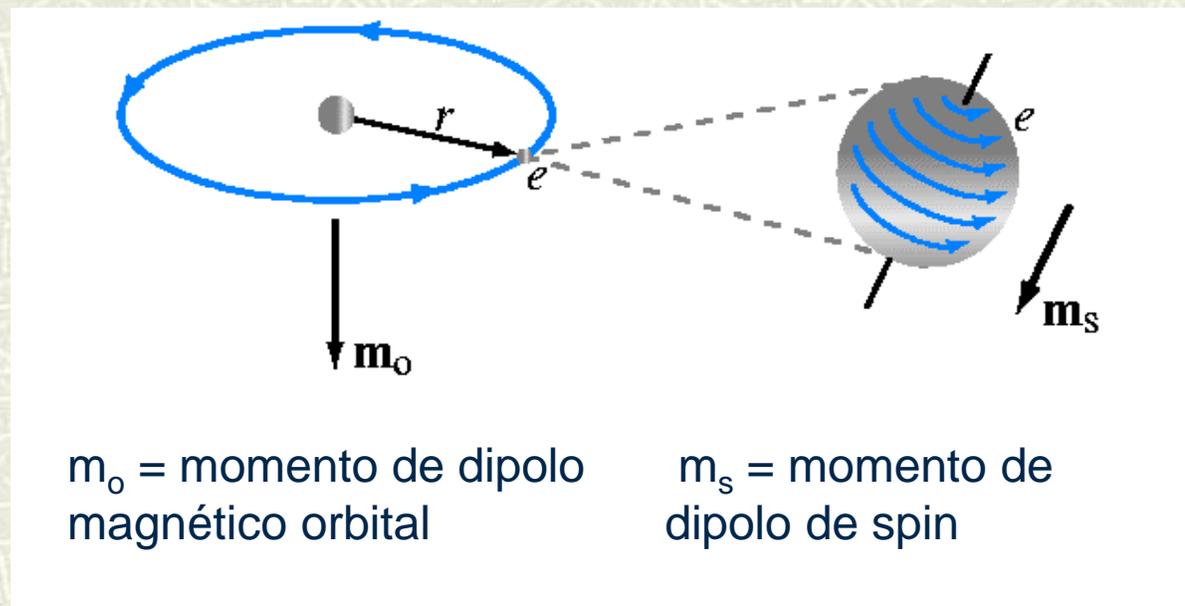




Introdução ao Magnetismo e Propriedades Magnéticas

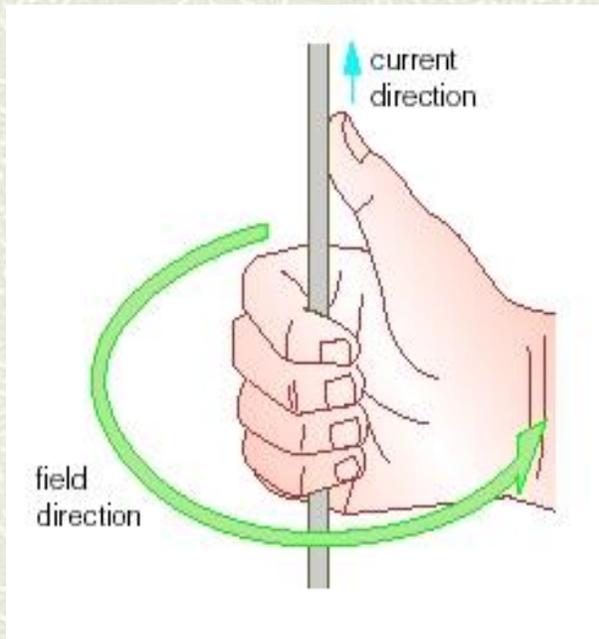
Origem Microscópica das Propriedades Magnéticas da Matéria

- ▣ Presença de momentos de dipolos magnéticos nos átomos



$$[m] = [A.m^2]$$

Campo gerado por uma corrente



- Regra da mão direita

- A intensidade do campo depende da intensidade da corrente e da distância ao fio

Equações de Maxwell

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

Lei de Gauss

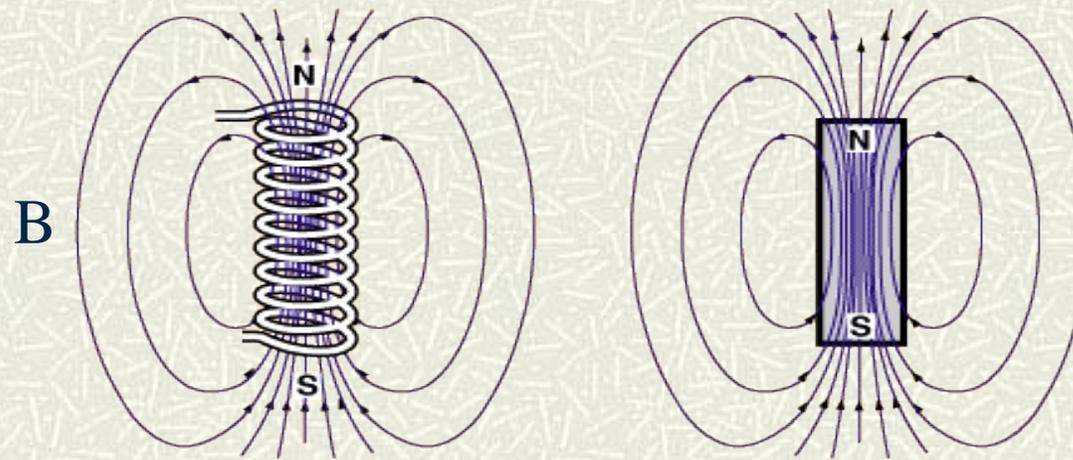
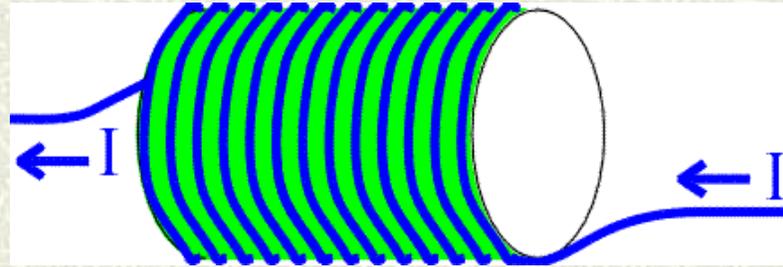
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Lei de Ampère

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

Lei de Faraday

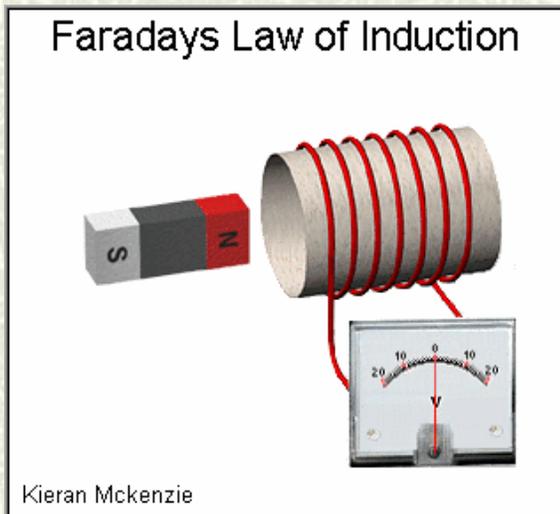
Campo de um solenóide



Força eletromotriz ε (V) induzida em uma bobina

Lei de Faraday

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$



Lei de Lenz

$$-\frac{dB}{dt} \Rightarrow V$$

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

$$V \Rightarrow I$$

Operação de geradores e transformadores

Campos Magnéticos

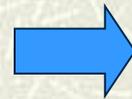
- H – intensidade de campo magnético – campo externo (A/m).
- B – densidade de fluxo magnético – campo interno total (Tesla – T)
(depende do material)
- M – magnetização – campo resultante devido à presença de momentos de dipolo permanentes orientados (A/m). (depende do material)

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}$$

Equações dos Campos Magnéticos

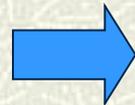
$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}$$

No vácuo



$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

No material



$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad \text{e} \quad \mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ - permeabilidade magnética no vácuo

μ - permeabilidade magnética no material

$\mu_R = \mu / \mu_0$ - permeabilidade relativa

Unidades em Magnetismo

| | | | | |
|--|--|--------------------------------------|---|--|
| Momento magnético | m | emu (d), erg/G | 10^{-3} | A·m ² , joule por tesla (J/T) |
| Momento de dipolo magnético | j | emu, erg/G | $4\pi \times 10^{-10}$ | Wb·m (i) |
| Susceptibilidade (volumétrica) | χ, κ | adimensional, emu/cm ³ | 4π $(4\pi)^2 \times 10^{-7}$ | Adimensional; henry por metro (H/m), Wb/ (A·m) |
| Susceptibilidade (massa) | χ_p, κ_p | cm ³ /g, emu/g | $4\pi \times 10^{-3}$ $(4\pi)^2 \times 10^{-10}$ | m ³ /kg H·m ² /kg |
| Susceptibilidade (Molar) | $\chi_{\text{molar}}, \kappa_{\text{molar}}$ | cm ³ /mol, emu/mol | $4\pi \times 10^{-6}$ $(4\pi)^2 \times 10^{-13}$ | m ³ /mol H·m ² /mol |
| Permeabilidade | μ | adimensional | $4\pi \times 10^{-7}$ | H/m, Wb/(A·m) |
| Permeabilidade Relativa | μ_r | Não definida | ----- | adimensional |
| Densidade de Energia, Produto de Energia (e), | W | erg/cm ³ | 10^{-1} | J/m ³ |
| Fator de Desmagnetização | D, N | adimensional | $1/4\pi$ | adimensional |

Unidades em Magnetismo

| | Símbolo | Gaussiana & cgs meu (a) | Fator de Conversão | SI e mks racionalizado (b) |
|--|-------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Densidade de fluxo magnético, indução magnética | B | gauss (G) | 10^{-4} | tesla (T), Wb/m ² |
| Fluxo Magnético Φ | ϕ | maxwell (Mx), G·cm ² | 10^{-8} | weber (Wb), volt second (V·s) |
| Intensidade de campo, Força magnetizante | H | oersted (Oe), Gb/cm | $10^3/4\pi$ | A/m |
| (Volume) Magnetização (c) | M | emu/cm ³ (d) | 10^3 | A/m |
| (Volume) Magnetização | 4πM | G | $10^3/4\pi$ | A/m |
| Polarização Magnética, Intensidade de Magnetização | J, I | emu/cm ³ | $4\pi \times 10^{-4}$ | T, Wb/m ² |
| Magnetização (massa) | σ, M | emu/g | $4\pi \times 10^{-7}$ | A·m ² /kg Wb·m/kg |

Unidades em Magnetismo

- a) Unidades gaussianas e emu cgs são as mesmas para propriedades magnéticas
- (b) SI (Système International d'Unités) foi adotado pelo National Bureau of Standards. Os fatores de conversão dados, são consistentes com a definição $B = \mu_0(H + M)$, sendo $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; também $B = \mu_0 H + J$, onde o símbolo I é geralmente usado no lugar do J .
- (c) Momento magnético por unidade de volume
- (d) A designação “emu” não é uma unidade.
- (e). $B \cdot H$ and $\mu_0 M \cdot H$ tem unidade SI J/m³; $M \cdot H$ and $B \cdot H/4\pi$ têm unidade gaussianas erg/cm³.

Momento magnético resultante no átomo

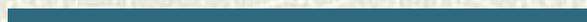
| No. atômico | Elemento | Estrutura Eletrônica de elementos 3d | | | | | Momento (μ_B) |
|-------------|----------|--------------------------------------|----|----|----|----|---------------------|
| 21 | Sc | ↑ | | | | | 1 |
| 22 | Ti | ↑ | ↑ | | | | 2 |
| 23 | V | ↑ | ↑ | ↑ | | | 3 |
| 24 | Cr | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | 5 |
| 25 | Mn | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | 5 |
| 26 | Fe | ↑↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | 4 |
| 27 | Co | ↑↓ | ↑↓ | ↑ | ↑ | ↑ | 3 |
| 28 | Ni | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑ | ↑ | 2 |
| 29 | Cu | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | 0 |

↑ = orientação do spin eletrônico

ÁTOMOS COM CAMADAS E SUBCAMADAS CHEIAS NÃO TÊM CAPACIDADE DE SER PERMANENTEMENTE MAGNETIZADAS.



Diferentes Tipos de Propriedades Magnéticas da Matéria



Diamagnetismo

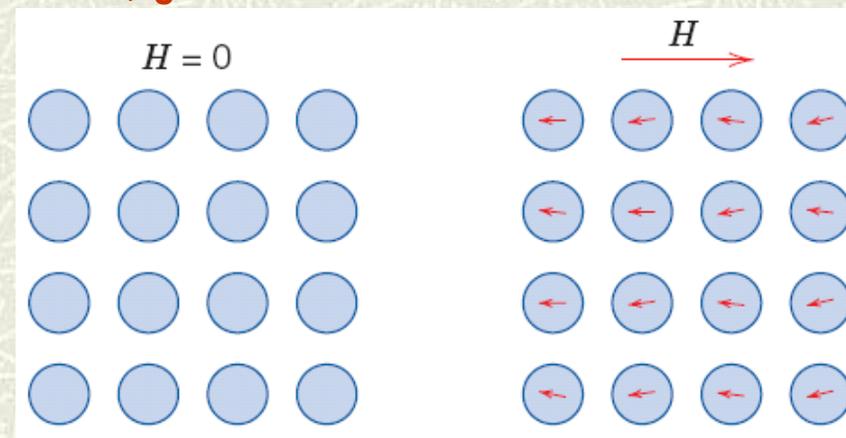
Momento magnético induzido pela **mudança do movimento orbital do elétron devido a presença de um campo aplicado**. O momento magnético induzido é muito pequeno e na direção oposta à do campo aplicado.

Momento magnético é não-permanente

É importante em materiais que têm átomos com última camada completa.

$$\chi_m < 0 \text{ (muito pequeno)} \rightarrow 0 < \mu_r < 1 \text{ e } \mathbf{B} < \mu_0 \mathbf{H}.$$

Todo material apresenta diamagnetismo!



Paramagnetismo

Momento magnético permanente (spin) mesmo na ausência de campo magnético.

Momentos magnéticos permanentes alinhados aleatoriamente sem a presença de campo (não há interação entre eles)

Na presença de campo, os momentos magnéticos são livres para rotacionar e se alinham na direção do campo aplicado.

Retirando-se o campo magnético os momentos magnéticos voltam à situação aleatória.

χ_m é positivo mas muito pequeno; $\mu_r > 1$ e $B > \mu_0 H$.

$H = 0$

H



Magnetização ? Susceptibilidade?

O que há de diferente comparando com diamagnético e paramagnético?



Antiferromagnetismo

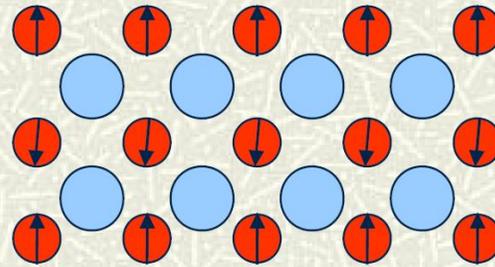
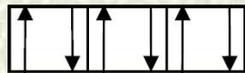
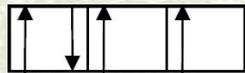
Alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos (spin) permanentes de átomos vizinhos

MnO – óxido de manganês (cerâmica de carácter iônico) \Rightarrow Mn^{+2} e O^{-2}

Mn^{+2} tem momento magnético líquido.



subcamada incompleta



Ferromagnetismo

Momento magnético permanente (spin) já alinhados, mesmo se $H = 0$

Interação (de troca) entre dipolos: **alinhamento paralelo**.

A contribuição importante para a magnetização vem do spin.

São os metais de transição: Fe, Co e Ni e algumas terras raras como Gd e Sm.

Só ocorre em elementos que possuem níveis de energia incompletos.

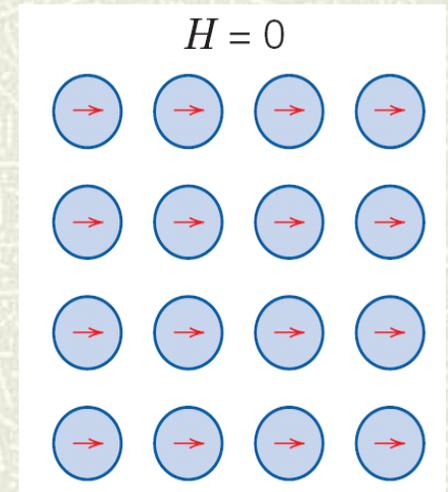
(Fe: 3d e Gd: 4f)

$\chi_m \approx 10^6$, significando que $M \gg H$ e $B \approx \mu_0 M$.

Ferromagnetismo - cont.

Magnetização de saturação – M_s

M_s é o valor máximo possível da magnetização
(todos os momentos estão alinhados na mesma direção)



$M_s =$ densidade de átomos \times n° . líquido de momentos $\times \mu_B$

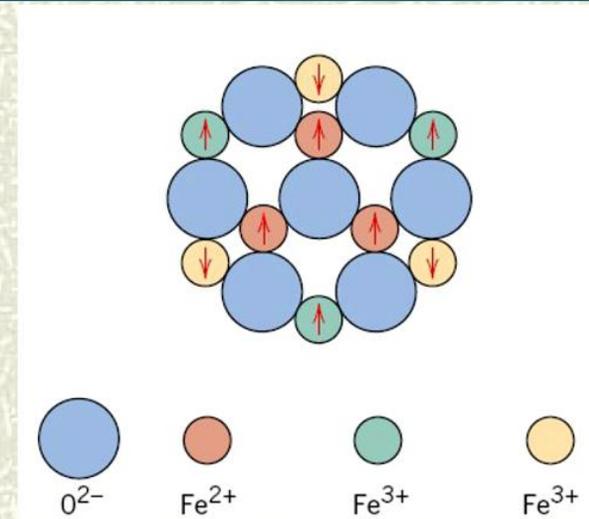
Fe \rightarrow 2,22 μ_B Co \rightarrow 1,72 μ_B Ni \rightarrow 0,60 μ_B

Um **magnéton de Bohr** é o menor valor permitido (não nulo) do momento magnético.

$$1\mu_B = \frac{e h}{4\pi m} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2 \text{ (J/T)}$$

Ferrimagnetismo

- alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos (spins) de átomos vizinhos
- momento magnético de cada um dos componentes do par antiparalelo é diferente → não se cancelam
- há um momento líquido resultante.



FERRITAS: MFe_2O_4 (M = Metal)
são ferrimagnéticos

Fe^{+2} ($4\mu_B$) e Fe^{+3} ($5\mu_B$)

| | <i>coordenação octaédrica</i> | <i>coordenação tetraédrica</i> | <i>Momento magnético líquido</i> |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Fe^{+3} | ↑↑↑↑ | ↓↓↓↓ | <i>Cancelamento completo</i> |
| Fe^{+2} | ↑↑↑↑ | — | |

Classificação dos Tipos de Propriedades Magnéticas da Matéria

Fracas (baixos valores de magnetização)

- Paramagnetismo
- Diamagnetismo
- Antiferromagnetismo

Fortes (Altos valores de magnetização)

- Ferromagnetismo
- Ferrimagnetismo

Susceptibilidade de Materiais Paramagnéticos e Diamagnéticos

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$$

$$\mathbf{M} \approx 0$$



$$\mathbf{B} \approx \mu_0 \mathbf{H}$$

| <i>Material</i> | <i>Susceptibilidade Magnética</i> |
|---------------------|-----------------------------------|
| | χ_m (SI) |
| | <u>Diamagnéticos</u> |
| Óxido de Alumínio | $- 1,81 \times 10^{-5}$ |
| Cobre | $- 0,96 \times 10^{-5}$ |
| Ouro | $- 3,44 \times 10^{-5}$ |
| Mercúrio | $- 2,85 \times 10^{-5}$ |
| Silício | $- 0,41 \times 10^{-5}$ |
| Prata | $- 2,38 \times 10^{-5}$ |
| Cloreto de Sódio | $- 1,41 \times 10^{-5}$ |
| Zinco | $- 1,56 \times 10^{-5}$ |
| | <u>Paramagnéticos</u> |
| Alumínio | $+ 2,07 \times 10^{-5}$ |
| Cromo | $+ 3,13 \times 10^{-4}$ |
| Cloreto de Cromo | $+ 1,51 \times 10^{-3}$ |
| Sulfato de Manganês | $+ 3,70 \times 10^{-3}$ |
| Molibdênio | $+ 1,19 \times 10^{-4}$ |
| Sódio | $+ 8,48 \times 10^{-6}$ |
| Titânio | $+ 1,81 \times 10^{-4}$ |
| Zircônio | $+ 1,09 \times 10^{-4}$ |