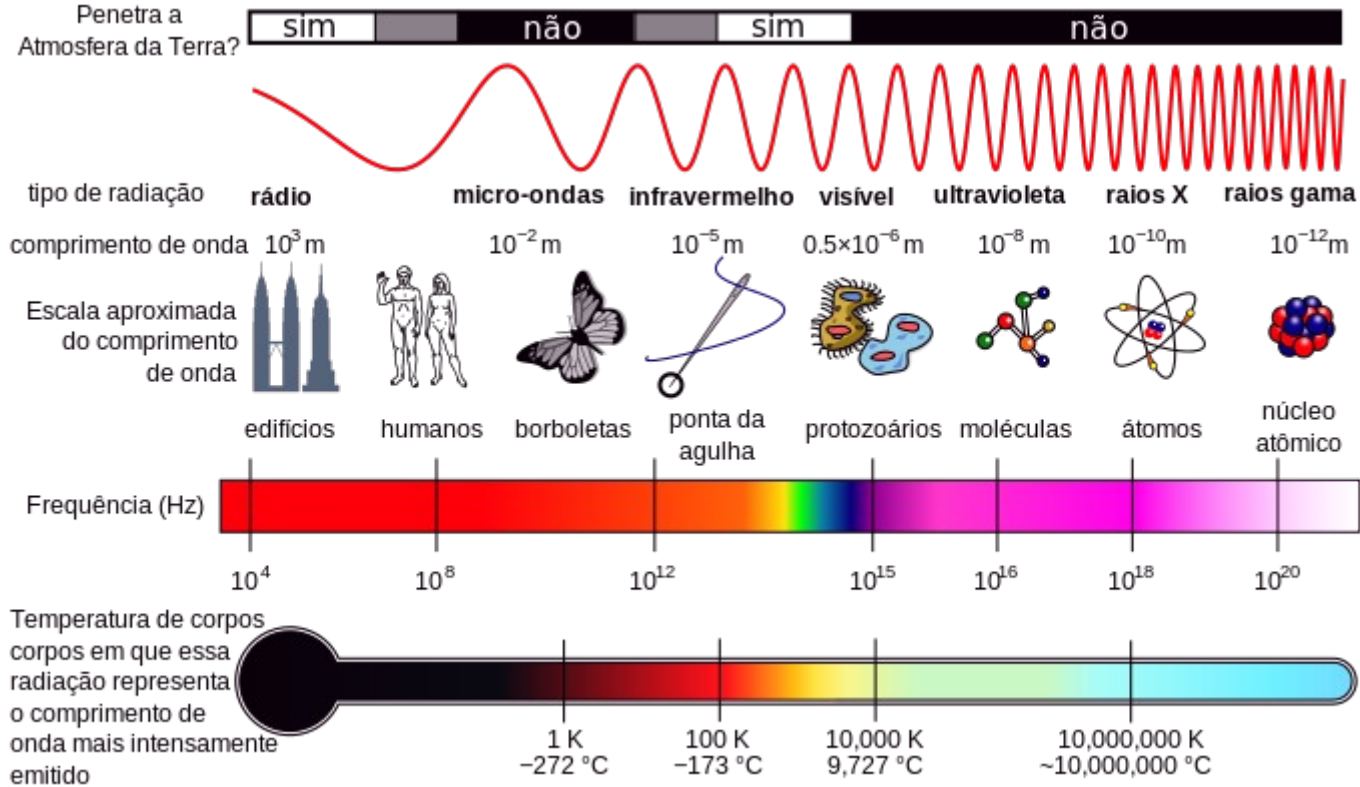


Física IV (IF 2023)

Aula 6

- Objetivos de aprendizagem:
 - Definir o que é um pincel e um raio de luz
 - Descrever sucintamente as hipóteses do princípio de Huygens
 - Utilizar o princípio de Huygens para deduzir as leis da reflexão e da refração
 - Reconhecer o fenômeno de reflexão total
 - Enunciar o princípio de Fermat
 - Usar o princípio de Fermat para deduzir as leis da reflexão e da difração
 - Usar o princípio de Fermat para explicar o funcionamento de espelhos côncavos e lentes.

Espectro eletromagnético

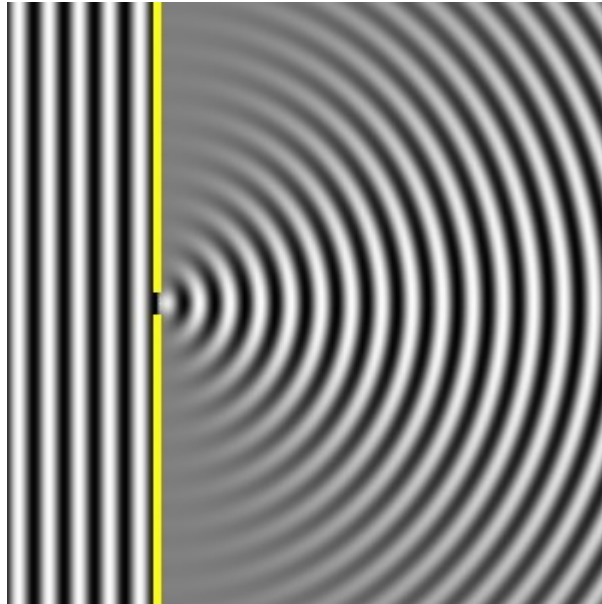


(wikipedia)

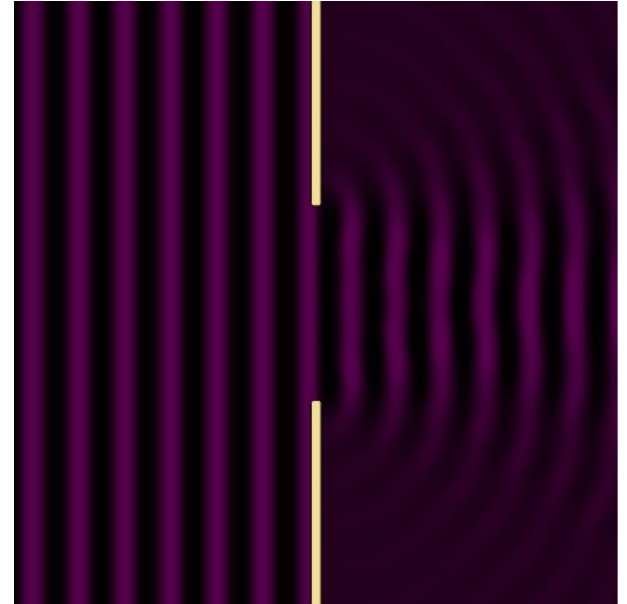
Difração

Exs.:
comprimento de
onda/largura da
fenda

$$d \approx \lambda$$



$$d \approx 3\lambda$$

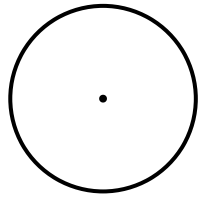


Outros exemplos: <http://www.falstad.com/ripple/>

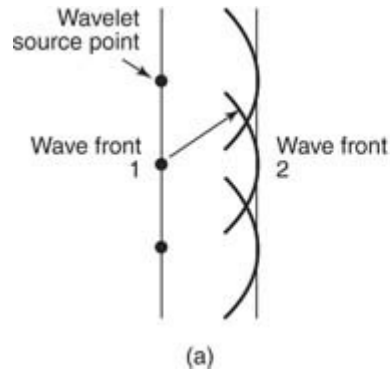
https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html

Princípio de Huygens (1678-)

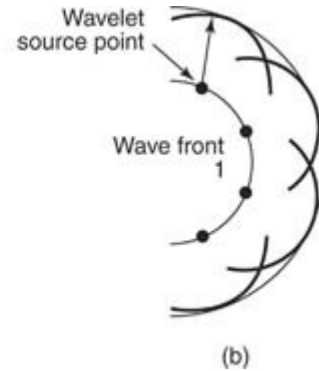
- Cada ponto da frente de onda comporta-se como uma fonte puntiforme de ondas secundárias
- A nova frente de ondas é a envoltória dessas ondas secundárias



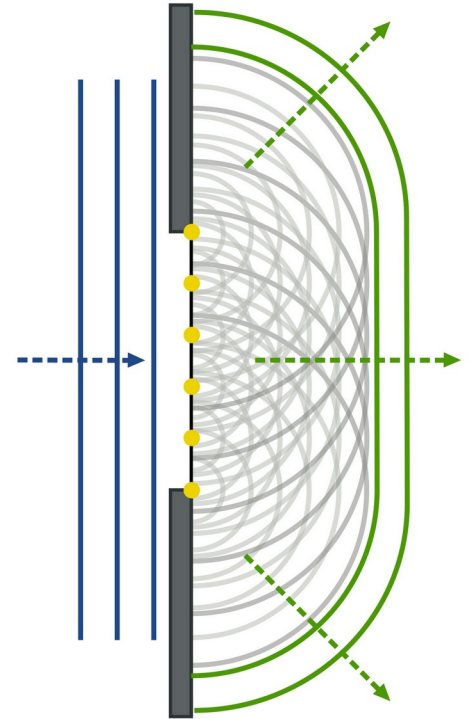
Fonte puntiforme



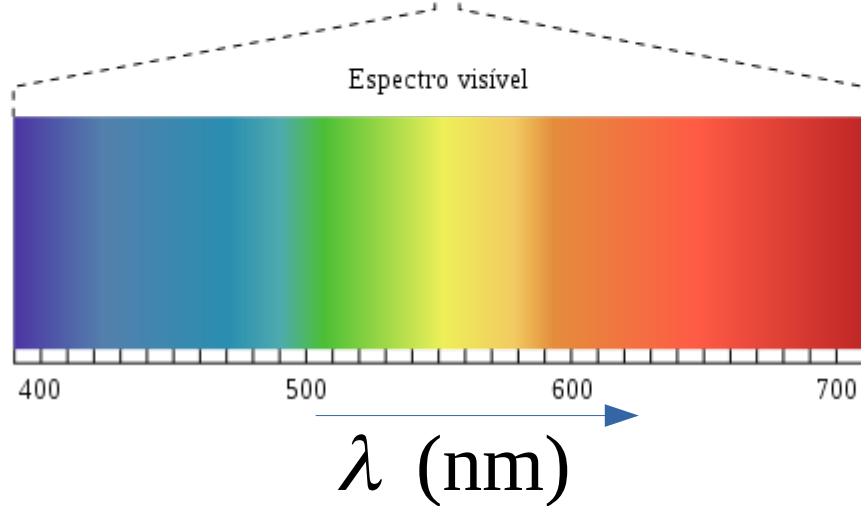
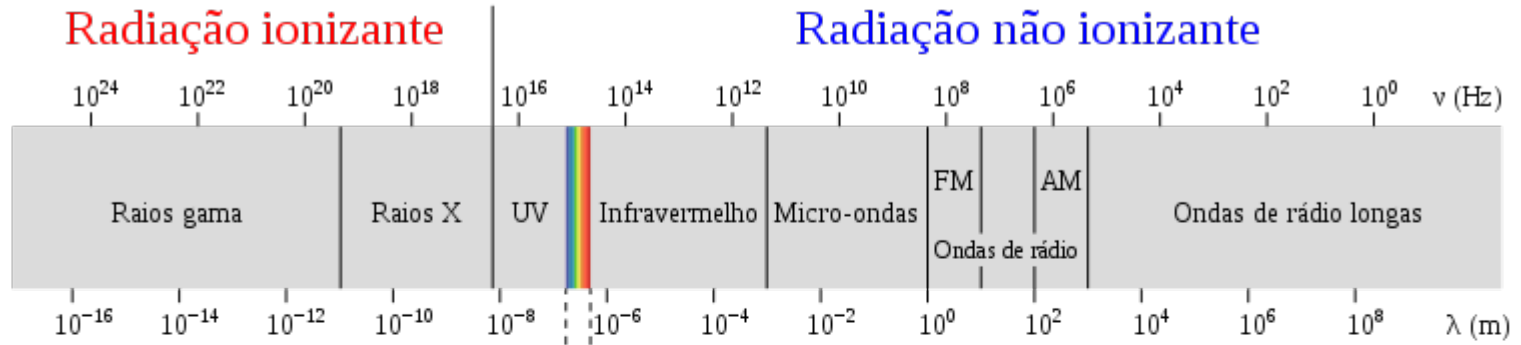
λ



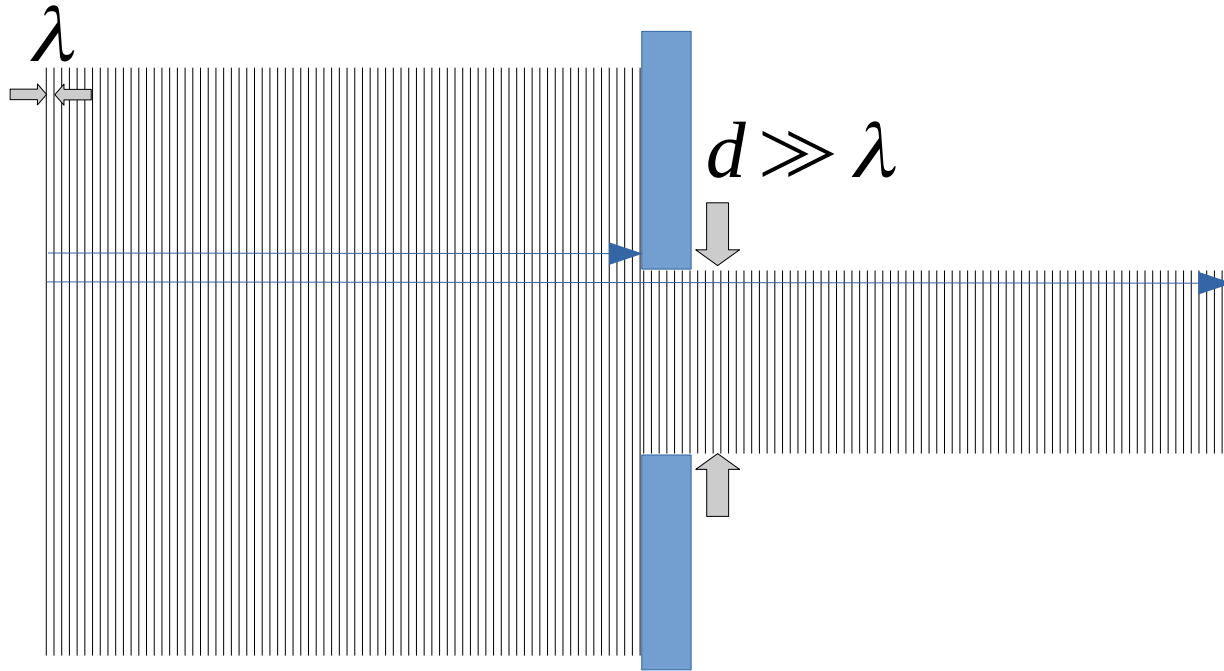
← introduzido “depois”



Espectro visível



Propagação “retilínea”

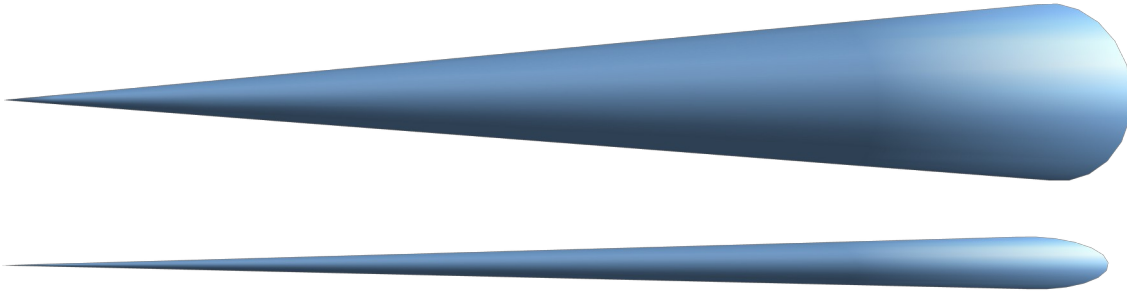


Outros exemplos:
<http://www.falstad.com/ripple/>

Half Plane
Refraction (& reflection)
Internal reflection

Pincel e raio de luz

Pincel



Raio

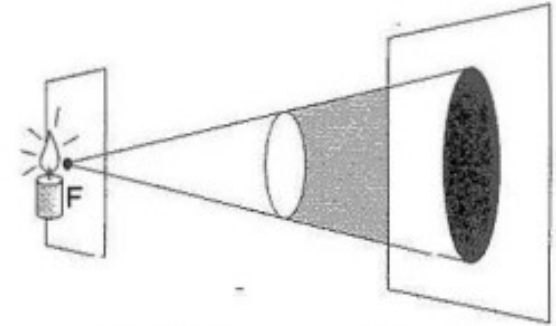


Fig. 2.1 Propagação retilínea da luz

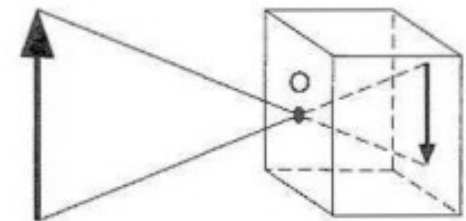
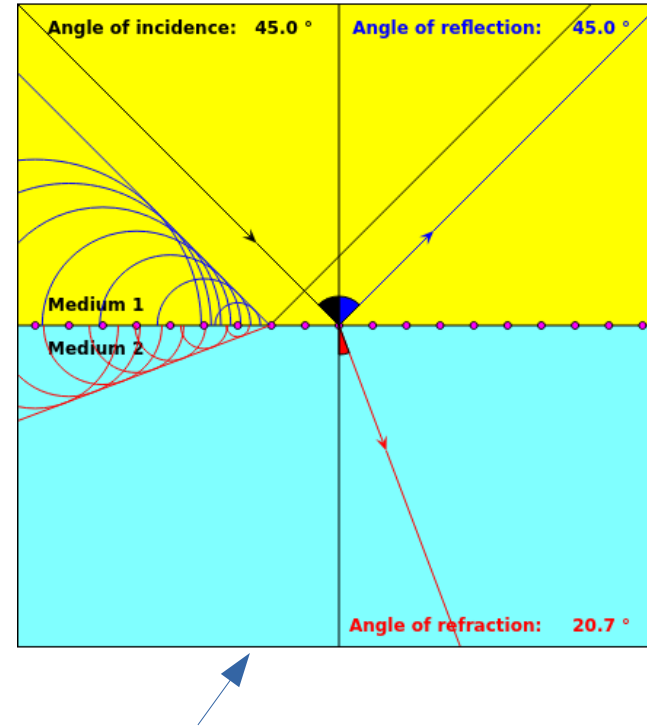
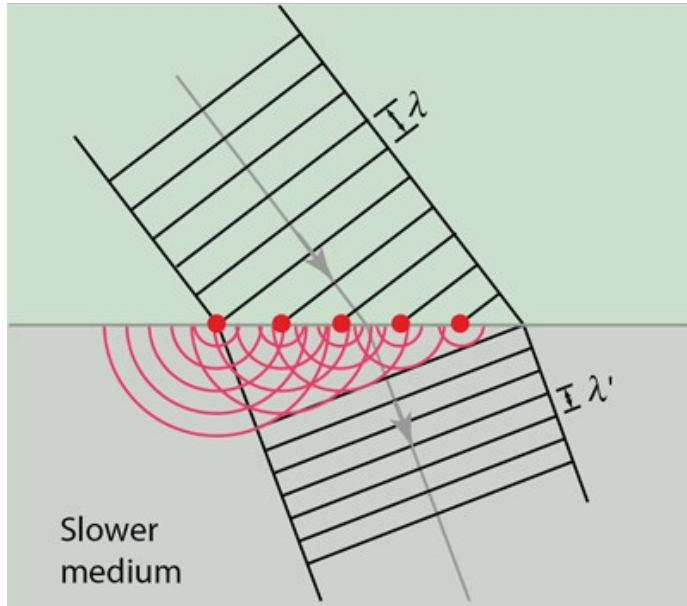


Fig. 2.2 Câmara escura

Óptica geométrica

Refração e reflexão

Raios: perpendiculares às frentes de onda



https://www.walter-fendt.de/html5/phen/refractionhuygens_en.htm

Ondas no interior de dielétrico

- Eqs. Maxwell $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E} = \kappa \epsilon_0 \vec{E}$

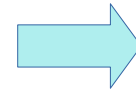
$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho_l$$

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J}_l + \frac{\partial (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P})}{\partial t} \right)$$

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

Na ausência de cargas e correntes livres, e supondo permitividade elétrica constante:



(= vácuo, mas sem o índice "0" na permitividade elétrica). Portanto:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\kappa}} c < c$$

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

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

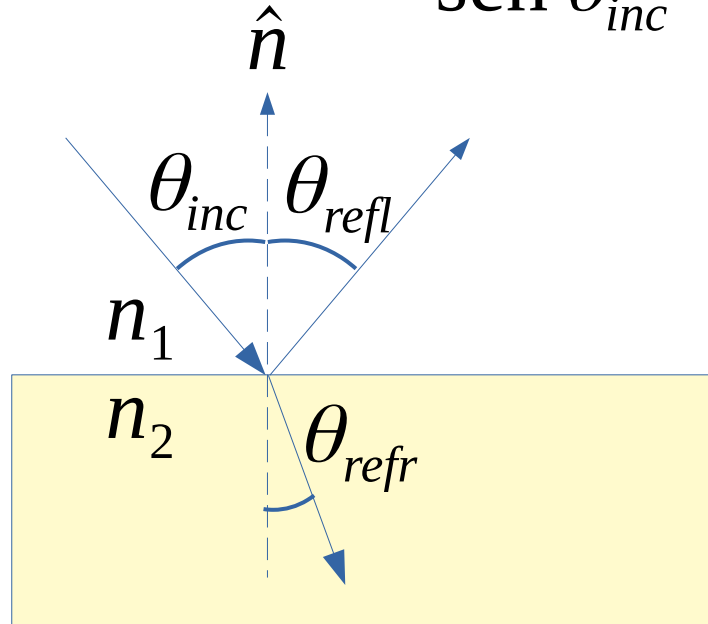
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

(Obs.: campos médios)

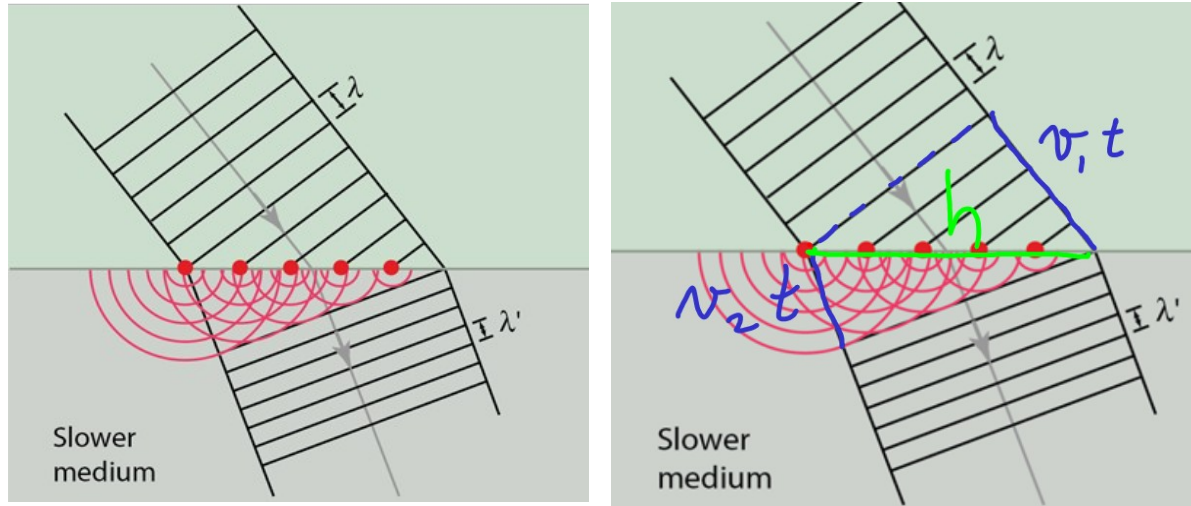
Leis da reflexão e refração

$$\theta_{\text{refl}} = \theta_{\text{inc}}$$

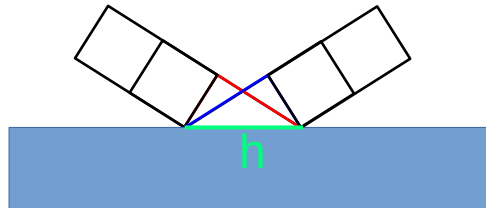
$$\frac{\text{sen } \theta_{\text{refr}}}{\text{sen } \theta_{\text{inc}}} = n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$



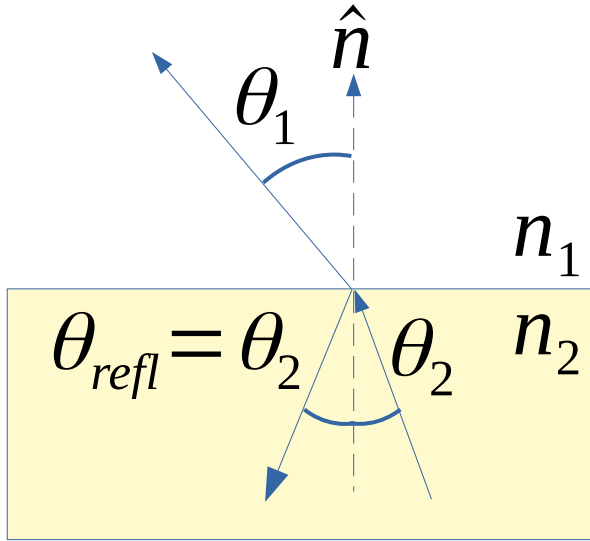
Dedução da lei de Snell



... e da Reflexão



Reflexão interna total

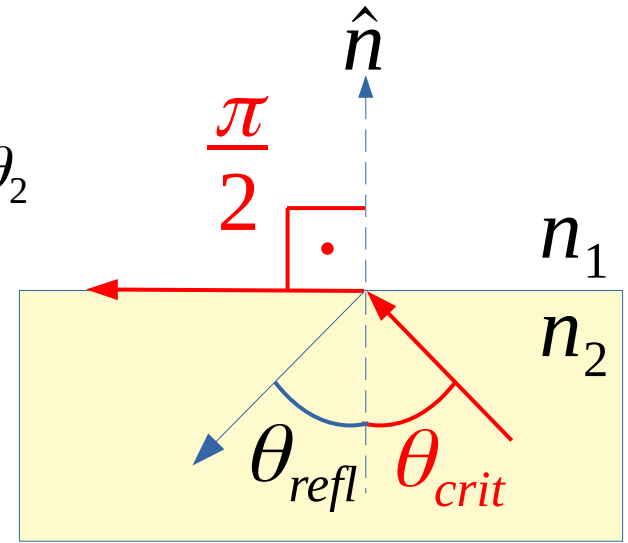


$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} > 1$$

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1}{v_2} \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$$

$$\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 = \frac{v_1}{v_2} \sin \theta_{crit}$$

$$\theta_{crit} = \arcsen\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$



Acima deste ângulo, só tem reflexão (reflexão total)

Caminho óptico

- Tempo para percorrer uma distância d num meio:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{nd}{c}$$

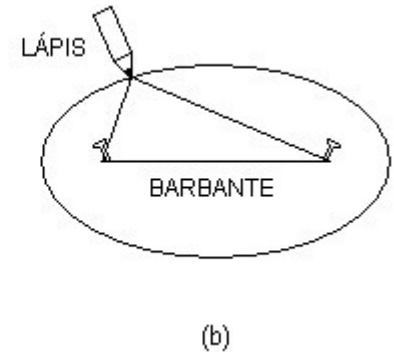
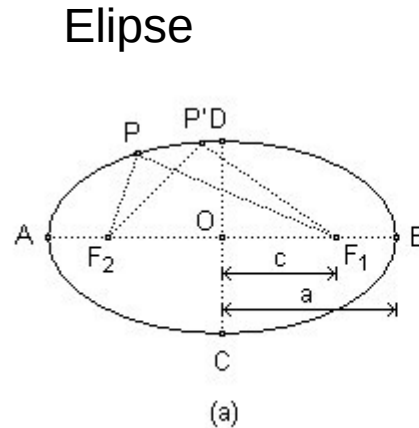
- Índice de refração do meio: $n \geq 1$
- Caminho óptico: nd

Princípio de Fermat (~1662)

- “O raio de luz segue o caminho que leva o menor tempo possível entre dois pontos.”
- = menor “caminho óptico”.
- Obs.: Na verdade devia ser o tempo “extremo” (máximo ou mínimo), ou melhor, “estacionário” com relação a pequenas variações de caminho.
- Para aplicar o princípio, consideramos o ponto inicial e o final como dados, e normalmente 1 ponto intermediário (ou mais) como “variável”, dentre um conjunto de possibilidades.
- → Conexões com a mecânica quântica

Deduções com o Princípio de Fermat

- Reflexão
- Refração
- Foco: quando diversos caminhos são “equivalentes”
- Espelhos côncavos
- Lentes



Reflexão

- Qual o ponto x que minimiza o **caminho óptico** de A até B?

