

# PHYS-H-200 Physique quantique et statistique

## Chapitre 11: Les noyaux

Jean-Marc Sparenberg

2011-2012

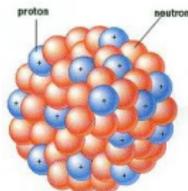
## 1 Propriétés fondamentales

## 2 Énergie de liaison

- Stabilité et radioactivités
- Fission et fusion

# Le monde des noyaux

- Noyau = système de  $Z$  **protons**  $p^+$  et  $N$  **neutrons**  $n^0$  lié par l'**interaction nucléaire forte** ( $\gg$  répulsion coulombienne)
- Notation :  ${}^A_Z X_N$  ou  ${}^A X$ 
  - ▶  $X$  : symbole **chimique** (cf atome et tableau périodique)
  - ▶  $A = N + Z =$  **nombre de masse**
- Isotopes :  $Z$  constant, isotones :  $N$  constant, isobares :  $A$  constant
- Unité d'**énergie** ( $\sim$  **intensité** de l'interaction)



$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \quad (\gg \text{Ryd} \approx 1,36 \times 10^{-5} \text{ MeV})$$

- Unité de **longueur** ( $\sim$  **portée** de l'interaction)

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} \quad (\ll a_0 \approx 0,53 \times 10^5 \text{ fm})$$

- Volume noyau  $V \propto A$  (interaction courte portée, cf **liquide**)  
 $\Rightarrow$  rayon  $r = r_0 A^{1/3}$  ( $r_0 \approx 1,2 \text{ fm}$ )  
 $\Rightarrow$  densité **matière nucléaire**  $\rho \approx 0,14 \text{ nucléon/fm}^3 \approx 2,4 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$

## 1 Propriétés fondamentales

## 2 Énergie de liaison

- Stabilité et radioactivités
- Fission et fusion

# Énergies de liaison et de seuil, radioactivités

- Énergie de **liaison** = énergie de masse (nucléons – noyau)  
 = (défaut de masse)  $\times c^2 = B = (Nm_n + Zm_p - M)c^2$   
 où  $m_p c^2 \approx 938,3 \text{ MeV}$ ,  $m_n c^2 \approx 939,6 \text{ MeV}$  et  $M$  = masse noyau
- Énergie de **seuil**  $A \rightarrow B$  = énergie de masse  $B$  – énergie de masse  $A$ 
  - ▶  $E_{\text{seuil}} < 0$  : processus **exothermique**. Exemple : désintégration **neutron**  
 $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$ ,  $-E_{\text{seuil}} = T = m_n c^2 - m_p c^2 - m_e c^2 \approx 0,782 \text{ MeV}$
  - ▶  $E_{\text{seuil}} > 0$  : processus **endothermique**. Exemple : dissociation **deuton**  
 $d \rightarrow n + p$ ,  $E_{\text{seuil}} = B_d \approx 2,22 \text{ MeV}$
- Noyau **stable**  $\iff \forall E_{\text{seuil}} > 0$
- Noyau **instable** ou **radioactif**  $\iff \exists E_{\text{seuil}} < 0$ 
  - ▶  $\alpha$  (noyau hélium) :  ${}^A_Z X_N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y_{N-2} + {}^4_2 \text{He}_2$
  - ▶  $\beta^\pm$  (électron/positron) :  ${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z\pm 1} Y_{N\pm 1} + e^\pm + \nu_e$  ou  $\tilde{\nu}_e$
  - ▶  $\gamma$  (photon) :  ${}^A_Z X_N^* \rightarrow {}^A_Z X_N$  (cf atomes et molécules)
- Probabilité désintégration par unité de temps  $W \Rightarrow$  loi décroissance radioactive, **durée de vie moyenne**  $\tau = \frac{1}{W} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$

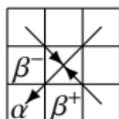
$$\Delta N = -NW\Delta t \quad \Rightarrow \quad N(t) = N_0 e^{-Wt} \equiv N_0 e^{-t/\tau} \equiv N_0 2^{-t/t_{1/2}}$$

# Carte des noyaux et vallée de stabilité

- Vallée de stabilité : 255 noyaux **stables**, avec  $N \geq Z$  (pour compenser la répulsion coulombienne)
- Environ 30 noyaux instables **assimilés à stables** car

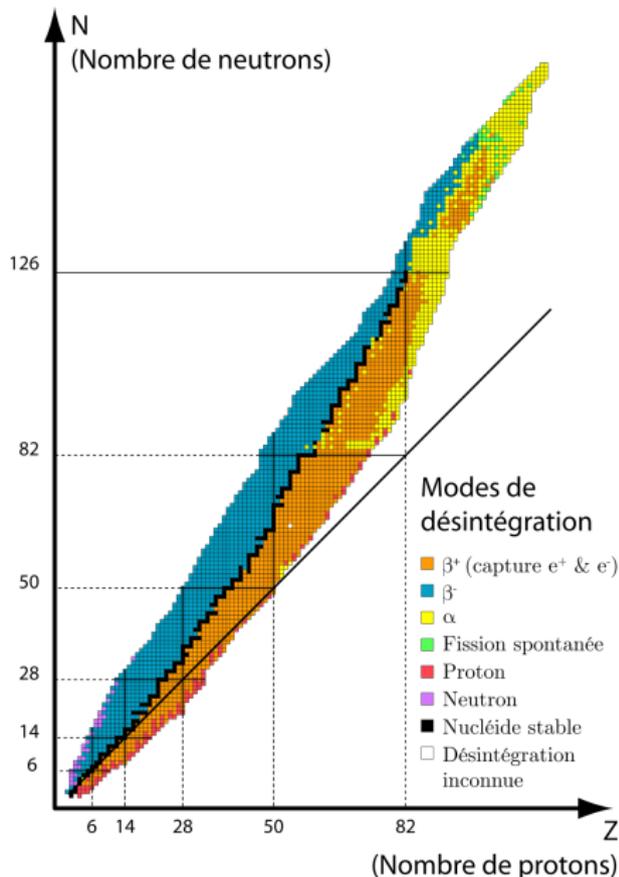
$$\tau \gg 1,5 \times 10^{10} \text{ ans}$$

- Plus de 3000 noyaux instables ou **radionucléides** observés



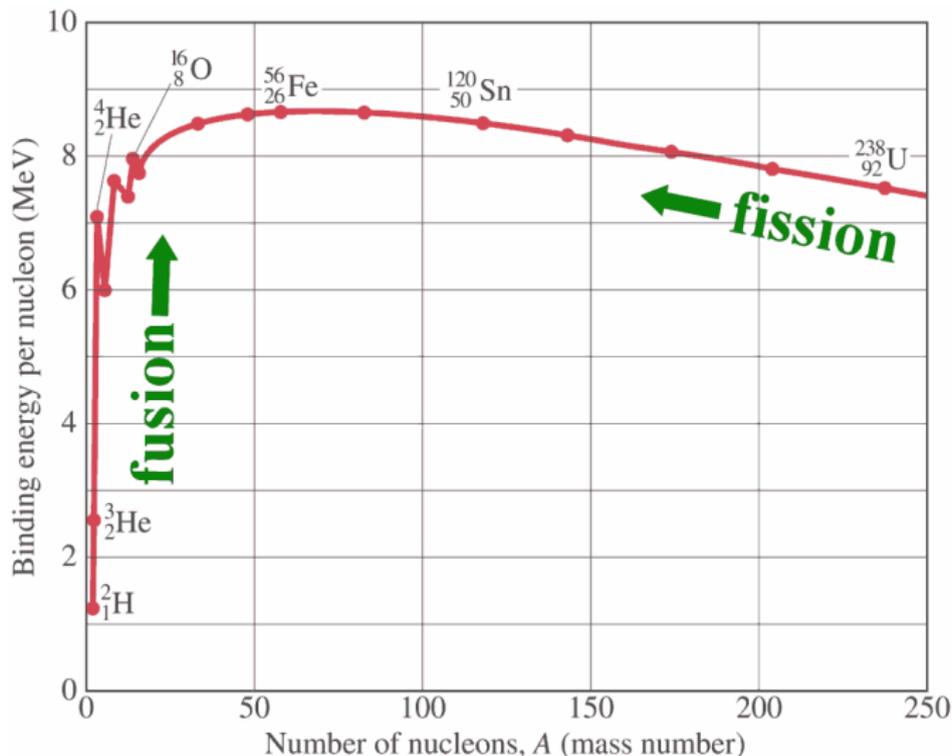
$\gamma$

- Le reste : « terra incognita »



# Énergie de liaison par nucléon dans la matière nucléaire

- Courte portée  $\Rightarrow$  saturation  $\Rightarrow \frac{B}{A} \approx 8 \pm 1 \text{ MeV}$  (sauf noyaux légers)

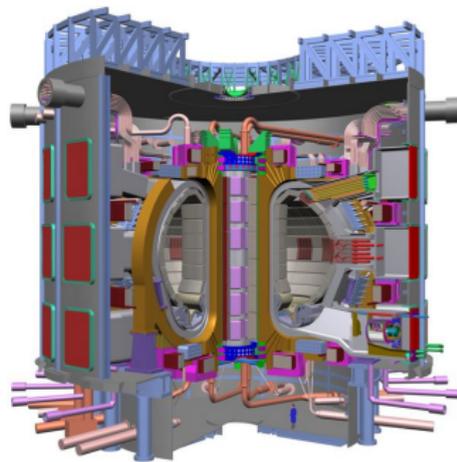


# Production d'énergie

- Transformation d'énergie de **masse** en énergie **cinétique** (chaleur)
- Fission des noyaux lourds
  - ▶ spontanée : barrière de potentiel (cf radioactivité  $\alpha$ )  $\Rightarrow$  parfois **très lente**  
Exemple :  $\tau = 7 \times 10^8$  ans pour  $^{235}\text{U}$
  - ▶ induite : par exemple par neutron  $\Rightarrow$  possibilité **réaction en chaîne**
- Fusion des noyaux légers  
Exemple :  $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$   
produit une **énergie** de

$$\begin{aligned}
 & M(^2\text{H})c^2 + M(^3\text{H})c^2 - M(^4\text{He})c^2 - m_n c^2 \\
 &= B(^4\text{He}) - B(^2\text{H}) - B(^3\text{H}) \\
 &= 28,30 \text{ MeV} - 2,22 \text{ MeV} - 8,48 \text{ MeV} \\
 &= 17,60 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

(cf **Soleil** et **réacteur ITER**)



[<http://www.iter.org>]