Fusion deutérium tritium

Bac S 2006 Inde (Pondichéry) (ancien programme) · Exercice 4 **4 points** **Durée conseillée 52 min**

1.1 (III.1.a) Qu'appelle-t-on isotopes ?

Des isotopes sont des noyaux qui ont le même nombre de protons Z mais des nombres de neutrons différents, donc des nombres de nucléons A différents.

Isotopes : même Z, A différents.

COMPRENDRE
Même Z signifie même élément chimique : les isotopes ont les mêmes propriétés chimiques, mais pas la même masse ni la même stabilité.

1.2 (III.1.b) Écrire les noyaux de deutérium D et de tritium T dans la notation ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$. À quel élément chimique appartiennent-ils ?

Données utiles D : 1 proton et 1 neutron ; T : 1 proton et 2 neutrons

Deutérium : $Z = 1$ et $A = 1 + 1 = 2$, noté ${}^{2}_{1}\mathrm{D}$.

Tritium : $Z = 1$ et $A = 1 + 2 = 3$, noté ${}^{3}_{1}\mathrm{T}$.

Ces deux noyaux ont $Z = 1$: ils appartiennent à l'élément hydrogène, comme ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$.

${}^{2}_{1}\mathrm{D} = {}^{2}_{1}\mathrm{H}$ et ${}^{3}_{1}\mathrm{T} = {}^{3}_{1}\mathrm{H}$: deux isotopes de l'hydrogène.

PIÈGE
A est le nombre de nucléons (protons + neutrons), pas le nombre de neutrons : écrire ${}^{1}_{1}\mathrm{D}$ ou ${}^{2}_{1}\mathrm{T}$ fait perdre les points.

2.1 (III.2.a) Qu'est-ce qu'un noyau radioactif ?

Un noyau radioactif est un noyau instable : il se désintègre spontanément, de façon aléatoire, en un autre noyau avec émission d'une particule et, souvent, d'un rayonnement γ.

COMPRENDRE
« Spontanément » est le mot attendu : la désintégration se produit sans intervention extérieure, à un instant imprévisible pour un noyau donné.

2.2 (III.2.b) Le tritium est radioactif β^-. Écrire l'équation de sa désintégration.

Une désintégration β^- émet un électron ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$. Avec un noyau fils ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$:

$$ {}^{3}_{1}\mathrm{T} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} $$

Conservation du nombre de nucléons : $3 = A + 0$, donc $A = 3$.

Conservation de la charge : $1 = Z - 1$, donc $Z = 2$: le noyau fils est un noyau d'hélium.

${}^{3}_{1}\mathrm{T} \longrightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

PIÈGE
En β^-, Z augmente d'une unité : le noyau fils est ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$ (donné dans les notations du sujet), pas un isotope de l'hydrogène.

MÉTHODE
Toute équation nucléaire se vérifie avec les deux lois de Soddy : somme des A et somme des Z identiques de part et d'autre de la flèche.

2.3 (III.2.c) Le tritium a une demi-vie $t_{1/2} = 12$ ans. Que signifie cette affirmation ?

La demi-vie est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux radioactifs présents dans un échantillon se soient désintégrés.

Dans un échantillon de tritium, il ne reste que la moitié des noyaux de tritium au bout de 12 ans.

COMPRENDRE
Au bout de 24 ans il en reste le quart, et non zéro : le nombre de noyaux est divisé par 2 à chaque demi-vie.

3.1 (III.3.a) Qu'appelle-t-on réaction nucléaire de fusion ?

La fusion est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle deux noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd, en libérant de l'énergie.

PIÈGE
Ne pas confondre avec la fission, où un noyau lourd se casse en deux noyaux plus légers sous l'impact d'un neutron.

3.2 (III.3.b) Écrire l'équation de la fusion DT, qui forme un noyau $^4_2\mathrm{He}$. Exprimer l'énergie ΔE qui peut être libérée en fonction des énergies de masse E_m.

$^2_1\mathrm{D} + {}^3_1\mathrm{T} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^A_Z\mathrm{X}$ avec $2+3=4+A$, soit $A=1$, et $1+1=2+Z$, soit $Z=0$: la particule émise est un neutron.

$$^2_1\mathrm{D} + {}^3_1\mathrm{T} \longrightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_0\mathrm{n}$$

L'énergie libérée est l'énergie de masse perdue par le système, avec $E_m = m\,c^2$:

$$\Delta E = E_m(^2_1\mathrm{D}) + E_m(^3_1\mathrm{T}) - E_m(^4_2\mathrm{He}) - E_m(^1_0\mathrm{n})$$

COMPRENDRE
Ainsi définie, l'énergie libérée est positive. Avec la convention « produits moins réactifs », on obtient l'opposé : une variation d'énergie de masse négative, le système cédant de l'énergie à l'extérieur. Les deux écritures sont cohérentes si le signe est justifié.

3.3 (III.3.c) Exprimer la masse $m(^A_Z\mathrm{X})$ en fonction de m_p, m_n, Z, A et $E_L(^A_Z\mathrm{X})$. En déduire ΔE en fonction des énergies de liaison.

L'énergie de liaison correspond au défaut de masse du noyau : $E_L(^A_Z\mathrm{X}) = \left[Z\,m_p + (A-Z)\,m_n - m(^A_Z\mathrm{X})\right]c^2$, donc

$$m(^A_Z\mathrm{X}) = Z\,m_p + (A-Z)\,m_n - \frac{E_L(^A_Z\mathrm{X})}{c^2}$$

Énergies de masse des quatre particules :

$E_m(\mathrm{D}) = (m_p + m_n)\,c^2 - E_L(\mathrm{D})$

$E_m(\mathrm{T}) = (m_p + 2\,m_n)\,c^2 - E_L(\mathrm{T})$

$E_m(^4_2\mathrm{He}) = (2\,m_p + 2\,m_n)\,c^2 - E_L(^4_2\mathrm{He})$

$E_m(^1_0\mathrm{n}) = m_n\,c^2$ (nucléon isolé, pas d'énergie de liaison).

Dans ΔE (III.3.b), les termes en m_p et m_n s'annulent : $2\,m_p + 3\,m_n$ avant comme après.

$$\Delta E = E_L(^4_2\mathrm{He}) - E_L(\mathrm{D}) - E_L(\mathrm{T})$$

PIÈGE
Le signe s'inverse entre les deux écritures : masses « réactifs moins produits », mais énergies de liaison « produits moins réactifs ».

MÉTHODE
Le nombre de protons et le nombre de neutrons sont conservés : dans tout bilan, les masses des nucléons s'éliminent et il ne reste que les énergies de liaison, produits moins réactifs.

3.4 (III.3.d) Calculer numériquement la valeur de ΔE.

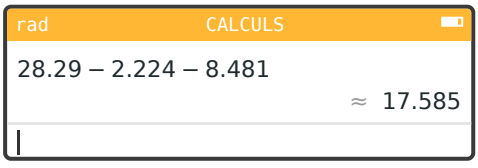
Données utiles $E_L(\mathrm{D}) = 2{,}224$ MeV ; $E_L(\mathrm{T}) = 8{,}481$ MeV ; $E_L(^4_2\mathrm{He}) = 28{,}29$ MeV ; expression de ΔE (III.3.c)

$$\Delta E = E_L(^4_2\mathrm{He}) - E_L(\mathrm{D}) - E_L(\mathrm{T}) = 28{,}29 - 2{,}224 - 8{,}481$$

$\Delta E = 17{,}59$ MeV : la fusion d'un noyau D et d'un noyau T libère 17,59 MeV.

COMPRENDRE
Pour une somme ou une différence, on garde le nombre de décimales de la donnée la moins précise : $28{,}29$ a deux décimales, donc $17{,}585$ s'arrondit à $17{,}59$ MeV.

À LA CALCULATRICE



4.1 (III.4.a) Les noyaux D et T se repoussent. Pourquoi ?

Les deux noyaux portent chacun une charge positive $+e$ (un proton) : deux charges de même signe se repoussent par interaction électrique (répulsion coulombienne).

COMPRENDRE
Cette répulsion augmente quand la distance diminue : il faut des noyaux très rapides pour les amener au contact, où l'interaction forte l'emporte.

4.2 (III.4.b) Quelle doit être la température minimale des noyaux pour que la fusion ait lieu ?

Données utiles $E_C > 0{,}35$ MeV ; température proportionnelle à E_C ; 1 eV correspond à 7700 K

$E_C = 0{,}35\ \text{MeV} = 0{,}35 \times 10^6\ \text{eV}$.

La température est proportionnelle à l'énergie cinétique : $T_{\min} = \dfrac{E_C}{1\ \text{eV}} \times 7700\ \text{K}$

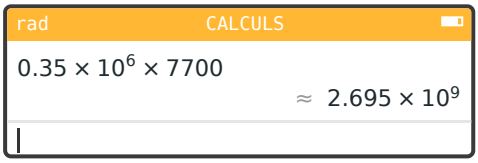
$$T_{\min} = 0{,}35 \times 10^6 \times 7700 = 2{,}7 \times 10^9\ \text{K}$$

$T_{\min} = 2{,}7 \times 10^9$ K, soit près de trois milliards de kelvins.

PIÈGE
Oublier la conversion $1\ \text{MeV} = 10^6\ \text{eV}$: on trouverait $2{,}7 \times 10^3$ K, une température de flamme, sans rapport avec la fusion.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme $0{,}35$ MeV.

À LA CALCULATRICE



4.3 (III.4.c) La température interne du Soleil n'est que de 15×10^6 K. Quelle conclusion inspire la comparaison de ces deux températures ?

Données utiles $T_{\min} = 2{,}7 \times 10^9$ K (III.4.b) ; $T_{\text{Soleil}} = 15 \times 10^6$ K

$$\frac{T_{\min}}{T_{\text{Soleil}}} = \frac{2{,}7 \times 10^9}{15 \times 10^6} = 1{,}8 \times 10^2$$

La température au cœur du Soleil est environ 180 fois plus faible que la température minimale calculée.

D'après ce modèle, la fusion DT ne devrait pas se produire dans le Soleil : l'énergie solaire provient d'autres réactions de fusion, possibles à une température plus basse.

COMPRENDRE
Le Soleil brille pourtant grâce à la fusion : le critère d'agitation thermique retenu ici est donc trop sévère pour décrire ce qui se passe réellement dans une étoile.

À LA CALCULATRICE

