

Radioactivité α

Radioactivité

Repères historiques

La radioactivité, phénomène découvert en 1896 par Henri Becquerel sur l'uranium et très vite confirmé par Marie Curie pour le radium, est un phénomène physique naturel au cours duquel des **noyaux** atomiques **instables**, dits radio-isotopes ou radioéléments, se transforment spontanément (se désintègrent), en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, en des noyaux atomiques plus stables. Les rayonnements ainsi émis sont appelés, selon le cas, des rayons α , des rayons β ou des rayons γ .

À première vue, ce nouveau rayonnement était semblable au rayonnement X, découvert l'année précédente (en 1895) par le physicien allemand Wilhelm Röntgen (1845-1923). Des études ultérieures menées par Becquerel lui-même, ainsi que par Marie Curie (1867-1934) et Pierre Curie (1859-1906), ou encore par Ernest Rutherford (1871-1937), montrèrent que la radioactivité est nettement plus complexe que le rayonnement X. En particulier, ils découvrirent qu'un champ électrique ou magnétique séparait les rayonnements « uraniques » en trois faisceaux distincts, qu'ils baptisèrent α , β et γ . La direction de la déviation des faisceaux montrait que les particules α étaient chargées positivement, les β négativement, et que les rayonnements γ étaient neutres. En outre, la magnitude de la déflexion indiquait nettement que les particules α étaient bien plus massives que les β .

Radioéléments et applications

Les radio-isotopes les plus fréquents dans les roches terrestres sont l'isotope 238 de l'uranium (^{238}U), l'isotope 232 du thorium (^{232}Th), et surtout l'isotope 40 du potassium (^{40}K). Outre ces isotopes radioactifs naturels encore relativement abondants, il existe dans la nature des isotopes radioactifs nettement plus rares. Il s'agit notamment des éléments instables produits lors de la suite de désintégrations des isotopes mentionnés, par exemple de divers isotopes du radium et du radon.

Un des radio-isotopes naturels les plus utilisés par l'homme est l'**isotope 235 de l'uranium** (^{235}U) qui se trouve dans la nature en **faible concentration** (<1 %) associé à l'isotope ^{238}U , mais dont on modifie la concentration par des techniques d'**enrichissement** de l'uranium pour qu'il puisse servir à la production d'**énergie nucléaire** civile et militaire.

Un autre radio-isotope naturel est le radiocarbone, c'est-à-dire l'**isotope 14 du carbone** (^{14}C). Ce dernier est constamment produit dans la haute atmosphère par des rayons cosmiques interagissant avec l'azote, et se détruit par désintégrations radioactives à peu près au même taux qu'il est produit, de sorte qu'il se produit un équilibre dynamique qui fait que la concentration du ^{14}C reste plus ou moins constante au cours du temps dans l'air et dans les organismes vivants qui l'ingèrent (photosynthèse, nutrition...). Une fois un organisme mort, la concentration en ^{14}C diminue dans ses tissus, et permet de dater le moment de la mort. Cette **datation** au radiocarbone est un outil de recherche très prisé en archéologie et permet de dater avec une bonne précision des objets organiques dont l'âge ne dépasse pas 50 000 ans.

Rayonnements ionisants

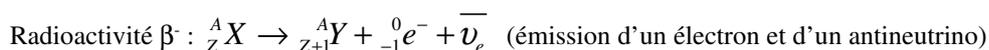
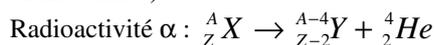
Les rayonnements α , β et γ produits par la radioactivité sont des **rayonnements ionisants** qui interagissent avec la matière en provoquant une ionisation.

L'irradiation d'un organisme entraîne des effets qui peuvent être plus ou moins néfastes pour la santé, selon les doses de radiation reçues, la durée d'exposition (aiguë ou chronique) et le type de rayonnement concerné. Elle peut être associée à une contamination radioactive surfacique (fixée ou non fixée), ou volumique (appelée aussi atmosphérique).

D'après <http://fr.wikipedia.org/wiki/Radioactivit%C3%A9>

Équations bilan

Les équations bilan traduisent la **conservation de la masse** (du nombre de masse A), la **conservation de la charge** (du nombre de charge Z) et la **conservation de l'énergie** (via la présence de particules non chargées : neutrinos et antineutrinos).



Loi de désintégration radioactive – Activité

L'**activité** d'un échantillon radioactif comportant $N(t)$ atomes à l'instant t est définie comme le nombre de noyaux désintégrés par seconde : $A(t) = -\frac{dN}{dt}$.

On constate expérimentalement que l'activité décroît exponentiellement avec le temps.

L'interprétation de cette observation réside dans le fait que la désintégration d'un noyau est indépendante de son « âge » (on dit qu'un atome ne vieillit pas) et est indépendante de son environnement (autres noyaux...), il s'agit d'un phénomène statistique, **la probabilité pour qu'un noyau se désintègre entre t et $t+dt$ est proportionnelle à dt : $dP = dt/\tau$** où τ est une **constante** commune à tous les noyaux **identiques**.

Dans un échantillon de $N(t)$ noyaux à l'instant t , la diminution du nombre de noyaux entre t et $t+dt$ est égale au nombre de noyaux désintégrés : $dN = N(t) - N(t+dt) = -N(t) \times dP \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$: **loi de décroissance radioactive**.

On a alors $A(t) = A_0 e^{-t/\tau}$.

Le temps $T_{1/2}$ au bout duquel la moitié de l'échantillon est désintégré est la **demi-vie** et vaut : $T_{1/2} = \frac{\tau}{\ln 2}$.

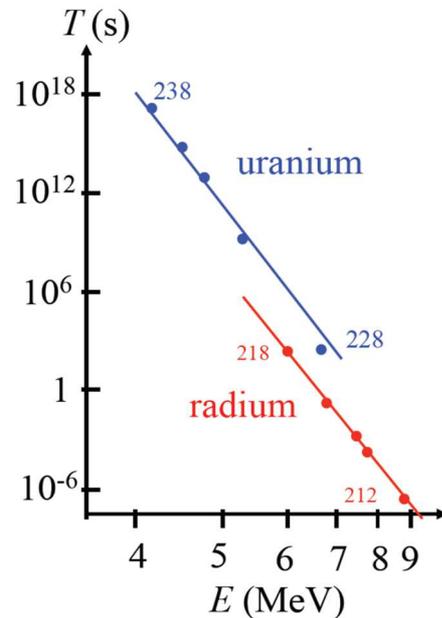
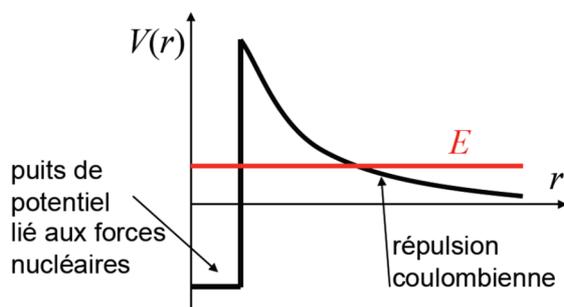
Rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité α

L'énergie libérée lors d'une désintégration alpha se retrouve sous forme d'énergie cinétique partagée entre la particule α et le noyau qui recule. L'énergie de la particule α est unique pour une désintégration donnée ; les valeurs s'échelonnent typiquement entre 4 et 8 MeV selon la nature du noyau de départ.

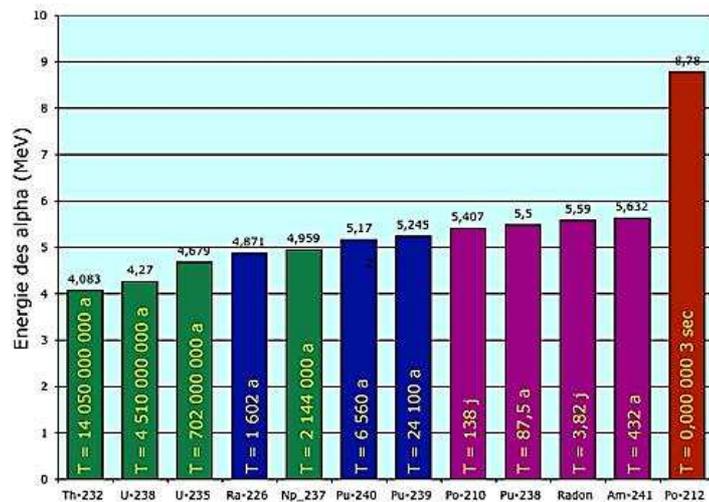
À ces valeurs d'énergie relativement peu dispersées, correspondent des périodes radioactives d'une grande disparité : de quelques milliards d'années pour le Thorium 232 à des fractions de milliardième de seconde pour le Polonium 212. On constate que la durée de vie du noyau radioactif est fonction décroissante de l'énergie de la particule α libérée.

Malgré cette disparité entre la durée de vie d'un élément radioactif et l'énergie de la particule α qu'il émet ces deux grandeurs sont reliées.

Gamow (1929) : $\log T = a + \frac{b}{\sqrt{E}}$



http://www.phys.ens.fr/~dalibard/PHY311/2012/PHY311_cours4.pdf



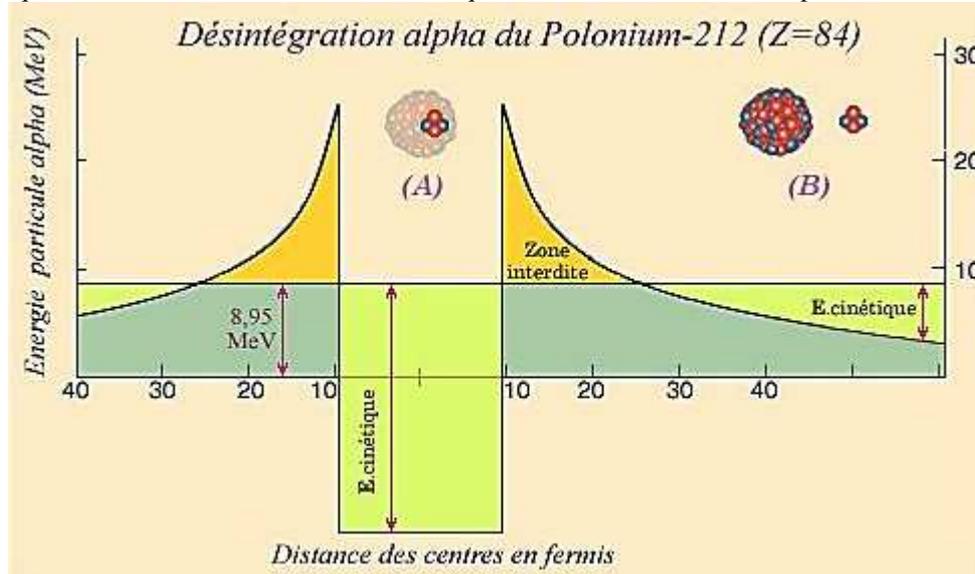
Ce diagramme de l'énergie des alpha émis par quelques-uns des principaux émetteurs montre des énergies toujours supérieures à 4 MeV. Plus l'énergie est élevée, plus la durée de vie du noyau est courte. La période varie de façon impressionnante de 14 milliards d'années pour le thorium (à gauche) à une fraction de millionième de seconde pour le polonium-212 (à droite) alors que l'énergie des alpha émis varie seulement de 4,083 à 8,78 MeV. La limite en énergie à 4 MeV et les durées de vie généralement très longues sont expliquées par l'effet 'tunnel'. © IN2P3.

Les très longues durées de vie qui caractérisent la radioactivité alpha et l'absence de rayons alpha en dessous de 4 MeV s'expliquent par un mécanisme appelé effet tunnel.

<http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/laradioactivitealpha.htm>

Le très grand âge des noyaux d'uranium et de thorium qui atteignent des milliards d'années témoigne que les désintégrations alpha se produisent difficilement, bien qu'elles libèrent des millions d'électronvolts d'énergie.

Ces noyaux seraient parfaitement stables sans un mécanisme laborieux qui vient à bout des forces nucléaires et déclenche une désintégration. L'effet attractif de la colle nucléaire cesse brutalement hors du noyau. Si quatre nucléons, groupés en une particule alpha, arrivent à perdre le contact avec les autres nucléons, ce groupe ne ressent plus que la répulsion due à la charge électrique du reste du noyau. Il s'en éloigne alors de plus en plus vite pour acquérir l'énergie cinétique de quelques millions d'électronvolts dont il a été question. Le tout est d'arriver à perdre ce contact.



Un "puits" de potentiel ...

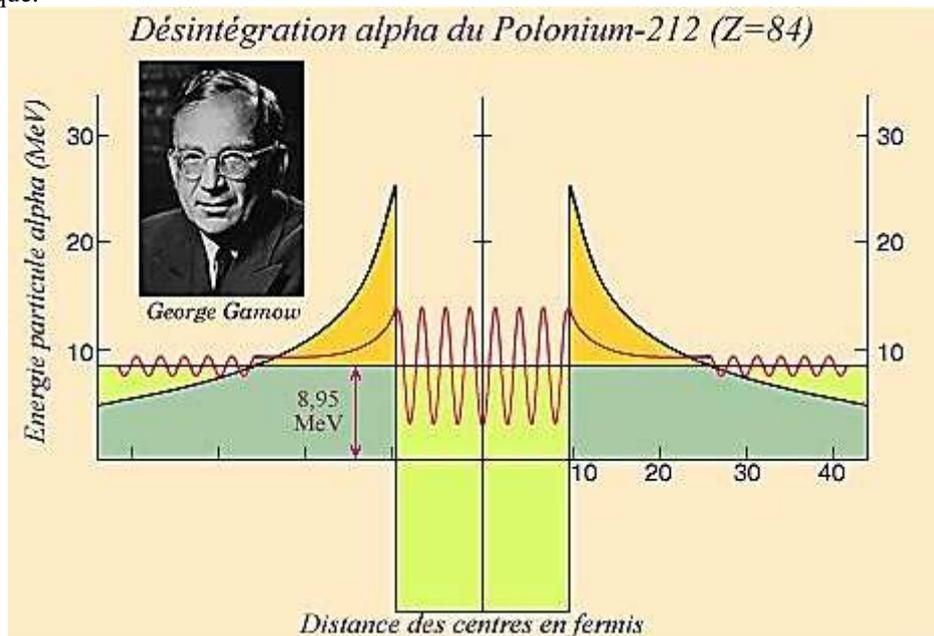
La désintégration alpha du Polonium-212 est celle qui dégage le plus d'énergie, 8,95 MeV. Cette désintégration est pourtant interdite par la mécanique classique. Il est impossible pour une particule alpha de passer de l'intérieur du noyau en A à l'extérieur en B. Elle se retrouve prisonnière au fond d'un « puits » comme le montre la courbe (en gris) qui représente l'énergie potentielle d'interaction entre la particule et le reste du noyau. Pour aller de A en B, la particule doit franchir une zone interdite où son énergie cinétique serait négative. Les zones permises sont le puits où l'attraction nucléaire prédomine, et l'extérieur du puits où la répulsion due à la charge du noyau l'emporte. © IN2P3.

On doit à un physicien américain d'origine russe, George Gamow, la première explication de la désintégration alpha, une désintégration qui n'est pas autorisée par les lois de la physique classique.

Le mécanisme proposé par Gamow a été appelé "effet tunnel". Pour simplifier la présentation de l'effet tunnel, nous supposons que la particule alpha préexiste dans le noyau, comme le fit George Gamow à l'époque

L'effet tunnel est dû à ce qu'une particule se comporte à la fois comme un corpuscule et comme une onde dans le domaine de l'infiniment petit où la mécanique quantique se substitue à la mécanique classique.

La particule alpha se retrouve dans la situation d'un alpiniste, prisonnier d'un cratère, qui n'a plus de forces pour gagner le sommet, passer sur l'autre versant et dévaler vers la vallée. La barrière à franchir figure la compétition entre la colle nucléaire attractive et la répulsion électrostatique. La particule alpha ne peut pas franchir la barrière car elle ne possède pas l'énergie nécessaire : elle se trouve soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du noyau. Du moins pour la mécanique classique.



L'effet tunnel

L'onde associée à une particule alpha prisonnière à l'intérieur d'un noyau a été superposée à la figure précédente. On voit que l'onde déborde légèrement à l'extérieur du noyau, où l'amplitude des oscillations a été amplifiée pour les rendre visibles. Le carré de l'amplitude des oscillations représente, en mécanique quantique, la probabilité d'observer la particule en un endroit donné. Il existe donc une probabilité d'observer la particule alpha en dehors du noyau, c'est-à-dire une désintégration. © IN2P3.

En mécanique quantique, la situation est moins tranchée. L'onde, qui représente une particule alpha dans le noyau, n'est pas strictement localisée et déborde légèrement de l'autre côté de la barrière. Il existe une probabilité d'observer la particule en dehors du noyau, là où la colle nucléaire ne se fait plus sentir. Cette probabilité est extrêmement petite, mais c'est elle qui permet la désintégration. Pour reprendre l'image de l'alpiniste, l'astuce dont il dispose pour gagner l'autre versant de la barrière montagneuse et trouver la liberté, est de creuser un tunnel à travers celle-ci.

Une loi empirique veut que plus la barrière de potentiel est haute, plus l'épaisseur à traverser est importante et plus le noyau vit longtemps. Ceci explique certaines durées de vie particulièrement longues.

http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/Effet_tunnel_Radioactivite_Alpha.htm