

高能同步辐射光源

建设进展



焦毅（代表HEPS建设团队）

高能物理研究所加速器装置联合年会 河南郑州

2025.10

报告内容

1. 光源概况
2. 挑战与进展
3. 结束语

1、光源概况



『十三五』国家重大科技基础设施

高能同步辐射光源

(HEPS | High Energy Photon Source)

建设内容：加速器、光束线站、配套土建工程及辅助设施等;

工 期：6.5年，2019年7月-2025年12月;

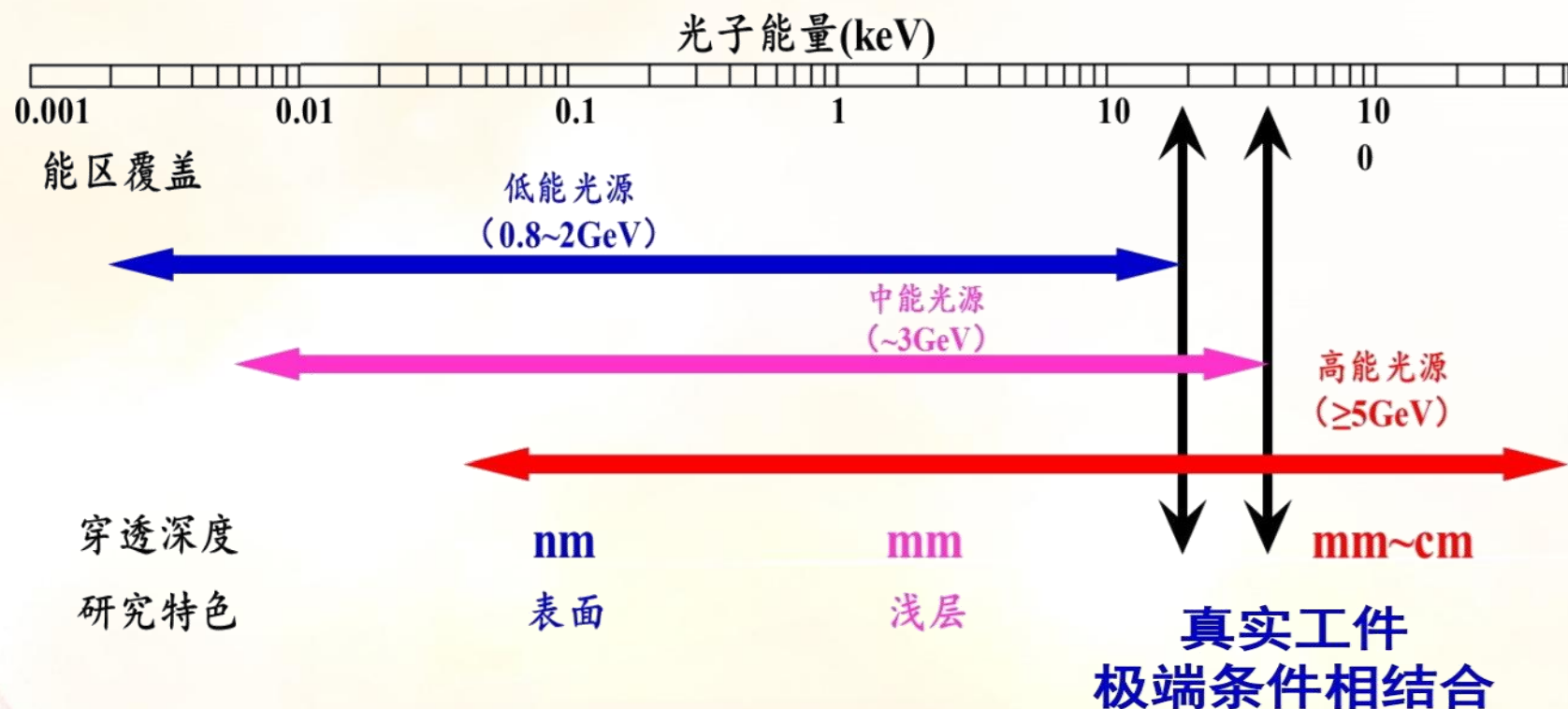
法人单位：中国科学院高能物理研究所;

建设地点：北京怀柔科学城北部核心区;

占地面积：976亩;

投资：47.6亿人民币

不同能区的光源具有不同的优势领域



真实材料 + 真实条件 + 实时研究：硬X射线 20-300keV, 高通量
——高能量、低发射度、高亮度的同步辐射光源



大量工业发展等研究需要高能光源的支撑

真实工
结

- 全面支
前沿研

实验需求:

真实材料 + 真实条件 + 实时研究

对光源的要求:

硬X射线

20 ~ 300keV

高通量

程的实时研
究

催化反应过
察

设计制备纳
化剂

米尺度上实
化的控制



同步辐射装置发展的趋势：更低的发射度

装置名称		ε_x (nm·rad)	ε_y (nm·rad)
DESY-DORIS III	第一代	410	12
BNL-NSLS	第二代	66	20
ESRF	第三代	4	0.025
DIAMOND	第三代	2.74	0.0274
BNL-NSLS II	第三代	0.55	0.008
DESY-PETRA III	第三代	1	0.01
ESRF-EBS	第四代	0.133	0.002
HEPS	第四代	0.035	0.0035



先进光源的基础：加速器

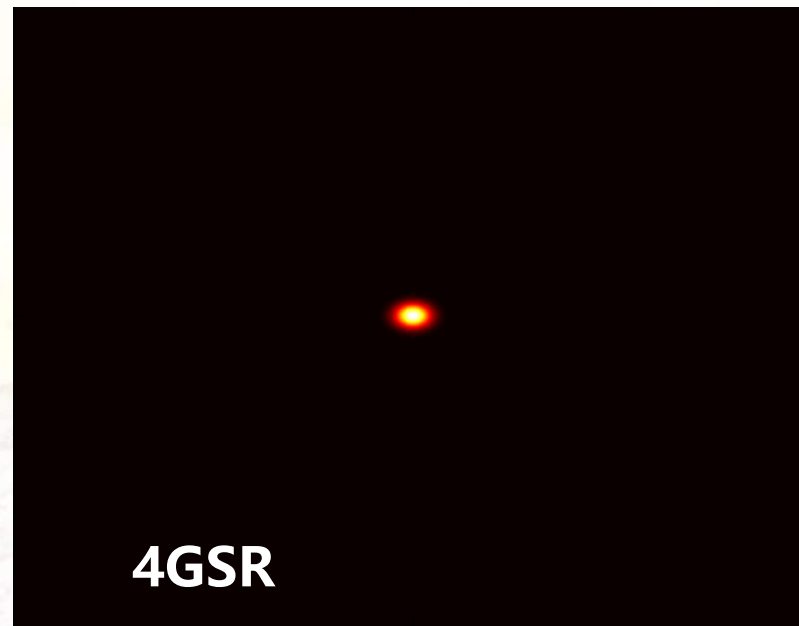
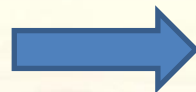
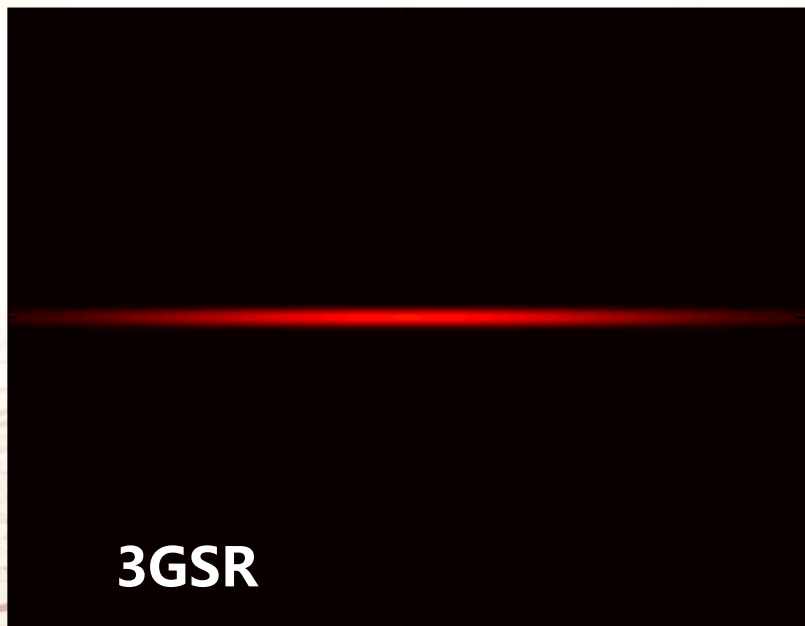
$$\varepsilon \propto \frac{E_e^2}{(N_{sect} \cdot N_{dipole})^3}$$



ESRF today

EBS

三代光源的发射度：
1000~5000 pm·rad
四代光源：≤ 100 pm·rad



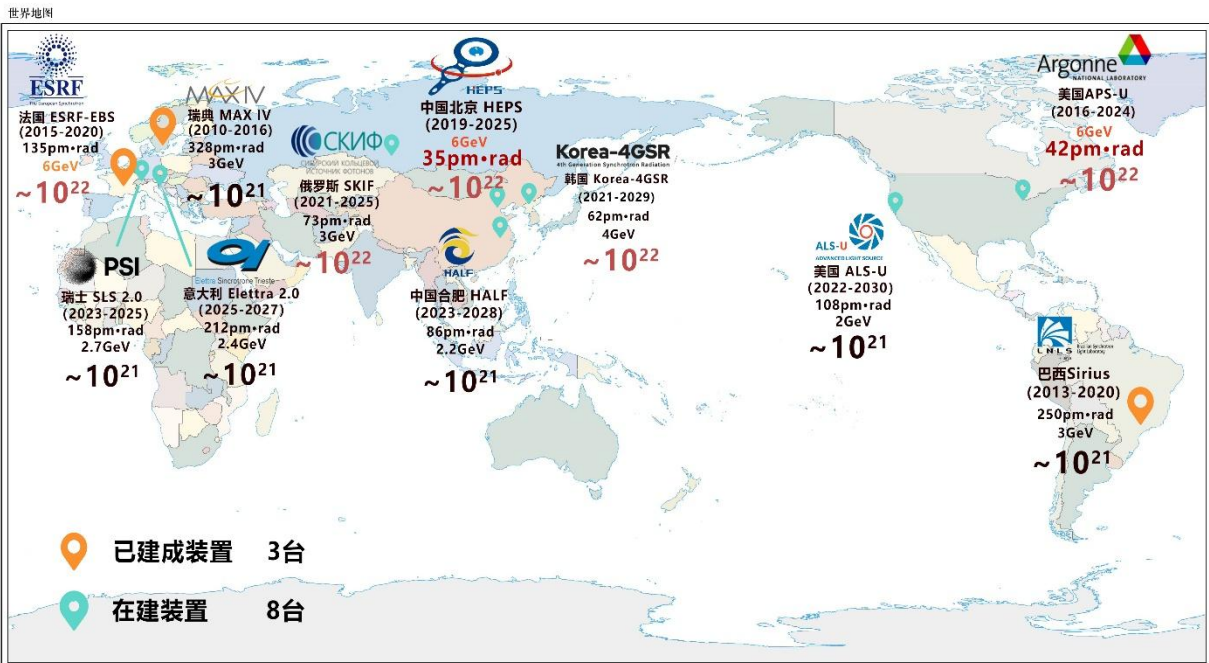


项目定位

世界最亮第四代同步辐射光源之一

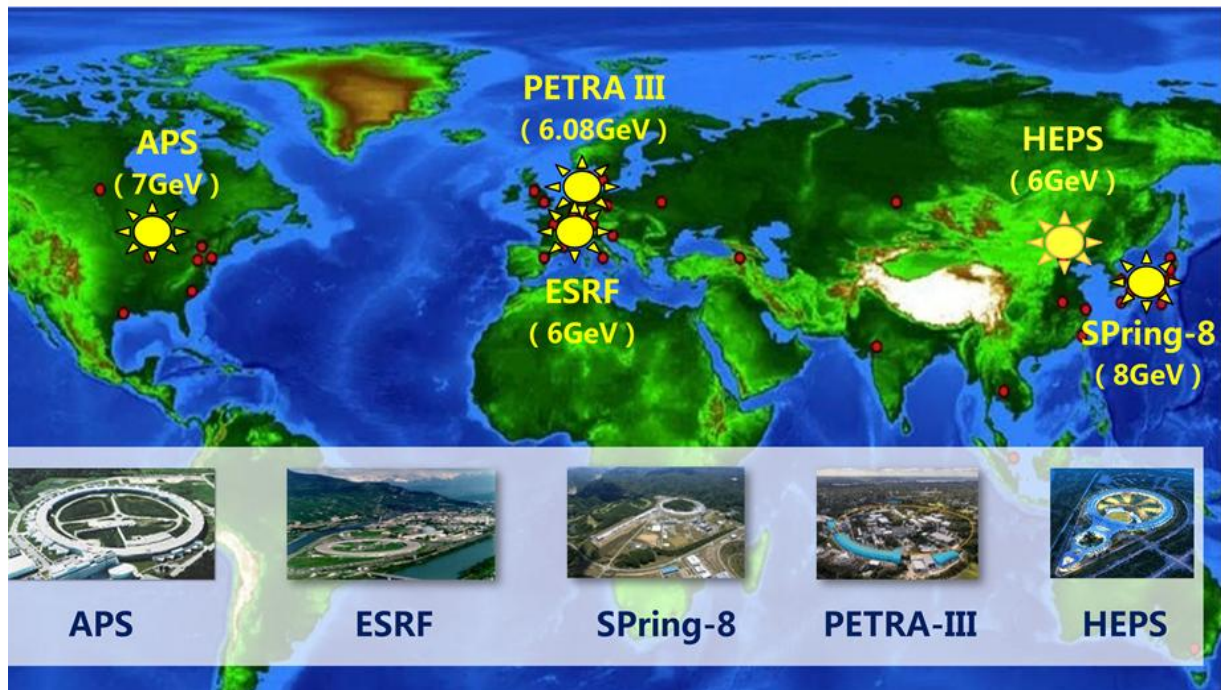
多弯铁消色散结构

第四代光源主要特征



中国第一台高能量同步辐射光源

建成后，HEPS将成为我国第一台高能量同步辐射光源，与世界上正在运行的美国先进光子源（APS）、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5大高能同步辐射光源。+





科学及工程目标



- 能量达6GeV，亮度 1×10^{22} phs/s/mm²/mrad²/0.1%BW，**X射线**能量达**300keV**。
- 空间分辨**10nm量级**；能量分辨**1meV量级**；时间分辨**ps量级**，具备高重频动态探测能力



——**国际领先（最亮）的高能同步辐射光源**





建设意义

满足国家需求和
足家求工创

- 高能X射线衍射/工程材料光束线站
- 硬X射线多功能多尺度显微成像线站
- 硬X射线谱学综合线站
- 粉光小角散射线站

重大科技项目

1. 航空发动机及燃气轮机
2. 深海空间站
3. 量子通信与量子计算机
4. 脑科学与类脑研究
5. 国家网络空间安全
6. 深空探测及空间飞行器在轨服务与维护系统

重大科技工程

1. 种业自主创新
2. 煤炭清洁高效利用
3. 智能电网
4. 天地一体化信息网络
5. 大数据

6. 智能制造和机器人
7. 重点新材料研发及应用
8. 京津冀环境综合治理
9. 健康保障

- 硬X射线纳米探针线站
- 结构动力学线站
- 硬X射线相干散射线站
- 硬X射线高能量分辨谱学光束线站

稳态

平衡态

线性过程

统计平均

简单体系

瞬态、动力学

非平衡态

非线性过程

局域、个体

复杂体系

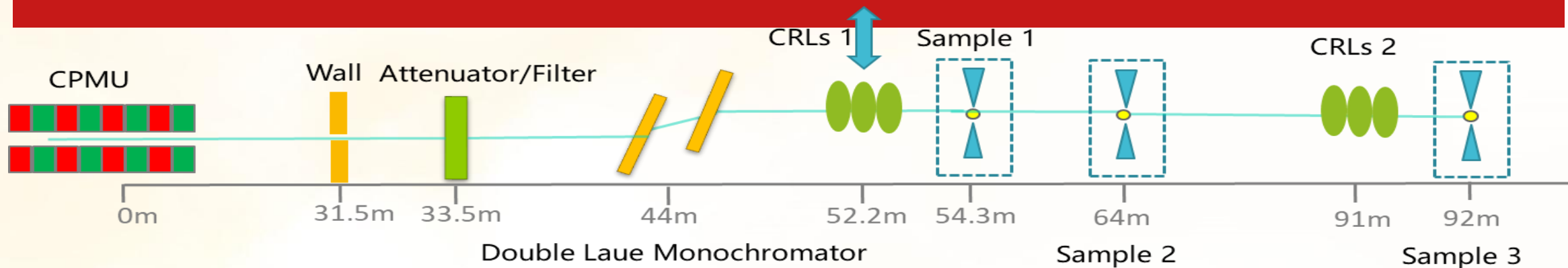
- 超高分辨纳米电子结构线站
- 高压极端条件光束线站
- 硬X射线多功能多尺度显微成像线站

单个纳米颗粒结构
高分辨电子结构
微小晶体结构
细胞精细结构
催化过程动态结构
.....

满足
前沿
研究



B1. 工程材料线站——举例1



HEPS工程材料线站可提供具备强穿透能力，**多尺度空间分辨率，高密度灵敏度，高角分辨率，大视场等特点的无损检测手段，原位、无损、多维度、多尺度**研究工程材料**大工件**的微介观组织结构和残余应力分布、制备和加工工艺、载荷与环境、宏观使役性能之间的关系。

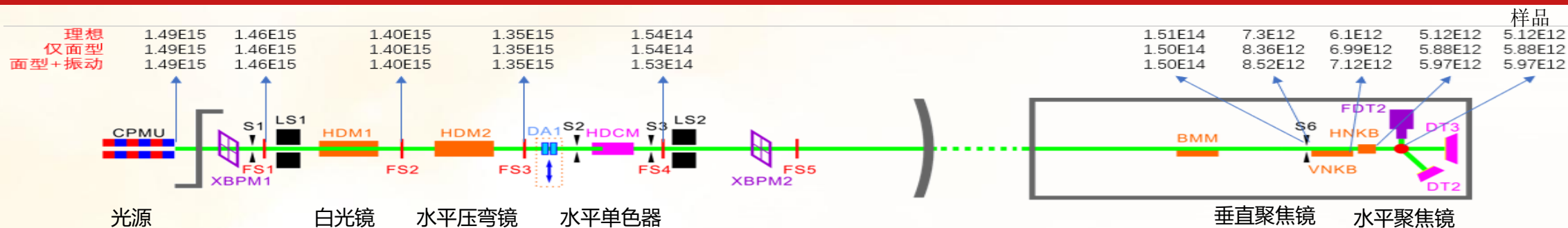
先进钛合金和复合材料的研发，需要对材料的制备和服役条件下，对其中的结构和缺陷进行精细的表征。例如，**解决高温合金材料的制造、加工、服役和修复等环节中的偏析问题和应力问题**。为了穿透这些材料**形成的、有一定厚度的工件以及模拟这些材料在制备和使用时所处环境的容器**，要求X射线具有足够的穿透能力和足够高的亮度，才能获得高质量的数据以表征这些微小的结构变化。

2微米光斑， 10^{11} phs/s光通量





B2. 硬X射线纳米探针——举例2



线站特点

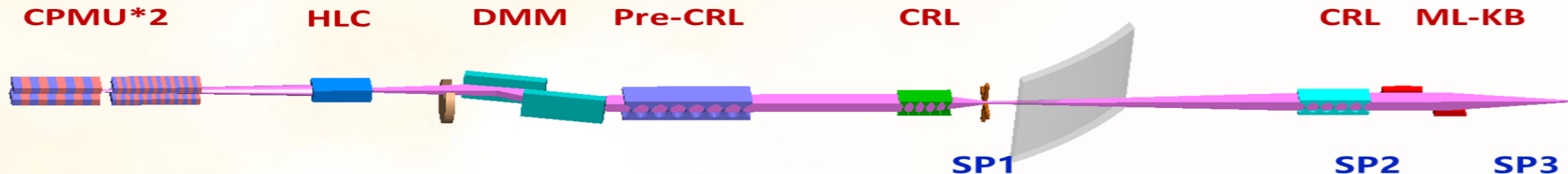
- 聚焦光斑尺寸 < 10nm 填补显微技术空间分辨能量空档区 (1~25nm)
- 高亮度、高通量, 样品处光通量高达 $\sim 10^{12}$ phs/s@10keV

纳米材料的性能与其尺度密切相关, 往往尺寸上微小变化会带来性质上的巨大改变。而目前的表征手段得到的是很多不同的纳米颗粒平均的结果, 很难满足纳米科技发展需求。利用聚焦到纳米尺寸的X射线, 可对单个纳米颗粒进行原位结构研究, 这样可以理解纳米材料的性质, 为其实用化带来巨大的推动。





B3. 结构动力学线站——举例3

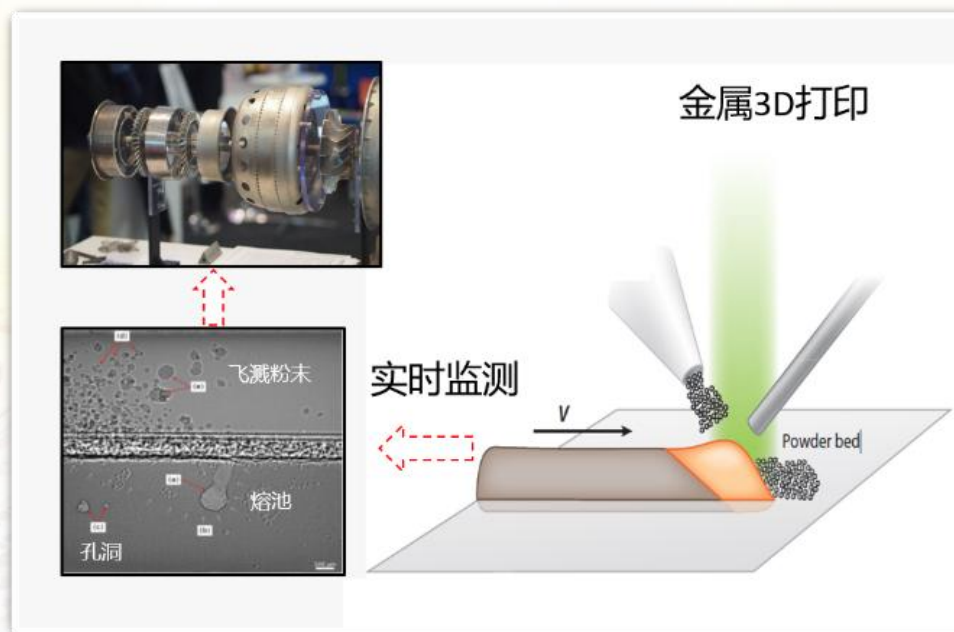


先进材料

工业级3D打印因其复杂加工条件极易带来微结构缺陷和残余应力，极大地影响了材料性能，进而在真实服役应用的过程中面临疲劳和失效等问题。

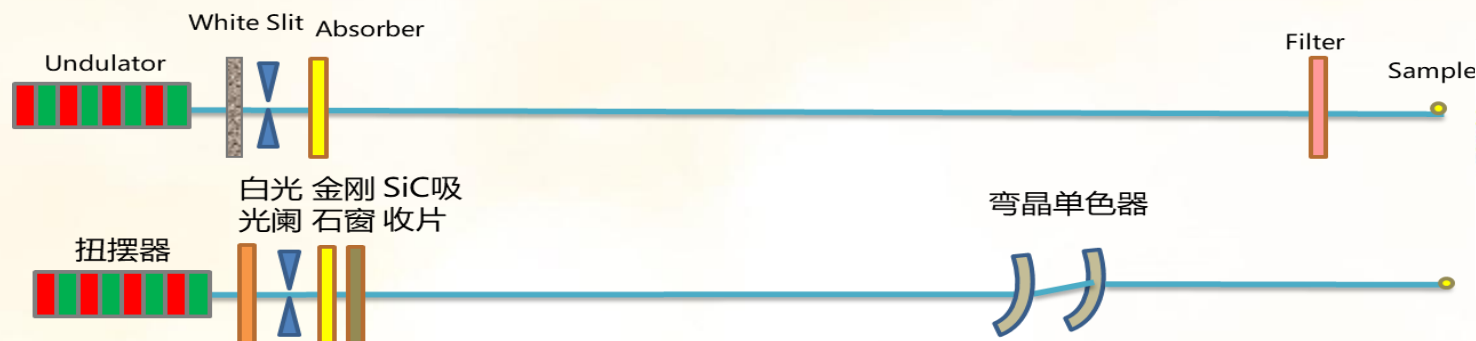
可对材料加工过程和使用下的冲击变形等进行原位实时动态诊断，建立微观结构与宏观材料性能之间的桥梁。对工程材料全寿命周期进行多尺度表征，探究性能和使用失效的关键因素。

发挥低发射度优势，将动态实验推向纳米尺度。光斑50nm，通量 $4.0e15\text{ph/s}$



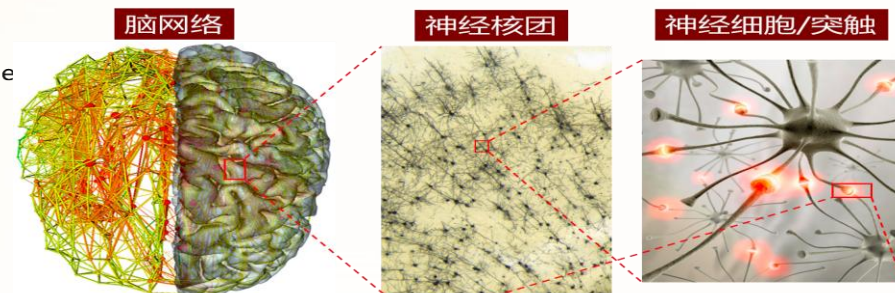


B7. 硬X射线成像线站——举例4

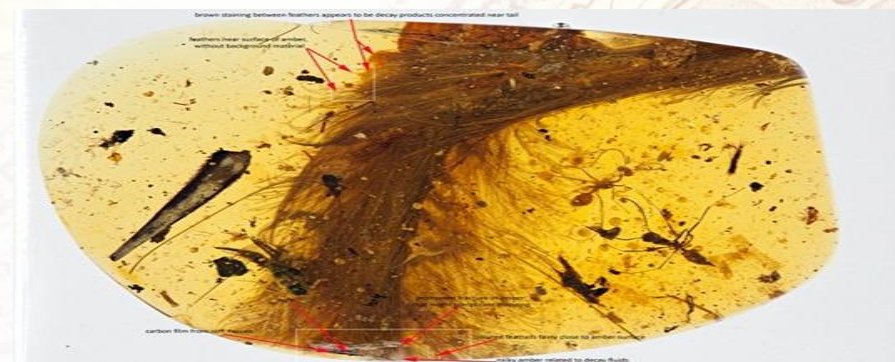


“完整器官三维结构与功能的精准介观成像”是生物医学研究迫切需要的变革性技术。核心是突破现有研究手段在大体积样本中（厘米级）难以进行高分辨率三维介观（微米级）成像的瓶颈。

HEPS的硬X射线成像线站提供SRX同轴相衬成像方法，在密度灵敏度、穿透能力、辐射剂量和空间分辨率等4个方面均可满足脑介观成像的需求，可以同时实现**厘米级视场和亚微米空间分辨率**。



神经递质

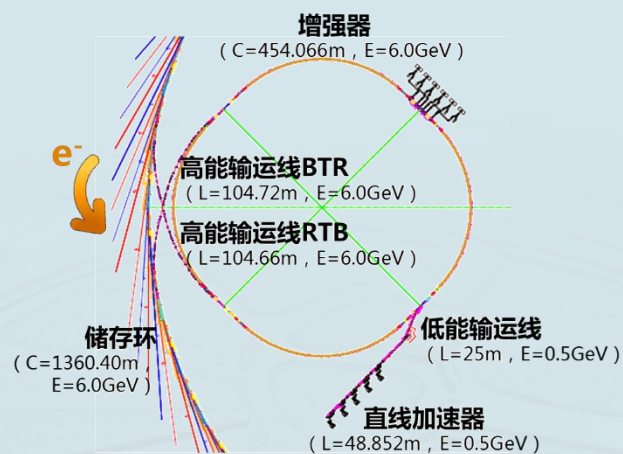




建设内容

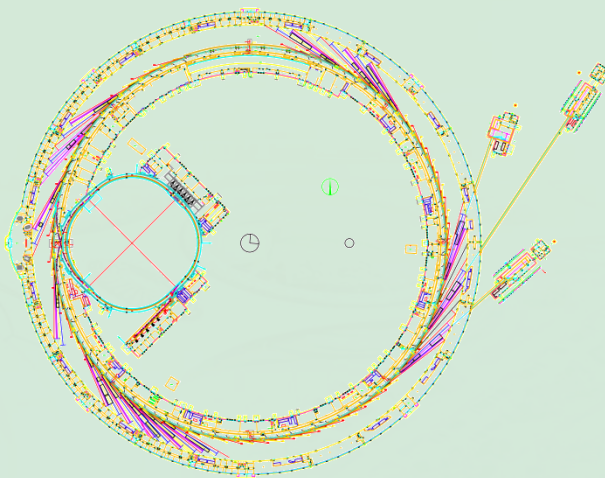
加速器

- 电子能量**6GeV**的储存环
- 为储存环提供束流的直线加速器、输运线和增强器等



光束线站

- 光束线站首批建设**14条**光束线和相应的实验站等



配套设施

- 主体环形同步辐射光源实验建筑、配套附属建筑物，以及供水、供电、空调、辐射防护等通用设施。





性能指标

HEPS主要指标

储存环周长	1360.4	m
能 量	6	GeV
发 射 度	≤ 0.06	nm·rad
亮 度	$> 1 \times 10^{22}$	phs/s/mm ² /mrad ² /0.1%BW
最多可容纳线站数	≥ 90	首期14条
供光能量范围	0.1-300	keV



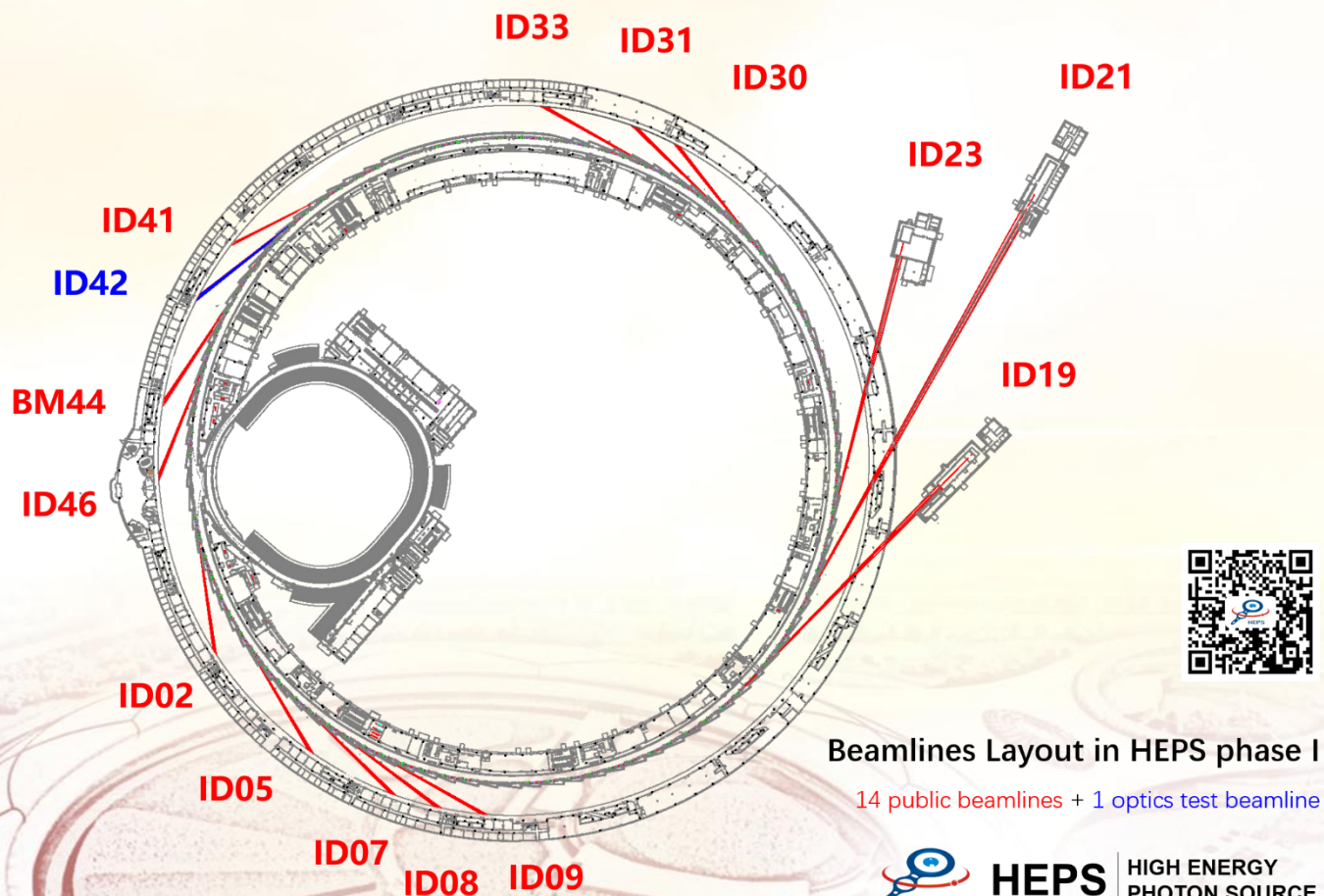
- 1) 高亮度模式: 680束团, 相邻束团间隔6ns
- 2) 高电荷量模式, 63束团均匀填充, 束团间隔72ns



光束线站

首期建设 **14** 个用户线站 + **1** 个测试线站

12 实验大厅内 **3** 超长线



HEPS

HIGH ENERGY
PHOTON SOURCE

序号	线站名称	国家需求	工业应用	可持续发展	科学前沿	高能	低发射度	用户广泛
1	工程材料线站	√	√	√		√	√	√
2	硬X射线纳米探针线站			√	√	√	√	
3	结构动力学线站	√	√		√	√	√	√
4	硬X射线相干散射线站				√	√	√	
5	高分辨谱学线站	√			√	√	√	
6	高压线站	√			√	√	√	√
7	硬X射线成像线站	√	√		√	√	√	√
8	X射线吸收谱学线站			√	√			√
9	低维结构探针线站	√		√	√			√
10	生物大分子微晶衍射线站	√		√	√			√
11	粉光小角散射线站	√	√		√			√
12	高分辨纳米电子结构线站		√		√		√	√
13	通用环境谱学线站			√	√			√
14	X射线显微成像线站		√	√	√			√



8个performance线站，和国外四代光源同类线站水平相当或超出

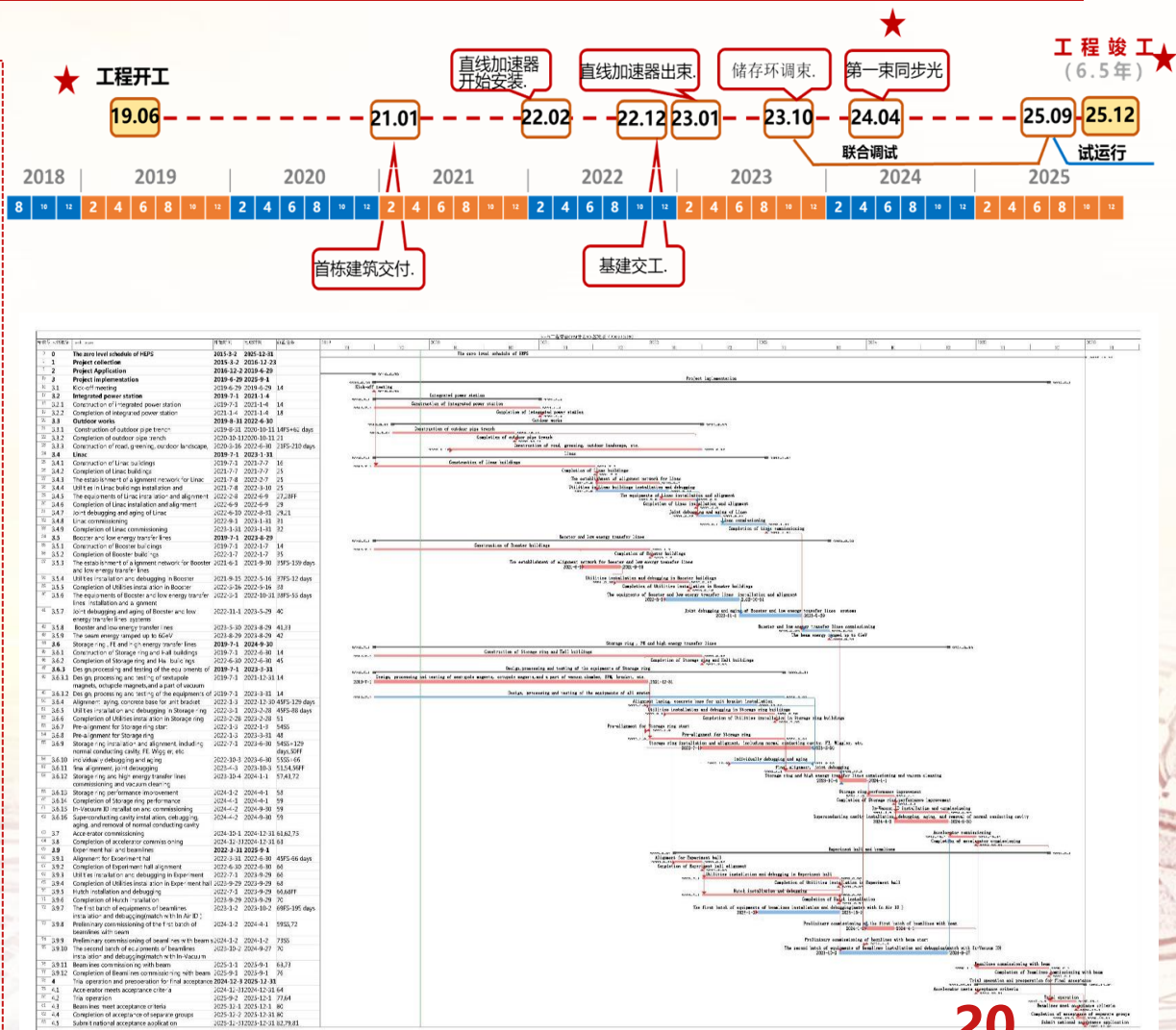
	束 线	特 点
高 能	工程材料	50-170keV, XRD, SAXS, PDF
	硬X射线成像	10-300keV, 相衬/衍射衬度成像, 350m长束线, 200mm大光斑
高亮度	纳米探针	小光斑, <10nm; 原位纳米探针, <50nm; 180m长束线
	结构动力学	15-60keV, 单发衍射/成像探测; < 50nm投影成像
	高压	110nm光斑, 衍射/成像
相干性	硬X射线相干散射	CDI (<5nm分辨率), 亚微秒XPCS
	低维探针	表面/界面散射, 表面XPCS
谱学	高能量分辨谱学	大型Raman谱仪



整体计划

建设周期为自开工之日起为6.5年

- 2019年6月， HEPS开工
- 2024年3月， HEPS进入联调阶段
- 2024年6月， 储存环调束开始
- 2024年12月， 第一束同步光出光
- 2025年9月， HEPS试运行开始
- 2025年12月， HEPS达到验收指标， 提交国家验收申请。



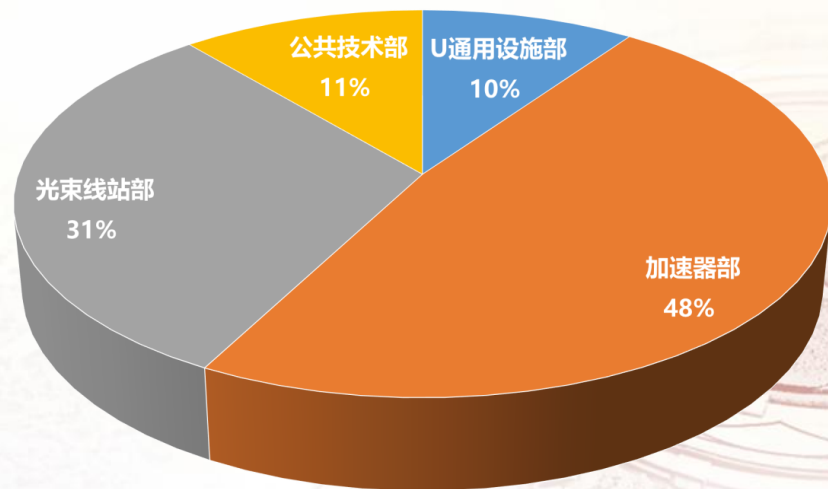
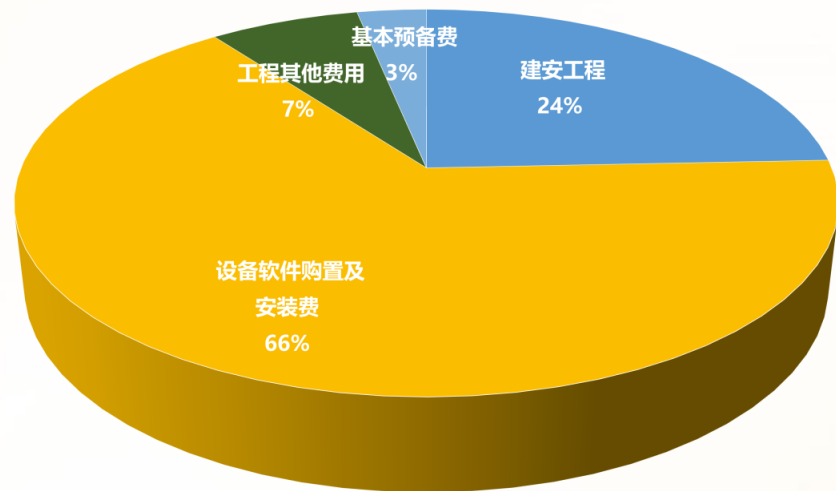


建设经费

国家：382,539万元

北京市：93,600万元（约占总投资的20%）

- 概算批复总经费**476,139万元**（与可研基本持平）
- 建安工程费：115,883.16万元（占总投资的24%）
- 设备和安调费：311,611.75万元（占总投资的66%）
 - 加速器：149,421.91万元
 - 光束线站：97,065.53万元
 - 公共技术：34,698.44万元
 - 通用设施：30,425.87万元
- 工程其他费用 33,237.07万元（7%）
- 基本预备费 15,407.03万元（3%）





管理组织架构

HEPS项目建议书批复后，为了保障工程进展，科学院成立了HEPS工程指挥部、科技委，项目组织成立国际顾问委员会和用户委。

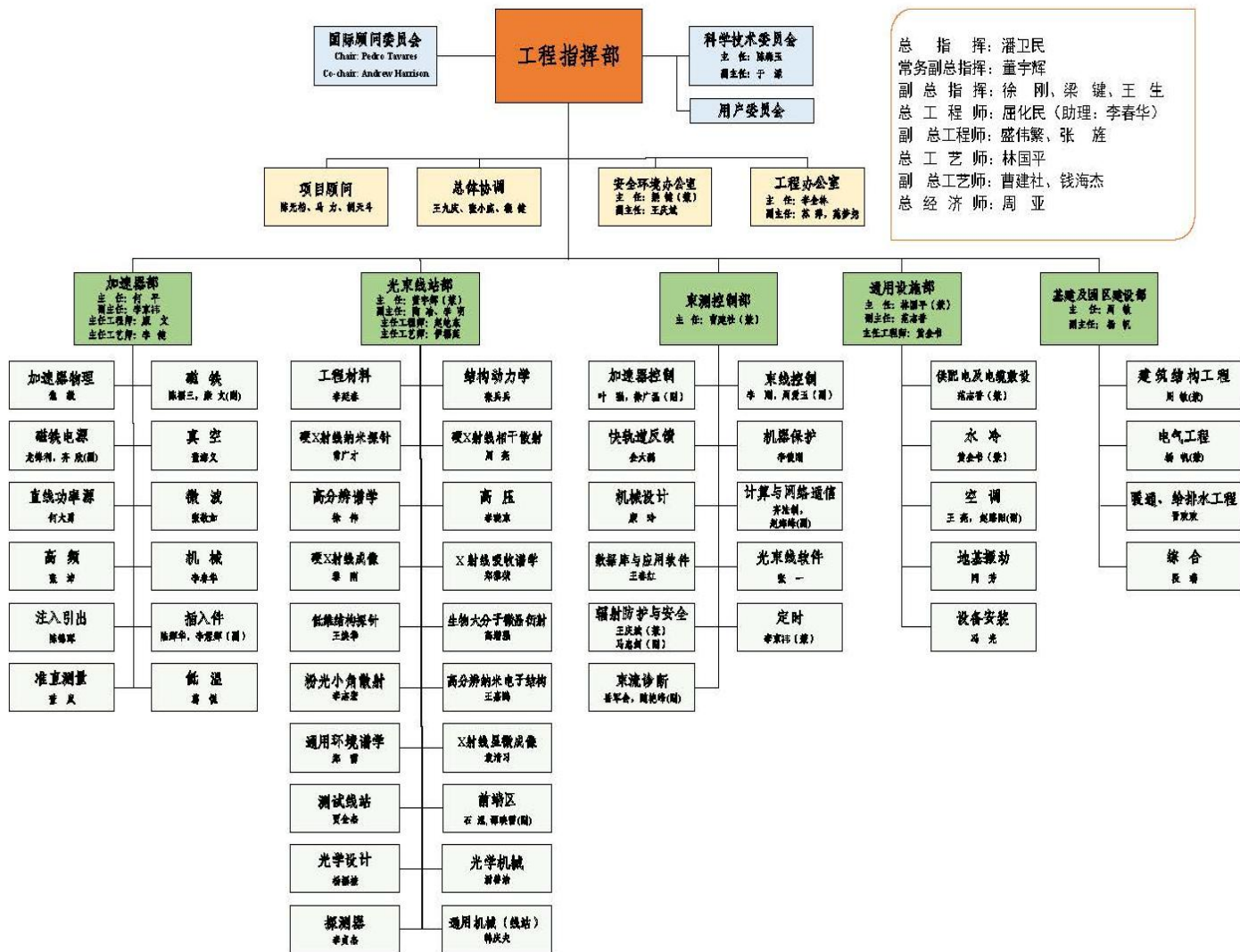
- ◆ **指挥部**：高能所上报，中国科学院聘任。
- ◆ **科技委**：科技咨询机构，科学院聘任，年度例会制度；主任为陈森玉院士（IHEP）和于渌院士（IPHY）。
- ◆ **国际顾问委员会**：根据工程需要和以往工程经验，成立国际顾问委员会，主席SLAC Bob Hettel担任。
- ◆ 所归口管理部门为工程提供管理支持：财务资产处、采购办、档案室等。
- ◆ **用户委员会**：主任姚建年院士，副主任陈春英院士。



团队攻关

5个分总体 52个系统

- **加速器部 (12)**：物理、磁铁、电源、真空、直线功率源、微波、机械、高频、注入引出、插入件、低温、准直等
- **光束线站部 (20)**：15个线站系统+5个横向系统（光学设计、探测器、通用机械等）
- **束测控制部 (11)**：束流诊断系统、加速器控制、光束线控制、计算与网络通信、定时、光束线软件等
- **通用设施部 (5)**：供配电及电缆敷设、水冷、空调、设备安装、防微振
- **基建及园区建设部 (4)**：建筑结构工程、电气、暖通给排水、综合



2、挑战与进展





HEPS项目建设总体进展

大事记



2022年5月12日
直线加速器全线真空封接



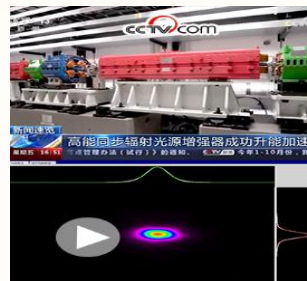
2023年1月13日
增强器全线贯通



2023年2月1日
储存环隧道设备安装启动



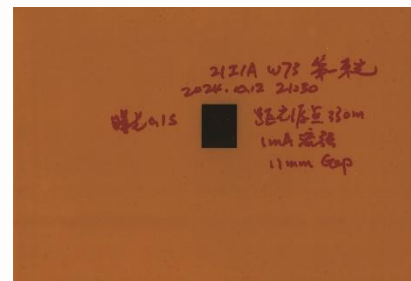
2023年3月14日
直线加速器成功出束
2023年6月5日通过验收



2023年11月17日
增强器成功升能加速，
通过工艺测试和验收



2024年7月1日储存环真空封接，
全环贯通；7月23日，储存环正式
开机调束



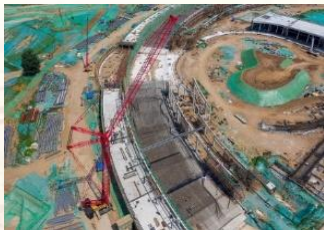
2024年10月12日HEPS发出
第一束光。

目前，储存环束流流强达到了
100毫安，发射度小于
100pm·rad，线站全面出光

2019年6月29日
启动建设



2020年7月1日
第一根屋面钢梁



2021年4月13日
通用设施集成安装启动



2021年6月27日
主环建筑单体封顶



2021年6月28日
首台科研设备开始安装



2023年11月3日
配套楼建筑通过五方验收



2024年11月11日
基建通过专项验收



2024年11月 通过专项验收

• 防微振超厚地基处理

- 通过现场多次实验，C15混凝土换填施工问题已全部解决且施工完成，经测试，剪切波数等4个参数满足设计指标。
- 基础底板混凝土施工：施工方案经专家评审，严格按照设计要求施工。

• 大体积辐射防护重晶石混凝土

- 通过对重晶石混凝土配合比反复适配、分不同高度浇筑、反复测试验证等试验方式，全面掌握了一次性4m浇筑重晶石墙体的施工方法和过程控制措施。



2024年8月





攻关

- 关键技术问题的解决：3米厚C15素混凝土防微振基础、重晶石混凝土、大跨度钢结构、无粘结预应力等 ——防微振目的



土方开挖



地基处理（首层）



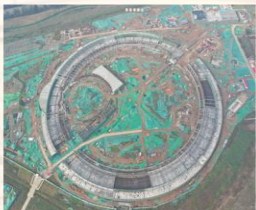
地基处理（第二层）



地基处理（第三层）



底板施工



混凝土结构完成



钢结构完成



封顶





攻关

防微振

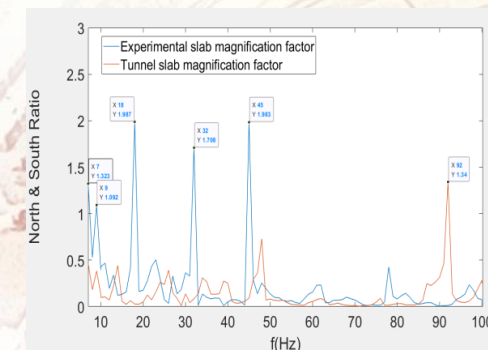
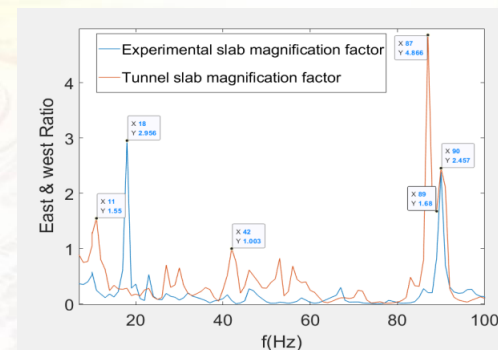
- 工程地基防微振动控制要求高，包括地基、基础防微振、动力设备及管道的隔振措施

难点：

- (1) 混凝土材料（指标）需满足防微振要求
- (2) 需克服大体积素混凝土开裂对振动影响
- (3) 需克服环境变化（温度、湿度、太阳潮汐、地脉动等）对环形地基变形影响。
- (4) 需克服分仓分层施工缝对微振动的影响

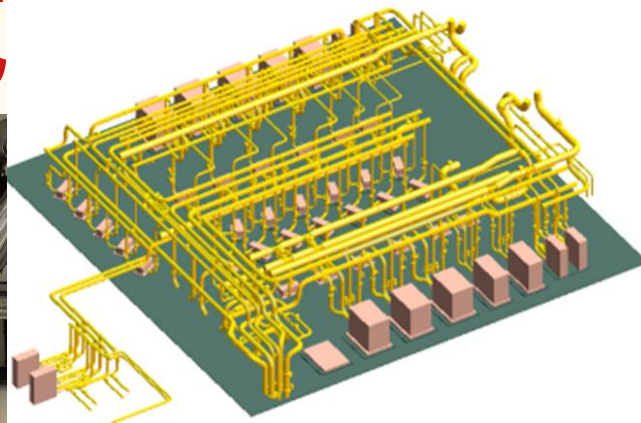


整个地基闭合后1-100Hz的综合效果对振动是不放大，但有个别频率还是有放大的现象





通用设施



冷冻站



纯水站

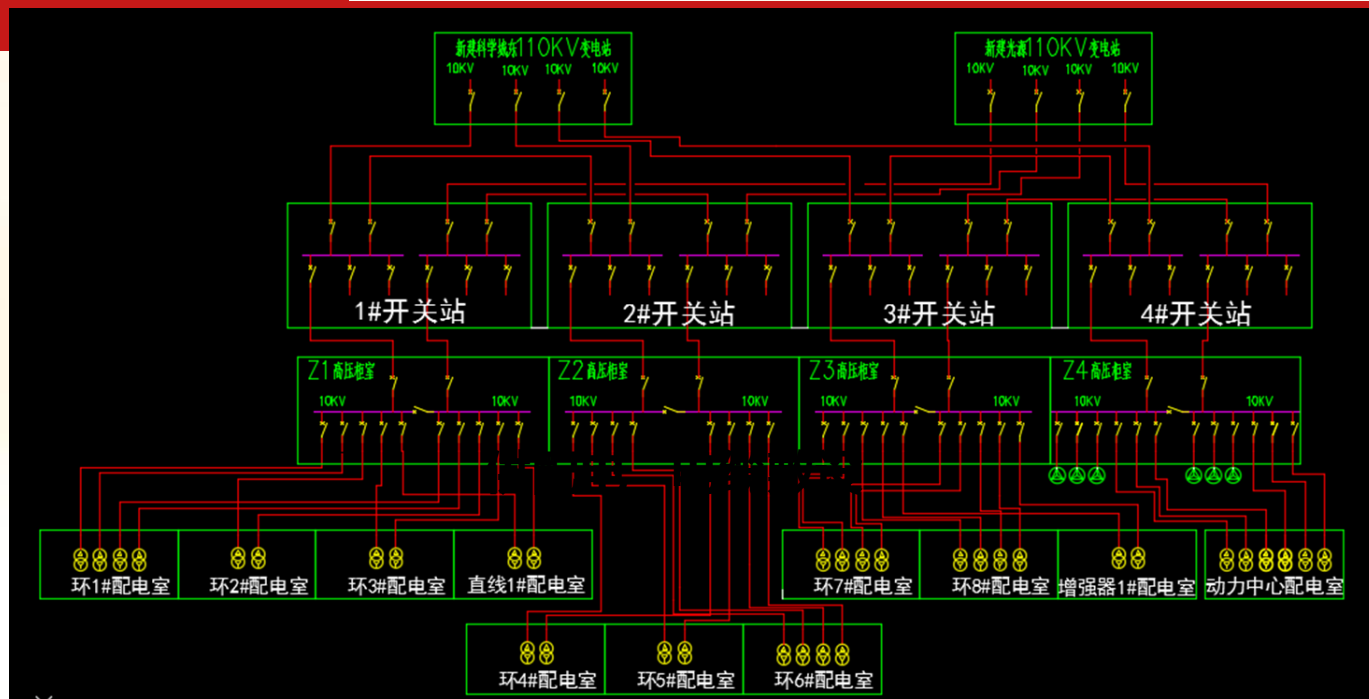


空压站

2024年7月 综合动力站、储存环工艺安装完成

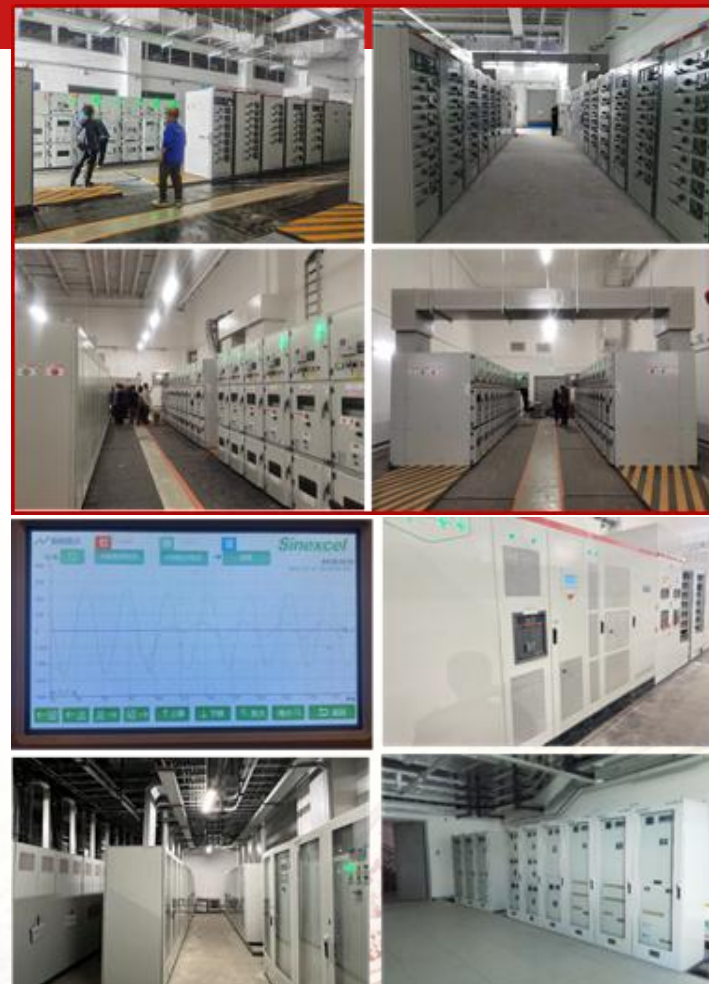


通用设施



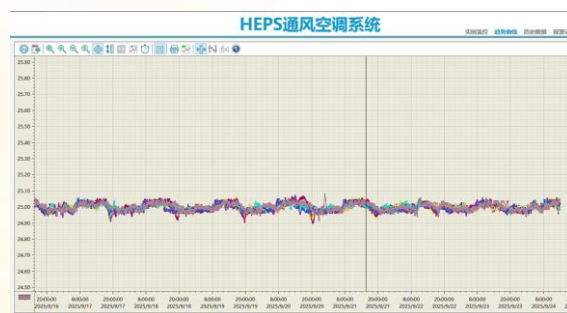
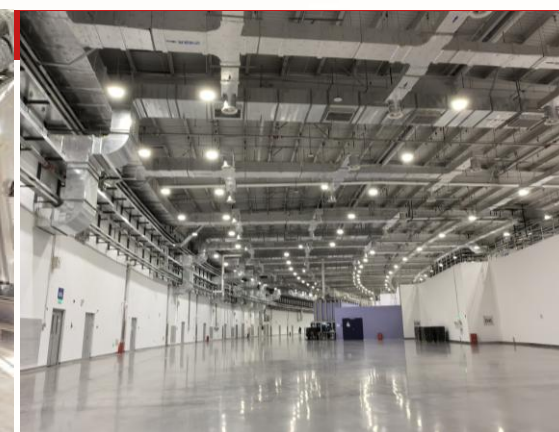
供配电 电缆敷设

2022年11月 4个开关站、11个10kV变电站投入运行，正式供电





通用设施



2024年7月：完成水冷系统、工艺精密空调系统的安装，在电源测试时完成带负荷调试

储存环隧道环境温度稳定度： $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

磁铁、真空盒冷却水供水温度： $25 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$

加速器挑战（举例）





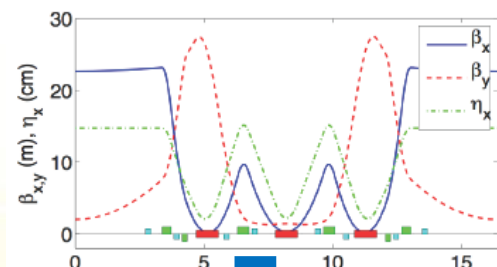
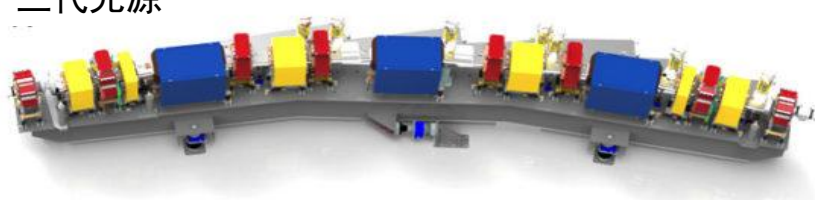
第四代光源：发射度接近X射线衍射极限

紧凑型多弯铁消色散结构, Multi Bend Achromat, MBA

→ 发射度降低1~2个量级, 接近甚至达到X射线衍射极限

→ 在第三代光源基础上, 亮度提升2~3个量级

三代光源

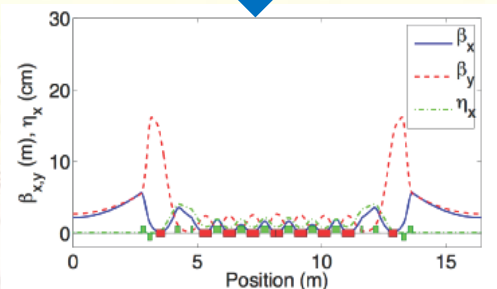
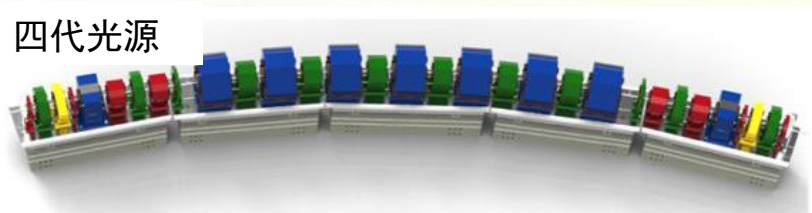


三代光源的发射度:

1000~5000 pm·rad

四代光源: $\lesssim 100$ pm·rad

四代光源



元件布局

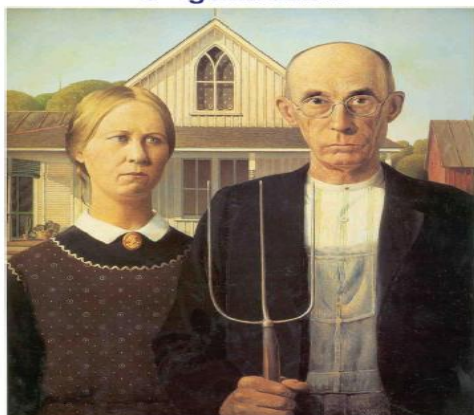
磁聚焦结构束流光学





从三代到四代光源：泾渭分明 → 相互耦合

3rd generation



MBA generation



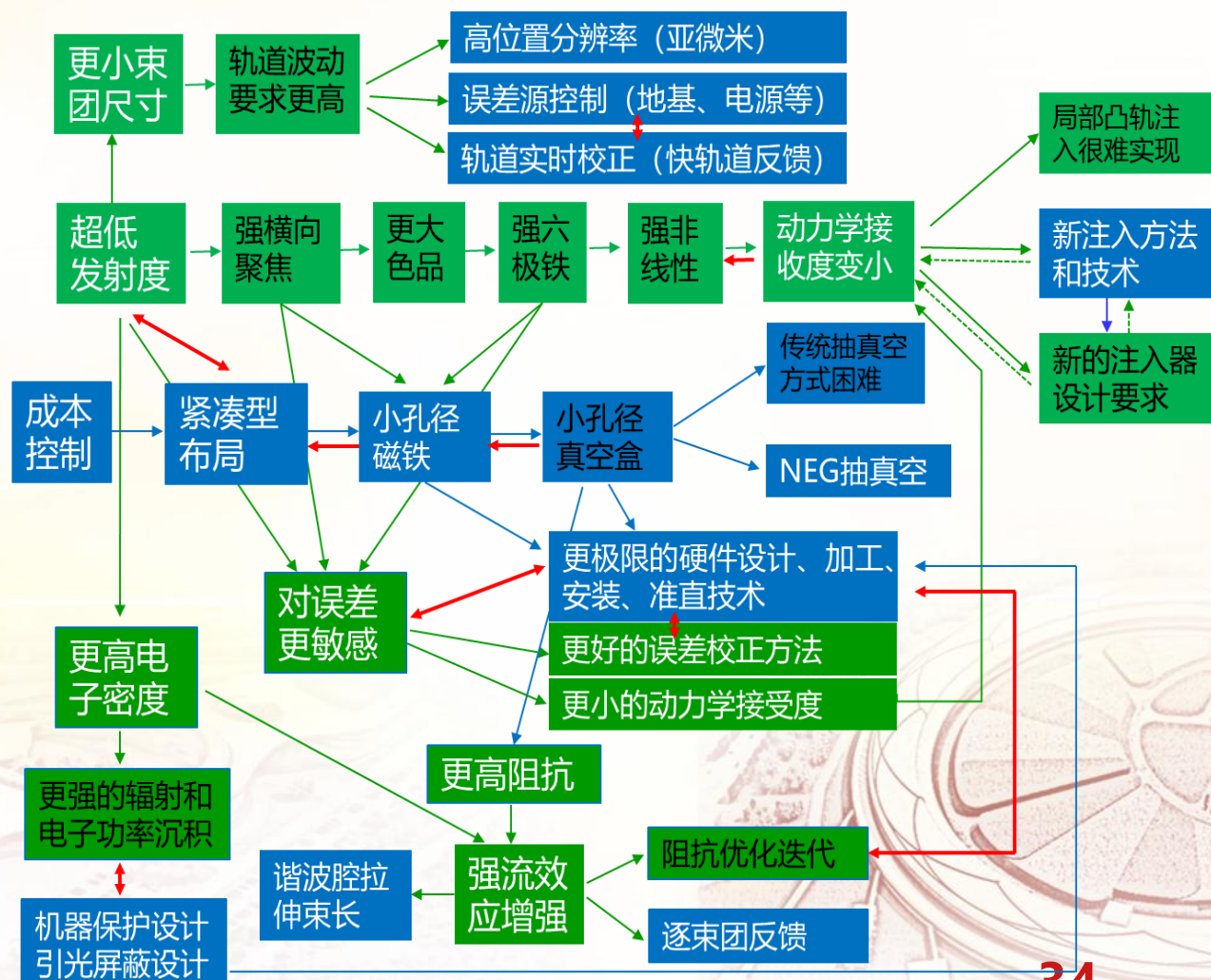
在多个光源性能参数间寻找最佳平衡点

更极限或新的加速器技术

- 磁铁技术
- 真空技术
- 注入技术
- ...

更极限或新的加速器物理设计方法

- Lattice设计
- 动力学优化
- 注入方法
- ...





HEPS储存环加速器 —— 最大的难点

一、高性能，即小发射度、高流强的实现

- **物理设计：** MBA lattice, 强非线性, 足够的动力学孔径 (DA)
- **硬件系统：**
 - **小发射度：** 高梯度四极铁、二、四极组合铁, 纵向梯度二极铁等, 以提供强聚焦、紧凑的MBA标准单元;
 - **小DA和束流尺寸：** 在轴注入, 严格的准直精度和磁场误差控制; 束流轨道的高精度测量和反馈控制, 微米尺度束流截面的测量
 - **高流强：** 高功率、高可靠性; 小孔径真空盒高真空的实现、束流不稳定性的反馈抑制、功率沉积
 - **高亮度：** 高性能的插入件

二、高稳定性

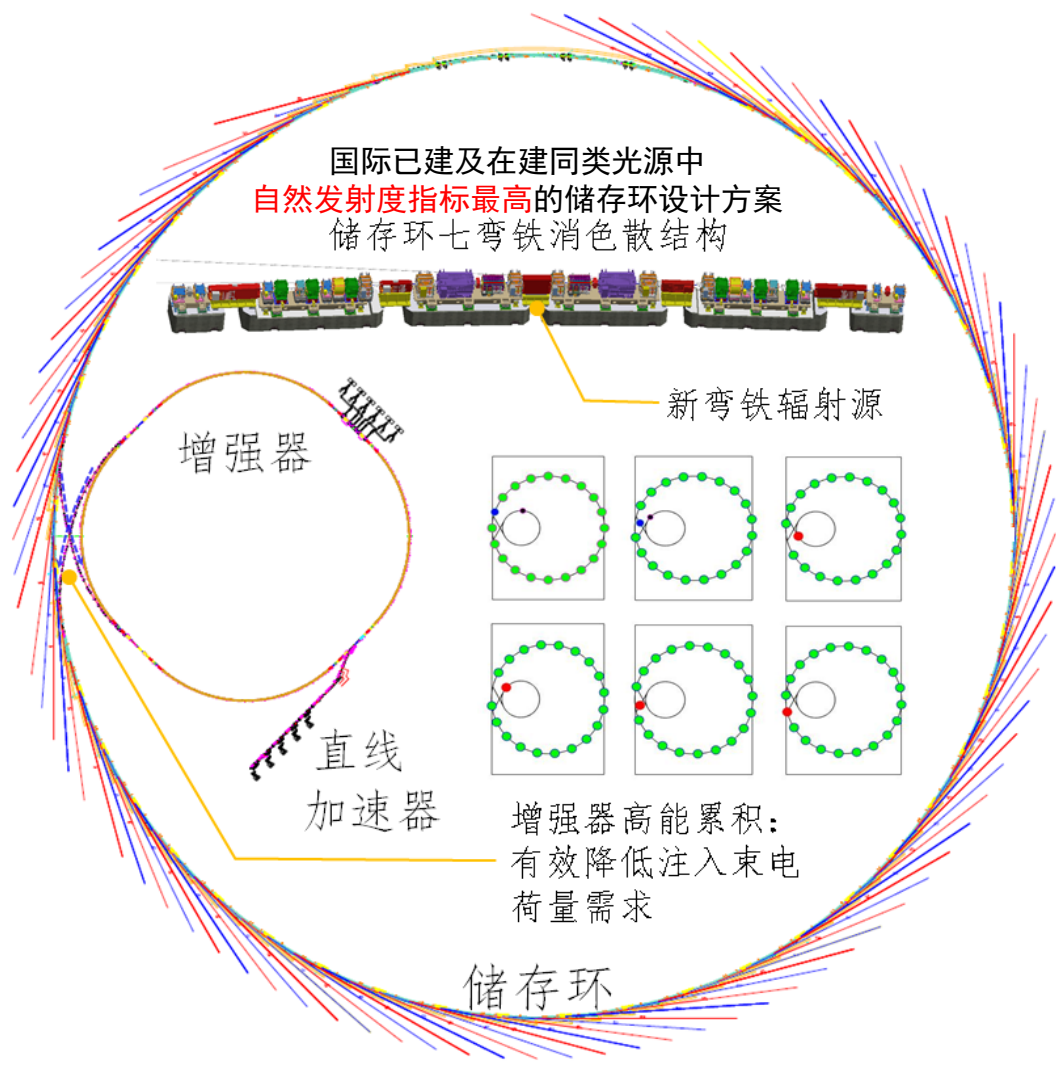
轨道稳定性要求：10%的束团尺寸 =) 亚微米

- 高精度、高稳定的励磁电源;
- 恒温、低振动的隧道环境系统
- 快轨道反馈系统;
- ...





核心组成部分——储存环



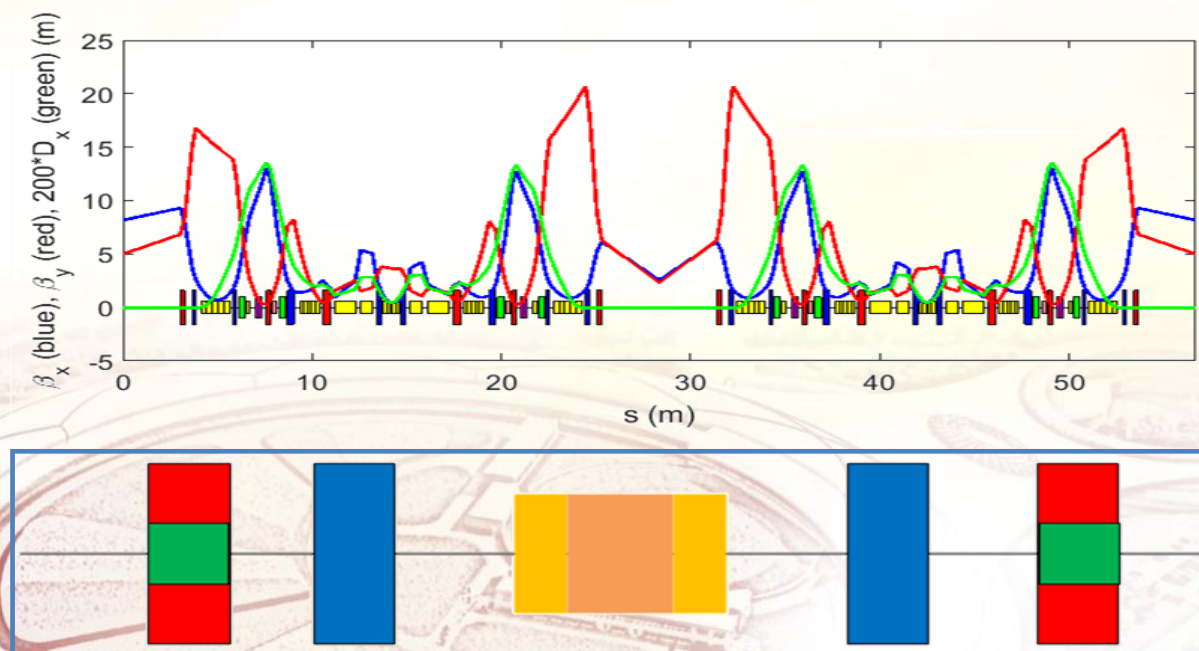
参数	参数值
束流能量/GeV	6
束流流强/mA	200
周长/m	1360.4
自然发射度/(pm·rad)	35
工作点 (H, V)	115.15, 104.29
自然色品 (H, V)	-209, -233
动量压缩因子	1.83×10^{-5}
单圈能量损失 (无ID) /MeV	2.64



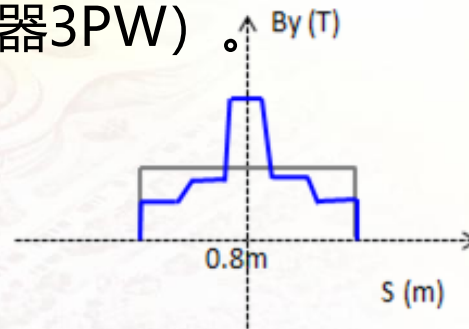
新颖的MBA Lattice

储存环周长1360.4 m

- 48 混合 7BA_s (包含反向弯转磁铁AB和纵向梯度二极磁铁BLG)
- 24个超周期
- AB+BLG的组合使得发射度进一步降低



BLG3中央模块 (~1T) 为束线提供弯铁辐射, 因此不用像ESRF-EBS和APS-U那样, 在单元内再安装别的弯铁辐射源 (如三极头扭摆器3PW)



Peak field (T)	Critical photon energy (keV)	Peak power density (W/mrad ²)
0.5T	12.0	702
0.85T	20.3	1194
1T	23.9	1405
1.5T	35.9	2107
2T	47.9	2810
3T	71.8	4215
3PW(1.6T)	38.3	2349

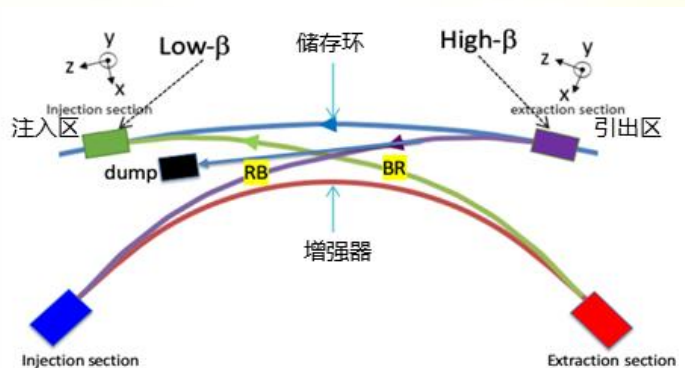


- HEPS储存环需要两台切割磁铁：1.6米长，垂直物理孔径仅 ± 2.5 毫米

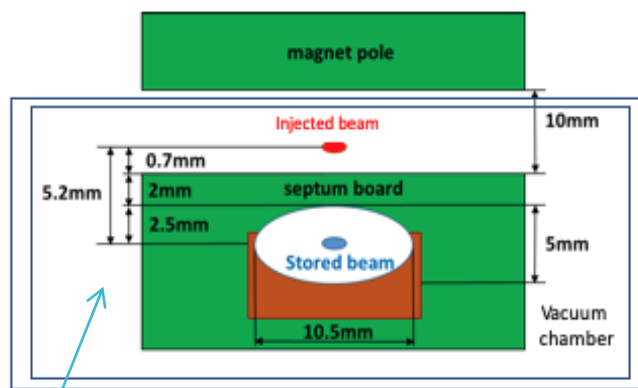
- 在三台高能区第四代同步辐射光源中孔径最小！

(ESRF-EBS：垂直 ± 4 毫米；APS-U：水平单侧3毫米)

- 两个小孔比只有一个小孔径元件调束难度高很多！

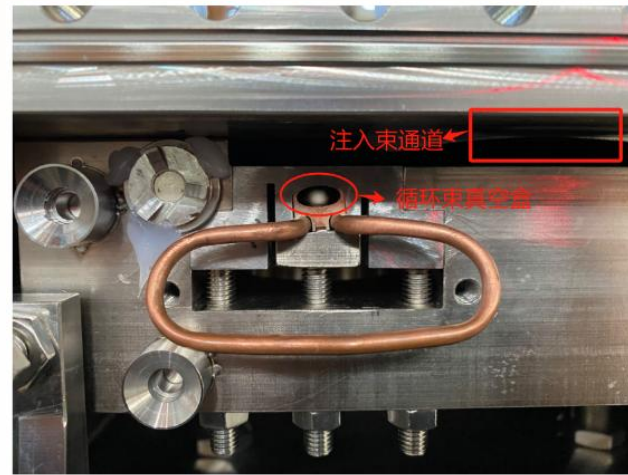


HEPS注入引出区各一台切割磁铁



切割磁铁处水平物理孔径： ± 5.25 mm

切割磁铁处垂直物理孔径： ± 2.5 mm



HEPS切割磁铁注入束与循环束通道



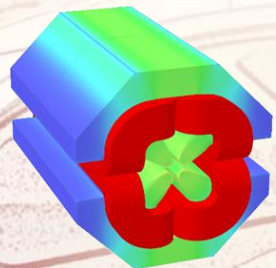
超高磁铁指标

2400块 储存环磁铁+增强器磁铁

性能要求	举例	第三代光源
超高梯度	四极磁铁 80T/m	20T/m
超高精度	磁场质量 0.01%	0.05%
特殊功能	组合磁铁 纵向梯度二极铁	常规磁铁
磁场测量精度高	5×10^{-5}	1×10^{-4}
准直精度高	15-20 μ m	50 μ m

磁铁的性能指标和技术难度都达到了国际先进水平，在国内加速器上也是首次应用

- 纵向梯度二极磁铁和超高梯度四极磁铁（结构复杂、磁场质量高）是实现HEPS超低发射度的关键
- 超高梯度二四极组合磁铁节省了宝贵的纵向空间



对磁铁的**加工、装配**都提出了极高的要求，尤其是**批量磁铁的制造**，需要有成熟稳定的工艺和严格的质量控制措施。



HEPS储存环注入引出

HEPS储存环的发射度已接近X光的衍射极限！如何实现低发射度储存环的恒流注入？

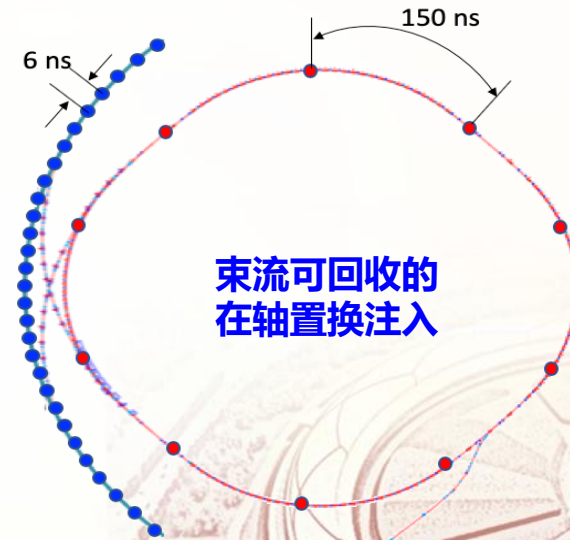
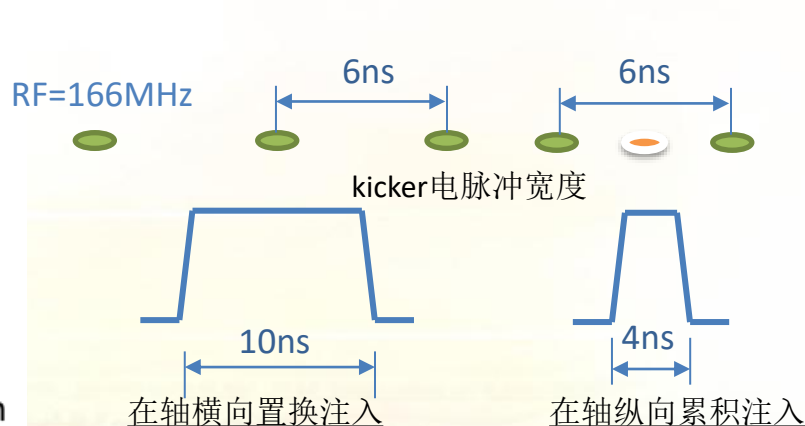
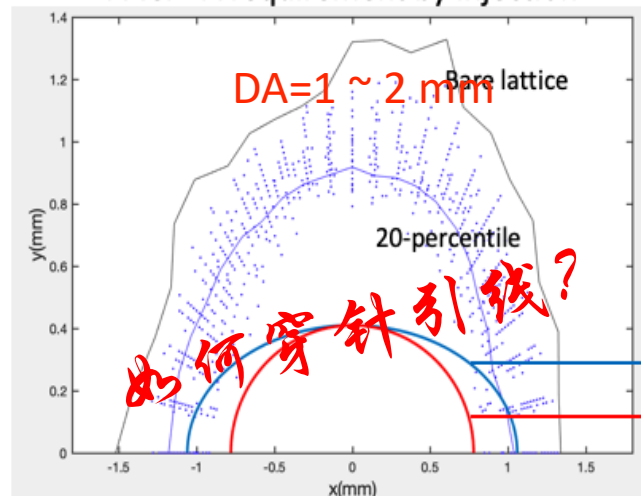
为实现低
发射度

采用7BA消色
散磁聚焦结构

用于色品校正的六极铁
引入了很强的非线性

机器动力学孔径（DA）远小于物理孔径，
且与Lattice高亮度及束流寿命优化存在矛盾

DA vs. DA requirement by injection

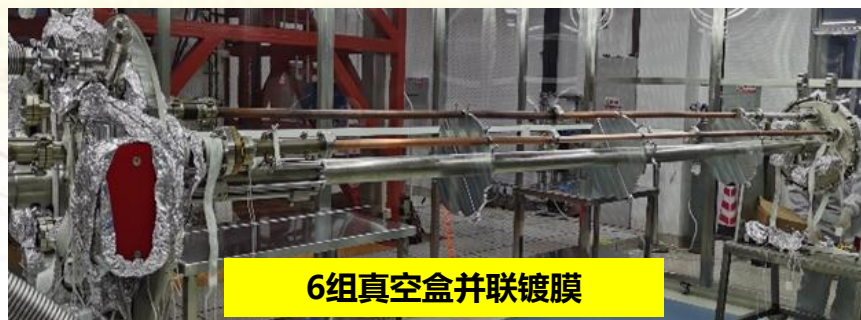
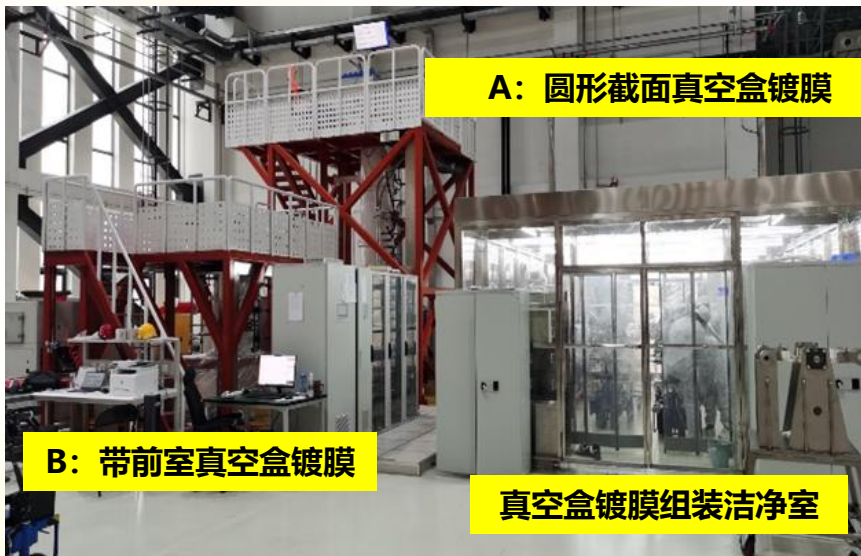


小动力学孔径(DA=1~2mm)下的注入是一个巨大的挑战！注入引出硬件的技术指标要求也已接近极限
唯一的选择：在轴注入方案（横向置换或纵向累积）



真空盒批量镀膜

- 3套镀膜装置，完成储存环918根，总长约1200米真空盒镀膜；
- 通过螺线管分段加磁场、提高端部螺线管磁场强度、调整放电参数等方法，解决了1.2m长前室真空盒的6mm狭缝镀膜的**国际难题**。
- 长期驻厂抢工时——按天督促加工、检验、镀膜、烘烤、……、隧道安装、准直、在线烘烤、……
- 抢在七月一日（去年）完成储存环真空闭合





世界首台“芒果”型扭摆磁器

提出并成功研制世界首台“芒果”型扭摆磁器

差异化的x-y
磁场周期

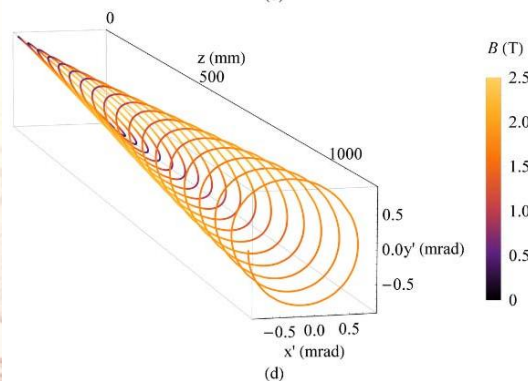
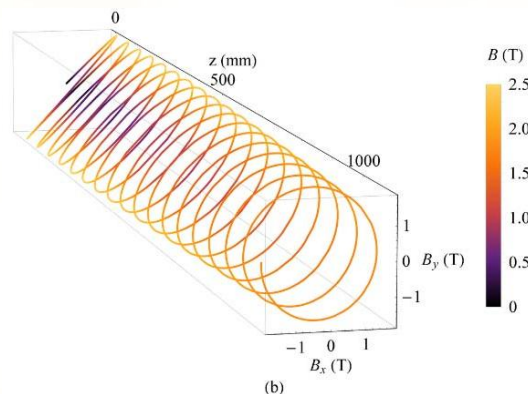
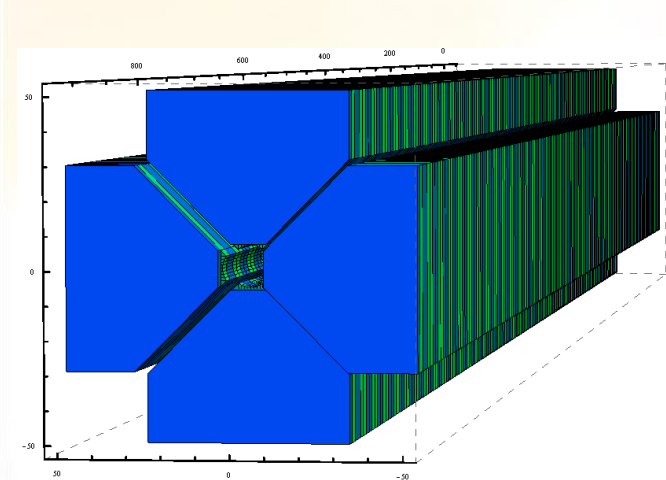
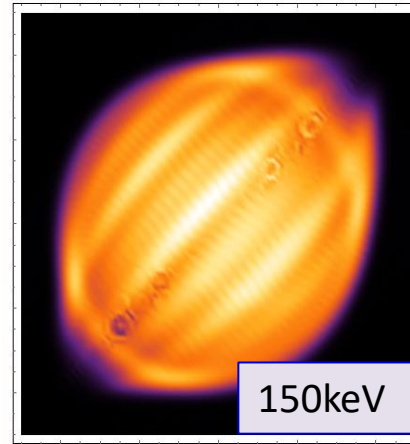
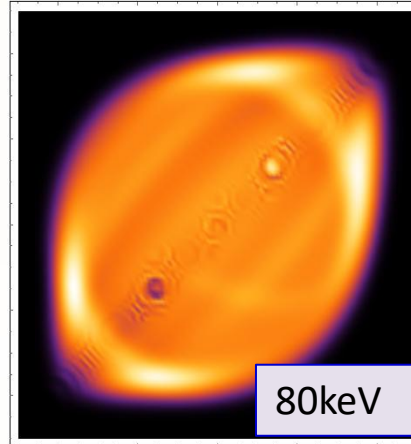
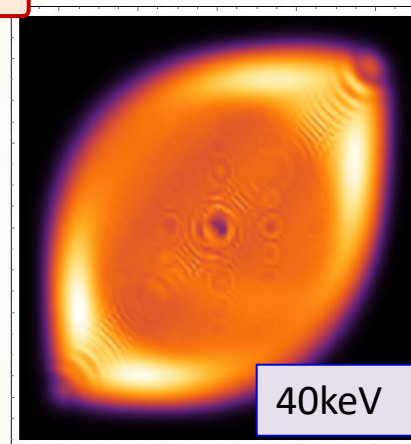


增强的辐射
水平偏角



大视场x射
线扫描

根据实测磁场模拟的不同能量光子的通量分布：



$$B_x(z) = B_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_{ux}}\right), \lambda_{ux} = \frac{L}{N_u \pm \frac{1}{4}}$$

$$B_y(z) = B_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda_{uy}}\right), \lambda_{uy} = \frac{L}{N_u}$$

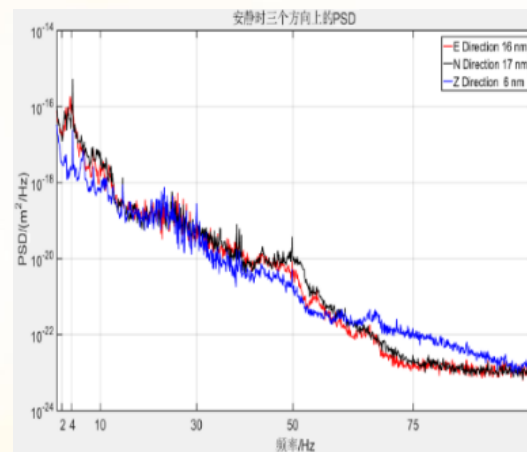




防微振

MAX IV 世界首个MBA光源
3GeV, 7BA, 528m, 330 pm
2010- 运行中

距离其它装置、建筑、道路等均有相当距离，而且装置周围的波浪型起伏处理是为了衰减高速公路、园区内道路等带来的振动。



根据国际上光源关键地块基础以及地基的设计及施工经验，HEPS**要求地面振动（包括地脉动、周边环境各种设备和人类活动包括轨道交通、行人等引起的振动）在1-100Hz频率范围内振动的均方根位移积分小于25nm。**

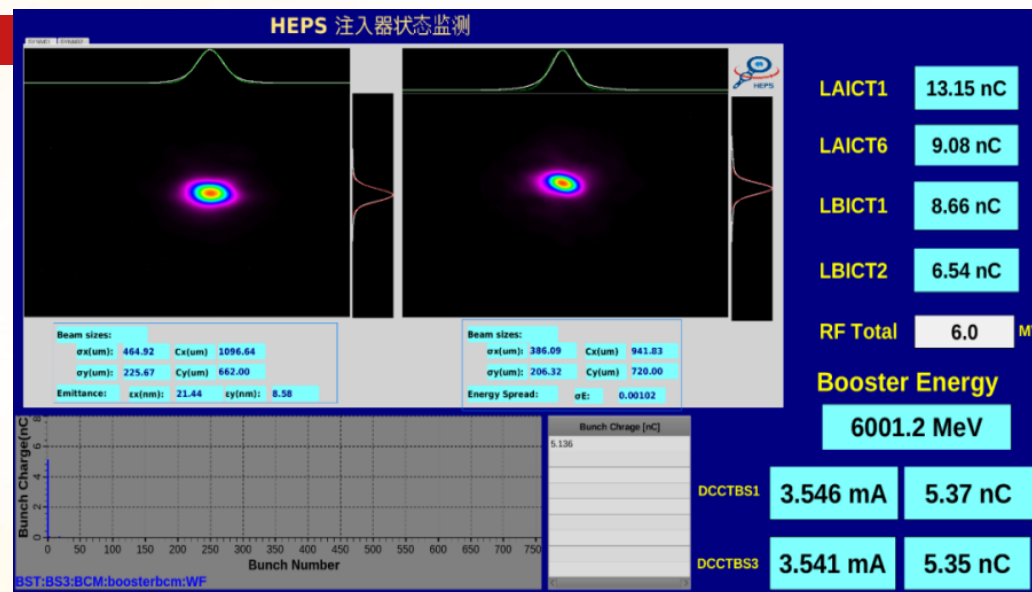




2023年直线加速器与增强器通过验收

HEPS直线加速器：国际同类装置单束团电荷量最高 (7nC)

HEPS增强器：国内能量最高 (6GeV) 和电荷量最高 (5nC)





储存环建设

1776台磁铁 288个预准直单元

- 2024, 7, 1, 储存环闭环联调
- 2024, 7, 23 储存环开始调束



[illegible]



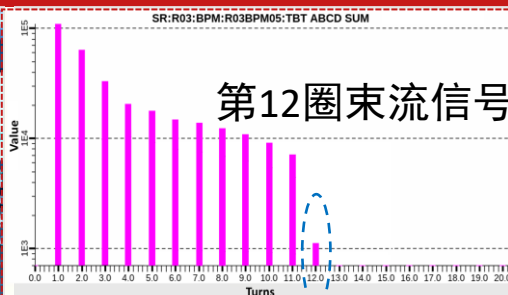
取得多项调束进展



储存环调束启动

07.23

2024.07.23



束流循环 10 圈

07.29



流强达到12毫安

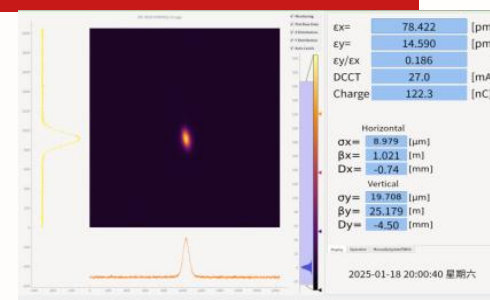
08.18



第一束光

09.22

10.12

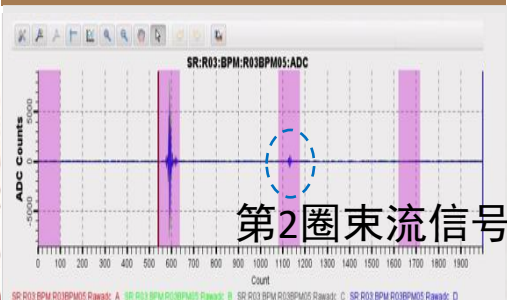


发射度优于验收指标

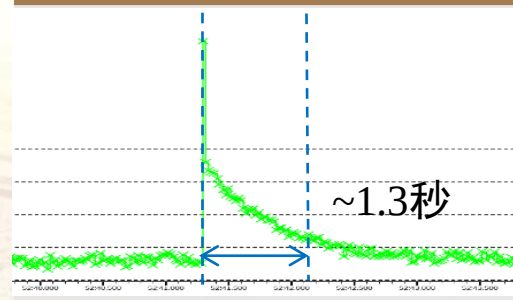
2025.01.02

01.12

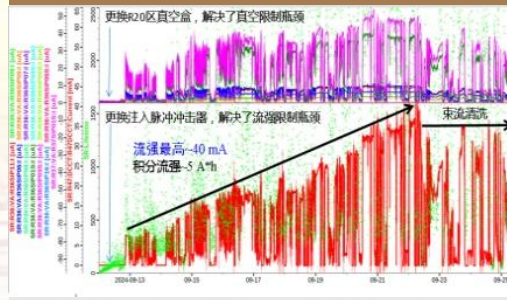
储存环首圈贯通



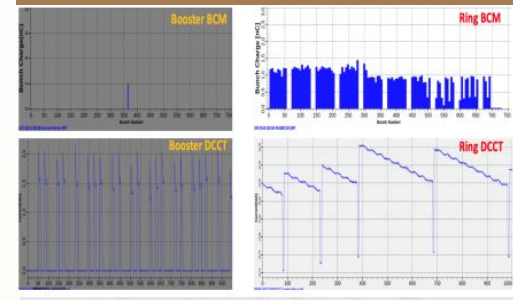
束流首次存储



流强达到40毫安

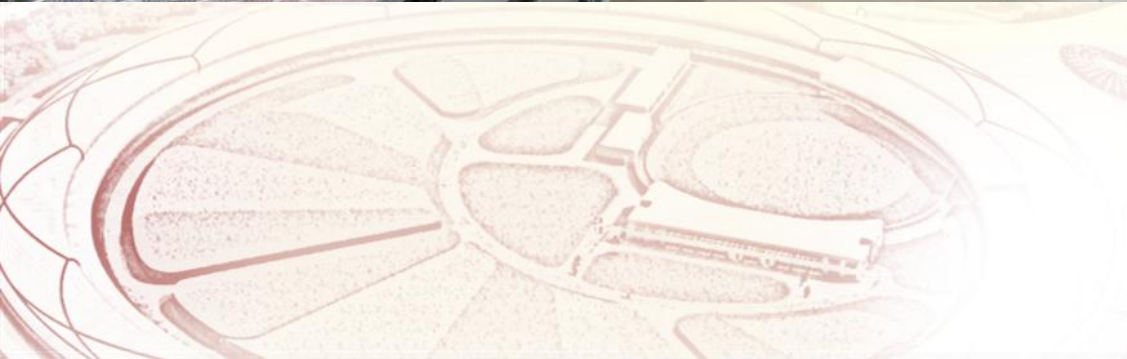


注入方案成功验证





自调束启动以来，已开展6轮调束

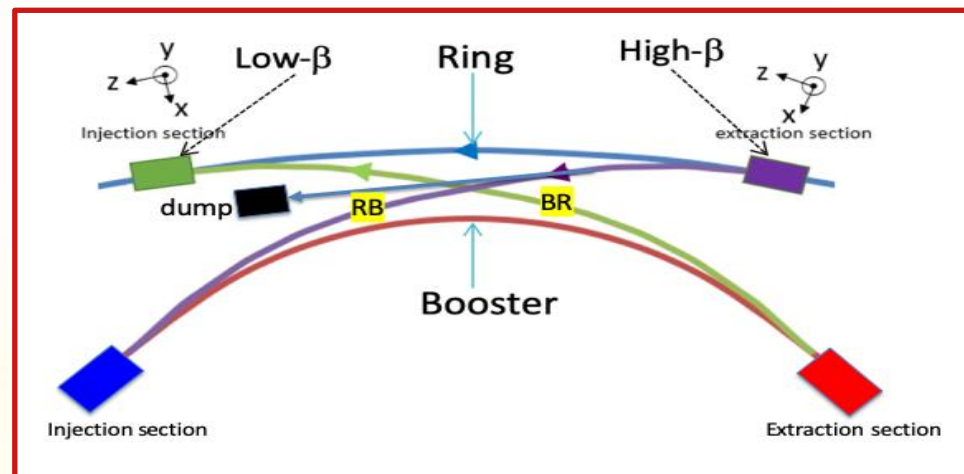




第1轮：实现束流存储，流强超过10毫安

7月23日：储存环电子束首圈贯通

- 11:00，HEPS储存环调束启动；
- 15:10，储存环实现**首次注入**；
- 19:50，储存环实现**首圈贯通**！



首圈注入在第三代光源中已经是一项很有挑战的工作，
在第四代光源中则是调束过程中的“卡脖子”环节

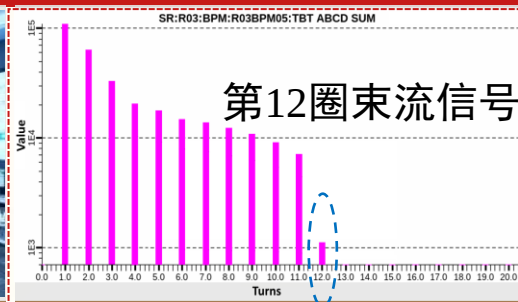


第1轮：实现束流存储，流强超过10毫安



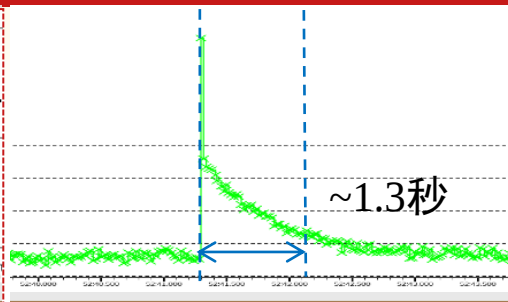
储存环调束启动

07.23



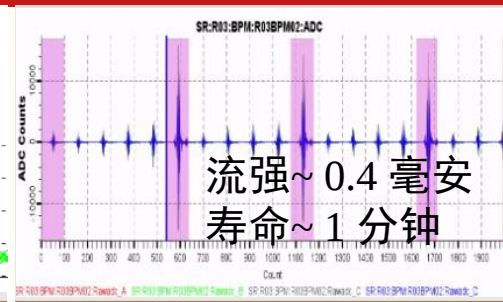
束流循环 10 圈

07.29



束流首次存储

08.06



首次储存多束团

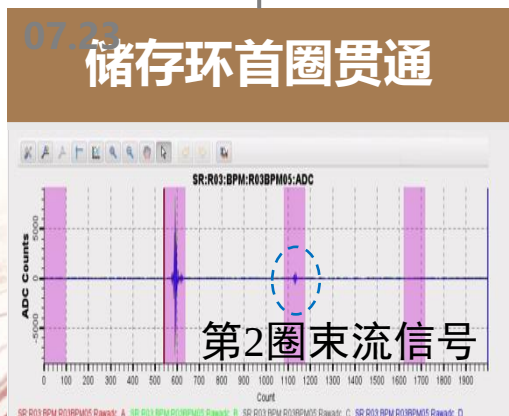
08.06



流强达到12 毫安

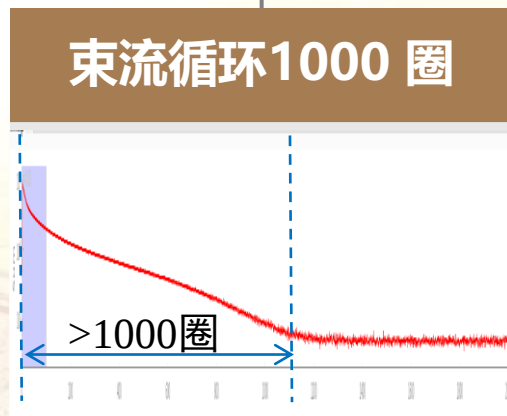
08.15

08.18



储存环首圈贯通

07.23



束流循环1000 圈



束流寿命 1分钟

08.06



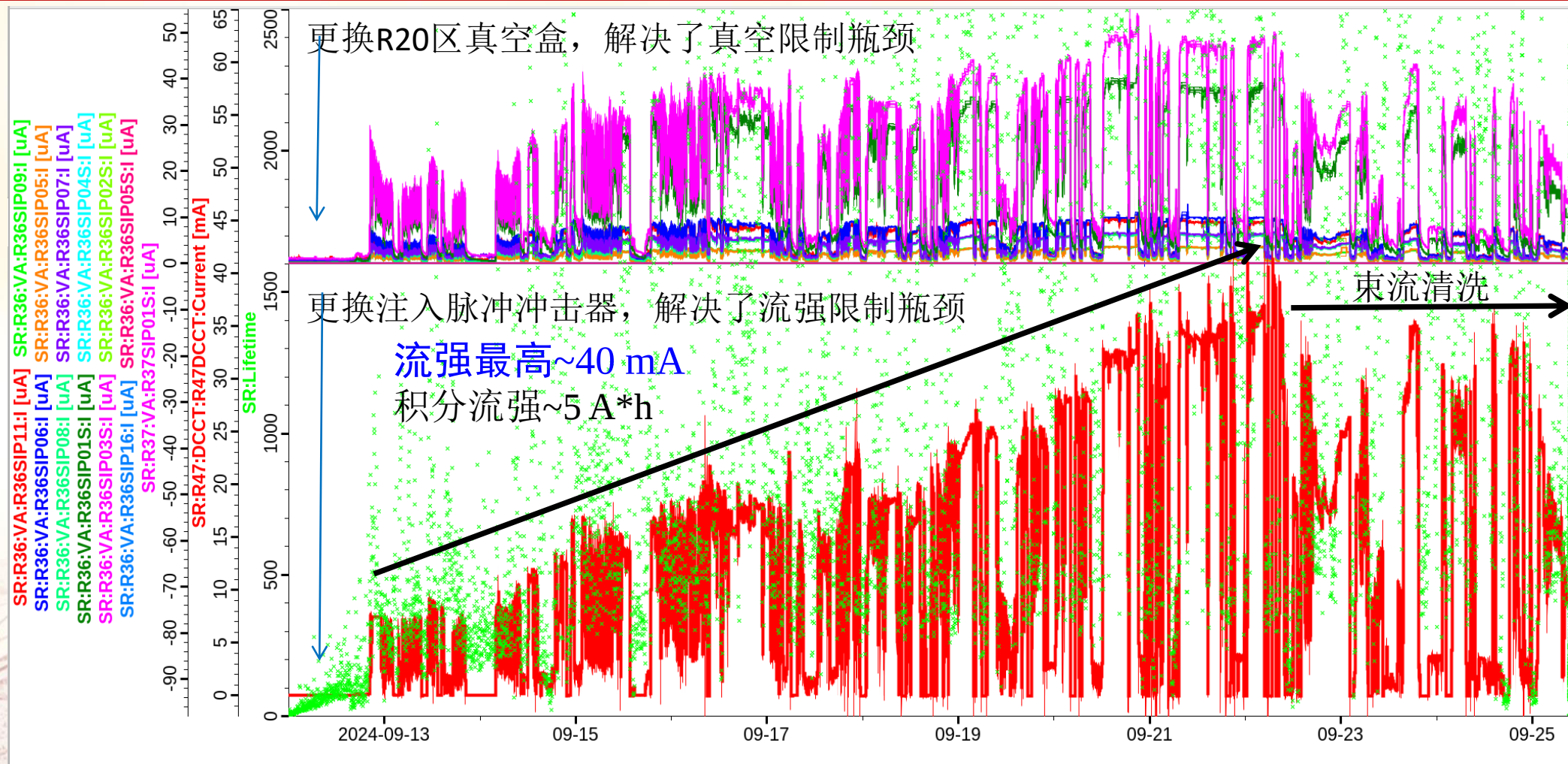
流强达到 7 毫安

08.15

08.18



第2轮：提升流强，超过40毫安



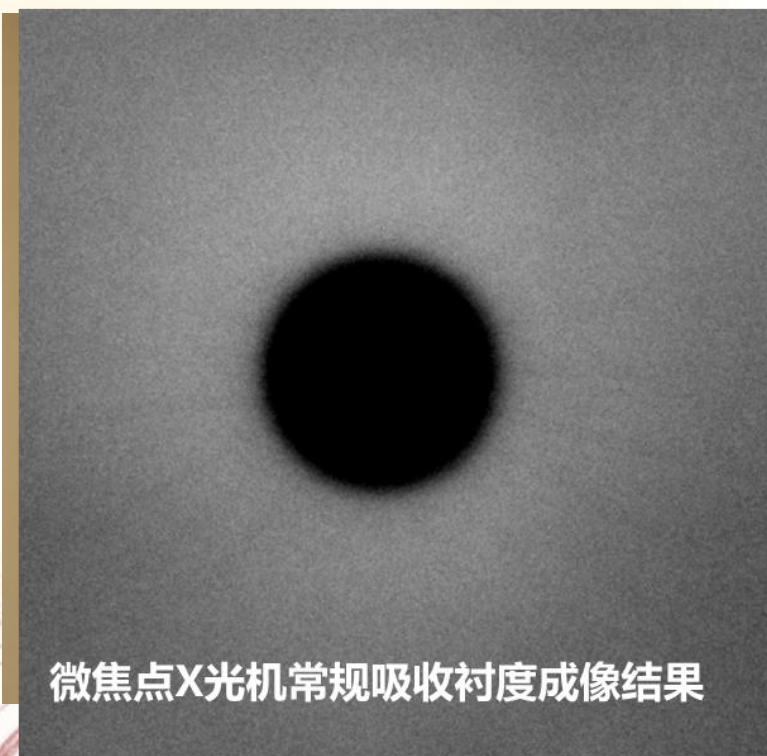


第3轮：发射第一束光并开展束线相关实验

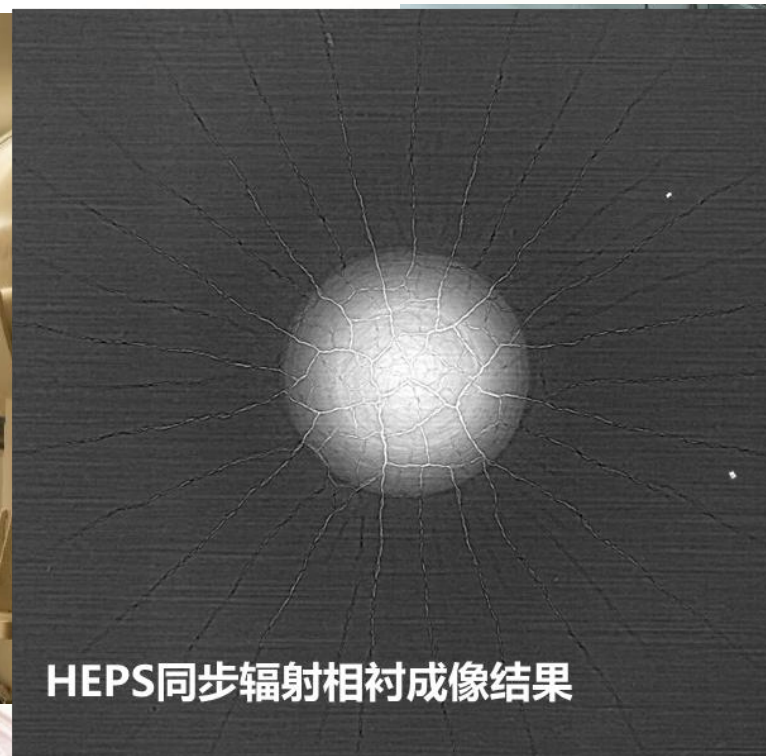
3mm 厚不锈钢板+
几十 μm 深镀铬裂纹



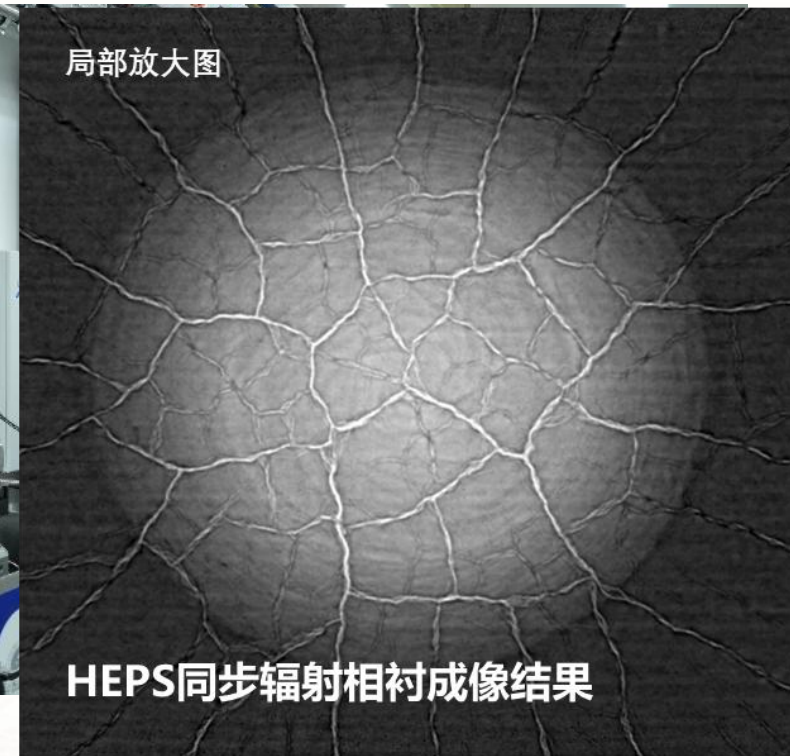
“第一束光” 及样品实验



微焦点X光机常规吸收衬度成像结果



HEPS同步辐射相衬成像结果



局部放大图

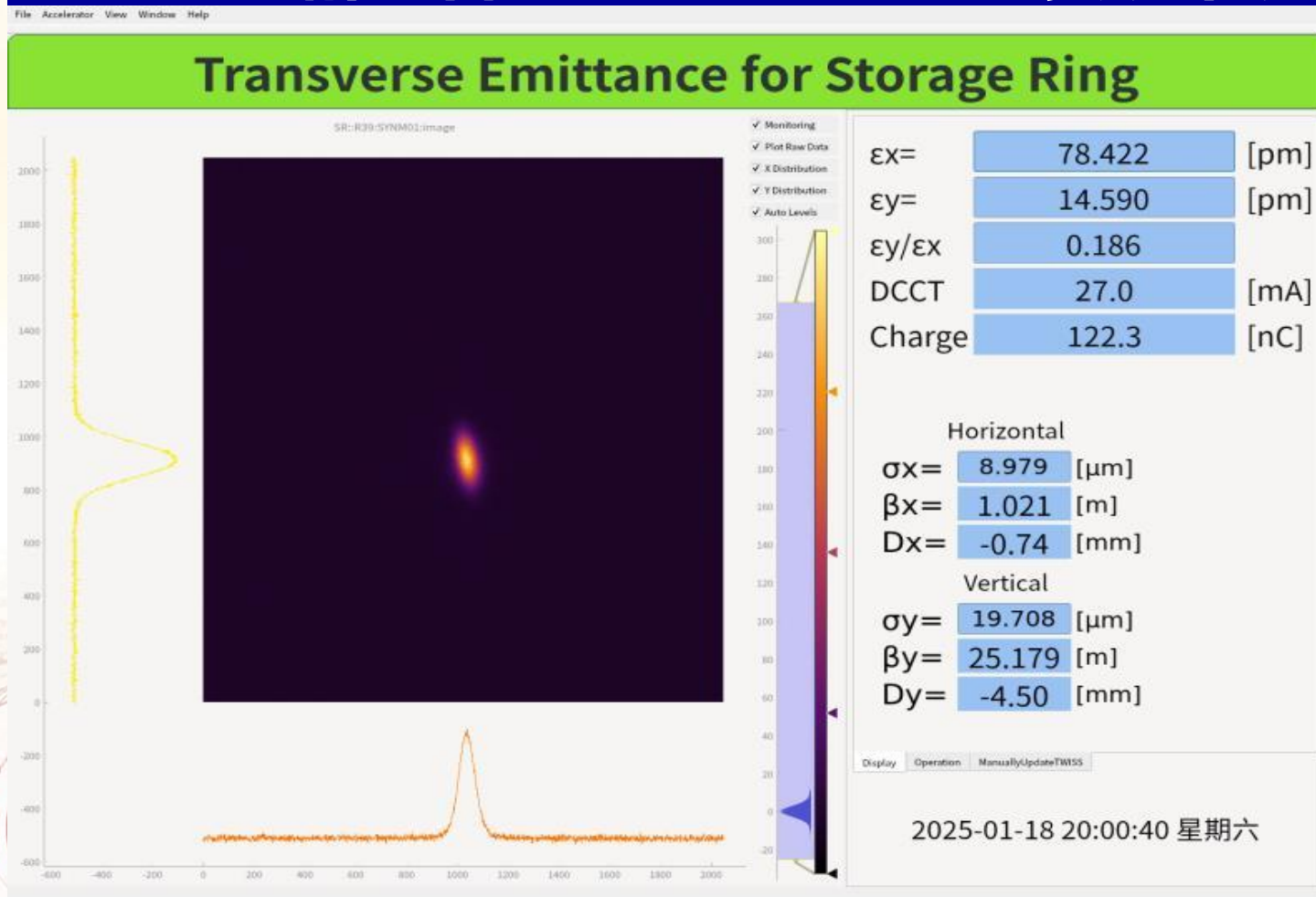
HEPS同步辐射相衬成像结果

B7-硬X射线成像实验站 最长线站 350m



第4轮：冲击发射度国家验收指标（100 pm.rad）

HEPS储存环在27 mA@6 GeV实现束流发射度小于100 pm·rad



国家重大科技基础设施—高能同步辐射光源

储存环束流发射度阶段自测试评审意见

2025年3月18日，中国科学院高能物理研究所高能同步辐射光源工程指挥部组织专家（名单附后）在北京怀柔对国家重大科技基础设施“高能同步辐射光源”进行了储存环束流发射度阶段自测试评审。与会专家听取并审阅了高能同步辐射光源储存环发射度阶段自测试测试大纲和测试报告。经过认真讨论、质询，形成意见如下：

高能同步辐射光源储存环束流发射度阶段自测试方法合理，测试结果真实有效。专家组一致认可 HEPS 储存环在 27mA@6GeV 实现束流发射度小于 100 pm·rad。

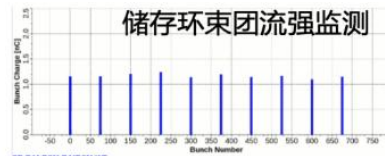
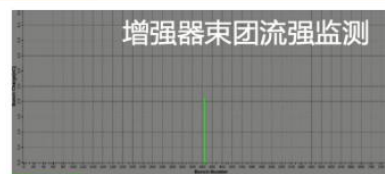
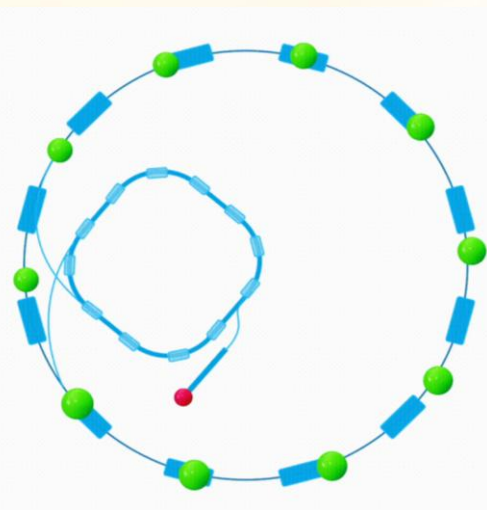
专家组组长：刘世新

2025年3月18日

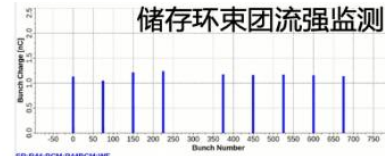
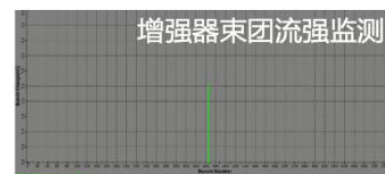


基于增强器高能累积的置换注入调试成功

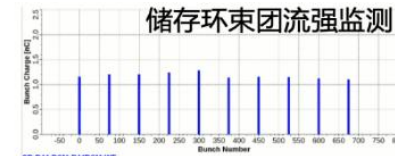
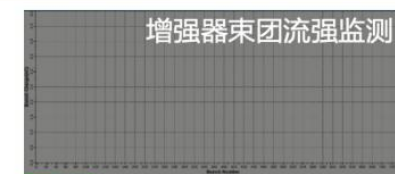
- 2025年1月2日，该方案国际首次调试成功并投入运行
- 2025年9月12日，储存环单束团电荷量超过5nC，满足相关束线测试验收需求。



增强器在500MeV注入单束团，
升能到6GeV

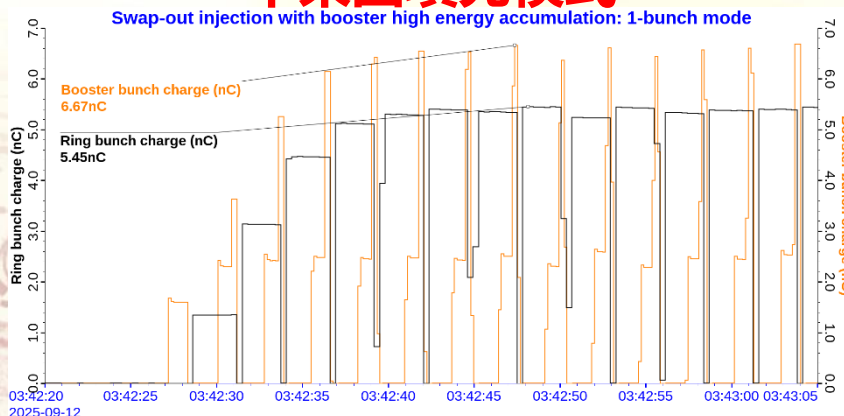


储存环引出束团回注到增强器，
同循环束累积

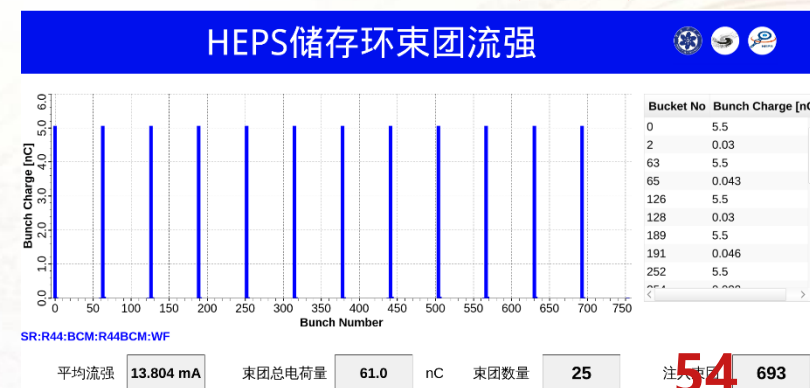


该束团从增强器引出并注入到
储存环中，增强器降能

单束团填充模式

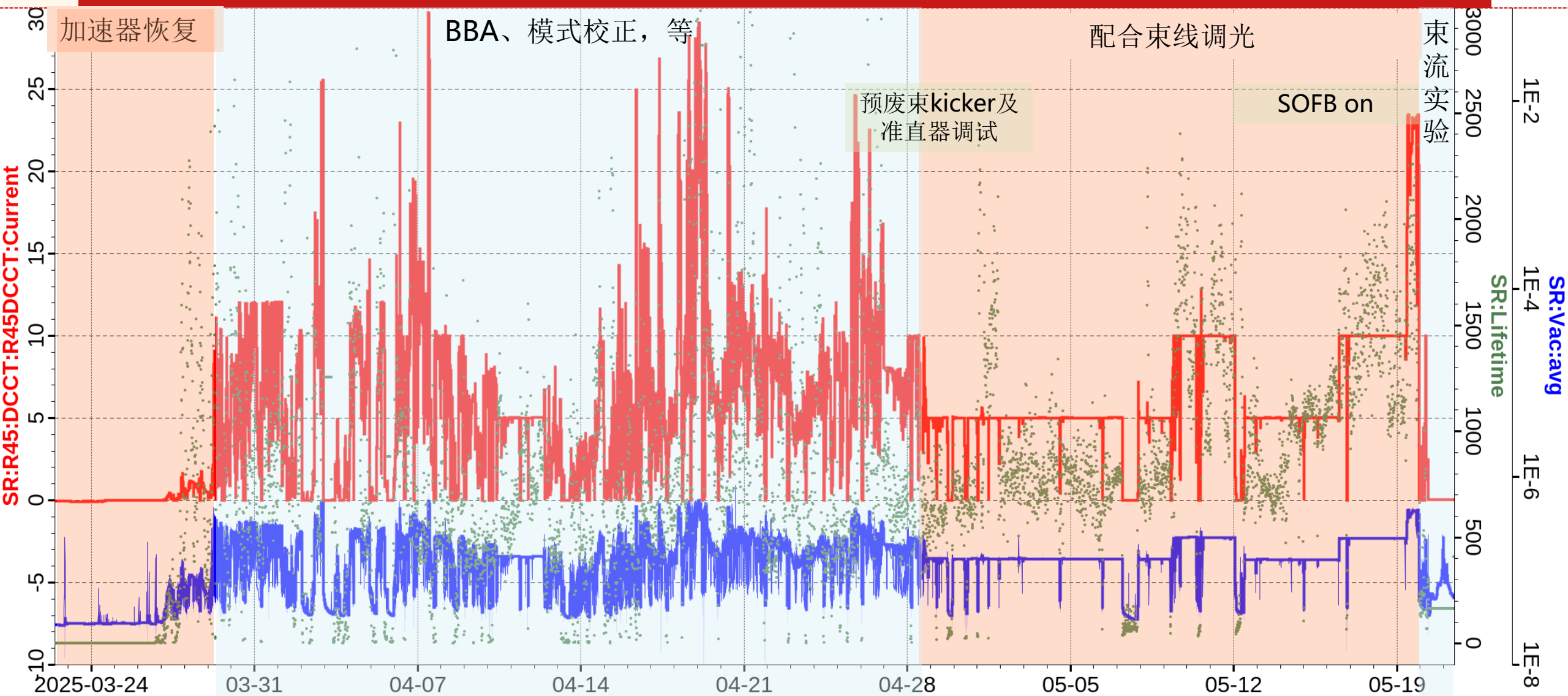


12束团均匀填充模式



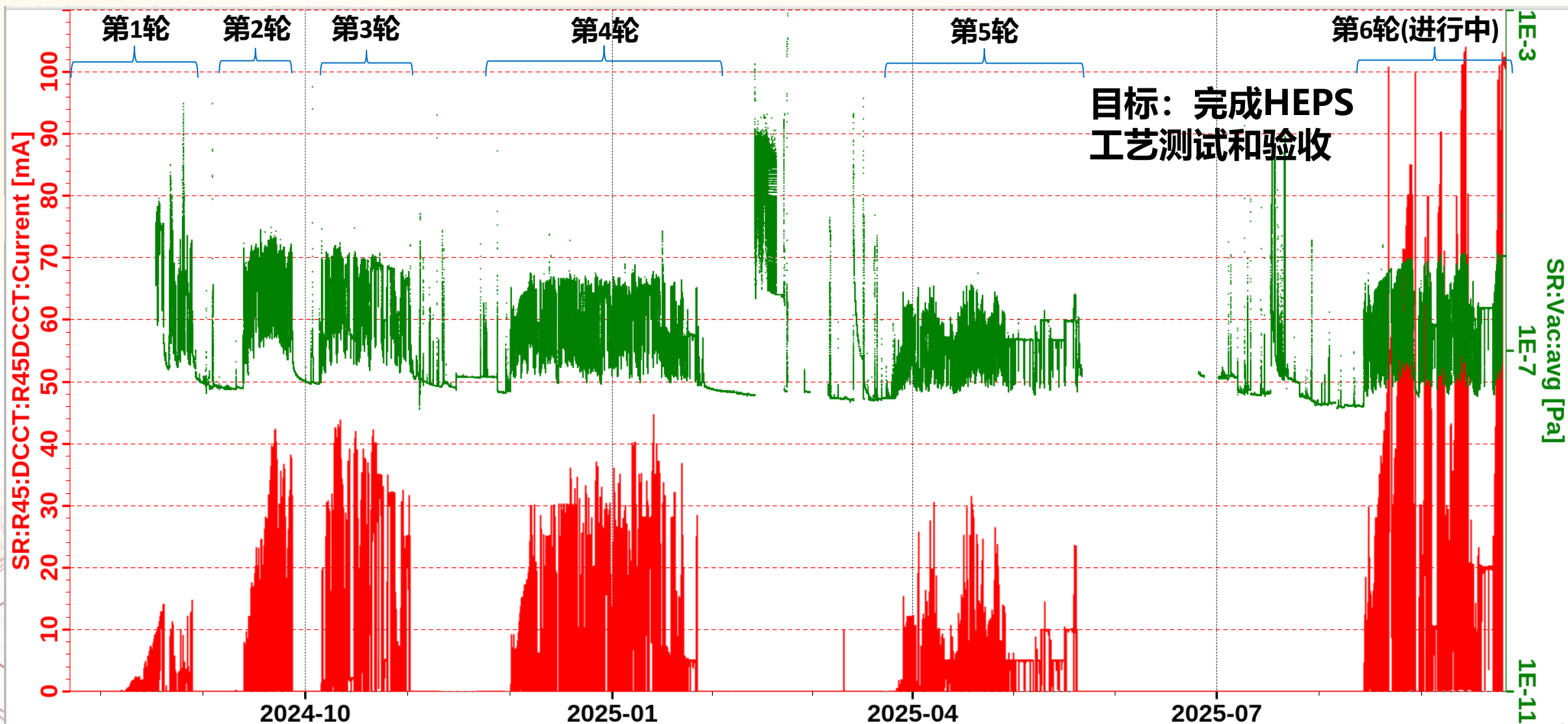


第5轮：加速器与束线联合调试





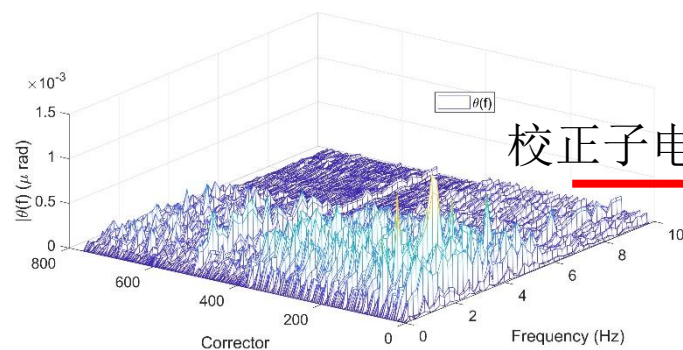
正在开展第6轮调束 (积分流强65A·h)



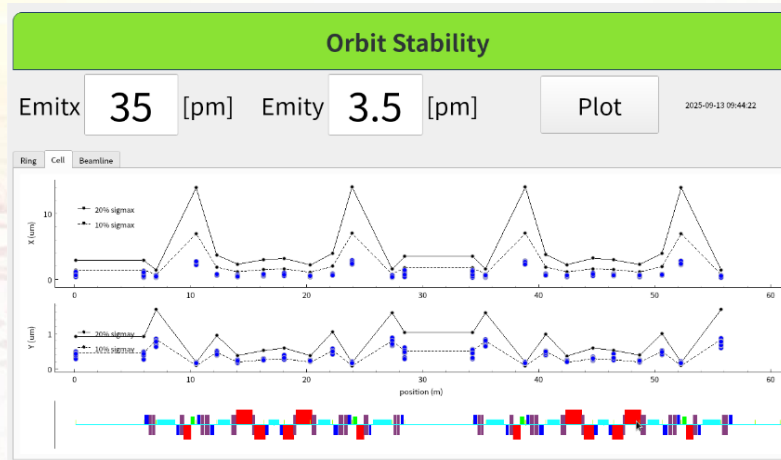
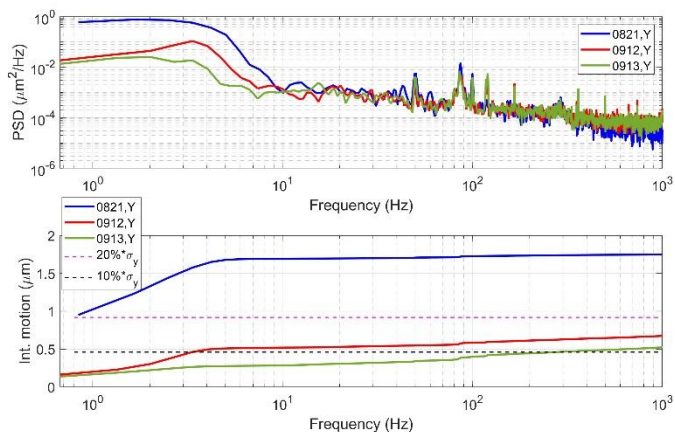
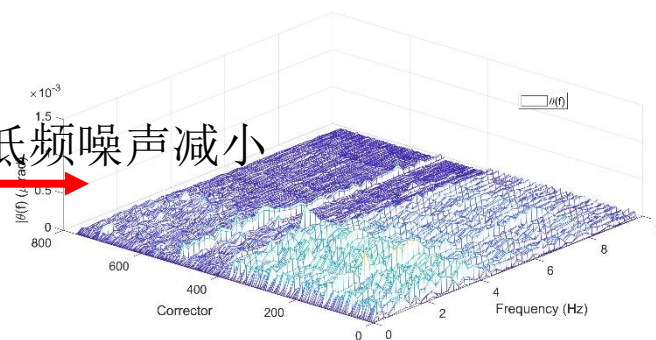


储存环束流轨道稳定性持续提升

- 进行了一系列测试和针对性优化，束流轨道稳定性持续提升
- 当前模式、束流100mA —— 水平方向轨道稳定性小于10%束团尺寸；
—— 垂直方向轨道稳定性小于20%束团尺寸。



校正子电源优化，低频噪声减小





- 据中国地震台网数据，9月19日2时58分堪察加东岸附近海域发生7.8级地震（北纬53.10度，东经160.60度），震源深度20公里。

SR:OrbitX:Avg
03:05, -0.023

SR:OrbitX:Avg
02:58, -0.023

SR:OrbitX:Avg
03:10, -0.022

典型地震波形

58



HEPS加速器已成功通过中科院科技基础能力局组织的工艺测试，加速器达到验收指标

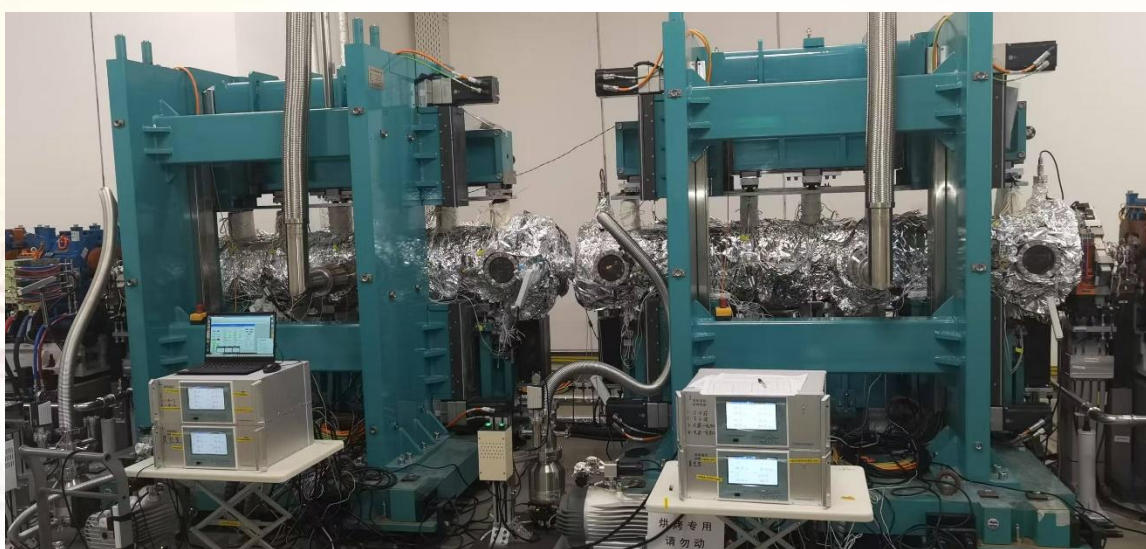
参数 Parameters	设计指标 Design	验收指标 KPP	测试结果
能量Energy (GeV)	6	6	6.01 ± 0.01
流强Beam current (mA)	200	100	100.5 ± 0.4
水平自然发射度 Horizontal natural emittance (pm·rad)	≤ 60	≤ 100	56.8 ± 0.9
束流轨道稳定性Beam stability**	10%	20%	全环最大值19.8%
亮度Brightness (phs/s/mm ² /mrad ² /0.1%BW)	1×10^{22}	2×10^{21}	$(4.0 \pm 0.16) \times 10^{21}$
X射线能量 X-ray energy (keV)	300	≥ 300	> 300 (能量峰值349.57 keV)

*依据《国家发展改革委关于高能同步辐射光源国家重大科技基础设施项目可行性研究报告的批复》（发改高技〔2018〕1928号）。

**垂直方向轨道变化的均方根值与束团垂直均方根尺寸的比值。



一期所有插入件就位 ——满足光束线站调光





前端区均达处于工作状态





光束线站完成设备安装和带光调试

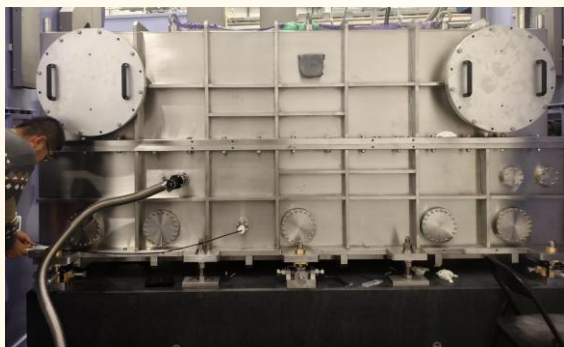


环境

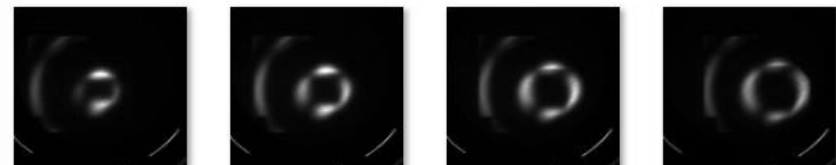
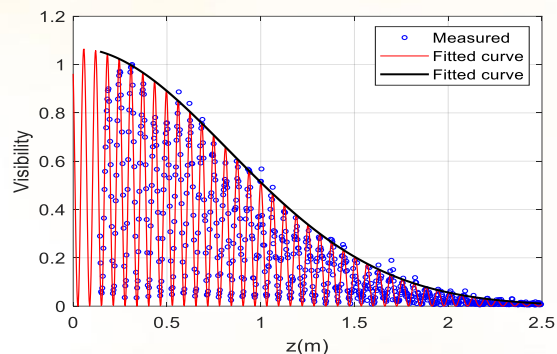
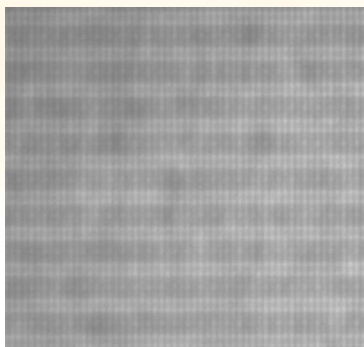
光



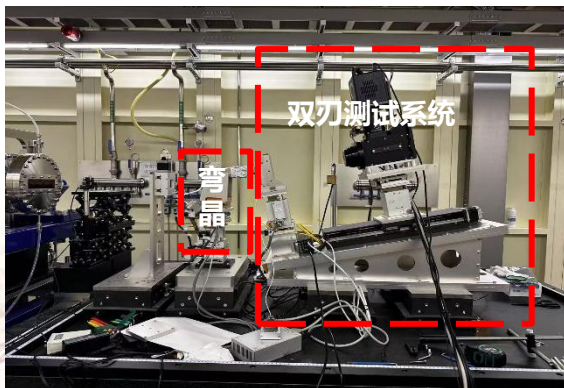
多条光束线开展了实验测试 ——展示了四代光源的卓越性能



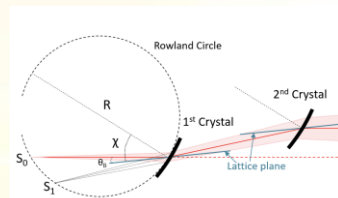
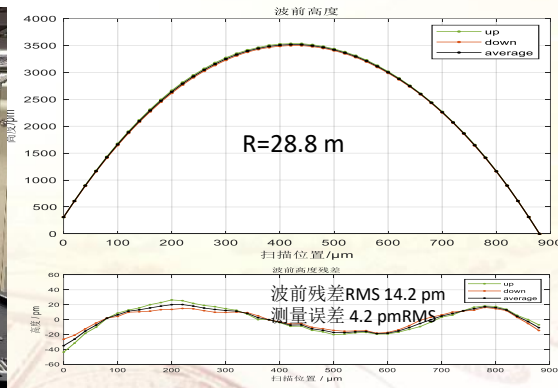
ID09相干散射束线，光栅干涉仪方法，检测储存环发射度，达到97.7pm



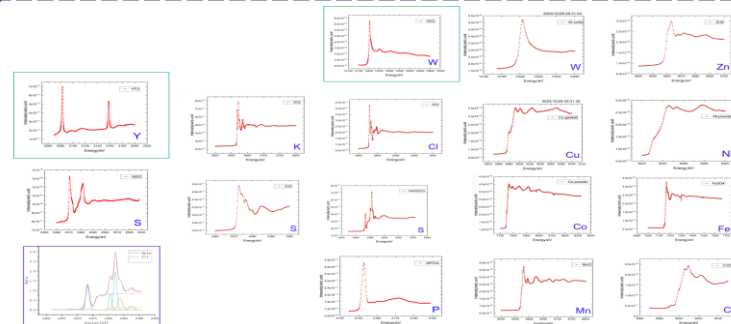
ID46通用谱学束线，晶体衍射诊断仪实验，初步实现光轴和插入件磁场性能诊断



ID42测试线站，双刃波前检测方法，检测高能Laue弯晶波前；检测精度4.2pm RMS。



新方法实现强模糊波前高精度检测，此前国际未见报道



BM44环境谱学束线，大部分性能指标达标，成功开展了标样吸收谱实验。



结束语

- 按计划进行了HEPS各项建设工作
- **HEPS加速器达到验收指标。** 储存环束流能量6.01千兆电子伏，束流水平自然发射度0.0568纳米·弧度，束流强度100.5毫安，束流轨道稳定性即垂直方向轨道变化的均方根值小于束团垂直均方根尺寸的19.8%，亮度 4.00×10^{21} phs/s/mm²/mrad²/0.1%BW（每秒每平方毫米每平方毫弧度及千分之一带宽内光子数），X射线能量峰值349.57千电子伏，具备提供能量达300千电子伏X射线的能力
- 光学线站正在进行最后的达标自测试
- 已开展的束线实验测试取得优异的结果，展示了第四代光源的卓越性能



谢谢!

