Equações de Maxwell: Magnetismo da Matéria pág. 334 1

CÁP. 32

Lei de Gauss para campos Magnéticos

slide 3

dipolo magnético => Ex. imã

A estrutura magnética mais simples que existe é o dipolo magnético. Não existem (até onde sabemos) monopolos magnéticos.

$$\boxed{\Phi_B = \oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0}$$

lei de Gauss para campos magnéticos

$$\boxed{\Phi_E = \oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{q_{env}}{\epsilon_0}}$$

Superfície fechada

lei de Gauss para campos elétricos

Campos Magnéticos Induzidos

slide 4

Como vimos, toda variação de fluxo magnético induz um campo elétrico pela lei de Indução de Faraday.

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

lei de Indução de Faraday

Como na física procuramos por simetrias. A pergunta é:

A indução pode ocorrer em sentido oposto, ou seja, um fluxo elétrico variável pode induzir um campo magnético? SIM

$$\boxed{\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}$$

lei de Indução de Maxwell

Eq. de Maxwell

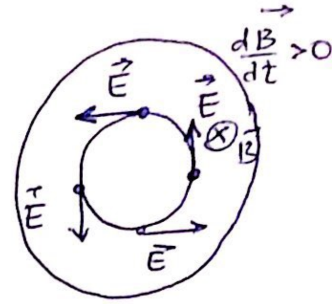
Antes de começar a falar das eq. de Maxwell escrever uma lista provisória:

1) $\oint \vec{E}\cdot\hat{n}\,dA = \frac{q_{env}}{\epsilon_0}$ (Gauss)

2) $\oint \vec{B}\cdot\hat{n}\,dA = 0$ (Gauss/Mag.)

3) $\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$ (Faraday) $\rightarrow \frac{d\vec{B}}{dt} \xrightarrow[\text{gera}]{} \vec{E}$

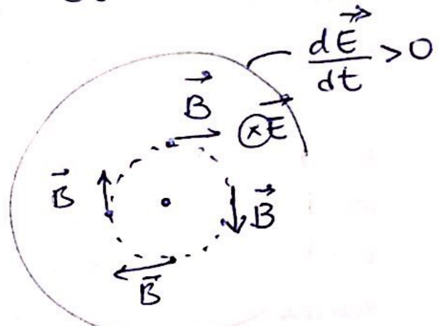
4) $\int \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{env}$ (Ampère)



logo deve-se perguntar

variando ao tempo $\vec{E}$ → deve aparecer $\vec{B}$

$\frac{d\vec{E}}{dt} \rightarrow \vec{B}$ SIM



(*) O campo $\vec{B}$ induzido tem sentido contrário ao $\vec{E}$ induzido

Procurando analogias:

Pela (3) $\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt}$

↓ ?

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = +\frac{d\phi_E}{dt}$$

fazendo um balanço dimensional o lado direito ≠ lado esquerdo → adicionar $\mu_0\epsilon_0$

Slide 19

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \rightarrow \frac{d\vec{E}}{dt} \rightarrow \vec{B}$$

+ uma corrente tb produz $\vec{B}$ logo

$$\boxed{\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + \mu_0 i_{env}}$$

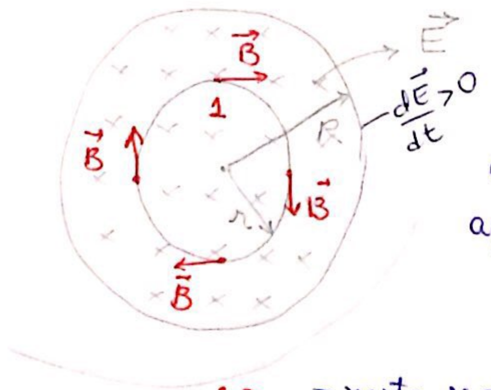
eq. corrigida devido à Maxwell

Ampère-Maxwell

Carga de um Capacitor

slide 6

Variação do campo $\vec{E}$ entre as placas cria um campo magnético $\vec{B}$

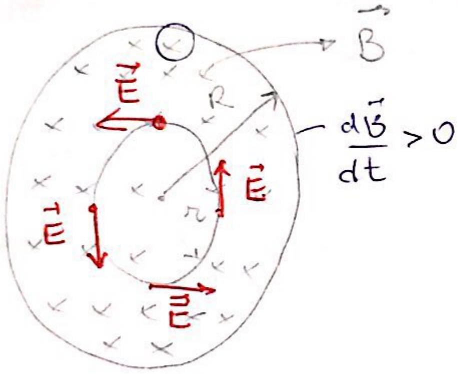


$\vec{B}$ induzido ⇒ tem o mesmo módulo em todos os ptos da circunferência e, apresenta simetria circular

2 → nesta região, vemos que um $\vec{B}$ induzido aparece ao longo da curva

Qdo $\vec{E}$ pára de variar ⇒ $\vec{B}_{ind} = 0$

O campo elétrico induzido $\vec{E}$ e o campo magnético induzido $\vec{B}$ têm sinais opostos quando são produzidos em situações análogas.



A lei de Ampère - Maxwell

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{env}$$

ampère — curva fechada

i_{env} → corrente envolvida pela curva

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

↳ indução de Maxwell

$$\boxed{\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{env} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}$$

Equação ou lei de Ampère - Maxwell

Corrente de deslocamento pág. 339

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{env} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

slide 20

Comparando os 2 termos, vemos que o produto $\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$ tem dimensão de corrente elétrica.

$$\boxed{i_d = \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}}$$

corrente de deslocamento

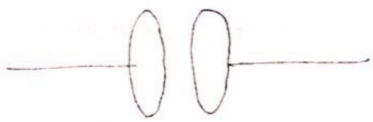
Assim:

$$\boxed{\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{env} + \mu_0 i_{d,env}}$$

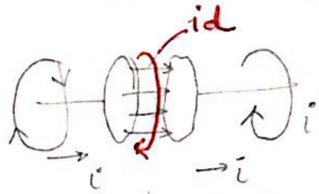
lei de Ampère - Maxwell

$i_{d,env}$ → é a corrente de deslocamento envolvida pela amperiana

Vamos analisar um capacitor de placas circulares que está sendo carregado



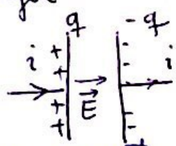
antes da carga, $\nexists \vec{B}$



durante a carga, é criado um $\vec{B}$ tanto pela corrente real i como pela corrente fictícia i_d.

$|E| = \sigma/\epsilon_0 = \frac{q}{\epsilon_0 A}$ ↑

perfil:



durante a carga a regra da mão direita pode ser aplicada tanto à corrente real i, como a i_d

i → a corrente real i que está carregando as placas faz variar o $\vec{E}$ entre as placas. * a carga está crescendo e é proporcional ao campo $\vec{E}$

i_d → a corrente de deslocamento fictícia i_d entre as placas está relacionada à variação de $\vec{E}$.

$$q = \epsilon_0 A E$$

A → área entre as placas

$$\frac{dq}{dt} = i = \epsilon_0 A \frac{dE(t)}{dt} \quad (1) \qquad E=E(t)$$

Slide 21 Slide 19

Supondo $\vec{E}$ entre as placas é uniforme (desprezando os efeitos de borda)

Fluxo do $\vec{E} \Rightarrow \phi_E = E.A \quad (2)$

Usando a expressão: $i_d = \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (3)$

Subs. (2) em (3)

$$\boxed{i_d = \epsilon_0 \frac{d(\overset{\phi_E}{E.A})}{dt} = \epsilon_0 A \frac{dE}{dt}}$$

Mesmo valor: $\boxed{i = i_d}$ corrente de deslocamento em um capacitor

A aparição de uma corrente fictícia i_d entre as placas do capacitor facilita a determinação do campo magnético induzido. A corrente de deslocamento i_d = corrente de indução

Determinação do campo Magnético Induzido Slide 75

$i_d \rightarrow$ para determinar o $|\vec{B}_{ind}|$ por um capacitor de placas circulares de raio R que está sendo carregado.

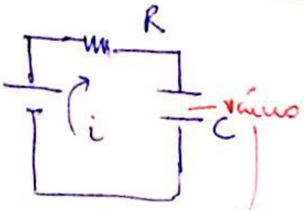
$$\boxed{B = \left(\frac{\mu_0 i_d}{2\pi R^2}\right) r}$$ dentro de um capacitor circular

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 i_d}{2\pi r}}$$ campo $\vec{B}$ fora de um capacitor circular

E-II/21

4a

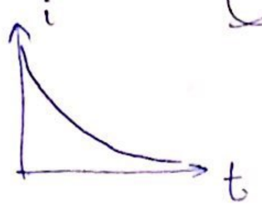
Circuito RC



$i(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC}$

Slide 21

O que é id?



Como a corrente passa no capacitor

id = i → logo garante o fechamento do circuito

↓ fictícia

garante a continuidade

↓

comprova a lei dos Nós

A corrente de condução = corrente de deslocamento no capacitor ⇒ mesmo sem movimento real de corrente

↓

tem uma corrente fictícia

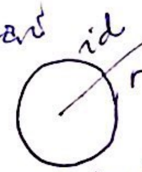
? → id → tem implicação física real? SIM

Se olharmos p/o $\vec{B}$ no interior das placas

Slide 22

as linhas tem o mesmo sentido da corrente de condução

$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_d$



cilindro c/ corrente de deslocamento

Determinar o campo $\vec{B}$ dentro e fora das placas:

$r < R \qquad B(r) = \frac{\mu_0 i_d}{2\pi R^2} r$

$r > R \qquad B(r) = \frac{\mu_0 i_d}{2\pi r}$

Campo magnético de um fio cilíndrico c/ corrente!

A corrente de deslocamento NÃO é um artifício → tem ∃ real!

Prova é o cálculo do campo magnético que aparece entre as placas do capacitor

$$\underbrace{\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}}_{\text{tem dimensão de corrente}} = i_{\text{deslocamento}}$$

Pela lei de Ampère - Maxwell:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{env} + \mu_0 \underbrace{\epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}}_{i_{\text{deslocamento}}}$$

placas do capacitor

logo Eq. Maxwell - Ampère

$$\boxed{\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{env} + \mu_0 i_d}$$

Scanned with CamScanner