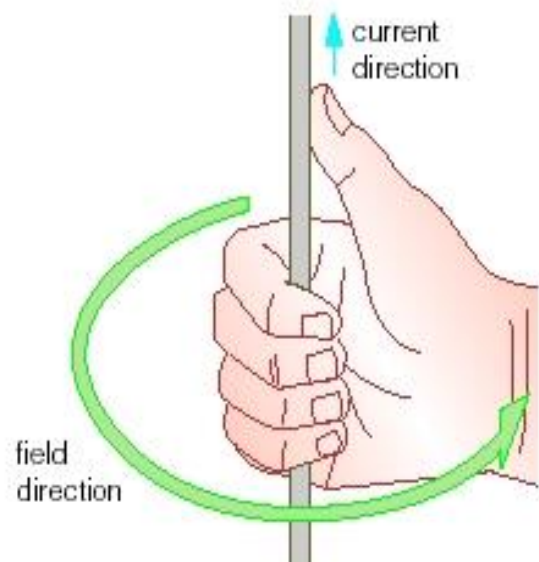


Introdução ao Magnetismo e Propriedades Magnéticas

Campo gerado por uma corrente

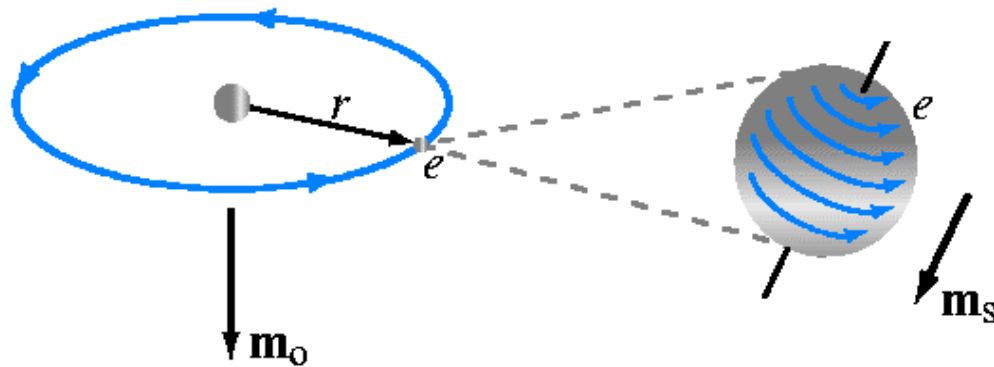
Elétrons em movimento geram campo magnético



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

Origem Microscópica Propriedades Magnéticas da Matéria

- Presença de momentos de dipolos magnéticos nos átomos **devido aos elétrons em movimento**



m_o = momento de dipolo magnético orbital

m_s = momento de dipolo de spin

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

Momentos de dipolo são micro-campos magnéticos gerados por cada elétron.

Equações de Maxwell

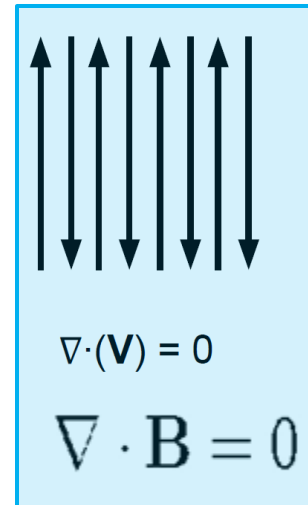
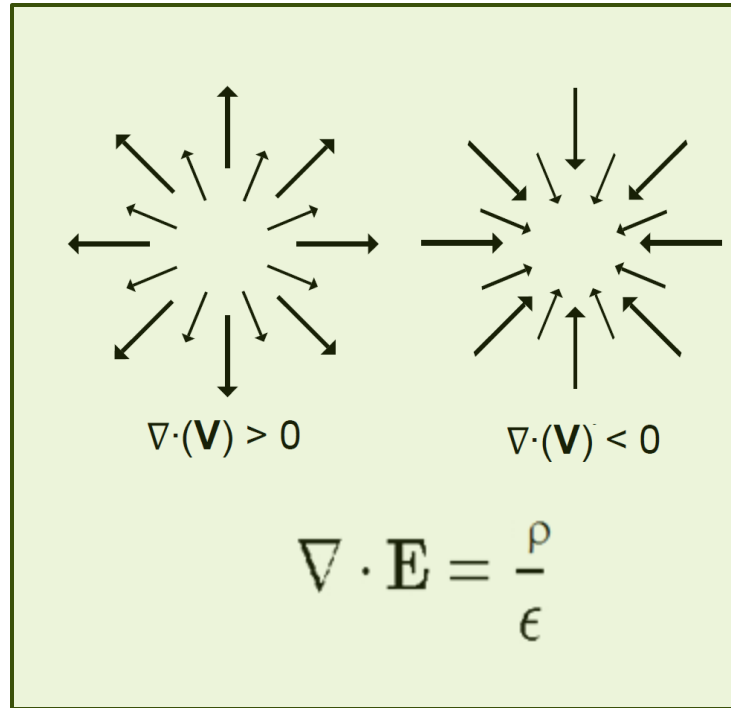
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	}	Lei de Gauss
$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$		
$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$		Lei de Ampère
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$		Lei de Faraday

O que é mesmo divergente?????

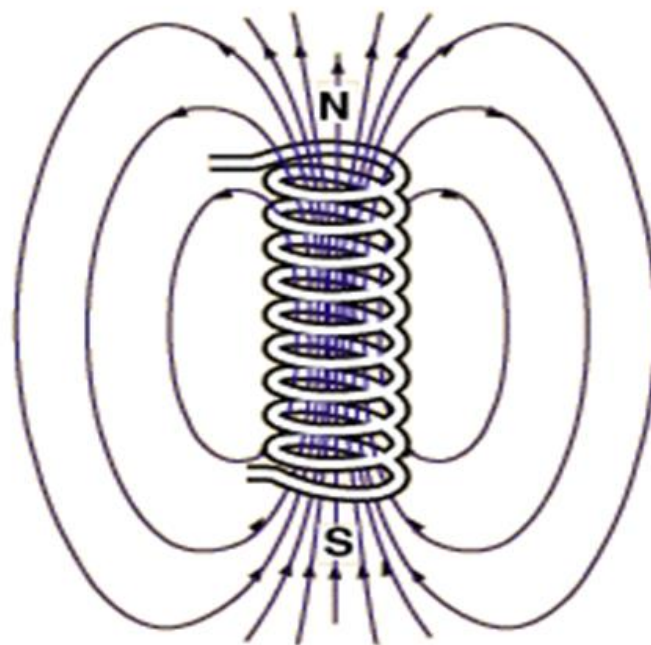
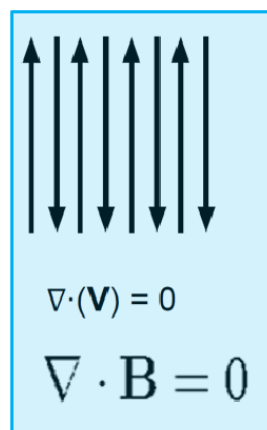
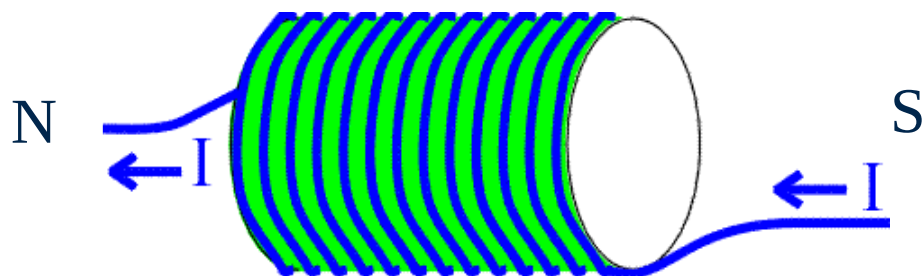
Se $\mathbf{F} = P\mathbf{i} + Q\mathbf{j} + R\mathbf{k}$ é um campo vetorial (espaço dos Reais em 3D), o divergente de $\mathbf{F}$ é:

$$\text{div } \mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F}$$

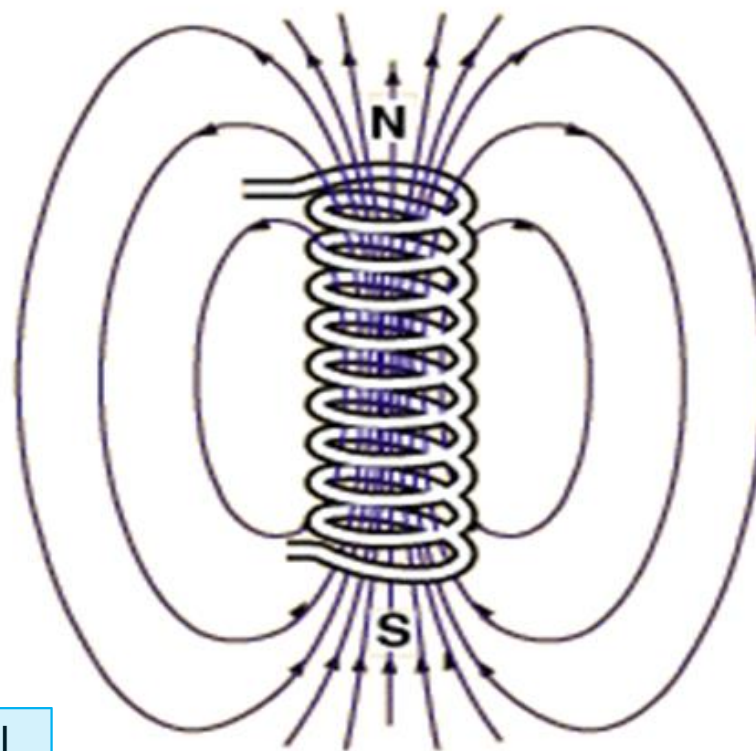
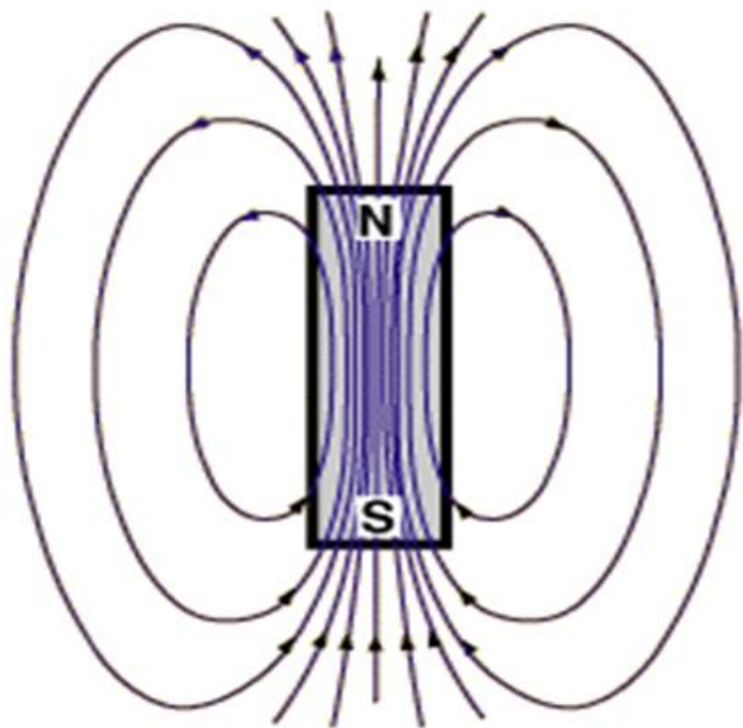
$$\begin{aligned}\text{div } \mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F} &= \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot (P, Q, R) \\ &= \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z}.\end{aligned}$$

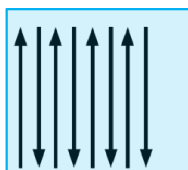


Campo de um solenóide



Campo de um ímã





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

E rotacional?????

$$\text{Se } \mathbf{F} = P\mathbf{i} + Q\mathbf{j} + R\mathbf{k}$$

$$\text{rot } \mathbf{F} = \nabla \times \mathbf{F} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \times (P, Q, R)$$

$$= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ P & Q & R \end{vmatrix}$$

Variação espacial

$$= \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) \mathbf{k}$$

É um vetor

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

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

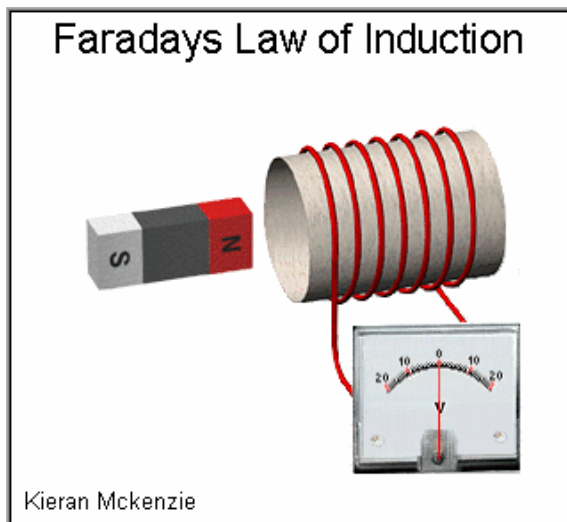
Força eletromotriz ε (V) induzida em uma bobina

Lei de Faraday

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

$$B = \frac{\phi}{A} \quad A = \text{área}$$

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



Variação do campo magnético com o tempo cria um campo elétrico no espaço que por sua vez induzem o movimento dos elétrons na bobina e mede-se uma ddp.

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) ou correntes induzidas. (depende do material)

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

Observação importante

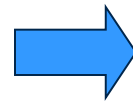
Em materiais supercondutores

- A magnetização (M) significativa existente está relacionada às correntes induzidas neste material devido à aplicação de campo magnético.
- A origem da alta magnetização em supercondutores **não é** devido à presença de momentos de dipolo permanentes orientados (A/m).
- Os momentos de dipolo existem, mas o efeito deles é nulo neste tipo de material comparado às correntes induzidas.

Equações dos Campos Magnéticos

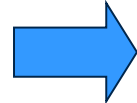
$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}$$

No vácuo



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

No material



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

e

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

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

μ - permeabilidade magnética no material

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

Unidades em Magnetismo

	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	$4\pi M$	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

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

Observações sobre :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 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; também $B = \mu_0 H + J$.
- (c) Magnetização = Momento magnético por unidade de volume
- (d) A designação “emu” não é uma unidade (electromagnetic unit).
- (e) Densidade de energia: $B \cdot H$ e $\mu_0 M \cdot H$ tem unidade no sistema SI de J/m^3 ;
 $M \cdot H$ e $B \cdot H/4\pi$ têm unidade gaussianas erg/cm^3 .

Momento magnético resultante no átomo

		Estrutura Eletrônica de elementos 3d					Momento (μ_B)
No. atômico	Elemento						
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

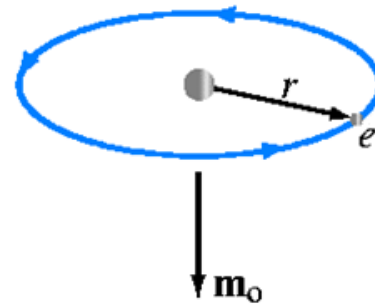
ÁTOMOS COM CAMADAS E SUBCAMADAS CHEIAS NÃO TÊM CAPACIDADE DE SER PERMANENTEMENTE MAGNETIZADAS.

**Propriedades Magnéticas da
Matéria originadas pelo
movimento orbital e spin dos
elétrons nos átomos**

Diamagnetismo

- ▶ 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.
- ▶ $\chi_m < 0$ (muito pequeno) $\rightarrow 0 < \mu_r < 1$ e $B < \mu_0 H$.

Todo material apresenta diamagnetismo!



Momento Angular Orbital e Momento Magnético Orbital

MODELO DE DIPOLO MAGNÉTICO ATÔMICO - $\mu_m = I \cdot A$

unidade = [A.m²]

A = área e I = corrente

Momentos Magnéticos: são originados devido à movimentação de partículas carregadas.

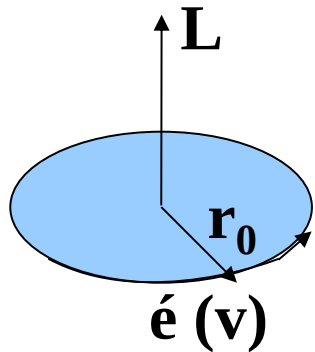
Momento angular (L) e momento magnético (μ_m) relacionados

$$\gamma = \frac{\mu_m}{L} = \text{constante}$$



Razão giromagnética

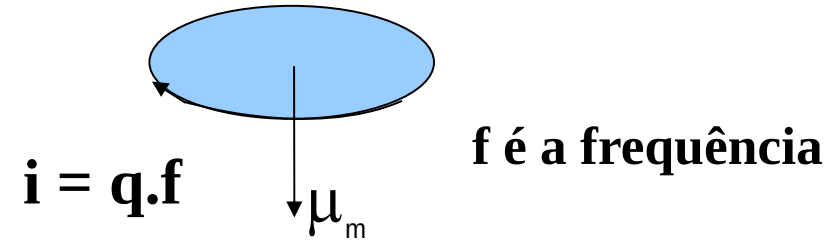
Cálculo da razão giromagnética



$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = m(\mathbf{r} \times \mathbf{v})$$

$$|\mathbf{L}| = m \cdot v \cdot r_0$$

$m = m_e$, massa do elétron



$$\mu_m = (q \cdot f) \cdot (\pi r_0^2) \quad \Rightarrow \quad \omega = 2\pi f = \frac{v}{r_0}$$

$$\mu_m = \frac{q \cdot v \cdot r_0}{2}$$

$$\gamma = \frac{\mu_m}{L} = \frac{q \cdot v \cdot r_0}{2 \cdot m \cdot v \cdot r_0} = \frac{q}{2 \cdot m} = -\frac{e}{2 \cdot m} = -8,78 \times 10^{10} \text{ C/kg}$$

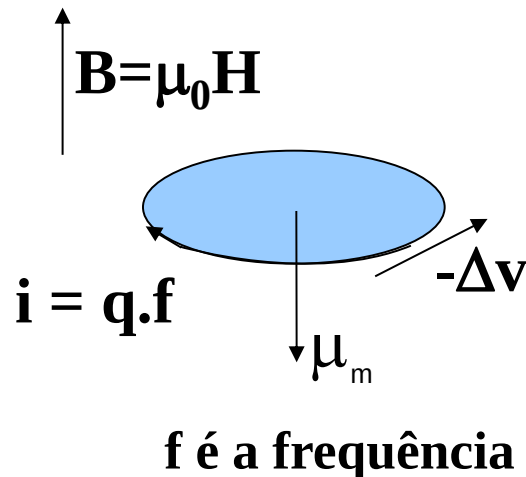
É um número exato em materiais nos quais o **magnetismo é originário do somente do movimento orbital dos elétrons**, ou seja, em matérias diamagnéticos, mas em outros materiais não é. Nos outros é necessário o uso de física quântica

Diamagnetismo Clássico

Lei de Lenz

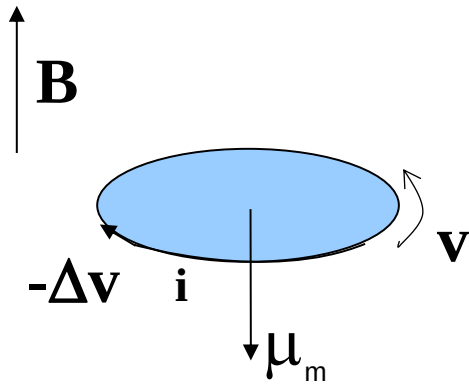
Se um campo magnético é aplicado perpendicular ao plano da órbita de um elétron, a corrente se modifica (variação na velocidade - Δv).

A variação de fluxo $d\phi/dt$ originada a partir do laço de corrente é igual e oposta àquela devido ao campo



**O campo não
modifica o raio da
órbita!**

Diamagnetismo Clássico



$$i = q.f$$

f é a frequência

Há duas forças radiais:

1) A força do campo sobre o elétron: $F_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = -e.v.B$ (FORÇA DE LORENTZ) $\rightarrow \Delta F_L = e.\Delta v.B$

2) A FORÇA CENTRÍFUGA ($F_c = m_e v^2/r$) sofre variação ΔF_c devido à variação da velocidade (reação):

$$\Delta F_c = -2. m_e .v .\Delta v/r \quad \text{fazendo} \quad F_L + \Delta F_c = 0$$

$$e.\Delta v.B - 2. m_e .v .\Delta v/r = 0 \quad v = \frac{er}{2m_e} B$$

$$m = \mu = \frac{q.v.r}{2}$$

$$m = - (e^2 r^2 / 4 m_e) B$$

Susceptibilidade Diamagnética

A magnetização M é dada por:

$$M = N.m$$

N é a
densidade de
átomos

onde: $m = - (e^2 r^2 / 4 m_e) B$

$$M = - \frac{\mu_0 N e^2 Z R^2}{4 m_e} H$$

$$r^2 = Z R^2$$

$$B = \mu_0 H$$

$$M = \chi H$$

$$\chi = \frac{dM}{dH}$$

$$\chi = - \frac{\mu_0 N e^2 Z R^2}{4 m_e}$$

$$\chi < 0$$

Susceptibilidade Diamagnética

Boa concordância com valores experimentais $\chi \approx -10^{-6}$

$\underline{Z}$, $\underline{e}$ e $\underline{m}_e$  **independem de T**
 $\underline{N}$, $\underline{R}^2$  **dependem fracamente de T**

$$\chi = -\frac{\mu_0 N e^2 Z R^2}{4 m_e}$$

gases raros: He, Ne, Ar

gases poliatômicos: H₂, N₂

sólidos iônicos: NaCl

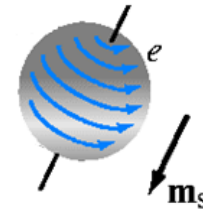
substâncias com ligações covalentes: Si, Ge

Diamagnetismo ocorre para **todas** as substâncias, mas em alguns casos é tão fraco que pode ser desprezado.

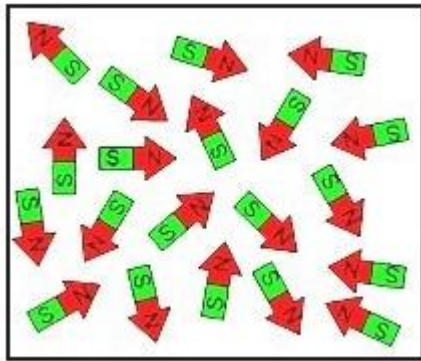
Materiais diamagnéticos são aqueles que não têm contribuição do spin para o momento magnético total.

Paramagnetismo

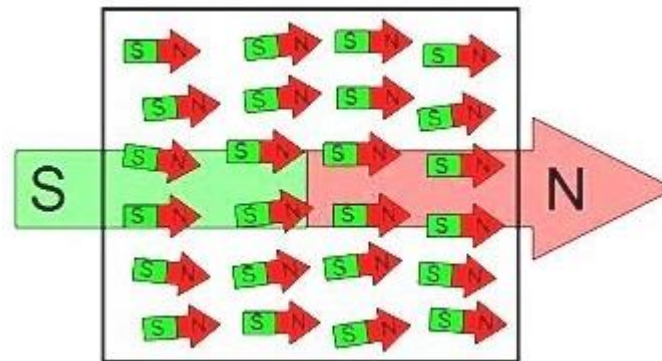
- **Momento magnético permanente (spin) mesmo na ausência de campo magnético.**



Momentos magnéticos permanentes, alinhados aleatoriamente para $H = 0$ (não há interação entre eles)



H
→



Para $H > 0$, 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 $B > \mu_0 H$.

Susceptibilidade de Materiais Diamagnéticos e Paramagnéticos

<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	$+1,09 \times 10^{-4}$

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

Quais as semelhanças e diferenças se compararmos o material diamagnético com paramagnético?

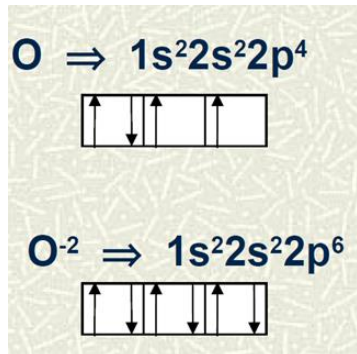
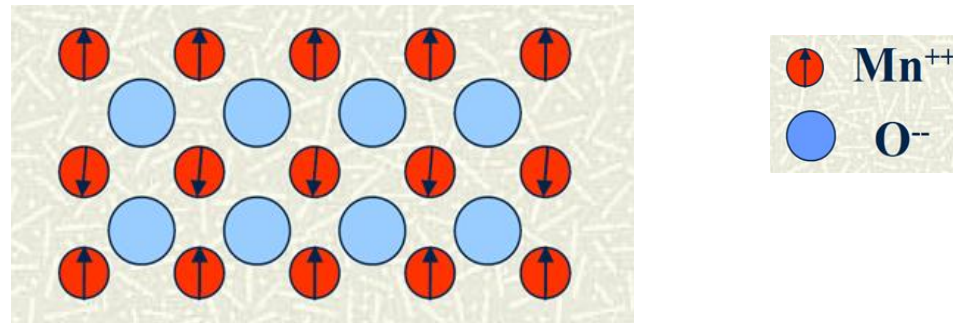
Magnetização ? Susceptibilidade?

Momento magnético permanente?

Antiferromagnetismo

Interação entre os momentos magnéticos >>> Ordenamento $\uparrow\downarrow$

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 permanente não nulo

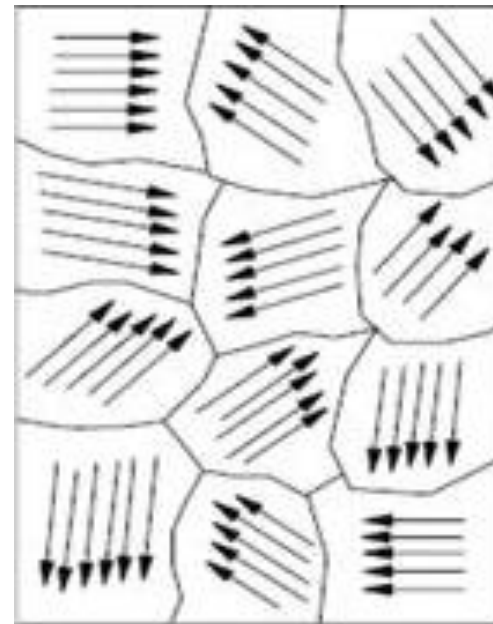
$\text{Mn} \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^5$

$\text{Mn}^{+2} \rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^3$

Ferromagnetismo

Interação entre os momentos magnéticos >>> Ordenamento ↑ ↑

- ❑ Momento magnético permanente (spin) já alinhados, mesmo se $H = 0$, em determinadas regiões do material (domínios magnéticos).
- ❑ Ordenamento é devido à Interação (de troca) entre dipolos: alinhamento paralelo.
- ❑ A contribuição importante para a magnetização vem do spin.



<https://www.intechopen.com/chapters/57295>

Ferromagnetismo - continuação

- ▶ 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
- ▶ $\chi_m \approx 10^3 - 10^5$, significando que $M \gg H$ e $B \approx \mu_0 M$.

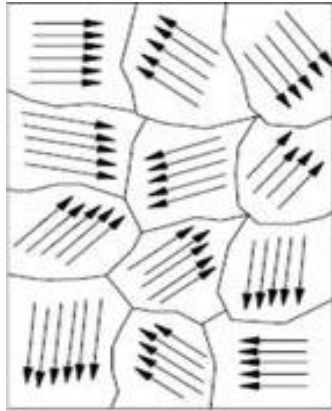
Ferromagnetismo - continuação

► Magnetização de saturação – M_s

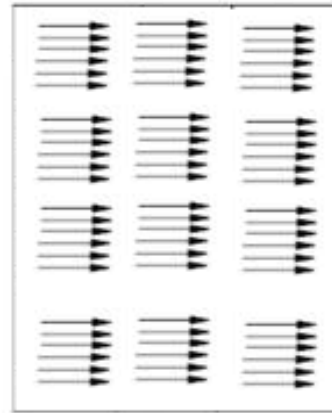
► M_s é o valor máximo possível da magnetização

► (todos os momentos estão alinhados na mesma direção)

$H=0$



$H \gg 0$



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

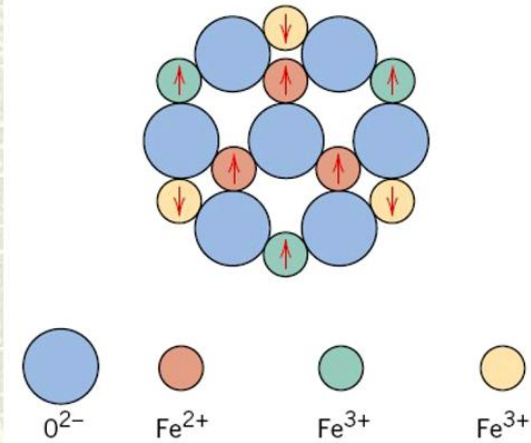
Um **magnéton de Bohr** é o menor valor permitido (não nulo) do momento magnético. É o quantum do momento magnético.

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

Ferrimagnetismo

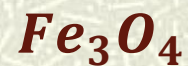
Interação entre os momentos magnéticos >>> Ordenamento $\uparrow\downarrow$

- 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} ($5\mu_B$)

	coordenação octaédrica	coordenação tetraédrica	Momento magnético líquido
Fe^{+3}	$\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$ $\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$ $\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$	$\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow$ $\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow$ $\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow$	Cancelamento completo
Fe^{+2}	$\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$ $\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$	—	

Classificação dos Tipos de Propriedades Magnéticas da Matéria quanto à Intensidade

Fracas

(baixos valores de magnetização)

- Paramagnetismo
- Diamagnetismo
- Antiferromagnetismo

Fortes

(altos valores de magnetização)

- Ferromagnetismo
- Ferrimagnetismo

Classificação dos Tipos de Propriedades Magnéticas da Matéria quanto à Interação entre Momentos Magnéticos

Não interagentes

- Paramagnetismo
- Diamagnetismo

Interagentes

- Ferromagnetismo
- Ferrimagnetismo
- Antiferromagnetismo

**Propriedades Magnéticas da
Matéria originadas por
correntes induzidas**

SUPERCONDUTIVIDADE

Efeito Meissner - Ochsenfeld

Supercondutor “expele” o campo magnético do seu interior

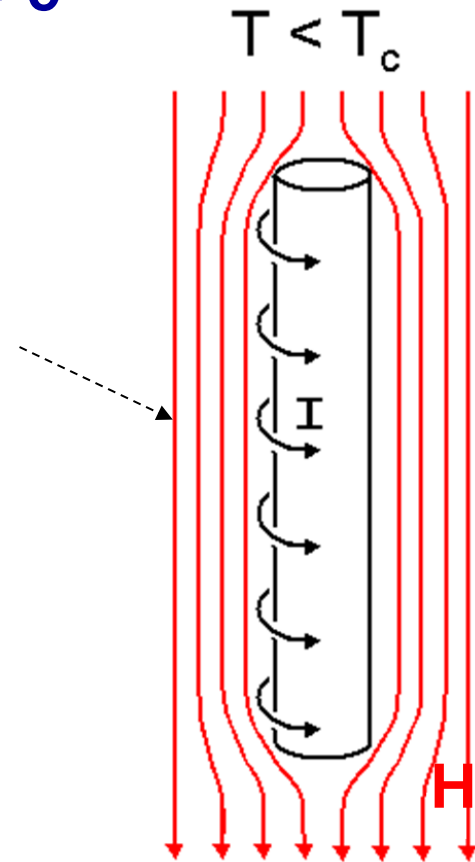


I são correntes supercondutoras – altíssimas, e geram campos magnéticos muito intensos

Efeito Meissner - Ochsenfeld

Supercondutor “expele” o campo magnético do seu interior

→ $B = 0$



Correntes são superficiais de comprimento de penetração λ , somente uma casquinha.

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

$$M = -H$$

$$\chi = -1$$

No diamagnetismo

$\chi < 0$
Mas $\chi \geq -1$



Diamagnetismo Perfeito