基于HIAF的核天体物理研究

郭冰¹, 柳卫平^{1*}, 唐晓东², 李志宏¹, 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. 北京师范大学核科学与技术学院, 射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875

*联系人, E-mail: wpliu@ciae.ac.cn

收稿日期: 2020-07-23; 接受日期: 2020-08-18; 网络出版日期: 2020-10-13

国家自然科学基金(编号: 11490560)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2016YFA0400500)、核技术创新联合基金(编号: U1867214)和财政部稳定支持研究经费(编号: WDJC-2019-13)资助项目

摘要 核天体物理是研究微观世界的核物理与研究宇观世界的天体物理、天文学融合形成的一门交叉学科, 在国际上一直作为物理学的一个重要前沿方向而受到关注. 本文总结了核天体物理领域的研究现状、热点科学问题及实验研究方法, 介绍了基于强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)的核天体物理研究展望. HIAF是我国正在建设的核物理大科学装置, 在开展远离稳定线核素的质量、半衰期和核反应截面等方面的核天体物理研究中极具优势, 将为研究爆发性核过程和理解宇宙重元素起源问题提供研究机遇. 在元素核合成中关键反应研究方面, 发展ANC, Oslo, 替代反应和替代比率等间接测量方法及实验技术, 系统开展带电粒子、中子俘获反应的研究. 通过HIAF储存环, 可以系统测量 r -过程核素质量; 通过HIAF次级束流线, 发展高效率探测器, 系统测量 r -过程核素的衰变半衰期. 此外, 基于HIAF还可以开展中子星物态方程以及弱相互作用率等研究. 通过以上核物理实验及理论研究, 更新核天体物理研究所需的质量和反应率数据库, 结合天文观测, 检验和发展天体物理模型, 理解星体演化和宇宙中的元素起源.

关键词 核天体物理, 元素核合成, 反应截面, 质量, 半衰期

PACS: 26.30.Hj, 25.60.Dz, 32.10.Bi, 21.10.Tg

1 核天体物理简介及其关键科学问题

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, 恒星发光发热的能量来源于其内部发生的热核聚变反应. 此外, 核过程也是宇宙中除氢以外所有化学元素赖以合成的唯一机制, 它在

原初大爆炸后三分钟至恒星寿命终结的宇宙和天体演化过程中起着关键作用. 核天体物理是研究微观世界的核物理与研究宇观世界的天体物理、天文学融合形成的一门交叉学科, 它在极小和极大尺度的物质之间架起了一座桥梁, 从而阐释恒星乃至宇宙中发生的纷繁复杂的奇妙现象^[1]. 核天体物理是一门令人振奋的

引用格式: 郭冰, 柳卫平, 唐晓东, 等. 基于HIAF的核天体物理研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112007

Guo B, Liu W P, Tang X D, et al. Research program of nuclear astrophysics based on the HIAF (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 112007, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0281](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0281)

人类自身以及赖以生存的丰富多彩的物质世界是由各种化学元素构成的(图1). 宇宙大爆炸三分钟后开始的原初核合成阶段只产生了氢、氦和少量的锂(其中 ^1H 约占75%, ^4He 约占25%, 而剩余的 ^2H , ^3He , ^6Li 和 ^7Li 质量之和只占十万分之一), 而其他化学元素是在各种不同的天体场所通过一系列核过程产生的. 在不同温度和密度的天体场所, 发生的核过程不同. 要了解天体核过程, 首先需要了解恒星的演化. 在恒星演化中, 比较常见的主要有两种: 孤立恒星和双星系统.

Figure 1 More than 90% of the elements in our bodies are from the nucleosynthesis process in the universe (revised based on the picture from Lugaro's talk).

图2 赫罗图(基于IEEE.tv网站原图修改)

Figure 2 Hertzsprung-Russell diagram (revised based on the picture from the IEEE.tv website).

发生r-过程生成重元素的天体场所之一。

太阳是一颗孤立恒星,它是中小质量恒星演化的典型。现在的太阳处于主序星阶段,这一阶段的特点是核芯通过氢聚变的方式产生能量。主序星是恒星最为稳定、长寿的时期,太阳在主序星阶段将度过总共约100亿年的时间。在大约50亿年之后,太阳核芯部分的氢元素将会消耗殆尽,核芯的主要物质变成氦元素。随着核芯氢聚变的停止,太阳将在重力作用下发生坍缩,导致核芯温度上升,进而加热核芯周围的氢元素并使之发生聚变,这时太阳进入红巨星阶段。当太阳成为红巨星时,其半径大约会是现在的200倍,表面可能将膨胀至地球现在的轨道。当核芯继续坍缩导致温度达到1亿摄氏度,这时核芯的氦元素开始聚变,能量产生的速率快速增大,最终导致剧烈的氦闪。氦“燃烧”的速度比氢快了很多,仅大约10亿年后,太阳耗尽核芯部分的氦元素(这时的核芯主要由氢聚变的产物——碳和氧构成),并再一次开始坍缩产生能量,进而加热核芯周围的氢元素并使之发生聚变,氢壳层中的氢元素聚变继续进行,这样太阳光度大大增加,太阳进入渐近巨星分支阶段。随后,由于受到强烈的恒星风的影响,太阳外层中的气体物质被吹向太空,更高温的部分暴露出来,因此太阳表面温度快速升高。当温度升高到一定程度,强紫外线辐射将把正在膨胀的喷出物质电离,使其开始发荧光,这一阶段称为行星状星云。由于该阶段氢聚变已经停止,因此太阳表面的温度和光度都快速下降。最终太阳演化成一颗碳氧白矮星,在未来漫长的岁月中慢慢变凉,而质量也只剩下

最初质量的一半左右。

除孤立恒星外,双星系统是宇宙中另一类重要天体。密近双星系统通常由主星和伴星两颗恒星组成。当初始质量大的恒星(主星)演化成高密度的星体(如白矮星、中子星)时,由于伴星(如红巨星)的“体型太大”,它外层的气体物质(主要是氢)会落入主星的“引力陷阱”而被主星夺走。随着主星表面吸积的这些物质越来越多,进而产生的压力越来越大,导致温度不断升高,最终引发剧烈的天体事件,如新星、X-射线暴。图3给出了红巨星外层的富含氢的物质被吸积到氧氦白矮星表面最终导致新星爆发的演化过程。V1974 Cygni是NASA于1994年1月拍摄的天鹅座新星,距地球约1万光年,图中不连续的环状外壳是被爆发事件抛射到空间的高温气泡的边缘,中心是氧氦白矮星和伴星。X-射线暴是另一种典型的双星系统演化导致的爆发性天体事件,源于伴星的富含氢的物质被吸积到中子星表面,迅速释放高达 $\sim 10^{39} - 10^{40}$ erg ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$)的能量,其亮度相当于10万到100万颗太阳。甚至还有释放能量更大、而且更加稀有的超级X-射线暴,2000年首次报道以来只发现了15例,释放能量比普通X-射线暴高达1000倍。

双中子星并合是另一种双星系统发生的剧烈的天体事件。在围绕共同中心旋转过程中,两颗中子星会不断释放引力波,导致该双星系统能量降低、轨道减小,并最终发生并合。北京时间2017年10月16日,激光干涉引力波天文台(LIGO)执行主任大卫·莱兹(David Reitze)宣布, LIGO和室女座引力波天文台(Virgo)于2017

图3 双星系统的演化(以新星为例)^[4]

Figure 3 Evolution of binary star system (for example nova) [4].

年8月17日首次发现了一种前所未有的引力波事件,即在NGC 4993星系观测到了第一例双中子星并合现象.这种剧烈的天体事件不仅会生成比铁更重的元素,还会产生大量的放射性核素,这些核素会发生衰变,并在短时间内发出大量的光,亮度可达到新星的一千倍左右,因此这个现象又被称为“千新星”(Kilonova).数据显示这个天体系统的质量估计为1.1–1.6倍太阳质量,恰好是中子星的质量范围.自此,多信使天文学时代正式开启.从初步的观测结果来看,此次中子星并合事件确实产生了大量重元素(特别是镧系元素).目前,中子星并合模型在解释重元素丰度时还存在一些不确定性,还需要进一步的完善.预期在不远的将来,利用更精确的天文观测结果、更可靠的核物理输入以及更准确的天体物理模型,人们可以较真实地模拟中子星并合过程所产生的重元素.

根据目前的理解,宇宙中元素核合成过程可分为四类.(1) 原初核合成,发生在大爆炸后最初三分钟.大爆炸后1 s,宇宙温度降至 10^{10} K时,宇宙中有处于热平衡的少量质子和中子.当温度降至大约 5×10^9 K以后,质子和中子合成 ^2H 的概率开始超过 ^2H 被 γ 光子裂解的概率,核合成过程开始.以 ^2H 为种子,相继合成 ^3H , ^3He , ^4He 和少量 ^6Li , ^7Li 及 ^7Be .按丰度排序, ^1H , ^4He , ^3He , ^2H , ^7Li 和 ^6Li 是可观测到的原初核素.(2) 恒星

平稳演化阶段的核合成,包括氢、氦、碳、氮、氧和硅的燃烧,主要涉及铁峰以下的稳定核素和长寿命核素的热核反应.氢燃烧主要包括pp反应链^[5]、CNO循环、Ne-Na循环等,慢速中子俘获(s)过程^[6]发生在氦燃烧阶段.由于这些核合成过程发生在相对低温的天体环境中,反应率低、演化过程缓慢;其中氢燃烧阶段的持续时间最长,基本上决定了恒星的寿命.(3) 高能宇宙射线诱发的散裂过程,主要产生铍、硼和部分的锂元素.(4) 爆发性核合成,如新星、X-射线暴、超新星爆发和双中子星并合等爆发性事件中的核合成,其反应流沿远离 β 稳定线的路径发展,有大量不稳定核素卷入核燃烧过程,包括快速中子俘获(r)过程^[7,8]、快速质子俘获(rp)过程^[9,10]、p-过程^[11,12]和最近提出的中微子质子(vp)过程^[13].这些过程发生在相对高温的天体环境中,反应率高、持续时间极短.上述核合成过程及其在核素图上的反应路径示于图4.

迄今为止,核天体物理虽然取得了显著的进展^[14,15],但关于元素起源及星体演化仍存在很多亟待破解的难题.鉴于核天体物理的重要性,中国、美国和欧洲分别制定的核科学中长期规划均将其列为重点发展领域^[16–18].

目前国际公认的关键科学问题如下.

(1) 地下实验室开展天体物理能区关键热核反应

图4 核素图与宇宙中产生元素的各种核过程^[4]

Figure 4 Table of nuclides and various nuclear processes occurred in the universe [4].

截面的直接测量仍是备受关注的前沿课题。尽管可进行直接测量的反应相对较少，但作为检验低能外推模型和约束理论计算的基准，直接测量具有至关重要的意义。意大利LUNA、美国CASPA和中国JUNA正在开展相关实验。

(2) 高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推。大多数情况下，天体物理能区的热核反应截面难以直接测量，通常需根据高能区数据和核反应理论向天体物理能区外推，但不同外推模型的可靠性有待进一步深入研究。

(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。由于间接测量是在较高能区进行的，电子屏蔽效应的干扰可以忽略，因此间接方法可用于研究许多难以直接测量的天体核反应。关于这些间接方法的应用还需要开展更多的实验和理论工作。

(4) 新星、X-射线暴和超新星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) 天体高温致密环境改变核外电子分布和原子核的布居状态，使得弱相互作用率在天体环境和实验

室环境中存在显著差异。原子核的弱相互作用跃迁强度是确定天体环境中弱相互作用率的关键物理量。

(6) 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，以及核反应如何控制恒星演化过程和结局等重要科学问题。

(7) 宇宙中铁以上重元素的来源之谜是核天体物理研究的重点课题，是21世纪的11大物理难题之一。为此，核物理学家需要对产生铁以上重元素的核过程(r-过程、s-过程、p-过程等)开展系统研究，这些核过程涉及数千个核素和数万个核反应，天体物理学家需要对恒星乃至宇宙演化的机制进行深入研究和理解，天文学家需要对天体现象、元素丰度、恒星能量释放等进行精确观测^[19]。

2 核天体物理研究方法

核物理是理解星体演化和元素起源的关键。通过核物理理论和实验手段获得的核反应截面、核衰变半衰期以及核素质量，然后将其输入天体演化模型进行计算机模拟，预言宇宙中元素的丰度。通过比较预言

和天文观测结果, 可以加深对天体演化和元素起源的理解. 核天体物理研究流程见图5.

天体演化和元素起源涉及的核反应有数万个, 其中只有少数反应可以进行实验测量, 实验研究方法主要包括两大类: 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. 天体物理感兴趣的能区(伽莫夫窗口)一般在几个keV到几百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高的束流强度, 还要求发展高效的探测技术和降低本底干扰来改善效应本底比, 因此可以进行直接测量的核反应是相对较少的. 中子诱发的不稳定核反应截面的直接测量也是非常困难的, 例如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)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)反应的直接测量是难以实现的. 因此, 研究和发展间接测量方法变得非常重要. 间接测量方法的核心思想是, 实验上通过截面较大的反应测定关键的物理量, 并结合成熟的核理论模型, 导出天体核反应的截面及反应率. 目前应用较多的间接测量方法主要包括: 渐近归一化系数(ANC)/谱因子方法、库仑离解法、Oslo方法和替代反

应法等. 这些间接测量方法也需要较高强度的不稳定束流. 在以上工作中, 实验总是比较困难的, 理论便可发挥重要作用. 如果说直接测量方法是点, 那么间接测量方法就是线, 而核理论就是面. 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的实验无法测量的天体核反应.

3 HIAF核天体物理终端建议

核天体物理研究是国际上建设核物理大科学装置的重要推动力之一. 强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)是由中国科学院近代物理研究所(中科院近代物理所)提出的大型多用途多功能先进的强流离子加速器装置^[18,20]. HIAF采用超导直线加速器、同步加速器和储存环组合的技术路线, 主要包括超导ECR离子源(SECR)、超导直线加速器(iLinac)、增强器(BRing), 以及相关配套设施, 主要实验测量装置有强流离子辐照和多核子转移谱仪、超核研究和高能辐照装置、放射性束流线、高精度环形谱仪(SRing)、电子-离子复合共振谱

图5 核天体物理的研究流程^[4]

Figure 5 Nuclear astrophysics research process [4].

图6 HIAF装置总体布局

Figure 6 Schematic layout of HIAF

仪、外靶终端、高能密度终端等(图6).

HIAF是中国新一代加速器装置. 该装置具有两个特点: (1) 低能强流, HIAF的17 MeV强流直线注入器计划加速流强为1 emA的从氢到铀的离子; (2) 高能量, HIAF的同步加速器将提供高于0.8 GeV/u的U及其他离子, 利用弹核碎裂反应产生放射性核素. 由于同步加速器的占空比小于1%, 强流直线注入器有99%的束流可以用来开展低能核物理研究.

建议在HIAF 17 MeV强流直线注入器的实验终端建造一台先进的反冲谱仪, 利用HIAF注入器的强流优势, 通过熔合反应、多核子转移反应、转移反应, 产生低能丰质子和丰中子核素, 经过反冲谱仪的分离和纯化后, 这些不稳定束流轰击次级靶, 次级反应产物可以通过靶附近的粒子和伽马探测器阵列测量, 重反冲核可以通过分析谱仪和焦面探测器测量, 通过符合压低本底、提高实验灵敏度. 这将是开展核天体物理与低能核物理的极好实验终端(图7).

与ADS耦合, 将大量的丰中子裂变产物注入HIAF, 可以为r-过程核合成及丰中子核物理研究提供独特的研究机遇. HIAF由于其灵活的技术组合, 在开展远离

图7 17 MeV强流直线注入器实验终端的反冲谱仪示意图(图6终端1处)

Figure 7 Schematic layout of recoil spectrometer at 17-MeV high-intensity linear injector terminal (terminal 1 in Figure 6).

稳定线核素的质量、核衰变半衰期和中子俘获反应截面等方面的研究中具有优势.

值得一提的是, HIAF上的储存环可以提供研究不稳定核反应和衰变的新途径. 如在储存环上通过测量穿过反应靶的轻离子, 可以高效利用多圈来测量核反应. 利用环上的透射式探测器, 可以测量核衰变. 如建造另一个实验环(例如一个小型质子束实验环), 那么利用两环的极小能量差, 就可以通过飞行中碰撞来测量伽莫夫窗口的反应截面, 即所谓的轻重并合束流(Merging Beam)的方法. 这种方法主要特色在于通过

调整两个较高能量束流间的相对速度, 实现较低质心系碰撞能量, 开展库仑势垒附近的核反应研究; 由于质心在实验室系的速度高, 出射产物的电荷态分布单一且动能大, 与低能重离子相比更容易鉴别.

4 天体核反应

4.1 与丰中子核素有关的天体核反应

在重元素起源研究中, r -过程被认为生成了宇宙中一半左右的重元素, 它发生在中子密度极高的爆发性天体环境中. LIGO探测到双中子星并合所产生的引力波^[21]以及千新星现象的研究^[22,23], 证明了双中子星并合是发生 r -过程的重要天体场所. 目前的主流观点认为, 最可能发生 r -过程的天体场所还包括核心坍缩型超新星^[7]. 丰中子核素的质量、寿命、衰变性质等直接影响 r -过程反应路径及其产物丰度分布. 此外, 配分函数(低激发态的能量和自旋)和 β -缓发中子的发射几率等也很重要. 其中, 重要核素分布在中子满壳附近, 例如, $A \sim 76-82, 128-132, 190-196$ ^[24]. 利用多核子转移反应, 与弹核碎裂反应形成互补, 有效地产生丰中子核素. 计划建立离子/原子阱、 β -衰变谱仪、中子探测阵列、裂变谱仪等实验装置, 针对关键核素开展相关研究.

r -过程核素丰度对天体物理条件非常敏感, 包括“冷” r -过程和“热” r -过程两种情况. 在“冷” r -过程中, 温度相对较低, 导致中子俘获(n, γ)反应和光致裂解(γ, n)反应没有处于平衡状态, 因此(n, γ)反应将影响最终的 r -过程核素丰度. 即使在“热” r -过程中, 在最终冻结期间, (n, γ)和(γ, n)反应也处于不平衡状态, 因此丰中子核的(n, γ)反应将对 r -过程元素丰度产生重要影响^[25,26]. 这都表明, 丰中子核(n, γ)反应率的实验测量对于理解 r -过程发生的天体场所及重元素丰度起源仍有重要意义^[27].

本节将对中子俘获反应的研究方法做简要介绍.

最可靠的是直接测量方法, 这个难度最大, 但非常值得重视和发展. 直接测量主要包括两种方式: 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; 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. 2014年, 国际上提出一种不稳定核中子俘获反应的直接测量方法, 基本思路是利用反应堆核心的高通量中子作为中子靶, 使用储存

环的不稳定束流轰击反应堆核心的中子, 来实现不稳定核中子俘获的直接测量^[28]. 2017年, 该团队又提出了一种新方法, 基本思路是使用质子诱导的散裂反应在线产生的热化中子靶, 通过高强度放射性束轰击中子靶来测量中子俘获反应^[29]. 这种方法需要进行逆运动学测量, 实验中需要使用储存环来测量重的反应产物.

由于直接测量难度极大以及对实验设备要求极高, 使得可以开展直接测量的核反应相对较少. 因此, 发展中子俘获反应的间接测量方法是非常重要的. 目前, 国际上间接测量方法主要包括: 渐近归一化系数(ANC)/谱因子方法、Oslo方法、替代反应法和替代比率法等.

(d, p)反应是研究(n, γ)中子俘获的有效手段. 利用转移反应截面与中子宽度的关联, 约束(n, γ)反应的关键参数, 确定(n, γ)反应有关的重要激发态及相应的中子宽度. γ 宽度是确定(n, γ)反应的另外一个参数. ($d, p\gamma$)俘获测量可以提供中子发射阈附近激发态的 γ 宽度和共振强度. 利用这些实验结果, 约束反应模型, 提供可靠预言. 在ANC方法中, 通过测量 $A(d, p)B$ 转移反应提取 B 核的核谱学信息(如ANC或谱因子), 结合辐射俘获理论可以定出 $A(n, \gamma)B$ 反应中的直接俘获贡献. ANC方法最早用于研究质子辐射俘获反应^[30,31], 近年来开始逐渐应用于中子辐射俘获反应的研究^[32-36]. 为实现不稳定核(d, p)转移反应的高分辨测量, 逆运动学技术以及轻重反应产物和伽马射线多重符合测量是关键技术. 例如, 利用HIAF中高能次级束流线提供的“鸡尾酒”丰中子束流, 通过在日本理化学研究所研制成功的降能技术(如OEDO), 将束流能量降低到20–100 MeV/A; 使用 CD_2 等反应靶, 利用多单元带点粒子望远镜阵列(类似法国GANIL实验室的MUSTII), 同时测量多个核素的散射和转移角分布, 导出丰中子核的系列光学势、激发能和核谱因子, 系统得到高精度的、质量数为130–180(r -过程第二和第三峰)范围内的(n, γ)中子俘获反应截面, 在下游利用零度磁谱仪, 次级束流还可以重复使用和符合测量. 实验构想见图8. 该装置可以灵活使用, 既在HIAF中高能次级束流线上使用, 也可以在图7所示的低能终端使用. 中国原子能科学研究院(原子能院)在 $^8Li(d, p)^9Li$ 反应测量中, 通过逆运动学实验实现了轻重带电粒子反应产物的符合测量, 较好地鉴别出反应产物 9Li , 并获得 $^8Li(n, \gamma)^9Li$ 反应率(图9)^[32], 为将来在HIAF开展更丰中子核区的(n, γ)

图8 (d, p)反应逆运动学测量示意图

Figure 8 Schematic layout of measurement of (d, p) reactions in inverse kinematics.

图9 $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ 反应率的比较^[32]

Figure 9 The $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ reaction rates together with the previous results [32].

反应奠定了初步基础。

Oslo方法是通过测量复合核B的衰变或退激来约束能级密度和伽马强度函数,进而结合统计模型确定 $A(n, \gamma)B$ 反应截面。在Oslo方法中,可以通过不同的方式来布居目标复合核的激发态。一种方式是通过轻离子转移反应、非弹性散射等不同的核反应模式来布居激发态,这种方式需要高强度束流和相应核反应截面的测量^[37]。另一种方式是通过 β 衰变来布居目标复合核的激发态,通过测量复合核的中子衰变^[38]或伽马跃迁来^[39]约束能级密度和伽马强度函数,这种方法也称为 β -Oslo方法。基于这种 β -Oslo方法的实验可以在低流强(~ 1 pps)的条件下开展^[40]。例如,利用HIAF提供的极端丰中子束流(如 ^{70}Co ,比稳定的 ^{59}Co 多11个中子),其 β 衰变布居 ^{70}Ni 中子阈附近的激发态,通过符合测量 β 衰变发射的电子及衰变子体 ^{70}Ni 的退激 γ 射线,约

束 ^{70}Ni 中子阈附近的能级密度及 γ 强度函数,结合光学模型给出r-过程 $^{69}\text{Ni}(n, \gamma)^{70}\text{Ni}$ 的反应截面和反应率。

替代反应法的基本思路是采用一个容易实现的反应道替代 (n, γ) 等目标反应的入射道,合成与目标反应相同的复合核并测量其出射道。国际上已经通过稳定核的实验数据对该方法进行了验证^[26,40]。替代反应需要精确测得复合核的数目,而靶中的杂质和其他一些出射道容易干扰复合核数目的测量。替代比率法^[40]是在替代反应法基础上发展起来的一种新方法,采用两个替代反应的比率和一个中子俘获截面来确定不稳定核的中子俘获截面,消除了替代法中复合核数目测量以及较为复杂的理论计算问题。目前,替代比率法已经在间接测量 (n, f) 和 (n, γ) 截面上得到实验验证并得到应用。文献^[41,42]中分别采用了拾取和非弹性散射,利用 $^{235}\text{U}(^3\text{He}, \alpha f)^{238}\text{U}(^3\text{He}, \alpha f)$ 和 $^{238}\text{U}(\alpha, \alpha' f)^{236}\text{U}(\alpha, \alpha' f)$ 比率分别确定了 $^{236}\text{U}(n, f)$ 和 $^{237}\text{U}(n, f)$ 反应截面。原子能院采用替代比率法和 $(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})$ 反应获得了稳定核 $^{93}\text{Zr}(n, \gamma)^{94}\text{Zr}$ 反应截面,实验结果与直接测量截面符合得很好(图10),证明了该方法的可行性^[43]。目前已成功应用于研究不稳定核 $^{95}\text{Zr}(n, \gamma)^{96}\text{Zr}$ 反应截面^[44]。例如,利用HIAF提供的丰中子束流可以开展单中子转移或双中子转移反应测量,约束复合核的伽马衰变概率,进而获得s-过程或r-过程中的 (n, γ) 反应截面及反应率。

在r-过程的 (n, γ) 反应中,直接俘获与共振俘获均起着重要作用^[7],需要对这些贡献进行全面研究。在上述方法中,ANC方法侧重研究直接辐射俘获,Oslo方法和替代反应法侧重研究共振辐射俘获。这几种方法互

图10 通过稳定核 $^{93}\text{Zr}(n, \gamma)^{94}\text{Zr}$ 反应截面验证了替代比率法的可行性^[43]

Figure 10 Verification of the surrogate ratio method using the $^{93}\text{Zr}(n, \gamma)^{94}\text{Zr}$ cross sections [43].

为补充, 有利于获得不稳定核中子辐射俘获反应的全面信息, 特别是将有可能填补核天体物理r-过程(n, γ)反应测量中的空白区域.

r-过程反应流在丰中子超重区 $A=270$ 附近发生裂变, 裂变产物将反应流带回 $A\sim 130$ 区域, 形成裂变循环^[45]. 这个过程是中子星并合事件中的重要过程, 对产物元素丰度有重要影响. 目前超重丰中核素合成是个难点, 相关裂变数据缺失. 多核子转移反应是目前唯一一个有可能产生超重丰中子重核的途径. 利用 β 缓发裂变及(d, pf)反应, 可以研究超重核裂变位垒高度及裂变产物分布, 为改进丰中子重核的裂变模型提供实验依据.

4.2 与丰质子核素有关的天体核反应

热CNO循环、 αp -反应链及rp-过程是发生在新星和X-射线暴等天体环境. 新星及X-射线暴的光变曲线、银河系 ^{22}Na 和 ^{26}Al 的伽马射线强度、新星产物的元素丰度等的理论研究都需要这些核合成过程反应率的基准数据^[46]. 根据模型研究, 重要的反应有 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)^{19}\text{Ne}$, $^{19}\text{Ne}(p, \gamma)^{20}\text{Na}$, $^{56}\text{Ni}(p, \gamma)^{58}\text{Cu}$, $^{25}\text{Al}(p, \gamma)^{26}\text{Si}$, $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$, $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 等. 利用丰质子束流研究相关的质子或 α 诱发反应, 在10–20 MeV/u能区利用转移反应($^3\text{He}, d$)或($^6\text{Li}, d$)间接测量共振能量和共振强度.

中科院近代物理所基于RIBLL1次级束流线和东京大学CRIB次级束装置, 开展了 $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ 和 $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ (图11)等反应的研究^[47–49], 为将来在HIAF开展更丰质子核区的相关反应奠定了基础.

5 核素质量和半衰期

核素质量和半衰期是研究r-过程路径的又一关键数据, 开展质量和半衰期的实验测量对于研究r-过程和理解重元素起源有重要意义.

远离稳定线的核素质量测量通常包括直接测量和间接测量两类方法. 直接测量主要包括三种技术: 飞行时间质谱(TOF-MS)、储存环和离子阱. 间接测量方法通常依赖于目标核素的反应或衰变过程中的能量平衡, 未知质量是根据反应中的已知质量或衰变计算出来的. 中科院近代物理所基于冷却储存环, 精确测量了一批短寿命不稳定核素的质量^[50], 包括近质子滴线短寿命核素 ^{63}Ge , ^{65}As , ^{67}Se 和 ^{71}Kr 的质量^[51]和缺中子

图11 质心系 $^{21}\text{Na}+p$ 弹性共振散射的实验微分截面^[48]

Figure 11 Experimental center-of-mass differential cross section for resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+p$ [48].

短寿命原子核(尤其是 ^{45}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, 排除了理论预言可能存在的Ca-Sc循环^[52]. 中科院近代物理所还精确测量了近质子滴线短寿命核素 ^{41}Ti , ^{45}Cr , ^{49}Fe 和 ^{53}Ni 的质量, 在fp壳层对同位旋多重态质量公式(Isospin Multiplet Mass Equation, IMME)进行了严格的检验^[53]; 测量了短寿命核素 ^{52}Co 及其同核异能态的质量, 重新构建了 ^{52}Ni 的 β 衰变纲图, 重新指认了 ^{52}Co 中 $T=2$ 的同位旋相似态, 发现IMME公式依然能够描述 $A=52$, $T=2$ 的同位旋相似态^[54]; 这两项工作使得IMME公式在核天体物理中的应用有了重新的认识. 中科院近代物理所研究人员还精确测定了 ^{82}Zr 和 ^{84}Nb 的原子核质量, 大幅提高了 ^{79}Y , ^{81}Zr 和 ^{83}Nb 的质量精度, 结果不支持Zr-Nb循环对rp-过程具有较大贡献的可能性^[55]. 原子能院基于RIBLL次级束流线, 通过精确测量 ^{53}Co 的质子衰变能, 给出了 ^{52}Fe 的质量^[56]. 包括正在发展的位置灵敏的TOF MCP探测器^[57], 这些工作为将来在HIAF开展r-过程丰中子核素的质量测量做了重要铺垫.

β 衰变将中子变为质子, 使得r-过程向高原子序数方向行进. β 衰变测量通常受到电子和丰中子核素的探测效率的挑战. 在日本RIKEN的最新衰变实验中, 使用了八块双面硅条探测器, 硅阵列周围被EURICA阵列的84个高纯锗(HPGe)探测器所包围. 巨大的探测能力, 再加上目前国际最强的放射性束, 这些实验对半衰期的测量做出了重大贡献^[58,59]. 除硅探测器外, 美国MSU研发出一种高效率的双面锗条探测器(GeDSSD),

该探测器显示出50%的电子探测效率和更高的机械稳定性^[60]. 加拿大TRIUMF国家实验室已开发出一套正负电子标记闪烁体探测器阵列(Scintillating Electron-Positron Tagging Array, SCEPTAR), 该阵列由20个薄的塑料闪烁体构成的 β 探测器组成, 真空室周围是16个高纯锗Clover探测器. SCEPTAR的电子探测效率达到80%, 同时可以提供其出射方向信息. 这些工作为将来在HIAF上开展r-过程丰中子核素的半衰期测量提供了重要的参考和借鉴.

基于HIAF, 利用带电粒子探测器、中子和 γ 探测器, 围绕注入靶, 通过测量 β , α , n和 γ 射线, 有望系统得到r-过程上述质量范围的丰中子核的半衰期、伽莫夫-泰勒跃迁强度(B(GT))和激发能, 并使用这些信息, 通过IMME关系, 结合HIAF质量测量环的直接在上述质量区的丰中子质量测量, 系统导出r-过程的丰中子核质量, 精度达到数十keV, 较大程度消除r-过程模拟的质量和半衰期不确定性^[61].

6 其他方面

中子星物态方程^[62]与中子星并合过程中发射的引力波紧密相关. 系统研究重离子碰撞中不同物理量相对于对称能的敏感程度. 开展实验测量, 研究和提取丰中子核物质的状态方程, 特别是对称能在高密度区的行为; 丰中子原子核的巨共振研究为中子星物质的不可压缩性提供依据; 超核实验将研究超子与核子的相互作用, 为建立包含奇异夸克的中子星模型提供基本相互作用. 基于核力泛函理论, 利用当前对致密星体质量半径及引力波的天文观测和探测, 约束高密度核物质状态方程.

弱相互作用率: 弱相互作用在宇宙元素演化过程中起重要作用. 大质量恒星通过塌缩过程中的电子俘获过程及中微子反应^[63,64], 对II型超新星爆发过程中的核合成及中子星的形成起决定作用. 由于星体中的高温环境, 原子核有一定概率布居其激发态并参与弱相互作用, 使有效 β 衰变及电子俘获速率发生极大的

改变^[65]. 在100–300 MeV/u能区开展电荷交换反应实验, 可以测量关键激发态的B(GT), 为确定天体环境中弱相互作用过程的反应速率提供可靠的数据, 为相关核理论模型提供约束, 进而提升模型的预言能力.

核合成过程理论研究: 针对元素核合成过程发生的天体场所研究相关核过程, 确定关键核素及其性质^[66], 为实验指出方向; 根据实验结果, 约束核物理模型, 提升模型的预言能力, 更新核天体物理研究所需的质量和反应率数据库, 结合天文观测, 检验星体模型, 理解宇宙中的元素起源.

7 总结与展望

本文简要介绍了基于HIAF的核天体物理研究展望及国际相关研究进展. 在核天体物理研究中, 原子核的质量、衰变半衰期以及相关核反应截面是其中最重要的三个核物理输入量. HIAF在开展远离稳定线核素的质量、半衰期以及中子俘获反应截面等方面的研究中极具优势. 建议在HIAF 17 MeV强流直线注入器的实验终端建造一台先进的反冲谱仪, 利用HIAF注入器的强流优势, 通过熔合反应、多核子转移反应、转移反应, 产生低能丰质子和丰中子核素, 与HIAF高能终端形成互补, 开展前沿核结构和核天体物理实验研究.

在中子俘获反应方面, 发展ANC, Oslo, 替代反应和替代比率等间接测量方法及实验技术, 系统开展r-过程中子俘获反应的研究. 通过HIAF质量环, 可以系统测量r-过程核素质量; 通过HIAF次级束流线, 发展高效率探测器, 系统测量衰变半衰期. 此外, 基于HIAF还可以开展中子星物态方程、弱相互作用率等研究. 通过以上核物理实验及理论研究, 更新核天体物理研究所需的质量和反应率数据库, 结合天文观测, 检验星体模型, 理解星体演化和宇宙中的元素起源.

综上所述, HIAF建成将为开展不稳定核素的质量、半衰期和中子俘获反应截面的高精度测量提供更加广阔的前景, 将为研究核天体物理r-过程和理解宇宙重元素起源问题提供难得的研究机遇.

参考文献

- 1 Rolfs C E, Rodney W S. *Cauldrons in the Cosmos*. Chicago: University of Chicago Press, 1988
- 2 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]

- 3 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]
- 4 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]
- 5 Adelberger E G, García A, Robertson R G H, et al. Solar fusion cross sections. II. The pp chain and CNO cycles. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 195–245
- 6 Käppeler F, Gallino R, Bisterzo S, et al. The s process: Nuclear physics, stellar models, and observations. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 157–193
- 7 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
- 8 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 Particle Nucl Phys*, 2011, 66: 346–353
- 9 Champagne A E, Wiescher M. Explosive hydrogen burning. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1992, 42: 39–76
- 10 Schatz H, Aprahamian A, Görres J, et al. rp-process nucleosynthesis at extreme temperature and density conditions. *Phys Rep*, 1998, 294: 167–263
- 11 Arnould M, Goriely S. The p-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics status. *Phys Rep*, 2003, 384: 1–84
- 12 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
- 13 Wanajo S, Janka H T, Kubono S. Uncertainties in the vp-process: Supernova dynamics versus nuclear physics. *Astrophys J*, 2011, 729: 46
- 14 Bethe H A. Energy production in stars. *Phys Rev*, 1939, 55: 434–456
- 15 Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. Synthesis of the elements in stars. *Rev Mod Phys*, 1957, 29: 547–650
- 16 Reaching the Horizon—The 2015 Long Range Plan for Nuclear Science. Department of Energy, National Science Foundation, 2015. 1–150
- 17 Perspectives in Nuclear Physics—NuPECC Long Range Plan. European Science Foundation, 2017. 1–235
- 18 Development strategy research group of nuclear physics and plasma physics. Nuclear Physics and Plasma Physics—Frontiers 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]
- 19 He J, Guo B, Liu W, et al. How were the heavy chemical elements beyond iron made in the Universe? *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2429–2439
- 20 Zhou X. Construction of the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF). *AAPPS Bull*, 2019, 29: 6–12
- 21 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- 22 Tanvir N R, Levan A J, González-Fernández C, et al. The emergence of a lanthanide-rich kilonova following the merger of two neutron stars. *Astrophys J*, 2017, 848: L27
- 23 Pian E, D’Avanzo P, Benetti S, et al. Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger. *Nature*, 2017, 551: 67–70
- 24 Horowitz C J, Arcones A, Côté B, et al. r-process nucleosynthesis: Connecting rare-isotope beam facilities with the cosmos. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2019, 46: 083001
- 25 Cowan J J, Sneden C, Lawler J E, et al. Making the heaviest elements in the universe: A review of the rapid neutron capture process. arXiv: 1901.01410v1
- 26 Ratkiewicz A, Cizewski J A, Escher J E, et al. Towards neutron capture on exotic nuclei: Demonstrating (d, p γ) as a surrogate reaction for (n, γ). *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 052502
- 27 Arcones A, Bardayan D W, Beers T C, et al. White paper on nuclear astrophysics and low energy nuclear physics. Part 1: Nuclear astrophysics. *Prog Particle Nucl Phys*, 2017, 94: 1–67
- 28 Reifarh R, Litvinov Y A. Measurements of neutron-induced reactions in inverse kinematics. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2014, 17: 014701
- 29 Reifarh R, Göbel K, Heftrich T, et al. Spallation-based neutron target for direct studies of neutron-induced reactions in inverse kinematics. *Phys Rev Accel Beams*, 2017, 20: 044701
- 30 Liu W, Bai X, Zhou S, et al. Angular distribution for the $^7\text{Be}(d, n)^8\text{B}$ reaction at $E_{\text{cm}}=5.8$ MeV and the $S_{17}(0)$ factor for the $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ reaction.

- Phys Rev Lett*, 1996, 77: 611–614
- 31 Azhari A, Burjan V, Carstoiu F, et al. The $^{10}\text{B}(^7\text{Be}, ^8\text{B})^9\text{Be}$ Reaction and the $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ S Factor. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 3960–3963
 - 32 Li Z H, Liu W P, Bai X X, et al. The $^8\text{Li}(d, p)^9\text{Li}$ reaction and the astrophysical $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ reaction rate. *Phys Rev C*, 2005, 71: 052801
 - 33 Jones K L, Adekola A S, Bardayan D W, et al. The magic nature of ^{132}Sn explored through the single-particle states of ^{133}Sn . *Nature*, 2010, 465: 454–457
 - 34 Mohr P. Direct capture in the $^{130}\text{Sn}(n, \gamma)^{131}\text{Sn}$ and $^{132}\text{Sn}(n, \gamma)^{133}\text{Sn}$ reactions under r-process conditions. *Phys Rev C*, 2012, 86: 068803
 - 35 Kozub R L, Arbanas G, Adekola A S, et al. Neutron single particle structure in ^{131}Sn and direct neutron capture cross sections. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 172501
 - 36 Ma T L, Guo B, Pang D Y, et al. New determination of astrophysical $^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}$ reaction rate from the spectroscopic factor of ^{15}C . *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 212021
 - 37 Guttormsen M, Ramsøy T, Rekstad J. The first generation of γ -rays from hot nuclei. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A*, 1987, 255: 518–523
 - 38 Raman S, Fogelberg B, Harvey J A, et al. Overlapping β decay and resonance neutron spectroscopy of levels in ^{87}Kr . *Phys Rev C*, 1983, 28: 602–622
 - 39 Spyrou A, Liddick S, Larsen A, et al. Novel technique for constraining r-process (n, γ) reaction rates. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 232502
 - 40 Escher J E, Burke J T, Dietrich F S, et al. Compound-nuclear reaction cross sections from surrogate measurements. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 353–397
 - 41 Lyles B F, Bernstein L A, Burke J T, et al. Absolute and relative surrogate measurements of the $^{236}\text{U}(n, f)$ cross section as a probe of angular momentum effects. *Phys Rev C*, 2007, 76: 014606
 - 42 Burke J T, Bernstein L A, Escher J, et al. Deducing the $^{237}\text{U}(n, f)$ cross section using the surrogate ratio method. *Phys Rev C*, 2006, 73: 054604
 - 43 Yan S Q, Li Z H, Wang Y B, et al. Examination of the surrogate ratio method for the determination of the $^{93}\text{Zr}(n, \gamma)^{94}\text{Zr}$ cross section with $^{90,92}\text{Zr}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{92,94}\text{Zr}$ reactions. *Phys Rev C*, 2016, 94: 015804
 - 44 Yan S Q, Li Z H, Wang Y B, et al. The $^{95}\text{Zr}(n, \gamma)^{96}\text{Zr}$ cross section from the surrogate ratio method and its effect on s-process nucleosynthesis. *Astrophys J*, 2017, 848: 98
 - 45 Vassh N, Vogt R, Surman R, et al. Using excitation-energy dependent fission yields to identify key fissioning nuclei in r-process nucleosynthesis. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2019, 46: 065202
 - 46 Schatz H, Rehm K E. X-ray binaries. *Nucl Phys A*, 2006, 777: 601
 - 47 Hu J, He J J, Parikh A, et al. Examination of the role of the $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ reaction rate in type-I X-ray bursts. *Phys Rev C*, 2014, 90: 025803
 - 48 He J J, Zhang L Y, Parikh A, et al. The $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ breakout reaction in X-ray bursts: Experimental determination of spin-parities for α resonances in ^{22}Mg via resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+p$. *Phys Rev C*, 2013, 88: 012801
 - 49 Zhang L Y, He J J, Parikh A, et al. Investigation of the thermonuclear $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$ reaction rate via resonant elastic scattering of $^{21}\text{Na}+p$. *Phys Rev C*, 2014, 89: 015804
 - 50 Zhang Y H. Mass measurements of short-lived nuclides at the heavy-ion storage ring in Lanzhou. *AAPPS Bull*, 2019, 29: 4–12
 - 51 Tu X L, Xu H S, 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. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 112501
 - 52 Yan X L, Xu H S, Litvinov Y A, et al. Mass measurement of ^{45}Cr and its impact on the Ca-Sc cycle in X-ray bursts. *Astrophys J*, 2013, 766: L8
 - 53 Zhang Y H, Xu H S, Litvinov Y A, et al. Mass measurements of the neutron-deficient ^{41}Ti , ^{45}Cr , ^{49}Fe , and ^{53}Ni nuclides: First test of the isobaric multiplet mass equation in fp-shell nuclei. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 102501
 - 54 Xu X, Zhang P, Shuai P, et al. Identification of the lowest $T=2, J^\pi=0^+$ isobaric analog state in ^{52}Co and its impact on the understanding of β -decay properties of ^{52}Ni . *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 182503
 - 55 Xing Y M, Li K A, Zhang Y H, et al. Mass measurements of neutron-deficient Y, Zr, and Nb isotopes and their impact on rp and vp nucleosynthesis processes. *Phys Lett B*, 2018, 781: 358–363
 - 56 Shen Y P, Liu W P, Su J, et al. Measurement of the ^{52}Fe mass via the precise proton-decay energy of $^{53}\text{Co}^m$. *Phys Rev C*, 2015, 91: 047304
 - 57 Liu J H, Ge Z, Wang Q, et al. Electrostatic-lenses position-sensitive TOF MCP detector for beam diagnostics and new scheme for mass measurements at HIAF. *Nucl Sci Tech*, 2019, 30: 152
 - 58 Lorusso G, Nishimura S, Xu Z, et al. β -decay half-lives of 110 neutron-rich nuclei across the $N=82$ shell gap: Implications for the mechanism and

- universality of the astrophysical r process. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 192501
- 59 Wu J, Nishimura S, Lorusso G, et al. 94 β -decay half-lives of neutron-rich ^{55}Cs to ^{67}Ho : Experimental feedback and evaluation of the r-process rare-earth peak formation. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 072701
- 60 Larson N, Liddick S N, Bennett M, et al. High efficiency beta-decay spectroscopy using a planar germanium double-sided strip detector. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A*, 2013, 727: 59–64
- 61 Xu X D, Sun B, Niu Z M, et al. Reexamining the temperature and neutron density conditions for r-process nucleosynthesis with augmented nuclear mass models. *Phys Rev C*, 2013, 87: 015805
- 62 Zhang N B, Li B A. Astrophysical constraints on a parametric equation of state for neutron-rich nucleonic matter. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 178
- 63 Sullivan C, O'Connor E, Zegers R G T, et al. The sensitivity of core-collapse supernovae to nuclear electron capture. *Astrophys J*, 2016, 816: 44
- 64 Misch G W, Sun Y, Fuller G M. Neutrino spectra from nuclear weak interactions in sd-shell nuclei under astrophysical conditions. *Astrophys J*, 2018, 852: 43
- 65 Langanke K, Martínez-Pinedo G. Shell-model calculations of stellar weak interaction rates: II. Weak rates for nuclei in the mass range $A=45$ –65 in supernovae environments. *Nucl Phys A*, 2000, 673: 481
- 66 Zhu L, Ma Y G, Chen Q, et al. Multilayer network analysis of nuclear reactions. *Sci Rep*, 2016, 6: 31882

Research program of nuclear astrophysics based on the HIAF

GUO Bing¹, LIU WeiPing^{1*}, TANG XiaoDong², LI ZhiHong¹ & HE JianJun³

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

² Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

³ Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Nuclear astrophysics is an interdisciplinary research field integrating nuclear physics, astrophysics and astronomy. It has always been an important frontier of physics in the world. This paper summarizes the current status, key research topics, and experimental approaches in nuclear astrophysics and briefly introduces its research prospect based on the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF), which is a large-scale scientific facility for nuclear physics that is under construction in China. HIAF has great advantages for studying the masses, half-life, and reaction cross sections of the unstable nuclides and will provide a good opportunity for understanding explosive nuclear processes as well as the origin of heavy elements in the universe. For key reactions in the nucleosynthesis process, indirect measurement methods and experimental techniques such as ANC, Oslo, surrogate reactions, and surrogate ratio methods, will be developed and used for the systematic studies on the charged-particle or neutron capture reactions. Using the HIAF storage ring, the mass of the r-process nuclides can be systematically measured. Using the HIAF secondary beam line and high-efficiency detector, the decay half-life of the r-process nuclides can be measured. Furthermore, based on HIAF, the equations of states of a neutron star and weak interaction rates can be studied. Using the above nuclear physics experimental and theoretical research, the database of the masses and reaction rates will be updated. Astronomical observations will be combined to test the astrophysical model, and to understand the evolution of stars as well as the origin of elements in the universe.

nuclear astrophysics, nucleosynthesis, reaction cross section, mass, half-life

PACS: 26.30.Hj, 25.60.Dz, 32.10.Bi, 21.10.Tg

doi: 10.1360/SSPMA-2020-0281