

串列加速器放射性次级束流线上的 核天体物理反应研究*

柳卫平 白希祥 王有宝 李志宏 连 钢
李志常 郭 刚 江历阳 卢绍均 符长波 陈永寿

(中国原子能科学研究院核物理所 北京 102413)

摘要 通过在串列加速器次级束流线上开展反应等的研究,导出天体物理 S 因子;通过反应的研究,探索核的内部结构.初步得出反应的渐进归一化常数平方为 3.5 ± 1.5 ,表明直接反应的贡献不可忽略.

关键词 $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 反应 ANC 方法 角分布 直接贡献

1 引言

在天体演化过程中,从轻元素过渡到重元素的主要路径取决于核反应与衰变的竞争.其中许多核反应涉及放射性核素,因此,随着国际核物理学界对放射性核束的产生和加速技术的成熟和完善,对关键天体核反应测量成为当前国际核物理发展的前沿之一.比较典型的研究工作包括对 $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$, $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$, $^8\text{Li}(\alpha,p)^{11}\text{B}$ 反应截面的测量^[1-4].通过这些工作,人们对天体演化的过程开始从质的了解转向量的认识.

然而,天体反应的过程繁多,迄今为止仍有大量的重要核反应有待测量,如 $^{17}\text{F}(p,\alpha)^{14}\text{O}$ 反应,它是 HCNO 循环向外泄露的主要过程^[5],计划测量 $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 反应是热的 pp 链内部的重要反应^[6].目前,人们在进行天体物理网络计算时,对这类反应只能使用理论计算的结果,其偏差有时达到 1—2 个数量级,在此情况下,人们无法对反应路径的走向进行有效的判断.就 $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 反应来说,其天体物理能量下的截面为共振和直接过程之和,目前人们对共振截面有了大体的了解,但直接过程的截面仍急需实验测量.

目前,测量 (p,γ) 反应截面的直接成份主要有 3 种方法,它们分别是直接测量法^[3]、库仑裂解法^[9]和 ANC 方法^[4].直接测量法精度最高,但反应截面只有 μb — pb 的量级,实验十分困难.更重要的是,有些放射性核素,如感兴趣的 ^8B 和 ^{11}C ,由于半衰期太短,无法制成靶.库仑裂解法具有反应截面大的特点,但由于反应截面是纯的 E1 过程,而库仑裂解过程中有 E2

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077400),国家自然科学基金(19735001,10045002,19935030),核工业科学基金(Y7197A0106)资助

和 M1 成份的混杂,而且它在外推到天体物理能量时存在额外的不确定性.计划使用的 ANC 方法,通过单质子转移反应的测量,可以直接导出接近零能量的天体物理温度下的反应截面^[7],具有反应截面大,使用放射性核束不受靶材料限制、和测量效率高等优点.它的可靠性已经得到实验的验证^[10],是测量(p, γ)反应的有效手段.

该实验虽然在核天体物理中具有重要意义,但由于国际上各个实验室实验条件的制约,一直无法完成.其主要困难在于¹¹C 次级束流的产生和鉴别和次级核反应的测量.通过选择先进的技术路线,对次级束流线 GIRAFFE 进行了关键技术改造,使这种局面有了根本性的改变.

2 实验与数据分析

¹¹C 次级束是在 HI-13 串列加速器的次级束流线 GIRAFFE 上,利用¹H(¹¹B, ¹¹C)n 反应产生的.初级束为 67.2 MeV 的¹¹B⁵⁺,轰击气压为 1.2 atm 氢气靶,其前后窗均为 1.9 mg/cm² 的 Havar 膜.通过仔细调节次级束流线的 D-Q-Q 磁分离聚焦系统,获得了能量为 43.3 MeV,纯度好于 80% 的¹¹C⁶⁺ 次级束.次级束流线的概貌以及实验的探测器安排见图 1.

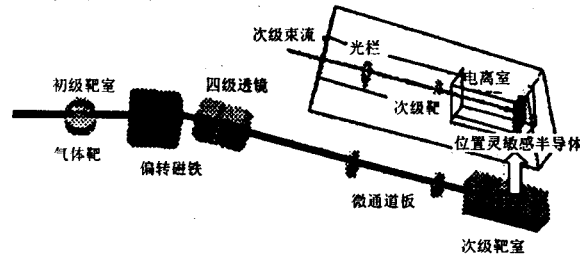


图 1 次级放射性核束实验装置 GIRAFFE 示意图

实验中观察到次级束流中 7⁺ 和 6⁺ 态的¹⁴N 杂质.对于²H(¹¹C, ¹²N)n 反应,¹⁴N 杂质对反应产物¹²N 的鉴别造成严重的干扰.克服这种干扰的有效途径是在反应靶前对次级束进行飞行时间分析(TOF).为此利用两个微通道板定时探测器构成飞行时间测量系统,微通道板的时间分辨为 500 ps,符合探测效率为 60%.¹¹C 次级束的飞行时间谱见图 2.

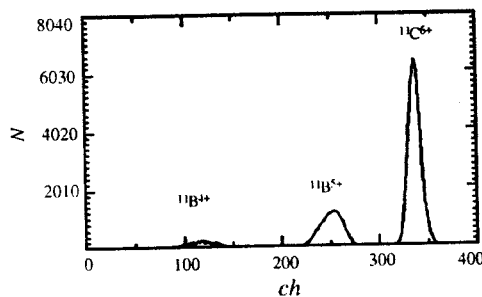


图 2 ¹¹C 次级束的飞行时间鉴别

¹¹C 束经 $\phi 4\text{mm}$ 的光阑准直后,打到 (CD₂)_n 反应靶上.用一套 $\Delta E - E$ 计数器望远镜鉴别次级束及反应产物. ΔE 探测器为屏栅电离室,充有 75 torr 的 P-10 工作气体.E 探测器是二维位置灵敏硅探测器(PSSD),其有效面积为 $45 \times 45\text{mm}^2$,能同时给出入射离子的能量及二维位置分布.PSSD 与 (CD₂)_n 靶的距离为 105mm,覆盖的实验室系出射角范围为 $\pm 10^\circ$,可保证反应产物¹²N 的全立体角探测.用于测量(CD₂)_n 靶效应的入射¹¹C 离子数累积达到

约 2.0×10^8 , 用于测量 $(\text{CH}_2)_n$ 靶本底的累积达到约 1.8×10^7 . 实验数据分析正在进行中. 首先对 PSSD 探测器的位置响应进行校准, 然后利用 TOF 信息选择出对应于 ^{11}C 的 ^{12}N 反应事件. 进而结合二维位置信息得出 $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$ 反应的角分布.

3 结果与讨论

最后得到的反应全截面为 $46.7 \pm 15\text{mb}$, 通过 DWBA 和 ANC 理论分析导出反应的 ANC 平方常数为 3.5 ± 1.5 , 这表明了直接反应的贡献不可忽略. 通过正在顺利进行的微观模型计算, 将可以导出 $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$ 反应直接过程的天体物理能量下的截面. 可以预期, 这个截面的导出, 将加深对天体物理热的 pp 过程的了解.

参考文献(References)

- 1 Delbar T et al. Phys. Rev. ,1993, C48:3088
- 2 Hammdane H et al. Phys. Rev. Lett. ,1998, 80:929
- 3 LIU W et al. Phys. Rev. Lett. , 1996,77:611
- 4 Boyd R N et al. Phys. Rev Lett. , 1992, 68:1283
- 5 Wiescher W et al. Ap. J. ,1983, 316:162
- 6 Descouvemont P. Nucl. Phys. , 1999, A646:261
- 7 XU H M et al. Phys. Rev. Lett. , 1994. 73:2027
- 8 Harris B et al. Phys. Rev. Lett. , 1999,82:3964
- 9 Motobayashi T et al. Phys. Rev. Lett. , 1994,73:2680
- 10 Gagliardi C A et al. Phys. Rev. , 1999,C59:1149

Study of Astrophysical Nuclear Reaction on Beijing Secondary Beam Line GIRAFFE *

LIU Wei-Ping BAI Xi-Xiang WANG You-Bao LI Zhi-Hong LIAN Gang LI Zhi-Chang
GUO Gang JIANG Li-Yang LU Shao-Jun FU Chang-Bo CHEN Yong-Shou

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

Abstract The $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$ reaction is one of the key processes in hot pp chains. We have carried out a measurement of $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$ reaction. The ^{11}C beam was produced with the secondary beam facility GIRAFFE. The angular distribution was measured and used to deduce ANC through DWBA analysis. We are performing a microscopic study to get the astrophysical S-factor of $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$ reaction from ANC square constant of 3.5 ± 1.5 . This result implies that the direct contribution to (p, γ) reaction is not negligible.

Key words $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$ reaction, ANC methods, angular distribution, direct contribution

* Supported by Major State Basic Research Development Program(G200077400), NSFC(10045002, 19735010 and 19935030)