Fenomenologia Quântica

FERROMAGNÉTICOS

Interações entre momentos magnéticos

- **Ferromagnéticos**
- **Ferrimagnéticos**
- **Antiferromagnéticos**

$T < T_C$ (T_N) $\rightarrow$ comportamento coletivo: ordenamento.

$\Downarrow$

Momentos magnéticos não são livres,
<u>interagem</u> ***entre si*** e ***com o meio***.

Interações mais importantes entre Momentos Magnéticos

1) Interações de Troca (Exchange)

2) Interações responsáveis pela anisotropia magnetocristalina

$\Downarrow$

Fenômenos puramente quânticos

Outra interação

3) Interação dipolar entre 2 momentos magnéticos:

- Responsável pelo campo criado dentro e fora do material
- Interação fraca e de longo alcance
- Importante em aplicações

$$E_D = -\frac{1}{2}\sum_{i}\sum_{j\neq i} m_i B_{ij}$$

$B_{ij} = B_{ji}$

$$E_D = -\frac{1}{2}\sum_{i} m_i B_i$$

onde $$B_i = \sum_{i\neq j} B_{ij}$$

B_{ij} é o campo criado por i em j.

Interação de Troca

- **Heisenberg 1929**
- $\xi_{ij} = -\mu_0 n_{ij} m_i m_j$ i e j são dois átomos vizinhos
- n_{ij} intensidade da interação de troca
- $n_{ij} > 0$ – alinhamento paralelo
- $n_{ij} < 0$ – alinhamento antiparalelo

A densidade de energia de troca é dada por:

$$\mathbf{E_{ex} = \frac{1}{2}\sum_{i}\sum_{j\neq i}\xi_{ij}}$$

$$E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\sum_{i}\sum_{j\neq i} n_{ij} m_i m_j$$

Interação de Troca - cont.

$$E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\sum_i \sum_{j \neq i} n_{ij} m_i m_j$$

- Podemos escrever: $E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\sum_i m_i H_i$

para: $\mathbf{H_i} = \sum_{\mathbf{i \neq j}} \mathbf{n_{ij} m_j}$ ➡ campo local atuando em m_i

As direções de $\mathbf{m_i}$ e $\mathbf{H_i}$ flutuam com o tempo:

difícil determinar a orientação para um dado H e T.

Aproximação de Campo Molecular ou Campo Médio

- **P. Weiss – 1906** $\rightarrow$ Modelo do campo molecular

Suposições

- Não considera o caráter flutuante de **H_i**, mas sim o valor médio em uma dada T => $\boldsymbol{H_i = \lambda M}$
- Considera que todos os momentos são idênticos.
- A densidade de energia de troca será então:

$$\boldsymbol{E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\lambda M^2}$$

- λ é o coeficiente de campo molecular
- M é a magnetização.

Detalhes do desenvolvimento

$$E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\sum_i \sum_{j\neq i} n_{ij} m_i m_j$$

$$\boldsymbol{H_i} = \sum_{i\neq j} \boldsymbol{n_{ij} m_j}$$

$$E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\sum_i m_i \boldsymbol{H_i}$$

$$\boldsymbol{H_i} = \sum_{i\neq j} \boldsymbol{n_{ij} m_j} \Rightarrow \langle \boldsymbol{H_i} \rangle = \boldsymbol{\lambda} \sum_{i\neq j} \boldsymbol{m_j} = \boldsymbol{\lambda M}$$

$$\Downarrow$$

$$E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\sum_i m_i \boldsymbol{H_i} \Rightarrow E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\lambda M \sum_i m_i$$

$$E_{ex} = -\frac{\mu_0}{2}\lambda M M = -\frac{\mu_0}{2}\lambda M^2$$

Ferromagnetismo

- $T \geq T_C$: $\chi = C / T$ – paramagnético (sem interação entre os momentos magnéticos) $\rightarrow M \sim 0$.
- $T < T_C$: material se torna ferromagnético (interação entre os momentos magnéticos – ordenam-se paralelamente) $\rightarrow M >> 0$.

Ferromagnetismo - Modelo

- Como os momentos são paralelos, se forma um campo interno intenso que sobrepõe o efeito da temperatura.

- Se H_a é o campo aplicado, o material estará sujeito a um novo campo $H_a + H_i$, onde $H_i = \lambda.M$, M é a magnetização e $T_C = \lambda C$ é a temperatura de Curie.

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}$$

Ferromagnetismo
Teoria do campo molecular

Na teoria de Brillouin:

$$m = \frac{M}{M_0} \qquad x = \frac{\mu_0 M_0 \boldsymbol{H}}{N k_B T} \qquad \text{com} \quad M_0 = N.g_J.\mu_B.J$$

Substituindo-se *H* por H + λM em x:

$$x = \frac{\mu_0 M_0 H}{N k_B T} + \frac{\mu_0 M_0 \lambda M}{N k_B T} \xrightarrow[\text{segundo termo}]{\div \text{ e } \times \text{ por } M_0 \text{ o}} x = \frac{\mu_0 M_0 H}{N k_B T} + \frac{\mu_0 M_0^2 \lambda M}{N k_B T M_0}$$

$$x = \frac{\mu_0 M_0 H}{N k_B T} + \frac{\mu_0 M_0^2 \lambda m}{N k_B T}$$

Ferromagnetismo
Teoria do campo molecular –cont.

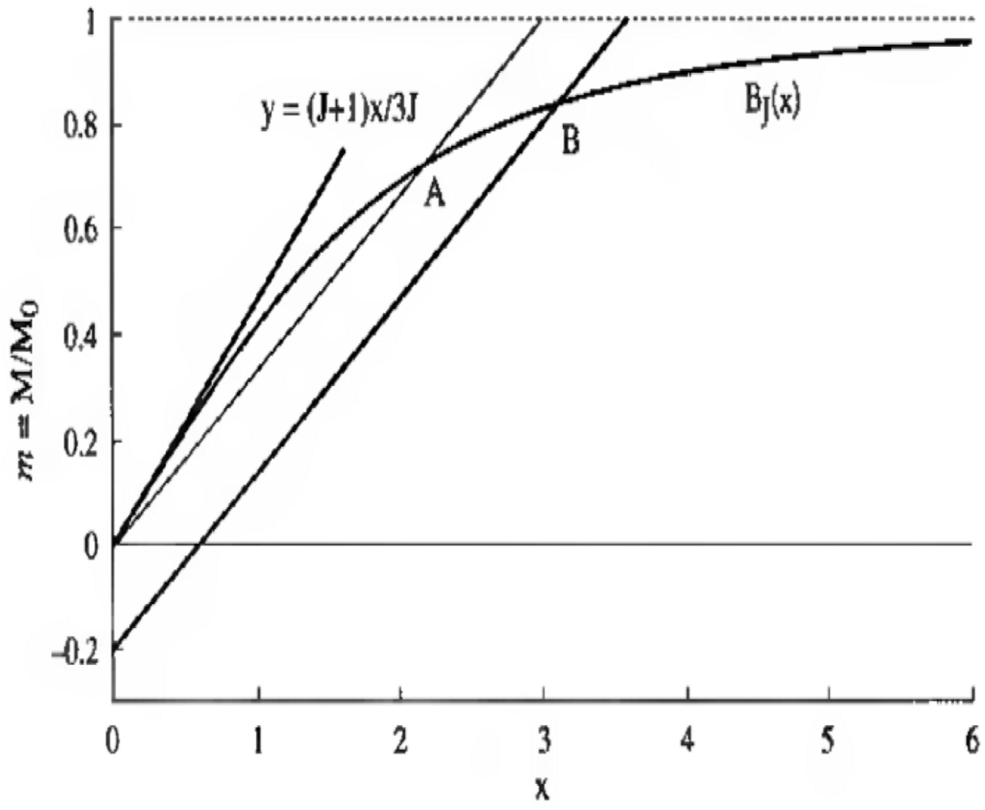
Temos assim 2 expressões para M ou m=M/M_0

$$m = -\frac{H}{\lambda M_0} + \frac{N k_B T}{\mu_0 \lambda {M_0}^2} x$$

$$m = B_J(x) =$$

$$\frac{2J+1}{2J} coth\left[\frac{2J+1}{2J} x\right] - \frac{1}{2J} coth\left[\frac{1}{2J} x\right]$$

Resolve-se numericamente ou graficamente.



PARA x PEQUENO e H = 0

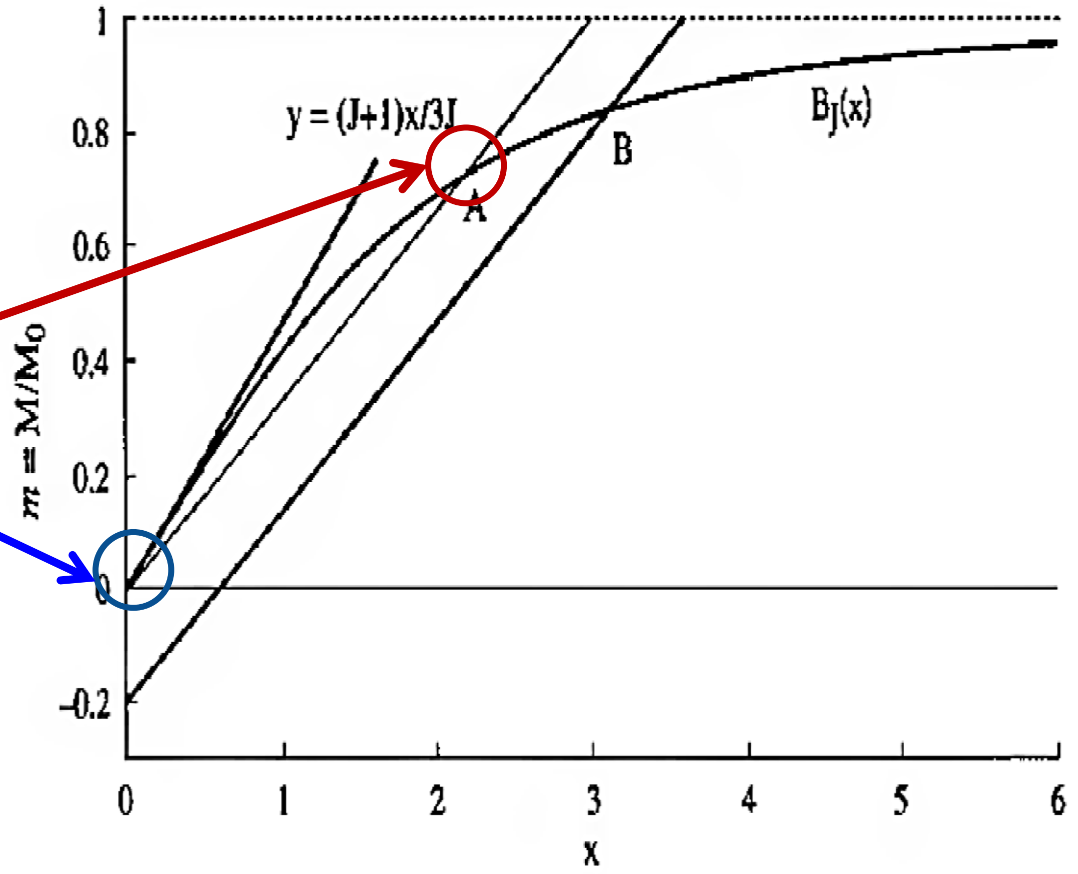
$$m = \frac{J+1}{3J}x \qquad \text{e} \qquad m = -\frac{H}{\lambda M_0} + \frac{Nk_BT}{\mu_0\lambda M_0{}^2}x$$

0

Se $\dfrac{Nk_BT}{\mu_0\lambda M_0{}^2} < \dfrac{J+1}{3J}$ $\rightarrow$ **2 soluções**

1ª) M = 0 ⇒ solução trivial

2ª) Reta A



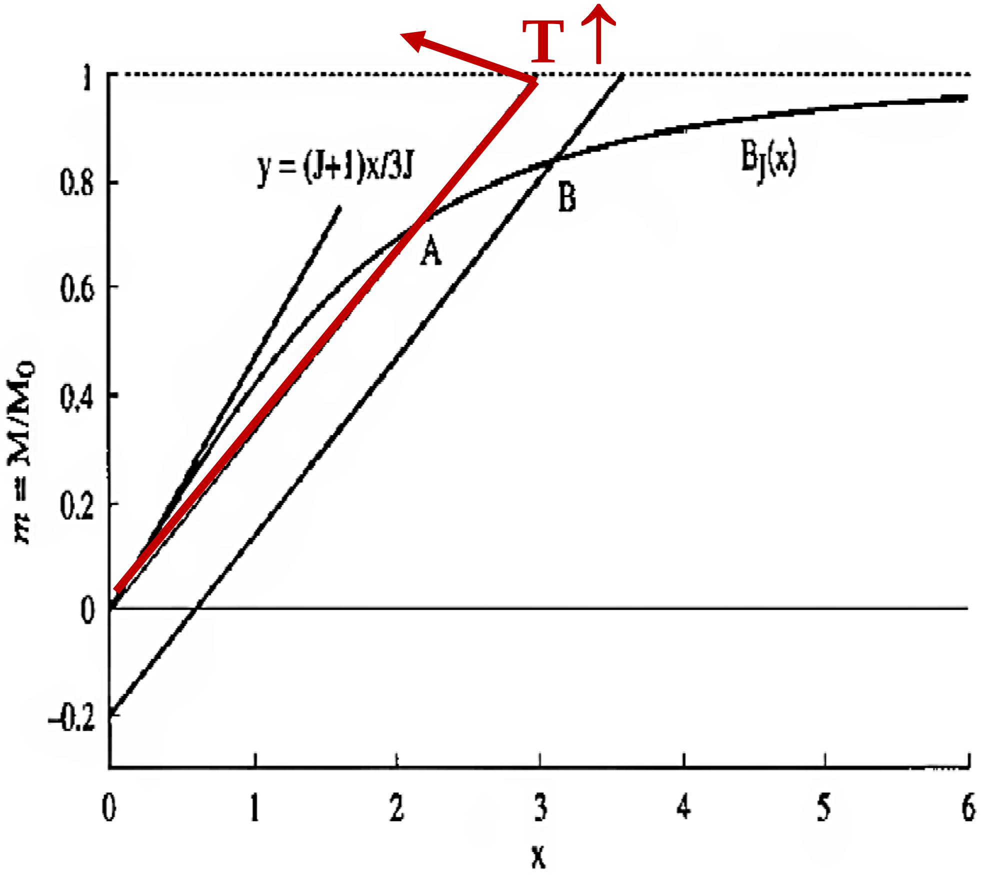
PARA x PEQUENO e H=0 (Reta A)

$$m = \frac{J+1}{3J}x \qquad \textbf{e} \qquad m = \frac{Nk_BT}{\mu_0\lambda {M_0}^2}x$$

$$\frac{\mathrm{N}k_B\mathrm{T}}{\mu_0\lambda {\mathrm{M}_0}^2} < \frac{\mathrm{J}+1}{3\mathrm{J}}$$

Para T > 0 → a inclinação da reta aumenta e o ponto A se move para esquerda e M(T) decresce até o limite que corresponde a T = T_C → $\frac{Nk_BT_C}{\mu_0\lambda {M_0}^2} = \frac{J+1}{3J}$

$$T_C = \frac{\mu_0(J+1){M_0}^2}{3JNk_B}\lambda = C\lambda$$



PARA x PEQUENO e H=0 (Reta A)

Para T = T_c

$$\frac{N k_B T_C}{\mu_0 \lambda {M_0}^2} = \frac{J+1}{3J}$$

$$T_C = \frac{\mu_0 (J+1) {M_0}^2}{3 J N k_B} \lambda$$

Mas $\quad M_0 = N . g_J . \mu_B . J$

$$T_C = \frac{\mu_0 (J+1) N^{\cancel{2}} g_J^2 \mu_B^2 J^{\cancel{2}}}{3 \cancel{J} \cancel{N} k_B} \lambda$$

Mas $\rightarrow C = \dfrac{N g_J^2 \mu_B^2 J (J+1) \mu_0}{3 k_B}$

$$T_C = \frac{\mu_0 N \mu_B^2 g_J^2 J (J+1)}{3 k_B} \lambda = C \lambda$$

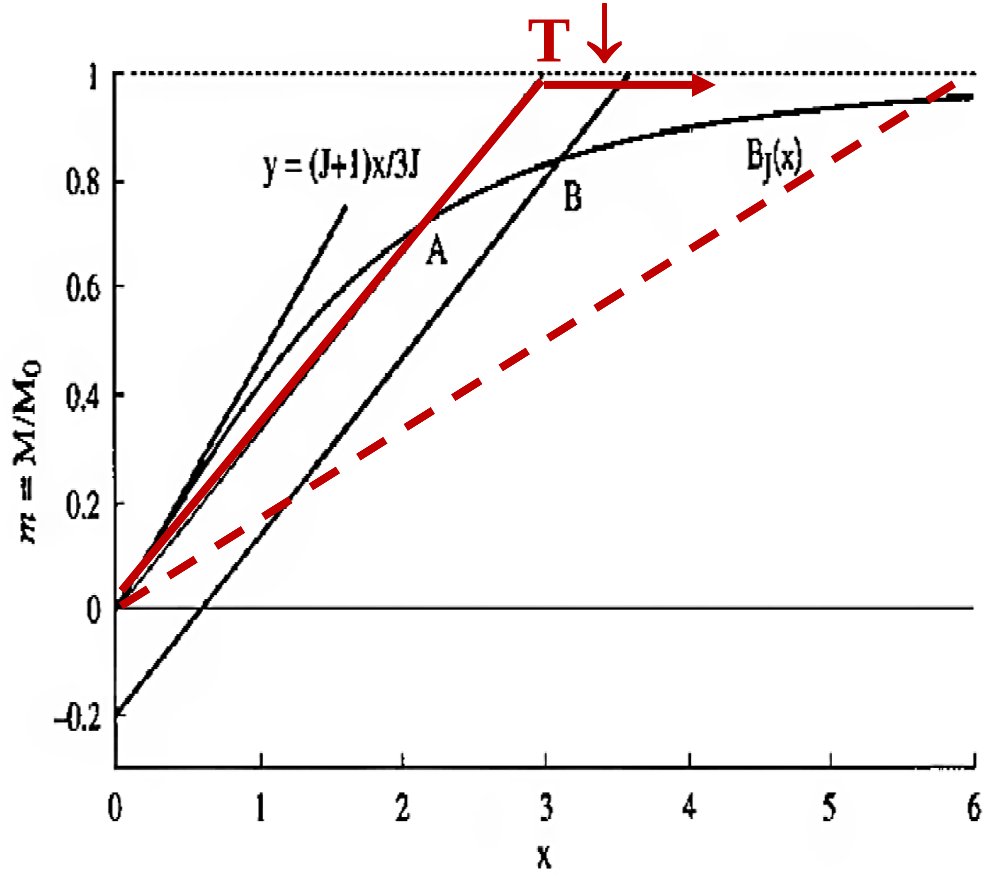
PARA x PEQUENO e H=0 (Reta A)

❖ Voltando com a expressão de x em função de m:

$$x = \frac{\mu_0 M_0 H}{N k_B T} + \frac{\mu_0 M_0^2 \lambda m}{N k_B T}$$

❖ Para T = 0, $x \to \infty$ e o ponto de intersecção das duas curvas ocorrem para $m \to 1$;

$M_s(T) = M_0 \Rightarrow M_s(T) = N g_J \mu_B J$

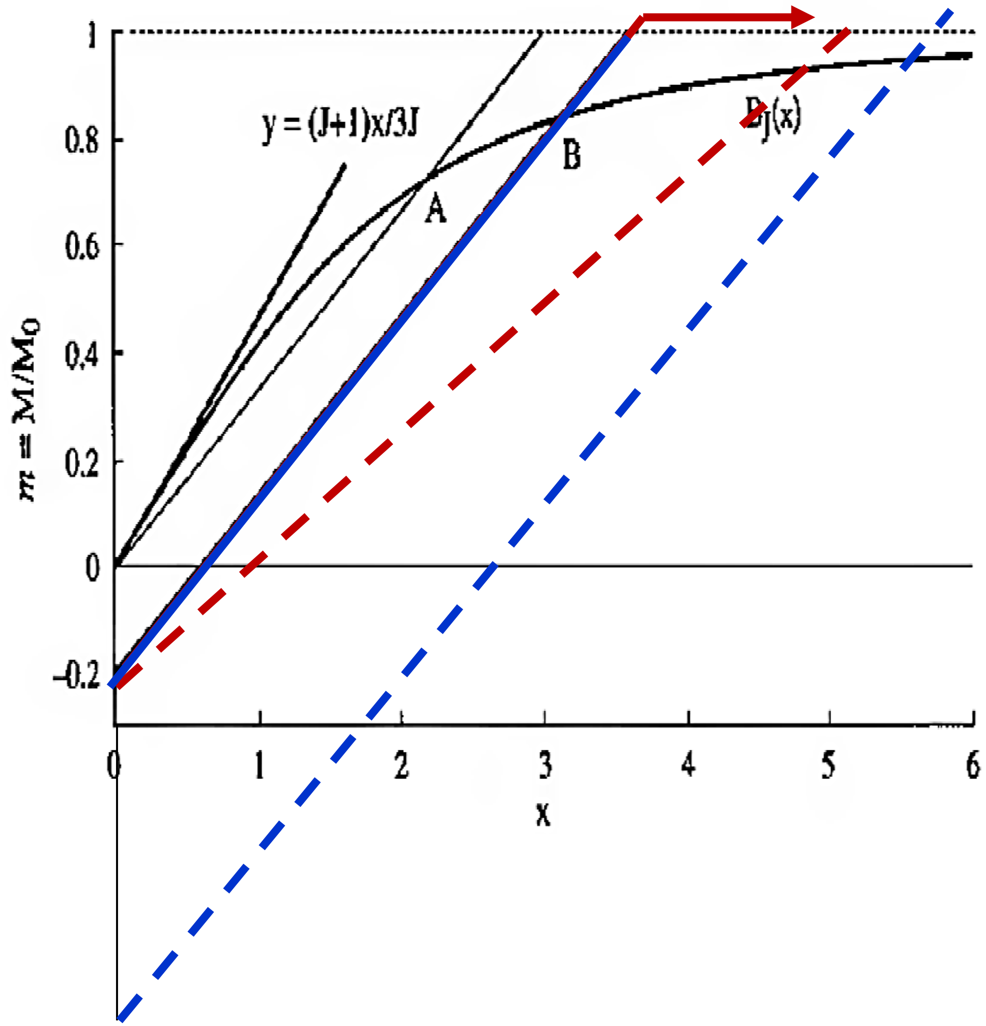


PARA x PEQUENO e H ≠ 0 (Reta B)

$$m = -\frac{H}{\lambda M_0} + \frac{N k_B T}{\mu_0 \lambda {M_0}^2} x$$

- **T < T_C , se T diminui a reta B anda para a direita, variando a inclinação.**
- **Se H ↑, e T constante, a reta B anda para a direita com a inclinação fixa e M ↑**

T ↓, H constante



PARA x PEQUENO e H ≠ 0 (Reta B)

- **$T > T_C$**

$$m = \frac{J+1}{3J} x \xrightarrow{\text{Isola x}} x = \frac{3J}{J+1} m$$

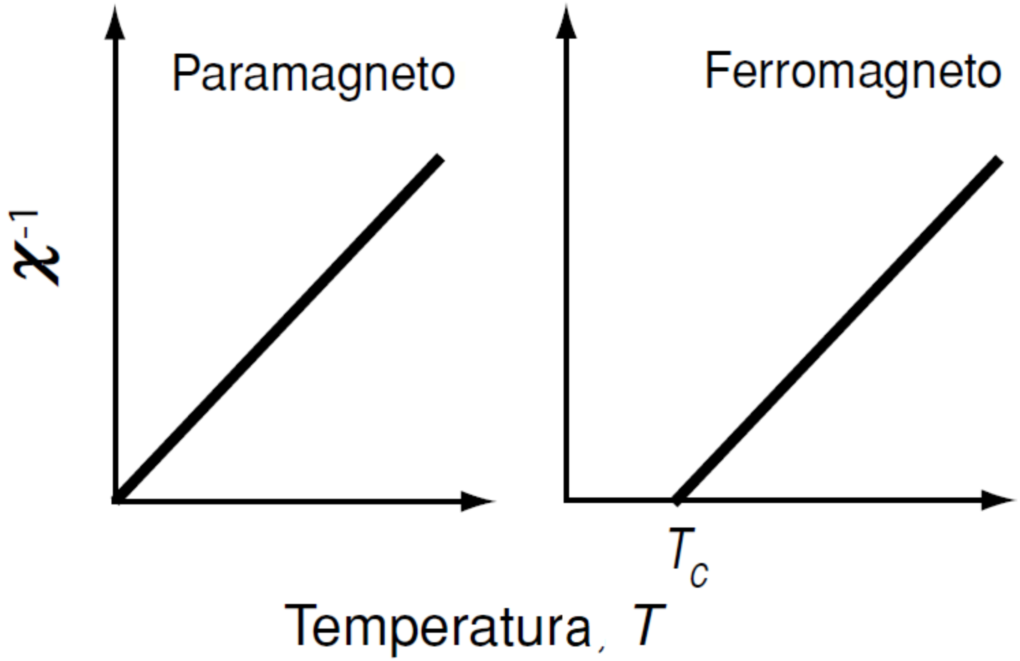
$$m = -\frac{H}{\lambda M_0} + \frac{N k_B T}{\mu_0 \lambda M_0^{\,2}} x \xrightarrow{\text{Substitui x}} m = -\frac{H}{\lambda M_0} + \frac{3J\, N k_B T}{\mu_0\, \lambda\, (J+1) M_0^2} m$$

Mas $T_C = \frac{\mu_0 (J+1) M_0^{\,2}}{3 J N k_B} \lambda \longrightarrow m = -\frac{H}{\lambda M_0} + \frac{3J\, N k_B T}{\lambda\, \mu_0 (J+1) M_0^2} m$

$$m = -\frac{H}{\lambda M_0} + \frac{T}{T_C} m \xrightarrow{\text{Isola m}} \boxed{M = \frac{C}{(T - T_C)} H = \chi H}$$

Susceptibilidade - FM

$$\chi = \frac{C}{(T - T_C)}$$



$$\frac{1}{\chi} = \frac{(T - T_C)}{C}$$