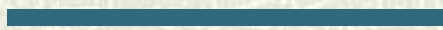


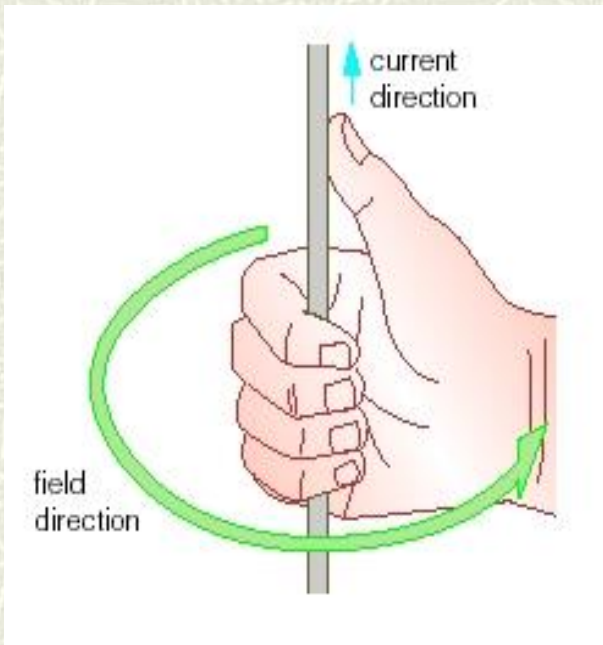
Introdução ao Magnetismo e Propriedades Magnéticas



Introdução Geral



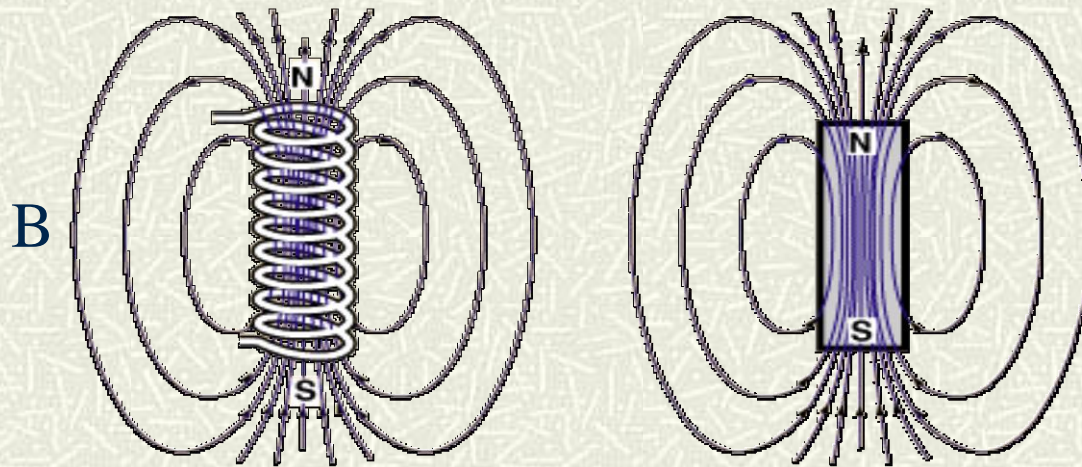
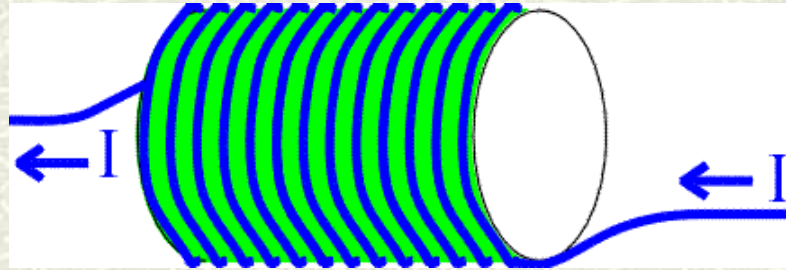
Campo gerado por uma corrente



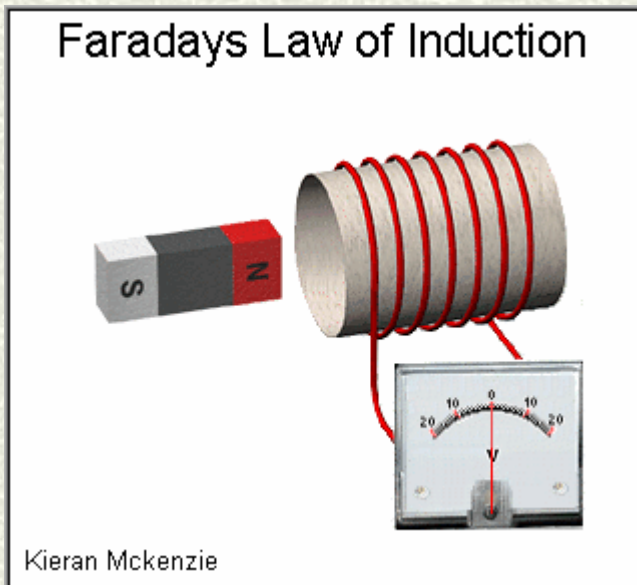
- Regra da mão direita

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

Campo de um solenóide



Voltagem induzida em uma bobina



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

$$V \Rightarrow I$$

Operação de geradores e transformadores

Equações dos Campos Magnéticos

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

$$\begin{array}{ccc} & \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} & \\ \text{No vácuo} & \longrightarrow & \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \\ \text{No material} & \longrightarrow & \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad \text{e} \quad \mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \end{array}$$

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

μ - permeabilidade magnética no material

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

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 (Volume)	H	oersted (Oe), Gb/cm	$10^3/4\pi$	A/m
Magnetização (c)	M	emu/cm ³ (d)	10^3	A/m
(Volume) Magnetização	$4\pi M$	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
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	$\frac{4\pi}{(4\pi)^2} \times 10^{-7}$	Adimensional; henry por metro (H/m), Wb/(A·m)
Susceptibilidade (massa)	χ_p, κ_p	cm ³ /g, emu/g	$\frac{4\pi \times 10^{-3}}{(4\pi)^2} \times 10^{-10}$	m ³ /kg H·m ² /kg
Susceptibilidade (Molar)	$\chi_{molar}, \kappa_{molar}$	cm ³ /mol, emu/mol	$\frac{4\pi \times 10^{-6}}{(4\pi)^2} \times 10^{-13}$	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), Fator de Desmagnetização	W, D, N	erg/cm ³	10^{-1}	J/m ³
		adimensional	$1/4\pi$	adimensional

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.

Equações de Maxwell

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

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

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

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

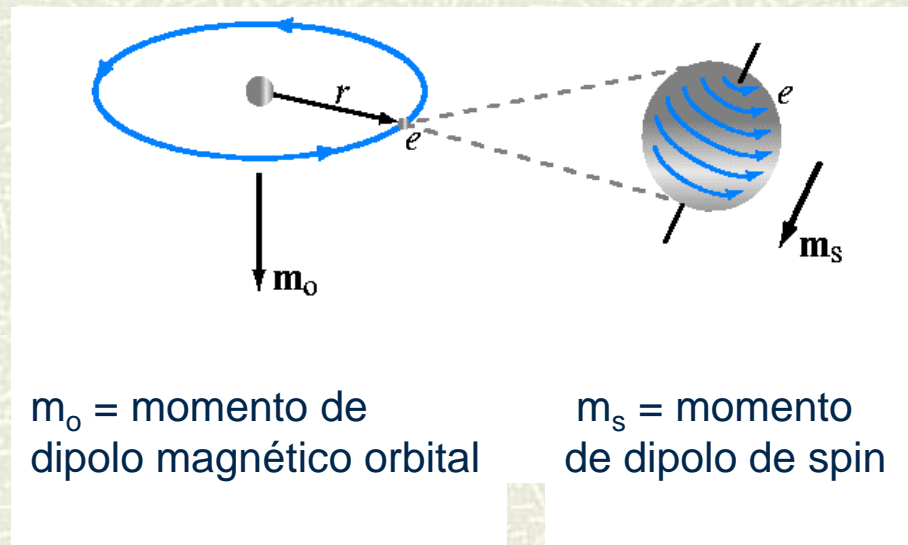
Lei de Gauss

Lei de Ampère

Lei de Faraday

Origem Microscópica das Propriedades Magnéticas da Matéria

- Presença de momentos de dipolos magnéticos nos átomos



$$[m] = [A \cdot m^2]$$

Momento magnético resultante no átomo

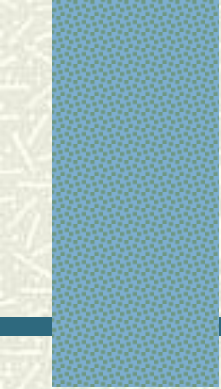
No. atômico	Elemento	Estrutura Eletrônica de elementos 3d					Momento (μ_B)
21	Sc	↑					1
22	Ti	↑	↑				2
23	V	↑	↑	↑			3
24	Cr	↑	↑	↑	↑	↑	5
25	Mn	↑	↑	↑	↑	↑	5
26	Fe	↑↓	↑	↑	↑	↑	4
27	Co	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	3
28	Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	2
29	Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	0

↑ = orientação do spin eletrônico

ALGUNS MOMENTOS ORBITAIS E DE SPIN SE CANCELAM

O MOMENTO LÍQUIDO DO ÁTOMO É A SOMA DOS MOMENTOS ORBITAL E SPIN QUE NÃO SE CANCELAM

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



Diferentes Tipos de Propriedades Magnéticas da Matéria

Diamagnetismo

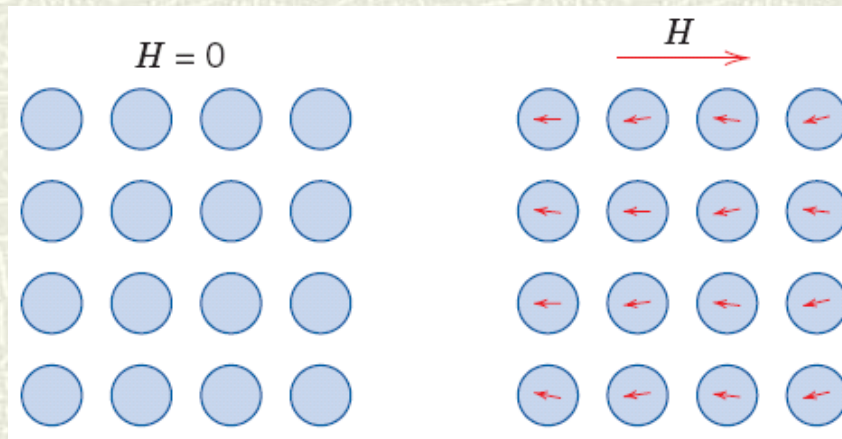
Momento magnético não-permanente, aparece apenas na presença de campo magnético. É importante em materiais que têm átomos com última camada completa.

Induzido pela mudança do movimento orbital do elétron. O momento magnético induzido é muito pequeno e na direção oposta à do campo aplicado.

χ_m é negativo e muito pequeno

$$\chi_m < 0 \quad \rightarrow \quad \mu_r < 1 \quad e \quad B < \mu_0 H.$$

Todo material apresenta diamagnetismo!



Paramagnetismo

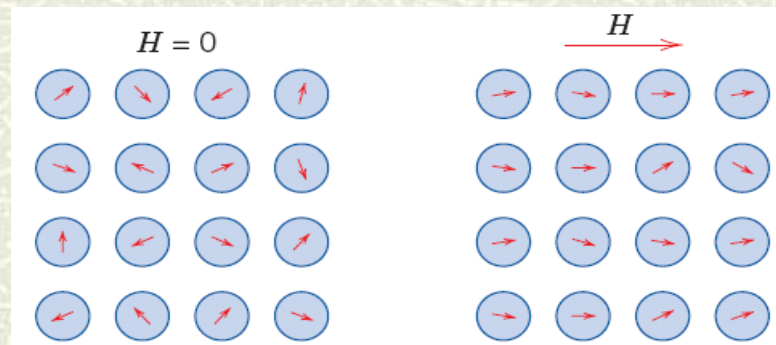
Momento magnético permanente (spin + orbital) mesmo na ausência de campo magnético.

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 $B > \mu_0 H$.



Antiferromagnetismo

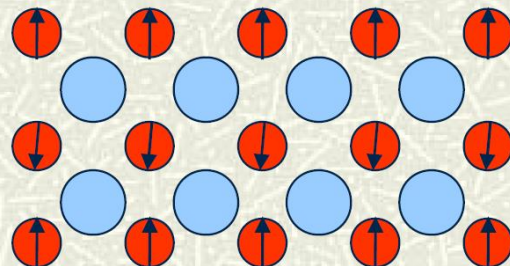
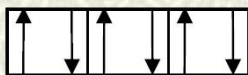
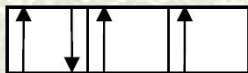
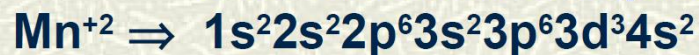
Alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos (spin) permanentes de átomos vizinhos

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

Mn^{+2} tem momento magnético líquido.



subcamada incompleta



Ferromagnetismo

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 $B \approx \mu_0 M$.

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

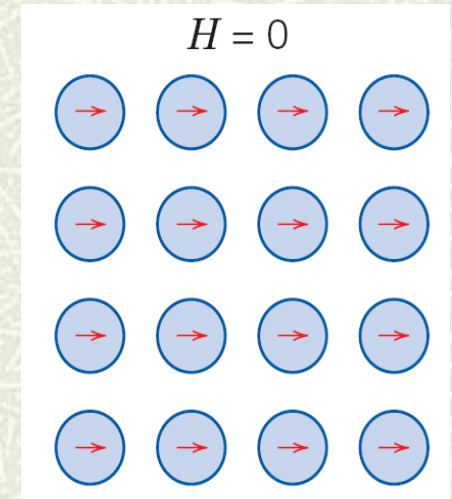
Interação (de troca) entre dipolos: **alinhamento paralelo**.

A contribuição importante para a magnetização vem do spin.

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 $\times \mu_B$

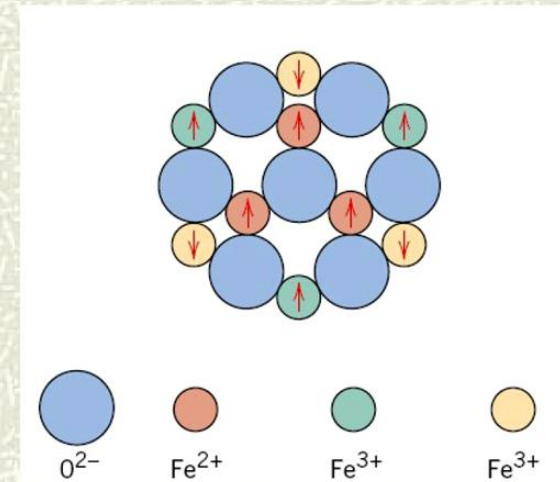
Fe \rightarrow **2,22** μ_B

Co \rightarrow **1,72** μ_B

Ni \rightarrow **0,60** μ_B

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

- Paramagnetismo
- Diamagnetismo
- Antiferromagnetismo

Fortes

- Ferromagnetismo
- Ferrimagnetismo

Susceptibilidade de Materiais Paramagnéticos e Diamagnéticos

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (H + M)$$

$$M = \chi_m H$$

$$M \approx 0$$



$$B \approx \mu_0 H$$

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