

# Physique du noyau – Fiche de cours

## 1. Notions de mécanique quantique

### a. Les 3 principes de la mécanique quantique

- union des théories classiques (Newton) et quantique à l'échelle macroscopique
- tenir compte de la constante de Planck  $h$  (ou rationalisée  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ )
- et de la quantification énergétique des spectres des atomes
- rendre compte de la dualité onde – corpuscule

### b. Quantité de mouvement

On définit le vecteur quantité de mouvement par  $\vec{p} = m \vec{c}$   
avec  $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$  ou  $p = \sqrt{2mE}$

### c. Loi de De Broglie

La loi de De Broglie s'énonce par  $p = \frac{h}{\lambda}$

### d. Dualité onde corpuscule

- aspect corpusculaire caractérisé par :  $E, p$
- aspect ondulatoire caractérisé par :  $\lambda, \nu$

### e. Inégalités de Heisenberg

En mécanique quantique, il existe une limite théorique selon laquelle 2 variables complémentaires peuvent être connues avec une certaine précision

- position impulsion

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad \text{et pour certains cas} \quad \Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

- temps énergie

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad \text{et pour certains cas} \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

### f. Relativité restreinte

Lorsqu'une particule se déplace à une vitesse  $\frac{c}{10} \leq v \leq c$  alors sa masse est transformée :

$$m_{\text{relativiste}} = m_0 \cdot \gamma \quad \text{avec} \quad \gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (\text{facteur de Lorentz})$$

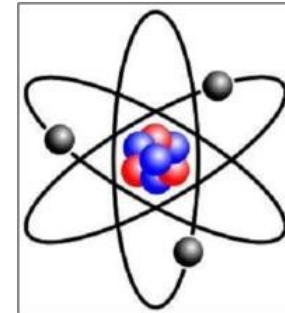
L'énergie de la particule est définie par :  $E = m_{\text{relativiste}} \cdot c^2$

## 2. Modèles de l'atome

### a. Modèle de Rutherford

Le modèle planétaire de l'atome est constitué par :

- un noyau contenant des charges électriques positives
- du vide représentant l'essentiel du volume
- des électrons gravitant selon des orbites circulaires



Selon le modèle de Rutherford un électron est maintenu en orbite autour du noyau avec 2 forces de même direction, de même norme mais de sens opposé :

- force électrostatique attractive  $|F_e| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r^2}$

- force centrifuge répulsive  $|F_c| = \frac{mv^2}{r}$

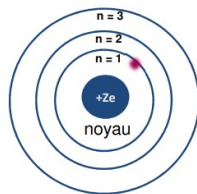
Par égalité des normes des 2 forces, le rayon de l'orbite des électrons vaut :

$$r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{mv^2}$$

Le modèle de Rutherford a pour limite de ne pas tenir compte qu'une particule chargée génère un champ magnétique et rayonne de l'énergie, ce qui causerait la chute de l'électron sur le noyau.

## b. Modèle de Bohr

Le modèle de Bohr définit les électrons comme placés sur des trajectoires ou orbites circulaires :



### - Premier postulat :

Il existe des orbites stables pour lesquelles les électrons ne rayonnent pas d'énergie.

L'énergie d'un électron sur une orbite stable vaut :

$$E = 13,6 \cdot \frac{Z^2}{n^2} \text{ unité eV}$$

Si l'on tient compte de la constante d'écran, l'énergie d'un électron sur

une orbite stable vaut :  $E = 13,6 \cdot \frac{(Z-b)^2}{n^2} \text{ unité eV}$

### - Deuxième postulat :

Un électron peut passer d'une orbite à une autre par absorption ou émission d'un quantum d'énergie :

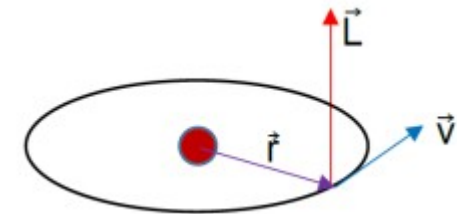
$$\Delta E = -13,6 \cdot Z^2 \cdot \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad \Delta E \text{ en eV}$$

ou  $|\Delta E| = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}$   $\omega \text{ en rad.s}^{-1}$   $\Delta E \text{ en J}$   
 $\nu \text{ en Hz}$   $\lambda \text{ en m}$   $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$   $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

### - Troisième postulat :

Les orbites stables ont pour moment cinétique :

$$|\vec{L}| = m \cdot r_n \cdot v = n \cdot \hbar \text{ avec } \vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$$



Le rayon d'une couche est défini par :  $r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{Zme^2} n^2$

### - Limites du modèle de Bohr

- en contradiction avec la mécanique classique (l'électron devrait tomber sur le noyau)
- en contradiction avec les incertitudes de Heisenberg (on ne peut pas connaître avec précision la position et la vitesse d'un électron)
- n'explique pas toutes les raies d'émission des atomes polyélectroniques

## c. Modèle de Schrödinger

### - Equation de Schrödinger :

La résolution de l'équation de Schrödinger permet d'obtenir les niveaux d'énergie occupés par les électrons et les fonctions mathématiques pouvant régir leur comportement.

On appelle  $\psi(x, y, z, t)$  une fonction d'onde associée à une particule tel que  $|\psi(x, y, z, t)|^2$  représente la probabilité de rencontrer la particule dans l'espace à un instant

L'équation différentielle de Schrödinger peut s'écrire sous forme matricielle (pour des états dont l'énergie est stable et indépendante du temps) :

$$\hat{H} \Psi = E \cdot \Psi$$

- $\hat{H}$  est l'opérateur hamiltonien qui transforme  $\Psi$
- $\Psi$  est la fonction propre d'onde que l'on souhaite résoudre
- $E$  sont les niveaux d'énergie considérés (état fondamental ou excités)

#### - Expression des solutions :

La solution de l'équation de Schrödinger est associée à 3 nombres quantiques :

- $n$  : nombre quantique principal (numéro de couche)
- $l$  : nombre quantique secondaire (type d'orbitale)  
 $0 \leq l \leq n-1$
- $m$  : nombre quantique magnétique (orientation des orbitales)  
 $-l \leq m \leq l$

Un quatrième nombre quantique est utilisé pour tenir compte du principe d'exclusion de Pauli

- $s$  : nombre quantique de spin (distingue le sens de rotation de l'électron autour de lui-même)

### 3. Modèle du noyau

#### a. Généralités

Le noyau d'un atome est symbolisé par :



$A$  nombre de masse (nombre de nucléons)

$X$  est le nom du noyau

$Z$  numéro atomique (nombre de protons)

masse d'un proton :  $m_{\text{proton}} = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

masse d'un neutron :  $m_{\text{neutron}} = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

#### b. Isotopes, isobares, isotones et isomères nucléaires

- Isotopes : 2 noyaux qui ont le même nombre de protons
- Isobares : 2 noyaux qui ont le même nombre de nucléons
- Isotones : 2 noyaux qui ont le même nombre de neutrons
- Isomères nucléaires : 2 noyaux isotopes et isotones mais avec des niveaux d'énergie différents

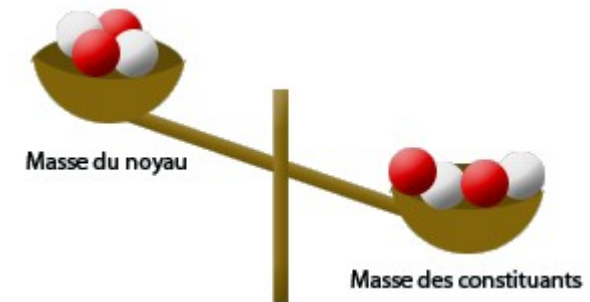
#### c. Unité de masse atomique

1 u vaut  $\frac{1}{12}$  de la masse d'un atome de carbone 12

$$1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad \text{ou} \quad 1u = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

#### d. Défaut de masse et énergie de liaison

- Défaut de masse



Le noyau assemblé est plus léger que la somme des ses constituants pris séparément.

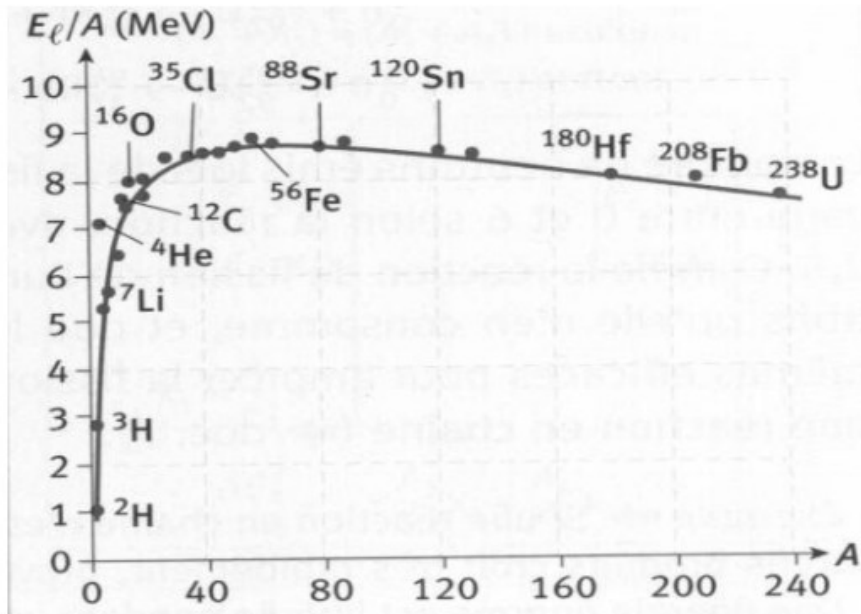
$$DDM = (A - Z) m_{\text{neutron}} + Z m_{\text{proton}} - M(X)$$

- Energie de liaison

L'énergie de liaison  $E_l$  ou  $B$  du noyau est l'énergie à apporter pour le dissocier de chacun de ses nucléons

### e. Courbe d'Aston

On représente  $E_l/A$  ou  $B/A$  (énergie de liaison par nucléon) en fonction de  $A$  (nombre de nucléons)



On distingue 2 parties :

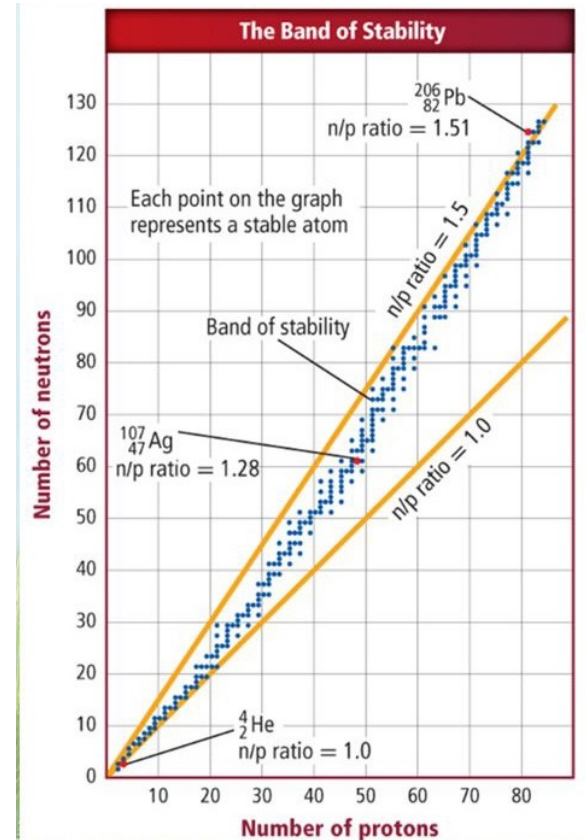
- $A < 20$  :  $B/A$  augmente très rapidement
- $A > 20$  :  $B/A$  est compris entre 8 et 9 MeV/nucléon (considéré constant)

### f. Fusion et fission

- fusion nucléaire (noyaux légers  $A < 60$ )  
transformation thermonucléaire provoquée  
Deux noyaux légers fusionnent pour donner un noyau plus lourd en libérant de l'énergie
- fission nucléaire (noyaux lourds  $A > 60$ )  
transformation spontanée ou provoquée ; libère de l'énergie  
Un gros noyau donne 2 noyaux plus légers et des neutrons en libérant de l'énergie

### g. Diagramme de Segré

Représentation de tous les noyaux existants : axe des abscisses  $Z$ , axe des ordonnées  $N$



L'ensemble des noyaux stables connus sont placés sur la bande de stabilité

Il existe plusieurs catégories de noyaux plus ou moins stables :

- $Z$  pair  $N$  pair stable pour 80% des noyaux connus
- $Z$  pair  $N$  impair stable pour 15% des noyaux connus
- $Z$  impair  $N$  impair stable pour 5% des noyaux connus

Il existe des noyaux possédant un nombre de protons ou de neutrons particulier qui les rendent plus stables, appelés nombres magiques

Les nombres magiques sont : 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

## h. Modèles nucléaires

### - modèle de la goutte liquide

Assimile le noyau à une goutte sphérique de fluide nucléaire :

- nucléons en constant mouvement
- charges des protons uniformément réparties
- masse volumique  $\rho = 2.10^{11} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- rayon  $r = r_0 A^{1/3}$  avec  $r_0 = 1,2 - 1,5 \text{ fm}$  (ou rayon d'un proton)

La formule de Bethe-Weizsäcker donne une approche de l'énergie de liaison des nucléons :

$$B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} + E_{\text{appariement}}$$

- $a_v$  énergie de liaison en volume
- $a_s$  énergie de liaison en surface
- $a_c$  énergie de répulsion coulombienne entre protons
- $a_a$  énergie d'asymétrie (lié au type de paire proton / neutron proton / proton ou neutron / neutron)
- $E_{\text{appariement}}$  noyaux pair-pair  $E_{\text{appariement}} > 0$   
noyaux pair-impair  $E_{\text{appariement}} = 0$   
noyaux impair-impair  $E_{\text{appariement}} < 0$

### - modèle en couche

Chaque nucléon se situe sur des niveaux d'énergies discrets et quantifiés appelés couches nucléaires.

La résolution de l'équation de Schrödinger permettant de prévoir la position des nucléons est associée à 5 nombres quantiques :

- n : nombre quantique principal (numéro de la couche nucléaire)
- l : nombre quantique secondaire (orbitale du nucléon)
- m : nombre quantique magnétique (orientation de l'orbitale)
- s : nombre quantique de spin égale à  $-\frac{1}{2}$  ou  $+\frac{1}{2}$  - j : moment cinétique du nucléon égale à  $+\frac{1}{2}$  ou  $+\frac{3}{2}$

## 4. Particules élémentaires

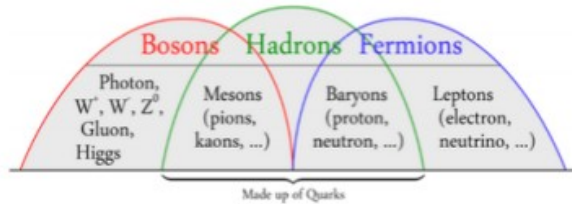
### a. Définitions

- particule élémentaire : ne présentent pas de sous structure
- particule composite ou hadron : constitué de plusieurs particules élémentaires

On peut classier les particules de l'univers en 2 catégories :

- les fermions (statistique de Fermi-Dirac) constituent la totalité de la masse de l'univers
- les bosons (statistique de Bose-Einstein) ont pour rôle de transmettre de l'énergie

|                                        |                                            |                                            |                                            | fermions<br>(3 générations de la matière) |                           |     | bosons<br>(forces) |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-----|--------------------|
|                                        |                                            |                                            |                                            | I                                         | II                        | III |                    |
| masse →<br>charge →<br>spin →<br>nom → | 2.4 MeV                                    | 1.27 GeV                                   | 171.2 GeV                                  | 0                                         | 0                         | 0   | électromagnétisme  |
|                                        | $\frac{2}{3}$                              | $\frac{2}{3}$                              | $\frac{2}{3}$                              | 0                                         | 0                         | 0   |                    |
|                                        | $\frac{1}{2}$                              | $\frac{1}{2}$                              | $\frac{1}{2}$                              | 1                                         | 1                         | 1   |                    |
|                                        | u<br>up                                    | c<br>charm                                 | t<br>top                                   | photon                                    |                           |     |                    |
| Quarks                                 | 4.8 MeV<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | 104 MeV<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | 4.2 GeV<br>$-\frac{1}{3}$<br>$\frac{1}{2}$ | 0                                         | 0                         | 0   | interaction forte  |
|                                        | d<br>down                                  | s<br>strange                               | b<br>bottom                                | g<br>gluon                                |                           |     |                    |
|                                        | <2.2 eV<br>0<br>$\frac{1}{2}$              | <0.17 MeV<br>0<br>$\frac{1}{2}$            | <15.5 MeV<br>0<br>$\frac{1}{2}$            | 91.2 GeV<br>0<br>1                        | Z°<br>boson Z°            |     |                    |
| Leptons                                | 0.511 MeV<br>-1<br>$\frac{1}{2}$           | 105.7 MeV<br>-1<br>$\frac{1}{2}$           | 1.777 GeV<br>-1<br>$\frac{1}{2}$           | 80.4 GeV<br>$\pm 1$<br>1                  | W <sup>±</sup><br>boson W |     | interaction faible |
|                                        | e<br>électron                              | μ<br>muon                                  | τ<br>tau                                   |                                           |                           |     |                    |
|                                        |                                            |                                            |                                            |                                           |                           |     |                    |



## b. Les fermions

Particule de nombre de spin non-entier

Chaque fermion est associé à une antiparticule

Il existe 3 catégories de fermions :

- leptons (particule qui n'est pas sensible à l'interaction forte)
- quarks (particules élémentaires)
- baryons (hadrons formés de 3 particules élémentaires)

## c. Les bosons

Particule de nombre de spin entier

14 bosons sont médiateurs des interactions fondamentales :

- photon : médiateur de l'interaction électromagnétique
- gluons : au nombre de 8 médiateurs de l'interaction forte
- bosons intermédiaires :  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$  médiateurs de l'interaction faible
- graviton : médiateur de l'interaction gravitationnelle
- boson de higgs : médiateur de l'interaction électrofaible (permet d'expliquer pour certaines particules ont une masse)

## d. Les quarks et antiquarks

### - Couleur

Chaque quark possède un nombre quantique supplémentaire la couleur (rouge, vert, bleu)

### - Antiquarks

Chaque quark est associé à un antiquark (même masse, charge opposée, couleur complémentaire)

### - Nombre baryonique

Le nombre baryonique est défini par : 
$$B = \frac{N_q - N_{\bar{q}}}{3}$$

### - Les mesons

Un meson est un hadron composé d'un quark et d'un antiquark ; il appartient à la famille des bosons

Les pions et les kaons sont des mesons (participent aux interactions fondamentales)

## e. Les interactions fondamentales

Il existe 4 interactions fondamentales :

- interaction gravitationnelle (attraction des corps massiques) ; portée infinie
- interaction électromagnétique (cohésion de l'atome ; résiduel cohésion de la molécule) ; portée infinie
- interaction forte (cohésion des nucléons ; résiduel cohésion du noyau) ; portée 1fm
- interaction faible (radioactivité  $\beta^+$  et  $\beta^-$ ) ; portée  $<10^{-18}$  m

## 5. Instabilité du noyau

### a. Définition

On distingue 3 types d'instabilités naturelles :

#### - désintégration d'un noyau père en noyau fils

Le noyau père doit avoir une masse supérieure au noyau fils

L'énergie disponible en fin de transformation se répartie sous la forme d'énergie cinétique des particules radioactives et éventuellement en excitation du noyau fils

#### - désexcitation d'un noyau

- si l'énergie d'excitation est suffisante, il y a émission d'un photon  $\gamma$  (isométrie nucléaire)
- si l'énergie d'excitation n'est pas suffisante, il n'y a pas émission d'un électron de conversion interne

#### - désexcitation d'un atome (hors noyau)

- émission d'un photon de fluorescence X
- et/ou émission d'un électron Auger

## b. Fission spontanée

### - Equation nucléaire

Pour de gros noyaux  $X \rightarrow Y + Z$

### - Propriétés

- désintégration par interaction forte

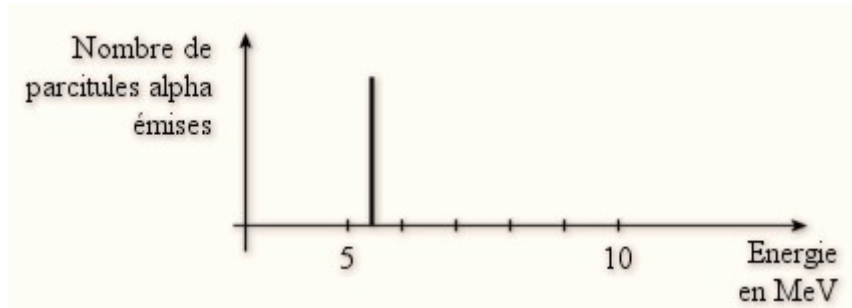
## c. Emission $\alpha$

### - Equation nucléaire

Pour  $A > 200$   ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y^* + {}^4_2 He$

### - Propriétés

- désintégration par interaction forte
- la particule  $\alpha$  monoénergétique émise est un noyau d'hélium
- le spectre énergétique est discret et compris entre 4 MeV et 9 MeV
- la particule  $\alpha$  ont un pouvoir de pénétration maximal dans la matière de moins de 1 mm



## d. Emission $\beta^-$

### - Equation nucléaire

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e^- + \bar{\nu}_e$$

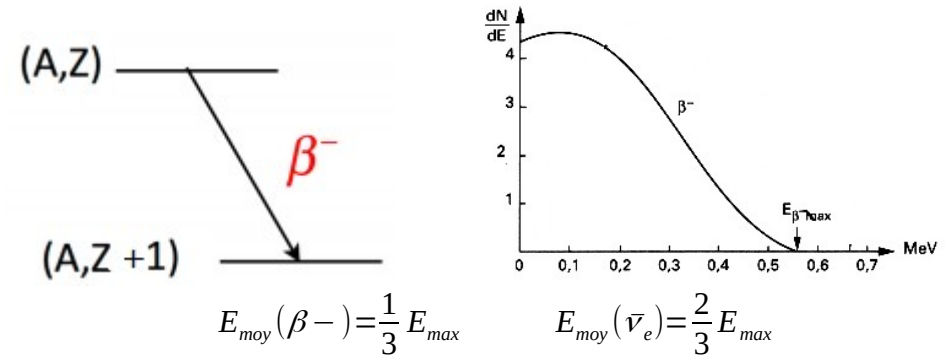
### - Propriétés

- transformation isobarique ; le noyau a un excès de neutrons ; un neutron se transmute en proton
- le noyau fil est stable (pas d'isométrie nucléaire)

- désintégration par interaction faible

- le spectre énergétique est compris et compris entre 0 et  $E_{\max}$

- les particules  $\beta^-$  ont un pouvoir de pénétration maximal dans la matière de l'ordre de quelques centimètres



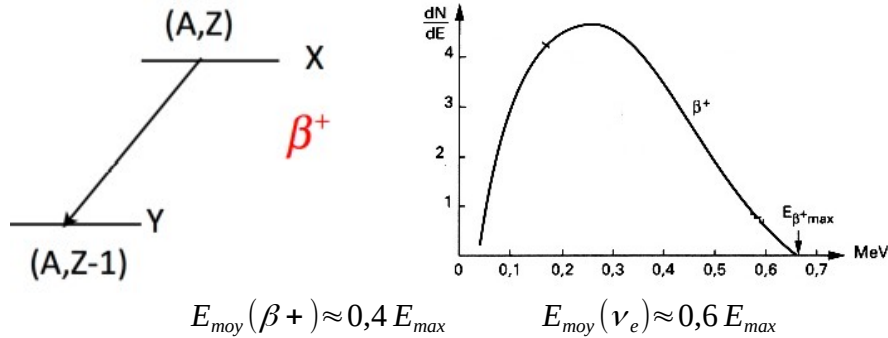
## e. Emission $\beta^+$

### - Equation nucléaire

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e^+ + \nu_e$$

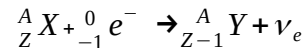
### - Propriétés

- transformation isobarique ; le noyau a un excès de protons ; un proton se transmute en neutron
- une différence d'énergie minimale de 1,022 MeV entre le noyau père et fils doit être disponible
- le noyau fil n'est pas nécessairement stable (isométrie nucléaire)
- désintégration par interaction faible
- le spectre énergétique est compris et compris entre 0 et  $E_{\max}$
- les particules  $\beta^+$  ont une longueur de pénétrations maximale de l'ordre de quelques centimètres



### f. Capture électronique

- Equation nucléaire

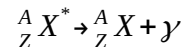


- Propriétés

- nécessite un seuil énergétique (énergie de liaison de l'électron)
- transformation isobarique ; le noyau absorbe un électron
- transformation compétitive de l'émission  $\beta^+$  (sans seuil énergétique)
- le noyau et atome fils peut être émis dans un état excité
- le spectre énergétique est compris et compris entre 0 et  $E_{\max}$

### g. Emission gamma

- Equation nucléaire



- Propriétés

- transformation isobarique
- émis lors de la désexcitation d'un noyau
- nécessite un seuil énergétique
- monénergétique (pour une seule désexcitation)
- plusieurs émissions gamma peuvent avoir lieu en cascade

### h. Loi de décroissance radioactive

L'évolution du nombre de noyaux radioactifs est donnée par :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

On définit T la période radioactive tel que  $N(T) = \frac{N_0}{2}$

On a  $N(nT) = \frac{N_0}{2^n}$  ; on définit  $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

### i. Activité nucléaire

L'activité est définie par :  $A(t) = \frac{dN(t)}{dt}$  ou  $A(t) = \lambda N(t)$

On définit  $A(t) = A_0 \exp^{-\lambda t}$  (unité en Bq)

- conversion d'unités :

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ Gbq} ; 1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$$

### j. Chaînes radioactives

Soient 3 cas de chaînes radioactives :

1. pour  $t=0$   $A_{\text{père}} > A_{\text{fils}}$   $T_{\text{père}} < T_{\text{fils}}$

pour  $t_m = \frac{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$  avec  $A_{\text{père}} = A_{\text{fils}}$

après  $10 T_{\text{père}}$  il y a disparition de l'activité du père

2. pour  $t=0$   $A_{\text{père}} < A_{\text{fils}}$   $T_{\text{père}} > T_{\text{fils}}$  équilibre de régime

$$\frac{A_{\text{fils}}}{A_{\text{père}}} = \frac{\lambda_{\text{fils}}}{\lambda_{\text{fils}} - \lambda_{\text{père}}} \text{ et } \frac{N_{\text{fils}}}{N_{\text{père}}} = \frac{\lambda_{\text{père}}}{\lambda_{\text{fils}} - \lambda_{\text{père}}}$$

3. pour  $t=0$   $A_{\text{père}} < A_{\text{fils}} \cdot 10^5$   $T_{\text{père}} > T_{\text{fils}} \cdot 10^5$  équilibre séculaire

après  $10 T_{\text{fils}}$   $A_{\text{père}} = A_{\text{fils}}$

## **k. Radioactivité naturelle ou artificielle**

### **- radioactivité naturelle :**

Provient principalement d'isotopes présents dans :

- l'écorce terrestre (roches ou minéral)
- transformations nucléaires provoquées par les rayonnements cosmiques de la haute atmosphère

### **- radioactivité artificielle :**

Provient de l'activité de l'homme ; la radioactivité est créée au moyen d'accélérateurs de particules ou de réacteurs