Física IV

Aula 2

Prof. Helena Malbouisson

Normas e Datas

- Atendimento ao estudante: sala 3018 A – professora Helena Malbouisson.
- Os alunos com menos de 75% de presença serão reprovados por falta.
- Entretanto, solicitações extraordinárias devem ser feitas por escrito na secretaria do IF (3002B).
- Data das provas: a definir
- Fórum da turma: uerj-fisica-iv-quimica@googlegroups.com

Ementa do Curso

Prova Final.
Estimativa de data: 8/12

1. **Ondas Eletormagnéticas**
   - Propagação
   - Vetor de Poynting
   - Intensidade
   - Pressão de Radiação
   - Polarização
2. **Ótica Física**
   - Reflexão e Refração
   - Reflexão Interna Total
   - Polarização por reflexão
3. **Interferência**
   - Difração e o princípio de Huygens
   - O Experimento de Young
     - Intensidade em interferência em duas fendas
4. **Difração**
   - Difração em fenda única
   - Difração em fenda circular
   - Rede de difração
   - Dispersão e poder de resolução

1ª Prova.
Estimativa de data: 20/10

5. **Relatividade**
   - Transformação de Lorentz
   - Cinemática relativística
   - Energia-Massa
6. **Mecânica Quântica**
   - O efeito fotoelétrico
   - Equação de Schroedinger
   - Princípio da Incerteza de Heisenberg
   - Tunelamento
   - Poço de potencial
   - Modelo de Bohr
   - O átomo de Hidrogênio
7. **Física de Partículas**
   - O modelo padrão das partículas elementares
   - O CERN
   - O Bóson de Higgs

2ª Prova.
Estimativa de data: 1/12

Livros texto

- Halliday e Resnick, volume 4 (qualquer edição)
- Caruso e Oguri, Física Moderna

Aula Anterior

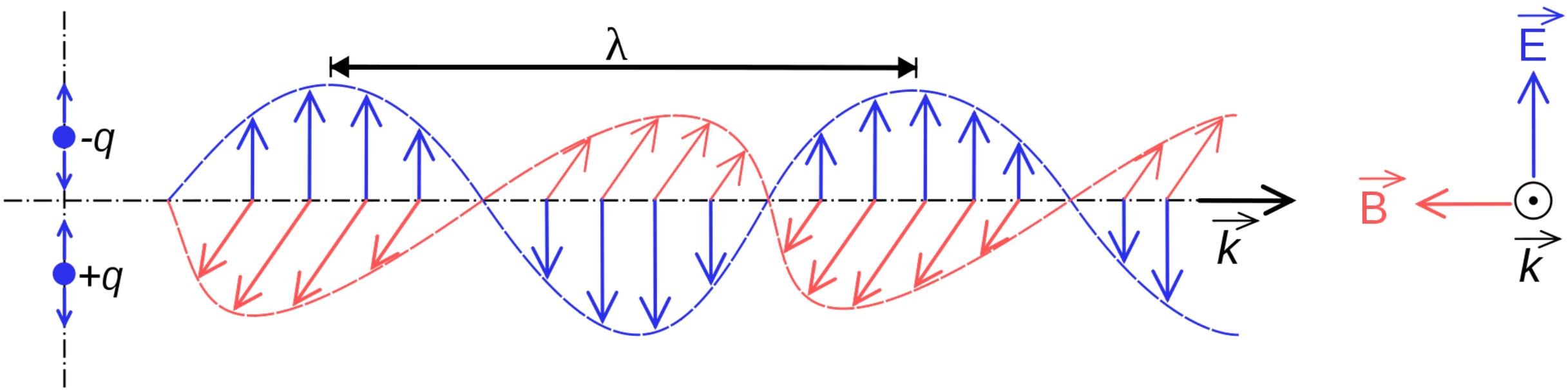
Aula Anterior

- Ondas eletromagnéticas
- Transporte de energia
- Intensidade

Propriedades das O.E.

- Descrevendo os campos elétricos e magnéticos.

$$v = \frac{\omega}{k}$$



$$\mathbf{E} = E_m.sen(kx - \omega t) \qquad \mathbf{B} = B_m.sen(kx - \omega t)$$

Amplitudes

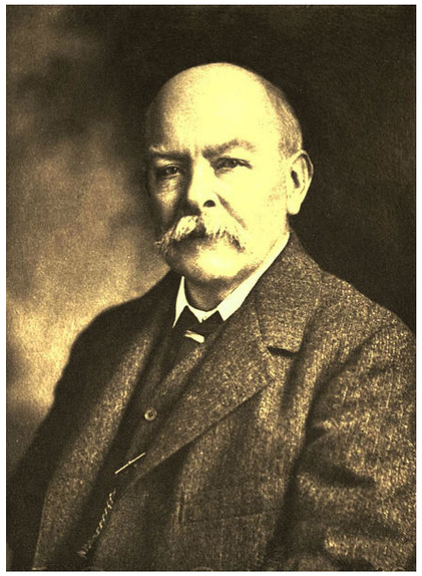
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458\, m/s$$

$$\boxed{c = \frac{E_m}{B_m} = \frac{E}{B}}$$

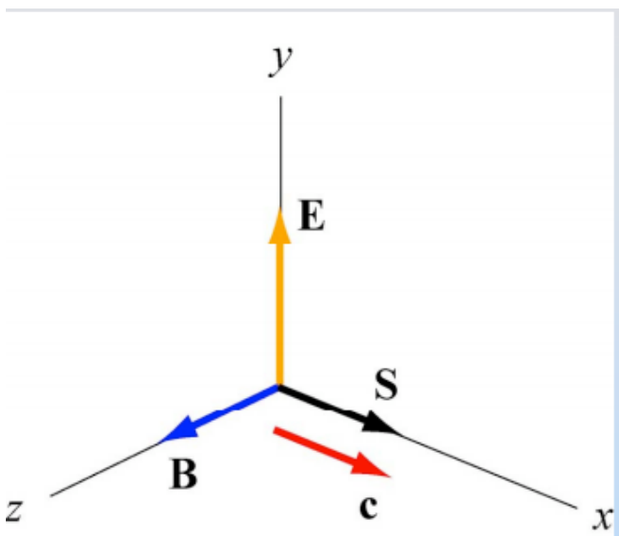
no vácuo todas as OE se propagam com a mesma velocidade: c.

Transporte de Energia

- Uma onda eletromagnética transporta e fornece energia a um corpo;
- A **taxa de transporte de energia por unidade de área** por parte de uma onda eletromagnética é descrita por um vetor S, conhecido como vetor de Poynting.



John Henry Poynting (1852-1914)



Direção de propagação da onda

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

$$|\mathbf{S}| = \frac{1}{\mu_0}\mathbf{E}.\mathbf{B} = \boxed{\frac{1}{c\mu_0}\mathbf{E}^2}$$

Fluxo instantâneo de energia

no SI:

$$S = \left(\frac{energia/tempo}{area}\right)_{instantanea} = \left(\frac{potencia}{area}\right)_{instantanea} = \frac{W}{m^2}$$

Transporte de Energia

- Na prática, a grande utilidade é o **valor médio de S**, também conhecido como **intensidade I** da onda.

$$I = S_{med} =< S >= \frac{1}{c\mu_0} < E^2 >$$

para:

$$\mathbf{E} = E_m.sen(kx - \omega t)$$

logo,

$$I = \frac{1}{c\mu_0}\left\langle E_m^2 \cdot sen^2(kx - \omega t)\right\rangle = \frac{1}{c\mu_0}E_{rms}^2 = \frac{1}{2c\mu_0}E_m^2$$

$$< sen^2 x >= \frac{1}{2} \qquad sen^2 x + cos^2 x = 1 \qquad E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$$

μ0: constante de permeabilidade = 1,26 x 10^{-6} H/m

Exercício Resolvido

Quando olhamos para a Estrela Polaris, interceptamos luz de uma estrela a uma distância de 431 anos-luz e emitindo energia a uma taxa de 2,2 X 10^3 vezes a do nosso Sol (P_{sol} = 3,90 X 10^{26} W). Desprezando qualquer absorção atmosférica, encontre os valores de *rms* dos campos elétrico e magnético quando a luz da estrela chega a nós.

Dados:

$$P_{estrela} = (2,2 \times 10^3)(3,90 \times 10^{26} W)$$

$$r = 431 * 60 * 60 * 24 * 365 * 300 * 10^6 m = 407726 \times 10^{15} m = 4,08 \times 10^{18}$$

$$r^2 = 1,66 \times 10^{36} m^2$$

Sabemos que $I = \frac{1}{c\mu_0} E_{rms}^2 = \frac{P_{estrela}}{4\pi r^2} \Rightarrow E_{rms} = \sqrt{\frac{c\mu_0 P_{estrela}}{4\pi r^2}}$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{(300 \times 10^6 m/s)(1,257 \times 10^{-6} V \cdot s / A \cdot m)(8,58 \times 10^{29} V \cdot A)}{2,08496 \times 10^{37} m^2}} = 12,457 \times 10^{-4} V/m = 1,2 mV/m$$

$$B_{rms} = \frac{E_{rms}}{c} \rightarrow B_{rms} = \frac{1,2457 \times 10^{-3} V/m}{300 \times 10^6 m/s} = 0,00415 \times 10^{-9} \frac{V \cdot s}{m^2} = 4,15 \times 10^{-12} T$$

$$\boxed{B_{rms} = 4,2\ pT \qquad E_{rms} = 1,2\ \frac{mV}{m}}$$

Aula de Hoje

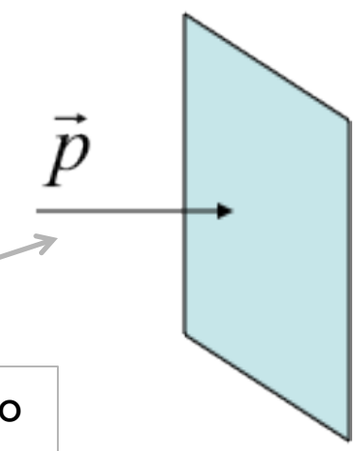
- ✓ Pressão de radiação;
- ✓ Polarização,

Pressão de Radiação

- Além da energia, as ondas eletromagnéticas possuem momento linear **p**. Isso significa que ao iluminarmos um objeto por um período de tempo $\Delta \mathbf{t}$ podemos exercer uma pressão sobre o mesmo. Essa pressão é chamada de **pressão de radiação**.
- Estudaremos dois aspectos da pressão de radiação:
  - Quando há <u>absorção total</u> da onda pelo corpo;
  - Quando há indiência perpendicular e <u>reflexão total</u> da onda pelo corpo.

$$\Delta\vec{p}_a = \frac{\overline{\Delta U}}{c}\hat{k}$$

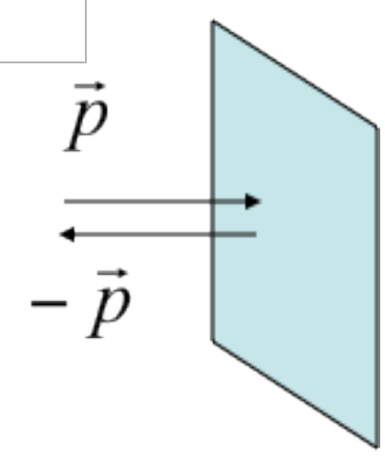
no caso de absorção total da radiação



A direção de variação do momento do objeto é a mesma do feixe incidente, absorvido pelo objeto

$$\Delta\vec{p}_r = 2\frac{\overline{\Delta U}}{c}\hat{k}$$

no caso de reflexão total da radiação e incidência perpendicular

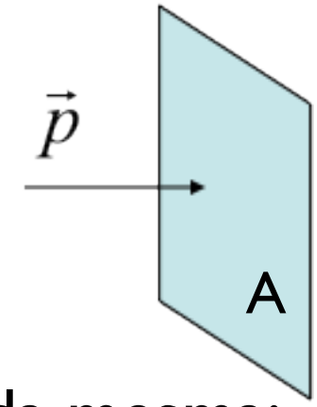


Δp: variação de momento
ΔU: variação de energia

Pressão de Radiação

Segunda Lei de Newton:
variação de momento se está relaciona a uma força.

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{\Delta\mathbf{p}}{\Delta t}$$



Sabemos também que a energia da onda EM está relacionada à intensidade da mesma:

$$I = < S >_{medio} = \left(\frac{energia/tempo}{area}\right) = \left(\frac{potencia}{area}\right) = \frac{W}{m^2}$$

Intensidade de radiação

$$\overline{\Delta U} = I A \Delta t$$

Comparando as duas equações:

$$I = \frac{\Delta U}{A \cdot \Delta t} \Rightarrow \Delta U = I \cdot A \cdot \Delta t$$

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c} = \frac{I \cdot A \cdot \Delta t}{c} \Rightarrow F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{I \cdot A}{c}$$

Absorção total

$$\Delta p = \frac{2\Delta U}{c} = \frac{2I \cdot A \cdot \Delta t}{c} \Rightarrow F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2I \cdot A}{c}$$

Reflexão total

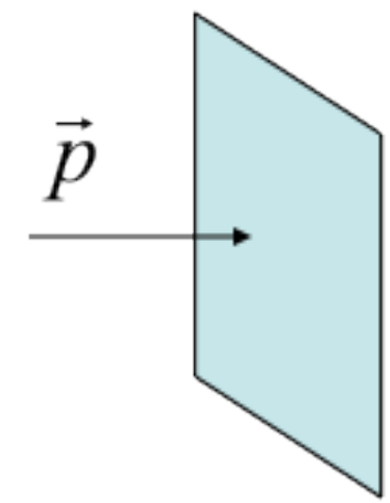
Pressão de Radiação

Transporte de momento linear : pressão de radiação

$$\overline{\Delta U} = IA\Delta t \qquad \Delta p_a = \frac{\Delta U}{c}, \quad \Delta p_r = \frac{2\Delta U}{c}$$

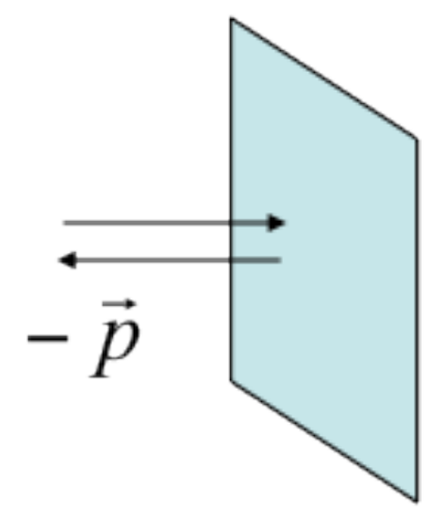
Pressão de radiação na absorção total

$$F_a = \frac{\Delta p_a}{\Delta t} = \frac{IA}{c} \Rightarrow \boxed{P_a = \frac{F_a}{A} = \frac{I}{c}}$$

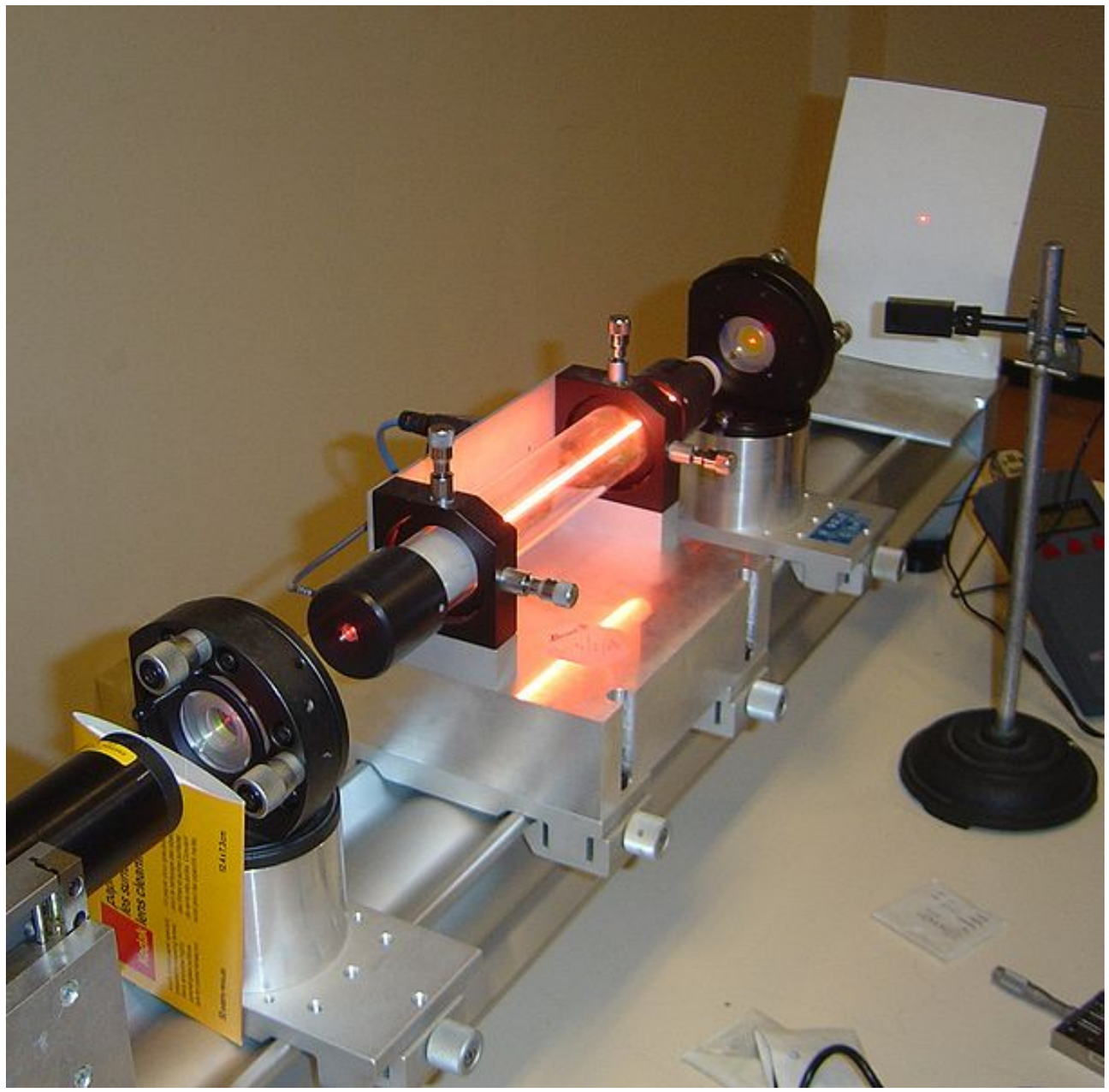


Pressão de radiação na reflexão total

$$F_r = \frac{\Delta p_r}{\Delta t} = \frac{2IA}{c} \Rightarrow \boxed{P_r = \frac{F_r}{A} = \frac{2I}{c}}$$



Laser



Exercícios

Exercício 1:

Um feixe de luz de intensidade uniforme incide perpendicularmente em uma superfície refletora, iluminando-a totalmente. Se a área diminuir:

(a) o que ocorre com a pressão de radiação?

(b) e a força exercida sobre a superfície?

Exercício 1:

Um feixe de luz de **intensidade uniforme** incide perpendicularmente em uma superfície refletora, iluminando-a totalmente. Se a área diminuir:

(a)o que ocorre com a pressão de radiação?

Sabemos que a pressão de radiação com incidência perpendicular em uma superfície totalmente refletora é dada por:

$$P_r = \frac{F_r}{A} = \frac{2I}{c}$$

Logo, não depende da área da superfície refletora e portanto, se a área da superfície diminui, a pressão de radiação continua sendo a mesma.

(b) e a força exercida sobre a superfície?

Sabemos que a força exercida por um feixe de luz incidente perpendicularmente em uma superfície totalmente refletora é dada por:

$$F_r = \frac{2IA}{c}$$

Logo, se a área da superfície diminui, a força exercida sobre ela também diminui.

Exercício 2:

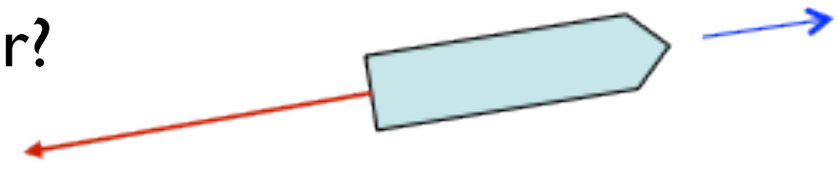
Uma pequena espaçonave, cuja massa é 1,5 x 10^3 kg (incluindo um astronauta), está perdida no espaço, longe de qualquer campo gravitacional. Se o astronauta ligar um laser de 10 kW de potência, que velocidade a nave atingirá após transcorrer um dia, por causa do momento linear associado à luz do laser? (considerando que o espaço absorve totalmente a luz do laser)

Dados:

$$P_{laser} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = 10\ kW \Rightarrow \Delta U = P_{laser} \cdot \Delta t$$

$$\Delta t = 24\ horas = 60 \cdot 60 \cdot 24\ s = 86400\ s$$

Uma pequena espaçonave, cuja massa é 1,5 x 10^3 kg (incluindo um astronauta), está perdida no espaço, longe de qualquer campo gravitacional. Se o astronauta ligar um laser de 10 kW de potência, que velocidade a nave atingirá após transcorrer um dia, por causa do momento linear associado à luz do laser?



- O Laser do astronauta transporta uma energia U. A variação de momento associada a essa energia é $\Delta p = \Delta U/c$ (considerando que o espaço absorve totalmente a luz do laser);
- O momento total do laser e da nave são conservados, logo, o momento transportado pelo laser é igual ao momento adquirido pela nave;
- Seja P a potência do laser, então a energia carregada pelo laser em um instante de tempo Δt é igual a $\Delta U = P \Delta t$ (pois sabemos que energia/tempo = potência);
- Logo $$p = \frac{\Delta U}{c} = \frac{P_{laser} \cdot \Delta t}{c}$$
- Considerando o intervalo de tempo como sendo um dia = 86400 segundos e *m* a massa da nave, obtemos a velocidade atingida pela nave:

$$\boxed{v = \frac{p}{m} = \frac{P_{laser} \cdot \Delta t}{c \cdot m} = \frac{(10 \times 10^3\ W) \cdot (86400\ s)}{(2,998 \times 10^8\ m) \cdot (1,5 \times 10^3\ Kg)} = 1,9 \times 10^{-3}\ m/s}$$

Exercício 3:

Uma onda eletromagnética plana, com um comprimento de onda de 3,0 m, se propaga no vácuo, no sentido positivo do eixo x, com o campo elétrico **E**, cuja amplitude é 300 V/m, paralelo ao eixo y.

(a) Qual é a frequência f da onda?

(b) Quais são a direção e a amplitude do campo magnético associado a esta onda?

(c) Quais são os valores de k e ω se $E = E_m \text{sen}(kx - \omega t)$?

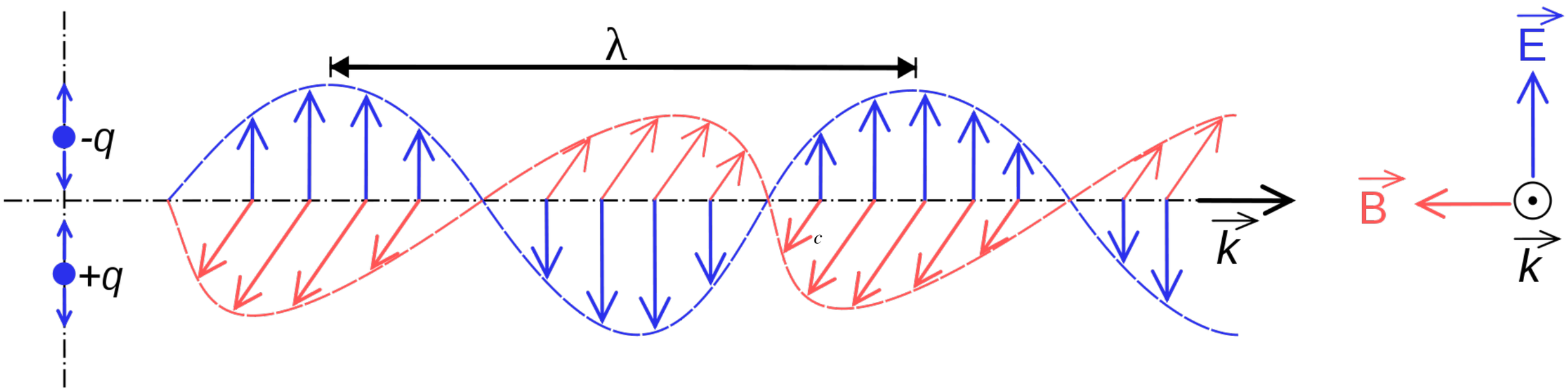
(d) Qual é o fluxo médio de energia, em W/m^2, associado a esta onda?

(e) Se a onda incide em uma placa perfeitamente absorvedora com uma área de 2,0 m^2, a que taxa o momento é transferido à placa e qual é a pressão exercida pela radiação sobre a placa?

Lembrando da aula passada

- Descrevendo os campos elétricos e magnéticos.

$$\hat{c} = \vec{E} \times \vec{B}$$



$$\mathbf{E} = E_m.sen(kx - \omega t) \qquad \mathbf{B} = B_m.sen(kx - \omega t)$$

Amplitudes

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458\, m/s$$

$$\boxed{c = \frac{E_m}{B_m} = \frac{E}{B}}$$

no vácuo todas as OE se propagam com a mesma velocidade: c.

Uma onda eletromagnética plana, com um comprimento de onda de 3,0 m, se propaga no vácuo, no sentido positivo do eixo x, com o campo elétrico **E**, cuja amplitude é 300 V/m, paralelo ao eixo y.

(a) Qual é a frequência f da onda?

Como c=λf, onde λ é o comprimento de onda e f a frequência, temos:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2.998 \times 10^8\,\mathrm{m/s}}{3.0\,\mathrm{m}} = 1.0 \times 10^8\ \mathrm{Hz}\ .$$

(b) Quais são a direção e a amplitude do campo magnético associado a esta onda?

A *amplitude* do campo magnético é dada por:

$$B_m = \frac{E_m}{c} = \frac{300\,\mathrm{V/m}}{2.998 \times 10^8\,\mathrm{m/s}} = 1.00 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}\ .$$

A direção de propagação da onda é o eixo x, sentido positivo. Logo, quando **E** aponta no sentido de y positivo, **B** deve apontar no sentido positivo do eixo z, para que **E** x **B** aponte no sentido positivo de x.

(c) Quais são os valores de k e ω se $E = E_m \mathrm{sen}(kx - \omega t)$?

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{3.0\,\mathrm{m}} = 2.1\,\mathrm{rad/m}\ . \qquad \omega = 2\pi f = 2\pi(1.0 \times 10^8\,\mathrm{Hz}) = 6.3 \times 10^8\ \mathrm{rad/s}\ .$$

(d) Qual é o fluxo médio de energia, em W/m², associado a esta onda?

O fluxo médio de energia é igual à intensidade da onda e é dado por:

$$I = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c} = \frac{(300\,\mathrm{V/m})^2}{2(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{H/m})(2.998 \times 10^8\,\mathrm{m/s})} = 119\ \mathrm{W/m^2}\ .$$

(e) Se a onda incide em uma placa perfeitamente absorvedora com uma área de 2,0 m², a que taxa o momento é transferido à placa e qual é a pressão exercida pela radiação sobre a placa?

Para uma placa perfeitamente absorvedora, a taxa de momento transferido para a placa, é igual à força exercida sobre a placa: $F_a = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{IA}{c}$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{IA}{c} = \frac{(119\,\mathrm{W/m^2})(2.0\,\mathrm{m^2})}{2.998 \times 10^8\,\mathrm{m/s}} = 8.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}\ .$$

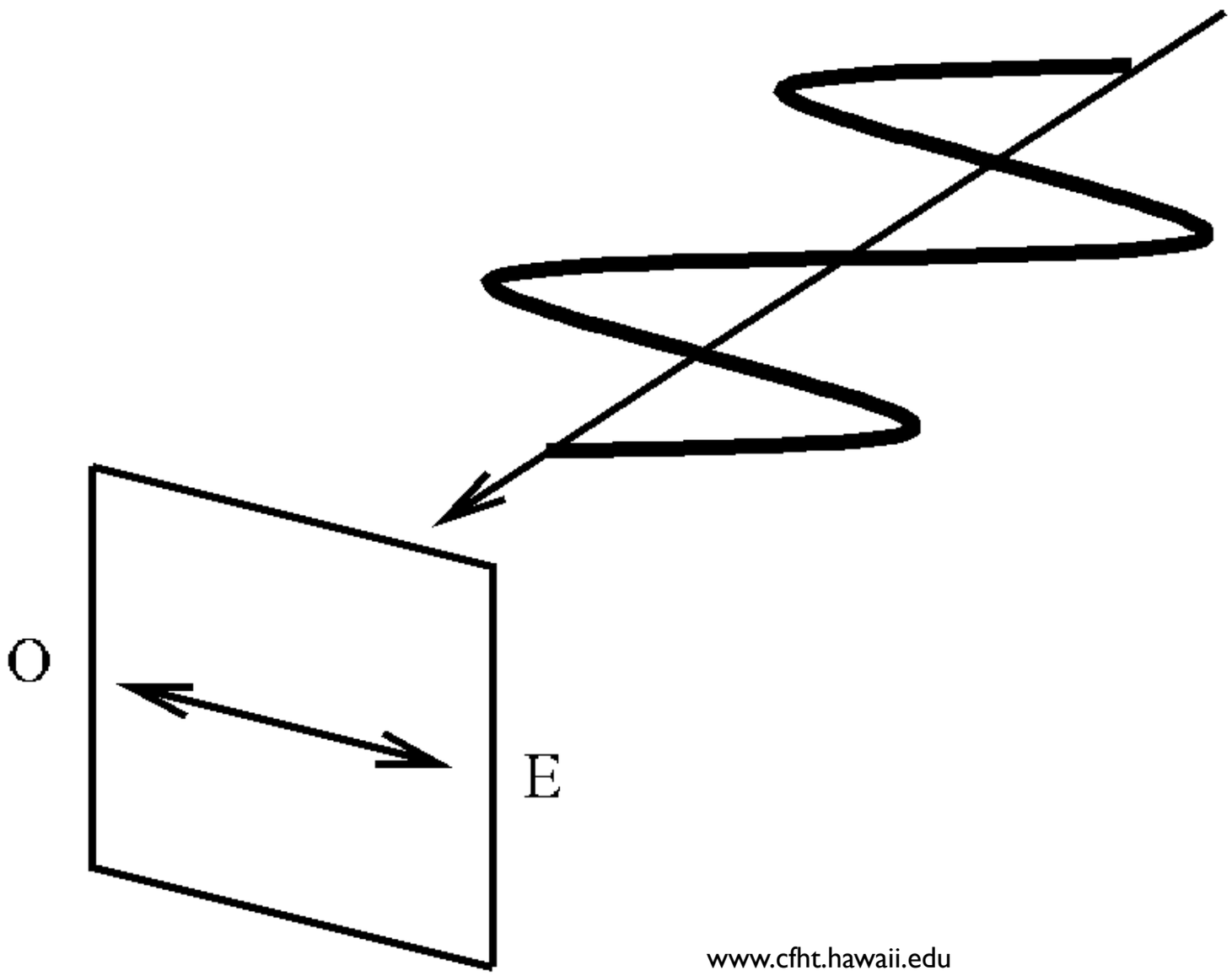
E a pressão de radiação é

$$p_r = \frac{dp/dt}{A} = \frac{8.0 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}}{2.0\,\mathrm{m^2}} = 4.0 \times 10^{-7}\ \mathrm{Pa}\ .$$

Polarização

Polarização da Radiação

- <u>Polarização linear</u>: *direção de oscilação do campo elétrico* **E**

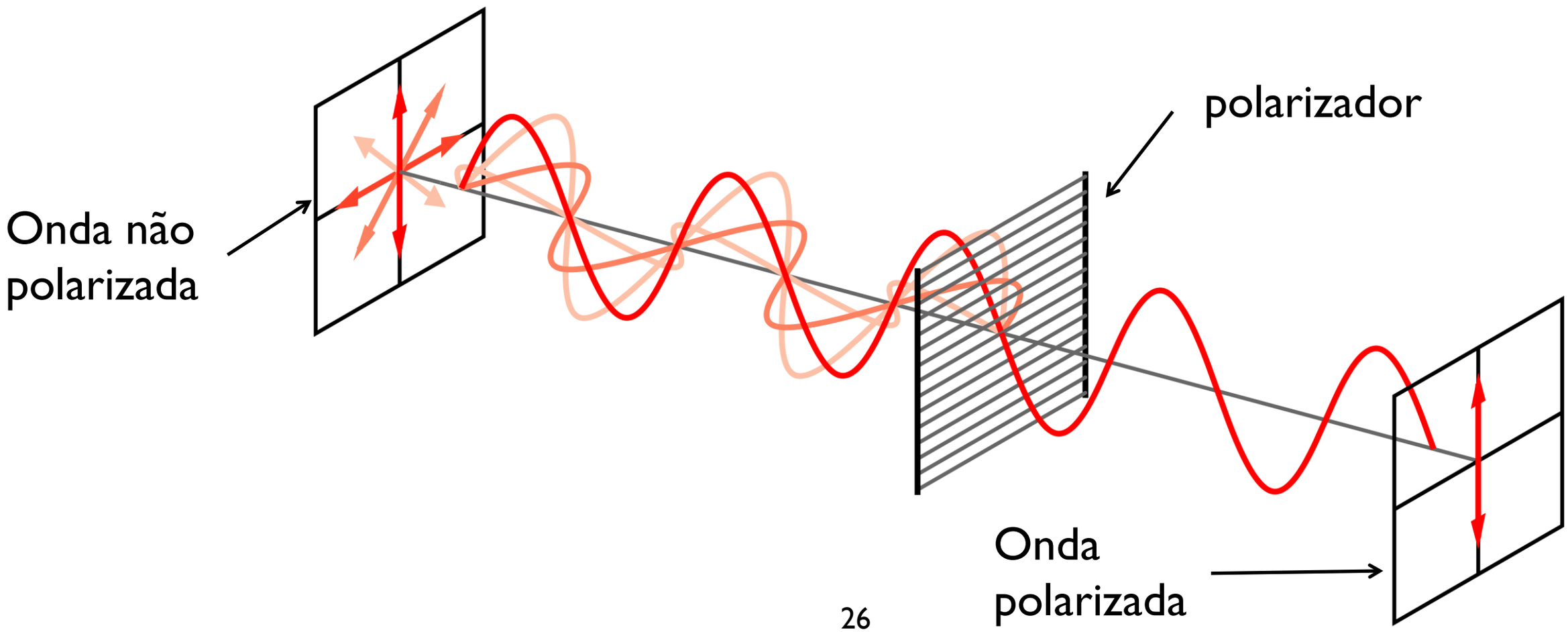


www.cfht.hawaii.edu

Polarizadores

É possível transformar a luz não-polarizada em polarizada, fazendo-a passar por um *filtro polarizador*.

As componentes do campo elétrico ***paralelas*** à direção de polarização são ***transmitidas*** por um filtro polarizador; as componentes **perpendiculares** são **absorvidas**.



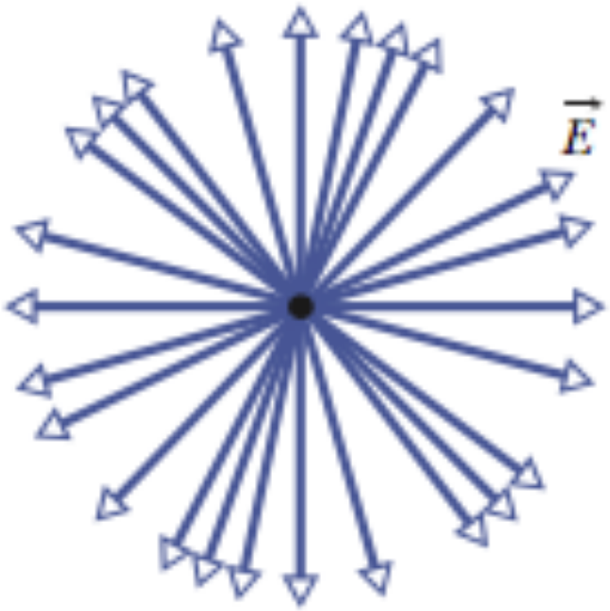
Intensidade da Luz Polarizada transmitida

Vamos considerar a intensidade da **luz não polarizada** transmitida por um polarizador.

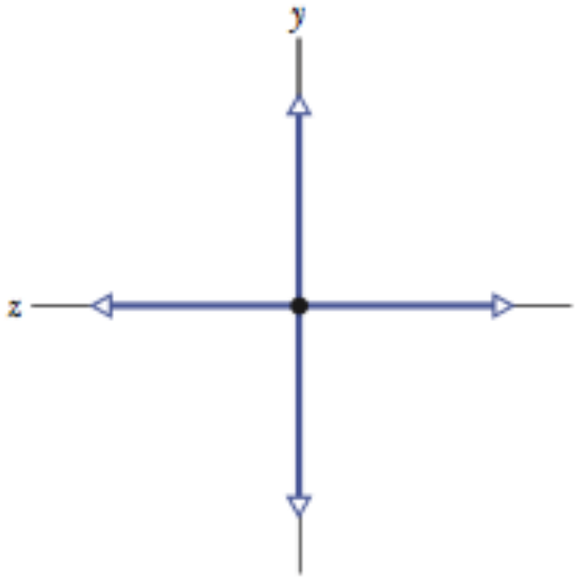
- Seja uma **onda não polarizada**, como mostra a figura (a), sendo o eixo y a direção de polarização;
- Podemos decompor as oscilações do campo elétrico em componentes y e z (como mostra a figura (b));
- As componentes y serão transmitidas e as componentes z serão absorvidas pelo material;
- Quando as componentes z são absorvidas, metade da intensidade I_0 da onda original é perdida;
- A intensidade I da luz que emerge do filtro é portanto:

$$\boxed{I = \frac{I_0}{2}}$$

Regra da metade



(a)



(b)

Intensidade da Luz Polarizada transmitida

Vamos considerar a intensidade da **luz polarizada** transmitida por um polarizador.

- Seja uma **<u>onda de luz polarizada</u>**, prestes a atravessar um filtro polarizador;
- Podemos separar **E** nas componentes y (direção de polarização) e z;
- Ey = E cos θ;
- Ez = E sen θ;
- A intensidade de uma onda eletromagnética é dada por:

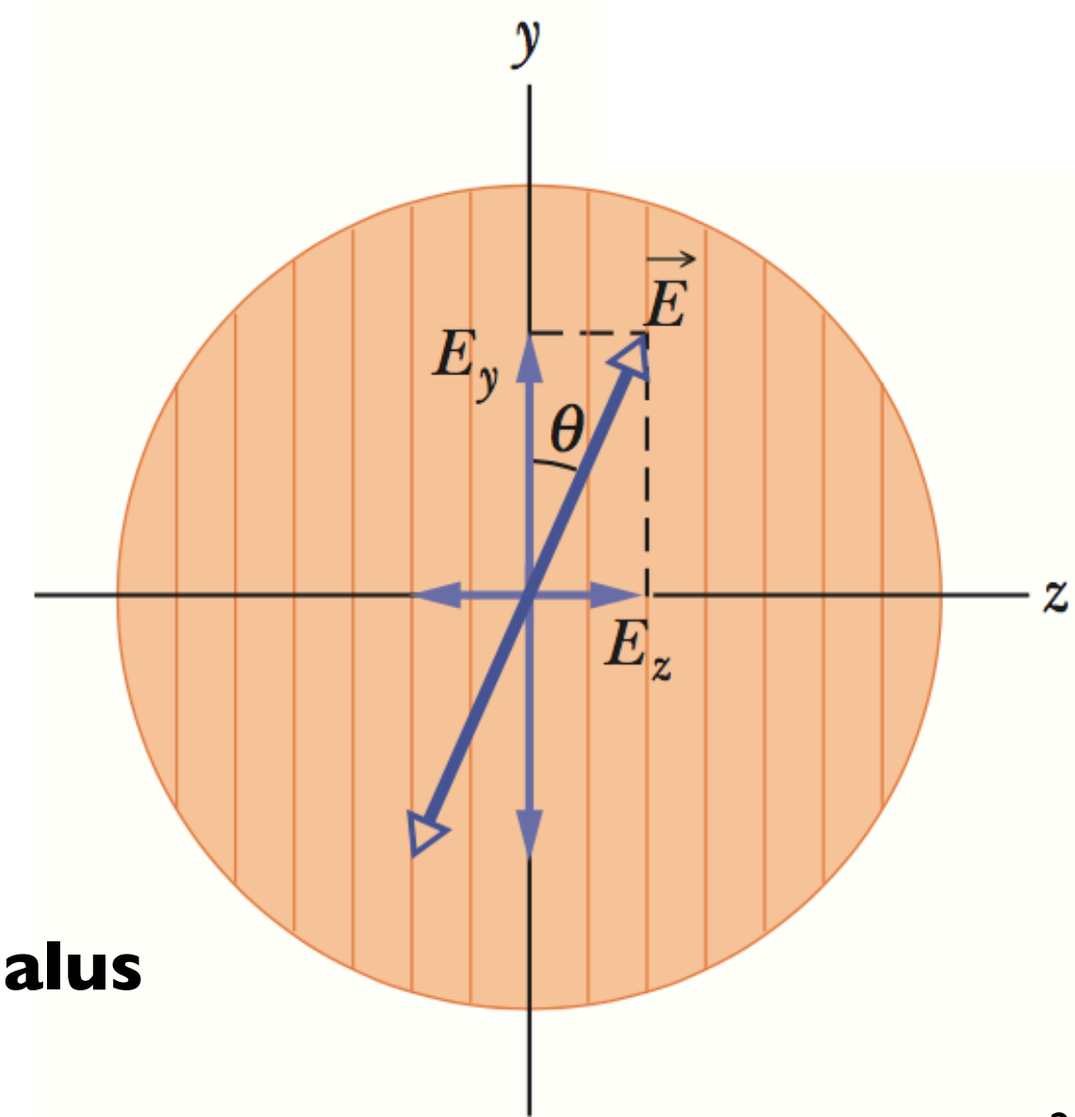
$$I = \frac{1}{2c\mu_0} E^2$$

- A intensidade I da onda emergente é proporcional a Ey;
- A intensidade I_0 da onda original é proporcional a E;
- Logo **$I/I_0 = E^2 \cos^2 \theta / E^2 = \cos^2 \theta$**;

$$\boxed{I = I_0 \cos^2 \theta}$$

← **Lei de Malus**

Onda polarizada, antes de atravessar o filtro polarizador



Aplicações

Efeito de um polarizador sobre a reflexão de lama. Na figura da esquerda, o polarizador está rodado para transmitir as reflexões o melhor possível. Ao rodar o polarizador de 90 graus (figura da direita), quase toda a luz solar refletida é bloqueada.

Podemos ver os efeitos de um filtro polarizador no céu da fotografia. A figura à direita usa o filtro.

Exercícios

A figura abaixo mostra um conjunto de três filtros polarizadores sobre o qual incide um feixe de luz inicialmente não-polarizada. A direção de polarização do primeiro filtro é paralela ao eixo y, a do segundo faz um ângulo de 60° com a primeira no sentido anti-horário e a do terceiro é paralela ao eixo x.

(a) Qual é a direção de polarização da luz que sai do conjunto? **Direção x.**

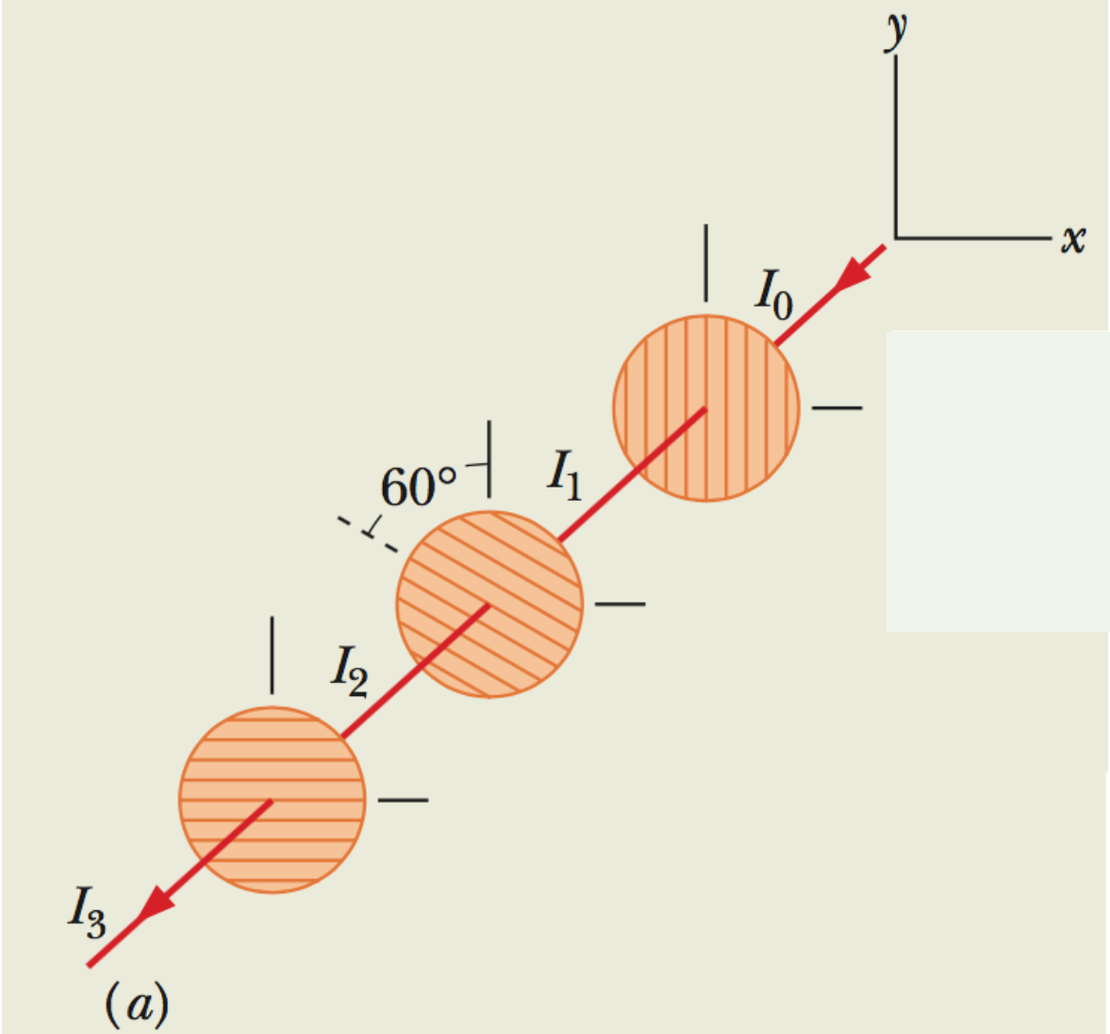
(b) Que fração da intensidade inicial I_0 da luz sai do conjunto? **$I_3/I_0 = 0{,}094$**

(c) Se removermos o segundo filtro, que fração da luz deixará o sistema? **Zero.**

- *Primeiro filtro:* luz incidente <u>não-polarizada</u> **$\rightarrow I_1 = I_0/2$**;
  - A polarização da luz transmitida é paralela ao eixo y;
- *Segundo filtro*: luz incidente é <u>polarizada</u>, **$\rightarrow I_2 = I_1\cos^2\theta = I_1\cos^2 60^o$**;
  - Θ: ângulo entre a direção de polarização da luz incidente e a direção de polarização do segundo filtro: $\theta = 60^o$;
- *Terceiro filtro*: **$I_3 = I_2\cos^2\theta = I_2\cos^2 30^o$**;
  - Luz sai polarizada na direção x;

$$I_3 = I_2\cos^2 30^o = (I_1\cos^2 60^o)\cos^2 30^o$$

$$= \left(\frac{1}{2}I_0\right)\cos^2 60^o\cos^2 30^o = 0{,}094 I_0$$



Próxima Aula

- Ótica física

Fim

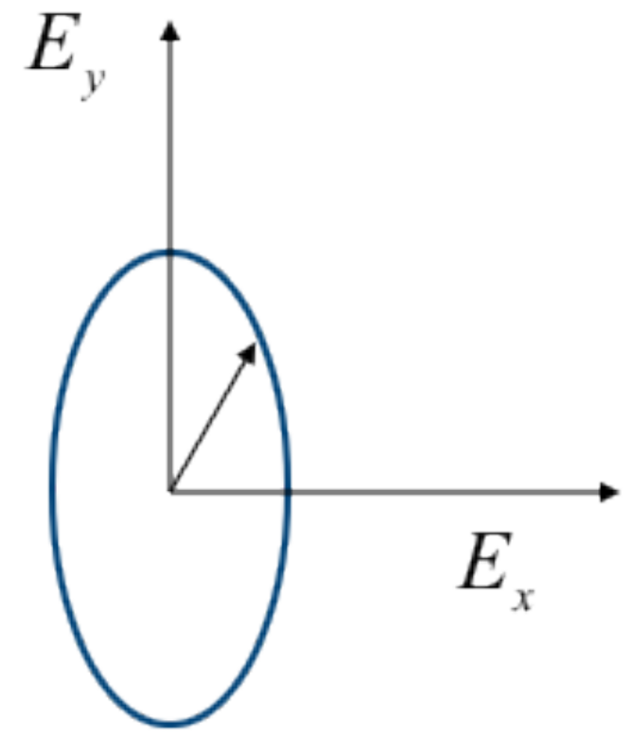
Polarização da radiação

Polarização elíptica

$$\vec{E}(\vec{r},t) = E_{x0}\sin(kz-\omega t)\hat{x} + E_{y0}\cos(kz-\omega t)\hat{y}$$

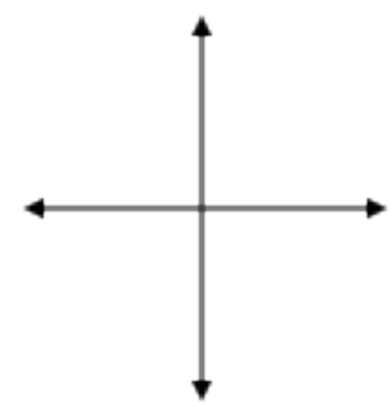
$$\Downarrow$$

$$\frac{E_x^2(\vec{r},t)}{E_{x0}^2} + \frac{E_y^2(\vec{r},t)}{E_{y0}^2} = 1$$



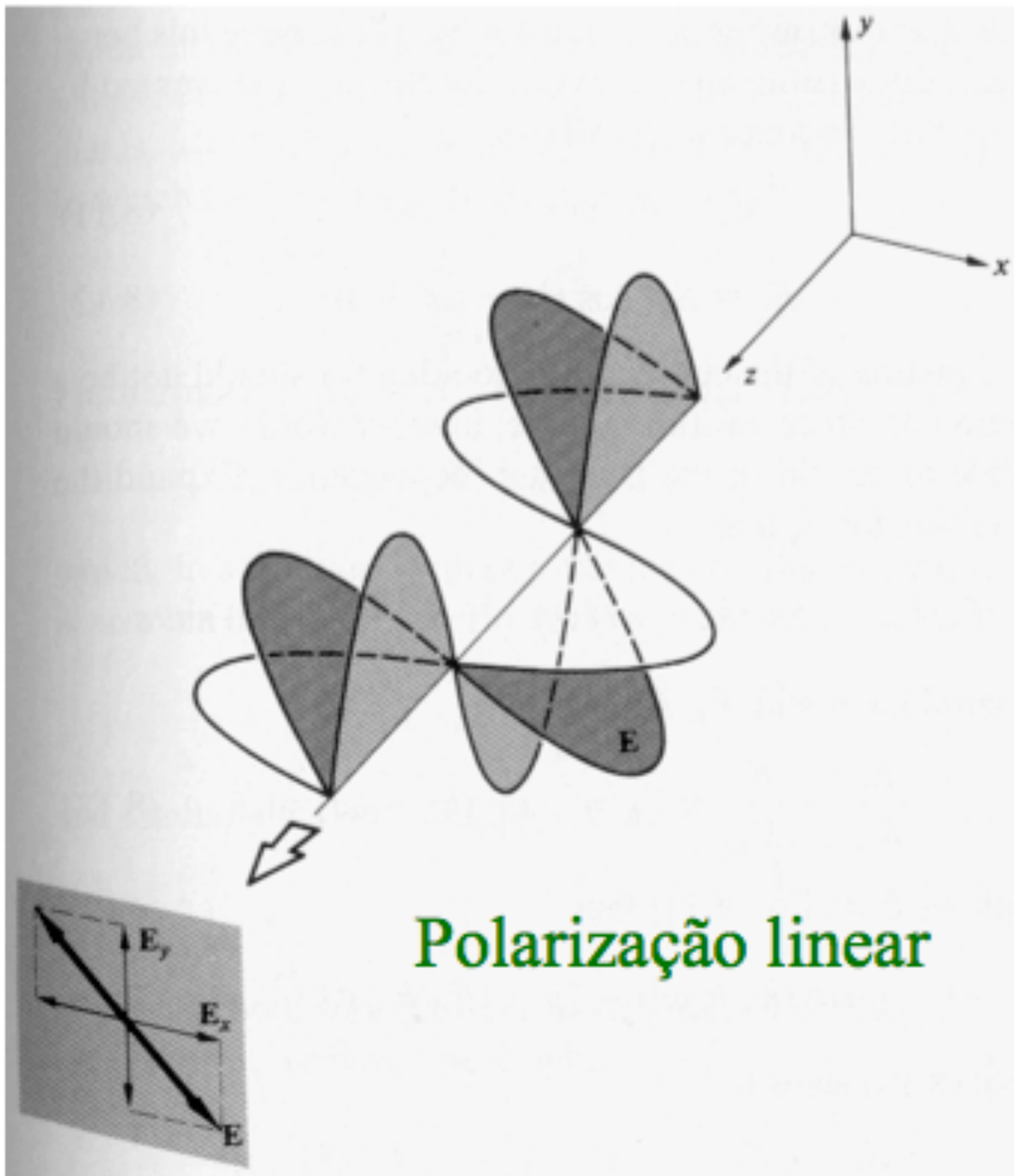
Um pulso eletromagnético geral corresponde a uma superposição de vários pulsos que oscilam em diferentes direções, com diferentes fases

$\Rightarrow$ radiação não-polarizada

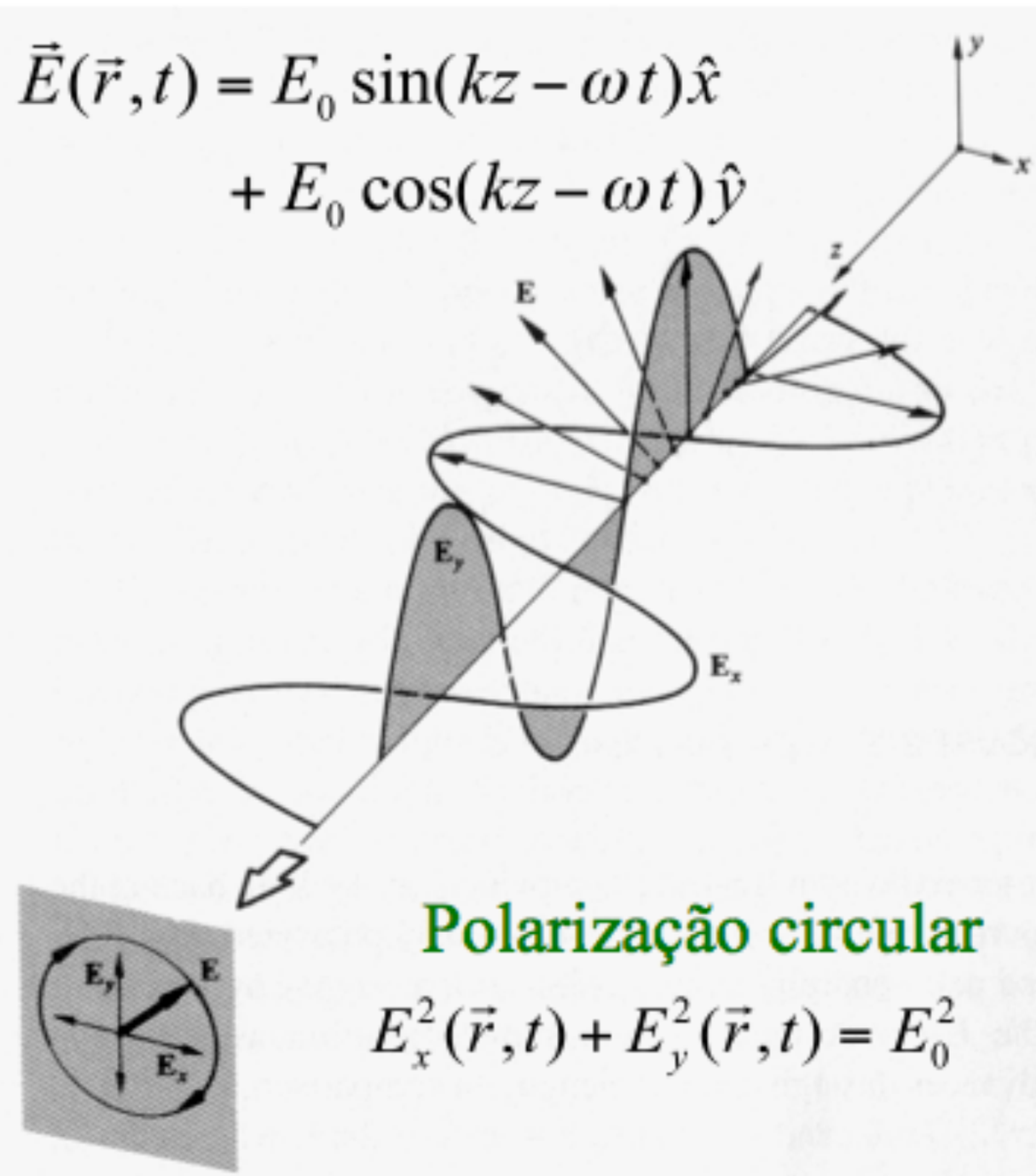


Polarização da radiação

$$\vec{E}(\vec{r},t) = E_0 \sin(kz - \omega t)\hat{x} + E_0 \cos(kz - \omega t)\hat{y}$$



Polarização linear



Polarização circular

$$E_x^2(\vec{r},t) + E_y^2(\vec{r},t) = E_0^2$$

Unidades

$$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg}}{\mathrm{C}^2} = \frac{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{kg}}{\mathrm{s}^2 \cdot \mathrm{A}^2} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{A}^2} = \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{A}} = \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{A}} = \frac{\mathrm{s}^2}{\mathrm{F}} = \Omega \cdot \mathrm{s}$$

where

A = ampere,
C = coulomb,
F = farad,
J = joule,
kg = kilogram,
m = meter,
s = second,
Wb = weber,
V = volt,
Ω = ohm.