

Nucléosynthèse des éléments chimiques

Source : <http://www.chimix.com/an6/bac/fra92.htm>

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.

On donne :

Masse d'un noyau d'hydrogène ou d'un proton : $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; masse d'un positron (ou positon) : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; constante radioactive du "béryllium 8", $\lambda = 1 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$; $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

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 Question

Déterminer la composition des noyaux des atomes d'hélium ${}^4_2\text{He}$ et ${}^3_2\text{He}$ ainsi que celle de l'ion hélium ${}^4_2\text{He}^{2+}$.

1.2 Question

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 107 K. A cette température démarre la première réaction de fusion de

l'hydrogène dont le bilan peut s'écrire : $4 \cdot {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 \cdot {}^0_1\text{e}$. Une étoile est née.

2.1 Question

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 $4 \cdot 10^{-12} \text{ J}$.

2.2 Cas du Soleil

A sa naissance on peut estimer que le Soleil avait une masse d'environ $M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. 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 10^{44} J .

- 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 : $10^{34} \text{ J.an}^{-1}$. 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 : $4\text{He} + 4\text{He} \rightarrow \text{}^8_4\text{Be}$. 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.

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

3.1 Question

Calculer le temps de demi-vie $t_{1/2}$ du "béryllium 8". Aide au calcul : $\ln 2 = 0,7$.

3.2 Question

En déduire le rapport $N_0/N(t_1)$ à l'instant de date $t_1 = 1,4 \cdot 10^{-16}$ 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 Question

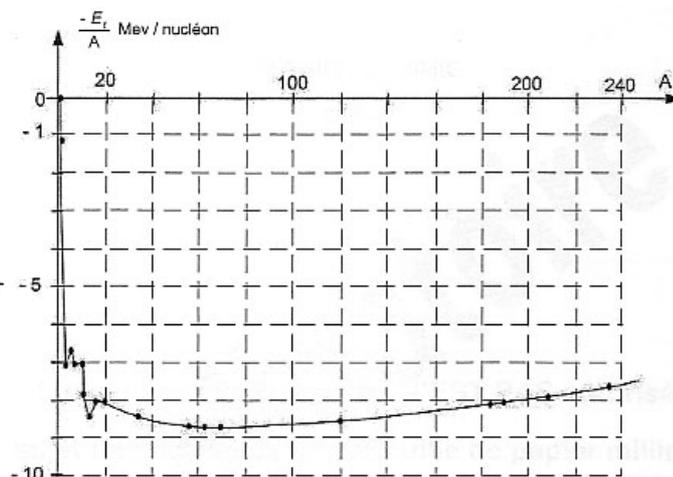
Donner l'expression littérale de l'énergie de liaison par nucléon E_l/A d'un noyau de fer $^{56}_{26}\text{Fe}$, en

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 Question

Indiquer sur la courbe d'Aston représentée ci-dessous, le point correspondant à la position du noyau de "fer 56".

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 ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ sont dissociés et d'autres sont recréés par désintégration radioactive des

noyaux de cobalt ${}^{56}_{27}\text{Co}$. 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 Question

Lors de la désintégration radioactive du noyau de cobalt ${}^{56}_{27}\text{Co}$ il se forme, en plus du fer ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, une

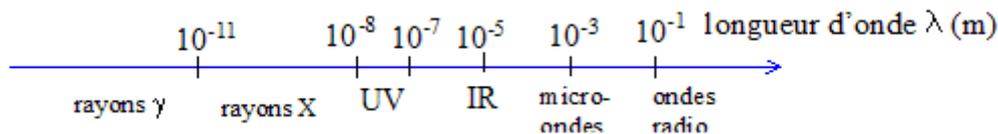
autre particule. Écrire l'équation de cette désintégration et nommer la particule formée.

L'un des rayonnements détectés a une énergie de 1238 keV. Quelle est l'origine de ce rayonnement émis par le fer ?

5.2 Question

-Ce rayonnement a une énergie bien déterminée. Que peut-on en déduire concernant les niveaux d'énergie du noyau de fer ?

- Ce rayonnement est-il un rayonnement X ou γ ? Justifier. On pourra s'aider de la gamme de longueur d'onde donnée ci-dessous.



Aide aux calculs : $6,63 / (3 \cdot 1,238) = 1,8$; $1,238 / (6,63 \cdot 3) = 2,7$; $3 \cdot 6,63 / 1,238 = 16$