LP 45 : Paramagnétisme, ferromagnétisme, approximation du champ moyen

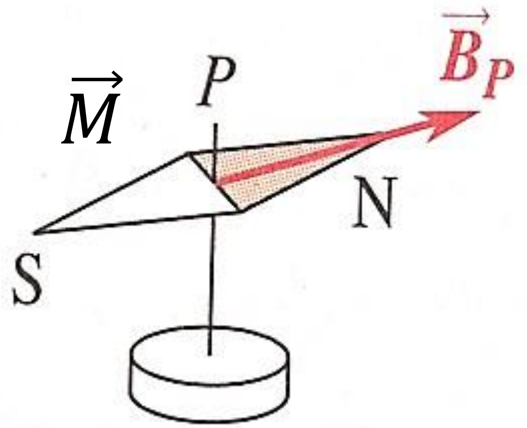
Niveau: L3

Prérequis:

-Electromagnétisme

-Ensemble canonique

-Phénoménologie du magnétisme (diamagnétisme / paramagnétisme / ferromagnétisme)



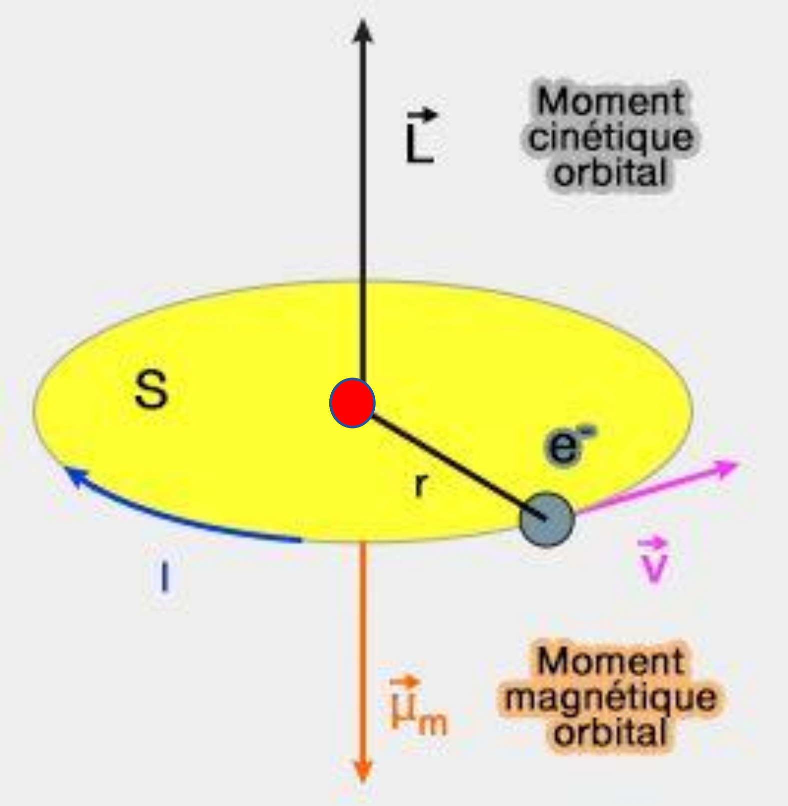
Hamiltonien du moment magnétique $\vec{M}$:

$$H_M = -\vec{M}.\overrightarrow{B_p}$$

- $\vec{M}$ interagit avec $\overrightarrow{B_p}$
- $\vec{M}$ créé un champ magnétique

→ Description du <u>magnétisme de la matière</u> à l'aide de <u>moments magnétiques</u> dus aux électrons au sein des atomes.

1) Moment magnétique orbital classique



$$\vec{L} = m_e\, \vec{r} \times \vec{v} = m_e\, \mathrm{r}^2 \omega\, \vec{n}$$

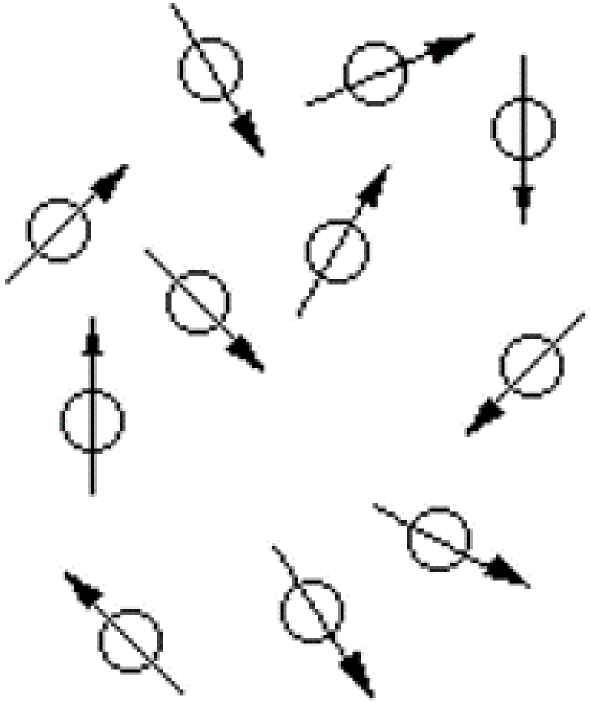
$$\vec{M} = I\, \vec{S} = \pi\, r^2 I\, \vec{n} = \pi\, r^2 \times \frac{-e\, \omega}{2\, \pi}\, \vec{n} = \frac{-e}{2\, m_e} \vec{L}$$

D'où $\vec{M} = \gamma_0\, \vec{L}$

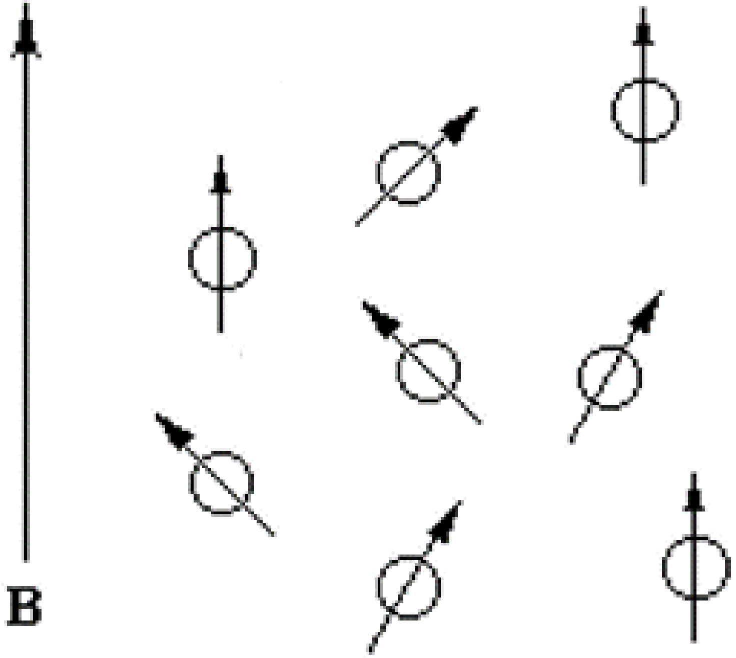
avec $\gamma_0 = \frac{-e}{2\, m_e}$ le facteur gyromagnétique de l'électron.

Alignement des moments magnétiques permanent en présence d'un champ extérieur

Paramagnétisme



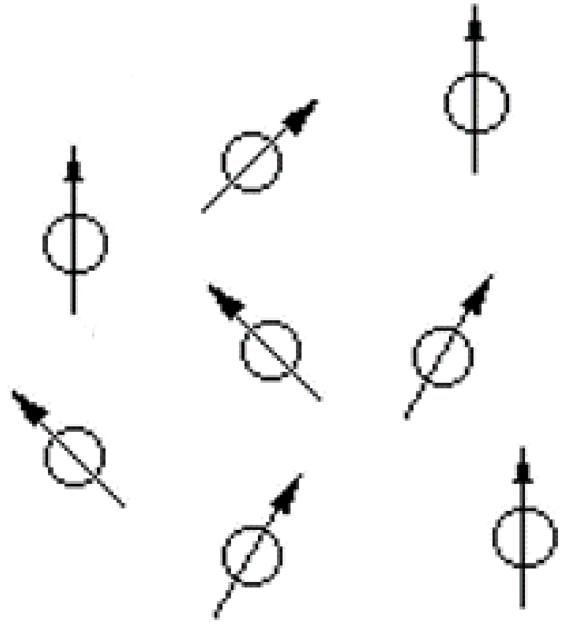
Sans champ magnétique extérieur, $\boxed{m=0}$



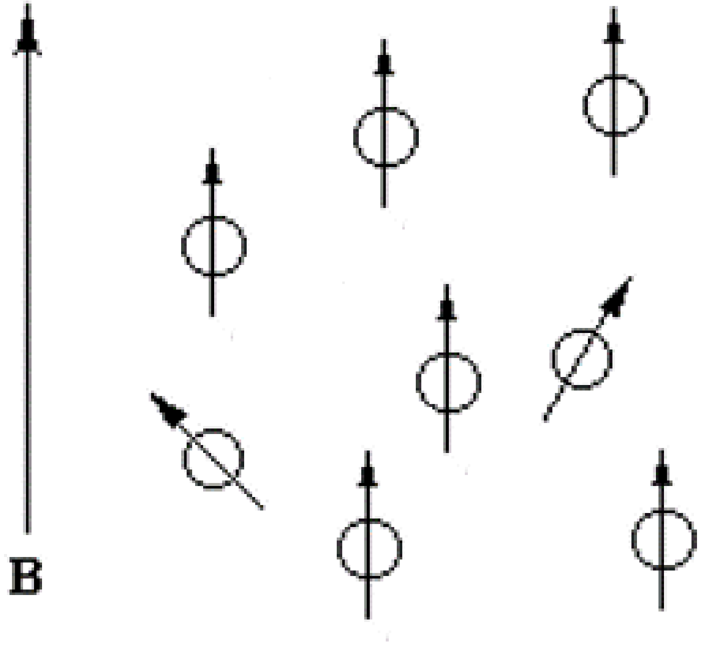
Avec un champ magnétique extérieur, $\boxed{m\neq0}$

Alignement des moments magnétiques permanent en présence d'un champ extérieur

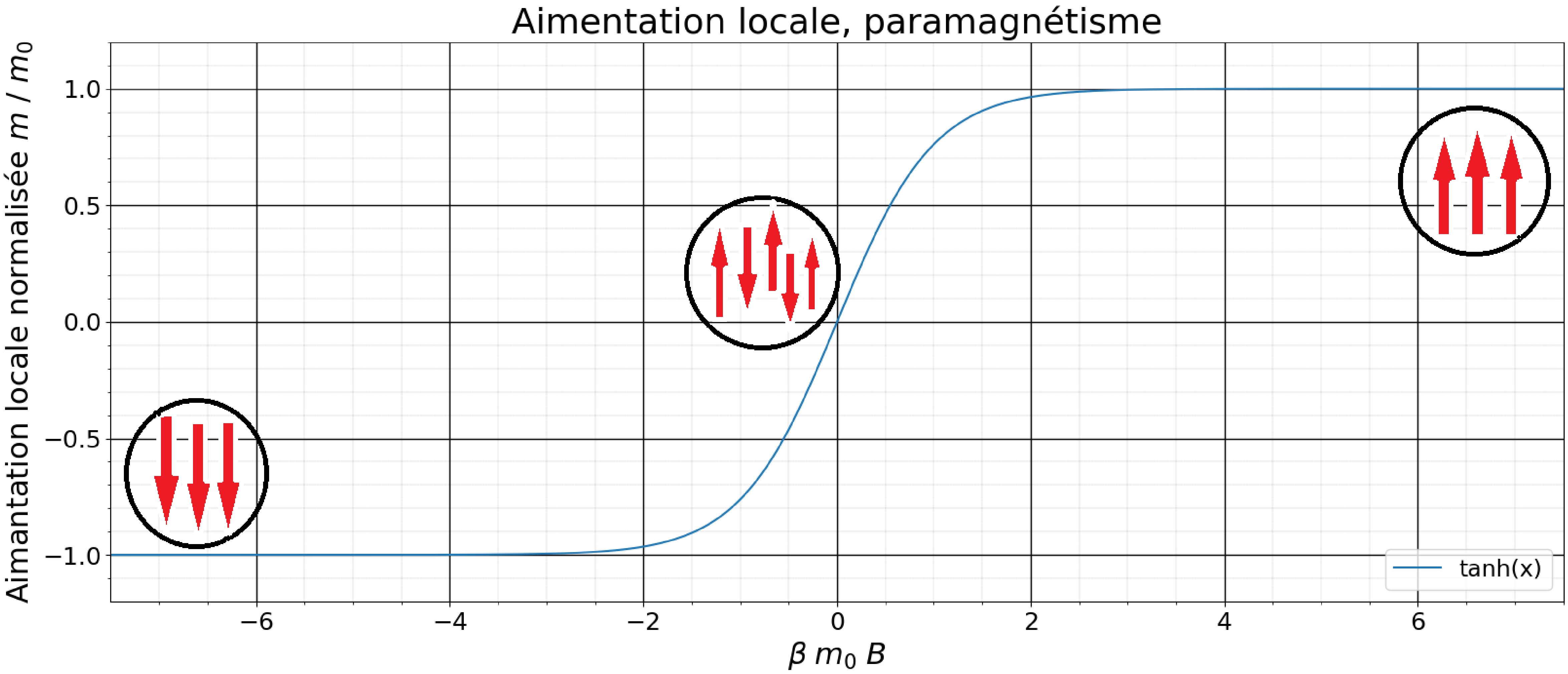
Ferromagnétisme



Sans champ magnétique extérieur, $\boxed{m \neq 0}$



Avec un champ magnétique extérieur, $\boxed{m \neq 0}$



Aimentation locale, paramagnétisme
Aimantation locale normalisée m / m_0
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−6
−4
−2
0
2
4
6
$\beta\, m_0\, B$
tanh(x)

Avec un moment cinétique total J quelconque :

$$\boxed{m = g_J\, \mu_B\, J\, B_J\left(\frac{g_J\, \mu_B\, B_0\, J}{k_B\, T}\right)}$$

Avec B_J la fonction de Brillouin:

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J}\coth\left(\frac{2J+1}{2J}x\right) - \frac{1}{2J}\coth\left(\frac{x}{2J}\right)$$

Courbes d'aimantation en fonction du champ magnétique :

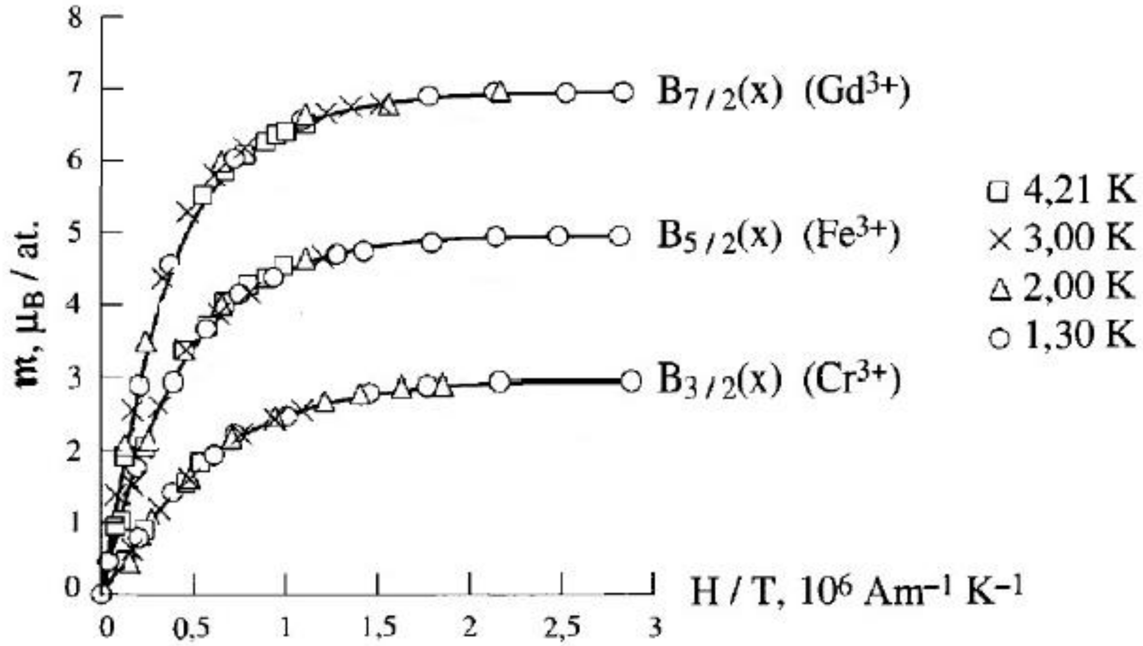


Figure 4.7 - Courbes d'aimantation, en fonction de H / T, pour trois sels contenant un ion magnétique : $CrK(SO_4)_2.12H_2O$, $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.12H_2O$, et $Gd_2(SO_4)_3.8H_2O$, d'après [1]

Loi de Curie:

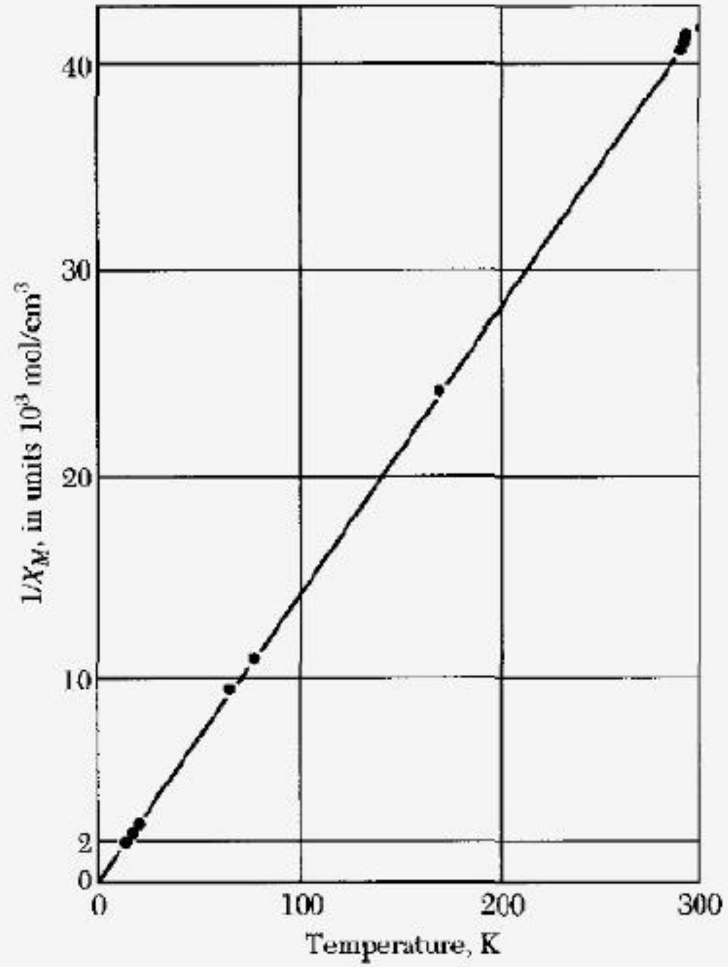


Figure 5 Plot of $1/\chi$ *vs* T for a gadolinium salt, $Gd(C_2H_3SO_4)_3 \cdot 9H_2O$. The straight line is the Curie law. (After L. C. Jackson and H. Kamerlingh Onnes.)

$$S_{iz} = \frac{m}{m_0} + \delta S_{iz}$$ (fluctuation autour de la moyenne)

$$S_{iz} \times S_{jz} = \left(\frac{m}{m_0} + \delta S_{iz}\right)\left(\frac{m}{m_0} + \delta S_{jz}\right)$$

Ordre 2

$$= (\frac{m}{m_0})^2 + \frac{m}{m_0}\left(\delta S_{iz} + \delta S_{jz}\right) + \cancel{\delta S_{iz} \delta S_{jz}}$$

$$\sim -(\frac{m}{m_0})^2 + \frac{m}{m_0}\left(S_{iz} + S_{jz}\right)$$

Approximation du champ moyen

Aimantation en fonction de la température

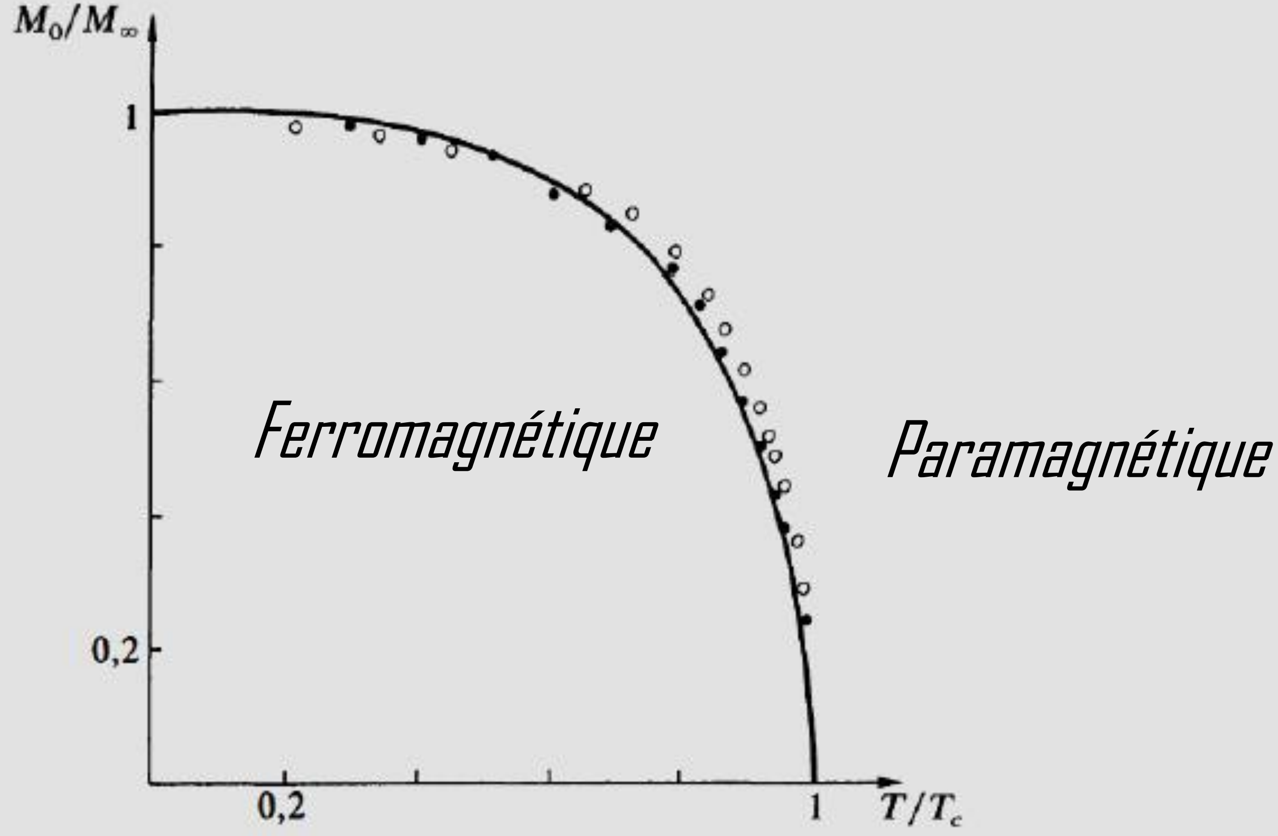


FIGURE 14

Courbe d'aimantation spontanée en fonction de la température dans l'approximation de champ moyen, comparée avec les points expérimentaux : ○ fer, • cobalt et nickel (d'après F. Tyler, *Phil. Mag.* 11, 596 (1931)).

Moment magnétique total d'un électron $\vec{\mu}$:

$$\vec{\mu} = -g_J \, \mu_B \, \vec{J}$$

Avec :

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2\, J(J+1)}$$