

Al, Ti, V, In 和 I 核的快中子激发曲线

卢涵林 王大海 崔云峯 黄建周 赵文荣

范培国 夏宜君 陈宝林 馬鴻昌 李际周

本文在 $E_n=4.5-18$ 兆电子伏能量范围内, 用活化法测量了 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $\text{Ti}(n, x)^{46}\text{Sc}^\dagger$, $\text{Ti}(n, x)^{48}\text{Sc}^\ddagger$, $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$, $^{115}\text{In}(n, 2n)^{114\text{m}}\text{In}$ 和 $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 的反应截面。在 $E_n=14.6\pm 0.3$ 兆电子伏时, 对 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面进行了绝对测量, 并以此为基础对上述反应截面作了相对测量。结果分别为 117.5 ± 3.9 毫靶; 291.4 ± 15.4 毫靶; 63.7 ± 3.5 毫靶; 16.8 ± 0.9 毫靶; 1359 ± 90 毫靶和 1656 ± 77 毫靶。本文还对国外发表的数据作了比较和讨论。

一、引言

快中子激发曲线在用阈探测器测快中子能谱时经常使用。国外已有许多数据发表, 但结果往往彼此差异较大, 不能满足实际需要。为此, 我们用活化法选测了堆工中常用的几种反应的激发曲线: $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$, $\text{Ti}(n, x)^{46}\text{Sc}^\dagger$, $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$, $\text{Ti}(n, x)^{48}\text{Sc}^\ddagger$, $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$, $^{115}\text{In}(n, 2n)^{114\text{m}}\text{In}$ 和 $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ (这几种反应截面分别表示为 σ_{27} , σ_{46} , σ_{46}^* , σ_{48} , σ_{48}^{**} , σ_{51} , σ_{115} 和 σ_{127})。在 $E_n=12-18$ 兆电子伏能区, 作各反应截面随中子能量变化的测量。在 $E_n=14.6$ 兆电子伏, 对 σ_{27} 作绝对测量, 其他各反应均以 σ_{27} 为标准作相对测量。在 $E_n=11.4, 10.0$ 兆电子伏时, 也以 σ_{27} 为标准作相对测量。在 $E_n=4.5, 5.0$ 兆电子伏时, 对 σ_{46} 作了绝对测量。在 $E_n=6.3, 7.6$ 兆电子伏时, 对 σ_{48} 以 σ_{27} 为标准作了相对测量。

二、测量原理及实验安排

上述反应的生成核都是不稳定同位素, 通过对其特征能量的 γ 射线强度测量可定出生成核数。由于中子通量不可能是恒定的, 并且生成核在生长的同时不断在衰变, 因此要分段计算, 在中子通量下反应截面正比于生成核数。其计算公式如下:

$$\sigma = \frac{N_\gamma R^2}{M \epsilon_\gamma f_s f_d \frac{1}{1+\alpha} \sum_{i=1}^n \phi_i (1 - e^{-\lambda T_i}) e^{-\lambda t_i}} \quad (1)$$

式中 N_γ ——所测特征 γ 射线全能峰单位时间计数; M ——所测同位素的核数目; R ——样品到中子源的距离; ϕ_i ——照射过程中第 i 段时间内的中子通量, 中子数/单位时间单

† $\text{Ti}(n, x)^{46}\text{Sc}$ 包括 $^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$ 与 $^{47}\text{Ti}(n, np), (n, d), (n, pn)^{46}\text{Sc}$ 。

‡ $\text{Ti}(n, x)^{48}\text{Sc}$ 包括 $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 与 $^{49}\text{Ti}(n, np), (n, d), (n, pn)^{48}\text{Sc}$ 。

位立体角； T_i ——样品的第 i 段照射时间； t_i ——第 i 段照射之末到放射性测量的冷却时间； λ ——放射性衰变常数； ε_γ ——有效的全能峰效率； f_s ——样品的特征 γ 射线自吸收修正因子； f_d ——特征 γ 射线的分支比； α ——内转换系数。式中求和是考虑到中子通量的变化，因而把照射时间分为数段，一般为 4—7 段。

对相对于 σ_{27} 的截面测量，上式中的通量无需求绝对值，只要知道各段时间的相对中子通量就可以了。

样品 均为天然同位素组分 $\phi=20$ 毫米的薄片，厚度从 0.5—2 毫米不等。Al, Ti, In 使用金属样品。I 用 NaI(Tl) 晶体，为防止潮解而封于塑料袋中，实验前后均置于干燥皿内。V 采用 V_2O_5 粉末，压成薄饼并盛于薄壁有机玻璃盒中。样品用万分之一天平称量。

辐照状况 在 12—18 兆电子伏能区，在静电加速器上进行相对测量。以 $T(d, n)^4He$ 反应作中子源，入射氘核能量为 $E_d=2.1$ 兆电子伏，Ti-T 靶厚为 2.05—2.34 毫克/厘米²。样品放在 $\phi=150$ 毫米的有机玻璃圆环架上，靶点在圆心。利用架上的不同位置而得到不同的中子能量。其照射几何如图 1 所示。样品对称放置是为了减少靶点漂移所造成的误差，计算时取两对称样品的平均值。

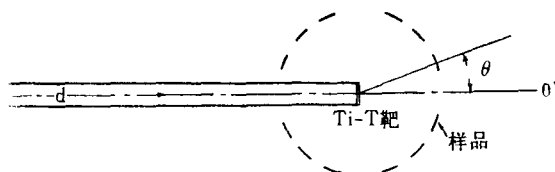


图 1 相对测量的照射几何

中子角分布用巴姆(S. J. Bame)等^[1]的测量结果。若样品所在位置与入射氘核方向的夹角为 θ ，该角度的中子能量以及由样品张角、靶厚所引起的能散度如表 1 所示。

表 1 中子能量、能散度与角度的关系

θ	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°
\bar{E}_n , 兆电子伏	18.0	17.2	16.1	14.8	13.7	12.8	12.2
ΔE_n , 兆电子伏	0.4	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2

为了在 14 兆电子伏附近作更精细的测量，在 13—15 兆电子伏能区用高压倍加速器测量。以 $T(d, n)^4He$ 反应作中子源，入射氘核能量为 200 千电子伏，Ti-T 靶厚约 0.5 毫克/厘米² ($\bar{E}_d=125$ 千电子伏)。样品照射几何与上述相同，只是架的直径较大 ($\phi=200$ 毫米)，样品能散度较小 ($\Delta E_n=0.2-0.3$ 兆电子伏)。

在 6—11 兆电子伏能区，用可变量和固定能量的回旋加速器相对于 σ_{27} 进行测量。以 $D(d, n)^3He$ 反应作中子源。对 $E_n=6.3$ 和 7.6 兆电子伏两点，用厚度为 2.04 毫克/厘米² 的固体 Ti-D 靶，这时入射氘核能量分别为 3.70 和 5.03 兆电子伏，样品放在 0° 角距靶 10 毫米处。用蒽晶体闪烁谱仪作中子能谱和中子产额监视。

对 $E_n=11.4$ 和 10.0 兆电子伏两点，用 $\phi 10 \times 30$ 毫米充一个大气压氙的气体靶进行测量。为了得到合适的中子能量，采用加吸收片的办法，将 13.5 兆电子伏的入射氘核能

量降低。加 100 微米铅箔时, 0° 角的平均中子能量为 11.4 兆电子伏;加 120 微米铅箔时为 10 兆电子伏。样品放在 0° 角距靶 1 厘米处。由于加了吸收片, 中子能量的单色性变差, 故用具有 $n-\gamma$ 分辨的蒺晶体闪烁谱仪作中子能谱测量。这两点的截面要根据中子能谱的形状和 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 激发曲线的走向进行修正, 通量的变化用长中子计数器监测。

4.5 和 5.0 兆电子伏两点的绝对测量在静电加速器上进行, 以 $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 作中子源, 平均入射氘核能量分别为 1.35 和 1.80 兆电子伏, 样品放在 0° 角距源 5 厘米处照射。以半导体望远镜作通量的绝对测量, 以另一半导体望远镜监测中子通量的变化。

14.6 兆电子伏处的截面绝对测量在高压倍加速器上进行。照射几何如图 2 所示。以 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应作中子源, 样品放在与入射氘束成 45° 角的方向上距靶 10 厘米处照射, 这样由于靶点漂移所造成的误差要小些。为限制靶点漂移, 我们还采用了 $\phi=8$ 毫米的 Ti-T 靶。除 Al 以外的其他样品均相对于 σ_{27} 进行测量。照射时样品前后均贴以同样直径的 Al 片, Al 的放射性取前后两片的平均值, 通量变化用 90° 伴随 α 粒子半导体计数器监测。

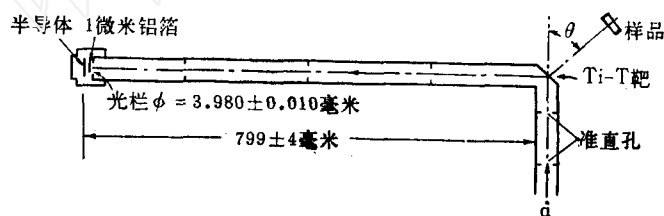


图 2 绝对测量实验布置

在作 σ_{27} 绝对测量时为增加测量的可靠性, 还选取了厚度为 0.5, 1.0 和 2.0 毫米的 Al 片在 10, 15, 20 厘米三种不同距离上同时照射多次, 结果取平均值。通量用 90° 伴随 α 粒子半导体计数器进行绝对测量, 伴随靶管长 799 ± 4 毫米, 半导体前光栏孔径为 $\phi = 3.980 \pm 0.010$ 毫米, 通量测量的总误差为 $\pm 1.1\%$ 。各因素对误差的贡献列于表 2。

表 2 通量测量误差

误差来源	几何	各向异性修正	本底修正	干扰反应	α 探测角	σ 和 $\frac{dE}{dx}$ 误差	总计
误差	$\pm 0.6\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.1\%$

样品照射时间依产物半衰期的长短和通量的大小而定, 一般在 8—24 小时之内。

样品的放射性用 $\phi 100 \times 75$ 毫米的 NaI(Tl) γ 闪烁计数器测量。 γ 闪烁计数器的全能峰效率用 ^{114m}In ($E_\gamma=0.192$ 兆电子伏), ^{198}Au ($E_\gamma=0.412$ 兆电子伏), ^{137}Cs ($E_\gamma=0.662$ 兆电子伏), ^{56}Mn ($E_\gamma=0.845$ 兆电子伏), ^{46}Sc ($E_\gamma=0.89$ 兆电子伏; 1.12 兆电子伏) 和 ^{24}Na ($E_\gamma=1.37$ 兆电子伏; 2.75 兆电子伏) 等标准源刻度。样品的冷却时间由所测产物及干扰反应产物的半衰期而定。各产物的半衰期、所取用的特征 γ 射线能量、冷却时间等列于表 3。

各产物的 γ 探测效率, 除产物源外均在效率曲线中内插。对存有级联 γ 的产物 ^{48}Sc , 因无此标准源, 故需对由于光叠加而造成的全能峰计数损失进行修正, 因测量几何近于 2π , 所以修正后的全能峰效率

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_p (1 - T_1) (1 - T_2),$$

表 3 各反应产物的有关特性

反 应	同位素丰度	产物半衰期	E_γ , 兆电子伏	γ 数/每次衰变	冷 却 时 间
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	100%	15小时	1.37	100%	2小时
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	7.93%	84天	1.12	100%	一个月
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	73.94%	44小时	1.31	100%	十几小时
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	99.76%	44小时	1.31	100%	十几小时
$^{115}\text{In}(n,2n)^{114\text{m}}\text{In}$	95.7%	50天	0.192	18.5%	20天
$^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$	100%	13天	0.650	33%	3-4天
			6.75	4%	

式中 ε_p ——未经修正的 1.31 兆电子伏峰全能峰效率; T_1 ——0.986 兆电子伏 γ 的总效率 (17.5%); T_2 ——1.04 兆电子伏 γ 的总效率 (17.5%)。

另外我们还对样品的 γ 自吸收进行了修正。

三、测量结果和误差分析

我们对 $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 中子源在 $\bar{E}_d=125$ 千电子伏时产生的 14 兆电子伏中子在靶装置上的吸收和散射引起中子通量的变化进行了计算。计算中考虑的靶管为 ϕ 20 毫米, 厚 1 毫米, 靶片厚 0.2 毫米。结果见表 4。

表 4 靶头吸收和散射修正

样品所在角度	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°
修正系数	0.9989	0.9985	0.9981	0.9986	0.8878	0.9924	0.9866	0.9693

从表 4 可以看出, 小角度的修正很小, 大角度的修正较大。由于在两加速器上作相对测量的靶装置很相近, 所以静电加速器上 ($E_d=2.1$ 兆电子伏) 的相对测量也近似地按上述计算修正。另外 90° 角的靶头结构较复杂, 衰减也较严重, 计算的误差较大, 故该处的测量数据舍去。

14.6 兆电子伏处的绝对测量结果列于表 5。

表 5 14.6 兆电子伏处绝对测量结果

测 量 项 目	σ_{27}	$\sigma_{46}^*/\sigma_{27}$	$\sigma_{48}^*/\sigma_{27}$	σ_{51}/σ_{27}	σ_{115}/σ_{27}	σ_{127}/σ_{27}
测 量 结 果	1	118.1	2.47 ^{(2)†}	0.550 ⁽²⁾	0.145 ⁽²⁾	11.37 ⁽²⁾
	2	115.8 ⁽³⁾	2.51 ⁽²⁾	0.539 ⁽²⁾	0.139 ⁽²⁾	11.77 ⁽²⁾
	3	120.1	2.47 ⁽²⁾	0.537 ⁽²⁾	0.144 ⁽²⁾	13.99 ⁽²⁾
	4	118.2 ⁽³⁾				
	5	116.5 ⁽³⁾				
	平均值	117.5	2.48	0.542	0.143	11.57
	平均值标准偏差	±0.4%	±0.60%	±0.76%	±1.2%	±1.5%

† 数据右上角的 (2) 和 (3) 分别表示该数据为同时照射两样品和三样品之平均值。

14.6 兆电子伏处 σ_{27} 绝对测量的误差为 $\pm 3.3\%$ ，主要是由全能峰效率的误差、通量测量的误差和源到样品的距离测不准引起的。为了避免照射中的系统误差，采用几种不同的照射距离：10 厘米的五次，15 厘米的两次，20 厘米的四次。距离的测量精度均为 0.5 毫米。没有观测到截面随距离的系统变化。有关的各项误差列于表 6。

表 6 σ_{27} 绝对测量的各项误差贡献

系 统 误 差, %								偶然误差, %
全能峰效率	通 量	距 离	统 计	自吸收	靶头散射	样品称重	总 计	平均值标准偏差
± 2.4	± 1.1	± 1.0	± 0.5	± 0.1	± 0.2	± 0.1	± 2.9	± 0.4

14.6 兆电子伏处相对于 σ_{27} 测量的其他反应的误差列于表 7。因相对于 σ_{27} 测量，所以距离、通量测量和靶装置散射所引起的误差均无需考虑。

表 7 14.6 兆电子伏处相对于 σ_{27} 测量的各反应截面的误差

反 应	误差来源 计数统计	光 叠 加 修 正	自 吸 收 修 正	称重误差	平均 值 偏 差	全 能 峰 效 率	标准截面	总误差
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	$\pm 1\%$	—	$\pm 0.8\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.6\%$	$\pm 3.9\%$	$\pm 3.3\%$	$\pm 5.3\%$
$^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$	$\pm 1\%$	$\pm 1.2\%$	$\pm 0.8\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.76\%$	$\pm 4.0\%$	同 上	$\pm 5.5\%$
$^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$	$\pm 1\%$	$\pm 1.2\%$	$\pm 0.7\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.2\%$	$\pm 4.0\%$	同 上	$\pm 5.6\%$
$^{115}\text{In}(n,2n)^{114m}\text{In}$	$\pm 1\%$	—	$\pm 1.5\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 5.2\%$	同 上	$\pm 6.6\%$
$^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$	$\pm 1\%$	—	$\pm 0.4\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.44\%$	$\pm 3.0\%$	同 上	$\pm 4.6\%$

10.0 和 11.4 兆电子伏两点，因能谱单色性差，估计能谱测量误差为 $\pm 5\%$ ； σ_{27} 截面误差为 $\pm 5\%$ ；待测截面走向误差为 $\pm 10\%$ ；放射性测量误差为 $\pm 3\%$ 。总计误差约 $\pm 13\%$ 。

6.3 和 7.6 兆电子伏两点只作了 $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 反应，误差为 $\pm 6\%$ 。其中 σ_{27} 误差为 $\pm 3\%$ ；全能峰效率误差为 $\pm 4\%$ ；计数统计误差为 $\pm 1\%$ ；光叠加修正误差为 $\pm 1.2\%$ ；自吸收修正误差为 $\pm 0.8\%$ 。

表 8 相 对 测 量 误 差

反 应 E_n , 兆电子伏	σ_{27}	σ_{46}^*	σ_{48}^*	σ_{51}	σ_{115}	σ_{127}
18.0 \pm 0.4	$\pm 4.8\%$	$\pm 6.4\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 6.7\%$	$\pm 7.6\%$	$\pm 6.0\%$
17.2 \pm 0.5	$\pm 4.8\%$	$\pm 6.4\%$	$\pm 6.5\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 7.6\%$	$\pm 5.9\%$
16.1 \pm 0.5	$\pm 4.8\%$	$\pm 6.4\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 6.7\%$	$\pm 7.5\%$	$\pm 5.8\%$
14.8 \pm 0.3	$\pm 3.4\%$	—	$\pm 6.0\%$	$\pm 5.6\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 4.6\%$
14.6 \pm 0.3	$\pm 3.3\%$	$\pm 5.3\%$	$\pm 5.5\%$	$\pm 5.6\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 4.6\%$
14.3 \pm 0.3	$\pm 3.4\%$	—	$\pm 5.8\%$	$\pm 5.6\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 4.6\%$
13.7 \pm 0.2	$\pm 3.4\%$	$\pm 5.3\%$	$\pm 5.5\%$	$\pm 5.6\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 4.6\%$
13.5 \pm 0.2	$\pm 3.4\%$	—	—	—	—	—
13.4 \pm 0.2	$\pm 3.4\%$	—	—	$\pm 5.6\%$	$\pm 6.6\%$	—
12.8 \pm 0.3	$\pm 4.8\%$	$\pm 7.0\%$	$\pm 6.7\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 7.5\%$	$\pm 6.0\%$
12.2 \pm 0.2	$\pm 4.8\%$	$\pm 7.3\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 6.6\%$	$\pm 7.6\%$	$\pm 5.9\%$

6.3, 7.6, 10.0 和 11.4 兆电子伏诸点的 σ_{27} 截面值取自巴特勒(J. P. Butler) 等的结果^[2]。

4.5 和 5.0 兆电子伏两点, 因通量测量不准, 所以误差较大 ($\pm 15\%$)。

相对测量的误差除绝对点的误差外, 尚需考虑平均值的标准偏差 ($\pm 0.2\% - \pm 1.7\%$) 和中子角分布的误差。在静电加速器上 ($E_d = 2.1$ 兆电子伏) 角分布较锐, 其测量误差较大 ($\pm 3.5\%$); 在高压倍加器上 ($E_d = 200$ 千电子伏) 中子在质心系中各向同性, 实验室系角分布较平缓, 并且可以精确计算, 误差较小 ($< 0.5\%$)。各反应相对测量的误差示于表 8。

四、结果分析

测量结果列于表 9。我们的结果和国外发表的一些结果画于图 3—8 中。下面将各反应分别进行讨论。

表 9 激发曲线测量结果

截面, 反应 毫靶 E_n , 兆电子伏	σ_{27}	σ_{46}^*	σ_{48}	σ_{48}^*	σ_{48}	σ_{51}	σ_{115}	σ_{127}
18.0±0.4	60.8±2.9	299.5±19.2	156	46.1±3.0	44.3	19.7±1.3	1304±100	1648±99
17.2±0.5	70.9±3.4	277.6±17.8	160	50.9±3.3	49.5	20.3±1.3	1315±101	1689±100
16.1±0.5	91.4±4.4	290.5±18.6	197	57.9±3.8	57.2	19.3±1.3	1333±101	1732±101
14.8±0.3	115.9±3.9	—	—	64.3±3.8	63.5	17.4±0.9	1354±90	1661±77
14.6±0.3	117.5±3.9	291.4±15.4	261	63.7±3.5	62.9	16.8±0.9	1359±90	1656±77
14.3±0.3	121.0±4.1	—	—	62.9±3.6	62.1	16.0±0.9	1331±89	1643±76
13.7±0.2	123.7±4.2	288.5±15.3	265	59.6±3.3	58.0	14.1±0.8	1258±84	1617±75
13.5±0.2	128.1±4.3	—	—	—	—	—	—	—
13.4±0.2	126.9±4.3	—	—	—	—	13.2±0.7	1198±80	—
12.8±0.3	120.3±5.8	304.5±21.3	—	54.4±3.6	—	11.5±0.8	1163±88	1530±93
12.2±0.2	117.7±5.7	295.2±21.5	—	50.9±3.7	—	10.1±0.7	1125±86	1428±85
11.4±0.8	—	—	—	42.2±5.5	—	5.2±0.7	749±97	827±107
10.0±0.6	—	—	—	27.2±3.5	—	—	—	—
7.6±0.6	—	—	—	10.8±0.6	—	—	—	—
6.3±0.4	—	—	—	3.3±0.2	—	—	—	—
5.0±0.1	—	69±11	69	~0.1	—	—	—	—
4.5±0.1	—	44±7	44	—	—	—	—	—

1. $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 从图 3 可以看出, 多数作者的数据在 $\pm 5\%$ 误差范围内, 无论是走向还是绝对值彼此基本一致。但惠隈部 (I. Kumabe) 等^[14] 由于测量方法不同, 结果有较大偏离。杰罗尼姆 (J. M. F. Jeronymo) 等^[15] 和海明威 (J. D. Hemingway) 等^[7] 的结果也偏低。前者可能角分布有问题, 后者采用压强法测 α 粒子数可能有系统误差。在高精度 ($< \pm 1\%$) 测量时结果是否一致, 尚待进一步研究。为了便于比较, 我们将 14 兆电子伏附近的一些测量结果示于表 10。

2. $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 为便于比较, 我们在表 11 和图 4 中列出了 14 兆电子伏处的一些数据。由于测量中用的是天然同位素丰度的金属样品, 所以测到的实际是 σ_{46}^* 。从图 4 可

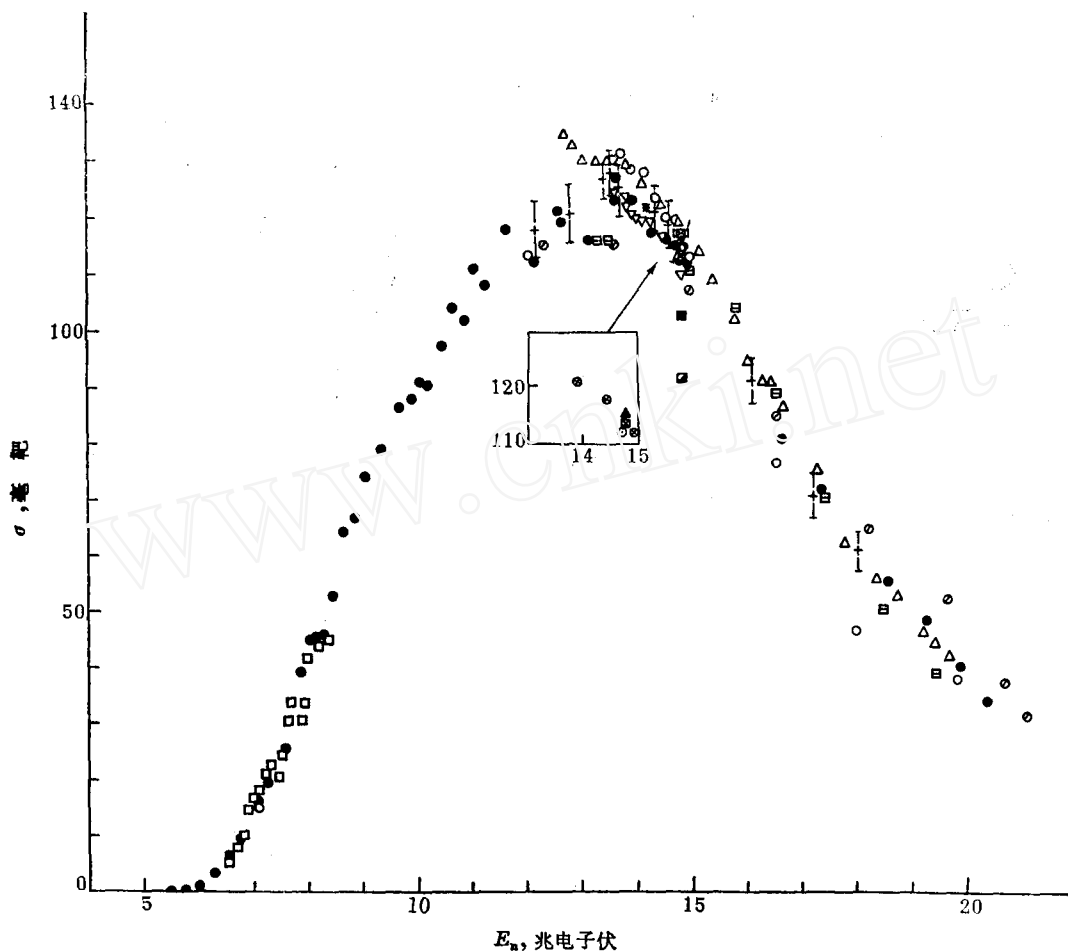


图 3 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应的 $\sigma-E_n$ 关系

+——本工作; ·——取自[2]; ▲——[3]; ▽——[4]; ▽——[5]; ▽——[6]; ■——[7]; △——[8]; ⊙——[9]; □——[10]; ○——[11]; ⊗——[12]; ⊠——[13]; ▣——[14]; ⊚——[15]; *——[16]; ×——[17]; ⊞——[18]。

以看出, 国外的数据在高端分成两组, 看来主要是由于扣除和不扣除 $^{47}\text{Ti}(n, np)$, (n, d) , $(n, pn)^{46}\text{Sc}$ 的贡献造成的。我们的 σ_{46} 是用佩^[21]的上述截面对我们测量的结果进行了修正后的值, 修正后的结果与用加浓同位素样品的结果^[21]一致, 说明上述判断是正确的。阿拉姆用核乳胶测得的结果偏低。

3. $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 我们将 14 兆电子伏附近的一些测量结果示于表 12 和图 5。

我们用的是天然同位素金属钛样品, 因此测得的结果包括 $^{49}\text{Ti}(n, np)$, (n, d) , $(n, pn)^{48}\text{Sc}$ 的贡献。取佩^[21]的结果扣除它后得到的 σ_{48} (见表 9), 修正量不大 (<5%)。

波尔^[25]和克伦普顿^[28]的结果偏高, 他们的 σ_{51} 值也高, 估计有系统偏差。阿拉姆用核乳胶测得的结果与 σ_{46} 一样, 都偏低, 估计亦有系统偏差, 其它较一致。

在 7—13 兆电子伏区间, 没有看到国外测量的数据。我们所测 7.5, 10, 11.4 和 12.2 兆电子伏诸点表明, 该反应截面在这个能区是光滑变化的。

4. $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$ 14 兆电子伏处的一些测量结果示于表 13 和图 6。可以看出, 早年的结果^[25, 29, 17]偏高, 近来的结果^[28, 22, 3, 26, 36]偏低, 彼此差别较大, 估计与实验技术的状

表 10 14 兆电子伏附近 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 的截面

作者	通量测量	放射性测量	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年份	参考文献
本文	伴随 α	$\gamma(\text{NaI})$	14.6 ± 0.3	117.5 ± 3.9		
罗伯逊(J. P. Robertson)等	反冲质子	$4\pi\beta\text{-}\gamma$	14.78 ± 0.1	115.5 ± 3	1973	[3]
巴雷尔(R. C. Barrall)等	同上	γ	14.8 ± 0.2	116 ± 8	1969	[4]
冯那赫(H. Vonach)等	伴随 α	γ	14.43 ± 0.2 14.8 ± 0.2	117.0 ± 0.8 110.3 ± 1.3	1970	[5]
博希(Boschung)	同上	γ	14.8 ± 0.1	112 ± 5	1969	[6]
海明威等	同上	γ	14.8 ± 0.1	103.6 ± 5.5	1966	[7]
保尔森(A. Paulsen)等	反冲质子	γ	14.71 ± 0.27	119 ± 7	1965	[8]
邦纳佐拉(G. C. Bonazzola)等	伴随 α	端窗 β	14.7 ± 0.3	112 ± 4	1964	[9]
巴特勒等	相对 $^{32}\text{S}(n,p)$	同上	14.76 ± 0.06	112 ± 5	1963	[2]
施米特(E. W. Schmitt)等	相对 ^{238}U 的 σ_f	β	14.76	117 ± 8	1961	[10]
贝赫斯特(B. F. Bayhurst)等	同上	β	14.81 ± 0.31	114.7 ± 5.7	1961	[11]
加巴德(F. Gabbard)等	反冲质子塑料闪烁	γ	14.9	112 ± 11	1962	[12]
波拉里克斯(A. Poularikas)等	相对 $^{63}\text{Cu}(n,2n)$	β	14.8	114 ± 7	1959	[13]
慕限部等	核乳胶	α	14.8	92 ± 15	1957	[14]
杰罗尼姆等	反冲质子塑料闪烁	γ	14.9 ± 0.2	107 ± 11	1963	[15]
滨道安见(Shinjiro Yasumi)	伴随 α	$4\pi\beta$	14.1	$120(1 \pm 12\%)$	1957	[16]

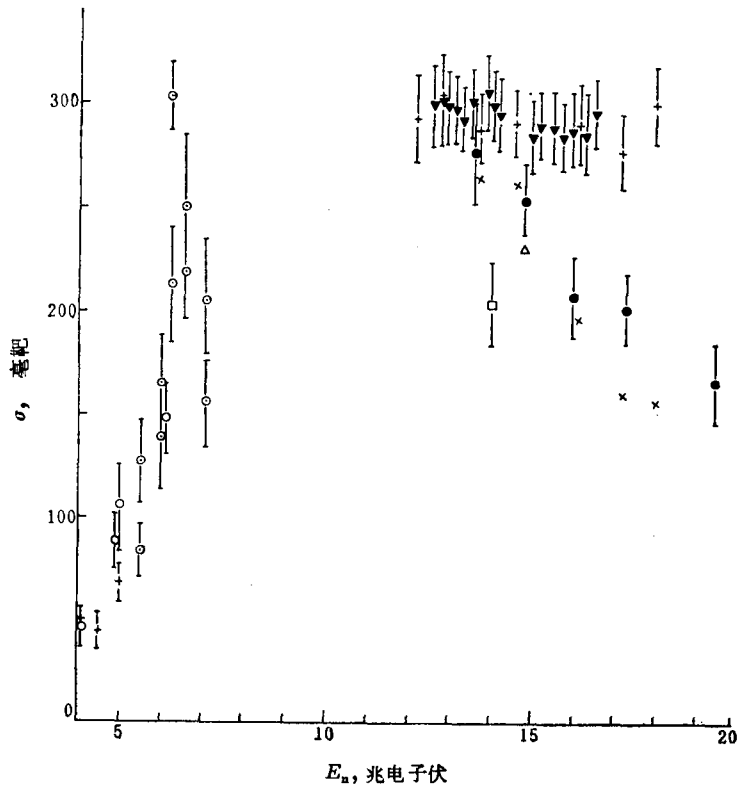


图 4 $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 反应的 $\sigma-E_n$ 关系

\times —— $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 本文; $+$ —— $^{46}\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$ 本文; \square —— 取自[19]; \blacktriangledown —— [20];
 \bullet —— [21]; \triangle —— [22]; \circ —— [23]; \odot —— [24].

表 11 14 兆电子伏附近 $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 的截面

作者	通量测量	放射性测量	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年份	参考文献
本文	相对 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	γ	14.6 ± 0.3	$291.4 \pm 15.4^*$ 261^{**}		
阿拉姆(D. L. Allam)	相对 $^{54}\text{Fe}(n,p)$	核乳胶测 p	14	203 ± 21	1961	[19]
利斯金(H. Liskien)等	反冲质子	γ - γ 符合	14.61 ± 0.26 14.42 ± 0.26	293 ± 21 295 ± 21	1965	[20]
佩(H. L. Pai)	相对 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	γ	14.8 ± 0.1	253 ± 24	1966	[21]
列夫可夫斯基(B. H. Левковский)等		δ	14.8	230 ± 50	1969	[22]

* 系 $\text{Ti}(n,x)^{46}\text{Sc}$ 的截面。

** 系 $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ 的截面。

表 12 14 兆电子伏附近 $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 的截面

作者	通量测量	放射性测量	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年份	参考文献
本文	相对 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	γ	14.6 ± 0.3	$63.7 \pm 3.5^*$ 62.9^{**}		
波尔(E. B. Paul)	伴随 α	端窗 β	14.5 ± 0.35	93 ± 32	1953	[25]
波拉克里斯等	相对 $^{63}\text{Cu}(n, 2n)$	同上	14.8 ± 0.8	58 ± 8	1959	[13]
阿拉姆	相对 $^{54}\text{Fe}(n,p)$	核乳胶测 p	14	29 ± 8	1961	[19]
希尔曼(M. Hillman)	相对 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	γ	14.5 ± 0.5	55 ± 11	1962	[26]
加巴德等	塑料闪烁	γ	14.6 ± 0.2	65 ± 10	1962	[12]
佩	相对 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	γ	14.8 ± 0.1	63 ± 4	1966	[21]
克伦普顿(D. Crumpton)	伴随 α	γ	14.7 ± 0.2	80 ± 4	1969	[28]
列夫可夫斯基等		β	14.8	63 ± 6	1969	[22]

* 系 $\text{Ti}(n,x)^{48}\text{Sc}$ 的截面。

** 系 $^{48}\text{Ti}(n,p)^{48}\text{Sc}$ 的截面。

表 13 14 兆电子伏附近 $^{51}\text{V}(n,\alpha)^{48}\text{Sc}$ 反应截面

作者	通量测量	放射性测量	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年份	参考文献
本文	相对 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	γ	14.6 ± 0.3	16.8 ± 0.9		
波尔	伴随 α	β	14.5	28.6 ± 12	1953	[25]
希尔曼	同上	γ	14.5 ± 0.5	18 ± 3	1962	[26]
嘉隈部	核乳胶	α	14.8	43.2 ± 8.6	1958	[29]
克伦普顿	伴随 α	γ	14.7 ± 0.2	21 ± 1	1969	[28]
列夫可夫斯基等		β	14.8	16 ± 3	1969	[22]
罗伯逊等	相对 $^{56}\text{Fe}(n,p)$	$4\pi\beta$ - γ	14.78 ± 0.1	19.5 ± 1.2	1973	[3]
保尔森	望远镜同时相对 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$ $^{59}\text{Co}(n,2n)$	γ	14.40 ± 0.44	16.3 ± 0.9	1973	[36]

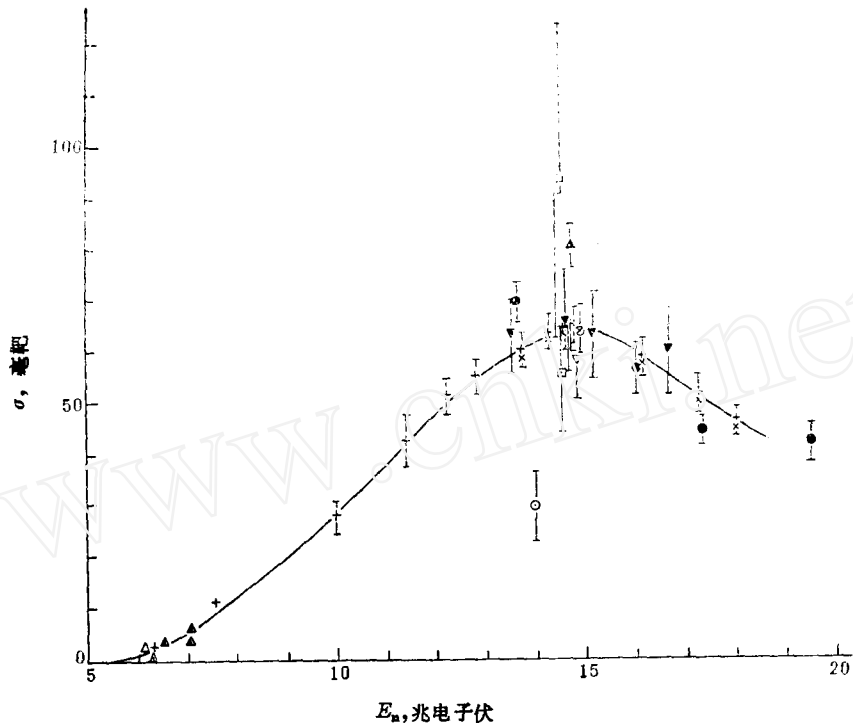


图 5 $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 的 σ - E_n 关系

+— $\text{Ti}(n, x)^{48}\text{Sc}$ 本文; ×— $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 本文; ▽—[13]; ⊙—[19]; •—[21];
⊗—[22]; △—[23]; ▲—[24]; □—[25]; ◻—[26]; ▲—[28]。

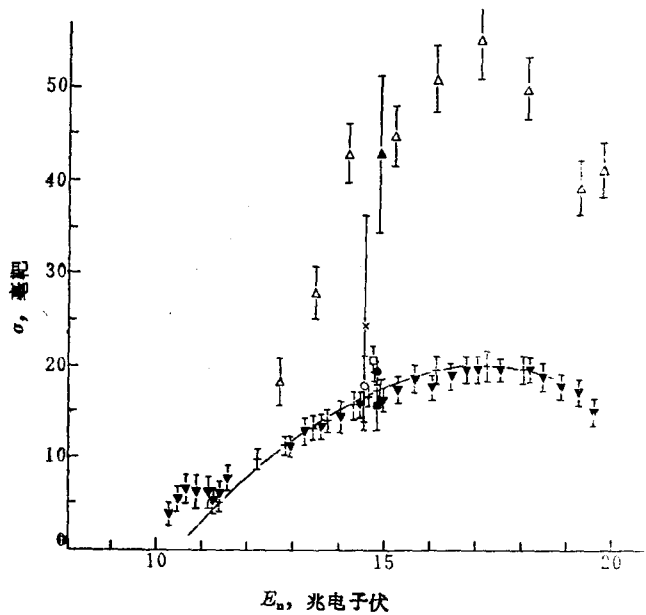


图 6 $^{51}\text{V}(n, \alpha)^{48}\text{Sc}$ 的 σ - E_n 关系

+—本文; •—[3]; △—[17]; ×—[25]; ▲—[29]; □—[28]; ■—[22];
○—[26]; ▼—[36]。

况有关。我们的结果与近年来的测量^[3,36,22,26]较一致。1953年波尔^[25]和1969年克伦普顿^[28]的结果也偏高,估计有一个系统偏差。1958年惠限部的结果^[29]是用核乳胶测 α 的方法得到 σ_{51} 的。由于 $^{51}\text{V}(n, n\alpha)^{47}\text{Sc}$ 和 $^{50}\text{V}(n, \alpha)^{47}\text{Sc}$ 反应也产生 α ,因此 α 粒子成分较复杂,他认为 $(n, n\alpha)$ 反应产生的 α 的能量低于 $(n, \alpha\gamma)$ 反应产生的 α 能量,在 α 谱上用卡阏的方法去掉 $(n, n\alpha)$ 道的影响。我们认为各道产生的 α 的能量很难截然分开。因而这种作法显然是不严格的,加之乳胶法统计误差大。这三种反应 $\text{V}(n, \alpha\gamma)$, $(n, n\alpha)$, $(n, \alpha n)$ 截面之和为126毫靶也过于偏大,估计有杂质影响。1962年希尔曼^[26]由于看到自己的结果与已发表的波尔和惠限部的结果相差约50%和140%,因此未敢作正式结果发表。

我们用的 V_2O_5 样品中有少量 V_2O_4 ,其含量未能分析出来,计算表明,即使样品中有10%的 V_2O_4 ,它对截面测量的影响也不过1%左右。

为了验证 V_2O_5 的纯度,我们还用钒酸铵 (NH_4VO_3) 为样品作了实验,结果在2%范围内一致。

1961年博尔曼(M. Bormann)等^[17]测量了该反应的激发曲线,结果比我们约高一倍多。他是用测1.04和0.986兆电子伏两 γ 的全能峰的方法得出的。这两个峰在探测器上分不开,可能在引用分支比上有错误。

在我们的测量工作结束后,看到保尔森^[36]也对 σ_{51} 作了测量。其结果与我们的相当一差。他是用Ge(Li)谱仪作 γ 放射性测量,以 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ 和 $^{59}\text{Co}(n, 2n)$ 作为通量标准,误差在12—20兆电子伏能区为 $\pm 5.5\%$ 。该文中引用以往的数据时已把博尔曼等^[17]的结果抛弃,引用了其合作者经修正(约降80%)的结果。

5. $^{115}\text{In}(n, 2n)^{114m}\text{In}$ 从表14和图7可以看出,比较早期的普雷斯特伍德(R. J. Prestwood)等^[30]的结果偏高,估计由于当时实验技术较差,效率定不准,再加上他用的照射装置结构材料多,散射较严重。在其提供的数据中大部分只给出了相对值。我们的结果与巴雷尔等^[4]的结果较一致。 ^{114m}In 的特征 γ 能量为0.192兆电子伏,所以自吸收较严重,加上金属铟样品较软,厚度不均匀且易发生形变,所以自吸收修正因子误差也较大($\pm 15\%$)。0.192兆电子伏的内转换系数较大($\alpha \approx 4.3 \pm 0.4$),也会引进误差,但在前列误差中未包括在内,因为它对 ^{114m}In 标准源 $4\pi\beta$ 源强测量的影响小(约引起 $< \pm 1\%$ 误差),在测量 σ_{115} 时,采用一样的 $f_{\alpha} \frac{1}{1+\alpha}$ 值(18.5),不会引入系统误差。

6. $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 从表15和图8中可以看到,早年的结果^[35,25,27]比近年的^[32,33,4]

表 14 14兆电子伏附近 $^{115}\text{In}(n, 2n)^{114m}\text{In}$ 反应截面

作者	通量测量	放射性测量	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年份	参考文献
本文	相对 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	γ	14.6 ± 0.3	1359 ± 90		
	α 探测器校准Al	β	14.50 ± 0.20	1539 ± 77	1961	[30]
				14.81 ± 0.31		
门洛夫(H. O. Menlove)等	^{235}U 裂变室	γ	14.96 ± 0.87	1264 ± 137	1967	[18]
罗兹(H. Rötzer)	相对 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$	γ	14.70 ± 0.15	1470 ± 120	1968	[31]
巴雷尔等	反冲质子	γ	14.80	1390 ± 110	1969	[4]

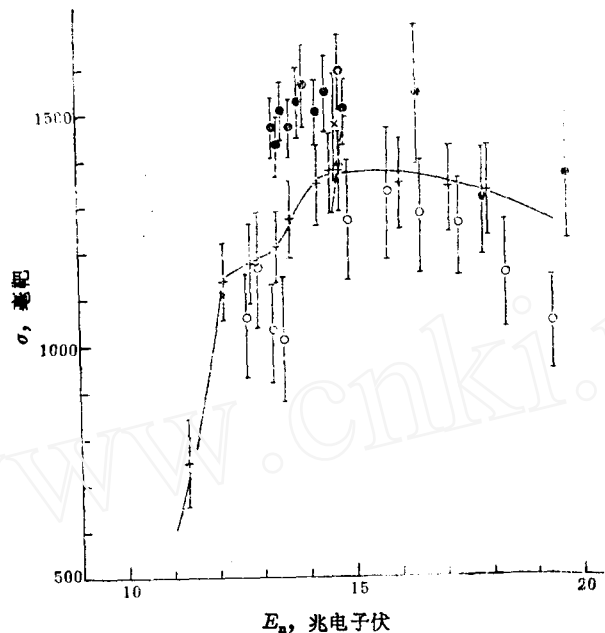


图 7 $^{115}\text{In}(n, 2n)^{114m}\text{In}$ 的 $\sigma-E_n$ 关系
 +——本文; •——[30]; ○——[18]; ▲——[4]; ×——[31]。

表 15 14 兆电子伏附近 $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 反应截面

作 者	通 量 测 量	放射性 测 量	E_n , 兆电子伏	σ , 毫 靶	发表 年 份	参考 文 献
本 文	相对 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	γ	14.6 ± 0.3	1656 ± 77		
马丁(H. C. Martin)等	伴随 α	γ	14.1	1250 ± 70	1953	[35]
博尔曼等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ $\sigma = 107 \pm 5$ 毫靶	γ	15.2	1300 ± 80	1962	[27]
奎姆(S. M. Qaim)等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ $\sigma = 117$ 毫靶	γ	14.7	1128 ± 120	1968	[34]
巴雷尔等	反冲质子	γ	14.8 ± 0.2	1660 ± 140	1969	[4]
卢温德(Wen-Deh Lu)等	混合粉末	$\gamma\text{Ge}(\text{Li})$	14.3 ± 0.3	1649 ± 80	1970	[33]
博迪(Z. T. Bódy)等	(推荐值)		14.7	1655 ± 55	1973	[32]
波尔	伴随 α	β	14.4	$1120 \pm 35\%$	1953	[25]

要低。从 ^{126}I 的 γ 谱(图9)中可以看到,在0.386兆电子伏峰的后沿处尚有能量为0.48和0.511兆电子伏的小峰,由于探测器分辨率不佳,这两个小峰分得不够开,重叠在0.386兆电子伏峰的后沿上,因此0.386兆电子伏峰的全能峰面积取不准。我们在测量中用0.650和0.75兆电子伏峰,测量结果与近年国外的一些结果较一致。奎姆等^[34]的结果偏低,其工作目的在于寻求 ^{126}I 2.6小时的同质异能态,用KI作样品,照射后用化学方法提取I,估计是I的提取效率定不准造成的。

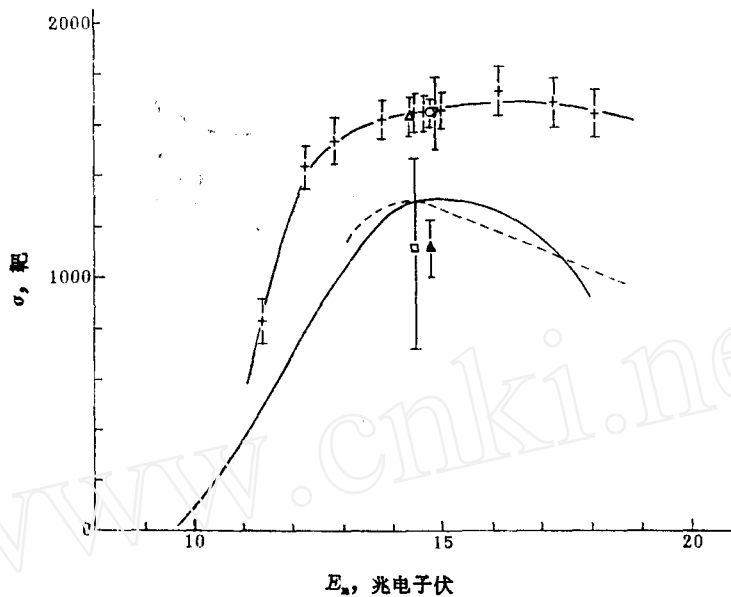


图 8 $^{127}\text{I}(n, 2n)^{126}\text{I}$ 的 $\sigma-E_n$ 关系
 +—本文; ○—[32]; △—[33]; ▽—[4]; ▲—[34]; □—[25]; ————[35];
 - - - - [27].

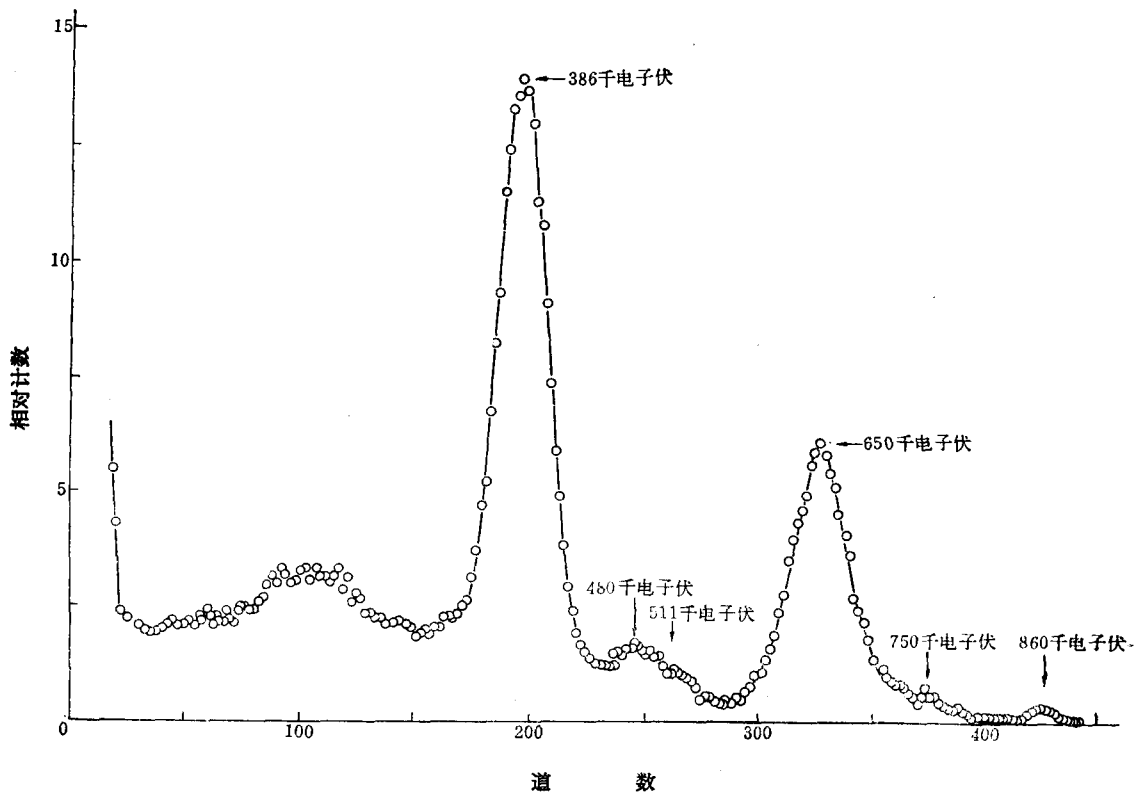


图 9 ^{126}I 的 γ 能谱

五、结 束 语

本工作虽只对几种元素的激发曲线作了测量,但从和有关数据的比较中可以看到现有数据的一般情况:

1. 从时间上来看,近年的数据比早年的彼此较符合、可靠。

2. 从测量方法上来看,乳胶法精度差,并且可能有系统误差。 β 测量法有产物分离效率等问题,在鉴别杂质和干扰反应的影响上也不及 γ 闪烁谱仪有效,所以后者的结果可能更可靠些。可以推想,对具有复杂谱的反应产物,应当采用具有高分辨率的Ge(Li)谱仪。

3. 从数据的分歧情况来看,截面走向一般相近,关键是1.4兆电子伏附近的绝对值相差较大(如 σ_{51}),其中必有某些测量存在有系统的差错,需要注意的问题,除中子通量的绝对测量外,作为标准的参考截面需要统一,并进一步提高其精确度,尤其要在放射性绝对测量上下功夫,探测器效率要作更仔细的刻度,作为基本数据的分支比,内转换系数等也要进一步精确测定。

4. 在阈附近,截面数据差别较大,需要仔细测量以分辨其是否存在某种结构,如 σ_{115} 似乎有一个台阶,有待进一步探讨。

本工作中刻度NaI(Tl)探测器效率用的标准源由中国计量科学研究院提供,某些能量点的测量工作是在上海原子核研究所进行的,得到他们的许多帮助,在此一併表示感谢。

参 考 文 献

- [1] S. J. Bame et al., *Phys. Rev.*, **107**, 1616 (1957).
- [2] J. P. Butler et al., *Can. J. Phys.*, **41**, 372 (1963).
- [3] J. C. Robertson et al., *J. Nucl. Energy*, **27**, 531 (1973).
- [4] R. C. Barrall et al., *Nucl. Phys.*, **A 138**, 387 (1969).
- [5] H. Vonach et al., *Z. Phys.*, **237**, 155 (1970).
- [6] P. Boschung et al., *Helv. Phys. Acta*, **42**, 252 (1969).
- [7] J. D. Hemingway et al., *Proc. Roy. Soc.*, **A 292**, 180 (1966).
- [8] A. Paulsen et al., *J. Nucl. Energy*, **19**, 907 (1965).
- [9] G. C. Bonazzola et al., *Nucl. Phys.*, **51**, 337 (1964).
- [10] H. W. Schmitt et al., *Phys. Rev.*, **121**, 827 (1961).
- [11] B. P. Bayhurst et al., *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **23**, 173 (1961).
- [12] F. Gabbard et al., *Phys. Rev.*, **128**, 1276 (1962).
- [13] A. Poularikas et al., *ibid.*, **115**, 989 (1959).
- [14] I. Kumabe et al., *ibid.*, **108**, 155 (1957).
- [15] J. M. F. Jeronymo et al., *Nucl. Phys.*, **47**, 157 (1963).
- [16] Shinjiro Yasumi, *J. Phys. Soc. Japan*, **12**, 443 (1957).
- [17] M. Bormann et al., *J. Phys. Rad.*, **22**, 602 (1961).
- [18] H. O. Menlove et al., *Phys. Rev.*, **163**, 1308 (1967).
- [19] D. L. Allam, *Nucl. Phys.*, **24**, 274 (1961).
- [20] H. Liskien et al., *Nucl. Phys.*, **63**, 393 (1965).
- [21] H. L. Pai, *Can. J. Phys.*, **44**, 2337 (1966).
- [22] В. Н. Левковский и др., *Ядерная физика*, **10**, 44 (1969).
- [23] S. K. Ghoral et al., *J. Nucl. Energy*, **25**, 319 (1971).
- [24] Y. Lukic et al., *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, **12**, 283 (1969).
- [25] E. B. Paul et al., *Can. J. Phys.*, **31**, 267 (1953).
- [26] M. Hillman, *Nucl. Phys.*, **37**, 78 (1962).
- [27] M. Bormann et al., *Z. Phys.*, **166**, 477 (1962).
- [28] D. Crumpton, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **31**, 3727 (1969).
- [29] I. Kumabe, *J. Phys. Soc. Japan*, **13**, 325 (1958).
- [30] R. J. Prestwood et al., *Phys. Rev.*, **121**, 1438 (1961).
- [31] H. Rötzer, *Nucl. Phys.*, **A 109**, 694 (1968).
- [32] Z. T. Bödy et al., *Atomic Energy Rev.*, **2**, 153 (1973).
- [33] Wen-Deh Lu et al., *Phys. Rev.*, **C 1**, 350 (1970).
- [34] S. M. Qaim et al., *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **30**, 2577 (1968).
- [35] H. C. Martin et al., *Phys. Rev.*, **89**, 1302 (1953).
- [36] A. Paulsen et al., *Atomkern Energie*, **22**, 291 (1973).