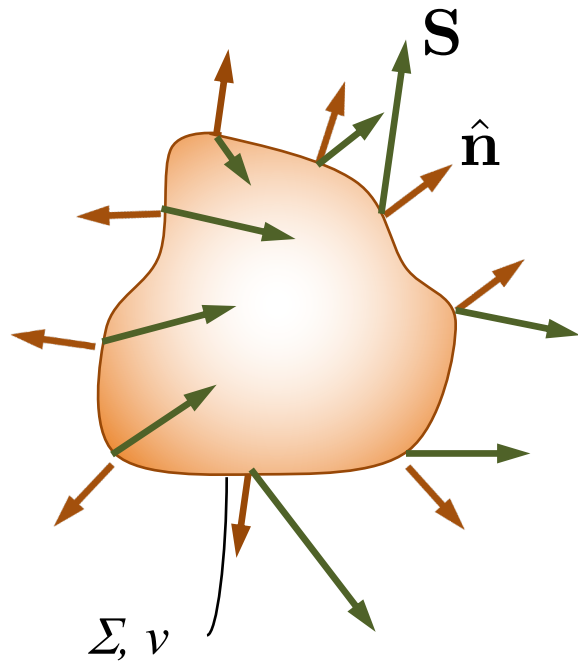




4302212 – Física IV

Ondas Eletromagnéticas –V

# Vetor de Poynting e Continuidade



$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

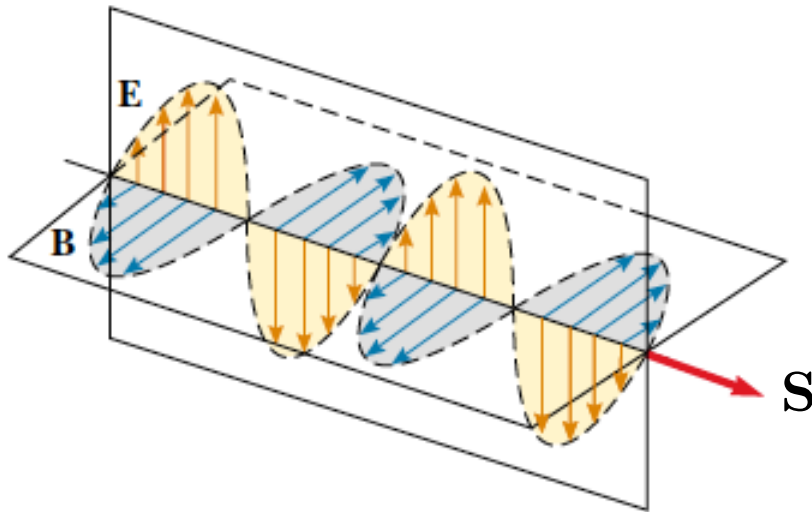
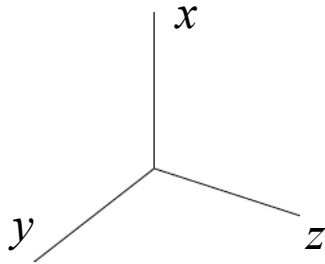
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = 0$$

$$\frac{dU}{dt} = \int_{\nu} \frac{\partial u}{\partial t} dV = - \int_{\Sigma} \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA$$

# Ondas EM Monocromáticas

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

$$u_E = u_B$$



– Intensidade (potência média por unidades de área):

$$I = \langle S \rangle = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c}$$

# Radiação EM: Momento Linear

- Maxwell previu que a radiação EM transporta **momento linear**. A confirmação se deve a Nichols e Hull (1903):

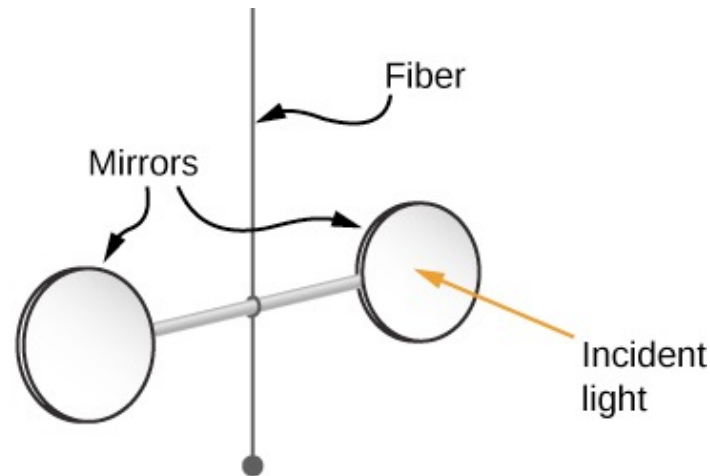


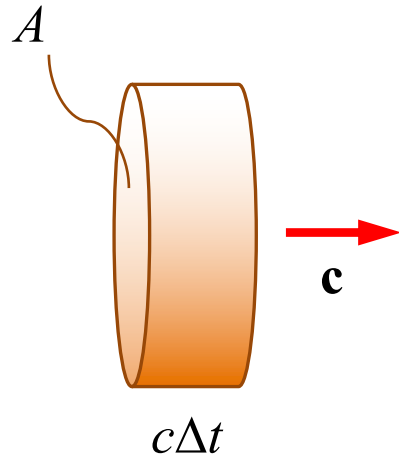
Imagem: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/)

- **Densidade de momento linear:**

$$\pi = \frac{1}{c^2} \mathbf{S}$$

$$[\pi] = \frac{[T^2]}{[L^2]} [S] = \frac{1}{[L^3]} \frac{[M][L]}{[T]}$$

# Ondas EM Monocromáticas



– Energia que atravessa a área  $A$  no intervalo  $\Delta t$ :

$$U = u A c \Delta t$$

$$\mathbf{S} = cu \hat{\mathbf{z}}$$

$$\pi = \frac{1}{c} u \hat{\mathbf{z}}$$

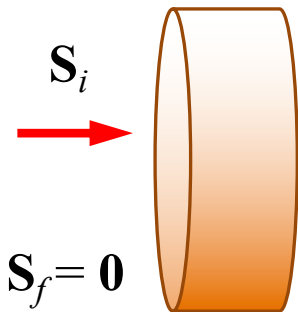
– Média sobre 1 período de oscilação:

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{\max}^2 \quad I = \langle S \rangle = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c} \quad \langle \pi \rangle = \frac{\epsilon_0}{2c} E_{\max}^2 \hat{\mathbf{z}}$$
$$= \frac{\epsilon_0 c}{2} E_{\max}^2$$

# Pressão de Radiação

– Momento linear transferido a uma superfície pela onda EM:

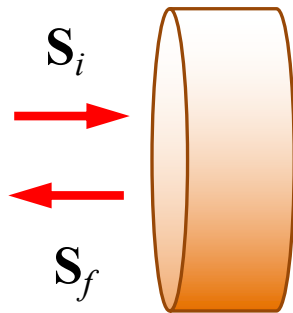
$$P = \frac{F_{\perp}}{A} = \frac{(\Delta p_{\text{sup}}/\Delta t)}{A} = -\frac{1}{c}\Delta\langle S \rangle$$



– Absorção completa:

$$\Delta\langle S \rangle = -\langle S_i \rangle$$

$$P = \frac{I}{c} = \langle u \rangle$$



– Reflexão completa:

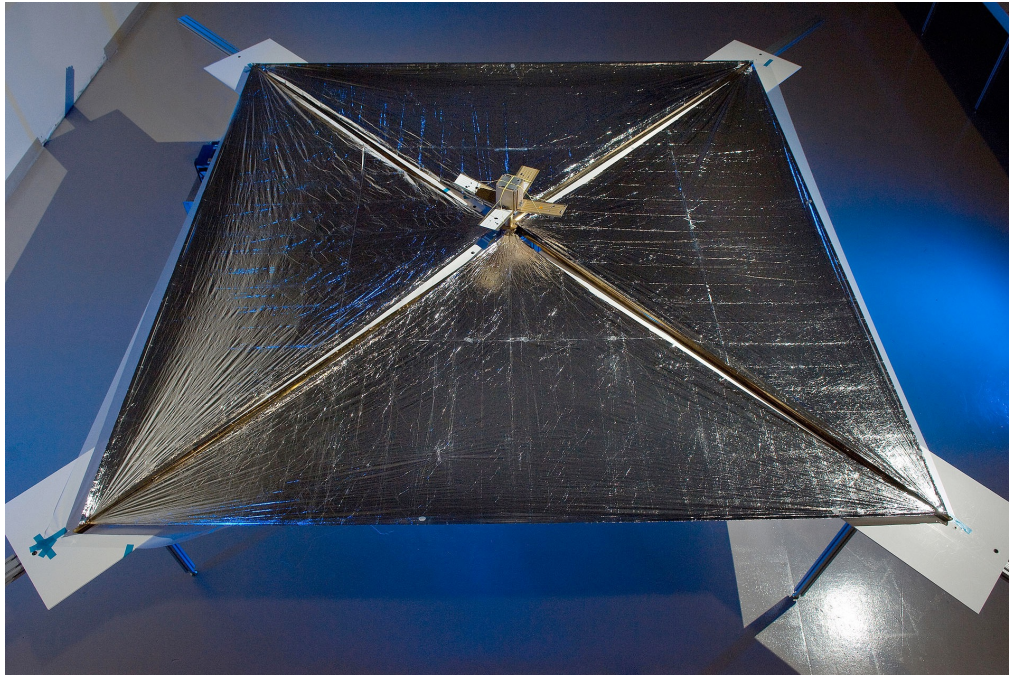
$$\Delta\langle S \rangle = -2\langle S_i \rangle$$

$$P = 2\frac{I}{c} = 2\langle u \rangle$$

Vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=ifyLMuSyfdI>



– **Exercício:** a figura mostra um protótipo do LightSail, cuja propulsão no espaço é baseada na pressão de radiação. O primeiro teste (2015) foi realizado em uma órbita baixa, onde a irradiância solar é  $1.37 \text{ kW/m}^2$ . Admitindo que a área do equipamento seja de  $32\text{m}^2$  e que sua massa seja  $5.0 \text{ kg}$ , qual a aceleração máxima?



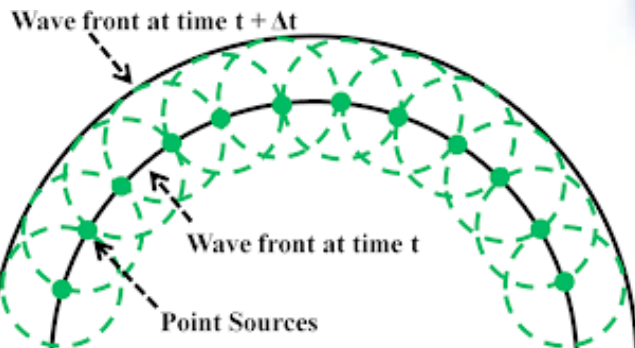
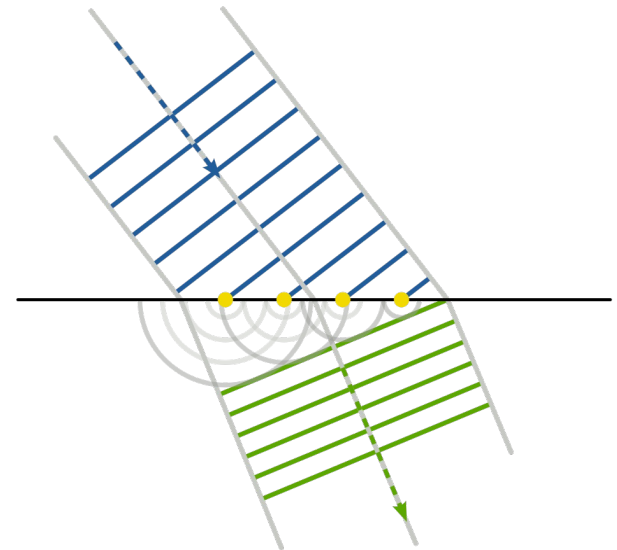
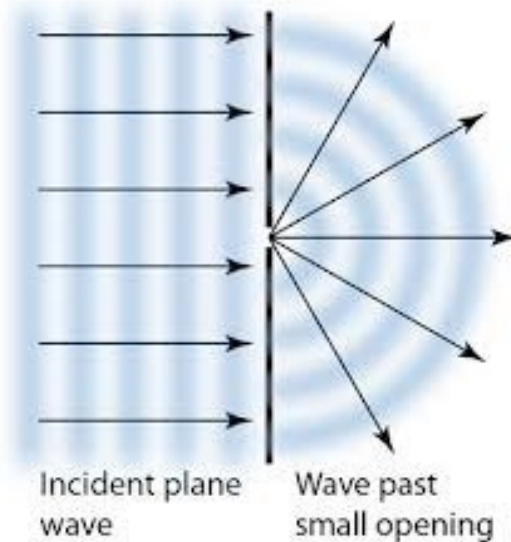


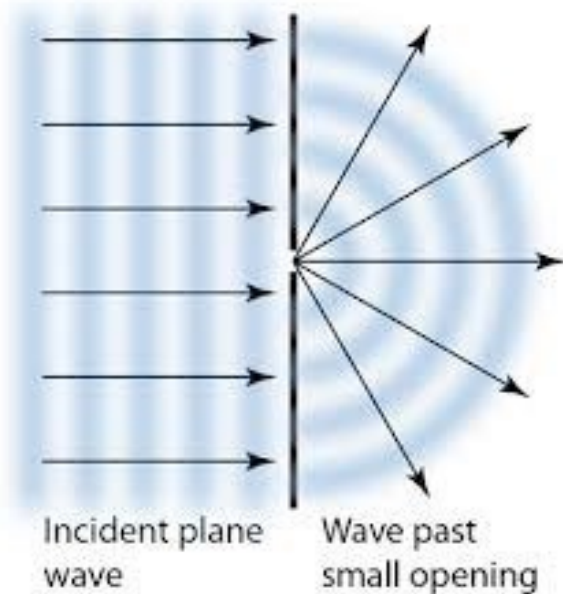
– **Exercício:** Admitindo reflexão completa:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{m} F = \frac{1}{m} (PA) = \frac{1}{m} \left( 2 \frac{I}{c} \right) A \\ &= \frac{1}{5.0} \left( 2 \times \frac{1.37 \times 10^3}{3.00 \times 10^8} \right) \times 32 = 5.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

# Limite de Ótica Geométrica

- Século XVII/XVIII: a natureza da luz é corpuscular (Newton) ou ondulatória (Huygens)?
- **Princípio de Huygens:** Cada ponto em uma frente de onda se comporta como uma fonte puntiforme, gerando ondas secundárias.





– **Raios de Luz:** retas perpendiculares às frentes de onda.

– **Limite da Ótica Geométrica:**

$$\lambda \ll d$$

(visível: ~400 nm a ~700nm)

– **Índice de Refração ( $n$ ):** propriedade do meio associada à velocidade de propagação da luz (radiação EM).

$$v = \frac{c}{n}$$

$$n(\lambda) \approx A + \frac{B}{\lambda^2}$$

(equação de Cauchy)

Material	Index of Refraction (n)
Vacuum	1.000
Air	1.000277
Water	1.333333
Ice	1.31
Glass	About 1.5
Diamond	2.417

$$\lambda \approx 600 \text{ nm}$$