

兰州重离子研究装置*

中国科学院近代物理研究所 中国科学院基础研究所

(兰州 730000)

(北京 100864)

关键词 重离子,装置,兰州

1 科学背景

自从 1932 年劳伦斯建成世界上第一台回旋加速器起,物理学方面的重大成果越来越多地出自于大科学装置,上世纪许多获得诺贝尔物理奖的成果就是基于大科学装置的大型实验中获得的。

近 30 多年来,随着大型重离子加速器、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 116 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。上世纪 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

其它学科,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生长点。例如,日本和德国的重离子治癌研究取得了治愈 6 000 余病例的骄人业绩,国际上纷纷开始建造治癌专用的重离子加速器系统;重离子驱动的惯性约束核聚变前期研究和重离子辐照培育能源作物优良新品种为人类寻找清洁、安全的可再生新能源展现出美好的前景。

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。

2 装置综述

上世纪 60 年代初,在中科院近代物理研究所建成了 1.5 米经典回旋加速器,开展了轻核反应研究,70 年代初改建后率先在国内开展了低能重离子物理研究。

1988 年 12 月,兰州重离子研究装置(HIRFL)建成出束,主要指标达到国际先进水平,1992 年获国家科技进步奖一等奖。它的主加速器是新建的大型分离扇回旋加速器(SSC);注入器是改建的 1.7 米扇聚焦回旋加速器(SFC)。两者联合运行,可以把从



中国科学院

* 本文由近代物理研究所所长肖国青(E-mail: xiaogq@impcas.ac.cn)、李振中,基础科学局彭子龙共同组织撰写

收稿日期: 2008 年 11 月 27 日

碳到氙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。

1997年7月,在HIRFL上建成中能放射性束流线(RIBLL1),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。近物所在RIBLL上发现了一批重要的中子皮核、中子晕核和质子晕核。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。加上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,兰州重离子加速器冷却储存环(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。HIRFL-CSR是国家“九五”重大科学工程,1994年12月近物所上报项目建议书,1998年7月原国家计委批准立项,2000年4月开工建设。CSR工程由主环(CSRm)、实验环(CSRc)、放射性束分离器(RIBLL2)、实验探测装置、原有装置改进、建安工程等组成,其超高真空束流管道总长约500米、各类磁铁总重约1500吨、特殊大功率电源近300台,是一个集累积、冷却、加速、储存、内靶实验及高分辨核质量测量于一体的多功能实验装置。

在CSR工程建设中,科技人员以创新的设计思想,建成世界上独特的重离子级联回旋加速器与双冷却储存环的耦合系统;创造性地实现了变谐波同步加速;大幅度提高了重离子束流的能量、强度和品质,主要技术指标达到或超过验收要求,并创造了国际同类加速器束流指标的最高记录。实现了诸

多方面的技术创新:在国际上建成新一代电子冷却装置,首次实现了“空心”电子束对重离子束的冷却;自主研发的 10^{-12} mbar大型超高真空系统,比国际同类装置的最高真空度还高将近一个量级;实现了高性能网络数字化控制系统;研制成功纳秒量级大功率Kicker电源;在实验环直接进行的核质量测量实验达到了 10^{-5} 的高精度。CSR的主要技术指标达到国际先进水平,而所用投资相对很少,创造了国际最佳的性能造价比。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。

1991年8月,原国家计委批准成立兰州重离子加速器国家实验室。实验室实行向国内外开放、资源共享的体制和以岗位责任制为核心的运行机制。经过升级改造,HIRFL的束流时间、束流指标、运行效率进入国际先进行列,迄今已为80多个国内外用户的重离子物理基础和应用研究提供了80余种不同种类、不同能量的稳定核的重离子束和100余种放射性束,较好地满足了实验研究的需要。

3 研究综述

3.1 在HIRFL上取得的重要成果

(1)在世界上首次合成25种新核素包括两种超重新核素。1992—2000年,近物所在重质量丰中子区等核区合成了19种新核素,实现了我国新核素合成零的突破。近几年又合成了6种新核素,其中包括 ^{259}Db ($Z=105$)和 ^{265}Bh ($Z=107$)两种超重新核素,使我国新核素合成研究首次跨入超重区,开始了超重新元素探索研究的征程。在中重缺中子区,还首次将“质子- γ ”符合方法用于鉴别近质子滴线新核素;观测了22种核的 β

缓发质子衰变;首次建立了15种近滴线核的EC/ β^+ 衰变纲图、14种核的高自旋态能级纲图,扩展了其它18种核的高自旋态能级纲图。10多年来,新核素合成、鉴别和研究的成果共获国家自然科学奖二等奖2项,中科院自然科学奖一等奖2项,甘肃省自然科学奖一等奖2项;多次入选年度中国十大科技成就、科技新闻和科技进展。

(2)核结构、重离子碰撞和热核性质研究进入国际前沿。从理论和实验两方面对重离子碰撞及热核性质的同位旋相关性进行研究,获得了一些重要成果。实验证实了热核衰变从级联发射到多重碎裂的过渡特性,观测到了核物质比热性质随激发能的变化(相变)及不同系统之间的差别;实验证明中能重离子反应中同位旋自由度存在弛豫过程。“高激发核的温度及时空演化研究”和“质量数 $A=170$ 核区形变双奇核高自旋态核结构实验研究”,分别获2000年度和2004年度甘肃省科技进步奖一等奖。

(3)HIRFL-CSR实验环高精度质量测量进入国际先进行列。2007年12月,利用CSRm提供的400 MeV/u的 $^{36}\text{Ar}^{18+}$ 束流,在RIBLL2中轰击7mm厚的Be初级靶,将产生的 ^{34}Cl 、 ^{32}S 及 ^{30}P 等次级离子束注入到等时性模式运行的CSRe进行质量测量,得到 10^{-6} 量级的高精度质量分辨。

(4)重离子治癌试验成功,使我国成为国际上第4个开展该项研究的国家。用重离子束治疗肿瘤,具有对健康组织损伤小、对肿瘤杀伤力大、可适形精确调强治疗、实时监控等优点,被誉为当代最佳的放疗用射线。近物所进行了10多年的重离子治癌前期研究,在HIRFL建成浅层(深度小于2.5厘米)治癌装置。从2006年11月底到2008年9月,与当地医疗单位合作,利用中能碳离子束试验治疗了7批82例浅层肿瘤患

者,疗效非常显著。目前,利用HIRFL-CSR提供的高能重离子束进行深部治癌的装置即将建成投入使用。

(5)重离子辐照材料研究取得重要进展。在新型功能材料研究方面,完成了运用惰性气体离子缺陷工程合成纳米新材料、高能重离子辐照在注碳 SiO_2 中引起的纳米相变、碳化硅晶体中纳米气泡的形成及其对碳化硅发光性能的作用研究,“荷能离子在金属材料中引起的新效应及其机理研究”获2003年度甘肃省科技进步奖一等奖。2006年,用重离子径迹模板结合电化学沉积的方法制备的金纳米线表面光滑、线径均匀,多晶金纳米线的晶粒达到10nm。2008年2月,在航天半导体器件单粒子效应实验中获得一批关键数据,对指导航天电子元器件和系统抗辐射加固具有重要意义。

另外,在高离化态原子物理研究方面,取得一批重要成果;用重离子辐照生物技术培育出“陇辐2号”春小麦新品种和4个甜高粱新品系,取得显著的经济效益;研制成功几种特殊核辐射探测器,搭载在多个卫星、神舟飞船、嫦娥探月卫星上,为空间科学研究做出了贡献。

3.2 正在承担的主要科研任务

在基础研究方面主要有:超重新核素和元素合成探索研究、放射性束物理及超重核研究、极端条件下核物质性质研究、弱束缚核谱学研究、不稳定原子核谱学及核结构实验研究、高电荷态离子与原子分子碰撞反应动力学实验和理论研究、STAR相对论核核碰撞物理研究与飞行时间探测器研制、高能物理与核物理探测技术和实验方法研究等。

在应用基础和应用研究方面主要有:重离子治癌关键科学技术研究、治疗计划系统的研究与开发。

在加速器和实验装置方面主要有:反质



中国科学院

子与离子加速器 (FAIR) 重大国际合作项目、兰州强子物理谱仪 (HPLUS) 预先研究、中能重离子微束辐照装置、精密质量测量 Penning 离子阱研制。

大科学装置改造项目: 新聚束器 NB2 研制、SSC 真空系统和注入引出元件改造、公共物理实验平台改造、CSR 束流诊断监测系统改造、CSR 实验装置改造。上述主要科研任务来源于国家、部委和中科院的重大重点科技计划。

3.3 拟开展的研究工作

利用 HIRFL 及其 CSR 主要开展以下若干领域的前沿研究,并争取用 5 年左右的时间使之进入国际前列:

重离子核物理、强子物理——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。研究重子激发谱、共振态和一些强子的稀有衰变道,寻找多夸克态和混杂态,探索核介质中强子性质改变和手征对称性的部分恢复。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。

高离化态原子、分子和团簇物理,重离子辐照材料研究——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 and 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。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,优先发展与核聚变能源研究相关的

新材料、特殊光电材料和航天半导体芯片单粒子效应的地面模拟研究。

高能量密度物理,重离子惯性约束核聚变能源前期研究——开展强流重离子束的加速、传输、聚焦及压缩研究,高能量密度等离子体性质研究,高温高密度等离子体性质的诊断研究等,掌握该领域的关键基础知识;在适当时候开展重离子驱动的小型先进能源试验装置研制工作,掌握其关键技术。

重离子治癌生物物理、辐照育种等辐照生物效应研究——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。

先进离子加速器研究——(1)开展强流离子加速器物理与技术研究,固定磁场交变梯度 (FFAG) 加速器研究,超导离子源研制,冷却储存环中随机冷却、束团非绝热压缩和慢引出等新技术研究;适时提出强子物理兰州谱仪和作为 CSR 另一注入器的强流直线加速器设计建造计划,为开展强子物理和重离子物理研究创造更好的实验条件。(2)争取早日立项建设离子束应用研究装置 (FIARL),用以进行航天员和元器件安全检测地面模拟研究;重离子束临床治癌研究,建立治疗计划系统,开展全体位治疗;同时进行辐照生物技术和辐照材料科学研究。FIARL 还可作为重离子治癌示范装置,通过改进和优化,早日定型生产并实现产业化。

4 组织与管理

HIRFL 及新建的 CSR 上的研究工作,由兰州重离子加速器国家实验室组织与管理。用户可按照实验室发布的实验指南提出

束流时间申请,由实验室学术委员会进行审议并提出安排意见,经实验室主任批准后即可实验。近物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,近物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;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、联合实验室、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。

5 发展展望

根据国家重大战略需求和国际科学前沿,充分发挥可提供从低能到高能全离子的

HIRFL 和多学科交叉的综合优势;争取早日立项建设离子束应用研究装置,适时提出强流直线加速器和强子物理兰州谱仪建造计划,采用先进探测技术、高集成度数据采集及处理技术,逐步完善实验装置;以超重核研究、重离子治癌等重大项目促进学科发展和自主创新能力的提高;扩大和完善向国内外开放、资源共享的运行体制和公平竞争、科学评价的激励机制,积极开展国内外合作交流;吸引和凝聚优秀科学家及跨学科研究团队,大力培养高层次青年科技人才,把近物所建设成为依托大科学装置的多学科综合研究基地。

该研究基地将以重离子核物理及其相关交叉学科的基础和应用研究为主攻方向,开展强子、原子核、原子、分子、辐照生物、辐照材料、核天体物理等学科重大科技问题研究,高能量密度物理、先进加速器、实验探测技术、数据获取及处理系统等新原理、新技术及新方法研究,力争取得一批具有国际影响的创新成果和重要进展;同时加快核技术向生产领域转移,促进科技成果产业化,为实现我国原子核科学技术的跨越发展做出新贡献。

(相关图片请见封二、封三)



中国科学院