

* Capítulo 2: Definições e diamagnetismo

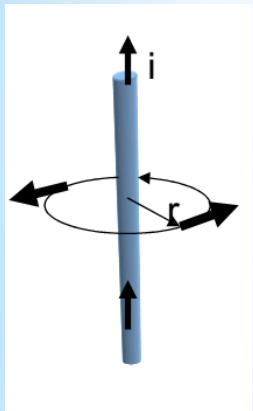
Prof. J. A. H. Coaquira

* Campos magnéticos

Campo Magnético: campo de forças produzido por cargas em movimento (correntes)

Duas grandezas relacionadas:

H intensidade de campo magnético
corrente elétrica (I) num condutor (Lei de Biot-Savart)



$$dH = \frac{I}{4\pi} \frac{dl \times r}{r^3}$$

H independe do meio

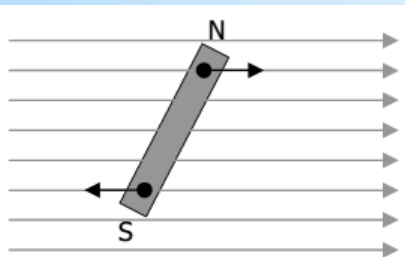
SI	CGS
[H]=[Am ² /m ³]	[H]=[Oe]
=[A/m]	1Oe = 10 ³ /4π A/m

B indução magnética ou **campo magnético**
(**Depende do meio, resposta do meio**)

Sempre que for gerado um H por uma corrente I

* O meio responde com o aparecimento de uma força (força de Lorentz)

* Torque



* Campos magnéticos

Unidades de B

$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \rightarrow$ força de Lorentz

SI

CGS

$$[\text{N}] = [\text{C}][\text{m/s}][\text{B}]$$

$$[\text{B}] = [\text{G}]$$

$$[\text{B}] = [\text{N}][\text{C}]^{-1}[\text{m/s}]^{-1}$$

$$1\text{G} = 10^{-4}\text{T}$$

$$[\text{B}] = [\text{N}][\text{Am}] = [\text{T}]$$

relação entre B e H

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

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$

Permeabilidade
do vácuo

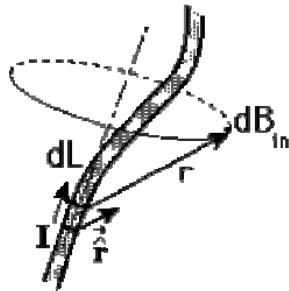
Mesmo campo
magnetizante
(unidades
diferentes)

Como gerar um campo magnético?

- 1) Correntes macroscópicas em um fio condutor.
- 2) Correntes microscópicas associadas a elétrons em orbitais atômicos.

* Campo magnético

■ Fio Condutor: Biot-Savart

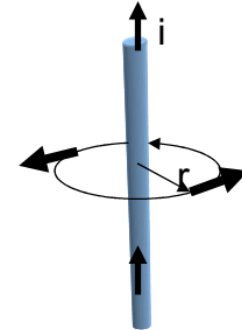


$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{L} \times \hat{r}}{4\pi r^2}$$

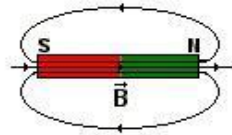
■ Fio Infinito

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

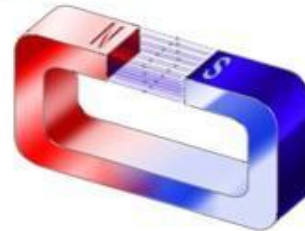
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



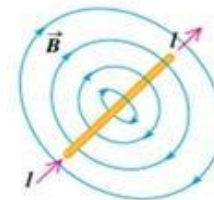
Campo magnético gerado por um íman em barra



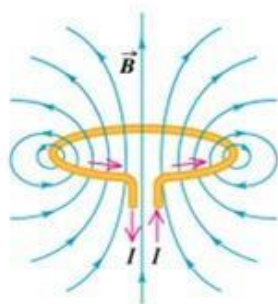
Campo magnético gerado por um íman em U



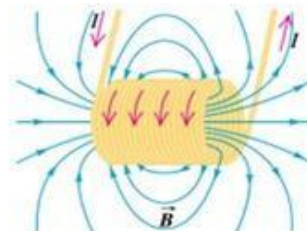
Campo magnético gerado por um fio retilíneo



Campo magnético gerado por uma espira.

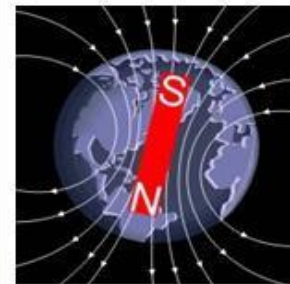


Campo magnético gerado por um solenóide.



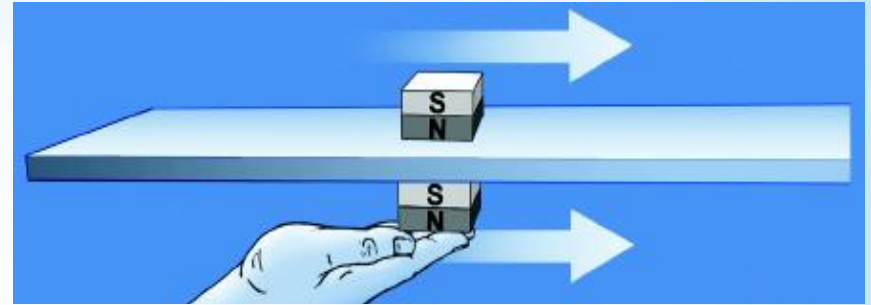
nota: no interior do solenóide as linhas de campo são retilíneas e paralelas.

Campo magnético gerado pelo planeta Terra



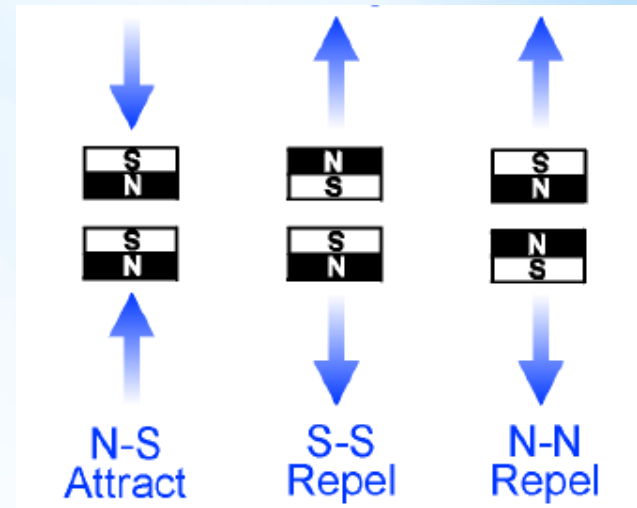
* Propriedades dois imas

- * Plásticos, madeira e a maioria dos materiais isolantes são transparentes a forças magnéticas.
- * Metais condutores como o alumínio também permitem a passagem das forças magnéticas, mas podem alterar as forças.



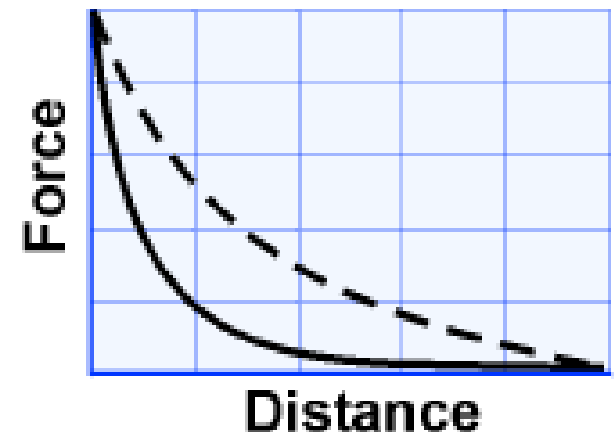
* Força magnética

- * Ímãs exercem forças entre si.
- * As forças dependem do alinhamento dos pólos.
- * A intensidade da força entre ímãs depende da distância entre eles.
- * A força magnética decresce com a distância muito mais rápido que a força da gravidade ou elétrica.



Comparing force vs. distance

- - - Electrical force and gravity
(inverse square law)
- Force between two magnets



* Momento magnético

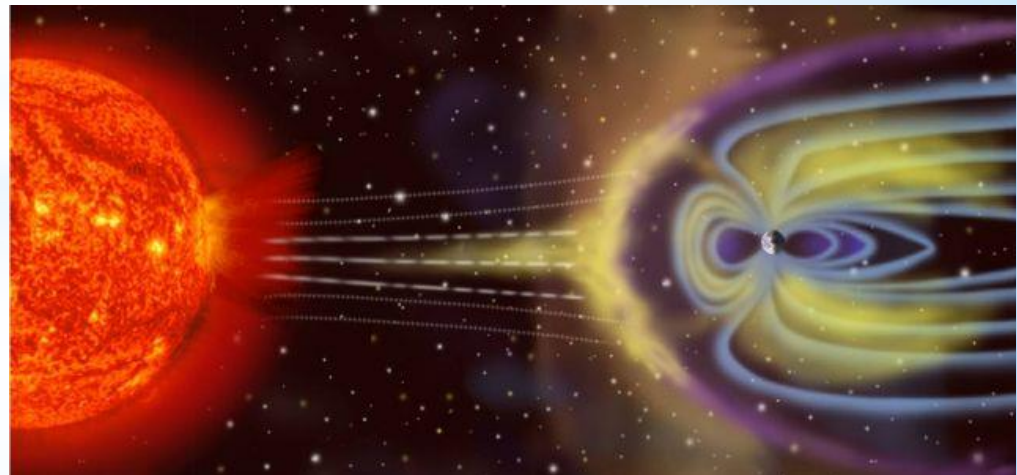
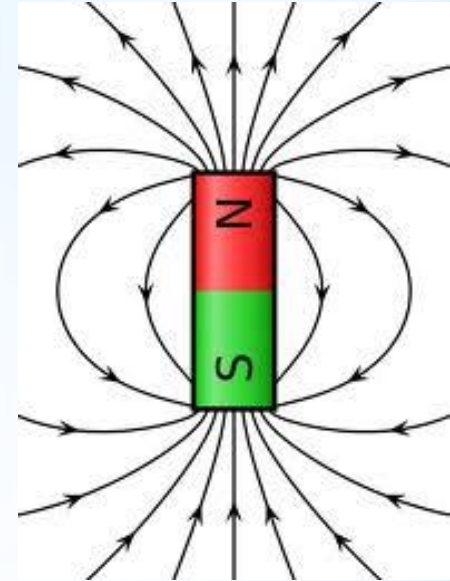
* momento magnético $\vec{\mu}$ é definido:

$$\vec{\mu} = \frac{1}{2} \int \vec{r}' \times \vec{J}(\vec{r}') d^3 r'$$

* Neste caso, o campo magnético é dado por:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{\mu} \cdot \vec{r})}{r^5} \vec{r} - \frac{\vec{\mu}}{r^3} \right]$$

Campo magnético dipolar!



Momento magnético

Table 3.1. Properties of the electron

Mass	m_e	9.109×10^{-31} kg
Charge	$-e$	-1.6022×10^{-19} C
Spin quantum number	s	1/2
Spin angular momentum	$\frac{1}{2}\hbar$	5.273×10^{-34} J s
Spin g-factor	g	2.0023
Spin magnetic moment	m	-9.285×10^{-24} A m ²
Classical radius $\mu_0 e^2 / 4\pi m_e$	r_e	2.818×10^{-15} m

- Origem do momento magnético atômico:
 - movimento orbital** do elétron em torno do núcleo
 - movimento de spin** do elétron

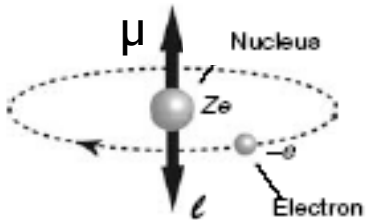
Clássico: $\mu \rightarrow$ corrente fluindo em um circuito fechado

$$\mu = I \cdot A$$

- correntes convencionais
- elétron em órbita

Modelo de Bohr

- elétron em órbita circular



$$A = \pi r^2$$

$$v = \omega/2\pi$$

$$I = q \cdot t^{-1} = -e \cdot \omega/2\pi$$

- com momento angular orbital:

$$\underline{L} = m_e \underline{v} \times \underline{r} \rightarrow L = m_e \omega \cdot r^2$$

- Momento magnético orbital será:

$$\mu_{orb} = I \cdot A = -\frac{1}{2} \cdot e \cdot \omega \cdot r^2$$

$$\underline{\mu}_{orb} = - (e / 2m_e) \cdot \underline{L}$$

antiparalelos

razão
giromagnética

- L : *valores discretos* $\rightarrow L = n \cdot \hbar$, onde $n = 1, 2, 3, 4, \dots$
- Logo μ_{orb} *é quantizado*

$$\mu_{orb} = \hbar e / 2m_e$$

$$\mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

magneton de Bohr

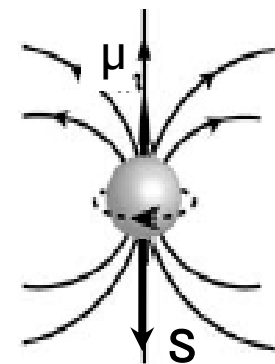
unidade fundamental do magnetismo

* Momento magnético

- Movimento de spin do elétron → momento magnético de spin μ_S

$$\mu_S = -(e/m)S \quad \text{onde} \quad S = \hbar \cdot s \quad \text{e} \quad s = \pm 1/2$$

Note: contribuição de spin **2X** maior do que contribuição angular



- Momento magnético total:

$$\underline{\mu}_T = \underline{\mu}_{orb} + \underline{\mu}_S$$

$$\underline{\mu}_T = -(e/2m)\underline{L} - (e/2m)2\underline{S}$$

$$\underline{\mu}_T = -g (e/2m) \underline{J}$$

$$\begin{cases} \underline{J} = \text{momento ang. total} \\ g = \text{fator giromagnético} \end{cases}$$

- g : fator de Landé

$$1 \leq g \leq 2 \quad \begin{cases} g = 1 \text{ somente orbital} \\ g = 2 \text{ somente spin} \end{cases}$$

Podemos escrever:

$$\begin{aligned} \mu_T &= -g (e/2m) J \\ &= -g \left(\frac{e\hbar}{2m} \right) j; \quad J = \hbar j \\ &= -g \mu_B j \end{aligned}$$

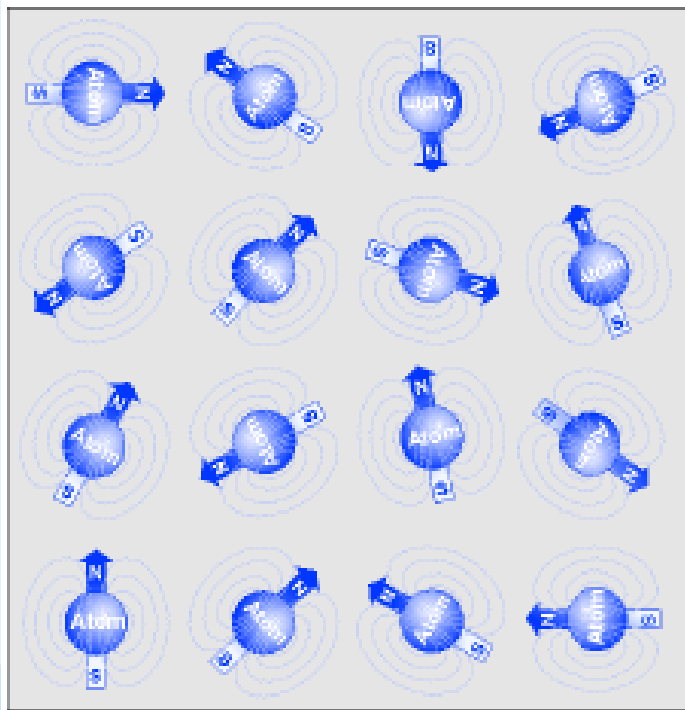
onde j é sempre semi-inteiro

$$\mu_T = -g \mu_B j$$

* Magnetização

* Seja o momento magnético de um átomo $\vec{\mu}_i$, a magnetização de um conjunto de N átomos contidos num volume V é definida como

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V}$$



* Campos magnéticos

Grandezas magnéticas

- * B é a indução magnética, campo magnético ou densidade do fluxo magnético.
- * H é a intensidade magnética.
- * M é a magnetização do meio

A relação entre eles

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

No vácuo, quando $M=0$ (sem a presença de matéria)

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

onde $\mu_0/4\pi=10^{-7}$ H/m, permeabilidade no vácuo.

B e H referem-se ao mesmo campo magnetizante.

* Susceptibilidade

- * Para a grande maioria dos materiais, a magnetização é proporcional ao campo magnético aplicado (campos baixos).

$$\chi = \frac{M}{H}$$

No sistema internacional de unidades (SI), como

$$\vec{H} = \vec{B}/\mu_0 - \vec{M}, \chi \text{ é adimensional.}$$

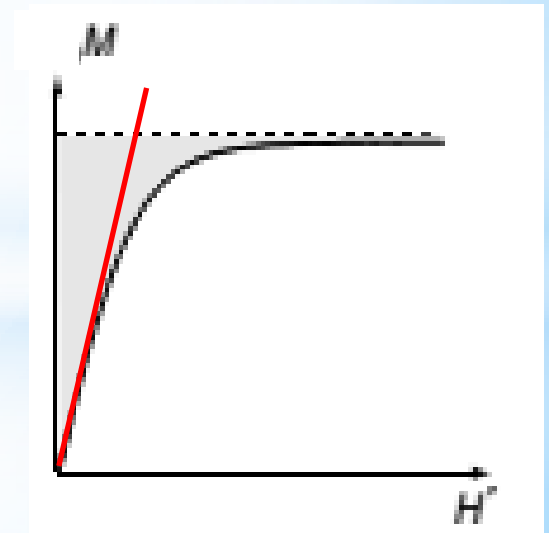
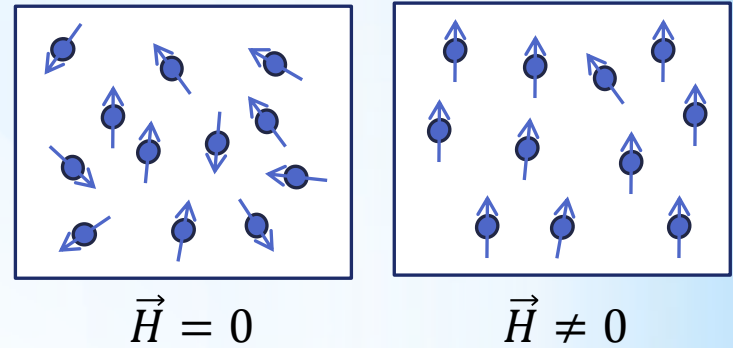
- * Na prática é mais conveniente introduzir a susceptibilidade molar

$$\chi_{mol} = \chi V_{mol}$$

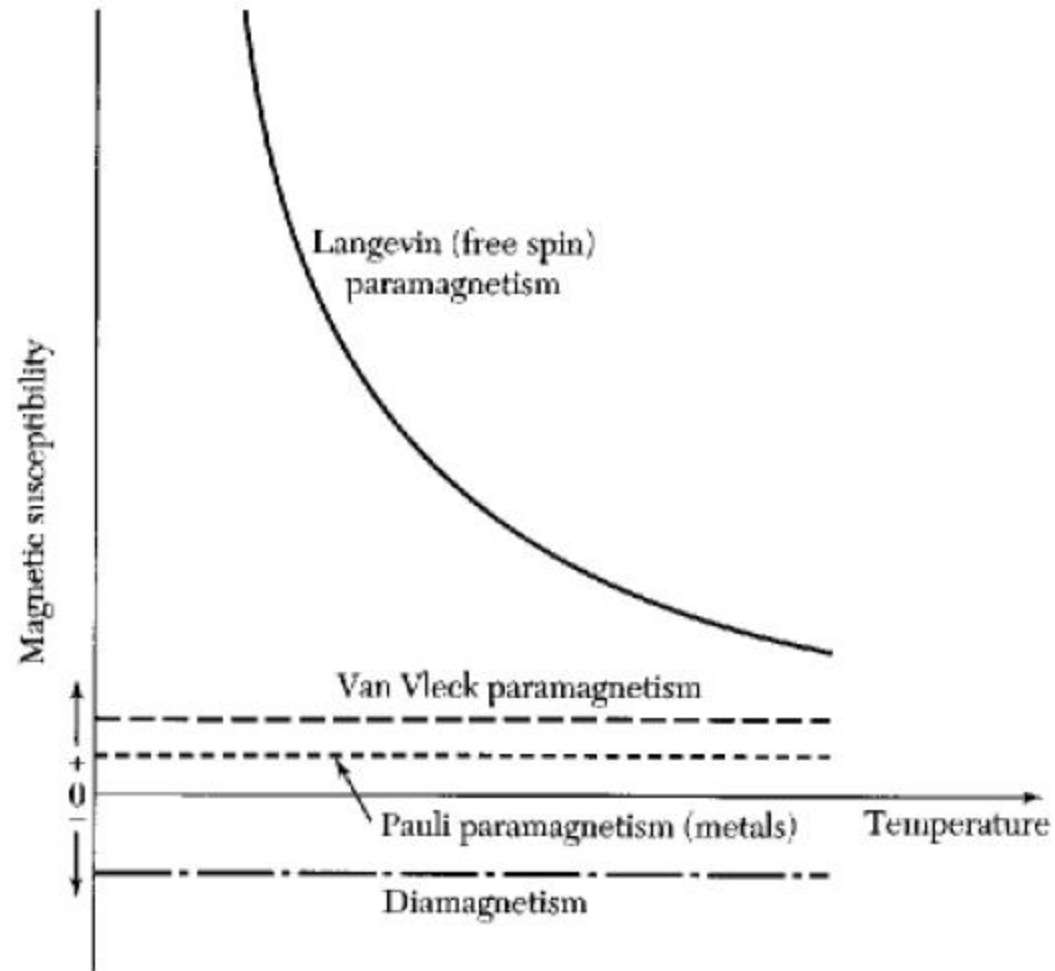
$$[\chi_{mol}] = \text{m}^3 / \text{mol}$$

- * Susceptibilidade mássica:
 $[\chi_m] = \text{m}^3 / \text{kg}$

$$\chi_m = \chi / \rho$$

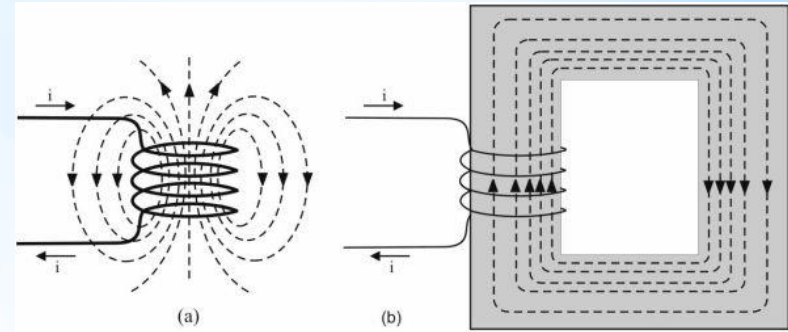


* Susceptibilidad



Permeabilidade magnética

- ❑ A permeabilidade magnética mede a capacidade de um material em "aceitar" linhas de indução em seu interior.
- ❑ Quanto maior for a permeabilidade de um material, mais linhas de indução em seu interior.
- ❑ Conceito similar à condutividade elétrica de um corpo.



Distribuição das linhas de campo na proximidade de um material magnético e não magnético!

- ❑ Como $B = \mu_0(H + M)$

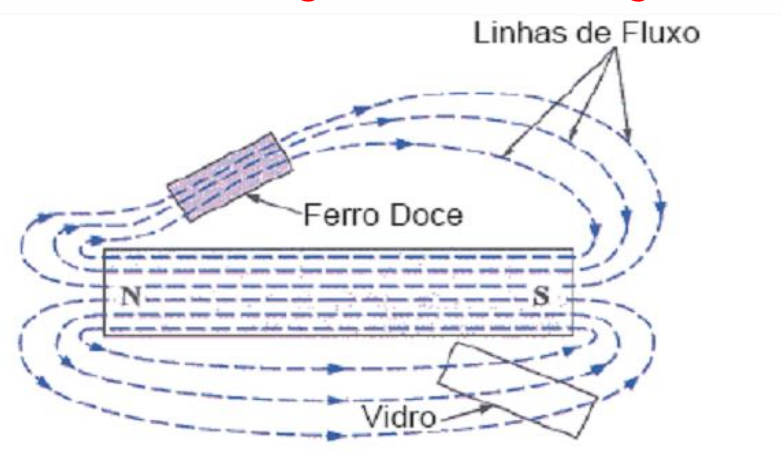
$$\frac{B}{H} = \mu_0 \left(1 + \frac{M}{H} \right)$$

Sabendo que $\chi = \frac{M}{H}$,
A permeabilidade é:

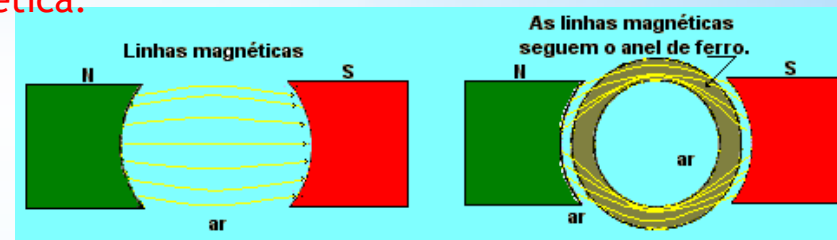
$$\mu = \frac{B}{H}$$

Então

$\mu = \mu_0(1 + \chi)$ ou $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi$ (permeabilidade relativa)



Efeito da alta permeabilidade do ferro na blindagem magnética.



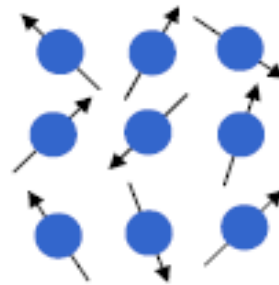
Materiais magnéticos

- Origem dos momentos magnéticos
- Tipo de interação entre os momentos

- Magnetismo Fraco

- Diamagnetos

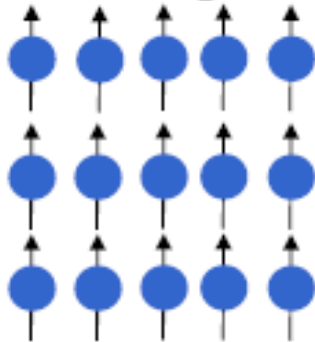
- Paramagnetos



- Magnetismo Forte

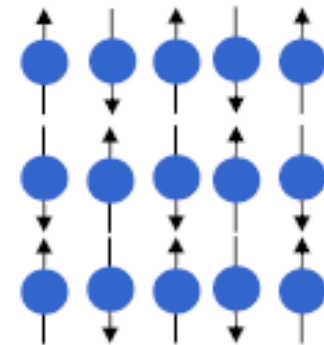
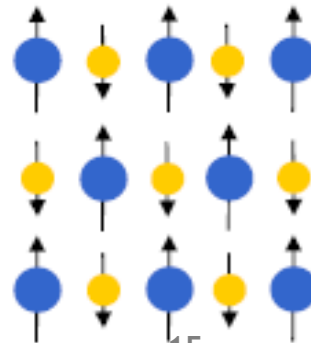
- Materiais Ordenados:

- Ferromagnetos



- Ferrimagnetos

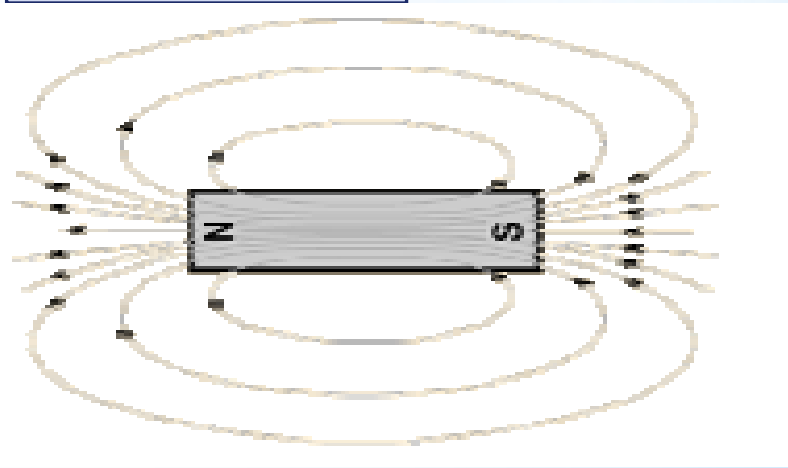
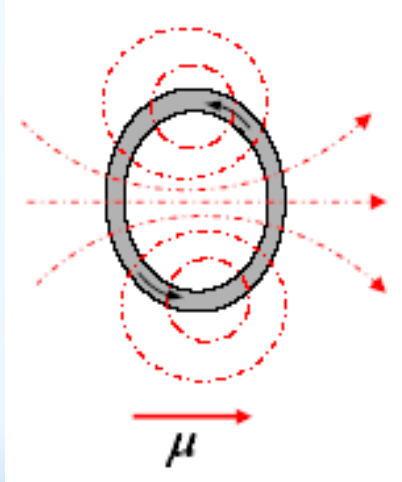
- Antiferromagnetos



* Diamagnetismo

- * Materiais diamagnéticos não possuem momento magnético permanente

Origem: variação do momento orbital dos elétrons induzida pela ação de um campo magnético (Lei de Lenz)

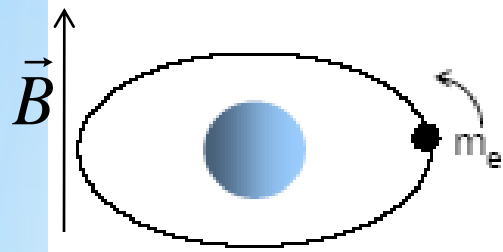


- * Resposta se opõe ao campo $\rightarrow \chi = \frac{M}{H} < 0$ ($\approx -10^{-6}$ MUITO PEQUENO)

- * Todo material apresenta diamagnetismo

DIAMAGNETISMO: DESCRICAO CLASSICA

■ elétron em órbita circular



$$A = \pi a^2$$
$$v = \omega / 2\pi$$

* Corrente equivalente

$$I = ev = e\omega / 2\pi$$

* Momento magnético

$$\mu = IA = e\omega a^2 / 2$$

* Orbitando sob a força central

$$F = m_e \omega^2 a$$

* Se aplicamos um campo magnético na direção z. A força de Lorentz aparece

$$F_L = evB = e\omega aB$$

* Assumindo que o movimento não muda o raio a, teremos

$$F - F_L = m_e \omega'^2 a$$

Do modo que

$$m_e \omega^2 a - e\omega aB = m_e \omega'^2 a$$

ou

$$\omega'^2 - \omega^2 = -\frac{e\omega B}{m_e}$$

DIAMAGNETISMO: DESCRICAO CLASSICA

* Se a $\Delta\omega = \omega' - \omega$ for pequena

$$\omega'^2 - \omega^2 \approx 2\omega\Delta\omega$$

* entao

$$\Delta\omega = -\frac{eB}{2m_e}$$

Onde $eB/2m_e$ e a frequencia de Larmor

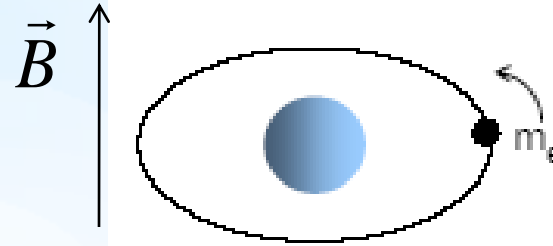
* Substituindo em

$$\mu = IA = e\omega a^2 / 2$$

Percebemos uma mudanca no momento magnetico

$$\Delta\mu = -\frac{e^2 a^2}{4m_e} B$$

■ elétron em órbita circular



$$A = \pi a^2$$

$$v = \omega / 2\pi$$

* Lembrando que a é o raio da orbita perpendicular a B .

Para uma distribuicao esfericamente simetrica, temos

$$a^2 = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle = \frac{2}{3} [\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle + \langle z^2 \rangle] = \frac{2}{3} \langle r^2 \rangle$$

entao

$$\Delta\mu = -\frac{e^2 \langle r^2 \rangle}{6m_e} B$$

DIAMAGNETISMO: DESCRICAO CLASSICA

* Para N átomos por unidade de volume e Z elétrons por átomo, temos

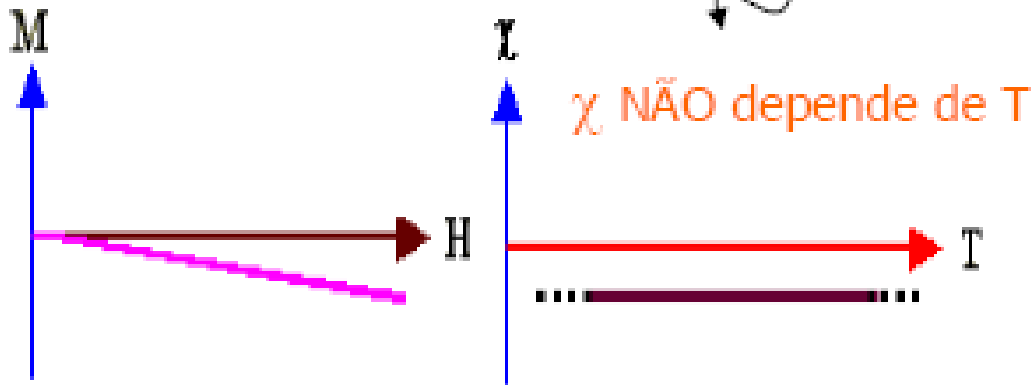
$$M = NZ\Delta\mu$$

* Então

$$\chi = \frac{M}{H} = \mu_0 \frac{M}{B} = -\frac{\mu_0 NZe^2}{6m_e} \langle r^2 \rangle$$

* Características:

- **Negativa**
- **Independente da temperatura**
- **Sempre presente mesmo quando não há momentos permanentes nos átomos.**



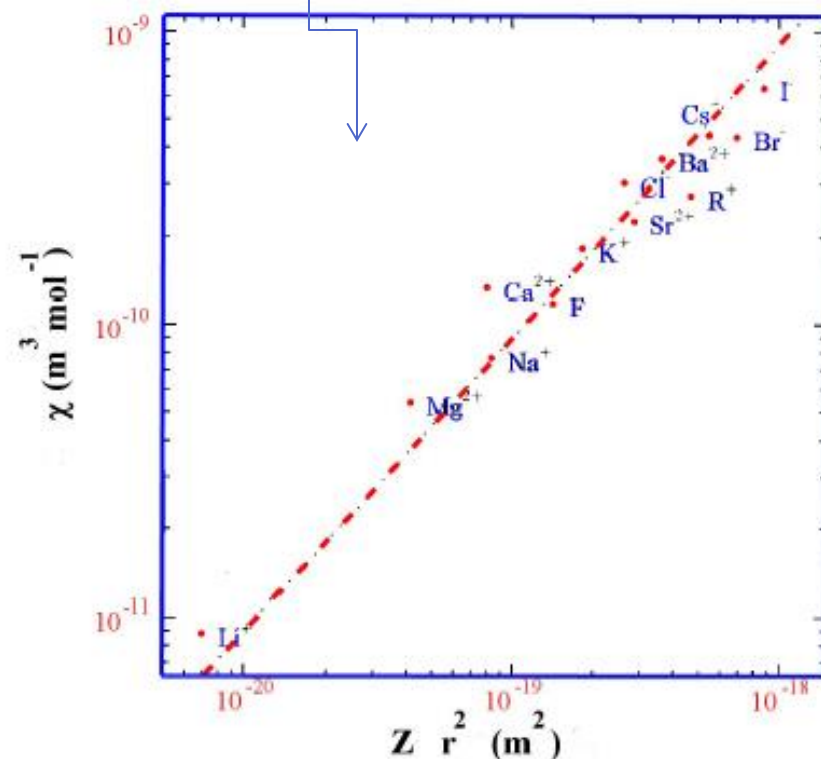
Diamagnetismo

Valores absolutos

Table 3.2. Diamagnetic susceptibilities χ_m of common ions. Units are $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (after Sellwood, 1956)

H ⁺	0	Be ²⁺	0.6	Sc ³⁺	1.7	C ⁴⁺	0.1	F ⁻	7.2
Li ⁺	1.1	Mg ²⁺	1.6	Y ³⁺	1.8	Si ⁴⁺	0.4	OH ⁻	8.8
Na ⁺	2.7	Ca ²⁺	2.5	La ³⁺	1.8	Ge ⁴⁺	1.2	Cl ⁻	9.2
K ⁺	4.2	Sr ²⁺	2.1	Lu ³⁺	1.2	Sn ⁴⁺	1.7	Br ⁻	5.6
Rb ⁺	2.9	Ba ²⁺	2.9			Pb ⁴⁺	1.4	I ⁻	5.1
Cs ⁺	2.9			B ³⁺	0.2				
Cu ⁺	2.4	Zn ²⁺	1.9	Al ³⁺	0.9	Ti ⁴⁺	1.3	O ²⁻	9.4
Ag ⁺	2.8	Cd ²⁺	2.5	Ga ³⁺	1.4	Zr ⁴⁺	1.4	S ²⁻	14.8
Au ⁺	2.5	Hg ²⁺	2.3	In ³⁺	2.1	Hf ⁴⁺	1.1	Se ²⁻	7.6
NH ₄ ⁺	8.0	Pb ²⁺	1.7			U ⁶⁺	1.0	Te ²⁻	6.8

* Os valores do raio atômico podem ser calculados!



$\chi_{\parallel} (10^{-6})$ $\chi_{\perp} (10^{-6})$



Benzene

-3.5 -9.1



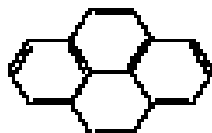
Naphthalene

-5.4 -17.4



Anthracene

-7.0 -25.2



Pyrene

-8.1 -30.3

* Diamagnetismo

Aplicação: Levitação magnética

