

第三届全国辐射探测微电子学术交流会

合肥光源与合肥 先进光源简介

刘啸嵩

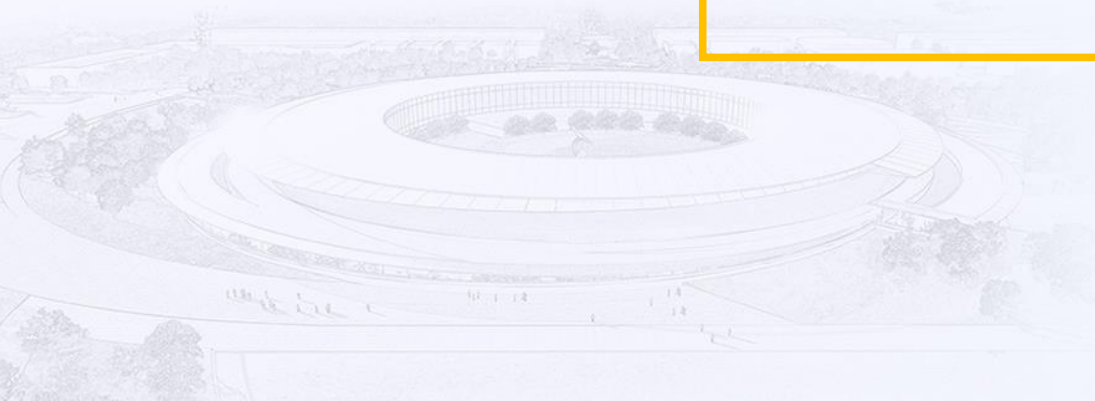
中国科学技术大学
国家同步辐射实验室



2023年10月



同步辐射简介及我国光源现状

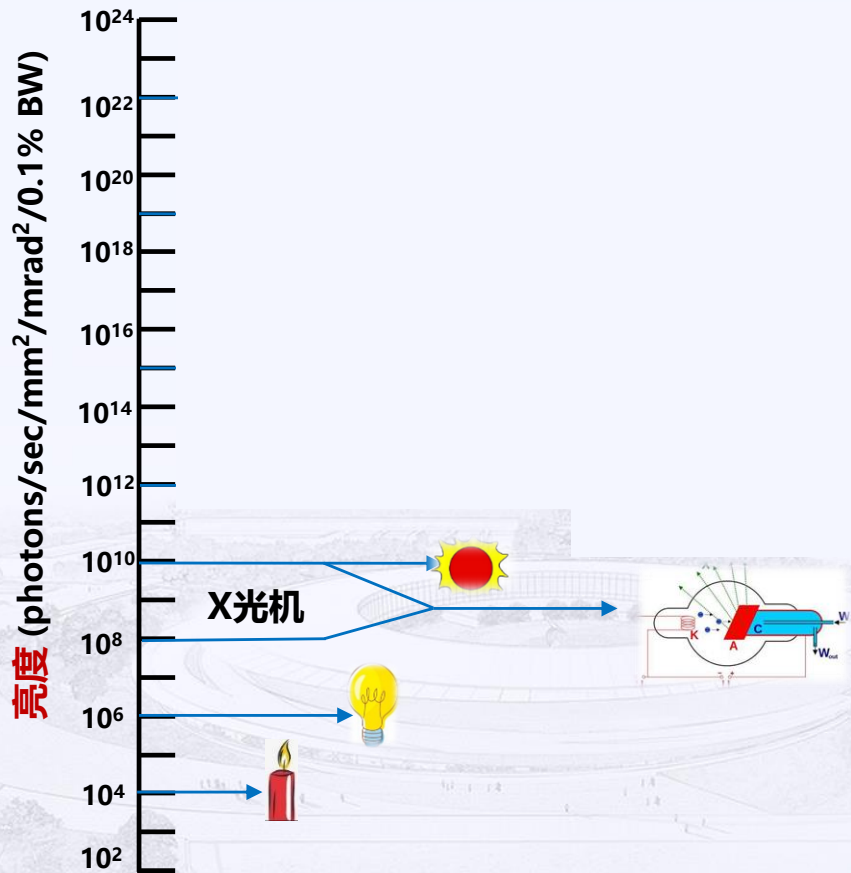


同步辐射是科技的灯塔



全世界10万用户在50余台同步辐射工作 是各国家实验室/国家级科创中心的旗舰装置

同步辐射的发展 — 历经四代



X射线让人“见所未见”

伦琴夫人手指



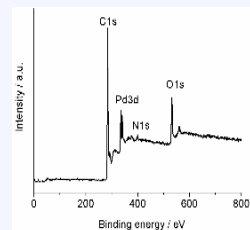
成像

DNA双螺旋结构



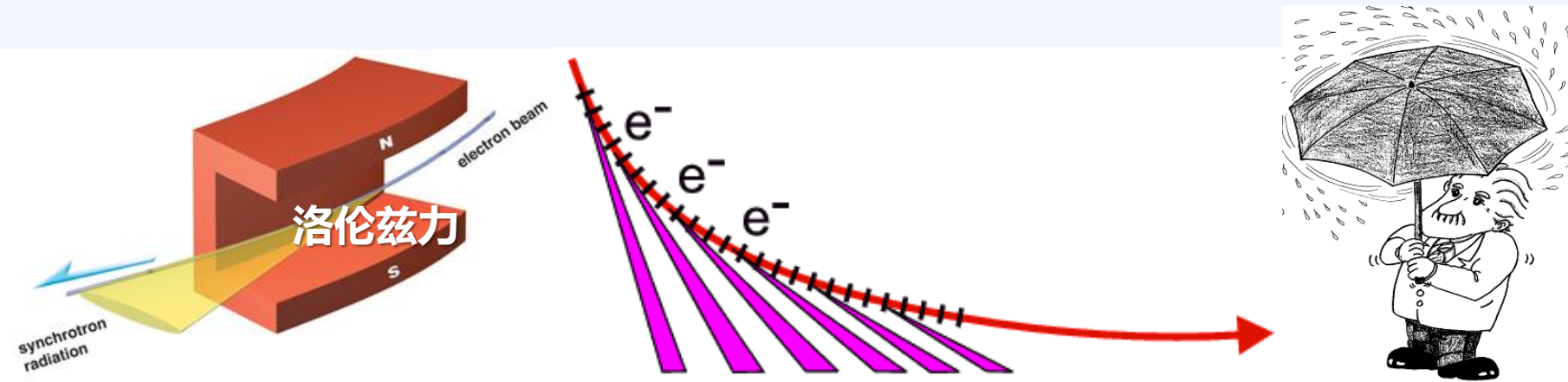
散射(衍射)

化学分析



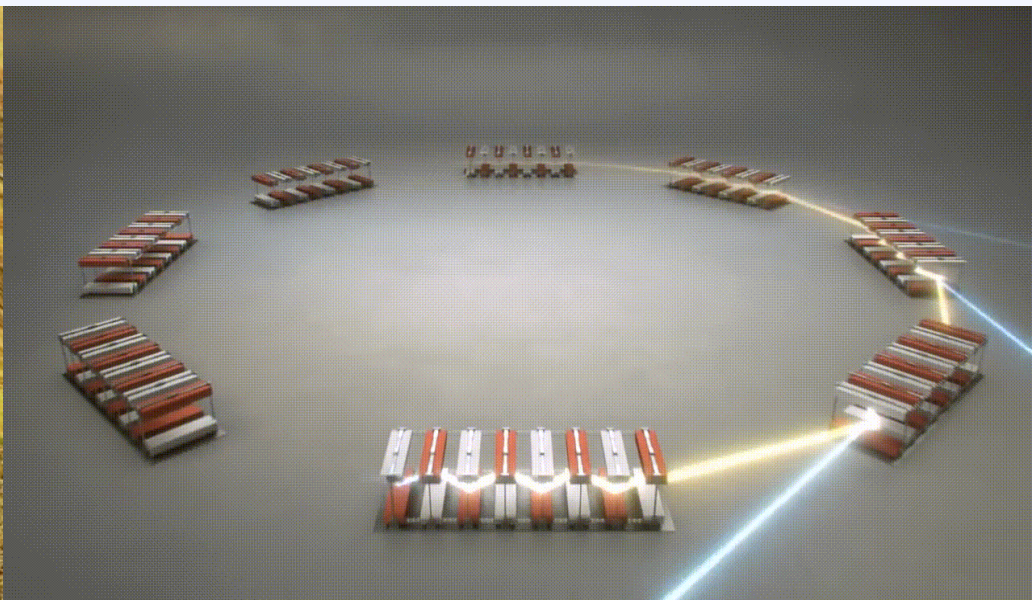
谱学

同步辐射 — 电子在磁场中偏转发出的光



同步辐射：带电粒子（电子、离子）以接近光速运动时，在电磁场的作用下偏转，沿运动的切线方向上发出的一种电磁辐射。

第三代同步辐射的主要标志 — 插入件



磁铁阵列

第四代同步辐射光源 — 衍射极限电子储存环

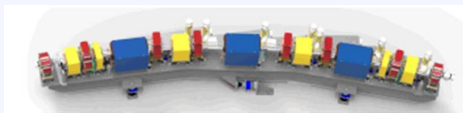
储存环磁铁结构

电子束团

光斑

相干度

三代



DBA或TBA

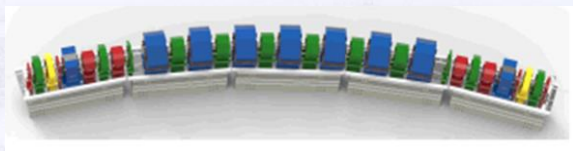


亮度 $\sim 10^{19}$

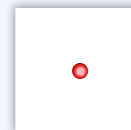


$\sim 0.1\%$

四代



MBA



点光源, 亮度 $\sim 10^{21-22}$



$\sim 30\%$

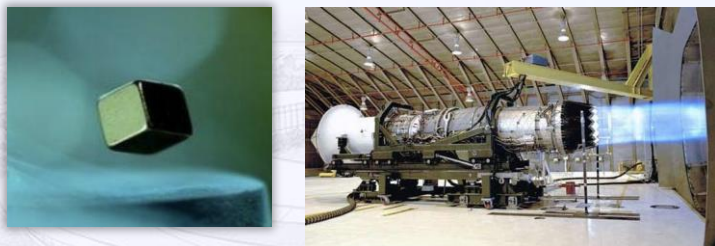
极低电子束发射度 $< \lambda/4\pi$, 达到衍射极限

均比三代光源高100-1000倍!

不同能区光源能力互补

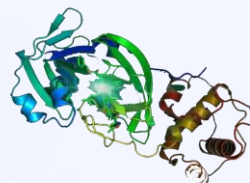


低能区侧重于功能：电子状态、化学状态、轻元素结构等



研究化学反应、超导电性、磁性、航发燃烧动力学，机身轻质材料...

中高能区侧重于结构：原子位置、晶格结构、重元素信息等



观察单晶生长、蛋白质分子结构、航发单晶叶片的结构缺陷...

我国光源现状

合肥光源
0.8 GeV
低能光源

上海光源
3.5 GeV
中能光源

北京高能光源 (在建)
6.0 GeV
高能光源

二代光源

三代光源

四代光源

能量/eV

真空紫外

软X射线 (SX)

韧X射线

硬X射线 (SX)

伽马射线

6

500

5000

10 k

30 k

>100 k

注：另有北京同步辐射装置(BSRF)，为第一代同步辐射，每年提供约3个月专用机时

上海光源一期工程 and 首批线站

首批光束线站

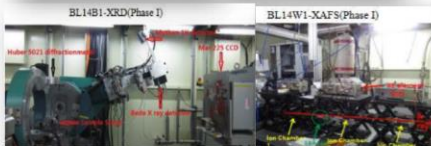
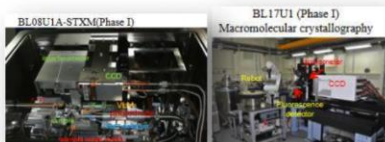
- 软X射线谱学显微线站 (BL08U1A)
- X射线成像及生物医学应用线站 (BL13W1)
- XAFS线站 (BL14W1)
- 衍射线站 (BL14B1)
- 硬X射线微聚焦线站 (BL15U)
- X射线小角散射线站 (BL16B1)
- 生物大分子晶体学线站 (BL17U)

蛋白设施五线六站 梦之线

- 高通量晶体结构线站 (BL17B)
- 蛋白质微晶体结构线站 (BL18U)
- 蛋白质复合物结构线站 (BL19U1)
- X射线小角散射线站 (BL19U2)
- 红外谱学与时间分辨线站 (BL01B)
- “梦之线” (BL09U)



2009年5月

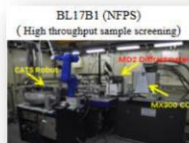


2012年1月

分支线站

- 软X射线干涉光刻分支线站 (BL08U1B)

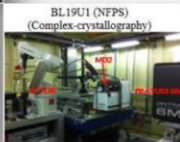
2015年7月
2016年3月



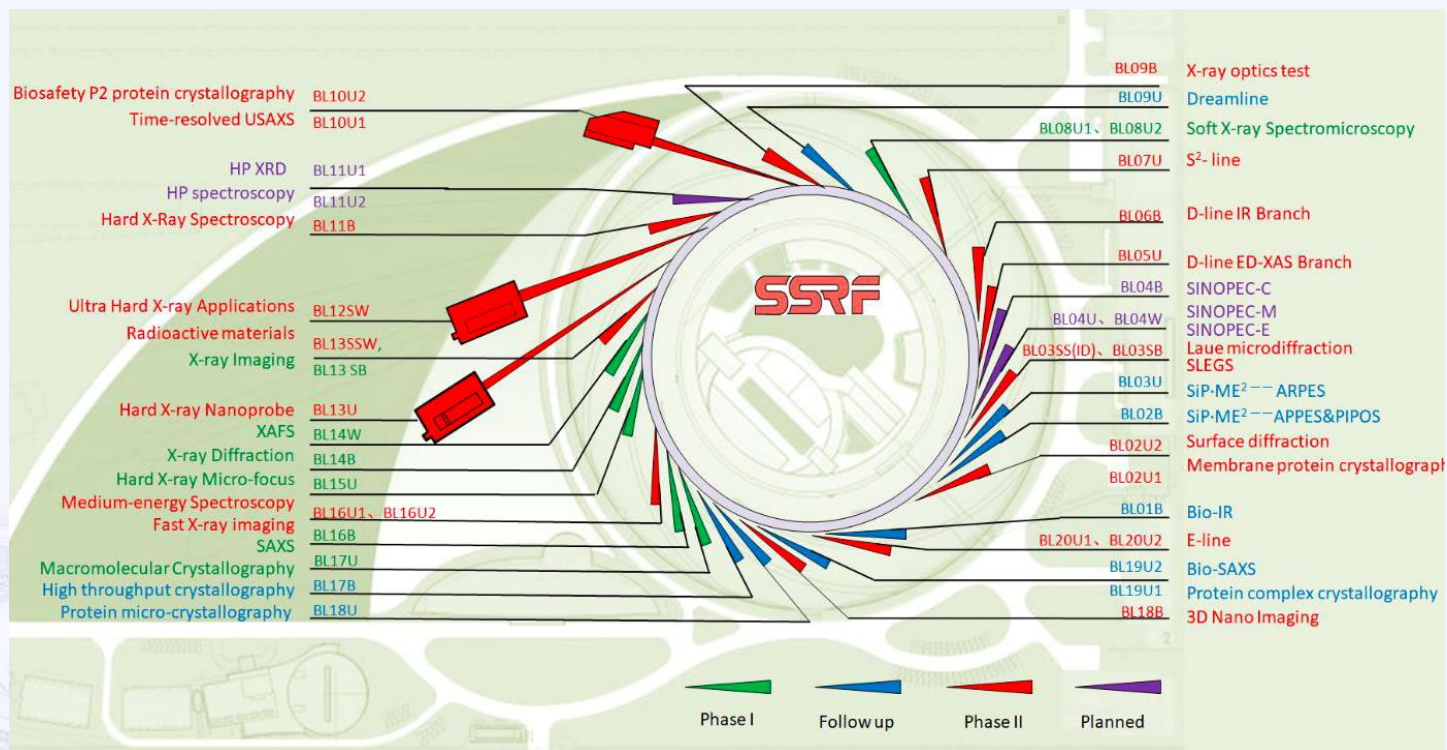
2019年1月

ME²-SIP

- 近常压软X射线原位谱学线站 (BL02B)
- 原位高分辨电子结构线站 (BL03I)



上海光源二期线站工程



2016-2023年二期工程建设，30余条光束线55个实验站对用户开放

高能光子源 (HEPS)



- 束流能量: 6 GeV
- 储存环周长: 1346 m
- 发射度: 34 pm-rad
- 流强: 200 mA
- MBA结构: 7BA

2019-2025年, 一期工程14条线站



北京怀柔

| | | |
|------|--------------|---|
| 高能 | 工程材料线站 | 50-170keV, 微米聚焦 |
| | 硬X射线成像线站 | 10-300keV, 300mm大光斑, 350m长 |
| 高亮度 | 纳米探针线站 | <10nm; 原位nanoprobe; 180m长 |
| | 结构动力学线站 | 15-60keV, 不可逆过程单发实验; 200m长 |
| | 高压线站 | 衍射、成像; 150nm光斑, 超高压 |
| | 纳米角分辨光电子能谱线站 | 100-2000eV, 100nm |
| 高相干 | 硬X射线相干散射线站 | CDI (<10nm分辨) sub- μ s XPCS (时间分辨提高4个量级) |
| | 低维结构探针线站 | 表面界面研究, 表面XPCS |
| 用户广泛 | 高能量分辨谱学线站 | 核共振散射, X射线拉曼 |
| | X射线吸收谱线站 | 亚微米, quick XAFS |
| | 中能谱学线站 | 弯铁束线, 2-7 keV 中能谱学 |
| | 生物大分子线站 | 1 μ m, 串行晶体学 |
| | 粉光小角线站 | 粉光, 时间分辨 |
| | X射线显微成像线站 | 纳米全场成像及谱学 |
| 测试 | 测试线站 | undulator和wiggler, 光学检测 |



合肥光源及合肥先进光源



国家同步辐射实验室发展历程

国家同步辐射实验室

- 中国**第一个**国家级实验室(1983)
- 中国专用同步辐射的**发源地**

合肥光源

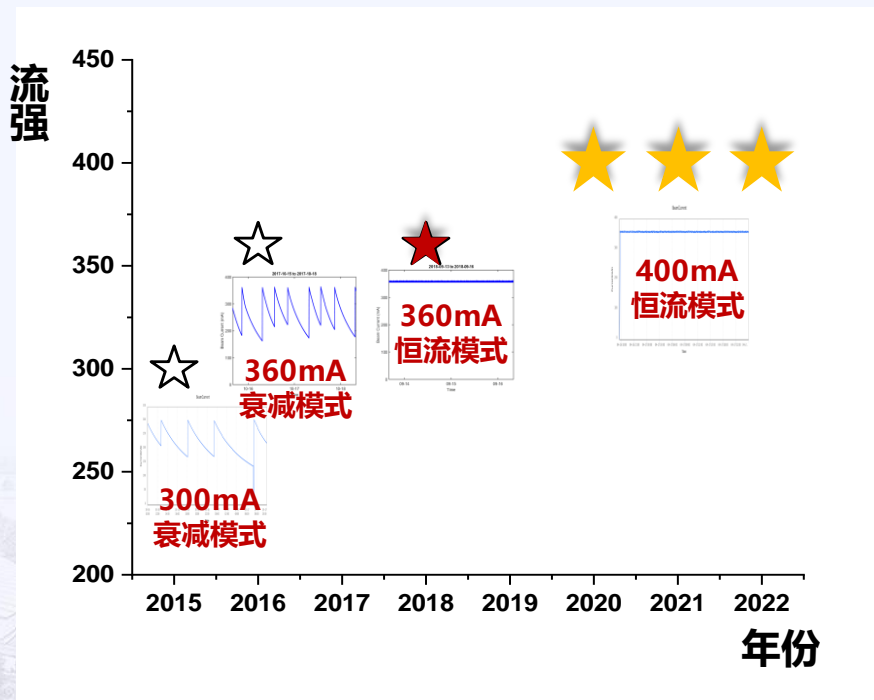
- 1991年建成中国**第一个**专用同步辐射光源，获1995年**国家科技进步一等奖**
- 2014年完成升级改造，近五年发表论文2050篇，过半于一区刊物发表，与国际先进光源相当



合肥光源加速器核心运行指标

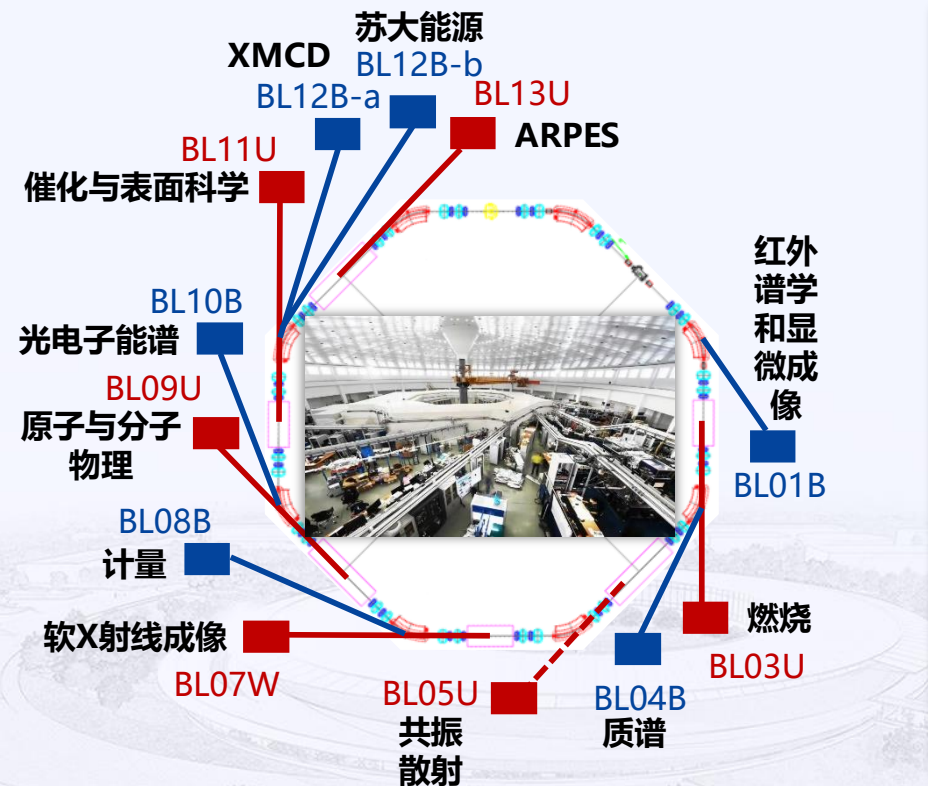
2021.10-2022.9

- 稳定运行在**400mA恒流模式**
- 束流稳定度： $\pm 1\%$
- 开机率 **99.7%**
- 平均无故障时间 **213.14 h**
- 装置运行时间 **7251 h**
- 用户机时 **43521.83 h**



机器性能达到国际同类二代光源装置公认的优秀水平

合肥光源光束线站



| | |
|---------|--------------|
| BL03U | 燃烧 |
| BL07W | 软X射线成像 |
| BL09U | 原子与分子物理 |
| BL11U | 催化与表面科学 |
| BL13U | ARPES |
| BL01B | 红外谱学和显微成像 |
| BL04B | 质谱 |
| BL08B | 计量 |
| BL10B | 光电子能谱 |
| BL12B-a | XMCD-a |
| BL12B-b | XMCD-b* (共建) |

2014新建

2014新建

2014新建 性能优化

2014新建

2020完成升级

2017完成升级

验收中, 2022年完成

升级中, 2023年完成

2022完成升级

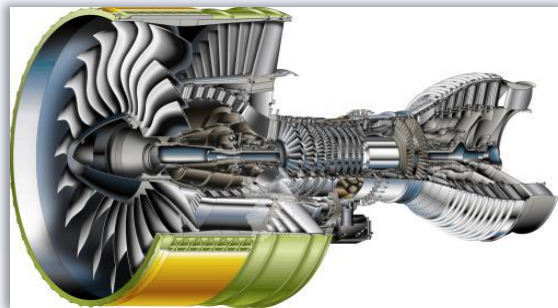
2020完成升级

2020建成开放

光束线站技术稳步提升, 共10条线站, 红外-软X射线

重要成果举例：推动基础燃烧和催化机理研究

先进航空发动机技术是我国核心战略需求，发动机点火、燃烧、主动冷却等微观过程亟待厘清

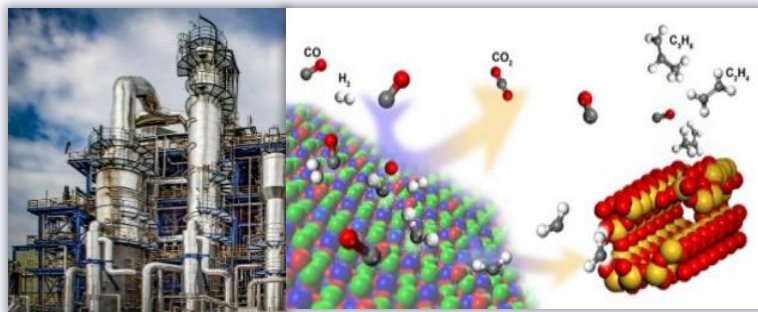


齐飞等利用合肥光源发现了系列重要燃烧中间体，揭示了重要燃烧反应路径及其动力学

成果

Science, 2005, 308, 1887
国家自然科学基金二等奖 (2018年)

煤制烯烃/汽/柴油/苯系物
是未来我国煤炭清洁利用主要途径

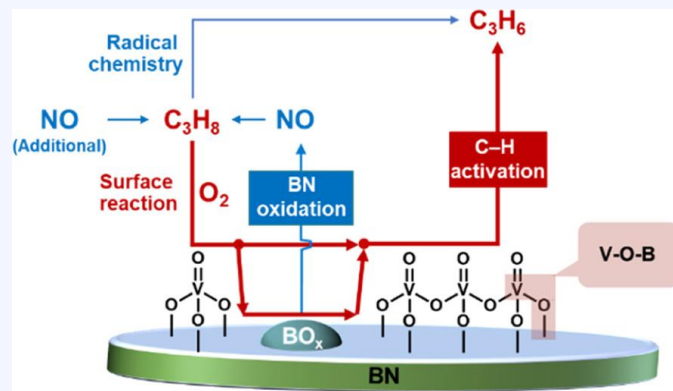
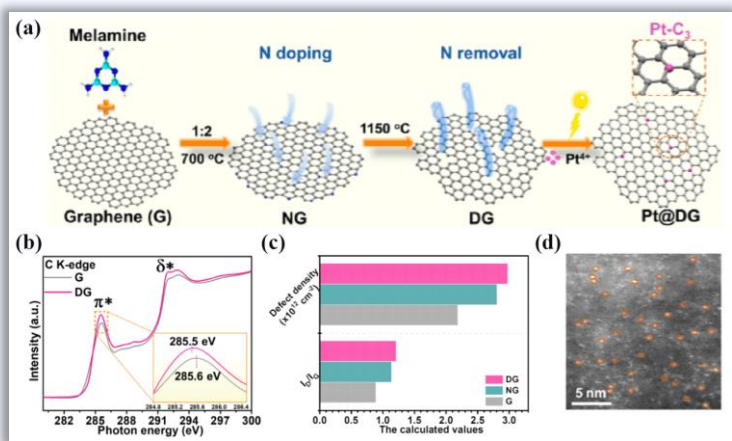


包信和等利用合肥光源探测到煤基合成气制烯烃关键中间产物，打破了传统费托极限

成果

Science, 2016, 351, 1065
中国科学十大进展 (2016年)
国家自然科学基金一等奖 (2020年)

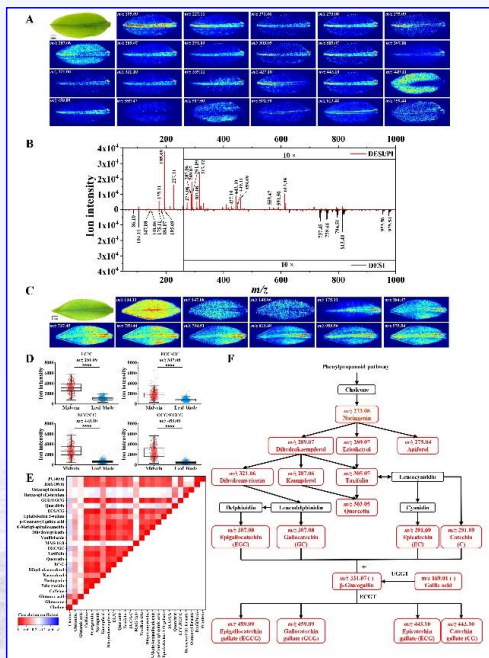
面向世界科技前沿：催化科学



催化剂的理性设计和构效关系探究是当前国际研究焦点和难点，依托合肥光源磁圆二色、表面与催化、光电子能谱、质谱等多个线站技术，澳大利亚格里菲斯大学姚向东与西交大常春然和福州大学袁珮、清华大学王定胜与温州大学张剑、中科大黄伟新与美国橡树岭国家实验室Zili Wu、大连理工大学曲振平与大连化物所焦峰/肖建平、中科大谢毅团队、浙江大学范杰/吴进明等在高效单原子产氢、高效烯烃氢磷酸化、丙烷氧化脱氢、甲醛低温催化氧化、光催化二氧化碳还原至甲烷、常温常压甲烷活化等方面取得了系列成果 (JACS 144, 2171, 2022; JACS 144, 4321, 2022; JACS Au 2, 1096, 2022; Nat. Commun. 13, 2209, 2022; Angew. Chem. Int. Ed. 61, e2022032, 2022; ACS Catal. 12, 7037, 2022)。

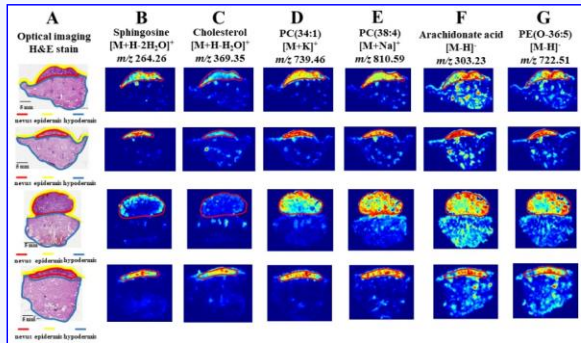
面向人民生命健康：国际唯一的光电离质谱成像平台

■ 植物代谢组学研究



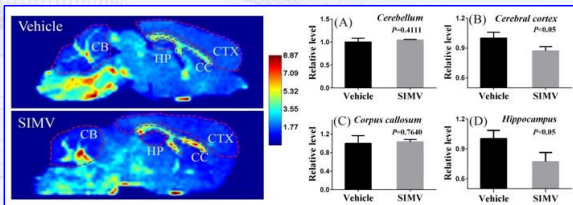
结论：为咖啡因主要在茶叶中脉合成和茶氨酸在茶叶根部合成并转运至叶片的生物合成位点及转运路径提供了强有力证据。

■ 黑色素细胞痣诊断和形成机制



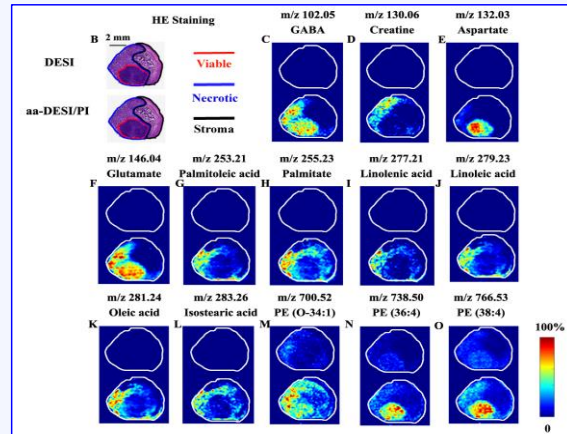
结论：胆固醇是黑色素细胞痣重要标志物，是由HMGR和TSPO酶的共同作用产生

■ 他汀类药物降脂研究



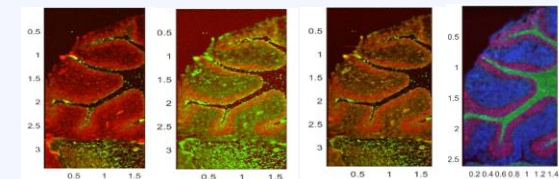
结论：注射SIMV的小鼠脑部和脊髓胆固醇信号峰明显低于对照组

■ 肿瘤标志物特异性分布研究



结论：发现乳腺癌肿瘤中GABA, creatine, oleic acid等的特异性空间分布

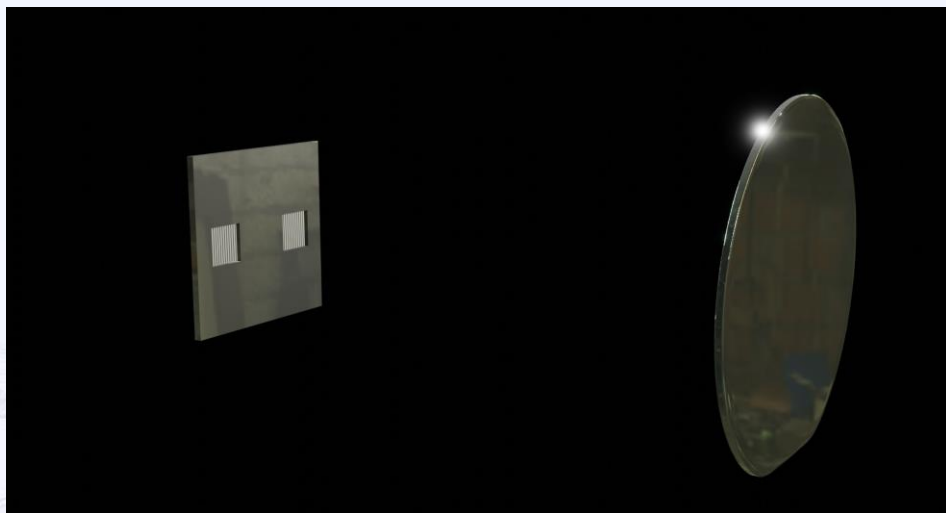
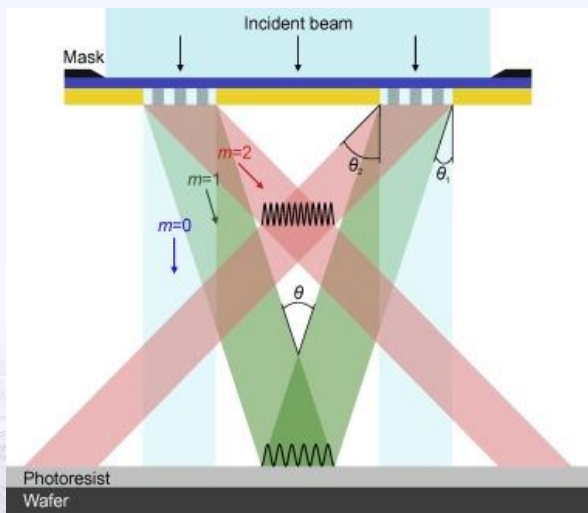
■ 小鼠小脑脂质代谢成分高分辨研究



结论：实现5um空间分辨率

面向国家重大需求：规划中的干涉光刻实验线站

相干光通过光栅衍射分光在光刻胶面干涉，获得比光栅周期更小的周期结构



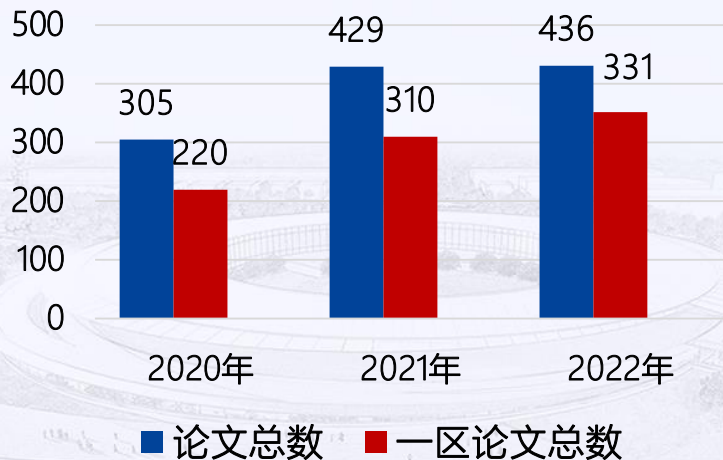
$$p = \frac{g}{2m}$$

p : 晶片上的周期
 g : 光栅周期
 m : 衍射阶次

- 衬度高、面积大、通量高
- 分辨高，理论极限分辨率: HP = **3.5 nm**@13.5nm
- 结构周期性好、重复性好

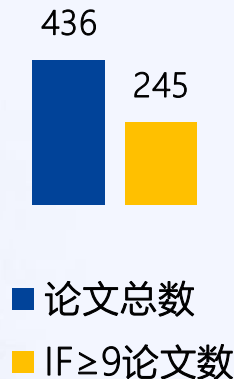
2022年成果产出

- 2022年成果产出稳定高质：发表文章**436篇**，其中一区论文**331篇**，占比**76%**（包括Energy & Environmental Science、Advanced Materials等）

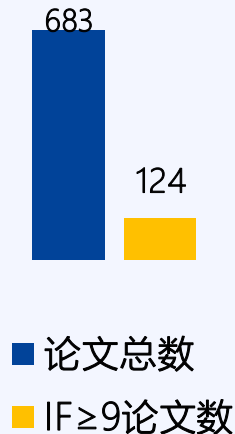


- 与国际先进光源相比，**IF \geq 9论文产出比更高**

合肥光源 2022
(10条光束线站)



法国SOLEIL光源 2021
(29条光束线站)



低能区光源性能依然是我国光源体系中的短板

合肥光源

0.8 GeV

低能光源

上海光源

3.5 GeV

中能光源

北京高能光源 (在建)

6.0 GeV

高能光源

四代光源

四代光源

三代光源

低能区高性能光源

真空紫外

软X射线 (SX)

初X射线

硬X射线 (SX)

伽马射线

能量/eV

6

500

5000

10 k

30 k

>100 k

初期预期每年全球用户3000人次，未来可达10000人次

我国光源现有实验线站

| | 线站总数 | | 软X光束线 | 实验方法 |
|------------------|------------------|----|----------------------|----------------|
| | 上海光源SSRF (三代) | 一期 | 7 | 08U |
| 二期 | | 16 | S ² | XMCD + ARPES |
| | | | E-line (分支) | XAS + XES |
| | | | D-line (分支) | IR |
| 其他 | | 12 | Dreamline | S-ARPES + PEEM |
| | | | ME ² -02B | NAP-XPS + XAS |
| | | | ME ² -03U | VUV-ARPES |
| 高能光源HEPS (四代) | 一期 | 14 | Beamline 12 | S-ARPES |

我国三、四代光源上共49条线站，仅有7条软X射线线站，严重不足，急需补足我国光源在低能量区实验技术的短板

更精确测量电子/化学/轻元素状态的广泛需求

物理与信息

- ◆ 科学前沿：高温超导等量子材料的机理
- ◆ 信息产业：变革性量子材料和器件研发
- ◆ 信息产业：光刻工艺研究和芯片超高分辨无损探伤
- ◆ 信息产业：磁性和自旋存储器件集成

化学与化工 能源

- ◆ 化工：工业催化剂的开发
- ◆ 能源存储：大容量锂电池研发
- ◆ 燃烧动力：新型航空发动机的研制
- ◆ 能源转换：光-电转化材料和器件研发
- ◆ 能源开发：剩余油开采

关键材料

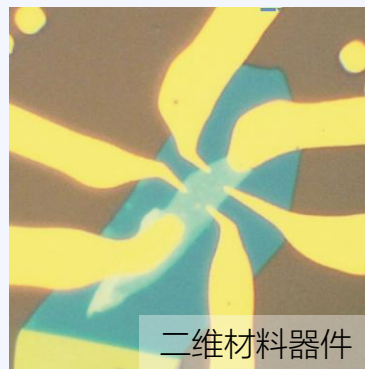
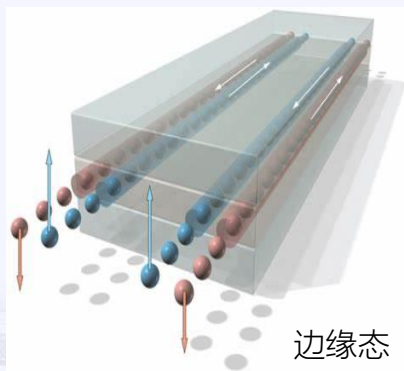
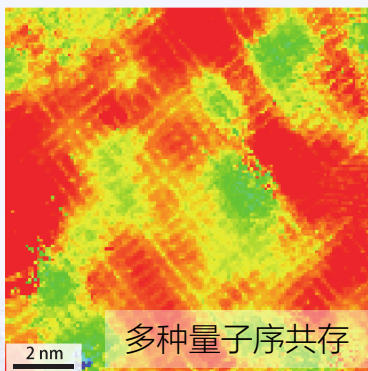
- ◆ 膜功能材料：海水淡化分离膜，燃料电池膜和锂电池隔膜
- ◆ 航空航天：大飞机关键轻质材料研发
- ◆ 稀缺资源：稀土赋存形态研究
- ◆ 国家安全：XXX腐蚀的微观机制

生命与健康 环境保护

- ◆ 科学前沿：细胞成像、蛋白质折叠
- ◆ 健康：退行性神经疾病机理
- ◆ 农业：农药研发、微量元素分布等
- ◆ 环境保护与食品安全：重金属污染的形成、循环和防治

量子材料前沿的重大需求：机理和变革性器件

- ◆ 量子材料包含丰富的现象和未解的重大难题，是凝聚态物理的前沿
- ◆ 量子材料器件研究是未来量子信息、超导电子学、自旋电子学、新型传感器的基础



量子材料和器件有复杂的微结构，目前难以看清电子态的精细结构、工况下电子和自旋状态的分布，阻碍了对高温超导机理等重大难题的突破、以及对器件性能和工艺的高效优化。

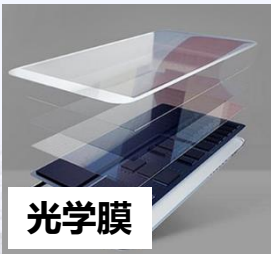
材料领域重大需求：关键轻质材料的研发

缺显示、机身和轮胎的大飞机
怎能自由飞翔？



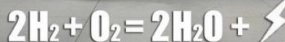
高强度碳纤维

航空橡胶



光学膜

氢燃料电池膜



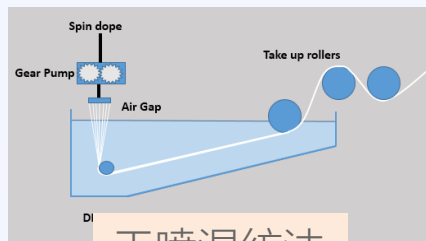
5G天线膜



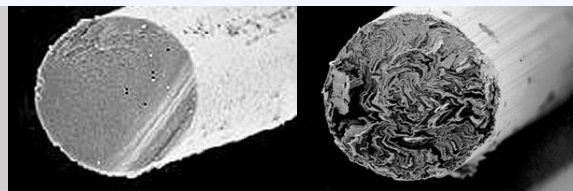
水处理膜

我国高端轻元素材料几乎完全依赖进口，是众多

产业和国家需求的“卡脖子”材料！



干喷湿纺法



无定形碳纤维

高模碳纤维

轻元素材料的生产工艺极其复杂。当前技术看不清其在加工、服役过程中多尺度结构演化过程，无法精确判断构效关系，研发靠“碰”，效率极低！

第四代同步辐射光源将极大提升复杂体系探测能力

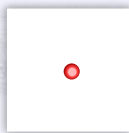
四代



MBA

极低电子束发射度 $< \lambda/4\pi$, 达到衍射极限

光斑



点光源, 亮度 $\sim 10^{21-22}$

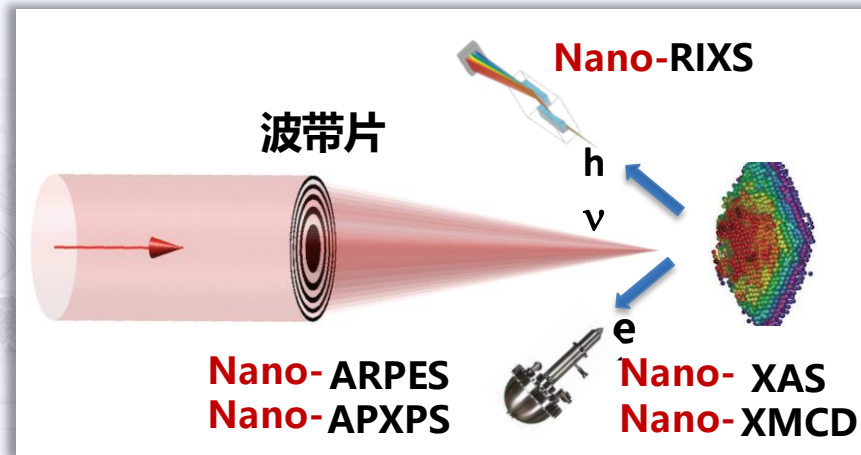
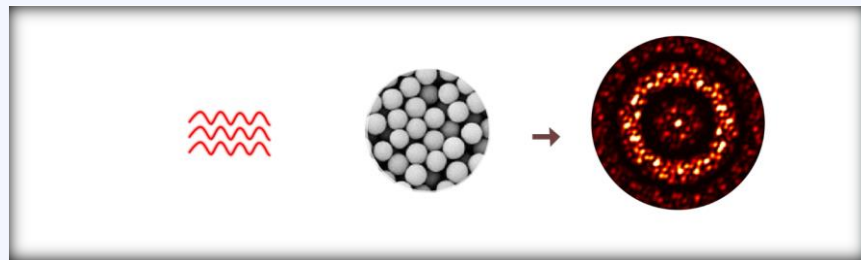
相干度



$\sim 30\%$

均比三代光源高100-1000倍!

相干散射成像(CDI)



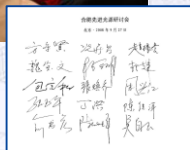
低能区四代光源立项建设过程

2006-2017
谋划部署

2017-2020
预研实施

2020-2023
立项审批

2023-2028
工程建设



2008.9, 北京
新光源研讨会

中国科学技术大学国家同步辐射实验室
中长期发展规划纲要
(初稿)



中国科学技术大学
国家同步辐射实验室
二〇〇七年十二月



2021.2, 北京
“十四五”立项答辩

“十四五”国家重大科技基础设施

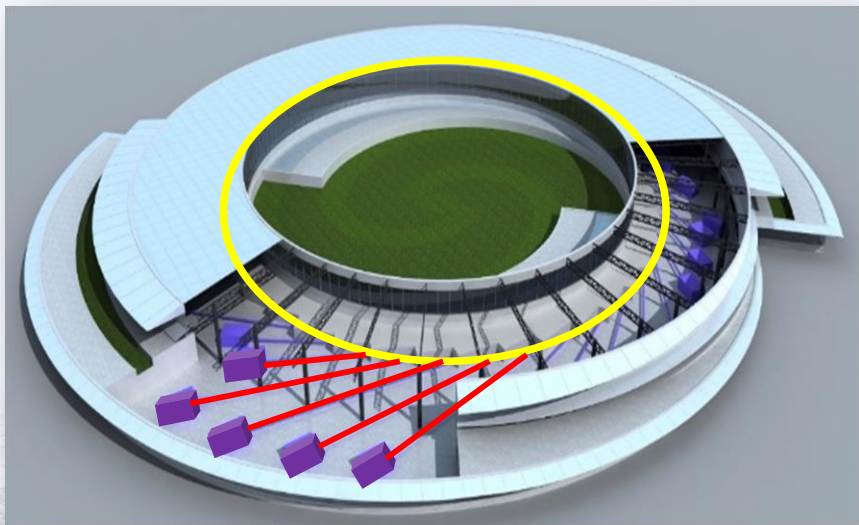
合肥先进光源
项目建议书

主管部门：中国科学院
项目法人单位：中国科学技术大学
联系人：舒尔杰
联系电话：0551-63602916
E-mail地址：dlfeng@ustc.edu.cn

二〇二〇年六月

合肥先进光源 Hefei Advanced Light Facility (HALF)

周长480米、2.2GeV衍射极限储存环



首批10条光束线和实验站
光子能量优化于软X射线波段

工程目标

国际先进、低能量区第四代

同步辐射光源

工期64月

初设批复概算27.8亿元

科学目标

实现复杂体系电子态/化学
态/轻元素结构的精确测量

合肥先进光源 工程进度计划



国家发改委
完成初概评
审并批复
2023.3

项目启动

2023.6

施工许可
证下发
2023.9

奠基仪式
土建开工
2023.9

科大建校65周年

测试大厅、能源中心交付
2024.7

直线结构验收
2024.9

光源主体结构验收
2025.2

直线坑道交付
2025.7

注入器完成设备加工，开始离线调试
2025.5

注入器设备开始安装
2025.7

储存环完成设备加工，开始离线调试
2025.9

储存环设备开始安装；线站
离线安装调试
2026.1

储存环小束流情况下，6台波
荡器固定gap稳定出光；光束
线开始小束流同步光调试
2027.3

光源主体建筑竣工
验收、交付
2026.1

注入器设备安装完成，开始总调
2026.7

线站在线安装调试
2026.8

注入器完成总调；储存环设备
安装完成，开始总调
2026.12

注入器出束
2026.9

储存环完成总调，10台
波荡器稳定出光；
光束线、站开始联调
2027.11

储存环出光
2027.2

投入试运行，
首次用户实验
2028.5

项目竣工

2028.10

科大建校70周年

- ★ 里程碑
- 📍 关键节点
- 📍 工程节点

总工期64个月

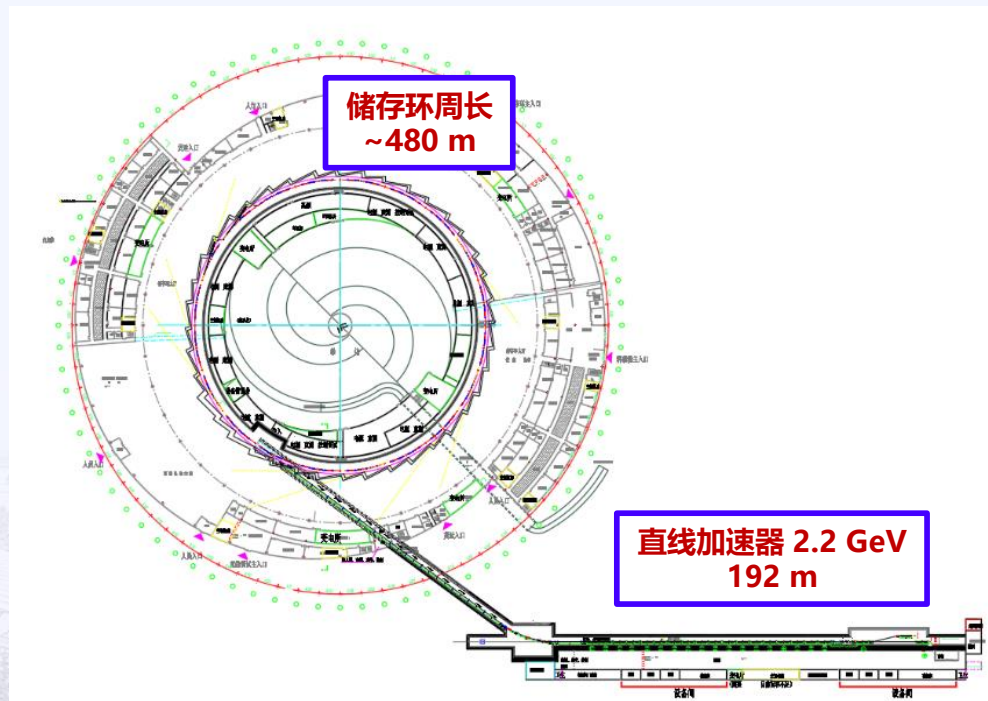
加速器总体方案

□ 注入器

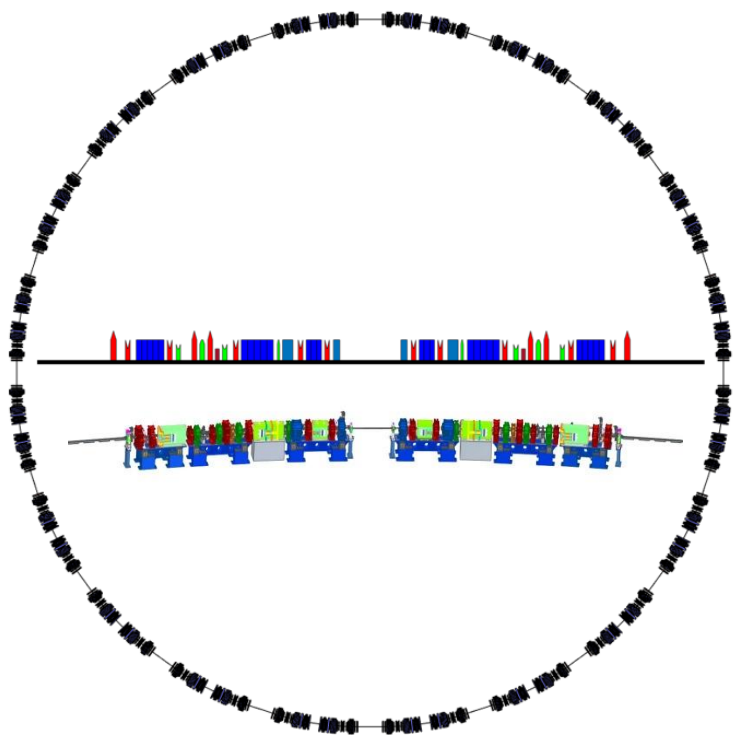
方案：采用基于S波段等梯度行波直线加速器的满能量注入器方案。电子束由热阴极直流高压电子枪产生，经过直线加速器加速，能量提升到2.2 GeV。束流经过束流输运线被注入到储存环。

□ 电子储存环

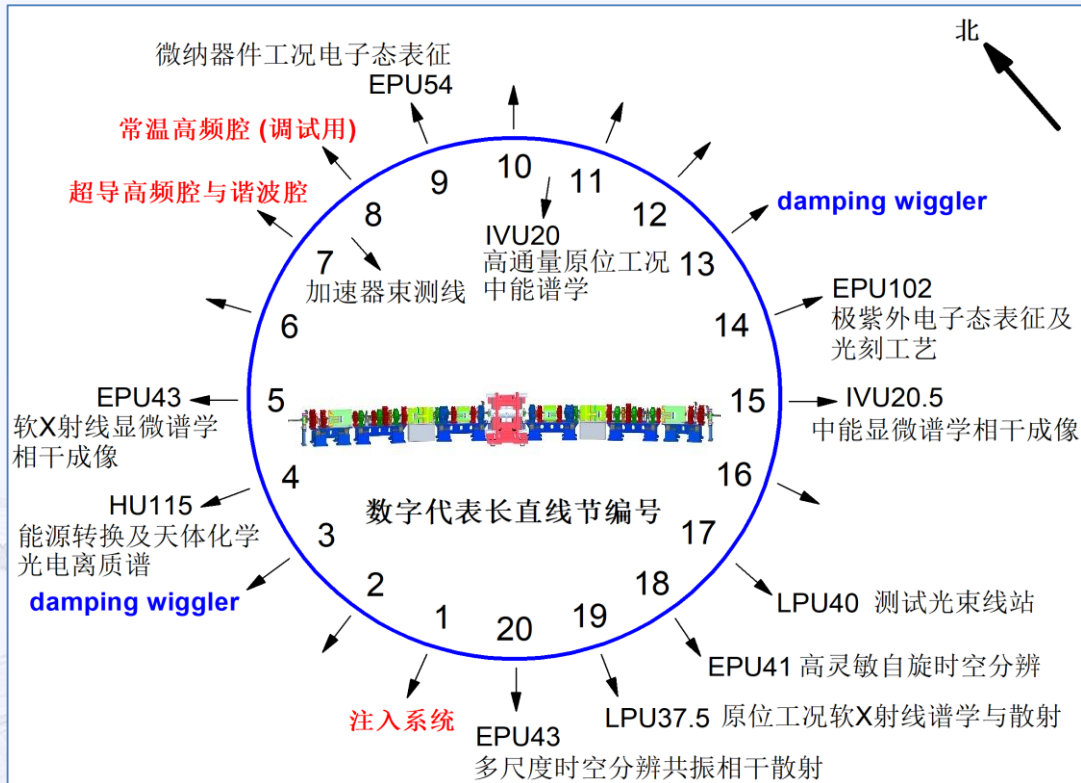
方案：衍射极限储存环采用20个全周期6-弯转磁铁消色散（6BA）结构，局部凸轨注入方式，高频系统使用500 MHz超导高频腔，利用高次谐波腔抑制耦合束团不稳定性和减弱束内散射效应。全环共40个直线节。



储存环布局



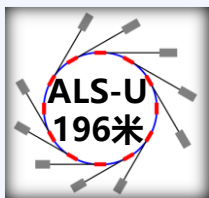
储存环磁铁布局



直线节元件布局

综合指标国际先进

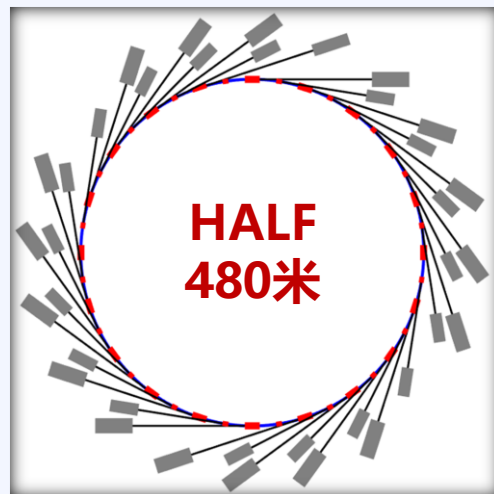
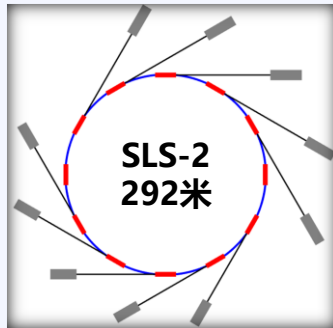
美国



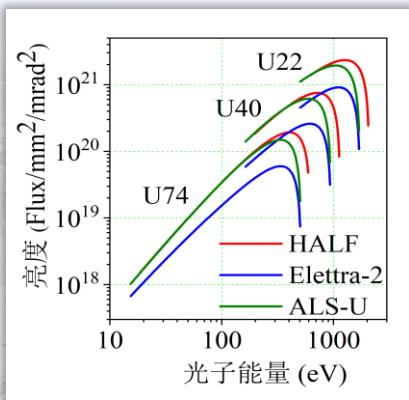
意大利



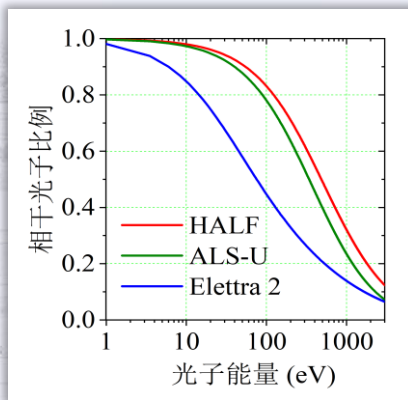
瑞士



低能量区亮度最高



相干性最好

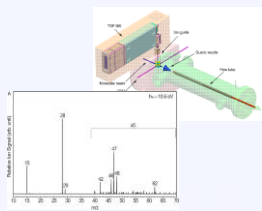


- ◆ 直线节数目最多、最长、占比最高
- ◆ 支撑用户能力最强、性价比最高
- ◆ 充分发挥四代光源优势

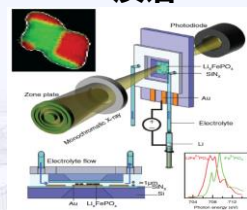
合肥先进光源的科学目标

实现复杂体系电子态/化学态/轻元素结构的精确测量

谱学
多维度电子结构

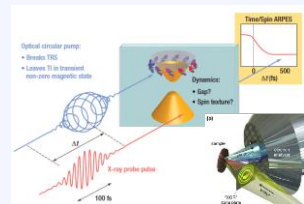


质谱

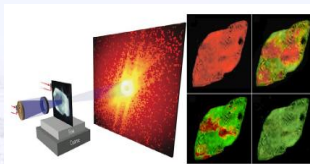


扫描显微

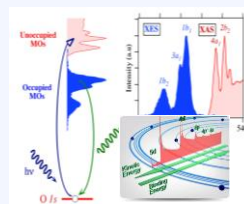
成像/衍射
单颗粒结构成像



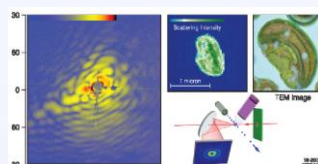
nano-ARPES



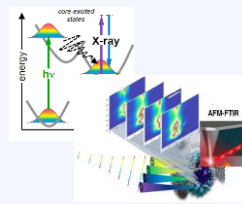
叠层成像



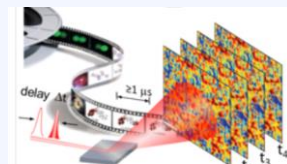
芯能级谱学



相干衍射



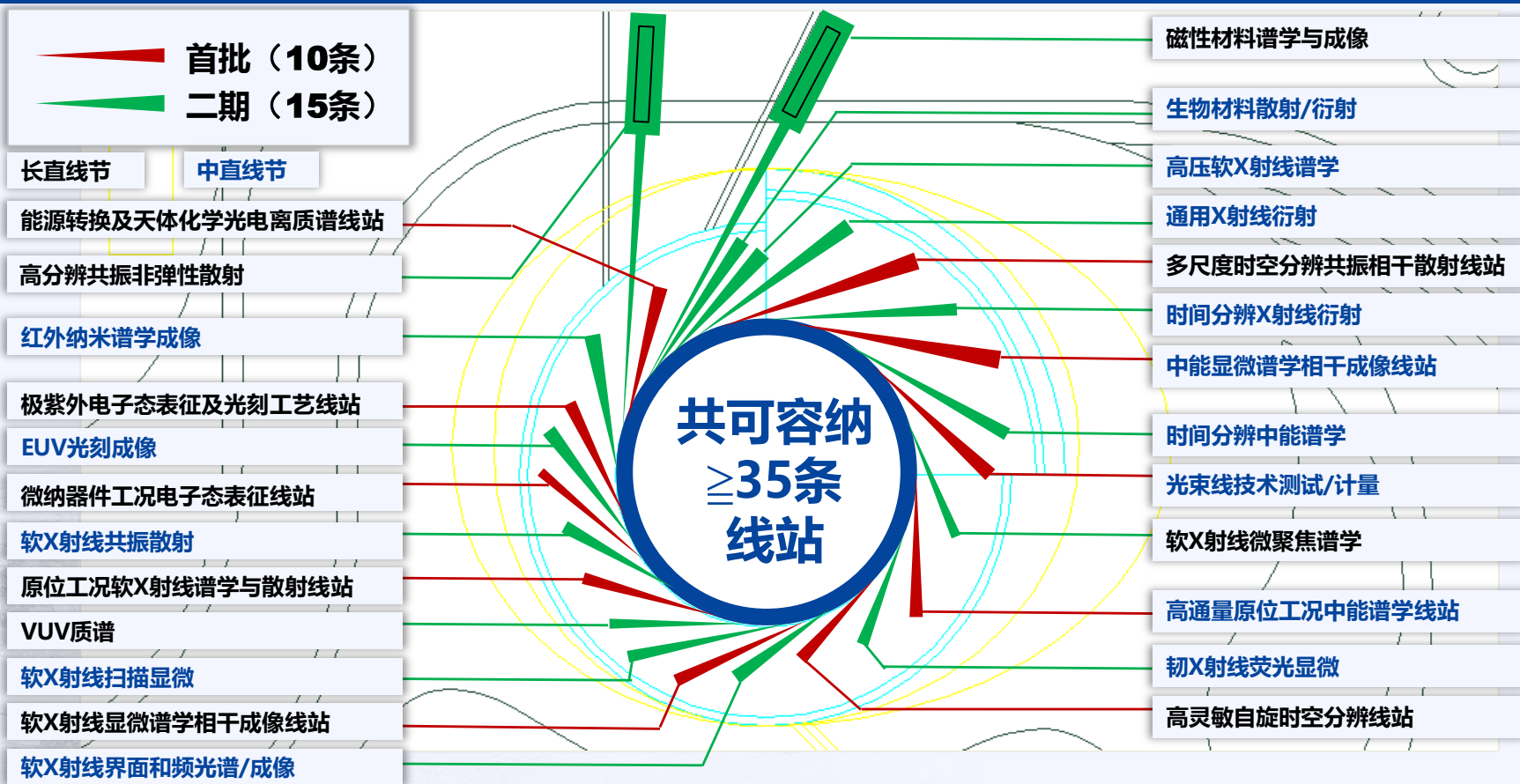
RIXS/REXS



XPCS

发挥第四代同步辐射高亮度、小光斑、高相干性的优势，在能量、动量、空间、时间等维度提升谱学、成像、衍射技术的探测精度，并形成新的实验方法

光束线站一次规划、分步实施



高水平用户科学家全程参与

聚集国内外高水平用户和线站科学家，含建制化平台/新基石/院士团队30个

BL01 能源转换及天体化学光电离质谱

齐飞(上海交大)、杨斌(清华)、高蕪(化学所)
潘秀莲(大连化物所)、杨涛(华东师大)

BL02 极紫外电子态表征及光刻工艺

丁洪(上海交大)、罗锋(南开)、封东来(中国科大)
张焱(北大)、史明(PSI)

BL03 微纳器件工况电子态表征

陈宇林(牛津)、徐海超(复旦)、黄耀波(物理所)
乔山(上海微系统所)、杨乐仙(清华)、王美晓(上科大)

BL04 高灵敏自旋时空分辨

沈保根(物理所)、陈仙辉(中国科大)、吴义政(复旦)
牛宇然(MAX IV)、张冠华(大连化物所)、栗佳(北大)
曹杰峰(上海高研院)、叶茂(上海微系统所)

BL05 原位工况软X射线谱学与散射

李泓(物理所)、马丁(北大)、周克瑾(Diamond)、孙旭辉(苏大)
柳学榕(上科大)、刘啸嵩(中国科大)、岑俊江(加拿大西安大略大学)
朱苏云(MAX IV)、张亮(苏大)、章辉(上海微系统所)

BL06 软X射线显微谱学相干成像

李亚栋(清华)、樊春海(上海交大)、俞书宏(中国科大)
禹习谦(物理所)、王建(加拿大光源)、张福才(南科大)
周亮(北方光源)、许子健(上海光源)、苗庆庆(中国科大)

BL07 多尺度时空分辨共振相干散射

门永锋(长春应化所)、李良彬(中国科大)、洪亮(上海交大)
周亮(高能所)、刘烽(上海交大)、马伟(西安交大)
张石磊(上科大)、封东来(中国科大)、边风刚(上海光源)

BL08 高通量原位工况中能谱学

孙世刚(厦大)、包信和(中国科大)、贺弘(生态环境研究中心)
傅强(大连化物所)、刘志(上科大)、余彦(中国科大)、韩永(上科大)
张学强(北理工)、胡永峰(中石化上海研究院)、翁祖谦(上科大)

BL09 中能显微谱学成像

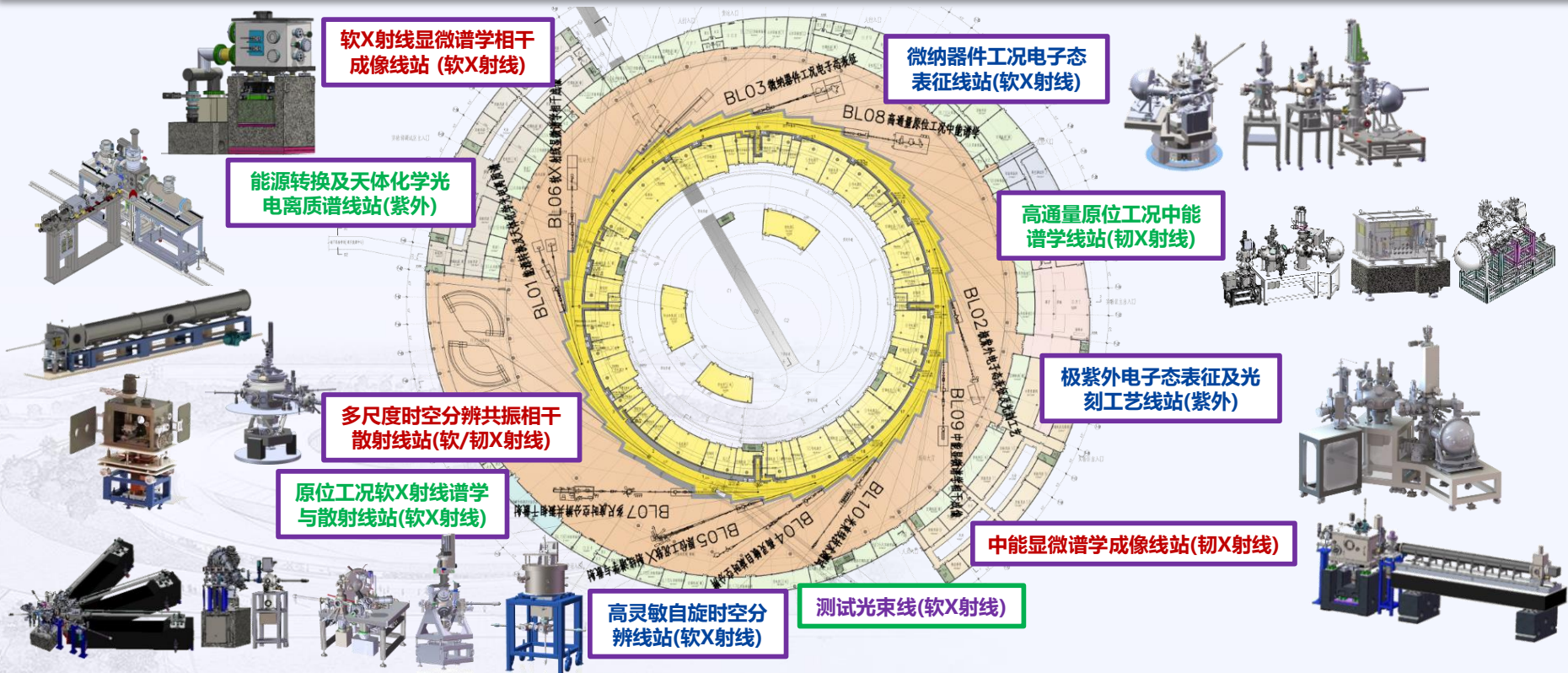
樊春海(上海交大)、陈春英(国家纳米科学中心)、陆现彩(南大)
吴爱国(宁波材料所)、王家钧(哈工大)、袁清习(北京高能所)
范家东(上科大)、邓彪(上海高等研究院)、陈波(同济)

BL10 测试光束线

王占山(同济)、李明(北京高能所)、李中亮(上海应物所)
罗红心(上海应物所)、黄秋实(同济大学)、佟亚军(上科大)

首批实验线站初步设计方案

线站规划-重点发展低能量区同步辐射实验方法，与我国其他光源形成技术互补



合肥先进光源首批线站及实验方法

| | 线站名称 | 能量/eV | 特色优势 | 主要实验方法 | 备注 |
|----|------------------|-----------|---------------------------|------------------------------|--------------|
| 1 | 能源转换及天体化学光电离质谱线站 | 5-20 | 气相反应中间体的高灵敏度探测 | 光电离质谱 | 小光斑 |
| 2 | 极紫外电子态表征及光刻工艺线站 | 6-135 | 兼顾高能量分辨和高空间分辨 | 真空紫外角分辨光电子能谱 | 高亮度 |
| 3 | 微纳器件工况电子态表征线站 | 80-1000 | 高空间分辨、自旋分辨、工况条件 器件电子结构 | 纳米分辨角分辨光电子能谱 软X射线角分辨光电子能谱 | 小光斑 |
| 4 | 高灵敏自旋时空分辨线站 | 250-2000 | 高时空分辨、高灵敏度的磁性测量 | X射线磁圆二色 光电子显微谱学成像 | 高亮度/ 高相干性 |
| 5 | 原位工况软X射线谱学与散射线站 | 180-2500 | 真实反应条件下的高精度电子结构 | 近常压光电子能谱 共振非弹性散射 | 小光斑/ 高亮度 |
| 6 | 软X射线显微谱学相干成像线站 | 250-2500 | 高空间分辨化学成像 | 扫描透射X射线成像 叠层相干衍射成像 | 高相干性 |
| 7 | 多尺度时空分辨共振相干散射线站 | 250-4000 | 多尺度结构动力学研究 | X射线光子关联谱 软X射线共振散射 | 高相干性 |
| 8 | 高通量原位工况中能谱学线站 | 2300-8000 | 工况条件器件电子结构 | 韧X射线光电子能谱 韧X射线吸收/发射谱 | 高亮度 |
| 9 | 中能显微谱学成像线站 | 2100-8000 | 高空间分辨化学成像 | X射线显微谱学成像 叠层相干衍射成像 | 高相干性 |
| 10 | 测试光束线站 | 250-2000 | 波动光学、关键光学器件的检测 | | 高亮度 |

自旋电子材料表征线站

科学目标：自旋电子学材料的磁性存储和电子特性研究

服务领域：物理、量子信息、自旋电子学

◆ 能量范围

250-2000 eV

◆ 表征方法

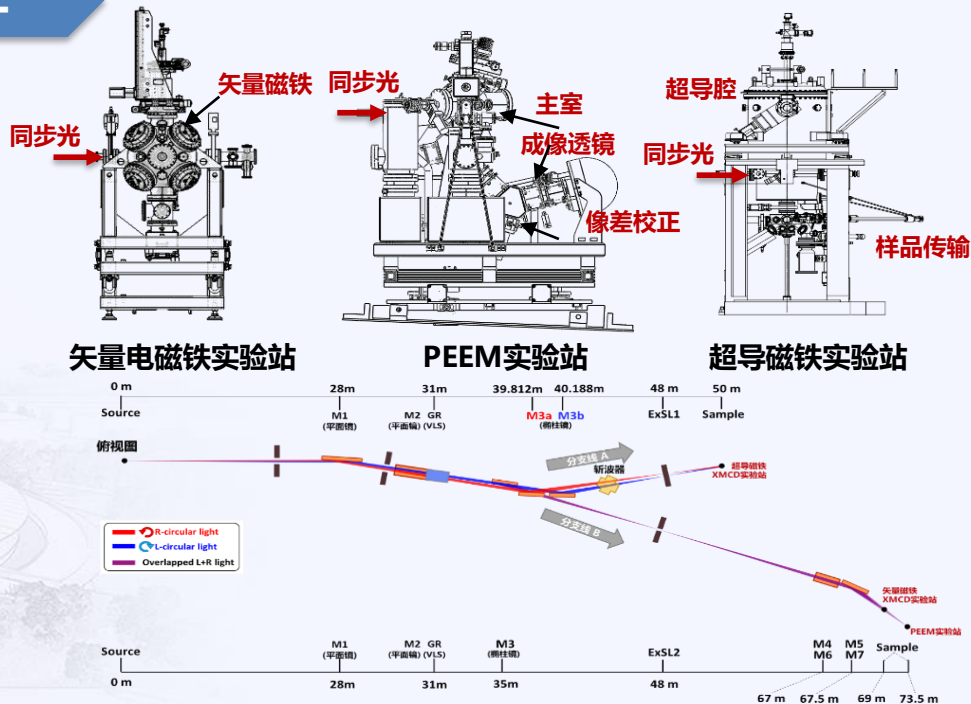
XMCD/XMLD, XPEEM, XFMR

◆ 线站特色

- 集成多种磁性表征技术
- **融合空间分辨和时间分辨**
- 多维度、多场条件

◆ 先进性

- 磁矩探测极限灵敏度为**万分之一 μ_B** 变化
- 谱学空间分辨率： **$\sim 5 \mu m$** ，提升近20倍



能源催化原位谱学与散射线站

科学目标：能源存储与转化的机理及应用研究

服务领域：双碳、新能源、新材料、绿色环保

◆ 能量范围

180-2500 eV

◆ 表征方法

近常压光电子能谱 (NAP-XPS)

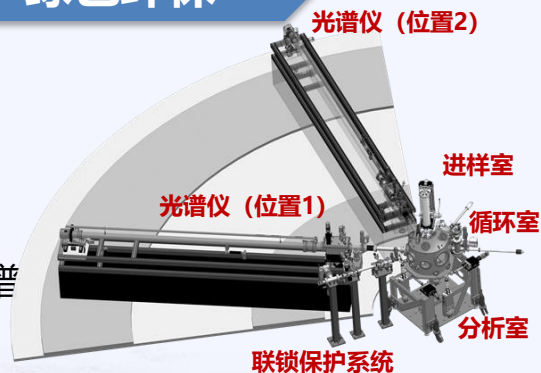
软X射线吸收谱/发射谱/共振非弹性散射谱
(XAS/XES/RIXS)

◆ 线站特色

- 集成多种软X射线谱学和散射技术
- 工况条件下材料的电子结构和化学态

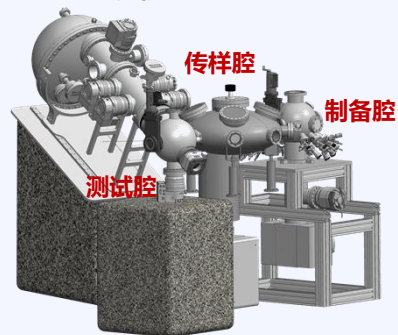
◆ 先进性

- NAP-XPS工作气压：100 mbar
- 首次实现电池工况条件下的RIXS测量
- 能量分辨：>10000

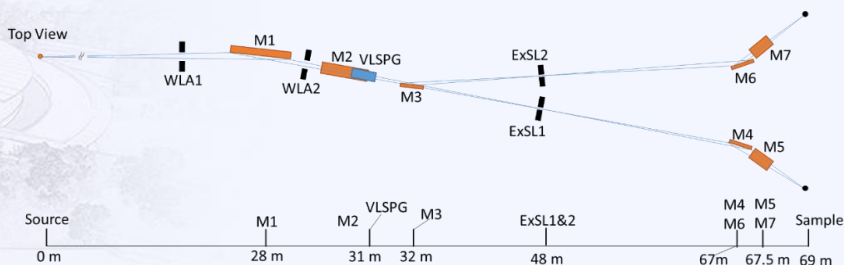


in-situ RIXS实验站

HiPP-3能量分析器



NAP-XPS实验站



软X射线谱学显微成像线站

科学目标：化学态纳米空间分布与生命活动、材料性能关系研究

服务领域：脑科学、生命健康、新能源、新材料

◆ 能量范围

250-2500 eV

◆ 表征方法

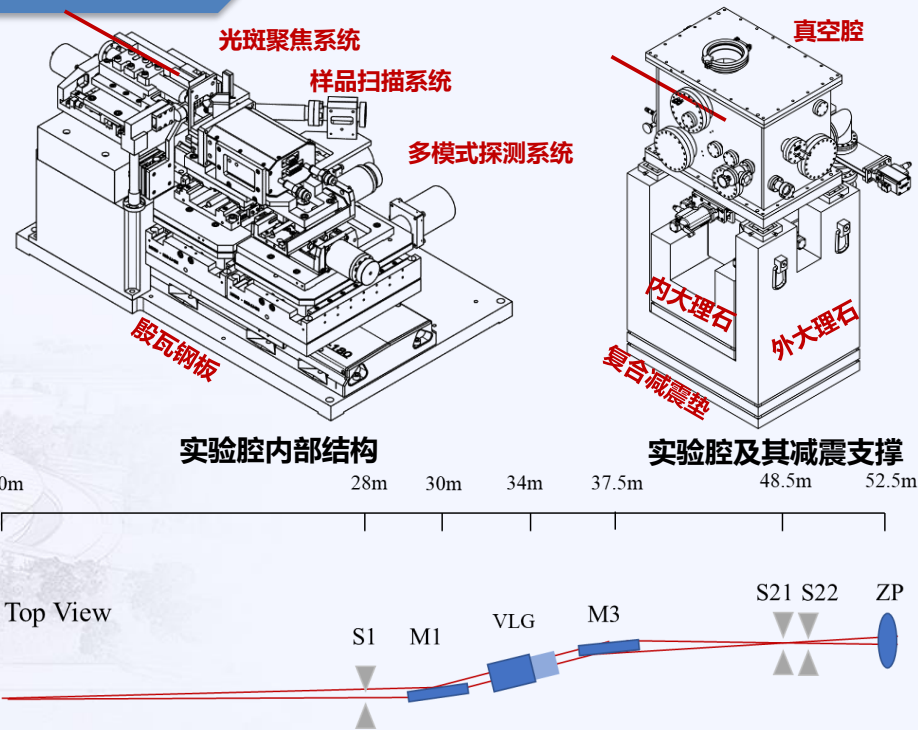
Ptychography, STXM

◆ 线站特色

- 集成多种软X射线谱学显微成像技术
- 多种样品环境
- 空间/化学/取向分辨

◆ 先进性

- 成像空间分辨率：**~3 nm**
- 比三代高3倍
- 成像效率比三代高**~ 2量级；秒量级**



后续线站建设方案征集

合肥先进光源后续建设线站提案征集

*1. 您的姓名

*2. 您的单位

*3. 您的联系方式：电话或Email

*4. 您需要研究的具体问题

*5. 您所研究问题的属性【多选题】

- 面向世界科技前沿
- 面向经济主战场
- 面向国家重大需求
- 面向人民生命健康
- 关键卡脖子问题

*6. 问题所属领域【多选题】

- 物理
- 化学
- 生物与医学
- 地质与环境
- 工程与材料
- 信息
- 产业研发 (请填写具体产业领域)
- 其他领域

所属领域

*7. 您需要利用的实验技术【多选题】

- IR
- ARPES
- XAS
- XPS
- XES
- RIXS
- 其它[] (请填写具体技术名称)
- STXM
- TXM
- Ptychography
- CDI
- 其它[] (请填写具体技术名称)
- 薄膜衍射
- 高分辨粉末衍射
- 广角散射
- 小角散射
- 共振散射
- X射线光子关联谱XPCS
- 其它[] (请填写具体技术名称)

实验技术

*8. 您需要利用的光子能区【多选题】

- 红外
- 真空紫外
- 软X射线
- 中能X射线
- 其它能区[] (请填写您需要的光子能区)

光子能区

*9. 您需要利用同步光源何种属性【多选题】

- 相干性
- 通量[] (请填写具体值)
- 光斑大小[] (请填写具体值)
- 能量分辨率[] (请填写具体值)
- 偏振[] (请填写具体值)

侧重指标

*10. 您需要哪些原位实验条件【多选题】

- 光照[] (请填写具体值)
- 电场[] (请填写具体值)
- 磁场[] (请填写具体值)
- 温度[] (请填写具体值)
- 压力[] (请填写具体值)
- 气氛[] (请填写具体值)
- 液体环境[] (请填写具体值)
- 其它[] (请填写具体值)

实验条件

*11. 如您有其它建议，请在下面空格处填写

提交

NSRL 中国科学院大学 国家同步辐射实验室
首页 NSRL概况 合肥光源 用户开放 科学研究 师资队伍 招生培养 人才招聘 党建工作 历史文化 联系我们

首页 - 新闻动态 - 公告通知 - 内容

合肥先进光源后续建设线站提案征集

发布时间: 2022-07-13



合肥先进光源 (Hefei Advanced Light Facility, 简称HALF) 是一台低能量区基于衍射相存储环的第四代同步辐射光源, 至少可容纳15束光管线, 首批规划建设10束光管线和17个实验站, 计划于2027年建成。

实验线站面向同步辐射光源科学目标(“用户终端”), HALF线站规划的核心是充分发挥低能区衍射相存储同步辐射光源在高度、相干性、能量时空分辨率方面的优势, 在空间、时间、能量等维度形成具有更高精度和灵敏度的新实验方法和技术, 对前沿科学和用户需求相关基础科学研究具有重要作用, 且HALF线站规划建设过程中, 来自国内外2000多家高校、科研院所和企业的专家、用户4000余人次参加了讨论, 提出了宝贵的意见和建议。

为统筹推进HALF线站筹建、规划建设周期, 中国科学院大学国家同步辐射实验装置启动HALF线站征集工作。

征集内容: 在HALF首批线站的基础上, 根据各领域用户关注的前沿科学问题和产业研究需求, 以及国际同步辐射光源实验技术和方法的发展趋势, 征集HALF后续建设线站的提案。

征集对象: 国内外同步辐射用户和在用户、线站科学家和工程师

征集方式: 点击下方按钮或使用微信扫描下方二维码进行填写

网页链接: <http://www.hsl.gov.cn/COLM010app>

二维码:



征集时间: 长期有效

联系方式: HALF工程办公室 Email: out@hsl.mec.edu.cn

补充说明: 我们会认真对待您的提案, 记录存档, 后期我们将邀请部分提案人参与线站的沟通、设计及相关建设工作, 并作为核心用户开展应用研究。

HALF基本情况

HALF主体包是一台全能量电子直线加速器, 一台周长400米的2.0 GeV电子储存环, 作为国际上先进的低能区基于衍射相存储环的同步辐射光源, HALF的建设将填补我国高能区第四代同步辐射光源的空白, 使我国成为少数建成全能量同步辐射光源体系的国家, HALF将面向世界科技前沿、经济主战场、国家重大需求和人民生命健康, 为国家战略科技力量的提升, 发挥“国之重器”和“科技利器”的作用, 全面支撑我国基础科技发展、创新能力建设、战略新兴产业发展和综合国力提升。

科学目标

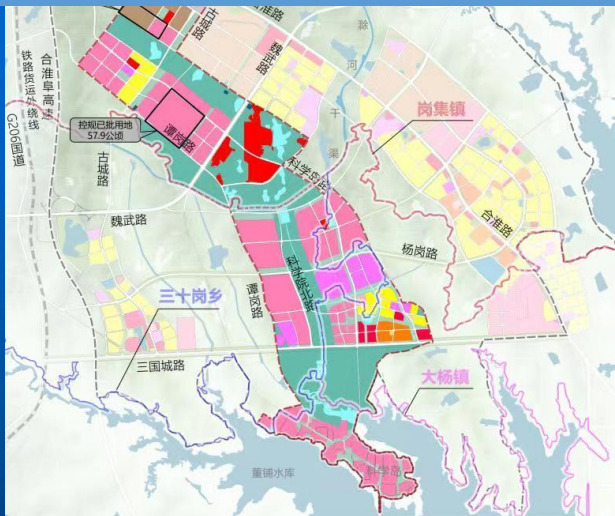
充分发挥低能区衍射相存储同步辐射光源在高度、相干性、能量和时空分辨率方面的优势, 在空间、时间、能量等维度形成具有更高精度和灵敏度的实验方法, 将研究范围向“海量数据驱动的智能诊断和生物体系在非平衡态或真实反应条件下的动态变化过程”推进, 实现对非均匀的复杂体系电子、化学、自旋态的精确测量, 聚焦变革性量子材料、磁性与非磁存储器件、集成电路芯片无损检测、能源存储材料的关键材料与交互过程、微纳与催化机理、航空航天关键轻量化材料、重大灾害治理、重金属污染的形成与防治、石油开采、基础能源领域的解构形式等基础科学、产业应用和国家战略需求领域的关键科学问题, 并攻克重大难题。

长期征集方案

二期十五条线站建设规划

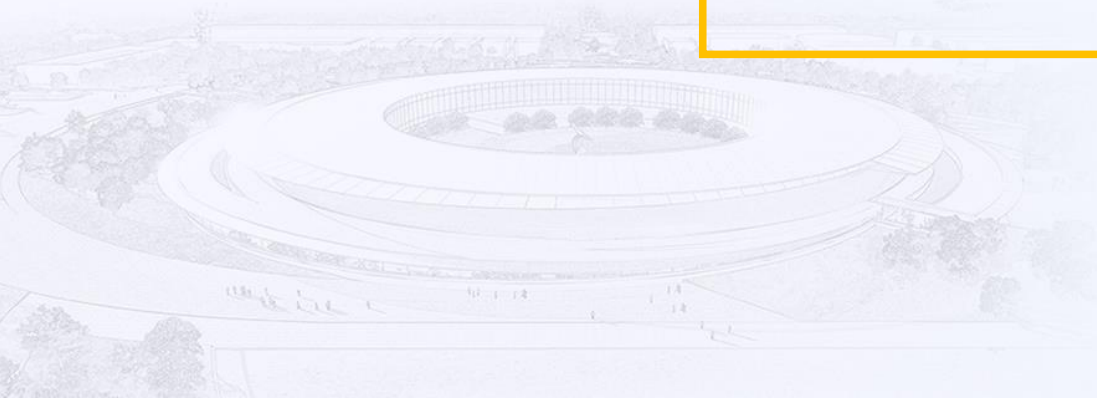


合肥先进光源位于大科学装置集中区 (未来大科学城)





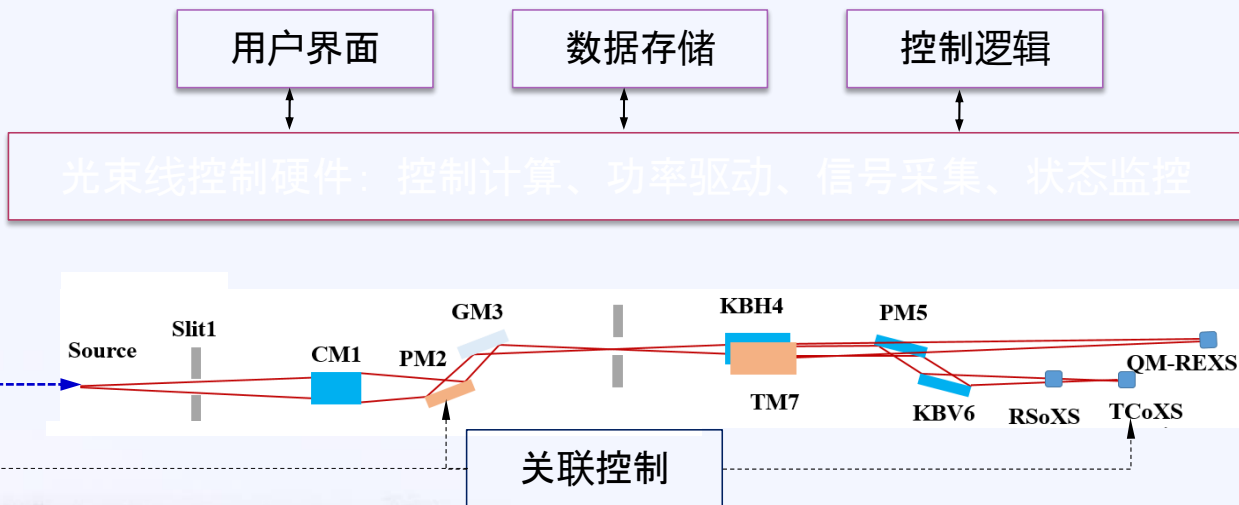
新一代光源对核电子学的需求



加速器束流探测现状及需求

| 需求 | 当前典型仪器 (逐圈) 参数 | 下一代仪器 (逐束团) 需求 |
|------------|-----------------------------|--|
| BPM信号处理器 | 窄带带通欠采样, 四通道 | 低通射频直接采样, 四通道 |
| | FPGA + ADC (125MHz/16 bits) | FPGA + ADC (1GHz/16 bits) |
| 束损信号处理器 | 基带低通采样, 四通道 | 基带低通采样, 四通道 |
| | FPGA + ADC (125MHz/16 bits) | FPGA + ADC (5GHz/10 bits) |
| 逐束团束流反馈控制器 | 模拟下/上变频, 中频采样处理 | 低通/带通射频直采, 两通道 |
| | ADC + FPGA + DAC (500MHz) | ADC + FPGA + DAC (1GHz) |
| 同步光信号处理器 | 无 | 逐束团, > 16通道 |
| | | FPGA + ADC (500MHz) |
| LLRF控制器 | 模拟下/上变频, 中频采样处理 | 射频直采, 射频处理, 射频输出 |
| | ADC + FPGA + DAC (~ 100MHz) | ADC + FPGA + DAC (~ 1GHz) |
| 轨道快反馈控制器 | 无 | 多输入 (> 8通道RocketIO), 多输出 (>16通道 DIO), FPGA反馈算法 |

光束线数据采集-监测-诊断-反馈-控制



设备控制：单色器，光学反射镜、原为设备及探测器等

安全联锁：设备保护，人身保护

光束诊断：通量、位置、能量等

监测存储：温度、真空、水流以及设备状态等

实验控制：实验逻辑，数据采集与处理等

数据获取：

- 光束位置
- 光束通量
- 实验数据

实验站探测器需求

通用软X射线探测器

光电倍增管
多通道板
光电二极管
固态探测器
TES、STJ
.....



前置放大器:

5 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 输入噪声
1 MHz 最大带宽
1 pA/V 最大放大率

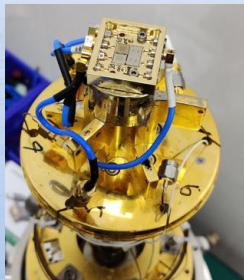
读出电子学:

外部触发
数据时间戳
10 MHz采样
50K数据点存储



高性能软X射线面探测器

能量范围: 200–1000 eV
空间分辨: 像素尺寸 $\leq 5 \mu\text{m}$
探测效率: 量子效率高于60%
读取速率: $> 1\text{K fps}@ 4\text{K} \times 4\text{K}$
读出噪声: 低于 $3 e^- (\text{RMS})$
真空兼容: 10^{-4} – 10^{-7} Pa



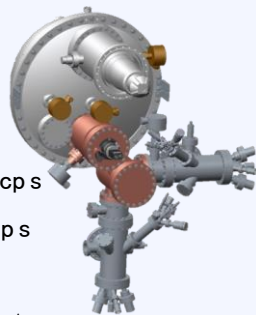
@ SIM IT

能量范围: 优于100–4000 eV
感光线宽: $\leq 2 \mu\text{m}$
占空比: $\geq 50\%$
光响应时间: $\leq 1 \text{ ns}$
计数率: $\geq 100 \text{ kHz/像素}$
读取噪声: 几乎无背底

高分辨电子能量分析器

自旋电子能量分析器

能量通道 > 1000
角度通道 > 750
单通道平均噪声 $< 0.01 \text{ cps}$
总能量通道总噪声 $< 2 \text{ cps}$
单像素动态范围 $> 7 \text{ bit}$
信息读取速率 400 Mbit/s



角分辨电子能量分析器

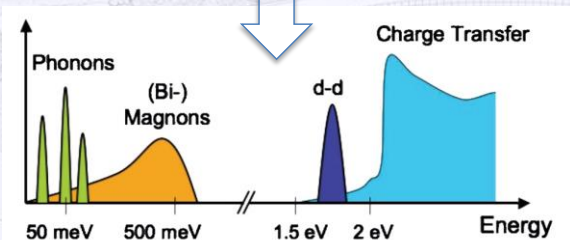
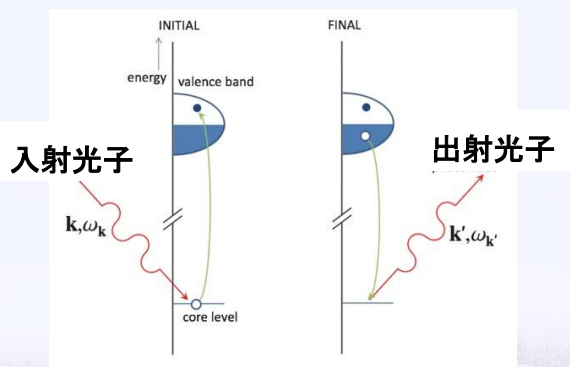
焦距调节范围 $200 \mu\text{m}$
能量范围 0.5–1500 eV
能量分辨率 $< 1 \text{ meV}@ 12 \text{ eV}$
扫描接收角度范围 $\pm 19^\circ$
总读取噪声 $< 2 \text{ cps}$



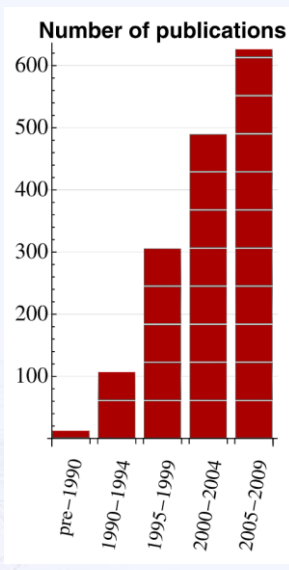
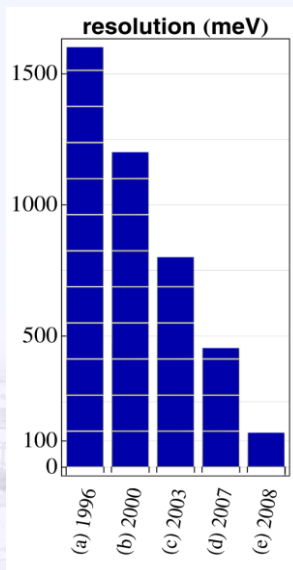
实例：RIXS — 电子结构精密测量

- RIXS-共振非弹性散射是探测电子结构和各种元激发的重要手段

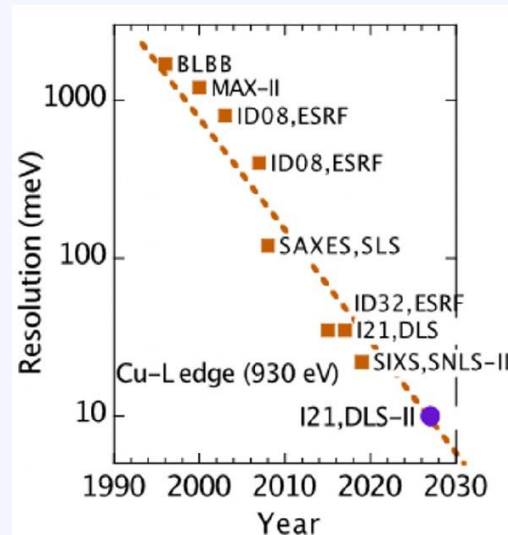
RIXS的物理过程



元激发的能量尺度



RIXS能量分辨从> 1000m eV提升到100m eV, 带来了诸多的新发现

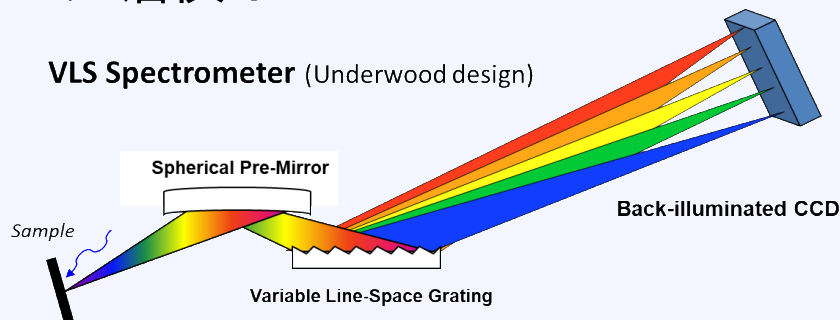


RIXS能量分辨率已经< 100 m eV

未来10年预计达到< 10 m eV

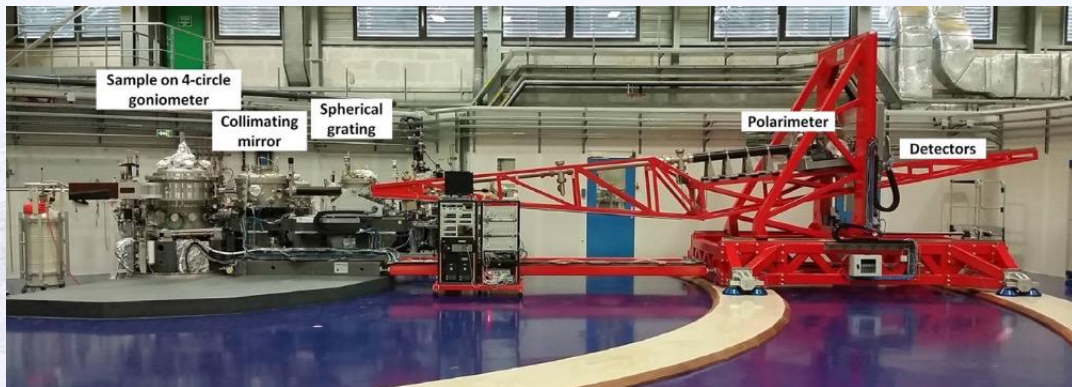
RIXS技术对探测器的需求

■ RIXS光谱仪原理



探测器的像素尺寸是决定光谱仪能量分辨率的重要因素

| 探测器类型 | 像素尺寸 |
|--------|----------------------|
| 硅像素探测器 | 几十 μm |
| 光学传感器 | $\sim 10\mu\text{m}$ |

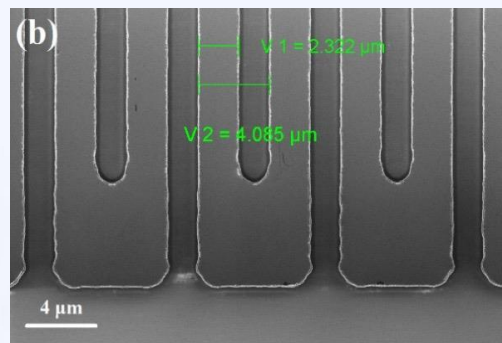
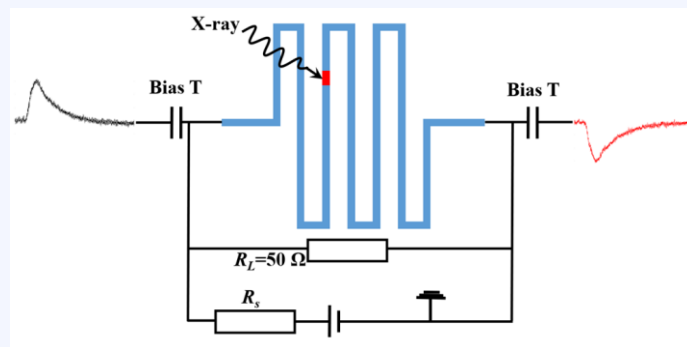
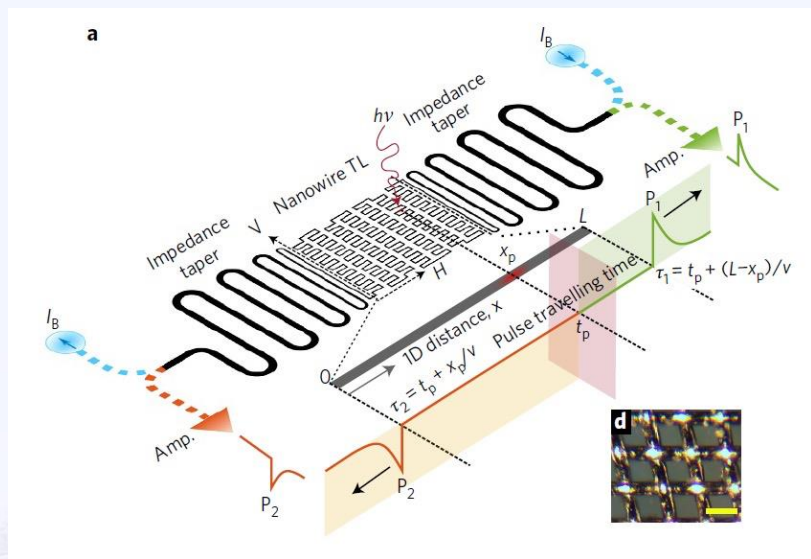


现有探测器的像素尺寸 ~ 10 微米。若想达到 < 10 meV的能量分辨，需要增大光栅到探测器的距离。

目前，主流的高分辨RIXS光谱仪的**长度 > 10 米**，对真空、机械、稳定性等方面要求极高，已经达到极限！

■ 研发更小像素的光子探测器是进一步提高RIXS能量分辨率的关键

新一代RIXS探测器



基于超导微/纳米线的单光子探测器

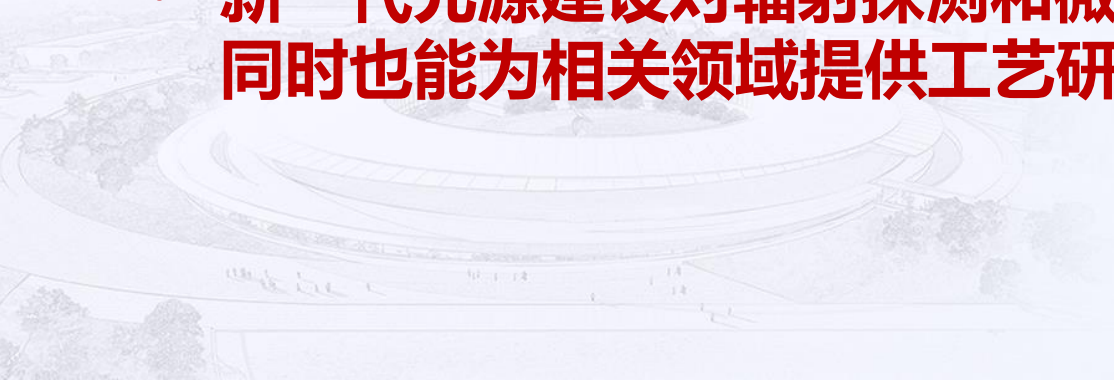
- 延时线原理，双端读出
- 高空间分辨，线宽和占空比决定
- cm级大面积

Nat. Photon. 11, 247–251 (2017)

线宽可以达到微米-百纳米量级，有望在~3米长的RIXS光谱仪实现<10 meV能量分辨

总结

- **我国已初步建成全能区覆盖的同步辐射光源体系**
- **合肥先进光源将补齐我国低能区光源的短板**
- **新一代光源建设对辐射探测和微电子领域有迫切的需求，同时也能对相关领域提供工艺研发及测试验证平台**





国家同步辐射实验室
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

Hefei Advanced Light Facility

合肥先进光源—探索微观世界之眸



谢谢!