Mécanisme de fusion de l'hydrogène dans une étoile

Bac S 2003 La Réunion (ancien programme) · Exercice 3 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

A.1 Donner une définition rapide des mots « fusion nucléaire » et « fission nucléaire ».

Fusion nucléaire : réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.

Fission nucléaire : réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd, percuté par un neutron, se scinde en deux noyaux plus légers.

Fusion : deux noyaux légers donnent un noyau plus lourd. Fission : un noyau lourd donne deux noyaux plus légers. Les deux libèrent de l'énergie.

PIÈGE
Confondre les deux mots, ou parler d'atomes et de molécules. Ce sont les noyaux qui sont transformés : il faut écrire « noyau » dans chaque définition.

A.2 En considérant les charges des noyaux en cause, expliquer pourquoi ces réactions de fusion ne peuvent se produire qu'à très haute température.

Les noyaux ne contiennent que des protons et des neutrons : ils sont tous chargés positivement. Deux noyaux qui s'approchent exercent donc l'un sur l'autre une force électrostatique répulsive, d'autant plus intense que leur distance est faible.

Pour fusionner, ils doivent pourtant arriver presque au contact. Il leur faut une très grande vitesse, donc une très grande énergie cinétique, ce qui correspond à une agitation thermique très forte.

La très haute température donne aux noyaux assez d'énergie cinétique pour vaincre leur répulsion électrostatique.

COMPRENDRE
La température mesure l'agitation des particules : plus elle est élevée, plus les noyaux sont rapides. À très courte distance, l'interaction forte, attractive, l'emporte sur la répulsion et soude les noyaux.

B.1 Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hydrogène en un noyau de deutérium et une particule notée ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$. Comment s'appelle cette particule ?

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{A}_{Z}\mathrm{X} $$

Conservation du nombre de nucléons : $1 + 1 = 2 + A$, donc $A = 0$.

Conservation de la charge électrique : $1 + 1 = 1 + Z$, donc $Z = 1$.

La particule n'a aucun nucléon et porte une charge $+e$: c'est un positon.

${}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}$: la particule émise est un **positon**.

PIÈGE
Répondre « électron ». L'électron se note ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$; avec $Z = +1$, il s'agit de son antiparticule, le positon, de même masse et de charge opposée.

MÉTHODE
Pour toute équation nucléaire, écrire deux égalités : somme des nombres du haut (A) identique des deux côtés, somme des nombres du bas (Z) identique des deux côtés.

B.2 Écrire la réaction de fusion d'un noyau de deutérium et d'un proton en un noyau d'hélium 3. Comment interpréter l'émission d'un photon qui l'accompagne ?

${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He}$; on vérifie $2 + 1 = 3$ et $1 + 1 = 2$.

Le noyau d'hélium 3 est formé dans un état excité, noté ${}^{3}_{2}\mathrm{He}^{*}$. Il retrouve son état fondamental en cédant son excédent d'énergie sous la forme d'un photon γ : ${}^{3}_{2}\mathrm{He}^{*} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma$.

${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma$: le photon est émis lors de la désexcitation du noyau d'hélium 3.

COMPRENDRE
Le photon γ n'a ni charge ni nucléon ($A = 0$, $Z = 0$) : il ne change rien aux lois de conservation, il emporte seulement de l'énergie.

B.3 Écrire la réaction de fusion de deux noyaux d'hélium 3 en un noyau d'hélium 4. Quels sont les deux noyaux identiques émis ?

$$^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^A_Z\mathrm{X}$$

Conservation du nombre de nucléons : $3 + 3 = 4 + 2A$, donc $A = 1$.

Conservation de la charge électrique : $2 + 2 = 2 + 2Z$, donc $Z = 1$.

$^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^1_1\mathrm{H}$: les deux noyaux émis sont des **noyaux d'hydrogène** (protons).

PIÈGE
Oublier le coefficient 2 devant A et Z dans les deux égalités : on trouverait $A = 2$ et $Z = 2$, ce qui ne correspond à aucun noyau connu.

B.4 Écrire la réaction bilan des trois réactions de fusion précédentes, qui permet d'obtenir un noyau d'hélium 4 à partir de noyaux d'hydrogène.

La dernière étape consomme deux noyaux d'hélium 3 : les deux premières doivent donc se produire deux fois chacune.

$2 \times \left({}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^2_1\mathrm{H} + {}^0_1\mathrm{e}\right)$

$2 \times \left({}^2_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \gamma\right)$

$^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^1_1\mathrm{H}$

En additionnant, les noyaux de deutérium et d'hélium 3 disparaissent ; il reste 6 noyaux d'hydrogène à gauche et 2 à droite, soit 4 après simplification.

$4\,{}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^0_1\mathrm{e} + 2\,\gamma$

COMPRENDRE
Vérification : $4 \times 1 = 4 + 0$ nucléons et $4 \times 1 = 2 + 2 \times 1$ charges. C'est bien la réaction donnée par le sujet en partie C.

MÉTHODE
Dans un bilan, les espèces intermédiaires, produites par une étape puis consommées par la suivante, ne doivent plus apparaître. On ajuste les coefficients des étapes jusqu'à ce qu'elles se simplifient toutes.

C.1 Calculer la perte de masse correspondant à la fusion $4\,{}^1_1\mathrm{H} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + 2\,{}^0_1\mathrm{e} + 2\,\gamma$.

Données utiles $m({}^1_1\mathrm{H}) = 1{,}0073$ u ; $m({}^4_2\mathrm{He}) = 4{,}0026$ u ; $m({}^0_1\mathrm{e}) = 0{,}0006$ u

Perte de masse = masse des réactifs − masse des produits (le photon a une masse nulle) :

$$\Delta m = 4\,m({}^1_1\mathrm{H}) - \left[m({}^4_2\mathrm{He}) + 2\,m({}^0_1\mathrm{e})\right]$$

$$\Delta m = 4 \times 1{,}0073 - (4{,}0026 + 2 \times 0{,}0006) = 4{,}0292 - 4{,}0038$$

$\Delta m = 0{,}0254$ u

PIÈGE
Oublier les deux positons, ou ne compter qu'un seul noyau d'hydrogène. Sans calculatrice, poser les opérations : $4 \times 1{,}0073 = 4{,}0292$ puis $4{,}0026 + 0{,}0012 = 4{,}0038$.

COMPRENDRE
Une différence se donne avec la précision des termes, ici 10^{-4} u : le résultat n'a plus que trois chiffres significatifs alors que les masses en ont cinq.

C.2 En déduire une estimation, en MeV, de l'énergie libérée par nucléon lors de cette fusion (0,6 MeV, 6 MeV ou 60 MeV).

Données utiles $\Delta m = 0{,}0254$ u (C.1) ; 1 u correspond à 935 MeV $\approx$ 1000 MeV

Énergie libérée par la fusion : $E \approx 0{,}0254 \times 1000 \approx 25$ MeV.

La réaction met en jeu 4 nucléons (les quatre protons) :

$$\frac{E}{4} \approx \frac{25}{4} \approx 6 \text{ MeV}$$

L'énergie libérée est d'environ **6 MeV par nucléon**.

PIÈGE
S'arrêter à 25 MeV : c'est l'énergie libérée par la réaction entière. La question porte sur un nucléon, il faut diviser par 4.

COMPRENDRE
Avec 935 MeV au lieu de 1000, on obtient environ 24 MeV, soit toujours 6 MeV par nucléon. Les propositions diffèrent d'un facteur 10 : seul l'ordre de grandeur compte.

C.3 Le Soleil transforme chaque seconde 720 millions de tonnes d'hydrogène en hélium 4. Estimer la perte de masse qu'il subit chaque seconde.

Données utiles $\Delta m = 0{,}0254$ u (C.1) ; $\dfrac{0{,}0254}{4{,}0292} \approx \dfrac{1}{160}$

Pour $4 \times 1{,}0073 = 4{,}0292$ u d'hydrogène consommé, la masse perdue est $0{,}0254$ u. La fraction de masse perdue est la même à l'échelle du Soleil :

$$\frac{m_{\text{perdue}}}{m_{\text{hydrogène}}} = \frac{0{,}0254}{4{,}0292} \approx \frac{1}{160}$$

$$m_{\text{perdue}} \approx \frac{720 \times 10^6}{160} = \frac{72}{16} \times 10^6 = 4{,}5 \times 10^6 \text{ tonnes}$$

Le Soleil perd environ **4 500 000 tonnes** par seconde.

COMPRENDRE

Le Soleil « maigrit » donc bien : la masse perdue est convertie en énergie rayonnée. Cette perte reste infime devant sa masse, de l'ordre de 10^{27} tonnes.

MÉTHODE

Passage du noyau à l'étoile : calculer la proportion de masse perdue sur une réaction, puis l'appliquer à la masse totale consommée. Le rapport ne dépend pas de l'unité de masse choisie.