

天体物理重要反应 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 的实验研究

郭冰, 李志宏, 颜胜权, 连钢, 白希祥, 王友宝, 曾晟,
苏俊, 王宝祥, 柳卫平, 舒能川, 陈永寿, 常宏伟, 江厉阳

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要: $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 是高温 CNO 循环中的关键反应, 对恒星能量产生机制及其演化的研究具有重要意义。利用北京 HI-13 串列加速器次级束流线产生的 ^{13}N 放射性束测量了质心系能量为 8.9 MeV 的 $^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{14}\text{O}$ 反应的角分布, 导出了 ^{14}O 基态渐进归一化系数 (ANC) 为 $(29.4 \pm 5.3) \text{ fm}^{-1}$ 。此外, 使用镜像核的电荷对称性, 通过分析 $^{13}\text{C}(\text{d}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反应的角分布, 导出了与实验一致的 ^{14}O 基态质子 ANC。使用最新开发出的 \mathbf{R} 矩阵程序, 导出 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 反应在高温 CNO 循环中的天体物理 S 因子和反应率。将此数据代入核天体物理反应的网络程序进行计算, 结果表明, 新星中 CNO 循环产生的能量比原有的结果多 5%, 这可能会对新星的演化有一定的影响。

关键词: 高温 CNO 循环; 放射性束流; 角分布; 渐进归一化系数; S 因子

中图分类号: O571.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)02-0097-06

Experimental Study of $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ Reaction of Astrophysical Importance

GUO Bing, LI Zhi-hong, YAN Sheng-quan, LIAN Gang, BAI Xi-xiang, WANG You-bao,
ZENG Sheng, SU Jun, WANG Bao-xiang, LIU Wei-ping, SHU Neng-chuan,
CHEN Yong-shou, CHANG Hong-wei, JIANG Li-yang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China)

Abstract: $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ is one of the key reaction in hot CNO cycle, which is important for studying the energy source of evolution of stars. The angular distribution of $^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{14}\text{O}$ at $E_{\text{cm}} = 8.9 \text{ MeV}$ was measured using ^{13}N beam produced by secondary beam facility at HI-13 tandem accelerator. The ANC of ^{14}O was then extracted to be $(29.4 \pm 5.3) \text{ fm}^{-1}$. In addition, we derived the asymptotic normalization coefficient (ANC) of ^{14}O by analyzing the $^{13}\text{C}(\text{d}, \text{p})^{14}\text{C}$ angular distribution based on charge symmetry of mirror nuclei, which agrees with the experimental result. The astrophysical S factor and reaction rate of $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ were then calculated using \mathbf{R} -matrix theory and

收稿日期: 2008-05-05; 修回日期: 2008-07-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目资助(2007CB815003); 国家自然科学基金资助项目(10575137, 10675173, 10705053)

作者简介: 郭冰(1978—), 男, 山西太原人, 助理研究员, 博士, 粒子物理与原子核物理专业

were inputted into astrophysical reaction network. It shows the energy generated by CNO cycle in novae using the present data is 5% more than that using the previous ones, which could affect the evolution of novae.

Key words: hot CNO cycle; radioactive nuclear beam; angular distribution; asymptotic normalization coefficient; astrophysical S factor

恒星能量源于其内部氢燃烧,主要途径是 pp 反应链和 CNO 循环。在大质量恒星中,氢燃烧主要通过 CNO 循环进行。常温 CNO 循环的主导反应链是 $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}(\beta^+)^{15}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{12}\text{C}$ 。随着天体环境温度升高, ^{13}N 俘获质子的速率慢慢超过其 β 衰变的速率,这时,常温 CNO 循环向高温 CNO 循环转化,其主导反应链是 $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}(\beta^+)^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}(\beta^+)^{15}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{12}\text{C}$ 。 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 反应是常温 CNO 循环向高温 CNO 循环的转化反应。这两个反应链的净结果均是把 4 个氢原子核转化成 1 个氦原子核、2 个正电子和 2 个中微子,同时释放出 26.73 MeV 的能量,构成恒星能量的重要来源^[1]。常温 CNO 循环中涉及到 ^{13}N 和 ^{15}O 两个核的 β^+ 衰变,高温 CNO 循环涉及到的是 ^{14}O 和 ^{15}O 的 β^+ 衰变。因 $^{14}\text{O}(T_{1/2} = 70.6 \text{ s})$ 的 β^+ 衰变比 $^{13}\text{N}(T_{1/2} = 9.965 \text{ min})$ 快得多,所以,高温 CNO 循环产生能量比常温 CNO 循环快得多。因此,常温 CNO 循环向高温 CNO 循环转化时,能量产生率会发生快速变化。研究 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 可以帮助人们理解这两种循环相互转化的温度密度条件。

因 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 反应 Q 值较低(4.628 MeV),因此,天体物理感兴趣低能区的反应截面取决于末态为 ^{14}O 第 1 激发态(1^- , 5.173 MeV)的共振俘获过程和末态为基态的直接俘获过程。由于该反应的重要性,迄今为止,国际上许多著名大学和实验室通过不同的实验方法已经测量了该反应的共振俘获贡献,其中包括比利时鲁汶大学的直接测量实验^[2],日本理化学研究所和法国 GANIL 实验室的库仑离解实验^[3-4],美国普林斯顿大学、华盛顿大学两个研究组和耶鲁大学的转移反应实验^[5-8]。这些实验很好地测定了 ^{14}O 第 1 激发态的共振参数,进而确定了该反应中的共振俘获贡献。因此, $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 反应截面的不确定性主要在于直接俘获及其与共振俘获相干的贡献。目前,已有两个实验工作间接测量过该反应中的直接俘获

贡献。比利时鲁汶大学^[9]和美国德克萨斯大学^[10]分别通过测量 $^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{14}\text{O}$ 反应总截面和 $^{14}\text{N}(^{13}\text{N}, ^{14}\text{O})^{13}\text{C}$ 反应角分布导出了 ^{14}O 基态的谱因子或渐进归一化系数(ANC),进而给出了 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 直接俘获贡献的反应截面和天体物理 S 因子。此外,加拿大 TRIUMF 国家实验室提出了用高强度 ^{13}N 束流轰击无窗氢气靶的实验方案,进行直接俘获贡献的直接测量^[11]。上述两个实验给出的直接俘获天体物理 S 因子相差 30%,与共振俘获相干后低能区总的天体物理 S 因子相差 38%,这可能是由于鲁汶大学从 $^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{14}\text{O}$ 总反应截面导出的谱因子和 ANC 不正确。一般情况下,只有从转移反应前角区角分布导出的谱因子和 ANC 才是可靠的。因此,本工作计划利用北京 HI-13 串列加速器次级束流线测量 $^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{14}\text{O}$ 反应的前角区角分布,导出 ^{14}O 基态的谱因子和 ANC。此外,还将使用镜像核的电荷对称性,通过分析 $^{13}\text{C}(\text{d}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反应的角分布,导出 ^{14}O 基态的谱因子和 ANC,与实验结果进行交叉检验。最后将用最新开发出的 **R** 矩阵程序导出 $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ 反应的天体物理 S 因子和反应率。

1 实验过程与结果

实验是在 HI-13 串列加速器次级束流线^[12-13]上完成的。利用串列加速器产生的能量为 84 MeV 的 ^{12}C 初级束轰击长度为 4.8 cm、气压为 $1.7 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的氘气靶,通过逆运动学反应 $^2\text{H}(^{12}\text{C}, ^{13}\text{N})\text{n}$ 产生 ^{13}N 次级束。气体靶前后窗均为 1.9 mg/cm^2 的 Havar 膜。由于逆运动学效应, ^{13}N 离子集中出射在 ^{12}C 初级束方向一个很小的角锥中,便于收集和传输。经过偶极磁铁的分离纯化、四极透镜的聚焦、速度选择器的二次纯化和 $\phi 3 \text{ mm}$ 的准直孔准直后,能量为 69 MeV 的 ^{13}N 束流被传输到次级反应靶。 ^{13}N 束流强度约为 1500 s^{-1} ,纯度约为 92%,主要杂质来自初级束 ^{12}C 在 Havar 膜和管道上的卢瑟福散射。实验数据的能量刻度使

用 $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ 混合 α 源和 ^{13}N 束流完成。反应靶和探测器的安排示于图 1。厚度为 1.5 mg/cm^2 的 $(\text{CD}_2)_n$ 靶用于测量效应, 1.8 mg/cm^2 厚的 C 靶用于扣除 ^{13}N 束流与 $(\text{CD}_2)_n$ 靶中 C 反应带来的本底。实验中使用了由 $21.6\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 ΔE 探测器和 $300\text{ }\mu\text{m}$ 厚的多环中空半导体探测器组成的望远镜系统来探测和鉴别反应产物。多环探测器的中心洞后面贴了 1 块厚度为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的硅探测器,与望远镜系统一起来记录 ^{13}N 束流和反应产物 ^{14}O 。 $(\text{CD}_2)_n$ 靶上累积的 ^{13}N 计数为 3.54×10^8 ,C 靶累积的 ^{13}N 计数为 1.18×10^8 。本探测系统可以覆盖实验室系 $0^\circ\sim 5.4^\circ$ 的角度范围,相应的 ^{14}O 质心系角度为 $0^\circ\sim 66.5^\circ$ 。

图 2 示出 $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ 反应的 ΔE - E_r 二维粒子鉴别谱。图 2 中所示的 ^{14}O 运动学区域使用 Monte-Carlo 模拟给出,模拟中考虑了运动学、几何因素、反应产物在次级反应靶和 ΔE 探测器中的角度歧离和能量歧离,并使用 ^{13}N 运动学区域作了验证。为了节省计算机处理数据的时间,将 $\Delta E<19\text{ MeV}$ 的事件数除以 1 000。从图 2 可看出,这种处理不会影响反应产物 ^{14}O 的运动学区域。图 3 示出 ^{14}O 运动学区域中来自 $(\text{CD}_2)_n$ 靶和 C 靶的效应和本底。本底事件主要来自于束流中 ^{12}C 杂质的堆垒事件,由于

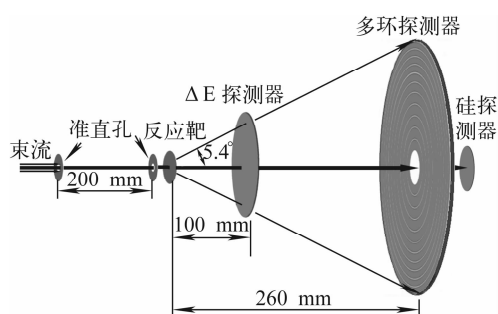


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of experimental setup

束流中 ^{12}C 杂质集中在小角度,因此,这些堆垒事件在探测器的外环上基本消失。

多环探测器每环覆盖的立体角由几何计算得出,用 $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ 混合 α 源对几何计算的立体角进行了验证。多环探测器每环探测到的 α 粒子数对于相应各环的立体角作归一,在统计误差范围内给出了各向同性的角分布,这证明了几何计算的立体角结果是正确的。然后,经过束流归一和扣本底之后,得到了 $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ 反应的角分布(图 4)。

^{14}O 基态的谱因子可以通过比较实验测量的微分截面与 DWBA 理论模型计算结果导出:

$$(d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}} = S_d S_{140} (d\sigma/d\Omega)_{\text{DW}} \quad (1)$$

其中: S_d 和 S_{140} 分别为氘核和 ^{14}O 基态的谱因

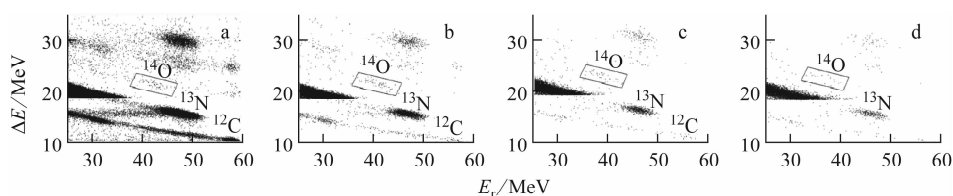

 图 2 $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ 反应的 ΔE - E_r 二维粒子鉴别谱

 Fig. 2 Scatter plots of ΔE vs E_r for $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ reaction measurement with $(\text{CD}_2)_n$ target

a~d 分别给出多环探测器第 1 环到第 4 环的实验数据

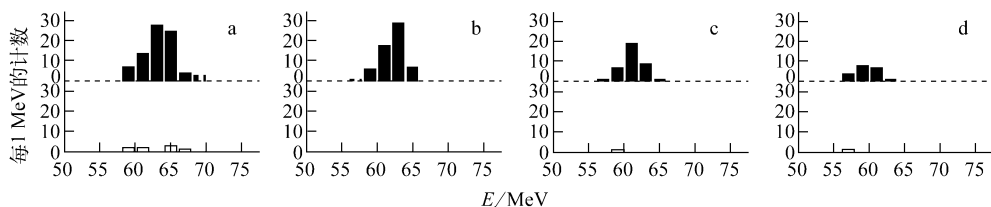

 图 3 实验中来自 $(\text{CD}_2)_n$ 靶和 C 靶的效应本底比较

 Fig. 3 Comparison of total energy spectra between $(\text{CD}_2)_n$ and pure carbon target

a~d 分别给出多环探测器第 1 环到第 4 环的数据,单个图中虚线的上、下部分分别为 1 MeV 间隔内的效应数与本底数

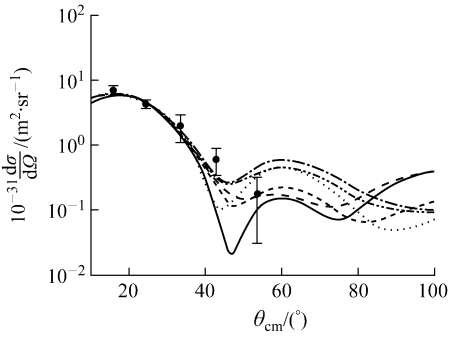


图 4 实验测量的质心系能量为 8.9 MeV 时 $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ 反应的角分布和 DWBA 计算结果
Fig. 4 Angular distribution of $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ reaction at $E_{\text{cm}} = 8.9$ MeV, together with DWBA calculations using different optical potential parameters
●——实验值;实线——D1-N1;长虚线——D1-N2;
点线——D2-N1;点划线——D2-N2;
双点划线——D3-N1;短虚线——D3-N2

子; σ 为反应截面; Ω 为立体角。

进而通过下式可得虚衰变 $^{14}\text{O}_{\text{g.s.}} \rightarrow ^{13}\text{N}+\text{p}$ 的质子 ANC:

$$\text{ANC}^2 = S_{140}b^2 \tag{2}$$

式中: b 为 ^{14}O 的单粒子 ANC,它可以通过比较 ^{14}O 的单粒子束缚态波函数和 Whittaker 函数得出。

角分布的计算中使用了 6 套光学势参数,其中,入射道的光学势参数取自文献[14],出射道的光学势参数取自文献[14-15]。

氘核的谱因子已知,等于 0.859^[16]。因此,通过式(1、2)可以导出虚衰变 $^{14}\text{O}_{\text{g.s.}} \rightarrow ^{13}\text{N}+\text{p}$ 的谱因子和 ANC。为了保证好的周边性,角分布的前 3 个数据用于导出谱因子。对于每套光学势,通过拟合实验数据可以得到 3 个带有不同实验误差的谱因子值,然后将这 3 个值取加权平均作为对应这套光学势的谱因子值,6 套光学势对应 6 个值。6 套经过谱因子归一的 DWBA 角分布和实验数据示于图 4。最后,取这 6 个谱因子值的平均值作为 ^{14}O 虚衰变谱因子的最终结果,为 1.88 ± 0.34 ,利用式(2)导出 ANC 值为 $(29.4 \pm 5.3) \text{ fm}^{-1}$,误差主要包括实验误差和光学势的不确定性带来的误差。

2 镜像核反应 $^{13}\text{C}(\text{d},\text{p})^{14}\text{C}$ 的分析

镜像核是质量数相等的两个核,交换其中 1 个核的质子数与中子数就得到另 1 个核。由

于核力与电荷近似无关,所以,1 对镜像核的两条对应能级的结构具有相似性。目前,镜像核中子质子 ANC 之间的联系已经建立起来^[17],并成功地应用于 $^8\text{B}(\text{p},\gamma)^9\text{C}$ 、 $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$ 和 $^{26}\text{Si}(\text{p},\gamma)^{27}\text{P}$ 3 个核天体物理重要反应的研究^[18-20]。这样,就可以通过研究实验上更容易测量的 ^{14}C 中子 ANC 来间接地导出 ^{14}O 质子 ANC 和谱因子。

利用有限程近似程序 PTOLEMY 计算了 $^{13}\text{C}(\text{d},\text{p})^{14}\text{C}$ 反应布居 ^{14}C 基态的角分布,与实验数据比较示于图 5,实验数据取自文献[21]。计算中使用了 3 套光学势参数,分别取自文献[15, 22-23]。导出的 ^{14}C 基态虚衰变的中子 ANC 值为 $(21.4 \pm 5.0) \text{ fm}^{-1}$,进而根据镜像核电荷对称性导出 ^{14}O 虚衰变的 ANC 和谱因子分别等于 $(30.4 \pm 7.1) \text{ fm}^{-1}$ 和 1.94 ± 0.45 。图 6 比较了现有几个工作给出的 ^{14}O 基态谱因子。可以看出,从 $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ 反应前角区角分布导出的谱因子与德克萨斯大学从 $^{14}\text{N}(^{13}\text{N},^{14}\text{O})^{13}\text{C}$ 角分布给出的结果是一致的,二者均大于鲁汶大学从 $^{13}\text{N}(\text{d},\text{n})^{14}\text{O}$ 反应总截面导出的结果。此外,从镜像核系统导出的结果也与实验结果一致,进一步验证了实验结果的可靠性。

3 $^{13}\text{N}(\text{p},\gamma)^{14}\text{O}$ 天体物理 S 因子和反应率

由于 $^{13}\text{N}(\text{p},\gamma)^{14}\text{O}$ 反应中核内贡献不可忽略,因此,使用 \mathbf{R} 矩阵方法来计算该反应的截面。在 \mathbf{R} 矩阵方法中,辐射俘获反应 $^{13}\text{N}(\text{p},\gamma)^{14}\text{O}$ 的截面可以表示为:

$$\sigma_{J_f} = \frac{\pi}{k^2} \sum_{J_i, l_i} \frac{2J_i + 1}{(2J_p + 1)(2J_{^{13}\text{N}} + 1)} |U_{J_i J_f J_i}|^2 \tag{3}$$

其中: J_f 是 ^{14}O 某态的自旋; J_i, I 和 l_i 分别为初态中 p 和 ^{13}N 的总角动量、轨道自旋和轨道角动量; k 为入射波波数; J_p 和 $J_{^{13}\text{N}}$ 分别为 p 和 ^{13}N 的自旋; $U_{J_i J_f J_i}$ 为从初态 (J_i, I, l_i) 向末态 (J_f, I) 跃迁的幅度。直接俘获的幅度可以表述为:

$$U_{J_i J_f J_i}^{\text{NR}} = -(2)^{3/2} i^{l_i+L-l_i+1} e^{i(\omega t_i - \phi_i)} \cdot \frac{1}{\hbar k} \mu_{\text{C}_p}^{L+1/2} \cdot \left[\frac{Z_p e}{m_p^L} + (-1)^L \frac{Z_c e}{m_c^L} \right] \cdot \sqrt{\frac{(L+1)(2L+1)}{L}} \cdot \frac{1}{(2L+1)!!} \cdot (k_f r_c)^{L+1/2} C_{J_i J_f} F_{l_i}(k, r_c) G_{l_i}(k, r_c) \cdot$$

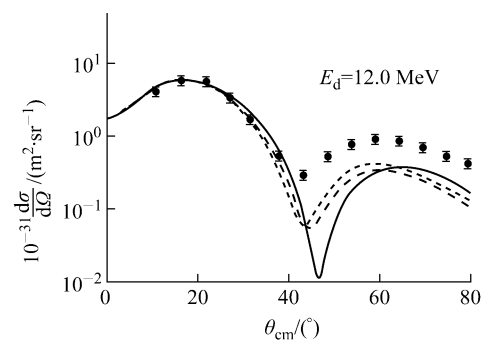


图 5 ¹³C(d,p)¹⁴O_{g.s.} 反应的角分布
Fig. 5 Angular distribution
of ¹³C(d,p)¹⁴O_{g.s.} reaction

3 条曲线分别代表使用 3 套光学势的 DWBA 计算结果
●——实验值

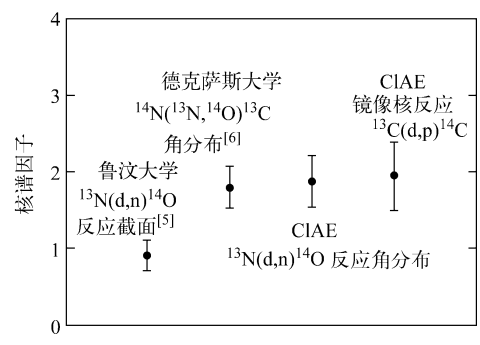


图 6 现有 4 个工作给出的¹⁴O 基态谱因子的比较
Fig. 6 Comparison of spectroscopic factor
for ¹⁴O_{g.s.} from four different works

$$W_{l_f}(2k_B r_c) \sqrt{P_{l_i}}(l_i 0 L 0 | l_i 0) \cdot U(L l_f J_i I; l_i J_f) J'_L(l_i l_f) \quad (4)$$

其中,唯一需要实验上测定的量就是 $C_{J_i l_i}$,即¹⁴O 基态虚衰变的 ANC。

此外,共振俘获的幅度可以表述为:

$$U_{l_i J_f J_i}^R = -i e^{i(\omega l_i - \mu_i)} \frac{[\Gamma_{p l_i}^{J_i}(E) \Gamma_{\gamma J_f}^{J_i}(E)]^{1/2}}{E - E_R + i \frac{\Gamma_{J_i}}{2}} \quad (5)$$

其中,需要实验上测定的量包括能级的质子宽度 Γ_p 、 γ 宽度 Γ_γ 和总宽度 Γ_{J_i} 以及共振能 E_R 。

基于本工作给出的¹⁴O 虚衰变的 ANC ((29.4±5.3) fm⁻¹)和已有的共振参数($E_R = (527.9 \pm 1.7)$ keV, $\Gamma_p(E_R) \approx \Gamma_{tot}(E_R) = (37.3 \pm 0.9)$ keV, $\Gamma_\gamma(E_R) = (3.36 \pm 0.72)$ eV)^[8],通过 **R** 矩阵方法计算了¹³N(p,γ)¹⁴O 反应直接俘获和共振俘获的天体物理 S 因子,结

果示于图 7。总 S 因子比文献[9]中给出的结果大 40%左右,与文献[10]给出的结果一致。

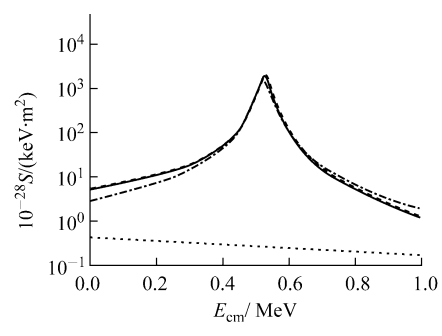


图 7 ¹³N(p,γ)¹⁴O 反应的天体物理 S 因子
Fig. 7 Astrophysical S factors
of ¹³N(p,γ)¹⁴O reaction
点线——DC;实线——Total;
虚线——Tang;点划线——Decrock

在图 7 中,DC 和 Total 分别指本工作给出的直接俘获天体物理 S 因子和总的天体物理 S 因子,Tang 和 Decrock 分别指文献[9-10]中给出的总天体物理 S 因子。

¹³N(p,γ)¹⁴O 的反应率可以通过式(6)作数值积分给出:

$$N_A \langle \sigma \rangle = N_A \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \cdot \int_0^\infty S(E) \exp\left(-\frac{E}{kT} - \frac{b}{E^{1/2}}\right) dE \quad (6)$$

式中: $S(E)$ 即为前面导出的天体物理 S 因子。

把反应率数据代入核天体物理反应的网络程序进行计算,新结果表明,新星中 CNO 循环产生的能量比原有 NACRE 数据库采用的结果多 5%。

4 结论

在北京 HI-13 串列加速器次级束流线上利用逆运动学测量了¹³N(d,n)¹⁴O 反应的角分布,进而通过 DWBA 分析导出了¹⁴O 基态的谱因子和 ANC。此外,还使用镜像核的电荷对称性,通过分析¹³C(d,p)¹⁴C 反应的角分布,导出了与实验一致的¹⁴O 基态谱因子和 ANC。由于¹³N(p,γ)¹⁴O 反应中核内贡献不可忽略,因此,使用 **R** 矩阵方法导出了¹³N(p,γ)¹⁴O 的天体物理 S 因子和反应率。把此数据代入核天体物理反应的网络程序进行计算,结果表明,新星中 CNO 循环产生的能量比原有的结果多

5%,这可能会对新星的演化有一定的影响。

参考文献:

- [1] MATHEWS G J, DIETRICH F S. The $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ thermonuclear reaction rate and the hot CNO cycle[J]. *Astrophys J*, 1984, 287: 969-976.
- [2] DECROCK P, DELBAR T, DUHAMEL P, et al. Determination of the $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ reaction cross section using a ^{13}N radioactive ion beam[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 67: 808-811.
- [3] MOTOBAYASHI T, TAKEI T, KOX S, et al. Determination of the astrophysical $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ cross section through the Coulomb dissociation method[J]. *Phys Lett*, 1991, B264: 259-263.
- [4] KIENER J, LEFEBVRE A, AGUER P, et al. Determination of the astrophysical $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ reaction rate through the Coulomb break-up of a ^{14}O radioactive beam[J]. *Nucl Phys*, 1993, A552: 66-81.
- [5] CHUPP T E, KOUZES R T, McDONALD A B, et al. Total width of the 5.17 MeV 1^- state in ^{14}O and the hot-CNO cycle[J]. *Phys Rev*, 1985, C31: 1 023-1 025.
- [6] FERNANDEZ P B, ADELBERGER E G, GARCIA A. γ width of the unbound 5.17 MeV level of ^{14}O and the hot CNO cycle[J]. *Phys Rev*, 1989, C40: 1 887-1 900.
- [7] SMITH M S, MAGNUS P, HAHN K I, et al. Gamma width of $^{14}\text{O}^*$ (5.17 MeV) and the stellar $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ reaction rate[J]. *Phys Rev*, 1993, C47: 2 740-2 750.
- [8] MAGNUS P V, ADELBERGER E G, GARCIA A. The hot CNO cycle $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)$ resonance energy and the ^{18}Ne mass[J]. *Phys Rev*, 1994, C49: R1 755-R1 758.
- [9] DECROCK P, GAELENS M, HUYSE M, et al. Study of the $^{13}\text{N}(\text{d}, \text{n})^{14}\text{O}$ reaction cross section and its astrophysical implications for the ^{13}N proton capture reaction[J]. *Phys Rev*, 1993, C48: 2 057-2 067.
- [10] TANG X, AZHARI A, FU C, et al. Determination of the direct capture contribution for $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{O}$ from the $^{14}\text{O} \rightarrow ^{13}\text{N} + \text{p}$ asymptotic normalization coefficient[J]. *Phys Rev*, 2004, C69: 055807-1-055807-4.
- [11] KING J. TRIUMF EEC experiment proposal number E805[EB/OL]. Canada: TRIUMF Laboratory. [2008. 4. 14]. <http://dragon.triumf.ca/experiments.html>.
- [12] BAI X, LIU W, QIN J, et al. A facility for production and utilization of radioactive beams[J]. *Nucl Phys*, 1995, A588: 273c-276c.
- [13] LIU W, LI Z, BAI X, et al. Current progress of nuclear astrophysics study and BRNBF at CIAE[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 2003, B204: 62-70.
- [14] PEREY C M, PEREY F G. Compilation of phenomenological optical model parameters[J]. *At Data Nucl Data Tables*, 1976, 17: 1-66.
- [15] WATSON B A, SINGH P P, SEGEL R E. Optical model analysis of nucleon scattering from $1p$ -shell nuclei between 10 and 50 MeV[J]. *Phys Rev*, 1969, 182: 977-989.
- [16] BLOKHINTSEV L D, BORBELY I, DOLINSKII E I. Nuclear vertex constants[J]. *Sov J Part Nucl*, 1977, 8: 485-511.
- [17] TIMOFEYUK N K, JOHNSON R C, MUKHAMEDZHANOV A M. Relation between proton and neutron asymptotic normalization coefficients for light mirror nuclei and its relevance to nuclear astrophysics[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 232501-1-232501-4.
- [18] GUO B, LI Z H, LIU W P, et al. The $^8\text{Li}(\text{d}, \text{p})^9\text{Li}$ reaction and astrophysical $^8\text{B}(\text{p}, \gamma)^9\text{C}$ reaction rate[J]. *Nucl Phys*, 2005, A761: 162-172.
- [19] GUO B, LI Z H, LIU W P, et al. Determination of the astrophysical $^{11}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{12}\text{N}$ reaction rate from the asymptotic normalization coefficients of $^{12}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{B} + \text{n}$ [J]. *J Phys*, 2007, G34: 103-114.
- [20] GUO B, LI Z H, BAI X X, et al. Determination of the astrophysical $^{26}\text{Si}(\text{p}, \gamma)^{27}\text{P}$ reaction rate from the asymptotic normalization coefficients of $^{27}\text{Mg} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \text{n}$ [J]. *Phys Rev*, 2006, C73: 048801-1-048801-4.
- [21] SCHIFFER J P, MORRISON G C, SIEMSEN R H, et al. Study of the (d, p) reaction in the $1p$ shell[J]. *Phys Rev*, 1967, 164: 1 274-1 284.
- [22] VARNER R L, THOMPSON W J, McABEE T L, et al. A global nucleon optical model potential[J]. *Phys Rep*, 1991, 201: 57-119.
- [23] KONING A J, DELAROCHE J P. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV[J]. *Nucl Phys*, 2003, A713: 231-310.