

# 从BSRF到HEPS

姜晓明<sup>1</sup> 董宇辉<sup>2</sup> 王九庆<sup>2</sup> 于梅娟<sup>2</sup>

(1.中国科学院科技创新发展中心 10090;2.中国科学院高能物理研究所 100049)

作为北京怀柔综合性国家科学中心的核心装置,高能同步辐射光源(High Energy Photon Source,简称HEPS)的建设如火如荼,基建工作已基本完成(建设实景照片如图1所示),正处于设备安装阶段,将于2025年底顺利完成。届时世界领先水平的新一代同步辐射光源(参数见表1)<sup>[1]</sup>将屹立在古老的长城脚下,为中国多学科领域研究能力的提升、产出世界一流的研究成果提供重要的研究支撑平台。

## 一、我国同步辐射光源发展助力国家科技水平的提升

中国的同步辐射装置建设发端于中国科学技术大学的合肥光源和高能物理研究所的北京同步辐射装置(Beijing Synchrotron Radiation Facility,简

称BSRF)。BSRF是按照“一机两用”的方针,作为北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider,简称BEPC)的附属设施于1989年建设完成的国内第一个用户装置。BSRF建成以来,取得了一系列的重大成果,如SARS冠状病毒主蛋白酶的晶体结构解析、菠菜主要捕光复合物(LHC-II)2.72Å分辨率晶体结构解析、三氧化二砷治疗急性早幼粒细胞性白血病分子机制研究、碳基高效光解水催化剂研制等<sup>[2-5]</sup>,也为我国同步辐射光源的后续发展培养了大批建设人才和用户人才。

1993年,丁大钊、方守贤和冼鼎昌三位院士高瞻远瞩地提出了在北京建设第三代同步辐射光源的建议<sup>[6]</sup>。由于当时国家经济实力所限,第三代光源建设经杨福家、谢希德院士等专家的大力推荐,



图1 建设中的HEPS。不远处的雁栖湖、沿山脊蜿蜒而上的长城和山顶的烽火台清晰可见。摄于2022年8月,HEPS工程办供稿。

表1 HEPS加速器的主要设计指标

参数	设计指标
储存环周长(m)	1360.4
增强器周长(m)	454.5
Lattice结构	48×7BA
能量(GeV)	6
流强(mA)	200
发射度(nm·rad)	0.06
亮度(phs/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%BW)	>1×10 <sup>22</sup>

得到上海市政府对建设光源(所需的匹配经费)的大力支持,1995年开始了上海光源前期立项和预研工程。在陈森玉院士带领下,高能所派出了一个完整的加速器专家团队和部分线站专家前往上海原子核研究所(后更名为上海应用物理研究所)协助指导、推进上海光源的立项和设计工作。后来几经周折,在广大结构生物学专家的大力支持下,上海光源于2004年正式开工建设。2009年建成后成为我国同步辐射的核心装置,为多学科的科学和技术发展做出了重要贡献<sup>[7]</sup>。

随着我国科学水平的不断提升,高能所于本世纪初开始谋划发展成为一个大型的综合性多学科科学中心。2005年成立了多学科研究中心,并开始了综合性科学中心的规划布局工作。2007年开始,这个设想逐步得到怀柔区及北京市政府和科学院的大力支持,进而成为我院在怀柔发展的一个突破点。2010年,北京市和科学院共同签署在怀柔建设北京综合研究中心的合作协议,为未来发展奠定基础。此后,在广大用户的大力支持下,北京综合研究中心开始了在怀柔建设综合性科学中心的规划组织工作。另一方面,随着我国经济的发展,国家对大科学装置建设的支持力度在持续增加。在谋划“十二五”规划过程中,集中建设数个大科学装置形成综合性国家科学中心的构想,开始得到国家发改委以及地方政府相关领导的支持。拟落户怀柔的高能同步辐射光源验证装置(High Energy Photon Source Test Facility, 简称 HEPS-TF)、综合极端条件实验装置和地球环境系统数值模拟装置同时获批为“十二五”国家重大科技基础设施项目。

2017年5月,国家发改委正式批复由北京市和中国科学院联合提交的《北京怀柔综合性国家科学中心建设方案》,HEPS是综合性国家科学中心的核心平台型装置。2019年,在高能所HEPS项目指挥部辛勤努力和广大用户的大力支持下,HEPS在北京怀柔正式开工建设,2025年底建成后将成为怀柔综合性国家科学中心的核心装置。

## 二、HEPS立项过程中的关键因素

### 1. 强烈的用户需求为 HEPS 立项打下了坚实的基础

在谋划北京怀柔大科学中心的初始阶段,建设一个什么样的光源经历了比较长时间的论证。2007年以来,项目团队分别与国内材料科学界、航空发动机研制单位以及中国工程物理研究院等重大需求用户进行了广泛交流讨论。先后组织召开了北京先进光源(HEPS初期项目名称)初步方案暨用户交流会、环境科学和地质科学用户研讨会、材料科学用户研讨会、生命科学用户研讨会。国内各领域的代表性用户对高能同步辐射光源的科学意义、性能指标、主要研究定位等问题进行了深入的讨论,明确了HEPS建设的紧迫性和必要性。

2009年HEPS-TF项目被列入《国家重大科技基础设施建设“十二五”规划》,2010年8月开始了HEPS-TF项目的调研和概念设计以及前期研究<sup>[8]</sup>。

2011年8月29日~31日,以“高能同步辐射光源前沿科学和应用”为主题的香山科学会议在北京召开。会议围绕高能光源的先进加速器技术、高能光源线站技术前沿、极端条件及国家安全相关科学研究、高能光源上的工程材料研究及工业应用等中心议题进行了深入的讨论。与会专家认为大型高能同步辐射光源在国家重大需求、工程材料实时研究、极端条件、前沿科学相关的科学研究方面发挥着关键的平台支撑作用,低发射度、储存环能量为5-6 GeV的高能光源是一个能满足广大用户迫切需求的合理方案。

2016年12月23日,HEPS项目被列为《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》(发改高技[2016]2736号)优先布局的十个建设项目之一。2017年1月17日~18日,以“准极限高能光源带来的新科学新技术”为主题的香山科学会议在北京召开。会议围绕准极限HEPS在物质材料科学、生命医药科学、工业工程应用、能源环资研究中的科学突破及其对光源的技术需求等中心议题进行了深入的讨论。与会专家指出作为用户装置,HEPS的建设目标需充分考虑光源性能指标与用户需求之间的平衡,注重用户科学需求;需与国家战略需求、科学前沿、用户需求相结合,成立相关的组织机构,以长远发展的眼光,广泛组织用户参与探讨,综合考虑二期线站建设等因素,确定首期建设线站的选择。

2016年—2018年期间,随着HEPS项目立项工作的不断推进,项目组针对一期拟建设的线站或实验方法召开了系列国内外研讨会,包括成像、高压、低维结构探针分析、粉光小角散射、高能衍射/工程材料、生物大分子微晶衍射、结构动力学、软X射线及中能谱学、核共振散射、X射线非弹性散射等。这些会议的召开,进一步明确了各线站的应用目标,凝练了线站的功能和技术方案选择,对线站设计和建设达成了共识。

## 2. 我国经济实力的发展是高能光源先进性的关键

在HEPS工程论证过程中,随着我国经济实力的不断发展,根据专家的建议,国家发改委对HEPS的技术指标提出了进一步要求。为了保证HEPS建成时跻身世界一流光源行列,加速器方案设计需要充分借鉴国际加速器界先进光源设计的最新进展。

HEPS方案的酝酿期间,恰逢国际上提出了基于储存环进一步提高同步光亮度及横向相干性的第四代光源的概念。特别是2012年起,国际上已有的高能储存环光源(如ESRF, SPring-8和APS)均计划将束流能量调整为6 GeV、并采用MBA(Multi-

Bend Achromat)结构实现超低发射度( $60\sim 150\text{ pm}\cdot\text{rad}$ ),以提供高亮度和高性能的X波段同步辐射光(如ESRF UP PII<sup>[9]</sup>、SPring-8-II<sup>[10]</sup>、APS-U<sup>[11]</sup>)。加速器设计上,多采用小孔径、高梯度的四极铁(如四极磁铁内孔径25 mm左右,磁场梯度80 T/m左右),以实现高性能并控制合理的造价。由于超低发射度设计需采用很高的聚焦强度,自然色品大,所以校正自然色品需要高强度的六极磁铁;而后者会引入极强的非线性,给光源的束流动力学性能优化带来很大困难,其动力学孔径相对第三代光源更小,从而对磁铁的高阶场、准直误差等要求也更为严格。同时,较小的动力学孔径,使得传统的离轴注入累积束流的方式变得困难,需要采用基于纳秒级快脉冲技术的在轴置换(swap out)<sup>[11]</sup>注入方式。此外,为了保持光源稳定运行,对励磁电源的稳定性,磁铁支架系统及加速器运行的隧道环境都提出了比第三代光源更为严格的要求,如表2。

表2 HEPS储存环的硬件要求及其与第三代光源的对比

光源参数	HEPS	第三代光源
束流发射度( $\text{nm}\cdot\text{rad}$ )	低于0.1	1~5
磁铁磁场梯度(T/m)	80	<25
磁铁磁场精度	$1\times 10^{-4}$	$5\times 10^{-4}$
磁铁电源电流稳定度(ppm)	10	50
磁铁定位精度( $\mu\text{m}$ )	30	80~150
BPM分辨率( $\mu\text{m}$ )	~0.1	~1
束流轨道稳定度( $\mu\text{m}$ )	~0.3	~1
关键设备冷却水温控制( $^{\circ}\text{C}$ )	$\pm 0.05$	$\pm 0.1\sim\pm 0.2$
加速器隧道温度控制( $^{\circ}\text{C}$ )	$\pm 0.05$	$\pm 0.1$

对照第四代光源的性能指标和技术参数要求,国内当时在一些加速器、光束线和实验站的关键技术上存在不小的差距,必须通过高能同步辐射光源验证装置(HEPS-TF)解决。2015年2月,HEPS-TF项目建议书获得国家发展改革委批复。2016年4月,HEPS-TF初步设计报告获得中科院批复,启动建设。

HEPS-TF工程设立加速器、光束线站、工程材料分总体。为了在加速器物理设计上实现HEPS的总体指标,同时确保相关的硬件技术指标,如表2,

在技术和工艺上切实可行,HEPS-TF 加速器分总体设置了包括物理、磁铁、电源、插入件、束测、高频、机械与准直、注入引出、真空和隧道环境试验等 10 个系统开展物理设计的研究与优化和关键技术的预制研究。

经过 2 年 6 个月的艰苦努力,以 2018 年 9 月 21 日插入件系统的 3W1 超导扭摆器通过工艺测试为标志,加速器分总体各系统完成了初步设计和任务书中所列的研制内容,并按期完成了工艺测试,所研制设备均达到了预期性能。同时,结合关键技术的预研,完成了 HEPS 项目建议书和 HEPS 可行性研究报告的相关任务。这样,通过 HEPS-TF 项目的实施,形成了一个性能上先进、技术上可行的加速器设计方案,并在相关的关键技术上取得跨越发展,为 HEPS 的顺利建设奠定了坚实的基础。HEPS 以接近 50 亿元人民币的投资规模,成为国家发改委投资额度最大的大科学工程项目。

### 3. 怀柔优良的地质条件是高能光源落户怀柔的基础

HEPS 是院市共建北京怀柔综合性国家科学中心的核心装置,选址工作一直受到双方的高度关注和大力支持。由于 HEPS 是一个接近衍射极限的第四代光源,其束流发射度较目前国际上现有的三代光源要小一到两个数量级,对地基的不均匀沉降和微振动有很高要求。在选址过程中,怀柔候选地的有关地质条件成为 HEPS 能否在北京怀柔建设的一个相对关键的限制条件。

HEPS 初选的拟建设场地位于北京雁栖经济开发区中部,牯牛河与沙河之间、宰相村和安各庄西面。2011 年 6~7 月,高能所委托中国科学院地质与地球物理研究所对该拟建设场地进行了可行性研究勘察。结果表明该初选场地基岩埋深变化较大,深度从 50 多米到 230 米;由于其基岩岩性由花岗岩和火山碎屑岩经数百万年沉积而成,其不均匀沉降较低,且选址地点离最近的八宝山-黄庄-高丽营断裂带距离超过 600 米,宏观地质条件满足 HEPS 建

设要求<sup>[12]</sup>。

地基的微振动方面,自 2011 年开始,高能所项目人员先后多次对初选拟建设场地进行了微振动测量。测试结果表明拟建设场地水平向振幅大于垂直向振幅,安静期间水平向振幅为 50.3~84.5 nm,垂直向振幅为 30.7~82.0 nm;嘈杂期间水平向振幅为 57.0~117.1 nm,垂直向振幅为 44.8~92.8 nm<sup>[13]</sup>,与世界各地主要加速器的地基微振动情况相比处于中等偏差的位置。从国内来看,比上海光源的地基要稳定,但比 BEPC 地基要差。根据这一微振动测量结果为条件进行储存环束流模拟的结果显示,在出光点处,受振动影响产生的轨道畸变大于垂直光斑尺寸的 50%,离 10% 以下这一既定目标还有一定差距,但可以通过应用轨道快反馈技术等技术条件实现所期望的 10% 以下目标。同时,专家建议,在加速器地基建设过程中,稳定的混凝土地基、对振动源的有效控制以及细节技术的仔细研究都是实现高能光源设计能力的必备条件。

HEPS 实际建设场地后来调整到北京雁栖经济开发区北端,离初选地址约 6 公里,北侧为京密引水渠,东侧为牯牛河,南侧为永乐大街,西侧为京加路。测量得到的地质条件数据与原初选场地类似<sup>[14]</sup>,经过项目建设人员的大力攻关,对地基进行一些创新性特殊处理<sup>[15]</sup>,有效控制了园区内道路、内部振源、外部振源以及地面振动的影响<sup>[16]</sup>,未来在储存环运行时加载快轨道反馈后,可实现束流位置和角度的抖动小于束斑 RMS 尺寸 10% 的实验用户需求。

一个有趣的巧合是,位于玉泉路的 BSRF 和位于怀柔的 HEPS 都坐落于八宝山-黄庄-高丽营断裂带附近,像一“带”连接起来的两颗明珠。

## 三、新一代高能光源的强大支撑能力

HEPS 具有世界领先的技术指标,将极大提升对前沿科学研究的支撑能力,主要体现在以下几个方面:

(1) 提供能量上限可达 300 keV 的高性能同步辐射

X射线,满足国家重大需求及工程材料方面的特殊需求;

- (2)为衍射实验提供微米量级的聚焦光斑,获得重要但结晶十分困难的蛋白质晶体结构,解决生命科学研究的瓶颈问题;
- (3)为谱学和成像研究提供 nm 量级的聚焦光斑,直接观察纳米尺度上的结构变化;
- (4)达到 ps 量级的时间分辨能力,研究物质(生命物质和非生命物质)结构变化的动力学过程,为实现物质调控奠定基础;
- (5)超高能量分辨( $<1\text{ meV}$ )和动量分辨( $0.1\text{ nm}^{-1}$ )的谱学方法为精细结构研究提供条件;
- (6)为开展动态、原位和极端条件下的科学研究提供了重要的平台。

这些支撑能力将会对多个学科,如分子环境科学、极端条件下的科学研究、纳米科技、催化和能源、生命科学和生物医学的发展起着重要的推动作用。

## 四、结语

世界同步辐射光源的发展历史,是一部服务广大多学科用户开展多学科前沿研究并取得突破性成果的历史。其最辉煌的篇章是同步辐射 X 射线蛋白质晶体学方法的发展和广泛应用,助力结构生物学家破解了众多生命科学具有关键意义的蛋白质结构,并获得了 5 个诺贝尔奖。我国的同步辐射光源建设起步较晚,一直处于学习、追赶阶段,未能帮助中国的科学家荣获诺贝尔奖。HEPS 光源将是首次站上领先位置的中国同步辐射光源,期待服务、支撑我国科技界广大用户创造更辉煌的未来。

2025 年,当 HEPS 完成建设并提交用户正式使用的时候,我们这些 HEPS 的参与者和建设者可以自豪地对用户说:“朋友,世界领先的 HEPS 光源已经建好了,后面就看你们的了。”

中国同步辐射用户朋友们,加油!

**致谢:**HEPS 工程办提供了精彩的建设现场俯视图照片,闫芳提供了建设场地部分数据和最新进展。

## 参考文献

- [1]《高能同步辐射光源初步设计报告》,2019年1月。
- [2] Haitao Yang et al.,The crystal structures of severe acute respiratory syndrome virus main protease and its complex with an inhibitor, PNAS, 100 (23), 13190-13195, 2003.
- [3] Zhenfeng Liu et al. Crystal structure of spinach major light-harvesting complex at 2.72 Å resolution. Nature, 428, 287-292, 2004.
- [4] Zhang, X. W. et al. Arsenic trioxide controls the fate of the PML-RAR $\alpha$  oncoprotein by directly binding PML. Science, 328(2010) 240-243.
- [5] Juan Liu et al., Metal-free efficient photocatalyst for stable visible water splitting via a two-electron pathway. Science, 2015: Vol. 347 (no. 6225), 970-974.
- [6] 丁大钊、方守贤、冼鼎昌,《关于在北京建设第三代同步辐射光源的建议》,1993年。
- [7] 参见上海光源网站 <http://www.ssr.ac.cn/>
- [8]《高能同步辐射光源验证装置建设总结报告》,IHEP-HEPSTF-P0-TR-2018-005,2018年11月。
- [9] P. Raimondi, et al., ESRF Upgrade Phase II, Third DLSR Workshop at SLAC, CA, USA (December 2013).
- [10] Tetsuya Ishikawa, SPring-8 Upgrade Plan from SP8 to SP8II, Third DLSR Workshop at SLAC, CA, USA (December 2013).
- [11] A MBA Lattice at the APS: A New Generation, A Preliminary Report on the October 2013 Workshop on New Science Opportunities Provided by a Multibend Achromat Lattice at the APS, <http://www.aps.anl.gov/Upgrade/Workshops/2013/MBA-Technology/>.
- [12] 北京先进光源工程地质可行性研究勘察报告,中国科学院地质与地球物理研究所,2011年11月。
- [13] 北京先进光源场地微振动测试报告,北京市勘察设计研究院有限公司,2012年7月。
- [14] 北京高能同步辐射光源项目场地北京环境微振动测试报告,中国电子工程设计院,2016.12,北京。
- [15] Fang Yan et. al, The design and prototype test for the tunnel foundation of high energy photon source, MEDSI2020 proceedings, July 26-29, 2022 Virtual format.
- [16] 北京高能同步辐射光源(HEPS)地基基础设计方案微振动复核报告,同济大学,2020年7月。