

兰州重离子研究装置实验终端介绍

中国科学院近代物理研究所

兰州重离子研究装置 (HIRFL), 亦称兰州重离子加速器, 是我国规模最大、可以把氢到铀的全离子加速到高能的重离子研究装置。它由 ECR 离子源、1.7 米扇聚焦回旋加速器 (SFC)、大型分离扇回旋加速器 (SSC)、新建的冷却储存环 (CSR) 主环和实验环、放射性束流线、实验终端等主要设施组成, 用以开展重离子物理及其交叉学科研究。

中国科学院近代物理研究所作为 HIRFL 的依托单位, 负责 HIRFL 的正常运行和维护任务。1991 年 8 月, 兰州重离子加速器国家实验室成立并向国内外用户开放。目前, HIRFL 每年开机运行 7000 多小时, 实验束束时间 4000 多小时, 可完成用户实验 150 多项。已在 HIRFL 上建成并投入运行的实验终端共有 20 个, 终端名称及负责人等信息见下表。用户在提交束流申请书前, 请认真了解终端可开展实验的研究方向, 以便合理地提出实验申请。

HIRFL 实验终端信息表

序号	终端名称	简称	负责人	邮箱
1	高能微束装置	TR0	杜广华	gh_du@impcas.ac.cn
2	原子物理实验终端	TR1	张少锋	zhangshf@impcas.ac.cn
3	充气反冲核谱仪	TR2	甘再国	zggan@impcas.ac.cn
4	高温-应力材料辐照效应实验终端	TR3	王志光	zhgwang@impcas.ac.cn
5	浅层治疗及生物辐照终端	TR4	李文建	wjli@impcas.ac.cn
6	单粒子效应实验终端	TR5	刘杰	j.liu@impcas.ac.cn
7	核孔膜辐照终端	TR6	莫丹	modan@impcas.ac.cn
8	在束 γ 实验装置	TL1	柳敏良	liuml@impcas.ac.cn
9	中能辐照终端	SFC-T1	张崇宏	c.h.zhang@impcas.ac.cn
10	放射性束流线 1 号线	RIBLL1	王建松	jswang@impcas.ac.cn
11	放射性束流线 2 号线外靶终端	CSRm-ET3	孙志宇	sunzhy@impcas.ac.cn
12	CSRe 原子质量谱仪	CSRe-AMS	张玉虎	yhzhang@impcas.ac.cn
13	CSRe 内靶 X 射线装置	CSRe-IT	于得洋	d.yu@impcas.ac.cn
14	核数据实验终端	CSRm-ET2	陈志强	zqchen@impcas.ac.cn
15	深层治疗及高能生物学辐照终端	CSRm-ET1	李强	liqiang@impcas.ac.cn
16	CSRm 双电子复合实验装置	CSRm-DR	马新文	x.ma@impcas.ac.cn
17	CSRe 双电子复合实验装置	CSRe-DR	马新文	x.ma@impcas.ac.cn
18	介质环境材料辐照协同效应实验终端	SFC-T2	王志光	zhgwang@impcas.ac.cn
19	核化学实验终端	SFC-T3	秦芝	qinzhi@impcas.ac.cn
20	CSRe 通用实验终端	CSRe	冒立军	maolijun@impcas.ac.cn

1.高能微束装置

高能微束装置 (TR0) 是将 HIRFL 提供的几 MeV/u 至 80MeV/u 的束流聚焦到微米量级, 用于对样品进行准确定位和精确剂量 (精确至离子个数) 的辐照和分析装置。装置采用两台 45 度的垂直偏转磁铁辅以四极透镜, 将重离子束流导向地下室, 再用高梯度三组合四极透镜强聚焦形成微米尺寸束斑, 束流沿垂直方向辐照样品。该装置可使用束流能量范围宽、粒子种类多, 具备大气辐照分析和在线显微定位平台。

TR0 可以开展单离子辐照、单粒子效应分析、辐照效应材料分析、活细胞在线成像、活体动物和材料的微区辐照、信息安全攻击等多学科交叉实验研究。它是目前世界上能量最高的微束装置。

2.原子物理实验终端

原子物理实验终端 (TR1) 主要利用反应显微成像谱仪进行中高能区原子分子碰撞动力学实验。反应显微成像谱仪利用电子探测器、反冲探测器以及散射探测器的三重甚至四重符合测量, 对每次发生的离子与原子分子碰撞的运动学信息进行完全的测量。根据测量到的运动信息来推断碰撞的动力学性质, 进而可以在原子物理的层面对量子力学各种模型以及基本假设进行最精确的验证。例如, 可以对离子原子碰撞中的俘获、电离、激发以及它们共同参与的复杂反应过程的全微分截面进行测量; 甚至可以对局域实在性、相干性等涉及量子力学基本哲学原理的问题进行验证。

3.充气反冲核谱仪

充气反冲核谱仪 (TR2) 由一台二极偏转磁铁和三台四极聚焦磁铁组成, 以氦气作为工作气体, 拥有转动靶装置、束流调制装置、焦平面气体探测器、位置灵敏型硅探测阵列、全数字化电子学数据获取系统等实验装置。

TR2 主要用于重离子熔合蒸发反应产物的分离、鉴别和测量等研

究工作。基于重带电离子可以在稀薄气体中形成平衡电荷态的特点，TR2 能够利用高强度二极磁场，将薄靶中反冲出的熔合蒸发产物在飞行中进行快速分离，使其注入位于谱仪焦平面位置的低本底探测系统中，并对产物的衰变性质等特征进行测量。

TR2 可开展的研究工作主要有重核和超重核素的合成研究、重离子熔合蒸发反应研究、奇异核素的衰变谱学研究以及重核素的放射化学研究等。

4.高温-应力材料辐照效应实验终端

高温-应力材料辐照效应实验终端（简称 TR3）基于扇聚焦回旋加速器（SFC）和分离扇回旋加速器（SSC）而建成，可进行变温、应力加载等模拟多种工况的材料辐照效应研究。

TR3 可提供束流参数如下：

- ◇离子种类：p-U
- ◇能量范围：9.5~100 MeV/u
- ◇能量发散度： $\leq 1 \times 10^{-3}$
- ◇连续束流强：0.1~3.5 e μ A
- ◇配有 X、Y 方向束流电磁扫描系统

TR3 参数如下：

- ◇真空度： $\geq 1 \times 10^{-5}$ Pa
- ◇X-Y 方向的电磁扫描频率：0~100 Hz
- ◇辐照温度：室温~1200℃，温度稳定性为： ± 2 °C
- ◇拉/压应力加载系统：最大载荷 1200 N，加载精度为 1 N
- ◇配备室温旋转多样品台
- ◇辐照区域：40×40 mm²

5.浅层治疗及生物辐照终端

浅层治疗及生物辐照终端（TR4）由照射装置、样品辐照转动系统、剂量监测系统、控制系统、被动降能系统、辐射防护在线监测系

统等多个部分组成，可以使用不同离子种类、不同能量、不同传能线密度、不同剂量率的重离子开展诱变育种及重离子治癌基础研究。终端采用半自动化平台运行，具有照射精准、换样效率高等特点，不但可以开展重离子治疗人体浅层肿瘤临床试验研究，也可以满足各类生物样品（包括植物种子、组织、枝条；哺乳动物细胞、小型动物；微生物悬浮细胞、孢子等）的辐照处理需求。

6.单粒子效应实验终端

单粒子效应实验终端（TR5）主要用于宇航器件单粒子效应检测试验。TR5建成后完成了多项型号任务、核高基项目的单粒子效应检测试验，与国内五十多家单位建立了合作关系。

TR5具有真空和大气环境下的单粒子效应检测能力，真空辐照试验采用真空预抽副靶室和从大气到真空的小样品快速更换设计，节省了样品的更换时间，大大提高了束流的利用率。TR5具有束流扫描装置，最大扫描面积为 $60\times 60\text{ mm}^2$ ；具有大气和真空环境四维定位台、探测器直线驱动装置，可变狭缝控制等功能，能够远程进行样品的定位、探测器控制、数据获取及束斑的调节；能够进行注量、能量、均匀度的测量。

7.核孔膜辐照终端

核孔膜辐照终端(TR6)专门用于核孔膜的辐照生产。TR6主要包括真空系统、扫描磁铁、扫描电源、膜传动装置、束流探测器和自动控制六个部分。TR6能在大气条件一次下辐照6层薄膜，最大走料速度为每分钟2米。自动控制系统能根据束流强度大小，调整走料速度，从而实现核孔膜的均匀辐照。目前该终端完成了多次生产任务，提供医疗输注膜和防伪膜几十万平米，该终端辐照的核孔膜产品孔径均匀，锥度很小且孔形规整，产品性能达到医用过滤、食品饮料、锂离子电池等精密过滤膜的要求。整个系统设计指标和生产能力均达到国际先进水平。

8.在束 γ 实验装置

原子核辐射几乎都伴随有衰变过程。因此，大型阵列是当今核物理研究的基本探测装置，为世界各大实验室所必备。中国科学院近代物理研究所在“十二五”期间初步搭建起 32 个单元的大型阵列测量平台，包括 16 台高纯锗、8 台 Clover 和 8 台 LaBr_3 探测器，拥有亚洲最高的探测效率，并实现谱学和寿命测量同时进行，完全可支撑当今核谱学前沿研究。另外，我们还为大型阵列研制了自动的冷却系统和高速、大容量的电子学与获取系统。此阵列现置于 TL2 终端，可结合实验在束谱学实验；也可与 RIBLL1 和充气谱仪结合研究放射性核素和超重核。

9.中能辐照终端

中能辐照终端是扇聚焦回旋加速器（SFC）束运线上的一个实验终端，简称 SFC-T1。

SFC-T1 主要功能：①离子能量梯度衰减：将 SFC 提供的单一动能的离子进行梯度减能，从而实现沿样品深度方向离位损伤和注入原子的准均匀分布。②样品的制冷/加热控制：具有液氮制冷样品台、高温样品台（室温-600oC 范围连续可调），实现对样品温度的有效控制。具有升降机构，可每次装 5 块样品依次辐照。③散射束低剂量辐照：实现小于 10^{11} ions/cm² 的宽广剂量范围的辐照。

SFC-T1 可开展实验研究内容：①核能装置候选材料在强辐射环境的损伤行为研究；②光电子材料辐照效应的研究。

10.放射性束流线 1 号线

放射性束流线 1 号线（RIBLL1）全长 35m，由产生、分离、鉴别和聚焦系统组成。它的设计集中了国际上已有 4 条中能重离子放射性束流线的优点，首次采用双段反对称双消色差传输结构，提高了对放射性束的分辨能力，质量分辨（ $A/\Delta A$ ）大于 200，动量接收度为 10%，最大磁刚度 4.2Tm。可提供上千种短寿命放射性核束。

RIBLL1 已为国内外用户提供了多种短寿命放射性核束，开展了一系列放射性核束物理研究，取得了一批重要成果，比如证实了一批具有质子晕、中子晕结构的奇异核素，首次研究了 ^{12}Be 的分子态结构， ^{18}N ， $^{21}\text{N}\beta$ 延发谱学， ^{28}P ， ^{29}S 的双质子放射机制， ^{40}Ar 的弹核碎裂机制， ^8B 弹性散射等。

11.放射性束流线 2 号线外靶终端

放射性束物理是当前核科学最具活力的前沿研究领域之一，而放射性束流线 2 号线外靶终端 (CSRm-ET3) 正是促进这一研究的强有力工具。终端拥有包括大接收度偏转磁铁和中子阵列探测器、CsI 阵列 Gamma 探测器、带电粒子径迹 (MWDC) 及飞行时间阵列探测器等大型探测设备及配套的先进电子学和获取系统，可以同时实现对带电粒子、中子和 gamma 等的高精度探测。利用 CSRm 提供的中高能重离子束流或 RIBLL2 产生的次级束流，在终端可以实现核反应产物的完全动力学测量，从而开展以短寿命核素性质及反应机制和核物质性质为主的实验研究工作，促进相关领域的研究发展。

12.CSRe 原子质量谱仪

CSRe 原子质量谱仪 (CSRe-AMS) 于 2007 年建成，它包括 3 套高精度的飞行时间探测器系统、2 台采样率分别为 80GHz 和 100GHz 的数字示波器、1 套谐振腔型肖特基探测器系统以及基于 GPU 并行运算的在线数据处理系统，主要用于短寿命放射性核素的精确质量测量。

近代物理研究所核质量测量团队利用 CSRe-AMS 已开展多项等时性质量测量实验。2013 年始，在 CSRe 直线段加装了两套飞行时间探测器，使 CSRe-AMS 实现对离子飞行速度的直接测量，并提高对储存离子的回旋频率分辨能力；发展电子冷却技术，在非等时性模式下，利用肖特基探测器实现短寿命核素的精确质量测量和衰变性质测量。

13.CSRe 内靶 X 射线装置

CSRe 内靶 X 射线装置 (CSRe-IT) 由团簇源、碰撞室和收集级三部分组成。预冷至露点附近的气体由 Laval 喷嘴注入真空腔体,并在喷射过程中通过绝热膨胀冷却到露点以下,降低横向速度并形成微小团簇。经四级准直光阑后形成直径约 3~5 毫米的团簇束,和储存环中的离子束交叉碰撞,未反应的靶束被收集级抽走。该装置可以保证在 5×10^{-9} Pa 的背景真空条件下,提供等效厚度约为 10^{13} atoms/cm² 的 Ne、Ar、Kr、Xe、N₂ 和 10^{12} atoms/cm² 的 H₂ 团簇束。碰撞靶室在多个角度配有铍窗和半导体 X 射线探测器,可以进行高能、高电荷态重离子与原子碰撞的 X 射线谱学测量,开展如辐射电子俘获、原子内壳层多重电离等研究。

14.核数据实验终端

2011 年,为了开展加速器驱动次临界系统 (ADS) 散裂靶相关核数据测量,在兰州重离子加速器冷却储存环上建成核数据实验终端 (CSRm-ET2), CSRm-ET2 主要包括用于轻带电粒子与中子测量的 ADS 核数据测量装置、用于散裂靶中子学性能研究的水浴中子活化测量装置及用于轻带电粒子与中等质量碎片测量的 PISA 装置 (由德国 Julich 研究中心赠送)。

CSRm-ET2 可以开展中高能核反应、离子束辐照、离子束照相等实验研究。利用 CSRm-ET2 已经开展了 ADS 散裂靶相关的散裂反应中子能谱测量、中子学性能研究及质子束成像等实验。它是目前国内唯一的高能质子束实验终端。

15.深层治疗及高能生物学辐照终端

深层治疗及高能生物学辐照终端 (CSRm-ET1) 是在兰州重离子加速器冷却储存环主环 (CSRm) 上建成的一条水平束辐照终端,配备有被动式及主动式束流配送系统,可提供从质子到铀的全离子束流辐照,照射野最大可达 20cm×20cm,照射野均匀性在 90% 以上。

CSRm-ET1 不仅可以从事重离子辐照生物学效应、重离子治疗技术及相关机理、空间重离子的辐射危害与评价以及重离子辐照效应等研究工作，也可以进行重离子前期临床治疗试验研究，是一个可从事生物、医学、材料等多学科交叉研究的辐照终端。

16.CSRm 双电子复合实验装置

双电子复合 (DR) 实验的过程是当一个自由电子与非裸的离子 Aq^+ 相互作用时，电子被共振俘获到离子能级形成双激发态，如果双激发态辐射退激后离子稳定下来，这就是离子的 DR 共振过程。

利用兰州重离子加速器冷却储存环主环 (CSRm) 双电子复合实验装置 (简称 CSRm DR) 开展 DR 实验是通过连续扫描电子冷却器 (可以提供的电子束最大能量为 35kV, 电子束能量扫描范围 $\pm 5kV$) 中电子相对于离子的能量并同时探测复合离子, 就可获得 DR 共振谱, 从而得到离子的共振能级信息。CSRm 上 DR 共振复合精细谱学技术可以开展天体物理相关的电子离子复合截面进行精确测量。

17.CSRe 双电子复合实验装置

双电子复合 (DR) 实验的过程是当一个自由电子与非裸的离子 Aq^+ 相互作用时，电子被共振俘获到离子能级形成双激发态，如果双激发态辐射退激后离子稳定下来，这就是离子的 DR 共振过程。

利用兰州重离子加速器冷却储存环实验环 (CSRe) 双电子复合实验装置 (简称 CSRe DR) 开展 DR 实验是通过连续扫描电子冷却器 (可以提供的电子束最大能量为 300kV, 电子束能量扫描范围 $\pm 30kV$) 中电子相对于离子的能量并同时探测复合离子, 就可获得 DR 共振谱, 从而得到离子的共振能级信息。CSRe 上 DR 共振复合精细谱学技术可以开展天体物理相关的电子离子复合截面进行精确测量; 高电荷态离子精细结构测量从而检验强场 QED; 放射性离子的精细谱学测量等等。

18. 介质环境材料辐照协同效应实验终端

介质环境材料辐照协同效应实验终端（简称 SFC-T2）基于扇聚焦回旋加速器（SFC）而建成，拥有高温蠕变应力辐照靶室和腐蚀/辐照协同靶室两套实验装置，可进行变温、应力加载、蠕变、介质环境等模拟多种工况的材料辐照效应研究。

SFC-T2 可提供束流参数如下：

- ◇可提供离子种类：p-U
- ◇能量：0.08~8.5 MeV/u
- ◇能量发散度： $\leq 1 \times 10^{-3}$
- ◇连续束流强：0.1~15 e μ A
- ◇配有 X、Y 方向束流电磁扫描系统
- ◇配有束流能量调节（降能）系统

SFC-T2 参数如下：

- ◇真空度： $\geq 1 \times 10^{-4}$ Pa
- ◇介质种类：液态金属如 PbBi、LiPb、Ga 和水、水汽、超临界水等。

- ◇介质温度：200~600 °C
- ◇介质流速：0~2.0 m/s
- ◇辐照区域：15×15 mm²

高温蠕变应力辐照靶室实验装置参数如下：

- ◇真空度： $\geq 1 \times 10^{-5}$ Pa
- ◇辐照温度：室温~1200°C，温度稳定性为： ± 2 °C
- ◇拉/压应力加载系统：最大载荷 1000 N，加载精度为 0.1 N。
- ◇位移实时测量系统：测量分辨率为 2 μ m
- ◇配备室温旋转多样品台
- ◇辐照区域：15×15 mm²

19.核化学实验终端

核化学实验终端 (SFC-T3) 是在扇聚焦回旋加速器 (SFC) 上建成的实验终端, SFC-T3 主要通过低能核反应进行核化学相关研究工作。

SFC-T3 已有的特色装置是基于“氦喷嘴传输技术+转轮收集探测装置”的重核在线分离鉴别系统和基于“在线等温气相色谱装置”的单原子气相化学测量系统。

SFC-T3 可开展的研究工作主要有重元素和超重元素的合成及其气相化学性质研究、超重元素的同族元素液相化学现在研究、低能核反应快化分离研究以及放射化学分离相关的重离子反应研究等。

20.CSRe 通用实验装置

CSRe 通用实验装置亦称兰州重离子加速器冷却储存环实验环 (CRSe), 它的周长 128.80 米, 最大接收能量 600MeV/u ($^{12}\text{C}^{6+}$) 和 400MeV/u ($^{238}\text{U}^{90+}$), 是集冷却、储存、内靶实验及高灵敏、高分辨测量等当代加速器先进技术于一体的多功能实验装置。电子冷却装置位于 CSRe 注入直线段, 可有效地将离子束品质提高一个量级以上。

CSRe 研究主要针对束流冷却装置参数的优化, 包括冷却装置纵向磁场参数的设置, 不同螺线管磁场强度比例的变化及电子枪参数的优化。通过参数的优化, 可以显著提高储存束流的品质, 为核物理及原子物理提供所需的束流条件。