

FR 2900347

Conférence Internationale sur la physique neutronique et les données nucléaires
pour les réacteurs et autres applications.
Harwell, Royaume-Uni, 25-29 septembre 1978.

CEA-CONF-4454

SYSTEMATIQUE DES SECTIONS EFFICACES DE REACTION (n,2n)

POUR DES SERIES D'ISOTOPES SEPARES

J. Fréhaut, J. Jary

Service de Physique Nucléaire

Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel

B.P. n° 561

92542 MONTROUGE CEDEX, France

RESUME

Les sections efficaces de réaction (n,2n) ont été mesurées du seuil à 15 MeV pour les isotopes pairs du Se, Nd, Sm, et pour les principaux isotopes du Gd, W, Tl et Pb. Pour une valeur donnée de l'énergie d'excès au-dessus du seuil de réaction, $\sigma(n,2n)$, en moyenne, augmente avec le nombre de masse A pour chaque série d'isotopes, et est plus faible pour un isotope ayant un nombre impair de neutrons que pour les isotopes pairs voisins. Des effets de couches et de moment angulaire très importants sont observés pour les isotopes du Tl, du Pb et pour ^{209}Bi .

Les sections efficaces calculées à l'aide d'un modèle statistique indépendant du spin et de la parité pour les isotopes du Nd et du Sm sont en bon accord avec les résultats expérimentaux, mais le calcul est très sensible au choix des densités de niveaux.

ABSTRACT

(n,2n) cross sections have been measured between threshold and 15 MeV for the even isotopes of Se, Nd, Sm, and for the main isotopes of Gd, W, Tl and Pb. For a given excess energy above the reaction threshold $\sigma(n,2n)$, on the average, is an increasing function of the mass number A, and is lower for an odd-N isotope than for the adjacent even isotopes. Strong angular momentum and shell effects are observed for Tl and Pb isotopes and for ^{209}Bi .

Calculations using a spin and parity independent statistical model are in agreement with experiment for Nd and Sm isotopes, but are very sensitive to the choice of the level densities.

La méthode du gros scintillateur liquide chargé au gadolinium est utilisée depuis plusieurs années au Service de Physique Nucléaire du Centre d'Etudes de Bruyères-le-Château pour la mesure des sections efficaces de réaction $(n,2n)$ et $(n,3n)$ [1-2]. Elle repose sur la détection des neutrons émis pour identifier une réaction $(n,2n)$ ou $(n,3n)$. Elle peut dès lors être utilisée pour tout isotope séparé disponible en quantité suffisante (10 à 15 g). De ce fait, elle est très utile pour l'étude des sections efficaces $(n,2n)$ de séries d'isotopes. De telles mesures sont en effet généralement impossibles par la méthode classique de l'activation, car la plupart des noyaux résiduels sont stables ou ont une période trop longue pour qu'une mesure d'activité soit envisageable. D'autre part, la méthode du gros scintillateur liquide, contrairement à la méthode par activation, ne demande pas la connaissance du schéma de désintégration du noyau résiduel. Elle évite donc toutes les incertitudes liées à la précision de ces schémas et permet d'obtenir de très bonnes mesures relatives.

Nous présentons ici les résultats que nous avons obtenu pour plusieurs séries d'isotopes séparés, nous en dégagons une systématique des sections efficaces $(n,2n)$, puis nous montrons qu'un calcul basé sur le modèle statistique permet de reproduire de façon satisfaisante les résultats expérimentaux.

ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le principe de la mesure, le dispositif expérimental et les différentes corrections ont déjà été décrits en détail [1] et ne seront pas discutés ici. Les mesures ont été réalisées du seuil de la réaction à 15 MeV pour les isotopes $^{76,78,80,82}\text{Se}$ [3], $^{142,144,146,148,150}\text{Nd}$ [4], $^{148,150,152,154}\text{Sm}$ [4], $^{155,156,157,158,160}\text{Gd}$, $^{182,183,184,186}\text{W}$, $^{203,205}\text{Tl}$ [5], $^{206,207,208}\text{Pb}$. Les mesures sur les isotopes du gadolinium, du tungstène et du plomb ont été réalisées récemment et ne sont pas publiées. L'ensemble des résultats expérimentaux est porté sur les figures 1 et 2 en fonction du nombre de masse A, pour différentes valeurs de l'énergie d'excès U_R au-dessus du seuil de réaction. Nous avons également porté sur la fig. 2 des résultats obtenus antérieurement pour ^{209}Bi [3] afin de mieux cerner l'influence des effets de couches au voisinage du noyau doublement magique ^{208}Pb .

Pour une énergie d'excès U_R donnée, on constate que $\sigma(n,2n)$ augmente généralement en fonction du nombre de masse A pour une série d'isotopes donnés ayant un nombre de neutrons de même parité. Cette augmentation est une tendance moyenne autour de laquelle on observe de nombreuses fluctuations. En particulier, l'allure de la variation est différente pour chaque série d'isotopes et dépend également de la valeur de U_R .

Cet effet peut être interprété dans le cadre du modèle statistique, à partir duquel on peut obtenir l'expression approchée :

$$(1) \quad \sigma(n,2n) = (\sigma_{ne} - \sigma_{nc}) \left[1 - (1 + U_R/T) \exp(-U_R/T) \right]$$

avec $T = [(U_R + E_b)/a]^{1/2}$, où E_b est l'énergie de liaison du dernier neutron dans le noyau cible et "a" le paramètre de la densité de niveaux. Pour les noyaux présentés sur la fig. 2, la section efficace σ_{nc} de production de particules chargées est pratiquement négligeable, tandis que la section efficace non élastique σ_{ne} croît légèrement avec A. D'autre part, la plupart des noyaux étudiés présentent un excès de neutrons par rapport à la vallée de stabilité, et l'énergie de liaison E_b du dernier neutron décroît lorsque A augmente. Dans ces conditions, l'expression (1) permet de prévoir une augmentation de $\sigma(n,2n)$ avec A pour une valeur donnée de U_R . Cependant cette augmentation sera modulée par des effets locaux, par exemple une variation de "a" avec A et, pour de faibles valeurs de U_R , des effets de moment angulaire.

Pour les isotopes du sélénium (fig. 1), la section efficace de production de particules chargées σ_{nc} n'est plus négligeable, et on peut admettre en première approximation qu'elle décroît exponentiellement en fonction de $(N-Z)/A$, contribuant ainsi à l'augmentation de $\sigma(n,2n)$ en fonction de A, d'après l'expression (1).

Ces considérations concernent essentiellement des isotopes ayant un nombre pair de neutrons. Pour les quelques mesures sur des isotopes ayant un nombre impair de neutrons (^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{183}W , ^{207}Pb), on constate que $\sigma(n,2n)$, pour une valeur de U_R donnée, est systématiquement inférieure à la valeur obtenue pour les isotopes pairs voisins. Pour ces noyaux, l'énergie de liaison E_b du dernier

$\sigma(n,2n)$. Comme nous le verrons par la suite, un calcul plus rigoureux basé sur le modèle statistique et tenant compte de l'énergie d'appariement permet de retrouver cette diminution de $\sigma(n,2n)$ pour les isotopes ayant un nombre impair de neutrons.

Les résultats obtenus pour les isotopes du thallium, du plomb et pour ^{209}Bi permettent de mettre en évidence des effets de couches. Pour ces noyaux, en effet, le paramètre "a" de la densité de niveaux est fortement diminué. D'après l'expression (1), il en résulte que $\sigma(n,2n)$ doit croître moins vite en fonction de U_R , ce qui est bien observé expérimentalement (fig. 2). On peut également prévoir dans cette région des effets de moment angulaire très importants. Par exemple, les isotopes ^{203}Tl et ^{205}Tl ont un niveau fondamental de spin et parité $1/2^+$, tandis que l'on a la séquence $2^-, 4^-, 7^-, 6^-$, pour le fondamental et les premiers états excités des noyaux résiduels ^{202}Tl et ^{204}Tl . Cette configuration est particulièrement défavorable, et la section efficace $(n,2n)$ des isotopes du thallium reste inférieure à celle des isotopes du plomb, pour une valeur donnée de U_R , bien que le paramètre "a" de la densité de niveaux soit supérieur. Par contre, la situation est nettement plus favorable dans le cas du ^{209}Bi (spin et parité du niveau fondamental $9/2^-$ pour ^{209}Bi et 5^- pour ^{208}Bi) : aucun effet n'est apparent au-dessus de $U_R = 2,5$ MeV, et il semble que les effets de couches soient compensés par des effets de moment angulaire.

En résumé, l'allure générale des variations des sections efficaces $(n,2n)$ mesurées pour plusieurs séries d'isotopes séparés peut être comprise qualitativement à l'aide de considérations simples effectuées dans le cadre du modèle statistique. Mais les résultats expérimentaux sont suffisamment précis pour permettre une étude plus quantitative, développée dans le paragraphe suivant.

CALCUL DES SECTIONS EFFICACES $(n,2n)$

Les sections efficaces de réaction $(n,2n)$ ont été calculées pour les isotopes du néodyme et du samarium à l'aide du code M S P Q [6], basé sur un modèle statistique indépendant du spin et de la parité. La compétition neutron-gamma est prise en compte, et le calcul de la largeur radiative totale est basé sur le formalisme de la résonance géante. Les sections efficaces de formation du noyau composé ont été obtenues en utilisant un code de modèle optique en voies couplées [7]. Les effets de pré-équilibre ont été introduits sous la forme simplifiée décrite dans la référence [8]. Les éléments de matrice $(M)^2$ des interactions à 2 corps, qui définissent la proportion de la composante de pré-équilibre par rapport à la composante d'équilibre, ont été déterminés en admettant une variation en $(A^3 E)$ en fonction du nombre de masse A et de l'énergie d'excitation E du noyau. La constante de proportionnalité a été déterminée à partir des résultats expérimentaux disponibles pour des noyaux voisins.

Le choix de la loi de variation de la densité de niveaux en fonction de l'énergie d'excitation joue un rôle déterminant. Les résultats expérimentaux pour les isotopes pairs du néodyme sont assez bien reproduits si l'on adopte la formulation de Gilbert et Cameron [9] (fig. 2). Les écarts observés pour $U_R \leq 2$ MeV peuvent être attribués à des effets de moment angulaire non pris en compte dans le modèle. Par contre, cette formulation ne permet pas de reproduire les résultats expérimentaux obtenus pour les isotopes pairs du samarium. Nous avons adopté dans ce cas la formulation développée par Ignatyuk et al. [10], dans laquelle le paramètre "a" de la densité de niveaux, varie en fonction de l'énergie d'excitation.

L'accord avec les résultats expérimentaux est alors acceptable (fig. 2). Le tableau I donne les valeurs de "a" de Gilbert et Cameron [9] et de Ignatyuk et al. [10] pour les isotopes pairs du néodyme et du samarium. La variation de "a" en fonction de A est très différente pour les deux formalismes. Il est cependant remarquable que la loi $a(A)$ de Gilbert et Cameron utilisée pour les néodymes, et la loi $a(A)$ de Ignatyuk et al. utilisée pour les samarium, qui permettent de reproduire de façon satisfaisante les résultats expérimentaux, ont une allure très voisine des lois $\sigma(n,2n) = f(A)$ pour $U_R =$ constante pour chaque série d'isotopes.

Les sections efficaces $(n,2n)$ ont également été calculées pour les isotopes du néodyme et du samarium ayant un nombre impair de neutrons. A titre d'exemple, les valeurs obtenues pour les isotopes ^{145}Nd et ^{147}Nd sont comparées aux valeurs obtenues pour les isotopes pairs voisins dans le tableau II pour $U_R = 3,4$ et 6 MeV. On constate une diminution de $\sigma(n,2n)$ lorsque Z est impair, semblable au décalage observé pour les résultats expérimentaux des isotopes de Cd,

W et Pb. Cependant, cet effet n'est pas systématique, en particulier il n'est pas obtenu pour les isotopes ^{147}Sm et ^{149}Sm .

CONCLUSION

Les sections efficaces $(n,2n)$ mesurées du seuil de réaction à 15 MeV pour des isotopes de Se, Nd, Sm, Gd, W, Tl, Pb et Bi montrent qu'en moyenne, pour chaque série d'isotopes, $\sigma(n,2n)$ augmente avec le nombre de neutrons du noyau pour une valeur donnée de l'énergie d'excès U_R .

Les sections efficaces $(n,2n)$ mesurées pour les isotopes pairs du néodyme et du samarium sont reproduites de façon satisfaisante à l'aide d'un modèle statistique indépendant du spin et de la parité. Le calcul est très sensible au choix des densités de niveaux, et plus particulièrement à la variation du paramètre "a" avec le nombre de masse A pour une série d'isotopes donnée. Pour certains isotopes impairs et pour une valeur donnée de l'énergie d'excès U_R , le calcul donne des sections efficaces inférieures à celles des isotopes pairs voisins. Un décalage de ce type a été observé expérimentalement pour les isotopes de Gd, W et Pb, et il serait intéressant d'entreprendre des calculs pour ces noyaux.

Les mesures effectuées sur les isotopes du thallium, du plomb et sur ^{209}Bi montrent qu'il existe dans cette région des effets de couches et de moment angulaire très importants pour des valeurs de l'énergie d'excès U_R inférieure à 5 MeV.

REFERENCES

- [1] Fréhaut, J., : "Use of the large Gd-loaded liquid scintillator technique for $(n,2n)$ and $(n,3n)$ cross section measurements", Nucl. Instr. Meth., vol. 135, p. 511, (1976).
- [2] Fréhaut, J., Mosinski, G. : "Mesure des sections efficaces $(n,2n)$ et $(n,3n)$ du seuil de réaction à 15 MeV", Rapport CEA-R-4627, (1974).
- [3] Fréhaut, J., Mosinski, G. : "Measurement of $(n,2n)$ and $(n,3n)$ cross sections for incident energies between 8 and 15 MeV", Proc. Conf. on Nuclear cross sections and technology, Washington, vol. 2, p. 89, (1975).
- [4] Fréhaut, J., Mosinski, G. : "Measurement of $(n,2n)$ and $(n,3n)$ cross sections at incident energies between 8 and 15 MeV", Proc. 5th International Symposium on the Interactions of fast Neutrons with Nuclei, ZfK-324, p. 24, (1976).
- [5] Fréhaut, J., Holub, E., Cates, M., Mosinski, G. : "Mesure de la section efficace $(n,2n)$ des isotopes ^{203}Tl et ^{205}Tl du seuil à 15 MeV", Rapport NEANDC (E) 187 "L", (1977).
- [6] Jary, J., : "MSPQ, a fortran code for cross section calculations using a statistical model with preequilibrium effects", Rapport NEANDC(E) 175 "L" (1977).
- [7] Lagrange, Ch. et al. : A paraître.
- [8] Cline, C.K., and Blann, M. : "The pre-equilibrium statistical model", Nucl. Phys., vol. A. 172, p.225, (1971).
- [9] Gilbert, A., Cameron, A.G.W. : "A composite nuclear level density formula with shell corrections", Can. J. Phys., vol. 43, p. 1446, (1965).
- [10] Ignatyuk, A.V., Smirenkin, G.N., Tishin, A.S. : "Phenomenological description of the energy dependence of the level density parameter", Sov. J. Nucl. Phys. 1975, 21, 22, 225 (1975).

Tableau I - Valeurs du paramètre "a" de la densité de niveaux, en MeV⁻¹, pour les isotopes pairs du néodyme et du samarium :

- 1 - Valeurs indépendantes de l'énergie d'excitation de Gilbert et Cameron [9].
- 2 - Valeurs de Ignatyuk et al. [10] pour des énergies d'excitation E de 8 et 15 MeV.

A	Néodyme					Samarium			
	142	144	146	148	150	148	150	152	154
a, réf. [9]	13,76	16,35	17,64	19,25	19,90	19,18	21,90	22,85	20,36
a, réf. [10], E=8MeV	20,96	20,11	19,42	18,81	18,74	18,99	18,36	18,27	19,37
a, réf. [10], E=15MeV	21,03	19,96	19,10	18,33	18,99	18,54	17,75	17,59	18,84

Tableau II - Sections efficaces (n,2n), en mb, calculées pour des isotopes du néodyme aux énergies d'excès U_R au-dessus du seuil de réaction de 3,4 et 6 MeV.

UR, MeV \ A	144	145	146	147	148
3	1315	1305	1360	1290	1370
4	1540	1515	1565	1500	1580
6	1815	1760	1825	1745	1790

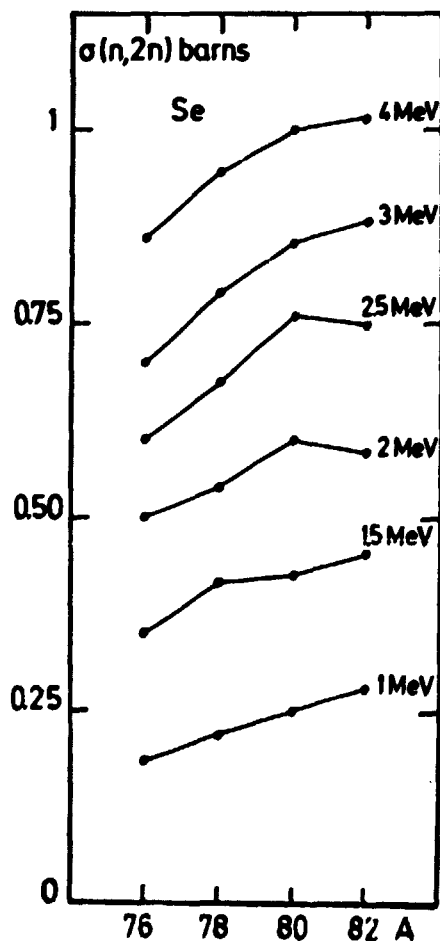


Figure 1 : Sections efficaces (n,2n) expérimentales des isotopes pairs du sélénium en fonction du nombre de masse A pour différentes valeurs de l'énergie d'excès U_R.

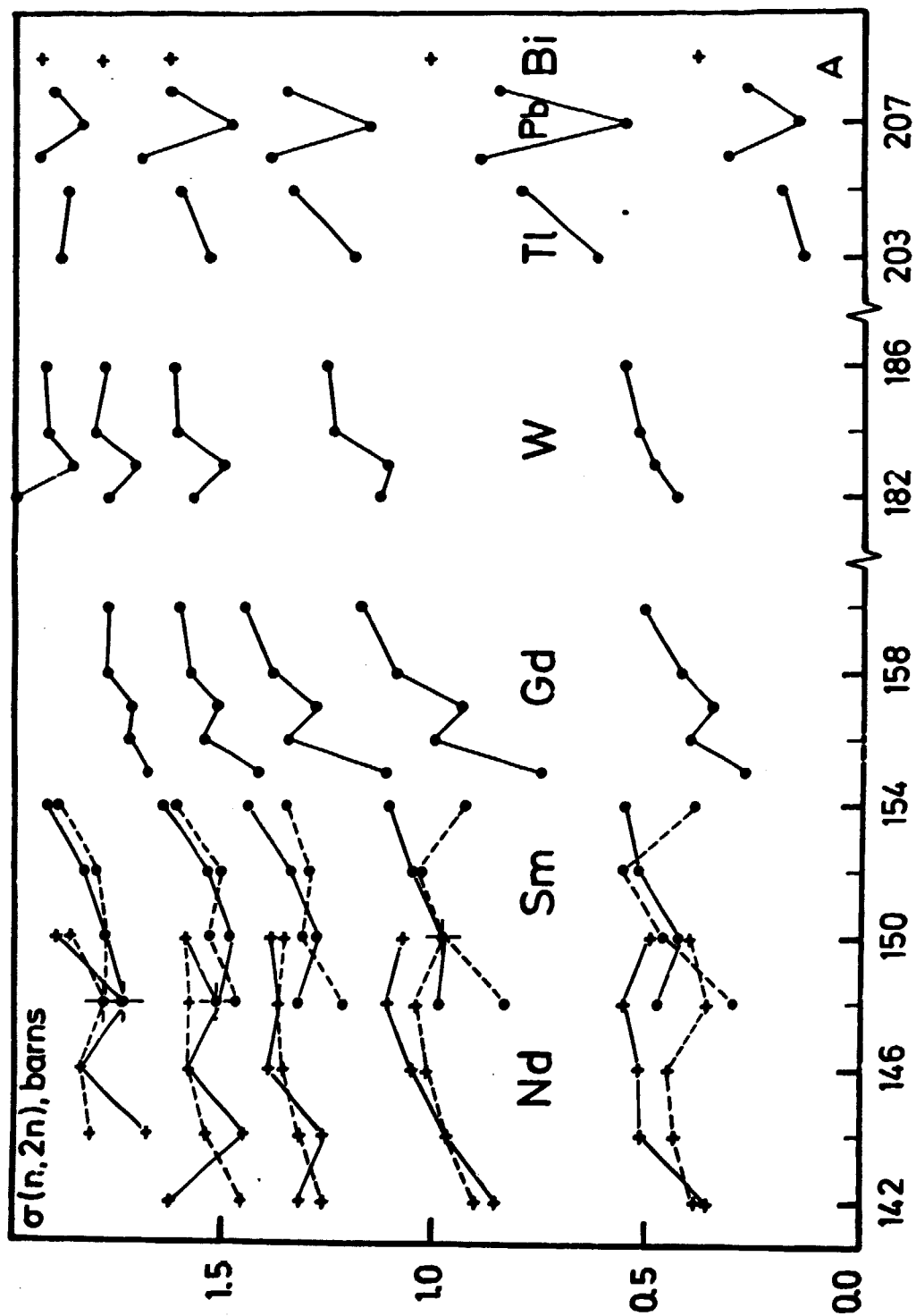


Figure 2 : Sections efficaces $(n, 2n)$ expérimentales des isotopes du Nd, Sm, Gd, W, Tl, Pb et de ^{209}Bi en fonction du nombre de masse A pour des valeurs de l'énergie d'excès U_p de 1, 2, 3, 4 et 6 MeV (respectivement, de bas en haut pour chaque série d'isotopes). Les courbes en pointillés pour les isotopes du Nd et du Sm correspondent au résultat d'un calcul à l'aide d'un modèle statistique indépendant du spin et de la parité.