HIRFL-CSR 设施中 RIBLL2 分离器的完全实现

Xiao-Dong Xu^{1,2}, Yong Zheng¹,* Zhi-Yu Sun^{1,2},[†] Yu-Nan Song^{1,2}, Bao-Hua Sun³,[‡] Satoru Terashima¹,

Chang-Jian Wang³, Ge Guo³, Guang-Shuai Li³, Xiu-Lin Wei³, Jun-Yao Xu³, Ji-Chao Zhang³, Yong

Cao³, Bing-Shui Gao^{1,2}, Jia-Xing Han³, Jin-Rong Liu³, Chen-Gui Lu¹, Shu-Ya Jin¹, Hooi Jin

Ong^{1,2}, Hao-Tian Qi³, Yun Qin³, Ya-Zhou Sun¹, Isao Tanihata³, Lu-Ping Wan³, Kai-Long Wang¹,

Shi-Tao Wang^{1,2}, Xin-Xu Wang³, Tian-Yu Wu³, Xiao-Tian Wu¹, Mei-Xue Zhang³, Wen-Wen

Zhang³, Xiao-Bin Zhang³, Xue-Heng Zhang^{1,2}, Jian-Wei Zhao³, Zi-Cheng Zhou³, and Li-Hua Zhu³

¹Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

²School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China and

³School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, People's Republic of China

(10Dated: 2025 年 6 月 2 日)

自从美国劳伦斯伯克利国家实验室在 20 世纪 80 年代首次使用放射性离子束 (RIB) 以来, 生产并研 究远离稳定性的奇异核已经成为可能,涵盖了广泛的 质量数图。在过去几十年里, RIB 触发了奇异核研究 领域的巨大进步。例如,已有超过3300种同位素被发 现[1],其中相当一部分是通过使用放射性离子束生成 的。实验上,有几种方法可以生成放射性原子核。其 中,在飞行生产方法中,特别是射弹碎片和在飞行裂 变,已被证明是最关键的方法之一。在飞行方法广泛 用于创建远离稳定谷的放射性原子核,例如位于或接 近r过程路径上的那些(如参考文献所示[2-4]),从而 允许科学家探索以前无法触及的核领域。在过去几十 年里,世界各地建造了多种碎片分离器,以便利用在 飞行技术生成奇异核 [5]。杰出的设置包括德国 GSI 的 FRS、法国 GANIL 的 LISE、日本 RIKEN 的 RIPS 和 BigRIPS、美国 NSCL/MSU 的 A1200 和 A1900、美 国 FRIB/MSU 的 ARIS、俄罗斯 DUBNA 的 ACCU LINNA、中国 HIRFL 的 RIBLL1 和 RIBLL2 等。

在上述实验设施中,兰州重离子研究装置 (HIRFL) 是一个多功能加速器复合体,能够提供 从氢到铀的所有离子束。进入 21 世纪后进行了升 级,HIRFL 扩展到了 HIRFL-CSR 设施,该设施包 括两个回旋加速器、一个冷却储存主环 (CSRm) 和一 个冷却储存实验环 (CSRe) [6,7]。作为连接 CSRm 和 CSRe 的传输束线,兰州第二放射性离子束线 (RIBLL2) [6,8] 是世界上为数不多能提供能量超过 300 MeV/u 的 RIBs 的碎片分离器之一。这里我们 展示了 RIBLL2 分离器的一些基本参数。最大磁刚 度 (Bρ) 是 10.64 Tm。水平和垂直角度接受率均为 ±25mrad,而动量接受率为±1%。从 F0 到 F1 的水 平和垂直放大倍数分别为-0.487 和-11.77。在色散焦点 F1 处的动量色散为 1.169 cm/%。假设 F0 处的对象尺 寸半宽为 1 mm, F1 处的一级动量分辨率是 1200。关 于 RIBLL2 的全面描述可以在参考文献 [8] 中找到。

在 RIBLL2 束线中, 在 RIBLL2 建成后, 建造了一 个名为外部靶设施(ETF)的实验平台。它位于 RIBLL2 的中焦点平面(F2)下游(参见图 1)。通常,在ETF 安装一个二次靶进行反应研究。ETF 具有一个偶极磁 铁和各种探测器,可以识别从 RIBLL2 传输的 RIB,并 测量在二次靶上发生的核反应 [9]。通过使用碎裂法在 F0产生二次束,然后通过从F0到F2的束线分离和输 送感兴趣的原子核,在ETF进行了一系列实验,例如 击出反应研究(例如,参考文献 [10])、截面测量(例 如,参考文献 [11])、电荷交换截面 (CCCS) 测量 (例 如,参考文献 [12, 13]) 和电荷半径研究 [14] 基于最 近发现的 CCCS 与分离能之间的稳健相关性 [15]。由 于从 F0 到 F2 的束线具有有限的分离能力和相对较短 的飞行路径 (~26 m), 上述实验主要致力于研究 p-或 sd-壳层原子核,并采用轻初级束 (如 ¹⁸O 和 ⁴⁰Ar)。为 了进一步扩展对奇异原子核在中等和重质量区域的研 究, 充分发挥 RIBLL2 分离器的能力至关重要 [16]。主 要任务是在最后一个焦平面(F4)区域构建一个新的

^{*}Corresponding author: zhengyong@impcas.ac.cn

 $^{^\}dagger\mathrm{Corresponding}$ author: <code>sunzhy@impcas.ac.cn</code>

[‡]Corresponding author: bhsun@buaa.edu.cn

实验平台,从而使整个 RIBLL2 束线(55 米)能够完 全用于分离和传输稀有同位素束。相应地,为这个新 的实验平台开发了各种探测器(以下简称 RIBLL2-F4 平台)。同时,部分现有的探测器也随着新构建的设备 进行了升级。本文总结了这些发展,并介绍了 RIBLL2 分离器的当前状况。图 1是 RIBLL2 的示意图布局,在 此图中展示了安装在各个焦平面的束线探测器和仪器 以及新开发的 RIBLL2-F4 平台。



图 1: RIBLL2 分离器的示意图布局。主束被注入 RIBLL2 的 入口,撞击位于 F0 的初级靶。在焦平面 F1、F2 和 F3 处,布 置了多条束线探测器(其中一些通过照片显示)和仪器(如狭 缝)。在 F4 处,由下部示意图展示了包含各种探测器和次级靶 的 RIBLL2-F4 平台。详情见正文。

在焦平面 F1,开发了一种新型探测器系统来替 换原来的塑料闪烁探测器。该系统包括一个塑料闪烁 片(图 1中的 SC1)和一个塑料闪烁条阵列(图 1中的 SSA),用于测量离子的时间和位置。SC1的活跃区域 为100×100 mm²,而 SSA 由 50 个宽度各为 2 毫米的 条组成,使得能够测量离子在水平方向上的坐标(即 相对于束流方向的横向坐标)。这允许假设 F0 处对象 尺寸半宽为 1 毫米时,动量分辨率达到约 1.9×10⁻³。 该探测器系统的性能通过测量由高能 ⁷⁸Kr 束碎片产生 的反应产物在 F1 的时间-of-flight (TOF)和位置而得 到证明。通过在 F1 处测量离子的位置([17]),粒子识 别(PID)能力得到了显著增强。

在 F2 区域,安装了一个紧凑型装置,其中包含一 个多重线比例室 (MWPC1,见图 1),专门用于位置 测量。该设备设计方便从 F2 的真空腔中插入和移除。 MWPC1 的有效检测面积为 100 × 70 mm²。它允许我 们在 F2 处测量粒子的位置。此测量具有双重目的。首 先,它可以监测光斑位置,进而有助于调束过程,特别 是在二次束流精细调整时。其次,在 F2 处精确测量离 子的位置对于推断离子的磁刚度是必要的。

在 F3 区域,最初仅有束管而没有任何探测器。我 们移除了一部分束管以便为空气中安装探测器腾出空 间。开发并安装了一个具有活性面积 256 × 256 mm² 的 MWPC (图 1中的 MWPC2)。MWPC2 的尺寸足够 大,可以容纳 F3 处的光斑大小。

在最后一个焦平面上F4,我们重新设计了束管并 构建了一个电机控制平台以适应探测器的安装。随后, 致力于探测器的研发。一种与光电倍增管耦合的塑料 闪烁体被开发用于 F4 的时间测量。该探测器的有效 面积为 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 。四个多丝漂移室(MWDC) 被 建造用于位置测量和轨迹重建。MWDC 的有效体积是 160×160×70 毫米³。两个多重采样电离室(MUSIC) 被开发用于离子的电荷测量。MUSIC 室总长为 520 毫 米,其中448毫米用于容纳工作气体,而其窗口直径为 90毫米。此外,一个由10个拉伸形状闪烁体探测器组 成的阵列被建造以检测轻带电粒子。上述所有探测器 均安装在 RIBLL2-F4 平台上,它们的相对位置可以在 图1中看到。次级目标放置在平台中间。次级目标上游, 一个塑料闪烁体探测器(SC2 在图 1)和一个 MUSIC 探测器(即MUSIC1在图1), 夹在两个MWDC之间 (MWDC1 和 MWDC2 在图 1)。下游的次级目标处, 安装了另一个 MUSIC 探测器 (图 1中的 MUSIC2) 和 两个 MWDC(图 1中的 MWDC3 和 MWDC4)。闪烁 体探测器阵列(图 1中的 SC Wall)位于平台的最远 端。这样的探测器配置允许在反应目标之前进行粒子 鉴别,并在反应目标之后进行电荷识别,这非常适合 CCCS 测量。值得一提的是,也可以用硅探测器替代 MWDC 和 MUSIC, 为次级目标附近的探测器阵列腾 出额外的空间。

在 RIBLL2-F4 实验平台完成后,进行了一项旨在 测量各种 sd 壳核 CCCS 的实验。一个初级 ⁴⁰Ar 束被加 速到 400 MeV/u并注入位于 RIBLL2 入口处有一个 10 毫米厚铍靶的位置。RIBLL2调整为将感兴趣的 RIB 传 输到 F4 以轰击一个 10 毫米厚的碳靶。图 1中所示的大 多数探测器都被使用了。通过 SC1 和 SC2 测量离子的 时间飞行(TOF)。MWPC2 用于监控离子的位置,这有 助于获取其动量值的信息。MUSIC1 被用来测量 C 靶 上游的离子能量损失 (ΔE)。MWDC1 和 MWDC2 用 于追踪入射粒子。在碳靶下游,通过 MUSIC2 测量出射 离子的电荷,而它们的轨迹则由 MWDC3 和 MWDC4 监控。MUSIC 中的工作气体是 CF4,在1 大气压下; MWDC 使用 P10,同样在1 大气压下。关于 MWPCs, 其工作气体是在1 大气压下的氩 (80%) +CO₂ (20%) 混合物。接下来,展示该实验中获得的初步结果以证 明 RIBLL2-F4 平台的表现。



图 2: 典型的粒子识别图,显示了由 400 MeV/u⁴⁰Ar 束 (a)和 350 MeV/u⁷⁸Kr 束 (b)裂变产生的离子。横坐标表示离子从 F1 到 F4 的时间飞行,通过在 F3 处测量的离子位置校正了离子的动量,纵坐标显示了离子在 MUSIC1 中的能量损失。两个 面板中,强度最大的核都被标记出来了。值得一提的是,在用于同位素分离的动量分散焦点 F1 和 F3 处没有使用任何能量衰 减器。

实验使用了 RIBLL2 的四种不同设置进行。在每 种设置中, 感兴趣的离子被分离并运输到 F4 区域进行 CCCS 测量。总共产生了数十个位于接近 N = Z 线并 向丰中子区方向的同位素,并具有合理的统计量。以硅 同位素链为例,各种同位素(从N = Z - 1核²⁷Si到丰 中子核 ³⁴Si) 被创造出来。可以通过利用所谓的 ΔE -Bρ-TOF 方法实现粒子识别。为了说明,图2(a)绘制了 离子的 ΔE 与其 TOF 的二维图, 其中在 RIBLL2 的一 个设置中,³⁵P离子表现出最大的强度。在此设置中, F1 处的狭缝完全打开。同位素的分配是通过特定方法 实现的。在实验过程中,我们分几步调整了 RIBLL2 的中心 $B\rho$,逐步将同位素覆盖范围从包含初级束种转 变为感兴趣的核素。我们选择了一个相对较小的步长, 以确保连续步骤之间有一些重叠的同位素。这种方法 使我们能够通过参考 PID 图中的初级束种位置以及相 邻设置之间的联系来识别离子种类。如图 2(a) 明显所 示,每种核素在该 PID 图中占据一个独特的位置,并 且不同的离子种类被很好地分开。电荷分辨率表现出 明显的对 Z 的依赖性,从 0.12 (σ) 变化到 0.18 (σ)。 关于离子的飞行时间(TOF),我们使用 MWPC2 测 量的 F3 处离子位置对离子动量进行了现象学校正,该 测量具有大约 0.5 毫米分辨率 (σ)。经过校正后, TOF 的分辨率显著提高,足以区分实验期间产生的所有同 位素链中的相邻同位素。这种良好的粒子鉴别能力确 保了 CCCS 测量的成功。最近,通过对该实验的数据 进行分析,得出了 300 MeV/u 能量下 ²⁸Si 在碳上的 CCCS,并且测量得到的 CCCS 与类似能量下的现有 数据一致 [18]。

为进一步测试 RIBLL2 对更重射弹碎片产生的次 级束流的分离和识别能力,我们使用了 350 MeV/u 的 ⁷⁸Kr 束进行了另一个实验。当该束撞击 10 毫米厚的 铍靶后,产生了包含数十种离子种类的鸡尾酒束。图 2(b) 是这些到达 F4 的离子在 RIBLL2 某一设置下的 PID 图。在这个设置中,F1 狭缝调整为动量接受度为 ±0.4%。显然,可以清楚地识别出 ⁷⁸Kr 离子的碎片残 留物,这表明 RIBLL2 现在具备分离和识别中等质量 核的能力。

总结而言,我们在 HIRFL-CSR 加速器设施中的 RIBLL2 束线的最后一焦平面区域构建了一个新的实 验平台。同时,我们开发了几种新型探测器并升级 了一些现有设备。为了测试性能,我们分别利用 400 MeV/u⁴⁰Ar 束和 350 MeV/u⁷⁸Kr 束,在 RIBLL2-F4 平台上进行了两次实验。初步结果显示 PID 图中的清 晰分离以及由射线碎片反应产生的次级束种的明确识 别,这表明 RIBLL2 分离器能够提供中质量稀有同位 素束 (RIBs),并且新开发的 RIBLL2-F4 平台已全面投 入使用。随着完全实现, RIBLL2 可以用来生产感兴趣 的稀有同位素束,并将它们输送到一个实验终端(例 如 ETF 和 RIBLL2-F4 平台)进行稀有同位素束实验, 自然也可以作为传输线更好地从 CSRm 向 CSRe 输送 束流用于储存环实验。

值得注意的是,下一代 RIB 设施高强重离子加速 器设施(HIAF)[19,20]目前正在中国惠州市建设。在 HIAF中,高能放射性离子束线 HFRS [21,22]将是一 个强大的碎片分离器,用于生产 RIBs。RIBLL2 可以 有效地用来测试和评估为 HFRS 开发的束线探测器的 性能。此外,从 RIBLL2 实验中获得的宝贵经验可用

- Kondev FG, Wang M, Huang WJ, et al. The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties. Chin Phys C 2021;45:030001.
- [2] Bernas M, Engelmann C, Armbruster P, et al. Discovery and cross-section measurement of 58 new fission products in projectile-fission of 750·A MeV ²³⁸U. Phys Lett B 1997;415:111-116.
- [3] Ohnishi T, Kubo T, Kusaka K, et al. Identification of 45 new neutron-rich isotopes produced by in-flight fission of a ²³⁸U beam at 345 MeV/nucleon. J Phys Sci Jpn 2010;79:073201.
- [4] Kurtukian-Nieto T, Benlliure J, Schmidt KH, et al. Production cross sections of heavy neutron-rich nuclei approaching the nucleosynthesis r-process path around A = 195. Phys Rev C 2014;89:024616.
- [5] Ma CW, Wei HL, Liu XQ, et al. Nuclear fragments in projectile fragmentation reactions. Prog Part Nucl Phys 2021;121:103911.
- [6] Xia JW, Zhan WL, Wei BW, et al. The heavy ion cooler-storage-ring project (HIRFL-CSR) at Lanzhou. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A 2002;488:11 – 25.
- [7] Zhan WL, Xia JW, Zhao HW, et al. HIRFL Today. Nucl Phys A 2008;805:533c - 540c.
- [8] Song MT, Yang XD, Xia JW, et al. Radioactive ion beam line of CSR. Chin Phys C 2001;25:443-447.

于提高未来在 HIAF 上运行 HFRS 的操作水平。

利益冲突

作者声明他们没有利益冲突。

致谢

作者感谢现代物理研究所加速器部门的工作人员提供 了稳定的束流。本工作得到了国家自然科学基金(项 目编号:12325506,11922501,U1832211,11961141004, 和11905260),中国科学院西部之光项目,以及中科院 大型研究基础设施开放研究项目的部分资助。

作者贡献

孙志宇、郑勇和孙宝华监督了该项目。孙宝华、郑勇 和徐晓东提出了并领导了实验。徐晓东和宋玉南处理 了数据。徐晓东撰写了原始手稿,所有合著者都作出 了贡献,而孙宝华和寺岛萨托鲁深入参与了讨论过程。 所有作者都参与了实验和手稿修订。

- [9] Sun YZ, Sun ZY, Wang ST, et al. The charged fragment detector system of the External Target Facility. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A 2019;927:390.
- [10] Sun ZY, Yan D, Wang ST, et al. Knockout reactions from $^{14}{\rm O}$ at 305 MeV/nucleon. Phys Rev C 2014;90:037601.
- [11] Xu XD, Sun YZ, Wang ST, et al. Isotopic production cross sections of fragmentation residues produced by ¹⁸O ions on a carbon target near 260 MeV/nucleon. Chin Phys C 2022;46:111001.
- [12] Zhao JW, Sun BH, Tanihata I, et al. Isospin-dependence of the charge-changing cross-section shaped by the charged-particle evaporation process. Phys Lett B 2023;847:138269.
- [13] Li GS, Sun BH, Su J, et al. Single-proton removal reaction in the IQMD+GEMINI model benchmarked by elemental fragmentation cross sections of $^{29-33}$ Si on carbon at ~230 MeV/nucleon. Phys Lett B 2024;859:139143.
- [14] Zhao JW, Sun BH, Tanihata I, et al. Charge radii of ¹¹⁻¹⁶C, ¹³⁻¹⁷N and ¹⁵⁻¹⁸O determined from their charge-changing cross-sections and the mirror-difference charge radii. Phys Lett B 2024;858:139082.
- [15] Zhang JC, Sun BH, Tanihata I, et al. A new approach for deducing rms proton radii from charge-changing reactions of neutron-rich nuclei and the reaction-target dependence. Sci Bull 2024;69:1647-1652.

- [16] Sun BH, Zhao JW, Zhang XH, et al. Towards the full realization of the RIBLL2 beam line at the HIRFL-CSR complex. Sci Bull 2018;63:78 – 80.
- [17] Fang F, Tang SW, Wang ST, et al. Improving the particle identification of radioactive isotope beams at the RIBLL2 separator. Nucl Phys Rev 2022;39:65-72.
- [18] Wang CJ, Guo G, Ong HJ, et al. Charge-changing cross section measurements of 300 MeV/nucleon ²⁸Si on carbon and data analysis. Chin Phys C 2023;47:084001.
- [19] Yang JC, Xia JW, Xiao GQ, et al. High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF) in china. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B 2013;317:263 – 5.

- [20] Zhou XH, Yang JC and the HIAF project team. Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China. AAPPS Bull 2022;32,35.
- [21] Sheng LN, Zhang XH, Zhang JQ, et al. Ion-optical design of High energy FRagment Separator (HFRS) at HIAF. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B 2020;469:1-9.
- [22] Sheng LN, Zhang XH, Ren H, et al. Ion-optical updates and performance analysis of High energy FRagment Separator (HFRS) at HIAF. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B 2024;547:165214.