在 HIRFL 上的中能重离子物理基础和应用研究

罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 本文总结了三年来在兰州重离子研究装置(HIRFL)上进行的科研工作和取得的成果. 简单介绍了 HIRFL 的工作状态、次级束流线与 ECR 离子源的发展、中能重离子引起的反应研究、热核与远离 β 稳定线核素的合成与研究和重离子束的应用等.

关键词 HIRFL, 次级束流, 热核, 中能重离子.

HIRFL 由注入器 SFC(能量常数 K=69, 扇聚焦回旋加速器)、主加速器 SSC(K=450, 分离扇回旋加速器)、前后束流输运线、八个实验装置和公共基础实验设施组成[1]. 1988 年底, 由 SFC 和 SSC 首次引出 50MeV/u 的 ^{12}C 束流, 且开展了第一轮中能重离子物理基础和应用研究, 取得了首批科研成果.

1 HIRFL运行概况和ECR离子源[2]

1989 年 总运行 5400h, 包括后输运线调试, 束流参数测试和辐射防护测试, 为物理实验供束 700h.

1990 年 总运行 6000h, 包括调试 75MeV/u ^{12}C 束、50MeV/u ^{16}O 束和为四个实验装置调束, 为物理实验供束 650h.

1991 年初至 5 月, 为实验供束 1200h.

从 1991 年 5 月起安装 ECR 离子源, 并对 HIRFL 系统进行全面检修和改造提高, 预计于 1992 年 4 月完成.

已在 HIRFL 上进行的三个领域实验研究占用束流时间百分比如下:

中能重离子反应和热核性质研究 52%; 远离稳定线新核素合成和研究预研 26%; 中能重离子束应用研究 22%.

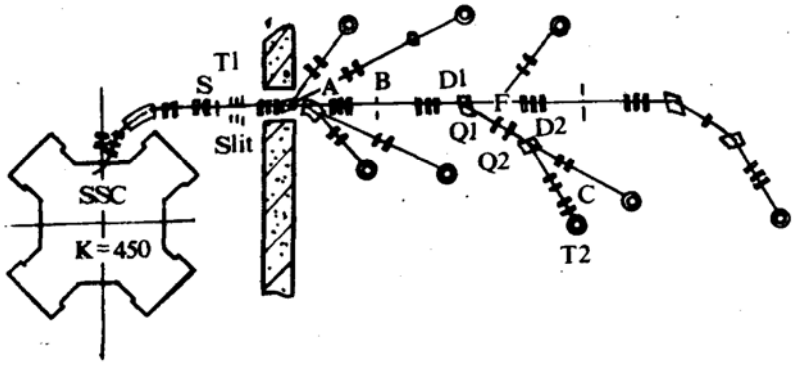

图1 HIRFL上正在研制中的奇异核次级束流线. S控制, T1、T2初级和二次靶室, D1、D2 偶极磁铁, Q1、Q2 四极磁铁, A、B 和 F 束流诊断元件, C 入射角

HIRFL 包括的八个实验装置也已分别投入使用. 此外, 作为实验装置重点发展计划之一, 由詹文龙等负责的奇异核次级束流线已完成设计和部分加工(图 1). 该装置以高效率传输, 在中能重离子反应中具有高反应截面且接近束流速度的高速前冲弹核碎裂产

物，并根据磁刚度和能损对飞行中的产物进行分离，从而提供放射性次级束流. 研制中的奇异核次级束流线主要参数为:

最大接收立体角$\Delta\Omega$	0.3 mSr
最大磁刚度$B\rho$	3.0 T.M
磁刚度分辨$\Delta B\rho / B\rho$	1.7×10^{-3}
电荷分辨$Z / \Delta Z$	50～100
质量分辨$A / \Delta A$	100～200

该奇异核次级束流线将用于核反应总截面测量、反应机制研究、远离稳定线新核素合成和性质的研究.

现已获得的 50MeV/u 和 75MeV/u ^{12}C 束及 50MeV/u ^{16}O 束均使用 PIG 离子源. 这种"内部源"有诸如离子电荷态低、离子种类少、真空度差、稳定性差和寿命短等一系列缺点. 我们从法国 CENG 实验室引进了一台 10GHz 的 ECR 离子源(Electron Cyclotron Resonant Ion Source，电子回旋共振源). 在这种新型离子源(外部源)中，当微波频率与电子回旋频率相同时，微波将能量共振耦合给电子,产生高电离度等离子体. 使用 ECR 源，将显著提高离子电荷态(从而提高束流能量)和束流强度，降低能散，增加离子种类，并能长期稳定运行.

表 1 ECR 源 CAPRICE 各种电荷态下束流强度($e\mu$A)

	3	4	5	6	7	8	9	10	11	15
O	390 (315)		220 (220)	205 (206)						
Ne		300 (124)		155 (100)	35 (25.4)					
Ar					183 (108)	220 (110)	105 (56)		15 (8.2)	
Xe										25 (22)

刘占稳等对该离子源作了相应改进，并用 O、N、Ne、Ar 和 Xe 进行了测试. 从表 1 可以看出，同在法国 CENG 实验室测量结果(括号内数字)相比，Ne 和 Ar 离子流强分别提高了 50%和 100%.

ECR 源于 1992 年投入使用后，在 HIRFL 上将可得到能量为(120～7.5) MeV/u 的 C——Ta 的各种束流. ^{20}Ne、^{40}Ar 和 ^{84}Kr 束的能量可分别达 100、37 和 18MeV/u.

2 在HIRFL上开展的中能重离子反应和热核性质第一轮实验研究

中能区(10MeV/u～100MeV/u)是由平均场效应起主导作用的低能区向核子–核子碰撞起主导作用的高能区过渡的能区，重离子反应呈现一系列过渡特征[3]. 中能重离子反应为研究热核的形成和衰变,探索极限条件下的核物质性质提供了有利条件[4].目前，我们已在该前沿领域开展了下列实验研究.

2.1 中能重离子反应靶碎裂和线性动量转移的放射化学研究

放射化学方法具有确切鉴别反应产物 Z、A 值和测量由于受探测器截止阈限制而不能探测的反冲能很低的重靶余核等优点. 李文新等使用离线 γ 能谱和厚靶–厚收集箔技术，在核反应 47MeV/u ^{12}C+Cu、^{93}No、^{115}In、^{181}Ta、^{197}Au 中，如:

(20～46)MeV/u ^{12}C+Cu

(18～46)MeV/u ^{12}C+^{93}No

对重靶余核质量分布和线性动量转移随不同靶质量和入射能的变化作了系统研究[5].

(1)测定了数十个靶余核生成截面，在假设高斯电荷分布的基础上得到了靶余核质量分布；并在宽广的靶质量范围，对靶余核质量分布进行了理论拟合，成功地检验了描述热核衰变的统计碎裂模型[6]. 证明，靶余核质量分布形状基本不随靶质量(非裂变)而改变，但随入射能增加、质量分布加宽和中等质量碎片产额增加；在较宽靶质量和入射能范围，统计碎裂模型均能拟合靶余核质量分布，但对可裂变靶核，需对理论模型做某些修正(图 2)，理论似乎对壳结构效应估计过高.在 A～45 和 A～110，理论比实验明显

偏高.

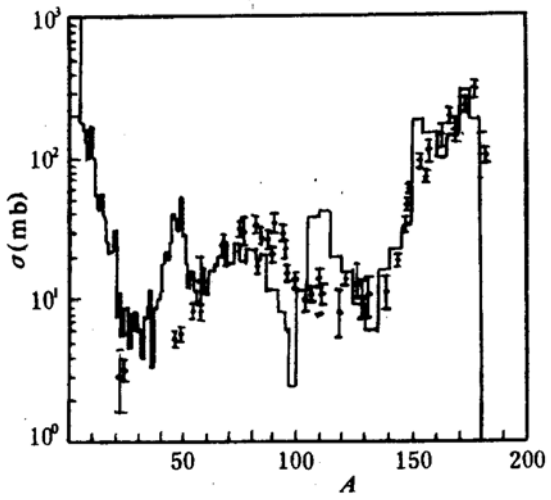

图2　在47MeV/u $^{12}C+^{181}Ta$反应中，质量产额分布实验值和统计碎裂模型计算值的比较

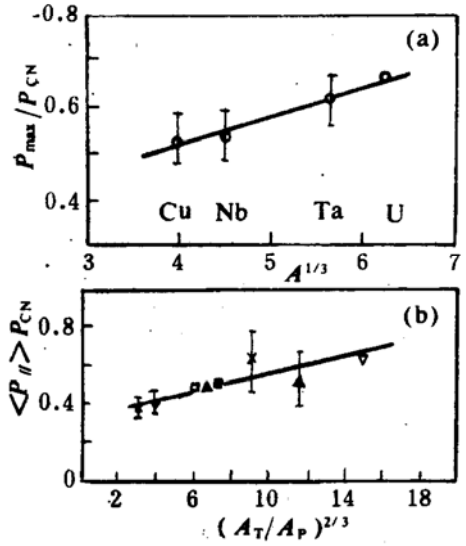

图3　中心碰撞的最大线性动量转移随靶质量的变化(a)和反映从周边碰撞到中心碰撞的线性动量转移平均值随弹靶系统不对称性的变化(b)

(2)由平均反冲射程，计算了初始碰撞中线性动量转移；并从反冲余核相对速度与靶余核质量数的依赖关系，明确区分了中心碰撞线性动量转移和反映从周边碰撞到中心碰撞的线性动量转移平均值. 证明，中心碰撞线性动量转移随靶质量增加而增加，而平均线性动量转移强烈依赖于弹靶系统不对称性(图 3).

(3)相对线性动量转移随入射能增加而线性减少. 同其它实验相比，发现其下降速率对靶核质量和入射粒子呈现系统性差异.

2.2　中能重离子周边反应研究

詹文龙和诸永泰等使用 47MeV/u 的 $^{12}C+^{58}Ni$、^{64}Ni、^{117}In 和 ^{197}Au 反应进行了两轮实验，测量了带电离子角分布、带电粒子角关联、复杂粒子和弹散角分布，数据获取参数约九十余个.

实验使用了下述探测器:

(1)九单元 CsI(Tl)光二极管读出探测器阵列——1.2× 1.2× 1.5cm^{3}CsI(Tl)光二极管读出探测器具有体积小、长期工作稳定、简单、便宜和能量阈低等优点，可通过光衰减形状甄别来鉴别轻带电粒子(P、d、t、^{3}He 和 ^{4}He 等). 该阵列单元之间死区小，靠得很近，适用于轻带电粒子关联测量.

(2)高分辨 Si+CsI(Tl)望远镜探测器——ΔE 探测器是三片 Si 半导体(金耗尽型，厚度为 130μm、1580μm 和 5000μm)；E 探测器是 10× 10× 30mm^{3}CsI(Tl)光二极管读出探测器,可同时给出 $1<Z<7$ 产物的 Z、A 鉴别，有大的能量动态范围、高的能量和质量分辨,用于弹核碎裂和弹性散射测量.

(3)Si+BaF_2 望远镜探测器——两片 Si 半导体厚度均为 100μm，BaF_2 为 Φ40mm× 20mm；采用快慢成分关联法，用于前方向上较高能量轻带电粒子的探测和鉴别.

实验数据分析尚在进行中，现已获得下述结果:

(1)根据轻粒子发射和反应产物同位素产额分布随能量、角度和靶核的变化，研究了各种反应机制的共存与竞争[7].

如图 4 所示，能量低于 15MeV/u 的低能部分的 d、t 粒子的产额比 t/d 随靶核中质比 N/Z 增加而增加，而 30MeV/u 以上高能部分的 t/d 比基本不随靶核 N/Z 变化；对应于同一个靶核 N/Z 值，高能时的

t/d 值小于低能时的 t/d. 从图 5 可以看出，低能的 t/d 比值基本上不随出射角变化，而高能的 t/d 比(图 5 中是以 d/t 示出)随出射角增大而减小. 上述现象说明低能部分的 d、t 粒子来源于与耗散有关的平衡系统的蒸发，而高能部分的 d、t 粒子来源于反应初始阶段的类弹产物或前平衡发射. $^4He/^3He$ 产额比及类弹碎片 Li 同位素产额分布随靶核 N/Z 值的改变也表现出类似特征. 这说明，尽管核反应主要表现为直接过程，但平均场效应不能忽略.

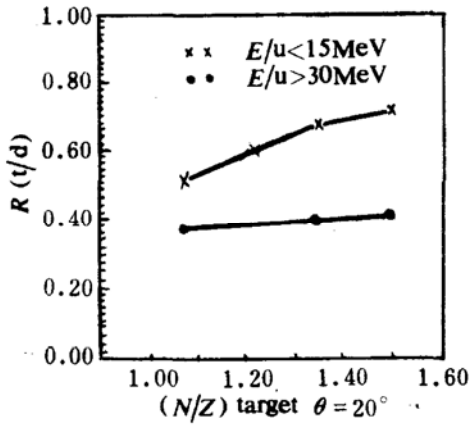

图4 在 $\theta=20°$ 测得的 47MeV/u^{12}C 引起的反应中，t/d 比值与靶核的关系

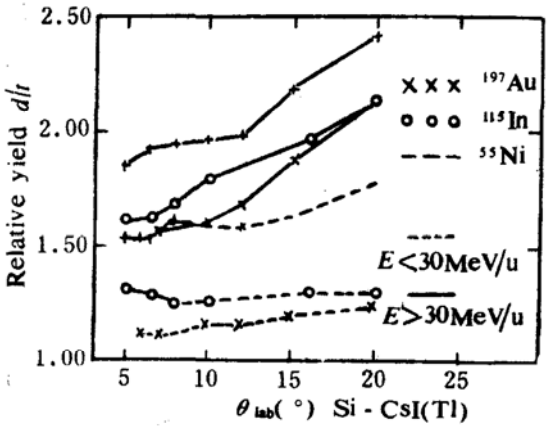

图5 47MeV/u^{12}C 在各种靶上引起的反应中，出射的 t/d 比值随出射角的变化

该实验还研究了中能 ^{12}C 入射核反应中弹核碎裂与转移反应的竞争，证明转移反应比弹核碎裂过程更快;随出射角增加，前者角分布下降比后者快.

此外，由 d/t 产额比提取热核的熵[8]，提供了反应过程熵变化的信息.

(2)由测定非稳态核不同激发态产额比提取核温度. 核温度的测定在热核研究中有重要意义. 假定出射复杂粒子与发射源已处于热平衡，即可由同种粒子在不同激发态的布居比来确定核温度[9]. 用九单元 CsI(Tl)阵列测量了不同激发态的同一非稳态核的衰变产物以获得同种粒子不同激发态布居比. 例如，在 47MeV/u^{12}C+^{58}Ni 反应中，由对 ^{5}Li(基态)→P+α 和 ^{5}Li(16.6MeV 激发态)→d+^{3}He 衰变产物 P 和 α、d 和 ^{3}He 的测量，提取的核温度为 $T=3.07\pm0.5$MeV.

(3)研究轻带电粒子末态相互作用以研究发散源时空演化[10]. 用九单元 CsI(Tl)探测器阵列测量了 PP、Pd、dd 和 dt 关联以研究末态相互作用. 测量得到的两质子符合产额和单峰产额给出关联函数 $R(q)+1$(q 为两质子相对动量)，进而提取了发射源半径. 发现，相应于较高的能量，质子发射源半径小一些，提示高能质子来自反应初始阶段的前平衡发射或类弹碎片发射.

(4)用 Si+CsI(Tl)望远镜探测器测量了弹性散射角分布并提取核反应总截面 σ_R.

2.3 中能重离子中心碰撞研究

戴光曦等在筒形通用散射室中选用核反应 47MeV/u^{12}C+^{159}Tb、^{197}Au 和 ^{209}Bi 测量了裂变碎片、轻粒子、复杂粒子和 γ 等产物共 100 余个参数，以研究上述反应中线性动量转移，热核巨偶极共振，二、三裂变和核温度.

在该实验中，放置两块灵敏面积为 25 × 20cm^2 的双栅位置灵敏雪崩室 PPAC(位置分辨为 4mm)做两体裂变互补裂片的关联测量(包括位置和飞行时间);并使用两个 Φ100mm × 100mm 的 NaI(Tl)探测器在与裂

片符合的情况下探测高能 γ;与此同时，用多层天然白云母裂变碎片经迹探测器夹以多层铝箔测量了不同入射能量的裂片径迹.

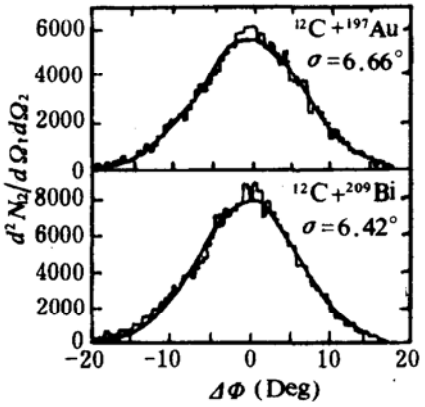

图6　两体裂变出射裂片共面歧离分布及高斯拟合

现进行实验数据分析，研究范围涉及:

(1)核温度测定

两体裂变碎片偏离反应平面的出反应平面角分布(由于粒子发射的反冲效应)可以提供复合系统核温度的信息[11]. 用两块 PPAC 进行两体裂变互补裂片关联测量，得到其出反应平面角分布，用高斯函数拟合得到标准偏差 σ(图 6). 根据[12]，该标准偏差 σ 与单核子激发能间存在一线性关系 $\sigma=2.8\times E^*/A_c+1.1$(度)，$A_c$ 为复合系统质量数. 由线性动量转移测量值对弹核质量进行修正，得到复合系统单核子有效激发能 $(E^*/A_c)_{eff}$，从而提取三个反应中复合系统核温度分别为 4.72MeV、4.15MeV 和 4.00MeV.

(2)线性动量转移 LMT 研究

两块 PPAC 测定两体裂片(关联)位置和飞行时间，由关联裂片速度 V_1、V_2 和发射角 θ_1、θ_2 并根据 $lmt=\mathrm{LMT}/P_0=V_1V_2\sin(\theta_1+\theta_2)/V_{cm}(V_1\sin\theta_1+V_2\sin\theta_2)$，定出线性动量转移 LMT 与入射动量 P_0 的比值 lmt[12]. 平均线性动量转移 $\langle lmt\rangle$ 约为 0.66，对应于单核子线性动量转移值 195MeV/c.u.

(3)三裂变的观测和研究

三裂变发射机制、裂变断点形状和随激发能的变化是热核衰变和裂变物理研究的重要课题.

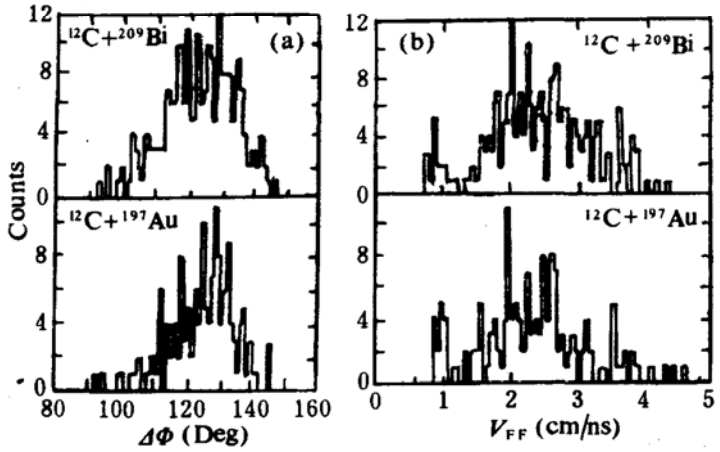

图 7　三裂变中两裂片夹角分布(a)和相对速度分布(b)

用质量阈为 40 的天然云母裂变碎片径迹探测器观测到了 $^{12}C+^{209}Bi$ 反应中的三裂变事件. 其三叉径迹表明品字形裂变断点似乎更为可能. 此外，入射能由 20MeV/u 增高到 45MeV/u 时，三裂与二裂比值由 0.8%上升至 2%.

用两片 PPAC 在中心极角 67.5°、辐角差 120° 的几何安排下测定三裂变裂片夹角分布和相对速度分布. 发现相对速度分布 V_{FF} 在 2.5cm / ns 处成峰，而质心系中两裂

片夹角分布 $\Delta\Phi$ 在 130° 成峰(图 7). 说明三裂变裂片并非均来自对称三裂.

(4)热核巨偶极共振 GDR 观测

发射高能 γ 光子的高激发能集体激发态——巨偶极共振态的观测是热核研究中又一个重要课题. 巨共振消失的临界温度的研究尤为引人注目[13]. 在该临界温度之上，由于粒子发射的竞争，不再产生热核巨共振集体激发.

该实验在 $^{12}C+^{197}Au$、^{209}Bi 反应中，使用两个 NaI(Tl)探测器在与裂变碎片符合情况下探测 γ 谱. γ 谱中未观察到巨偶极共振成分. 如前所述，相应核温度分别为 4.15MeV 和 4.0MeV. 该核温度是否已超过临界温度? 戴光曦等在上述实验基础上,已完成 BGO 探测器制作和测试,拟进一步研究.

北京大学技物系江栋兴教授等已完成 47MeV/u $^{12}C+^{197}Au$、^{209}Bi 裂变碎片与发射粒子关联测量，数据分析即将完成.

3 远离稳定线新核素合成、衰变性质、核结构和生成机制研究预研

远离稳定线核的合成和衰变性质、核结构的研究是重离子物理前沿领域之一. 远离核呈现一系列奇异衰变性质和核结构特征. β–P、β–2P、β–3P、β–(1～4)n、β–α 和 β–F 等缓发粒子发射、直接质子发射、单能重离子放射性、轻丰中子核的中子晕现象和高自旋超形变现象等，是近年来远离核研究中的重要成果[14]. 合成和研究在实验和理论上有重要意义的特定核区的新核素，对于检验和发展在稳定线附近建立起来的核结构模型，探索原子核稳定性极限，研究在不平衡的核子环境中(丰或缺中子)的核形状、大小 壳模型幻数、低位能级和高自旋核结构，发展快速质量、电荷分离技术、稀少放射性核素探测鉴别技术等具有重要意义. 随着未知核素越来越远离稳定线，生成截面越来越低，寿命越来越短，加上某些特殊化学物理性质的限制，分离鉴别难度越来越大，而核素图上尚有广阔区域有待开垦，所以这是一个颇具竞争性的领域.

该项目将在三个核区重点开展新核素合成和研究[15].

(1)很重质量($A>170$)丰(缺)中子区，包括超铀缺中子区

$A>170$ 丰中子区位于裂变区之外，由于缺乏有效的生成机制和分离手段(重产物反冲能极低)，该区域尚存在大块空缺. 理论预言在该区域 $Z=82$，$N=126$ 附近可能存在 β 延迟中子先驱核岛，和 $N=126$ 中子壳谱学研究的进展已展示出该区域核合成和研究的重要意义.

该项目拟用多核子转移反应生成该区域新核素，并使用熔融靶技术(包括配有熔融靶离子源的在线同位素分离器)、多层靶室氦喷传输加化学分离技术、跑兔靶和粉末靶加化学分离技术等对产物进行分离，测量 γ，γ–γ，β–$\gamma\beta$ 端点能量和 $t_{1/2}$ 对分离产物进行鉴别.

超铀缺中子区涉及奇异重离子放射性，对于自发裂变的异常稳定性和重质量区核形变等是一个十分有意义的研究课题. 该项目拟使用 ^{40}Ar 等重束在 Bi、Tl 和 Hg 等重靶上生成超铀缺中子新核素，或使用 ^{129}Xe 轰击 ^{233}U 等缺中子重靶，通过准弹和深度非弹过程生成该区域新核素. 拟用氦喷转盘技术测量 α 衰变母子体关系、α–kX 符合和衰变 γ 以鉴别核素.

(2)高温难熔元素同位素的分离鉴别

该类未知同位素的高温难熔性质和短寿命极大地限制了它们的分离和鉴别. 此外，大量核素缺乏谱学数据. 本项目拟用氦喷带传输系统和 X–γ 符合法(包括 γ–γ，β–γ 测量)鉴定和测量未知核素. 现正在研制用于激光共振电离 Z 选择的激光离子源，以实现对高温难熔同位素的分离.

(3)$A<70$ 轻质量区 β 延迟质子先驱核的合成和研究

该区域奇异核合成和研究已获巨大进展[14]. 但是，对未知奇异核的寻找、衰变方式的研究以及补充已知核的谱学数据仍然是引人注目的工作. 本项目拟对 $A=4n+1$, $T_z=-3/2$ 系列和 $A=4n+3$, $T_z=-3/2$ 系列做进一步的工作.

该项目在 HIRFL 上开展的预研工作提供了关于新核素生成截面的实验数据，为弹靶系统的选择和技术线路的改进等提供了依据;并研制试验了分离鉴别专用技术和设备. 主要的预研工作，包括在高能所质子直线加速器和上海所回旋加速器上的两个实验预研结果如下:

(1)重质量区新核素合成——近靶余核生成和鉴别预研

(a)44MeV/u $^{12}C+^{133}Cs$、^{197}Au 和 ^{209}Bi 近靶产物同位素分布测定. 赵之正和谢秀君等用常规化学方法分离反应产物并用衰变 γ 谱学法鉴别，发现靶减少 2 个质子的多核子转移截面为数十微巴量级. 在 $^{12}C+^{197}Au$ 反应中，分离鉴别出了靶减少 2 个质子生成的丰中子核 $^{195m}Ir(t_{1/2}=3.8h)$，其生成截面达 100μb.黄业成等在在线同位素分离器上测定了 47MeV/u $^{12}C+Ta$ 反应中多个质量核素的产额，表明与低能相比，类靶产物有较高的生成截面.

(b)47MeV/u $^{12}C+^{93}Nb$、^{181}Ta 和 ^{197}Au 靶碎片质量分布和同位素分布测量.李文新等用放化方法测量了重靶余核，证明在中能重离子引起的靶碎裂中，生成新缺中子重同位素的截面可达数百微巴.

(c)新同位素 ^{208}Hg 的寻找. 新丰中子核素 ^{208}Hg 的衰变可提供 ^{208}Tl 的能级结构信息，而 ^{208}Tl 可视作双闭表核 ^{208}Pb 质子空穴态和一个中子粒子态的耦合，具有重要谱学意义. 张立等采用 47MeV/u $^{12}C+^{208}Pb$ (2g/cm^2)反应，试图通过多核子转移反应生成 ^{208}Hg.使用了厚熔化靶技术，使产物从厚的熔化 Pb 靶中扩散出来，并对 Hg 元素进行选择性传输和收集，然后测量其衰变 γ. 实验结果没有观测到 ^{208}Hg，给出其生成截面上限为 1μb，半衰期上限为 2900s. 拟改用丰中子炮弹 ^{18}O 以增大反应 Q 值，从而提高反应截面，并在在线同位素分离器上研制在线熔化靶离子源,以实现在线快速质量分离.

(d)合成新同位素 ^{202}Pt 的尝试.赵之正、谢秀君等选用反应 47MeV/u $^{12}C+HgO$ (1g/cm^2 粉末靶)，欲由靶 ^{204}Hg(丰度 6.9%)减少两个质子的多核子转移反应合成 ^{202}Pt(半衰期预言值 1.5～44h). 对产物进行常规化学分离后，做 γ、γ-γ 测量，并使用 ΔE-β 探测器和 Ge γ 探测器做 β-γ 符合测量以抑制对缺中子产物(主要通过 EC 衰变)γ 射线的探测. 实验结果未发现 ^{202}Pt. 拟进一步提高化学分离效率，提高束流强度，改用同位素 ^{204}Hg 靶.

(2)^{176m}Ta 的探索

徐树威等在上海所试验了氦喷咀带传输系统，并在反应 $^{175}Lu(\alpha, 3n)^{176m}Ta$ 中，观察到该同质异能态的一些迹象，也证明了氦喷咀带传输系统和 X-γ 符合法用于高温难熔同位素鉴别的有效性.

(3)轻质量区 β 延迟质子 $A=4n+3$, $T_Z=-3/2$ 系列的进一步探索

徐晓冀等在高能所质子直线加速器上使用多层靶室氦喷传输系统和转盘装置，用 ΔE-E-E_R 望远镜探测器，观测到了产生 $A=4n+3$, $T_Z=-3/2$ 系列的下一个先躯核 ^{19}Na 的可能迹象.

4　在HIRFL上开展的中能重离子束应用研究

荷能重离子在固体物质中淀积能量，发生相互作用，其表面辐射效应和体辐射效应可导致辐照损伤，也可由此实现材料改性. 重离子辐照模拟聚变堆第一壁材料的快中子辐照损伤,几百 MeV/u 重离子模拟研究航天器中半导体器件受宇宙射线的单粒子干扰，快重离子辐照的超导材料研究,MeV/u

能量重离子辐照绝缘体薄膜以制备用途广泛的微孔膜,重离子辐照材料表面精微加工应用研究已获得进展并展现出广阔前景[16].

此外，重离子是高 LET 粒子；具有 Bragg 峰，同 γ、X、电子和中子辐照相比，有较高的生物突变率，对于相同染色体畸变率，细胞损伤不易修复. 重离子辐照并具有离子种类、电荷态、能量和剂量等多种诱变参数；加上其能量淀积有高的空间分辨性，可实现对细胞或基因的定点定位损伤. 因此,中能重离子束具有良好的定向诱变条件,在诱发生物学、辐照育种中有独特优势.

利用 HIRFL 提供的中能 ^{12}C 束和配有高低温装置(4K～800K)的重离子辐照装置[19]，在上述两个应用领域开展了下述研究，为聚变堆第一壁材料研究和诱变育种提供了初步实验数据.

(1)中能 ^{12}C 束对铁素体钢 HT-9 和纯镍辐照肿胀实验

金运范等运用内转换电子的穆斯堡尔谱学 (CEMS)，对 42.5MeV/u ^{12}C 束辐照 HT-9 不锈钢(5 片 240μm 样品)，进行了相分析[17]. 辐照总剂量为 $1.33\times10^{15}n/cm^2$，实验结果发现未辐照试样与辐照试样之间，不同能量 ^{12}C 束(不同损伤截面)辐照试样之间，均观察到了穆斯堡尔谱的差异，辐照样品(特别是高损伤截面样品)顺磁相成分增加. 此外，观察到铁磁相超精细磁场值的变化，反映了 Fe 原子近邻和次近邻的变化. 从图 8 可以看出，随损伤截面增大，超精细场分布范围逐渐收缩，分布峰位向减小超精细场方向移动，且分布峰宽减小. 上述现象已被解释为中能 ^{12}C 引起的合金元素偏析.

徐荣辉等用正电子湮没寿命法研究了 42.5MeV/u ^{12}C 束在纯镍材料(15 片 75μm 样品)中的损伤分布[18]. 正电子湮没平均寿命值表征缺陷态强弱. 由实验得到了损伤分布，而且理论计算的损伤能沉积曲线和正电子湮没平均寿命值曲线，以及正电子湮没捕获率曲线基本符合.

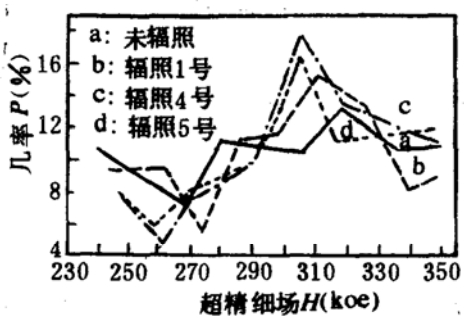

图 8 试样的铁磁相超精细磁场几率分布

(2)中能 ^{12}C 辐照铁氧体 $Y_{1.6}$、$Ca_{1.4}$、$Sn_{0.5}$、$V_{0.45}$、$Fe_{4.05}$ 和 O_{12} 的非晶化研究

这是南京大学夏元复教授主持的实验，数据分析即将完成.

(3)50MeV/u $^{12}C^{6+}$离子对植物细胞遗传学效应研究

卫增泉等(近物所、兰州大学、甘肃省农科院) 用能量为 50MeV/u, 电荷态为 6^+ 的 ^{12}C 束辐照小麦、山黧豆、白兰瓜和枸杞等五个植物品种种子，取得 66 盘样品. 研究了小麦发芽势随辐照剂量的变化、染色体结构畸变等亚显微结构变化和植物细胞 DNA 损伤与修复及细胞突变变异现象[19].

该实验观测了辐照种子萌发后小麦胚芽鞘高度、山黧豆幼苗高度、白兰瓜主根长度和枸杞胚根长度随辐照离子流密度的变化，并得到了致死剂量. 辐照小麦干种子后观察到的根尖细胞中出现的染色体畸变类型有：微核、染色体桥、落后染色体、染色体断片、游离染色体和畸形核，且畸变率由 0.5‰增加到 179‰. 辐照小麦干种子经萌发后切取主根在电镜下观察到了主根中细胞的一系列亚显微结构变化，包括线粒体形态异常、叶绿体内基粒发育不良、高尔基体发达、出现特有次级溶酶体和淀粉粒变大等. 其中，高尔基体是溶酶体的重要来源，高尔基体发达，小泡增多，以及出现次级溶酶体，有利于消除细胞内破损细胞器，是一种辐射损伤修复. 显然，进一步研究这种辐照损伤修复的规律，提高诱发突变效率，对于

诱变育种具有重要意义.

参 考 文 献

1 Wei Baowen, et al. Chinese Science Bulletin, 1989, 34 : 1057

2 Wang YiFang , et al. IMP Ann. Rep., Bijing : Atomic Energy Press, 1990, 1

3 Bondorf J P. Nucl. Phys. 1988, A488 : 31C

4 Guerreau D. A talk at Inter. Schopl on Nucl. Phys. Les Houches, 1989

5 Li Wenxin, et al. Proc. of Inter. Symp. on Heavy Ion Phys. and Its Appl., Lanzhou, 1990, 158

6 Sa Benhao, et al. Phys. Rev., 1989, C40 : 2680

7 Chitwood C B, et al. Phys. Rev., 1986, C34 : 858
Richert J, et al. Nucl. Phys., 1987, A466 : 132

8 Cugnon J. Phy. Lett., 1984, 135B : 374

9 Pochodzalla J, et al. Phys. Rev., 1987, C35 : 1695

10 Lynch W G.Nucl. Phys., 1988, A488 : 359C

11 Dai Guangxi, et al. Proc. of Inter. Symp. on Heavy Ion Phys. and Its Appl. Lanzhou, 1990, 215

12 ibid.

13 Gaardhoje J J, et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 59 : 1409

14 Proceedings of the Fifth Inter. Conf. on Nucl. far from Stab., Canada, 1987
Detraz C, Vieira D. Ann. Rev. Nucl. Sc. 1989

15 Luo Yixiao, et al. Proc. of the Inter. Symp. on Heavy Ion Phys. and Its Appl. Lanzhou, 1990, 227

16 Hou Mingdong. the same as Ref. 11, P462

17 金运范等. 核材料会议文集——动力堆燃料材料的辐照和腐蚀, 1989, 90

18 徐荣辉等. 同上, P100

19 卫增泉等. 核技术, 1991, 14(6) : 380

Experimental Studies of Intermediate Energy Heavy Ion Physics and Its Applications at HIRFL

Luo Yixiao

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

Abstract The scientific activities and achievements made at the Heavy Ion Research Facility Lanzhou (HIRFL) during the past three years are summarized. In addition to the brief introduction of the operation status of HIRFL and the development of the secondary beam line and an ECR ion source, the paper describes the experimental studies of intermediate energy heavy ion–induced reactions, the investigation of hot nuclei, the synthesis and study of nuclei far from stability and the applications of heavy ion beams at HIRFL.

Key Words HIRFL, secondary beam, hot nucleus, intermediate energy heavy ion.