

兰州重离子加速器的状态和发展*

王 义 芳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 文章首先简要地介绍了世界上重离子加速器的发展状态,然后对兰州重离子加速器(HIRFL)的结构、建造过程、运行情况、多年来以及目前正在进行的主要改造项目进行了描述,为适应核物理及其相关学科的持续发展研究的需要,对 HIRFL 近期和将来的发展情况作了概括的描述。

关键词 重离子加速器, ECRIS, 放射性束流线, 冷却储存环

THE LANZHOU HEAVY ION RESEARCH FACILITY

WANG Yi-Fang

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract A brief overview is given of the development of heavy ion accelerators throughout the world. Then, the structure of the heavy ion research facility at Lanzhou, its construction, operation and upgrading over the years are described in more detail. In order to meet the requirements of continued research in nuclear physics and related disciplines, future developments are discussed briefly.

Key words heavy ion accelerator, ECRIS, radioactive beam line, cooling storage ring

加速器最初是作为核物理研究的工具出现和发展起来的。1932年,世界上第一台加速器在英国问世,它是采用整流倍压原理得到了700kV直流高压的倍压加速器,成功地加速了质子。其后,加速器技术得到迅速的发展,不同加速模式的加速器纷纷出现,加速离子的能量迅速提高。20世纪60年代以来,随着核物理研究的发展,对重离子束的要求越来越迫切。80年代后,一批中能重离子加速器建成出束,如德国 GSI、法国 GANIL、日本 RIKEN 等等,为核物理研究提供了有力的工具。近年来,随着放射性束物理的出现和发展以及其他核物理研究的需要,一些能产生具有更高能量、更大束流强度的重离子加速器正在研制之中,如法国 GANIL 的 SPIRAL、德国 GSI 的 SIS - ESR、日本 RIKEN 的 MUSES 和中国的 HIRFL - CSR 等。看来,21世纪前20年,核物理研究和其他应用物理研究的一批新的成果将要涌现出来。

在1988年建成出束的兰州重离子加速器(HIRFL)是目前世界上已有的8台大型重离子加速器之一,也是国内现有的3台大型加速器之一。它的建成,对我国核物理事业的发展 and 加速器技术的提高起到了极大的推动作用。

1 HIRFL 的结构

兰州重离子加速器是一个有两级加速的组合式回旋加速器系统(如图1)。它的注入器是一台 K 值为 69 的螺旋扇回旋加速器(SFC),主加速器是一台 K 值为 450 的分离扇回旋加速器(SSC)。由位于地下室的电子回旋共振离子源(ECRIS)引出的离子束经其后的束运线(BL0)进行电荷态选择、聚束、相空间匹配等束流制备之后,垂直注入到 SFC 中心,并经过静电螺旋反射镜进入 SFC 的中心平面,在 SFC 加速后的束流,通过前束运线(BL1)输送到 SSC,其间,束流经过碳膜的剥离器提高离子的电荷态,经过磁四极透镜和聚束器分别调整束流的横向和纵向性质,以便把与 SSC 的接收度最佳匹配的束流送进主加速器。在 SSC 经过第二次加速后的束流,由后束运线(BL2)输送到 8 个物理实验终端以提供科研人员做各种基础和应用研究的实验,其中也包括 1997 年建成的具有世界先进水平的放射性束流线(RIBLL)。同时,连接前、后束运线还建成了一条旁路束运线,

* 2000 - 09 - 18 收到初稿,2000 - 11 - 27 修回

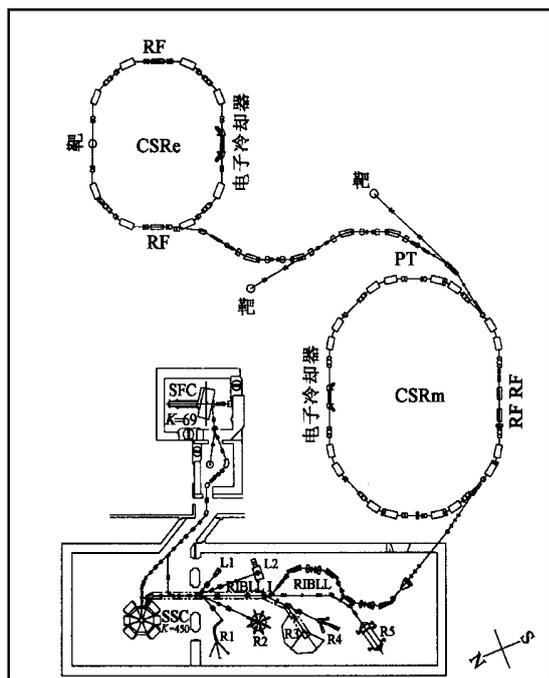


图1 HIRFL和CSR简图

通过它可以把从SFC来的离子束直接送到各个终端进行低能物理实验。

2 HIRFL 的建造过程

在20世纪60年代初期,中国科学院近代物理研究所的一台直径为1.5m的经典回旋加速器可以提供质子、氘、 α 等轻离子束。随着核物理研究的发展,对加速器提供重离子束的要求日益强烈地被提出来了。70年代初,这台加速器经改造可以加速碳、氮、氧等轻的重离子,在我国率先开展了一批低能重离子物理的实验研究。由于它能量比较低,离子种类少,不能满足进一步研究工作的需要。在此期间,经过调研,提出了一个筹建中能重离子加速器系统的方案:改造原有的经典回旋加速器为扇聚焦回旋加速器作为注入器,并建一台分离扇回旋加速器作为主加速器。1976年11月该项目经国家计委批准立项,称作“7611工程”。此后,这项工程便全面展开。

在建造过程中,遇到了许多当时很难解决的问题,如SSC的四扇磁铁总重有2000多吨,为了使这些磁铁的含碳量均匀,满足要求并且没有气泡等,在富拉尔基第一重型机械厂专门成立了攻关小组,经过了多次实验才得以解决;为主线圈供电的直流电源为4000A/185V,且电源稳定度为 5×10^{-6} ,这么大功率的电源又要求如此高的稳定度在我国当时是绝无仅有的,通过电源组专家们的长期钻研,终于得到

了满意的结果;SSC的真空室体积为 100m^3 ,整体安装到位,且一次抽空就达到了好于 $1 \times 10^{-5}\text{Pa}$ 的要求;设计了由主线圈、调差线圈和附着在极面上的36对垫补线圈所组成的系统,以便建立加速各种束流所需要的等时性场;高频腔及发射机也都得到了较好的结果等等。同时,这些攻关项目的实现,也有有力地促进了我国相关工业的发展。经过大家多年的努力,也由于改革开放给我们创造了与国外交流学习先进经验的良好机会,终于在1988年调出了HIRFL的第一种束流——C 50 MeV/u。

3 运行状态和成果

HIRFL自1989年开始运行以来到现在已有10多年的历史了。这些年来加速器运行了56200多小时,先后为国内40多所大学和科研院所提供了50多种离子束,做了237项次实验。到目前为止,提供了有最高能量的C-100 MeV/u和最重为Xe的离子束,供束效率在逐年增加,已达到70%以上。

这些年来,研究人员利用HIRFL开展了远离稳定线新核素的合成和研究、中低能重离子碰撞、热核性质研究以及重离子束应用研究,并取得了丰硕的成果。如首次合成的新核素达13种以上,研究了十多种重要核素的奇异衰变性质;利用新建的兰州放射性束流线,围绕放射性奇异核开展了丰质子核、丰中子核的反应截面和密度分布等一系列研究;在高激发热核性质前沿领域研究中也取得了可喜的成果;在重离子应用基础研究方面的材料科学、凝聚态物理、生命科学和交叉科学的研究方面都取得了重要进展。为此,多次获得国家、院和省部级奖励,并先后4次在全国十大科技新闻等得到表彰。

4 一些改进工作

在加速器系统投入运行之后,一方面要解决在建造过程中存在的遗留问题,另一方面随着核物理研究的不断深入,对加速器的性能指标提出了新的要求,例如,离子的种类、束流强度和其他束流品质等,特别是放射性束物理的出现对HIRFL有了更高的要求。像世界上所有加速器系统一样,改进提高工作始终没有停止过。下面就一些主要的改进项目作简要的描述。

4.1 电子回旋共振离子源

电子回旋共振离子源(electronic cyclotron reso-

nance ion source, ECRIS) 是 20 世纪 70 年代后期出现的一种新型离子源,它是提供强流高电荷态离子束最有效的装置.其束流具有离子种类广、电荷态高、束流强度大、长期稳定性和重复性能好、能散和发射度低等显著优点.它的出现不仅给原子物理、表面物理和一些新材料的研究等提供了有力的工具,而且作为重离子加速器的源,可以显著提高加速器的引出能量、束流强度,改善束流品质.因此,十多年来,高电荷态 ECRIS 一直是国际离子源领域发展和研究的热点.

1988 年,中国科学院近代物理研究所从法国 Grenoble 购买了一台 10GHz 的 ECRIS 并在该源上做了大量的研究工作.1992 年,该源安装在线,取代了原有的内离子源 PIG 源为 HIRFL 提供束流,并建立了相应的束流线和注入系统.1995 年,中国科学院近代物理研究所自行研制了一台 10GHz ECRIS,并建立了 ECRIS 的新的工作模式^[1],使束流强度明显提高(见表 1).为了进一步提高流强,特别是重离子和金属离子流强,1998 年我们研制了一台 14.5GHz 的 ECRIS,得到了很好的结果,表 2 给出了该源与世界上几个实验室高水平 ECRIS 所给出的结果的比较.当该离子源使用 10GHz 和 14.5GHz 双频馈入后,会得到更好的结果.

表 1 10GHz ECRIS 改进前后束流强度比较

离子	束流强度($e\mu A$)			
	ECRI (刚进口时的指标)	ECRI (改进后的指标)	ECR2 (传统模式)	ECR2 (新模式)
$^{40}Ar^{8+}$	110	220	245	430
$^{40}Ar^{9+}$	45	90	125	300
$^{40}Ar^{11+}$	10	40	25	80

表 2 世界上几个实验室高水平 ECRIS 的结果比较

ECRIS	LBL AECRU	Grenoble 1.4T Caprice	GANIL ECR4M	Catania SERSE [*]	RIKEN ECRIS	IMP ECR3
RF (GHz)	14 + 10	14.5	14.5	14.5	18	14.5
O^{6+}	1150	1130	1031	430	500	560
O^{7+}	306	180	142	225	130	100
Ar^{8+}		560	650			460
Ar^{11+}	270	190	200	257	300	160
Ar^{12+}	192	100	100	200	180	80
Ar^{13+}	120	40	34	122	95	23
Kr^{18+}	100	50			80	60
Kr^{19+}	79	40			50	50
Kr^{20+}	63	25		67	30	25
Xe^{26+}		35	12	70	45	50
Xe^{27+}		20	5	45		25
Xe^{28+}	21	10	3	30		12

目前,一台超导 ECRIS 的研制已经开始.它利用超导线圈产生的 3.0T 的轴向磁镜场和所需的六极

场叠加,形成适合高电荷态离子产生和约束的三维最小 B 磁场结构,并使用 18GHz 和 14.5GHz 双频微波功率馈入.这个源着眼点是极重离子、超高电荷态.它的建成,对于实现 HIRFL - CSR 的目标具有十分重要的意义.

4.2 ECR 束运线的建立和改进^[2]

注入器 SFC 最初运行的时候,我们使用内离子源潘宁源(PIG)提供重离子束.这种源的优点是可以提供较大流强的轻的重离子束,如 C、N、O 等.但对于较重的离子束,如 Ar 以上的离子,其束流强度迅速下降,以致于无法加速.这种源平均使用七八小时就需要拉出来清洗一次(每次清洗需 1—2 小时),一方面运行效率低,另一方面加大了运行人员的劳动强度,且有放射性,影响身体健康.由于它本身就是一个气源,工作状态下加速器的真空度不能很高,较重的离子束与剩余气体反应截面大,即使能加速也基本上损失殆尽.由于内源占据了加速器的中心区,以致于束流的垂直聚焦性能变差,影响束流性质. ECRIS 的出现正好弥补了这些缺陷,重的重离子的产额大大地高于前者;原则上没有运行寿命问题;其源放在器外,保证了加速器内有高的真空度;从 ECRIS 出来的束流经其后的束运线电、磁元件的调整,可以得到在六维相空间与加速器的要求最佳匹配的束流注入到 SFC 内,提高了传输效率和束流品质.

鉴于如此多的优点,1992 年我们建立了 ECR 束运线和相应的注入系统,同时,更换了已经老化的主线圈,重新测磁.1996 年,又对该束线进行了进一步的改造和完善,建立了高分辨的电荷态分析系统,可以半频聚束的三角波聚束器、束流调制器等,使加速器的运行效率由原来的 30% 提高到现在的 70% (包括其他改进项目的综合效果).

4.3 SFC 的真空问题

如上所述,SFC 在运行初期,使用内离子源 PIG 源提供重离子束.对于真空来说,由于它本身就是一个气源,所以对 SFC 的真空室的要求不是很高,真空度仅为 1×10^{-4} Pa,真空室漏率较大.我们从理论上做了许多研究和计算工作^[3],结果表明 SFC 的真空度应好于 1×10^{-5} Pa,特别是对重的重离子更是如此.在运行过程中的经验也充分表明了这一点.1997 年夏季,我们对该真空室做了细致的清洁处理,改善了密封性能,增大了泵的抽速等,其真空度提高了近半个量级.但这还不能满足加速较重的重离子的要求.

从1999年起,我们开始研制一个 SFC 新真空室.我们考虑了双层真空室的整体结构(见图2),把所有线圈和其他出气率较高的部件置于低真空室内,提高了低温泵的抽速.为确保真空室的安全,在高、低真空室之间的壁上安装了两套安全阀系统.该真空室的加工工作正在进行,2000年年底完成.2001年5月开始正式安装检漏.

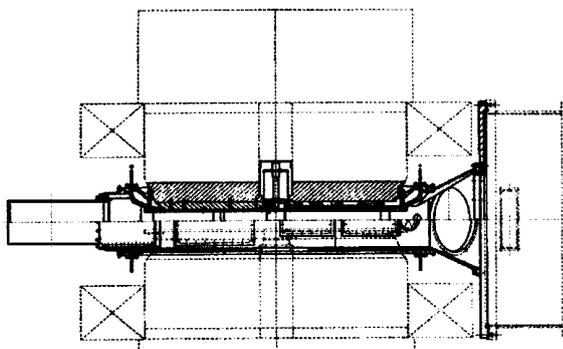


图2 SFC 双层真空室结构图

4.4 纵向相空间匹配问题

从 SFC 引出的束流在纵向相空间中有参数 $\Delta \phi$ 和 ΔW , 这代表着束流的纵向长度和能散. 束流通过 60 多米长的束运系统进入 SSC 时, 由于能散的作用, 纵向长度变长, 已不能为 SSC 中的高频加速相宽所全部接受. 也就是说, 在加速相宽以外的束流将损失掉. 因此, 在束运系统的中部, 放置了聚束器, 即高频谐振腔. 当束流通过聚束器时, 跑在前面的能量高的束流被减速(相对于中心离子); 反之, 后面的被加速. 经过一段距离束流进入 SSC 后, 纵向长度 L 被压缩以便与 SSC 的高频相位相匹配. 由于历史的原因, 该聚束器的指标不能满足要求. 目前, 一个新的聚束器 BI 正在研制之中(如图3). 它通过短路片

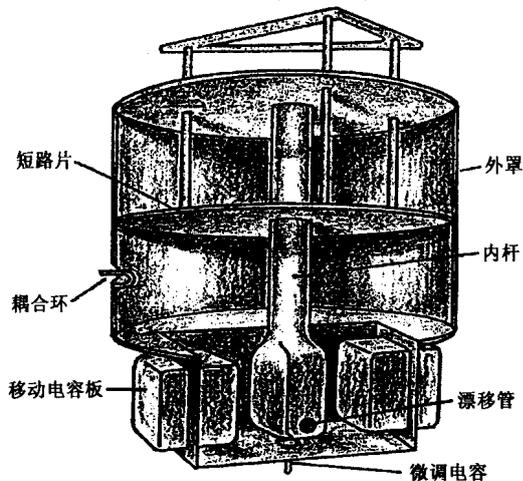


图3 BI 腔体结构示意图

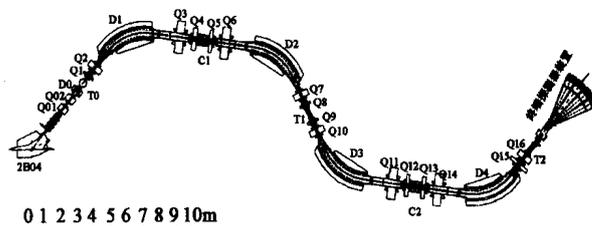
和可移动电容板合作完成所需频率的调谐(22—54 MHz), 高频电压的最大幅度为 110kV. 按计划 2001 年年底可以投入使用.

5 HIRFL 的发展

随着核物理研究的迅速发展, 特别是 20 世纪 80 年代中期以后, 放射性束物理的出现和发展对加速器提出了更高的要求, 为了适应这新的情况, 我们又提出了新的发展规划.

5.1 兰州放射性束流线(RIBLL)

1997 年 7 月, 经过 20 个月的精心设计、加工和安装调试, 一个高水平的放射性束流线(见图4)建成并投入了运行^[4].



最后确定了冷却储存环装置.其结构如图1所示.它是由周长分别为161.201 m的主环(CSRm)和128.961 m的实验环(CSRe)所构成.作为HIRFL的增能器,它可以把HIRFL提供的轻的和重的重离子分别加速到900 MeV/u和400 MeV/u的能量.从HIRFL来的束流在主环里将经过累积、冷却和加速的过程.

表3 RIBLL主要性能指标及与RIPS, LISE, FRS, A1200的比较

	RIBLL (设计)	RIBLL (测试)	RIPS RIKEN	LISE GANIL	FRS GSI	A1200 MSU
立体接收角 ΔQ (msr)	> 5	≥ 7	~ 5	1.0	0.7-2.5	0.3-4.3
动量接收度 $\Delta P/P$	10 %	10 %	6 %	5 %	2.0 %	3 %
最大磁刚度(Tm)	4.2	4.2	5.76	3.0	5-18	5.4-7.2
磁刚度分辨率 $\Delta B_0/B_0$	6×10^{-4}	6×10^{-4}	$\sim 10^{-3}$	$\sim 1.72 \times 10^{-3}$	1.25×10^{-4}	3×10^{-4}
电荷态分辨 $Q/\Delta Q$	50-120	≥ 150	50-100	50-100	50-120	50-100
质量分辨 $A/\Delta A$	> 200	≥ 300	> 100	> 100	> 200	> 150
束流入射角	0°-5°	0°-5°	0°-15°	0°-2°		
最短 RIB 分离时间(μ s)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

表4 CSR主要性能表

CSRm	
离子种类	稳定核:C-U RIB(A < 238):丰中子,丰质子
最大能量	900 MeV/u($^{12}\text{C}^{6+}$) 400 MeV/u($^{238}\text{U}^{72+}$)
强度	10^5-10^8 pps(稳定核)
动量接收度	$\Delta P/P \sim 10^{-4}$ (稳定核) $\Delta P/P \sim 10^{-3}$ (RIB)
辐射度	$\leq 5\pi$ mmmrad(稳定核) $\sim 25\pi$ mmmrad(RIB)
CSRe	
离子种类	全剥离重离子:C-Ta 类氢,类氦重离子:Ta-U RIB(A < 238):丰中子,丰质子
最大能量	600 MeV/u($^{12}\text{C}^{6+}$) 400 MeV/u($^{238}\text{U}^{90+}$)
强度	10^{11-14} pps(稳定核,内靶) 10^{7-12} pps(RIB,内靶)
动量接收度	$\Delta P/P \sim 10^{-5}$
辐射度	$\leq 1\pi$ mmmrad

该项工程已经在1999年6月正式批准立项,将在2004年建成.其后,物理学家将使用这些高品质的重离子束进行深入的研究.极端条件下核物质性质研究、高电荷态原子物理研究,以及超重核的探索性研究和交叉应用方面如治癌等研究,可望在HIRFL-CSR上取得更加丰硕的成果.

6 小结

HIRFL运行10多年来,经过不断地改进,运行水平逐步提高.实验研究人员在HIRFL上做出了许多可喜的成果.然而,刚刚兴起的放射性束物理和其他学科的研究以及应用方面的研究对加速器提出了更高的要求,已建成的RIBLL和正在建造的CSR工

程都对作为注入器的HIRFL提出了很硬的指标,特别是要加速全粒子,束流强度要在现有的基础上提高1-2个量级;另一方面,加速器已面临老化,许多设备需要逐步更新.因此,我们必须做好如下几方面的工作:精心研制冷却环CSR;进一步做好HIRFL的改进工作;逐步更新所有的老化设备;同时,要做好现有加速器的运行工作,一方面多出一些好的成果,另一方面为将来在CSR上作放射性束物理研究打好基础.

参 考 文 献

- [1] Zhao H W, Liu Z W, Zhang W *et al.* A New Working Model and a New Magnet Field Configuration Tested on HIRFL ECRIS. In: Donald P M, Judith E. R ed. Proc. of 13th Inter. Workshop on ECRIS. Chicago(USA), 1997. 34
- [2] Wang Y F, Wei B W. Proceeding of HIRFL. In: Chin Y H, Kihara M, Kobayashi H *et al.* Proceedings of The First Asian Particle Accelerator Conference (APAC98). Tsukuba(Japan), 1998. 232
- [3] 唐靖宇,雷文,王义芳. HIRFL束流在真空中的损失.见:林郁正,王光伟编.第六届全国加速器物理学术交流会论文集.张家界(中国),1997. 56[Tang J Y, Lei W, Wang Y F. The Beam Losses in Vacuum for HIRFL. In: Lin Y Z, Wang G W ed. Proceedings of the Sixth Particle Accelerator Physics Symposium. Zhangjiajie(China), 1997. 56(in Chinese)]
- [4] Zhan W L, Guo Z Y, Liu G H *et al.* Radioactive Beam Line in Lanzhou. In: Chin Y H, Kihara M, Kobayashi H *et al.* Proceedings of the First Asian Particle Accelerator Conference (APAC98). Tsukuba(Japan), 1998. 605
- [5] Xia J W, Wang Y F, Rao Y N *et al.* HIRFL Status and HIRFL-CSR Project in Lanzhou. In: Chin Y H, Kihara M, Kobayashi H *et al.* Proceedings of The First Asian Particle Accelerator Conference (APAC98). Tsukuba(Japan), 1998. 342