

A.IIc - NOYAU ATOMIQUE

1. Rappel sur les unités de mesure utilisées

- Les nombres de constituants, souvent très grands, peuvent être comptés en “moles”. La mole est définie par rapport à la masse car celle-ci est mesurée plus précisément : une mole d'objets contient $\mathcal{N}_A \approx 6,022045 \cdot 10^{23}$ objets, (égal par définition au nombre d'atomes $^{12}_6\text{C}$ dans 12 g de $^{12}_6\text{C}$).

◊ remarque : à l'origine, la définition d'après la masse était inévitable car l'existence des atomes n'était pas encore démontrée ; à l'heure actuelle on ne sait pas encore compter d'aussi grands nombres, mais des projets sont à l'étude.

- Inversement, la masse d'un constituant, souvent très petite, peut être comptée en “unités de masse atomique” (symbole u, ou u.m.a. en cas d'ambiguïté). L'unité de masse atomique est définie de telle sorte que la masse d'un atome $^{12}_6\text{C}$ soit : $m(^{12}_6\text{C}) = 12 \text{ u}$, c'est-à-dire : $1 \text{ u} = \frac{1 \text{ g}}{\mathcal{N}_A} \approx 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

- L'unité de masse atomique est voisine mais un peu inférieure à la masse d'un nucléon ; par effet relativiste : la masse de l'ensemble est plus faible que la somme des masses des constituants à cause de l'énergie de liaison E_ℓ :

$$m_p = 1,0072765 \text{ u} ; m_n = 1,0086650 \text{ u} ; m_e = 0,0005486 \text{ u} ;$$

$$m(^{12}_6\text{C}) = 6 m_p + 6 m_n + 6 m_e + \Delta m, \text{ avec } \Delta m = -0,09894 \text{ u} ;$$

$$-E_\ell = \Delta m c^2 = \Delta E_m = \Delta E_c + \Delta E_p \approx \Delta E_p < 0.$$

- Les énergies, souvent petites, peuvent être comptées en “électron-volts” (ou les multiples) : $1 \text{ eV} \approx 1,601892 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Cela conduit, d'après des relations relativistes, à définir une nouvelle unité de masse: eV/c^2 , telle que l'énergie mc^2 correspondante soit 1 eV, c'est-à-dire : $1 \text{ GeV}/c^2 = 1,7823452 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0735355 \text{ u} ; 1 \text{ u} = 931,5016 \text{ MeV}/c^2$.

◊ remarque : on peut aussi utiliser les MeV/c pour unité d'impulsion.

- Ainsi pour $^{12}_6\text{C}$:

$$m_p = 938,2796 \text{ MeV/c}^2 ; m_n = 939,5731 \text{ MeV/c}^2 ; \\ m_e = 0,511003 \text{ MeV/c}^2 ; \Delta m = -92,16 \text{ MeV/c}^2.$$

◊ remarque : pour les calculs des énergies de liaison, les tables indiquent généralement les masses des atomes (et non pas celles des noyaux).

◊ remarque : ceci correspond à $\frac{E_\ell}{A} \approx 7,68 \text{ MeV}$ pour chaque nucléon, à comparer à $E_\ell \approx 13,6 \text{ eV}$ pour l'électron dans l'atome d'hydrogène ; les forces nucléaires sont beaucoup plus fortes que les forces électromagnétiques (mais elles n'agissent qu'à très courte portée).

2. Le noyau atomique

2.1. Rappel sur les notations

- On appelle “élément chimique” une sorte d’atomes correspondant à un nombre fixé Z de protons, indépendamment des électrons (éventuellement transférés, ou partagés dans des liaisons covalentes). Ainsi Cl désigne l’élément chlore aussi bien dans Cl , Cl^- , HCl , etc.

Le nombre Z de protons est généralement appelé “numéro atomique” ou “nombre de charge”.

- On appelle “nucléide” une sorte d’atomes correspondant à un nombre fixé Z de protons et à une nombre fixé A de nucléons (indépendamment des électrons transférés ou partagés).

Chaque élément chimique correspond donc à plusieurs “isotopes”, en fonction du nombre $N = A - Z$ de neutrons. Ainsi $^{35}_{17}\text{Cl}$ et $^{37}_{17}\text{Cl}$ correspondent à deux isotopes de l’élément chlore (aussi bien dans Cl , Cl^- , HCl ...).

Le nombre A de nucléons est généralement appelé “nombre de masse”.

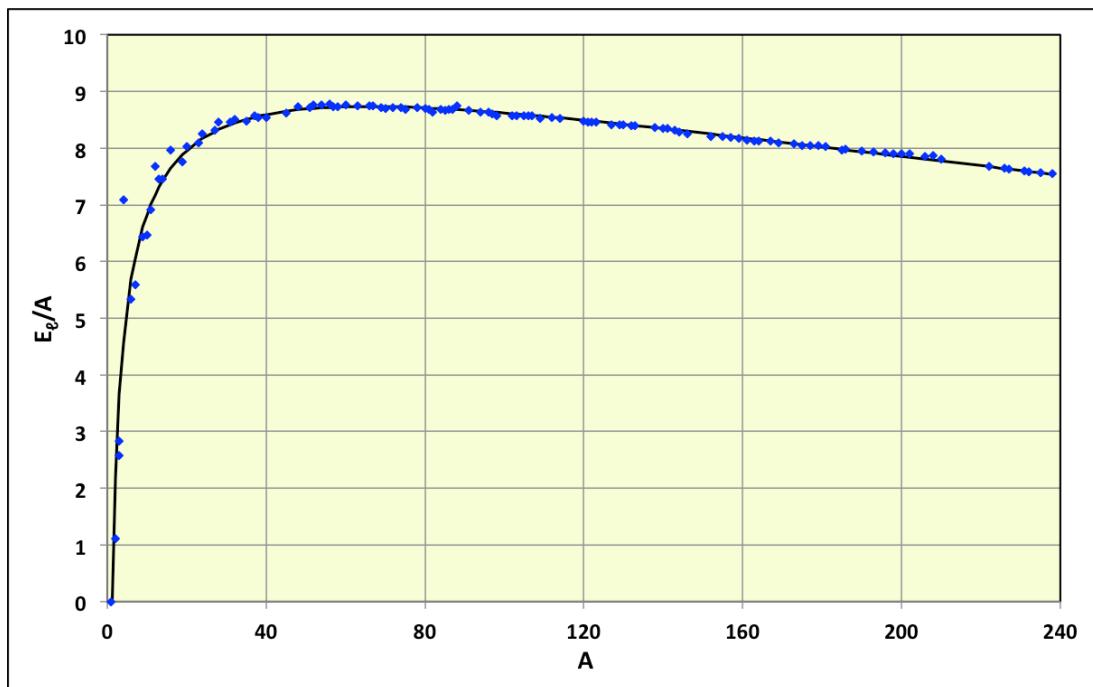
2.2. Modèle de la goutte liquide

- Contrairement à l'atome, dont la majeure partie du volume est “vide”, le noyau peut être représenté en première approximation comme une “goutte liquide” de nucléons, tassés les uns contre les autres sous l'effet de la force attractive nucléaire (qui entre autres compense la répulsion électrique entre protons).

Ce modèle impose une proportionnalité du volume et du nombre A de nucléons ; l'expérience confirme que le rayon du noyau varie approximativement comme $R \approx R_0 A^{1/3}$ avec $R_0 \approx 1,2 \text{ fm}$.

◊ remarque : les masses volumiques sont considérables (à comparer à $\mu \approx 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ pour l'eau) : $\mu = \frac{m}{V} \approx \frac{A m_n}{\frac{4}{3} \pi R^3} \approx \frac{m_n}{\frac{4}{3} \pi R_0^3} \approx 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg.m}^{-3}$.

- Le modèle de la goutte liquide est qualitativement compatible avec l'allure générale des variation de l'énergie de liaison moyenne par nucléon :



Pour A faible, l'interaction nucléaire par nucléon est limitée par le faible nombre de “voisins” ; pour A grand, l'interaction nucléaire moyenne est limitée par les distances trop importantes entre nucléons.

L'énergie de liaison moyenne par nucléon est ainsi maximum pour les atomes dont les structures sont voisines de celle de $^{56}_{26}\text{Fe}$ (au dessous se trouve le domaine de la fusion nucléaire, au dessus le domaine de la fission).

- Ceci peut être précisé par l'approximation de Weizsäcker ; on considère ainsi l'énergie de liaison totale E_l comme la somme :

- ◊ d'un terme "volumique" proportionnel au nombre de nucléons : $a_v A$;
- ◊ d'une réduction "surfacique" (voisins moins nombreux) : $-a_s A^{2/3}$;
- ◊ d'une répulsion "coulombienne" (selon leur distance) : $-a_c \frac{Z.(Z-1)}{A^{1/3}}$;
- ◊ d'un terme quantique "d'asymétrie" neutrons-protons : $-a_a \frac{(N-Z)^2}{A}$;
- ◊ d'un terme quantique "de parité" de Z et N : $\pm a_p A^{-3/4} \cdot [(-1)^Z + (-1)^N]$.

◊ remarque : la modélisation "simple" de Weizsäcker (sans le second terme quantique) est indiquée sur le graphique précédent.

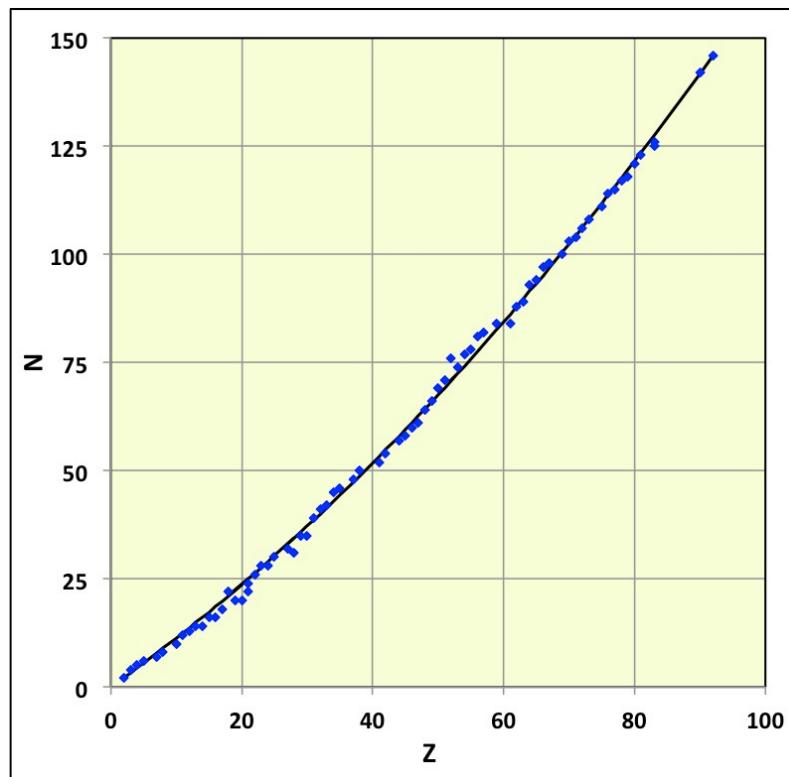
2.3. Effets quantiques

- Le modèle de la goutte liquide est toutefois incomplet :

- ◊ l'étude détaillée du début de la courbe précédente montre des irrégularités qui découlent d'effets quantiques (surtout pour ^4_2He) ;
- ◊ sans le terme d'asymétrie, la courbe de Weizsäcker a une allure correcte mais donne une description assez médiocre ;
- ◊ le nombre de neutrons ($N = A - Z$) pour les nucléides stables est approximativement égal ou un peu supérieur au nombre Z de protons ; ceci ne peut être expliqué simplement que par un modèle quantique.

De même que pour les électrons dans l'atome, il existe des niveaux d'énergie quantifiés pour les nucléons dans le noyau :

- ◊ chaque niveau peut contenir deux protons et deux neutrons ; le remplissage progressif tend à imposer $N \approx Z$;
- ◊ pour les grandes valeurs de Z , la répulsion entre protons impose une compensation par un léger excès de neutrons, afin d'augmenter les forces de liaison nucléaires.



- Des modélisations quantiques plus approfondies prédisent des niveaux d'énergie (analogues à ceux pour les électrons de l'atome) pouvant contenir respectivement : 2, 6, 12, 8, 22, 32, 44, 58 nucléons (protons et/ou neutrons). Elles permettent d'expliquer l'observation de nucléides plus stables pour les nombres Z ou N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184.

◊ remarque : à part pour ${}^4_2\text{He}$, la courbe précédente représentant $\frac{E_\ell}{A}$ n'est pas assez précise pour visualiser de tels effets.

exercices n° I et II.