

Option Rayonnements ionisants et radioprotection

Pr. Abdel Mjid NOURREDDINE

Abdelmjid.nourreddine@ires.in2p3.fr

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien

UMR 7178 CNRS/in2p3 et UdS

B.P 28 - 67037 Strasbourg Cedex 2



A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

1/chapitre-2

STRUCTURE DU NOYAU

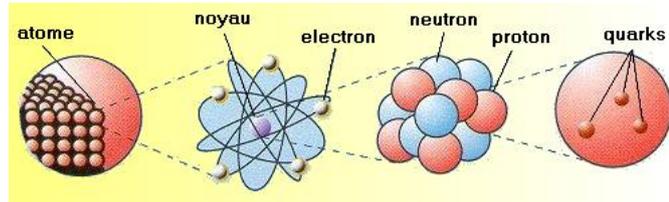
- 1. CONSTITUANTS ELEMENTAIRES**
- 2. MODELE EN COUCHES**
- 3. ENERGIE DE LIAISON**

A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

2/chapitre-2

De quoi est fait un atome ?



Atome = Noyau central + Cortège électronique

\downarrow \downarrow
Z protons, N neutrons **Z électrons**

$${}^A_Z X_N \quad A = Z + N$$

| | Masse (kg) | Charge |
|----------|--------------------------------|--------|
| électron | $9,109\,389\,7 \cdot 10^{-31}$ | -e |
| proton | $1,672\,623\,1 \cdot 10^{-27}$ | +e |
| neutron | $1,674\,928\,6 \cdot 10^{-27}$ | 0 |

A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

3/chapitre-2

Structure du nucléon



| | | Symbole | Charge électrique ($q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) | Spin (h) | Masse (MeV/c ²) |
|-----------------|----------------|----------|---|-------------|--------------------------------|
| Électron | | e | -1 | 1/2 | 0,511 |
| Nucléon | Proton | p | +1 | 1/2 | 938,28 |
| | Neutron | n | 0 | 1/2 | 939,57 |
| Quark | Up | u | +2/3 | 1/2 | 390 |
| | Down | d | -1/3 | 1/2 | 390 |
| | Charmed | c | +2/3 | 1/2 | 1550 |
| | Strange | s | -1/3 | 1/2 | 510 |
| | Top | t | +2/3 | 1/2 | > 80 000 |
| | Beauty | b | -1/3 | 1/2 | 4700 |



- > charge électrique : interaction électromagnétique
- > saveur : interaction faible
- > couleur : interaction forte

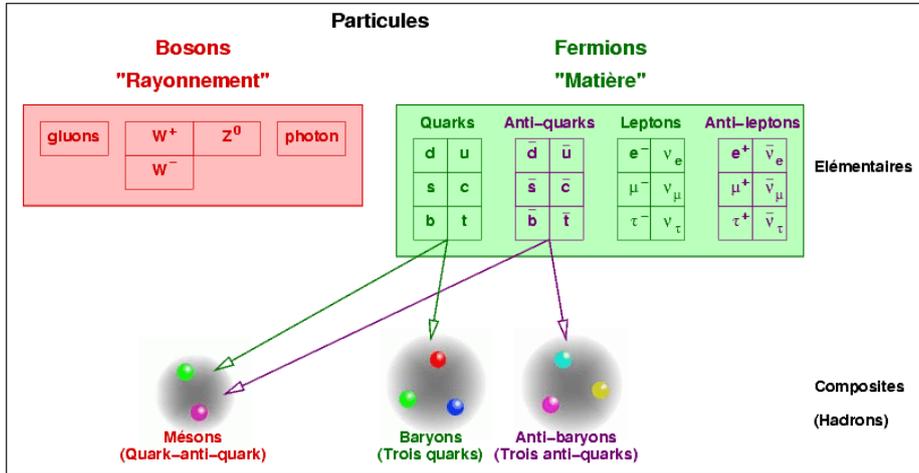
A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

4/chapitre-2

Particules élémentaires

Les particules élémentaires du modèle standard sont au nombre de 24 :



<http://voyage.in2p3.fr>

A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

5/chapitre-2

Modèle en couches du noyau

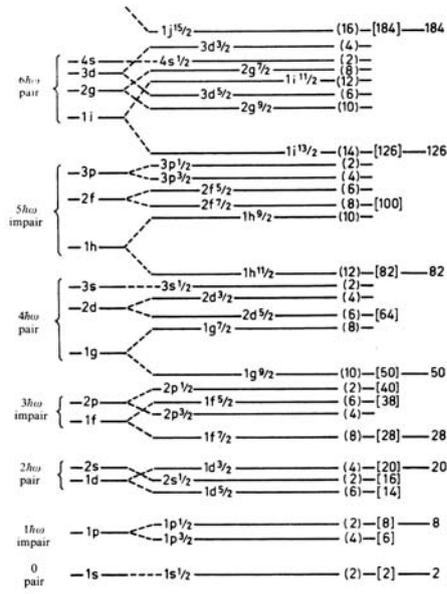
| N | n | l | j | Sous états | Nucléons par sous couche (-j → +j) | Nucléons par couche | Nombre magique |
|---|---|---|-----|-------------------|------------------------------------|---------------------|----------------|
| 0 | 1 | 0 | 1/2 | 1s ^{1/2} | 2 | 2 | 2 |
| 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1p ^{1/2} | 2 | 6 | 8 |
| | | | 3/2 | 1p ^{3/2} | 4 | | |
| 2 | 1 | 2 | 3/2 | 1d ^{3/2} | 4 | 12 | 20 |
| | | | 5/2 | 1d ^{5/2} | 6 | | |
| 3 | 1 | 3 | 5/2 | 1f ^{5/2} | 6 | 20 | 40 |
| | | | 7/2 | 1f ^{7/2} | 8 | | |
| | 2 | 1 | 1/2 | 2p ^{1/2} | 2 | | |
| | | | 3/2 | 2p ^{3/2} | 4 | | |
| 4 | 1 | 4 | 7/2 | 1g ^{7/2} | 8 | 30 | 70 |
| | | | 9/2 | 1g ^{9/2} | 10 | | |
| | 2 | 2 | 3/2 | 2d ^{3/2} | 4 | | |
| | | | 5/2 | 2d ^{5/2} | 6 | | |
| | | | 1/2 | 3s ^{1/2} | 2 | | |

A. Nourreddine

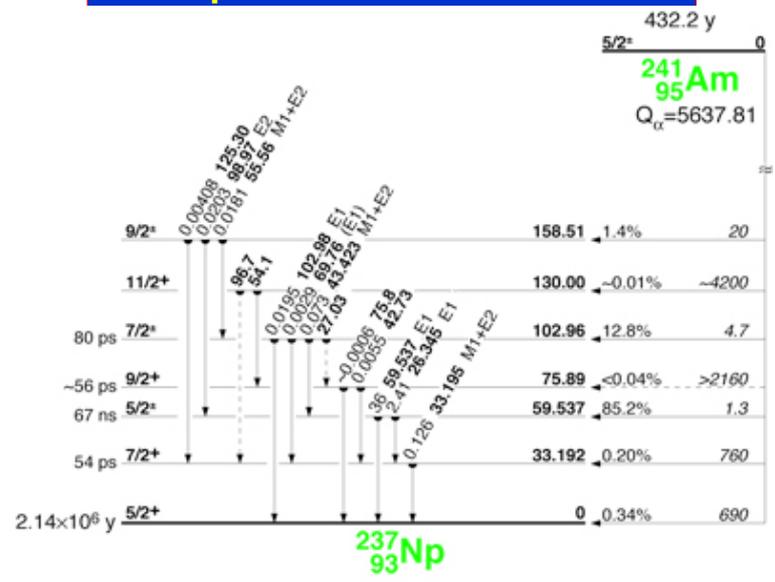
Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

6/chapitre-2

Niveaux d'énergies dans le noyau



Exemple de schéma de niveaux



Forme et dimension du noyau

- **Nuage électronique** $\varnothing = 10^{-10}$ m.
1 cm \Rightarrow aligner 100 millions d'atomes
- **Noyau** $\varnothing = 10^{-14}$ m 5 10^5 fois/atome

- **Rayon nucléaire** : $R = R_0 A^{1/3}$ avec $1,14 < R_0 < 1,5$ fm
Exemple pour $R_0 = 1,2$ fm
 $R(^{16}\text{O}) = 3,6$ fm $R(^{238}\text{U}) = 7,3$ fm

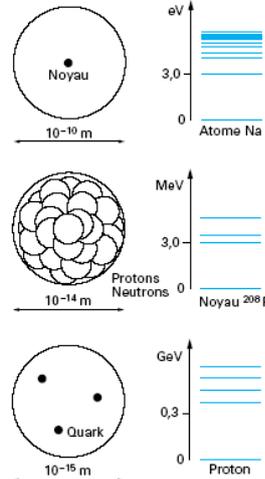
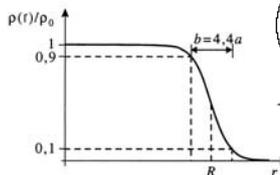
- **Densité nucléaire** : $\rho = 2.17 \cdot 10^{17}$ kg/m³

La masse de l'atome est concentrée dans son noyau

- **Densité de charge** : Modèle de Fermi

Sphère à bords diffus $a = 0,6$ fm

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{-\frac{r-R}{a}}}$$



A. Nourredine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

9/chapitre-2

Énergie de liaison et unité de masse

- ❖ **Énergie de liaison B** : Énergie nécessaire pour dissocier le noyau en protons et en neutrons.
Unité SI : Joule (J)

Habituellement : $1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ keV} = 1,6022 \cdot 10^{-16} \text{ J}$ $1 \text{ MeV} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

- ❖ **Unité de masse atomique** : $1 \text{ uma} = \frac{M(^{12}\text{C})}{12} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$1 \text{ uma} \cdot c^2 = 931,494 \text{ MeV}$$

$$M_p c^2 = 938,272 \text{ MeV}$$

$$m_e c^2 = 0,510 \text{ MeV}$$

$$M_n c^2 = 939,565 \text{ MeV}$$

- ❖ **Masse** : masse noyau stable $<$ \sum masses des nucléons libres



| | | | |
|---------------|----------|---------------|-------------------------|
| ⊕ ⊕ | protons | 2 x 1.00728 u | Alpha particle |
| ⊖ ⊖ | neutrons | 2 x 1.00866 u | |
| Mass of parts | | 4.03188 u | Mass of alpha 4.00153 u |

- ❖ **Défaut de masse Δ** : différence entre \sum masses de tous les nucléons et la masse du noyau
 $\Delta = ZM_p + (A - Z)M_n - M(A, Z) \Rightarrow B(A, Z) = \Delta \cdot c^2$ $1 \text{ MeV}/c^2 = 1,7827 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

A. Nourredine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

10/chapitre-2

Excès de masse

❖ Les tables de masses donnent souvent, non pas la masse atomique $M(A,Z)$ mais l'équivalent en énergie de l'excès de masse (généralement exprimé en eV) :

$$\Delta(A, Z) = [M(A, Z) - A \cdot m_p]c^2$$

| Isotope | Excès de masse |
|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| 1n | 8,071 | 14B | 23,664 ± 0,021 | 19O | 3,332 ± 0,002 | 24Na | -8,42 |
| | | 15B | 28,970 ± 0,022 | 20O | 3,796 ± 0,001 | 25Na | -9,360 ± 0,001 |
| 1H | 7,289 | 16B | 37,140 ± 0,400 | 21O | 8,066 ± 0,015 | 26Na | -6,904 ± 0,016 |
| 2H | 13,136 | 17B | 43,310 ± 0,500 | 22O | 9,440 ± 0,090 | 27Na | -5,600 ± 0,040 |
| 3H | 14,95 | 18B | 52,280 ± 0,860 | 23O | 14,540 ± 0,700 | 28Na | -1,140 ± 0,140 |
| 4H | 25,840 ± 0,380 | 19B | 59,360 ± 1,030 | 24O | 18,790 ± 0,900 | 29Na | 2,650 ± 0,150 |
| | | | | | | 30Na | 8,210 ± 0,250 |
| 3He | 14,931 | 8C | 35,094 ± 0,024 | 14F | 33,610 ± 0,400 | 31Na | 11,830 ± 0,580 |
| 4He | 2,424 | 9C | 28,913 ± 0,002 | 15F | 16,770 ± 0,130 | 32Na | 16,550 ± 0,740 |
| 5He | 11,390 ± 0,050 | 10C | 15,699 | 16F | 10,680 ± 0,008 | 33Na | 21,470 ± 1,140 |
| 6He | 17,592 | 11C | 10,65 | 17F | 1,951 | 34Na | 26,650 ± 3,570 |
| 7He | 26,110 ± 0,030 | 12C | 0 | 18F | 0,873 | | |
| 8He | 31,598 ± 0,007 | 13C | 3,125 | 19F | -1,487 | 20Mg | 17,570 ± 0,027 |
| 9He | 40,810 ± 0,120 | 14C | 3,02 | 20F | -0,017 | 21Mg | 10,913 ± 0,016 |

A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

11/chapitre-2

Énergie de liaison totale

❖ **Énergie de liaison nucléaire** : énergie nécessaire pour dissocier un noyau

✓ Masse nucléaire : $M'(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - B_n(A, Z)/c^2$

✓ Masse atomique : $M(A, Z) = M'(A, Z) + Zm_e - B_e(Z)/c^2$

$B_e(\text{eV}) = 15,73Z^{7/3}$ énergie totale de liaison des électrons

❖ **Énergie de liaison totale** : $B(A, Z) = B_n(A, Z) + B_e(Z)$

$$= [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2$$

$$= Z\Delta(^1\text{H}) + (A - Z)\Delta(n) - \Delta(A, Z)$$

avec : $\Delta(^1\text{H}) = 7289.030 \text{ keV}$ et $\Delta(n) = 8071.369 \text{ keV}$

❖ Bibliothèque des tables de masses :

G. Audi et A.H Wapstra, Nucl. Phys. A 595 (1995)

✓ compilation des données expérimentales

✓ estimations pour les nouveaux noyaux

| Z | 1995 evaluation | 2003 evaluation |
|-----|------------------|------------------|
| 104 | Dubnium Db | Rutherfordium Rf |
| 105 | Joliotium J1 | Dubnium Db |
| 106 | Rutherfordium Rf | Seaborgium Sg |
| 107 | Bohrium Bh | unchanged Bh |
| 108 | Hahnium Hn | Hassium Hs |
| 109 | Meitnerium Mt | unchanged Mt |
| 110 | No name yet .. | Darmstadtium Ds |
| 111 | No name yet .. | Roentgenium Rg |

Noyaux transuraniques

Evaluation Wapstra (2003)

A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

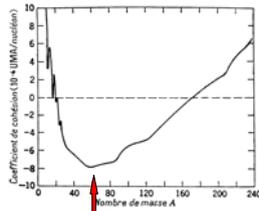
12/chapitre-2

Énergie de liaison moyenne

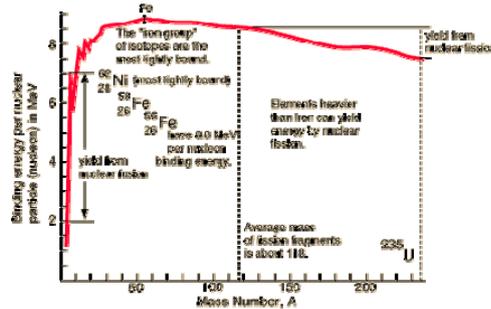
$$B_m = \frac{B(A, Z)}{A} = \frac{[ZM_H + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2}{A} = [(M_n - 1) - \frac{Z}{A}(M_n - M_H)]c^2 - f$$

$$f = \frac{\Delta}{A} \text{ coefficient de cohésion} \Rightarrow M(A, Z) = A(1 + f)$$

$$\frac{\Delta(\text{MeV})}{A} \cong 8.364 - 931f - 0.782 \frac{Z}{A}$$



f_{\min} (Fe)



- ✓ $B_m \cong 8.6 \text{ MeV}$ soit $\cong 1\%$ de $1 \text{ uma} = 931 \text{ MeV}$
- ✓ $B_m = \text{Cte}$ pour $30 < A < 240$
- ✓ Pics de liaison pour $A = 4n$

A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

13/chapitre-2

Formule semi-empirique de masse

Bethe-Weizsäcker (1935) : Modèle de la goutte liquide

$$B(\text{MeV}) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} \pm \delta + \eta$$

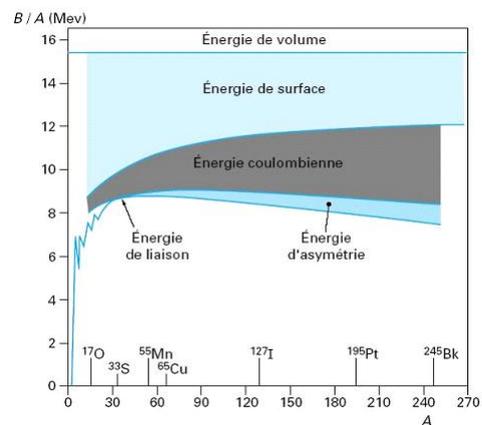
Masse d'un atome neutre :

$$M(A, Z) = ZM_H + (A - Z)m_n - B(A, Z)/c^2$$

Exemple de jeu de paramètres : *Wapstara*

- $a_v = 15,6$: volume
- $a_s = 17,2$: surface
- $a_c = 0,7$ coulombien
- $a_a = 23,6$ asymétrie
- η : couches
- δ : appariement

$$\delta = \begin{cases} 0 & \text{pour } A \text{ impair} \\ -\Delta & \text{pour } Z \text{ et } N \text{ pairs} \\ +\Delta & \text{pour } Z \text{ et } N \text{ impairs} \end{cases} \quad \Delta \approx \frac{12}{\sqrt{A}}$$



A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

14/chapitre-2