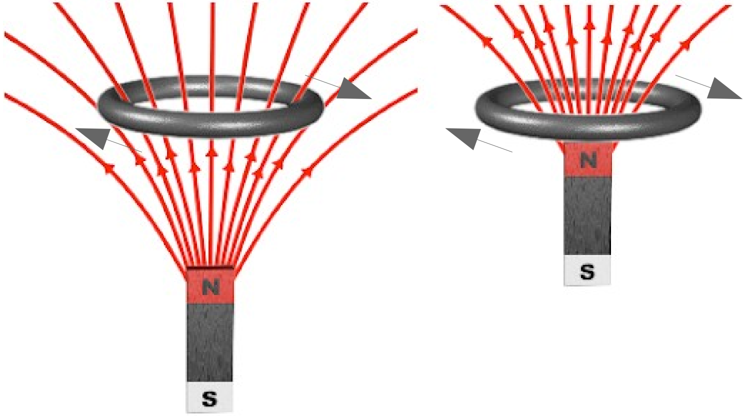
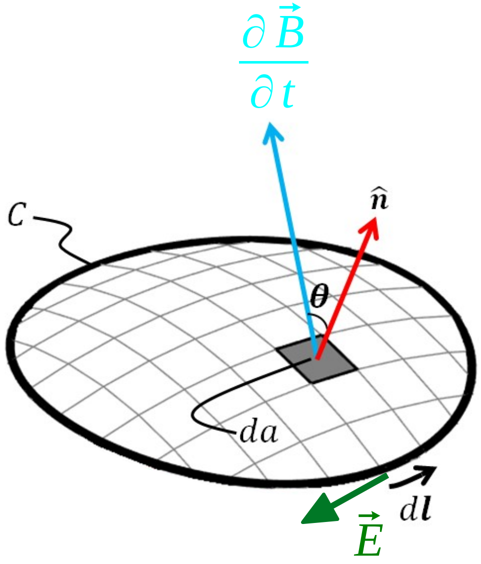
Física III 2022 (IQ) – Aula 23

Objetivos de aprendizagem

- Enunciar a lei de Faraday
- Reconhecer a analogia formal entre as leis de Faraday e de Ampére
- Calcular o campo elétrico gerado por um solenoide cuja corrente depende do tempo
- Calcular a corrente induzida em uma espira imersa em um campo magnético variável no tempo.
- Enunciar a Lei de Faraday na forma diferencial.
- Reconhecer quando o campo elétrico é não-conservativo
- Definir força eletromotriz.
- Definir tensão.

A Lei de Faraday



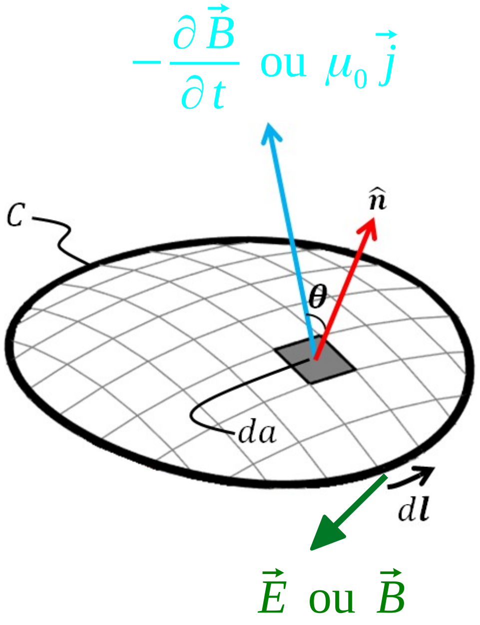


$$\oint_C \vec{E} \, . \, d\vec{l} = -\Phi_{(\partial \vec{B}/\partial t)} = -\int_{S(C)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} . \hat{n} \, dS$$

Analogia Faraday/Ampére

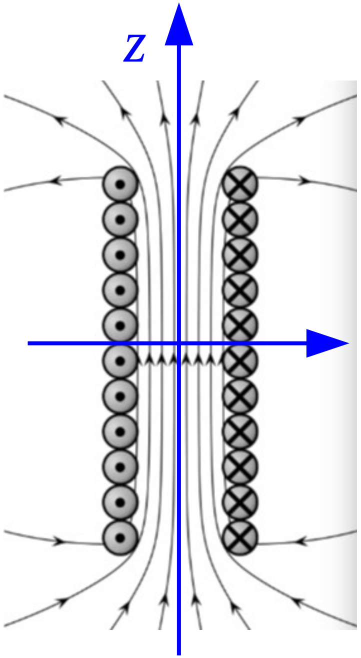
$$\oint_{C} \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 \int_{S(C)} \vec{j}.\hat{n}\, dS$$

$$\oint_{C} \vec{E}.d\vec{l} = -\int_{S(C)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.\hat{n}\, dS$$



Exemplo 1

- Solenoide cilíndrico longo com corrente que cresce linearmente no tempo (raio R, espiras/comprimento = N): $I(t)=\alpha t$



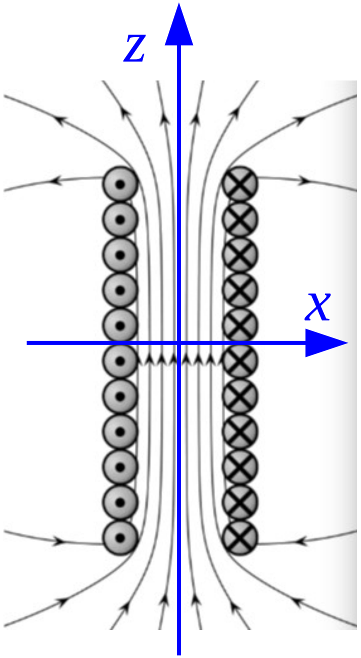
$$\vec{B}(t)=\mu_0 N I(t)\hat{k} \quad (r<R)$$

$$\vec{B}(t)=0 \quad (r>R)$$

$$\vec{E}=?$$

Exemplo 1

- Solenoide cilíndrico longo com corrente que cresce linearmente no tempo (raio R, espiras/comprimento = N): $I(t)=\alpha t$

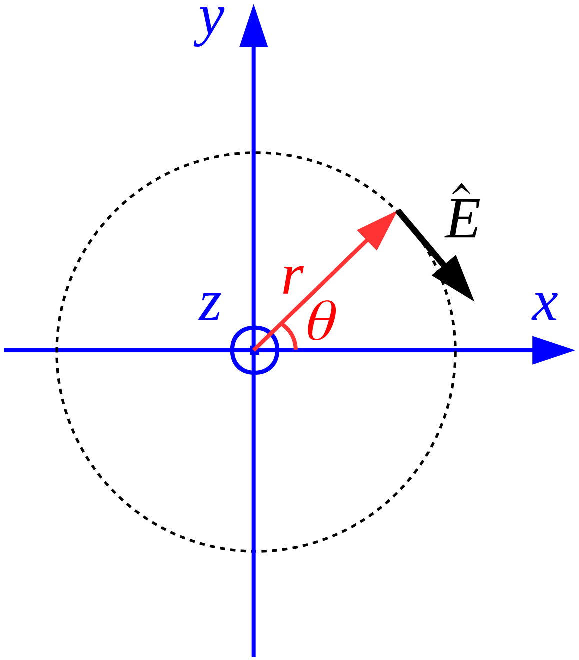


$$\vec{B}(t)=\mu_0 N I(t)\hat{k} \quad (r<R)$$

$$\vec{B}(t)=0 \quad (r>R)$$

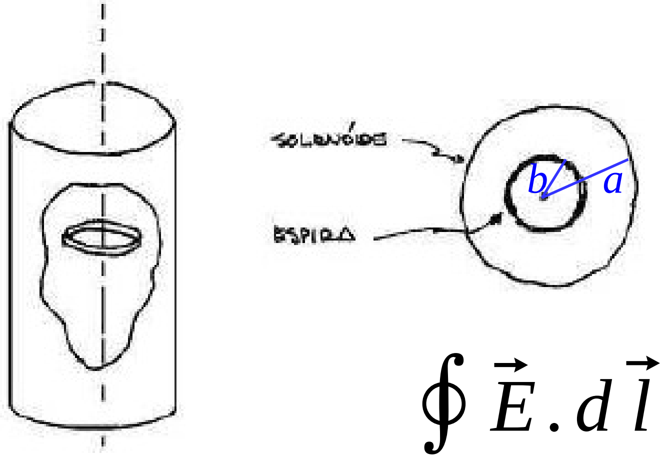
$$r>R: \vec{E}=-\frac{\mu_0 N \alpha R^2}{2r}\hat{\theta}$$

$$r<R: \vec{E}=-\frac{\mu_0 N \alpha r}{2}\hat{\theta}$$



Corrente induzida em espira dentro do solenoide

exemplo 2: cálculo da corrente elétrica induzida sobre a espira metálica circular, de raio $b(b < a)$ e resistência R, cujo centro coincide com o solenóide do problema anterior, como mostra a figura 34-3.



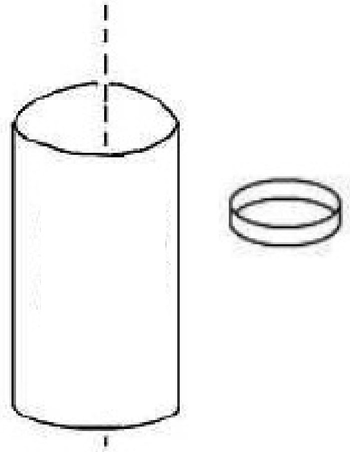
$$E = \mu_0 N \alpha b/2$$

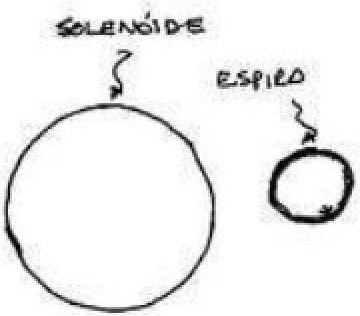
resistência

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{\pi}{2} N \alpha b^2 = R I$$

Figura 34.3: solenóide cilíndrico de raio a e espira circular de raio $b < a$.

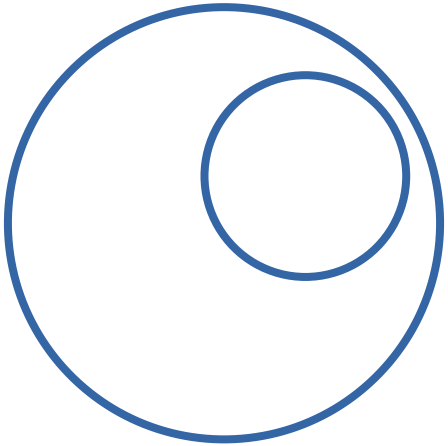
Corrente induzida em espira **fora** do solenoide





Qual é a corrente induzida?
A) zero porque não tem campo elétrico
B) zero porque não tem campo magnético
C) diferente de zero porque tem campo elétrico

Corrente induzida em espira dentro mas “fora de centro”



(discutir
melhor em
outra aula)

• **exemplo 3:** Numa região cilíndrica de raio a (interior de um solenoide) existe um campo magnético uniforme dado por $\mathbf{B} = B_o(sen\omega t)\mathbf{k}$.

a) Calcule o campo elétrico induzido $\mathbf{E}$, em todo o espaço.

a amplitude de

b) Faça um gráfico representando E em função de r, a distância ao eixo da região cilíndrica.

c) Desenhe as linhas de campo elétrico e magnético nos instantes $t_0 = 0$, $t_1 = \pi/4\omega$, $t_2 = \pi/2\omega$, $t_3 = 3\pi/4\omega$, $t_4 = \pi/\omega$, $t_5 = 3\pi/2\omega$.

d) Calcule a corrente elétrica induzida numa espira circular, de raio $b < a$ e resistência R, quando o seu centro está no eixo da região cilíndrica.

e) O que muda na sua resposta quando a espira está no interior da região cilíndrica mas deslocada do centro? E se estiver fora da região cilíndrica?

Lei de Faraday na forma diferencial

L.F. Integral

$$\oint_C \vec{E}\,.\,d\vec{l} = -\int_{S(C)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\,.\,\hat{n}\,dS$$

Teorema de Stokes

$$\oint_C \vec{E}\,.\,d\vec{l} = \int_{S(C)} (\vec{\nabla}\times\vec{E})\,.\,\hat{n}\,dS$$

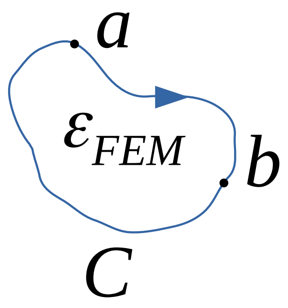
L.F. Diferencial

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

Campo elétrico não conservativo

$$\vec{\nabla}\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\neq 0$$

$$\oint_C \vec{E}.d\vec{l}=\int_{S(C)}(\vec{\nabla}\times\vec{E}).\hat{n}\,dS=\varepsilon_{FEM}\neq 0$$



Força eletromotriz (caminho fechado).
Tensão (caminho aberto), ex.: $V_{ab}(C)$

O **potencial** e, portanto, a “diferença de potencial” V_b-V_a não é definida:

$$\nexists V(\vec{r})|\vec{E}(\vec{r})=-\vec{\nabla}V$$

Em geral

$$V_{ab}(C)\neq V_b-V_a$$

$$V_{ab}(C)\neq V_{ba}(C)$$

Obs.: Caso haja movimento do circuito (condutor)

$$\varepsilon_{FEM} = \oint_C \frac{1}{q} \vec{F} . d\vec{l} = \oint_C (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) . d\vec{l}$$