

兰州重离子研究装置

综述及基本情况

兰州重离子研究装置（HIRFL），亦称兰州重离子加速器，包括电子回旋共振（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）、冷却储存环（CSR）主环和实验环、放射性束流线、实验终端等部分。

HIRFL 是我国规模最大、可以加速全离子的重离子研究装置，可提供多种类、宽能量范围、高品质的稳定核束和放射性束，主要技术指标达到国际先进水平。1991 年 8 月 13 日，原国家计委批准成立兰州重离子加速器国家实验室。目前，HIRFL 年运

行时间超过 7 000 小时，年供束时间约 5 000 小时，年提供不同能量、不同电荷态的离子种类 20 多种，已为国内外 200 多个用户单位提供了实验条件。

依托兰州重离子加速器，中国科学院近代物理研究所（以下简称“近代物理所”）取得了以新核素合成、短寿命原子核质量测量、重离子肿瘤治疗、辐照诱变育种等为代表的一批科技创新成果，为我国重离子科学与研究技术和区域经济发展作出了重要贡献。



兰州重离子研究装置局部图

研究进展与成果

兰州重离子研究装置的建设

1988年，国家大科学工程“分离扇重离子回旋加速器（SSC）”建成，其等时性磁场精度为 1×10^{-4} 、5个高频谐振腔，相对相位精度为 0.7° ， 100 m^3 整体式大型真空室真空度达 $2 \times 10^{-8} \text{ Torr}$ 。SSC是我国自主研制的首台大型中能重离子加速器装置（最高能量为 100 AMeV ），也是目前国际上正在运行的三大常温重离子回旋加速器之一。在最近20年中，为产生强流高电荷态离子束，成功研制出常温线圈、全永磁、蒸发冷却和全超导电子回旋共振离子源，在国际上形成独特的ECR离子源体系，一直保持着高电荷态重离子连续束流强度的世界纪录，引领着国际强流高电荷态离子束产生及ECR离子源技术发展。

依托兰州重离子加速器，1991年原国家计委批准成立兰州重离子加速器国家实验室，开启了我国重离子物理及其相关交叉学科的研究，形成了在国际上有重要位

置的重离子科学与技术研究基地。“兰州重离子研究装置”于1991和1992年获中国科学院科技进步奖特等奖和国家科技进步奖一等奖。赵红卫和孙良亭研究员曾分别获国际离子源领域最高奖“Brightness Award”和首届“Geller Prize”奖（为亚洲科学家首次获奖）。“超导高电荷态ECR离子源”获2008年度国家科技进步奖二等奖。



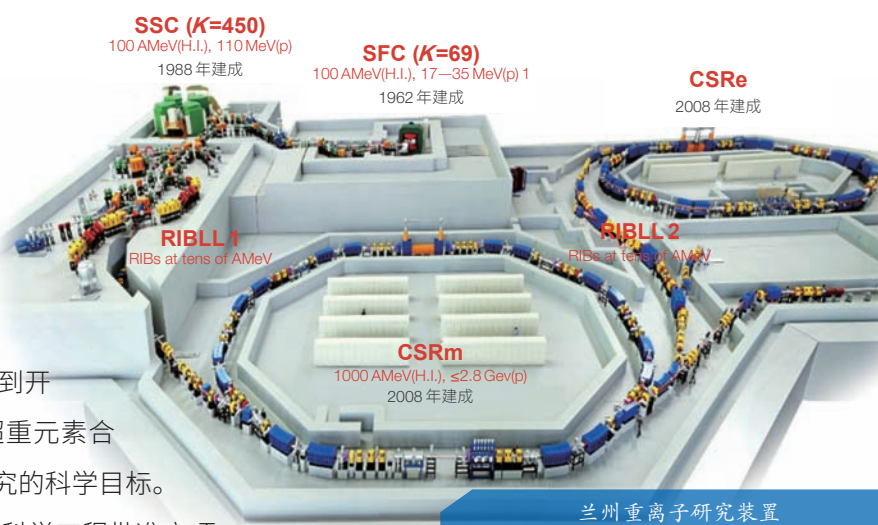
超导高电荷态ECR离子源

兰州重离子加速器冷却储存环工程

20 世纪 90 年代初，为使我国重离子物理研究在部分前沿领域继续保持国际先进，近代物理所提出在兰州重离子加速器上续建冷却储存环的计划并进行了预先研究，其目的是提高束流强度，拓宽束流种类，让重离子加速器再进一步达到开展放射性束核物理、高离化态原子物理研究、超重元素合成探索研究以及相关交叉学科和重离子束应用研究的科学目标。

1998 年，兰州重离子加速器冷却储存环国家重大科学工程批准立项；

1999 年通过中国科学院的初步设计及概算论证；2000 年开工建设，主要建设内容是主环、实验环、束流运输线、放射性束分离器、辐射防护系统等。兰州重离子加速器冷却储存环于 2005 年建成，2007 年出束，2008 年通过国家验收。该项目自主研制各类大型非标设备占设备总数的 70% 以上，主环加速离子的最高能量、束流强度和动量分散均达到或超过设计指标。兰州重离子加速器冷却储存环的建成使我国重离子物理及其交叉学科在国际前沿领域的激烈竞争中保持一席之地。该研究荣获中国科学院杰出成就奖，国家科技进步奖二等奖。

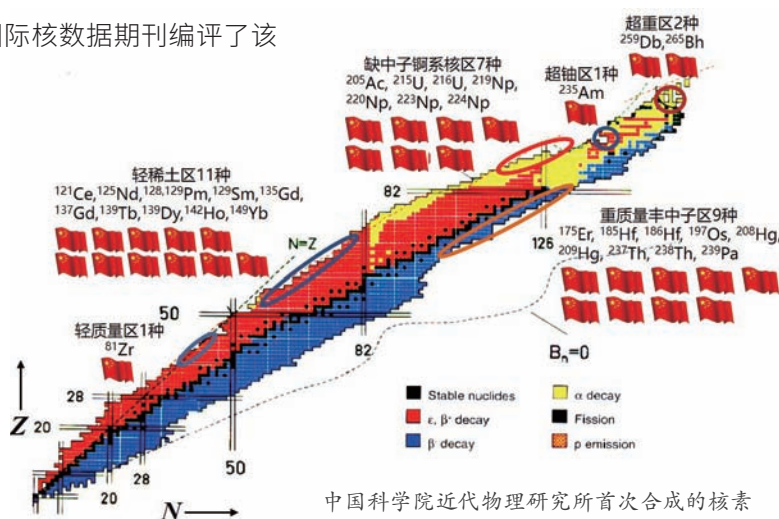


新核素合成研究获重要进展

近代物理所创新性地“质子-伽马”符合方法用于鉴别新核素，比国际通用方法灵敏度提高了约 50 倍，使我国在丰质子新核素合成研究方向上走到了国际最前列，合成了 11 种稀土新核素，观测了 22 种原子核的 β 缓发质子衰变，建立了 15 种原子核的 EC/ β^+ 衰变纲图，测量了一批原子核的寿命，发现极丰质子稀土原子核普遍具有大形变。研制了高效率的充气反冲核分离器，研发了单原子灵敏的探测鉴别技术，在极端缺中子的锕系核区，合成了 7 种新核素，提供了中子壳 N=126 在 Np 同位素中仍然存在的实验证据，观测到了核素图中最重的质子滴线外核素。

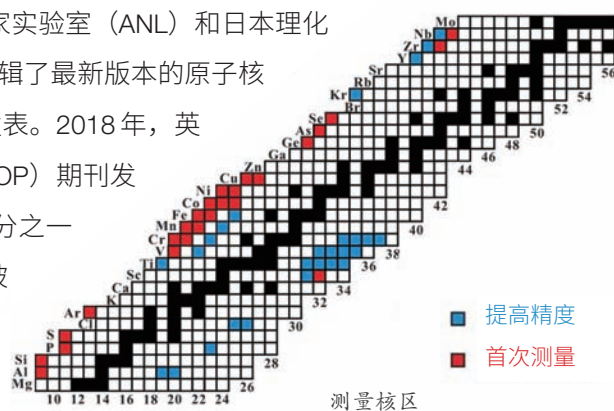
发表 SCI 论文逾百篇。30 种新核素被国际通用工具手册以及日、美、法等国的核素图收录并引用上百次。国际原子能机构、美国国家核数据库、国际核数据期刊编评了该

团队产生的核数据，累计篇幅 100 多页。“重质量丰中子新核素的合成、鉴别和研究”获 1999 年度国家自然科学奖二等奖；“中重缺中子区近滴线新核素合成及核结构实验研究”获 2007 年度国家自然科学奖二等奖；“重（轻）离子合成新核素及衰变性质、核结构和生成机制研究”于 2009 年入选新中国成立 60 周年“创新中国的 60 项科学成就”；研究工作先后 7 次入选年度中国十大科技进展、科技事件、科技成就、科技新闻等。



原子核质量精确测量

近代物理所在国际上率先实现了基于存储环“双飞行时间探测器质谱术”，开发了新的数据分析方法，先后测量和提高了 60 余种原子核质量，保持着测量寿命最短和精度最高世界纪录。自 2013 年，近代物理所负责主持国际原子核质量评估中心，权威发布原子核质量数据，受 AME 原子核质量数据等因素影响，《中国物理 C》（*Chinese Physics C*）影响因子从 2013 年的 0.819 攀升至 2017 年的 5.09。在 2014 年中国科学院组织的国际评估中，短寿命原子核质量精确测量被国际专家组评为“IMP has reached world top level in direct mass measurement”。经近代物理所联合法国核谱质谱中心（CSNSM-Orsay）、美国阿贡国家实验室（ANL）和日本理化研究所（RIKEN）等多家研究机构的研究人员共同努力，编辑了最新版本的原子核质量数据评价 AME 2016，于 2017 年 3 月在《中国物理 C》发表。2018 年，英国物理学会（IOP）对 2015—2017 年在英国皇家物理学会（IOP）期刊发表的所有论文进行评选，对被引次数在所属领域排名为前百分之一的论文通讯作者进行表彰，发布了“2018 英国物理学会高被引中国作者奖”，原子核质量精确测量的负责人王猛研究员入选该奖项。



重离子治癌从基础研究到产业化推广

重离子以其独特的深度剂量分布和高的相对生物学效应，在国际上被誉为 21 世纪最理想的放疗用射线。发展重离子治疗技术，符合建设健康中国，引领产业发展的国家战略。

近代物理所从 1993 年起利用兰州重离子加速器提供的中能重离子束，开展了重离子束辐射生物学效应及其机理研究，奠定了重离子束治疗肿瘤的基础。先后建成了体表和体内肿瘤治疗终端，成立了“甘肃省重离子束治疗肿瘤临床研究基地”。

2006 年 11 月—2014 年 1 月，近代物理所与兰州军区兰州总医院和甘肃省肿瘤医院合作，进行了 8 批 103 例体表肿瘤患者和 10 批 110 例体内肿瘤患者重离子临床治疗前期试验研究，取得很好的效果。

通过兰州重离子冷却储存环大科学工程的建设 and 重离子临床试验治疗的实践，近代物理所培养了一支高水平的重离子束治疗研究和治疗装置研发人才队伍，掌握了核心技术，申请了 60 余项专利，其中 2 项专利获第 13 届、16 届中国专利优秀奖，形成了一批自有知识产权，具备了自主研发重离子治疗专用装置并使之产业化的实力。2012 年开始建设武威、兰州示范装置。2019 年武威装置完成 46 例临床实验，9 月 29 日，国家药品监督管理局批准碳离子治疗系统注册上市。

