

Al、Ti、V、I 的快中子激发曲线

卢涵林 王大海 夏宜君 崔云峰 陈宝林

(中国科学院原子能研究所)

摘 要

在 $E_n = 4.5—18.3$ MeV 能区, 用活化法测量了 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$, $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$, $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$ 和 $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 的激发曲线. 在 $E_n = 14.61 \pm 0.20$ MeV 处, 以伴随粒子法作中子通量测量, 得到了 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面. 其他反应以此截面为标准进行绝对测量. 产物核放射性用经标定过效率的 NaI(Tl) 闪烁谱仪测量. 结果分别为 117.5 ± 3.0 mb, 291.4 ± 14.0 mb, 63.7 ± 3.2 mb, 16.8 ± 0.9 mb 和 1656 ± 68 mb. 最后对测量结果进行了简单的比较.

一、引 言

快中子激发曲线经常被用于反应堆的快中子能谱测量和结构材料的辐照损伤研究. 虽然已有许多作者发表了测量结果, 但往往有较大分歧, 故尚不能满足实际需要. 因此, 我们测量了 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$, $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$, $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$ 和 $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 的激发曲线. 在 $E_n = 4.5, 5.0$ MeV 以半导体望远镜测定中子通量, 对 ^{46}Ti 作绝对测量. $E_n = 6.3—11.4$ MeV 截面以本文推荐的 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 截面为标准进行测量. 在 $E_n = 14.61$ MeV 处以伴随粒子法测定中子通量, 对 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面作绝对测量. 其他反应截面均以 Al 截面作标准进行绝对测量. $E_n = 12—18$ MeV 的相对测量结果用 $E_n = 14.61$ MeV 的截面值归一得出该能区的激发曲线.

二、测量原理及实验安排

活化法测量中子截面的原理和计算公式以及中子通量的绝对测量, 已在工作(1)中有较详细的叙述. 本工作对 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应在 $E_n = 14.61$ MeV 能量点作了绝对测量. 其他四种反应都以 Al 截面为标准进行测量, 采用样品前后均贴以同样直径的 Al 片照射. 其截面计算公式为:

本文 1978 年 4 月 25 日收到.

1) 天然 Ti 中产生的全部 ^{46}Sc 和 ^{48}Sc , 以 ^{46}Ti 和 ^{48}Ti 原子数计算截面.

$$\sigma_x = \frac{N_x}{N_{Al}} \cdot \frac{\left[M \cdot \varepsilon_r \cdot f_s \cdot f_d \cdot \frac{1}{1 + \alpha} \sum_i \phi_i (1 - e^{-\lambda Ti}) e^{-\lambda t_i} \right]_{Al}}{\left[M \cdot \varepsilon_r \cdot f_s \cdot f_d \cdot \frac{1}{1 + \alpha} \sum_i \phi_i (1 - e^{-\lambda Ti}) e^{-\lambda t_i} \right]_x} \cdot \sigma_{Al},$$

N ——产物核特征 γ 射线全能峰计数率。

M, ε_r, f_s ——分别为样品核数目, 全能峰效率和样品的自吸收修正因子。

f_d, α, λ ——特征 γ 射线的分支比、内转换系数和衰变常数。

ϕ_i ——照射过程中第 i 段时间内的中子通量相对值。

(下标 Al 和 x 分别代表铝和待测样品)

样品: 本工作均为天然同位素组份 $\phi 20$ mm 的圆片, 厚度 0.2—2 mm 不等。Al, Ti 为金属样品, I 由 NaI(Tl) 晶体密封在聚乙烯薄膜中制成, 以防潮解。V 样品用 V_2O_5 粉末压制而成。纯度分别为 99.9%, 99%, 99.99% 和 99.4%。

样品辐照: 4.5 和 5.0 MeV 两能量点的绝对测量在静电加速器上进行, 样品放在 0° 角距源 5 厘米处辐照, 用半导体望远镜作通量绝对测量。照射过程中用长中子管监视通量变化。6.3 和 7.6 MeV 两能量点在可变能量迴旋加速器上相对 Al 作测量。样品与 Al 片夹心放置于距源 10 厘米处。

10.0 和 11.4 MeV 两能量点用气体氙靶在上海原子核研究所的固定能量迴旋加速器上用 Pt 吸收片改变入射氙能量得到。加吸收片后, 中子能散度变大, 因此, 在辐照的同时, 用具有 $n - \gamma$ 分辨的苾晶体闪烁谱仪测中子能谱, 以便对截面作相应的修正。由于我们所测的反应均有较高的反应阈能, 因而氙的崩裂反应 $D(d, np)D$ 所生成的低能中子群影响不大。

12—18 MeV 能区在静电加速器 and 高压倍加器上作相对测量, 以 $T(d, n)^4He$ 反应作中子源, 样品对称地放置在 $\phi 150$ 毫米或 $\phi 200$ 毫米有机玻璃环形架的不同角度上。 $\bar{E}_d = 2.0$ MeV 的中子通量角分布用 S. J. Bame^[36] 的测量结果, $\bar{E}_d = 120$ KeV 的角分布用核反应运动学计算结果。同时, 对由于靶头结构材料对中子角分布的干扰用 Monte-Carlo 法进行计算, 以便对中子通量的角分布作相应地修正。由于在与入射氙束成 90° 的位置此影响较大, 故在此位置不放置样品。

14.61 MeV 截面绝对值的测量在高压倍加器上进行。Al 样品放在与氙束成 45° 角, 与中子源的距离为 10、15、20 厘米处多次照射。为减少靶点漂移造成的误差, 采用 $\phi 8$ 毫米的芯靶。

其他核均以 Al 截面为标准, 辐照时样品与 Al 夹心放置。由于中子通量在照射过程中有波动, 因此, 用伴随 α 粒子法监测通量变化, 每隔 10 分钟记录一次, 以便进行修正。

产物核测量: 反应产物的放射性用 $\phi 10 \times 7.6$ cm 的 NaI(Tl) 闪烁谱仪测量。除 ^{24}Na 和 ^{46}Sc 有标准源外, 其他产物核的探测效率由 NaI(Tl) 闪烁谱仪的效率曲线上内插得到。效率曲线由 $^{198}Au, ^{137}Cs, ^{56}Mn, ^{46}Sc, ^{24}Na$ 五个薄膜型标准源标定。标准源强由 $4\pi\beta - \gamma$ 符合和 $4\pi\beta$ 装置测定。用薄膜源标定闪烁谱仪效率时, 还作了面源和环高度修正, 有关反应还作了叠加修正。由于天然组份的样品同位素复杂和有多种反应道, 因此, 产物核的测量应在照射后的一定时间进行, 冷却时间从 1 小时 (^{24}Na) 到 30 多天 (^{46}Sc) 不等。测量时对样

品的几何和自吸收作了修正。对特征 γ 射线有级联而又无标准产物源的 ^{48}Sc 核,作了由于光叠加而造成的全能峰计数损失的修正。

三、测量结果和误差

测量结果列于表一中, 14.61 MeV 点的绝对测量, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 进行 11 次, 其余四种反应进行六次。

表 1 激发曲线测量结果

$\sigma(\text{mb})$ $E_n(\text{MeV})$	反应 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	$^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$	$^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$	$^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$	$^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$
17.97±0.27	62.0±2.6	299.5±17.7	46.1±2.9	19.7±1.3	1648±94
17.18±0.38	72.3±3.1	277.6±16.3	50.9±3.1	20.3±1.3	1689±93
16.05±0.43	93.3±4.0	290.5±17.1	57.9±3.6	19.3±1.2	1732±94
14.77±0.25	116.0±3.0		64.3±3.7	17.4±0.9	1661±68
14.61±0.21	117.5±3.0	291.4±14.0	63.7±3.2	16.8±0.9	1656±68
14.36±0.15	121.0±3.2		62.9±3.4	16.0±0.8	1643±67
13.68±0.35	126.2±3.3	288.5±13.9	59.6±3.1	14.1±0.7	1617±66
13.56±0.13	128.1±3.3				
13.41±0.16	126.9±3.3			13.2±0.7	
12.79±0.29	122.7±5.3	304.5±19.8	54.4±3.5	11.5±0.7	1530±87
12.23±0.14	120.1±5.1	295.2±20.4	50.9±3.2	10.1±0.6	1428±79
11.4±0.8			43.1±5.5	5.3±0.7	894±116
10.0±0.6			27.2±3.5		
7.6±0.6			10.8±0.6		
6.3±0.4			2.5±0.2		
5.0±0.1		69±11	~0.1		
4.5±0.1		44±7			

$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 截面绝对测量点的误差为 $\pm 2.5\%$, 主要考虑了中子通量(1.2%)、标准源强的刻度(1.5%)、样品距离(1.4%)、计数统计(0.5%)的误差。另外, 尚考虑了中子通量变化、靶结构材料散射、样品核数目等误差。

以 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 截面作标准的其他反应截面的绝对点的误差, 除标准截面误差外, 还考虑了各自样品的核数和特征 γ 射线测量(包括效率、自吸收修正、计数统计)的误差。

10.0 和 11.4 MeV 两能量点, 因为能谱单色性差, 需引入激发曲线走向不确定性和能谱测量误差, 因而使误差大到 $\pm 13\%$ 。

12—18 MeV 能区的误差除该反应绝对点误差外, 还考虑了中子通量角分布 ($\bar{E}_d = 2.0$ MeV 时为 3.5%, $\bar{E}_d = 120$ KeV 时为 0.5%) 和各点的计数统计误差。

四、讨 论

1: $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$

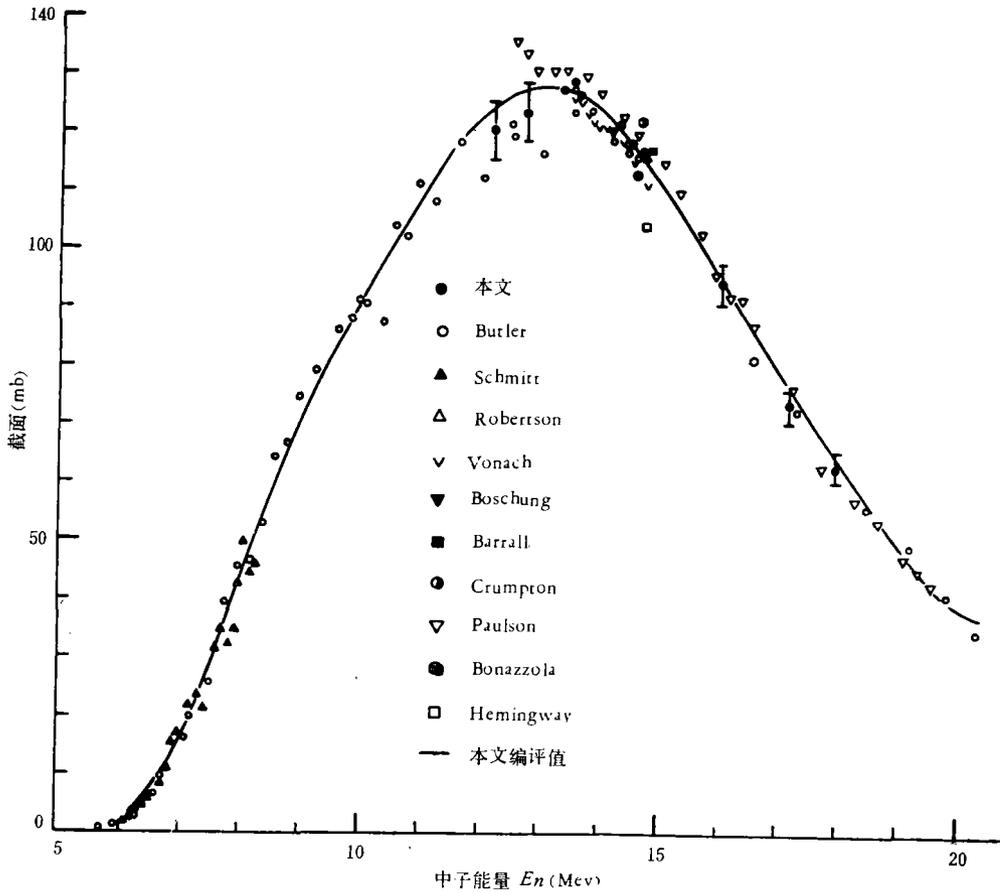


图1 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应激发曲线

我们把有关此反应的主要数据画在图1中, 并把中子通量进行绝对测量的误差小于10%的数据列于表2中。为了便于比较, 利用本组编评的激发曲线走向, 把数据都归一到 $E_n = 14.8 \text{ MeV}$ 能量点进行比较。

表2 $E_n = 14.8 \text{ MeV}$ 附近 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 截面值比较

作者	发表年份	通量测量	放射性测量	$E_n(\text{MeV})$	$\sigma(\text{mb})$	归一到 14.8 MeV 处 $\sigma(\text{mb})$	文献
本文		伴随 α	γ	14.61 ± 0.20	117.5 ± 3.0	115.7 ± 3.0	
J. P. Robertson	1973	反冲质子	$4\pi\beta-\gamma$	14.78 ± 0.1	115.5 ± 3	115.3 ± 3	2
H. Vonach	1970	伴随 α	γ	14.43 ± 0.2	117.0 ± 0.8	112.3 ± 0.8	3
P. Boschung	1969	伴随 α	γ	14.2	120 ± 5	114.2 ± 5	4
R. C. Barrall	1969	反冲质子	γ	14.8 ± 0.2	116 ± 8	116 ± 8	5
D. Crumpton	1969	伴随 α	γ	14.7 ± 0.2	121 ± 6	119.8 ± 6	6
A. Paulsen	1965	反冲质子	γ	14.71 ± 0.27	119 ± 7	117.8 ± 7	7
G. C. Bonazzola	1964	伴随 α	端窗 β	14.7 ± 0.3	112 ± 4	110.9 ± 4	8
J. D. Hemingway	1966	测停留在铝箔中的 α 的量	γ	14.8 ± 0.1	103.6 ± 5.5	103.6 ± 5.5	9

我们的结果与 J. Robertson^[2] 很一致, 除 J. D. Hemingway^[9] 以外与其他作者在误差范围内一致. J. D. Hemingway 的结果偏低, 估计是由于采用独特方法测量中子通量所致. 我们的激发曲线走向与 J. P. Butler^[10]、A. Paulsen^[7] H. Vonach^[3] 等人一致. 在 $E_n = 12.5-13$ MeV 能区 A. Paulsen 的激发曲线走向与本文及 J. P. Butler^[10] 相反. $E_n = 13-15$ MeV 能区在绝对值上明显地分为两组, A. Paulsen 的结果比 H. Vonach 高出 4%.

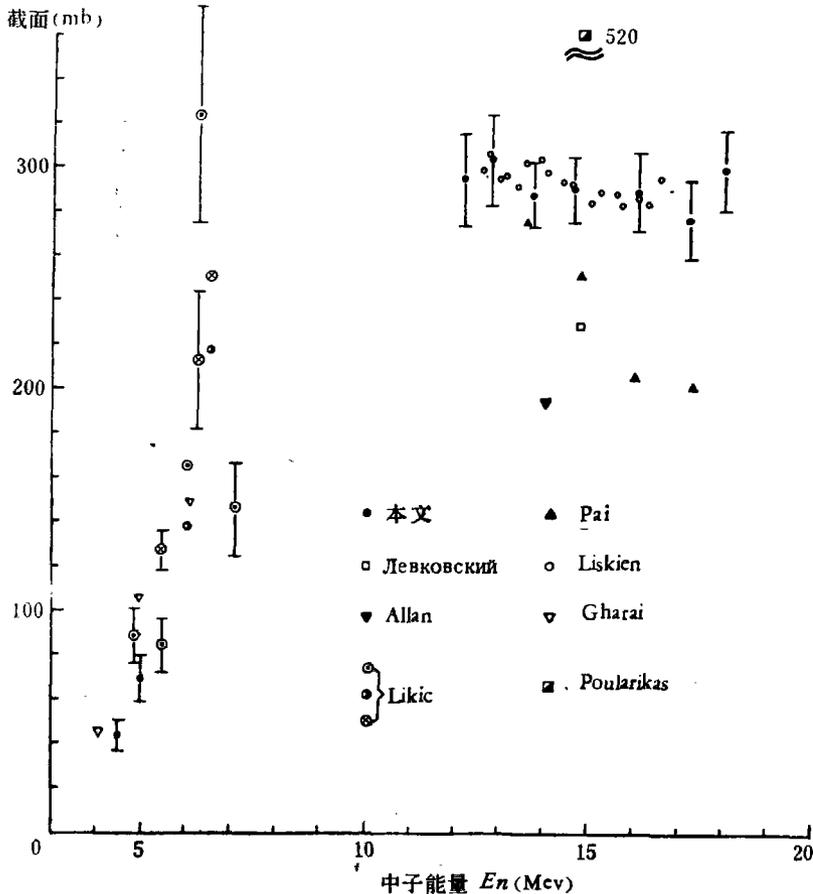


图2 $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 反应激发曲线(图中 Gharai 应是 Ghorai——编者)

2: $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$

由图2可以明显地看出, 中子能量大于 12 MeV 能区激发曲线走向分为两组. 一组平滑, 另一组很快下降. 其原因在于所用样品成份不同. 凡是天然组份的样品, 由于未扣除 $^{46}\text{Ti}[(n, np) + (n, pn) + (n, d)]^{46}\text{Sc}$ 反应的影响, 使截面抬高. 我们与 H. Liskien^[12] 均属于这一类. 而 H. L. Pai^[13] 使用的是同位素样品, 所以截面下降. 与本文相比, A. Poularikas^[14] 高 70%, 而 D. L. Allan^[15] 低 50%.

在 4—7 MeV 能区, Y. Likic^[16] 用三种不同的标准截面测得的结果不一致, 有时超出

所给误差。估计是由于 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 反应阈低, 散射本底影响严重所造成。其余数据基本一致。

3: $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$

本文较为完整地测量了 5—18 MeV 能区的激发曲线。由图 3 可见, 大多数作者的数据都在误差范围内一致。但应该指出的是, H. L. Pai^[13] 的结果是用同位素样品测量的。对天然同位素组份的样品, 当 $E_n > 13$ MeV 时, 随着入射中子能量的增高, $^{59}\text{Ti}[(n, np) + (n, pn) + (n, d)]^{48}\text{Sc}$ 反应截面的贡献也逐渐增大。在 $E_n = 13.7\text{—}18$ MeV 能区此影响为 (2.7—4.0)%, 本工作未予扣除。在 14 MeV 附近, 本文的结果与 H. L. Pai^[13]、B. H. Левковский^[17] W. Mannhart^[19]、F. Gabbard^[20] 一致。与本文相比 D. L. Allan^[15] 低 50%, E. B. Paul^[21] 高 50%, D. Crumpton^[22] 高 27%。

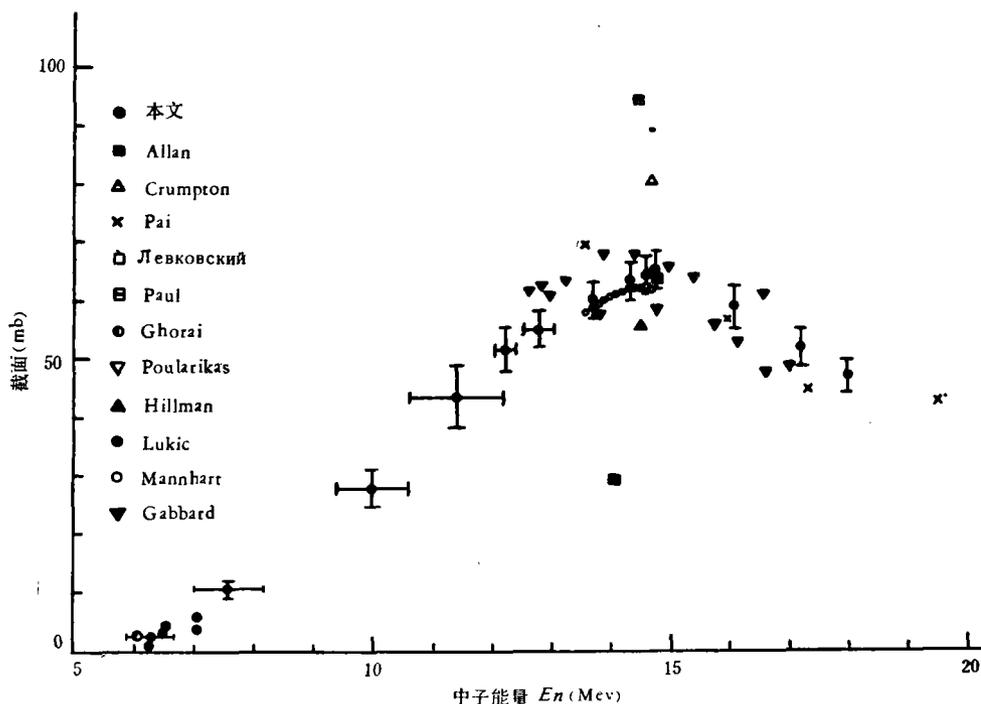


图 3 $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 反应激发曲线

4: $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$

此反应截面分歧很大, 截面值相差可达两倍。在图 4 中未画出 M. Bormann^[24] 和 I. Kumabe^[25] 的数据, 他们的数据比本工作高出两倍。本工作仅与近年发表的 A. Paulsen^[26] 和 W. Mannhart^[19] 一致。与 E. B. Paul^[21] 和 S. Cierjacks^[27] 相差一倍。在 10—12 MeV 附近 A. Paulsen^[26] 的数据有起伏是由于中子源弱 [$^{15}\text{N}(d, n)^{16}\text{O}$], 计数统计太差造成的。

为验证样品纯度的可靠性, 我们用 NH_4VO_3 作样品也作了测量, 结果在 $\pm 2\%$ 范围内一致。

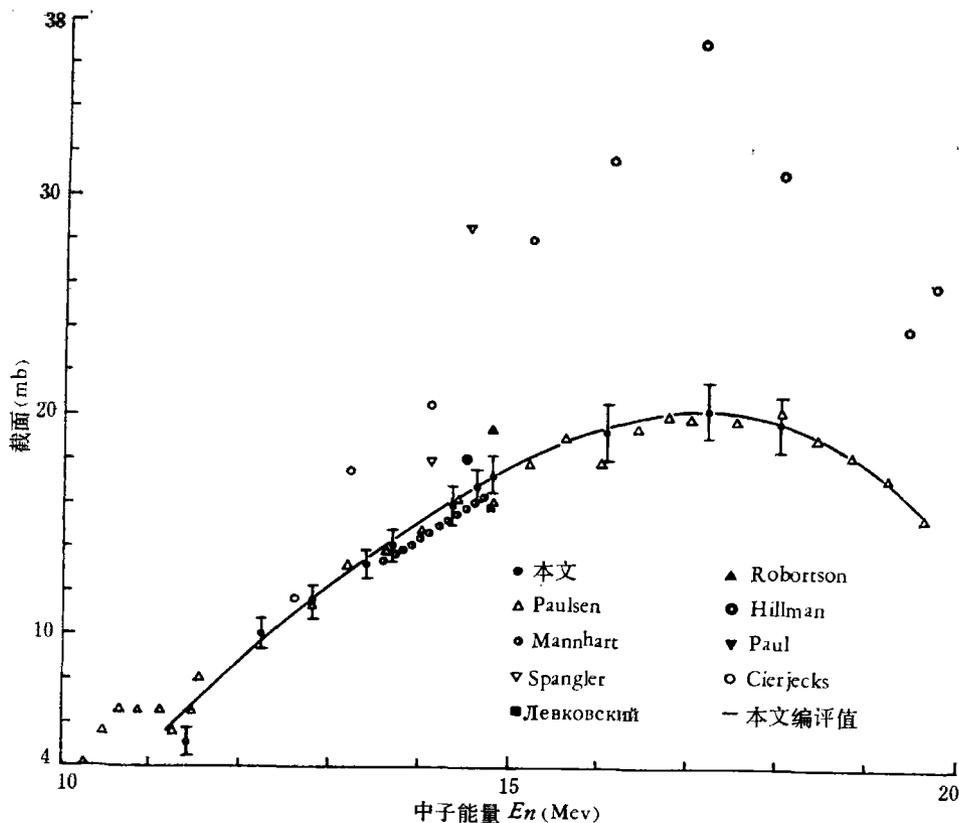


图4 $^{21}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$ 反应激发曲线(图中 Cierjecks 应是 Cierjacks——编者)

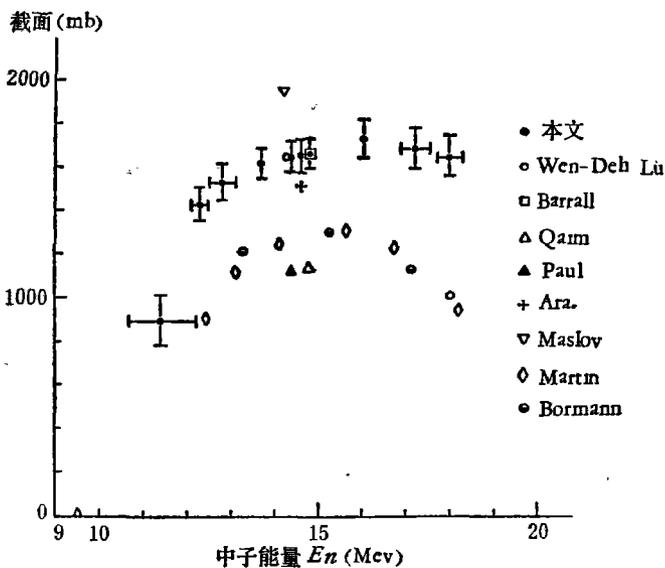


图5] $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 反应激发曲线

5: $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$

本反应的截面值也有较大分歧。从现有数据来看,在 14 MeV 附近的截面值最大相差将近一倍。Wen-Deh Lu^[30] 和 R. C. Barrall^[5] 两个实验点与本工作非常一致。Maslov^[31] 比本工作高 20%, Araminowicz^[32] 低 10%。H. C. Martin^[33] 和 M. Bormann^[34] 的结果符合很好, S. M. Qaim^[35] 和 E. B. Paul^[21] 的结果符合也很好,但他们比本工作分别低 20% 和 30%。

由以上五个反应的激发曲线测量可看出, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应在 12—13 MeV 能区激发曲线走向的分歧, $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$ 和 $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 在 6—12 MeV 能区, 以及 $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 在 9—12 MeV 能区截面数据的稀少和短缺, 都有待于进一步工作, 使数据更加准确和完善。

参加本工作的还有黄建周、赵文荣、李际周、范培国、马鸿昌等同志。

作者对上海原子核研究所的协助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 李际周等, 高能物理与核物理, 2 (1978), 550.
- [2] J. C. Robertson et al., *J. Nucl. Energy*, 27 (1973), 139.
- [3] H. Vonach et al., *Z. Phys.*, 237 (1970), 155.
- [4] P. Boschung et al., *Helv. Phys. Acta*, 42 (1969), 252.
- [5] R. C. Barrall et al., *Nucl. Phys.*, A138 (1969), 387.
- [6] D. Crumpton et al., *J. Inorg. and Nucl. Chem.*, 31 (1969), 1.
- [7] A. Paulsen et al., *J. Nucl. Energy*, 19 (1965), 907.
- [8] G. C. Bonazzola et al., *Nucl. Phys.*, 51 (1964), 337.
- [9] J. D. Hemingway et al., *Proc. Roy. Soc.*, A292 (1966), 180.
- [10] J. P. Butler et al., *Can. J. Phys.*, 41 (1963), 372.
- [11] H. W. Schmitt et al., *Phys. Rev.*, 121 (1961), 827.
- [12] H. Liskien et al., *Nucl. Phys.*, 63 (1965), 393.
- [13] H. L. Pai, *Can. J. Phys.*, 44 (1966), 2337.
- [14] A. Poularikas, *Phys. Rev.*, 115 (1959), 989.
- [15] D. L. Allan, *Nucl. Phys.*, 24 (1961), 274.
- [16] Y. Likic et al., *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, 12 (1969), 283.
- [17] B. H. Левковский, *Я. Ф.*, 10 (1969), 44.
- [18] S. K. Ghorai et al., *J. Nucl. Energy*, 25 (1971), 319.
- [19] W. Mannhart et al., *Z. Phys.*, A272 (1975), 279.
- [20] F. Gabbard et al., *Phys. Rev.*, 128 (1962), 1276.
- [21] E. B. Paul et al., *Can. J. Phys.*, 31 (1953), 267.
- [22] D. Crumpton, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 31 (1969), 3727.
- [23] M. Hillman, *Nucl. Phys.*, 37 (1962), 78.
- [24] M. Bormann et al., *J. Phys. Rad.*, 22 (1961), 602.
- [25] I. Kumabe, *J. Phys. Soc., Japan*, 13 (1958), 325.
- [26] A. Paulsen et al., *Atomkern Energie*, 22 (1973), 291.
- [27] S. Cierjacks, BNL—325, (1976).
- [28] R. Spangler et al., *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, 22 (1975), 818.
- [29] J. C. Robertson et al., *J. Nucl. Energy*, 27 (1973), 531.
- [30] Wen-deh Lu et al., *Phys. Rev.*, C1 (1970), 350.
- [31] Maslov et al., *YK—9* (1972), 50.
- [32] Araminowicz, BNL—325 (1976).
- [33] H. C. Martin et al., *Phys. Rev.*, 89 (1953), 1302.
- [34] M. Bormann et al., *Z. Phys.*, 166 (1962), 477.
- [35] S. M. Qaim et al., *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 30 (1968), 2577.
- [36] S. J. Bame et al., *Phys. Rev.*, 107 (1957), 1616.

EXCITATION CURVES FOR SOME REACTIONS OF Al, Ti, V AND I

LU HAN-LIN WANG DA-HAI XIA YI-JUN

CUI YUN-FENG CHEN PAO-LIN

(Institute of Atomic Energy, Academia Sinica)

ABSTRACT

Excitation curves for the reaction $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$, $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$, $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$ and $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ have been measured by the activation method in the 4.5—18.3 MeV energy region. The cross section for the reaction $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ was determined at 14.61 ± 0.20 MeV. The measurement of neutron flux was performed using the associated particle method. The cross sections for other reactions were determined relative to the measured $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ cross section. The resulting activities were measured employing a calibrated NaI(Tl) scintillation counter. The values obtained were 117.5 ± 3.0 mb, 291.4 ± 14.0 mb, 63.7 ± 3.2 mb, 16.8 ± 0.9 mb and 1656 ± 68 mb respectively. A brief comparison with existing data was made.

* The total cross sections of ^{46}Sc and ^{48}Sc production in natural Ti sample were calculated using the atomic number of ^{46}Ti and ^{48}Ti .