

· 研究进展 ·

我国核天体物理前沿科学问题研究进展

柳卫平^{*1} 李志宏¹ 郭冰¹ 唐晓东² 何建军³

(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] 我国核天体物理研究群体紧密围绕核天体物理关键科学问题开展了研究, 依托兰州重离子加速器、北京串列加速器和国家天文台郭守敬望远镜, 结合国际合作, 对核天体物理反应直接测量和间接测量、原子核质量和衰变测量、理论计算、核合成网络计算、以及天文观测等关键科学问题开展研究, 制定了我国核天体物理中长期发展战略, 取得了国际公认的创新性研究成果。研究成果充分展现了核天体物理研究群体的集成效应, 催生了锦屏深地核天体物理实验室, 较大地促进了核物理与天体物理的深度交叉和融合, 加强了国内核天体物理领域实质性的交流与合作, 促使我国核天体物理研究进入到国际先进水平。

[关键词] 核天体物理; 元素核合成; 关键核天体物理反应; 网络计算

核天体物理是研究微观世界的核物理与研究宇宙世界的天体物理、天文学相融合形成的交叉学科, 其主要研究目标是: 宇宙中合成各种化学元素的过程、时标、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、核裂变、 β 衰变及电子俘获等)与核结构如何控制和决定恒星的演化进程和命运及爆发性天体事件的能量产生。

核物理是理解星体演化和宇宙中元素起源的关键。通过核物理理论和实验技术获得的核反应截面、核衰变半衰期以及核素质量等作为核物理输入量, 与天体物理理论和天文观测一起输入天体演化模型进行计算机模拟, 预言天体演化中元素的丰度。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, 可以帮助人们更好地理解天体演化过程。核天体物理研究流程图 1。

1 研究背景

天体演化和元素起源涉及的核反应有数十万个, 其中只有少数反应可以进行实验测量, 实验研究方

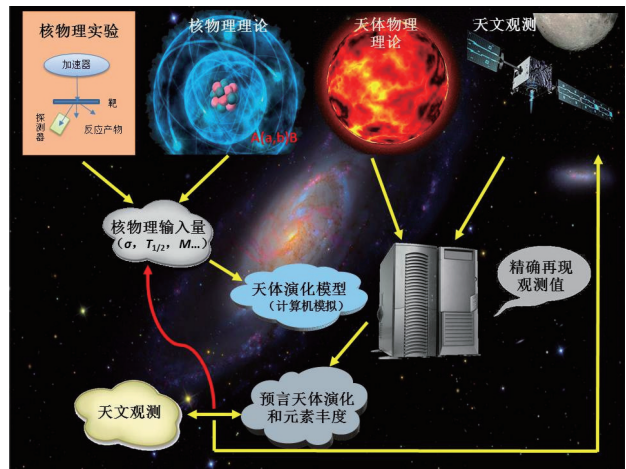


图 1 核天体物理的研究流程

法主要包括两大类: 直接测量和间接测量。

直接测量不依赖任何理论模型, 是最可靠的方法。主要包括两种方式: 一种是直接测量目标反应 $A(a, b)B$ 的反应产物 b 或 B , 分为单举测量和符合测量, 或者测量其逆反应 $B(b, a)A$, 通过细致平衡原理来得到; 第二种是测量反应产物 B 的衰变, 分为在线测量和离线测量。天体物理感兴趣的能区(伽莫夫窗口)一般在几个 keV 到几百个 keV, 远小于库

仑势垒,因此带电粒子诱发的反应截面极低,导致直接测量难度较大。此类实验不仅需要相当多的束流时间,还要求极低本底环境、发展高效的探测技术和降低本底干扰来改善效应本底比,因此这类实验大多只能在深地实验室开展,可以进行直接测量的核天体物理反应相对是少量的。

目前,对有些核反应的直接测量是不可能的,例如:快速中子俘获 r -过程涉及的大量短寿命丰中子核上发生的中子俘获 (n, γ) 的反应。因为既没有中子靶,短寿命核也难以制靶,所以这些 (n, γ) 反应的直接测量目前是难以实现的。因此,研究和发间接测量方法非常重要。间接测量方法是对直接测量的必要补充,其核心思想是:实验上通过截面较大的反应测定影响核反应的关键物理量,并结合成熟的核理论模型,导出天体核反应的截面或者反应率。目前应用较多的间接测量方法主要包括:渐进归一化系数(ANC)方法、核谱因子方法、库仑离解法、特洛伊木马法和共振参数测量法。

在核天体物理的工作中,实验总是比较困难的,因此可以根据天体物理模型的敏感度研究,确定各种核反应的重要性,集中测量比较关键的核反应,理论可以计算更大范围核区的数据。如果说直接测量方法是点,用于解决最重要的反应测量,那么间接测量方法就是线,解决相对重要的核反应测量;核理论就是面,解决核反应的全面性。有了直接测量的基础数据(少量),再加上相对较多的间接测量数据,核理论经这些数据刻度后便可以计算大量实验无法测量的天体核反应,用于核天体物理网络计算。

2 我国核天体物理研究工作主要进展

近年来,我国在国家自然科学基金委创新研究群体项目、重大项目和科技部 973 和重点研发计划项目支持下,依托兰州重离子加速器、北京串列加速器和国家天文台郭守敬望远镜,结合国际合作,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、网络计算和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,多项反应率数据被美国联合核天体物理中心(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($^{11}\text{B}, ^7\text{Li}$)的 α 转

移反应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),澄清了国际数据间高达 25 倍的分歧^[1]。2014 年,首次将高精度磁谱仪应用于 ^{15}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 $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ 天体物理反应率,为研究恒星氟丰度异常问题提供了新数据^[2]。

通过元素丰度观测研究天体核合成的场所取得重要进展: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^[3-6]。

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

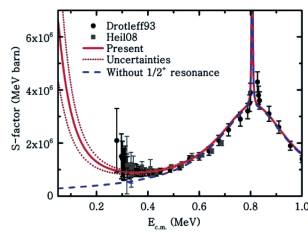


图 2 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应激发函数

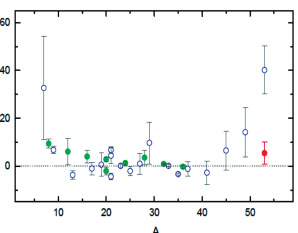


图 3 质量数 53 的同位旋破缺系数

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}Ge , ^{65}As , ^{67}Se 和 ^{71}Kr 的质量^[8](图 4)。精确测定了一批缺中子短寿命原子核(如 ^{45}Cr)的质量,进而确定了低质量区快速质子俘获 rp -过程中核反应路径的走向,否定了理论预言的 Ca-Sc 循环的存在^[9]。在 320 kV 高压平台上,直接测量了 $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ 反应截面,将数据拓展到迄今为止最低能区^[10]。在小于 200 keV 的低能区,测得的天体物理 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)。

2014 年,上海交通大学和中科院物理所等实验合作组,在世界上首次利用等离子体喷流对撞的方

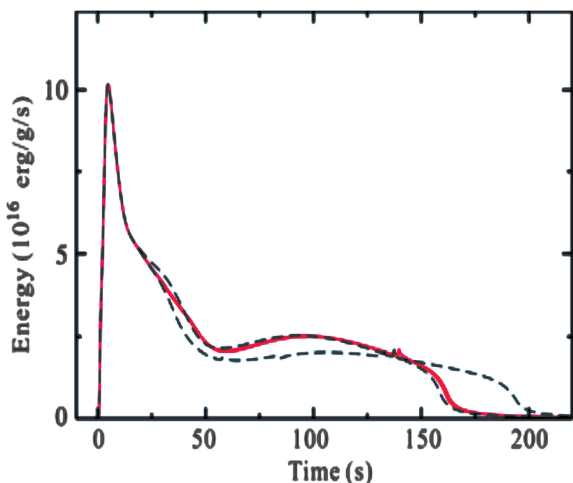


图 4 ^{65}As 的质子分离能对 X 射线光度曲线的影响

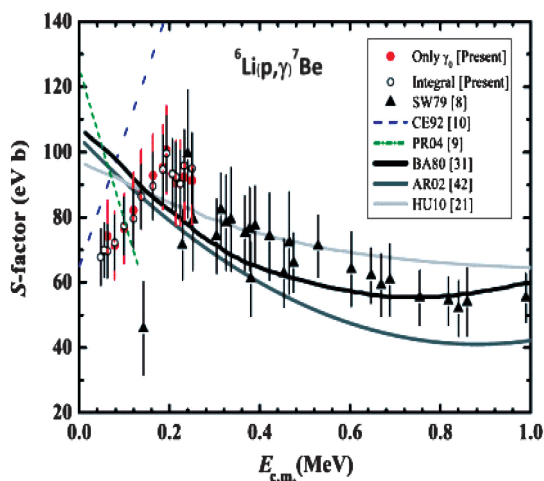


图 5 $^6\text{Li}(p,\gamma)^7\text{Be}$ 反应的激发函数

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 CD_2 靶上,产生等离子体冲击波或喷流^[11];另外 4 路聚焦在对面的 CD_2 靶,产生方向相反的喷流,从而实现二者的对撞。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,这为研究天体环境下的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 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},n)^{23}\text{Mg}$ 反应的截面^[12]。该反应率不确定性对早期恒星灰烬中 Na 和 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等院校开展了 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;中子量相关的核物理工作;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 β 缓发质子衰变;南京大学研究了特定熔合反应对产生星际 ^{26}Al 的影响;原子能院开展了 rp-过程的网络计算等^[13]。

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。这是开展关键核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核天体物理反应精确测量提供一个新的顶级平台。锦屏山地下实验室示意图如图 6 所示。



图 6 锦屏深地核天体物理实验项目示意图

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^[14]。发展了核天体物理新的实验技术:使用了带电粒子-伽玛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。

3 我国核天体物理研究团队建设和国内外交流

我国核天体物理研究群体的组成覆盖了核天体物理领域的各个关键环节:核物理实验(原子能院、近物所)、核物理理论(国内高校、原子能院)、天体演化网络模拟(原子能院)、天体物理及天文观测(国家天文台等)。核物理实验、理论和天文观测人才搭配合理,有利于学科交叉和优势互补,开展的研究项目

有内在的关联。经过多年的联合研究,研究群体取得了一批创新的研究成果。

目前,我国的核天体物理研究队伍研究人才培养引进方面也取得一定的成绩,例如引进多位中国科学院外籍特聘研究员:德国的 C. Rolfs 教授、日本的 S. Kubono 教授、I. Tanihata 教授、T. Kajino 教授;聘请美国 JINA 中心主任 M. Wiescher 教授任锦屏深地核天体物理实验 IAC 主席等。

迄今,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 等签署了谅解合作备忘录;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、意大利 INFN 国家实验室等建立了紧密的合作关系。群体成员柳卫平研究员担任 IU-PAP 的 C12 工作组(核物理)副主任,并任 C19 工作组(天体物理)观察员。

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,2017 年举办引力波探测与重元素合成交叉科学问题研讨会,参加会议的有中国原子能科学研究院、中科院国家天文台、中科院紫金山天文台、南京大学、北京大学、中科院近物所、高能所、中山大学、厦门大学的研究人员。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,中国原子能科学研究院等单位主办香山科学会议“我国核物理与核科学装置发展研讨”。2015 年,主持制定了我国核天体物理中长期发展规划。2015 年 6 月 24 日,中国原子能科学研究院在北京成功主办的“第十三届物质起源与星系演化研讨会”在北京成功召开。该“物质起源与星系演化研讨会(OMEG)”是国际核天体物理领域的重要系列会议,该会议汇聚了核物理、天体物理、天文学和宇宙学等多个学科的研究人员,旨在报告这些学科的最新研究进展,尤其重视多学科集成创新的研究成果。这是该系列会议首次在中国举办。它的成功举办,标志着我国核天体物理研究地位在国际上有较大提升。

4 我国核天体物理未来发展建议

展望未来,核天体物理研究将进入一个令人振

奋的时期。我国目前在国际公认的核天体物理研究领域布局的 6 大研究课题是:(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理论外推。(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实验测量和理论研究。(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,发展天体物理网络模拟程序,系统研究元素核合成的过程、天体场所和核素丰度分布,以及核反应如何控制恒星的演化进程和结局。(6) 宇宙中比铁更重的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、中科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、锦屏深地实验室、上海激光电子伽玛源和国家天文台的天文望远镜等研究平台,结合国际合作,我国在核天体物理领域预期开展以下研究工作。

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, α) 和 (p, γ) 反应,氦燃烧过程中的 (α, n) 和 (α, γ) 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 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 、 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 仍然需要进行更精细的实验测量。

开展中子俘获反应的直接测量,更好地了解慢速中子俘获 s-过程。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}Ni , ^{79}Se , ^{95}Zr 等分支点核,还包括产生 γ -射线天文学可观测到的若干不稳定同位素(例如 ^{60}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的直接测量。

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, γ) 、 (n, γ) 、 (α, p) 、 (α, n) 和 (α, γ) 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反应的测量,而且得到了相关理论发展的支持。库仑离解方法也被广泛应用,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 β 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, γ) 和 (α, 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,特别是进入到引力波多信使探测时代,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。

(γ, n) 、 (γ, p) 和 (γ, α) 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) γ -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 (γ, n) 反应截面,但迄今 (γ, α) 和 (γ, 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 γ 束的LCB γ 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。上海激光电子伽玛源

(SLEGS)有望在2021年建成,将为我们在国内开展 (γ, n) 、 (γ, p) 和 (γ, α) 这些光核反应的研究提供一个重要平台。

在深地实验室开展核天体物理反应在伽莫夫能区的直接测量是破解核天体物理领域许多重要悬而未决的最重要问题的关键途径之一。在国家自然科学基金重大项目支持下,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^[15]。JUNA(见图6)预期将恒星平稳演化阶段关键反应的直接测量推进到伽莫夫能区,这对获得基准数据、检验低能外推模型、约束理论计算,以及解决制约核天体物理关键核反应测量的难题等方面具有至关重要的意义。预计2018年底加速器和离子源运往锦屏深地实验室,2020年底深地计划调试完成并开始实验测量工作。

面向未来,随着锦屏深地核天体物理项目JUNA的建成,重离子应用装置惠州HIAF的开工建设,以及北京ISOL装置BISOL列入国家十三五基础设施规划,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。

5 总结

核天体物理是原子核物理与天体物理融合形成的交叉学科,主要目标是研究天体环境中的核过程,进而理解宇宙元素起源和星体演化。目前对于天体环境复杂过程的认知是核物理学家和天体物理学家近一个世纪密切合作的结果,至今已有多项成就获得诺贝尔物理奖。尽管已取得显著进展,但在理解元素起源及星体能量产生方面仍存在许多亟待破解的难题。中美欧核科学中长期规划将宇宙元素起源列为前沿科学问题。我国核天体物理研究紧密围绕核天体物理关键科学问题,依托北京串列加速器核物理国家实验室、兰州重离子加速器国家实验室和国家天文台LAMOST天文望远镜等大科学平台,并结合高水平的国际合作,充分发挥团队学科交叉的特点,成功开拓了核天体物理相关的直接测量和rp过程衰变性质和深地核天体物理测量,制定了我国核天体物理中长期发展战略,取得了国际公认的创新性研究成果。研究中充分展现了研究群体的集成效应,较大的促进了核物理与天体物理的交叉,实质性的加强了国内核天体物理领域的交流,促使我国核天体物理研究进入了国际先进水平。随着JUNA项目建成和HIAF项目的开工建设,我国核天体物理的研究将逐步走向国际领先行列。

致谢 本工作的到国家自然科学基金创新研究群体(项目批准号:11321064)和重大项目(11490560)、科技部973项目(2013CB834406)和重点研发计划(2016YFA0400500)的资助。

参 考 文 献

- [1] Guo B, Li Z, Lugaro M, et al. New determination of the $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction rate and its influence on the s-process nucleosynthesis in AGB stars. *The Astrophysical Journal*, 2012, 756 (2): 193.
- [2] Guo B, Li Z, Li Y, et al. Spectroscopic factors for low-lying ^{16}N levels and the astrophysical $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ reaction rate. *Physical Review C*, 2014, 89 (1): 012801(R).
- [3] Shi J, Gehren T, Zeng J, et al. Statistical equilibrium of copper in the solar atmosphere. *The Astrophysical Journal*, 2014, 782 (2): 80.
- [4] Yan H, Shi J, Zhao G. Non-lte analysis of neutral copper in late-type metal-poor stars. *The Astrophysical Journal*, 2015, 802 (1): 36.
- [5] Tan K, Shi J, Masahide TH, et al. A non-LTE study of silicon abundances in GIANT stars from the SiI infrared lines in the J-BAND. *The Astrophysical Journal*, 2016, 823: 36.
- [6] Shi J, Takada M, Takeda Y, et al. Silicon abundances in nearby stars from the SiI infrared lines. *The Astrophysical Journal*, 2012, 755 (1): 36.
- [7] Su J, Liu W, Zhang N, et al. Revalidation of the isobaric multiplet mass equation at $A = 53$, $T = 3/2$. *Physics Letters B*, 2016, 756: 323–327.
- [8] Tu X, Xu H, Wang M, et al. Direct mass measurements of short-lived $A = 2Z - 1$ nuclides ^{63}Ge , ^{65}As , ^{67}Se , and ^{71}Kr and their impact on nucleosynthesis in the rp-process. *Physical-Review Letters*, 2011, 106 (11): 112501.
- [9] Yan X, Xu H, Litvinov YA, et al. Mass measurement of ^{45}Cr and its impact on the Ca-Sc cycle in X-Ray bursts. *The Astrophysical Journal Letters*, 2013, 766 (1): L8.
- [10] He JJ, Chen S, Rolfs CE, et al. A drop in the $^6\text{Li}(p, \gamma)^7\text{Be}$ reaction at low energies. *Physics Letters B*, 2013, 725 (4): 287–291.
- [11] Li C, Ryutov D, Hu S, et al. Structure and dynamics of colliding plasma jets. *Physical Review Letters*, 2013, 111 (23): 235003.
- [12] Bucher B, Tang X, Fang X, et al. First Direct Measurement of $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, n)\text{Mg}$ at Stellar Energies. *Physical Review Letters*, 2015, 114 (25): 251102.
- [13] Su J, Liu W, Shu N, et al. Reexamining the β decay of $^{53,54}\text{Ni}$, $^{52,53}\text{Co}$, ^{51}Fe , and ^{50}Mn . *Physical Review C*, 2013, 87 (2): 024312.
- [14] He J, Xu S, Ma P, et al. A new low-energy radioactive beam line for nuclear astrophysics studies in China. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 680: 43–47.
- [15] Liu W, Li Z, He J, et al. Progress of Jinping Underground laboratory for Nuclear Astrophysics (JUNA). *Science China Physics, Mechanic & Astronomy*, 2016, 59 (4): 642001.

Progress of nuclear astrophysics in China

Liu Weiping¹ Li Zhihong¹ Guo Bing¹ Tang Xiaodong² He Jianjun^{2,3}

(1. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*; 2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 73000*; 3. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

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 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 sub-fields 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; (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. The progress of nuclear astrophysics in China will be reviewed, ranging from ground base reaction, mass and decay experiments, to the underground Jinping JUNA project.

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