



HAL
open science

Un effet constaté lors du passage des neutrons rapides dans la matière

Jean Thibaud, Paul Comparat

► **To cite this version:**

Jean Thibaud, Paul Comparat. Un effet constaté lors du passage des neutrons rapides dans la matière. Journal de Physique et le Radium, 1939, 10 (6), pp.282-290. 10.1051/jphysrad:01939001006028200 . jpa-00233672

HAL Id: jpa-00233672

<https://hal.science/jpa-00233672>

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.

UN EFFET CONSTATÉ LORS DU PASSAGE DES NEUTRONS RAPIDES DANS LA MATIÈRE

Par MM. JEAN THIBAUD et PAUL COMPARAT.

Institut de Physique Atomique. Faculté des Sciences de Lyon.

Sommaire. — Confirmation d'un effet précédemment observé par l'un des auteurs et se superposant à la courbe de décroissance moyenne : il consiste en une variation discontinue du nombre des désintégrations constatées dans la chambre à azote, lorsque l'épaisseur d'absorbant interposée sur le trajet du faisceau neutronique croît régulièrement.

a) L'effet est étudié dans le plomb, le sodium et la paraffine ;

b) Des expériences comparatives sont faites avec un absorbant de paraffine, en détectant les protons de collisions dans une chambre d'ionisation remplie d'hydrogène. La courbe d'absorption est alors monotone, mais présente au départ, une bosse caractéristique. On est conduit à admettre un rôle appréciable des neutrons ayant subi plusieurs chocs élastiques successifs dans l'épaisseur de l'absorbant. Une nouvelle valeur de la section de choc dans la paraffine est donnée, en accord avec des observations précédentes ;

c) L'interprétation de l'effet observé dans l'azote est plus complexe : elle fait intervenir à la fois la variation avec l'épaisseur d'absorbant de la composition moyenne du spectre de vitesse des neutrons, et les résonances correspondant aux niveaux nucléaires de ^{15}N .

1. Introduction. — L'un de nous a signalé, il y a cinq ans ⁽¹⁾, que, lors de l'excitation de $^{14}_7\text{N}$ par les neutrons rapides, le nombre des désintégrations ($^{14}_7\text{N}, n \rightarrow ^{11}_5\text{B}, \alpha$) observées variait périodiquement lorsque le faisceau neutronique primaire traversait une épaisseur variable de matière. Cet effet avait été obtenu principalement avec le plomb, puis avec la paraffine, le sodium, le fer, le bismuth, etc.

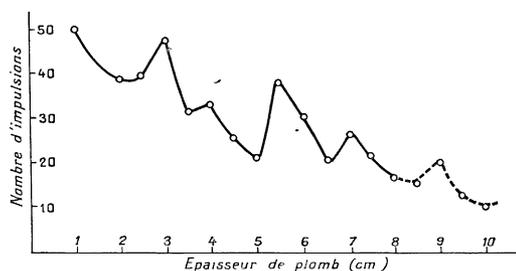


Fig. 1.

La figure 1 rappelle l'allure caractéristique de la courbe d'absorption obtenue dans le cas d'un absorbant cylindrique en plomb, de 3 cm de diamètre, les mesures étant faites par demi-centimètres.

Précédemment, l'élément le mieux étudié avait été le plomb ; nous avons avec lui, confirmé pleinement les résultats antérieurs. De plus, nous nous sommes attachés, dans le travail actuel, à une étude plus complète de la paraffine (gaz détecteur dans la chambre d'ionisation : azote puis hydrogène) et du sodium.

2. Dispositif expérimental. — Dans cette présente étude sur l'absorption et la diffusion des neutrons rapides dans la matière, nous avons employé un dispositif expérimental d'un principe analogue à celui qui a servi aux travaux antérieurs de J. Thibaud, F. Dupré la Tour et L. Cartan (chambre d'ionisation et amplificateur proportionnel), mais d'une réalisation technique différente comportant une augmentation de la sensibilité, permettant de déceler des corpuscules de plus faible énergie (particules α de 0,5 MeV).

⁽¹⁾ J. THIBAUD. *Bulletin de l'Acad. de Belgique*, 1934, **20**, p. 1106.

Le nombre de particules enregistrées à l'oscillographe par unité de temps (particules α de désintégration, avec l'azote ; protons de collision élastique avec l'hydrogène) sera proportionnel, pour chaque épaisseur de matière interposée, au nombre de neutrons subsistant après traversée de l'épaisseur correspondante. C'est donc l'effet combiné de l'absorption (capture nucléaire) et de la diffusion des neutrons par les atomes interposés que traduiront les mesures des nombres d'impulsions du compteur en fonction de l'épaisseur x de matière.

A) *Source de neutrons* : constituée par une ampoule de verre de 0,5 cm³ environ, remplie de poudre de béryllium et de radon (200 à 350 millicuries).

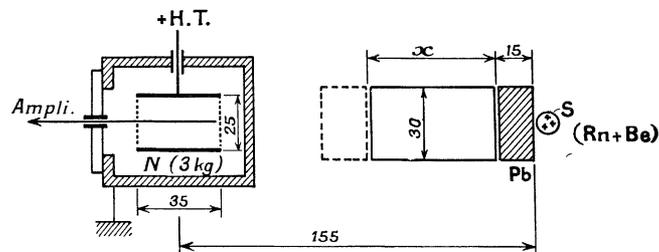


Fig. 2.

b) Entre la source et la chambre d'ionisation (fig. 2), on interposait des blocs diffuseurs de paraffine, de sodium ou de plomb. Ces blocs, de forme cylindrique, avaient un diamètre constant de 3 cm et des épaisseurs subdivisées de demi en demi centimètre. La longueur totale des cylindres absorbant variant de 0 à 10 cm.

Dans les expériences avec les absorbants légers (paraffine ou sodium), on interposait toujours entre source et absorbant 1,5 cm de plomb destiné à filtrer les rayons gamma du dépôt actif de la source. Les cylindres absorbants étaient portés par un support très léger dont le rôle dans la diffusion des neutrons peut être tenu pour faible.

c) *Chambre d'ionisation* : elle est d'un type déjà décrit ⁽¹⁾ ; étanche, elle permet l'introduction d'un gaz

⁽¹⁾ J. THIBAUD, P. COMPARAT, L. CARTAN. Techniques actuelles en physique nucléaire, p. 183 (Gauthier-Villars, 1938), *Journal de physique*, 1939, **10**, p. 161.

sous pression capable de détecter le passage d'un neutron : soit de l'azote (3 kg/cm² de pression) dont la désintégration est suivie de l'émission d'une particule α , soit de l'hydrogène (5 kg/cm² de pression) : projection élastique de protons. La constance de la pression était contrôlée à 1/300 près à l'aide d'un manomètre à mercure. Le volume efficace pour la collection des ions était de 18 cm³ environ.

D) Cette chambre d'ionisation était reliée à un amplificateur linéaire à lampe électromètre, dont les caractéristiques et le réglage ont été décrits (1). La sensibilité globale du compteur mesurée à l'aide de particules α du polonium, permettait la détection de particules d'une énergie minima de 0,5 MeV dans le cas de l'azote, de 0,09 MeV dans le cas de l'hydrogène.

E) *Enregistrements.* — A) En employant l'azote comme détecteur, nous avons obtenu :

1° Avec le *plomb*, trois séries de mesures, comprenant de 150 à 200 désintégrations pour chaque épaisseur d'absorbant interposé; durée d'un enregistrement : 30 min; pollution radioactive de la chambre 2 à 4 pour 100;

2° Avec le *sodium*, une seule série de mesures de 100 à 150 désintégrations par épaisseur; durée d'un enregistrement : 30 min; pollution de la chambre 8 à 10 pour 100;

3° Avec la *paraffine*, quatre séries de mesures de 100 à 250 désintégrations par épaisseur; durée d'un enregistrement 30 min; pollution 2 pour 100 environ. Certaines régions de la courbe d'absorption ont été tracées en subdivisant les épaisseurs de paraffine de quart en quart de centimètre.

B) En employant comparativement l'hydrogène comme détecteur, nous avons tracé une seule courbe d'absorption comprenant de 100 à 900 protons projetés pour chaque épaisseur d'absorbant interposée. Durée d'un enregistrement, 30 min; pollution : 1 à 10 pour 100.

Nous avons tenu compte enfin, au cours des mesures, de la décroissance d'activité du radon contenu dans la source, en supposant qu'à chaque instant, l'intensité neutronique soit proportionnelle à la quantité de radon présente (2).

(2) *Remarque.* — Le dispositif expérimental n'est pas exempt d'imperfections :

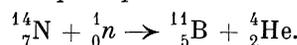
1° La distance entre la source de neutrons et le centre de la chambre d'ionisation est de 15 cm; le faisceau des neutrons incidents présente une ouverture non négligeable;

2° Le diamètre des blocs diffuseurs est appréciable (3 cm), ce qui favorise l'entrée dans la chambre d'ionisation de neutrons ayant subi un choc élastique dans la paraffine (diffusion sous un angle peu élevé);

3° Une certaine proportion (5 p. 100 peut-être) des neutrons détectés, résulte de la diffusion sur les murs de la pièce et sur les appareils voisins (qui se trouvent pourtant éloignés);

4° Les dimensions réduites de la chambre d'ionisation (volume cylindrique utile : diamètre, 2,5 cm; longueur, 3,5 cm) peuvent limiter le parcours de certaines particules rapides même sous les pressions de 3 à 5 kg/cm², en particulier pour les protons projetés dans l'hydrogène, ce qui modifiera légèrement la distribution en avantageant les faibles énergies.

3. **Résultats lorsque l'azote est employé comme détecteur.** — Nous admettrons que, dans ce cas, conformément à la discussion parue dans notre précédent mémoire (1) relatif à la distribution des énergies des particules de désintégration de l'azote sous l'action des neutrons rapides, la transformation des noyaux a lieu principalement suivant la réaction :



Le nombre d'impulsions enregistrées par la chambre d'ionisation pour chaque épaisseur x représentera le nombre de neutrons rapides résiduels après x cm et d'énergie suffisante pour produire la réaction précédente.

Sur les diverses courbes d'absorption neutronique ainsi enregistrées (fig. 3, 4, 5), on peut faire les observations suivantes :

1° En première approximation, la décroissance moyenne du nombre des neutrons en fonction de l'épaisseur de l'absorbant dépend de la nature de celui-ci; elle est beaucoup plus rapide avec la paraffine qu'avec le sodium et le plomb, fait qui traduit les propriétés bien connues des substances hydrogénées de diffuser et de « ralentir » les neutrons. Si l'on se reporte aux courbes correspondant à des énergies $E_{\alpha+B}$ supérieures à 0,8 MeV, on peut calculer les coefficients d'absorption suivants :

Paraffine.....	$\mu = 0,18 \text{ cm}^{-1}$
Sodium.....	$\mu = 0,05 \text{ cm}^{-1}$
Plomb.....	$\mu = 0,02 \text{ cm}^{-1}$

(1) J. THIBAUD et P. COMPARAT. *Journal de Physique*, 1939, 10, p. 161.

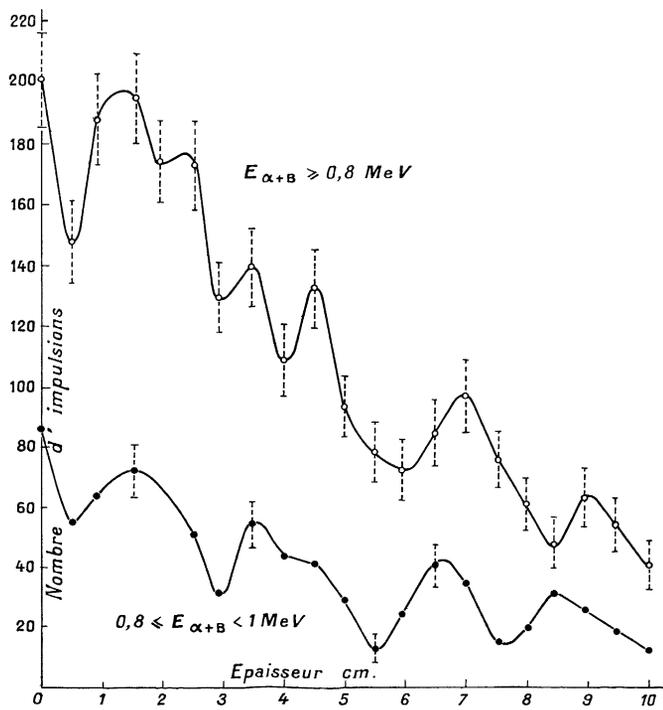


Fig. 3. — Paraffine.

2° Les courbes de décroissance ne sont pourtant pas monotones, ceci quelque soit l'élément absorbant, et quelque soit l'énergie des particules α que l'on considère. Les courbes présentent une succession de maxima et de minima, dont les amplitudes sont très supérieures aux fluctuations statistiques que l'on pourrait attendre

EXEMPLE (groupes de particules d'énergie $E_{\alpha+B} \geq 0,8$ MeV) :

Fig. 4 : *Plomb*, maximum à (3 cm) ; 4 cm ; 5 cm.

Fig. 5 : *Sodium*, maximum à 2 cm ; 5 cm ; 7 cm et 9,3 cm.

Fig. 3 : *Paraffine*, maximum à 1,5 cm ; (2,5 cm) ; 3,5 cm ; 4,5 cm ; 6,75 cm ; 9,0 cm.

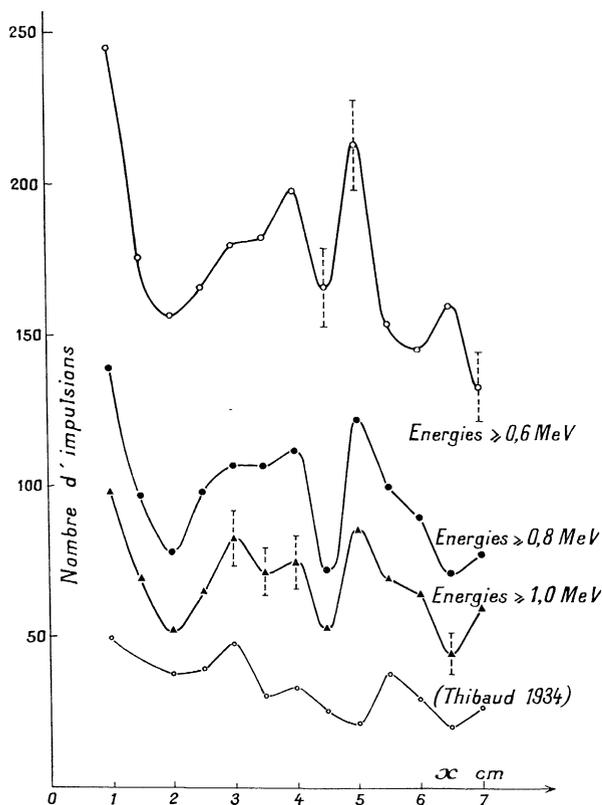


Fig. 4.

On notera un fait important dans le cas des mesures avec des cylindres de plomb (fig. 4) : nous avons placé en regard des courbes d'absorption actuelles, celle déterminée en 1934 par J. Thibaud (1) toujours avec le plomb. Le principe des mesures était le même, mais le dispositif expérimental de l'époque (chambre d'ionisation, amplificateurs, oscillographe) complètement différent. Pourtant l'allure des courbes d'absorption demeure identique (à la position près du maximum à 5 cm qui est décalée de 0,5 cm, ce qui peut provenir d'une différence d'étalonnage des deux instruments différents utilisés) : ceci montre la réalité des maxima obtenus qui ne sauraient être attribués, par exemple, à des fluctuations de sensibilité des compteurs.

3° Les hauteurs relatives de ces maxima paraissent pouvoir varier suivant l'énergie des particules de désintégration que l'on considère, bien que dans l'ensemble les positions respectives des maxima et des minima soient assez fixes.

EXEMPLE. — *Plomb* (fig. 4) : pour les corpuscules d'énergie $E_{\alpha+B} \geq 0,6$ MeV, le maximum à 4 cm est très net, il en existe un autre à 6,5 cm ; pour les énergies $E_{\alpha+B} \geq 1$ MeV, il semble qu'il apparaisse deux maxima distincts à 3 et 4 cm, tandis que celui de 6,5 cm aurait disparu. Le maximum observé à 5 cm demeurerait, au contraire, très constant.

Sodium (fig. 5) : pour les corpuscules d'énergie $E_{\alpha+B} \geq 1$ MeV le maximum à 2 cm s'atténue ; pour les énergies $E_{\alpha+B} \geq 1,5$ MeV ce maximum réapparaît tandis que celui observé précédemment à 5 cm semble se dédoubler (4,5 cm et 5,5 cm).

Paraffine (fig. 3) : pour les corpuscules d'énergie $E_{\alpha+B}$ comprise entre 0,8 et 1 MeV le maximum à 4,5 cm s'efface ; par contre, il en apparaît un à 8,5 cm là où se trouvait un minimum sur la courbe correspondant aux particules d'énergie $E_{\alpha+B} \geq 0,8$ MeV.

Nous avons tracé, dans le cas de la paraffine, les diverses courbes d'absorption relatives à des corpuscules d'énergie différente (groupes correspondant à

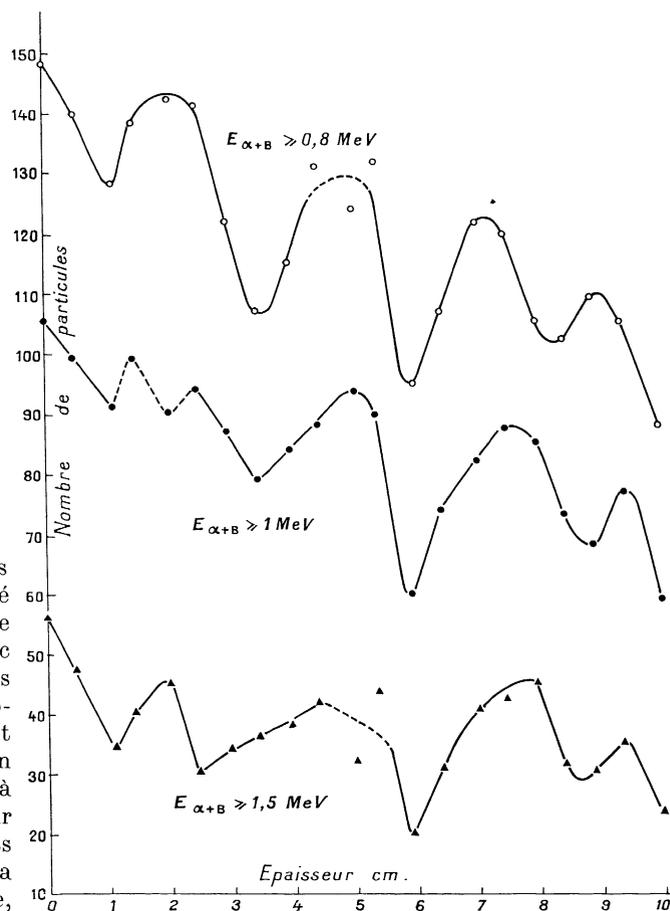


Fig. 5.

des bandes d'énergies $E_{\alpha \pm \beta}$ étroites : 0,08 MeV environ (fig. 6). On peut observer que d'une courbe à l'autre, le nombre des maxima varie et qu'il n'y a pas de relation systématique entre la position des maxima.

4° La position et l'espacement des maxima varierait avec l'élément absorbant utilisé. Pour une même classe d'énergie (corpuscules de 0,8 à 1 MeV) l'écartement des maxima successifs qui serait de 1 à 1,5 cm pour le plomb, et de 1,5 à 2 cm pour le sodium, atteindrait 2 à 3 cm pour la paraffine ; ce résultat suggérerait l'existence d'une relation entre l'écartement des maxima et la nature de l'absorbant constituant les cylindres.

5° Influence du degré de subdivision des épais-

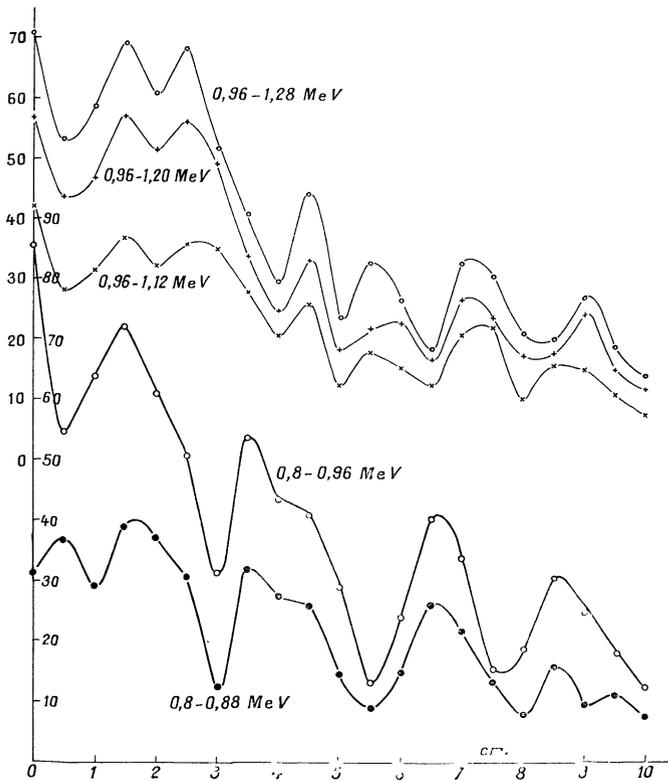


Fig. 6.

seurs interposées : dans certains cas, pour les faibles épaisseurs surtout, un maximum unique semble se résoudre en deux autres si l'on divise l'absorbant en tranches plus minces. Aux fortes épaisseurs pourtant, les maxima sont mieux définis et moins sous la dépendance de la subdivision de l'absorbant. (Dans l'interprétation donnée plus loin et qui relie l'effet d'épaisseur à une modification de la distribution en vitesses du spectre neutronique, on comprend que cette modification sera moins appréciable, pour les épaisseurs de paraffine dépassant plusieurs centimètres, le spectre des vitesses des neutrons étant alors beaucoup moins susceptible d'être modifié par l'ad-

jonction d'une petite épaisseur de paraffine supplémentaire.)

6° Nous avons pu nous rendre compte de l'indépendance de ce phénomène d'absorption non monotone vis-à-vis des neutrons lents qui apparaissent inévitablement en présence de la paraffine. Pour cela, nous avons enregistré deux courbes d'absorption dans la paraffine de centimètre en centimètre (fig. 7) ; l'une dans des conditions normales décrites plus haut, l'autre avec un écran de cadmium de 5/10 mm d'épaisseur interposé entre la paraffine et la chambre d'ionisation à azote sous pression. Aux fluctuations et aux erreurs d'expérience près, ces deux courbes présentent un profil identique (en particulier un maximum très net à 7 cm).

D'ailleurs, il ne semble pas, du point de vue théorique, que les neutrons thermiques puissent intervenir d'une façon appréciable dans la réaction $N, n \rightarrow B, \alpha$ puisque cette réaction nécessite (défaut de masse, bilan énergétique négatif) une énergie neutronique supérieure à 0,4 MeV.

4. Résultats lorsque l'hydrogène est employé comme détecteur. — Les mesures d'absorption furent faites ici uniquement avec les cylindres absorbant de paraffine.

La chambre d'ionisation était remplie d'hydrogène sous une pression de 5 kg/cm² ; les neutrons se

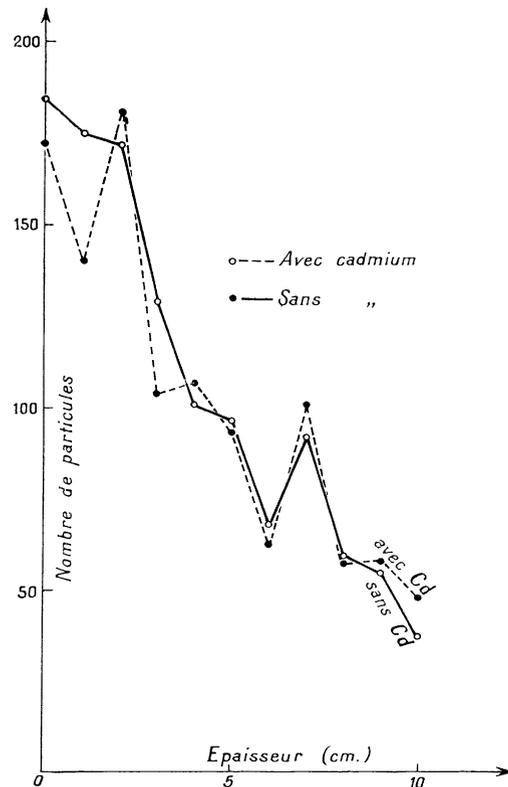


Fig. 7.

manifestaient par les noyaux d'hydrogène projetés ; la détection des neutrons ne fait donc intervenir que des chocs élastiques, et l'on n'a pas à tenir compte d'effets d'excitation nucléaire possibles comme dans le cas de l'azote.

Les protons peuvent présenter toutes les énergies comprises entre celle du neutron incident et zéro ; mais dans le cas le plus probable, où l'angle de diffusion est de 45°, il prend la moitié de l'énergie du neutron. Rappelons encore que les parois de la chambre d'ionisation peuvent limiter le parcours des protons les plus rapides.

Sur notre enregistrement, les impulsions les plus nombreuses correspondaient à des protons d'une énergie de 0,1 à 0,3 MeV.

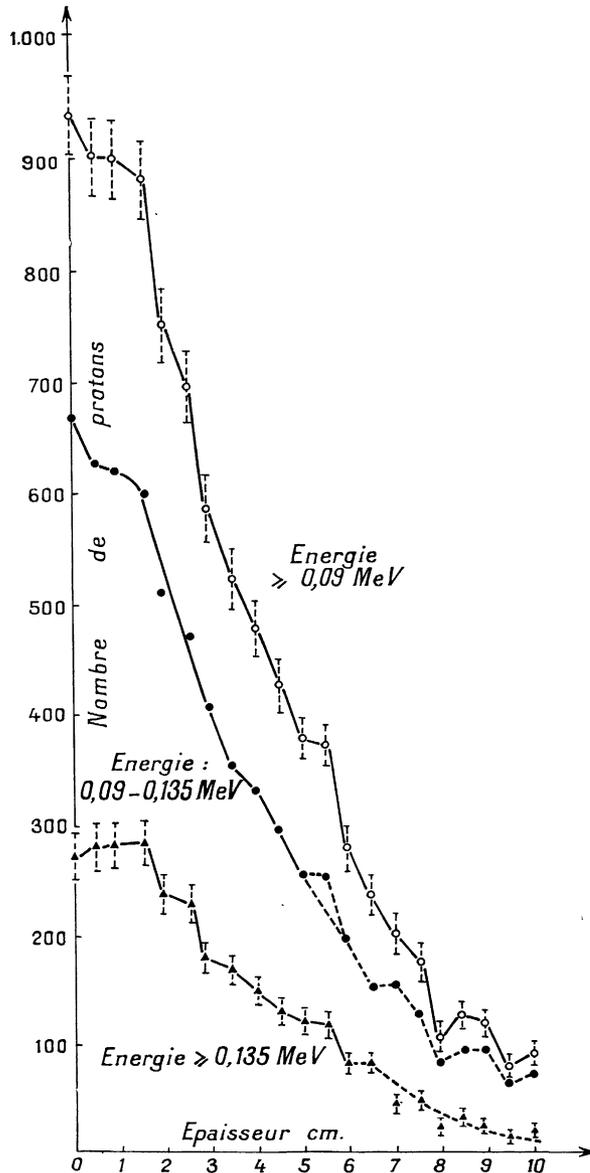


Fig. 8.

L'étude de la courbe d'absorption dans la paraffine montre, avec le détecteur à hydrogène :

1° Une décroissance presque monotone du nombre des neutrons en fonction de l'épaisseur de paraffine (fig. 8) ; la courbe ne présente plus de maximum ni de minimum appréciable comme dans le cas de l'azote, mais une région étendue (1,5 à 10 cm de paraffine) dans laquelle la décroissance est sensiblement exponentielle.

Sur un graphique semi-logarithmique on peut en déduire un coefficient d'absorption $\mu = 0,27 \text{ cm}^{-1}$ pour les corpuscules d'énergie $\geq 0,09 \text{ MeV}$ (fig. 9). D'où un libre parcours moyen des neutrons d'énergie correspondante dans la paraffine de 3,7 cm (section efficace de choc $\sigma = 2,2 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$).

Cette section de choc est en accord avec les valeurs déterminées dans l'hydrogène par de précédents auteurs (1, 2) :

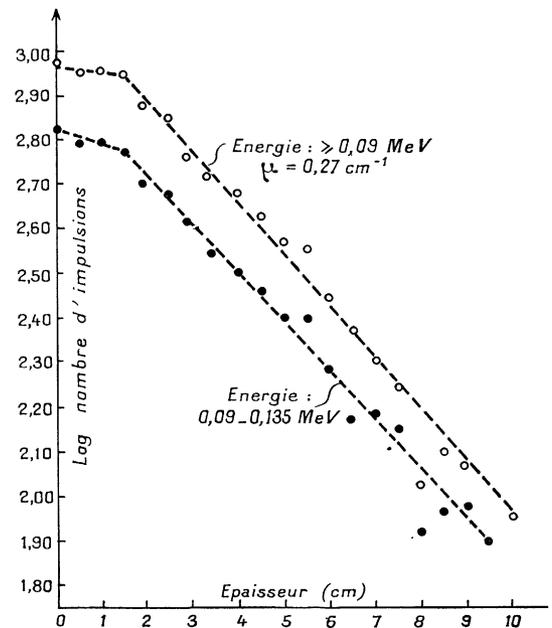


Fig. 9.

$\sigma = 2,11 \cdot 10^{-24}$ (hydrogène et neutrons d'énergie $E = 2,44 \text{ MeV}$).

2° Au début, en dessous de 1,5 cm de paraffine (mesures à 0, 0,5, 1, 1,5 cm) la décroissance n'est pas régulière, et s'éloigne de l'exponentielle générale : pour les protons d'énergie $\geq 0,1 \text{ MeV}$, la courbe présente pour ces épaisseurs une légère décroissance ; pour les énergies $\geq 0,15 \text{ MeV}$, la décroissance a même disparu et fait place à un faible maximum visible à 1,5 cm.

Ainsi la courbe d'absorption paraffine-hydrogène présente deux parties distinctes : nous verrons qu'il

(1) J. R. DUNNING. *Phys. Rev.*, 1934, **55**, p. 586.

(2) LADENBURG et KANNER. *Phys. Rev.*, 1937, **52**, p. 911.

est possible de les rapporter à des énergies différentes des neutrons primaires qui leur correspondent.

Dès maintenant il nous apparaît que les neutrons peu rapides projetant des protons de 0,1 à 0,15 MeV environ sont complètement absorbés par les premiers centimètres de paraffine.

3° La seconde partie de la courbe d'absorption paraffine-hydrogène (épaisseurs $\geq 1,5$ cm) nous a conduit expérimentalement à une section de choc $\sigma = 2,2 \cdot 10^{-24}$ cm².

A quelle énergie des neutrons primaires rapporter cette section de choc? Dans le cas où les neutrons auraient subi au plus un choc cette énergie neutronique déduite des énergies des protons de recul observés, devrait se situer entre 0,2 et 0,5 MeV.

Or, la valeur de la section de choc que l'on peut calculer à partir de la formule proposée par Bethe pour les neutrons de cette même énergie de 0,2 à 0,5 MeV, $\sigma = 7$ à $10 \cdot 10^{-24}$ cm² est beaucoup trop grande.

De cet important désaccord et en admettant la légitimité de la formule de Bethe, nous concluons que la partie de la courbe d'absorption à allure exponentielle ($\mu = 0,27$ cm⁻¹) ne correspond pas en réalité à des neutrons d'énergie 0,2-0,5 MeV ayant subi *seul* choc. (Voir plus loin.)

5. Discussion. — A) CAS OÙ L'HYDROGÈNE EST EMPLOYÉ COMME DÉTECTEUR. — Nous discuterons d'abord ce cas, car les processus de ralentissement et de détection des neutrons ne font intervenir ici que des chocs élastiques (nous négligeons la présence du carbone dans la paraffine qui pourrait pourtant, pour certaines énergies, donner une diffusion sélective).

Nous baserons notre discussion sur les points suivants :

A) Un neutron ayant subi un choc, a peu de chance de pénétrer dans la chambre d'ionisation, malgré les conditions géométriques imparfaites (angle solide d'entrée dans le compteur non négligeable).

B) Mais un deuxième ou plusieurs chocs ultérieurs peuvent ramener le neutron dans l'angle solide efficace, avec une énergie réduite.

C) Avec la chambre d'ionisation remplie d'hydrogène on doit s'attendre à enregistrer les impulsions correspondant à :

α) Des neutrons primaires d'énergie faible (0,2 à 0,5 MeV).

β) Quelques neutrons plus rapides ayant subi un seul choc sous un petit angle de déviation. (Assez rarement.)

γ) Des neutrons d'énergie relativement élevée, 1 à 5 MeV par exemple, ayant subi deux chocs consécutivement dans la paraffine avant d'atteindre le détecteur.

δ) Des neutrons primaires de toutes énergies, 1 à 10 MeV, par exemple, donnant des protons rapides

dont on ne mesure l'ionisation que sur une partie du parcours, à cause des dimensions limitées de la chambre à hydrogène et se traduisant par de petites impulsions de l'oscillographe.

Pour une première interprétation des phénomènes nous négligeons les neutrons des catégories β (rares) et δ (fréquents, mais petites impulsions).

Les courbes expérimentales nous ont montré déjà que les neutrons d'énergie faible (catégorie α) sont totalement absorbés par 1,5 cm de paraffine. Au fur et à mesure que l'épaisseur de paraffine augmente, la probabilité de rencontrer des neutrons ayant subi deux chocs consécutifs commence par croître pour les faibles épaisseurs, passe par un minimum et décroît ensuite suivant une loi exponentielle ⁽¹⁾.

La superposition de ces deux effets peut donner une courbe telle que celle représentée schématiquement sur la figure 10. On constate que l'allure de la courbe résultante est analogue à celle observée expérimentalement (fig. 8, énergie $\geq 0,1$ MeV). La bosse qui se manifeste à 1,5 cm correspondrait à l'épaisseur

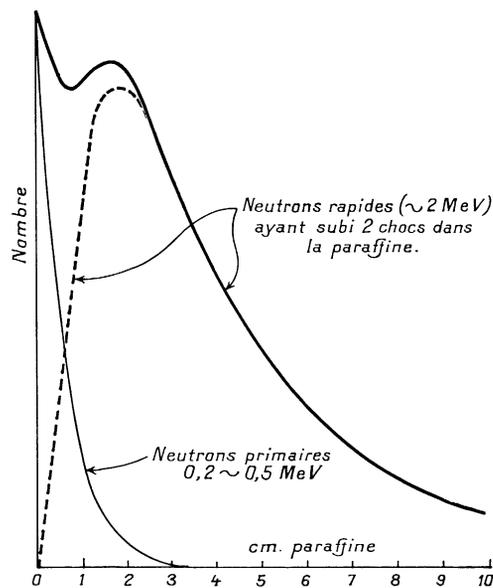


Fig. 10.

pour laquelle des neutrons d'énergie convenable ont la probabilité la plus grande de subir deux chocs, puis d'être décelés par le compteur.

En résumé, nous interpréterons les deux parties de la courbe expérimentale de la manière suivante :

a) De 0 à 1,5 cm d'épaisseur, absorption complète dans la paraffine des neutrons d'énergie moyenne : de 0,2 à 0,5 MeV (nous entendons par absorption, ou bien la diffusion d'un neutron hors de l'angle solide efficace, ou bien une diminution d'énergie suffisante pour rendre le neutron non sensible au compteur).

⁽¹⁾ Les auteurs doivent d'importantes remarques sur les chocs multiples à la discussion avec M. G. БЕРК.

b) Au-dessus de 1,5 cm la courbe représente la décroissance sensiblement exponentielle des neutrons rapides d'énergie primaire 2 MeV par exemple, ayant subi deux chocs dans la paraffine ; peut-être γ a-t-il aussi, se superposant à ce dernier, un effet de neutrons plus rapides encore subissant trois ou quatre chocs dans l'absorbant avant de pénétrer dans la chambre d'ionisation.

De là nous tirons une conclusion intéressante :

1° Le désaccord signalé antérieurement (§ 4,3°) n'est qu'apparent, et la section efficace de choc trouvée expérimentalement ($\sigma = 2,2 \cdot 10^{-24}$ cm²) correspond effectivement à des neutrons primaires rapides (énergie environ 2 MeV) en accord avec la valeur numérique déduite de la formule de Bethe pour des neutrons de cette énergie ;

2° Si l'on compare les courbes d'absorption dans la paraffine obtenues respectivement avec l'azote et l'hydrogène comme détecteurs, une différence fondamentale se manifeste : succession presque périodique de maxima pour l'azote, décroissance quasi monotone (pour $x \geq 1,5$ cm) pour l'hydrogène.

Ces courbes correspondent, la première aux neutrons ayant une énergie primaire assez élevée pour transmuter le noyau d'azote, soit 0,8 à 3,7 MeV pour la sensibilité de notre dispositif expérimental [voir le premier mémoire (1)], la seconde à des neutrons ayant subi deux chocs dans la paraffine avant d'entrer en collision avec l'hydrogène, et possédant une énergie de l'ordre de 2 MeV.

Ainsi la décroissance monotone observée avec l'hydrogène comme détecteur se rapporte à des neutrons du même ordre d'énergie que ceux détectés avec la chambre remplie d'azote. Puisque ce sont sensiblement des neutrons du même domaine énergétique qui agissent dans les deux cas, il est légitime d'attribuer à la nature même du détecteur, c'est-à-dire ici à l'azote, la succession de maxima qui se manifeste avec cet élément et non pas à une distribution discontinue des énergies des neutrons primaires.

B) CAS OÙ L'AZOTE EST EMPLOYÉ COMME DÉTECTEUR. — Dans ce cas, l'interprétation des phénomènes, beaucoup moins simple qu'avec l'hydrogène, doit tenir compte des deux faits suivants :

1° La détection des neutrons par une chambre à azote fait intervenir un processus complexe (transmutation) : le noyau intermédiaire d'azote ¹⁵N présente après capture du neutron des niveaux d'excitation distincts et la probabilité de désintégration est sous la dépendance étroite de l'énergie des neutrons reçus. [Voir premier mémoire (1)] ;

2° La présence de maxima et de minima sur la courbe d'absorption s'observe aussi bien avec le plomb ou avec le sodium, comme absorbant, qu'avec la paraffine. L'on sait pourtant que le processus de ralentisse-

ment d'un neutron dans chacun de ces éléments, est différent :

— Dans la paraffine, la majorité des chocs avec les noyaux H sont élastiques, avec peut-être un effet possible de diffusion sélective sur les noyaux de carbone pour les neutrons d'énergie élevée.

— Dans le plomb la probabilité de chocs inélastiques est de beaucoup la plus grande, et dans les cas de diffusion élastique la perte d'énergie reste faible.

— Dans le sodium, le processus de ralentissement des neutrons a sans doute un caractère intermédiaire.

Avec la chambre d'ionisation remplie d'azote on détectera des corpuscules de désintégration dont les énergies $E_{\alpha+B}$ se rapportent à des catégories diverses de neutrons agissant :

α) Neutrons primaires traversant sans choc l'absorbant (énergie de l'ordre de 1 à 4 MeV dans nos expériences).

β) Des neutrons, en nombre plus restreint, ayant subi un seul choc sous un petit angle de diffusion.

γ) Des neutrons de vitesse élevée, ayant subi deux chocs.

δ) Des neutrons de vitesse plus élevée encore, ayant subi trois ou quatre chocs.

Le nombre des neutrons très rapides appartenant à cette dernière catégorie est faible ; supposons provisoirement que l'effet des neutrons de la catégorie γ soit prépondérant.

On pourrait songer alors à donner à la courbe obtenue avec l'azote comme détecteur une interprétation analogue à celle donnée dans le cas de l'hydrogène en admettant, de plus, la présence de « groupes » monocinétiques distincts dans la répartition énergétique des neutrons primaires : après avoir subi deux chocs avant de pénétrer dans la chambre, la nouvelle répartition présenterait une probabilité maximum (sommet de la courbe en cloche, pointillé de la figure 10) se trouvant à des épaisseurs d'autant plus grandes que l'énergie primaire des neutrons serait plus élevée.

La superposition des effets de diffusion des différents groupes et de courbes en cloche de moins en moins hautes mais présentant des maxima de plus en plus décalés vers les hautes énergies, expliquerait la présence de maxima dans les courbes d'absorption ; la position de ces maxima pourrait varier suivant l'énergie $E_{\alpha+B}$ considérée, puisque l'on aurait à faire à des groupes différents de neutrons primaires.

Cette hypothèse ferait prévoir que les maxima qui apparaissent aux fortes épaisseurs seraient surtout visibles sur les courbes tracées pour des énergies $E_{\alpha+B}$ élevées ; or, nos courbes ne montrent rien de tel.

Remarquons que ce raisonnement suppose l'existence de groupes distincts dans le spectre des vitesses des neutrons primaires, hypothèse qui bien que n'étant

(1) Journal de Physique, 1939, 10, p. 161.

pas en contradiction avec les résultats expérimentaux d'autres auteurs, Dunning en particulier, nous paraît difficile à soutenir dans le domaine énergétique où nous nous sommes placés car elle devrait conduire à l'observation des mêmes maxima aussi bien avec l'hydrogène qu'avec l'azote. Or, nos expériences avec l'azote, qui font apparaître un grand nombre de maxima, indiqueraient (dans cette hypothèse), que le nombre des groupes de grande énergie serait nécessairement élevé, tandis que les expériences faites avec l'hydrogène indiqueraient au plus un nombre réduit de groupes et plutôt un spectre continu pour les énergies moyennes (1 ou 2 MeV par exemple).

Par ailleurs l'interprétation des maxima des courbes d'absorption par de simples effets de diffusion des neutrons s'accorde mal avec les processus de ralentissement différents dans le plomb et la paraffine, par exemple. Il serait difficile, en particulier, d'expliquer de quelle manière l'interposition d'une faible épaisseur de matière suffirait à provoquer une grande variation du nombre des neutrons, ainsi qu'on l'observe.

Enfin, pour les énergies élevées que l'on aurait à considérer, les maxima devraient être beaucoup plus *larges* que ceux obtenus, et indépendants du mode de subdivision de l'absorbant.

Nous sommes ainsi conduits à admettre que la variation du nombre des neutrons en fonction de l'épaisseur d'absorbant ne dépend pas seulement de leur diffusion dans la matière mais aussi de la nature du gaz détecteur et que, avec l'azote, la probabilité de désintégration doit varier beaucoup suivant l'énergie des neutrons incidents.

Rappelons ici les grandes lignes d'un travail antérieur⁽¹⁾ qui avait pour objet d'obtenir, pour chaque épaisseur de paraffine, la statistique du nombre des particules α de désintégration de l'azote en fonction de leur énergie.

L'étude des courbes de répartition énergétique nous avait conduits aux résultats suivants :

1° En première approximation, décroissance très rapide du nombre des particules à mesure que leur énergie augmente (diminution de moitié pour 0,3 MeV environ).

2° La décroissance n'est pas régulière, et la courbe présente une succession de sommets nets, à différentes valeurs de l'énergie $E_{\alpha+B}$ des corpuscules de désintégration. Ces énergies discrètes correspondent aux divers niveaux de résonance du noyau $^{15}_7\text{N}$ formé par la capture du neutron. Entre 0,5 et 3,5 MeV, nous trouvons 14 niveaux, distants en moyenne de 0,2 MeV. Il y a ainsi résonance pour l'une des valeurs suivantes de l'énergie E_n des neutrons incidents : $E_n = 0,95 ; 1,10 ; 1,25 ; 1,40 ; 1,60 ; 1,75 ; 1,95 ; 2,10 ; 2,40 ; 2,60 ; 2,90 ; 3,10 ; 3,40 ; 3,65$ MeV, etc.

3° Pour les fortes énergies ($E_{\alpha+B} \geq 1,3$ MeV) la position des pics de la courbe est la même quelque soit l'épaisseur de l'absorbant ; mais leur hauteur relative peut varier.

4° Pour les faibles énergies ($E_{\alpha+B}$ de 0,5 à 1,3 MeV) les niveaux, apparemment plus resserrés, n'apparaissent pas tous simultanément sur une même courbe, mais se manifestent les uns après les autres, à mesure que l'épaisseur de l'absorbant varie.

Ceci étant rappelé, voici sur quelles bases il nous paraît le plus logique d'interpréter l'effet d'absorption périodique observé avec le détecteur azote.

Nous raisonnons dans le cas où le spectre de vitesse des neutrons primaires serait continu et présenterait une répartition avec un maximum à v_m (vitesse la plus probable). Si d'ailleurs le spectre n'était pas continu et montrait une série de groupes distincts v_1, v_2, \dots ce que nous allons dire pour un seul groupe v_m s'appliquerait de la même façon aux autres, seul, le nombre des maxima apparus serait augmenté.

Lorsque nous interposerons une épaisseur variable d'absorbant devant la chambre à azote, la répartition énergétique du spectre des neutrons reçus variera, par conséquent, la vitesse la plus probable v_m sera modifiée d'une façon continue en fonction de l'épaisseur (fig. 11 a). Lorsque cette vitesse v_m correspondra à l'une des énergies neutroniques E_n (0,95 ; 1,10 ; 1,25 MeV, etc.) de résonance, la probabilité de transformation du noyau d'azote s'accroît considérablement. Ainsi, devons-nous attendre, pour le nombre des particules α de désintégration en fonction de l'épaisseur x , une courbe discontinue, en marches d'escalier (fig. 11 b).

Comme nous avons trouvé un assez grand nombre de niveaux, on conçoit que l'interposition d'une faible épaisseur de matière suffise à modifier l'excitation de quelques niveaux, et à faire varier de façon assez considérable la probabilité globale qu'a l'azote de se désintégrer. Par ailleurs, puisque les neutrons de faible énergie (0,5 à 1,3 MeV) sont les plus nombreux, et sont aussi les plus affectés par l'adjonction d'une épaisseur supplémentaire, on conçoit que, pour les faibles épaisseurs, la subdivision de l'absorbant en tranches plus minces suffise à provoquer une variation assez grande du nombre total des noyaux d'azote désintégrés, ainsi qu'on l'observe.

Il y a là un phénomène analogue à celui observé en optique (dispersion anormale) où le passage de la fréquence de la radiation sur une limite d'absorption modifie rapidement la dispersion de cette radiation.

Dans cette interprétation, les épaisseurs critiques successives d'absorbant (épaisseurs pour lesquelles apparaissent les maxima de la distribution de particules) pourront correspondre aux niveaux nucléaires successifs de l'azote. Or, d'après notre précédente publication, dans le domaine d'énergie des neutrons

(1) Journal de Physique, 1939, 10, p. 161.

considérés ici — 1 à 3 MeV — l'espacement des niveaux du Compound ^{15}N est d'environ 200 MeV. D'autre part, l'écartement des épaisseurs critiques est, suivant l'absorbant, de 1 à 2 cm. Ainsi la variation d'énergie par centimètre d'absorbant devrait atteindre 100 à 200 KeV en ce qui concerne la vitesse la plus probable v_m du spectre de vitesse :

$$\frac{dE_m}{dx} \cong 100 \text{ KeV} : \text{cm}^{-1}.$$

La variation avec l'épaisseur de la composition moyenne du spectre peut se comprendre de deux façons différentes :

A) S'il existait un seul groupe (neutrons primaires monocinétiques) la traversée de x cm s'accompagnerait d'un ralentissement moyen : $\frac{dE}{dx} < 0$.

L'origine de cette perte d'énergie étant : *a*) soit une interaction entre les neutrons et les électrons matériels (analogie avec les effets d'ionisation des particules α et des protons) : nombre élevé de chocs élastiques correspondant individuellement à une faible perte d'énergie ; *b*) soit les collisions (élastiques ou non) des neutrons et des noyaux du milieu absorbant : nombre faible de chocs d'un quantum moyen.

Aucune de ces hypothèses ne paraît acceptable, car même le processus *b*) ne semble pas susceptible de donner à $\frac{dE}{dx}$ un ordre de grandeur suffisant pour atteindre la valeur expérimentalement observée.

B) Dans la pratique le spectre de vitesse des neutrons d'une source Radon + béryllium est très étendu. L'absorbant aura surtout pour effet de filtrer les composantes les moins pénétrantes et d'enrichir progressivement le spectre en faveur des vitesses les plus élevées. De sorte que la vitesse la plus probable v_m augmentera avec x (fig. 11 a), fait qui est confirmé par les déterminations des coefficients d'absorption pour des épaisseurs croissantes : $\frac{dE}{dx} > 0$.

En nous rapportant à des mesures déjà anciennes^(1,2), mais qui ont l'avantage d'avoir été obtenues avec un dispositif semblable au matériel utilisé ici (cylindres absorbants allongés et étroits, de hauteur x variable), nous pouvons, à partir des coefficients moyens μ , déterminés en fonction de l'épaisseur x , dans le plomb, calculer la section de choc σ et par suite l'énergie moyenne à x cm. Les coefficients μ_{pb} étaient respectivement égaux à 0,3, 0,2, 0,15, 0,12, 0,10, 0,075 cm^{-1} après $x = 1, 3, 5, 7, 9, 13$ cm. La variation d'énergie par centimètre atteint bien, alors, la valeur expérimentalement trouvée : $\frac{dE}{dx} = 100$ à 200 KeV.

C) Dans l'interprétation que nous donnons de l'effet azote (filtration du spectre neutronique primaire combinée avec résonance des divers niveaux nucléaires de ^{15}N) la courbe représentant la variation du nombre de particules z de désintégration avec l'épaisseur est discontinue (marches d'escalier, fig. 11 b), mais diffère encore de la courbe expérimentale (fig. 3 par exemple), en ce qu'elle ne présente pas d'augmentation du nombre des particules si x augmente.

Il y aurait lieu de tenir compte, en plus des neutrons primaires, des neutrons qui ont subi un choc dans l'absorbant avant de pénétrer dans la chambre d'ionisation (remarque de M. G. Beck), neutrons dont l'énergie primitive est quelconque, mais dont l'énergie résiduelle après une collision est précisément E_n . Le nombre n_2 de ces neutrons de diffusion croît avec l'épaisseur (maximum vers 10 cm pour la paraffine).

La courbe finale du nombre de désintégration sera représentée par la somme des deux (escalier plus n_2 : (fig. 11 b, courbe en pointillé).

D) Enfin, nous ferons remarquer que l'existence de cet effet périodique apporte une preuve supplémentaire à l'existence de niveaux nucléaires distincts de l'azote.

Nous devons remercier M^{me} Lambert à qui nous sommes redevables de l'extraction et de la purification du radon, ainsi que le docteur Beck pour la discussion de certains résultats.

Manuscrit reçu le 1^{er} mars 1939.

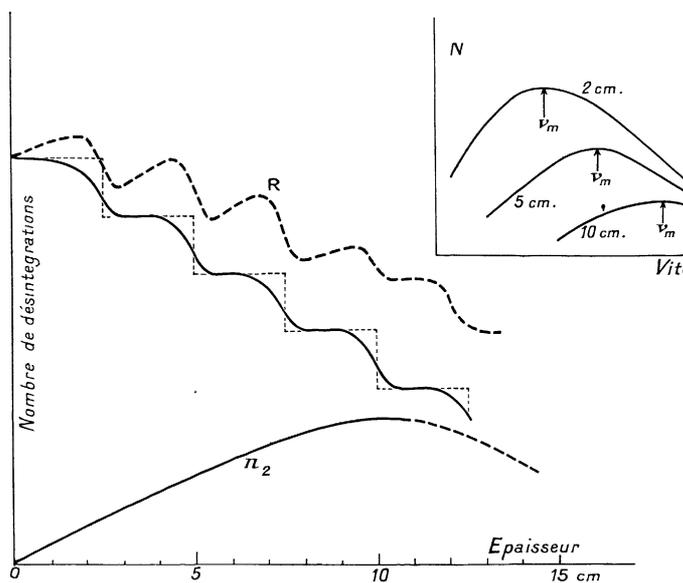


Fig. 11.

^(1,2) J. THIBAUD et F. DUPRÉ LA TOUR. *Comptes Rendus, Acad. Sc.*, 1932, **111**, p. 1647 et **115**, p. 655.