

文章编号: 1007-4627(2005)01-0020-03

## 大爆炸核合成相关的 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$ 反应截面测量\*

李志宏, 柳卫平, 白希祥, 郭冰, 连钢, 颜胜权, 王宝祥, 陆昀, 曾晟, 苏俊  
(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:** 利用 ${}^8\text{Li}$  次级束测量了质心系能量 7.8 MeV  ${}^2\text{H}({}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^1\text{H}$  反应的角分布, 导出了 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  反应的天体物理  $S$  因子及 ${}^9\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Li} + n$  虚衰变的渐近归一化系数.

**关键词:**  ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  反应; 角分布; 天体物理  $S$  因子; 渐近归一化系数

**中图分类号:** P14      **文献标识码:** A

### 1 引言

大爆炸原初核合成的标准模型假定重子密度均匀分布, 由于没有  $A=5$  和  $8$  的稳定核, 核合成的反应流在该处终止. 在重子密度不均匀的非标准原初核合成 (IBBN) 模型中<sup>[1]</sup>, 该稳定核空隙可通过 ${}^4\text{He}({}^3\text{H}, \gamma){}^7\text{Li}(n, \gamma){}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}(n, \gamma){}^{12}\text{B}(e^-\nu){}^{12}\text{C} \cdots \cdots, {}^4\text{He}({}^3\text{H}, \gamma){}^7\text{Li}(n, \gamma){}^8\text{Li}(n, \gamma){}^9\text{Li}(e^-\nu){}^9\text{Be}(n, \gamma){}^{10}\text{Be}(e^-\nu){}^{10}\text{B}(n, \gamma){}^{11}\text{B}(n, \gamma){}^{12}\text{B}(e^-\nu){}^{12}\text{C} \cdots \cdots$  等反应链跨越过去, 从而使核合成的反应流延伸到更重的核区. 在上述反应链中, 入射道中包含不稳定核 ${}^8\text{Li}$  的反应起关键的桥梁作用, 后续核的产量决定于原初核合成时刻 ${}^8\text{Li}$  的丰度, 因而涉及所有产生或消灭 ${}^8\text{Li}$  的反应. 其中,  ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ ,  ${}^8\text{Li}(n, \gamma){}^9\text{Li}$  和 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  是 IBBN 模型中的 3 个关键反应.

通过对 ${}^2\text{H}({}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^1\text{H}$  反应角分布的测量, 不仅可以直接得到 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  反应的截面, 还可以通过渐近归一化系数方法间接确定 ${}^8\text{Li}(n, \gamma){}^9\text{Li}$  反应的截面. 20 世纪 90 年代有人测量过 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  反应的截面, 但未测量到 ${}^9\text{Li}$  事例, 只给出了反应截面的上限<sup>[2]</sup>.

本工作测量了  $E_{\text{cm}} = 7.8 \text{ MeV}$   ${}^2\text{H}({}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^1\text{H}$  反应的角分布, 导出了 ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  反应的天体物理  $S$  因子和 ${}^9\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Li} + n$  虚衰变的渐近归一化系数.

### 2 实验与数据分析

实验是在北京 HI-13 串列加速器次级束流装置<sup>[3, 4]</sup>上完成的. 利用串列加速器提供的 44 MeV 的 ${}^7\text{Li}$  离子束轰击气压  $1.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 长度 48 mm, 前后窗均为  $1.9 \text{ mg/cm}^2$  的 Havar 膜的氘气靶, 通过 ${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li}){}^1\text{H}$  反应产生 ${}^8\text{Li}$  离子束. 在 ${}^7\text{Li} + d$  初级反应中伴随目标核 ${}^8\text{Li}$  出现的产物有 ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^2\text{H}$  及 ${}^1\text{H}$  等. 由于它们的磁刚度不同, 可以通过调节偏转磁铁的磁感应强度来分离出 ${}^8\text{Li}$  离子的磁刚度与其质量、能量和电荷态的关系为

$$B\rho = \frac{0.0033356}{q} \sqrt{2M_c^2 E_k + E_k^2}, \quad (1)$$

式中,  $B\rho$  为离子的磁刚度 (单位是 Tm),  $q$  为电荷态,  $M_c$  和  $E_k$  分别表示质量和动能 (单位 MeV). 被分离出的 ${}^8\text{Li}$  经一对四极透镜聚焦后形成次级束. 初级反应产物的接收角设置在  $3^\circ$ ,  ${}^8\text{Li}$  次级束的能量为 39 MeV, 纯度约 80%<sup>[5]</sup>.

实验设置示于图 1.  ${}^8\text{Li}$  次级束经光阑准直后, 打到  $(\text{CD}_2)_n$  次级靶上. 用一套由穿透型的硅探测器和角度灵敏的空心多环半导体探测器所组成的  $\Delta E$ - $E$  计数器望远镜鉴别 ${}^2\text{H}({}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^1\text{H}$  反应产生的 ${}^9\text{Li}$ . 在次级靶的上游放置一个空心多环半导体探测器, 用于测量该反应产生的质子. 通过上、下游

收稿日期: 2004-08-31

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (G2000077400, 2003CB716704); 国家自然科学基金资助项目 (10375096, 19935030, 1002524)

作者简介: 李志宏 (1968-), 男 (汉族), 河南太康人, 研究员, 从事放射性核离子束及核天体物理实验研究;

E-mail: zhli@iris.ciae.ac.cn

探测器事件的符合可以有效抑制本底的干扰，鉴别出<sup>9</sup>Li。上、下游探测器覆盖的实验室系角度分别为 103°—107° 及 0°—11°，根据运动学计算，本设置可探测到质心系出射角 10°—50° 的<sup>9</sup>Li。

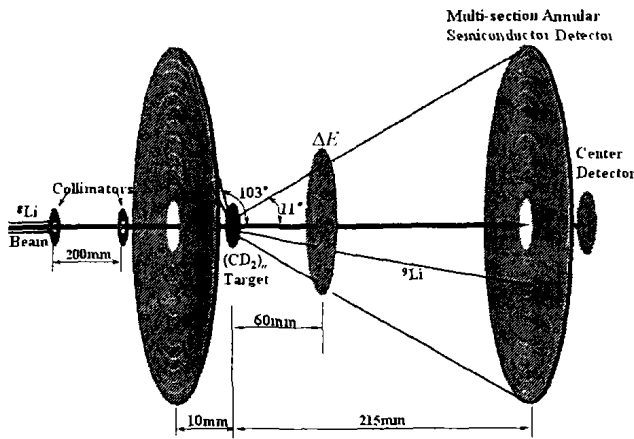


图 1 实验设置的示意图

图 2 给出了用上、下游探测器事件符合后的  $\Delta E$ - $E$  二维谱。从图可以鉴别出<sup>7</sup>Li, <sup>8</sup>Li 及<sup>9</sup>Li 事例。本次实验共得约 50 个<sup>9</sup>Li 事例。用 C 靶测量本底，没有发现<sup>9</sup>Li 事例。为了说明图 2 中其它事例的来源，我们在  $\Delta E$ - $E$  二维谱上选取了 4 个典型的区域，通过比较符合谱、非符合谱在这 4 个区域中的事例数之比可以看出：<sup>9</sup>Li 以外的 3 个区域的该比值基本一致，而<sup>9</sup>Li 区域的显著偏高。这说明符合谱上的非<sup>9</sup>Li 事例源于下游探测器事件同上游探测器噪声事件的偶然符合。

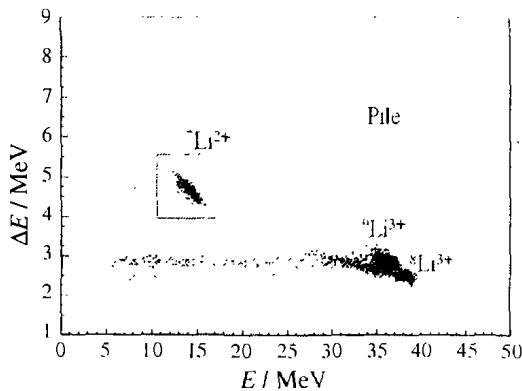


图 2 质子符合事例的  $\Delta E$ - $E$  二维谱

由于上、下游探测器均为环形探测器，相邻两环之间都有 0.6 mm 的死区，在确定微分截面时必须

须进行符合效率的几何修正。我们应用蒙特卡罗方法对实际的实验设置进行了模拟，并考虑了<sup>8</sup>Li 次级束的角散度及能散度、束斑尺寸、<sup>8</sup>Li 在次级靶中的能量和角度歧离，反应产物<sup>9</sup>Li 和质子在靶、探测器中的能量及角度歧离。通过模拟上游探测器相关环上与<sup>9</sup>Li 符合的质子计数及下游探测器各环的<sup>9</sup>Li 计数，可以得到下游探测器各环对<sup>9</sup>Li 的符合探测效率。经过效率修正之后的角分布示于图 3。截面的误差主要来自统计误差和  $\Delta E$ - $E$  二维谱上<sup>9</sup>Li 事件分布区域选取的不确定性。角度误差源于束流的角分散、束斑大小、<sup>9</sup>Li 在靶和探测器中的角度歧离及探测器各环的宽度。图 3 同时给出了 DWBA 计算的角分布，不同的线代表采用不同光学势的计算结果。

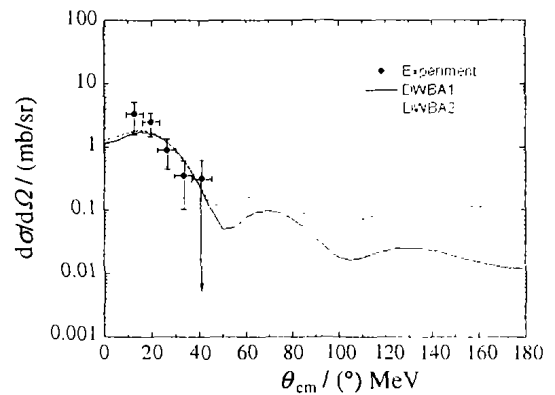


图 3 <sup>2</sup>H(<sup>8</sup>Li, <sup>9</sup>Li)<sup>1</sup>H 反应的角分布

对 DWBA 计算的角分布进行积分，得到<sup>8</sup>Li(d, p)<sup>9</sup>Li 反应在质心系能量为 7.8 MeV 的总截面为  $7.9 \pm 2.0$  mb，由此可以得到<sup>8</sup>Li(d, p)<sup>9</sup>Li 反应在该能量下的天体物理 S 因子为  $(236 \pm 60)$  keV b。按照文献[7]采用的方法，我们导出了<sup>9</sup>Li → <sup>8</sup>Li + n 虚衰变的渐近归一化系数  $ANC^2 = (1.25 \pm 0.26)$  fm<sup>-1</sup>。

### 3 结果与讨论

本工作测量了质心系能量为 7.8 MeV <sup>2</sup>H(<sup>8</sup>Li, <sup>9</sup>Li)<sup>1</sup>H 反应前角区的角分布并进行了 DWBA 计算，给出了<sup>8</sup>Li(d, p)<sup>9</sup>Li 反应的截面和天体物理 S 因子，导出了<sup>9</sup>Li → <sup>8</sup>Li + n 虚衰变的渐近归一化系数。用该系数可以计算<sup>8</sup>Li(n, γ)<sup>9</sup>Li 直接俘获过程的天体物理 S 因子和反应率。有关工作正在进行中。

## 参考文献:

- [1] Kajino T. Nucl Phys, 1995, A588: 339c.  
[2] Balbes M J, Farrell M M, Boyd R N, *et al.* Phys Rev Lett, 1993, 71: 3 931; Nucl Phys, 1995, A584: 315.  
[3] Bai X X, Liu W P, Qin J C, *et al.* Nucl Phys, 1995, A588: 273c.  
[4] 曾 晟, 柳卫平, 李志宏等. 原子能科学技术, 2002, 36: 227.  
[5] Liu W, Bai X X, Zhou S H, *et al.* Phys Rew Lett, 1996, 77: 611.

## Cross Section of ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$ Reaction Involved in Big Bang Nucleosynthesis\*

LI Zhi-hong, LIU Wei-ping, BAI Xi-xiang, GUO Bing, LIAN Gang,  
YAN Sheng-quan, WANG Bao-xiang, LU Yun, ZENG Sheng, SU Jun  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** We have measured the angular distribution of  ${}^2\text{H}({}^8\text{Li}, {}^9\text{Li}){}^1\text{H}$  at  $E_{cm} = 7.8$  MeV and deduced the astrophysical  $S$ -factor of  ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  reaction as well as the Asymptotic Normalization Coefficient (ANC) for  ${}^9\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Li} + n$  virtual decay.

**Key words:**  ${}^8\text{Li}(d, p){}^9\text{Li}$  reaction; angular distribution; astrophysics  $S$ -factor; asymptotic normalization coefficient

\* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program(G2000077400, 2003CB716704); National Natural Science Foundation of China (10375096, 19935030, 1002524)