



陈佳洱与北京大学重离子物理研究所的粒子加速器研究

郭之虞*, 刘克新, 颜学庆

北京大学重离子物理研究所, 北京 100871

* 联系人, E-mail: zhyguo@pku.edu.cn

Jiaer Chen and the particle accelerator research at the Institute of Heavy Ion Physics, Peking University

Zhiyu Guo*, Kexin Liu & Xueqing Yan

Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: zhyguo@pku.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2022-1085](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1085)

陈佳洱是我国著名的加速器物理学家。1958年, 他带领年轻教师和学生在北京大学技术物理系建成了我国第一台 30 MeV 电子感应加速器, 并于次年调试出束。20 世纪 60 年代, 在英国访问工作期间, 他在国际上首次提出了诊断等时性回旋加速器越隙共振的实验判据, 并发展了用可控的局域性一次谐波有效地抑制越隙共振振幅增长的方法, 使卢瑟福高能物理研究所等时性回旋加速器中心区的束流传输效率提高了 3 倍以上。1972 年, 国内基础研究逐步恢复。陈佳洱通过调查研究, 发现螺旋波导腔是国际上新出现的一种加速结构, 于是他率领研制组从螺旋线绕制开始, 研制了一台螺旋波导聚束器并实现了稳定运行。1974~1978 年期间, 他利用北京师范大学的倍压加速器进行了螺旋波导聚束器的束流实验, 用 8.4 W 的射频功率将 350 keV 的直流氖离子束群聚成脉宽为 1 ns 的脉冲束, 不同功率下脉冲的波形与他之前提出的二维群聚理论完全一致。继研制螺旋波导聚束器之后, 陈佳洱进一步提出研制端电压为 4.5 MV 的静电加速器的建议。20 世纪 70 年代后半期, 他带领团队与上海先锋电机厂合作, 自行设计了 4.5 MV 静电加速器, 并参与了加速器的加工和建造。1979 年, 北京大学技术物理系从汉中迁回北京, 在北京市领导的支持下开始建造北京大学加速器楼。1986 年, 加速器楼建成, 同时 4.5 MV 静电加速器在加速器楼中相继完成了安装与调试。这是迄今为止我国自行研制的端电压最高的单端静电加速器, 自 20 世纪 80 年代建成之后一直使用至今。这台 4.5 MV 静电加速器主要用于中子物理实验研究与核参数测量, 可提供国内原来没有的 3.5~7 及 14~20 MeV 单色中子束。



陈佳洱先生

1 陈佳洱与加速器质谱、射频四极场加速器和射频超导加速器研究

北京大学重离子物理研究所成立于 1983 年。1986 年, 北京大学重离子物理研究所转为实体, 技术物理系加速器教研室的大部分人员和核物理实验教研室的中子物理课题组人员划入重离子物理研究所, 陈佳洱出任所长。他在前期工作的基础上, 瞄准国际上粒子加速器研究的前沿领域, 确定发展加速器质谱(accelerator mass spectrometry, AMS)、射频四极场加速器(radio frequency quadrupoles, RFQ)和射频超导(superconducting radio frequency, SRF)等三个重点方向的粒子加速器研究。这在当时是非常具有前瞻性的布局, 相关研

究在相当一段时间内均处于国内外相应研究领域的前沿。

1.1 加速器质谱研究

加速器质谱(AMS)是20世纪80年代初国际上发展起来的一项现代核分析技术,在地球科学、考古学、环境科学、生命科学以及核物理等领域有广泛应用。北京大学的AMS装置是基于英国牛津大学1985年赠送给北大的EN型串列加速器建造的。这台加速器在牛津大学曾用于AMS研究,陈佳洱和李坤经过讨论酝酿决定用这台EN型串列加速器在北京大学建造一台主要用于 ^{14}C 测年的AMS装置。陈佳洱安排当时在牛津大学访问工作的郭之虞去牛津大学的AMS实验室调研并参加1986年英国皇家学会组织的AMS报告会和牛津大学组织的AMS专题研讨会,与国际AMS学界建立联系。1987年,郭之虞回国后即与李坤一起在陈佳洱的指导下筹备北京大学AMS装置的建造。1988年,国家自然科学基金重大项目“应用于地球科学的加速器质谱计的研制与建立”启动,陈佳洱担任项目主持人。项目基于EN型串列加速器,自行研制了离子源、低能注入系统、高能分析系统与探测器、数据获取系统,构成了一台完整的AMS装置。北京大学AMS装置于1992年建成,1993年通过验收,是国内首台可进行批量 ^{14}C 样品测量的AMS装置,也可以测量 ^{10}Be 和 ^{26}Al 等宇宙成因核素,在考古学、地球科学、环境科学、生命科学等领域开展了卓有成效的应用研究,取得了在国际上有影响力的成果,并于1995年获得国家教育委员会科学技术进步奖一等奖。AMS团队还在1990年主办了北京AMS国际研讨会,陈佳洱担任大会主席。这次研讨会对国内的AMS研究起到了很大的推动作用。

1996年,国家“九五”科技攻关项目“夏商周断代工程”启动,陈佳洱担任项目领导小组副组长,北京大学重离子物理研究所承担了“AMS 法技术改造与测试研究”专题,由郭之虞担任专题组组长。在陈佳洱的指导下,专题组对原有设备进行了升级改造,各同位素共用束线实现了全静电传输,更新了电控系统、数据获取与测量控制系统,进行了系统的方法学研究,编写了数据处理软件,完善了AMS ^{14}C 测量的质量控制措施,开展了系列样品贝叶斯方法的年代校正研究。1999年,北京大学AMS ^{14}C 测量达到了优于0.5%的测量精度,在随后的数年间圆满完成了“夏商周断代工程”的考古遗址与殷墟甲骨测年任务,为建立夏商周三代的年代框架作出了重要贡献。2001年,该项目被评为国家“九五”科技攻关优秀成果,北京大学AMS团队的刘克新被评为国家“九五”科技攻关先进个人。

1.2 射频四极场加速器研究

射频四极场(RFQ)加速器是国际上20世纪80年代迅速发展起来的一种新型强流离子直线加速器,适于将各种离子从离子源引出后直接加速到每核子1~2 MeV的能量,广泛用于各类加速器的注入器、离子注入机、强中子源等场合。陈佳

洱和方家驯于1984年提出了适于加速重离子的整体分离环RFQ加速结构,并在国家自然科学基金的连续资助下对这种RFQ结构进行了系统的研究,1994年成功地建成了首台26 MHz 整体分离环RFQ原型加速器,将 N^+ 离子加速到设计的300 keV能量。此后又在国家自然科学基金重点项目的资助下,于1999年研制成功可将 N^+ 、 O^+ 、 O^- 离子加速到1 MeV 的26 MHz整体分离环RFQ加速器,其 O^+ 束的输出流强可达3 mA,在负载因子、射频效率等性能上都达到了国际先进水平。利用该加速器,也可以产生能量260 keV、峰值流强约1 mA的氦离子束,用于研究强流氦离子束对聚变反应堆第一壁材料的损伤机制。

为了克服RFQ加速器存在的加速效率随着能量增高而显著降低的问题,1998年陈佳洱又提出了一种新型的分离作用RFQ加速结构(separated function RFQ, SFRFQ),将具有高效加速特性的飘移管型射频加速间隙嵌入到传统的RFQ加速结构内,使离子的加速过程和聚焦过程相分离。针对分离作用RFQ加速器中存在反向减速电场的问题,陈佳洱采纳了他的博士生颜学庆设计的将偶数光阑的厚度增加至1/4波长的非对称光阑加速结构,解决了反向电场限制加速效率的关键物理问题,又采用非对称四极透镜结构解决了电极之间的射频打火问题,并保证了足够的聚焦力,同时采用了同步相位渐变的纵向设计方案以减小能散度。在此基础上,RFQ课题组于2009年建成了国际上首台SFRFQ加速器,并用该器与ECR(electron cyclotron resonance)氧离子源、1 MeV整体分离环RFQ加速器构成组合加速系统,成功地将mA级 O^+ 束加速到1.66 MeV,能散度为 $\pm 1.5\%$ 。束流实验结果表明这种新型加速器的加速效率是常规RFQ加速器的两倍左右。

20世纪90年代,强流质子直线加速器成为国际上关注的研究热点,陈佳洱与中国科学院高能物理研究所方守贤一起积极推动我国在该领域的研究。北京大学重离子物理研究所也积极开展了低能强流离子直线加速器以及配套的强流ECR离子源和强流离子束发射度测量仪的研制。1999年“973”项目“加速器驱动洁净核能系统”启动,陈佳洱推荐郭之虞为该项目专家组成员。北京大学积极参与该项目,研制了我国第一台350 MHz强流质子RFQ加速器工艺腔和我国第一台强流离子束发射度测量仪。同时RFQ课题组也开展了强流质子/氦离子RFQ加速器的研究,研制了一台201.5 MHz、2 MeV强流氦离子RFQ加速器,其束流动力学采用了匹配均温设计方法,有效抑制了强流离子束发射度增长和束流丢失现象。这是我国第一台氦离子RFQ加速器。与此同时,2.45 GHz ECR离子源的研究也取得了重要进展,可产生75 mA氦离子束(负载因子10%),其中 D^+ 离子比达到81%。在此基础上,课题组进一步研制了一台基于RFQ加速器的热中子成像装置,并将其成功地用于飞机发动机叶片的无损检测。这是我国第一台基于RFQ加速器的中子成像装置。此后,北京大学RFQ课题组还先后研制了用于强流离子束加速的带窗四翼型RFQ加速

器、用于中国科学院兰州近代物理研究所SSC-LINAC(separated section cyclotron - linear accelerator)装置的连续波高电荷态重离子RFQ加速器、用于核工业西南物理研究院聚变反应堆第一壁材料损伤实时检测的氦离子RFQ加速器等多种类型的RFQ加速器。

1.3 射频超导加速器研究

射频超导加速器经过几十年的发展已经广泛应用于大科学装置中。陈佳洱从20世纪70年代就开始关注国际上射频超导技术的发展,并和中国科学院高能物理研究所丁渝共同提出了在中国发展射频超导加速器的建议。1982年,陈佳洱到美国纽约州立大学石溪分校做访问学者,参加了重离子射频超导分离环型超导腔的化学处理、超导加速器的安装、锻炼和载束调试工作以及束流脉冲化研制工作。1984年初,陈佳洱回国后即开始筹备北京大学射频超导实验室的建设,并派赵夔于1984年秋去纽约州立大学石溪分校参与射频超导加速器技术和四分之一波长谐振腔(quarter wavelength resonator, QWR)的研发。1986年底赵夔回国后,北京大学射频超导实验室的建设工作进一步展开,并得到了国家“863”项目“410”(自由电子激光)专项的支持。在陈佳洱领导下,北京大学超导腔课题组建成了具有较高水平的射频超导加速器实验室。1991年,利用德国电子同步加速器研究中心(deutsches elektronen synchrotron, DESY)提供的一只L波段超导腔,超导腔课题组在国内首次成功地进行了纯铌加速腔的低温超导实验,建立了超导腔表面处理和测试系统。接着,陈佳洱又提出并主持用国产铌材研制射频超导腔,超导腔课题组与超导材料公司合作,成功解决了国产铌材射频超导性能差等难题,研发出了国产铌材的改性方法,确定了工艺流程,使得国产铌材的残余电阻比由61提高到470,解决了超导腔国产化的关键问题。1994年,国内首只国产纯铌射频超导腔研制成功,其 Q 值好于 5×10^9 ,峰值场强大于21 MV/m,主要性能达到20世纪90年代初的国际先进水平。该成果于1995年获得了国家科学技术进步奖二等奖。1996年,在陈佳洱指导下,课题组开始为北京放射性核束装置进行加速低能离子的QWR超导腔研究,1997年建成大容积的直流偏压溅射装置,1999年研制成功铜铌溅射QWR超导腔。随后,课题组又研制了相应的低温恒温器。2000年底,在北京大学EN串行加速器束流传输线上建成了国内第一台超导后加速器,并用质子束在国内首次进行了超导腔的载束实验,质子能量增益达到500 keV,有效加速电场梯度超过3 MV/m。

陈佳洱十分注重团队的建设。在研制国产超导腔的过程中,射频超导的研究队伍不断壮大,通过优化整合重离子物理研究所的科研力量,并引入优秀毕业生,形成了一支具有创新能力的研究团队。

X射线自由电子激光(X-ray free electron laser, XFEL)同时兼具高空间分辨率、高时间分辨率、高能量分辨率和波

长可调等特性,在生命科学、材料科学、信息科学、环境科学和非线性科学等科学前沿有着重要的应用。陈佳洱积极推动我国XFEL的发展,促进XFEL研究进入“国家重点基础研究发展计划”“国家重点研发计划”“国家重大基础设施建设项目”等国家计划,同时带领北京大学射频超导团队进行高重频XFEL关键技术的研究。团队于2008年研制出我国第一只九胞(9-cell)纯铌超导腔。之后不断改进超导腔的制造和后处理工艺,使超导腔性能不断提高,采用大晶粒铌材的9-cell超导腔的加速梯度达到32.6 MV/m,品质因数高于 1×10^{10} ,这两项指标均达到了国际直线对撞机超导腔的标准。在软X射线自由电子激光试验装置项目的支持下,团队完成了小批量9-cell超导腔和射频超导加速单元的研制,大晶粒9-cell超导腔在加速梯度大于20 MV/m时的品质因数高于 2×10^{10} ,射频超导加速单元运行稳定,积累了超导加速器的运行经验,为我国硬X射线自由电子激光装置最终采用射频超导加速结构提供了重要依据。

注入器是XFEL等大科学装置的关键部件,直接关系到电子束的品质。在陈佳洱指导下,射频超导团队基于十余年的研发基础于2000年提出了具有自主知识产权的DC-SC(direct current-superconducting, 亦称为direct current-superconducting radio frequency, DC-SRF)光阴极注入器,成功解决了光阴极和超导腔的兼容性问题。2004年,完成了DC-SC光阴极注入器的可行性验证;2012年,第一代DC-SRF光阴极注入器实现稳定运行;2021年,第二代DC-SRF光阴极注入器稳定运行。在DC-SRF光阴极研制过程中,陈佳洱经常亲临一线指导研究工作。目前DC-SRF光阴极注入器已经能够提供具有超低发射度、高平均流强的连续波高品质电子束,为硬X射线自由电子激光装置的注入器提供了一种可选方案。DC-SRF光阴极注入器是国际上超导电子加速器的4种注入器之一。

陈佳洱非常重视超导腔的国产化和产业化研究。为提高我国超导腔研究的自主能力,在陈佳洱和何季麟推动下,宁夏东方钽业股份有限公司和北京大学联合成立了东方超导科技有限公司。经过多年努力,公司已经具备生产各种类型超导腔的能力,完成了包括材料、加工、焊接、后处理在内的全面国产化,促进了产、学、研的高度结合,为我国射频超导腔研制夯实了产业基础。

北京大学射频超导团队的研究得到了国际上的认可,北京大学已成为TESLA(TeV superconducting linear accelerator)国际合作组的正式成员。2007年,北京大学成功举办了第十三届国际射频超导会议(SRF2007),陈佳洱为大会主席。团队还为美国杰斐逊国家实验室(Jefferson National Laboratory, JLab)研制了两只1.5 GHz 7-cell超导腔用于其连续电子束加速装置(continuous electron beam accelerator facility, CEBAF)的加速器升级研究,为美国阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)研制了一只1.3 GHz 5-cell超导腔用于强流加速器研究。

2 陈佳洱与激光等离子体加速器研究

2004年,国际上激光等离子体加速研究取得了重要突破,陈佳洱遂请重离子物理研究所重点关注激光等离子体加速的发展动向.颜学庆通过调研建议开展离子加速作为突破口,并借鉴风帆的原理率先提出可用于离子加速的激光稳相光压加速的初步想法.当时北京大学没有这方面的积累,缺少硬件和软件条件,开展这项前沿工作的可行性遭到了一些老师和同事的质疑.陈佳洱始终勉励他不要放弃,坚持按照自己的思路继续探寻,并亲自带队去中国科学院上海光学精密机械研究所拜访徐至展和李儒新,寻求开展飞秒激光和加速物理的交叉合作研究.此后,郭之虞邀请了中国科学院物理研究所盛政明来北京大学担任兼职教授,并组建了激光加速研究小组,开始了激光粒子加速方面的前沿探索.2007年,郭之虞派他的博士生林晨到美国伯克利国家实验室激光光学加速综合研究实验室进行了为期三年的联合培养.考虑到当时国内高功率激光还不具备开展光压加速的实验条件,2008年,陈佳洱推荐颜学庆到德国马普量子光学所开展激光离子加速实验研究.颜学庆和德国、美国的专家们一起在国际上首次证实了激光稳相加速机制的存在,并证实该机制可以解决离子能量低、能散大的问题,比原有机制的加速转化效率提高了两个量级.2010年,陈佳洱和中国科学院物理研究所张杰、李玉同团队一起申请了国家自然科学基金重点项目,协同推动国内开展光压稳相加速的实验探索.

2012年,陈佳洱和颜学庆一起推动了“超小型激光离子加速器及其关键技术研发”在科技部立项,并获得了国家重大科学仪器设备开发专项支持.激光加速团队在2012~2017年的五年间攻克了高对比度高功率飞秒激光、自支撑纳米薄膜靶、激光等离子体透镜、激光驱动超高流强离子束传输等一系列关键技术,建成国际上首台能量3~15 MeV、能散度1%~5%、单束团电量2~30 pC的激光质子加速器与辐照装置.2019年,颜学庆代表该项工作被授予世界粒子加速器大会Hogil Kim加速器奖.近期,激光加速团队马文君制备出完美的碳纳米管薄膜靶,通过与韩国基础科学研究所合作,在实验上获得了超过1.2 GeV的金离子,又将激光驱动的离子能量纪录提升了6倍.

2019年12月,由北京大学牵头承担的国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项“拍瓦激光质子加速器装置研究与应用示范”项目正式批复,项目的目标是开发具有自主知识产权、质量稳定可靠、核心部件国产化的激光质子放疗系统,并开发相关软件和数据库,实现质子放射肿瘤治疗.这项研究又进一步获得了北京市的支持,北京激光加速创新中心正式立项,并入选怀柔科学城第二批交叉平台项

目.该中心将建造短脉冲激光质子加速器和短脉冲宽谱高亮度光源应用平台,打造国际领先的激光加速器创新平台,支撑新一代光源预研,为未来国家重大科技基础设施落地奠定基础,并有望培育新型加速器产业.

2020年,激光加速团队受北京大学委托,与广州市白云区人民政府共同建立了广东省新兴激光等离子体技术研究院.研究院将围绕飞秒激光技术、激光加速器技术和粒子束技术等方面展开应用研究与成果转化,同步促进与医学、生物、材料以及芯片等学科的交叉融合.2021年,陈佳洱的院士专家工作站成功落户于广东省新兴激光等离子体技术研究院.他将唯一的工作站设在了广东研究院,表达了共同推进激光质子放疗系统的研制和加快后续产业化进程的强烈愿望

3 总结

陈佳洱在科研工作中注重不断创新,时刻关注国际上粒子加速器领域的最新发展动态,从中发现适合我国国情的突破口,并根据我国的当前与长远需求,布局北京大学重离子物理研究所的粒子加速器物理与技术研究.同时他也十分重视人才培养和团队建设,先后在不同方向建立了若干个强有力的研究团队.在他的领导下,北京大学重离子物理研究所先后建成了国内端电压最高的4.5 MV单端静电加速器、国内首台可进行批量 ^{14}C 样品测量的AMS装置、在国际上独具特色的整体分离环RFQ加速器和分离作用RFQ加速器、国内首台强流氦离子RFQ加速器、国内首台基于RFQ加速器的中子成像装置;研制了国内首只国产纯铌射频超导腔、国内首只铜铌溅射超导QWR腔、国内首只9-cell纯铌超导腔,以及在国际上独具特色的DC-SRF光阴极注入器,并建成了国内首台超导电子直线加速器;在国际上率先提出用于离子加速的激光稳相加速机制并进行了实验验证,建成了国际首台能量3~15 MeV、能散度1%~5%、单束团电量2~30 pC的激光质子加速器与辐照装置.以上粒子加速器装置都是适合高等学校特点的基础研究和小型工程装置,对国内的粒子加速器研究起到了引领和推动作用.同时他十分重视与国内的大科学工程项目相结合,与中国科学院高能物理研究所、上海应用物理研究所和上海高等研究院、兰州近代物理研究所等共同申请和承担国家重点和重大项目.他也十分重视粒子加速器的产业化,在研发过程中积极推动射频超导腔和激光离子加速器的产业化.在陈佳洱的引领下,今后北京大学重离子物理研究所将在我国基于射频超导技术的大科学装置、激光质子放疗系统、短脉冲激光粒子加速器、短脉冲宽谱高亮度光源和新一代相干光源平台等方面继续作出贡献.