UERJ
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

DFNAE
DEPARTAMENTO DE FÍSICA NUCLEAR E ALTAS ENERGIAS

Física IV

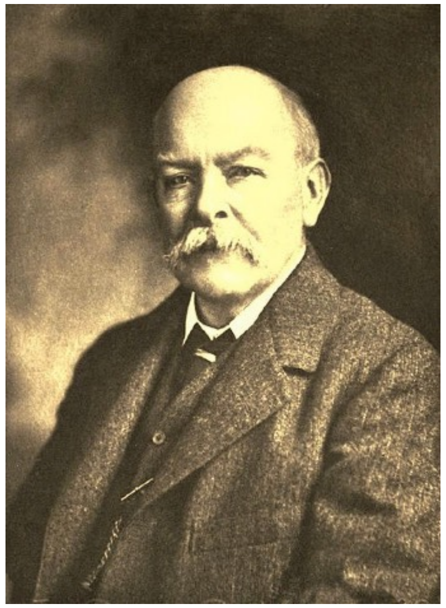
Aula 2

Aula Anterior

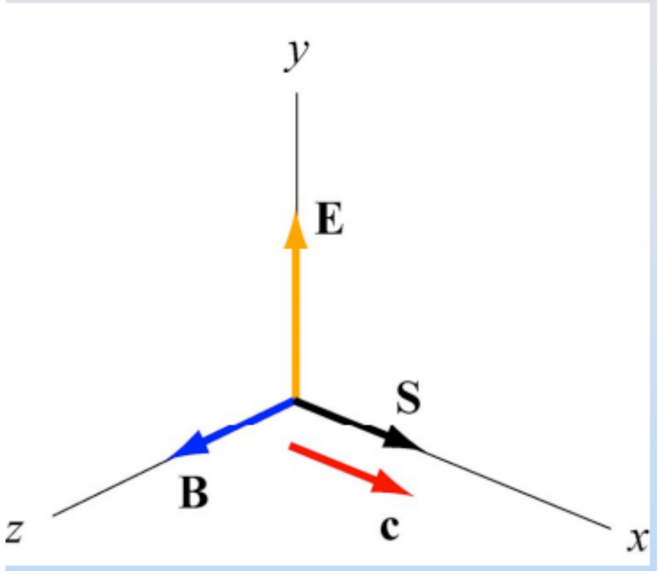
- Equações de Maxwell;
- Propriedades das ondas eletromagnéticas;

Transporte de Energia

A taxa de transporte de energia por unidade de área por parte de uma onda eletromagnética é descrita por um vetor S, conhecido por vetor de Poynting.



John Henry Poynting (1852-1914)



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

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

Fluxo instantâneo de energia

no SI:

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

Transporte de Energia

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

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

para:

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

logo,

$$\boxed{I = \frac{1}{c\mu_0} < E_m^2.sen^2(kx - \omega t) > = \frac{1}{c\mu_0} E^2}$$

$$\boxed{< sen^2 x > = \frac{1}{2} \qquad sen^2 x + cos^2 x = 1 \qquad E_m^2 = 2E^2}$$

Exercícios e Problemas

1. Frank D. Drake, um investigador do programa SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence, ou seja, Busca de Inteligência Extraterrestre), disse uma vez que o grande radiotelescópio de Arecibo, Porto Rico "é capaz de detectar um sinal que deposita em toda a superfície da Terra uma potência de apenas um picowatt". (a) Qual a potência que a antena do radiotelescópio de Arecibo receberia de um sinal como este ? O diâmetro da antena é 300m. (b) Qual teria que ser a potência de uma fonte no centro de nossa galáxia para que um sinal com esta potência chegasse a Terra? O centro da galáxia fica a $2{,}2 \times 10^4$ anos-luz de distância. Suponha que a fonte irradia uniformemente em todas as direções. (Halliday 34.18P)


Radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico)
Infoastro.com - Cortesia NAIC/NFS

(a)

$$P_t = 1\ pW = 1 \times 10^{-12}\ W$$ na superfície terrestre:

$$I = \frac{pot}{area} = \frac{P_t}{4\pi r_t^2}$$ área da superfície terrestre

Mesma onda na antena (supondo sua área plana):

$$I = \frac{P_a}{\pi r_a^2} \Rightarrow P_a = I\pi r_a^2 = I\pi\frac{d^2}{4} = \frac{P_t}{4\pi r_t^2}\pi\frac{d^2}{4}$$

raio terrestre $r_t = 6{,}37 \text{ x } 10^6$ m

diâmetro da antena $d = 300$ m

$$\boxed{P_a = 1,3863 \times 10^{-22}\ W}$$

(b) $P_s = ?$

$$I = \frac{pot}{area} = \frac{P_s}{4\pi r_g^2} = \frac{P_t}{4\pi r_t^2}$$

I do item anterior

$$\Rightarrow \quad P_s = \frac{P_t \, r_g^2}{r_t^2}$$

$$r_g = 2,2\times10^4 \ anos{-}luz = 2,2\times10^4\times365\times24\times60\times60\times3\times10^8 \ m$$

$$r_g = 2,2 \times 10^4 \ anos - luz = 2,0814 \times 10^{20} \ m$$

$$\boxed{\Rightarrow \quad P_s = 1,0677 \times 10^{15} \ W}$$

Aula de Hoje

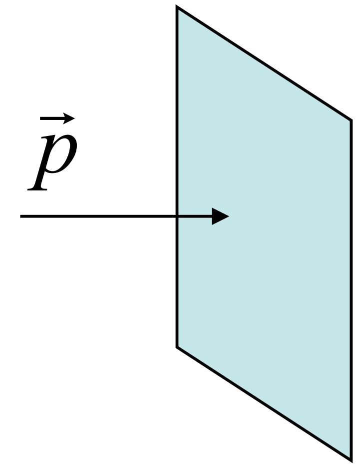
- ✓ Pressão de radiação;
- ✓ Polarização,

Pressão de Radiação

Quando um corpo totalmente livre é submetido a um feixe de radiação eletromagnética durante um intervalo de tempo e que a radiação é totalmente **absorvida**. Isto significa que num intervalo de tempo o mesmo recebe uma energia oriunda da radiação

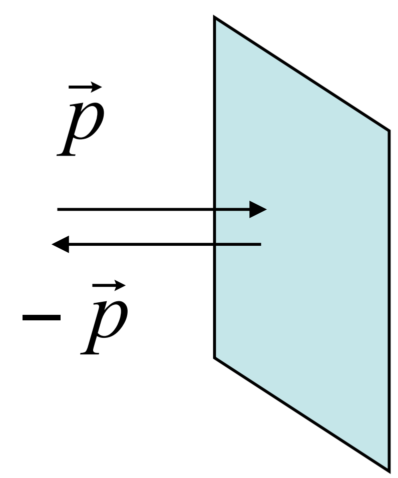
$$\Delta\vec{p}_a = \frac{\overline{\Delta U}}{c}\hat{k}$$

no caso de absorção total da radiação



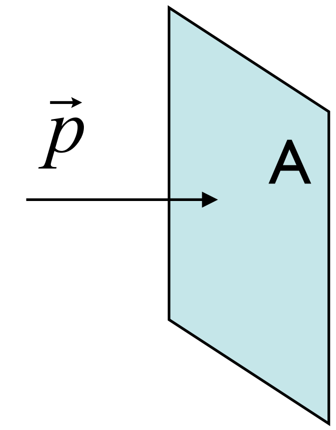
$$\Delta\vec{p}_r = 2\frac{\overline{\Delta U}}{c}\hat{k}$$

no caso de reflexão total da radiação



Relembrando
Segunda Lei de Newton

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



$$\boxed{I = \langle S \rangle_{medio} = \left(\frac{energia/tempo}{area}\right) = \left(\frac{potencia}{area}\right) = \frac{W}{m^2}}$$

Intensidade de radiação

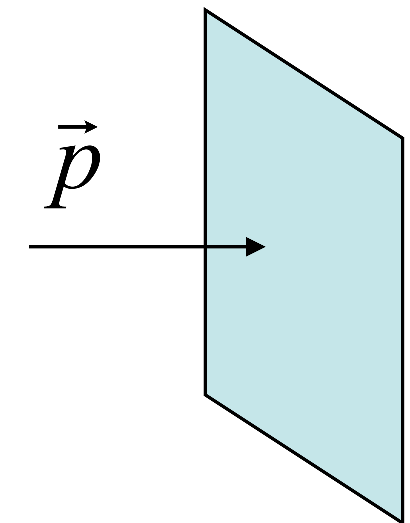
$$\overline{\Delta U} = I A \Delta t$$

Comparando as duas equações:

Pressão de Radiação

Transporte de momento linear : pressão de radiação

$$\overline{\Delta U} = IA\Delta t$$

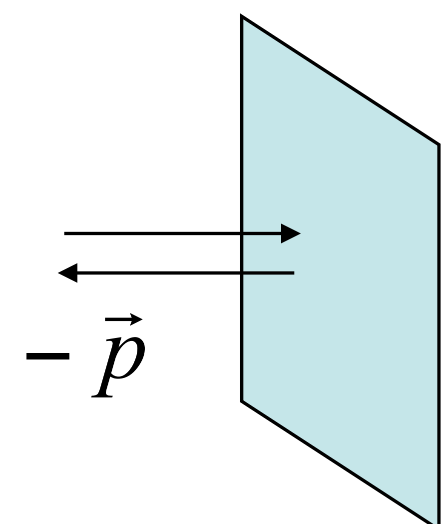


Pressão de radiação na absorção total

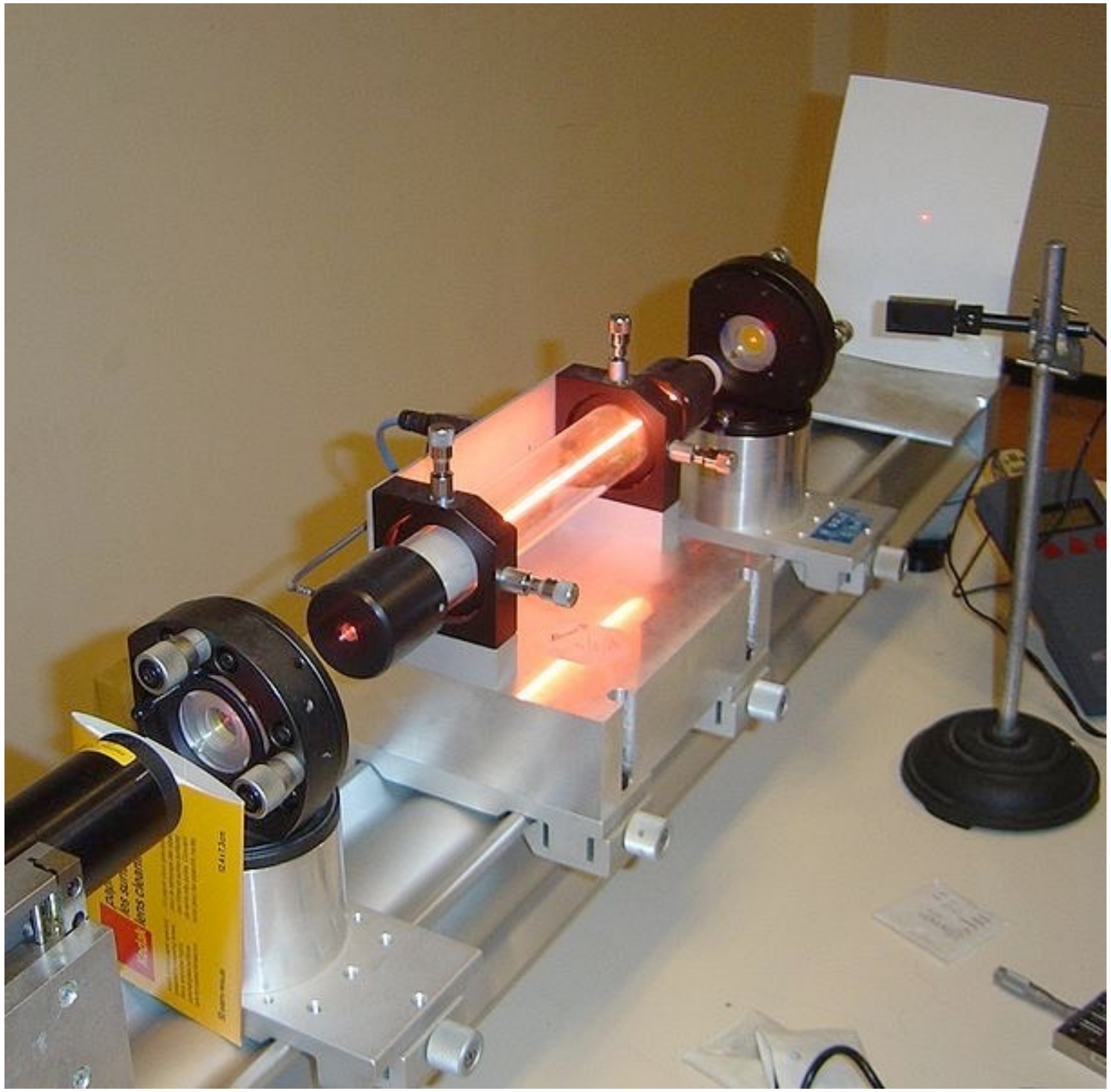
$$F_a = \frac{\Delta p_a}{\Delta t} = \frac{IA}{c} \Rightarrow P_a = \frac{F_a}{A} = \frac{I}{c}$$

Pressão de radiação na reflexão total

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



Laser



G1 | Ciência e Saúde

FenaSaúde

20/05/2010 19h05 - Atualizado em 20/05/2010 19h17

Japão lança sonda que viaja impulsionada pela luz do Sol

Missão é chegar perto de Vênus; veja como o 'veleiro solar' funciona.
Tecido dez vezes mais fino que um fio de cabelo servirá como 'motor'.

Do G1, em São Paulo   imprimir

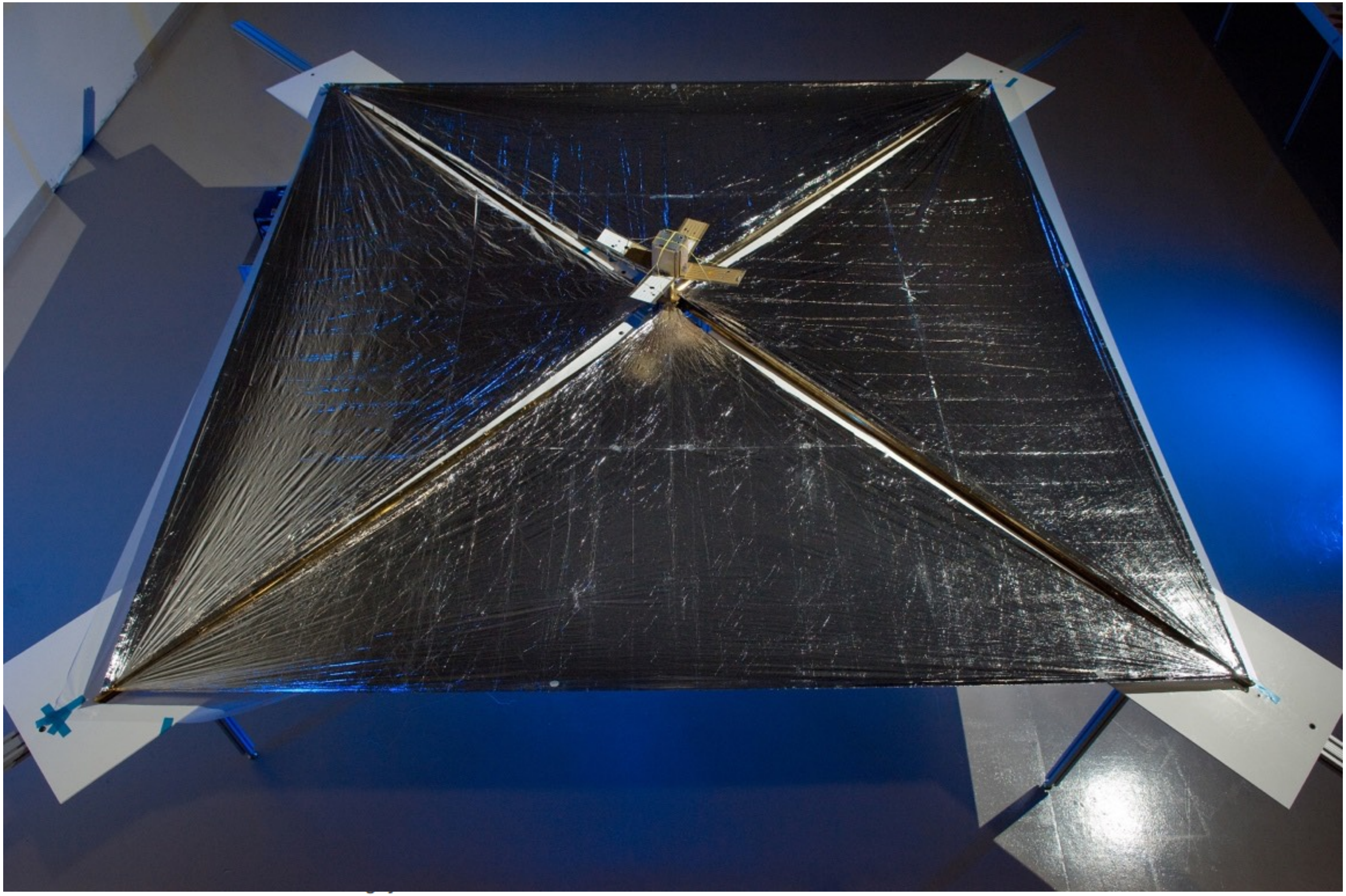
A Agência Espacial Japonesa (Jaxa) lançou com sucesso o **primeiro "veleiro solar" da história**. O foguete que transporta a sonda Ikaros deixou às 18h58 (horário de Brasília) desta quinta-feira (20), já manhã de sexta-feira no Japão. A primeira tentativa, na segunda-feira, foi abortada por causa do mau tempo.

O objetivo é mandar a sonda para perto de Vênus, movida apenas por uma espécie de vela que gera movimento quando se choca com fótons – as partículas que carregam a luz. Com o foguete partiu também a sonda Akatsuki, que analisará a atmosfera de Vênus e entrará em órbita nesse planeta.

Duas tentativas de despachar veículos como o Ikaros já foram feitas, mas houve problemas no lançamento. No final de 2010, a Planetary Society – uma das maiores ONGs dedicadas à astronomia – pretende colocar no espaço a sonda LightSail-1, também para testar a tecnologia da "navegação solar".

http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2010/05/japao-lanca-sonda-que-viaja-impulsionada-pela-luz-do-sol.html

http://www.planetary.org/blogs/jason-davis/2014/lightsail-update-launch.html



http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2010/05/japao-lanca-sonda-que-viaja-impulsionada-pela-luz-do-sol.html

http://www.planetary.org/blogs/jason-davis/2014/lightsail-update-launch.html

Exercícios

Exercício 1:

Um feixe de luz de intensidade uniforme incide perpendicularmente em uma superfície refletora, iluminando totalmente. Se a área diminuir o que ocorre com a pressão de radiação(a) e a força exercida sobre a superfície(b)

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 lux incidente perpendicularmente em uma superfície totalmente refletora é dada por:

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

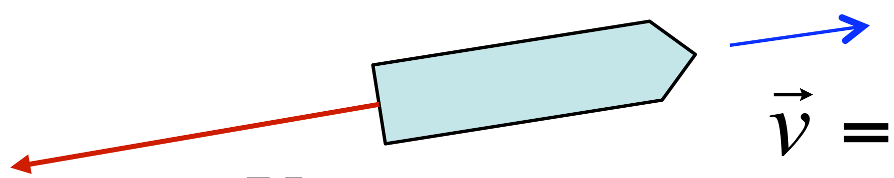
Logo, se a área da superfície diminui, a força exercida sobre ela também diminui.

Exercício 2:

Uma pequena espaçonave, cuja massa é $1,5 \times 10^3$ 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?

Exercício 3:

Uma pequena espaçonave, cuja massa é 1,5 x 10³ 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?



$$\vec{v} = v\,\hat{x}$$

$$\vec{p}_{luz} = -\frac{U}{c}\hat{x} \qquad \vec{p}_n = -\vec{p}_{luz} \qquad F_n = \frac{P}{c} = ma \;\longrightarrow\; a = \frac{P}{mc}$$

$$\frac{dp_{luz}}{dt} = \frac{1}{\mathrm{c}}\frac{dU}{dt} = \frac{P}{c}$$

$$\boxed{v(t) = v_0 + at\,; \quad \mathrm{se}\;\; v_0 = 0 \;\longrightarrow\; v(t) = at}$$

$$\boxed{P = 10\,kW\,; \quad m = 1500\,kg\,; \quad 1\,\mathrm{dia} = 24\times 60\times 60 = 86400\,s}$$

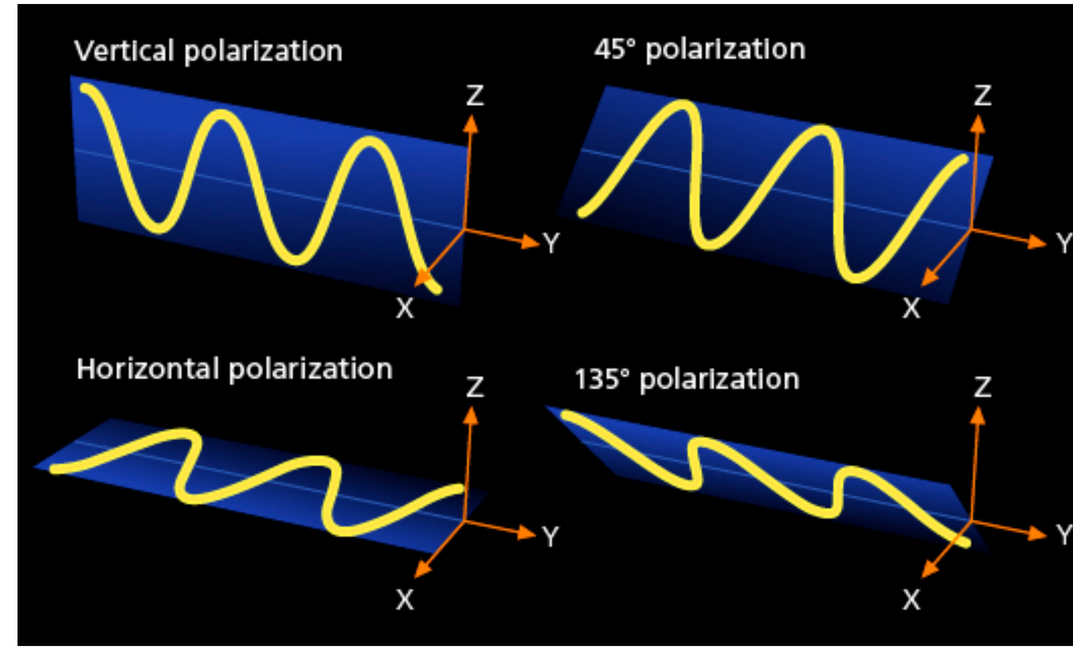
$$\boxed{v = \frac{P}{mc}t = \frac{10^4\,W\times 86400\,s}{1500\,kg\times 3\times 10^8\,m/s} \approx 1{,}9\times 10^{-3}\,m/s\,!}$$

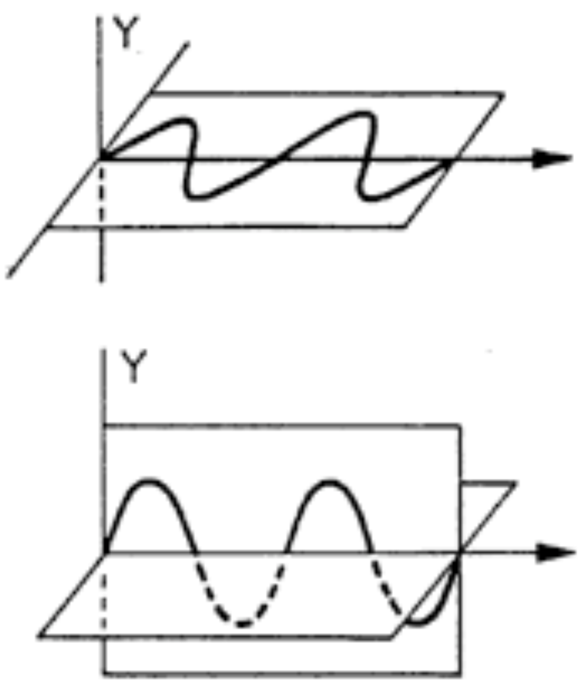
Polarização

Polarização da radiação

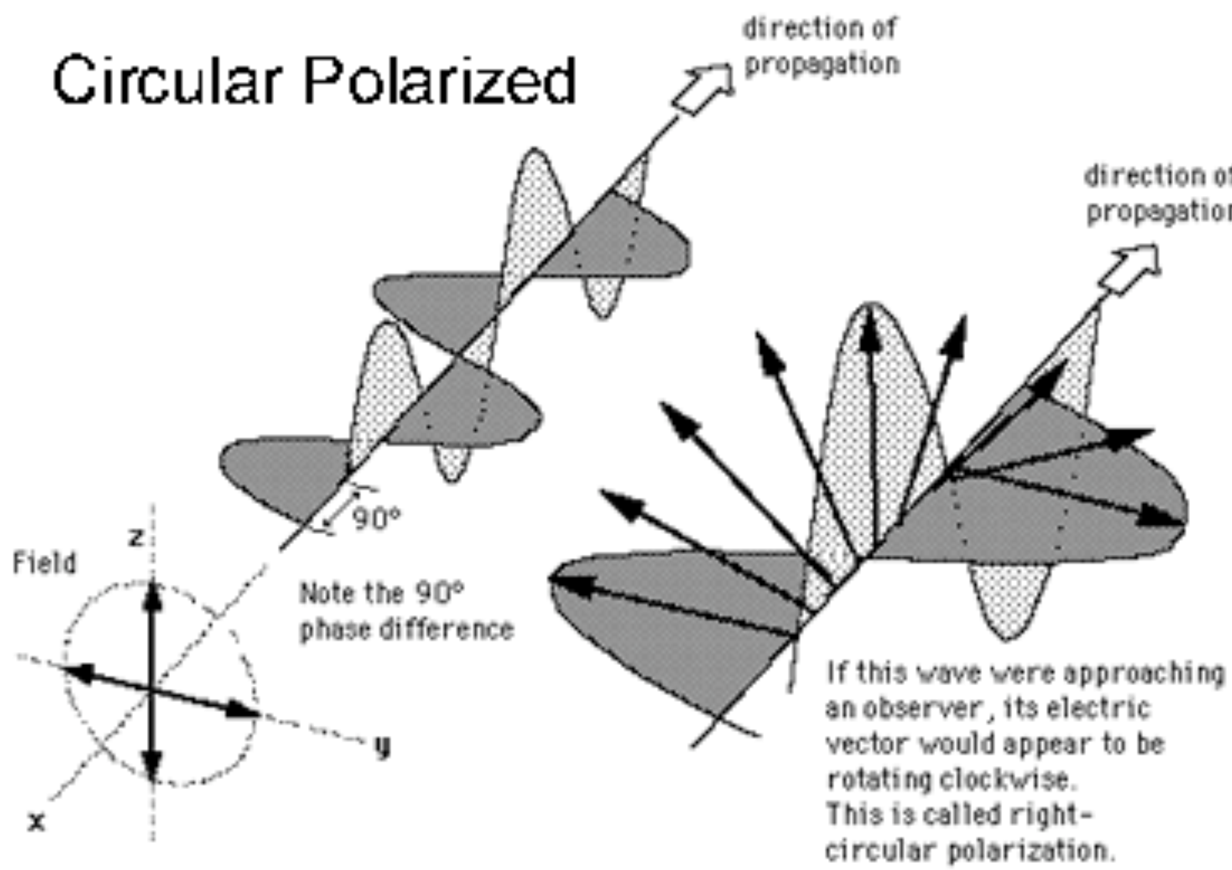
Polarização linear:

Direção do campo elétrico $\vec{E}(\vec{r},t)$





Linear Polarized

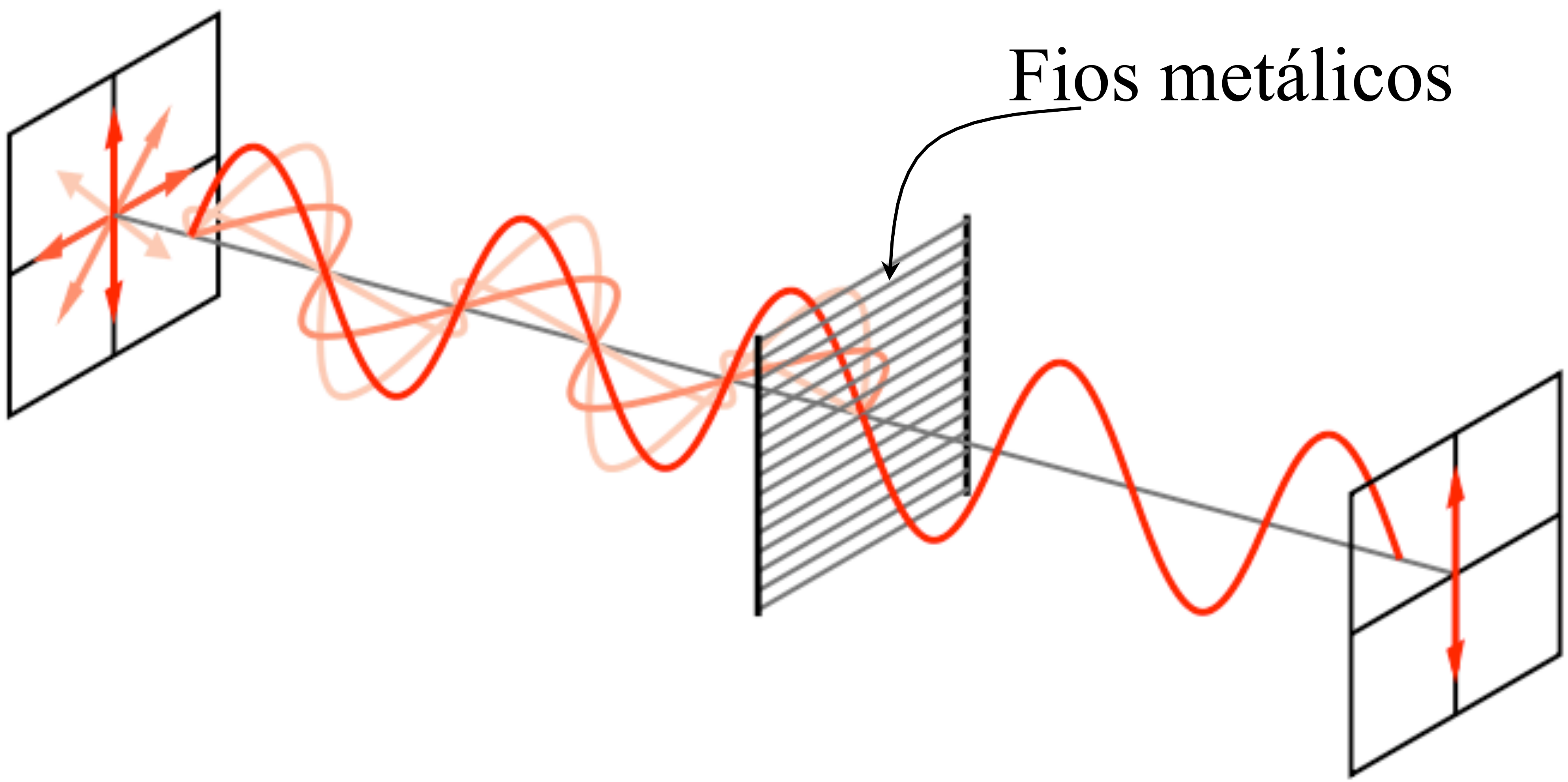


http://www.colorado.edu/physics/2000/polarization/index.html

Polarizadores

A luz polarizada em uma dada direção é absorvida pelo material usado na fabricação do polarizador. A intensidade da luz polarizada perpendicularmente a esta direção fica inalterada.

Exemplo:

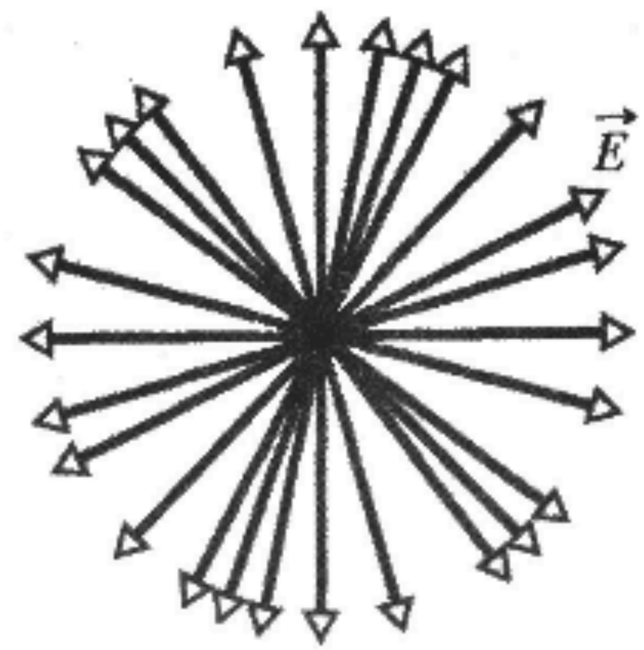


Intensidade da Luz Polarizada transmitida

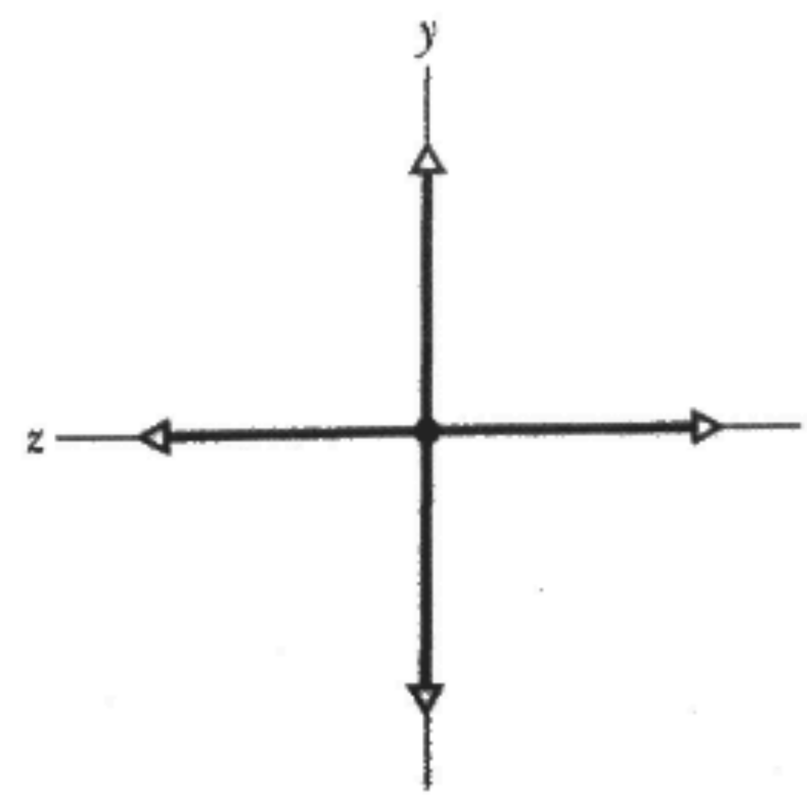
Vamos considerar a intensidade da **luz não polarizada** transmitida por um polarizador.

- 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:

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



(a)



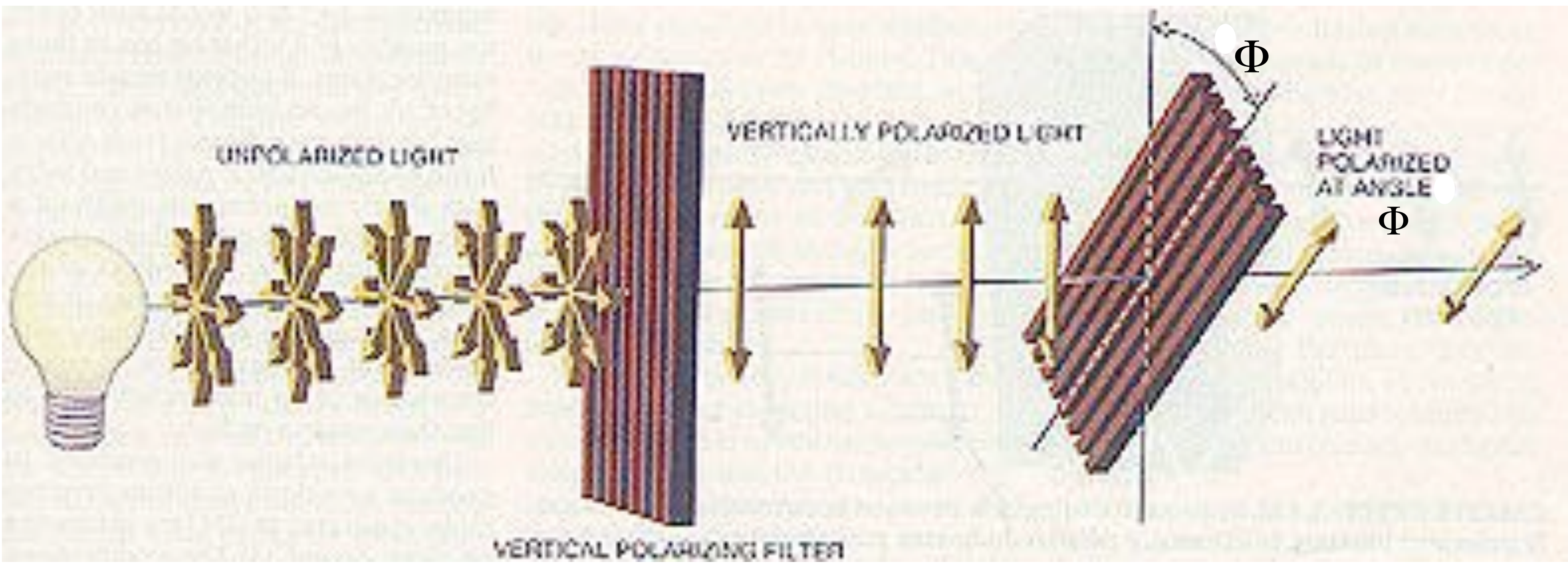
(b)

Polarizadores   Lei de Malus

Intensidade da radiação incidente não-polarizada
(ex.: luz natural)

Intensidade da radiação polarizada ao longo de $\hat{y}$:

$$I = I_0 \overline{\cos^2\theta} = \frac{I_0}{2\pi}\int_0^{2\pi}\cos^2\theta\, d\theta = \frac{I_0}{2}$$



$$\vec{E}_0 = \vec{E}_{\perp 0}\hat{x} + \vec{E}_{//0}\hat{y}$$

Intensidade de uma componente da radiação incidente:

$$E_{0\|} = E_0 \cos\theta$$

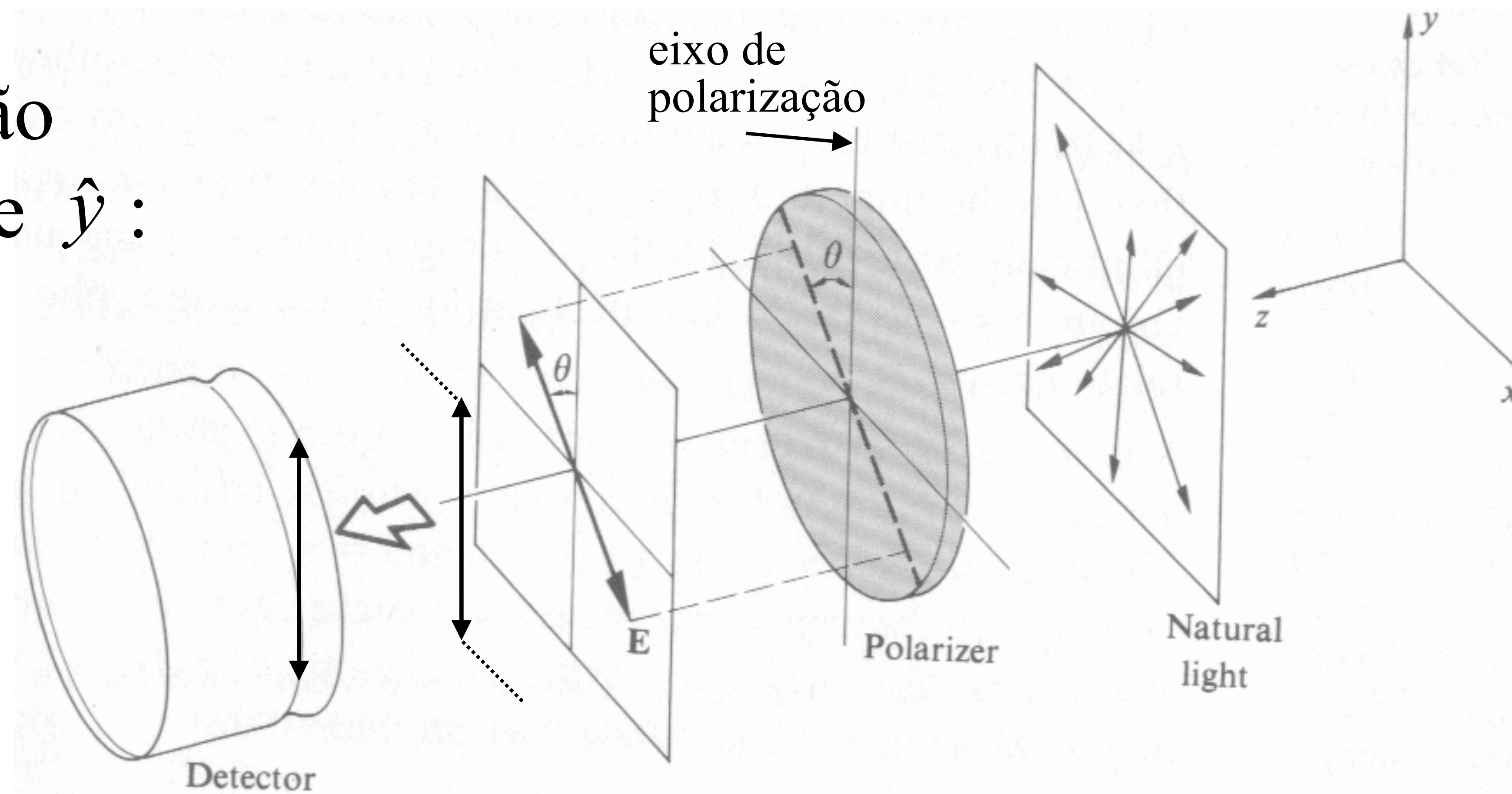
$$E_{0\perp} = E_0 \sin\theta$$

$$I_0 = \frac{1}{2} c\varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} c\varepsilon_0 (E_{0\|}^2 + E_{0\perp}^2)$$

Intensidade da radiação polarizada ao longo de $\hat{y}$:

$$I = \frac{1}{2} c\varepsilon_0 E_{0\|}^2$$

$$I = I_0 \cos^2\theta$$



Intensidade da luz polarizada transmitida

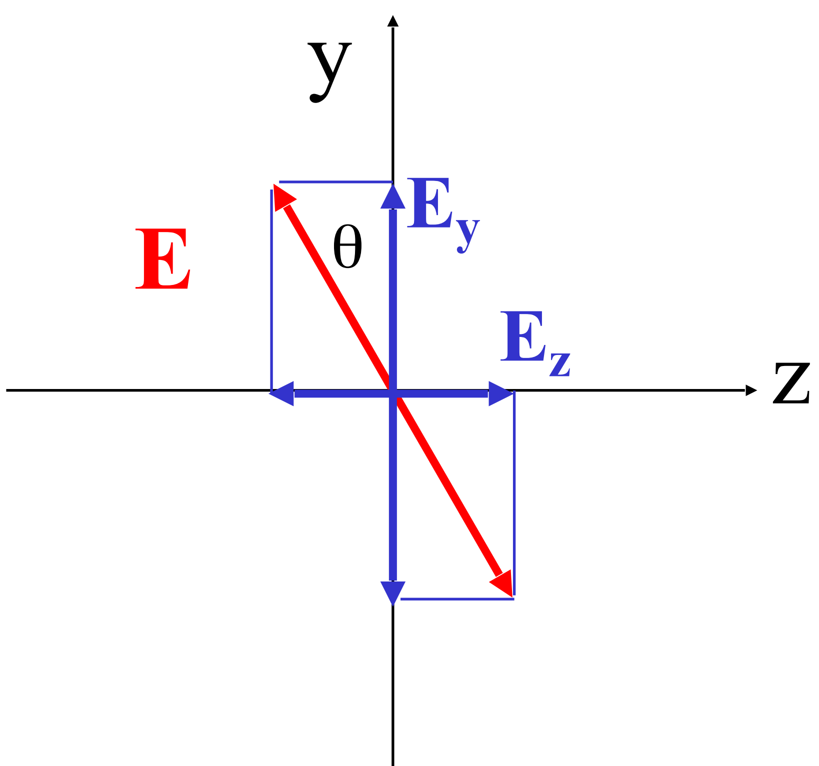
Luz não-polarizada:

polariz.

não-polariz.

$$I = \frac{1}{2} I_0$$

Luz polarizada: projeção o vetor **E**



$$E_y = E \cos\theta$$

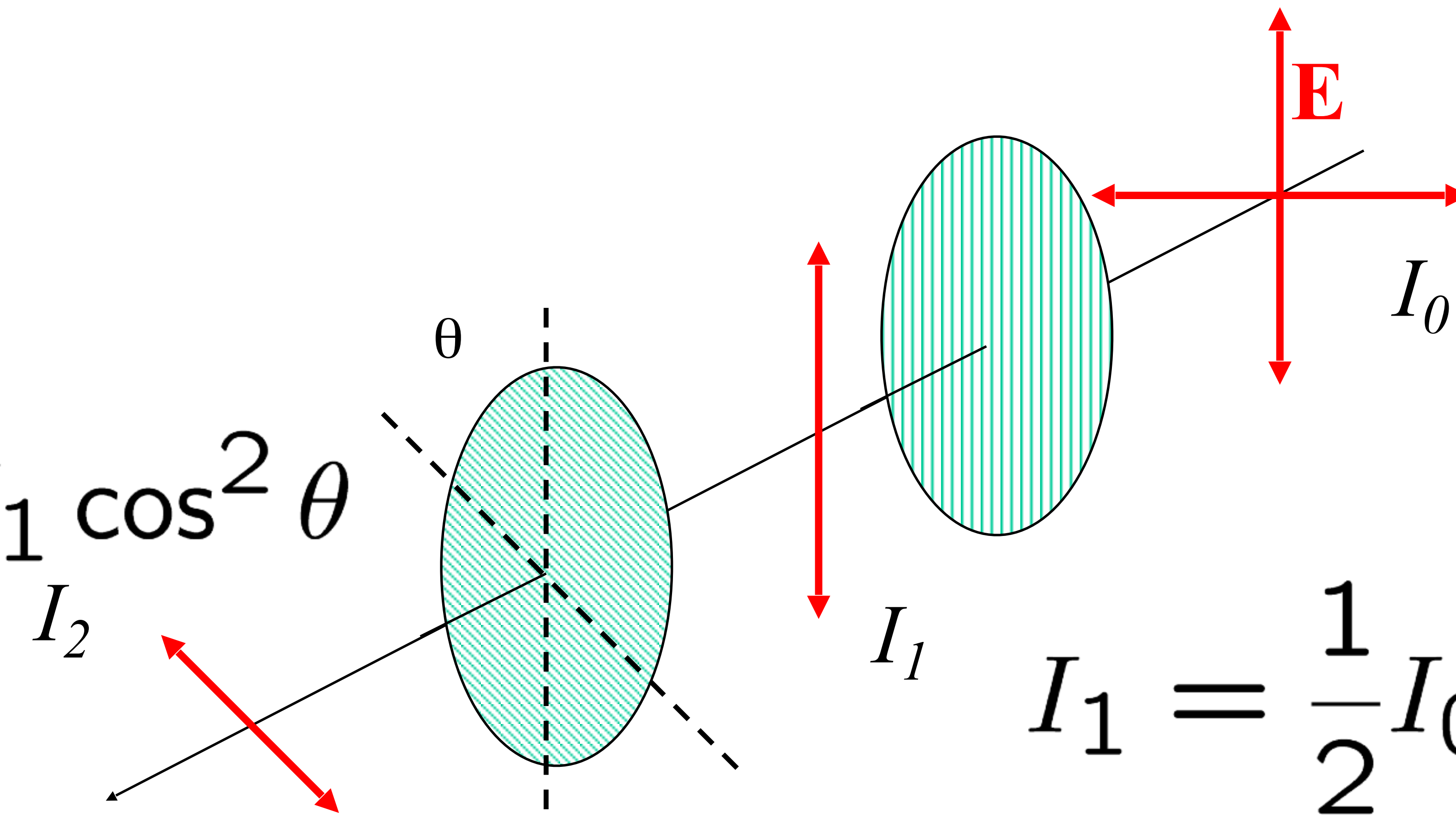
Como:

$$I \propto E^2$$

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

(só para luz já polarizada)

+ de 1 polarizador



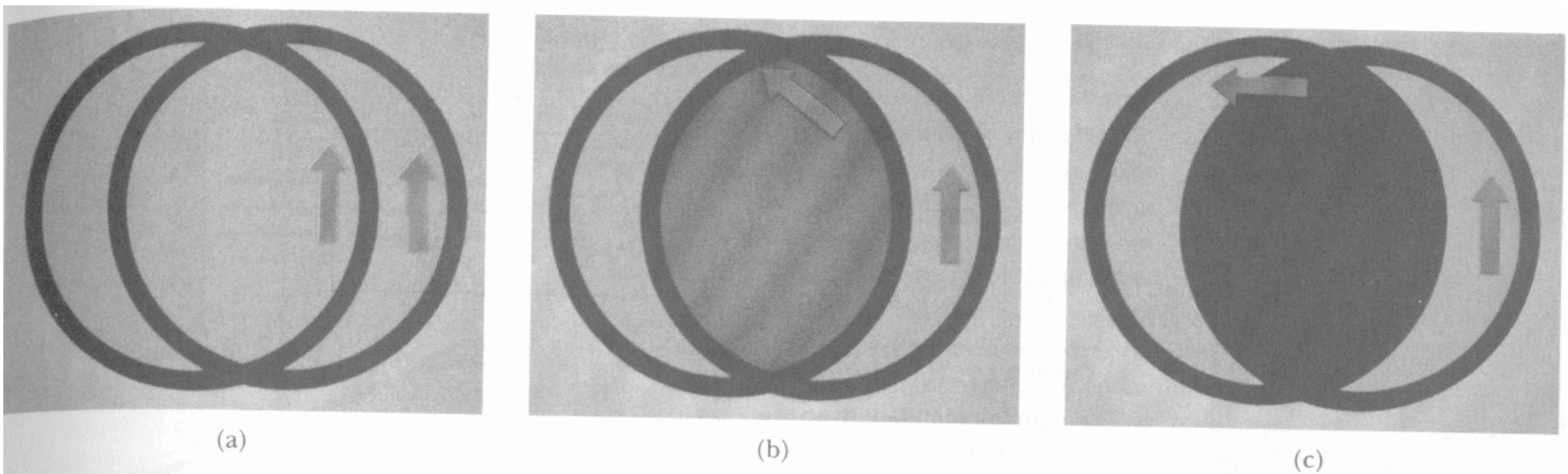
$$I_2 = I_1 \cos^2\theta$$

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

$$\Rightarrow \boxed{I_2 = \frac{I_0}{2}\cos^2\theta}$$

Polarizadores

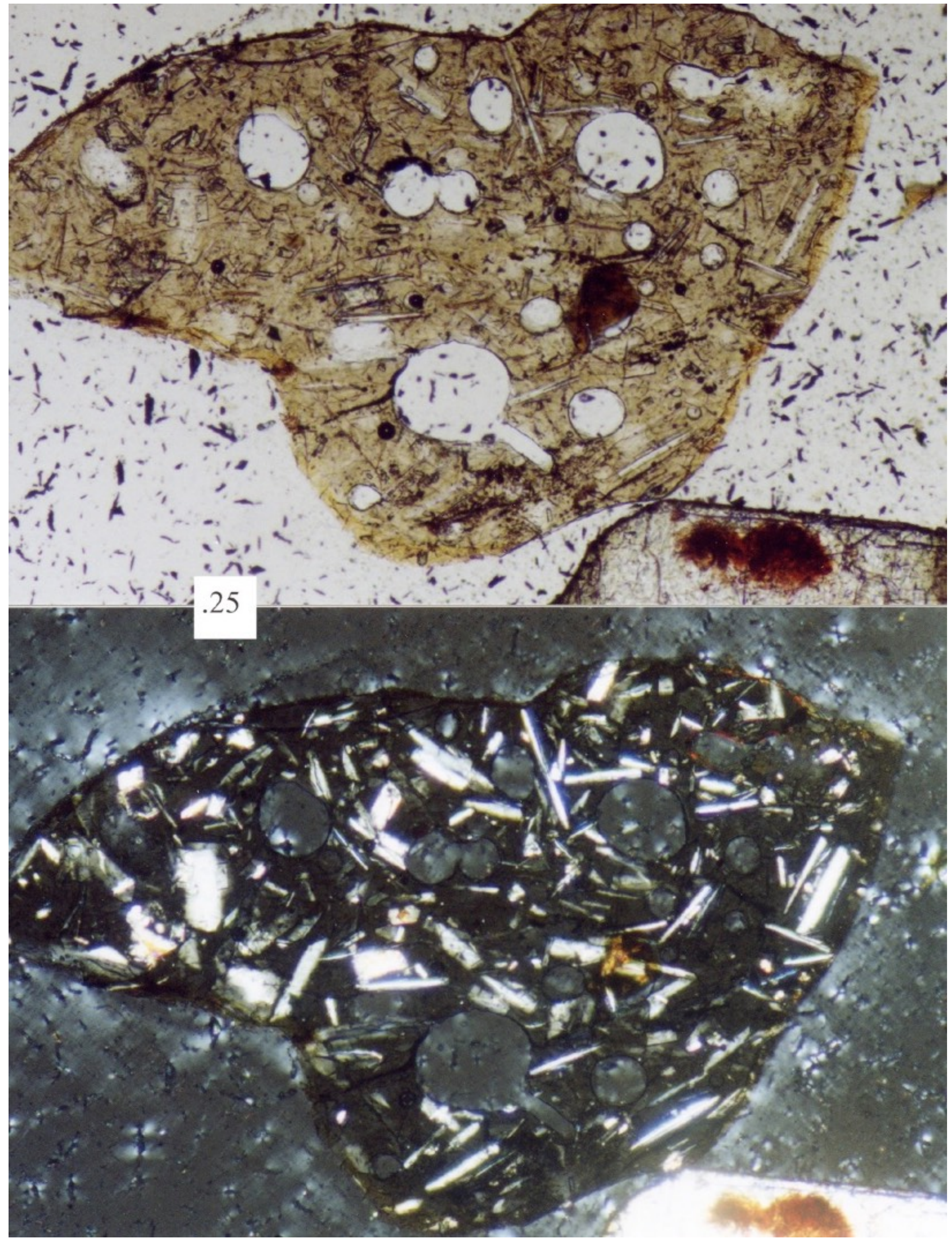
Visualização através de um polarizador:



Aplicações

Aplicando um polarizador a 90 graus para identificar a lama mistura nesta onda

Quando aplicamos um polarizador na foto da esquerda podemos ver do lado direito o efeito causado



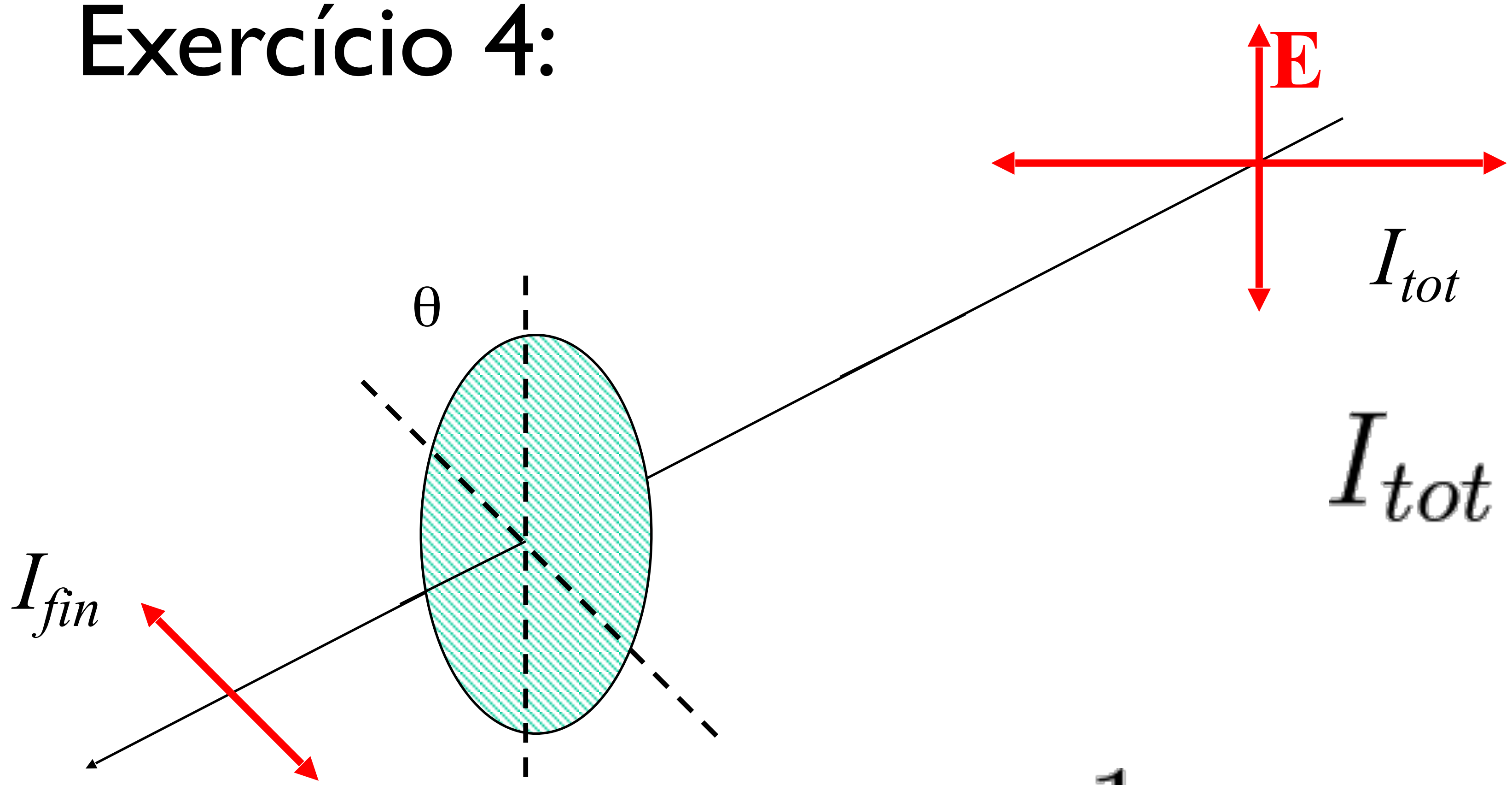
Aplicações para identificar a composição de minerais usando mineralogia ótica que é o estudo das rochas e minerais pelas suas propriedades óticas.

Exercícios

Exercício 4:

Um feixe de luz parcialmente polarizada pode ser considerado como uma mistura de luz polarizada e não-polarizada. Suponha que um feixe deste tipo atravesse um filtro polarizador e que o filtro seja girado de 360º enquanto se mantém perpendicular ao feixe. Se a intensidade da luz transmitida varia por um fator de 5,0 durante a rotação do filtro, que fração da intensidade da luz incidente está associada à luz polarizada do feixe ?

Exercício 4:



$$I_{tot} = I_{np} + I_p$$

$$I_{fin} = I'_{np} + I'_p = \frac{1}{2} I_{np} + I_p \cos^2\theta$$

$$\frac{1}{2} I_{np} + I_p = 5 \frac{1}{2} I_{np}$$

$$\Rightarrow \quad I_p = 2 I_{np}$$

$$\Rightarrow \quad I_{tot} = 3 I_{np} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{I_p}{I_{tot}} = \frac{2}{3}}$$

Próxima Aula

- Interferência
- Experimento de Young
- Coerência
- Difração

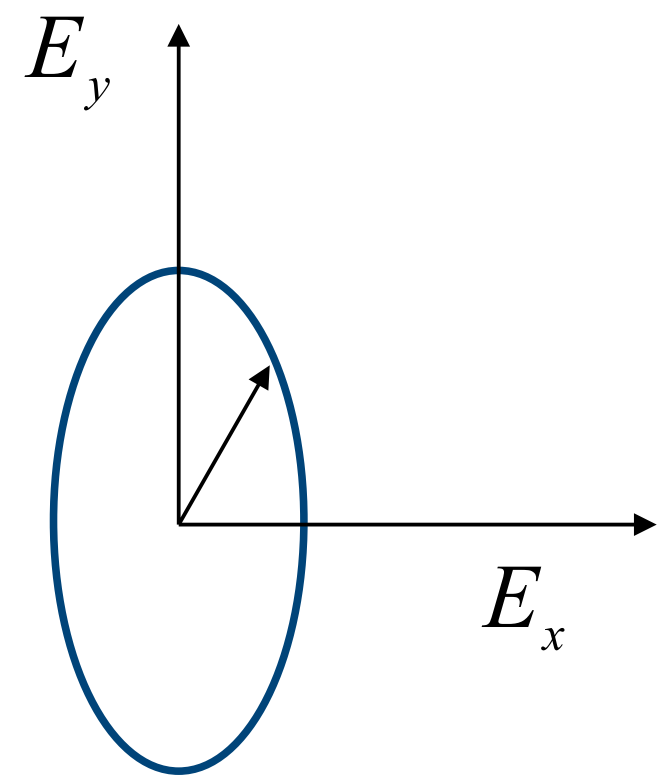
Fim

Polarização da radiação

Polarização elíptica

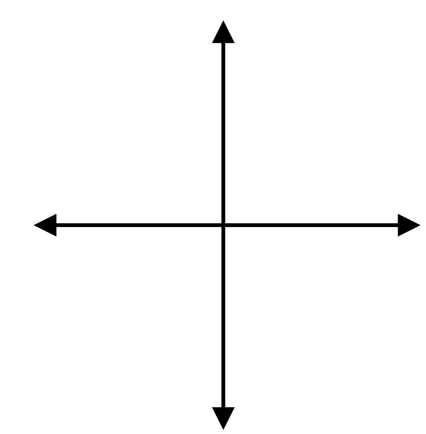
$$\vec{E}(\vec{r},t) = E_{x0}\sin(kz-\omega t)\hat{x} + E_{y0}\cos(kz-\omega t)\hat{y}$$

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

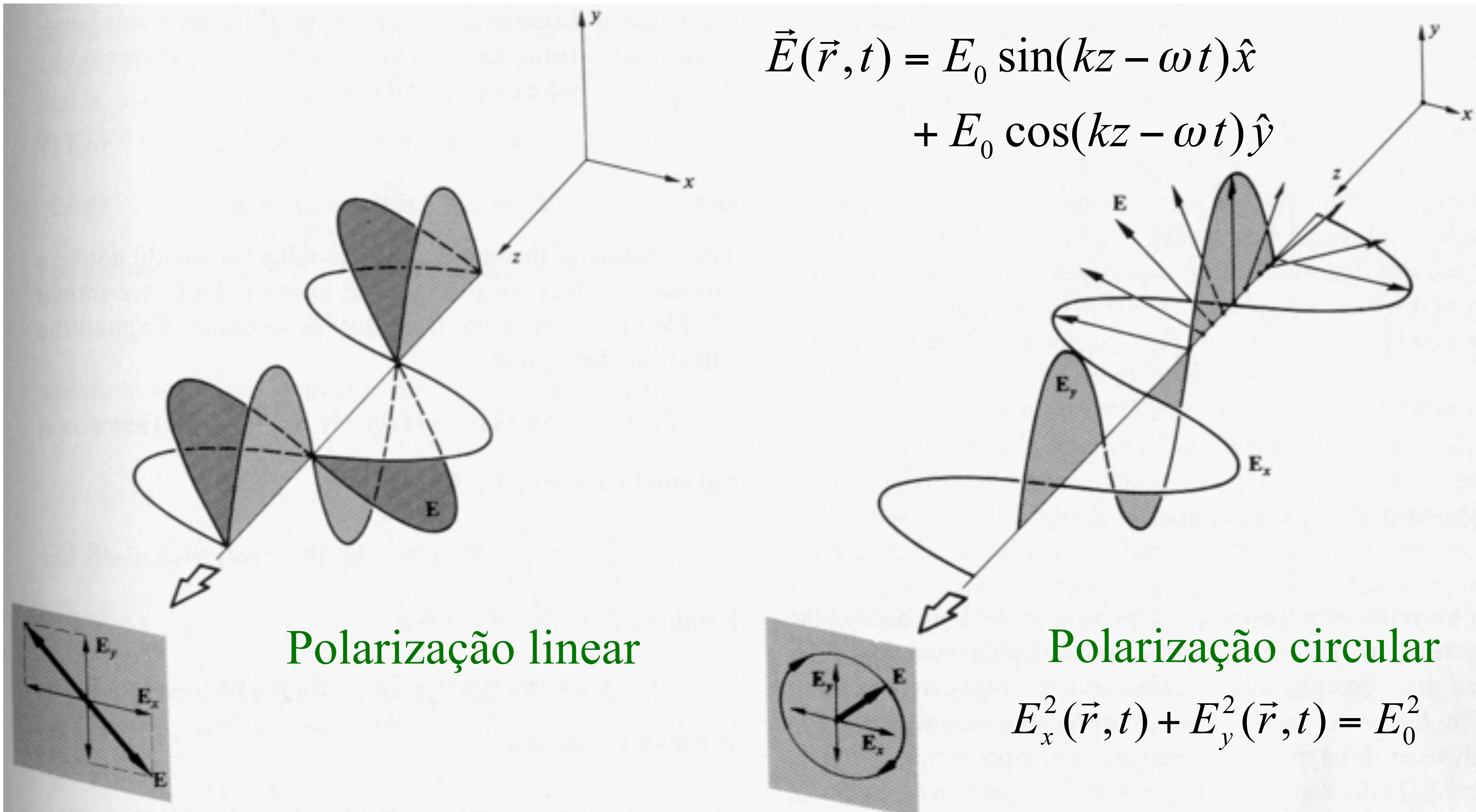


Um pulso eletromagnético geral corresponde a uma superposição de vários pulsos que oscilam em diferentes direções, com diferentes fases

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

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