

Tutorat de Physique - UE3

Fiche Magnétisme - Pr Zanca

Préparée par l'ATM²

1) Champ électrique, Champ magnétisant et Champ magnétique

$\vec{E} = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{\epsilon_0} \cdot q \cdot \vec{u}$ Le champ électrique diminue avec le carré de la distance

$\vec{H} = \frac{1}{4\pi r^2} \cdot q \cdot \vec{v} \wedge \vec{u}$ Pour créer un champ magnétisant il faut une charge en mouvement
L'unité est : A.m⁻¹
C'est un produit vectoriel donc \vec{H} est perpendiculaire au plan formé par \vec{v} et \vec{u}

$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$ L'unité est : Tesla
 μ_0 est la perméabilité magnétique du vide
Le champ magnétique \vec{B} oriente les moments magnétiques dans l'espace

Champ magnétisant = champ appliqué responsable de l'aimantation

Champ magnétique = champ mesuré correspondant à la somme du champ magnétisant et de l'intensité d'aimantation

2) Magnétisme dans la matière

Moment cinétique, Moment magnétique et Rapport gyromagnétique

Une particule en mouvement possède un moment cinétique : $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{P}$ avec \vec{P} la quantité de mouvement.

Cette particule possède aussi un moment magnétique : $\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{L}$ avec γ le rapport gyromagnétique (gyro=tourne ↔ moment cinétique) qui lie les moments cinétique et magnétique
 γ est caractéristique du noyau

Moment magnétique électronique

Moment orbital (l'électron se situe sur une orbite)

$\vec{\mu}_{oe} = \gamma_{oe} \cdot \vec{L}_{oe}$ avec $\gamma_{oe} = \frac{-e}{2m_e}$

γ_{oe} est responsable d'un mouvement de précession de $\vec{\mu}_{oe}$ (dans un champ magnétique de 1 Tesla à une fréquence $\nu_{oe} = 14$ GHz)

Moment intrinsèque (l'électron tourne sur lui-même)

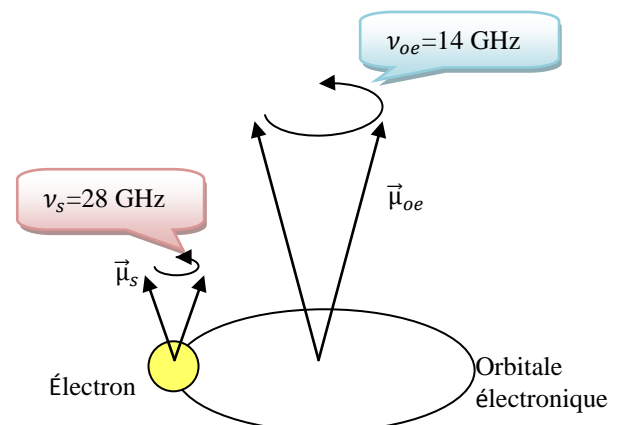
$\vec{\mu}_s = \gamma_s \cdot \vec{S}$ avec $\gamma_s = g_s \cdot \gamma_{oe}$

g_s est le facteur de Landé ($g_s = 2$)

γ_s est responsable d'un mouvement de précession de $\vec{\mu}_s$ (dans un champ magnétique de 1 Tesla à une fréquence $\nu_s = 28$ GHz)

Moment électronique global

$g_e = 2$ donc γ_e est responsable d'un mouvement de précession de $\vec{\mu}_e$ (dans un champ magnétique de 1 Tesla à une fréquence $\nu_e = 28$ GHz)



Moment magnétique du proton

$$\vec{\mu}_p = g_H \cdot \frac{e}{2m_p} \cdot \vec{I} \quad \text{avec } g_H = 5,58$$

Le proton possède le magnétisme le plus fort des noyaux

Le proton possède un magnétisme environ 1000 fois inférieur à celui de l'électron (car $m_p = 1836m_e$) : $\mu_e \approx 1000\mu_p$

De plus la fréquence de précession de H^+ dans un champ de 1T est :

$$2\pi\nu_0 = \gamma_p B_0 \Leftrightarrow \nu_0 = g_p \cdot \frac{e}{2m_p} \cdot \frac{B_0}{2\pi} = 5,58 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}} \cdot \frac{1}{2\pi} = 42 \text{ MHz}$$

Moment magnétique du neutron

Le neutron est composé de quarks qui sont des particules élémentaires chargées ce qui explique qu'il réagisse au champ magnétique alors que c'est une particule globalement neutre.

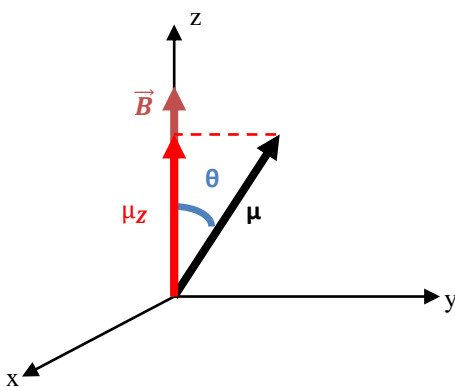
Moment magnétique nucléaire

Les spins des protons et des neutrons se combinent : -par famille (jamais un neutron avec un proton)

-par couple en opposition de phase

Ce sont les fermions célibataires qui sont responsable du spin : la RMN ne s'applique qu'aux noyaux de spin non nul.

3) Les nombres quantiques



Le nombre quantique de spin s

Il vaut $\frac{1}{2}$ pour les fermions.

En présence et en absence de \vec{B} il sert à quantifier le module de \vec{L} et de $\vec{\mu}$:

$$|\vec{\mu}| = \gamma \cdot |\vec{S}| = \gamma \cdot \hbar \cdot \sqrt{s(s+1)}$$

Le nombre quantique magnétique m ($m \in [-s; +s]$)

Il est défini en présence de \vec{B} seulement car il quantifie la direction des $\vec{\mu}$ en quantifiant le module de leur projection $\vec{\mu}_z$

$$|\vec{\mu}_z| = |\vec{\mu}| \cdot \cos(\theta)$$

$$|\vec{\mu}_z| = \gamma \cdot \hbar \cdot m$$

$$\text{Et } \cos(\theta) = \frac{|\vec{\mu}_z|}{|\vec{\mu}|} = \frac{m}{\sqrt{s(s+1)}}$$

4) Séparation des niveaux d'énergie et précession

$\vec{\mu}$ interagit avec \vec{B} de deux façons :

*sous forme d'un produit scalaire qui rend compte de l'énergie potentielle magnétique qui oriente les spins :

$$E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \Leftrightarrow E = -\mu \cdot B \cdot \cos(\theta) = -\mu_z \cdot B$$

$$E = -m \cdot \gamma \cdot \hbar \cdot B$$

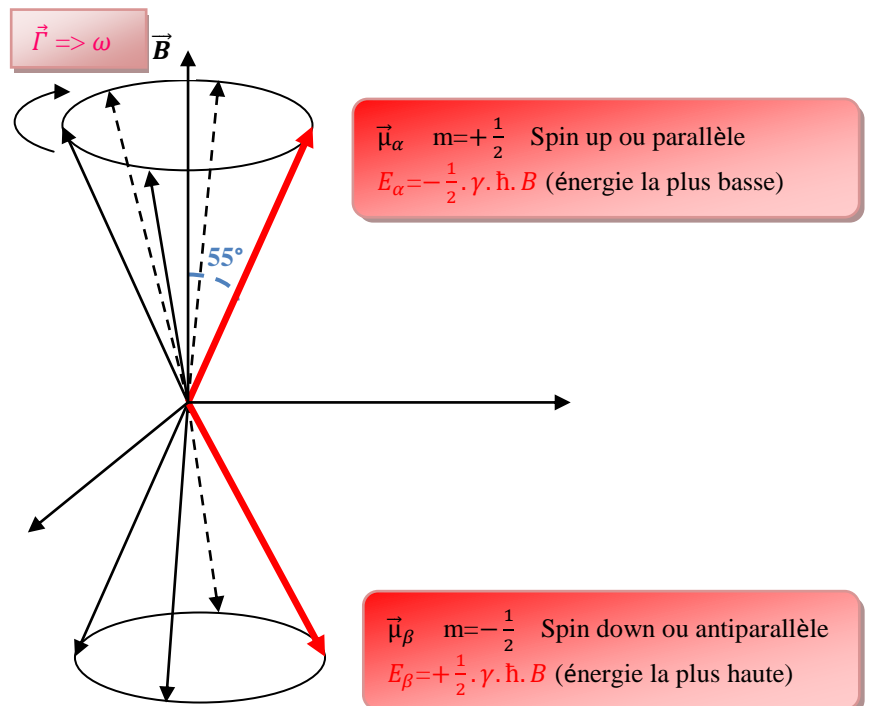
Il y a plus de spins up que down car l'état d'entropie minimale est favorisé : $n_\alpha > n_\beta$ (de l'ordre du partie par million)

Cet état d'entropie minimale est aussi favorisé par une température basse (puisque la température a tendance à augmenter l'énergie des spins à cause de l'agitation thermique) :

La séparation des niveaux d'énergie résulte d'une interaction entre la température et le champ magnétique.

Entre les deux niveaux d'énergie il y a une différence d'énergie : $\Delta E = E_\beta - E_\alpha$

$$\Delta E = \gamma \cdot \hbar \cdot B$$



*sous forme d'un produit vectoriel qui rend compte de **la précession par l'apparition d'un couple de torsion** :

$$\vec{T} = \vec{\mu} \wedge \vec{B}$$

5) Relation de Larmor et fréquence de résonance

Lors de l'excitation par une radiofréquence il faut apporter des photons d'énergie

$$h\nu_0 = \Delta E_0 = \gamma \cdot \hbar \cdot B_0 \Leftrightarrow \boxed{2\pi\nu_0 = \gamma \cdot B_0 = \omega_0}$$

Pour la bascule le champ \vec{B}_1 doit être à la résonance, c'est-à-dire qu'il tourne autour de \vec{B}_0 à la fréquence ν_0 mais il entraîne une précession des spins autour de lui-même à la fréquence ν_1 (dans le repère tournant)

6) Susceptibilité magnétique χ_m et intensité d'aimantation \vec{J}

Elle correspond à la réaction du matériau lorsqu'il est placé dans un champ magnétisant \vec{H} . En effet le matériau crée alors un champ magnétisant \vec{J} qui lui est propre tel que : $\vec{J} = \chi_m \vec{H}$.

$$\chi_m \text{ caractérise le matériau car } \mu = \mu_0(1 + \chi_m) \text{ et } \vec{B}_{tot} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 \left(1 + \frac{J}{H}\right) \cdot \vec{H}$$

$$\text{Donc } \vec{B}_{tot} = \mu_0(1 + \chi_m) \cdot \vec{H} = \mu \cdot \vec{H}$$

7) Diamagnétisme et paramagnétisme

Diamagnétisme électronique

Distorsion des doublets électronique => TRES FAIBLE car pas d'électrons célibataires

Paramagnétisme électronique

Distorsion des singulets électroniques => FORT

Concerne les produits de contraste ou les radicaux libres : cela permet par exemple de quantifier une dose de radiations reçues par un organisme (les radiations entraînent la formation de radicaux libres)

Paramagnétisme nucléaire (concerne l'IRM)

Concerne les noyaux d'hydrogène : eau, lipides...

Diamagnétisme nucléaire

Négligeable en RMN