

Titre : LPS3 Paramagnétisme, Ferromagnétisme : Approximation du champ moyen

Présentée par : Xavier Dumoulin

Rapport écrit par : Xavier Dumoulin

Correcteur : Gwendal Feve

Date : 31/01/2020

Bibliographie de la leçon :			
Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Electromagnétisme 4, 3 ^e edition	M.Bertin, J.P.Faroux, J.Renault	Dunod Université	1984
Physique Statistique	B.Diu, C.Guthmann, D.Lederer, B.Roulet	Hermann	2001
Physique de la matière condensée	Hung T. Diep	Dunod	2003
Physique de l'état solide 8 ^e edition	Charles Kittel	Dunod	2007

Plan détaillé
<p><u>Niveau choisi pour la leçon :</u> L3</p> <p><u>Prérequis :</u> Milieux magnétiques, EM dans la matière, Mécanique quantique (Spin), Physique statistique : Maxwell-Boltzmann</p> <p>Intro : Dans une leçon antérieure sur les milieux mag ont été définies les notions d'aimantation et de susceptibilité magnétique. Une interprétation macroscopique du ferromagnétisme a été donnée. Comment comprendre à l'échelle micro comment se fait l'aimantation ?</p> <p><u>I/Origine microscopique du magnétisme</u></p> <ul style="list-style-type: none">• <u>Moment magnétique et aimantation</u> <p>2 origines au magnétisme : Magnétisme orbital et magnétisme de spin</p> <p>Magnétisme orbital : Avec le magnéton de Bohr.</p> <p>Magnétisme de spin : avec ≈ 2.00 le facteur de Landé de l'électron.</p>

Finalement, un petit moment magnétique i total vaut avec

Chaque électron porte un moment magnétique. Pour rendre compte de cela à l'échelle macro on définit l'aimantation :

TR : Comportement relié à la réponse magnétique d'un échantillon soumis à une excitation extérieure : soit un champ B soit un changement de température. Cette réponse s'exprime au travers de la susceptibilité

$t = 5 \text{ min}$

- Susceptibilité magnétique

Par définition de la susceptibilité magnétique :

La susceptibilité correspond à la réponse magnétique d'un échantillon à une excitation extérieure. En fonction de sa valeur, on a différentes propriétés. Si la susceptibilité est négative diamagnétisme, B et M sont de signes opposés. Sinon paramagnétisme : M et B sont de même sens.

On ne s'intéresse pas au diamagnétisme.

TR : On dit qu'il existe des moments magnétiques permanents et on étudie leur interaction avec un champ magnétique extérieur. Commençons par étudier le cas où les moments magnétiques sont indépendants les uns des autres : c'est ce qu'on appelle le paramagnétisme.

$t = 7 \text{ min } 15$

II/ Paramagnétisme

En l'absence de champ les μ_i sont orientés au hasard et $M=0$. En présence de champ les μ_i s'alignent et M n'est plus nulle. Pourquoi ?

- Etats magnétiques du système

Si les μ_i sont indépendants alors avec n la densité de moment magnétiques dans le matériau. L'énergie d'interaction entre un moment magnétique avec un champ B vaut :

Pour simplifier le problème, on se place dans le cas où . Soit on a un spin \uparrow soit \downarrow . On suppose donc que les spins sont soit // à B et de même sens, soit // à B et de sens opposés. On a alors deux états d'énergie possible W_+ et W_- . Pour déterminer la probabilité d'occupation de chaque état on utilise Maxwell-Boltzmann. On peut alors déterminer $\langle \mu \rangle$. Après calcul on trouve (Cf BFR) :

TR : M ne dépend que de B et T . On a donc compétition entre les deux.

$t = 12 \text{ min } 30$

- Agitation thermique contre alignement magnétique

Si $\mu_B B \gg k_B T$: $M = n\mu_B$ et l'aimantation est maximale. Tous les moments sont alignés dans la direction de B.

Sinon, en considérant que alors on obtient la loi de Curie :

AN : Si $T = 300\text{K}$ et $B = 1\text{T}$ alors $\mu_B B / k_B T = 2.24 \cdot 10^{-3} \ll 1$. On trouve $\chi_m = 2.7 \cdot 10^{-3}$ pour $n = 10^{29} \text{ m}^{-3}$.

B tend à orienter les moments magnétiques, T tend à désordonner les moments magnétiques. Pour aligner les moments mag et avoir une aimantation il faut B fort et T faible.

TR : Si $B=0$, $M=0$ dans ce modèle. Pourtant avec les aimants on a une aimantation pour $B=0$. Donc l'hypothèse de moments magnétiques indépendants n'est pas valable dans ce cas.

t = 20 min 30

III/ Description du ferromagnétisme

On a jusqu'ici supposé les spins indépendants. Mais ce n'est pas toujours le cas.

- Couplage entre spins voisins

En 1928 Heisenberg propose couplage entre spins voisins par l'intermédiaire des fonctions d'ondes électroniques. Interaction fondée sur le principe de Pauli et ses conséquences sur les contraintes sur les fonctions d'onde décrivant le système.

Energie de couplage entre 2 spins atomiques :

J_e intégrale d'échange dépend de la distance entre les atomes. Si d trop faible antiferro. Si d trop grand pas de couplage.

J_e diminue avec d => on ne prend en compte que les interactions avec les plus proches voisins.

On en déduit l'hamiltonien pour 1 spin S_i dans un champ B :

TR : Problème à N corps couplé trop compliqué à résoudre. On a besoin de faire une approximation.

- Approximation du champ moyen

On peut écrire l'hamiltonien sous la forme :

Tout se passe comme si le site i était soumis à un champ effectif B^i .

On néglige les fluctuations du champ moléculaire et on en prend la valeur moyenne. En faisant intervenir l'aimantation on trouve (Cf Diu Phy stat) :

Tout se passe comme si chaque spin était soumis à 1 champ B^{eff} indépendant du spin considéré. On est ramené au cas où on a N spins indépendants placés dans un champ B^{eff} . On a donc :

Par résolution graphique de cette équation d'autocohérence, on remarque que si $T < T_c$ alors on a 3 solutions pour M . 2 différentes de 0 qui sont des équilibres stables, 1 égale à 0 qui est un équilibre instable

Si $T > T_c$ alors on a une seule solution pour M , $M=0$ qui est un équilibre stable.

TR : Pourrait-il y avoir une autre interaction qui explique le ferromagnétisme ?

t = 35 min 40

- Autre origine de l'interaction ?

Cette partie n'était pas prévue au départ. Elle devrait être en III.1 mais par peur de manque de temps je ne l'avais pas faite. J'avais finalement encore 5 minutes j'ai donc pu la traiter en III.3

L'interaction pourrait-elle venir aussi de l'interaction magnétique dipôle-dipôle ? On a en ODG :

Or pour $T=298K$, $k_B T=0,026$ eV. Donc $E_{\text{mag}} \ll k_B T$, ce n'est donc pas cette interaction. On aurait alors des températures de Curie de l'ordre de 1K ce qui n'est pas cohérent avec la réalité.

t = 38 min

CCL : Récap leçon. Ouverture : cohérence du modèle micro et modèle macro. Dans les domaines de Weiss c'est là que les moments magnétiques sont alignés.

Fin t = 39 min 30

Questions posées par l'enseignant

Placement du III.3 dans la dernière partie ?

Quelle origine micro du ferromagnétisme ? Couplage entre spins. Origine quantique : principe d'exclusion de Pauli. A la base interaction de Coulomb.

Pourquoi interaction de Coulomb agit sur le spin ? Les électrons sont des fermions qui vérifient le postulat d'antisymétrie de la fonction d'onde qui dépend à la fois de la partie orbitale et du spin. Si l'un est symétrique, l'autre est antisym. Le choix de la symétrie de la fonction d'onde orbitale induit une symétrie sur le spin.

Peut-on trouver du ferromag dans les liquides ou les gaz ? N'existent pas car le signe de J nécessite une distance faible et bien fixée (donc que dans les solides). Ferrofluides : suspension de solides dans le liquide.

Cas aligné ou non aligné, est-ce général comme façon de voir les choses ? En toute généralité, y a-t-il que deux niveaux ? C'est faux, uniquement pour spin $1/2$. Modèle de

Langevin donne approche classique.

Dégénérescence de J ? $2j+1$ donc pour $L=0$ et $S=1/2$ on a dégé de 2. Il faut préciser pendant la leçon qu'on s'intéresse au cas particulier.

χ_m toujours proportionnel à $1/T$? $1/T$ vient de Maxwell Boltzmann donc si on a une autre distribution ce n'est plus vrai. Pour le cas ferro on a proportionnalité à $1/(T-T_c)$.

Lien avec la capacité thermique d'un métal ? Pour un bon métal, C proportionnel à $Nk_B T/T_F$ (électrons gelés).

Idée de χ_m dans un métal ? Susceptibilité proportionnelle à $(T/T_F)^{-1} \chi_m^{\text{classique}}$ Donc les électrons de faible énergie sont « gelés ». T/T_F e^- peuvent bouger, tous les états avant sont occupés avec proba de 1. C'est le paramagnétisme de Pauli pour les métaux.

Peut-on déduire le magnétisme de manière classique ? Ferromag est clairement quantique. Pour paramag on a des modèles classiques. e^- dans B, la force mag ne travaille pas donc à priori pas de changement d'énergie. Mais les modèles classiques marchent quand même un peu. Au fond, on ne peut pas décrire classiquement le magnétisme.

Commentaires donnés par l'enseignant

Globalement bonne leçon. Le plan est bien et les explications claires. Bonne aisance à l'oral.

Gros point perfectible : lien entre théorie et expérimental à approfondir. Donner des valeurs de T_c , de χ_m etc...

Possibilité de faire une expérience : clou en fer chauffé, matériau dia, ferro, para dans un électroaimant etc...

Essayer de mieux comprendre origine micro du ferromag : Pauli et interaction de Coulomb.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Bon plan et bon contenu, bonne maîtrise du sujet. Quelques points sont perfectibles : 1) faire un lien plus explicite avec des mesures expérimentales et présenter une expérience 2) Discuter plus clairement l'origine de l'interaction entre spins pour le ferromagnétisme.

- Le Kittel décrit des mesures expérimentales de l'aimantation en fonction du champ magnétique et de la susceptibilité magnétique en fonction de la température (loi de Curie) pour des solides ioniques (sels) qui contiennent des ions magnétiques (métaux de transition Fe^{3+} , Cr^{3+} ou terres rares Gd^{3+}) ces mesures nécessitent de discuter le cas J différent de $1/2$. Je conseille de ne faire le calcul que pour $J=1/2$ (comme présenté dans la leçon) et de dire que l'on peut généraliser à un J arbitraire. Pour la partie ferromagnétisme, donner des valeurs de T_c la température critique.

- La partie III.3 aurait pu être discutée en donnant la valeur typique de la température critique T_c de l'ordre de 1000K et $T_c = pJ/(4 k_B)$ donne J de l'ordre de quelques dizaines de meV. L'interaction ne peut pas être d'origine magnétique (interaction dipôle-dipôle), l'ordre de grandeur est compatible avec l'interaction de Coulomb : c'est la combinaison de l'interaction de Coulomb avec l'antisymétrie de la fonction d'onde pour des fermions qui donne une interaction effective spin-spin.

Dernier point important : dans la partie 3 : ferromagnétisme, il faut introduire la loi de Curie-Weiss pour la susceptibilité : $\chi = 1/(T - T_c)$ pour $T > T_c$.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

-paramagnétisme : moment magnétique non-nul lié au moment cinétique non nul (orbital ou de spin). Les moments n'interagissent pas entre eux et peuvent être ordonnés par l'action d'un champ extérieur. Cet ordre est détruit par les fluctuations thermiques ($k_B T \gg \mu_B B$) ce qui donne une susceptibilité en $1/T$ (loi de Curie). Attention, ce résultat est obtenu en sommant les contributions de chaque atome/ion dans un solide. Il n'est pas valable pour la contribution des électrons dans un métal pour lesquels le couplage entre atome joue un rôle déterminant (théorie des bandes). C'est le paramagnétisme de Pauli avec une susceptibilité obtenue par multiplication du facteur T/T_F habituel pour les métaux et qui ne dépend donc pas de la température.

-ferromagnétisme : l'interaction entre spins provient de l'interaction de Coulomb, permet d'ordonner les spins pour obtenir une aimantation non nulle à champ extérieur nul en dessous de la température critique T_c . Au dessus de T_c la susceptibilité est donnée par la loi de Curie-Weiss.

-Les fluctuations thermiques tendent à détruire l'ordre magnétique (comparaison de $k_B T$ avec $\mu_B B$ pour le paramagnétisme, de $k_B T$ avec $k_B T_c$ pour le ferromagnétisme).

Notions secondaires :

-le diamagnétisme est toujours présent, il est compensé par la réponse paramagnétique pour les corps paramagnétiques

-la magnétisme nucléaire existe aussi, il est plus faible (facteur m dans le magneton de Bohr)

-autres ordres magnétiques : antiferromagnétisme, ferrimagnétisme

- pour $T = T_c$, fluctuations importantes de l'aimantation, divergence de la susceptibilité

Point délicat : on fait d'abord le lien entre le moment magnétique μ et les moments cinétiques L et S : $\mu = -\mu_B (L + 2S)$ puis on relie μ à J , moment cinétique total ($J = L + S$). Ce lien n'est pas évident. Il est nécessaire car en raison du couplage spin-orbite L_z et S_z ne commutent pas avec H alors que J^2 et J_z commutent bien avec H . On peut montrer que dans le sous-espace généré par les états propres de (L^2, S^2, J^2, J_z) (qui commutent entre eux et avec H), μ est proportionnel à J , $\mu = -g_J \mu_B J$ avec g_J le facteur de Landé qui dépend de J, L et S . Il n'est pas nécessaire de dire tout cela durant la leçon (manque de temps) mais il faut expliquer pourquoi il est nécessaire de relier $\mu = -\mu_B (L + 2S)$ à J (couplage spin-orbite).

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Expérience du clou ou fil de fer chauffé pour illustrer la température de Curie. En approchant un aimant, le clou/fil de fer est attiré. Le clou/fil de fer est ferromagnétique, en présence d'un champ magnétique extérieur il apparaît une aimantation importante (courbe d'aimantation d'un ferromagnétique). En chauffant le clou/fil au-dessus de la température de Curie, il devient paramagnétique et l'aimantation est beaucoup plus faible, de même que la force d'attraction exercée par l'aimant.

Paramagnétisme/diamagnétisme : orientation d'un barreau paramagnétique ou diamagnétique dans l'entrefer d'un électroaimant, le barreau paramagnétique se place dans les régions de champ fort, le barreau diamagnétique dans les régions de champ faible (décrit par exemple dans le cours de Feynman électromagnétisme 2 p257).

Bibliographie conseillée

Ok avec la bibliographie conseillée.