

文章编号: 1007-4627(2011)04-0428-05

$^{17}\text{F} + \text{p}$ 厚靶实验对 ^{18}Ne 共振态性质的研究*

胡 钧^{1,2}, 何建军^{1, #}, 许世伟¹, 陈志强¹, 张雪荧¹, 王建松¹, 于祥庆¹, 苏 俊³, 李二涛³,
王宏伟⁴, 田文栋⁴, 李 龙^{1,2}, 张立勇^{1,2}, 杨彦云^{1,2}, 马 朋^{1,2}, 章学恒¹, 胡正国¹,
郭忠言¹, 徐 星^{1,2}, 袁小华¹, 鲁 皖^{1,2}, 余玉洪¹, 臧永东^{1,2}, 唐述文^{1,2}, 叶瑞平^{1,2},
陈金达^{1,2}, 金仕纶^{1,2}, 杜成名^{1,2}, 王世陶^{1,2}, 马军兵¹, 刘龙祥^{1,2}, 白 真^{1,2},
雷祥国¹, 孙志宇¹, 李湘庆⁵, 张玉虎¹, 周小红¹, 徐珊珊¹

- (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 100049;
3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
4. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;
5. 北京大学, 北京 100871)

摘 要: 实验通过 $^{17}\text{F} + \text{p}$ 共振弹性散射研究了复合核 ^{18}Ne 激发态中与天体核反应 $^{14}\text{O}(\alpha, \text{p})^{17}\text{F}$ 相关的共振态性质。利用兰州放射性束流线(RIBLL)对弹核碎裂反应产生的放射性束 ^{17}F 进行了分离和提纯。经过降能后, 能量为 4.22 A MeV 的 ^{17}F 束流轰击在 T2 终端的厚氢靶 $(\text{CH}_2)_n$ 上。两套 $\Delta E-E$ Si 探测器望远镜放置在两个不同的探测角度 $\theta_{\text{lab}} \approx 2.3^\circ$ 和 14° 上, 对反冲质子的角度和能量进行了测量。实验观测到了复合核 ^{18}Ne 的几条质子共振能级。通过 R -Matrix 理论程序对激发函数进行拟合, 得到了共振态的能量、自旋、宇称和衰变宽度等共振参数。

关键词: 共振态; 厚靶方法; 放射性核束; R -Matrix 拟合

中图分类号: O571.1 **文献标志码:** A

1 引言

高温、高密天体环境中的核燃烧过程涉及大量的放射性核素。这些短寿命核素的共振态性质(自旋、宇称、衰变宽度等)在确定天体核反应率、核合成路径以及能量产生等方面具有重要的意义。在天体 X 射线爆(X-ray burst)过程中, $^{14}\text{O}(\alpha, \text{p})^{17}\text{F}$ 反应是突破热 CNO 循环进入到快质子俘获过程(rp-process)的关键反应之一^[1-2]。因此, 长期以来, 人们对这一关键反应有着浓厚的兴趣。国内外各大实验室利用间接或直接方法对该反应进行了大量的研究工作^[3-12]。反应率是天体网络方程的一个关键核物理输入量。计算 $^{14}\text{O}(\alpha, \text{p})^{17}\text{F}$ 反应率所需要的知

识是其复合核 ^{18}Ne 相关准束缚态能级(α 阈以上)的共振参数。但是, 截止目前, ^{18}Ne 共振态性质仍然有太多的不确定性, 这就严重影响了计算 $^{14}\text{O}(\alpha, \text{p})^{17}\text{F}$ 反应率的准确性。因此, 对 ^{18}Ne 共振态性质进行更深入的研究是非常必要的。

放射性核束的产生和应用, 给核物理和核天体物理带来了新的生机。它极大地拓展了核反应中弹靶组合的多样性。鉴于放射性核束的流强相对较低, 人们发展了厚靶逆运动学的方法来研究次级束的共振弹性散射, 从而得到相应复合核的共振态性质。本实验使用较厚的固体质子靶, 如 $(\text{CH}_2)_n$ 等, 使束流的能量全部损失在靶里。通过次级靶后的 Si 探测器阵列来探测反应中出射的质子。经过反应运

* 收稿日期: 2011-01-13; 修改日期: 2011-02-17

* 基金项目: 中国科学院百人计划资助项目(BR091104); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-YW-N32); 国家自然科学基金资助项目(10975163, 11021504); 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB815000)

作者简介: 胡钧(1982-), 男, 云南思茅人, 助理研究员, 在读博士, 从事核天体物理实验研究;

E-mail: hujunbaggio@impcas.ac.cn

通讯联系人: 何建军, E-mail: jianjunhe@impcas.ac.cn

动力学和能量损失的修正，可以一次性得到较大能量范围内的弹性散射激发函数。通过 R -Matrix 理论程序对激发函数进行分析，可以得到共振态的能量、自旋、宇称和衰变宽度等共振参数。

2 实验

实验是在兰州放射性束流线(RIBLL)^[13] 实验终端上完成的。由 SSC 回旋加速器提供的初级束 $^{20}\text{Ne}^{10+}$ ，能量为 69.5 A MeV，流强为 300 enA。初级靶为 4094 μm 厚的 ^9Be 靶，通过弹核碎裂反应产生次级束 ^{17}F 。次级束流经过 RIBLL 分离、提纯后，传输到次级靶靶室。

图 1 给出了 RIBLL 束流线结构及参数配置示

意图。在色散焦点(C1)处，放置了一块 313 μm 厚和均匀厚度的 Al 降能片。该降能片的作用是为了把产生的 $^{17}\text{F}^{9+}$ 束流从其它杂质中分离出来并降低其能量。另外，由于弹核碎裂反应产生的次级束能量相对比较高(一般都高于天体核反应相应的能区)，所以，为了达到所需能量要求，在中心聚焦点 T1 处先后放置了一块 323 μm 厚的方硅和一块 294 μm 厚的 Al 降能片。在方硅之前放置一块 34 μm 厚的塑料闪烁膜(C_9H_{10})作为飞行时间探测器 TOF1，用来记录束流粒子飞行时间的起始时刻。为了能够进一步纯化束流，在 C1 和 C2 处设置了两个横向狭缝来限制次级束流的动量分散。本实验中，两个狭缝的动量接收度分别为 $\pm 0.34\%$ 和 $\pm 0.92\%$ 。

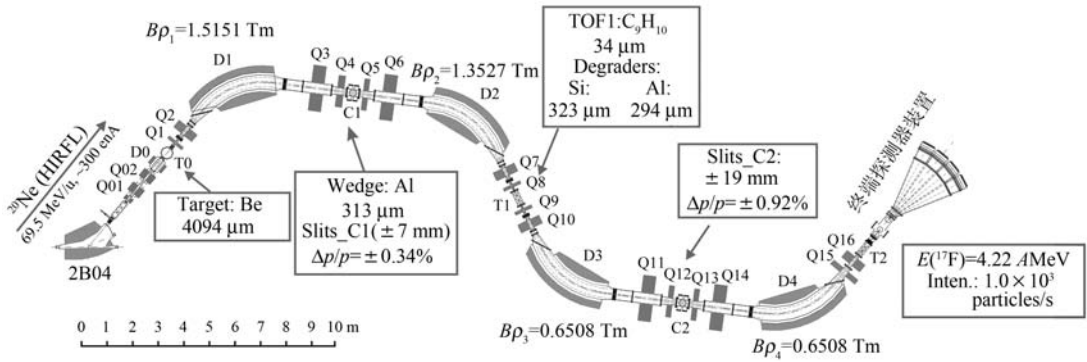


图 1 RIBLL 束流线结构及参数配置示意图

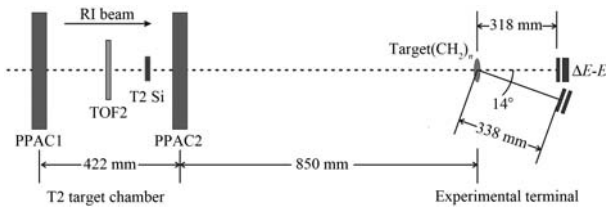


图 2 RIBLL 实验终端探测器及靶布局图

在束流线终端焦点 T2 靶室处(如图 2 所示)，放置两块平行板雪崩计数器(PPAC)和一块 10 μm 厚的塑料闪烁膜(C_9H_{10})作为飞行时间探测器 TOF2——用来记录束流粒子飞行时间的停止时刻。次级靶(CH_2)_n 放置在 T2 靶室和 Si 探测器终端之间的管道内。两块 PPAC 用来确定次级束流打击到次级靶靶点的位置，PPAC 的位置分辨能够达到 1 mm^[14]。调次级束流期间，在 PPAC2 前面放置了一块 280 μm 厚的硅探测器，用来沉积束流的全部能量 E_{total} 。这样，通过 TOF-E 粒子鉴别方法就可

以区分开次级靶前的所有束流粒子，其中，TOF 是粒子的飞行时间，可以用两块飞行时间探测器

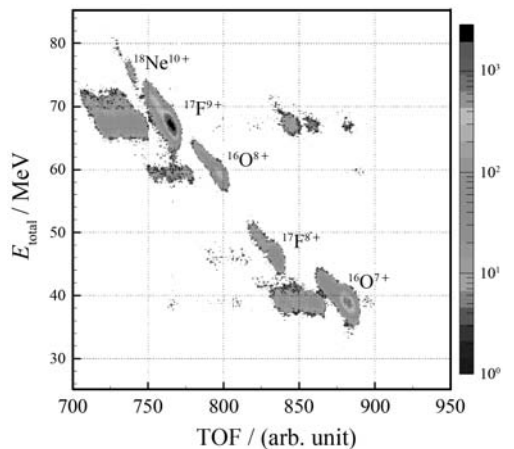


图 3 次级束流 TOF-E 鉴别图

(TOF1 和 TOF2)测得的时间差计算得到。图 3 清晰地显示了各种束流粒子的鉴别情况。调束结束

后, Si 探测器被移出束流线。实验期间, 可以通过 TOF 谱监测 $^{17}\text{F}^{9+}$ 束流粒子的纯度和强度。

在次级靶前, $^{17}\text{F}^{9+}$ 束流平均能量为 (4.22 ± 0.25) A MeV, 由于使用了大量的降能片, 平均流强只有 1×10^3 particles/s, 纯度约为 50%。厚度为 10.46 mg/cm^2 的次级靶 $(\text{CH}_2)_n$ 能够沉积所有的束流粒子, 这样就避免了束流直接轰击靶后 Si 探测器, 使探测器免遭束流损伤。次级靶后两套 ΔE - E Si 探测器望远镜分别安装在实验室系 $\theta_{\text{lab}} \approx 2.3^\circ$ 和 14° 处, 用来探测从靶内反冲出来的轻粒子 (p 和 α)。 2.3° 角望远镜是由一块 $63 \mu\text{m}$ 厚 W1 型双面硅条 (16×16 条), 一块 $1500 \mu\text{m}$ 厚 MSX25 型方硅组成; 14° 角望远镜则是由一块 $300 \mu\text{m}$ 厚 MSQ25 型方硅, 一块 $1000 \mu\text{m}$ 厚 MSPX042 型双面硅条 (16×16 条) 组成。每一块 Si 探测器的有效探测面积是 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 能够探测的角度范围是 $\Delta\theta_{\text{lab}} \approx 9^\circ$ 。两套望远镜分别能覆盖的立体角 $\Delta\Omega_{\text{lab}}$ 为 25 和 22 msr。对于逆运动学的弹性散射, 质心系下的散射角 $\theta_{\text{c.m.}} = 180^\circ \sim 2\theta_{\text{lab}}$ 。实验室系角度 $\theta_{\text{lab}} \approx 2.3^\circ \pm 2.3^\circ$ 和 $14^\circ \pm 4^\circ$ 分别对应质心系角度 $\theta_{\text{c.m.}} \approx 175^\circ$

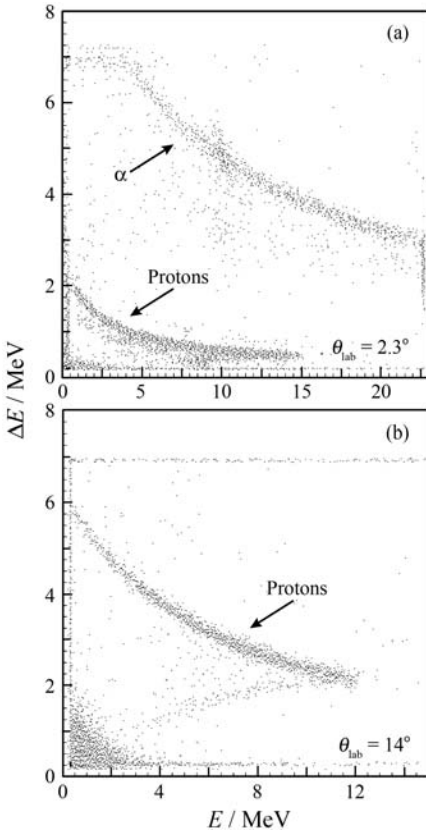


图 4 反冲轻粒子 ΔE - E 鉴别图

$\pm 5^\circ$, $152^\circ \pm 8^\circ$ 。运用 ΔE - E 粒子鉴别方法可以很清楚地鉴别出反冲轻粒子 (p 和 α), 如图 4 所示。

3 实验结果

在质心系下, $^{17}\text{F} + \text{p}$ 共振弹性散射的微分截面可由如下关系式计算:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{\text{c.m.}}}(E_{\text{c.m.}}, \theta_{\text{c.m.}}) = \frac{1}{4 \cos \theta_{\text{lab}}} \frac{N_p}{I_p N_H \Delta\Omega_{\text{lab}}}, \quad (1)$$

其中: N_p 是在 $E_{\text{c.m.}} \rightarrow E_{\text{c.m.}} + \Delta E_{\text{c.m.}}$ 能量间隔内探测到的质子数目; I_p 是打到 $(\text{CH}_2)_n$ 靶上的 $^{17}\text{F}^{9+}$ 束流粒子总数; N_H 是靶内单位面积单位能量间隔 ($\Delta E_{\text{c.m.}}$) 内的氢原子个数。这里, $^{17}\text{F} + \text{p}$ 共振弹性散射的入射粒子相对运动动能, $E_{\text{c.m.}}$ 由下式得到:

$$E_{\text{c.m.}} = \frac{A_b + A_t}{4A_b \cos^2 \theta_{\text{lab}}} E_p, \quad (2)$$

其中: A_b 和 A_t 分别是弹核和靶核的质量数; E_p 是在靶内反应点处出射质子的能量。已知 $E_{\text{c.m.}}$ 能量, ^{18}Ne 共振态的能量可通过公式 $E_r = E_{\text{c.m.}} + S_p$ 得到, 其中 $S_p = 3.924 \text{ MeV}$ 是 ^{18}Ne 的单质子分离能^[15]。

图 5 给出了在质心系角度 $\theta_{\text{c.m.}} \approx 175^\circ \pm 5^\circ$ 和 $152^\circ \pm 8^\circ$ 下 $^{17}\text{F} + \text{p}$ 共振弹性散射的激发函数。质心系微分截面误差主要来源于统计误差。运用 R-Matrix 理论^[16] 程序对所观测到的共振峰进行拟合, 指出了 6 个共振态的自旋和宇称。图 5 中标识的各共

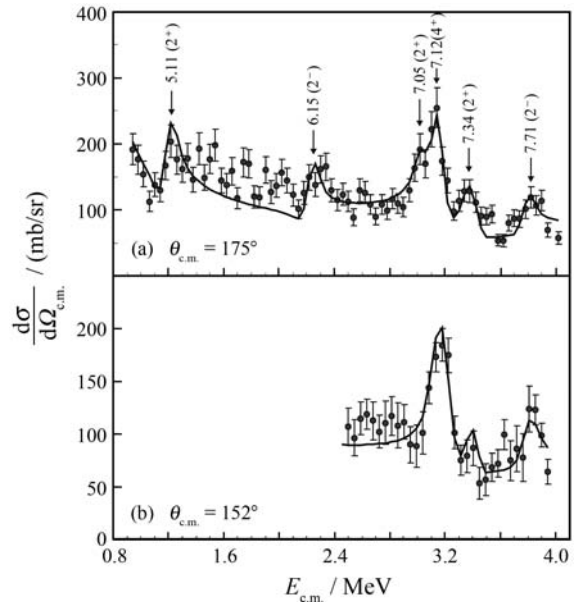


图 5 $^{17}\text{F} + \text{p}$ 共振弹性散射的激发函数
圆点代表实验数据点, 实线为 R-Matrix 拟合线。

振态的自旋和宇称为最佳拟合值。

4 结果讨论

以前的实验结果^[3, 7, 10]一直认为 $E_x = 6.15$ MeV 态的自旋和宇称为 1^- ，并且在计算天体核反应 $^{14}\text{O}(\alpha, \text{p})^{17}\text{F}$ 的反应率中扮演着非常重要的角色。但是，最近在对 Gómez del Campo 等^[5]的数据进行重新分析后，发现该态很有可能是 2^- 或 3^- 态^[17]。本工作给出 R -Matrix 拟合最可能的自旋和宇称值也是 2^- 或 3^- 态。不同的是本工作在进行了 R -Matrix 拟合时，使用的轨道角动量参数 $\ell = 3$ ，而在文献^[17]中则是 $\ell = 1$ 。由于本工作和文献^[5]中的数据统计量都不是理想，均不能给出这个态确切的自旋和宇称值。但是，这些有意义的探讨将促使人们对该态进行更加仔细的研究。因此，我们建议通过高精度的 $^{16}\text{O}(\text{}^3\text{He}, \text{n})^{18}\text{Ne}$ 反应和高统计量的 $^{17}\text{F}(\text{p}, \text{p})^{17}\text{F}$ 共振弹性散射实验来对这一关键共振态进行更深入的研究。

Hahn 等^[3]曾经认为 7.07 MeV 附近的峰具有双峰结构，本实验数据支持这一结论（如图 5 所示）。基于本实验和 Hass 等^[7]实验数据的 R -Matrix 拟合情况，能够得到 7.09 MeV 这个峰（双峰中的高能成分）具有 4^+ 态 ($\ell = 2$) 性质的结论。Nero 等^[13]在认为该峰 ($E_x = 7.06$ MeV) 是单峰的前提下，对其角分布进行 DWBA 计算拟合得到 1^- 或 2^+ 态的结论。根据 $^{16}\text{O}(\text{}^3\text{He}, \text{n})^{18}\text{Ne}$ 拾取反应机制的考虑，Nero 认为该态最有可能是一个 2^+ 态。对于双峰中的低能成分，本工作采用了这一 2^+ 态指认。本工作的 R -Matrix 拟合也得到了双峰好于单峰的拟合结果。Notani 等^[9]在 $^{14}\text{O}(\alpha, \text{p})^{17}\text{F}$ 厚靶实验研究中，也观察到了这一双峰现象。采用文献^[3]中给出的精确能量值，可以初步指认该双峰为 7.05 MeV (2^+)，7.12 MeV (4^+)。

图 6 给出了互为镜像核的 ^{18}Ne 和 ^{18}O 的能级纲图。本工作给出了初步的相似态对应结果。

5 总结

本工作利用 $^{17}\text{F} + \text{p}$ 共振弹性散射研究了 ^{18}Ne 共振态的性质。实验所得激发函数，通过 R -Matrix 程序对实验激发函数的分析得到了各共振态的共振参数。其中，能量为 6.15 MeV 的态初步指认为 2^- 或 3^- 态，这和以前实验将其指认为关键的 1^- 态有很大的不同；对于位于 7.05 MeV 相对较宽的共振峰， R -Matrix 拟合得到了双峰好于单峰的拟合结果，初步指认该双峰为 7.05 MeV (2^+)，7.12 MeV (4^+)。这些实验结果可能会对计算 $^{14}\text{O}(\alpha, \text{p})^{17}\text{F}$ 反应的反应率有一定的影响。目前，进一步的实验分析和反应率计算等工作正在进展中。

参考文献 (References):

[1] Champagne A E, Wiescher M. Annu Rev Nucl Part Sci, 1992, **42**: 39.
 [2] Wiescher M, Schatz H, Champagne A E. Phil Tran R Soc, 1998, **A356**: 2105.
 [3] Hahn K I, Garcia A, Adelberger E G, et al. Phys Rev, 1996, **C54**: 1999.
 [4] Hass B, Greene J P, Henderson D, et al. Phys Rev Lett, 1999, **82**: 3964.
 [5] Gómez del Campo J, Galindo-Uribarri A, Beene J R, et al. Phys Rev Lett, 2001, **86**: 43.

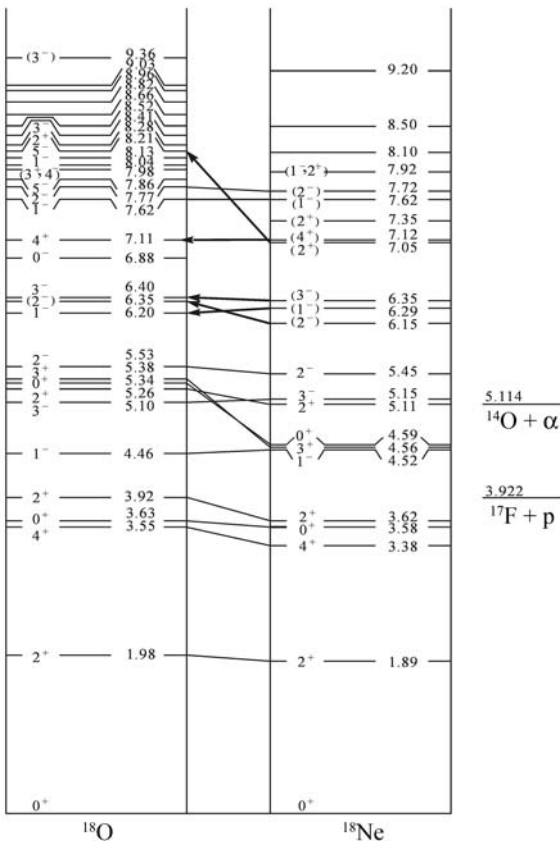


图 6 ^{18}Ne 和 ^{18}O 的能级纲图

箭头线为本工作给出的镜像核相似态对应的结果。

- [6] Blackmon J C, Bardayan D W, Bradfield-Smith W, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A688**: 142(c).
- [7] Hass B, Jiang C L, Rehm K E, *et al.* Phys Rev, 2002, **C65**: 035803.
- [8] Blackmon J C, Bardayan D W, Bradfield-Smith W, *et al.* Nucl Phys, 2003, **A718**: 127(c).
- [9] Notani M, Kubono S, Teranishi T, *et al.* Nucl Phys, 2004, **A746**: 113(c).
- [10] He J J, Woods P J, Davinson T, *et al.* Phys Rev, 2009, **C80**: 042801(R).
- [11] Jin S J, Wang Y B, Wang B X, *et al.* Chin Phys Lett, 2010, **27**: 032102.
- [12] Bardayan D W, Blackmon J C, Chae K Y, *et al.* Phys Rev, 2010, **C81**: 065802.
- [13] Sun Z, Zhan W L, Guo Z Y, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **A503**: 496.
- [14] Ma Peng, Wang Jiansong, Duan Limin, *et al.* Atomic Energy Sci and Tech, 2010, **45**(3): 356(in Chinese). (马朋, 王建松, 段利敏, 等. 原子能科学技术, 2011, **45**(3): 356.)
- [15] Audi G, Wapstra A H, Thibault C. Nucl Phys, 2003, **A729**: 337.
- [16] Lane A M, Thomas R G. Rev Mod Phys, 1958, **30**: 257.
- [17] He J J, Wang H W, Hu J, *et al.* arXiv: 1001.2053v1, 2010.
- [18] Nero A V, Adelberger E G, Dietrich F S, *et al.* Phys Rev, 1981, **C24**: 1864.

Investigation of Resonant Properties in ^{18}Ne via a Thick-target Method of $^{17}\text{F}+p$ *

HU Jun^{1, 2}, HE Jian-jun^{1, #}, XU Shi-wei¹, CHEN Zhi-qiang¹, ZHANG Xue-ying¹, WANG Jian-song¹, YU Xiang-qing¹, SU Jun³, LI Er-tao³, WANG Hong-wei⁴, TIAN Wen-dong⁴, LI Long^{1, 2}, ZHANG Li-yong^{1, 2}, YANG Yan-yun^{1, 2}, MA Peng^{1, 2}, ZHANG Xue-heng¹, HU Zheng-guo¹, GUO Zhong-yan¹, XU Xing^{1, 2}, YUAN Xiao-hua¹, LU Wan^{1, 2}, YU Yu-hong¹, ZANG Yong-dong^{1, 2}, TANG Shu-wen^{1, 2}, YE Rui-ping^{1, 2}, CHEN Jin-da^{1, 2}, JIN Shi-lun^{1, 2}, DU Cheng-ming^{1, 2}, WANG Shi-tao^{1, 2}, MA Jun-bing¹, LIU Long-xiang^{1, 2}, BAI Zhen^{1, 2}, LEI Xiang-guo¹, SUN Zhi-yu¹, LI Xiang-qing⁵, ZHANG Yu-hu¹, ZHOU Xiao-hong¹, XU Hu-shan¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

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

5. *Peking University, Beijing 100871, China)*

Abstract: Resonant properties in ^{18}Ne relevant to the stellar reaction of $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ have been investigated through a resonant elastic scattering of $^{17}\text{F}+p$. The ^{17}F RI beam was produced via a projectile-fragmentation reaction, and subsequently separated and purified by Radioactive Ion beam Line in Lanzhou (RIBLL). After a series of energy degradation, a 4.22 AMeV ^{17}F beam bombarded a thick $(\text{CH}_2)_n$ target at T2 terminal. Energy and angle of the recoiled protons were measured by two sets of $\Delta E-E$ silicon telescope at $\theta_{\text{lab}} \approx 2.3^\circ, 14^\circ$ respectively. Several resonances in ^{18}Ne were observed, and their resonant parameters including energy, spin-parity and decay width have been determined by an R -Matrix analysis of the experimental excitation function.

Key words: resonance; thick-target method; radioactive beam; R -Matrix fitting

* **Received date:** 13 Jan. 2011; **Revised date:** 17 Feb. 2011

* **Foundation item:** Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences(BR091104); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(KJ CX2-YW-N32); National Natural Science Foundation of China(10975163, 11021504); Major State Basic Research Development Program of China(2007CB815000)

Corresponding author: He Jian-jun, E-mail: jianjunhe@impcas.ac.cn