

3 Radioactivité — phénomènes nucléaires spontanés

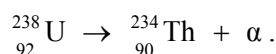
C'est à Henri Becquerel que l'on doit la découverte de la radioactivité. En 1896, il réalisait des expériences avec des sels fluorescents (qui contenaient de l'uranium) et a constaté que ses plaques photographiques étaient exposées mêmes si elles étaient enveloppées de façon à les protéger de la lumière. On a plus tard démontré que les « rayons pénétrants » qu'il avait découvert étaient de trois types différents : les particules alpha (α), les particules bêta (β) et les rayons gamma (γ).

3.1 Types d'émission

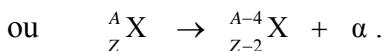
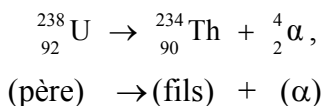
Tous les noyaux dont le nombre atomique est supérieur à 83 sont instables (radioactifs) et, irrémédiablement, finissent un jour par se désintégrer en émettant une particule alpha ou bêta. Les nouveaux noyaux formés (*descendants* ou *produits de filiation*) se désintégreront jusqu'à ce qu'un nucléide de numéro atomique 83 ou moins soit formé. Il existe aussi plusieurs noyaux radioactifs naturels dont le nombre de masse est inférieur à 83. On a fabriqué également plusieurs noyaux radioactifs artificiels.

3.1.1 Émission d'une particule alpha

Normalement, la particule alpha est émise par un noyau lourd, tel le ^{238}U , ce que l'on peut exprimer comme suit :



L'étude des particules α a démontré qu'elles étaient identiques aux noyaux d'hélium, ainsi on écrit parfois :

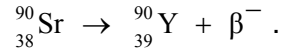


Ces équations représentent l'émission d'une particule α (un noyau d'hélium 4) rapide par un noyau père et la production d'un noyau fils.

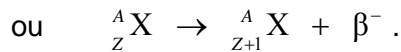
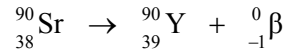
Aucun électron n'est en orbite autour de la particule α (laquelle est un noyau d'hélium) et, donc, elle porte une charge de +2e [que l'on écrit habituellement +2]. La particule alpha a une masse de 4,0015 u et sa vitesse, juste après son éjection, est habituellement une fraction de la vitesse de la lumière.

3.1.2 Émission d'une particule bêta

Les particules bêta sont émises par les noyaux riches en neutrons (certains noyaux comptent trop de neutrons). Par exemple :



Si on le désire, on peut ajouter le nombre de masse et la charge au symbole, ce qui s'écrit :

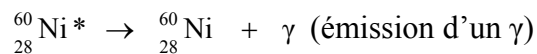
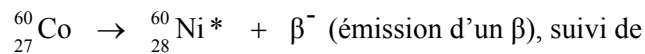


Comme on peut l'observer ci-dessus, le produit de filiation d'une désintégration bêta se trouve une case plus loin dans le tableau périodique. Un des neutrons du noyau s'est transformé en proton et, donc, le numéro atomique augmente de une unité, alors que le nombre de masse reste constant.

Une particule bêta est un électron très rapide émis par un nucléon du noyau. Elle a la même masse que tout électron, 0,000548 u, et la même charge, -1. Elles se déplacent à une vitesse entre 90 et 99 % de la vitesse de la lumière.

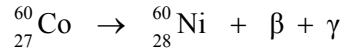
3.1.3 Émissions d'un rayon gamma

L'émission d'une particule alpha ou bêta laisse habituellement le produit de filiation dans un état excité. Il existe une différence entre un noyau dans un état excité et un noyau instable. Les noyaux excités ont un excès d'énergie. Les noyaux stables et instables peuvent être dans un état stable. La désexcitation peut se faire par l'émission d'une particule (α , β , neutron ou proton) mais, dans la plupart des cas, elle se produit par l'émission d'un ou de plusieurs photons gamma. Nous utilisons le terme *photon* pour indiquer que le rayonnement gamma a des propriétés ressemblant à celles des particules. Par exemple :

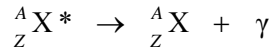


Les noyaux de cobalt 60 émettent une particule bêta, laissant les noyaux de filiation, le nickel 60, dans un état excité (comme l'indique l'astérisque). Presque immédiatement, les noyaux excités de nickel 60

émettent des rayons γ jusqu'à ce qu'ils soient tous désexcités. Puisque la durée de l'excitation est très courte, habituellement 10^{-9} s, on écrit habituellement les désintégrations bêta et gamma comme s'il s'agissait d'un unique événement :



On peut écrire une équation généralisée de la désintégration gamma :



On observera que les valeurs de Z et A ne changent pas. Puisque le rayon γ n'a ni charge ni masse (il est composé d'énergie pure), son émission ne modifie ni le numéro atomique ni le nombre de masse du nucléide.

Les rayons gamma sont un rayonnement électromagnétique comme la lumière, les ondes radio ou les rayons X. Un changement dans la distribution de la charge peut provoquer l'émission d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie des photons définit les différents types de rayonnement électromagnétique. Un photon gamma possède plus d'énergie que la plupart des photons X, lesquels sont plus énergétiques que les photons ultraviolets, et ainsi de suite jusqu'aux ondes radio les plus longues. La figure 3.1 montre le spectre électromagnétique. Les photons de basse énergie ont une fréquence peu élevée, une grande longueur d'onde et se comportent comme des ondes. Les rayons gamma de haute énergie agissent comme des particules lors de leurs interactions. La vitesse de propagation du rayonnement électromagnétique est $c = 3 \times 10^8$ m/s.

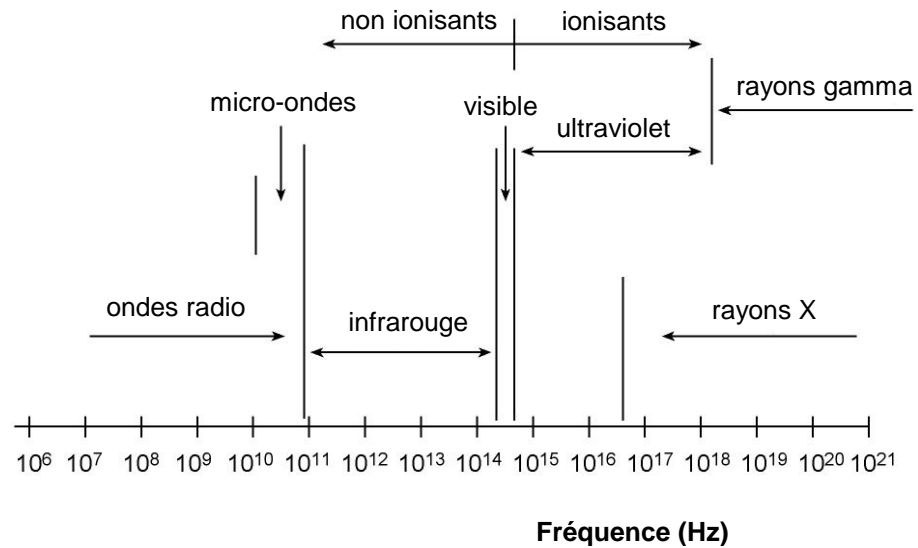


Figure 3.1
Le spectre électromagnétique

3.2 Interaction du rayonnement avec la matière

Les particules alpha et bêta sont des particules ionisantes. À cause de la charge électrique qu'elles transportent, les atomes dont elles s'approchent se séparent en ions. Chaque séparation crée une paire d'ions. Comme nous l'expliquons plus tard dans ce chapitre, les rayons gamma produisent une ionisation indirecte. Le tableau 3.1 résume les propriétés des différents types de rayonnement.

3.2.1 Interactions des particules alpha

Avec leur charge de +2 et leur masse de 4 u, les particules alpha créent une ionisation intense. En traversant de l'air sec, une particule alpha produit environ 50 000 paires d'ions par centimètre et perd environ 34 eV par paire produite. Une particule alpha de 4 MeV aura épuisé toute son énergie après avoir traversé 2,5 cm. Elle ralentira, s'arrêtera et, en capturant deux électrons à son entourage, redeviendra un atome d'hélium normal. Vers la fin de son parcours, elle transmet un peu d'énergie aux atomes avoisinants par excitation atomique.

Puisque, dans les liquides ou les solides, le nombre de paires d'ions créés par centimètre parcouru sera très supérieur, la particule traversera une distance beaucoup plus courte. Quelle que soit la substance, la *portée* d'une particule alpha (soit la distance parcourue en ligne droite), traverse la même masse de matière. La portée des particules alpha est généralement inférieure à 0,1 mm, soit l'épaisseur d'une feuille de papier.

3.2.2 Interactions des particules bêta

Les particules bêta ont une charge de -1 , une masse de $0,000\ 548\ u$ et se déplacent très rapidement (entre 90 et 99 % de la vitesse de la lumière, c). Elles causent moins d'ionisation intense que les particules alpha : entre 100 et 300 paires d'ions par centimètre d'air sec traversé. À cause de leur faible masse, les particules bêta sont facilement défléchies et ne se déplacent pas en ligne droite. Dans l'air sec, leur parcours total est d'environ 20 m, mais la distance réellement parcourue peut facilement être moitié moindre. Les particules bêta sont plus pénétrantes que les alpha, elles peuvent traverser une feuille de papier. Normalement, 1 mm de matière dense suffit à les arrêter.

Lorsqu'elles sont arrêtées rapidement ou changent brusquement de direction, les particules bêta émettent des rayons X. Habituellement, ce phénomène est responsable d'une fraction de la perte d'énergie des particules bêta, l'ionisation étant responsable de la plupart de cette perte. Ce rayonnement étrange porte un nom insolite : *bremstrahlung*, mot en allemand signifiant « rayonnement de freinage ».

3.2.3 Interaction des rayons gamma avec les atomes

L'interaction des rayons gamma avec les atomes diffère de celle des particules alpha et bêta. Ils ne possèdent ni charge ni masse et n'éparpillent pas constamment de petites quantités d'énergie aléatoires. Au contraire, ils cèdent de grandes quantités d'énergie lors d'interactions directes. Il existe trois mécanismes d'interaction entre les rayons gamma et les atomes :

L'effet photoélectrique.

C'est le mécanisme d'interaction des rayons gamma de faible énergie. Un rayon gamma incident heurte un électron sur une orbite atomique, il lui cède toute son énergie et cesse d'exister. L'électron est éjecté de l'atome et se comporte comme une particule bêta, on appelle cet électron éjecté *photoélectron*.

Ce phénomène est négligeable pour plusieurs substances si l'énergie des photons dépasse 0,1 MeV.

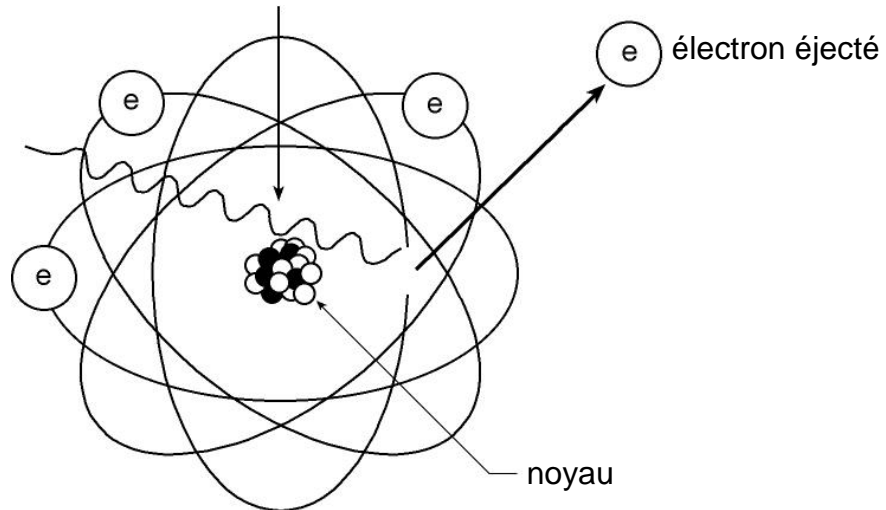


Figure 3.2
L'effet photoélectrique

L'effet Compton

Ce mécanisme d'interaction est très important pour les photons gamma dont l'énergie se situe entre 0,1 et 10 MeV. Le rayon gamma incident est « diffusé » par sa collision avec un électron. Celui-ci absorbe une partie de l'énergie du gamma et est éjecté de l'atome. Cet électron *Compton* a normalement plus d'énergie qu'un photoélectron et peut provoquer autant d'ionisations qu'une particule bêta.

En réalité, le rayon gamma diffusé est un autre rayon gamma, puisque le photon incident est absorbé et qu'un nouveau photon de moindre énergie est émis. Après une série d'interactions de ce type, le rayon gamma de basse énergie résultant est absorbé par effet photoélectrique.

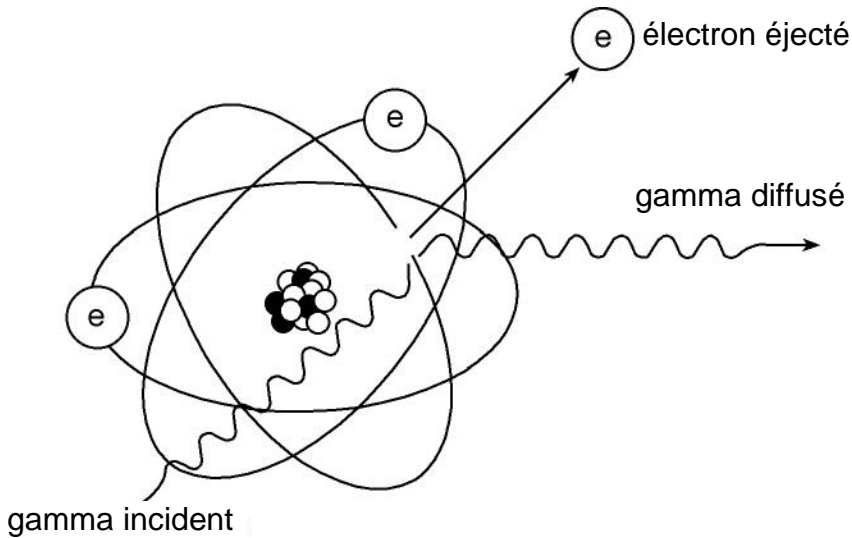


Figure 3.3
Effet Compton

La production de paires électron-positron

Cette interaction d'un rayon gamma se produit toujours près d'un noyau atomique qui « recule » (il absorbe une partie de la quantité de mouvement). L'énergie du rayon gamma sert à créer une paire électron-positron. (Un *positron* est un électron porteur d'une charge positive, on écrit parfois *positon*.) Pour créer une paire, le photon doit avoir une énergie d'au moins 1,02 MeV, soit l'énergie équivalente à la masse de deux électrons. Ce mécanisme se produit fréquemment pour les rayons gamma très énergétiques.

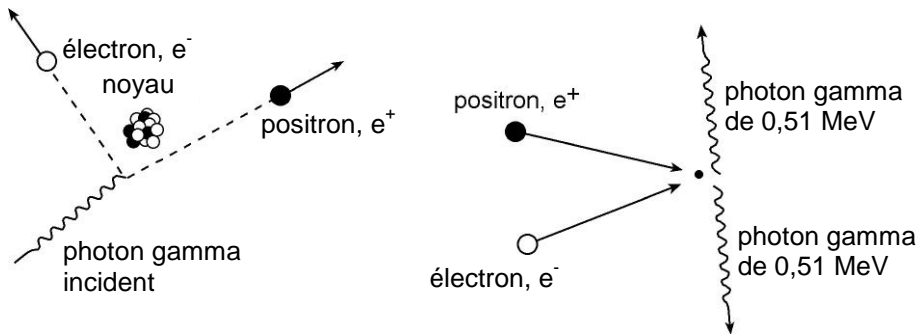


Figure 3.4
Production de paire

Les électrons positif et négatif créés produisent tous deux de l'ionisation mais leur destin diffère. Une fois ralenti, le positron « heurte » un électron d'un atome et ils s'annihilent mutuellement. Ils cessent d'exister et deux rayons gamma de 0,511 MeV sont créés.

Les rayons gamma de 0,511 MeV se propagent et interagissent par effet photoélectrique ou effet Compton. De son côté, l'électron ralentit et se joint à un atome pour redevenir un électron atomique « normal ».

3.3 Ionisation directe et indirecte

Les rayons alpha et bêta causent une ionisation directe. Chaque création de paire d'ions absorbe une petite quantité d'énergie et ralentit d'autant la particule. La particule finit par s'arrêter. Quelle que soit leur énergie, les alphas franchissent la même distance en ligne droite (dans une substance donnée, ils ont la même portée). De façon analogue, les bêtas d'une énergie donnée ont approximativement la même portée dans une substance donnée. Les gammas, toutefois, n'ont pas de portée. Ils peuvent interagir immédiatement ou se déplacer sur une longue distance entre les interactions. Les gammas perdent leur énergie par grandes quantités qui sont absorbées par la matière par des ionisations indirectes (secondaires), à proximité des lieux d'interaction. Une petite fraction d'un flux de rayons gamma peut traverser des matériaux très épais et ressortir sans avoir perdu d'énergie.

Tableau 3.1

Rayonnement	Masse approx. (u.m.a.)	Charge	Énergie (MeV)	Notes
α	4	+2	de 4 à 8	Très courte portée, fortement ionisant
β	0,0005	-1	de 0,5 à 3,5	Courte portée
γ	0	0	jusqu'à 10 (la plupart moins de 3 MeV)	Longue portée

3.4 Blindage

Il est facile de créer un blindage contre les particules alpha et bêta. On a qu'à disposer des matériaux dont l'épaisseur est égale ou supérieure à leur portée. Les matériaux de blindage contre les rayons bêta ne devraient pas les arrêter trop rapidement puisque leur freinage peut se traduire par l'émission de *bremsstrahlung* (rayons X) dont on peut se protéger en plaçant du blindage supplémentaire.

Il est plus difficile de se protéger des rayons γ et X. Quelle que soit l'épaisseur du blindage, certains rayons le traverseront. On peut

toujours trouver, pour une énergie donnée de photon, la quantité de matériel qui diminuera de moitié l'intensité. On appelle cette quantité *couche de demi-atténuation* (abrégé par CDA). Deux couches de demi-atténuation réduisent l'intensité au quart de sa valeur originale, et une troisième la réduit au huitième.

Par exemple, la couche de demi-atténuation des rayons gamma ordinairement émis par les produits de filiation est d'environ quinze centimètres d'eau. Or, dans les piscines (ou travées), on conserve le combustible épuisé sous au moins quatre mètres et demi d'eau, ce qui correspond à 30 CDA. Ainsi, à la surface de la travée, l'intensité des rayons γ est réduite d'un facteur 2^{30} — ou coupée de moitié 30 fois. Une fois arrondi, $1/2^{30}$ donne 10^{-9} ou un milliardième de l'intensité originale. (Vous devriez répéter ce calcul sur votre calculatrice.)

Les matériaux composés d'atomes lourds forment les blindages les plus efficaces contre les rayons gamma. On utilise souvent le plomb lorsqu'il y a peu d'espace pour le blindage. Si l'on utilise des matériaux moins coûteux (le béton, l'eau etc.), on devra prévoir des murs plus épais.

3.5 Notions principales

- Les trois particules principales émises spontanément lors de désintégrations radioactives sont les rayons alpha, bêta et gamma.
- Les particules alpha sont des noyaux d'hélium doublement chargés; elles se déplacent lentement après avoir été émises. Elles sont éjectées de gros noyaux comme ceux de l'uranium et du thorium.
- Les particules bêta sont des électrons. Lorsqu'elles sont émises, elles se déplacent habituellement à une vitesse dépassant 90 % de la vitesse de la lumière. Elles sont produites par les noyaux qui comptent trop de neutrons. Un neutron du noyau se transforme en proton et émet une particule bêta.
- L'émission d'un rayon gamma accompagne habituellement une désintégration alpha ou bêta. Ce sont des photons porteurs d'énergie électromagnétique et ils se déplacent à la vitesse de la lumière.

- Les particules alpha et bêta sont des rayonnements responsables d'une ionisation directe. Elles laissent un sillage d'atomes ionisés
- Les photons gamma sont un rayonnement ionisant indirect, ils interagissent avec les atomes pour produire des ions. Les trois mécanismes d'interaction des gammas sont : l'effet Compton, l'effet photoélectrique et la production de paires.
- On peut se protéger des rayonnements bêta et alpha en disposant certains matériaux entre leur source et soi.
- Il est plus difficile de se blinder contre les rayons gamma. On utilise la couche de demi-atténuation (CDA) pour qualifier l'efficacité du blindage par une substance contre les rayons gamma. LA CDA est l'épaisseur de matériau nécessaire pour réduire de moitié la quantité d'énergie transportée par les rayons gamma.

3.6 Exercices

1. Écrivez les équations nucléaires menant à l'émission de rayons alpha, bêta et gamma en utilisant la notation ${}^A_Z X$.
2. Décrivez brièvement comment les rayons alpha, bêta et gamma cèdent leur énergie à la matière.
3. Donnez les masses et les charges électriques des particules α et β .
4. Qu'entend-on par le mot ionisation?
5. Pourquoi dit-on que les rayons γ ne causent pas d'ionisation directe?
6. Décrivez les méthodes utilisées pour se blinder contre les particules α ou β .
7. Quel type de matériaux peut-on utiliser pour se blinder contre les rayons γ ?
8. Soit une substance dont la couche de demi-atténuation contre des rayons γ de 1 MeV est de 6 cm, calculez l'épaisseur nécessaire pour en réduire l'intensité par un facteur 1000.