

Natureza da luz e das ondas eletromagnéticas

Evolución das teorías acerca da natureza da luz

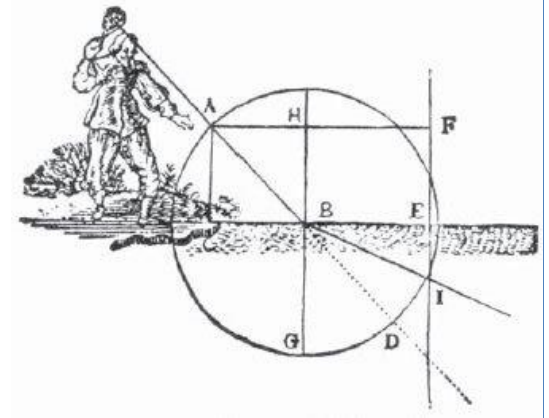
1. Modelo corpuscular
2. Modelo ondulatorio
3. Fenómenos ondulatorios da luz

Natureza da luz: primeiros modelos

- Na antiguidade:
 1. **Leucipo** (450 a.e.c) da escola atomística entendía que os obxectos emitían “imaxes”, auténticos halos capaces de chegar aos nosos ollos proporcionando toda a información visual.
 2. **Apuleio** (400 a.e.c) da escola pitagórica afirmaba que o que acontecía era que os nosos ollos “palpaban” os obxectos por medio dunha lapa invisíbel e recibía as sensacións das cores e das dimensións. Un pouco máis tarde Euclídes (300 a.e.c) fala xa directamente dun “raio” emitido polos ollos.
- Na idade media **Alhacen de Basora** (965-1039) expresa que a luz procedente do Sol está formada por proxetís que inciden nos obxectos e ao rebotaren neles inciden nos ollos provocando a visión. Baixo esta perspetiva, deduce a lei da reflexión que fora xa expresada por Euclídes.

Modelo corpuscular

- Willebrond Snell (1580-1626) descubre as leis da refracción da luz.
- René Descartes (1596-1650) na súa obra “Óptica” estuda a refracción e a reflexión da luz escollendo o modelo da pelota que rebota.
- Isaac Newton (1642-1727) adoita o modelo mecánico de Descartes .



Modelo ondulatorio

- Christiaan Huygens (1629-1695) explica a luz recorrendo ao mesmo modelo que para o son, a luz é un fenómeno ondulatorio mecánico que polo tanto precisaba un medio para propagarse. Este medio era o “éter”, un suposto fluído que estaría mesmo no espazo interestelar.
A súa teoría topaba un grande problema ao non poder comprobar a difracción da luz.
- Thomas Young (1773-1829) comproba a difracción da luz co seu experimento da dobre fenda e proba o modelo ondulatorio da luz.

A unificación eletromagnética e a natureza ondulatoria da luz (ver vídeo)

- <https://youtu.be/tS52z0ISK5g>

As ecuacións de Maxwell

1ª Lei: é o teorema de Gauss aplicado ao campo eléctrico:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{interior}}{\epsilon_0}$$

2ª Lei: é o teorema de Gauss aplicado ao campo magnético:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

3ª Lei: é a lei de Faraday-Henry-Lenz que explica os fenómenos

da indución magnética: $\epsilon = -\frac{d\phi_M}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$ nesta

expresión, podemos considerar: $\epsilon = V = \oint \vec{E} \cdot d\vec{r}$ e como xa

vimos obtemos: $\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$

A 4ª ecuación de Maxwell

- A 4ª ecuación de Maxwell ven sendo a Lei de Ampère, que xa vimos e comentamos o seu significado.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \cdot I \quad (1)$$

- Maxwell aposta porque tamén un campo eléctrico variábel, é quen de producir un campo magnético. A esa corrente denomínalle “corrente de desprazamento”

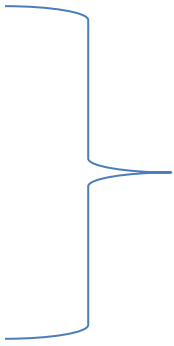
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot I_d \quad (2)$$

- Un par de cambios:

$$1) \quad I_d = \frac{dq}{dt}$$

$$2) \quad d\phi_E = \frac{dq}{\epsilon_0} \rightarrow dq = \epsilon_0 \cdot d\phi_E$$

$$3) \quad \phi_E = \iint \vec{E} \cdot d\vec{S}$$


$$I_d = \epsilon_0 \cdot \frac{d \iint \vec{E} \cdot d\vec{S}}{dt}$$

A 4ª ecuación de Maxwell

- E enton a ecuación (2) :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \frac{d \iint \vec{E} \cdot d\vec{S}}{dt}$$

1. A terceira ecuación (ley de Faraday-Henry-Lenz) decia que a variación do fluxo magnetico produce un campo eléctrico que non é conservativo.
2. A cuarta ecuación, que resolvía a experiencia de Oersted e que decía que o campo magnético non é conservativo, expresa agora tamén que a variación do fluxo eletrico produce un campo magnético.

A 4ª ecuación de Maxwell

- Imos revisar o produto $\mu_0 \cdot \varepsilon_0$:

$$1) \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$$

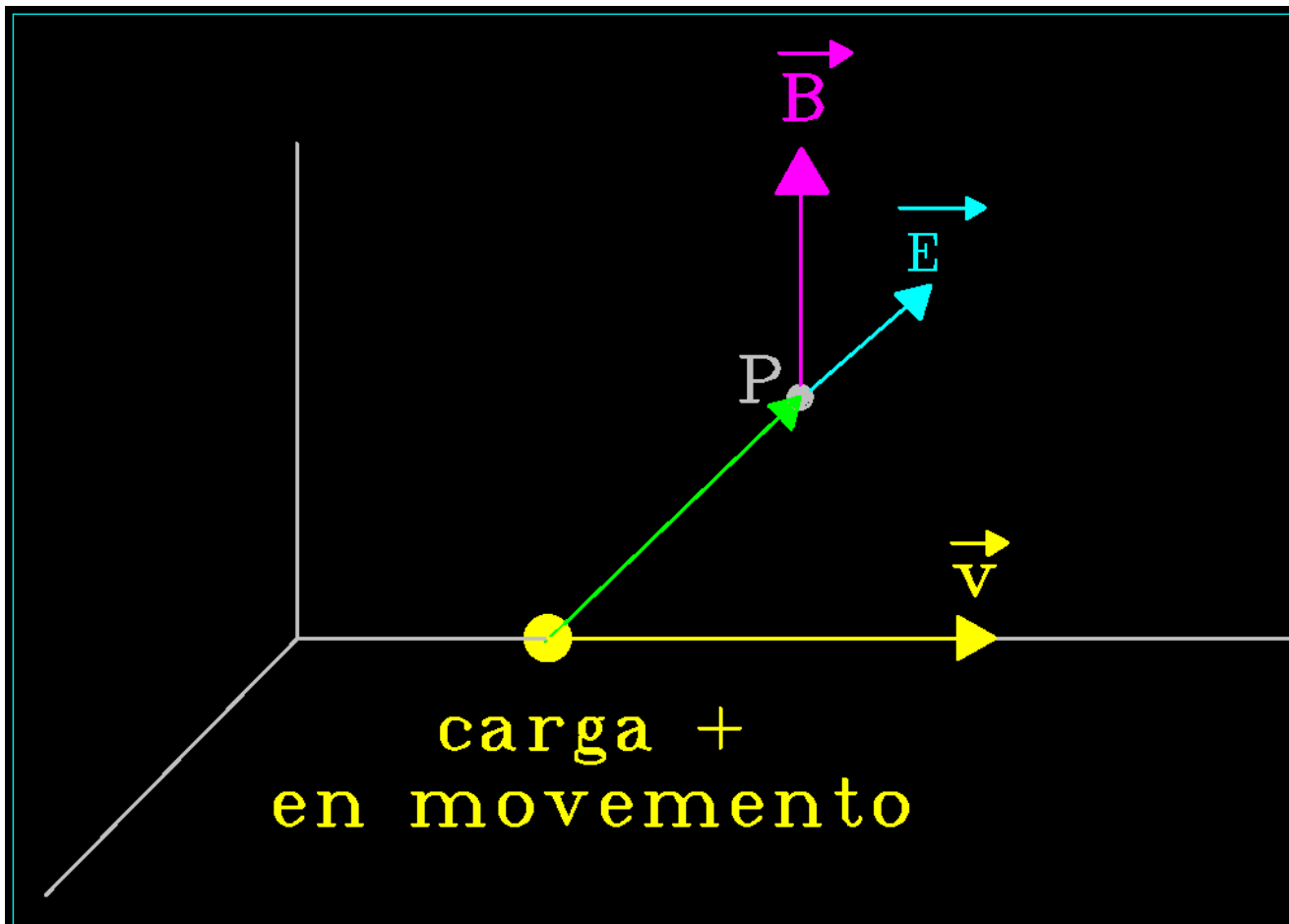
$$2) \varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ A}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\mu_0 \cdot \varepsilon_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^2 = \frac{1}{9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}} = \frac{1}{c^2}$$

- Como vemos, o termo que relaciona ao campo eléctrico variabel co campo magnético, tamén variabel, é c^2 , o cadrado da velocidade da luz.

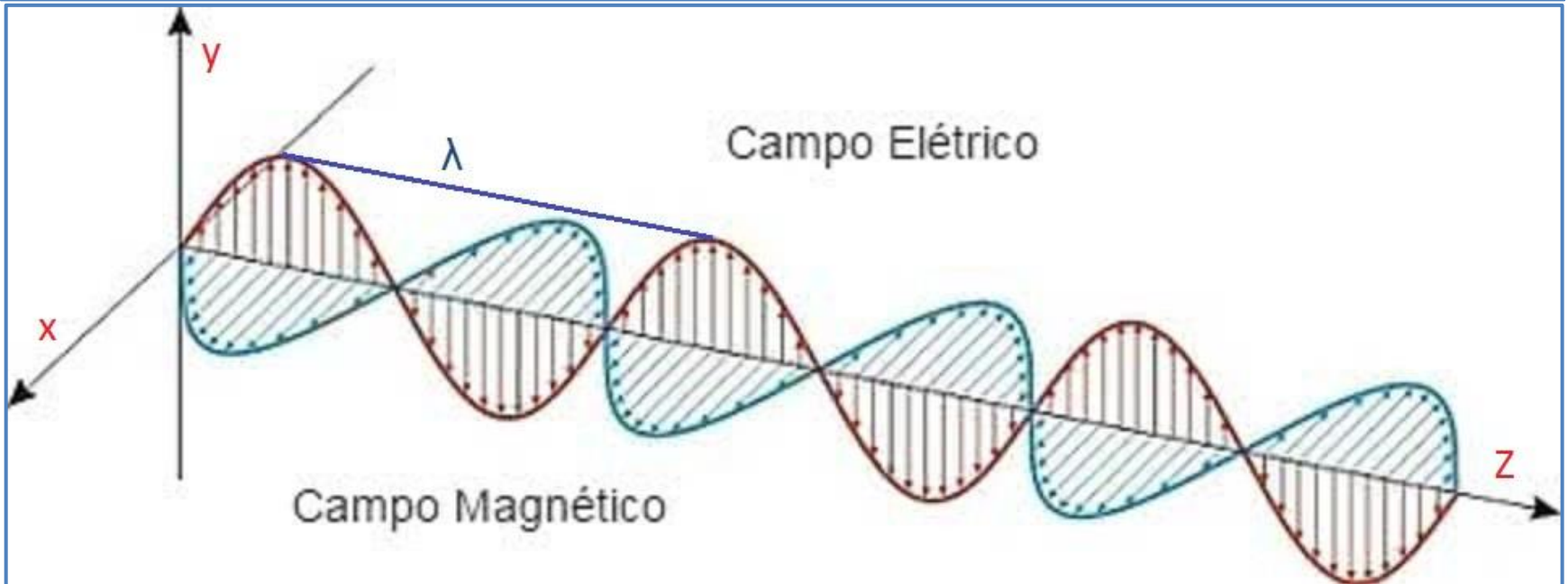
As ondas eletromagnéticas

- O campo elétrico e o campo magnético criados por unha carga en movimento son perpendiculares:



As ondas eletromagnéticas

- A variación dun campo magnético oscilante produce un campo eléctrico perpendicular a aquel e tamén oscilante e un campo eléctrico oscilante produce un campo magnético tamén variábel.
- Os dous efectos combinados daran lugar a dous campos acoplados relacionados, interdependentes e perpendiculares entre si.



Ecuación da onda eletromagnética

- As ecuacións dos campos eléctrico e magnético, son as ecuacións dunha onda harmónica

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - k \cdot z + \theta_0) , \text{ na que}$$

\vec{E}_0 =valor máximo

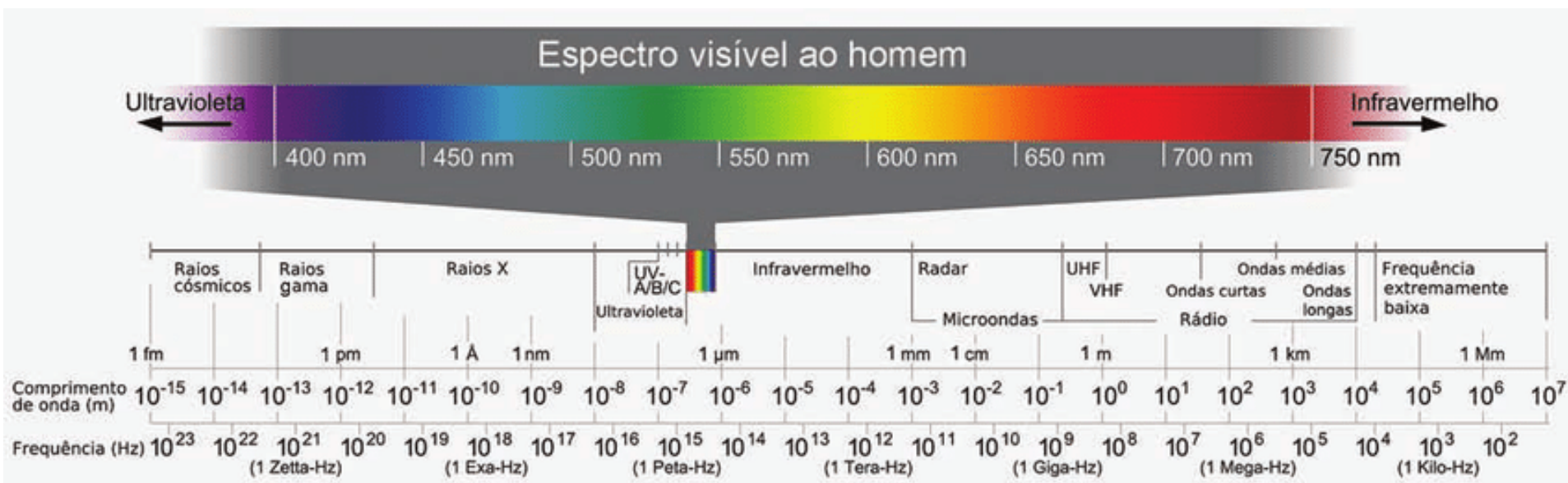
$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - k \cdot z + \theta_0) , \text{ na que}$$

\vec{B}_0 =valor máximo

- Ademais comprobase que : $E = c \cdot B$

Espectro eletromagnético

- É o conxunto de todas as OEM distribuídas segundo a súa frecuencia ou outras magnitudes asociadas como a enerxía ou a lonxitude de onda.

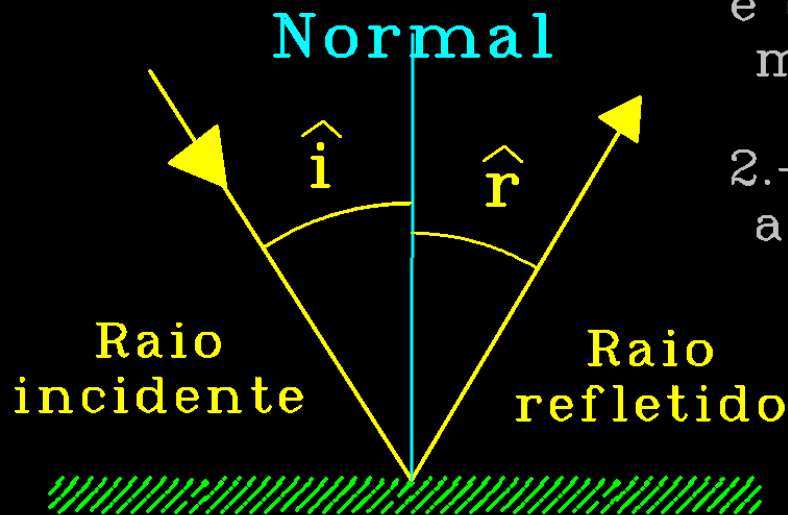


Fenómenos ondulatorios da luz: reflexión , refracción e difracción



Fenómenos ondulatorios: reflexión

A luz, onda eletromagnética, da comprimento ás leis sobre a reflexión como as ondas mecánicas



- 1.-A normal, o raio incidente e o raio refletido, estan no mesmo plano.
- 2.-O angulo incidente e o angulo de reflexión son iguais.

Fenómenos ondulatorios: refracción

- A velocidade da luz é distinta segundo o medio que percorre.

Por exemplo: vacío ou ar: $c = 300\,000 \frac{km}{s}$

$$\text{Auga: } v_{auga} = 225\,000 \frac{km}{s} \quad \text{Vidro: } v_{vidro} = 200\,000 \frac{km}{s}$$

- Definimos índice de refracción de calquera medio (n) como o cociente da velocidade da luz no vacío entre a velocidade da luz nese medio. Por exemplo:

$$1. \quad \text{Auga: } v_{auga} = 225\,000 \frac{km}{s} \rightarrow n_{auga} = \frac{300\,000 \frac{km}{s}}{225\,000 \frac{km}{s}} = \frac{4}{3}$$

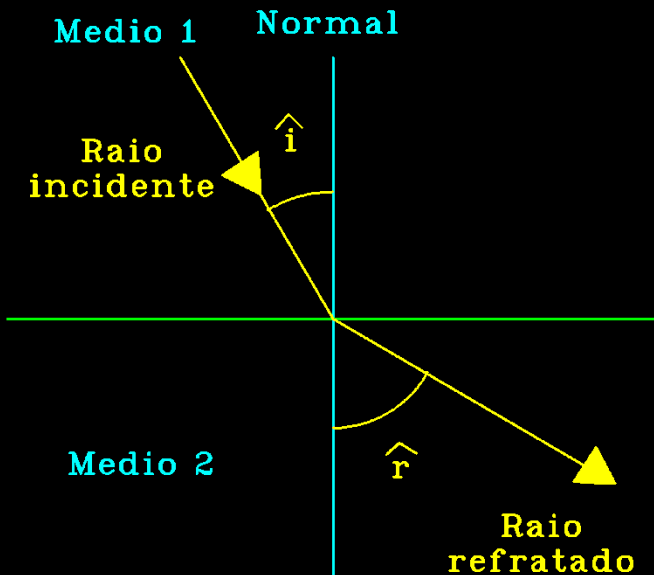
$$2. \quad \text{Vidro: } v_{vidro} = 200\,000 \frac{km}{s} \rightarrow n_{vidro} = \frac{3}{2}$$

$$3. \quad \text{Diamante: } v_{diamante} = 120\,000 \frac{km}{s} \rightarrow n_{diamante} = \frac{5}{2}$$

- Así, o medio máis rápido é o ar ou o vacío ($n=1$) e o resto teran un índice de refracción sempre maior

Fenómenos ondulatorios: refracción

- A luz refracta-se ao cambiar de medio, como calquera onda, e cumpre a lei de Snell.



1.- A normal, o raio incidente e o raio refratado están no mesmo plano.

2.- Os ángulos de incidencia e de refracción, gardan unha relación coa velocidade da onda en cada medio, dada pola lei de Snell:

$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{r}} = \frac{v_1}{v_2}$$

E tendo en conta os índices de refracción:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2}$$

$$\sin \hat{i} \cdot n_1 = \sin \hat{r} \cdot n_2$$

Fenómenos ondulatorios: refracción

- Supoñamos un raio de luz que pasa do ar á auga baixo un ángulo de incidencia de 45° , e calculemos o ángulo de refracción:

Medio 1: ar

Medio 2: auga

$$n_1 = 1 \quad \hat{i} = 45^\circ \quad \rightarrow \quad n_2 = \frac{4}{3} \quad \hat{r} = ?$$

$$1 \cdot \text{sen } 45^\circ = \frac{4}{3} \cdot \text{sen } \hat{r} \quad \rightarrow \quad \hat{r} = \mathbf{32,03^\circ} \text{ o raio achéga-se á normal}$$

- Supoñámos agora un raio de luz que pasa da auga ao ar baixo un ángulo de incidencia de 45° , e calculemos o ángulo de refracción:

Medio 1: auga

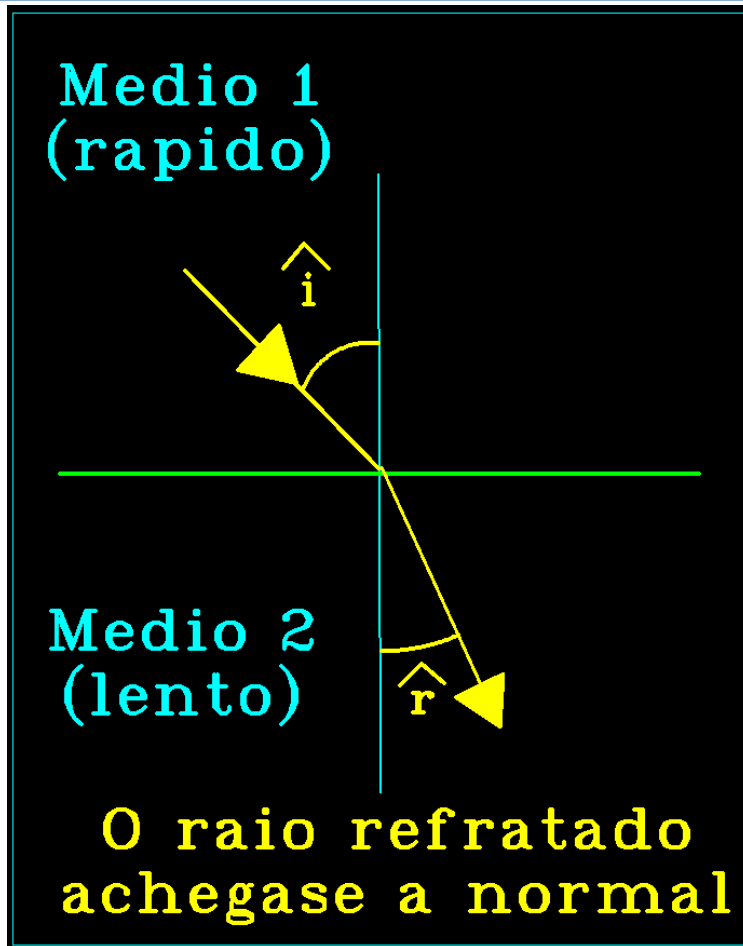
Medio 2: ar

$$n_1 = \frac{4}{3} \quad \hat{i} = 45^\circ \quad \rightarrow \quad n_2 = 1 \quad \hat{r} = ?$$

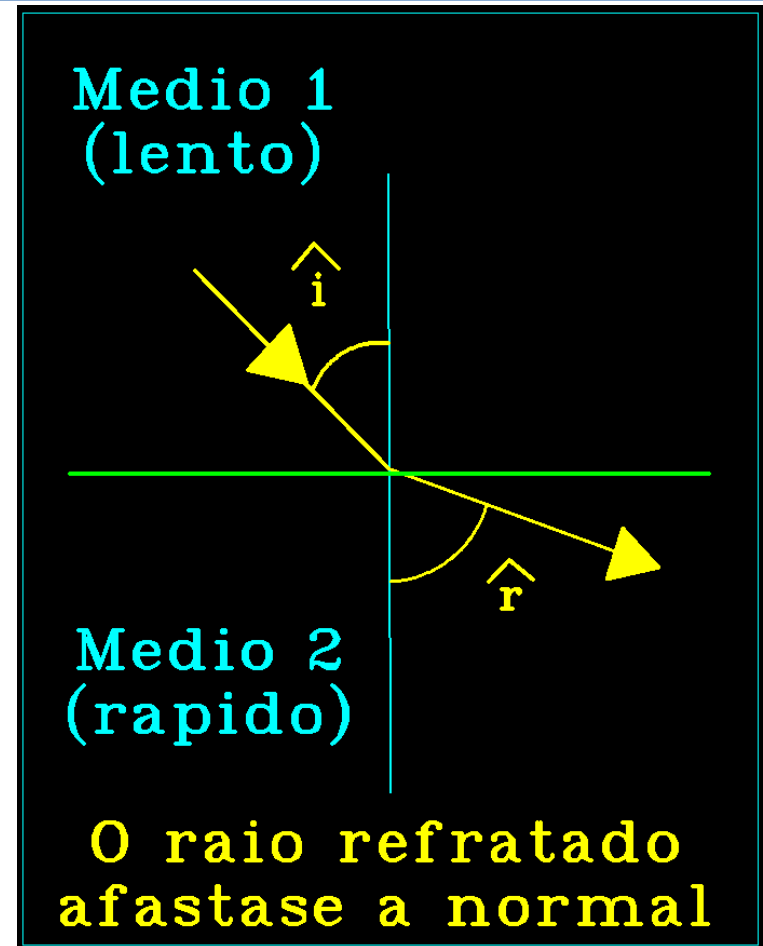
$$\frac{4}{3} \cdot \text{sen } 45^\circ = 1 \cdot \text{sen } \hat{r} \quad \rightarrow \quad \hat{r} = \mathbf{70,53^\circ} \text{ o raio afasta-se da normal}$$

Fenómenos ondulatorios: refracción

1.-Dende un medio rápido a un medio lento



2.-Dende un medio lento a un medio rápido



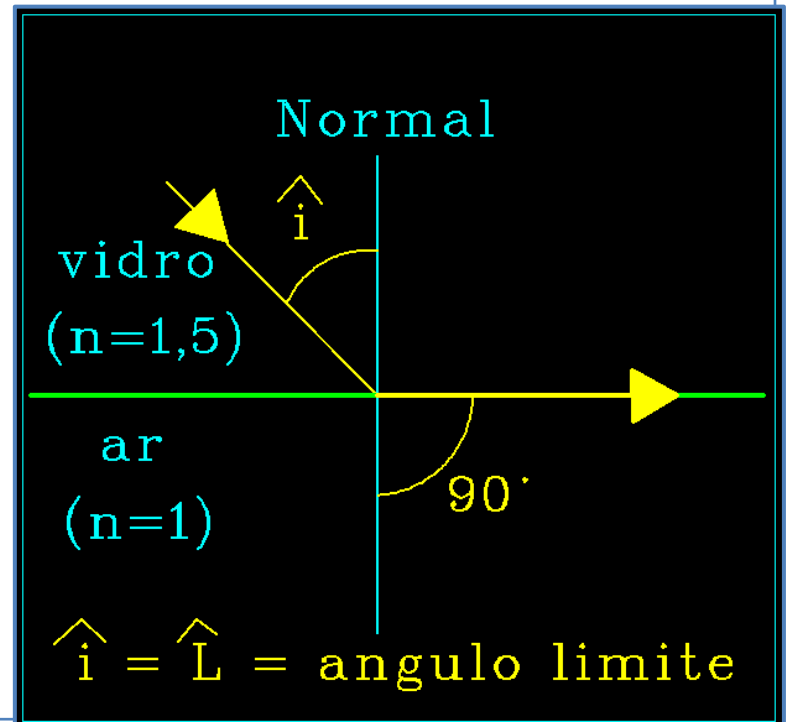
Refracción, ángulo límite e reflexión total

- Cando o raio de luz vai dun medio lento a un medio rápido, alonxase da normal.
- Chamamos **ángulo límite** ao ángulo de incidencia para o que xa non se produce refracción, senon que o raio de luz sae baixo un ángulo de 90° .
- A partir dese ángulo de incidencia deixa de haber refracción e o raio sofre a reflexión total.
- No caso da figura:

$$\text{sen}\hat{i} \cdot n_1 = \text{sen}\hat{r} \cdot n_2$$

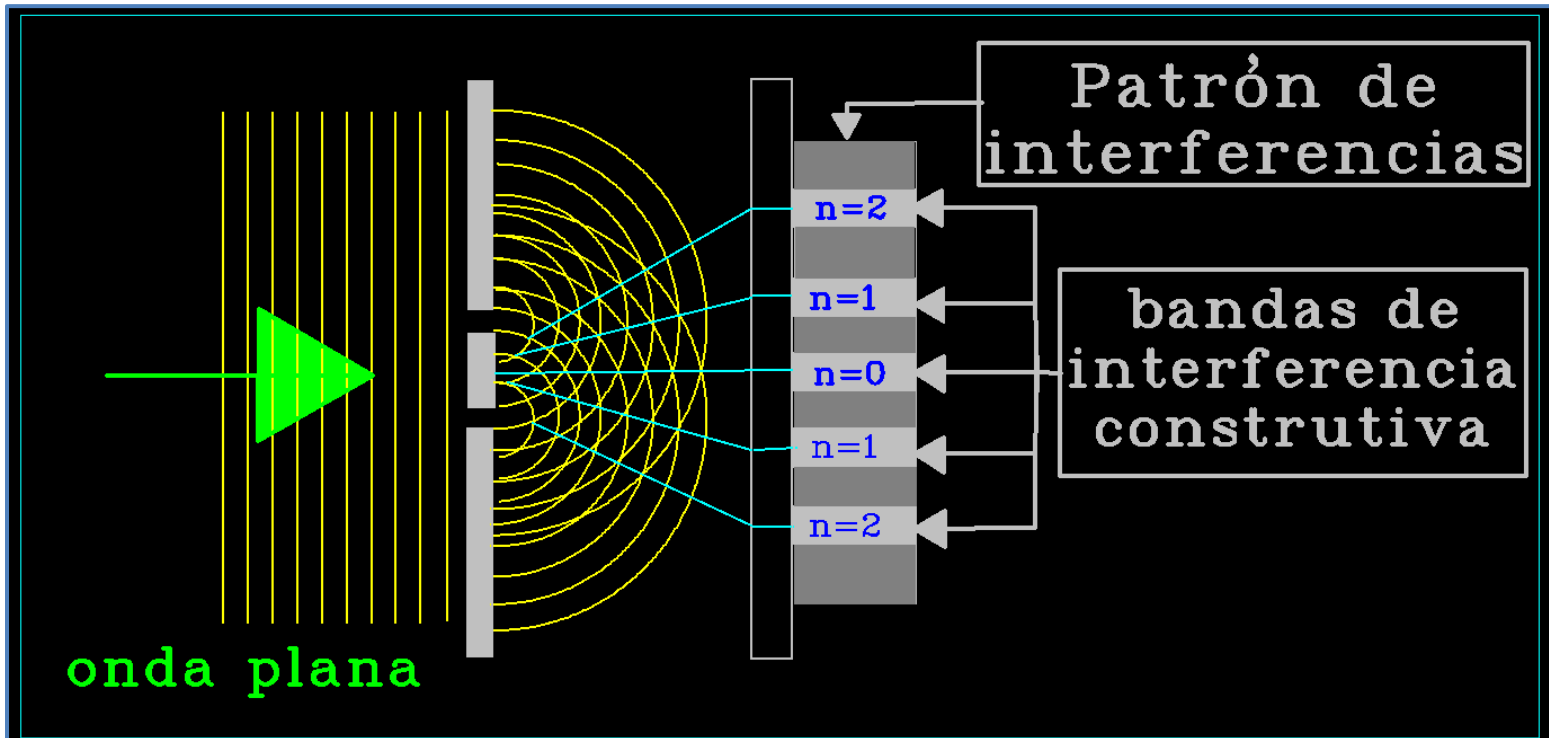
$$\text{sen}\hat{L} \cdot 1,5 = \text{sen}90^\circ \cdot 1$$

$$\hat{L} = 41,8^\circ$$



Fenómenos ondulatorios: difracción

- A difracción da luz é a desviación que sofre a onda sen cambiar de medio, cando no seu camiño encontra unha fenda ou un obstáculo que teña un tamaño do orde da súa lonxitude de onda.
- Foi Thomas Young quen comprobou, coa súa experiencia da dobre fenda, que a luz sufría difracción como calquera onda e que esa difracción traía consigo a aparición de interferencias.

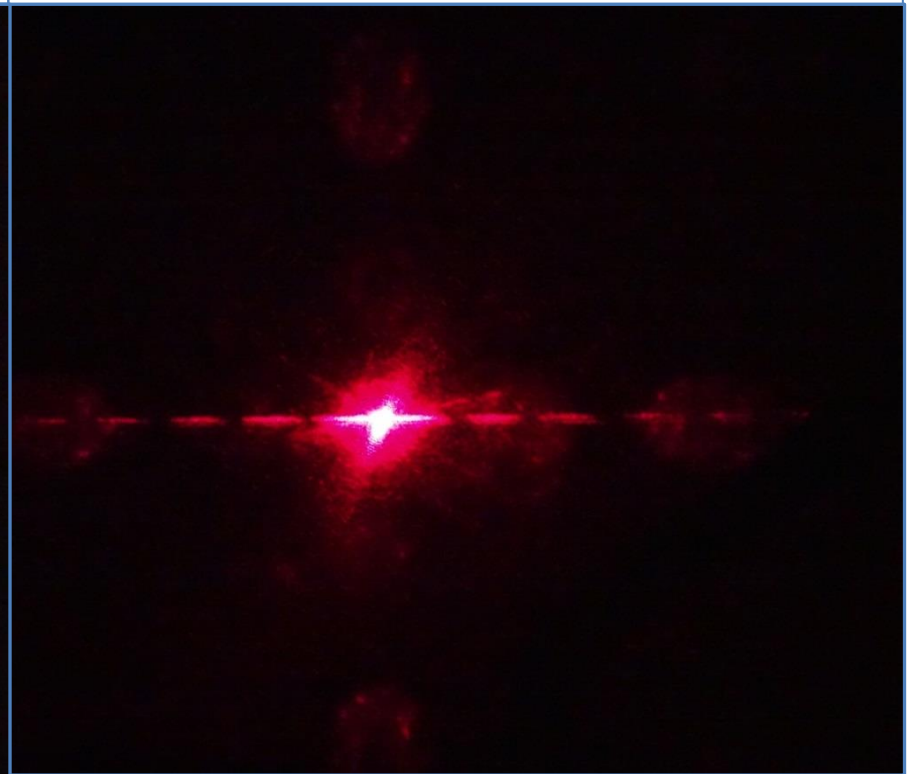
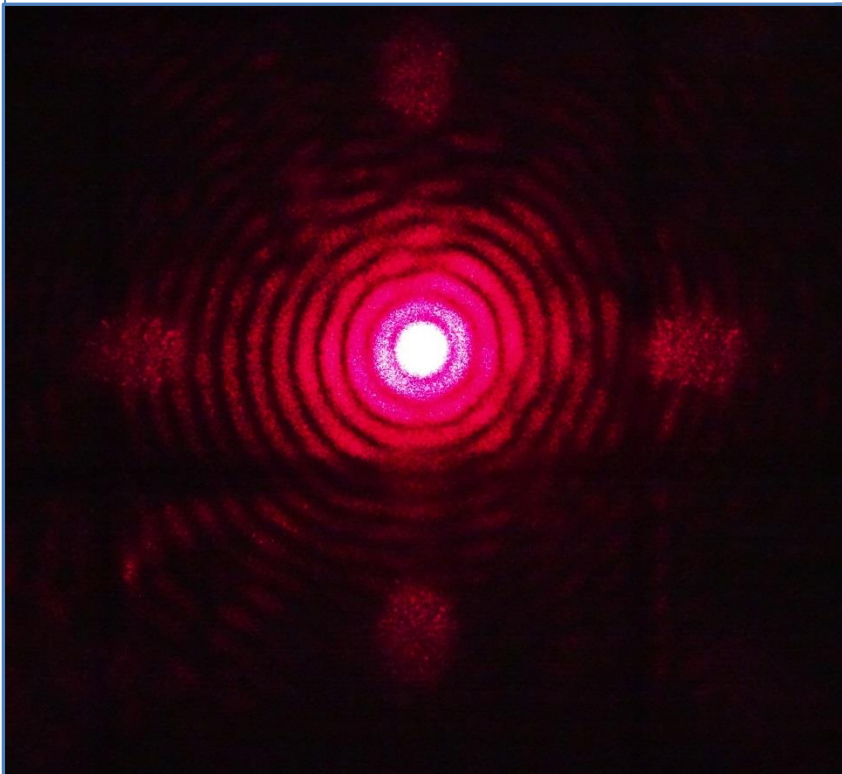


Fenómenos ondulatorios: difracción

O fenómeno da difracción, vai acompañado de interferencias que debuxan un patrón no que se distinguen as interferencias construtivas e as destrutivas (zonas iluminadas e zonas escuras)

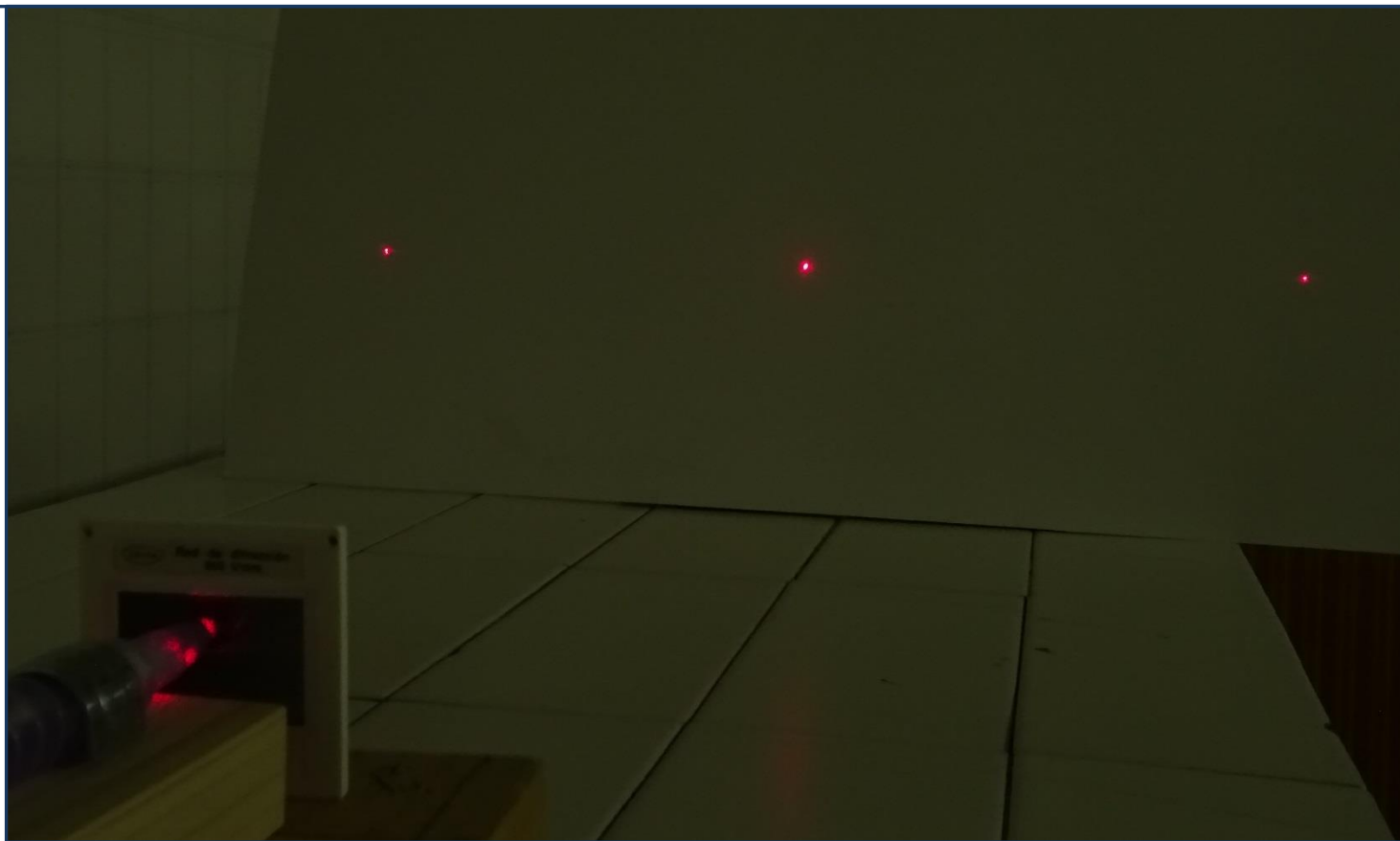
1.-Difracción da luz dun laser que atravesa unha pequena fenda

2.-Difracción da luz dun laser que topa no seu camiño un cabelo



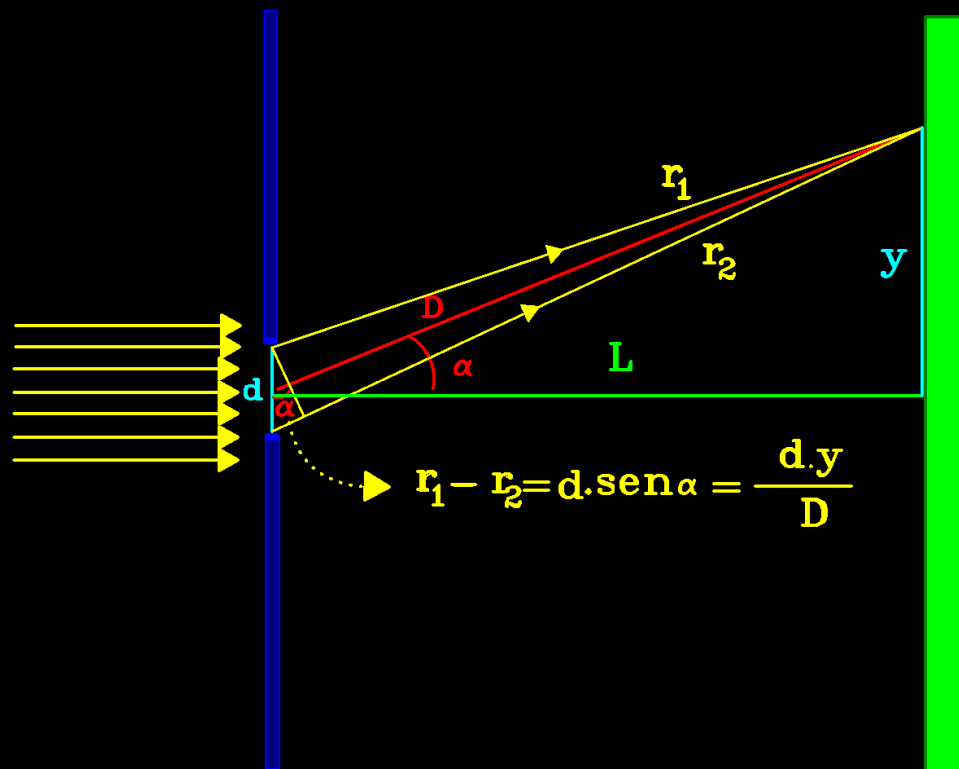
Aplicacións da difracción: determinación da lonxitude de onda dun laser

Ao producir a difracción dunha luz laser por medio dunha rede de difracción de 600 liñas/mm a figura presenta no centro o máximo central e aos dous lados os máximos de interferencia construtiva de primeira orde.



Aplicacións da difracción: determinación da lonxitude de onda dun laser

Segue a explicación co caderno de prácticas



como a interferencia
e construtiva:

$$r_1 - r_2 = n \cdot \lambda$$

Nesta expresión **n** é
un número enteiro.
Para o primeiro máximo:

$$n=1 \longrightarrow r_1 - r_2 = \lambda$$

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

Aplicacións da difracción: determinación do grosor dun cabelo

Segue a explicación co caderno de prácticas

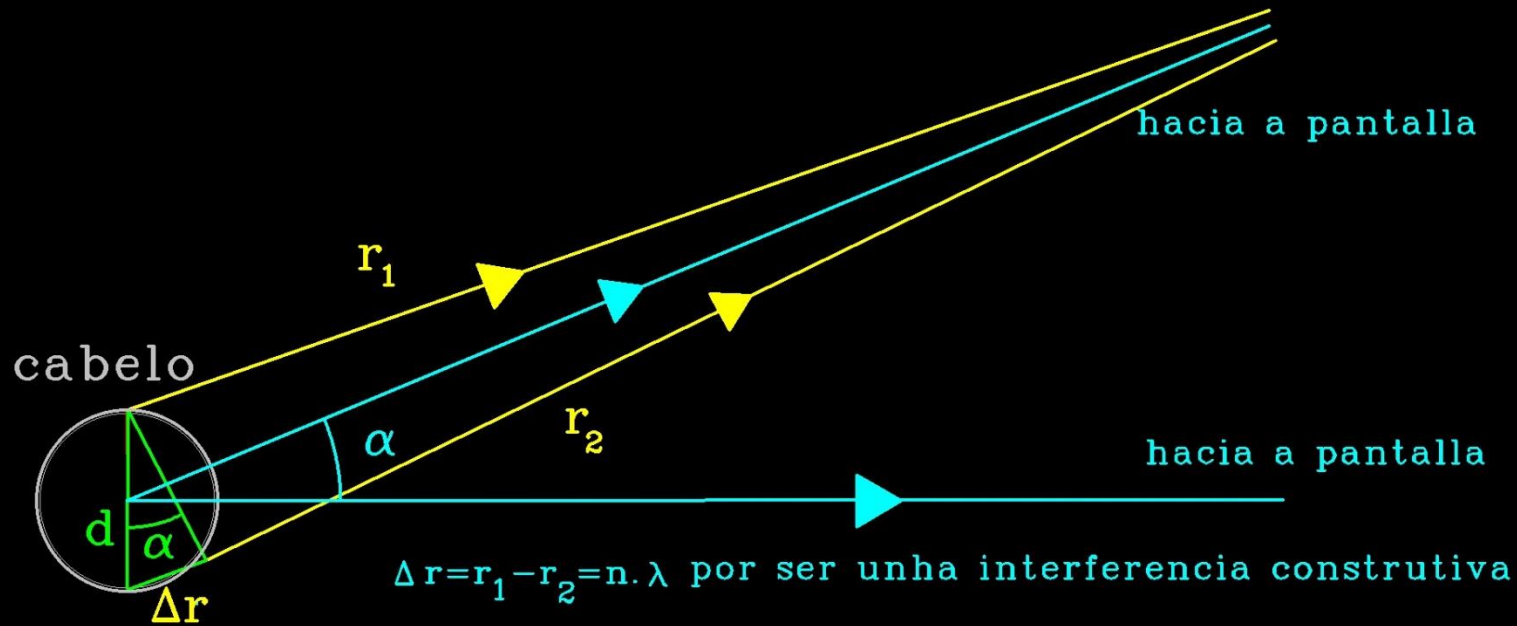
Diagram illustrating the experimental setup for determining the thickness of a hair (cabelo) using laser diffraction. A laser beam passes through the hair, creating a diffraction pattern on a screen at distance D . The central maximum is at $y=0$, and higher-order maxima are at $y=±D \tan(\alpha)$. The path differences r_1 and r_2 are shown for angles α . The distance L is the distance from the hair to the screen.

- 1.- L debe medir varios metros.
- 2.- Medimos a distancia $D=2 \cdot y$
- 3.- Polo tanto o cateto oposto ao ángulo α :
$$y = \frac{D}{2}$$
- 4.- O cateto contiguo é L
- 5.- $\sin \alpha = \tan \alpha$, para ángulos moi pequenos.
- 6.- $\tan \alpha = \frac{y}{L}$

n=3	
n=2	
n=1	y
n=0	y
n=1	
n=2	

Aplicacións da difracción: determinación do grosor dun cabelo

Aplicamos as relacións das interferencias construtivas.



$\Delta r = r_1 - r_2 = n \cdot \lambda$ por ser unha interferencia construtiva

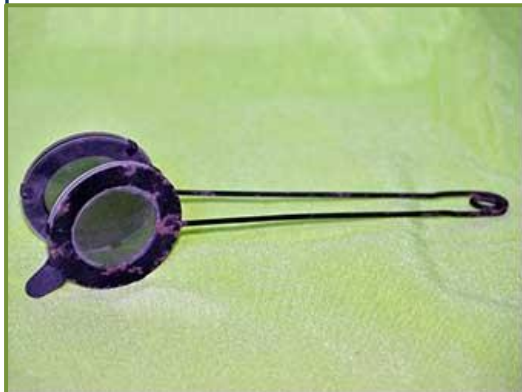
$\Delta r = d \cdot \sin \alpha = d \cdot \tan \alpha$, para ángulos moi pequenos

como $n=1$ e $\tan \alpha = \frac{y}{L} \rightarrow \lambda = d \cdot \frac{y}{L}$

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

Polarización da luz

- O fenómeno da polarización, era coñecido por Newton e Huygens que coñecían o efeto nos cristais de calcita.
- O fenómeno foi estudado e realmente descuberto por Malus.



Pinzas de turmalina fabricadas por William Nicol, físico escocés (1768-1851)

Calcita: mineral formado por cristais de carbonato de calcio.

Turmalina: mineral vítreo formado por silicato de aluminio , boro e outros metais.



Étienne-Louis Malus
(1775-1812)

Polarización da luz (ver vídeo)

- <https://youtu.be/tFIT0RYHnBo>

Polarización da luz

- As fontes luminosas, en xeral, emiten luces formadas por O.E.M que vibran en varias direccións. Esa luz non está polarizada.
- Na natureza existen substancias que ao seren atravesadas polos feixes de luz deixa pasar apenas unha parte da onda luminosa. Dese acontecemento ocorre un fenómeno chamado de **polarización da luz**. A luz natural que antes se propagaba en todos os planos, agora pasa a se propagar nun único plano.
- O acontecemento da polarización da luz dá evidencias de que está formada por ondas transversais. Ese fenómeno só pode acontecer con ese tipo de onda e non coas ondas de tipo lonxitudinal como as ondas sonoras.

