LP n°26 : Milieux aimantés. Notions sur le diamagnétisme, le paramagnétisme et le ferromagnétisme. Matériaux magnétiques, température de Curie, production de champs magnétiques.

Prérequis :
- Dipôle électrostatique
- Lien entre intensité et champ magnétique
- Principes de la spectroscopie

Bibliographie :
- Hecht
- BFR4
- Mauras
- Perez électromagnétisme
- Smart

Introduction :

Lien entre I et $\overrightarrow{B}$, Aimants connus depuis 2500 avt J.C. mais au XX$^{\text{ième}}$ siècle nécessite de construire de gros aimants (RMN, IRM, Maglev, LHC) Cela nécessite une meilleur compréhension du magnétisme.

I Présentation

1 Mise en évidence

Expérience : Réponse de Al,Bi, acier
3 comportements différents.
↺ On va expliquer ces 3 réponses au cours de la leçon.

2 Vecteur aimantation *Mauras, BFR*

$\overrightarrow{M}(\overrightarrow{r},t) = \dfrac{\overrightarrow{m}(\overrightarrow{r},t)}{d\tau}$ analyse dimensionnelle, définition de l'échelle mésoscopique.

Remarque $\overrightarrow{M} \neq 0$ pour aimant

En général on a $\underbrace{\overrightarrow{B}}_{\text{champ total}} = \underbrace{\mu_0\overrightarrow{H}}_{\text{imposé par l'opérateur}} + \underbrace{\mu_0\overrightarrow{M}}_{\text{réponse du matériau}}$

↺ lien entre $\overrightarrow{M}$ et $\overrightarrow{H}$

3 Susceptibilité magnétique *Mauras, BFR*

$\overrightarrow{M} = \chi_m(\overrightarrow{H})\overrightarrow{H}$ $[\chi_m] = \phi$ $\overrightarrow{B} = \mu_0\mu_r\overrightarrow{H}$ $\mu_{\mathrm{r}}=1+\chi_{\mathrm{m}}$

↺ À l'aide de ce formalisme, on va expliquer les trois expériences vues en I)1)

II Les différents milieux magnétiques

1 Milieux diamagnétiques *Mauras, BFR*

χ_{m} négatif, $|\chi_m| \gg 1$, indépendant de T,$\overrightarrow{H}$, traduit la loi de Lenz le matériau s'oppose au champ imposé. Ordres de grandeur (*Perez p415, BFR p183-184*). Introduction de l'énergie $E = -\overrightarrow{M} \cdot \overrightarrow{B}$ et de la force $\overrightarrow{F} = \chi_m \overrightarrow{grad}(\dfrac{\overrightarrow{B}^2}{2\mu_0})$. On peut expliquer le I)1) sans la notion de couple, on représente le gradient de champ puis la force sur chaque extrémité du barreau ce qui explique l'alignement perpendiculaire pour le dia et parallèle pour le para/ferro.

↺ Le champ total est inférieur à ce que l'opérateur impose, ce n'est pas bon pour la création d'un aimant.

2 Milieux paramagnétiques *Mauras, BFR*

χ_{m} positif, $|\chi_m| \ll 1$, varie en $\dfrac{C}{T}$: loi de Curie, indépendant de $\overrightarrow{H}$, en général lié à un électron célibataire. Ordres de grandeur (*Perez p415, BFR p183-184*).
Expérience : FeCl3 (*BFR p135*), mesure de χ_{m}, bon ordre de grandeur, source d'incertitude avec champ inhomogène, orientation du teslamètre pas top, mesure de h peu précise
↺ Le champ total est pas suffisamment augmenté pour créer un bon aimant. (1T)

3 Milieux ferromagnétiques *Mauras, BFR*

χ_{m} positif, $|\chi_m| \gg 1$, transition ferro/para pour une température de Curie (éventuellement loi de Curie-Weiss, fortement dépendant de $\overrightarrow{H}$. Ordres de grandeur (*Perez p415, BFR p183-184*).
Expérience : mise en évidence de la température de Curie avec le clou sur fil chauffant.
† à la surchauffe du fil
Expérience : On peut mettre un noyau dans une bobine, on voit que le champ passe d'une vingtaine de millitesla à environ 160mT. De plus, on peut mettre le noyau à demi rentré dans la bobine et montrer qu'il y a bien une force qui entraîne le noyau à l'intérieur de la bobine.
↺ Encore insuffisant et problème de l'effet Joule dans le bobinage qui impose $\overrightarrow{H}$, comment créer un aimant ? ?

III Production de champs magnétiques *Smart&Moore p300*

1 Création d'un aimant

Expérience : Mise en évidence du cycle d'hystérésis (*BFR p185/138*), discussion sur H_c, B_r pour un matériau dur/doux. Applications en fonction du type (transformateurs, aimant dans une casse, aimant d'un spectromètre de masse versus aimant permanent dans un haut parleur) On peut avoir le temps de parler des domaines de Weiss, ce qui redonne l'occasion de discuter de l'échelle mésoscopique. ⥁ Ça marche pour faire électroaimant mais trop faible pour applications citées en intro, on fait appel aux supraconducteurs.

2 Supraconducteurs

Résistivité nulle, il n'y a plus d'effet joule, diamagnétisme parfait. La supraconductivité a valu 5 prix Nobel en physique, problème de la température à atteindre. Transition vers la RMN qui permet de mesurer le magnétisme nucléaire beaucoup plus faible que le magnétisme électronique dont on vient de parler pendant la leçon. Un truc intéressant est de souligner la stratégie jusqu'à présent, on introduisait un matériau dans le bobinage pour augmenter le champ, ici, on ne fait qu'améliorer la bobine elle même.

Conclusion : Bilan, schéma d'un appareil RMN ouverture vers la RMN

Lire le *Mauras* (disponible en BU d'agreg physique, couverture bleue sous les BFR) permet de commencer en douceur, en plus on a une explication jolie du fait que $\overrightarrow{j_{induit}} = \overrightarrow{rot}(M)$. Pour le reste, le *Bertin Faroux Renault 4* fait l'affaire. Le *Perez* complète pour les données mais est rapidement trop formel. Le *Smart et Moore* permet de bien traiter la partie supraconduction. Le *Hecht* donne des ordres de grandeur de $\overrightarrow{B}$ (p789) et donne quelques applications, mais c'est très “à l'anglo saxonne”, on aime ou pas..

Supraconducteurs : limitation par l'effet Silsbee, pour H trop élevé, le matériau n'est plus supraconducteur. Supraconducteur haute température : $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: T_c=93K (N_2 :77K)

$\overrightarrow{m} = \gamma \overrightarrow{J}$ $\gamma = \frac{q}{2m} g$ (magnétisme nucléaire faible car $\overrightarrow{m} \propto 1/m$)

$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ Magnéton de Bohr

- $\overrightarrow{J}$ moment cinétique quelconque
- g facteur de Landé (vaut à peu près 2 pour l'électron)

Explication du diamagnétisme :

Maxwell-Faraday :

$\oint \overrightarrow{E} \cdot d\overrightarrow{l} = -\iint \overrightarrow{B} \cdot d\overrightarrow{S}$

$\overrightarrow{E} = -\frac{1}{2} r \frac{\partial B}{\partial t} \overrightarrow{e_\theta}$

Application du théorème de l'énergie cinétique :

$\Delta \overrightarrow{L} = \overrightarrow{r} \times \overrightarrow{F} \Longrightarrow \Delta \overrightarrow{m} = \frac{-e^2}{4m_e} r^2 B_0$

Explication du paramagnétisme :

$p_+ = \frac{e^{-\frac{\mu B}{kT}}}{2\cosh(\frac{\mu B}{kT})}$ $p_- = \frac{e^{\frac{\mu B}{kT}}}{2\cosh(\frac{\mu B}{kT})}$

$< \mu >= p_+\mu - p_-\mu \overset{D.L.}{=} \frac{\mu_B^2 B}{kT}$