

Terceira Parte: Os números dos capítulos, das seções e dos exercícios são os da 12ª edição do Física III de Sears e Zemansky. Os números entre parênteses se referem aos capítulos, às seções e aos exercícios correspondentes da 10ª edição.

Capítulo 28(29): Fontes de Campo Magnético (Materiais Magnéticos)

- Número de aulas: **1 aula** de 19/5 a 23/5
- Seção do livro texto: *28.8 Materiais Magnéticos (29.9).*
- Exercícios sugeridos: 28.47(29.31), 28.48(29.32), 28.49(29.33).

Capítulo 29(30): Indução Eletromagnética

- Número de aulas: **3 aulas** de 25/5 a 1/6 (MEC e QUI) e de 24/5 a 31/5 (CIV)
- Seções do livro texto: *29.1 Experiências de Indução; 29.2 Lei de Faraday; 29.3 Lei de Lenz; 29.4 Força Eletromotriz Produzida pelo Movimento; 29.5 Campos Elétricos Induzidos; 29.6 Correntes de Foucault (30.1 a 30.7).*
- Exercícios sugeridos: 29.2(30.2), 29.3(30.3), 29.7(30.36), 29.16(30.13), 29.25(30.18), 29.31(30.24), 29.61(30.39), 29.64(30.42), 29.65(30.43), 29.77(30.50).

Capítulo 30(31): Indutância + Seção 26.4(27.5) Circuito RC

- Número de aulas: **4 aulas** de 6/6 a 15/6 (MEC e QUI) e de 2/6 a 14/6 (CIV)
- Seções do livro texto: *30.1 Indutância Mútua; 30.2 Indutores e Auto-Indutância; 30.3 Energia do Campo Magnético; 30.4 O Circuito R-L; 30.5 O Circuito L-C; 30.6 O Circuito R-L-C em Série; + 26.4 O Circuito R-C (31.1 a 31.7 + 27.5).*
- Exercícios sugeridos: 30.1(31.1), 30.3(31.5), 30.9(31.7), 30.16(31.14), 30.23(31.25), 30.32(31.26), 30.45(31.39), 30.47(31.45), 30.48(31.46), 30.55(31.53), 30.78(31.62).

P3 em 16 de junho às 13:10

SUB em 30 de junho às 13:10

REC em 28 de julho às 13:10

Materiais magnéticos (§29.9)

176

O objetivo desta aula é discutir de onde vem o campo magnético em materiais magnéticos.

Revisão:

Uma espira de área A percorrida por uma corrente I tem, associado, um momento magnético dipolar $\vec{\mu} = I\vec{A}$.



se ela for colocada num campo externo \vec{B}_0 , $\vec{\mu}$ tende a se alinhar com \vec{B}_0 .



Os materiais magnéticos tem momento magn. $\vec{\mu}$, isto explica o movimento de uma bússola no campo magnético da terra; atração-repulsão entre ímãs, etc.

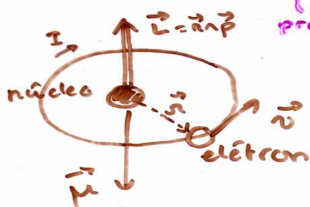


No que segue, estudamos a origem de $\vec{\mu}$ nos materiais.

Modelo semi-clássico

Os átomos possuem elétrons que se movem e estes elétrons formam espiras de corrente microscópicas que produzem campos magnéticos.

(Em muitos materiais, estes campos não produzem campo resultante. Mas não todos).



$$\mu = IA = \frac{e}{T} A = \frac{evr}{2} = \frac{evr}{2} \cdot \pi r^2 = \frac{e}{2m} L$$

$$\Rightarrow \mu = \left(\frac{e}{2m}\right) L \quad (\text{momento magn. associado a } L)$$

Venemos (Fis. IV) que na mecânica quântica (devido à quantização de L) o menor valor não nulo de μ é: $\mu_B = \frac{e}{2m} \hbar$: magneton de Bohr
 $= 9,274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$

Existe também um momento magnético associado ao spin do elétron (outra quantidade que aparece na mecânica quântica)

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{\hbar}{2} \\ \mu = \left(\frac{e}{m}\right) S \end{array} \right. \Rightarrow \mu = \frac{e\hbar}{2m} = \mu_B$$

Obs.1: classicamente, as vezes considerase que o elétron tem movimento de rotação sobre si que dá origem a este μ . Mas, precisamente, sua origem é quântica. (O elétron é considerado pontiforme então rotação em torno do seu eixo não é definida).



Imagem clássica

Obs.2: os nucleons também tem este tipo de momento magnético, porém muito menor do que para o elétron (já que é $\propto \frac{1}{m}$).

Os momentos magnéticos orbitais e de spin geralmente se cancelam. Porém, alguns materiais possuem um momento magnético resultante não nulo. Quando este materiais são colocados num campo magnético \vec{B}_{ext} , seus momentos magnéticos se alinham* com \vec{B}_{ext} . O campo magnético \vec{B}_m gerado pelos momentos magnéticos se soma a \vec{B}_{ext}

$$\vec{B} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_m$$


\vec{B}_m é proporcional ao momento magn. por u. de volume, \vec{M} (vetor magnetização) (unidade $\frac{Am^2}{m^3} = \frac{A}{m}$)

$$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M} \text{ com } \mu_0 \text{ permeabilidade do vácuo}$$

As vezes, escreve-se $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$ com $\vec{H} \equiv \frac{\vec{B}_{ext}}{\mu_0}$: vetor intensidade do campo magn. (em A/m)

(Observe o paralelo entre dielétrico num campo el. ext. material magnético num campo magn. ext.)
* com mesmo sentido ou oposto

mat. diel.: separação +- \rightarrow m^o de dipolo el.

$$\vec{p} \text{ c/ } p = qd$$


mat. magn.: mov.º carga* \rightarrow m^o de dipolo magn.

$$\vec{\mu} \text{ c/ } \mu = IA$$


mat. diel.: $\vec{E}_{ext} \rightarrow \vec{E} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}_i$ c/ \vec{E}_i devido a dip. e anti|| \vec{E}_{ext}

mat. magn.: $\vec{B}_{ext} \rightarrow \vec{B} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_m$ c/ \vec{B}_m devido a dip. e || a anti|| a \vec{B}_{ext} .

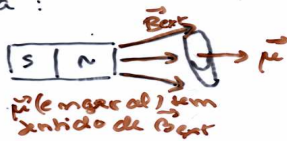
*"Spin" também faz aparecer um m^o de dipolo magn.

Para muitos materiais: $\vec{B}_m \propto \vec{H}$
 $\propto \vec{B}_{ext}$

e escreve-se $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ com χ_m susceptibilidade magnética assim

$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = (1 + \chi_m) \vec{B}_{ext}$
 permeabilidade da substância
 (notada μ também) ↳ "esconde" os efeitos de dipolo

Obs.: Com isto, entendemos porque um dípolo é atraído por um ímã:



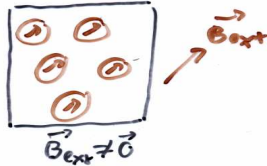
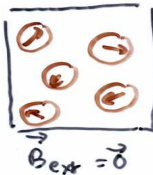
Como \vec{B}_{ext} não é uniforme, tem forças sobre o dípolo (do tipo $\vec{p} \cdot \nabla \vec{B}$) e ele é atraído

Classificação das substâncias magnéticas

• Paramagnetismo: $0 < \chi_m \ll 1$
 (ex. alumínio)

Os átomos da substância tem átomos com momento de dipolo magnéticos permanente. Na ausência de \vec{B}_{ext} , eles estão orientados aleatoriamente. Na presença de \vec{B}_{ext} , eles se alinham mas isto compete com os movimentos térmicos que tendem a os desalinhar.

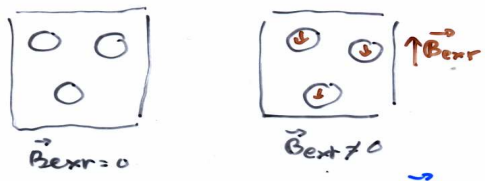
$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_i$	$\vec{B} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_m$
em geral:	em geral:
$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}$	$\vec{B}_m = \chi_m \vec{B}_{ext}$
$\kappa = \epsilon/\epsilon_0$	$\vec{B} = (1 + \chi_m) \vec{B}_{ext}$
	$= \mu \vec{H} = \mu_0 \vec{H}$



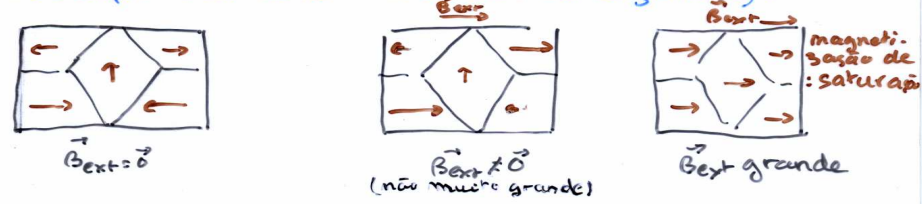
Exp^e: $M = c \frac{\vec{B}_{ext}}{T}$ (Lei de Curie) (vale p/T não muito baixos
 \vec{B}_{ext} " " alto)

Este efeito é pequeno \Rightarrow um ímã atrai pouco um objeto de alumínio.

• Diamagnetismo: (ex. prata) $|\chi_m| \ll 1$ e $\chi_m < 0$
 Os átomos da substância não tem momentos de dipolo magnético permanentes. Na presença de \vec{B}_{ext} , há indução de um fraco $\vec{\mu}$, na direção oposta (devido à mudança no movimento orbital dos elétrons). De fato, isto ocorre em todas as substâncias mas é um efeito fraco comparado com o paramagnetismo e ferromagnetismo.

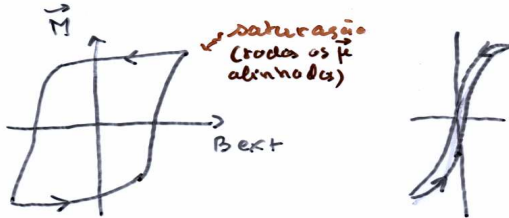


• ferromagnetismo:
 $\vec{M} \neq \chi_m \vec{B}_{ext}$
 Em substâncias como ferro, cobalto, gadolínio, disprósio, a relação entre \vec{M} e \vec{B}_{ext} não é linear (cf. histerese). Os átomos destas substâncias possuem momentos magn. permanentes que se alinham ^(dentro de domínios) mesmo com \vec{B}_{ext} fraco e continuam alinhadas mesmo quando \vec{B}_{ext} é desligado (se $T < T_c$). isto vem de um efeito quântico (acoplamento de momentos vizinhos).



Obs: pode-se destruir este alinhamento usando um campo ext. com outra direção. Por isto q, não é bom colocar uma bússola ou centão magnético perto de um ímã.

Para muitos materiais ferromagnéticos, a curva de \vec{M} vs \vec{B}_{ext} é diferente quando $B_{ext} \rightarrow \text{out}$ 180

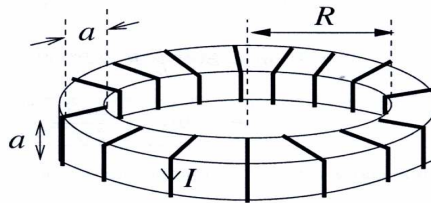


Este tipo de comportamento se chama histerese.

Um material com ciclo de histerese como o da esquerda faz um bom imã pois não se demagnetiza facilmente. Um material como o da direita, se magnetiza e demagnetiza facilmente e pode ser usado para núcleos de transformador e outros, que usam correntes alternadas.

Questão 2

Uma bobina toroidal de raio interno R e seção reta quadrada de lado a , com $a \ll R$, possui N espiras percorridas por uma corrente I .



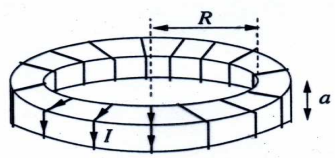
- (a) (0,5 ponto) Calcule o vetor campo magnético no interior do toróide.
- (b) (1,0 ponto) Calcule a auto-indutância da bobina supondo que o módulo do campo magnético seja aproximadamente constante dentro da bobina.
- (c) (1,0 ponto) Suponha que a bobina toroidal seja preenchida com um núcleo de um material magnético com permeabilidade magnética relativa $K_m \equiv \mu/\mu_0 = 500$. Calcule os novos valores do vetor campo magnético no seu interior e da auto-indutância.

P3

Física III
 Escola Politécnica - 2004
 FGE 2203 - GABARITO DA P3
 1 de julho de 2004

Questão 1

Considere um toróide de seção quadrada de lado a e raio interno R , conforme a figura,



que possui N espiras enroladas, e por onde passa uma corrente I . Ele se encontra no vácuo.

(1,0 ponto) (a) Calcule o vetor campo magnético no interior do toróide (\vec{B}_0) e o coeficiente de auto-indutância L .

Agora, o toróide é preenchido com um material de suscetibilidade magnética χ_m .

(0,5 ponto) (b) Determine o vetor intensidade magnética \vec{H} no interior do toróide.

(0,5 ponto) (c) Determine o campo magnético (\vec{B}) no interior do toróide na presença do material.

(0,5 ponto) (d) Determine o vetor magnetização \vec{M} no material.

FILIPAPER
 FOTOCOPIADORA P&B
 IMPRIMIR NO OUTRO LADO
 FILIPAPER
 FOTOCOPIADORA P&B
 IMPRIMIR NO OUTRO LADO
 FILIPAPER
 FOTOCOPIADORA P&B
 IMPRIMIR NO OUTRO LADO
 FILIPAPER
 FOTOCOPIADORA P&B
 IMPRIMIR NO OUTRO LADO

Questão 2

Um solenóide longo com enrolamento uniforme produz um campo magnético no seu interior igual a \vec{B}_0 no vácuo.

- (1,0 ponto) (a) O solenóide é preenchido por um material desconhecido. Observa-se que o campo magnético no seu interior diminui para $B = 0,9999B_0$. Determine o campo de intensidade magnética H no interior do solenóide, e a susceptibilidade magnética χ_m do material. Como se classifica esse material quanto à sua propriedade magnética?
- (1,0 ponto) (b) O solenóide é agora preenchido por um núcleo de ferro com permeabilidade magnética 1000 vezes maior que o valor μ_0 no vácuo. Determine a magnetização \vec{M} e o campo magnético \vec{B} no interior do núcleo.
- (0,5 ponto) (c) Quando a corrente no solenóide é desligada, o núcleo de ferro apresenta uma magnetização remanente uniforme igual a M_1 . Determine o novo valor do campo magnético B_1 no interior do núcleo.