



**HAL**  
open science

## Nouvelles recherches sur l'émission des neutrons

Irène Curie, F. Joliot

► **To cite this version:**

Irène Curie, F. Joliot. Nouvelles recherches sur l'émission des neutrons. Journal de Physique et le Radium, 1933, 4 (6), pp.278-286. 10.1051/jphysrad:0193300406027800 . jpa-00233152

**HAL Id: jpa-00233152**

**<https://hal.science/jpa-00233152>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## NOUVELLES RECHERCHES SUR L'ÉMISSION DES NEUTRONS

Par M<sup>me</sup> IRÈNE CURIE et F. JOLIOT.

**Sommaire.** — On étudie le rayonnement nucléaire pénétrant excité par les rayons  $\alpha$  du polonium dans les éléments légers en employant une chambre d'ionisation remplie de méthane ou de butane pour augmenter l'effet des neutrons.

I. On montre par des expériences d'absorption que le fluor, le sodium, l'aluminium émettent des neutrons, accompagnés probablement de rayons  $\gamma$ . Pour le magnésium on n'a pu obtenir de certitude en ce qui concerne la nature du rayonnement.

En irradiant les éléments H, C, O, N, P, Ca, on n'a pu mettre en évidence aucun rayonnement pénétrant.

L'émission de neutrons par les noyaux  $F_{19}$ ,  $Na_{23}$  et  $Al_{27}$  qui sont connus pour émettre des protons, montre qu'un même noyau peut subir 2 modes de transmutation différents sous l'action des rayons  $\alpha$ , à moins que l'émission des protons et des neutrons ne soit simultanée.

II. On étudie la variation de l'excitation des neutrons avec l'énergie des rayons  $\alpha$ . Pour le glucinium on confirme l'existence d'un niveau de résonance signalé par Rasetti pour une énergie de  $2,6 \times 10^6$  eV des rayons  $\alpha$ . On établit l'existence d'un niveau de résonance analogue pour le bore pour une énergie de  $2,2 \times 10^6$  eV.

Les neutrons du bore sont émis à partir d'une énergie de  $2 \times 10^6$  eV des rayons  $\alpha$ , en accord avec la limite prévue d'après l'énergie des neutrons projetés par les rayons  $\alpha$  du polonium.

L'émission des neutrons de Li commence seulement pour une énergie de  $3 \times 10^6$  eV des rayons  $\alpha$  alors que celle des rayons  $\gamma$  commence vers  $3 \times 10^6$  eV. Il est possible que l'émission des rayons  $\gamma$  de Li corresponde à une excitation nucléaire sans capture de la particule  $\alpha$  et sans transmutation.

Pour expliquer l'émission des neutrons on est conduit à admettre une masse de 7,011 pour Li (dans le système He = 4) si l'on admet une masse de 1,0065 pour le neutron.

On indique approximativement l'énergie minimum des rayons  $\alpha$  nécessaire pour l'excitation des neutrons du fluor et de l'aluminium.

### I. Émission des neutrons par le fluor, le sodium et l'aluminium.

Il a été établi par Bothe et Becker <sup>(1)</sup> que les noyaux des éléments légers Li, Be, B, F, Na, Mg, Al, émettent, en faible proportion, un rayonnement  $\gamma$  nucléaire sous l'action des particules  $\alpha$  du polonium. Il a été prouvé par la suite que la radiation émise par Li, Be et B est complexe et constituée en partie de neutrons. Nous avons exposé dans un article précédent <sup>(2)</sup> les raisons qui conduisent à admettre l'existence de ce rayonnement nouveau.

L'étude des rayonnements excités dans F, Na, Mg et Al est très difficile, en raison de la faible intensité de ces rayonnements, surtout celui de Na et de Mg. Nous avons pu, toutefois, établir que le fluor, l'aluminium et le sodium, irradiés par les rayons  $\alpha$  du polonium, émettent des neutrons, accompagnées probablement de rayons  $\gamma$ .

**Méthode d'étude.** — Le rayonnement excité dans les atomes légers était mesuré par l'ionisation produite dans une chambre montée sur un électromètre Hoffmann. La source de rayons  $\alpha$  était un disque de 1 cm de diamètre, portant environ 150 millicuries de Po. Les courants mesurés étaient de l'ordre de  $10^{-3}$  UES.

L'effet relatif des rayonnements excités dans les divers éléments légers, dépend beaucoup des conditions expérimentales. Avec une chambre d'ionisation remplie d'air et fermée

(1) Bothe et Becker, *Zeitsch. f. Physik.* 66 (1930) 289-301.

(2) Irène Curie et F. Joliot, *J. de Phys. et Rad.*, 4 (1933), p. 21.

par un couvercle peu épais, les intensités, rapportées à celle du rayonnement  $\gamma$  du polonium sont environ :

$\frac{\text{Po}}{1}$	$\frac{\text{Be}}{40}$	$\frac{\text{B}}{1}$	$\frac{\text{Li}}{1}$	$\frac{\text{F}^2\text{Ca}}{0,2}$	$\frac{\text{Al}}{0,2}$	$\frac{\text{Na}}{0,1}$	$\frac{\text{Mg}}{0,1}$
-----------------------	------------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

On peut augmenter considérablement l'effet des neutrons en mettant dans la chambre des substances hydrogénées; les protons projetés par les neutrons produisent alors une ionisation supplémentaire. Nous avons travaillé avec une chambre remplie de méthane à la pression atmosphérique et dont le couvercle était recouvert intérieurement d'une couche de paraffine rendue conductrice par le graphite. Dans ces conditions, le courant produit par un rayonnement  $\gamma$  est sensiblement le même qu'avec la chambre pleine d'air, alors que l'on multiplie environ par 3,5 l'effet du rayonnement excité dans Be, par 5 celui de B, par 3 celui de F. L'effet de Li, Al, Na, Mg n'est guère augmenté. Ceci montre que le rayonnement excité dans ces éléments est, en majeure partie, de nature électromagnétique.

Pour Na et Mg, les courants mesurés étant trop faibles avec le méthane, nous avons introduit du butane  $\text{C}^4\text{H}^{10}$  dans la chambre d'ionisation (1). Le courant produit par les rayons  $\gamma$  est multiplié environ par 2,5 et l'effet de Na et Mg par un facteur analogue.

L'emploi de méthane dans la chambre d'ionisation est spécialement indiqué quand on veut augmenter l'effet des neutrons par rapport à celui des rayons  $\gamma$ . L'emploi du butane permet d'augmenter considérablement l'effet global des rayonnements excités,  $\gamma$  ou neutrons.

**Emission de neutrons par le fluor (2).** — On a irradié du fluorure de calcium; il a été vérifié que le calcium produit un effet négligeable.

Le rayonnement est extrêmement pénétrant et traverse 5 cm de plomb, sans absorption sensible. Par contre, l'absorption dans un bloc de 6,5 cm d'épaisseur de paraffine est notable.

Le rayonnement excité dans le fluor, est donc certainement composé en grande partie de neutrons rapides, ce qui est aussi démontré par le fait que l'ionisation qu'il produit dans le méthane est plus forte que dans l'air.

**Emission de neutrons par le sodium.** — On irradie du sodium métallique. Le rayonnement émis traverse environ 3 cm de plomb. Il est beaucoup plus absorbé dans 3 gr/cm<sup>2</sup> de paraffine que dans 3 gr/cm<sup>2</sup> de plomb, caractère qui indique la présence de neutrons.

**Emission de neutrons par l'aluminium (2).** — L'aluminium irradié par les rayons  $\alpha$  du polonium, émet un rayonnement peu pénétrant, absorbé en grande partie par 5 mm de plomb. Ce rayonnement est beaucoup plus absorbé dans 1 gr/cm<sup>2</sup> de paraffine que dans 1 gr/cm<sup>2</sup> de plomb; il contient donc des neutrons dont la faible pénétration indique qu'il s'agit de neutrons lents. L'intensité est la même, selon que l'on place contre la source de Po une feuille épaisse d'Al ou une feuille mince de 5 mm d'air équivalent pour les rayons  $\alpha$ . Il semble donc que l'excitation n'est produite que par les rayons  $\alpha$  peu ralentis, ayant une énergie de 4 à 5  $\times 10^6$  eV.

Nous avons déjà observé (4) dans l'appareil à trajectoires de brouillard de Wilson un proton projeté par un neutron de Po + Al. Ce proton, lancé vers l'avant par rapport à la direction des neutrons était assez court, 1,6 cm rapporté à l'air atmosphérique, ce qui correspond à une énergie de 7  $\times 10^5$  eV. Pierre Auger et Monod-Hertzen ont confirmé nos expériences sur l'émission de neutrons par l'aluminium en observant des protons projetés par Al irradié par le dépôt actif du radium (4).

(1) Nous remercions ici M. Francis Perrin qui nous a suggéré l'emploi de ce gaz et M. Marcellin qui nous l'a procuré.

(2) Irène CURIE et F. JOLIOT, *C. R.*, **196** (1933), 397.

(3) Irène CURIE et F. JOLIOT, *C. R.*, **194** (1932), 876.

(4) Pierre AUGER et Monod HERTZEN, *C. R.*, **196** (1933), 1102.

**Rayonnement excité dans le magnésium.** — Le rayonnement émis n'est pas sensiblement absorbé dans 3 cm de plomb, ni dans 3 cm de paraffine, à la faible précision des expériences. La petitesse des courants mesurés n'a pas permis d'éloigner la source pour augmenter l'épaisseur des écrans absorbants. La grande pénétration du rayonnement, fait penser qu'il contient des neutrons rapides, mais il peut s'agir aussi de rayons  $\gamma$  de très grande énergie quantique.

**Autres éléments légers.** — Nous avons irradié de la paraffine, du nitrate d'ammoniaque, de l'acide oxalique, de la chaux, du phosphore rouge. Aucun rayonnement pénétrant n'a été observé. Les éléments H, C, O, N, Ca, P, n'émettent donc que peu ou pas de rayonnement nucléaire de neutrons.

**Formules de réactions nucléaires pour la transmutation de F, Na et Al.** — Remarquons, que sur les 3 éléments Li, Be, B, pour lesquels l'émission de neutrons tout d'abord a été prouvée, seul le bore émet également des protons sous l'action des rayons  $\alpha$ , mais dans ce cas l'émission des neutrons est attribuée à l'isotope  $B_{11}$  et celle des protons à l'isotope  $B_{10}$ . Les transmutations du fluor, du sodium et de l'aluminium présentent donc un intérêt particulier, car un même noyau  $F_{19}$ ,  $Na_{23}$  ou  $Al_{27}$  peut subir deux modes de transmutations différents avec émission de neutrons ou de protons à moins que l'émission des deux corpuscules ne se fasse pendant la même transmutation.

Les noyaux  $F_{19}$ ,  $Na_{23}$ ,  $Al_{27}$  dont la masse est de la forme  $4n + 3$  ( $n$ , nombre de rayons  $\alpha$  que peut contenir le noyau), doivent avoir des constitutions nucléaires analogues, différant seulement par l'addition d'une particule  $\alpha$ . Ceci est bien en accord avec la similitude de leurs transmutations. Les tableaux de constitution des noyaux indiquent d'ailleurs la possibilité de la transmutation avec émission de protons et de neutrons (1).

Soient  $\alpha$ ,  $\pi$ ,  $\omega$ ,  $\beta$ , la particule  $\alpha$ , le proton, le neutron, l'électron.

La capture d'une particule  $\alpha$  dans le noyau  $F_{19}$  donne d'abord un noyau  $Na_{23}$ . Ce dernier peut se détruire avec émission d'un proton, d'un neutron, ou encore d'un demi hélium qui pourrait se décomposer en un proton et un neutron, suivant l'une des formules :



On peut encore supposer que l'isotope inconnu  $Nz_{22}$  n'est pas stable et se transforme spontanément en  $Ne_{22}$  par captation d'un électron extranucléaire. La formule de réaction serait alors



Des formules exactement semblables peuvent être écrites pour la transmutation de  $Na_{23}$  et  $Al_{27}$ . Les formules (2) conduiraient à des isotopes inconnus  $Al_{26}$  et  $P_{30}$ .

Les données expérimentales que nous possédons sur les masses des noyaux sont insuffisantes pour permettre de discuter le bilan énergétique de ces réactions. Si l'on se base sur les courbes de variations du défaut de masse en fonction du nombre de particules  $\alpha$  contenues dans le noyau, pour les éléments de masse  $4n$ ,  $4n + 1$ ,  $4n + 2$ ,  $4n + 3$ , on arrive à un bilan énergétique positif de quelques millions de volts pour l'émission des protons par la formule (1), en accord avec l'énergie maximum observée (2).

Pour l'émission d'un neutron seul, on arrive à un bilan énergétique positif de quelques millions de volts également. Au contraire, l'émission simultanée d'un proton et d'un neutron, conduit à un bilan énergétique fortement négatif; la réaction ne semble pas possible.

Nous pouvons aussi comparer directement le bilan énergétique de la réaction (1) et de

(1) F. PERRIN, *C. R.*, (1932), **194**, 1343. G. FOURNIER, *Journ. de Phys.*, **1** (1930), 194.

(2) Dans le cas de transmutation de  $F_{19}$  avec émission de protons, on peut faire le calcul avec la valeur de  $F_{19}$  donnée par Aston et celle de  $Ne_{22}$  donnée par Bainbridge (*Phys. Rev.* (1933), **43**, 424). La valeur obtenue pour l'énergie des protons est trop faible, mais les masses ne sont peut être pas connues avec exactitude suffisante.

la réaction (2 bis), sans faire intervenir les masses des noyaux. Si on retranche membre à membre ces 2 formules, on en déduit, pour la différence des bilans énergétiques,  $W_2 - W_1 = \pi + \beta - \omega = 0,0007$ , si on prend  $\pi + \beta = 1,0072$ ,  $\omega = 1,0065$  (dans le système He = 4).

L'énergie du rayon de recul étant sensiblement la même que le corpuscule émis soit un proton ou un neutron, l'énergie maximum des neutrons serait toujours supérieure de  $0,7 \times 10^6$  eV à l'énergie maximum des protons, pour n'importe quelle énergie de la particule  $\alpha$ .

On peut remarquer, du reste, que le même raisonnement est applicable à la comparaison des réactions nucléaires (1) et (2), si l'on suppose que la masse d'un noyau  $\text{Na}_{22}$  s'il existe, doit être peu différente de celle de  $\text{Ne}_{22}$  comme cela doit être si les défauts de masses des noyaux de poids atomiques  $4n + 2$  se placent sur une courbe à peu près régulière.

L'énergie maximum des protons émis sous l'action des rayons  $\alpha$  du polonium est de l'ordre de  $7 \times 10^6$  eV pour  $\text{F}_{19}$  et  $\text{Al}_{27}$  et  $6 \times 10^6$  eV pour  $\text{Na}_{23}$ . L'énergie maximum des neutrons devrait donc être de l'ordre de  $7$  à  $8 \times 10^6$  eV. Or, si les neutrons du fluor sont très pénétrants et paraissent avoir une grande énergie, par contre, ceux du sodium et de l'aluminium sont peu pénétrants, ce qui fait penser que leur énergie est faible.

L'énergie de transmutation de  $\text{Na}_{23}$  et  $\text{Al}_{27}$  devrait donc être en grande partie dépensée d'une autre manière, par exemple, en rayonnement  $\gamma$  de très grande énergie quantique (plusieurs millions d'électrons-volts) que l'on n'a pas observé jusqu'ici. D'après les expériences récentes de M. Savel les rayons  $\gamma$  de  $\text{Po} + \text{Al}$  ont une énergie de l'ordre de  $10^6$  eV et sont probablement émis en même temps que certains groupes de protons.

Nous avons indiqué ici seulement les formules de réactions nucléaires les plus simples. Il semble prématuré de rechercher d'autres formules avant d'avoir quelques valeurs expérimentales des masses qui interviennent dans les calculs (1).

## II. Conditions d'excitation des neutrons.

L'émission des neutrons par les éléments légers Li, Be, B, sous l'action des rayons  $\alpha$ , s'interprète par des formules de réaction nucléaire comportant l'hypothèse de la capture de la particule  $\alpha$  dans le noyau.

D'après le bilan énergétique de ces réactions, il doit exister, dans le cas de B et de Li, une limite inférieure d'énergie de la particule  $\alpha$  au-dessous de laquelle l'émission de neutrons n'est plus possible; dans le cas de Be, une telle limite n'existe pas. D'autre part, la transmutation ne peut se produire que si l'énergie de la particule  $\alpha$  est suffisante pour que la probabilité de traverser la barrière de potentiel des noyaux soit notable, à moins que la particule ne pénètre dans le noyau par un phénomène de résonance.

On voit donc qu'il est très important de connaître la variation de l'excitation du rayonnement de neutrons en fonction de l'énergie des rayons  $\alpha$ , afin de contrôler la validité des formules de réaction nucléaires et d'obtenir des renseignements sur les niveaux de résonance du noyau.

Nous avons entrepris cette étude, en employant, comme dans la première partie de ce travail, une chambre d'ionisation remplie de méthane et à couvercle paraffiné intérieurement, conditions dans lesquelles l'ionisation produite par les rayons  $\gamma$  ne représente qu'une très faible partie de l'ionisation totale.

**Courbe d'excitation des neutrons de Be et B.** — On colle de la poudre de glucinium ou de bore sur une calotte sphérique de 8 cm de rayon; la préparation de polonium, de 1 cm de diamètre, est placée au centre de la sphère (fig. 1). On établit une pression d'air réduite dans l'appareil et l'on peut ainsi faire varier l'énergie des rayons  $\alpha$  qui atteignent la surface sphérique. Les conditions géométriques sont telles que la différence de

(1) Nous avons montré récemment que l'aluminium émet des électrons positifs sous l'action des rayons  $\alpha$ . Il y a donc lieu d'envisager d'autres formules de réactions nucléaires. En particulier, l'émission de protons de transmutation pourrait être remplacée dans certains cas par celle d'un proton et d'un neutron.

parcours des rayons qui proviennent des divers points de la source ne peut introduire que des erreurs négligeables dans la forme des courbes. La couche de glucinium ou de bore absorbe entièrement les rayons  $\alpha$ .

Les figures 2 et 3 représentent, pour le glucinium et pour le bore, respectivement : I) la courbe de variation du courant d'ionisation  $I$  en fonction du parcours des rayons  $\alpha$  incidents, II) la variation de la dérivée  $dI/dr$  en fonction de  $r$ , c'est-à-dire l'excitation due aux rayons  $\alpha$  ayant une énergie comprise entre les limites  $W$  et  $W + \Delta W$  correspondant à la portion de parcours comprise entre  $r$  et  $r + \Delta r$ . III) la variation du courant d'ionisation, quand la chambre est remplie d'air et qu'il n'y a pas de paraffine à l'intérieur.

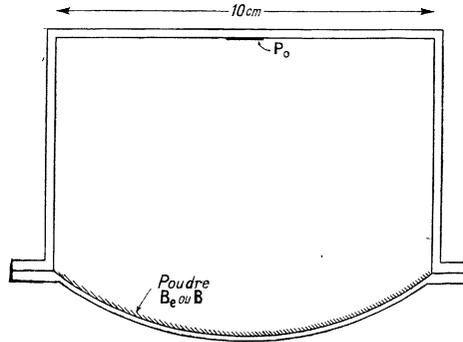


Fig. 1.

La courbe III est très au-dessous de la courbe I, ce qui montre que la plus grande partie du courant d'ionisation est attribuable à des neutrons, dans tout le domaine d'excitation du rayonnement.

Les courbes relatives au glucinium et au bore présentent une ressemblance frappante. Sur les courbes II, on peut voir que l'excitation passe par un maximum et par un minimum pour les énergies suivantes  $W_\alpha$  des rayons  $\alpha$  incidents :

	Be		B	
	$r$	$W_\alpha$	$r$	$W_\alpha$
Maximum . . . . .	1,4 cm	$2,6 \times 10^6$ eV	1,1 cm	$2,2 \times 10^6$ eV
Minimum . . . . .	1,85 cm	$3,2 \times 10^6$ eV	1,6 cm	$2,9 \times 10^6$ eV.

La courbe relative à l'excitation des neutrons du glucinium est en très bon accord avec celle de Rasetti qui a décelé les neutrons au moyen d'un compteur contenant de la paraffine (1). Elle n'est pas en accord avec celle de Kirsch et Rieder, obtenue par la numération des rayons H projetés par les neutrons dans un appareil à détente de Wilson (2); d'après ces auteurs, il y aurait plusieurs maxima et minima d'excitation. Les courbes de Webster(3) pour l'excitation de Be et B ne concordent pas non plus avec les nôtres; elles étaient d'ailleurs faites dans des conditions où l'importance relative des rayons  $\gamma$  et des neutrons n'était pas connue.

Ces courbes montrent que les noyaux de glucinium et de bore possèdent des niveaux de résonance correspondant à des énergies de  $2,6 \times 10^6$  eV et  $2,2 \times 10^6$  eV respectivement qui favorisent la pénétration dans le noyau des particules  $\alpha$  de cette énergie ou d'énergie très voisine. Par ailleurs, on peut supposer que la particule pénètre dans le noyau à travers la barrière de potentiel et la probabilité de pénétration augmente jusqu'au moment où son énergie atteint celle de la barrière de potentiel.

(1) RASETTI, *Z. f. Physik.*, 78 (1932), 163.

(2) KIRSCH et RIEDER, *Wien. Ber.*, 141 (1932) 501.

(3) WEBSTER, *Proc. Roy. Soc.*, 196 (1932), 709.

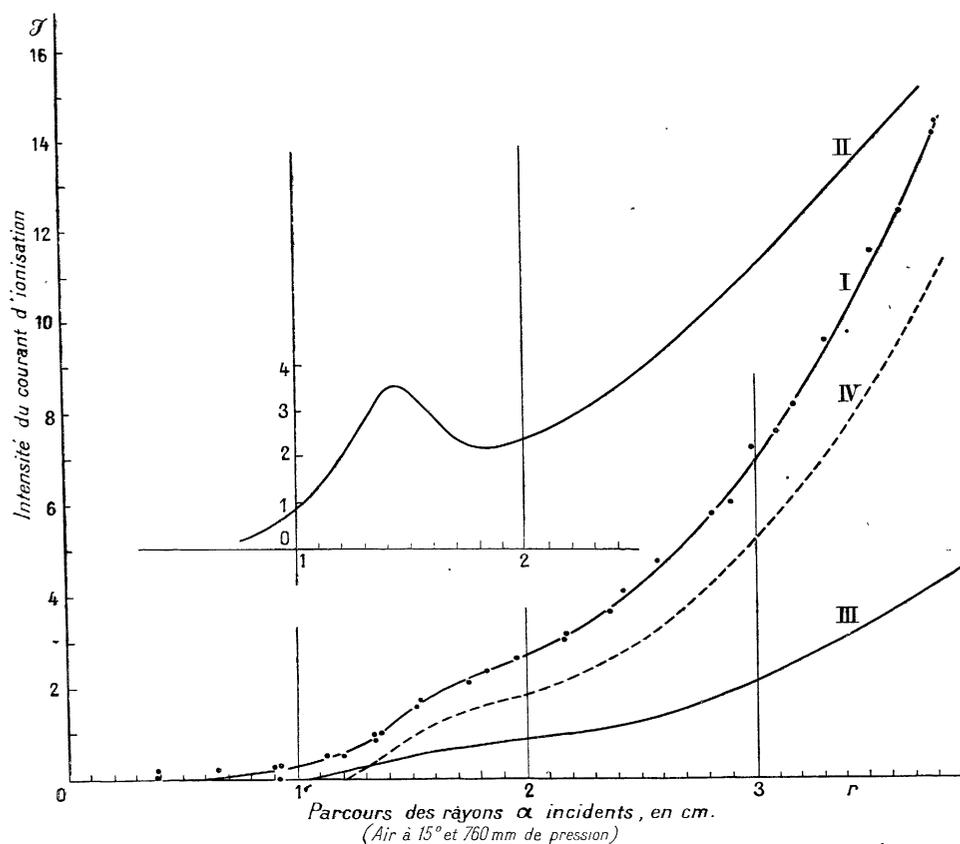


Fig. 2.

- I. Variation de  $\mathcal{J}$  en fonction de  $r$  (méthane et paraffine dans la chambre d'ionisation).
- II. Variation de  $\frac{d\mathcal{J}}{dr}$  en fonction de  $r$  (méthane et paraffine dans la chambre d'ionisation).
- III. Variation de  $\mathcal{J}$  en fonction de  $r$  (air dans la chambre d'ionisation).
- IV. Variation de l'intensité du rayonnement  $\gamma$  en fonction de  $r$ , d'après Becker et Bothe.

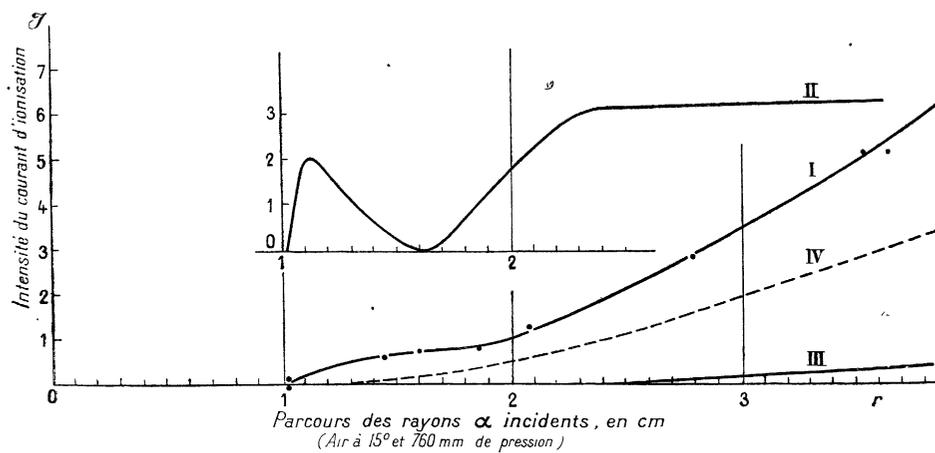


Fig. 3.

Si l'on se base sur la valeur de  $7,5 \times 10^6$  eV admise pour la barrière de potentiel de Al <sup>(1)</sup>, on peut prévoir pour celle de Be et B des énergies de l'ordre de  $3,5 \times 10^6$  et  $4 \times 10^9$  eV qui correspondent à un parcours de 2 cm et 2,5 cm des rayons  $\alpha$ . On peut donc attribuer à l'approche de la barrière de potentiel l'augmentation du nombre de neutrons au delà du minimum d'émission qui suit le niveau de résonance. Dans le cas du bore, l'excitation augmente peu au-dessus de 2,3 cm de parcours des rayons  $\alpha$  (voir fig. 3, courbe II), quand la barrière de potentiel est franchie. Pour Be, la dérivée du courant d'ionisation (voir fig. 2, courbe II) continue à augmenter au-dessus de l'énergie de la barrière de potentiel. Ceci tient probablement à la manière dont sont utilisés les rayons H produits dans la paraffine du couvercle de la chambre.

**Limite d'excitation.** — Nous pouvons comparer la limite d'excitation du bore observée dans ces expériences avec celles que l'on peut prévoir d'après la formule de réaction nucléaire. En effet, posons

$$B_{11} + \alpha = N_{14} + \omega$$

pour l'émission des neutrons.

Dans le cas où les rayons  $\alpha$  sont ceux du polonium, non ralentis, on peut évaluer l'énergie des neutrons émis vers l'avant, laquelle est égale à celle des protons de parcours maximum qu'ils projettent. On peut calculer l'énergie correspondante du rayon de recul.

Soient  $W_\alpha$  l'énergie de la particule  $\alpha$ ,  $W_R$  et  $W_\omega$  celles du rayon de recul et du neutron. Posons aussi  $I = W_R + W_\omega$ , énergie cinétique totale après transmutation.

Soient  $W_0$  l'énergie la plus faible de la particule  $\alpha$  capable de produire la transmutation. Soit  $I_0$  l'énergie cinétique totale qui correspond à ce cas limite. Il est facile de calculer, par l'application des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, que les valeurs de  $I_0$  et  $W_0$  sont reliées par la formule

$$I_0 = \frac{\alpha}{N_{14} + \omega} W_0.$$

En exprimant l'énergie en unités de masse, on peut écrire

$$\begin{aligned} B_{11} + \alpha + W_\alpha &= N_{14} + \omega + I \\ B_{11} + \alpha + W_0 &= N_{14} + \omega + I_0 \end{aligned}$$

En retranchant membre à membre, on obtient

$$W_\alpha - W_0 = I - I_0$$

d'où l'on déduit

$$\begin{aligned} W_\alpha - W_0 &= I - \frac{\alpha}{N_{14} + \omega} W_0 \\ W_0 \left( 1 - \frac{\alpha}{N_{14} + \omega} \right) &= W_\alpha - I. \end{aligned}$$

On voit donc que le minimum d'énergie nécessaire à la particule  $\alpha$  pour provoquer la transmutation peut être calculé sans erreur notable, en utilisant seulement l'énergie des rayons  $\alpha$  du polonium, l'énergie maximum des neutrons qu'ils projettent et les masses approximatives des noyaux.

Nous avons déterminé au moyen d'une petite chambre d'ionisation formée par une feuille mince d'aluminium le parcours maximum des protons projetés par les neutrons de Po + B. Nous avons trouvé un parcours de 24,6 mgr/cm<sup>2</sup> dans l'aluminium correspondant à un parcours de 16 cm dans l'air et à une énergie de  $3,27 \times 10^6$  eV. Cette valeur est en accord avec la détermination de Chadwick <sup>(2)</sup>.

On en déduit, d'après la formule ci-dessus, une valeur limite de l'énergie de la particule  $\alpha$  égale à  $2 \times 10^6$  eV.

<sup>(1)</sup> E. RUTHERFORD, J. CHADWICK, C. D. ELLIS, *Radiations from radioactive substances*.

<sup>(2)</sup> J. CHADWICK, *Proc. Roy. Soc.*, **136** (1932), 692.

La limite inférieure de l'émission des neutrons du bore est précisément obtenue pour  $r = 1$  cm,  $W_\alpha = 2 \times 10^6$  eV, en excellent accord avec ces prévisions.

Dans le cas du glucinium, l'énergie maximum des neutrons émis par Po + Be est de l'ordre de  $7,8 \times 10^6$  eV, supérieure à celle des rayons  $\alpha$  excitateurs. La réaction nucléaire est donc possible pour toutes les énergies de la particule  $\alpha$ . En accord avec ce fait, on n'observe pas de limite inférieure bien définie pour l'excitation des neutrons.

**Relation entre l'excitation des rayons  $\gamma$  et celle des neutrons.** — Les courbes IV des figures 2 et 3 représentent la variation de l'intensité du rayonnement  $\gamma$  excité dans Be et B en fonction du parcours des rayons  $\alpha$  excitateurs, d'après les courbes de Becker et Bothe (1).

Sur la courbe relative à Be, on observe un maximum et un minimum d'excitation des rayons  $\gamma$  qui coïncident exactement avec le maximum et le minimum d'excitation des neutrons. Mais l'excitation des rayons  $\gamma$  semble avoir une limite inférieure définie pour un parcours de 1,2 cm, soit une énergie de  $2,3 \times 10^6$  eV des rayons  $\alpha$ .

Nos expériences à l'appareil Wilson (2) en accord avec celles de Becker et Bothe (3) et de Rasetti (4), montrent que la limite supérieure de l'énergie quantique de la majeure partie du rayonnement  $\gamma$  est d'environ  $4,8 \times 10^6$  eV. Si on suppose que le rayonnement  $\gamma$  est composé d'un ou plusieurs groupes homogènes, dont l'énergie quantique ne change pas avec l'énergie de la particule  $\alpha$ , leur émission peut s'interpréter par la formule

$$\text{Be}_9 + \alpha = \text{C}_{12} + \omega_{\gamma} + h\nu$$

les neutrons émis formant un groupe moins rapide que le groupe émis suivant la formule simple.

$$\text{Be}_9 + \alpha = \text{C}_{12} + n.$$

L'énergie maximum des neutrons de Po + Be excités par les rayons  $\alpha$  du polonium ( $W_\alpha = 5,25 \times 10^6$  eV) est de  $7,8 \times 10^6$  eV (1). Nous avons supposé jusqu'ici que ce groupe de neutrons n'est pas accompagné d'émission de rayons  $\gamma$ . En ce cas, l'émission de rayons  $\gamma$  de  $4,8 \times 10^6$  eV accompagnerait un groupe de neutrons d'énergie maximum  $3 \times 10^6$  eV pour  $W_\alpha = 5,25 \times 10^6$  eV; l'énergie de ce groupe deviendrait nulle pour  $W_\alpha = 2,3 \times 10^6$  eV environ, ce qui correspondrait précisément à la limite d'émission des rayons  $\gamma$ . La difficulté de cette interprétation, c'est qu'on n'a pas observé de groupes de neutrons d'énergie  $3 \times 10^6$  eV dans le rayonnement de Po + Be.

Récemment, Bainbridge (5) a publié une détermination de la masse du glucinium d'après laquelle on arrive à des conclusions différentes. Si on admet cette valeur,  $\text{Be} = 9,011$ , et 1,0065 pour la masse du neutron, dans le système  $\text{He} = 4$ , on arrive à un bilan énergétique de  $13 \times 10^6$  eV. L'émission des neutrons d'énergie maximum  $7,8 \times 10^6$  eV doit être accompagnée de celle d'un quantum de  $4 \times 10^6$  eV environ, en accord avec l'énergie maximum des rayons  $\gamma$  observés. On ne prévoit pas en ce cas de différence entre la limite inférieure d'énergie des rayons  $\alpha$  pour l'excitation des rayons  $\gamma$  et des neutrons. Ce point devra être précisé expérimentalement.

D'après la masse  $\text{Be} = 9,011$ , le noyau de Be ne pourrait pas être constitué par deux particules  $\alpha$  et un neutron ou deux particules  $\alpha$ , un proton et un électron.

Pour le bore, Becker et Bothe ont montré que l'énergie quantique est de  $3 \times 10^6$  eV. Ces auteurs ont interprété ce rayonnement comme représentant la différence d'énergie de deux groupes de protons de transmutation que l'on suppose émis par  $\text{B}_{10}$ , ce qui semble pour le moment la supposition la plus probable.

**Excitation du rayonnement de Li.** — Le rayonnement de Li étant très faible,

(1) BECKER et BOTHE, *Z. Physik*, **76** (1932), 1616.

(2) IRÈNE CURIE et F. JOLIOU, *Journ. de Phys.*, **4** (1933), p. 21.

(3) BECKER et BOTHE, *Zets. f. Physik*, **76** (1932) 421.

(4) ROSETTI, *Naturwiss.*, **20** (1932) 252-253.

(5) BAINBRIDGE, *Phys. Rev.*, **43** (1933), 367.

on a employé un appareil analogue à celui de la figure 1, mais permettant d'utiliser les rayons  $\alpha$  émis dans un angle solide plus grand, les différences de parcours des rayons émis par les diverses parties de la source étant naturellement plus grandes. La précision des mesures est faible.

L'émission du rayonnement commence pour un parcours des rayons  $\alpha$  de 1,7 cm environ, correspondant à  $3 \times 10^6$  eV, résultat en accord avec celui de Webster (1).

On sait que le rayonnement est peu pénétrant; on étudie son absorption comparativement dans 1 g/cm<sup>2</sup> de paraffine ou de plomb. Pour le lithium excité par les rayons  $\alpha$  du polonium non ralentis, on observe, conformément à nos expériences antérieures (2) une absorption plus grande dans la paraffine, ce qui manifeste la présence de neutrons dans le rayonnement. Au contraire, on n'observe pas d'absorption sensible dans la paraffine si le lithium est excité par les rayons  $\alpha$  du polonium ralentis, même si le ralentissement est seulement de cinq millimètres.

Le lithium émet donc une radiation électromagnétique à partir d'une énergie de  $3 \times 10^6$  eV des rayons  $\alpha$  et un rayonnement de neutrons, observable seulement quand l'énergie des rayons  $\alpha$  atteint  $5 \times 10^6$  eV environ.

Ce résultat est en accord avec la formule de réaction nucléaire



Si l'on admet, dans le système  $\text{He} = 4$ ,  $\text{B}_{10} = 10,008$ ,  $\omega = 1,0065$ , et  $\text{Li} = 7,041$ , on prévoit la limite d'émission des neutrons pour une énergie de  $5 \times 10^6$  eV des rayons  $\alpha$ . Avec la valeur actuellement admise,  $\text{Li} = 7,008$ , le bilan énergétique serait négatif et l'excitation de neutrons par les rayons  $\alpha$  de Po serait impossible, mais la valeur 7,041 est dans les limites d'erreur de la détermination de la masse de  $\text{Li}^7$ .

L'excitation de rayons  $\gamma$  nucléaires dans le lithium par les rayons  $\alpha$  d'énergie comprise entre  $3 \times 10^6$  et  $5 \times 10^6$  eV ne s'accompagne pas d'émission corpusculaire, protons ou neutrons, que l'on ait mis en évidence jusqu'ici. Il ne semble pas facile d'interpréter l'émission de ce rayonnement  $\gamma$  peu pénétrant par la capture de la particule  $\alpha$  dans  $\text{Li}_7$  ou  $\text{Li}_6$  ou  $\text{Li}$ . On peut supposer qu'il s'agit d'une excitation de l'un ou l'autre de ces noyaux sans capture de la particule  $\alpha$  et sans transmutation.

**Limite d'excitation des neutrons de F.** — On a déterminé la limite d'excitation en employant le même appareil que dans le cas de Li. On a observé l'émission des neutrons à partir de 2,7 cm de parcours des rayons  $\alpha$ , soit  $4 \times 10^6$  eV. Cette énergie est inférieure à celle de la barrière de potentiel du noyau de fluor. La pénétration de la particule  $\alpha$  se fait peut-être par un niveau de résonance.

**Limite d'excitation des neutrons de Al.** — Le rayonnement de Al est trop faible pour permettre l'emploi de l'appareil précédent. Nous avons vu dans la première partie de cet article que le rayonnement est presque entièrement produit par les rayons  $\alpha$  de Po peu ralentis. L'énergie limite des rayons  $\alpha$  doit être de 4,5 à  $5 \times 10^6$  eV, très inférieure à celle de la barrière de potentiel et la pénétration de la particule ne peut se faire que par résonance.

Ce travail a été effectué à l'Institut du Radium et nous adressons nos remerciements à M<sup>me</sup> Pierre Curie pour l'intérêt qu'elle a pris à notre travail et les moyens mis à notre disposition. Nous remercions M. Winand qui nous a aidé à effectuer les mesures à l'électromètre Hoffmann.

(1) WEBSTER, *loc. cit.*

(2) Irène CURIE, F. JOLIOT et P. SAVEL, *C. R.* 194 (1932) p. 2208.