

PARAMAGNETISME

Le paramagnétisme est le fait des atomes et molécules qui possèdent **un moment magnétique permanent** (atomes et molécules possédant **un nombre d'électrons impair** ou dont les **couches électroniques internes** sont **incomplètes**).

- $\vec{B}_{\text{extérieur}} = \vec{0} \Rightarrow$ orientation aléatoire des moments magnétique \Rightarrow le moment magnétique résultant est nul.
- $\vec{B}_{\text{extérieur}} \neq \vec{0}$, les moments magnétiques atomiques $\vec{\mu}$ sont soumis à un couple $\vec{\mu} \wedge \vec{B}$

Ce couple tend à aligner les moments magnétiques dans le sens du champ.

La projection du moment magnétique $\vec{\mu}$ sur \vec{B} peut prendre deux valeurs $+\mu$ ou $-\mu$.

L'énergie potentielle du moment magnétique $E_p = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ peut prendre deux valeurs $E_p = -\mu \cdot B$ ou $E_p = +\mu \cdot B$.

L'orientation des moments est contrariée par l'agitation thermique. Chaque atome a deux états d'énergie possibles.

D'après la loi de Boltzmann, la probabilité pour qu'un système dans l'état d'énergie E soit en équilibre thermique à la

température T , est proportionnelle au facteur de Boltzmann : $e^{-\frac{E}{kT}}$

Les probabilités respectives des deux états sont donc: $A \cdot e^{\frac{\mu B}{kT}}$ et $A \cdot e^{-\frac{\mu B}{kT}}$

La condition de normalisation [somme des probabilités = 1] permet de déterminer la valeur de la constante A :

$$A \cdot e^{\frac{\mu B}{kT}} + A \cdot e^{-\frac{\mu B}{kT}} = 1 \Rightarrow A = \frac{1}{e^{\frac{\mu B}{kT}} + e^{-\frac{\mu B}{kT}}}$$

Valeur moyenne de la projection du moment magnétique d'un atome

$$\mu_{\text{moy}} = \mu A e^{\frac{\mu B}{kT}} - \mu A e^{-\frac{\mu B}{kT}} \Rightarrow \frac{\mu e^{\frac{\mu B}{kT}} - \mu e^{-\frac{\mu B}{kT}}}{e^{\frac{\mu B}{kT}} + e^{-\frac{\mu B}{kT}}} = \mu \cdot \text{th}\left(\frac{\mu B}{kT}\right)$$

Rappel : fonctions hyperboliques $\text{sh}(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$ et $\text{ch}(x) = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$

L'aimantation $M = \frac{d\mu}{dV} = n \cdot \mu_{\text{moy}} \Rightarrow \boxed{M = n \cdot \mu \cdot \text{th}\left(\frac{\mu \cdot B}{kT}\right)}$ avec n densité d'atomes par unité de volume

- Si B est grand $\text{th}\left(\frac{\mu \cdot B}{kT}\right) \rightarrow 1$ et $M \rightarrow n \cdot \mu$. les atomes sont tous orientés dans le sens du champ.

- Pour une valeur de B intermédiaire l'aimantation résulte d'un compromis entre l'action du champ qui tend à aligner les moments et l'agitation thermique qui tend à les en empêcher

- Si $\mu B \ll kT$ (à température ordinaire) $\text{th}\left(\frac{\mu \cdot B}{kT}\right) \approx \frac{\mu \cdot B}{kT}$ $\boxed{M = n \frac{\mu^2}{kT} \cdot B = \chi \cdot B}$

$\chi = n \frac{\mu^2}{kT} > 0$ le moment magnétique induit est de même sens que le champ, la substance est dite paramagnétique.

$M = \frac{Cte}{T} \vec{B}$ loi de Curie

Remarques

1- Pour la détermination des températures $< 1K$, on mesure la susceptibilité magnétique d'une substance paramagnétique.

2- Désaimantation adiabatique.

Une substance paramagnétique préalablement soumise à un champ magnétique intense (quelques Teslas) est mise en contact avec de l'hélium liquide ($\approx 1K$). Elle est ensuite thermiquement isolée. On diminue le champ ce qui provoque le refroidissement de la substance. Les températures obtenues sont de l'ordre de $10^{-3}K$.

La désaimantation adiabatique nucléaire (moment magnétique portés par des noyaux atomiques) permet d'atteindre des températures de l'ordre de $10^{-6}K$.

3- Dans les liquides et les solides, les interactions moléculaires obligent à remplacer la loi de Curie par la loi de Curie-Weiss

$\vec{M} = \frac{Cte}{T - T_0} \vec{B}$ avec T_0 température de Curie caractéristique de la substance