

## REMARQUES SUR LA CONSTITUTION DES NOYAUX ATOMIQUES. I.

Par K. GUGGENHEIMER.

**Sommaire.** — Limites de stabilité des diverses catégories d'atomes. Existence probable à l'intérieur des noyaux de couches indépendantes de neutrons et de protons.

Chaque catégorie d'atomes est caractérisée par sa charge nucléaire  $Z$  et sa masse  $M$ . Selon toute probabilité la synthèse progressive des atomes de plus en plus lourds se fait essentiellement par deux processus distincts. Le premier est la liaison successive des neutrons aux noyaux, le second, quand il y a lieu, la transformation d'un neutron en proton, soit par émission d'un électron, soit par addition d'un positron <sup>(1)</sup>. Par conséquent, on peut encore caractériser un atome par le nombre  $P$  des protons et le nombre  $N$  des neutrons contenus dans son noyau <sup>(2)</sup>.

Certains auteurs pensent <sup>(3)</sup> que chaque groupe de deux protons s'unit toujours par une liaison particulièrement forte avec un groupe de deux neutrons, de manière à former une particule  $\alpha$ . Ces particules, qui jouent un rôle essentiel dans les transformations radioactives, apparaîtraient ainsi comme des unités constituantes des éléments stables non radioactifs. Cependant, d'après une hypothèse due à Bartlett <sup>(4)</sup> et développée par Elsasser <sup>(5)</sup>, il serait possible que les interactions entre neutrons et protons soient de telle nature qu'au lieu des particules  $\alpha$ , ce soient les protons qu'il faille considérer comme constituants primordiaux des noyaux et que leur liaison se fasse par couches successives. Il serait alors possible, ou même nécessaire, d'attribuer à chaque proton des nombres quantiques déterminés.

Dans ces conditions il semble particulièrement intéressant de classer tous les noyaux connus en fonction de leurs nombres  $N$  de neutrons et de leurs nombres  $P$  de protons. On obtient ainsi le schéma de la figure 1, où les nombres  $N$  et  $P$  sont portés respectivement en abscisses et en ordonnées. Les isotopes se trouvent ainsi sur une même horizontale,  $P = C^{te}$ , les atomes contenant un même nombre de neutrons sur une même verticale,  $N = C^{te}$ . Ce dernier mode de groupement jouera dans ce travail et dans ceux qui suivront un rôle important. C'est pourquoi je me suis permis de proposer

un nom nouveau : comme ces atomes de même nombre  $N$  sont en quelque sorte isotopes par rapport au nombre de neutrons, nous les appellerons, pour abrégier le langage, des isotones. Nous pourrions alors désigner chaque espèce de noyau par un symbole à deux indices  $(P, N)$ . La figure présente encore quelques lacunes, car les expériences ont porté presque uniquement sur les éléments qui ont pu être analysés au spectrographe de masses.

Dans la figure (1) se trouvent quelques droites auxiliaires : Elles relient les noyaux pour lesquels un nombre maximum de protons est atteint pour la première fois par les séries successives d'isotones, et ceux pour lesquels le même phénomène se produit pour les neutrons et les séries successives d'isotopes. Ces droites limitent donc le domaine à l'intérieur duquel existent des noyaux stables en quantités mesurables. C'est pourquoi nous appellerons ces lignes les *limites extérieures de stabilité*.

Si l'on compare les limites de stabilité respectives des noyaux de nombre protonique  $P$  pairs et impairs, on trouve que le domaine de stabilité est beaucoup plus étroit pour ces derniers, la distance entre leurs deux limites ne dépassent pas  $\Delta P = 2$  <sup>(1)</sup> ou  $\Delta N = 2$ .

On constate en outre, que ces limites de stabilité ne s'inclinent *jamais* vers l'arrière, ce qui signifie qu'à condition de comparer toujours entre eux des noyaux de même parité, les nombres maximum et minimum de neutrons des noyaux ne diminuent jamais quand  $P$  augmente; réciproquement, les nombres minimum et maximum de protons ne diminuent jamais quand  $N$  augmente. (Dans le schéma de Landé, où les noyaux sont ordonnés suivant les nombres possibles de particules  $\alpha$  et de neutrons en excédent, ces règles ne sont nullement valables).

Signalons encore qu'il y a des endroits, surtout près de (29,34) (47,60) (62,88), où les limites de stabilité, d'abord très voisines, divergent ensuite.

La figure 1 montre immédiatement les régularités simples qui valent pour les noyaux légers. On reconnaît les successions régulières entre (3,3) et (8,8) entre (8,8) et (16,16). Dans ces deux régions, les limites de stabilité sont parallèles entre elles et ont la direction de la diagonale ( $N - P = \text{const.}$ ) Entre (17,17) et

<sup>(1)</sup> La conservation du moment d'impulsion exige l'existence du neutrino et sa participation à cette réaction (W. Pauli)

<sup>(2)</sup> W. HEISENBERG, *Z. Physik*, 1932, 77, p. 4; 1932, 78, p. 456; 1933, 80, p. 587; E. MAJORANA, *ibid.*, 1933, 82, p. 437.

<sup>(3)</sup> L. LANDÉ, *Phys. Rev.* 1933, 43, p. 620 et 624; GAMOW, *Constitution of Atomic Nuclei and Radioactivity*, Oxford, 1931.

<sup>(4)</sup> J.-H. BARTLETT, *Nature*, 1932, 130, p. 430; *Phys. Rev.* 1931, 41, p. 370; 1932, 42, p. 145.

<sup>(5)</sup> W. ELSASSER, *J. Phys.*, 1933, 4, p. 549.

<sup>(1)</sup> W.-D. HARRIS, *Phys. Rev.*, 1931, 38, p. 1270.

(62,92) l'apparence est beaucoup plus complexe, avec des séries d'isotopes et d'isotones parallèles entre elles, et beaucoup d'isobares (ceux-ci sont situés sur une droite parallèle à la diagonale  $N + P = C$ ). L'aspect devient ensuite plus simple, avec peu d'isobares.

Cependant, on remarquera aussi dans le domaine compris entre  $P = 17$  et  $P = 62$  plusieurs régions où les limites de stabilité sont rectilignes, par exemple :

(22,24)-(24,26)-(26,28)-(28,30) parallèle à (22,28)-(24,30).

(30,36)-(32,38)-(34,40)-(36,42) et (30,40)-(32,44)-(34,48);

ou encore (42,50)-(44,52) parallèle à (40,56)-(42,58)-(44,60);

(48,70)-(50,74)-(52,78)-(54,82) est de nouveau moins incliné et parallèle à (50,62)-(54,70).

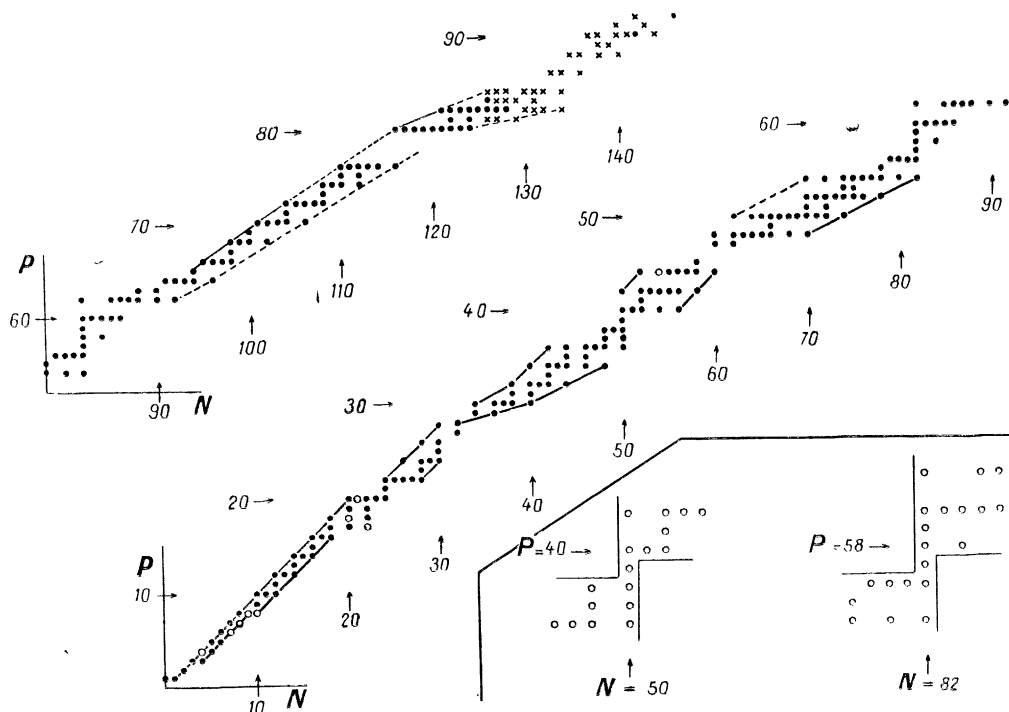


Fig 1.

Abscisses : nombre de neutrons }  
Ordonnées : nombre de protons } constituant le noyau.

- Noyaux obtenus au spectrographe de masses.
- Noyaux observés spectroscopiquement et extrêmement rares.
- × Noyaux naturellement radioactifs.

On n'a pas tenu compte ici des noyaux à radioactivité artificielle.

L'allure *rectiligne* des limites de stabilité nous montre, quand elle se manifeste, que ces limites sont déterminées non par le rapport  $N/P$  des nombres de neutrons et de protons, mais par le rapport  $\Delta N/\Delta P$  des nombres de neutrons et de protons *additionnels* qui peuvent s'intégrer aux noyaux.

Dans les exemples cités le rapport  $\Delta N/\Delta P$  varie entre 1 : 1 et 2 : 1, mais il arrive des cas où il prend des valeurs sensiblement plus grandes ou plus petites. Ces derniers cas présentent un intérêt particulier et nous y reviendrons.

L'inclinaison des limites de stabilité fournit une mesure qualitative et peut-être grossière, du rapport des énergies de liaison d'un nouveau proton et d'un nouveau neutron. Quand l'inclinaison est faible, la liaison des neutrons est favorisée, quand elle est plus forte,

le rapport des énergies varie en faveur de la liaison des protons. Etant donnée l'importance du rapport  $\Delta N/\Delta P$  on peut définir de façon plus étroite des *limites intérieures* de stabilité :

La limite supérieure exprime le nombre minimum de neutrons qui doivent être liés avant qu'un nouveau proton puisse s'attacher au noyau; la limite inférieure est le nombre minimum de protons qui doivent être liés avant que de nouveaux neutrons puissent s'ajouter à l'édifice nucléaire.

Une seconde mesure grossière du rapport des énergies de liaison s'obtient en comparant les différences entre les nombres maximum et minimum de neutrons pouvant être liés pour un  $P$  donné. Nous appellerons cette grandeur la « largeur isotopique ». De même, il existe une « largeur isotonique » différence entre les

nombre maximum et minimum de protons compatibles avec un certain nombre  $N$  de neutrons.

Sur les figures de 2a et 3a sont portées en fonction des nombre  $N$  et  $P$  les largeurs isotoniques et isotopi-

ques. Les figures 2b et 3b; qui représentent l'une, l'inclinaison  $\Delta N_{\max} / \Delta P$  des limites intérieures en fonction de  $P$ , l'autre  $\Delta P_{\max} / \Delta N$  en fonction de  $N$  montrent avec les premières un parallélisme remarquable.

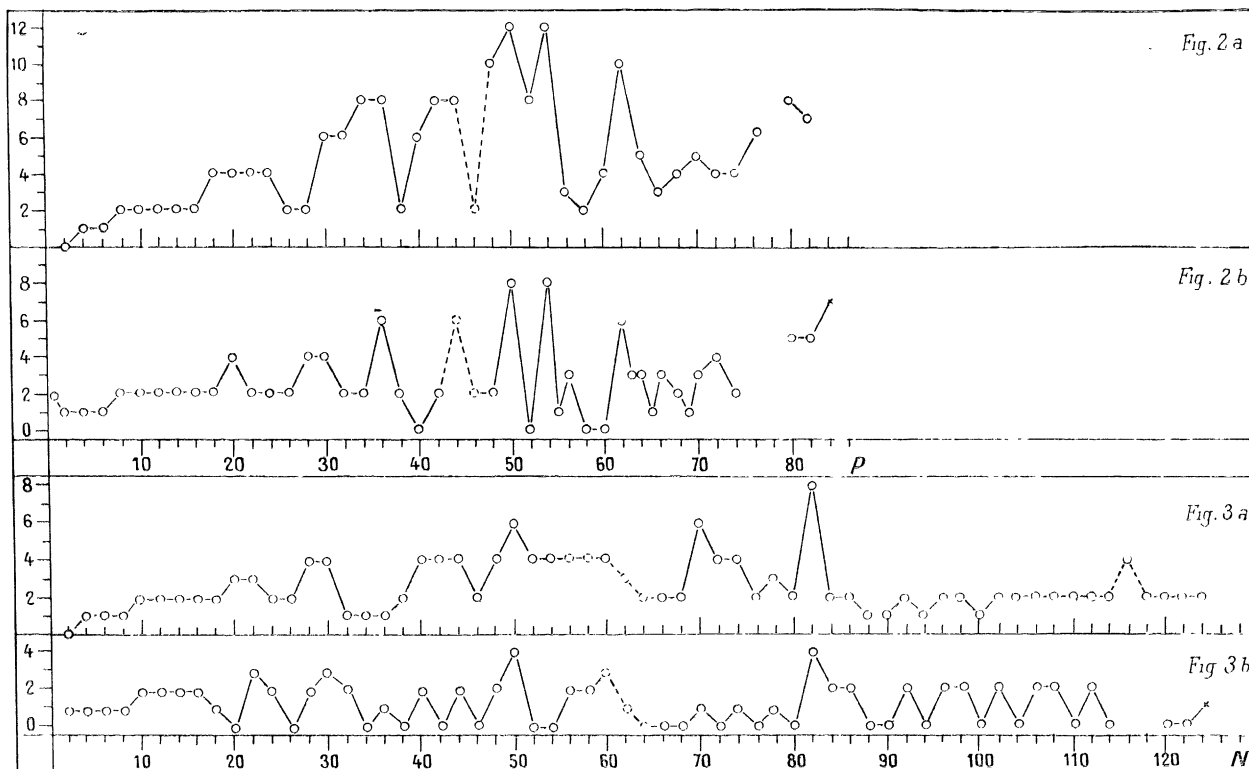


Fig. 2a. — Largeur isotopique  $N_{\max} - N_{\min}$ .

Fig. 2b. — Limite inférieure  $\frac{\Delta N_{\max}}{\Delta P}$  en fonction de  $P$ .

Fig. 3a. — Largeur isotonique  $P_{\max} - P_{\min}$ .

Fig. 3b. — Limite supérieure  $\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta N}$  en fonction de  $N$ .

Un trait particulièrement caractéristique des limites de stabilités et de leurs distances c'est qu'elles ne sont pas généralement constantes et qu'elles ne varient même pas de manière monotone, comme il faudrait s'y attendre si les lois d'interaction étaient elles-mêmes représentées uniquement par des fonctions monotones. L'expérience montre un aspect différent : des sections à allure monotone, interrompues de temps en temps par des chutes brusques. Les discontinuités des énergies de liaison mettent généralement en évidence des effets de quanta. En particulier, l'allure des courbes suggère l'idée que les grands sauts des énergies de liaison correspondent à l'achèvement d'une couche close et à la naissance d'une nouvelle enveloppe. La courbe des largeurs isotopiques (fig. 2a) présente par exemple plusieurs maxima très nets, encore accentués par une chute brusque qui les suit immédiatement. Tandis que la liaison d'un nouveau neutron est en général de plus en plus favorisée par rapport à celle des protons, au fur et à

mesure que la charge des noyaux augmente, il se produit des renversement subits en faveur des protons : ainsi pour  $P = 20, 36, 54, 84$ .

Il est remarquable que ces renversements sont situés de préférence au voisinage des gaz nobles. Il semble par conséquent qu'il existe certaines analogies entre les enveloppes successives de protons et les couches électroniques extérieures au noyau. Mais l'interprétation des phénomènes se complique du fait que les variations brusques du rapport des énergies de liaison peuvent signifier aussi bien un changement de l'énergie de liaison des neutrons que des protons ou des deux simultanément. Seules une analyse et une discussion précises permettront de distinguer l'influence des neutrons de celle des protons dans chaque cas particulier.

Les courbes des largeurs isotoniques et des limites de stabilité en fonction du nombre  $N$  de neutrons présentent également des variations et des discontinuités, mais moins prononcées. On peut distinguer aussi plu-

sieurs groupes nets. Les discontinuités les plus accentuées se trouvent aux points  $N = 50$  et  $N = 82$ . La largeur isotopique y atteint ses valeurs maxima (6 et 8). (On observe aussi une largeur égale à 6 pour  $N = 70$ , mais en ce point les isotones extrêmes sont d'une rareté exceptionnelle). Aux nombres 50 et 82 correspondent aussi des maxima nets dans la courbe des largeurs isotopiques. Le sens de cette coïncidence sera encore à discuter.

Les isotones  $N = 50$  et  $N = 82$  sont en outre les seuls où il existe deux noyaux distincts de charge impaire. Dans les deux cas, les limites de stabilité supérieures et inférieures sont verticales au même endroit, (cf. fig. 1a et 1b), encadrant une série d'isotones : entre (36,50) et (40,50) d'une part, entre (38,50) et (42,50) de l'autre et de même entre (54,82) et (58,82) d'une part, entre (56,82) et (62,82) de l'autre. Elles coïncident donc entre (38,50) et (40,50) et entre (56,82) et (58,82).

Il faut insister sur ce fait, que la limite inférieure de stabilité peut se diriger parallèlement à une série d'isotones. Car il montre nettement que les neutrons et les protons s'attachent aux noyaux — du moins à ces endroits — comme constituants primordiaux et indépendants les uns des autres. Par exemple, que le noyau contienne 36 protons, ou 38, le nombre maximum de neutrons attachés est le même. Si les deux protons ajoutés les derniers se liaient avec deux neutrons de manière particulièrement forte pour former une particule  $\alpha$ , ceci signifierait que 36 protons peuvent attacher 50 neutrons, soit 14 en surplus, tandis que pour 38 protons il n'en reste que 12 en surplus au maximum. Les circonstances sont analogues pour le 82<sup>e</sup> neutron. Si les noyaux consistaient essentiellement en particules  $\alpha$  et neutrons, on devrait prévoir que la limite de stabilité ne prend *jamais* une inclinaison plus forte que celle de la diagonale, car alors l'excédent maximum de neutrons libres diminuerait quand le nombre de particules  $\alpha$  augmente.

Le fait que les limites de stabilité sont verticales sur une longueur notable montre que, dans cette région, les nombres maximum et minimum de neutrons sont indépendants de  $P$ .

La coïncidence des limites inférieures et supérieures paraît s'expliquer immédiatement en admettant qu'il se produit pour une valeur déterminée du nombre  $N$  une discontinuité de l'énergie de liaison des neutrons, absolument indépendante de la valeur du nombre  $P$ .

C'est ce qu'on peut prévoir si l'on suppose qu'une nouvelle couche de neutrons prend naissance indépendamment de la charge nucléaire.

Voici un nouvel argument en faveur de notre hypothèse : dans les longues séries d'isotopes, leur abondance augmente d'abord, passe par un maximum, pour décroître ensuite. Au contraire, les séries  $P = 38$  et  $P = 56$  s'arrêtent brusquement à l'isotope le plus abondant dont le nombre  $N$  est justement 50 pour l'une et 82 pour l'autre.

Signalons que la différence entre ces deux nombres, trente-deux, est égale à la longueur de la période à quatre quanta principaux du système périodique.

Dans un travail ultérieur nous discuterons de façon plus précise et à l'aide d'autres méthodes les relations entre les énergies de liaison, les limites et les divisions possibles en sous-groupes des couches successives de neutrons et de protons.

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique Expérimentale du Collège de France. Je prie M. Langevin de recevoir ici ma sincère gratitude pour les facilités qu'il m'a accordées pour mener à bien ces recherches. Il m'est tout particulièrement agréable de pouvoir exprimer ma profonde reconnaissance à M. Bauer pour ses conseils précieux, sa grande bonté et l'aide efficace qu'il n'a cessé de me prodiguer durant ce temps.