

# 基于 $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{19}\text{F}$ 和 $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$ 共振反应的 低能质子束流能量刻度\*

陈鑫<sup>1)</sup> 苏俊<sup>1)</sup> 张昊<sup>1)</sup> 陈银吉<sup>1)</sup> 宋路洋<sup>1)</sup> 胡钧<sup>2)</sup>  
田宁<sup>2)</sup> 陈思泽<sup>3)</sup> 张立勇<sup>1)†</sup> 何建军<sup>1)</sup>

(1)北京师范大学核科学与技术学院,射线束技术教育部重点实验室,北京市科学技术研究院辐射技术研究所,100875,北京;

2)中国科学院近代物理研究所,730000,甘肃兰州;

3)中国科学院合肥物质科学研究院核能安全技术研究所,230031,安徽合肥)

**摘要** 长时间稳定运行的低能强流质子加速器对低能核天体物理实验至关重要.中国科学院合肥物质科学研究院的HINEG(high intensity D-T fusion neutron generator)高压平台,目前可以为核天体物理实验在70~260 keV能量范围内提供最大5 mA的质子束流.基于此强流加速器装置,我们搭建了核天体物理实验测量平台,利用已知的 $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{19}\text{F}$ 和 $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$ 共振反应对加速器束流能量进行了刻度,通过Geant4模拟给出了束流能量的偏移量和展宽.测试结果表明,质子束流能量在151.3和222.8 keV附近的能量偏移分别为 $(0.3\pm 0.3)$ 和 $(1.7\pm 0.1)$  keV,展宽分别为 $0.97_{-0.05}^{+0.02}$ 和 $1.39_{-0.28}^{+0.12}$  keV.该结果表明,HINEG的束流满足低能核天体物理实验的要求.

**关键词** 核天体物理;共振反应;束流能量刻度;Geant4模拟

**中图分类号** O571.42

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2022163

## 0 引言

核天体物理学是利用核物理手段去研究天体物理问题的交叉学科,主要致力于研究宇宙演化进程中化学元素的合成、恒星内部的核反应以及各种天体的形成与演化机制等.核天体物理反应的研究方法主要分为2大类,即直接测量和间接测量<sup>[1]</sup>.直接测量方法尽可能在恒星温度下研究核反应过程,必要时向低能外推到天体物理感兴趣的伽莫夫窗口.恒星氢氦燃烧阶段的伽莫夫窗口一般在几到几百 keV,远小于库仑势垒,导致带电粒子诱发的反应截面非常小,直接测量难度较大<sup>[2]</sup>.因此强流加速器、高效率探测技术以及极低本底环境对一些关键核反应的直接测量至关重要.

带电粒子引发的核反应截面在低能区对束流能量非常敏感,随着能量的降低呈指数下降趋势<sup>[3]</sup>.在核天体物理实验中,随着核反应截面的降低,往往需要一定能量的束流长时间地轰击靶,这便对束流能量的长时间稳定性有较高要求.因此在实验测量时,需要事先对加速器进行能量刻度,以得到实际打到靶表面的束流能量值.

中国科学院合肥物质科学研究院 HINEG<sup>[4]</sup> 高压平台目前可以为核天体物理实验在70~260 keV能量范围内提供最大5 mA的质子束流.在本工作中,我们利用已知的 $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{19}\text{F}$ 和 $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$ 这2个共振反应对该加速器的束流能量进行了精确刻度,使用Geant4模拟给出了束流能量的偏移量和展宽.

## 1 实验原理

在共振能量为 $E_r$ 的共振反应中,反应截面满足布莱特-维格纳(Breit-Wigner)公式<sup>[5-6]</sup>:

$$\sigma_{\text{BW}}(E) = \sigma_r \frac{\Gamma^2/4}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2/4}, \quad (1)$$

式中: $\Gamma$ 是复合核共振能级的宽度; $\sigma_r$ 是共振反应截面峰的极大值.

能量为 $E_0$ 的束流轰击一定厚度的靶,其核反应产额可表示为

$$Y(E_0) = \int_{E_0 - \Delta E}^{E_0} \frac{\sigma(E)}{\varepsilon} dE, \quad (2)$$

式中: $\Delta E$ 是入射粒子在靶中所损失的能量, $\varepsilon$ 是单个

\* 国家自然科学基金资助项目(12075027)

† 通信作者:张立勇,男,副教授.研究方向:核天体物理. E-mail: liyongzhang@bnu.edu.cn

收稿日期:2022-05-10

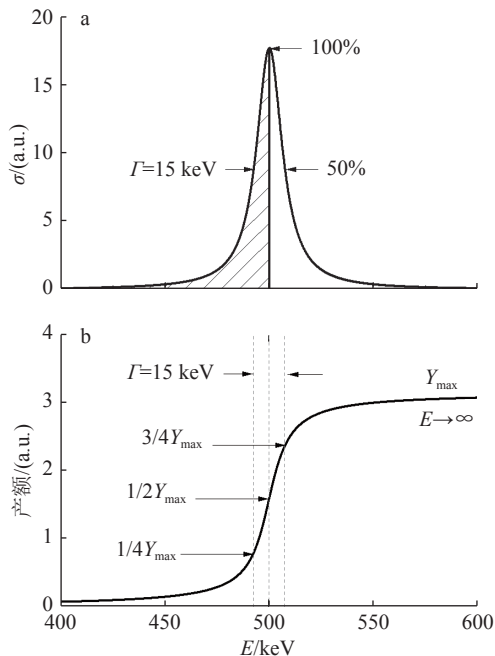
靶原子的阻止本领. 将式(1)代入式(2), 得到靶厚为  $\Delta E$  时共振反应的产额<sup>[6]</sup>

$$Y(E_0) = \frac{\Gamma\sigma_r}{2\varepsilon} \left[ \arctan\left(\frac{E_0 - E_r}{\Gamma/2}\right) - \arctan\left(\frac{E_0 - E_r - \Delta E}{\Gamma/2}\right) \right]. \quad (3)$$

对于足够厚的靶, 即束流能量在靶内能全部损失时, 产额可表示为

$$Y_{\Delta E \rightarrow \infty}(E_0) = \frac{\Gamma\sigma_r}{2\varepsilon} \left[ \arctan\left(\frac{E_0 - E_r}{\Gamma/2}\right) + \frac{\pi}{2} \right]. \quad (4)$$

如图 1 所示, 当束流能量  $E_0 = E_r$  时, 入射粒子在厚靶中损失全部能量, 恰好覆盖一半的共振峰, 此时产额为最大产额的 1/2, 即  $Y_{\max}/2$ . 也就是说,  $Y_{\max}/2$  处所对应的能量即为共振能量  $E_r$ . 共振宽度  $\Gamma$  则为从  $Y_{\max}/4 \sim 3Y_{\max}/4$  所对应的能量之差.



假设共振能量  $E_r = 500$  keV, 宽度  $\Gamma = 15$  keV<sup>[5]</sup>.

图 1 Breit-Wigner 截面(a), 基于该共振反应计算的厚靶的产额曲线(b)

上述讨论仅考虑了共振能级的宽度  $\Gamma$  以及靶厚对产额曲线的影响. 实际测量中, 由于加速器提供的束流能量并不是单一值, 而是有一定的展宽, 真实的产额曲线与上述理想情况有偏差<sup>[7]</sup>. 根据实测的产额曲线直接计算出束流能量比较困难, 一般通过蒙特卡罗模拟来确定束流能量的展宽和偏移<sup>[8]</sup>.

## 2 实验部分

实验装置如图 2 所示: 束流通过 2 个准直孔和液氮冷阱后轰击水冷靶; 液氮冷阱尽量靠近靶表面, 以

减少碳沉积; 铜管上施加 -300 V 抑制电压, 用来抑制束流在靶上轰击出的次级电子; 实验中使用了 1 块厚约 2  $\mu\text{m}$  的  $\text{Ti}^{18}\text{O}_x$  同位素靶<sup>[9-10]</sup>(铜衬底)和 1 块 1.8 mm 厚的纯 Al 靶, 束流在 2 块靶的能损均远大于反应共振宽度, 可以当作无限厚靶处理; 1 个 6 cm  $\times$  6 cm  $\times$  12 cm 的 BGO 探测器置于水冷靶的正后方, 用来测量反应产生的  $\gamma$  射线.

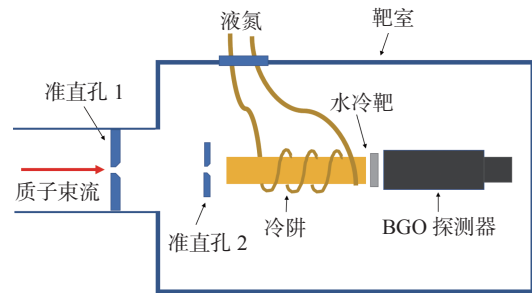
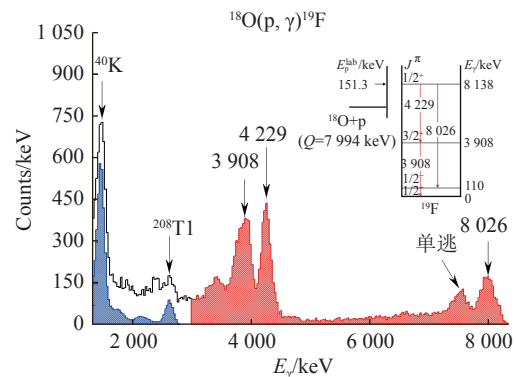


图 2 实验装置示意

对于  $^{18}\text{O}$  靶, 实验测得的  $\gamma$  射线能谱如图 3 所示, 其中纵坐标计数对时间进行了归一化. 在  $E_{\text{lab}, p} = 149 \sim 153.5$  keV 区间以 0.2~0.3 keV 的步长选取了 10 个能量点, 测量  $^{18}\text{O}(p, \gamma)^{19}\text{F}$  反应  $E_{\text{lab}, r} = 151.3$  keV<sup>[11]</sup> 共振的产额曲线, 平均质子电流 0.25 mA. 该反应发射的 3 条主要  $\gamma$  射线能量分别为 8 026、4 229、3 908 keV<sup>[12]</sup>. 考虑到这些特征峰的康普顿平台和逃逸峰, 计算产额时选取的能量区间为 3 000~8 400 keV(图 3 红色区域).

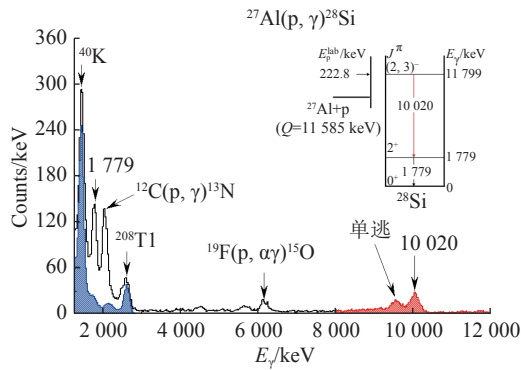


束流能量  $E_{\text{lab}, p} = 152.5$  keV; 蓝色区域为  $\gamma$  射线天然本底, 红色为计算产额时选取的能区.

图 3  $^{18}\text{O}(p, \gamma)^{19}\text{F}$  反应的  $\gamma$  射线能谱

对于  $^{27}\text{Al}$  靶, 实验测得的  $\gamma$  射线能谱如图 4 所示. 我们在  $E_{\text{lab}, p} = 220 \sim 227$  keV 区间以 0.5 keV 的步长选取了 11 个能量点, 测量  $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$  反应  $E_{\text{lab}, r} = 222.8$  keV<sup>[13]</sup> 共振的产额曲线, 平均质子电流 0.5 mA. 该反应发射的 2 条主要  $\gamma$  射线能量分别为 1 779 和 10 020 keV<sup>[14]</sup>. 为降低天然本底以及  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应产生的  $\gamma$  射线的干扰<sup>[15]</sup>, 计算产额时选取的能量区间为 8 000~12 000 keV(图 4 红色区域).

实验中还测量了 40 min 的天然本底, 对每个能量



束流能量  $E_{\text{lab}, p} = 226 \text{ keV}$ ; 蓝色区域为  $\gamma$  射线天然本底, 红色为计算产额时选取的能区.

图 4  $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$  反应的  $\gamma$  射线能谱

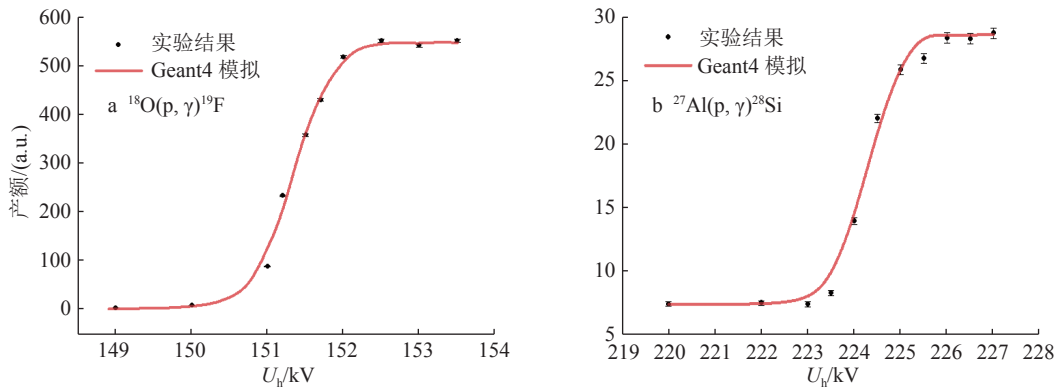


图 5 Geant4 模拟结果与实验结果对比

表 1 Geant4 模拟得到的偏移量和束流能量展宽

反应	$E_{\text{lab}, r}/\text{keV}$	$\Gamma/\text{eV}$	$\Delta E_{\text{shift}}/\text{keV}$	$\Delta E_b/\text{keV}$
$^{18}\text{O}(p, \gamma)^{19}\text{F}$	$151.3 \pm 0.3^{[11]}$	$130^{[17]}$	$0.3 \pm 0.3$	$0.97_{-0.05}^{+0.02}$
$^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$	$222.8 \pm 0.1^{[13]}$	$34^{[13]}$	$1.7 \pm 0.1$	$1.39_{-0.28}^{+0.12}$

注:  $\Gamma$ 取文献中的上限值.

模拟结果表明: 在 151.3 和 222.8 keV 附近, 束流的能量展宽  $\Delta E_b$  分别为  $0.97_{-0.05}^{+0.02}$  和  $1.39_{-0.28}^{+0.12}$  keV; 能量偏移  $\Delta E_{\text{shift}}$  分别为  $(0.3 \pm 0.3)$  和  $(1.7 \pm 0.1)$  keV. 以上结果与其他同类型加速器的性能参数基本一致, 如兰州 320 kV 高压平台, 在质子束流能量为 224 keV 时, 束流的能量展宽约为 1.0 keV, 能量偏移约 1.4 keV<sup>[7]</sup>.

### 3 结论与展望

本工作对中科院合肥物质科学研究所的 HINEG 平台质子束流进行了能量刻度. 实验分别测量了  $^{18}\text{O}(p, \gamma)^{19}\text{F}$  和  $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$  反应在 151.3 和 222.8 keV 共振附近的  $\gamma$  射线产额曲线; 通过对产额曲线进行 Geant4 模拟, 我们给出该平台在束流能量为 151.3 和 222.8 keV 附近时的能量展宽分别为  $0.97_{-0.05}^{+0.02}$  和  $1.39_{-0.28}^{+0.12}$  keV; 能量偏移分别为  $(0.3 \pm 0.3)$  和  $(1.7 \pm 0.1)$  keV. 该结

点的  $\gamma$  射线能谱扣除天然本底后, 得到其总计数, 绘出实验所得产额曲线, 如图 5 中黑色数据点所示, 其中误差棒代表统计误差, 红线代表蒙特卡罗模拟结果. 本文蒙特卡罗模拟采用了 Geant4 程序<sup>[16]</sup>, 模拟中可调参数包含靶成分、束流能量展宽  $\Delta E_b$  和能量偏移  $\Delta E_{\text{shift}}$ , 束流在靶中能量沉积步长设置为 1 nm. 模拟计算中的截面由式(1)给出, 共振能量  $E_{\text{lab}, r}$  和宽度  $\Gamma$  如表 1 所示. 束流能量的高斯展宽  $\Delta E_b$  和偏移量  $\Delta E_{\text{shift}} = E_{\text{HV}} - E_{\text{true}}$  ( $E_{\text{HV}}$  为高压平台所给出的束流能量,  $E_{\text{true}}$  为实际打到靶表面的束流能量) 为模拟时使用的拟合参数(表 1).

果表明, HINEG 高压平台满足核天体物理实验的要求. 下一步实验计划使用更多已知的共振反应, 如  $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$ 、 $^{24}\text{Mg}(p, \gamma)^{25}\text{Al}$  对更多能量点进行刻度, 并对加速器长时间运行稳定性做进一步探究.

### 4 参考文献

- [1] 何建军, 周小红, 张玉虎. 核天体物理实验研究[J]. 物理, 2013, 42(7): 484
- [2] 郭冰, 柳卫平, 唐晓东, 等. 基于HIAF的核天体物理研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(11): 95
- [3] Rolfs C E, Rodney W S, Rodney W S. Cauldrons in the cosmos: nuclear astrophysics[M]. Chicago: University of Chicago press, 1988
- [4] WU Y C, LIU C, SONG G, et al. Development of high intensity D-T fusion neutron generator (HINEG)[J]. EPJ Web of Conferences, 2017, 153: 03006
- [5] ILIADIS C. Nuclear Physics of Stars[M]. Weinheim: Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015
- [6] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1981-1982
- [7] WANG S, LI K A, XU S W, et al. Measurement of the proton beam characteristics of low-energy accelerators[J]. Nuclear Physics Review, 2017, 34(3): 454

- [8] FORMICOLA A, IMBRIANI G, JUNKER M, et al. The LUNA II 400 kV accelerator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 507(3): 609
- [9] WANG L H, SHEN Y P, SU J, et al. Development of irradiation-resistant enriched  $^{12}\text{C}$  targets for astrophysical  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  reaction measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2022, 512: 49
- [10] 郭春刚, 张梦迪, 英敏菊. 氧气流量对于磁过滤阴极真空弧法制备  $\text{ZrO}_2$  薄膜特性的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 47
- [11] BEST A, PANTALEO F R, BOELTZIG A, et al. Cross section of the reaction  $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{19}\text{F}$  at astrophysical energies: the 90 keV resonance and the direct capture component[J]. Physics Letters B, 2019, 797: 134900
- [12] VOGELAAR R B, WANG T R, KELLOGG S E, et al. Low-energy reaction yields for  $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)$  and  $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)$ [J]. Physical Review C, 1990, 42(2): 753
- [13] UHRMACHER M, PAMPUS K, BERGMEISTER F J, et al. Energy calibration of the 500 kV heavy ion implanter ionas[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1985, 9(2): 234
- [14] ILIADIS C, SCHANGE T, ROLFS C, et al. Low-energy resonances in  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{27}\text{Al}$  and  $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$ [J]. Nuclear Physics A, 1990, 512(3): 509
- [15] ZHANG L Y, SU J, HE J J, et al. Direct measurement of the astrophysical  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  reaction in the deepest operational underground laboratory[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(15): 152702
- [16] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4: a simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3): 250
- [17] BECKERH W, BAHR M, BERHEIDE M, et al. Hydrogen depth profiling using  $^{18}\text{O}$  ions[J]. Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 1995, 351(4): 453

## Energy calibration of low energy proton beam with $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{19}\text{F}$ and $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$ resonant reactions

CHEN Xin<sup>1)</sup> SU Jun<sup>1)</sup> ZHANG Hao<sup>1)</sup> CHEN Yinji<sup>1)</sup> SONG Luyang<sup>1)</sup> HU Jun<sup>2)</sup>  
TIAN Ning<sup>2)</sup> CHEN Size<sup>3)</sup> ZHANG Liyong<sup>1)</sup> HE Jianjun<sup>1)</sup>

(1) Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Institute of Radiation Technology, Beijing Academy of Science and Technology, 100875, Beijing, China;

2) Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 730000, Lanzhou, Gansu, China;

3) Institute of Nuclear Energy Safety Technology of Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, 230031, Hefei, Anhui, China)

**Abstract** Low energy, high current proton accelerators, which can run stably for a long period, are crucial for low-energy nuclear astrophysical experiments. The HINEG (high intensity D-T fusion neutron generator) high-voltage platform at Hefei Institute of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, can provide a proton beam up to 5 mA in the energy range of 70-260 keV. This high current accelerator was used to build a low-energy nuclear astrophysical platform. The beam energy was calibrated with  $^{18}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{19}\text{F}$  and  $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$  resonant reactions. Data were analyzed by Geant4 simulation. Simulations showed that for proton beams of 151.3 and 222.8 keV, energy spread was  $0.97_{-0.05}^{+0.02}$  and  $1.39_{-0.28}^{+0.12}$  keV, energy shift was  $(0.3 \pm 0.3)$  and  $(1.7 \pm 0.1)$  keV respectively. The HINEG platform satisfies requirements for nuclear astrophysics studies.

**Keywords** nuclear astrophysics; resonance reaction; beam energy calibration; Geant4 simulation

【责任编辑: 刘先勤】