


CNRS
 CENTRE NATIONAL
 DE LA RECHERCHE
 SCIENTIFIQUE


**UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**

THALES

Origines des propriétés magnétiques des matériaux

Origines des propriétés magnétiques des matériaux

Unité Mixte de Physique

Origines des propriétés magnétiques des matériaux

➤ Pourquoi les atomes portent-ils un moment magnétique ?

➔ Dû aux électrons (mouvement orbital, spin)

Origines des propriétés magnétiques des matériaux

Unité Mixte de Physique


CNRS
 CENTRE NATIONAL
 DE LA RECHERCHE
 SCIENTIFIQUE


**UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**

THALES

This document is the property of Thales. It is not to be distributed outside of Thales.

Moment magnétique des électrons : mouvement orbital

- Modèle simple : électron sur une orbite circulaire de rayon R.
- Mouvement de charge $\Rightarrow$ existence d'un courant :

$$I = e \frac{w}{2p}$$

- A ce courant est associé un champ magnétique appelé

moment magnétique

$$\vec{\mu}_{orb.} = \mu_0 I \vec{S} = \frac{1}{2} \mu_0 e w R^2 \vec{u}_z$$

Moment magnétique des électrons : mouvement orbital

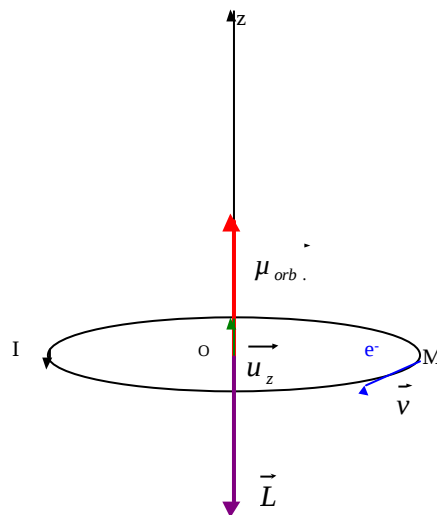
- Moment cinétique de l'électron :

$$\vec{L} = \vec{OM} \wedge m \vec{v} = -m R^2 \omega \vec{u}_z$$

- Il existe une relation entre moment magnétique orbital et moment cinétique :

$$\vec{\mu}_{orb.} = -\frac{e}{2m} \mu_0 \vec{L}$$

Moment magnétique des électrons : mouvement orbital



Origines des propriétés magnétiques des matériaux

Unité Mixte de Physique



This document is the property of Thales. The content represents confidential information of Thales and its subsidiaries.

Moment magnétique des électrons : mouvement orbital

- ⇒ Dans un atome, L est quantifié :
- ⇒ sa projection le long de l'axe de quantification ne peut prendre que des valeurs multiples de $\hbar$.
- ⇒ $\vec{L} = \hbar \vec{l}$ avec $|\vec{l}|^2 = l(l+1)$ et l entier
- ⇒ $-l \leq l_z = m_l \leq +l$
- ⇒ m_l peut prendre $(2l+1)$ valeurs ; l est le nombre quantique associé au moment cinétique.
 - $l=0$ pour un électron s
 - $l=1$ pour un électron p
 - $l=2$ pour un électron d
 - $l=3$ pour un électron f

Origines des propriétés magnétiques des matériaux

Unité Mixte de Physique



This document is the property of Thales. The content represents confidential information of Thales and its subsidiaries.

Moment magnétique des électrons : mouvement orbital

⇒ **Le moment magnétique**, qui est relié au moment cinétique, est lui aussi **quantifié**. Sa projection le long de l'axe de quantification peut prendre $(2l+1)$ valeurs.

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} \mu_0 : \text{magnéton de Bohr}$$

$$\mu_{\text{orb.}} = -\mu_B \vec{l} \quad |\mu_{\text{orb.}}| = \mu_B \sqrt{l(l+1)}$$

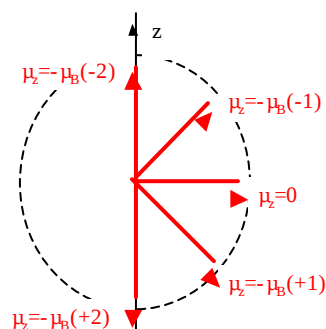
$$-\mu_B l \leq \mu_{\text{orb.}}^z \leq \mu_B l \quad (2l+1) \text{ valeurs}$$

$$\mu_B = 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ J.T}^{-1}$$

Moment magnétique des électrons : mouvement orbital

Exemple :

- ♦ $l=2$
- ♦ $(2l+1)=5$ valeurs possibles pour la projection de le long de l'axe de quantification.



Moment magnétique des électrons : spin

- ♦ Il y a une seconde contribution au magnétisme, qui est due au spin de l'électron.
- ♦ La projection du moment magnétique dû au spin le long de l'axe de quantification ne peut prendre que deux valeurs :

$$\mu_{sp.}^z = \pm \frac{e\hbar}{2m} \mu_0 = \pm \mu_B$$

correspondant aux deux valeurs de la composante selon z du vecteur spin $\vec{s}$

$$m_s = s_z = \pm \frac{1}{2} \quad \mu_{sp.}^z = -2\mu_B s_z$$

Moment magnétique des atomes et des ions

Combinaison des électrons dans l'atome : problème de physique atomique.

- ♦ Pour les éléments pas trop lourds, les interactions entre moments orbitaux et de spin de deux électrons différents sont très faibles (règles de Hund)

- ♦ Les spins interagissent ensemble pour former le vecteur résultant de l'atome (spin maximum).

$$\vec{S} = \sum_{\text{électrons}} \vec{s}_i$$

- ♦ Les moments orbitaux forment le vecteur résultant $\vec{L}$

$$\vec{L} = \sum_{\text{électrons}} \vec{L}_i$$

Moment magnétique des atomes et des ions

- Les vecteurs spin de chacun des électrons sont quantifiés $\vec{S} \Rightarrow$ est quantifié. Sa projection le long de l'axe de quantification peut prendre $(2S+1)$ valeurs.

$$-S \leq m_s = S^z \leq +S$$

- De même pour $\vec{L}$ dont la projection peut prendre $(2L+1)$ valeurs.

$$-L \leq m_L = L^z \leq +L$$

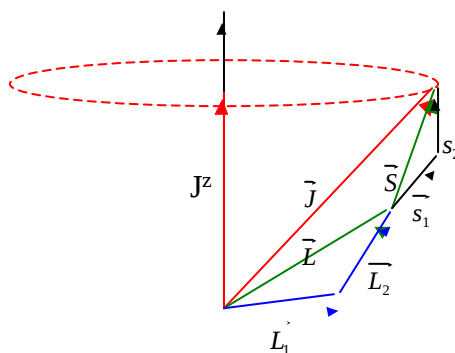
S : nombre quantique associé à $\vec{S}$

L : nombre quantique associé à $\vec{L}$

A ce stade, le degré de dégénérescence est $(2L+1)(2S+1)$

Couplage spin-orbite

- Le couplage spin-orbite couple $\vec{L}$ et $\vec{S}$ pour former $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ et lève partiellement la dégénérescence.



Couplage spin-orbite

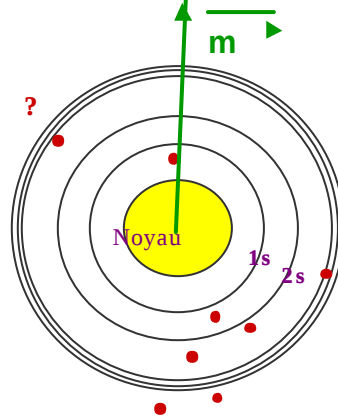
- ♦ $\vec{L}$ et $\vec{S}$ sont quantifiés $\Rightarrow \vec{J}$ est quantifié. Le nombre quantique correspondant est J .
- ♦ J peut prendre toutes les valeurs comprises entre $|L-S|$ et $|L+S|$.
- ♦ $|J|^2 = J(J+1)$
- ♦ La dégénérescence est $(2J+1)$
- ♦ Le niveau fondamental (niveau de plus basse énergie) est :
 $\Rightarrow J=|L-S|$ si la couche est moins qu'à moitié remplie
 $\Rightarrow J=|L+S|$ si la couche est plus qu'à moitié remplie.

Moment magnétique

- ♦ Le moment magnétique associé $\vec{\mu}$ est :
 $\Rightarrow \vec{\mu} = -g\mu_B \vec{J}$
 $\Rightarrow$ avec $g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$
- ♦ Sa projection le long de l'axe de quantification peut prendre $(2J+1)$ valeurs
 $\Rightarrow -g\mu_B J \leq \mu_z = -g\mu_B J^z \leq g\mu_B J$

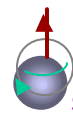
- ⇒ Si $L=0$, alors $J=S$ et $g=2$. On a uniquement une contribution due au spin.
- ⇒ Si $S=0$, alors $J=L$ et $g=1$. Le moment provient uniquement de la contribution orbitale.
- ⇒ Remarque : dans le cas des métaux de transition (métaux 3d), le moment orbital est bloqué. Le moment magnétique est dû uniquement au spin ($J=S$, $g=2$).

Dans atome: électrons sur différentes couches atomiques

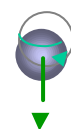


➤ Mouvement orbital ➤ mouvement de charge
➤ champ magnétique

➤ Spin (rotation de l'atome sur lui-même)



Spin up



Spin down

➤ Champ magnétique additionnel dû au spin

Dans l'atome: Si les couches ne sont que partiellement remplies:
Addition des différents champs magnétiques: physique atomique.

Au final: il existe un champ magnétique (moment magnétique) sur l'atome si les couches ne sont que partiellement remplies