

RADIOACTIVITÉ

TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

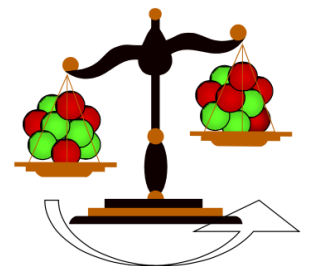


1) GÉNÉRALITÉS

1) Définition :

Une transformation radioactive est mutation/désintégration **spontanée** d'un noyau atomique.

- Un noyau père, **instable**, se transforme en noyau fils de moindre masse : on a une perte de masse convertie en énergie.
- Cette énergie est emportée par une particule ou un photon
- On a une augmentation du défaut de masse.



Dans la nature, les noyaux sont **majoritairement stables**, il en existe cependant spontanément radioactifs et instables : 274 noyaux stables et 51 radioactifs. On peut également fabriquer des noyaux radioactifs : c'est la radioactivité artificielle.

2) Différentes transformations radioactives

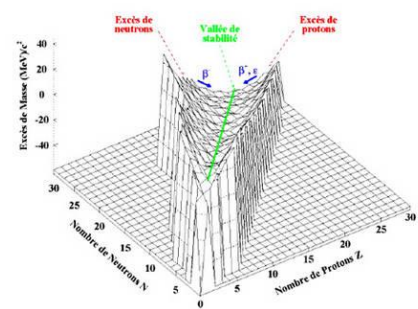
On a 3 types de transformations radioactives :

- Radioactivité α : Pour les **noyaux lourds** qui ont un grand nombre de nucléons ($A > 200$), ils ont besoin de perdre des nucléons pour se stabiliser. Ils émettent alors une particule α pour se diriger vers les noyaux les plus petits afin de retrouver leur stabilité.

- Transformations isobariques : Concernent les **noyaux instables autour de la vallée de la stabilité**, leur nombre de nucléons n'est pas trop élevé, mais ils sont trop riches soit en neutrons soit en protons. Ils transforment alors un neutron en proton et inversement : **ILS CONSERVENT LEUR NOMBRE DE MASSE.**
- Transformations isomériques : **Le noyau ne change pas de nature**, il y a modification du niveau d'énergie par désexcitation avec émission γ .

3) Évoluer vers une masse inférieure

- Les noyaux stables sont dans la vallée de la stabilité : ils ont la masse la plus faible pour un même nombre de nucléons : donc **E_L/A la plus forte.**
- Le but des transformations radioactives est de se diriger vers cette vallée de stabilité.

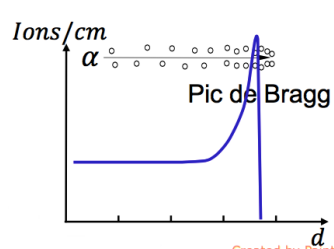


4) Lois de conservation lors des transformations radioactives

1. Conservation du nombre de nucléons (A) et du nombre de charges (Z)
2. Conservation de l'énergie totale du système
3. Conservation de la quantité de mouvement : $P = mv$

II) RADIOACTIVITÉ α

- Concerne les **noyaux lourds**
- Radioactivité efficace : perte de 4 nucléons à la fois

Réaction de désintégration	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$ <p>Formation d'un NOYAU d'hélium, formé de 4 nucléons, c'est une particule très stable (7 MeV/A), seul noyau émis spontanément Z change : on a un nouvel élément.</p>
Bilan masse énergie	$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A - 4, Z - 2) - \mathcal{M}(4, 2)$ <p>$E = \Delta M \times 931,5$</p>
Spectre en énergie	<p>L'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique, partagée entre les 2 noyaux formés. Le noyau fils est trop lourd, donc la particule α emporte toute l'énergie : on a un spectre de RAIE.</p>
Parcours dans la matière	<p>La particule α est :</p> <ul style="list-style-type: none"> - non relativiste : vitesse faible - lourde par rapport aux électrons : elle a une trajectoire rectiligne. - Chargée positivement : elle attire les électrons et provoque des ionisations (interactions obligatoires) \rightarrow elle est directement ionisante selon le pic de Bragg (la probabilité d'ionisation augmente brutalement à partir d'une certaine distance) - arrêtée par une feuille de papier <p>Parcours très court (ordre du micromètre)</p> <div style="text-align: right;">  <p style="font-size: small;">Created by Paint X</p> </div>
Application médicale	<ul style="list-style-type: none"> • En source externe aucun danger, arrêtées par la peau • Mais important effet biologique car ionisation importante • Ex: radium 223 pour traiter les métastases osseuses d'un cancer de la prostate.

III) TRANSFORMATIONS ISOBARIQUES

- **Nombre de masse (A) constant** : on a un changement de la répartition neutrons/protons
- Z change donc **nouvel élément chimique**
- On a une diminution de la masse pour obtenir une E_L maximale et retourner vers la vallée de la stabilité.

1) Désintégration β^-

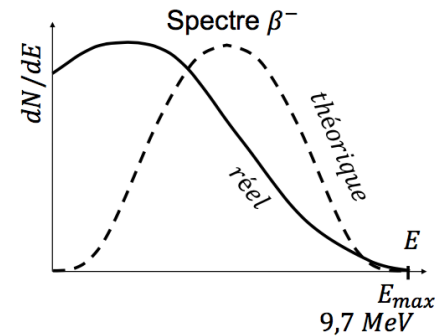
Réaction de désintégration	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}\beta + {}^0_0\bar{\nu}$ <ul style="list-style-type: none"> • Concerne les nuclides avec un excès de neutrons. • Particules formées : <ul style="list-style-type: none"> -Noyau fils avec $Z = Z_{\text{père}} + 1$ -Particule β^- : correspond à un électron -antineutrino : masse négligeable et charge nulle •☼ L'électron ne préexiste pas dans le noyau, il naît d'une transformation : ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$ <ul style="list-style-type: none"> • La transformation d'un neutron en proton, correspond à l'inversion d'un quark : $n = udd \rightarrow p = uud$
Bilan masse énergie	$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A, Z + 1)$ <ul style="list-style-type: none"> •☼ On ne prend pas en compte la masse de l'antineutrino (négligeable)
Spectre en énergie	<ul style="list-style-type: none"> • L'énergie disponible se répartit entre les énergies cinétiques des 3 particules. • Le noyau fils est trop lourd : son énergie cinétique de recul est nulle. • L'E_c se répartit entre l'antineutrino et β^- → on a un spectre CONTINU. •☼ En pratique seule la particule β^- est détectable.

→ Théorie : forte proportion de cas où l'énergie est partagée équitablement entre les 2 particules, et faible proportion de cas où l'énergie est totalement emportée par une des 2 particules.

→ Réalité : β^- est chargé

négativement et le noyau positivement : il y a attraction entre les 2.

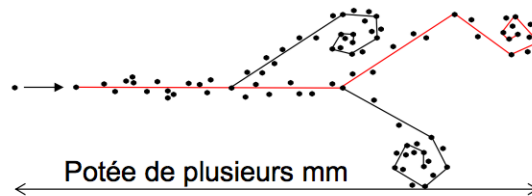
Une partie de l'énergie est utilisée pour séparer la particule β^- et le noyau : Le spectre est décalé vers les faibles énergies.



Parcours dans la matière

Les particules β^- sont :

- **relativistes** (vitesse proche de celle de la lumière)
- **chargées** donc elles interagissent obligatoirement avec les électrons et provoquent des ionisations : elles ont un parcours non rectiligne (parcours > portée (mm)).
- arrêtées par une feuille métallique.



Application médicale

Ex : traitement d'un cancer thyroïdien et ses métastases avec l'iode 131 (isotope de l'iode 127)

2) Désintégration β^+

Concerne les nuclides avec un **excès de protons**.

Réaction de désintégration	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} \beta + {}^0_0 \nu$ <ul style="list-style-type: none"> ▪ ${}^0_{+1} \beta$ ou β^+ ou ${}^0_{+1} e =$ positon <ul style="list-style-type: none"> • Un proton se transforme en neutron, avec toujours une conservation du nombre de masse A : il y a inversion d'un quark. • C'est une transformation spontanément impossible. • On a formation de : <ul style="list-style-type: none"> -un <u>noyau fils</u> avec Z -1 -un <u>positon</u> : antimatière de l'électron de même masse mais de charge opposée, ne préexiste pas dans le noyau, nait d'un transformation isobarique : ${}^1_1 p \rightarrow {}^1_0 n + {}^0_{+1} \beta + {}^0_0 \nu$ ${}^0_0 \nu = \text{neutrino};$ - un <u>neutrino</u> (masse et charge négligeable)
Bilan masse énergie	$\Delta M = M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_e$ $\Delta M > 0$ <p>Donc</p> $M(A, Z) - M(A, Z-1) > 2m_e$ $M(A, Z) - M(A, Z-1) > 2 \times 0,00055u = 0,0011u$ $M(A, Z) - M(A, Z-1) \times 931,5 > 2 \times 0,511 = 1,022 \text{ MeV}$ <p>→ IL Y A UN SEUIL EN MASSE ET EN ÉNERGIE</p>
Spectre	<ul style="list-style-type: none"> • L'énergie disponible se répartie entre les 3 particules sous forme d'énergie cinétique. • Le noyau fils étant trop lourd, son énergie cinétique de recul est nulle : on a un spectre CONTINU, avec répartition de l'énergie entre le neutrino (non détectable) et le positon.
Parcours dans la matière	<p>Les particules β^+ sont sujettes à des :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Collisions avec les électrons jusqu'à épuisement de l'énergie cinétique. • Réactions d'annihilations avec un électrons : création de 2 photons gamma de 0,511 MeV chacun émis à 180°. <p>Les photons gamma :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sont non chargés → interactions non obligatoires • Traversent la matière sans atténuation • Ont un parcours et une portée plus longue • Interagissent par effet photo-électrique ou Compton

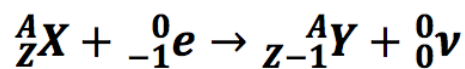
Application médicale

- Tomographie par émission de positons, utilisé en oncologie.

3) Désintégration par capture électronique

Concerne les nuclides **avec excès de protons dans le cas où β^+ est impossible.**

Réaction de désintégration



- Au lieu de libérer un positon on capture une charge négative pour faire la transformation.
- Le noyau père capture un électron (de la couche K généralement), cela forme un noyau fils avec $Z - 1$ et libère un neutrino (rappel : masse négligeable, charge nulle).

A est constant.

- L'atome se retrouve avec un vacance électronique, ce qui entraîne un réarrangement de l'atome Y (fils) par des photons de fluorescence ou électron Auger.

Bilan masse énergie

$$\Delta M = M(A, Z) - M(A, Z-1)$$

Il faut que : $\Delta M > W_K$

Pas de seuil comme pour β^+ !

Spectre

Toute l' E_c est emportée par le neutrino (indéetectable).

→ Aucun spectre d'origine nucléaire,

→ On a un spectre de **RAIES atomique lié aux réarrangements de Y.**

Parcourt dans la matière

- Neutrino indéetectable
- Les photons de réarrangement :
 - Sont non chargés donc : interaction non obligatoire
 - Ont grande portée.

Application médicale

Scintigraphie cardiaque au thallium 201.

Récap : pour les noyaux instables par excès de protons, on a 2 possibilités :
émission β^+ ou capture électronique.

ΔM	Inférieur à 1,022 MeV	Supérieur à 1,022 MeV
	Capture électronique uniquement	Capture électronique Emission β^+ → On a une compétition : La capture électronique est plus probable lorsque A est élevé et lorsque le défaut de masse est peu supérieure à 1,022 MeV.

IV) TRANSFORMATIONS ISOMÉRIQUES

1) Radioactivité γ

- Transformations **sans changement de nature du noyau**. La transformation porte sur les niveaux d'énergie des nucléons permettant une stabilisation du noyau.
- Certaines transformations isobariques aboutissent à un état intermédiaire avec un excédent d'énergie.
- On libère cet excédent à l'aide d'un photon gamma ou d'une conversion interne.
- **Retour à une masse minimale avec une stabilité maximale.**

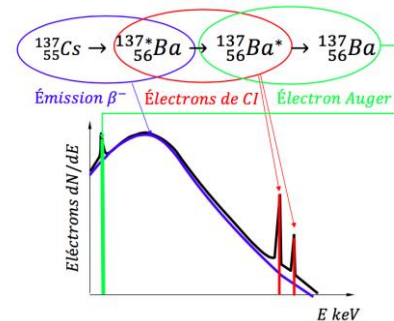
Réaction de désintégration	$A_m \text{ ou } {}^*_Z Y \rightarrow {}^A_Z Y + \gamma$ Il y a émission d'un photon gamma d'origine nucléaire.
Bilan masse énergie	$\Delta m = M_{\text{père}} - M_{\text{fils}}$ $E_d = \Delta m \times 931,5 = E_\gamma$ <i>Rappel : le photon n'a pas de masse donc ne rentre pas dans le calcul de Δm</i>
Spectre en énergie	L'énergie disponible est emportée par le photon : on a un spectre électromagnétique nucléaire de raie.
Parcourt dans la matière	Le photon est non chargé : interactions non obligatoires. Les interactions se font avec les électrons (ionisations) : effet photo-électrique, diffusion (= effet Compton), création de paire. Le parcours est relativement long (très pénétrants) : portée en mètre.
Application médicale	Gamma caméra

2) Conversion interne

Réaction de désintégration	$A_m \text{ ou } {}^*_Z Y \rightarrow {}^A_Z Y$ <ul style="list-style-type: none"> Le noyau métastable libère de l'énergie en la transmettant à un électron : il est ionisé. Possibles réarrangements électroniques : photons de fluorescences, électrons Auger.
Bilan masse énergie	<ul style="list-style-type: none"> $\Delta m = M(A, Z^*) - M(A, Z)$ $E_{\text{libérée}} = \Delta m \times 931,5$ $E_{\text{cinétique}}(e_i) = E_{\text{libérée}} - \dots$
Spectre	L'énergie disponible est transmise à l'électron : pas de spectre nucléaire. On a donc un spectre électronique atomique de raie. Il y a également un spectre indirect lié au réarrangements (électrons Auger, fluorescence).

Spectre électronique
réel complet

Ex :
On a un spectre composite avec une partie continue et 3 raies.
C'est un mélange des spectres de la transformation isobarique, la conversion interne du Baryum, et de l'émission d'un électron Auger.



CONCLUSION

La transformation d'un noyau père se fait en plusieurs étapes et selon plusieurs voies, avec des cascades successives et des probabilités de transformations radioactives différentes.

Récap spectre

Électromagnétique (photon)	Electronique (électron)
Atomique	Nucléaire
Raie (une seule particule)	Continue (plusieurs particules)

Récap portée

- ✓ α : 10 μm – feuille de papier
- ✓ β^- : quelques mm
- ✓ β^+ : quelques mm + 2 photons
- ✓ γ : plusieurs m

