09/2006 Métropole **Calculatrice interdite**

EXERCICE III. NUCLÉOSYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES (4 points)

Le but de cet exercice est d'étudier les réactions nucléaires qui se produisent dans l'univers, notamment dans les étoiles, et qui engendrent la synthèse des éléments chimiques.

Données: *masse d'un noyau d'hydrogène ou d'un proton: $m_p = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg*
masse d'un positron (ou positon) : m_e
célérité de la lumière dans le vide : $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m.s^{-1}
constante radioactive du "béryllium 8", $\lambda \approx 1 \times 10^{16}$ s^{-1}
1 eV = 1,60 $\times 10^{-19}$ J
constante de Planck : $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s

Certaines aides au calcul peuvent comporter des résultats ne correspondant pas au calcul à effectuer.

1. Les premiers éléments présents dans l'univers

Selon le modèle du big-bang, quelques secondes après l'explosion originelle, les seuls éléments chimiques présents étaient l'hydrogène (90%), l'hélium et le lithium, ce dernier en quantité très faible. Les physiciens ont cherché à comprendre d'où provenaient les autres éléments existant dans l'univers.

1.1. Déterminer la composition des noyaux des atomes d'hélium $^{4}_{2}\mathrm{He}$ et $^{3}_{2}\mathrm{He}$ ainsi que celle de l'ion hélium $^{42}\mathrm{He}^{2+}$.

1.2. *La synthèse des éléments chimiques plus lourds se fait par des réactions nucléaires.*
Pourquoi cette synthèse ne peut-elle pas se faire par des réactions chimiques ?

2. Fusion de l'hydrogène

Sous l'action de la force gravitationnelle les premiers éléments (hydrogène, hélium…) se rassemblent, formant des nuages gazeux en certains endroits de l'univers. Puis le nuage s'effondre sur lui-même et la température centrale atteint environ 10^{7} K. À cette température démarre la première réaction de fusion de l'hydrogène dont le bilan peut s'écrire: $4\,^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{0}_{1}\mathrm{e}$. Une étoile est née.

2.1. En notant m_{He} la masse d'un noyau d' "hélium 4", écrire l'expression littérale de l'énergie $|\Delta E|$ libérée lors de cette réaction de fusion des 4 noyaux d'hydrogène.
L'application numérique donne une valeur voisine de $|\Delta E| \approx 4 \times 10^{-12}$ J

2.2. Cas du Soleil

2.2.1. *À sa naissance on peut estimer que le Soleil avait une masse d'environ $M_S = 2 \times 10^{30}$ kg. Seul un dixième de cette masse est constituée d'hydrogène suffisamment chaud pour être le siège de réactions de fusion. On considère que l'essentiel de l'énergie produite vient de la réaction de fusion précédente.*
Montrer que l'énergie totale E_T pouvant être produite par ces réactions de fusion est voisine de $E_T \approx 10^{44}$ J.

2.2.2. *Des physiciens ont mesuré la quantité d'énergie reçue par la Terre et en ont déduit l'énergie E_S libérée par le Soleil en une année: $E_S \approx 10^{34}$ J.an^{-1}.*
En déduire la durée Δt nécessaire pour que le Soleil consomme toutes ses réserves d'hydrogène.

3. Un produit de la fusion de l'hélium

D'autres réactions de nucléosynthèse peuvent se produire au cœur d'une étoile. Selon les modèles élaborés par les physiciens, l'accumulation par gravitation des noyaux d'hélium formés entraîne une contraction du cœur de l'étoile et une élévation de sa température. Lorsqu'elle atteint environ 10^8 K, la fusion de l'hélium commence : ${}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{8}_{4}Be$. Il se forme ainsi des noyaux de "béryllium 8" radioactifs de très courte durée de vie.

On s'intéresse à la radioactivité du "béryllium 8". Soit N(t) le nombre de noyaux de "béryllium 8" présents dans l'échantillon à l'instant de date t, et N_0 celui à l'instant de date $t_0 = 0$ s.

3.1. En utilisant la loi de décroissance radioactive, démontrer la relation entre la demi-vie $t_{1/2}$ et la constante radioactive λ : $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$.

3.2. Calculer le temps de demi-vie $t_{1/2}$ *du "béryllium 8".*

Aide au calcul : $\ln 2 \approx 0{,}7$

3.3. En déduire le rapport $\dfrac{N(t_1)}{N_0}$ à l'instant de date $t_1 = 1{,}4 \times 10^{-16}$ s

4. Vers des éléments plus lourds

Dans les étoiles de masse au moins 4 fois supérieure à celle du Soleil, d'autres éléments plus lourds peuvent ensuite être formés par fusion, par exemple le carbone ${}^{12}C$, l'oxygène ${}^{16}O$, le magnésium ${}^{24}Mg$, le soufre ${}^{32}S$ (…) et le fer ${}^{56}Fe$.

4.1. Donner l'expression littérale de l'énergie de liaison par nucléon $\dfrac{E_\ell}{A}$ d'un noyau de fer ${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$, en fonction des masses du neutron m_n, du proton m_p, du noyau de "fer 56" m_{Fe} et de la célérité de la lumière dans le vide c.

4.2. Indiquer sur la courbe d'Aston représentée, **EN ANNEXE À RENDRE AGRAFÉE À LA COPIE**, le point correspondant à la position du noyau de "fer 56".

4.3. En s'aidant de la courbe précédente, dire où se situent les noyaux capables de libérer de l'énergie lors d'une réaction de fusion.

5. L'élément fer

Dans certaines étoiles, à la fin de la période des fusions, une explosion se produit libérant de l'énergie. Des noyaux de fer ${}^{56}_{26}Fe$ sont dissociés et d'autres sont recréés par désintégration radioactive des noyaux de cobalt ${}^{56}_{27}Co$. Les noyaux de fer, formés dans un état excité, émettent alors des rayonnements d'énergie bien déterminée, tels que le satellite SMM a pu en détecter en 1987 en observant une supernova dans le nuage de Magellan.

5.1. *Lors de la désintégration radioactive du noyau de cobalt ${}^{56}_{27}Co$ il se forme, en plus du fer ${}^{56}_{26}Fe$, une autre particule.*
Écrire l'équation de cette désintégration et nommer la particule formée.

5.2. *L'un des rayonnements détectés a une énergie de 1238 keV.*

5.2.1. Quelle est l'origine de ce rayonnement émis par le fer ?

5.2.2. *Ce rayonnement a une énergie bien déterminée.*

Que peut-on en déduire concernant les niveaux d'énergie du noyau de fer ?

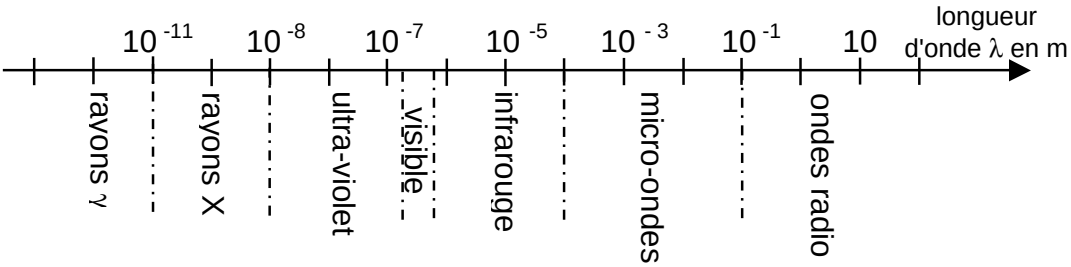
5.2.3. Ce rayonnement est-il un rayonnement X ou γ ?Justifier.

On pourra s'aider de la gamme de longueur d'onde donnée sur la ***figure 1****.*

Aide au calcul :

$$\frac{6,63}{3,00\times1,238}=1,8 \qquad \frac{6,63\times1,238}{3,00}=2,7 \qquad \frac{3,00\times6,63}{1,238}=16$$

Figure 1: Gamme de longueurs d'onde



Remarque: L'énergie libérée lors de l'explosion de l'étoile permet de former les éléments de nombre de masse supérieure à 56.

ANNEXE À RENDRE AGRAFÉE À LA COPIE

4. Vers des éléments plus lourds

Courbe d'Aston :

