

Chapitre 5

Noyaux, masse & énergie

Énergie de liaison et stabilité

5.1 N°21 p. 115 : Isotopes du sodium

5.2 Comparaisons de noyaux

- La masse du noyau d'oxygène $^{16}_8\text{O}$ est 15,995 u. Calculez l'énergie de liaison par nucléon pour ce noyau.
- Faire de même pour le noyau d'hélium ^4_2He , de masse 4,0026 u.
- Lequel des deux noyaux est le plus stable ? Situer chaque noyau sur la courbe d'Aston.

Fission de l'uranium

5.3 N°27 p. 116 : Fission de l'uranium

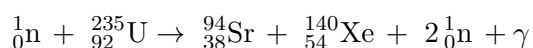
5.4 ER n°2 p. 113 : Réactions de fissions

Bilan d'énergie d'une réaction et énergie de liaison des noyaux

5.5 N°24 p. 115 : Énergie libérée et énergie de liaison

5.6 Calcul par les énergies de liaison

- Exprimez en fonction des énergies de liaison par nucléon, l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235 :



- La calculer, sachant que les énergies de liaison par nucléon valent 8,50 MeV/nucléon pour les noyaux Sr et Xe, et 7,6 MeV/nucléon pour le noyau U.

Fusion dans les étoiles

5.7 N°28 p. 116 : Les étoiles

5.8 ER n°1 p. 112 : Réactions stellaires

Fusion dans le Soleil

5.9 La perte de masse du Soleil La fusion thermonucléaire des protons dans le Soleil produit des noyaux d'hélium. La réaction libère 24 MeV.

- Calculer la perte de masse correspondante.
- On suppose que toute l'énergie produite est rayonnée par le Soleil. La puissance rayonnée, supposée constante, vaut $3,9 \times 10^{26}$ W. Calculer la perte de masse par seconde.

- La masse du Soleil est de l'ordre de $1,99 \times 10^{30}$ kg. Son âge est évalué à 4,6 milliards d'années.

Quelle masse a-t-il perdu depuis qu'il rayonne ? Quel pourcentage de sa masse actuelle cela représente-t-il ?

5.10 Cycle thermonucléaire de Bethe

Voici un texte du scientifique américain GAMOW, découvreur de la radioactivité β^- , et célèbre pour ses ouvrages de vulgarisation :

« On a trouvé que le processus thermonucléaire responsable de la production de l'énergie solaire n'était pas limité à une seule transformation nucléaire, mais qu'il consistait en une suite de transformations formant ce que l'on appelle une chaîne de réactions.

Partons par exemple du carbone ordinaire (^{12}C) ; nous voyons qu'une collision avec un proton conduit à la formation de l'isotope léger de l'azote (^{13}N) et à la libération d'énergie nucléaire sous forme de rayonnement γ .

Le noyau ^{13}N est instable ; il se transforme en un noyau stable de l'isotope lourd du carbone (^{13}C) que l'on sait être présent en petites quantités dans le carbone ordinaire.

Frappé par un autre proton, cet isotope du carbone se transforme en azote ordinaire (^{14}N), accompagné d'un intense rayonnement γ .

Puis le noyau ^{14}N entrant en collision avec un proton (le troisième) donne naissance à un isotope instable de l'oxygène (^{15}O), qui très rapidement se transforme en ^{15}N , stable, par émission d'un positon.

Finalement, ^{15}N , absorbant un quatrième proton, se scinde en deux parties inégales dont l'une est le noyau ^{12}C dont nous sommes partis, et l'autre un noyau d'hélium, ou particule α . Ainsi, dans cette réaction cyclique, les noyaux de carbone et d'azote sont infiniment régénérés... »

Naissance, vie et mort du Soleil, GAMOW, 1960.

- Écrire les six équations des réactions nucléaires constituant le cycle de BETHE.
- Préciser la nature de chacune des réactions nucléaires.
- Établir l'équation globale du cycle de BETHE. De quel type de réaction nucléaire s'agit-il ?

Bilans de masse et d'énergie

5.11 N°33 p. 117 : La cobalthérapie

5.12 N°34 p. 117 : Les éléments dans l'Univers

Corrigé 5

Noyaux, masse & énergie

5.1 N°21 p. 115 : Isotopes du sodium

5.2 Comparaison de noyaux

a. $A = 16$ nucléons, et $m = 15,995$ u. Le défaut de masse Δm vaut :

$$\Delta m = 8m_p + 8m_n - m = 0,133 \text{ u}$$

L'énergie de liaison E_ℓ s'écrit alors :

$$E_\ell = \Delta mc^2 = 1,977 \times 10^{-11} \text{ J}$$

On obtient :

$$E_\ell = 123,4 \text{ MeV et } E_\ell/A = 7,711 \text{ MeV/nucléon}$$

b. $A = 4$ nucléons, et $m = 4,0026$ u,

$$\Delta m = 2m_p + 2m_n - m = 0,0293 \text{ u}$$

$$\Rightarrow E_\ell = \Delta mc^2 = 4,367 \times 10^{-12} \text{ J}$$

On obtient :

$$E_\ell = 27,26 \text{ MeV et } E_\ell/A = 6,815 \text{ MeV/nucléon}$$

c. Le noyau d'oxygène est plus stable que celui d'hélium, car son énergie de liaison par nucléon est plus élevée. Les deux noyaux sont sur la première partie ($A < 20$) de la courbe d'Aston, donc tout deux propices à des réactions de fusion.

5.3 N°27 p. 116 : Fission de l'uranium

5.4 ER n°2 p. 113 : Réactions de fissions

5.5 N°24 p. 115 : Énergie libérée

5.6 Calcul par les énergies de liaison

$$a. Q = 235 \left. \frac{E_\ell}{A} \right|_{\text{U}} - 94 \left. \frac{E_\ell}{A} \right|_{\text{Sr}} - 140 \left. \frac{E_\ell}{A} \right|_{\text{Xe}}$$

$$b. Q = 235 \times 7,6 - 140 \times 8,5 - 94 \times 8,5 = -203 \text{ MeV.}$$

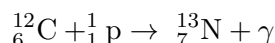
5.7 N°28 p. 116 : Les étoiles

5.8 ER n°1 p. 112 : Réactions stellaires

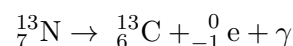
5.9 La perte de masse du Soleil

5.10 Cycle thermonucléaire de Bethe

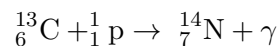
La première équation correspond à une absorption d'un proton au cours d'un choc :



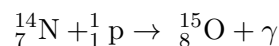
La deuxième équation est une émission β^+ spontanée :



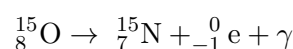
La troisième est l'absorption d'un proton :



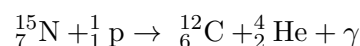
La quatrième est encore l'absorption d'un proton :



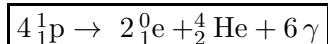
La cinquième est une émission β^+ spontanée :



La dernière est une émission α stimulée par l'absorption d'un proton :



Bilan, en additionnant les six équations nucléaires :



Il s'agit d'une fusion de quatre noyaux d'hydrogène ${}^1_1\text{H}$ pour former un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$.

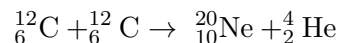
5.11 N°33 p. 117 : La cobaltothérapie

5.12 N°34 p. 117 : Les éléments dans l'Univers

1.a. Une réaction de fusion est une réaction au cours de laquelle deux noyaux s'assemblent pour former un noyau plus lourd.

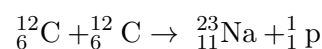
Pour écrire les équations, on utilise les lois de Soddy : conservation du nombre de masse A , conservation du nombre de charges Z .

• Première équation, formation d'un néon :



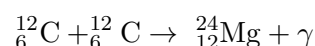
La seconde particule formée est une particule alpha, ou noyau d'hélium.

• Deuxième équation, formation d'un sodium :



La seconde particule formée est désormais un proton.

• Troisième équation, un magnésium :



L'énoncé indique que, dans chaque cas, une seule particule est formée; ici, ce ne peut être qu'un photon gamma γ .

- 1.b.** Pour calculer les énergies libérées, on effectue dans chaque cas une différence des énergie de masse des noyaux formés, moins celle des noyaux réagissant; par commodité, on a factorisé les calculs par 10^4 , en MeV :

$$\Delta E = E_{\text{final}} - E_{\text{initial}}$$

- Première équation, formation d'un néon et d'un hélium :

$$\Delta E_1 = (1,8618 + 0,37274 - 2 \times 1,1175) \times 10^4$$

$$\Rightarrow \Delta E_1 = -4,6 \text{ MeV}$$

- Deuxième équation, formation d'un sodium et d'un proton :

$$\Delta E_2 = (2,1409 + 0,09383 - 2 \times 1,1175) \times 10^4$$

$$\Rightarrow \Delta E_2 = -2,7 \text{ MeV}$$

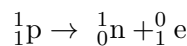
- Troisième équation, formation d'un magnésium et d'un photon :

$$\Delta E_3 = (2,2336 + 0 - 2 \times 1,1175) \times 10^4$$

$$\Rightarrow \Delta E_3 = -14 \text{ MeV}$$

On remarquera que certaines de ces réactions sont plus intéressantes du point de vue énergétique que d'autres.

- 2.a.** La transformation qui se produit au sein du noyau est la transformation d'un proton en un neutron, par émission d'un positron :



Cette transformation correspond à la radioactivité β^+ .

- 2.b.** $m = 1 \times 10^{-3} \text{ g}$ correspond à un nombre de noyaux N tel que :

$$n = \frac{N}{N_A} \quad \text{et} \quad n = \frac{m}{M} \quad \Rightarrow \quad N = \frac{m N_A}{M}$$

avec $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ pour le nombre d'Avogadro, et $M = 56 \text{ g.mol}^{-1}$ pour la masse molaire.

Le cobalt 56 a une constante radioactive λ telle que :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

L'activité de l'échantillon vaut alors :

$$\mathcal{A} = \lambda N = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot \frac{m N_A}{M}$$

Application numérique :

$$\mathcal{A} = \frac{0,6931 \times 1 \times 10^{-3} \times 6,022 \times 10^{23}}{56}$$

$$\Rightarrow \mathcal{A} = 7,5 \times 10^{18} \text{ Bq}$$

Posons que cette valeur est $\mathcal{A}_0$; pour $t = 1 \text{ an}$, soit 365 jours, on applique la loi de décroissance radioactive :

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t} = \mathcal{A}_0 e^{-\frac{\ln 2 t}{t_{1/2}}}$$

Application numérique :

$$\mathcal{A} = 7,5 \times 10^{18} \times e^{-\frac{0,6931 \times 365}{77,3}}$$

$$\Rightarrow \mathcal{A} = 2,8 \times 10^{17} \text{ Bq}$$

L'activité est encore très forte même au bout d'un an.

- 2.c.** L'énergie de liaison E_ℓ est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau immobile, pour le dissocier en nucléons libres et immobiles. En pratique ici, c'est la différence entre les énergie de masse des particules séparées (26 protons et 30 neutrons pour le noyau de Fer), moins celle du noyau entier :

$$E_\ell = 26 \times 938,3 + 30 \times 1,00866 \times 931,5 - 56 \times 938,3 = 492,8 \text{ MeV}$$

où l'on a fait le calcul en MeV, en utilisant l'énergie de masse de l'unité de masse atomique et la masse en unité atomique pour le neutron.

$$\Rightarrow E_\ell = 492,8 \text{ MeV}$$

Par nucléons, pour $A = 56$ nucléons :

$$\frac{E_\ell}{A} = \frac{492,8}{56} = 8,8 \text{ MeV/nucléon}$$

Cette ordonnée correspond à un minimum sur la courbe d'Aston :

$$-\frac{E_\ell}{A} = -8,8 \text{ MeV/nucléon}$$

Le noyau de Fer est parmi les noyaux les plus stables.