

**LP n° 45**    **Titre :** Paramagnétisme, Ferromagnétisme : approximation du champ moyen

**Présentée par :** Gloria Robert

**Rapport écrit par :** Léa Chibani

**Correcteur :** Yves Guldner

**Date :** 19/02/19

### Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
BFR 4 Electromagnétisme	BFR		
Physique Statistique	Diu		
Physique de l'état solide	Kittel		
Fondements Magnétisme			

### Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : **Licence 3**

Prérequis :

Electrostatique

Magnétostatique

Mécanique Quantique

Physique statistique

Intro : familiarité avec les aimants/ il existe plusieurs sortes de matériaux magnétiques.  
Que se passe-t-il à l'échelle microscopique ? 1min10

**I-Origine Microscopique du magnétisme**

1) **Atome magnétique**

-Tableau périodique : éléments chimiques non magnétiques

-Dans les atomes non magnétiques : tous les électrons sont appariés.

-Tous les autres atomes ont au moins un électron célibataire → magnétisme

2) **Moment magnétique d'un atome**

-Moment magnétique de l'atome : modèle classique → moment magnétique orbitalaire en fonction du moment cinétique → apparition du magnéton de Borh

-Mécanique Quantique = moment cinétique quantique.

-Magnéton de Borh = ordre de grandeur → plus petit moment magnétique et = unité des moments.

- IL faut aussi rajouter le moment intrinsèque de spin de l'atome
- On pose J moment magnétique total de l'atome  $J = L + S$
- Formule du moment magnétique avec J et le magnéton de Borh

Rq = on peut négliger la contribution du moment du proton car  $M_p \gg M_e$

### 3) Changement de comportement dans la structure cristalline

- Atomes dans les édifices polyatomique
- Tableau périodique : paramagnétique/diamagnétique/ ferromagnétique → étude  
→ pour observer magnétisme dans les solides il faut au moins un électron célibataire dans une sous couche interne de l'atome.

10min

## II- Le Paramagnétisme

### 1) Position du problème

- Ou trouver les matériaux magnétiques ?
- Hyp : les moments magnétiques n'interagissent pas entre eux et il faut appliquer un champ magnétique pour voir apparaître du magnétisme dans la matière para

### 2) Aimantation

Moment magnétique rappel

- Energie magnétique  $E = -g \cdot \mu_B \cdot B$
- Cas ou  $J=1/2$

Probabilité d'être dans l'état  $E_-$  ou  $E_+$  (calcul)

- Aimantation moyenne de la substance paramagnétique (calcul)

$$M = N \cdot \mu_B \cdot \tanh(\mu_B B / k_B T)$$

Etude des comportements de cette aimantation aux limites →

$\mu_B \gg k_B T$  aimantation à saturation

$\mu_B \ll k_B T$   $M = \chi H$

Compétition entre deux types d'énergie = ordre magnétique et désordre agitation thermique

### 3) Loi de Curie

- A haute température :  $M = \chi H$
- Etude de la susceptibilité : établissement de  $\chi = C/T$   
 $C$  = constante de Curie
- Fonction de Brillouin / Slide diapo
- Loi de Curie → susceptibilité diverge

## III- Le Ferromagnétisme

### 1) Position du problème

- Le ferromagnétisme = caractéristique de la matière cristalline
- Hyp : on se place dans un domaine de Weiss pour comprendre microscopiquement se qu'il se passe.
- ex : Fer/Cobalt/Nickel

Pour que l'aimantation persiste il faut qu'il y ait une interaction entre moment magnétique qui permette de combattre l'énergie thermique  $k_B T$

-Interaction dipole-dipole magnétique :  $(\text{odg}) \ll k_B T$  DONC ne fonctionne pas !  
Il faut trouver une autre interaction qui puisse combattre l'énergie d'agitation thermique.

## 2) Interaction d'échange

-Energie d'interaction d'échange postulée par Weiss puis vérifiée expliquer quantiquement par Heisenberg

-Champ fictif interne = champ moléculaire

Propriétés -  $\lambda_i = \lambda_{\text{atome}} (10^{-3} \text{ T}) \rightarrow$  traduit l'aimantation d'un atome sur ces voisins

→ Négliger les fluctuations → champ  $B_{\text{moyen}} = B$

Heisenberg : PRINCIPE DE PAULI + ENERGIE COULOMBIENNE)

-Electrons sont des fermions → Fonction antisymétriques

-Etude avec les moments up → Ecoulombienne faible

-Etude avec les moments down → Ecoulombienne forte

-L'Hamiltonien d'échange 32min (formule)

$J = \text{intégrale d'échange}$  étude  $J > 0$  ?  $J < 0$

## 3) Influence de la température

-Calcul de l'aimantation moyenne en repartant de la formule établie lors de l'étude de la partie II paramagnétique

- Résolution graphique de la fonction  $m = \tanh(m/t)$  ( $m = \langle M \rangle / N$ ,  $t = T / T_c$  .....)

-Graphique  $M = f(T)$

- Transition de phases = divergence de la susceptibilité donc transition de phases FERRO → PARA

Conclusion : RECAP DE LA LECON

37min 41

## Questions posées par l'enseignant

1) Susceptibilité : attention dépend de la température et de la concentration de la phase N.

Oxygène liquide : N important car l'oxygène est en phase condensée

2) Susceptibilité positive : il faut bien le préciser

3) FAIRE ATTENTION : lors de la leçon il faut bien préciser  $g=2$  pour un électron libre mais pas toujours égal 2.

4) IL faut bien définir dès le début  $M$  vecteur aimantation

5) Définition de la susceptibilité :  $\chi = M \cdot \mu_0 / B$

6) Prérequis : mettre les milieux magnétiques

7) IL faut citer d'autres types de matériaux que des corps purs : oxydes etc ...

8) Citer une application du magnétisme nucléaire ? IRM

- 9) Electrons libres dans les métaux PAULI = Pourquoi c'est très important le paramagnétisme de Pauli ?
- 10) La susceptibilité  $\chi$  de Pauli = important car explique de  $\chi$  n'est pas géant (cuivre refroidi) et que  $\chi$  ne dépend pas de la température.
- 11) Faire attention lors des calculs à bien mettre  $\mu = \mu$  de Borh lorsque c'est nécessaire
- 12) Pour la susceptibilité : il faut vraiment bien dire que c'est positif.
- 13) Montrer qu'en général EMagnétisme  $\ll kBT$
- 14) Ferromagnétique : il faut comparer  $kBT_c$  à l'énergie dipolaire
- 15) Champ magnétique fictif = faire attention à ce terme
- 16) Ne pas trop écrire de phrases blabla au tableau.
- 17) Si  $S_j =$  moment de spin, pas de problème de notation !!!!
- 18)  $J =$  dépend de la structure cristalline
- 19) Pour l'étude de la température  $\rightarrow$  il faut dire que  $t = T/T_c$
- 20) Attention il faut bien expliquer le passage de  $m = \tanh(m/t)$  à la courbe  $M=f(T)$
- 21) Avoir conscience de  $\lambda/J / T_c$  c'est la même chose
- 22) Comment visualise-t-on l'ordre magnétique ? Diffraction avec Neutrons car neutre et voient les moments magnétiques.
- 23) Qu'est ce que le Ferri/Ferro  $\rightarrow$  Louis Néel.
- 24) Savoir tous les noms des physiciens associés à l'étude des propriétés magnétiques.
- 25) Comment varie la susceptibilité en phase para Ferromagnétique ? Curie Weiss

MANQUE : lien entre  $J/\lambda$  et  $T_c$

#### Commentaires donnés par l'enseignant

### Partie réservée au correcteur

#### Avis sur le plan présenté

Plan logique mais certains points importants manquent (détermination de la loi de Curie-Weiss par exemple).

#### Concepts clés de la leçon

-Dans un matériau magnétique, chaque atome porte un moment magnétique. Ces moments peuvent être ordonnés (ferromagnétisme) ou désordonnés (paramagnétisme). Un champ magnétique appliqué oriente les moments magnétiques et l'agitation thermique tend à détruire l'ordre créé.

-Définition du paramagnétisme, aimantation fonction de la température, loi de Curie. Susceptibilité de Pauli des électrons libres d'un métal (gaz de Fermi).

-Définition du ferromagnétisme. Montrer que l'interaction dipolaire magnétique entre moments magnétiques ne peut expliquer l'ordre magnétique observé jusqu'à la température de Curie. Définition du champ moyen (modèle de Weiss) et interprétation en fonction de l'interaction d'échange. Introduction de l'hamiltonien d'Heisenberg.

Détermination de la susceptibilité pour  $T > T_c$  (loi de Curie-Weiss). Définition de la température de Curie.

Influence de la température sur l'aimantation (on se restreint au cas d'un spin  $\frac{1}{2}$ ).

#### Concepts secondaires mais intéressants

Lien entre l'intégrale d'échange  $J$ , la température de Curie et le champ moyen. Ordre de grandeur de ces quantités pour des corps ferromagnétiques usuels (métaux de transitions).

Montrer que l'ordre magnétique est détruit pour  $T = T_c$  lorsque l'agitation thermique devient égale à l'énergie de l'interaction d'Heisenberg entre premiers voisins.

Détermination de l'ordre magnétique par la diffusion des neutrons.

Autres ordres magnétiques (ferri, anti-ferro...)

#### Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Pas indispensable

#### Points délicats dans la leçon

Bien définir dès l'introduction le vecteur aimantation et la susceptibilité.

Commenter les expressions obtenues pour la susceptibilité paramagnétique  $\chi$ : influence de  $T$ , de la densité volumique d'atomes magnétiques  $n$ . Ne pas donner d'ordre de grandeur de  $\chi$  sans donner les valeurs de  $T$  et de  $n$  correspondantes.

Introduire très simplement (sans calculs) le paramagnétisme de Pauli et ses conséquences (évidence du gaz de Fermi).

Définition et origine du champ moyen. Interaction d'échange. Lien entre l'intégrale d'échange  $J$ , la température de Curie et le champ moyen.

#### Bibliographie conseillée

Ok avec la liste proposée.