

文章编号: 1007-4627(2005)03-0248-04

试用特洛伊木马方法研究天体核反应 ${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$

李成波^{1,2}, R. G. Pizzone¹, C. Spitaleri¹, L. Lamia¹, 周书华², 袁 坚²

(1 INFN-LNS, Catania, Italy;

2 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 为克服低能带电粒子核反应截面直接测量中所遇到的库仑位垒和电子屏蔽效应带来的困难, 试用基于准自由反应机制的特洛伊木马方法, 在意大利南部国家核物理实验室的 15 MV 串联加速器上, 通过 ${}^2\text{H}({}^9\text{Be}, \alpha){}^6\text{Li}$ 核反应对 ${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$ 在低能区($E_{\text{cm}} = 0-1000$ keV)的裸核反应截面做了间接测量, 并将测量结果与直接测量数据进行了比较。

关键词: 特洛伊木马方法; 裸核; 库仑位垒; 电子屏蔽

中图分类号: O571; P14 **文献标识码:** A

1 引言

最近 20 年来, 随着宇宙大爆炸及核合成理论的发展, 人们对轻元素丰度的研究产生了浓厚的兴趣, 这些元素的丰度信息被作为原初核合成和恒星核合成中不同模型假说正确性的重要判据^[1, 2]。Be 元素的原始丰度可以对原初核合成的均匀模型和非均匀模型的分歧提供一个有力的检验。此外, 开展对年轻恒星中 Li, Be 和 B 等轻元素丰度的研究, 对理解恒星结构以及恒星内部可能的非标准混合过程也具有极其重要的意义。

在宇宙大爆炸和恒星演化过程中, Li, Be 和 B 元素主要是经由(p, α)反应道而遭到破坏的, 核反应发生的能量范围大约从 ~ 10 keV(恒星核合成)到 ~ 100 keV(原初核合成), 即所谓的 Gamow 能区 E_G 。 E_G 与核反应的库仑位垒 E_C (通常在 MeV 的量级)相比要小得多, 核反应只能通过隧道效应发生。随着能量的减小, 反应截面呈近指数方式骤然下降, 为达到一定的测量统计精度, 要求极长的测量时间以及极低的本底噪声, 这给实验上直接测量带来很大的困难。天体能区的截面数据一般都是通过下式所定义的随能量变化相对比较平缓的天体物理因子 $S(E)$ 从高能区数据外推得到的:

$$S(E) = \sigma(E)E \exp(2\pi\eta), \quad (1)$$

其中, $\eta = Z_1 Z_2 e^2 / (\hbar v)$, 为索莫非因子。然而, 这种向未知区域的外推会引入一些不确定因素, 尤其是可能存在极低能共振和阈下共振的情况。另外, 低能区电子屏蔽效应会使截面升高, 从而影响外推截面的基本走向。

为了克服这些困难, 近几年来, 针对各种特定反应类型, 发展了一些相应的间接测量方法。其中, 特洛伊木马方法 (THM) 因其在低能轻带电粒子核反应裸核截面测量方面的优点而引起特别的关注^[3-5]。

THM 以准自由反应机制为基础, 通过采用适当的三体反应 $A + a \rightarrow C + c + b$ 来间接研究感兴趣的低能带电粒子两体反应 $A + x \rightarrow C + c$, 如图 1 所示。其中, “木马”核 a 具有较强的成团结构, 可以看作由两部分组成($a = x + b$)。在反应过程中, x 作为参与者, b 作为两体反应 $A + x \rightarrow C + c$ 的旁观者。THM 理论计算^[5]给出了三体反应和两体反应之间的能量关系:

$$E_{Ax}^{\text{qf}} = E_{Aa} \left(1 - \frac{\mu_{Aa}}{\mu_{Bb}} \cdot \frac{\mu_{bx}^2}{m_x^2} \right) - \varepsilon_a, \quad (2)$$

式中, E_{Ax}^{qf} 表示准自由反应 $A + x$ 体系的相对能量,

收稿日期: 2005-02-25; 修改日期: 2005-07-13

* 基金项目: C. S. F. N. S. M., Catania, Italy

作者简介: 李成波(1974-), 男(汉族), 河北东光人, 博士, 助理研究员, 从事实验核物理研究;

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

E_{Aa} 表示 $A+a$ 体系的相对能量, ε_a 表示 x 在 a 中的结合能。从能量关系可以看到, E_{Aa} 的一部分要提供给 x 克服 a 对它的束缚, 同时考虑到 x 在 a 内有一定的动量分布, 即便 E_{Aa} 比较大, E_{Ax} 也可以达到很小, 甚至接近于 0。选取 E_{Aa} 高于 $A+a$ 的库仑位垒, 此时三体反应 $A+a\rightarrow C+c+b$ 可以在库仑位垒之上顺利进行, 同时借助于木马核准自由两体反应 $A+x\rightarrow C+c$ 在三体核反应相互作用区域内发生, 从而库仑位垒和电子屏蔽效应影响可以忽略, 间接测量两体反应在天体能区的裸核截面成为可能。

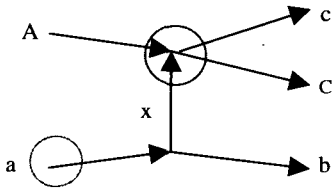


图 1 特洛伊木马方法示意图

在该实验中, 我们选用三体反应 ${}^2\text{H}({}^9\text{Be}, \alpha{}^6\text{Li})n$ 来研究两体反应 ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$ 在天体能区的截面, 其中, $d=p+n$ 作为“木马”核, n 为准自由反应的旁观者。 ${}^9\text{Be}$ 的束流能量选用 22 MeV, 即相对能量 $E_{Aa} = 4$ MeV, d 核的结合能为 $E_d = 2.224$ MeV, 计算得到 $E_{Ax} \approx 0$, 而相应的三体反应阈能和库仑位垒分别为 $E_{th} = 0.121$ MeV, $E_C = 1.32$ MeV, E_{Aa} 远高于库仑位垒和反应阈能, 此时三体反应顺利发生, 位垒效应和电子屏蔽可以被忽略。根据 THM 理论给出的截面关系, 可以从三体反应中提取出两体反应裸核的截面。

2 实验装置

实验在意大利南部国家核物理实验室 (INFN-LNS) 完成。使用 LNS 实验室的 15 MV 串列加速器提供的 ${}^9\text{Be}^{2+}$ 束流轰击 CD_2 靶, 束流能量为 22 MeV, 流强约 2—5 nA, 束斑大小约 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$; CD_2 靶 (厚度约 $190\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) 放置在与束流方向呈 90° 的位置。利用两个 ΔE - E 探测器对 α 和 ${}^6\text{Li}$ 进行符合测量, 其中 E 采用位置灵敏探测器 (PSD₁, PSD₂) 以获得精确的角度信息。两探测器分别放置于束流方向两侧距离靶约 25 cm 处, 其中 PSD₁ 的中心角度为 $\theta_1 = 18.5^\circ$, 角度覆盖范围 11.5° — 25.5° , 用于探测 ${}^6\text{Li}$; PSD₂ 置于 $\theta_2 = 21.5^\circ$, 角度覆盖范围 14.5° —

28.5° , 用于探测 α 。探测器角度的选择依据蒙特卡罗模拟计算所给出的准自由反应粒子出射“角度对”确定, 此条件下, 准自由反应机制的贡献最大。为了在实验过程中对靶的厚度进行持续监测, 还在 45° 方向上距离靶约 70 cm 处安装了一套硅 ΔE - E 监测探测器。实验以两路 PSD 的符合作为事件获取的触发信号, 各探测器给出的粒子能量和位置信号经由电子学系统处理后送到数据获取系统。数据以事件带格式存储到磁带上, 用于离线分析。

3 数据分析和结果讨论

首先要进行探测器刻度, 包括对 ΔE - E 探测器的能量刻度以及 PSD 的角度刻度。然后, 利用三体反应运动学, 可由 ${}^6\text{Li}$ 和 α 离子的能量和角度信息计算出第三个粒子 n 的能量、动量和角度, 进而可得到三体反应 Q 值和各出射粒子两两之间的相对能量等信息。

实验数据的 $E_{6\text{Li}}-E_\alpha$ 双维谱结构与三体运动学模拟计算结果符合得很好, 据此可以在实验能谱上把 ${}^2\text{H}({}^9\text{Be}, \alpha{}^6\text{Li})n$ 反应从其他可能的干扰反应道中选取出来。在三体反应的 Q 值实验谱中, $Q = -0.1$ MeV 附近的峰与理论计算的三体反应 Q 值符合得相当好, 这不仅有力地检验了角度和能量刻度的有效性, 也可用 Q 值作为选取三体反应事件的一个有效工具。数据分析中, 我们以 $E_{6\text{Li}}-E_\alpha$ 运动学关联、 Q 值谱的区域选择以及时间谱给出的 ${}^6\text{Li}$ - α 时间符合一起作为三体反应的选择条件。此外, 从实验数据计算出中子在“木马”核氘中的动量分布谱, 与理论给出的结果进行了比较 (见图 2)。可以看到

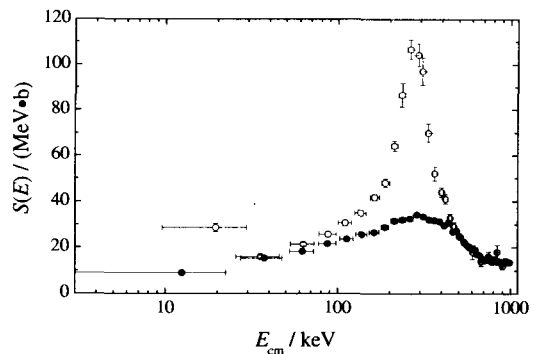


图 2 中子在氘核中的动量分布谱
点为实验结果, 曲线为理论结果。

两者符合比较好,这是对准自由反应机制的有力检验。

THM 理论计算^[5]给出了三体反应与两体反应间的截面关系:

$$\frac{d^3\sigma}{dE_c d\Omega_c d\Omega_e} \propto K_{lab} |W(Q_{Bb})|^2 \cdot P_l(R, \eta_{Ax}, k_{Ax}, Q_{Aa}) \frac{d\sigma_1}{d\Omega}(Ax \rightarrow Cc), \quad (3)$$

K_{lab} 为实验室系运动学因子, $|W(Q_{Bb})|^2$ 为中子在氦核中的动量分布, $P_l(R, \eta_{Ax}, k_{Ax}, Q_{Aa})$ 为库仑位垒穿透因子,以上各项可以根据实验条件参数和理论模型计算给出。公式中 $\frac{d^3\sigma}{dE_c d\Omega_c d\Omega_e}$ 为三体反应截面,

$\frac{d\sigma_1}{d\Omega}(Ax \rightarrow Cc)$ 为准自由两体反应截面。

根据式(3),可以从三体反应实验数据中提取出相应的两体反应截面的能量依赖关系,进而可以得到 $S(E)$ 因子随能量的变化。数据处理中只考虑作为旁观者的中子动量谱满足 $|P_3| < 30 \text{ MeV}/c$ 条件的事件,根据 THM 理论,在这一条件下准自由反应机制占主导地位。应当指出的是,该方法只能给出截面或 $S(E)$ 因子随能量的变化趋势,而不能给出绝对值。因此,必须将它与直接数据相比较进行归一化,为避免直接测量数据在低能区的电子屏蔽效应影响,通常应选择库仑位垒以上能区。图 3 给出了特洛伊木马方法得到的 $S(E)$ 因子与直接数据的比较。图中横坐标为两体反应入射道 $p + {}^9\text{Be}$ 的质心系能量, $E_{cm} = E_{\alpha Li} - Q_2$, Q_2 为两体反应的 Q 值, $E_{\alpha Li}$ 为 ${}^6\text{Li}-\alpha$ 的相对能量,可由实验数据经运动学计算得到。

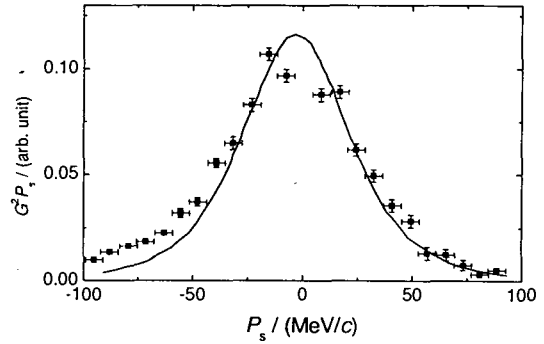


图 3 THM 方法提取的 $S(E)$ 因子(实心点)与直接数据(空心点)的比较

从图中可以看到, $E \approx 270 \text{ keV}$ 的低能共振峰(对应于 ${}^{10}\text{B}$ 的 6.87 MeV , $J = -1$ 的能级),其峰值与直接数据相吻合,这说明特洛伊木马方法可以给出低能共振。随后,该方法又在多次间接测量实验中获得成功。这就克服了外推法无法确定低能共振和阈下共振的困难。另外,低能端数据延伸趋势的差别反映了电子屏蔽效应的影响,直接测量数据在低能端的抬高可能根源于电子屏蔽效应,利用特洛伊木马方法有望获得天体核物理所关注的裸核反应截面。应当指出的是,此次实验结果还是比较粗糙的,共振峰的宽度远大于直接测量结果,这是由于多方面的因素造成的。初次实验的探测器的能量分辨率比直接测量条件下低是主要原因,理论模型处理中的一系列近似也会产生一定的影响。这些问题的解决有待于在进一步的实验方案中采取措施提高探测器的能量分辨率,并深入分析理论模型处理过程,以期获得更精确的结果,从而提取更有效的天体物理感兴趣的信息。

参考文献:

[1] Boyd R N, Kajino T. APJ, 1989, **336**: L55.
 [2] Stephens A, Boesgard A M, King J R, et al. APJ, 1997, **491**: 339.
 [3] Spitaleri C, Aliotta M, Cherubini S, et al. Phys Rev. 1999, **C60**: 055802 - 1.
 [4] Spitaleri C, Cherubini S, Zoppo A, et al. Nuc Phys, 2003, **A719**: 99c.
 [5] Typel S, Baur G, Annals Phys, 2003, **305**: 228.
 [6] Zahnow D, Rolfs C, Schmidt S, et al. Z Phys, 1997, **A359**: 211.

γ 射线辐照人类正常肝细胞染色体损伤的动态修复*

杨建设^{1,2}, 李文建¹, 王菊芳¹, 王转子^{1,2}, 夏景光^{1,2}, 金晓东^{1,2}, 高清祥³, 魏巍^{1,2}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3 兰州大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 应用早熟染色体凝集技术对人类正常肝脏细胞经 γ 射线照射导致的染色体损伤后 48 h 内的动态修复过程进行了研究。结果显示: 照射后原初染色单体断裂和等点染色单体断裂数随着照射剂量的增加而增多, 染色单体断裂显著多于等点染色单体断裂; 经过 24 h 的继续培养, 这两种类型的损伤都有不同程度的修复, 约 50% 染色单体断裂得到修复, 而等点染色单体断裂的修复率最多为 15%; 经过 48 h 的照射后培养, 染色体损伤的水平与 24 h 相比没有显著差异。说明肝细胞经 γ 射线照射后染色体损伤的主要形式是染色单体断裂, 易于修复; 虽然等点染色单体断裂数量较少, 但修复困难。由此表明, 等点染色体断裂是细胞经 γ 射线照射后死亡和癌变的一个重要因素。

关键词: 染色体断裂; 动态修复; 人肝细胞

(上接第 250 页)

Indirect Measurement of ${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$ Reaction by Means of Trojan Horse Method**

LI Cheng-bo^{1,2}, R. G. Pizzone¹, C. Spitaleri¹, L. Lamia¹, ZHOU Shu-hua², YUAN Jian²

(1 INFN-LNS, Catania, Italy;

2 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The beryllium abundance acts as a key role for understanding the inhomogeneous Big Bang nucleosynthesis. In order to measure the ${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$ bare nucleus cross section and $S(E)$ factor at astrophysical energies, the Trojan Horse Method (THM) can be applied. The main feature of the method is that it allows to extract the energy dependence for the astrophysical $S(E)$ factor of bare nuclei at very low energies without any extrapolation, by measuring the cross section of an appropriate three body process. Thus the ${}^9\text{Be}(p, \alpha){}^6\text{Li}$ has been studied by means of the THM applied to the ${}^2\text{H}({}^9\text{Be}, \alpha){}^6\text{Li}$ at INFN-LNS, Catania, Italy. The two body reaction cross section has been studied in the energy range of $E_{\text{cm}}=0-1000$ keV. Preliminary results are discussed and a comparison with direct data is made.

Key words: Trojan Horse Method; bare nucleus; Coulomb barrier; electron screening

* 基金项目: 国家自然科学基金重点课题(10335050); 国家重大基础研究前期研究专项基金资助项目(2003CCB00200)

** Foundation item: C. S. F. N. S. M., Catania, Italy