

# HIRFL 上奇异核次级束流的研究及进展

詹文龙

(兰州重离子加速器国家实验室 兰州 730000)

**摘要** HIRFL上发展的奇异核次级束流的研究计划分为三个阶段. 1. 基本就位的改造束流后输运为(PF)RNB; 2. 设计中高性能(PF)RNB; 3. 展望中的重离子冷却(加速)储存环. 同时介绍了第一阶段RNB进展.

**关键词** 放射性核素, 弹核碎裂, 储存环.

## 1 目的意义、国内外水平和发展趋势

本世纪以来,用加速器加速带电粒子进行核物理研究,已在核结构和核反应机制及核应用上都取得了巨大的进展.按加速的粒子种类和研究的方法可大致划分如表1所示.60年代以前的研究基本只局限于p、d、 $\alpha$ 等在 $\beta$ 稳定线上的稳定核素之间的反应研究.重离子研究发展到80年代,已开阔了核物理研究的视野,增加了反应种类,同时也给系统研究增加了新的维度,如: $A_p$ 、 $Z_p$ 和高自旋 $I_x$ 等,但这也基本上只是建立在稳定核素之间的研究.随着几台中能加速器的相继投入运行(GANIL、MSU、RIKEN和HIRFL等)和重离子研究的深入,高能重离子研究进入了相对成熟的阶段,远离 $\beta$ 稳定线的不稳定核素即奇异核研究得到了显著的进展.奇异核研究增加了核反应的入射道和系统研究的新维度 $I_x$ (同位旋).初步的实验<sup>[1-3]</sup>已发现了近百种新核素,基本上填满了 $Z < 10$ 滴线内的同位素,发现了多种新的核衰变方式,从实验中首次直接测定了一大批同位素的质量,使得液滴模型面临从所未有的检验;用奇异核次级束流进行了核反应总截面测量,发现了核半径与同位旋之间存在新的关系;特别是在 $^{11}\text{Li}$ 、 $^{14}\text{Be}$ 、 $^{15}\text{B}$ 等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;质子晕、及其与质子皮演化;软巨共振等新的物理概念<sup>[1]</sup>.这是对核物质的结构与核子组成的极限以及现有核理论模型的普适性进行更深层次的研究,

也是未来重离子核物理的发展方向.

表1 核物质的性质研究简况

带电粒子	轻粒子	重离子	奇异核
年代	60年代以前	80年代以前	80年代以后
可加速带电粒子种类	$\sim 1 \times 10^1$	$\sim 2 \times 10^2$	$\sim 3 \times 10^3$
反应入射道	$\sim 1 \times 10^3$	$\sim 5 \times 10^4$	$\sim 1 \times 10^6$
系统研究的参量	$Z_T, A_T, E, T$	$Z_p, A_p, Z_T, A_T, E, T, I_x$	$Z_p, A_p, Z_T, A_T, E, T, I_x, I_x?$

$Z$ 为核质子数,  $A$ 为核质量数,  $E$ 为弹核能量,  
 $T$ 为核温度系数,  $I_x$ 为核自旋量子数,  
 $I_x$ 为核同位旋量子数.

目前,国际上的几个中高能重离子加速器实验室都提出了一些新方案,并大量投资建设奇异核次级束流研究装置来开展奇异核次级束流的研究<sup>[1,2]</sup>.这些装置大体可分为:

1)收集核反应前角区类弹产物,经电磁分离引出;

2)收集初级核反应产物入ECR源(离子源),经后加速引出.

现有的奇异核次级束流研究装置都属第一类,如GANIL的LISE;RIKEN的RIPS等.第二类的奇异核次级束流研究装置目前处于建造提方案阶段,如ISL<sup>[4]</sup>.

国内这方面的研究工作已逐步开展,除了在国外实验结果的基础上进行一些理论研究<sup>[5]</sup>和派人到GANIL,RIKEN进行合作研究外,几个研究单位也提出一些方案和着手研制相对简单的装置. HIRFL从物理研究和现实

条件着想,制定出分三阶段研制奇异核次级束装置的计划,这无疑会做出有世界一流水平的工作,同时延长 HIRFL 的实验物理周期.

## 2 第一期 HIRFL 的次级束流装置及其进展

第一期:HIRFL 的次级束流装置是利用 HIRFL 现有的后输运系统,建成一个相对简单的、精度适当的实验装置<sup>[6]</sup>. (80 年代中期世界先进水平)

### 2.1 运行原理

这套奇异核次级束流线采用现有的 SSC 后输运系统上的双消色差束流传输线. 如图 1 所示,其运行原理如下:

1) 奇异核是在初级反应靶室(T1)中,利用同位旋较高的初级弹核在靶核上进行碎裂和复杂转移反应产生的. 在中能重离子核反应中:(1)碎裂与复杂转移反应的类弹产物速度与炮弹速度相近,动量分散相对小,

$$\sigma(P_s) = \sigma_0 \sqrt{A_F(A_p - A_T)/(A_p - 1)}$$

( $\sigma_0 \sim 90\text{MeV}/c$ )

且运动学效应使类弹反应产物集中在范围较

小的前角区,这有利于在较有限的相空间中进行高效率的奇异核次级束流传输;(2)入射弹核能量较高时,在介质中能损小,可使用有一定厚度的反应靶子以提高奇异核反应产额;(3)中能重离子加速器能提供较强的初级束流(HIRFL 能提供  $10^{11}/\text{pps}$ ).

2) 奇异核次级束流是用磁场分离法在通常的束流传输系统中选择所需的初级反应产物. 即在 S 处加一 Steer 偏转初级束流对厚的初级靶(T1)的入射角( $< 2^\circ$ ),这样经初级核反应后的初级束流和大部分初级反应产物都阻止在加速器大厅里,只有在一定角区内的初级反应产物才能进入实验大厅,也因此可降低次级反应的实验本底.

3) 在 HIRFL 后输运系统上,双消色差束流传输线的第一偏转单元(D1)选取符合磁刚度  $B_p1$  的反应产物,经过焦平面(C)上的降能片,根据不同 Z 的粒子穿过介质的能损不同来改变入射粒子的动量,再经过窄逢的选择,最后用第二偏转单元(D2)的  $B_p2$  进一步分离出所需的几种奇异核.

4) 奇异核次级束经过约大于 31m 消色差

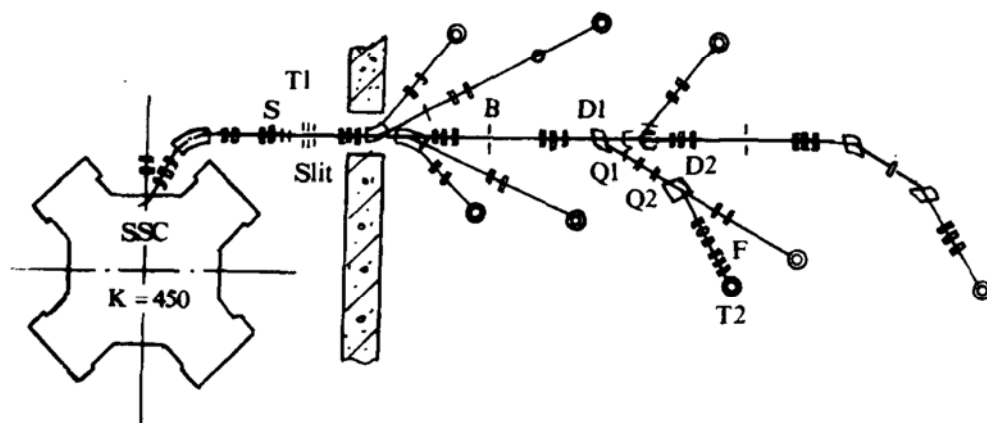


图 1 奇异核次级束流线的示意图. S:校正磁铁;T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>:初级和次级反应靶室;D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>:偏转磁场;Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub>:四极透镜;A、B、C:次级束诊断;C:降能片,狭逢;F:入射角与 ΔE 探测器

的传输途径达到次级反应靶室(T2),可期望探测到寿命大于  $4 \times 10^{-7}$ s 的不稳定奇异核.

5) 奇异核次级束流的粒子是通过测量每个粒子的飞行时间 TOF (TOF 可由 HF 相位与 T2 点的探测时间飞行距离为 31m,或由 B 点与 T2 点探测时间之差飞行距离为 18m)、磁刚度  $B\rho$ ,以及在探测器中测到的部分能损  $\Delta E$  和总能量  $E_t$  后,逐个鉴定核素的质子数  $Z$ 、电荷数  $Q$  和质量数  $A$ .

用束运理论计算中,选择的条件为:次级束  $^{35}\text{Si}$  30MeV/A 在初级靶处的物点尺度  $X_0 = \pm 2.0\text{mm}$ ;  $\theta = \pm 10\text{mrad}$ ,相应的束流传输包络线如图 2 所示.图中虚线为  $\Delta P/P=0$ ;实线为  $\Delta P/P=2.5\%$ .通常,可将此条件下产生的奇异核次级束流用于核物理实验.

在此基础上,根据不同的研究内容安排不同的实验探测设备进行实验.

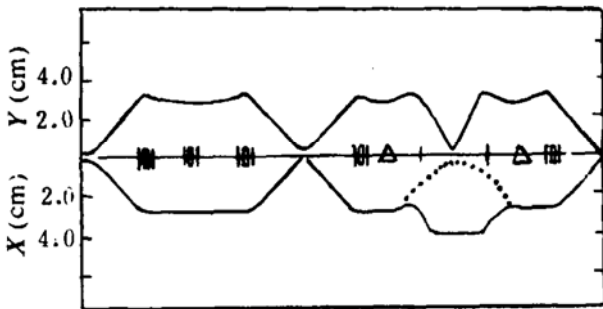


图 2 奇异核次级束流传输包络线.束运理论计算中选择条件为:次级束  $^{35}\text{Si}$  30MeV/A 在初级靶处的物点尺度  $X_0 = \pm 2.0\text{mm}$ ,  $\theta = \pm 10\text{mrad}$

### 2.2 主要特性

与法国 GANIL 的类似设备 SPEG +  $\alpha$  传输线 LISE 相比,第一期 HIRFL 的次级束流装置特性见表 2.

### 2.3 可开展的物理研究工作

第一期终端建成后,可立即开展以下二方面的工作和一些探索性的研究工作:

1) 用奇异核次级束 ( $A < 30$ ) 与稳定核进行核反应研究极端情况下的核反应机制,主要集中在反应截面比较大的弹性散射、转移反

应、碎裂等直接反应和反应总截面的测量,研究奇异核尺度、形状,中子、质子晕、皮及其演化等.

表 2

	SPEG + $\alpha$	LISE	第一期
最大接收立体角 $\Delta\Omega$	0.25 msr	1.0 msr	0.32 msr
动量接收范围 $\Delta P/P$	1.0 %	5.0 %	5.0 %
磁度分辨 $\Delta B\rho/B\rho$	$1 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-3}$
最大磁刚度 $B\rho$	2.8 T.M	3.2 T.M	3.0 T.M
电荷分辨率 $Z/\Delta Z$	150	100	100
质量分辨率 $A/\Delta A$	$5 \times 10^3$	$3 \times 10^2$	$2 \times 10^2$

\* 对于初级束流斑点  $X_0 = \pm 0.15\text{cm}$

2) 产生和鉴别  $A: 10 \sim 80$  范围内远离  $\beta$  稳定线的丰中子、丰质子核素或同质异能态,测量一些不稳定核的衰变性质、衰变方式及其核的基本特性.同时探索利用奇异核与稳定核进行反应,产生高自旋与高形变核研究和天体核物理研究.

### 2.4 第一期 HIRFL 的奇异核次级束流装置的进度

1) 这个装置中控制产生、诊断和分离奇异核次级束所用步进电机驱动的磁密封进动和转动器件,整体由计算机经 IEEE488 总线进行控制和保护.现已调试成功.

2) 用于奇异核次级束鉴别的大面积二维位置灵敏半导体探测器(厚  $300\mu\text{m}$ ,  $45 \times 45\text{mm}^2$ )同时可得到时间、位置和  $\Delta E$  信息.用 5.5MeV 的  $\alpha$  源进行测试,测试结果符合装置的基本性能要求.

3) 奇异核次级束流引起次级核反应的一典型探测器是由纵向电场的电离室(IC)、大面积二维位置灵敏半导体探测器、大面积半导体探测器(厚  $400\mu\text{m}$ ,  $48 \times 48\text{mm}^2$ ) 和 CsI 阵列探测器组成. IC 用于测量类靶和重反应产物,半导体探测器测量类弹产物,同时测时间、位置, CsI 阵列主要测轻带电粒子.

纵向电场的电离室用 5.5MeV 的  $\alpha$  源测试,其结果为  $\delta\Delta E/\Delta E \sim 5.5\%$ ,  $\delta E/E \sim 2.5\%$ ;

CsI 阵列粒子探测器,采用脉冲形状时间过零鉴别法在实验中获得很好的带电粒子分辨,如图 3 所示.

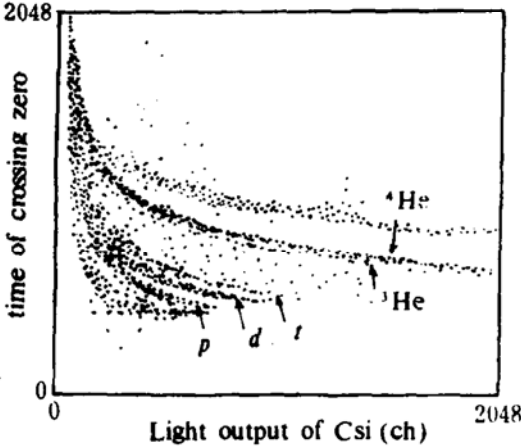


图 3 实验中用 CsI 阵列测到的轻粒子散布图

4)用于实验数据处理的程序(PAW)已调试完成,可在高档 PC 上运行.

第一期研制所需的器件到目前已基本完成,部分探测器在物理实验中得到了较好的性能指标.计划到年内进行在束整体调试后,提供物理实验.

### 3 第二期、第三期 HIRFL 的次级束流装置的物理设计及规划

#### 3.1 第二期装置的基本特点

第二期计划尽快地在 HIRFL 实验区内建成一个具有高科技、高精度和 90 年代世界先进水平的实验装置(与 GANIL 的 LISE 和 RIKEN 的 RIPS 相比,在某种程度上有所改进,但进展如何,要取决于经费落实情况),现在为物理设计阶段.同时也考虑今后在 HIRFL 上建造存储加速环,进行不稳定奇异核注入的可行性.

#### 3.2 第二期装置的主要技术性能

第二期的次级束流装置的次级束流也是由同位旋较高的初级弹核在靶核上进行碎裂

和复杂转移反应产生的类弹产物.与第一期相比,主要有下列技术特点:

(1)提高装置的接收立体角和动量接收范围;

(2)用强磁场尽可能地缩小初级束在初级靶上的斑点,以增加收集奇异核能力;

(3)提高奇异核的分离能力.其主要技术参数见表 3.

表 3

	第一期	第二期*
最大接收立体角 $\Delta\Omega$	0.3 msr	>10 msr
动量接收范围 $\Delta P/P$	5 %	7 %
磁刚度分辨 $\Delta B\rho/B\rho$	$1.7 \times 10^{-3}$	$10^{-4}$
最大磁刚度 $B\rho$	3.0 T.M	4.0 T.M
电荷分辨率 $Z/\Delta Z$	50~100,	>150
质量分辨率 $A/\Delta A$	100~200	500

\*可鉴别、测量寿命  $\tau > 5 \times 10^{-7}$ s 的奇异核及其性质.

设计第二期装置比第一期在次级束总接收能力高 >1000; 单核素的分离能力即分离出的核素数比本底 ~1000.

#### 3.3 可开展的研究领域

第二期装置建成后,基本上可进行奇异核的研究和探索,不仅可开展和拓广第一期的研究工作,主要还可进行下述几方面的研究:

(1)进行奇异核次级束与稳定核的反应,探索用奇异核合成超重核的可能性;

(2)探索中子核( $^2\text{N}$ 、 $^4\text{N}$ )的存在与性质;

(3)研究液滴线极限性质;

(4)探索利用奇异核次级束合成新核素的可能性;

(5)高自旋与高形变核的研究;

(6)天体核物理研究.

#### 3.4 第三期装置的特点

第三期装置的基础上,考虑在未来 HIRFL 兴建的重离子冷却储存环(具有加速能力)里注入半衰期 >1 小时的不稳定奇异核,以产生高强度与高品质的奇异核次级束流,这是不稳定奇异核研究的新设想,只处于提方案阶

段.

采用具有加速能力的重离子冷却储存环和一般的后加速器相比,主要有下列特点:

(1) 储存、加速不稳定奇异核,可使单一的奇异核次级束的强度达  $10^9 \sim 10^{10}$ pps;

(2) 束流在环内可保持  $>10$  小时,即没有产生反应的束流可在环内重复轰击内靶进行实验;

(3) 储存环对原有加速器注入要求较宽,注入时间端存储运行时间,这就减少对原有设备运行状况的依赖.

在这样的装置上可进行各种不阻止束流的内靶实验和瞬间的外靶实验,这无疑是奇异核研究开创核物理研究新纪元的实现.

### 参 考 文 献

- 1 Tanihata I. *Treatise on Heavy Ion Science*, 1989, 8
- 2 Detraz C. *Inter. Nucl. Phys. Conf.*, Brasil 1989, 2: 337 and *Nucl. Astrophys. Problems*, Tokyo 1988, 151
- 3 Mittig W, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59: 1889
- 4 Shen Wenqing, et al. *Nucl. Phys.*, 1989, A491: 440

## Studies and Progress of Exotic Nuclei with Radioactive Beam at HIRFL

Zhan Wenlong

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

**Abstract** The researches with Radioactive Nucleon Beam (RNB) at HIRFL is proposed as three stages. 1) Modification of post beam transport line as Projectile Fragmentation (PF) type RNB under construction. 2) High quality (PF) RNB being designed. 3) Storage ring (with accelerating ability) is perspective. Meantime, the progress of 1st stage RNB at HIRFL is described.

**Key Words** radioactive nucleon beam(RNB), projectile fragmentation, storage ring.

(上接 64 页)

due to the bombardment and penetration of the ions. The heavy ions can significantly inhibit germination and growth of the seeds and can affect physiological functions. In root tip cells of irradiated seeds, a great variety of chromosomal aberrations were observed and the aberration frequencies were greatly higher than that of the corresponding controls. Serious damages of some organelles were induced by the ions. Damaged DNA can be repaired to some extent. Median lethal doses and inactivation cross-sections of the four kinds of plant seeds are determined and the differences of radiation sensitivity between different seeds are found. The correlations of organelle damages with abnormal physiological processes and the repairing process of damaged DNA are discussed.

**Key Words** heavy ion, biological effect, radiation sensitivity, chromosomal aberration and frequency, organelle, DNA, damage and repair.