Du Big Bang aux éléments chimiques

Bac S 2004 Amérique du Sud (ancien programme) · Exercice 3 **6 points** **Durée conseillée 1 h 18**

1.1 À quelle équivalence le texte fait-il allusion, en particulier dans sa dernière phrase ?

L'Univers transforme son « capital énergie » en « capital matière » : de l'énergie devient de la masse.

Le texte évoque l'équivalence entre la **masse** et l'**énergie**.

1.2 Donner une relation définissant cette équivalence. Préciser la signification et l'unité SI de chaque terme.

Relation d'Einstein : toute particule de masse m, au repos, possède une énergie de masse E.

- E : énergie de masse, en joules (J) ;
- m : masse de la particule, en kilogrammes (kg) ;
- c : célérité de la lumière dans le vide, en mètres par seconde ($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$).

$$E = m\,c^2$$

PIÈGE
Donner une unité pratique (MeV pour l'énergie, unité de masse atomique pour la masse) alors que la question demande les unités du système international.

2 Calculer l'énergie de masse nécessaire à la création de la paire positon-électron, de masse $2\,m_e$. L'exprimer en J, puis en MeV.

Données utiles $c = 2{,}998 \times 10^{8}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg ; $1\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \times 10^{-19}$ J

La paire a une masse $2\,m_e$; son énergie de masse est $E = 2\,m_e\,c^2$.

$$E = 2 \times 9{,}11 \times 10^{-31} \times (2{,}998 \times 10^{8})^2 = 1{,}64 \times 10^{-13}\ \mathrm{J}$$

Conversion : $1\ \mathrm{MeV} = 10^{6}\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \times 10^{-13}$ J, donc

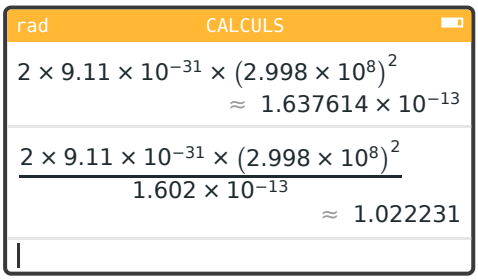
$$E = \frac{2 \times 9{,}11 \times 10^{-31} \times (2{,}998 \times 10^{8})^2}{1{,}602 \times 10^{-13}} = 1{,}02\ \mathrm{MeV}$$

$$E = 1{,}64 \times 10^{-13}\ \mathrm{J} = 1{,}02\ \mathrm{MeV}$$

PIÈGE
Oublier le facteur 2 (il faut créer deux particules), ou diviser par $1{,}602 \times 10^{-19}$: on obtient alors des eV, pas des MeV.

COMPRENDRE
Trois chiffres significatifs, comme m_e, la donnée la moins précise. La conversion se fait avec la valeur non arrondie gardée dans la calculatrice.

À LA CALCULATRICE



3 Donner la composition du noyau de deutérium ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$.

Dans ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, Z est le nombre de protons et A le nombre de nucléons. Ici $Z = 1$ et $A = 2$, donc $A - Z = 1$ neutron.

Le noyau de deutérium contient **1 proton** et **1 neutron**.

COMPRENDRE
Le deutérium est un isotope de l'hydrogène : même nombre de protons que ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, mais un neutron en plus.

4.1 Que représente ${}^{0}_{1}\mathrm{e}$?

La particule a un nombre de charge $+1$ et un nombre de nucléons nul : même masse que l'électron, charge opposée.

${}^{0}_{1}\mathrm{e}$ est un **positon** (ou positron), antiparticule de l'électron.

4.2 Quel est le nom, effacé dans le texte, de la réaction nucléaire mise en jeu ?

Des noyaux légers (hydrogène) s'assemblent pour former un noyau plus lourd (hélium).

Il s'agit d'une **fusion** (thermonucléaire).

4.3 Énoncer les lois de conservation que vérifie cette réaction.

Lors d'une réaction nucléaire, il y a :

- conservation du nombre de charge : $4 \times 1 = 2 + 2 \times 1$;
- conservation du nombre de nucléons : $4 \times 1 = 4 + 2 \times 0$.

Conservation du **nombre de charge** Z et du **nombre de nucléons** A (lois de Soddy).

PIÈGE
Écrire que la masse se conserve. Elle diminue lors de la réaction (question 4.4) : c'est l'énergie totale qui est conservée.

4.4 Calculer la perte de masse lors de cette réaction nucléaire.

Données utiles $m_H = 1{,}6726 \times 10^{-27}$ kg ; $m_{He} = 6{,}6447 \times 10^{-27}$ kg ; $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg

Perte de masse = masse des réactifs − masse des produits :

$$\Delta m = 4\,m_H - (m_{He} + 2\,m_e)$$

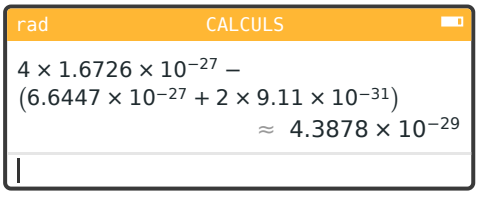
$$\Delta m = 4 \times 1{,}6726 \times 10^{-27} - (6{,}6447 \times 10^{-27} + 2 \times 9{,}11 \times 10^{-31})$$

$\Delta m = 4{,}39 \times 10^{-29}$ kg

PIÈGE
Arrondir les masses avant de soustraire : la différence porte sur les derniers chiffres. Attention aussi aux exposants, m_e est en 10^{-31} kg.

COMPRENDRE
Les masses sont connues à 10^{-31} kg près, la différence aussi : d'où trois chiffres. Cette masse perdue est libérée sous forme d'énergie, $\Delta m\,c^2$.

À LA CALCULATRICE



5 Qu'est-ce qu'une particule alpha ? Justifier le nom du processus « triple alpha ».

Une particule alpha (α) est un noyau d'hélium 4, ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Dans le bilan $3\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + \gamma$, trois noyaux d'hélium fusionnent pour donner un noyau de carbone.

Le processus met en jeu **trois particules** α : d'où le nom « triple alpha ».

6.1 Définir l'énergie de liaison.

L'énergie de liaison E_l d'un noyau est l'énergie qu'il faut lui fournir, lorsqu'il est au repos, pour le séparer en ses nucléons isolés et au repos.

Elle est liée au défaut de masse du noyau : $E_l = [Z\,m_p + (A-Z)\,m_n - m_{\text{noyau}}]\,c^2$.

COMPRENDRE
Les nucléons séparés ont une masse totale supérieure à celle du noyau : E_l est toujours positive.

6.2 Calculer l'énergie moyenne de liaison par nucléon d'un noyau de carbone 12.

Données utiles $E_l = 92{,}2$ MeV pour $^{12}_{6}\text{C}$

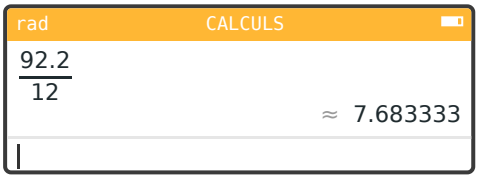
Le noyau de carbone 12 contient $A = 12$ nucléons :

$$\frac{E_l}{A} = \frac{92{,}2}{12} = 7{,}68 \text{ MeV/nucléon}$$

$\dfrac{E_l}{A} = 7{,}68$ MeV/nucléon

PIÈGE
Diviser par $Z = 6$ au lieu de $A = 12$: l'énergie de liaison se répartit sur tous les nucléons, protons et neutrons.

À LA CALCULATRICE



6.3 Parmi les noyaux $^{4}_{2}\text{He}$, $^{56}_{26}\text{Fe}$ et $^{238}_{92}\text{U}$, lequel est le plus stable ? Justifier.

Données utiles E_l/A : 7,1 (He) ; 8,8 (Fe) ; 7,6 (U) en MeV/nucléon

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande : il faut alors davantage d'énergie, par nucléon, pour le dissocier.

$8{,}8 > 7{,}6 > 7{,}1$

Le noyau de **fer 56** est le plus stable.

PIÈGE
Comparer les énergies de liaison E_l : celle de l'uranium est la plus grande, simplement parce qu'il a beaucoup de nucléons. Le bon critère est E_l/A.

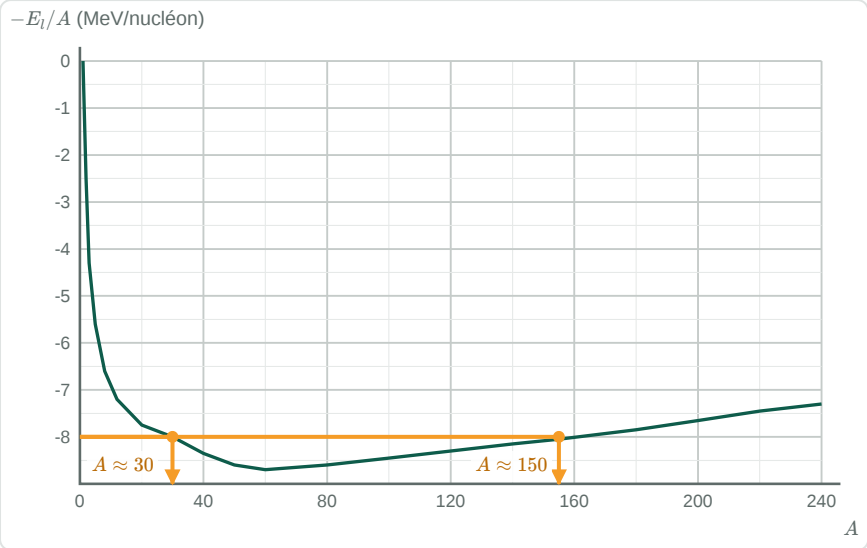
6.4.1 D'après la courbe d'Aston, comment évolue la stabilité d'un noyau quand son nombre de nucléons augmente ? Distinguer trois domaines.

La courbe représente $-E_l/A$: plus un noyau est bas sur la courbe, plus il est stable.

- Noyaux légers (A inférieur à 30 environ) : la courbe descend très vite, la stabilité augmente fortement avec A.
- Noyaux moyens (A entre 30 et 150 environ) : la courbe est presque plate autour de son minimum ; ce sont les noyaux les plus stables ($E_l/A > 8$ MeV/nucléon).
- Noyaux lourds (A supérieur à 150 environ) : la courbe remonte lentement, la stabilité diminue quand A augmente.

La stabilité augmente, passe par un maximum (vers le fer 56), puis diminue.

COMPRENDRE
L'axe vertical porte l'opposé de E_l/A : le noyau le plus stable est au creux de la courbe, comme une bille au fond d'une cuvette.



6.4.1 · Courbe d'Aston (allure de l'annexe) et limites des trois domaines

6.4.2 Quels sont les deux types de réactions nucléaires qui permettent d'accéder au maximum de stabilité ? Préciser dans quel domaine.

- Domaine des noyaux légers : la **fusion**. Deux noyaux légers s'unissent en un noyau plus lourd, donc plus stable.
- Domaine des noyaux lourds : la **fission**. Un noyau lourd se casse en deux noyaux plus légers, donc plus stables.

Fusion pour les noyaux légers, fission pour les noyaux lourds : dans les deux cas, les produits se rapprochent du creux de la courbe.

COMPRENDRE
Dans les deux cas E_l/A augmente : la masse diminue et la réaction libère de l'énergie.

6.4.3 Justifier pourquoi la synthèse des éléments chimiques au cœur des étoiles s'arrête à l'élément fer.

Dans les étoiles, les éléments se forment par fusions successives. Une fusion libère de l'énergie tant que le noyau formé est plus stable que les noyaux de départ.

Le fer 56 est au minimum de la courbe : aucun noyau n'est plus stable. Fusionner du fer donnerait un noyau moins stable et consommerait de l'énergie au lieu d'en libérer.

Le fer étant le noyau le plus stable, la fusion cesse d'être favorable au-delà : la synthèse s'arrête au fer.

7.1 Le premier scénario (capture d'un neutron donnant un noyau stable) permet-il de créer des éléments chimiques différents ? Justifier.

Capture d'un neutron : ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{A+1}_{Z}\mathrm{X}$.

Le nombre de nucléons augmente d'une unité, mais le numéro atomique Z ne change pas. Or un élément chimique est caractérisé par son numéro atomique.

Non : on obtient seulement des isotopes du même élément.

7.2 Écrire l'équation générale de la désintégration β^- du noyau ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ en son noyau fils Y, en fonction de A et Z.

La radioactivité β^- est l'émission d'un électron ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$. Les lois de conservation donnent pour le noyau fils : nombre de nucléons A, nombre de charge $Z+1$.

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

PIÈGE
Écrire $Z-1$ pour le noyau fils. L'électron emporte une charge -1 : il faut $Z = (Z+1) + (-1)$.

COMPRENDRE
Le noyau fils est souvent formé dans un état excité : il émet ensuite un rayonnement γ. Un antineutrino accompagne aussi l'électron ; il n'était pas exigé dans ce sujet.

7.3 Peut-on, a priori, obtenir tous les éléments chimiques de numéro atomique supérieur à Z ? Justifier.

Chaque désintégration β^- fait passer le numéro atomique de Z à $Z+1$. Le noyau fils peut à son tour capturer des neutrons, puis, s'il devient instable, se désintégrer en un noyau de numéro atomique $Z+2$, et ainsi de suite.

Oui, a priori : par captures de neutrons et désintégrations β^- successives, on atteint de proche en proche tous les numéros atomiques supérieurs à Z.

COMPRENDRE
« A priori » : la chaîne a une limite. Les noyaux très lourds sont instables et se désintègrent autrement (radioactivité α notamment), ce qui fait redescendre Z.