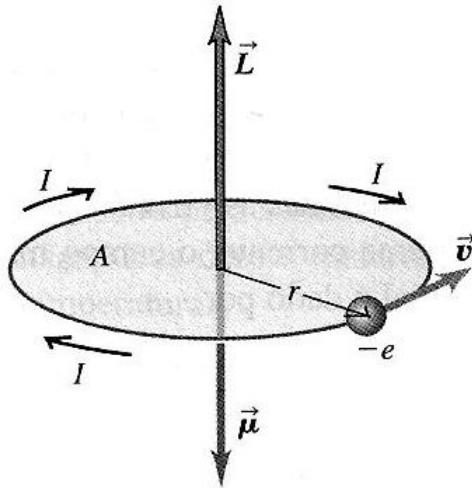


Noções de magnetismo e materiais magnéticos



$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$$

$$\mu = \frac{ev}{2\pi r} (\pi r^2) = \frac{evr}{2}$$

$$\mu = \frac{e}{2m} L$$

O momento angular é quantizado: $L = m_L \frac{h}{2\pi}$

Componente z
do momento angular

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Constante de Planck

$$\mu = \frac{e}{2m} \left(\frac{h}{2\pi} \right) = \frac{eh}{4\pi m}$$

Esse momento magnético denomina-se **magneton de Bohr**, designado por μ_B , cujo valor numérico é

$$\mu_B = 9,274 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2 = 9,274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$$

Os elétrons também possuem um momento angular intrínseco, S . Este momento angular também tem um momento magnético associado e verifica-se que seu módulo é quase exatamente igual a um magneton de Bohr (aproximadamente $1,0001\mu_B$).

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi} \quad m_s = \pm \frac{1}{2}$$

Campo magnetizante, indução magnética e magnetização.

$$M = \frac{1}{V} \sum_i m_i$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad [B] = T \quad \chi_{\text{Mol}} = \chi V_{\text{mol}}, \quad [\chi_{\text{Mol}}] = \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad [H] = [M] = A/m$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad \mu = \mu_0 (1 + \chi)$$

H ou **B**?

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

$$\chi = K_m - 1$$

H mais fácil de controlar na presença de matéria.

Solenóide Infinito, $H=nI$, independente se haja ou não matéria dentro dele, enquanto que, $\mathbf{B}=\mu_0(\mathbf{H}+\mathbf{M})$.

Quantity	Symbol	Gaussian Units	SI Units	Equivalencies
magnetic field strength	H	Oersted Oe	Am^{-1}	$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ Am}^{-1}$
magnetic induction	B	Gauss G	Tesla T	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
intensity of magnetisation	M	Gauss [Oe]*	Am^{-1}	$1 \text{ G [Oe]}^* = 10^3 \text{ Am}^{-1}$
magnetisation/ unit mass $\sigma = \frac{M}{\rho}$, ρ = density	σ	e.m.u. ($\text{G cm}^3 \text{ g}^{-1}$)	SI ($\text{Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	$1 \text{ e.m.u.} = 1 \text{ SI}$
magnetic moment	μ, m	Gauss cm^3 [Oe cm^3]*	Am^2	$1 \text{ G[Oe]}^* \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ Am}^2$
volume susceptibility	χ	e.m.u. +	SI +	$1 \text{ e.m.u.} = 4\pi \text{ SI}$
mass susceptibility	$\frac{\chi}{\rho}$	e.m.u. ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)	SI ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$)	$1 \text{ e.m.u.} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ SI}$
demagnetisation factor	D	e.m.u. +	SI +	$1 \text{ e.m.u.} = 4\pi \text{ SI}$
(BH) product	(BH)	G Oe	$\text{T Am}^{-1} (\text{Jm}^{-3})$	$1 \text{ G Oe} = \frac{10^{-1}}{4\pi} \text{ T Am}^{-1}$

* Both G and Oe appear in the literature

+ Dimensionless

(a) Diamagnetismo

Átomos que não apresentam momento magnético permanente, apresentam susceptibilidade negativa e independente da temperatura.

Mecanismo: lei de lenz

B_{ind} é oposto a variação do campo.

$$\vec{\omega}_L = \frac{-e\vec{B}}{2m}$$

Momento magnético de um conjunto de cargas

$$\vec{\mu} = \frac{-e}{2} \sum \vec{r}_i \times \vec{v}_i = \frac{-e}{2} \sum \vec{r}_i \times (\vec{v}_i^0 + \vec{v}_L)$$

$$\mu_{\text{Dia}} = \frac{-e}{2} \sum \vec{r}_i \times (\vec{\omega}_L \times \vec{r}_i)$$

Somando sobre todos os elétrons (átomo isotrópico), sobrevive apenas a componente paralela a **B**.

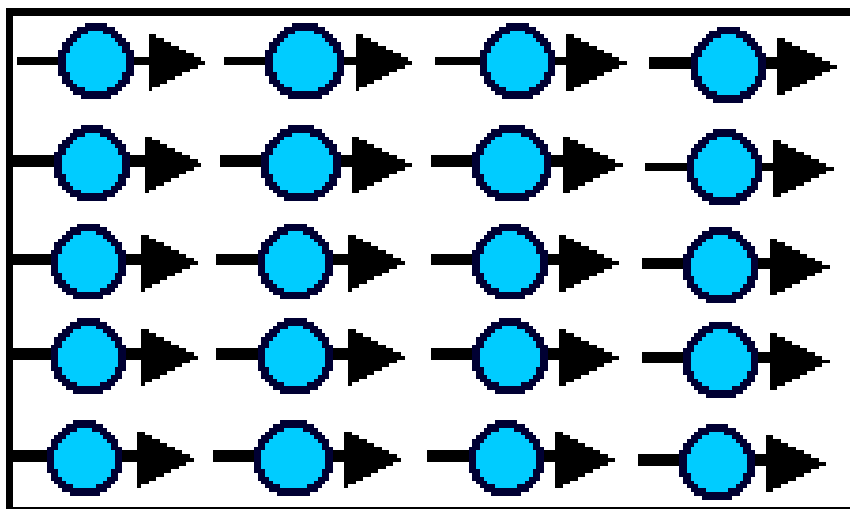
$$\begin{aligned}\mu_z &= \frac{-e\omega_L}{2} \sum (x_i^2 + y_i^2) = \frac{-e^2 B}{4m} Z \left(\overline{x^2 + y^2} \right) \\ &= \frac{-e^2 B}{4m} Z \frac{2}{3} \overline{r^2}\end{aligned}$$

e com N átomos por unidade de volume,

$$\chi_{\text{Dia}} = \frac{M}{H} = \mu_0 N \frac{\mu_z}{B} = -\frac{N\mu_0 Z e^2}{6m} \overline{r^2}$$

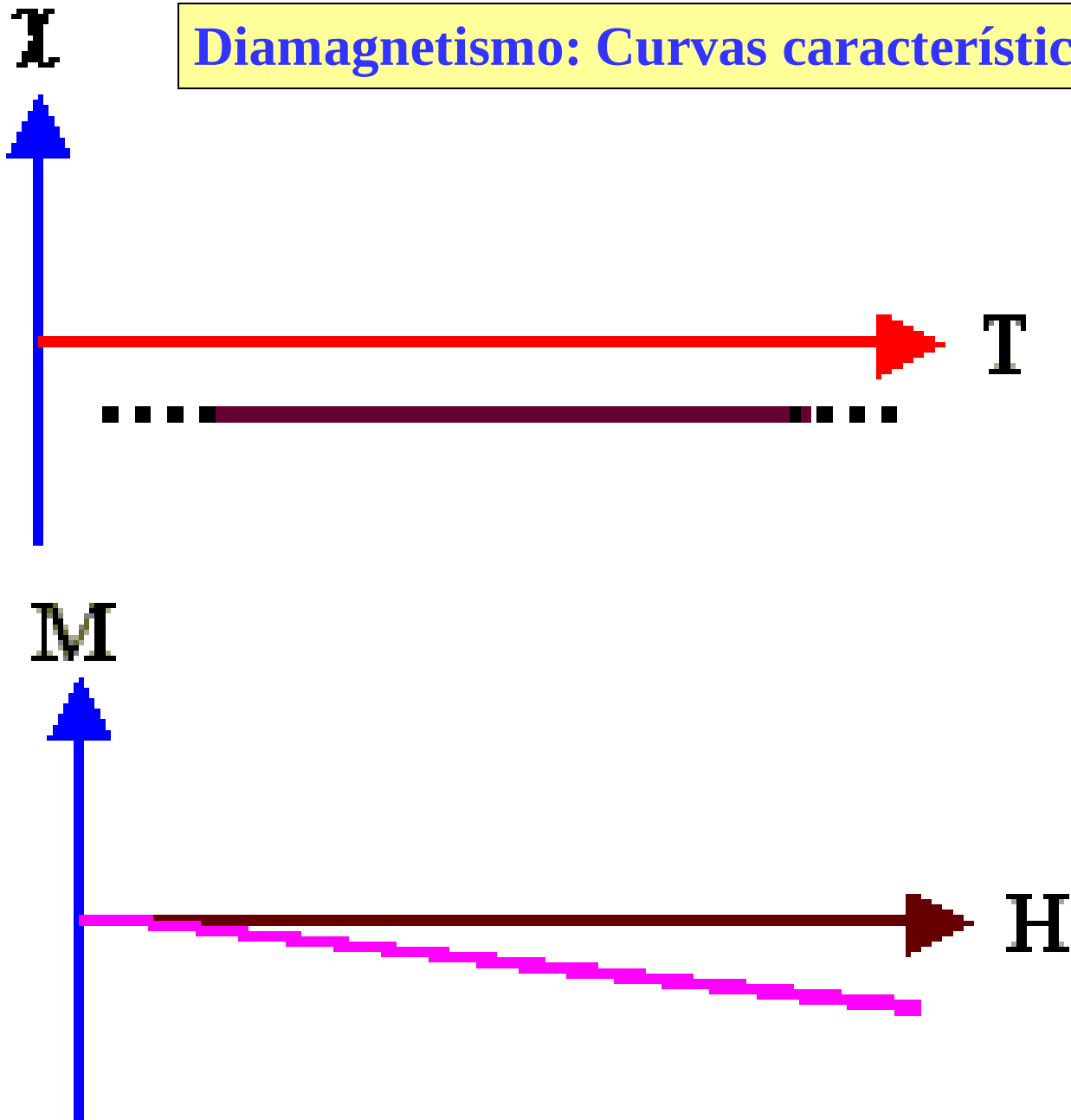
$$\chi_{\text{Dia}} (\text{mol}) = 10^{-4} \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

Constante e independente da temperatura



Na prática, todas as substâncias possuem diamagnetismo.

Diamagnetismo: Curvas características



(b) Paramagnetismo (visão clássica)

$$\chi = \frac{C}{T} \quad \text{Lei de Curie (1895)}$$

Explicação rudimentar foi dada por Langevin, através de uma hipótese “ad hoc” de que átomos tivessem momento magnético permanente.

$$E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B \cos \theta$$

$$\overline{\mu_z} = \overline{\mu \cos \theta} = \frac{\mu \int \cos \theta e^{\frac{\mu B \cos \theta}{kT}} d\Omega}{\int e^{\frac{\mu B \cos \theta}{kT}} d\Omega}$$

$$\frac{\mu B}{kT} = x, \quad d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$$

$$\overline{\mu_z} = \mu \frac{\partial}{\partial x} \ln \int_0^\pi e^{x \cos \theta} \sin \theta d\theta$$

$$\overline{\mu_z} = \mu L(x) = \mu \left(\coth x - \frac{1}{x} \right)$$

L é a Função de Langevin

A magnetização para N átomos por m^3 é:

$$M = N\mu L\left(\frac{\mu B}{kT}\right)$$

Para $x \rightarrow \text{infinito}$, $L(x) \rightarrow 1$, $M = N\mu$

Para $x \rightarrow 0$, $L(x) \rightarrow x/3$, $M = N\mu \frac{\mu B}{3kT} \square \frac{N\mu^2 \mu_0 H}{3kT}$

Ou seja, $\chi_{\text{Mol}} = \frac{\mu N \mu^2}{3kT}$

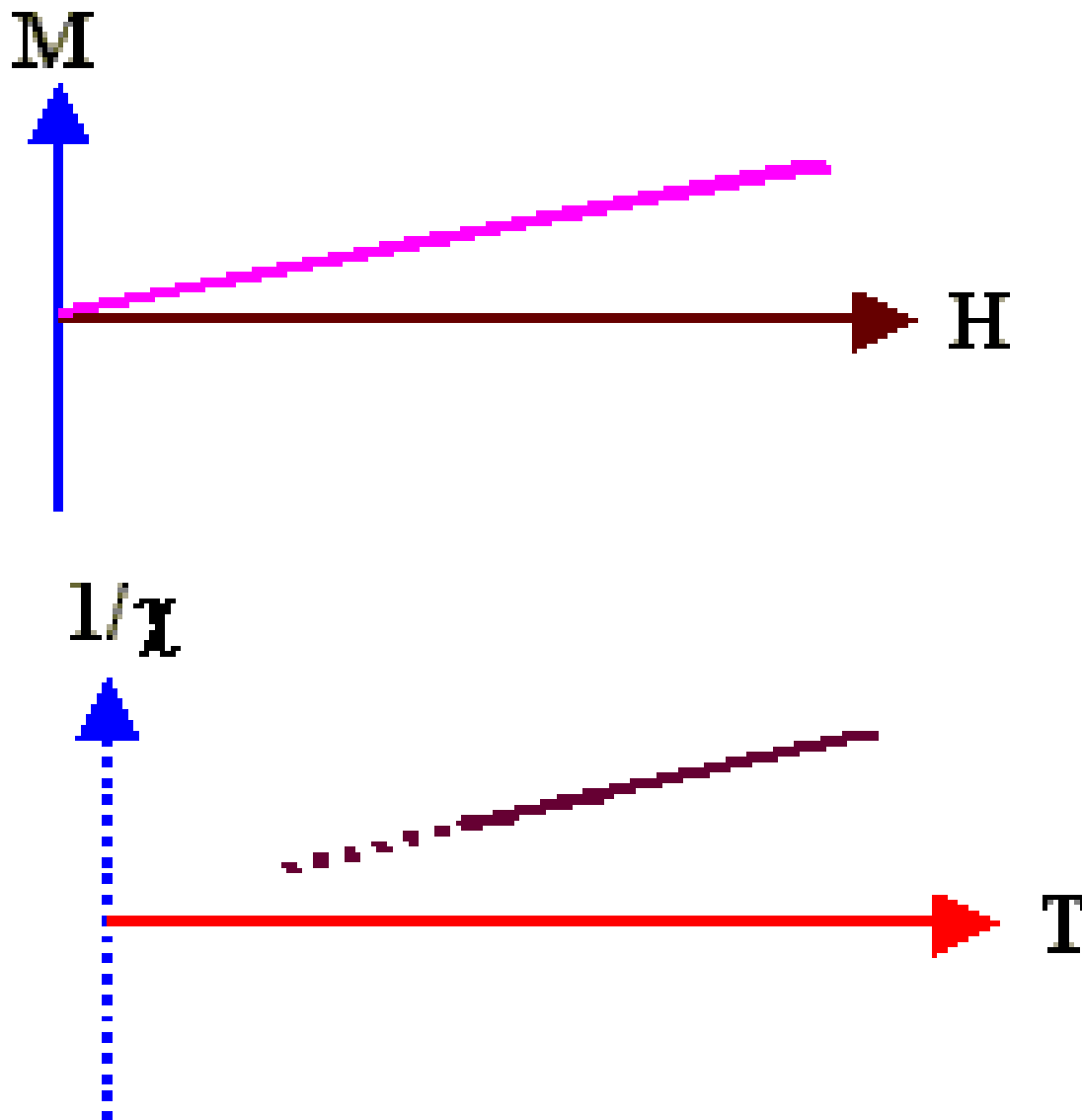
Para $B = 1 \text{ Tesla}$, $H = \frac{B}{\mu_0} = 8 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$

$T = 300 \text{ K}$ $x = \frac{\mu_0 B}{kT} = 2.2 \times 10^{-3}$

$T = 4 \text{ K}$ $x = 0.2$

Ordem de grandeza $\chi_{\text{para}} = 10^{-5} \text{ a } 10^{-3} \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$

Paramagnetismo: Curvas características



(c) Ferromagnetismo

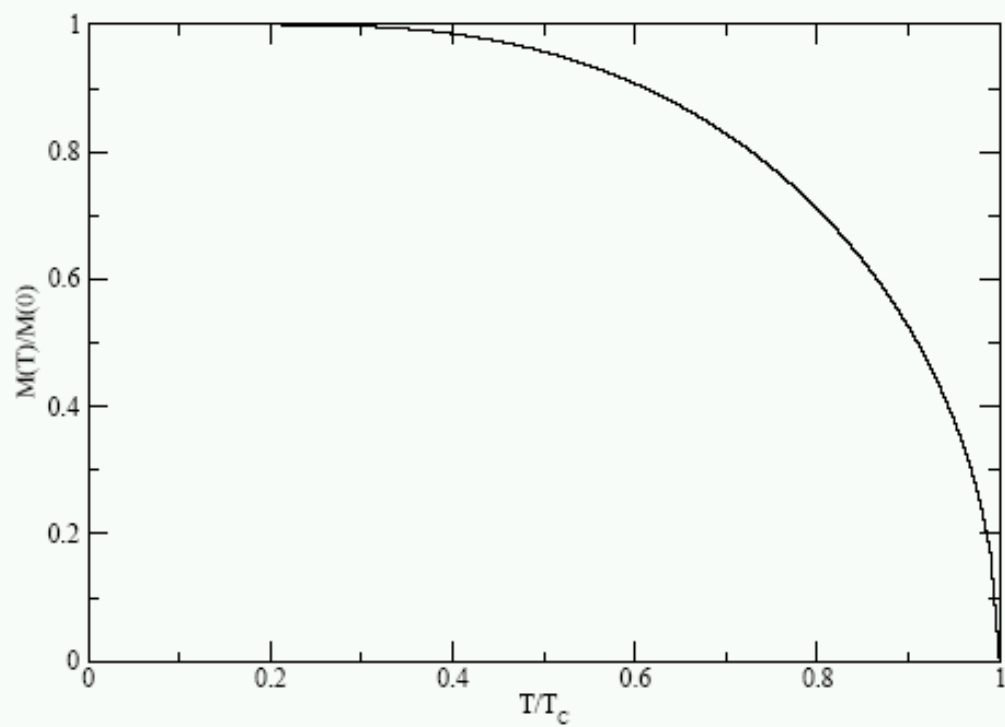
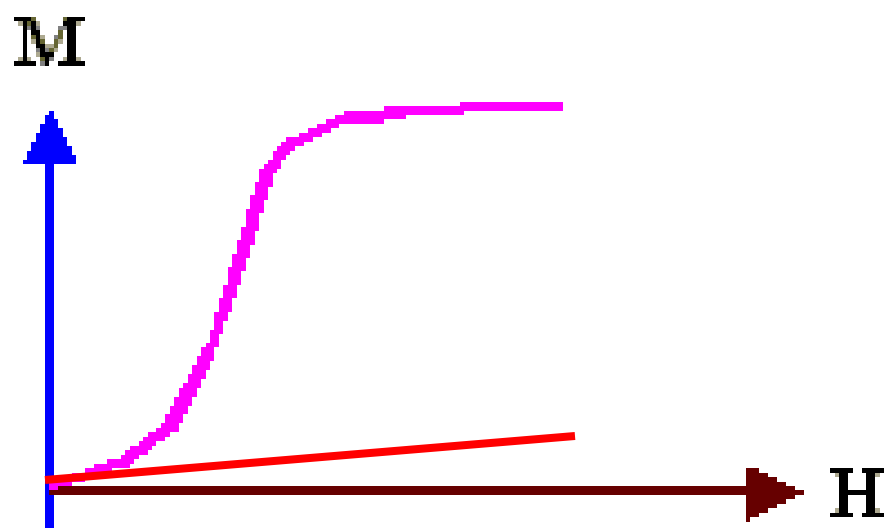
Para certas substâncias, observa-se que:

(a) A magnetização não é uma função linear (e nem mesmo unívoca) do campo.

(b) Os valores de M observados são os que para um paramagneto normal teria em campos várias ordens de grandeza maiores que os efetivamente aplicados.

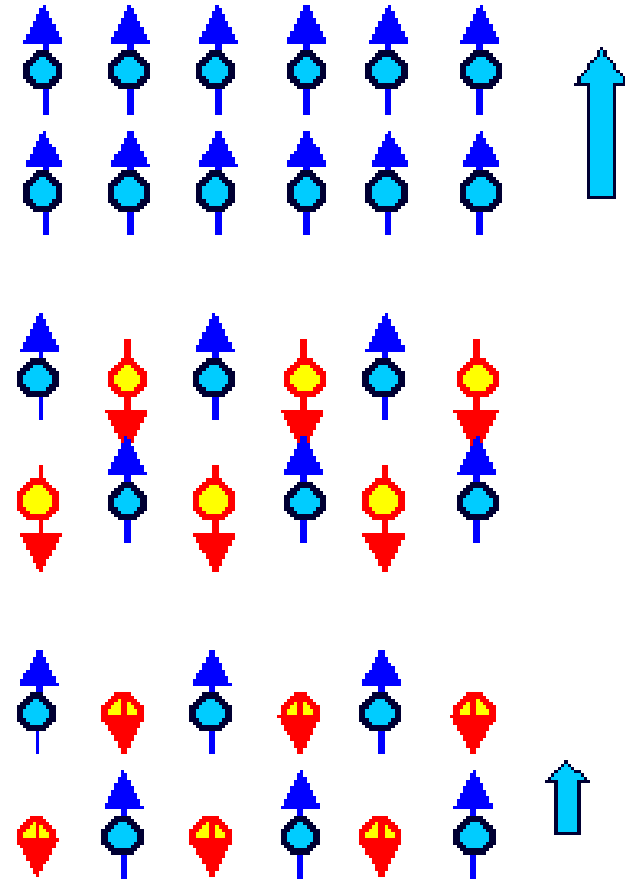
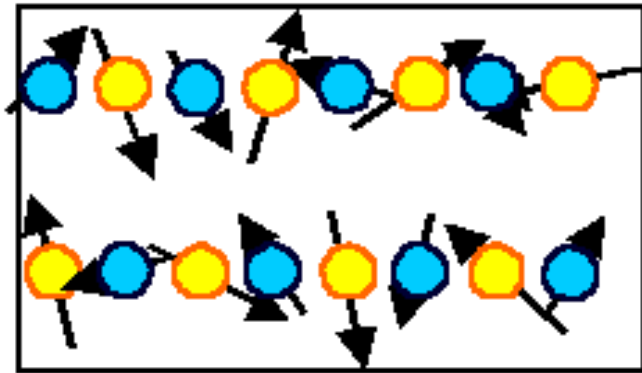
(c) A magnetização de saturação se anula para $T \geq T_C$ (temperatura de Curie).

(d) Magnetização é não nula mesmo na ausência de campo magnético externo.



Ferro, antiferro e ferrimagnetismo

Paramagnetismo

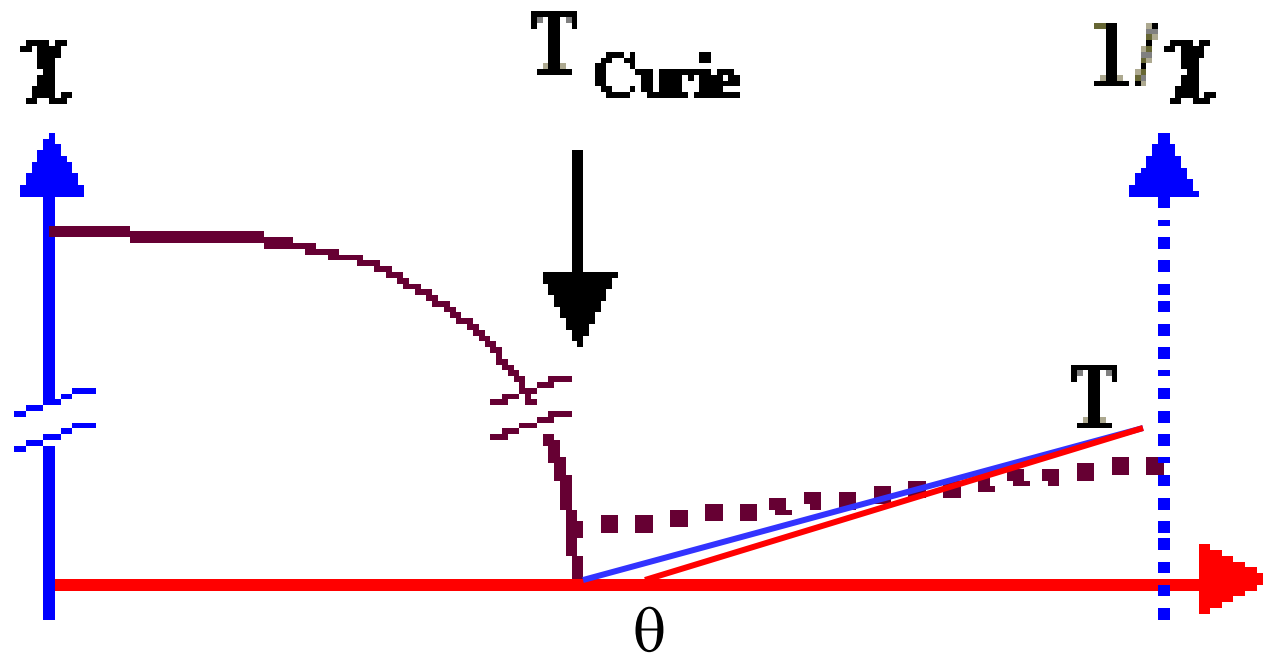


Elementos que apresentam ferromagnetismo

	$M_S(0)$ (10^6 A/m)	μ_s átomo (μ_B)	T_C (K)	θ (K)
Fe	1.74	2.22	1043	1093
Co	1.45	1.72	1403	1428
Ni	0.51	0.61	631	290
Gd	2.01	7.1	290	302
Dy	2.92	10.0	105	?

Suscetibilidade a $T > T_C$

$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{C}{T - \lambda C}$$



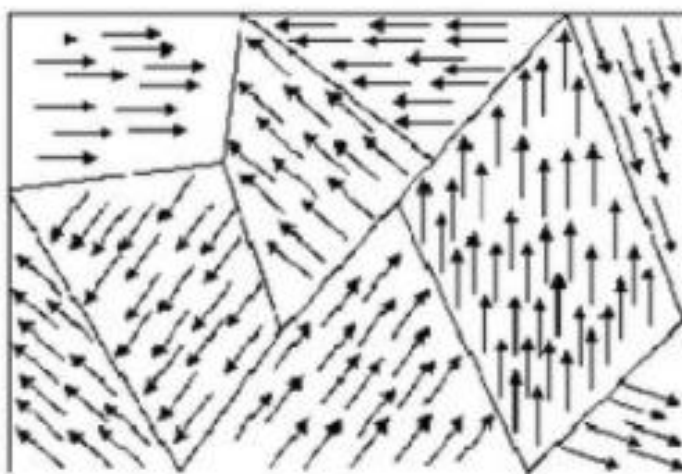


Figura 3: Esquematisação dos domínios magnéticos em um material.

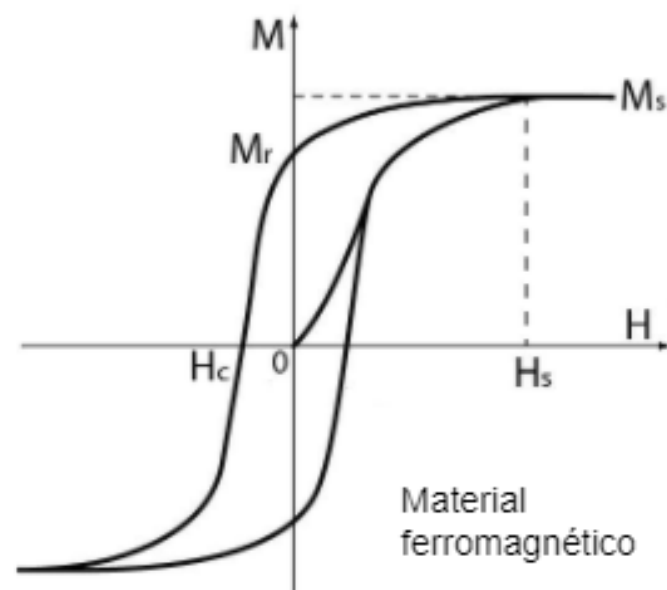


Figura 4: Curva de histerese, magnetização(M) por campo magnético aplicado(H), onde M_s é a magnetização de saturação, M_r é a magnetização remanente, H_s é o campo de saturação e H_c é o campo coercivo.