Transformations nucléaires

I Introduction

Activité p286 du livre

II Les transformations nucléaires

II.a Définition

La désintégration radioactive d'un noyau est une transformation nucléaire particulière (qui se fait naturellement). De manière générale, une transformation nucléaire est une transformation modifiant la nature des noyaux.

Remarque : les réactions chimiques n'en font pas partie.

II.b Unités de masse et d'énergie

Les échelles impliquées dans les phénomènes de transformation nucléaire étant faibles, il faut changer d'unités de masse et d'énergie.

II.b.1 Unités d'énergie :l'électronvolt eV

Le Joule est inadapté à l'échelle atomique : il donnerait des valeurs très faibles, aussi utilise-t-on d'autres unités :

- **L'électronvolt (eV) est équivalent à $1,6022.10^{-19}$ J**
- Le mégaélectronvolt (MeV) est équivalent à 10^6eV=$1,6022.10^{-13}$ J

II.b.2 Unités de masse atomique u

L'unité de masse atomique (u) est telle que la masse d'un atome de carbone 12 est égale à 12u

$$u = \frac{m_{atome\ C}}{12} = \frac{\frac{12g/mol}{\mathbb{N}_A\ mol^{-1}}}{12} = \frac{1}{\mathbb{N}_A} = 1,7.10^{-24}g$$

$\mathbb{N}_A = 6,02.10^{23}mol^{-1}$

$$u = 1,7.10^{-27}Kg$$

II.c Equivalence masse-énergie

II.c.1 Relation d'Einstein

A partir de considérations sur les changements de référentiel, A. Einstein aboutit en 1905, pour tout corps au repos dans le référentiel d'étude, à :

$$\mathbf{E = m.c^2}$$

Où E est l'énergie totale en J du corps, m sa masse en Kg et c, la vitesse de la lumière en m/s. E s'appelle énergie de masse. Cette relation traduit l'équivalence entre masse et énergie.

II.c.2 Application 1 : variation de masse d'un système

Lorsqu'un système échange une énergie ΔE avec le milieu extérieur, alors, sa masse au repos varie d'une valeur Δm telle que :

$$\Delta \mathbf{E} = \Delta \mathbf{m}.\mathbf{c}^2$$

<u>Exemple :</u> Calculer la variation de masse impliquée dans l'explosion de la bombe A de Nagasaki, sachant que $\Delta E = 8{,}4.10^{13}$J.

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \; soit \; \Delta m = \frac{8{,}4.10^{13}\mathrm{J}}{(3.10^8)^2} \; d'où \; \Delta m = 9{,}3.10^{-4}\mathrm{Kg} = 933mg \approx 1\,g$$

II.c.3 Application 2 : relation entre unités de masse u et d'énergie

Calculer la variation de l'énergie (en MeV) correspondant à une variation de masse d'une unité de masse atomique u.

$$\Delta E = \Delta m.c^2 = u.c^2 = \frac{\frac{12g/mol}{\mathbb{N}_A\,mol^{-1}}}{12}c^2 = \frac{1}{\mathbb{N}_A}c^2 = 1{,}5.10^{-7}J$$

$$\Delta E = \frac{c^2}{e \times \mathbb{N}_A} = 9{,}4.10^{11}eV = 9{,}4.10^5 MeV$$

$e = 1{,}6022.10^{-19}\mathrm{C}$

<u>Ex 12 p298</u>

II.c.4 Application 3 : énergie de liaison du noyau

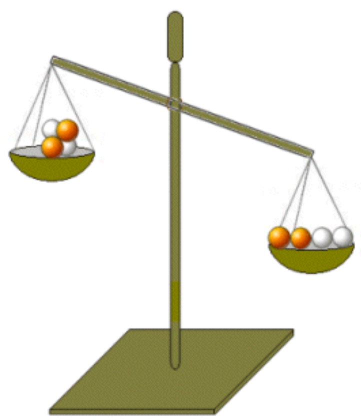
1) Au moyen du doc distribué (doc 4 p 288), calculer la masse des particules constituant le noyau d'hélium.

   Masse des particules de ${}^4_2He \; = (2 \times 1{,}6726231 + 2 \times 1{,}674929)10^{27} = 6{,}6951042.10^{27}\;Kg$

2) Comparer à la masse du noyau elle-même

   Masse du noyau de ${}^4_2He = 6{,}64472.10^{27}\mathrm{Kg}$

3) Interpréter

On constate que les particules (nucléons) sont moins massiques lorsqu'elles sont liées pour former le noyau que lorsqu'elles sont sépaées Il faut fournir de l'énergie pour séparer les nucléons donc la masse du système est plus grande quand les nucléons sont séparés.	

II.d Défaut de masse

- Pour tout noyau, la masse est inférieure à la somme des masses des nucléons.
- Le défaut de masse Δmest la différence entre la masse des nucléons séparés au repos et la masse du noyau.

$$\mathbf{\Delta m = \left(Z.m_p + (A - Z).m_n\right) - m_{{}^A_Z X}}$$

II.e Energie de liaison

- Pour dissocier un noyau, il faut lui fournir une énergie : l'énergie de liaison.
- L'énergie de liaison est l'équivalent énergétique du défaut de masse

$$\boldsymbol{E_\ell = \Delta m.c^2}$$

Exemple : Calculer le défaut de masse et l'énergie de liaison de l'atome d'Hélium. En déduire l'énergie de liaison $\mathbf{E_\ell}$ pour le noyau d'hélium

$$\Delta m = 6{,}6951042.10^{-27} - 6{,}64472.10^{-27}$$
$$\Delta m = 0{,}0503842\ .10^{-27}\mathrm{Kg}$$
$$\boldsymbol{\Delta m = 0{,}02963\ u}$$

$$\boldsymbol{E_\ell = \Delta m.c^2}$$
$$E_\ell = 0{,}0503842.10^{-27}\ \mathrm{Kg} \times (3.10^8)^2$$
$$\boldsymbol{E_\ell = 4{,}5345.10^{-12} J}$$
$$E_\ell = \frac{4{,}5345.10^{-12} J}{10^6 \times 1{,}6.10^{-19}} = \mathbf{28{,}34\ MeV}$$

II.f Energie de liaison par nucléon

Il s'agit de l'énergie de liaison rapportée à un nucléon :

$$\mathbf{E_{par\ nucl\acute{e}on} = \frac{E_\ell}{A}}$$

Exemple : Calculer l'énergie par nucléon pour l'hélium $\mathbf{E_{par\ nucl\acute{e}on}}$

$$\mathrm{E_{par\ nucl\acute{e}on}} = \frac{28{,}34\ \mathrm{MeV}}{4}\ soit\ \boldsymbol{E_{par\ nucl\acute{e}on} = 7{,}4\ MeV}$$

Ex : 10,11 p 298

III Réactions nucléaires

III.a Lois de conservation

Les réactions de fusion et de fission sont décrites par des équations qui doivent vérifier la loi de conservation des charges et la loi de conservation du nombre de nucléons.

III.b La fission nucléaire

fission.html

La fission nucléaire est la division d'un noyau atomique en deux noyaux plus légers.(par bombardement de neutrons).

Exemple : Une réaction de fission possible de ${}^{235}_{92}U$:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2\,{}^{1}_{0}n $$

Remarque :

- Cette réaction est une réaction en chaîne, puisque la réaction avec un neutron permet de créer deux neutrons qui, à leur tour, vont provoquer deux réactions, etc… Si cette réaction n'est pas contrôlée, l'énergie est libérée très rapidement, il s'agit d'une bombe atomique.

- Dans les réacteurs nucléaires, la réaction est contrôlée, en absorbant les neutrons produits.

III.c La fusion nucléaire

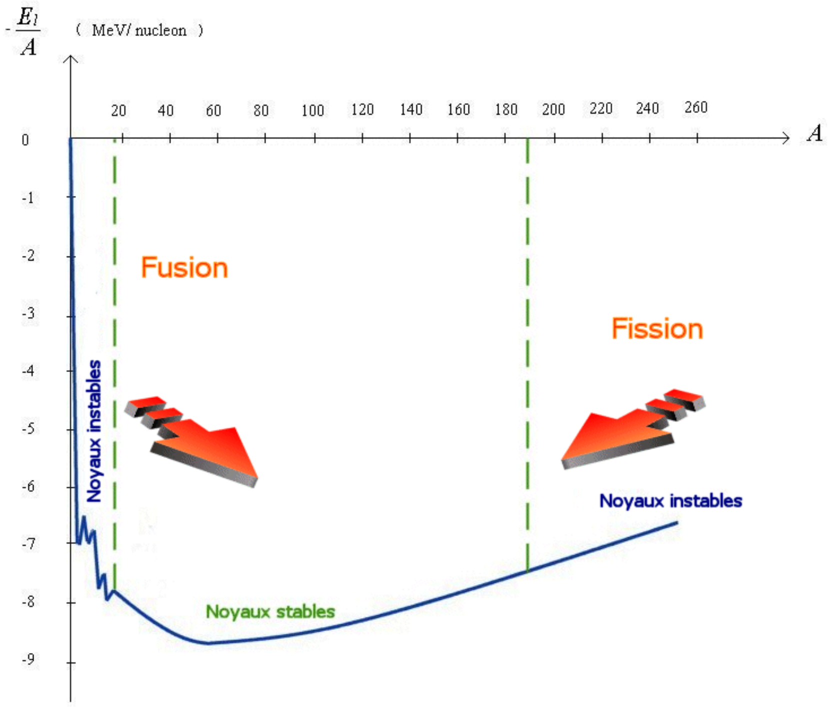
fusion.html

La fusion nucléaire est la réunion de deux noyaux en un seul.

La fusion est la réaction qui produit l'énergie du soleil. On ne sait toujours pas l'amorcer autrement que par une explosion nucléaire.

III.d La courbe d'Aston

La courbe d'Aston permet de comparer la stabilité des noyaux. Elle représente l'énergie de liaison par nucléon $\frac{\mathbf{E}_{\ell}}{\mathbf{A}}$ (en MeV) en fonction de A. Plus ce rapport est grand, plus le noyau est dit stable.



<u>Voir Doc 5 p 289</u>

Le noyau le plus stable, qui présente la plus grande énergie de liaison par nucléon, est le ^{56}Fe. De part et d'autre, la stabilité décroît en s'éloignant de ce noyau.

IV Noyaux fusibles, noyaux fissibles

Un noyau gagnera en stabilité par une transformation si celle-ci le rapproche du fer. Dans ce cas, l'énergie de liaison par nucléon augmente, donc la masse diminue, et il y a libération d'énergie.

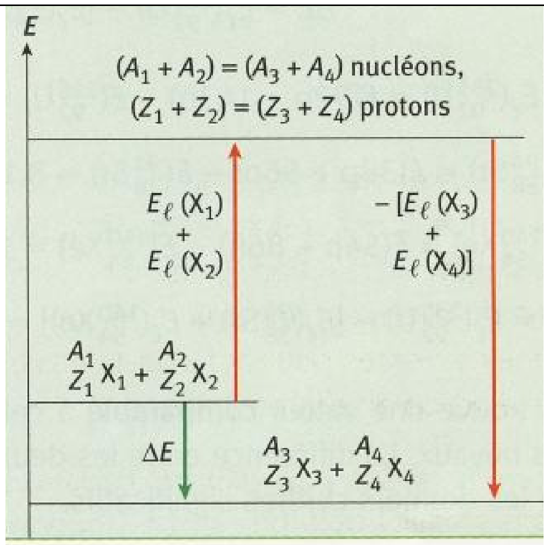
Deux processus sont possibles :

- La fission, qui concerne donc des noyaux lourds, et qui rapproche le noyau du fer en faisant décroître A.
- La fusion, qui concerne donc des noyaux légers, et qui rapproche le noyau du fer en faisant croître A.

<u>Ex 13,14 p298</u>

V Bilans d'énergie et de masse

V.a Définition

On considère la réaction générale : $${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}X_3 + {}_{Z_4}^{A_4}X_4$$ Ce diagramme correspond à un eréaction exothermique, c'est-à-dire $\Delta E < 0$	

V.b Première approche pour calculer ΔE

Effectuer le bilan d'énergie consiste à calculer l'énergie de réaction ΔE.

$$\mathbf{\Delta E = [E_\ell(X_1) + E_\ell(X_2)] - [E_\ell(X_3) + E_\ell(X_4)]}$$

$$\mathbf{\Delta E = E_\ell(r\acute{e}actifs) - E_\ell(produits)}$$

Comme il y a équivalence entre masse et énergie, on peut calculer cette énergie en effectuant un bilan de masse. En distinguant énergie de masse des nucléons et énergie de liaison, et en utilisant la conservation du nombre de nucléons et de la charge, on obtient :

Voir 15 P 299

$$\mathbf{\Delta E = [(m_{X_3} + m_{X_4}) - (m_{X_1} + m_{X_2})]c^2}$$

$$\mathbf{\Delta E = (m_{produits} - m_{r\acute{e}actifs})c^2}$$

V.c Bilan énergétique s'appuyant sur la valeur de ΔE

- Si ΔE est positif, cela signifie qu'il faut fournir de l'énergie pour que la réaction ait lieu. (transformation. endothermique).
- Si ΔE est négatif, cela signifie que de l'énergie est dégagée lorsque la réaction se produit. (transformation. exothermique).

V.d Exemples

V.d.1 Fission de l'uranium

Calculer l'énergie libérée par un noyau d'uranium 235

$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{38}^{94}Sr + {}_{54}^{140}Xe + 2{}_{0}^{1}n $$

Données

$m_{{}_{92}^{235}U} = 234{,}9935\ u$ $m_{{}_{38}^{94}Sr} = 93{,}8945\ u$ $u = 1{,}66.10^{-27}Kg = 931{,}494\ MeV/c^2$	$m_{{}_{54}^{140}Xe} = 139{,}8920\ u$ $m_{{}_{0}^{1}n} = 1{,}0087\ u$

$$ \Delta E = \left\{\left[2m_{{}_{0}^{1}n} + m_{{}_{54}^{140}Xe} + m_{{}_{38}^{94}Sr}\right] - \left[m_{{}_{92}^{235}U} + m_{{}_{0}^{1}n}\right]\right\} c^2 $$

$$ \Delta E = \{[2 \times 1{,}0087 + 139{,}8920 + 93{,}8945] - [234{,}9935 + 1{,}0087]\}u.c^2 $$
$$ \Delta E = -0{,}1983\ u.c^2\ or\ \mathbf{u.c^2 = 931{,}494\ MeV} $$
$$ D'où\ \Delta E = -0{,}1983 \times 931{,}494\ \mathrm{MeV} $$

$$ \mathbf{\Delta E = 184{,}7\ MeV} $$

- 16 g (1 mole) de méthane libère 8.10^5 J
- 1 noyau d'uranium libère 184,7 MeV donc 1 mol (235g) libère 184,7 MeV $\times \mathbb{N}_A = 1{,}11.10^{26}$MeV soit $1{,}779.10^{13}$J

	Energie libérer par une mole	Energie libérée pour 1 g de matière
Méthane	$8.10^5 J$	$\frac{8.10^5 J}{16} = 50000J$
Uranium	$1{,}779.10^{13}$J	$\frac{1{,}779.10^{13}\mathrm{J}}{235} = 7{,}5.10^{10}J$

1g d'uranium 235 libère **1,5 million fois** plus d'énergie que 1g de méthane

V.d.2 Fusion de l'hélium

Calculer l'énergie libérée par 2 noyaux d'hélium 3

$$ {}_{2}^{3}He + {}_{2}^{3}He \rightarrow {}_{2}^{4}He + 2{}_{1}^{1}H $$

$m_{{}_{2}^{3}He} = 3{,}0149\ u$ $m_{{}_{2}^{4}He} = 4{,}0015\ u$	$m_{{}_{1}^{1}H} = 1{,}0073\ u$ $u = 1{,}66.10^{-27}Kg = 931{,}494\ MeV/c^2$

$$ \Delta E = \left[m_{{}_{2}^{4}He} + m_{{}_{1}^{1}H} - 2m_{{}_{2}^{3}He}\right].u.c^2 $$
$$ \Delta E = [4{,}0015 + 1{,}0073 - 2 \times 3{,}0149\ ].u.c^2 $$
$$ \Delta E = -1{,}021.u.c^2\ or\ u.c^2 = 931{,}494\ MeV $$

$$ \mathbf{\Delta E = -951{,}1\ MeV} $$

- 2 noyaux d'hélium libère 951,1 MeV donc une mole (3g) de He libère $\frac{951,1\times\mathbb{N}_A}{2} = 2,86.10^{26} MeV$ soit $4,58.10^{13} j$

	Energie libérer par une mole	Energie libérée pour 1 g de matière
Méthane	$8.10^5 J$	$\frac{8.10^5 J}{16} = 50000J$
Hélium	$4,58.10^{13} j$	$\frac{4,58.10^{13} j}{3} = 1,52.10^{13} J$
Uranium	$1,779.10^{13}$J	$\frac{1,779.10^{13}\text{J}}{235} = 7,5.10^{10} J$

- 1g d'hélium 3 libère **305 millions fois** plus d'énergie que 1g de méthane
- 1g d'hélium 3 libère **203 fois plus** d'énergie que 1g d'uranium

<u>Ex : 16,17,18 p299</u>