Eletricidade e Magnetismo II – Licenciatura: *10ª Aula* (30/08/2012)

Prof. Alvaro Vannucci

Na última aula vimos:

- $\boxed{B_{\text{solenoide}} = \mu_0 nI}$
- $\boxed{B_{\text{toroide}} = \dfrac{\mu_0 nI}{2\pi r}}$; $n = \dfrac{N}{\ell}$

- Considerando o movimento clássico de um elétron nos átomos/moléculas como formando pequenas *espiras de corrente*:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{e}{T} = ef = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{e}{2\pi}\frac{v}{R}\text{; sendo que } \vec{m} = IA\hat{n} = \frac{evr}{2}\hat{n}$$

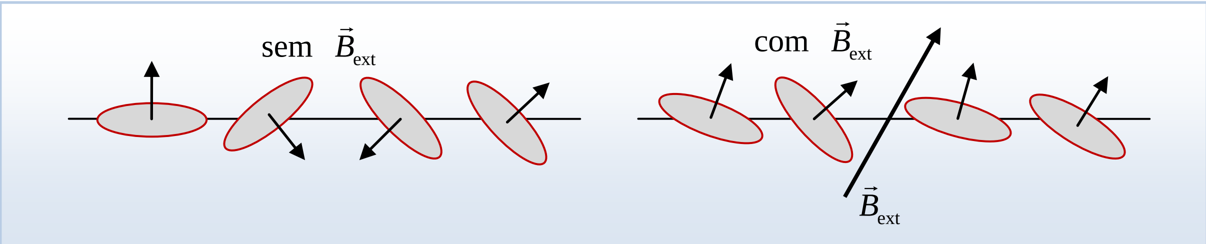
- Considerando a existência de N destes dipolos em um certo volume $\Delta V \rightarrow$ o momento de dipolo magnético total será:

$$\boxed{\vec{m}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{N} \vec{m}_i}$$

- Analogamente ao que fixemos com respeito à polarização das moléculas, aqui também definiremos o ***vetor magnetização*:**

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}_{\text{total}}}{\Delta V} = \frac{1}{\Delta V}\sum_{i=1}^{N} \vec{m}_i \qquad \left(\text{unidade: } \frac{A\cancel{m^2}}{m^{\cancel{3}}} = \frac{A}{m}\right)$$

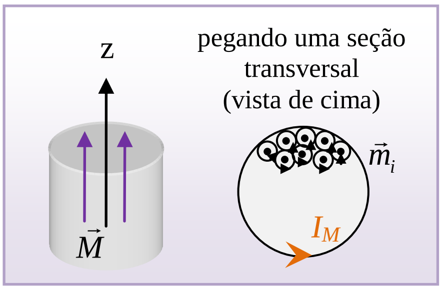
- Normalmente a orientação desses N dipolos na matéria é aleatória; mas com a aplicação de um $\vec{B}_{\text{ext}}$ ocorre um alinhamento (mais ou menos parcial) dos vários $\vec{m}_i$ em relação às linhas de campo do $\vec{B}_{\text{ext}}$:



- De forma que, na situação de alinhamento, o meio como um todo passa a ser uma fonte de campo magnético, representado por $\vec{M}$!

- E note que este efeito pode ser também interpretado como devido à existência de uma "*corrente global de magnetização*" (I_M).

- Por exemplo, considere um tarugo cilíndrico com os dipolos alinhados na direção axial (de z), gerando $\vec{M} = M\,\hat{z}$.



- Observe, na figura, a tendência natural de ocorrer um "cancelamento par a par" dos efeitos produzidos por dipolos adjacentes.

- De forma que o "efeito global" – que gera a magnetização – pode ser entendido como devido à existência de uma "*corrente de magnetização*" I_M (imaginária) que flui pela superfície do tarugo cilíndrico.

- Em analogia à Lei de Ampère, esta corrente de magnetização global pode ser escrita:

$$\boxed{I_M = \oint_C \vec{M}\cdot d\vec{l}}$$

circuitação ao longo da superfície do material

- Agora, nas situações em que há campos magnéticos produzidos tanto por correntes reais quanto de magnetização, a Lei de Ampère torna-se:

$$I_M = \oint \frac{\vec{B}}{\mu_0}\cdot d\vec{l} = I_{enl}^{total} = I^{real} + I_M = I^{real} + \oint \vec{M}\cdot d\vec{l}$$

$$\Rightarrow \oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}\right)\cdot d\vec{l} = I^{real}; \quad \text{ou} \quad \boxed{\oint \vec{H}\cdot d\vec{l} = I_{enl}^{real}}$$

- Sendo que $\vec{H} = \underbrace{\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}}_{\Rightarrow \vec{B}=\mu_0\left(\vec{H}+\vec{M}\right)}$ e, no vácuo ($\vec{M} = 0$): $\boxed{\vec{B} = \mu_0 \vec{H}}$

- Agora, sob ação de um $\vec{H}_{ext}$ ($\vec{H}$ relacionado apenas com correntes reais) a grande maioria dos materiais passa a apresentar um certo grau de magnetização $\vec{M}$, de forma que podemos escrever:

$\vec{M} = \chi_M \vec{H}$, sendo χ_M $\equiv$ **susceptibilidade magnética do meio.**

- De forma que $\vec{B} = \underbrace{\mu_0\left(1+\chi_M\right)}_{\equiv\mu}\vec{H}$, sendo μ ≡ **permeabilidade magnética do meio.**

- Portanto, de forma geral: $\boxed{\vec{B} = \mu\vec{H}}$

- Lembrando: quando estudamos o campo elétrico agindo na matéria, vimos que as cargas de polarização eram criadas de forma a sempre enfraquecer o campo resultante:

$$\vec{E}_{\text{resultante}} = \vec{E}_0 - \vec{E}_{\text{induzido}}$$

- No magnetismo, porém, o efeito não é único!

- Isto porque, além do momento de dipolo magnético orbital (que vimos acima), os elétrons também apresentam um “momento de dipolo magnético de *spin*”.

- De forma que o momento de dipolo magnético resultante irá depender da soma destes dipolos de todos os átomos (e mais as interações mútuas).

- Classificam-se, assim, os materiais em três categorias distintas

  1. Paramagnéticos
  2. Ferromagnéticos
  3. Diamagnéticos

Materiais destes dois tipos naturalmente possuem momento de dipolo magnético resultante diferente

Paramagnetismo

- Nos materiais paramagnéticos, que corresponde à grande maioria, os momentos de dipolo magnético não interagem entre si e não se encontram normalmente alinhados.

- Além disso, possuem permeabilidades magnéticas $\mu \approx \mu_0$ (sempre estaremos adotando esta condição no nosso curso, a não ser que se especifique o contrário).

- Quando se aplica um campo magnético externo, ocorre então um alinhamento que contribui para aumentar a intensidade do campo resultante.

- Em 1895, Pierre Curie propõe uma expressão empírica para a magnetização induzida em meios paramagnéticos

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

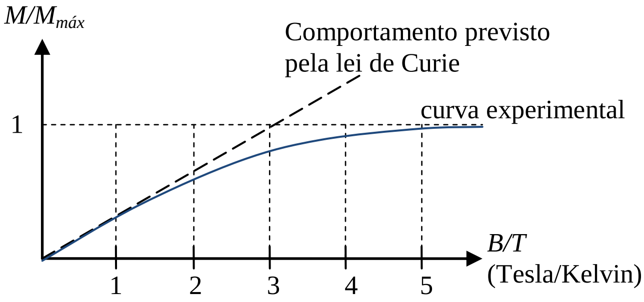
Campo magnético aplicado

constante que depende do material

temperatura do material

- Após uma simples análise fica claro que esta equação só deve valer para valores não muito elevados de *B/T*, já que deverá haver uma condição de máxima magnetização (ou *saturação*) que corresponde à situação de máximo alinhamento dos dipolos magnéticos.

- Em uma amostra de $KCr(SO_4)_2 12H_2O$, por exemplo, sabe-se que os átomos de cromo serão os responsáveis pelo efeito paramagnético do material:



- Note, do gráfico, que para se conseguir 99,5% de saturação é preciso aplicar na amostra, a uma temperatura $T_{amostra} \sim 1{,}3K$, um campo de aproximadamente 5 teslas (ou 50.000 gauss).

- No entanto, em condições usuais de laboratório, com campos de aproximadamente 1T e temperaturas da ordem de 10K:

$$\frac{B}{T} \sim \frac{1T}{10K} = 0{,}1\frac{T}{K}$$

- Ou seja (observar o resultado no gráfico), a Lei de Curie pode ser perfeitamente aplicada.