

LP45-Para-Ferro.Approximation du champ moyen

Pierre Ghesquiere

Références :

- Couture et Zitoun chapitre 13
- Diu : CptIII-J

Prérequis :

Introduction

I- Paramagnétisme

II- Ferromagnétisme

A- Expérimentalement

- **Expérience du clou** : perte des propriétés ferromagnétique (aimantation super forte pour pouvoir être attiré). Au dessus, de T_c = température de curie. Il devient paramagnétique. Transition de phase.
- Représentation du cycle **d'hystérésis** d'un barreau aimanté dans une bobine. Phénomène important (i) aimantation (rémanente) non nulle à champ nul. (ii) hystérésis dépend de son histoire (iii) champ coercitif pour que M soit nulle.
- **Loi expérimentale** : Loi du curie Weiss $\chi = \frac{C}{T-\theta}$ avec $\chi = \frac{\partial M}{\partial H}$, $H \rightarrow 0$. Et θ , température de Weiss.

Au voisinage de T_c , $\chi \propto \left(\frac{T-T_c}{T_c}\right)^\gamma$ avec γ exposant critique ~ 1.3 (tableau p384 Couture).

Aimantation réduite au voisinage de Curie : $R \propto \left(\frac{T_c-T}{T_c}\right)^\beta$ avec $R = \frac{M_0}{M_{sat}}$

B- Obtention de l'hamiltonien

- **Deux interactions entre particules magnétiques :**

→ Interactions entre atomes de Fer (ie interaction entre dipôles magnétique).

$\epsilon_{ij} \sim \frac{\mu_0 \mu_i \mu_j}{4\pi r_{ij}^3}$. Pour μ_i et μ_j de l'ordre de μ_B $\epsilon_{ij} \sim 6.7 \cdot 10^{-6} eV$. Rappel : $kT = 26 meV$ à T ambiant. Pour que cette interaction ait un effet notable, il faut $T = \epsilon/k = 0.1 K$. En revanche, elle décroît en $1/r^3$ alors que l'interaction d'échange décroît exponentiellement.

--> Interaction d'échange électrostatique entre électrons : interaction d'origine coulombienne $\epsilon = \langle \psi | \frac{e^2}{r} | \psi \rangle$

- **Interaction d'échange électrostatique entre électrons :**

Comme les électrons sont des fermions, leur fonction spin-orbitale est antisymétrique. Cela implique (i) soit fonction orbitale est symétrique et fonction spin antisym, (ii) soit

l'inverse. La fonction d'onde de spin symétrique peut prendre 3 états $S=1$. La fonction d'onde de spin antisym peut prendre 1 état ($S=0$). Après calcul, on obtient $\epsilon = -2J\vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2$.

- **Synthèse** : L'interaction d'échange est purement coulombienne bien que les spins des électrons s'introduisent dans l'expression de l'énergie via la règle de symétrisation : l'énergie d'échange est une notion quantique et n'a aucun équivalent classique.
- **Qualitativement (Reif p428)** : Les électrons ne peuvent occuper le même état (principe d'exclusion de Pauli). Deux électrons qui ont le même spin, ne peuvent pas s'approcher aussi proche l'un de l'autre (ie ne peuvent pas occuper le même état orbital). Deux électrons qui ont des spins différents peuvent s'approcher l'un de l'autre. Puisque différentes répartitions spatiales donnent différentes interactions électrostatiques, cela donne naissance à une interaction coulombienne qui dépend de l'orientation des spins.
- **Règle de symétrisation (Couture p37), Combinaison symétrique et antisymétrique et conséquences sur le nombre d'occupation de l'état**: Le principe d'indiscernabilité (conséquence du théorème d'indétermination d'Heisenberg), implique que les fonctions d'ondes d'un système de particules indiscernables sont soit symétriques, soit antisymétrique par permutation de deux arguments (ie 2 particules). P38 bas de page. La règle de symétrisation implique une *combinaison* particulière pour les fonctions d'onde d'un système de 2 particules indiscernables : Une *combinaison* symétrique et une *combinaison* antisymétrique. On voit que si les deux particules sont identiques. La *combinaison* antisymétrique s'annule et donc n'est pas physiquement acceptable (pas normalisable). **Donc 2 fermions (ie. fonction d'onde antisymétrique) ne peuvent se retrouver dans le même état quantique.**
- **L'intégrale d'échange : J** (cf expression p 388) varie rapidement en fonction de la distance des atomes de fer. A petite distance elle est négative, puis elle devient positive et tend alors vers 0 exponentiellement. Le manganèse métallique présente une intégrale d'échange négative alors que les ions du nickel métallique présentent une intégrale d'échange positive. J positif favorise l'alignement parallèle des spins (ferromagnétisme). Et J négatif l'alignement antiparallèle (antiferromagnétisme).

C- Fonction de partition et propriétés

- **Découplage du Hamiltonien d'Heisenberg : Pourquoi découpler ?** Pour pouvoir déterminer les valeurs propres du hamiltonien (ie les différents niveaux d'énergie possible) On remarque que le terme dû à l'interaction d'échange dans le hamiltonien entraîne un couplage entre les spins des atomes. On va dire qu'un spin ne va interagir qu'avec la moyenne du spin de ses plus proches voisins. $\vec{S}_i \vec{S}_j \rightarrow \vec{S}_i \cdot \langle \vec{S}_j \rangle$. On fait de manière équivalente $\vec{S}_i \vec{S}_j \rightarrow \vec{S}_i \cdot \langle \vec{S} \rangle + \vec{S}_j \cdot \langle \vec{S} \rangle - 2 \langle \vec{S} \rangle^2$. Ce qui revient à négliger les fluctuations au deuxième ordre. Ensuite les calculs se déroulent. Et on se ramène à un système équivalent (effectif) où les N spins interagissent avec un champ dit effectif somme du champ initial et d'une composante qui dépend du spin moyen (ou du moment magnétique totale).
- Le calcul qui mène à la fonction de partition a été rédigée (cf. pdf)

D- Présentation du phénomène

Cf. Cours de Maria et Diu p 445 Cpt III.J

La présence des différents domaines de Weiss s'explique par la minimisation de l'énergie libre. Compétition entre énergie d'interaction magnétique dipolaire (faible et à longue portée) et l'énergie d'échange, forte et à courte portée. La première diminue lorsque le nombre de domaine augmente et tend donc à les multiplier ; la seconde tend au contraire à étendre un domaine unique.

Notes :