FI 008 – Eletrodinâmica I

1º Semestre de 2021
16/03/2020
Aula 1

Informações gerais

Site da disciplina:
https://sites.ifi.unicamp.br/emiranda/fi008-eletrodinamica-i-1o-sem-de-2021/

Google classroom:
https://classroom.google.com/u/1/c/MjYzMTE2ODg3MjM1

Livros

Livro adotado: *Classical Electrodynamics*, J. D. Jackson, 3a. edição, Wiley, New York, 1999.

Fontes adicionais:

Modern Electrodynamics, Andrew Zangwill, Cambridge University Press, 2012.

Teoria do Campo, L. Landau e E. Lifshitz, Mir, Moscou, 1980.

Classical electromagnetic radiation, Mark. A. Heald e Jerry. B. Marion, 3a. edição, Saunders College Publishing, 1995.

Classical Electricity and Magnetism, Wolfgang K. H. Panofsky e Melba Phillips, 2a. edição, Addison-Wesley, 1969.

Introduction to Electrodynamics, David J. Griffiths, 3a. edição, Prentice Hall, 1999.

Fundamentos da Teoria Eletromagnética, J. R. Reitz, F. J. Milford e R. W. Christy, 3a. edição, Editora Campus, 1982.

The Feynman Lectures on Physics – vol. II, R. P. Feynman, R. B. Leighton e M. Sands, Addison-Wesley, 1964.

Ementa

Ementa: Os capítulos indicados são do Jackson.

- Revisão de eletrostática e magnetostática.
- Equações de Maxwell. Leis de conservação e simetrias (Cap. 6).
- Ondas eletromagnéticas planas e propagação de ondas (Cap. 7).
- Guias de ondas e cavidades ressonantes (Cap. 8).
- Radiação de sistemas simples. Radiação de dipolo elétrico, dipolo magnético, quadrupolo elétrico (Cap. 9).
- Teoria da relatividade restrita. Transformações de Lorentz. Covariância da eletrodinâmica. Transformações de campos eletromagnéticos (Cap. 11).
- Dinâmica de partículas relativísticas. Lagrangiana e Hamiltoniana para uma partícula carregada relativística em um campo eletromagnético. Lagrangiana para o campo eletromagnético (Cap. 12).
- Radiação de cargas em movimento. Potenciais de Liénard-Wiechert (Cap. 14).

Avaliação

- Duas provas, cada uma com 2 problemas e 2 horas para ser resolvida (P1, P2). A média da P1 e da P2 será 50% da nota final (NF).
  - P1 – 27/04 (Revisão, Caps. 6 e 7).
  - P2 – 24/06 (Caps. 9, 11 e 12).

- Um problema escolhido aleatoriamente de cada lista (L1, L2, ..., L9). A nota média das listas será 50% da NF.
- Conceitos: A (NF > 8.5), B (6.5 < NF < 8.5), C (5 < NF < 6.5), D (NF<5)

CAM SCANNER

Estrutura de aulas

Estrutura de aulas (FI-008; 1o. sem. de 2021)

Revisão (5 aulas) (Notas de aula (parte 1) e (parte 2))

16/03 – Revisão: Equações de Maxwell, força de Lorentz e sistemas de unidades. Densidades de carga e corrente elétricas. Eletrostática. Teorema de Stokes. Potencial elétrico. Equações de Poisson e Laplace. Solução geral da Eq. de Poisson.

18/03 – Revisão: Solução geral da Eq. de Poisson. Função delta de Dirac: propriedades. Método da função de Green. Revisão de funções de Green em uma dimensão (início).

23/03 – Revisão: Revisão de funções de Green em uma dimensão (fim). Problemas de valor de contorno: teoremas de unicidade, condições de contorno de Dirichlet, Neumann e mistas, funções de Green para problemas de valor de contorno. Energia eletrostática. Capacitância.

25/03 – (L1). Revisão: Expansão multipolar: polinômios de Legendre, harmônicos esféricos, momentos de multipolo elétrico. Energia de uma distribuição de cargas num campo elétrico externo. Magnetostática: solução geral, transformação de calibre.

30/03 – Revisão: Magnetostática: Elementos de corrente, forças magnéticas sobre correntes, expansão multipolar, energia de e torque sobre um dipolo magnético num campo magnético externo. Lei de indução de Faraday, lei do fluxo e lei de Lenz. Energia magnética. Indutância.

Estrutura de aulas

Cap. 6 (4 aulas) (Notas de aula)

06/04 – (video da aula) Equações de Maxwell: conservação da carga elétrica, potenciais vetor e escalar, transformações de calibre, calibres de Lorenz e de Coulomb, equação de onda não homogênea e sua solução geral (início).

08/04 – (video da aula) (L2) Equações de Maxwell: equação de onda não homogênea e sua solução geral (fim). Solução geral da eletrodinâmica. Interpretação física das funções de Green retardada e avançada. Leis de conservação de energia (teorema de Poynting) e de momento linear, vetor de Poynting, densidade de energia e de momento linear dos campos, tensor de tensões de Maxwell.

13/04 – (video da aula) Propriedades de transformação das quantidades eletromagnéticas sob rotações, inversão espacial e reversão temporal.

15/04 – (video da aula) Monopolos magnéticos: equações de Maxwell na presença de monopolos magnéticos, dualidade elétrica/magnética, não observabilidade da carga magnética quando todas as partículas têm a mesma razão de carga elétrica e magnética, dinâmica quântica de uma partícula carregada eletricamente na presença de um monopolo magnético, cordas de Dirac, condição de quantização de Dirac.

Revisão

EQS. DE MAXWELL: SISTEMAS DE UNIDADES

DOIS IMPORTANTES: SI , GAUSSIANO

SI:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = \mu_0\vec{J} + \mu_0\epsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$$

GAUSSIANO:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{J} + \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$$

$$c = 299\,792\,458\ \frac{m}{s}$$

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{4\pi\epsilon_0} &= 10^{-7}(299\,792\,458)^2\ \frac{F}{m}\\ \frac{\mu_0}{4\pi} &= 10^{-7}\ \frac{H}{m}\end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{1}{\epsilon_0\mu_0} = (299\,792\,458)^2\ \frac{m^2}{s^2}$$

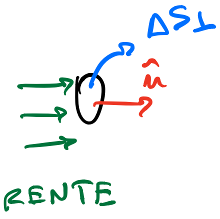
$$\frac{1}{\mu_0\epsilon_0} = c^2$$

FONTES DOS CAMPOS: ρ E $\vec{J}$

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V} \Rightarrow [\rho] = \frac{Q}{L^3}$$

DENSIDADE VOLUMÉTRICA DE CARGA

$\vec{J}$:

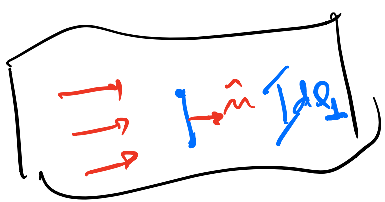


$$\vec{J} = \left[\lim_{\Delta S_\perp \to 0} \frac{I(\Delta S_\perp)}{\Delta S_\perp}\right]\hat{n}$$

$$[\vec{J}] = \frac{[I]}{L^2} = \frac{Q}{TL^2}$$

DENS. VOLUM. DE CORRENTE

$\vec{K}$: DENS. SUPERFICIAL DE CORRENTE



$$\vec{K} = \left[\lim_{\Delta \ell_\perp \to 0} \frac{I(\Delta \ell_\perp)}{\Delta \ell_\perp}\right]\hat{n}$$

$$[\vec{K}] = \frac{Q}{LT}$$

COMO OS CAMPOS $\vec{E}$ e $\vec{B}$ ATUAM NAS CARGAS:

FORÇA DE LORENTZ.

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$$

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}\right) \quad \text{(GAUSSIANA)}$$

ELETROSTÁTICA:

$$\begin{cases} \vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \dfrac{\rho}{\epsilon_0} \\ \vec{\nabla}\times\vec{E} = 0 \Longleftrightarrow \vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi \end{cases}$$

Φ : POTENCIAL ELÉTRICO

CAMPOS:

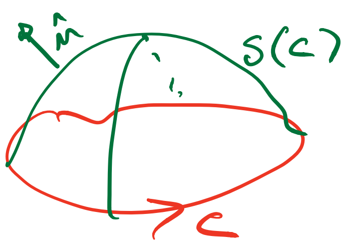
$$\vec{E}(x,y,z,t) \equiv \vec{E}(\vec{x},t)$$
$$\vec{B}(x,y,z,t) \equiv \vec{B}(\vec{x},t)$$
$$\rho(x,y,z,t) \equiv \rho(\vec{x},t)$$
$$\vec{J}(x,y,z,t) \equiv \vec{J}(\vec{x},t)$$

$$\vec{x} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$$

QUE $\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi \Longrightarrow \vec{\nabla}\times\vec{E} = 0$ JÁ QUE $\vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\Phi) = 0$

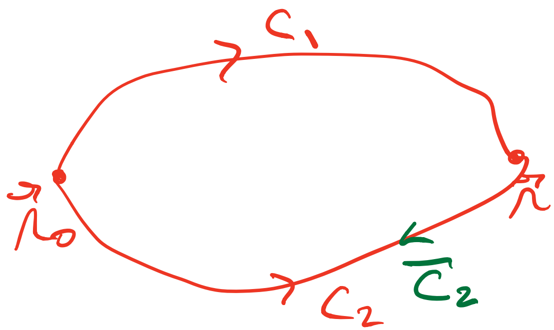
E A VOLTA? $\vec{\nabla}\times\vec{E} = 0 \Longrightarrow \vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi$

TEOREMA DE STOKES:



$$\oint_C \vec{A}\cdot d\vec{\ell} = \int_{S(C)} (\vec{\nabla}\times\vec{A})\cdot\hat{n}\, ds$$

STOKES: $\displaystyle\oint_C \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = \int_{S(C)} (\vec{\nabla}\times\vec{E})\cdot\hat{n}\, dS = 0$



$$I_1 = \int_{C_1} \vec{E}\cdot d\vec{\ell}$$

$$I_2 = \int_{C_2} \vec{E}\cdot d\vec{\ell}$$

$$I_1 - I_2 = \int_{C_1} \vec{E}\cdot d\vec{\ell} - \underbrace{\int_{C_2} \vec{E}\cdot d\vec{\ell}}_{-\int_{\bar{C}_2} \vec{E}\cdot d\vec{\ell}} = \int_{C_1} \vec{E}\cdot d\vec{\ell} + \int_{\bar{C}_2} \vec{E}\cdot d\vec{\ell} =$$

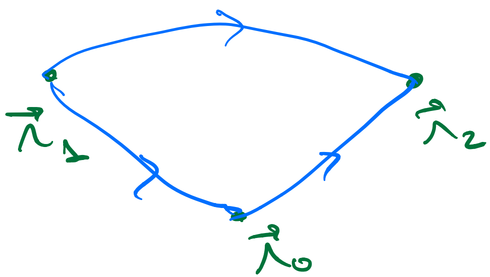
$$= \int_{C_1 \cup \bar{C}_2} \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = 0 \Rightarrow \boxed{I_1 = I_2} \qquad \int_{C_1} \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = \int_{C_2} \vec{E}\cdot d\vec{\ell}$$

$C_1 \cup \bar{C}_2$ = CURVA FECHADA $\Rightarrow \displaystyle\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E}\cdot d\vec{\ell}$ INDEPENDE DO CAMINHO

$$\Rightarrow \Phi(\vec{r}, \vec{r}_0) \equiv -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\Phi(\vec{r}_2, \vec{r}_0) - \Phi(\vec{r}_1, \vec{r}_0) = -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}_1} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$= -\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_0} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$



$$\Delta\Phi = \Phi(\vec{r}_2, \vec{r}_0) - \Phi(\vec{r}_1, \vec{r}_0)$$

$$= -\int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

DIFERENÇAS DE POTENCIAL NÃO DEPENDEM DO PONTO DE REF. $\vec{r}_0$

$$\left.\begin{aligned}\vec{r}_2 &= \vec{r} + d\vec{r}\\ \vec{r}_1 &= \vec{r}\end{aligned}\right\}\quad \Delta\Phi(\vec{r}_2,\vec{r}_1) = \Phi(\vec{r}_2,\vec{r}_0) - \Phi(\vec{r}_1,\vec{r}_0)$$

$$= \Phi(\vec{r}+d\vec{r},\vec{r}_0) - \Phi(\vec{r},\vec{r}_0)$$

SÉRIE DE TAYLOR:

$$\Phi(\vec{r}+d\vec{r},\vec{r}_0) - \Phi(\vec{r},\vec{r}_0) = \left[\vec{\nabla}\Phi\right]\Big|_{\vec{r}} \cdot d\vec{r}$$

$$= \frac{\partial\Phi}{\partial x}\Big|_{\vec{r}} \cdot dx + \frac{\partial\Phi}{\partial y}\Big|_{\vec{r}} dy + \frac{\partial\Phi}{\partial z}\Big|_{\vec{r}} dz$$

$$\Delta\Phi = -\int_{\vec{r}}^{\vec{r}+d\vec{r}} \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = -\vec{E}(\vec{r})\cdot d\vec{r}$$

$$\Rightarrow (\vec{\nabla}\Phi)\cdot d\vec{r} = -\vec{E}(\vec{r})\cdot d\vec{r} \quad \forall\, d\vec{r}$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{E}(\vec{r}) = -\vec{\nabla}\Phi} \Rightarrow \vec{\nabla}\times\vec{E} = 0 \Rightarrow \vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi$$

LEVANDO $\vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi$ NA LEI DE GAUSS:

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \Longrightarrow -\vec{\nabla}\cdot(\vec{\nabla}\Phi) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{\nabla} \equiv \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$ LAPLACIANO

$$\Longrightarrow \boxed{\nabla^2\Phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}}$$ EQUAÇÃO DE POISSON

SOLUÇÃO GERAL DA EQUAÇÃO DE POISSON:

DADO $\rho(\vec{x})$ EM TODO O ESPAÇO:

$$\Phi(\vec{x}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int_{\text{TODO O ESPAÇO}} \frac{\rho(\vec{x}')\,d^3x'}{|\vec{x}-\vec{x}'|}$$

d^3x : ELEMENTO DE VOLUME