CHAPITRE III.4

ETUDE DE L'ATOME D'HYDROGENE ET DES HYDROGENOUIDES

1. Historique
2. Théorie de Bohr
    - Spectre de l'hydrogène
    - Rayonnement dans la théorie de Bohr
    - Entrainement du noyau
3. Etude quantique
4. **Moment orbital de l'électron et effet Zeeman**
5. Spin de l'électron

Moment orbital de l'électron et effet Zeeman

Moment cinétique orbitale classique

Dans les deux mécaniques, classique et quantique, le moment angulaire (ou cinétique) est l'une des trois propriétés fondamentales du mouvement avec la quantité de mouvement et l'énergie. La notion de moment angulaire regroupe plusieurs opérateurs qui ne doivent pas être confondus en mécanique quantique.

- Le moment angulaire orbital " classique " ($\boldsymbol{L}$).
- Le moment angulaire intrinsèque ou spin ($\boldsymbol{S}$) qui n'a pas d'équivalent en mécanique classique.
- Le moment angulaire total ($\boldsymbol{J}$).

En mécanique classique, le moment angulaire ou cinétique, ($\vec{\boldsymbol{L}}$) , est exprimé en fonction des diverses composantes des vecteurs position et quantité de mouvement.

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = (rmv \cdot sin\beta)\vec{u}$$

$$\vec{L} = m(vd)\vec{u} = |\vec{L}|\vec{u} \qquad \Longrightarrow \qquad |\vec{L}| = mvd$$

d : la distance de la direction de vitesse au centre de force $\vec{F}$.

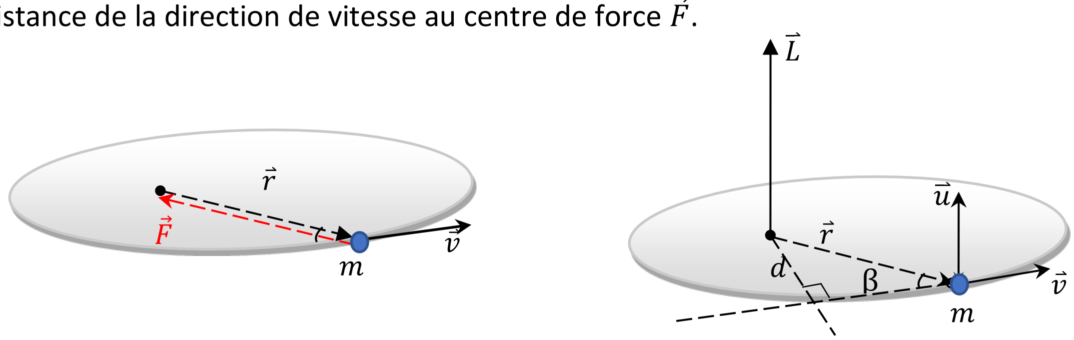


Figure 1 : Particule de masse m orbitant sous l'effet d'une force centrale $\vec{F}$

D'après la 2eme loi de newton le couple résultant sur la particule, (**Figure 1)**

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{r} \times \; m\frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\vec{\tau} = m\left[\frac{d}{dt}(\vec{r} \times \vec{v}) - \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{v}\right]$$

$$\vec{\tau} = m\left[\frac{d}{dt}(\vec{r} \times \vec{v}) - \; \vec{v} \times \vec{v}\right] \quad ; \quad \vec{v} \times \vec{v} = 0$$

$$\vec{\tau} = \frac{d}{dt}(m\vec{r} \times \vec{v}) \; = \frac{d}{dt}(\vec{r} \times \vec{p})$$

$$\vec{\tau} = \frac{d}{dt}\vec{L}$$

Dans le cas où la force est centrale, c.-à-d. $\vec{r} \backslash\backslash \vec{F} \quad \Longrightarrow \quad \vec{r} \times \vec{F} = 0$; d'où

$$\vec{\tau} = \vec{0} \quad \Longrightarrow \quad \frac{d}{dt}\vec{L} = \vec{0} \quad \Longrightarrow \quad \vec{L}\ est\ constante$$

Le moment cinétique est dans ce cas constant en grandeur et en direction alors la composante $L_z = L\cos\theta$ est constante pour tout mouvement elliptique, (**Figure 2)**, c.-à-d. pour θ fixe $(\theta : o \rightarrow \pi)$.

MOUMENT MAGNETIQUE DIPOLAIRE CLASSIQUE

Certains physiciens s'attachent à étudier une autre propriété de l'atome. Ils observèrent que sous l'application du champ magnétique, les raies se doublaient. Pour expliquer cela, ils eurent l'idée géniale et extrêmement simple d'expliquer ce phénomène par le moment magnétique de l'électron. Un électron se déplaçant sur un cercle est équivalent à un courant électrique I.

$$I = \frac{Q}{t} = -\frac{ne}{t}, \quad pour \quad n = 1 \; ; \qquad I = -\frac{e}{T} \quad ; \; t = T \quad periode$$

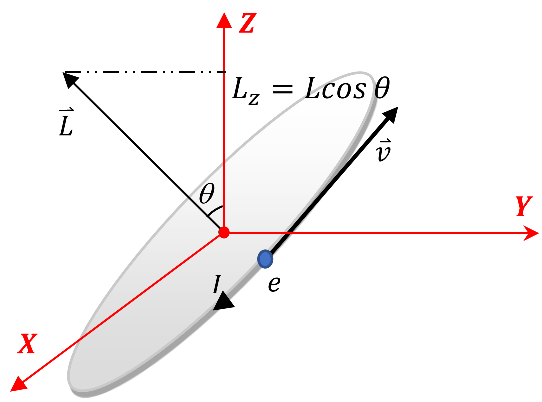


Figure 2 : La composante $L_z = L\cos\theta$ pour tout mouvement elliptique

La boucle circulaire de courant crée un champ Magnétique (**Figure 3**), donc à l'électron orbitant nous associerons un moment magnétique dipolaire $\vec{\mu}_l$ dont l'intensité est :

$$|\vec{\mu}_l| = IA = ef(\pi r^2)$$

A est l'aire comprise par l'électron sur son orbite.

Le sensé du courant est l'oppose du sens de la vitesse de l'électron $\vec{v}$.

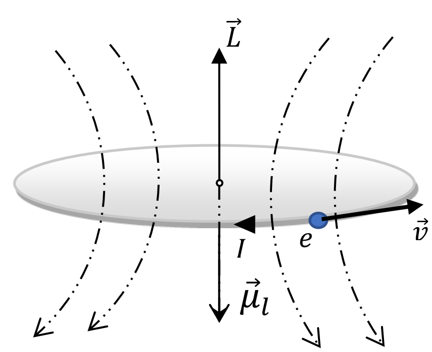


Figure 3 : Le champ magnétique crée par un électron orbitant

Le moment cinétique $\vec{L}$ avec

$$|\vec{L}| = \mathrm{m}vr = m(2\pi rf)r = 2\pi r^2 fm$$

$$|\vec{L}| = ({}^{2m}/_{e})|\vec{\mu}_l|$$

$\vec{L}\ et\ \vec{\mu}_l$ sont de sens opposées, alors

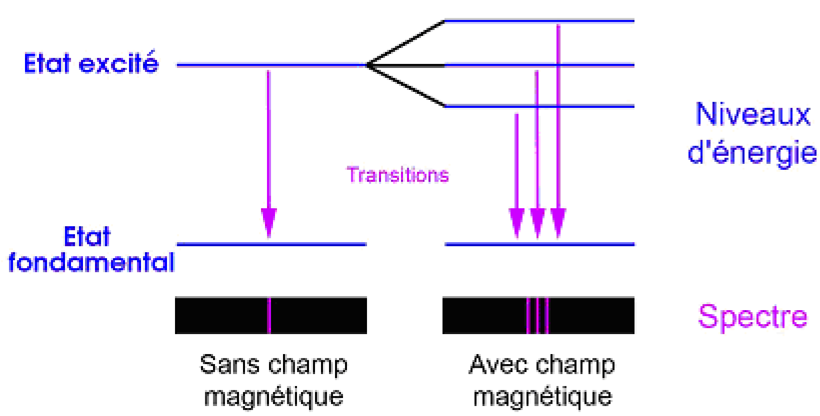
$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m}\vec{L}$$

L'équation pour l'énergie potentielle dans un champ magnétique donne

$$E_{\vec{B}} = -\vec{\mu}_l \cdot \vec{B} = \frac{e}{2m}\vec{L} \cdot \vec{B}$$

Effet Zeeman

L'effet Zeeman désigne la séparation d'un niveau d'énergie d'un atome en plusieurs sous-niveaux distinctes, sous l'effet d'un champ magnétique externe. L'effet Zeeman s'observe aisément par spectroscopie : lorsqu'une source de lumière est plongée dans un champ magnétique statique, ses raies spectrales se séparent en plusieurs composantes. L'effet a été découvert par le physicien néerlandais Pieter Zeeman qui a reçu le prix Nobel de physique de 1902 pour cette découverte. Zeeman a effectué donc une expérience pour mesurer les effets d'interaction du moment magnétique interne d'un atome et d'un champ magnétique externe. On observe que chaque raie spectrale en presence d'un champ magnétique externe $\vec{B}$ est séparé en plusieurs raies discrètes. L'apparition de ces raies supplémentaires indique que l'atome acquiert des niveaux discrets d'énergie quand il est placé dans un champ magnétique.



L'interprétation de cet effet repose sur la mécanique quantique qui prévoit une quantification de l'intensité et de la direction du moment cinétique.

Quantification du moment cinétique

Contrairement à ce que prévoit le model de Bohr, Pour n donnée l'intensité du moment cinétique n'a pas une valeur unique ($|\vec{L}| = \mathrm{m}vr = n\hbar$), au contraire pour une énergie E_n , il existe n valeurs possibles de $|\vec{L}|$, avec

$$|\vec{L}| = \sqrt{l(l+1)}\ \hbar$$

l est le nombre quantique du moment cinétique orbital, avec $l = 0, 1, 2, 3, \dots \dots (n-1)$.

Quantification de la direction du moment cinétique

Soit un atome a un seul électron placé dans un champ magnétique extérieur de direction $\vec{Z}$. La mécanique ondulatoire permet de montrer que la direction du vecteur $\vec{L}$ ne peut être quelconque, $\vec{L}$ sera oriente de façon telle que L_z sera quantifie en valeurs discrètes

$$L_z = m_l \hbar$$

m_l est le nombre quantique magnétique qui prend le valeurs suivantes :

$$m_l = -l, -(l-1), \dots \dots \dots, 0, (l-2), (l-1), l$$

Interprétation de l'effet Zeeman

La mécanique quantique énonce que l'énergie d'un atome a un seul électron placé dans un champ magnétique extérieur pointe vers l'axe *z*, est :

$$E = E_0 + E_{\vec{B}} = E_0 + \frac{e}{2m} L_z\, B = E_0 + m_l \frac{e}{2m} \hbar\, B$$

$$E = E_0 + m_l \frac{e}{2m} \hbar\, B, \qquad \frac{e}{2m} \hbar = 9{,}27 \cdot 10^{-24}\ J/T$$

Avec E_0 est l'énergie quantifie avant la mise en place du champ $\vec{B}$. Ainsi sous l'action de $\vec{B}$ chaque niveau E_n sera séparé en $2l + 1$ sous niveaux identiquement repartis.
Construisons les niveaux d'énergie d'un atome d'hydrogène dans un champ magnétique extérieur $\vec{B}$ suivant $\vec{Z}$.

Pour

$$n = 1,\ \ l = 0,\ \ m_l = 0, \qquad E_1 = E_{01} = -\frac{13{,}6}{1^2} = -13{,}6\ eV$$

$$n = 2,\ \begin{cases} l = 0, & m_l = 0 \\ l = 1, & \begin{cases} m_l = -1 & E_{2,-1} = E_{02} - \dfrac{e}{2m}\hbar B \\ m_l = 0 & E_{2,0} = E_{02} \\ m_l = +1 & E_{2,+1} = E_{02} + \dfrac{e}{2m}\hbar B \end{cases} \end{cases} ,$$

$$n = 3,\ \begin{cases} l = 0, & m_l = 0 \qquad E_{3,0} = E_{03} \\ l = 1, & \begin{cases} m_l = -1 & E_{3,-1} = E_{03} - \dfrac{e}{2m}\hbar B \\ m_l = 0 & E_{3,0} = E_{03} \\ m_l = +1 & E_{3,+1} = E_{03} + \dfrac{e}{2m}\hbar B \end{cases} \\ l = 2, & \begin{cases} m_l = -2 & E_{3,-2} = E_{03} - 2\left(\dfrac{e}{2m}\right)\hbar B \\ m_l = -1 & E_{3,-1} = E_{03} - \left(\dfrac{e}{2m}\right)\hbar B \\ m_l = 0 & E_{3,0} = E_{03} \\ m_l = 1 & E_{3,+1} = E_{03} + \left(\dfrac{e}{2m}\right)\hbar B \\ m_l = 2 & E_{3,+2} = E_{03} + 2\left(\dfrac{e}{2m}\right)\hbar B \end{cases} \end{cases} ,$$