

粒子加速器

——加速近物所与高能所交流合作

赵红卫

(中国科学院近代物理研究所 730000)

值此中国科学院高能物理研究所(以下简称“高能所”)成立 50 周年之际,很高兴应约写一篇有关高能所与中国科学院近代物理研究所(以下简称“近物所”)交流合作方面的文字。借此机会回首过往,一方面表示祝贺,祝贺高能所 50 年来在粒子物理、粒子加速器和人才培养等方面取得的辉煌成就!另一方面表达感谢,感谢高能所与近物所之间的交流与合作,感谢高能所过去这么多年对近物所发展给予的支持与帮助!由于本人对两所早期发展历史和合作知之甚少,因此本文主要基于我的亲身经历,回顾两所在粒子加速器领域的交流、合作、相互协助乃至“竞争”,疏漏偏颇之处,在所难免。

一、历史渊源

近物所和高能所都是源自原中国科学院近代物理研究所(北京)这所新中国核科学技术研究机构的“老母鸡”,属同根同源。原中国科学院近代物理研究所先后改称中国科学院物理研究所(1953 年 10 月)和中国科学院原子能研究所(1958 年 7 月)。1957 年春季在原中国科学院物理所内成立了“兰州物理研究室”,同年下半年由杨澄中先生率领 23 位科学家和科技工作者迁往兰州,1962 年 1 月正式成立了现在的中国科学院近代物理研究所,定位主要研究方向是核物理,并为国防需求服务。1967 年 11 月原中国科学院原子能研究所建立了高能物理研究所筹备组,于 1973 年 2 月在原子能所“一部”基础

上正式成立了中国科学院高能物理研究所,主要研究方向是粒子物理。可见,近物所与高能所是从“老母鸡”中分离出的“兄弟”单位,一个是核物理方向,一个是粒子物理方向,同属物质最基本结构的两个层次,相互关联,难于割舍,在学科上也是难于分离的“姊妹”学科。两所这种天然的“亲密血缘”关系,注定必然有较多的交流与合作,而恰是粒子物理核物理共同的研究装置需求——粒子加速器,加速了两所的交流与合作。

近物所与高能所的老一辈科学家曾在原中国科学院近代物理研究所一起工作、协作完成科研项目,开创了中国粒子加速器建造之先河,开启了中国人依托自主研发的离子加速器开展实验核物理研究之滥觞,树立了团队协作、自主研发大科学装置之典范。1952—1955 年,赵忠尧先生主持设计建造我国第一台质子静电加速器(700 keV),近物所杨澄中、金建中、邬恩九和高能所叶铭汉、徐建铭等一批老一辈科学家都是主要的贡献者。在当时非常艰苦的条件下,老一辈科学家们竭尽全力、团结协作、攻坚克难,自主解决了一系列技术难题,研制成功我国首台质子静电加速器。这台质子加速器的设计与建造既培养了人才,又积累了加速器核心技术,同时开始了中国人自己的核反应实验研究。图 1 是当年赵忠尧先生主持设计的 700 千伏低压静电加速器和 200 万伏高压静电机的总结报告,图 2 是这台 700 keV 质子静电加速器照片。

近物所和高能所都是依托大型粒子加速器开展前沿基础研究及其相关应用的研究所。过去几

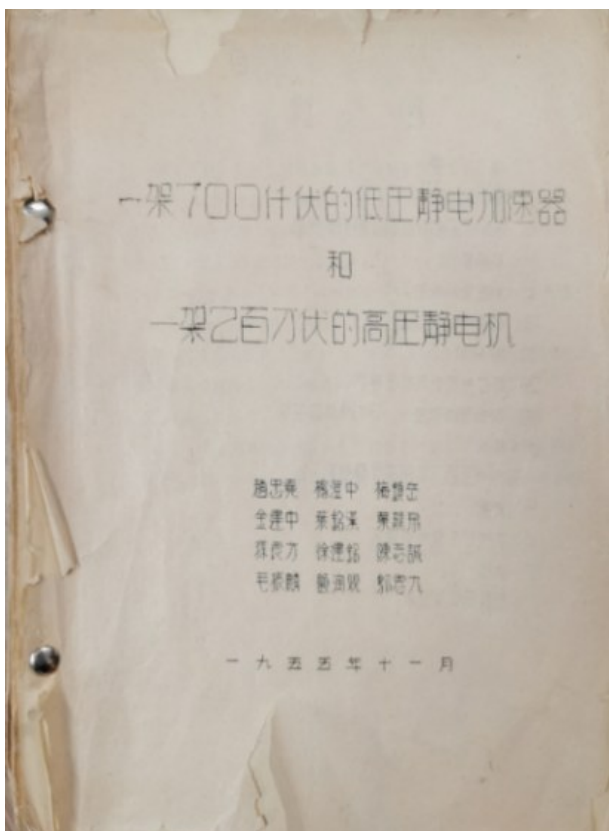


图1 赵忠尧先生主持设计我国首台质子静电加速器的总结报告



图2 赵忠尧先生主持建造的我国首台质子静电加速器

十年里,两所里程碑式的重大发展,无不伴随着大型粒子加速器大科学装置的建造和升级改造。二十世纪八十年代,近物所建成大型分离扇回旋加速

器(HIRFL-SSC),高能所建成北京正负电子对撞机(BEPC);本世纪前十年,近物所建成重离子冷却储存环(HIRFL-CSR),高能所实施了北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC-II);近十年,近物所与高能所合作完成了中科院战略性科技先导专项(A类)“未来先进核裂变能—加速器驱动的嬗变系统(ADS)”中的“质子超导直线加速器注入器”研究项目;高能所完成了中国散裂中子源工程(CSNS)建设,投入运行后,开始实施CSNS二期升级工程;近物所开始建造强流重离子加速器(HIAF)和加速器驱动的嬗变研究装置(CiADS)。可看出,几乎在同一时期两所都有大型粒子加速器设计与建造,两所加速器领域的专家交流与合作是必然的,双方的加速器专家都曾参与了对方正式组织的加速器方案研讨、技术方案论证、关键设备性能现场测试与验收,双方加速器专家、研究小组以及朋友之间的私下讨论和自由学术交流更是不计其数。过去几十年来,近物所在设计、建造和运行大型离子加速器大科学装置期间,高能所专家、同事在多方面曾给予近物所大力支持、帮助与合作,谢家麟、方守贤、徐建铭、陈森玉、吴英志、王书鸿、张闯等老一辈加速器科学家曾给予近物所许多指导性建议。这些交流、合作与建议使近物所受益匪浅,在近物所的离子加速器大科学装置设计与建造过程中发挥了重要作用。

二、HIRFL-SSC与高能所

1976年11月,国家批准兰州重离子加速器装置HIRFL工程(核心加速器是大型重离子分离扇回旋加速器SSC)正式立项,称为“7611工程”。由于当时缺乏设计和建造经验,工程批复后花费了数年时间开展详细的工程设计研究和关键技术预研,SSC较大规模的建造和安装是在二十世纪八十年代进行的。SSC重离子加速器于1988年12月12日建成出束,1989年11月,HIRFL重离子加速器装置通过国家竣工验收,投入运行至今。SSC至今也是国际上三大常温重离子回旋加速器之一(如图3所



图3 HIRFL-SSC重离子加速器

示)。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,向国内外开放。

近物所SSC和高能所BEPC核心设备的加工制造都是在二十世纪八十年代初期进行的,在当时的计划经济年代,在一些高精尖设备的加工制造方面,两所工程指挥部及工程技术人员有一些交流,曾相互协调、帮助,工程遇到困难也曾一起请示汇报中科院相关领导协调解决。例如,BEPC一部分磁铁当年是在上海电机厂加工制造的,SSC大型磁铁的测磁支架和垫补线圈也是在上海电机厂加工制造的,中科院和高能所的领导曾与上海电机厂协调,在测磁支架与线圈加工等方面给予近物所帮助。

1988年9月,是SSC和BEPC束流调试最紧张、也是两工程指挥部及加速器调束人员压力最大的时候。我当时作为硕士研究生参与束流诊断组调束运行值班,经常在SSC中央控制室目睹老师们调束。当时科学院希望SSC和BEPC能够在年底前出束或对撞成功,两工程核心调束人员每天加班加点,设备负责人及维护人员全天候在所里待命,设备出现故障立即抢修,每天24小时束流调试不间断。听老师们说,SSC和BEPC的调束,某种程度上说是“竞争”,比看谁先“报喜”。10月16日,听说BEPC对撞成功的消息后,SSC工程指挥部和核心调束人员倍感压力。每天晚上我们都能看到魏宝文老师坐在中央控制室,与其他老师讨论问题,指

挥调束,我也分明感觉到了老师们的压力。但是,这种压力并没有让人沮丧懈怠,反而是转换成了大家废寝忘食迎难而上、解决问题的强大动力。终于,12月12日凌晨传来好消息,50 MeV/A $^{12}\text{C}^{6+}$ 碳离子束引出成功,随后几天,国内外贺电像雪花一样纷至沓来。

我第一次迈进高能所的大门是1989年4月初。魏宝文老师和沈志清老师1988年9月为我硕士论文确定的题目是“回旋加速器重离子束流强度非拦截式测量”。初衷是希望在兰州重离子加速器注入器SFC出口和SSC入口分别放置一台非拦截式束流强度测量设备,监测束流强度稳定性和前束线传输效率,希望我研制一台束流变压器,即类似DCCT的束流探测器。我查阅了大量国内外文献,发现要做一台能够精确测量微安量级重离子束的束流变压器很难,主要难点是如何提高灵敏度和信噪比。曾看到高能所老师写的两篇文章,是报道他们研制的测量电子束束流强度的类似束流变压器的探测器。我专程去北京请教,在高能所打听了三位老师,才辗转找到文章的第一作者(很遗憾现在记不清他的名字了)。我敲门进入那位老师的办公室,告诉他我是专程从兰州来向他请教的,他很热情地接待了我。这位老师曾设计并研制过电子束束流变压器样机,我主要请教他束流变压器结构设计、屏蔽和如何把部分放大器埋入探测器内等技术问题,他用了一个多小时给我这个首次见面的学生不厌其烦地讲解他是如何设计和实验测试的以及研制的艰难过程等,还拿出一张图纸给我讲解。最后他告诉我,根据他的经验,我不可能研制出满足相关要求的测量重离子的束流变压器,因为重离子束流强度比他们的电子束至少低2~3个量级。我还想向他请教有关电子学及信号处理部分的内容,他表示电子学部分是刘世耀老师设计并制作的,并告诉我刘老师房间号。我去了刘世耀老师房间,他同样很耐心地回答了我提的几个问题,并找出两张电路图给我作了解释。后来,虽然为了按时硕士毕

业,我放弃了这台束流变压器的研制(直到现在我国都没有自主研发出可以测量连续波微量级质子或重离子的束流变压器,只能采购国外的DCCT和ACCT),论文方向改为束流发射度测量了,但高能所两位老师细致严谨的学术态度和对后生晚辈耐心认真的培养情怀,给我留下了深刻的印象和温暖的回忆。

三、HIRFL-CSR与高能所

1997年6月,国务院科技领导小组审议批复兰州重离子冷却储存环工程(HIRFL-CSR)建议书;2000年4月,国家发改委批准CSR开工建设;2007年12月,CSR通过工艺鉴定验收;2008年7月,CSR通过国家验收投入正式运行(如图4所示)。在CSR工程设计、建造和调试过程中,一批高能所老师曾给予近物所许多帮助和指导性建议,近物所同事受益匪浅,至今心存感激、由衷感谢!

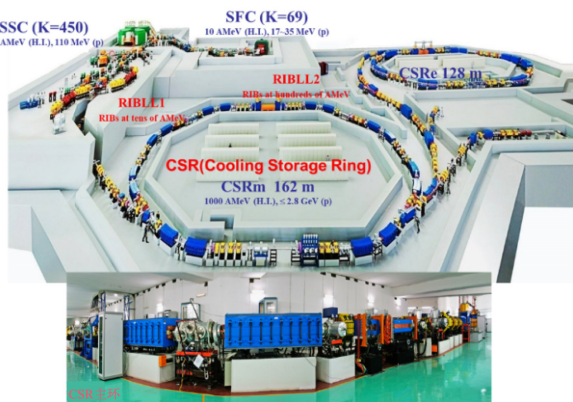


图4 HIRFL-CSR重离子冷却储存环

二十世纪九十年代初期,兰州重离子加速器已稳定运行供束两年多了。时任所长的魏宝文老师开始考虑未来发展,想法是在兰州重离子加速器SSC后续建重离子冷却储存环。魏宝文老师带领他的三名学生夏佳文、饶亦农、原有进开始重离子冷却储存环(HIRFL-CSR)概念性设计。当时近物所加速器方面的人员学术背景都是回旋加速器方向,而高能所有同步加速器与储存环丰富的设计和建

造经验。重离子冷却储存环计划提出后,得到高能所谢家麟、方守贤、张闯等老师的大力支持。在CSR方案设计初期,还邀请了张闯老师专程来近物所给设计组讲授同步加速器和储存环的设计。回忆起当年两所合作情景,老师们感觉恍如昨日,历历在目:CSR总工程师夏佳文谈到,在CSR冷却储存环动力学设计和优化那2~3年最关键的时期,几乎每年夏天徐建铭老师都会受邀来兰州1~2周,参与CSR束流动力学设计,后来徐先生也是CSR工程国际顾问委员会成员;高能所加速器物理组吴英志老师带领王生帮助近物所校验了CSR lattice设计;国智元老师被邀请专程来兰州与CSR动力学设计组进行讨论,给予很多建议。CSR磁铁系统负责人袁平说,高能所磁铁组曹瓚老师曾给予CSR磁铁设计组很多帮助包括磁铁技术与工艺设计建议、提供了部分参考资料、参与设计评审等,尹兆升和侯锐老师分别在切割铁设计和利用积分线圈测量磁场等方面给予很多重要建议。CSR电源系统负责人高大庆说,高能所电源组徐中雄老师曾给予CSR电源设计组很多帮助包括二极铁电源技术方案设计、电源测试等方面的建议、参与设计评审等,韩谦老师在Kicker电源方面给予关键建议。在CSR束流调试期间,陈森玉院士多次来兰州给予指导,陈先生还参与了CSR部分设备性能和工艺测试工作,也两次参与了24~28 GHz超导高电荷态ECR离子源的性能测试和验收(其中一次作为组长)。当时在高能所工作的韦杰(Jie Wei)研究员,作为CSR工程性能及工艺现场测试组组长,参加了由中国科学院组织的CSR工程性能及工艺所有的测试,与多位高能所同事多次来兰州现场进行测试。

方守贤院士是1992年被聘为兰州重离子加速器国家实验室学术委员会委员的,从1999年至2012年长期担任兰州重离子加速器国家实验室学术委员会主任兼重离子加速器专业委员会主任,同时方先生也是CSR工程国际顾问委员会委员。在

CSR建设期间和建成后开始运行取得成果的重要时期,作为重离子加速器国家实验室学术委员会主任,方先生每年都会来近物所1至2次,为CSR建设和HIRFL运行提出宝贵的指导意见和建议,为兰州重离子加速器发展做出了重要贡献。

四、ADS与高能所

二十世纪九十年代末,高能所方守贤院士与原子能研究院丁大钊先生推动和领导了我国加速器驱动的次临界嬗变系统(ADS)研究,他们曾作为顾问或牵头负责人,参与科技部两期与ADS研究相关的973项目。2008年,方先生组织召开了4次院士咨询会议,对我国ADS发展前景进行分析和评估。

2011年,在詹文龙院士推动和领导下,中国科学院启动了战略性先导科技专项(A类)“未来先进核裂变能—ADS嬗变系统”研究。高能所是ADS先导专项主要的合作单位。为了探索ADS强流质子超导直线加速器不同的技术路线,也为了让近物所和高能所两个超导直线加速器团队形成竞争态势,ADS先导专项总体组设置了两个质子超导直线加速器注入器项目(注入器I和注入器II),一个由高能所潘卫民研究员负责,选择Spoke(轮辐腔)超导腔技术路线;另一个由我负责,选择HWR(半波长)超导腔技术路线。两个团队既有良好的合作,也有

健康有益的竞争。在项目执行期关键的前三年,两个加速器团队每年都有2~3次联合设计或方案讨论会。在项目共7年的执行期内,每年年中和年末先导专项都有项目进展总结会、交流会;除此,科学院每年还组织2次项目监理会,参与项目的人员交流与合作非常多。在两所10 MeV质子超导直线加速器的建造过程中,近物所为高能所设计建造了质子源和低能传输线,高能所为近物所设计建造了测试用的RFQ加速器两套功率耦合器和两套模组12只超导管(HWR010)的功率耦合器,可谓是各展所长、互为助益。两个团队在RFQ腔体和超导管研制、测试以及低电平控制、束流调试等方面有着密切的交流与讨论。虽然采用了不同的技术路线,但近物所和高能所的团队“异曲同工”,最终都圆满完成了10 MeV强流质子超导直线加速器的研制任务,在10 MeV能量下都达到了连续波1~2 mA质子束的稳定加速,这在国际超导直线加速器领域尚属首次。完成10 MeV质子超导直线加速器的研制任务后,近物所和高能所的两个加速器团队又一起合作完成了25 MeV质子超导直线加速器的研制任务(如图5所示)。图5中最后一套超导模组(黄色部分)是高能所研制,该模组包含6只 β 为0.21、频率为325 MHz的Spoke超导管,其余部分包括质子源、RFQ加速器和包含17只HWR(162.5 MHz)超导管的三套模组是近物所研制。2017年6月,在两所团

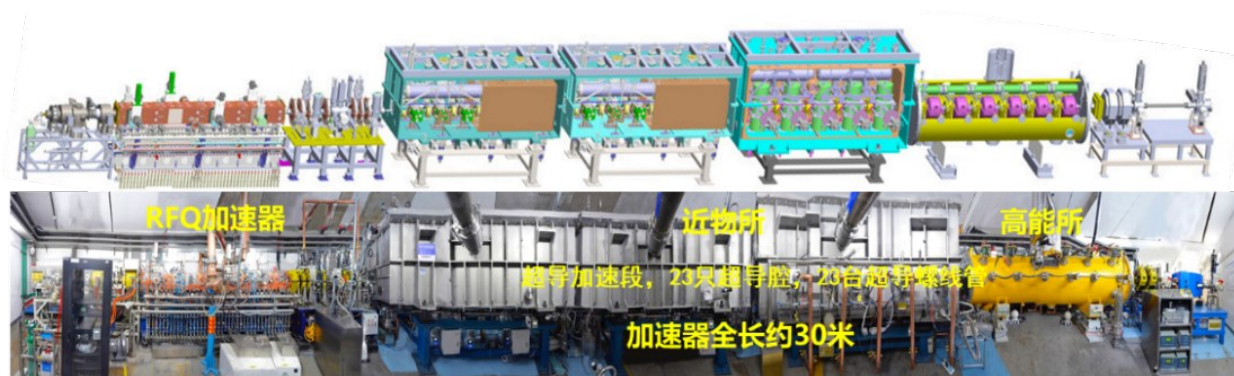


图5 近物所与高能所联合研制的世界上首台25 MeV连续波质子超导直线加速器

队共同努力下,在国际上首次实现了超导直线加速器 25 MeV、连续波 0.17 mA 质子束稳定加速,完成了 ADS 先导专项预期的目标和任务。2018 年至 2021 年,近物所多方面筹集经费对该 25 MeV 质子超导直线加速器进行了改造,目标是实现 20 MeV、连续波质子束 10 mA 的稳定加速和运行。2021 年 3 月,在 17 MeV 能量下实现百千瓦、百小时长时间连续波质子束流稳定运行测试和 10 mA、12 小时束流稳定运行连续测试以及 20.5 MeV、10 mA 情况下短时间束流测试,这些都是世界首次。2014 年至 2018 年,近物所联合高能所、北京大学等单位,完成了“强流高功率离子加速器物理及技术先导研究”的科技部 973 项目。2016 至 2021 年,中科院和近物所组织了 4 次 ADS 质子超导直线加速器样机性能现场测试,高能所陈森玉院士被邀请担任组长,来自高能所、中国科大、北京大学、上海应用物理所等单位的专家参加了现场测试,陈先生表现出的严格、严谨、求是、包容的科学态度以及给予的支持和现场指导令人难以忘怀、心存感谢,值得我们年轻一辈学习。在近物所和高能所等单位的共同努力下,2018 年 1 月,国家“十二五”重大科技基础设施“加速器驱动的嬗变研究装置 CiADS”通过可行性研究批复,2021 年 7 月正式动工开始建造,高能所是 CiADS 主要合作单位之一。

五、人才培养与交流

多年来,近物所和高能所在人才培养和年轻人才交流方面同样富有合作。早期的近物所,没有粒子加速器方向的博士培养点,1986 至 1991 年期间,魏宝文老师是高能所圆形加速器方向兼职博士导

师。夏佳文和我作为魏老师的博士生,最初是注册高能所的博士研究生,直到 1992 年才转回近物所。2017 年 11 月,近物所联合高能所、上海应用物理所和理论物理所在中国科学院大学(国科大)创建了核科学与技术学院(核学院),四所共同建设国科大核学院,高能所所长王贻芳院士任核学院首任院长。近物所培养的我国第一个实验核物理博士、也是第一个实验核物理博士后胡晓庆,从近物所博士后出站后受聘在高能所工作多年,后来去国外工作。近 20 多年时间里,大约有 15 名近物所研究生或职工,曾经受聘或正在高能所工作(包括东莞散裂中子源分部),也有 4 名高能所研究生和职工,曾经受聘或正在近物所工作。我们看得见,两所的人才培养和交流工作源远流长,双赢互惠;我们也相信,以科研装置为平台、以学术交流为纽带的人才协同培养与合作,也必将继续下去和进一步加强。

结束语

回顾过去几十年来近物所和高能所的合作发展,离不开两所深入而密切的联系,相互支持、交叉融合、交流合作、共同发展,关键在两所“一脉同宗”“齐头并进”的初心不易,得益于肩负国家和时代的使命担当。值此高能所成立 50 周年之际,撰此短文,衷心希望高能所在实现高水平科技自立自强的新时期,踔厉奋进,再创辉煌,取得新的更大成就。

致谢:感谢近物所魏宝文院士提供部分历史材料;感谢近物所同事夏佳文、袁平、高大庆、何源、尹经敏、陈华等提供的相关信息、图片和部分建议与修改。感谢高能所张闯给予的建议,感谢高能所苏萍提供部分信息。