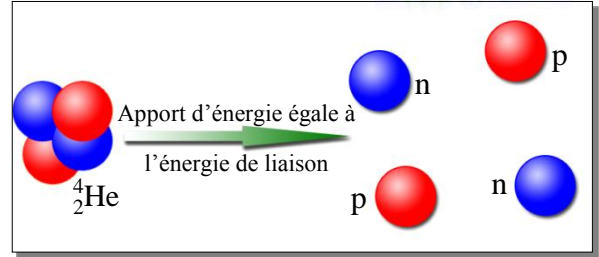


Chapitre 5 : Noyaux, masse, énergie

1. Équivalence masse-énergie

1.1. Énergie de liaison

L'énergie de liaison E_l est l'énergie qu'il faut fournir au noyau d'un atome, au repos, pour le dissocier en ses nucléons constitutifs (tous les protons et neutrons sont séparés) au repos. Cette grandeur est toujours positive, car l'interaction forte entre nucléons est attractive.



1.2. Défaut de masse

1.2.1. Mise en évidence

Considérons le noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He}$ (particule α). Ce noyau est constitué de deux protons et de deux neutrons. La masse du noyau d'hélium, mesurée avec une grande précision est : $m_\alpha = 6,64464 \cdot 10^{-27}$ kg.

Calculons la masse des particules qui le constituent prises isolément : $m_{\text{particules}} = 2 \times m_p + 2 \times m_n = 6,69510 \cdot 10^{-27}$ kg.

On constate que la masse des particules, prises isolément, qui constituent le noyau d'hélium est supérieure à la masse du noyau d'hélium lui-même : $m_{\text{particules}} - m_\alpha = 6,69510 \cdot 10^{-27} - 6,64464 \cdot 10^{-27} = 5,046 \cdot 10^{-29}$ kg !

particule	masse (en kg)	masse (en u)
proton	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	1,00728
neutron	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	1,00866
électron	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	0,000549

1.2.2. Généralisation

La masse des particules isolées qui constituent un noyau est toujours supérieure à la masse du noyau.

Le **défaut de masse** d'un noyau de symbole ${}^A_Z\text{X}$ est égal à la différence entre la masse des nucléons, **isolés et au repos**, qui constituent le noyau et la masse du noyau **au repos** : $\Delta m = m_{\text{nucléons isolés}} - m_{\text{noyau}}$

$$\Delta m = Z \times m_p + (A - Z) \times m_n - m_{\text{noyau}}$$

Le défaut de masse Δm est toujours positif : $\Delta m > 0$

1.2.3. L'unité de masse atomique

Pour « manipuler » les masses à l'échelle nucléaire, les physiciens utilisent fréquemment l'unité de masse atomique. Cette dernière représente un douzième de la masse d'un atome de carbone 12 ($M({}^{12}\text{C}) = 12,000000 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) :

$$1 \text{ u} = \frac{12,000000 \cdot 10^{-3}}{12 \times 6,022142 \cdot 10^{23}} = 1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Rem. : La masse d'un atome de carbone 12 est, par définition de l'unité de masse atomique, exactement : 12 u.

La masse du noyau de carbone 12 est : $m({}^{12}_6\text{C}) = m_{\text{atome}} - m_{\text{électrons}} = 12 - 6 \times 0,000549 = 11,996706 \text{ u}$. Le défaut de

masse est donc alors : $\Delta m({}^{12}\text{C}) = 1,00728 \times 6 + 1,00866 \times 6 - 11,996706 = 0,09893 \text{ u}$

En négligeant la masse des électrons, la masse d'un noyau de carbone 12 serait : 12 u. Le défaut de masse serait alors :

$$\Delta m({}^{12}\text{C}) = 1,00728 \times 6 + 1,00866 \times 6 - 12,00000 = 0,09564 \text{ u}$$

Une question se pose : où est passée la masse manquante ?

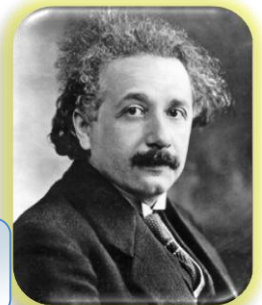
1.3. Équivalence masse-énergie ; relation d'Einstein

Albert Einstein a postulé en 1905 qu'il existe une équivalence entre la masse et l'énergie. Un système, au repos, de masse m possède une énergie de masse E telle que :

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

E : énergie de masse en joule (J)
 m : masse du système en kilogramme (kg)
 c : célérité de la lumière dans le vide ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Albert Einstein
 (1879-1955)
 Prix Nobel en 1921



Au sein d'un noyau l'énergie de liaison E_l correspond au défaut de masse Δm : $E_l = \Delta m \cdot c^2$.

Exercice d'application : calculer l'énergie de liaison du noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ et du noyau de carbone ${}^{12}_6\text{C}$.

Solution : $E_l({}^4_2\text{He}) = \Delta m({}^4_2\text{He}) \cdot c^2 = 5,046 \cdot 10^{-29} \times (2,99792 \cdot 10^8)^2 = 4,536 \cdot 10^{-12} \text{ J}$.

$E_l({}^{12}_6\text{C}) = \Delta m({}^{12}_6\text{C}) \cdot c^2 = 0,09893 \times 1,660539 \cdot 10^{-27} \times (2,99792 \cdot 10^8)^2 = 1,476 \cdot 10^{-11} \text{ J}$.

¹ Biographie d'Albert Einstein sur Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein

1.4. Unité d'énergie

Le joule est une unité d'énergie trop grande à l'échelle de la physique nucléaire. On utilise l'électronvolt, qui représente l'énergie acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt :

1 eV = 1,602177.10⁻¹⁹ J.

On utilise fréquemment les sous-unités :

- le kiloelectronvolt (1 keV = 1,602177.10⁻¹⁶ J) ;
- le mégaélectronvolt (1 MeV = 1,602177.10⁻¹³ J) ;
- le gigaélectronvolt (1 GeV = 1,602177.10⁻¹⁰ J).

Rem. : D'après la relation d'Albert Einstein, l'unité de masse atomique correspond à :
 $1,660539.10^{-27} \times (2,99792.10^8)^2 = 1,492413.10^{-10} \text{ J} = 931,49 \text{ MeV}.$

particule	masse (en u)	énergie (en MeV)
proton	1,00728	938,27
neutron	1,00866	939,57
électron	0,000549	0,511

Justification : $\Delta E = U.I.\Delta t$ et $I = q/\Delta t$ (1°S)
 donc $\Delta E = q.U$ or pour $q = e$, $\Delta E = e.U$
 $1 \text{ eV} = \Delta E = 1,602177.10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V}$
 donc $1 \text{ eV} = 1,602177.10^{-19} \text{ J}$

1.5. Énergie de liaison par nucléons ; Courbe d'Aston

Plus un noyau contient de nucléons, plus son énergie de liaison est grande. Pourtant cela ne signifie pas que la stabilité du noyau est plus importante !

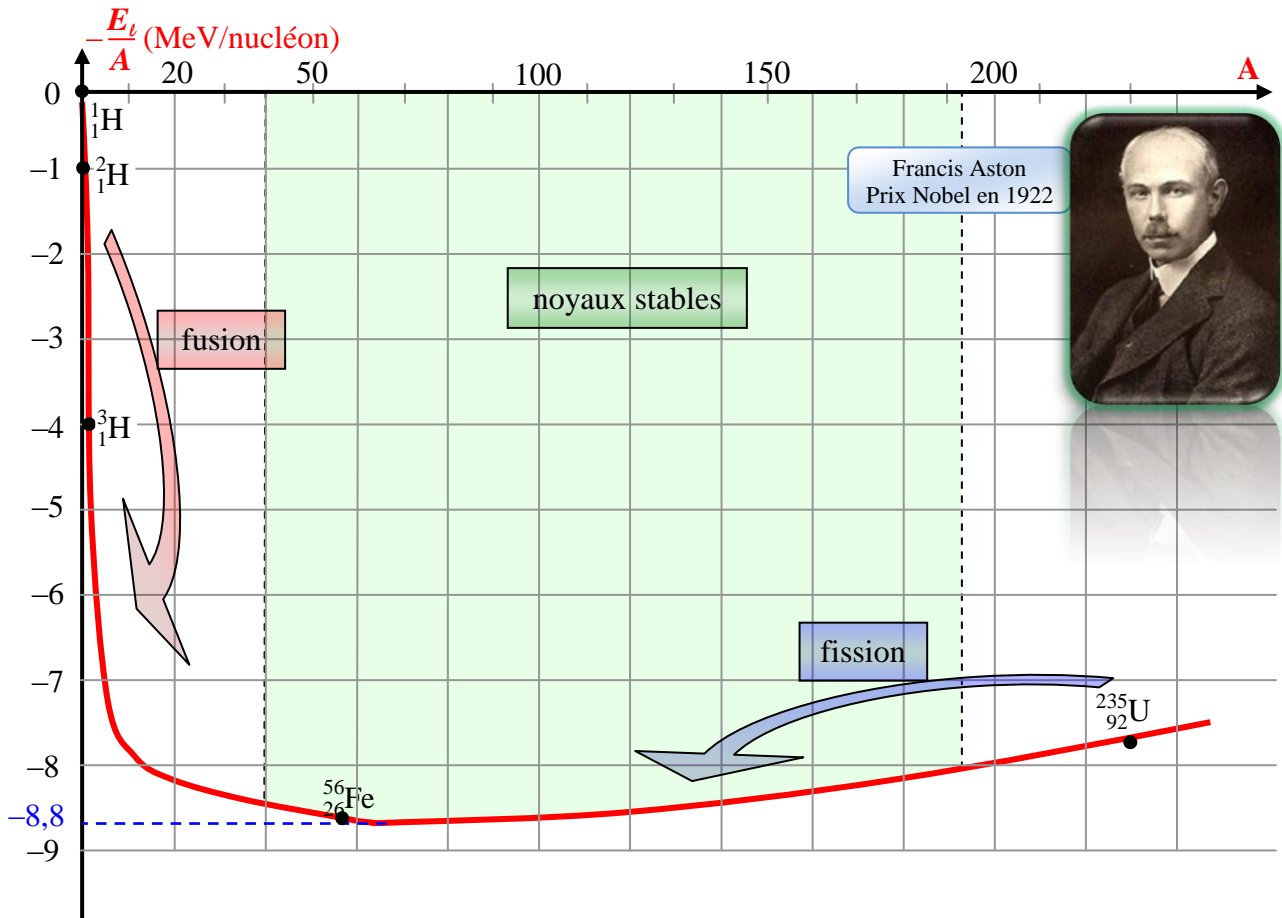
Par exemple, le fer ⁵⁶Fe ($E_l = 492 \text{ MeV}$) est plus stable que l'uranium 238 ($E_l = 1802 \text{ MeV}$).

Plus l'énergie de liaison par nucléons $\frac{E_l}{A}$ (E_l : énergie de liaison et A : nombre de nucléons) est élevée plus le noyau est stable.

Cas du fer ⁵⁶Fe : $\frac{E_l}{A} = \frac{492}{56} = 8,79 \text{ MeV/nucléon}$; Cas de l'uranium 238 : $\frac{E_l}{A} = \frac{1802}{238} = 7,57 \text{ MeV/nucléon}$

Rem. : L'énergie de liaison par nucléons est de l'ordre de 8 MeV/nucléon pour la grande majorité des noyaux.

La courbe d'Aston représente l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon ($-\frac{E_l}{A}$) en fonction du nombre A de nucléons.



Les noyaux les plus stables sont situés dans la partie basse de la courbe d'Aston. Il est possible, pour les noyaux situés trop loin du creux de la courbe, de gagner en stabilité. Pour cela deux voies sont possibles : la fission d'un noyau lourd, ou bien la fusion de deux noyaux légers. Ces deux réactions, non spontanées, doivent être amorcées.

2. La fusion et la fission

2.1. La fission

livret du CEA : fusion et fission : <http://www.cea.fr/content/download/4685/27879/file/livret-fusion-fission.pdf>

La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd est scindé en deux noyaux plus légers. Les noyaux formés sont plus stables que le noyau fissile : la réaction de fission libère de l'énergie.

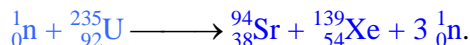
2.2. La fusion

La fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers fusionnent pour former un noyau plus lourd. Le noyau formé est plus stable que les noyaux qui fusionnent : la réaction de fusion libère de l'énergie.

3. Bilan de masse et d'énergie d'une réaction nucléaire

3.1. La fission

Considérons la réaction de fission de l'uranium 235, qui peut conduire à une multitude de produits de fission et envisageons, parmi tous les cas possibles, le suivant :



On vérifie la conservation de la charge et la conservation du nombre de nucléons (loi de Soddy !).

Effectuons un bilan énergétique :

La variation de masse au cours de la réaction est $\delta m = m_{\text{ap}} - m_{\text{av}}$

L'énergie échangée est : $\Delta E = \delta m \cdot c^2 = (m_{\text{ap}} - m_{\text{av}}) \cdot c^2$ donc :

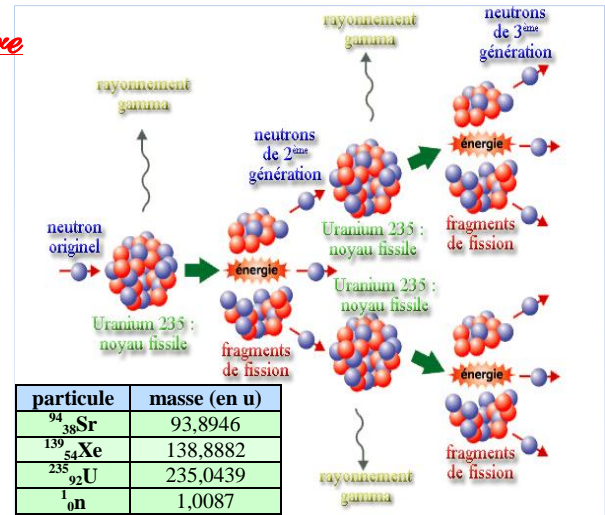
$$\Delta E = (m({}_{38}^{94}\text{Sr}) + m({}_{54}^{139}\text{Xe}) + 3 \times m({}_0^1\text{n}) - [m({}_{92}^{235}\text{U}) + m({}_0^1\text{n})]) \cdot c^2$$

A.N. : $\Delta E = (93,8946 + 138,8882 + 2 \times 1,0087 - 235,0439) \times 931,49$

$\Delta E = -227 \text{ MeV} < 0$: énergie libérée par le système : 227 MeV.

Rem. 1 : $\delta m < 0$: il y a une perte de masse : $D_m = -\delta m = m_{\text{av}} - m_{\text{ap}}$

Rem. 2 : Les neutrons produits peuvent également casser des noyaux d'uranium ; il s'agit d'une réaction en chaîne⁴. Cette dernière peut être contrôlée grâce à des barres de graphite (qui absorbent les neutrons), comme dans les centrales nucléaires (type réacteur REP⁵ ou EPR⁶) ou bien non contrôlée (bombe A⁷).



Rem. : l'énergie échangée est **négative**, il s'agit donc d'une énergie libérée par le système !

3.2. La fusion

Considérons la fusion d'un noyau de deutérium (${}_1^2\text{H}$) et d'un noyau de tritium (${}_1^3\text{H}$) : ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$.

Conservation de la charge et conservation du nombre de nucléons.

Effectuons un bilan énergétique :

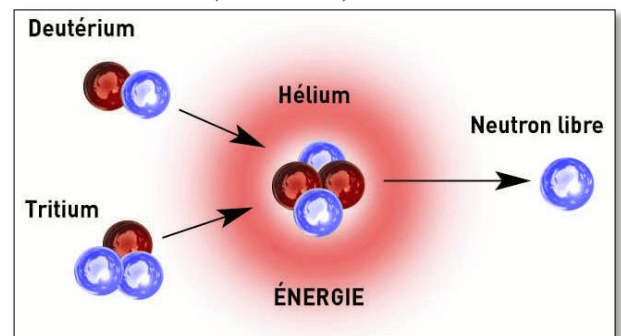
L'énergie échangée est : $\Delta E = (m_{\text{ap}} - m_{\text{av}}) \cdot c^2$ donc :

$$\Delta E = (m({}_2^4\text{He}) + m({}_0^1\text{n}) - [m({}_1^2\text{H}) + m({}_1^3\text{H})]) \cdot c^2$$

A.N. : $\Delta E = (4,00150 + 1,00866 - 2,01355 - 3,01550) \times 931,49$

$\Delta E = -17,6 \text{ MeV} < 0$: libération d'énergie ! (fission : 0,96 MeV/nucléons ; fusion : 3,5 MeV/nucléons)

Rem. : A masse égale la fusion nucléaire libère plus d'énergie que la fission (projet v⁸ ; bombe H⁹).



3.3. Réactions nucléaires spontanées

Dans le cas des réactions nucléaires spontanées (radioactivité α , β ou γ), il y a également libération d'énergie, car $\delta m < 0$ et donc $\Delta E < 0$.

http://www.itercad.org/_flash/fusion.swf

http://www.itercad.org/_flash/tokamak.swf

<http://fusion.gat.com/images/8/81/Fusion.mov>

² La réaction de fission – site du CEA : <http://www.cea.fr/UserFiles/File/Animations/animations/fission.html>

La réaction de fission – vidéo : <http://www.atomicarchive.com/Movies/Movies/fission.mov>

Le réacteur naturel d'Oklo au Gabon : http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_nucl%C3%A9aire_naturel_d%27Oklo

³ La réaction de fusion – site du CEA : <http://www.cea.fr/UserFiles/File/Animations/animations/fusion.html>

La réaction de fusion – vidéo : <http://www.atomicarchive.com/Movies/Movies/fusion.mov>

⁴ La réaction en chaîne – site du CEA : <http://www.cea.fr/UserFiles/File/Animations/animations/reaction.html>

⁵ Le réacteur à eau pressurisée (REP) sur Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_%C3%A0_eau_pressurisé%C3%A9

Le réacteur à eau pressurisée (REP) sur le site du CEA : <http://www.cea.fr/var/cea/storage/static/fr/jeunes/animation/animations/REP/animation.htm>

⁶ Le réacteur pressurisé européen (EPR) sur Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_pressurisé%C3%A9_europ%C3%A9en

⁷ La bombe A sur Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Bombe_A

⁸ Le projet ITER – site du CEA : <http://www.fusion-magnetique.cea.fr/>

Le projet ITER – sur Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org/wiki/ITER> http://www.iter.org/fusioncd/fusion_fr.swf

⁹ La bombe H – site Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Bombe_H