

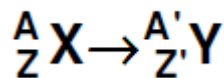
BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

Tut' rentrée – Cours 2b - La Radioactivité

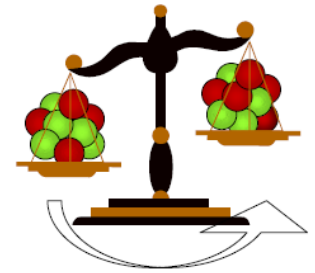
La radioactivité ☠

Généralités

Transformation radioactive : mutation (ou désintégration) d'un noyau atomique. On change de noyau atomique, donc d'élément chimique. On dit que l'élément père X se transforme en élément fils Y de masse moindre donc plus stable :



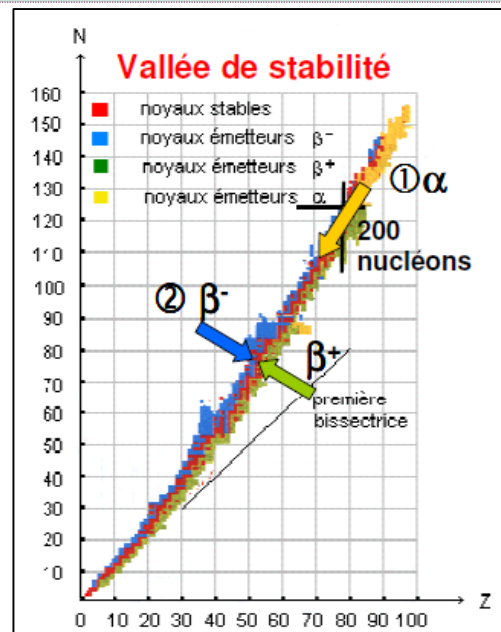
L'élément fils Y a toujours une masse inférieure à l'élément père X. On a une perte de masse, qui est convertie en énergie. Cette énergie est emportée par la ou les particules, les photons résultants de la désintégration.



Les différentes transformations

Les noyaux radioactifs instables vont se transformer en noyaux stables. Selon le noyau d'origine on distingue :

- * **L'émission alpha** : émission d'un noyau d'Hélium ${}^4_2\text{He}^{++}$, concerne les noyaux lourds.
- * **Les transformations isobariques** :
 - ↳ **Émission β^-** - si excès de neutrons dans le noyau
 - ↳ **Émission β^+** - si excès de protons dans le noyau
- * **Les transformations isomériques** : Il peut y avoir transformation isomérique si après le départ d'une particule α ou β , le noyau fils se retrouve dans un état excité. Il va alors spontanément se désexciter par émission rayonnement électromagnétique γ qui emportera l'excédent d'énergie.



elle

d'un

Pour résumer

On peut donc avoir :

- * Une émission α pure : rend le noyau stable.
- * Une émission β pure : rend le noyau stable.
- * Radioactivité α suivie de γ : si le départ de la particule α a laissé le noyau instable.
- * Radioactivité β suivie de γ : si le départ de la particule β a laissé le noyau instable.
- * Émission d'un γ pur
- * Capture électronique/ Conversion interne

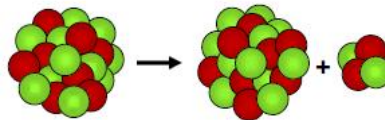
Schématisation des transformations

β^-	On a une transformation β^- , un neutron disparaît pour former un proton. On passe donc de Z-1 à Z . Il y a également perte de masse entre X et Y, le noyau fils Y devient donc plus stable par rapport au père.	
β^+	On a une transformation β^+ , un proton disparaît pour former un Neutron. On passe de Z+1 à Z . Il y a une perte de masse entre X' et Y. Le noyau fils Y devient donc également plus stable que le père.	
$^A_ZY^m$	Le noyau fils se retrouve instable. En effectuant une transformation isomérique , l'atome se stabilise par libération d'énergie, donc par une diminution de sa masse.	

Lois de conservation lors des transformations radioactives (♥)

- * Conservation du **nombre de nucléons (A)** et du **nombre de charges (Z)**.
- * Conservation de **l'énergie totale du système** (bilan masse-énergie).
- * Conservation de **la quantité de mouvement** (explique le spectre énergétique de la transformation).

La radioactivité alpha

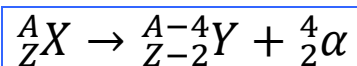


La particule α est formée de 4 nucléons (2p, 2n) : c'est le noyau $^4_2\text{He}^{*}$ de l'atome d'hélium. Le noyau d'He est très stable (son énergie de liaison est de 7 MeV/ nucléon).

Le nombre de protons Z change : l'élément fils formé (Y) est donc différent de l'élément père (X)

Bilan masse-énergie

La réaction de désintégration est la suivante :

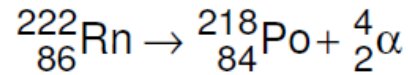


On soustrait à la masse du noyau initial les masses du noyau fils et de la particule α . On obtient alors un défaut de masse qui sera emporté sous forme d'énergie cinétique par la particule α formée :

$$\Delta M = M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - M(4, 2)$$

Exemple

Le Radon se transforme en Polonium



On donne : $M(222, 86) = 222.0176 \text{ u}$; $M(218, 84) = 218.009 \text{ u}$; $M(4, 2) = 4.0026 \text{ u}$

$$\Delta M = 222.0176 - 218.009 - 4.0026 = 6.10^{-3} \text{ u}$$

$$E_d = 6.10^{-3} * 931.5 = 5.6 \text{ MeV}$$

L'énergie disponible par cette réaction est donc de **5.6 MeV**

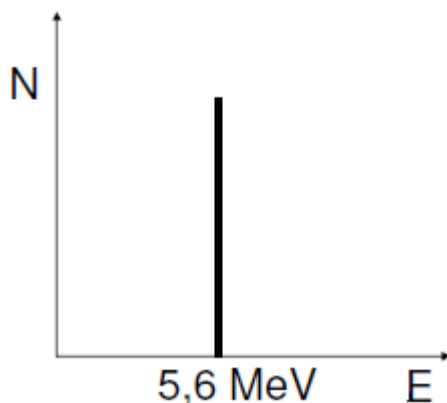
Spectre d'énergie

L'énergie disponible est libérée sous forme d'énergie cinétique partagée entre les 2 noyaux formés :

- * Énergie cinétique de la particule α
- * Énergie de recul du noyau Y

La loi de conservation de la quantité de mouvement ($p=mv$) permet de montrer que E_d se répartit entre Y et α de telle sorte que **la particule α emporte la quasi-totalité** de l'énergie libérée par la réaction. Par contre, on peut qualifier sa vitesse de **non relativiste** (négligeable par rapport à la lumière).

En revanche le noyau Y va emporter très peu, voire aucune énergie cinétique à cause de sa grosseur. Il aura une **vitesse de recul** très faible.



Si on reprend l'exemple du Radon transformé en Polonium ci-dessus,

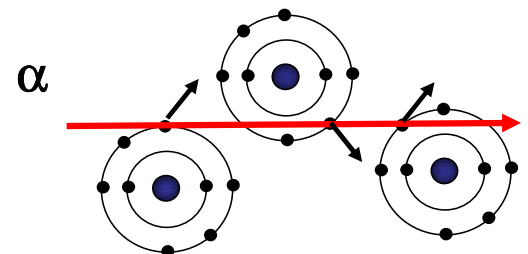
On se rend compte qu'on obtient un spectre de raie caractéristique de l'émission α .

Parcours dans la matière

Les particules α étant lourdes et chargées, elles vont tout bousculer sur leur passage, en ayant une trajectoire rectiligne mais avec une faible vitesse.

Le passage de particules α dans la matière va provoquer :

- * Des ionisations
- * Une perte progressive de l'énergie des particules alpha, qui se traduit par un ralentissement puis l'arrêt total des particules α .



Dans l'air, quelques cm sont nécessaires pour arrêter les particules alpha, alors que **10 μm** suffisent dans les tissus. Une simple feuille de papier est donc capable d'arrêter ces particules.

III. Les transformations isobariques

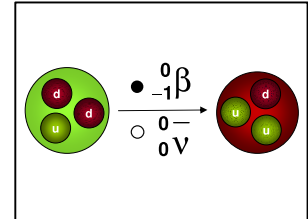
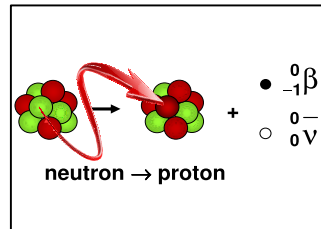
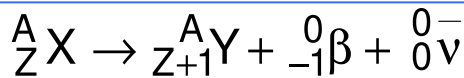
Transformation à nombre de masse A et nombre de charge constant
 Seul Z donc le nombre de protons et neutrons change
 On aboutit à un nouvel élément
 Il y a évolution vers une masse minimale

Désintégration β^-

Elle est due à un déséquilibre avec excès de neutron dans le noyau qui est remplacé par un proton

Réaction de désintégration

Transformation β^- d'un noyau X :



Le neutron se transforme en proton et cette transformation émet une **particule β^-** (ou électron e^-) et un **antineutrino** (charge nulle et masse négligeable).

L'électron formé ne préexiste pas dans le noyau ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$

La transformation d'un neutron en proton est due à l'inversion d'un quark (down vers up)

Bilan masse-énergie

Il y a conservation de l'énergie. **Le défaut de masse ΔM** est la différence entre la masse de l'atome initial X et la masse de l'atome fils Y :

$$\Delta M = M(A, Z) - Zm_e - [M(A, Z+1) - (Z+1)m_e + m_e]$$

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

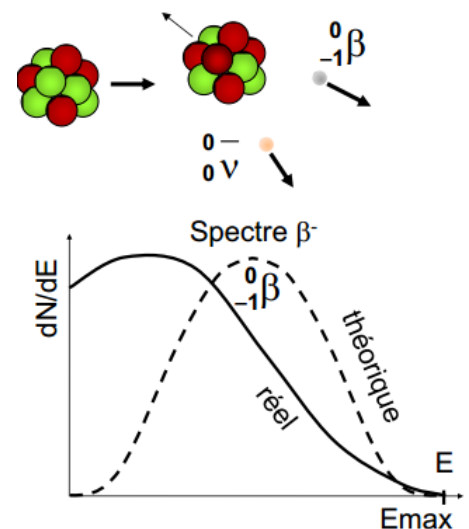
$$\Delta M = M(A, Z) - M(A, Z+1)$$

Spectre d'énergie

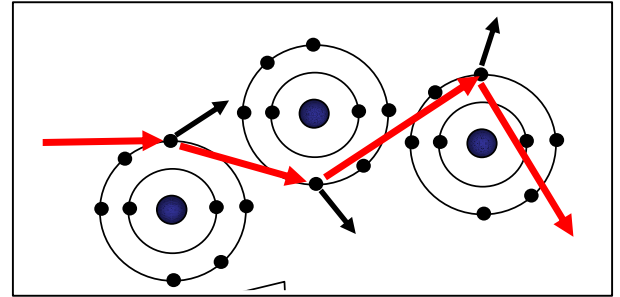
L'énergie disponible : $E_d = E_c(\text{recul}) + E_c(\beta^-) + E_c(\nu)$

L'énergie disponible issue de la réaction correspond au défaut de masse, elle se répartie en énergie cinétique de recul pour le noyau fils (quasi nulle du à sa masse), pour l'électron et l'antineutrino (partage aléatoire de l'énergie entre β^- et ν entre 0 et E_{max})

Seule la particule β^- est détectable et apparait sous forme de spectre continu



Particules β^- : avec une vitesse proche de celle de la lumière (0.9c) ce sont des **particules relativistes** pour la plupart. Ces particules sont chargées et **interagissent donc obligatoirement avec la matière** et provoquent des **ionisations et excitation**. Leur **parcours** est **non rectiligne** et leur **portée** est **millimétrique**.

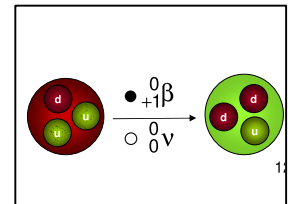
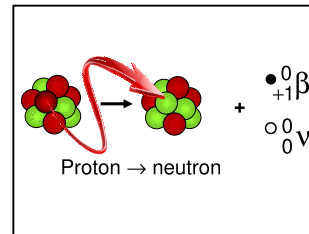
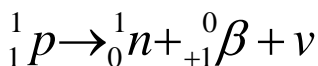
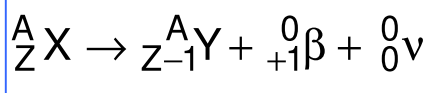


Désintégration β^+

Elle est due à un déséquilibre avec excès de **proton dans le noyau qui est remplacé par un neutron**

Réaction de désintégration

Le proton se transforme en neutron et cette transformation émet une **particule β^+** (ou positon, antimatière de l'électron) et un **neutrino ν** (charge nulle et masse négligeable). De même, on a ici une inversion de quark, de up en down transformant proton en neutron.



Bilan masse énergie

Il y a conservation de l'énergie. **Le défaut de masse ΔM** est la différence entre la masse de l'atome initial X et la masse de l'atome fils Y :

$$\Delta M = M(A, Z) - Zm_e - [M(A, Z-1) - (Z-1)m_e + m_e]$$

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

$$\Delta M = M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_e$$

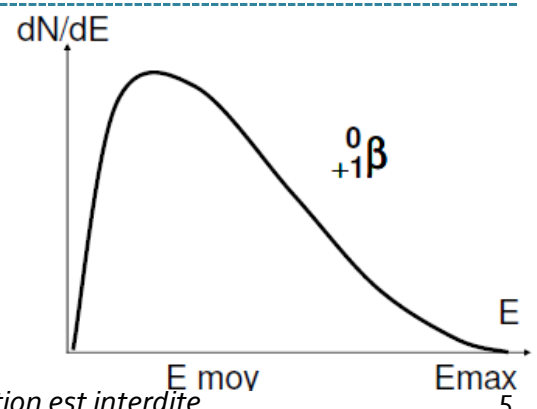
$$\text{Donc : } \Delta M = M(A, Z) - M(A, Z-1) > 2m_e$$

Ainsi cette réaction est à seuil, elle ne peut pas se faire si l'énergie libérée est inférieure à 2 fois la masse d'un électron c'est-à-dire que **l'énergie de la réaction doit être supérieure 1.022 MeV**. Si elle est inférieure la désintégration se fera par **capture électronique**.

Spectre d'énergie.

L'énergie se répartit entre les trois particules formées : le **noyau (recoil = négligeable)** le **positon** et le **neutrino**. L'énergie est donc répartie aléatoirement entre la **particule β^+** et le **neutrino**.

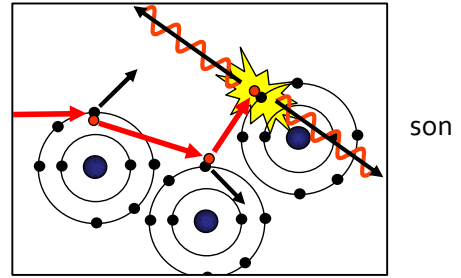
Seule la particule β^+ est détectable et apparait sous forme de spectre continu



Le positon a une grande énergie cinétique et une portée courte

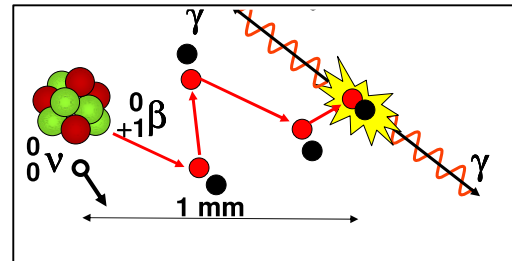
Il peut soit :

- Rentrer en collision avec l'électron jusqu'à épuisement de l'énergie
- Réagir particule/antiparticule avec l'électron : réaction d'annihilation avec émission de 2 photons à 180°



La réaction d'annihilation produit 2 photons gammas d'énergie équivalent à la masse d'un électron (0.511 MeV)

Les photons gamma interagissent de façon non obligatoire avec la matière et sont **atténués par le plomb ou le béton**

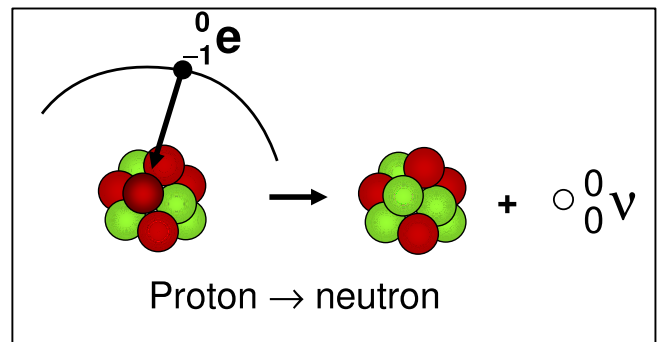
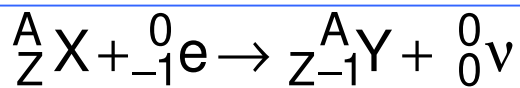
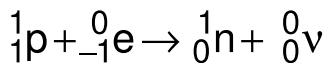


Désintégration par capture électronique

La **capture électronique** est l'autre désintégration possible en cas d'excès de protons dans le noyau.

Réaction de désintégration

Le noyau, trop riche en proton, capte un électron de la couche k le plus souvent :



Du à la perte d'un électron, l'atome subira un réarrangement électronique entraînant la création d'un photon de fluorescence ou d'un électron Auger

Bilan masse énergie

Le défaut de masse :

$$\Delta M = M(A, Z) - Zm_e + m_e - [M(A, Z-1) - (Z-1)m_e]$$

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

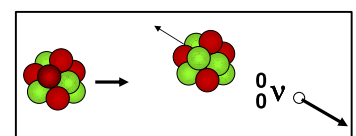
Pour les noyaux instables en excès de protons, les **désintégrations β^+ et CE** sont possibles.

- * *Au-dessous du seuil de 1.022 MeV*, seule la capture électronique sera possible.
- * *Au-dessus de ce seuil* et si le défaut de masse est supérieur à $|W_k|$ les 2 sont en compétition

Spectre d'énergie

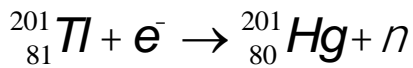
L'énergie de la réaction est répartie entre :

- Le noyau (recul négligeable)
- Le neutrino (indétectable il prend toute l'énergie) : $E_{\text{neutrino}} = E_d - |W_k|$



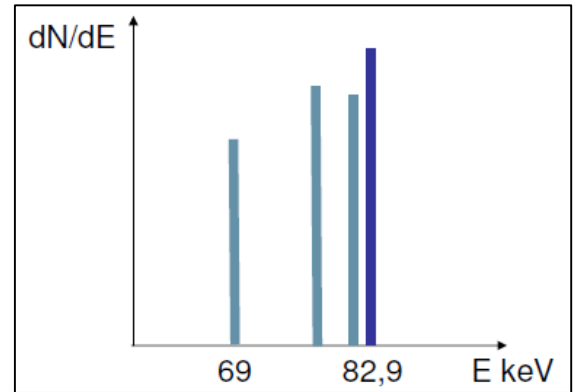
Il n'y a pas de spectre d'origine nucléaire détectable

Les réarrangements électroniques vont néanmoins être responsables d'un **spectre atomique de raie**

Exemple

Le seul spectre détectable est celui des **réarrangements électroniques** de ${}^{201}_{80}\text{Hg}$:

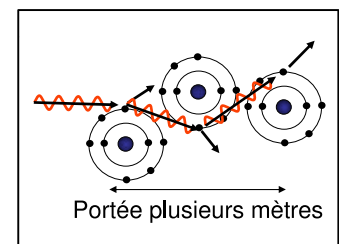
keV	W_K	W_L	W_M	W_N	W_O
${}_{81}\text{Tl}$	85	14	2	0,4	0,1
${}_{80}\text{Hg}$	83	14	2,5	0,5	0,1
$W_i - W_K$		69	80,5	82,5	82,9

**Parcours dans la matière**

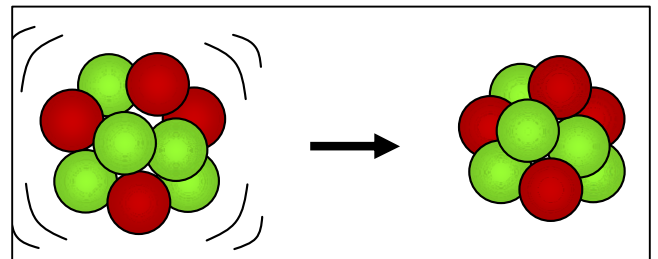
Le neutrino ne provoque pas d'interaction (indétectable)

Les photons émis indirectement interagissent avec la matière.

Ils ont une longue portée (plusieurs m) et seront **atténués** par du **plomb** ou du **béton**.

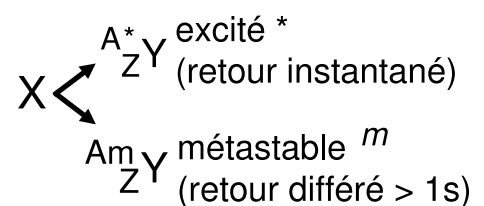
**Les transformations isomériques.**

Les transformations isomériques se font sans changement de nature du noyau. La transformation porte sur les niveaux d'énergie des nucléons. En effet, les **nucléons** se répartissent sur des niveaux d'énergies comme les électrons. Certaines transformations isobariques peuvent aboutir à un état intermédiaire du noyau où persiste un excédent d'énergie. Les nucléons occupent alors des niveaux d'énergie supérieurs à ceux de l'état fondamental.

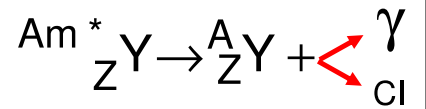


Il a 2 possibilités suite au départ de la particule

- * Soit le noyau produit se trouve dans un état excité, Il retournera instantanément à son état d'équilibre.
 - * Soit ce noyau produit sera dans un état métastable, avec un retour différé à son état d'équilibre stable (temps > 1 sec).
- ☞ La différence est donc le temps de retour à l'état stable



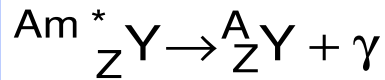
Lors du retour à l'état stable du noyau, l'excès d'énergie est libéré grâce à l'émission d'un **photon γ** ou grâce à un phénomène de **conversion interne (CI)**.



Radioactivité γ

Il s'agit du retour à l'état stable **instantanément** du noyau par émission d'un photon γ . Le photon γ provient **du noyau** de l'élément : il a une **origine nucléaire** (+++)

La **désintégration γ** :



Le défaut de masse :

$$\Delta M = M(A_m, Z) - Z m_e - [M(A, Z) - Z m_e]$$

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

$$E_d = E_\gamma = \Delta M \times 931,5$$

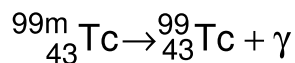
Spectre d'énergie

Les gros noyaux emportent peu d'énergie donc ont une vitesse faible voire nulle.

L'énergie disponible est alors emportée par le photon uniquement.

On a un **spectre électromagnétique nucléaire de raie**

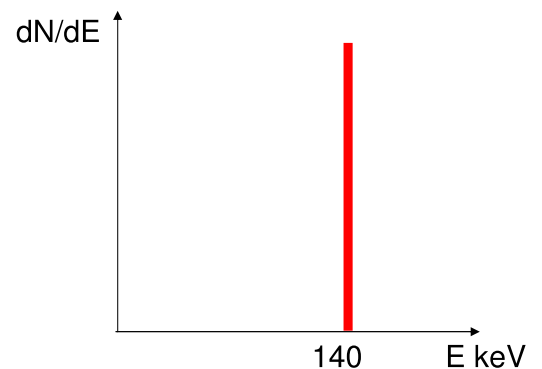
Exemple du Technétium



On donne les masses: $M(99m, 43) = 98,90655$; $M(99, 43) = 98,90640$

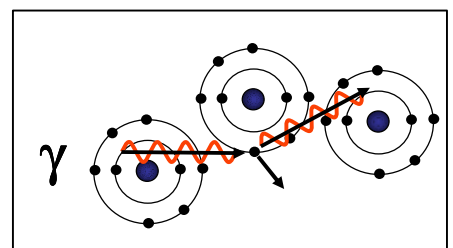
$$\Delta M = 98,90655 - 98,90640 = 0,00015 \text{ u}$$

$$E_d = 0,00015 \times 931,5 = 0,14 \text{ MeV} = 140 \text{ keV} = E_\gamma$$



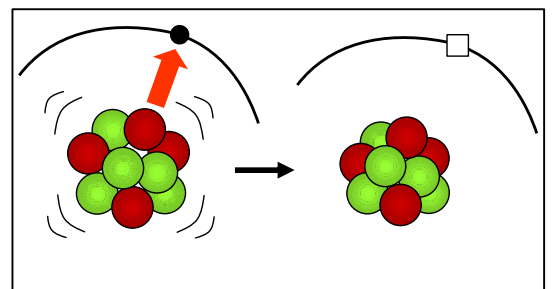
Parcours dans la matière

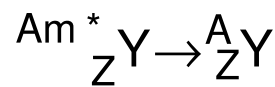
Les **photons γ** provoquent des **ionisations** par collision avec des électrons. (Effet photo-électrique, diffusion Compton, création de paire...). Ils ne seront **atténués** que par du plomb ou du béton.



Conversion interne

Dans la **conversion interne**, il n'y a pas d'émission de photon γ . L'énergie en excès est transmise à un électron de l'atome qui est alors ionisé. L'ionisation est susceptible d'engendrer des **réarrangements électroniques** tels que les **photons de fluorescence** et les **électrons Auger**.



Bilan masse énergie**La réaction de désintégration :****Le défaut de masse :**

$$\Delta M = M(A_m, Z) - Zm_e - [M(A, Z) - Zm_e]$$

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

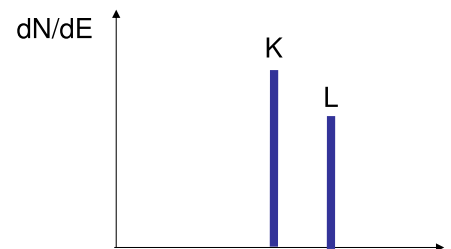
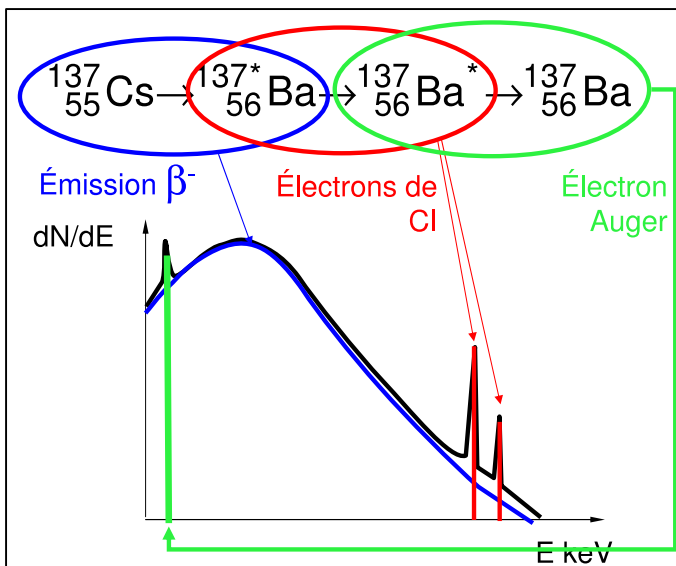
On déduit :

$$E_c (\text{électron ionisé}) = E_d - |W_i| = \Delta M \times 931,5 - |W_i|$$

Spectre d'énergie

L'énergie disponible est emportée par l'électron atomique: pas de spectre nucléaire ☛.

On obtient donc un spectre électronique atomique de raie.

**Exemple d'une succession de transformations radioactives**

Réaction 1 : émission β^- , spectre continu, formation de Barium excité

Réaction 2 : conversion interne, spectre atomique de raies.

Réaction 3 : formation d'un électron Auger et retour à l'état fondamental.

Bon courage pour cette année !
L'UE3a est avec vous !