

HIRFL 上的放射性次级束流线*

詹文龙 郭忠言 周建群 尹全民 赵有雄

王金川 郝鸿飞 王义芳 罗永锋

(中国科学院近代物理研究所 兰州重离子加速器国家实验室 兰州 730000)

1994年4月1日收到

摘 要

兰州重离子国家实验室的重离子研究装置(HIRFL)上第一阶段的放射性次级束流线是利用中能重离子炮弹碎裂(PF)在 0° 附近产生中能放射性丰中子和丰质子次级束流的实验装置。本文介绍了放射性次级束流(RNB)的产生、分离、传输和鉴别的原理,描述实验装置的结构、性能,报道了调试实验结果。

关键词 RNB, PF, 分离, 传输, 鉴别。

1 引 言

本世纪以来,用加速器加速带电粒子进行核物理研究在核结构和核反应机制及核应用上都取得了巨大的进展,但这基本上是建立在稳定核素之间的核研究。如表1所示,按加速的粒子种类和研究的方法可大致划分为:60年代以前的研究基本只局限于p、d、 α 等有限的轻粒子与 β 稳定线上的稳定核素之间的核反应研究。重离子研究发展到80年代研究工作的视野开阔了,增加了反应入射道,也给系统研究增加了新的维度,如: A_p 、 Z_p 、和高自旋 I_i 等。80年代后,随着重离子研究的拓广,逐渐展开了远离 β 稳定线的不稳定核素即放射性不稳定核研究。放射性不稳定核的研究增加了核反应的入射道,系统研究了新维度同位旋(I_i)。初步的实验结果^[1-4]已发现了近百种新核素,基本上填满了 $Z < 10$ 液滴线内的同位素,发现了多种新的核衰变方式,从实验中第一次测定一大批同位素的质量,使得液滴模型面临前所未有的检验;用放射性奇异核次级束流进行了核反应总截面测量,发现核反应半径与同位旋之间存在一定的关系;特别是在 ^{11}Li 、 ^{10}Be 、 ^{11}B 等放射性奇异核引起的核反应中观察到非常奇异的现象,由此引入了中子晕及其与中子皮演化、软巨共振等新的物理概念;与此相关的放射性丰中子奇异核的轨道中子的研究和中子集团的研究正在进行,以期望由这种核物质的奇异结构得到更普适的核结构模型;同时,也给天体物理提供了天体演化过程的实验结果。一批长期得不到答案的研究课题也期望在这一新领域研究中得到结果,特别是合成超重元素的研究。这是对核物质的结构与核

* 国家自然科学基金、中国科学院和兰州重离子加速器国家实验室资助;中国科学院院长青年特别基金和国家自然科学基金青年专项基金资助。

子组成的极限以及现有核理论的普适性进行更深层次的研究,无疑是重离子核物理研究的又一个里程碑。

表1 核物质的性质研究简况

带电粒子	轻粒子	重离子	放射性核素
年代	60年代以前	80年代以前	80年代以后
可加速带电核子种类	$\approx 1 \times 10^1$	$\approx 3 \times 10^2$	$\approx 3 \times 10^3$
反应入射道	$\approx 1 \times 10^3$	$\approx 6 \times 10^4$	$\approx 1 \times 10^6$
系统研究的参量	Z_t, A_t, E, T	$Z_p, A_p, Z, A_t, E, T, I$	$Z_p, A_p, Z, A_t, E, T, I_s, I_t$

E :弹核能量; T :核温度系数; I_s :核自旋量子数; I_t :核同位旋量子数。

目前国际上的中高能重离子加速器实验室都研制成和提出一些新方案^[5-10],并大量投资建设放射性次级束流(RNB)研究装置,用来开展奇异核次级束的研究。这些装置基本上分为:

- (1) 收集核反应前角区类弹产物,经电磁、能损分离引出(PF);
- (2) 收集初级核反应产物入 ECR 源,再经后加速引出(ISOL)。

现有的放射性次级束流研究装置基本上属于第一类,如 GANIL 的 LISE、RIKEN 的 RIPS、MSU 的 A1200、GSI 的 FRS 等。第二类的奇异核次级束流研究装置目前正处于提方案和研制阶段,如 GANIL、ISOLAB。

兰州重离子加速器国家实验室的放射性次级束流线 RIBLL (Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou)^[11] 是属 PF 型的,与改造前的 LISE 有相类似的性能指标。它具有 PF 型 RNB 的特性:亚微秒量级的分离时间、不需化学选择、有一定的收集效率和可靠并较方便的运行。还可根据实验的要求采用不同的两种运行模式。

2 弹核碎裂型的 RNB 工作原理

2.1 PF 型的 RNB 的产生原理

中能(30—200MeV/u)重离子核反应处于过渡能区,其反应机制介于高能与低能重离子核反应之间^[9],周边反应既有高能时的碎裂反应也存在少量的复杂转移反应。典型的重离子弹核碎裂反应可以由高能重离子核反应的参加者-旁观者模型进行唯象的描述:当弹核与靶核进行碰撞时,弹核和靶核分别被剪切成两部分;在弹核和靶核重叠的部分由弹核碎片与等量核子的靶核碎片产生激烈的核反应,这部分有很高激发能的称为参加者,约具有一半的弹核速度;靶核的和弹核的另一碎片激发能很低为旁观者,即动能很小的类靶核碎片和具有弹核近似速度的类弹碎片。PF 型的 RNB 就是碎裂反应产生的放射性类弹碎片,其高斯型的平行动量离散较小:

$$\sigma_{\parallel} [\text{MeV}/c] \approx \sigma_0 \times \sqrt{\frac{A_t(A_b - A_t)}{A_b - 1.0}}, \quad (1)$$

其中, $\sigma_0 \approx 90 \text{MeV}/c$ 为除去一个核子的平均费米动量。

中能重离子碎裂碰撞与高能时类似,但剪切时间较高能碰撞长,相应存有弛豫过程,因此增加了类弹碎片的垂直动量分布,其离散如下:

$$\sigma_{\perp} [\text{MeV}/c] \approx \sqrt{\sigma_{\parallel}^2 + \sigma_N^2}, \quad (2)$$

其中, $\sigma_N \approx 200 \text{MeV}/c$ 。类弹碎片在给定的角区内极化,放射性同位素的产生截面也与靶核有一定的影响。

中能重离子碎裂反应产生的放射性次级束流的特点是:

(1) 类弹反应产物的速度与束流速度相近,高度地集中在前角区很小的范围内,而且动量离散很小,便于 RNB 的收集、运输;

(2) 入射弹核能量较高,在介质中能损小,可用有一定厚度 ($10^2 \rightarrow 10^4 \text{mg}/\text{cm}^2$) 的初级反应靶子;

(3) 亚微秒量级的分离时间。

2.2 RNB 的粒子鉴别

在实验中,可测量到如下相关的参数:

磁刚度 $B\rho$; 飞行时间 TOF; 总动能 E ; 能量损失 ΔE 。

在不考虑相对论和 RNB 原子核外的电子被全剥离 ($Z=Q$), RNB 的粒子鉴别为:

$$A/Q \propto B\rho \times (1.0 + \delta\rho) \times \text{TOF}, \quad (3)$$

$$Q \propto E \times \text{TOF} / B\rho_0 (1 + \delta\rho), \quad (4)$$

$$Z \propto \sqrt{\Delta E} \times \text{TOF}, \quad (5)$$

当考虑相对论效应时(3)、(4)式改为如下:

$$A/Q \propto B\rho_0 (1 + \delta\rho) / \gamma\beta, \quad (3a)$$

$$Q \propto E \times \beta / [B\rho_0 \times (1 + \delta\rho) \times (1 - \sqrt{1 - \beta^2})], \quad (4a)$$

这里, $\beta = L/C \times \text{TOF}$; $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ 。

3 RIBLL 和调试实验的布局

3.1 RIBLL 的描述

兰州重离子加速器国家实验室建成的 RNB 系统 RIBLL 如图 1 所示, RIBLL 包括初级反应靶室 T11 或 T12、起始时间探测器 S11 或 S110、降能单元 degrader、狭缝单元 Slit 和一条约 40m 长的双消色差束流传输线。RNB 选择和分离主要从 T12 到 T2 部分,相应的束流传输包络图由 Transport 程序在一阶近似下,初始条件为:水平和垂直发射度分别为 $\epsilon_0 = 15\pi \text{mm.mrad}$ 、动量宽度为 $\pm 2.5\%$ 、初级束流在靶上的斑点为 $X_0 = Y_0 = \pm 3.0 \text{mm}$,计算结果如图 2。图中的 X、Y 分别为偏离中心轨道的水平、垂直量;Z 为束流传输的方向,RIBLL 的 RNB 选择和分离部分约 18m 长。图中实线部分为动量离

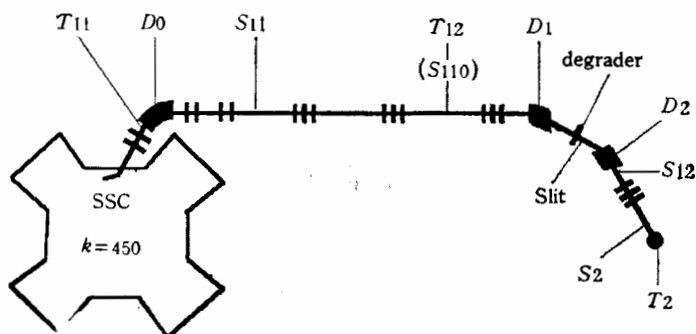


图1 HIRFL 上放射性次级束流线示意图

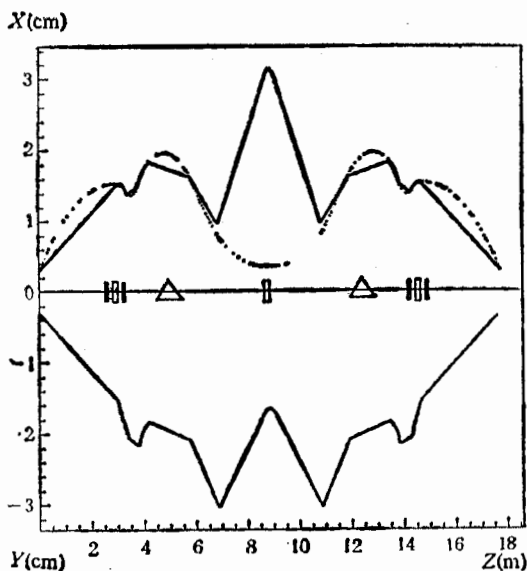


图2 RIBLL 束流运输包络图

散 $\pm 2.5\%$ 时 RNB 的运输包络线;虚线为动量离散为 0 时 RNB 在水平方向的运输包络线。

RNB 是由 SSC 引出的中能重离子束流在 T_{11} 或 T_{12} 与厚靶进行 PF 反应(主要是逆运动学反应)产生的,反应产物中的 RNB 经 D_1 ,选取了磁刚度为 $B_{\rho_1}(1 \pm \delta\rho)$ 的 RNB,经 degrader 由不同 RNB 能量损失后再用 slit 选择 RNB,最后只有磁刚度为 $B_{\rho_2}(1 \pm \delta\rho)$ 的 RNB 通过 D_2 ,形成所需的 RNB 用于实验.表 2 列出了 RIBLL 的主要性能参数并与改造前的 LISE 进行了比较。

RIBLL 可根据实验的需要选择高品质的或高强度的 RNB 两种不同运行模式。第一种模式的 RNB 在加速器大厅里的 T_{11} 中产生,起始的时间可在 S_{11} 或 S_{110} 测定,也可利用 SSC 的高频测定,这种模式由于有较长的飞行路程和初级束阻止在加速器大厅,得到的 RNB 有较高的粒子鉴别能力和实验大厅很低的放射性本底,因此主要用于质量测量、低本底的实验,特别是核衰变方式和核谱学等的研究;另一种模式的 RNB 在实验

表 2 RIBLL 的主要性能参数

	RIBLL	LISE
接收立体角 $\Delta\Omega$	$\approx 0.3\text{msr}$	$\approx 1.0\text{msr}$
动量接收度 $\Delta p/p$	$\approx \pm 2.5\%$	$\approx \pm 2.5\%$
磁刚度分辨 $\Delta B\rho/B\rho$	$\approx 1.7 \times 10^{-3}$	$\approx 1.32 \times 10^{-3}$
最大的磁刚度 $B\rho_{\text{max}}$	$\approx 3.0\text{TM}$	$\approx 3.2\text{TM}$
元素分辨 $Z/\Delta Z$	50→100	≈ 100
质量分辨 $A/\Delta A$	100→300	≈ 300
可测最短的 RNB 寿命 τ	$2 \rightarrow 5 \times 10^{-7}\text{s}$	$\approx 2 \times 10^{-7}\text{s}$

大厅里的 T12 中产生,起始的时间在 S12 测定,这种运行模式由于短的输运路程使 RNB 的调试较方便且具有较高的 RNB 收集率和传输效率,因此主要用于 RNB 引起的次级核反应研究。

3.2 RIBLL 调试实验的布局

RIBLL 调试是在第一种运行模式下分别用 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ ($\approx 67\text{mg/cm}^2$) 和 $50\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + ^9\text{Be}$ (200mg/cm^2) 进行的。起始时间探测是在椭球型反光镜一焦点上的 $8\mu\text{m}$ NE102A 塑料闪烁体薄膜发光反射到另一焦点上的光电倍增管 (XP2020) 测量到的^[12]。这种时间探测器的时间分辨 $< 150\text{ps}$, 对于约 $50\text{MeV/u } ^4\text{He}, ^{17}\text{N}$ 在计数率 $\approx 10^6$ pps 的探测效率分别为 40% 和 50%。一组由 PPAC + IC + Si1 + Si2 组成的通用望远镜在 S2 的位置上探测到停止时间、 ΔE 和 E_r 。

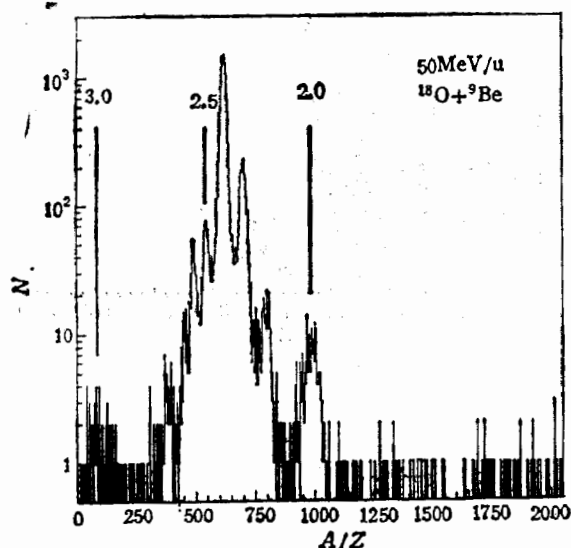


图 3 A/Z 分布

4 实验结果

实验测得总动能 E 、能量损失 ΔE 、飞行时间 TOF 和磁刚度 $B\rho$, 由式(3)、式(5)导

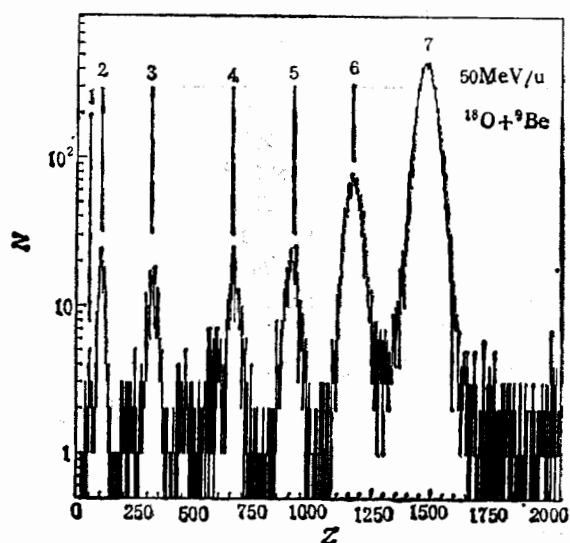


图4 Z分布

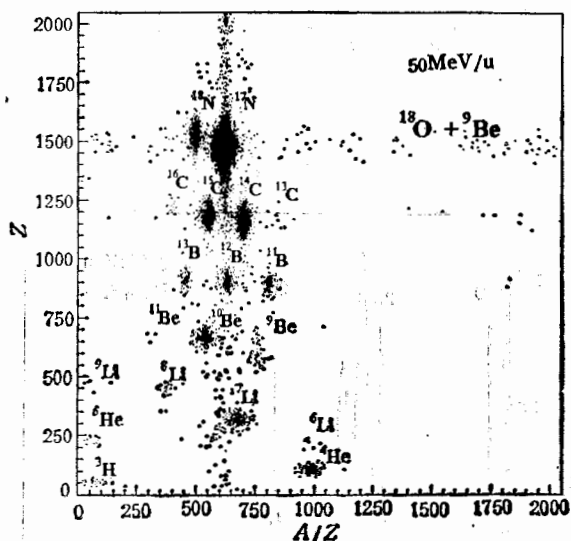


图5 Z和A/Z关联散布图

出典型 A/Z 和 Z 的分布如图3、图4所示。

$25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al} (\approx 67\text{mg/cm}^2)$

的实验在 $A/Z = 2.5-3.0$ 范围内产生了30多种RNB, 如 ^{30}Mg 、 ^{15}C 、 ^9Li 。但由于此能量较低, $Z > 10$ 时的多电荷态使同位素鉴别较难。 $50\text{MeV/u } ^{18}\text{O} + ^9\text{Be}$ (200mg/cm^2) 的实验在 $A/Z = 2.0-3.0$ 范围内产生了19种RNB。此实验解决了多电荷态的问题, 得到了较好的同位素分辨如图5。此调试实验主要是进行系统的研究以比较实验结果和理论计算, 实验得到RNB束流的相对强度与LISE程序在该工作条件下的计算(只考虑纯弹核碎裂反应)结果基本一致。

表 3 几种典型的放射性丰中子奇异核次级束流的相对强度

反应道	靶子	RNB	I/I_0
50MeV/u ¹⁸ O	(351mg/cm ²) ⁹ Be	¹⁷ N	1.3×10^{-5}
50MeV/u ¹⁸ O	(271mg/cm ²) ⁹ Be	¹⁷ C	4.7×10^{-8}
50MeV/u ¹⁸ O	(325mg/cm ²) ⁹ Be	¹⁶ C	5.9×10^{-7}
50MeV/u ¹⁸ O	(377mg/cm ²) ⁹ Be	¹⁵ C	2.6×10^{-6}
50MeV/u ¹⁸ O	(379mg/cm ²) ⁹ Be	¹⁴ C	6.1×10^{-6}
50MeV/u ¹² C	(442mg/cm ²) ⁹ Be	¹⁰ C	5.8×10^{-7}
50MeV/u ¹² C	(350mg/cm ²) ⁹ Be	⁹ C	2.1×10^{-8}
50MeV/u ¹⁸ O	(379mg/cm ²) ⁹ Be	⁹ Li	5.0×10^{-8}
50MeV/u ¹⁸ O	(458mg/cm ²) ⁹ Be	⁶ He	9.6×10^{-8}

表 3 列出几种近期内 RIBLL 将提供给物理实验的典型的放射性丰中子丰质子同位素次级束流的相对强度,数据是根据 RIBLL 的实际运行条件由 LISE 程序优化计算(只考虑纯弹核碎裂反应产生 RNB)给出的。

5 小结与展望

兰州重离子加速器国家实验室的第一阶段 RNB 研究装置 RIBLL 已成功地调试出 30 多种能量在 30—50MeV/u 的 RNB。建立在弹核碎裂产生 RNB 后经磁选择-能损-磁选择方法分离出的 RNB 的相对强度与 LISE 程序的计算结果相一致。高品质与高强度 RNB 的两种不同运行模式,给远离 β 稳定线的放射性奇异核性质研究,提供了低本底的实验条件和放射性核素引起的反应研究的相对合适条件。

RIBLL 是改造 HIRFL 原有的 SSC 到 TR3 束流的后输运系统建立的,因而在一定程度上受到限制,如最大的磁刚度为 3.0TM,接收立体角限制在 0.3msr。前一个限制使 RIBLL 的性能改进上受到根本的限制,即丰中子奇异核 ¹¹Li、¹⁴Be、¹⁷B 的 RNB 无法分离。立体角的限制在初级靶边上引入超导螺线管^[9]可得到一定的改善。为此,HIRFL 上第二阶段专用的 PF 型 RNB 研究装置的设计正在进行。如果经费落实到位,1996 年底可望研制成国际上届时性能最好的 PF 型 RNB 研究装置之一。同时,基于存储环的 RNB 研究装置正在积极地提出课题方案。

感谢 HIRFL 的全体工作人员提供实验用的 ⁴⁰Ar、¹⁸O 束流和实验所需的条件设备。作者之一感谢中国科学院院长青年特别基金和国家自然科学基金青年专项基金的资助。

参 考 文 献

- [1] I. Tanihata et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985) 2676.
- [2] W. Mittig et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987)1889.
- [3] I. Tanihata, *Tretise on Heavy Ion Scince*, V8,1989.
- [4] M. Ishihara, A. C. Mueller, D. J. Morrissey, *Nucl. Phys.*, **A538**(1992). 309c,321c,333c.
- [5] R. Anne et al., *N.I.M.*, **A257**(1987)215.
- [6] T. Kubo et al., *Proc. 2nd IN2P3-RIKEN Symp. on Heavy Ion Collision*, (1990)40.

- [7] B. M. Sherrill, et al., *N.I.M.*, **B56/57**(1991)1106.
[8] H. Gessel et al., *N. I.M.*, **A282**(1989) 247.
[9] B. M. Sherrill, 2nd Int. Conf. on Radioactive Nuclear Beams, (1991)3.
[10] H. L. Ravn, 2nd Int. Conf. on Radioactive Nuclear Beams, (1991)85.
[11] Zhan Wenlong, et al., 4Th China Japan Joint Symp. on Accel. for Nucl. Science and their Appl. (Oct. 1990).
[12] 赵有雄等,一种高分辨的飞行时间望远镜,核电子学与探测技术,待发表.

Radioactive Ion Beams at HIRFL

Zhan Wenlong Guo Zhongyan Zhou Jianqun Yin Quanmin Zhao Youxiong
Wang Jinchuan Xi Hongfei Wang Yifang Luo Yongfeng
(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy, National Laboratory of
Heavy Ion Accelerator in Lanzhou, Lanzhou 730000*)

Received on April 1, 1994

Abstract

At the first stage the Radioactive Ions Beam Line in Lanzhou (RIBLL) is a Projectile Fragmentation (PF) type RNB facility, in which neutron-rich and proton-rich RNB are produced by means of the energetic projectile fragmentation at around 0° . The mechanisms of RNB production, seperation, transportation and identification are introduced; the stucture and characteristics of this system are described. The results of test run are also reported in this paper.

Key words RNB, PF, seperation, transportation, identification.