

LP45 – Para, ferro, approx champ moyen

29 juin 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

📌 *Le nom du livre, l'auteur*¹

→ Expliciter si besoin l'intérêt du livre dans la leçon et pour quelles parties il est utile.

Prérequis

Expériences

- Physique statistique : Distribution de Maxwell-Boltzmann, ☕ Biréfringence du quartz
- Mécanique quantique : Hamiltonien,
- Équations de Maxwell dans les milieux matériels
- expérience de Stern-Gerlach, spin.

Table des matières

1	Origine et description du magnétisme dans la matière	3
1.1	Phénoménologie du magnétisme	3
1.2	Description classique du magnétisme	5
1.3	Modèle quantique du magnétisme	5
2	Paramagnétisme	6
2.1	Cadre de l'étude	6
2.2	Modèle statistique du paramagnétisme de Curie	6
2.3	Désaimantation adiabatique	7
3	Ferromagnétisme	7
3.1	Origine microscopique du ferromagnétisme	8
3.2	Hamiltonien de Heisenberg et champ moyen	8
3.3	Bonus : Comportement critique, limites du champ moyen	10
3.4	Le magnétisme dans la matière	15
3.4.1	Description classique	15
3.4.2	Susceptibilité magnétique	15
3.4.3	Description microscopique	15
3.5	Paramagnétisme	15
3.5.1	Hypothèse du modèle	15
3.5.2	Aimantation et susceptibilité	15
3.6	Ferromagnétisme	16
3.6.1	Equation auto-cohérente	16
3.6.2	Comportement avec la température	16
3.6.3	Simulation Monte-Carlo	16

Jury

Le moment magnétique, son image semi-classique et son ordre de grandeur doivent être maîtrisés. De même, le lien avec l'ordre de grandeur de l'aimantation d'un aimant doit être connu.

Préparation

Biblio : Lacheisserie, Diu, Simon (Oxford), Kittel, <https://www.britannica.com/science/magnetism/Induced-and-perma>

Préparation : résolution graphique sur transparent

Plan : passer très rapidement le I/, il faut du temps pour les calculs

Manip : Paramagnétisme d'un oxyde de cuivre, Température de Curie du clou en fer. Tracé python des courbes. Domaines de Weiss en conclusion.

Passage : distinguer aimantation (volumique) et moment magnétique (extensif), justifier les notions de fonctions de partition et l'ensemble statistique dans lequel on se place

Questions : ferrofluides, domaines de weiss (LP 46), diamagnétisme, justifier $J < 0$ dans l'antiferromagnétisme de Mott.

Introduction

Quels éléments sont attirés par des aimants ?

On montre la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=Xgy51aDEkBU>. On dispose d'un aimant permanent. Quel élément est attiré par l'aimant ? Fe, Ni, Co mais pas les autres. 🚫 Il ne faut pas faire croire que les matériaux paramagnétiques ne sont pas attirés par des aimants : ils le sont aussi mais plus faiblement

Phénoménologie Il existe des matériaux dits ferromagnétiques, qui possèdent une aimantation permanente $\vec{M}$. Ex : Fe, Ni, Co. Au delà d'une certaine température T_c , la température de Curie, ou point de Curie, le matériau perd son aimantation permanente. Le matériau est alors dans un état magnétiquement désordonné dit paramagnétique.

Expérience du clou chauffé

On montre la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=dtmgpy8gxao>. On place une aiguille en fer qui peut osciller dans un plan vertical et un aimant permanent en U. A température ambiante, le fer possède est ferromagnétique, il est attiré par l'aimant. En chauffant le fer au bec bunsen, il devient paramagnétique et est moins attiré par l'aimant. Lorsqu'il redroidit, il redevient ferromagnétique.

Cette transition de phase est réversible, le matériau retrouve ses propriétés ferromagnétiques quand la température redescend en dessous de la température de Curie. En revanche il a perdu son ancienne aimantation, même s'il peut être aimanté à nouveau.

Problématique L'aimant possède une aimantation permanente forte qui attire fortement le morceau de fer mais moins lorsqu'il est porté à une température de transition. On a caractérisé macroscopiquement mais que se passe-t-il au niveau microscopique pour que deux morceaux de métal aient des comportements complètement différents.

Objectif On est habitué à rencontrer les phénomènes quantiques à l'échelle atomique. On va voir que le magnétisme est une manifestation macroscopique du caractère quantique des électrons (pas les protons, car $\mu_B \propto 1/m$).

1 Origine et description du magnétisme dans la matière

1.1 Phénoménologie du magnétisme

🔗 BFR 4 p124.

Moment magnétique On a vu la notion de moment magnétique en électromagnétisme, dans le cadre de boucle de courant. **ODG:** boucle de courant parcourue $i = 1A$, de rayon $R = 5cm$ $M = i\pi r^2 = 10^{-2} A.m^2$. Mais aussi dans le cadre des milieux matériels : pour un aimant néodyme $B = 1T, m = 10^6 A.m^2$, pour la Terre $m \sim BR_T^3/\mu_0 \sim 7 \cdot 10^{22} A.m^2$.

Aimantation Dans un milieu matériel, on utilise une grandeur intensive indépendante de l'échelle : le vecteur aimantation

$$\vec{M} = \frac{\partial \vec{m}}{\partial V}$$

exprimé en A/m, désigne la densité volumique de moments magnétiques, qui peut par exemple apparaître sous l'influence d'une champ magnétique extérieur. **ODG:** 10^5 A/m pour Fe, Ni, Co. On peut faire le parallèle avec ce qu'il se passe pour le champ électrique dans un diélectrique et l'apparition d'une polarisation.

Relation constitutive En comptant les équations et les inconnues dans les équations de Maxwell, on se rend compte de la nécessité d'introduire une relation constitutive qui lie $\vec{M}$ et $\vec{H}$ par exemple. La relation constitutive n'est pas aussi fondamentale que les équations de Maxwell mais est indispensable pour faire des prédictions. Une telle relation peut parfois s'écrire, pour un matériau homogène et isotrope et un champ statique *sinon, il y aurait une dépendance en pulsation* :

$$\vec{M} = \chi_m(\vec{H}, T, \dots) \vec{H} \quad (1)$$

où χ_m est la susceptibilité magnétique, sans dimensions. On peut alors classer les matériaux magnétiques en différentes catégories.

Réponse linéaire J'ai mis un tableau récapitulatif sur transparent, mais c'est mieux de le construire au fur et à mesure au tableau Lorsque la réponse est approximativement linéaire en H , dans le domaine $B(\text{tesla})/T(\text{Kelvin}) < 0.3$.

Alors on le porte sur un [Beau graphe \(Britannica\)](#) et les alcalins sont paramagnétiques (pointillés). La valeur de χ_m dépend fortement de la densité et de la phase et est faible devant l'unité $|\chi_m| \ll 1$ on distingue :

- les matériaux diamagnétiques, $\chi_m < 0$ et $\vec{M}$ est opposé à $\vec{H}$, ce qui peut être vu de manière classique comme une conséquence de la loi de Lenz. Exemples : **ODG**: $\chi_m \sim -10^{-5}$ phase condensée, $\chi_m \sim -10^{-9}$ phase gaz. χ_m dépend peu de la température. Les gaz rares sont diamagnétiques. Un matériau diamagnétique est attiré par les champs faibles :

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} = \frac{\chi_m}{1 + \chi_m} \frac{\vec{B}}{\mu_0} \simeq \chi_m \frac{\vec{B}_{\text{ext}}}{\mu_0} \quad (2)$$

où on a utilisé $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H}$ et l'approximation $\chi_m \ll 1$. Ainsi la force s'exprime

$$\vec{F} = \iiint_{V_0} (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \simeq \iiint_{V_0} \chi_m \vec{\nabla} \frac{B_{\text{ext}}^2}{2\mu_0} d\tau \quad (3)$$

Ainsi, macroscopiquement, un matériau diamagnétique est attiré par les champs faibles. Microscopiquement, [admis pour le moment](#), les atomes d'un diamagnétique ont un moment magnétique nul. Exemple : N_2 En fait, tous les matériaux présentent le phénomène de diamagnétisme. Il est souvent masqué par le paramagnétisme ou le ferromagnétisme. Un supraconducteur est diamagnétique parfait $\chi_m = -1$

- Pour les matériaux paramagnétiques, $\chi_m > 0$ et $\vec{M}$ est parallèle à $\vec{H}$. **ODG**: 10^{-3} phase condensée, 10^{-7} pour O_2 Le paramagnétisme est plus fort que le diamagnétisme et en fait il le masque lorsqu'il est présent. Macroscopiquement, un matériau paramagnétique est attiré par les champs faibles. Microscopiquement, les atomes d'un paramagnétique ont un moment magnétique non nul avec interactions mutuelles négligeables devant l'agitation thermique. La dépendance en température est marquée : $\chi_m = C/T$ loi de Curie ou Curie-Weiss $\chi_m = C/(T - T_c)$ ou $\chi_m = C/(T + T_c)$ Exemples : O_2 , NO_2 mais NO ne suit pas une loi de Curie.

Diazote et dioxygène liquide dans un électroaimant

<https://www.youtube.com/watch?v=Lt4P6ctf06Q> On peut illustrer : qu'un paramagnétique est attiré par les champs forts tandis qu'un diamagnétique est attiré par les champs faibles ainsi que la dépendance en densité de l'aimantation : il faut liquéfier O_2 pour voir les effets magnétiques.

Réponse non-linéaire, matériaux ferromagnétiques Pour les matériaux ferromagnétiques le lien entre $\vec{M}$ et $\vec{H}$ dépend de l'histoire du système et est non-linéaire. On trouve notamment des phénomènes d'hystérésis et de saturation. Ainsi, on ne peut écrire $\vec{M} = \chi_m(\vec{H}, T)\vec{H}$. Mais généralement, l'aimantation induite est importante et colinéaire au champ imposé : $\chi_m^{\text{max}} \simeq 10^2$ à 10^6 valeurs maximums. Le ferromagnétisme est caractéristique des d'atomes/ions avec des moments magnétiques en interaction non négligeables devant l'agitation thermique. Cette propriété ferromagnétique dépend beaucoup de la température, sous certaines conditions, un milieu ferromagnétique devient paramagnétique. Exemples : Fe, Ni, Co à température ambiante, alliages CuMnAl (alors qu'aucun n'est ferromagnétique individuellement), AlNiCo, lanthanides à basse température. On rencontre le ferromagnétisme dans les structures cristallines, mais aussi dans des structures amorphes réalisés par une trempe (refroidissement) rapide d'un alliage sous forme liquide.

Bonus : paramagnétisme de Pauli, de Van Vleck Paramagnétisme de Pauli pour le gaz de fermions libres **ODG**: $\chi \sim 10^{-6}$, comme les électrons dans les métaux. Paramagnétisme de Van Vleck, indépendant de la température.

Bonus : ferri/antiferro/hélimagnétisme Les matériaux ferrimagnétiques ont des propriétés analogues aux ferromagnétiques, mais sont constitués de deux types de spins opposés, de norme différente. L'aimantation à saturation est souvent plus faible Ex : FeO , Fe_2O_3 . Les antiferromagnétiques ont un couplage antiparallèle. Ex : Cr, Mn. L'hélimagnétisme se produit lorsque les spins tournent d'un angle fixe d'un plan à l'autre. Ex : 120° pour MnO_2 .

Bonus : mesure de susceptibilité On les mesure avec une balance de Gouy pour les solides ou par ascension paramagnétique pour les liquides (cf. ma fiche).

On constate une variété de comportements macroscopiques, qu'on va comprendre microscopiquement.

↓ Nous allons essayer de comprendre l'origine de ce magnétisme dans la matière et les mécanismes responsables des différents types de réponse.

1.2 Description classique du magnétisme

Spire de courant microscopique ? On a vu qu'on pouvait associer un moment magnétique à une spire de courant. Quel comportement analogue à une spire de courant peut-on trouver à l'échelle microscopique ?

Modèle de l'électron en orbite stationnaire Une image semi-classique du magnétisme consiste à assimiler le mouvement des électrons (charge q , masse m), autour d'un noyau supposé immobile, à des boucles de courant. [On fait un dessin](#). Le moment magnétique associé est alors $\vec{m} = \frac{1}{2} \vec{r} \wedge (-e)\vec{v}$ et un son moment cinétique, dit orbital, vaut $\vec{L} = \vec{r} \wedge m_e\vec{v}$, on a donc :

$$\vec{m} = \frac{-e}{2m_e} \vec{L} = \gamma_e \vec{L} \quad (4)$$

Rapport gyromagnétique On a donc une proportionnalité entre moment magnétique $\vec{M}$ et moment cinétique $\vec{L}$, le facteur de proportionnalité est appelé rapport gyromagnétique $\gamma_e = -\frac{e}{2m_e} = -8.79 \times 10^{10} \text{ C kg}^{-1}$

Limites du modèle classique : théorème de Van Leeuwen (1919) $\nLeftarrow$ Diu $\heartsuit$ p327 En mécanique classique $Z(T, B) = Z(T, 0)$. [On peut l'admettre : le Hamiltonien de couplage minimal est délicat à passer en prérequis.](#)

Limites du modèle classique : expérience du Stern et Gerlach L'expérience de Stern-Gerlach a permis de montrer la quantification de $\vec{M}$ [On peut supposer cela en prérequis, cela prend du temps de l'introduire.](#)

On a trouvé la proportionnalité entre $\vec{L}$ et $\vec{m}$ avec une image classique. Plus généralement, à tout moment cinétique, on peut associer un moment magnétique colinéaire, même en mécanique quantique !

1.3 Modèle quantique du magnétisme

Lien entre $\vec{J}$ et $\vec{M}$ L'image classique a cependant mis en évidence une propriété compatible avec les observations : à tout moment cinétique total $\vec{J}$, on peut associer un moment magnétique $\vec{m}$ qui lui est proportionnel. *La proportionnalité n'est vraie qu'au sous-espace restreint aux nombres quantiques $\{n, l, s, j\}$ fixés. Expérience de Einstein-de Haas (1915) : l'application d'un champ magnétique met un barreau aimanté en rotation. L'efft réciproque a été mesuré par Barnett (1915) : un barreau mis en rotation dans un champ magnétique s'aimante..*

$$\vec{m} = g \frac{q}{2m} \vec{J} \quad (5)$$

où g est le facteur de Landé, d'origine quantique, sans dimension et autour de l'unité. *On mesure le facteur de Landé avec les déviations dans l'expérience de Stern et Gerlach. Il représente le couplage entre moment cinétique orbitaire et moment cinétique de spin.*

Magnéton de Bohr Comme le moment cinétique est $J \sim \hbar$ en mécanique quantique, l'unité naturelle du moment magnétique élémentaire est $\hbar e/2m$. Dans le cas de l'électron, on l'appelle magnéton de Bohr : $\mu_B = \hbar e/2m_e \sim 10^{-23} \text{ Am}^2$.

Le magnétisme est dû aux électrons Puisque le moment magnétique est proportionnel à $1/m$, les électrons contribuent beaucoup plus que le noyau au moment magnétique. Le magnétisme est donc dû aux électrons. *mais il joue un rôle en résonance paramagnétique nucléaire.*

Quantification du moment cinétique Pour un électron, le moment cinétique total est $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ comprenant une partie orbitaire et une partie de spin. Si $J = j$, sa projection suivant un axe peut prendre les valeurs $-j\hbar, \dots, j\hbar$ par intervalles entiers de $\hbar$. *En fait, le moment cinétique d'un électron n'est pas déterminé car il ne subit pas un champ central à cause des autres électrons. En revanche, le moment cinétique total de l'atome est bien déterminé.*

Culture : exemples de matériaux avec un moment magnétique non nul Ce sont les matériaux avec des électrons non appariés. Comme exemple de tels matériaux, on peut citer les éléments ayant un nombre impair d'électrons (Lithium, Rubidium), les ions, terres rares (Gadolinium) et certains éléments de transition (Potassium),

quelques molécules ayant un nombre pair d'électrons (dioxygène).

Exemple du spin libre 1/2, moment macroscopique Dans le cas particulier d'un électron célibataire sans moment cinétique orbital, comme c'est le cas des alcalins, $L=0$, $S=1/2$, $J=1/2$ et $g=2$ et alors $m = \pm\mu_B$. En supposant tous les moments magnétiques alignés, on retrouve l'ordre de grandeur de l'aimantation d'un aimant macroscopique $m = 10^{23} \cdot \mu_B \sim 1 \text{ Am}^2$. *Plus généralement, on suit des règles de remplissage $\blacktriangle$ Simon, BFR 4 : une couche remplie de contribue pas au moment cinétique, une couche incomplète se remplit en donnant le moment cinétique de spin maximal à l'atome (Hund)*

Conclusion Le magnétisme est dû au moment cinétique orbital et intrinsèque des électrons.

↓ On sait maintenant qu'il existe au sein de la matière des moments magnétiques au niveau de l'atome, ces moments magnétiques peuvent interagir avec un champ magnétique

2 Paramagnétisme

2.1 Cadre de l'étude

Système et cadre Nous allons étudier le magnétisme des électrons (i) localisés (ii) interaction *i.e.* des spins libres (iii) dans le cas le plus simple $L = 0$. On considère alors un ensemble de N électrons sans interactions dans un volume V , en contact avec un thermostat à température T et placé dans un champ uniforme stationnaire $\vec{B}$. **On se place donc dans l'ensemble canonique.** Puisque $g \simeq 2$ pour le moment cinétique intrinsèque de l'électron, l'énergie d'interaction est $U = -\vec{M} \cdot \vec{B} = g m_j \mu_B B = \pm \mu_B B$

Exemples de matériaux Dans de nombreux sels, les ions paramagnétiques sont suffisamment loin des autres pour qu'on puisse négliger leur interaction magnétique et les hypothèses précédentes sont valables. *Exemple : CMN $\text{Ce}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, qui suit la loi de Curie jusqu'à 0.01 K et est utilisé en laboratoire comme thermomètre secondaire entre 0.01 K et 100 K . Il en est de même pour les gaz d'atomes/molécules magnétiques (O_2) et certains oxydes de terres rares.*

Objectif On cherche une équation d'état de la forme $M = M(T, B)$, ce qui permet de décrire complètement le système.

2.2 Modèle statistique du paramagnétisme de Curie

$\blacktriangle$ Diu phystat, BFR 4,...

Indépendance et factorisation On a négligé les interactions entre les électrons donc la fonction de partition se factorise, l'aimantation totale est la somme de toutes les contributions individuelles.

Fonction de partition à 1 spin On considère alors un électron, fermion de spin $\frac{1}{2}$. Pour faciliter les calculs, on choisit l'axe de quantification selon $\vec{B}$. On a alors deux états possibles, un de spin "up" $m_\uparrow = \mu_B$ aligné avec le champ magnétique $\vec{B}$ d'énergie $U_\uparrow = -\frac{1}{2}g\mu_B B = -\mu_B B$ et un de spin "down" opposé au champ magnétique d'énergie $U_\downarrow = \mu_B B$. La fonction de partition à une particule est alors :

$$z = e^{-\frac{U_\downarrow}{k_B T}} + e^{-\frac{U_\uparrow}{k_B T}} = 2 \cosh \frac{\mu_B B}{k_B T} \quad (6)$$

Aimantation moyenne On peut alors calculer le moment magnétique moyen pour un électron, qui comme toute valeur moyenne est une dérivée bien choisie de la fonction de partition. Ainsi, $F = kT \ln Z$ et $\langle m \rangle = -\partial F / \partial B$ (cf. ma fiche). Alternativement, on peut faire le calcul naïf, en posant $x \equiv \mu_B B / k_B T$:

$$\langle m \rangle = \frac{m_\uparrow e^{-\frac{U_\uparrow}{k_B T}} + m_\downarrow e^{-\frac{U_\downarrow}{k_B T}}}{z} = \mu_B \frac{e^x - e^{-x}}{2 \cosh x} = \mu_B \tanh x \quad (7)$$

Pour les N électrons, l'aimantation (volumique) moyenne est alors

$$\langle M \rangle = \frac{N}{V} \mu_B \tanh \frac{\mu_B B}{k_B T} \quad (8)$$

Compétition énergie-entropie, cas limites

- Le potentiel thermodynamique associé à l'ensemble canonique $F = U - TS$. La valeur de l'aimantation $M(T, B)$ est le résultat de la compétition énergie-entropie : compromis entre l'abaissement de l'énergie en alignant tous les moments magnétiques avec le champ $\vec{B}$ et augmentation de l'entropie en ayant plus de spins dans les deux directions.
- À fort champ ou basse température ($\mu_B B \gg k_B T$), le terme énergétique domine : tous les spins sont alignés dans la direction du champ magnétique, le moment magnétique sature à sa valeur maximale. $M \rightarrow N\mu_B/V$. **ODG:** Pour des conditions usuelles $T = 300\text{K}$, $B = 1\text{T}$ et $J = 1/2$, on a $x = 2 \times 10^{-3} \ll 1$, c'est un régime extrême.
- À haute température ou faible champ ($\mu_B B \ll k_B T$), le terme entropique domine et les spins sont équitablement répartis entre les deux états. C'est le régime à température ambiante avec le matériel de TP.

Loi de Curie Dans la zone "entropique", on peut obtenir l'expression de la susceptibilité magnétique en faisant un développement limité de $\langle M \rangle$ en $\frac{\mu_B B}{k_B T}$: $\langle M \rangle = \frac{N\mu_B^2}{V k_B T} B = \frac{N}{V} \frac{\mu_0 \mu_B^2}{k_B T} H$. On trouve la loi de Curie :

$$\chi_m = \frac{N}{V} \frac{\mu_B^2}{k_B T} \propto \frac{1}{T}$$

. **ODG:** $B=1\text{T}$, $T=300\text{K}$, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ $\frac{\mu_B B}{k_B T} = 0.002$ On est bien dans la partie linéaire, et pour une phase condensée $\chi_m \simeq 2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-3}$

Comparaison avec la courbe expérimentale pour un sel de gadolinium $\blacktriangleleft$ Kittel p365. $\blacktriangleleft$ Polyboris. La courbe $1/\chi_m$ en fonction de T est bien linéaire pour le sel de gadolinium : la loi de Curie est vérifiée. On rappelle que pour des conditions usuelles $x = 2 \times 10^{-3} \ll 1$, donc pour parcourir la courbe d'aimantation totale, il faut soit se placer à très basse température (3K et moins), soit créer des champs inductifs encore plus importants (difficile).

Aimantation en champ nul Dans ce modèle paramagnétique, $M = 0$ en champ nul $B = 0$. En effet, puisque les spins sont indépendant et qu'il n'y pas de couplage avec l'extérieur, ils n'ont pas de raison de s'orienter dans une direction particulière ou de s'aligner mutuellement : l'aimantation macroscopique est nulle.

Bonus : cas général J quelconque, fonction de Brillouin Dans le cas plus général d'un moment cinétique J quelconque, l'expression a la même forme avec une fonction de Brillouin à la place de la tangente hyperbolique

2.3 Désaimantation adiabatique

$\blacktriangleleft$ Diu $\heartsuit$ p317

Constat : dépendance en B/T La fonction de partition ne dépend que du rapport B/T .

Principe de la désaimantation adiabatique Considérons un système paramagnétique en équilibre à la température T_i dans un champ B_i . On l'isole thermiquement et on diminue lentement le champ B pour que le système soit à l'équilibre en tout temps : on fait une transformation adiabatique réversible. Ainsi l'entropie S reste constante et n'est fonction que du rapport B/T . Ainsi, $T_f = T_i B_f / B_i$

Limites, en pratique En pratique, il faut partir de températures initiales assez basses pour que la contribution dominante à l'entropie soit celle magnétique calculée. On a pu passer de 1 K à 10^{-3} K. On ne peut descendre à $T = 0$ car alors les interactions deviennent non négligeables.

↓ Dans le modèle de spins indépendants, l'aimantation est nulle lorsque le champ magnétique est nul. Or ce n'est pas le cas pour les matériaux ferromagnétiques. Qu'est-ce qui change ?

3 Ferromagnétisme

$\blacktriangleleft$ Diu $\heartsuit$ démarche complète, Simon (Oxford) pour la philosophie et la pédagogie

3.1 Origine microscopique du ferromagnétisme

⚡ Diu♡ p452

Nécessité d'une interaction Le ferromagnétisme se manifeste lorsque les moments magnétiques du matériau sont alignés. Quelle est l'interaction à l'origine de l'alignement ?

Ce n'est pas l'interaction dipolaire L'interaction dipolaire tend à antialigner les spins, elle ne peut être responsable du ferromagnétisme. De plus, si on considère une interaction dans un cadre classique entre des moments magnétiques μ_B séparés de 10^{-10}m , l'énergie d'interaction est donnée par

$$E_{mag} = \frac{\mu_0 \mu^2}{4\pi r^3} \approx 10^{-24} J \ll k_B T_{ambient} \sim 10^{-21} J \quad (9)$$

Ainsi, à température ambiante, l'agitation thermique rend nul l'alignement moyen de tels dipôles : comme vu dans la partie précédente, le terme entropique gagne le terme énergétique à température ambiante. Or, on observe bien des aimants à température ambiante. *En revanche, l'interaction dipolaire joue un rôle dans la formation des domaines de Weiss.*

Interaction d'échange *Par manque de temps, on peut expliquer rapidement avec les mains.* L'interaction à l'origine du ferromagnétisme doit donc être plus forte que l'interaction dipolaire. Elle est d'origine quantique et est due à la combinaison de la répulsion coulombienne entre électrons avec le principe de Pauli. En effet, les électrons sont des fermions. Le principe de Pauli donne que la fonction d'onde multiélectronique doit être antisymétrique par échange de deux électrons

$$\psi(1, 2) = -\psi(2, 1) \quad (10)$$

Or la fonction d'onde totale est le produit *tensoriel* d'une partie spatiale et une partie spin : $\psi(1, 2) = \phi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \chi_S(1, 2)$. On considère deux cas de figure [en s'appuyant sur un schéma](#) :

- si les spins sont alignés, la partie spin de ψ est symétrique donc la partie spatiale est antisymétrique donc fonction d'onde doit s'annuler $\phi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \rightarrow 0$ lorsque $\vec{r}_1 \rightarrow \vec{r}_2$. Autrement dit, la densité de probabilité s'annule lorsque les électrons sont au même endroit et très faible lorsqu'ils sont voisins.
- si les spins sont opposés, la partie spin de ψ est antisymétrique donc la partie spatiale est symétrique. La densité de probabilité est alors plus élevée pour $\vec{r}_1 = \vec{r}_2$ que dans le premier cas : les électrons sont plus proches en moyenne.

En conclusion, dans la configuration spin aligné, les électrons sont plus éloignés et donc la répulsion Coulombienne est plus faible. *Ainsi le spin a une influence sur la partie spatiale à travers le principe de Pauli, quand bien même le Hamiltonien ne contient pas de terme de couplage de spin avec la partie spatiale.* La différence d'énergie entre les configurations aligné/parallèle est appelée interaction d'échange. **ODG:** 0.1 eV, ce qui est plus important que $k_B T_{ambient} \sim 0.02\text{eV}$.

Hamiltonien de l'interaction d'échange Le hamiltonien de l'interaction d'échange est alors donné par l'Hamiltonien de Heisenberg

$$H_{int} = -J \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 \quad (11)$$

où $J > 0$ est l'intégrale d'échange, positive lorsque l'alignement des spins est énergétiquement favorisé. On peut avoir $J < 0$, ce que l'argument précédent n'explique pas. *En fait, des spins alignés peuvent se rapprocher, ce qui augmente la répulsion Coulombienne déstabilisante mais cela peut avoir un effet stabilisant si la délocalisation (ex : par effet tunnel) est favorisée énergétiquement.*

Bonus : Hamiltonien d'Ising Alternativement, on peut donner le hamiltonien de Ising, qui revient à mettre à 0 la moyenne de S_x et S_y et de traiter les directions x,y en champ moyen. L'avantage de l'hamiltonien de Ising est d'être plus simple (solution exacte 1D et 2D) tout en conservant les ingrédients physiques principaux.

Bonus : de quoi dépend J ? Ce sont les mécanismes microscopiques qui déterminent le signe, l'ordre de grandeur et la portée des interactions d'échange. J dépend du remplissage de la bande d et de la structure cristalline. A courte distance, $J < 0$ c'est l'antiferromagnétisme. Puis J devient positif puis J décroît rapidement avec la distance. RKKY prévoit une portée $J \propto 1/r^3$.

3.2 Hamiltonien de Heisenberg et champ moyen

Système et hypothèses On considère un système composé de N atomes placés aux noeuds d'un réseau cristallin et portant chacun un spin 1/2. Comme l'intégrale d'échange J décroît fortement avec la distance entre deux atomes,

on ne tient compte que de l'interaction entre les z atomes voisins immédiats. Le système est plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$ constant. Le champ vu par un spin est le champ imposé, on néglige le champ dipolaire généré par les autres spins du réseau. *Ainsi, on suppose qu'on se place dans un seul domaine de Weiss ou que l'échantillon soit assez petit pour négliger l'interaction dipolaire volumique à longue portée.*

Hamiltonien de Heisenberg Le hamiltonien du système s'exprime alors, en notant le moment magnétique $m_i = \pm\mu_B = \sigma_i\mu_B$ et en quantifiant les spins selon l'axe z du champ magnétique. **Le Hamiltonien de Heisenberg est isotrope, les spins ont une orientation quelconque. Ici, on passe en Hamiltonien d'Ising car le champ magnétique brise l'isotropie. Donc on considère que le spin ne peut prendre que deux états orientations $S_z \pm S$.**

$$H = \sum_i -g\sigma_i\mu_B B + \sum_i -J \sum_{k \text{ voisin de } i} \sigma_i\sigma_k\mu_B^2 \quad (12)$$

$$H = \sum_i -g\mu_B\sigma_i(B + J\mu_B \sum_{k \text{ voisin de } i} \sigma_k) \quad (13)$$

Le calcul général avec le hamiltonien de Heisenberg n'est pas soluble analytiquement. *Il faut justifier l'approche champ moyen.* On va donc faire une approximation, dite l'approximation de champ moyen proposée par Pierre Weiss en 1907.

Philosophie de l'approche champ moyen ∇ ma fiche, Simon (Oxford) C'est une méthode assez générale en physique : quand les interactions rendent le système non soluble analytiquement, on fait ce genre d'approche. Il n'y en avait pas besoin en paramagnétisme puisque le système était simple à résoudre. **On peut donner les étapes séparément au fur et à mesure de la résolution, sur un bout de tableau séparé.**

Application du champ moyen et champ moléculaire de Weiss ∇ ma fiche, Simon (Oxford)

Equation d'autocohérence ∇ ma fiche, Simon (Oxford)

Résolution graphique en champ nul ∇ ma fiche, Simon (Oxford) **On fait un schéma sur python ou sur transparent ou on va sur le super Geogebra de Vincent et Benjamin : ici.** On a obtenu une équation auto-cohérente pour $\langle m \rangle$, on va la résoudre graphiquement, d'abord en champ nul $B = 0$ **on compare la tangente en 0 avec $\tanh x \sim x$ lorsque $x \rightarrow 0$**

- pour $T < T_c$, on a une aimantation non-nulle même pour $B=0$, c'est bien la caractéristique du ferromagnétisme.
- La température critique est appelée température de Curie : $T_c = \frac{JZ}{4k_B}$. **Commentaire physique : elle compare l'agitation thermique qui tend à désordonner l'orientation à l'interaction d'échange qui tend à aligner les moments magnétiques.**
- Pour $T > T_c$, il n'y a qu'une solution $M = 0$.

On a donc une transition de phase entre ferromagnétisme et paramagnétisme à une température critique appelée Température de Curie.

Élément	T_c (K)	$M_{sat}(10^4 \text{ A m}^{-1})$
Fer	1043	14
Cobalt	1388	11
Nickel (Ni)	627	4
Gadolinium (Gd)	293	16
Dysprosium (Dy)	85	24
Magnétite (Fe_3O_4)	858	4

Stabilité et interprétation avec l'énergie libre **Pour calculer l'énergie libre totale $F = kT \ln Z$, qui est différente de $F_i = kt \ln Z_i$, il faut réexprimer H en introduisant la moyenne et en négligeant les fluctuations (cf. ma fiche), pour simplifier en H_{cm} puis calculer Z_{cm} et F_{cm} .** On obtient l'énergie libre en champ nul, en fonction de M dans l'approximation de champ moyen :

$$F_{c.m.}(M) = Nk \left[\frac{T_c}{2} \left(\frac{M}{M_\infty} \right)^2 - T \ln \left(2 \cosh \frac{T_c}{T} \frac{M}{M_\infty} \right) \right]$$

Le calcul est long et sur ma fiche est dans le Diu. A la place, on peut admettre l'allure et on utilise le super Geogebra.

Diagramme de bifurcation **On projette le schéma ou on le dessine.**

Courbe d'aimantation spontanée En champ faible, on peut développer la tangente hyperbolique et trouver $m(B, T)$ On montre une courbe expérimentale, ça colle bien sauf au point critique.

Loi de Curie-Weiss Avec la relation $m(B, T)$ trouvée, on obtient proche du point critique : $\chi_m \propto \frac{1}{T-T_c}$, qui est la loi de Curie-Weiss.

Résolution graphique en champ non nul On le fait avec le code python ou le super geogebra. Cela biaise f d'un côté ou de l'autre.

3.3 Bonus : Comportement critique, limites du champ moyen

⚡ LP transition de phase. Comparaison avec les résultats expérimentaux (⚡ Diu p466), Les calculs de $M(T)$ et d'exposants critiques sont bien traités dans le Diu.

Expérience du clou chauffé

On mesure la température de Curie du fer. **ODG: 770°C** La connaissance de la valeur de la température de Curie de l'aimant permanent utilisé permet de justifier la présence de la plaque isolante

Champ extérieur non nul ⚡ Diu♥ On fait une résolution graphique. Le plus simple est de laisser la tangente hyperbolique fixe et de faire varier la droite. La droite de la pente reste fixée par T et l'ordonnée à l'origine est fixée par B_0 . La présence de deux minima dans l'énergie libre indique la possibilité d'avoir des états métastables, qui "sautent" vers l'autre état quand ils deviennent instables.

Bonus

Fabrication d'une boussole En pratique, pour aimanter une boussole, on la chauffe au delà de la température de Curie et on la refroidit dans un champ magnétique qui empêche la formation de domaines de Weiss. Bien entendu, ce champ magnétique ne peut pas être créé par un aimant qui perdrait lui aussi son aimantation. On place donc l'aiguille à aimanter dans un solénoïde parcouru par un courant.

- domaines de Weiss, qui expliquent la non aimantation permanente du fer
- espèces antiferro, ferrimagnétiques
- ferromagnétisme itinérant, critère de Stoner, modèle de Hubbard.

Conclusion

Le magnétisme est une manifestation macroscopique du caractère quantique des électrons (pas les protons, car $\mu_B \propto 1/m$) Ces effets sont dus aux moments magnétiques microscopiques créés par le moment cinétique des différentes particules présentes dans la matière. Microscopiquement, l'interaction d'échange est responsable de l'alignement de spins. A l'échelle mésoscopique, l'interaction dipolaire joue un rôle dans la formation de domaines de Weiss.

Ouverture : domaines de Weiss, applications technologiques (disques durs, moteurs électriques, transformateurs...

Compléments/Questions

Compléments

Ferrofluides ∇ Wiki. Les ferrofluides sont des suspensions colloïdales de nanoparticules ferromagnétiques ou ferri-magnétiques d'une taille de l'ordre de 10 nanomètres dans un solvant ou de l'eau. Ces liquides deviennent magnétiques lors de l'application d'un champ magnétique extérieur tout en conservant leur stabilité colloïdale. Beaucoup d'applications variées, cf. wiki.

Couplage du magnétisme avec d'autres phénomènes physiques ∇ Lacheisserie p112. A la température de Curie, on observe un point lambda de la capacité thermique, de la dérivée de la résistivité. Il y a un couplage avec les dilatation thermique, les propriétés élastiques (magnétostriction : le réseau cristallin se déforme).

Questions

- Quelle différence entre les modèles d'Heisenberg et d'Ising ? Dans le modèle d'Heisenberg, les moments magnétiques sont classiques et libres dans les trois dimensions de l'espace. Au contraire, dans le modèle d'Ising, les moments magnétiques sont contraints à être orientés selon un seul axe, disons z .
- Définir précisément le moment magnétique $\vec{m}$ (aussi noté $\mathcal{M}$) et l'aimantation $\vec{M}$? L'aimantation est une grandeur mésoscopique : c'est la densité de moment magnétique ($M = \partial m / \partial V$).
- Intérêt d'introduire les relations constitutives avec $P = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$ et $M = \chi_m \vec{H}$? On a en besoin pour fermer le système d'équations. Comparé à Maxwell dans le vide, on a rajouté les variables $\vec{H}, \vec{D}, \vec{P}, \vec{M}$. On a les relations $\vec{D} = \epsilon_0(\vec{E} + \vec{P})$ et $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$. Il faut 6 autres équations : les équations constitutives $P = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$ et $M = \chi_m \vec{H}$. NB : un rotationnel donne deux équations indépendantes car les composantes du rotationnel sont liés par une divergence nulle. Les équations de Maxwell donnent donc 6 équations.
- Nom de $1 + \chi_m$? μ_r , c'est la perméabilité relative.
- Comment mesurer le facteur g ? Par spectroscopie par effet Zeeman.
- Expliquer avec des mots l'interaction d'échange. Ce n'est pas dû à l'interaction des dipôles $\propto (\mu_B^2 \mu_0 / r^2)$ qui est trop faible.
- Validité du calcul avec spin $S = 1/2$ valable pour quels types d'atomes ? Les alcalins. Pour les cas $S \neq 1/2$, il faut utiliser les fonctions de Brillouin. Si on met des figures, bien insister dessus.
- Le dioxygène sature à combien ? $J = ?$
- Dans le calcul de champ moyen, que se passe-t-il si on met un champ extérieur ? On favorise un des puits jusqu'à effacer l'autre.
- Qu'est-ce qui caractérise le système pile à la température critique ? Invariance d'échelle, théorie conforme des champs.
- qu'est ce que l'approximation de champ moyen ? est ce qu'on l'utilise pour le paramagnétisme ? pourquoi ? est elle utile ? Pas utile en paramagnétisme, on peut trouver M analytiquement.
- qu'est ce que l'interaction d'échange ? Cf Diu pp450-451
- pourquoi on ne s'intéresse pas au diamagnétisme ? Effet présent dans tous les matériaux mais très faible, mécanisme différent car moments magnétiques induits alors que para/ferro moments permanents.
- pourquoi les spins sont alignés quand on impose un champ magnétique ? est ce intuitif ? exemple de système physique où ça ne l'est pas ? (spins dans les orbitales sont de sens opposés par principe de Pauli) En fait, précession mais perte d'énergie et alignement.
- expériences qu'on aurait pu faire ? clou chauffé, domaines de Weiss au polariseur, transitions ferro para
- pourquoi se placer dans l'ensemble canonique ? Contact avec un thermostat (système pas isolé donc pas microcanonique, nombre de particules fixé donc pas grand canonique)
- Quelle est la grosse différence entre les matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques ? Aimantation quand champ magnétique nul pour les ferro.

- **Ferromagnétisme : quelle est l'origine de cette constante de couplage et son signe ? Dans quel cas peut-elle être négative ?** Interactions entre spins voisins. Son signe dépend de la structure cristalline exacte du matériau.
- **Donner des ordres de grandeurs des susceptibilités magnétiques.** Cf texte.
- **On m'a questionné ensuite sur les domaines de Weiss. Pourquoi a-t-on besoin d'un microscope polarisant pour les observer ? Quels sont les propriétés optiques des milieux ferromagnétiques ?** Effet Faraday
- **d'où viennent les domaines de Weiss ?** En champ nul, équiprobabilité de $+M$ ou $-M$
- **Pourquoi un seul cadran pour la courbe $M(x)$?** Imprécision au tableau, les solutions pour M positif ou négatif sont toutes les deux stables et toutes les deux équiprobables, et il faut représenter les deux. Les défauts microscopiques et les fluctuations entraînent un échantillon donné vers l'une ou l'autre des solutions, mais en moyenne sur un grand nombre d'échantillons (moyenne d'ensemble), autant choisiront $M > 0$ que $M < 0$. Il n'y a donc pas de contradiction avec le principe de Curie. Ce point peut être évoqué dans la leçon, et à défaut risque de vous être soumis aux questions.
- **A quoi correspond g ?** Facteur de Landé, caractérise le couplage entre le moment cinétique orbital et le moment cinétique de spin.
- **Pourquoi choisir l'axe de quantification suivant z ?** On a fait l'hypothèse $B = B \text{ ez}$, c'est la direction privilégiée. Choisir la quantification selon un autre axe ne changerait pas la physique (heureusement !) mais compliquerait les calculs. Ce point est à évoquer dans la leçon.
- **Justifier le fait de ne pas tenir compte du magnétisme des noyaux atomiques.** Le magnéton de Bohr (ordre de grandeur du moment magnétique de l'électron) fait intervenir sa masse. L'électron étant 1000 fois plus léger que le noyau, son analogue nucléaire serait 1000 fois plus faible, et le négliger est légitime. Ce point est à évoquer dans la leçon.
- **Paramagnétisme seulement dans les solides ?** Non, il existe aussi dans les liquides (le dioxygène liquide est paramagnétique) ou dans les ferrofluides, qui sont des suspensions colloïdales de particules ferromagnétiques qui confèrent au fluide des propriétés paramagnétiques. Au contraire, le ferromagnétisme n'existe que dans des matériaux à structure cristalline. Ce point est à évoquer dans la leçon.
- **Pourquoi néglige-t-on les interactions dipolaires entre moments dans l'origine microscopique du ferromagnétisme ? Ordre de grandeur de ces interactions ?** En ordre de grandeur, l'interaction dipolaire entre deux moments magnétiques de l'ordre du magnéton de Bohr situés à 10^{-10} m l'un de l'autre est de 10^{-23} J, alors que $kT_{\text{amb}} = 10^{-21}$ J. Un tel couplage serait donc détruit thermiquement, alors qu'on observe du ferromagnétisme à température ambiante. Le calcul de ces ordres de grandeur est à faire dans la leçon.
- **D'après les modèles présentés dans la leçon, un ferromagnétique présente une aimantation spontanée. Pourtant, un clou de fer n'est spontanément pas aimanté. Pourquoi ?** Domaines de Weiss : l'aimantation spontanée existe, mais à une échelle intermédiaire. Au niveau macroscopique, elle est moyennée à zéro par un grand nombre de domaines.
- **L'interaction d'échange est d'origine quantique, mais pourtant on traite les moments magnétiques classiquement et non pas quantiquement (i.e. avec des opérateurs). Pourquoi ?** On montre que lorsque le moment cinétique total est suffisamment grand, alors les résultats quantiques tendent vers ceux d'un modèle classique, ce qui légitime le traitement classique du modèle d'Heisenberg.
- **Quelle différence entre les modèles d'Heisenberg et d'Ising ?** Dans le modèle d'Heisenberg, les moments magnétiques sont classiques et libres dans les trois dimensions de l'espace. Au contraire, dans le modèle d'Ising, les moments magnétiques sont contraints à être orientés selon un seul axe, disons z . En pratique on dit alors souvent que $S_z = \pm 1$, et $S_x = S_y = 0$. Cela n'a rien à voir avec la géométrie du réseau sous-jacent, qui peut être dans tous les cas 1d, 2d ou 3d.
- **Qu'est-ce qu'une ferrite**
- **Qui a introduit le concept de spin ?** Pauli en 1924 pour expliquer l'effet Zeeman anomal, de façon ad hoc. Puis Samuel Goudsmit et George Uhlenbeck, en septembre 1925, notamment pour interpréter la structure fine du spectre de l'hydrogène, en l'interprétant comme un mouvement de rotation de l'électron sur lui-même, qui a rapidement été abandonné.
Mis en évidence expérimentalement par Râman et Bhagavantam en 1931 (<http://dspace.rrri.res.in/jspui/bitstream/2289/2123/1/1931%20IJP%20V6%20p353.pdf>).

- **Qui a introduit l'approximation de champ moyen ?** Pierre Weiss en 1907.
- **Applications du paramagnétisme ?** Refroidissement par désaimantation adiabatique, RMN.
- **Applications du ferromagnétisme ?** Disques durs, moteurs
- **Autres comportements dans un champ magnétique à part para/ferro ?** Antiferro, ferri...
- **Limites de l'approximation de champ moyen ? Comment l'améliorer ?** Voisinage du point critique (Diu p466), normal puisqu'on néglige les fluctuations, et c'est au niveau de la température de Curie qu'elles sont les plus fortes
- **Quand a été découvert le paramagnétisme ?** Faraday en 1845 (découvre aussi le diamagnétisme en 1845), description classique en 1905 (paramagnétisme de Langevin), description quantique en 1932 (paramagnétisme de Brillouin)
- **Autres types de paramagnétisme ?** Paramagnétisme de Curie (température ambiante, loi de Curie), paramagnétisme de Pauli (métaux), paramagnétisme de Van Vleck (très faible, indépendant de la température, matériaux avec $J=0$)
- **Pourquoi hypothèse matériau isotrope ?** Simplifie les calculs car dans le cas général la susceptibilité est un tenseur
- **Tu as évoqué l'expérience de Stern et Gerlach, est-ce que tu peux la décrire ? Pourquoi avec des atomes d'argent ?** Jet d'atomes d'argent dans un champ magnétique homogène, on devrait avoir un segment entre les valeurs max et min du moment magnétique si description classique suffisante, mais on observe deux taches, d'où la quantification du moment magnétique.
- **Cadre de l'étude du paramagnétisme : tu as supposé $l=0$, pourquoi ?** Pour simplifier les calculs, mais on peut aussi faire le calcul avec l différent de 0 (Brillouin).
- **C'est quoi le modèle de Brillouin ?**
- **Calcul de l'aimantation : quel modèle as-tu utilisé ?** Ising
- **Comment tu calcules l'ordre de grandeur de l'interaction dipolaire ?** Calcul du champ créé par un dipôle magnétique puis on place un autre dipôle dans le champ créé. Analogie avec le dipôle électrostatique.
- **Explications sur l'interaction d'échange.** Fonction d'onde antisymétrique, J résulte un couplage entre principe d'exclusion de Pauli et interaction électrostatique. Autre mécanisme possible dans les métaux, où le couplage est dû aux électrons de conduction.
- **Champ moyen, l'échelle sur laquelle on fait la moyenne est-elle importante ?** On fait la moyenne sur tout le cristal, on ne moyenne même pas sur l'environnement du spin considéré.
- **Tu as évoqué l'exposant critique, est-ce que tu peux développer ?** Transition du second ordre.
- **Est-ce qu'on peut prédire le comportement magnétique d'une espèce ? Comment le montrer expérimentalement ?** Ferro : solides, para : solides, liquides. Il faut regarder les diagrammes d'orbitales. Le dioxygène est paramagnétique mais pas le diazote. On peut le montrer expérimentalement avec un électroaimant (azote liquide vs air liquide).
- **Quels sont les autres types de matériaux magnétiques ?** Des exemples ?
- **Que représente le facteur de Landé ?** Quelle est sa valeur pour un mouvement d'orbite pur et un mouvement de spin pur ?
- **En quoi la description quantique du moment est fondamentalement différente de la description classique ?**
- **Ces phénomènes sont-ils linéaires ou non linéaires ?**
- **Comment s'appelle le facteur de proportionnalité dans l'interaction spin-spin ? Pourquoi ?**
- **Quel est l'ordre de la transition Ferro/para ?**
- **Quel est le paramètre d'ordre ?**
- **A-t-on brisure de symétrie spontanée ?**
- **Quel est l'exposant critique pour cette transition ?**

- Quel phénomène physique permet d'observer les domaines de Weiss dans l'expérience ?
- Comment explique-t-on microscopiquement l'hystérésis des matériaux ferromagnétiques ?
- Quelle est l'origine physique du facteur de Landé ? Avez-vous déjà entendu parler du couplage spin-orbite ? Le facteur de Landé apparaît-il dans l'expression du magnéton de Bohr (suite à une erreur de ma part, qui le faisait effectivement figurer) ? Comment l'estime-t-on ? - Comment se traduit la transition de phase para/ferro en terme de potentiel thermodynamique ? - Qu'est-ce que le diamagnétisme ? - Comment mesure-t-on, en pratique, la susceptibilité paramagnétique des matériaux solides ? Et liquides ? - Quel est l'ordre de la transition para/ferro ? - Qu'est-ce que le "champ moléculaire" ? - Quelles sont les applications des matériaux ferromagnétiques, autres que la boussole (dont j'avais déjà parlé en introduction) ? Comment classe-t-on les matériaux ferromagnétiques ? Dans les transformateurs, on utilise quelle catégorie, et pourquoi ?
- On m'a demandé de revenir sur l'approximation de champ moyen et de préciser de quelle moyenne il était question. Quelle est la grosse différence entre les matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques ? J'ai parlé de la constante de couplage lors de l'étude du ferromagnétisme et je l'avais choisie positive pour le raisonnement. On m'a demandé l'origine de cette constante de couplage et son signe. Dans quel cas peut-elle être négative ? Donner des ordres de grandeurs des susceptibilités magnétiques. J'avais choisi la résolution graphique pour l'étude de l'aimantation induite des corps ferromagnétiques, on m'a demandé s'il était possible de faire autrement. D'autres petites questions ont porté sur la définition de l'énergie interne, de l'énergie libre, de différentes formules de physique statistique. On m'a questionné ensuite sur les domaines de Weiss. Pourquoi a-t-on besoin d'un microscope polarisant pour les observer ? Quels sont les propriétés optiques des milieux ferromagnétiques ?
- **Champ moyen** qu'est ce que l'approximation de champ moyen ? est ce qu'on l'utilise pour le paramagnétisme ? pourquoi ? Non, c'est solvable exactement. Pourquoi est elle utile ? Rend un calcul non solvable, solvable. Qu'est ce que l'interaction d'échange ? pourquoi on ne s'intéresse pas au diamagnétisme ? pourquoi les spins sont alignés quand on impose un champ magnétique ? est ce intuitif ? exemple de système physique où ça ne l'est pas ? (précession ! spins dans les orbitales sont de sens opposés par principe de Pauli) - d'où viennent les domaines de Weiss ? - expériences qu'on aurait pu faire ? (clou chauffé, domaines de Weiss au polariseur, transitions ferro para) - pourquoi se placer dans l'ensemble canonique ?
- Quelle est l'origine physique du facteur de Landé ? Avez-vous déjà entendu parler du couplage spin-orbite ? Le facteur de Landé apparaît-il dans l'expression du magnéton de Bohr (suite à une erreur de ma part, qui le faisait effectivement figurer) ? Comment l'estime-t-on ? Stern-Gerlach. Comment se traduit la transition de phase para/ferro en terme de potentiel thermodynamique ? Qu'est-ce que le diamagnétisme ? Comment mesure-t-on, en pratique, la susceptibilité paramagnétique des matériaux solides ? Et liquides ? Balance de Gouy.
- Quel est l'ordre de la transition para/ferro ? - Qu'est-ce que le "champ moléculaire" ? - Quelles sont les applications des matériaux ferromagnétiques, autres que la boussole ? Comment classe-t-on les matériaux ferromagnétiques ? Dans les transformateurs, on utilise quelle catégorie, et pourquoi ? Doux pour éviter les pertes par hystérésis.
- Quelle moyenne il était question dans le champ moyen ? Moyenne d'ensemble. Quelle est la grosse différence entre les matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques ? J'ai parlé de la constante de couplage lors de l'étude du ferromagnétisme et je l'avais choisie positive pour le raisonnement. On m'a demandé l'origine de cette constante de couplage et son signe. Dans quel cas peut-elle être négative ? Donner des ordres de grandeurs des susceptibilités magnétiques. J'avais choisi la résolution graphique pour l'étude de l'aimantation induite des corps ferromagnétiques, on m'a demandé s'il était possible de faire autrement. D'autres petites questions ont porté sur la définition de l'énergie interne, de l'énergie libre, de différentes formules de physique statistique. On m'a questionné ensuite sur les domaines de Weiss. Pourquoi a-t-on besoin d'un microscope polarisant pour les observer ? Quels sont les propriétés optiques des milieux ferromagnétiques ?

Commentaires

- Pour la déf. de la force et l'interprétation de $(\vec{M} \cdot \vec{\nabla})\vec{B}$, comment qualifier cette dérivée ? Dire c'est la dérivée de B dans la direction de M.
- Amener l'interaction d'échange comme ça : on a fait le paramagnétisme. Ici, en champ nul l'aimantation est toujours nulle. Or on sait qu'il y a des matériaux avec une aimantation permanente
- Bien souligner que χ_m du diamagnétisme dépend de la densité, il dépend de la phase (gaz H $\chi_m \sim 10^{-9}$, vs condensé) il y a plusieurs ordg entre celle de H et celle de Hg par exemple. Condensé (FeCl3) $\chi_m \sim 10^{-3}$
- Attention, comparaison dia para en comptant les électrons de valence facile avec les premiers, mais lorsqu'il y a des liaisons, délocalisations (métaux), c'est compliqué de prévoir. Exemple avec le cuivre qui est dia (diamagnétisme de Landau).

- Dire que les développements effectués sont valables sur un domaine de Weiss, pas sur un ferromagnétique dans sa globalité.

biblio BFR4, diu calculs ferro, para : la physique par la pratique portelli, champ moyen ngo,

Pq les deux devraient se coller au milieu ?.

Oxygène calcul de J.

COurbe J_0 en fonction de ?

Passage

Introduction.

- On a vu l'électromagnétisme dans le vide puis dans la matière. En faisant des moyennes mésoscopiques, on définit le champ de déplacement D et H. Ecrire leur expression.
- Dans cette leçon, on va se concentrer sur M.
- Manip introductive : clou chauffé qui perd son aimantation.
- Dans cette leçon, on va comprendre pourquoi quand on chauffe on décroche le clou d'une zone de champ fort, mais aussi comment induire une aimantation dans un milieu matériel et trouver le Nord magnétique.

3.4 Le magnétisme dans la matière

3.4.1 Description classique

- Expression de M avec une boucle de courant. Avec des ordres de grandeur.
- Expression de la force $F = (M \cdot \nabla)B = -\nabla(M \cdot B)$ et donc $W_B = -MB$

3.4.2 Susceptibilité magnétique

- Définition de $\chi_m = \partial M / \partial H)_{H \rightarrow 0}$. Approximation dans un milieu linéaire, homogène et isotrope. $M = \chi_m H$ avec $\chi_m(T, N, \dots)$.
- On a donc : $W_b = -\frac{\chi_m}{\mu_0(1+\chi_m)} B^2$.
- $\chi_m < 0$ diamagnétisme (aimantation opposée à B).
- $\chi_m > 0$ paramagnétisme (sauf 3 qui sont ferro ?) aimantation colinéaire au champ B.
- Manip électroaimant et sulfate de cuivre + vidéo Harvard avec oxygène/azote dans électroaimant. L'un lévite et l'autre non.

3.4.3 Description microscopique

- Électron en orbite = spire de courant, calcul de γ , facteur gyromagnétique.
- Magnéton de Bohr : $10^{-23} Am^2$. multiplié par nombre d'Avogadro $1 Am^2$.
- Stern et Gerlach 1920 : moment cinétique intrinsèque.
- Ferromagnétisme : interaction d'échange $H_{int} = -J \sum_{i,j} J_i J_j$.

3.5 Paramagnétisme

3.5.1 Hypothèse du modèle

- Hypothèses du calcul : électrons indépendants, $L=0$, $J=S$, $S = \pm 1/2$ comme l'électron externe d'un alcalin, équilibre thermodynamique, ensemble canonique.

3.5.2 Aimantation et susceptibilité

- Calcul avec la physique statistique de χ_m .
- Cas général avec J, fonction de Brillouin. Accord avec courbes expérimentales (Kittel p364).
- On retrouve la valeur à saturation pour Gd^{3+} . $J=S=7/2$, $g=2$.

3.6 Ferromagnétisme

3.6.1 Equation auto-cohérente

Weiss 1907. On réinjecte dans la formule précédente avec le nouveau B .

3.6.2 Comportement avec la température

Interprétation graphique de l'équation autocohérente, 3 cas de figure. Température de transition : température de Curie.

3.6.3 Simulation Monte-Carlo

Grille 2D. Température effective numérique. $T > T_c$ on voit une aimantation nulle au cours du temps qui fluctue un peu. $T < T_c$ l'aimantation a une valeur moyenne non nulle. $T = T_c$ longueur de corrélation. Température critique vs. Onsager (1960)

Ouverture : PN 2017 magnétorésistance géante.