

2.06 MeV 氚核引起的 ^7Li (d,n) 反应中子能谱

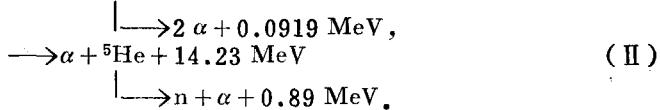
孙汉城 王正民 王大海 张焕乔 陈宝林 戴能雄 崔云峯

用闪烁晶体闪烁谱仪和石蜡球壳慢化谱仪测量 2.06 MeV 氚核引起的 ^7Li (d,n) 反应中子能谱，并得到各反应道的分支比。

一、引言

2 MeV 左右的氘核引起的 ^7Li (d,n) 反应中子能谱至今还没有文献报道完整的数据，只有文献[1,2]给出了一个角度的、中子能量大于 6.5 MeV 区的能谱。我们在测量 1.02 MeV 以下的氘核引起的 ^7Li (d,n) 中子谱的基础上^[3,4]，进一步测量了 2.06 MeV 氚核引起的 ^7Li (d,n) 中子谱。

^7Li (d,n) 反应主要有下列反应道：



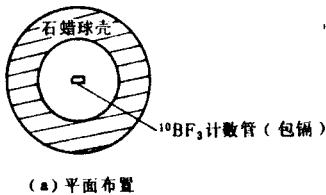
与更低能区氘核引起的反应不同，2 MeV 氚核的反应道（I）中除 ${}^8\text{Be}$ 基态和 2.94 MeV 第一激发态以外，还可到达 ${}^8\text{Be}_{16.63 \text{ MeV}}$ 态。由于刚过阈能，与 ${}^8\text{Be}_{16.63 \text{ MeV}}$ 态相应的中子能量很低。由专测低能中子的实验^[5]得知，2.1 MeV 氚是此态宽共振的峰位，可以预计，2.06 MeV 氚仍可产生相当数量的低能中子。另一方面，与 ${}^8\text{Be}$ 基态相应的中子能量可高达 16.5 MeV。因此，本工作要求选用宽量程的中子谱仪。

我们选用了两种谱仪：测量反冲质子积分谱的闪烁晶体闪烁谱仪和一套用作人工阈探测器的石蜡球壳慢化谱仪。前者测量 0.5—8 MeV 的中子谱，后者测量 0.5 MeV 以下的低能中子所占的份额。

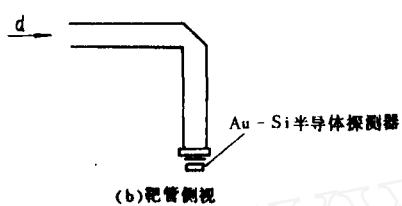
二、实验装置与实验测量

氘束由原子能研究所 2.5 兆伏静电加速器获得。

靶用天然同位素丰度的金属锂。真空喷镀于 7 微米厚的金箔上，然后附着在钽片上。锂层厚 0.24 毫克/厘米²。为防止锂的氧化，锂表面再真空喷镀一层厚 1 毫克/厘米² 的金。用这种夹心薄片靶的优点是，氘核穿透金-锂-金层后到达钽片时，能量只剩 400 keV，与钽片上吸附的氘产生的氘-氘反应截面已很低，实验表明 D(d,n) 本底已可忽略不计。



(a) 平面布置



(b) 靶管侧视

图 1 实验装置示意图

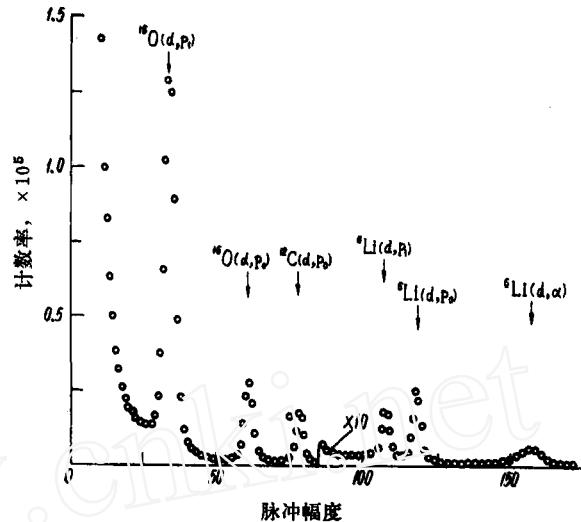


图 2 金-锂-金靶带电粒子监视谱

由加速器引出的 2.2 MeV 氚核与靶面成 45° 入射。氘核经防氧化的金层进入锂层表面时能量为 2.1 MeV。在锂层中氘核平均能量为 2.06 MeV。

实验装置如图 1 所示。在与氘束成 90° 方向用半导体探测器测量带电粒子谱。带电粒子进入半导体前经过真空密封 Mylar 薄膜（与 8 微米厚的铝等效）和 30 微米厚铝箔。弹性散射的氘核和 $^7\text{Li}(\text{d}, \alpha)$ 反应产生的 α 粒子都被吸收掉。这样测得的带电粒子监视谱如图 2 所示。其中 $^6\text{Li}(\text{d}, \text{p}_0)$ 和 $^6\text{Li}(\text{d}, \alpha)$ 计数作效应用归一。

我们所用簇晶体闪烁谱仪参考了文献 [6,7]。簇晶体 $\phi 30 \times 30$ 毫米，光电倍增管为 56 AVP。用饱和-抵消法分辨中子- γ 射线，用 4096 道多道分析器记录。

慢化谱仪由厚度不同的几个石蜡球壳和置于球心的包镉皮的微型 $^{10}\text{BF}_3$ 计数管组成。我们参考了文献 [8]，但我们在球心所用探测器与 [8] 所用不同。球壳外径 40 厘米，壁厚分别为 2, 6, 8, 15 厘米。用蒙特卡罗方法计算各个球壳-计数管组合对单色中子的效率曲线 $\eta_i(E)$ 。对 6 厘米厚的球壳的效率曲线作了单色中子的实验检验，证明计算是正确的。

用簇晶体测谱时，测量了散射角为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 的中子能谱。用丰度为 90% 的浓缩 ^6Li 靶扣除 $^6\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 和 $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{n})$ 本底。扣除本底时以 $^6\text{Li}(\text{d}, \text{p}_0)$ 和 $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{p}_0)$ 计数归一。 ^6Li 靶产生的 (d, n) 中子谱如图 3 所示。所测得反冲质子积分谱用逆矩阵法解出中子谱。

用慢化谱仪测谱，本工作只测了两个角度， 30° 和 80° 。实验表明，低能中子谱与角度的关系不大，我们即用这两个角度所测结果的平均作为空间平均结果。石蜡球壳中心离靶 62 厘米。另外在离靶 1.7 米处测大厅本底（靶与石蜡球壳间挡铁-石蜡屏蔽锥）。对 2, 6, 8, 15 厘米厚的球壳，大厅本底计数依次占 22%，12%，8% 和 4%。除此以外，还有

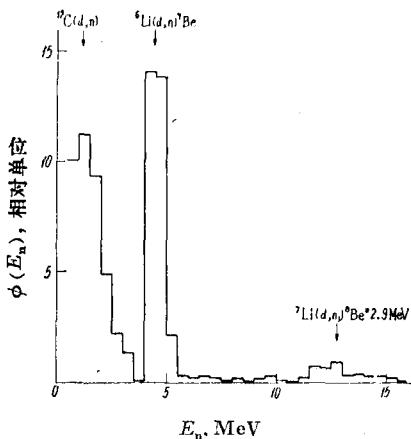


图 3 ${}^6\text{Li}$ 靶在 2.06 MeV 氚作用下产生的中子谱
 ${}^6\text{Li}$ 丰度 90%; $\theta_L = 45^\circ$.

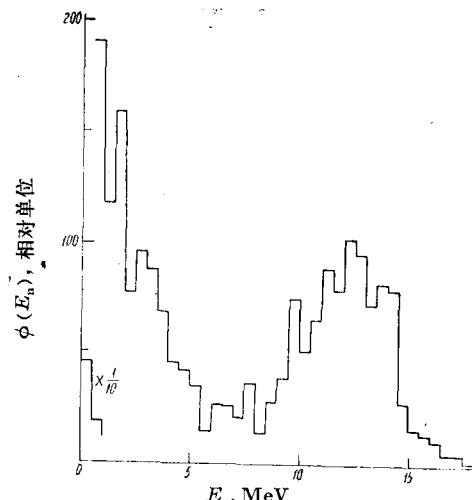


图 4 2.06 MeV 氚核引起的 ${}^7\text{Li}(d, n)$ 中子能谱

靶上沾污的碳、氧的(d, n)中子本底。用无锂的金箔空靶实验表明，金箔靶的 ${}^{12}\text{C}(d, p_0)$ 峰与 ${}^{16}\text{O}(d, p_0)$ 峰计数之比与金-锂-金靶的有明显差异，不宜作靶头沾污本底测量之用。经多种靶的试验后，带电粒子监视谱表明，银箔靶的碳、氧(d, p_0)峰计数比与效应靶的接近，可用来扣除靶头沾污本底。对于上述球壳，靶头沾污本底计数依次占 14%，5%，6% 和 2%。

用慢化谱仪测中子谱 $\phi(E)$ 时，令第 i 个球壳的计数率为 A_i ，则有

$$A_i = \int_0^\infty \phi(E) \eta_i(E) dE. \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

方程(1)是一组积分方程，需用近似解法求解。我们用最简单的矩形谱近似法，(1) 式近似作

$$A_i = \sum \bar{\eta}_{ij} \phi_j \Delta E_j. \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中 $\bar{\eta}_{ij}$ 为 $\eta_i(E)$ 在第 j 能区的平均值，参见文献[9]， ΔE_j 为第 j 能区的道宽， ϕ_j 为第 j 能区每单位能量内的中子数。由(2)式容易解得 ϕ_j 。

三、测 量 结 果

1. 空间平均谱和平均能量 各角度测得的中子谱按立体角因子作权重平均得空间平均谱，如图 4 和表 1 所示。

表 1 中 0.5 MeV 以上用锗晶体测量结果。0.5 MeV 以下用慢化谱仪数据。两种方法在可比较能区都是符合的，如表 2 所示。

由表 1 还可求得中子平均能量 $\bar{E}_n = 5.94 \pm 0.48$ MeV。将文献上各种入射能量的氘引起的 ${}^7\text{Li}(d, n)$ 反应中子平均能量的数据与本文数据整理在一起得图 5。

2. 各反应道的分支比 按文献[3]的方法，将锗晶体所测得能谱解剖得 ${}^8\text{Be}_{g.s.}$ ， ${}^8\text{Be}_{2,94 \text{ MeV}}$ ， ${}^5\text{He}_{g.s.}$ 和 ${}^5\text{He}_{4,1 \text{ MeV}}$ 各反应道的分支比，再加上慢化谱仪结果，得 ${}^8\text{Be}_{16,63 \text{ MeV}}$

表 1 2.06 MeV 氚核引起的 $^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 中子谱

E_{d} , MeV	$\phi(E_{\text{n}})$	E_{n} , MeV	$\phi(E_{\text{n}})$	E_{n} , MeV	$\phi(E_{\text{n}})$
0~0.5	461.3 ± 124.5	6~6.5	26.8 ± 0.9	12~12.5	102.0 ± 2.7
0.5~1	190.6 ± 66.7	6.5~7	26.1 ± 1.0	12.5~13	94.9 ± 2.0
1~1.5	117.5 ± 38.8	7~7.5	20.5 ± 0.9	13~13.5	72.2 ± 1.1
1.5~2	158.5 ± 51.3	7.5~8	36.0 ± 3.0	13.5~14	81.6 ± 1.3
2~2.5	77.6 ± 5.4	8~8.5	13.9 ± 0.6	14~14.5	78.6 ± 1.4
2.5~3	95.9 ± 4.8	8.5~9	27.8 ± 1.0	14.5~15	28.1 ± 2.5
3~3.5	87.9 ± 4.4	9~9.5	38.9 ± 1.8	15~15.5	15.8 ± 1.2
3.5~4	69.3 ± 3.5	9.5~10	75.0 ± 1.3	15.5~16	14.0 ± 1.0
4~4.5	45.8 ± 2.3	10~10.5	50.5 ± 2.7	16~16.5	10.6 ± 0.5
4.5~5	42.3 ± 2.1	10.5~11	65.0 ± 0.9	16.5~17	5.2 ± 0.3
5~5.5	35.1 ± 1.8	11~11.5	88.8 ± 1.5	17~17.5	5.1 ± 0.3
5.5~6	14.3 ± 0.4	11.5~12	78.3 ± 1.2	17.5~18	1.5 ± 0.1

表 2 萤晶体和慢化谱仪测量结果比较

E_{d} , MeV	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~12
萤晶体结果		7.5 ± 2.4	11.25 ± 2.6	7.05 ± 0.3	55.1 ± 2.8
慢化谱仪结果	18.2 ± 5.1	9.2 ± 3.5	12.0 ± 5.9	5.1 ± 3.8	54.9 ± 2.9

表 3 各反应道分支比

反 应 道	$^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$	$^8\text{Be}_{2.54\text{MeV}}$	$^8\text{Be}_{18.68\text{MeV}}$	$^5\text{He}_{\text{g.s.}}$	$^5\text{He}_{4.1\text{ MeV}}$	^8Be 道	^5He 道
分 支 比	10.5	28	9.6	28.8	23.1	48.1	51.9

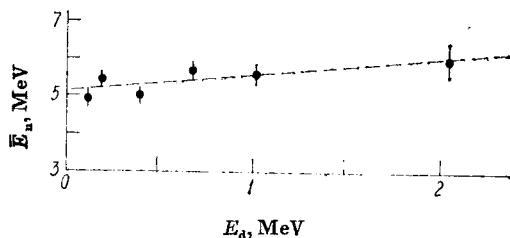


图 5 中子平均能量与入射氘核能量的关系

道的分支比，如表 3 所示。

参 考 文 献

- [1] C. C. Trail et al., *Phys. Rev.*, **95**, 1363(1954).
- [2] C. H. Johnson et al., *Phys. Rev.*, **133B**, 1181(1964).
- [3] 阎辰等, 原子核物理, 2, 137(1980).
- [4] 戴能雄等, 110, 190 keV 氚核引起的 $^7\text{Li}(\text{d}, \text{n})$ 反应中子能谱, 待发表。
- [5] J. C. Slattery et al., *Phys. Rev.*, **108**, 809(1957).
- [6] T. Hiramoto et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **46**, 261(1967).
- [7] T. Hiramoto et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **58**, 167(1968).
- [8] R. L. Bramlett, *Nucl. Instrum. Methods*, **9**, 1(1960).
- [9] 孙汉城, 射线物理测量方法, 原子能出版社, 1975, 117 页。