

**EXAMEN TERMINAL DE PHYSIQUE ATOMIQUE ET SUBATOMIQUE**

Mardi 30 juin 2009 - Durée 3h  
TOUT DOCUMENT INTERDIT – PARTIES INDEPENDANTES

**EFFET ZEEMAN SUR LE DOUBLET JAUNE DU SODIUM**

Pour décrire les états du système, il faudra bien préciser les notations utilisées :  $^{2S+1}L_J$  ou  $|L, S, J, M_J\rangle$  ou  $|n, l, s, m_l, m_s\rangle \dots$

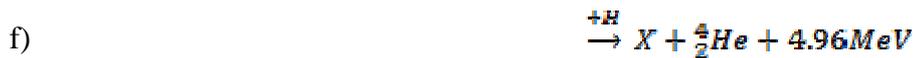
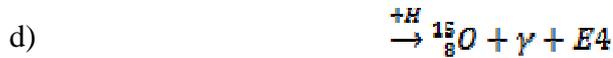
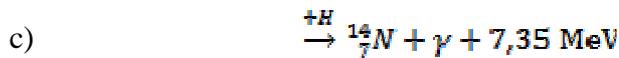
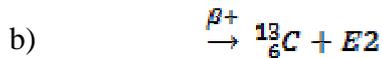
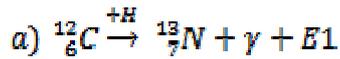
Dans l'état fondamental, l'atome de sodium a une configuration électronique  $1s^2 2s^2 2p^6 3s$  et une première configuration excitée  $1s^2 2s^2 2p^6 3p$ . Les transitions entre états issus de ces deux configurations ont pour longueur d'onde  $588,99 \text{ nm}$ ,  $589,59 \text{ nm}$ , i.e. le doublet jaune du sodium.

- 1) Donner les nombres quantiques L, S et J des états issus des deux configurations mentionnées ci-dessus.
- 2) Calculer l'écart énergétique entre les états correspondants à la configuration excitée. Quel phénomène physique est à l'origine de cette structure ?
- 3) On applique sur l'atome de sodium un champ magnétique statique. Sachant qu'en laboratoire les valeurs de ce champ sont de l'ordre du Tesla, on se trouve en situation de champ faible. Expliquer le sens de cette affirmation et justifier la. La correction énergétique à appliquer s'écrit dans ce cas :  $\Delta E = g_J \mu_B B M_J$ .
- 4) Calculer la décomposition Zeeman *des états* mis en jeu dans les transitions du doublet jaune (préciser la structure énergétique en unité  $\mu_B B$ ).
- 5) Tracer sur un diagramme la décomposition Zeeman des raies du doublet jaune. Préciser la position énergétique des composantes par rapport à la raie en l'absence de champ. On rappelle que  $\Delta M_J = 0, \pm 1$ .
- 6) On peut imaginer des situations, en astrophysique par exemple, dans lesquelles le champ magnétique est suffisamment élevé pour que le système soit alors en champ fort. Calculer l'ordre de grandeur du champ magnétique pour être dans cette situation.
- 7) Dans ce cas, et dans le cadre d'un calcul de perturbations, donner l'ordre dans lequel les calculs devraient être effectués. En se limitant, dans la description du système, au seul électron externe, expliciter les états à utiliser.
- 8) Sachant que le hamiltonien Zeeman s'écrit  $W_Z = \frac{\mu_B B}{\hbar} (L_z + 2S_z)$ , rappeler l'expression de la correction énergétique associée à cet hamiltonien et qui devra être appliqué.
- 9) Calculer la décomposition Zeeman pour *les états* correspondants aux deux configurations.
- 10) En ne tenant compte que de cette décomposition Zeeman, tracer sur un diagramme les transitions correspondant au doublet jaune. Quel est le nombre de longueurs d'onde différentes ? On rappelle que  $\Delta m_l = 0, \pm 1$  et  $\Delta m_s = 0$ .

On donne  $g_J = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$ ,  $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  et  $\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$ .

### CYCLE CNO DE BETHE

L'ensemble des éléments plus lourds que l'Hydrogène est produit par les étoiles suivant des cycles successifs de fusion/fission (radioactivité). Un de ces cycles majeur réalisé par l'étoile permet de convertir l'hydrogène en hélium suivant un cycle donnant naissance aux éléments constitutifs de l'essentiel de la chimie du vivant : le carbone, l'azote et l'oxygène. Ce cycle est représenté ci-dessous :



Les réactions notées  $+H$  correspondent à des réactions de fusion avec un proton. Dans tous les cas, on négligera l'énergie cinétique de recul des noyaux et on considérera que ceux-ci sont produits à l'état fondamental.

1. Calculer à partir des données fournies, l'énergie de masse du noyau de carbone  $^{12}\text{C}$  en  $\text{MeV}$ . Montrer que la masse de l'atome peut être assimilée-en première approximation- à celle du noyau. On donnera pour cela une limite supérieure à l'énergie de liaison des électrons.
2. En déduire l'énergie de liaisons du carbone, en  $\text{MeV}$ . A quoi correspond cette énergie de liaison et quel est le rapport entre cette énergie et la formule de *von Weizsäcker* et *Bethe* dont on rappellera la forme ? Comment est appelé le modèle à l'origine de cette formule ?
3. Expliquer, en s'appuyant simplement sur la signification physique des interactions contenues dans la formule de *von Weizsäcker* et *Bethe*, pourquoi le  $^{12}\text{C}$  est stable.
4. Lors de la première réaction nucléaire notée *a*), un carbone fusionne avec un hydrogène pour donner un  $^{13}\text{N}$ . Calculer l'énergie  $E_1$  libérée par cette réaction de fusion nucléaire, énergie emportée par le photon gamma.
5. En déduire l'énergie de masse de l'azote  $^{13}\text{N}$ .
6. Quelle est la nature de la réaction (b) ? Détailler le processus et la nature des particules émises.
7. Quels sont les critères énergétiques pour que cette réaction ait lieu spontanément ? Dans ce cas, en déduire l'énergie minimale  $E_2$  libérée par cette réaction. Sous quelle(s) forme(s) est-elle (sont-elles) libérée(s) ?
8. En réalité  $E_2$  vaut  $2,22 \text{ MeV}$ . En déduire l'énergie de masse du  $^{13}\text{C}$  en  $\text{MeV}/c^2$ .
9. Calculer l'énergie  $E_4$ .

10. Quel type de réaction intervient au cours de l'étape (e) ? L'énergie libérée est-elle compatible avec ce que vous savez de ces réactions ?
11. Lors de la dernière étape (f), quelle est la nature de l'élément X produit ? Commenter.
12. Ecrire l'équation bilan des 6 étapes.

Données :

$$m_p = 1,0073 \text{ u} ; m_n = 1,0087 \text{ u} ; m(^{12}\text{C}) = 12,0000 \text{ u} ; m(^{13}\text{N}) = 13,0057 \text{ u} ; m(^{14}\text{N}) = 14,0067 \text{ u} ; E_l(^4\text{H}) = 7,08 \text{ MeV/A} ; E_l(^{13}\text{N}) = 7,02876 \text{ MeV/A} ; 1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}$$