

5218-223

兰州放射性束流线^{*}

詹文龙 郭忠言

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

0571.1

摘要 兰州放射性束流线(RIBLL)是产生中能重离子放射性束流(RIB)的装置和高精度放射性束物理的实验谱仪。RIBLL的立体角接收度 > 6.5 msr、动量接收度达10%；RIBLL可提供极化RIB；RIBLL采用大接收度双消色差反对称结构，既可纯化放射性束，还可作为 0° 磁谱仪。

关键词 放射性束流 双消色差 立体角接收度 动量接收度 极化放射性束

分类号 O571.1

1 引言

近几十年来，随着加速器技术的发展和原子核物理实验水平的提高，加速器提供的炮弹由p、d、 α 扩展到 ^{238}U 的所有粒子，炮弹能量也由几MeV/u的低能、几十至上百MeV/u的中能扩展到几GeV/u的相对论能区。这使得原子核物理在高能量和高自旋维度上取得了长足进步。

1985年，I. Tanihata在劳伦斯伯克利实验室(LBL)利用中子滴线核 ^{11}Li 成功地进行了RIB引起反应截面和核子密度分布测量^[1]，发现了新的现象——中子晕，人们立即认识到，RIB在同位旋空间将大大地拓广原子核物理研究的领域，使得原子核物理研究从稳定核及其 β 稳定谷附近区域扩展到远离 β 稳定谷直至滴线的广袤空间。目前，已经有几台弹核碎裂(PF)型RIB装置投入使用，如GANIL的LISE^[2]、RIKEN的RIPS^[3]、MSU的A1200^[4]、GSI的FRS^[5]等。利用这些装置仅几年时间，产生鉴别了数以百计的新核素^[6~11]，发现了有重要意义的滴线外核 ^{10}He 、双幻核 ^{78}Ni 、 ^{100}Sn 和 ^{132}Sn ，发现并研究了新的衰变方式和晕核结构。

直至80年代中期，几乎所有原子核物理实验和理论研究都局限于 β 稳定谷及临近区域的核。RIB装置可提供种类繁多的放射性

核，使这些研究扩展到远离稳定线核乃至滴线核区域。对这些核的研究既可验证现有的核理论、核模型，又可拓广核理论的普适性，探索原子核组成的极限，研究极限核的结构和衰变特性。

RIBLL是PF型RIB装置，它利用兰州重离子加速器(HIRFL)提供的中能重离子引起的弹核碎裂，为RIB实验产生并分离出各种放射性束流。与LISE、A1200、RIPS和FRS相比，它有大的接收立体角(>6.5 msr)和动量接收度(10%)。RIBLL采用双消色差反对称结构，它既是高精度的RIB产生分析装置，又可以作为 0° 磁谱仪。RIBLL于1997年7月建成，1997年12月正式运行。迄今，它已为北京大学、上海原子核所和近代物理所相关课题提供了Ne、F、O、C、B元素的多种放射性同位素束流，取得了满意的结果。

2 RIBLL的结构和特点

图1是RIBLL的结构示意图。HIRFL提供的初级中能重离子束流，经二极磁铁2B04偏转 50° ，被四极透镜 Q_{01} 、 Q_{02} 强聚焦在RIBLL的初级反应靶上引起弹核碎裂等反应。进入RIBLL的弹核碎片和其它反应产物经RIBLL的磁刚度($B\rho$)、降能器(ΔE)

收稿日期：1998-10-12 收稿，收修改稿日期：1999-09-28。

* 国家自然科学基金(项目号19673055、19505006)资助。

消色差选择和分离,产生出实验需要的各种放射性次级束.

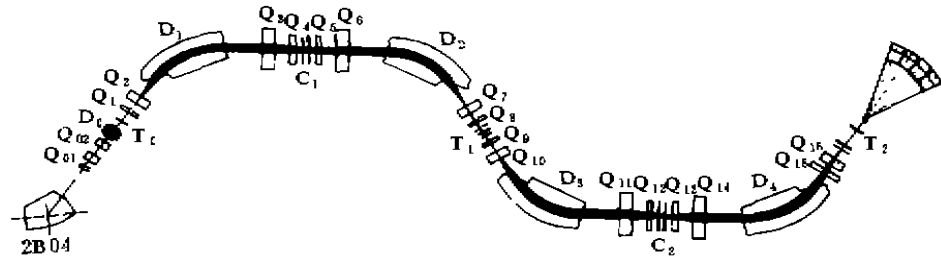


图1 RIBLL结构示意图

RIBLL 全长 33.69 m, 其中 T_0-T_1 长 17 m, T_1-T_2 长 16.69 m. 从 T_0 开始, 四极透镜 Q_{1-4} 和二极磁铁 D_1 构成第 1 分析节 ($Q_1Q_2D_1Q_3Q_4$). 根据碎片质量 A 、电荷 Q 与 D_1 的磁刚度 $B\rho$ 的关系 $B\rho \propto A/Q$ 选择一组 A/Q 相同的碎片, 使其通过该节到达第 1 色散点 C_1 ; 在 C_1 , 一个精心设计的消色差降能器对碎片进行电荷选择 ($dE/dX \propto Z^2/\beta^2$, 其中 dE/dX 为粒子在降能器中的能量损失, Z 为粒子电荷, $\beta=V/c$), 被 2 次选择的 RIB 在第 2 节分析 ($Q_5Q_6D_2Q_7Q_8$) 完成色差补偿. 通常, 到达 RIBLL 第 1 聚焦点 T_1 的碎片就是经过选择的、双消色差的和较纯净的 RIB.

RIBLL 的后半段 ($Q_9Q_{10}D_3Q_{11}Q_{12}-C_2-$

$Q_{13}Q_{14}D_4Q_{15}Q_{16}-T_2$) 结构、工作原理与前半段 ($Q_1Q_2D_1Q_3Q_4-C_1-Q_5Q_6D_2Q_7Q_8-T_1$) 基本相同. 由于前后两段以 T_1 点反对称和后段对 RIB 的再选择, 降低了本底, 提高了纯度.

RIBLL 有下面几个特点: 开始经 Q_{01} 、 Q_{02} 将初级束流强聚焦在初级靶上, 显著提高了 RIB 的收集能力; 初级靶前的矫正磁铁 D_c 调整初级束流的入射角, 可以得到部分极化 RIB; RIBLL 双消色差反对称结构提供了低本底实验环境和高纯度 RIB. 此外, RIBLL 有高分辨、中分辨和 0° 磁谱仪 3 种运行模式. 表 1 给出了 RIBLL 主要性能指标, 同时也列出了国际上几台重要 PF 型 RIB 装置的相应参数.

表1 RIBLL 主要性能指标及与 RIPS、LISE、FRS 和 A1200 的比较

	RIBLL	RIPS	LISE	FRS	A1200
立体接收角 $\Delta\Omega/\text{msr}$	7	5	1.0	0.7~2.5	0.3~4.3
动量接收度 $\Delta P/P$	10%	6%	5%	2.0%	3%
最大磁刚度 $(B\rho)_{\text{max}}/\text{T}\cdot\text{m}$	4.2	3.76	3.0	5~18	5.4~7.2
磁刚度分辨率 $\Delta B\rho/B\rho$	6×10^{-4}	10^{-3}	1.72×10^{-3}	1.25×10^{-4}	3×10^{-4}
电荷态分辨 $Q/\Delta Q$	150	50~100	50~100	50~120	50~100
质量分辨 $A/\Delta A$	300	100	100	200	150
束流入射角	$0^\circ \sim 5^\circ$	$0^\circ \sim 15^\circ$	$0^\circ \sim 2^\circ$		
最短 RIB 分离时间 (μs)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

3 RIBLL 的束流诊断

RIBLL 的束流诊断元件分布在 RIBLL 的初级靶 T_0 、色散点 C_1 与 C_2 、聚焦点 T_1 与

T_2 附近区域. 实时检测并显示初级束流、次级束流的强度、斑点尺寸和空间密度分布. 指导优化调整 RIBLL 的各项参数, 记录束流的空间和时间分布.

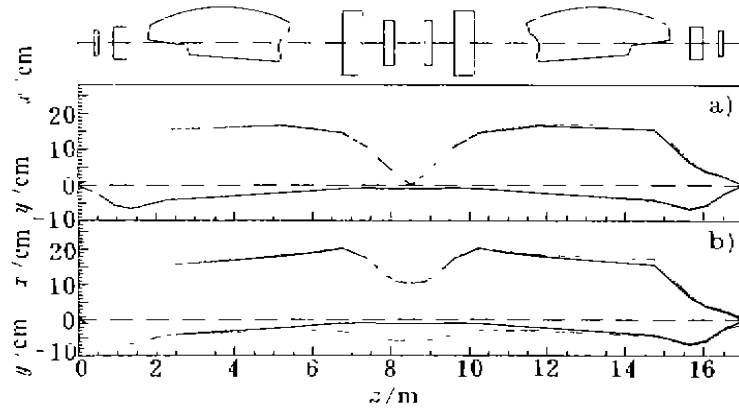


图 2 ^{11}Li 的传输包络
(a) $\delta\rho/\rho = \pm 0\%$, (b) $\delta\rho/\rho = \pm 5\%$. — 和 --- 分别表示一级和二级近似计算的数值, 详细说明见正文.

图 2 为 60 MeV/u $^{18}\text{O} - \text{Be}$ 反应, 初级束流在 T_0 为 1 mm 直径和 RIBLL 的磁刚度 $B\rho = 1.152 \text{ T} \cdot \text{m}$ 时, Transport 程序给出的 RIBLL 的束流包络, 其条件为 $\Delta E = \Delta\varphi = \pm 50 \text{ mrad}$ ($\Delta\Omega > 7 \text{ msr}$), $X_0 = Y_0 = \pm 1 \text{ mm}$. 根据在各点束流包络的尺寸, 设计不同类型的诊断元件. 在 T_0 处, 通常初级靶位于靶室中心, 石英玻璃荧光靶和法拉第筒位于它的下方. 通过计算机遥控步进电机-真空密封磁传动机械, 将石英玻璃荧光靶或法拉第筒放置在靶心, 在显示屏上观察束流斑点位置、大小, 或在束流积分器上测量束流绝对强度. 在初级靶室的出口, 上下左右对称放置 4 个完全相同的束流位置和强度监视器, 实时地检测初级束流的强度、走向随时间的变化. 监视器有两种类型: 光纤-光电倍增管和雪崩光二极管探测器. 在色散点及其上游 200 mm 处分别放置降能器和狭缝. 光纤束流扫描器安置在其后 200 mm 处, 用于测量 RIB 的水平密度分布. CsI(Tl)+PD 或 Si 雪崩二极管位于降能器的下游, 测量 RIB 中心垂直密度分布. Si 薄片探测器位于中心聚焦点

T_2 . 其后 200 mm 有时间探测器. 在 T_1 的前后 100 mm 处, 放置光纤双维位置灵敏探测器, 测量 RIB 的密度分布. 聚焦点 T_2 的探测器设置与聚焦点 T_1 基本相同. 但在时间探测器后面, 有次级靶和次级反应产物探测器. 如位置灵敏 CsI(T_1) 探测器或探测器阵列. 它们都可以检测 RIB.

为了进一步改进束流诊断质量, 正在研制多阳极光电倍增管读出的光纤排探测器.

4 RIB 的鉴别和典型的 RIB 强度

RIB 的分离是由 RIBLL 的离子光学系统执行的, 即 $B\rho - \Delta E - B\rho$ 选择. 对 RIB 的鉴别, 通常采用飞行时间鉴别技术, 即 TOF- ΔE 鉴别. 当 RIBLL 运行于 0° 磁谱仪模式时, RIB 飞行时间 (TOF) 的起始时间信号由 HIRFL 的高频信号提取, 在高分辨模式或中分辨高流强时, 由放置于 T_1 处的时间拾取探测器提供. TOF 的停止时间信号由 T_2 处的时间拾取探测器给出. 时间拾取探测器是塑料闪烁薄膜发光、椭球镜面聚焦和光电倍增

管读出结构的时间探测器, 时间分辨约 140 ps (FWHM). RIB 的能量损失信息 (dE/dX) 由焦点的 Si 全耗尽薄片探测器测量. 图 3 是 RIBLL 运行于中分辨模式时, 对 55 MeV/u $^{40}\text{Ar} + \text{Be}$ (175 mg/cm²) 初级反应, RIBLL 仅设置磁刚度 $B\rho$ 值, 不加降能器选择, 在 T₂ 处经 TOF- ΔE 技术鉴别的放射性同位素. 图 4 是对于 60 MeV/u $^{18}\text{O} + \text{Be}$ (550 mg/cm²) 碎裂反应, 由 RIBLL 分离、鉴别的 RIB 束流 ^{17}N , 纯度 > 99%, 强度约 3×10^6 ion/s.

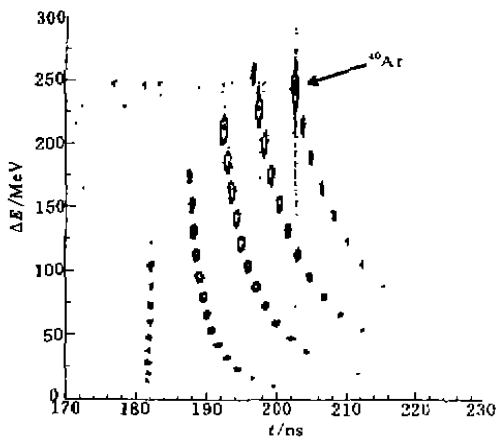


图 3 55 MeV/u $^{40}\text{Ar}-\text{Be}$ 碎裂反应 (详细说明见正文)

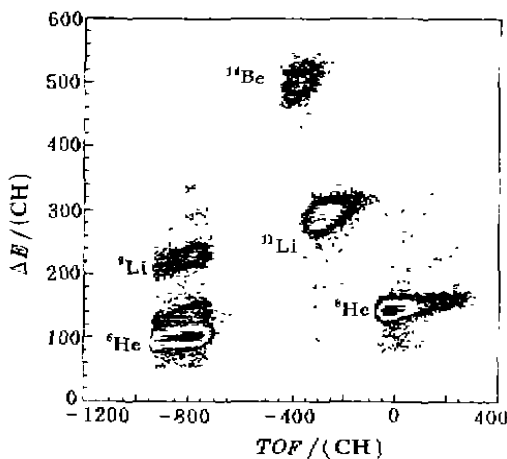


图 4 60 MeV/u $^{18}\text{O} + \text{Be}$ (550 mg/cm²) 碎裂反应, 经 RIBLL 分离、鉴别的中子滴线核 ^6He 、 ^7Li 和 ^9Be 等高图

表 2 是 RIBLL 提供的 RIB 强度计算值,

实际分离 ^{17}N 的强度与计算值符合得很好.

表 2 RIBLL 典型放射性束流强度计算值

初级反应系统	放射性束	$I/(\text{ions} \cdot \text{s}^{-1})$
45 MeV/u $^{40}\text{Ar} + \text{Be}$ (100 mg/cm ²)	^{39}Ar	$> 4.0 \times 10^6$
	^{38}S	$> 3.0 \times 10^7$
84 MeV/u $^{20}\text{Ne} + \text{Be}$ (800 ~ 1 000 mg/cm ²)	^{19}Ne	$> 1.0 \times 10^7$
	^{16}Ne	$> 1.2 \times 10^6$
	^{16}F	$> 2.0 \times 10^7$
100 MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Be}$ (1 100 ~ 1 800 mg/cm ²)	^{11}C	$> 2.5 \times 10^7$
	^{10}C	$> 3.0 \times 10^5$
	^9C	$> 1.2 \times 10^5$
	^8B	$> 1.5 \times 10^6$
	^7Be	$> 6.5 \times 10^6$
70 ~ 80 MeV/u $^{18}\text{O} + \text{Be}$ (600 ~ 1 400 mg/cm ²)	^{17}N	$> 3.0 \times 10^7$
	^{15}B	$> 3.0 \times 10^4$
	^{14}B	$> 3.0 \times 10^5$
	^{14}Be	$> 1.4 \times 10^7$
	^{11}Be	$> 1.0 \times 10^6$
	^{12}Li	$> 1.0 \times 10^4$
	^9Li	$> 3.0 \times 10^5$
	^5He	$> 5.0 \times 10^3$
^4He	$> 7.0 \times 10^5$	

5 RIBLL 的物理工作前景

RIBLL 是产生中能重离子放射性束流的装置和高精度放射性束物理的实验谱仪. 它可以提供能量 5 ~ 140 MeV/u、质量小于 140 的各种放射性同位素束流.

放射性束流装置为我们提供了访问直至滴线核的远离稳定性核空间的唯一机会. 这些核具有异常的 N/Z 值, 因此可以研究奇异核性质在同位旋维度的演变, 如核子密度分布、束缚能、核形状、壳效应、集体行为和衰变特性等. RIBLL 为在下列领域开展放射性科学实验研究带来新的机遇.

5.1 产生鉴别新核素

根据现在的核理论预言, 寿命大于 μs 的

核素接近 8 000 种, 目前仅有 3 000 余种核素被发现和鉴别. 实验证明, PF 型 RIB 装置是产生、分离和鉴别放射性新核素的有效工具. M. Bernas 等人在 GSI 以 750 MeV/u ^{238}U 轰击 Be 和 ^{208}Pb 靶反应中利用 FRS 分离和鉴别出了 100 多种新核素, 充分展现出这种无与伦比的能力. 具有重要物理意义的滴线外核 ^6He 、双幻核 ^{78}Ni 、 ^{100}Sn 和 ^{132}Sn 的发现更是这些研究的亮丽点 (详见文献[12]).

最近, 在 RIBLL 上对 ^{19}Na 的研究也取得了新进展.

5.2 奇异核结构

随着放射性核束装置的出现, 近年来在奇异核结构研究中, 发现了许多新现象. 例如, ^{11}Li 、 ^{14}Be 、 ^{17}B 、 ^{19}C 和其它丰中子核的中子密度分布的扩展, 导致中子晕、中子皮结构的形成, 为研究中子物质带来希望; 同时, 对丰质子核的质子密度分布、质子晕现象也在研究之中; N/Z 值异常的远离核表现出 β 延迟中子、双中子发射, β 延迟质子、双质子放射性等衰变特性; 壳效应和集体行为随同位旋的变化等.

5.3 奇异核反应

RIB 在同位旋自由度上可极大的扩展核反应研究空间, 从稳定谷到滴线, 反应系统任意选择, 使用 RIB 既可研究奇异核引起的

核反应过程, 也能探索在极端条件下发生的核反应, 解释奇异核结构特点和天体物理中的核过程. 在 RIB 进行的核反应研究中, 发现了核反应半径与同位旋之间存在一定的关系; 转移、碎裂、熔合等核反应截面存在不同程度的变化, 这也给合成超重元素提供了可能的途径.

5.4 核天体物理

天体物理和核物理是密不可分的, 不仅核过程是宇宙天体的主要能源, 而且天体中发生的各种元素合成都来自于核反应 (详见本期第 207 页). 由 RIB 引起的核反应研究的结果可较好地模拟宇宙演变、重元素的形成、s 过程、r 过程、p 过程、rp 过程、CNO 循环等天体主要演化的核过程, 为天体演化提供最基本的实验数据. 特别是利用中高能 RIB 库仑裂解反应为核天体物理研究提供了可靠的、不可取代的新实验方法和实验结果.

5.5 原子核物理和材料科学

利用注入到物质内部的 RIB 的辐射和极化特性以及 Mössbauer 等效效应测定物质材料的性质. RIB 的定位、诊断 (治疗)、示踪的初步实验表明, RIB 在固体物理、材料科学、凝聚态物理、生命科学和生物工程等学科中也具有非常广泛的应用前景, 是一种难于取代的实验方法.

参 考 文 献

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al.* Measurements of Interaction Cross Section and Nuclei Radii in the Light p-shell Region. *Phys Rev Lett.* 1985, 55; 2 676~2 679
- 2 Anne R, Bazin D, Mueller A C *et al.* The Achromatic Spectrometer LISE at GANIL. *Nucl Instr & Meth.* 1987, A257; 215~232
- 3 Kubo T, Ishihara T M, Inabe N *et al.* The RIKEN Radioactive Beam Facility. *Nucl Instr & Meth.* 1992, B70; 309~319
- 4 Sherrill B M, Morrussey D J, Nolen J A *et al.* The A1200 Projectile Fragment Separator. *Nucl Instr & Meth.* 1991, B56/37; 1 106~1 110
- 5 Gessel H, Armbruster P, Behr K H *et al.* The GSI Projectile Fragment Separator (FRS): A versatile magnetic system for relativistic heavy ions. *Nucl Instr & Meth.* 1992, B70; 286~297
- 6 Langevin M, Quiniou E, Bernas M *et al.* Production of Neutron-rich Nuclei at the Limits of Particle Stability by Fragmentation of 44 MeV/u ^{40}Ar Projectiles. *Phys Lett.* 1985, 150B; 71~74
- 7 Poughéon F, Jacmart J C, Quiniou E *et al.* Direct Observation of New Proton Rich Nuclei in Region $23 < Z < 29$ Using a 55 MeV/u ^{58}Ni Beam. *Z Phys.* 1987, A327; 17
- 8 Mueller D G, Penionzhkevich Yu E, Anne R *et al.* Ob-

- servation of New Neutron Rich Nuclei ^{26}F , $^{35,36}\text{Mg}$, $^{38,39}\text{Al}$, $^{40,41}\text{Si}$, $^{43,44}\text{P}$, $^{45\sim 47}\text{S}$, $^{46\sim 49}\text{Cl}$ and $^{49\sim 51}\text{Ar}$ from the Interactions of 55 MeV/u $^{48}\text{Ca} + \text{Ta}$. *Z Phys*, 1988, A332, 189
- 9 Saint-Laurent M G, Dufour J P, Anne R *et al.* Observation of a Bound $T_z = -3$ Nucleus: ^{32}Si . *Phys Rev Lett*, 1986, 59, 33
- 10 Lewitowicz M, Anne R, Auger G *et al.* Identification of the Doubly-magic Nucleus ^{100}Sn in the Reaction $^{113}\text{Sn} - ^{94}\text{Ni}$ at 63 MeV/nucleon. *Phys Lett*, 1994, B332, 20~24
- 11 Bernas M, Armbruster P, Czajkowski S *et al.* Identification of More than a 100 New Isotopes from ^{238}U Projectile Fission and Beam of Neutron-rich Nuclei at BRENDA. *Nucl Phys*, 1997, A616, 352c~362c
- 12 杨水峰, 刘军辉. 在放射性束装置上进行新核素鉴别及其衰变性质的研究. *原子核物理评论*, 1999, 16(3), 142~152

Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou

Zhan Wenlong Guo Zhongyan

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) is a facility to produce intermediate energy radioactive ion beams (RIB), and also a high precision spectrometer for RIB physical experiments. The solid angle acceptance of RIBLL is 6.5 msr. The momentum acceptance is about 10%. The polarized RIBs will be available. RIBLL is the equipment with double achromatic and asymmetric structure. So that it can not only sublimate the RIBs in pureness, but also operate as 0° magnet spectrometer.

Key words radioactive ion beam double achromatic solid angle acceptance momentum acceptance polarized RIB

Classifying number O571.1