

Propriedades Magnéticas I

Magnetismo

- Fenômeno pelo qual certos materiais exercem uma força ou influência atrativa e repulsiva sobre outros materiais

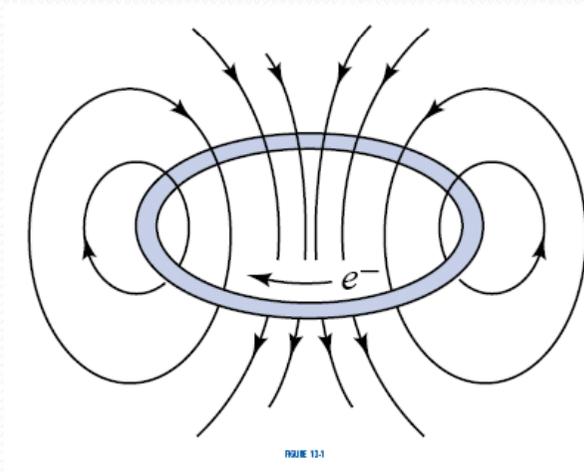
Aplicações mais importantes

- Geradores de potência elétrica
- Transformadores
- Motores elétricos
- Radio
- Televisão
- Telefones
- Computadores
- Componentes de som e vídeo (sistema de reprodução)

Momento Magnético Momento de Dipolo

É originado devido à movimentação de partículas carregadas.

↓
Momento Magnético

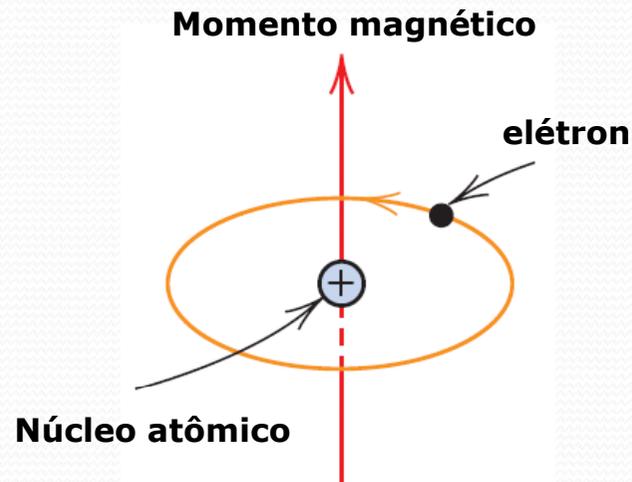


Linhas de força de campo magnético

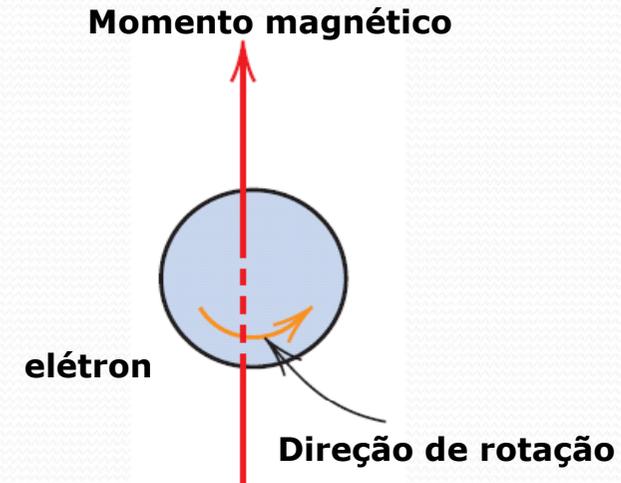
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Origem dos momentos magnéticos no átomo

MOMENTO ORBITAL



MOMENTO DE SPIN



Magneton de Bohr = Quantum de momento magnético para o elétron
 $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2$

Momento de spin: $\pm \mu_B$

Momento orbital: $m_l \mu_B$
(m_l é o no. quântico magnético; $-l < m_l < l$)

Propriedades Magnéticas Macroscópicas = \sum Momentos Magnéticos dos Elétrons Individuais

E

Recordando...

$n=7$

- 7s

— 6p

— 5d

— 4f

$n=6$

- 6s

— 5p

— 4d

$n=5$

- 5s

— 4p

— 3d

$n=4$

- 4s

— 3p

$n=3$

- 3s

— 2p

$n=2$

- 2s

$n=1$

- 1s

$l=0$

$l=1$

$l=2$

$l=3$

s

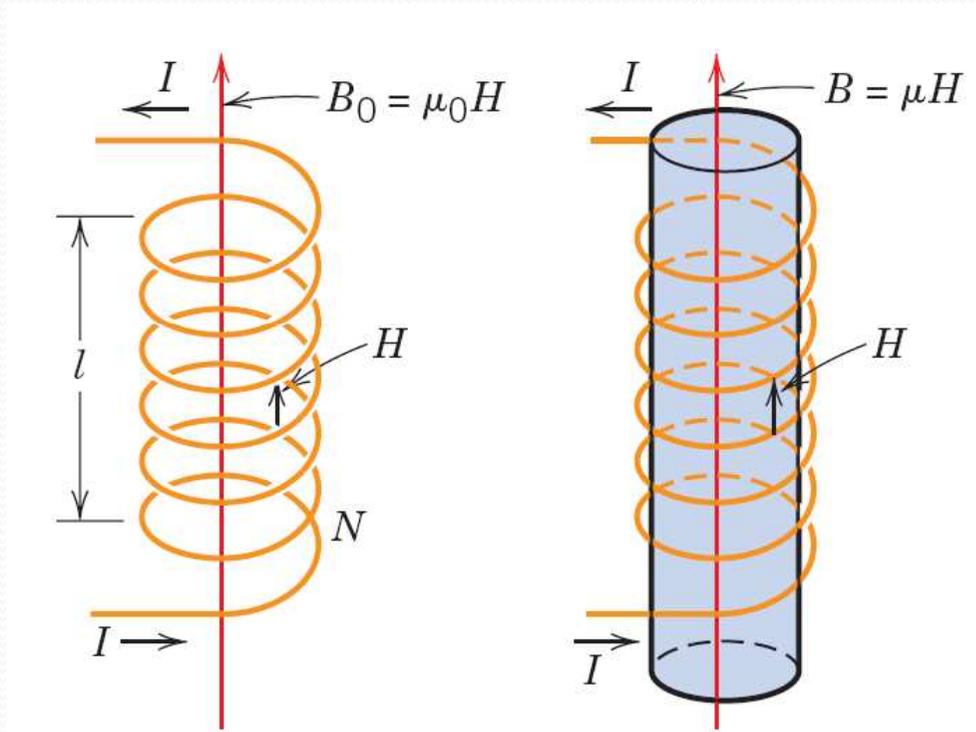
p

d

f

$$-l < m_l < l$$

CAMPO MAGNÉTICO DE UM SOLENÓIDE (BOBINA CILÍNDRICA)



$$H = \frac{NI}{l}$$

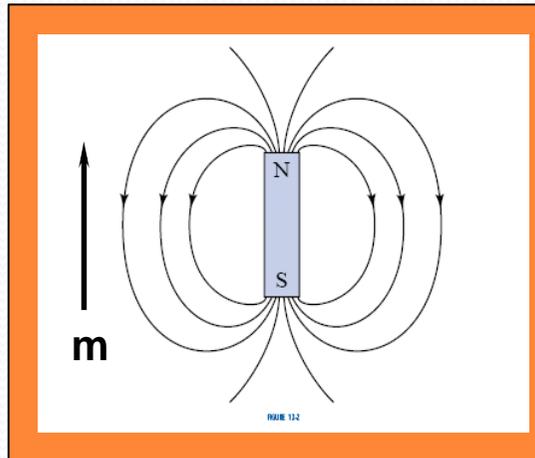
H – campo magnético gerado pela bobina

N – número de espiras (voltas)

l – comprimento do fio

I – corrente elétrica

MODELO DE DIPOLO



- Na presença de campo magnético (H), os dipolos são influenciados, ou sofrem interação com H , da mesma forma que o dipolo elétrico é afetado pelo campo elétrico ϵ
- Sob ação do campo magnético, os dipolos tendem a se orientar na direção do campo

Vetores de Campo Magnético

- B: indução magnética ou densidade de fluxo magnético (Tesla)
- H: campo aplicado (externo) (A/m)
- M: magnetização (A/m)

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

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m ou Wb/(Am)

μ é a permeabilidade magnética do material

$$B_0 = \mu_0 H$$

$$B = \mu H$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$M = \chi_m H$$

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

χ_m é a susceptibilidade magnética do material

Momento magnético resultante no átomo

- **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.**

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

Tipos de Magnetismo

FRACO

- **Diamagnetismo**
- **Paramagnetismo**
- **Antiferromagnetismo**

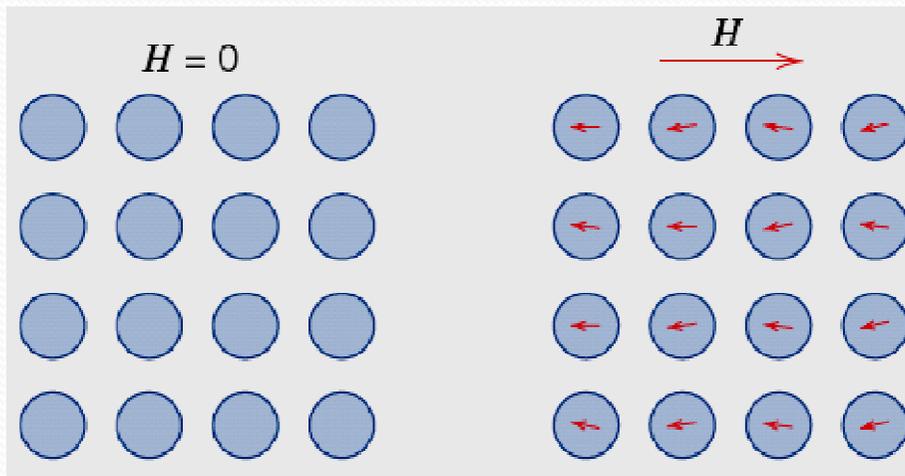
FORTE

- **Ferromagnetismo**
- **Ferrimagnetismo**

Esta classificação de intensidade é relativa à magnitude da magnetização M .

Diamagnetismo

- **Momento magnético não-permanente (átomos com última camada completa)**
- **Induzido pela presença de campo magnético, que causa a mudança do movimento orbital do elétron.**
- **O momento magnético induzido (orbital) é muito pequeno e na direção oposta à do campo aplicado.**
- **$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$ χ_m é negativo e χ_m é muito pequeno**
 - **$\mu_r = \chi_m + 1$; já que $\chi_m < 0 \rightarrow \mu_r < 1$ e $B < \mu_0 H$.**





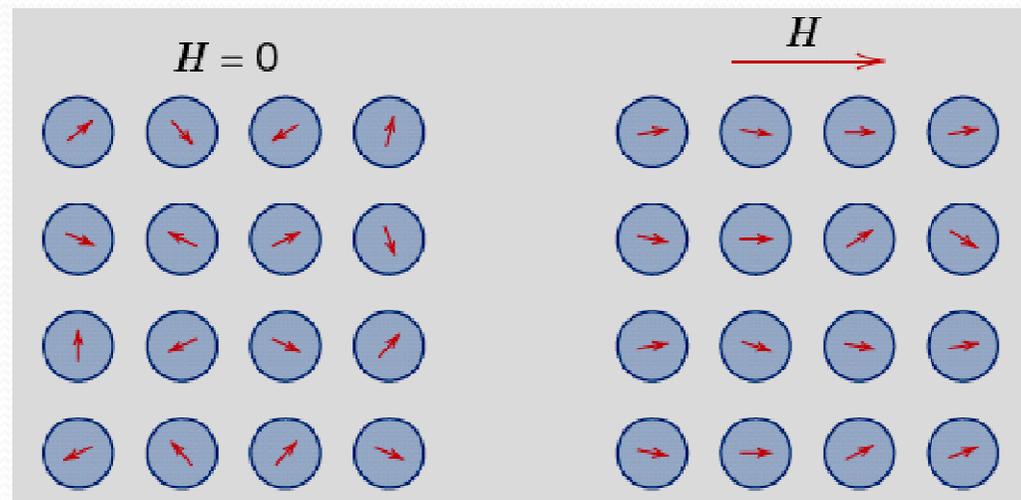
**Todo material apresenta
comportamento diamagnético!!**

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.**

- $M = \chi_m H$ χ_m é positivo e χ_m é muito pequeno

- $\mu_r = \chi_m + 1 \rightarrow \mu_r > 1$ e $B > \mu_0 H$.





**Comportamento
paramagnético se
sobrepõe ao
diamagnético!!!**

Antiferromagnetismo

■ Este fenômeno ocorre devido o alinhamento antiparalelo dos momentos magnéticos permanentes (spins) de átomos vizinhos (sem campo aplicado). ---- **Interação de troca.**

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

O^{2-} não tem momento magnético líquido.

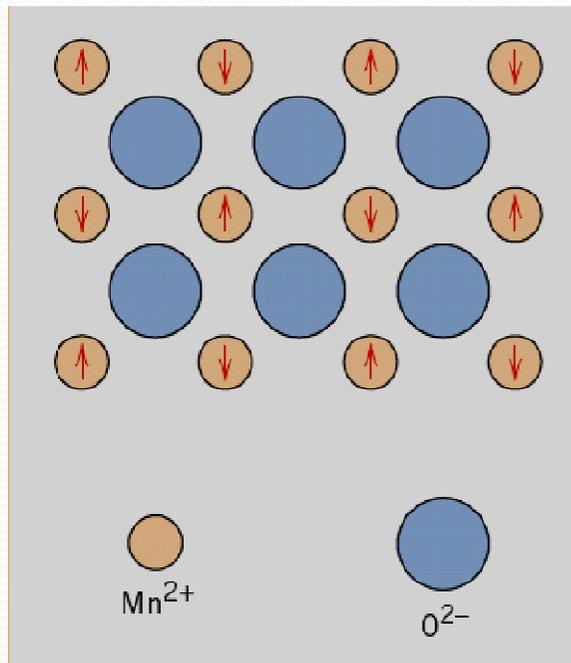
$O \Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^4$

$O^{2-} \Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6$

Mn^{+2} tem momento magnético líquido.

$Mn \Rightarrow 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^2$

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



■ Outros

Cr ($T_N = 475$ K)

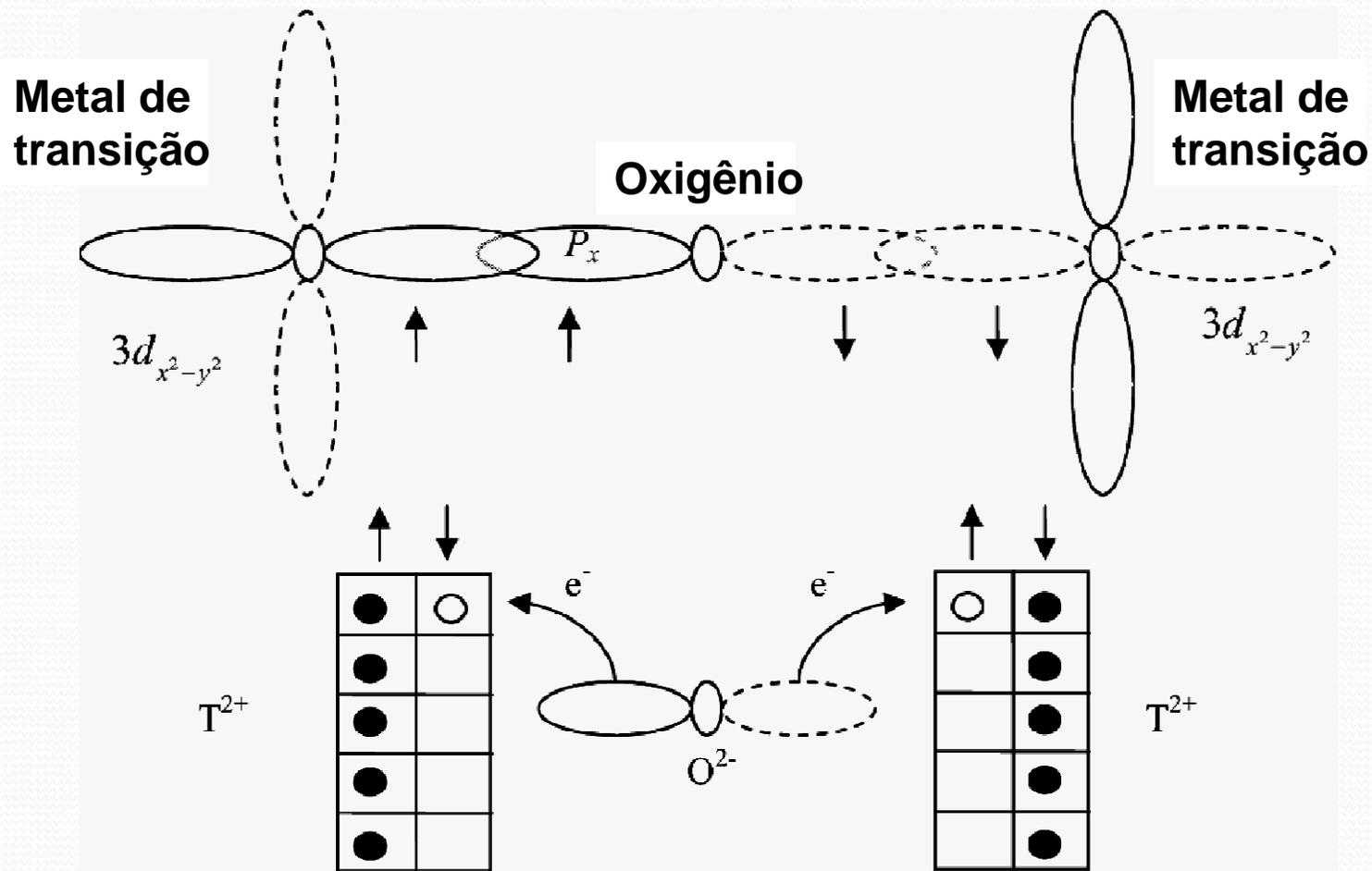
Mn ($T_N = 100$ K)

MnS

FeO

T_N – temperatura de Néel

Superexchange - Supertroca



Ferromagnetismo

- Momento magnético permanente (spin + orbital) já alinhados, mesmo se $H = 0 \rightarrow$ interação (de troca) entre dipolos.
- 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 $H \ll M$ e $B \approx \mu_0 M$.
- A contribuição importante para a magnetização vem do spin.

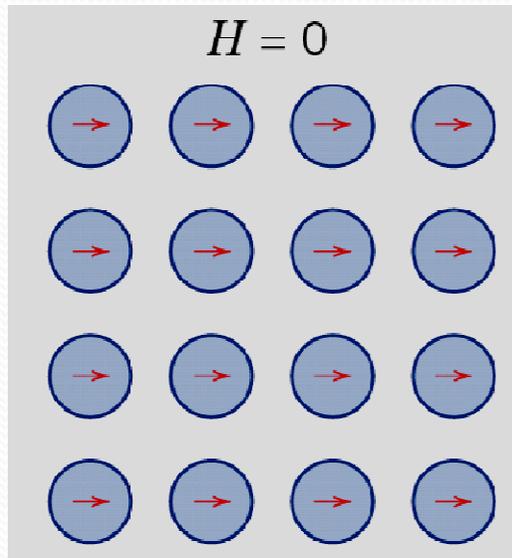
Explicações propostas por Stern (1976)

- **Forte acoplamento de troca**
- **Troca Indireta: pequena fração de elétrons d são itinerantes devido à mistura com a banda s**
(elétrons de condução $4s^{0,95}$, portanto o restante 1,05 seriam elétrons d itinerantes)
 - Estes elétrons são mais polarizados >>> maior alcance de interação
- Cálculos mostram que 5 – 8% dos 7 elétrons d (0,35 – 0,6 elétrons) em Fe metálico são suficientemente itinerantes para mediar a troca entre átomos

Magnetização de saturação

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

$$M_s = \text{densidade de átomos} \times n^\circ. \text{ líquido de momentos} \times \mu_B$$



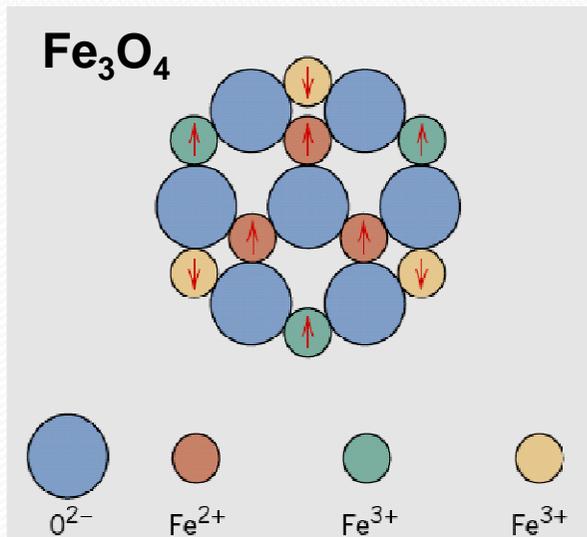
↓

$$\begin{aligned} \text{Fe} &\rightarrow 2,22 \mu_B/\text{at} \\ \text{Co} &\rightarrow 1,72 \mu_B/\text{at} \\ \text{Ni} &\rightarrow 0,60 \mu_B/\text{at} \end{aligned}$$

Ferrimagnetismo

Característica: 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.

Em geral, todos MFe_2O_4 ,
(M = Metal)
são ferrimagnéticos



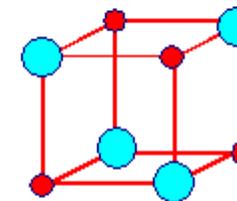
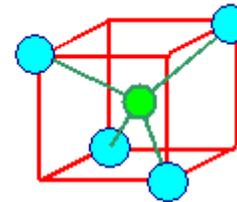
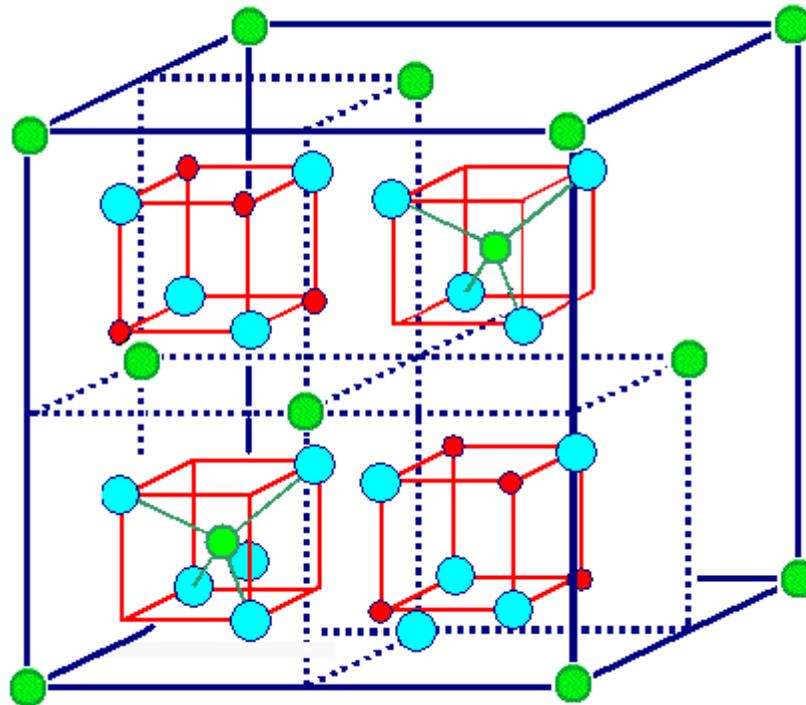
	<i>coordenação octaédrica</i>	<i>coordenação tetraédrica</i>	<i>Momento magnético líquido</i>
Fe^{3+}	↑ ↑ ↑ ↑	↓ ↓ ↓ ↓	<i>Cancelamento completo</i>
Fe^{2+}	↑ ↑ ↑ ↑	—	

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

Estrutura Spinel

32 Sítios octaédricos – 16 ocupados

64 Sítios tetraédricos – 8 ocupados



-  Oxigênio
-  Átomos B - Sítios octaédricos
-  Átomos A – Sítios tetraédricos



Íons dos sítios tetraédricos e octaédricos têm spin contrários

Óxidos de ferro – Fe_3O_4 (ferrita)

- Magnetita (spinel)
(denominação metalurgia)
- **Ferrimagnético**

64 Sítios tetraédricos – 8 ocupados (A)

32 Sítios octaédricos – 16 ocupados (B)

Spinel: $\text{AB}_2\text{O}_4 = \text{BO}-(\text{AB})\text{O}_3$

8 Fe^{+3} em A

8 Fe^{+3} em B

8 Fe^{+2} em B

ângulo da ligação

A-O-B: 125°

B-O-B: 90°

A-O-A: não há ligação

