



## 科学背景

加速器是用人工方法把带电粒子加速到较高能量的装置，最初是作为探索原子核和粒子的性质、内部结构和相互作用等核物理研究的重要工具出现和发展起来的。

1932 年劳伦斯建成世界上第一台回旋加速器后，加速器技术得到迅速发展，加速器加速模式渐趋多样化，加速离子的能量也逐步提高，物理学方面的重大成果和大科学装置的联系也变得越来越紧密，20 世纪诸多诺贝尔物理学奖获得者的成果就是基于大科学装置的大型实验取得的。

随着大型粒子加速器、核探测技术和数据采集及处理技术的迅速发展，重离子核物理作为主要的前沿领域和推动力，引领原子核物理基础研究取得了长足的发展，其代表性的成就是美国、俄罗斯、德国合成了原子序数直至 118 的一批超重新元素，这对于探索原子核质量的极限、检验核壳模型理论、研究核结构及其相互作用规律具有重要意义。20 世纪 80 年代中期以来，美国、法国、德国、日本等国实现了放射性核束的产生和应用，开辟了放射性束物理这一新的前沿领域，发现了一批中子晕核、质子晕核和新的核衰变模式，拓广和深化了核物理研究的领域和内容，成为核物理发展的又一里程碑。随着加速质子能量进入 GeV 能区，为强子物理研究提供了有利条件，丰富了人们对夸克层次强作用物质结构及其性质的

认识。与此同时，将重离子束应用于其他学科，通过交叉融合，形成了高能量密度物理、高离化态原子物理、辐照材料和辐照生物、核天体物理等新的学科。

这一切表明，依托先进的重离子加速器大科学装置，已经形成一个以重离子核物理为核心，既可对微

观世界的强子、原子核、原子、分子、团簇，宏观世界的等离子体、天体、宇宙，进行深入了解和认识，又可在航天、能源、材料、生物、医学等领域直接造福人类的学科群。

## 装置综述

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中高能的重离子研究装置。它由电子回旋共振（ECR）离子源、1.7 m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（CSRm）、放射性束流线（RIBLL）以及实验终端等主要设施组成，开展重离子物理及其交叉学科研究。



兰州重离子研究装置整体布局图

中科院近代物理所于20世纪60年代初建成SFC，通过轻核反应实验为我国氢弹研制做出了贡献；70年代初，SFC经过改造可以加速碳、氮、氧等较轻的重离子，在我国率先开展了低能重离子物理基础研究。

1976年11月，经国家计委批准立项，近代物理所负责筹建中能重离子加速器系统，代号“7611”工程，即新建SSC。

1988年12月，近代物理所负责设计建造的HIRFL建成出束，其主要指标达到国际先进水平，获

得1992年国家科技进步奖一等奖。SFC+SSC联合运行可以把从碳到铀的重离子加速到中能，用以开展远离稳定线新核素合成、中低能重离子碰撞和热核性质、重离子束应用等研究。1991年8月经原国家计委批准，以HIRFL为基础成立“兰州重离子国家实验室”。

1997年7月，在HIRFL上建成放射性次级束流线流（RIBLL），它的设计首次采用两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，1999年获中科院科技进步奖一等奖。近代物理所以及国内外相关用户在RIBLL上发现了一批重要的中子皮核、中子晕核和质子晕核，开辟了我国放射性束物理研究的新领域。

随后，建成了具有全新结构的超导ECR离子源，它产生的具有代表性的高离化态重离子束的流强创造了国际同类离子源的最高记录，2007年获甘肃省科技进步奖一等奖。随着一批改造项目的实施，HIRFL的运行水平不断提高，2005年6月加速成功最重的铀离子束，使之成为国际上少数几个大型全离子加速器系统之一。

2007年12月，国家“九五”HIRFL-CSR工程全面建成，通过了工艺鉴定并完成了首批物理实验，2008年7月顺利通过国家验收。CSR工程超高真空束流管道总长约500 m、各类磁铁总重约1500 t、特殊大功率电源近300台，是一个集累积、冷却、加速、储存、高分辨核质量测量及内、外靶实验于一体的多功能加速器装置。HIRFL-CSR的建成及成功运行，大大提高了我国相关领域的自主创新能力，促进了我

国特别是西部相关企业的科技进步，培养和造就了一支能打硬仗的优秀中青年科技创新团队。2009 年 HIRFL – CSR 获中科院杰出科技成就奖，2012 年获国家科技进步奖二等奖。

经过近年来的一系列升级改造，HIRFL 的束流时间、束流指标、运行效率进入国际先进行列，现在 HIRFL 每年开机运行 7 000 多小时，年均提供 5 000 小时左右的各種重离子束流，迄今已经为国内外 200 多个

实验用户的重离子物理及交叉学科的基础和应用研究提供了 100 多种不同种类、不同能量的稳定核束和几百种放射性核束，较好地满足了实验研究的需要。同时与 14 个国家 40 多个著名大学、科研单位、高技术企业建立了合作关系，联合成立了国家实验室原子核理论中心、多个实验物理联合中心及青年科学家小组，开展了多学科合作研究，取得一系列重要科研成果。

## 研究综述

### 在 HIRFL 上取得的重要研究成果

多年来，各方面的实验用户在 HIRFL 上进行的重离子物理基础和应用研究、重离子加速器技术研究取得了一系列重要成果。2012—2014 年期间，依托 HIRFL，近代物理所获国家和省部级自然科学奖、科技进步奖等奖项 7 项，其中国家奖 2 项。

#### 短寿命原子核质量精确测量

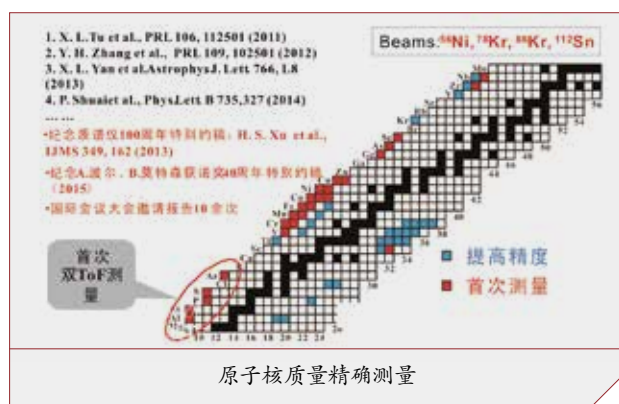
原子核质量是描述原子核的基本参数之一，当前核物理学的发展迫切需要精确测量远离稳定线或近滴线原子核的质量，核质量数据在核结构、核天体物理等方面也具有重要的应用价值。

近代物理所基于 HIRFL 建立等时性质量谱仪，首次实现等时性模式下同时测量核态的寿命和质量；首次测量了 35 个短寿命原子核的质量，对一批（大于 50 个）原子核的质量做了独立的实验测量，实验精度达到  $10^{-6}$ — $10^{-7}$ ；组织发布了原子质量评估数据，

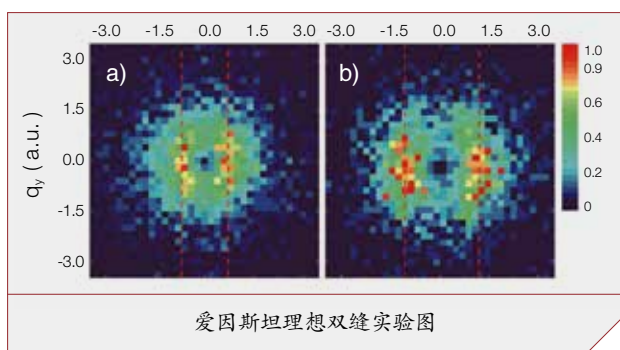
使近代物理所成为国际原子质量评估中心。在 X 射线暴快质子俘获过程中等待点核（ $^{64}\text{Ge}$ ）、Ca–Sc 循环，同位旋多重态质量公式适应性，fp 壳同位旋非守恒力等天体核合成过程及原子核壳层结构演化研究方面取得重大成果，并在 *Physical Review Letters* 上发表，在国际会议上做邀请报告 10 余次。在中科院组织的研究所国际评估中，该研究被专家评为国际领先（International leadership）。鉴于近代物理所在质量测量方面的水平和潜力，2013 年国际原子质量评估中心的工作已由法国质谱中心全面移交近代物理所。最新一期的 AME 原子质量数据已于 2012 年 12 月发表在 *Chinese Physics C* 上，也大大提高了我国科技期刊的国际影响力。

#### 极端条件下重离子物理研究

（1）原子物理。通过氢分子离子与氦原子碰撞产生的电离解离反应，实现了原子物质波的杨氏双缝干涉实验；首次实现爱因斯坦与玻尔论战中的“理想”实验，直接证实了玻尔对于双缝实验的论断，研究结果被编辑推荐为亮点文章发表在 *Physical Review Letters* 上。在储存环上实现了电子共振 DR 和 X 射线精细谱学实验及相对论离子束激光冷却实验；首次揭示了 HCl 作用表面时动能能损和势能沉积的协同效应，取得了一些重要的研究结果。







(2) 放射性束物理。联合国内外20余家单位成立了放射性束物理合作组。北京大学和近代物理所利用 RIBLL1 对<sup>12</sup>Be 激发态中反常增强的单极跃迁和集团结构进行了研究, 清楚标识了非稳定核<sup>12</sup>Be 中10.3 MeV 近阈激发态的分子集团结构, 澄清了核科学界多年的争论, 研究成果发表在 *Physical Review Letters* 上。在双质子发射、弹性散射等研究方面也取得了系列重要结果。

(3) 核天体物理。开发了低能次级束产生新方法, 开辟了国内低能核天体物理直接测量方向, 完成了天体X射线暴的两个重要核反应研究, 为理解核素合成、演化及能量产生提供了可靠数据; 研究结果在 *Physics Letters B* 等期刊发表。

### 重离子束临床试验治疗肿瘤效果显著

重离子束具有能量损失集中于射程末端的物理学特性和高的相对生物学特性。用于治疗肿瘤时, 具有对健康组织损伤较小、对肿瘤杀伤作用较强、可适形精确调强治疗、实时在线监控等优点, 被誉为当代最佳的放疗用射线。经过20多年的重离子治癌前期研究, 在HIRFL上建成浅层和深层两个治疗终端装置。截至2013年7月, 与当地医疗机构合作, 完成103例浅层肿瘤和110例深层肿瘤患者治疗, 病人的4年存活率和肿瘤局部控制率均在60%以上。

通过大科学工程建设和临床试验研究实践, 近代物理所自主设计了世界上环形同步加速器周长最短、性价比最高的重离子治疗专用装置。2012年, 近代物理所与兰州城投、武威荣华集团分别签订了两台重离子治癌示范装置, 合同总金额11亿元人民币。目前,

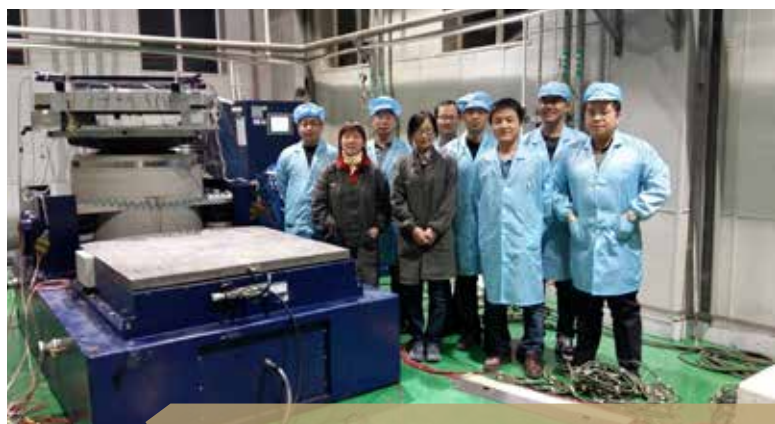
基础设施建设基本完成, 武威装置已进入设备调试阶段; 兰州装置设备正在安装。截至2014年底, 重离子治癌项目获得专利授权近60项, 完成《医用重离子(碳离子)加速器注册产品标准》、技术说明书、使用说明书及安全专用要求的编写。目前, 近代物理所牵头组建了医用重离子加速器产业联盟。

### 航天器件空间单粒子效应研究取得重要进展

在HIRFL上建设了国际先进的单粒子效应实验终端, 科研人员利用中高能重离子束对我国自主研制的大量航天电子器件、大规模集成电路进行空间单粒子效应地面模拟验证实验, 对器件抗辐射性能进行安全检测和筛选, 为我国航天电子元器件抗辐射加固性能验证与评估提供了支撑。目前, 与近代物理所合作开展此项工作的航天部门、科研院所和高校等单位共计50余个, 已成为航天和总装部门认可的最重要的检测基地。

### 重离子辐照诱变育种研究获得显著的经济效益

重离子束作为一种先进的辐射源, 具有变异率高、变异谱宽、变异快、稳定周期短、简便易行的优点。近代物理所利用重离子束开展了春小麦、甜高粱、棉花、玉米、瓜果、中药材、花卉和蓖麻等多种作物和微生物的辐射诱变工作, 选育出一批优良品系和突变体, 6个新品种获得了省级审定或认定的新品种证书。其中, “陇辐2号”春小麦已成为河西地区主要小麦品种; 重离子辐照甜高粱, 已构建出一条集乙醇、酵母、葡聚糖、谷氨酸、果葡糖浆、复合微生物菌剂和青贮饲料等多种生物产品的完整产业链, 截



塑闪阵列探测器正样件力学测试现场图

至2014年底累计种植45.93万亩。此外，近代物理所还对蓖麻、棉花、玉米、马铃薯、黄芪和吊竹梅等经

济作物和花卉进行了辐照诱变，均获得相应的有益突变株系和一批新品系。

## 组织与管理

近代物理所和兰州重离子加速器国家实验室建立了一套完整的组织管理办法。实验用户可以按照国家实验室发布的实验指南提出实验用束申请，由国家实验室学术委员会进行审议、评审并给出意见，经国家实验室主任批准后即可在装置上进行实验研究。

近代物理所既是大科学装置及实验平台的建设者、运行维护及改进的组织者，又是进行多学科创新研究的主要用户之一。今后，近代物理所和国家实验室将继续以“扩大开放，加强合作，资源共享”为宗旨，与国际一流研究机构建立密切的学术交流与合作关系，组建联合研究团队，对若干国际前沿的重大基础性课题进行共同研究。

## 研究方向

(1) 重离子核物理。深入开展超重新核素合成研究和超重核性质研究，极端条件下原子核结构、性质及奇异衰变模式研究，核物质状态方程的同位旋效应及其在核天体物理中的应用研究。力争合成原子序数 $Z \geq 110$ 的超重新核素，取得一批重要的创新成果。

(2) 高离化态原子、分子和团簇物理。发展完全测量和极快速成像技术，开展高离化态重离子原子谱学研究和强场中量子电动力学效应检验，极端条件下原子碰撞动力学研究，高激发、多激发等特殊原子分子的性质和结构研究，多电子重组过程研究，量子多体动力学研究、量子相干和分子初态中量子纠缠现象研究。

(3) 重离子辐照材料研究。进行极端条件下离子束与物质相互作用研究，快重离子辐照效应研究，探索原子水平可控及纳米特殊结构材料、抗辐照材料、特殊功能材料制备新途径及材料辐照效应特殊分析技术，优先发展与核裂变能源研究相关的新材料以及抗辐照研究，开展航天用芯片及器件的单粒子效应

与国内研究型大学、著名研究机构和高技术企业建立密切的合作关系，成立科学家小组、联合实验中心、技术攻关小组等联合研究团队，开展重离子核物理及交叉学科的基础和应用研究，承接加速器等科学装置的研制任务，共同争取承担国家及省部委的重大科技项目。

与地方联合建立重离子治癌、辐照育种、新药研制、粒子束辐照技术等高科技中心，将大科学装置建设和基础研究过程中形成的新技术加以推广应用，服务于国防、农业、材料、医学、环境保护等，协助解决生产建设中的相关科技问题，为高技术产业化和区域经济发展提供技术支持。

的地面模拟研究。

(4) 重离子辐照生物效应研究。开展重离子和质子治癌若干重要物理问题研究，为进一步发展我国离子束治癌技术提供科学依据。开展离子束在农学及医药领域的应用研究，地面模拟空间环境中的辐照生物效应研究等，特别要利用西北地区光照充足的优势，重点培育耐旱、高产、含糖量高的能源作物优良新品种，以及高效价的微生物新菌种。



近代物理所国际交流合作情况