

Magnetismo

Fenomenologia Clássica

■ **Origem e comportamento de momentos magnéticos: tratamento clássico**

■ **Diamagnetismo, Paramagnetismo e Espectro Atômico: modelo simples**

Momento Angular Orbital e Momento Magnético Orbital

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

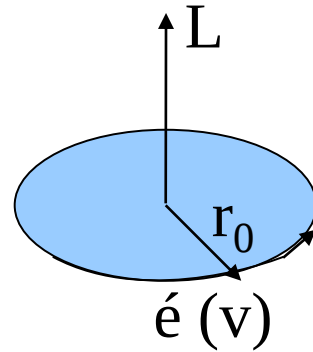
Momentos Magnéticos: são originados devido à movimentação de partículas carregadas.

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

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

**Razão
giromagnética**

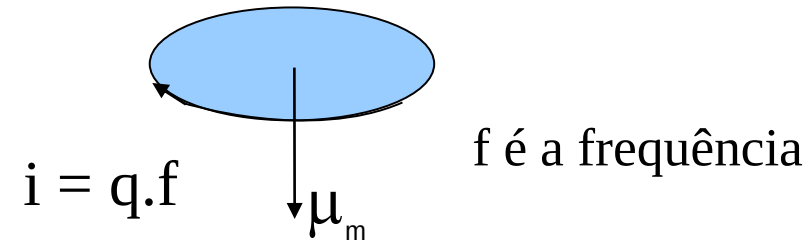
Cálculo da razão giromagnética



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

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

$m = m_e$, massa do elétron



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

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

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

É um número exato em materiais nos quais o magnetismo é originário do somente do **movimento orbital dos elétrons**, 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!

Há duas forças radiais:

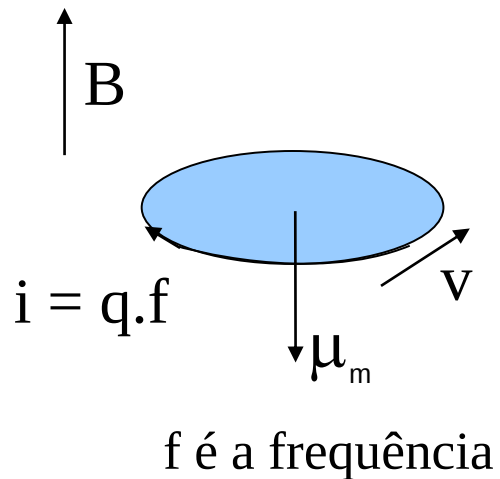
- a força do campo sobre o elétron $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} = -e.v.B$ (FORÇA DE LORENTZ)
- A reação: variação da FORÇA CENTRÍFUGA ($F = m_e v^2/r$) devido à variação da velocidade:

$$\Delta F_c = 2 \cdot m_e \cdot v \cdot \Delta v / r \quad \text{fazendo } F = \Delta F_c$$

$$\Delta v = \frac{er}{2m_e} B$$

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

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



Susceptibilidade Diamagnética

$$M = N \cdot \Delta m$$

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

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

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

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

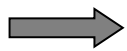
Susceptibilidade Diamagnética

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

$\underline{Z}$, $\underline{e}$ e $\underline{m_e}$
 $\underline{N}$, $\underline{R^2}$



independem de T



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

Materiais Paramagnéticos

**Materiais que têm momentos magnéticos permanentes locais,
mas cuja interação entre eles é fraca ($\ll k_B T$)**

Lei de Curie : $\chi = \frac{C}{T}$ **para átomos livres ($M = \chi H$)**

$T = 0$ K e campo aplicado: todos momentos alinhados ao campo.

$T > 0$ K – energia térmica atua contra o ordenamento, a energia é fraca e positiva.

Teoria de Langevin

μ_m é o momento atômico;

H é o campo aplicado

θ é o ângulo entre μ_m e H

A energia é dada por:

$$E(\theta) = \mu_m \cdot B \quad \longrightarrow \quad E(\theta) = \mu_0 \cdot \mu_m \cdot H \cdot \cos(\theta)$$

Para uma temperatura T , a probabilidade do momento ter energia $E(\theta)$ é proporcional ao fator de Boltzmann:

$$e^{-E(\theta)/k_B T}$$

É aplicável quando a temperatura é alta o suficiente ou a densidade de partículas é baixa o suficiente para tornar os efeitos quânticos insignificantes.

Teoria de Langevin - continuação

A probabilidade do ângulo entre μ_m e H estar entre θ e $\theta + d\theta$ será:

$$dp(\theta) = \frac{\exp(-E(\theta)/k_B T) \cdot d\Omega}{Z}$$

Ângulo sólido
 $d\Omega = 2\pi \cdot \sin \theta \cdot d\theta$

Z é a função partição de probabilidade:

$$Z = \int_0^\pi \exp(-E(\theta)/k_B T) \cdot 2\pi \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

A média térmica do momento magnético da componente paralela ao campo é:

$$\langle \mu_m \rangle_T = \int_0^\pi \mu \cdot \cos(\theta) \cdot dp(\theta) = L(s) \quad s = \frac{\mu B}{k_B T}$$

Teoria de Langevin - continuação

A função $L(s)$:

$$L(s) = \left[\cot \operatorname{gh}(s) - \frac{1}{s} \right]$$

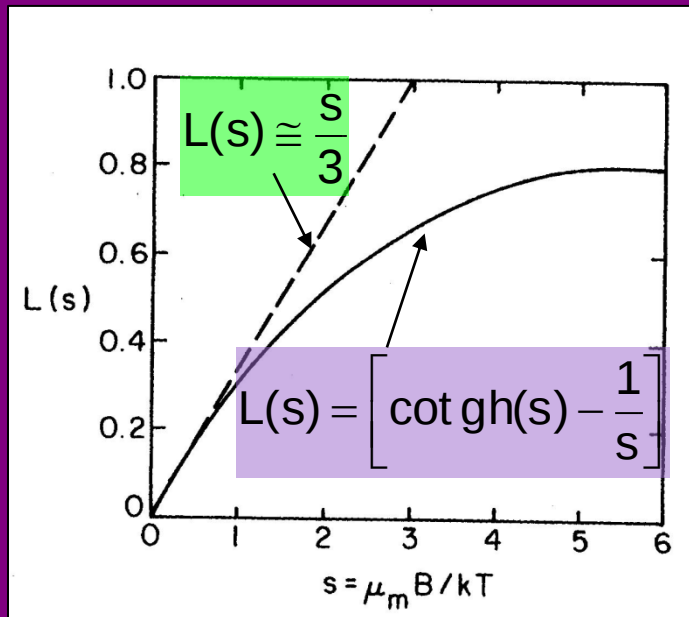
onde $s = \frac{\mu_m B}{k_B T}$

Para s pequeno:

$$\cot \operatorname{gh}(s) = \operatorname{tgh}^{-1}(s) = \frac{1}{s} + \frac{s}{3} - \frac{s^3}{45} + \dots$$

E:

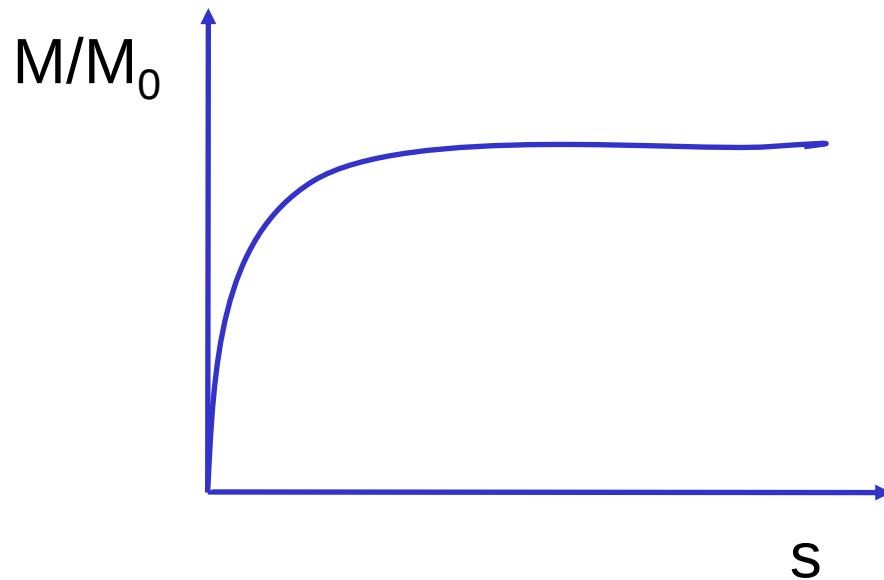
$$L(s) \cong \frac{s}{3}$$



Teoria de Langevin - continuação

A magnetização é dada por N (densidade de átomos) multiplicado por

$$\langle \mu_m \rangle_T = L(s) \quad \Rightarrow \quad M = N \langle \mu_m \rangle_T L(s) \quad \Rightarrow \quad M = N \cdot \mu_m \cdot \left[\cot gh(s) - \frac{1}{s} \right]$$



$$M_0 = N \cdot \mu$$

$$s = \frac{\mu B}{k_B T}$$

Teoria de Langevin - continuação

Para s pequeno:

$$M = N\mu \cdot \frac{s}{3} \quad \Rightarrow \quad M = N\mu_m \cdot \frac{\mu_m \mu_0 H}{3k_B T} \quad \Rightarrow \quad M = \frac{N\mu_m^2 \mu_0}{3k_B T} H = \chi H$$

$$\chi = \frac{N \mu_m^2 \mu_0}{3 k_B T} = \frac{C}{T}$$

χ cresce para T pequeno (baixa agitação térmica) e/ou H grande: $M/M_0 \approx 1$ (saturação)

Exemplo: Gadolínio para B ~ 1 T.

$$s = \frac{\mu B}{k_B T}$$

T @ 300 K $\rightarrow \chi \approx 1,5 \times 10^{-2}$;

T @ 1 K $\rightarrow \chi \approx 0,8$

Teoria de Langevin - resumo

A magnetização é dada por N (densidade de átomos) multiplicado por $\langle \mu_m \rangle_T$:

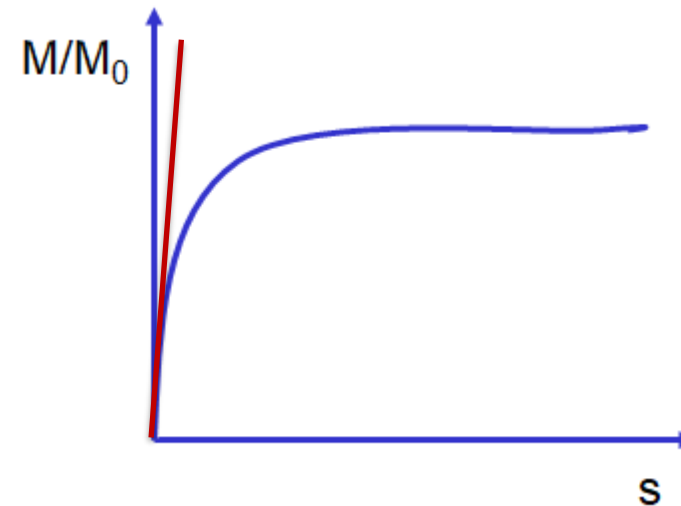
$$M = N \cdot \mu_m \cdot \left[\coth(s) - \frac{1}{s} \right]$$

$$M_0 = N \cdot \mu_m$$

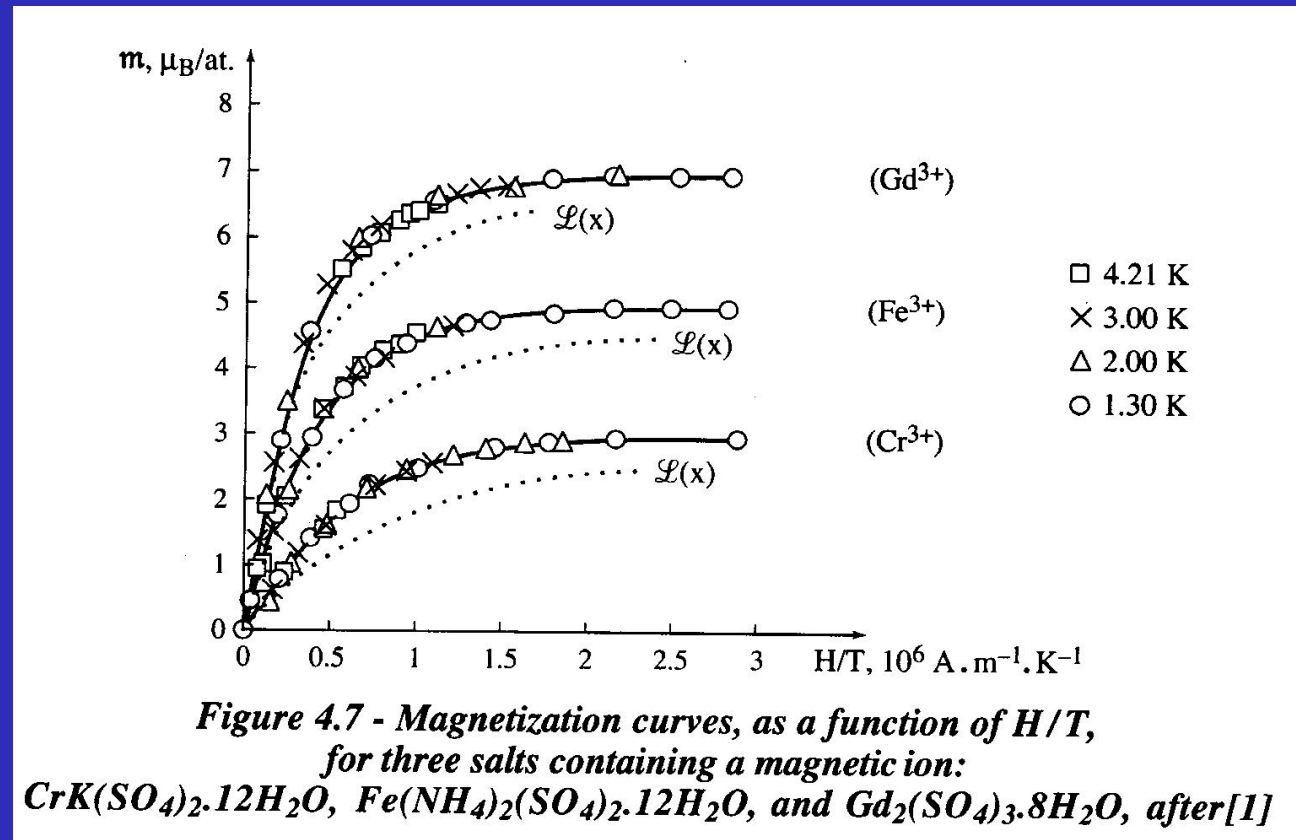
$$s = \frac{\mu_m B}{k_B T}$$

Para s pequeno:

$$\chi = \frac{N \mu_m^2 \mu_0}{3 k_B T} = \frac{C}{T}$$



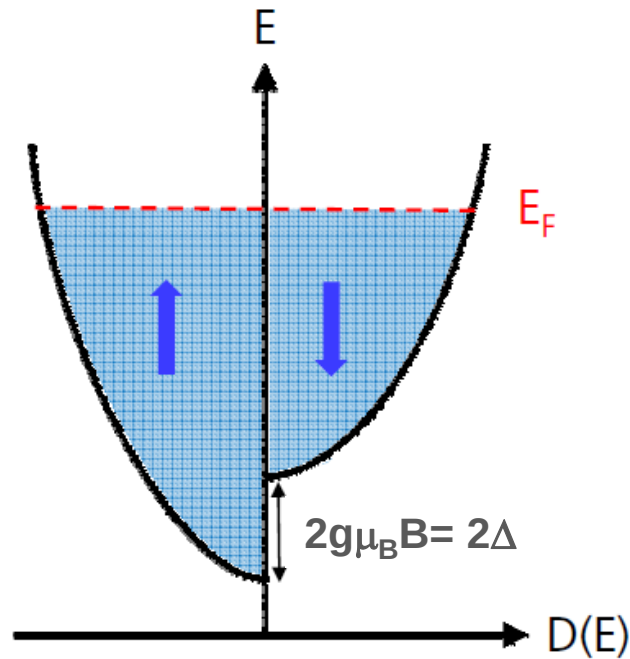
Teoria de Langevin comparada a dados experimentais



CRÉDITOS EXTRAS

Paramagnetismo de Pauli

- Ocorre principalmente em metais (elétrons livres)
- Como cada orbital pode ser ocupado por um spin "up" ou "down", se um campo magnético é aplicado, a energia do elétron pode aumentar ou diminuir.



- A susceptibilidade de Pauli é:

$$\chi_P = \frac{3N\mu_0\mu_B^2}{2E_F}$$

- Independe da temperatura
- Efeito fraco comparado ao paramagnetismo de íons
- Há contribuição somente dos elétrons livres, aqueles próximos do nível de Fermi (energia de Fermi é E_F)