

^{58}Ni 和 ^{93}Nb 的快中子激发曲线

黄建周 崔云峯 赵文荣 陈宝林

在 12.8—18.3 兆电子伏能量范围内测量了 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$, $^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$, $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 和 $^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90m}\text{Y}$ 反应的激发曲线。在 14.6 ± 0.3 兆电子伏处测量了上述四个反应以及 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 反应的截面。结果分别为 36.9 ± 1.3 ; 523 ± 30 ; 490 ± 24 ; 5.72 ± 0.41 和 346 ± 14 毫靶。文中还将我们的结果与国外的一些数据作了比较。

一、引言

镍和铌在作为中子的阈探测器以及裂变堆和聚变堆的结构材料等方面有着广泛的用途,因此,其快中子截面为人们所重视。国外虽已有许多数据发表,但结果往往彼此有较大的差异。为此,我们用活化法测量了镍和铌的一些有关反应的快中子截面。在 12.8—18.3 兆电子伏中子能区内测量了反应截面随入射中子能量的变化。在 14.6 ± 0.3 兆电子伏处,相对于 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面 (117.5 ± 3.9 毫靶) 或 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 反应截面 (108.0 ± 2.9 毫靶) 作上述反应截面的绝对测量。

二、样品及辐照

用活化法测量反应截面的原理及实验安排在文献[1]中已有较详细的叙述。

样品均为天然同位素组分的金属圆片。铌样品的纯度好于 99.9%。镍样品的纯度为 $99.7\% \pm 0.1\%$, 对镍的截面测量可能产生影响的铁和钴的含量分别为 0.028% 和 0.081%。

$E_n = 14.6$ 兆电子伏处的反应截面绝对测量在高压倍加器上进行。以 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应作中子源, 入射氘核能量为 200 千电子伏, Ti-T 靶厚约 0.26—0.6 毫克/厘米²。镍样品直径 ϕ 为 15 毫米, 厚度为 0.5 毫米。铌样品直径 ϕ 为 13 毫米, 厚度为 0.45 毫米。样品放在与入射氘束成 45° 角, 与靶心距离为 1.7—3.0 厘米处。由靶厚和样品张角引起的中子能散度为 300 千电子伏。

样品夹在厚度为 0.2 毫米的铝或厚度为 0.1 毫米的铁片之间照射, 用金硅面垒探测器测量 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应产生的 α 粒子进行中子通量监视。

E_n 为 12.8—18.3 兆电子伏能区, 在静电加速器上照射。以 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应作中子源。Ti-T 靶厚约 1.5 毫克/厘米², 入射氘核平均能量分别为 1.5 和 2.0 兆电子伏。镍样品直径 ϕ 为 20 毫米, 厚度为 1.5 毫米。铌样品直径 ϕ 为 15 毫米, 厚度为 0.45 毫米。放在 ϕ 为 20 厘米的有机玻璃圆环上照射。中子通量的角分布用反冲质子望远镜测定。与入射氘束成不同角度 θ 处的中子能量 E_n , 能散度 ΔE_n 及中子通量的相对角分布因子 \mathcal{N}

(θ)列于表1。

表1 中子能量、能散度及通量相对角分布因子与角度 θ 的关系

E_n , 兆电子伏	θ 参 数	0°	22.5°	45°	67.5°	112.5°	135°
		E_n , 兆电子伏	17.6	17.3	16.7	15.7	13.7
1.5	ΔE_n , 兆电子伏	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2
	$W(\theta)$	1.000	0.977	0.908	0.819	0.637	0.576
	E_n , 兆电子伏	18.3	18.0	17.2	16.1	13.7	12.8
2.0	ΔE_n , 兆电子伏	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3
	$W(\theta)$	1.000	0.934	0.802	0.699	0.546	0.494

三、产物核的放射性测量

在测 γ 放射性时, 采用了NaI(Tl)和Ge(Li)两种谱仪。谱仪的全能峰探测效率用薄膜标准源进行了刻度。由于样品直径和厚度远较标准源大, 所以对探测效率随源几何的变化及样品对 γ 射线的自吸收均进行了修正。

在截面测量中所用到的产物核的有关特性列于表2。

表2 产物核的有关特性

反 应	产物核半衰期	特征 γ 射线能量, 兆电子伏	γ 射线强度,%	文 献
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	71.3 天	0.8106 0.8636	99.44 0.69	[50]
$^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$	36 小时	1.37	86.0	[51]
$^{58}\text{Ni}(n, np + pn + d)^{57}\text{Co}$	270 天	0.122	87.7	[52]
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$	10.15 天	0.913 0.934	1.84 99.10	[40]
$^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90m}\text{Y}$	3.19 小时	0.4826	91.7	[53]
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	15.0 小时	1.3686	100	[50]
$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	2.58 小时	0.8466	99	[54]

在有级联 γ 的情况下, 对级联 γ 的叠加引起的全能峰计数损失进行了修正。

不同产物的放射性测量中的特殊问题分别叙述如下。

1. $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 除 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 反应所用之Al片用Ge(Li)谱仪测量外, 其余均用NaI(Tl)谱仪测量。

2. $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 用NaI(Tl)谱仪测量。仅在测 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面时遇到了这一反应。

3. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 产物 ^{58}Co 有一个半衰期为9.0小时的亚稳态和半衰期为71.3天的基态。我们测量的是 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 截面。 ^{58}Co 放射性用NaI(Tl)谱仪测量。因

0.8106 和 0.8639 兆电子伏两条 γ 线的全能峰不能分辨开, 所以同时记录。杂质反应 $^{59}\text{Co}(n, 2n)^{58}\text{Co}$ 对测量的影响约为 0.16%。由于 Fe 含量少, $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 的产物半衰期又短, 故对测量无影响。

4. $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 在 $E_n=14.6$ 兆电子伏处进行该截面测量时, ^{57}Ni 和 ^{24}Na 放射性均用 Ge(Li) 谱仪测量。因为在 NaI(Tl) 谱仪上, ^{57}Ni 的 1.37 兆电子伏 γ 的全能峰与由 ^{58}Co 的 0.8106 兆电子伏 γ 跟 0.511 兆电子伏湮没辐射符合形成的叠加峰 ($E_\gamma=1.32$ 兆电子伏) 是分不开的。而在 Ge(Li) 谱仪上不但能使 1.37 兆电子伏峰与 1.32 兆电子伏峰分开, 而且特别注意到 ^{57}Ni 和 ^{24}Na 两者的特征 γ 能量十分相近这一事实。从测到的 γ 谱上看, ^{57}Ni 的 γ 能量比 ^{24}Na 的 γ 能量约高出 8 千电子伏, 反映在全能峰探测效率上约有 0.5% 的微小差别。在求截面时减小了效率刻度引进的误差, 从而提高了截面的测量精度。

在 $E_n=12.8-18.3$ 兆电子伏能区内产物放射性的相对测量在 NaI(Tl) 谱仪上进行。对 1.37 兆电子伏和 0.511 兆电子伏 γ 均进行了测量, 并对 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 的影响进行了扣除。用 1.37 兆电子伏峰时计数较少, 统计误差较大。用 0.511 兆电子伏峰时计数多一些, 但扣除量大(约 60—70%)。两种方法各有利弊。我们取两种测量方法的平均值。

5. $^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$ 14.6 兆电子伏的截面由 Ge(Li) 谱仪测 ^{57}Co 的 0.122 兆电子伏 γ 获得。 ^{57}Co 的 0.9144 兆电子伏 γ 射线虽然与 0.122 兆电子伏 γ 为级联辐射, 但因其能量低, 多为样品、样品托盘和探测器外壳所吸收, 叠加修正无需考虑。

因为 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 的产物 ^{57}Ni 也衰变到 ^{57}Co , 所以要等 ^{57}Ni 几乎完全衰变到 ^{57}Co 时再进行 ^{57}Co 的放射性测量, 以便于扣除 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 反应的贡献。

12.8—18.3 兆电子伏间的相对测量用 NaI(Tl) 谱仪测 0.122 和 0.136 兆电子伏 γ 的组合峰。

6. $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ ^{92m}Nb 的 0.934 和 0.913 兆电子伏的两条 γ 射线, 在 NaI(Tl) 谱仪上分不开, 在 Ge(Li) 谱仪上也不能完全分开。因此, 必将同时记录。对于 14.6 兆电子伏处的绝对测量, 为增加可靠性, 用两种谱仪进行了测量。

在 $E_n=12.8-18.3$ 兆电子伏间 ^{92m}Nb 的放射性用 NaI(Tl) 谱仪测量。

7. $^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90m}\text{Y}$ 用 NaI(Tl) 谱仪测半衰期为 3.19 小时的同质异能态 ^{90m}Y 发出的 0.4826 兆电子伏的 γ 射线。

四、测量结果与误差分析

14.6 兆电子伏处 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+s}\text{Co}$, $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$, $^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$, $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 和 $^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90m}\text{Y}$ 反应截面的测量结果分别为 346 ± 14 , 36.9 ± 1.3 , 523 ± 30 , 490 ± 24 , 5.72 ± 0.41 毫靶。其他能量点的测量结果示于图 1—4。

14.6 兆电子伏处进行绝对测量的误差, 主要由标准截面的误差、有效探测效率的误差、计数统计误差、样品对 γ 的自吸收修正误差、称重误差以及测量的平均值标准偏差等构成。因为相对于 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 或 $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 的反应截面进行测量, 所以距离、通量测量及靶装置散射所引起的误差均无需考虑。各误差的贡献及总误差列于表 3。

相对测量点的误差, 除绝对点的测量误差外, 尚需考虑中子通量角分布的测量误差

表 3 14.6 兆电子伏处的测量误差 (±%)

反 应	误差来源	标准截面	有效效率	样品称重	自吸收修正	平均值标准偏差	总误差
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58\text{m}}+^{\text{g}}\text{Co}$		3.3	1.9	0.1	0.4	0.45	3.9
$^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$		3.3	0.7	0.1	0.5	0.42	3.4
$^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$		3.3	4	0.1	0.6	0.49	5.8
$^{92}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	Nal(Tl)	3.3	3.7	0.1	0.3	0.84	5.0
	Ge(Li)		3.3		0.5	0.84	4.8
$^{92}\text{Nb}(n, \alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$		3.3	6	0.1	0.25	2.2	7.2

(所用的实验中子通量角分布是未经靶头散射修正的, 所以不需对相对测量作靶头散射修正)、各次测量数据平均值的标准偏差以及靶位置前后偏心引起的误差。

$^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$ 反应截面的误差, 除上述几项外, 还考虑了扣除 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}(^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co})$ 的贡献所造成的误差。

五、讨 论

在图 1—4 中画出了我们测量的激发曲线和国外一些作者测量的结果, 并于表 4—8 中列出了 14 兆电子伏附近各家测量的反应截面值。下面按反应进行简单的分析比较。

1. $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58\text{m}}+^{\text{g}}\text{Co}$ 此反应的阈能较低。从梅多斯(J. W. Meadows)^[2]等人的测量来看, 其实验阈能约为 1 兆电子伏。因此, 在测量时极易受 $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 反应产生的中子(在入射氘核能量为 200 千电子伏时, 中子能量约 3.5 兆电子伏)及其他散射本底中子的影响。因此, 我们在照射时采用了新的 Ti-T 靶, 这样可使靶中吸附氘的量减少一些, 从而减小 D-d 中子的影响。另外我们还用实验测量了 D-d 中子的数量, 其影响小于 1%。

相对测量时, 由于中子通量比绝对测量低一个数量级, 需照射较长的时间。Ti-T 靶中将吸附较大数量的氘, D-d 中子影响较大且难于扣除。因此, 我们未进行相对测量。

从表 4 的数据, 并考虑到截面走向(14 兆电子伏附近是截面值迅速下降的地方)后, 则我们的测量结果与阿拉姆(D. L. Allam)^[3], 罗斯(W. G. Cross)等^[4], 格洛弗(R. N. Glover)等^[5], 坦泼雷(J. K. Temperley)等^[6], 列夫柯夫斯基(B. H. Левковский)等^[7], 巴勒尔(R. G. Barrall)等^[8], 芬克(R. W. Fink)等^[9], 保尔森(A. Paulsen)等^[10], 海明威(J. D. Hemingway)等^[11]的结果比较一致。但各家数据还比较分散。估计与 D-d 中子及其他散射本底中子的影响有关。

1959 年珀泽(K. H. Purser)等^[12]的结果, 不但(n, p)截面, 而且(n, 2n)截面也偏高, 可能存在系统偏差。

1963 年杰罗尼姆(J. M. F. Jeronimo)等^[13]的激发曲线, 不但绝对值低, 而且从走向看来也不合理。

1968 年迪柯夫斯基(P. Decowski)等^[14]在 12—18 兆电子伏间的结果偏高。其所用标准截面和所测 $^{59}\text{Co}(n, 2n)^{58}\text{Co}$ 反应截面也较合适。由于 $^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$ 和 $^{59}\text{Co}(n, 2n)^{58}\text{Co}$ 的反应阈能均在 10 兆电子伏以上, D-d 中子不能引起反应。但 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 的反应阈能

表 4 14 兆电子伏附近 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58\text{m}}\text{Co}$ 的截面值

作者	通量测量方法	放射性测量方法	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年代	文献
珀泽等	伴随 α	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.1	560 ± 110	1959	[12]
普里斯等	$^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$	NaI(Tl) 测 0.811 γ	14.8	237 ± 20	1960	[16]
阿拉姆	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	核乳胶测质子	14	435	1961	[3]
克罗斯等			14.5	316 ± 20	1962	[4]
格洛弗等	伴随 α	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.59 ± 0.20	385	1962	[5]
杰罗尼姆等	塑料闪烁体	NaI(Tl) 测 0.810 γ	14.90	122 ± 15	1963	[13]
奥村(S. I. Okumura)	伴随 α	NaI(Tl) 测 0.810 γ	14.59 ± 0.08	418 ± 11	1967	[15]
坦波雷等	伴随 α	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.53 ± 0.32	317 ± 32	1968	[6]
迪柯夫斯基等	$^{65}\text{Cu}(n, 2n)^{64}\text{Cu}$	化学分离测 β	14.77 ± 0.12	528 ± 55	1968	[14]
列夫柯夫斯基等		β	14.8	380 ± 80	1969	[7]
巴勒尔等	望远镜	NaI(Tl) 测 0.810 γ	14.8 ± 0.2	318 ± 25	1969	[8]
芬克等			14.4	331 ± 30	1970	[9]
保尔森等			14.80 ± 0.34	353 ± 11	1971	[10]
海明威等	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	NaI(Tl) 测 0.810 γ	14.7 ± 0.2	349 ± 11	1973	[11]
本文	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl) 测 0.810 γ	14.6 ± 0.2	346 ± 14		

只有 1 兆电子伏左右, D-d 中子对此反应有贡献。这可能是截面测高的原因之一。

2. $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 从图 1 可以看出, 由于此反应阈能较高, 14 兆电子伏附近正是该反应截面迅速上升的地方。截面值与能量的依赖关系比较强, 故不易测准。

表 5 14 兆电子伏附近 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 的截面值

作者	通量测量方法	放射性测量方法	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年代	文献
保尔(E. B. Paul)等	伴随 α	β	14.5	$40.6 \pm 30\%$	1953	[23]
雷伯恩等			14	$33.4 \pm 8\%$	1959	[17]
珀泽等	伴随 α	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.1	38 ± 8	1959	[12]
普里斯等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.8 ± 0.9	52 ± 5	1960	[16]
雷伯恩等	$^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$	γ - γ 符合	14.4 ± 0.3	34.2 ± 7.5	1961	[18]
普里斯特伍德等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	β	14.50 ± 0.20	34.3 ± 1.7	1961	[20]
克罗斯等		NaI(Tl) 测 1.37 γ	14.5	40 ± 5	1962	[4]
格洛弗等	伴随 α	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.59 ± 0.20	$33.5 \pm 8\%$	1962	[5]
杰罗尼姆等	塑料闪烁体	NaI(Tl) 测 1.37 γ	14.90	39 ± 4	1963	[13]
布拉姆里特等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl) 测 1.37 γ	14.7	31 ± 4	1963	[19]
保尔森等	望远镜	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.61 ± 0.26	33.4 ± 2.3	1965	[22]
锡凯(J. Csikai)等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl) 测 1.37 γ	14.6	37 ± 3	1967	[24]
坦波雷等	伴随 α	NaI(Tl) 测 0.511 γ	14.53 ± 0.32	27.3 ± 2.7	1968	[6]
巴勒尔等	望远镜	NaI(Tl) 测 1.37 γ	14.8 ± 0.2	36 ± 3	1969	[8]
芬克等			14.4 ± 0.4	38 ± 5	1970	[9]
海明威等	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	NaI(Tl) 测 1.37 γ	14.7 ± 0.2	32.6 ± 2.7	1973	[11]
博迪(Z. T. Bödy)等	推荐值		14.7	33.7 ± 1.3	1973	[25]
本文	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	Ge(Li) 测 1.37 γ	14.6 ± 0.3	36.9 ± 1.3		

从表 5 看出, 14 兆电子伏附近我们的结果与大多数作者的结果较一致。1960 年普里斯(I. L. Preiss)等^[16]的结果偏高。1959 年珀泽等^[12]的结果偏高, 正如在 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 一节中所讨论的那样, 估计有系统偏差。1959 年雷伯恩(L. A. Rayburn)等^[17]的结果偏

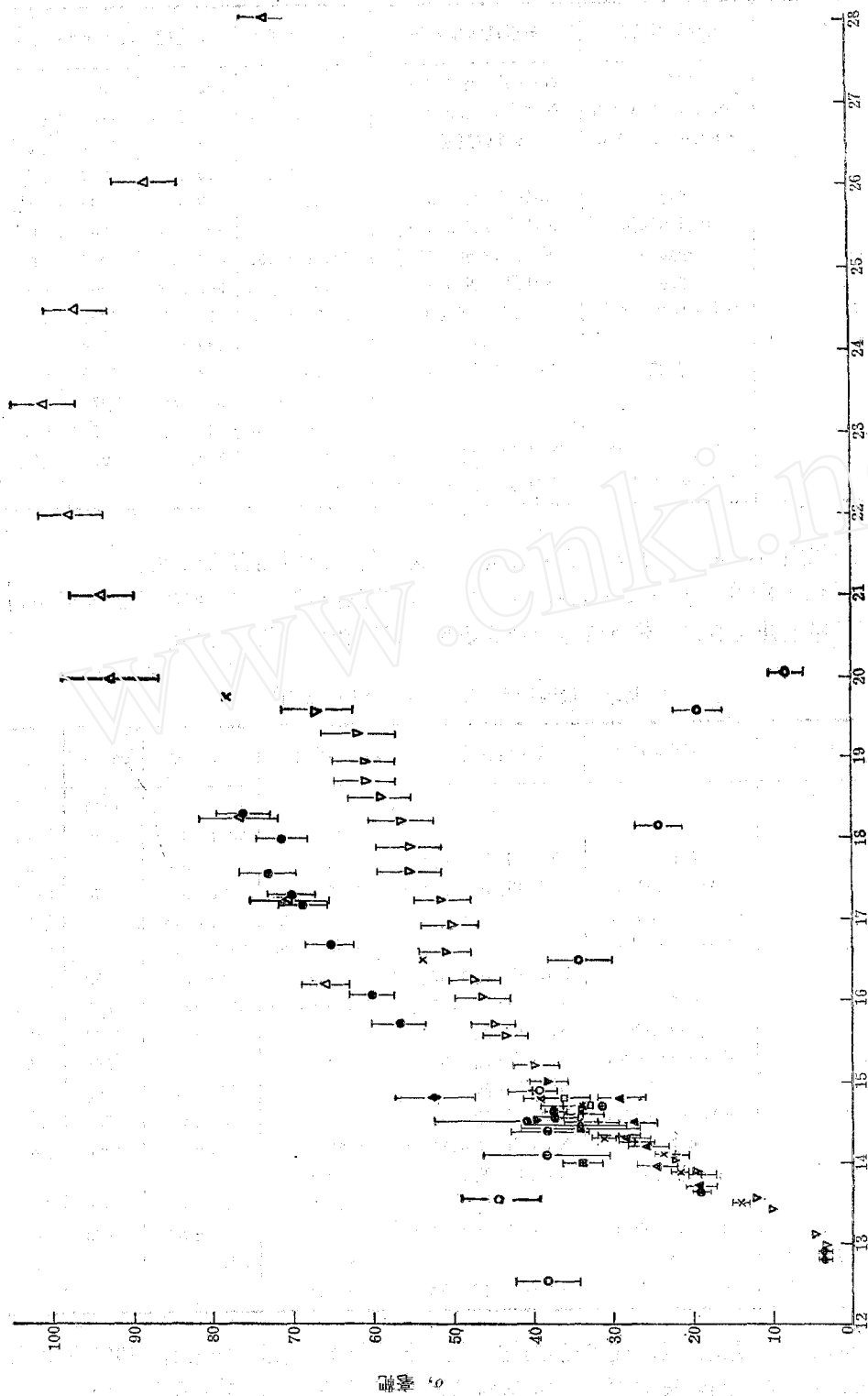


图 1 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 激发曲线
 E_n , 兆电子伏

● 本文; ○ 保尔等^[28]; □ 雷伯恩等^[17]; ○ 珀泽等^[21]; ◆ 普里斯等; □ 雷伯恩等^[18]; × 普雷斯特伍德等^[20]; ◆ 克罗斯等^[4];
 + 格洛弗等^[9]; ○ 木罗尼姆等^[13]; ⊕ 布拉姆里特等^[19]; ⊗ 杨凯等^[23]; ▲ 坦波雷等^[6]; □ 巴克等^[10]; ● 芬克等^[12]; ▣ 海明威等^[11]; * 博迪等^[25](推荐值); △ 贝赫斯特等^[21]; ▽ 保尔森等^[22]。

高。1961年他重新测量的结果^[18]与许多作者一致了。其余除1963年布拉姆里特等^[19]和1973年海明威等^[11]的结果稍低外，在误差范围内均符合。

从截面走向来看，在15兆电子伏以下能区，我们的测量与普雷斯特伍德(R. J. Prestwood)等^[20]，坦泼雷等^[6](14.53和14.79兆电子伏两点除外)及格洛弗等^[5]的结果是一致的。

1961年普雷斯特伍德等^[20]所测16—20兆电子伏间的三点结果偏低。这三点是相对于²³⁸U裂变截面作的，与其他能量点的标准不一样。已在与贝赫斯特(B. P. Bayhurst)合作的工作^[21]中作了修正。

在15兆电子伏以上能区，我们的结果与1975年贝赫斯特的测量衔接得相当好；与保尔森等^[22]的走向一致。

我们认为，1963年杰罗尼姆等的激发曲线^[13]走向是不合理的。

3. $^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$ 从图2和表6可以看出，该反应截面的测量数据少，分歧大。

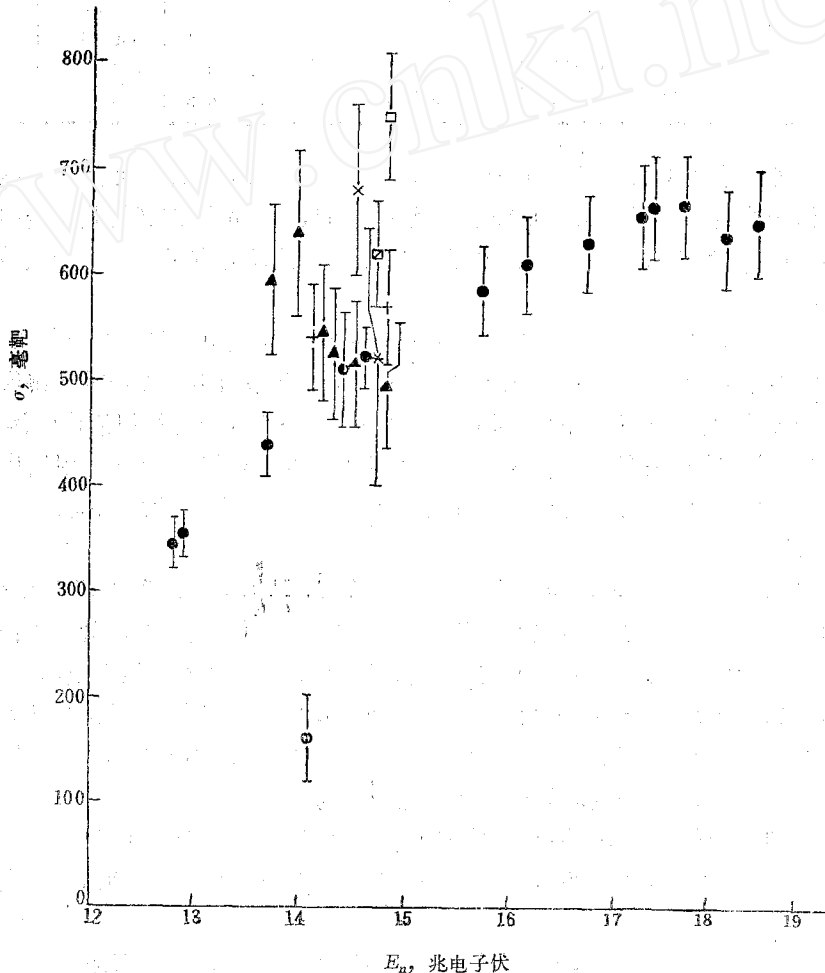


图2 $^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$ 激发曲线

●—本文；○—珀泽等^[12]；×—克罗斯等^[4]；+—格洛弗等^[5]；▲—坦泼雷等^[6]；□—巴勒尔等^[8]；●—芬克等^[9]；□—海明威等^[11]；*—布拉姆里特等^[19]。

1959年珀泽等^[12]的结果只有其他人的四分之一左右。1962年克罗斯等^[4]的结果偏高。1969年巴勒尔等^[7]的结果偏高，他用NaI(Tl)测 γ 放射性，这样0.122和0.136兆电子伏 γ 的光电峰是分不开的，从他用的 γ 射线的分支比为87%来分析，可能是忽略了0.136兆电子伏 γ 的贡献。

在14.5兆电子伏附近，我们的结果与芬克等^[9]，格洛弗等^[5]，布拉姆里特等^[19]以及坦泼雷等^[6]的结果较为一致。

表6 在14兆电子伏附近 $^{58}\text{Ni}(n, np+pn+d)^{57}\text{Co}$ 的截面值

作者	通量测量方法	放射性测量方法	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年代	文献
珀泽等	伴随 α	NaI(Tl)	14.1	160 ± 40	1959	[12]
克罗斯等		NaI(Tl)	14.5	680 ± 80	1962	[4]
格洛弗等	伴随 α	NaI(Tl)	14.8	570 ± 55	1962	[5]
布拉姆里特等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl)	14.7 ± 0.2	520 ± 120	1963	[19]
坦泼雷等	伴随 α	NaI(Tl)	14.53 ± 0.32	516 ± 62	1968	[6]
巴勒尔等	望远镜	NaI(Tl)	14.8 ± 0.2	750 ± 60	1969	[3]
芬克等			14.4 ± 0.4	509 ± 51	1970	[9]
海明威等	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	NaI(Tl)	14.7 ± 0.2	619 ± 49	1973	[11]
本文	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	Ge(Li)	14.6 ± 0.3	523 ± 30		

除本工作外，仅有坦泼雷等^[6]的一家测量了13.7—14.8兆电子伏能区的激发曲线。从整个激发曲线的走向来看，两条曲线不一致。我们认为，坦泼雷等的截面走向不合理。

通过本工作，使在12.8—18.3兆电子伏能区，对该反应有了一条比较完整的激发曲线。

4. $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 从表7和表8可以看出，14兆电子伏 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面数据明显地分为两群。数值约为1300毫靶的一群是用中子飞行时间谱仪或液体闪烁探测器直接测量次级中子得出的。数值为400—500毫靶的一群均用活化法测量。分为两群的原因是 ^{92}Nb 的基态有一个非常长的半衰期($\sim 10^7$ 年^[26])。因此，用活化法测到的仅仅是 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面，而用测次级中子的方法得到的是总截面，即 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m+g}\text{Nb}$ 截面。

在1964年谢林(R. K. Sheline)等^[27]和斯韦特(R. F. Sweet)等^[28]用实验发现10.15天的半衰期是由 ^{92}Nb 的同质异能态产生的，在这以前，均被认为该放射性是由基态发出的，所以1964年前用活化法测到的所谓“总截面”，实际上是同质异能态截面。

在14.5兆电子伏附近布拉姆里特等^[19]，里德(R. Rieder)^[29]，巴苏(B. Basu)等^[30]，瓦里斯(D. G. Vallis)^[31]，博尔曼(M. Bormann)等^[32]，内瑟韦(Nethaway)^[33]，葛拉高列夫(B. Л. Глаголев)^[34]和我们的测量结果是一致的。

1959年冯那赫(H. Vonach)等^[35]和1960年蒂维斯(H. A. Tewes)^[36]的结果都偏低。1966年卡特(H. G. Carter)^[37]和1970年卢温德(Lu Wen-Deh)^[38]的结果偏高，原因不清楚。

1962年斯特罗哈尔(P. Strohal)等^[39]的结果低30—40%，从其所测 $^{89}\text{Y}(n, 2n)^{88}\text{Y}$ 的截面也比别人低40%来看，可能存在系统偏差。1970年保尔森等^[40]在静电加速器上进行绝对测量的结果偏低，可能是通量监测中的问题。从截面走向来看，与我们的结果较为一

表 7 14 兆电子伏附近 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 截面值

作者	通量测量方法	放射性测量方法	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年代	文献
冯那赫等			14.4	420	1959	[35]
蒂维斯			14.6	410	1960	[36]
葛拉高列夫	$^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$	NaI(Tl)	14.7	530 ± 60	1961	[34]
斯特罗哈尔等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl)	14.6 ± 0.3	318 ± 18	1962	[39]
布拉姆里特等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl)	14.7 ± 0.2	499 ± 91	1963	[19]
里德	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl)	14.05 ± 0.05 14.7 ± 0.1	$470 \pm 5\%$ $464 \pm 5\%$	1965	[29]
卡特			14.8	550	1966	[37]
瓦里斯	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl)	14.7 ± 0.5	502 ± 25	1966	[31]
巴苏等			14.8	480 ± 40	1966	[30]
博尔曼等	茂晶体	NaI(Tl)	~ 14.3	~ 480	1970	[32*]
保尔森等	望远镜	Ge(Li)	14.71 ± 0.27	$421 \pm 5\%$	1970	[40]
卢温德等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	Ge(Li)	14.4 ± 0.3	572 ± 30	1970	[38]
内瑟韦	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl)	14.10 14.80	498 ± 25 487 ± 24	1972	[33]
本文	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	NaI(Tl) Ge(Li)	14.6 ± 0.3	490 ± 24		

* 数据系由曲线近似读出。

表 8 14 兆电子伏附近 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}+g}\text{Nb}$ 的截面值

作者	测量方法	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年代	文献
保尔森等	飞行时间谱仪	16.8	$1380 \pm 13\%$	1970	[40]
哈林等	锰浴法	14.1	1350 ± 250	1971	[41]
马瑟等	大液体闪烁计数器	12.4 14.3	977 ± 79 1312 ± 83	1972	[42]
赫姆斯道夫等	飞行时间谱仪	14.6	1280 ± 140	1973	[43]

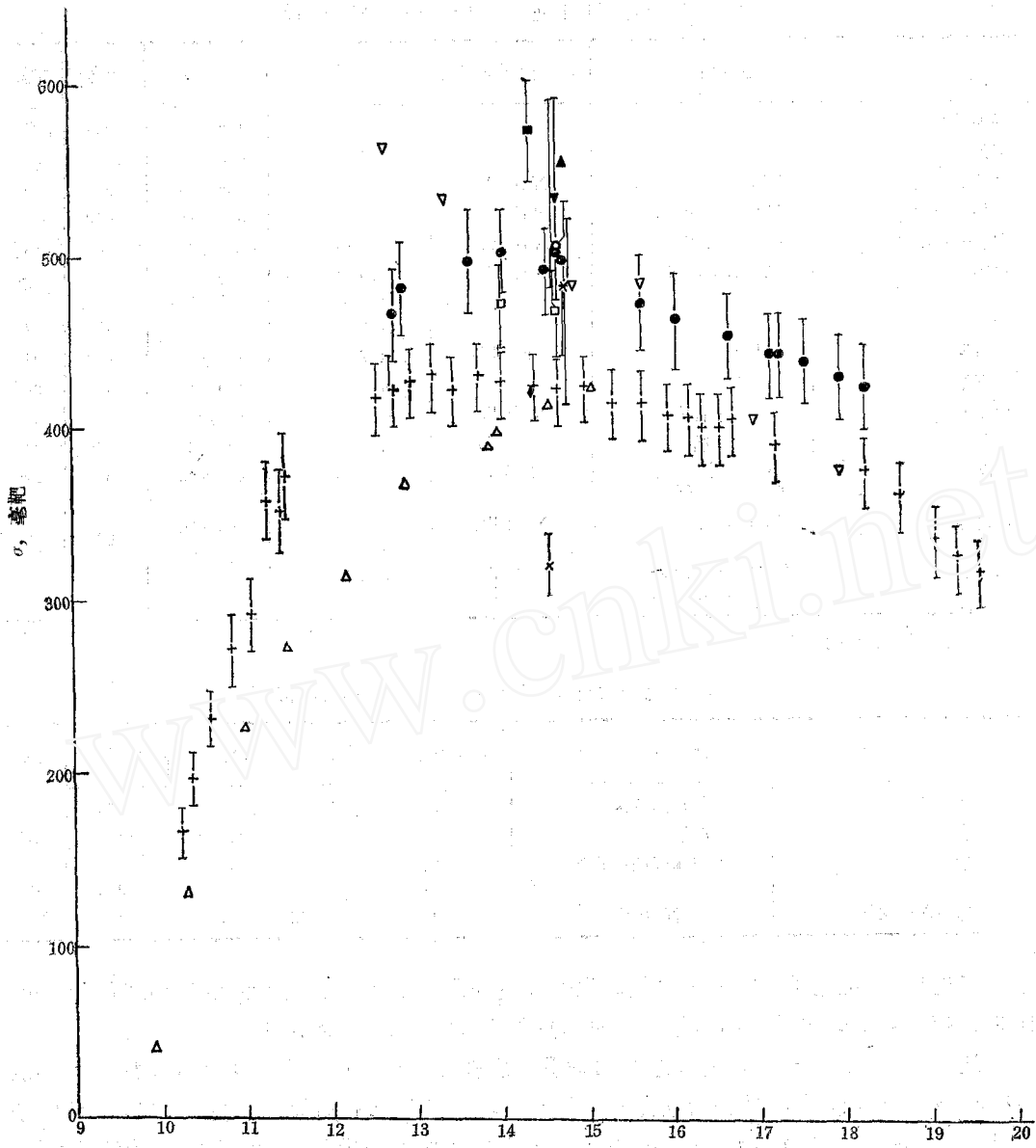
致。但他在 14 兆电子伏附近较平缓。根据他给的照射条件，这一段能区样品正好放在 90° 附近，靶头散射较严重且不易修准。博尔曼^[32]的截面走向与众不同。

从 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92}\text{Nb}$ 反应的总截面来看，保尔森等^[40]，哈林(M. Häring)等^[41]，马瑟(D. S. Mather)等^[42]，赫姆斯道夫(D. Hermsdorf)等^[43]的测量与卡特^[37](14.8 兆电子伏为 1140 毫靶)，珀尔斯坦(S. Pearlstein)等^[44](14 兆电子伏为 1290 毫靶)，卢温德等^[38]

表 9 14 兆电子伏附近 $^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$ 截面值

作者	通量测量方法	放射性测量方法	E_n , 兆电子伏	σ , 毫靶	发表年代	文献
奥尔福德等	$^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$	NaI(Tl)	14.7	5 ± 2	1961	[46]
布拉姆里特等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$	NaI(Tl)	14.7	5.9 ± 2.0	1963	[19]
苏齐克拉等			214	5 ± 2	1967	[47*]
卢温德等	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	Ge(Li)	14.4 ± 0.3	5.3 ± 0.5	1970	[38]
本文	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	NaI(Tl)	14.6 ± 0.3	5.72 ± 0.41		

* 数据系由曲线近似读出。



E_n , 兆电子伏

图 3 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 激发曲线

●—本文; ◆—冯那赫等^[35]; △—蒂维斯^[36]; ▼—葛拉高列夫^[34]; ×—斯特罗哈尔等^[39]; ●—布拉姆里特等^[18]; □—里德^[29]; ▲—卡特^[37]; ○—瓦里斯^[31]; *—巴苏等^[31]; ▽—博尔曼等^[32]; +—保尔森等^[40]; ■—卢温德等^[38]; ⊗—内瑟韦^[33]。

(14.4 兆电子伏为 1140 毫靶) 以及布洛 (S. Blow)^[45] 的理论计算值 (14 兆电子伏附近为 1100—1200 毫靶) 是一致的。

5. $^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90m}\text{Y}$ 半衰期为 64 小时的 ^{90}Y 的基态为纯 β 衰变, 只有半衰期为 3.19 小时的激发态有 γ 放出。所以凡是用测 γ 放射性的方法获得的截面均为 $^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90m}\text{Y}$ 反应截面。

从表 9 和图 4 可以看出, 我们的结果与奥尔福德 (W. L. Alford) 等^[46], 布拉姆里特等^[19], 苏齐克拉 (P. Guzzocrea) 等^[47], 卢温德等^[38]的结果在误差范围内均一致。1961 年贝赫斯特等^[48]用测 β 放射性的方法测到的 $^{93}\text{Nb} (n, \alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$ 截面在 14.5 兆电子伏处为 9.5 ± 0.5 毫靶, 与 1964 年塞他 (E. Saetta) 等^[49]的理论计算值 (14.4 兆电子伏为 9.3 毫靶) 是一致的。

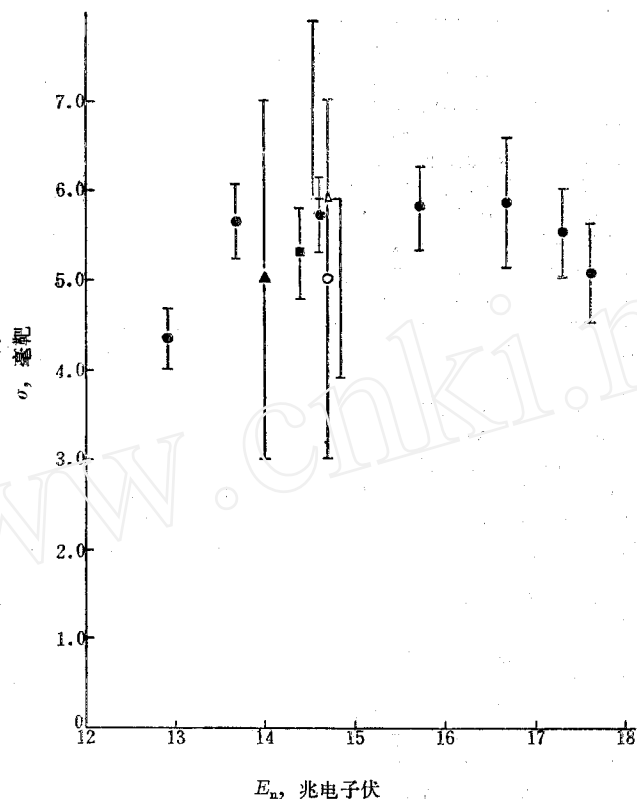


图 4 $^{93}\text{Nb} (n, \alpha)^{90\text{m}}\text{Y}$ 激发曲线

●——本文; ○——奥尔福德等^[46]; △——布拉姆里特等^[19]; ▲——苏齐克拉等^[47];
■——卢温德等^[38]。

我们还没有找到其他作者有关激发曲线走向的数据。

参加工作的还有范培国、李际周、马鸿昌、王大海、卢涵林等同志。本工作的部分测量是在上海科学技术大学作的, 得到他们许多帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 卢涵林等, 原子能科学技术, 2, 113(1975).
- [2] J. W. Meadows et al., *Phys. Rev.*, **130**, 2022 (1963).
- [3] D. L. Allam, *Nucl. Phys.*, **24**, 274 (1961).
- [4] W. G. Cross et al., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **7**, 335 (1962).
- [5] R. N. Clover et al., *Nucl. Phys.*, **29**, 309 (1962).
- [6] J. K. Temperlay et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **32**, 195 (1968).
- [7] В. Н. Левковский и др., *Я. Ф.* **10**, 44 (1969).
- [8] R. C. Barrall et al., *Nucl. Phys.*, **A138**, 387 (1969).
- [9] R. W. Fink et al., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **15**, 1372(1970).

- [10] A. Paulsen et al., *Chemical Nuclear Data, Measurements and Applications*, 1971, p. 121.
- [11] J. D. Hemingway et al., *J. Nucl. Energy*, **27**, 241 (1973).
- [12] K. H. Purser et al., *Aust. J. Phys.*, **12**, 103 (1959).
- [13] J. M. F. Jeronimo et al., *Nucl. Phys.*, **47**, 157 (1963).
- [14] P. Decowski et al., *Nucl. Phys.*, **A112**, 513 (1968).
- [15] S. I. Okumura, *Nucl. Phys.*, **A93**, 74 (1967).
- [16] I. L. Preiss et al., *Nucl. Phys.*, **15**, 325 (1960).
- [17] L. A. Rayburn et al., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **4**, 288 (1959).
- [18] L. A. Rayburn et al., *Phys. Rev.*, **122**, 168 (1961).
- [19] E. T. Bramlitt et al., *Phys. Rev.*, **131**, 2649 (1963).
- [20] R. J. Prestwood et al., *Phys. Rev.*, **121**, 1438 (1961).
- [21] B. P. Bayhurst et al., *Phys. Rev.*, **C12**, 451 (1975).
- [22] A. Paulsen et al., *Nukleonik*, **7**, 117 (1965).
- [23] E. B. Paul et al., *Can. J. Phys.*, **31**, 267 (1953).
- [24] J. Csikai et al., *Acta Phys. Hung.*, **23**, 87 (1967).
- [25] Z. T. Bödy et al., *Atomic Energy Review*, **11**, 1, 153 (1973).
- [26] D. Steiner et al., ORNL-TM-3094, 1970.
- [27] R. K. Sheline et al., *Phys. Letters*, **8**, 121 (1964).
- [28] R. F. Sweet et al., *Phys. Letters*, **8**, 131 (1964).
- [29] R. Rieder, Nuclear Structure Study with Neutron, Antwerp, Belgium, 1965, p. 547.
- [30] B. Basu et al., Proc. of the Nuclear Physics and Solid State Physics Symposium, 1966, p. 209.
- [31] D. G. Vallis, AWRE-O-76/66(1966).
- [32] M. Bormann et al., *Nucl. Phys.*, **A157**, 481 (1970).
- [33] D. R. Nethaway, *Nucl. Phys.*, **A190**, 635 (1972).
- [34] B. Л. Глаголев, *ЖЭТФ*, **40**, 745 (1961).
- [35] H. Vonach et al., *Anz. Math.-Naturw. Kl. Oesterr. Akad. Wiss.*, **6**, 120 (1959).
- [36] H. A. Tewes, WASH-1023 (1960), p. 63.
- [37] H. G. Carter, Proc. Conf. Neutron Cross Sections Technology, Washington D. C. Vol. 2 (1966), p. 682.
- [38] Lu Wen-Deh et al., *Phys. Rev.*, **C1**, 350 (1970).
- [39] P. Strohal et al., *Nucl. Phys.*, **30**, 49 (1962).
- [40] A. Paulsen et al., *Z. Phys.*, **233**, 23 (1970).
- [41] M. Häring et al., *Z. Phys.*, **244**, 352 (1971).
- [42] D. S. Mather et al., AWRE-O-72/72 (1972).
- [43] D. Hermsdorf et al., *J. Nucl. Energy*, **27**, 747 (1973).
- [44] S. Pearlstein et al., *Nucl. Data*, **A3**, 327 (1967).
- [45] S. Blow, *J. Nucl. Energy*, **26**, 635 (1972).
- [46] W. L. Alford et al., *Phys. Rev.*, **123**, 1365 (1961).
- [47] P. Cuzzocrea et al., INFN/BE-67/11 (1967).
- [48] B. P. Bayhurst et al., *J. Inorg. Nucl. Chem.*, **23**, 173 (1961).
- [49] E. Saetta et al., *Nucl. Phys.*, **51**, 449 (1964).
- [50] M. J. Martin et al., *Nucl. Data Table*, **8**, (1976).
- [51] C. M. Lederer et al., *Table of Isotop.*, p. 191, 1967.
- [52] G. T. Strouse et al., *Nucl. Phys.*, **74**, 177 (1965).
- [53] C. M. Lederer et al., *Table of Isotop.*, p. 226, 1967.
- [54] A. H. Sher et al., *Nucl. Phys.*, **A 112**, 85(1968).