



恒星氦燃烧关键反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的实验研究

南巍 郭冰 谌阳平 连钢 苏俊 李云居 樊启文 李志宏 王友宝 颜胜权 廖俊辉 曾晟 张龙
曹富强 李歌星 陈晨 南威克 宋娜 王强 董超 李家英豪 田峻文 张扬 张玉强 周江枫 陈
誉文 郭昌鑫 侯江林 蒋宇辰 张智程 朱铭浩 柳卫平

Experimental Research on the Key Reaction of Stellar Helium Burning: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

NAN Wei, GUO Bing, SHEN Yangping, LIAN Gang, SU Jun, LI Yunju, FAN Qiwen, LI Zhihong, WANG Youbao, YAN Shengquan, LIAO Junhui, ZENG Sheng, ZHANG Long, CAO Fuqiang, LI Gexing, CHEN Chen, NAN Weike, SONG Na, WANG Qiang, DONG Chao, LI Jiayinghao, TIAN Junwen, ZHANG Yang, ZHANG Yuqiang, ZHOU Jiangfeng, CHEN Yuwen, GUO Changxin, HOU Jianglin, JIANG Yuchen, ZHANG Zhicheng, ZHU Minghao, LIU Weiping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC59>

引用格式:

南巍, 郭冰, 谌阳平, 连钢, 苏俊, 李云居, 樊启文, 李志宏, 王友宝, 颜胜权, 廖俊辉, 曾晟, 张龙, 曹富强, 李歌星, 陈晨, 南威克, 宋娜, 王强, 董超, 李家英豪, 田峻文, 张扬, 张玉强, 周江枫, 陈誉文, 郭昌鑫, 侯江林, 蒋宇辰, 张智程, 朱铭浩, 柳卫平. 恒星氦燃烧关键反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的实验研究[J]. 原子核物理评论, 2024, 41(1):11-19. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC59

NAN Wei, GUO Bing, SHEN Yangping, LIAN Gang, SU Jun, LI Yunju, FAN Qiwen, LI Zhihong, WANG Youbao, YAN Shengquan, LIAO Junhui, ZENG Sheng, ZHANG Long, CAO Fuqiang, LI Gexing, CHEN Chen, NAN Weike, SONG Na, WANG Qiang, DONG Chao, LI Jiayinghao, TIAN Junwen, ZHANG Yang, ZHANG Yuqiang, ZHOU Jiangfeng, CHEN Yuwen, GUO Changxin, HOU Jianglin, JIANG Yuchen, ZHANG Zhicheng, ZHU Minghao, LIU Weiping. Experimental Research on the Key Reaction of Stellar Helium Burning: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ [J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):11-19. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC59

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锦屏深地核天体物理实验(JUNA)地面实验进展

Progress of the Ground Experiments of Jinping Underground Nuclear Astrophysics Experiment

原子核物理评论. 2020, 37(3): 283-290 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC60>

核天体物理实验中的原位正电子湮灭测量方法

In situ Measurement Method of Positron Annihilation in Nuclear Astrophysical Experiments

原子核物理评论. 2024, 41(1): 340-345 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC75>

山东大学(威海)开展的核物理研究

The Nuclear Physics Research of Shandong University at Weihai

原子核物理评论. 2020, 37(3): 500-508 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC70>

致密物质状态方程: 中子星与奇异星

Dense Matter Equation of State: Neutron Star and Strange Star

原子核物理评论. 2019, 36(1): 1-36 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.001>

首次使用核反应法鉴别JUNA深地加速器 $A/q=2$ 的束流种类

Identification of the $A/q=2$ Beam Species from the JUNA Deep Underground Accelerator by Nuclear Reaction Method for the First

Time

原子核物理评论. 2019, 36(4): 414–418 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.414>

[用于核天体物理实验的活性靶时间投影室](#)

Active Target Time Projection Chamber (TPC) for Nuclear Astrophysics Experiments

原子核物理评论. 2020, 37(3): 636–642 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC47>

恒星氦燃烧关键反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的实验研究

南巍¹, 郭冰^{1,4,†}, 谌阳平^{1,4,†}, 连钢^{1,4}, 苏俊², 李云居^{1,4}, 樊启文¹, 李志宏^{1,4}, 王友宝^{1,4}, 颜胜权^{1,4}, 廖俊辉^{1,4}, 曾晟^{1,4}, 张龙^{1,4}, 曹富强^{1,4}, 李歌星^{1,4}, 陈晨¹, 南威克¹, 宋娜¹, 王强¹, 董超¹, 李家英豪¹, 田峻文¹, 张扬¹, 张玉强¹, 周江枫¹, 陈誉文¹, 郭昌鑫¹, 侯江林¹, 蒋宇辰¹, 张智程¹, 朱铭浩¹, 柳卫平^{1,3,4}

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875;

3. 南方科技大学理学院, 广东 深圳 518055;

4. 锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室, 四川 凉山 615000)

摘要: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应是核天体物理重要核反应之一。该反应通过与 3α 反应竞争直接影响氦燃烧产生的 C 和 O 的丰度比, 对于理解恒星演化和生物演化都有重要意义, 也对研究黑洞间隙有重要作用, 被誉为核天体物理的圣杯反应。本文对该反应的研究现状进行了介绍, 并介绍了未来的计划。对该反应的间接测量方法主要有弹性/非弹性散射、 β 延迟 α 发射、逆反应和 α 转移等方法, 近年来国际上也有一些直接测量实验研究。然而目前现有 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应直接测量仍无法将测量能区扩展至核天体物理关心的伽莫夫窗口, 间接测量结果之间也存在较大分歧, 远未达到恒星模型计算要求的 10% 精度, 因此对该反应的测量仍是核天体物理关注的重点。中国原子能科学研究院利用 (^{11}B , ^7Li) 转移体系对圣杯反应进行了间接测量, 并正在锦屏深地核天体物理实验平台开展直接测量研究, 已完成国际最低能区直接测量, 未来将向更低的能区发起冲击。

关键词: 核天体物理; α 转移反应; 深地实验室

中图分类号: O571.1

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC59

0 引言

我们生存的世界由各种元素构成的, 元素在宇宙中的起源一直是科学界关注的重要问题, 也是核天体物理研究的重点之一。核天体物理主要研究恒星演化和元素起源中的关键核反应^[1-5], 通过将天体环境中发生的核过程在实验室中还原, 实现对这些核过程截面、反应率等关键信息的测量。基于这些核数据, 我们可以构建核天体物理网络对宇宙元素丰度和恒星演化过程进行预言, 并与天文观测相结合, 推进核天体物理理论发展。核天体物理作为一门新兴的交叉学科, 是物理学的一个重要前沿领域^[6]。

O 和 C 是宇宙中元素丰度第三和第四的元素, 也是人体中质量占比最大的两种元素。宇宙中的这两种元素被认为主要来自于各类恒星的氦燃烧过程。氦燃烧过程是宇宙中比碳重的元素合成的关键天体核过程, 包含大

量 α 粒子的俘获反应。以恒星的核心氦燃烧过程为例, 当恒星核心的氢在氢燃烧阶段完全消耗, 恒星外的壳层仍然进行氢燃烧, 恒星由于无法通过产生热压力以对抗引力而开始收缩, 导致氦核心温度和密度进一步升高, α 粒子俘获反应率快速提升, 核心的氦开始聚变成更重的核素, 恒星进入氦燃烧阶段。

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应是平稳氦燃烧阶段的重要环节, 在驱动低质量和大质量恒星进化和相关核合成的关键核燃烧阶段发挥着重要作用, 是核天体物理最重要的反应之一^[7-10]。图 1 给出了 3α 反应与 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的示意图。在恒星氦燃烧过程中, 该反应与 3α 反应联系紧密, 3α 反应将 α 转化为 ^{12}C , 而 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应进一步消耗 α 和 ^{12}C 产生 ^{16}O , 二者共同决定了氦燃烧产生的 C 和 O 的丰度。从上述过程可以看出, $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应率直接影响了宇宙中碳氧元素的合成比例。碳氧元素也是更重元素合成的种子核, 因此该反应对宇宙中诸多

收稿日期: 2023-08-22; 修改日期: 2024-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFA1602301); 国家自然科学基金资助项目 (12125509, 12005304, 12222514); 中核集团青年英才项目; 稳定支持基础科研计划项目

作者简介: 南巍 (1996-), 男, 河北张家口人, 博士研究生, 从事核天体物理研究; E-mail: nanw1996@qq.com

† 通信作者: 郭冰, E-mail: guobing@ciae.ac.cn; 谌阳平, E-mail: ypshe@cicae.ac.cn

关键元素丰度均有重要影响。此外, 由于碳氧比变化也会影响随后在核心及壳层中发生的碳、氧燃烧过程, 该反应对深入确定黑洞质量间隙也有重要作用^[11]。由于在天体演化和元素合成中的关键地位, $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的重要性被诺贝尔奖得主威廉·富勒肯定, 被誉为核天体物理的“圣杯反应”。目前 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的精度还没有达到恒星模型计算要求的 10% 精度^[7, 12], 在天体物理感兴趣的伽莫夫窗口 (Gamow window) 能区 $E_{\text{cm}} = (300 \pm 80) \text{ keV}$ 内精度仅为 20%^[13], 极大影响了对恒星演化和关键元素合成的约束, 因此该反应的测量仍是核天体物理关注的重点。

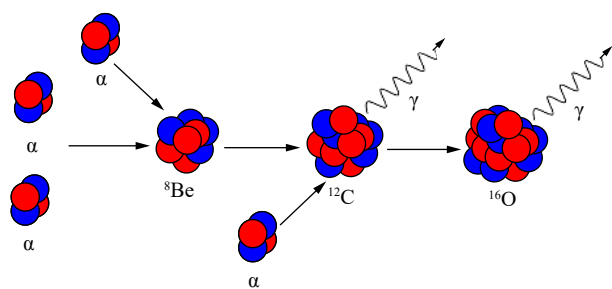


图 1 3α 反应与圣杯反应

目前对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应反应的直接测量、间接测量和理论研究正在同步开展, 然而开展精确的实验测量仍存在较大的挑战。在直接测量方面, 由于在伽莫夫能区内 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应截面量级约为 10^{-17} b , 再加上宇宙射线带来的伽马本底, 导致很难通过直接测量将实验数据推进伽莫夫窗口能区, 目前直接测量所达到的最低能量仅为 891 keV, 距离 $(300 \pm 80) \text{ keV}$ 的伽莫夫窗口还有相当大的差距。间接测量主要针对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应中重要共振对应的 ^{16}O 的激发态能级开展测量。图 2 给出了 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的能级纲图, 该反应的 α 分离阈为 7.16 MeV, 两个主要辐射俘获模式是 $E1$ 和 $E2$ 基态跃迁, $E1$ 基态跃迁主要由 $E_x = 9.585 \text{ MeV}$ 1^- 态共振的拖尾和 $E_x = 7.117 \text{ MeV}$ 1^- 态阈下共振贡献; $E2$ 基态跃迁主要包括 ^{16}O 基态俘获和 $E_x = 6.917 \text{ MeV}$ 2^+ 态阈下共振。在这些共振中, 两个阈下共振对伽莫夫窗口内的 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应有显著的贡献, 但由于该反应的直接测量无法布居阈下态, 且各激发态无法跃迁到这两个阈下态, 因此这两个态的贡献目前无法依靠直接测量数据进行约束。理论计算方面, 常通过 R 矩阵方法计算核天体物理反应率。 R 矩阵理论是描述复合核反应过程性质的参数化理论, 依赖于高精度的能级参数, 因此目前阈下共振参数的不确定导致不同 R 矩阵计算结果之间也存在较大的差异。

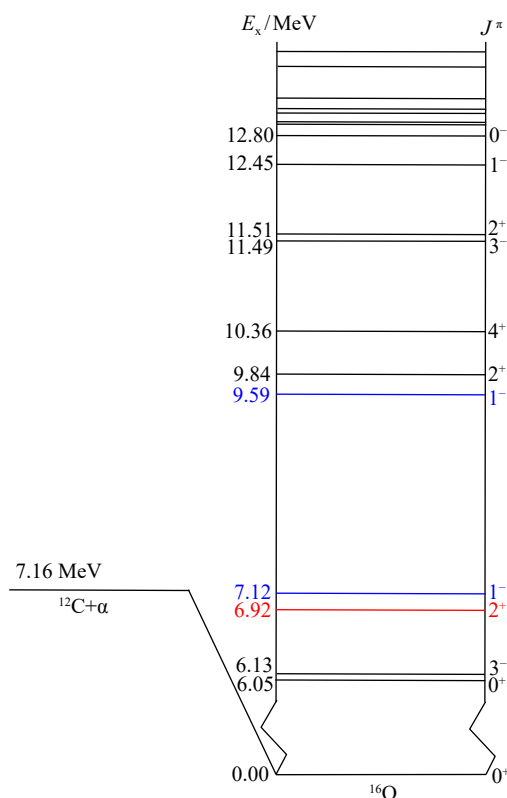


图 2 ^{16}O 能级纲图与入射道 $^{12}\text{C} + \alpha$

1 间接测量实验研究

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 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的测量范围扩展至截面极低的伽莫夫能区, 且由于该反应的直接测量无法布居阈下共振, 阈下共振的贡献无法通过直接测量得到, 因此有必要通过间接测量方法对其进行研究。近年来, 国内外有很多间接测量的工作, 目前主要的研究方法有弹性散射、 β 延迟 α 发射、逆反应和 α 集团转移等间接测量手段。

1.1 弹性散射实验研究

由于 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应是辐射俘获反应, 对其截面进行计算时, 需要考虑不同的产生或衰变产生复合核的反应, 即不同的反应道。图 3 给出了 $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$ 弹性散射反应的示意图。弹性散射可以测量复合核激发态的粒子道分宽度, 并且可以确定激发态的自旋宇称和能量等信息, 且其截面比转移反应大得多, 更利于进行实验测量。另外, 弹性散射实验测量的是出射的带电粒子而非伽马粒子, 也可以降低本底带来的影响。Tischhauser 等^[14-15] 在 2002 年和 2009 年分别进行了 $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$ 反应的实验研究, 利用圣母大学的硅探测器阵列对 $E_\alpha = 2.6 \sim 8.2 \text{ MeV}$ 范围内的 ^{16}O 能级进行了研究。他们利

用 R 矩阵对实验数据进行了分析,并得到了基态 $E2$ 跃迁的天体物理 S 因子,计算得到的 R 矩阵相移因子为后续的实验提供了支持。更多相关工作参见文献[16–22]。

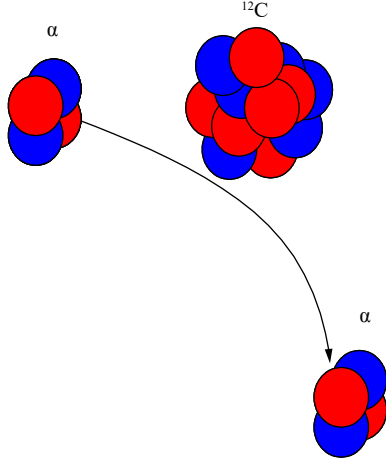


图3 $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$ 反应示意图

1.2 β 延迟 α 发射

^{16}N 衰变受到其基态自旋宇称的限制,将主要布居于核 ^{16}O 的 1^- 和 3^- 态上,因此可以用该方法约束 ^{16}O 到基态的 $E1$ 跃迁分量。图4给出了 $^{16}\text{N}(\beta\alpha)^{12}\text{C}$ 反应的示意图。 ^{16}N 首先发射一个电子,衰变为 ^{16}O ;随后 ^{16}O 再发射一个 α 粒子,衰变为 ^{12}C 。通过对 1^- 态衰变出射的 α 峰进行测量,可以根据 α 能谱给出 1^- 态的 α 衰变分宽度,然后通过 R 矩阵等理论能够导出天体物理 S 因子的 $E1$ 分量。另一方面, ^{16}N 通过 β 衰变到7.12 MeV 1^- 态,和9.59 MeV 1^- 态延迟发射的 α 粒子,相干引起 $E_\alpha=1.1$ MeV处有一个小峰,对其进行 R 矩阵拟合可以对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的 $E1$ 部分贡献进行有效约束。Tang等[23–24]于2007年开展了 $^{16}\text{N}(\beta\alpha)^{12}\text{C}$ 实验研究,利用电离室探测器对反应产物进行了测量,并得到了 $E1$ 跃迁分量的 S 因子,实验结果与其它工作的结果进行了比较,并证明理论外推仍需要更高精度的相移因子、截面、分支比等参数。更多相关工作参见文献[25–34]。

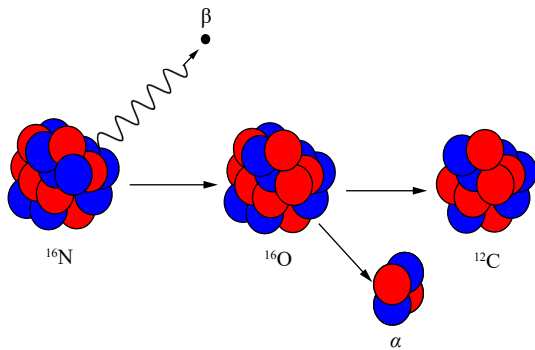


图4 $^{16}\text{N}(\beta\alpha)^{12}\text{C}$ 反应示意图

1.3 逆反应实验研究

逆反应也是研究圣杯反应的有效手段。如图5所示,利用光子轰击 ^{16}O 核,布居到高激发态,随后 ^{16}O 发射 α 粒子衰变到 ^{12}C 。通过测量出射的 α 粒子可以降低伽马本底带来的影响,通过测量逆反应,再通过 R 矩阵方法和细致平衡原理可以得到圣杯反应的信息。2021年,Smith等[35]对 $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ 进行研究,利用TPC探测器测量出射的 α 粒子,测量了 $E_{\text{c.m.}}=2.4$ MeV的 1^- 态共振,并对 $E1$ 和 $E2$ 组分的混合相位角进行了分析,证明逆反应方法能够以更高的精度覆盖较大的测量范围,未来可以利用该方法进行更低能量的研究。更多相关工作参见文献[36]。

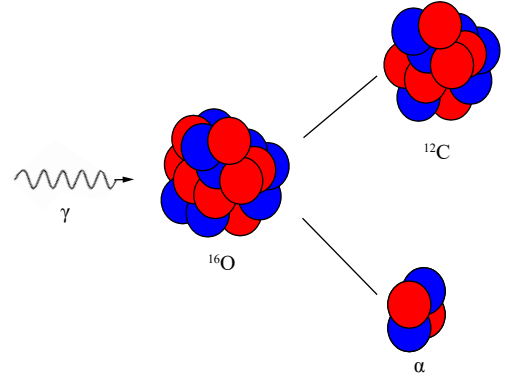


图5 $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ 反应示意图

1.4 α 集团转移反应

α 集团转移是研究圣杯反应的重要间接测量手段。自核物理诞生以来,原子核的集团结构一直是核结构的基本概念之一[37]。由于其自旋和同位旋对称性以及高结合能, α 集团被认为是最可能存在的集团结构,可以在不受干扰的原子核内存在相当长的时间[38]。 α 集团可以优先以集团结构填充自然宇称等同位旋态,而且集团结构有助于对天体物理俘获反应的研究。通过测量轻核引发的 α 集团转移,可以在比伽莫夫窗口能量更高的能区对天体物理反应截面进行研究,同时也可以测量直接反应无法布居的阈下能级。目前有很多利用 α 集团转移对圣杯反应进行研究的工作。Brune等[39]通过测量 $^{12}\text{C}(^6\text{Li}, d)^{16}\text{O}$ 和 $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, t)^{16}\text{O}$ 反应的总截面对 ^{16}O 的阈下能级进行了研究;Belhout等[40]测量了 $^{12}\text{C}(^6\text{Li}, d)^{16}\text{O}$ 反应的截面数据,并利用扭曲波玻恩近似(Distorted-wave Born-approximation, DWBA)方法分析了数据;Oulebsir等[41]测量了 $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, t)^{16}\text{O}$ 反应,得到了约化 α 宽度;Avila等[42]通过 $^6\text{Li}(^{12}\text{C}, d)^{16}\text{O}$ 反应测量了阈下能级的渐进归一化系数(ANC)。如表1所列,上述工作得到的ANC仍存在一定分歧,这可能是由于不同的模型

提供的输入参数所导致的, 因此需要新的转移体系来提供数据支持。更多国际上的相关工作参见文献[43–44]。

表 1 转移反应测量 ANC 对比表 [39–32, 45–46]

实验工作	$ANC_{6.917}/\text{fm}^{-1/2}$	$ANC_{7.117}/\text{fm}^{-1/2}$
Brune(1999)	$1.14(10) \times 10^5$	$2.08(20) \times 10^{14}$
Belhout(2007)	$1.40(50) \times 10^5$	$1.87(54) \times 10^{14}$
Oulebsir(2012)	$1.44(28) \times 10^5$	$2.00(35) \times 10^{14}$
Avila(2015)	$1.22(7) \times 10^5$	$2.09(14) \times 10^{14}$
Shen(2020)	$1.05(13) \times 10^5$	
Nan(2024)		$1.59(13) \times 10^{14}$

中国原子能科学研究院利用 (^{11}B , ^7Li) 转移体系对圣杯反应进行了研究 (图 6)。实验设置如图 7 所示, 利用北京串列国家实验室 HI-13 串列加速器产生的 50 MeV ^{11}B 束流轰击厚度为 $66 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的自衬碳靶, 出射的 ^7Li 粒子通过 Q3D 磁谱仪的偏转, 被位于焦平面探测器室的二维位置灵敏硅探测器阵列测量。转移反应角分布数据利用 FRESKO 程序 [45] 进行处理, 利用得到的阈下态的束缚态参数及其它工作的数据, 通过有限程扭曲波玻恩近似 (Finite-range distorted-wave Born-approximation,

FRDWBA) 方法进行分析, 并通过最小 χ^2 法确定束缚态光学势参数 (图 8), 最终得到 ^{16}O 阈下能级的谱因子、ANC 及约化 α 宽度等数据。将上述参数及直接测量实验的高激发态数据作为输入量, 经过 R 矩阵计算得到天体物理 S 因子。目前已经得到了 ^{16}O 基态俘获、6.917 MeV 2^+ 态和 7.117 MeV 1^- 态跃迁的结果 [46–48], 已经完成了对圣杯反应的间接测量工作, 为圣杯反应提供了重要的数据支持。

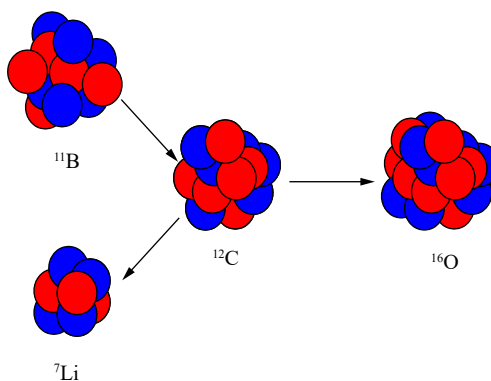


图 6 $^{12}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{16}\text{O}$ 反应示意图

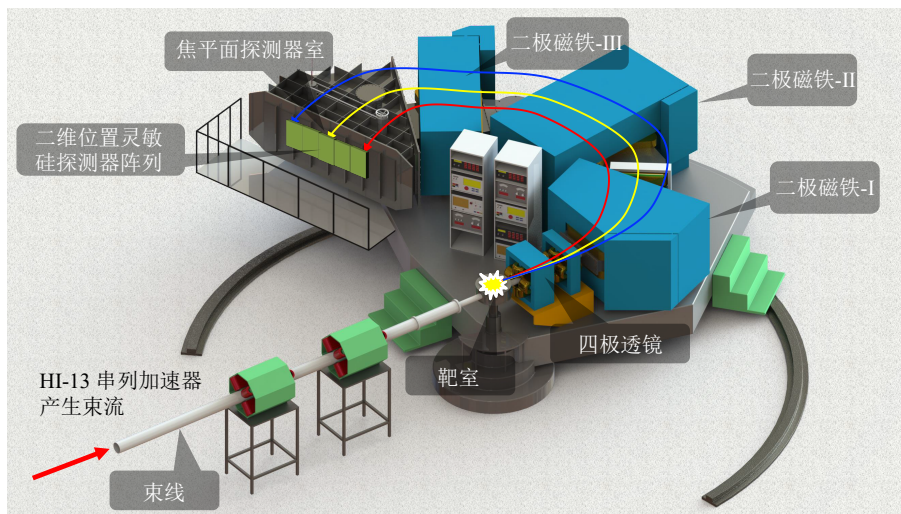


图 7 $^{12}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{16}\text{O}$ 反应实验设置

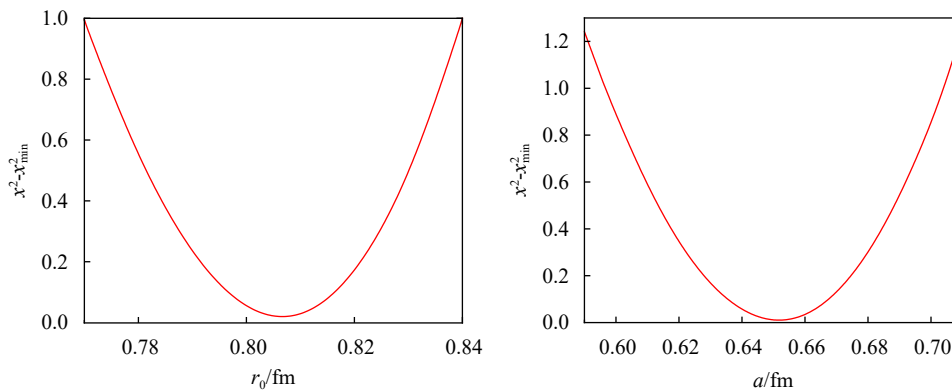


图 8 最小 χ^2 确定 ^{16}O 7.117 MeV 激发态拟合参数

2 直接测量实验研究

2.1 地面直接测量实验研究

直接测量可以直接得到反应的截面和能级信息，降低间接测量可能存在的系统性偏差和复杂的共振干涉机制带来不确定性。现有的直接测量工作主要在地面实验室完成，目前主要的直接测量工作结果见表 2。

1987 年，Redder 等^[49]进行了 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的直接测量。实验在斯图加特高频高压加速器进行，产生的 α 束流能量范围为 1.3~3.9 MeV。利用放置在不同出射角度的 NaI 探测器和锗探测器对出射的 γ 进行测量，得到了 S 因子的 $E1$ 分量。通过对测量到的角分布的分析，该实验计算得到了不同能量下 $E1$ 和 $E2$ 俘获的截面比，并首次验证了 $E2$ 俘获具有与 $E1$ 俘获相当的贡献，证明在恒星温度下，跃迁模式的多极性十分重要。

2005 年，Hammer 等^[50]利用斯图加特高频高压加速器进行了实验。该实验利用高纯锗探测器进行测量，测量的最低能量达到了 891 keV，是目前直接测量达到的最低能量。该实验成功分离了 $E1$ 和 $E2$ 俘获的激发函数，对于天体物理反应率的分析精度达到 25%。

2011 年，Schürmann 等^[51]利用德国波鸿鲁尔大学地那米串列实验室的欧洲核天体物理反冲分离器开展了实验。实验通过产生 ^{12}C 束流轰击 ^4He 无窗气体靶，利用 6 块 NaI 探测器组成的伽马探测器阵列对 ^4He ($^{12}\text{C}, \gamma$) ^{16}O 反应产生的 γ 进行测量，经过 R 矩阵分析，最终得到了 $E_{\text{c.m.}}=3\ 300\sim 4\ 500$ keV 能量范围内的 6.05, 6.13, 6.92, 7.12 MeV 几个共振态对 S 因子的贡献，并得出了 6.05 MeV 级联跃迁在氢燃烧温度下不存在天体物理相关性的结论。

2012 年，Plag 等^[52]利用德国卡尔斯鲁厄理工学院的 3.7 MV 范德格拉夫静电加速器进行了实验。实验利用脉冲 ^4He 束流进行，实验 4π 立体角 BaF_2 探测阵列对反应产生的 γ 进行测量，最终得到了 $E_{\text{c.m.}}=1\ 002\sim 1\ 510$ keV 能量范围内的 $E1$ 、 $E2$ 跃迁 S 因子。这项工作为恒星温度下的反应率分析提供了重要输入量。

2015 年，Sagara 等^[53]发展了吹入式无窗气体靶并进行了 ^4He ($^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}$) γ 反应测量。实验在日本九州大学进行，利用脉冲 ^{12}C 束流轰击气体靶，利用反冲质量谱

仪对出射的 ^{16}O 粒子和束流中的 ^{12}C 进行分离，最终实验产生的 ^{16}O 通过气体计数器和硅探测器组成的 ΔE - E 探测器阵列进行测量和分析。这是首次使用气体靶进行的圣杯反应测量，为未来的圣杯反应研究带来了新思路。

除了上述实验之外，目前还有一些直接测量工作^[54-80]。当前直接测量的最接近伽莫夫窗口能量仅在 891 keV，距离天体物理感兴趣的伽莫夫窗口能区 $E_{\text{c.m.}}=(300\pm 80)$ keV 仍有差距，主要原因是圣杯反应在伽莫夫能区截面极低，且在地面实验室开展直接测量受到宇宙射线本底影响，因此对该反应的直接测量研究逐渐转向了深地实验室。深地实验室可以降低反应的环境本底，便于将反应能区推进伽莫夫窗口，得到更高精度的直接测量实验数据。目前致力于圣杯反应的深地实验室主要有意大利的 LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) 和中国锦屏深地核天体物理实验平台 JUNA (Jinping Underground Nuclear Astrophysics laboratory)。

2.2 深地直接测量实验研究

LUNA 实验平台位于意大利的 Gran Sasso 国家实验室，是目前国际上最先进的核天体物理实验室之一^[81]。自 1991 年至今，LUNA 平台已经成功完成了多个核天体物理重要核反应的实验测量。目前 LUNA 即将建成升级计划 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 He^+ 最大流强可达 500 μA 。LUNA 拥有高效率的锗酸铋 (BGO) 探测阵列和高分辨率的高纯锗 (HPGe) 探测器，在 LUNA 的升级计划 LUNA-MV 的任务之中，圣杯反应被设置为第二阶段的首要反应^[81]。

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)^[82]。CJPL 的本底水平比意大利 Gran Sasso 深地实验室低 2 个量级 (见表 3)，更有利于低截面核天体物理实验的测量。近年来，JUNA 项目进展顺利，成功完成 400 kV 强流加速器和 ECR 离子源的研发，获得了 400 keV、10 mA 的质子束流和 He^+ 束流及 800 keV、2 mA He^{2+} 束流，加速器结构示意图如图 9 所示。大功率固体靶的研制及实验数据获取系统的建立也已成功完成。还测量了锗酸铋 (BGO) 探测阵列和溴化镧 (LaBr_3) 探测器

表 2 地面直接测量实验对比表^[49-53]

实验工作	束流	$E_{\text{c.m.}}$ 能量范围/keV	实验用靶	探测器
Redder(1987)	^4He	940~2 840	注入靶，铜衬底	NaI 探测器，锗探测器
Hammer(2005)	^4He	891~2 800	注入靶，金衬底	高纯锗探测器
Schürmann (2011)	^{12}C	3 300~4 500	^4He 无窗气体靶	NaI 探测器
Plag(2012)	脉冲 ^4He	1 002~1 510	注入靶，镀金铜衬	4π 立体角 BaF_2 探测阵列
Sagara(2015)	脉冲 ^{12}C	1 200~2 400	^4He 无窗气体靶	硅探测器

表 3 深地实验室主要参数对比表^[83-84]

实验平台	宇宙线 μ 子本底/($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	He束流能量/keV	He束流强度/cmA	γ 探测效率@8 MeV
LUNA-MV	2×10^{-8}	200~3 500	0.5	67%
JUNA	2×10^{-10}	50~800	2.0	60%

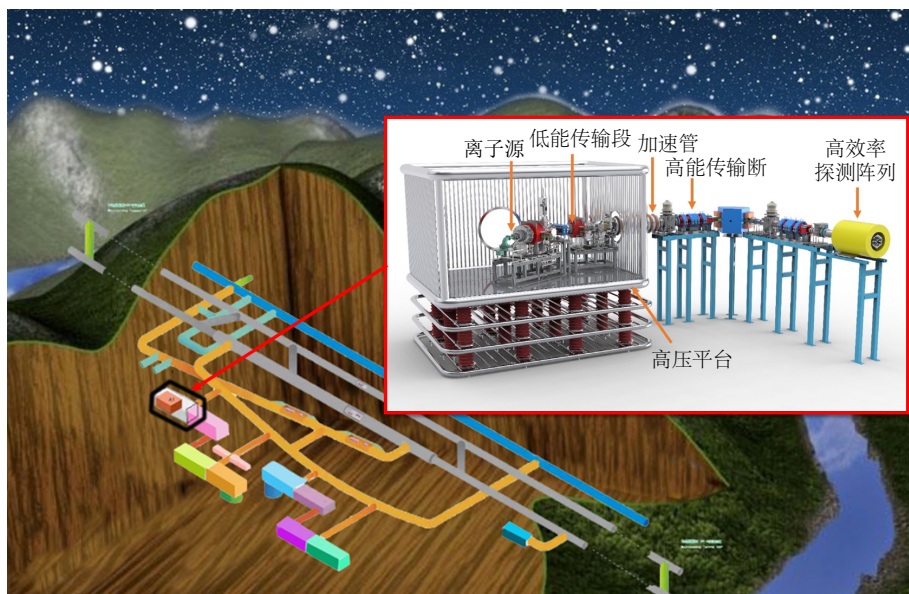


图 9 JUNA 加速器结构图

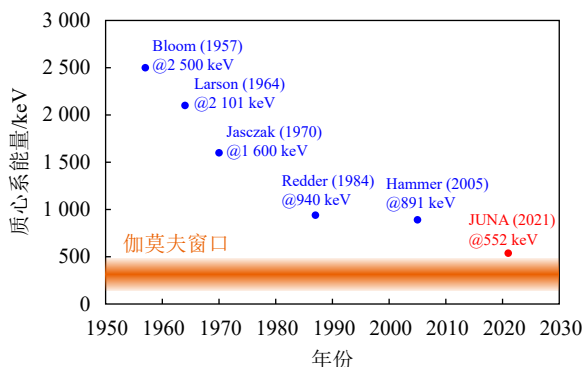
在 JUNA 上的 γ 本底能谱, 并通过减小符合时间、点火数选择、粒子甄别等技术, 进一步压低了 5~10 MeV 能区的 γ 本底。

依靠以上技术, JUNA 项目首次发现碳氮氧循环突破反应 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 在 225 keV 的共振峰, 导致反应率比之前估计的高了 6 倍, 解释了古老恒星钙丰度之谜^[85]; 通过高精度基态分支比和能级宽度测量, 使 $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 伽马射线天文学反应达到最高精度^[86]; 首次在伽莫夫窗口精确测量 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 氟丰度反应, 为研究氟超丰问题提供了关键数据^[87]; 恒星中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 的测量首次覆盖天体物理 i 过程能区, 澄清了国际 30 多年的分歧^[88]。目前 JUNA 已经完成了 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在低至 $E_{\text{c.m.}}=552$ keV 能量处的直接测量(图 10), 目

前直接测量仍受到靶中杂质干扰的限制, 下一步即将率先将能区扩展至伽莫夫能区附近。未来 JUNA 将挑战更重要的核天体物理问题, 确保我国在深地核天体物理实验研究的国际领先地位。

3 总结与展望

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应一直是核天体物理最重要的反应之一, 也是最具挑战性的反应之一。 R 矩阵方法可以通过核反应的共振结构计算反应的核天体物理反应率, 但由于阈下共振无法直接测量且很难外推, 导致不同实验 R 矩阵计算的 S 因子具有较大差距。间接测量方面, 目前 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应已经发展了弹性散射、 β 延迟 α 发射、逆反应和 α 集团转移等间接测量手段, 但不同的间接测量体系之间也存在系统性的差异, 导致间接测量结果也无法统一。对 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应最准确的研究手段仍是直接测量, 由于在能量接近伽莫夫能区时该反应的截面极低, 估计只有 10^{-17} b, 同时受困于宇宙射线带来的本底影响, 对其的直接测量始终无法真正深入核天体物理感兴趣的能区。目前 JUNA 已经看到了攻克 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的曙光, 经过不断发展新的探测阵列, 研究新的实验手段, 不断降低实验本底, 其测量的最低能量已经达到 552 keV, 距离伽莫夫窗口已经不远, 有望在不久的将来实现伽莫夫能区内 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的首次测量, 消除长久以来该反应存在的分歧。

图 10 JUNA 已经完成 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应国际最低能量直接测量

参考文献:

- [1] ROLFS C E, RODNEY W S. *Cauldrons in the Cosmos*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1988.
- [2] QIAN Y Z. *Physics*, 2013, 42: 468. (in Chinese)
(钱永忠. *物理*, 2013, 42: 468.)
- [3] HE J J, ZHOU X H, ZHANG Y H. *Physics*, 2013, 42: 484. (in Chinese)
(何建军, 周小红, 张玉虎. *物理*, 2013, 42: 484.)
- [4] GUO B, LIU W P, LI Z H. *Nuclear Astrophysics*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2017. (in Chinese)
(郭冰, 柳卫平, 李志宏. *核天体物理* [M]. 北京: 中国原子能科学出版社, 2017.)
- [5] ILIADIS C. *Nuclear Physics of Stars*[M]. 2nd ed. Berlin: Wiley-VCH GmbH, 2015.
- [6] Edit of *Nuclear Physics and Plasma Physics. Discipline Frontier and Development Strategy of Nuclear Physics and Plasma Physics*[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
(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* [M]. 北京: 科学出版社, 2017.)
- [7] DEBOER R J, GÖRRES J, WIESCHER M, et al. *Rev Mod Phys*, 2017, 89: 035007.
- [8] WEAVER T A, WOOSLEY S E. *Phys Rep*, 1993, 227(1): 65.
- [9] WALLERSTEIN G, IBEN I, PARKER P, et al. *Rev Mod Phys*, 1997, 69: 995.
- [10] SCHÜRMANN D, GIALANELLA L, KUNZ R, et al. *Phys Lett B*, 2012, 711(1): 35.
- [11] SHEN Y P, GUO B, DEBOER R J, et al. *Astrophys J*, 2023, 945(1): 41.
- [12] WOOSLEY S E, HEGER A, WEAVER T A. *Rev Mod Phys*, 2002, 74: 1015.
- [13] XU Y, TAKAHASHI K, GORIELY S, et al. *Nucl Phys A*, 2013, 918: 61.
- [14] TISCHHAUSER P, AZUMA R E, BUCHMANN L, et al. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 072501.
- [15] TISCHHAUSER P, COUTURE A, DETWILER R, et al. *Phys Rev C*, 2009, 79: 055803.
- [16] ITOH M, AKIMUNE H, FUJIWARA M, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 054308.
- [17] NITA C R, PANTELICA D, IONESCU R A, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2012, 292(1): 40.
- [18] DEBOER R J, COUTURE A, DETWILER R, et al. *Phys Rev C*, 2012, 85: 045804.
- [19] CLARK G J, SULLIVAN D J, TREACY P B. *Nucl Phys A*, 1968, 110: 481.
- [20] JONES C M, PHILLIPS G C, HARRIS R W, et al. *Nucl Phys*, 1962, 37: 1.
- [21] MORRIS J M, KERR G W, OPHEL T R. *Nucl Phys A*, 1968, 112: 97.
- [22] PLAGA R, BECKER H W, REDDER A, et al. *Nucl Phys A*, 1987, 465: 291.
- [23] TANG X D, REHM K E, AHMAD I, et al. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 052502.
- [24] TANG X D, REHM K E, AHMAD I, et al. *Phys Rev C*, 2010, 81: 045809.
- [25] FRANCE R H, WILDS E L, MCDONALD J E, et al. *Phys Rev C*, 2007, 75: 065802.
- [26] AZUMA R E, BUCHMANN L, BARKER F C, et al. *Phys Rev C*, 1997, 50: 1194.
- [27] BUCHMANN L, AZUMA R E, BARNES C A, et al. *Phys Rev Lett*, 1993, 70: 726.
- [28] ZHAO Z, FRANCE R H, LAI K S, et al. *Phys Rev Lett*, 1993, 70: 2066.
- [29] NEUBECK K, SCHÖBER H, WÄFFLER H. *Phys Rev C*, 1974, 10: 320.
- [30] BUCHMANN L, AZUMA R E, BARNES C A, et al. *Phys Rev C*, 1996, 54: 393.
- [31] FRANCE R H, WILDS E L, JEVTIC N B, et al. *Nucl Phys A*, 1997, 621: 165.
- [32] HÄTTIG H, HÜNCHEN K, ROTH P, et al. *Nucl Phys A*, 1969, 137: 144.
- [33] HÄTTIG H, HÜNCHEN K, WÄFFLER H. *Phys Rev Lett*, 1970, 25: 941.
- [34] REFSGARRD J, KIRSEBOM O S, DIJCK E A, et al. *Phys Lett B*, 2016, 752: 296.
- [35] SMITH R, GAI M, STERN S R, et al. *Nat Commun*, 2021, 12: 5920.
- [36] GREENBERG L H, ROALSVIG J P, HASLAM R N H. *Can J Phys*, 1964, 42(4): 731.
- [37] HAFSTAD L R, TELLER E. *Phys Rev*, 1938, 54: 681.
- [38] FREER M. *Rep Prog Phys*, 2007, 70: 2149.
- [39] BRUNE C R, GEIST W H, KAVANAGH R W, et al. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 4025.
- [40] BELHOUT A, OUICHAOU S, BEAUMEVIEILLE H, et al. *Nucl Phys A*, 2007, 793: 178.
- [41] OULEBSIR N, HAMMACHE F, ROUSSEL P, et al. *Phys Rev C*, 2012, 85: 035804.
- [42] AVILA M L, ROGACHEV G V, KOSHCHYIY E, et al. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 071101.
- [43] LOEBENSTEIN H M, MINGAY D W, WINKLER H, et al. *Nucl Phys A*, 1967, 91: 481.
- [44] PÜHLHOFER F, RITTER H G, BOCK R, et al. *Nucl Phys A*, 1970, 147: 258.
- [45] THOMPSON I J. *Comput Phys Rep*, 1988, 7: 167.
- [46] SHEN Y P, GUO B, LI Z H, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99: 025805.
- [47] NAN W, SHEN Y P, GUO B, et al. *Phys Rev C*, 2024, 109: 045808.
- [48] SHEN Y P, GUO B, DEBOER R J, et al. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 162701.
- [49] REDDER A, BECKER H W, ROLFS C, et al. *Nucl Phys A*, 1987, 462(2): 385.
- [50] HAMMER J W, FEY M, KUNZ R, et al. *Nucl Phys A*, 2005, 752(18): 514.
- [51] SCHÜRMANN D, DI LEVA A, GIALANELLA L, et al. *Phys Lett B*, 2011, 703(5): 557.
- [52] PLAGA R, REIFARTH R, HEIL M, et al. *Phys Rev C*, 2012, 86: 015805.
- [53] SAGARA K, FUJITA T, YAMAGUCHI H, et al. *J Radioanal Nucl Chem*, 2015, 305: 903.
- [54] MAKII H, NAGAI Y, SHIMA T, et al. *Phys Rev C*, 2009, 80: 065802.
- [55] ASSUNÇÃO M, FEY M, LEFEBVRE-SCHUHL A, et al. *Phys*

- Rev C, 2006, 73: 055801.
- [56] KUNZ R, JAEGER M, MAYER A, et al. *Phys Rev Lett*, 2011, 86: 3244.
- [57] ROTERS G, ROLFS C, STRIEDER F, et al. *Eur Phys J A*, 1999, 6: 451.
- [58] OUELLET J M L, BUTLER M N, EVANS H C, et al. *Phys Rev C*, 1996, 54: 1982.
- [59] BLOOM S D, TOPPEL B J, WILKINSON D H. *Philos Mag*, 1957, 2: 57.
- [60] BROCHARD F, CHEVALLIER P, DISDIER D, et al. *J Phys (Paris)*, 1973, 34: 363.
- [61] DYER P, BARNES C A. *Nucl Phys A*, 1974, 233: 495.
- [62] FEY M. Im Brennpunkt der Nuklearen Astrophysik: Die Reaktion $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}[\text{D}]$. Baden-Wurttemberg: Universität Stuttgart, 2004(5).
- [63] GIALANELLA L, ROGALLA D, STRIEDER F, et al. *Eur Phys J A*, 2001, 11: 357.
- [64] IKEDA N, SAGARA K, TSURUTA K, et al. *Nucl Phys A*, 2003, 718: 558.
- [65] JASZCZAK R J, MACKLIN R L. *Phys Rev C*, 1970, 2: 2452.
- [66] JASZCZAK R J, GIBBONS J H, MACKLIN R L. *Phys Rev C*, 1970, 2: 63.
- [67] KERNEL G, MASON W M, WIMMERSPERG U V. *Nucl Phys A*, 1971, 167: 352.
- [68] KETTNER K U, BECKER H W, BUCHMANN L, et al. *Z Phys A*, 1982, 308: 73.
- [69] KREMER R M, BARNES C A, CHANG K H, et al. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 1475.
- [70] LARSON J D, SPEAR R H. *Nucl Phys*, 1964, 56: 497.
- [71] MATEI C, BRUNE C R, MASSEY T N. *Phys Rev C*, 2008, 78: 065801.
- [72] MEADS R E, MCILDOWIE J E G. *Proc Phys Soc London*, 1960, 75: 257.
- [73] MITCHELL I V, OPHEL T R. *Nucl Phys*, 1964, 58: 529.
- [74] MITCHELL I V, OPHEL T R. *Nucl Phys*, 1965, 66: 553.
- [75] OUELLET J M L, EVANS H C, LEE H W, et al. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 1896.
- [76] SAYRE D B, BRUNE C R, CARTER D E, et al. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 142501.
- [77] SNOVER K A, ADELBERGER E G, BROWN D R. *Phys Rev Lett*, 1974, 32: 1061.
- [78] SWANN C P, METZGER F R. *Phys Rev*, 1957, 108: 982.
- [79] WIMMERSPERG U V, KERNEL G, ALLARDYCE B W, et al. *Phys Lett B*, 1970, 33: 291.
- [80] YAMAGUCHI H, SAGARA K, FUJITA K, et al. *AIP Conf Proc*, 2014, 1594: 229.
- [81] ANANNA C, BARILE F, BOELTZIG A, et al. *Universe*, 2022, 8(1): 4.
- [82] LIU W P, LI Z H, HE J J, et al. *Few-Body Syst*, 2022, 63: 43.
- [83] BROGGINI C, BEMMERER D, CACIOLLI A, et al. *Prog Part Nucl Phys*, 2018, 98: 55.
- [84] WU Y C, HAO X Q, YUE Q, et al. *Chin Phys C*, 2013, 37: 086001.
- [85] ZHANG L Y, HE J J, DEBOER R J, et al. *Nature*, 2022, 610: 656.
- [86] SU J, ZHANG H, LI Z H, et al. *Sci Bull*, 2022, 67: 125.
- [87] ZHANG L Y, SU J, HE J J, et al. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 152702.
- [88] GAO B, JIAO T Y, LI Y T, et al. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 132701.

Experimental Research on the Key Reaction of Stellar Helium Burning: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

NAN Wei¹, GUO Bing^{1,4,†}, SHEN Yangping^{1,4,†}, LIAN Gang^{1,4}, SU Jun², LI Yunju^{1,4}, FAN Qiwen¹, LI Zhihong^{1,4}, WANG Youbao^{1,4}, YAN Shengquan^{1,4}, LIAO Junhui^{1,4}, ZENG Sheng^{1,4}, ZHANG Long^{1,4}, CAO Fuqiang^{1,4}, LI Gexing^{1,4}, CHEN Chen¹, NAN Weike¹, SONG Na¹, WANG Qiang¹, DONG Chao¹, LI Jiayinghao¹, TIAN Junwen¹, ZHANG Yang¹, ZHANG Yuqiang¹, ZHOU Jiangfeng¹, CHEN Yuwen¹, GUO Changxin¹, HOU Jianglin¹, JIANG Yuchen¹, ZHANG Zhicheng¹, ZHU Minghao¹, LIU Weiping^{1,3,4}

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. College of Science, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

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

Abstract: The $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction is one of the most important reactions in nuclear astrophysics. It greatly influences the ratio of the abundances for the carbon and oxygen created at the end of the helium burning by competing with the triple- α process. It is of great significance for understanding both stellar and biological evolution, as well as for studying black hole gaps. It is called the Holy Grail reaction in nuclear astrophysics. In this article, the current research status of this reaction and future plans were introduced. There are several indirect methods to measure this reaction, such as elastic scattering, β -delayed α decay of ^{16}N , inverse reactions and α transfer reactions. In recent years, there were also some direct measurement experiments. However, these studies couldn't make the measurement entering inside the Gamow Window. There are also differences between different indirect measurement results. The uncertainty of this reaction is still much larger than the critical value of 10%, which is required by the nuclear astrophysics calculation. Therefore, the measurement of this reaction remains a focus of attention in nuclear astrophysics. The RNB group in China Institute of Atomic Energy used the (^{11}B , ^7Li) transfer reaction to study the $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction and are working on the direct experiment in Jinping underground nuclear astrophysics laboratory. The lowest energy experiment has been finished and the measurement for lower energy will be performed in the future.

Key words: nuclear astrophysics; α -transfer reaction; underground laboratory

Received date: 22 Aug. 2023; Revised date: 10 Jan. 2024

Foundation item: National Key Research and Development Project (2022YFA1602301); National Natural Science Foundation of China (12005304, 12125509, 12222514); CNNC Science Fund for Talented Young Scholars; Continuous-Support Basic Scientific Research Project

† Corresponding author: GUO Bing, guobing@ciae.ac.cn; SHEN Yangping, E-mail: ypshen@ciae.ac.cn