



锦屏深地核天体物理实验进展

柳卫平^{1,2,3*}, 郭冰^{2,3}, 连刚², 何建军^{4,3}, 谌阳平^{2,3}, 唐晓东^{5,3}, 苏俊^{6,3}, 蒋宇辰², 南威克¹

1. 南方科技大学物理系, 深圳 518055

2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413

3. 锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室, 凉山 615000

4. 复旦大学现代物理研究所, 上海 200433

5. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000

6. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875

*联系人, E-mail: liuwp@sustech.edu.cn

收稿日期: 2024-10-01; 接受日期: 2024-11-01; 网络出版日期: 2025-02-08

国家自然科学基金(编号: 12435010)和国家重点研发计划(编号: 2022FYA1603300)资助项目

摘要 针对关键核反应在恒星伽莫夫能区的直接测量是当今核天体物理研究的重要前沿课题。中国锦屏深地核天体物理实验平台(JUNA)依托锦屏地下实验室(CJPL)的超低本底环境, 利用JUNA强流加速器、高效率探测器和高水平靶优势, 直接测量了若干恒星演化关键核反应在天体感兴趣能区内的核反应率。这些反应包括 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$, $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 以及 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 等, 推动了对早期恒星及大质量恒星重元素产生机制的理解。JUNA实验在数据统计量、测量精度和灵敏度方面达到了国际先进水平。本文将对JUNA完成的多个实验结果进行总结, 与当前国际进展进行对比以阐明JUNA实验的优势和先进性, 并对今后发展方向JUNA Run-2进行展望。

关键词 天体物理反应, 深地实验室, 伽莫夫能量窗口, 直接测量

PACS: 26.20.+f, 26.40.+r, 26.65.+t

1 引言

近年来, 天文学的观测技术取得了巨大进展, 比如天眼FAST和哈勃空间望远镜提供的重要数据, 以及PLANCK卫星精确绘制的宇宙微波背景图。这些先进技术极大地拓展了观测数据的广度和精度, 从而显著增强了天文学家获取宇宙天体信息的能力。地球上的化学元素虽然只有90多种, 但关于它们如何产生以及

在哪里产生的问题仍然悬而未决。宇宙中, 像恒星这样的巨大天体因其极高的密度与温度, 使得轻元素相对容易被电离, 并具备足够大的热速度来引发核反应。因此, 一般认为, 大质量恒星系统是元素核合成的重要场所。

核天体物理学是融合天体物理与核物理研究的前沿交叉学科^[1], 已广泛应用于研究恒星演化、元素合成、核物理理论等复杂而深刻的课题。其感兴趣的恒

引用格式: 柳卫平, 郭冰, 连刚, 等. 锦屏深地核天体物理实验进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111013

Liu W P, Guo B, Lian G, et al. Progress of the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111013, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0431

星内部平稳燃烧过程(如氢燃烧、氦燃烧、碳燃烧等)^[2], 大都发生在相对低温、低密度的天体环境中. 相应的伽莫夫窗口能区(约几十到几百电子伏特)远远低于库仑位垒能量(几兆电子伏特). 由于带电粒子库仑隧穿效应, 这类热核反应的截面极小且反应持续时间较长. 随着能量降低, 这些核反应的截面几乎呈指数下降, 尤其在伽莫夫峰附近, 反应截面只有皮靶到飞靶, 意味着需要几百亿次碰撞才产生一次核反应. 在地面实验室条件下, 由于宇宙射线引起的本底太大, 这些核反应信号完全被淹没, 无法对这些反应的截面进行精确测量. 而利用在高能区观测到的截面与能量的关系来外推出低能区的反应截面, 常常会造成比较大的模型误差. 由于岩层对宇宙射线的屏蔽作用, 把实验室搬到极深的地下可以大大降低宇宙射线引起的本底, 从而获得较为精确的测量结果.

当今很多核天体物理实验室都在努力采用这种方法. 目前, 国外正在运行的主要有3个深地核天体物理实验项目, 分别是意大利格兰萨索(Gran Sasso)的LUNA项目、美国桑福德(Sanford)的CASPAR项目以及德国Felsenkeller浅层地下实验室.

LUNA实验室位于意大利国家核物理研究所(INFN)的格兰萨索国家实验室(LNGS), 是核天体物理地下实验研究的先驱. 在过去的35年里, LUNA实验使用了若干不同的加速器装置. 早期使用的50 kV加速器^[3]现已退役, 主要用于研究与太阳相关的氢燃烧反应, 并取得了开创性的成果^[4]. 2001年, LUNA安装了一台400 kV单端静电加速器, 能够提供稳定的质子或者 α 强流($I > 200 \mu\text{A}$)粒子束. 该加速器至今仍在运行, 主要用于研究大爆炸核合成(BBN)、质子质子(pp)链、渐近巨星分支(AGB)星中的碳氮氧(CNO)循环和氦钠(NeNa)循环反应^[5,6]. 最近, LUNA团队安装了一台3.5 MV加速器, 其是最新建设的Bellotti离子束装置的一部分, 能够在0.35–3.5 MeV的能量范围内提供 H^+ , $^4\text{He}^+$, $^{12,13}\text{C}^+$ 和 $^{12,13}\text{C}^{2+}$ 离子束. LUNA团队计划利用该加速器, 专注于恒星氢燃烧和碳燃烧过程中关键的核反应研究, 如 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 和 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应. 这些反应对恒星演化和元素合成起关键作用, 在核天体物理领域被视为最具挑战性的前沿课题之一.

CASPAR实验室位于南达科他州地下1500 m处的桑福德地下研究设施(SURF)^[7,8], 其1 MV的Van de Graaff加速器自2018年开始全面运行, 并和圣母大学

等研究机构保持紧密的合作. 目前正致力于测量原始恒星燃烧反应和恒星中子源反应, 如 (α, γ) 和 (α, n) 反应等^[9,10]. 与此同时, CASPAR近年来计划推进实验室系统的全面升级. 计划主要包括对 γ 射线和中子探测器系统的屏蔽优化, 以及信号甄别技术的改进等, 预计将在2028年落实完成.

德国Felsenkeller浅层地下实验室, 位于德国德累斯顿(Dresden)地下45 m. 至今已对CNO循环起始反应 $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}$ 的高能点数据进行测量, 验证了与LUNA等深地实验室的低能加速器互补的有效性^[11].

以下将对我国锦屏深地核天体物理实验(JUNA)平台上取得的最新关键核天体物理反应相关进展予以介绍, 并就JUNA的未来计划做简要展望.

2 中国锦屏地下实验室(CJPL)

2009年, 清华大学与雅砻江流域水电开发有限公司签署协议, 利用该公司建设的锦屏水电站交通隧道, 双方于2010年12月联合建成了中国首个极深地下实验室——中国锦屏地下实验室(CJPL). 锦屏交通隧道在垂直方向上岩层覆盖最厚的段落达到2.5 km, 是国际上岩石覆盖最厚的地下隧道, 能够将宇宙射线通量降低至地面水平的千万分之一到亿分之一. 此外, 隧道内的主要岩层为大理岩, 其放射性本底极低. 隧道的建成为我国地下实验室的发展提供了极为有利的条件.

得益于CJPL提供的优势, 锦屏深地核天体物理(JUNA)合作组提出利用该极低本底来探索关键核天体反应在伽莫夫能区的特性^[12]. JUNA实验平台位于CJPL-II A1大厅, 在2020–2021年进行临时使用, 这让JUNA合作组得以进行第一阶段的实验(JUNA Run-1). 2020年12月, JUNA合作组在CJPL-II A1中实现了第一次深地加速器出束, 然后在2021年第一季度对一些关键的核天体物理反应进行了直接测量. 具体研究内容与成果将在下一节详细介绍.

表1为中国锦屏地下实验室^[13]、意大利Gran Sasso深地实验室^[14–16]、美国SURF实验室^[7]、德国Felsenkeller实验室^[17], 以及地面实验室的本底水平. 就宇宙线缪子本底而言, 中国锦屏地下实验室要比意大利Gran Sasso低2个量级^[18]. 另外, 作为隧道型地下实验室, 实验地点可以开车直达, 比在矿井中建设地下实验

表 1 国内外地下实验室及地面开展核天体物理反应测量本底水平比较**Table 1** Comparison of background levels for nuclear astrophysics reaction measurements at international underground laboratories and surface laboratories

实验场所	埋深 (岩层厚度) (m)	宇宙线缪子 通量 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	中子本底 ($\text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}$)	γ 本底 ($\text{keV}^{-1} \text{h}^{-1}$ @1–2 MeV, HPGe)
地面	~0	2×10^{-2}	$\sim 10^{-3}$	~100
意大利 Gran Sasso	1400	3×10^{-8}	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-1}$
中国CJPL	2400	2×10^{-10}	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-1}$
美国SURF	1500	4×10^{-9}	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-1}$
德国 Felsenkeller	45	5×10^{-4}	$\sim 10^{-6}$	~1

室工作更为便捷, 而且锦屏隧道周围配套工作生活设施完善, 是国际上综合条件最好的、开展核天体物理反应测量的极深地下实验场所。

3 锦屏深地核天体物理实验平台(JUNA)

在地下核天体物理实验研究方面, 全世界范围内意大利Gran Sasso地下实验室的LUNA团队一直是领跑者. 经过近30年的努力, LUNA团队直接测量了恒星pp链及CNO循环中的一些关键核反应在伽莫夫能区的反应截面, 实验结果在太阳中微子物理、元素核合成及宇宙学等方面产生了重要影响. 与此同时, 美国SURF的CASPAR、德国的Felsenkeller实验团队也开展了大量的核天体物理实验测量。

近年来, 中国也在发展一个在深地测量核天体物理的计划. 由中国原子能科学研究院、北京师范大学、中国科学院近代物理研究所、四川大学、山东大学、南方科技大学、清华大学等共同参与的锦屏深地核天体物理实验已顺利开展. 在国家自然科学基金重大项目等项目支持下, 研究团队在极低环境本底的锦屏深地实验室中, 利用自主研制的永磁ECR离子源和高压平台, 建成了强流低能量加速器, 于2020年底出束, 束流强度达到2.1 mA, 是国际同类装置束流强度的2倍以上. 结合高效率的 4π BGO γ 射线探测器阵列和 ^3He 中子探测器阵列, 锦屏深地核天体物理实验平台已经成为国际先进的深地核天体物理实验设置. 在2021年的Run-1实验中, 基于该平台开展了以下6个课

题的实验研究工作。

(1) $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应. $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应(又称“圣杯反应”)与三 α 过程共同决定了碳和氧的绝对丰度, 这是有机化学的基础, 也是宇宙中生物生命演化的根本依据^[19,20]. 碳氧比不仅影响 $A>16$ 的所有重元素的生成, 还对超新星爆发产生关键作用. 根据恒星演化理论, 由于该反应率直接影响核心氦燃烧结束时的碳氧比例, 并进而决定大质量恒星的最终命运^[21,22], 因此黑洞质量缺口对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率也极为敏感. 大量直接测量实验已经在地面实验室进行, 最低能量达到 $E_{\text{c.m.}}=891 \text{ keV}$. 然而, 由于熔合反应库仑穿透概率随能量减小而急剧下降, 且在3 MeV以上的伽马射线能区受宇宙射线本底影响较大, 该反应截面的测量精度目前仍然无法达到恒星模型要求的小于10%的不确定性^[19,23].

在当前的JUNA实验中, $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在 $E_{\text{c.m.}}=552 \text{ keV}$ 下通过1 emA的 $^4\text{He}^{2+}$ 束流进行直接测量. 复合核发出的伽马射线由JUNA 4π BGO阵列探测器测量, 另一个 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器放置在靠近靶的位置, 以覆盖更多的立体角, 并用作反符合探测器. 采用BGO阵列信号多重性筛选, 反符合技术等多种方法, 显著降低了7000–8000 keV能量范围内的中子诱发 γ 本底, 其水平下降了超过75%^[24]. 我们对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应完成数据处理, 置信水平约 2σ . 在 $E_{\text{c.m.}}=552 \text{ keV}$ 能量下, 实现国际最佳的 10^{-13} barn 的灵敏度。

(2) $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应. $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应在低质量($M<4M_{\odot}$)AGB星的氦壳层中起着关键作用^[25], 是推动慢中子俘获过程(s-过程)的主要中子源. s-过程贡献了宇宙中约一半重元素($A\geq 90$)的产生. 为了准确模拟这一核合成过程, 必须精确地确定 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应在天体物理相关能区的反应率. 然而, 目前在较低能量区间($280 \text{ keV} < E_{\text{c.m.}} < 350 \text{ keV}$)的直接测量截面数据存在超过40%的误差^[26,27], 任何在更低能量范围进行的直接反应测量都由于反应截面急剧下降以及环境本底的存在而变得几乎不可能。

JUNA课题组在中国锦屏地下实验室(CJPL)和四川大学的加速器上, 首次进行了一致性的直接测量. 能量测量范围($E_{\text{c.m.}}=0.24\text{--}1.9 \text{ MeV}$)几乎涵盖了整个i-过程的伽莫夫窗口, 见图1, 将实验不确定性从60%降低到15%, 并消除了由于现有数据集不一致而导致的外推系统误差^[28]. 这为s-过程和i-过程的研究提供了更

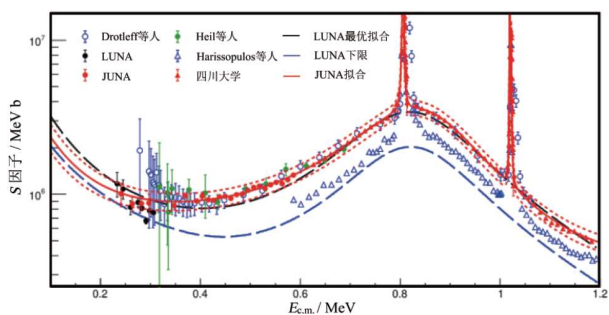


图 1 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应天体物理 S-因子^[26–29]

Figure 1 The astrophysical S-factor of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction [26–29].

可靠的反应率. 该反应率与“低LUNA”反应率相似, 有利于在热脉冲阶段从 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应释放更多的中子. 另外, 我们首次使用直接测量确定了阈值态的ANC, 修正了干涉效应, 并通过R-矩阵分析确定了屏蔽势.

(3) $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应. $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应在恒星氢燃烧区域的镁-铝循环过程具有关键作用. 其典型的天体物理场所为大质量主序星的氢燃烧对流核(温度约5000万K)^[30,31], 非主序星的氢燃烧壳层(温度约1亿K)^[32], 以及新星爆发等爆发性氢燃烧过程(温度约4亿K)^[33]. 该反应涉及长寿命放射性核素 ^{26}Al 的产生, 观测与研究 ^{26}Al 衰变相关的1.809 MeV伽马射线谱, 对理解银河系 ^{26}Al 储量及不同恒星族群的化学演化方面具有重要意义. 在恒星氢燃烧相关能区, $E=58, 92, 189$ 和 304 keV的共振对 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应截面起主导作用^[34]. 然而由于该反应极低的反应截面, 地面测量只推进到190 keV.

在中国锦屏地下实验室的JUNA平台上, 研究团队对 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应进行直接测量. 通过单一谱线提取了92和304 keV共振的主要伽马射线分支比, 并且确定了92 keV共振强度和基态馈电系数为 $(3.8 \pm 0.3) \times 10^{-10}$ eV和 0.66 ± 0.04 , 与先前LUNA地下直接测量结果在误差范围内符合, 但不确定度显著变小. 新的结果表明, 在大质量恒星的Mg-Al循环中能产生更多的 ^{26}Al ^[35], 这对于理解星际 ^{26}Al 之谜具有重要意义.

近年来, JUNA课题组成员研究了核心坍缩超新星(CCSNe)中通过电子中微子过程产生 ^{26}Al 的机制. 基于CCSNe爆炸的一些假设, 估算了在不同中微子温度下喷射的 $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$ 的最终比例, 如图2所示^[36]. 讨论了O/Ne壳层半径和冲击速度对产量的影响, 发现最大 ^{26}Al

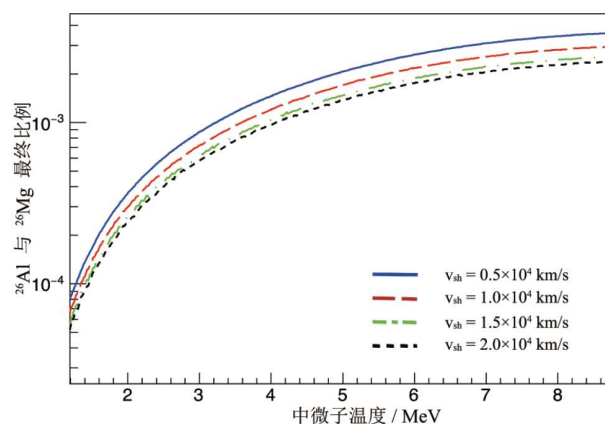


图 2 在O/Ne壳层半径 $r_0=11000$ km不同冲击速度与不同中微子温度下, $^{26}\text{Mg}(\nu_e, e^-)^{26}\text{Al}$ 过程的最终 ^{26}Al 与 ^{26}Mg 比例^[36]

Figure 2 The final ratios of ^{26}Al and ^{26}Mg in the process $^{26}\text{Mg}(\nu_e, e^-)^{26}\text{Al}$ vary with neutrino temperatures for different average shock velocities at the radius of the O/Ne shell $r_0=11000$ km [36].

产量出现在壳层半径 $r_0=11000$ km处. 然后通过拟合Woosley和Weaver^[37]的模拟结果, 得出了大质量恒星的初始质量和金属丰度与 ^{26}Mg 产量之间的解析关系, 从而方便地估算 ^{26}Al 的产量. 这种解析形式有助于考虑银河系中金属丰度和质量分布的影响, 最终推导出随银河系半径变化的当前 ^{26}Al 表面密度.

(4) $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应. $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应在复合核 ^{20}Ne 的核结构研究^[38]和恒星中氟及更重元素的核合成方面都能提供重要信息. 在前者中, 该反应能够帮助研究复合核 ^{20}Ne 中质子分离阈值($S_p=12.844$ MeV)以上的能级纲图, 目前多个理论研究预测了 ^{20}Ne 四重态激发的可能性^[39]. 此外, 氟丰度强烈依赖于天体环境的条件, 因此可以用来验证不同的核合成场景. AGB星被认为是银河系中氟元素最主要的贡献者^[40,41], 但观测到的氟丰度远高于最新AGB模型预测的值, 被称为氟超丰问题. 因此, 需要对所有牵涉氟产生及破坏的核反应截面进行精确的实验测量, 研究表明, $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应是氟的重要破坏反应道之一.

$^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 反应涉及3种不同的反应道, 即 (p, α_0) , (p, α_π) 和 $(\text{p}, \alpha_\gamma)$ ^[42]. 目前, 对于 $(\text{p}, \alpha_\gamma)$ 和 (p, α_0) 道, 地面实验的测量分别进行到了 $E_{\text{c.m.}} \approx 189$ keV^[43]和 172 keV^[44]. 通常认为 (p, α_π) 道的贡献可以忽略不计. 在中国锦屏地下实验室, 利用高流强的JUNA加速器以及极低的宇宙射线本底, 对 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha_\gamma)^{16}\text{O}$ 反应进行了直接测量^[45], 并获得了 $E_{\text{c.m.}} \approx 72.4\text{--}188.8$ keV的天体物理S因子, 首次全面覆盖了伽莫夫能量窗口. 目前的实验低能S因子明

显偏离了先前的理论预测, 并且不确定性显著降低. 这表明, 我们成功地在天体物理感兴趣的温度下, 使用直接测量数据提供了天体物理模型要求的

$^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反应率, 确定了 (p, α_0) 和 $(\text{p}, \alpha\gamma)$ 道在伽莫夫能区的角色.

(5) $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应. 第三星族 (Pop III) 恒星形成于宇宙大爆炸后大约 1.5 亿年, 其最初的化学成分接近于原初状态^[46]. 研究这些古老恒星的组成, 尤其是钙元素的产生机制, 可以揭示早期恒星如何演化以及它们最终的命运. 例如, Keller 等人^[47] 发现了宇宙中最古老的恒星之一, SMSS0313-6708 的钙丰度上限只有太阳丰度的 10^{-7} , 被认为是由于氢燃烧过程中热 CNO 循环突破产生的. 然而, Clarkson 和 Herwig^[48] 的恒星演化模拟研究结果表明, 通过 CNO 突破生成大量钙的可能性较小, 预测的钙丰度比观测值低了 0.8–2 个数量级. 这一差异意味着只有 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应率比 NACRE 编评结果高出约 6 倍或以上, 该模型才可能生成与极贫金属星观测值一致的钙丰度. 因此, 围绕 0.1 GK 典型温度下 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应率的精确测定, 成为理解第三星族恒星中钙生成的关键, 并为验证恒星演化模型的准确性提供极其重要的实验数据.

依赖 JUNA 极低宇宙线本底的实验环境, JUNA 课题组直接测量了 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应的截面, 首次在 $E_{\text{c.m.}} = 225.2 \text{ keV}$ 处发现了一个新的共振, 见图 3. 在约 0.1 GK 的温度下, 该新共振使得 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应率比 NACRE 推荐值高出 5.4–7.4 倍. 基于恒星演化模型^[48,49], 使用我们新的 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应率可以重现已知最古老恒星 SMSS0313-6708 中的钙丰度. 这项研究不仅有助于解释最古老恒星中的钙丰度来源之谜、约束第一代恒星的演化模型, 还将为未来詹姆斯·韦布太空望远镜对第一代恒星和星系的观测提供重要的核物理数据.

(6) $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 反应. 宇宙中, 大约一半的重元素 (铁以上的元素) 是通过慢中子俘获过程 (s-过程) 合成的, 而 s-过程由 $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 和 $^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n})^{25}\text{Mg}$ 反应产生的中子驱动^[50,51]. 另外, 由于与几种关键同位素 (如 ^{21}Ne 和 ^{22}Ne) 的丰度相关, $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 反应对 AGB 星核合成至关重要. 然而, 主导该反应的 470 keV 共振, 其能量和自旋-宇称的不确定性, 导致了 $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 天体物理反应率存在显著的误差.

我们在锦屏地下核天体物理实验平台 (JUNA) 中

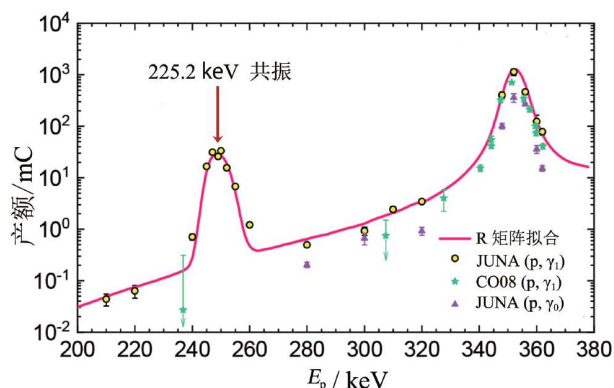


图 3 在 JUNA 测量的 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma_0, 1)^{20}\text{Ne}$ 反应的实验产额^[46]

Figure 3 Experimental yields of the $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma_0, 1)^{20}\text{Ne}$ reaction measured at JUNA [46].

对 $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 低能共振的共振能量和强度进行了更精确的测量^[52]. 关键的 470 keV 共振能量被首次精确测定为 $E_{\alpha} = 474.0 \pm 1.1 \text{ keV}$, 达到前所未有的高精度. 该共振态的自旋-宇称确定为 1^{-} , 消除了早期研究中关于共振强度的分歧. 与之前的数据相比, 这些结果将 AGB 星典型温度 (0.1–0.3 GK) 下的 $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 反应率的测量精度提高了约 10 倍. 我们展示了这一改进如何精确预测 ^{21}Ne 的丰度, 并对探究来自 AGB 星陨石星尘 SiC 颗粒的起源产生重要影响.

锦屏深地核天体物理实验进展作为国际天文学会议上的焦点报告, 已被美国 Science 杂志报道. 标志着我国深地核天体物理研究能力已进入国际先进行列.

4 $^3\text{He}({}^4\text{He}, \gamma){}^7\text{Be}$ 课题展望

太阳的金属丰度是天体物理领域十分重要的一个物理量. 目前光谱学和日震学给出的独立结果之间存在着较大的分歧 (即著名的“太阳金属丰度之谜”). 近些年来, 太阳中微子的高精度测量为解决这一问题提供了新的视角. 但是, 该方法目前受制于太阳模型的理论预测精度, 其中 $^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ 熔合反应是太阳 pp 链中一个关键步骤^[11], 其反应截面是 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 中微子通量理论预测的最大的不确定性来源之一, 限制了太阳模型的预测精度^[53]. 目前有多个工作指出^[54,55], 基于中微子理论预测对输入参数的依赖关系, 应该需要将 $^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ 反应的低能截面测量精度提高到 2%–3% 的水平. 此外, 该反应对于大爆炸和巨星等场景中的锂丰度问题至关重要, 几乎完全负责大爆炸后

生成的 ${}^7\text{Li}$ 的产生, 而该核素的原始丰度仍然是一个谜团^[56].

${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ 反应速率研究方法包括在束 γ 射线测量^[57–59]和 ${}^7\text{Be}$ 放射性活度测量^[59–61]. 20世纪早期的 ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ 反应在低能区测量精度较低, 最大误差接近100%, 数据的利用价值不大. 后来, 随着实验技术的进步, 国际上开展了许多实验对 ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ 反应截面进行了测量. 随着近些年实验工作的增多, 测量的最高能量已经达到 $E_{\text{c.m.}} \approx 8300 \text{ keV}$ ^[62], 但是, 库仑势垒的存在使得核反应在低能段的截面呈指数规律急剧减小, 测量难度极大, 直接到达或接近天体物理伽莫夫能区的数据是极少的, 然而, 这部分数据对天体物理又最有价值. $E_{\text{c.m.}} < 1 \text{ MeV}$ 能区的数据对低能外推作用较大, 而这段区间数据误差最大约20%, 导致对低能段约束较弱. 目前只有意大利LUNA合作组将 ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ 截面测量推进到国际最低能点 $E_{\text{c.m.}}=94 \text{ keV}$ ^[63], 是目前最接近太阳伽莫夫窗口的实验数据. 但是由于受到加速器能量的限制, LUNA的数据最高只能达到 $E_{\text{c.m.}}=170 \text{ keV}$, 这和 $E_{\text{c.m.}} > 300 \text{ keV}$ 的地面测量数据之间不能形成有效光滑的衔接, 综合考虑多个数据集之后, 总体误差远未达到太阳模型要求的2%–3%的精度要求.

JUNA合作组计划发展高效率的离线测量平台、高分辨的在线探测阵列. 通过在线、离线测量结合, 有望在 $E_{\text{c.m.}}=80\text{--}380 \text{ keV}$ 能区获得可靠的高精度截面数据, 达到天体物理模型要求的精度, 从而为太阳金属丰度问题提供重要的见解. 此外, JUNA合作组还将把天体流体动力学和核反应理论模型结合, 从而定量分析大爆炸、巨星、新星等天体环境中的锂丰度问题.

与此同时, JUNA Run-2的研究内容也将包括渐进巨星支中子源反应 ${}^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n}){}^{25}\text{Mg}$ 、 ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ 熔合反应和圣杯反应 ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ 等更具挑战性的若干核天体物理关键核反应在伽莫夫窗口的反应截面直接测量. 为此, JUNA Run-2计划将进一步提高加速器束流强度, 研制

表 2 JUNA Run-2实验计划

Table 2 Experimental plan for JUNA Run-2

反应	靶类别	天体环境	质心系能量 (keV)
${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$	固体靶	氢燃烧	450–600
${}^{13}\text{C}(\alpha, \text{n}){}^{16}\text{O}$	固体靶	中子源	190–610
${}^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma){}^{20}\text{Ne}$	固体靶	CNO循环	80–150
${}^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma){}^{15}\text{O}$	固体靶	CNO循环	70–280
${}^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n}){}^{25}\text{Mg}$	气体靶	中子源	480–730
${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$	气体靶	pp 链	80–380
${}^{17}\text{O}(\text{p}, \alpha){}^{14}\text{N}$	固体靶	CNO循环	65–75
${}^{17}\text{O}(\text{p}, \gamma){}^{18}\text{F}$	固体靶	CNO循环	65–360
${}^{17}\text{O}(\alpha, \text{n}){}^{20}\text{Ne}$	固体靶	中子源	390–700
${}^{26}\text{Al}(\text{p}, \gamma){}^{27}\text{Si}$	固体靶	Mg-Al循环	120–350
${}^{10}\text{B}(\alpha, \text{n}){}^{13}\text{N}$	固体靶	中子源	220–780

MV级强流加速器、新型无窗气体靶, 建设更加完善的基础设施和实验操作平台. 实验结果预期对理解天体演化和元素核合成产生深刻影响, 具体反应见表2^[64].

5 总结

总的来说, 目前首轮 ${}^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma){}^{26}\text{Al}$ 实验对92 keV共振强度的测量, 已得到国际最大曝光量和最好测量精度^[34]; ${}^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha){}^{16}\text{O}$ 实验成果在国际上首次覆盖了伽莫夫能量窗口, 获得了 $E_{\text{c.m.}}=72.4\text{--}188.8 \text{ keV}$ 的S因子, 在*Physical Review Letters*发表, 并被选为编辑推荐亮点成果^[45]; ${}^{13}\text{C}(\alpha, \text{n}){}^{16}\text{O}$ 中子源反应取得国际最宽能量覆盖, 覆盖了核天体物理过程伽莫夫能量窗口^[28]; ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ 圣杯反应取得国际最高灵敏度, 成果在国际核天体物理大会上做邀请报告. 此外, 相关的若干个核天体物理课题研究也取得重要成果^[46,52].

目前, 中国锦屏地下实验室已经在恒星演化关键核反应截面直接测量等方面取得了重要成果, 未来将成为国际上最先进的深地核天体物理平台之一.

参考文献

- Bertulani C A, Kajino T. Frontiers in nuclear astrophysics. *Prog Part Nucl Phys*, 2016, 89: 56–100
- Schatz H, Becerril Reyes A D, Best A, et al. Horizons: Nuclear astrophysics in the 2020s and beyond. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2022, 49: 110502
- Greife U, Arpesella C, Barnes C A, et al. Laboratory for underground nuclear astrophysics (LUNA). *Nucl Instr Meth Phys Res A*, 1994, 350: 327–337
- Junker M, D'alessandro A, Zavatarelli S, et al. Cross section of ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2\text{p}){}^4\text{He}$ measured at solar energies. *Phys Rev C*, 1998, 57: 2700–2710

- 5 Ananna C, Barile F, Boeltzig A, et al. Underground measurements of nuclear reaction cross-sections relevant to AGB stars. *Universe*, 2021, 8: 4
- 6 Masha E, Barbieri L, Skowronski J, et al. First measurement of the low-energy direct capture in $^{20}\text{Ne}(p, \gamma)^{21}\text{Na}$ and improved energy and strength of the $E_{\text{c.m.}}=368$ keV resonance. *Phys Rev C*, 2023, 108: L052801
- 7 Robertson D, Couderc M, Greife U, et al. Underground nuclear astrophysics studies with CASPAR. *EPJ Web Conf*, 2016, 109: 09002
- 8 Horn M, Woodward E L. Sanford Underground Research Facility's approach to school education, community activities, and public outreach. *Front Phys*, 2023, 11: 1310451
- 9 Liu Q, Febraro M, deBoer R J, et al. Low-energy cross-section measurement of the $^{10}\text{B}(\alpha, n)^{13}\text{N}$ reaction and its impact on neutron production in first-generation stars. *Phys Rev C*, 2020, 101: 025808
- 10 Shahina, Görres J, Robertson D, et al. Direct measurement of the low-energy resonances in $^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{26}\text{Mg}$ reaction. *Phys Rev C*, 2022, 106: 025805
- 11 Skowronski J, Masha E, Piatti D, et al. Improved S factor of the $^{12}\text{C}(p, \gamma)^{13}\text{N}$ reaction at $E=320\text{--}620$ keV and the 422 keV resonance. *Phys Rev C*, 2023, 107: L062801
- 12 Liu W P, Li Z H, He J J, et al. Progress of Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics (JUNA). *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, 59: 642001
- 13 Liu W P, Li Z H, He J J, et al. Progress of Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment (JUNA) (in Chinese). *Atom Ener Sci Tech*, 2019, 53: 1729–1741 [柳卫平, 李志宏, 何建军, 等. 锦屏深地核天体物理实验(JUNA)进展. *原子能科学技术*, 2019, 53: 1729–1741]
- 14 Szűcs T, Bemmerer D, Broggini C, et al. An actively vetoed Clover γ -detector for nuclear astrophysics at LUNA. *Eur Phys J A*, 2010, 44: 513–519
- 15 Best A, Görres J, Junker M, et al. Low energy neutron background in deep underground laboratories. *Nucl Instr Meth Phys Res A*, 2016, 812: 1–6
- 16 Csédes L, Ciani G F, Balibrea-Correa J, et al. Characterization of the LUNA neutron detector array for the measurement of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction. *Nucl Instr Meth Phys Res A*, 2021, 994: 165081
- 17 Grieger M. Full background characterization of Felsenkeller underground laboratory. *J Phys-Conf Ser*, 2020, 1468: 012246
- 18 Cheng J P, Kang K J, Li J M, et al. The China Jinping Underground Laboratory and its early science. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2017, 67: 231–251
- 19 Weaver T A, Woosley S E. Nucleosynthesis in massive stars and the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction rate. *Phys Rep*, 1993, 227: 65–96
- 20 Wallerstein G, Iben I, Parker P, et al. Synthesis of the elements in stars: Forty years of progress. *Rev Mod Phys*, 1997, 69: 995–1084
- 21 Farmer R, Renzo M, de Mink S E, et al. Mind the gap: The location of the lower edge of the pair-instability supernova black hole mass gap. *Astrophys J*, 2019, 887: 53
- 22 Farmer R, Renzo M, de Mink S E, et al. Constraints from gravitational-wave detections of binary black hole mergers on the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ rate. *Astrophys J Lett*, 2020, 902: L36
- 23 Woosley S E, Heger A, Weaver T A. The evolution and explosion of massive stars. *Rev Mod Phys*, 2002, 74: 1015–1071
- 24 Liu W P, Guo B, An Z, et al. Recent progress in nuclear astrophysics research and its astrophysical implications at the China Institute of Atomic Energy. *Nucl Sci Tech*, 2024, 35: 217–249
- 25 Prajapati P M, Qureshi M, Hingu A, et al. $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$: The source of neutrons for the s-process main component. *EPJ Web Conf*, 2023, 275: 02014
- 26 Drotleff H W, Denker A, Knee H, et al. Reaction rates of the s-process neutron sources $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ and $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$. *Astrophys J*, 1993, 414: 735–739
- 27 Heil M, Detwiler R, Azuma R E, et al. The $^{13}\text{C}(\alpha, n)$ reaction and its role as a neutron source for the s process. *Phys Rev C*, 2008, 78: 025803
- 28 Gao B, Jiao T Y, Li Y T, et al. Deep underground laboratory measurement of $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ in the Gamow windows of the s and i processes. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 132701
- 29 Harissopulos S, Becker H W, Hammer J W, et al. Cross section of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction: A background for the measurement of geo-neutrinos. *Phys Rev C*, 2005, 72: 062801(R)
- 30 Palacios A, Meynet G, Vuissoz C, et al. New estimates of the contribution of Wolf-Rayet stellar winds to the Galactic ^{26}Al . *Astron Astrophys*, 2005, 429: 613–624
- 31 Limongi M, Chieffi A. The nucleosynthesis of ^{26}Al and ^{60}Fe in solar metallicity stars extending in mass from 11 to $120 M_{\odot}$: The hydrostatic and explosive contributions. *Astrophys J*, 2006, 647: 483–500
- 32 Izzard R G, Lugaro M, Karakas A I, et al. Reaction rate uncertainties and the operation of the NeNa and MgAl chains during HBB in

- intermediate-mass AGB stars. *Astron Astrophys*, 2007, 466: 641–648
- 33 Iliadis C, Champagne A, Jose J, et al. The effects of thermonuclear reaction-rate variations on nova nucleosynthesis: A sensitivity study. *Astrophys J Suppl S*, 2002, 142: 105–137
 - 34 Strieder F, Limata B, Formicola A, et al. The $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ reaction at low astrophysical energies. *Phys Lett B*, 2012, 707: 60–65
 - 35 Su J, Zhang H, Li Z, 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. *Sci Bull*, 2022, 67: 125–132
 - 36 Li G, Li Z. The ^{26}Al production of the ν_e -process in the explosion of massive stars. *Astrophys J*, 2022, 932: 49
 - 37 Woosley S E, Weaver T A. The evolution and explosion of massive stars. II. Explosive hydrodynamics and nucleosynthesis. *Astrophys J*, 1995, 101: 181–235
 - 38 Tilley D R, Cheves C M, Kelley J H, et al. Energy levels of light nuclei, $A=20$. *Nucl Phys A*, 1998, 636: 249–364
 - 39 Lombardo I, Dell'Aquila D, Campajola L, et al. Analysis of the $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$ reaction at low energies and the spectroscopy of ^{20}Ne . *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2013, 40: 125102
 - 40 Woosley S E, Haxton W C. Supernova neutrinos, neutral currents and the origin of fluorine. *Nature*, 1988, 334: 45–47
 - 41 Kahl D, José J, Woods P J. Uncertainties in the $^{18}\text{F}(p, \alpha)^{15}\text{O}$ reaction rate in classical novae. *Astron Astrophys*, 2021, 653: A64
 - 42 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. *Astrophys J*, 2021, 913: 51
 - 43 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. *EPJ A*, 2000, 7: 79–85
 - 44 Lombardo I, Dell'Aquila D, Di Leva A, et al. Toward a reassessment of the $^{19}\text{F}(p, \alpha_0)^{16}\text{O}$ reaction rate at astrophysical temperatures. *Phys Lett B*, 2015, 748: 178–182
 - 45 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. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 152702
 - 46 Zhang L, He J, deBoer R J, et al. Measurement of $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ reaction suggests CNO breakout in first stars. *Nature*, 2022, 610: 656–660
 - 47 Keller S C, Bessell M S, Frebel A, et al. A single low-energy, iron-poor supernova as the source of metals in the star SMSS J031300.36–670839.3. *Nature*, 2014, 506: 463–466
 - 48 Clarkson O, Herwig F. Convective H–He interactions in massive population III stellar evolution models. *Mon Not R Astron Soc*, 2021, 500: 2685–2703
 - 49 deBoer 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. *Phys Rev C*, 2021, 103: 055815
 - 50 Käppeler F. The origin of the heavy elements: The s process. *Prog Part Nucl Phys*, 1999, 43: 419–483
 - 51 Käppeler F, Gallino R, Bisterzo S, et al. The s process: Nuclear physics, stellar models, and observations. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 157–193
 - 52 Wang L H, Su J, Shen Y P, et al. Measurement of the $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ reaction rate at JUNA and its impact on probing the origin of SiC grains. *Phys Rev Lett*, 2023, 130: 092701
 - 53 Vinyoles N, Serenelli A M, Villante F L, et al. A new generation of standard solar models. *Astrophys J*, 2017, 835: 202
 - 54 Villante F L, Serenelli A. The relevance of nuclear reactions for standard solar models construction. *Front Astron Space Sci*, 2021, 7: 618356
 - 55 Orebi Gann G D, Zuber K, Bemmerer D, et al. The future of solar neutrinos. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2021, 71: 491–528
 - 56 Coc A, Vangioni-Flam E, Descouvemont P, et al. Updated big bang nucleosynthesis compared with *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* observations and the abundance of light elements. *Astrophys J*, 2004, 600: 544–552
 - 57 Holmgren H D, Johnston R L. $^3\text{H}(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$ and $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ reactions. *Phys Rev*, 1959, 113: 1556–1559
 - 58 Parker P D, Kavanagh R W. $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ reaction. *Phys Rev*, 1963, 131: 2578–2582
 - 59 Osborne J L, Barnes C A, Kavanagh R W, et al. Low-energy $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ cross-section measurements. *Phys Rev Lett*, 1982, 48: 1664–1666
 - 60 Robertson R G H, Dyer P, Bowles T J, et al. Cross section of the capture reaction $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$. *Phys Rev C*, 1983, 27: 11–17
 - 61 Bemmerer D, Confortola F, Costantini H, et al. Activation measurement of the $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ cross section at low energy. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 122502
 - 62 Tóth Á, Szűcs T, Szegedi T N, et al. Experimental determination of the $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ reaction cross section above the ^7Be proton separation threshold. *Phys Rev C*, 2023, 108: 025802

- 63 Costantini H, Bemmerer D, Confortola F, et al. The S-factor at solar energies: The prompt γ experiment at LUNA. *Nucl Phys A*, 2008, 814: 144–158
- 64 Liu W P, Guo B, An Z, et al. Recent progress of nuclear astrophysics study and their astrophysical implications at CIAE. *Nucl Sci Tech*, 2024, accepted

Progress of the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment

LIU WeiPing^{1,2,3*}, GUO Bing^{2,3}, LIAN Gang², HE JianJun^{4,3}, SHEN YangPing^{2,3},
TANG XiaoDong^{5,3}, SU Jun^{6,3}, JIANG YuChen² & NAN WeiKe¹

¹ Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

² China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

³ Jinping Deep Underground Frontier Science and Dark Matter Key Laboratory of Sichuan Province, Liangshan 615000, China

⁴ The Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China

⁵ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

⁶ College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

*Corresponding author (email: liuwp@sustech.edu.cn)

Directly measuring key nuclear reactions within the Gamow window of stars is a critical frontier in modern nuclear astrophysics. The China Jinping Underground Laboratory (CJPL) offers an ultra-low-background environment, serving as the foundation for the China Jinping deep Underground Nuclear Astrophysics experimental platform (JUNA). By utilizing JUNA's high-intensity accelerator, efficient detectors, and advanced targets, several crucial nuclear reactions relevant to stellar evolution have been successfully measured within the energy ranges of relevant stars. These reactions include $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$, $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, and $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$, significantly enhancing our understanding of heavy element production in early and massive stars. The JUNA experiment has achieved internationally advanced levels in data statistics, measurement precision, and sensitivity. This article will summarize JUNA's key experimental results and compare them with current international advancements to highlight the platform's unique strengths. Additionally, it will offer an outlook on the future development of JUNA Run-2.

astrophysical reactions, deep underground laboratory, the Gamow window energy, direct measurement

PACS: 26.20.+f, 26.40.+r, 26.65.+t

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0431](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0431)