

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

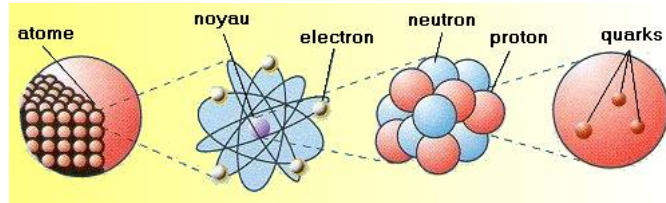
- 1. CONSTITUANTS ELEMENTAIRES**
- 2. MODELE EN COUCHES**
- 3. ENERGIE DE LIAISON**

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. Nourredine

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

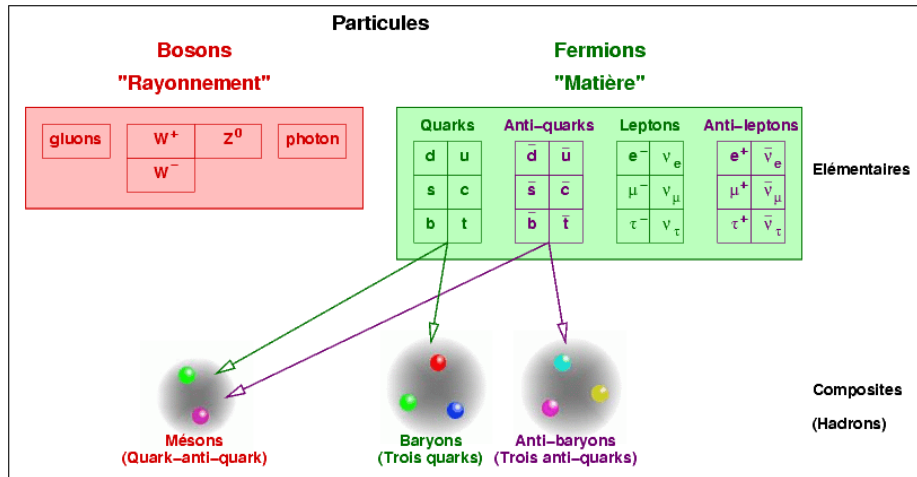
A. Nourredine

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

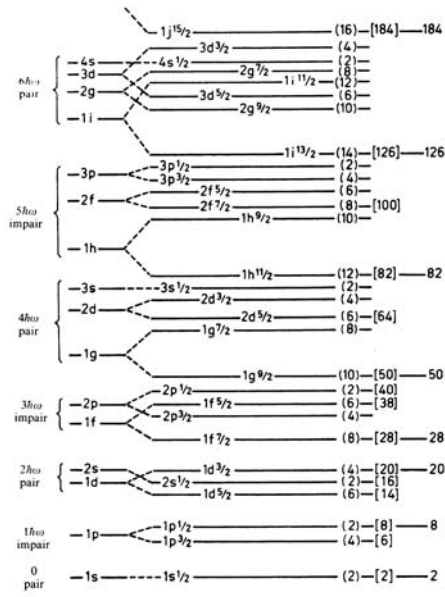
N	n	l	j	Sous états	Nucléons par sous couche (-j → +j)	Nucléons par couche	Nombre magique
0	1	0	1/2	1s ^{1/2}	2	2	2
1	1	1	1/2	1p ^{1/2}	2	6	8
			3/2	1p ^{3/2}	4		
2	1	2	3/2	1d ^{3/2}	4	12	20
			5/2	1d ^{5/2}	6		
3	1	3	5/2	1f ^{5/2}	6	20	40
			7/2	1f ^{7/2}	8		
	2	1	1/2	2p ^{1/2}	2		
			3/2	2p ^{3/2}	4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

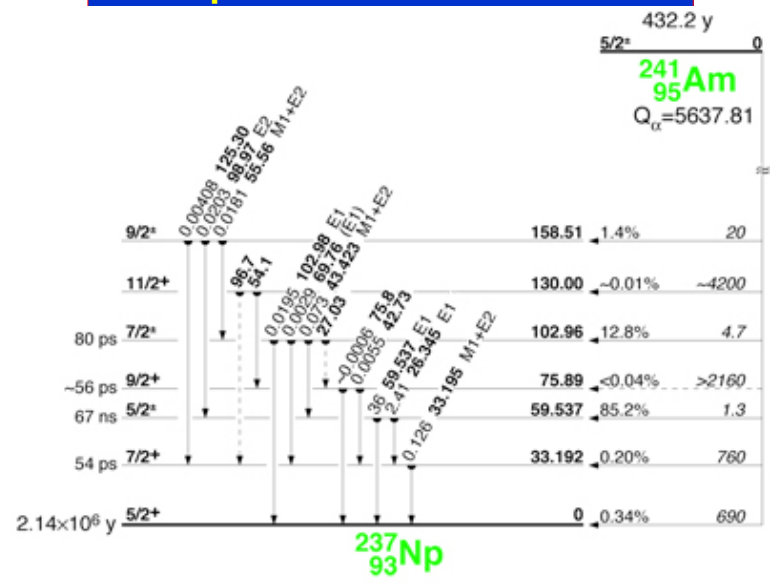
Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

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

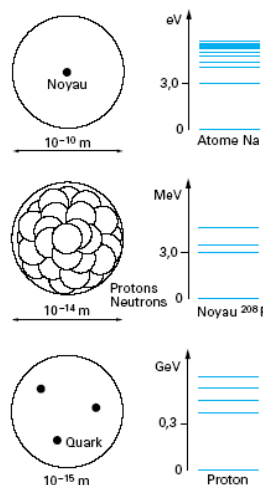
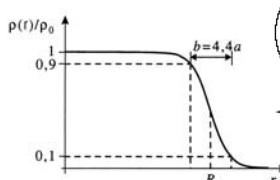
- **Densité nucléaire** : $\rho = 2.17 \cdot 10^{17}$ kg/m³

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	$2 \times 1,00728 \text{ u}$	
	neutrons	$2 \times 1,00866 \text{ u}$	
Mass of parts		<u>4.03188 u</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	Isotope	Excès de masse	Isotope	Excès de masse	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	Rf
105	Joliotium J1	Dubnium Db	Db
106	Rutherfordium Rf	Seaborgium Sg	Sg
107	Bohrium Bh	unchanged	Bh
108	Hahnium Hn	Hassium Hs	Hs
109	Meitnerium Mt	unchanged	Mt
110	No name yet ..	Darmstadtium Ds	Ds
111	No name yet ..	Roentgenium Rg	Rg

Noyaux transuraniques

Evaluation Wapstra (2003)

A. Nourreddine

Option L2-S4 : Rayonnements ionisants et radioprotection

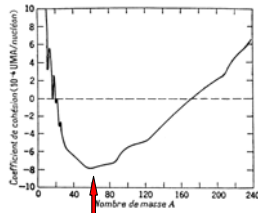
12/chapitre-2

Énergie de liaison moyenne

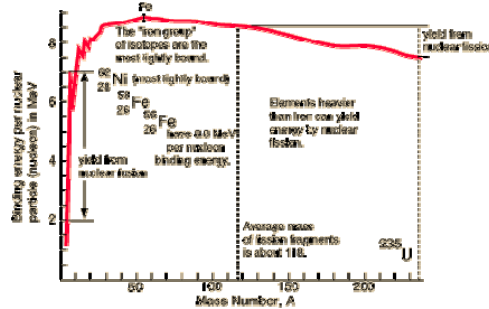
$$B_m = \frac{B(A, Z)}{A} = \frac{[ZM_H + (A - Z)m_n - M(A, Z)]c^2}{A} = [(M_n - 1) - \frac{Z}{A}(M_n - M_H)]c^2 - f$$

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

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



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

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

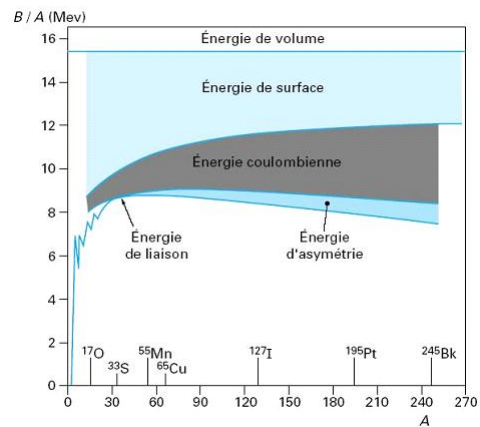
Masse d'un atome neutre :

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

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