



$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应: 大质量恒星中的关键中子源

南巍, 郭冰*, 谌阳平, 李志宏, 柳卫平

中国原子能科学研究院, 北京 102413

* 联系人, E-mail: guobing@ciae.ac.cn

2022-03-14 收稿, 2022-05-23 修回, 2022-05-24 接受, 2022-05-24 网络版发表

国家杰出青年科学基金(12125509)和国家自然科学基金重点国际合作项目(11961141003)资助

摘要 宇宙从铁到铀的超铁元素起源是核天体物理领域一个重要的前沿方向, 被认为是21世纪“物理学的11个未解之谜”之一, 有望孕育出重大科学发现. 中子俘获反应可以克服库仑势垒, 是生成宇宙中超铁元素的关键途径. 自由中子的平均寿命只有约15 min, 因此, 中子的来源对理解超铁元素起源是一个热点课题. 本文评述了超铁元素起源、大质量恒星中的关键中子源 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应的研究意义、中子源最新研究进展和未来研究计划, 特别是深地直接测量实验计划.

关键词 核天体物理, 超铁元素起源, s-过程, 中子源, 深地实验

宇宙是如何演化的? 太阳为何一直发光发亮? 我们身体中的各种元素又是由何而来? 要找到这些问题的答案, 需要了解天体环境中发生的核过程, 这一研究领域就是核天体物理. 核天体物理是天体物理和核物理的交叉学科, 它将宇观的宇宙演化和微观的核反应相结合, 主要研究宇宙中各种元素的起源和星体能量产生^[1-5]. 通过在实验室中研究重要的天体核反应, 对其截面、反应率等关键参数进行精确测量, 以便对天体核反应机制进行深入研究. 核天体物理一直作为物理学的一个重要前沿方向而备受关注^[6-8].

随着核天体物理不断发展, 很多天体过程已经得到了初步了解, 但由于宇宙射线本底的影响, 仍有大量的关键核反应无法得到精确测量, 因此核天体物理实验逐渐从地面走向了深地实验室. 意大利LUNA(Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics)实验平台是国际上比较成熟的深地核天体物理实验室, 自20世纪90年代以来, 开展了多个核天体反应的深地直接测量. 中国锦屏深地核天体物理实验平台JUNA(Jinping Underground Nuclear Astrophysics Laboratory)是一个年

轻的实验平台, 自2020年在深地实验室运行以来, JUNA已经完成了第一期的实验任务, 对几项关键核反应进行了研究.

1 宇宙超铁元素起源之谜

迄今为止, 人类对比铁轻的元素起源已经有了相对清楚的认知, 其产生机制主要包括3种核过程: (1) 大爆炸核合成产生了宇宙中最轻的3种元素——氢(H)、氦(He)、锂(Li); (2) 通过恒星内部带电粒子的聚变或质子、中子俘获反应产生了从碳(C)到铁(Fe)的各种元素; (3) 宇宙射线(最主要是高能轻离子)在恒星内部形成的碳氮氧(CNO)核上发生散裂过程, 产生了铍(Be)、硼(B)以及部分锂元素. 然而, 由于比铁重的原子核比结合能随质量数增加而减小, 加之库仑斥力的增强, 带电粒子俘获截面较小, 因此, 比铁重的元素(本文简称超铁元素)很难通过带电粒子的俘获过程合成. 超铁元素的核合成也被选为21世纪物理学11个未解之谜之一^[9,10].

由于中子俘获过程不受库仑势垒影响, 因此, 超铁元素主要通过中子俘获反应合成. 中子俘获反应主要

引用格式: 南巍, 郭冰, 谌阳平, 等. $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应: 大质量恒星中的关键中子源. 科学通报, 2022, 67: 3357–3366

Nan W, Guo B, Shen Y P, et al. $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$: The key neutron source in massive stars (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 3357–3366, doi: [10.1360/TB-2022-0279](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0279)

包括慢速中子俘获过程(slow neutron capture process, 简称s-过程)^[11]、快速中子俘获过程(rapid neutron capture process, 简称r-过程), 这两个过程分别产生了宇宙中一半左右的超重元素^[12,13]。另外, 目前研究也认为, 有一部分丰质子核素由光致解离过程(photo-dissociation process, 简称p-过程)合成^[14,15]。

原子核通过俘获中子产生新的原子核, 如果新原子核的中子俘获速率低于其 β 衰变速率, 那么该原子核在俘获下一个中子之前将优先发生衰变, 则称这一俘获过程为s-过程。s-过程沿着近稳定线核区进行(图1), 其发生环境的中子密度比较低(约 10^7 cm^{-3}), 持续时间为 $10^2 \sim 10^5$ 年。发生s-过程的最主要场所是大质量恒星(质量大于8倍太阳质量)和渐进巨星支星(asymptotic giant branch, AGB)(图2), 其核合成反应主要发生在中小质量AGB星的氦壳间层(He intershell), 以及大质量恒星的氦燃烧核心、碳燃烧壳层。s-过程主要影响从铁到铀($A=209$)元素的产生。

与s-过程相对应, 当反应生成的新原子核俘获中子的速率高于 β 衰变速率时, 则称这一过程为r-过程。r-过程主要发生在具有极高中子密度(约 10^{22} cm^{-3})和温度 $T_9 \approx 1$ (T_9 代表以 10^9 K 为单位的无量纲温度)的天体环境中, 如超新星爆发、中子星并合等。r-过程发生的时间

极短, 一般为 $0.01 \sim 10 \text{ s}$ 。由于r-过程发生的场所具有很高的中子密度, 且r-过程的中子俘获速率高于 β 衰变速率, 因此r-过程会使元素逐渐向远离稳定线的方向合成(图1)。r-过程可以生成一直到铀($A=238$)的超重元素。

在观测中还发现了30余种丰质子核素, 它们很难通过中子俘获过程合成。研究表明, 这些原子核主要通过预先形成的重核(通过s-过程和r-过程)上发生一系列核反应而形成, 主要包括光核反应(γ, n)、(γ, p)、(γ, α)和质子俘获过程(p, γ)、(p, n)等, 该过程称为p-过程。p过程产生的核素丰度比较低。p过程典型温度为 $T_9 \approx 2 \sim 3$, 质子密度较高。因此, p过程只能发生在超新星等极端天体环境中^[14]。

2 s-过程核合成中子源

中子俘获反应需要大量的中子, 这需要易于产生中子的核反应来提供, 我们称之为“中子源反应”。s-过程主要有两个中子源反应: 一个是 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应, 另一个是 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应。 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应主要为中小质量恒星的s-过程核合成提供中子, 影响质量数90~209核素的合成; 而 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应主要为大质量恒星的s-过程核合成提供中子, 影响质量数小于90的核素合成(图3)。

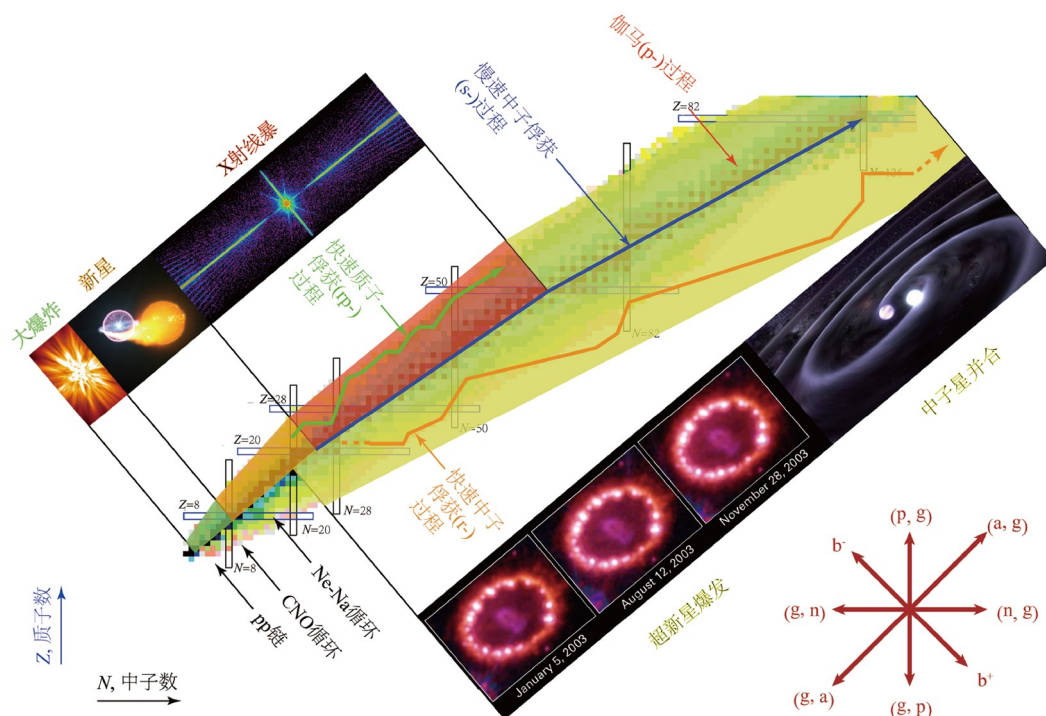


图1 核素图与宇宙中产生元素的各种核过程

Figure 1 Nuclide chart and the processes producing the elements in the universe

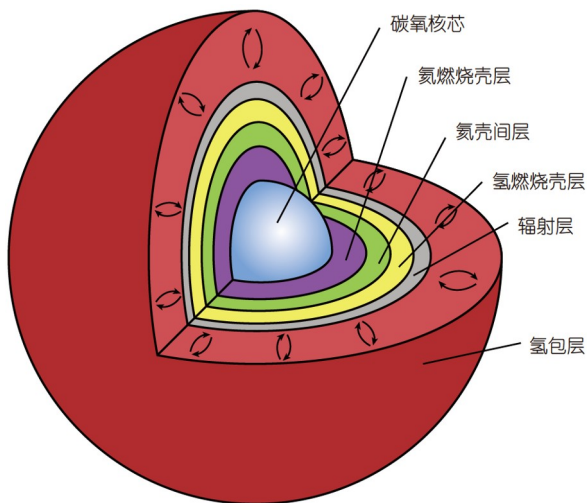


图2 AGB星结构图

Figure 2 The structure of the AGB star

在AGB星阶段, 其核心中的氢和氦已经消耗殆尽, 留下处于电子简并状态的碳和氧. AGB星结构如图2所示, 它有氢和氦两个燃烧壳层, 为恒星提供能量. 氢燃烧壳层在氢包层的底部, 氦燃烧壳层在碳氧核心的顶部, 在这两个燃烧壳层之间, 有一层薄薄的氦壳间层. 在中小质量的AGB星(质量小于8倍太阳质量)演化过程(图4)中, s-过程核合成就发生在氢燃烧壳层和氦燃烧壳层之间的氦壳间层. 当氦燃烧被激活时, 大量的能量

被释放出来, 从而推动恒星各壳层之间的对流, AGB星进入热脉冲(thermal pulses)阶段. 在热脉冲期间, 对流会把外部包层中的氢和核心中的 ^{12}C 带到富含氦的壳间层, 通过 $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+ \nu)^{13}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{14}\text{N}$ 形成富含 ^{13}C 和 ^{14}N 物质的薄层, 该薄层称为 ^{13}C 袋(^{13}C pocket). 当该区域温度达到约 $9 \times 10^7 \text{ K}$ 时, $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 反应发生, 产生中子, 进而触发s-过程核合成. 因此, $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 反应是s-过程的重要中子源反应之一, 主要影响质量数90~209核素的合成. 在热脉冲过程中, 对流包层穿透下方的氦壳层, 并将氦燃烧的产物从恒星内部带到表面, 尤其是s-过程中产生的超铁元素. 这种混合过程被称为第三次挖掘(third dredge-up). 最终, 碳-氧简并核会变成一颗冷却的白矮星^[16].

$^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n})^{25}\text{Mg}$ 反应是s-过程另外一个重要的中子源反应, 主要影响质量数小于90的核素合成. $^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n})^{25}\text{Mg}$ 反应发生在大质量恒星的核心氦燃烧阶段和随后的壳层碳燃烧阶段. 首先, 在氦燃烧壳层活跃的大质量AGB星, 热脉冲中的温度足够高, 环境温度可达 $T_9 \approx 0.3$, 可以发生 ^{14}N 核的氦燃烧, 并通过反应链 $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(\beta^+ \nu_e)^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ 生成 ^{22}Ne . 由此, $^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n})^{25}\text{Mg}$ 反应被激活, 为s-过程核合成提供中子. 对于初始质量大于4倍太阳质量的AGB星来说, $^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n})^{25}\text{Mg}$ 反应是最主要的中子源. 此外, 随着大质量恒星继续演化, 当氦耗尽时, ^{22}Ne 仍有剩余, 这时在碳燃烧壳层中通过 ^{12}C

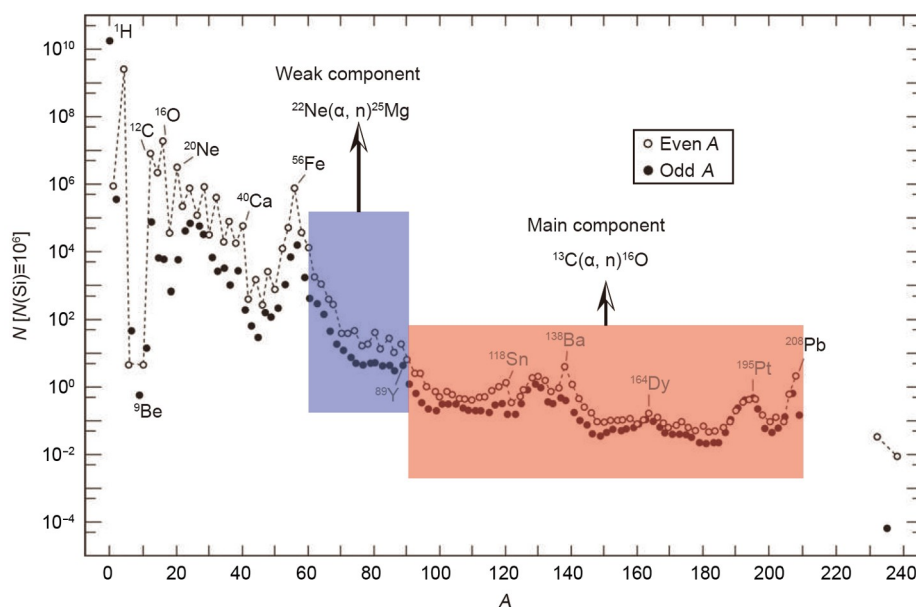


图3 太阳系中奇A核和偶A核的丰度(以硅元素丰度进行归一)随质量数A的变化

Figure 3 Abundances of the nuclides with even or odd mass numbers (A) versus A in the solar system. The abundances are normalized to the value of silicon element

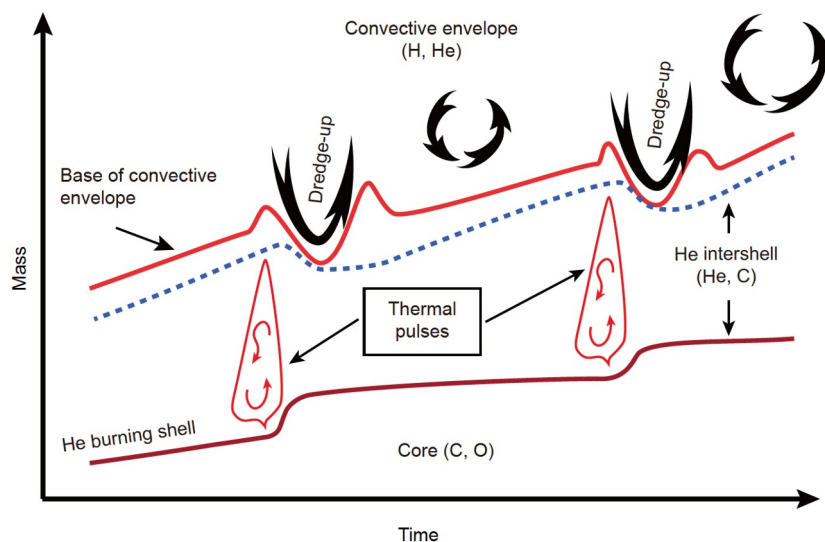


图4 中低质量的AGB星(质量小于9倍太阳质量)结构的演化过程

Figure 4 Schematic diagram of the evolution of the structure of a low- or intermediate-mass ($M < 9M_{\odot}$) AGB star

(^{12}C , α) ^{20}Ne 反应产生 α , 并被 ^{22}Ne 俘获发生 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应, 继续为s-过程核合成提供中子. 目前由于实验的困难, $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应率数据仍极为缺乏, 导致大质量恒星中的超铁元素核合成的中子有效供给问题目前很难被解决.

3 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 中子源研究现状

在 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应过程中, ^{22}Ne 与 α 形成 ^{26}Mg 复合核, 然后放出中子生成 ^{25}Mg . 由于 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 是吸能反应, 因此该反应与 $^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{26}\text{Mg}$ 反应存在竞争. 在 ^{26}Mg 能级(图5)中, 比较重要的共振之一是实验室系能量 $E_{\alpha}=832\text{ keV}$ 的共振, 对应激发能为 11.317 MeV 的 ^{26}Mg 能级, 这个能级是现在 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 地面直接测量实验可以测到的能量最低的共振能级. 另外, 很重要的共振是 $E_{\alpha}=600\text{ keV}$ 附近的共振, 对应图5中激发能为 11.167 MeV 的 ^{26}Mg 能级, 由于在天体环境温度 $T_9=0.3$ 时, $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应对应的天体物理伽莫夫窗口能量是 $570\sim 750\text{ keV}$, 测量这个能量范围内的共振能级对核天体物理研究有重要意义. 目前, 对该反应研究的主要目标是寻找伽莫夫窗口内可能的低能共振.

关于 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应的测量, 主要有直接测量和间接测量两种方法. 直接测量的优点是可以直接得到反应的激发函数, 直接了解反应的共振强度数据, 避免高能实验数据外推导致的不确定性, 缺点是库仑势垒带来的反应截面极小. 间接测量则可以避免由于库

仑势垒导致的低能区极小截面测量的困难, 为R矩阵或其他反应模型进行低能外推提供实验数据, 缺点是低能外推存在不确定性.

3.1 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应的间接测量现状

$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应的间接测量方法主要有非弹性散射、伽马非弹、中子俘获反应、转移反应等. 目前国际上已经有了很多间接测量的工作.

3.1.1 $^{26}\text{Mg}(p, p')$ 非弹性散射

$^{26}\text{Mg}(p, p')$ 反应是非选择性的^[17], 因此这种实验方法可以作为参考来确定 ^{26}Mg 各个态的激发能信息. 1976年, Moss^[18]利用 200 nA 、 20 MeV 的质子束轰击 ^{26}Mg 靶来研究 ^{26}Mg 能级性质; ^{26}Mg 靶通过蒸镀制成, 其靶衬为碳箔; 最终利用Q3D谱仪对出射的质子进行鉴别探测. 2018年, Adsley等人^[19]进行了实验, 由Maier-Leibnitz实验室串行加速器产生的 18 MeV 能量的质子束入射到 ^{26}MgO 靶上, 靶的衬底同样是碳; 反应产物同样利用Q3D谱仪进行筛选, 并利用两个气体探测器和一个塑料闪烁体探测器进行粒子鉴别. 这些实验对 ^{26}Mg 能级的激发能等性质进行了研究.

3.1.2 $^{26}\text{Mg}(\alpha, \alpha')$ 非弹性散射

2016年, Talwar等人^[20]利用 206 MeV 能量的 α 束流轰击 ^{26}Mg 的自衬靶进行实验. 由于Mg接触空气时易被氧化, 他们还利用碳氢靶 $[(\text{CH}_2)_n]$ (1.13 mg/cm^2)和聚酯薄膜 $[(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n]$ (1 mg/cm^2)做本底靶进行修正. 探测器

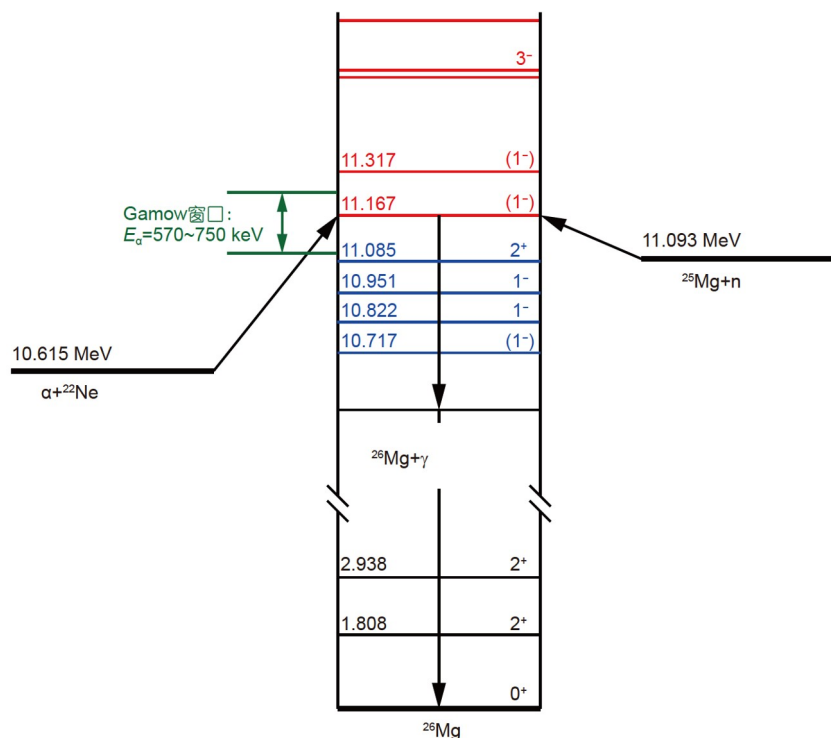


图 5 ^{26}Mg 能级纲图及入射道 $\alpha+^{22}\text{Ne}$ 和出射道 $n+^{25}\text{Mg}$
Figure 5 ^{26}Mg energy level diagram with entrance channel $\alpha+^{22}\text{Ne}$ and exit channel $n+^{25}\text{Mg}$

系统由两个多丝漂移室和两组塑料闪烁体探测器组成。2017年,在Adsley等人^[21]的实验中,200 MeV能量的 α 束流入射到 ^{26}Mg 自衬靶上,反应产物通过Q2D磁谱仪进行动力学分析;在焦平面上使用塑料闪烁体探测器收集出射粒子,测量粒子能量;同时还测量了散射粒子在谱仪中的飞行时间,从而实现粒子鉴别。

3.1.3 $^{26}\text{Mg}(\gamma, \gamma')$ 反应

Longland等人^[22]和deBoer等人^[23]利用三角大学核实验室的强流 γ 源装置进行了 $^{26}\text{Mg}(\gamma, \gamma')$ 反应的测量,束流能量为10.8、11.0、11.2和11.4 MeV,流强为 $10^7/\text{s}$;反应靶为氧化镁粉末,其 ^{26}Mg 丰度为99.41(6)%;使用了4个相对效率为60%的高纯锗探测器,每个探测器都有一个铅和铜组成的屏蔽体,用于减小样品中产生的低能 γ 本底和电子对湮灭产生的 γ 射线的影响。2009年,Schwengner等人^[24]利用能量为13 MeV、流强为450 μA 电子束产生的韧致辐射光子轰击 ^{26}MgO 靶进行实验,散射光子通过4个高纯锗探测器进行探测。

3.1.4 α 集团转移反应

α 集团转移反应的特点是可以布居 ^{26}Mg 的 α 自然宇称态,这些激发态对 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应有重要贡献。1993年,Giesen等人^[25]利用串列加速器产生的32 MeV

能量的 ^6Li 束轰击厚度为 $1.24 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{22}Ne 气体靶,通过位置灵敏正比计数器测量得到了 ^{26}Mg 激发能 $E_x = 9.3 \sim 12.1 \text{ MeV}$ 范围内的能级。2007年,Ugalde等人^[26]使用注入靶技术,将 ^{22}Ne 离子注入到 ^{12}C 碳箔中进行实验,其束流能量为30 MeV,流强为80 pA;反应产物由磁谱仪进行分析,利用位置灵敏气体探测器和塑料闪烁体探测器在焦平面上进行探测。2014年,Ota等人^[27]利用10 pA、110 MeV的 ^{22}Ne 束流进行逆运动学测量,采用石墨为衬底的碳酸锂靶,并且利用硅探测器组成 ΔE - E 望远镜进行粒子鉴别。2018年,Adsley等人^[19]使用回旋加速器产生82.3 MeV能量的 ^6Li 束流入射到靶室压强为0.2 atm的 ^{22}Ne 气室中进行实验,利用高分辨谱仪分析出射粒子,研究了 ^{26}Mg 在 α 分离阈以上的一些能级。2020年,Jayatissa等人^[28]通过垒下转移反应 $^{22}\text{Ne}(^6\text{Li}, d)^{26}\text{Mg}$ 和 $^{22}\text{Ne}(^7\text{Li}, t)^{26}\text{Mg}$,研究了相应于伽莫夫窗口内 ^{26}Mg 能级的 α 宽度,进而导出了 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 的反应率。

3.1.5 $^{25}\text{Mg}(n, \gamma)^{26}\text{Mg}$ 反应

2017年,Massimi等人^[29]在欧洲核子中心的中子飞行时间装置n_TOF上对 $^{25}\text{Mg}(n, \gamma)^{26}\text{Mg}$ 反应进行了测量。中子能量为1 eV~700 keV,反应样品为 ^{25}Mg 粉末,探测

器为两块 $C_6^2H_6$ 液体闪烁体探测器.

3.1.6 间接测量小结

由于在地面实验室开展直接测量受到宇宙射线本底影响, 很难将测量范围扩展至伽莫夫能区, 因此有必要通过间接测量方法对伽莫夫能区的 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应截面进行研究. 目前已经通过非弹性散射、中子俘获反应、转移反应等间接测量方法, 对 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应开展了大量研究, 对相关重要能级位置及其性质有了一定了解.

然而, 现有的间接测量工作还无法解决 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 在低能区的未知共振问题, 其存在与否及贡献大小均需要通过直接测量进行研究.

3.2 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应直接测量现状

3.2.1 1991年斯图加特大学加速器实验

1991年, Harms等人^[30]最早进行了 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应的直接测量. 他们利用斯图加特大学高频高压加速器产生的 $^4He^+$ 束流进行了测量, 束流能量范围为实验室系能量 $E_a=730\text{ keV}\sim 2.1\text{ MeV}$, 流强为250 μA . 他们使用了 ^{22}Ne 无窗气体靶, 其靶室压强为1.3~2.7 mbar(1 bar= 1×10^5 Pa). 实验使用 3He 电离室探测器和 3He 正比管探测器对 neutron 进行探测, 利用石蜡砖和镉层、碳化硼层对 neutron 进行屏蔽. 3He 电离室探测器的探测效率通过 $^3He(n, p)^3H$ 反应进行刻度, 在低能区的探测效率只有0.07%; 3He 正比管探测器的效率较高, 约为3%. 实验对能量范围为 $E_a=830\text{ keV}\sim 2.046\text{ MeV}$ 的一系列共振进行了测量, 并分析得到了 $E_a>1\text{ MeV}$ 的几个共振的共振参数. 在 $E_a<1\text{ MeV}$ 的区域, 数据的误差都比较大; 而在天体感兴趣的能区 $E_a=570\sim 750\text{ keV}$, 他们推测在635 keV处可能存在共振, 但是由于探测效率低和受本底干扰而无法确定.

3.2.2 1993年多伦多大学加速器实验

1993年, Giesen等人^[25]利用多伦多大学的范德格拉夫加速器对 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 进行了直接测量. 他们利用流强100~150 μA 的 α 束流轰击 ^{22}Ne 注入靶, 注入靶在圣母大学的210 keV离子注入机上完成, 靶衬为0.5 mm的钽, 注入能量为25 keV, 注入量为500 mC, 在800 keV能量的 α 束流轰击下的靶厚为30 keV; 利用 $^{22}Ne(p, \gamma)^{23}Na$ 反应的0.64和0.85 MeV共振能级的产额曲线来监测靶厚. 实验使用了31块 3He 正比管探测器将靶包围, 探测器阵列整体嵌入一个10 cm厚的聚乙烯基体中, 利用石蜡、镉和碳化硼层进行屏蔽. 实验前后测量中子

室内本底计数为每分钟 11.2 ± 0.2 个, 探测器系统的效率使用Am-Li源进行刻度, 为 $20\%\pm 3\%$.

实验最终得到了 $E_a=600\sim 900\text{ keV}$ 范围内的 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 中子产额曲线, 并与利用 $^{13}C(\alpha, n)^{16}O$ 反应计算得到的结果进行了比较, 对 $E_a=828\text{ keV}$ 的共振进行了比较好的测量, 而在低能区, 由于测量精度不高, 仍不能测量到可能的共振.

3.2.3 1993年斯图加特大学实验

1993年, Drotleff等人^[31]利用斯图加特大学4 MV高频高压加速器产生的 $^4He^+$ 束流开展了直接测量实验. 他们使用扩展型无窗气体靶, 气体压强为5.3 mbar, 等效靶厚为 $4\times 10^{18}/\text{cm}^2$, 利用100 μA 束流进行轰击. 探测器阵列由8块 3He 正比管探测器组成, 放置于聚乙烯慢化体中, 其效率为 $37\%\pm 1\%$, 实验室中子本底为0.08个/s. 实验测得了 $E_a=500\sim 1500\text{ keV}$ 范围内 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 的反应截面, 他们将低能区测量极限降低到了 5×10^{-10} barn.

3.2.4 2001年斯图加特大学实验

2001年, Jaeger等人^[32]对 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应进行了直接测量. 该工作沿用了之前使用的无窗气体靶和加速器, 但是采用了新的 4π 立体角中子探测器系统, 反应中子在圆柱形聚乙烯慢化体中进行慢化, 随后由12个正比计数探测器进行探测. 探测器被布置在两个同心圆环中, 最终获得了高达50%的绝对探测效率. 探测器周围放置塑料闪烁体探测器进行反符合测量, 以抑制宇宙射线引起的本底. 此外, 在探测器周围布置了几层屏蔽材料(石蜡、聚乙烯、硼和镉)来降低本底.

该实验主要提升了 $E_a<800\text{ keV}$ 能量范围内 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应的测量精度, 创造了地面直接测量实验极限的新纪录, 将截面测量极限降低到了 1×10^{-11} barn, 并确定了可能存在的 $E_a=635\text{ keV}$ 共振的共振强度上限.

3.2.5 小结

我们总结了目前国际上已有 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应直接测量工作的实验数据结果, 如图6所示. 目前国际上直接测量给出的共振结构最低能量仅为800 keV, 在天体物理能区570~750 keV范围内仅给出了截面上限, 通过R矩阵分析后, 不能排除低能区存在共振的可能性. 因此, 对 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应低能区的直接测量极为重要. 当前提升 $^{22}Ne(\alpha, n)^{25}Mg$ 反应低能区实验精度的有效方法是使用强流加速器、高功率靶和低本底环境, 而深地实验室可以降低反应的环境本底, 便于得到高精度的直接测量实验数据.

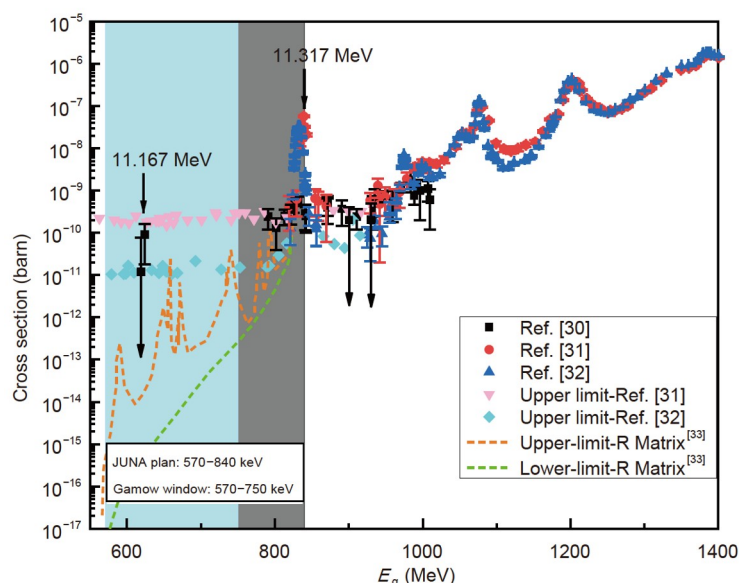


图 6 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应已有直接测量实验截面数据

Figure 6 The cross section data from the direct measurement of the $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction

4 未来深地直接测量计划

4.1 LUNA

LUNA实验平台位于意大利的Gran Sasso国家实验室,自1991年以来,LUNA团队一直在进行深地核天体物理实验研究,是目前国际上最先进的深地核天体物理装置之一^[34]。近年来,LUNA团队成功进行了多个核天体反应的直接测量实验。目前LUNA正在开展升级计划LUNA-MV,将提供能量范围200 keV~3.5 MeV的 H^+ 、 He^+ 、 $^{12}\text{C}^+$ 和 $^{12}\text{C}^{2+}$ 束流,其中 H^+ 最大流强为1 emA, He^+ 最大流强为500 eμA, $^{12}\text{C}^+$ 最大流强为150 eμA, $^{12}\text{C}^{2+}$ 最大流强为100 eμA。LUNA团队已经成功利用靶室压强1.5 mbar的 ^{22}Ne 扩展型无窗气体靶进行了 $^{22}\text{Ne}(\text{p}, \gamma)^{23}\text{Na}$ 反应的测量,并且使用探测效率为 $34\% \pm 3\%$ 的 ^3He 正比管探测器对 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应进行了测量,测量到 neutron 本底为1个/h。对 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应的直接测量也被列在了LUNA的升级计划LUNA-MV任务之中^[35]。

4.2 JUNA

JUNA位于目前世界最深的地下实验室——中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL)。CJPL的 μ 子本底水平比意大利Gran Sasso深地实验室低两个量级(表1),更有利于低截面核天体反应的测量。JUNA团队研制成功了基于ECR(electron cyclotron resonance)离子源和高压平台的强流低能量加速

器,旨在结合高能量分辨BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)和中子探测器阵列,在深地极低本底环境中对多项核天体物理关键反应进行实验研究。

自2020年12月成功出束以来,JUNA已经成功结束了第一阶段实验,对多个核天体物理关键反应进行了研究:对 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应的92 keV共振进行精确测量^[39];对 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反应进行了直接测量,首次覆盖了伽莫夫能量窗口^[40];利用厚靶技术对s-过程关键中子源反应—— $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应进行了直接测量;使用高强度 $^4\text{He}^{2+}$ 离子束在伽莫夫窗口附近对核天体物理圣杯反应—— $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应进行了直接测量,将目前国际测量极限提高了一个数量级。

JUNA的第二阶段实验预计将于2023年开展, $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应将成为第二阶段的首个实验,届时将利用强流 $^4\text{He}^{2+}$ 离子束和低本底环境对伽莫夫窗口内 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应截面进行直接测量,探索可能存在的低

表 1 意大利Gran Sasso国家实验室、中国锦屏地下实验室及地面本底水平比较^[36-38]

Table 1 Comparison between backgrounds in Italian Gran Sasso National Laboratory, in CJPL and on the Earth surface^[36-38]

实验室	埋深(岩层厚度) (m)	等效水深 (m)	宇宙线 μ 子通量 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
地面	~0	~0	2×10^{-2}
意大利Gran Sasso	1400	3780	3×10^{-8}
中国CJPL	2400	6720	2×10^{-10}

表 2 各加速器基本情况比较^[41~43]Table 2 Comparison of basic parameters of several accelerators^[41~43]

加速器	He束流最大流强	²² Ne靶	³ He正比管探测器效率(%)	本底计数	最小测量截面(barn)
多伦多加速器	100~150 μ A	注入靶	20 $\pm$ 3	17000/d	$\sim 10^{-10}$
斯图加特大学加速器	200 μ A	扩展型无窗气体靶	50	7000/d	10^{-11}
LUNA-MV	500 μ A	扩展型无窗气体靶	34 $\pm$ 3	1/h	5.6×10^{-16}
JUNA计划	2.5 mA	喷射型无窗气体靶	27.0(15)	1/h	1.4×10^{-16}

能共振. JUNA加速器可以提供10 emA H^+ 、 He^+ 及2 emA He^{2+} 的高强度束流和90%以上传输效率的长期稳定运行. 中子探测器阵列由24块³He正比管探测器组成, 放置在聚乙烯慢化体中, 均匀分布在两个同心圆上, 其探测效率为27.0(15)%, 目前已经应用于¹³C(α , n)¹⁶O反应的直接测量. 同时, 结合JUNA正在研制喷射型无窗气体靶, 通过增加靶厚进一步提升²²Ne(α , n)²⁵Mg的反应产额. 从表2可以看出, 结合流强、靶厚和本底压低, JUNA是目前国际上测量灵敏度最高的核天体反应实验平台, 有望实现伽莫夫能区²²Ne(α , n)²⁵Mg中子源反应的首次测量.

5 总结与展望

作为s-过程关键中子源反应, ²²Ne(α , n)²⁵Mg反应

对理解宇宙超铁元素起源有重要意义. 本文评述了该反应最新研究进展和未来研究计划, 特别是深地直接测量实验计划. 最有效的研究手段就是在深地实验室对²²Ne(α , n)²⁵Mg反应进行直接测量; 同时, 利用不同的间接测量反应也可以对这个反应进行全面的分析, 降低系统上的不确定度, 如利用 α 转移反应研究²⁶Mg的自然宇称态, 利用²⁶Mg(p, p')反应或²⁵Mg(n, γ)²⁶Mg反应精确研究²⁶Mg的能级等. 目前对²²Ne(α , n)²⁵Mg反应的直接测量实验有限, 且还没有触及天体物理能区, 因此这个课题仍有着很大的研究空间. JUNA有着得天独厚的低本底和强流加速器条件, 因此作为JUNA第二阶段的首个实验, ²²Ne(α , n)²⁵Mg反应有望在国际竞争中取得有国际影响力的研究成果.

参考文献

- Rolf C E, Rodney W S. *Cauldrons in the Cosmos*. Chicago: University of Chicago Press, 1988
- Qian Y Z. A brief introduction to nuclear astrophysics (in Chinese). *Physics*, 2013, 42: 468–483 [钱永忠. 原子核天体物理简介. *物理*, 2013, 42: 468–483]
- He J J, Zhou X H, Zhang Y H. Experimental studies of nuclear astrophysics (in Chinese). *Physics*, 2013, 42: 484–495 [何建军, 周小红, 张玉虎. 核天体物理实验研究. *物理*, 2013, 42: 484–495]
- Guo B, Liu W P, Li Z H. *Nuclear Astrophysics* (in Chinese). Beijing: China Atomic Energy Press, 2017 [郭冰, 柳卫平, 李志宏. 核天体物理. 北京: 中国原子能出版社, 2017]
- Iliadis C. *Nuclear Physics of Stars*. Weinheim: VCH Verlag, 2007
- Aprahamian A, Robert A, Caines H, et al. Reaching the Horizon—The 2015 Long Range Plan for Nuclear Science. 2015, <https://inspirehep.net/literature/1398831>
- Bracco A. The NuPECC Long Range Plan 2017: Perspectives in nuclear physics. *Europhys News*, 2017, 48: 21–24
- Compiling Group for the Development Strategy of Nuclear Physics and Plasma Physics. *Nuclear Physics and Plasma Physics-Frontiers of the Discipline and Development Strategies* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [核物理与等离子体物理发展战略研究编写组. 核物理与等离子体物理——学科前沿及发展战略. 北京: 科学出版社, 2017]
- Haseltine E. The 11 greatest unanswered questions of physics. *Discover*, 2002, 23: 36–43
- He J J, Guo B, Liu W P, et al. How were the heavy chemical elements beyond iron made in the Universe (in Chinese)? *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2429–2439 [何建军, 郭冰, 柳卫平, 等. 宇宙中铁以上的重核是如何合成的. *科学通报*, 2018, 63: 2429–2439]
- Käppeler F, Gallino R, Bisterzo S, et al. The s process: Nuclear physics, stellar models, and observations. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 157–193
- Arnould M, Goriely S, Takahashi K. The r-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries. *Phys Rep*, 2007, 450: 97–213
- Thielemann F K, Arcones A, Käppeli R, et al. What are the astrophysical sites for the r-process and the production of heavy elements? *Prog Part*

- Nucl Phys, 2011, 66: 346–353
- 14 Arnould M, Goriely S. The p-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics status. *Phys Rep*, 2003, 384: 1–84
 - 15 Rauscher T, Dauphas N, Dillmann I, et al. Constraining the astrophysical origin of the p-nuclei through nuclear physics and meteoritic data. *Rep Prog Phys*, 2013, 76: 066201
 - 16 Shen Y P, Guo B, Liu W P. Alpha-cluster transfer reactions: A tool for understanding stellar helium burning. *Prog Part Nucl Phys*, 2021, 119: 103857
 - 17 Benamara S, de Séréville N, Laird A M, et al. Nucleosynthesis of ^{26}Al in massive stars: New ^{27}Al states above α and neutron emission thresholds. *Phys Rev C*, 2014, 89: 065805
 - 18 Moss C E. Excitation energies of levels in ^{23}Na , ^{24}Mg and ^{26}Mg . *Nucl Phys A*, 1976, 269: 429–442
 - 19 Adsley P, Brümmer J W, Faestermann T, et al. High-resolution study of levels in the astrophysically important nucleus ^{26}Mg and resulting updated level assignments. *Phys Rev C*, 2018, 97: 045807
 - 20 Talwar R, Adachi T, Berg G P A, et al. Probing astrophysically important states in the ^{26}Mg nucleus to study neutron sources for the s process. *Phys Rev C*, 2016, 93: 055803
 - 21 Adsley P, Brümmer J W, Li K C W, et al. Re-examining the $^{26}\text{Mg}(\alpha, \alpha')^{26}\text{Mg}$ reaction: Probing astrophysically important states in ^{26}Mg . *Phys Rev C*, 2017, 96: 055802
 - 22 Longland R, Iliadis C, Rusev G, et al. Photoexcitation of astrophysically important states in ^{26}Mg . *Phys Rev C*, 2009, 80: 055803
 - 23 deBoer R J, Wiescher M, Görres J, et al. Photoexcitation of astrophysically important states in ^{26}Mg . II. Ground-state-transition partial widths. *Phys Rev C*, 2010, 82: 025802
 - 24 Schwengner R, Wagner A, Fujita Y, et al. Dipole transition strengths in ^{26}Mg . *Phys Rev C*, 2009, 79: 037303
 - 25 Giesen U, Browne C P, Görres J, et al. The astrophysical implications of low-energy resonances in $^{22}\text{Ne} + \alpha$. *Nucl Phys A*, 1993, 561: 95–111
 - 26 Ugalde C, Champagne A E, Daigle S, et al. Experimental evidence for a natural parity state in ^{26}Mg and its impact on the production of neutrons for the s process. *Phys Rev C*, 2007, 76: 025802
 - 27 Ota S, Makii H, Ishii T, et al. The $^6\text{Li}(^{22}\text{Ne}, ^{26}\text{Mg})\alpha$ -transfer experiment for the study of low-energy resonances in $^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{26}\text{Mg}$. *EPJ Web Conf*, 2014, 66: 07017
 - 28 Jayatissa H, Rogachev G V, Goldberg V Z, et al. Constraining the $^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{26}\text{Mg}$ and $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction rates using sub-Coulomb α -transfer reactions. *Phys Lett B*, 2020, 802: 135267
 - 29 Massimi C, Altstadt S, Andrzejewski J, et al. Neutron spectroscopy of ^{26}Mg states: Constraining the stellar neutron source $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$. *Phys Lett B*, 2017, 768: 1–6
 - 30 Harms V, Kratz K L, Wiescher M. Properties of $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ resonances. *Phys Rev C*, 1991, 43: 2849–2861
 - 31 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
 - 32 Jaeger M, Kunz R, Mayer A, et al. $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$: The key neutron source in massive stars. *Phys Rev Lett*, 2001, 20: 202501
 - 33 deBoer R J. Measurements and Analysis of α -Induced Reactions of Importance for Nuclear Astrophysics. Ann Arbor: ProQuest LLC., 2011
 - 34 Ananna C, Barile F, Boeltzig A, et al. Underground measurements of nuclear reaction cross-sections relevant to AGB stars. *Universe*, 2022, 8: 4
 - 35 Broggini C, Bemmerer D, Caciolli A, et al. LUNA: Status and prospects. *Prog Part Nucl Phys*, 2018, 98: 55–84
 - 36 Hauser G. Cosmic ray-induced background in Ge-spectrometry. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms*, 1993, 83: 223–228
 - 37 Imbriani G. Recent results and prospective of the LUNA experiment. In: International Workshop on Nuclear Physics 28th Course, 2006
 - 38 Wu Y C, Hao X Q, Yue Q, et al. Measurement of cosmic ray flux in the China JinPing Underground Laboratory. *Chin Phys C*, 2013, 37: 086001
 - 39 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
 - 40 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
 - 41 Li Y T, Lin W P, Gao B S, et al. Development of a low-background neutron detector array. *Nucl Sci Tech*, 2022, 33: 41
 - 42 Csétreki 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 Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 2021, 994: 165081
 - 43 Ohm H, Kratz K L, Prussing S G. The analysis of delayed neutron energy spectra recorded with ^3He ionization chambers. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A-Accel Spectrom Dect Assoc Equip*, 1987, 256: 76–90

Summary for “ $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应: 大质量恒星中的关键中子源”

$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$: The key neutron source in massive stars

Wei Nan, Bing Guo^{*}, Yangping Shen, Zhihong Li & Weiping Liu

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

^{*} Corresponding author, E-mail: guobing@ciae.ac.cn

The origin of heavy elements from iron to uranium in the universe is an important frontier direction for nuclear astrophysics. It is considered to be one of the 11 greatest unanswered questions of physics in this century. The neutron capture reaction can overcome the Coulomb barrier and is the key way to generate heavy elements in the universe. The average life of free neutrons is only about 15 min. Therefore, the neutron source is a hot topic for understanding the origin of heavy elements. There are two main neutron sources in the s-process nucleosynthesis, one is the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction, the other is the $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction. The $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction mainly provides neutrons for the s-process nucleosynthesis of small or medium mass stars, and affects the nucleosynthesis of nuclides with the mass numbers from 90 to 209; while the $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction mainly provides neutrons for the s-process nucleosynthesis of massive stars and affects the nucleosynthesis of nuclides with the mass number less than 90. The $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction takes place in the core helium burning phase and the subsequent shell carbon burning phase of massive stars. Due to the difficulty of experiment measurement, the data of the $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction rate is still lacking, which leads to the problem of understanding effective neutron supply in the nucleosynthesis of the heavy elements in massive stars.

Limited by cosmic ray backgrounds, a large number of key reactions in hydrostatic nuclear burning phases cannot be accurately measured. Therefore, direct measurement of these reactions has gradually moved from the earth-surface to underground laboratories. The Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics (LUNA) experimental platform in Italy is a mature underground nuclear astrophysics laboratory in the world. Since the 1990s, direct measurement of many nuclear reactions has been carried out. Jinping Underground Nuclear Astrophysics Laboratory (JUNA) is a new experimental platform. JUNA is located in the world's deepest underground laboratory—China Jinping Underground Laboratory (CJPL). JUNA team has successfully developed a 10 mA low-energy accelerator and experimental terminal, which aims to conduct experimental research on a number of key nuclear reactions in hydrostatic hydrogen and helium burnings of stars in an underground environment with very low background. Since its operation in the underground laboratory at the end of 2020, JUNA has completed the first phase of experimental tasks and successfully studied several key nuclear reactions including the neutron source reaction $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$.

In this paper, we review the motivation of the key neutron source $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ in the origin of heavy elements and in the massive stars, the latest research progress of this neutron source and future research plan, especially the underground direct measurement experimental plan. As the key neutron source reaction of the s-process, the $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction is of great significance for understanding the origin of heavy elements in the universe. As the first experiment in the second phase of JUNA, the $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reaction is expected to achieve world-class research results and provides the crucial nuclear input for understanding the nucleosynthesis in weak s-process.

nuclear astrophysics, origin of the elements heavier than iron, s-process, neutron source, underground experiment

doi: [10.1360/TB-2022-0279](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0279)