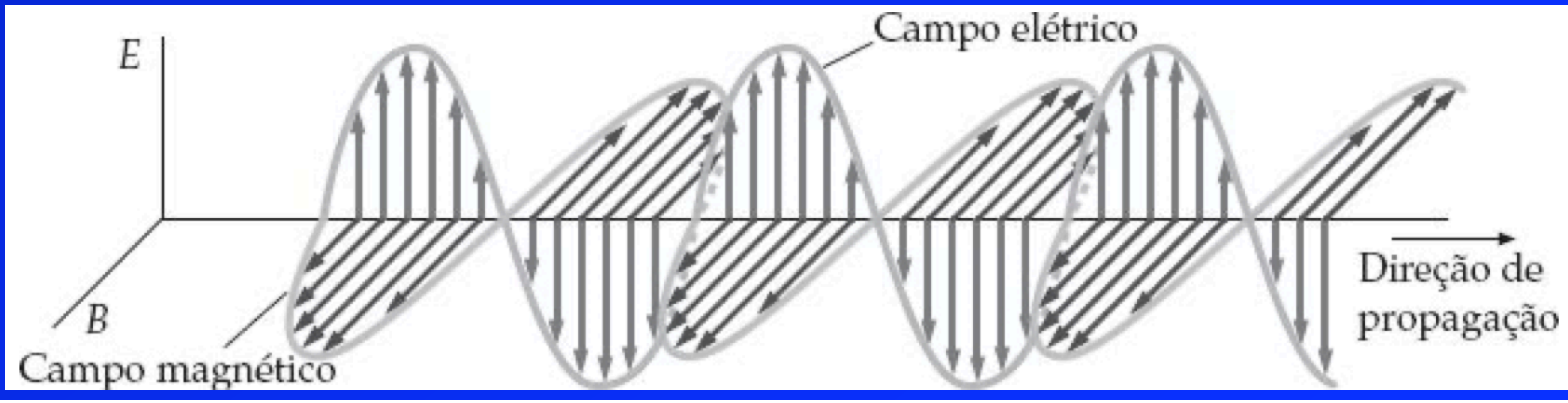
30-4 Radiação eletromagnética

A figura mostra os vetores campo elétrico e campo magnético de uma onde eletromagnética.
Os campos elétrico e magnético são perpendiculares entre si e perpendicular à direção de propagação da onda.
As ondas eletromagnéticas são, portanto, ondas transversais.
Os campos elétrico e magnético estão em fase e, em cada ponto no espaço e em cada instante de tempo, suas magnitudes estão relacionadas por $E = cB$
onde $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ é a velocidade da onda.
A direção e o sentido de propagação de uma onda eletromagnética é dada por $\vec{E} \times \vec{B}$.

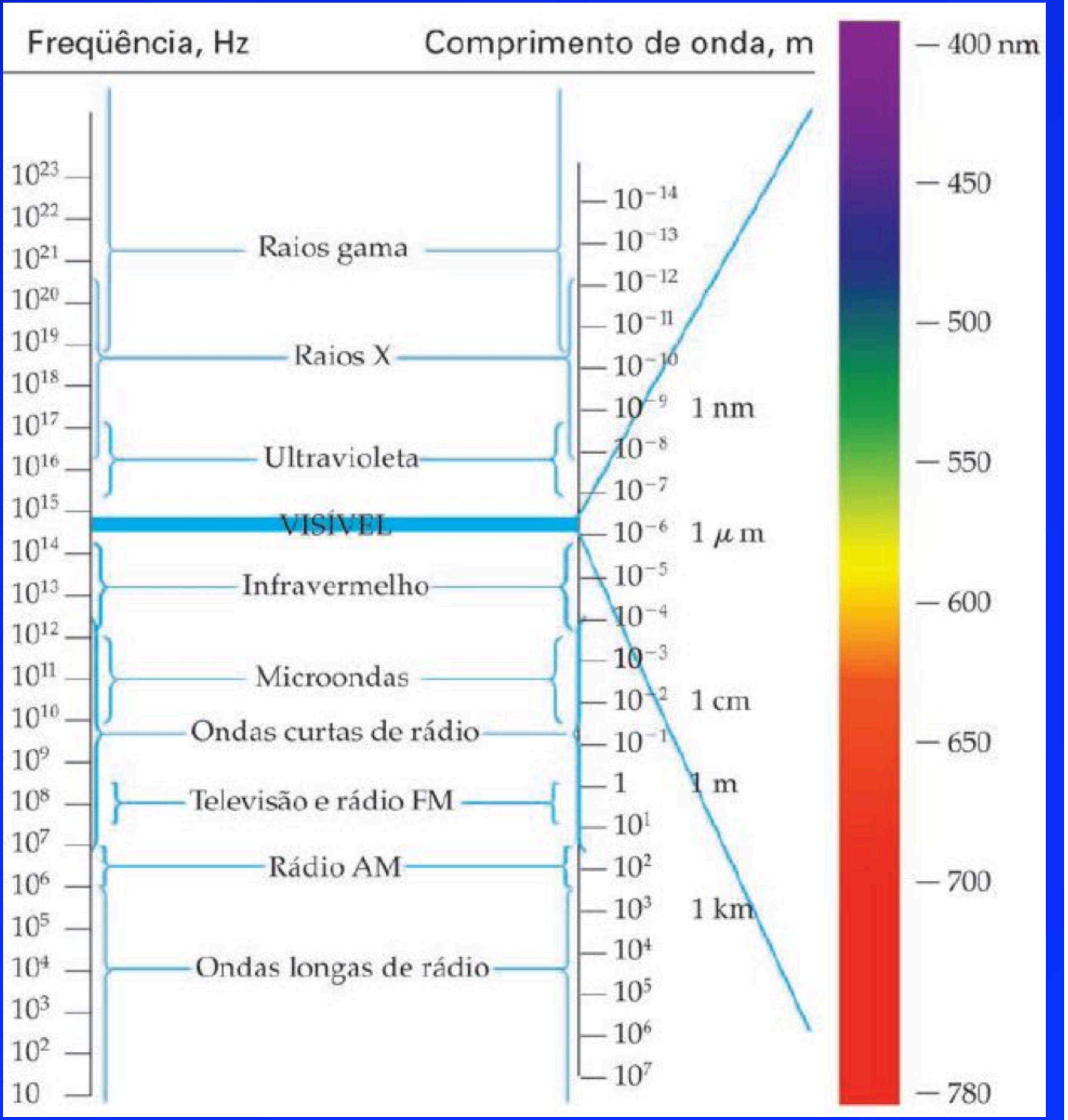


O espectro eletromagnético

Os vários tipos de ondas eletromagnéticas diferem apenas em comprimento de onda λ e frequência f, que estão relacionados de acordo com a equação

$$f\lambda = c.$$

Estes intervalos, geralmente, não estão bem definidos, se superpondo, muitas vezes. Não há limite para os comprimentos de onda da radiação eletromagnética, todos os comprimentos de onda são teoricamente possíveis.



**A interação das ondas eletromagnéticas com a matéria,
depende fortemente do comprimento de onda e
das dimensões das estruturas contidas na matéria.**

**Por exemplo, a luz visível, que tem comprimento de onda
entre 400 e 780 nm, não penetra profundamente em nossos tecidos,
como pele e músculos, já os raios X, que possuem
comprimento de onde de nm ou fração de nm,
são usados para exames diagnóstico,
pois permitem a visualização de tecidos internos dos seres vivos.
A radiação na faixa de microondas, que possui comprimento de onda
entre 1 mm e 30 cm, são muito usadas para aquecer alimentos.
O princípio utilizado para isso é que as moléculas que possuem
dipolo elétrico tendem a se alinhar ao campo elétrico da radiação,
que inverte de sentido duas vezes na frequência da radiação, fazendo
com que as moléculas girem rapidamente, transferindo energia
térmica ao alimento. Microondas também são utilizadas em
bluetooth e outros protocolos sem fio de área local em rede.**

Produção de ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são produzidas quando cargas livres são aceleradas ou quando elétrons ligados aos átomos e moléculas fazem transições para estados de menor energia (por exemplo, EDS - Espectroscopia por energia dispersiva).

No caso das ondas de rádio (entre 550 e 1600 kHz para AM e entre 88 e 108 MHz para FM), são produzidas por correntes elétricas oscilando em antenas de transmissão de rádio.

Um espectro contínuo de raios X é produzido pela desaceleração de elétrons quando eles colidem com um alvo metálico. A radiação produzida é chamada de bremsstrahling (“radiação de freamento” em alemão).

A radiação sincrotron surge do movimento orbital circular de partículas carregadas (geralmente elétrons e pósitrons) em aceleradores nucleares chamados de síncrotrons. Os raios X produzidos por sincrotrons são usados como uma ferramenta para diagnóstico médico e análise de materiais.

O calor é irradiado pelo movimento molecular excitado termicamente. O espectro da radiação de calor é o espectro de *radiação de corpo negro*.

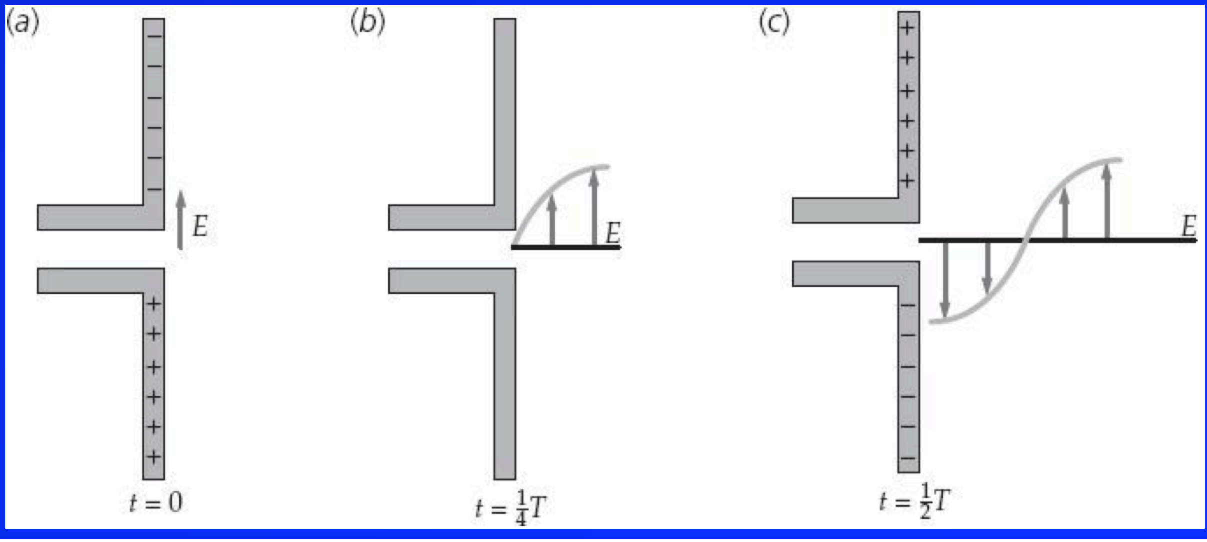
A figura é um esquema de uma antena de rádio do tipo dipolo elétrico que consiste em dois bastões condutores conectados a um gerador de corrente alternada.

No instante $t = 0$, as extremidades dos bastões estão carregadas e existe um campo elétrico paralelo ao bastão próximo a ele.

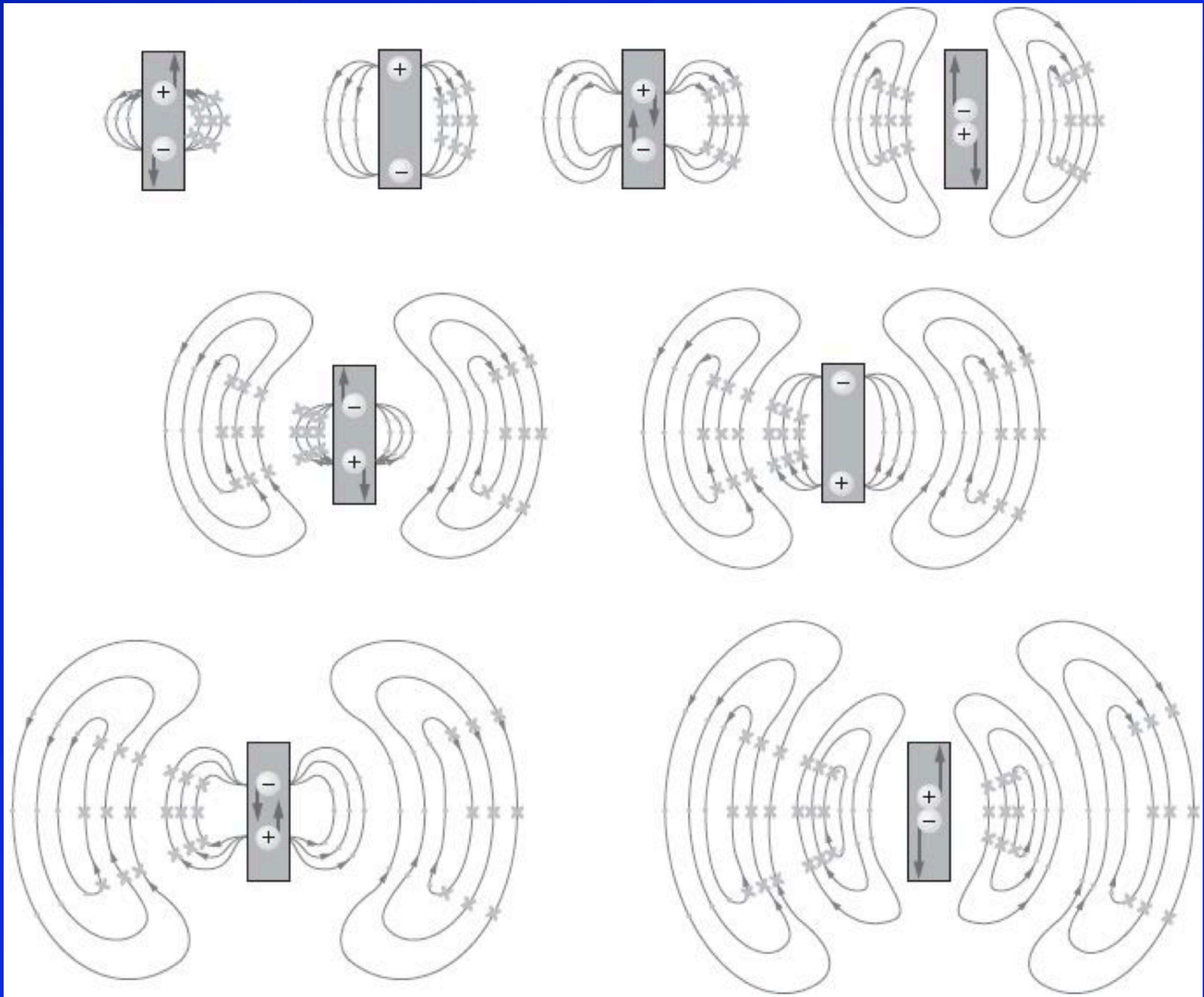
Um campo magnético também existe, o qual não é mostrado, circundando os bastões devido à corrente. As oscilações nesses campos se afastam dos bastões com a velocidade da luz.

Depois de ¼ de período, em $t = T/4$ os bastões estão descarregados e o campo elétrico próximo a eles é zero.

Em $t = T/2$, os bastões estão novamente carregados, mas as cargas são opostas as de $t = 0$.



Os campos elétrico e magnético a uma grande distância da antena são bastante diferentes dos campos próximos à antena. Longe dela, os campos elétrico e magnético oscilam em fase com movimento harmônico simples, perpendiculares entre si e à direção de propagação da onda.



A figura mostra os campos elétrico e magnético longe de uma antena de dipolo elétrico.

Energia e quantidade de movimento em uma onda eletromagnética

A energia em uma onda eletromagnética é descrita pela intensidade. Considere uma onda eletromagnética viajando para a direita e penetrando em um cilindro (imaginário) de comprimento L e área de seção transversal A. Assim, a quantidade média de energia eletromagnética dentro do cilindro é $U_{méd} = u_{méd}V$, onde $V = LA$ é o volume do cilindro. Considerando ainda o tempo Δt para que toda a energia $u_{méd}LA$ atravesse a extremidade direita do cilindro, teremos $\Delta t = L/c$. Dessa forma, a potência média $P_{méd}$ (energia por unidade de tempo) saindo da extremidade direita do cilindro será

$$P_{méd} = U_{méd}/\Delta t = u_{méd}LA/(L/c) = u_{méd}Ac$$

E a intensidade I (potência média por unidade de área) é

$$I = P_{méd}/A = u_{méd}c$$

A densidade de energia total na onda u é a soma das densidades de energia elétrica e magnética, já vistas: $u_e = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}$ e $u_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$.

Do slide anterior

$$I = P_{méd}/A = u_{méd}c \quad \text{onde} \quad u = u_e + u_m$$

sendo $u_e = \dfrac{\varepsilon_0 E^2}{2}$ e $u_m = \dfrac{B^2}{2\mu_0}$.

Mas, $E = cB$, assim

$$u_m = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{(E/c)^2}{2\mu_0} = \frac{E^2}{2\mu_0 c^2} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$$ **onde usamos que $\mu_0\varepsilon_0 = 1/c^2$.**

Portanto, as densidades de energia elétrica e magnética são iguais.

Assim, podemos escrever

$$u = u_e + u_m = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{EB}{\mu_0 c},$$ **onde usamos que $E = cB$**

que é a densidade de energia de uma onda eletromagnética.

Para calcular a densidade média de energia, precisamos calcular o valor médio de

$$u = u_e + u_m = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{EB}{\mu_0 c}.$$

Escolheremos $u = \varepsilon_0 E^2$ para esse cálculo,

onde $\vec{E} = E_0 \sin(kx - \omega t)\,\hat{\imath}$ e $E^2 = E_0^2 \sin^2(kx - \omega t)$

assim, $\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T E_0^2 \sin^2(kx - \omega t)\, dt = \frac{E_0^2}{2}$

Dessa forma, $u_{méd} = \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2} = \frac{B_0^2}{2\mu_0} = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0 c}$**, onde usamos que** $E_0 = cB_0$

e a intensidade é

$$I = u_{méd}\, c = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} = \left|\vec{S}\right|_{méd}$$

onde o vetor $\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0}$

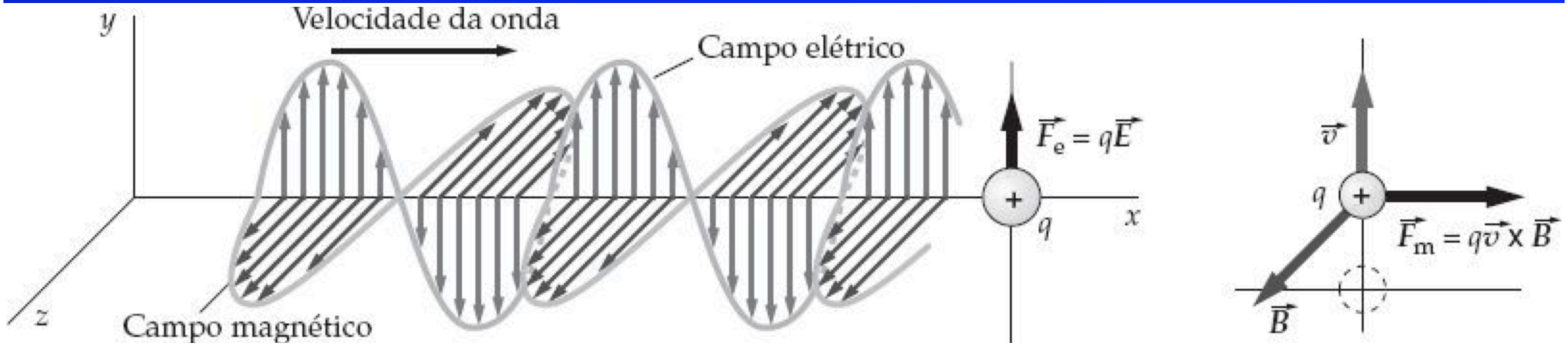
é chamado *vetor de Poynting*.

Portanto, o valor médio do módulo de $\vec{S}$ é a intensidade da onda e a direção e sentido de $\vec{S}$ é a de propagação da onda.

A quantidade de movimento por unidade de tempo
e por unidade de área de uma onda eletromagnética
é chamada de *pressão de radiação*.

Considere uma onda plana viajando na direção $\hat{\imath}$,
que incide em uma carga estacionária, como mostra a figura.
A partícula vai, então, estar sujeita a
uma força $q\vec{E}$ na direção de $\hat{\jmath}$ e é acelerada pelo campo elétrico,
adquirindo a velocidade $v_y = a_y t = \frac{qE}{m}t$ e após um curto tempo t_1, terá

$$K = \frac{1}{2}mv_y^2 = \frac{1}{2}\frac{mq^2E^2t_1^2}{m^2} = \frac{1}{2}\frac{q^2E^2}{m}t_1^2$$



Mas, quando a carga está se movendo na direção $\hat{j}$, ela está sujeita a uma força magnética

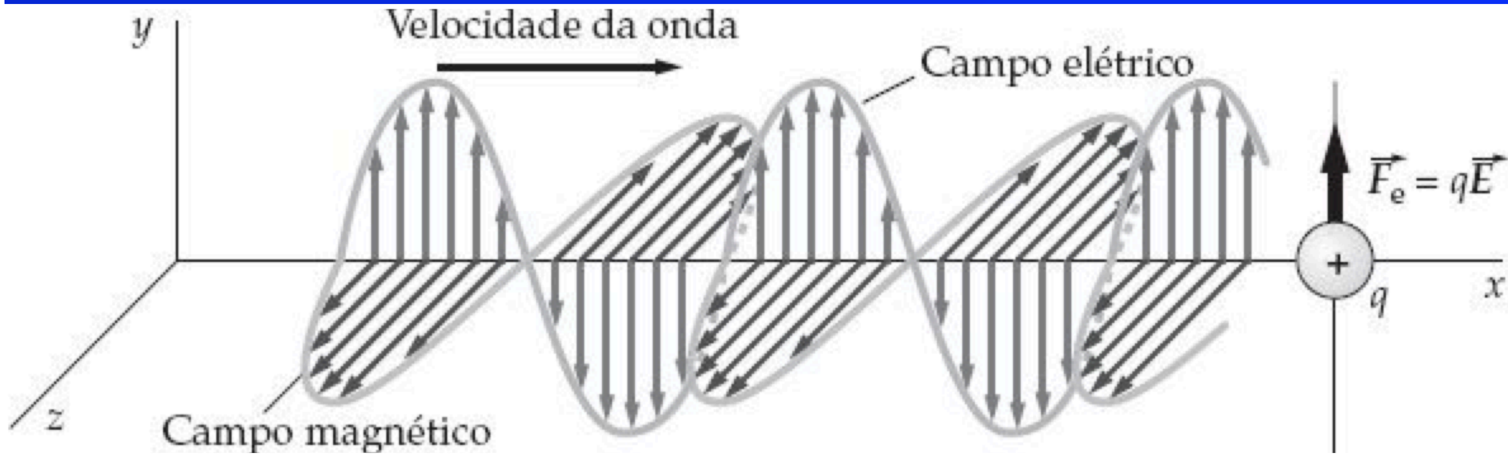
$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} = qv_y\,\hat{j} \times B\,\hat{k} = qv_y B\,\hat{i} = \frac{q^2EB}{m}t\,\hat{i}$$

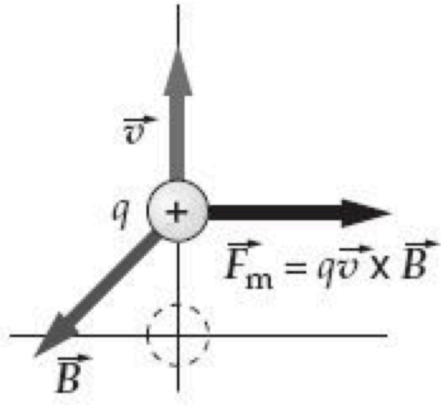
onde foi usado $v_y = a_y t = \frac{qE}{m}t$

Notem que essa força está na direção de propagação da onda. Lembrando que $dp_x = F_x dt$, podemos calcular a quantidade de movimento p_x transferida pela onda para a partícula no tempo t_1

$$p_x = \int_0^{t_1} F_x\,dt = \int_0^{t_1} \frac{q^2EB}{m}t\,dt = \frac{1}{2}\frac{q^2EB}{m}t_1^2$$

usando $B = E/c$ $p_x = \frac{1}{c}\left(\frac{1}{2}\frac{q^2E^2}{m}t_1^2\right)$





Comparando as equações

$$K = \frac{1}{2}\frac{q^2E^2}{m}t_1^2 \quad \text{e} \quad p_x = \frac{1}{c}\left(\frac{1}{2}\frac{q^2E^2}{m}t_1^2\right)$$

podemos observar que a

$$p = \frac{U}{c}$$

que, apesar de ter sido calculado para um exemplo específico, este é um resultado geral.

Lembrando que *I* é a energia por unidade de tempo e por unidade de área, então, dividindo a equação $p = U/c$ por tempo e por área teremos, à direita I/c e à esquerda $\frac{quantidade\ de\ movimento}{tempo \times area}$, mas $\frac{quantidade\ de\ movimento}{tempo} = força$

e $\frac{força}{area} = pressão$, assim, podemos escrever

$P_r = \frac{I}{c}$, onde P_r é a pressão de radiação da onda eletromagnética.

Podemos relacionar a pressão de radiação aos campos elétrico e magnético usando as equações

$$I = u_{méd}\,c = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} \quad \text{e} \quad E = cB$$

assim,

$$P_r = \frac{I}{c} = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0 c} = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c^2} = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

Considere uma onda eletromagnética incidindo perpendicularmente em alguma superfície. Se a superfície absorve energia *U* da onda eletromagnética, ela também absorve quantidade de movimento *p* e a pressão exercida na superfície é igual à pressão de radiação.

Exemplo 30-6 Pressão de radiação a 3,0 m de uma lâmpada

Uma lâmpada emite ondas eletromagnéticas esféricas em todas as direções. Determine (a) a intensidade, (b) a pressão de radiação e (c) as magnitudes dos campos elétrico e magnético a uma distância de 3,0 m da lâmpada, considerando que ela emita 50 W de radiação eletromagnética.

(a) A intensidade da radiação é a potência dividida pela área, assim,

$$I = \frac{50\text{ W}}{4\pi r^2}$$

$$I = \frac{50\text{ W}}{4\pi(3{,}0\text{ m})^2} = \boxed{0{,}44\text{ W/m}^2}$$

(b)

$$P_r = \frac{I}{c} = \frac{0{,}44\text{ W/m}^2}{3{,}00 \times 10^8\text{ m/s}} = \boxed{1{,}5 \times 10^{-9}\text{ Pa}}$$

(c)

$$P_r = \frac{I}{c} = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0 c} = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c^2} = \frac{B_0^2}{2\mu_0}$$

$$\begin{aligned} B_0 &= \sqrt{2\mu_0 P_r} \\ &= [2(4\pi \times 10^{-7}\text{ T}\cdot\text{m/A})(1{,}5 \times 10^{-9}\text{ Pa})]^{1/2} \\ &= 6{,}1 \times 10^{-8}\text{ T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_0 &= cB_0 = (3{,}00 \times 10^8\text{ m/s})(6{,}1 \times 10^{-8}\text{ T}) \\ &= 18\text{ V/m} \end{aligned}$$

assim

$E = E_0 \operatorname{sen} \omega t$ e $B = B_0 \operatorname{sen} \omega t$

com $E_0 = 18\text{ V/m}$

e $B_0 = 6{,}1 \times 10^{-8}\text{ T}$

Exemplo 30-7 Um foguete a laser

Você está encalhado no espaço a uma distância de 20 m de sua nave. Você tem consigo um laser de 1,0 kW. Se sua massa total, incluindo seu traje espacial e o laser, é 95 kg, quanto tempo levará para você chegar à nave se você apontar o feixe de laser no sentido oposto ao da nave?

O laser emite luz que possui quantidade de movimento. Pela conservação da quantidade de movimento, você adquire quantidade de movimento no sentido oposto e, portanto, em direção à nave. A quantidade de movimento da luz é $p = U/c$, onde U é a energia emitida pela luz. Se a potência do laser é $P = dU/dt$, então a taxa de variação da quantidade de movimento produzida pelo laser é

$$dp/dt = (dU/dt)/c = P/c,$$

sendo essa a força exercida sobre você, que é constante.

Exemplo 30-7 Um foguete a laser

Você está encalhado no espaço a uma distância de 20 m de sua nave. Você tem consigo um laser de 1,0 kW. Se sua massa total, incluindo seu traje espacial e o laser, é 95 kg, quanto tempo levará para você chegar à nave se você apontar o feixe de laser no sentido oposto ao da nave?

O tempo necessário para você chegar até a nave está relacionado com a distância e a aceleração

$$x = \frac{1}{2}at^2 \quad t = \sqrt{\frac{2x}{a}}$$

sua aceleração é

$$a = \frac{F}{m} = \frac{P/c}{m} = \frac{P}{mc}$$

Assim,

$$t = \sqrt{\frac{2x}{a}} = \sqrt{\frac{2xmc}{P}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(20\ \text{m})(95\ \text{kg})(3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s})}{1000\ \text{W}}}$$

$$= 3{,}38 \times 10^4\ \text{s} = \boxed{9{,}4\ \text{h}}$$