

串列加速器实验室 35 年发展回顾

柳卫平

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2023 年是北京串列加速器核物理国家实验室建成 35 周年,加速器与核反应堆是研究核科学的两大利器,1988 年,串列实验室正式成立,作为我国核物理研究的重要基地之一,持续发挥核基础创新引领作用,完成了 14 万小时的稳定运行,开展了核物理基础、核数据测量、核物理应用和交叉学科的研究工作,产出了一系列国际水平和满足国家重大需求的科技成果,培养了一批杰出人才,为我国核物理研究和核科技战略的持续发展提供了有力支撑。本文对串列实验室 35 年的发展做一综述。

Review of the development of tandem accelerator laboratory in 35 years

LIU Weiping

(China Institution of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

The year 2023 marks the 35th anniversary of the establishment of the Beijing Tandem Accelerator Nuclear Physics National Laboratory. Accelerators and nuclear reactors are the two main tools for studying nuclear science. In 1988, the Tandem Laboratory was officially founded, serving as a significant research hub for nuclear physics in our country. It has consistently played a leading role in nuclear science innovation, achieving 140 000 h of stable operation. The laboratory has undertaken research in nuclear physics research, nuclear data measurement, nuclear physics applications, and interdisciplinary studies. This has resulted in a series of internationally recognized basic and technological achievements that meet national major demands, fostering a group of outstanding talents. It has provided solid support for the continuous development of nuclear physics research and nuclear technology strategy in our country. This article provides a comprehensive overview of the 35 years of development of the Tandem Laboratory.

今年是中国原子能科学研究院(简称原子能院)建院 70 周年。2023 年是北京串列加速器核物理国家实验室(以下简称串列实验室)建成 35 周年,是值得纪念的年份。如果从我 1985 年开始到原子能院串列实验室开展核物理实验算起,也有超过 35 年的工作经历了,如今我已是原子能院的资深研究员了,自己这一生的事业发展也跟原子能院,特别是串列实验室的发展一直紧密地联系在一起。

加速器与核反应堆并列被认为是研究核科学的两大利器,1958 年,一堆一器建成投运,开启了中国原子能时代;1987 年,串列加速器建成并投入运行,

我国建立了核物理先进研究基地;1988 年,北京串列加速器核物理国家实验室正式成立,标志着我国核物理研究步入了一个崭新阶段。

串列实验室建立在中国原子能科学研究院核物理研究所。原子能院建立于 1950 年,吴有训、钱三强和王淦昌为首三任所长,是国家级研究中心、是我国核科技发源地,拥有加速器、反应堆等大型科学平台,开展核燃料循环的全领域研究,是我国核科技杰出人才的培养基地,在核科技基础、核燃料循环应用和核技术应用方面取得了丰硕的成果,串列实验室是其中的杰出代表。

第一作者:柳卫平,男,1962 年出生,1998 年在中国原子能科学研究院/德国重离子中心获得博士学位,时任北京串列加速器核物理国家实验室主任

收稿日期:2023-07-29

First author: LIU Weiping, male, born in 1962, graduated from China Institution of Atomic Energy / GSI with a doctoral degree in 1998, former director of Tandme laboratory

Received date: 2023-07-29

作为国家实验室, 串列实验室的开放共享、协同创新是发挥其作用的主要抓手, 串列实验室组建了由国内顶尖专家组成的学术委员会, 其中包括了多位“两弹一星”元勋、两院院士和知名专家, 极大促进了我国核物理研究的蓬勃发展。

历经三十五载, 串列实验室作为我国核物理研究的重要基地之一, 得到了党和国家领导人、上级部门以及国内外学界的大力支持和指导。依托中国原子能科学研究院核物理研究所, 串列实验室持续发挥创新引领作用, 完成了 14 万小时的稳定运行, 开展了核物理基础、核数据测量、核物理应用和交叉学科的研究工作, 产出了一系列国际水平的科技成果, 为我国核物理研究和核科技战略的持续发展提供了有力支撑。为纪念实验室建成 35 周年, 特别撰写此文予以纪念。实验室各方面取得的成果详见本专辑的其他文章。

1 实验室大事记和历任主任

1.1 启动建设阶段, 1972~1988 年

1972 年在第一次全国核物理会议上, 根据国际核物理研究发展的动态, 许多科学家提出了建设串列实验室的建议。1978 年国家计委、国家建委批准订购串列静电加速器。1981 年串列加速器土建工程动工。1986 年串列加速器安装调试完成并通过技术验收, 开始试运行并为核物理实验提供束流。1987 年串列加速器工程项目通过国家验收并正式交付使用, 并于当年 9 月向全国开放, 串列加速器核物理实验室课题评审委员会正式成立。1988 年财政部下文, 同意解决串列加速器运行经费, 要求串列加速器实验室作为国家实验室对外开放。北京串列加速器核物理国家实验室成立。

1.2 稳定运行阶段, 1990~2002 年

1990 年通过自主设计建立 5 条新的国产束流管道, 对串列研究领域进行扩充。1993 年在串列加速器上建成我国第一条放射性次级束流线。1994 年原子能院提议以现有的 HI-13 串列加速器为基础, 建立“北京放射性核束装置”, 并上报了“北京放射性核束装置建议书”。1995 年成功举办了国际核物理大会, 这是我国第一次举办国际核物理大会。1996 年柳卫平、白希祥等在 *Physical Review Letters* (物理评论快报, PRL) 发表文章, 首次利用放射性核束转移反应获得高能太阳中微子产生截面。1997 年, 实验室成立十周年。王淦昌先生指出: “串列加速器是有特色的低能核物理研究工具, 有其不可替代性” “在与兄弟院所共同利用中发挥了我国核物理研究

中心的作用”。2002 年完成串列加速器加速管技术改造, 端电压由 13 MV 提升至 15 MV。

1.3 扩充发展阶段, 2003~2022 年

2003 年国防科工委批准串列升级工程立项。2008 年建立了国内首台微电子器件重离子单粒子效应专用辐照装置。2015 年在线同位素分离器与 100 MeV 回旋加速器联调成功, 在线产生并分离出 ^{38}K 放射性核束。2016 年开始串列加速器超导直线后加速器的建设。2017 年串列加速器实现累计供束 10 万小时, 杨磊、林承键等在 PRL 发表文章, 首次发现奇特核光学势的反常“阈异常”。2018 年北京放射性核束装置 (Beijing Radioactive Ion-beam Facility, BRIF) 开展了首个放射性束物理实验, 2019 年实现放射性核束的串列加速器后加速。2020 年, 谌阳平、郭冰等在 PRL 发表文章, 实现 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 圣杯反应高精度测量。世界最强流锦屏深地核天体物理加速器成功出束。2021 年超导后加速实现增能出束。2022 年锦屏首批成果达到国际先进水平, 分别在 *Science Bull*、PRL 和 *Nature* 上陆续发表。多粒子可变能量回旋加速器外靶出束, 并基于此加速器建立了单粒子效应专用辐照装置。杨磊、林承键等在 *Nature Communications* 发表文章, 在近库仑势垒质子晕核破裂机制研究方面取得重要进展。

串列实验室的历任学术委员会和实验室主任, 以及物理所所长的情况见图 1。老中青国内最杰出的三代核科技工作者, 为串列实验室的持续发展作出了重要贡献, 形成了“高水平、有特色”的串列文化。

2 在串列实验室工作的一些体会

2.1 次级束流线和太阳中微子工作

我和白希祥老师一道, 于 1991 年申请到了国家自然科学基金 (原子能院第一份自然科学基金), 后又得到中核集团项目的支持。在孙祖训院长的支持下, 我们采用我国第一台回旋加速器的磁铁部件, 于 1993 年在串列加速器实验室建成我国第一条放射性次级束流线。

有了次级束流线这个工具, 我们就可以开展创新研究工作。太阳中微子丢失这个科学难题, 与产生中微子的核反应截面有关系。我和白老师组成的团队, 经过三年的艰苦努力, 克服了束流产生、信号抗堆积和理论处理的难题, 于 1996 年完成了太阳中微子产生截面的测量, 这也是国际上第一次用放射性核束流开展转移反应的角分布测量。该成果入选 1996 年“中国十大科技新闻”。原子能院串列实验

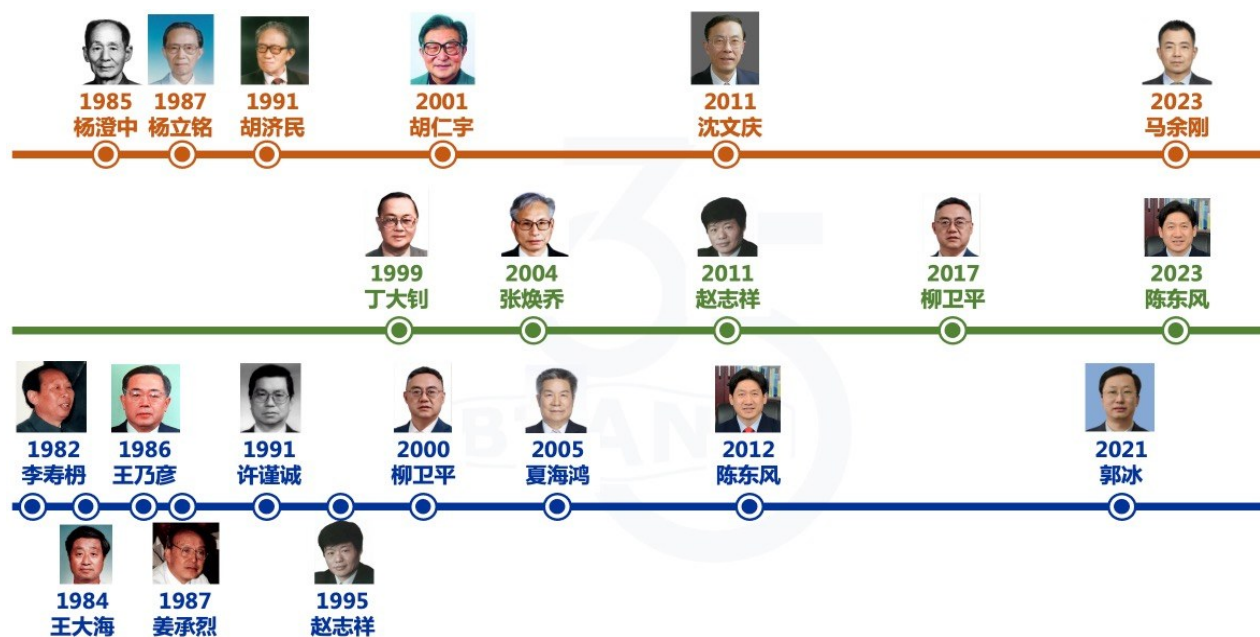


图1 串列实验室的历任学术委员会和实验室主任,以及物理所所长的情况

Fig.1 List of scientific advisory committee, director of Tandem laboratory, and director of nuclear physics division in CIAE

室因此第一次在PRL上发表文章,也是该刊第一次发表中国实验核物理领域的论文。

我感觉到,是否能够取得顶尖的研究成果,一流的设备固然是重要的,但更重要的是创新的物理思想,这个信念一直伴随着我后续的研究工作。

2.2 实验室的开拓创新

2000年前后,我开始了在老一辈科学家带领下,促进串列升级工程(也称北京放射性核束装置, BRIF)立项的进程,这个项目作为原子能院的4大工程,较大地促进了我国的核物理基础研究和应用的发展,我也在物理目标、体系设计、工程管理和物理实验方面作出了一定贡献。

同时,我意识到在串列加速器上开展航天电子器件的抗辐射考验大有可为,就大胆地建立了项目团队并通过竞聘方式选拔了项目带头人,至2017年,这个团队已经发展为原子能院基于串列实验室抗辐照应用的国家级创新中心。

2.3 锦屏深地核天体物理之旅

基于串列实验室核天体物理的长期积累,我带领核天体物理团队,布局国际核物理研究前沿,在2014年启动了锦屏深地核天体物理重大项目,促使我国核天体物理在未来处于国际引领的位置。到了2023年,锦屏深地核天体物理平台(Jinping Underground Nuclear Astrophysics, JUNA),已经建成了国际最强流锦屏深地核天体物理实验平台,将若干核天体反应首次推进到伽莫夫窗口能量,获得

最高精度反应率数据,在Nature、PRL和Science Bulletin上发表了一批高水平文章。

3 串列实验室取得的成果

3.1 完成了加速器设施运行改造和建设

HI-13串列加速器作为串列实验室的主要设备,自1987年投运以来,保持每年4000h的稳定运行水平。通过自主创新,实现多个主要部件国产化和改造升级,有效降低成本,满足实验需求,部分部件出口海外,保持了设备的良好运行状态,达到国际同等装置先进水平。目前已经形成成果转化,打破了国际封锁,成为我国核物理基础和应用研究对外开放的两大基地之一。升级前串列实验室的布置见图2。

为进一步推动我国核物理发展,拓展串列实验室创新能力,打造高水平研究平台,实现老一辈科学家提出的串列加速器“穿靴戴帽”愿景,串列加速器升级工程BRIF正式立项并于2015年顺利完工,2016年10月正式投运,是目前亚洲唯一已运行的在线同位素分离(ISOL)型装置。2016年完成回旋加速器质子束首批物理实验,2019年完成首个不稳定核束物理实验,发现原子核衰变新模式。目前已经产生55种不稳定核束,强度达到国际水平。北京大学在ISOL装置上成功建立了共线激光核谱测量装置,原子能院在100 MeV回旋加速器上建立了质子、准单能中子、白光中子单粒子效应试验装置和中子

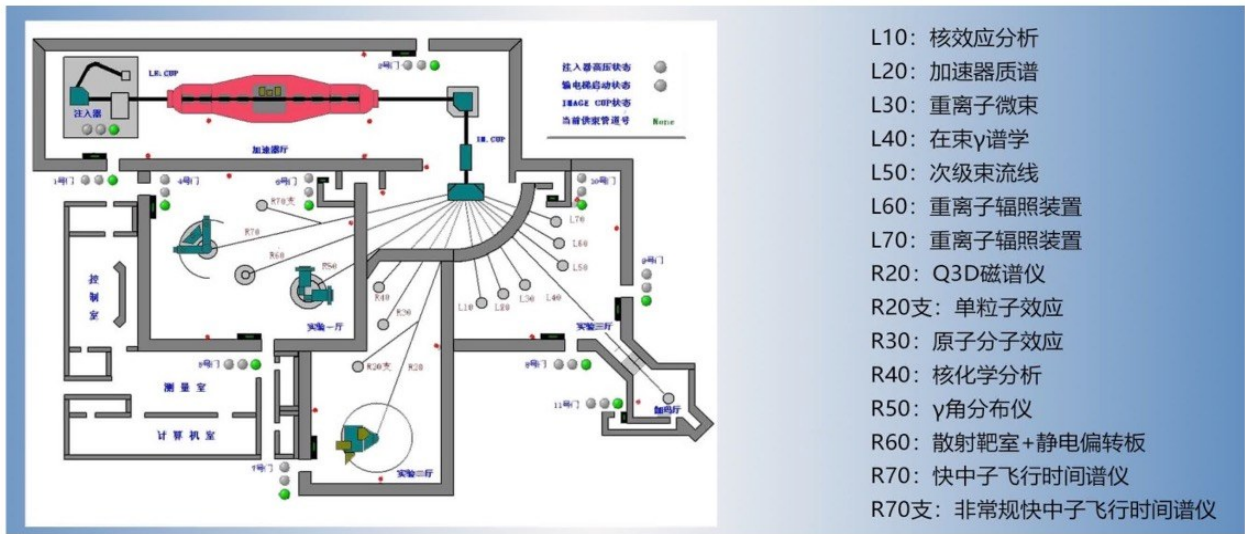


图2 升级前串列实验室的布置
Fig.2 Layout of Tandem laboratory before upgrading

能量标准装置。BRIF 逐步形成一器多用、多器合 平面图见图3。
用、多领域、多学科的重要科研平台。BRIF 装置的

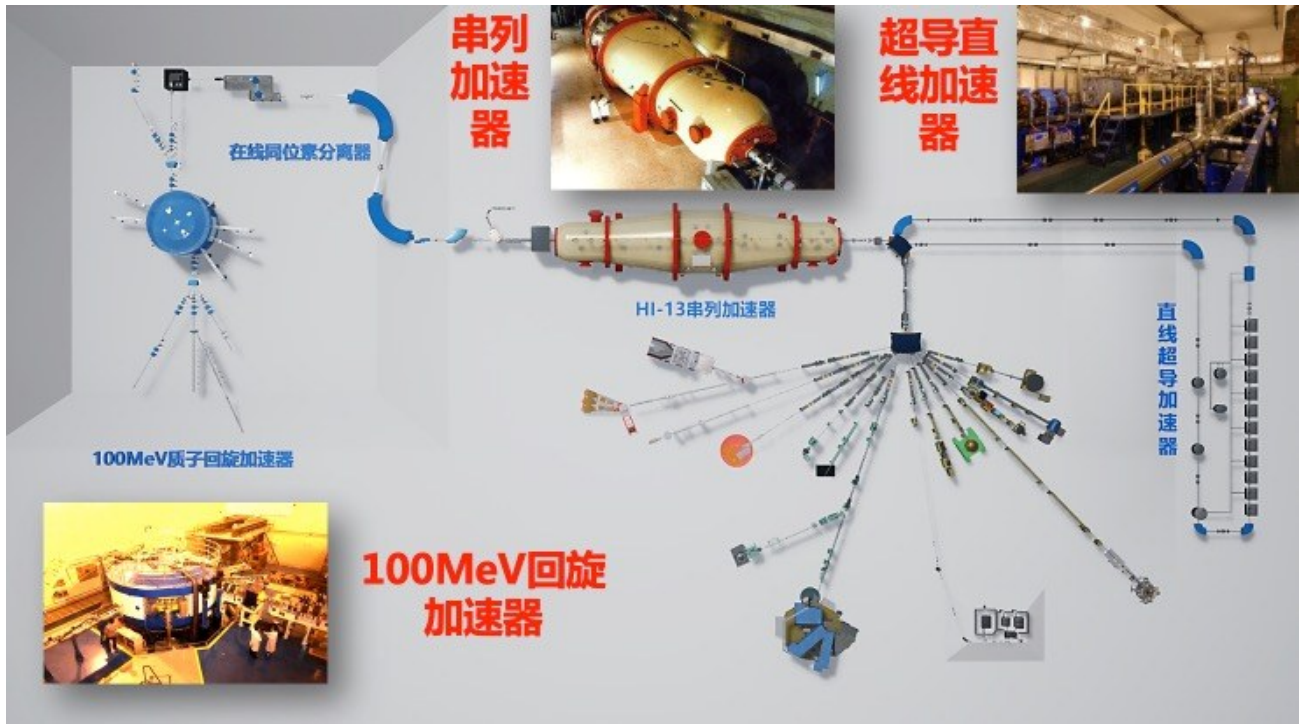


图3 BRIF 装置的平面图
Fig.3 Layout of BRIF facility

3.2 取得一批基础和应用科技成果

串列实验室自成立以来，研究领域逐渐涵盖了核物理基础、核物理应用、核数据三大领域，多个学科方向取得了一批具有国内外重要影响力的科研成果，为国家重大需求提供了重要支撑。

面向世界科技前沿，串列实验室充分发挥基础引领作用，取得了一批重要基础研究成果，共计发表学术论文2 500余篇，其中，我国首台低能次级束流线开展首次利用放射性核束逆转移反应获得高能太阳中微子产生截面、首次测定奇特核体系存在反常“阈异常”现象、核天体物理“圣杯”反应研究首次高

精度给出外部俘获贡献等工作发表在国际物理学顶级期刊《物理评论快报》。自主研发国际最强流深地核天体物理平台，入选2021年两院院士大会战略高技术领域十项科技成果之一，首批物理成果被选为国际顶级期刊《自然》亮点文章。

面向核数据、航空航天、特种材料考验等国家重大需求，串列实验室集智攻关，经过几代科技工作者的共同努力，为国家重大工程型号顺利推进提供了卓有成效的保障与支撑。在核数据方面，建立多探测器快中子飞行时间谱仪等实验终端，完成了大量核数据测量，为我国核科学技术发展与原子能开发利用提供了重要实验数据；在抗辐照应用方面，通过模拟空间辐射效应，完成航天器用微电子器件抗辐照性能的考核评估和加固验证，满足了航天器在轨长寿命高可靠运行需求；通过三束辐照，解决了重离子辐照精准模拟中子辐照肿胀问题，为我国快堆等新一代反应堆和核能关键材料提供了重要的材料筛选平台。

依托串列实验室平台，产出了一系列重大科技创新成果，获得近百项重要奖项，包括国家自然科学基金、国家科技进步奖、国防科学技术进步奖等荣誉及中华技能大奖、何梁何利科学技术奖、香港求是科技基金杰出青年学者奖、吴有训物理奖、杨振宁奖等人才奖励；授权发明专利170余项，包括中核集团首个同时获得美国日本授权的国际专利。

3.3 人才培养成绩斐然

串列实验室为国家培养了一批核科技高级人才，凝聚了一支专业配套、结构层次合理的科技队伍，丁大钊、黄胜年、王乃彦、张焕乔院士是他们之中的杰出代表。

串列实验室现有科技人员260余人，形成了以中国科学院院士、“973”首席科学家、国家杰青、百千万人才等为代表的领军人才队伍，以国家优青、海外高层次人才引进计划青年人才为代表的青年拔尖人才队伍，为实验室高质量发展发挥着中流砥柱作用。实验室培养的各类人才分布见图4。



图4 实验室培养的各类人才分布
Fig.4 Distinguished researcher recruited in Tandem laboratory

3.4 合作交流成果丰硕

秉承共商、共建、共享、共赢理念，串列实验室始终积极面向国内外研究机构用户开放合作，与北京大学、清华大学、中国科学院、航天集团等上百国内科研院所、高校以及华为等民营企业开展了2000余项课题的实验工作，与来自英、美、俄、韩、日等十余个国家的科研团队开展了合作研究。其中，重离子、质子航天电子器件抗辐照检测技术，为航天、电子、中国科学院、高等院校等下属近60家单位国家航天任务的完成提供了支撑，项目成果分别荣获2011年、2018年度国防科学技术进步二等奖和2022年度国防科学技术进步一等奖。

实验室立足促进前沿基础研究和成果应用转

化，其中高压型加速器打破国外封锁，满足了国家需求，目前已形成数亿元的成果转化，充分发挥了国家级创新平台的辐射引领作用。

4 未来发展展望

创新驱动，科技引领，立足新的历史起点，北京串列加速器核物理国家实验室面向世界科技前沿、面向国家重大需求、面向经济主战场，推动战略性、原创性、基础性科技创新，持续加强建设加速器集群、新型大科学装置、中小型特色装置，源源不断提供创新成果、重大应用和领军人才，向建成国际一流的国家实验室目标不懈努力。未来将布局发展强流在线同位素分离丰中子束流装置(BISOL)，使我国

在极端丰中子物理方面达到国际领先水平。串列实验室的大科学装置在国内核物理地位见图5。原子能院具有很好的综合优势,随着BISOL项目的立项并在2030年前后和我院其他加速器装置一起陆续

建成,原子能院在核物理研究和应用方面,将可能进入国际领先行列。到了那时,我们将有可能发现新的幻数、找到原子核存在的边界,甚至找到科学家梦想多年的超重岛。

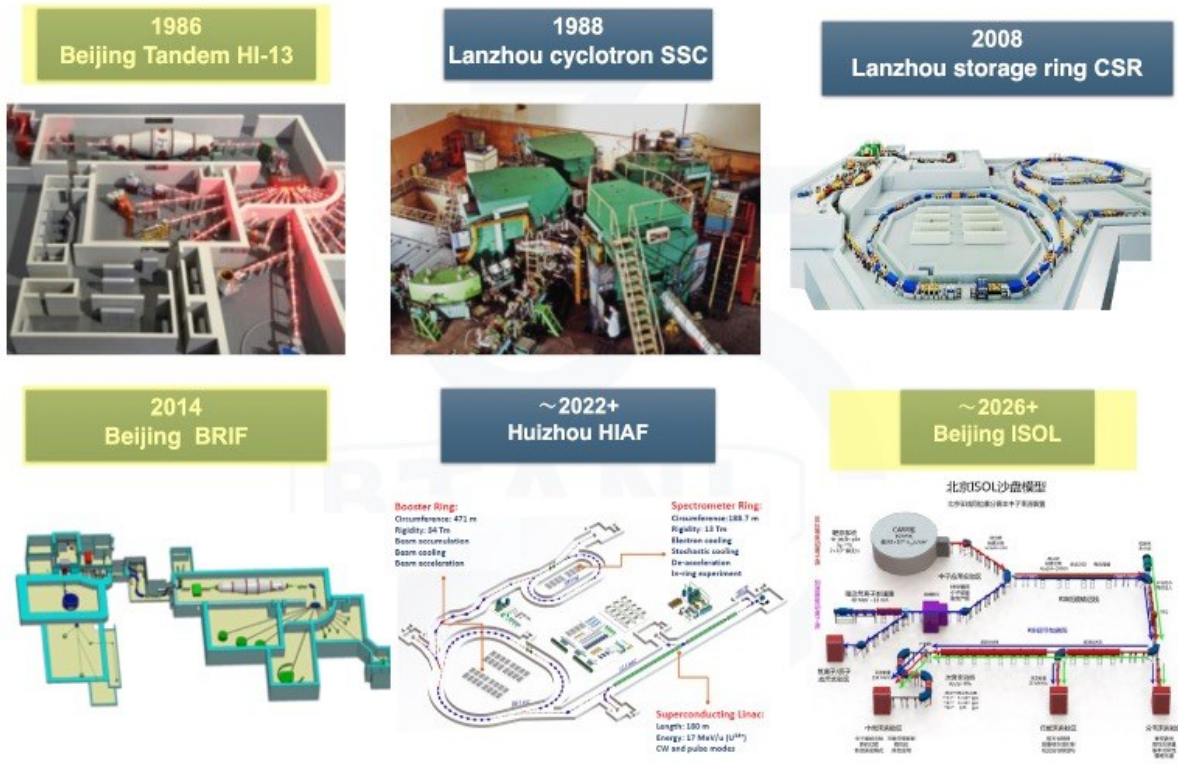


图5 串列实验室的大科学装置在国内核物理地位

Fig.5 Contribution of Tandem laboratory for nuclear physics facility in China

面向未来,串列实验室将在以下4个维度继续发展。一是向深度发展,在核物理优势领域继续做出国际前沿和解决国家重大需求的成果;二是向广度发展,在低能核物理优势领域上,拓展面向未来的核物理前沿和交叉领域;三是向开放共享发展,开展高水平的国内外合作,拓宽优秀人才培养和引进渠道;四是向可持续发展,通过重要基础和应用战略产出,得到国家更多运行经费和项目支持,逐步助力串列实验室成为我国新时期核科技国家实验室的重要组成部分。

35年华诞,35年耕耘。我从到原子能院工作以来,就有幸陪伴串列实验室度过近35年的发展,见

证了它从人才辈出的核科学基地,发展为基础性、综合性和应用性均处于国际先进水平的核科学创新中心的历程。实验室的每一项成绩,都离不开原子能院老一辈科学家的贡献和帮助,离不开串列实验室研究团队的拼搏,更离不开原子能院良好的科研环境。串列实验室开展的核物理研究的发展,正是原子能院核科技事业日新月异发展的缩影。今天,原子能院示范快堆实验装置和超导回旋加速器等一批新的研究装置陆续投入使用,葫芦岛核科学基地整装待发,新一代的核科学装置BISOL也蓄势待发,让我们共同努力,再奋斗15年,共同迎接串列实验室的50年华诞!