Física IV para a Escola Politécnica (Engenharia Elétrica)

4320293 – TURMA 3

Professor: Dr. Marcos A. G. Alvarez

Departamento de Física Nuclear (DFN) – IFUSP

Edifício Oscar Sala – (sala 246)

Escaninho 22

malvarez@if.usp.br

Coordenador: Dr. Alvaro Vannucci

vannucci@if.usp.br

LIVRO: Princípios de Física (Óptica e Física Moderna)

Raymond A. Serway / John W. Jewett Jr.

Volume 4

❑ Problemas com a matrícula devido à nota de Cáculo III

De momento não há problemas por parte da equipe do curso de Física IV.
De nossa parte os alunos podem cursar a disciplina normalmente.

❑ Dispensa de laboratório:

Aluno que cursou a disciplina em anos anteriores pode solicitar dispensa em uma ou mais experiências em que obteve conceito integral.

Para isso **entrar em contato com o Professor Alvaro Vannucci** (coordenador da disciplina) enviando um e-mail à direção:

vannucci@if.usp.br

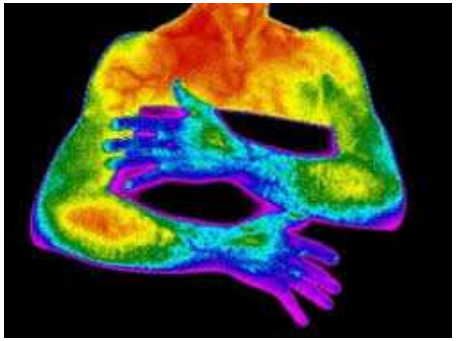
LISTA DE EXERCÍCIOS – CAPÍTULO 25

- ❑ **Q25.4, Q25.12, Q25.13, Q25.14, Q25.15, Q25.16**
- ❑ **25.20, 25.21, 25.33, 25.35, 25.42, 25.43, 25.52**

❑ **Q25.4** Enquanto a luz se propaga do vácuo (n=1) para um meio como o vidro (n>1), o comprimento de onda da luz se altera? A frequência se altera? A velocidade se altera? Explique.

O que é Radiação?

- mata (acidentes nucleares – Césio de Goiânia – Chernobil)
- cura (radioterapia)
- queima e produz câncer (radiação ultra-violeta)
- produz imágens (raios-X; Técnicas PET; radiação infra-vermelha)
- produção de energia (radiação solar – elétrica)
- aquece e cozinha alimentos (radiação de micro-ondas)
- esterelização de alimentos
- verificação de defeitos ou anomalias em circuitos, redes de transmissão etc
- atravessa materiais sem interação, é absorvida por outros
- raios cósmicos (chuva diária)



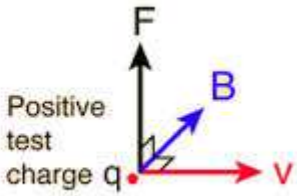
Força de Lorentz

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

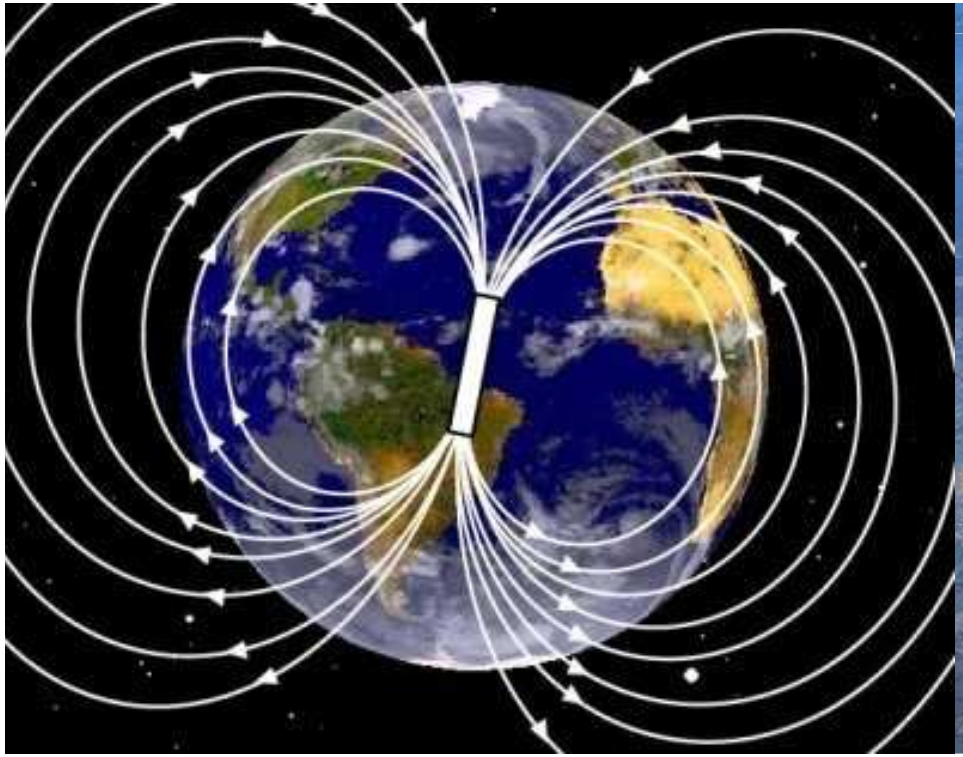
$$\underset{\text{Força total}}{\vec{F}} = \underset{\text{Força elétrica}}{q\vec{E}} + \underset{\text{Força magnética}}{q\vec{v} \times \vec{B}}$$

As equações de Maxwell e a Lei de Lorentz fornecem uma descrição completa de todas as interações eletromagnéticas

$$\vec{F} = q\vec{v} \ x \ \vec{B}$$



Aplicações

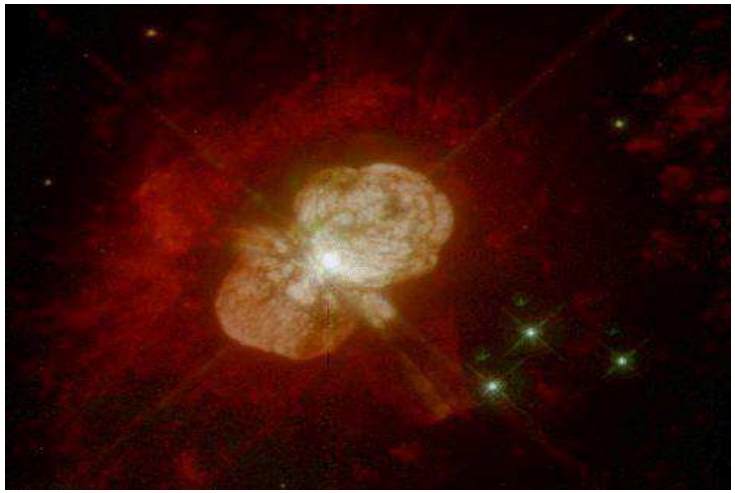


O que é Radiação?

Radiação: Propagação de energia no espaço.

Tipos de Radiação: - **Eletromagnética** ou de **Partículas**, que podem ser:
- **ionizante** ou **não ionizante**

Eletromagnética (ONDAS): Não necesitam um meio material para propagar-se.



Ondas eletromagnéticas (LUZ)

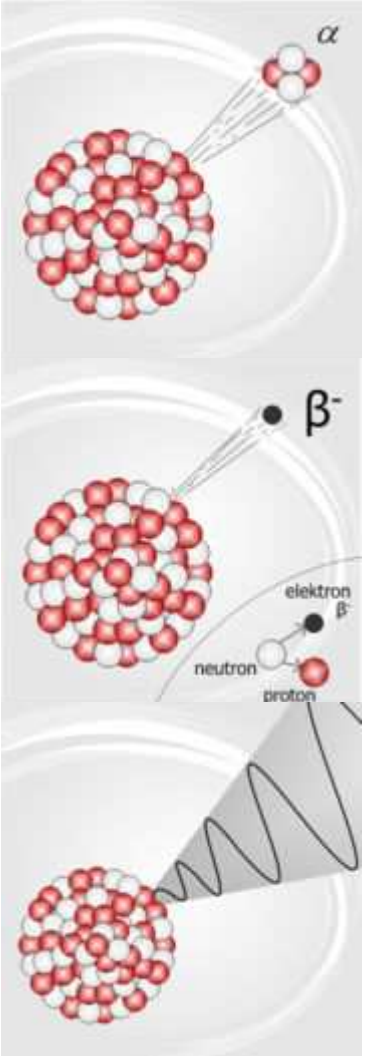
Ondas mecânicas (mar, som)

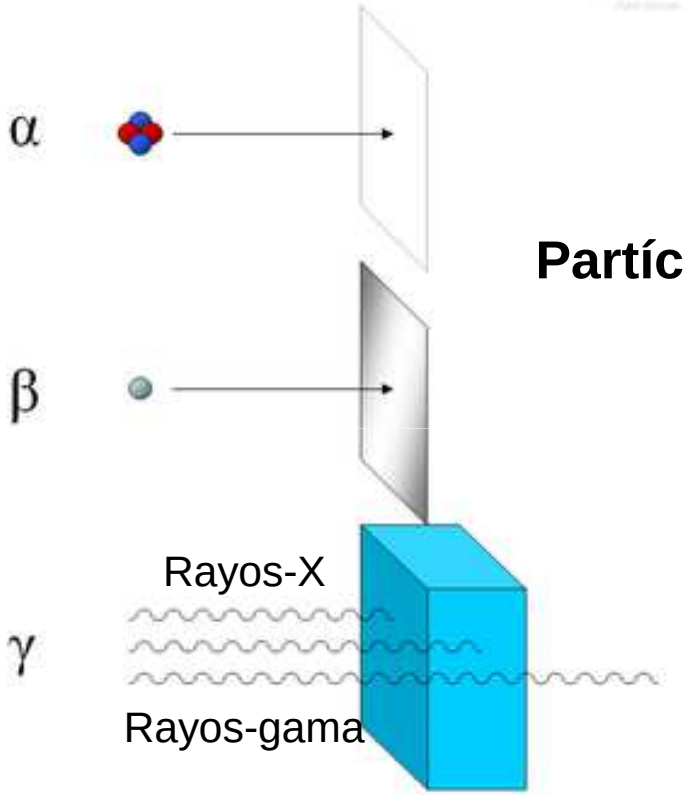
Partícula: pode representar toda entidade de matéria (energia) que apresenta massa, carga, spin.

Aspecto Diferencial:
Interação da Radiação com a matéria e o meio ambiente.

RADIAÇÃO IONIZANTE ou NÃO IONIZANTE!

Partícula ou Eletromagnética:





$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Partículas: alfa, prótons, elétrons

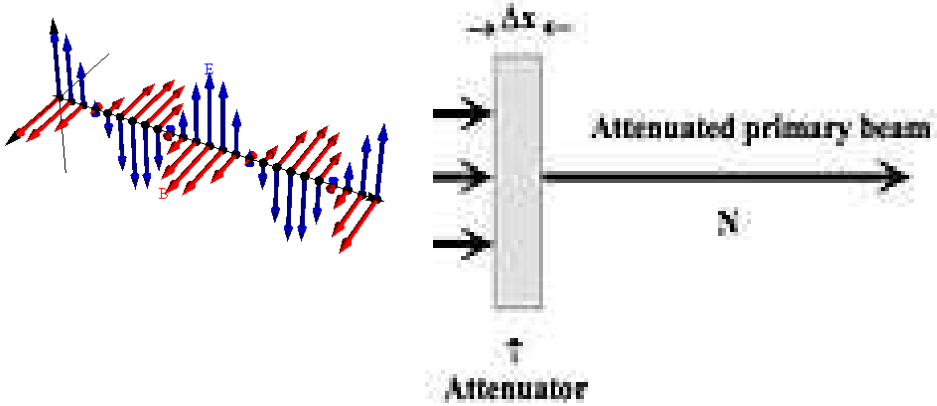
$$E = h\nu = \frac{c}{\lambda}$$

electromagnética

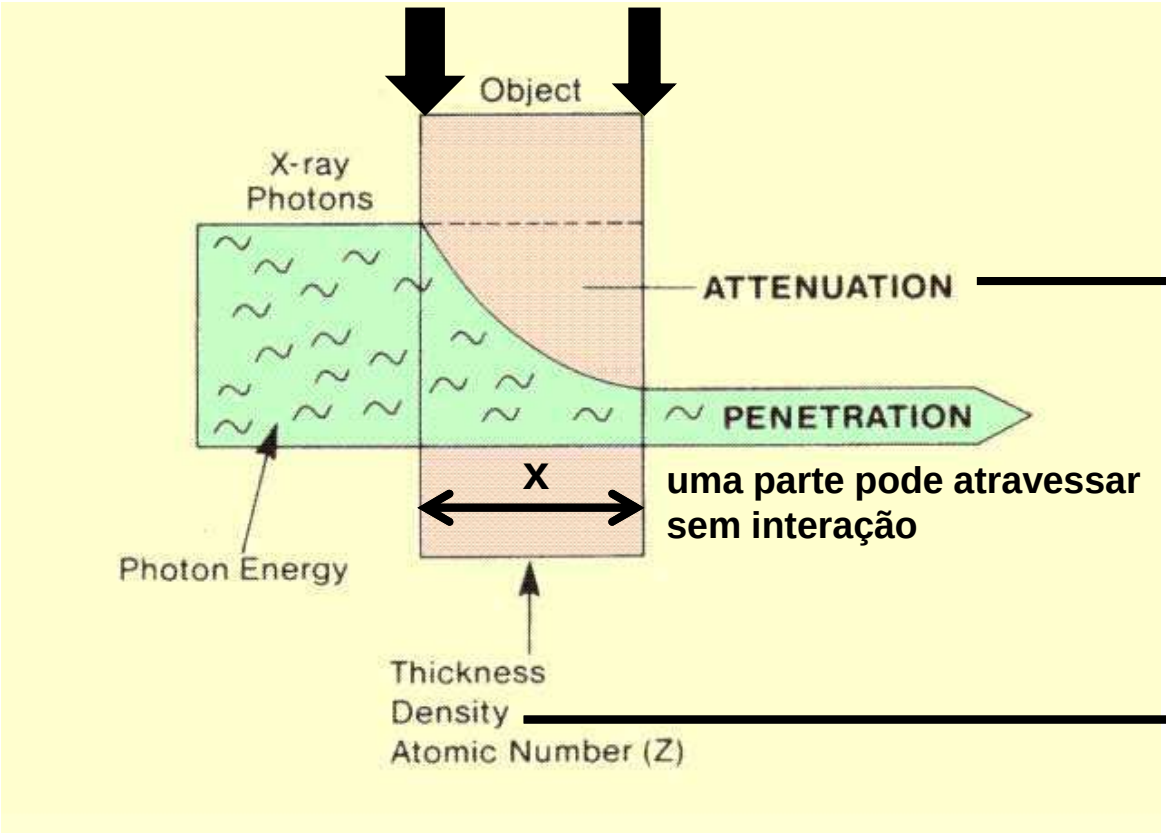
CÁLCULOS DE BLINDAGEM (ABSORÇÃO)

Assim que, quanto maior a frequência maior é a energia e maior pode ser o poder de penetração (mas isso também depende do "meio" (Z,A))!!!!

Esquematicamente temos:



Mudanças de meio



uma parte pode atravessar sem interação

Matematicamente temos:

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\cdot(\rho\cdot x)\right]$$

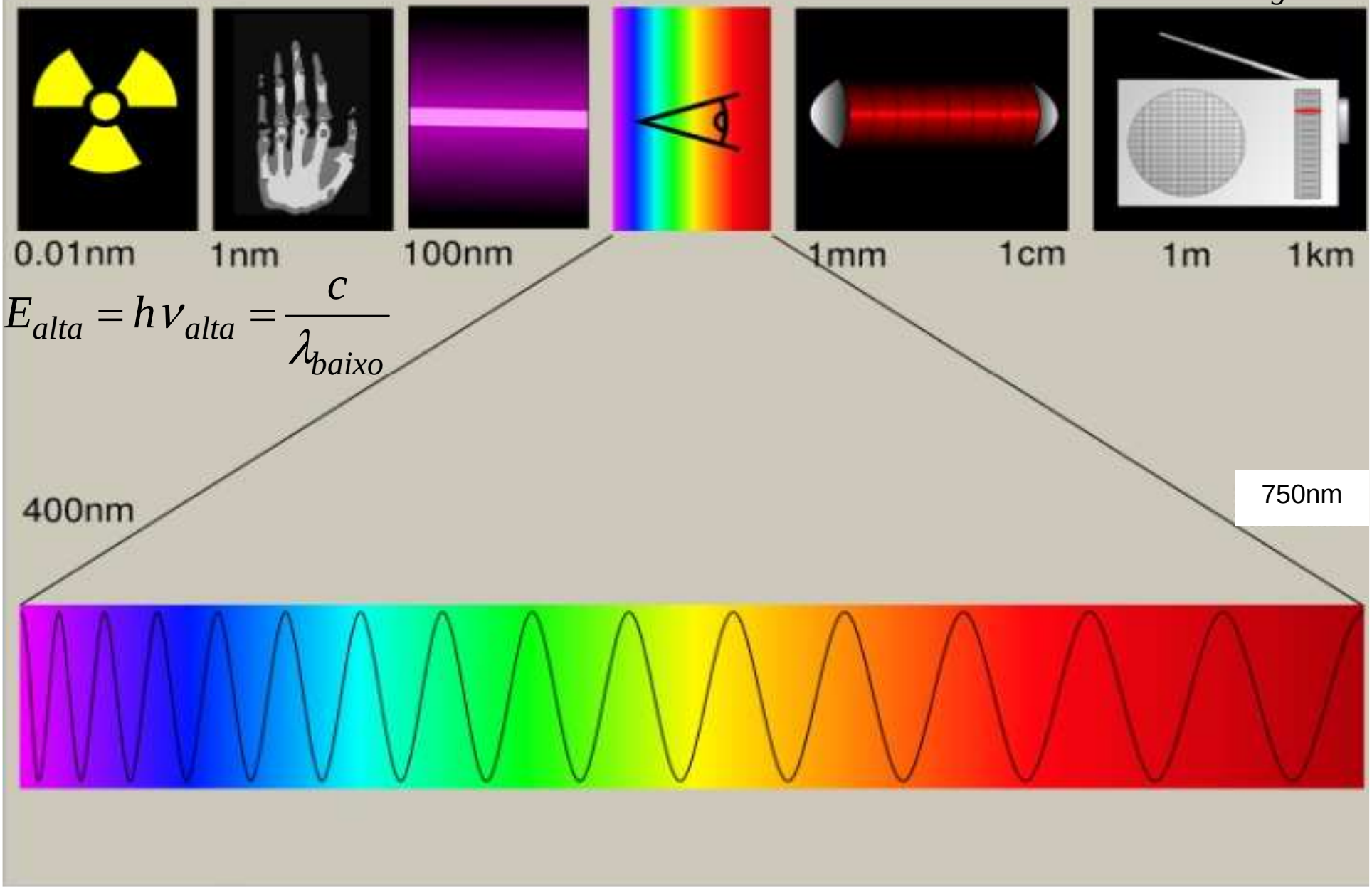
$\mu \equiv$ coeficiente de absorção

$\frac{\mu}{\rho} \equiv$ coeficiente de absorção mássico

$$\rho(Z) = \frac{m(Z,A)}{V}$$

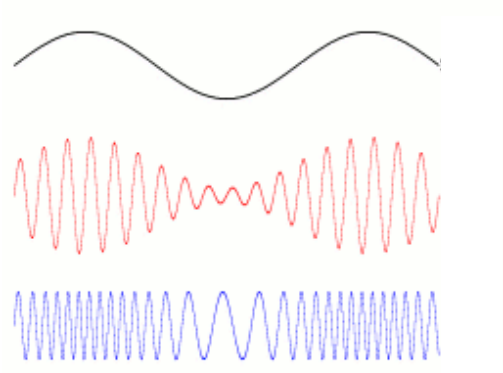
Espectro eletromagnético

$$E_{baixa} = h\nu_{baixa} = \frac{c}{\lambda_{grande}}$$



$$E_{alta} = h\nu_{alta} = \frac{c}{\lambda_{baixo}}$$

O ESPECTRO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS



$$E = h \cdot \nu = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

h é uma constante conhecida como a constante de Planck

$$h = 6.63 \times 10^{-34}\, Js$$

$$1J \rightarrow 6.24 \times 10^{18}\, eV$$

Definição da unidade de Energia **elétron-volt** (eV):
quantidade de energia cinética de um elétron, no vácuo, acelerado por uma diferença de potencial (elétrico) de 1V (Volt).

$$E = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda}$$

c=velocidade da luz=3x10^{8} m/s
h=constante de Planck=6.63x10^{-34}Js

$$E = 6.63\,x10^{-34}\ Js\,\frac{3\,x10^{8}\ m/s}{\lambda}$$

frequência

luz visível :

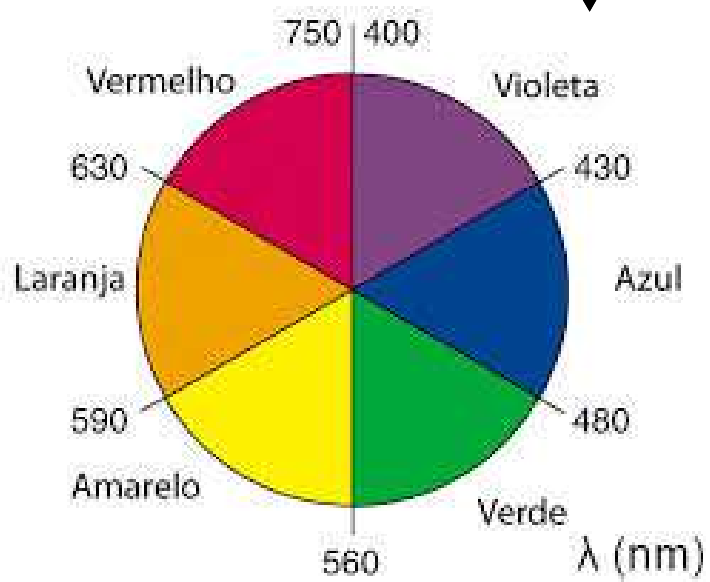
$$E \sim \frac{6.63\,x10^{-34}\ x3\,x10^{8}\ Jsm/s}{\lambda x10^{-9}\ m} \sim E\ (J)$$

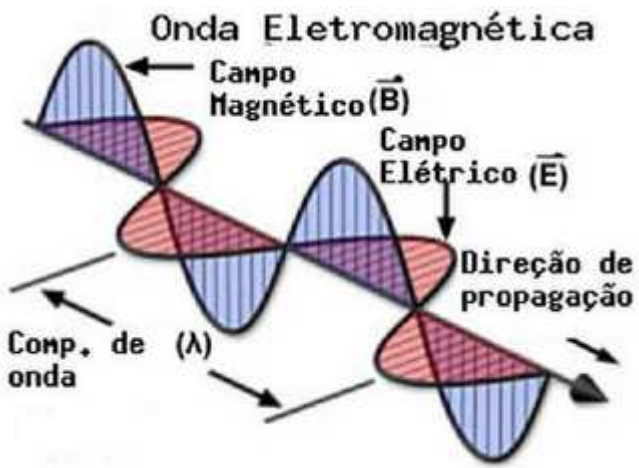
$$1J \rightarrow 6.24\,x10^{18}\ eV$$

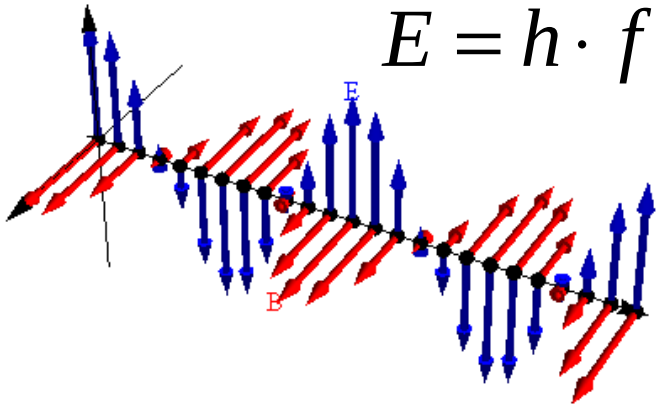
$$E\,(J) \rightarrow X\,(eV)$$

$$E\,(400\ nm) \approx 3.1eV$$

$$E\,(750\ nm) \approx 1.7\,eV$$







$$E = h \cdot f = \frac{c}{\lambda}$$

As **equações de Maxwell** prevêem que
uma onda eletromagnética consiste em campos elétricos e magnéticos oscilantes.

um campo magnético variável induz um campo elétrico e

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

um campo elétrico variável induz um campo magnético

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

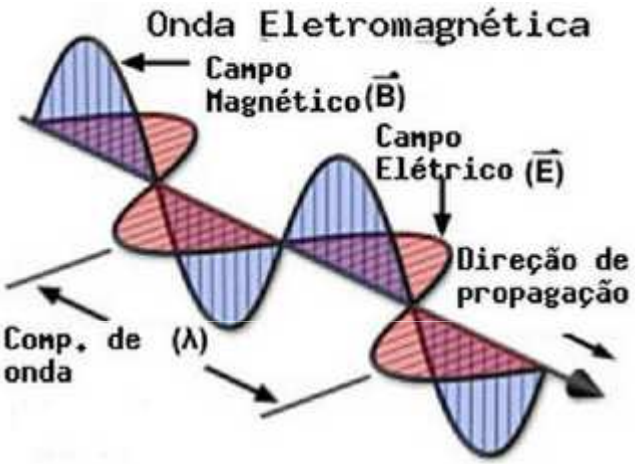
❑ Os vetores ***E*** e ***B*** são perpendiculares entre si e à direção de propagação.

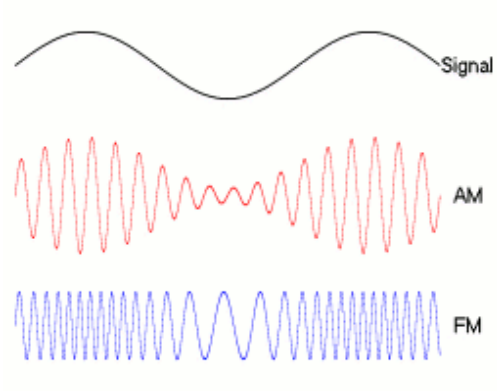
❑ A direção de propagação é a direção do produto vetorial ***E*** x ***B***.

Definição: Radiação Eletromagnética.

A combinação de campos elétricos e magnéticos oscilantes que se propagam transportando energia de um lugar a outro.

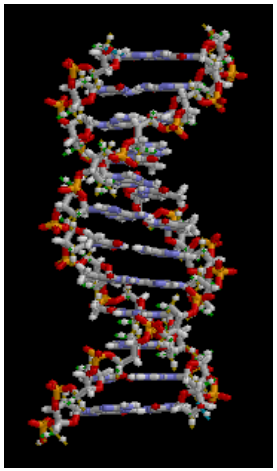
- **Transportam energia, transportam *informação*.**





Com Radiação Eletromagnética IONIZANTE, fazemos referência a frequências mais altas que o espectro da luz visível:

- ❑ **Raios-X (KeV);**
- ❑ **Raios-gama (MeV) e**
- ❑ **Radiação Ultra-Violeta (eV).**



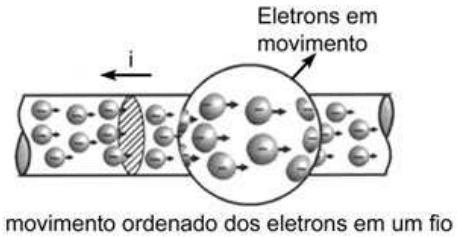
❑ Ondas mecânicas **transportam energia**: SOM (velocidade do som)

❑ Ondas eletromagnéticas também transportam energia e à medida que se propagam podem **transferir energia** à matétria situada em seu caminho.

❑ Uma diferença importante é que ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagar,
isto é: **se propagam no vácuo** **à velocidade da luz no vácuo**:

A **taxa** do **fluxo de energia** **atravessando uma unidade de área** em uma onda eletromagnética é dada por um vetor, chamado de vetor S, conhecido como **vetor de Poynting** (John Henry Pointing – 1852 – 1914):

$\vec{S} \equiv$ taxa de transporte de energia por unidade de área



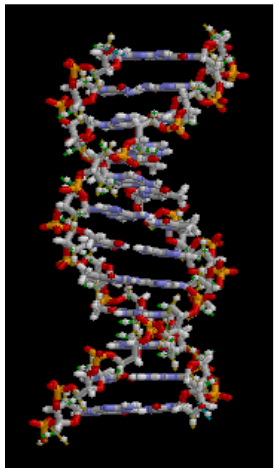
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$$

$$\Delta E = IA\Delta t$$

fluxo de energia

$$\text{taxa} \Rightarrow \frac{Energia/tempo}{área} \Rightarrow S = \left(\frac{Joule/segundo}{área}\right) \approx \left(\frac{W}{m^2}\right) \equiv \frac{Potência}{Área}$$

$$|S| = \left(\frac{Joule/segundo}{área}\right)_{inst} \approx \left(\frac{W}{m^2}\right)_{inst}$$



Ondas eletromagnéticas **transportam momento** e desta forma podem exercer **pressão sobre uma superfície**. Se uma onda eletromagnética cuja intensidade é ***"I"***

$$I = \frac{Potência(W)}{A(m^2)} = \frac{P}{4\pi r^2}(\text{esfera})$$

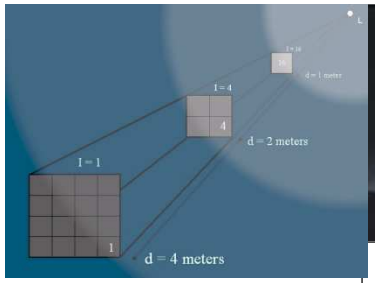
for completamente **absorvida** por uma **superfície**, sobre a qual ela incide normalmente, a **pressão da radiação nesta superfície** é:

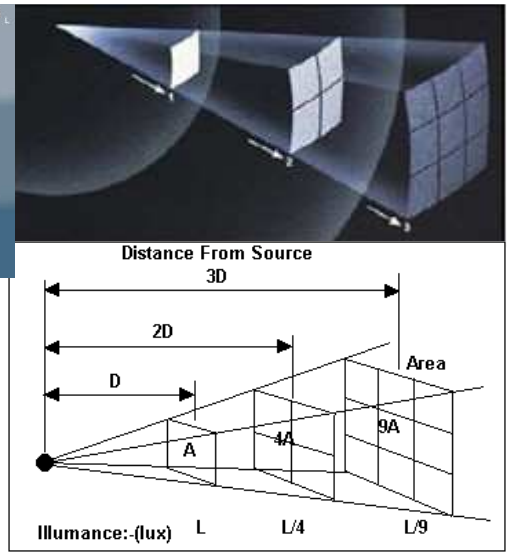
$$P = \frac{F}{A} = \frac{I}{c} \Rightarrow F = \frac{IA}{c}$$

Se a superfície **reflete** totalmente uma onda **incidindo normalmente**, **a pressão é dobrada**.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{2I}{c} \Rightarrow F = \frac{2IA}{c}$$

Variação da intensidade com a distância





$$I = \frac{Potência}{A} = \frac{P}{4\pi r^2} \text{(esfera)}$$

Ondas eletromagnéticas transportam energia e momento linear.
para uma partícula de massa "m" o momento linear é dado por:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

quantidade de movimento:
grandeza vetorial que caracteriza o efeito dinâmico de um corpo de massa m, com uma velocidade v.

Pela Lei da variação do momento linear ou da quantidade de movimento

O **impulso** de uma
força constante que atua num corpo durante um intervalo de tempo
é igual **à variação do momento linear desse corpo**, **nesse intervalo de tempo**,

$$\vec{I} = \Delta\vec{p} \text{ ou seja } \vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v} \Leftrightarrow F = ma = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

$$\vec{I} = \Delta\vec{p} \text{ ou seja } \vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v} \Leftrightarrow F = ma = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

2ª Lei de Newton :

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

considerando uma superfície de área A :

$\Delta E = IA\Delta t$, onde I é a intensidade da radiação

$$I = \frac{Potência(P)}{área(A)} = \frac{P}{A}$$

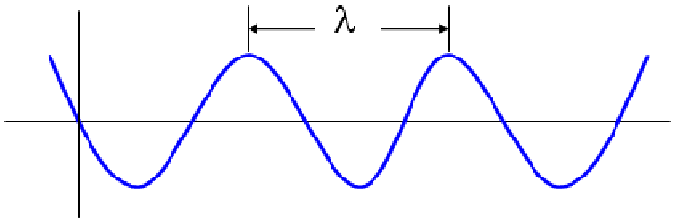
Absorção total :

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\frac{\Delta E}{c}}{\Delta t} = \frac{\frac{IA\Delta t}{c}}{\Delta t} = \frac{IA}{c}$$

Incidência perpendicular e reflexão total :

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\frac{2\Delta E}{c}}{\Delta t} = \frac{\frac{2IA\Delta t}{c}}{\Delta t} = \frac{2IA}{c}$$

Ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo com velocidade "*c*", frequência "*f*" e comprimento de onda "*λ*", onde



$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{e} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

$$c = 3 \times 10^{8}\, m/s$$

Ondas eletromagnéticas transportam energia como função das grandezas acima da seguinte forma:

$$E = hf = h\frac{c}{\lambda}$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34}\, Js$$

No Cap. 9 (vol. I) ondas eletromagnéticas/fótons tranportam momento

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h \cdot c}{c \cdot \lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

e desta forma podem exercer pressão sobre uma superfície

Se **transporta momento**, concluímos que quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície ela **exerce pressão sobre esta superfície.**

O professor de Física IV utiliza um apontador a laser para dirigir a atenção dos alunos. de 1mW cria um ponto de 2mm de diâmetro.

Determine a pressão de radiação sobre a parede que reflete 70% da luz incidente

$$P = \frac{I}{c}$$

$$I = \frac{Potência}{A} = \frac{P}{\pi \cdot r^2} = \frac{1.0\times10^{-3}W}{\pi \cdot \left(\frac{2.0\times10^{-3}m}{2}\right)^2} \approx 3.2\times10^2 \frac{W}{m^2}$$

A pressão total sobre a superfície devida à absorção e à reflexão é

$$P = \frac{I}{c} + 0.70\frac{I}{c} = 1.7 \cdot \frac{3.2\times10^2 W/m^2}{3\times10^8 m/s} = 5.4\times10^{-6} \frac{N}{m^2}$$

$$E = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda}$$

c=velocidade da luz=3x10^{8} m/s
h=constante de Planck=6.63x10^{-34}Js

$$E = 6.63\,x10^{-34}\ Js\ \frac{3x10^{8}\ m/s}{\lambda}$$

luz visível :

$$E \sim \frac{6.63\,x10^{-34}\ x3x10^{8}\ Jsm/s}{\lambda x10^{-9}\,m} \sim E(J)$$

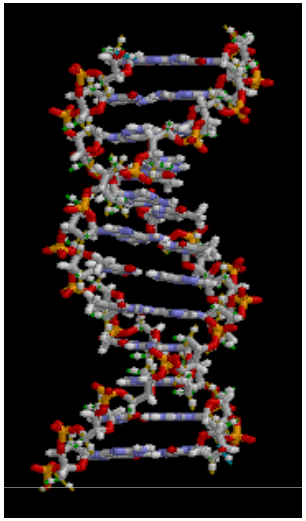
$$1J \rightarrow 6.24\,x10^{18}\,eV$$

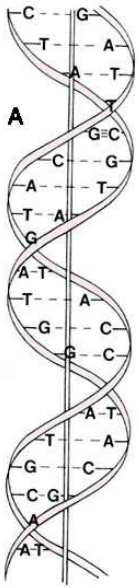
$$E(J) \rightarrow X$$

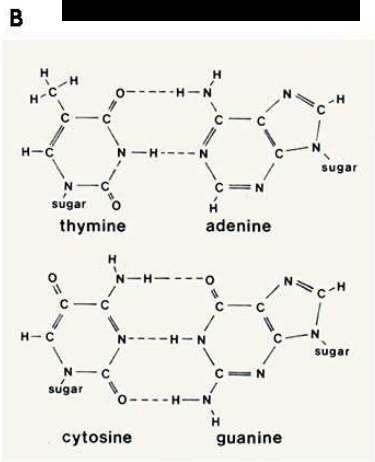
$$X\,(500\ nm) \approx 2.5eV$$

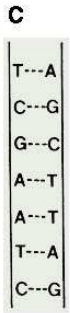
$$X\,(400\ nm) \approx 3.1eV$$

$$X\,(750\ nm) \approx 1.7eV$$



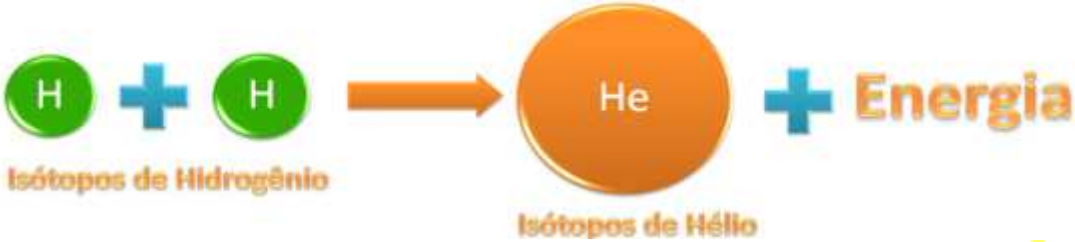






A palavra "ionizante" está conectada a danos no ADN – polímero ADN (DNA) – estudos biológicos de reparação de ruptura simples

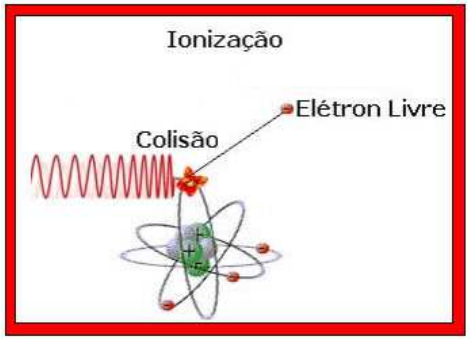
A **energia renovável** é a energia que vem de recursos naturais como **SOL**, **VENTO**, **ÁGUA**, **TERRA** (**Energia Geotérmica**) que são recursos renováveis (naturalmente reabastecidos).

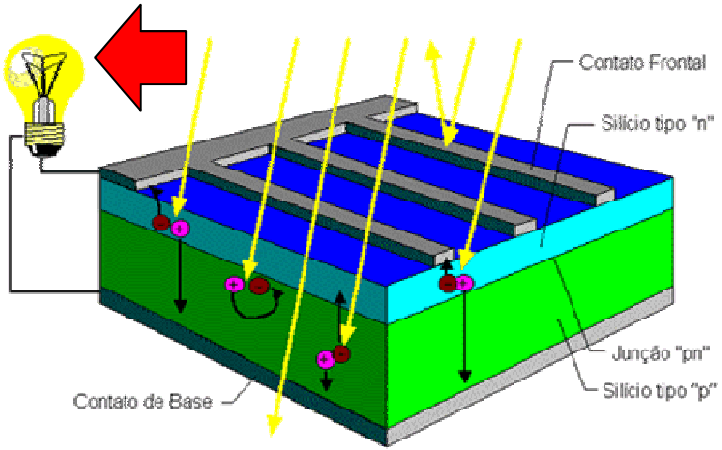


$$\approx h\nu \approx 3.6eV$$

$$\approx h\nu \approx 3.6eV$$

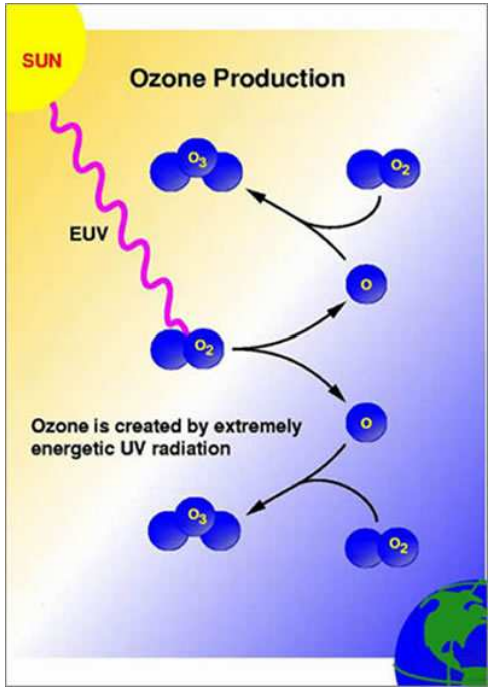
IONIZAÇÃO DO SILÍCIO

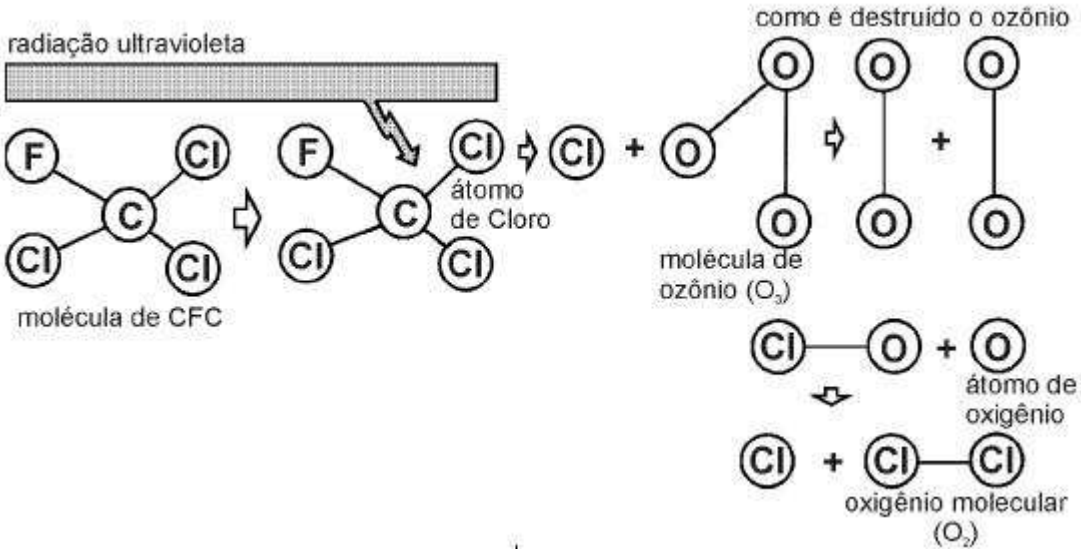




QUEBRA DO OZÔNIO

UV-B(3-5%) : emissões de 280-320 nm, é "filtrada" (absorvida) pela camada de ozônio, mas, quanto menos espessa for a camada de ozônio, menor a probabilidade de interação e maior a probabilidade da UV-B atravessar tal camada.





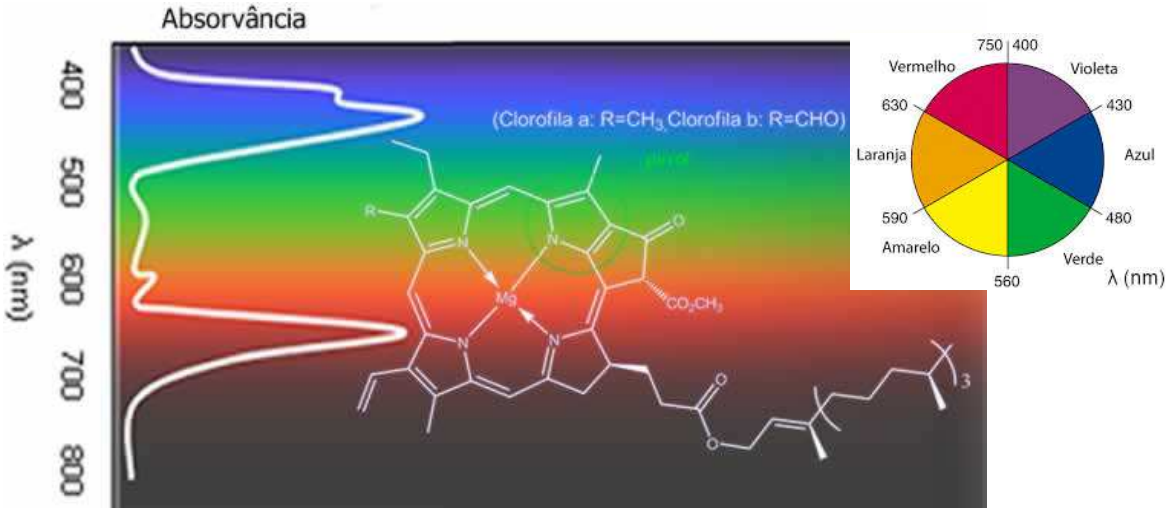
O cloro (Cl) reage com o ozônio, quebrando-o, que é então transformado em oxigênio (O2).

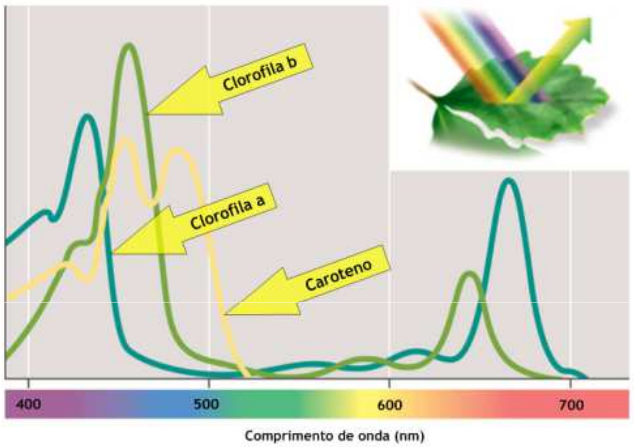
O oxigênio não é capaz de absorver os raios ultravioleta.

❑ Quando os **raios** atingem um corpo, encontram átomos e moléculas que podem absorver/dispersar/refletir a energia do Sol. **Vemos o que é refletido!!!**

Um exemplo em Física do Meio Ambiente: FOTOSSÍNTESE

Clorofila (absorção) da LUZ nas plantas, com λ diferente do verde, o qual é refletido

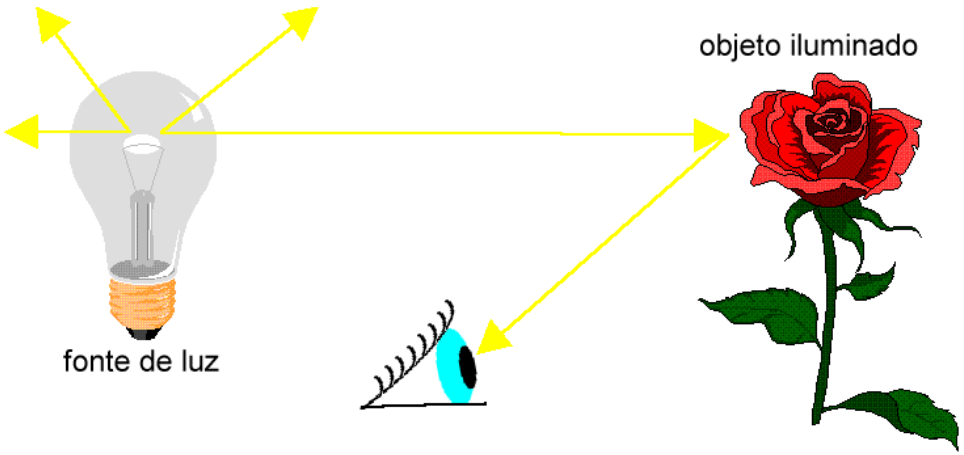




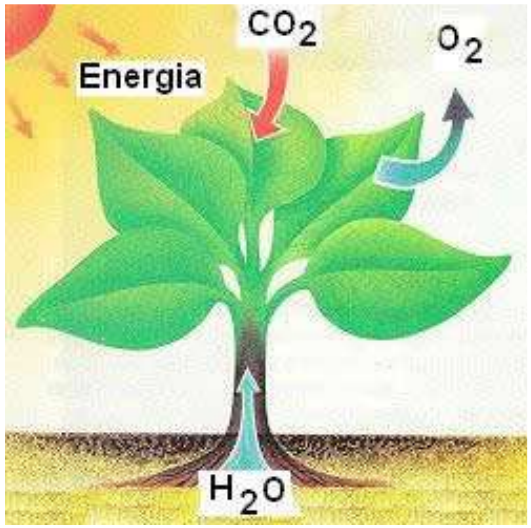
Clorofila: $C_{XX}H_{YY}O_ZN_4Mg$

Absorvância ou Absorvência

$$A_{\nu,\lambda} = \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$



A **fotossíntese** transforma energia eletromagnética do sol (luz) em energia química, quebrando as ligações químicas da água (fotólise) favorecendo a formação de moléculas de O_2, fixando CO_2 em açucar.



$$2\,H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} 4H^+ + 4e^- + O_2$$

H_2O captada do solo

Fotólise libera: $H^+, O_2 +$

CO_2 (captado da atmosfera)

$$2H_2O + CO_2 \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{luz}} (CH_2O) + H_2O + O_2$$

- **Captação de gás carbônico**
- **Produção de oxigênio (respiração)**
- **Manutenção/equilíbrio da temperatura na Terra**

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{clorofila}]{\text{energia luminosa}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

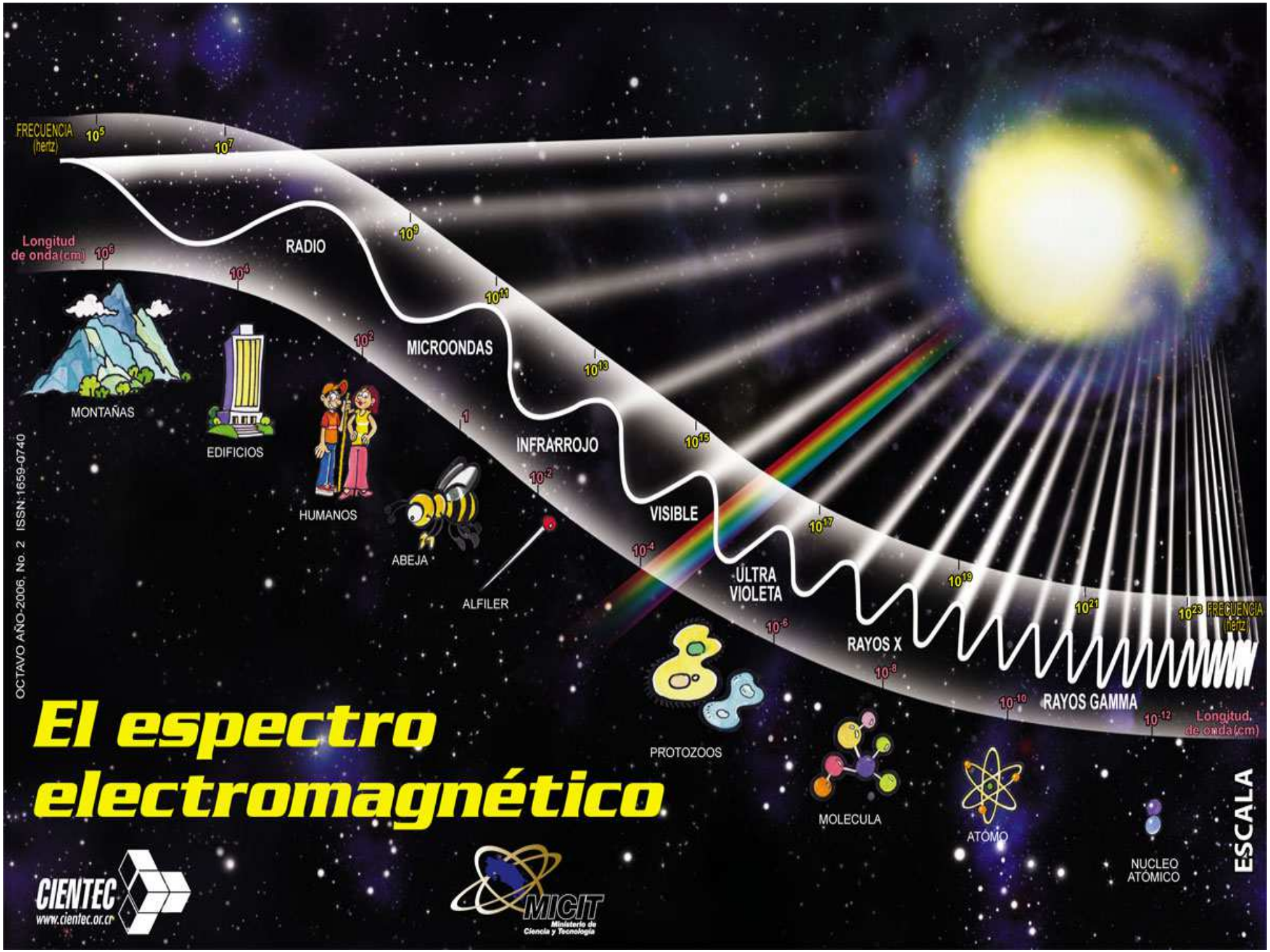
dióxido de carbono | água | glicose | oxigénio | água

- **Produção de Glicose (açucar – alimento)**
- **Base da cadeia alimentar**

Algumas bactérias, algas e todas as plantas realizam a fotossíntese, que é um processo fundamental para a vida na Terra que só é possível graças à luz solar. **Bioreatores – Reatores de ciclo combinado – Mercado de Trabalho**

CONJUNTO DE INFORMAÇÕES IMPORTANTES:

- Procure os **filtros solares de amplo espectro** que proteja contra os raios **ultravioletas dos tipos UVA e UVB**.
- Passe uma quantidade abundante, **20 minutos antes da exposição** para **aumentar a absorção e assim a espessura da camada protegida.**
- **Reaplique** a cada intervalo entre 2 e 3 horas.
- Mesmo com protetor, use chapéu com aba para cobrir as orelhas e óculos escuros para **proteger os olhos**.
- Usar óculos de sol com lentes que **protejam** contra o ultravioleta.
- **Mesmo em dias nublados**, cerca de 80% dos **raios UV atravessam as núvens** e a neblina.
- **Cuidado com a luz refletida**. **A luz do sol reflete** na areia, na neve, nas salinas, no concreto e na água, atingindo a pele, mesmo na sombra.
- Proteja crianças e jovens pois em geral, quando se cuida da pele até os 18 anos, cerca de 85% dos casos de câncer podem ser evitados.
- Hidrate a pele após ter tomado sol, para restaurar a umidade perdida, evitando assim o seu ressecamento.
- Vá ao dermatologista quando uma pinta aumentar de tamanho ou de cor em seu corpo.
- Permaneça na sombra sempre que possível.

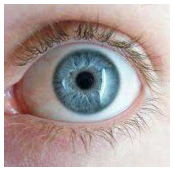


El espectro electromagnético

OCTAVO AÑO-2006, No. 2 ISSN:1659-0740

CIENTEC
www.cientec.or.cr

MICIT
Ministerio de Ciencia y Tecnología

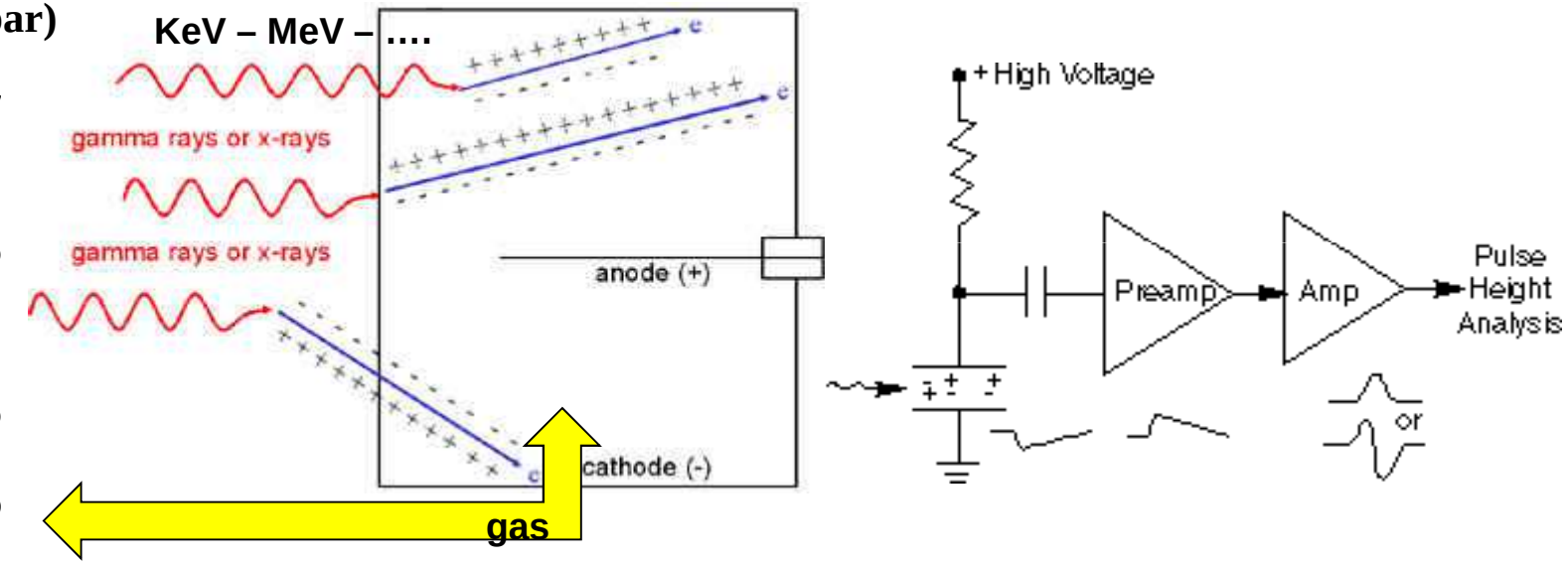


- ❑ Fukushima (2011)
- ❑ Chernoby (1986)
- ❑ Hiroshima e Nagasaki (1945)

KeV – MeV – GeV – ....

O **tempo de subida** de um pulso de saída de um pré-amplificador está relacionado com o tempo de "coleção" de carga, enquanto que o tempo de decaimento de um pulso de saída de um pré-amplificador é a **constante característica de tempo RC** do próprio pré-amplificador. A variação do tempo de subida pode variar desde picosegundos até uns poucos microsegundos, enquanto os tempos de decaimento giram em torno dos microsegundos.

Gas	W (eV/par)
H2	37
He	41
N2	35
O2	31
Ar	35
Ne	36
Ar	26



Exemplo de aplicações: detectores de radiação

Pré-amplificadores de carga são normalmente usados pela maior parte de detectores de estado sólido. Nos pré-amplificadores de carga, um pulso de voltagem de saída é produzido proporcional ao pulso de entrada de carga.

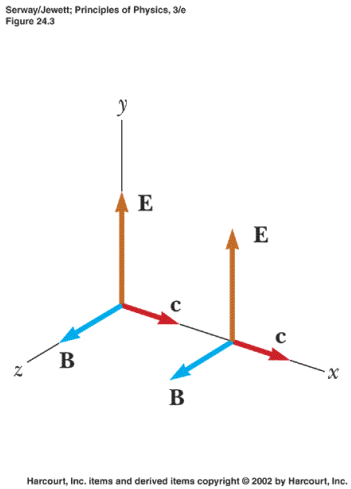
Ondas eletromagnéticas

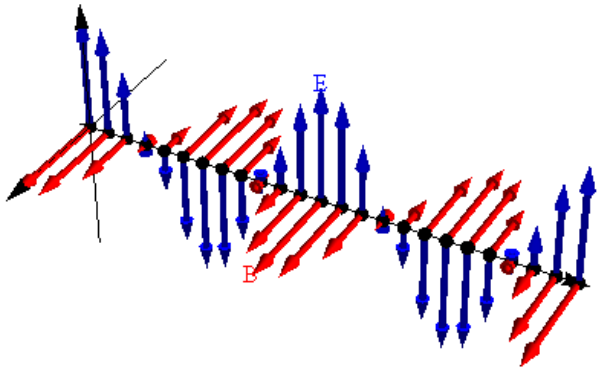
$$1)\ \oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

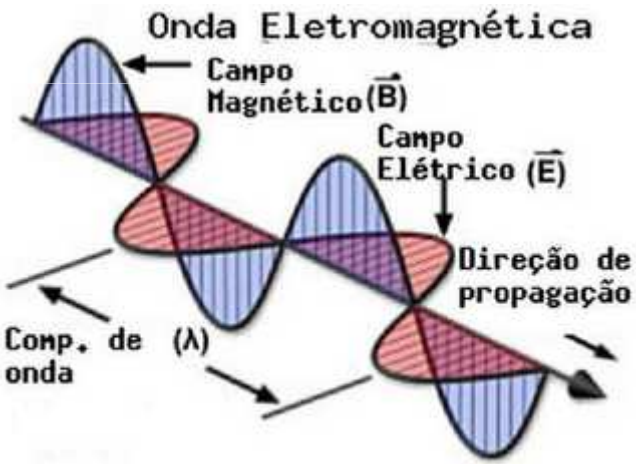
$$2)\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

$$3)\ \oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$4)\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$



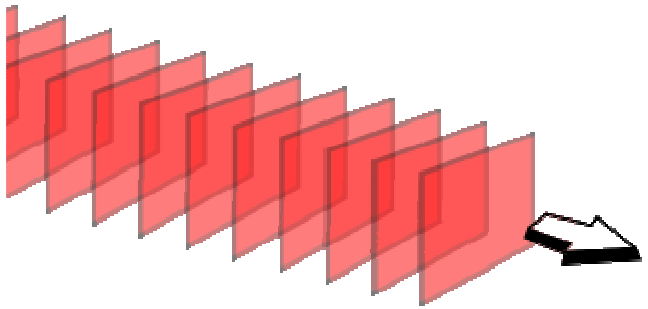




Campos elétricos e magnéticos dependentes do tempo satisfazem uma equação de onda.

Matematicamente, uma onda plana é descrita pela solução da equação de onda da seguinte forma:

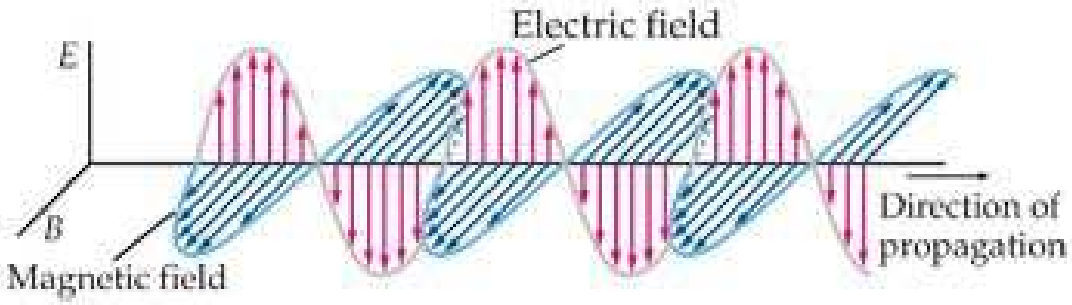
$$u(\vec{x},t) = A\cos(kx - \omega t)$$
$$E(\vec{x},t) = |E|\cos(kx - \omega t)$$
$$B(\vec{x},t) = |B|\cos(kx - \omega t)$$

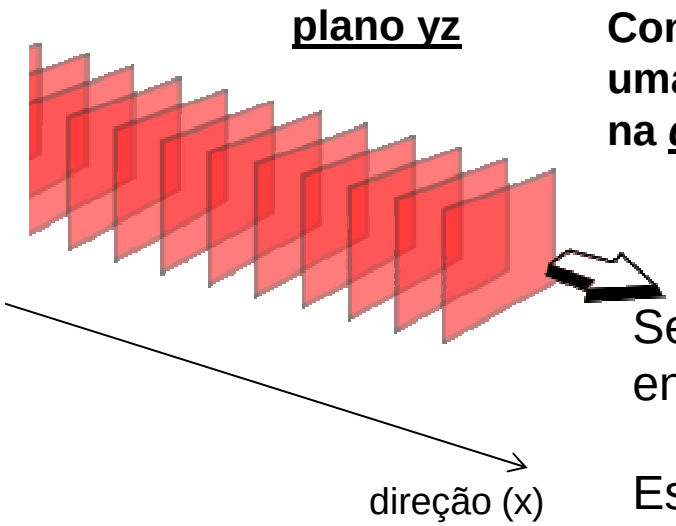


Onde ***k* é o vetor de onda**, ***ω* é a frequência angular e *A* é a amplitude**.

Para equações de onda vetoriais, como as que descrevem a radiação eletromagnética ou as ondas em um meio elástico, a solução para um meio homogêneo é similar:

multiplicado por um vetor constante **A**. (Por exemplo, em eletromagnetismo **A** é tipicamente o vetor para o **campo elétrico, campo magnético, ou o potencial vetorial**).





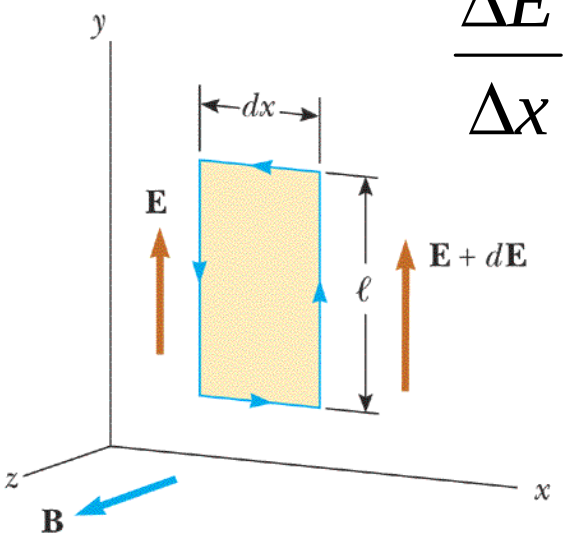
Consideramos que a fonte das ondas eletromagnéticas é tal que uma onda irradiada de qualquer posição no *plano yz* se propaga na *direção x* e todas as ondas deste tipo são emitidas em fase.

Se definimos uma linha ao longo da qual a onda se propaga então todas as linhas dessas ondas são paralelas.

Este conjunto de ondas é conhecido como **onda plana.**

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 24.4

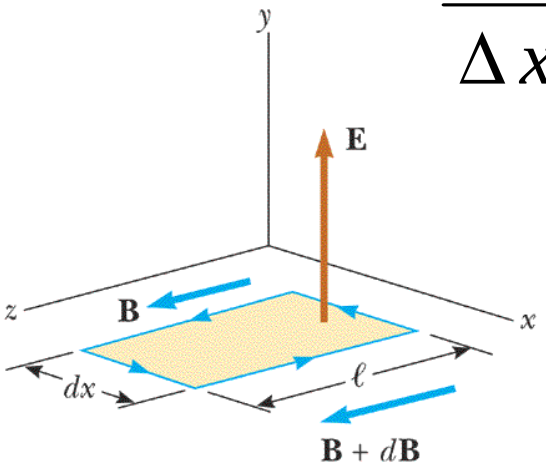
$$\frac{\Delta E}{\Delta x}$$

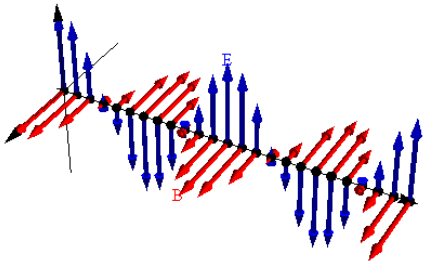


Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 24.5

$$\frac{\Delta B}{\Delta x}$$





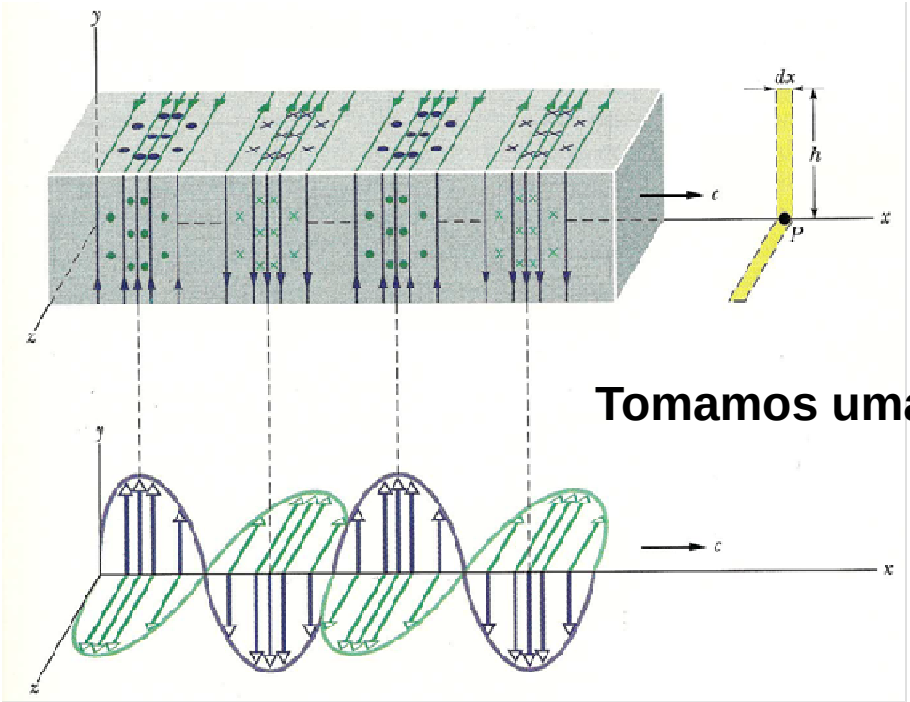
Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Representação de uma onda eletromagnética que se propaga na direção x

$$u(\vec{x},t) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$E(\vec{x},t) = |E|\cos(kx - \omega t)$$

$$B(\vec{x},t) = |B|\cos(kx - \omega t)$$



Tomamos uma notação

- Para esta onda, o campo elétrico ***E*** está na **direção y**
  o campo magnético ***B*** está na **direção z**.

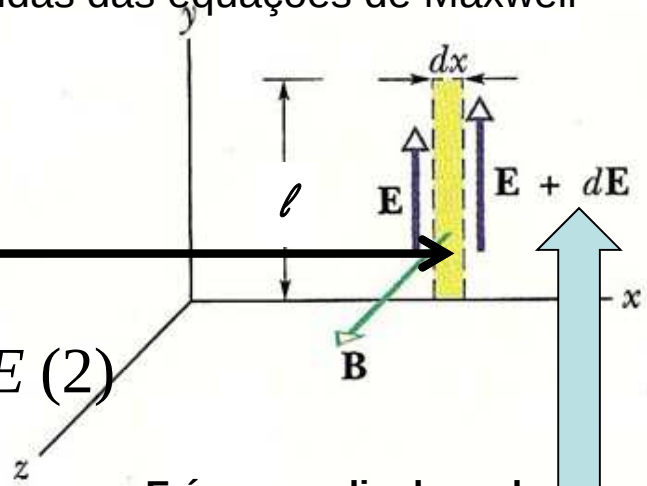
- As magnitudes (módulo/intensidade) dos campos ***E*** e ***B*** dependem de (variam com) **(x e t)** mas **não dependem das coordenadas y ou z**

- Considerando que todas as ondas emitidas ao longo do eixo x estão em fase

As propriedades das ondas eletromagnéticas podem ser deduzidas das equações de Maxwell

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

considerando o retângulo amarelo



$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = (E+dE)l - El = ldE \Rightarrow \oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = ldE \quad (2)$$

As contribuições da parte superior e inferior do retângulo são nulas porque E é perpendicular a ds.

O campo magnético está na direção "z", o fluxo magnético através do retângulo de área A=ldx é:

$\Phi_B = BA = Bldx$ **e uma vez diferenciado**

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = ldx\frac{dB}{dt}; \quad \textbf{(1)}$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \Rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = -ldE \quad \textbf{(2)}$$

De (1) e (2) temos: igualando o lado esquerdo (2) com o lado direito da equação (1)

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -ldE = ldx\frac{dB}{dt} \Rightarrow -\frac{dE}{dx} = \frac{dB}{dt} \text{ ou } \frac{dE}{dx} = -\frac{dB}{dt} \text{ ou } \frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$u(\vec{x},t) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$E(\vec{x},t) = E_{\max}\cos(kx - \omega t)$$

$$B(\vec{x},t) = B_{\max}\cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(E_{\max}\cos(kx - \omega t)\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(B_{\max}\cos(kx - \omega t)\right)$$

$$k \cdot E_{\max} \cdot \left(-sen(kx - \omega t)\right) = -\omega \cdot B_{\max} \cdot \left(-sen(kx - \omega t)\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\omega}{k} = c$$

a todo instante,

a razão entre o campo elétrico e o campo magnético é igual à velocidade da luz no vácuo

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k}$$

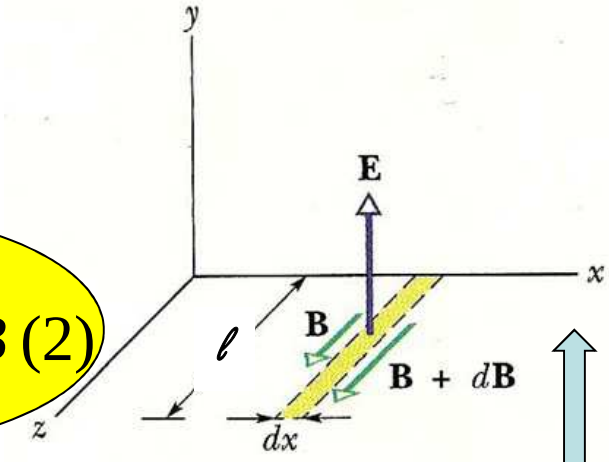
$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \frac{c}{f} = \frac{2\pi}{k} \Rightarrow 2\pi f = ck \Rightarrow \omega = ck \Rightarrow \frac{\omega}{k} = c$$

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \varepsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (1)$$

ANALOGAMENTE

considerando o retângulo amarelo

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = Bl - (B+dB)l = -ldB \Rightarrow \oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = -ldB \quad (2)$$



As contribuições da parte superior e inferior do retângulo são nulas porque B é perpendicular a ds.

O campo elétrico está na direção "y", o fluxo elétrico através do retângulo de área A=ldx é:

$\Phi_E = EA = Eldx$ **e uma vez diferenciado**

$$\frac{d\Phi_E}{dt} = ldx\frac{dE}{dt};$$

(1)

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \varepsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \Rightarrow \varepsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = -ldB$$

Substituindo temos:

$$-ldB = \varepsilon_0\mu_0 ldx\frac{dE}{dt} \Rightarrow \frac{\partial B}{\partial x} = -\varepsilon_0\mu_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

MANIPULANDO

Derivando a equação $\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}$ **em relação a x:** $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-\frac{\partial B}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial B}{\partial x}\right)$

2 páginas antes

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial B}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E}{\partial t}\right)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E}{\partial t}$$

página anterior

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left(-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E}{\partial t}\right) = -\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

Analogamente, derivando a equação $\frac{\partial B}{\partial x} = -\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E}{\partial t}$ **em relação a x**

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E}{\partial t}\right) = -\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right) = -\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial B}{\partial t}\right) = \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Ambas equações têm a forma de uma equação de onda linear: Capítulo 13 volume II

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Portanto, na atual discussão esta equação representa:
ondas eletromagnéticas progressivas que se deslocam com uma velocidade "c"

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{T \cdot m}{A} \right) \text{permeabilidade no vácuo}$$

$$\varepsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12} \left(\frac{C^2}{N \cdot m^2} \right) \text{permissividade no vácuo}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 3.0 \times 10^8 \, m/s$$

ou seja, esta velocidade **é precisamente a velocidade da luz no vácuo**,

o que indica que **a luz é uma onda eletromagnética**.

Como as ondas eletromagnéticas podem ser consideradas ondas progressivas, então, podemos adotar a relação entre **velocidade da onda**, **comprimento de onda** e **frequência**:

$$v = \lambda \cdot f$$

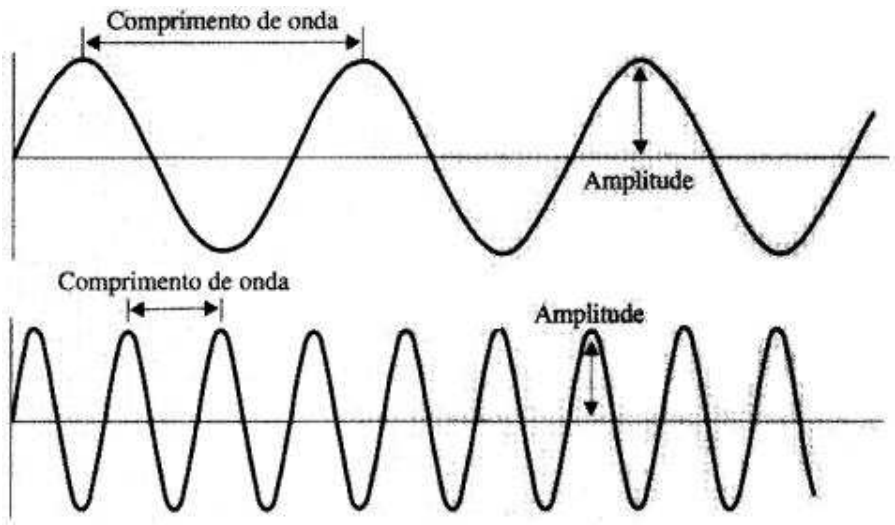
$$c = \lambda \cdot f$$

(para ondas eletromagnéticas contínuas)

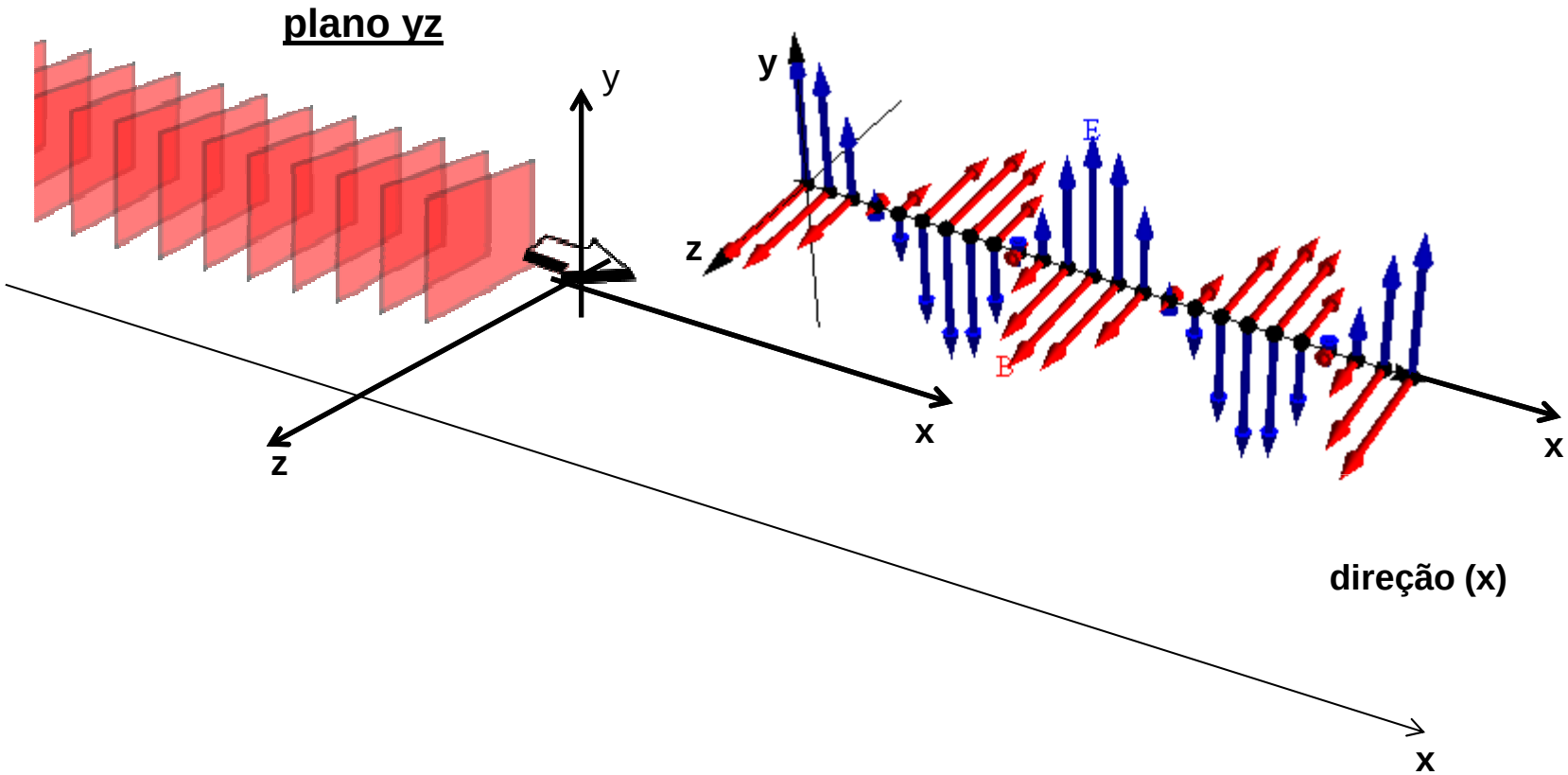
$$u(\vec{x}, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

$$E(\vec{x}, t) = |E| \cos(kx - \omega t)$$

$$B(\vec{x}, t) = |B| \cos(kx - \omega t)$$



❑ Os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética são perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação da onda (x,y,z)



❑ A natureza transversal de uma onda eletromagnética reflete a direção dos vetores do campo com respeito à direção de propagação.

❑ As magnitudes instantâneas de ***E*** e ***B*** em uma onda eletromagnética estão relacionadas pela expressão:

$$\frac{E}{B} = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \times 10^8 \, m/s$$

Ondas eletromagnéticas transportam energia e a **taxa de fluxo de energia** atravessando uma unidade de área ***"A"*** é descrita pelo vetor de pointing ***"S"***

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

Calculando $\vec{S}$ para uma onda eletromagnética plana.

$\vec{E}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares entre sí $\Rightarrow \left|\vec{E} \times \vec{B}\right| = EB$, assim neste caso:

$S = \dfrac{EB}{\mu_0}$, sendo $B = \dfrac{E}{c}$ também podemos formular:

$S = \dfrac{E^2}{\mu_0 c} = \dfrac{cB^2}{\mu_0}$ equações para S que se aplicam a $\forall$ instante de tempo.

A média temporal de S por um ou mais ciclos é a intensidade.

Isso involve a média temporal de $\cos^2(kx - \omega t)$ que é igual a $\dfrac{1}{2}$.

Desta forma, o valor médio de S ou a intensidade da onda é:

$$I = \bar{S} = \frac{E_{\max} \cdot B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{cB_{\max}^2}{2\mu_0}$$

Exemplo: uma onda eletromagnética senoidal com frequência de 40MHz propaga-se no vácuo na direção "x".
Em um certo ponto e em um certo instante, o campo elétrico tem seu valor máximo de 750N/C (ao longo do eixo z).

(a) Determine o comprimento de onda e o período desta onda.

(b) Calcule a magnitude e a direção do campo magnético quando E=750N/C

(c) Escreva expressões para a variação espacial e temporal das componentes do campo elétrico e magnético para esta onda

$$u(\vec{x},t) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$E(\vec{x},t) = E_{\max}\cos(kx - \omega t)$$

$$B(\vec{x},t) = B_{\max}\cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\omega}{k} = c$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

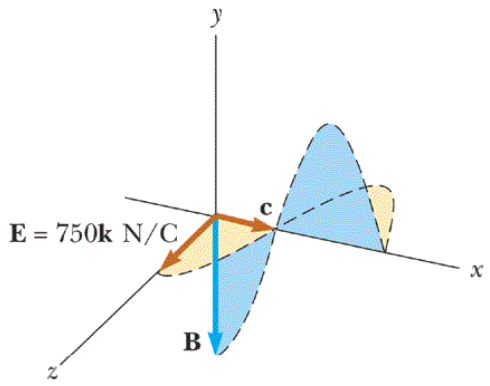
Exemplo 24.1: uma onda eletromagnética senoidal com frequência de 40MHz propaga-se no vácuo na direção “x”. Em um certo ponto e em um certo instante, o campo elétrico tem seu valor máximo de 750N/C (ao longo do eixo z).

(a) Determine o comprimento de onda e o período desta onda.

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 24.7

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\times10^{8}\, m/s}{4\times10^{7}\, Hz\left(\frac{1}{s}\right)} = 7.50m$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{4\times10^{7}\, Hz\left(\frac{1}{s}\right)} = 2.5\times10^{-8}s$$



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

(b) Calcule a magnitude e a direção do campo magnético quando E=750N/C

$$B_{máx} = \frac{E_{máx}}{c} = \frac{750\left(N/C\right)}{3\times10^{8}\left(m/s\right)} = 2.5\times10^{-6}T$$

E e **B** têm de ser perpendiculares entre si e como **E x B** tem de estar na direção de propagação da onda (“x” neste caso), concluímos que **B está na direção “y”**

Exemplo 24.1: uma onda eletromagnética senoidal com frequência de 40MHz propaga-se no vácuo na direção “x”. Em um certo ponto e em um certo instante, o campo elétrico tem seu valor máximo de 750N/C (ao longo do eixo z).

(c) Escreva expressões para a variação espacial e temporal das componentes do campo elétrico e magnético para esta onda

$$u(\vec{x},t) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$E(\vec{x},t) = E_{\max}\cos(kx - \omega t) = (750\,N/C)\cos(kx - \omega t)$$

$$B(\vec{x},t) = B_{\max}\cos(kx - \omega t) = \left(2.5\times10^{-6}\,T\right)\cos(kx - \omega t)$$

onde,

$$\omega = 2\pi f = 2\pi\left(4\times10^{7}\,Hz\right) = 2.51\times10^{8}\,(rad/s)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{7.5m} = 0.838\,(rad/m)$$

Exemplo 24.2: Uma fonte pontual de radiação eletromagnética fornece uma potência média de 800W. Calcule os valores máximos dos campos elétrico e magnético em um ponto a 3.5m da fonte.

Solução: para ondas propagando-se uniformemente a partir de uma fonte pontual, a energia da onda a uma distância “r” da fonte é distribuída sobre a área da superfície de uma esfera imaginária de raio “r”. Assim,

$$I = \frac{P_{méd}}{A} = \frac{P_{méd}}{4\pi r^2} = \frac{E_{máx}^2}{2\mu_0 c}$$

$$E_{máx} = \sqrt{\frac{\mu_0 c P_{méd}}{2\pi r^2}} = \sqrt{\frac{\left(4\pi\times10^{-7}\,T\cdot m/A\right)\cdot\left(3\times10^{8}\,m/s\right)\cdot 800W}{2\pi\cdot(3.5m)^2}}$$

$$E_{máx} = 62.6\frac{V}{m}$$

$$B_{máx} = \frac{E_{máx}}{c} = \frac{62.6\frac{V}{m}}{3\times10^{8}\,m/s} = 2.09\times10^{-7}T$$

Exercício: Calcule a densidade de energia a 3.5 m da fonte puntual

$$u_{médio} = \varepsilon_0\left(E^2\right)_{méd} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_{máx}^2 = \frac{B_{máx}^2}{2\mu_0} = \frac{(2.09\times10^{-7}T)^2}{2\cdot4\cdot\pi\times10^{-7}\left(\frac{T\cdot m}{A}\right)} = \frac{4.37\times10^{-14}T^2}{25.13\times10^{-7}\left(\frac{T\cdot m}{A}\right)} = 1.73\times10^{-8}\left(T/m\right)$$