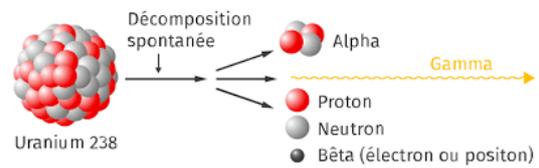


# Chapitre I : Production de rayonnement ionisant particulières

*Cours Radiobiologie Radioprotection*



Dr. Lezzar

# Table des matières



<b>Introduction</b>	3
<b>I - Rayonnement ionisant excès de nucléons</b>	4
<b>II - Rayonnement alpha</b>	6
<b>III - Rayonnement Bêta -</b>	8
<b>IV - Rayonnement Bêta +</b>	10
<b>V - Diagramme de désintégration (Diagramme de rayonnement)</b>	14

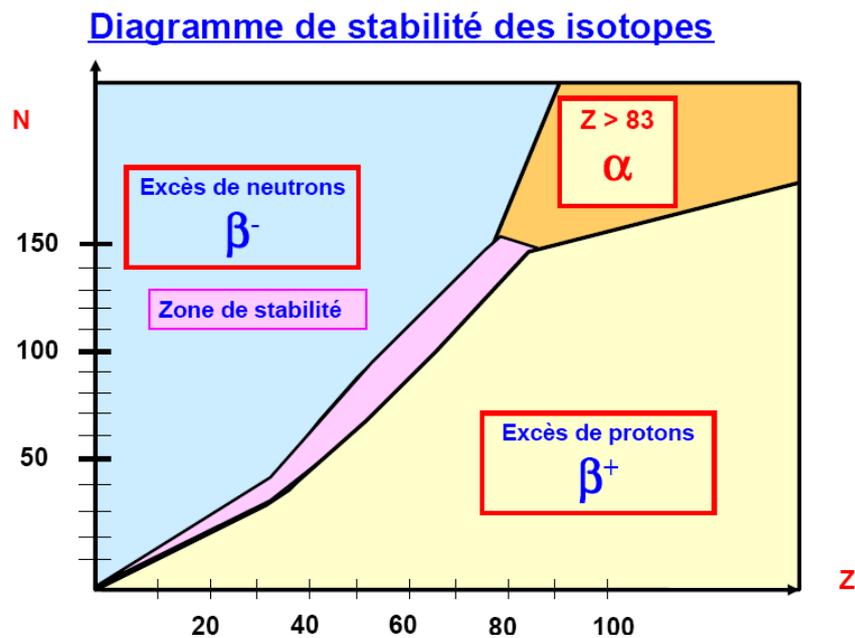
# Introduction

Les rayonnements particuliers sont émis lors du processus de radioactivité par lequel certains noyaux atomiques instables émettent de façon instantanée un rayonnement.

Nous distinguons deux types de radioactivités (un excès de nucléons émission de rayons  $\alpha$   $\beta$ , un excès d'énergie avec émission de rayons  $\gamma$ ).

La stabilité nucléaire résulte de l'équilibre entre les protons et les neutrons qui composent le noyau.

Sur la figure suivante, on rapporte sur un graphique le nombre de neutrons  $N=A-Z$  en fonction du nombre de protons  $Z$ , déterminant le diagramme des nucléides stables et radioactifs.



# Rayonnement ionisant excès de nucléons

I

Certains noyaux contiennent des particules est renferme trop d'énergie, la force de cohésion n'est plus suffisante pour maintenir les p et n ensemble , ce qui nous donne des noyaux instable.

## Définition

L'énergie de liaison  $E_l$  d'un atome est l'énergie qu'il faut fournir pour séparé les nucléons et annulée l'interaction forte.

## Méthode : Déficit de masse

Pour calculer cette énergie on fait le bilan de masse du système, sachant que la masse du réel du noyau est inférieur à la somme des masses de chacun de ces nucléons  $m_{\text{noyau}} < \Sigma \text{ masse des neutrons et proton}$

## Rappel

C'est ce qu'on appelle le déficit de masse qui correspond à une énergie, grâce au principe d'équivalence masse énergie de Einstein :  $E = m \cdot c^2$ .

## Fondamental

Si on considère le noyau qui est formé de Z protons et N neutron, la masse théorique du noyau  $m_{th} = Z * mp + N * mn$ .

- La masse réelle < masse théorique.

$$\Delta m = m_{th} - m_{\text{noyau}}$$

$$\Delta m = (Z * mp + N * mn) - m_{\text{noyau}}$$

$\Delta m$  se retrouve sous forme d'énergie de liaison ( $E_{\text{Liaison}}$ ) du noyau  $E_{\text{liaison}} = \Delta m * c^2$ .

$$\Delta m * c^2 = (Z * mp + N * mn) * c^2 - M(A,Z) * c^2 = E_{\text{liaison}}$$

On définit l'énergie de liaison moyenne par nucléon :  $E_{\text{nucléon}} = (\Delta m * c^2) / A = E_{\text{liaison}} / A$ .

Plus cette énergie est élevé plus l'atome est stable.

La relation entre l'atome et la masse du noyau :  $m_{\text{atomique}} = m_{\text{noyau}} + Z * m_e$

 *Remarque : L'unité de masse atomique (U.m.a)*

---

$$1 \text{ MeV} = 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ u.m.a} = 931.6 \text{ MeV} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1.00866 \text{ u.m.a} \rightarrow E = 939.55 \text{ MeV}$$

$$m_p = 1.00727 \text{ u.m.a} \rightarrow E = 938.256 \text{ MeV}$$

$$m_e = 0.000548 \text{ u.m.a} \rightarrow E = 0.511 \text{ MeV}$$

 *Complément : Conservation des paramètres*

---

Lors d'une transformation radioactive il y a conservation des paramètres pendant la transformation radioactive.

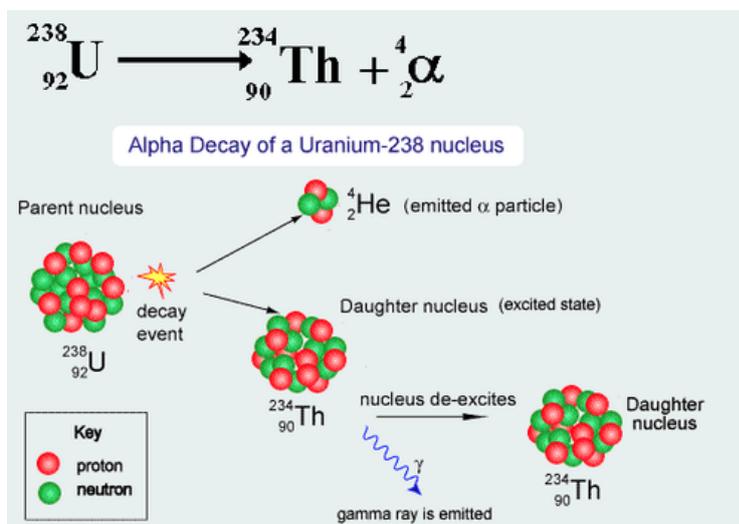
- Conservation de la charge et du nombre de nucléons (A et Z) qui restent les mêmes entre l'état instable et l'état finale.
- Conservation de l'énergie totale E et l'impulsion du système.

# Rayonnement alpha

II

Il est constitué d'un noyau d'hélium, comportant deux protons et deux neutrons. Il a donc une masse et une charge électrique importantes.

Il provient des réactions nucléaires de désintégration des atomes lourds ( $Z > 82$ ). L'énergie d'émission  $\alpha$  d'un atome lourd est constante et caractéristique de cet atome. Cette énergie varie de 1 à 10 MeV.



## ✂ Méthode

Un noyau instable X possédant un nombre atomique Z élevé se désintègre en un atome Y avec l'émission d'un rayon  $\alpha$

Le nouveau nucléide Y peut être lui même instable qui se stabilise (désexcitation) alors par une émission  $\gamma$ .  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha + \gamma$

## 🦋 Fondamental

Quand on envoie un rayon  $\alpha$  sur le corps humain par exemple elle peut pénétrée jusqu'à 0.03 mm ( faible pénétration), elle est utilisée pour les thérapies de contact (à la surface)

L'énergie cinétique de ces particules varie de 4 à 8 MeV, si on applique le principe de défaut de masse des noyau pour compenser

$$m_{\text{noyau}}(X) = m_{\text{noyau}}(Y) + m_{\text{noyau}}(\alpha) + \Delta m$$

On observe une différence de masse entre mi (masse de la particule dans l'état initial) et mf (somme des masses des particules dans l'état final) :  $\Delta m = m_X - (m_Y + m_\alpha)$ .

Ou si on prend la masse atomique de l'atome X et Y on trouve  $\Delta m = M_{\text{atomique}}(X) - M_{\text{atomique}}(Y) - M_{\text{atomique}}(\alpha)$

L'énergie libérée est  $E_{lib} = \Delta m \cdot c^2$  correspond à l'énergie cinétique  $E_\alpha$  et l'énergie du rayon  $\gamma$

$$E_{lib} = E_\alpha + E_\gamma$$

 *Remarque*

---

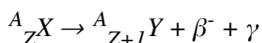
La profondeur de pénétration est faible, elle est de quelque micromètre dans le tissu mou, mais ils ont une très grande énergie 1000 fois supérieur que les  $\beta^-$ . Ces particules sont utilisé dans la radiothérapie de contact (curiethérapie) pour le traitement du cancers, avec les rayons gamme qui permettent la localisation ou le traitement aussi.

# Rayonnement Bêta -

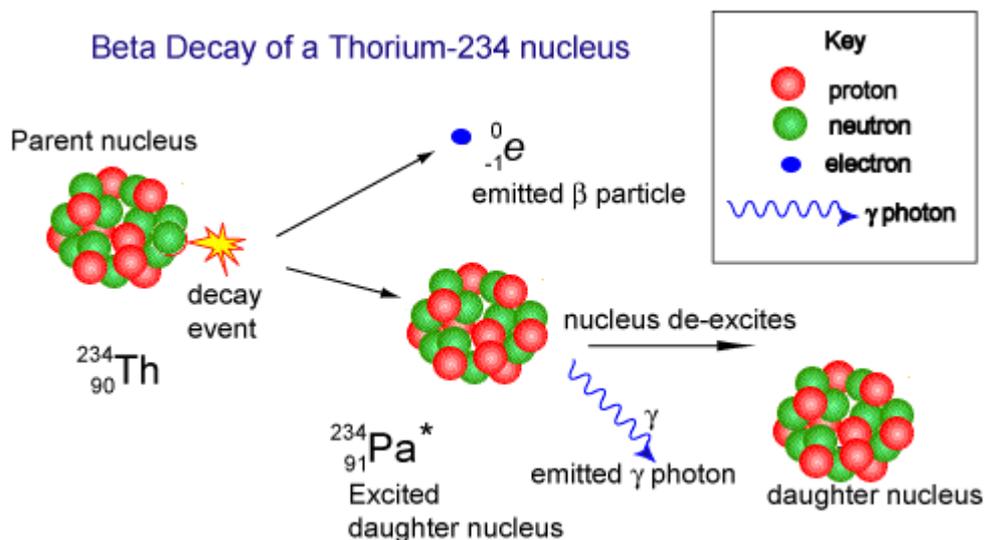
III

Une particule  $\beta^-$  est un électron, cette électron n'existe pas dans le noyau il provient de la transformation d'un neutron en proton + électron :  ${}^1_0n = {}^0_{-1}e + {}^1_1p$

Donc dans la transformation  $\beta^-$  le nombre de proton augmente et le nombre de masse A ne change pas. C'est une transformation isobarique qui s'accompagne d'une émission  $\gamma$



Cette transformation concerne les éléments chimique qui se trouvent au dessus de la ligne de stabilité, elle est naturelle



## Exemple



C'est le noyau père et Ni est le noyau fils

## Fondamental

Cette émission à lieu lorsque  $m_X > m_Y$

On applique le principe de défaut de masse nucléaire (noyau) pour compenser

$$m_{\text{noyau}}(X) = m_{\text{noyau}}(Y) + m_{\beta} + \Delta m$$

On observe une différence de masse entre  $m_i$  (masse de la particule dans l'état initial) et  $m_f$  (somme des masses des particules dans l'état final) :  $\Delta m = m_{\text{noyau}}(X) - (m_{\text{noyau}}(Y) + m_{\beta})$ .

Ou si on prend la masse atomique de l'atome X et Y on trouve  $\Delta m = M_{\text{atomique}}(X) - M_{\text{atomique}}(Y)$ .

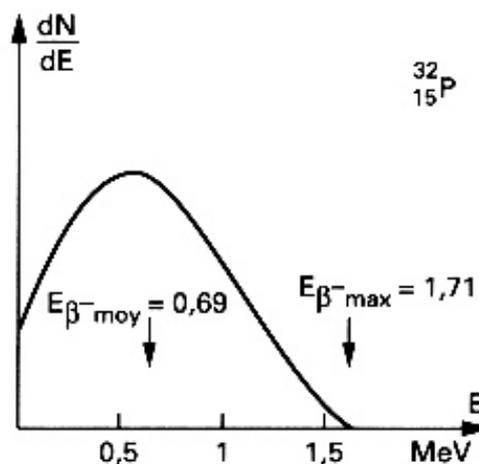
L'énergie libérée est  $E_{\text{lib}} = \Delta m \cdot c^2$  correspond à l'énergie cinétique  $E_{\beta\text{-max}}$  et l'énergie du rayon  $\gamma$

$$E_{\text{lib}} = E_{\beta\text{-max}} + E_{\gamma}$$

La réaction est énergétiquement possible à la seule condition  $\Delta m > 0$ .

### Complément

Le diagramme d'énergie de ce rayonnement correspond à une émission selon un spectre avec peu de particules émises avec l'énergie maximale et une énergie moyenne de l'ensemble des particules aux environs de tiers (1/3) de l'énergie maximale. car l'électron émis subit l'attraction des protons présents dans le noyau et perd ainsi de son



**Figure 8** – Spectre d'émission des  $\beta^-$ , cas du  $^{32}_{15}\text{P}$

### Remarque

La profondeur de pénétration est plus importante que celle des  $\alpha$ , elle est de quelques millimètres dans le tissu mou, ces particules sont utilisées en radiothérapie interne pour le traitement du cancer ou la médecine nucléaire par imagerie avec les rayons gamma qui permettent l'exploration fonctionnelle ou le traitement.

# Rayonnement Bêta +

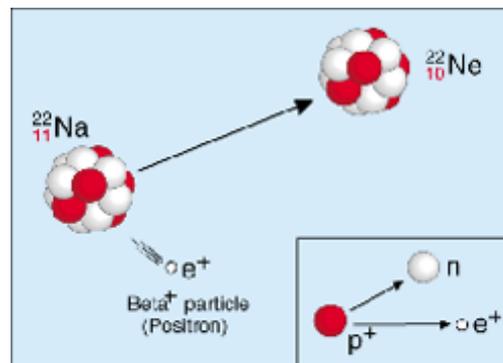
## IV

Cette émission est caractérisée par l'expulsion d'un positron  $\beta^+ = {}^0_1e$ , cette positron n'existe pas dans le noyau il provient de la transformation d'un proton en positon + neutron :  ${}^1_1p = {}^0_1e + {}^1_0n$

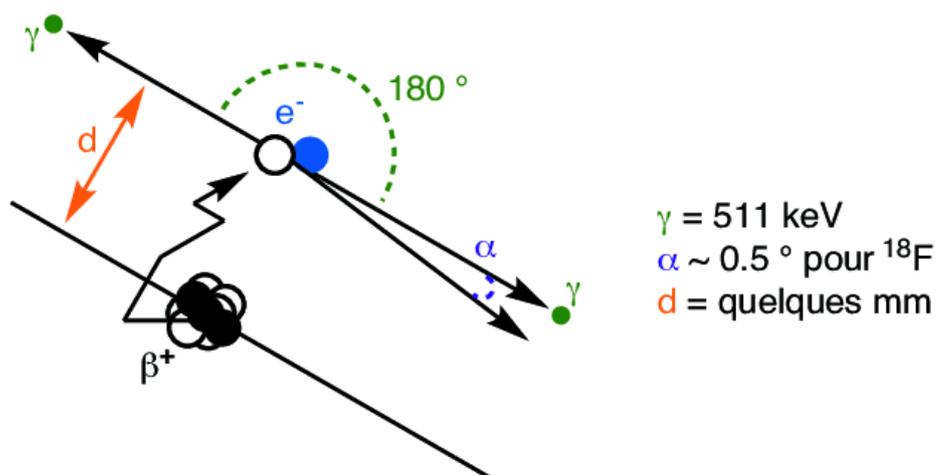
Donc dans la transformation  $\beta^+$  le nombre de proton diminue et le nombre de masse A ne change pas. C'est une transformation isobarique qui s'accompagne d'une émission  $\gamma$



Cette transformation concerne les éléments chimique qui se trouvent au dessous de la ligne de stabilité, elle est artificiel.



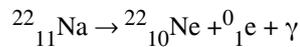
Le positron s'annihile en fin de son parcours avec un électron, pour obtenir deux photon  $\gamma$  dos a dos ( $180^\circ$ ) chacun emportes une énergie de 0.511 Mev



### ⚠ Attention

Il faut faire la différence entre les photons  $\gamma$  du à la réaction *d'annihilation* et les rayons  $\gamma$  de la *désexcitation* du noyau fils pour qu'il se stabilise.

### 👉 Exemple



Na le noyau père et Ne le noyau fils.

### 🌸 Fondamental

On applique le principe de défaut de masse nucléaire (noyau) pour compenser

$$m_X = m_Y + m_\beta + \Delta m$$

On observe une différence de masse entre  $m_i$  (masse de la particule dans l'état initial) et  $m_f$  (somme des masses des particules dans l'état final) :  $\Delta m = m_{\text{noyau}}(X) - (m_{\text{noyau}}(Y) + m_\beta)$ .

Ou si on prend la masse atomique de l'atome X et Y on trouve  $\Delta m = M_{\text{atomique}}(X) - M_{\text{atomique}}(Y) - 2*m_e$ .

L'énergie libérée est  $E_{\text{lib}} = \Delta m * c^2$  correspond à l'énergie cinétique  $E_{\beta+\text{max}}$ , l'énergie de l'annihilation du positon avec l'électron ( $2*m_e*c^2$ ) qui vient après et l'énergie du rayon  $\gamma$  de désexcitation du noyau fils

$$E_{\text{lib}} = E_{\beta+\text{max}} + E_\gamma \text{ ou } (M_{\text{atomique}}(X) - M_{\text{atomique}}(Y)) * c^2 - 2*m_e * c^2 = E_{\beta+\text{max}} + E_\gamma$$

La réaction est énergétiquement possible à la seule condition que  $M_{\text{atomique}}(X) - M_{\text{atomique}}(Y) > 2*m_e$  ou  $E_{\text{lib}} > 2*m_0*c^2$

### 📦 Complément

Du fait de la répulsion électrostatique du noyau ( lui aussi chargé +) le positon aura tendance à avoir une plus grande énergie dans sa traversé de la matière.

Le diagramme d'énergie de ce rayonnement est un spectre d'émission.

Cependant, on remarque qu'un certain nombre de particules sont émises pour les faibles énergies (la courbe démarre à l'origine des 2 axes)

En effet, les particules  $\beta+$  subissent d'emblée une répulsion du aux charges positives des protons du noyau favorise les énergies hautes (à l'inverse des particules  $\beta-$  qui subissent une attraction et nécessitent plus d'énergie pour être expulsées).

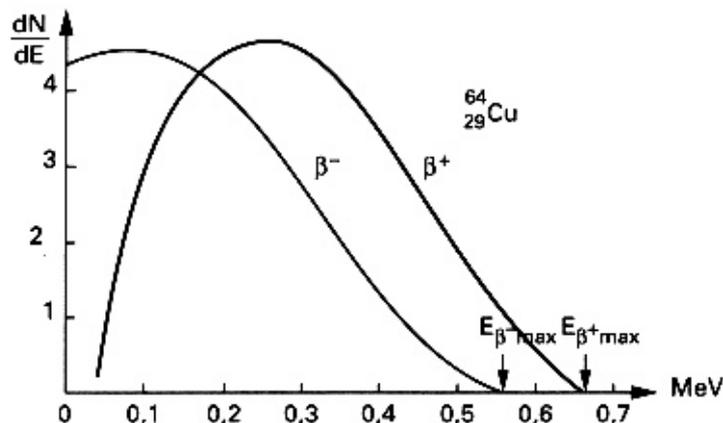


Figure 9 – Spectre d'émission  $\beta^- - \beta^+$ , cas du  ${}^{64}_{29}\text{Cu}$

### Remarque

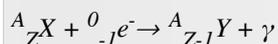
Les particules ont une durée de vie courte, elles se propagent dans la matière en perdant leur énergie.

Elle est utilisée dans la médecine nucléaire pour le diagnostic avec l'imagerie médicale par la détection des rayons  $\gamma$  ou radiothérapie pour le traitement du cancer par  $\beta^+$ .

### Attention : Capture électronique

Le rayonnement  $\beta^+$  est en concurrence avec le phénomène de la capture électronique. En effet, un noyau excédentaire en proton peut convertir celui-ci en un neutron en capturant un électron.  ${}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^1_0\text{n}$ .

Donc dans la transformation CE le nombre de proton diminue et le nombre de masse  $A$  ne change pas. C'est une transformation isobarique qui s'accompagne d'une émission  $\gamma$



On applique le principe de défaut de masse nucléaire (noyau) pour compenser  $m_{\text{noyau}}(\text{X}) + m_{\text{e}} = m_{\text{noyau}}(\text{Y}) + \Delta m$

Ou si on prend la masse atomique de l'atome X et Y on trouve  $\Delta m = M_{\text{atomique}}(\text{X}) - M_{\text{atomique}}(\text{Y})$

L'énergie libérée est  $E_{\text{lib}} = \Delta m \cdot c^2$  correspond à l'énergie cinétique  $E_{\text{CE}}$  et l'énergie du rayon  $\gamma$

$$E_{\text{lib}} = E_{\text{CE}} + E_{\gamma}$$

99% des captures électroniques sont de type K, c'est à dire avec un électron de la couche K, la plus proche du noyau. un phénomène secondaire de la CE est l'émission d'un rayon X : la capture de l'électron y crée une place vide qui sera comblée par un électron des couches supérieures en émettant un rayon X.

La capture peut également laisser le noyau dans un état excité. Elle est alors suivie par l'émission d'un rayon  $\gamma$  de désexcitation.

La capture électronique est prédominante pour les éléments lourds.

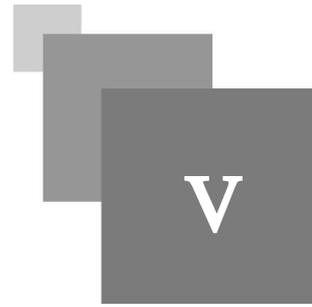
La réaction est énergétiquement possible à la seule condition que  $E_{\text{lib}} > E_{\text{liaison}}$

 *Fondamental : Compétition avec CE et bêta +*

---

- si  $E_{\text{liaison}} < \Delta m < 2*m_e$  : CE
- si  $\Delta m > 2*m_e$  :
  - atomes légers :  $\beta^+$
  - atomes lourds : CE (car en moyenne, les électrons seront plus près du noyau, favorisant la conversion électronique)

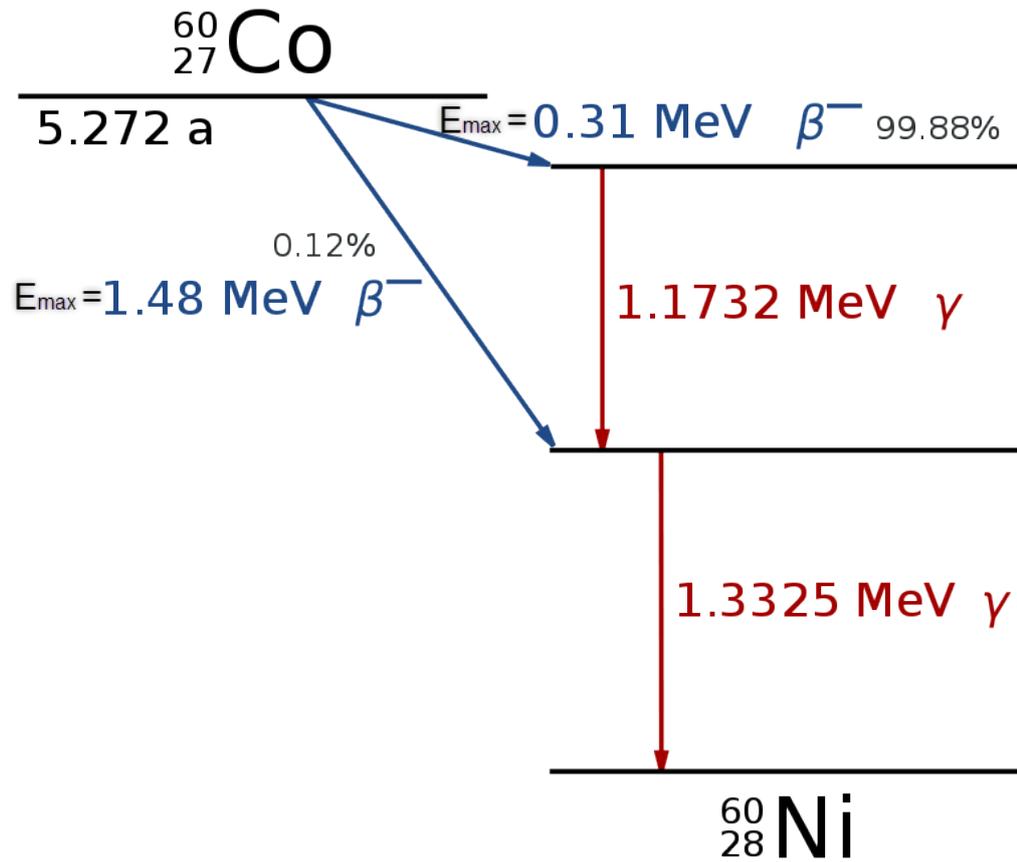
# Diagramme de désintégration (Diagramme de rayonnement)



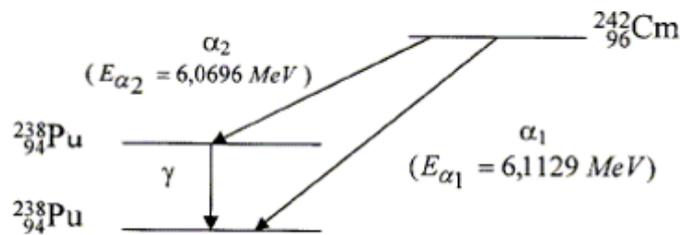
Le Schéma de désintégration d'une substance radioactive est une représentation graphique de toutes les transitions dans cette désintégration, et de leur relations.

Ces relations peuvent être assez compliquées; ici, un cas simple est montré: le schéma de désintégration d'un isotope radioactif de cobalt, le  $^{60}\text{Co}$ . Cet isotope se désintègre en émettant un électron (radioactivité  $\beta$ ) dans un état excité de  $^{60}\text{Ni}$ , et celui-ci retombe très vite à son état fondamental, en émettant deux photons gamma. Dans un cas sur 1000 (99.88%), l'électron est éjecté avec une énergie qui intègre celle du premier rayon gamma, et seul le second est ensuite émis.

On peut s'imaginer que le schéma soit placé dans un système de coordonnées, où l'axe des y est l'énergie, augmentant de bas en haut, et l'axe des x est le numéro atomique Z (nombre de protons), augmentant de gauche à droite. Les flèches indiquent les particules émises. Pour les transitions gamma (flèches verticales) les énergies gamma sont indiquées; pour les transitions bêta (flèches obliques), les énergies maximum sont données.



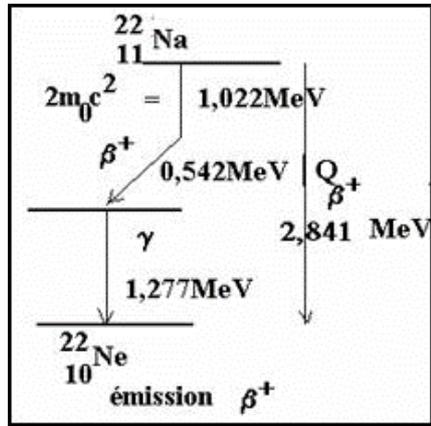
Désintégration par bêta -



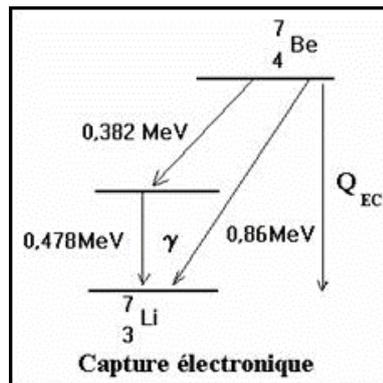
Désintégration par alpha

Pour la désintégration  $\beta^+$  l'énergie qui est représenté dans le diagramme de désintégration sur l'axe Y (des énergie) est comme suite :

$$E_{\text{lib}} (0,542 + 1,277) + 2 \cdot m_e \cdot c^2 (1,022) = E_{\beta^{\text{max}}} (0,542) + E_{\gamma} (1,277) + 2 \cdot m_e \cdot c^2 (1,022)$$



Désintégration par bêta +



Désintégration par capture électronique

Comme la capture électronique qui est en compétition avec la désintégration  $\beta^+$ , donc il y a une relation entre l'énergie de la capture électronique et l'énergie cinétique de  $\beta^+$  qui est :  $E_{CE} = E_{\beta^+max} + 2m_e c^2$

