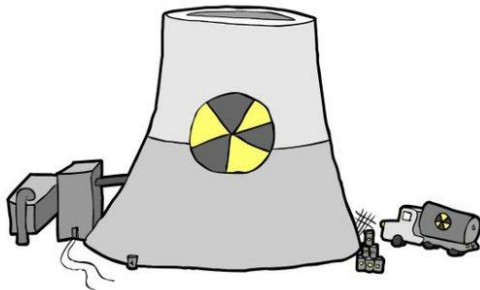


Radioactivité

Transformations radioactives



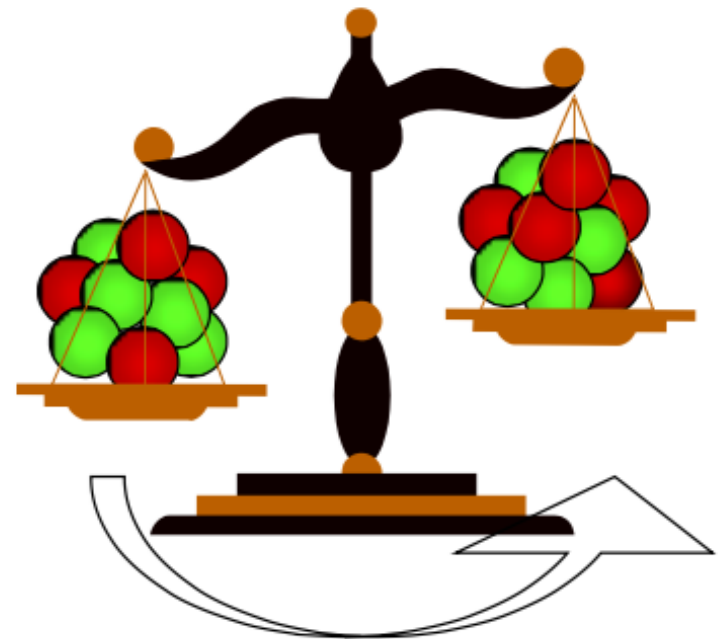
Transformations radioactives

1. Généralités
2. Radioactivité α
3. Transformations isobariques
4. Transformations isomériques

1. Généralités

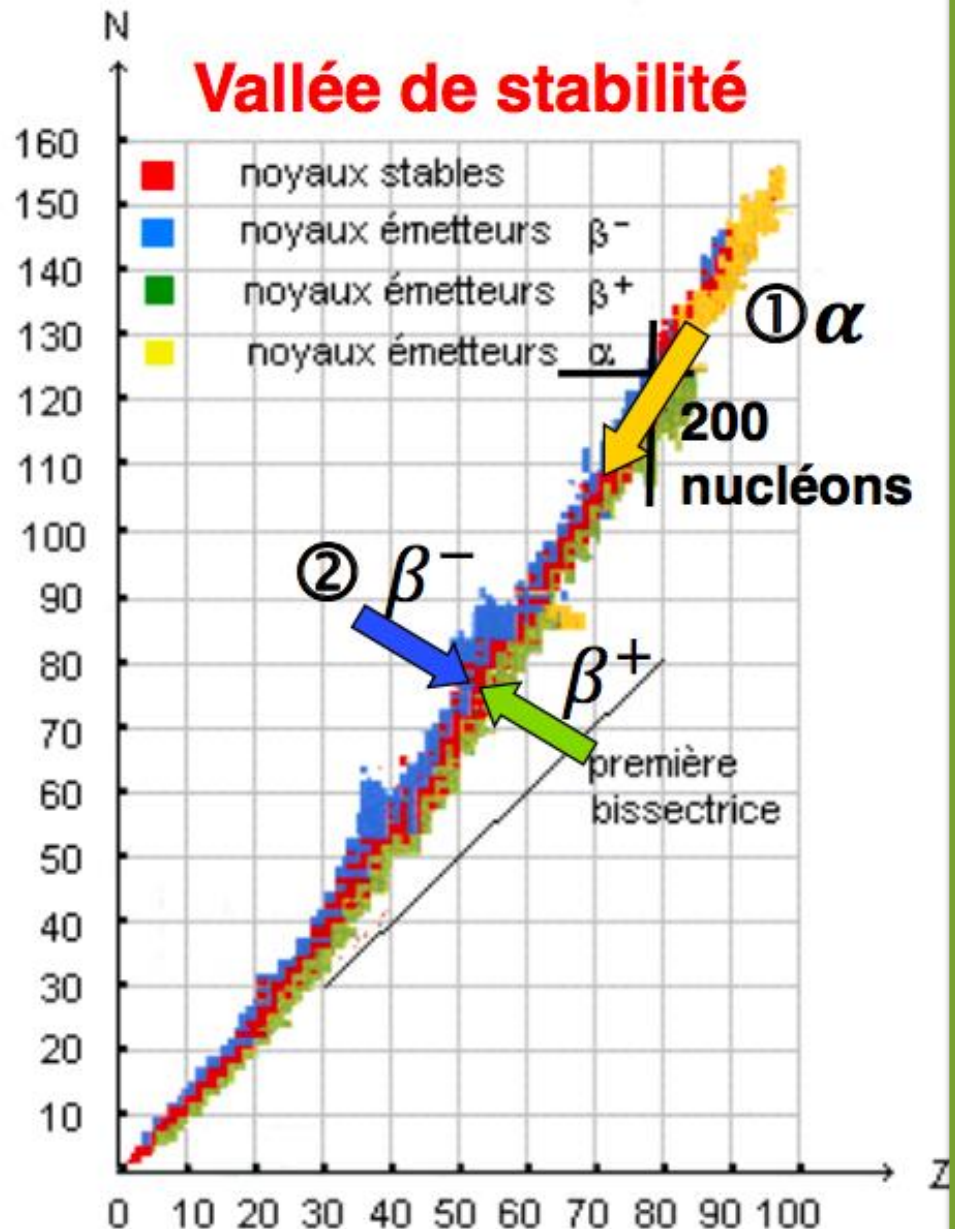
Définition : mutation/désintégration spontanée
d'un noyau atomique

- 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
- Augmentation du défaut de masse



3 types de transformations radioactives :

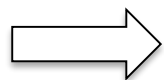
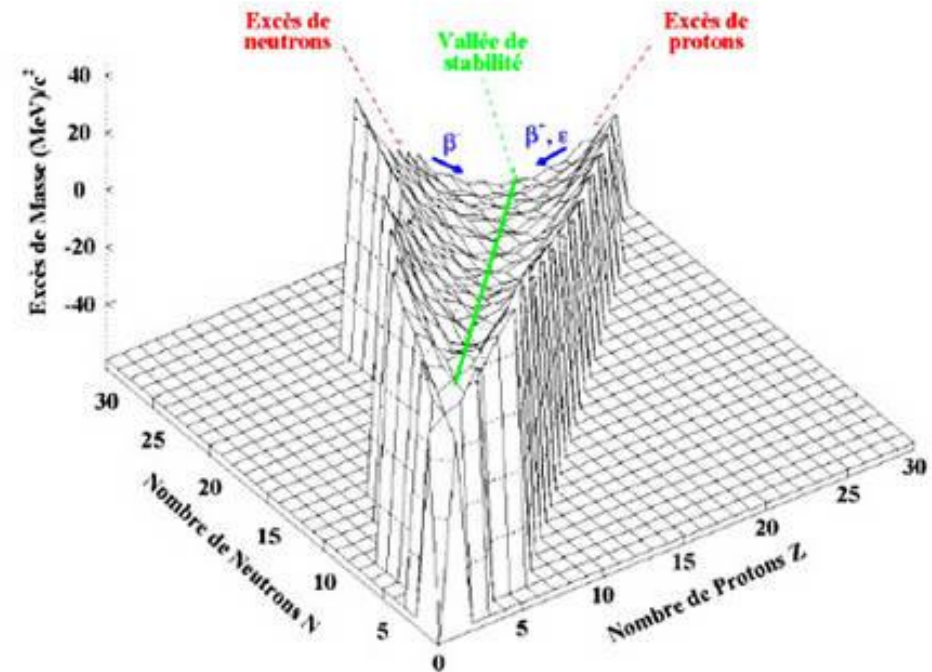
- Radioactivité α
- Transformations isobariques
- Transformations isomériques



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 l' E_L/A la plus forte



Le but de la radioactivité est de rejoindre cette vallée

Lois de conservation lors des transformations radioactives

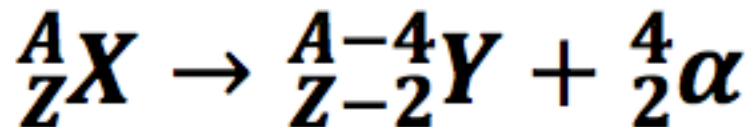
1. Conservation du nombre de nucléons (A) et du nombre de charges (Z)
2. Conservation de l'énergie totale du système
3. Conservation de la quantité de mouvement

$$P = mv$$

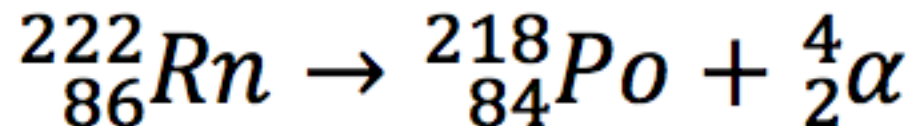
2) Radioactivité α

- Concerne les **noyaux lourds**
- Particule émise : particule α (${}^4_2\text{He}$) : NOYAU d'Hélium
- Particule très **stable** (7 MeV/A)
- Seul noyau émis spontanément
- Radioactivité efficace : perte de 4 nucléons à la fois

a. Réaction de désintégration



- Il faut conservation de A et Z, donc le noyau fils a (A-4) nucléons et (Z-2) protons
- Z change donc on a un nouvel élément
- Ex:



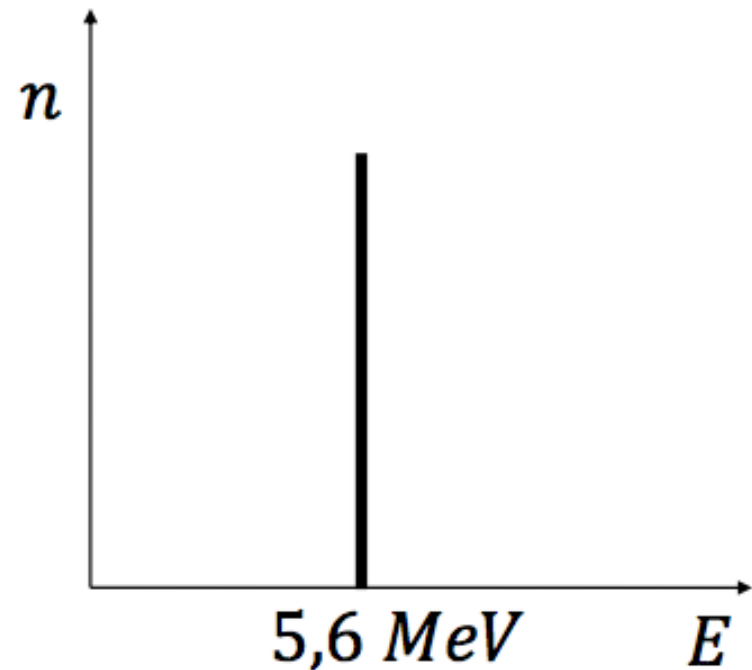
b. Bilan masse énergie

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

Énergie disponible = différence des masses nucléaires

c. Spectre en énergie

- L'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique partagée entre le noyau fils et la particule α .
- La masse trop importante du noyau fils : $E_c(\text{recul}) = 0$
- La particule α emporte quasiment toute l'énergie : on a un spectre de **raie**

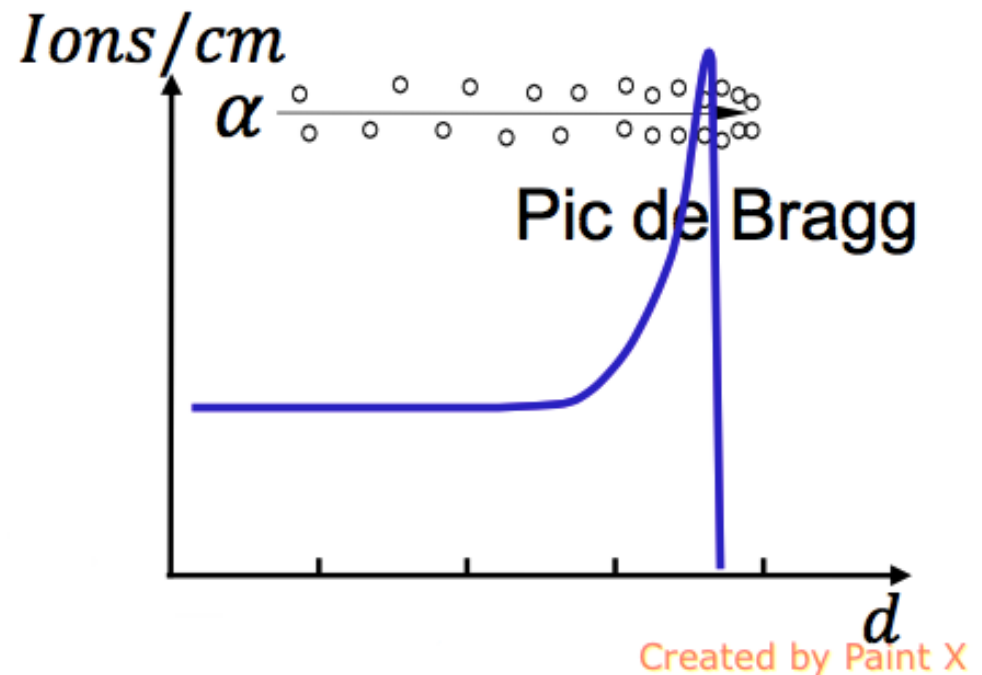


d. Parcours dans la matière

Particule α

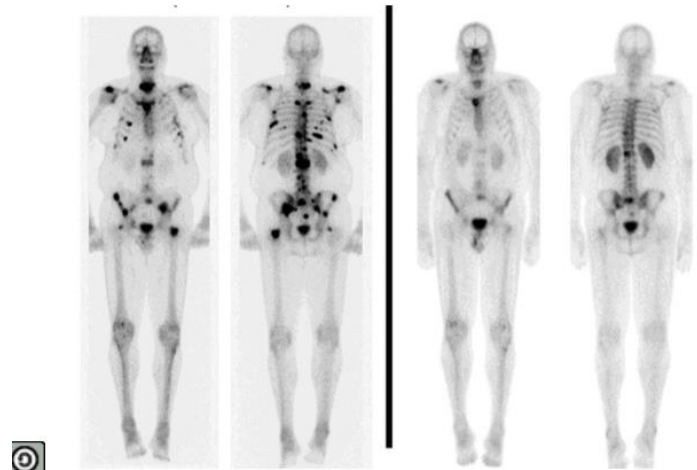
- Particule **chargée**
- Non relativiste (**vitesse faible**)
- **Lourde** (par rapport aux électrons)
- Trajectoire **rectiligne**
- Interaction **obligatoire**

- Chargée + donc attirée par les électrons → « directement ionisante » surtout en fin de parcours (pic de Bragg)
- Arrêtées par une feuille de papier



e. Applications biomédicales

- 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.



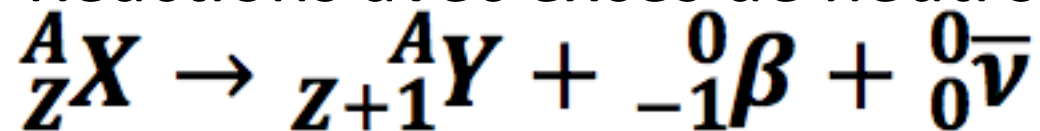
3) Transformations isobariques

- **Nombre de masse (A) constant** : changement de la répartition neutrons/protons
- Z change donc **nouvel élément chimique**
- Diminution de la masse pour obtenir une E_L **maximale**

① Désintégration β^-

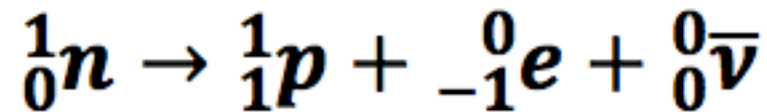
a. Réaction de désintégration

- Réactions avec excès de neutrons



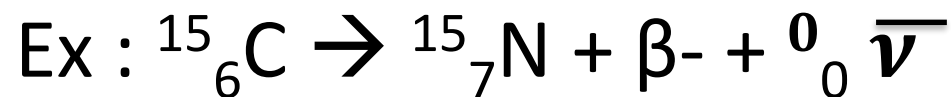
- Particules formées :
 - Noyau fils avec $Z = Z_{\text{père}} + 1$
 - Particule β^- = électron
 - antineutrino : masse négligeable et charge nulle

- L'électron ne préexiste pas dans le noyau, il naît d'une transformation :



- La transformation d'un neutron en proton correspond à l'inversion d'un quark :

Proton (uud) \rightarrow neutron (udd)



b. Bilan masse énergie

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

Remarque : on ne prend pas en compte la masse de l'antineutrino

c. Spectre en énergie

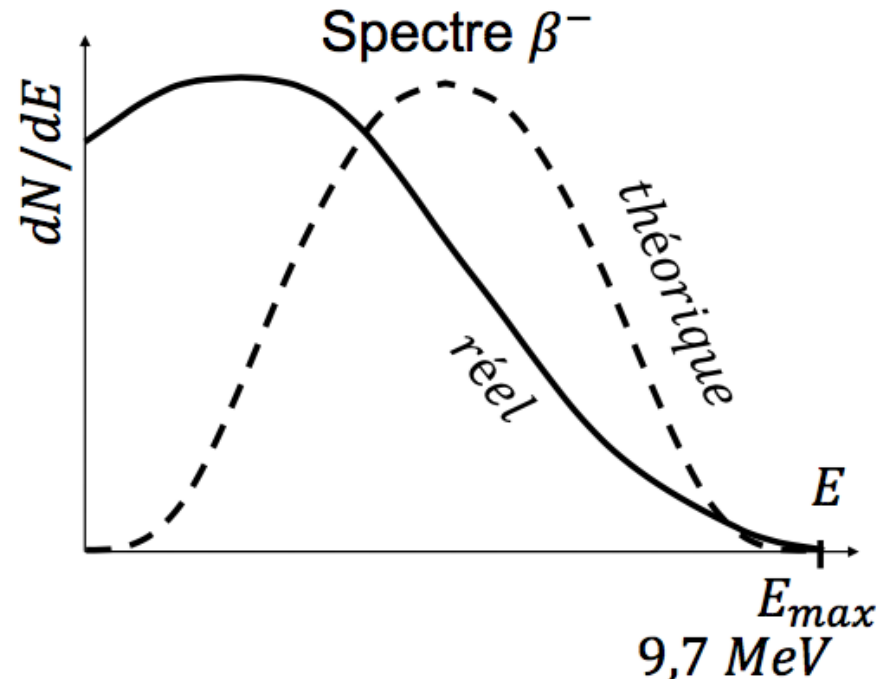
- *Rappel : le spectre doit satisfaire la loi de conservation de la quantité de mouvement.*
- L'énergie libérée répartie entre les énergies cinétiques des 3 particules :

$$E_d = E_c(\text{recul}) + E_c(\beta^-) + E_c(\bar{\nu})$$

- Le noyau fils est trop lourd : répartition aléatoire de l'énergie cinétique entre l'antineutrino et la particule β^-

→ on a un spectre **CONTINU**

NB : En pratique seul β^- est détectable



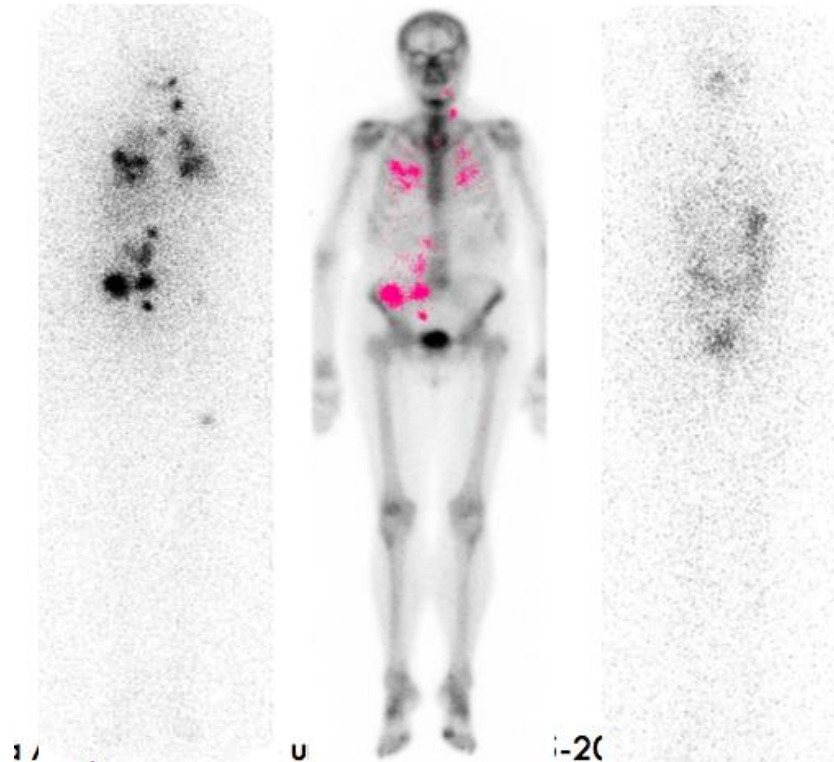
d. Parcours dans la matière

β^-

- Particule **relativiste**
- **Chargée**
- Interaction **obligatoire** avec électrons
- Ionisation +++
- Parcours **non rectiligne** donc parcours plus grand que portée
- Arrêtées par une feuille métallique

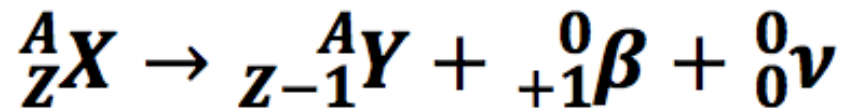
e. Applications médicales

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



② Désintégration β^+ Excès de protons

a. Réaction de désintégration

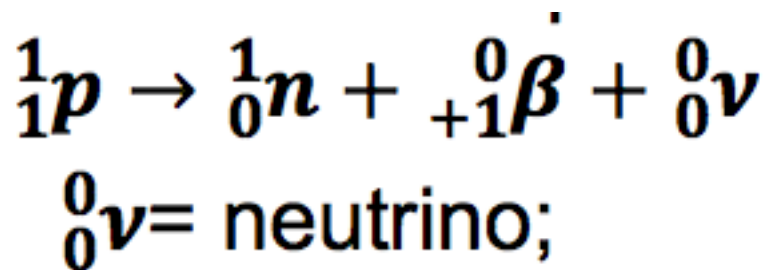


■ ${}^0_1\beta$ ou β^+ ou 0_1e = positon

- Correspond à l'inversion d'un quark :
Proton uud \rightarrow Neutron udd (impossible spontanément)

Particules formées :

- Noyau fils avec $Z = Z_{\text{père}} - 1$ (A inchangé)
 - Neutrino : charge nulle, masse négligeable
 - Particule β^+ : antimatière de l'électron
- ne préexiste pas dans le noyau, nait de a transformation isobarique :



b. Bilan masse énergie

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

$$\Delta M > 0$$

Donc

$$M(A, Z) - M(A, Z-1) > 2m_e$$

$$M(A, Z) - M(A, Z-1) > 2 \times 0,00055u = 0,0011u$$

$$M(A, Z) - M(A, Z-1) \times 931,5 > 2 \times 0,511 = 1,022 \text{ MeV}$$

→ IL Y A UN SEUIL EN MASSE ET EN ÉNERGIE

c. Spectre en énergie

Rappel : l'énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique

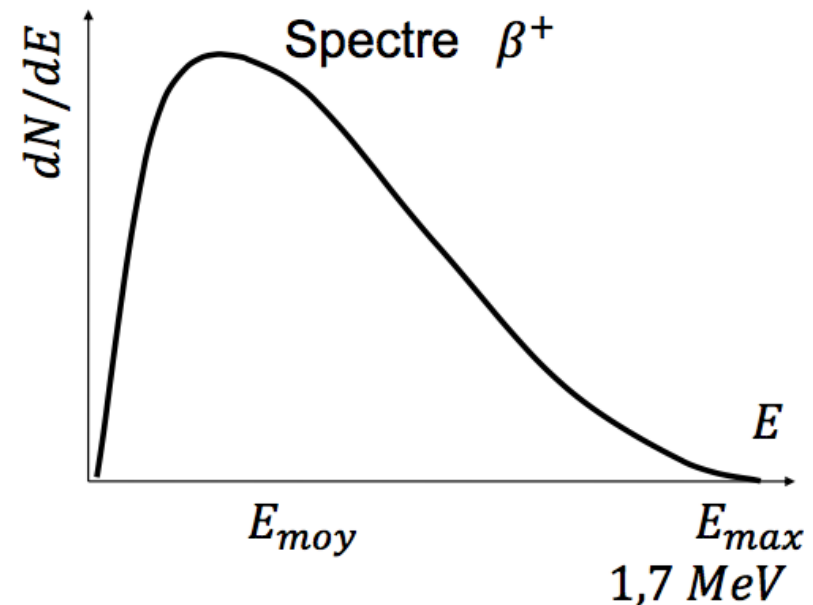
$$E_d = E_c(\text{recul}) + E_c(\beta^+) + E_c(\nu)$$

Répartition de l'énergie :

Noyau fils : trop lourd $\rightarrow E_c(\text{recul}) = 0$

β^+ : spectre CONTINU

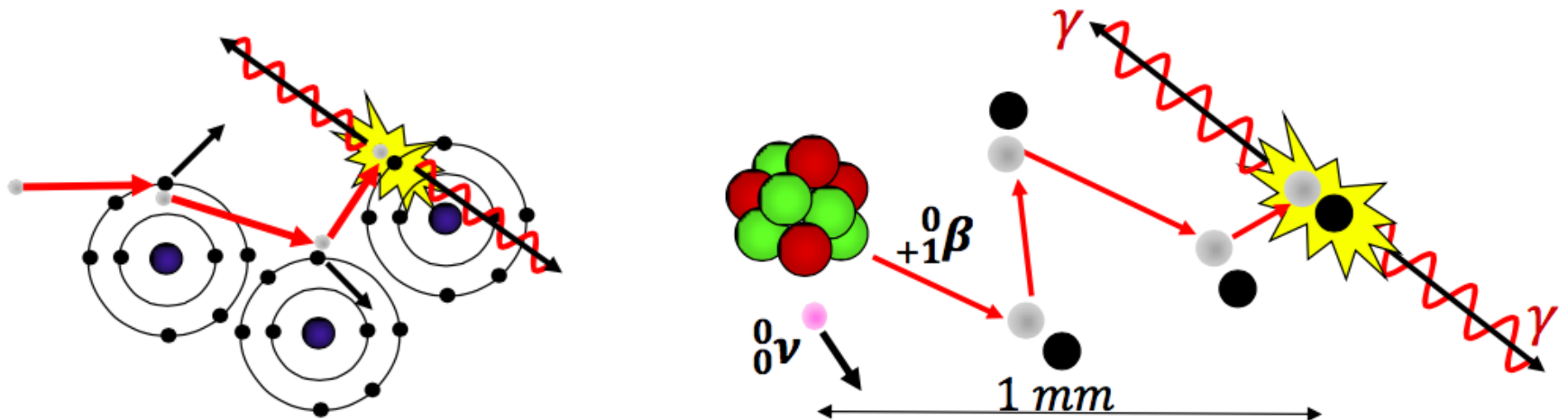
Neutrino : non détectable



d. Parcours dans la matière

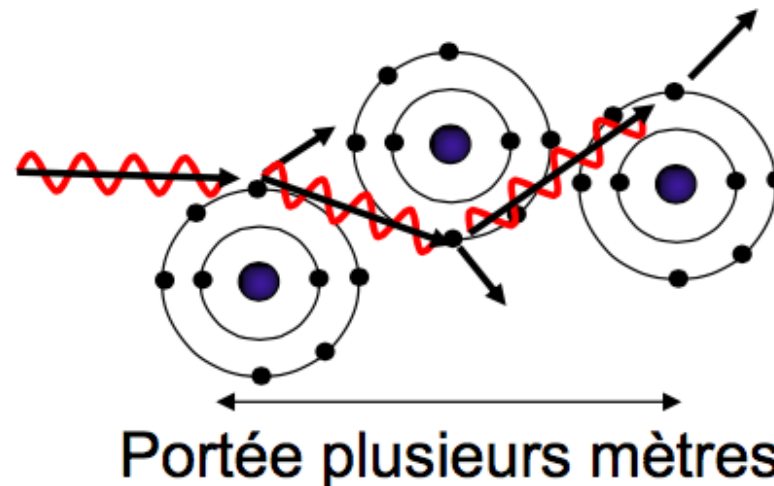
Les particules β^+ sont sujettes à des :

- 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° .



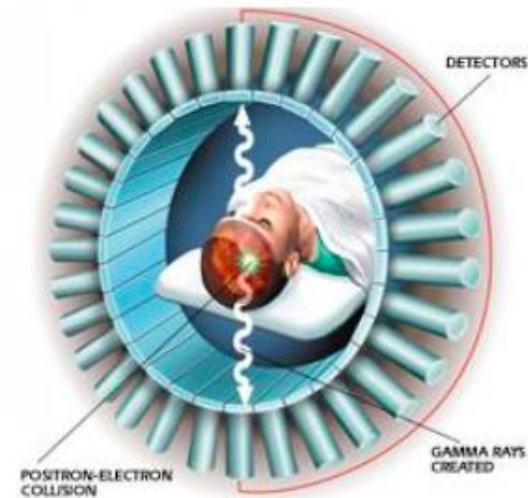
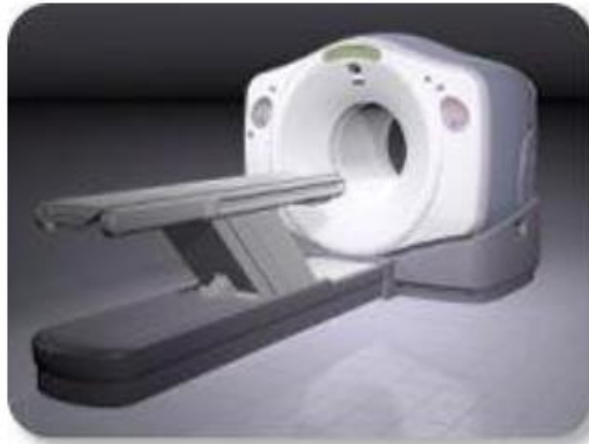
Les photons gamma :

- **Non chargés** → interactions non obligatoires
- Traversent la matière **sans atténuation**
- Parcours et portée plus **longue**
- Interagissent par effet photo-électrique ou Compton (besoin de matériaux denses)



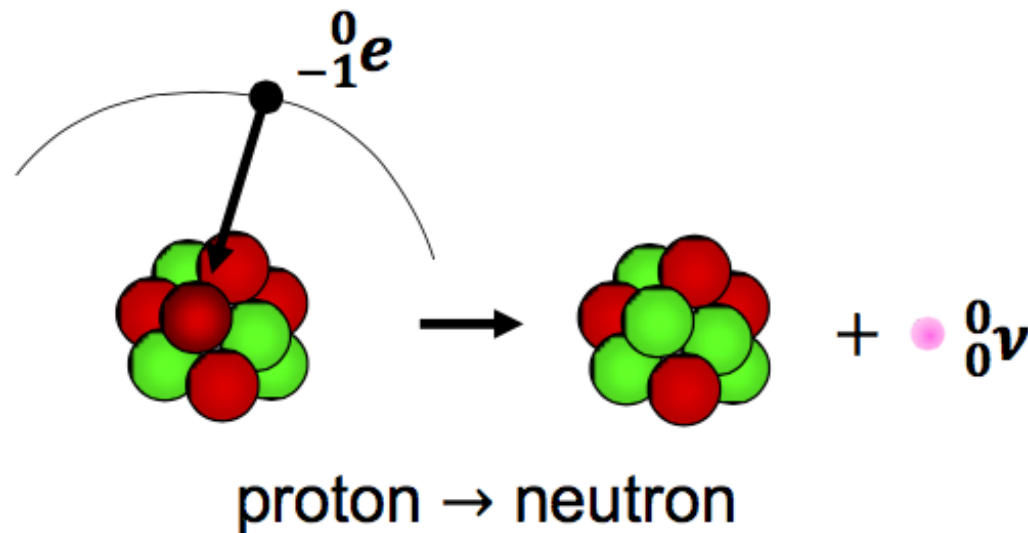
e. Applications médicales

- Ex : Tomographie par émission de positons, utilisé en cancérologie.

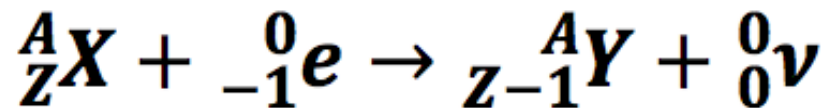


③ Capture électronique

→ nuclides avec excès de protons, dans le cas où β^+ est impossible : on capture une charge négative pour faire la transformation.



a. Réaction de désintégration



- Electron prélevé sur la couche K généralement.
- Neutrino masse nulle, charge nulle
- la capture entraîne un réarrangement de l'atome Y : photons de fluorescence ou électrons auger

b. 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^+ !

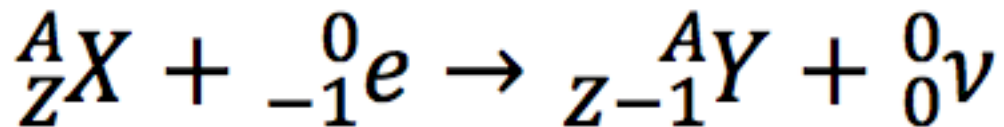
- Récap

Pour les noyaux instables par excès de protons, 2 possibilités :

- Emission β^+
- 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 Q est peu > 1,022 MeV.

c. Spectre en énergie

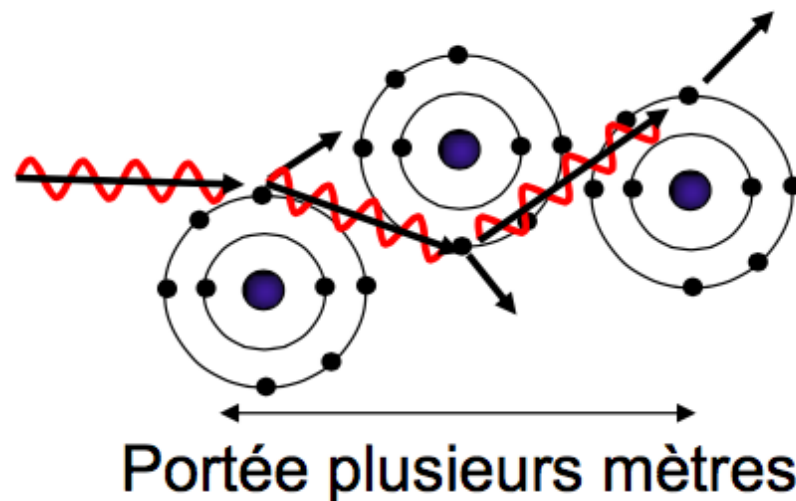


Toute l' E_c est emportée par le neutrino (indétectable).

- Aucun spectre d'origine nucléaire,
- On a un spectre de RAIES atomique lié aux réarrangements de Y.

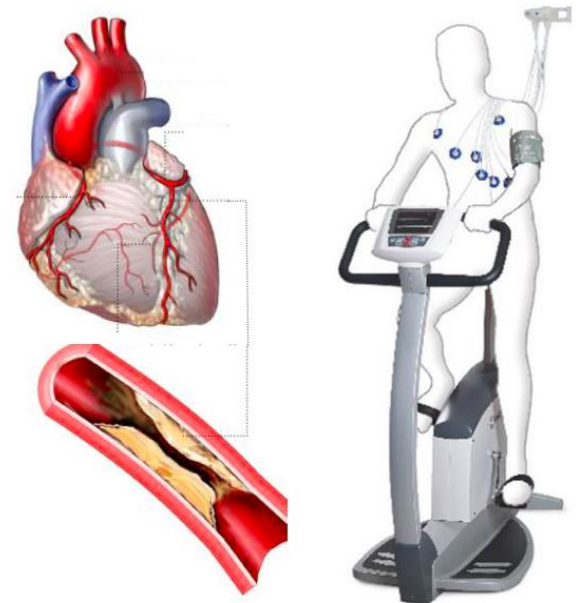
d. Parcours dans la matière

- Neutrino indétectable
- Photons de réarrangement : non chargés, interaction non obligatoire, grande portée.



e. Application médicale

Ex : Scintigraphie cardiaque au thallium 201



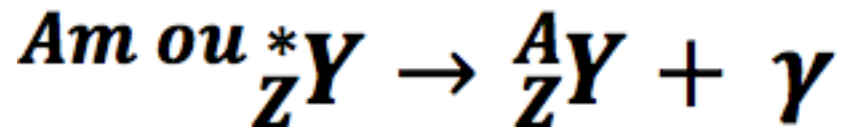
4) Transformations isomériques

- Transformations sans changement de la nature du noyau.
- Modifications du niveau d'énergie des nucléons.

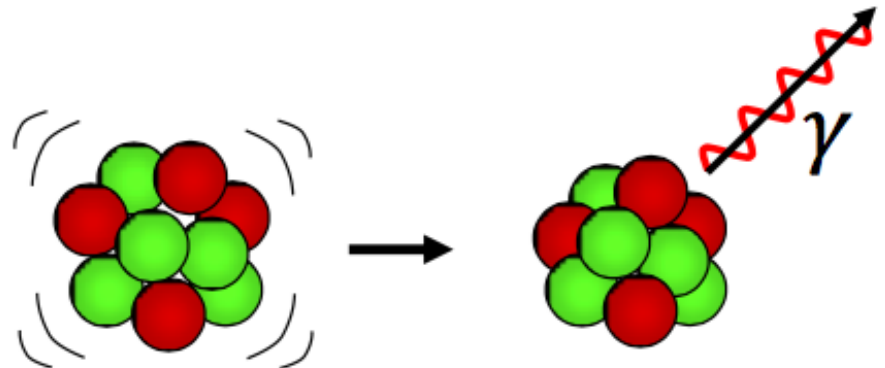
- Certaines transformations isobariques aboutissent à un état intermédiaire avec un excédent d'énergie.
 - Cet excédent est libéré grâce à :
 - l'émission de photons γ
 - la conversion interne
- Retour vers une masse minimale et une stabilité maximale

① Radioactivité γ

a. Réaction de désintégration



- Emission d'un photon gamma d'origine nucléaire.



b. Bilan masse énergie

$$\Delta M = M_{\text{père}} - M_{\text{fils}}$$

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

Rappel : le photon n'a pas de masse donc ne rentre pas dans le calcul de ΔM

c. Spectre en énergie

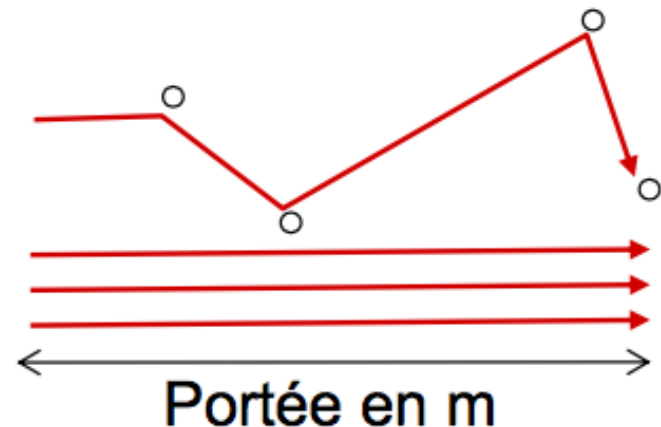
Toute l'énergie est emportée par le photon

→ Spectre :

- électromagnétique (photon)
- nucléaire (origine noyau)
- RAIE (une particule récupère toute l'énergie)

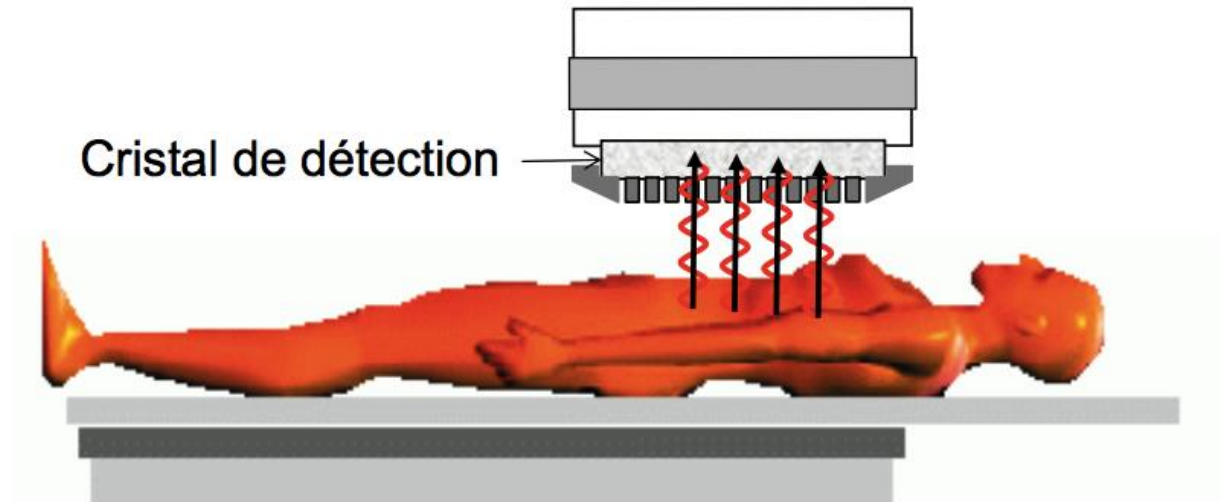
d. Parcours dans la matière

- Non chargé → interactions non obligatoires
- Ionisation par collision avec des électrons
- Effet photoélectrique, Compton, création de paires
- Très pénétrants (atténués par du béton, plomb)
- Portée en mètre.



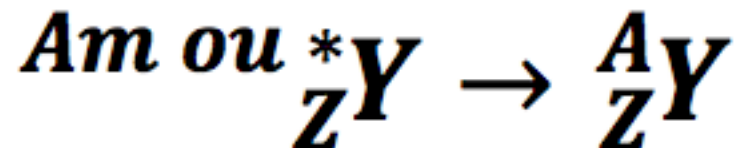
e. Applications médicales

- Ex : Gamma caméra



② Conversion interne

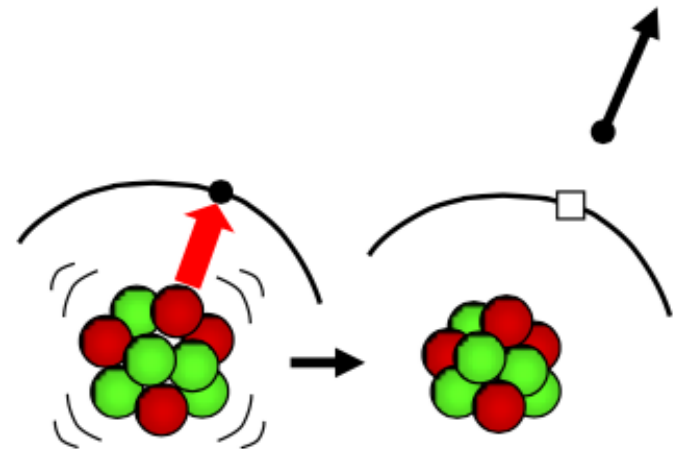
a. Réaction de désintégration



- Le noyau métastable libère de l'énergie en la transmettant à un électron : il est ionisé.
- Possibles réarrangements électroniques : photons de fluorescences, électrons auger.

b. Bilan masse énergie

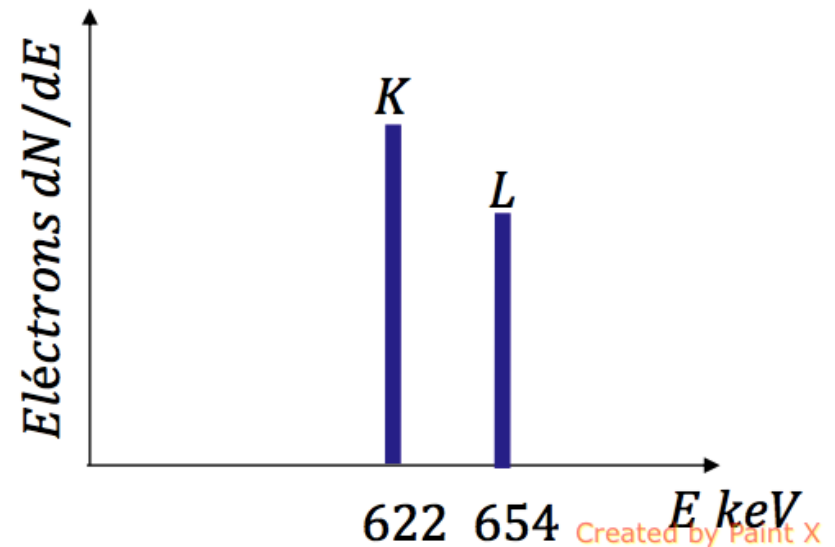
- $\Delta M = M(A, Z^*) - M(A, Z)$
- $E_{\text{libérée}} = \Delta M \times 931,5$
- $E_{\text{cinétique}}(e_i) = E_{\text{libérée}} - \Delta W_i$



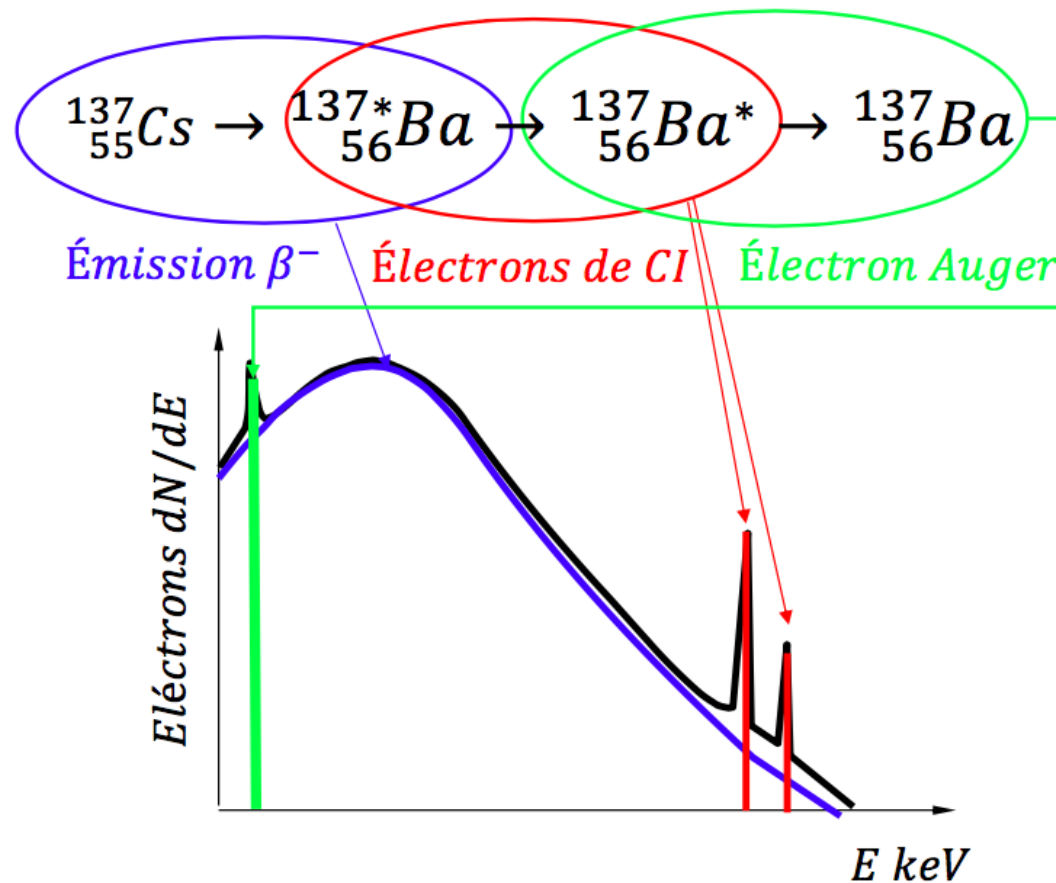
c. Spectre en énergie

Spectre :

- électronique (provient de électron)
- atomique (provient de l'atome)
- de raie (énergie entièrement transmise à e_i)



d. Spectre électronique réel complet



Récap

- Spectres énergétiques

Électromagnétique
(photon)



Electronique
(électron)

Atomique



Nucléaire

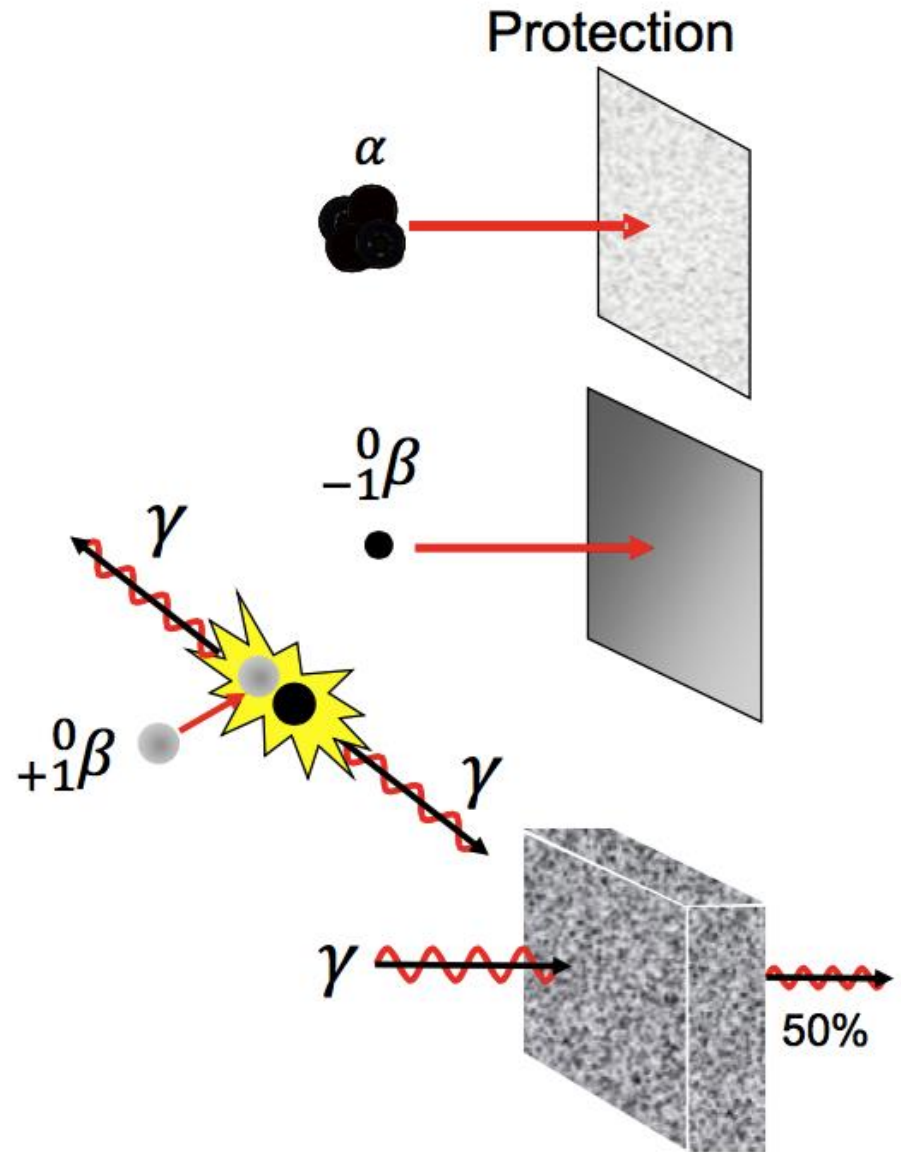
Raie
(une seule particule)



Continue (plusieurs
particules)

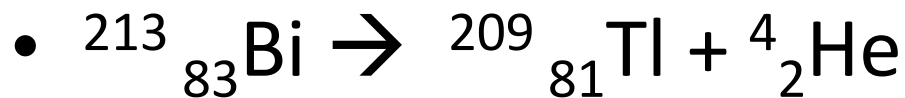
- Parcours dans la matière

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



QCM

① Le Bismuth-213 se transforme en Thallium-209



- On donne :

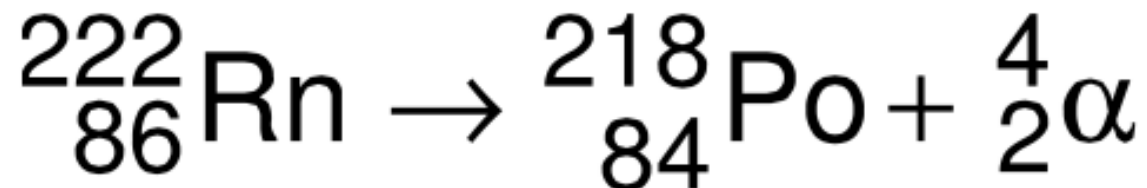
$$M(213,83)=212,9943 \text{ u}$$

$$M(209,81)= 208,9853 \text{ u}$$

- Quelle est l'énergie libérée par cette transformation?

- Correction
- $\Delta M = M(213,83) - M(209,81) - M(4,2)$
- $\Delta M = 212,9943 - 208,9853 - 4,0026 = 0,0064$
- $E_d = 0,0064 \times 931,5 \approx 6,0 \text{ MeV}$

② Soit la transformation suivante:



- On donne :
 $M(222, 86) = 222.0176 \text{ u}$
- $M(218, 84) = 218.009 \text{ u}$
 $M(4, 2) = 4.0026 \text{ u}$
Quelle est l'énergie libérée par cette transformation ?

- Correction

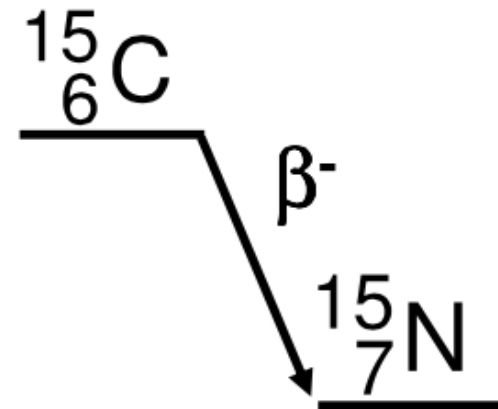
$$\Delta M = 222.0176 - 218.009 - 4.0026 = 6.10^{-3} \text{ u}$$

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

③ Soit la désintégration du carbone-15 en azote-15 avec:

- $M(15,6) = 15,0105$; $M(15,7) = 15,0001 \text{ u}$

- Quelle est l'énergie libérée?



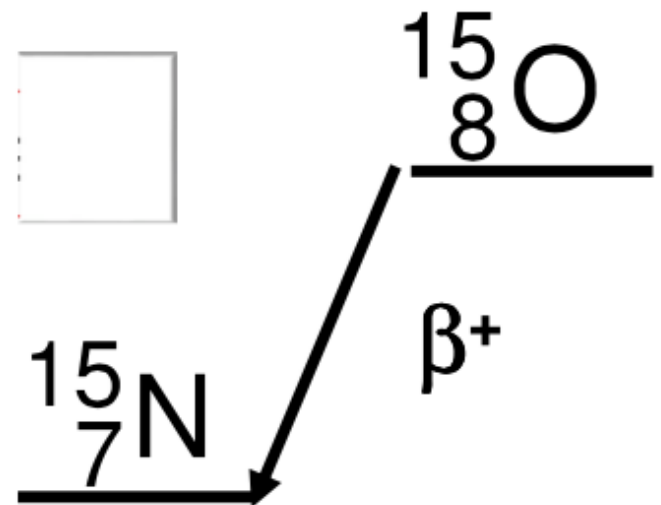
- Correction

$$\begin{aligned}\Delta M &= 15,0105 - 15,0001 \\ &= 0,0104 \text{ u}\end{aligned}$$

$$E_d = 0,0104 \times 931,5 = 9,7 \text{ MeV}$$

④ Soit la désintégration de l'oxygène-15 en azote-15 avec:

- $M(15,8) = 15,0030 \text{ u}$;
- $M(15,7) = 15,0001 \text{ u}$;
- $m_e = 0,00055 \text{ u}$

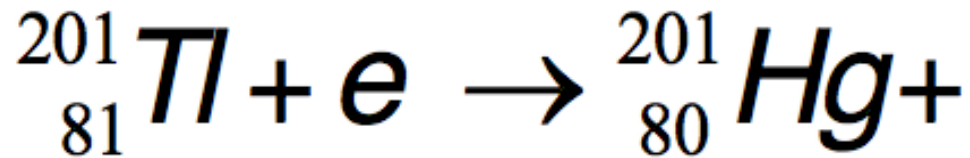


- Correction

$$\begin{aligned}\Delta M &= 15,0030 - 15,0001 - 2 \times 0,00055 \\ &= 0,0018 \text{ u}\end{aligned}$$

- $E_d = 0,0018 \times 931,5 = 1,7 \text{ MeV}$
- Le seuil de 1,022 MeV est dépassé la transformation β^+ est possible.

⑤ Soit la transformation suivante :



- On donne :
Wk du ${}^{201}\text{Tl}$ = -85keV
 $M(201, 81) = 200,97079$
 $M(201, 80) = 200,97028$
- Quelle est l'énergie libérée?

- Correction

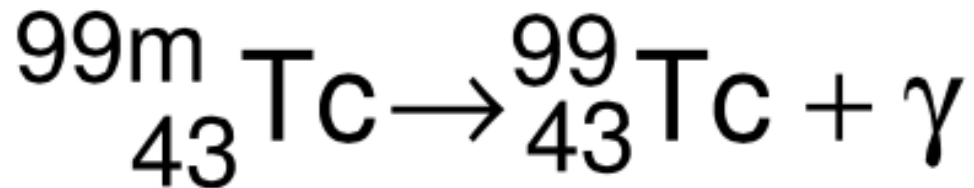
$$\Delta M = 200,97079 - 200,97028 = 5.10^{-4} \text{ u}$$

$$E_d = 5.10^{-4} \times 931,5 = 0,475 \text{ MeV}$$

L'énergie libérée est inférieure à 1,022 MeV: pas de désintégration β^+ possible.

L'énergie libérée est supérieure 85 keV = $|W_K|$: elle permet une capture électronique.

⑥ Soit la transformation suivante:



- On donne les masses:

$$M(99\text{m},43) = 98,90655$$

$$M(99,43) = 98,90640$$

Quelle est l'énergie du photon gamma libéré?

- Correction

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

-

$$\begin{aligned}E_d &= 0,00015 \times 931,5 \\ &= 0,14 \text{ MeV} \\ &= 140 \text{ keV}\end{aligned}$$

⑦ Soit la désexcitation du $^{137*}_{56}\text{Ba}$:

Avec

$$\Delta M = 660 \text{ keV}$$

$$W_k(^{56}\text{Ba}) = - 37,4 \text{ keV}$$

$$W_L(^{56}\text{Ba}) = - 5,6 \text{ keV}$$

- Calculer les énergies cinétiques des électrons pouvant être ionisés.

- Correction

$$\Delta M = 660 \text{ keV}$$

$$W_k(56\text{Ba}) = - 37,4 \text{ keV}$$

$$W_L(56\text{Ba}) = - 5,6 \text{ keV}$$

- $E_c(e_k) = 660 - 37,4$
 $= 622,6 \text{ keV}$

- $E_c(e_L) = 660 - 5,6$
 $= 654,4 \text{ keV}$



FIN

Merci pour votre attention !

