

Etude des sections efficaces différentielles des réactions
(n,p) et (n,α) sur ^{19}F , ^{29}Si , ^{32}S et ^{40}Ca à 5,85 MeV

THÈSE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel
pour l'obtention du grade de docteur ès sciences

par

FEREYDOUN FOROUGHİ

diplômé ingénieur physicien de l'Ecole Polytechnique
de l'Université de Lausanne

Bâle
Imprimerie Birkhäuser S. A.
1972

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL
FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel, sur le rapport de Messieurs les professeurs J. ROSSEL, P. HUGUENIN et E. JEANNET autorise l'impression de la présente thèse sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont contenues.

Neuchâtel, le 25 août 1972

Le doyen:

A. JACOT-GUILLARMOD

à la mémoire de mon père

à ma mère

à ma femme

Remerciements

J'aimerais remercier très sincèrement le professeur Jean Rossel, promoteur de ce travail.

Je remercie également le Dr C. Nussbaum pour l'aide qu'il m'a apportée.

Etude des sections efficaces différentielles des réactions

(n, p) et (n, α) sur ^{19}F , ^{29}Si , ^{32}S et ^{40}Ca à 5,85 MeV

par **F. Foroughi** et **J. Rossel**

Institut de Physique, Université de Neuchâtel, Suisse

(19. VII. 71)

Summary. Using $\Delta E \cdot E$ discrimination in a counter telescope, $\sigma(\theta)$ and σ_t have been measured for (n, α) and (n, p) reactions in open shell nuclei (^{19}F , ^{29}Si , ^{32}S) and in double magic ^{40}Ca .

Results are given concerning $^{19}\text{F}(n, \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$; $^{29}\text{Si}(n, \alpha_0)$ and (n, α_1) ; $^{32}\text{S}(n, \alpha_0)$, $(n, p_0 + p_1)$ and (n, p_2) ; $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)$, $(n, \alpha_1 + \alpha_2)$ and $(n, p_0 + p_1)$. In the open shell nuclei $\sigma(n, \alpha)$ angular distributions are mostly forward compared to (n, p) processes but no other specific shell effect is observed. In ^{40}Ca the situation is reversed; $\sigma(\theta)$ has no remarkable structure for (n, α) whereas for (n, p) it is strongly peaked forward. Previous conclusions on α particle dominance in compound ^{41}Ca decay are confirmed.

As a by product of preliminary measurements we give upper bounds for (n, α) and (n, p) cross-sections in ^{53}Cr and ^{47}Ti .

1. Introduction

Dans le domaine d'énergie inférieur à 6 MeV les réactions nucléaires n, p et n, α sur les noyaux de masse moyenne peuvent faire intervenir à la fois la formation d'un noyau composé et des processus directs. En outre la compétition de plusieurs niveaux excités voisins du compound conduit à des phénomènes de fluctuation des sections efficaces en fonction de l'énergie. Ces difficultés ainsi que les sections efficaces assez faibles expliquent partiellement les résultats, assez peu nombreux et souvent en conflit apparent, publiés pour ce domaine d'énergie des neutrons incidents.

Dans le présent travail nous tentons de clarifier certains points concernant le mécanisme de réaction et l'effet possible de la configuration nucléaire. Dans ce but, nous mesurons simultanément, pour les différents groupes de protons et de particules α dans la voie de sortie, la valeur absolue de la section efficace différentielle dans les domaines d'énergie correspondant à des maxima de la fonction d'excitation et pour des noyaux: pair-pair avec 2 protons et 2 neutrons dans la couche $2s_{1/2}$ (^{32}S), pair-impair et impair-pair avec 1 neutron ou 1 proton dans la couche $2s_{1/2}$ (^{29}Si et ^{19}F) et magique (^{40}Ca).

D'autres noyaux choisis initialement et pour lesquels le taux de comptage s'est révélé trop faible pour une mesure acceptable ont fourni accessoirement des bornes supérieures à la section efficace (^{53}Cr et ^{47}Ti).

2. Méthode de mesure et dispositif expérimental

2.1 Système de détection

Les faibles sections efficaces nécessitent la mesure simultanée du spectre des protons et de particules α , ce qui est possible par une discrimination $\Delta E - E$ sur une plage d'énergie suffisamment étendue. Le système de détection consiste en un compteur-télescope comportant trois compteurs proportionnels à gaz (CO_2) et un compteur final à barrière de surface (Si), tous quatre en coïncidence (Fig. 1).

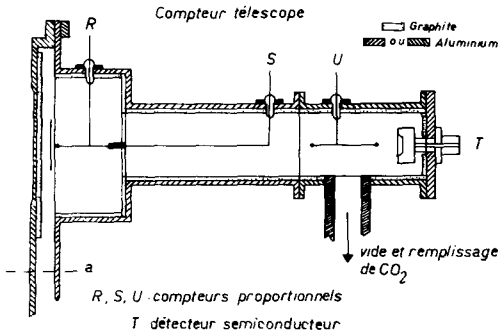


Figure 1

Le compteur S fournit l'information ΔE , le compteur T le signal spectrométrique ($\hat{E} = E - \Delta E$) qui sont multipliés électroniquement. Les compteurs proportionnels d'entrée R et de sortie U définissent la direction de diffusion et diminuent fortement le bruit de fond. La mesure de la distribution angulaire s'effectue en tournant le télescope autour d'un axe vertical passant par le centre de la cible.

Les revêtements intérieurs ont été choisis après plusieurs essais pour réduire au maximum les fausses diffusions et le bruit de fond. La couche de graphite à l'intérieur du couvercle arrête les particules chargées produites dans l'aluminium.

La pression du gaz CO_2 a été fixée à 15 mm Hg. C'est un compromis entre, d'une part, la résolution et le signal ΔE qui tous deux augmentent avec la pression (jusqu'à 60 mm Hg environ) et, d'autre part, l'effet de fausse cible de l'oxygène de CO_2 (le seuil des réactions (n, α) sur ^{16}O est de $-2,215$ MeV). La résolution du compteur S donnant ΔE a été mesurée dans ces conditions au moyen d'une petite source non focalisée de ThC' fixée au centre de la cible et trouvée égale à 12%.

L'électronique associée comprend 3 préamplificateurs de tension (PDT) et un préampli de charge (PAC), les amplificateurs et les coïncidences 2 à 2 pour les 4 canaux, le multiplicateur, l'analyseur multicanaux (400 canaux pour les protons, 400 canaux pour les α), les systèmes de test et la sortie sur bande perforée (Fig. 2 et 3).

Les quelques données suivantes renseignent sur les performances du système détecteur.

Avec les 4 compteurs en coïncidence, les faux événements sont réduits à 40 par heure et représentent pour les petits angles, les plus défavorables, environ 5% des événements utiles.

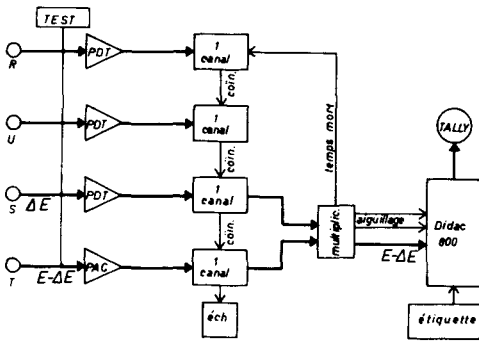


Figure 2
Schéma de principe de l'électronique utilisée.

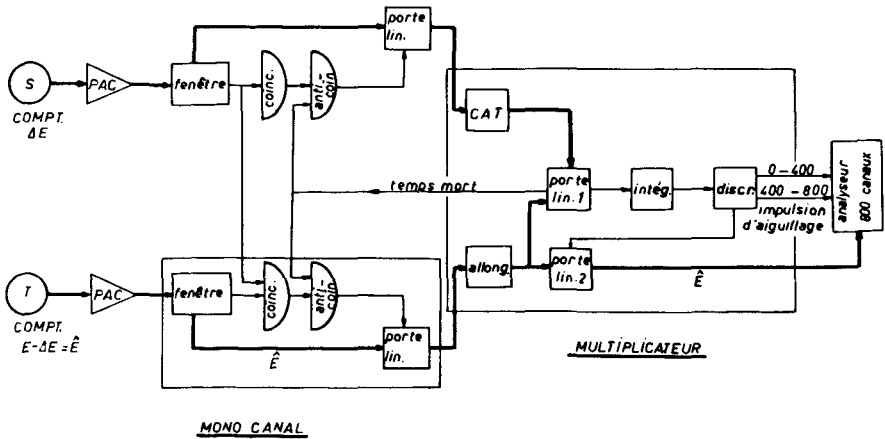


Figure 3
Schéma de principe du multiplicateur [20]

Les α produits dans le ^{29}Si du détecteur solide et qui parcourent le télescope à l'envers ne fournissent qu'une faible contribution au bruit de fond. Les α dus au ^{28}Si et les protons rétrodiffusés, sont éliminés par le choix du seuil de détection du compteur solide. Celui-ci nous a permis d'ailleurs, en servant de cible-détecteur, d'analyser au préalable différentes sections efficaces intéressantes dans Si [1].

La stabilité du compteur spectrométrique a été testée indépendamment de celle de l'ensemble du télescope. Dans les deux cas la variation du gain était inférieure à 1% par 24 heures.

La discrimination α -proton a été testée en utilisant une source de Ra et les protons de recul d'une cible de $(\text{CH}_2)_n$ soumise aux neutrons incidents (Fig. 4).

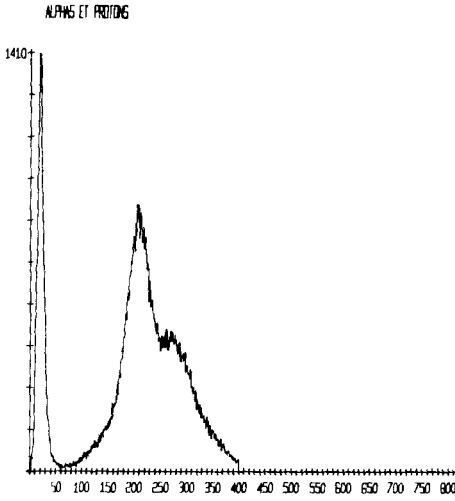


Figure 4a
Spectre des α de la source Ra et des protons produits dans $(\text{CH}_2)_n$ dans le compteur $S(\Delta E)$ sans discrimination.

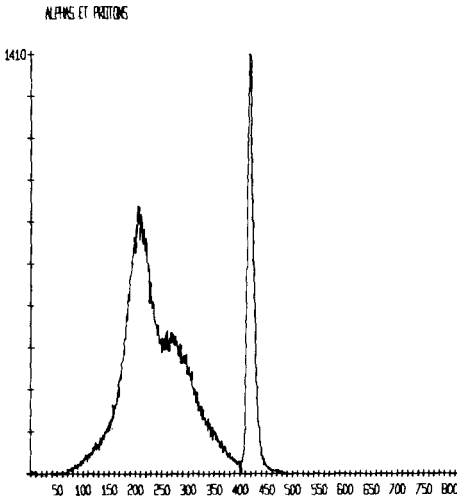


Figure 4b
Même spectre avec discrimination canal no 0 à 399 pour les α et 400 à 800 pour les protons.

2.2 Source et cibles

Les neutrons étaient produits dans une cible refroidie de deutérium [2] par les deutons de 3 MeV de l'accélérateur Van de Graaff avec un courant moyen réduit à $5 \mu\text{A}$, pour des raisons de bruit de fond et de stabilité de cible. Le spectre de neutrons peut être assimilé à un trapèze de largeur à mi-hauteur $\sim 65 \text{ keV}$ (pression du deutérium de 400 mm Hg). Cette distribution a été convoluée avec la répartition des énergies sur l'angle d'émission accepté par la cible de mesure. A 0° , cette ouverture était de $8,5^\circ$ correspondant à une cible de 3 cm de diamètre placée à 10 cm du centre de la source. Compte-tenu de la variation angulaire en énergie des neutrons $d - d$, le spectre des neutrons incidents sur la cible avait l'allure donnée dans la figure 5.

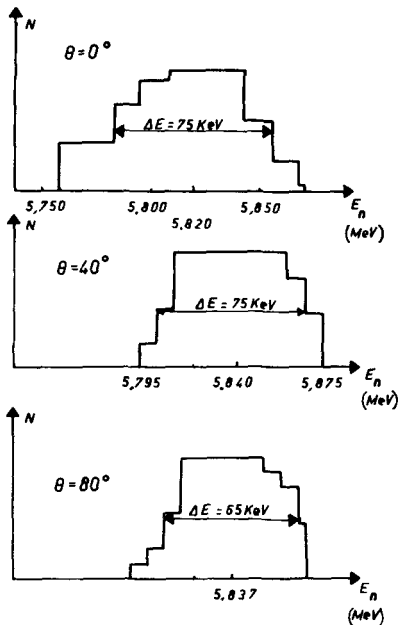


Figure 5
Résolution en énergie du faisceau de neutrons pour 3 angles θ (angle dont le télescope a tourné).

La mesure absolue de la section efficace exige la connaissance et le contrôle du flux de neutrons incidents. Dans ce but, le compteur à BF_3 (long counter) et l'intégration de courant des deutons ont été étalonnés à l'aide du télescope transformé en compteur de neutrons par les protons de recul d'une cible de $(\text{CH}_2)_n$. Un programme de calcul tenant compte des ouvertures angulaires et de la matière interposée sur le trajet des neutrons a été utilisé. Ce système de monitoring absolu a permis de rejeter toutes les mesures affectées par des variations de la cible de deutérium ou d'autres causes accidentelles.

La cible de ^{53}Cr de $1,12 \text{ mg/cm}^2$ était enrichie à 95,3% de cet isotope. Celle de ^{47}Ti de $1,10 \text{ mg/cm}^2$ était enrichie à 80,1%. Les cibles pour lesquelles des mesures complètes ont été possibles étaient les suivantes:

$0,7 \text{ mg/cm}^2$ de ^{29}Si (95,3% d'enrichissement);

$1,2 \text{ mg/cm}^2$ de soufre naturel (95% de ^{32}S)

et $1,29 \text{ mg/cm}^2$ de CaF_2 (soit 96,9% d'abondance de ^{40}Ca et 100% de ^{19}F).

Toutes ces cibles étaient déposées sur un disque d'or de 3 cm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur.

Pour la détermination de la position effective des 9 points fixant l'angle θ entre 0° et 165° et de leur imprécision $\Delta\theta$, la distribution angulaire des neutrons dans le faisceau incident ainsi que la répartition de matière sur le trajet du neutron dans la cible ont été prises en considération.

En outre, pour la détermination de la section efficace absolue, l'absorption des neutrons sur leur trajet source-cible a été convoluée avec les distributions de la figure 6b.

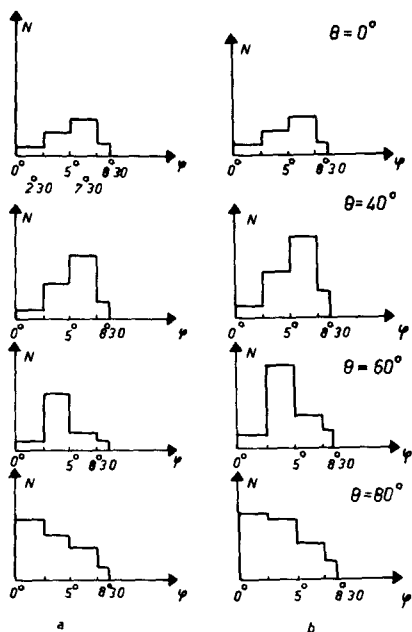


Figure 6a
Distribution angulaire du faisceau de neutrons tombant sur la cible.

Figure 6b
Grandeur précédente multipliée par l'épaisseur de la portion de cible rencontrée sous chaque angle.

Les sections efficaces totales pour chaque groupe de particules α ou de protons distincts ont été obtenues en sommant les histogrammes construits pour les distributions angulaires. L'extrapolation au-delà de 165° a été effectuée en conservant la dernière valeur; l'erreur ainsi commise ne dépasse pas 0,5%.

3. Resultats et discussion

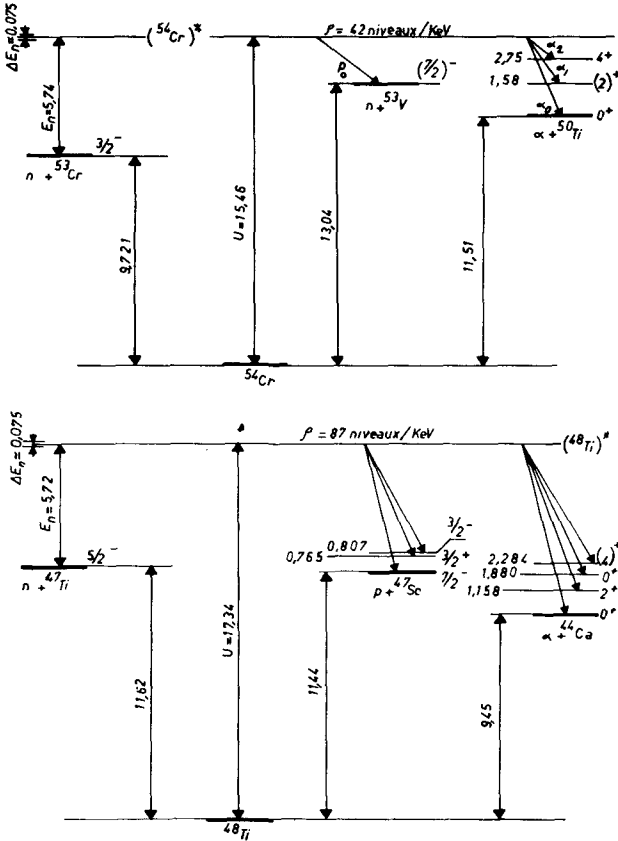
Les données et les résultats concernant ^{53}Cr et ^{47}Ti sont donnés dans les figures 7 et 8 et dans les tableaux 1 et 2.

Une mesure avec des neutrons de 6,2 MeV a également donné une valeur trop faible des sections efficaces pour permettre une analyse. Ces faibles valeurs sont ainsi confirmées sur un domaine d'énergie de 0,5 MeV, ce qui exclut un effet de fluctuation.

Les fonctions d'excitation pour les réactions (n, p) et (n, α) sur ^{28}Si et ^{29}Si ont été mesurées au préalable [1] pour clarifier les résultats contradictoires de la littérature [3-5] et pour mettre en évidence les régions correspondant à des maxima. Comme cela a été dit dans l'introduction, nous avons choisi pour ^{29}Si une énergie des neutrons coïncidant avec un pic de la fonction d'excitation apparaissant à 5,85 MeV.

Les informations relatives aux schémas de niveaux des noyaux sont données dans les figures 9 à 12; les sections efficaces différentielles mesurées sont présentées dans les figures 13 à 21.

Les marges d'erreur horizontales portées pour chaque point des distributions angulaires indiquent l'imprécision angulaire due à l'angle solide fini. Les barres d'erreur verticales donnent l'imprécision statistique.



Figures 7 et 8

Schémas des niveaux et des particules pouvant être détectées. La densité de niveaux indiquée a été estimée par la formule de Gilbert et Cameron [21].

Tableau 1

Réaction	Energie	Angle	$\sigma(\theta)$ mesure	(mb/sr) prévision théorique	σ mesure	Références
^{53}Cr	5,85 MeV	0°	$\leq 0,4$			Présent travail
(n, p)	14 MeV	120°	3,5			D. Allen [6]
	14,5 MeV	0°		5,1		D. G. Gardner [15]
	6,8 MeV				0,5 mb	T. P. Dryapachenko [16]
	spectre de 2 à 18 MeV				valeur moyenne 0,37 mb	G. Rau [17]
(n, α)	5,85 MeV	0°	$\leq 0,6$			Présent travail
	14,5 MeV	0°		7,5		D. G. Gardner [18]

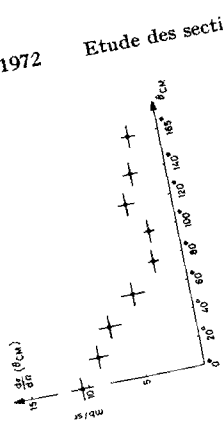


Figure 15

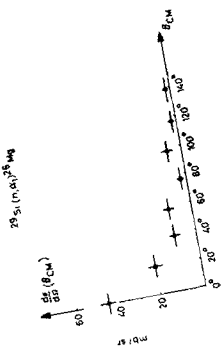


Figure 14

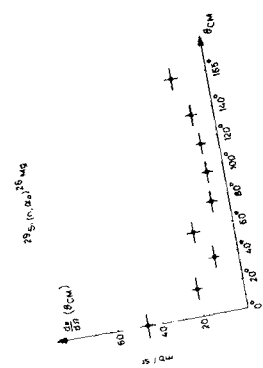


Figure 13

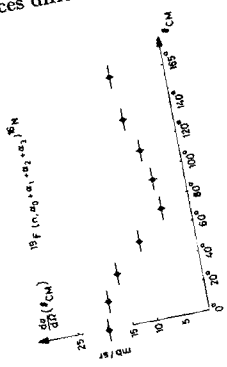


Figure 18

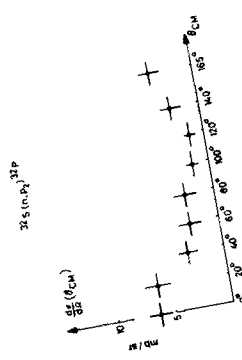


Figure 17

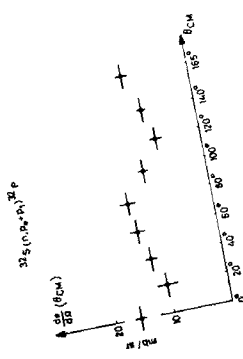


Figure 16

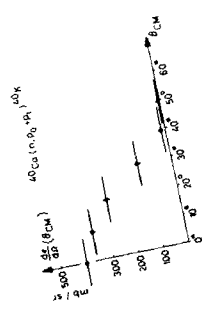


Figure 21

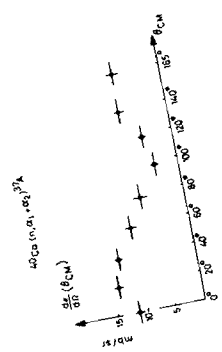
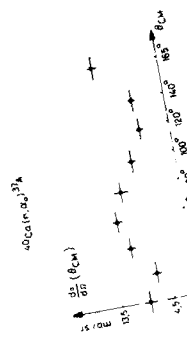


Figure 20



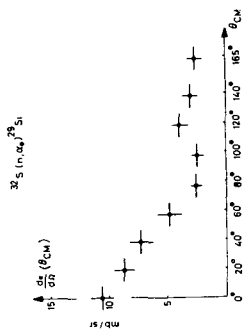


Figure 13

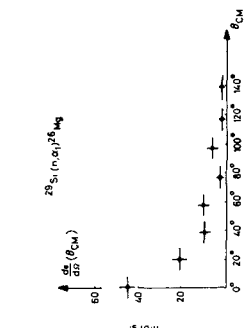


Figure 14

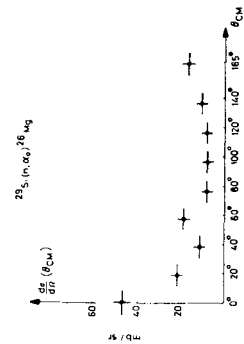


Figure 15

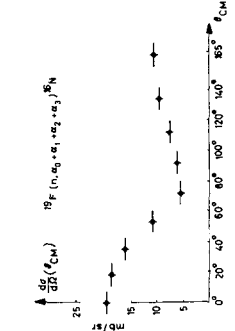


Figure 16

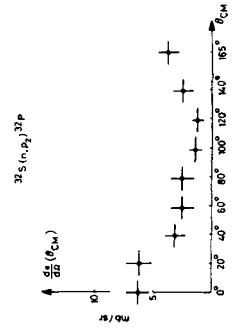


Figure 17

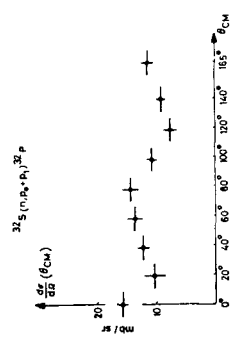


Figure 18

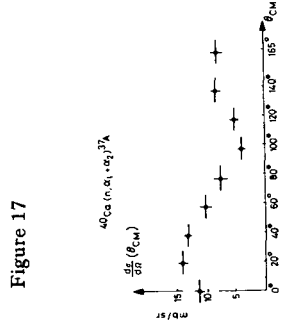


Figure 19

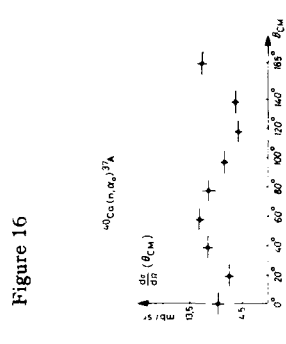


Figure 20



Figure 21

Dans le tableau 3, les sections efficaces totales (n, p) et (n, α) sont données pour les quatre noyaux étudiés.

Tableau 3

	Réactions	σ
^{40}Ca	(n, α_0)	116 ± 12 mb
	$(n, \alpha_1 + \alpha_2)$	110 ± 12 mb
	$(n, p_0 + p_1)$	365 ± 27 mb
^{19}F	(n, α)	135 ± 27 mb
^{32}S	(n, α_0)	51 ± 7 mb
	$(n, p_0 + p_1)$	150 ± 20 mb
	(n, p_2)	82 ± 9 mb
^{29}Si	(n, α_0)	140 ± 20 mb
	(n, α_1)	90 ± 10 mb

Pour ^{32}S la valeur de 232 ± 22 mb pour $(n, p_0 + p_1 + p_2)$ est compatible avec le résultat de 250 à 280 mb rapporté par Allen [6] et Klema [7] pour la même énergie.

Dans les mesures de Huber [8] entre 2,2 et 4,0 MeV effectuées avec une bonne résolution, apparaissent des structures ayant un caractère de fluctuation. C'est pourquoi notre valeur de 51 ± 7 mb pour (n, α_0) qui est environ 2,5 fois plus faible que celle donnée par Huber [8] peut fort bien s'expliquer par une dépression dans la courbe d'excitation à 5,85 MeV.

La valeur obtenue pour $\sigma(n, \alpha_0)$ dans ^{29}Si de 140 mb est supérieure au résultat, non corrigé des effets de bords, de 100 ± 10 mb trouvé lors des mesures des fonctions d'excitation en utilisant le compteur solide de Si comme cible [1]. Comme la distribution angulaire $\sigma(\theta)$ a un pic vers l'avant, les corrections sur l'ancien résultat agiraient dans le bon sens et avec le bon ordre de grandeur.

Dans le cas de ^{19}F les neutrons incidents (5,55 MeV dans le CM) peuvent produire une excitation dans le noyau ^{20}F au voisinage d'un niveau bien marqué. La distribution angulaire cependant n'a pas la symétrie correspondant au cas simple d'un noyau compound. La section efficace totale (n, α) de 135 mb est à comparer aux résultats de 250 mb obtenus par Marion [9], de 205 mb obtenus par Smith [10] et de 155 mb obtenus par Davis [11], dans ces 3 cas à 5,85 MeV également.

Pour ^{40}Ca , notre section efficace totale (n, α_0) de 116 mb à 5,85 MeV confirmerait une nette décroissance avec l'énergie, allant de 160 mb à 5 MeV (mesure de Bass [12]) à la valeur de 60,5 mb à 6,0 MeV (mesure de Knellwolf [2] effectuée avec notre équipement antérieur). D'autre part au-dessous de 5 MeV les résultats de Calvi [13] indiquent que $\sigma(n, \alpha_0)$ est de l'ordre de 40 mb entre 4,0 et 4,5 MeV. Dans la mesure où les conditions expérimentales sont suffisamment comparables, on aurait donc affaire à un maximum prononcé dans la fonction d'excitation entre 4 et 6 MeV. Un tel comportement avec variation rapide peut également se déduire de notre valeur de 110 mb pour $\sigma(n, \alpha_1 + \alpha_2)$ et du résultat trouvé précédemment [2] de 50 mb à 6,0 MeV.

Si l'on essaie de tirer de nos résultats encore limités quelques conclusions en comparant les différents types de noyaux étudiés et les sections différentielles (n, α) et (n, p) on remarquera les faits suivants:

Pour les noyaux à couches non saturées (^{29}Si , ^{32}S , ^{19}F) les distributions angulaires (n, α) sont toutes assez prononcées vers l'avant, le rapport avant/arrière étant dans tous les cas égal ou supérieur à 2. Pour les réactions (n, p) qui ont pu être mesurées dans ces noyaux, les distributions sont essentiellement uniformes. Il n'apparaît pas d'effet distinct lié au type de nucléon ou paires de nucléons hors couche saturée.

La situation est inversée pour le noyau magique ^{40}Ca : les distributions angulaires (n, α) n'ont pas de structure remarquable tandis que la réaction ($n, p_0 + p_1$) présente un très fort maximum vers l'avant, $\sigma(\theta)$ étant essentiellement nul au-dessus de 50° .

Comparant $\sigma(\theta)$ pour (n, α_0) et ($n, \alpha_1 + \alpha_2$) avec les distributions mesurées précédemment [2] à 6,0 MeV on constate, à part une diminution d'un facteur 2 environ, une modification de la forme qui peut confirmer l'interprétation déjà donnée [2] de l'influence de fluctuations du type de Ericson.

En résumé, le seul processus interprétable comme une interaction directe typique est la réaction ($n, p_0 + p_1$). Un examen de la situation à 5,6 et 6,0 MeV a montré que les résultats sont essentiellement stationnaires (à l'inverse des processus n, α). Ce caractère est confirmé en outre par la réaction (n, n) observée pour ^{40}Ca par Rebert [14].

Le passage par un noyau composé (^{41}Ca) dans le cas de la réaction (n, α) alors qu'il n'en est rien pour (n, p) ou (n, n) montre que $\Gamma_\alpha \gg \Gamma_p, \Gamma_n$. Ce résultat corrobore la conclusion à laquelle nous étions arrivés [2] que la voie de sortie α est très fortement favorisée dans ^{41}Ca après capture d'un neutron rapide et formation d'un noyau intermédiaire.

Ce travail a bénéficié de l'appui financier du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. FOROUGHI et J. DURISCH, *Helv. phys. Acta* **43**, 432 (1970).
- [2] T. KNELLWOLF et J. ROSSEL, *Helv. phys. Acta* **39**, 376 (1966).
- [3] G. ANDERSON-LINDSTRÖM, G. BETZ, W. MANSBERG et E. RÖSSLE, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liège* **30**, 265 (1964).
- [4] R. POTENZA, R. RICAMO et A. RUBINO, *Nucl. Phys.* **41**, 298 (1963).
- [5] B. MAINSBRIDGE, T. W. BONNER et T. A. RABSON, *Nucl. Phys.* **48**, 83 (1963).
- [6] L. A. ALLEN, JR., W. A. BIGGERS, R. J. PRESTWOOD et R. K. SMITH, *Phys. Rev.* **107**, 1363 (1957).
- [7] E. D. KLEMA et A. O. HANSON, *Phys. Rev.* **73**, 106 (1948).
- [8] P. HUBER et T. HÜRLIMAN, *Helv. phys. Acta* **28**, 33 (1955).
- [9] J. B. MARION et R. M. BRUGGER, *Phys. Rev.* **100**, 69 (1955).
- [10] D. SMITH, N. A. BORTOM et E. L. HUDSPETH, *Phys. Rev.* **117**, 514 (1960).
- [11] E. A. DAVIS, F. GABBARD, T. W. BONNER et R. BASS, *Nucl. Phys.* **27**, 448 (1961).
- [12] R. BASS et F. SALEH, *EANDC 57 'U' p. 1* (1965).
- [13] G. CALVI, A. S. FIGUERA et R. POTENZA, *Proc. Intern. Conf. on Nucl. Phys. (Paris 1964)*, p. 724.
- [14] J. D. REBERT et J. D. BRANDENBERGER, *Phys. Rev. A* **163**, 1077 (1967).
- [15] D. G. GARDNER, *Nucl. Phys. A* **96**, 121 (1967).
- [16] T. P. DRYAPACHENKO, V. A. KORNILOV, O. F. NEMETZ et V. A. PILIPCHENKO, *Sov. Phys. J.* **6**, no 3, 321 (1968).
- [17] G. RAU, *Nukleonik* **9**, 228 (1967).
- [18] D. G. GARDNER, et YU-WEN YU, *Nucl. Phys.* **60**, 49 (1964).
- [19] A. POULARISKAS, *Phys. Rev.* **115**, 989 (1959).
- [20] F. FOROUGHI, E. GRAF et J. DURISCH, *Helv. phys. Acta* **41**, 1288 (1968).
- [21] A. GILBERT et A. C. CAMERON, *Canad. J. Phys.* **43**, 1446 (1965).

Curriculum vitae

De nationalité iranienne, je suis né à Genève le 13 mars 1940. Après avoir fait des études en Suisse, en France, en Iran, en Autriche et en Italie, j'ai obtenu en 1960 (en Autriche) le baccalauréat, section mathématiques élémentaires.

Entré en 1961 à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne, j'y ai acquis en 1966 le diplôme d'ingénieur physicien.

Depuis, je travaille comme assistant à l'Institut de Physique de l'Université de Neuchâtel, sous la direction du Prof. J. ROSSEL.