

SLC 641 – Óptica

Licenciatura em Ciências Exatas – São Carlos

Aula 2

**Natureza da Luz/Velocidade da luz/ Princípio de Huygens
(continuação)**

28/08/2023

Energia transportada pela luz: Vetor de Poynting

$$\boxed{\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}} \quad (\text{Watts por metro quadrado})$$

Produto vetorial indica a direção de propagação da luz (regra da mão direita)

Como **E** e **B** são ortogonais, o módulo do vetor de Poynting é:

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB$$

Usando a razão entre E e B : $\frac{E_0}{B_0} = \frac{\omega}{k} = c \quad \Rightarrow \quad S = \frac{E^2}{c\mu_0}$

Finalmente, considerando que o campo é oscilante (senoidal), temos que determinar o valor médio, ou intensidade I :

$$I = \overline{S} = \langle S \rangle = \frac{\overline{E^2}}{c\mu_0} = \frac{1}{c\mu_0} E_0^2 \overline{\sin^2(kx - \omega t)} \quad \Rightarrow \quad E_{rms} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad \overline{\sin^2\theta} = \frac{1}{2}$$

$$I = \frac{E_{rms}^2}{c\mu_0} \quad (\text{rms=roth means square, valor eficaz})$$

Energia transportada pela luz: Vetor de Poynting

Exemplo de uma fonte de luz

Qual o campo elétrico eficaz (*rms*) a 1,8 m de distância de uma fonte de luz que emite 250 W de potência?

$$I = \frac{E_{rms}^2}{c\mu_0}$$

$$I = \frac{\text{Potência}}{\text{Area}} = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{250}{4\pi(1,8)^2} = 6,14 \text{ W/m}^2$$

$$I = \frac{E_{rms}^2}{c\mu_0}$$



$$E_{rms}^2 = I c\mu_0$$

$$E_{rms} = \sqrt{6,14 \text{ W/m}^2 * 3 \times 10^8 \text{ m/s} * 4\pi \times 10^7 \text{ H/m}}$$

$$E_{rms} = \sqrt{2314,725} = 48,1 \text{ V/m}$$

$$B_{rms} = \frac{48,1 \text{ V/m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1,6 \times 10^{-7} \text{ T}$$

Pressão da radiação

Mesmo sem massa, a radiação pode transferir momento linear, ou seja, pode exercer pressão.

$$\text{Pressão} = \frac{\text{Força}}{\text{Area}} = \frac{F}{A} = \frac{dp}{Adt}$$

Varição de momento linear de uma partícula com massa: $\longrightarrow dp = mdv$

Usando conceitos de relatividade: $\longrightarrow E = mc^2 = c(mv) = p c$

Portanto, a variação de momento linear de uma onda eletromagnética:

$$dE = dp c \longrightarrow dp = \frac{dE}{c}$$

$$dp = \frac{dE}{c}$$

Absorção total

$$dp = \frac{2dE}{c}$$

Reflexão total

Pressão da radiação

A energia entregue na superfície: $dE = IAdt$ (Absorção Total)

$$\text{Pressão} = \frac{dp}{Adt} = \frac{dE}{Ac dt} = \frac{I}{c}$$

No caso da reflexão total, a mudança de momento é o dobro:

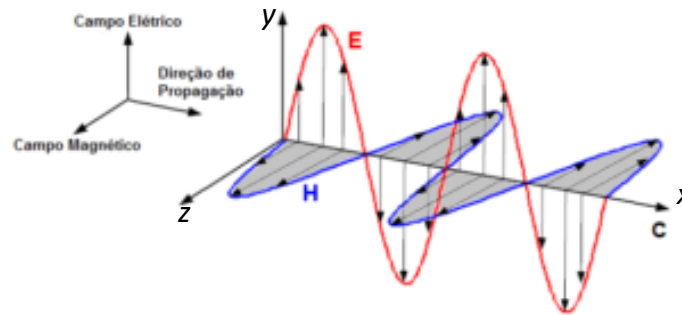
$$\text{Pressão} = \frac{dp}{Adt} = \frac{dE}{Ac dt} = \frac{2I}{c}$$

Ordem de grandeza da força: Considere a mesma luz de 250 W a 1,8 m reflexão total

$$\text{Pressão} = \frac{2I}{c} = \frac{2 * 6,14 \text{ W/m}^2}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 4,1 \times 10^{-8} \text{ N/m}^2$$

Polarização da luz

Onda eletromagnética transversal propagando-se no eixo-x, com velocidade $c = \omega/k$, campo elétrico no eixo-y e campo magnético no eixo-z

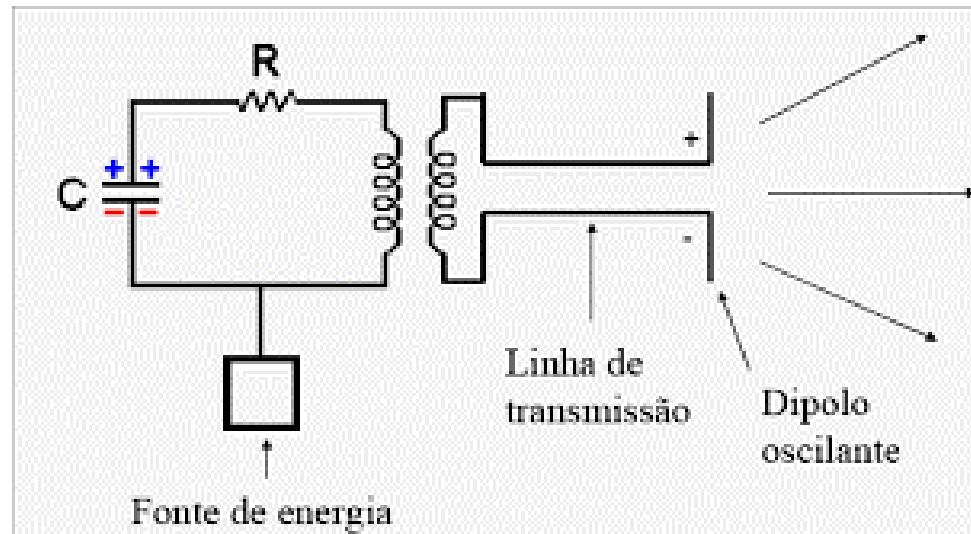


Trata-se de uma luz linearmente polarizada no eixo-y (sentido do campo elétrico)

No entanto, a maior parte da luz encontrada na natureza ou gerada artificialmente não é polarizada, ou seja, não tem um sentido dominante de oscilação do campo elétrico.



Ondas de rádio tem polarização linear



Polarização da luz

Polarizador de luz:

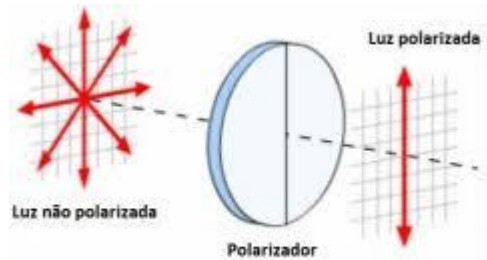
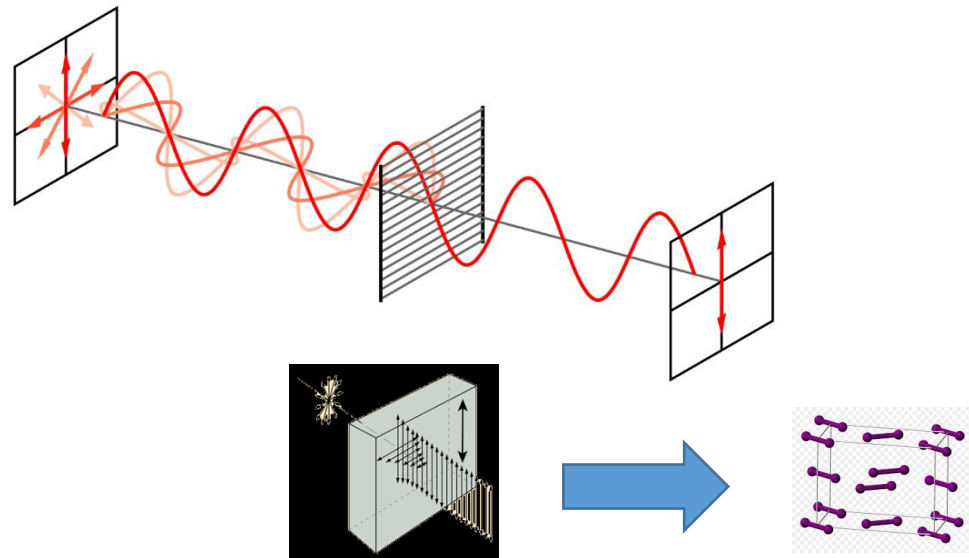


Figura: Os polarizadores são como uma fenda que deixa passar a luz em somente um plano.

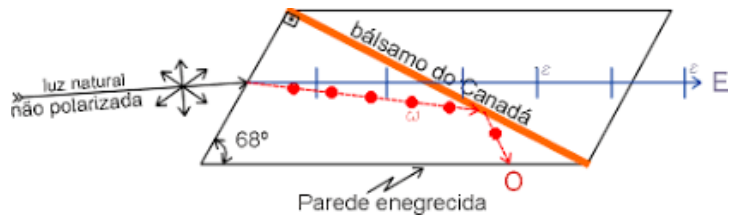
Filme polaroide funciona por absorção seletiva do iodo (I_2)



Filme com moléculas de iodo alinhadas

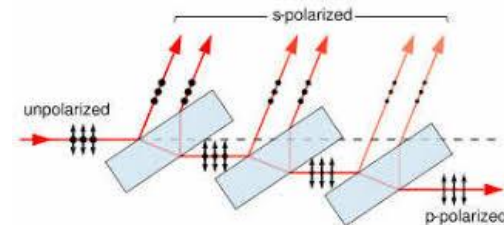
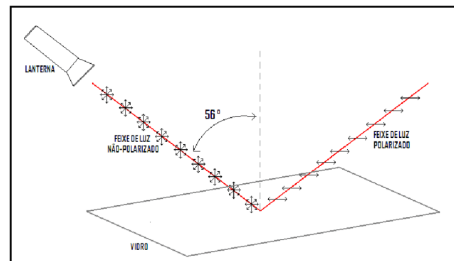


Outras formas de polarizar a luz

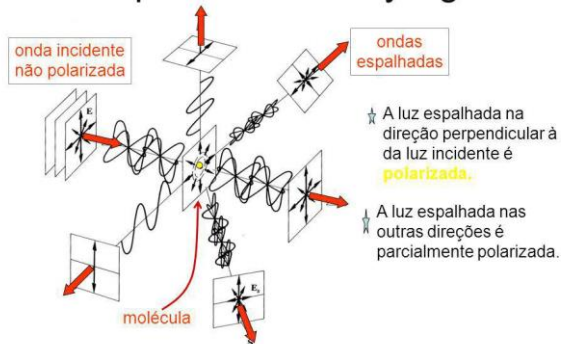


Cristal birrefringente
(calcita)

Reflexão em ângulo de Brewster
(reflexão na pista de asfalto é polarizado!)



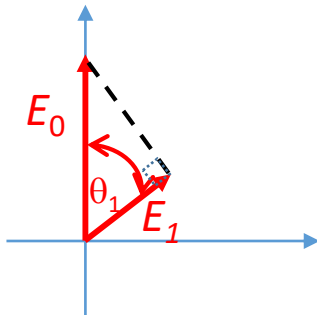
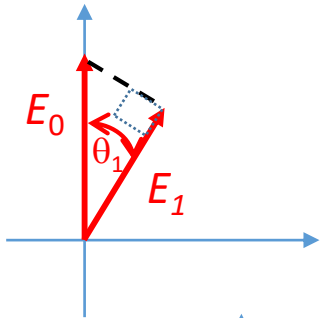
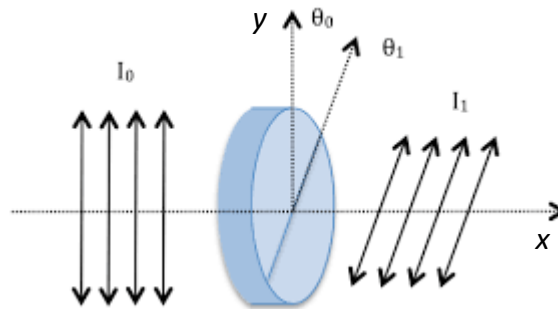
Espalhamento Rayleigh



Polarização por espalhamento
(céu azul é polarizado!)

Transmissão por um polarizador linear

Lei de Malus



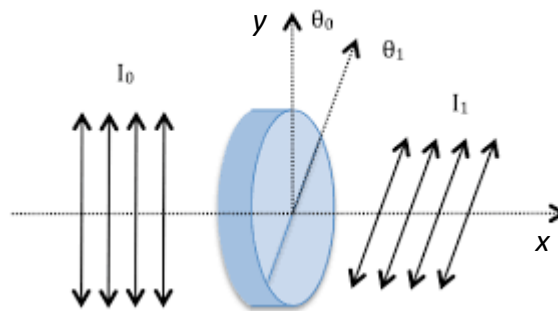
$$\cos(\theta_1) = \frac{E_1}{E_0} \quad \Rightarrow \quad E_1 = E_0 \cos(\theta_1)$$

Só que a intensidade (mensurável) é proporcional ao campo elétrico ao quadrado!

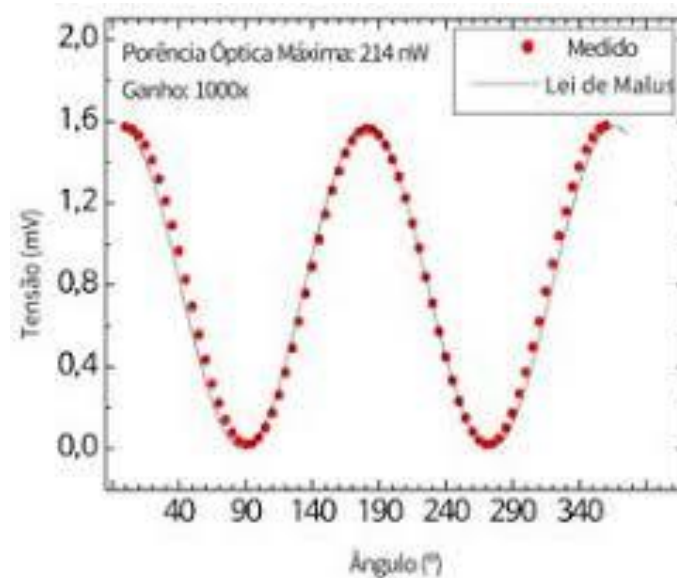
$$I_1 = I_0 \cos^2(\theta_1)$$

Transmissão por um polarizador linear

Lei de Malus



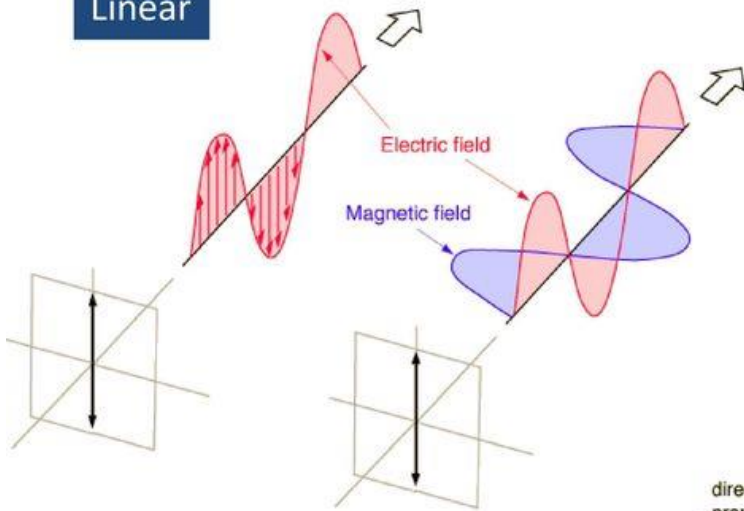
$$I_1 = I_0 \cos^2(\theta_1)$$



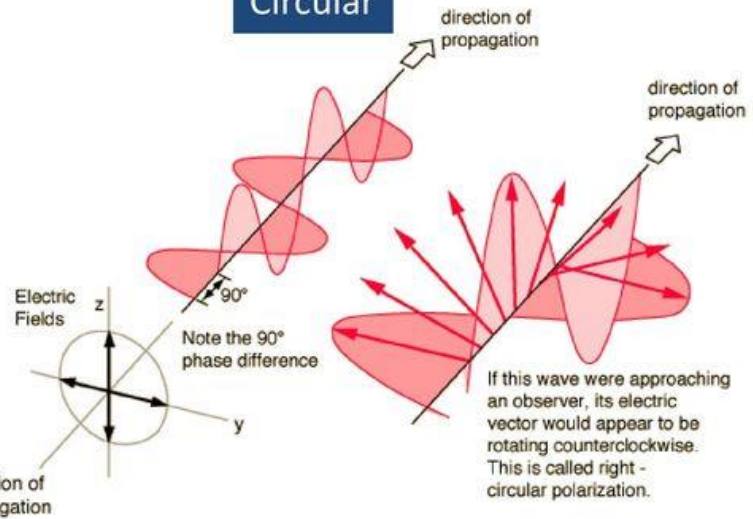
Outros tipos de polarização da luz

Polarização

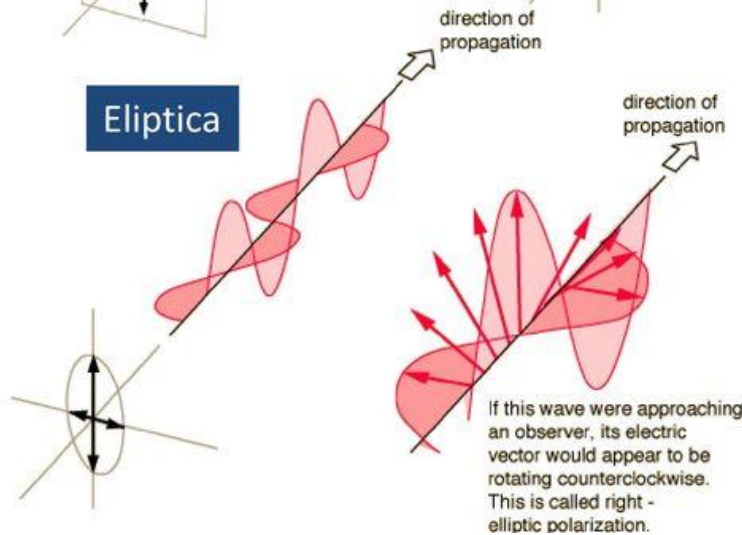
Linear



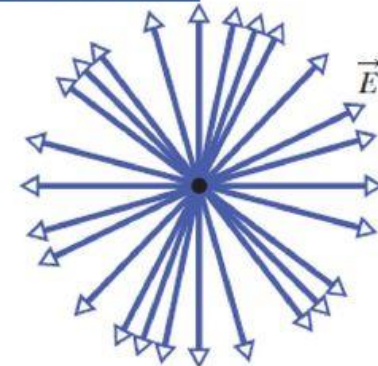
Circular



Elíptica

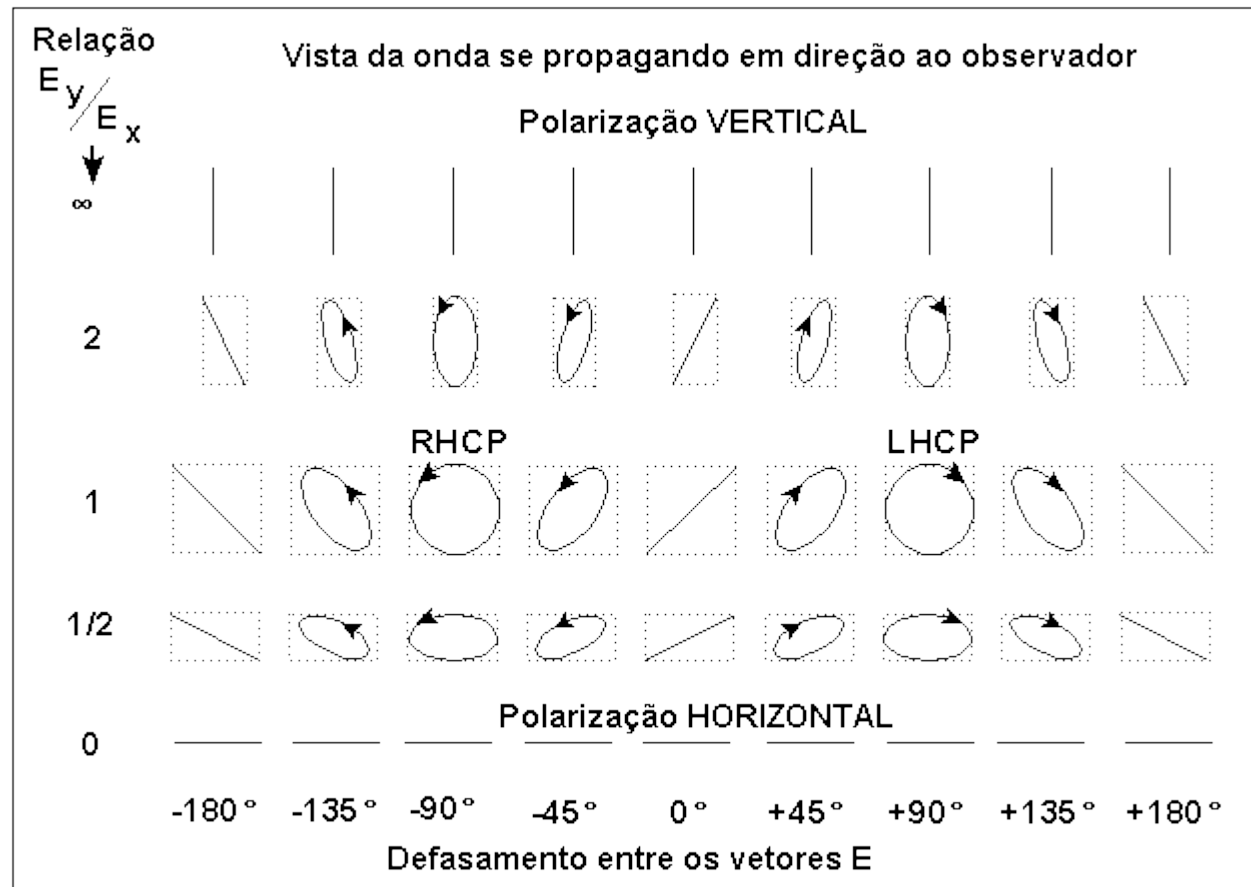


Não polarizada



Outros tipos de polarização da luz

$$\vec{E}(z,t) = E_x \cos(kz - \omega t) \vec{i} + E_y \cos(kz - \omega t + \varphi) \vec{j}$$



Polarização da onda resultante em função de E_y/E_x e do defasamento

Velocidade da luz

Algumas observações em cima da velocidade da luz:

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

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

Definição moderna de distância:

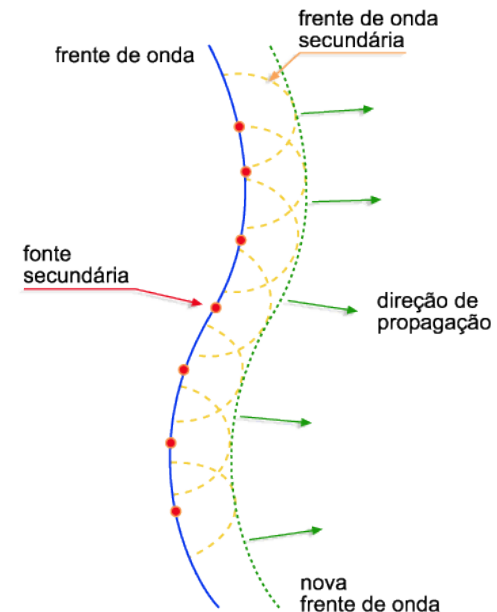
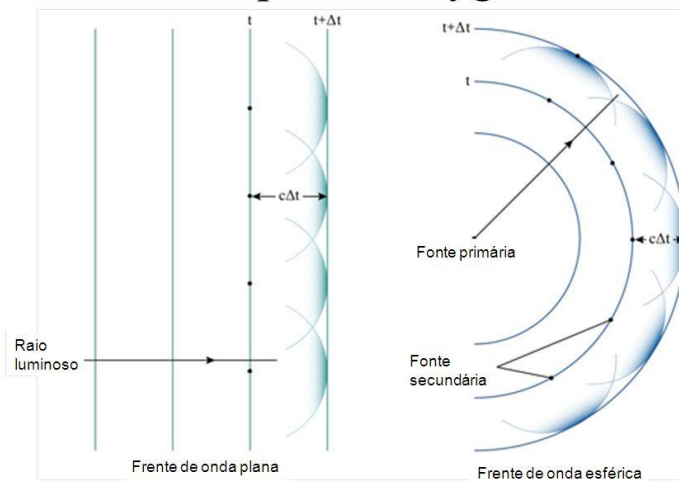
$$1 \text{ m} = c \Delta t = c * \left(\frac{1}{299.792.458} \right)$$

Teoria da relatividade de Einstein: A velocidade da luz c , no espaço livre, é a mesma em todas as direções e em todo os referenciais inerciais.

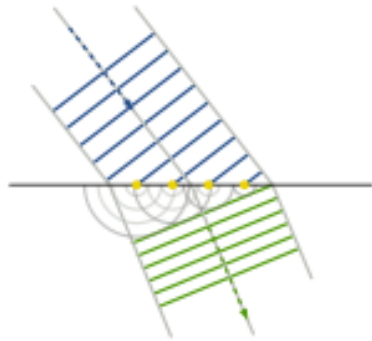
Princípio de Huygens

Christian Huygens (1629-1605), físico holandês, propôs: Conhecendo a posição de uma frente de onda em um instante, a posição da frente de onda em um instante posterior pode ser construída imaginando que cada ponto da frente de onda é uma fonte de ondas secundárias.

Princípio de Huygens

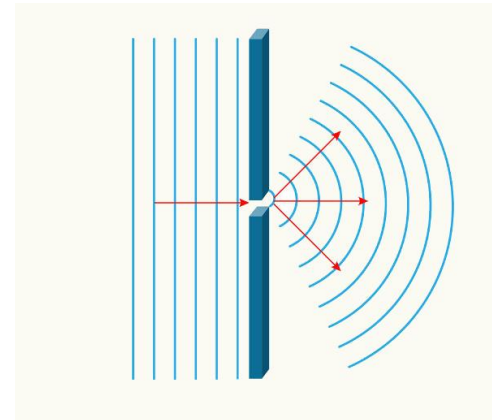
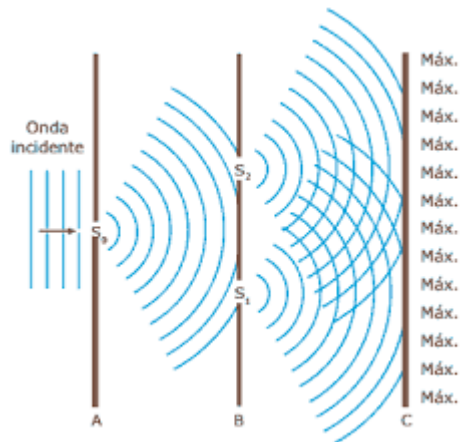


Aplicações do princípio de Huygens



Refração

Difração na Fenda



Fenda dupla