Eletromagnetismo

4300372

F.S. Navarra

navarra@if.usp.br

Guilherme Germano (monitor)

guilherme.germano@usp.br

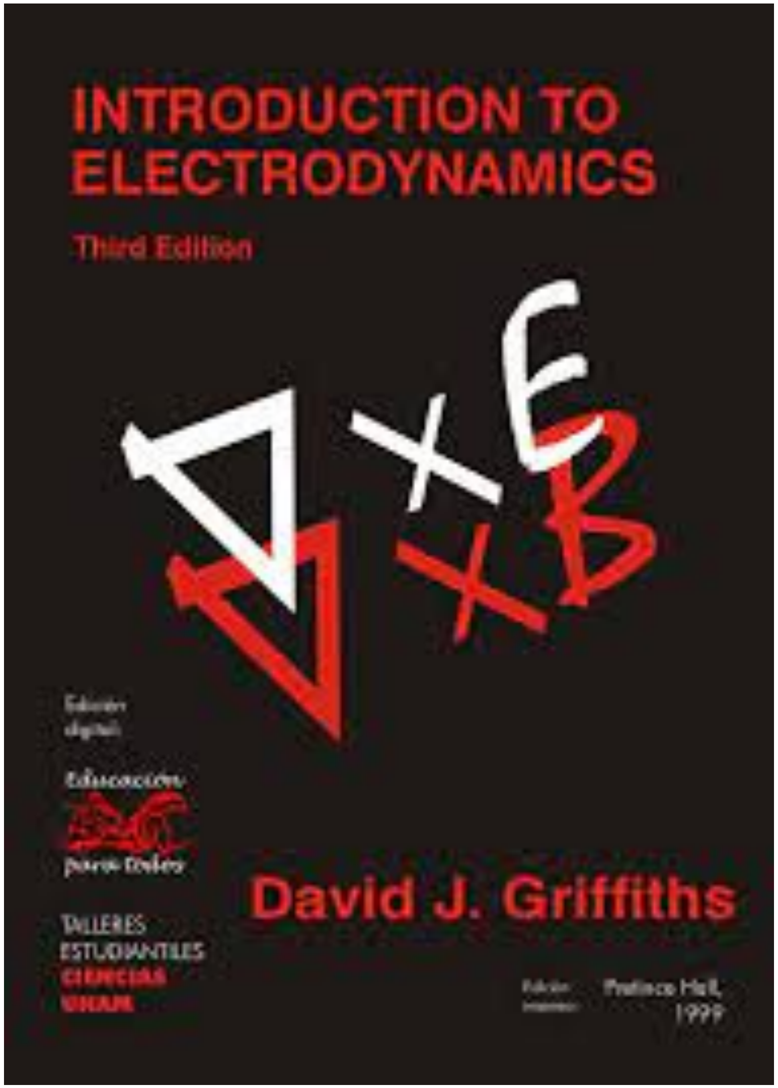
edisciplinas.if.usp.br

Plano do Curso

17/08	14/09	12/10	09/11
20/08	17/09	15/10	12/11
24/08	21/09	19/10	16/11
27/08	24/09	22/10	19/11
31/08	28/09	26/10	23/11
03/09	01/10	29/10	26/11
07/09	05/10	02/11	30/11 ←
10/09	08/10	05/11	03/12 : às 9:00

Substitutiva: 07/12

Bibliografia



Capítulo 2 : eletrostática

Capítulo 5 : magnetostática

Capítulo 7 : eletrodinâmica

Capítulo 8 : leis de conservação

Capítulo 9 : ondas eletromagnéticas

Capítulo 10 : campos e potenciais

Capítulo 11 : radiação

Aula 25

Fim e Resumo

Duas ou três coisas sobre radiação

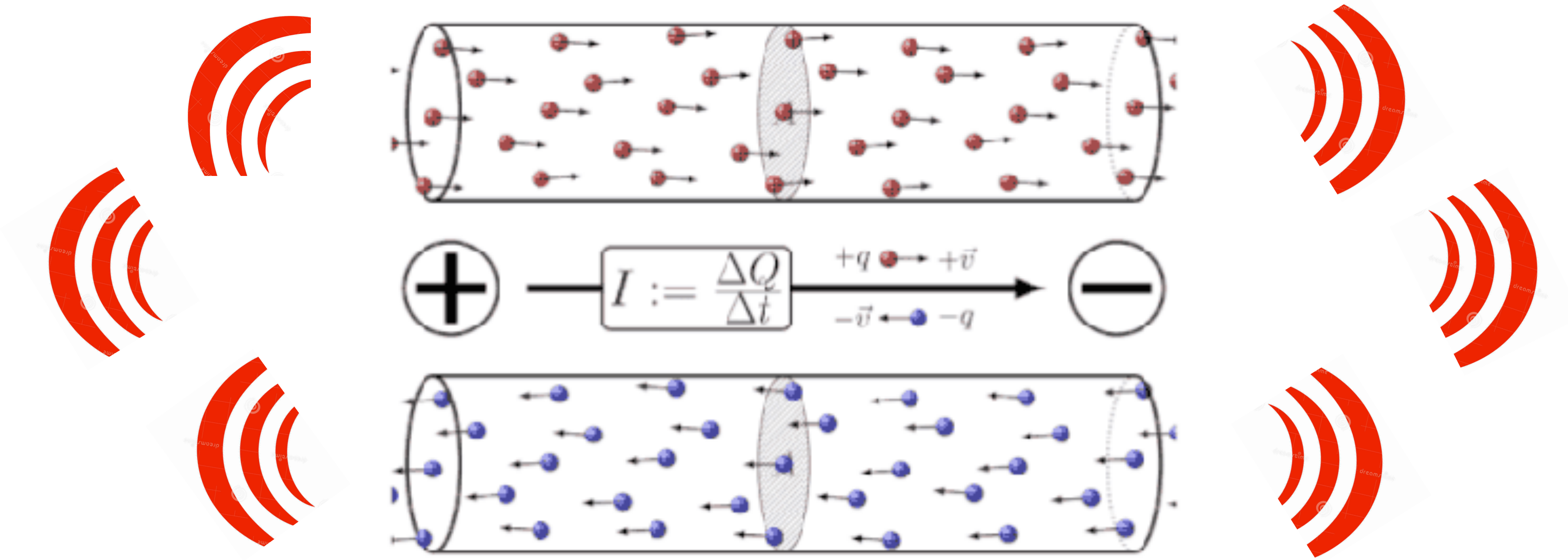
Professor Alvaro Vannucci

Emissão de *Radiação Eletromagnética por cargas aceleradas*:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\left(\vec{E}\times\vec{B}\right) = \frac{1}{\mu_0}E_\theta B_\phi\,\hat{r} = \frac{\mu_0 q^2 a^2}{16\pi^2 c}\frac{\sin^2\theta}{r^2}\,\hat{r}$$

$$\boxed{P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2}{3}\frac{q^2 a^2}{c^3}}$$

"Fórmula de Larmor"



As cargas colidem, se desaceleram e irradiam !

$$R_{rad} = \frac{2}{3}\frac{\pi\,\mu_0\,\ell^2}{c}f^2$$

$\equiv$ ***Resistência de Radiação***

(unidade: Ω)

Resumão

Eletromag is not the easy thing
Is the only baggage you can bring
Is all that you can't leave behind

Bono Vox

Equações de Maxwell

$$\vec{\nabla}\,.\,\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \oint_S \vec{E}\,.\,d\vec{a} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad \oint_C \vec{E}\,.\,d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\,.\,d\vec{a}$$

$$\vec{\nabla}\,.\,\vec{B} = 0 \qquad \oint_S \vec{B}\,.\,d\vec{a} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = \mu_0\,\vec{J} + \mu_0\,\epsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \qquad \oint_C \vec{B}\,.\,d\vec{l} = \mu_0\,I_{int} + \mu_0\,\epsilon_0\int_S \frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\,.\,d\vec{a}$$

O grande projeto da eletrostática e magnetostática:

Conhecendo as densidades ("fontes"), encontrar os campos !

$\rho \rightarrow \text{Coulomb ou Gauss} \rightarrow \vec{E}$ $\qquad$ $\vec{J} \rightarrow \text{Biot-Savart ou Ampère} \rightarrow \vec{B}$

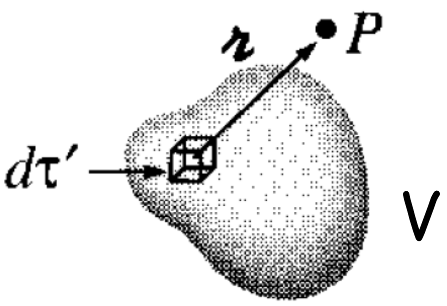
Eletrostática

Interação entre duas partículas:

$$F = \frac{1}{4\pi\,\epsilon_0}\,\frac{q_1\,q_2}{r^2} \qquad E = \frac{1}{4\pi\,\epsilon_0}\,\frac{q_1}{r^2} \qquad F = q_2\,E$$

(Força de Coulomb)

Interação entre várias partículas:

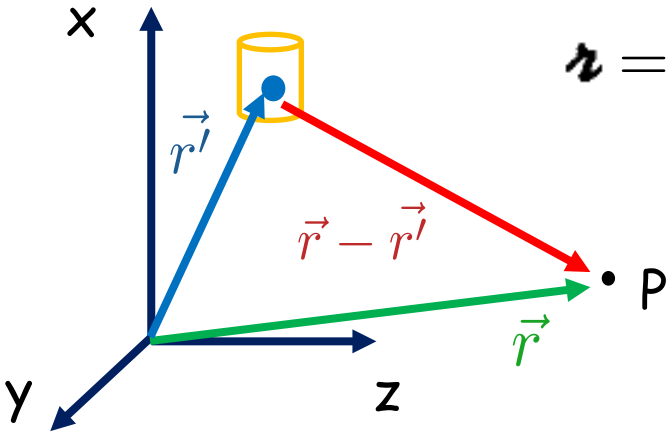


$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int \frac{1}{\mathscr{r}^2}\hat{\boldsymbol{\mathscr{r}}}\,dq \qquad \vec{F} = q\,\vec{E}$$

Potencial eletrostático :

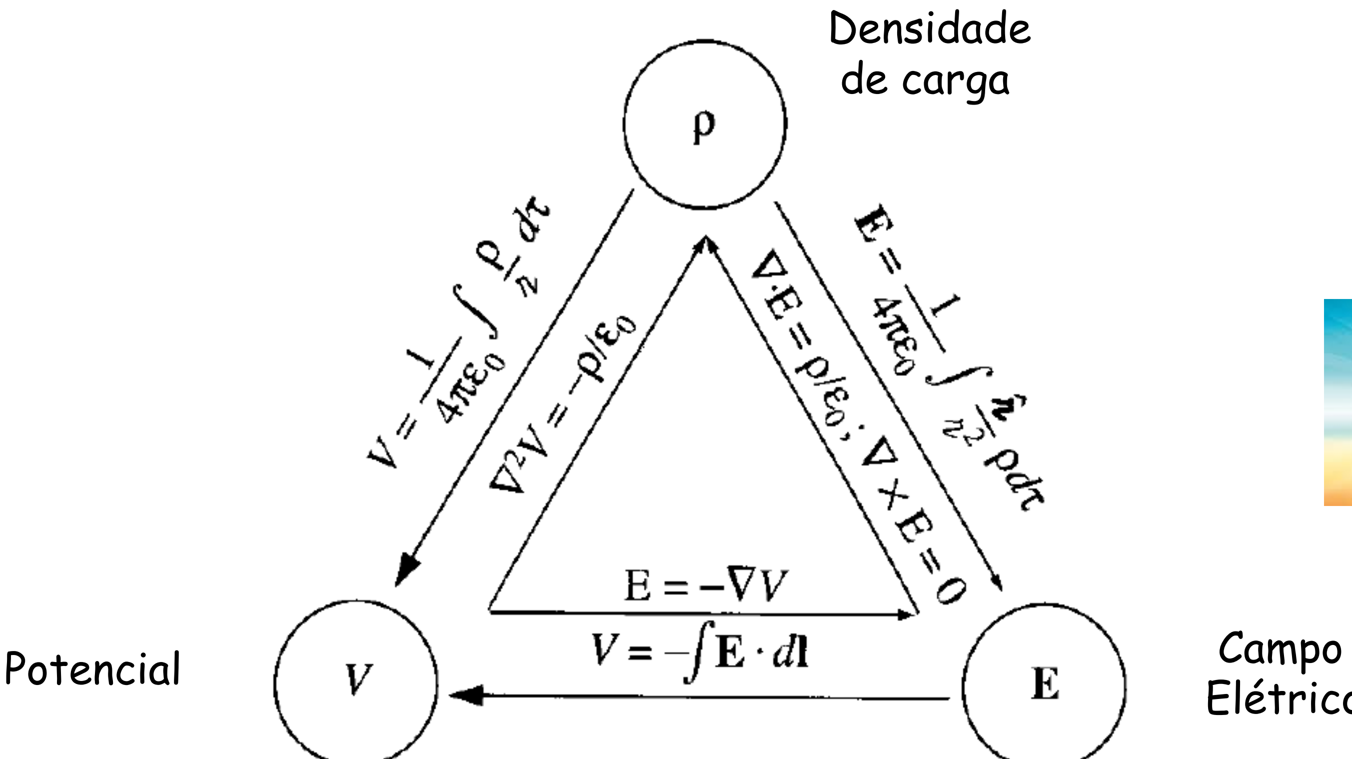
$$V(\mathbf{r}) \equiv -\int_{\mathcal{O}}^{\mathbf{r}} \mathbf{E}\cdot d\mathbf{l} \qquad V(\mathbf{b}) - V(\mathbf{a}) = -\int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{b}} \mathbf{E}\cdot d\mathbf{l}$$

Ponto de referência



$$\boldsymbol{\mathscr{r}} = \vec{r} - \vec{r}'$$

D.J. Griffiths



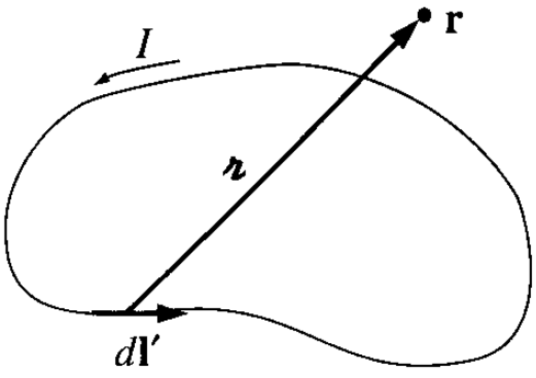
Magnetostática

Força sobre uma carga em movimento num campo B: $\vec{F} = q\,\vec{v} \times \vec{B}$

Força sobre uma corrente num campo magnético : $\vec{F} = I \int d\vec{l} \times \vec{B}$

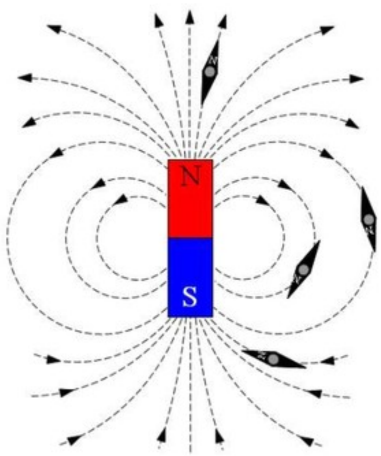
Força entre dois fios percorridos por correntes : $\dfrac{F}{l} = \dfrac{\mu_0\, I_2\, I_1}{2\,\pi\, d}$

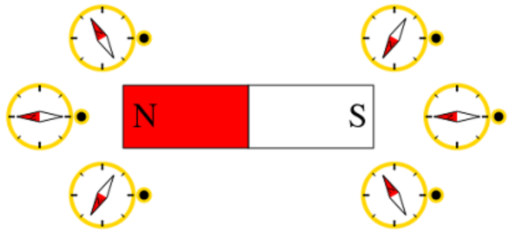
Lei de Biot-Savart: $$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int \frac{\mathbf{I} \times \hat{\boldsymbol{\imath}}}{\imath^2}\, dl' = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\mathbf{l}' \times \hat{\boldsymbol{\imath}}}{\imath^2}.$$

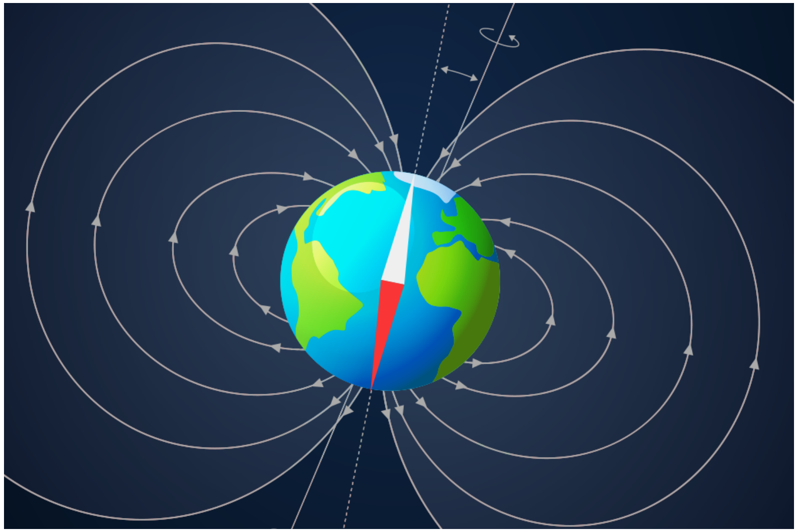


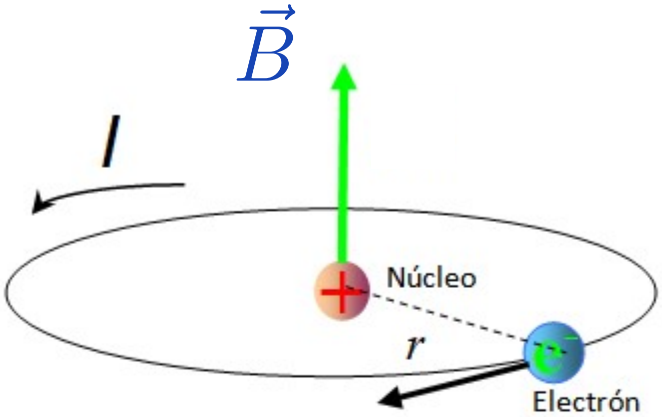
Lei de Ampère: $\oint_C \vec{B}\,.\,d\vec{l} = \mu_0\, I$

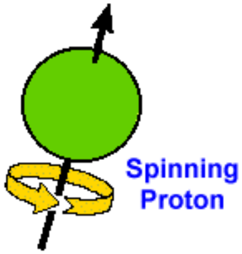
Campo magnético micro e macroscópico:



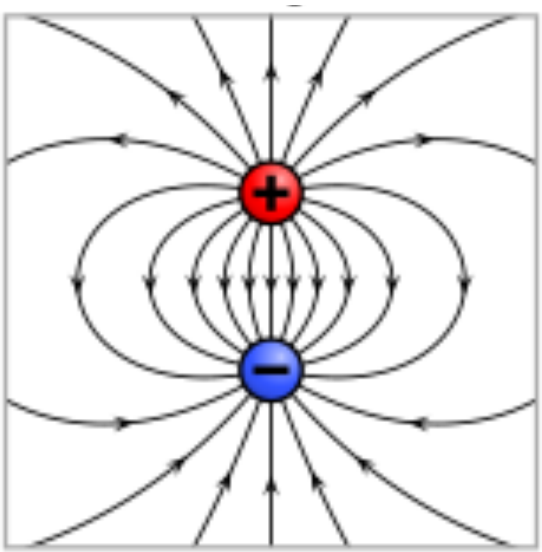




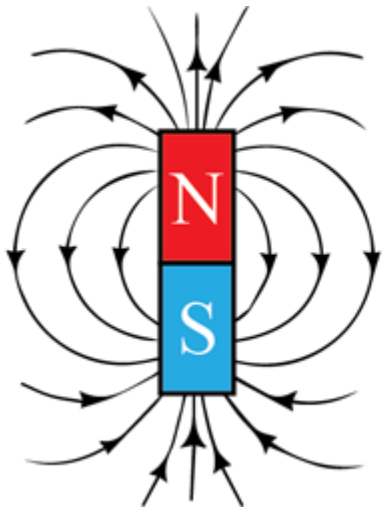




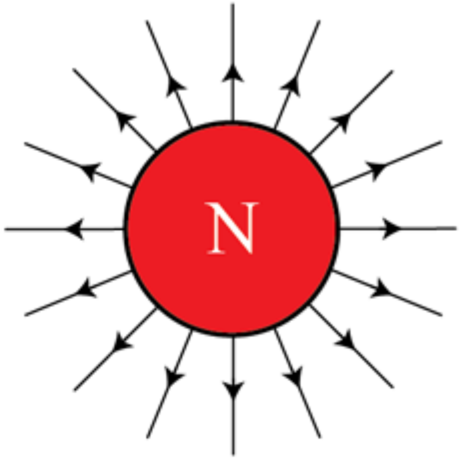
Não existem monopolos magnéticos !



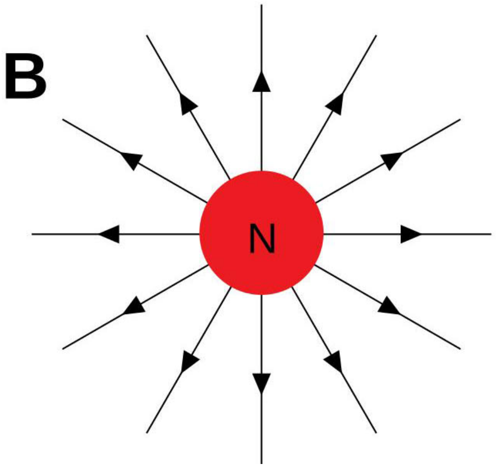
dipolo elétrico

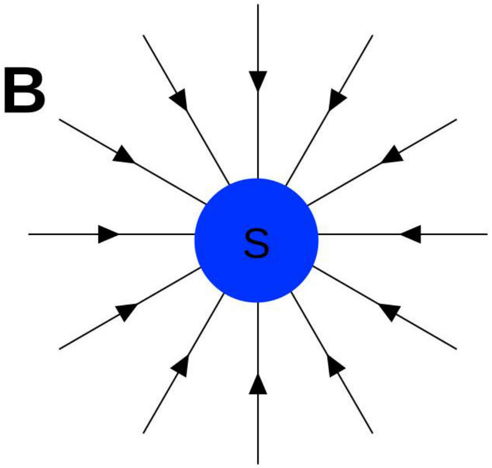


dipolo magnético



monopolo magnético



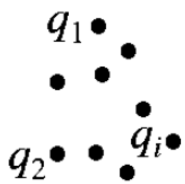


$$\vec{\nabla} \, . \, \vec{B} = 0$$

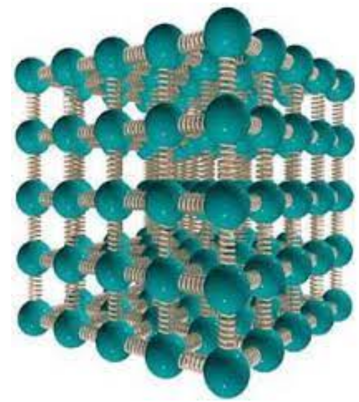
$$\oint_S \vec{B} \, . \, d\vec{a} = 0$$

Energia Elétrica

Trazendo cargas do infinito



$=$

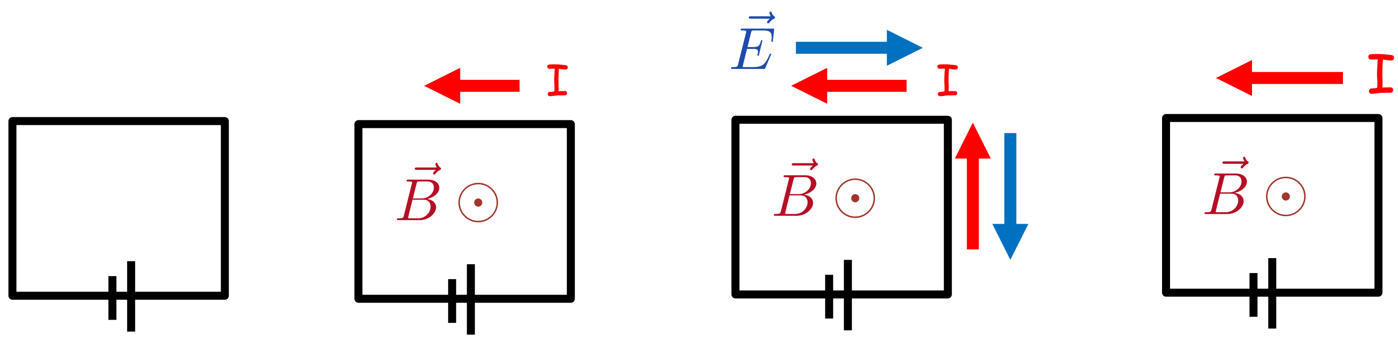


$$W = \frac{1}{2}\int \rho\, V\, d^3r$$

$$W_e = \frac{\epsilon_0}{2}\int E^2\, d^3r$$

Energia Magnética

Iniciando um circuito



$$W = \frac{1}{2}\, L\, I^2$$

$$W_m = \frac{1}{2\,\mu_0}\int B^2\, d^3r$$

Ondas Eletromagnéticas

Equações de Maxwell no vácuo

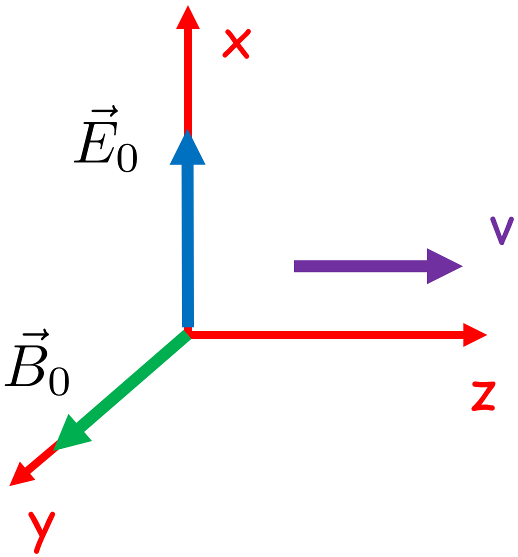
$$\begin{cases} \vec{\nabla} \,.\, \vec{E} = 0 \\ \vec{\nabla} \,.\, \vec{B} = 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0\, \epsilon_0\, \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{cases} \longrightarrow$$

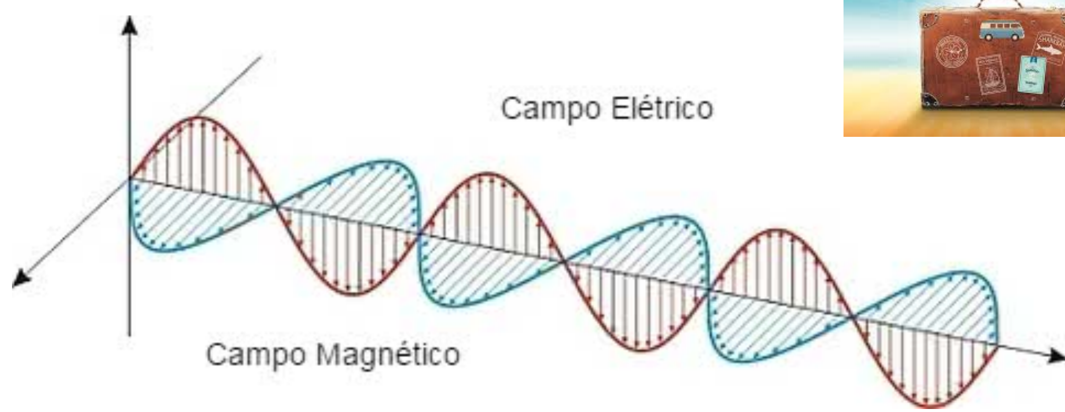
$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2}\, \frac{\partial^2}{\partial t^2}\, \vec{E}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2}\, \frac{\partial^2}{\partial t^2}\, \vec{B}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\, \epsilon_0}}$$

Luz !





$$\vec{E} = \vec{E}_0\, cos\,(kz - \omega t) \qquad \vec{B} = \vec{B}_0\, cos\,(kz - \omega t)$$

Ondas Eletromagnéticas carregam energia e momento

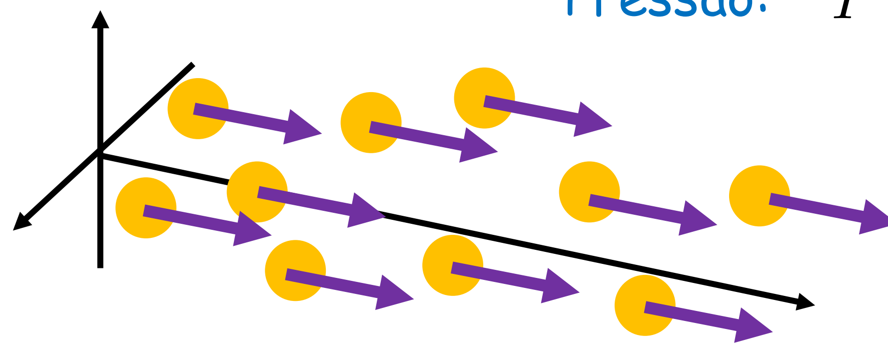
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\,(\vec{E} \times \vec{B})$$

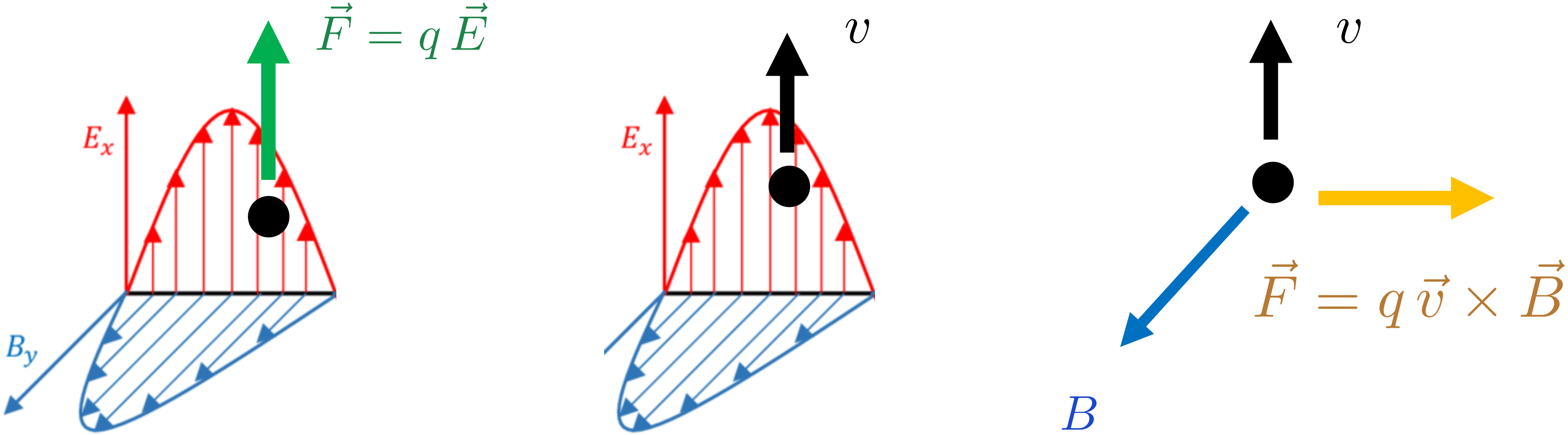
$$\vec{S} = c\,\epsilon_0\,E_0^2\,cos^2\,(kz - \omega t)\,\hat{z}$$

$$I = \langle S \rangle \;\; = \frac{1}{T}\int_0^T dt\, S(t)$$

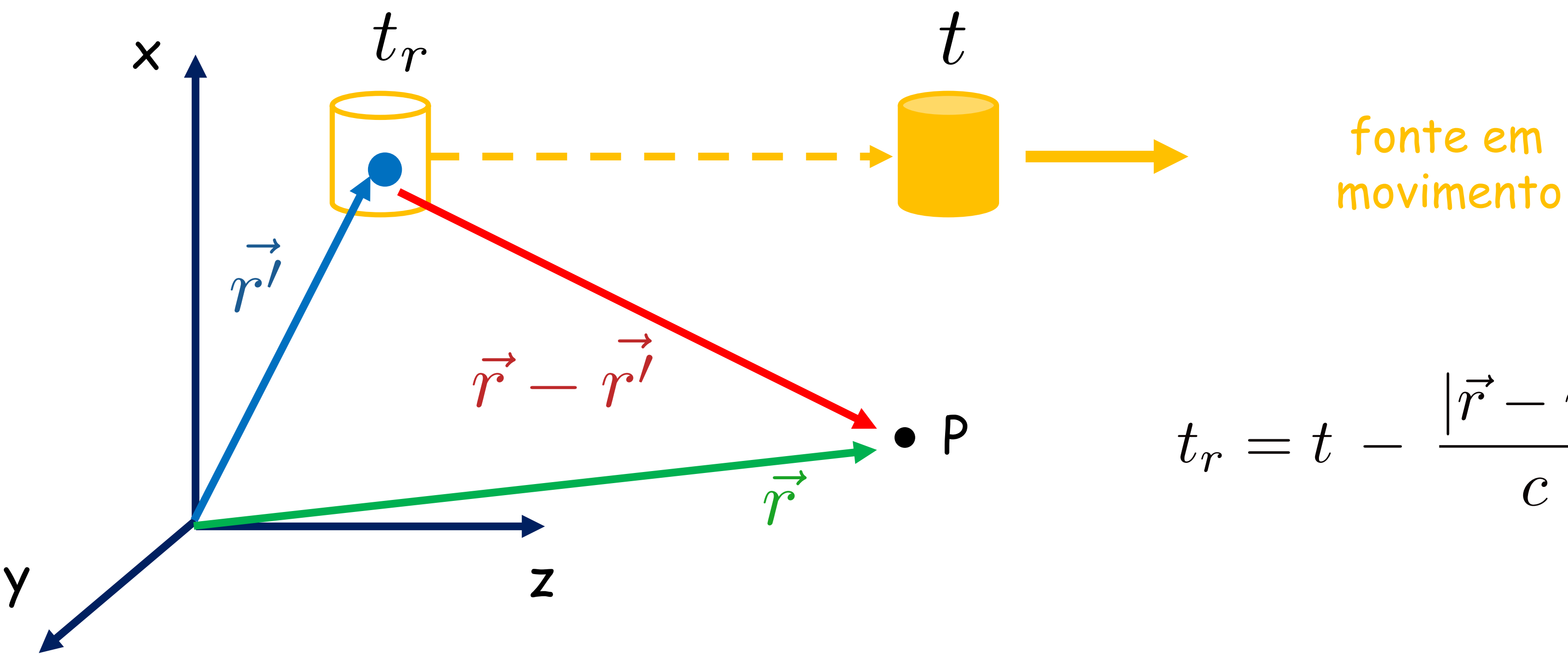
$$= \frac{1}{2}\,c\,\epsilon_0\,E_0^2$$

Pressão: $P = \dfrac{I}{c}$





Potenciais retardados



$$t_r = t - \frac{|\vec{r} - \vec{r'}|}{c}$$

$$V(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\,\pi\,\epsilon_0} \int \frac{\rho(\vec{r'}, t_r)}{|\vec{r} - \vec{r'}|}\, d^3r'$$

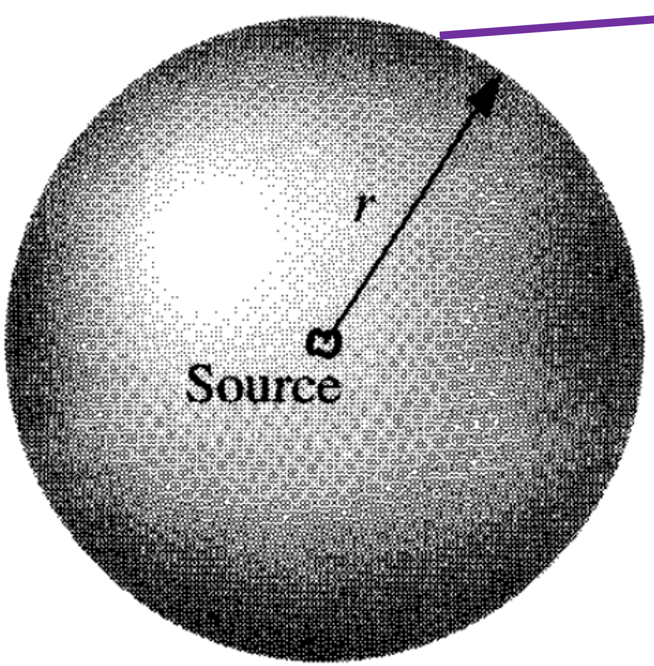
$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\,\pi} \int \frac{\vec{J}(\vec{r'}, t_r)}{|\vec{r} - \vec{r'}|}\, d^3r'$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

Radiação: produção de ondas eletromagnéticas

Radiação: emissão de energia eletromagnética, que sai de uma fonte finita e vai até o infinito.



Potência atravessando esta superfície:

$$P = \oint \vec{S} \, . \, d\vec{a} \;\; = \oint \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B}) \, . \, d\vec{a}$$

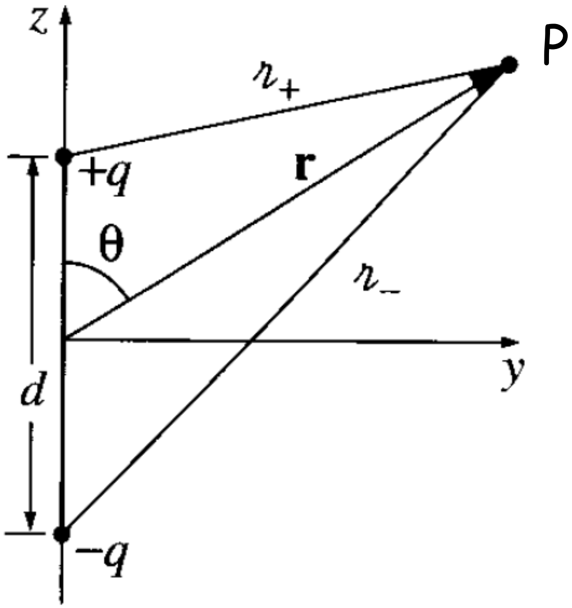
Potência Radiada é o limite de P quando o raio r vai ao infinito

$$P_{rad} = \lim_{r \to \infty} P(r)$$

Radiação: fluxo de energia para longe da fonte !!!

$$\begin{cases} P_{rad} = 0 & \text{Fonte não irradia} \\ P_{rad} \neq 0 & \text{Fonte irradia} \end{cases}$$

Paradigma: dipolo - antena



$$< P >= \frac{\mu_0\, q_0^2\, d^2 \omega^4}{12\, \pi^2\, c}$$

$$< P_{rad} >= \lim_{r \to \infty} < P > \neq 0$$

Sim, este sistema irradia !

Céu azul !

Para onde ir ?

Equações de Maxwell e ondas em meios

Equações de Maxwell e relatividade

Mundo microscópico: física quântica