

Radioactivité

Généralités

La radioactivité -mot composé de rayon et activité- représente les réactions nucléaires impliquant les noyaux d'isotopes radioactifs (radionucléides). Elle peut être d'origine naturelle ou artificielle.

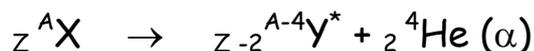
- La radioactivité naturelle correspond à la désintégration spontanée de noyaux d'atomes présents dans la nature, comme par exemple les nucléides ^{14}C et ^{235}U .
- La radioactivité artificielle représente la désintégration de noyaux atomiques produits artificiellement comme par exemple $^{30}_{15}\text{P}$, qui est synthétisé selon la réaction nucléaire:



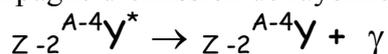
Types de radioactivité

a- Radioactivité α

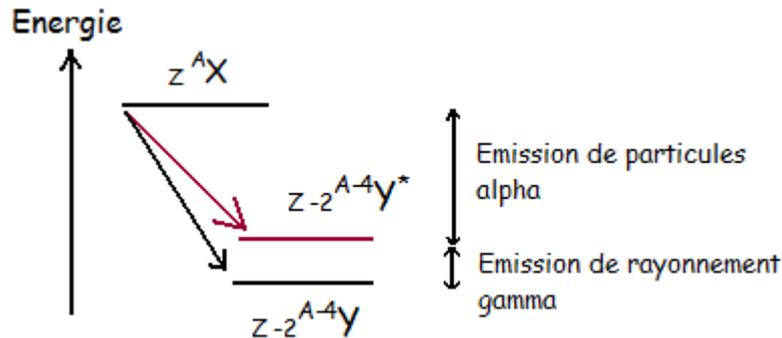
Elle correspond à l'émission de noyaux d'hélium (^4_2He), désigné α , selon la transformation:



$^{A-4}_{Z-2}\text{Y}^*$ est le noyau produit à l'état excité. La désexcitation de $^{A-4}_{Z-2}\text{Y}^*$ s'accompagne d'émission de rayonnement γ :



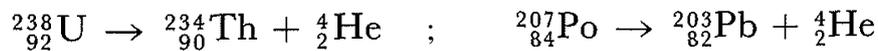
Le diagramme des énergies des noyaux impliqués dans cette transformation est de la forme :



Remarques

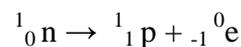
- La radioactivité α concerne les noyaux lourds ($A > 180$), riches en protons et en neutrons. Elle correspond à une réaction de fission et s'accompagne d'émission de rayonnement γ .
- Les particules α ont un pouvoir polarisant puissant, et sont peu énergétiques. Elles sont facilement arrêtées par une feuille de papier, par l'air et le linge.

Exemples de radioactivité α



b- Radioactivité β^-

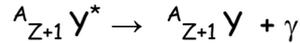
La radioactivité β^- correspond à l'émission d'électrons (${}_{-1}^0\text{e}$) suite à la désintégration de radionucléides généralement riches en neutrons. L'électron produit dérive de la transformation d'un neutron en proton:



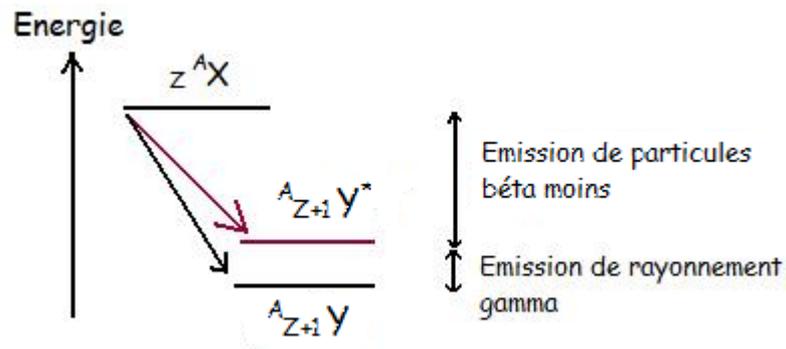
La réaction de transformation d'un noyau ${}^A_Z X$ siège de radioactivité β^- s'écrit :



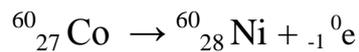
Le passage de l'état excité à l'état fondamental de ${}^A_{Z+1} Y^*$ s'accompagne également d'émission de rayonnement γ :



Le schéma suivant montre la stabilité énergétique relative aux noyaux impliqués dans la radioactivité β^- :



Exemple de radioactivité β^-

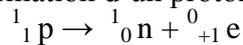


Observation : Les particules β^- sont relativement plus énergétiques que les particules α , mais elles peuvent être arrêtées par une feuille d'aluminium par exemple.

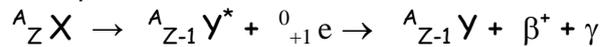
c- Radioactivité β^+

Les noyaux trop riches en protons, tels que les nucléides artificiels, sont instables et se désintègrent en donnant lieu à des positons (ou positrons), ${}^0_{+1}e$.

Les positons sont des particules de masse identique à celle de l'électron et ont une charge égale à celle du proton. En fait, le positon dérive de la transformation d'un proton en neutron :

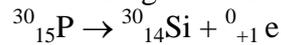


L'équation de désintégration d'un nucléide A_ZX siège de radioactivité β^+ est de la forme :



Exemple :

${}^{30}_{15}P$ (nucléide artificiel) se désintègre en émettant des particules β^+ :



Remarques :

- La radioactivité β^+ s'accompagne d'émission de rayons γ .
- Les particules β^+ sont relativement très instables (faible durée de vie). Elles peuvent être instantanément annihilées par les électrons adjacents.

Lois de conservation de Soddy

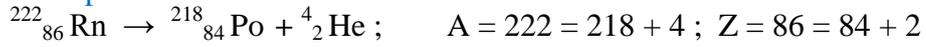
Les transformations nucléaires se font de telle manière que les nombres de protons et de nucléons restent constants, et l'énergie totale est conservée.

Soit la réaction nucléaire suivante mettant en jeu une particule p (α , ${}^0_{-1}e$, ${}^0_{+1}e$) :



La loi de conservation impose que : $Z = Z' + z$ et $A = A' + a$

Exemple :



En conclusion, les particules α sont émises par des radionucléides pesants et les émissions de ${}^0_{-1}\text{e}$ et ${}^0_{+1}\text{e}$ dépendent du rapport : nombres des neutrons/nombre des protons (N/P) (voir graphe ci-après).

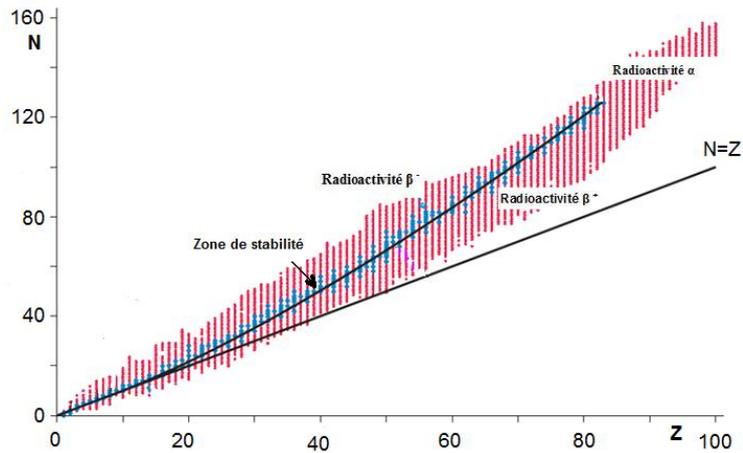
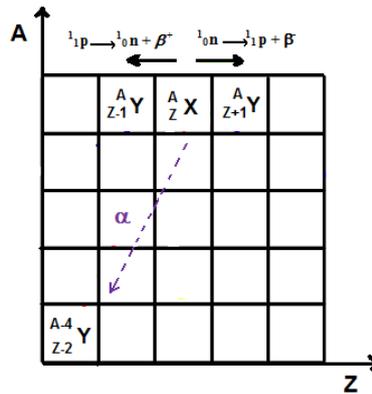


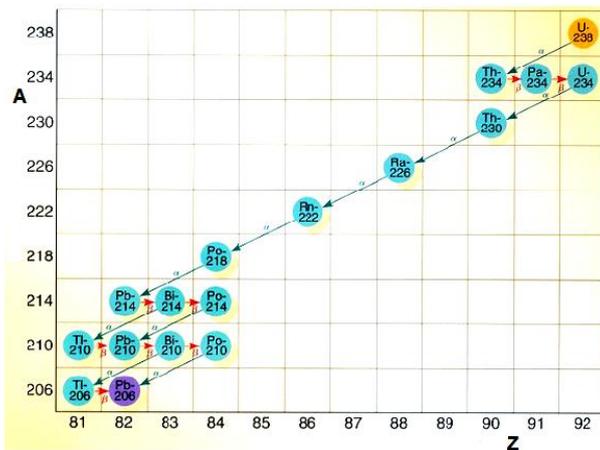
Tableau montrant les types de radioactivités et de noyaux susceptibles d'être formés à partir d'un radionucléide ${}^A_Z\text{X}$.



Remarque :

Les nucléides lourds se désintègrent en donnant lieu à une série de réactions nucléaires qui se terminent par la formation d'un nucléide stable.

Exemple de désintégration de ^{238}U



^{206}Pb est le nucléide le plus stable dans cette série de réactions.

Energie de cohésion du noyau-Energie de stabilité du noyau-

Rappel :

Les nucléons sont soumis à trois types de force :

- * Gravitationnelle (de nature attractive, mais relativement faible) ;
- * Electrostatique (de type répulsive pour les protons)- Elle est moyennement faible ;

* Nucléaire (fortement attractive) - Elle se manifeste à des distances de l'ordre de 10^{-15} m (femtomètre-fm). Sous l'effet d'une telle force, la matière se trouve fortement condensée.

La masse des nucléons (p et n), pris séparément, est toujours supérieure à celle du noyau. Le défaut de masse (Δm) tel que:

$$\Delta m = | m_{\text{noyau}} - (\sum m_p + \sum m_n) | \approx | m_{\text{atome}} - (\sum m_p + \sum m_n) |$$

est transformé en énergie selon la relation $E = \Delta m C^2$ où C est la vitesse de la lumière (3×10^8 m/s). E représente l'énergie de cohésion ou de stabilité du noyau.

Remarques

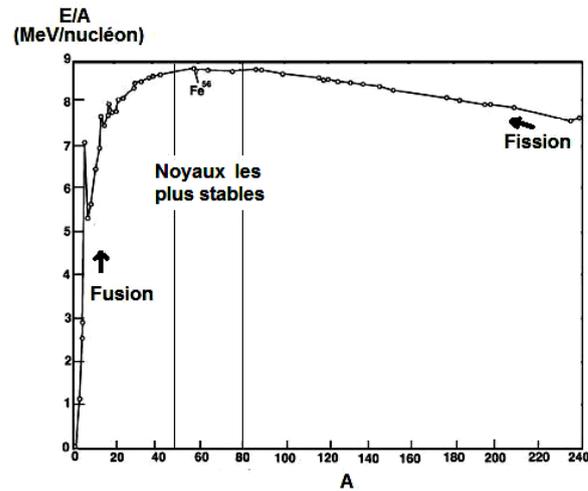
- L'énergie correspondante au défaut de masse de 1 uma, soit $1,66 \cdot 10^{-24}$ g, est :
 $E = 1,6610^{-27} \times (310^8)^2 = 1,49410^{-10}$ J ; soit $E = 933,7510^6$ eV = 933,8 MeV
- La comparaison de la stabilité des noyaux se fait sur la base des valeurs du rapport E/A. A étant la somme des nucléons.

Exemples

$$\begin{array}{ll} {}_1^3\text{H} & E/A = 2,71 \text{ MeV/nucléon} \\ {}_{92}^{238}\text{U} & E/A = 7,57 \text{ MeV/nucléon} \end{array}$$

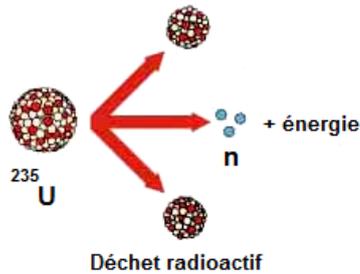
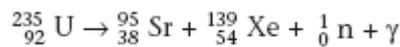
(Le noyau de ${}_{92}^{238}\text{U}$ est plus stable que celui de ${}_1^3\text{H}$)

Le graphe donné ci-après montre l'évolution de l'énergie de cohésion par nucléon (E/A) en fonction du nombre des nucléons (courbe d'Aston). Il montre également le domaine correspondant aux noyaux les plus stables.



Il peut être noté que :

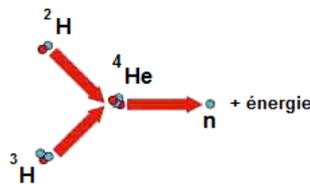
- i) Les nucléides dont E/A est aux alentours de 8,8 MeV/nucléon sont les plus stables.
- ii) Les radionucléides lourds dont $A > 180$ sont relativement instables et se transforment par fission, comme par exemple ${}_{92}^{235}\text{U}$:



Dans ce cas, le processus de transformation nucléaire est amorcé par la collision d'un neutron lent avec le noyau. En présence d'une masse

critique de radionucléides, les neutrons libérés peuvent à leur tour perpétuer le processus de fission, ce qui donne lieu à une réaction en chaîne.

iii) Les nucléides légers radioactifs peuvent être le siège de fusion. Ce type de réaction se produit à très haute température (10^8 K) et s'accompagne d'émission d'une quantité considérable d'énergie. La réaction se produisant au niveau du soleil en est un exemple :



Ce type de réaction est exploité dans la fabrication de la bombe H.

Loi de désintégration radioactive

Considérons, à un instant t , un échantillon composé de $N(t)$ radionucléides. Après un temps $t + \Delta t$, le nombre de radionucléides se trouve réduit à $N(t + \Delta t)$. La quantité de noyaux désintégrés ($-\Delta N$) au cours de l'intervalle Δt est proportionnelle à $N(t)$ et Δt :

$$-\Delta N = \lambda N(t)\Delta t ; \text{ avec } \Delta N = N(t + \Delta t) - N(t)$$

Autrement,

$$\Delta N = -\lambda N(t)\Delta t$$

λ est la constante de radioactivité; elle est positive et s'exprime en s^{-1} . λ est une caractéristique du radionucléide considéré.

Pour un laps de temps dt , la relation de désintégration s'écrit :

$$dN = -\lambda N(t)dt$$

En séparant les variables, on obtient :

$$dN/N(t) = -\lambda dt$$

L'intégration de cette équation donne :

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

N_0 est le nombre de radionucléides présents à l'instant initial ($t = 0$) ;
 N est le nombre de noyaux non désintégrés au moment t .

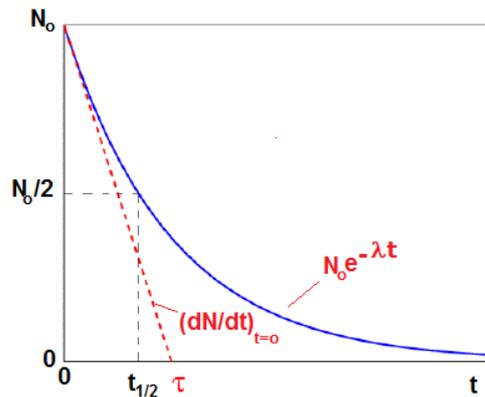
Période radioactive T (temps de demi-vie $t_{1/2}$)

La période radioactive (ou temps de demi-vie $t_{1/2}$) correspond au temps requis pour la désintégration de la moitié d'un échantillon de N_0 radionucléides.

Au temps de demi-vie $t_{1/2}$ on a :

$$N = N_0/2, \text{ et par conséquent } t_{1/2} = (\ln 2)/\lambda = 0,693/\lambda$$

Le graphe suivant montre l'évolution de $N = f(t)$ et le point correspondant à $t_{1/2}$



Exemples de période radioactive :

^{214}Po : 164 μs ; ^{15}O : 2 min ; ^{131}I : 8 jours ; ^{137}Cs : 30 ans ;
 ^{14}C : 5700 ans; ^{235}U : 710×10^6 ans; ^{238}U : $4,5 \times 10^9$ ans.

En considérant le graphe précédent ($N=f(t)$), la tangente à l'origine $(dN/dt)_{t=0}$ de la courbe $N=f(t)$ est égale à $-N_0/\tau$;

Sachant que : $N = N_0 e^{-\lambda t}$, $(dN/dt)_{t=0} = -\lambda N_0$

On déduit :

$\tau = 1/\lambda$. τ est la constante de temps caractéristique du nucléide considéré.

Activité radioactive

L'activité radioactive (A) d'un échantillon de nucléides instables est le nombre de désintégrations par unité de temps :

$$A = -dN/dt$$

Comme $N = N_0 e^{-\lambda t}$ on a alors :

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

A l'instant $t = 0$ on a : $A(t=0) = A_0 = \lambda N_0$

Donc :

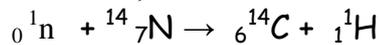
$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Dans le système MKSA, A est exprimé en Bq (le Becquerel) qui correspond à une désintégration par seconde (des/s). A peut être mesurée en Ci (le Curie) : $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

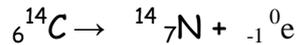
Exemples d'application de la radioactivité

Datation de fossiles

L'interaction des neutrons du rayonnement cosmique avec le gaz atmosphérique, particulièrement l'azote, donne lieu au nucléide ^{14}C :



Le nucléide ^{14}C et le reste des isotopes de C (^{12}C ; ^{13}C) sont assimilés par les organismes vivants, et l'activité de ^{14}C dans ce cas est de 0,23 Bq/g de carbone. Après la mort, l'organisme cesse d'assimiler le carbone et l'activité de ^{14}C diminue en raison de son désintégration :



La diminution de l'activité obéit à la relation :

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

En remplaçant λ par $\text{Ln}2 / t_{1/2}$ on obtient :

$$\text{Ln}(A_0/A) = (\text{Ln}2).t / t_{1/2}$$

Finalement, dans le cas d'un organisme fossilisé, l'âge t est donné par la relation :

$$t = t_{1/2} \cdot \text{Ln}(A_0/A) / \text{Ln}2, \text{ avec } t_{1/2} = 5700 \text{ ans.}$$

La datation par ^{14}C permet de connaître l'âge des fossiles vieux de 50.000 ans au maximum.

La série de réactions nucléaires issue de la désintégration de l'uranium conduisant à la formation de ^{206}Pb a été utilisée pour la détermination de l'âge de la terre (4,5 milliards d'années).

Médecine nucléaire

Certains isotopes radioactifs, appelés marqueurs ou traceurs radioactifs, sont utilisés pour diagnostiquer le dysfonctionnement d'organes du corps humain.

Le traceur en mouvement ou immobilisé sur un endroit du corps se désintègre, et les particules ou les rayonnements émis sont détectés.

Ci-après quelques traceurs utilisés dans divers diagnostics

^{44}Tc -99m (Technétium de faible demi-vie : 6 h) : Imageries des organes vitaux (foie, poumons, cœur, ...) et du squelette (voir image)

^{85}Sr Imagerie du cerveau

^{131}I Imagerie de la thyroïde (goitre)

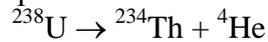
^{141}Ce Mesure du flux sanguin ; examen gastro-intestinal

Production d'électricité

La réaction de fission de l'uranium ^{235}U enrichi au ^{238}U (97%) est utilisée comme une source d'énergie. L'énergie ainsi produite permet la production de la vapeur, qui sert à faire tourner des turbines, qui font tourner à leur tour des générateurs d'électricité.

Bombe atomique

L'énergie dégagée par la bombe atomique provient de la réaction de fission de l'isotope de l'uranium ^{238}U :



La perte de masse (Δm) qui accompagne la fission d'une mole de ^{238}U , à savoir 238,0003 g, est égale à -0.0046 g, et l'énergie dégagée dans ce cas est: $E = |\Delta m| \times c^2 = 410.10^9 \text{ J} = 410 \text{ GJ}$. Cette énergie est équivalente à 195000 bâtons de dynamite.

La bombe atomique dégage une énergie égale à 67TJ ($67 \times 10^{12}\text{J}$) qui s'accompagne d'une perte de masse de 750 mg.