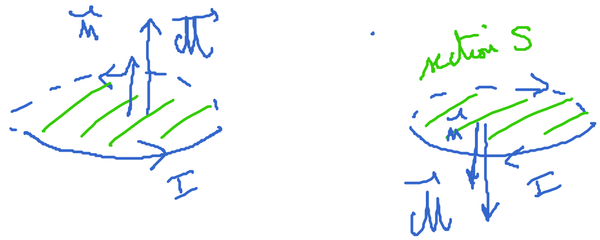
Chapitre EM 7: Le dipôle magnétique

I. Le dipole magnétique

1. *Définition* : On appelle dipôle magnétique toute boucle de courant fermée parcourue par un courant d'intensité I. Le dipôle possède un moment dipolaire $\overrightarrow{M}$ défini par:

$\boxed{\vec{\mathcal{M}} = IS\vec{n}}$

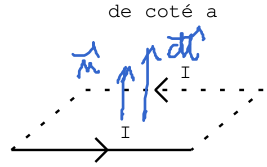
⚠ à multiplier par le nbre de spires



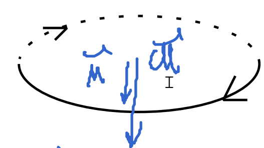
le moment magnétique est orienté par I par la règle de la main droite

unité : $[\mathcal{M}] = A\,m^2$

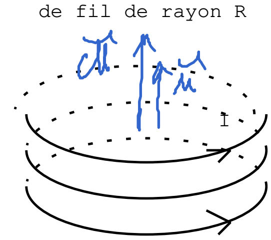
Exemples de moments magnétiques :



$\vec{\mathcal{M}} = I a^2 \vec{n}$



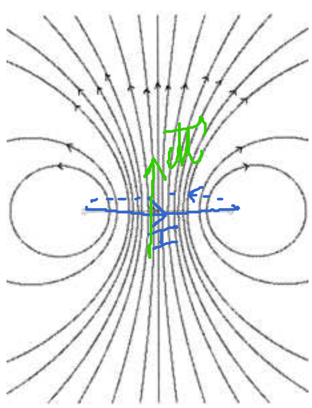
$\vec{\mathcal{M}} = I \pi R^2 \vec{n}$



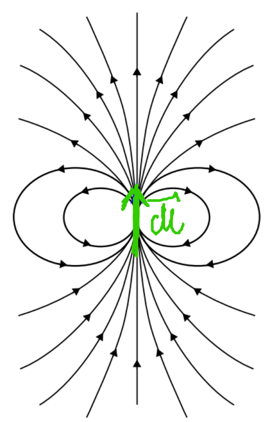
$\vec{\mathcal{M}} = N \times I \pi R^2 \vec{n}$

2. *Lignes de champ magnétique*

spire parcourue par un courant d'intensité I



les lignes de champ sont très serrées à l'intérieur de la spire c'est là où le champ est maximal.



lignes de champ créé par un dipôle $\mathcal{M}$ dans l'approximation dipolaire (ces lignes de champ ne sont "valables" que loin du dipôle)

3. *Analogie avec le dipôle électrique dans l'approximation dipolaire*

L'approximation dipolaire consiste à chercher le champ lointain créé par le dipôle. On se place en un point M tel que $OM = r \gg a$ où a est la taille caractéristique du dipôle, on fait les calculs avec des DL à l'ordre le + bas non nul en $\frac{a}{r}$.

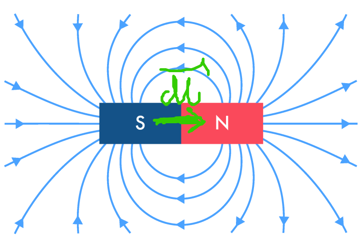
$\vec{E} \leftrightarrow \vec{B}$
$\vec{p} \leftrightarrow \vec{\mathcal{M}}$
$1/\varepsilon \leftrightarrow \mu_0$

	Dipôle électrique	Dipôle magnétique
Potentiel	$V(M) = \dfrac{p\cos\theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	n'existe pas
Champ créé par un dipôle	$\vec{E} = -\vec{\text{grad}}\,V = \begin{cases} \dfrac{2p\cos\theta}{4\pi\varepsilon r^3} & \vec{e_r} \\ \dfrac{p\sin\theta}{4\pi\varepsilon r^3} & \vec{e_\theta} \end{cases}$	$\vec{B} = \dfrac{\mu_0 \mathcal{M}}{4\pi r^3}\left[2\cos\theta\,\vec{e_r} + \sin\theta\,\vec{e_\theta}\right]$
Force exercée sur le dipôle	$\vec{F}(A) = (\vec{p}.\text{grad})\vec{E}(A)$	$\vec{F}(A) = (\vec{\mathcal{M}}.\vec{\text{grad}})\vec{B}(A)$
Moment exercé sur le dipôle	$\vec{\Gamma}(A) = \vec{p} \wedge \vec{E}(A)$	$\vec{\Gamma}(A) = \vec{\mathcal{M}} \wedge \vec{B}(A)$
Energie potentielle	$E_p(A) = -\vec{p}.\vec{E}(A)$	$E_p(A) = -\vec{\mathcal{M}}.\vec{B}(A)$

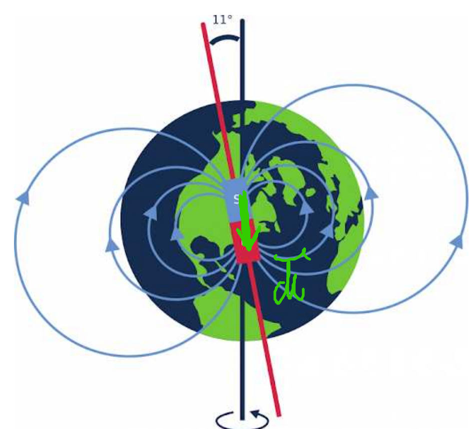
Dans un champ extérieur uniforme, le dipôle ne subit aucune force, il subit un couple qui oriente le dipôle dans la direction et le sens du champ magnétique.

$\vec{B} \nearrow \ \nearrow \vec{\mathcal{M}}$ ép stable

4. *Exemples de moments magnétiques*



Les lignes de champ $\vec{B}$ créées par l'aimant sont identiques à celles créées par un dipôle donc on attribue à l'aimant un moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$.



La Terre se comporte comme un aimant de moment magnétique $\vec{\mathcal{M}}$ dont le pôle nord magnétique se trouve au pôle sud géographique.

D'où viennent les moments magnétiques des aimants ?

Le magnétisme est liée à des courants, donc à des déplacements de charges. Dans les atomes, il y a déplacement de charges lorsque l'électron tourne autour du noyau et aussi lorsque l'électron tourne autour de lui-même.

La rotation de l'électron autour du noyau peut être modélisée par un dipôle magnétique dont le moment est appelé moment magnétique orbital

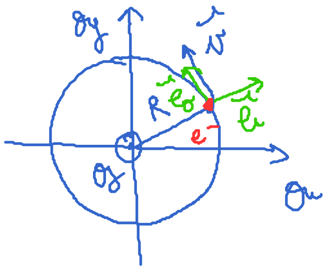
La rotation de l'électron autour de lui-même peut être modélisée par un dipôle magnétique dont le moment est appelé moment magnétique de spin

II. Origine du magnétisme dans la matière

1. *Le moment magnétique orbital: le magnéton de Bohr*

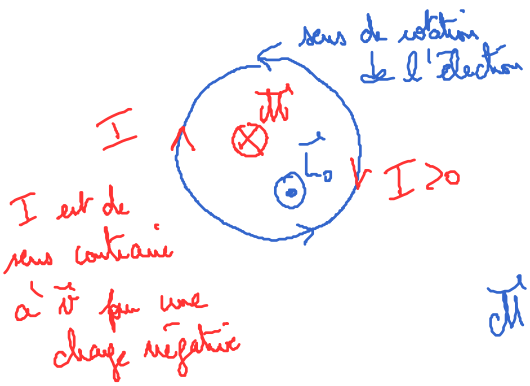
Dans le modèle de Bohr, l'électron de l'atome d'hydrogène décrit une orbite circulaire autour du noyau. On note R, le rayon de l'orbite, v la vitesse de l'électron, $-e$ la charge et m la masse de l'électron. Données: $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\ H.m^{-1}$, $e = 1,6.10^{-19}\ C$, $m = 9,0.10^{-31}\ kg$, $\hbar = 1,0.10^{-34}\ J.s$.

Représenter la trajectoire de l'électron et exprimer $\overrightarrow{L}_O$, son moment cinétique par rapport au noyau placé en O à l'origine du repère.



$$\vec{L}_O(M) = \vec{OM} \wedge m\vec{v} = R\vec{e_r} \wedge mv\,\vec{e_\theta} = mRv\,\vec{e_z}$$

L'électron en mouvement crée un courant électrique dans une boucle circulaire. Exprimer en fonction des données le moment magnétique $\overrightarrow{M}$ de cette boucle de courant.



$$\vec{M} = I\pi R^2(-\vec{e_z}) \quad \text{avec} \quad I = \frac{|-e|}{T} = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi R}$$

pendant une période de rotation il passe la charge $-e$

$v = \frac{2\pi R}{T}$

$$\vec{M} = -\frac{ev}{2\cancel{\pi R}}\cancel{\pi} R^{\cancel{2}}\vec{e_z} = -\frac{evR}{2}\vec{e_z}$$

On définit γ_e le rapport gyromagnétique de l'électron par $\overrightarrow{M} = \gamma_e \overrightarrow{L}_O$. Exprimer γ_e.

$$\left.\begin{array}{l} \vec{L}_O = mRv\,\vec{e_z} \\ \vec{M} = -\frac{evR}{2}\vec{e_z} \end{array}\right\} \text{donc } \vec{M} = -\frac{e}{2m}\vec{L}_O = \gamma_e \vec{L}_O \text{ avec } \boxed{\gamma_e = -\frac{e}{2m}}$$

Dans le modèle de Bohr, le moment cinétique de l'électron est quantifié: $L_O = n\hbar$. En déduit que le moment magnétique associé à l'électron est quantifié. On appelle magnéton de Bohr noté μ_B, le moment magnétique pour $n = 1$, exprimer et calculer μ_B (on donne $\hbar = 10^{-34}\ J.s$).

$$\|\vec{M}\| = |\gamma_e|\,\|\vec{L}_O\| = \frac{e}{2m}n\hbar = n\frac{e\hbar}{2m} = n\,\mu_B$$

la quantification du moment cinétique entraîne la quantification du moment magnétique

$$\boxed{\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}}$$

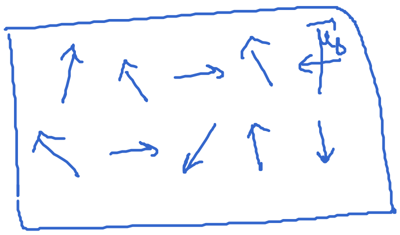
AN: $\mu_B = 8,9.10^{-24}\ A\,m^2$

moment magnétique orbital

Les électrons possèdent donc tous des moments magnétiques. Dans la matière, en l'absence de champ extérieur, le moment magnétique résultant est nul à cause de l'agitation thermique. Un moment magnétique apparaît en présence d'un champ extérieur, d'autant plus grand que le champ appliqué est intense. Dans les aimants permanents, des interactions d'origine quantique ordonnent les moments magnétiques des constituants, cet ordre l'emporte sur le désordre imposé par l'agitation thermique.

Pour le fer, on donne sa masse volumique $\rho = 7,9.10^3\ kg.m^{-3}$ et sa masse molaire $M = 55,8\ g/mol$. On suppose que chaque atome de fer porte un magnéton de Bohr μ_B. Calculer le moment magnétique maximal d'un barreau de fer de longueur $L = 10\ cm$, de largeur $l = 1\ cm$ et d'épaisseur $e = 0,5\ cm$.

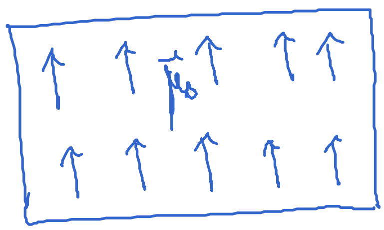
en absence de champ $\vec{B}$



les moments magnétiques des atomes sont orientés aléatoirement dans toutes les directions de l'espace, le moment résultant est nul

en présence d'un champ $\vec{B_0}$ extérieur

$\vec{B_0} = B_0 \vec{e_z}$



les moments magnétiques de chaque atome s'orientent dans la direction et le sens de $\vec{B_0}$

le moment résultant est $\vec{\mathcal{M}} = N \times \mu_B \vec{e_z}$

nbre d'atomes de fer

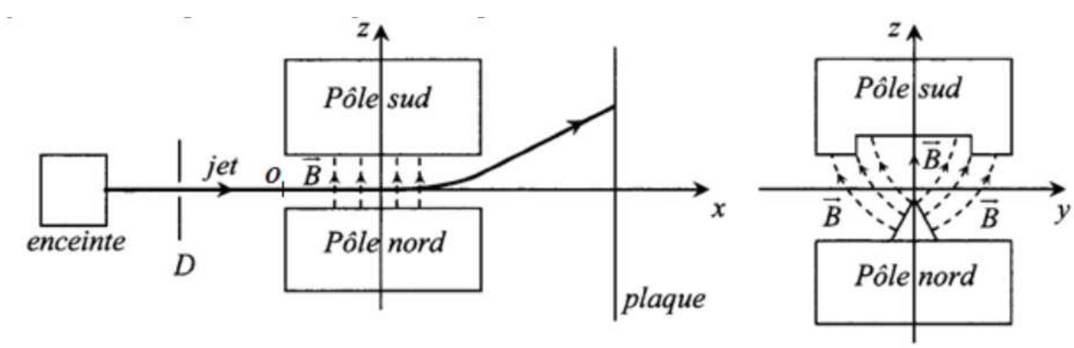
sens et direct. de $\vec{B_0}$

$$N = \frac{m}{M} \times \mathcal{N}_a = \frac{\rho V \mathcal{N}_a}{M} = \frac{\rho \mathcal{N}_a}{M} l L e$$

AN: $N = 4,25.10^{23}$ atomes dans le barreau de fer $\qquad \mathcal{M} = 3,8\ A\,m^2$

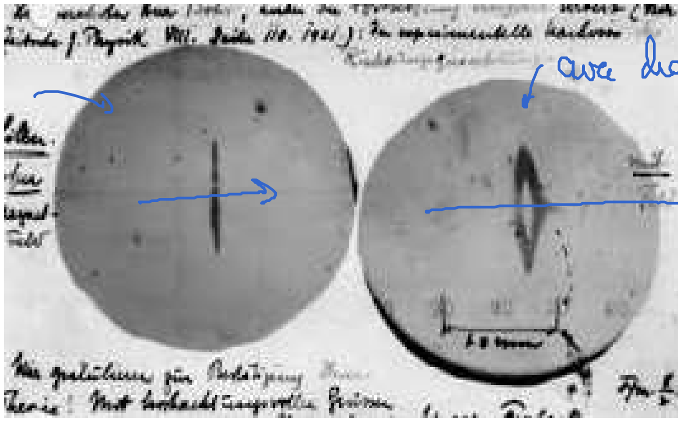
2. *Le moment magnétique de spin: expérience historique de Stern et Gerlach (1922)*

Dans une enceinte où règne une faible pression est placé un four contenant de l'argent porté à la température T. Un ensemble d'ouvertures pratiquées dans le four permet d'obtenir un jet homocinétique d'atomes d'argent de masse m et de vitesse $\vec{v} = v_0 \vec{e_x}$. La pesanteur est négligée.



On donne la configuration électronique de l'argent ($Z = 47$): $1s^2 2s^2 2p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 4d^{10} 5s^1$. En admettant que seuls les électrons de valence participent au moment magnétique de l'atome, conclure sur le résultat de l'expérience.

Lors de l'expérience historique, Stern et Gerlach ont observé qu'en absence de champ magnétique les atomes ne sont pas déviés et qu'en présence de champ magnétique, les atomes sont déviés selon $+Oz$ ou $-Oz$ et frappent la plaque en deux points symétriques par rapport à la direction initiale du jet.

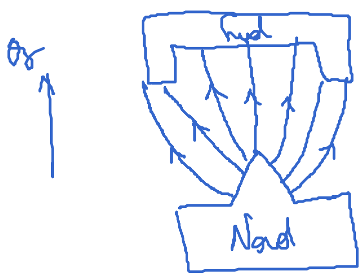


Quelle force dévie les atomes ?

$\vec F = q\vec v \wedge \vec B$: non car les atomes sont neutres

$\vec F = (\vec{\mathcal{M}} \cdot \vec{\text{grad}})\vec B$: cette force n'existe qu'en présence d'un champ $\vec B$ non uniforme qui agit sur des dipôles magnétiques

Y a-t-il ici un champ magnétique non uniforme ?



les lignes de champ $\vec B$ sont orientées du pôle nord vers le pôle sud donc $\vec B$ selon $+Oz$ et les lignes de champ sont serrées près du pôle nord, le champ est + intense et plus éloignées près du pôle sud, le champ est + faible $\therefore$ $\frac{dB}{dz} < 0$ car $B \downarrow$ quand $z \uparrow$

Les atomes ont-ils un moment magnétique orbital ?

L'électron de valence est $5s^1$ soit $n=5$ et $l=0$: il n'a pas de moment cinétique donc pas de moment magnétique orbital

La déviation des atomes selon + ou $-Oz$ dans le champ magnétique non uniforme prouve que les atomes possèdent un moment magnétique qui peut prendre 2 valeurs $\uparrow \vec{\mathcal{M}} = +\mathcal{M}\vec{e_z}$ ou $\downarrow \vec{\mathcal{M}} = -\mathcal{M}\vec{e_z}$. Ce moment magnétique n'est pas orbital donc il a une autre origine que le m^t des e^- autour du noyau, c'est le moment magnétique de spin : spin up $\uparrow \vec S$ ou spin down $\downarrow \vec S$. Cette expérience a permis la découverte du moment magnétique de spin des électrons.