

Biophysique des rayonnements ionisants

Pr N ISMAILI ALAOUI

Université Sidi Mohamed Benabdelleh

Faculté de médecine, de pharmacie et de médecine dentaire Fès

CHU Hassan II Fès

Programme

- Introduction aux bases physiques des rayonnements ionisants
- Interactions des rayonnements ionisants avec la matière
 - Interactions des rayonnements particulaires avec la matière
 - Interactions des photons avec la matière
- Radioprotection
- Radiobiologie

LES RADIOELEMENTS ET RADIOACTIVITE

Définitions:

- Un radioélément: élément chimique **radioactif**
- Les **radionucléides**: radioactivité et nucléide
- **La radioactivité**: propriété de certains éléments chimiques d'émettre des rayonnements ← instabilité du noyau atomique
- Les radioéléments existent naturellement mais peuvent aussi être produits artificiellement par une réaction nucléaire

Pour comprendre la nature de ce
phénomène « RADIOACTIVITE »

Il est important de rappeler la structure
de l'atome et de son noyau →

LA MATIERE

I- STRUCTURE DES ATOMES:

L'atome est constitué:

- ▶ d'un noyau central très dense ou nucléide chargé

positivement

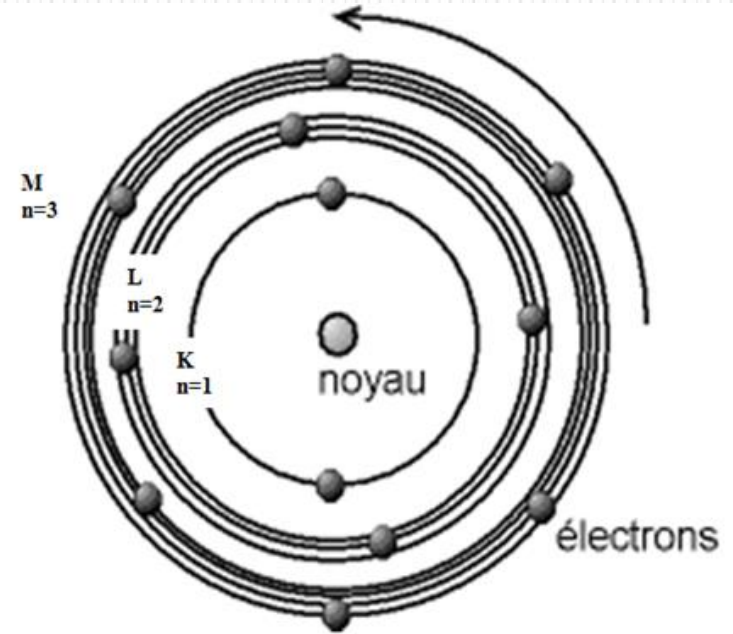
- ▶ autour du noyau gravite un nuage d'électrons chargés

négativement

Masse de l'électron = $9,109 \cdot 10^{-31}$ Kg

- Les électrons sont liés au noyau atomique par des forces d'interaction qui leur assignent une trajectoire
- Cette trajectoire ne peut pas être considérée comme bien définie pour chaque électron
- ➔ Modèle physique rendant plus facile la représentation des phénomènes.
- Sommerfeld en 1916 propose l'atome à orbites elliptiques
- Bohr en 1913 avait proposé un modèle à orbites circulaires que nous allons adopter comme schéma simplifié

- Modèle à orbites circulaires
- Les e^- gravitent autour du noyau sur ces orbites \equiv couches électroniques
- Chaque orbite se caractérise par un nombre quantique principal désigné par la lettre n (1,2,3...)
- Chaque couche représentée par une lettre (K,L,M...)
- Le nombre d' e^- dans les différents niveaux est limité à $2n^2$.
- Les e^- se placent sur la couche K puis L, M...



L'état de l'atome obtenu par ce type de remplissage: état fondamental

II- STRUCTURE DU NOYAU

1-Constitution :

- Les noyaux des atomes sont constitués de nucléons : protons et neutrons

a- Caractéristiques du proton

- Le proton (Z) : noyau de l'atome d'hydrogène.
- $m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ Kg}$
- $m_p \approx 1836 m_e$
- Sa charge électrique élémentaire « e » est positive + e = $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$.

b- Caractéristiques du neutron

- Le neutron (N) : $m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ Kg} \Rightarrow m_n \approx m_p$
- Charge électrique « e » nulle

2-Représentation du noyau

- Pour représenter le noyau d'un élément X, appelé encore nucléide, on utilise la représentation suivante :



- ▶ X: symbole chimique de l'élément
- ▶ A: nombre total des nucléons = nombre de masse
- ▶ Z: nombre de protons = numéro atomique = nombre de charges électriques positives: e^+ = nombre d'électrons
- ▶ $N = A - Z$: nombre de neutrons

Cette présentation \Rightarrow identifier un noyau et déterminer sa composition

3- La masse du noyau:

La masse d'un atome = masse du noyau + masse de Ze^-

La masse d'un atome est essentiellement concentrée dans son noyau \Leftrightarrow la masse des électrons est négligeable devant celle des nucléons.

a-Unité de masse :

- **La masse molaire** = la masse d'une mole
- **Masse d'un atome:** nombre de nucléons x masse du nucléon
- **Masse d'un atome** = $A \times 1.67 \times 10^{-27}$ (kg)
- **Masse d'un atome** = $A \times 1.67 \times 10^{-24}$ (g)
- **Masse molaire atomique = M**
- **M = masse d'un atome x NA** *NA* : nombre d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ atomes
- **M** = $A \times 1.67 \times 10^{-24} \times NA$
- **M** = $A \times 1.67 \times 10^{-24} \times 6.02 \times 10^{23}$
- **M** = $A \times 10.05 \times 10^{-1} = A \times 1.005$ => **M = A**

La masse molaire atomique => nombre de nucléons (A)

Unité : g/mol

- Exemple:



- La masse de l'atome = A/N

Exemples :

Masse molaire atomique : Oxygène (16) 16g /mol

Masse molaire atomique : Carbone (12) 12 g/mol

Pour exprimer les masses, nous utilisons l'unité de masse atomique: u.m.a (mieux adaptée aux très faibles masses)

b- Unité de masse atomique

Par définition : $1/12^{\text{ème}}$ de la masse d'un atome de ^{12}C

- Masse de N atomes C \longrightarrow 12g
- Masse de 1 atome C \longrightarrow $12 / N$
- $1 \text{ u.m.a} = 1 / 12 \times 12 / N$
- $1 \text{ u.m.a} = 1/N$ $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ atomes
- $1 \text{ u.m.a} = 1,660 \cdot 10^{-24} \text{ g}$
- $1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$

Relativité Einstein:

- **Relation d'équivalence : masse - énergie**
- **Toute masse possède une énergie E**

$$E = m c^2$$

- **C = 3.10^8 m/s** : célérité ou vitesse lumière: vide
- **E = $1,66.10^{-27} \times (3.10^8)^2 = 1,5.10^{-10}$ J**
- **L'unité d'énergie en physique nucléaire : eV**

L'eV: l'énergie acquise par une charge élémentaire e- soumise à une différence de potentiel de **1 volt**

- **1 eV = $1,6.10^{-19}$ J;**
- **1 u.m.a = $\frac{1,5.10^{-10}}{1,6.10^{-19}} = 931.10^6$ eV / c²**
- **1 u.m.a = 931 MeV / c²**

4- Énergie de liaison des noyaux :

m_n : masse des neutrons

m_p : masse des protons

$M(A, Z)$: masse du noyau

A
 Z

En principe : $M(A, Z) = Zm_p + (A-Z)m_n$

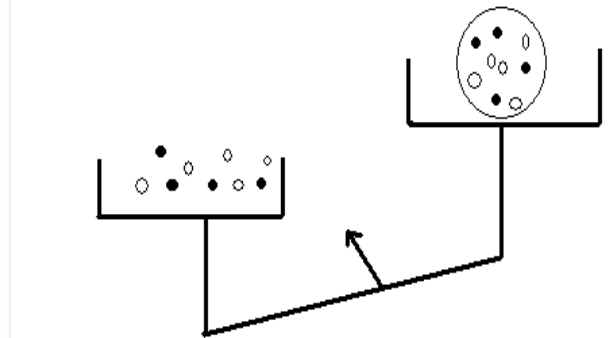
En réalité:

$M(A, Z) < Zm_p + (A-Z)m_n$

$M(A, Z) = [Zm_p + (A-Z)m_n] - \Delta m$

Δm : défaut de masse

$\Delta M = [Zm_p + (A-Z)m_n] - M(A, Z)$



- Ce défaut de masse correspond à l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le séparer en ses constituants : à l'énergie de liaison totale EL des nucléons dans le noyau

$$EL = \Delta M c^2$$

Dans un noyau, l'énergie de liaison moyenne par nucléon vaut:

$$Em = \frac{EL}{A}$$

Avec A : nombre de masse

- Noyau stable : sa masse M < à la masse de ses constituants pris séparément
- Noyau radioactif : sa masse > à la masse de ses constituants
- Noyau radioactif possède un excès d'énergie
- Cet excès d'énergie est libéré par la transformation du noyau en un ou plusieurs nouveaux noyaux stables

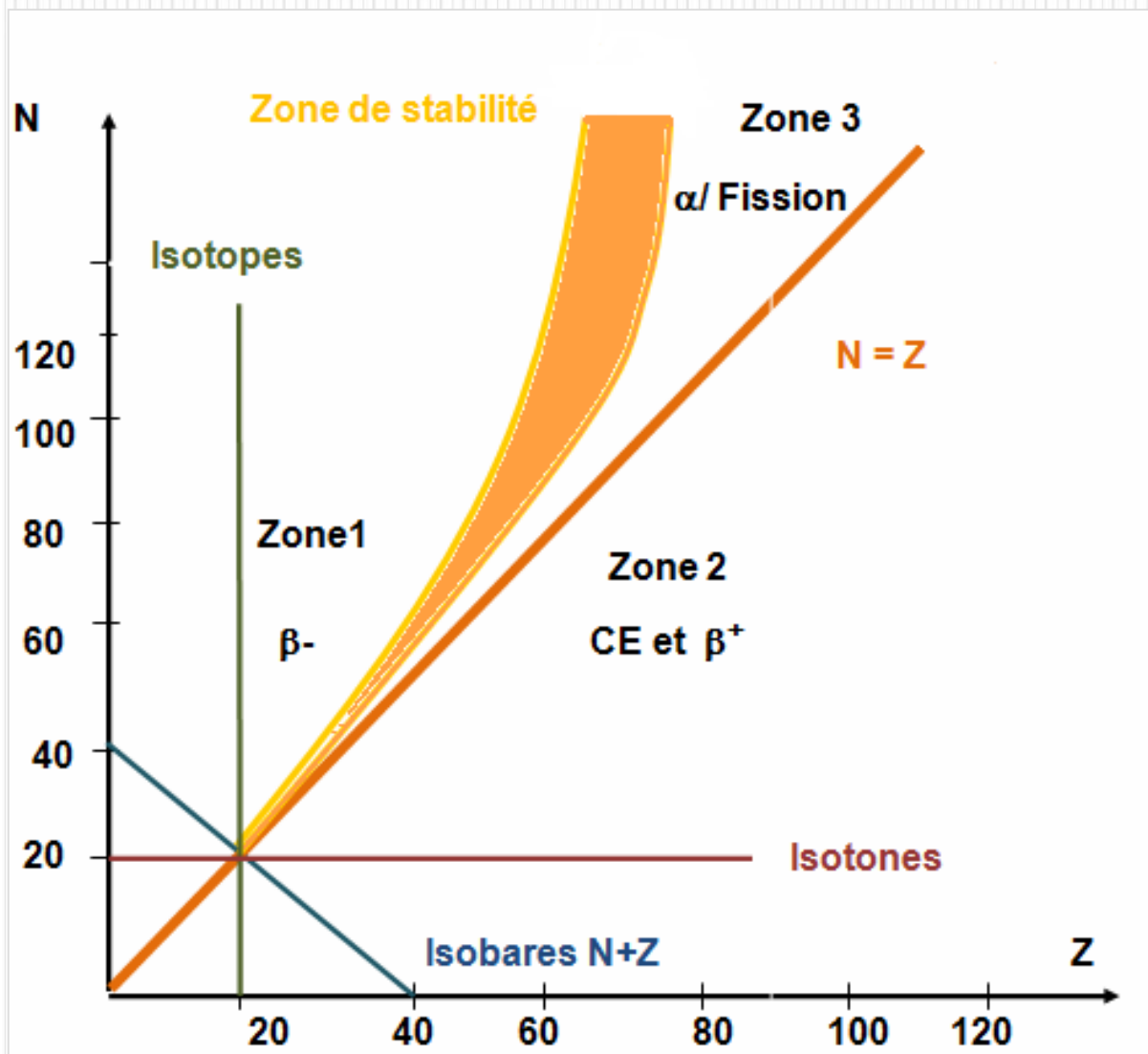


Diagramme de stabilité

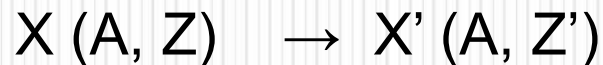
≡

Diagramme de Segré

LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

■ Transformations isobariques :

A= constant



⇒ Emissions β^- , β^+ et capture électronique

L'instabilité de ces noyaux

un excès de neutrons

un excès de protons

- Les noyaux père et fils sont sur la même ligne isobarique : même nombre de masse A mais leur nombre de charge Z diffère d'une unité.

Emission β^-

- ◆ Un noyau situé dans la zone 1 présente un excès de neutrons
- ◆ Pour retrouver sa stabilité, il va transformer ses neutrons en protons suivant la réaction:



- ◆ Emission : - d'un Rayonnement β^- (e^-)
- d'un anti-neutrino: $\bar{\nu}$ particule neutre; $m_{\bar{\nu}} \approx 0$
- ◆ e^- et $\bar{\nu}$ ne sont pas des composants du noyau
- ◆ donc sont éjectés : rayonnements nucléaires émis

➤ **L'équation bilan de la désintégration β^- :**



➤ **Condition énergétique :**

L'énergie maximale libérée au cours de la réaction:

$$Q_{\beta^-} = E_{\beta^- \text{ Max}} = E_i - E_f$$

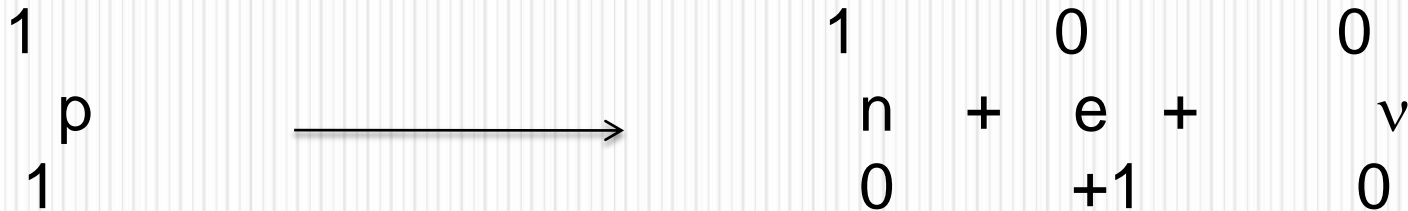
- $E_{\beta^- \text{ Max}} = [M (A , Z) - (M (A , Z+1) + m_{e^-} + m_{\nu})] C^2$
- $M (A , Z) = M (A , Z) - Z m_{e^-}$ et
- $M (A , Z+1) = M (A , Z+1) - (Z+1) m_{e^-}$
($m_{\nu} = 0$)
- $Q_{\beta^-} = E_{\beta^- \text{ Max}} = [M (A , Z) - M (A , Z+1)] C^2$
- **Il suffit pour que l'émission β^- soit spontanément possible que:**

$$Q_{\beta^-} > 0 \Leftrightarrow \Delta M C^2 > 0 \Leftrightarrow M (A , Z) - M (A , Z+1) > 0$$
- Q_{β^-} : énergie libérée se partage au hasard entre l' e^- et le $\bar{\nu}$

Emission β^+

Un noyau situé dans la zone 2 présente un excès de protons

Pour retrouver la stabilité il va transformer ses protons en neutrons suivant **la réaction** :



Emission d'un rayonnement:

- ▶ β^+ ou un e^+ : positon
- ▶ et d'un neutrino ν .

➤ L'équation nucléaire correspondante



➤ Condition énergétique:

$$Q_{\beta^+} = E_{\beta^+ \text{ max}} = E_i - E_f$$

$$E_{\beta^+ \text{ max}} = \{M(A, Z) - [M(A, Z-1) + m_{e^+} + m_{\nu}]\} C^2 \quad (m_{\nu} = 0) ; \text{ or } m_{e^-} = m_{e^+}$$

$$M(A, Z) = M(A, Z) - Z m_e$$

$$M(A, Z-1) = M(A, Z-1) - (Z-1) m_e$$

$$E_{\beta^+ \text{ max}} = [M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_e] C^2$$

$$E_{\beta^+ \text{ max}} = [M(A, Z) - M(A, Z-1)] C^2 - 2m_e C^2$$

$$E_{\beta^+ \text{ max}} = \Delta M C^2 - 2m_e C^2$$

Emission β^+ possible:

$$\text{si } E_{\beta^+ \text{ max}} > 0 \Leftrightarrow \Delta M C^2 > 1,022 \text{ MeV}$$

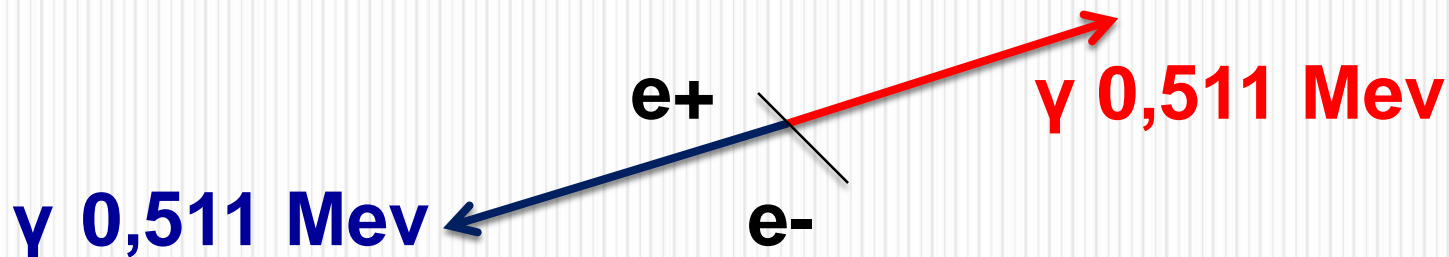
⇒ **Notion d'énergie seuil**

L'énergie maximale de la particule β^+ émise
hasard entre l' e^+ et le ν

$$E_{\beta^+ \text{ max}} = \Delta M c^2 - 1,022 \text{ MeV se partage au}$$

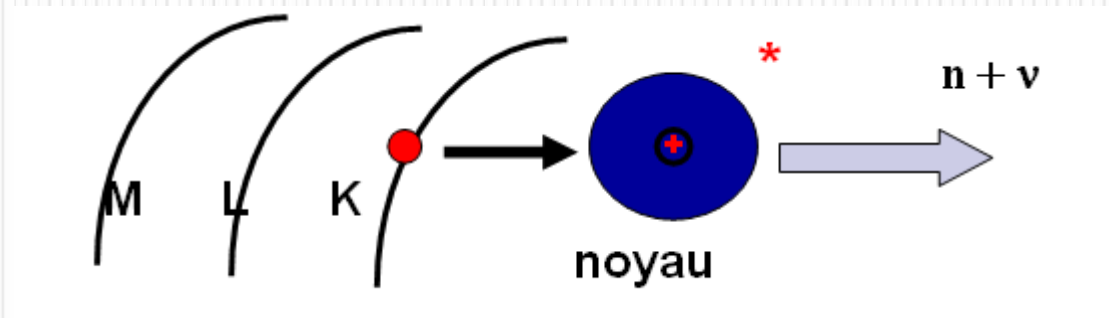
➤ Effets secondaires :

- *Le positon émis « e^+ »: se propage dans la matière en perdant son énergie
- *Au repos : e^+ rencontre un e^- de la matière \Rightarrow
- ***Annihilation** avec émission de deux photons γ de même énergie $h\nu = 0,511 \text{ MeV}$ émis dans deux sens opposés à 180°



Capture électronique: CE

- Les noyaux de zone 2: un excès de protons peuvent également se transformer par CE
- La CE la capture d'un des électrons des couches internes de l'atome par le noyau, au sein duquel se combine à un proton pour donner un neutron.



➤ La réaction nucléaire



➤ Bilan énergétique CE :

Emission par C.E possible si :

$$\{M(A, Z) + m_e - [M(A, Z-1) + m_\nu]\} C^2 > E_I$$

En passant aux masses atomiques on obtient :

$$M(A, Z) = M(A, Z) - Zm_e$$

$$M(A, Z-1) = M(A, Z-1) - (Z-1)m_e$$

$$\Delta M C^2 > E_I$$

$$E_{CE} = [M(A, Z) - M(A, Z-1)] C^2 - E_I$$

Toute l'énergie de désintégration $\Delta M C^2 - E_I$ est emportée par le neutrino

➤ Phénomènes secondaires à la CE

✖ *Emission d'un Rayonnement X*: après une C.E:

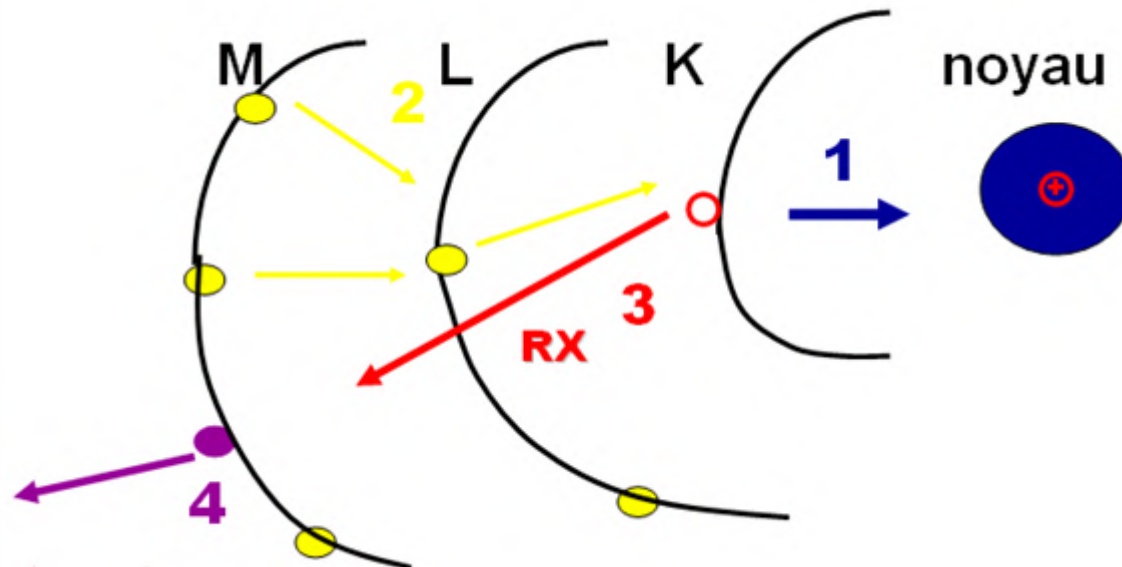
- Le cortège électronique comporte un «trou»: vacance
- atome* : excité
- réarrangement électronique qui aboutit à:
- l'émission de RX caractéristique du noyau final.
- Ce RX émis est un photon qui a une énergie :

$$E_x = E_k - E_l$$

(l'électron transite de L \longrightarrow K)

x Electron Auger :

- L'énergie de transition X interagit avec un électron périphérique qui sera ainsi libéré:
- c'est l'électron Auger



Electron Auger

➤ **Compétition entre β^+ et la C.E :**

La C.E est favorisée si :

- **Energie seuil < 1,022 Mev**
- **Pour les noyaux lourds (Z très élevé)**

■ Transformations par partition

Zone 3 :

- excès de neutrons et de protons
- répulsions importantes
- évolution vers la stabilité par :

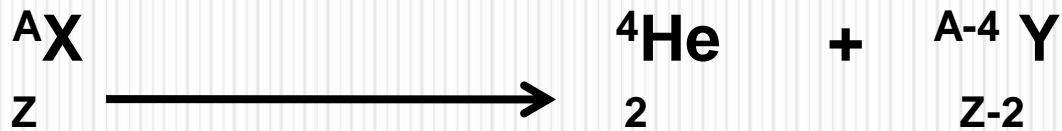
Emission alpha

ou

Fission spontanée

Emission α

- Ce type d'émission s'observe pour les noyaux qui ont des $Z > 83$ qui vont essayer d'évoluer vers la zone de stabilité et en particulier jusque vers la zone $Z = 83$.
- 2 neutrons et 2 protons se réunissent à l'intérieur du noyau pour former un noyau d'hélium qui est émis spontanément par des noyaux lourds instables suivant la réaction:



- Dans cette désintégration, le nombre de masse A diminue de 4 et le numéro atomique Z diminue de 2.

➤ Condition énergétique

Pour que cette émission alpha puisse se faire spontanément:

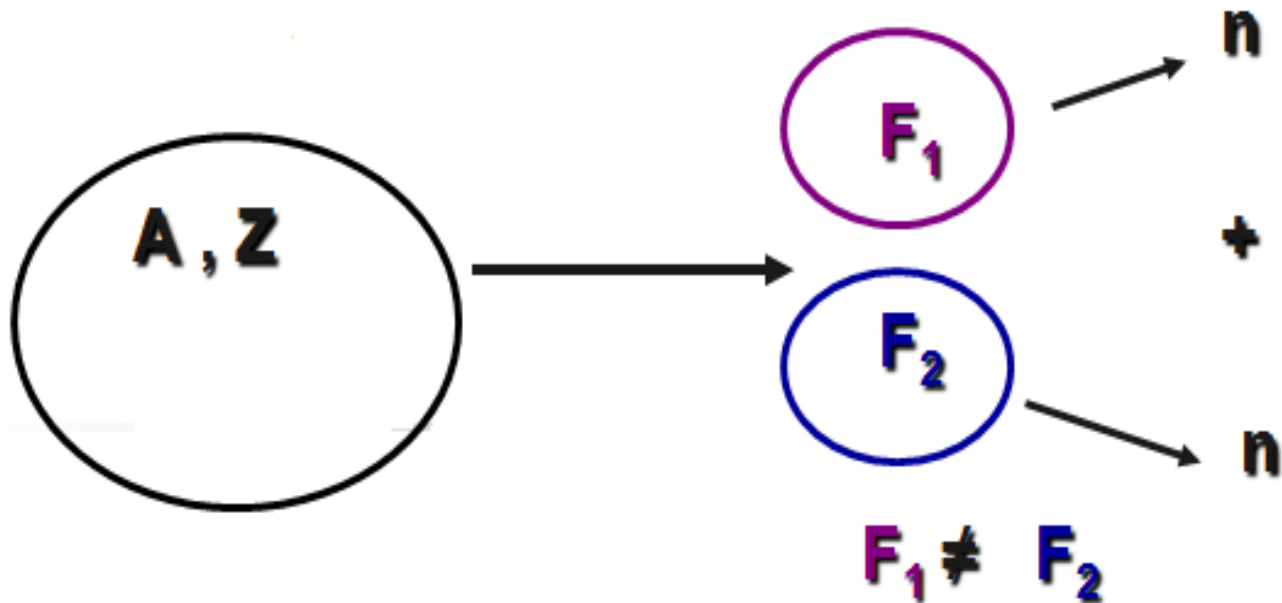
$$\Delta M = M(A, Z) - [M(A-4, Z-2) + M(\text{He})] > 0$$

$$E_{\alpha} = [M(A, Z) - (M(A-4, Z-2) + M({}^4_2\text{He}))] C^2$$

Les particules α émises pour un type de désintégration sont monoénergétiques: ont même énergie

Fission spontanée

- **Cause** : noyaux lourds
- **Mécanisme** :



■ Désexcitation électromagnétique des noyaux

Après émission α , β^- , β^+ ou CE

Le noyau reste excité; d'où désexcitation par:

- ▶ émission γ ,
- ▶ conversion interne (CI)
- ▶ émission d'une paire (e^+ , e^-)

Emission gamma :

Noyau*

Désexcitation sans modification
de la composition

Instantanée

10^{-6} sec \rightarrow 1 sec

E_i^*

or $\nu = c / \lambda$;

isomérique

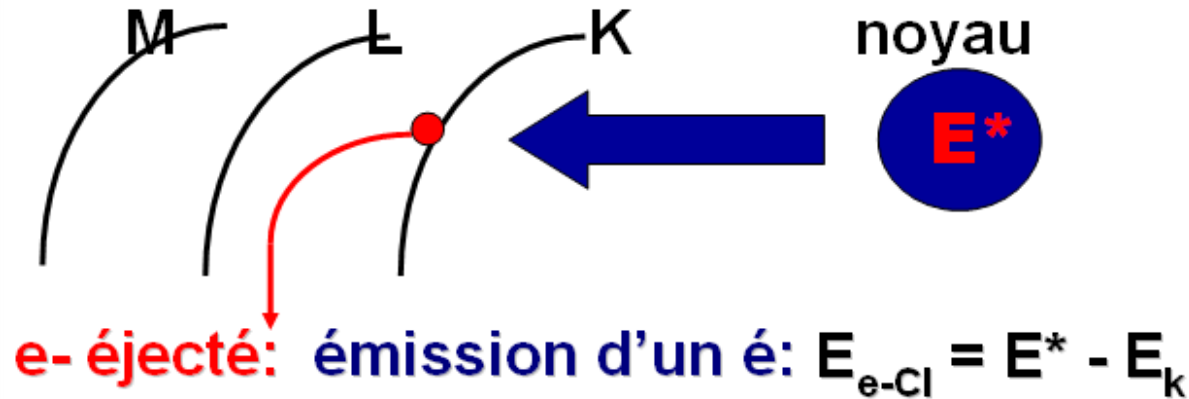
> 1 sec

E_f

$E_\gamma = h\nu$

$E_\gamma = h.c / \lambda = E_i^* - E_f$

Conversion Interne : CI



Phénomènes secondaires à la CI:

- émission de RX
- émission d'électron Auger

E^* : γ ou CI ? - γ si énergie grande

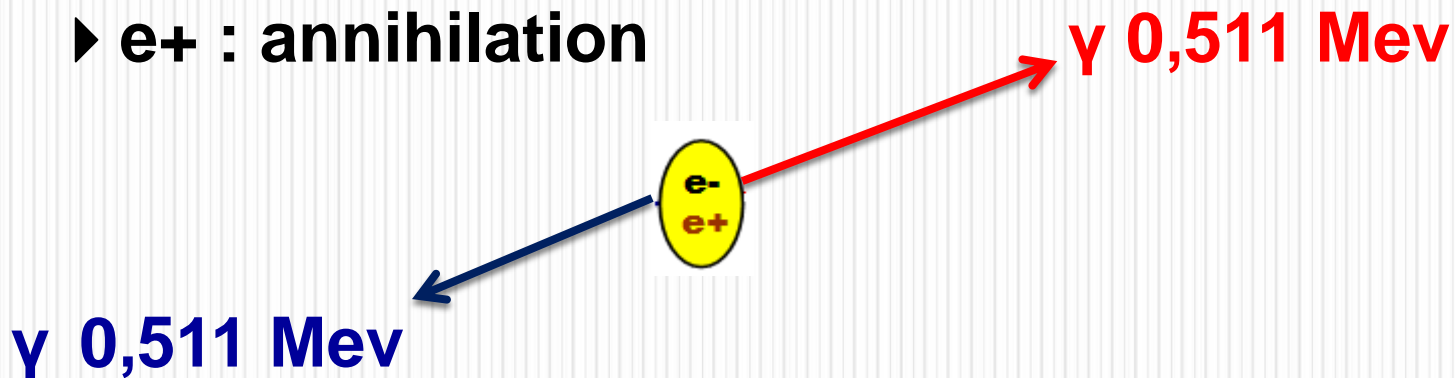
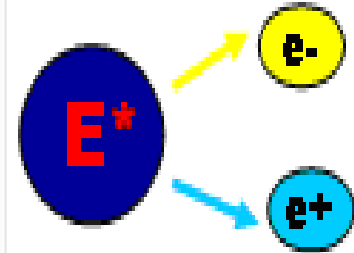
- CI si noyau lourd ou faiblement excité

Emission de Paire Interne

- Noyau* : $E^* \geq 1,022 \text{ MeV}$
- Désexcitation $\longrightarrow (e^+, e^-)$
- $E_{e^-} + E_{e^+} = E^* - 1,022$

Phénomènes Secondaires:

▶ e^+ : annihilation



▶ e^- : excitation ; ionisation des atomes de la matière