UNIVERSITE PAUL SABATIER
TOULOUSE III

STME : mention PHYSIQUE
M1 Parcours Sciences Physiques et Chimiques
2M80PC3E1

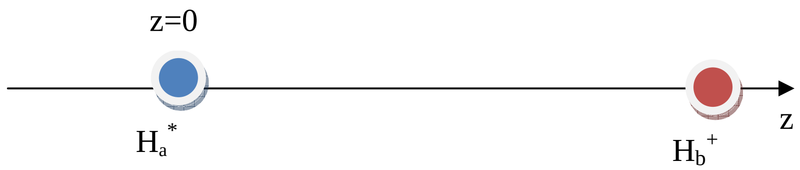
Année 2008/2009

EXAMEN TERMINAL DE PHYSIQUE ATOMIQUE ET SUBATOMIQUE

Jeudi 28 mai 2009- Durée 3h
TOUT DOCUMENT INTERDIT – PARTIES INDEPENDANTES

EFFET STARK APPLICATION A LA FORMATION DE LA MOLECULE DE H_2^+

On se propose d'étudier la formation d'une molécule de H_2^+ à partir d'un proton H_b^+ et d'un atome d'hydrogène neutre excité H_a dont l'électron est dans un état de nombre quantique principale $n = 2$.



L'atome d'hydrogène H_a^* est en $z = 0$ et le proton H_b^+ à une distance d de H_a^*.

A) Questions préliminaires: étude de l'atome H_a seul
Initialement, le proton H_b^+ est considérée infiniment éloigné de l'atome H_a^* ; l'électron $2p$ n'interagit donc pas avec celui-ci.
1) Quels sont les 'bons nombres quantiques' à utiliser pour décrire l'état de l'électron ayant pour nombre quantique principale $n = 2$ si on ne tient pas compte des corrections de structure fine et hyperfine.
2) Donner les 4 vecteurs de base pour l'électron de l'atome excité H_a^*. Ces vecteurs sont-ils vecteurs propres du Hamiltonien non perturbé W_0 ?
3) Les valeurs propres associées sont-elles dégénérées ? Quel est leur degré de dégénérescence ?

B) Etude du système perturbé $(H_a^* + H_b^+)$
L'ion H_b^+ est maintenant à une distance d de l'atome H_a^*. Il génère donc un champ électrique E constant au niveau de H_a^* et perturbe l'électron dans la couche $2p$. Ce champ induit donc un effet Stark sur H_a^*.
1) Donner l'expression du champ électrique $\boldsymbol{E}$ uniforme créé par H_b^+ au niveau de H_a^* en fonction de d.
2) Montrer qu'alors, le Hamiltonien Stark W_s qui agit sur l'électron $2p$ de H_a^* situé à une distance r du proton s'écrit sous la forme (coordonnées sphériques).

$$\widehat{W}_{stark} = \frac{Ar}{d^2}\cos(\theta)$$

A est une constante dont en donnera l'expression et le signe.
3) Dans la base des 4 vecteurs propres trouvés en A-2), écrire l'expression en notation de Dirac puis sous la forme intégrale des 16 éléments de matrice associés à cette interaction.
On utilisera le fait que $\Psi(r, \theta, \phi) = R_{2\,l}(r)\, Y_{l,\,ml}(\theta, \phi)$ pour séparer les parties radiales des parties angulaires. On rappelle en outre les expressions

$$Y_{10}(\theta,\varphi) = B\cos(\theta)\ ;\ Y_{1\mp1}(\theta,\varphi) = \pm B\sin(\theta)\, e^{\mp i\varphi}$$
$$R_{20}(r) = k'\left(Z - \frac{Zr}{2a_0}\right)e^{-Zr/2a_0}\ ;\ R_{21}(r) = kZr * e^{-Zr/2a_0}$$

k, k', B, a_0 sont des constantes positives

4) En évitant de faire un calcul explicite des intégrales et en utilisant les propriétés de symétrie de la partie angulaire, dire quels éléments de matrice sont nécessairement nuls. Faire le calcul de la partie angulaire pour les éléments non nuls. On notera γ le résultat des intégrales radiales, mais on ne fera pas leur calcul explicite.

5) La matrice obtenue est-elle diagonale ? Les vecteurs de base utilisés sont-ils vecteurs propres de cette matrice ?

6) Trouver les valeurs et vecteurs propres de cette matrice (diagonalisation).

7) Faire un schéma des niveaux d'énergie avec et sans la présence du proton H_b^+. Discuter du déplacement relatif des niveaux lorsque la distance d diminue. En remarquant que l'énergie du proton H_b^+ est de -13.6 eV et que celle des niveaux de H_a^*, initialement dégénérés à -3.4 eV, se séparent et se déplacent avec la distance d, conclure sur la possibilité d'obtenir un état lié ($H_a^* + H_b^+$) c'est-à-dire une molécule H_2^+.

FUSION NUCLEAIRE DANS LE SOLEIL

L'énergie électromagnétique rayonnée par une étoile, telle que le soleil, a pour origine la fusion de l'hydrogène en hélium, selon la chaîne de réactions suivantes

$$p^+ + p^+ \rightarrow X + e^+ + \nu\,,\ p^+ + X \rightarrow Y + \gamma\,,\ 2Y \rightarrow {}^4_2He + 2p^+$$

1) Identifier les nucléides X et Y.

2) En admettant que l'énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire est intégralement rayonnée par le soleil, avec une puissance P_r = 3,9 x 10^{26} W, trouver la diminution de la somme des masses des particules de cette étoile pendant une seconde.

3) La détection des neutrinos émis par le soleil est réalisée à partir de la réaction

$$\upsilon + {}^{37}_{17}Cl \rightarrow e^- + {}^{37}_{18}Ar$$

Calculer la variation de la somme des masses en MeV/c^2 à l'aide des énergies de masse du proton, du neutron ainsi que des énergies de liaison suivantes $\varepsilon_{l,Cl} = 8{,}5704 MeV$ et $\varepsilon_{l,Ar} = 8{,}5252 MeV$. On donne $m_n c^2 = 939{,}565 MeV$, $m_p c^2 = 938{,}270 MeV$ et $m_e c^2 = 0{,}511 MeV$.

PRODUIT DE DESINTEGRATION

La figure ci-dessous montre une partie d'un schéma de désintégration du ${}^{237}_{93}Np$ (neptunium) dans un graphique présentant le nombre de masse A en fonction du numéro atomique Z. Cinq segments de droites représentant la désintégration α ou la désintégration β^- relient les points qui représentent les isotopes.

Parmi la liste ${}_{91}Pa$ (proactinium), ${}_{90}Th$ (thorium), ${}_{89}Ac$ (actinium) ou ${}_{88}Ra$ (radium), quel isotope se trouve à la fin des 5 désintégrations (accompagné d'un point d'interrogation) ? Préciser le nombre de masse correspondant. Toute réponse devra être justifiée.