

# 1 (Rappel) Électromagnétisme classique

On s'intéresse d'abord à développer la théorie du magnétisme en physique classique. Cette théorie échoue à décrire correctement le magnétisme. En effet il faut la mécanique quantique pour le faire. Par contre le formalisme développé en quantique reste utile.

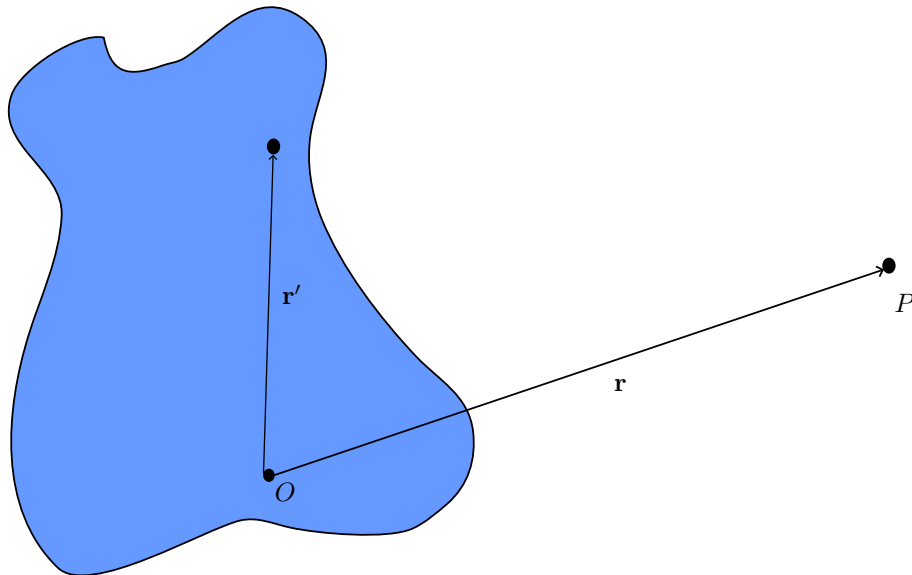


FIGURE 1 – densité de courant

On a la loi suivant pour obtenir le champ magnétique

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d^3 r' \quad (\text{Biot-Savart})$$

Qu'on peut réécrire comme

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \nabla \times \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3 r'$$

Puisque  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

$$\mathbf{A} = \frac{1}{c} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3 r'$$

Pas de monopoles magétiques :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \nabla \times \nabla \times \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3 r' = \dots$$

On developpe  $\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$

$$\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} = \frac{1}{|\mathbf{r}|} + \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}'}{|\mathbf{r}|^3} + \dots$$

Le premier terme non-nul est le terme dit *dipolaire*

$$A_{\text{dip}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \frac{1}{|\mathbf{r}|^3} \sum_{i,j} \hat{n}_i r_j \int r'_j J_i d^3 r' = \dots = -\frac{1}{c} \frac{1}{|\mathbf{r}|^3} \sum_i \hat{n}_i \frac{1}{2} \left[ \mathbf{r} \times \int (\mathbf{r}' \times \mathbf{J}) \right]_i d^3 r'$$

On définit alors la densité de moment dipolaire comme

$$\mathcal{M}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2c} \mathbf{r} \times \mathbf{J}(\mathbf{r})$$

Ce qui permet de réécrire

$$\mathbf{A}_{\text{dip}} = -\frac{1}{|\mathbf{r}|^3} \mathbf{r} \times \int \vec{\mathcal{M}}(\mathbf{r}') d^3 r' \equiv \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3}$$

Le moment magnétique peut se réécrire de la forme

$$\mathbf{m} = \sum_i \gamma_i \mathcal{L}_i$$

avec  $\mathcal{L}_i$  le moment cinétique et  $\gamma_i = \frac{q_i}{2M_i c}$  le facteur gyromagnétique

2024-01-16

## On poursuit sur le Magnétisme quantique

$$H = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} - \gamma \mathbf{L} \cdot \mathbf{H} + \frac{e^2}{2mc^2} \mathbf{A}^2$$

## Comment faire apparaitre le spin 1/2

L'équation de Shordinger n'est pas invariante de Lorentz

L'idée de Dirac, prendre un  $H$  linéaire en  $p$  mais dont le carré redonne  $E = p^2 c^2 + m^2 c^4$

On pose la forme

$$H = c \vec{\alpha} \cdot \vec{p} + \beta m c^2$$

$$= c^2 \sum_{ij} \alpha_i \alpha_j p_i p_j + \beta^2 + \dots$$

C'est impossible de trouver des matrices 2x2 qui fonctionne, on prends donc des matrices 4x4

$$\psi = \begin{pmatrix} \chi \\ \Phi \end{pmatrix}$$

On rajoute le champ mangétique dans l'équation par  $\mathbf{P} \rightarrow \mathbf{P} - \frac{e}{c} \mathbf{A}$

## Magnétisme quantique

$$Z = \text{tr } e^{-\beta H} = \sum e^{-\beta E} = \sum \langle e \rangle \quad \text{ensemble canonique}$$

On considère que les spins vivent sur un réseau.

On néglige l'interaction avec les spins ?? (Je sais pas ce que ça veut dire, spin-spin surement)

On considère que le champ magnétique externe est constant

## Moment magnétique d'un atome à plusieurs e

$$\mathbf{M} = \gamma \sum_i (\mathbf{L}_i + g\mathbf{S}_i) \xrightarrow{\text{W-E proj}} \gamma g_J \mathbf{J} \quad \text{dans} \quad \mathcal{E}_J = \{|E_0, S, L, J, M\rangle\}$$

$$|\mu_{\text{eff}}| \|\mathbf{M}\rangle_{\mathcal{E}_J}\| = \sqrt{\langle \mathbf{M} | \vec{M} \cdot \mathbf{M} | \rangle_{\mathcal{E}_J}} = \frac{\hbar |\gamma| \rho_s}{|\mu|_B} \sqrt{J(J+1)}$$

### 1 Règles de Hund\*

1. Maximiser  $S$
2. Maximiser  $L$
3. Minimiser l'interaction spin-orbite  $\rightarrow J$

$$\sum_i \lambda_i \mathbf{L}_i \mathbf{S}_i \xrightarrow{\text{W-E}} \lambda(L, S) \vec{L} \cdot \mathbf{S}$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} \implies \mathbf{J}^2 = (\mathbf{S} + \mathbf{L})^2 = \dots$$

$$\implies \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{2} (\mathbf{J}^2 - \mathbf{L}^2 - \mathbf{S}^2)$$

théorie des perturbations dégénéré au premier ordre

$$\langle W_{\text{SO}} \rangle_{\mathcal{E}_J} = \frac{\lambda(L, S)}{2} \langle \mathbf{J}^2 - \dots \rangle$$

$$\Delta E_{\text{SO}} = \hbar^2 \lambda(S, L) \frac{1}{2} [J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)]$$

En prenant  $J = L - S$  On minimise la répulsion si

## Interaction d'échange (directe mais aussi superéchange)

Lorsque deux fonctions onde on on recouvrement non nul on doit les anti-symétriser

$$\psi_{\epsilon_1, \epsilon_2}(r_1, r_2) = A\psi_a(r_1)\psi_b(r_2) |\epsilon_1 \epsilon_2\rangle$$

1.  $\psi_{\uparrow \uparrow}(r_1, r_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi_a(r_1)\psi_b(r_2) - \psi_a(r_2)\psi_b(r_1)] |++\rangle$
2. idem pour  $--$
3.  $| - + \rangle - | + - \rangle$
4.  $| + - \rangle - | - + \rangle$

Pour que les fonctions d'onde corresponde au valeurs prorpres de  $S^2$  on prend des combinason linéaires de 3 et 4