科学通报 2016 年 第 61 卷 第 4-5 期：467 ~ 477
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

兰州重离子加速器研究装置 HIRFL

夏佳文*, 詹文龙, 魏宝文, 原有进, 赵红卫, 杨建成, 石健, 盛丽娜, 杨维青, 冒立军

中国科学院近代物理研究所, 兰州重离子加速器国家实验室, 兰州 730000
* 联系人, E-mail: xiajw@impcas.ac.cn

2015-05-04 收稿, 2015-05-26 修回, 2015-05-26 接受, 2015-10-08 网络版发表

摘要 兰州重离子加速器装置HIRFL是目前我国规模最大、加速离子种类最多、能量最高的重离子研究装置, 主要技术指标达到国际先进水平, 是世界上几个重要的核物理研究设施之一. HIRFL由ECR离子源、扇聚焦回旋加速器SFC、分离扇回旋加速器SSC、放射性束流分离线RIBLL1和RIBLL2、冷却储存环主环CSRm和实验环CSRe等主要设施组成. HIRFL具有加速全离子的能力, 可提供多种种类、宽能量范围、高品质的稳定核束和放射性核束, 用以开展重离子物理及交叉学科研究. 本文重点介绍了兰州重离子加速器装置HIRFL的发展现状以及取得的系列成果, 同时对国内外重离子加速器装置的发展现状做了简要介绍.

关键词 重离子加速器, 回旋加速器, 同步加速器, 储存环, 离子

重离子加速器具有重要的科学作用和社会意义, 是研究物质微观结构、宇宙演化、解决人类有关生存环境问题的有效手段, 如探索原子核存在的极限, 探究宇宙中铁到铀元素的来源以及能量的起源, 探究太阳系的演化过程等. 此外, 重离子加速器可为应用研究提供独特的实验条件, 可开展高能量密度物理研究、先进能源相关材料研究、离子径迹与纳米技术研究、生命科学研究、高效生物农业研究、辐照相变与特殊功能材料研究、空间辐照效应研究以及信息材料技术研究等. 重离子加速器一般采用直线加速器或者回旋加速器作为注入器, 采用同步加速器或者回旋加速器做为主加速器将粒子加速到高能量, 最后注入到储存环并开展内靶和外靶实验研究.

1 国内外重离子加速器装置现状

目前, 国际上运行和建设中的大型重离子加速器约30余台, 而我国现有北京BRIF[1]和兰州HIRFL[2~6]以及即将建设的强流重离子装置HIAF[7]. 国际上的重离子加速器主要有美国BNL-RHIC[8]、日本RIKEN-RIBF[9], 以及正在建设中的德国FAIR[10,11]、美国MSU-FRIB[12~14]、法国GANIL-SPIRAL2[15], 国内外几台典型装置的发展状况如下.

北京原子能科学研究院的HI-13串列加速器1987年正式投入运行, 2001~2002年进行了更新改造, 加速器最高头部电压由13 MV提高到15 MV. 北京放射性束装置(BRIF)是HI-13的升级工程, 是在HI-13串列加速器的前端新建一台紧凑型等时性强流质子回旋加速器(100 MeV, 200 μA), 一台质量分辨率为20000的在线同位素分离器, 以及在其后端新建一台具有2 MeV/q加速能力的超导重离子直线增能器, 与现有的HI-13串列加速器组成一套加速器组合装置[16](中国原子能科学研究院网址: www.ciae.ac.cn). 目前, 100 MeV的质子回旋加速器已经建成出束. 该加速器组合装置有多种运行模式, 回旋加速器单独使用时主要用于中子物理、辐射物理、生物医学的研究以及同位素研发; 联合使用时, 回旋加速器的质子束将用于轰击靶源, 产生放射性同位素, 经在线同位素分离器后注入串列加速器加速, 为用户提供放射性核素

引用格式: 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器研究装置 HIRFL. 科学通报, 2016, 61: 467–477
Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. Heavy Ions Research Facility in Lanzhou (HIRFL) (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 467–477, doi: 10.1360/N972015-00472

© 2015《中国科学》杂志社

束流. 该加速器在亚库仑位垒熔合、原子核高自旋态结构、核天体物理、核数据测量、加速器质谱等方面取得了重要成果. 图1是北京BRIF的布局图.

美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机(BNL-RHIC)于2000年开始运行, 是目前世界上唯一的自旋极化质子对撞机(美国布鲁克海文国家实验室网址: www.bnl.gov/world/). 科学家利用RHIC研究重离子/质子对撞产生的夸克-胶子等离子体的复杂过程, 研究宇宙大爆炸后的早期现象. RHIC储存环为6边形结构, 周长为3834 m, 有6个对撞点. 图2是BNL-RHIC的总布局图, 电子束离子源EBIS引出的重离子束首先经过Tandems预加速, 然后注入到增强器Booster中加速, 再注入到同步加速器AGS加速到高能量, 最后经过高能传输线注入到RHIC, 加速到相对论速度后开始碰撞[17]. 此外, 质子-质子碰撞则采用直线加速器LINAC作为注入器, 经过Booster, AGS后注入到RHIC.

日本理化学研究所RIKEN的重离子加速器系统分两大部分: 原有的加速器研究装置RARF, 以及升级后的放射性同位素束流工厂RIBF(日本理化学所网站: www.riken.jp/). RARF由重离子直线加速器RLAC, 回旋加速器AVF以及回旋加速器RRC组成,

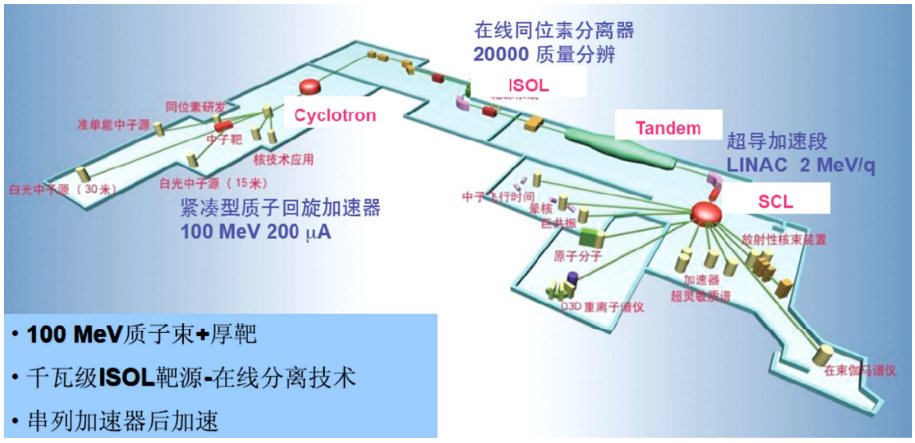


图 1 (网络版彩色)北京BRIF布局图

Figure 1 (Color online) Layout of BRIF in Beijing

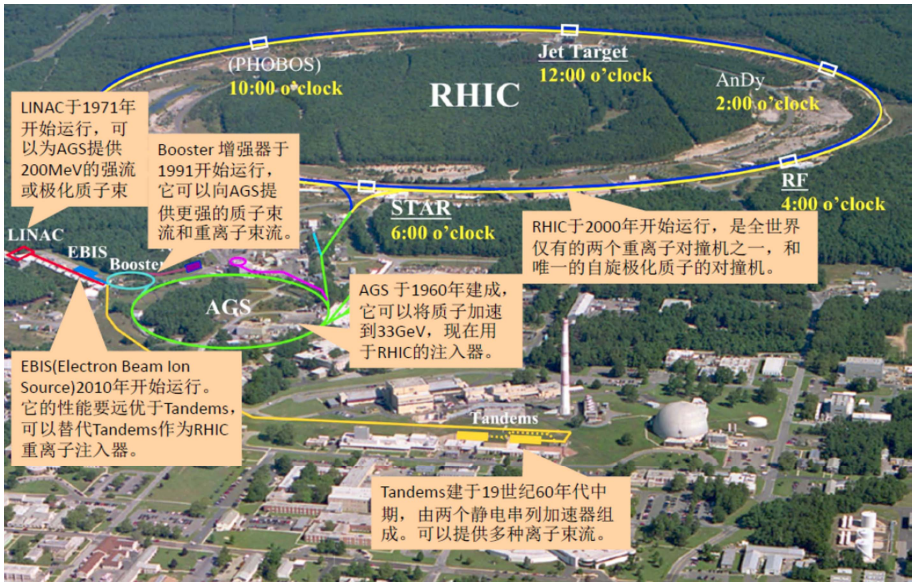


图 2 (网络版彩色)美国BNL-RHIC的总布局图

Figure 2 (Color online) Layout of BNL-RHIC in USA

其中RLAC和AVF都可作为RRC的注入器. AVF的能量常数为K=65; RRC的能量常数K=540, 主要用于核物理和生物实验. 随着科学家对更高能量的需求, RIKEN在RARF的基础上新建了3台回旋加速器: 固定频率回旋加速器fRC、中间段回旋加速器IRC以及超导回旋加速器SRC, 其能量常数K分别为570, 980以及2500. 2006年RIBF完成升级任务, 共有5台回旋加速器, 可级联加速, 能将轻离子能量加速到440 MeV/u, 铀离子能量加速到350 MeV/u. 利用强流放射性束流可深入研究远离稳定线核素(奇异核)的结构、性质和反应, 包括建立原子核新的统一图像, 揭示元素的起源[18,19]. 此外, RIBF的成果还广泛应用于医疗、环境、农业、工业和考古等诸多领域. 图3是RIKEN-RIBF布局图.

德国重离子研究中心GSI的重离子加速器系统由离子源、直线加速器UNILAC、同步加速器SIS18、碎片分离器FRS、实验储存环ESR及若干束运线和实验终端组成. FRS可将打靶产生的放射性次级束进行高效的分离选择; ESR环内可开展原子核质量高精度测量以及内靶实验等研究.

FAIR是在德国GSI现有UNILAC, SIS18和ESR加速器基础上, 新建同步加速器SIS100和SIS300、收集环CR、累积环RESR、储存环NESR、超级碎片分离器SuperFRS、质子直线加速器p-Linac和高能储存环HESR, 其总体布局如图4所示(德国重离子研究装置GSI: www.gsi.de/start/aktuelles.htm). $^{238}U^{28+}$束流最高能量可达9.7 GeV/u、流强5×10^{11}离子数/脉冲; 质子束最高能量29 GeV/u、流强4×10^{13}离子数/脉冲[20~22]. FAIR由德国、法国和俄罗斯等10余个国家投资建造, 已于2011年开工建设, 预计2019年完成SIS100, RESR, HESR, FLAIR和p-Linac建造, 2023年完成SIS300和实验探测装置建造. FAIR能够提供重离子和反质子束流, 主要开展强子结构、远离稳定线原子核结构、强相互作用物质性质和重离子束应用等研究.

美国密歇根州立大学MSU国家超导回旋加速器实验室NSCL由美国能源部资助(美国密歇根州立大

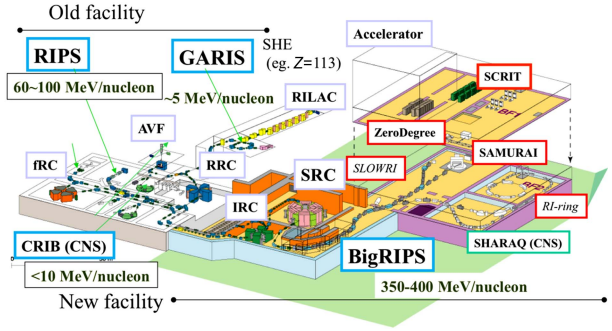


图 3 (网络版彩色)日本RIKEN-RIBF装置

Figure 3 (Color online) Facilities of RIKEN-RIBF in Japan

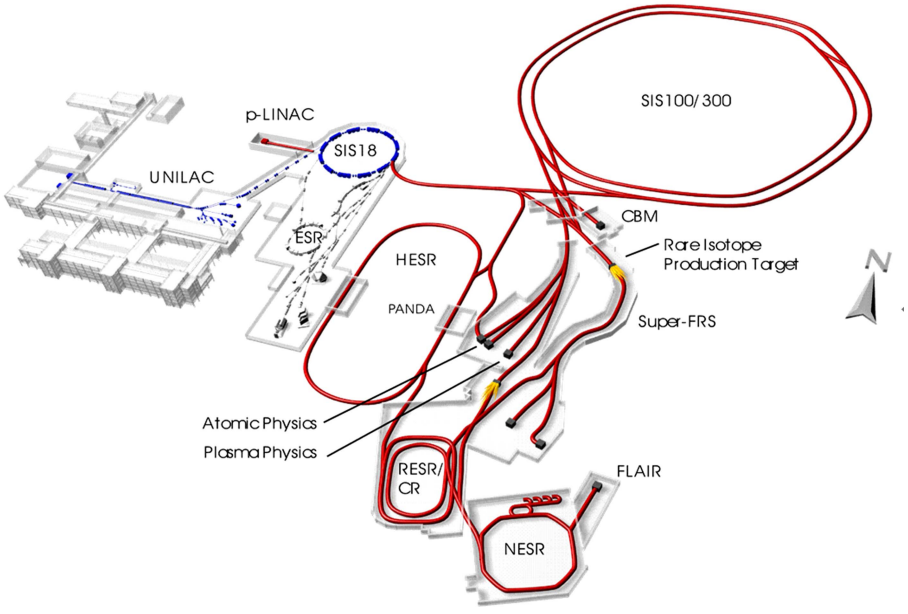


图 4 (网络版彩色)德国重离子加速器装置及FAIR总体布局图

Figure 4 (Color online) Layout of FAIR and GSI in Germany

学MSU: http://admissions.msu.edu/), 主要从事稀有同位素和核物理研究, 其在核结构、核天体物理、重离子反应机制、加速器物理、束流动力学以及实验技术和癌症治疗等方面都取得了许多成果. 2009年美国能源部与MSU签署协议, 在NSCL基础上建立新的超导重离子直线加速器、散裂靶、碎片分离器、气体阻止器以及次级束后加速器等, 构成高流强的放射性稀有同位素装置FRIB, 其总体布局如图5所示. FRIB的设计功率为400 kW, 质子束能量610 MeV、流强656 pμA; ^{86}Kr束流能量265 MeV/u、流强18.0 pμA; ^{238}U束流能量210 MeV/u、流强8.0 pμA. 目前, FRIB已基本完成了直线加速器的模型腔、高频加速腔、靶分离装置、电荷剥离器等的预研和测试, 计划于2022年完成工程建设[23~25]. FRIB主要用于开展原子核结构、核天体物理、基本对称性检验和重离子束应用等研究.

法国重离子加速器国家实验室GANIL有2个放射性束装置SPIRAL1以及其升级装置SPIRAL2(法国重离子加速器国家实验室GANIL: www.ganil-spiral2.eu/). SPIRAL1包括靶-源系统以及中能回旋加速器系统, 主要用于产生和加速放射性奇异核, 该装置可产生质量数达90的轻奇异核, 并将其加速到1/4光速. 为了获得更高流强更高稳定性的放射性次级束, 在原有加速器装置基础上新建了ISOL型放射性束流装置SPIRAL2, 其总体布局如图6所示. 驱动器为超导直线加速器, 设计氘束能量为1.5~40.0 MeV, 流强5.0 mA; M/Q=3的重离子束能量2.0~14.5 MeV/u, 流强1.0 mA. 后加速系统是一台回旋加速器, 能够提供能量为3~10 MeV/u的放射性束流[26,27]. SPIRAL2于2013年完成了基础设施建设和加速器相关设备的设计、加工、测试和验收, 于2014年底开始调试. 主要开展奇异原子核结构、核物质性质、基本对称性和离子束应用等研究.

2 兰州重离子加速器研究装置HIRFL及先进强流重离子装置HIAF

兰州重离子加速器装置HIRFL主要包括前级回旋加速器系统, 如电子回旋共振ECR离子源、扇聚焦回旋加速器SFC、分离扇回旋加速器SSC, 以及后加速冷却储存环CSR系统, 如主环CSRm、实验环CSRe、连接两环之间的放射性束流分离线RIBLL2以及若干束运线和实验终端. HIRFL的2个回旋加速器SFC和SSC作为CSR的注入器, 提供的离子束被

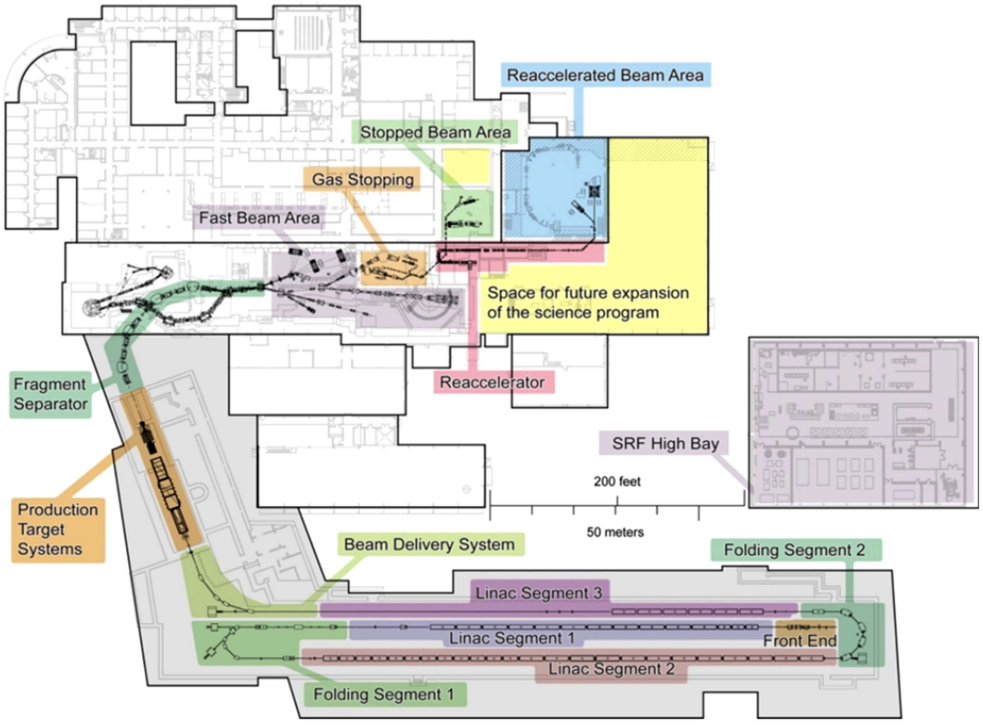


图 5 (网络版彩色)MSU-FRIB总体布局图

Figure 5 (Color online) Layout of MSU-FRIB in USA

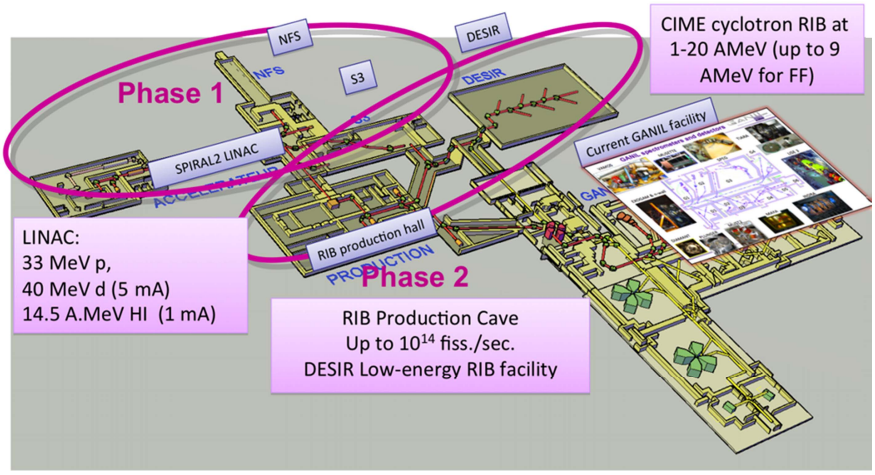


图 6 (网络版彩色)GANIL-SPIRAL2 总体布局图
Figure 6 (Color online) Layout of GANIL-SPIRAL2 in France

CSRm累积、冷却并加速到更高能量，然后快引出打靶产生放射性次级束或高电荷态离子束. 次级束流注入到CSRe，在电子冷却辅助下储存或减速以开展多种内靶实验或者高精度的原子核质量测量实验. 另一方面，束流可由CSRm慢引出开展癌症治疗临床实验以及单粒子效应研究等，也可以快/慢引出开展各种外靶实验[28]. 图7是HIRFL的总体布局图，表1给出了HIRFL各部分的主要束流参数(中国科学院近代物理研究所: www.impcas.ac.cn).

2.1 电子回旋共振ECR离子源

根据国际重离子加速器发展前沿，从1989年开始，中国科学院近代物理研究所从法国引进CAPRICE型ECR (electron cyclotron resonance)离子源. 经过两年的调试和改进，于1992年正式将这台10 GHz离子源在HIRFL上投入使用，这也是国际上第一次将CAPRICE型ECR源在回旋加速器上使用，明显提高了SFC引出束流强度. 为配合ECR离子源的使用，对SFC进行了相应改造，其注入系统由原先使用PIG离子源时的水平方向内注入改为垂直方向外注入. 1990年开始自行设计建造我国第一台10 GHz ECR离子源(ECR1)并于1993年投入使用. 1997年又设计建造了一台14.5 GHz的ECR离子源(ECR2)，于1999年投入使用. 通过这些研究，发展了ECR离子源技术，积累

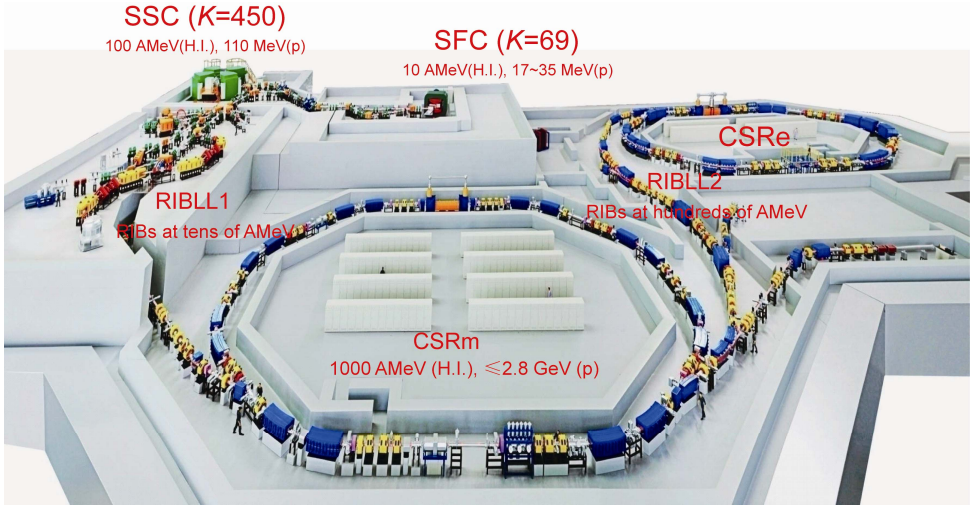


图 7 (网络版彩色)HIRFL的总体布局图
Figure 7 (Color online) Layout of HIRFL in China

表 1 HIRFL各部分主要束流参数

Table 1 Main beam parameters of HIRFL

参数	数值	
	SFC	SSC
最大能量(MeV/u)	10(H_2^+) 8.5($^{12}C^{6+}$) 1.22($^{238}U^{72+}$)	100($^{12}C^{6+}$) 9.5($^{209}Bi^{31+}$)
最大磁刚度(T_m)	0.84	3.0
离子种类	H_2^+~U	C~Bi
动量分散	5×10^{-3}	10^{-3}
发射度(πmmmrad)	20	10
	CSRm	CSRe
周长(m)	161	128
最大磁刚度(T_m)	12.1	9.4
离子种类	p-U(稳定核), RIBs	p-U(稳定核), RIBs
最大能量(MeV/u)	1000(H_2^+) 1100($^{12}C^{6+}$) 500($^{238}U^{72+}$)	750($^{12}C^{6+}$) 500($^{238}U^{90+}$)
离子数(个)	稳定核: $10^{6\sim9}$	稳定核: $10^{6\sim9}$
动量分散	10^{-4}(稳定核), 10^{-3}(RIBs)	10^{-5}
发射度(πmmmrad)	⩽5(稳定核), 20(RIBs)	⩽1

了丰富的研制经验.

为了进一步提高HIRFL加速极重离子的束流强度, 2000年中国科学院批准中国科学院近代物理研究所研制超导高电荷态ECR离子源. 作为中国科学院创新工程重大项目之一, 经过近5年的努力, 于2005年建成了在磁场设计和结构方面都有所创新的超导ECR离子源[29], 2006年通过了中国科学院组织的国内外专家进行的测试、鉴定和验收, 并投入使用. 图8是超导高电荷态ECR离子源.

2.2 扇聚焦回旋加速器SFC

扇聚焦回旋加速器SFC(Sector Focused Cyclotron)是一台螺旋扇聚焦的等时性回旋加速器, 是中国科学院近代物理研究所由原有的1.5 m直径的经典轻离子回旋加速器改造而成的, 其能量常数为K=69. 该加速器是"一五"时期前苏联援建我国的156个重大项目之一, 由第二机械工业部投资和领导, 于1962年底安装就绪并开始调试, 于1964年5月份正式投入运行. 为配合"双超"(超钚、超重元素的合成)工作的开展, 1970年中国科学院近代物理研究所将1.5 m回旋加速器成功地改装为我国第一台重离子加速器, 目前可加速从氢到铀的所有离子.

SFC主体由圆形电磁铁、双层结构真空室和高频加速腔组成, 可将H~U的重离子分别加速到10.0~1.28 MeV/u的能量, 相应的引出流强为15~1 eμA. SFC作为HIRFL的注入器, 在日常的科学研究中发挥了举足轻重的作用: 一方面, SFC可以为SSC提供各种束流, 进而在各种低能实验终端上开展多种物理研究以及相关学科的应用研究, 如浅层治癌, 材料辐照等; 另一方面, 从SFC引出的束流通过直通线直接注入到CSRm, 进行后加速, 以进行更高能量的实验[30,31]. 图9是SFC的实物图.

2.3 分离扇回旋加速器SSC

分离扇等时性回旋加速器SSC(Separated Sector Cyclotron)是HIRFL系统中的主回旋加速器, 其能量常数K=450, 1988年建成出束, 按建成顺序是国际现有8台中能重离子加速器中的第4台, 是我国"七五"时期自主建设的重离子回旋加速器, 碳离子束能量可达100 MeV/u. 其主体由4台总重2000 t的扇形电磁铁、两台大型高频加速腔和100 m^3真空室组成, 轮廓

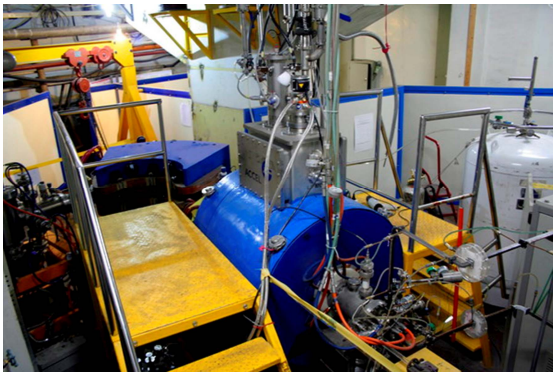


图 8 (网络版彩色)超导高电荷态ECR离子源

Figure 8 (Color online) High charge state superconducting ECR ion sources

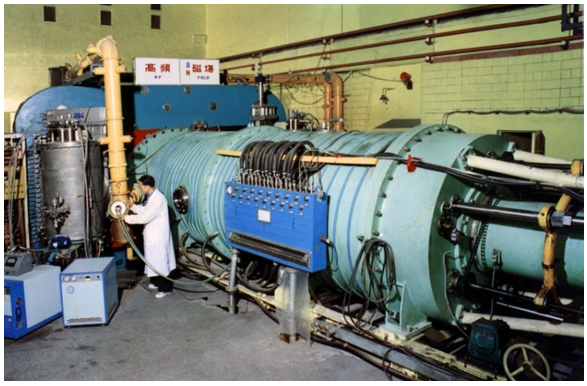


图 9 (网络版彩色)SFC实物图

Figure 9 (Color online) Picture for SFC

直径12 m、高度6 m(见图10, SSC实物图). SSC与SFC联合运行，可把典型的C~Bi的重离子分别加速到100~9.5 MeV/u的能量，相应的引出流强为3.5~0.1 eμA. SSC主要用于开展新核素合成和研究、中低能重离子碰撞和热核性质研究，以及重离子束应用研究等.

2.4 冷却储存环CSR

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL)是国家“九五”重大科学工程之一，2007年建成并投入运行，2008年7月通过国家验收，是国际上继德国GSI的SIS18-ESR之后又一个大型重离子冷却储存环装置. CSR由主环CSRm、实验环CSRe、放射性次级束分离线(RIBLL2)、实验探测装置等组成，是一个集累积、冷却、加速、储存、内靶实验及高分辨质量测量于一体的大型多功能实验装置，可提供C~U、单核子能量达GeV量级的重离子束, CSR主环加速的$^{12}C^{6+}$, $^{36}Ar^{18+}$束流的最高能量均达到了1000 MeV/u，流强分别为1190 μA(7.5×10^8 ppp)和1200 μA(2.6×10^8 ppp)，技术指标达到国际先进水平. 图11是主环CSRm和实验环CSRe的实物图.

HIRFL的创新发展，使我国重离子加速器技术水平及重离子物理实验研究能力进入世界前列，是我国放射性束核物理、极端条件下核物质性质研究、高离化态原子物理、核天体物理等基础研究领域的最大实验设施，是国内目前LET航天器件单粒子效应检测以及辐射加固等国防任务最高的研究平台，为生命科学(如重离子深层治癌)、生物科学、材料与能源科学等应用研究提供了有力的支撑条件.

HIRFL在多个方面实现了技术创新和突破，使我国在重离子加速器领域实现了跨越式发展，推动了我国相关高新技术的发展及科技创新，带动了粒子加速器行业经济及西部区域的科技进步: (1) 通过对重离子冷却储存环技术的创新发展，HIRFL突破了以回旋加速器作注入器时注入流强低的瓶颈，实现了重离子双冷却储存环与同步加速器高效组合，完成了从低能加速器向高能加速器的跨越. (2) 创建了独特的非对称等时性磁聚焦结构，发明时间—幅度二维离子鉴别及相对时间数据修正的数据处理方法，使CSR在高精度直接测量短寿命近质子滴线核素领域取得重大突破，在世界上率先达到了10^{-7}量级的相对测量精度，并在Z=23~35区的滴线核素质量测量处于国际领先地位，成为世界上原子核质量精确测量的最重要实验室之一. 国际核质量评估系统已经转移至中国科学院近代物理研究所以进行核质量数据的权威发布，实现了我国在该领域的国际主导权. (3) 通过综合集成创新，实现了重离子冷却储存环与同步加速器技术的整体突破. 推动了我国高精度磁铁、大功率电源、超高真空系统等14个集成系统的相关领域高、精、尖工业技术水平的高速发展. (4) 国际上首次采用回旋与同步加速器的组合模式，成功实现了重离子束深层治癌. 目前已完成临床试验治疗，取得显著疗效，并开发了具有全部自主知识产权的专用重离子治疗装置[18]，已被国家列为大力发展的特色优势产业，以及推进产业结构优化升级的“战略性新兴产业”.



图 10 (网络版彩色)SSC实物图
Figure 10 (Color online) Picture for SSC



图 11 (网络版彩色)冷却储存环CSR. (a) 主环CSRm隧道; (b) 实验环CSRe隧道
Figure 11 (Color online) CSRm (a) and CSRe (b) of China

2.5 放射性次级束分离线

HIRFL的放射性次级束分离线有RIBLL1和RIBLL2. RIBLL1[32]全长35 m，由放射性束的产生、分离、鉴别和聚焦系统组成，1997年建成. 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，质量分辨($A/\Delta A$)大于200，动量接受度10%，最大磁刚度4.2 Tm. 在RIBLL1上开展的物理研究，发现了一批具有质子晕、中子晕结构的奇异核素. 图12为RIBLL1实物图.

RIBLL2[33]全长55 m，是中高能放射性次级束分离线，由反对称的双消色差传输结构组成，包含4台二极磁铁、20台四极磁铁、8台六极磁铁以及4台八极磁铁. CSRm提供的高品质中高能初级束打靶后，经RIBLL2分离出弹核碎裂等反应中产生的前冲碎片，注入到CSRe进行内靶实验；RIBLL2的第2部分也可用作谱仪分析次级束再打靶的产物，然后注入到CSRe；或者RIBLL2直接将次级束提供给终端，进行外靶实验. RIBLL2的质量分辨($A/\Delta A$)大于1200，动量接受度10%，最大磁刚度10.6 Tm. 图13为RIBLL2布局图.

2.6 先进强流重离子加速器装置HIAF

即将建设的“十二五”国家重大科技基础设施—先进强流重离子加速器装置(High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility，HIAF)由加速器系统和实验测量装置构成，其总体布局和结构见图14. 加速器系统采用超导直线加速器、同步加速器和储存环组合的技术路线，主要包括：强流超导离子源SECR、超导离子直线加速器iLinac、磁刚度分别为34 和43 Tm的增强器BRing和压缩环CRing、磁刚度为13 Tm的高精度环形谱仪SRing、能量回收型电子加速器ERL，以及相关配套设施[34].

利用离子源产生从氢到铀的强流离子束，注入iLinac进行预加速. iLinac是BRing的注入器，也可为低能物理实验提供强流离子束. BRing利用相空间涂抹和束流冷却技术将离子束累积到高流强并加速到高能量，引出束流注入到CRing或打靶产生放射性核素. 放射性束流线分离和选择目标核并注入SRing. 在等时性工作模式下，SRing精确测量短寿命原子核的质量；在收集工作模式下，SRing制备高品质放射性束流，既可开展内靶实验也可引出束流注入到CRing或开展外靶实验. CRing采用束流纵向堆积和冷却技术储存尽可能多的离子并具有加速功能，在环内开展高电荷态离子的精细双电子复合实验；将束流压缩为百纳秒束团后快引出开展高能量密度物质性质研究，或超长周期慢引出束流进行辐照效应研究. ERL电子加速器提供的高品质电子束既可开展电子-原子核对撞研究，也可诊断高密度物质状态. HIAF的设计充分考虑了将来升级的空间和能力，BRing和CRing可升级为8字型结构加速器，产生高能极化质子束，结合后续建造的高能电子加速器，开展高亮度、双极化电子-质子对撞实验，研究核子的基本性质. HIAF的主要性能指标见表2所示.

2.7 主要研究成果

中国科学院近代物理研究所创建于1957年，是



图 12 (网络版彩色)RIBLL1 实物图
Figure 12 (Color online) Picture of RIBLL1

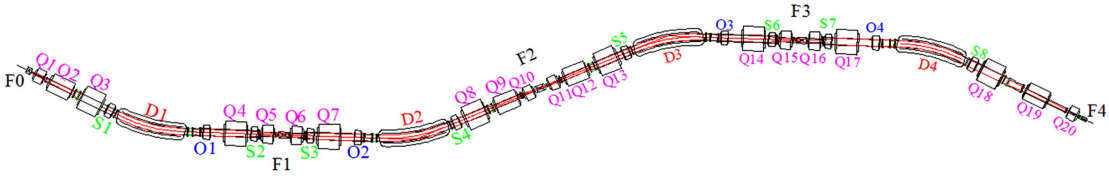


图 13 (网络版彩色)RIBLL2 布局图
Figure 13 (Color online) Layout of RIBLL2

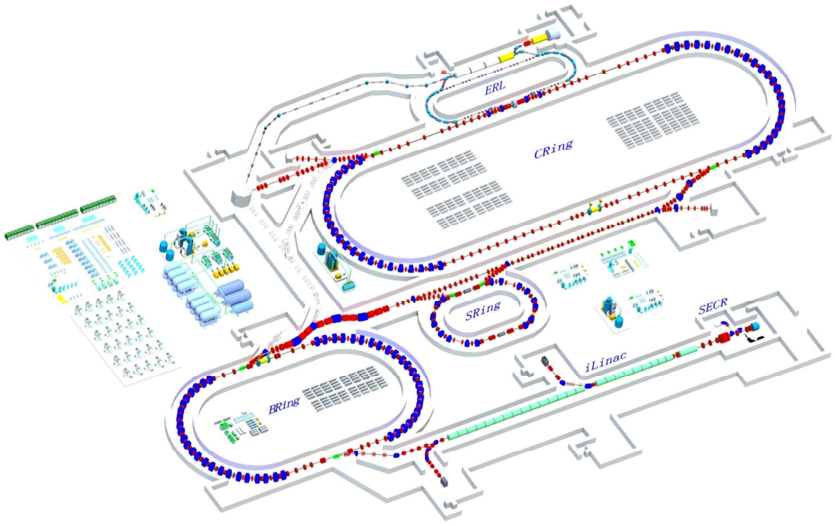


图 14 (网络版彩色)HIAF总体布局图
Figure 14 (Color online) Layout of HIAF

表 2 HIAF性能指标
Table 2 Main beam parameters of HIAF

参数		BRing	CRing
周长(m)		440.2	880.4
磁刚度(T_m)		34.0	43.0
接受度(πmmmrad)		250×100, $\Delta p/p$=±5×10^{-3}	130×30($\Delta p/p$=±5×10^{-4})
加速时间(s)		0.08(20T_m), 0.68(34T_m)	2 s
运行周期(s)		2.28~15	4~1200
离子种类		p~U	p~U
引出能量(GeV/u)		0.80(U^{34+}), 2.4(U^{76+}), 9.3(p)	1.1(U^{34+}), 3.3(U^{76+}), 12.0(p)
引出离子数(ppp)	U^{34+}	2.0×10^{10}~5.0×10^{10}	2.0×10^{11}~3.0×10^{11}
	U^{76+}	1.0×10^{10}~2.0×10^{10}	5.0×10^{10}
	p	1.0×10^{12}	3.0×10^{12}

在周恩来总理提出建立的中国科学院兰州物理研究室基础上发展起来的. 经过逾半个世纪的发展, 近代物理研究所已成为在国际上有重要影响的重离子科学综合研究中心, 是一个依托大科学装置, 主要从事核物理基础前沿和重离子束应用研究、同时发展先进粒子加速器及核应用技术的研究所. 主要研究方向有: 原子核物理、原子与分子物理、高能量密度物理、材料科学、生命科学、ADS嬗变系统、先进粒子加速器等.

中国科学院近代物理研究所通过几代人的不懈努力和3项大科学工程建设, 建成了兰州重离子加速器(HIRFL)国家重大科技基础设施, 主要技术指标达到国际先进水平, 为我国重离子物理及交叉学科研究创造了先进的实验条件, 取得了以新核素合成[35,36]、原子核质量精确测量[37,38]、重离子治癌[39]为代表的一批重要科研成果, 使我国进入重离子物理及交叉学科研究的国际先进行列. 同时, 在核技术产业化方面也取得了重要进展, 为我国科技、经济、社会的发展和国家安全作出了贡献.

中国科学院近代物理研究所共取得科研成果660多项, 其中获国家奖17项、省部级奖158项. 获得的主要科技奖项有: 兰州重离子研究装置, 获得1992年国家科技进步一等奖; 重质量丰中子新核素的合成、鉴别和研究, 获得1999年国家自然科学二等奖; 中重缺中子区近滴线新核素合成及核结构实验研究, 获得2007年国家自然科学二等奖; 超导高电荷态ECR离子源, 获得2008年国家科技进步二等奖; 兰州重离子加速器冷却储存环工程, 获得2009年度中国科学院杰出成就奖和2012年国家科技进步二等奖. 研究成果8次入选全国十大科技成就、科技新闻、科技进展

和全国基础研究十大新闻. “新核素合成研究”入选“创新中国”的60项科学成就.

3 结论

重离子加速器在核物理、原子物理、天体核物理等研究领域具有重要的科学意义; 在核探测、辐射医学以及医学物理等应用领域具有重大的社会需求; 在核物理、核技术、辐射生物学、材料、生物与农业等交叉学科领域具有重要的应用前景. 重离子加速器为促进人类发展和社会进步做出了巨大贡献.

参考文献

1 Yang B F, Guan X L, Cao X P, et al. Progresses in the project of upgrading HI-13 tandem accelerator at CIAE (in Chinese). Nucl Technoques, 2008, (1): 41–46 [杨丙凡, 关遐令, 曹小平, 等. HI-13 串列加速器升级工程进展与现状. 核技术, 2008, (1): 41–46]
2 Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. General design of the CSR project in IMP. High Energy Phys Nucl Phys, 2006, 30: 335–343
3 Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. Heavy ion cooler-storage-ring synchrotron in Lanzhou (in Chinese). High Power Laser Particle Beams, 2008, 20: 1787–1794 [夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器冷却储存环. 强激光与离子束, 2008, 20: 1787–1794]
4 Xia J W, Zhan W L, Yuan Y J, et al. Heavy ion synchrotron and cooler-storage-Ring in Lanzhou (in Chinese). Atomic Energy Sci Technol, 2009, 43(Suppl): 150–158 [夏佳文, 詹文龙, 原有进, 等. 千兆电子伏重离子加速器—兰州冷却储存环. 原子能科学技术, 2009, 43(增刊): 150–158]
5 Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. The heavy ion cooler-storage-ring project (HIRFL) at Lanzhou. Nucl Instr Met A, 2002, 488: 11–25
6 Zhan W L, Xia J W, Zhao H W, et al. HIRFL Today. Nucl Phys A, 2008, 805: 533c–540c
7 Proposal of High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility (HIAF) (in Chinese). 2015 [强流重离子加速器 HIAF 项目建议书, 2015 年]
8 Hahna H, Forsyth E, Foelsche H, et al. The RHIC design overview. Nucl Instr MethA, 2003, 499: 245–263
9 Yano Y. The RIKEN RI Beam Factory project: A status report. Nucl Instr Meth Phys Res B, 2007, 261: 1009–1013
10 Henning W F. The future GSI facility. Nucl Instr Meth A, 2004, 214: 211–215
11 FAIR Baseline Technical Report, 2006
12 Souliotis G A. A large acceptance spectrometer for reaccelerated radioactive beams at the proposed facility for rare isotope beams (FRIB) in the USA. Nucl Instr Meth A, 2008, 266: 4213–4217
13 Wei J, Arenius D, Bultman N, et al. Progress towards the facility for rare isotope beams. In: Proceedings of PAC2013, Pasadena, CAUSA, 2013. 1453–1457
14 York R C, Bollen G, Compton C, et al. FRIB: A new accelerator facility for the production of rare isotope beams. In: Proceedings of SRF2009, Berlin, Germany, 2009. 888–894
15 Avilov M S, Tecchio L B, Titov A T, et al. Design of the 50 kW neutron converter for SPIRAL2 facility. Nucl Instr Meth A, 2010, 618: 1–15
16 Liu W P. The prospects for accelerator-basednuclear physics facilities (in Chinese). CIAE, 2014, 43, 3: 150-156 [柳卫平. 加速器核物理大科学平台现状及展望. 物理, 2014, 43: 150–156]
17 Hahn H, Forsyth E, Foelsche H, et al. The RHIC design overview. Nucl Instr Meth A, 2003, 499: 245–263
18 Kubo T, Ishihara M, Inabe N, et al. The RIKEN radioactive beam facility. Nucl Instr Meth B, 1992, 70: 309–319
19 Yano Y. The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report. Nucl Instr Meth B, 2007, 261: 1009–1013
20 Geissel H, Weick H, Winkler M, et al. The Super-FRS project at GSI. Nucl Instr Meth B, 2003, 204: 71–85
21 Spiller P, Franchetti G. The FAIR accelerator project at GSI. Nucl Instr Meth A, 2006, 561: 305–309
22 Kester O, Barth W, Dolinskyy, O, et al. Status of the FAIR accelerator facility. In: Proceeding of IPAC2014, Dresden, Germany. https://inspirehep.net/record/1313754/files/wepro060.pdf
23 Kester O, Bazin D, Benatti C, et al. THE MSU/NSCL RE-ACCELERATOR ReA3, 2009. In: Proceedings of SRF2009, Berlin, Germany. Available from: http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/SRF2009/papers/moocau05.pdf
24 York R C, Bollen G, Compton C, et al. FRIB: A new accelerator facility for the production of rare isotope beams. In: Proceedings of SRF2009, Berlin, Germany. Available from: http://accelconf.web.cern.ch/Accelconf/SRF2009/papers/froaau02.pdf
25 Wei J, Arenius D, Bernard E, et al. The frib project—Accelerator challenges and progress.In: Proceedings of HIAT 2012, Chicago, ILUSA. Available from: https://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/HIAT2012/papers/mob01.pdf
26 Gales S. SPIRAL2 at GANIL: Next generation of ISOL facility for intense secondary radioactive ion beams. Nucl Phys A, 2010, 834: 717c–723c
27 Junquera T. Status of the construction of the spiral2 accelerator at ganil. In: Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada. Available from: http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/linac08/papers/tu102.pdf
28 Zhan W L, Xu H S, Xiao G Q, et al. Progress in HIRFL-CSR. Nucl Phys A, 2010, 834: 694c–700c

29 Zhao H W. Progress of high charge state ECR ion source (in Chinese). In: Proceeding of 3th National Accelerator Technology Conference, 2007 [赵红卫. 高电荷态 ECR 离子源进展. 见: 第三届全国加速器技术学术交流会论文摘要集, 2007]
30 Tang J Y, Wei B W. Theory and design of Cyclotrons (in Chinese). Changsha: China Science &Technology Press, 2008 [唐靖宇, 魏宝文. 回旋加速器理论与设计. 长沙: 中国科学技术大学出版社, 2008]
31 Shi L T. Research on Simulation and Optimization of HIRFL-SFC (in Chinese). Dissertation of Masteral Degree. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014 [石磊太. HIRFL-SFC 模拟及优化研究. 硕士学位论文. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2014]
32 Guo Z Y, Zhan W L, Zhou J Q. Experimental setup at RIBLL1 (in Chinese). High Energy Phys Nucl Phys, 1996, (6): 491–496 [郭忠言, 詹文龙, 周建群, 等. RIBLL1 终端实验装置. 高能物理与核物理, 1996, (6): 491–496]
33 Yao N. New developments for the in-flight separators FRS & RIBLL2. Dissertation of Doctoral Degree. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005 [姚楠. 次级束线设备 FRS 和当前 RIBLL2 的优化. 博士学位论文. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2005]
34 Yang J C, Shi J, Chai W P, et al. Design of a compact structure cancer therapy synchrotron. Nucl Instr Meth A, 2014, 756: 19–22
35 Gan Z G. Study of the transuriumnuclei (in Chinese). Dissertation of Doctoral Degree. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000 [甘再国. 超铀核的研究. 博士学位论文. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2000]
36 Huang M H, Gan Z G, Fan H M, et al. The driving potential and cross sections for synthesizing super heavy nuclei with hot fusion (in Chinese). Acta Phys Sin, 2008, 57: 1569–1575 [黄明辉, 甘再国, 范红梅, 等. 超重核合成时的驱动势与热熔合反应截面. 物理学报, 2008, 57: 1569–1575]
37 Tu X L, Xu H S, Wang M, et al. Direct mass measurements of short-lived A=2Z–1 nuclides ^{63}Ge, ^{65}As, ^{67}Se, and ^{71}Kr and their impact on nucleosynthesisin the rpprocess. Phys Rev Lett, 2011, 106: 112501
38 Zhang Y H, Xu H S, Litvinov Y A, et al. Mass measurements of the neutron-deficient ^{41}Ti, ^{45}Cr, ^{49}Fe, and ^{53}Ni nuclides: First test of the isobaric multiplet mass equation in fp-shell nuclei. Phys Rev Lett, 2012, 109: 102501
39 Xiao G Q, Zhang H, Li Q, et al. Progresses of heavy-ion cancer therapy in IMP (in Chinese). Nucl Phys Rev, 2007, 24: 85–88 [肖国青, 张红, 李强, 等. 中国科学院近代物理研究所重离子束治癌进展. 原子核物理评论, 2007, 24: 85–88]

Heavy Ions Research Facility in Lanzhou (HIRFL)

XIA JiaWen, ZHAN WenLong, WEI BaoWen, YUAN YouJin, ZHAO HongWei, YANG JianCheng, SHI Jian, SHENG LiNa, YANG WeiQing & MAO LiJun

National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Heavy ions accelerator has greatly scientific significance in nuclear physics, atomic physics and astrophysics. It is also of great social needs in many application fields, such as nuclear detection, radiation medicine and medical physics. In addition, Heavy ions accelerator has important application prospects in the interdisciplinary fields of nuclear physics, nuclear technology, radiation biology, material science, biology and agriculture. Therefore, heavy ions accelerator makes great contributions to the promotion of human development and social progress. At present, there are more than 30 large scale heavy ions accelerators. And the main overseas heavy ions accelerators are the BNL-RHIC in the United States, the RIKEN-RIBF in Japan, the MSU-FRIB in the United States, the GANIL-SPIRAL2 in France and the FAIR in Europe which is under construction. In China, however, there are the BRIF in Beijing and the HIRFL in Lanzhou being operation and High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF) which will be built in Huizhou. Heavy Ions Research Facility in Lanzhou (HIRFL), one of the most important research facilities for nuclear physics in the world, is the largest scale heavy-ion accelerator facility with the most ion species and the highest ion energy in China at present. And its main parameters have reached international advanced level. HIRFL is composed of ECR ion source, sector focused cyclotron (SFC), separated sector cyclotron (SSC), radioactive ion beam lines RIBLL1 and RIBLL2, cooler storage rings CSRm and CSRe, and many terminals. HIRFL can accelerate all ion species and provide high quality stable beams and radioactive beams with many ion species and broad energy ranges to carry on the heavy-ion physics and crossing discipline research. This paper is mainly to present the status of HIRFL and its progress, and the development of heavy-ion accelerator facilities at home and abroad are also introduces briefly.

heavy-ion accelerators, cyclotron, synchrotron, storage ring, ions

doi: 10.1360/N972015-00472