

Eletricidade e Magnetismo II – Licenciatura: 11ª Aula (10/09/2012)

Prof. Alvaro Vannucci

Na última aula vimos:

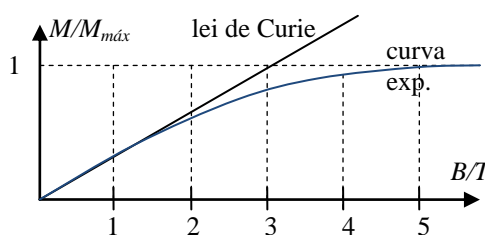
- Vetor de magnetização: $\vec{M} = \frac{\vec{m}_{\text{total}}}{\Delta V} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{m}_i$; o efeito pode ser macroscopicamente interpretado como devido às correntes (imaginárias) de magnetização.
- Lei de Ampère (na sua forma mais geral):

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{ent}}^{\text{real}} \quad ; \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad ; \quad \vec{B} = \mu \vec{H}$$

onde μ é permeabilidade magnética do meio.

- Materiais paramagnéticos: Lei de Curie:

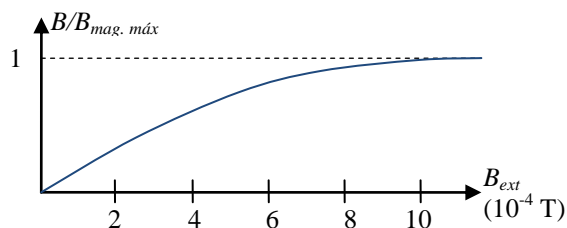
$$M = C \frac{B}{T}$$



Ferromagnetismo

- Em alguns poucos materiais como o ferro, cobalto, níquel (além das ligas que os possuem), observa-se um alto grau de alinhamento mesmo sob a ação de campos magnéticos de baixas intensidades.
- Outra característica interessante é que o efeito desaparece (o alinhamento se desfaz) quando o material é aquecido à $T > T_{\text{Curie}}$, quando só passa a existir o efeito paramagnético.
- No caso do ferro, por exemplo, $T_{\text{Curie}}^{\text{ferro}} = 1043 \text{ K}$.

- Uma curva experimental típica do efeito de magnetização de uma amostra de ferro é apresentada ao lado.

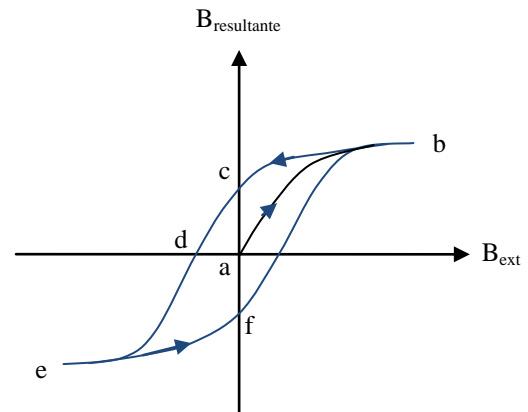


- Outra propriedade interessante exibida pelos materiais ferromagnéticos é que ao se diminuir o campo magnético aplicado, até ele se anular, observa-se uma significativa magnetização residual.

➤ A este fenômeno dá-se o nome de “*histerese*”.

➤ Nos pontos (c) e (f) da figura tem-se a “*magnetização permanente*” do material; ou seja, ele comporta-se como um ímã.

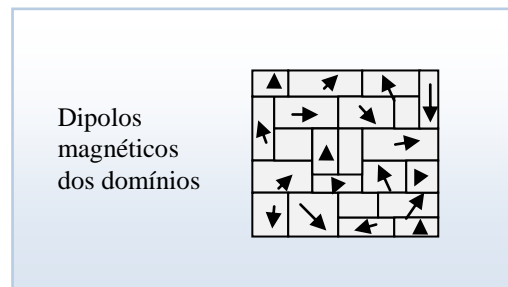
➤ Explicação física: efeito não decorre apenas do alinhamento dos dipolos magnéticos individuais, mas principalmente da interação entre vizinhos através da formação de “*domínios*”.



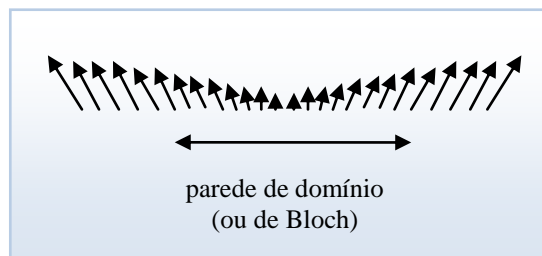
➤ Ou seja, nos materiais ferromagnéticos ocorre o acoplamento quântico entre os momentos magnéticos de *spins* eletrônicos que os alinham fortemente, mesmo sem a existência de um campo magnético externo, formando os domínios.

➤ Cada domínio possui tipicamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{volume: de } 10^{-12} \text{ a } 10^{-8} \text{ m}^3 \\ \text{quantidade } N : \text{ de } 10^{17} \text{ a } 10^{21} \text{ átomos} \end{array} \right.$$



➤ No estado natural, sem a aplicação de campo magnético externo, a orientação aleatória implica em magnetização (resultante) nula do material.



➤ O processo de magnetização do material, para campos magnéticos mais ou menos fracos, decorre, inicialmente, da “*movimentação das paredes*” dos domínios.

➤ Só para campos mais intensos é que se observa a “*rotação dos domínios*”, buscando alinharem-se com o campo magnético externo.

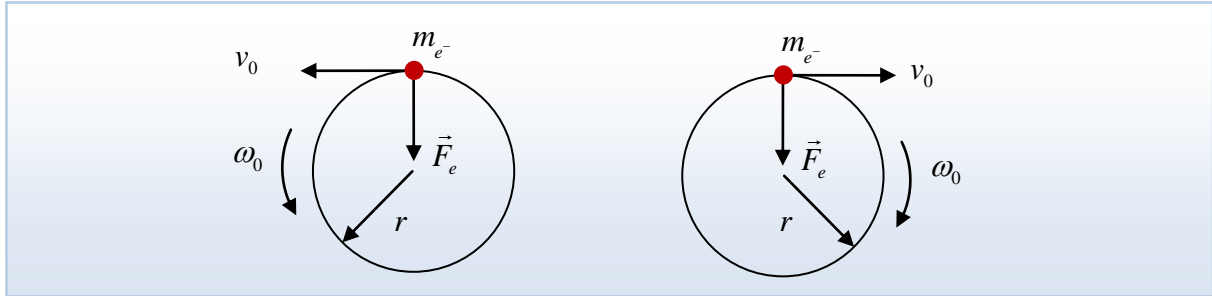
Diamagnetismo

➤ Efeito descoberto por Faraday, em 1846, ao observar o bismuto sendo repelido por um ímã.

➤ Compreendeu-se, posteriormente, que este efeito está presente em todas as substâncias, mas é “ *mascarado*” pelos efeitos paramagnéticos e ferromagnéticos, que são mais intensos.

➤ Pode-se entender o efeito diamagnético utilizando-se o modelo atômico clássico que considera o elétron movendo-se em uma trajetória circular de raio r constante.

- No geral, os materiais que são diamagnéticos não possuem intrinsicamente um momento de dipolo magnético resultante.
- Isto significa que, em média, um número igual de elétrons movem-se (no modelo clássico do átomo) no sentido horário e no anti-horário (em órbitas com raio r constante e velocidade angular ω_0 .)

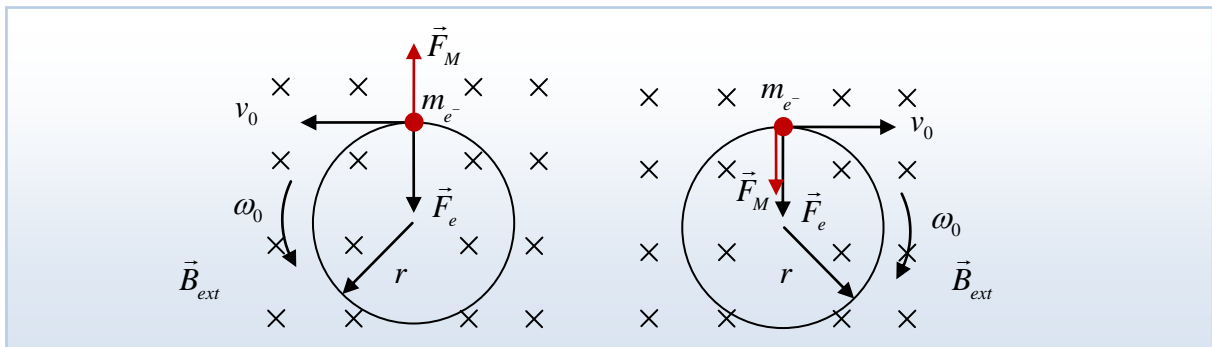


- Note que os módulos dos momentos de dipolo magnéticos são iguais nos dois casos e, por terem sentidos contrários, cancelam-se (par a par).

- Diagrama de forças correspondente:

$$F_{res} = F_{cp} = F_e \Rightarrow F_{cp} = \frac{m_e v^2}{r} = m_e r \omega_0^2 = \frac{Z e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = F_e$$

- Agora, quando um campo magnético externo é aplicado (aproximando-se um ímã, por exemplo), surgem \vec{F}_M com sinais opostos em cada caso!



- De forma que o elétron sente agora uma força resultante dada por

$$F_e \pm F_M = F_{cp}, \text{ sendo que } \begin{cases} F_e = m_e r \omega_0^2 & (\text{esta não varia}) \\ F_M = e v B = \omega r B & (\text{note que } \omega_0 \rightarrow \omega) \\ F_{cp} = m_e r \omega^2 & (\text{devido à } F_M) \end{cases}$$