

文章编号: 1007-4627(2017)03-0284-06

## 我国核天体物理前沿研究进展

柳卫平<sup>1</sup>, 郭冰<sup>1</sup>, 白希祥<sup>1</sup>, 何建军<sup>2,3</sup>, 张玉虎<sup>2</sup>

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

**摘要:** 核天体物理是研究微观世界的核物理与研究宏观世界的天体物理融合形成的交叉学科, 其主要研究目标是: 宇宙中各种化学元素核合成的过程、时间、物理环境、天体场所及丰度分布; 核反应(包括带电粒子、中子、光子及中微子引起的反应、 $\beta$ 衰变及电子俘获)如何控制恒星的演化过程和结局。近十多年来获得的大量实验和理论研究使核天体物理研究进入了一个蓬勃发展的新阶段。文章总结了以兰州重离子加速器、北京串列加速器和国家天文台为基础, 结合国际合作, 在核天体物理研究领域对直接测量、间接测量、衰变测量、质量测量、理论计算、网络计算、天文观测等关键科学问题进行的研究进展。也展望了核天体物理的关键科学问题, 这些关键问题包括: (1) 在地面实验室、尤其是地下实验室开展天体物理能区重要热核反应截面的直接测量; (2) 高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推; (3) 恒星平稳核燃烧阶段和爆发性天体事件中关键核反应截面的间接测量; (4) 爆发性天体事件中所涉及的大量远离稳定线核素的质量、衰变特性和共振态性质的研究; (5) 建立并不断完善核天体物理数据库, 发展网络模拟程序, 系统研究元素核合成的天体场所、丰度分布; (6) 宇宙中铁以上元素的来源之谜。

**关键词:** 核天体物理; 元素核合成; 直接测量; 间接测量

**中图分类号:** O571

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.284

### 1 核天体物理简介

浩瀚无垠的宇宙中无数闪闪发光的恒星都有形成、演化和死亡的过程。由于恒星内部热核反应释放出来的辐射能量形成向外的压力抗衡恒星自身的引力收缩, 导致恒星流体静力学平衡的演化过程非常缓慢。一颗类似太阳的恒星一旦形成, 在大约  $10^{10}$  年的时间内缓慢通过核反应将核心中的 H 转换成 He。这些核反应不仅是恒星的能源, 也是宇宙中除氢以外所有化学元素赖以合成的唯一机制, 在原始大爆炸后最初几分钟至恒星寿命终结的宇宙和天体演化过程中起极为重要的作用。

宇宙中存在 3 种元素核合成过程。(1) 大爆炸后最初几分钟发生的原初核合成; (2) 恒星平稳演化阶段的核合成; (3) 新星、X-射线暴和超新星等爆发性事件中的核合成。我们目前对于恒星演化和元素起源复杂过程的认知是核物理学家、天体物理学家和天文学家半个多世纪密切合作的结果。在国际核天体物理研究中, 我国的核天体物理研究也做出了重要的贡献。国际核天体物理研究分布图如图 1 所示。

核天体物理虽然取得了显著的进展, 但关于元素起

源及恒星演化仍存在很多亟待破解的难题。从核反应如何得到元素丰度? 答案是通过核理论和实验获得的反应截面、衰变半衰期以及核素质量作为核物理输入量, 与天体物理理论和天文观测(种子核丰度)一起输入天体演化模型进行计算机模拟, 预言感兴趣元素的丰度。通过比较预言值和天文观测结果, 可以研究核物理和天体物理等输入量是否正确, 加深人类对天体演化的理解(天体演化模型)。

### 2 国内的研究成果

近年来, 以兰州重离子加速器国家实验室、北京串列加速器核物理国家实验室和中国科学院国家天文台为基础, 结合国际合作, 我国开创和发展了利用低能次级束和高强度稳定束进行核天体物理研究的新领域, 并在国际核天体物理学界占有了一席之地。我国核天体物理研究领域已对直接测量、间接测量、衰变测量、质量测量、理论计算、网络计算、天文观测等关键科学问题进行全面的研究。研究成果在 PRL, ApJ, A&A, PLB 和 PRC 等国际主流期刊发表论文 100 余篇, 10 余项数据被 IAEA 的 EXFOR 数据库收录, 多项反应率数

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-05-31

作者简介: 柳卫平(1962-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 从事核物理实验研究; E-mail: wpliu@ciae.ac.cn.

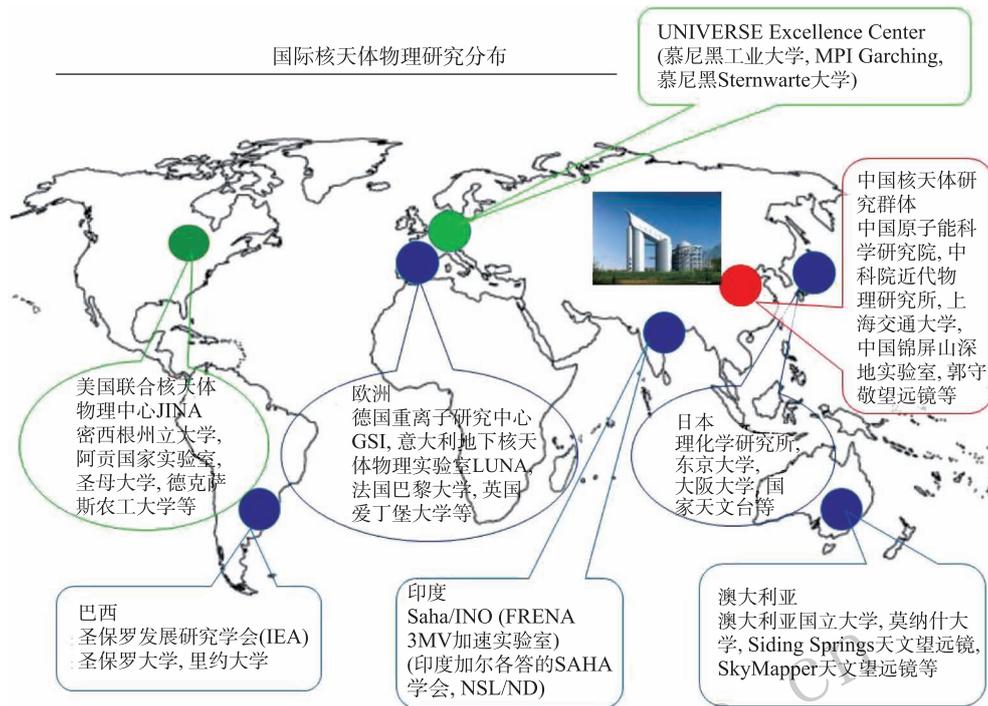


图 1 (在线彩图) 国际核天体物理研究分布图

据被美国 JINA 数据库选为推荐值。有代表性的成果如下。

2012年, 首次通过破裂干扰小的 ( $^{11}\text{B}$ ,  $^7\text{Li}$ ) 体系高精度测定了对产生宇宙重元素有重要意义的  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应(如图2), 澄清了国际核物理界此项数据高达25倍的分歧<sup>[1]</sup>。2014年, 首次将高精度磁谱仪应用于  $^{15}\text{N}$  中子转移反应的研究, 将实验误差减小到15%以内, 并导出了  $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$  反应率, 为研究恒星氟丰度问题提供了新数据<sup>[2]</sup>。

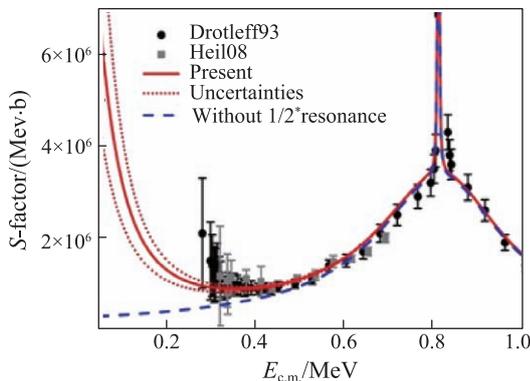


图 2 (在线彩图)  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反应激发函数

通过元素丰度观测研究天体核合成的场所取得重要进展: 国际首次建立了Cu原子模型关键数据并将该数据用于元素丰度计算, 并详细分析了太阳中Cu I谱线的NLTE效应, 确定了太阳中Cu元素的丰度; 在此基

础上, 完成了对一批贫金属恒星中Cu元素的NLTE效应分析, 新结果表明考虑NLTE效应非常必要; 研究了矮星和巨星中Si I红外谱线在恒星中的NLTE效应, 发现确定Si元素丰度时必须考虑NLTE效应<sup>[3-6]</sup>。

针对同位旋对称性破缺之谜, 中国原子能科学研究院对  $^{53}\text{Ni}$  的  $\beta^+$  衰变进行精细测量。首次观测到了  $^{53}\text{Co}$  IAS 发射的  $\gamma$  射线, 从而得到了其精确质量<sup>[7]</sup>。新结果将同位旋破缺系数从  $39 \pm 11$  减小到  $5.4 \pm 4.6$ , (如图3) 重新建立了IMME对称性p壳的适用性。

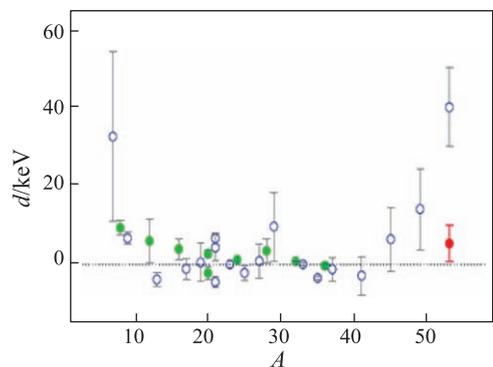


图 3 (在线彩图) 同位旋破缺系数

从2011年开始, 中国科学院近代物理研究所在兰州冷却储存环CSR和320 kV高压平台上完成了若干重要的核天体物理研究工作。首次测量了近质子滴线短寿命核素  $^{63}\text{Ge}$ ,  $^{65}\text{As}$ ,  $^{67}\text{Se}$  和  $^{71}\text{Kr}$  的质量<sup>[8]</sup> (如图4)。

精确测定了一批缺中子短寿命原子核 (尤其是  $^{45}\text{Cr}$ ) 的质量, 进而确定了低质量区  $rp$  过程中核反应路径的走向, 否定了理论预言的  $\text{Ca-Sc}$  循环的存在<sup>[9]</sup>。在 320 kV 高压平台上, 测量了  $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$  反应截面, 将数据拓展到迄今为止最低能区<sup>[10]</sup>。: 在小于 200 keV 的低能区, 测得的  $S$  因子随能量的降低而减小, 推翻了以前的理论预言。如图 5 所示。

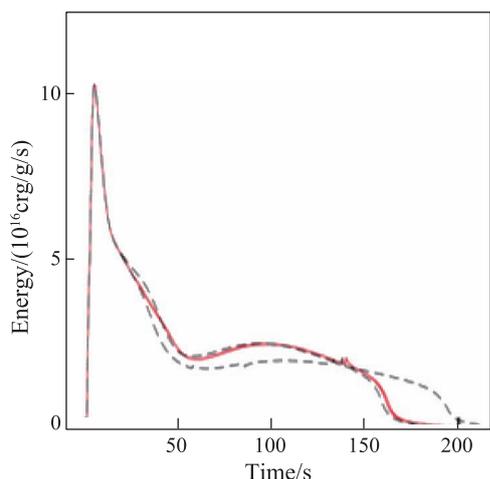


图 4 (在线彩图)  $^{65}\text{As}$  的质子分离能对一维 X 射线暴模型计算的 X 射线光度曲线的影响

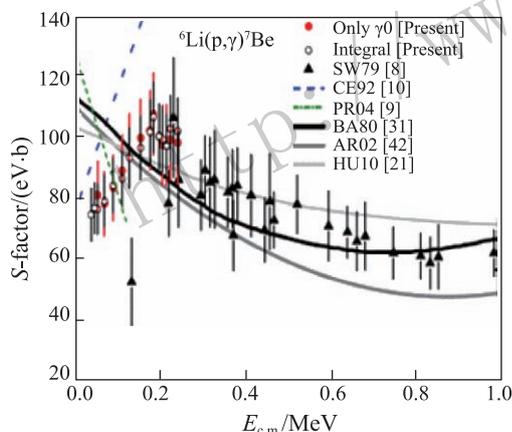


图 5 (在线彩图)  $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$  反应的激发函数

2014 年, 上海交通大学和中国科学院物理研究所等实验合作组, 在世界上首次利用等离子体喷流对撞的方法, 研究了  $\text{D}(d, n)^3\text{H}$  反应。实验利用了“神光 II”强激光装置的 9 路激光束。其中 4 路激光聚焦在  $\text{CD}_2$  靶上, 产生等离子体冲击波或喷流<sup>[11]</sup>; 另外 4 路聚焦在对面的  $\text{CD}_2$  靶, 产生方向相反的喷流, 实现二者的对撞。利用第 9 路激光对喷流进行成像, 测量等离子体的密度。反应产物被固体径迹探测器和中子探测器记录, 实验中观测到了中子的增强现象, 这为研究天体核反应开辟了一个新的实验途径。

中国科学院近代物理研究所与国外合作首次在天体物理能区直接测量  $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, n)^{23}\text{Mg}$  反应<sup>[12]</sup>。该反应率不确定性对早期恒星灰烬中  $\text{Na}$  和  $\text{Al}$  的含量有重要影响。研究团队首次在天体物理能区直接测量反应截面, 发现了新共振。发展了新的理论外推方法, 系统误差满足网络计算要求。

此外, 北京大学、上海交通大学和北京航空航天大学开展了  $r$ -过程极端丰中子核的质量和核素丰度的计算, 以及温度、密度及核核相互作用对天体环境中电子俘获率影响的计算; 中国科学院近代物理研究所研究了稀土区的近质子滴线核的  $\beta$  缓发质子衰变; 南京大学研究了特定熔合反应对产生  $^{26}\text{Al}$  的影响; 原子能院开展了  $rp$ -过程的网络计算等<sup>[13]</sup>。

2016 年 3 月 1 日, 锦屏深地核天体物理实验室 (JUNA) 的现场建设在四川省西昌市中国锦屏地下实验室 (CJPL) 正式启动。开展关键天体物理核反应的直接精确测量是核天体物理未来发展不可或缺的重要方向, 该实验室将为国际上开展天体物理核反应精确测量提供新的一个顶级平台。

在仪器设备开拓方面, 拓展了间接测量的实验手段, 利用高精度的磁谱仪, 改造了焦平面探测器系统, 取得了高水平研究成果 (ApJ, PRC 快讯等)。完成低能次级束装置改造, 可以提供  $10^5$  pps 的低能次级束, 比过去的流强提高了约 2 个数量级<sup>[14]</sup>。发展了核天体物理新的实验技术: 使用了带电粒子伽马射线符合和超导螺线管谱仪, 使碳碳融合截面推进到更低能区。基于北京放射性核束装置 BRIF, 发展了先进的衰变谱学终端。

在人才培养方面也取得了不少成绩, 1 人担任国际纯粹和应用物理学联合会 (IUPAP) 的 C12 工作组 (核物理) 副主任、任 C19 工作组 (天体物理) 观察员、任亚洲核物理联合会 (ANPhA) 副主席, 中国核物理学会副理事长。1 人担任国家重点研发计划项目负责人。2 人入选中科院百人计划。1 人获胡济民教育科学奖, 获北京市青年优秀科技论文奖, 获得中核集团创新创效成果一等奖。

### 3 国内外交流

通过以上发展, 我国的核天体物理研究队伍研究覆盖核天体物理领域的关键环节, 包括核物理实验、天体演化网络模拟、天体物理及天文观测。人才培养引进方面也取得一定成就: 引进 2 位中科院外籍特聘研究员: Rolfs 教授、Kubono 教授。

我国核天体物理研究群体建立了广泛的国际交流渠

道: 与加拿大粒子物理与核物理国家实验室 (TRIUMF) 和美国圣母大学核天体物理研究所 (ISNAP) 等签署了合作谅解备忘录; 同时与日本理化研究所、日本大阪大学、日本东京大学、日本国立天文中心、德国重离子研究中心和鲁尔大学、美国橡树岭国家实验室等建立了亲密的合作关系。2015年6月, 主办“第十三届物质起源与星系演化国际研讨会”, 这是该系列会议首次在中国举办。

我国核天体物理研究群体十分注重与国内天文学界交流。2009年在国家天文台兴隆观测站举办了核物理与天体物理联合讨论会。参加会议的有中国原子能科学研究院、中国科学院国家天文台、中国科学院紫金山天文台、南京大学、北京大学和中国科学院近代物理所的研究人员。会议加强了我国核物理与天体物理的学科交叉, 就通过网络计算机把核天体物理实验数据与天文观测联系起来开展联合研究形成了共识。2014年8月, 香山科学会议以“我国核物理与核科学装置发展研讨”为主题, 提出了未来20年我国核物理大装置的发展路线图, 随后2015年, 制定了我国核天体物理中长期发展规划。

#### 4 针对关键科学问题提出的发展展望

展望未来, 核天体物理研究进入了一个令人振奋的时期。目前国际公认的6大关键科学问题。(1) 在地面实验室、尤其是地下实验室开展天体物理能区最重要热核反应截面的直接测量仍是备受关注的前沿课题; (2) 高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推; (3) 恒星平稳核燃烧阶段和爆发性天体事件中关键核反应截面的间接测量; (4) 新星、超新星和X射线暴等爆发性天体事件中所涉及的大量远离稳定线核素的质量、衰变特性、反应截面和共振态性质的测量和理论研究; (5) 基于上述实验和理论研究成果, 建立并不断完善核天体物理数据库, 发展网络模拟程序, 系统研究元素核合成的过程、天体场所及丰度分布和核反应如何控制恒星的演化过程和结局; (6) 宇宙中铁以上元素的来源之谜是核天体物理研究的极端重点课题。

针对上述关键科学问题, 依托中国原子能科学研究院的串列加速器和已经建成的北京放射性束流装置、中国科学院近代物理研究所的次级束流装置和重离子加速器冷却储存环 (HIRFL-CSR)、上海激光电子伽玛源 (SLEGS) 和国家天文台的天文望远镜等研究平台, 结合国际合作, 推进我国的核天体物理研究提出的具体目标, 展望如下。

改进实验技术, 在地面实验室对恒星氢燃烧、氦

燃烧和碳燃烧阶段的重要热核反应进行直接测量, 有效降低现有数据的误差, 并尝试向天体物理能区推进。通过发展高流强加速器系统和高效率探测器阵列, 增加反应产物的计数率; 通过反应产物的符合测量有效降低本底, 并结合低能外推模型, 研究氢燃烧过程中的  $(p, \alpha)$  和  $(p, \gamma)$  反应, 氦燃烧过程中的  $(\alpha, n)$  和  $(\alpha, \gamma)$  反应, 以及  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应。特别是某些关键反应, 例如  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  反应和中子源反应  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  仍然需要进行更细致的测量。

中子俘获反应的直接测量对更好地了解  $s$ -过程起不可或缺的作用。过去几十年间中子俘获反应的测量取得了许多进展, 形成了一个可用于模拟  $s$ -过程的庞大数据库。然而, 有些中子俘获截面, 尤其是不稳定核, 仍没有精度足够的截面数据。其中包括  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{95}\text{Zr}$  等分支点核, 还包括产生  $\gamma$  射线天文可观测到的若干不稳定同位素 (例如  $^{60}\text{Fe}$ ) 的中子俘获反应。完成这些挑战性实验的第一个关键技术难题是放射性靶的产生和制备, 它要求发展热靶处理实验技术。我国在未来几年应投入必要的资源来攻克相关技术难点, 并开展关键不稳定同位素的中子俘获反应直接测量。

基于我国已有的和即将竣工的不稳定离子束大科学工程, 对恒星平稳和爆发性核燃烧中的  $(p, \gamma)$ ,  $(n, \gamma)$ ,  $(\alpha, p)$ ,  $(\alpha, n)$  和  $(\alpha, \gamma)$  反应截面进行间接测量, 并推进到中重核区, 充实核天体物理反应数据库。在过去十几年间, 渐进归一化系数 (ANC)、特洛伊木马 (THM) 方法和共振参数测量方法被广泛采用。这几种方法已经过充分的检验并成功地用于不同天体环境中许多核反应的测量, 而且得到了相关理论发展的支持。库仑解离方法也被广泛应用, 该方法未来也将是一种测量辐射俘获反应截面的有效方法。此外, 替代方法已经成功应用于中子诱发裂变截面的测量; 对于中子俘获截面的测量, 该方法仍需经过成功的原理验证, 但它有可能是一种有益的补充方法。

对新星、超新星和X射线暴等爆发性天体事件中所涉及的远离  $\beta$  稳定线核素的质量、衰变特性、反应截面和共振态性质进行实验测量和理论研究。例如, 利用 HIRFL-CSR 建立的等时性质量学方法和肖特基质量谱学方法精确测量这些短寿命核素的质量和寿命; 通过测量共振散射激发函数, 研究核天体物理重要的  $(p, \gamma)$  和  $(\alpha, p)$  反应。

核天体物理是一个多学科高度交融的研究领域, 天体物理模型和天文观测方面的进展可能产生对核物理知识的新需求, 必须进一步加强在这个领域从事研究的核物理学家、天体物理学家和天文学家之间的协作。自主

发展  $s$ -过程和  $r$ -过程等平稳和爆发性天体演化过程的网络模拟程序, 通过元素丰度的观测加深核物理与天体物理的结合, 并通过考虑非局部热动平衡等重要效应, 系统研究元素核合成的过程、天体场所及丰度分布和核反应如何控制恒星的演化过程和结局。

$(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$  和  $(\gamma, \alpha)$  的反应截面是研究元素核合成不可或缺的核物理输入量。激光康普顿背散射 (LCB)  $\gamma$  源出现之前的几十年间, 在电子加速器 (如德国的 BLBE) 的韧致辐射装置上已经测过一些与核合成相关的  $(\gamma, n)$  反应截面, 但迄今  $(\gamma, \alpha)$  和  $(\gamma, p)$  反应的测量极少, 数据很不可靠。虽然这些装置正在进行的标定光子能量的改进可提升实验品质和数据可靠性, 但利用提供准单能且能量连续可调  $\gamma$  束的 LCB  $\gamma$  源开展光致裂解反应的研究无疑是最佳的选择, 其低能光子本底水平远低于产生连续谱光子的韧致辐射装置。SLEGS 有望在 2021 年建成, 为在国内开展  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$  和  $(\gamma, \alpha)$  这些光核反应的研究提供一个重要平台。

过去 20 多年的研究经验表明, 在深地实验室开展天体物理能区最重要热核反应截面的直接测量是破解核天体物理领域仍悬而未决的最重要问题的关键途径之一。我国锦屏深地核天体物理实验项目 (JUNA) 提供了直接测量核天体物理关键反应的顶级条件。JUNA (见图 6) 将恒星平稳演化阶段关键反应的直接测量推进到伽莫夫窗口, 这对获得基准数据、检验低能外推模型、约束理论计算和解决制约核天体物理关键核反应测量的难题具有至关重要的意义。目前, 加速器和离子源已完成研制, 并在中国原子能科学研究院地面实验室完成联调出束, 预计 2018 年运往锦屏深地实验室。

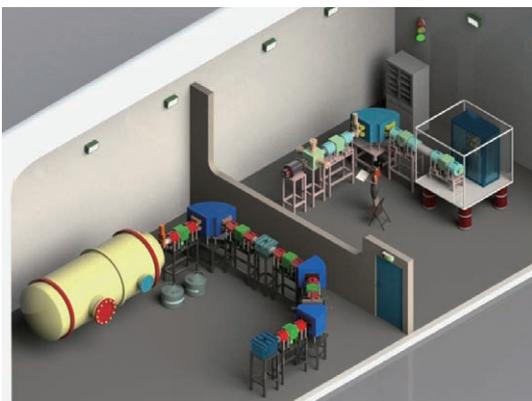


图 6 (在线彩图) 锦屏深地核天体物理实验项目 JUNA 示意图

强激光技术发展为核天体物理带来了难得的机遇。我国尽管有神光系列等大型激光装置, 但研究重心主要集中在惯性聚变问题上, 而对其它核物理问题, 特别是基础核科学领域, 如激光核天体物理等研究不多。而对基础物理研究的不足, 也很可能最后反过去阻碍以工程为导向的激光核技术研究。激光核天体物理研究将是一个新的交叉领域, 在激光核物理理论方面, 应该促进激光等离子体物理界与核物理界的沟通, 加大人才与资金等方面的支持力度; 在实验方面, 应推动激光核物理研究实验平台的建设, 建立以基础科学研究为中心的大型激光核科学实验装置和实验平台, 并依托这些装置开展核天体物理研究。

面向未来, 随着锦屏深地核天体物理项目 JUNA 建成, 强流重离子加速器 (HIAF) 的开工建设和北京在线同位素分离丰中子束流装置 (BISOL) 列入国家十三五基础研究设施规划, 结合我国众多的天文观测大科学项目, 我国核天体物理的研究将有机会走向国际领先行列。

#### 参考文献:

- [1] GUO B, LI Z H, LUGARO M, *et al.* *Astrophys J*, 2012, **756**: 193.
- [2] GUO B, LI Z H, LI Y J, *et al.* *Phys Rev C*, 2014, **89**: 012801(R).
- [3] SHI J R, GEHREN T, ZENG J L, *et al.* *Astrophys J*, 2014, **782**: 80.
- [4] YAN H L, SHI J R, ZHAO G. *Astrophys J*, 2015, **802**: 36.
- [5] TAN K F, SHI J R, MASAHIDE T H, *et al.* *Astrophys J*, 2016, **823**: 36.
- [6] SHI J R, TAKADA-HIDAI M, TAKEDA Y, *et al.* *Astrophys J*, 2016, **755**: 36.
- [7] SU J, LIU W P, ZHANG N T, *et al.* *Phys Lett B*, 2016, **756**: 323.
- [8] TU X L, XU H S, WANG M, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2011, **106**: 112501.
- [9] YAN X L, XU H S, LITVINOV YU A, *et al.* *Astrophys J*, 2013, **766**: L8.
- [10] HE J J, CHEN S. Z, ROLFS C E, *et al.* *Phys Lett B*, 2013, **725**: 287.
- [11] LI C K, RYUTOV D D, HU S X, *et al.* *Phys Rev Lett*, 2013, **111**: 235003.
- [12] BUCHER B, TANG X D. *Phys Rev Lett*, 2015, **114**: 251102.
- [13] SU J, LIU W P, SHU N C, *et al.* *Phys Rev C*, 2013, **87**: 024312.
- [14] HE J J, XU S W, MA P, *et al.* *Nucl Instr Meth A*, 2012, **680**: 43.

## Progress of Nuclear Astrophysics in China

LIU Weiping<sup>1,1)</sup>, GUO Bing<sup>1</sup>, BAI Xixiang<sup>1</sup>, HE Jianjun<sup>2,3</sup>, ZHANG Yuhu<sup>2</sup>

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

2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000, China;*

3. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

**Abstract:** Nuclear astrophysics is an interdisciplinary research field. It composes of nuclear physics, which studies micro phenomena, and astrophysics which studies macroscopic phenomena in our world. The main research goals of nuclear astrophysics are: (1) how, when and where chemical elements are synthesized and what is their final abundance distribution in the universe; (2) how nuclear processes (reactions induced by charged particles, neutrons, photons and neutrinos, beta decays and electron capture processes) determine the evolution and the ultimate fate of stars. At present, nuclear astrophysics has been developed into a new prosperous stage with a huge number of experimental and theoretical progresses. This paper summarized the current progress of nuclear astrophysics in China, in the subfields of direct and indirect measurement of key reactions, measurement of mass and decay, as well as the theoretical calculation and network simulation. In present paper, the prospects to solve the key scientific nuclear astrophysics problems are represented. These key problems include (1) direct measurement of important reactions at astrophysical energies in the laboratory on the earth surface and in the underground laboratory; (2) extrapolation of cross sections at higher energies for the reactions induced by charged particles; (3) indirect measurement of key reactions in the hydrostatic and explosive nuclear processes; (4) study of the mass, the properties of decay and resonant states for the nuclides far from the stability line in explosive astrophysical events; (5) establish and improve the database for nuclear astrophysics, and develop network simulation codes, and systematically study astrophysical sites and abundance distribution of nucleosynthesis; (6) origin of the elements heavier than iron in the universe.

**Key words:** nuclear astrophysics; element synthesis; direct measurement; indirect measurement