

# 锦屏深地核天体实验探究 AGB 星 氟超丰问题

陈银吉<sup>1</sup> 张立勇<sup>1,2</sup>

1(北京师范大学核科学与技术学院 教育部离子束技术重点实验室 北京 100875)

2(北京市科学技术研究院 辐射技术研究所 北京 100875)

**摘要** 氟是核天体物理学中最感兴趣的元素之一。长期以来,渐近巨星分支(Asymptotic Giant Branch, AGB)中的氟超丰问题一直难以用天体物理标准模型来解释。基于锦屏深地核天体物理实验装置(Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics, JUNA),利用强流加速器和高效的 $4\pi$  BGO探测器直接测量了 AGB 星中氟破坏反应 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 。将 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反应的测量推进到有史以来最低的72.4 keV,测量结果覆盖了整个天体物理感兴趣的伽莫夫能区,与之前的理论外推差异很大,且不确定度得到了极大降低,为天体物理模型计算提供了可靠的核物理输入量。

**关键词** 锦屏深地核天体物理, 氟超丰, 核反应, 天体物理S因子

**中图分类号** TL8

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110501

## Examining the fluorine overabundance problem by conducting Jinping deep underground experiment

CHEN Yinji<sup>1</sup> ZHANG Liyong<sup>1,2</sup>

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

2(Institute of Radiation Technology, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100875, China)

**Abstract** [Background] Nuclear reactions have been crucial in the evolution of the universe since the big bang. The cross section of nuclear reaction that occurs during the early evolution of the star is extremely low, so it cannot be accurately measured in a ground laboratory. The China Jinping Underground Laboratory (CJPL), which is the deepest operational underground laboratory in the world, offers unique ultra-low background conditions that facilitate the direct evaluation of the nuclear reactions occurring during the early evolution of stars. [Purpose] Asymptotic giant branch (AGB) stars are thought to be the major contributor to Galactic fluorine production. However, the astronomical fluorine overabundance cannot be explained by using the current standard AGB models. Direct measurements of  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  reactions can help solve this problem. [Methods] Experiments were conducted on a high-current 400-kV JUNA (Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics) accelerator at the CJPL. A  $4\pi$  BGO detector array was specially designed for the JUNA project. [Results] The astrophysical  $S$  factors in the energy region of 72.4~188.8 keV were experimentally derived for the first time, covering the astrophysical Gamow window.

国家自然科学基金(No.12075027, No.11490562)资助

第一作者: 陈银吉, 男, 1996年出生, 2014年毕业于北京航空航天大学, 现为博士研究生, 研究领域为核天体物理

通信作者: 张立勇, E-mail: liyongzhang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2023-08-28, 修回日期: 2023-09-28

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12075027, No.11490562)

First author: CHEN Yinji, male, born in 1996, graduated from Beihang University in 2014, doctoral student, focusing on nuclear astrophysics

Corresponding author: ZHANG Liyong, E-mail: liyongzhang@bnu.edu.cn

Received date: 2023-08-28, revised date: 2023-09-28

The thermonuclear  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  rate was determined at a low temperature of about 0.05 GK for astrophysical modeling. The present low-energy  $S$  factors significantly deviated from previous theoretical predictions, and the associated uncertainties were considerably reduced.

**Key words** Jinping underground nuclear astrophysics, Fluorine overabundance, Nuclear reaction, Astrophysical  $S$  factor

现有的理论模型认为宇宙起源于约 138 亿年前的一次剧烈大爆炸。在宇宙大爆炸之初,宇宙中只存在  $^1\text{H}$  和  $^4\text{He}$  等原初较轻的核素,在经过漫长的天体演化后逐渐形成了现在太阳系中丰富多样的元素组成(包括铀和钍等的重元素)。核过程在大爆炸后宇宙的演化过程中起着极为重要的作用:核反应是合成宇宙中除氢以外所有化学元素的唯一机制,也是恒星抗衡引力收缩、产生新星、X 射线暴以及超新星等爆发性天体现象的能量来源。因此,探索宇宙的奥秘就必然要借助核物理的知识和规律。在这个过程中,研究微观世界的核物理与研究宇观世界的天体物理自然融合,形成了一门前沿交叉学科——核天体物理。核天体物理的主要研究目标是应用核物理的知识和规律来阐释:1)宇宙中元素的起源及演化;2)恒星能量的产生与核合成过程;3)产生各种天体物理现象的机制等问题。它扮演的主要角色是提供天体物理模型所需要的关键核物理输入量。在天体核合成模型中,核反应截面(或者天体物理  $S$  因子)是最关键的核物理输入量之一<sup>[1]</sup>。在恒星的早期演化过程中,其内部发生的主要核过程是平稳的静态核燃烧(如氢燃烧、氦燃烧、碳燃烧等),所在的天体环境大都是相对低温、低密度的,因此天体物理感兴趣的伽莫夫能区约为几十到几百 keV,远远低于库仑位垒(大约 MeV 量级),故而核反应截面极小。随着能量降低,这些核反应的截面几乎呈指数趋势下降,在伽莫夫峰附近甚至只有皮巴(pb)或飞巴(fb)。在地面实验室条件下,宇宙射线引起的本底太大(信噪比太差),因此无法对这些反应的截面进行精确测量。利用在 高能区测量的截面数据外推出低能区的反应截面是一种替代方法,然而这种外推常常会造成很大的误差,很多时候并不可靠。在这种情况下,深地实验室成为了必然选择。中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL)<sup>[2-3]</sup>是目前世界上正在运行的最深的核物理和粒子物理实验室,它的岩石深度达 2 400 m,等效水深达 6 000 m。与地球表面相比,它的天然本底中  $\mu$  子和中子通量分别减少了 6 和 4 个数量级<sup>[4]</sup>。在如此独特的超低本底条件下,锦屏深地核天体物理实验(Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics, JUNA)项目<sup>[5-7]</sup>于 2015 年启

动,其中一个子课题<sup>[8]</sup>就是通过直接测量伽莫夫能区下的  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应来探究 AGB 星(Asymptotic Giant Branch star)中的氟超丰问题。

氟是天体物理中最重要的元素之一。作为唯一稳定的氟同位素, $^{19}\text{F}$  的丰度对恒星内部的物理条件非常敏感。因此,人们常用氟作为探针来研究恒星核合成的图像。人们通过天文观测发现:众多红巨星的氟元素丰度比太阳系的都要大,S 类红巨星氟丰度比太阳系大 2~10 倍,N 类红巨星氟丰度更大,超过了 30 倍,WZ Cas 类甚至接近 100 倍<sup>[8-9]</sup>。而作为银河系中氟元素丰度最主要的贡献者——AGB 星,现有的标准恒星模型却难以解释这一现象,这就是天体物理中的氟超丰问题<sup>[10]</sup>。要解决这一难题,除了对现有的恒星理论模型加以改进之外,还需要从核物理的角度对所有与氟的产生及破坏相关的核反应截面进行精确的实验测量。

AGB 星中的深度混合现象能够改变恒星外层的同位素构成<sup>[10]</sup>。在这种天体环境下, $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  反应代表了氟的主要破坏反应道,已有的实验结果表明,AGB 星中的氟丰度对  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  的反应率十分敏感,当该反应的反应率变化约两倍时, $^{19}\text{F}$  的表面丰度变化高达 50%<sup>[11]</sup>。另外,在贫氢的后 AGB 星(post-AGB star)演化阶段研究表明,氢元素混合在扭转过度氢燃烧以及合理解释观测丰度方面扮演着重要角色。在这个核合成过程中, $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  是同时去除氢和氟元素的重要反应。除此之外,该反应也在恒星热碳氮氧循环(Hot CNO Cycle, HCNO)过程中扮演着非常重要的角色: $^{19}\text{F}$  既可通过  $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$  反应进入 NeNa 循环,亦可通过  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  反应重新进入 HCNO 循环。因此, $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  与  $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$  两个反应间的竞争将决定核素合成、演化的进程,而这种竞争的胜负取决于两个反应的反应截面大小以及恒星内部的物理条件(温度和密度等)。同时, $(\text{p}, \gamma)/(\text{p}, \alpha)$  比率可以提供一个非常有用的工具来诊断宇宙中第一颗恒星是如何演化和死亡的,并且对恒星建模具有深远的影响。因此,准确测定  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  与  $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$  两个反应在 0.1 GK 左右的反应率和反应截面,对于解释氟元素丰度、确定 Pop III 恒星的钙来源以及验证恒星演化模型有着极为重要的意义<sup>[12]</sup>。

$^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  反应有三个反应道, 即  $(\text{p}, \alpha_0)$ 、 $(\text{p}, \alpha_n)$  和  $(\text{p}, \alpha\gamma)$ , 如图 1 所示<sup>[13]</sup>; 其中二阶跃迁可以忽略<sup>[14]</sup>。 $(\text{p}, \alpha_n)$  反应道在 0.05 GK 的低温下对反应率的贡献少于 10%<sup>[15-16]</sup>, 因此, 该反应道的贡献基本上可以忽略不计; 温度高于 0.2 GK 时,  $(\text{p}, \alpha\gamma)$  反应道占主导地位, 而温度在低于 0.15 GK 时,  $(\text{p}, \alpha_0)$  反应道则占据主导地位<sup>[13, 15]</sup>。然而, 最近的研究表明, 在温度低于 0.05 GK 时, 由于  $E_{\text{c.m.}} = 11 \text{ keV}$  和 323 keV 共振之间的干涉效应,  $(\text{p}, \alpha\gamma)$  反应率可能显著提高, 从而在总反应率中占据主导地位<sup>[17-18]</sup>。这些新的理论推测都需要进一步精确测量来验证。目前, 人们已经在地面实验室对  $(\text{p}, \alpha\gamma)$  和  $(\text{p}, \alpha_0)$  反应道进行了测量, 然而受宇宙射线的本底影响, 在低能区 (比如 70 keV), 外推反应截面的不确定度仍然高达 5 个数量级<sup>[13, 19-20]</sup>。因此, 在中国锦屏地下实验室, 我们针对  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应道进行了精确的直接测量<sup>[21-22]</sup>。

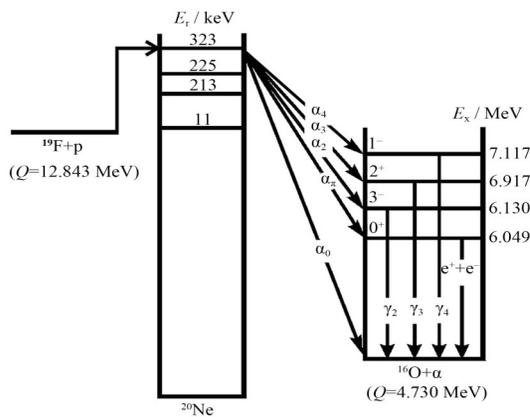


图 1  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  反应的能级纲图<sup>[13]</sup>

Fig.1 Level scheme of the  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  reaction<sup>[13]</sup>

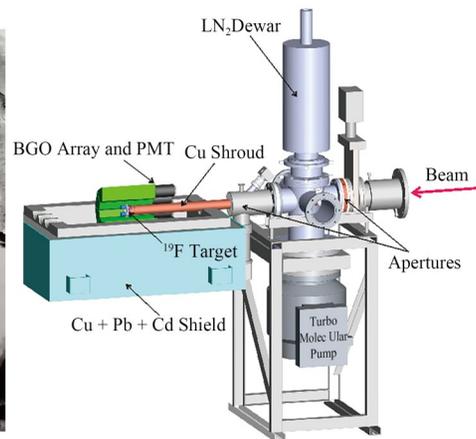


图 2 (a) JUNA 实验室艺术图, (b) 实验终端设置的三维图像<sup>[22]</sup>

Fig.2 (a) Artistic representation of the JUNA laboratory, (b) 3D image of the experimental setup<sup>[22]</sup>

## 1 实验设置

本实验在 JUNA 的 400 kV 强流加速器上完成, 图 2 是 JUNA 实验室的艺术图以及实验终端的具体设置情况。一根内置铜管延伸至靶表面并被冷却至液氮温度 ( $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 用来吸附终端及束流中的碳离子, 以减少靶表面的碳沉积。铜管和靶上的束流电荷均被收集, 共同构成一个法拉第筒。使用的靶是特殊制作的表面镀铬膜的氟注入靶, 利用  $500 \mu\text{A}$  质子束流轰击 2 d, 约为 109 C, 靶损失仅为 5% 左右, 可以满足实验的需求<sup>[23]</sup>。在最终的锦屏实验实际测量中, 我们用更高流强, 2 mA 质子束轰击 2 d, 在 270 C 的条件下靶的损失大约仅为 7%。我们研制的氟注入靶是目前国际上最耐强质子辐照的薄靶, 为未来开展氟相关实验奠定了坚实的基础。

探测  $\gamma$  射线使用的是专门为 JUNA 实验设计研制的  $4\pi$  BGO 探测器阵列, 该探测器阵列在之前的文献中已有详细介绍<sup>[21-22, 24]</sup>, 至此不再赘述。该 BGO 阵列对于 6 130 keV  $\gamma$  射线的绝对探测效率可达 58%, 能量分辨可达 11%。为了抑制岩石和中子俘获反应产生的天然本底, 该 BGO 阵列使用了厚度分别为 5 mm、100 mm、1 mm 的铜、铅和镉屏蔽 (图 2)。除此之外, 向阵列内部持续注入氮气, 保证终端内部空间不存在氦系放射性, 同时也可以避免水蒸气因温差在 BGO 晶体上凝聚。

## 2 实验结果

在  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  的实验测量中, 反应截面最低测量到质子能量  $E_p=88\text{ keV}$  (即质心系能量  $E_{\text{c.m.}} \approx 72.4\text{ keV}$ )。因为该反应道在此低能点截面极小, 所以本实验测量到的  $6\ 130\text{ keV}$   $\gamma$  射线峰计数很少。在这种情况下, 氘( $^2\text{H}$ )所引入的  $\gamma$  射线本底会严重影响反应产额的计算, 见图 3。我们推测,  $^2\text{H}$  污染可能是冷却铜管上因温差结冰且被束流辐照所致<sup>[22]</sup>。由于  $^2\text{H}$  引入的本底对低能点实验测量结果影响很

大且束流时间有限, 因此在约  $1\text{ mA}$  的束流强度下对该能量点持续测量约  $2\text{ d}$ , 获得了  $30 \pm 26$  的总净计数(不确定度约为  $80\%$ )。因此,  $E_{\text{c.m.}} \approx 72.4\text{ keV}$  可以看作当前 JUNA 实验终端条件下可以测量到的“能量下限”。对于未来更精确测量, 必须想办法减少  $^2\text{H}$  对测量的影响。此外, 使用纯 Fe 靶(覆盖有  $50\text{ nm}$  厚的 Cr 层)对束流本底做了精确测量(图 3), 从而可以进行本底扣除。整个实验过程中通过监测  $E_{\text{c.m.}} = 323\text{ keV}$  共振处  $6\ 130\text{ keV}$   $\gamma$  射线的产额, 可以实现对  $^{19}\text{F}$  靶损失情况的实时监测<sup>[22]</sup>。

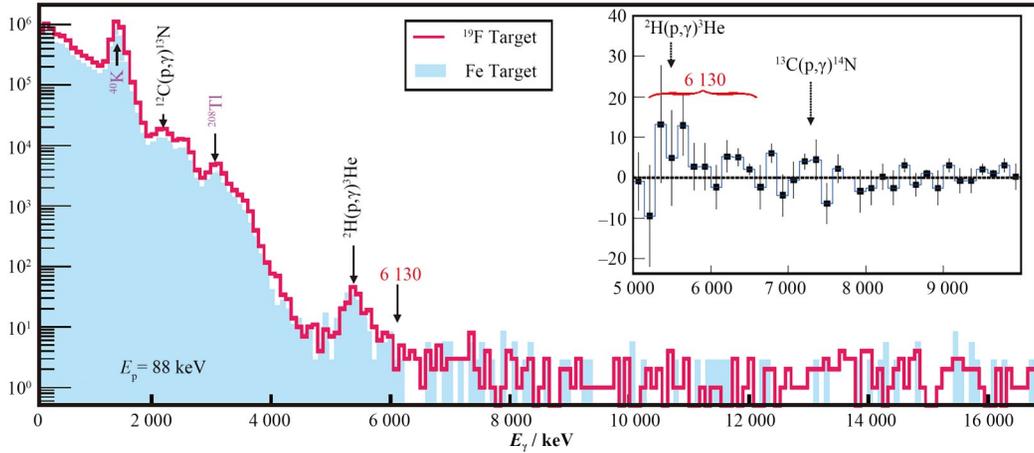


图 3 在锦屏地下利用  $4\pi$  BGO 阵列测量到的  $E_{\text{c.m.}}=72.4\text{ keV}$  时的  $\gamma$  射线能谱<sup>[21]</sup>  
 Fig.3  $\gamma$ -ray spectrum of the  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  reaction recorded at JUNA with a  $4\pi$  BGO array at  $E_{\text{c.m.}}=72.4\text{ keV}$ <sup>[21]</sup>

通过复杂的  $R$ -矩阵分析得到了 JUNA 测量的  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  天体物理  $S$  因子(图 4)。可以看出, 我们的测量结果覆盖了整个天体物理感兴趣的伽莫夫窗口。根据图 4 中通过  $R$ -矩阵分析得到的三条  $S$  因子曲线, 我们计算出了三个反应率。其中, 三个反应率中的最大值和最小值分别作为上下限, 最大值和最小值的平均值作为推荐使用的中间值。通过这种方式, 我们在  $0.005\sim 1\text{ GK}$  的温度范围内得到了当前的平均反应率和相应的不确定度。图 5 显示了我们 JUNA 实验的反应率和之前反应率之间的对比, 可以清楚地看到, 本次实验确定了迄今为止  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应最精确的反应率。目前, 在温度低至  $0.05\text{ GK}$  时, JUNA 的实验数据仍然能够为  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应率提供极大的约束, 为解释 AGB 星氟超丰问题提供了可靠的核物理输入量。

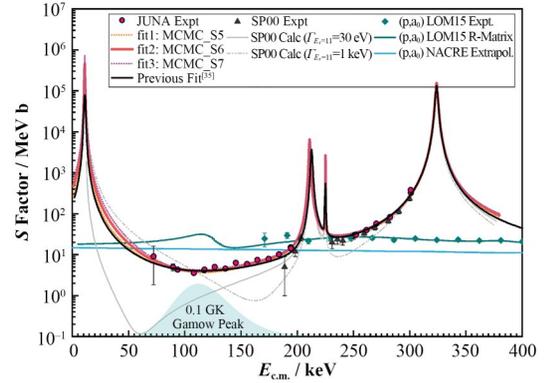


图 4 JUNA 实验测量  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应的天体物理  $S$  因子 其中包括了  $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$  反应道的数据和理论预言曲线<sup>[22]</sup>  
 Fig.4 Astrophysical  $S$  factors of the  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  reaction measured at JUNA. The existing experimental data and predicted curve for the  $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$  channel are also shown for comparison<sup>[22]</sup>

对于  $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$  反应道, 图 4 显示了 Lombardo 等<sup>[20]</sup> 的实验数据和  $R$ -矩阵计算结果, 以及 NACRE 简单外推的结果<sup>[25]</sup>。由图 4 可知, 在  $50\sim 200\text{ keV}$  的能量区间,  $(p, \alpha_0)$  反应道的贡献要明显高于  $(p, \alpha\gamma)$  的, 这意味着在相关温度范围内,  $(p, \alpha_0)$  反应道的反应率要明显高于  $(p, \alpha\gamma)$  反应率。因此, 目前 JUNA 的实验结果表明, 在  $0.03\sim 0.12\text{ GK}$  的温度范围内,

$(p, \alpha_0)$  反应道主导着总的  $(p, \alpha)$  反应率。

## 3 结语

我们利用锦屏深地实验室的极低环境本底和 JUNA 加速器的高强度束流以及特殊研制的氟注入靶将  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  反应的实验测量结果推进到国际

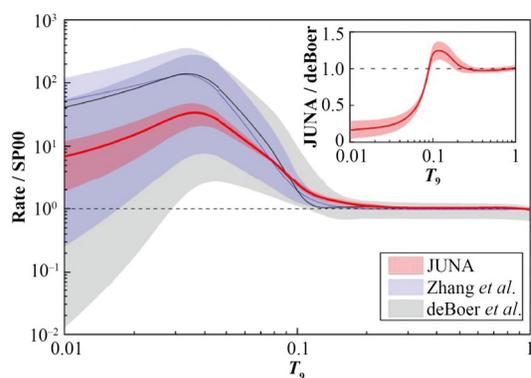


图5 JUNA 反应率与以前工作结果<sup>[17-19]</sup>的比较<sup>[21]</sup>

Fig.5 Ratio of present (labeled as JUNA) relative to Spyrou *et al.*'s rate (labeled as SP00<sup>[19]</sup>). The corresponding ratios for deBoer *et al.*'s rate<sup>[17]</sup> and Zhang *et al.*'s rate<sup>[18]</sup> are also shown for comparison<sup>[21]</sup>

最低能区  $E_{\text{cm}} \approx 72.4 \sim 344$  keV。通过  $R$ -矩阵分析拟合得到了天体物理  $S$  因子。在天体物理感兴趣的温度范围 (0.05~1 GK) 内, 基于 JUNA 实验数据确定了  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  的反应率, 对完善已有的天体物理模型具有重要意义。此外, 该实验结果揭示了在 0.03~0.12 GK 的温度范围内,  $(p, \alpha_0)$  反应道将主导总的  $(p, \alpha)$  反应率。但是, 由于在约 180 keV 以下能区, 目前尚无  $(p, \alpha_0)$  反应道的实验数据。因此, 我们计划在 70~240 keV 能区对  $(p, \alpha_0)$  反应道进行直接测量, 以最终确定 AGB 能区感兴趣的  $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$  反应的总反应率, 从而为理解 AGB 星的氟超丰问题等提供可靠的核物理输入量。同时, 这对验证先前的理论预言、约束核物理模型具有重要意义。

致谢 感谢锦屏深地核天体物理实验 (JUNA) 团队。

作者贡献声明 陈银吉负责共同完成实验、部分数据分析、撰写文章; 张立勇负责设计实验, 领导团队成员完成实验、数据分析, 对文章的知识性内容作批评性审阅和指导。

## 参考文献

- He J J, Guo B, Liu W P, *et al.* How were the heavy chemical elements beyond iron made in the Universe?[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(24): 2429 - 2439. DOI: 10.1360/n972017-01368.
- Kang K J, Cheng J P, Chen Y H, *et al.* Status and prospects of a deep underground laboratory in China[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, **203**: 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/203/1/012028.
- 王钰锋, 刘家璇, 杨丽桃, 等. 中国锦屏地下实验室与稀有物理实验 [J]. 核技术, 2023, **46**(8): 080018. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080018.
- WANG Yufeng, LIU Jiakuan, YANG Litao, *et al.* Rare physical events at China Jinping underground laboratory [J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(8): 080018. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080018.
- Wu Y C, Hao X Q, Yue Q A, *et al.* Measurement of cosmic ray flux in the China JinPing underground laboratory[J]. Chinese Physics C, 2013, **37**(8): 086001. DOI: 10.1088/1674-1137/37/8/086001.
- Liu W P, Li Z H, He J J, *et al.* Progress of Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics (JUNA) [J]. Science China - Physics Mechanics & Astronomy, 2016, **59**: 642001. DOI: 10.1007/s11433-016-5785-9.
- Toshitaka Kajino. Underground laboratory JUNA shedding light on stellar nucleosynthesis[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(3): 42. DOI: 10.1007/s41365-023-01196-1.
- Chen C, Li Y J, Zhang H, *et al.* Preparation of large-area isotopic magnesium targets for the  $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$  experiment at JUNA[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(9): 91. DOI: 10.1007/s41365-020-00800-y.
- He J J, Xu S W, Ma S B, *et al.* A proposed direct measurement of cross section at Gamow window for key reaction  $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$  in Asymptotic Giant Branch stars with a planned accelerator in CJPL[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2016, **59**(5): 652001. DOI: 10.1007/s11433-016-5797-5.
- Jorissen A, Smith V, Lambert D. Fluorine in red giant stars: evidence for nucleosynthesis[J]. Astronomy and Astrophysics, 1992, **261**: 164 - 187.
- Lugaro M, Ugalde C, Karakas A I, *et al.* Reaction rate uncertainties and the production of  $^{19}\text{F}$  in asymptotic giant branch stars[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2004, **615**(2): 934 - 946. DOI: 10.1086/424559.
- Palmerini S, D'Agata G, La Cognata M, *et al.*  $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$  and  $^{19}\text{F}(\alpha, p)^{22}\text{Ne}$  reaction rate measured via THM and fluorine nucleosynthesis in AGB stars[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, **1308**: 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1308/1/012016.
- Clarkson O, Herwig F. Convective H-He interactions in massive population III stellar evolution models[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, **500**(2): 2685 - 2703. DOI: 10.1093/mnras/staa3328.
- He J J, Lombardo I, Dell'Aquila D, *et al.* Thermonuclear  $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$  reaction rate[J]. Chinese Physics C, 2018, **42** (1): 015001. DOI: 10.1088/1674-1137/42/1/015001.
- Watson B A, Bardin T T, Becker J A, *et al.* Two-photon

- decay of the 6.05-MeV state of  $^{16}\text{O}$ [J]. *Physical Review Letters*, 1975, **35**(20): 1333 - 1336. DOI: [10.1103/physrevlett.35.1333](https://doi.org/10.1103/physrevlett.35.1333).
- 15 Indelicato I, La Cognata M, Spitaleri C, *et al.* New improved indirect measurement of the  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$  reaction at energies of astrophysical relevance[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, **845**(1): 19. DOI: [10.3847/1538-4357/aa7de7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7de7).
- 16 Lombardo I, Dell'Aquila D, He J J, *et al.* New analysis of  $p+^{19}\text{F}$  reactions at low energies and the spectroscopy of natural-parity states in  $^{20}\text{Ne}$ [J]. *Physical Review C*, 2019, **100**(4): 044307. DOI: [10.1103/physrevc.100.044307](https://doi.org/10.1103/physrevc.100.044307).
- 17 de Boer R J, Clarkson O, Couture A J, *et al.*  $^{19}\text{F}(p,\gamma)^{20}\text{Ne}$  and  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$  reaction rates and their effect on calcium production in Population III stars from hot CNO breakout [J]. *Physical Review C*, 2021, **103**(5): 055815. DOI: [10.1103/physrevc.103.055815](https://doi.org/10.1103/physrevc.103.055815).
- 18 Zhang L Y, López A Y, Lugaro M, *et al.* Thermonuclear  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$  reaction rate revised and astrophysical implications[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **913**(1): 51. DOI: [10.3847/1538-4357/abef63](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abef63).
- 19 Spyrou K, Chronidou C, Harissopulos S, *et al.* Cross section and resonance strength measurements of  $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$  at  $E_p=200\text{-}800$  keV[J]. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 2000, **7**(1): 79 - 85. DOI: [10.1007/s100500050014](https://doi.org/10.1007/s100500050014).
- 20 Lombardo I, Dell'Aquila D, Di Leva A, *et al.* Toward a reassessment of the  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$  reaction rate at astrophysical temperatures[J]. *Physics Letters B*, 2015, **748**: 178 - 182. DOI: [10.1016/j.physletb.2015.06.073](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.06.073).
- 21 Zhang L Y, Su J, He J J, *et al.* Direct measurement of the astrophysical  $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$  reaction in the deepest operational underground laboratory[J]. *Physical Review Letters*, 2021, **127**: 152702. DOI: [10.1103/PhysRevLett.127.152702](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.152702).
- 22 Zhang L Y, Su J, He J J, *et al.* Direct measurement of the astrophysical reaction in a deep-underground laboratory [J]. *Physical Review C*, 2022, **106**: 055803. DOI: [10.1103/PhysRevC.106.055803](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.106.055803).
- 23 Zhang L Y, Chen Y J, He J J, *et al.* Strong and durable fluorine-implanted targets developed for deep underground nuclear astrophysical experiments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 2021, **496**: 9 - 15. DOI: [10.1016/j.nimb.2021.03.017](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.03.017).
- 24 Su J, Zhang H, Li Z H, *et al.* First result from the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment JUNA: precise measurement of the 92 keV  $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$  resonance[J]. *Science Bulletin*, 2022, **67**(2): 125 - 132. DOI: [10.1016/j.scib.2021.10.018](https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.10.018).
- 25 Angulo C, Arnould M, Rayet M, *et al.* A compilation of charged-particle induced thermonuclear reaction rates[J]. *Nuclear Physics A*, 1999, **656**(1): 3 - 183. DOI: [10.1016/S0375-9474\(99\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(99)00030-5).