

李政道与中国的 同步辐射光源

陈森玉¹ 赵振堂²

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学院上海高等研究院 201210)

自20世纪60年代,同步辐射光源发展至今已经进入第四代光源建设阶段,它以其优异的性能成为了众多前沿学科领域基础研究和应用研究中必不可少的尖端工具。同步辐射光源影响科学技术发展的广度是其他任何一种科学装置都无法比拟的,受到世界上许多发达国家和新兴经济体国家高度重视并得以重点发展。目前全世界有50余台同步辐射光源在运行,还有10多台在建造和技术设计中。作为大型多学科交叉研究平台,同步辐射光源也已成为我国综合性国家科学中心的核心装置和支撑国家创新体系的重要设施,服务着国家的科技创新需求。饮水思源,中国的同步辐射光源发展从无到有、取得今天的长足进步,与李政道先生高瞻远瞩、从谋划北京正负电子对撞机(BEPC)建设规划之初,就倡导并一直推动和支持中国同步辐射的发展,对中国同步辐射发展做出的历史性贡献分不开。

一、北京同步辐射装置(BSRF)

早在20世纪70年代中期,在中国谋划发展高能物理之初,李政道先生和美国加速器专家潘诺夫斯基(W. H. Panofsky)就认为中国科学院高能物理研究所应从建设几十亿电子伏的正负电子对撞机起步,李先生还精心收集了电子对撞机和同步辐射方面的资料带给高能所。1978年2月,李政道先生和美籍华裔科学家袁家骝与吴健雄夫妇写信给高能所张文裕所长,建议中国建造正负电子对撞机。

1. 倡导并力主建设BSRF

1980年底我国落实经济调整方针,在中国高能物理事业如何调整、发展举棋不定的关键时刻,1981年3月,李先生给张文裕所长写信:“……在一个月前我就委托了各专家,尤其是潘诺夫斯基和SLAC实验室的多位物理学家做了很详细的分析……请立刻下决心做 e^+e^- Collider(~ 4.4 GeV Center of mass)的加速器和探测器。在现在调整的经济范围下,以物理的角度来看, e^+e^- Collider是唯一的可能……”。1981年7月18日,李政道先生给张文裕、朱洪元和谢家麟的信里,更是具体建议:因为正负电子对撞机对中国是一个新方向,不妨尽量采纳SLAC的SPEAR和MARKII的蓝本。这样可以减少很多不必要走的歧路。李政道先生帮助中国选择了既先进、又符合中国国情的聚物理目标和北京正负电子对撞机(BEPC)方案,同时也为发展同步辐射装置奠定了基础。1981年12月,邓小平接见李政道,明确表态要建造正负电子对撞机。李先生在《我和祖国的高能物理事业》(2005年)一文中写到:用于高能物理研究的电子对撞机,在进行基础科学研究的同时,可以进行重要的同步辐射研究。所以,我和很多物理学家都认为电子对撞机是“一箭双雕”的好方案。又说:“主要是出于三方面的考虑。其一,从基础科学研究上看,这个方案在20世纪80年代有重要的物理工作可以立刻去做,因而可以在较短的时间里为祖国培养一支有世界水平的高科技人才队伍;其二,从应用科学上看,具有同步

辐射功能的对撞机方案有很重要和广泛的应用科学研究用途;其三,符合当时中国的经济能力和高科技人员的实力”。

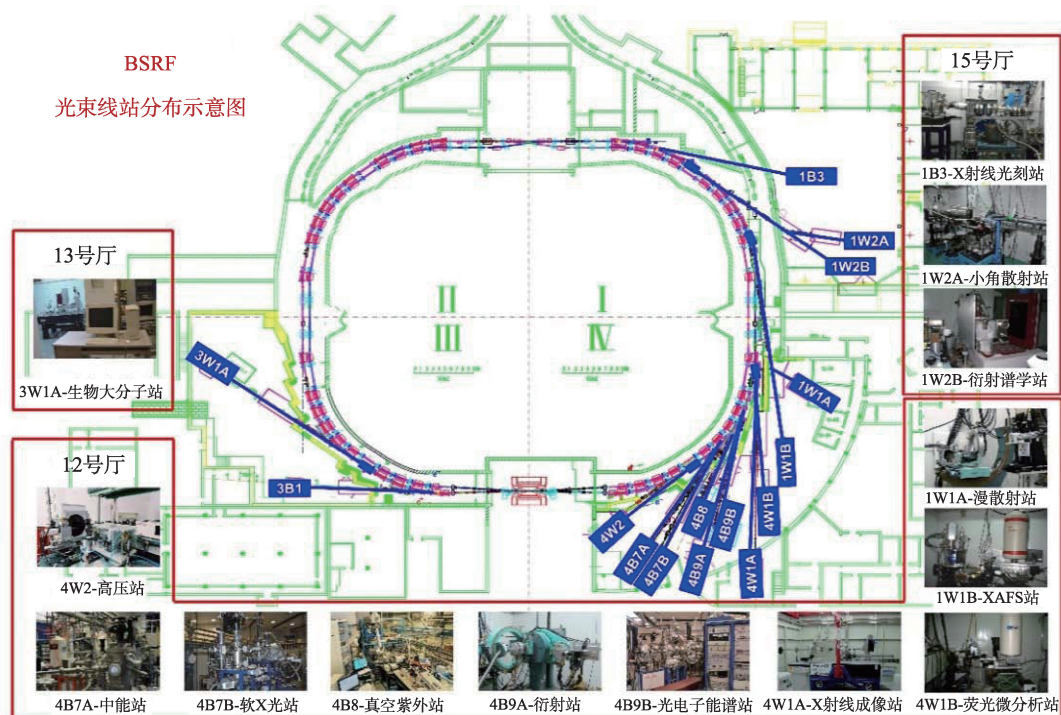
当基于 BEPC 的 BSRF 尚在建设中时,李先生就开始积极部署在中国培育同步辐射用户。1988 年 5 月,李先生邀请了十位国际著名专家到高能所,参加由“中国高等科学技术中心”(CCAST)组织的“同步辐射应用国际讨论会”,BSRF 建设者和用户单位共九十多位代表参加了这次会议。李先生说:“这个会为了提高中国科学家在尖端科学领域的水平和学术地位,为年轻科学家提供良好的学习机会而举办的。”、“为期两周的交流涉及同步辐射研究的各个领域……有助于对中国在同步辐射领域的研究开发,对促进中国科学技术和工业水平的提高有很大意义”。在这之后,李先生领导的中国高等科学技术中心把同步辐射研讨会和讲习班作为主要活动领域之一,2001~2017 年间共组织举办了 10 次同步辐射及其应用的活动和研讨会。

BEPC 研制团队创新性地提出了与 SPEARII 不

同的储存环聚焦结构设计,圆满地实现了“一机两用”的设计目标。BEPC 于 1990 年 7 月通过国家验收:BEPC 作为对撞机,是世界上同能区对撞机中亮度最高和束流能散度最小的机器,处于世界领先地位;BEPC 在同步辐射专用模式运行时,其性能达到或接近当时世界上正在运行的第二代同步辐射光源(如美国的 NSLS 和日本的 PF)的水平。

2. BSRF 现状及应用成果

BSRF 是我国于 1991 年底第一个建成并正式对外开放、横跨紫外到硬 X 射线波段的大型同步辐射装置,属于第一代同步辐射光源,现有 3 个实验大厅、5 个插入件、14 条光束线和实验站(图 1)。研究领域涉及物理、生命科学、材料科学、纳米科学、化学化工、资源环境、医学等。每年为国内外用户提供同步辐射专用光(能量 2.5 GeV、流强 250 mA、发射度 $120 \text{ nm} \cdot \text{rad}$)运行约 3 个月;有 10 个实验站可在 BEPC 运行在对撞模式时,实现兼容模式向用户提供同步辐射光。每年有来自国内外 100 多个研究机构



北京同步辐射装置建有 3 个实验大厅(12 号厅、13 号厅、15 号厅), 共有 5 个插入件、14 条光束线和实验站。

图 1 BSRF 光束线和实验站分布示意图

和大学的一千多名用户在BSRF进行五百多个实验。

30年来,BSRF累计向用户提供专用光机时30000余小时,支持用户课题10000余个,涉及国内外用户单位340余个;累计发表用户文章6000余篇,包括*Nature*、*Science*和*Cell*等期刊文章,并获得中国科学十大进展、中国百篇最具影响国际学术论文、国家自然科学基金等多个奖项。取得的重要结果如:

1) 揭秘SARS病毒蛋白结构,寻找SARS病毒克星:2003年春SARS病毒蔓延,抗SARS病毒的药物研究迫在眉睫。2003年6月,清华大学饶子和教授领导的课题组,首次在2002年底建成的国内第一条蛋白质晶体结构研究光束线和实验站,破解出SARS冠状病毒主蛋白酶的晶体结构;随后利用同步辐射实验得到了有效的药物靶分子,为研制治疗SARS病毒的药物提供了重要信息(图2)。

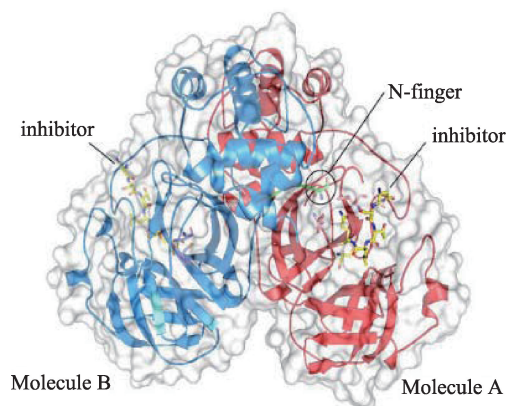


图2 SARS冠状病毒主蛋白酶晶体结构

2) 2.72 Å菠菜主要捕光复合物LHC-II晶体结构:2004年中科院生物所与植物所合作完成了“菠菜主要捕光复合物(LHC-II)2.72 Å分辨率晶体结构”的测定工作,在世界上率先完成了这一国际前沿课题,推动了我国光合作用机理与膜蛋白三维结构研究进入国际领先水平。论文发表于《自然》杂志上(*Nature*, 428, 287~292,2004),封面采用该晶体的结构彩图(图3)。该成果获2004年“中国十大科技进展新闻”和2005年度中国科学院杰出成就奖。

3) 分子水平揭示砒霜治疗白血病机理,对中华传统医学“以毒攻毒”的科学阐释:2010年,上海血

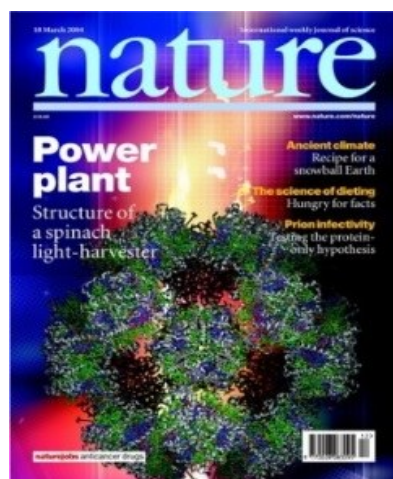


图3 2.72 Å菠菜主要捕光复合物LHC-II晶体结构图

液学研究所、医学基因组学国家重点实验室利用BSRF-XAFS实验站X射线吸收谱学方法,成功揭示了三氧化二砷(俗称砒霜)治疗急性早幼粒细胞性白血病的分子机制,对解释“砷的结合如何决定癌蛋白命运”起到了重要作用。这一研究成果发表在《科学》上(*Science*, 17, 584~589, 2010);被评选为2010年度“中国科学十大进展”之一和“2010年中国百篇最具影响国际学术论文”(图4)。

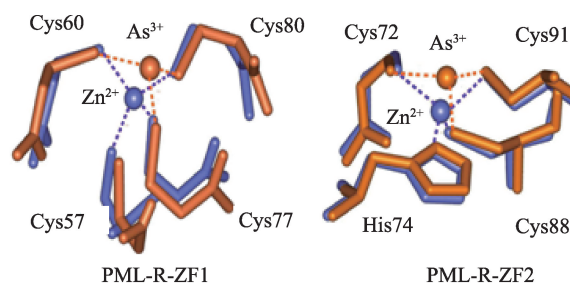


图4 PML蛋白在As替换Zn后局域空间结构的变化

BSRF开创了我国同步辐射研究事业,培养了大批人才,发挥了历史性作用。在上海光源投入运行后,BSRF仍然作为我国北方主要的同步辐射平台,继续为用户服务。

二、上海同步辐射光源(SSRF)

1993年,丁大钊、方守贤、冼鼎昌三位院士向国家建议在中国建设第三代同步辐射光源。1994年,中国科学院和上海市决定合作建造第三代光源—上海同步辐射装置(SSRF)。李政道先生十分关注上海

光源的立项、启动和建设工作,他和他领导的中国高等科学技术中心对 SSRF 给予了多方面的大力支持。

1. 鼎力支持和推动 SSRF 建设

1995 年 2 月,李政道先生致信徐匡迪市长:“第三代同步辐射光源”是现在高科技中最有广泛应用前途的,我很赞成或能建于上海。李先生考虑到第三代光源的技术难度和对高能所的了解,1995 年 5 月向中国科学院路甬祥院长推荐高能所陈森玉研究员负责新光源建设。1995 年 6 月,SSRF 可行性研究工作组成立。陈森玉(高能所)、徐洪杰(上海原子核研究所)和冼鼎昌(高能所)分别任正、副组长,带领从高能所借用的 26 名技术骨干和上海原子核研究所的青年科技骨干,完成了 SSRF 可行性研究和概念设计报告,获得国际评审委员会的高度评价和肯定。1997 年 11 月,陈森玉代表“上海光源”在中美高能物理委员会第 18 次会议上做了《上海光源方案》的报告。1997 年 11 月 7 日,李先生致信徐匡迪市长:已将上海原子核所列入“中美高能物理联合委员会”正式成员,会上将讨论美方合作单位与上海光源的合作项目。1997 年 12 月 7 日,致信上海原子核研究所杨福家所长:美方专家建议 SSRF 提高能量;并提出了为 SSRF 培养加速器和同步辐射技术人才的强化训练班的设想。1998 年 10 月,SSRF 工程指挥部成立,陈森玉、徐洪杰和赵振堂分别任正、副总经理;借调高能所 32 名骨干为中坚组成工程技术队伍,高质量、按时完成了工程预制研

究任务和“上海同步辐射装置工程初步设计”,并培养了上海原子核研究所的加速器和同步辐射队伍。1998 年,李先生领导在他的中国高等技术中心组织了为期两周的“中国加速器学校”。他在 2005 年的文章中说:“我的考虑是如何帮助这新计划培育人才”,“在我主持的 CCAST 办了 1998 年中国加速器学校(CAPS 98),这是我与美国加速器学校(USPAS)特别联合开展的一项活动,从美国和欧洲聘请了 30 位国际著名的加速器物理和技术专家,以及两位中国加速器物理专家作为教师”,“对参加上海同步辐射光源建设的 142 位年轻学者进行了强化训练”;“1998 年,中国计划在上海建设同步辐射光源,我是积极赞成的。较大规模的同步辐射光源计划,正是配合了祖国欣欣向上,各方面应用科技发展的需要。上海是我的故乡,我也很希望上海成为 21 世纪发展中国科技的基地之一”,“我的考虑是如何帮助这个新计划培育人才。通过建造北京正负电子对撞机国内已经成长起了一批第一流的精通加速器和同步辐射技术的人才,为了建造新加速器,开展同步辐射的应用,则需要更多的年轻人才”。在项目开工之后,李政道先生和中国高等科学技术中心始终关心并以多种形式鼎力支持着 SSRF 的建设和发展。

SSRF 是中国大陆第一台第三代同步辐射光源,其储存环能量为 3.5 GeV、发射度约 $4 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 、流强 200~300 mA、周长 432 米。SSRF 一期工程于 2004 年 12 月开工建设,2009 年 5 月建成并正式对用



图5 SSRF 鸟瞰图

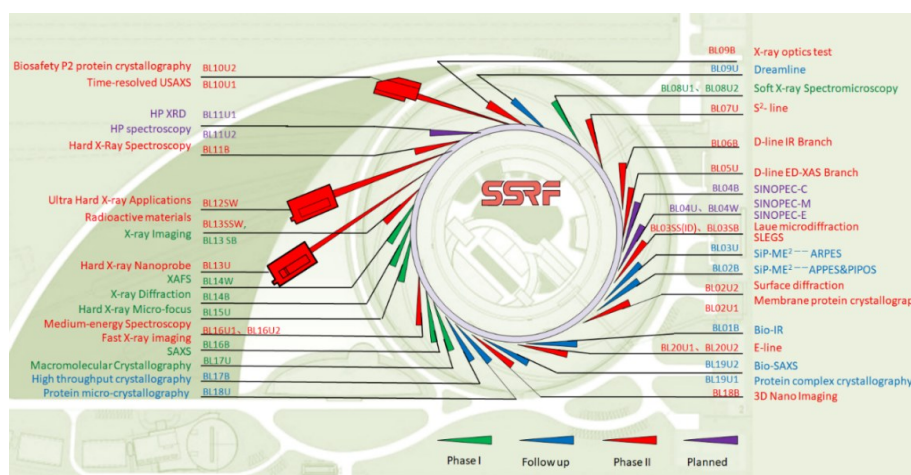


图6 SSRF 光束线站布局图

户开放,使中国同步辐射进入一个新的历史阶段并跨入了世界先进之列(图5);SSRF二期工程于2016年11月开工,预计2022年全部建成。目前共有23条光束线34个实验站向国内外用户开放,二期工程完成后将有34条光束线52个实验站为用户服务。此外,还有中石化投资建设的产业应用研究专用的3线7站也正在建设中,将在2024年全面投入使用(图6)。

2. SSRF 运行开放及应用成果

SSRF 的总体性能位居国际同类装置前列,开放十二年来,已服务近600家研究单位的3100多个研

究组、34000多名用户,支撑科学家在结构生物学、凝聚态物理、化学、材料科学、环境和医学等众多学科领域的前沿和应用研究中完成了约15000个课题研究,取得了一系列具有国际影响力的成果,用户累计发表SCI论文7000多篇,包括*Nature*、*Science*和*Cell*文章近140篇。9项用户成果入选年度中国科学十大进展、5项入选年度中国科技十大进展新闻,以及20项入选其他类国内外科技进展和科技奖项。与此同时,SSRF在国家重大技术攻关、流行病毒传播机制研究、产业技术应用等方面也取得了优异的成绩,已成为我国服务用户最多和产出成果最多的大科学装置。用户典型成果如下:

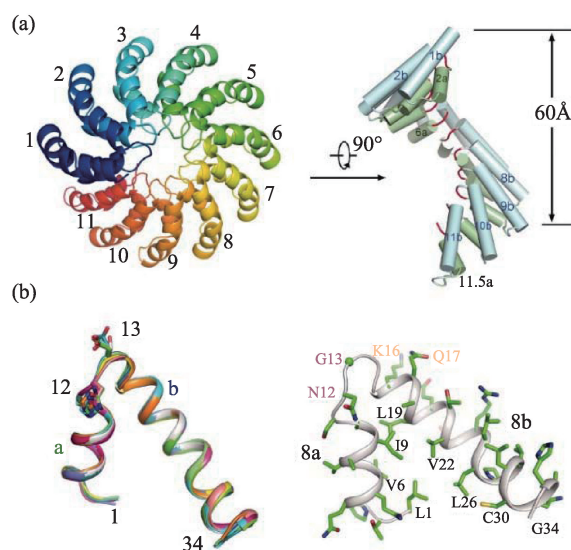


图7 揭示了TAL效应蛋白特异识别DNA的机理被《Science》2012年度“十大科学突破”引用、入选2012年度“中国科学十大进展”

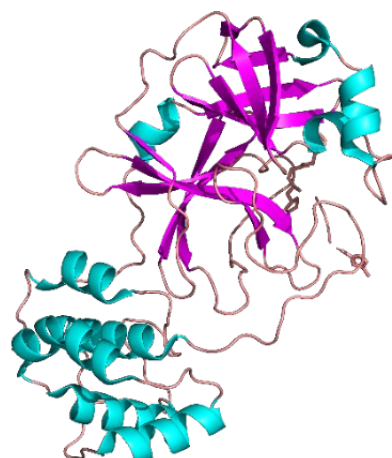


图8 新冠主水解酶蛋白与N3复合物晶体结构(2020年1月26日发布)

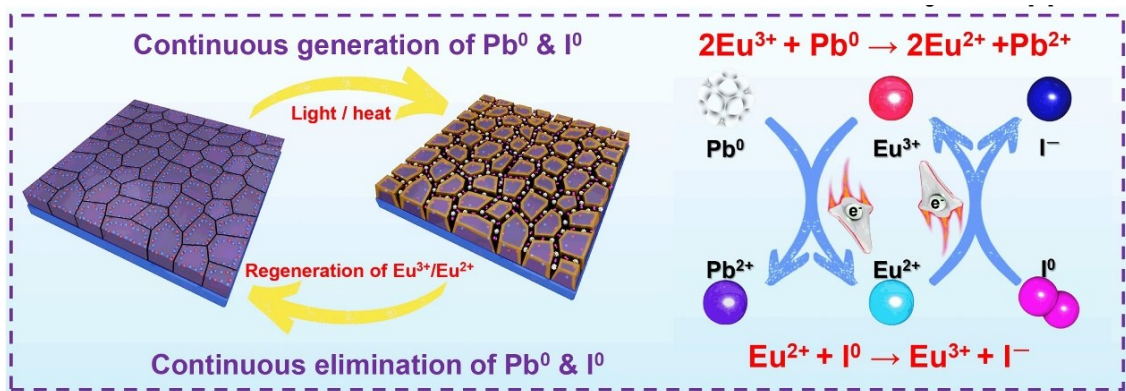


图9 铕离子对提升钙钛矿太阳能电池寿命机理入选2019年度“中国科学十大进展”

1)在生物学领域,SSRF为推动我国结构生物学发展发挥了重要作用,一经投入使用立即改变了我国科学家以往主要依赖国外同步辐射装置开展前沿领域研究的局面,支撑用户在结构生物学和细胞生物学以及功能基因组学的多学科交叉研究,在膜蛋白、蛋白质复合物以及禽流感、埃博拉、寨

卡、新冠肺炎等流行病毒相关的蛋白质结构与功能研究中取得了一批有国际影响力的重要成果,如转录激活样(TAL)效应蛋白特异性识别DNA的结构机理研究(图7),入选2012年度“中国科学十大进展”,还被《科学》杂志评选出的2012年度“十大科学突破”所引用。2020年初,我国科研人员借助SSRF率先解析了新冠病毒关键蛋白的高分辨结构(图8),以及S蛋白与人受体相互作用的高分辨结构,在分子水平上明确了病毒入侵、复制过程,为抗新冠药物的研发奠定了重要基础。相关工作成为2020年度中国科学十大进展“我国科学家积极应对新冠肺炎疫情取得突出进展”的组成部分。

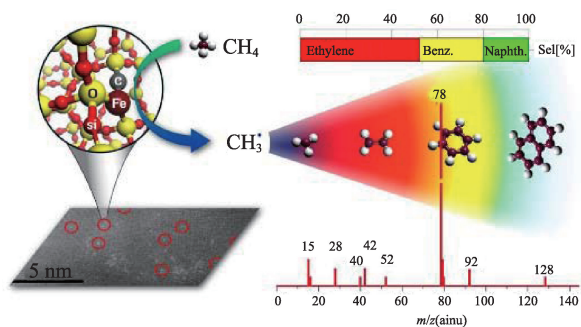


图10 直接、无氧化条件下的高效甲烷转化入选2014年度中国十大科技进展新闻、2014年度中国科学十大进展

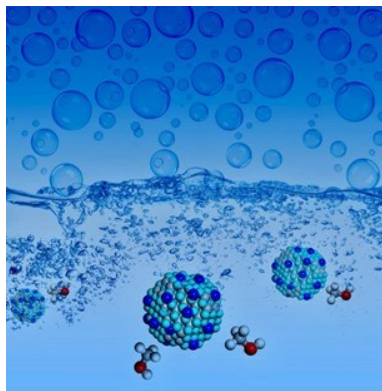


图11 基于原子级分散铂-碳化铜催化体系的甲醇和水液相低温反应制氢示意图,入选2017年度中国科学十大进展

2)在材料科学领域,用户利用SSRF在新材料发现及材料性能改进等方面开展了大量研究工作,包括铁基超导材料、半导体磁性材料、晶体材料、压

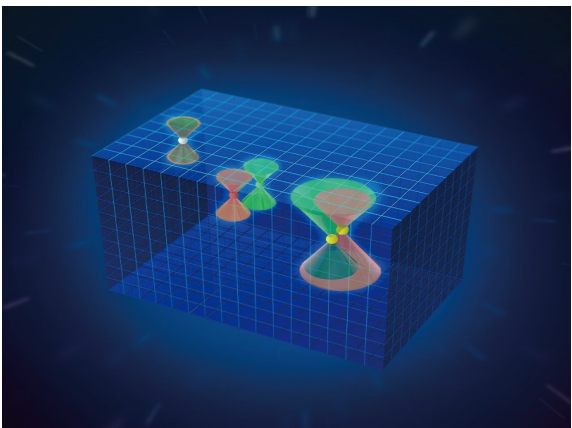


图12 固体材料中实验发现的三种费米子:四重简并的狄拉克费米子(左)、两重简并的外尔费米子(中)、三重简并的新型费米子(右)

电/铁电材料、高分子材料等,取得了多项具有重要应用前景与广泛用途的研究成果:新型铁基硫族化合物超导体在高压下重新出现超导新现象的发现、具有前所未有最优屈服强度(2.2 GPa)和延展率(16%)的超级钢研究、离子精确“装订”石墨烯膜和铈离子对提升钙钛矿太阳能电池寿命机理(图9)等。

3)在催化研究方面,用户利用 SSRF 在 CO 氧化、甲烷转化光解水、电催化、燃料电池和锂电池等方面展开系列研究,取得多项突破性成果。其中甲烷的高效转化(图10)和甲醇重整制氢(图11)等研究成果都入选了当年的中国十大科学进展;此外,由我国科学家首先提出的“单原子催化”理论、并在上海光源首次完成的实验验证,并且采用套单原子催化剂的全球首套烯烃多相氢甲酰化工业装置开车成功,产品质量达到国际优级品标准。



图13 百济神州1类创新药:泽布替尼胶囊

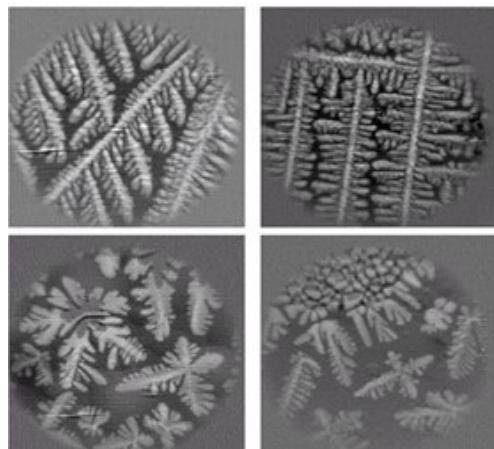


图14 新一代高铁接触线材料枝晶结构
2010年中国十大科技进展新闻、2015年国家技术发明二等奖

4)在凝聚态物理领域,支撑用户致力于新型费米子等基本问题探索,迄今已发现的四种重要新费米态,其中三种是我国科学家利用 SSRF 发现的(图12)。他们在 TaAs 晶体中首次成功观测到了费米弧(Fermi Arc)表面态,实验证实了“外尔费米子”的存在,这一工作入选2015年“中国科学十大进展”和“中国十大科技进展新闻”,美国《物理评论》125周年49篇精选论文;该团队随后完成的“发现三重简并费米子”入选了2017年“中国科学十大进展”和“中国十大科技进展新闻”。

SSRF 在国家战略需求与重大应用方面也发挥了显著的作用。目前已有约60家企业利用 SSRF 进行技术开发,取得了良好的效果和效益:世界知名制药公司诺华、罗氏、葛兰素史克、辉瑞,以及药明康德、睿智化学、百济神州、维亚生物科技等多家生物医药公司利用上海光源获得的大量结构数据进行了新药研发,如,SSRF 助力中国本土企业百济神州自主研发的抗癌新药“泽布替尼”,成为第一个在美获批上市的中国本土自主研发抗癌新药,改写了中国抗癌药“只进不出”的历史(图13)。在化工、冶金、汽车等产业领域,中国石化公司、上海宝钢集团、上汽集团等国内骨干企业借助上海光源平台开发新技术与新产品,突出的应用成果如高性能铜合金连铸凝固过程电磁调控技术已应用于京沪高铁接触线制造(图14)。

三、高能同步辐射光源(HEPS)

今天,人类需要更精细地在空间、时间、能量三个维度,从分子、原子、电子、自旋的水平认识和调控物质,使其具有期望的功能和性能;对微观世界的研究需要从平均、稳态、线性过程深入到瞬态的动力学与其功能关联的局域、动态、非线性的过程。具有超高空间分辨率、超高亮度和相干性的第四代(衍射极限)同步辐射光源的出现,将使人类现有的研究手段有跨越式的提高,从而带来科技发展

的革命性变化。

国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012~2030年)将第四代高能同步辐射光源(HEPS)验证装置列入“十二五”时期建设重点设施。HEPS验证装置于2019年1月通过国家验收。为HEPS的建设奠定了坚实的技术基础。

HEPS是“十三五”期间优先建设的国家重大科技基础设施。HEPS项目建议书于2017年8月获得

批复,落地北京怀柔科学城;2019年6月开工建设,建设周期6.5年,预计将于2025年12月底建成。

HEPS是我国第一台高能同步辐射光源,设计能量为6 GeV,储存环流强为200 mA,发射度优于 $0.06 \text{ nm} \cdot \text{rad}$,亮度 $> 1 \times 10^{22} \text{ phs/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{ BW}$,将是世界上亮度最高的第四代同步辐射光源之一。HEPS光束线站容量不少于90个,可提供能量达300 keV高能量、高亮度、高相干性等特点的X

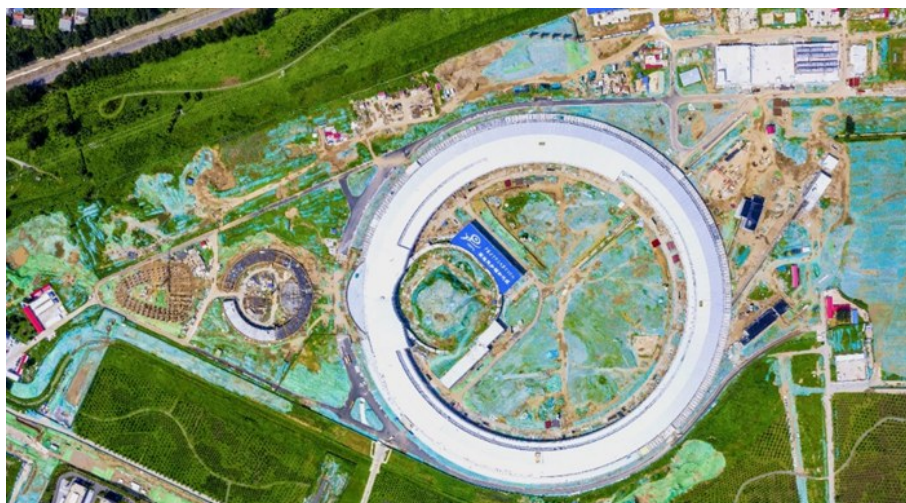


图15 HEPS在建现场鸟瞰图

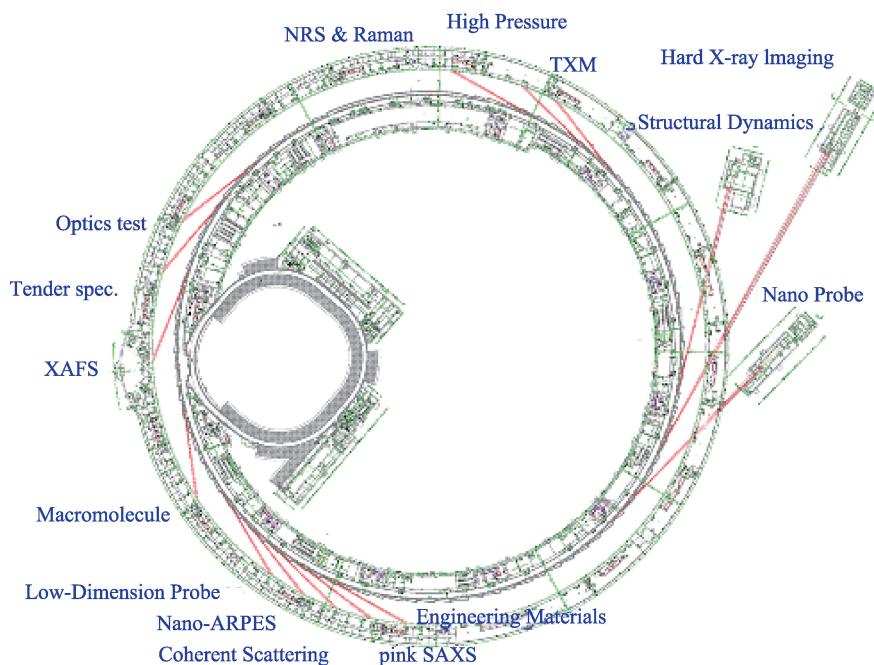


图16 HEPS首期建设线站布局图

射线,将有效满足国家战略和工业核心创新能力等相关研究的迫切需求;具备 nm 量级空间分辨、单个纳米颗粒探测能力、meV 量级能量分辨能力、ps 量级时间分辨,具有穿透能力强等优势、具备高重复频率的动态探测能力。其将与世界上正在运行、升级的美国先进光子源(APS-U)、欧洲同步辐射装置(ESRF-EBS)、日本 SPring-8、德国的 PETRA-III 一起,构成世界五大高能同步辐射光源。

HEPS 由加速器、光束线站及辅助设施等组成,HEPS 加速器装置包括直线加速器、增强器和储存环以及连接彼此间的 3 条输运线。HEPS 的储存环的周长约为 1360.4 m,HEPS 项目整体建筑外形似一个放大镜,寓意为探测微观世界的利器(图 15)。HEPS 首批建设 14 条面向用户的公共光束线和相应的实验站,向工程材料、能源环境、生物医药、石油化工等领域的用户开放。其中,11 条束线的实验站位于实验大厅建筑内,有 3 条 100 米以上的超长光束线,其光束线穿越实验大厅建筑后,在大厅外面建设实验站(图 16)。

HEPS 各线站有其擅长的实验方法,比如有可利用连续光谱的 X 射线吸收谱学、利用高相干性的 X 射线相干散射实验法、高通量生物大分子微晶衍射实验法、超硬 X 射线成像实验方法等的技术和相关设备,支持工程材料、催化与能源、生命科学与生物医学、新材料等前沿科学研究和国家发展战略中部署的课题。在为众多用户提供常规技术支撑的同时,还将为高能射线衍射、高 Z 元素的谱学、极端条件下的实验、高密度和/或大尺度样品成像等国家发展战略和工业核心迫切需求的相关研究,提供多维度、实时、原位的表征平台,解析工程材料的结构、观察其演化的全周期全过程,为材料的设计、调控提供信息。

HEPS 设施的使命是实现性能达到国际领先水平,进一步推动我国物理、化学、生命科学、材料科学、环境、能源、健康等领域部分前沿方向的科研工作

平进入国际先进行列。

经过 30 年的努力,中国的同步辐射光源从起步跟踪已进入到发展的快车道。1985 年李政道先生曾组织 BSRF 和合肥光源的科学家参加在美国布鲁克海文国家实验室召开的同步辐射光源建设研讨会,推动中国研制同步辐射光源的科学家与国际同行交流。30 多年后的今天,中国的第四代同步辐射光源已赶上世界的步伐,6.0 GeV 的 HEPS 在建,2.2 GeV 的合肥先进光源已完成预研,呈现出强劲的发展态势。李先生对我国同步辐射发展的重大贡献将永远载入中国同步辐射发展的史册。李先生在回顾 30 年来中国在高能物理和同步辐射方面取得的进步和成就时,曾深情地说:我期盼着,祖国在新的百年里,在新的时代有更好更大的发展,祖国的物理和其他基础及应用科学的未来更有极光辉的新成就!我们一定不辜负李政道先生的期望,继续努力前行,实现中国同步辐射事业发展的新的辉煌。

致谢:作者感谢陈和生、董宇辉、梁岫如、胡天斗、邵仁忠、李爱国和范颖对本文的贡献。

参考文献

- ① 陈和生、陈森玉. 2015. 李政道与中国的同步辐射. 现代物理知识, 27 (4): 59-63.

作者简介:陈森玉,中国工程院院士,中国科学院高能物理研究所原副所长,1981 年起从事大科学装置设计、建设和运行 40 年,曾任北京正负电子对撞机工程副经理和上海同步辐射装置工程指挥部总经理、上海光源工程总顾问。

赵振堂,中国工程院院士,中国科学院上海应用物理研究所原所长,上海光源科学中心主任,1990 年起一直从事加速器大科学装置设计、建设和运行工作,曾任上海光源工程副总经理,现任上海光源线站工程总经理。