

用 14 MeV 中子轰击铌伴生 γ 射线研究*

周宏余 颜一鸣 范国英 兰李桥 王 琪 孙树旭 华 明 韩崇霏

刘淑珍 荣亚宁 温深林 汪新福 杨 华 王皖虹

(北京师范大学低能核物理研究所)

唐 林

(中国自然科学基金会数理部, 北京)

摘 要

利用脉冲化的 $T(d,n)^4\text{He}$ 中子源、伴随粒子方法、Ge(Li) 探测器和飞行时间技术测量了 14.9 MeV 中子和铌反应在 30° — 140° 之间七个角度上的分立 γ 射线谱; 由高分辨 γ 谱分析程序识别了 79 条谱线; 初步确定了 62 条谱线所由产生的反应类型和跃迁能级, 其中有 40 条谱线是在由中子诱发的核反应中首次发现的. 定出了每条谱线在七个角度上的微分产生截面, 结果表明该反应中的伴生 γ 发射基本上是各向同性的.

一、引 言

随着近代科学技术的发展, 人们日益坚信热核聚变反应释放的能量必将成为人类未来取之不尽的新能源. 而在这个新能源的开发利用中, 由于铌金属所具有的优良的化学物理性能必将起重要的作用, 它可能是用于聚变反应堆等离子体约束的最理想的材料之一. 这个考虑已经激起了人们对快中子(到 14 MeV 以上的能量)和铌相互作用研究的兴趣^[1,2]. 这个作用中的分立 γ 射线谱, 微分产生截面, 以及它们的角分布是聚变堆设计中的基础核数据, 同时也能为核结构和核反应机制的研究提供有价值的知识. 早期的工作主要集中在 0.6 MeV—3 MeV 中子能区^[3-6], 目的在于了解 ^{93}Nb 的能级结构. 近年来由于聚变堆设计的需要, 开始转到 14 MeV 中子能点的研究^[7,8]. 因为铌元素的能级密度较大, 14 MeV 中子所引起的 γ 射线产额又比较低, 以前的分立 γ 射线谱的研究还只局限于个别角度上, 系统的角分布研究至今还未见报道. 在本工作中, 利用了具有高探测效率和高能量分辨率的 Ge(Li) 探测器, 首次测量了 14.9 MeV 中子和铌反应在 30° 到 140° 之间七个角度上的分立 γ 射线谱和微分产生截面.

* 本工作由中国自然科学基金会和核工业部资助.
本文 1987 年 12 月 23 日收到.

二、实验原理和方法

14.9 MeV 中子和铀反应的 γ 射线主要来自 $(n, n'\gamma)$ 和 $(n, 2n\gamma)$ 等反应道。一条能量为 E_γ ，在 θ 方向(相对于入射中子方向)的分立 γ 射线微分截面可由下式计算:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_\gamma, \theta) = \frac{N_\gamma(E_\gamma, \theta)}{4\pi\phi_n N \varepsilon(E_\gamma)} f, \quad (1)$$

其中 ϕ_n 是入射到样品上的中子数, $N_\gamma(E_\gamma, \theta)$ 是在 θ 方向测到的能量为 E_γ 的 γ 射线的全能峰计数, $\varepsilon(E_\gamma)$ 是 Ge(Li) 探测器对能量为 E_γ 的 γ 射线的全能峰的绝对效率, N 是中子入射方向上样品单位面积中的原子数, f 是对中子和 γ 射线产额的一些修正因子。

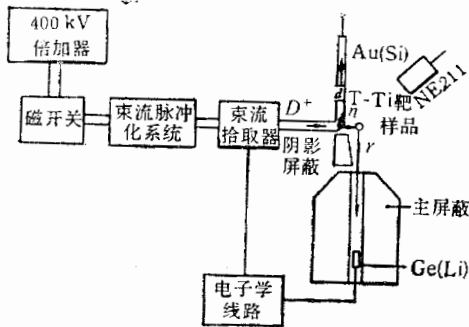


图1 实验装置

实验在北师大低能核物理所的一个400 kV 脉冲化的高压倍加器上完成。实验装置如图1所示,测量的电子学框图见图2,加速器产生300 keV 的氘束,经脉冲化系统得到重复频率为3.16 MHz,脉冲半宽度为1 ns左右的脉冲束,打到厚的T(Ti)靶上,在氘束的 0° 方向上产生平均能量为14.9 MeV、能散度为0.5 MeV的脉冲中子束,平均中子强度为 5×10^3 中子/秒。脉冲信号由一个装在加速器管道上距中子靶40 cm 的电容式束流拾取器给出。另外,用一个塑料闪烁探头NE 211的脉冲信号的飞行时间谱(相对于束脉冲时间,谱由ADC 2.3分析记录)来调试和监测脉冲化系统工作的稳定性。

样品采用 $\phi 3.02 \times 3.044$ cm 的柱形金属铀,重188克,纯度在99.9%以上。样品放在中子靶前方13.4 cm 处。

入射到样品上的绝对中子注量由一个与氘束成 90° ,距中子靶100 cm 的金硅面垒探测器测量 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应的 ^4He 粒子确定,伴随粒子能谱由ADC 2.4分析记录。

绝对 γ 射线产额由一个距样品中心139.4 cm 处的同轴 Ge(Li) 探测器测量。Ge(Li) 探测器的灵敏体积为110.7 cm^3 ,对 ^{60}Co 的1332.5 keV γ 射线的能量分辨率为1.85 keV。Ge(Li) 探测器放在一个全方位屏蔽体内。屏蔽体和中子靶之间有40 cm 厚的阴影屏蔽(由铁、钨组成)。主屏蔽和阴影屏蔽使得直射到 Ge(Li) 探测器上的14 MeV 中子衰减到 10^{-5} 。用ADC 1和ADC 3分析记录 γ 射线谱。在 γ 能谱测量中使用飞行时间以减少直射和散射中子本底,Ge(Li) 脉冲信号的飞行时间谱(见图3)由ADC 2.3分析记录,时间谱中 γ 射线峰的半宽度约为7 ns。实验证明,ADC 1取35 ns 的时间窗就无计数损失。ADC 3一般用20 ns 左右的窄窗测量,它测得的 γ 射线谱虽然有一部分计数损失,但大大压低了中子本底,提高了信噪比,这对识别产额很低的弱 γ 射线是很有益处的。

γ 射线探测器在100 keV—3 MeV 能区上的绝对探测效率由一组精度在2—3%之间

的
也
谓“

三
步
境)

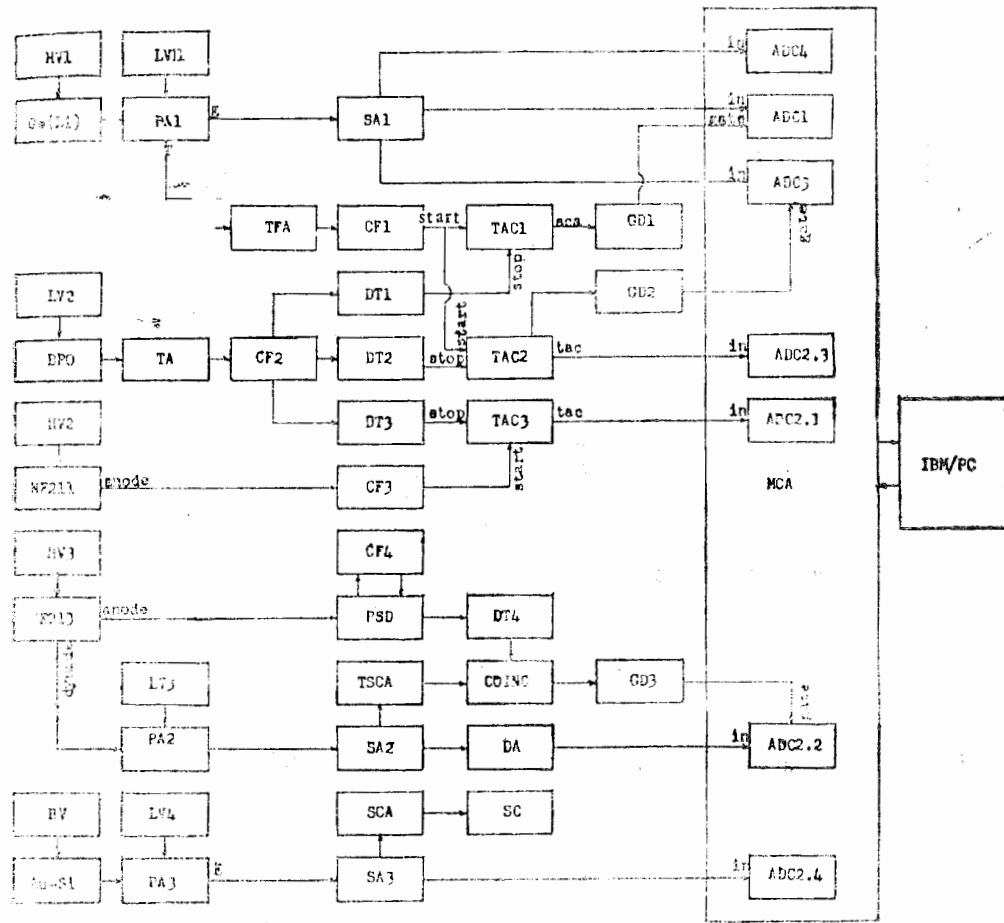


图 2 电子学线路框图

ADC——模数变换器, BV——探测器偏压电源, CF——恒比定时器, DT——毫微秒延时器, FA——快放大器, GD——门及延时产生器, HV——高压电源, LV——低压电源, MCA——多道分析器, PA——前置放大器, PSD——脉冲形状甄别器, SA——谱放大器, SC——定标器, SCA——单道分析器, TAC——时幅转换器, TFA——定时滤波放大器, BPO——束流拾取器, TSCA——定时单道分析器

的标准 γ 射线源确定。在刻度测量时,标准源放在实际测量的样品位置上,其他几何安排也和正式实验时完全一样,这样刻度的效率就是正式实验测量的效率,避免了找晶体的所谓“有效中心”外推而引进误差,另外也减少了周围物体散射和其他环境本底引起的误差。

用 ADC 2.2 分析记录 NE 213 液体闪烁探测器的中子谱,以进行中子注量监测。

六路信号由 S-80 多道分析器记录,并由联多道的 IBM-pc/XT 微型机处理。

在 30° 、 40° 、 55° 、 90° 、 110° 、 125° 和 140° 七个角度分别进行测量,每个角度的测量为三步: 第一步挂上样品测量在束 γ 谱 (12 小时左右), 第二步退束测量样品(包括周围环境)的活化 γ 谱 (1 小时), 第三步去样品测量在束本底谱 (2 小时)。

经实验检验证明,在七个角度的测量过程中, Ge(Li) 探测器的效率保持不变。

条

1)

线

对

率,

(子

因

400

置

且速

到

s 左

能

在

头

或和

占放

至

Ge

率为

1 厚

MeV

飞行

: 2.3

可窗

部分

很有

之间

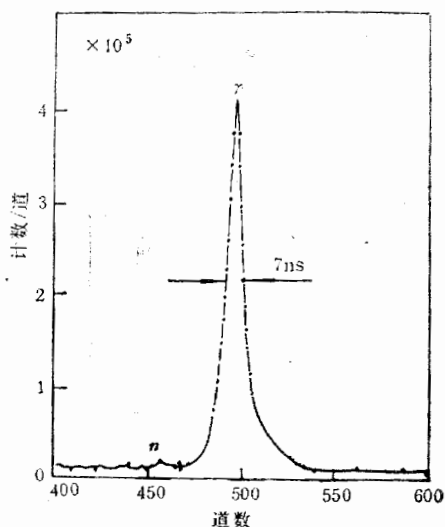


图3 铌样品测量中 Ge(Li) 脉冲时间谱(相对于束拾取时间)

三、数据处理

求出 ADC 2.4 记录的伴随粒子谱的净面积 N_a , 可由下式确定入射到样品上的中子数:

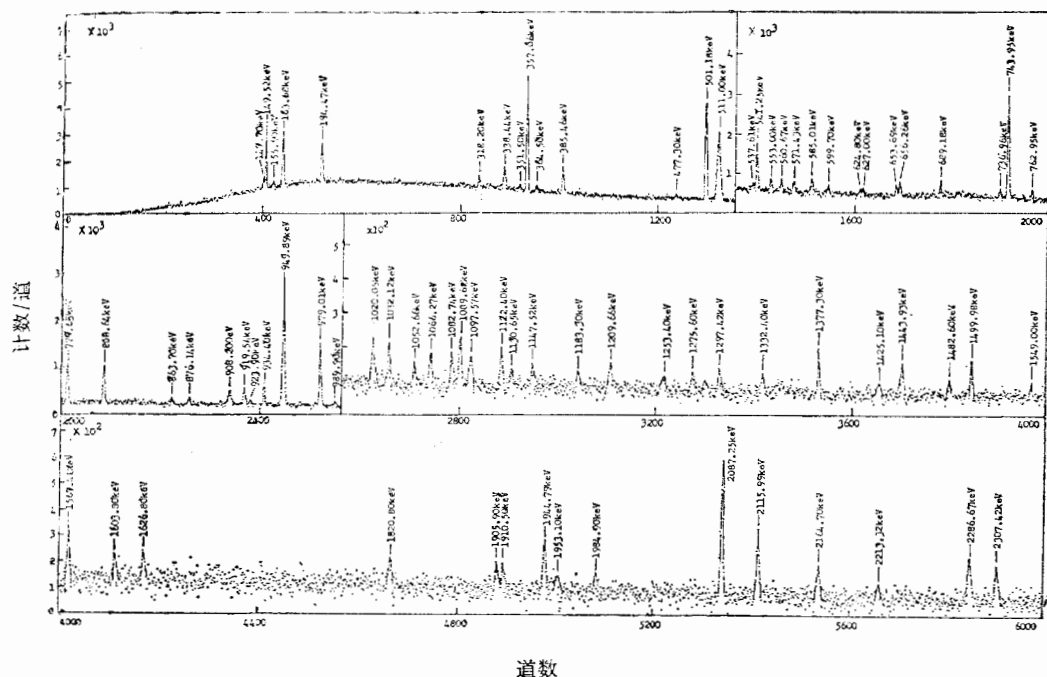
$$\phi_n = \frac{\Omega_i N_a}{\Omega_a} A_a \quad (2)$$

其中 Ω_a, Ω_i 分别是伴随粒子探测器和样品对中子靶所张的立体角, A_a 是 $T(d, n)^4\text{He}$ 中子源的由 90° 伴随粒子计数确定 0° 方向中子发射的各向异性因子。

γ 射线全能峰的净计数 N_γ 是由有样品的在束 γ 谱扣除无样品的在束本底谱(由伴随粒子计数归一)后用一个高分辨 γ 谱分析程序解出全能峰的面积, 再扣除相应峰的活化本底贡献后得到。以 ADC 1 测量的谱为定量计算的依据, ADC 3 的谱只作为确定某些弱峰峰位的参考。图 4 为在 90° 测量的已经扣除无样品本底的 γ 射线谱。

在修正因子 f 的计算中考虑了中子在样品中的注量衰减, 多次散射, γ 射线在样品中的吸收、中子在靶衬和冷却水层中的衰减、以及面源作点源近似的立体角修正等因素。各项修正的计算方法见文献 [8], 计算中用到的有关中子和 γ 射线的的数据取自 ENDF-BIV 和文献 [9]。表 1 中以 934.40 keV γ 射线为例列出了它的各个修正项的大小。

(1) 式中的各因子的误差估计如下: 入射到样品上的中子注量 ϕ_n 的不确定性不大于 4%; 在 100 keV—2.6 MeV 能区上 Ge(Li) 探测器的绝对效率 $\epsilon(E_\gamma)$ 的不确定性在 1.5%—2.5% 之间; 全能峰计数 N_γ 的不确定性由各峰计数的统计误差大小决定, 不同的峰差别很大, 在 1%—100% 之间变化; 修正因子 f 的不确定性主要由修正计算方法的近似性, 以及计算中所用到的中子和 γ 截面数据的不确定性造成。它的不确定性在 1%—3% 之间。

图 4 14.9MeV 中子和铈反应产生的 γ 射线谱 ($\theta = 90^\circ$)表 1 934.40keV γ 射线产额计算中的各个修正项的大小 ($\theta = 90^\circ$)

修正因子	修正量大小
中子在样品中的注量衰减	29.3%
弹性散射中子的多次散射	8.1%
非弹性散射中子的多次散射	2.6%
γ 射线在样品中的吸收	48.1%
中子在靶衬和冷却水层中的衰减	2.5%
面源作点源近似的立体角修正	1.2%

各项修正和微分截面的计算由 GAM.FOR 程序完成。

四、结果和讨论

14.9 MeV 中子和铈反应七个角度上的微分 γ 射线产生截面列于表 2 中, 和文献[8]中的 90° 测量结果相比, 这次测量由于将多道分析器每道分析的能量宽度由 0.8 keV 改成了 0.4 keV, 提高了能量分辨率, 使 149.52 keV 的 γ 线分裂成了 147.70 keV 和 149.52 keV 两条线。另外, 根据七个角度上的 γ 射线谱的对照, 去掉了原来 90° 测量确定的 1286.63 keV、1967.36 keV 和 2128.52 keV 三个峰, 增加了 155.90 keV 和 599.70 keV 两个峰, 这样连同 149.52 keV 中分裂出来的 147.70 keV 线, 总共还是 79 条谱线。这些谱线中有 40 条是在中子诱发的核反应中首次发现的。

表 2 中还按照已知的能级纲图^[3,10], 给出了 62 条谱线可能的反应类型和跃迁能级, 当然这只是初步的结果, 最后确定每条谱线在能级图中的位置, 还得依靠激发曲线, 角分布,

中子
(2)
 ^4He
由伴
活化
某些
品中
。各
-BIV
不大
性在
的峰
近似
-3%

表2 14.9MeV 中子与铋反应产生的 γ 射线微分截面

E_γ (keV)	反应道	跃迁 (keV)	微分截面 (mb/sr)							
			30°	40°	55°	90°	110°	125°	140°	
147.70	$(n_3, 2n)$	2235.00—2086.67	3.22±0.55	2.97±0.48	3.37±0.54	3.10±0.47	3.17±0.63	3.15±0.47	3.07±0.41	
149.52	$(n_3, 2n)$	285.0—135.1	16.75±1.68	16.75±1.46	16.20±1.46	16.11±1.36	16.50±1.37	16.41±1.21	14.41±1.10	
155.90	$(n_3, 2n)$	1480.0—1324.0	0.832±0.250	0.864±0.260	0.690±0.210	0.693±0.180	0.890±0.220	0.789±0.200	0.744±0.190	
163.68	$(n_3, 2n)$	389.1—225.0	14.50±1.16	12.91±1.03	13.82±1.10	13.28±0.87	13.06±0.91	13.46±0.94	12.92±0.90	
194.47	$(n_3, 2n)$	479.6—285.0	7.57±0.68	7.78±0.62	7.50±0.67	7.30±0.47	7.67±0.54	7.00±0.56	6.44±0.45	
318.20	(n_3, n')	1297.42—979.01								
		2003.38—1686.07	1.44±0.17	1.39±0.15	1.36±0.15	1.49±0.15	1.32±0.18	1.39±0.14	1.28±0.18	
	$(n_3, 2n)$	1642.0—1324.0								
338.44	(n_3, n')	1082.74—743.95	3.03±0.39	3.20±0.32	2.76±0.25	3.24±0.29	2.87±0.20	2.93±0.26	2.42±0.29	
		2003.38—1665.76								
351.50	(n_3, n')	1686.07—1334.80	0.394±0.100	0.382±0.100	0.556±0.111	0.602±0.124	0.473±0.104	0.682±0.136	0.590±0.148	
357.06	$(n_3, 2n)$	357.06—0.0	19.85±1.40	19.02±1.33	19.53±1.36	19.16±0.96	17.86±1.07	18.09±1.08	18.36±1.06	
364.50	(n_3, n')	1679.56—1315.08	0.654±0.196	0.648±0.194	0.531±0.159	0.511±0.128	0.414±0.104	0.470±0.117	0.453±0.113	
385.46	(n_3, n')	1334.80—949.89	5.22±0.31	4.97±0.30	5.27±0.36	5.20±0.31	4.73±0.38	4.78±0.29	4.94±0.25	
477.30	(n_3, n')	1968.25—1491.15	0.955±0.191	0.914±0.183	0.910±0.182	0.866±0.173	0.810±0.162	0.909±0.181	0.972±0.194	
501.18	$(n_3, 2n)$	501.18—0.0	18.31±1.10	18.78±1.13	20.13±1.21	19.54±1.24	18.92±1.04	18.69±1.03	18.34±1.03	
537.61	(n_3, n')	2203.20—1665.76	0.511±0.153	0.416±0.125	0.401±0.120	0.405±0.121	0.369±0.111	0.467±0.140	0.371±0.111	
541.25	(n_3, n')	1491.15—949.89	4.14±0.25	4.21±0.25	4.19±0.25	3.91±0.24	3.92±0.24	3.92±0.24	3.95±0.22	
553.00	(n_3, n')	1297.42—743.95								
		1947.80—1394.61	1.19±0.18	1.30±0.20	1.16±0.12	1.23±0.17	1.15±0.15	0.990±0.120	0.990±0.150	
	$(n_3, 2n)$	1642.00—1089.00								

$(n_2, 2n)$	1642.00—1089.00															
(n_2, n')	1369.41—808.64	1.47 ± 0.18	1.60 ± 0.19	1.81 ± 0.18	1.25 ± 0.17	1.29 ± 0.13	1.56 ± 0.12	1.44 ± 0.14								
(n_2, n')	1315.08—743.95	1.77 ± 0.27	1.81 ± 0.22	1.95 ± 0.21	1.36 ± 0.15	1.60 ± 0.19	1.29 ± 0.13	1.37 ± 0.17								
(n_2, n')	1394.61—810.05	1.10 ± 0.17	1.16 ± 0.17	1.27 ± 0.19	1.23 ± 0.18	0.951 ± 0.143	0.899 ± 0.135	1.08 ± 0.16								
(n_2, n')	2203.20—1603.80	0.695 ± 0.201	1.14 ± 0.22	1.36 ± 0.41	0.773 ± 0.155	1.12 ± 0.22	1.21 ± 0.36	0.916 ± 0.275								
(n_2, n')	1682.82—1082.68		0.457 ± 0.137	0.379 ± 0.114	0.566 ± 0.170	0.340 ± 0.102	0.527 ± 0.158	0.521 ± 0.156								
(n_2, n')	1603.80—979.01	0.546 ± 0.164														
(n_2, n')	2019.01—1394.61															
(n_2, n')	2118.59—1491.15	0.614 ± 0.154	0.575 ± 0.143	0.607 ± 0.152	0.783 ± 0.196	0.424 ± 0.106	0.670 ± 0.168	0.614 ± 0.154								
(n_2, n')	1603.80—949.89	1.07 ± 0.13	1.31 ± 0.16	1.11 ± 0.13	1.13 ± 0.14	0.936 ± 0.112	1.06 ± 0.13	0.888 ± 0.106								
(n_2, n')	686.44—30.40	1.75 ± 0.18	1.87 ± 0.19	1.97 ± 0.18	1.51 ± 0.16	1.90 ± 0.17	1.75 ± 0.18	1.65 ± 0.17								
(n_2, n')	2171.98—1483.37	2.05 ± 0.23	1.86 ± 0.15	2.18 ± 0.20	1.86 ± 0.19	2.08 ± 0.17	1.97 ± 0.18	1.95 ± 0.20								
(n_2, n')	1686.07—949.89	0.608 ± 0.152	0.500 ± 0.125	0.550 ± 0.138	0.651 ± 0.136	0.547 ± 0.138	0.686 ± 0.137	0.517 ± 0.129								
(n_2, n')	743.95—0.0	12.40 ± 0.74	12.35 ± 0.74	12.81 ± 0.77	13.00 ± 0.78	11.55 ± 0.69	11.66 ± 0.70	11.53 ± 0.64								
$(n_2, 2n)$	2998.0—2235.0	0.920 ± 0.110	1.12 ± 0.13	1.04 ± 0.12	1.11 ± 0.13	1.14 ± 0.13	0.930 ± 0.112	0.917 ± 0.110								
(n_2, n')	1738.0—975.0															
(n_2, n')	1728.59—949.89	5.00 ± 0.35	5.31 ± 0.37	5.00 ± 0.35	5.01 ± 0.35	4.48 ± 0.31	4.70 ± 0.33	4.24 ± 0.41								
(n_2, n')	810.05—30.40															
(n_2, n')	808.64—0.0	4.68 ± 0.35	4.43 ± 0.33	4.67 ± 0.35	4.96 ± 0.35	4.35 ± 0.33	4.42 ± 0.30	4.67 ± 0.29								
$(n_2, 2n)$	1089.0—225.3	0.631 ± 0.158	0.629 ± 0.189	0.632 ± 0.190	0.871 ± 0.174	0.636 ± 0.159	0.606 ± 0.152	0.600 ± 0.180								
(n_2, n')	2367.31—1491.15	0.916 ± 0.147	0.932 ± 0.158	1.27 ± 0.19	1.00 ± 0.16	0.889 ± 0.135	0.877 ± 0.263	0.803 ± 0.201								
$(n_2, 2n)$	1410.2—501.18	2.70 ± 0.24	2.62 ± 0.21	2.65 ± 0.21	2.72 ± 0.27	2.59 ± 0.20	2.84 ± 0.23	2.50 ± 0.28								
(n_2, n')	949.89—30.40	2.98 ± 0.22	3.04 ± 0.24	2.83 ± 0.21	2.86 ± 0.22	3.06 ± 0.23	2.75 ± 0.19	2.89 ± 0.23								
(n_2, n')	1728.59—808.64															
923.90		0.578 ± 0.347	1.07 ± 0.21	0.865 ± 0.173	0.882 ± 0.200	1.01 ± 0.20	0.815 ± 0.163	0.814 ± 0.163								

续表 2

E_{γ} (keV)	反应道	跃迁 (keV)	微分截面 (mb/sr)						
			30°	40°	55°	90°	110°	125°	140°
934.40	$(n_2, 2n)$	1414.0—479.6	3.03±0.24	2.86±0.23	3.25±0.23	2.89±0.22	3.02±0.24	3.21±0.26	3.32±0.27
949.89	(n_2, n')	949.89—0.0 2203.20—1253.40	20.36±1.22	20.50±1.23	20.93±1.26	19.22±1.11	18.61±1.09	18.60±1.12	18.83±1.06
979.01	(n_2, n')	979.01—0.0	9.01±0.54	9.20±0.55	9.56±0.57	9.43±0.56	9.31±0.56	9.18±0.55	8.98±0.60
989.90	(n_2, n')	1968.25—979.01	0.421±0.105	0.556±0.139	0.505±0.126	0.496±0.124	0.420±0.105	0.510±0.128	0.570±0.143
1020.05	(n_2, n')	1968.25—949.89	2.03±0.20	2.41±0.24	2.09±0.15	2.20±0.21	2.20±0.20	2.44±0.17	2.02±0.22
1032.12	(n_2, n')	2367.31—1334.80 2329.90—1297.32	1.76±0.18	1.75±0.18	1.32±0.13	1.69±0.17	1.44±0.14	1.59±0.16	1.52±0.15
1052.66	(n_2, n')	1082.74—30.40	0.885±0.133	1.04±0.16	0.942±0.141	0.995±0.149	0.882±0.149	0.922±0.138	0.821±0.123
1066.27			1.87±0.19	2.02±0.16	2.04±0.20	2.00±0.18	1.84±0.17	1.72±0.19	2.02±0.18
1082.74	(n_2, n')	1082.74—0.0	1.61±0.16	1.71±0.17	1.43±0.10	1.69±0.10	1.69±0.17	1.48±0.11	1.64±0.18
1089.62	(n_2, n')	2171.98—1082.74	2.13±0.21	2.40±0.24	2.45±0.20	2.39±0.21	2.14±0.21	2.40±0.17	2.16±0.22
1097.57			1.56±0.16	1.71±0.17	1.61±0.11	1.66±0.15	1.48±0.15	1.53±0.15	1.48±0.15
1122.40			1.76±0.19	2.02±0.20	2.10±0.17	2.00±0.16	1.86±0.19	2.02±0.18	2.00±0.18
1130.65	$(n_2, 2n)$	1632.00—501.18	1.12±0.28	1.08±0.27	1.13±0.28	1.02±0.25	0.872±0.218	1.14±0.28	1.05±0.26
1147.52	(n_2, n')	2482.89—1334.80	1.23±0.22	1.19±0.18	0.973±0.117	0.872±0.131	1.13±0.17	0.874±0.131	1.11±0.17
1183.30	(n_2, n')	2133.20—949.89	0.642±0.130	0.839±0.126	0.852±0.128	0.859±0.112	0.694±0.104	0.918±0.119	0.840±0.160
1209.66	(n_2, n')	2019.01—808.64	1.18±0.18	1.19±0.18	1.31±0.20	1.16±0.20	1.02±0.15	1.24±0.19	1.06±0.16
1253.40	(n_2, n')	1253.40—0.0	0.926±0.185	1.10±0.22	0.871±0.139	0.800±0.160	0.804±0.168	0.865±0.138	0.964±0.241
1275.60	$(n_2, 2n)$	1411.0—135.1		0.630±0.189	0.582±0.175	0.514±0.154	0.470±0.141	0.637±0.191	0.618±0.215
1297.42	(n_2, n')	1297.42—0.0	0.995±0.150	0.993±0.150	1.13±0.17	1.08±0.16	0.933±0.140	1.05±0.16	1.09±0.21
1332.40	(n_2, n')	2019.01—686.44	1.00±0.20	0.966±0.193	0.987±0.148	1.07±0.13	1.00±0.20	1.02±0.15	0.967±0.193

1332.40	(n_5, n')	2019.01—686.44	1.00±0.20	0.966±0.193	0.987±0.148	1.07±0.13	1.00±0.20	1.02±0.15	0.967±0.193
1377.30			2.63±0.24	2.41±0.20	2.48±0.20	2.35±0.19	2.45±0.22	2.75±0.25	2.48±0.24
1425.10			0.548±0.110	0.650±0.130	0.528±0.106	0.588±0.110	0.532±0.110	0.536±0.107	0.551±0.110
1443.93	$(n_5, 2n)$	1945.0—501.18	1.62±0.15	1.76±0.18	1.70±0.15	1.74±0.13	1.58±0.14	1.76±0.16	1.49±0.22
1482.60	(n_5, n')	1482.60—0.0	0.877±0.210	0.967±0.222	1.07±0.18	0.921±0.138	0.766±0.191	0.918±0.156	0.897±0.179
1499.98	(n_5, n')	1499.98—0.0	1.93±0.19	1.96±0.20	2.14±0.15	1.91±0.15	1.78±0.18	2.09±0.16	2.00±0.20
1549.00			0.634±0.159	0.741±0.185	0.982±0.246	0.871±0.235	0.626±0.125	0.676±0.203	0.545±0.164
1567.41	(n_5, n')	1567.41—0.0	1.91±0.25	1.93±0.25	1.74±0.23	1.89±0.20	1.65±0.17	2.10±0.25	1.98±0.21
1603.80	(n_5, n')	1603.80—0.0	0.355±0.178	0.322±0.161	0.556±0.278	0.366±0.186	0.229±0.115	0.465±0.233	0.316±0.108
1626.80			0.896±0.179	0.811±0.195	0.698±0.175	0.780±0.230	0.738±0.185	0.784±0.188	0.915±0.229
1820.80			0.713±0.178	0.809±0.162	0.809±0.162	0.838±0.210	0.659±0.132	0.852±0.174	0.770±0.193
1905.90			0.671±0.134	0.764±0.153	1.00±0.20	1.17±0.23	1.01±0.20	0.908±0.182	0.740±0.148
1910.50	(n_5, n')	1910.50—0.0	0.493±0.148	0.619±0.186	0.712±0.142	0.963±0.193	0.600±0.120	0.726±0.145	0.558±0.120
1944.79	$(n_5, 2n)$	1944.79—0.0	1.59±0.24	1.65±0.21	1.95±0.20	1.71±0.19	1.52±0.15	1.85±0.19	1.72±0.34
1953.10			0.535±0.161	0.622±0.187	0.811±0.162	0.503±0.146	0.494±0.148	0.503±0.151	0.675±0.203
1984.90			0.427±0.128	0.551±0.165	0.478±0.143	0.522±0.157	0.567±0.170	0.470±0.141	0.450±0.135
2087.25	$(n_5, 2n)$	2087.25—0.0	6.48±0.42	6.82±0.44	7.21±0.48	7.00±0.45	6.95±0.40	7.13±0.46	6.55±0.43
2115.99			2.57±0.26	2.56±0.31	2.39±0.24	2.69±0.30	2.64±0.26	2.78±0.28	2.46±0.25
2164.70	(n_5, n')	2164.70—0.0	1.26±0.26	1.29±0.26	1.64±0.16	1.32±0.16	1.44±0.20	1.51±0.15	1.33±0.27
2213.32			1.06±0.27	1.10±0.28	1.34±0.40	0.920±0.276	1.07±0.27	1.11±0.33	0.855±0.210
2286.67	$(n_5, 2n)$	2286.67—0.0	2.94±0.24	3.12±0.25	2.83±0.20	2.59±0.29	2.65±0.21	3.00±0.24	2.95±0.31
2307.42			1.13±0.22	1.43±0.28	1.20±0.24	1.48±0.22	1.12±0.22	1.45±0.22	1.02±0.21
2407.35			0.757±0.227	0.787±0.236	0.814±0.244	0.852±0.256	0.825±0.248	0.472±0.236	0.824±0.412
2432.28			0.662±0.199	0.609±0.183	0.839±0.252	0.757±0.227	0.700±0.210	0.879±0.264	0.730±0.219
2507.50			0.669±0.167	0.683±0.171	0.770±0.193	0.814±0.163	0.635±0.159	0.959±0.240	0.724±0.217

γ - γ 关联等多种实验的配合才能完成。

图5中给出了相对产额较高的12条 γ 谱线微分产生截面的角分布,其中有8条基本上是各向同性的,另外4条似乎随着角度的变化微分截面呈现微小的规律性的差异,用Legendre多项式对它们进行了拟合,拟合系数列于表3中。

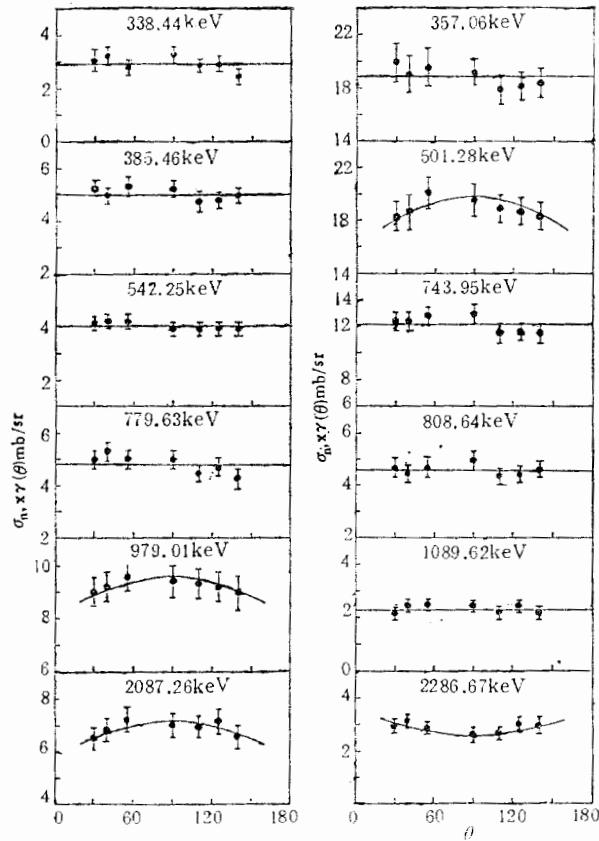


图5 14.9MeV中子和铌反应产生的一些 γ 射线微分截面角分布

表3 部分谱线微分截面角分布的Legendre多项式拟合系数

γ 射线能量 (keV)	B_0 (mb/sr)	B_2 (mb/sr)
501.18	18.91 ± 0.42	1.78 ± 0.80
979.01	9.23 ± 0.21	0.69 ± 0.39
2087.25	6.88 ± 0.17	0.66 ± 0.32
2287.67	2.85 ± 0.09	0.48 ± 0.18

参 考 文 献

- [1] Crocker, V. S., Blow, S., Watson, C. J. H.: Second International Conference on Nuclear Data for Reactors, Vol. 1, 67, Vienna: IAEA Press (1970).
- [2] Chernilin, Yu. F., Yankov, G. B.: Second International Conference Nuclear Data for Reactors, Vol. 1, 49, Vienna: IAEA Press (1970).

red
cto
teri
tioi
fou
7 a
are

- [3] U. Abbondanno, et al., *Lettere Al Nuovo Cimento*, **21**, **12**, (1978), 409.
 [4] I. J. van Heerden, et al., *Zeits. Phys.*, **260**, (1973), 9.
 [5] H Göbel et al., *Zeits. Phys.*, **240**, (1970), 430.
 [6] V. C. Rogers et al., *Nucl. Phys.*, **A142**, (1970), 100.
 [7] D. W. Drake et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **65**, (1978), 49.
 [8] Zhou Hongyu et al., INDC (CPR) 010/L, (1986).
 [9] 刘运祚等, 衰变纲图, 原子能出版社, 1982, p. 477.
 [10] D. M. Lederer et al., *Table of Isotopes*, U. S. A., John Wiley & Sons, Inc., 1978, p. 379.

STUDY OF ASSOCIATED GAMMA RAY FROM NIOBIUM UNDER 14.9MeV NEUTRON BOMBARDMENTS

ZHOU HONGYU YAN YIMING FAN GUOYING LAN LIQIAC SUN SUXU
 WANG QI HUA MING HAN CHONGZHEN LIU SHUZHEN RONG YANING
 WEN CHENLIN WANG XINGFU YANG HUA WANG WANHONG

(*Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University*)

TANG LIN

(*Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing*)

ABSTRACT

The gamma ray spectra from niobium under 14.9 MeV neutron bombardments were measured by means of a pulsed $T(d, n)^4\text{He}$ neutron source, associated particle method, Ge(Li) detector and time-of-flight technique at 7 angles between 30° and 140° . 79 gamma lines were determined by a high resolution gamma spectrum analysis program, and reaction types and transition levels of 62 lines were rudely assigned. There were 40 ones of 79 lines, which were first found in reactions induced by neutrons. The differential cross sections of every gamma line at 7 angles were determined. It is shown that associated gamma ray emissions from this reaction are basically isotropic.