PHYSIQUE ATOMIQUE
TD 3
EFFETS STARK ET ZEEMAN

L'effet Stark (prix Nobel en 1919) correspond à une modification des états électroniques des atomes (ions ou molécules) lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique extérieur. La présence du champ électrique a pour effet une levée partielle ou complète de dégénérescence des niveaux d'énergie de l'atome. Cet « éclatement » des niveaux d'énergie engendre un décalage observable des raies d'émission de l'atome, un élargissement de certaines raies, voire l'apparition de nouvelles raies associées à des états quantiques de l'atome initialement superposés.
Cet effet est analogue à celui découvert par Zeeman en 1896, cette fois-ci en présence d'un champ magnétique. Nous allons dans ce TD étudier ces effets dans les cas simples des niveaux *n=1* et *n=2* de l'hydrogène pour l'effet Stark et *n=2* pour l'effet Zeeman.

Effet Stark sur les niveaux *n=1* et *n=2* de l'atome d'hydrogène

On place un atome d'hydrogène dans un champ électrique extérieur, uniforme et constant ε, parallèle à l'axe *Oz* (axe de quantification). L'Hamiltonien Stark de ce système s'écrit :

$$H_s = q\vec{\varepsilon}.\vec{r}$$

On suppose que ε est assez grand pour que l'effet de H_s soit beaucoup plus important que celui de l'Hamiltonien de structure fine et hyperfine (voir TD2).

1. En considérant l'effet de H_s sur les états propres de H_0, déterminer la base la plus adaptée pour le calcul des niveaux d'énergie en présence du champ électrique.
2. Calculer la correction de l'ordre 1 de l'énergie du niveau fondamental. En déduire que le déplacement du niveau *1s* est quadratique en ε.
3. Etude de l'effet Stark pour le niveau *n=2*.
   a- Ecrire les fonctions d'onde des différents états dégénérés.
   b- Calculer la correction à l'ordre 1 de ces états.

Effet Zeeman sur les niveaux *n=2*

Nous plaçons cette fois-ci l'atome d'hydrogène dans un champ magnétique extérieur, uniforme et constant B_0 suivant l'axe *Oz*. L'Hamiltonien Zeeman de ce système s'écrit :

$$H_Z = -\vec{B}_0.(\overrightarrow{M_L} + \overrightarrow{M_S} + \overrightarrow{M_I}),$$

avec

$$\overrightarrow{M_L} = -\frac{q}{2m}\vec{L} \;;\; \overrightarrow{M_S} = -\frac{q}{2m} g_e \vec{S} \;;\; \overrightarrow{M_I} = -\frac{q}{2M_p} g_I \vec{I}$$

qui représentent respectivement les moments orbitaux, de spin électronique et de spin nucléaire. Le facteur de Landé de l'électron vaut $g_e=2$, celui du proton $g_I=5.59$. On pose également $\omega_0 = \frac{qB_0}{2m}$ et $\omega_n = -\frac{q}{2M_p} g_I B_0$.

1. Exprimer H_z en fonction de $\vec{L}, \vec{S}, \vec{J}, \vec{I}$, ω_0 et ω_N.
2. Calculer le rapport ω_0 / ω_N. En déduire que l'on peut -en première approximation- négliger le couplage du champ magnétique avec le mouvement de spin nucléaire.
3. Dans le cadre des champs magnétiques assez forts pour que l'Hamiltonien de structure fine soit également négligeable,

a. donner la structure des niveaux *n* sous l'effet du champ magnétique (énergie, dégénérescences).

b. Montrer que les raies correspondantes aux transitions électro-magnétiques entre ces niveaux d'énergies se décomposent en triplets. Illustrer par l'exemple de la transition $n=2 \rightarrow n=1$.

4. Dans le cas ou l'énergie associée à l'Hamiltonien Zeeman est du même ordre de grandeur que celle de l'Hamiltonien de structure fine, il faut traiter les deux perturbations de façon globale.

   a. Donner l'expression générale des éléments de matrice de cette perturbation globale pour la base des états $\left| n, l, s, m_l, m_s \right\rangle$.

   b. Ecrire cette matrice pour les états $n=2$, $l=1$, et calculer les énergies associées à cette perturbation.

   c. Tracer les énergies propres en fonction de $\hbar\omega_0$, et donner les valeurs limites de ces énergie dans les cas $B_0 \rightarrow 0$ et $B_0 \rightarrow \infty$.