

Licence de Physique Générale et Appliquée

Année 2004-2005

Introduction à la Physique Quantique

Fascicule I : Physique Nucléaire et Atomique

Philippe Tourenç, Paulo Angelo, Jérôme Gariel

Université Pierre et Marie Curie

Table des matières

Introduction	vii
Notations particulières	vii
Multiples et sous-multiples	viii
Constantes physiques : définitions	viii
Unités usuelles	ix
Constantes physiques usuelles	x
La classification périodique	xi
Les ondes électromagnétiques	xiii
I L'atome et son noyau	1
1 Constitution de l'atome	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les constituants de l'atome, le défaut de masse.	3
1.3 Le nuage électronique	5
1.4 Le noyau	9
1.4.1 Le rayon nucléaire	9
1.4.2 Le modèle de la goutte liquide	10
1.4.3 Les noyaux stables	12
1.4.4 Les états excités	15
1.5 Conclusion	16
2 Réactions nucléaires	17
2.1 Généralités	17
2.1.1 Loi de décroissance exponentielle	17
2.1.2 Constantes partielles et demi-vies effectives	18
2.1.3 Lois de conservations	20
2.2 Radioactivité	21
2.2.1 Radioactivité α	22
2.2.2 Radioactivité β^-	22
2.2.3 Radioactivité β^+ et capture électronique	23
2.2.4 Les familles radioactives	24
2.2.5 Radioactivité γ	25
2.3 Fission, Fusion	26
2.3.1 Fission	26
2.3.2 Fusion	26
2.4 Les rayonnements ionisants	27
2.4.1 Activité	28
2.4.2 Effet de la radioactivité, notion de dose	28

2.4.3	Protection	29
2.5	Applications	30
	Annexe : démonstrations	33
II	La quantification du rayonnement	35
3	Le rayonnement à l'équilibre thermodynamique	37
3.1	Introduction	37
3.2	Les modes d'une cavité	39
3.2.1	Cavité à une dimension	39
3.2.2	Cavité à trois dimensions	41
3.3	La densité spectrale d'énergie à l'équilibre thermodynamique	42
3.4	Les conséquences du calcul de Planck	46
3.5	Conclusion	47
4	Le photon	49
4.1	L'effet photoélectrique	49
4.2	L'effet Compton	51
4.3	Les coefficients A et B d'Einstein	53
4.4	Conclusion	55
III	La quantification des systèmes matériels	57
5	Quantification des énergies atomiques.	59
5.1	Les spectres atomiques	59
5.1.1	Les spectres de raies	59
5.1.2	La largeur des raies	61
5.2	L'expérience de Franck et Hertz	63
5.3	Les ondes de matière	65
5.3.1	La longueur d'onde de de Broglie	65
5.3.2	L'atome de Bohr	66
5.4	Les séries spectrales	69
5.4.1	L'atome d'hydrogène	69
5.4.2	Les atomes à plusieurs électrons	69
5.4.3	Les spectres de raies, les rayons X et la loi de Moseley	70
5.5	Conclusion	74
Annexes	. . . . .	74
Expérience de Davisson et Germer	. . . . .	74
Expérience de Fert et Faget	. . . . .	74
Effet d'entraînement du noyau	. . . . .	75
6	Le magnétisme atomique	77
6.1	Introduction	77
6.2	Le magnétisme à l'échelle atomique	80
6.2.1	Le théorème de Larmor	80
6.2.2	Les moments magnétiques	81
6.2.3	L'atome de Bohr	83
6.2.4	Rapport gyromagnétique et précession de Larmor	83
6.2.5	L'expérience de Stern et Gerlach	84
6.3	La théorie de la mesure en mécanique quantique.	86

6.3.1	La théorie de la mesure	86
6.3.2	L'expérience de Stern et Gerlach : résultats et interprétation . . .	88
6.3.3	Les mesures incompatibles	88
6.4	Le magnétisme à l'échelle macroscopique	89
6.4.1	Le diamagnétisme	89
6.4.2	Le paramagnétisme	89
6.5	Conclusion	91
Annexes	. . . . .	92
	Théorème de Larmor	92
	Modèle vectoriel de l'atome	95
Conclusion : vers la mécanique ondulatoire		99

Introduction

La présente introduction concerne le cours de *Physique Nucléaire et Atomique* et celui de *Mécanique Quantique* de licence. Les notes qui résument chacun de ces cours font l'objet de deux fascicules distincts mais ils participent du même enseignement, celui de la *Physique Quantique*.

Il existe plusieurs façons d'introduire cette physique quantique qui, bien que cachée, régit le monde macroscopique que nous percevons. Dans le cours qui suit, nous ne respectons pas la chronologie des découvertes et des compréhensions successives. Ce serait instructif, mais notre but est, avant tout, de présenter la physique quantique telle que nous la comprenons aujourd'hui. Nous avons donc choisi de la présenter "*ex cathedra*", puis d'illustrer les étapes importantes qui ont conduit aux conceptions actuelles et les propriétés remarquables des modèles auxquels les physiciens se réfèrent.

Compte tenu du petit nombre d'heures de cours consacrées à cet enseignement le présent polycopié ne peut constituer guère plus qu'une introduction. Cependant, les étudiants qui le souhaitent pourront approfondir ces questions en consultant les nombreux ouvrages qui existent, parmi lesquels nous citons :

pour la physique nucléaire : L. Valentin, *Physique subatomique* (2 tomes), ed. Hermann, Paris

pour la physique atomique : B. Cagnac et J-C. Pebay-Peyroula, *Physique atomique* (2 tomes), ed. Dunod, Paris

pour la mécanique quantique : Y. Ayant et E. Belorizky, *Cours de mécanique quantique*, ed. Dunod, Paris.

Bien qu'ils dépassent très largement le programme de licence, nous recommandons aussi

le livre de M. Alonso et E. Finn, *Fundamental University Physics (III Quantum and statistical physics)* - ed. Addison-Wesley Publishing Company - pour l'ensemble de la physique nucléaire et atomique et de la mécanique quantique,

l'ouvrage de C. Cohen-Tannoudji, B. Diu et F. Laloë, *Mécanique Quantique* (2 tomes) - ed. Hermann, 1973 -,

ainsi que celui de M. Le Bellac, *Physique Quantique* - ed. EDPS Sciences/CNRS éditions, 2003 -, en particulier pour l'introduction aux inégalités de Bell, à la notion de décohérence et à la cryptographie quantique.

Notations particulières

- Nous utiliserons le symbole " \propto " pour signifier "équivalent à..." ou "varie comme..." ou encore "proportionnel à...".
- Les symboles " \sim " et " \simeq " signifient respectivement "de l'ordre de..." et "à peu près égal à..."
- Nous utiliserons parfois le symbole " $:=$ " au lieu de " $=$ ".

Par exemple, définissant l'accélération nous écrivons " $\gamma_x := d^2x/dt^2$ ". Aucune loi n'est exprimée par cette égalité, elle ne représente pas une équation ni un résultat. C'est seulement **une définition**.

Par contre pour présenter la loi fondamentale de la dynamique (la seconde loi de Newton) nous écrivons " $\vec{F} = m \vec{\gamma}$ ".

Ainsi $x^3 - 7 := 0$ doit être considéré comme la relation de définition de x , tandis que $x^3 - 7 = 0$ est une équation à résoudre dont la solution devra être notée x_0 par exemple (" Soit x_0 la solution de l'équation $x^3 - 7 = 0$ " s'écrit " $x_0^3 - 7 := 0$ ").

Lors de démonstrations, nous ferons également usage de " $:=$ " pour souligner que telle égalité est bien établie et qu'elle ne fait pas l'objet de la démonstration en cours (par opposition aux égalités notées " $=$ ").

Nous utiliserons le symbole " $:=$ " dans un souci de concision ou de clarification; nous n'en ferons pas un usage systématique.

• Nous utilisons en outre les symboles suivants où $\{\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}\}$ est une base orthonormée de l'espace de la géométrie ordinaire et (x, y, z) les coordonnées cartésiennes correspondantes :

1. \wedge pour le **produit vectoriel** de deux vecteurs : $\vec{V} \wedge \vec{W}$.
2. $\vec{\nabla} := \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \vec{i}, \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}, \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right\}$ pour le **gradient** : $\vec{\nabla} f_{(x,y,z)} = \frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{k}$.
3. $\Delta := \vec{\nabla}^2$ pour le **laplacien** : $\Delta f_{(x,y,z)} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$.
4. $\square := \frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} - \Delta$ pour le **dalembertien** : $\square f_{(t,x,y,z)} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right)$
où c est la vitesse limite de la relativité restreinte (appelée communément "vitesse de la lumière dans le vide").

Multiples et sous-multiples

MULTIPLES			SOUS-MULTIPLES		
Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	Préfixe	Symbole
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	déci-	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	milli	m
10^{15}	péta	P	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	téra	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^6	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^3	kilo	k	10^{-18}	atto	a
10^2	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10	déca-	da	10^{-24}	yocto	y

Constantes physiques dont la valeur est fixée par définition

Grandeur	Symbole	Valeur (unités SI)
célérité de la lumière dans le vide	c	299 792 458 m s^{-1}
perméabilité du vide	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$
permittivité du vide	ε_0	$\frac{1}{\mu_0 c^2} \simeq 8,854... \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$

Unités usuelles du système international (SI)

Grandeur	Unité	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
courant électrique	ampère	A
température	kelvin	K
intensité lumineuse	candela	cd
quantité	mole	mol

Grandeur	Nom	Symbole	Equivalent
angle	radian	rad	1
angle solide	stéradian	sr	1

Grandeur	Nom	Symbole	Equivalent
fréquence	hertz	Hz	s^{-1}
force	newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
pression	pascal	Pa	$N \cdot m^{-2}$
travail, énergie	joule	J	$N \cdot m$
puissance	watt	W	$J \cdot s^{-1}$

Grandeur	Nom	Symbole	Equivalent
charge électrique	coulomb	C	$A \cdot s$
potentiel électrique	volt	V	$J \cdot C^{-1}$
champ magnétique	tesla	T	$Wb \cdot m^{-2}$
flux magnétique	weber	Wb	$V \cdot s$
champ électrique	volt par mètre	$V m^{-1}$	$Wb s m^{-1}$

Grandeur	Nom	Symbole	Equivalent
résistance	ohm		$V \cdot A^{-1}$
conductance	siemens	S	$^{-1}$
inductance	henry	H	$Wb \cdot m^{-2}$
capacitance	farad	F	$C \cdot V^{-1}$

Grandeur	Nom	Symbole	Equivalent
flux lumineux	lumen	lm	$cd \cdot sr$
éclairage	lux	lx	$lm \cdot m^{-2}$

Grandeur	Nom	Symbole	Equivalent
(radio)activité	becquerel	Bq	s^{-1}
dose	gray	Gy	$J \cdot kg^{-1}$
dose équivalente	sievert	Sv	$J \cdot kg^{-1}$
	dari	0,2 m Sv	

N.B. Le dari n'est pas une unité "officielle"; c'est une unité recommandée par divers scientifiques. La dose équivalente absorbée en un an par le corps humain, sous l'effet de ses propres sources radioactives internes est de l'ordre de 1dari.

On utilise aussi les unités suivantes :

l'angström :	$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$
le fermi ou femtomètre :	$1 \text{ fermi} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
le gauss :	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
l'électron-volt :	$1 \text{ eV} \simeq 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Constantes physiques usuelles

Les valeurs données ci-dessous sont les valeurs recommandées CODATA 2002.

En répétant la mesure d'une grandeur G , on constate que les résultats sont dispersés autour d'une valeur moyenne, \overline{G} . L'écart quadratique moyen, $\overline{\Delta G}$, constitue l'incertitude standard. Les résultats sont pour la plupart compris entre $\overline{G} - \overline{\Delta G}$ et $\overline{G} + \overline{\Delta G}$ ("la plupart" signifie 68% lorsque les erreurs suivent une loi normale).

On écrit, par exemple, $G = 6,673(10) \times 10^{-11} SI$, ce qui signifie que l'incertitude standard (entre parenthèse) porte sur les deux derniers chiffres (ici 73) et vaut donc $0,010 \times 10^{-11} SI$. On peut écrire de façon équivalente $G = (6,673 \pm 0,010) \times 10^{-11} SI$. L'incertitude relative est alors $|\Delta G/\overline{G}| = 0,10/6,673 = 1,5 \cdot 10^{-3}$.

Grandeur	Symbole	Valeur (CODATA 2002)
Nombre d'Avogadro	N_{Av}	$6,022\ 1415(10) \times 10^{23}$
constante de la gravitation	G	$6,6742(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
constante de Planck	h ou h_P	$6,626\ 0693(11) \times 10^{-34} \text{ J s}$
	$\hbar = h/2\pi$	$1,054\ 571\ 68(18) \times 10^{-34} \text{ J s}$
charge élémentaire	e	$1,602\ 176\ 53(14) \times 10^{-19} \text{ C}$
masse de l'électron	m ou m_e	$9,109\ 3826(16) \times 10^{-31} \text{ kg}$
masse du proton	m_P	$1,672\ 621\ 71(29) \times 10^{-27} \text{ kg}$
masse du neutron	m_N	$1,674\ 927\ 28(29) \times 10^{-27} \text{ kg}$
constante de Boltzmann	k ou k_B	$1,380\ 6505(24) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

On utilise parfois les approximations suivantes

$N_{Av} \simeq 6,02 \times 10^{23}$
$k \simeq 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$
$m_e c^2 \simeq 0,511 \text{ MeV}$
$m_P c^2 \simeq 938,3 \text{ MeV} \simeq m_n c^2 = 939 \text{ MeV}$
$m_N c^2 \simeq 939,6 \text{ MeV} \simeq m_n c^2 = 939 \text{ MeV}$
$m_n \simeq 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

où m_n est considéré comme la masse du nucléon.

L'unité de masse atomique (1 *uma*) est le douzième de la masse d'un atome de carbone $^{12}_6C$:

$$1 \text{ uma} = 1,660\ 538\ 86(28) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Grandeur	Symbole		Valeur
constante de structure fine	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	\simeq	$7,297 \times 10^{-3} \simeq \frac{1}{137,0}$
magnéton de Bohr	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	\simeq	$9,274 \times 10^{-24} \text{ J T}^{-1}$
rayon de Bohr	$a_0 = \frac{\hbar}{\alpha m_e c}$	\simeq	$0,5292 \text{ \AA}$
constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2}$	\simeq	$5,671 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Energie d'ionisation de l'hydrogène (avec $m_P \rightarrow \infty$)	$E_{I\infty} = \frac{1}{2} \alpha^2 m_e c^2$	\simeq	$13,606 \text{ eV}$

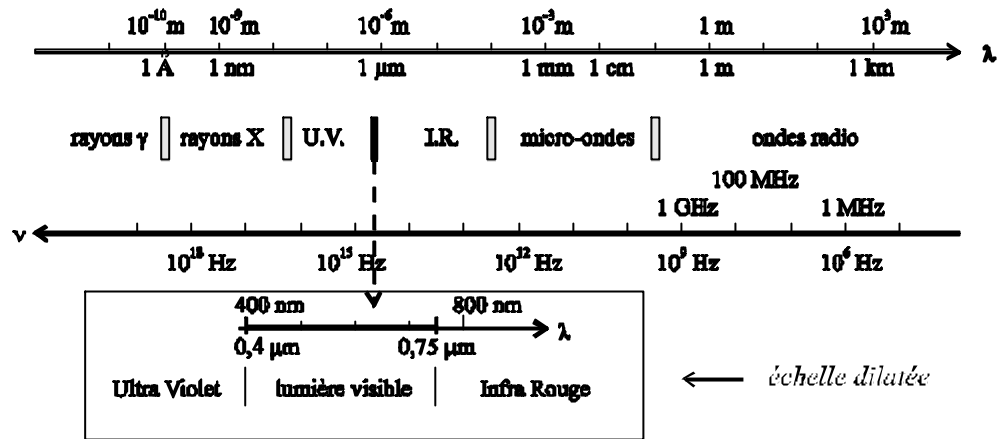
N.B. La densité d'énergie du rayonnement électromagnétique à l'équilibre thermodynamique à la température T est $a \times T^4 = 4 \frac{\sigma}{c} \times T^4$.

The atomic masses, based on the exact number 12.00000 as the assigned atomic mass of the principal isotope of carbon, ¹²C, are the most recent (1961) values adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The unit of mass used in this table is called *atomic mass* *unit* (amu): 1 amu = 1.6604 × 10⁻²⁷ kg. The atomic mass of carbon is 12.01115 on this scale because it is the average of the different isotopes naturally present in carbon. (For artificially produced elements, the approximate atomic mass of the most stable isotope is given in brackets.)

Period	Group →	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0								
1	Series 1	1 H 1.00797								2 He 4.0026								
2	2	3 Li 6.939	4 Be 9.0122	5 B 10.811	6 C 12.01115	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984		10 Ne 20.183								
3	3	11 Na 22.9898	12 Mg 24.312	13 Al 26.9815	14 Si 28.086	15 P 30.9738	16 S 32.064	17 Cl 35.453		18 A 39.948								
4	4	19 K 39.102	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71							
	5	29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.909			36 Kr 83.80							
5	6	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc [99]	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4							
	7	47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.9044			54 Xe 131.30							
6	8	55 Cs 132.905	56 Ba 137.34	57-71 Lanthanide series*	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09							
	9	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po [210]	85 At [210]			86 Rn [222]							
7	10	87 Fr [223]	88 Ra [226.05]	89-Actinide series**	90 Nd 144.24	91 Pr 140.907	92 U 238.03	93 Np [237]	94 Pu [242]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [249]	98 Cf [251]	99 Es [255]	100 Fm [257]	101 Md [258]	102 No [259]	103 Lr [260]

* Lanthanide series:
 † Actinide series:

Les ondes électromagnétiques



$$\lambda \nu = c \simeq 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

Première partie

L'atome et son noyau

Chapitre 1

CONSTITUTION DE L'ATOME

1.1 Introduction

L'atomisme fut très tôt introduit, dans des contextes divers, dès le monde antique avec Leucippe de Milet et son élève Démocrite (5ème siècle avant J-C.). Selon Lucrèce (1er siècle avant J-C.), dans *De natura rerum*, le monde étant composé de néant et d'atomes indestructibles, l'âme disparaît avec la mort ; en outre on peut espérer qu'un univers si simple devienne complètement compréhensible, sans mystères. Cette thèse qui contredit l'immortalité de l'âme n'était certes pas au goût des pères de l'église et il fallut attendre la renaissance pour que l'atomisme refasse surface avec Francis Bacon, Pierre Gassendi et plus tard, Robert Boyle et Descartes. Progressivement, l'atomisme quitte le domaine de la philosophie pour investir la chimie et la physique. Au 18ème siècle, les aperçus prophétiques de Boscovitch préfiguraient déjà une nouvelle science mais il fallut cependant attendre la fin du siècle pour que les travaux de Lavoisier et Proust permettent à l'hypothèse atomique d'émerger sous sa forme moderne. Cette hypothèse se précise tout au long du 19^{ème} siècle avec les travaux de Dalton, Gay-Lussac, Avogadro, Mendéleiev, entre autres. Cependant, c'est seulement au 20ème siècle que fut comprise la structure de l'atome : sa constitution et ses propriétés.

La matière est constituée d'atomes qui s'associent au moyen de liaisons, liaisons covalentes, liaisons ioniques, liaisons hydrogène, etc. On dénombre un peu plus de 100 éléments différents dont certains qui n'existent pas à l'état naturel, ont été fabriqués artificiellement.

Les atomes peuvent être considérés comme les constituants élémentaires de la matière tant que les énergies mises en jeu ne sont pas très importantes. Une telle situation se rencontre en chimie où les énergies échangées n'excèdent pas quelques électrons-volts par atome. Cependant, les atomes ne sont pas insécables. Il est possible de les "casser" en les bombardant avec des projectiles (d'autres atomes éventuellement) dotés d'une énergie cinétique de plusieurs dizaines d'électron-volts. On met ainsi en évidence deux types de constituants plus élémentaires encore : les *électrons* et les *noyaux*.

Les noyaux ne peuvent pas, non plus, être considérés comme des composants élémentaires, indestructibles. Certains d'entre eux se décomposent spontanément, de façon aléatoire : c'est le phénomène de *radioactivité* ; d'autres encore qui semblent très solides peuvent cependant être cassés lors de collisions avec divers types de projectiles. On met ainsi en évidence des constituants "encore plus élémentaires" : les *nucléons*[†].

1.2 Les constituants de l'atome, le défaut de masse.

Les atomes, tels qu'on les rencontre dans la nature, sont des objets de petites dimensions. Ils présentent une région centrale de forte densité de masse, le noyau, dont les

[†]Les nucléons sont eux-mêmes constitués de quarks.

dimensions n'excèdent pas quelques femtomètres ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Le nuage électronique entoure le noyau. Ses dimensions n'excèdent pas quelques angström ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

Les électrons constituent le nuage électronique. Le nombre d'électrons, Z , est le *numéro atomique* de l'atome. Les électrons sont des particules de petite masse[†] ($m \simeq 9,10938 \times 10^{-31} \text{ kg}$) et de charge négative ($q_e = -e \simeq -1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$).

On distingue deux constituants du noyau, **le proton** et **le neutron**. Ces deux constituants sont considérés comme les deux formes possibles d'une particule que l'on appelle le nucléon.

Le neutron est une particule de masse $m_N \simeq 1,674927 \times 10^{-27} \text{ kg}$ sans charge électrique. A l'état naturel il se décompose par radioactivité pour donner un proton et un électron.

Le proton admet la masse $m_P \simeq 1,672622 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Il présente une charge positive $q_P = e$.

Les masses du proton et du neutron sont voisines ; dans les applications, on prend souvent pour masse du nucléon la valeur $m_n \simeq 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Electron, neutron et proton présentent un moment cinétique intrinsèque, le "*spin*", caractérisé par le nombre quantique $s = \frac{1}{2}$. Cela signifie que le carré du spin vaut $s(s+1) \hbar^2 = \frac{3}{4} \hbar^2$ (voir ci-dessous le paragraphe 6.3, page 86).

Le nombre de protons dans le noyau est **le nombre de charge** du noyau tandis que le nombre total de nucléons est **le nombre de masse**. Les atomes sont électriquement neutres. Cette propriété implique que le nombre de charge est égal au numéro atomique, Z . Le nombre de masse étant noté A , on représente un noyau sous la forme ${}^A_Z X$ où X est le symbole chimique de l'atome dont le noyau est précisément celui que l'on considère. Ainsi ${}^{12}_6 C$ représente un noyau d'atome de carbone (C) qui est constitué de $Z = 6$ protons et de 6 neutrons (c'est à dire de $A = 12$ nucléons).

Les propriétés chimiques d'un élément sont déterminées par le nuage électronique de l'atome constitutif de cet élément. Il y a donc redondance entre X et Z . En effet, dans le cas considéré, ${}^{12}_6 C$, le symbole C signifie que l'on considère le noyau d'un atome de carbone, c'est à dire le noyau d'un élément dont le numéro atomique est 6. Le noyau d'un tel corps comprend donc 6 protons car l'atome étant neutre, son nombre de charge est égal à son numéro atomique.

Deux noyaux qui possèdent le même nombre de charge mais des nombres de masse différents sont des **isotopes**. Les propriétés physiques de deux isotopes peuvent être fort différentes : le carbone ${}^{14}_6 C$ se décompose spontanément tandis que ${}^{12}_6 C$ est stable. Cependant, les propriétés chimiques sont pratiquement les mêmes car ces atomes ont les mêmes numéros atomiques et par conséquent les mêmes nuages électroniques.

Calculons la masse, M , des constituants du noyau de carbone ${}^{12}_6 C$:

$$M = 6 \times m_P + 6 \times m_N = 2,0085 \times 10^{-26} \text{ kg}.$$

La masse d'un atome de carbone, M_{at} , est égale à 12 uma, par définition de l'unité de masse atomique. Soit, $M_{at} = 12 \times 1,66054 \times 10^{-27} = 1,9926 \times 10^{-26} \text{ kg}$. On trouve $M_{at} < M$ alors qu'en tenant compte de la masse des électrons on s'attendait à $M_{at} > M$.

[†]"petite" en comparaison avec les nucléons.

Il faut admettre que la masse d'un atome n'est pas égale à la masse de ses constituants. La différence est petite (de l'ordre de 10^{-3}). De façon générale, soit M la somme des masses des constituants d'un noyau A_ZX ($M = Zm_P + Nm_N$ avec $N = A - Z$) et M_X la masse du noyau, la différence $M - M_X = \Delta M$ est appelé "**défaut de masse**". C'est une quantité positive.

Depuis l'article d'Einstein de l'automne 1905 nous savons que la variation d'énergie d'un système se traduit par une variation de la masse de ce même système : $\Delta E = \Delta M \times c^2$ (où c est la célérité de la lumière dans le vide).

Ainsi, considérons le système formé de 6 protons et 6 neutrons immobiles, très éloignés les uns des autres. Sa masse est M . Lorsqu'on rapproche les nucléons, le même système forme un noyau de carbone ${}^{12}_6C$ dont la masse est M_{at} . La quantité $(M - M_{at}) \times c^2$ est l'énergie perdue par le système lorsque s'est formé le noyau. La formule d'Einstein ne dit pas sous quelle forme apparaît cette énergie : rayonnement, énergie cinétique...

Inversement, pour décomposer un noyau de carbone en ses nucléons constitutifs il faut lui fournir l'énergie $(M - M_{at}) c^2$. Cette énergie est l'**énergie de liaison** du noyau. L'énergie de liaison est une énergie potentielle que possède le système lorsqu'il est décomposé en nucléons et qu'il perd lors de la formation du noyau.

Les énergies d'ionisations telles qu'elles apparaissent dans le tableau 1-4 sont des énergies de liaison. Elles sont de l'ordre de quelques eV; le défaut de masse correspondant est négligeable. Pour le fer ($A = 57$) l'énergie de première ionisation est 7,9 eV. Le défaut de masse correspondant est $7,9 \times 1,6 \cdot 10^{-19} / (3 \cdot 10^8)^2 = 1,3 \times 10^{-33}$ kg tandis que la masse de l'atome est $57 \times 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg = $9,46 \times 10^{-26}$ kg. L'accroissement relatif de la masse du système lors de son ionisation est donc $1,3 \times 10^{-33} / 9,46 \times 10^{-26} \sim 10^{-8}$. On comprend pourquoi les réactions chimiques qui laissent les noyaux inchangés, ne permettent pas de mettre en doute la conservation de la masse. Il n'en est pas de même pour les réactions nucléaires qui conduisent à des défauts de masse plus facilement observables qui sont fréquemment de l'ordre de 10^{-3} .

Négligeons le défaut de masse et remarquons la relation $m_e \ll m_P$. On en déduit que la masse totale des électrons Zm_e est très inférieure à la masse des protons et par conséquent à la masse du noyau : $Zm_e \ll Zm_P < Zm_P + (A - Z)m_N \simeq Am_n$; ainsi on commet une erreur qui reste de l'ordre de 1% en posant $M = Am_n$ où M est la masse de l'atome.

1.3 Le nuage électronique

Les électrons forment un nuage qui enveloppe le noyau.

Rappelons la loi de Coulomb qui explique pour l'essentiel la cohésion de l'atome.

Soient deux charges ponctuelles q et q' situées en M et M' . La charge q exerce sur la charge q' la force $\vec{F}_{q/q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q'}{r^2} \frac{\overrightarrow{MM'}}{r}$ où $\|\overrightarrow{MM'}\| = r$ tandis que ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide $\left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9,0 \times 10^9 \text{SI}\right)$

Les électrons se repoussent donc les uns les autres car ils sont de même charge. Cependant, ils sont tous attirés par le noyau.

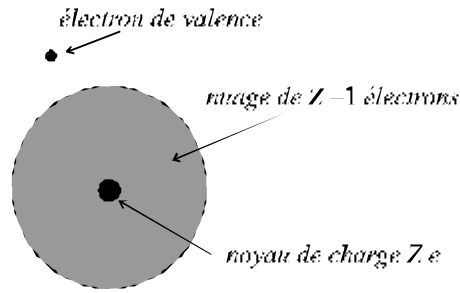


Figure 1-1.

Dans un atome alcalin, par exemple, l'électron de valence est éloigné des autres électrons qui avec le noyau forment un "coeur" de charge positive (cf. Fig. 1-1). Dans ce cas, la charge "vue" par l'électron de valence est $Ze - (Z - 1)e = e$. Il en résulte une force attractive qui maintient l'électron de valence lié au noyau. Des mécanismes similaires, bien que plus compliqués, se produisent pour tous les électrons. L'attraction exercée par le noyau domine et assure la cohésion de l'ensemble.

La description du nuage électronique ne peut se comprendre réellement que dans le cadre de la mécanique quantique. Une classification astucieuse et pertinente, expliquant de nombreuses propriétés chimiques, fut cependant établie par Mendeleïev bien avant les premiers balbutiements de la théorie des quanta[†]. Cette classification, améliorée, complétée et présentée parfois de diverses façons (cf. page ?? et suivantes de l'introduction et la figure 1-4 ci-dessous) est connue sous le nom de "*classification périodique des éléments*".

Les électrons se répartissent en couches, dans chaque couche on distingue les sous couches et dans les sous-couches les cases ; chaque case peut accueillir 2 électrons que l'on distingue par l'un des deux symboles \uparrow ou \downarrow .

Les couches sont numérotées 1, 2, 3, ..., n, Le nombre n est appelé "*nombre quantique principal*". Dans la couche n^on, les sous couches sont au nombre de n, elles sont numérotées 0, 1, ..., l, ..., n - 1. Dans la sous-couche n^ol, il y a 2l + 1 cases. Ainsi la couche n^on contient n² cases qui peuvent accueillir 2n² électrons.

L'usage veut que l'on distingue les sous-couches au moyen des lettres s, p, d, f et non des valeurs de l = 0, 1, 2, 3.

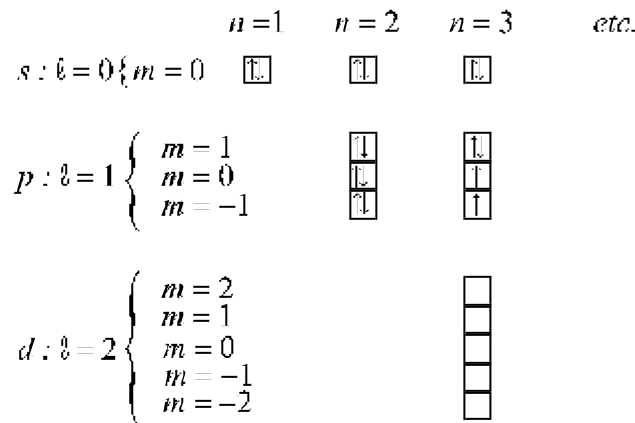


Figure 1-2. Le soufre : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$

[†]La théorie des quanta est l'ancêtre des théories quantiques.

La figure 1-2 présente un exemple de configuration électronique (celle du soufre, $Z = 16$). La notation $2p^6$, par exemple signifie qu'il y a 6 électrons sur la sous-couche p (sous-couche telle que $\ell = 1$) de la couche $n=2$, c'est à dire que la sous couche est "saturée". La figure 1-4 donne les configurations électroniques des atomes dans leur état fondamental (état de plus basse énergie).

Les couches électroniques périphériques correspondent aux valeurs maximales de n et ℓ . Les propriétés chimiques d'un élément dépendent des configurations de ces couches. Ce sont leurs configurations qui sont représentées sur le tableau de la figure 1-4.

Les liaisons interatomiques se produisent lorsque les couches extérieures des nuages électroniques s'interpénètrent. Le tableau de la figure 1-3 permet donc de vérifier que l'ordre de grandeur des dimensions atomiques est quelques angströms.

Densité et concentration atomique des éléments																														
Les valeurs sont données sous la pression atmosphérique à la température ambiante, ou à la température indiquée en deg K.																														
H ^{4K} 0,088																				He ^{2K} 0,205 <small>(à 37atm)</small>										
Li ^{78K} 0,542 4,700 3,023	Be 1,82 12,1 2,22											B 2,47 13,0	C 3,516 17,6 1,54	N ^{20K} 1,03	O	F 1,44	Ne ^{4K} 1,51 4,36 3,16													
Na ^{5K} 1,013 2,652 3,659	Mg 1,74 4,30 3,20											Al 2,70 6,02 2,86	Si 2,33 5,00 2,35	P	S	Cl ^{93K} 2,03	Ar ^{4K} 1,77 2,66 3,76													
← Densité en g cm ⁻³ (10 ³ kg m ⁻³) → ← Concentration × 10 ²² cm ⁻³ (10 ²⁸ m ⁻³) → ← Distance entre plus proches voisins, en Å (10 ⁻¹⁰ m) →																														
K ^{5K} 0,910 1,402 4,525	Ca 1,53 2,30 3,95	Sc 2,99 4,27 3,25	Ti 4,51 5,66 2,89	V 6,09 7,22 2,62	Cr 7,19 8,33 2,50	Mn 7,47 8,18 2,24	Fe 7,87 8,50 2,48	Co 8,9 8,97 2,50	Ni 8,91 9,14 2,49	Cu 8,93 8,45 2,56	Zn 7,13 6,55 2,66	Ga 5,91 5,10 2,44	Ge 5,32 4,42 2,45	As 5,77 4,65 3,16	Se 4,81 3,67 2,32	Br ^{123K} 4,05	Kr ^{4K} 3,09 2,17 4,00													
Rb ^{5K} 1,629 1,148 4,837	Sr 2,58 1,78 4,30	Y 4,48 3,02 3,55	Zr 6,51 4,29 3,17	Nb 8,58 5,56 2,86	Mo 10,22 6,42 2,72	Tc 11,50 7,04 2,71	Ru 12,36 7,36 2,65	Rh 12,42 7,26 2,69	Pd 12,00 6,80 2,75	Ag 10,50 5,85 2,89	Cd 8,65 4,64 2,98	In 7,29 3,83 3,25	Sn 5,76 3,62 2,81	Sb 6,69 3,31 2,91	Te 6,25 2,94 2,86	I 4,95 2,36 3,54	Xe ^{4K} 3,78 1,64 4,34													
Cs ^{5K} 1,997 0,905 5,235	Ba 3,59 1,60 4,35	La 6,17 2,70 3,73	Hf 13,20 4,52 3,13	Ta 16,66 5,55 2,86	W 19,25 6,30 2,74	Re 21,03 6,80 2,74	Os 22,58 7,14 2,68	Ir 22,55 7,06 2,71	Pt 21,47 6,62 2,77	Au 19,28 5,90 2,88	Hg ²²⁷ 14,26 4,26 3,01	Tl 11,87 3,50 3,46	Pb 11,34 3,30 3,50	Bi 9,80 2,82 3,07	Po 9,31 2,67 3,34	At —	Rn —													
Fr —	Ra —	Ac 10,07 2,66 3,76	Ce 6,77 2,91 3,65	Pr 6,78 2,92 3,63	Nd 7,00 2,93 3,66	Pm —	Sm 7,54 3,03 3,59	Eu 5,25 2,04 3,96	Gd 7,89 3,02 3,58	Tb 8,27 3,22 3,52	Dy 8,53 3,17 3,51	Ho 8,80 3,22 3,49	Er 9,04 3,26 3,47	Tm 9,32 3,32 3,54	Yb 6,97 3,02 3,88	Lu 9,84 3,39 3,43	Th 11,72 3,04 3,60	Pa 15,37 4,01 3,21	U 19,05 4,80 2,75	Np 20,45 5,20 2,62	Pu 19,81 4,26 3,1	Am 11,87 2,96 3,61	Cm —	Bk —	Cf —	Es —	Fm —	Md —	No —	Lw —

Figure 1-3.

Le tableau de la figure 1-4 appelle plusieurs remarques.

- Les nombres quantiques n , ℓ , m et s (avec $s = 1/2$ pour \uparrow et $s = -1/2$ pour \downarrow) déterminent complètement les propriétés de l'électron correspondant et l'on constate qu'il n'existe pas deux électrons présentant les mêmes nombres quantiques quel que soit l'atome considéré. Elevé au rang de principe, cette propriété est connu comme le "**principe d'exclusion**" de Pauli. Le principe d'exclusion ne s'applique pas seulement aux électrons mais à une famille de corpuscules appelée "**Fermions**"; le proton et le neutron, par exemple, sont des fermions.

- La constitution d'un atome, dans son état fondamental, à partir de son noyau et de ses Z électrons s'effectue de telle sorte que l'énergie potentielle du système soit minimale. Cette règle est très générale en physique. Le tableau de la figure 1-4 représente le résultat d'une telle opération. Pour $n < 4$ et $\ell < 2$, on constate que le remplissage

des couches et des sous-couches s'effectue suivant les valeurs de n croissantes et, pour n donné, de ℓ croissantes. Cette règle est en défaut pour $n \geq 4$ ou $\ell \geq 2$. D'autres règles permettent de décrire le remplissage mais nous n'étudierons pas plus avant cet aspect des propriétés du nuage électronique.

• L'énergie d'ionisation reste de l'ordre de quelques électrons-volts. Un maximum apparaît pour $Z = 2, 10, 18, 36, 54$ et 86 ; les atomes correspondant présentent donc une forte stabilité et peu de réactivité chimique : ce sont les gaz rares.

Electronic Configuration of Atoms*

Z	Symbol	Ground state	Ground configuration	Ionization energy, eV	Z	Symbol	Ground state	Ground configuration	Ionization energy, eV
1	H	$2S$	$1s$	13.595	52	Te	$3P_{3/2}$	$4d^{10} 5s^2 5p^4$	9.01
2	He	$1S$	$1s^2$	24.581	53	I	$2P_{3/2}$	$4d^{10} 5s^2 5p^5$	10.454
					54	Xe	$1S$	$4d^{10} 5s^2 5p^6$	12.127
3	Li	$2S$	[He] $2s$	5.390	55	Cs	$2S$	[Xe] $6s$	3.893
4	Be	$1S$	$2s^2$	9.320	56	Ba	$1S$	$6s^2$	5.210
5	B	$2P_{1/2}$	$2s^2 2p$	8.296	57	La	$2D_{3/2}$	$5d 6s^2$	5.61
6	C	$3P_0$	$2s^2 2p^2$	11.256	58	Ce	$1G_4$	$4f 5d 6s^2$	6.54
7	N	$4S$	$2s^2 2p^3$	14.545	59	Pr	$4I_{9/2}$	$4f^3 6s^2$	5.48
8	O	$3P_2$	$2s^2 2p^4$	13.614	60	Nd	$5I_4$	$4f^4 6s^2$	5.51
9	F	$2P_{3/2}$	$2s^2 2p^5$	17.418	61	Pm	$6H_{5/2}$	$4f^5 6s^2$	
10	Ne	$1S$	$2s^2 2p^6$	21.559	62	Fm	$7F_0$	$4f^6 6s^2$	5.6
11	Na	$2S$	[Ne] $3s$	5.138	63	Eu	$8S$	$4f^7 6s^2$	5.67
12	Mg	$1S$	$3s^2$	7.644	64	Gd	$9D_2$	$4f^7 5d 6s^2$	6.16
13	Al	$2P_{1/2}$	$3s^2 3p$	5.984	65	Tb	$6H_{15/2}$	$4f^9 6s^2$	6.74
14	Si	$3P_0$	$3s^2 3p^2$	8.149	66	Dy	$5I_8$	$4f^{10} 6s^2$	6.82
15	P	$4S$	$3s^2 3p^3$	10.484	67	Ho	$4I_{15/2}$	$4f^{11} 6s^2$	
16	S	$3P_2$	$3s^2 3p^4$	10.357	68	Er	$3H_6$	$4f^{12} 6s^2$	
17	Cl	$2P_{3/2}$	$3s^2 3p^5$	13.01	69	Tm	$2F_{7/2}$	$4f^{13} 6s^2$	
18	Ar	$1S$	$3s^2 3p^6$	15.755	70	Yb	$1S$	$4f^{14} 6s^2$	6.22
19	K	$2S$	[Ar] $4s$	4.339	71	Lu	$2D_{3/2}$	$4f^{14} 5d 6s^2$	6.15
20	Ca	$1S$	$4s^2$	6.111	72	Hf	$3F_2$	$4f^{14} 5d^2 6s^2$	7.0
21	Sc	$2D_{3/2}$	$3d 4s^2$	6.54	73	Ta	$4F_{3/2}$	$4f^{14} 5d^3 6s^2$	7.88
22	Ti	$3F_2$	$3d^2 4s^2$	6.83	74	W	$5D_0$	$4f^{14} 5d^4 6s^2$	7.98
23	V	$4F_{3/2}$	$3d^3 4s^2$	6.74	75	Re	$6S$	$4f^{14} 5d^5 6s^2$	7.87
24	Cr	$7S$	$3d^5 4s$	6.764	76	Os	$5D_4$	$4f^{14} 5d^6 6s^2$	8.7
25	Mn	$6S$	$3d^5 4s^2$	7.432	77	Ir	$4F_{9/2}$	$4f^{14} 5d^7 6s^2$	9.2
26	Fe	$5D_4$	$3d^6 4s^2$	7.87	78	Pt	$3D_3$	$4f^{14} 5d^8 6s^2$	8.88
27	Co	$4F_{9/2}$	$3d^7 4s^2$	7.86	79	Au	$2S$	[Xe, $4f^{14} 5d^{10}$] $6s$	9.22
28	Ni	$3F_4$	$3d^8 4s^2$	7.633	80	Hg	$1S$	$6s^2$	10.434
29	Cu	$2S$	$3d^{10} 4s$	7.724	81	Tl	$2P_{1/2}$	$6s^2 6p$	6.106
30	Zn	$1S$	$3d^{10} 4s^2$	9.391	82	Pb	$3P_0$	$6s^2 6p^2$	7.415
31	Ga	$2P_{1/2}$	$3d^{10} 4s^2 4p$	6.00	83	Bi	$4S$	$6s^2 6p^3$	7.287
32	Ge	$3P_0$	$3d^{10} 4s^2 4p^2$	7.88	84	Po	$3P_2$	$6s^2 6p^4$	8.43
33	As	$4S$	$3d^{10} 4s^2 4p^3$	9.81	85	At	$2P_{3/2}$	$6s^2 6p^5$	
34	Se	$3P_2$	$3d^{10} 4s^2 4p^4$	9.75	86	Rn	$1S$	$6s^2 6p^6$	10.745
35	Br	$2P_{3/2}$	$3d^{10} 4s^2 4p^5$	11.84					
36	Kr	$1S$	$3d^{10} 4s^2 4p^6$	13.996	87	Fr	$2S$	[Rn] $7s$	
37	Rb	$2S$	[Kr] $5s$	4.176	88	Ra	$1S$	$7s^2$	5.277
38	Sr	$1S$	$5s^2$	5.692	89	Ac	$2D_{3/2}$	$6d 7s^2$	6.9
39	Y	$2D_{3/2}$	$4d 5s^2$	6.377	90	Th	$3F_2$	$6d^2 7s^2$	
40	Zr	$3F_2$	$4d^2 5s^2$	6.835	91	Pa	$4K_{11/2}$	$5f^2 6d 7s^2$	4.0
41	Nb	$6D_{1/2}$	$4d^4 5s$	6.881	92	U	$5L_6$	$5f^3 6d 7s^2$	
42	Mo	$7S$	$4d^5 5s$	7.10	93	Np	$6L_{11/2}$	$5f^4 6d 7s^2$	
43	Tc	$6S$	$4d^5 5s^2$	7.228	94	Pu	$7F_0$	$5f^6 7s^2$	
44	Ru	$5F_5$	$4d^7 5s$	7.365	95	Am	$8S$	$5f^7 7s^2$	
45	Rh	$4F_{9/2}$	$4d^8 5s$	7.461	96	Cm	$9D_2$	$5f^7 6d 7s^2$	
46	Pd	$1S$	$4d^{10}$	8.33	97	Bk		$(5f^8 6d 7s^2)$	
47	Ag	$2S$	$4d^{10} 5s$	7.574	98	Cf		$(5f^9 6d 7s^2)$	
48	Cd	$1S$	$4d^{10} 5s^2$	8.991	99	E		$(5f^{10} 6d 7s^2)$	
49	In	$2P_{1/2}$	$4d^{10} 5s^2 5p$	5.785	100	Fm		$(5f^{11} 6d 7s^2)$	
50	Sn	$3P_0$	$4d^{10} 5s^2 5p^2$	7.342	101	Mv			
51	Sb	$4S$	$4d^{10} 5s^2 5p^3$	8.639	102	No			
					103	Lw			

* Chemical symbols in brackets indicate the equivalent configurations of the remaining electrons occupying filled shells. Configurations in parentheses are uncertain.

Figure. 1-4.

Les atomes ne sont pas nécessairement, toujours, dans leur état fondamental. Ils peuvent être dans un état excité. L'énergie interne de l'atome d'hydrogène dépend du nombre quantique principal n qui caractérise son état électronique : $E_n = -\frac{E_I}{n^2}$ où $E_I \simeq 13,6 \text{ eV}$ est l'énergie d'ionisation.

La quantification des énergies internes des atomes se traduit par l'existence de spectres de raies (raies d'émission et raies d'absorption).

Lorsqu'un atome au repos dans un état excité d'énergie $-\frac{E_I}{n^2}$ retombe dans un état de moindre énergie $-\frac{E_I}{p^2}$, il émet un photon de pulsation ω , d'énergie $\hbar\omega = -\frac{E_I}{n^2} + \frac{E_I}{p^2}$. Les raies dont la pulsation correspondent à $p = 1$ (état fondamental) sont les raies de Lyman, les raies de Balmer correspondent à $p = 2$.

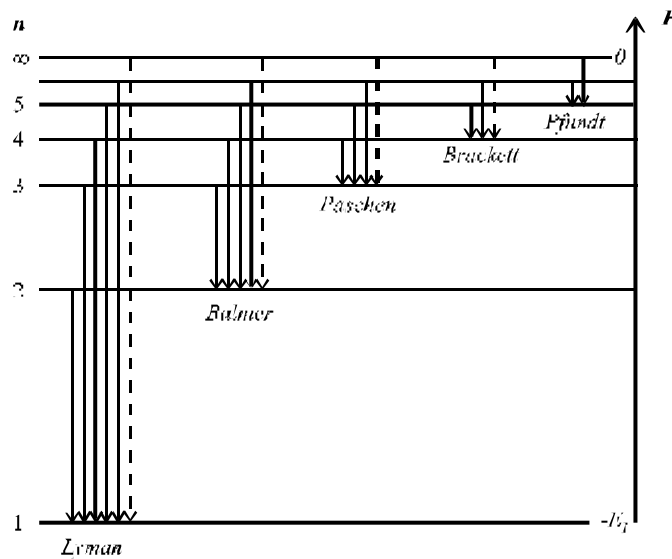


Figure 1-5. Séries spectrales de l'atome d'hydrogène.

L'observation des séries de Lyman et de Balmer est antérieure à la compréhension de la structure énergétique de l'atome d'hydrogène. L'explication qu'en fournit le modèle de Bohr[†] constitue une forte justification de ce modèle et des hypothèses qui le sous-tendent.

1.4 Le noyau

Le noyau constitue la région centrale de l'atome. La quasi totalité de la masse y est concentrée. La dimension du noyau étant très petite (quelques femtomètres), la densité y est très élevée ($\sim 10^{18} \text{ kg m}^{-3}$).

1.4.1 Le rayon nucléaire

Pour connaître la répartition de charges dans le noyau on le bombarde avec des électrons dont on étudie la déviation. La densité de charge, ρ , suit approximativement une loi de la forme $\rho(r) \simeq \frac{\rho_0}{1 + e^{(r-R)/0,5 \text{ fm}}}$ où r est la distance au centre tandis que $R \simeq A^{1/3} \times r_0$ avec $r_0 \simeq 1,1 \text{ fm}$ (rappelons que A est le nombre de masse du noyau).

[†]Le modèle de Bohr est un modèle quantique; c'est le premier modèle d'atome qui décrit convenablement le spectre d'énergie de l'atome d'hydrogène. Il sera étudié ultérieurement.

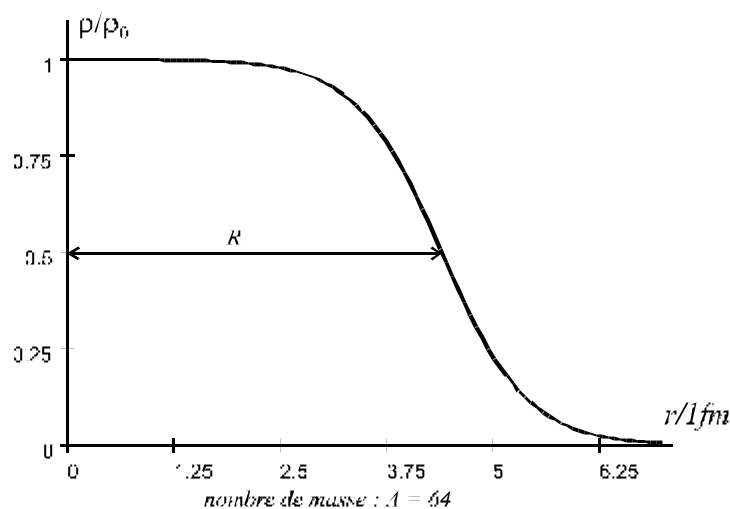


Figure 1-6.

La distance R qui apparaît sur la figure 1-6 peut être considérée comme le rayon de charge du noyau.

Pour étudier la répartition de masse dans le noyau, on utilise comme projectiles des neutrons de haute énergie. Le rayon du noyau obtenu (rayon de masse) est pratiquement le même que le rayon de charge.

1.4.2 Le modèle de la goutte liquide

La relation $R \simeq A^{1/3} \times r_0$ s'interprète ainsi : le volume du noyau est $V := \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \times A = A v$. Le volume du noyau, V , est la somme des volumes des nucléons qui le constituent ($A v$). Il est donc légitime d'interpréter v comme le volume d'un nucléon et $r_0 = 1,1$ fm comme l'ordre de grandeur du rayon d'un nucléon. Le noyau apparaît alors semblable à une goutte d'eau, constituée de molécules entassées les unes sur les autres et reliées entre elles par les forces moléculaires de Van der Waals.

Suivant la loi de Coulomb, dans les noyaux, les protons se repoussent car ils présentent la même charge positive. Une force d'attraction d'intensité bien supérieure à celle de la force de Coulomb, assure la cohésion de l'ensemble. Cette force est la force d'**interaction forte**. C'est cette force qui joue, pour le noyau, un rôle similaire à celui des forces moléculaires de Van der Waals pour une goutte liquide.

On peut considérer en première approximation que la force (forte) qui s'exerce entre deux nucléons dérive d'une énergie potentielle $V(r)$, où r est la distance entre les deux nucléons. L'allure de la fonction $V(r)$ est représentée sur la figure 1-7.

La portée de l'interaction forte qui s'exerce entre deux nucléons n'excède pas quelques femtomètres ; c'est donc la force de répulsion coulombienne qui domine aux distances supérieures.

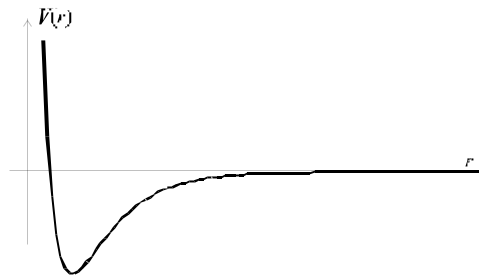


Figure 1-7.

La force est attractive pour $dV/dr > 0$ et répulsive à petite distance, pour $dV/dr < 0$.

Pour $r \gtrsim 1$ fm l'énergie potentielle est donnée par l'expression de Yukawa :

$$V \simeq -14,5 \hbar c \frac{e^{-\mu r}}{r} \text{ avec } 1/\mu \simeq 1,4 \text{ fm}$$

V est pratiquement nul lorsque μr est supérieur à quelques unités. On dit que la **portée** de la force est $1/\mu$.

Cette expression mérite d'être comparée à l'énergie potentielle électrostatique de deux charges élémentaires de signes opposés : $V_C \simeq -\frac{1}{137} \hbar c \frac{1}{r}$. Les deux expressions de V et V_C se présentent sous la même forme : $-g \hbar c \frac{e^{-\mu r}}{r}$. Cependant, la portée de l'interaction coulombienne est infinie ($\mu = 0$).

L'intensité de l'interaction forte est mesurée par $g \simeq 14,5$, elle est à peu près 2000 fois celle de l'interaction électromagnétique ($g = \alpha \simeq \frac{1}{137}$).

Les forces ainsi décrites assurent la cohésion du noyau.

En mesurant le défaut de masse des noyaux, ΔM , on obtient l'énergie potentielle totale, somme des énergie potentielles associées aux diverses interactions en présence. Cette énergie potentielle est notée $-B$ où B est l'**énergie de liaison** ; c'est une fonction de A et Z , c'est à dire une fonction du noyau considéré : $B = \Delta M c^2$ est toujours positive ; ΔM est le défaut de masse.

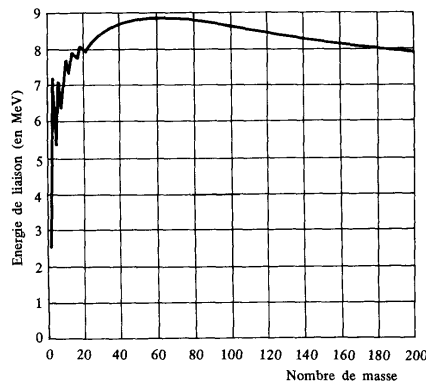


Figure 1-8a

Figures 1-8 Energie de liaison par nucléon : B/A

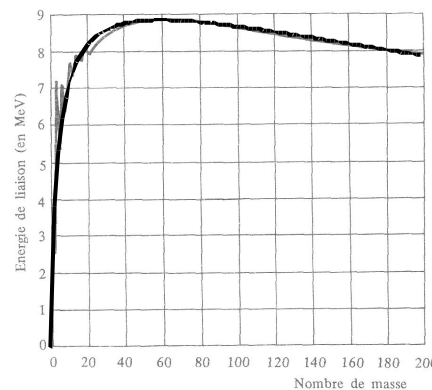


Figure 1-8b Ajustement théorique.

Sur la figure 1-8a on constate que pour $A \gtrsim 20$ l'énergie de liaison par nucléon (B/A) est approximativement une constante de l'ordre de 8,5 MeV, quel que soit A . Une analogie s'impose. Pour évaporer un gramme d'eau à partir d'un litre d'eau ou à partir

de 3 ou 4 litres, l'énergie à dépenser est toujours la même. Or les molécules d'eau sont retenues dans le liquide par les forces de Van der Waals que nous avons déjà évoquées, tandis que les nucléons sont retenus au sein du noyau par les interactions fortes. Cette analogie renforce l'image d'un noyau qui serait semblable à une goutte de liquide. Ainsi 8,5 eV serait l'équivalent de la chaleur latente d'évaporation d'un nucléon.

- En première approximation, l'énergie de liaison est donc de la forme $B = a_v \times A$

- Mais il faut corriger cette expression pour tenir compte des nucléons situés à la surface de la goutte liquide. Si le volume du noyau est $V = \frac{4\pi}{3} r_0^3 A$, sa surface est $4\pi r_0^2 A^{2/3}$, le nombre de nucléons de surface est donc proportionnel à $A^{2/3}$ et la correction de surface doit conduire à l'expression $B = a_v \times A - a_s \times A^{2/3}$

- Les protons pour leur part présentent une énergie potentielle, E_C , que l'on peut calculer en supposant une répartition uniforme de la charge Ze dans la sphère de rayon $R = r_0 A^{1/3}$. On trouve $\frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ ce qui suggère que l'expression précédente

de B soit modifiée ainsi : $B = a_v \times A - a_s \times A^{2/3} - a_c \times \frac{Z^2}{A^{1/3}}$.

- Deux autres corrections interviennent. Elles sont de nature quantique et nous ne pouvons pas en donner une justification simple :

la correction d'asymétrie introduit le terme $-a_a \frac{(N-Z)^2}{A}$ où N est le nombre de neutrons du noyau ($N = A - Z$);

enfin on complète l'expression de B par un terme d'appariement δ . Ce terme dépend de la parité de N et de celle de Z . Son expression est de la forme

$$a_p \times \frac{(-1)^Z + (-1)^N}{2} A^{-1/2}.$$

L'expression de B est alors :

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

(1.1)

avec $N = A - Z$ et $a_v \simeq 15,56$ MeV, $a_s \simeq 17,23$ MeV, $a_c \simeq 0,711$ MeV, $a_a \simeq 23,6$ MeV et $a_p \simeq 12$ MeV. Cette expression constitue la **formule de Bethe et Weizsäcker**, obtenue dès 1935. Elle fournit l'énergie de liaison d'un noyau quelconque dans son état fondamental. C'est une formule semi-empirique dont les coefficients sont ajustés de façon à décrire au mieux l'ensemble des atomes. Le résultat est satisfaisant : le défaut de masse est déterminé par la formule de Bethe et Weizsäcker à mieux que 1% près pour $A > 20$ (cf. la figure 1-8b).

1.4.3 Les noyaux stables

De même qu'en physique atomique certaines configuration électroniques sont particulièrement stables (celle des gaz rares), de même certains noyaux présentent une valeur élevée du rapport B/A . Pour de tels noyaux, très stables, les nombres de neutrons ou de protons sont les "**nombre magiques**" 2, 8, 20, 28, 50, 82, etc.

Le terme d'appariement accroît l'énergie de liaison pour les noyaux "pair-pairs" (Z pair et N pair), ce qui en favorise la formation le cas échéant. Ce même terme défavorise les atomes impair-impair. Ainsi s'explique les abondances des divers types de noyaux

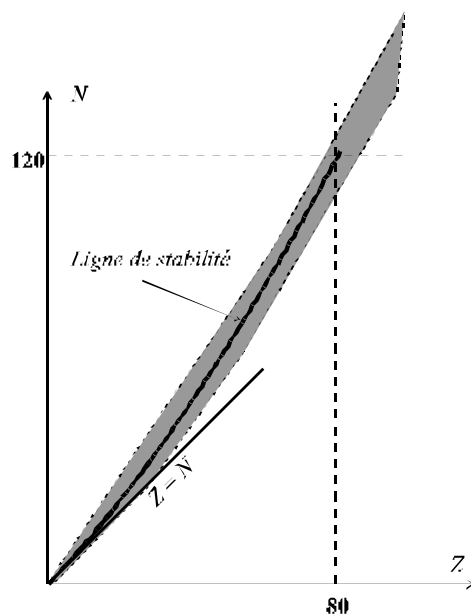
~ 200	atomes dont le noyau est	pair-pair
~ 135	atomes dont le noyau est	pair-impair ou impair-pair
4	atomes dont le noyau est	impair-impair

Nous verrons au chapitre suivant que la radioactivité β conduit à une modification spontanée de Z alors que A est conservé. Dès lors, la question suivante surgit naturellement : le nombre de masse, A , étant donné, quelle est la répartition des nombres de protons, Z , et de neutrons, $N = A - Z$, qui correspondent à la configuration la plus stable ?

Pour traiter cette question, nous ne tenons pas compte du terme d'appariement qui varie de façon discontinue et nous posons $\left(\frac{\partial B}{\partial Z}\right)_A = 0$ afin de déterminer les configurations de stabilité maximale. Il vient

$$Z = \frac{A}{2 + \frac{1}{2}(a_c/a_a)A^{2/3}} \simeq \frac{A}{2 + 0,015 A^{2/3}}$$

La figure 1-9 donne l'allure de la courbe de stabilité ainsi que sa localisation dans le plan $Z - N$. Le résultat obtenu est satisfaisant car les noyaux stables se situent effectivement au voisinage de la ligne de stabilité théorique, dans la zone grise où sont également localisés les noyaux radioactifs[†].

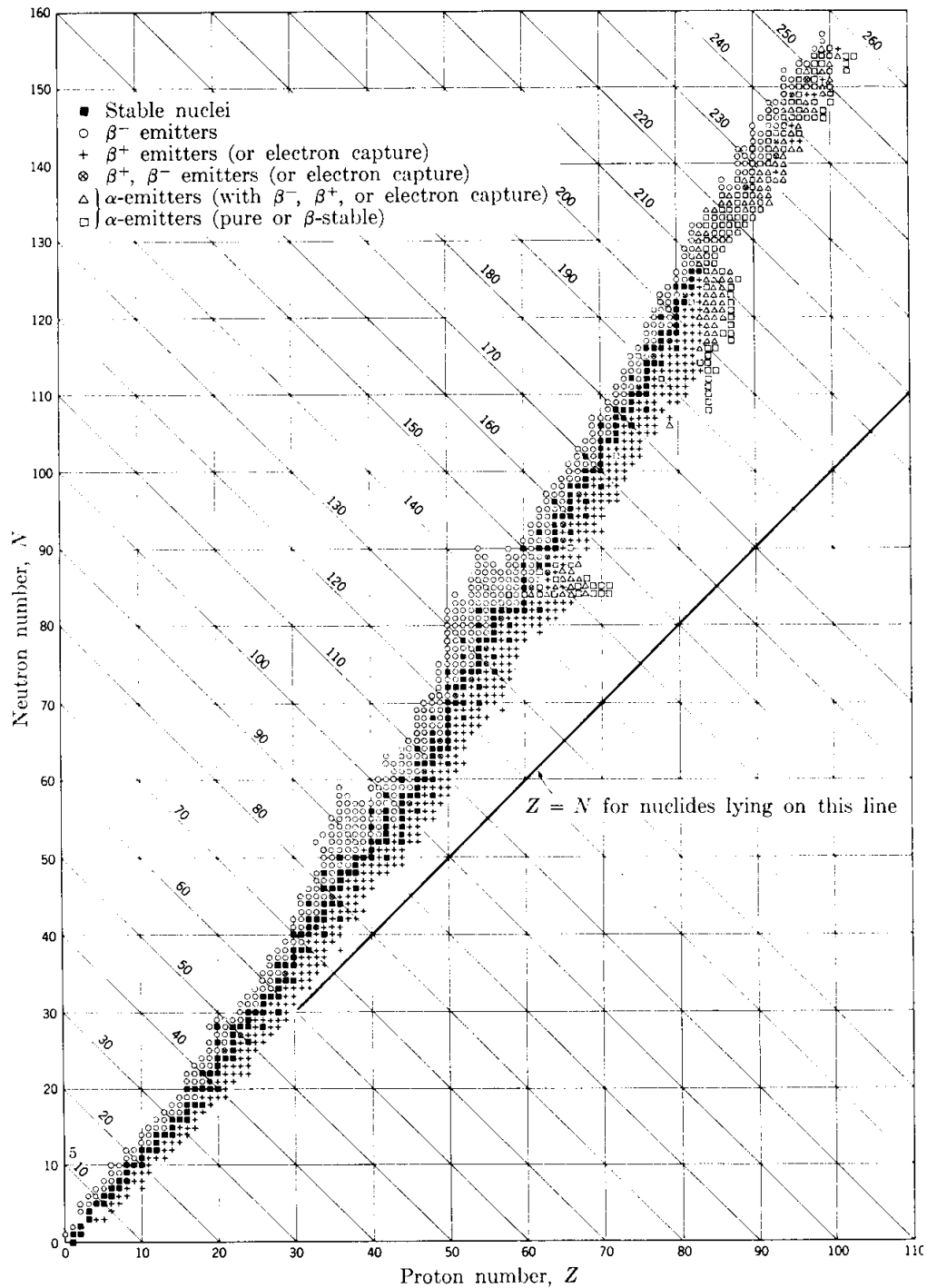


Figur 1-9.

Sur la ligne de stabilité, Z est une fonction de A . En remplaçant Z par cette fonction dans l'expression de B , nous obtenons l'expression théorique de B/A . Le graphe de cette fonction peut être comparé à la courbe expérimentale (cf. Fig.1-8b). Remarquons que le terme d'asymétrie est essentiel pour permettre la constitution de noyaux chargés ; en effet $a_a = 0$ impliquerait $Z = 0$: les seuls noyaux stables seraient alors nécessairement neutres.

De façon générale, le nombre de neutrons est du même ordre, mais supérieur au nombre de protons (voir la figure 1-10). C'est une conséquence de la charge des protons car, en supposant $a_c = 0$, on aurait en effet $N = Z = A/2$.

[†]Un noyau radioactif est un noyau qui se "désintègre" après une certaine durée. Cette durée n'est pas prédictible autrement que statistiquement. Les produits de la désintégration peuvent être divers selon le type de radioactivité. Nous étudions ces questions plus en détail au chapitre suivant.



Stable and radioactive nuclides. The 45° lines are lines of equal mass number A .

Figure 1-10 : Représentation dans le plan $Z - N$, des noyaux stables et radioactifs.

Les noyaux qui ont le même nombre de charge, Z , mais des nombres de masse différents sont des "*isotopes*". Ils peuvent tous être les noyaux d'atomes possédant Z électrons, c'est à dire d'atomes présentant le même nuage électronique et par conséquent

des propriétés chimiques similaires. Ainsi on trouve les atomes de carbone $^{12}_6C$ et $^{14}_6C$ dans les mêmes combinaisons chimiques et par conséquent dans les mêmes corps : hydrocarbures, aliments, bois, etc.

Remarquons qu'il existe souvent plusieurs isotopes stables d'un même corps tandis que certains noyaux de nombre de charge élevé, n'existent que sous forme instable. La ligne de stabilité introduite précédemment ne présente donc qu'un caractère descriptif de nature qualitative ; son existence constitue cependant une justification de la formule de Bethe et Weizsäcker.

1.4.4 Les états excités

Les noyaux ne sont pas nécessairement dans leur état fondamental. Il peuvent être excités de diverses manières. Reprenant le modèle de la goutte liquide, on peut imaginer que l'absorption d'un neutron provoque une déformation de la goutte et des oscillations. Lorsque la déformation est assez importante, la goutte se scinde en deux (ou plusieurs) gouttelettes.

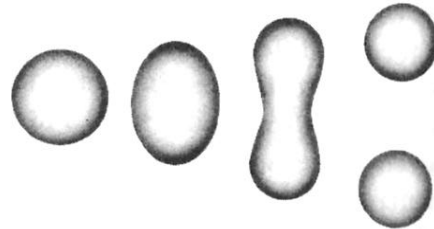


Figure 1-11.

Si la distance entre les gouttelettes est supérieure à la portée de l'interaction forte, cette scission est définitive : c'est une "fission".

Les énergies internes des noyaux sont quantifiées. Lors des transitions radiatives, un photon est émis tandis que le noyau subit une transition entre deux niveaux d'énergie.

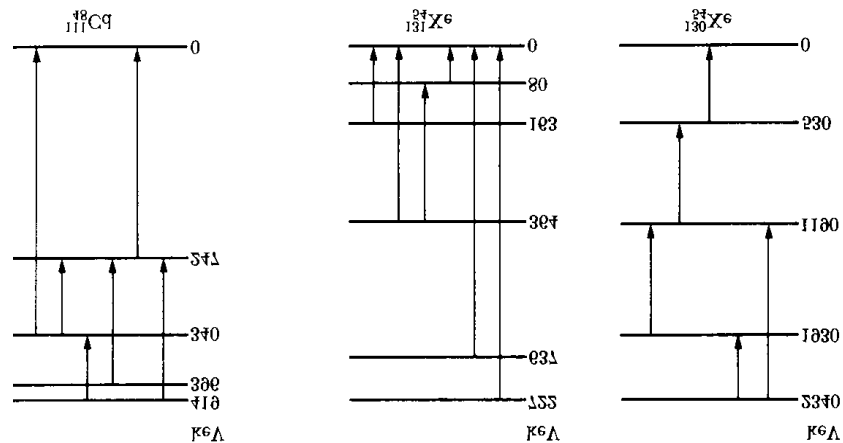


Figure 1-12.

La figure 1-12 montre les niveaux d'énergie de 3 noyaux différents (dont deux isotopes du xénon.). On remarquera l'échelle des énergies au dessus du niveau fondamental qui est de l'ordre de 1 MeV dans le domaine nucléaire tandis qu'elle est de l'ordre de 10 eV pour l'atome d'hydrogène.

Soulignons enfin que les transitions radiatives entre deux niveaux d'énergie quelconque ne sont pas toujours possibles. Certaines *règles de sélection* doivent également être satisfaites. Une situation semblable se rencontre en physique atomique.

1.5 Conclusion

Selon les figures 1-9 et 1-10 les noyaux qui se répartissent au voisinage de la ligne de stabilité ne sont pas tous stables. Mais qu'est-ce qu'un noyau instable ?

Un noyau instable est un assemblage de nucléons qui ne restent ensemble que pendant un temps limité. Si ce temps est très grand (de l'ordre de l'âge de l'Univers par exemple), on conçoit qu'il est impossible de distinguer un noyau instable d'un noyau stable. Cependant, dans la réalité, la distinction est pratiquement sans ambiguïté.

Un noyau instable peut subir divers types de modifications. Il peut se "fendre" pour donner des noyaux plus petits en éjectant éventuellement des nucléons. Ce mécanisme de "fission" nucléaire peut intervenir immédiatement lors de la tentative de fabrication du noyau instable, il peut intervenir après un certain délai. Ainsi certains atomes lourds émettent spontanément, après un certain temps, une particule α (un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$). Un tel mécanisme est appelé "*radioactivité α* ".

Dans un noyau instable il peut aussi arriver que les nombres de protons et de neutrons soient modifiés tandis que le nombre de masse, A , reste constant. De telles réactions sont observées, elles donnent lieu à la "*radioactivité β* ".

Au chapitre suivant nous étudions ces divers mécanismes.

Pour conclure ce chapitre, soulignons qu'il faut distinguer clairement les propriétés de l'atome qui sont celles de son cortège électronique, et les propriétés du noyau. Ainsi le radon (Rn) est un gaz rare, peu actif chimiquement. Cette caractéristique est due à son nuage électronique qui présente 8 électrons sur sa couche périphérique ($6s^26p^6$). C'est en outre un gaz radioactif, propriété qui caractérise son noyau. De même le noyau ${}^{12}_6\text{C}$ est stable tandis que ${}^{14}_6\text{C}$ est radioactif.