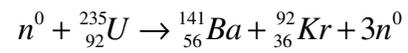


12 LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Une des réactions de fission de l'uranium possible est



Quelle est l'énergie libérée par cette réaction ?



hdfons.com/atomic-bomb/atomic-bomb-wallpaper-hd/

Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

12.1 LE NOYAU ATOMIQUE

La composition du noyau

Entre 1913 et 1932, on découvre la composition du noyau atomique. On en arrive à la conclusion que ce dernier est composé de deux types de particules : les protons et les neutrons.

Proton (p^+)	Masse : $m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$ kg	Charge = $+1,602 \times 10^{-19}$ C
Neutron (n^0)	Masse : $m_n = 1,6750 \times 10^{-27}$ kg	Charge = 0 C

Le nombre de protons dans un noyau est noté Z (qui vient de *zahl*, qui veut dire numéro en allemand). Ce nombre est simplement égal au numéro atomique de l'élément.

Le nombre de neutrons dans un noyau est noté N . Ce nombre peut varier pour un même élément. Les différentes possibilités obtenues en variant le nombre de neutrons pour un élément sont les différents *isotopes* de l'élément.

Les protons et les neutrons sont les deux seuls membres de la famille des *nucléons*. Le nombre de nucléons est noté A . Évidemment, il est égal au nombre de protons et de neutrons.

Nombre de nucléons dans un noyau

$$A = Z + N$$

On utilisera la notation suivante pour représenter les noyaux



Sy est le symbole chimique de l'élément. On peut omettre la valeur de Z puisque le numéro atomique est une information redondante avec le symbole chimique, car chaque élément a son numéro. C'est par contre pratique de l'indiquer parce qu'on ne sait pas toujours par cœur le numéro atomique de tous les éléments.

Donnons quelques exemples de noyau atomique.

Il y a trois isotopes principaux pour l'hydrogène. Ce sont

${}^1_1\text{H}$ (aussi appelé protium)	Composé d'un seul proton
${}^2_1\text{H}$ (aussi appelé deutérium)	Composé d'un proton et d'un neutron
${}^3_1\text{H}$ (aussi appelé tritium)	Composé d'un proton et de deux neutrons

(Ce sont les 3 seuls isotopes qui ont un nom particulier.) Pour le carbone, il y a 16 isotopes.

${}^8_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 2 neutrons
${}^9_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 3 neutrons

${}^{10}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 4 neutrons
${}^{11}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 5 neutrons
${}^{12}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 6 neutrons
${}^{13}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 7 neutrons
${}^{14}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 8 neutrons
${}^{15}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 9 neutrons
${}^{16}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 10 neutrons
${}^{17}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 11 neutrons
${}^{18}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 12 neutrons
${}^{19}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 13 neutrons
${}^{20}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 14 neutrons
${}^{21}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 15 neutrons
${}^{22}_6\text{C}$	Composé de 6 protons et de 16 neutrons

Le carbone 12 (en gras), composé de 6 protons et de 6 neutrons, est de loin l'isotope le plus commun dans la nature (98,9 % de la masse du carbone naturel), suivi du carbone 13 (1,1 %) et du carbone 14 (0,000 000 000 13 %). Les autres isotopes du carbone n'existent pas naturellement, ils ont été créés en laboratoire. Certains éléments, comme le technétium (élément n° 43), le prométhium (élément n° 61) et tous les éléments dont le numéro atomique est supérieur à 93, n'ont aucun isotope présent à l'état naturel.

Avec cette notation, on peut aussi noter le neutron ainsi : 1_0n .

L'unité de masse atomique

Pour mesurer la masse des noyaux atomiques, on a inventé l'unité de masse atomique. Sa valeur est

Unité de masse atomique

$$1 u = 1,660\,539 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

De façon précise, l'unité de masse atomique correspond à une masse de 1 g divisée par le nombre d'Avogadro (qui, depuis 2019, vaut exactement $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$. Toutes les décimales après le dernier 6 sont des 0).

Avec cette unité, on a les masses suivantes :

Électron	Masse = 0,000 549 <i>u</i>
Proton	Masse = 1,007 276 <i>u</i>
Neutron	Masse = 1,008 665 <i>u</i>
Atome d'hydrogène 1	Masse = 1,007 825 <i>u</i>

L'atome d'hydrogène 1 est un peu plus lourd que le proton, car il est formé d'un proton et d'un électron (dans les orbitales). On a mesuré la masse des atomes tous les isotopes. On retrouve toutes ces masses dans le document suivant.

<http://physique.merici.ca/ondes/masseatomique.pdf>

Notez que la masse d'un isotope inclue la masse du noyau et la masse des électrons dans les orbitales. Notez aussi que masse en u est aussi la masse molaire de l'isotope.

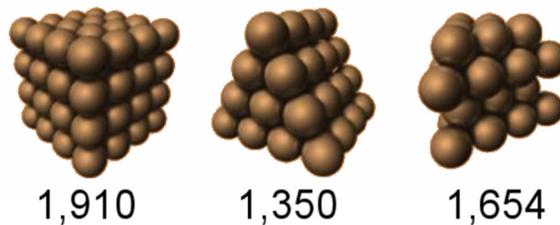
Le rayon du noyau

Un nucléon a un rayon de 0,87 fm. Le symbole fm signifie femtomètre, ou fermi, et représente 10^{-15} m. (Il y a d'ailleurs un petit problème en physique en ce moment puisqu'une façon de mesurer le rayon du proton donne des valeurs d'environ 0,84 fm et l'autre donne des valeurs autour de 0,88 fm. Même en tenant compte des incertitudes, les deux valeurs sont en désaccord !)

Trouvons maintenant le volume d'un noyau (V_{noyau}). S'il y a A nucléons dans le noyau, alors le volume du noyau est

$$V_{\text{noyau}} = V_{\text{nucléon}} \cdot A$$

Il y a toutefois une correction à faire. En empilant des sphères, le volume obtenu est un peu plus grand que la simple somme du volume des sphères puisqu'il y a aussi du volume entre les sphères. La figure montre les liens entre le volume total et le volume des sphères. Ce lien varie selon la façon d'empiler les sphères. La valeur affichée est le rapport entre le volume total et la somme des volumes des sphères. Par exemple, pour le premier empilement, le volume est 1,910 fois plus grand que la somme des volumes des sphères. On va y aller avec une valeur de 1,35 pour trouver la grosseur minimale du noyau.



villemain.gerard.free.fr/Wwwgvmm/Geometri/SpheEmpi.htm

On a donc

$$\begin{aligned} V_{\text{noyau}} &= 1,35 \cdot V_{\text{nucléon}} \cdot A \\ \frac{4}{3} \pi (r_{\text{noyau}})^3 &= 1,35 \cdot \frac{4}{3} \pi (r_{\text{nucléon}})^3 \cdot A \\ (r_{\text{noyau}})^3 &= 1,35 \cdot (r_{\text{nucléon}})^3 \cdot A \\ (r_{\text{noyau}})^3 &= 1,35 \cdot (0,87 \text{ fm})^3 \cdot A \\ r_{\text{noyau}} &= 0,96 \text{ fm} \cdot \sqrt[3]{A} \end{aligned}$$

C'est le rayon qu'on aurait si les nucléons étaient collés les uns sur les autres de la façon la plus compacte dans le noyau. C'est un modèle un peu simpliste comme on le verra plus

loin. Reste que ce qu'on obtient est le rayon minimum que le noyau peut avoir. Le noyau est en fait un peu plus gros que cela. Le véritable rayon est

Rayon du noyau

$$r_{\text{noyau}} = 1,2 \text{ fm} \cdot \sqrt[3]{A}$$

Notez que cette formule est un peu approximative. La valeur devant la racine varie en fait entre 1 fm et 1,4 fm selon le noyau étudié.

Cette formule fut obtenue pour la première fois par Rutherford.

12.2 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

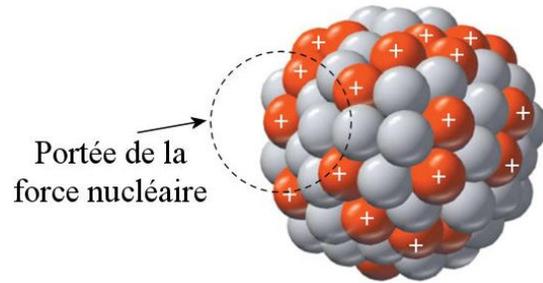
La force nucléaire

Quand on réalisa qu'il y avait plusieurs protons dans le noyau, on se demanda assez rapidement comment tous ces protons pouvaient bien rester ensemble. Comme ils ont tous une charge électrique positive, il y a une répulsion électrique assez forte entre les protons, que l'attraction gravitationnelle est bien loin d'annuler. Comme c'étaient les deux seules forces fondamentales connues à cette époque, il fallut bien se rendre à l'évidence qu'il existe une autre force entre les nucléons. C'est la force nucléaire (en réalité, elle s'appelle la *force nucléaire forte*, pour la distinguer de la force nucléaire faible qui est la quatrième force fondamentale de la nature.)

La force nucléaire est une force d'attraction entre les nucléons qui est très grande, mais qui a une portée très courte. Il faut que deux nucléons soient à moins de 2 fm l'un de l'autre pour que la force nucléaire agisse. S'ils sont trop loin l'un de l'autre, il n'y a pas de force nucléaire et il ne reste que la force de répulsion électrique. Si les nucléons sont suffisamment près, la force nucléaire agit et elle est plus grande que la répulsion électrique. Les deux nucléons restent alors ensemble et forment un noyau atomique. Heureusement que la force nucléaire a une courte portée, sinon tous les nucléons de l'univers s'attireraient mutuellement et se retrouveraient en une grosse boule de nucléons.

Les gros noyaux ont une proportion de neutrons plus importante. Par exemple, un petit noyau comme le carbone 12 possède 6 protons et 6 neutrons alors qu'un gros noyau comme le plomb 207 possède 82 protons et 125 neutrons. La proportion passe lentement de 1 neutron par proton pour les petits noyaux à presque 1,5 neutron par proton pour les gros noyaux. Il en est ainsi parce que les neutrons ajoutent de l'attraction par la force nucléaire sans ajouter de répulsion électrique. Dans les gros noyaux avec beaucoup de protons qui se repoussent tous, l'ajout de neutrons permet d'augmenter l'attraction entre les nucléons pour compenser la répulsion électrique. En se basant sur cet argument, on ne voit pas pourquoi on ne pourrait pas avoir de noyaux avec seulement quelques protons et une multitude de neutrons. On verra plus loin pourquoi il n'y a pas de noyaux avec un tel excès de neutrons.

Si le noyau devient trop gros, il y aura un sérieux problème de stabilité à cause de la portée limitée de la force nucléaire. Dans un noyau, un nucléon est seulement attiré par les nucléons voisins parce que les autres nucléons sont trop loin pour que la force d'attraction agisse. Par exemple, dans l'image suivante, le proton le plus à gauche subit la force d'attraction nucléaire des nucléons près de lui (à l'intérieur du cercle en pointillé).



slides.com/tofergregg/atoms-and-the-periodic-table/#/

Par contre, ce proton est soumis à la force de répulsion électrique de tous les autres protons du noyau. À partir d'une certaine taille, la force nucléaire faite par les quelques nucléons voisins n'est plus suffisante pour annuler la force de répulsion de tous les autres protons du noyau et le noyau devient instable. Le noyau perd alors des morceaux (on verra comment plus tard). Beaucoup d'isotopes sont instables et aucun isotope n'est stable pour des éléments dont le numéro atomique est supérieur à 83.

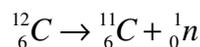
L'énergie nécessaire pour arracher un proton ou un neutron au noyau

On sait ce qu'il faudrait faire pour calculer le travail nécessaire pour arracher un nucléon du noyau. On peut calculer le travail avec la force ou avec la variation d'énergie mécanique.

$$W = \int F dr \cos \theta \quad \text{ou} \quad W = \Delta E_{mec} = \Delta E_k + \Delta U$$

C'est possible en théorie, car les formules de F et de U sont connues pour la force nucléaire, mais il y a une façon d'obtenir ce résultat beaucoup plus facilement.

En relativité, on a appris qu'il y a une équivalence entre l'énergie et la masse. Quand on ajoute ou enlève de l'énergie à un système, la masse du système change selon l'équation $E = mc^2$. Généralement, il est plutôt futile d'appliquer cette formule parce que le changement de masse par rapport à la masse initiale n'est pas très grand. Quand on soulève une brique de 1000 m, l'augmentation de masse du système Terre-brique n'est que $10^{-36} \%$. C'est plutôt difficile à mesurer. Par contre, le changement (en %) est plus important avec la force nucléaire. On devrait donc remarquer que la masse augmente quand on arrache un nucléon à un noyau. Allons voir si c'est effectivement ce qui se passe si on arrache un neutron à un noyau de carbone 12. On fait donc



Initialement, la masse est 12,000 000 000 u . (Les masses viennent de la table de masse. La masse du carbone 12 est vraiment très près de 12 puisqu'autrefois on définissait l'unité de masse atomique à partir du carbone 12.)

Après, on a du carbone 11 et un neutron. La masse totale est

$$\begin{array}{r}
 m_{^{11}\text{C}} = 11,011\,433\,6\,u \quad \searrow \\
 m_{\text{tot}} = 12,020\,098\,5\,u \\
 m_{\text{n}} = 1,008\,664\,916\,u \quad \nearrow
 \end{array}$$

On voit que la masse est effectivement plus grande après qu'on ait arraché le neutron. Elle a augmenté de $0,020\,098\,5\,u$. Cette différence s'appelle le *déficit de masse*. L'augmentation de masse nous permet de calculer l'augmentation d'énergie de la façon suivante.

$$\begin{aligned}
 E &= mc^2 \\
 &= 0,0200985u \cdot c^2 \\
 &= 0,0200985u \cdot 1,660\,539 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{u} \cdot \left(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \\
 &= 3,0037 \times 10^{-12} \text{ J} \\
 &= 18,748 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

Il a donc fallu fournir 18,748 MeV pour arracher un neutron au noyau de carbone 12. C'est près d'un million fois plus que l'énergie qu'il faut fournir pour arracher un électron des orbitales au carbone. Typiquement, les énergies nucléaires sont un million de fois plus grandes que les énergies chimiques (qui impliquent seulement les électrons des orbitales)

Résumons ce calcul. Selon la conservation de l'énergie, on doit avoir

$$E_{\text{avant}} = E_{\text{après}} + Q$$

où Q est l'énergie libérée (si Q est positif) ou l'énergie qu'on doit fournir (si Q est négatif). On a donc

$$\begin{aligned}
 Q &= E_{\text{avant}} - E_{\text{après}} \\
 &= m_{\text{avant}} c^2 - m_{\text{après}} c^2 \\
 &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) c^2
 \end{aligned}$$

Pour aller plus vite, on va faire une formule qui utilise les unités de masse atomique et qui donne une réponse en mégaelectronvolts. Comme l'énergie de $1\,u$ est

$$\begin{aligned}
 E &= mc^2 \\
 &= 1,660\,539 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \left(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \\
 &= 1,4924 \times 10^{-10} \text{ J} \\
 &= 931,49 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

on peut prendre le raccourci suivant pour calculer l'énergie en MeV.

Énergie nucléaire

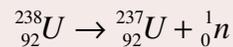
$$Q = (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

L'énergie est en MeV et les masses sont en unité de masse atomique.

Exemple 12.2.1

Quelle énergie doit-on fournir pour arracher un neutron à l'uranium 238 ?

On veut faire



Avec les masses dans la table des masses atomiques, on a

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (238,050\,788\,2u - (237,048\,730\,2u + 1,008\,664\,9u)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= -0,006\,606\,9u \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= -6,154\text{MeV} \end{aligned}$$

Il faut donc fournir 6,154 MeV pour arracher un neutron.



Erreur fréquente : Trop arrondir les masses atomiques

Quand on soustrait les masses atomiques, la différence de masse est très petite. Si on arrondit trop, on va perdre cette petite valeur. Il faut donc garder tous les chiffres de la masse atomique quand on calcule l'énergie.

Il y a une petite subtilité si on arrache un proton. Comme on ne touche pas aux électrons dans les orbitales, leur nombre reste identique à ce qu'il était. Mais en arrachant un proton, on baisse de 1 le nombre atomique. On passe donc à l'élément précédent dans le tableau périodique et, normalement, cet élément a un électron de moins dans ses orbitales. On se retrouve ainsi avec un élément qui a un électron en surplus dans ses orbitales par rapport à cet élément à l'état naturel.

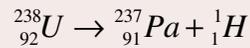
Le problème c'est que la table des masses nous donne la masse de l'atome tel qu'il est normalement, c'est-à-dire la masse de l'élément qui a le bon nombre d'électrons dans ses orbitales. Comme notre atome a un électron en surplus, il faudra ajouter un électron à la masse du noyau final pour tenir compte du fait qu'il y a un électron de plus dans les orbitales. On fait donc $m_{\text{après}} = m_{\text{atome}} + m_e + m_p$. On peut toutefois simplifier en utilisant le fait que l'hydrogène 1 est composé d'un proton et d'un électron. La somme des deux derniers termes sont donc égal à la masse de l'hydrogène 1 : $m_{\text{après}} = m_{\text{atome}} + m_{\text{H1}}$.

Tout ça pour dire, en conclusion, qu'on prend la masse de l'hydrogène 1 plutôt que celle du proton pour calculer la masse finale quand on arrache un proton.

Exemple 12.2.2

Quelle énergie doit-on fournir pour arracher un proton à l'uranium 238 ?

On veut faire



Avec les masses dans la table des masses atomiques, on a

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (238,050\,788u - (237,051\,15u + 1,007\,825u)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= -0,008\,19u \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= -7,63\text{MeV} \end{aligned}$$

Il faut donc fournir 7,63 MeV pour arracher un proton.

L'énergie de liaison du noyau

L'énergie de liaison est l'énergie qu'il faudrait fournir pour détruire complètement le noyau. Par exemple, c'est l'énergie requise pour prendre un noyau d'hélium 4 et obtenir 2 protons et 2 neutrons. En fait, on procède de la même façon qu'à la section précédente.

$$Q = (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Une fois que l'atome est complètement détruit, on se retrouve avec Z protons, Z électrons et N neutrons. La masse finale est donc

$$\begin{aligned} m_{\text{après}} &= Zm_p + Zm_e + Nm_n \\ &= Z(m_p + m_e) + Nm_n \\ &= Zm_{H1} + Nm_n \end{aligned}$$

Pour la dernière ligne, on a utilisé le fait que l'hydrogène 1 est formé d'un proton et d'un électron.

Comme l'énergie de liaison est égale à l'énergie qu'on doit fournir pour détruire le noyau ($-Q$), on a

Énergie de liaison d'un noyau de l'élément X

$$E_{\text{liaison}} = (Zm_{H1} + Nm_n - m_X) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Exemple 12.2.3

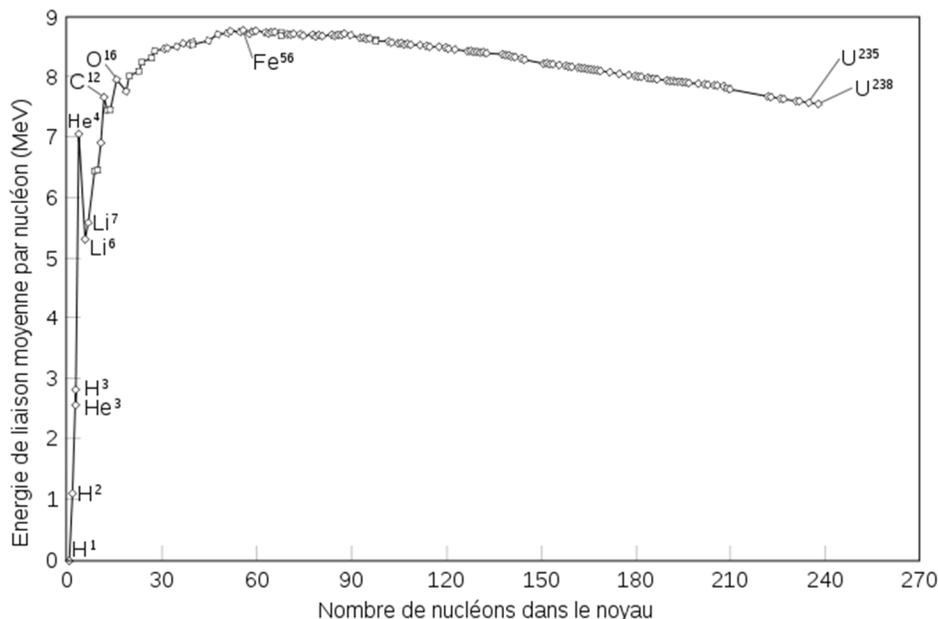
Quelle énergie de liaison du noyau d'hélium 4 ?

Avec les masses dans les tables, on a

$$\begin{aligned}
 E_{\text{liaison}} &= (Zm_{H^1} + Nm_n - m_X) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= (2 \cdot 1,007\,825\,032u + 2 \cdot 1,008\,664\,916u - 4,002\,603\,254u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= 0,030\,377u \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= 28,3 \text{MeV}
 \end{aligned}$$

Notez que s'il faut 28,3 MeV pour détruire un noyau d'hélium 4, la création d'un tel noyau à partir de 2 protons et de 2 neutrons libérerait 28,3 MeV. Nous verrons plus tard que cette formation est à la base de la génération d'énergie dans le Soleil.

Ce calcul de l'énergie de liaison nous permet de savoir quel noyau atomique est le plus stable. Ce n'est pas tellement la valeur totale de l'énergie de liaison qui importe. L'uranium a une énergie de liaison phénoménale parce qu'il y a beaucoup de nucléons à arracher pour détruire le noyau. Ce qui est plus intéressant, c'est le calcul de la moyenne de l'énergie qu'on doit fournir à chaque nucléon pour détruire le noyau. On l'obtient en divisant l'énergie de liaison par le nombre de nucléons. On obtient alors le graphique suivant.



fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_nucléaire

On voit que l'énergie de liaison augmente rapidement et plafonne ensuite en environ 8,75 MeV par nucléon. Elle plafonne, car les nucléons ne sont attirés que par les autres nucléons voisins. Même si le noyau est plus gros, le nombre de nucléons voisins reste environ toujours le même et il faut environ 8,75 MeV pour arracher un nucléon de ces voisins. La légère baisse vient de la répulsion électrique qui augmente avec la grosseur du

noyau et qui rend l'extraction des protons plus facile. On remarque que le noyau qui a le plus d'énergie de liaison par nucléon est le fer 56 à 8,75 MeV/nucléon. Ceux qui font le cours d'astrophysique savent bien l'importance de cet élément pour les réactions nucléaires dans les étoiles. Pour les autres, vous n'aviez qu'à suivre ce cours ☺.

12.3 LA RADIOACTIVITÉ

Certains isotopes sont stables et vont pouvoir exister pour toujours (ce sont les isotopes dont la masse est en gras dans le tableau des masses.) Par contre, beaucoup d'autres isotopes sont instables et vont finir par se transformer en un autre isotope.

Lors de la transformation, les isotopes instables émettent des particules. Cette émission de particules est la *radioactivité*. Les isotopes qui émettent de telles particules sont les *isotopes radioactifs*.

La découverte de la radioactivité

En 1896, Henri Becquerel découvre que l'uranium émet quelque chose en permanence. Becquerel fait cette découverte un peu par hasard alors qu'il étudiait la phosphorescence. Lorsqu'il entend parler des rayons X, découverts en 1895, il veut vérifier si les substances phosphorescentes émettent aussi des rayons X. Il découvre alors que les sels d'uranium phosphorescent peuvent marquer des plaques photographiques même si on les enveloppe dans du papier noir, ce qui laisse penser que les sels d'uranium émettent des rayons X en même temps que de la lumière visible lors de la phosphorescence. Alors qu'il y a quelques journées sans Soleil, Becquerel ne peut poursuivre ses expériences, car il se sert des rayons du Soleil pour exciter la phosphorescence des sels d'uranium. Mais Becquerel découvre alors que même si les sels d'uranium n'émettaient plus de lumière au bout de quelques jours, on peut toujours obtenir des marques sur les plaques photographiques. Cette observation montre que ce que l'uranium émet n'a aucun lien avec la phosphorescence. Il a ainsi découvert un nouveau phénomène, que Pierre Curie et Marie Skłodowska Curie ont baptisé *radioactivité*.

Becquerel parvient à déterminer que la radioactivité des sels vient spécifiquement de l'uranium. Aussi, peu après la publication des résultats de Becquerel, on découvre en 1898 que le thorium est également radioactif. Toujours en 1898, Pierre et Marie Curie découvrent que certains types de minerai émettent encore plus de rayonnement que s'ils étaient uniquement composés d'uranium, la substance la plus radioactive connue à cette époque. Cela laissait croire que ces minéraux contenaient une substance encore plus radioactive. Ils en viennent alors à isoler de nouveaux éléments radioactifs, le radium et le polonium (1898). Ce sont les premiers éléments découverts d'une longue série d'éléments radioactifs connus aujourd'hui.

La nature des particules émises par un élément radioactif

En 1899, plusieurs chercheurs avaient remarqué que les émissions faites par le radium étaient déviées par les champs magnétiques, ce qui laissait croire que la radioactivité était une émission de particules chargées électriquement. Pierre Curie montra en fait qu'il y avait deux types de particules : une qui n'était apparemment pas déviée (qu'il appela les particules alpha) et une autre qui était déviée (qu'il appela les particules bêta) et pénétrant davantage la matière.

Les travaux de Becquerel, Pierre Curie et Marie Curie indiquèrent en 1901 que les particules bêta sont en fait des électrons. Quant aux particules alpha, Ernest Rutherford parvint à montrer qu'un champ magnétique pouvait aussi les dévier. Il put en déduire qu'elles étaient beaucoup plus massives que des électrons et avaient une charge électrique positive. En 1907, Rutherford et Hans Geiger, en vinrent finalement à la conclusion que les particules alpha sont des atomes d'hélium doublement ionisé.

Un troisième type de particules (les particules gamma) fut découvert en 1900 par Paul Villard. Ces particules gamma sont des photons ayant une grande énergie.

Finalement, en 1934, Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie découvrent que le noyau peut également émettre un antiélectron (aussi appelé positron ou positon), l'antiparticule de l'électron.

En résumé, voici les particules émises par le noyau atomique pour chaque type de radioactivité :

Alpha : un noyau d'hélium

Bêta : un électron (e^-) ou un antiélectron (e^+)

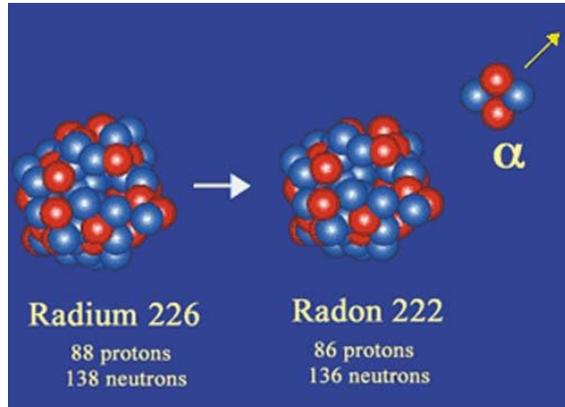
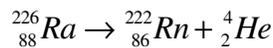
Gamma : un photon

Qu'arrive-t-il au noyau atomique quand il émet une particule ?

En 1903, Ernest Rutherford et Frederick Soddy, tous les deux à l'université McGill de Montréal, montrèrent que les atomes de thorium subissent des changements internes quand ils émettent une particule alpha, bêta ou gamma. En 1906, ils en sont venus à la conclusion que l'uranium, en émettant une particule alpha, se transforme en thorium, puis en radium puis en d'autres éléments successivement jusqu'à devenir du plomb. Lorsque la nature des trois types de particule émise fut déterminée, Soddy put donner les règles exactes de transformation (1911-1913) des atomes. Examinons ces règles pour chaque type de désintégration.

La désintégration alpha

Dans une désintégration alpha, un noyau émet un noyau d'hélium. Comme il y a 2 protons et 2 neutrons dans un noyau d'hélium, le noyau qui se désintègre perd 2 protons et 2 neutrons. Par exemple, voici ce qui se passe quand un noyau de radium émet une particule alpha (synonyme de noyau d'hélium 4).

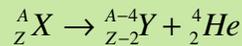


www.laradioactivite.com/fr/site/pages/laradioactivitealpha.htm

On constate que l'émission du noyau d'hélium a fait perdre 2 protons et 4 nucléons au noyau de départ. On a donc changé d'élément lors de la désintégration. On appelle l'élément de départ *l'élément père* et l'élément après la désintégration *l'élément fils*.

Si l'élément père est X et l'élément fils est Y , la réaction est toujours la suivante.

Désintégration alpha



La désintégration se fait spontanément si elle libère de l'énergie.

Encore une fois, on peut calculer l'énergie libérée avec $E = mc^2$.

Énergie libérée lors d'une désintégration alpha

$$Q = (m_X - m_Y - m_{\text{He4}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Si Q est positif, la désintégration libère de l'énergie et la désintégration est possible. Si Q est négatif, il faudrait fournir de l'énergie à cette réaction pour qu'elle se produise et elle est donc impossible.

Remarquez que l'éjection d'un seul proton ou d'un seul neutron par le noyau est presque toujours impossible, car Q est négatif pour presque tous les noyaux. (Il y a seulement quelques rares noyaux pour lesquels c'est possible.)

(Notez qu'il y a une petite subtilité parce que l'énergie est conservée dans une désintégration. Si l'énergie est la même avant et après la désintégration, alors la masse devrait aussi être la même avant et après la désintégration. C'est effectivement ce qu'on obtiendrait si on mesurait la masse des produits de désintégration immédiatement après la désintégration. Cette masse est identique parce que l'énergie libérée par la désintégration est maintenant sous forme d'énergie cinétique. La somme de la masse au repos des particules après la désintégration et de leur énergie cinétique est exactement identique à la

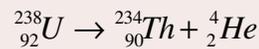
masse initiale de l'atome qui se désintègre. Toutefois, si on considère uniquement les masses au repos des particules après la désintégration, on n'aura pas cette masse de l'énergie cinétique et la masse après la désintégration sera plus petite. La partie qui va manquer sera égale à la masse de l'énergie cinétique. Or, comme cette énergie cinétique est égale à l'énergie libérée par la désintégration, la masse manquante correspondra donc à l'énergie libérée par la désintégration !)

En 1928, George Gamow montra que la particule alpha sort du noyau par effet tunnel.

Exemple 12.3.1

Donner la réaction de la désintégration alpha de l'uranium 238 et calculer l'énergie libérée par cette désintégration.

La réaction est



L'énergie libérée est

$$\begin{aligned} Q &= (m_X - m_Y - m_{\text{He4}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (238,050\,788u - 234,043\,601u - 4,002\,603u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (0,004\,584u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= 4,27\text{MeV} \end{aligned}$$

Cette énergie libérée se retrouve en énergie cinétique des deux noyaux après la désintégration. Pour trouver la vitesse de chaque morceau, il faut appliquer les lois de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

$$Q = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad 0 = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

Dans la première équation, on dit simplement que la somme des énergies cinétiques des deux noyaux est égale à l'énergie libérée. Dans la deuxième équation, la quantité de mouvement est égale à 0 puisque le noyau de départ était immobile. On peut donc obtenir l'énergie de la particule alpha ainsi

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2} m_{\text{He4}} v_{\text{He4}}^2 + \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 \\ Q &= \frac{1}{2} m_{\text{He4}} v_{\text{He4}}^2 + \frac{1}{2m_Y} (m_Y v_Y)^2 \\ Q &= \frac{1}{2} m_{\text{He4}} v_{\text{He4}}^2 + \frac{1}{2m_Y} (m_{\text{He4}} v_{\text{He4}})^2 \\ Q &= \frac{1}{2} m_{\text{He4}} v_{\text{He4}}^2 + \frac{m_{\text{He4}}}{m_Y} \frac{1}{2} m_{\text{He4}} v_{\text{He4}}^2 \end{aligned}$$

$$Q = \left(1 + \frac{m_{He4}}{m_Y}\right) \frac{1}{2} m_{He4} v_{He4}^2$$

$$Q = \left(1 + \frac{m_{He4}}{m_Y}\right) E_{k_{He4}}$$

Ce qui nous donne

Énergie de la particule alpha après une désintégration alpha

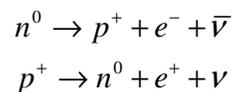
$$E_{k_{He4}} = \frac{m_Y}{m_{He4} + m_Y} Q$$

Dans le cas de la désintégration de l'uranium, on trouve que la particule alpha a une énergie cinétique 4,20 MeV. Il ne reste donc que 0,07 MeV pour le noyau de thorium. Dans presque tous les cas, c'est la particule alpha qui reçoit presque toute l'énergie libérée.

La désintégration bêta

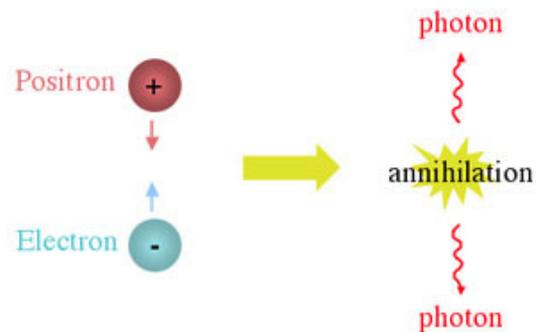
Dans une désintégration bêta, un noyau émet un électron ou un antiélectron (aussi appelé positron ou positon). L'électron émis n'a absolument rien à voir avec les électrons qui sont dans les orbitales. Cela amène naturellement la question : mais d'où peuvent bien venir cet électron ou cet antiélectron s'il n'y en a pas dans le noyau initialement ?

Pour comprendre d'où viennent ces particules, il faut savoir qu'il est possible de transformer un proton en neutron ou un neutron en proton. Les réactions de transformation, découverte par Fermi en 1934, sont



Dans ces formules, e^- est un électron, e^+ est un antiélectron, ν est un neutrino et $\bar{\nu}$ est un antineutrino.

Les antiélectrons sont de l'antimatière. Ce sont les antiparticules des électrons. Quand une particule et son antiparticule se rencontrent, elles disparaissent complètement (on dit qu'elles s'annihilent) en libérant beaucoup d'énergie sous forme de photons.

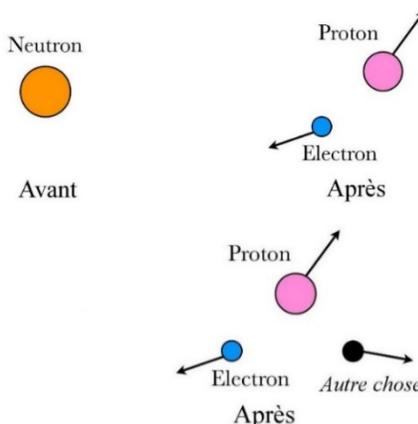


astronomy.swin.edu.au/cosmos/P/Positron

On peut aussi faire le processus inverse et créer de la matière à partir de photons. Dans ce cas, il se crée autant de matière que d'antimatière. Cette création de matière et d'antimatière se fait couramment dans les accélérateurs de particules.

Les neutrinos sont des particules de masse très faible et ayant une charge électrique nulle. Ils interagissent très peu avec la matière. Chaque seconde, des milliards de neutrinos traversent votre corps sans aucun effet. Peut-être qu'une fois dans votre vie, un de ces neutrinos va interagir avec un atome dans votre corps et le transformer. En 1930, Wolfgang Pauli suppose que ces particules existent parce que l'énergie et la quantité de mouvement ne semblaient pas conservées si on mesurait seulement l'énergie et la quantité de mouvement de l'électron (ou de l'antiélectron) et du noyau fils dans la désintégration bêta.

L'image de droite montre ce qu'on observe. La quantité de mouvement n'est pas conservée puisque les deux particules ne vont pas dans des directions opposées après la désintégration.

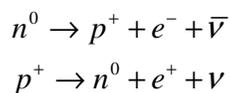


andthejoyofdiscovery.wordpress.com/tag/neutrino/

Cette deuxième image de droite montre ce que Pauli a supposé. Il suppose qu'il y a une troisième particule indétectable présente et que c'est elle qui a l'énergie et la quantité de mouvement manquante.

Pauli appela cette particule hypothétique *neutrino*. On confirma expérimentalement l'existence du neutrino en 1956.

Les réactions

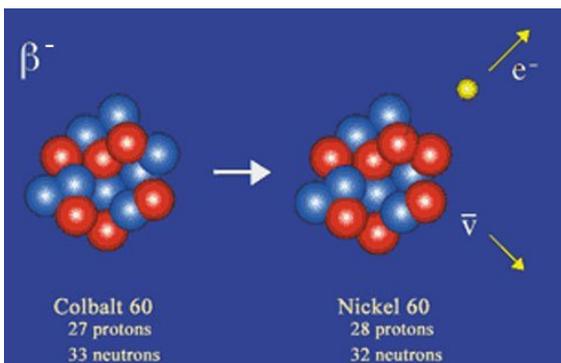
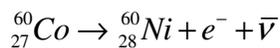


ne signifient pas dire qu'un neutron est fait d'un proton, d'un électron et d'un antineutrino (si on prend la première transformation en exemple). L'électron et l'antineutrino apparaissent quand le neutron devient un proton. Ils n'existaient pas avant la transformation.

Quand un neutron se transforme en proton et qu'un électron est éjecté (en même temps qu'un antineutrino), on a une désintégration bêta - (β^-). Quand un proton se transforme en neutron et qu'un positron est éjecté (en même temps qu'un neutrino), on a une désintégration bêta + (β^+).

La désintégration β^-

Si un neutron devient un proton, alors le noyau gagne un proton et perd un neutron. Voici un exemple de désintégration β^- .

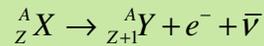


www.laradioactivite.com/fr/site/pages/laradioactivitebeta.htm

On passe donc à l'élément suivant dans le tableau périodique puisqu'on gagne un proton. Le nombre de nucléons reste cependant le même.

Si l'élément père est X et l'élément fils est Y , la réaction est toujours

Désintégration β^-



Comme d'habitude, on trouve l'énergie libérée par cette réaction à partir du changement de masse.

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (m_X - (m_Y \text{ avec un électron de moins} + m_e + m_{\bar{\nu}})) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \end{aligned}$$

Remarquez qu'il manque un électron dans les orbitales de l'élément fils parce que la transformation du noyau ne change pas le nombre d'électrons dans les orbitales. L'élément fils étant l'élément suivant dans le tableau périodique, il devrait y avoir un électron de plus dans les orbitales, mais il n'est pas là. On doit donc soustraire la masse d'un électron à la masse de l'élément fils. De plus, on va négliger la masse du neutrino, qui est au moins 250 000 fois massif que l'électron. On a donc

$$\begin{aligned} Q &= (m_X - (m_Y \text{ avec un électron de moins} + m_e)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (m_X - (m_Y - m_e + m_e)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \end{aligned}$$

Ce qui nous donne

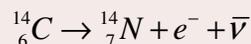
Énergie libérée lors d'une désintégration β^-

$$Q = (m_X - m_Y) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Exemple 12.3.2

Donner la réaction de la désintégration β^- du carbone 14 et calculer l'énergie libérée par cette désintégration.

La réaction est



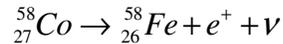
L'énergie libérée est

$$\begin{aligned} Q &= (m_{{}^{14}_6 C} - m_{{}^{14}_7 N}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (14,003\,241\,989u - 14,003\,074\,005u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (0,000\,167\,984u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= 0,1564 \text{MeV} = 156,4 \text{keV} \end{aligned}$$

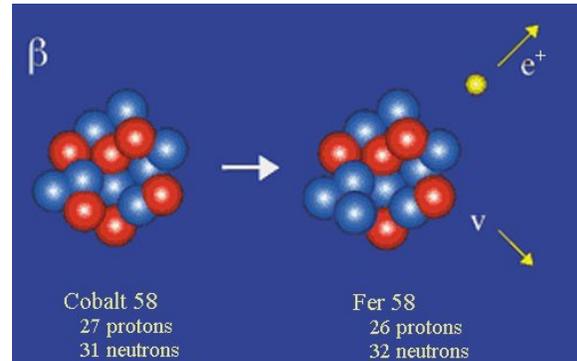
Cette énergie peut se répartir à peu près n'importe comment entre l'électron et l'antineutrino. Le noyau fils ne reçoit pratiquement pas d'énergie cinétique.

La désintégration β^+

Si un proton devient un neutron, alors le noyau perd un proton et gagne un neutron. Voici un exemple de désintégration β^+ .



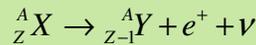
On passe donc à l'élément précédent dans le tableau périodique puisqu'on perd un proton. Le nombre de nucléons reste cependant le même.



www.laradioactivite.com/fr/site/pages/laradioactivitebeta.htm

Si l'élément père est X et l'élément fils est Y , la réaction est toujours

Désintégration β^+



On trouve l'énergie libérée par cette réaction à partir du changement de masse.

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (m_X - (m_Y \text{ avec un électron de plus} + m_e + m_\nu)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \end{aligned}$$

Remarquez qu'il y a un électron de trop dans les orbitales de l'élément fils parce que la transformation du noyau ne change pas le nombre d'électrons dans les orbitales. L'élément fils étant l'élément précédent dans le tableau périodique, il devrait y avoir un électron de moins dans les orbitales, mais il n'a pas disparu. On doit donc l'ajouter à la masse de l'élément fils. De plus, on va encore négliger la masse du neutrino. On a donc

$$\begin{aligned} Q &= (m_X - (m_Y \text{ avec un électron de plus} + m_e)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (m_X - (m_Y + m_e + m_e)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \end{aligned}$$

Ce qui nous donne

Énergie libérée lors d'une désintégration β^+

$$Q = (m_X - m_Y - 2m_e) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Exemple 12.3.3

Donner la réaction de la désintégration β^+ du fluor 18 et calculer l'énergie libérée par cette désintégration.

La réaction est



L'énergie libérée est

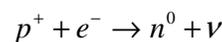
$$\begin{aligned} Q &= (m_{{}^{18}_9F} - m_{{}^{18}_8O} - 2m_e) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (18,000\,938\,0u - 17,999\,161\,0u - 2 \cdot 0,000\,548\,6u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (0,000\,679\,8u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= 0,6332\text{MeV} = 633,2\text{keV} \end{aligned}$$

Encore une fois, cette énergie peut se répartir à peu près n'importe comment entre l'antiélectron et le neutrino. Le noyau fils ne reçoit pratiquement pas d'énergie cinétique.

Généralement, l'antiélectron émis n'ira pas bien loin. Assez vite, il va rencontrer un électron et ils vont s'annihiler. L'annihilation va générer 2 photons très énergiques (dans la partie gamma du spectre électromagnétique).

La capture électronique (C.E. ou ϵ)

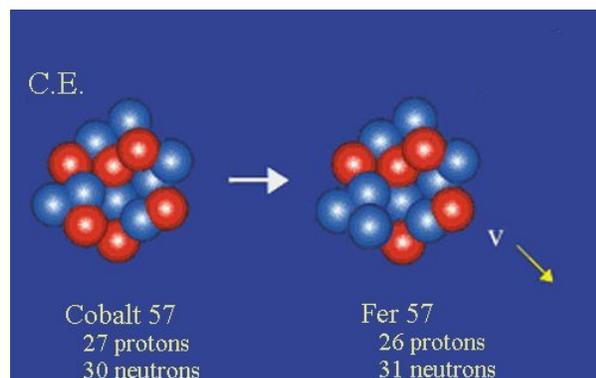
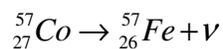
La capture électronique est une troisième variante de la désintégration bêta qui fut proposée en 1934 par Gian-Carlo Wick et observée pour la première fois en 1937 par Luis Alvarez. Dans une capture électronique, un proton se transforme en neutron par la réaction suivante.



Dans cette réaction, le noyau n'émet qu'un neutrino.

L'électron est pris dans les orbitales et cet électron provient presque toujours d'une orbitale s de basse énergie. Cela crée une place libre dans les orbitales basses. Quand un électron d'un niveau supérieur prend la place libre, un photon est émis. Il peut y avoir plusieurs photons émis si cette transition se fait en plusieurs étapes.

Voici un exemple de capture électronique.

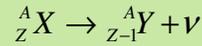


www.laradioactivite.com/fr/site/pages/laradioactivitebeta.htm

On passe donc à l'élément précédent dans le tableau périodique puisqu'on perd un proton. Le nombre de nucléons reste cependant le même.

Si l'élément père est X et l'élément fils est Y , la réaction est toujours

Capture électronique



On n'a pas indiqué l'électron de départ, car il fait déjà partie de l'atome père (il est dans les orbitales).

On trouve l'énergie libérée par cette réaction à partir du changement de masse

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (m_X - (m_Y + m_\nu)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \end{aligned}$$

Ici, les nombres d'électrons dans les orbitales sont corrects. En baissant le numéro atomique de 1, on doit avoir un électron de moins dans les orbitales. On a effectivement perdu un électron dans les orbitales lors de la capture de cet électron. Il y a donc le bon nombre d'électrons dans nos orbitales de l'élément fils. Si on néglige encore la masse du neutrino, on a

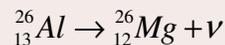
Énergie libérée lors d'une capture électronique

$$Q = (m_X - m_Y) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Exemple 12.3.4

Donner la réaction de capture électronique de l'aluminium 26 et calculer l'énergie libérée par cette désintégration.

La réaction est



L'énergie libérée est

$$\begin{aligned} Q &= (m_{{}^{26}_{13}\text{Al}} - m_{{}^{26}_{12}\text{Mg}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (25,986\,891\,69u - 25,982\,592\,93u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (0,004\,298\,76u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= 4,004 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Cette fois, c'est le neutrino qui ramasse toute l'énergie cinétique. Le noyau fils ne reçoit pratiquement pas d'énergie cinétique.

Il pourrait aussi exister, en théorie, une capture antiélectronique qui permettrait une transformation de neutron en proton, mais il est plutôt rare qu'un noyau puisse trouver un antiélectron puisqu'il n'y en a pas dans les orbitales.

La désintégration gamma

Dans une désintégration gamma, le noyau émet un photon. Cette émission ne provoque aucun changement dans la nature des particules dans le noyau. Tous les protons restent de protons et tous les neutrons restent des neutrons et on reste donc avec le même isotope qu'on avait avant l'émission du photon.

$2d_{3/2}$		4
$3s_{1/2}$		2
$1g_{7/2}$		8
$2d_{5/2}$		6

Mais alors, qu'est-ce qui change quand un noyau émet un photon ?

$1g_{9/2}$		10
$2p_{1/2}$		2
$1f_{5/2}$		6
$2p_{3/2}$		4

Un modèle plus raffiné du noyau montre que les protons et les neutrons sont également sur des niveaux d'énergie dans le noyau, exactement comme les électrons autour du noyau. La figure ci-contre vous montre ces niveaux d'énergie de même que le nombre de neutrons ou de protons qu'on peut mettre par niveau. Si on indique 2 à côté d'un niveau, c'est que ce niveau peut accueillir 2 protons **et** 2 neutrons, pour un total de 4 nucléons. On note aussi la similitude entre la notation de ces niveaux et la notation des niveaux des électrons autour du noyau.

$1f_{7/2}$		8
------------	--	---

$1d_{3/2}$		4
$2s_{1/2}$		2
$1d_{5/2}$		6

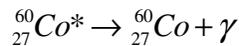
On comprend alors comment le noyau peut émettre un photon : si un nucléon descend de niveau, le nucléon émet un photon ayant l'énergie perdue, exactement comme les électrons dans les orbitales.

$1p_{1/2}$		2
$1p_{3/2}$		4

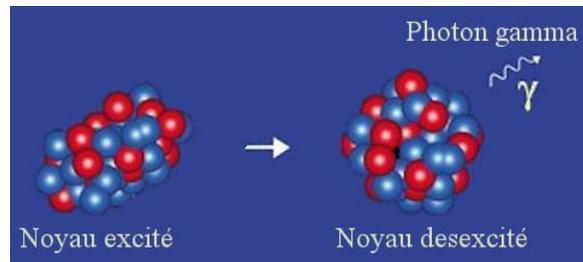
Évidemment, pour que cela puisse se produire, il faut qu'au départ un nucléon se soit retrouvé sur un niveau supérieur. Si c'est le cas, on parle alors de noyau excité et on indique ce fait par un astérisque au symbole du noyau.

$1s_{1/2}$		2
------------	--	---

Ainsi, la désintégration gamma d'un noyau de cobalt 60 excité se note



où γ est le symbole du photon.



www.laradioactivite.com/fr/site/pages/Radioactivite_Gamma.htm

Il y a plusieurs façons d'exciter un noyau atomique. Par exemple, une collision avec un autre noyau peut faire monter un nucléon de niveau. Il arrive souvent qu'une désintégration donne un noyau excité. Voyez comment cette désintégration alpha du plutonium 239 est suivie de deux désintégrations gamma dans l'animation suivante.

<https://youtu.be/xZ8A7lv32q4>

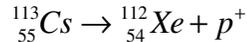
Pourquoi ne peut-il pas y avoir trop de neutrons dans un noyau ?

Les niveaux d'énergie dans le noyau nous permettent de comprendre pourquoi on ne peut avoir trop de neutrons dans un noyau. Supposons que nous ayons un noyau de carbone (6 protons) avec 50 neutrons. Les protons seraient sur les 3 premiers niveaux alors que les neutrons occuperaient les 25 premiers niveaux. Le dernier neutron serait sur un niveau tellement haut par rapport au dernier proton qu'une quantité importante d'énergie serait libérée si ce neutron devenait un proton et redescendait au 4^e niveau. Si la transformation libère de l'énergie, elle est possible et elle se fera tôt ou tard. Si la baisse d'énergie est immense, comme c'est le cas quand il y a beaucoup plus de neutrons que de proton, elle se fera presque instantanément. Les neutrons vont donc se transformer en proton jusqu'à ce que le rapport des deux soit près de celui de l'isotope le plus stable qu'on peut obtenir avec ce nombre de nucléons.

Autres désintégrations rares

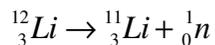
Il existe quelques autres possibilités de désintégration, mais qui sont plutôt rares.

- 1) **Émission de proton** : Certains noyaux avec un très large excès de protons peuvent éjecter un de ces protons. C'est le cas du césium 113. On a alors



On connaît 28 isotopes pouvant faire une émission de proton.

- 2) **Émission de neutron** : Certains noyaux (souvent ceux du début du tableau périodique) avec un très large excès de neutrons peuvent éjecter un de ces neutrons. C'est le cas du lithium 12. On a alors



On connaît 17 isotopes pouvant faire une émission de neutron.

Quel type de désintégration un isotope va-t-il faire ?

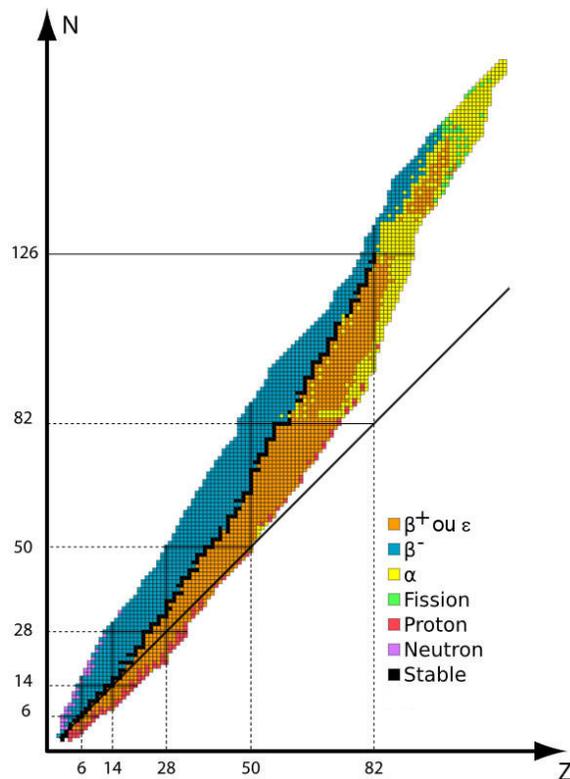
Il y a certains isotopes qui sont stables. Ces noyaux ne se désintègrent jamais. 80 éléments ont des isotopes stables. Il s'agit des 82 premiers éléments à l'exception du technétium (43) et du prométhium (61). En tout, il y a 251 isotopes stables qui ne vont jamais se désintégrer. Le plus gros de ces noyaux est le plomb 208. Notez que sur ces 251 isotopes, 105 pourraient, en théorie, se désintégrer, mais leur désintégration n'a jamais été observée.

Tous les autres isotopes finissent par se désintégrer. Évidemment, on peut uniquement faire les désintégrations qui libèrent de l'énergie, donc qui ont un Q positif. Voici les règles qui indiquent à quel type de désintégration on peut s'attendre pour les différents isotopes.

- 1) Les très gros noyaux font très souvent des désintégrations alpha. On remarque un changement aux alentours de $Z = 82$. Une majorité des isotopes des éléments ayant un numéro atomique supérieur à 82 font des désintégrations alpha, alors que très peu d'isotopes des éléments ayant un numéro atomique inférieur à 82 font des désintégrations alpha.
- 2) Les noyaux qui ont un surplus de neutrons par rapport à l'isotope stable de l'élément (ou par rapport à l'isotope qui se désintègre le plus lentement s'il n'y a pas d'isotope stable) vont faire une désintégration bêta – pour diminuer le nombre de neutrons. Si l'excès de neutrons est très important et si noyau est relativement petit, il peut y avoir émission de neutron.
- 3) Les noyaux qui ont un surplus de protons par rapport à l'isotope stable de l'élément (ou par rapport à l'isotope qui se désintègre le plus lentement s'il n'y a pas d'isotope stable) vont faire une désintégration bêta + ou une capture électronique pour diminuer le nombre de protons. Si l'excès de protons est très important, il peut y avoir émission de proton.

Notez que certains isotopes ont plusieurs modes de désintégration. Par exemple, un gros noyau contenant un excès de neutrons, comme celui du bismuth 212, peut faire une désintégration alpha (36 % des désintégrations pour le $^{212}_{83}\text{Bi}$) ou une désintégration bêta – (64 % des désintégrations pour le $^{212}_{83}\text{Bi}$).

Le graphique de droite montre le principal mode de désintégration des isotopes.



en.wikipedia.org/wiki/Stable_nuclide

Les substances radioactives ne brillent pas

Au cinéma et à la télévision, les substances radioactives émettent souvent un genre de lumière bleue ou verte. Pourtant, la seule lumière que peut émettre une substance radioactive est un rayonnement gamma et cette lumière n'est pas du tout dans la partie visible du spectre électromagnétique. Est-ce que ce qu'on nous montre est faux ou est-ce que les substances radioactives peuvent émettre un tel rayonnement bleu ou vert ?



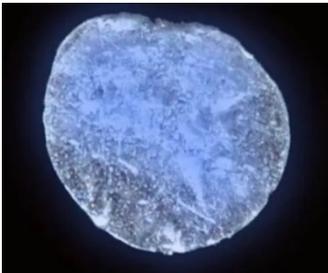
klotza.blogspot.com/2016/07/do-radioactive-things-glow.html

La réponse simple est que la très grande majorité des substances radioactives n'ont pas cette teinte bleue ou verte. Elles n'émettent pas de lumière du tout. À l'œil, rien ne laisse croire que la substance est radioactive.

On associe cette teinte aux éléments radioactifs parce que le radium a été utilisé jusqu'aux années 60 pour fabriquer des affichages phosphorescents qui permettaient, par exemple, de voir les aiguilles d'une montre la nuit. Mais pour y arriver, on devait associer le radium à du sulfure de zinc dopé au cuivre. Quand le radium se désintègre, la particule émise peut donner une partie de son énergie au sulfure de zinc, ce qui fait qu'un électron des orbitales monte de niveau d'énergie. Quand l'électron redescend, il émet un photon dans la partie verte de la lumière visible. (Ces vieilles montres sont toujours radioactives, puisque la demi-vie du radium est de 1600 ans, mais leurs aiguilles ne brillent plus dans le noir parce que la structure cristalline du sulfure de zinc se détériore assez vite.)



www.mentalfloss.com/article/541196/where-did-myth-radiation-glow-green-come



Notez que le radium pur brille un peu, mais c'est parce que les particules émises lors de la désintégration excitent l'azote de l'air autour de radium. Quand les électrons de l'azote redescendent de niveau, il y a de la lumière émise. La lumière émise dans ce cas est plutôt bleue.

www.mentalfloss.com/article/541196/where-did-myth-radiation-glow-green-come

D'autres substances radioactives brillent parce que les désintégrations radioactives libèrent de l'énergie qui peut mener à une augmentation assez importante de la température de la substance pour qu'elle devienne lumineuse. Ce n'est pas la radioactivité qu'on voit, c'est le rayonnement émis par les objets chauds. L'image montre un morceau de dioxyde de plutonium 238 qui émet de la lumière rouge parce que les désintégrations radioactives le rendent très chaud.



en.wikipedia.org/wiki/Plutonium-238

Effets des rayonnements sur le corps humain

La radioactivité est dangereuse pour les humains. Quand une particule ayant beaucoup d'énergie traverse une cellule humaine, elle peut causer des dommages. Par exemple, un photon gamma peut ioniser un atome dans une molécule, ce qui peut par la suite entraîner la rupture d'une liaison chimique et former des radicaux libres. Ainsi, l'eau peut être séparée en deux parties par un photon gamma.



Ces radicaux libres sont extrêmement réactifs et vont générer toutes sortes de réactions chimiques non voulues. Ces réactions dénaturent les constituants de la cellule et en perturbent le fonctionnement. Quand trop de ces radicaux libres apparaissent dans une cellule, cette dernière peut en mourir. Évidemment, si beaucoup de cellules de votre corps meurent, votre état de santé va se détériorer.

On doit donc se protéger des particules émises par les substances radioactives. C'est très facile de bloquer les particules alpha. Ces grosses particules interagissent beaucoup avec la matière et une simple feuille de papier est souvent suffisante pour les arrêter. L'électron émis par les désintégrations bêta – est aussi relativement facile à arrêter (mais c'est un peu plus difficile que pour la particule alpha). Généralement, une plaque de plomb de 1 millimètre d'épaisseur ou une plaque de plexiglass de 1 centimètre d'épaisseur fera l'affaire. En revanche, c'est beaucoup plus difficile de bloquer les photons émis lors des désintégrations gamma (ou ceux provenant de l'annihilation d'un antiélectron et d'un électron lors d'une désintégration bêta +). Par exemple, il faut une plaque de plomb ayant une épaisseur de 3,8 cm ou un mur de béton d'une épaisseur de 28 cm pour bloquer 90 % des rayons gamma provenant de la désintégration du cobalt 60. Peu importe l'épaisseur de la protection, il y aura toujours un certain pourcentage de rayons gamma qui réussiront à traverser.

Après avoir lu le paragraphe précédent, on pourrait facilement conclure qu'il n'y a pas grand-chose à craindre des substances qui font de la radioactivité alpha ou bêta. On doit simplement placer un écran entre nous et la substance (ou s'éloigner de la substance...) pour éviter d'être irradié. Cependant, tous les isotopes radioactifs, qu'ils fassent des désintégrations alpha, bêta ou gamma, feront des dommages s'ils sont **dans notre corps**. Dans ce cas, on ne peut plus se protéger en utilisant un écran ou en s'éloignant de la substance. On doit donc éviter que ces substances entrent dans notre corps. Les décès causés par l'exposition au radon sont un exemple des dommages causés par des désintégrations alpha dans notre corps. Le radon provient de la désintégration alpha du radium présent dans le sol. Ce gaz, lui aussi radioactif, sort du sol et s'accumule souvent dans le sous-sol des maisons puisque c'est un gaz très lourd. Ce gaz inerte ne va pas être assimilé par l'organisme, mais il va être respiré par les occupants de la maison. Une fois dans les poumons, les particules alpha émises vont causer des dommages aux parois des poumons. Santé Canada estime que 16 % des cancers des poumons seraient liés à l'exposition au radon, ce qui représente 3000 décès par année au Canada.

On connaît plusieurs façons d'éviter l'entrée de substances radioactives dans notre corps. Lors d'accident nucléaire, on donne souvent des comprimés d'iode aux personnes exposées. On espère ainsi saturer l'organisme d'iode non radioactif pour éviter que l'organisme absorbe de l'iode radioactif souvent présent dans les isotopes radioactifs relâchés lors de ces accidents. Les habits de protection portés par ceux qui travaillent avec des substances radioactives ne sont pas conçus pour bloquer les radiations (bien qu'ils bloquent les particules alpha), ils sont conçus pour éviter que la personne entre en contact avec ces substances et ainsi empêcher qu'elles soient absorbées par l'organisme.



en.wikipedia.org/wiki/Hazmat_suit

On peut aussi utiliser la radioactivité à notre avantage. On peut, par exemple, utiliser la radioactivité pour tuer des cellules cancéreuses en les bombardant avec des particules émises par des substances radioactives. La plupart du temps, on utilise la désintégration bêta du cobalt 60. L'électron émis lors de cette désintégration ne pourrait pas atteindre des tumeurs profondes (puisque les électrons de la désintégration bêta sont assez facilement bloqués), mais les deux désintégrations gamma qui suivent cette désintégration génèrent des photons ayant des énergies de 1,17 MeV et 1,33 MeV qui peuvent facilement atteindre la tumeur. En croisant plusieurs faisceaux de photons gamma sur la cellule cible, cette dernière reçoit une dose de radiation assez importante pour entraîner sa mort.

12.4 LA LOI DE DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

L'activité

On peut se demander à quel rythme se feront les désintégrations. Est-ce que tous les atomes vont se désintégrer immédiatement ou est-ce qu'il faudra un certain temps pour que les noyaux se désintègrent ?

Trouvons le nombre d'atomes qui se désintègrent en une seconde. C'est ce qu'on appelle l'*activité* et qu'on représente par R .

Chaque isotope instable a une certaine probabilité de se désintégrer durant la prochaine seconde. Cette probabilité est donnée par λ , appelée la *constante de désintégration*. Par exemple, si la probabilité que l'atome se désintègre durant la prochaine seconde est de 1 %, alors on a $\lambda = 0,01 \text{ s}^{-1}$. Si on a N atomes et que chacun a une probabilité λ de se désintégrer durant la prochaine seconde, alors on obtient le nombre d'atomes qui se désintègrent durant ce temps si on multiplie ces deux quantités. L'activité est donc

Activité d'une substance radioactive

$$R = \lambda N$$

(Notez qu'il y aurait des nuances d'interprétation à faire pour des substances qui ont un λ très grand, mais le résultat final est le même.)



Erreur fréquente : Confondre λ avec une longueur d'onde

La constante de désintégration λ n'a rien à voir avec une longueur d'onde. C'est dommage que ce soit le même symbole pour les deux.

Unités pour mesurer l'activité

On peut donner l'activité d'une substance en nombre de désintégrations par seconde. On a donné le nom de becquerel à cette unité.

Le becquerel

$$1Bq = 1 \text{ désintégration par seconde}$$

On peut aussi donner l'activité en curie, qui est

Le curie

$$1Ci = 3,7 \times 10^{10} \text{ désintégrations par seconde}$$

1 curie est très près de l'activité d'un gramme de radium 226 pur.

Nombre d'atomes et activité en fonction du temps

Puisqu'il y a des désintégrations, le nombre d'atomes restant de la substance radioactive va diminuer avec le temps qui passe. Ainsi, le nombre d'atomes va diminuer à un rythme de plus en plus petit. En effet, comme le nombre de désintégrations par seconde est donné par $R = \lambda N$, on voit que le nombre de désintégrations par seconde va diminuer à mesure que N va diminuer. Sachant que l'activité diminue avec N , on peut trouver le nombre d'atomes restant.

L'activité correspond au rythme auquel le nombre de noyaux diminue. S'il y a 1000 désintégrations en 1 seconde, alors le nombre de noyaux diminue au rythme de 1000 noyaux par seconde. On a donc

$$-\frac{dN}{dt} = R$$

Il y a un signe négatif puisque le nombre de noyaux diminue. Comme $R = \lambda N$, on a

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

On peut résoudre cette équation différentielle pour obtenir le nombre d'atomes restant en fonction du temps.

$$\begin{aligned}\frac{dN}{dt} &= -\lambda N \\ \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\ \ln N &= -\lambda t + cst\end{aligned}$$

On trouve la constante en posant qu'à $t = 0$, le nombre d'atomes est égal à N_0 .

$$\begin{aligned}\ln N_0 &= -\lambda \cdot 0 + cst \\ cst &= \ln N_0\end{aligned}$$

On a alors

$$\begin{aligned}\ln N &= -\lambda t + \ln N_0 \\ \ln N - \ln N_0 &= -\lambda t \\ \ln \frac{N}{N_0} &= -\lambda t \\ \frac{N}{N_0} &= e^{-\lambda t}\end{aligned}$$

ce qui nous permet de finalement obtenir

Nombre de noyaux restant d'une substance radioactive en fonction du temps

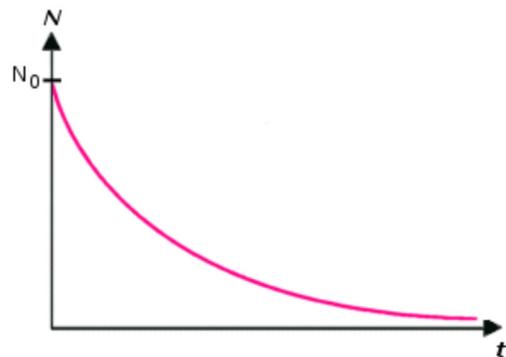
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Cette loi fut découverte à Montréal par Rutherford en 1899.

Donc le nombre d'atomes de la substance initiale décroît exponentiellement avec le temps.

Sachant cela, on peut trouver comment change l'activité avec le temps. L'activité de la substance devient alors

$$\begin{aligned}R &= \lambda N \\ &= \lambda N_0 e^{-\lambda t}\end{aligned}$$



tpe-rayons-ionisants.webnode.fr/introduction/la-radioactivite/

Comme l'activité initiale est $R_0 = \lambda N_0$, on peut écrire cette équation sous la forme suivante.

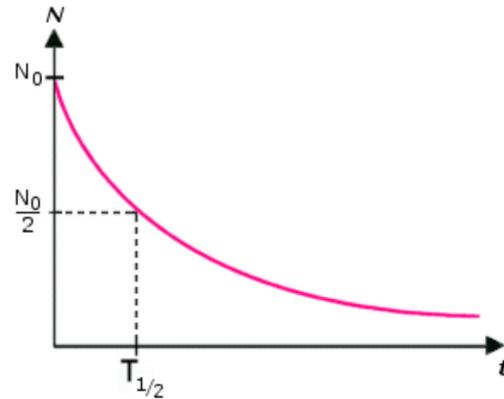
Activité en fonction du temps

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

Ainsi, l'activité d'un isotope radioactif décroît aussi exponentiellement.

La demi-vie

On ne peut dire au bout de combien de temps tous les noyaux radioactifs se seront désintégrés puisque la baisse est exponentielle. Comme la fonction exponentielle n'est jamais nulle, il reste toujours des noyaux en théorie. Pour mieux apprécier la vitesse avec laquelle les noyaux se désintègrent, on utilise la demi-vie. Elle indique au bout de combien de temps la moitié des noyaux se sont désintégrés.



Avec notre formule du nombre de noyaux en fonction du temps, on trouve donc que

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-\lambda t} \\ \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \\ \frac{1}{2} &= e^{-\lambda T_{1/2}} \\ \ln \frac{1}{2} &= -\lambda T_{1/2} \\ T_{1/2} &= \frac{-\ln \frac{1}{2}}{\lambda} \\ T_{1/2} &= \frac{\ln \left(\frac{1}{2}\right)^{-1}}{\lambda} \end{aligned}$$

On arrive finalement à

La demi-vie

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

Ces temps de demi-vie peuvent varier considérablement d'un isotope à l'autre. Certains isotopes ont des demi-vies aussi petites que $2,3 \times 10^{-23}$ seconde (hydrogène 7) alors que

d'autres isotopes radioactifs ont des demi-vies aussi longues que $2,2 \times 10^{24}$ années (tellure 128).

Chaque demi-vie, la moitié des noyaux restants se désintègre. Si la demi-vie est de 10 secondes et qu'on a 800 noyaux au départ, il en restera 400 après 10 secondes, 200 après 20 secondes, 100 après 30 secondes, 50 après 40 secondes et ainsi de suite. On divise par deux le nombre de noyaux à toutes les demi-vies.

Exemple 12.4.1

Le plutonium 239 fait une désintégration alpha avec une demi-vie de 24 100 ans. On a initialement 1 gramme de plutonium 239 pur.

- a) Quel est le nombre initial de noyaux ?

Le nombre de noyaux est évidemment égal au nombre d'atomes. Le nombre d'atomes est

$$\begin{aligned} N &= \frac{0,001 \text{ kg}}{239 \frac{\text{u}}{\text{atome}} \cdot 1,6605 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{u}}} \\ &= 2,52 \times 10^{21} \text{ atomes} \end{aligned}$$

Remarquez que 239 est aussi la masse molaire (en gramme) du plutonium. On aurait pu aussi faire

$$\begin{aligned} N &= \frac{1 \text{ g}}{239 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,022 \times 10^{23} \frac{\text{atomes}}{\text{mol}} \\ &= 2,52 \times 10^{21} \text{ atomes} \end{aligned}$$

- b) Quelle est la valeur de la constante de désintégration ?

La constante de désintégration est

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \\ &= \frac{\ln 2}{24\,100 \text{ ans}} \\ &= \frac{\ln 2}{7,605 \times 10^{11} \text{ s}} \\ &= 9,114 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Ce qui veut dire que le noyau de plutonium n'a que $9,114 \times 10^{-11} \%$ de se désintégrer chaque seconde.

- c) Quelle est l'activité initiale ?

L'activité initiale est

$$\begin{aligned} R_0 &= \lambda N_0 \\ &= 9,114 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1} \cdot 2,52 \times 10^{21} \\ &= 2,297 \times 10^9 \text{ Bq} = 0,0621 \text{ Ci} \end{aligned}$$

d) Quelle sera l'activité de ce gramme de plutonium dans 10 000 ans ?

L'activité sera de

$$\begin{aligned} R &= R_0 e^{-\lambda t} \\ &= 2,297 \times 10^9 \text{ Bq} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{24100 \text{ ans}} \cdot 10000 \text{ ans}} \\ &= 2,297 \times 10^9 \text{ Bq} \cdot 0,75 \\ &= 1,723 \times 10^9 \text{ Bq} = 0,0466 \text{ Ci} \end{aligned}$$

La datation radioactive

On peut utiliser la loi de désintégration pour dater certains objets si ces derniers contiennent des éléments radioactifs. Un des modes de datation les plus connus est la datation au carbone 14. Tous les organismes vivants incorporent du carbone durant leur vie et une partie du carbone naturel est du carbone 14 radioactif. Tant que l'organisme est vivant, l'absorption continue de carbone maintient la proportion de carbone 14 au même niveau, soit environ $1,3 \times 10^{-10} \%$. Quand l'organisme meurt, l'apport de carbone 14 cesse et la quantité de carbone 14 va alors diminuer de façon exponentielle avec une demi-vie de 5730 ans. En mesurant la proportion de carbone 14 dans l'organisme mort, on peut déterminer depuis combien de temps il est mort.

Calculons pour commencer l'activité initiale d'un gramme de carbone naturel. Le nombre d'atomes de carbone dans un gramme de carbone naturel est

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{1 \text{ g}}{12,0107 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,022 \times 10^{23} \frac{\text{atomes}}{\text{mol}} \\ &= 5,0122 \times 10^{22} \text{ atomes} \end{aligned}$$

On utilise la masse atomique de 12,0107 g/mol, car c'est la masse atomique moyenne des différents isotopes de carbone naturel (98,9 % de carbone 12, 1,1 % de carbone 13 et un peu de carbone 14). On aurait utilisé 14 g/mol si on avait eu du carbone 14 pur. Le nombre d'atomes de 14 est $1,3 \times 10^{-10} \%$ de ce nombre d'atomes.

$$\begin{aligned} N_{14\text{C}} &= 1,3 \times 10^{-12} \cdot 5,0122 \times 10^{22} \text{ atomes} \\ &= 6,516 \times 10^{10} \text{ atomes} \end{aligned}$$

L'activité initiale dans un gramme de carbone naturel est donc

$$\begin{aligned}
 R_0 &= N_0 \lambda \\
 &= N_0 \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \\
 &= 6,516 \times 10^{10} \cdot \frac{\ln 2}{5730 \text{ans}} \\
 &= 6,516 \times 10^{10} \cdot \frac{\ln 2}{1,808 \times 10^{11} \text{s}} \\
 &= 0,2497 \text{Bq}
 \end{aligned}$$

On va donc dire que

Activité initiale d'un gramme de carbone naturel

$$R_0 = 0,25 \text{Bq}$$

Voici comment on procède alors pour trouver l'âge d'un objet.

Exemple 12.4.2

Un morceau de coton ancien contenant 10 grammes de carbone a une activité de 0,5 Bq. Quel est l'âge de ce tissu ?

Avec 10 g de carbone, l'activité initiale est

$$\begin{aligned}
 R_0 &= 0,25 \frac{\text{Bq}}{\text{g}} \cdot 10 \text{g} \\
 &= 2,5 \text{Bq}
 \end{aligned}$$

Si l'activité est maintenant de 0,5 Bq, on a

$$\begin{aligned}
 R &= R_0 e^{-\lambda t} \\
 R &= R_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \\
 0,5 \text{Bq} &= 2,5 \text{Bq} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{5730 \text{ans}} \cdot t} \\
 \frac{1}{5} &= e^{-\frac{\ln 2}{5730 \text{ans}} \cdot t} \\
 \ln \frac{1}{5} &= -\frac{\ln 2}{5730 \text{ans}} \cdot t \\
 t &= 5730 \text{ans} \cdot \frac{\ln 5}{\ln 2} \\
 t &= 13\,305 \text{ans}
 \end{aligned}$$

Limites à la datation au carbone 14

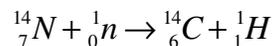
Premièrement, on ne peut dater que des objets qui ont été vivants. Le tissu de coton de l'exemple précédent en est un bon exemple puisque le coton est une plante. Il y a de bonnes chances que le tissu ait été fait peu de temps après la récolte du coton et c'est au moment de la récolte que le coton a cessé d'absorber le carbone naturel. L'or ne peut être daté au carbone 14, car il n'a jamais été vivant.



Deuxièmement, on ne peut dater d'objets très anciens (plus de 60 000 ans environ), car il n'y a plus assez de carbone 14 dans l'objet.

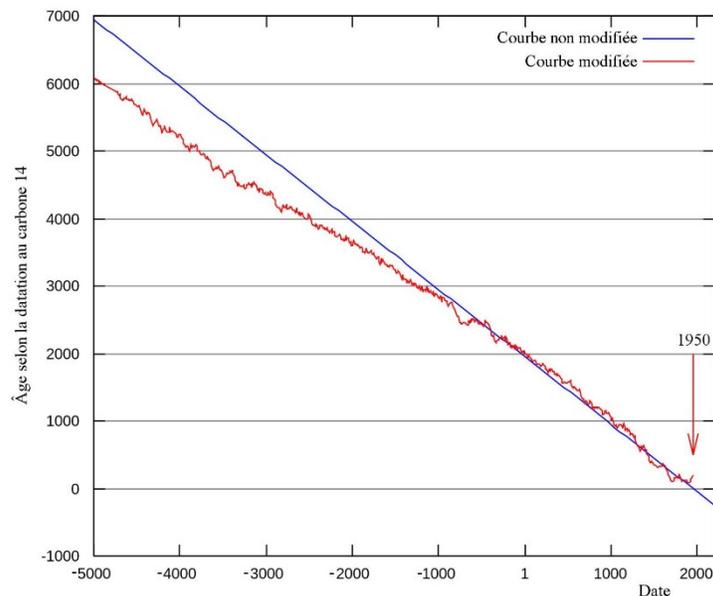
D'où vient le carbone 14 naturel

Si le carbone 14 a une demi-vie de 5730 ans, comment se fait-il qu'il y en ait encore sur Terre si elle a été formée il y a 4,5 milliards d'années ? Est-ce que les créationnistes ont raison et la Terre n'a que 6000 ans ? Évidemment non. Le carbone 14 se refait continuellement en haute atmosphère grâce à la réaction suivante.



Les neutrons proviennent du rayonnement cosmique. En fait, le flux de neutron en haute atmosphère est influencé par quelques éléments et la quantité de carbone 14 produite varie un peu. Heureusement, on a pu faire une courbe de calibration en comparant les âges obtenus par datation au carbone et d'autres méthodes quand c'était possible. Voici cette courbe.

Si on obtient un âge de 6000 ans avec le calcul (Âge selon la datation au carbone 14 non modifiée), cela ne veut pas dire que l'objet date de 4000 av. J.-C. (-4000) comme l'indique la courbe bleue (courbe non modifiée), mais plutôt qu'il date de 5000 av. J.-C. comme l'indique la courbe rouge (courbe modifiée).

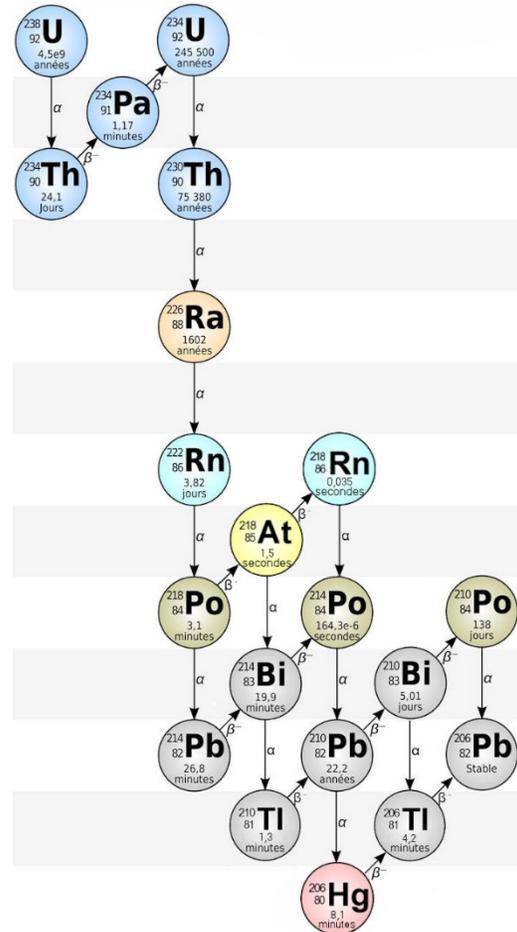


commons.wikimedia.org/wiki/File:Radiocarbon_dating_calibration.svg

Les séries radioactives

Il arrive souvent que le résultat d'une désintégration radioactive nous donne un noyau qui est lui aussi radioactif, qui à son tour se désintégrera en un autre noyau radioactif et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive à un noyau stable. Par exemple, voici quelques séquences possibles qu'on peut obtenir à partir de l'uranium 238 et qui se termine au plomb 206, et incluant les demi-vies de ces désintégrations.

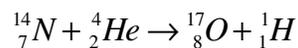
On peut comprendre alors pourquoi on retrouve encore du radium à la surface de la Terre même si la demi-vie du radium n'est que de 1602 ans. C'est la série de désintégration de l'uranium qui passe par le radium à un certain moment. Ainsi, même si le radium se désintègre assez rapidement (à l'échelle géologique), il y a du nouveau radium qui apparaît continuellement à cause de la désintégration de l'uranium, qui elle se fait beaucoup plus lentement (demi-vie de 4,51 milliards d'années).



physicsopenlab.org/2016/01/29/uranium-gamma-spectrometry/

12.5 LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Initialement, on ne connaissait que des isotopes existant dans la nature. La plupart de ceux-ci étaient stables et ne se désintégraient pas. Puis, Rutherford et James Chadwick furent capables pour la première fois, en 1919, de changer le noyau d'un isotope en un autre isotope avec la réaction suivante.



Les noyaux d'hélium (particules alpha) utilisés pour cette réaction provenaient d'une désintégration alpha du radium. Ainsi, la particule alpha arrive avec beaucoup de vitesse et le noyau ne peut pas survivre intact à un tel impact.

À partir de ce moment, on tenta de nombreuses réactions entre les noyaux de plusieurs éléments et on parvint à faire de multiples transformations de noyau atomique de cette façon. C'est ainsi qu'on obtient de nouveaux isotopes et de nouveaux éléments qui n'existent pas dans la nature.

Les réactions sont difficiles à obtenir en bombardant les noyaux avec des particules chargées puisque le noyau possède également une charge électrique qui repousse la particule chargée qui s'approche. On doit donc donner beaucoup de vitesse aux noyaux pour qu'ils atteignent leur cible et c'est pour cette raison qu'on a dû construire des accélérateurs de particules. Mais la découverte du neutron, qui n'a pas de charge électrique, en 1932 a tout changé. On pouvait alors facilement bombarder des noyaux avec des neutrons sans qu'il y ait de répulsion électrique. En bombardant ainsi des noyaux à l'aide de neutrons, Enrico Fermi obtient une quarantaine de nouveaux isotopes radioactifs. On obtient même des éléments qui n'existent pas naturellement. En 1940, McMillan et Abelson obtiennent du neptunium et, en 1941, Seaborg obtient du plutonium. (Fermi pensait les avoir obtenus en 1934-36, mais c'était du baryum et du krypton.)

Ici encore, on calcule l'énergie libérée par la réaction avec le défaut de masse.

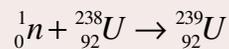
Énergie libérée lors d'une réaction nucléaire

$$Q = (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Si Q est positif, la réaction libère de l'énergie et elle est souvent possible même si les noyaux entrent en collision avec peu de vitesse. Si Q est négatif, la réaction demande de l'énergie. Cela ne veut pas dire que la réaction est impossible, mais plutôt qu'il faut fournir de l'énergie pour qu'elle se produise. Cette énergie est fournie sous forme d'énergie cinétique des noyaux avant la collision. Ainsi, si la réaction demande 5 MeV, les noyaux entrant en collision devront avoir au minimum une énergie cinétique de 5 MeV pour que la réaction puisse se produire. (Souvent, il en faut même un peu plus puisque la conservation de la quantité de mouvement peut faire que les noyaux après la collision ont une certaine vitesse. Ainsi, ce n'est donc pas toute l'énergie cinétique qui peut être utilisée pour faire la réaction, car la quantité de mouvement doit être conservée.)

Exemple 12.5.1

Une des réactions faites par Fermi en 1934 est



Quelle est l'énergie libérée par cette réaction ?

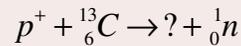
L'énergie est

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (1,008\,664\,9u + 238,050\,788\,2u - 239,054\,293\,3u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (0,005\,1598u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= 4,81\text{MeV} \end{aligned}$$

Comme la valeur de Q est positive, cette réaction est possible même si les neutrons sont lents.

Exemple 12.5.2

Soit la réaction nucléaire suivante.

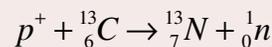


- a) Quel est l'isotope manquant ?

Dans les réactions nucléaires, le nombre de proton et le nombre de neutron restent donc identique avant et après la réaction. Ainsi, le nombre de protons (Z) et le nombre de nucléons (N) sont les mêmes de chaque côté de l'équation.

Avant la réaction, on a 7 protons. Il doit donc y en avoir 7 après la réaction. Ils sont tous dans l'isotope inconnu. L'élément avec 7 protons est l'azote.

Avant la réaction, on a 14 nucléons et on doit donc en avoir 14 après la réaction. Comme il y a un neutron éjecté, il en reste donc 13 pour notre isotope inconnu. On a donc de l'azote 13.



- b) Quelle est l'énergie libérée par cette réaction ?

L'énergie est

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= \left((m_p + m_C) - (m_{\text{N avec un electron de moins}} + m_n) \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \end{aligned}$$

Il y a un électron de moins pour l'azote puisque les électrons dans les orbitales n'ont pas changé durant la réaction. On avait 6 électrons dans les orbitales du carbone avant la réaction et il y en a donc 6 dans les orbitales de l'azote après la collision. Il en manque donc un puisque l'azote en a normalement 7. C'est ce genre de chose qui arrivera si c'est un noyau qui arrive pour faire la collision (comme un proton ou une particule alpha) au lieu d'un atome complet. On peut cependant régler le problème en prenant la masse de l'atome au lieu de la masse du noyau seulement. Les électrons vont alors s'annuler de chaque côté de l'équation.

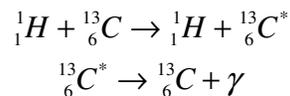
$$\begin{aligned} Q &= \left((m_p + m_C) - (m_{\text{N avec un electron de moins}} + m_n) \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= \left((m_{\text{H avec un electron de moins}} + m_C) - (m_{\text{N avec un electron de moins}} + m_n) \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= \left((m_{\text{H}} - m_e + m_C) - (m_{\text{N}} - m_e + m_n) \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= \left((m_{\text{H}} + m_C) - (m_{\text{N}} + m_n) \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \end{aligned}$$

On peut alors constater qu'il n'est plus nécessaire de s'occuper des électrons.

$$\begin{aligned}
 Q &= ((m_H + m_C) - (m_N + m_n)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= \left(\begin{array}{c} (1,007\,825\,03u + 13,003\,354\,84u) - \\ (1,008\,664\,92u + 13,005\,738\,61u) \end{array} \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= ((14,011\,179\,87u) - (14,014\,403\,53u)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= (-0,003\,223\,66u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= -3,003 \text{MeV}
 \end{aligned}$$

L'énergie du proton doit donc être de 3 MeV au minimum pour que cette réaction se produise (en réalité, un peu plus à cause de la conservation de la quantité de mouvement).

Parfois le résultat de la collision est simplement une excitation du noyau, qui fera par la suite une désintégration gamma.



Évidemment, l'énergie cinétique baisse lors de cette collision puisqu'une partie de cette énergie est absorbée par le nucléon qui monte de niveau d'énergie dans le noyau.

12.6 LA FISSION NUCLÉAIRE

La découverte

Au début, les transformations obtenues par désintégration ou par réaction nucléaire donnaient toujours des éléments assez près de l'élément initial dans le tableau périodique. Par exemple, Edwin McMillan et Philip Abelson obtinrent en 1940, en bombardant de l'uranium (élément 92), l'élément 93 (qu'ils baptisèrent neptunium, un élément qui n'existe pas naturellement dans l'univers). C'était le premier d'une série d'éléments créée en laboratoire. 23 nouveaux éléments furent ainsi obtenus au cours du 20^e siècle.

Mais on obtenait aussi des résultats plus étranges en bombardant l'uranium. En 1938, Otto Hahn et Fritz Strassmann obtenaient des substances dont les propriétés étaient bien différentes de ce qu'on attendait. On obtenait, entre autres, un élément dont les propriétés étaient similaires à celles du baryum. Quel était cet élément mystérieux ? On ne pensait pas que ce pouvait être du baryum (élément 56), car il est trop loin de l'uranium (élément 92) dans le tableau périodique.

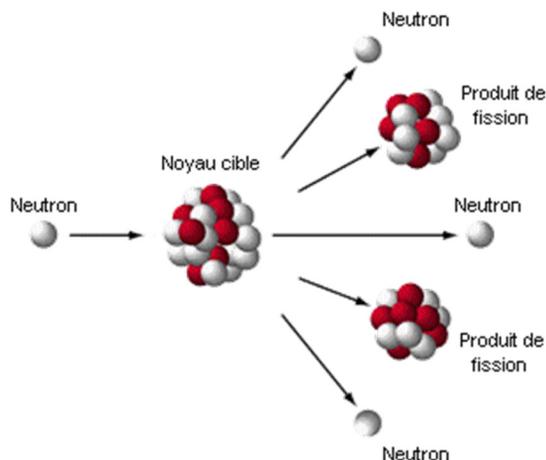
Ces résultats furent correctement interprétés au début de 1939 par Lise Meitner et Otto Frisch, d'anciens collaborateurs de Hahn en Allemagne, mais maintenant réfugiés en Suède (Hitler avait pris le pouvoir en Allemagne en 1933). Ils comprirent que ces produits étaient

le résultat d'un cassage en deux parties plus ou moins égales du noyau de l'uranium. C'est ce qu'on appelle la *fission nucléaire*.

Cette fois-ci, c'est l'équipe de Fermi à Rome qui passa à côté de cette découverte. En fait, plusieurs équipes avaient les évidences nécessaires pour conclure qu'il y avait de la fission nucléaire, mais plusieurs attribuèrent les résultats obtenus à une défectuosité d'appareil.

Voici une animation de fission de l'uranium.

<https://youtu.be/a5UuRjjLcLE>



www.atomicarchive.com/Fission/Fission1.shtml

Exemple 12.6.1

Une des réactions de fission de l'uranium possible est ${}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{141}\text{Ba} + {}_{36}^{92}\text{Kr} + 3{}_0^1n$.

(Observez que le nombre de protons et le nombre de neutrons sont les mêmes avant et après la réaction. Ce sera toujours vrai pour la fission.)

Quelle est l'énergie libérée par cette réaction ?

L'énergie est

$$\begin{aligned}
 Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= ((m_n + m_U) - (m_{\text{Ba}} + m_{\text{Kr}} + 3 \cdot m_n)) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= \left((1,008\,665u + 235,043\,930u) - (140,914\,411u + 91,926\,156u + 3 \cdot 1,008\,665u) \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= (0,186\,033u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\
 &= 173,3 \text{MeV}
 \end{aligned}$$

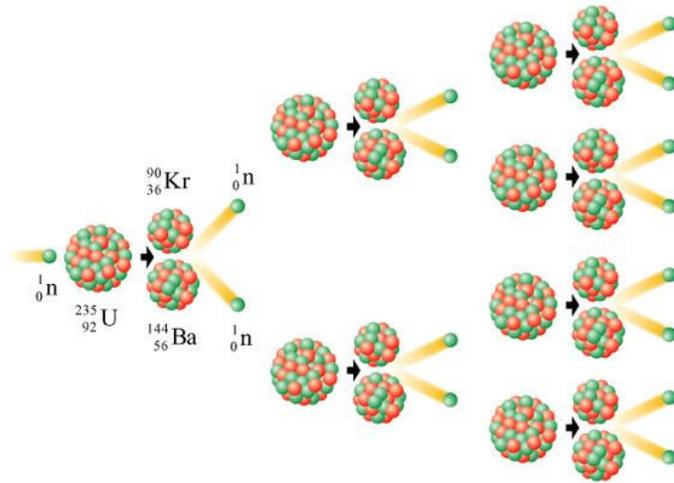
C'est beaucoup d'énergie par rapport aux énergies d'autres réactions nucléaires qui étaient, au mieux, de quelques dizaines de MeV.

Seuls les gros noyaux peuvent libérer de l'énergie lors d'une fission. Généralement, ce sont des actinides (élément 89 à 102) ayant un nombre impair de neutrons. Par exemple, l'uranium 235 (143 neutrons) est fissile alors que l'uranium 238 (146 neutrons) ne l'est pas (le noyau absorbe simplement le neutron). L'uranium 235 est le seul isotope fissile qui existe naturellement.

La réaction en chaîne

Quand on a découvert la radioactivité, on chercha si on pouvait l'utiliser pour générer de l'énergie de façon contrôlée. Toutefois, comme les réactions se font spontanément et au hasard, c'était pratiquement impossible. Avec la découverte de la radioactivité artificielle en 1934, on chercha, Leó Szilárd en tête, s'il était possible de provoquer les désintégrations en chaîne. On espérait que la particule émise par une désintégration puisse frapper un autre noyau et le transformer en un autre noyau radioactif. Quand ce dernier se désintégrerait, la particule émise irait, à son tour, provoquer la désintégration d'un autre noyau et ainsi de suite. On ne parvenait pas cependant à faire fonctionner cette technique.

Avec la découverte de la fission de l'uranium en 1939, Szilárd comprend aussitôt qu'on peut obtenir une réaction en chaîne. La fission du noyau d'uranium est provoquée par l'arrivée d'un neutron supplémentaire dans le noyau. Mais la fission émet aussi des neutrons et il serait donc possible que ces neutrons provoquent à leur tour la fission de d'autres noyaux d'uranium.



resources.edb.gov.hk/~senegy/power/print/nuclear_phy_print_e.html

La réaction peut donc s'entretenir elle-même et même gagner rapidement en intensité puisque chaque fission libère plusieurs neutrons. Vous pouvez voir une analogie de cette réaction en chaîne où des balles de pingpong jouent le rôle des neutrons et des trappes à souris le rôle des atomes d'uranium 235.

https://www.youtube.com/watch?v=vjqIJW_Qr3c

Dès 1939, Joliot-Curie et ses collaborateurs montraient expérimentalement que la réaction en chaîne est possible, mais ils ne possédaient pas assez d'uranium pour arriver à faire une réaction continue et contrôlée. C'est en 1942, seulement 4 ans après la découverte de la fission, que l'équipe d'Enrico Fermi parvient à faire la première réaction nucléaire contrôlée à l'Université de Chicago.

Notons deux caractéristiques importantes de ces réacteurs nucléaires.

1) On doit contrôler la réaction

Le nombre de fissions augmente rapidement puisque chaque fission en déclenche plusieurs autres environ 10 ns plus tard. Pour éviter que le réacteur s'emballe et n'explose, on doit contrôler la réaction. Cela se fait avec des barres de cadmium que l'on insère dans l'uranium. Le cadmium absorbe les neutrons ce qui arrête la

réaction. Quand la réaction va trop vite, on insère un peu plus les barres de cadmium pour absorber plus de neutrons et diminuer le nombre de fissions. Quand la réaction va trop lentement, on sort les barres de cadmium pour absorber moins de neutrons et augmenter le nombre de fissions.

2) On doit ralentir les neutrons

L'uranium contient naturellement beaucoup d'uranium 238 (99,3 % d'uranium 238 et 0,7 % d'uranium 235). Toutefois, l'uranium 238 absorbe les neutrons émis par la fission de l'uranium 235 sans faire de fission, ce qui fait que l'uranium naturel ne peut pas faire de réaction en chaîne. Par contre, la situation change drastiquement si on ralentit les neutrons émis par la fission. Cela augmente fortement la probabilité que les neutrons interagissent avec les rares atomes d'uranium 235 au point qu'un neutron lent a plus de chance d'interagir avec un atome d'uranium 235 que d'uranium 238 même s'ils sont nettement moins nombreux. Le problème, c'est que les neutrons émis par la fission sont trop rapides. On les ralentit en faisant faire au neutron de nombreuses collisions avec les atomes d'une substance appelée *modérateur*. Les atomes d'un bon modérateur n'absorbent pas les neutrons et résistent bien aux collisions. Les noyaux d'hydrogène (1H , 2H et 3H), d'hélium et de carbone sont d'excellents modérateurs. On utilise donc souvent de l'eau ou du graphite comme modérateur (incluant l'eau lourde, une eau dans laquelle un des hydrogènes 1H est remplacé par 2H , qui est un modérateur plus efficace que l'eau ordinaire). Puisqu'il est peu dispendieux, le graphite a souvent été utilisé dans les premiers réacteurs, mais il en faut beaucoup, car il est moins efficace. De plus, le graphite peut s'enflammer et est parti responsable de 2 des 4 grands accidents de centrale nucléaire. L'eau ordinaire absorbe un peu les neutrons de sorte que pour l'utiliser comme modérateur, on doit enrichir un peu l'uranium (c'est-à-dire augmenter la proportion d'uranium 235 à 2-3 %). Généralement, le cœur d'un réacteur est composé de pastilles de dioxyde d'uranium (UO_2) séparées par des couches de modérateurs ce qui force les neutrons émis par une pastille à traverser le modérateur avant de réagir avec un autre atome d'uranium 235 dans une autre pastille.

Ainsi, le premier réacteur, construit dans le court de squash de l'université de Chicago en 1942 était formé de briques de graphite contenant chacune 2 grosses pastilles d'uranium naturel. Ils ont retiré lentement les barres de cadmium une à une jusqu'à ce que la réaction se fasse à un rythme constant. Après 28 minutes, ils ont tout arrêté en insérant à nouveau les barres de cadmium.

La bombe atomique

Si la réaction en chaîne se produit rapidement, sans être contrôlée, il en résulte une violente explosion et on obtient alors une bombe atomique.

La réaction en chaîne peut se faire très rapidement si elle se fait avec une proportion importante d'uranium 235 et sans aucune barre de contrôle. On peut aussi l'obtenir avec du plutonium 239 qui est aussi un noyau fissile. Ce qui rend la fabrication de la bombe difficile, c'est d'obtenir un de ces deux isotopes. L'uranium 235 ne constitue que 0,7 % de l'uranium naturel. Si on veut faire une bombe, il faut beaucoup augmenter cette proportion (de l'ordre de 85 %). Cette tâche est d'autant plus difficile que les isotopes 235 et 238 ont les mêmes propriétés chimiques, ce qui rend inutiles toutes les techniques chimiques. On doit utiliser d'autres techniques, comme la centrifugation, pour augmenter lentement la proportion d'uranium 235 et obtenir ainsi de l'uranium enrichi. Quant au plutonium, il n'existe même pas naturellement. On peut cependant le produire avec une centrale nucléaire, car l'absorption des neutrons par l'uranium 238 finit par produire du plutonium 239 par deux désintégrations bêta. Le design des bombes à plutonium est également plus complexe.

Le 16 juillet 1945, on testait la première bombe atomique au Nouveau-Mexique. La bombe atomique fut ensuite utilisée sur les villes de Hiroshima (6 août 1945) et Nagasaki (9 août 1945). Voici d'ailleurs un vidéo de tests de bombe atomique fait à l'atoll de Bikini en 1946. <http://www.youtube.com/watch?v=nZCFrnL3W5A>

L'énergie libérée lors de ces tests était d'environ 23 kilotonnes chacun (l'équivalent de 23 000 tonnes de TNT), soit à peu près l'énergie libérée par chacune des bombes d'Hiroshima et de Nagasaki.

Voici deux films montrant les effets de l'explosion sur différentes structures.

<http://www.youtube.com/watch?v=tr76hNngqts>

<http://www.youtube.com/watch?v=QsB83fAtNQE>

On peut facilement voir les deux effets principaux de l'explosion : la chaleur et le souffle.

Les déchets radioactifs

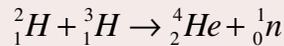
Après la fission, les noyaux obtenus sont généralement très radioactifs. Comme les gros noyaux fissiles ont une proportion de neutrons plus importante que les noyaux plus petits, on se retrouve, après la fission, avec des noyaux de tailles moyennes ayant un surplus de neutrons. Ces noyaux ont donc tendance à faire une désintégration bêta – pour diminuer le nombre de neutrons dans le noyau. On doit donc entreposer ces produits radioactifs dans une centrale nucléaire et c'est ce qui contamine toute la région où s'est produit une explosion atomique ou un accident dans une centrale. Comme certains de ces produits ont des demi-vies très longues, la zone est contaminée pour une très longue période.

12.7 LA FUSION NUCLÉAIRE

On peut aussi obtenir de l'énergie en combinant des petits noyaux pour en faire des plus gros. C'est ce qu'on appelle la *fusion nucléaire*. Généralement, cette réaction libère de l'énergie si la fusion des noyaux nous rapproche de fer 56 (il y a de nombreuses exceptions) puisque c'est le noyau qui a l'énergie de liaison par nucléon la plus élevée.

Exemple 12.7.1

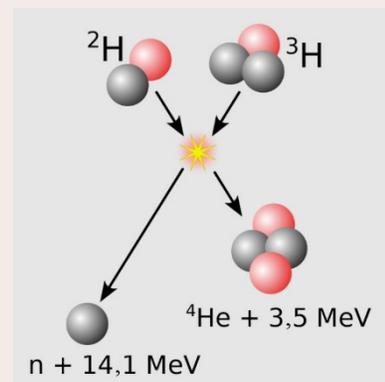
Quelle est l'énergie libérée par cette réaction ?



(Observez que le nombre de protons et le nombre de neutrons sont les mêmes avant et après la réaction. Ce sera toujours vrai pour la fusion.)

L'énergie est

$$\begin{aligned} Q &= (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= ((m_{\text{H}_2} + m_{\text{H}_3}) - (m_{\text{He}} + m_{\text{n}})) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= \left((2,014\,101\,778u + 3,016\,049\,278u) - \right. \\ &\quad \left. (4,002\,603\,254u + 1,008\,664\,916u) \right) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= (0,018\,882\,886u) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u} \\ &= 17,6 \text{MeV} \end{aligned}$$



simple.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion

La bombe H

On pensa assez vite que la fusion de l'hydrogène pouvait augmenter la puissance des bombes atomiques. Lors de l'explosion de la bombe à fission, la température devient si élevée que l'hydrogène peut fusionner. On parvint ainsi à mettre au point, en 1952, la bombe à hydrogène (bombe H) dont la puissance est nettement plus grande qu'une simple bombe à fission comme celle d'Hiroshima. La bombe H la plus forte ayant été testé a libéré une énergie de 50 Mt, soit environ 2500 fois celle libérée à Hiroshima ! Voici un vidéo montrant un test de bombe H.

<https://www.youtube.com/watch?v=D9c9kQDMis>

Les centrales à fusion

La réaction montrée dans l'exemple précédent est une des réactions qu'on tente de réaliser à grande échelle pour les futures centrales nucléaires à fusion. Ça reste difficile, car il faut que les noyaux s'approchent suffisamment pour que la fusion se produise et, pour ça, il faut qu'ils aient une vitesse suffisante pour vaincre la répulsion électrique des noyaux. On doit donc augmenter la vitesse des noyaux en augmentant la température du gaz jusqu'à plusieurs dizaines de millions de degrés Celsius ! Évidemment, c'est tout un problème : comment chauffer le gaz à de telles températures et dans quoi le met-on ? Il y a des avenues possibles, mais ce n'est pas encore au point pour qu'il y ait des centrales à fusion commerciales.

Le jour où les centrales à fusion seront opérationnelles (si cela se produit), il y a de bonnes chances que les crises énergétiques disparaissent et que les problèmes de CO₂ dans l'atmosphère soient, du moins en partie, réglés. Pour illustrer pourquoi il en est ainsi, calculons combien de temps on pourrait fournir de l'énergie à une maison québécoise moyenne avec 100 grammes d'hydrogène (la moitié des atomes sont des atomes de deutérium et l'autre moitié sont des atomes de tritium). Le nombre d'atomes est

$$\begin{aligned} N &= \frac{100\text{g}}{\text{masse molaire moyenne}} \cdot N_A \\ &= \frac{100\text{g}}{2,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6,022 \times 10^{23} \\ &= 2,4 \times 10^{25} \end{aligned}$$

Comme il faut 2 atomes pour faire une réaction, on aura $1,2 \times 10^{25}$ réactions de fusion. L'énergie obtenue est donc

$$\begin{aligned} E &= 1,2 \times 10^{25} \text{ fusions} \cdot 17,6 \frac{\text{MeV}}{\text{fusion}} \\ &= 2,1 \times 10^{32} \text{ eV} \\ &= 3,38 \times 10^{13} \text{ J} \end{aligned}$$

Comme une maison moyenne consomme 10^{11} J par année (30 000 kWh), on pourra fournir de l'énergie pendant

$$\text{temps} = \frac{3,38 \times 10^{13} \text{ J}}{10^{11} \frac{\text{J}}{\text{année}}} = 338 \text{ ans}$$

Pas mal pour seulement 100 grammes d'hydrogène, non ? Tout ça en ne produisant pas de CO₂ et en ne produisant pas de produits radioactifs ! (En réalité, les neutrons produits iront frapper les parois de l'enclume du réacteur et l'absorption de ces neutrons par les atomes de la paroi va les rendre radioactifs...) Les isotopes, comme le deutérium, nécessaires à la fusion sont simplement pris dans la mer. La proportion de ces isotopes n'est pas très grande, mais il y en a assez pour que chaque m³ d'eau fournisse la même énergie que 700 tonnes de pétrole.

On réalisa la première fusion contrôlée de deutérium tritium le 9 novembre 1991 au JET en Angleterre. En 1996 au JT-60 au Japon, on parvenait à obtenir les conditions nécessaires pour que plus d'énergie par fusion soit libérée que celle qu'on doit fournir pour faire fonctionner l'appareil. Il y a actuellement un centre d'étude important en construction (ITER) dans le sud de la France qui permettra de tester les technologies nécessaires à la première véritable centrale à fusion (DEMO). ITER devrait être opérationnel en 2034 (le budget du programme est de 30 milliards de dollars !).

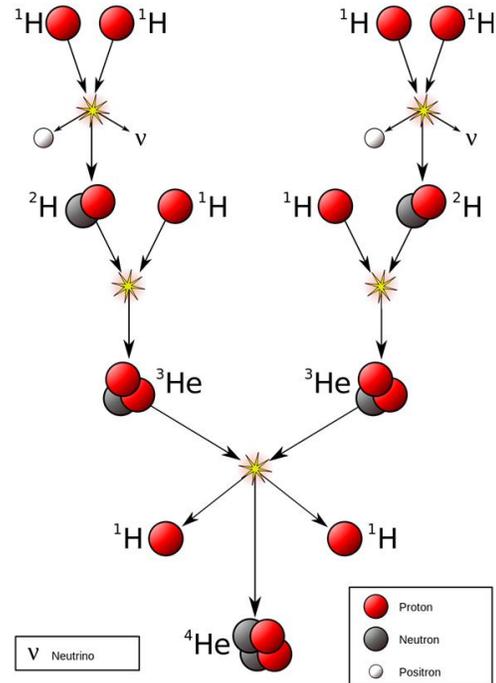
Le Soleil

Avec la découverte de la loi de la conservation de l'énergie (1868), on cherchait la source d'énergie du Soleil. Hélas, on ne trouvait aucune source d'énergie qui permettrait au Soleil de briller pendant quelques milliards d'années. Quand on fit les premières réactions nucléaires, Arthur Eddington suggéra, en 1920, que ces réactions étaient possiblement la source d'énergie du Soleil. C'est finalement Hans Bethe qui détermina, en 1939, la réaction de fusion qui se produit à l'intérieur du Soleil.

L'énergie du Soleil vient de la fusion de l'hydrogène, principal constituant du Soleil, en hélium. La réaction la plus courante (parce qu'il y a différentes façons de le faire) au centre du Soleil est montrée sur la figure.

Cette réaction libère 26,7 MeV. Il y a 632 millions de tonnes d'hydrogène qui fusionnent ainsi dans le Soleil chaque seconde, libérant ainsi $3,83 \times 10^{26}$ joules. Il y a également 2 neutrinos libérés à chaque réaction. Ces neutrinos sortent presque tous directement hors du Soleil. Environ 10^{15} (un million de milliards !) neutrinos émis ainsi par le Soleil traversent votre corps chaque seconde sans avoir le moindre effet sur vous.

en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion



On pourrait donc dire qu'on tire déjà une bonne partie de notre énergie de la fusion nucléaire, car presque toutes les sources d'énergie viennent ultimement de l'énergie solaire. (Les seules exceptions auxquelles je pense sont la fission nucléaire et la géothermie.)

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Nombre de nucléons dans un noyau

$$A = Z + N$$

Unité de masse atomique

$$1 u = 1,660\,539 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Rayon du noyau

$$r_{\text{noyau}} = 1,2 \text{ fm} \cdot \sqrt[3]{A}$$

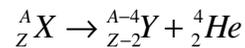
Énergie nucléaire

$$Q = (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

L'énergie est en MeV et les masses sont en unité de masse atomique.

Énergie de liaison d'un noyau de l'élément X

$$E_{\text{liaison}} = (Zm_{H1} + Nm_n - m_X) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Désintégration alpha**Énergie libérée lors d'une désintégration alpha**

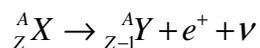
$$Q = (m_X - m_Y - m_{He4}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Énergie de la particule alpha après une désintégration alpha

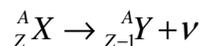
$$E_{k He4} = \frac{m_Y}{m_{He4} + m_Y} Q$$

Désintégration β^- **Énergie libérée lors d'une désintégration β^-**

$$Q = (m_X - m_Y) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Désintégration β^+ **Énergie libérée lors d'une désintégration β^+**

$$Q = (m_X - m_Y - 2m_e) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Capture électronique**Énergie libérée lors d'une capture électronique**

$$Q = (m_X - m_Y) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

Activité d'une substance radioactive

$$R = \lambda N$$

Nombre de noyaux restant d'une substance radioactive en fonction du temps

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Activité en fonction du temps

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

Le becquerel

$$1Bq = 1 \text{ désintégration par seconde}$$

Le curie

$$1Ci = 3,7 \times 10^{10} \text{ désintégrations par seconde}$$

La demi-vie

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

Activité initiale d'un gramme de carbone naturel

$$R_0 = 0,25Bq$$

Énergie libérée lors d'une réaction nucléaire

$$Q = (m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}) \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

EXERCICES**12.1 Le noyau atomique**

1. Combien y a-t-il de protons et de neutrons dans les noyaux suivants ?

- a) ${}_{18}^{39}\text{Ar}$
- b) ${}_{76}^{180}\text{Os}$

2. Quel est le rayon des noyaux suivants ?
- ${}^{18}_8\text{O}$
 - ${}^{235}_{92}\text{U}$
3. Quel serait le rayon de la Terre ($m = 6 \times 10^{24}$ kg) si elle avait la même densité que le noyau de ${}^{12}_6\text{C}$?

12.2 L'énergie nucléaire

Table des masses atomiques

<http://physique.merici.ca/ondes/masseatomique.pdf>

4. Combien faut-il fournir d'énergie pour arracher un neutron au noyau de ${}^{26}_{12}\text{Mg}$?
5. Combien faut-il fournir d'énergie pour arracher un proton au noyau de ${}^{26}_{12}\text{Mg}$?
6. Quelle est l'énergie de liaison des noyaux suivants ?
- ${}^{36}_{13}\text{Al}$
 - ${}^{204}_{84}\text{Po}$
7. Les deux noyaux ${}^{60}_{29}\text{Cu}$ et ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ont le même nombre de nucléons, mais cela ne signifie pas que leur énergie de liaison est exactement la même. Vérifiez cela en calculant l'énergie de liaison de ces deux noyaux.

12.3 La radioactivité

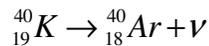
8. Examinons la désintégration alpha du xénon 112.
- Écrivez la réaction complète de la désintégration α du ${}^{112}_{54}\text{Xe}$.
 - Calculez l'énergie libérée par cette désintégration.
 - Quelle est l'énergie cinétique de la particule alpha éjectée lors de cette désintégration ?

9. Écrivez la réaction complète de la désintégration β^- du ${}^{85}_{36}\text{Kr}$ et calculez l'énergie libérée par cette désintégration.
10. Écrivez la réaction complète de la désintégration β^+ du ${}^{40}_{19}\text{K}$ et calculez l'énergie libérée par cette désintégration.
11. Écrivez la réaction complète de la désintégration par capture électronique du ${}^{29}_{15}\text{P}$ et calculez l'énergie libérée par cette désintégration.
12. Écrivez la réaction complète de la désintégration γ du ${}^{49}_{24}\text{Cr}$.
13. Déterminez si les désintégrations suivantes sont possibles.
- La désintégration β^- du noyau de ${}^{25}_{10}\text{Ne}$.
 - La désintégration β^+ du noyau de ${}^{28}_{13}\text{Al}$.

12.4 La loi de décroissance radioactive

14. Nous avons initialement 2 mg de strontium 83 dont la demi-vie est de 32,41 heures.
- Quel est le nombre initial de noyaux de strontium 83 dans cet échantillon ?
 - Combien restera-t-il de noyaux de strontium 83 dans cet échantillon dans 72 heures ?
15. Le polonium 208 se désintègre en plomb 204 avec une demi-vie de 2,898 ans. Initialement, on a 1 g de polonium pur. Combien de gramme de plomb a-t-on au bout de 10 ans ?
16. Nous avons initialement 5 μg de polonium 201 dont la demi-vie est de 15,3 minutes.
- Quelle est l'activité initiale de cet échantillon (en Ci) ?
 - Quelle sera l'activité de cet échantillon dans 1 heure ?

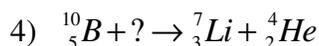
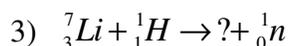
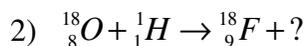
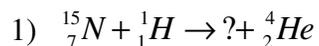
17. Une substance radioactive a initialement une activité de $20 \mu\text{Ci}$. 48 heures plus tard, l'activité du même échantillon est maintenant de $16,9 \mu\text{Ci}$. Quelle est la demi-vie de cette substance ?
18. Initialement, on a 10 g de radium 227 qui a une demi-vie de 42,2 minutes. Combien d'atomes de ce radium vont se désintégrer dans les prochaines 2 heures ?
19. Un archéologue découvre une pièce de bois provenant d'un drakkar très ancien. Un petit morceau de cette pièce de bois contient 20 g de carbone et a une activité de 4,4 Bq. De quel siècle date ce morceau de bois ? (Rappel : la demi-vie du carbone 14 est de 5730 ans.)
20. Un échantillon de radium 225 pur a une activité de 25 Ci. Quelle est la masse de l'échantillon si la demi-vie du radium 225 est de 14,9 jours ?
21. L'uranium 235 fait une suite de désintégrations pour aboutir finalement au plomb 207. Combien y a-t-il eu de désintégration α et β^- dans cette suite de désintégrations ? (Notez qu'il n'y a que des désintégrations α , β^- et γ dans cette suite de désintégrations.)
22. On date parfois des roches à l'aide de la désintégration par capture électronique du potassium 40.



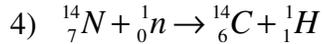
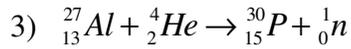
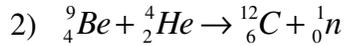
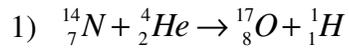
La demi-vie de cette désintégration est de 1,248 milliard d'années. Dans une roche, on mesure que le rapport du nombre d'atomes d'argon et du nombre d'atomes de potassium est de 0,15. Quel est l'âge de cette roche si on suppose que la roche ne contenait pas d'argon lors de sa formation ? (Cette supposition est quand même assez sensée parce que l'argon est un gaz qui peut s'échapper de la roche tant qu'elle ne s'est pas solidifiée.)

12.5 Les réactions nucléaires

23. Quel est le noyau manquant dans chacune de ces réactions nucléaires ?

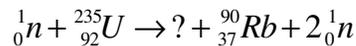


24. Quelle est l'énergie libérée ou quelle énergie faut-il fournir dans les réactions suivantes ?

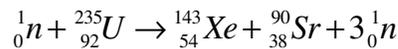


12.6 La fission nucléaire

25. Quel est le noyau manquant dans la réaction de fission suivante ?



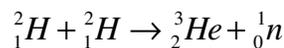
26. Quelle est l'énergie libérée par cette réaction ?



27. La fission d'un atome d'uranium 235 libère près de 200 MeV en moyenne. Pendant combien de temps peut-on fournir de l'électricité à une maison québécoise typique qui consomme environ 250 MJ par jour avec seulement 100 g d'uranium 235 si on suppose qu'on peut convertir toute l'énergie de la fission en électricité ?

12.7 La fusion nucléaire

28. a) Quelle est l'énergie libérée par la réaction de fusion deutérium-deutérium suivante ?



b) Si un atome d'hydrogène sur 6500 est un atome de deutérium dans l'eau de mer, combien d'énergie pourrait-on obtenir avec 1000 kg d'eau de mer ?

Défis

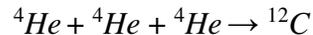
(Questions plus difficiles que les questions qu'il y aura à l'examen.)

29. Le radium 226 se désintègre en actinium 226 avec une demi-vie de 1590 ans. À son tour, l'actinium se désintègre en thorium 226 avec une demi-vie de 13,6 ans. Au

départ, on a uniquement des atomes de radium. Quelle est la proportion des atomes de chaque élément au bout de 300 s ?

Indice : La quantité d'actinium suit une fonction de la forme $N_2 = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t}$

30. Une étoile en fin de vie ayant une masse de 5×10^{30} kg et une luminosité de 10^{27} W obtient son énergie grâce à la réaction nucléaire suivante.



Initialement, l'hélium représente 30% de la masse de l'étoile. Pendant combien de temps cette étoile pourrait-il briller si la fusion de l'hélium est sa seule source d'énergie (en supposant que la luminosité reste toujours identique) ?

RÉPONSES

12.1 Le noyau atomique

1. a) 18 protons, 21 neutrons b) 76 protons, 104 neutrons
2. a) 3,14 fm b) 7,41 fm
3. 184 m

12.2 L'énergie nucléaire

4. 11,09 MeV
5. 14,14 MeV
6. a) 274,6 MeV b) 1599 MeV
7. Cuivre 519,9 MeV Cobalt 524,8 MeV

12.3 La radioactivité

8. a) ${}^{112}_{54}\text{Xe} \rightarrow {}^{108}_{52}\text{Te} + {}^4_2\text{He}$ b) Énergie libérée = 3,33 MeV
c) Énergie de la particule alpha 3,21 MeV
9. ${}^{85}_{36}\text{Kr} \rightarrow {}^{85}_{37}\text{Rb} + e^- + \bar{\nu}$ Énergie libérée = 0,687 MeV
10. ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + e^+ + \nu$ Énergie libérée = 0,483 MeV
11. ${}^{29}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{29}_{14}\text{Si} + \nu$ Énergie libérée = 4,94 MeV
12. ${}^{49}_{24}\text{Cr}^* \rightarrow {}^{49}_{24}\text{Cr} + \gamma$
13. a) possible b) impossible

12.4 La loi de décroissance radioactive

14. a) $1,45 \times 10^{19}$ b) $3,11 \times 10^{18}$
 15. 0,891 g
 16. a) 305,6 Ci b) 20,17 Ci
 17. 197,5 h
 18. $2,283 \times 10^{22}$
 19. 10^e siècle
 20. 642 µg
 21. 7 désintégrations alpha, 4 désintégrations bêta
 22. 252 millions d'années

12.5 Les réactions nucléaires

23.
 1) ${}^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$
 2) ${}^{18}_8\text{O} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{18}_9\text{F} + {}^1_0\text{n}$
 3) ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$
 4) ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$
 24. 1) On doit fournir 1,19 MeV 2) Libère 5,70 MeV
 3) On doit fournir 2,64 MeV 4) Libère 0,626 MeV

12.6 La fission nucléaire

25. ${}^1_0\text{n} + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{144}_{55}\text{Cs} + {}^{90}_{37}\text{Rb} + 2{}^1_0\text{n}$
 26. 171,2 MeV
 27. 89,9 ans

12.7 La fusion nucléaire

28. a) 3,27 MeV b) $2,7 \times 10^{12}$ J

Défis

29. Radium : 43,53%, actinium : 23,71%, thorium : 32,76%
 30. 2,78 milliards d'années