



Física VIII

Aula I

Sandro Fonseca de Souza

Sumário

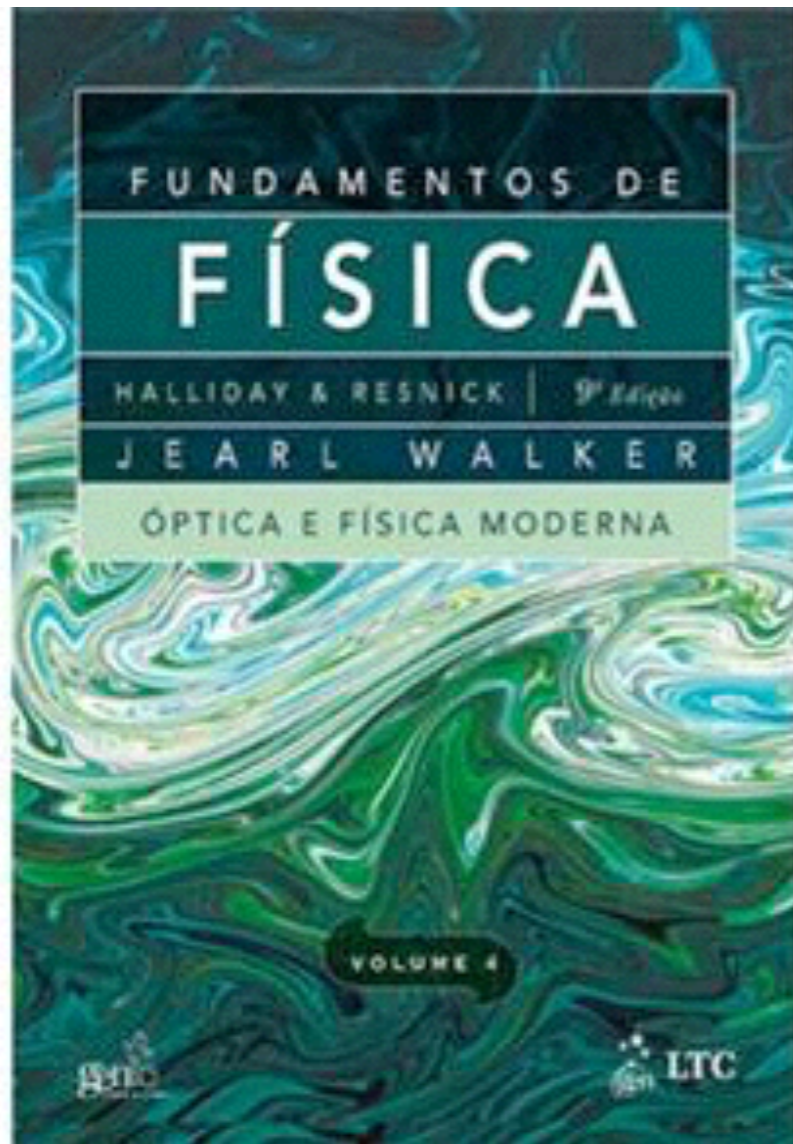
- Interações Eletromagnéticas
- Equações de Maxwell na forma diferencial
- Conceito de Ondas Eletromagnéticas

Normas e Datas



- Atendimento ao estudante: quarta-feiras de 09:00 - 10:00 na sala 3016 A.
- 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 ou 3001A).
- Abono de faltas somente serão aceitos mediante requerimento na secretaria do departamento até 7 dias úteis a contar da data da falta.
- A presença, participação e pontualidade dos alunos também será avaliada na média final do curso.
- Data das provas: P1-30/09, P2-21/10 e P3-04/11

Bibliografia



Fundamentos da Física
Halliday & Resnick
Volume 4

Seja bem-vindo à TWiki DFNAE

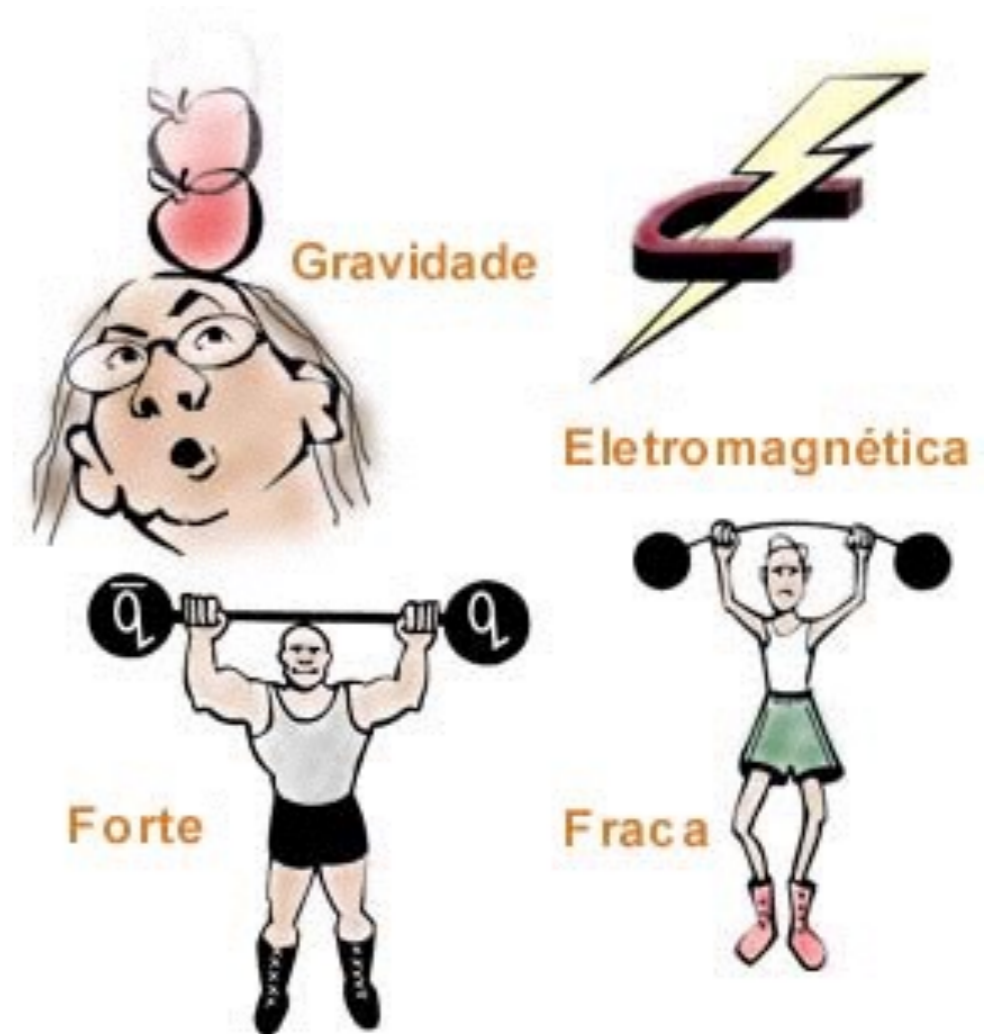
Disciplinas:

- [Física Geral](#)
- [Estrutura da Matéria I](#)
- [Estrutura da Matéria II](#)
- [Estrutura da Matéria III](#)
- [Física Exp. e Teórica IV-lab e Física IV-lab](#)
- [Física VIII](#)

<http://dfnae.fis.uerj.br/twiki/bin/view/DFNAE/WebHome>

Interações Fundamentais

- Existem quatro interações fundamentais na Natureza:
 - nuclear forte;
 - eletromagnética;
 - nuclear fraca;
 - gravitacional.



Interações Fundamentais

Tipo:	Intensidade:	Alcance (m):	Ocorre em:
Forte	1	10^{-15}	núcleos
Eletromagnética	$\frac{1}{137} \approx 10^{-3}$	infinito	Eletrosfera
Fraca	10^{-6}	10^{-18}	decaimento radioativo
Gravitacional	10^{-39}	infinito	corpos celestes

Interações Eletromagnéticas

- Tem seu efeito em escala macroscópica*
 - responsável pela estrutura da matéria
 - pela maioria dos fenômenos físicos e químicos conhecidos pelo homem.
- Seu tratamento em nível quântico é dada pelo eletrodinâmica quântica, que serviu de modelo para o tratamento de todas as demais interações conhecidas.

Interações Eletromagnéticas

- Ela ocorre quando dois possuidores de cargas elétricas e/ou corpos magnetizados interagem.
- A parte da Física que descreve estas interações é conhecida como eletrodinâmica.
- A formulação clássica da eletrodinâmica foi de autoria de James Clerk Maxwell.

James Clerk Maxwell



James Clerk Maxwell
(1831-1879) com 40 anos

- Foi um dos grandes cientistas do seu tempo a desenvolver a teoria eletromagnética clássica e aclamado como o pai da Física Moderna.
- As quatro equações de Maxwell descrevem todos os fenômenos elétricos e magnéticos.

James Clerk Maxwell

Fonte: <http://www.clerkmaxwellfoundation.org>

- O impacto do seu trabalho foi em algumas áreas:
 - Telecomunicações: descoberta do espectro eletromagnético (ex. rádio, micro-ondas, televisão e etc)
 - Termodinâmica: fundador da teoria cinética dos gases
 - Engenharias elétrica e civil
 - Matemática
 - Física Nuclear e Óptica
 - A Reologia é a ciência que estuda o modo como a matéria flui ou como esta se deforma. Nesta área da física, incluem-se a mecânica de fluidos clássica e a elasticidade que tratam respectivamente, os fluidos Newtonianos



James Clerk Maxwell
(1831-1879) com 40 anos

Equações de Maxwell

Equações de Maxwell

- Lei de Gauss
- Lei de Gauss para Magnetismo
- Lei de Faraday
- Lei de Ampère-Maxwell

Lei de Gauss

- A lei de Gauss relaciona o fluxo total Φ_E de um campo elétrico através de uma superfície fechada (superfície gaussiana) onde: a carga total Q que é envolvida por essa superfície e ϵ_0 sendo a constante permissividade do vácuo:

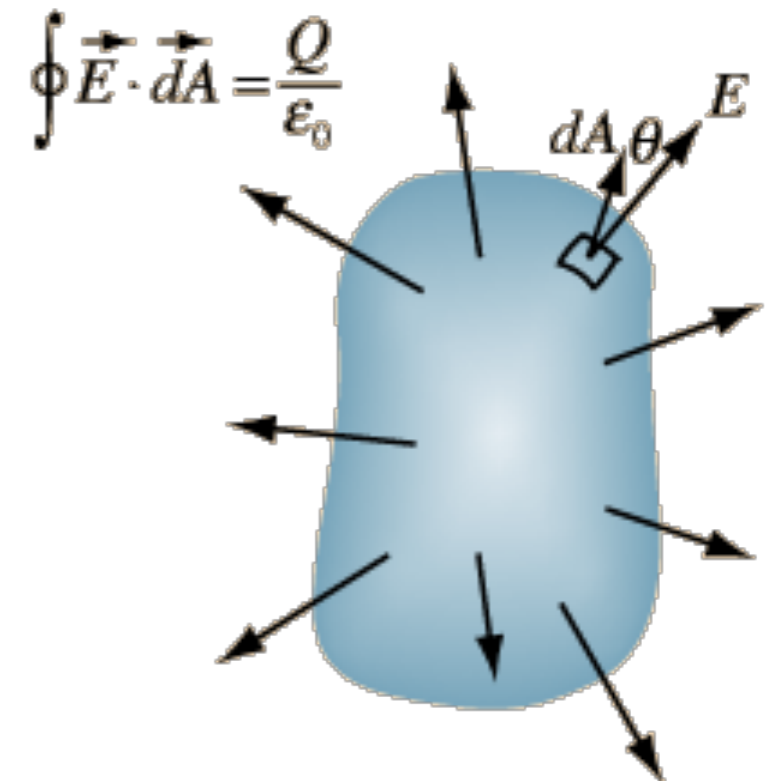
$$\epsilon_0 \Phi_E = Q$$

sendo o fluxo total através de uma superfície S fechada e definido por:

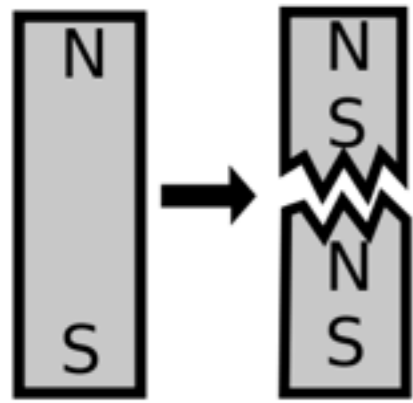
$$\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$

A lei de gauss pode ser escrita como:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$



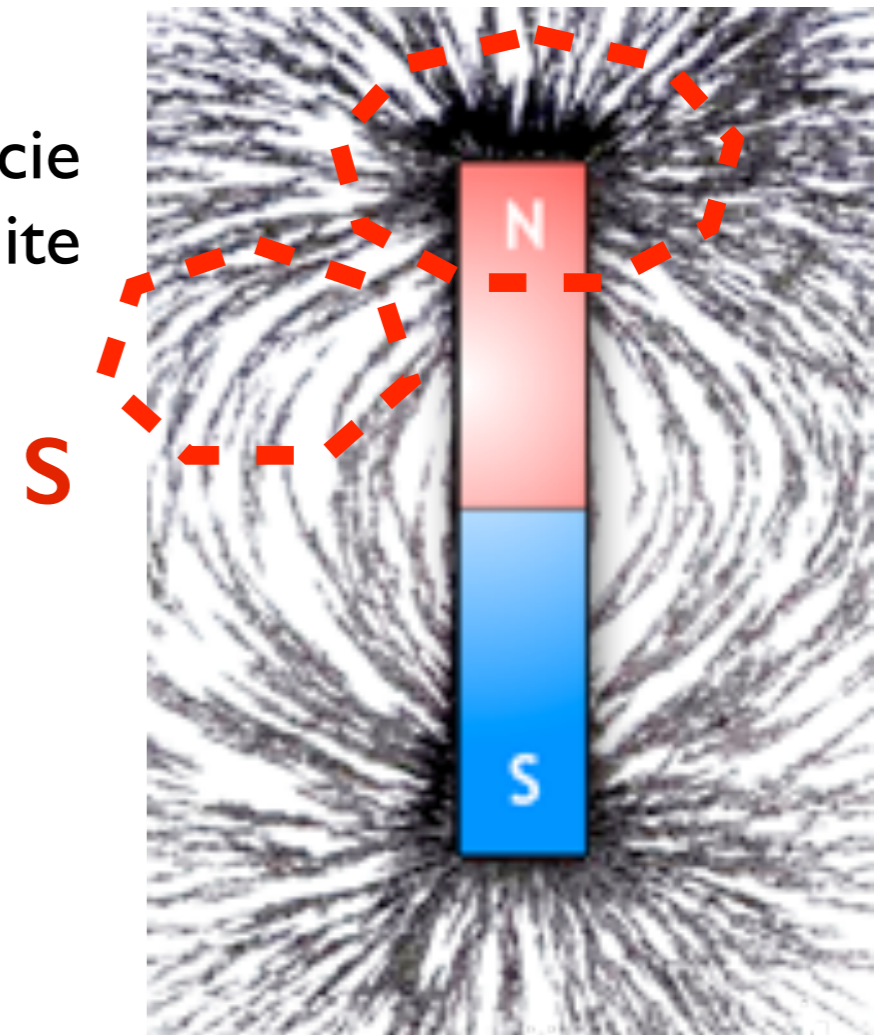
Lei de Gauss para Magnetismo



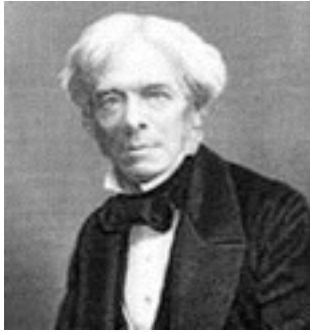
Impossível criar monopólios magnéticos

- O fluxo magnético através de uma superfície gaussiana **S** fechada é igual a zero, logo nos permite afirmar que monopolos magnéticos não existem!

$$\Phi_B = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$



Exemplo de dipolo magnético



Michael Faraday
(1791-1867)

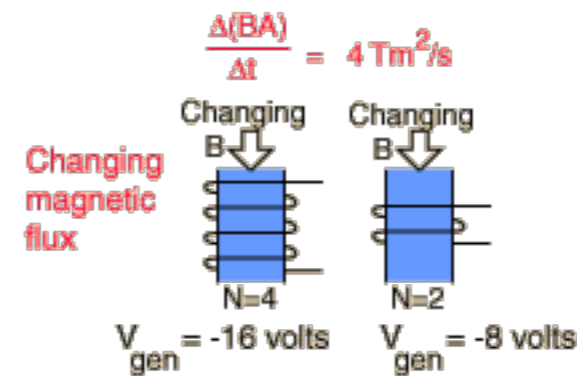
Lei de Faraday



Turbina da usina de Itaipú

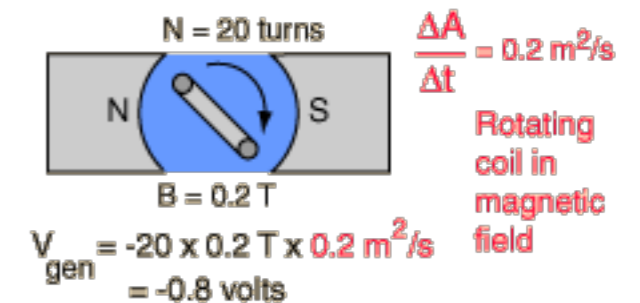
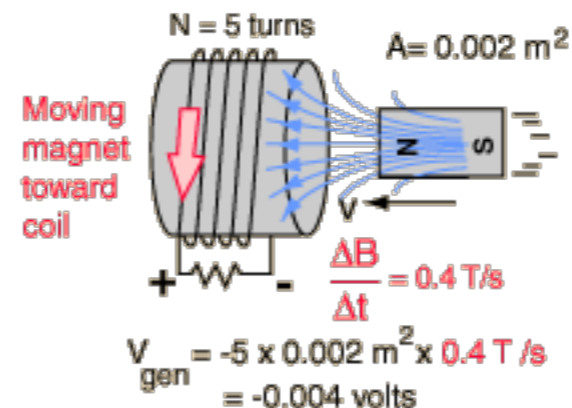
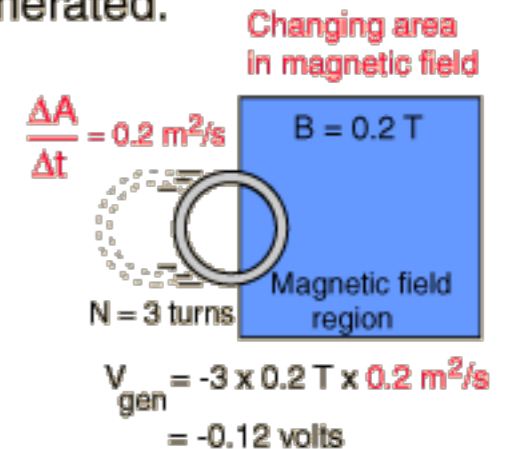
- Lei de Faraday expressa a geração de um campo elétrico induzido numa região em que há um campo magnético variável

$$\oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



Voltage generated = $-N \frac{\Delta(BA)}{\Delta t}$
Faraday's Law

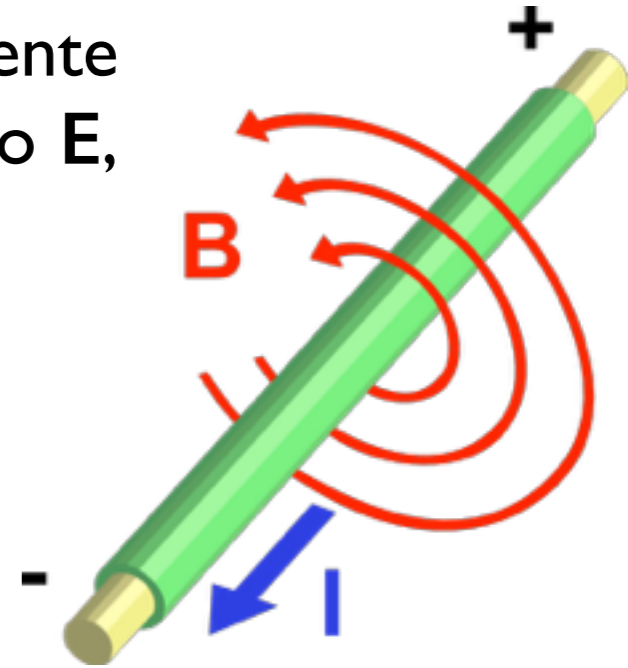
Faraday's Law summarizes the ways voltage can be generated.



Lei de Ampère-Maxwell

- Um campo magnético \mathbf{B} pode ser produzido por uma corrente elétrica ou pela variação (temporal) do fluxo do campo elétrico \mathbf{E} , (Φ_E):

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$



- Quando não se consideram a existência de campos elétricos variáveis no tempo, a equação acima se reduz a lei de Ampère :

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 i$$

- Integral de linha sobre um caminho fechado do campo magnético \mathbf{B} produzido por correntes é proporcional à corrente líquida que atravessa a superfície limitada pelo caminho da integração.

Unificação do Eletromagnetismo

- A teoria das interações eletromagnéticas descritas pelas quatro equações de Maxwell permitiram a unificação do eletromagnetismo e da ótica, mostrando que a luz é uma onda eletromagnética.
- As aplicações do eletromagnetismo revolucionaram toda a nossa tecnologia (do final do sec. XVIII até início do sec. XX).
- As ondas eletromagnéticas (rádio, radar e televisão) são empregadas em todos os nossos sistemas de telecomunicações.

• **Alguns Teoremas:**

Teorema de Gauss: $\oint_S \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{F}(\vec{r}) dV$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F}(\vec{r}) = \frac{\partial F_x(r)}{\partial x} + \frac{\partial F_y(r)}{\partial y} + \frac{\partial F_z(r)}{\partial z}$$

Teorema de Stokes: $\oint_C \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = \int_S \vec{\nabla} \times \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{s}$

$$\vec{\nabla} \times \vec{F}(\vec{r}) = \left(\frac{\partial F_z(r)}{\partial y} - \frac{\partial F_y(r)}{\partial z} \right) \hat{x} + \left(\frac{\partial F_x(r)}{\partial z} - \frac{\partial F_z(r)}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y(r)}{\partial x} - \frac{\partial F_x(r)}{\partial y} \right) \hat{z}$$

As equações de Maxwell

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad \longrightarrow \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

• As duas últimas equações mostram que variações espaciais ou temporais do campo elétrico (magnético) implicam em variações espaciais ou temporais do campo magnético (elétrico)

Ondas

Eletromagnéticas

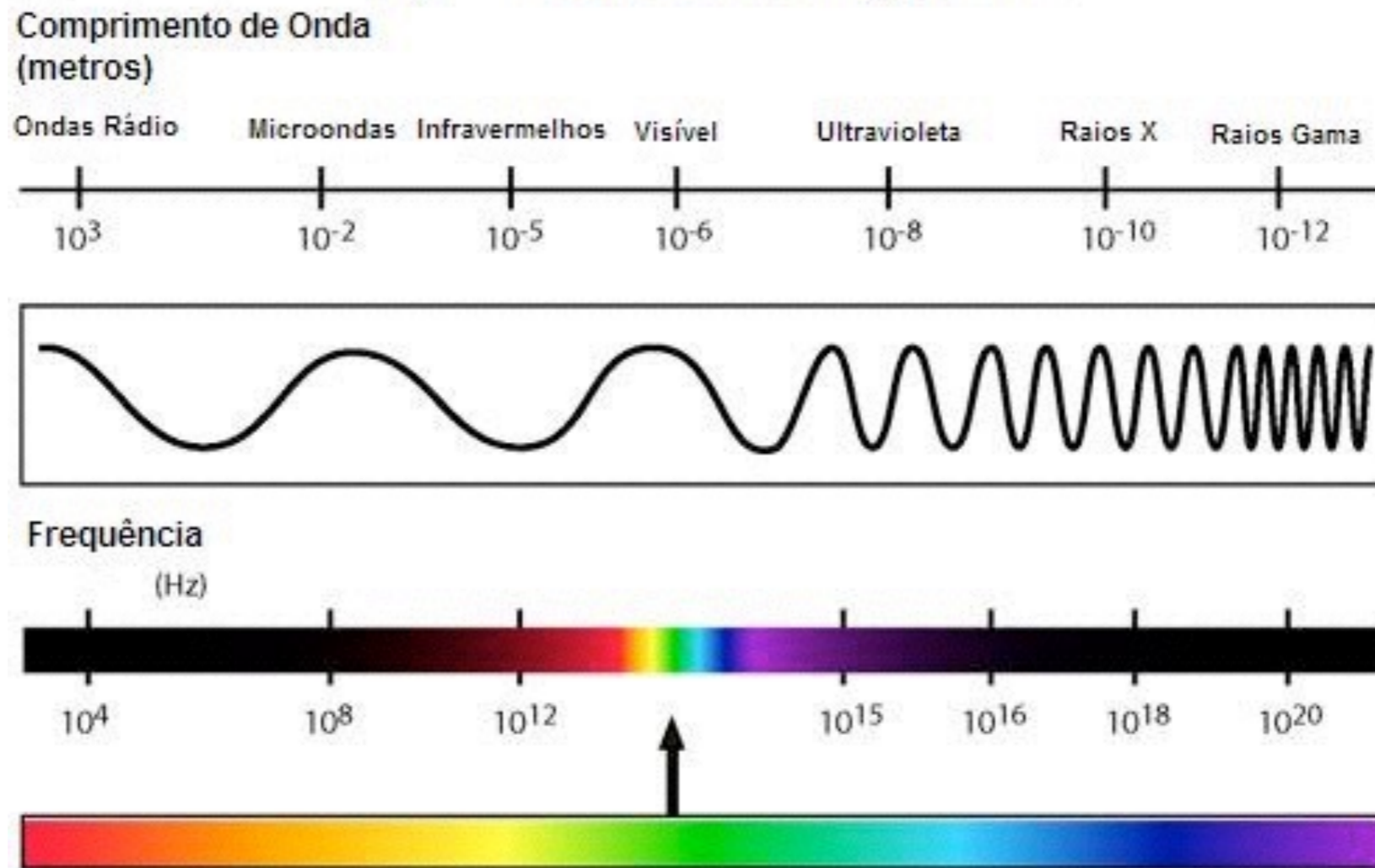
- Geração de uma Onda Eletromagnética;
- Propagação de uma O.E.;
- Transporte de Energia;
- Vetor de Pointing;
- Pressão de Radiação e Polarização;
- Velocidade de uma O.E.
- Aplicações.

Introdução as Ondas Eletromagnéticas

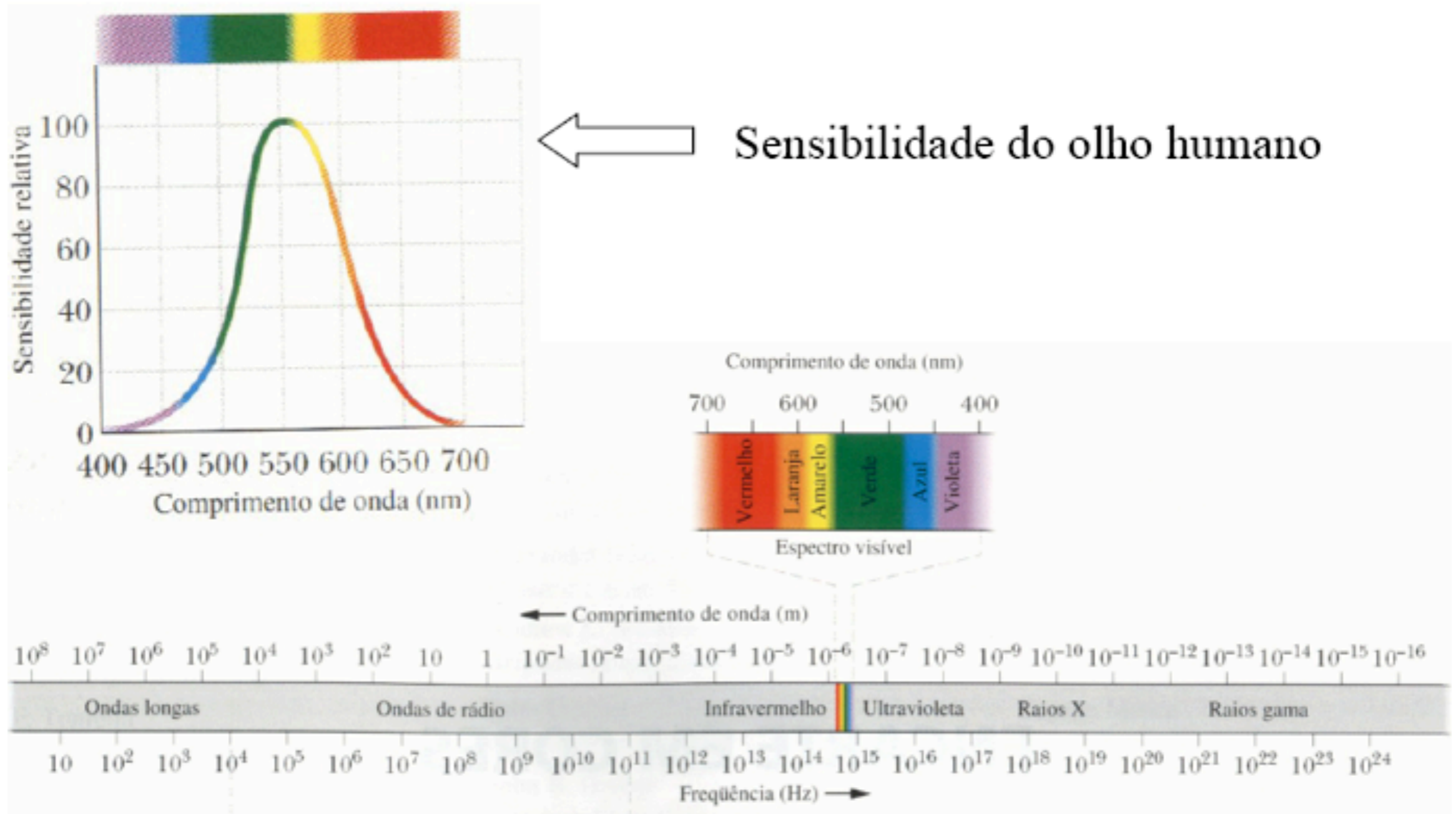
- Há cerca de 20 anos atrás a maior parte da tecnologia desenvolvida hoje não era vislumbrada pelos engenheiros.
- Nos meados dos Sec.XIX à luz visível, raios infravermelhos e ultravioleta eram as únicas formas de ondas eletromagnéticas conhecidas.

Introdução as Ondas Eletromagnéticas

Espectro Electromagnético



Ondas eletromagnéticas



Introdução as Ondas Eletromagnéticas

- Para Maxwell a luz é um distúrbio eletromagnético, na forma de ondas que se propagam através dos campos eletromagnéticos (uma configuração de campos elétricos e magnéticos) e de acordo com as lei do eletromagnetismo.
- Algumas fontes de ondas eletromagnéticas são:
 - ✓ Sol;
 - ✓ rádio/televisão/celular;
 - ✓ microondas;
 - ✓ raios cósmicos.

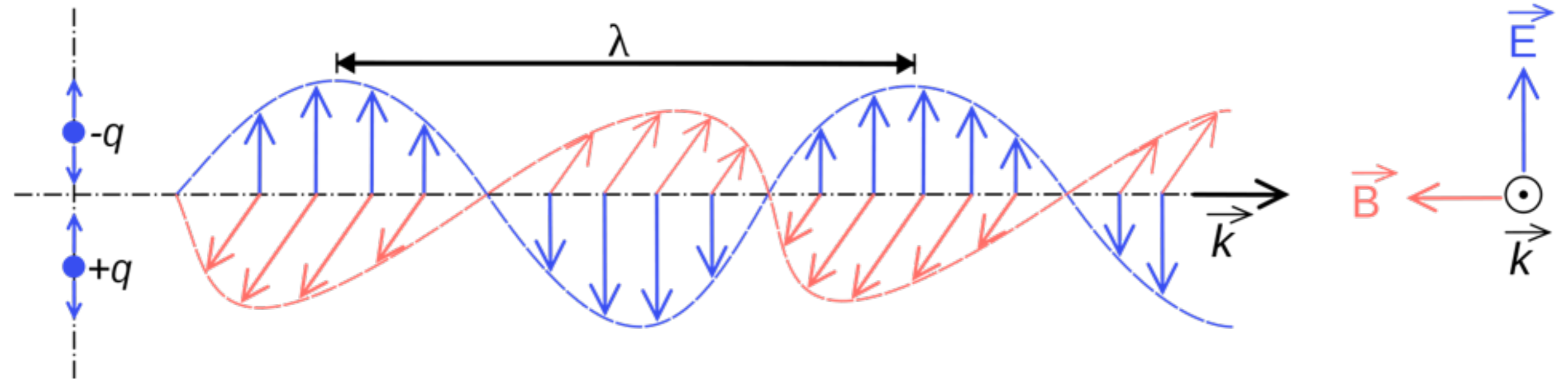
Propriedades das O.E.

- Os campos **E** e **B** são perpendiculares à direção de propagação da onda (onda transversal);
- O campo elétrico é perpendicular ao campo magnético;
- O produto vetorial $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ aponta no sentido de propagação da onda;
- Os campos variam senoidalmente, com a mesma frequência e estão em fase.

Propriedades das O.E.

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

Descrevendo os campos elétricos e magnéticos.



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

$$\mathbf{B} = B_m \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$$

Amplitudes

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

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

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

33-3 | Descrição Qualitativa de uma Onda Eletromagnética

- Então:

$$y(x, t) = y_m \text{sen}[k(x - vt)]$$

- Pode ser escrita, como:

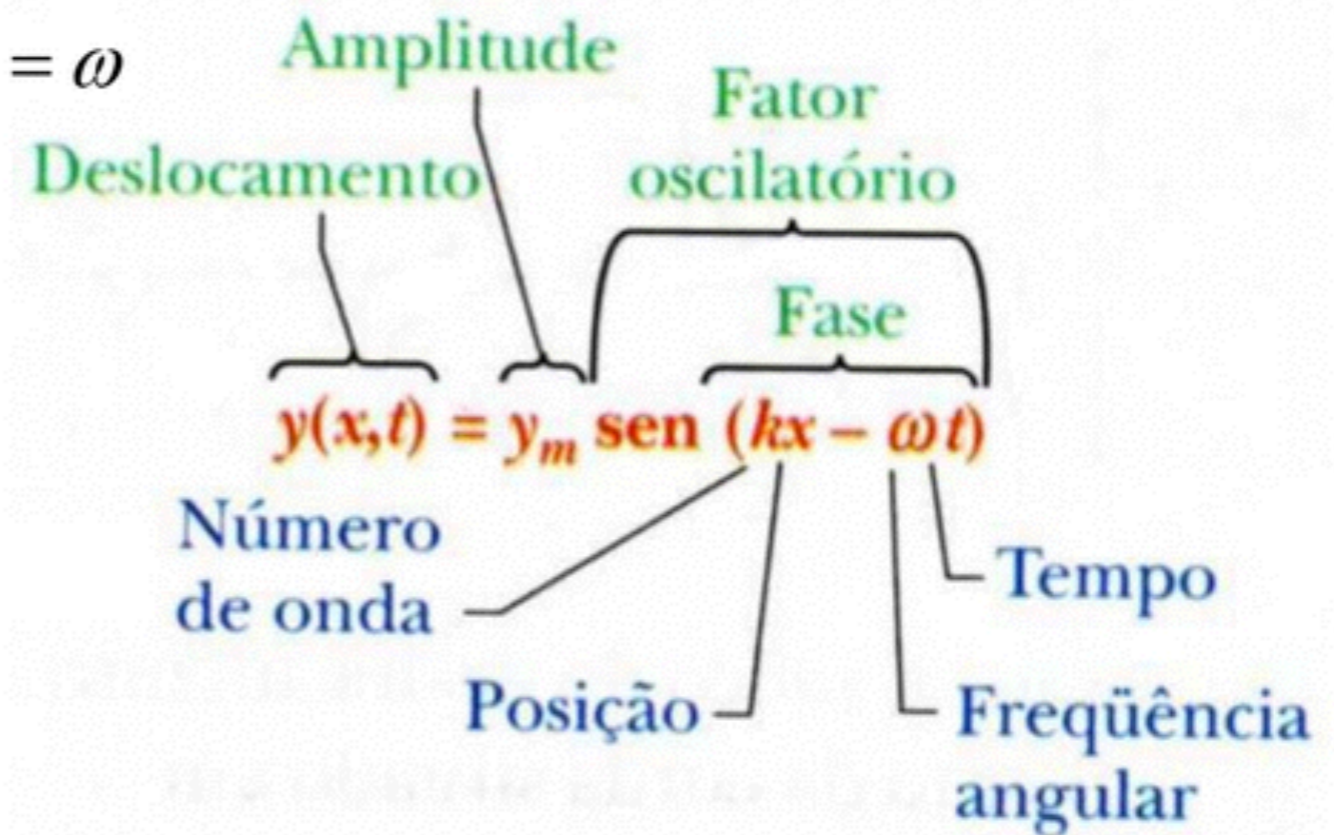
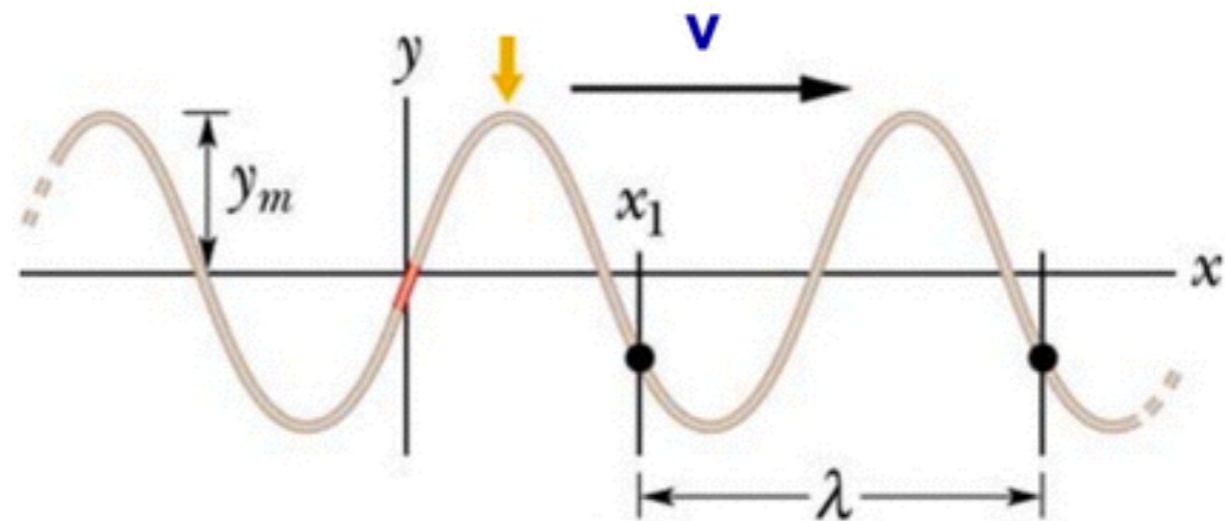
$$y(x, t) = y_m \text{sen}(kx - kv t)$$

- Mas:

$$kv = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{T} \quad \therefore kv = \frac{2\pi}{T} \quad \therefore kv = \omega$$

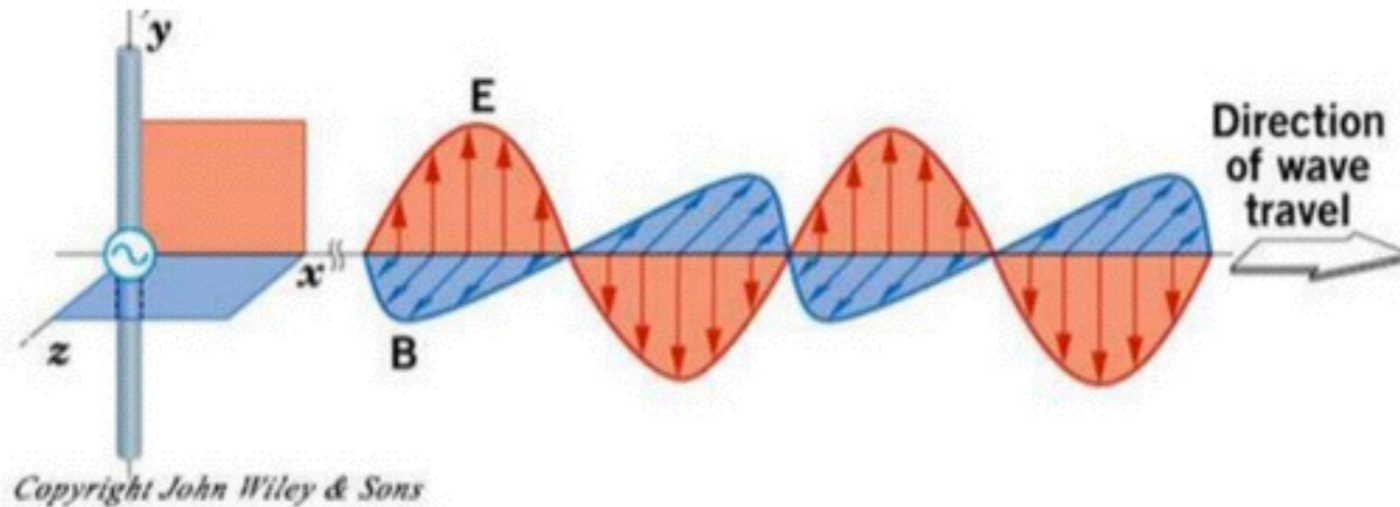
- Desse modo, tem-se:

(função de onda senoidal)

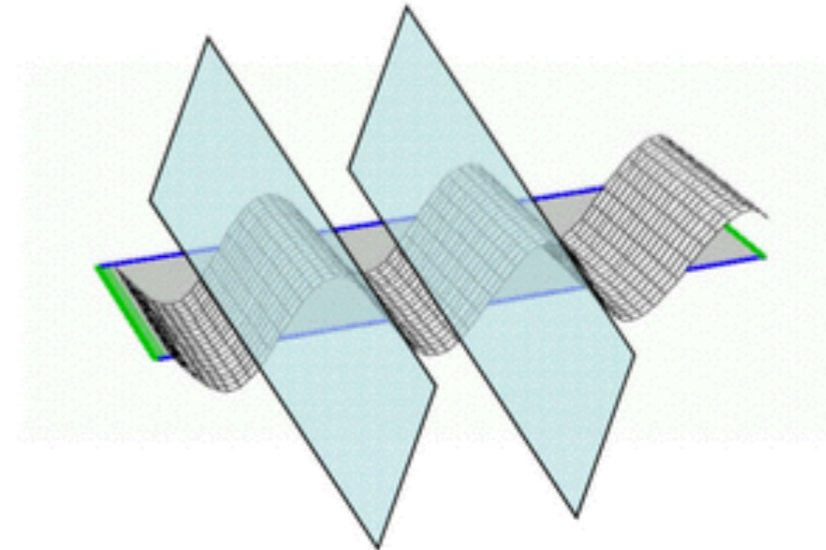


Ondas eletromagnéticas planas

$$E_y(x,t) = E_0 \sin k(x - ct) = E_0 \sin(kx - \omega t); \quad \omega = ck$$



- E e B propagam-se em fase.
- E e B são mutuamente perpendiculares.
- $E \times B$ aponta na direção de propagação



Ondas eletromagnéticas

Período:

$$T$$

Comprimento de onda:

$$\lambda$$

Frequência:

$$f = \frac{1}{T}$$

Frequência angular:

$$\omega = 2\pi f$$

Número de onda:

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

Velocidade de uma onda:

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

Mathematical Description of Travelling EM Waves

Electric Field: $E = E_m \sin(kx - \omega t)$

Magnetic Field: $B = B_m \sin(kx - \omega t)$

Wave Speed: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$

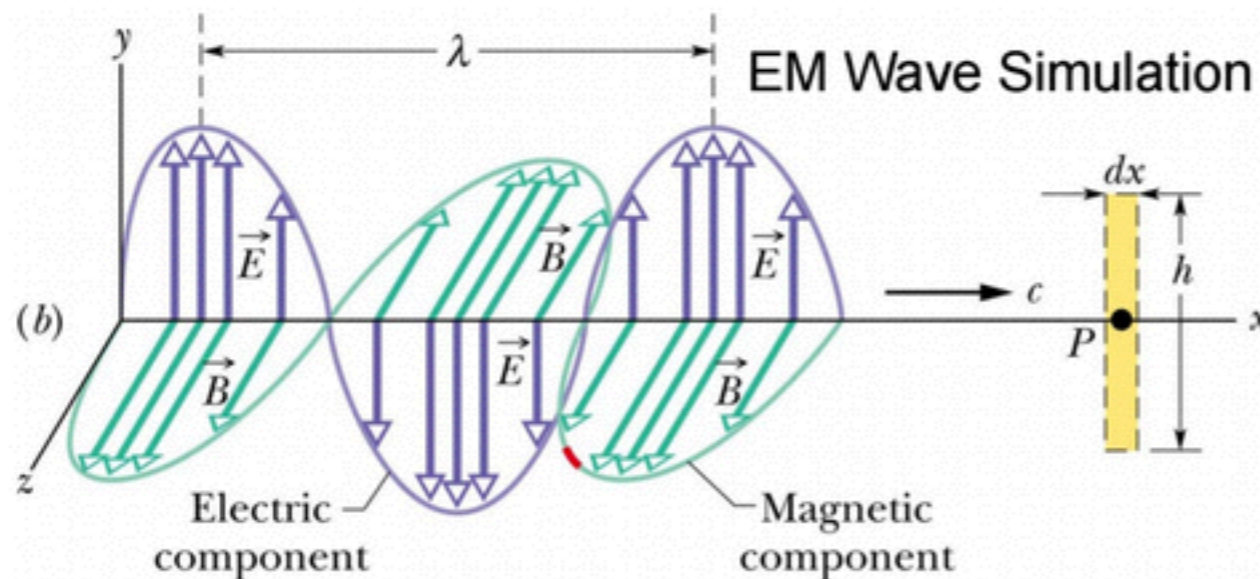
All EM waves travel a c in vacuum

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

Angular frequency: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Vacuum Permittivity: ϵ_0

Vacuum Permeability: μ_0



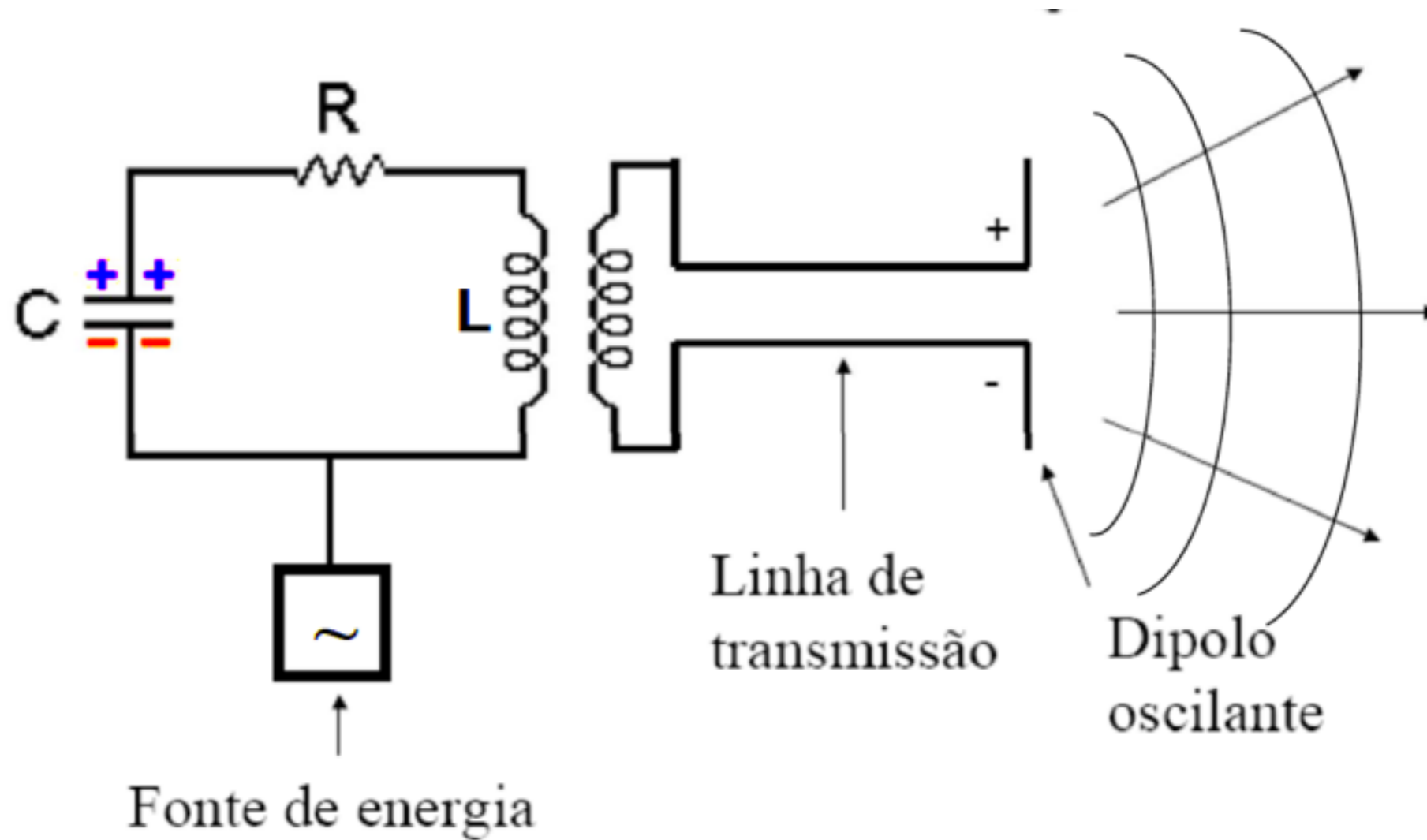
Amplitude Ratio: $\frac{E_m}{B_m} = c$

Magnitude Ratio: $\frac{E}{B} = c$

$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N / A}^2 \approx 1.256 \text{ 637 0614...} \times 10^{-6} \text{ H / m or T}\cdot\text{m / A or Wb / (A}\cdot\text{m) or V}\cdot\text{s / (A}\cdot\text{m)}$

Transmissor de O.E.

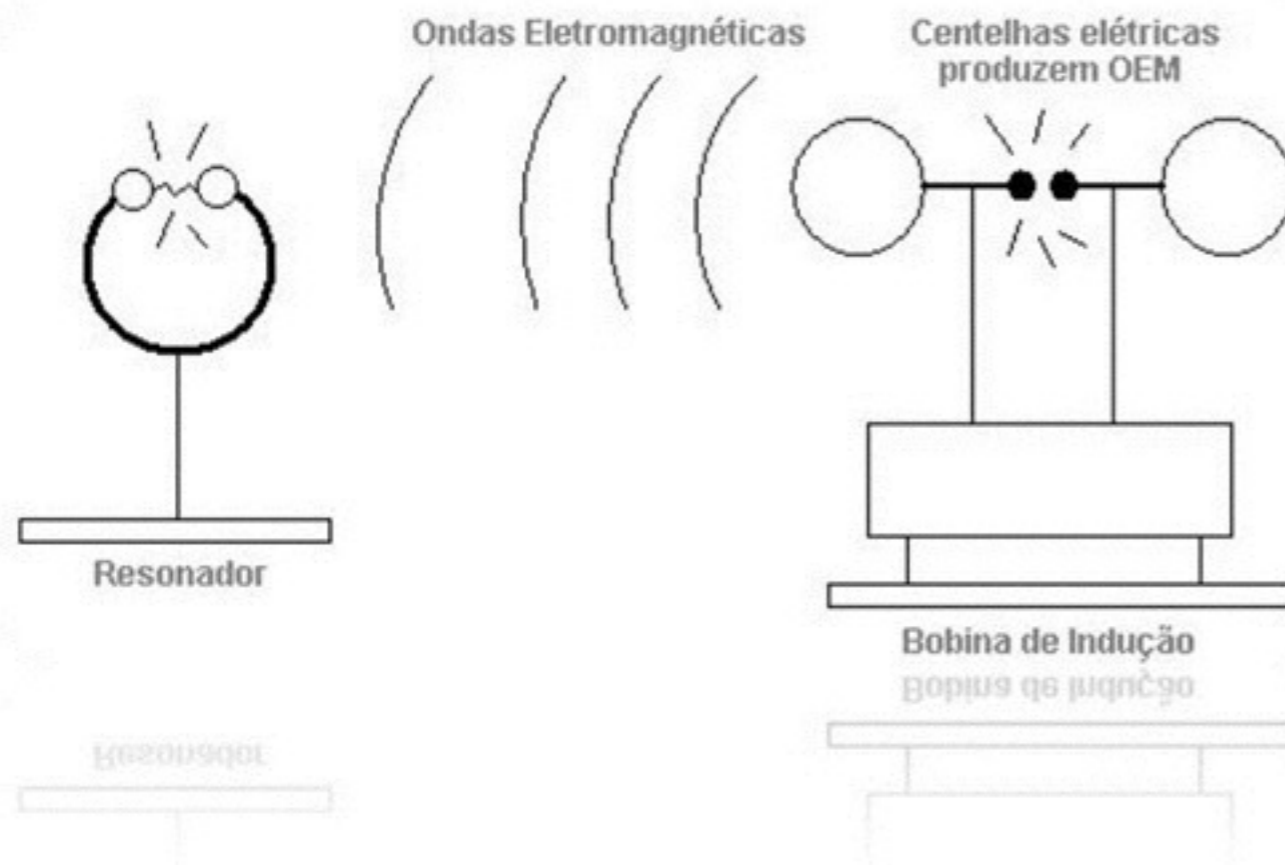


$$\text{Oscilação da corrente} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Experimento de Heinrich Hertz



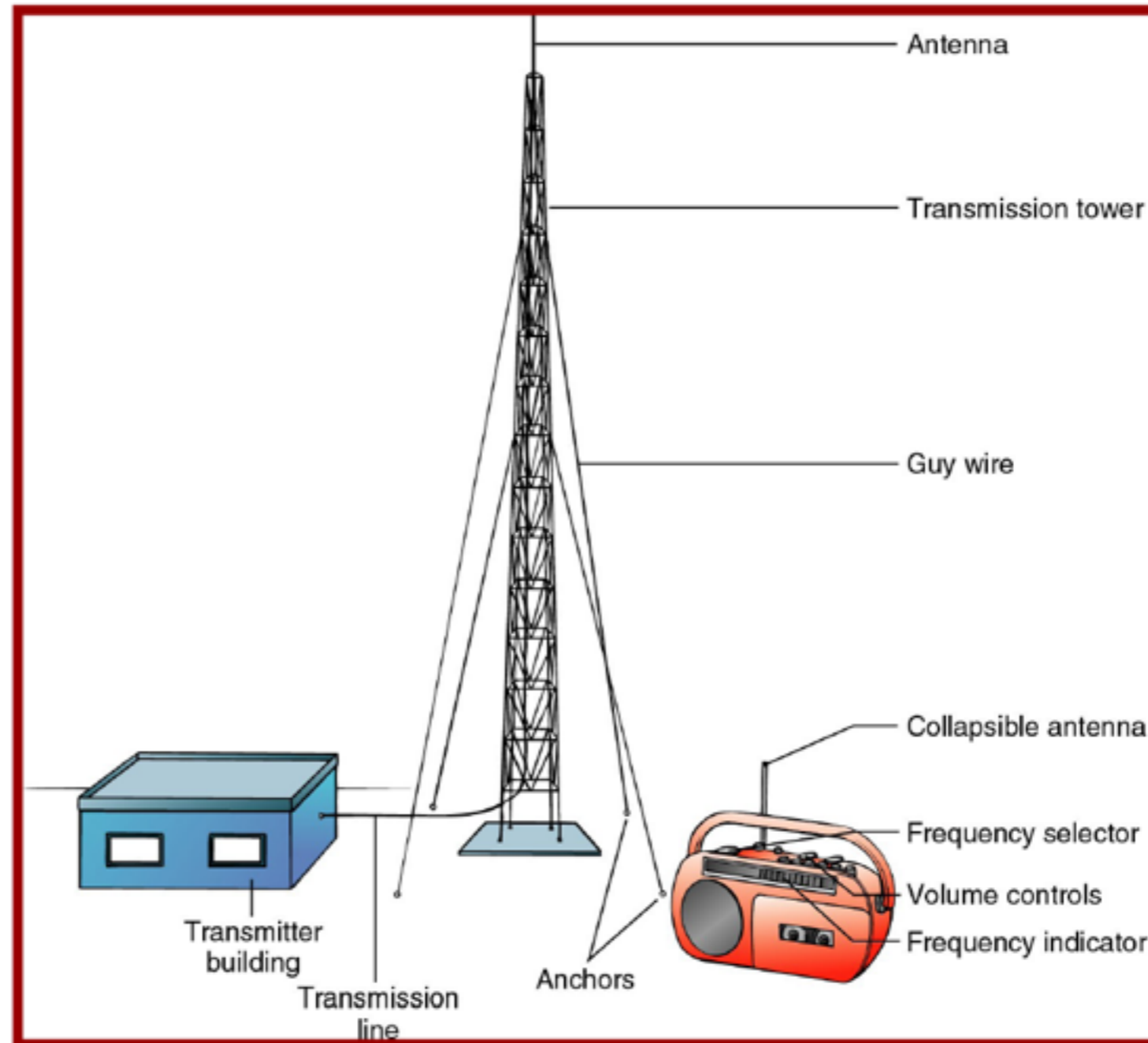
<https://www.youtube.com/watch?v=QZXYFr5YHew>



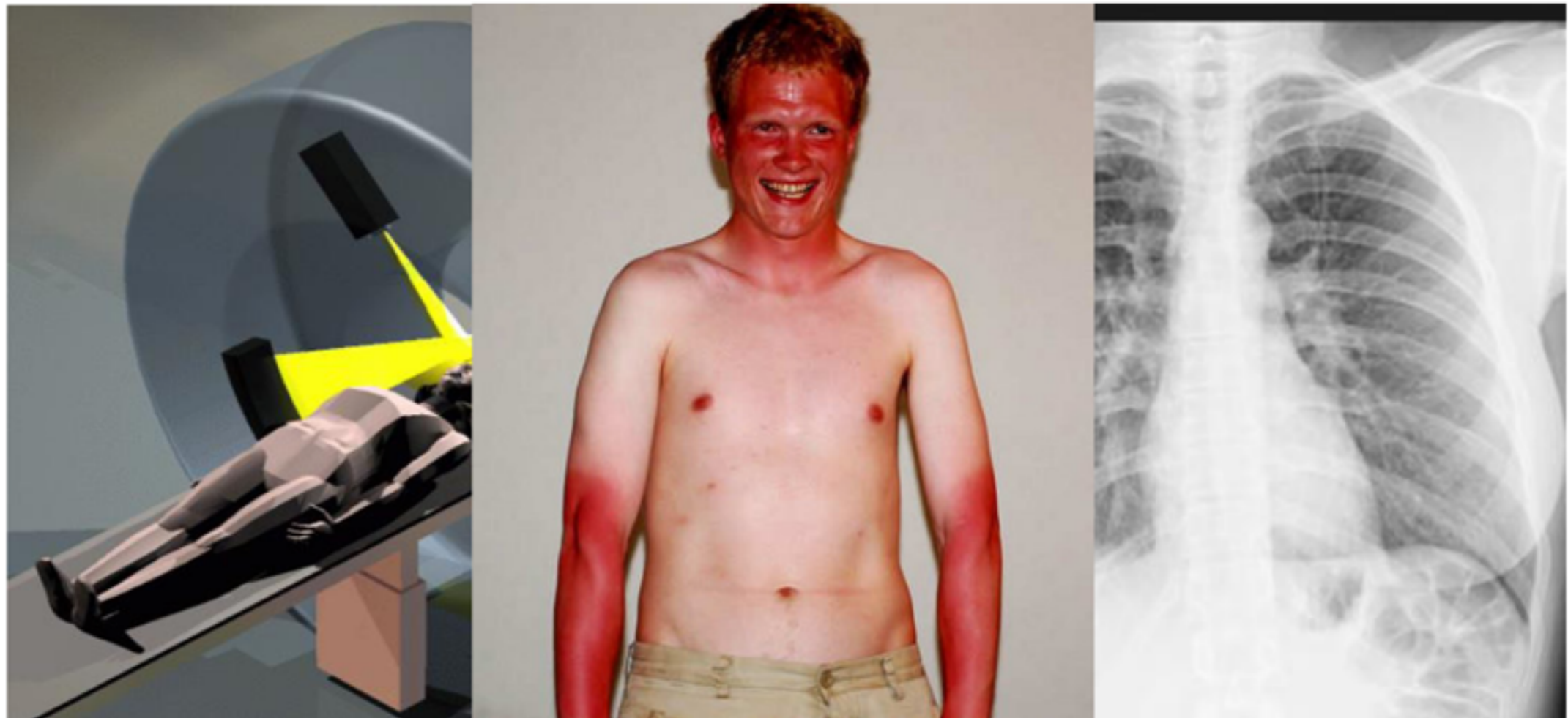
- Heinrich Rudolf Hertz foi um físico alemão. Hertz demonstrou a existência da radiação eletromagnética, criando aparelhos emissores e detectores de ondas de rádio.
- Hertz pôs em evidência em 1888 a existência das ondas eletromagnéticas imaginadas por James Maxwell em 1873

https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz

Ondas Eletromagnéticas



Transporte de Energia



- As ondas eletromagnéticas transportam energia.
- Podem transferir essa energia para os objetos que se encontram em seu caminho.

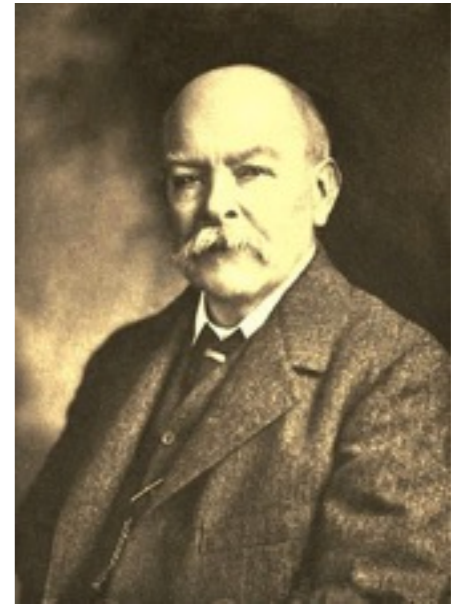
Transporte de Energia



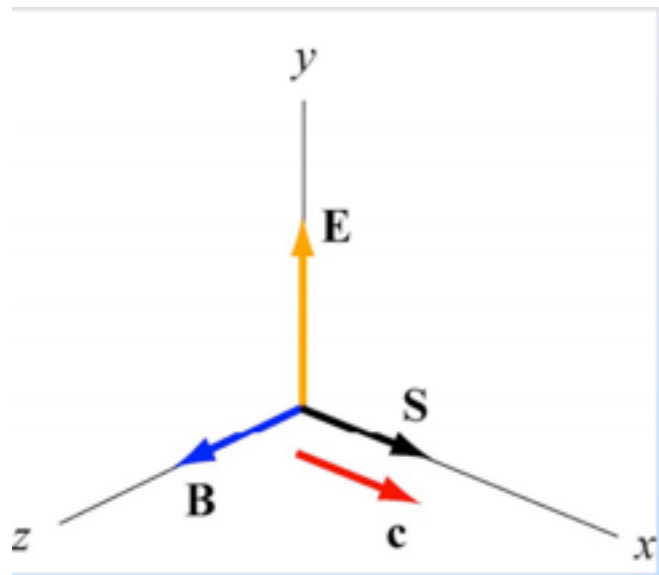
http://hubblesite.org/the_telescope/

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)



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

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

Fluxo instantâneo de energia

no SI:

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

Transporte de Energia

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

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

para:

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

logo,

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

$$\langle \text{sen}^2 x \rangle = \frac{1}{2} \quad \text{sen}^2 x + \text{cos}^2 x = 1 \quad E_m^2 = 2E^2$$

Ondas eletromagnéticas esféricas

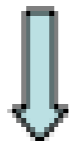
Transporte de energia

Se a potência fornecida pela fonte é P_f temos

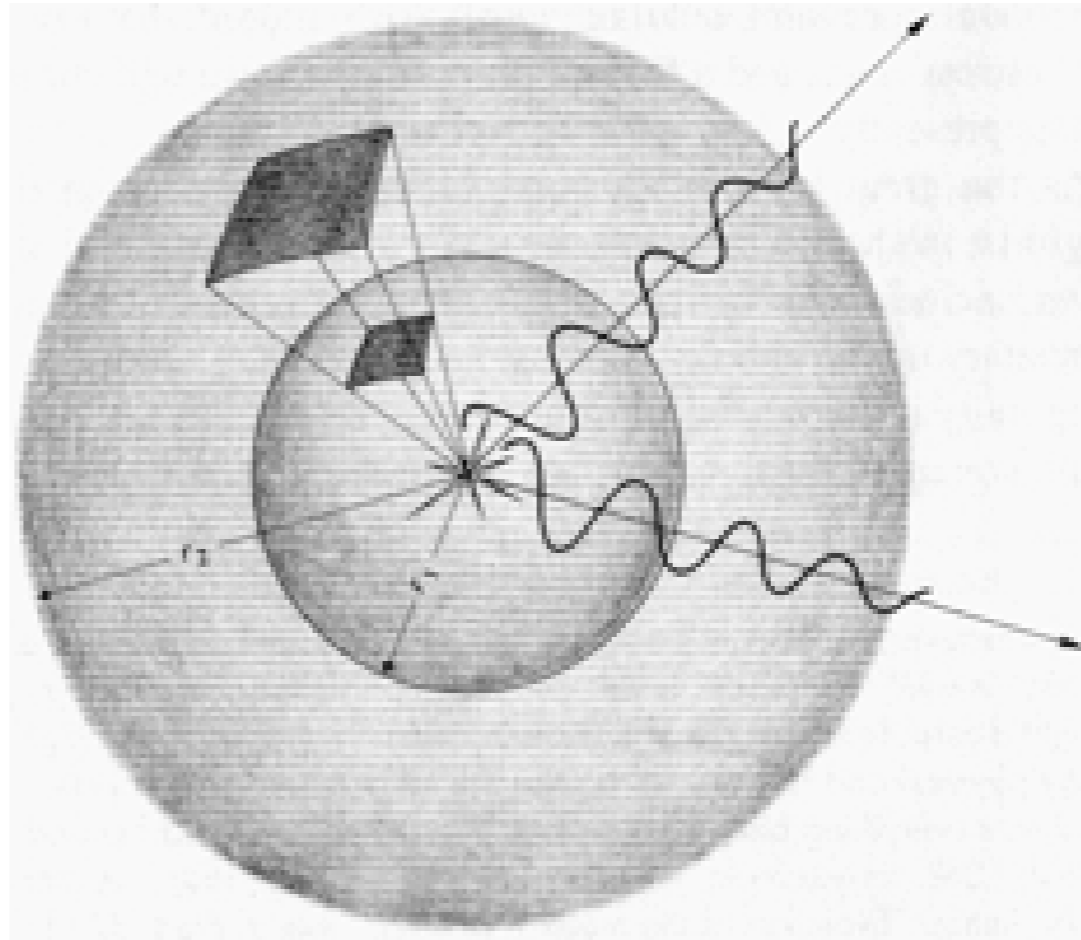
$$P_f = \int_A \vec{S} \cdot \hat{n} \, da$$

Emissão isotrópica

$$\vec{S} \cdot \hat{n} = \vec{S} \cdot \hat{r} = S$$



$$I = S = \frac{P_f}{4\pi R^2}$$



Exercícios

Transporte de Energia

Quando olhamos para a Estrela Polar (Polaris) recebemos a luz de uma estrela que está a 431 anos-luz da Terra e emite energia a uma taxa $2,2 \times 10^3$ vezes maior que o Sol ($P_{\text{sol}} = 3,90 \times 10^{26} \text{ W}$). Desprezando a absorção da luz pela atmosfera terrestre, determine os valores rms do campo elétrico e do campo magnético da luz que chega até nós.

Transporte de Energia

1. O valor rms do campo elétrico está relacionado à intensidade luminosa

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

2. Como a fonte está muito distante e emite ondas com igual intensidade em todas as direções, a intensidade I a uma distância r da fonte está relacionada à potência da fonte.

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2}$$

3. Os módulos do campo elétrico e do campo magnético de uma onda eletromagnética em qualquer instante e em qualquer ponto do espaço estão relacionados pela equação $\mathbf{E}/\mathbf{B}=\mathbf{c}$. Assim, os valores rms desses campos também estão relacionados por $\mathbf{E}_{rms}/\mathbf{B}_{rms}=\mathbf{c}$.

Transporte de Energia

$$1 \text{ ano} - \text{luz} = 9,4605284 \times 10^{15} \text{ metros}$$

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2} = \frac{E_{rms}^2}{c\mu_o}$$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{P_s c \mu_o}{4\pi r^2}}$$

Substituindo os valores conhecidos:

$$E_{rms} = 1,24 \times 10^{-3} \text{ V} / \text{m}$$

$$B_{rms} = \frac{E_{rms}}{c} = \frac{1,24 \times 10^{-3} \text{ V} / \text{m}}{3 \times 10^8 \text{ m} / \text{s}} = 4,1 \times 10^{-12} \text{ T}$$

Resumo da aula

- Equações de Maxwell;
- Propriedades das ondas eletromagnéticas;
- Próxima aula:
 - ✓ Polarização, Pressão de radiação;
 - ✓ ótica física;

Fim