

Chapitre 1

Le noyau atomique

I HISTORIQUE

I.1 L'atome en 1900

A la fin du 19^{ème} siècle, trois (3) découvertes ont marqué l'histoire du progrès de la connaissance de la Physique atomique. Ce sont :

- 1) La découverte des rayons X par Röntgen en 1895 ;
- 2) La découverte de la radioactivité de l'Uranium par Becquerel au début de l'année 1896 ;
- 3) La découverte de l'électron négatif par J. J. Thomson (à la fin du 19^{ème} siècle)

Ces découvertes ont permis de rompre avec la mécanique classique. Elles introduisent ainsi une nouvelle ère en Physique.

D'après la théorie des ions de Zeeman, développée par Lorentz, on suppose que dans chaque molécule rayonnante, il existe une ou plusieurs particules chargées, capables de vibrer autour d'une position d'équilibre. Ces ions ou électrons donnent lieu à des ondes électromagnétiques. Cette hypothèse des ions contenus dans tous les corps est rendue probable par la décharge électrique dans les gaz rares. Cette époque la notion d'ionisation n'est pas liée à une structure atomique.

Indication de la condition de la matière sur le passage de l'électron à travers les gaz.

Par déviation des rayons cathodiques par les forces électriques et magnétiques, on a mesuré la valeur de $\frac{e}{m}$, e et m étant respectivement la charge et la masse des particules cathodiques. m représente $\frac{1}{1000}$ fois la masse de l'atome d'hydrogène, la plus petite masse connue.

Cette expérience nous indique qu'il existe un nouvel état de la matière. Cet état est constitué de particules identiques qu'on appelle « corpuscules », qui ont une masse invariable et qui représente le millième de celle de l'atome d'hydrogène. Chacun de ces corpuscules porte une charge électrique négative ou positive. Ces corpuscules se trouvent dans tous les corps.

I.2 L'atome de J. J. Thomson

Avec un tube à rayons cathodiques (tube de Crookes), Thomson a montré que les rayons cathodiques sont déviés par un champ magnétique. Il existe aussi les rayons X qui peuvent ioniser le gaz. Les travaux de recherche de Thomson étaient de mettre en évidence l'existence de l'électron.

- L'électricité négative se trouve dans l'atome ;
- L'électricité négative est portée par des corpuscules appelés électrons ;
- On sait aussi que l'électricité positive se trouve dans l'atome mais on ne sait pas comment elle se présente.

Modèle :

- L'atome se présente comme une sphère de densité uniforme dans laquelle sont distribués les corpuscules. L'électricité positive attire les corpuscules vers le centre de la sphère et les deux se repoussent.
- Pour un nombre n de corpuscules on a :
 - $n = 1$ l'électron est au centre de la sphère, c'est-à-dire au centre de l'atome ;
 - $n = 2$ les électrons sont situés sur un diamètre ;
 - $n = 3$ les électrons sont situés aux sommets d'un triangle équilatéral ;
 - $n = 4$ les électrons sont situés aux sommets d'un tétraèdre.
- On a une sphère uniforme d'électricité positive et on a des corpuscules repartis sur des anneaux parallèles. Les anneaux qui ont beaucoup d'électrons sont à la surface et ceux d'un petit nombre sont à l'intérieur.

Insuffisance du modèle :

- On ne connaît pas le nombre d'électrons par atome dans ce modèle. Ce nombre est proportionnel au poids de l'atome.

I.3 L'atome de Rutherford

Vers 1911, Rutherford projette des particules sur une feuille d'or et certaines sont déviées et d'autres pas. Il déduit qu'une grande partie de la charge est concentrée au centre de l'atome et il propose la répartition planétaire des électrons. Autour du noyau, chargé positivement, gravitent les électrons chargés négativement (c'est le modèle atomique).

Modèle :

- Il s'énonce comme suit : Rutherford diffuse des particules α sur la matière : il conclut que les atomes sont chargés d'un noyau chargé positivement entouré d'un système d'électrons maintenus ensemble par les forces attractives du noyau. La charge négative totale des électrons est égale à la charge positive du noyau. En plus, le noyau est le siège de toute la masse de l'atome et que ses dimensions sont très petites par rapport à celles de l'atome.

Insuffisance du modèle :

- Les électrons qui gravitent autour du noyau doivent perdre leur énergie et venir s'écraser sur le noyau.

I.2 L'atome de J. J. Thomson

En 1913, Niels Bohr propose qu'à l'intérieur de l'atome les électrons ne peuvent graviter que sur des orbites circulaires dont chacune ne peut varier de manière continue. Ces orbites doivent être définies, précises et il est impossible à l'électron de descendre en dessous d'une orbite. Ce qui implique la quantification des orbites électroniques, donc la notion d'état quantique et de

transition quantique. Il y a une orbite minimale en dessous de laquelle chaque électron approprié ne doit descendre.

Après ce modèle on sait maintenant calculer les orbites elliptiques, les nombres quantiques. La quantification a profondément modifié la Physique corpusculaire par une approche théorique qui est la mécanique quantique en 1925.

II LES PARTICULES

I.1 Le neutron

Le neutron a été découvert par Chadwick en 1932. La réaction $\alpha + Be \rightarrow$ a permis de découvrir le neutron. Les rayonnements γ émis par le Be bombardé par les α du Po ont été identifiées pour la 1^{ère} fois en 1930 par Bethe et Becker. Cette expérience a été reprise le 18 janvier 1932 par les Joliot-Curie et qui pensent que c'est un rayonnement de type γ . Elle est encore reprise par Chadwick le 27 février 1932 et il conclut que le rayonnement est composé de particules de masses 1 ou 0 : il baptise cette particule du nom de neutron.

I.2 L'atome de J. J. Thomson

Il est sans masse.

L'invention :

Au début des années 20, les Physiciens qui étudiaient la radioactivité β sont : le noyau d'atome se transforme en émettant un électron. Cet électron éjecté n'emporte pas avec lui toute l'énergie perdue par le noyau lors de sa désintégration. Où est donc passée cette énergie ?

En 1930, Pauli postule l'existence d'une particule « fantôme » émise en même temps que l'électron mais indétectable à l'époque : le *neutrino*. Le neutrino est ainsi inventé.

La découverte

C'est en 1956 que le neutrino a été découvert (détecté) par les Américains (Reines et Cowan).

Il y a trois sortes de neutrinos : neutrino électron (ν_e) associé à l'électron, c'est-à-dire émis lors de la désintégration β , le neutrino muon (ν_μ) associé à l'émission du muon μ et le neutrino tau (ν_τ) associé à l'émission du tau τ .

I.3 Sources des neutrinos

I.3.1 Sources naturelles

- a) Les objets célestes galactiques ou extragalactiques.
- b) Les rayons cosmiques : 2 neutrinos muon pour 1 neutrino électron.
- c) Le soleil ne donne que des neutrinos électron.

Les neutrinos arrivent sur terre à raison de 65 milliards de neutrinos par cm^2 est par seconde avec une énergie de 15 MeV.

I.3.1 Sources naturelles

- a) Les accélérateurs de particules, avec des ν_μ de quelques GeV pour photographier les protons.
- b) Réacteurs nucléaires : ils accélèrent à une énergie de 4 MeV, $5 \cdot 10^{20} \nu_e/s$

I

I.4 Les autres particules

- a) Les mésons

- π (pion) : π^+, π^0, π^- . Ils sont produits lors des réactions élastiques.
- μ (muon) : μ^+, μ^0, μ^- .

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\text{Masse} = 105 \text{ MeV}/c^2 ; \quad \tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

- b) Les particules étranges

- K (kaon) :

$$K^+ : M = 500 \text{ MeV}/c^2 ; \quad \tau = 10^{-8} \text{ sec}$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$K^0 : M = 500 \text{ MeV}/c^2 ; \quad \tau = 10^{-10} \text{ sec}$$

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \nu_e$$

- c) Les quarks

Les différents quarks sont :

u (up) : charge : $\frac{2}{3}e$; $M = \frac{1}{3}m_e$

d (down) : charge : $-\frac{1}{3}e$; $M = \frac{1}{3}m_e$

Il y a 6 quarks : u, d, s, c, b, t

u (up), d (down), s (strange, 1964), c (charme, 1974), b (beauté, 1976), t (top).

- d) La composition de quelques particules en quarks

p : u, u, d ;

n : u, d, d ;

π^+ : u, d ; π^0 : u, u ou d, d ; π^- : u, d

K^+ : u, s ; K^- : d, s

τ : b, b

III LE NOYAU ATOMIQUE

L'atome est constitué du noyau et du cortège électronique. La presque totalité de la masse de l'atome est concentrée dans le noyau et ses dimensions sont très faibles par rapport à celle de l'atome.

II.1 Les constituants du noyau : ${}_Z^AX_N$

A = nombre de masse ou nombre de nucléons contenus dans le noyau ;

Le noyau atomique est constitué de nucléons : les protons (Z) et les neutrons (N) ;

$$A = Z + N$$

Z = numéro atomique ou nombre de protons ;

N = nombre de neutrons ;

X = élément chimique caractérisé par Z.

III.1.1 Le proton

Il est découvert en 1886. Il est chargé positivement et sa charge est égale à la valeur absolue de celle de l'électron : $e_p = 1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb. Sa masse est : $m_p = 1,673 \times 10^{-27}$ kg (avec une incertitude relative de $5,1 \times 10^{-6}$). Son énergie est :

$E_p = m_p c^2 = 1,673 \times 10^{-27} \times (2,9979 \times 10^8)^2$ Joules (1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ Joules). Son rayon est : $r_p = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$.

Il est composé de trois quarks : uud.

Il n'est pas une particule élémentaire car il est composé d'autres particules tels que les quarks.

Sa masse en unité de masse atomique unifiée est : $m_p = 1,00757 \text{ u}$.

Il est 1840 fois plus lourd que l'électron au repos.

III.1.2. Le neutron

Il est découvert en 1932 par l'anglais Chadwick. Il a une charge nulle.

Sa masse $m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (avec une incertitude relative de $23,5 \times 10^{-6}$).

Son énergie $E_n = m_n c^2 = 1,675 \times 10^{-27} (2,9979 \times 10^8)^2$ joules = 939,6 MeV.

Son rayon $r_n = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$.

Il est composé de 3 quarks : udd.

Il n'est pas une particule élémentaire car il est composé d'autres particules tels que les quarks.

Sa masse en unité de masse atomique unifiée est $m_n = 1,00877 \text{ u}$.

NB : Du fait que le neutron ne porte pas de charge électrique, il n'est pas influencé par les noyaux, il peut traverser les grandes épaisseurs d'éléments lourds sans perdre assez d'énergie, il n'ionise pas directement les atomes qu'il rencontre. Il est difficile de le détecter directement. Le neutron libre est radioactif et se désintègre en émettant un proton, un électron et un neutrino. Sa vie moyenne est de 20 mn.

Sources de neutrons :

On obtient des sources de neutrons par les réactions.

- 1) $\alpha + \text{Be} \rightarrow n + \dots$, α est fourni soit par le Po ou le Ra ou le Rn ;
- 2) En bombardant des cibles de diverses substances par des particules atomiques ;
- 3) Dans des piles atomiques.

III.1.3. Les isotopes

Ce sont des noyaux ayant le même nombre de protons Z , donc appartenant au même élément chimique et de nombre de neutrons différent.

Exemple : l'élément chimique de l'hydrogène a 3 isotopes : ^1_1H (99.985%), ^2_1H (0.015%) et des traces de tritium ^3_1H radioactif (émetteur β^-) dans la nature.

Le carbone naturel $^{12}_6\text{C}$ (98.99%), $^{13}_6\text{C}$ (1.11%) et des traces de $^{14}_6\text{C}$ radioactif, émetteur β^- , dans la nature.

L'uranium $^{238}_{92}\text{U}$ (99.275%), $^{235}_{92}\text{U}$ (0.720%), $^{234}_{92}\text{U}$ (0.0056%) tous radioactifs et émetteurs α .

III.1.4. Les isobares

Ce sont des noyaux qui ont le même nombre de nucléons.

Exemple : $^{14}_6\text{C}$ et $^{14}_7\text{N}$; $^{24}_{11}\text{Na}$ et $^{24}_{12}\text{Mg}$.

III.1.5. Les isotones

Ce sont des noyaux qui ont le même nombre de neutrons.

Exemple : $^{13}_6\text{C}$ et $^{14}_7\text{N}$ ont chacun 7 neutrons ; $^{14}_6\text{C}$ et $^{15}_7\text{N}$ ont chacun 8 neutrons.

III.1.6. Les noyaux impairs, pair-pair, impair-impair

Un noyau est pair-pair si son Z est pair et son N est pair. C'est-à-dire A pair ;

Un noyau est impair-impair si son Z est impair et son N est impair, c'est-à-dire A pair ;

Un noyau impair est un noyau dont A est impair, c'est-à-dire son Z est impair ou son N est impair.

III.2 Dimension des noyaux – densité nucléaire

III.2.1 Dimension des noyaux

Le nucléon est sphérique, son volume est $V_0 = \frac{4}{3}\pi R_0^3$ et le noyau est aussi sphérique de volume $V = A \times V_0$.

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = A \times V_0 = A \times \frac{4}{3}\pi R_0^3 \rightarrow R^3 = AR_0^3 \rightarrow R = R_0 A^{\frac{1}{3}}, \quad R_0 = 1,4 \text{ fm}$$

III.2.2 Densité nucléaire

Si on assimile le noyau à une sphère de rayon R_0 , sa densité de charge est ρ_0 pour $r < R_0$ et nulle pour $r > R_0$.

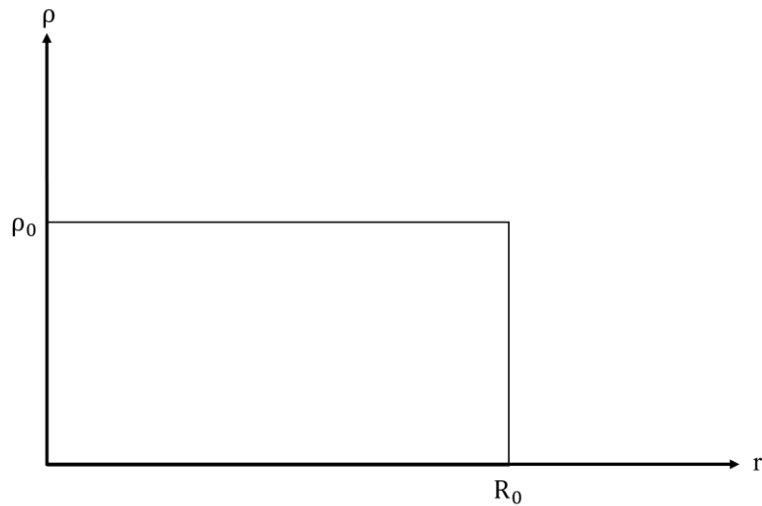


Figure 1 : Densité de charge ρ d'un noyau atomique assimilé à une sphère de rayon R_0

Après l'étude de la diffusion d'électron de très grande énergie sur les noyaux, on déduit que ρ (densité volumique de charge nucléaire) varie en fonction de r .

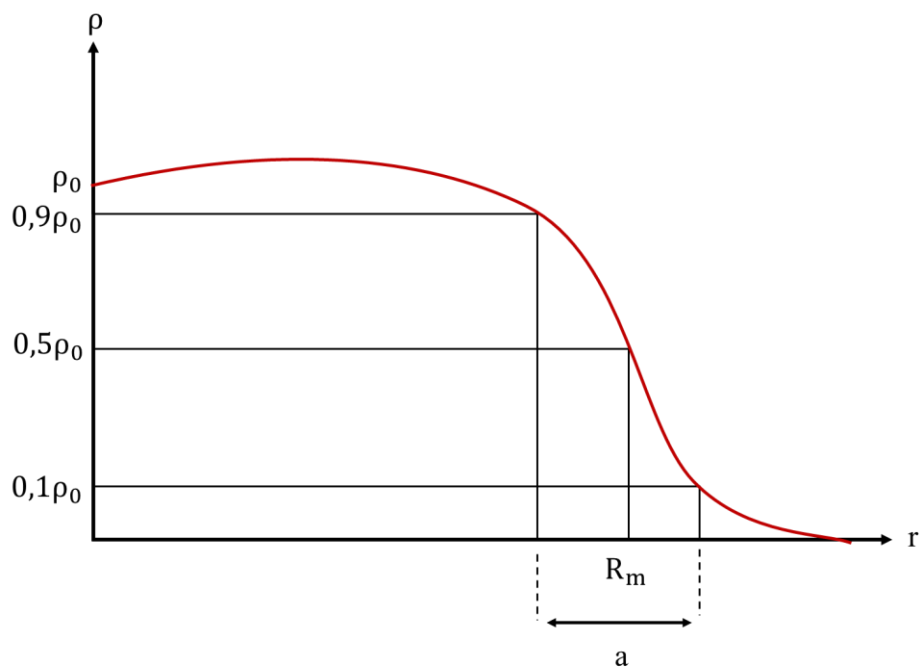


Figure 2 : Variation de la densité volumique de charge du noyau en fonction du rayon r .

On montre ainsi que la surface du noyau n'est pas polie. Il existe les effets de surface. R_m est la valeur qui correspond à $\frac{\rho_0}{2}$. a reflète les effets de surface et correspond à la distance séparant les valeurs de r pour 10% et 90% de ρ_0 . La densité de charge nucléaire est distribuée selon l'expression $\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-R_m}{0,228a}}}$

$$a = 2,4 \times 10^{-15} \text{ m}$$

0,228 justifie la représentation de la figure précédente.

R_m reflète la valeur du rayon moyen.

III.3. Masse des noyaux – énergie de liaison

III.3.1. Masse des noyaux

L'unité de masse atomique (U.M.A.) utilisée actuellement est l'unité de masse atomique unifiée u considérée dans le système de l'atome de $^{12}_6\text{C}$.

$1 u = 1,66043 \times 10^{-27} \text{ g}$, ce qui correspond à $931,48 \text{ MeV}/c^2$

NB : L'unité de masse atomique unifiée u est égale au $1/12^{\text{ème}}$ de la masse de l'atome l'isotope $^{12}_6\text{C}$. La masse s'exprime en kg, en u , ou en MeV/c^2 .

La masse de $^{35}_{17}\text{Cl}$ est $M = 35u$, la masse de $^{16}_8\text{O}$ est $M = 16u$.

	u	kg	MeV/c^2
u	1	$1,66043 \times 10^{-27}$	931,48
Proton	1,007276	$1,67262 \times 10^{-27}$	938,28
Neutron	1,008665	$1,67493 \times 10^{-27}$	939,57
électron	0,000548	$9,10939 \times 10^{-31}$	0,511

$$1u = \frac{12\text{g}}{12N} \text{ de carbone } 12 = \frac{1}{N} \text{ g}$$

Excès de masse : $\Delta(A, Z)$

L'excès de masse : $\Delta(A, Z)$ d'un atome est la différence entre la masse d'un atome et celle de $A(u)$ nucléons.

$$\Delta(A, Z)(u) = M_{\text{at}}(A, Z)(u) - A(u)$$

$$\Delta(A, Z)(\text{MeV}) = M_{\text{at}}(A, Z)c^2(\text{MeV}) - A \times 931,48(\text{MeV})$$

Stabilité du noyau

L'observation de la composition en proton et en neutron des nucléides naturels, montre que le nombre N de neutrons est sensiblement égal au nombre Z de protons.

La courbe $N = f(Z)$, celle qui est épaisse représente celle des nucléides stables ; elle se place au-dessus de celle qui est linéaire $N = Z$ (la 1^{ère} bissectrice) pour $Z = 20$.

- Pour les noyaux légers, $Z < 20$, la structure la plus stable est $N = Z$.
Exemple : ^4_2He $N = 2, Z = 2$; c'est le noyau le plus stable.
- Pour les noyaux lourds $N > Z$, la vallée de stabilité s'éloigne de la 1^{ère} bissectrice vers le haut à $Z > 20$, car la répulsion coulombienne entre protons affaiblit la cohésion dans le noyau.

L'effet de l'affaiblissement de la liaison dans le noyau est d'autant plus grand que le noyau possède plus de protons. Pour que les noyaux lourds soient stables, il faut qu'ils possèdent un léger excès de neutrons. Ces neutrons s'intercalent entre les protons et diminuent la répulsion électrique et stabilisent ainsi le noyau.

$\frac{N}{Z} \rightarrow 1,5$ en fonction de Z pour les noyaux lourds.

Solidité du noyau

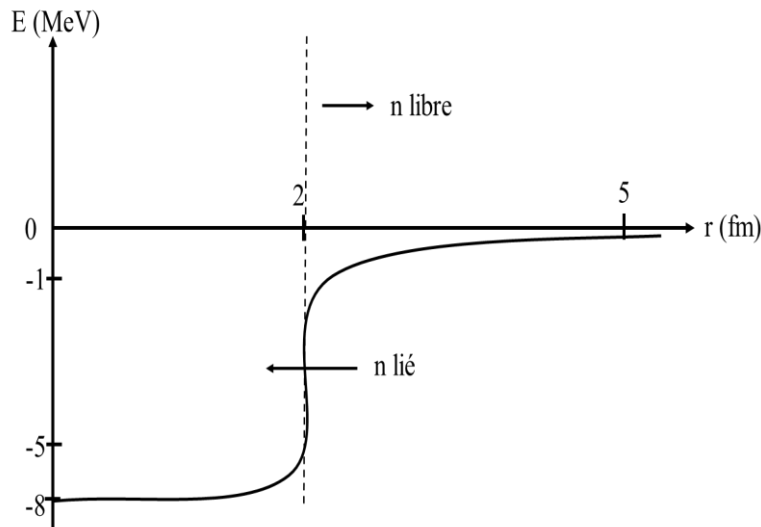
Le proton et le neutron sont composés de 3 quarks chacun. En eux, quarks sont maintenus par l'interaction forte. Cette interaction forte qui lie dans le nucléon a une portée qui est légèrement

supérieure au rayon du nucléon. Cet excédent d'interaction forte qui va en dehors du nucléon, est responsable de la cohésion des nucléons dans le noyau.

Cet excédent d'interaction forte s'appelle : *force nucléaire*.

A cette force nucléaire d'attraction correspond une énergie de liaison pour chaque nucléon.

▪ Neutron



Au voisinage du noyau, si le neutron se trouve à une distance supérieure de quelque fm, l'attraction nucléaire est nulle et le neutron est libre.

Si la distance est inférieure au rayon du noyau, alors la force nucléaire agit fortement et le neutron est lié, c'est-à-dire piégé dans un puits de potentiel qui représente l'énergie potentielle de liaison (négative car attractive).

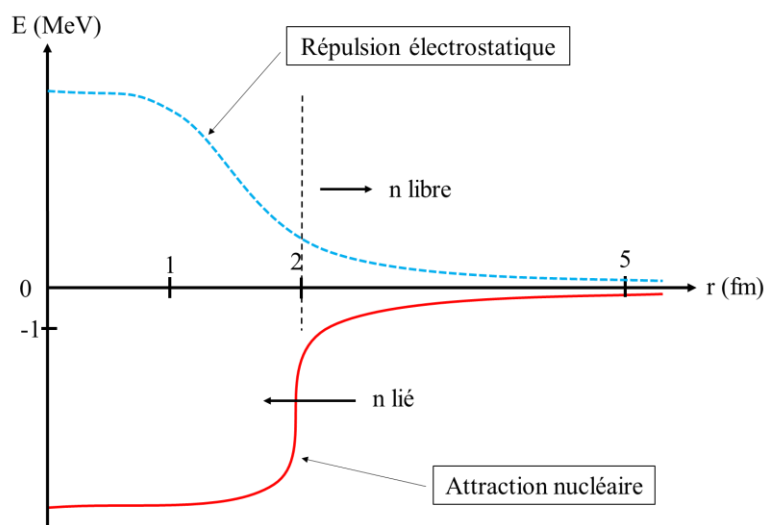
Figure 3 : Puits de potentiel nucléaire du neutron

La profondeur est en moyenne égale à 8 MeV. C'est cette énergie qu'il faut fournir au noyau pour libérer le neutron. Le neutron lié a une masse inférieure à celle du neutron libre.

Le neutron libre est instable et se désintègre par : $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$.

Ceci est possible, car la masse de n est supérieure de $0.8 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$ de la somme des masses de p , e^- et $\bar{\nu}$. Le neutron lié a une masse inférieure, donc la réaction est impossible : le neutron lié ne se désintègre pas.

▪ Proton



Au voisinage du noyau, un proton est repoussé par les autres protons. S'il a une énergie cinétique suffisante pour vaincre cette répulsion coulombienne, la force d'attraction nucléaire agit et le proton est lié.

Figure 4 : Puits de potentiel du proton

III.3.2. Energie de liaison E_l

III.3.2.1. Modèle de la goutte liquide

La masse M du noyau est inférieure à la somme des masses de ses constituants. Quand le noyau est formé à partir des nucléons libres, il s'est produit un fort dégagement d'énergie. La différence, E_l entre la somme des masses des constituants et la masse du noyau est appelée énergie de liaison et est donnée par : $E_l = (Z \times m_p + N \times m_n)c^2$

Dans le modèle de la goutte liquide, le noyau est considéré comme une goutte liquide, comme une sphère et la forme empirique de l'énergie de liaison donnée par Bethe et Weizsäcker est :

$$E_l(A, Z) = a_{\text{vol}} \times A - a_{\text{surf}} \times A^{\frac{2}{3}} - a_{\text{sym}} \times \frac{(Z - N)^2}{A} - a_{\text{coul}} \times \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} \pm \delta(A, Z)$$

Le modèle de la goutte liquide suggère cinq (5) conditions pour le calcul de l'énergie de liaison $E_l(A, Z)$:

- Le liquide nucléaire, quel que soit A , a une même masse volumique ;
- Le noyau est sphérique et incompressible ;
- Sa charge électrique est constante ;
- La force nucléaire est indépendante de la charge ;
- Cette force nucléaire est d'une très courte durée.

Calcul des différents coefficients :

- a) Energie de volume : $E_{\text{vol}} = a_{\text{vol}} \times A$, avec $a_{\text{vol}} \times A > 0$
C'est le terme principal, il reflète la propriété de saturation de l'énergie de liaison ; $a_{\text{vol}} \times A$ se détermine expérimentalement.
- b) Energie de surface : $E_{\text{surf}} = -a_{\text{surf}} \times A^{\frac{2}{3}}$, avec $a_{\text{surf}} > 0$
 $a_{\text{surf}} \times A^{\frac{2}{3}}$ se détermine expérimentalement. La tension superficielle dans la goutte liquide, qui réduit l'énergie de liaison et favorise la forme sphérique, résulte du fait que les nucléons en surface n'ont de voisins que d'un seul côté et sont moins fortement liés que ceux du centre. Il y a alors introduction d'un terme répulsif proportionnel à la surface qui est l'énergie de surface.
- c) Energie de symétrie : $E_{\text{sym}} = -a_{\text{sym}} \times \frac{(Z-N)^2}{A}$
Cette énergie de symétrie traduit la tendance des noyaux à avoir $N = Z$ (répulsif).
- d) Energie coulombienne : $E_{\text{coul}} = -a_{\text{coul}} \times \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$
Elle est due à la répulsion entre les protons (terme répulsif).
C'est le seul terme calculable dans ce modèle, tous les autres termes sont déterminés par l'expérience.

Calcul de a_{coul}

La densité volumique de charge est : $\rho = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R_0^3}$

dW est le travail nécessaire pour créer la couche d'électricité sphérique de rayon r et d'épaisseur dr . La charge est $q = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \rightarrow dq = 4\pi r^2 \rho dr$

$$dW = \frac{q dq}{4\pi \epsilon_0 r} = \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho\right) (4\pi r^2 \rho dr) \left(\frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}\right) = \frac{4\pi}{3\epsilon_0} \rho^2 r^4 dr$$

$$E_{\text{coul}} = \int dW = \int_0^{R_0} \frac{4\pi}{3\epsilon_0} \rho^2 r^4 dr = \frac{4\pi}{15\epsilon_0} \rho^2 R_0^5, \text{ avec } R_0 = r_0 A^{1/3}$$

$$E_{\text{coul}} = \frac{4\pi}{15\epsilon_0} \left(\frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R_0^3}\right)^2 R_0^5 = \frac{3}{20\pi\epsilon_0} \frac{Z^2 e^2}{R_0} = \frac{3}{20\pi\epsilon_0} \frac{Z^2 e^2}{r_0 A^{1/3}}$$

$$E_{\text{coul}} = \frac{3e^2}{20\pi\epsilon_0 r_0} \frac{Z^2}{A^{1/3}} = -a_{\text{coul}} \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

$$a_{\text{coul}} = \frac{3e^2}{20\pi\epsilon_0 r_0}, a_{\text{coul}} = -0.62 \text{ MeV pour } r_0 = 1.4 \text{ fm}$$

e) Energie d'appariement

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} a_p A^{-1/2} & \text{noyau pair - pair} \\ 0 & \text{noyau impair} \\ -a_p A^{-1/2} & \text{noyau impair - impair} \end{cases}, \text{ avec } a_p = 12 \text{ MeV}$$

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} a_p A^{-3/4} & \text{noyau pair - pair} \\ 0 & \text{noyau impair} \\ -a_p A^{-3/4} & \text{noyau impair - impair} \end{cases}, \text{ avec } a_p = 34 \text{ MeV}$$

Cette énergie traduit la caractéristique des noyaux pair-pair d'être plus liés que les impairs.

III.3.2.2. Energie de liaison par nucléon : E_l/A

On considère deux figures : l'une pour E_l/A négatif et l'autre pour E_l/A positif en fonction de A .

Pour E_l/A en fonction de A : E_l doit être proportionnelle à A et E_l/A doit être constant pour tous les noyaux. Il y a certains noyaux plus solides que d'autres. Un noyau est plus stable que E_l/A est plus grande et le maximum est de l'ordre de 8,6 MeV. Le maximum est très plat vers $A = 60$, ce qui correspond aux nucléides plus solides.

- La remontée ou la retombée (seconde courbe) rapide du diagramme pour les nucléides légers, qui sont donc moins solides, est due à un « effet de bord » : les nucléides situés à la surface du noyau sont moins liés que ceux situés au centre, car ils ne subissent l'attraction nucléaire que du côté intérieur.

Certains points sont nettement situés au-dessus de la moyenne, ils représentent des nucléides exceptionnellement solides : ce sont ceux qui correspondent à des structures multiples de deux protons plus deux neutrons : ${}^4_2\text{He}$, ${}^8_4\text{Be}$, ${}^{12}_6\text{C}$ et ${}^{16}_8\text{O}$, ...

- La retombée ou la remontée (seconde courbe) lente pour les noyaux lourds est due à la répulsion électrique entre les protons.

Exercice du chapitre 1

Exercice N° 1 :

Avant 1960, le nombre d'atomes dans une mole de $^{16}_8\text{O}$, appelé le nombre d'Avogadro \mathcal{N} étant de $6,0243 \cdot 10^{23}$ atomes de $^{16}_8\text{O}$ par mole. L'unité utilisée était l'unité de masse atomique (U.M.A.). Par définition $1 \text{ U.M.A.} = \left(\frac{1}{16}\right)^{\text{ème}}$ de la masse atomique de $^{16}_8\text{O}$. Calculer la valeur de l'U.M.A. en kg et donner son équivalent énergétique.

A partir de 1960, on a adopté une nouvelle unité appelée unité de masse atomique unifiée u , telle que la masse d'un atome de $^{12}_6\text{C}$ soit égale à $12u$. Jusqu'à présent c'est cette nouvelle unité qu'on utilise.

- Exprimer U.M.A. en fonction de u . En déduire le nombre d'Avogadro correspondant.
- Exprimer u en kg et donner son équivalent énergétique.

La masse de $^{16}_8\text{O}$ est de $15,994 u$; la vitesse de la lumière est $c = 2,997925 \text{ ms}^{-1}$; la charge élémentaire est : $e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Exercice N° 2 :

On introduit l'excès de masse noté Δ qui est égal à la masse atomique diminuée du nombre de masse.

- Exprimer la masse du proton et celle du neutron en unité u et en MeV.
 $M_p = 1,673 \cdot 10^{-24} \text{ g}$; $M_n = 1,675 \cdot 10^{-24} \text{ g}$
- La masse de l'azote $^{15}_7\text{N}$ étant égale à $15,000108 u$, calculer son excès de masse en u et en MeV.
- Calculer l'excès de masse en u et en MeV de $^{16}_8\text{O}$ si sa masse est égale $15,9949 u$.
- La masse du noyau est toujours inférieure à la somme des masses de ses constituants. Confirmer cette hypothèse par le deutéron dont l'excès de masse est égal à $13,1354 \text{ MeV}$
 $\mathcal{N} = 6,02252 \cdot 10^{23}$.

Exercice N° 3 :

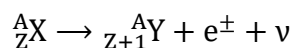
Le rayon du noyau de l'élément de nombre de masse $A = 100$ est donné par l'expression

$$R = r_0 A^{1/3}, \text{ avec } r_0 = 1,2 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = 1,2 \text{ fm}$$

Déterminer la densité du noyau.

Exercice N° 4 :

Soit les désintégrations β^+ ou β^- suivantes :



On suppose ^A_ZX au repos dans le laboratoire.

- Ecrire l'expression de l'énergie susceptible d'être libérée dans les réactions précédentes ; condition pour qu'il y ait effectivement d'énergie libérée.
- Soit la transition β^+ du $^{12}_7\text{N}$ de son état fondamental vers les états excités de $^{12}_6\text{C}$.

On a les excès de masse $\Delta(^{12}_7\text{N}) = 17,34 \text{ MeV}$ et $\Delta(^{12}_6\text{C}) = 0$.

- Jusqu'à quelle énergie d'excitation peut se trouver le $^{12}_6\text{C}$ après émission ?
- Les états excités du $^{12}_6\text{C}$ ont les énergies suivantes en MeV ; $4,44$; $7,65$; $10,30$; $12,71$; $15,11$.

Calculer pour chaque niveau, l'énergie cinétique maximum (T_{max}) de l' e^+ émis.

Exercice N° 5 : Calcul des masses

La formule semi-empirique des masses des atomes s'écrit :

$$M(A, Z) = Zm_p + Nm_n + Zm_0 - a_v A + a_s A^{\frac{2}{3}} + a_c \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + a_a \frac{(N - Z)^2}{A} \pm \delta(A)$$

Où

$a_v = 16 \text{ MeV} ;$	$a_s = 18 \text{ MeV}$
$a_c = 0,72 \text{ MeV}$	$a_a = 23,5 \text{ MeV}$
$m_n - m_p = 1,29 \text{ MeV}$	$m_0 = 0,511 \text{ MeV}$
$\delta(A) = \frac{11}{A^{1/2}}$	

- 1) Calculer le minimum mathématique Z_0 des paraboles de masse $A = 64$.
- 2) Y-a-t-il un ou deux éléments dans la famille $A = 64$? Lequel ou lesquels ? Les différents isobares $A = 64$ sont : ${}^{64}_{31}\text{Ga}$; ${}^{64}_{30}\text{Zn}$; ${}^{64}_{29}\text{Cu}$; ${}^{64}_{28}\text{Ni}$; ${}^{64}_{27}\text{Co}$.
- 3) Comment se désintègrent ${}^{64}_{29}\text{Cu}$?
- 4) Calculer la différence de masse (en MeV) entre ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ et ${}^{64}_{30}\text{Zn}$, puis entre ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ et ${}^{64}_{28}\text{Ni}$.