

文章编号: 1007-4627(2013)04-0385-06

关键天体反应 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 的实验研究

张立勇^{1, 2, 3}, 许世伟¹, 何建军¹, H. Yamaguchi⁴, S. Kubono⁴, Y. Wakabayashi⁵,
陈思泽^{1, 3}, 胡钧¹, 马朋¹, Y. Togano⁶, T. Hashimoto⁴, D. Kahl⁴, T. Teranishi⁷,
陈若富¹, 王宏伟⁸, 田文栋⁸, 郭冰⁹, S. Hayakawa⁴,
N. Iwasa¹⁰, T. Yamada¹⁰, T. Komatsubara¹¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. Center for Nuclear Study (CNS), University of Tokyo, Hirosawa 3510198 Japan;

5. Advanced Science Research Center JAEA, Tokai Ibaraki 3191195 Japan;

6. RIKEN, Hirosawa Wako Saitama 3510198 Japan;

7. Department of Physics, University of Kyushu, Fukuoka 8128581 Japan;

8. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

9. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

10. Department of Physics, University of Tohoku, Sendai 9808577 Japan;

11. Department of Physics, University of Tsukuba, Tsukuba 3050006 Japan)

摘要: 在 X 射线暴高温高密度的环境中, $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 很可能是由热 CNO 循环突破到 rp 过程的一个重要反应。到目前为止, 人们测得的反应率还存在很大的不确定性。实验中用 CRIB(CNS Radioactive Ion Beam separator) 提供的 ^{21}Na 放射性束轰击 8.8 mg/cm^2 的聚乙烯厚靶, 利用放置在 $\theta_{\text{lab}} = -14^\circ, 0^\circ, 14^\circ$ 处的 3 套硅条探测器望远镜阵列对反冲轻粒子进行鉴别和测量, 测得在一段能区 ($E_x = 5.5 \sim 9.2\text{ MeV}$) 内 $^{21}\text{Na}(p, p)^{21}\text{Na}$ 的激发函数。通过对 $^{21}\text{Na}(p, p)$ 共振弹性散射截面进行 R 矩阵拟合, 得到了 ^{22}Mg 共振能级的自旋宇称以及质子宽度等信息, 从而为计算 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 反应率提供了实验参数。

关键词: 核天体物理; X 射线暴; 放射性束; 厚靶方法; 共振散射

中图分类号: O571.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.385

1 引言

X 射线暴是 X 射线双星系统中 X 射线突然增强很多倍的现象, 在不到 1 s 的时间内 X 射线的强度增大 20~50 倍, 产生的总能量达 10^{10} J 。1974 年, 卫星首次发现了 X 射线暴, 后被认为是 20 世纪 70 年代天文学上的重大发现之一。在 X 射线暴高温高密的环境中进行着各种复杂的核反应, 包括氢燃烧、氦燃烧和 rp 过程等。这些核合成过程与吸积率、伴星化学成

分以及中子星表面温度等参量密切相关^[1]。其中, 爆发性氢燃烧是新星和 I 型 X 射线暴等密近双星系统的主要能量产生方式, 同时也是丰质子核素的重要合成方式之一^[2]。以 X 射线暴为例, 在温度较低 ($T_9 < 0.6$) 时, 氢燃烧主要通过热 CNO 循环进行, 随着反应的不断进行, 吸积盘的温度不断升高, 反应链突破到快质子俘获过程 (rp-process), 发生失控热核反应, 反应式为

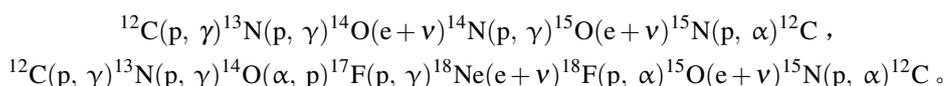
收稿日期: 2013-04-22; 修改日期: 2013-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11135005, 11021504); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2013CB834406)

作者简介: 张立勇(1985-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 从事核天体物理研究; E-mail: liyongzhang@impcas.ac.cn

通信作者: 许世伟, E-mail: shwxu@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>



其中, ${}^{18}\text{Ne}(\alpha, \text{p}){}^{21}\text{Na}$ 可能是关键的突破反应之一。

${}^{18}\text{Ne}(\alpha, \text{p}){}^{21}\text{Na}$ 的反应率主要由共振反应决定^[3], 因此可以通过研究复合核 ${}^{22}\text{Mg}$ 的共振态性质计算其反应率。1995 年, Gorres 等^[4]基于当时已知的 ${}^{22}\text{Mg}$ 两条 α 阈以上的能级 (8.29 和 8.55 MeV) 及其镜像核 ${}^{22}\text{Ne}$ 的 8 条能级计算了 ${}^{18}\text{Ne}(\alpha, \text{p}){}^{21}\text{Na}$ 的反应率, 指出 X 射线暴过程中此反应很可能是从热 CNO 循环突破到 rp 过程的一个关键反应。2001 年, Chen 等^[5]通过 ${}^{12}\text{C}({}^{16}\text{O}, {}^6\text{He}){}^{22}\text{Mg}$ 转移反应测到了 7 条 α 阈以上的能级, 其精度约为 20 keV。但他们在指认镜像核态时依旧延续了 Gorres 等人的方法: 只是简单地将 ${}^{22}\text{Mg}$ 能级值减去约 173 keV 对应到 ${}^{22}\text{Ne}$ 上。Caggiano 等^[6]在 2002 年通过 ${}^{25}\text{Mg}({}^3\text{He}, {}^6\text{He}){}^{22}\text{Mg}$ 转移反应测到了 5 条 α 阈以上的能级, 测量精度约为 20 keV, 但没能给出自旋宇称指认。Berg 等^[7]于 2003 年通过 ${}^{24}\text{Mg}({}^4\text{He}, {}^6\text{He}){}^{22}\text{Mg}$ 反应测量了 29 条 α 阈以上的能级, 最高精度达到了 10 keV, 也未能给出自旋宇称指认。中国科学院近代物理研究所核天体物理研究组在 2009 年进行了 ${}^{21}\text{Na}+\text{p}$ 的共振弹散测量, 并用 R 矩阵理论拟合弹性散射的激发函数, 从而得出了 4 条 α 阈以上能级的自旋宇称值, 但由于统计量不够, 所指认的依然有很大的不确定性^[8]。Matic 等^[3]于 2009 年通过 ${}^{24}\text{Mg}(\text{p}, \text{t}){}^{22}\text{Mg}$ 转移反应测到了从 α 阈 (8.142 MeV) 到 13 MeV 能区之间 33 条能级的能量, 最高精度可达到 3 keV, 是到目前为止对 ${}^{22}\text{Mg}$ 的能级测量精度最高的实验。这些能级的自旋宇称值只是通过比较

${}^{22}\text{Mg}$ 和 ${}^{22}\text{Ne}$ 的能级得出, 而没有做 DWBA (扭曲波波恩近似) 拟合。由于 ${}^{22}\text{Mg}$ 和 ${}^{22}\text{Ne}$ 的能级密度较大, 这种指认具有很大的随意性。Chae 等^[9]于 2009 年也进行了 ${}^{24}\text{Mg}(\text{p}, \text{t}){}^{22}\text{Mg}$ 转移反应的测量, 他们测到了 6 条 α 阈以上的能级, 并通过 DWBA 拟合得出了其自旋宇称值。但其在 8.459 MeV 附近的分辨不够, 不能将附近的 8.519, 8.574 和 8.657 MeV 3 个关键能级区分开, 所以给出的自旋宇称值也有很大的不确定性。2012 年, Salter 等^[10]测量了逆反应 ${}^{21}\text{Na}(\text{p}, \alpha){}^{18}\text{Ne}$ 的截面, 然后通过细致平衡原理计算了 ${}^{18}\text{Ne}(\alpha, \text{p}){}^{21}\text{Na}$ 截面, 由此计算出了反应率。他们的结果比前人的小 10 到 40 倍, 原因尚不清楚。由于低能区的截面很难测到, 他们只能给出高温时的反应率 (0.9 ~ 2.6 GK)。

由此可以看出, 前人对于 ${}^{18}\text{Ne}(\alpha, \text{p}){}^{21}\text{Na}$ 反应率的研究主要集中于确定 ${}^{22}\text{Mg}$ 能级的位置上, 而对自旋宇称的指认都比较随意, 是目前反应率计算误差的主要来源。这里我们测量了 ${}^{21}\text{Na}(\text{p}, \text{p}){}^{21}\text{Na}$ 共振散射的截面, 再将其用 R 矩阵理论拟合得出复合核 ${}^{22}\text{Mg}$ 各个共振态的自旋宇称和质子宽度, 从而为计算反应率提供参数。

2 实验方法

2.1 次级束流的产生与粒子鉴别

实验于 2011 年 3 月在日本理化学研究所 (RIKEN) 东京大学原子核研究中心的束流线装置 CRIB (CNS Radioactive Ion Beam separator) 上完成。如图 1 所示,

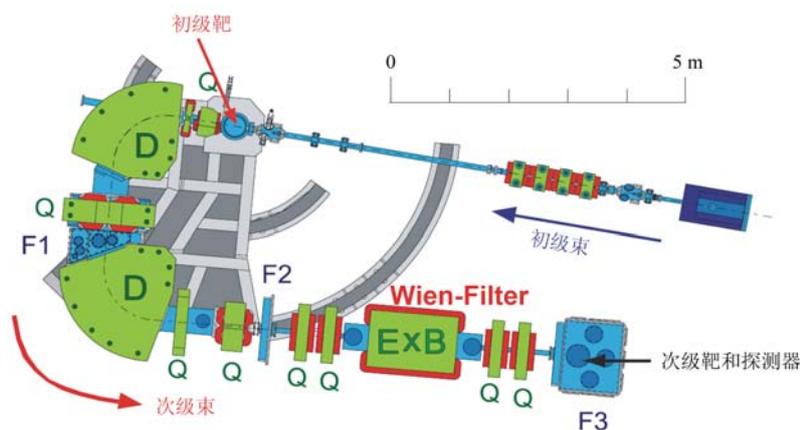


图 1 (在线彩图)CRIB装置示意图

CRIB 束流线由一个双消色差系统、一个速度选择器以及位于最后一个焦平面(F3)上的靶室组成, 整个束流线可以绕着F0从-5°到60°范围内转动。

首先我们用 AVF 加速器提供的 8.1 MeV/u 的 ²⁰Ne 稳定束轰击 F0 处的 D₂ 气体靶, 通过逆运动学 d(²⁰Ne, ²¹Na)n 转移反应产生所需要的 ²¹Na 束流。逆运动学的好处就是反应产物在实验室系下都是前倾的, 便于后续束流线的收集。D₂ 气体靶是一个直径 20 mm、长 80 mm 的圆柱体, 两端由 2.5 μm 的 Havar 膜密封。为了防止高流强的束流造成气体靶的损失以及系统的漏气, CRIB 设计了一个流气系统, 在气压不足时能及时充气。D₂ 气体在被充入之前先经过一组被液氮浸泡的弯管, 被冷却到 77 K 附近。这样做有两个目的: (1) 防止 Havar 膜被高流强的主束融化; (2) 可以增加气体靶的有效厚度。本实验中气体靶温度约为 90 K, 压强为 7 × 10⁴ Pa, 有效厚度约为 2.9 mg/cm²。

主束 ²⁰Ne 打到气体靶上不但会通过 (d, n) 反应生成 ²¹Na, 还会通过其他反应道生成其他杂质粒子, 几种主要的杂质粒子如表 1 所列。

表 1 F1处粒子鉴别

粒子	E /MeV	P/(MeV/c)	(dp/p)/%	dx/mm	反应
²¹ Na	122.46	2 192	0	0	(d, n)
²⁰ Ne	127.82	2 186	-0.27	-4.32	Scattering
²¹ Ne	129.16	2 250	2.65	42.4	(d, p)
¹⁹ Ne	108.79	1 967	-10.26	-164.16	(d, t)
¹⁹ F	119.43	2 059	-6.07	-97.12	(d, ³ He)
¹⁸ F	133.32	2 119	-3.33	-53.28	(d, α)
¹⁶ O	120.73	1 901	-13.28	-212.48	(d, ⁶ Li)

这些次级束和主束在经过二极铁D1后受到洛伦兹力会发生偏转:

$$\rho = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}, \quad (1)$$

其中 ρ 为洛伦兹偏转的半径, 即具有不同动量电荷比的粒子在相同的磁场下偏转幅度不同。实验中将 F1 处的狭缝调为 ±5 mm, 此时 D1 对 ²¹Na 的分离能力为 Δx/(Δp/p) = -16 mm/%, 即 ²¹Na 束流动量每变化 1%, 它在 F1 处的位置就改变 16 mm。从表 1 可以看出, 在经过 F1 处的狭缝后, 主束以外的其他杂质大部分都被去除。

在 F2 处没有被去除的粒子进入速度选择器后由于速度不同会被进一步分离。速度选择器中的电场为

水平方向, 由两块 1.5 m 长, 相距 8 cm 的平行电极板提供, 最高电压 200 kV。磁场为垂直方向, 由一个二极铁提供, 最高强度 0.3 T。进入速度选择器中的粒子会同时受到洛伦兹力和库仑力的作用:

$$F = qE - qvB, \quad (2)$$

只有速度 v = E/B 的粒子不会被偏转, 其他速度的粒子都会被偏转掉。速度选择器的偏转能力与电场和磁场强度以及速度选择器的长度成正比, 在高压为 ±200 kV 时其分辨为 0.8 cm/%, 即速度每相差 1%, 粒子将被偏转 0.8 cm。被 Wien-Filter 偏掉的束流会打在极板上引起高压放电, 这使得实验中高压只能加到 ±70 kV, 结果如表 2 所列。此时依然可以将大部分主束偏离掉, 注意其中的 ¹⁹Ne 已经在 F1 处被狭缝卡掉。

表 2 利用速度选择器分离粒子

粒子	(Δv/v)/%	Δx /mm
²¹ Na ¹¹⁺	0.0	0
²⁰ Ne ¹⁰⁺	-4.5	-15
²¹ Ne ¹⁰⁺	-9.0	-30
¹⁹ Ne ¹⁰⁺	0.5	1
¹⁹ F ⁹⁺	-9.5	31

F2 处在调束阶段放置了一块 PPAC 和一个阻止型硅探测器, 分别用来测量束流的飞行时间和能量, 同时 PPAC 还可以给出束斑的形状。图 2 分别给出了实验中的 TOF-E 谱 (a) 和计算结果 (b), 对比这两个谱就可以清晰地鉴别出 ²¹Na。

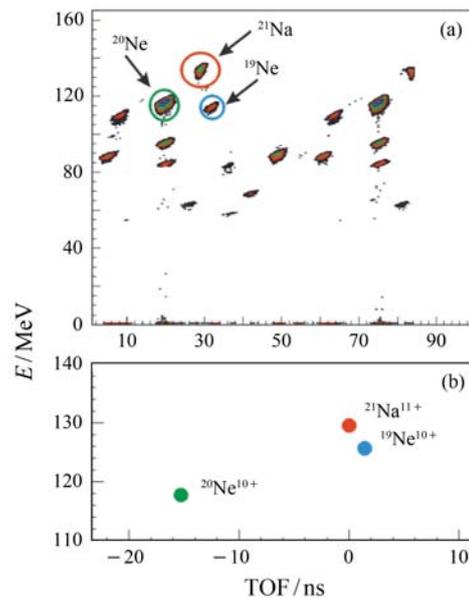


图 2 (在线彩图)F2 次级束流粒子鉴别

束流优化过程完成后, F2 处的 Si 和 PPAC 会被撤出来, 束流进入 Wien-Filter 被进一步分离. F3 处的 ^{21}Na 流强为 2×10^5 p/s, 纯度约为 70%. 图 3(a) 给出了 F3 处的粒子鉴别谱. 其中, x 轴为粒子飞行时间, 开始信号和结束信号分别由 RF 和 F3 PPACa 提供, y 轴为粒子打在 F3 PPACa 上的水平位置. 由于主束的流强较大, 且在 F1 处没有被完全去除, 从而构成了杂质的主要部分. 靶子直径为 35 mm, 通过调节聚焦磁铁 Q6 和 Q7 可以将 ^{21}Na 聚焦到靶子中心, 而 ^{20}Ne 则大部分被聚到靶子外面. 图 3(b) 是由 F3 两块 PPAC 外推得到的束流在靶子上的位置.

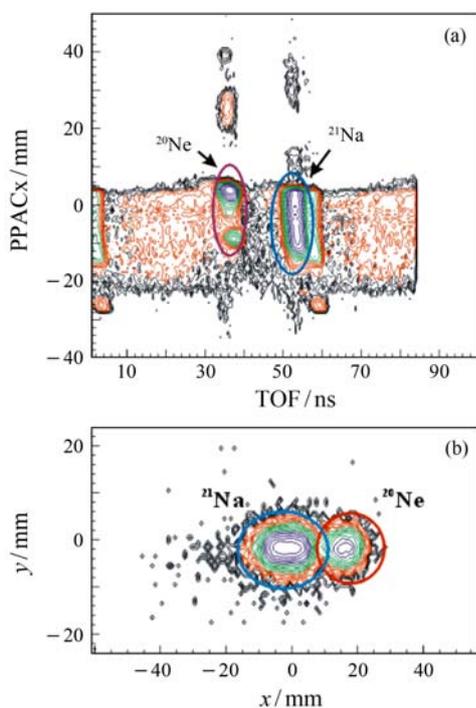


图 3 (在线彩图) F3 次级束流粒子鉴别

2.2 反应产物的探测与粒子鉴别

^{21}Na 束流在经过速度选择器后被聚焦到 F3 靶室的 $[\text{CH}_2]_n$ 靶上, 弹散产生的质子被 3 套 ΔE - E Si 探测器望远镜系统探测. 由于采用了厚靶方法, 束流和反应产生的重离子都被阻止在靶子里, 需要鉴别的主要是质子和 α . 探测装置如图 4 所示.

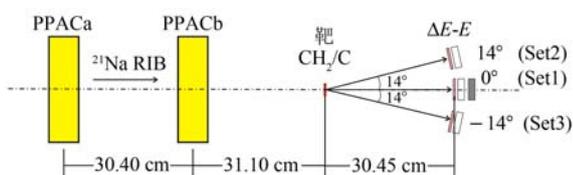


图 4 (在线彩图) F3 探测器设置

PPACa 和 PPACb 可以给出入射束流的位置和时间信号, 从而得到入射束流的方向以及打到靶子上的位置. PPAC 同时还可以给出束流的计数, 并根据图 3 谱进行实时粒子鉴别. 靶子包括一块厚度为 8.8 mg/cm^2 的聚乙烯薄膜 $(\text{CH}_2)_n$ 和一块厚度为 13.5 mg/cm^2 的 C 靶, 其作用是测量聚乙烯靶中的 C 带入的本底. 靶后的 3 套 ΔE - E 望远镜中的一套位于束流线中心, 另外两套与束流线的夹角分别为 14° 和 -14° . 14° 角望远镜由一块 $300 \mu\text{m}$ 厚 W1 型双面 Si 条 (16×16 条) 和一块 $1500 \mu\text{m}$ 厚 MSX25 型方 Si 组成; -14° 角望远镜则是由一块 $60 \mu\text{m}$ 厚 W1 型双面 Si 条和一块 $1500 \mu\text{m}$ 厚 MSX25 型方 Si 组成; 0° 角望远镜由一块 $300 \mu\text{m}$ 厚 W1 型双面 Si 条 (16×16 条) 和两块 $1500 \mu\text{m}$ 厚 MSX25 型方 Si 组成. 小角度的散射质子能量较大, 所以 0° 角望远镜需要用 2 块方 Si. 在 -14° 角用不同厚度的 Si 条可以避免所有探测器的死层位于同一能区, 从而在整个能区内都可以得到可靠数据. 每一块 Si 探测器的灵敏面积为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 能够探测的角度范围是 $\Delta\theta_{\text{lab}} \approx 5^\circ$. 3 套望远镜总共能覆盖的立体角 $\Delta\Omega_{\text{lab}} \approx 27 \text{ msr}$.

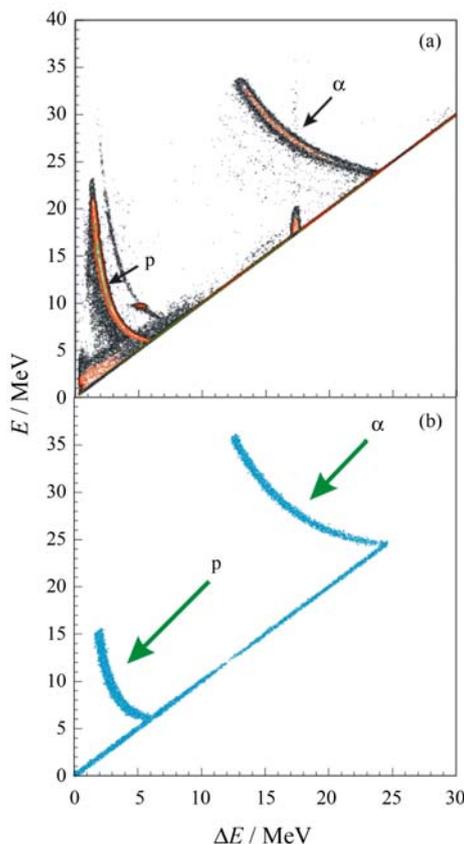


图 5 (在线彩图) ΔE - E 粒子鉴别

通过 ΔE - E 和 TOF - E 两种方法鉴别反应产物的粒子。图5中 x 轴是粒子在 ΔE 探测器中沉积的能量, y 轴是粒子总能量 $E = \Delta E + E_{\text{res}}$ 。其中,(a)为实验二维谱,(b)为蒙特卡罗模拟结果。从图上可以清晰地鉴别出质子和 α 粒子。实验中用到的两种 ΔE 探测器厚度分别为60和300 μm ,质子穿透这两种探测器所需的最小能量约为2.5和6 MeV,对于 α 粒子则分别为9和23 MeV。能量低于上述值的粒子将被阻止在 ΔE 探测器中,这时就需要利用 TOF - E 方法来鉴别它们。图6给出了实验测到的 TOF - E 谱,其中, x 轴是粒子的总能量 $E = \Delta E + E_{\text{res}}$, y 轴是TDC的道数,对应粒子飞行时间。 TOF 的开始信号由F3 PPACa给出,结束信号由PSD X面的信号给出。

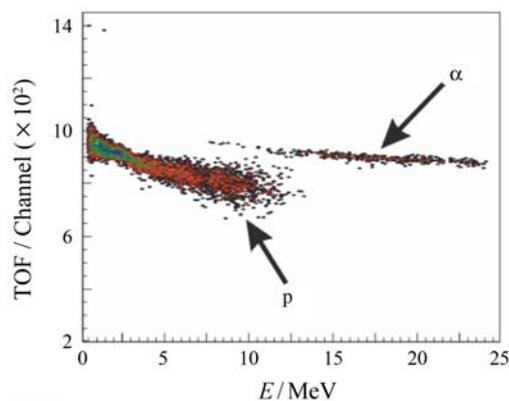


图 6 (在线彩图) TOF - E 粒子鉴别

我们根据PPAC和Si探测器的信息重建出反应点深度,进而算出碰撞时的质心系能量,最终得到 $^{21}\text{Na}+p$ 的弹散激发函数如图7所示。其中, x 轴为复合核 ^{22}Mg 的激发能 $E_x = E_{\text{c.m.}} + S_p$, $S_p = 5.504$ MeV,

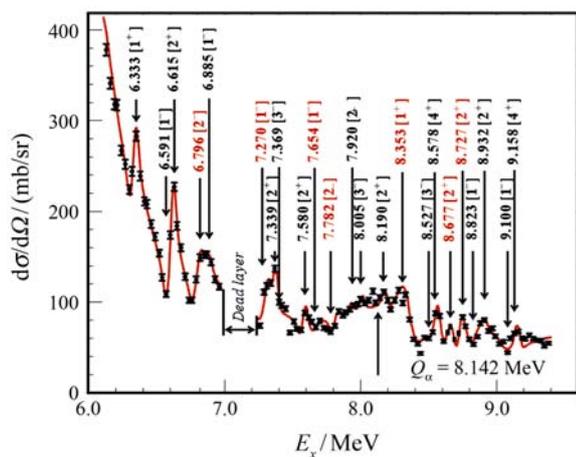


图 7 (在线彩图) $^{21}\text{Na}+p$ 弹性散射的激发函数以及R矩阵拟合结果

是 ^{22}Mg 的质子分离能, y 轴是微分截面。

3 R矩阵拟合结果

利用R矩阵理论^[11]对测到的 $^{21}\text{Na}(p, p)^{21}\text{Na}$ 截面进行了拟合,其中质子和 ^{21}Na 基态的自旋宇称分别为 $J^\pi = 1/2^+, 3/2^+$,入射道的道自旋可取 $s = 1, 2$,共振态的宇称为 $(-1)^l$ 。道半径参数取 $r_0 = 1.35$ fm,探测器分辨 Δ 取为50 keV。我们对每一个能级都尝试了所有可能的自旋宇称和宽度等参数,然后考虑到相邻能级之间的相互影响,以每两个相邻能级为一组,将所有可能的参数组合进行尝试,再根据前人给出的实验结果最终确定每个能级的自旋和宇称。此次实验一共观测到了23个共振能级,其中10个位于 α 阈以上。大部分能级的共振属性都是第一次由实验测得,其中的6个能级(红色,见在线彩图)我们给出了新的自旋宇称指认。

4 总结

本实验对X射线暴过程中一个重要的核天体反应 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 进行了间接测量。实验中利用CRIB提供的 ^{21}Na 放射性束轰击8.8 mg/cm²的聚乙烯厚靶,利用 ΔE - E 方法和 TOF - E 方法对反冲粒子进行鉴别和测量,从而在一段能区($E_x = 5.5 \sim 9.2$ MeV)内测得 $^{21}\text{Na}(p, p)^{21}\text{Na}$ 的激发函数。通过对测得的 $^{21}\text{Na}(p, p)$ 共振弹性散射截面进行R矩阵拟合,得到了复合核 ^{22}Mg 共振能级的自旋宇称以及质子宽度等信息。本实验共测到了 ^{22}Mg 的23条能级,其中10条位于 α 阈以上,且大部分能级的自旋宇称值都是第一次由实验清晰确定。这些共振参数是计算天体核反应 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ 反应率所需的基本核物理输入量。新反应率的天体物理意义正在计算中。

参考文献(References):

- [1] LEWIN W, PARADIJS J, TAAM R. *Space Science Reviews*, 1992, **62**: 223.
- [2] BRADFIELD W, DAVINSON T, DIPIETRO A, *et al.* *Phys Rev C*, 1999, **59**: 6.
- [3] MATIC A, BREG A M, Harakeh M N, *et al.* *Phys Rev C*, 1999, **80**: 5.
- [4] GORRES J, WIESCHER M. *Phys Rev C*, 1995, **52**: 1.
- [5] CHEN A A, LEWIS R, SWARTZ K B, *et al.* *Phys Rev C*, 2001, **63**: 065807.

- [6] CAGGIANO J A, BRADFIELD-SMITH W, GREENE J P, *et al.* Phys Rev C, 2002, **66**: 015804.
- [7] BERGA G P A, HATANAKAA K, WIESCHER M, *et al.* Nuclear Physics A, 2003, **718**: 608.
- [8] HE J J, KUBONO S, TERANISHI T, *et al.* Phys Rev C, 2009, **80**: 015801.
- [9] CHAE K Y, BARDAYAN D W, BLACKMON J C, *et al.* Phys Rev C, 2009, **79**: 055804.
- [10] SALTER P J C, ALIOTTA M, DAVINSON T, *et al.* Phys Rev Lett, 2012, **108**: 242701.
- [11] LANE A M, THOMAS R G. Reviews of Modern Physics, 1958, **30**: 257

Experimental Study of Key $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ Astrophysical Reaction

ZHANG Liyong^{1, 2, 3}, XU Shiwei¹, HE Jianjun¹, H. Yamaguchi⁴, S. Kubono⁴, Y. Wakabayashi⁵, CHEN Size^{1, 3}, HU Jun¹, MA Peng¹, Y. Togano⁶, T. Hashimoto⁴, D. Kahl⁴, T. Teranishi⁷, CHEN Ruofu¹, WANG Hongwei⁸, TIAN Wendong⁸, GUO Bing⁹, S. Hayakawa⁴, N. Iwasa¹⁰, T. Yamada¹⁰, T. Komatsubara¹¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Center for Nuclear Study (CNS), University of Tokyo, Hirosawa 3510198 Japan;

5. Advanced Science Research Center, JAEA, Takai Ibaraki 3191195 Japan;

6. RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 3510198 Japan;

7. Department of Physics, University of Kyushu, Fukuoka 8128581 Japan;

8. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

9. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

10. Department of Physics, University of Tohoku, Sendai 9808577 Japan;

11. Department of Physics, University of Tsukuba, Tsukuba 3050006 Japan)

Abstract: The $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ reaction is thought to be one of the key breakout reaction from the hot CNO cycle to the rp-process in X-ray bursts. Over stellar temperatures achieved in XRBs, this rate has not been sufficiently determined. The experiment was performed using CRIB (CNS Radioactive Ion Beam separator) at the Center for Nuclear Study (CNS) of the University of Tokyo. An 89 MeV ^{21}Na radioactive ion beam was produced and bombarded an 8.8 mg/cm² thick polyethylene target. The recoiled light particles were detected with three Micron silicon ΔE - E telescopes centered at angles of $\theta_{\text{lab}} = 0^\circ$, $+14^\circ$ and -14° with respect to the beam direction, respectively. The $^{21}\text{Na}+p$ elastic-scattering excitation functions were reconstructed with a thick-target method over energies $E_x = 5.5 \sim 9.2$ MeV. The resonance parameters have been determined through an R-matrix analysis, which will be used to evaluate the $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ reaction rate.

Key words: nuclear astrophysics; X-ray burst; radioactive beam; thick target method; resonant scattering

Received date: 22 Apr. 2013; **Revised date:** 12 May 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11135005, 11021504); National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB834406)

Corresponding author: XU Shiwei, E-mail: shwxu@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>