theta$$

la ley de Malus

## 7.5. Polarización

### Polarización por reflexión. Ángulo de Brewster



### Ley de Brewster

$$\begin{cases} n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2 \\ \theta_2 = 90^\circ - \theta_p \end{cases}$$

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \cos \theta_p$$

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

ángulo de Brewster

Se origina debido a la presencia de dipolos en el material

### Problema 59

Dos polarizadores tienen sus ejes de transmisión cruzados, de manera que la luz no los puede atravesar. Insertamos entre ellos un tercer polarizador, cuyo eje de transmisión forma un ángulo  $\phi$  con el eje del primer polarizador. Sobre el primer polarizador incide luz no polarizada de intensidad  $I_0$ .

- Calcular la intensidad  $I_3$  de la luz transmitida a través de los 3 polarizadores en función del ángulo  $\phi$ .
- ¿Para qué valor del ángulo  $\phi$  la transmisión es máxima, y cuánto vale en este caso la intensidad de la luz transmitida?

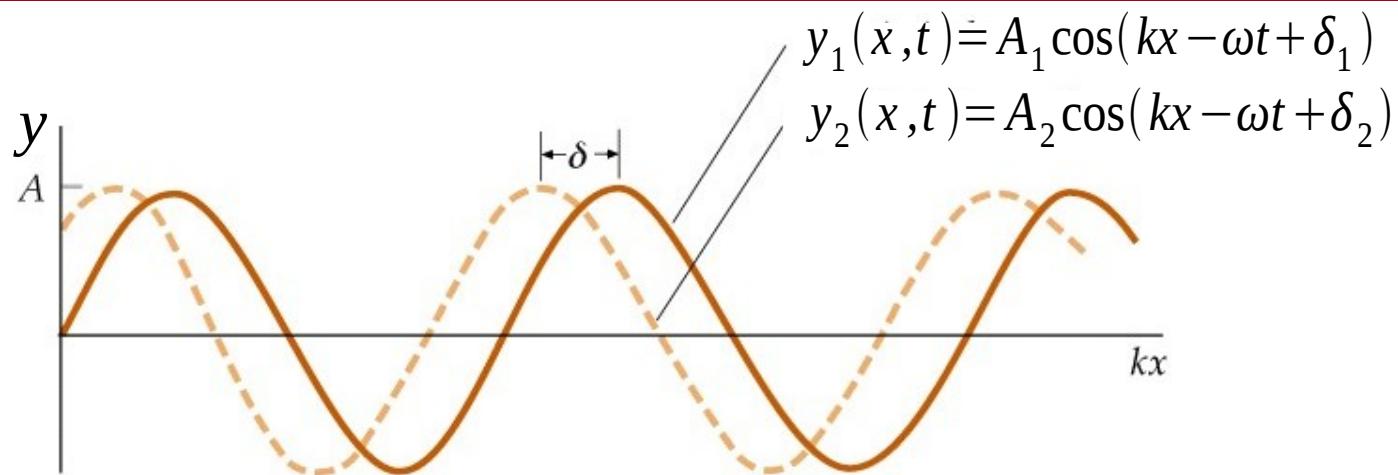
## 7.6. Interferencias

**Principio de superposición:** cuando dos o varias ondas se combinan la onda resultante es la suma algebraica de las ondas individuales.

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^n y_i(x,t) \text{ donde } y_i(x,t) = A_i \cos(kx - \omega t + \delta)$$

- Superposición de ondas armónicas de igual frecuencia y dirección de propagación, pero de sentido contrario: **ONDAS ESTACIONARIAS**
- Superposición de ondas armónicas de igual dirección y sentido de propagación, pero con frecuencias ligeramente distintas: **PULSACIONES**
- Superposición de ondas armónicas que tienen la misma frecuencia y longitud de onda:  
**INTERFERENCIAS CONSTRUCTIVAS Y DESTRUCTIVAS**
  - que se propagan en la misma dirección
  - que se propagan en direcciones distintas

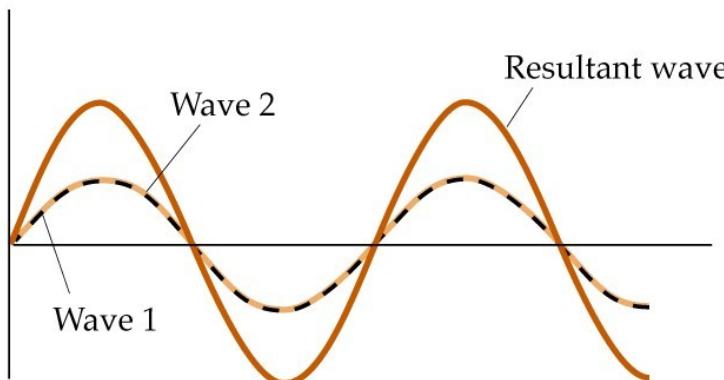
## 7.6. Interferencias



$$y = 2 y_0 \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cos\left(kx - \omega t + \frac{\delta}{2}\right) \quad \text{con } \delta = \delta_2 - \delta_1$$

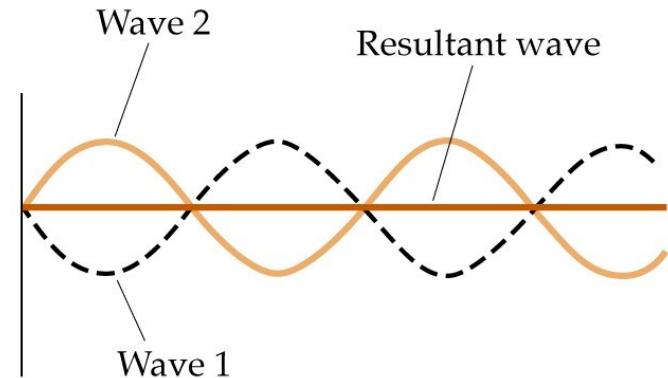
### INTERFERENCIAS CONSTRUCTIVAS

$$A_1 = A_2, \delta = 0$$



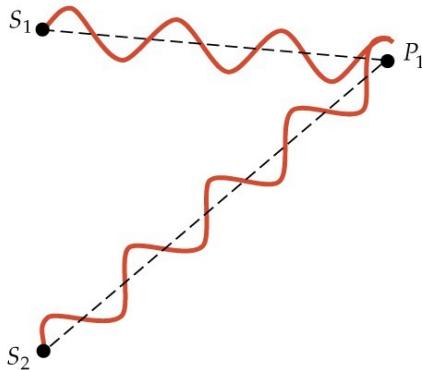
### INTERFERENCIAS DESTRUCTIVAS

$$A_1 = A_2, \delta = \pi$$



## 7.6. Interferencias

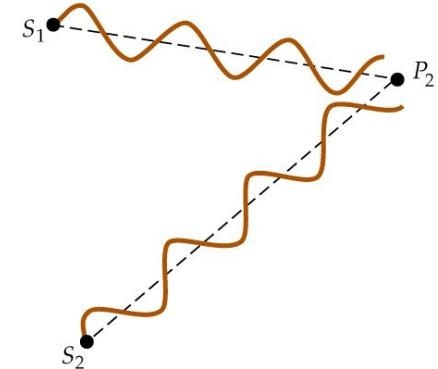
### Desfase y 'diferencia de caminos'



interferencia  
constructiva ( $\delta = 0$ )

$$\delta = k \Delta x = k(x_1 - x_2)$$

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda}$$



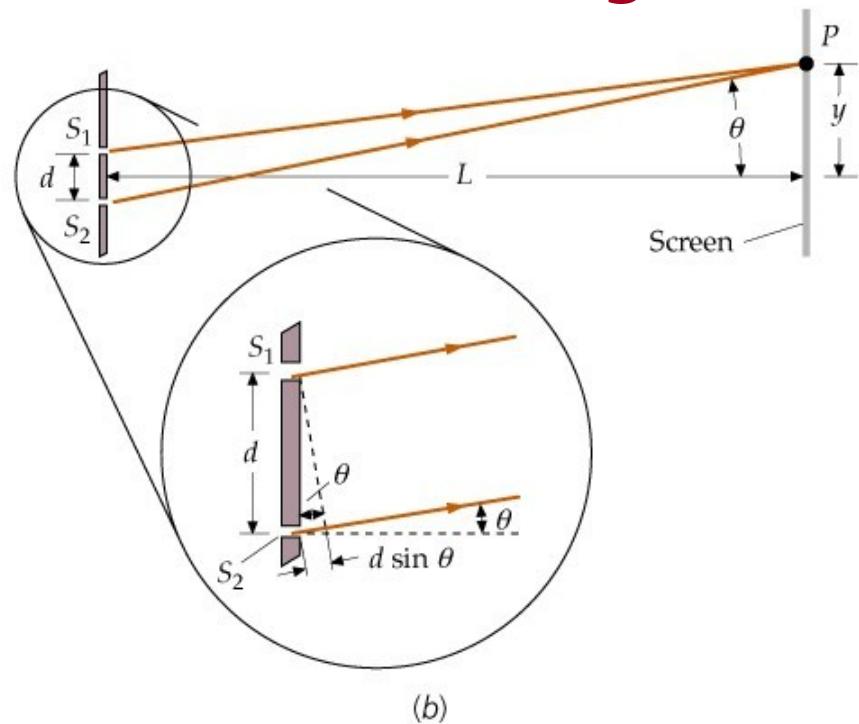
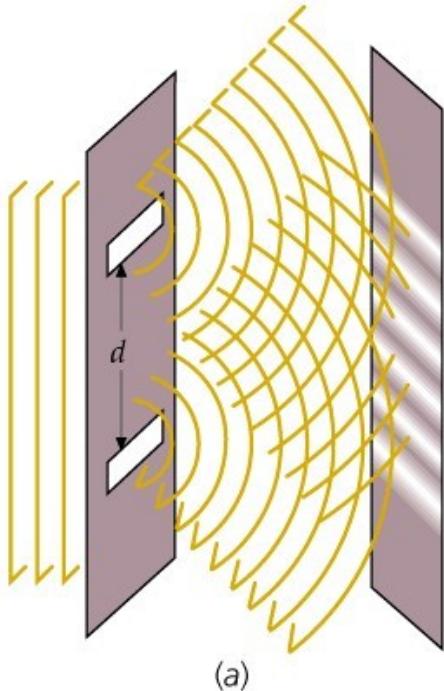
interferencia  
destructiva ( $\delta = 180^\circ$ )

Interferencia constructiva ( $\delta = n 2\pi$ )  $\rightarrow \Delta x = n \lambda$

Interferencia destructiva ( $\delta = n \pi$ )  $\rightarrow \Delta x = n \frac{\lambda}{2}$

## 7.6. Interferencias

### Interferencias - experimento de Young



Condición de máximo:

$$d \frac{y}{L} = m \lambda$$

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



$$y = m \frac{\lambda L}{d}$$

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L}$$

## 7.6. Interferencias

### Aplicación interferencia por 2 rendijas: (colección de problemas)

Un rayo se luz monocromática incide sobre dos rendijas paralelas que están separadas por una distancia  $d=0.8\text{mm}$ . A  $L=50\text{ cm}$  de las rendijas hay una pantalla sobre la cual se ven franjas de interferencia. Si la distancia sobre la pantalla entre  $n=11$  franjas oscuras consecutivas es de  $\Delta y=3.04\text{ mm}$ , ¿cuál es la longitud de onda de la luz utilizada?

### Aplicación interferencia en películas delgadas: (colección de problemas)

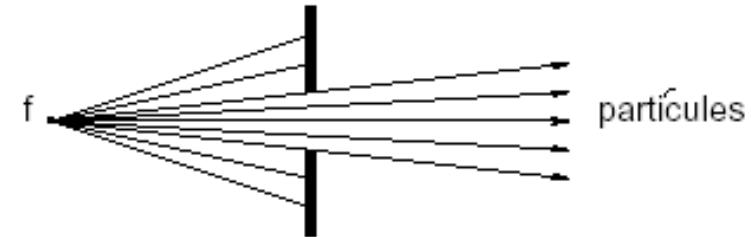
Determinar el grosor mínimo  $t_m$  que tiene que tener una película delgada de jabón para que parezca negra cuando se observa en incidencia normal con luz monocromática verde de  $\lambda = 600\text{nm}$ . El índice de refracción del agua con jabón es 1.4.

$$\text{Solución: } t_m = m \frac{\lambda_{\text{aire}}}{2n}$$

## 7.6. Difracción

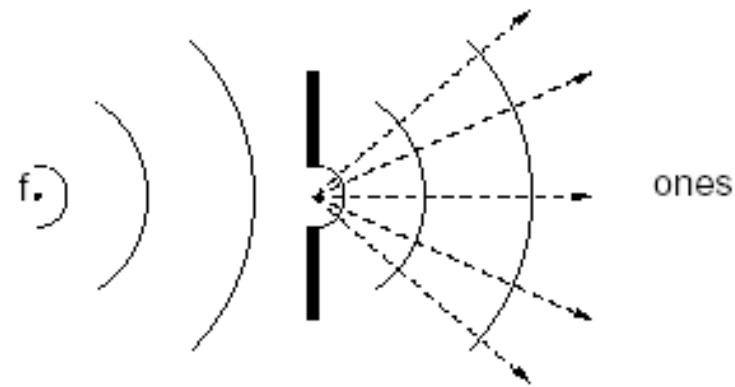
### Partículas que atraviesan una apertura en una barrera:

- pasan solo aquellas cuyas trayectorias pasa por la apertura, sin que esta trayectoria esté afectada;
- estas partículas estarán confinadas en un ángulo sólido pequeño.



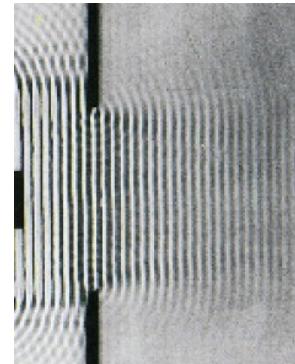
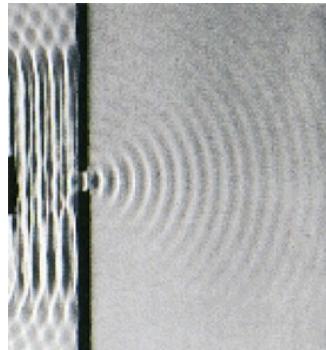
### Ondas que atraviesa una apertura en una barrera:

- cada punto del frente de onda que llega a la apertura actúa como un foco emisor puntual;
- las ondas (representadas por sus rayos) se transmiten en un ángulo más grande que en el caso de las partículas.



**Difracción:** fenómeno que se produce cuando se limita una parte del frente de onda.

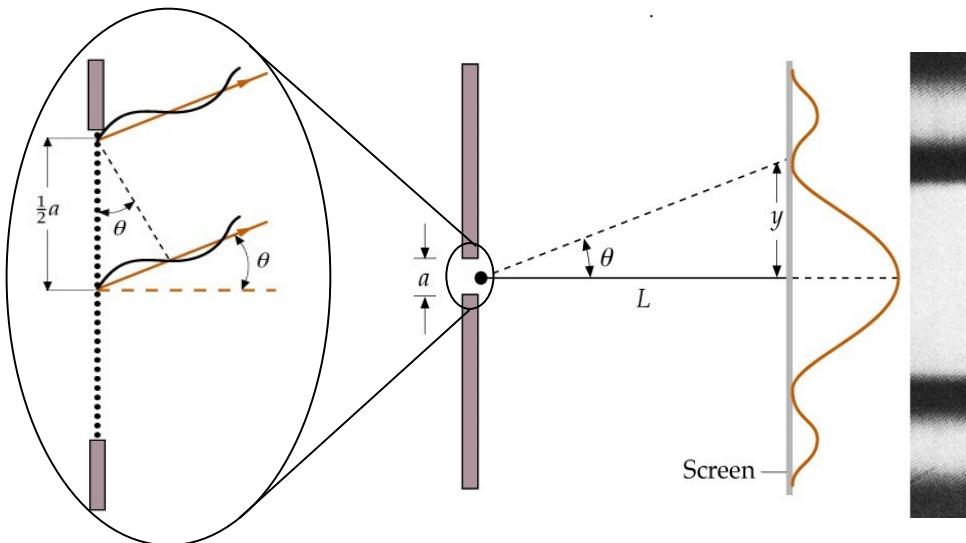
Este fenómeno se observa cuando el tamaño de esta apertura es comparable con la longitud de onda.



## 7.6. Difracción

**Difracción por una rendija :** la intensidad en una pantalla lejana presenta franjas de intensidad máxima y mínima.

- $L \gg a$  (rayos paralelos): difracción de Fraunhofer
- $L \sim a$  (rayos no paralelos): difracción de Fresnel

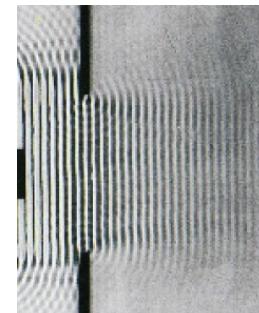
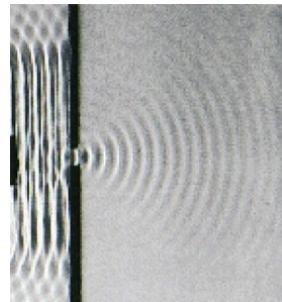


$$I(\theta) = I_0 \left| \frac{\sin\left(\frac{2\pi a \sin \theta}{2\lambda}\right)}{\frac{2\pi a \sin \theta}{2\lambda}} \right|^2$$

**condición de mínimo de intensidad:**

$$\frac{a}{2} \sin \theta = n \frac{\lambda}{2}, \quad n=1,2,3,\dots$$

$$\rightarrow \sin \theta = n \frac{\lambda}{a}$$



$$\frac{y}{L} = n \frac{\lambda}{a}$$

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L}$$

Oscilaciones, ondas y termodinámica

## 7.6. Difracción

### Difracción por varias rendijas

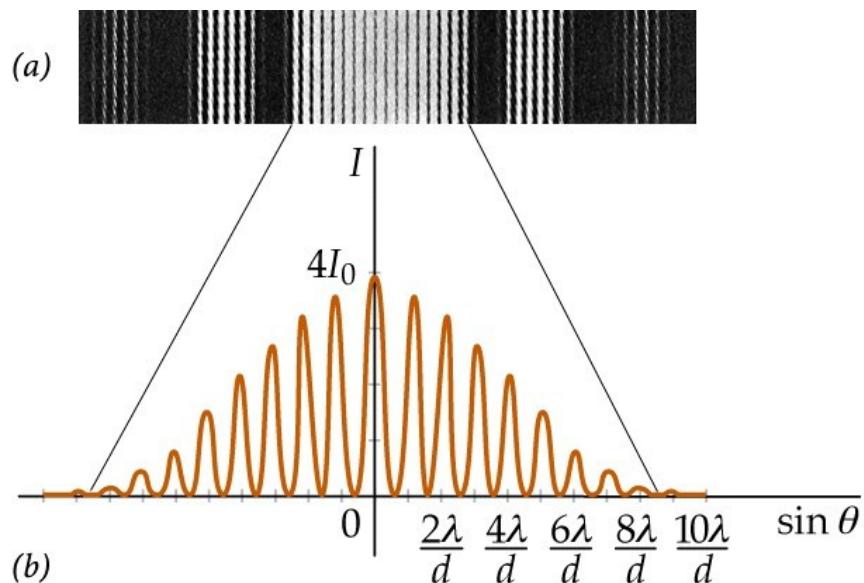
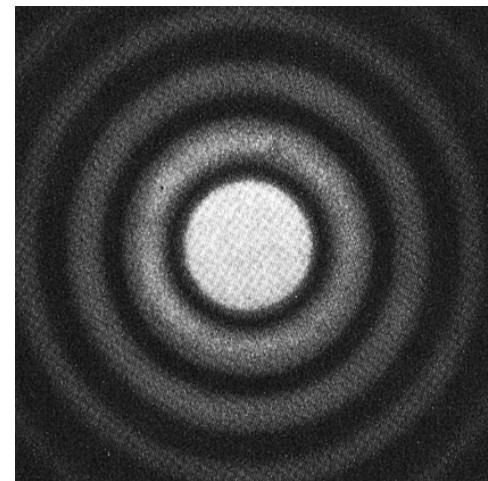


Diagrama de interferencia-difracción por 2 rendijas de anchura a separadas por una distancia  $d=10a$

### Difracción por una rendija circular

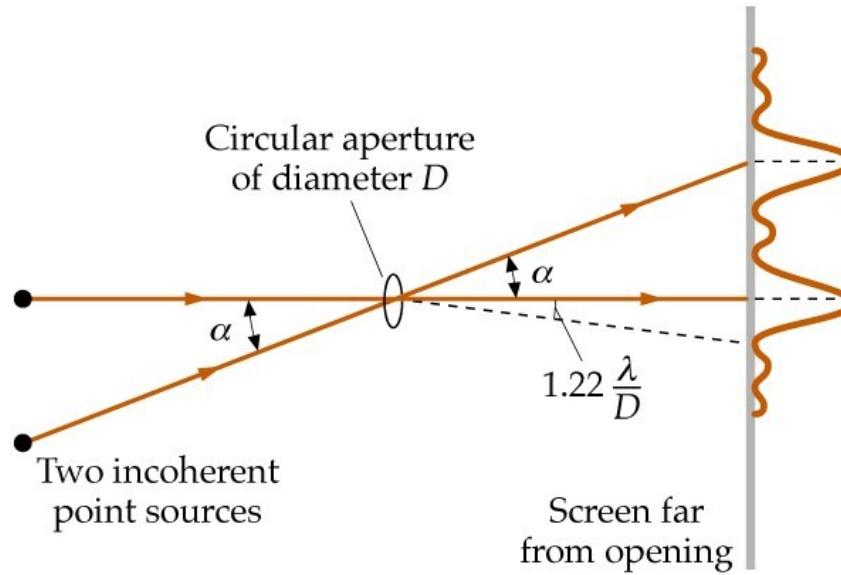


El mínimo de intensidad aparece para:

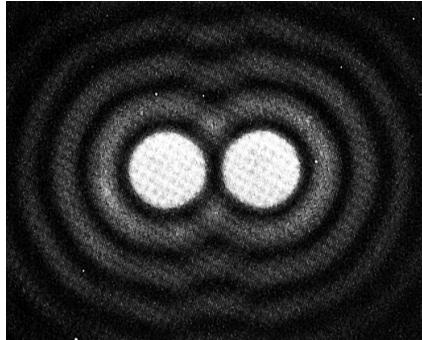
$$\sin \theta = 1.22m \frac{\lambda}{D}$$

## 7.6. Difracción

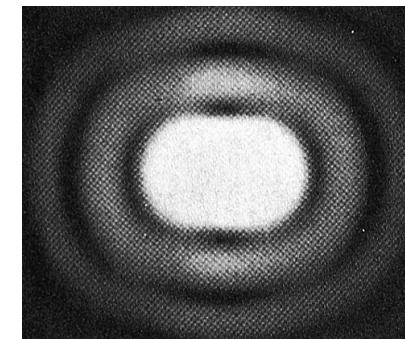
### Criterio de resolución de Rayleigh



$$\alpha > \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

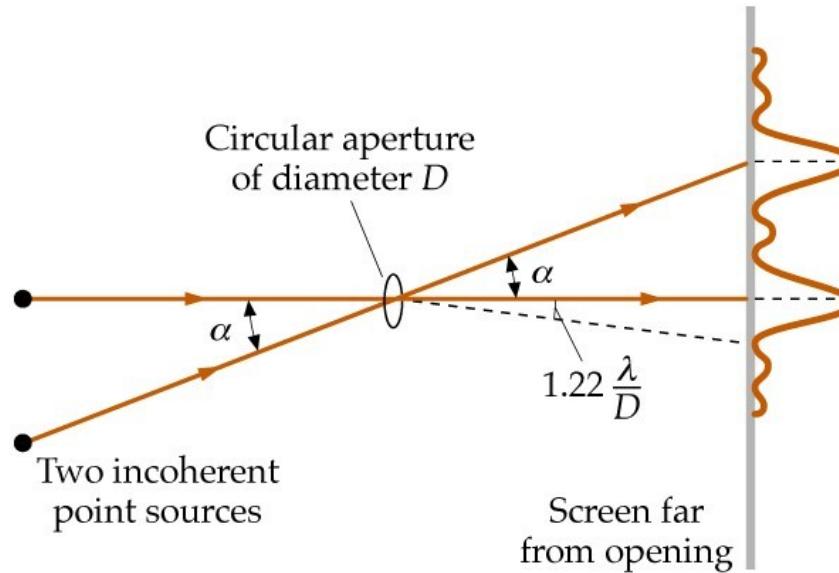


$$\alpha_c = \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$



## 7.6. Difracción

### Criterio de resolución de Rayleigh



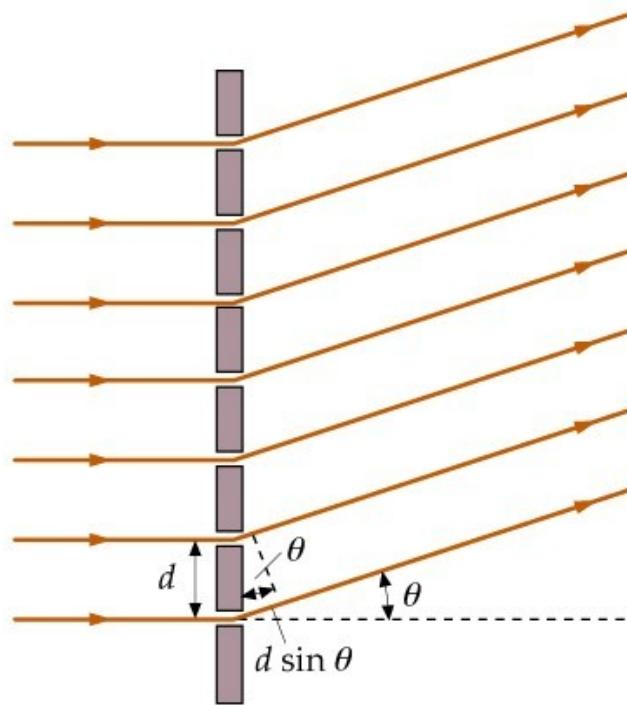
$$\alpha_c = \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

**Ejercicio:** Una cámara digital compacta tiene un CCD de formato 4/3 de 1/2.5" (5.76x4.29 mm<sup>2</sup>) y 8 megapixels. La máxima apertura que soporta el diafragma es Dmax=8mm y éste se encuentra a L=3cm del sensor. Atendiendo al criterio de Rayleigh, determinar cuál es un número máximo razonable de megapixels que debería tener la camara.

## 7.6. Difracción

Una **red de difracción** consiste en un gran número de rendijas de igual espesor y espaciadas igualmente sobre una superficie plana.

Una red de difracción para la luz visible tiene unas 10.000 rayas/cm  $\rightarrow d=10^{-6}$  m



**condición de máximo de intensidad:**

$$d \sin \theta = \frac{1}{N} \sin \theta = m\lambda$$

$$d \sin \theta = \frac{1}{N} \sin \theta = m\lambda$$

N – número de rendijas por metro  
d – la distancia entre dos rendijas