

**LP45 : Paramagnétisme, Ferromagnétisme,
Approximation de champ moyen
Correction : Jérémy Schmitt et Etienne Thibierge
24/10/2013**

Plan de l'exposé :

1. Origine du magnétisme dans la matière
 - 1.1. Aimantation induite
 - 1.2. Pourquoi une description classique ne marche pas ?
 - 1.3. Description quantique du magnétisme atomique
2. Paramagnétisme
 - 2.1. Origine microscopique du paramagnétisme : modèle des spins indépendants
 - 2.2. Comportement limite et loi de Curie
 - 2.3. Désaimantation adiabatique [non présenté à l'oral]
 - 2.4. Généralisation et validité du modèle
3. Ferromagnétisme
 - 3.1. Origine microscopique du ferromagnétisme
 - 3.2. Approximation du champ moyen de Weiss
 - 3.3. Transition ferro-para
 - 3.4. Loi de Curie-Weiss
 - 3.5. Comparaison avec les résultats expérimentaux

Questions :

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 $\mathbf{B} = B \mathbf{e}_z$, 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.*

J_{ij} est-il toujours positif ? *Non. Son signe dépend de la structure cristalline exacte du matériau et*

n'est « pas simple » à intuiter. L'argument qualitatif évoqué dans la leçon permet de comprendre l'origine quantique de l'interaction d'échange, mais donne $J_{ij} > 0$ tout le temps.

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 $kT_{amb} = 10^{-21}$ 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 $S_z = +/- 1$, 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.

Commentaires :

La présentation est de bonne qualité, le travail de préparation fourni est sérieux. Cependant, la leçon est trop calculatoire et manque d'explications physiques, d'ordres de grandeur et finalement de concret. Il est important de mieux motiver *physiquement* les calculs et d'en expliquer la philosophie avant de se lancer dans l'écriture d'équations au tableau.

Forme :

La présentation est bonne d'un point de vue formel. Le tableau est bien géré, le discours clair bien qu'un peu trop rapide. Il est dommage que les transparents aient été aussi peu expliqués et commentés : certaines équations présentes sur les transparents ne sont ni commentées ni même évoquées. Si vous n'avez pas besoin d'en parler dans votre discours, c'est que vous n'avez pas besoin de la mettre sur le transparent.

Fond :

Il est important de préciser le niveau de la leçon en début de présentation (ici, L3).

Dans l'ensemble, la présentation, très théorique et calculatoire, manque d'explications purement physiques, d'exemples concrets et d'ordres de grandeur. Le magnétisme macroscopique étant mis en pré-requis (ce qui est raisonnable), mentionnez dès le début de la leçon des exemples de matériaux, des ordres de grandeur d'aimantation rémanente, etc.

La première expérience de mise en évidence de la modification du champ magnétique par le matériau magnétique n'est peut-être pas pertinente dans le cadre de cette leçon, davantage pour la leçon suivante sur les propriétés macroscopiques des matériaux ferromagnétiques.

L'aspect quantique des phénomènes magnétiques est une des difficultés de cette leçon. Rentrer dans les détails peut vite s'avérer très complexe d'un point de vue théorique et calculatoire. Afin de ne pas surcharger la leçon, il peut être bon de ne pas rentrer dans les détails, et de simplement présenter « avec les mains » sur le modèle de Bohr le lien entre moments cinétique et magnétique. Se contenter ensuite d'énoncer qu'en mécanique quantique il y a deux contributions – orbitale et de spin – au moment magnétique de l'électron, ainsi que le caractère quantifié du moment magnétique, et s'arrêter là. Faire plus risquerait d'amener des questions sur le couplage de moments cinétiques quantiques ... ce qu'il vaut mieux éviter ! Ainsi, les parties I.2 et I.3 du plan proposé sont sûrement à retravailler.

Il faut préciser pourquoi on néglige le magnétisme des noyaux.

La partie sur le paramagnétisme manque d'exemples, comme la désaimantation adiabatique. Peut-être que la courbe d'aimantation n'est pas à mettre tout de suite, ou alors la présenter comme une courbe purement expérimentale sans écrire l'équation $M(B)$ à côté.

La présentation de l'origine microscopique du paramagnétisme est très bonne : l'expression du moment magnétique moyen à partir des probabilités d'occupation de chacun des états à l'équilibre thermique nous a semblé plus claire et intuitive que les raisonnements de physique statistique à base de fonction de partitions que l'on rencontre régulièrement dans les ouvrages.

Il faut donner des ordres de grandeur lorsqu'on présente les courbes d'aimantation. Il est impossible pour une leçon d'agrégation de distinguer les régimes de champ fort et faible sans donner d'ordre de grandeur : pour quelles valeurs du champ est en champ fort ou en champ faible ? Un aimant « normal » dans la pièce crée-t-il un champ dit fort ou un champ dit faible ? Rencontre-t-on des champs forts dans la nature ?

Lorsqu'on présente des valeurs de la susceptibilité magnétique en fonction du matériau, il est important de préciser que ces valeurs correspondent à la température ambiante, puisque la leçon montre que la susceptibilité varie fortement avec la température.

Il faut mieux présenter la manip de l'expérience du clou : un schéma sur transparent aurait été souhaitable. Par ailleurs, l'expérience était mal montée. Pour être sûr que le clou se détache, faire en sorte que l'effet de la gravité le fasse tomber (incliner la plaque réfractaire, et attention au fil du thermocouple). Vous obtiendrez alors une valeur de température de Curie un peu basse, mais vous serez sûr de la réussite de l'expérience. Méfiez-vous aussi du fonctionnement du thermocouple, cf. TP de thermo et montages.

Il faudrait mieux expliquer l'origine de l'interaction d'échange, liée à la répulsion coulombienne entre deux électrons combinée au principe d'exclusion de Pauli. Une explication avec les mains suffit dans la leçon. Une explication avec des fonctions d'onde à deux électrons, donc un peu moins avec les mains, est donnée dans le Diu de physique statistique, complément III.J. Elle vous aidera à comprendre, mais elle est trop technique pour être efficace à l'oral.

La courbe $M=f(x)$ doit être représentée sur les deux cadrans : en l'absence de champ extérieur, le moment magnétique n'a pas de raison d'avoir une orientation particulière.

L'approximation de champ moyen doit être mieux expliquée physiquement. Elle consiste à traiter le couplage entre moments magnétiques de façon *effective* pour se ramener à un système de moments magnétiques *indépendants*. En effet, le couplage ne peut pas être traité de façon exacte et simple. Cette méthode est très générale en physique statistique, ce qu'il faut mentionner.