

## PHYSIQUE ATOMIQUE ET SUBATOMIQUE

Examen du septembre 2007  
Tout document interdit – Durée 3 heures

### PROBLEME DE PHYSIQUE ATOMIQUE: Systèmes muoniques

Le muon est une particule élémentaire de même charge électrique  $-e$  que l'électron, de spin  $1/2$ , mais de masse  $m_\mu = 207 m_e$  ( $m_e$  étant la masse de l'électron). Lors du passage d'un faisceau de muons à travers une cible, certains peuvent être capturés par le champ coulombien des noyaux atomiques. On peut ainsi obtenir des atomes muoniques.

#### 1. HYDROGENE MUONIQUE

L'hydrogène muonique est l'atome formé d'un proton de masse  $m_p = 1836 m_e$  et d'un muon.

- A l'aide de la quantification du moment cinétique dans le cadre du modèle de Bohr, retrouver les rayons  $r_n$  des orbites et énergie  $E_n$  pour un état lié quelconque de l'atome d'hydrogène 'électronique'. On négligera tout effet de structure fine.
- En déduire les valeurs numériques des rayons  $r_1$  ( $\mu p$ ) et  $r_2$  ( $\mu p$ ) des deux premières orbites de Bohr.
- En déduire les valeurs numériques (en eV) des énergies  $E_1$  ( $\mu p$ ) et  $E_2$  ( $\mu p$ ) des deux premiers états de l'hydrogène 'muonique'.

#### 2. HELIUM MUONIQUE

On considère un atome d'hélium muonique, constitué d'un noyau d'hélium 4, d'un muon et d'un électron. On supposera que le noyau d'hélium est immobile et on utilisera les notations  $\vec{r}_e$ ,  $\vec{r}_\mu$ ,  $\vec{r}_{e\mu} = \vec{r}_e - \vec{r}_\mu$ ,  $\vec{P}_e$  et  $\vec{P}_\mu$ , avec  $\vec{r}_e$  et  $\vec{r}_\mu$  respectivement les positions par rapport au noyau de l'électron et du muon,  $\vec{P}_e$  et  $\vec{P}_\mu$  les quantités de mouvement.

- Ecrire le Hamiltonien  $H$  de cet atome d'hélium muonique, en négligeant la structure fine. Le mettre sous la forme  $H = H_1 + H_2 + H_3$ , avec  $H_1$  et  $H_2$  les hamiltoniens à une particule.
- Indiquer les nombres quantiques permettant de décrire les états propres de  $H_0 = H_1 + H_2$ .
  - Quelles sont les valeurs des nombres quantiques qui correspondent à l'état fondamental ?
  - Indiquer le degré de dégénérescence et les termes spectraux correspondants.
  - Calculer numériquement l'énergie de cet état.
- Ecrire  $H_3$  en tenant compte de la valeur relative de  $\vec{r}_\mu$  par rapport à  $\vec{r}_e$  lorsque le muon et l'électron ont le même nombre quantique  $n$ .

- ii. Expliquer la nouvelle expression de  $H$  en termes d'écrantage de la charge du noyau.
  - iii. Calculer numériquement l'énergie de l'état fondamental.
- d. Il existe entre le muon et l'électron une interaction de type spin – spin. Le Hamiltonien correspondant s'écrit  $H_s = a \vec{s}_e \cdot \vec{s}_\mu$ , avec  $\vec{s}_e$  et  $\vec{s}_\mu$  respectivement les opérateurs de spin de l'électron et du muon. On considère le Hamiltonien  $H' = H_0 + H_s$ , avec  $H_s \ll H_0$ .
- i.  $H_s$  lève-t-il la dégénérescence du niveau fondamental de  $H_0$  ?
  - ii. Ecrire  $H_s$  en fonction de  $\vec{s}^2$ ,  $\vec{s}_e^2$ ,  $\vec{s}_\mu^2$ , avec  $\vec{s} = \vec{s}_e + \vec{s}_\mu$ .
  - iii. Calculer la correction en énergie due à  $H_s$  du niveau fondamental  $H_0$ .

## **PROBLEMES DE PHYSIQUE SUBATOMIQUE**

1. Masse du neutron. Etant donné que le neutron est électriquement neutre, il faut déterminer sa masse par un autre moyen que la spectrométrie de masse. Quand un neutron et un proton se rencontrent, supposés au repos, ils se combinent pour former un deutéron, en émettant un rayonnement gamma de 2,2233 MeV. Les masses du proton et du deutéron (sans électron) sont respectivement de 1,007276467 u et de 2,013553213 u. A l'aide de ces données, déterminer la masse du neutron, au nombre de chiffres significatifs permis par les données.

On rappelle que  $1 \text{ u} = 931,494 \text{ MeV} / c^2$ .

2. Accident du réacteur nucléaire de Tchernobyl. Une partie de l'Ukraine a été contaminée en 1986 par du  $^{137}\text{Ce}$  qui subit une désintégration  $\beta^-$  de demi période 30,2 années. En 1996, l'activité totale de cette contamination sur une superficie de  $2,6 \times 10^5 \text{ km}^2$  était estimée à  $1 \times 10^{16} \text{ Bq}$ . En supposant que le  $^{137}\text{Ce}$  est répandu uniformément sur cette superficie, et que les électrons de la désintégration  $\beta^-$  se déplace verticalement, combien de ces électrons auriez-vous interceptés en 1996, pendant 1 h, à la surface de votre corps si vous étiez couché sur le sol dans la région de la centrale ? Même durée mais en 2007 ? On notera que la surface 'utile' d'un individu moyen est de  $1 \text{ m}^2$ , et que l'activité radioactive est définie comme le produit du nombre de noyaux par la constante radioactive.