



高能同步辐射光源
High Energy Photon Source | HEPS



同步辐射X射线探测器研发

董宇辉

中国科学院高能物理研究所



2026年8月10日 NED2026

汇报内容

01 探测器类型

02 X射线PAD

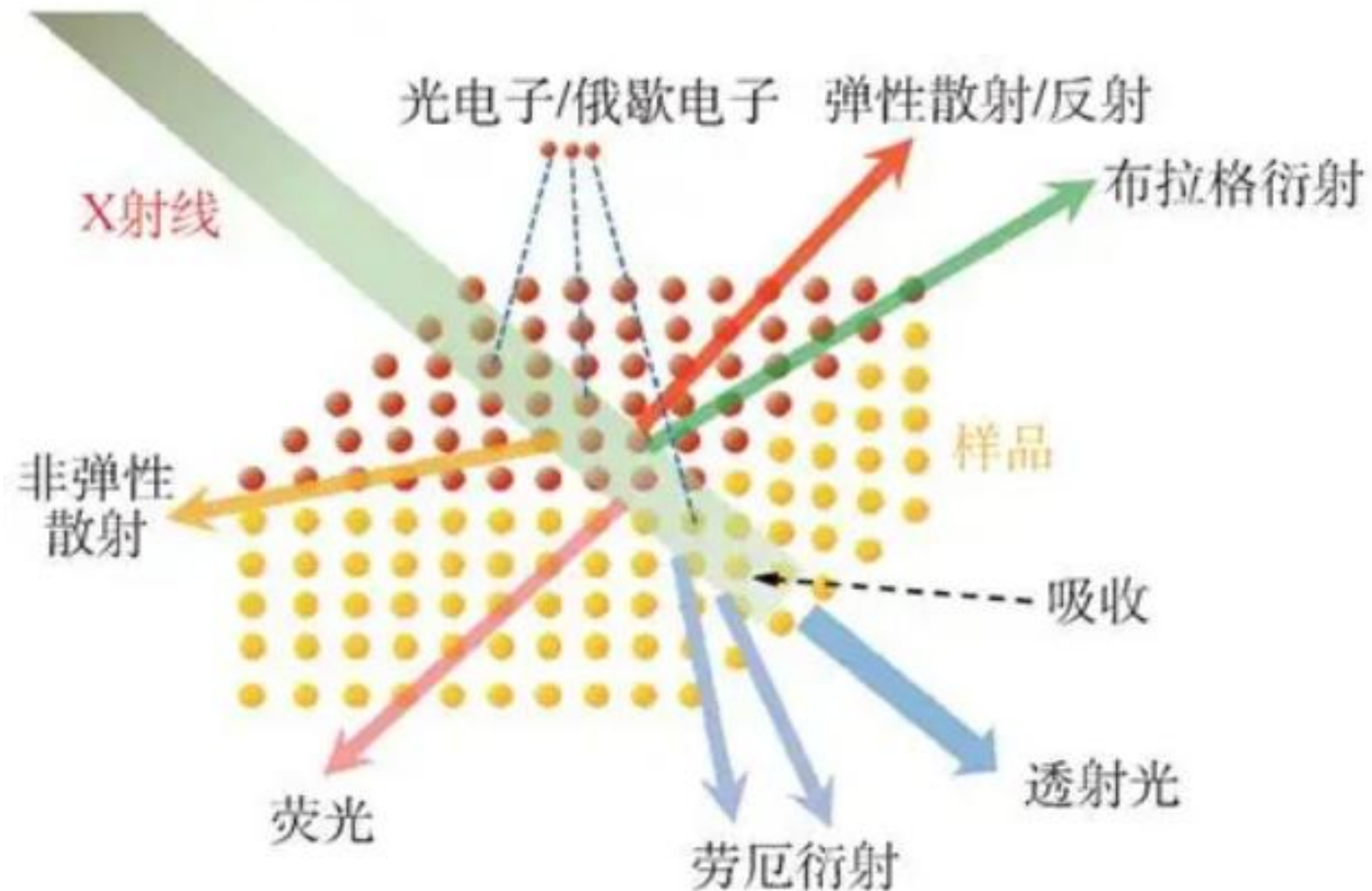
03 其它类型的探测器

04 发展规划



探测器的类型





- ◆ 入射X射线与样品（主要是电子）相互作用
- ◆ 探测出射的光子（少数情况是电子）
- ◆ 光子/电子的空间、能量、动量分布（探测空间）
- ◆ 推测样品中的状态：原子、电子、声子等准粒子
- ◆ 物理量在样品空间的分布



- 可以从两个维度进行分类。

- 维度一：实验方法（探测什么信号）

- ◆ 衍射/散射：探测能量不变的光子在空间的分布

- ◆ 谱学：探测光子/电子的能量分布，有时空间分布也需要探测

- ◆ 成像：探测样品空间的某个物理量分布

- 维度二：实验模式（以何种方式探测）

- ◆ 全场vs扫描

- ◆ 共振

- ◆ 掠入射（全反射）

- ◆ 原位/工况 (*in situ/in operando*)

- ◆ 时间分辨 (TR-)



➤衍射 (XRD)

- 通过衍射峰的位置得知哪个物相的存在，衍射峰的强度得知某个物相的丰度。衍射峰位置的移动测定某个物相的应变（需要其它信息，如应变角等），衍射峰的强度测定某个物相的取向分布。
- 晶格之外的有序：非公度，超晶格等信息，体现在Laue条件之外的分数衍射信号。

➤散射 (SAXS/WAXS)

- 获得纳米尺度的结构信息，如颗粒大小/分布，长周期晶格存在与否/取向。新的技术如SAXS成像。

➤谱学

- 范围极其广泛，测量信号（光子、电子）随能量的变化，揭示的信息多种多样。
- 吸收谱学 (XAFS)：可得到化学价态、配位结构、晶体场等信息



➤ 需要非常强的入射光亮度的谱学实验（第三代同步辐射以后发展起来）

- 发射谱 (XES)：探测出射光子的能量分布，可得到电子状态信息
- 非弹散射 (IXS)：探测光子的能量损失，该损失可能来自电子状态的激发，也可能来自某种元激发（如声子），因此能够得到电子状态，原激发等信息。

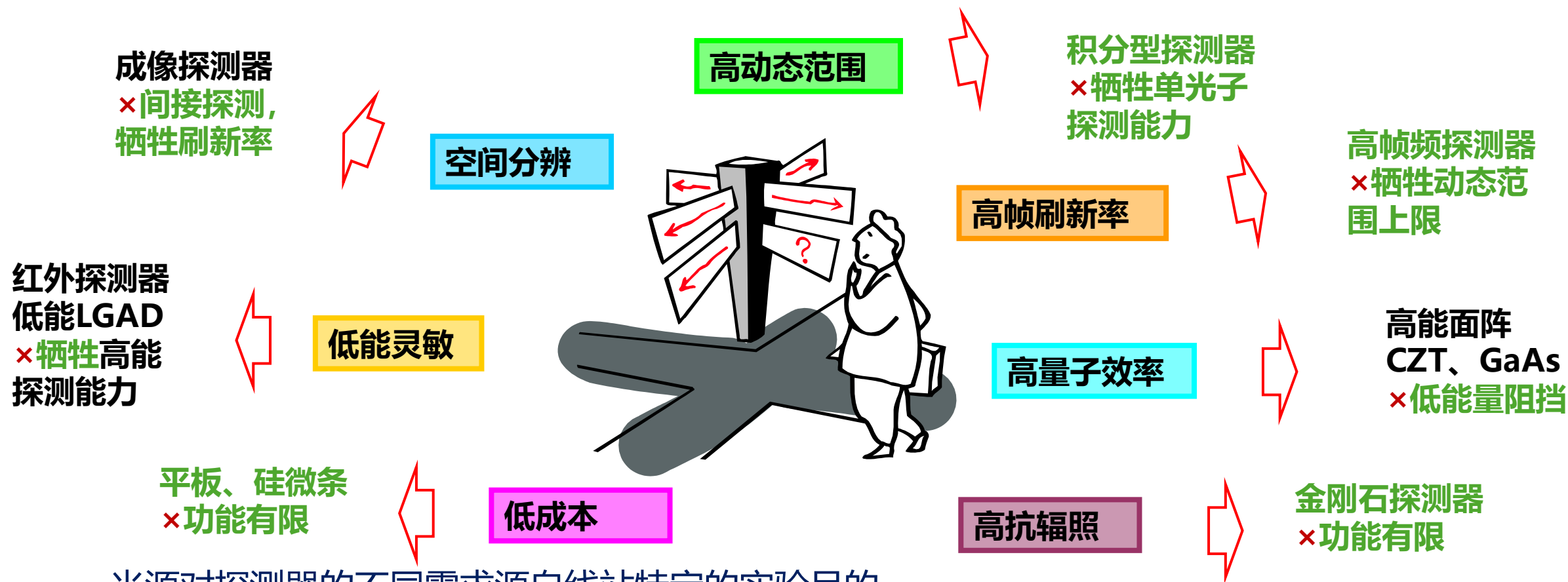
➤ **光电子能谱**：占据态电子信息，表面或浅层（取决于入射光子、光电子的穿透能力）

➤ **成像**：某个物理量的空间（2D/3D）分布

➤ 实验模式（不完全版本）

- **共振**：调节入射光能量，产生共振，这时某个特定的电子状态（轨道）相关的信号能够被放大。
- **全反射（也叫掠入射，G-前缀）**：探测表面信息。
- **原位 (*in situ/in operando*)**：加各种样品条件，这会给实验带来限制。
- **时间分辨 (TR-)**：探测时间尺度上的变化情况，不同时间分辨率下面的技术相差很大，不过前提是先把静态的情况表征清楚，否则结果分析几乎不可能。
- 掠入射、成像、时间分辨可以和几乎所有的实验方法结合。例如掠入射小角散射 (GSAXS/GISAXS)，吸收谱成像 (XAFS imaging)

光源探测器与定制化需求

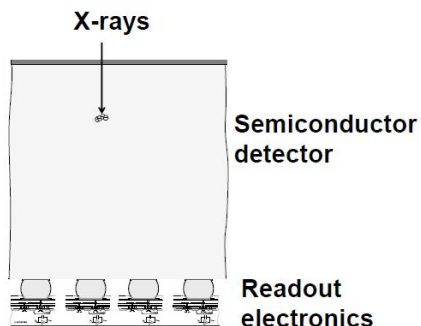


- 光源对探测器的不同需求源自线站特定的实验目的
- 探测器各项性能维度间存在相互制约, 无法同时做到极致
- 通用型探测器通常无法满足线站某些极致的性能要求: 灵敏度、效率、速度等
 - 向一个性能维度方向进行优化, 通常将牺牲其他的性能: 例如 空间分辨vs帧刷新率
- 针对线站目标进行不同类型的探测器定制, 是先进光源、先进实验方法的内在需求

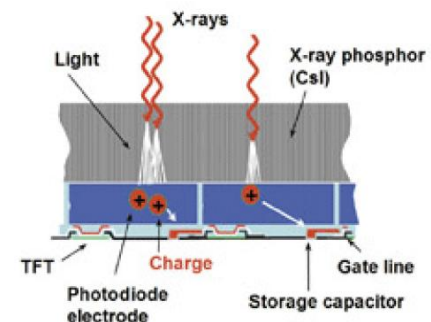
光源探测器主要需求大类

探测模式

直接探测



间接探测



核心探测器类型

混合型像素探测器
(面阵探测器)

SDD
高纯锗

碲镉汞、铟镓砷

金刚石探测器

CCD/CMOS相机

红外Bolometer

TES

微通道板

电子能量分析器

探测器功能

高能/软X灵敏/小像素/高帧频/
积分型/多阈值/4D复合/能
谱.....
能谱测量

红外探测 (成像、能谱)

XBPM束测

高分辨率成像
能谱应用

红外成像

能谱测量

- 线站需求分支众多，最适合的探测器类型也不相同，难以按照统一的标准对探测器进行分类
- 探测器的功能也互有交融，如：面阵探测器也做成像应用；CCD兼具成像、能谱应用
- 没有万能的探测器，只有最适合线站的探测器——**探测器随线站需求而定制无法避免**

国内主要光源探测器需求统计

• 表格设计

A	B	C	D	E	F	G	
探测器大类	探测器类型	主要性能指标	国产化状态	对标国外产品	需求急迫度	所属光源	
面阵探测器	计数型像素探测器	大像素140μm; 能量范围6-20keV; 帧刷新率100-1kHz; 探测器系统: 1M-6M像素	部分进口 可国产替代 已线站应用	PILATUS	推动批量化	高能同步光源	
	同上	同上	进口, 线站已用	Pilatus 100K, 300K, 1M, 2M (02U表面衍射, 10U超小角)		上海光源	
	计数型像素探测器	小像素75μm/55μm; 能量范围6-20keV; 帧刷新率100-1kHz; 探测器系统: 1M-6M像素	全部进口 国产化研制中	EIGER、Medipix	二期主要研制目标	高能同步光源	
	同上	同上	进口, 线站已用	EIGER(P2和膜蛋白)		上海光源	

国内光源（BSRF/HEPS、SSRF、HLS/HALF）使用或者计划使用的探测器，~30类，来自~25个公司/研究所
其中有DETRIS、Bruker、Rigaku、Hamamatsu、Canberra、Amptek等公司，也有PSI、ESRF、PF等国外光源/研究所

需求汇总

A	B	C	D	E	F	G
探测器大类	探测器类型	主要性能指标	国产化状态	对标国外产品	需求紧迫度	所属光源
面阵探测器	计数型像素探测器	大像素140μm; 能量范围6~20keV; 帧刷新率100~1kHz; 探测链系统: 1M~6M像素	部分进口 可国产替代 已线站应用	PILATUS	推动批量化	高能同步光源
	同上	同上	进口, 线站已用	Pilatus 100K, 300K, 1M, 2M (20U表面衍射, 10U超小角)		上海光源
	计数型像素探测器	小像素75μm/55μm; 能量范围6~20keV; 帧刷新率100~1kHz; 探测链系统: 1M~6M像素	全部进口 国产化研制中	EIGER, Medipix	二期主要研制目标	高能同步光源
	同上	同上	进口, 线站已用	EIGER(P2和膜蛋白)		上海光源
	高能像素探测器	像素140μm/75μm/55μm; 能量范围20~100keV; 帧刷新率100~1kHz; 探测链系统: 1M~6M像素	全部进口 国产化研制中	PILATUS-CdTe EIGER-CdTe	二期主要研制目标	高能同步光源
	同上	同上	进口, 线站已用	Pilatus CdTe 2M (超硬多功能125W)		上海光源
	超高帧频像素探测器	大像素140μm; 能量范围6~20keV 帧刷新率100kHz连续读出 计数深度2~4bit	进口无成熟商品 国内空白	XSPA (不成熟)	急迫——高能所排序1	高能同步光源
	同步辐射高帧频积分型像素探测器	大像素140μm; 能量范围6~20keV; 动态范围1~10 ⁴ 积分窗口100μs内连续可调 帧刷新率10kHz连续读出	进口无成熟商品 国内空白	JUNFRAU(不成熟)	急迫——高能所排序2	高能同步光源
	四维复合型像素探测器	单光子二维位置、时间、能量 同时测量	进口无成熟商品 国内空白	Timepix (无同步辐射版)		高能同步光源
	多阈值像素探测器	多阈值旁厄行射	进口无成熟商品 国产化研制中	Medipix (无同步辐射版)		高能同步光源
	软X射线光子计数像素探测器	大像素140μm; 能量范围2~8keV; 帧刷新率100~1kHz; 探测链系统: 1M~6M像素	进口无成熟商品 国产化研制中	EIGER-iLGAD (不成熟)		高能同步光源
能谱型探测器	多元SDD探测器	阵列规模: 16~64阵列, 像素 面积10~20mm ² 能量分辨率: 优于180eV@5.9keV 能量范围: 2keV~30keV 计数率: 好于250kcps/每通道	进口无成熟商品 单元SDD国产化完成, 已线站应用	VORTEX (不成熟)	高能所排序3	高能同步光源
				Vortex 7元和Daupre3元		

9	时间分辨探测器	纳秒时间分辨探测器	时间分辨率好于500ps 最大计数率8Mcps	进口无成熟商品 已国产化、已建站应用	无对标产品		高能同步光源
0	通用探测器	XBPM金刚石探测器		已国产化、已建站应用		进一步推动批量化	高能同步光源
1		同上		已国产化、已建站应用			上海光源
2		硅微条探测器		全部进口 国产化研制中	MYTHEN		高能同步光源
3		同上			MYTHEN	有需求	上海光源
4	成像探测器	高分辨成像探测器	空间分辨率亚微米	已国产化、已建站应用			高能同步光源
5		同上	同上	已国产化、已建站应用	滨松 ORCA flash 4.0 (13HB成像) 滨松 12849-1111U (18B纳米CT)		上海光源
6		高速成像探测器	成像帧率20kHz	已国产化、已建站应用	Photon Fastcam SA-Z (16U2超快成像)		上海光源
7		同上	成像帧率65kHz	已国产化	Phantom T-7510	有需求	上海光源
8		硅一维位置灵敏X射线探测器	2048像素、单像素50微米、 400kHz重复频率	进口、建站已用	PSI Gotthard (Dline 05U)		上海光源
9		二维位置灵敏探测器	像素 2048x2048, 单像素14微米、 采样频率1kHz	进口、建站已用	ESRF FReLon2D(05UDLine)		上海光源
0		大视场高分辨高灵敏X射线成像探测器	数值孔径>0.75 工作距离>2mm 视场4×4mm ²	拟研制	ESRF Optique Peter	急需	上海光源
1	低能谱学探测器	高分辨高灵敏软X射线探测器	最小像素尺寸5微米 单光子敏感	进口、建站已用	Sydor Spectro CCD(RIXS)		上海光源
2	红外探测器	HgCdTe、Si 探测器	中红外10000-450波数 远红外370-10波数	全部进口、建站已用	MCT (中红外) (红外06B) Si bolometer (远红外) (红外06B)		上海光源
3		FPA (中红外焦平面阵列)	光谱4000-900波数 像素64x64	国产化研制中	Bruker FPA (中红外焦平面阵列) (红外06B)	有需求	上海光源

国际探测器	双光子统计计数型像素探测器	能量范围0.5-12 keV; 时间分辨率100-1 kHz; 量子效率>80% @700 eV; 计数率<0.7 MHz/mm²像素 探测系统: 0.5M-16M像素	进口无成熟商品	PSI EIGER + LGAD (不成熟)	急造——排第1
	超高分辨率混合像素探测器	能量范围0.5-12 keV; 空间分辨率1 μm; 量子效率>80% @700 eV; 时间分辨率1 k-10 kHz; 探测系统: 0.5M像素 像素大小: 6.5 μm-15 μm; 像素数>2k × 2k; 真空兼容	进口无成熟商品	MOENCH + LGAD (不成熟)	急造——排第2
能谱类探测器	CMOS/CCD探测器		部分进口 国产替代已试点应用	滨松 Flash4.0 V3 , Greateyes LOTTE-i-KL等	
	高分辨、宽动态区电子能谱分析仪	能量范围0~1000; 所有能量通道的总峰分辨率<10 cps; 探测器读出速率>200 fps; 能量分辨率<1 meV 暗计数率≤0.5 counts/s/cm²; 电子增益<10⁴ 能量分辨率5 meV @20 eV; 电子接收角±60° 能量分辨率100eV; 角动量分辨率>750 能量分辨率1920 × 1200; 像素间距约3.75μm; 所有能量通道的总峰分辨率<3 cps; 探测器读出速率可达200 fps ADC-CMOS探测器: 可探测电子能量: ~1500 eV; 能量分辨率1000，所有能量通道的总峰分辨率<10 cps; 探测器读出速率>800 fps 外形: 24.8-50x20.05 mm; 有效直径: Φ18.8-44 mm; 通道宽度 6-12x5 μm; 重量: ±5-8 kg¹	依赖进口(德国Scintia Omicron GmbH/SPEC5/Focus GmbH)		急造——排第2
电子倍增型探测器	微通道板		国产化(BK/B8/C6/DN系列)	滨松 F系列	合肥光源/合肥先进光源
红外探测器	MCT探测器	D* (Ap 10000, 1) cm⁻²W⁻¹/2 = 5.0 x 10³⁵; Responsivity(pk/(W/V)) > 30,000; 波段: 2 μm to 13 μm	依赖进口 (美国 Infrared Associates)		排第3
	InGaAs/DTGS探测器	波段: 0.78 m-3 μm NEP: 1.2 x 10⁻¹¹ W/Hz¹/²	依赖进口 (英国Bruker)		
	Bolometer探测器	可测光谱范围: 15 μm-2000 μm (0.15-20 THz); 热导率 G=16 μW/K; 电流灵敏度 S=2.4×10⁷ V/W; MSR: 2.5 x 10¹⁹ Hz/Hz¹/²	依赖进口 (美国RLabs)		

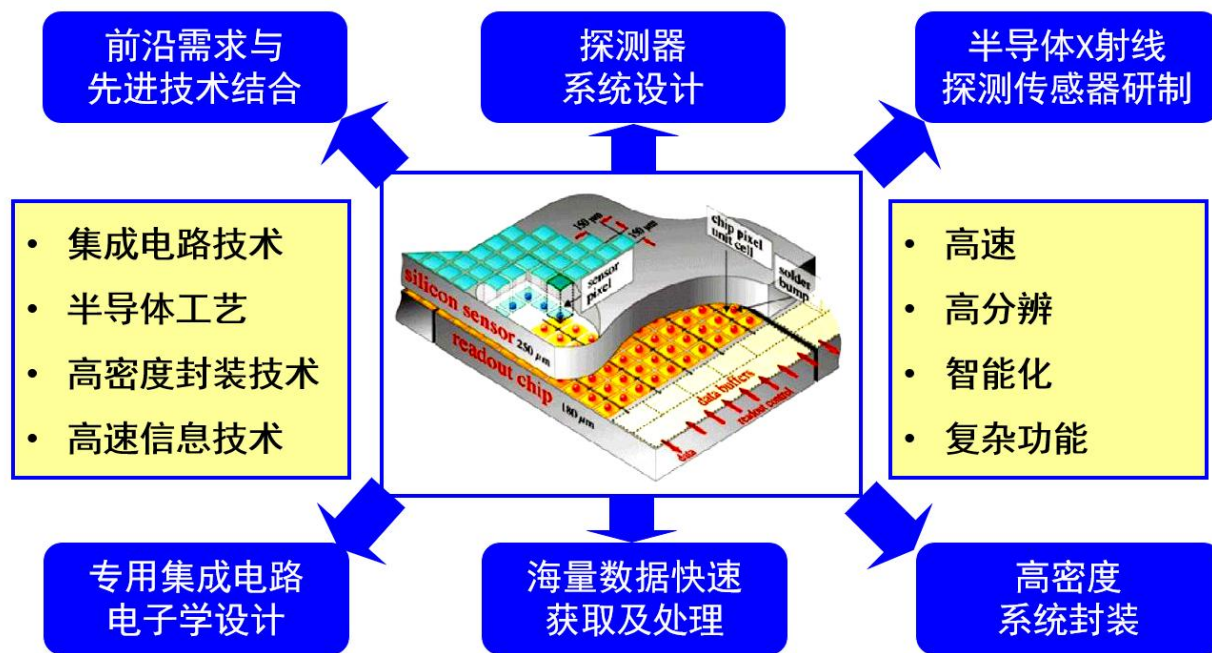
- 各光源对一些探测器（面阵、能谱、成像等）均有共性需求，但也有契合各自光源特点的特异性急迫需求
- 满足共性的需求，紧迫性明显
- X射线像素阵列探测器（面阵）需求最大



X射线像素阵列探测器



X射线阵列探测器关键技术



探测器研发关键技术

Technologies for assembling highly integrated detectors

ASIC Design
Sensor Design
Packaging technology
System electronics
DAQ
Mechanical structure and Thermal design

探测器研发是一个系统工程，包括单项关键技术研发、系统集成、工程应用。
学科交叉，涉及半导体传感器、集成电路、半导体封装、机械、散热、软件系统等

光源对探测器的需求及探测器研发的目标



光源实验需要：

信噪比

光子计数像素阵列
二维像素阵列
一维像素阵列

空间

小像素阵列探测器

动态范围

积分型像素阵列

能量

多阈值
SDD
高能像素阵列

时间

APD
超快积分型
高帧频光子计数
四维探测器

复合功能

多阈值像素阵列
四维像素阵列
SDD阵列
.....

探测器研发： 技术复杂、 门槛高、 周期长、 投入多

技术研发



原理样机



工程样机



应用样机

每一个环节都需要大量经费投入和多年迭代

X射线像素阵列探测器研发历史

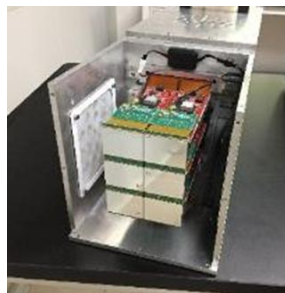


2011年

自发组织开展研究

2014年

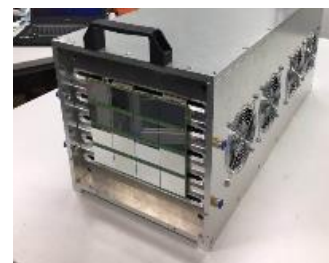
第一代原理样机



HEPS-TF项目支持

2016年-2018年

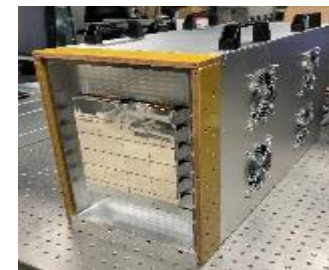
1M样机完成



HEPS项目支持

2019年-2021年

TSV样机完成



完成了技术积累，但是未推广起来

2026年至今

稳定运行，用户
PDB数据开始上传。

2025年11-12月

解决问题，开始运
行。不断优化软件
操作

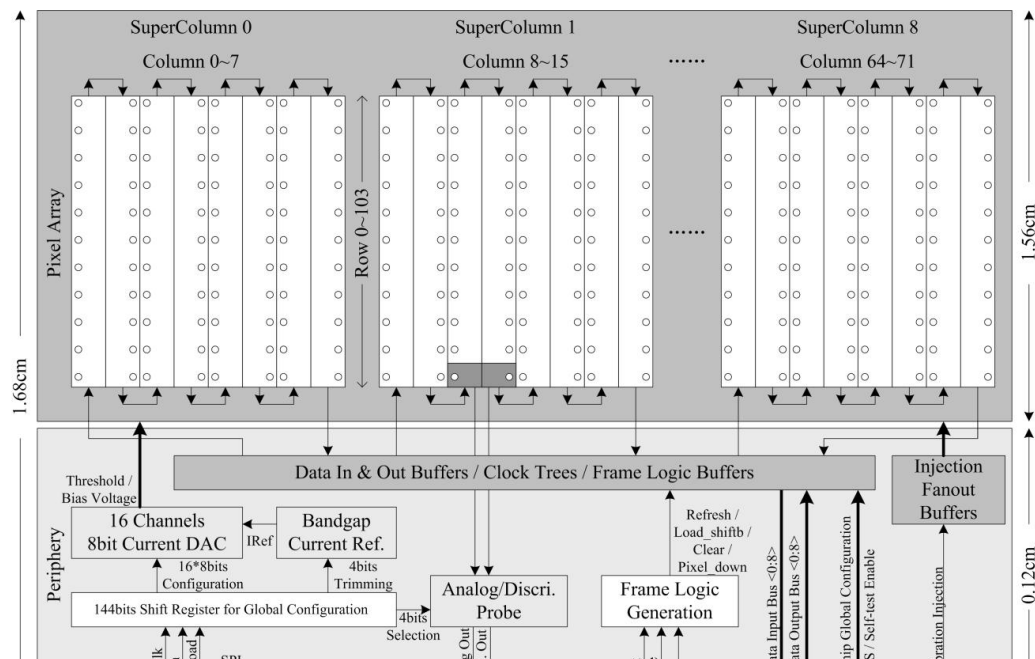
2025年10月

BA工艺验收测试

2022年-2025年

HEPS工程样机研制

ASIC关键技术

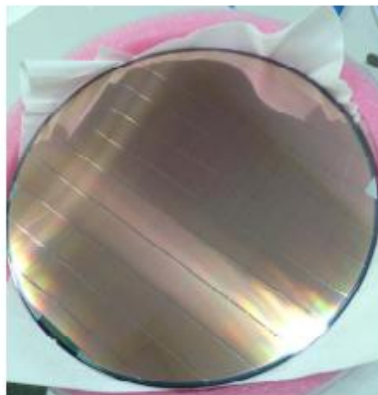


ASIC芯片

- 单光子计数型 – 用于像素阵列探测器和硅微条研制
- 积分型芯片 – 用于积分探测器的研制
- 低噪声前放 – 用于SDD探测器
- 时间TDC

140um像素ASIC, 55um像素ASIC、Reset 低噪声前放、硅微条ASIC

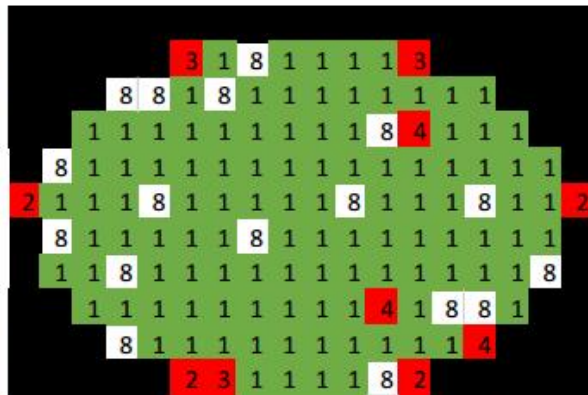
成熟ASIC芯片已用于探测器系统设计和样机研制



an 8-inch ASIC wafer



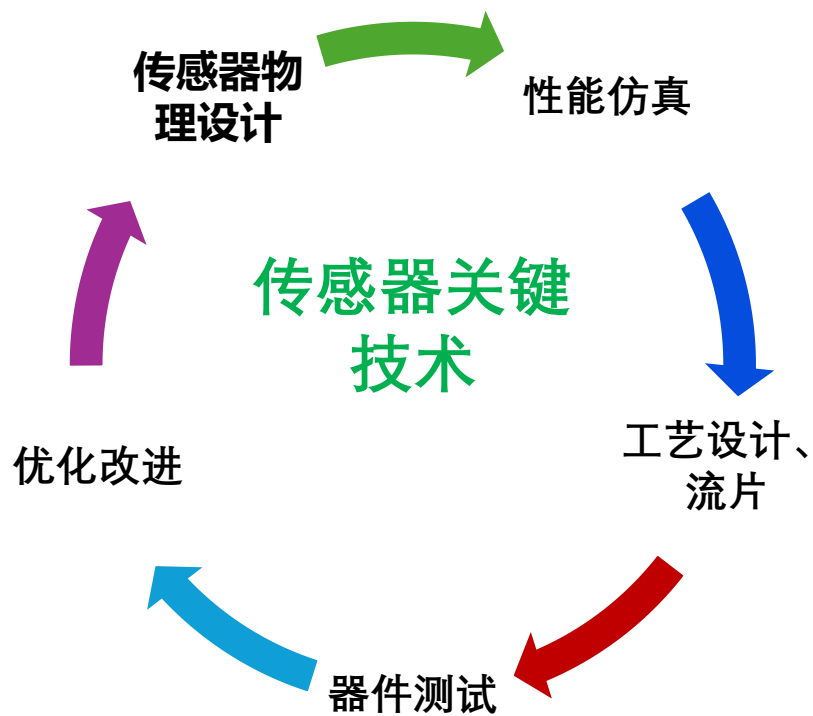
Probe card for ATE test



A wafer map of an 8-inch wafer

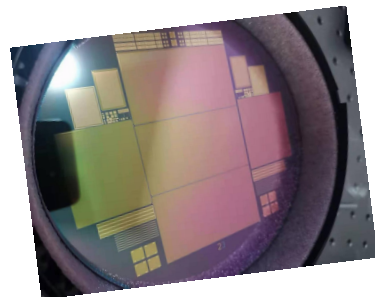
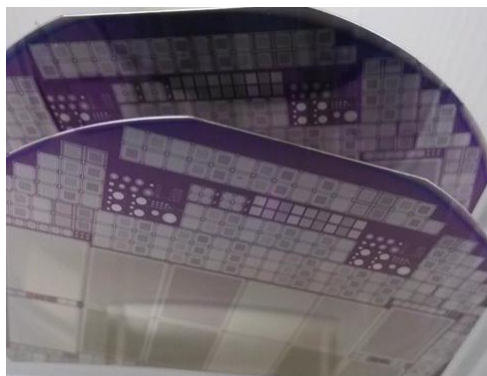
- 集成电路芯片决定了探测器的功能
- 设计周期长、成本高、不断迭代
- 测试环节重要，各部分配合

传感器技术



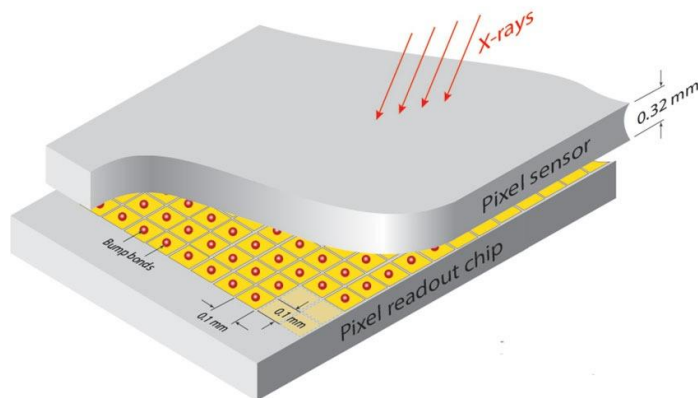
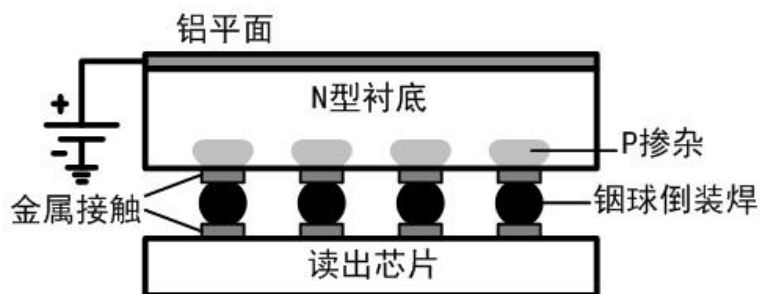
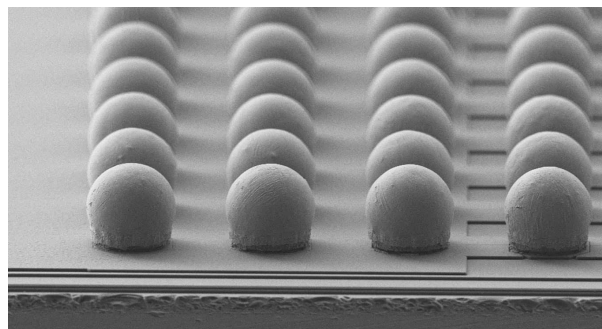
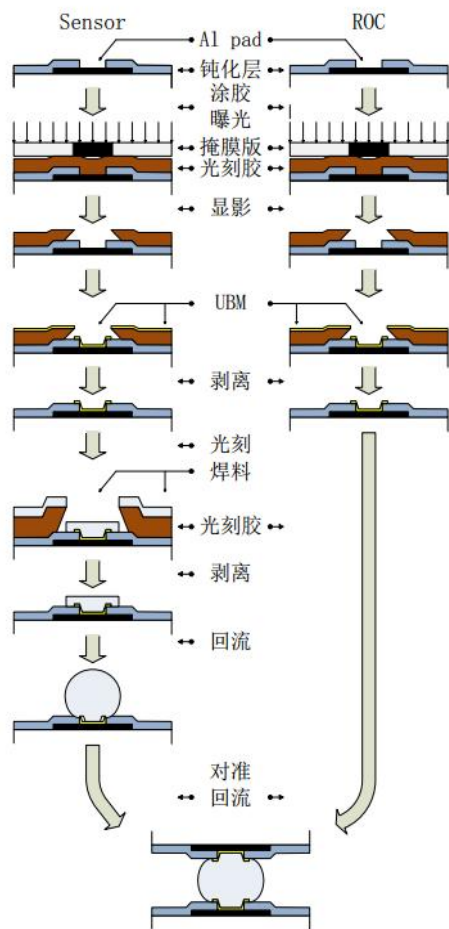
X射线传感器种类（直接探测型）

- 硅基像素阵列探测器（PIN阵列） → 二维像素阵列探测器
- 硅漂移探测器 → 能谱探测器
- 雪崩光电二极管APD → 时间分辨探测器
- 金刚石、碳化硅传感器 → 高能X射线探测器
- 化合物半导体探测器（GaAs、CZT等） → 固体电离室



形成稳定的6-8寸晶圆生产，已实现完全自主设计和探测器系统应用

先进半导体封装技术



实现探测器Sensor像素和读出ASIC像素的点对点连接

混合型像素探测器中的一项关键技术:

- 完成阵列连接的“唯一”方法
- 显著缩短连接路径, 避免串扰
- 需保证可靠性和极高的良率水平

封装面临的挑战

像素小

密度高

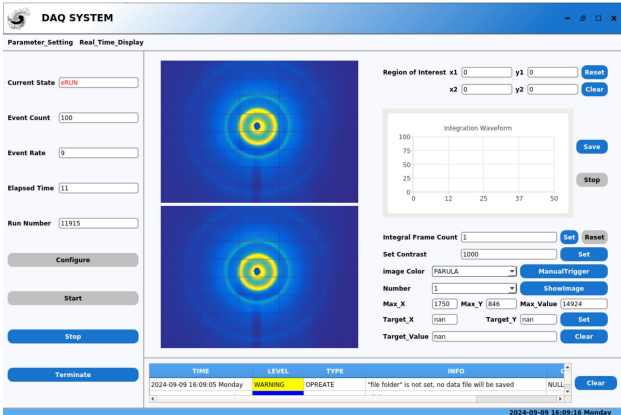
成品率

HEPS-BPIX 6M整机集成

Specs	BPIX-40-6M
像素大小	140 μm X 140 μm
传感器	Silicon 450 μm
模块像素规模	256 X 576
整机模块数	5 X 8
总像素数	5.898M
阈值数	2
增益配置	2 bits tunable
计数率	> 1 Mcps/pixel
帧刷新率	100 Hz (1 kHz)
计数深度	14 bit
图像深度	16 bit / 32 bit
模块死区	2.7 mm by WB
不良像素率	< 0.5‰



探测器模块和读出电子学

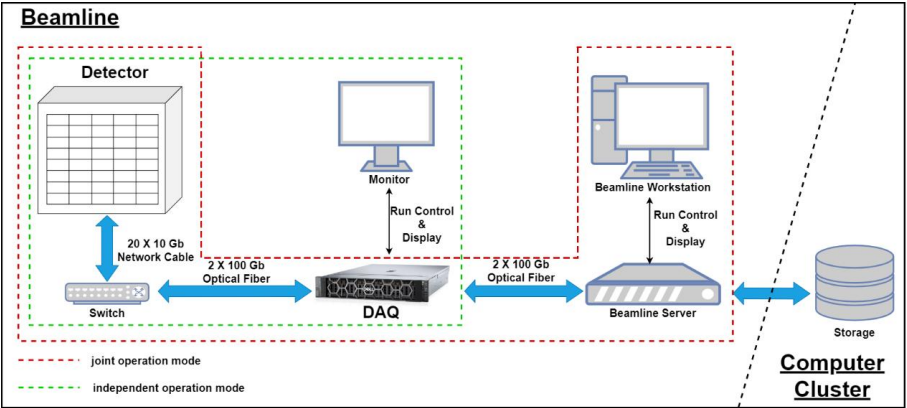


用户界面



探测器前面板

整机和读出



线站体系

- 全面自主设计：ASIC、Sensor、封装、电子学、机械、DAQ、软件
- 关键技术全部国产化

刻度标定—实现探测器的高数据质量

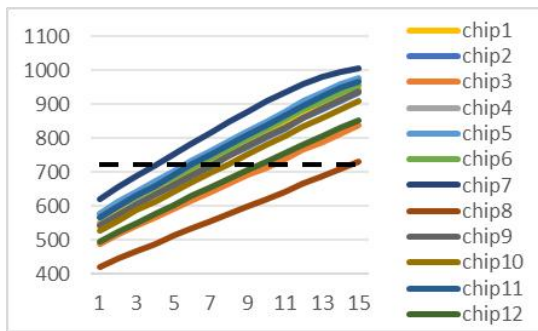


Adjust the threshold voltage of 12 ASICs

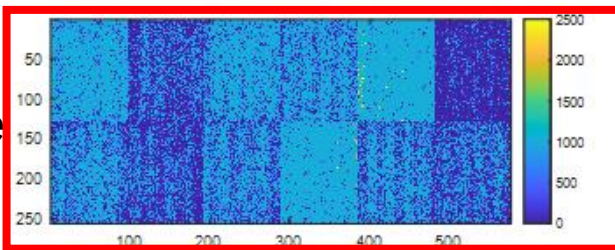
GDAC setting and LDAC scan (@Energy)

Find LDAC

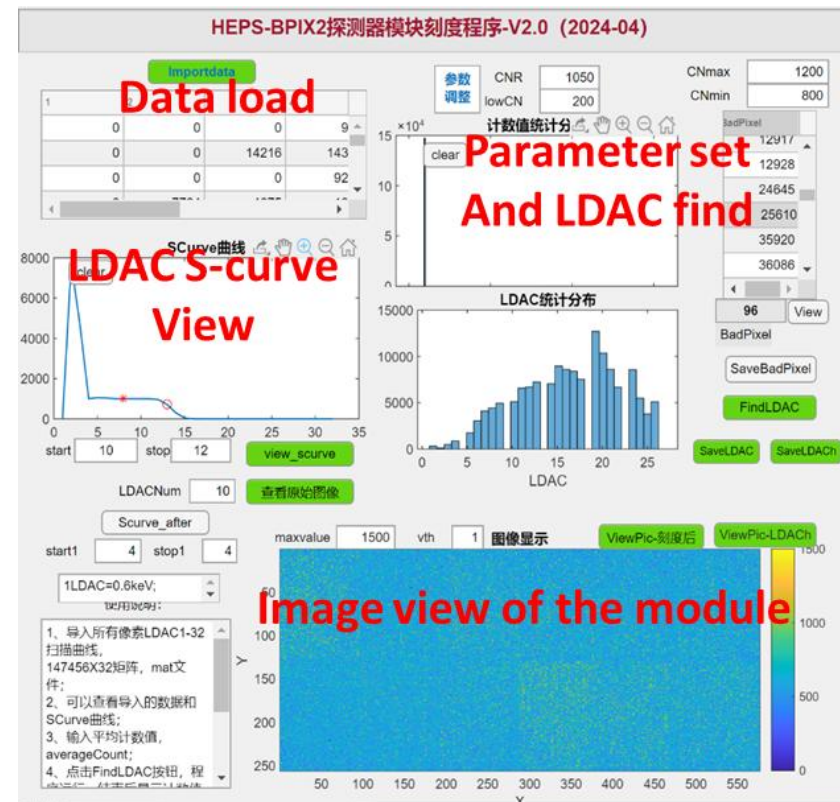
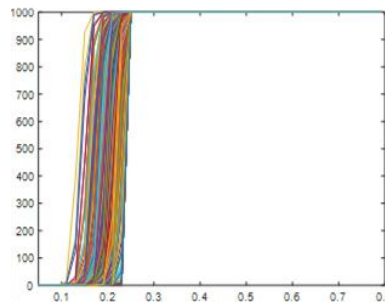
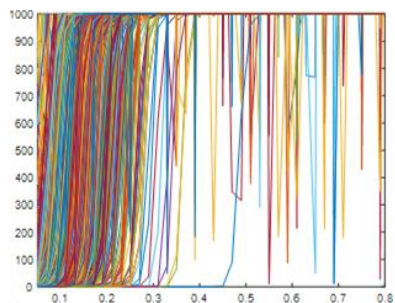
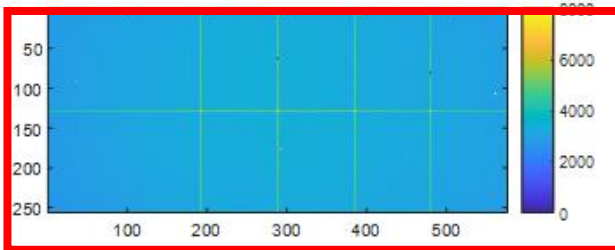
Get the best LDAC and reload



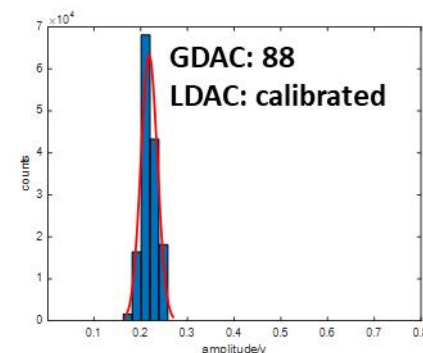
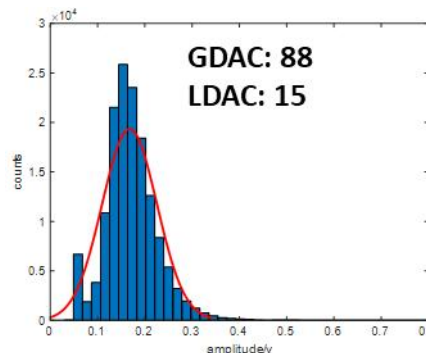
before



after

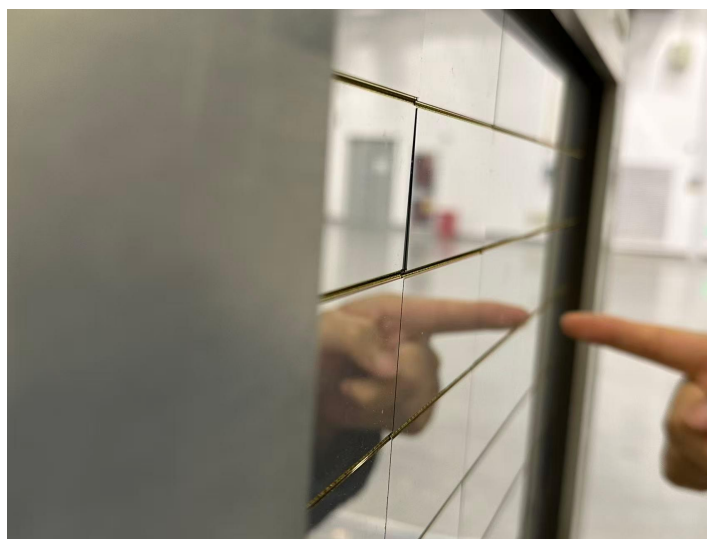
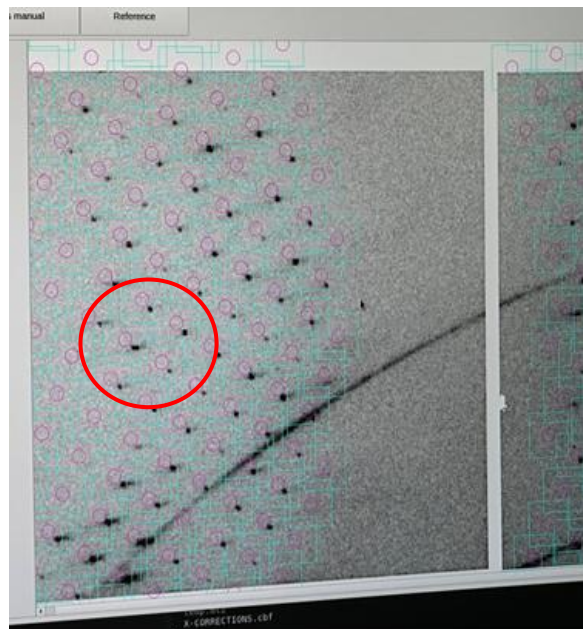


• Bad pixels: 31/147456

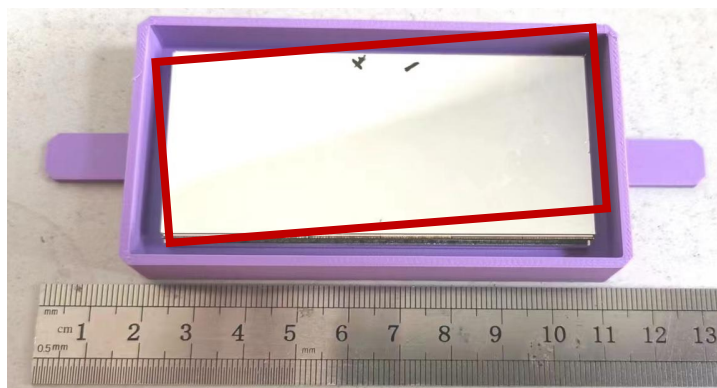
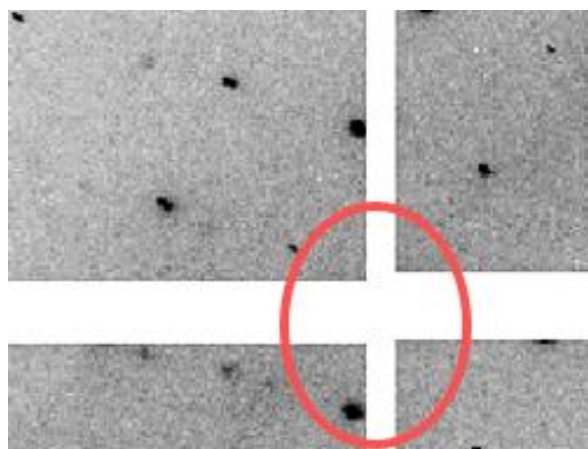


刻度标定-整机刻度决定了实验数据质量

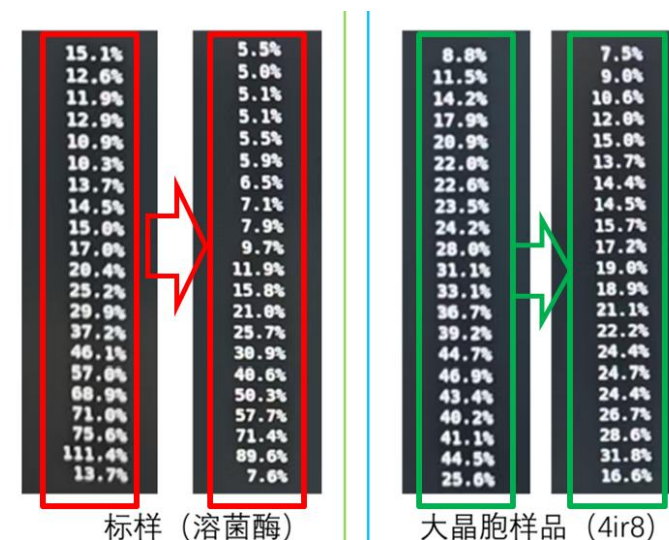
- 结论：QA/QC可能最终导致致命的结果



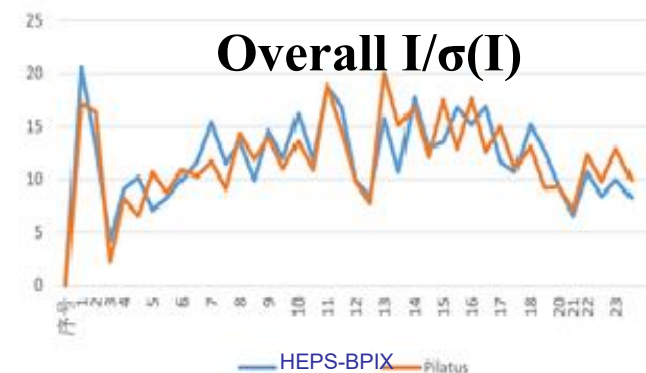
外协封装后模块高度不一致



外协倒装模块粘贴固化时未采用定制限位工装，位置偏差

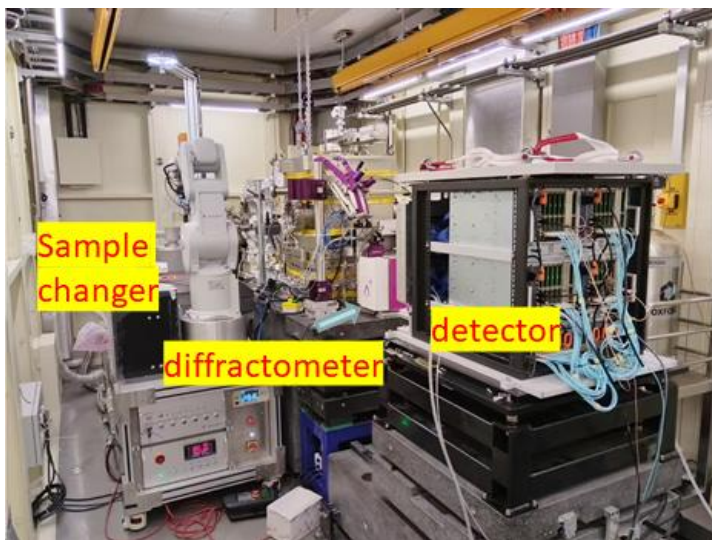


刻度前：位置精度2像素，刻度后：精度好于1像素

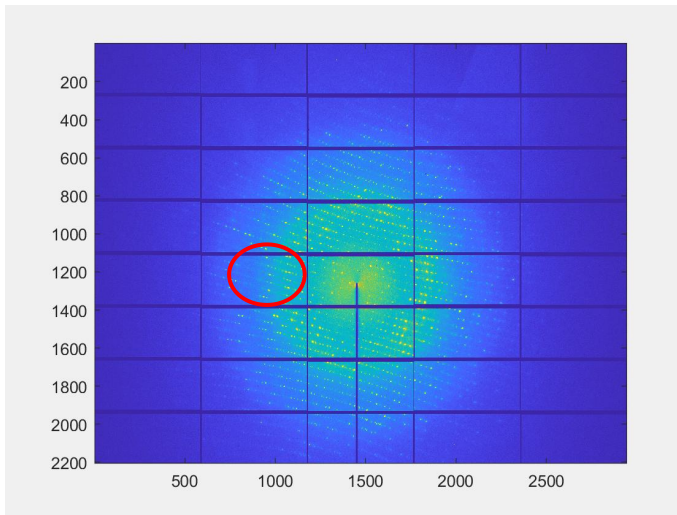


- 采用逐模块空间位置重建方法进行位置刻度
- 整体数据质量已和PILATUS在相同水平
- 后续批次加强QA/QC还可进一步提升

HEPS-ID02 (BA) 线站和生物大分子晶体学 (MX) 应用

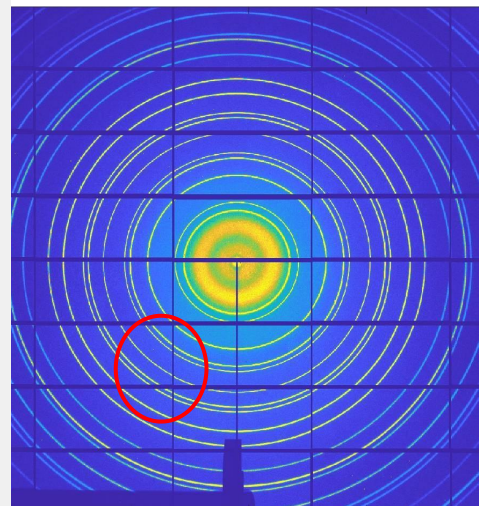


HEPS-BA生物大分子线站



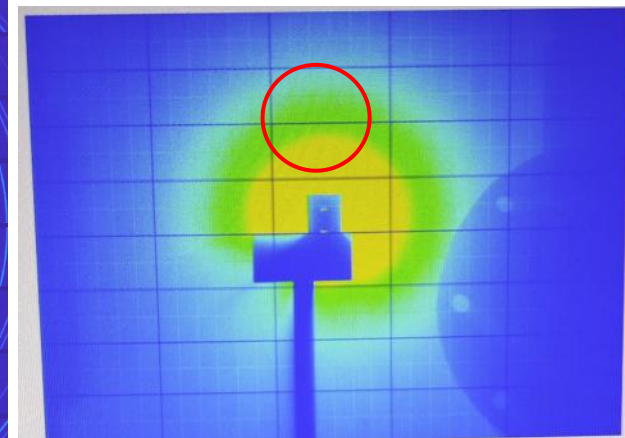
结构晶体学MX
衍射点

衍射信号弱、单点信号，刷新率要求高、面板要求大、动态范围要求高



粉末衍射XRD
衍射环

信号强度高，环数据平均、刷新率要求不高、面板要求不高、动态范围适中



小角散射SAXS
中心弥散

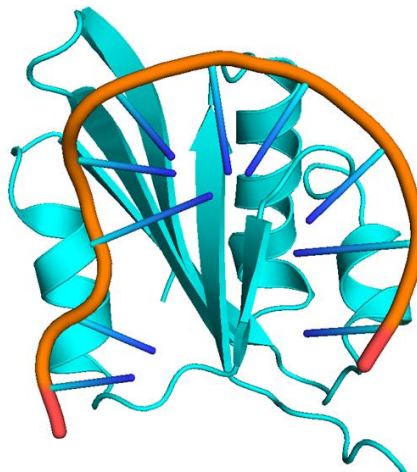
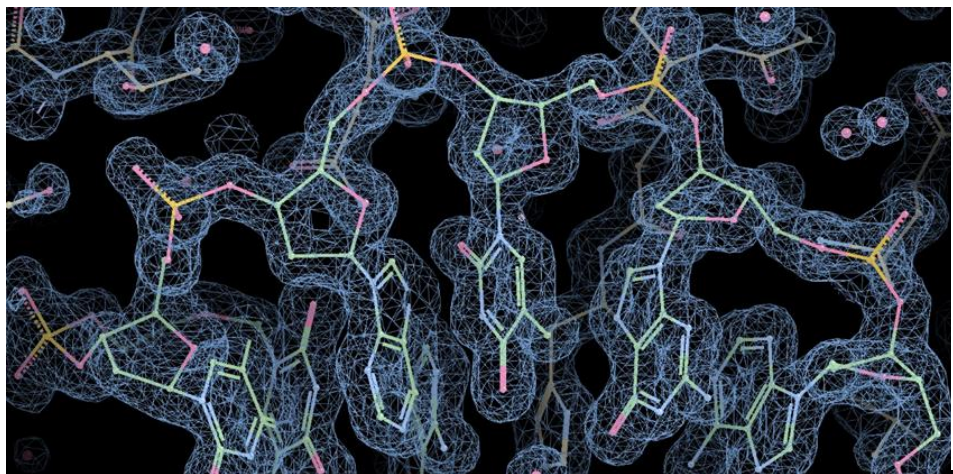
分辨率要求低、刷新率要求高，面板要求低

- 相比粉末衍射、小角散射等像素探测器同类应用场合，生物大分子结构解析对探测器性能提出了最苛刻的要求

- 衍射点vs衍射环（粉末）：信号弱，灵敏度极限
- 同时测量极强低角度衍射点&极弱高角度衍射点：动态范围极限（强度动态范围&灵敏面积动态范围）
- “旋转收集”样品三维信息：帧刷新率速度极限

线站试运行——用户实验

Data1:
Protein-DNA
complex



Virus replication enzyme-DNA complex

Resolution: 1.5Å

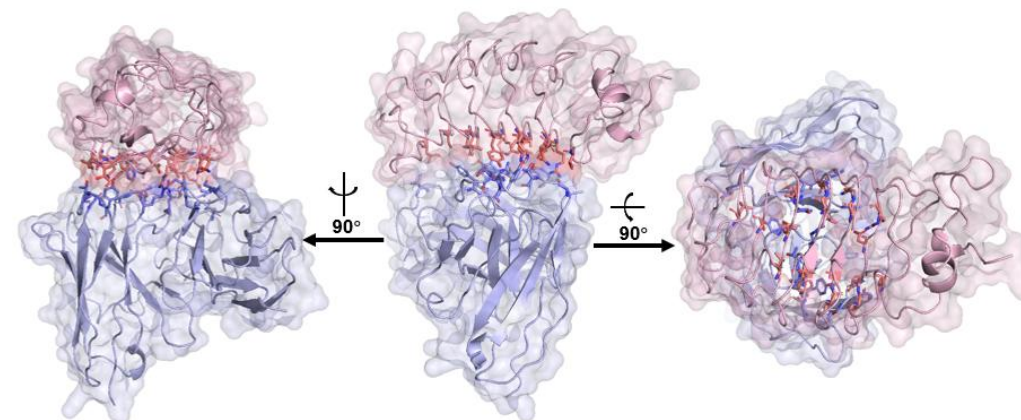
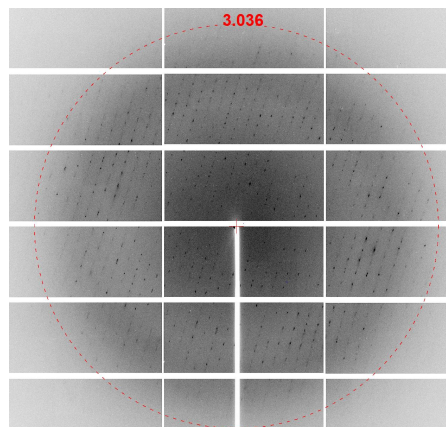
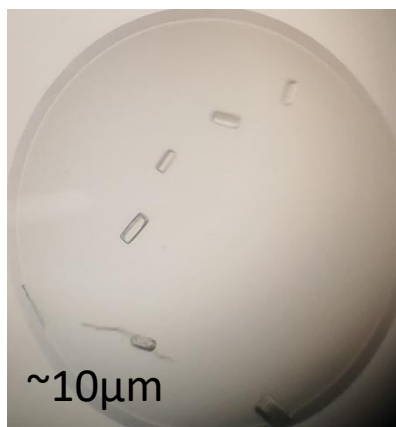
Rmerge:

Total: 9.1%;

inner/outer shell: 5.1%/68.2%

Rwork/Rfree: 19.8%/22.1%

Data2:
Protein-protein
complex

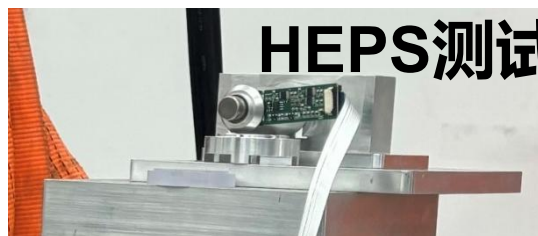


- 自2025年10月部署至BA线站试运行，截止到2026年6月30日，累计运行时间2600多小时，支持了来自40多个课题组的118个课题研究。
- 实验数据文章陆续发表中，部分蛋白质结构数据陆续上传PDB。



其它类型的探测器

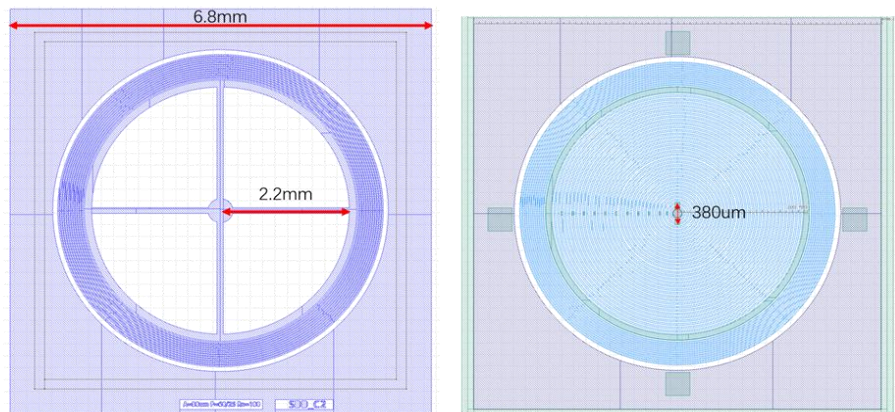
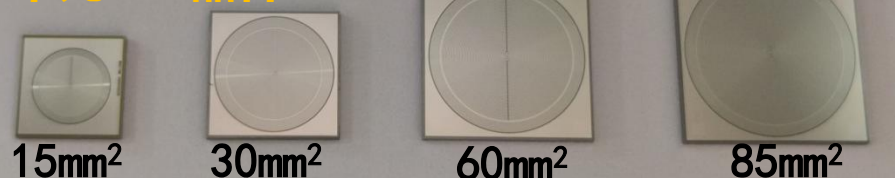




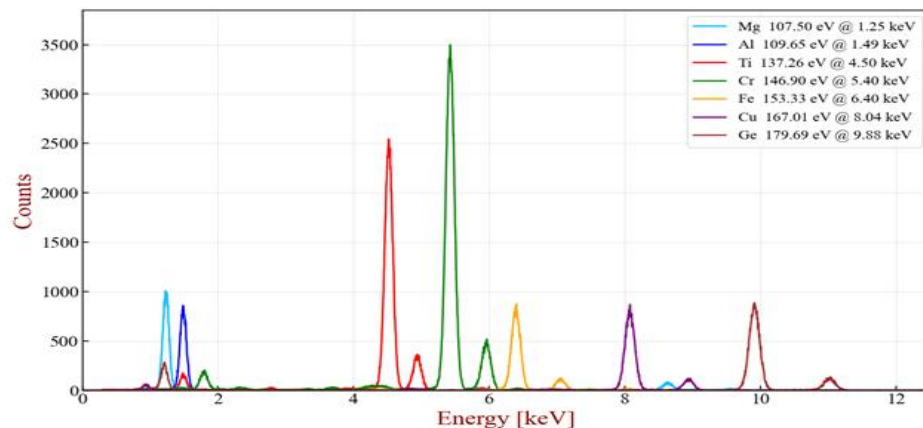
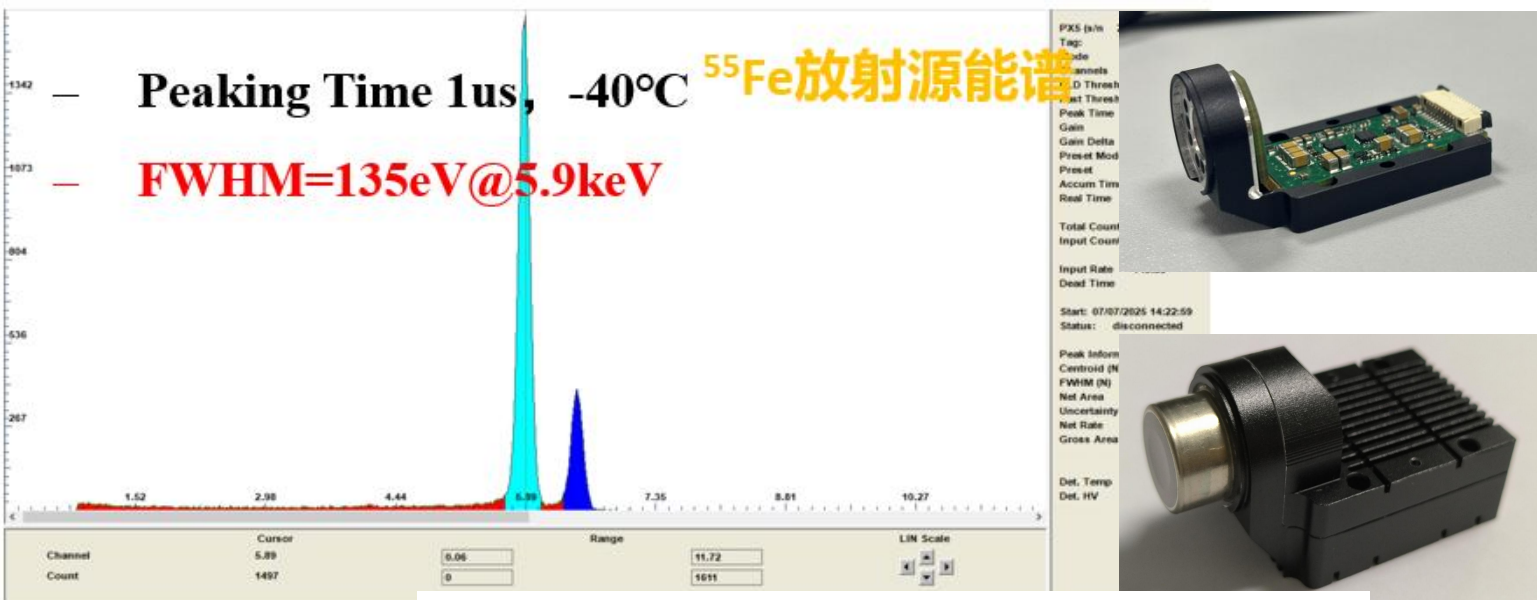
SDD探测器



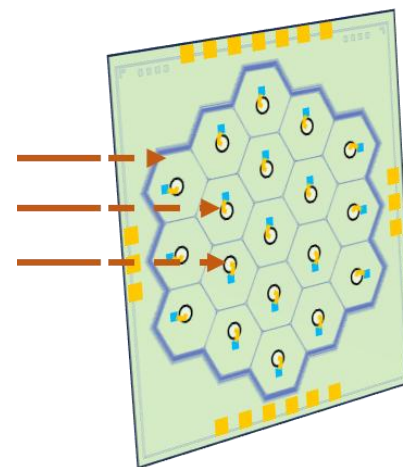
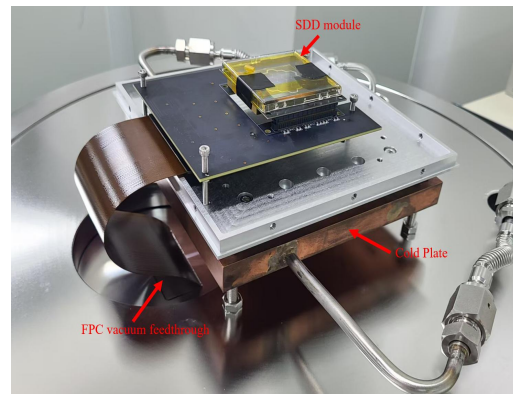
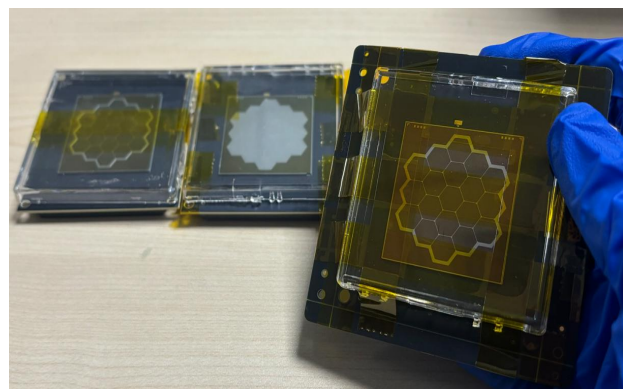
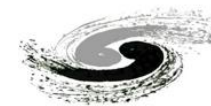
单元SDD器件



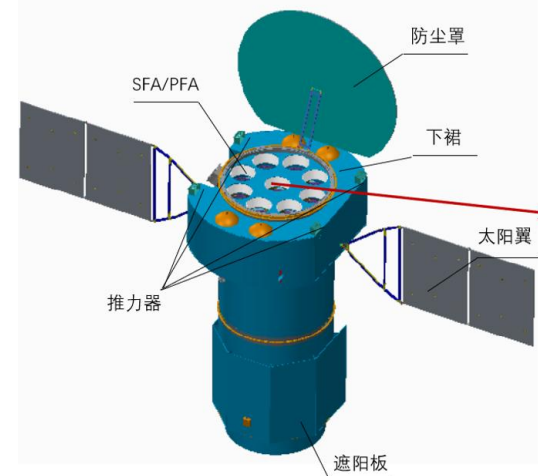
- 完成单元SDD探测器设计仿真和工艺流片;
- 传感器厚度550um, 单元尺寸15mm², 30mm², 60mm², 85mm²
- 30mm²单元能量分辨135eV@5.9keV (-40°C)



SDD探测器应用—19阵列



总面积600mm²



5台多像素SDD探测器

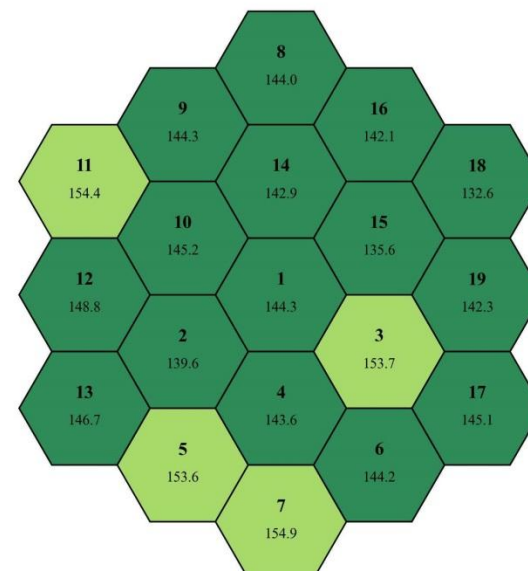
FWHM Map at 5.9 keV @ -35°C

- 国际上空间卫星首次搭载阵列SDD探测器；
- 我国X射线天文卫星首次搭载全国产探测器；
- 提前完成技术验证。130-150eV能量分辨

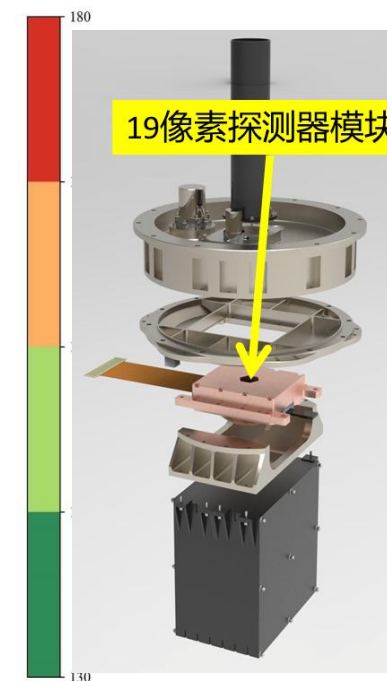
光源应用

- 解决真空封装问题，真空封装是实现光源应用的必要技术条件。
- 真空封装设备工艺在不断优化调试中。

指标名称	任务需求
尺寸布局	边长3.2mm 六边形单元， 1+6+12环形 排列
能量范围	0.5-10keV
能量分辨	≤180eV @6keV
工作温度	≥-55°C



能量分辨测试

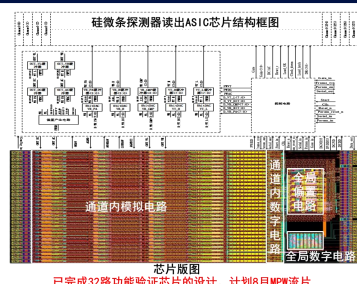




SSD硅微条探测器

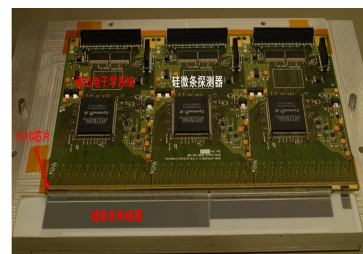
2022年

V0版验证设计



2023年

测试系统验证



2024年

320通道性能全面测试



2025年

工程批设计及加工-2048通道

APD

2013年开始： 单元APD：成熟系统，提供HEPS-TF使用，提供APS使用。

单元APD：HEPS

多元和阵列APD

探测器研发的经验和教训

- 相比起医疗等其它领域，同步辐射使用的探测器未必有广泛的商业用途，但是探测器是一个产品，必须具有足够的成熟度。
- 掌握的关键技术远远不够，一堆芯片组成不了一台探测器，需要系统地规划整个研发计划。
- 整体的设计：机械、供电、冷却、布线、电磁兼容、软件...甚至外观
- 关键技术的成熟度
- 供应链的可靠性
- 质量控制
- 成本控制：时间和经费



发展规划



光源对探测器的需求及探测器研发的目标



光源需要的主要探测器种类及长期规划:

(1) 散射衍射实验: 二维像素阵列探测器 (计数型, 积分型) ----低能、高能

计数型像素探测器比较成熟, 种类较多, 积分型正在发展。

(2) 谱学实验: SDD探测器、高纯锗探测器。

(3) 束线诊断探测器:

(4) 硅微条探测器:

(5) APD时间分辨探测器:

(6) 其他: 气体、beamstop等:

• 要做什么, 不要做什么?

• 国外公司在做的, 现在能买到的, 我们做吗?

探测器研发的目标:

第一步: 实现部分探测器的国产化, 掌握关键技术和研发流程, 建立起研发生态;

第二步: 开展个性化的探测器研制, 满足高端需求, 解决实验卡脖子问题;

第三步: 探测器的推广、产品化, 为研发提供良性循环

需求分析——探测器共性需求

- 探测器大类相对集中
 - 面阵探测器、能谱探测器、成像探测器、通用探测器（BPM、硅微条）等在各个光源中均有普遍需求
- 绝大部分探测器均仍依赖进口，部分探测器已开展自主研制，集中在四大类：
 - 相对高端的面阵、能谱型探测器是重灾区
 - 国际对标产品品类也相对一致：面阵：PILATUS/EIGER，能谱：VORTEX（SDD）、Canberra（高纯锗）
 - 针对该问题，一些探测器已开展国产研制，有望实现国产对标
 - 成像型探测器国内产品已发展较好，已有线站实现国产化
 - CMOS/CCD等器件国内基础相对较好，还需进一步解决闪烁体材料等关键技术问题
 - 高端成像探测器仍有自研需求
 - 红外探测器面向低能端，已开展国产研制
 - 一些通用探测器有共性需求，且已初步完成自研
 - 金刚石探测器（XBPM）
 - 硅微条探测器

需求分析——光源独特需求

- 根据光源不同特点（能量、相干性等），各光源还有各自独特需求，分为：

1. 探测器类型不变，功能/性能向极端条件发展

- 面阵探测器：超快、积分型、低能/高能、小像素、时间/4D复合探测
- 成像探测器：大视场高分辨
- 利用该类型探测器前期研制/应用经验，主要解决功能优化和探测器系统集成问题，有望快速投入线站应用
 - 三大光源所提各自急需探测器研制任务均属此类

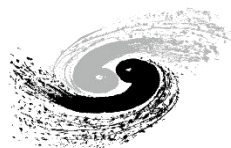
2. 探测器功能目标不变，多种实现方式

- 能谱探测器：SDD、TES、HPGe、CCD、面阵探测器
- 电子探测器：微通道板、CCD
- 红外探测器：碲镉汞、铟镓砷、Bolometer
- 根据目标不同，实现方案差异性较大，或可按光源各自需求差异化、稳步发展

光源高端探测器研制任务

- 光源急需
 - 高能同步光源：超高帧频像素探测器
 - 满足XPCS等线站相干性、高动态实验需求，禁运风险大
 - 上海光源：大视场高分辨高灵敏X射线成像探测器
 - 进一步实现成像探测器高性能和国产化
 - 合肥先进光源：软X射线计数型像素探测器
 - 满足软X射线低能端高分辨率光子计数探测器需求，国际无成熟商品
- 稳步规划，有序研制
 - 高能同步光源
 - 积分型像素探测器、多元SDD能谱探测器、多元TES能谱探测器
 - 合肥先进光源
 - 超高分辨率混合像素探测器、高分辨宽能区电子能量分析器、SDD探测器、红外探测器
- 科学院组织的“大科学装置联盟”在探测器研发上的统一规划

超高帧频像素探测器



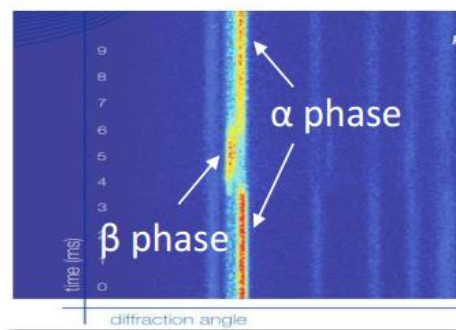
中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

高能同步辐射光源

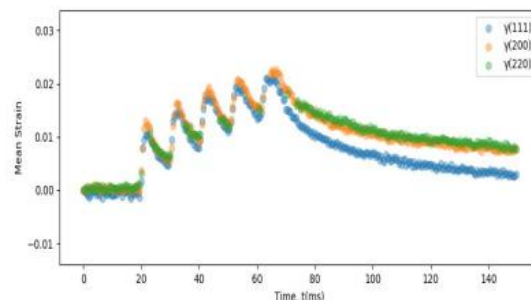
HEPS-超高帧频像素探测器-研究背景

□ 同步辐射超快衍射技术—高能同步辐射光源HEPS重点发展技术，**超快**

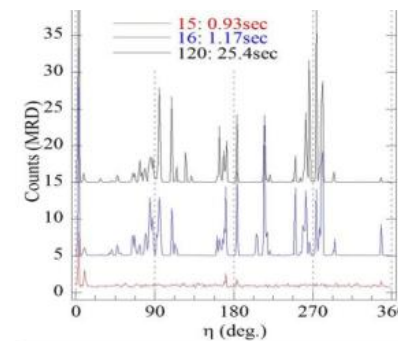
- 超快X射线探测器在同步辐射动态加载散射、衍射实验，材料原位表征、实时表征等领域广泛应用，可实现ms到 μ s量级时间分辨实验。



TC4钛合金相变过程



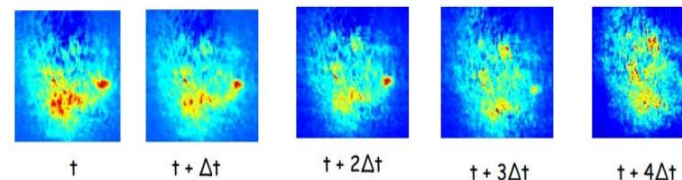
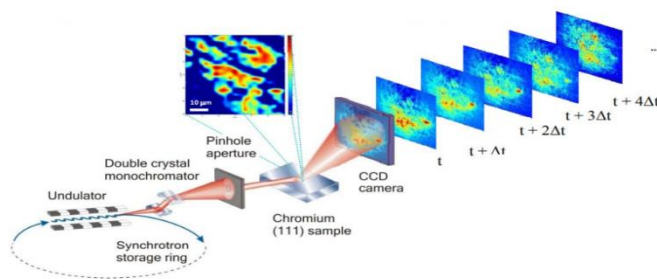
应变随时间的演变



织构随时间的演变

涉及到类似实验平台的探测技术国外管控和禁运；
国防应用必须全部国产化。

□ X射线光子相关谱 (XPCS) 实验—高能同步辐射光源HEPS重点发展技术，**相干**



O. G. Shpyrko, E. D. Isaacs, J. M. Logan, Yejun Feng, G. Aeppli, R. Jaramillo, H. C. Kim, T. F. Rosenbaum, P. Zschack, M. Sprung, S. Narayanan & A. R. Sandy (2007) *Nature* **447**, 68–71.

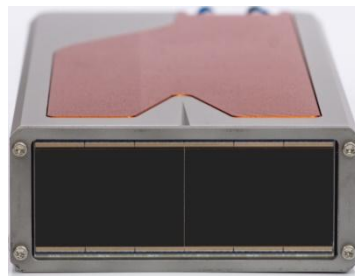
特色实验方法，发挥HEPS相干特性

HEPS-超高帧频像素探测器-国内外研究现状、研究意义

- 以HEPS-XPCS线站为例，要求帧率达到50 kHz（连续读出），以满足快速动力学测量的需求
- 国际范围内，高帧频像素探测器成熟度仍相对不足，帧频、计数深度都相对有限，处在研发和试用阶段
 - 商用探测器仅有XSPA探测器满足帧频要求，然而计数深度2bit非常有限



EIGER@2 kHz



Timepix@24kHz (1bit)



XSPA @56kHz (2bit)

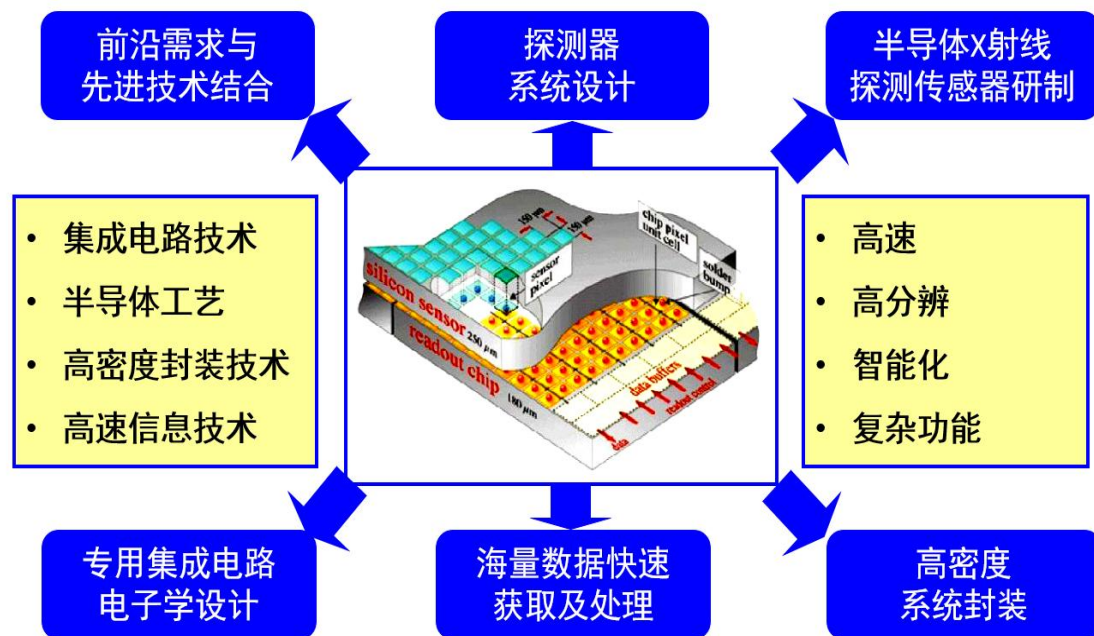
- 国内超高帧频像素探测器研究尚属空白
 - 高能所单光子像素探测器研究已实现全链条自主研制，实现光源线站应用
 - 面向上海硬线SHINE研发的STARLIGHT探测器，帧频为10kHz@12bit，帧频仍需提升；
 - 随着帧频的提高，其应用领域的实时性和国防应用的可能性，使其存在较高禁运风险
- 研究意义：
 - 研制超高帧频像素探测器急迫且必要
 - 使材料动态、实时过程研究成为可能，充分发挥先进光源时间分辨和相干特性，填补国内空白

HEPS-超高帧频像素探测器-研究目标

	HEPS-BPIX-HFR	备注
像素尺寸	140 μm $\times$ 140 μm	关键性能相比现有系统不降低
能量范围	6~20 keV	传感器材料Si
帧刷新率	100 kHz	国际同类最高，满足XPCS需求
读出模式	连续读出	非Burst模式，更适合同步辐射
计数深度	2~4 bit	国际同类最高，满足XPCS需求
动态范围	好于 1Mcps/pixel	关键性能相比现有系统不降低
整机规模	好于1M像素	实现线站应用

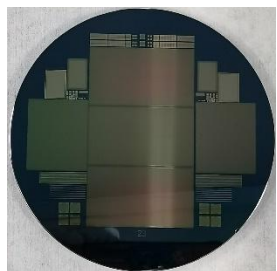
- 研制超高帧频像素探测器，突破核心关键技术
- 核心的帧刷新率、计数深度、工作模式等指标达到国际同类最高水平，并保持其他关键性能相比HEPS现有像素探测器系统不降低（像素尺寸、动态范围等）
- 实现探测器整机集成，并实现线站应用
- 积极拓展光源以外的相关领域应用

HEPS-超高帧频像素探测器-研究内容

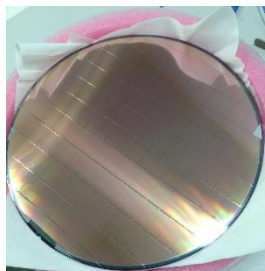


像素探测器涉及多方面关键技术和系统
在已有的工作基础上进一步突破超高帧频
探测器关键技术，开展以下研究：

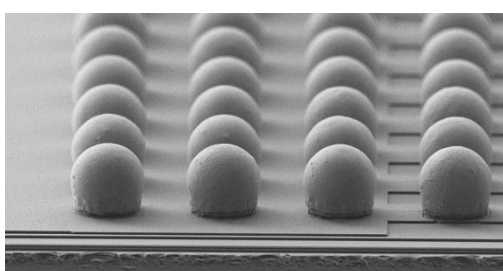
- 超高帧频像素读出芯片设计
- 海量数据传输和高速电子学系统
- 探测器刻度标定
- 探测器系统应用研究



传感器



集成电路



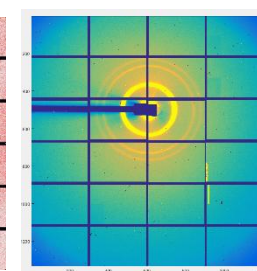
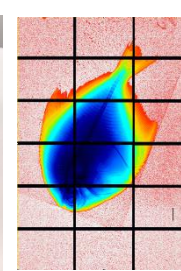
高密度封装



模块及电子学



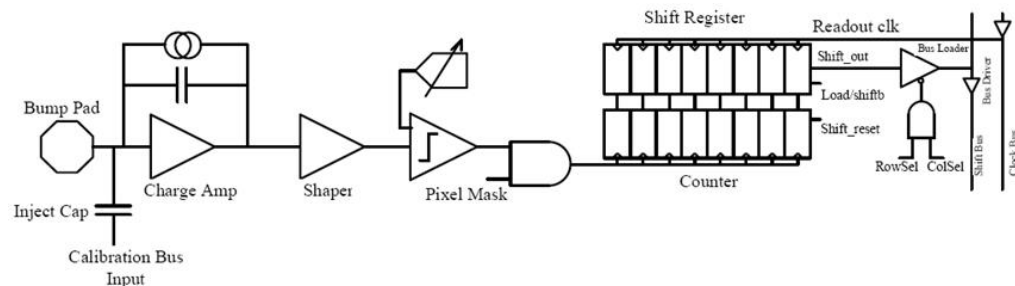
系统



应用

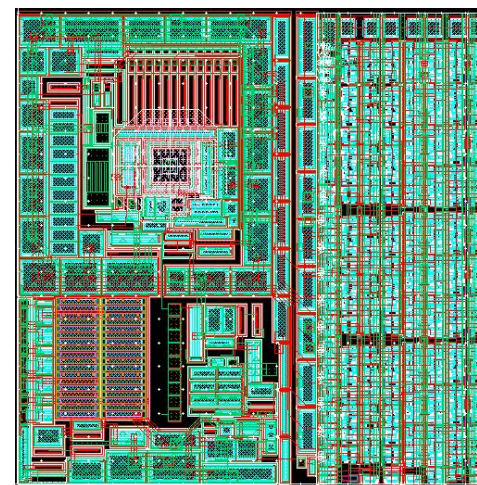
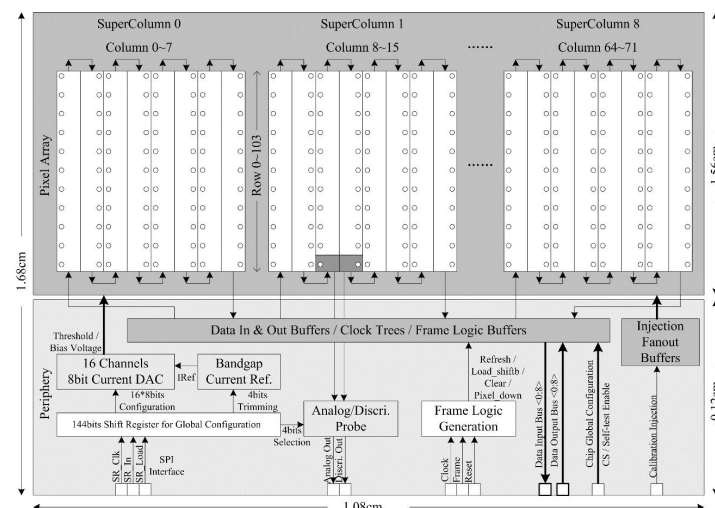
- 传感器、高密度封装、探测器系统集成、机械设计等关键技术已在前期研究中实现突破，仅需在此基础上实现技术复用和生产

HEPS-超高帧频像素探测器-研发内容



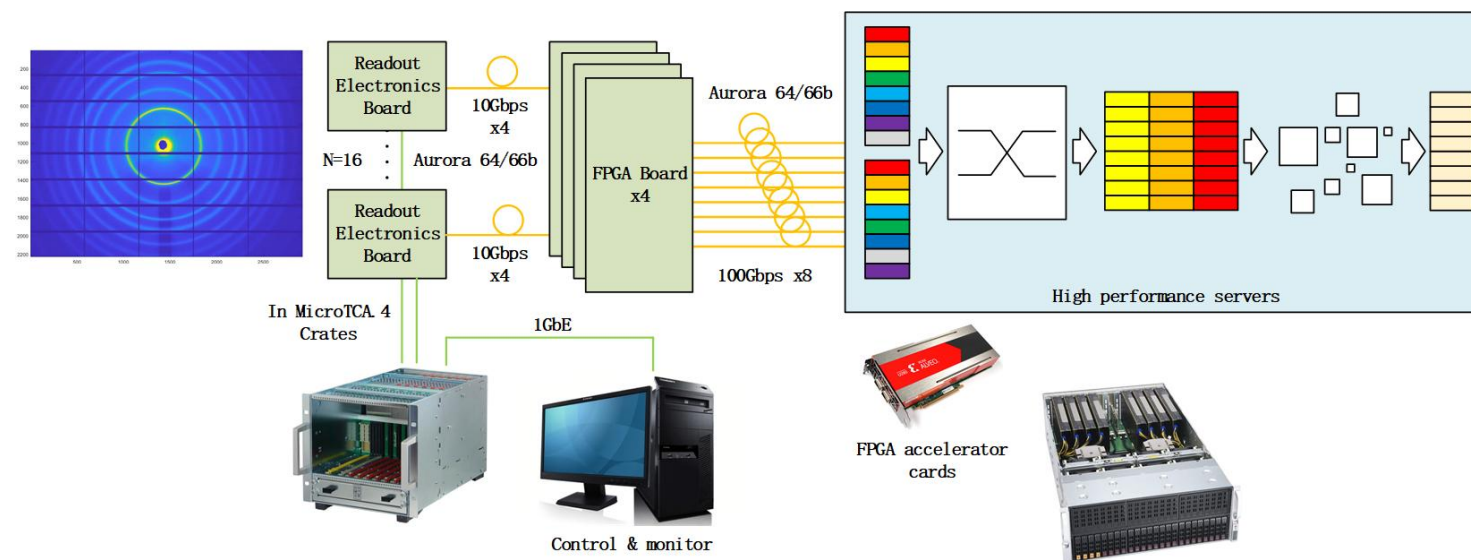
• 超高帧频像素读出芯片设计

- 高动态信号的前端电路信噪比优化
- 超高刷新率的像素阵列结构重构及信号完整性问题
- 超高帧频数据传输时的模数电路高隔离度和串扰抑制问题

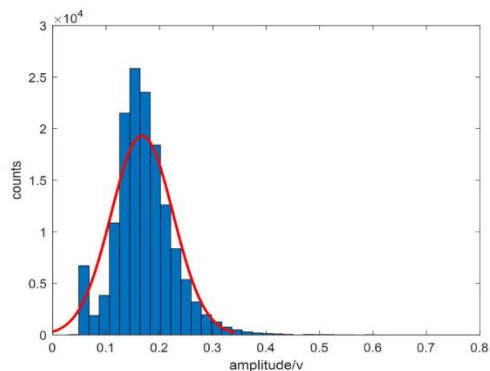


• 海量数据传输和高速电子学系统

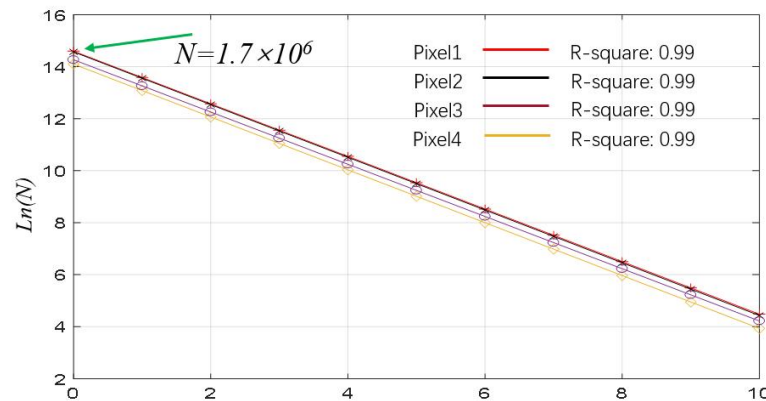
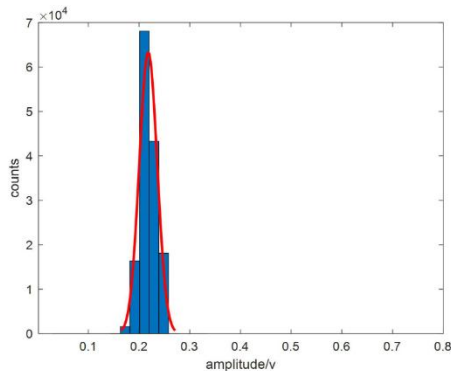
- 高速串行接口设计和信号完整性问题
- 数据传输链路可靠性及高频基板材料对信号、散热、真空的影响研究
- 海量数据传输及在线处理



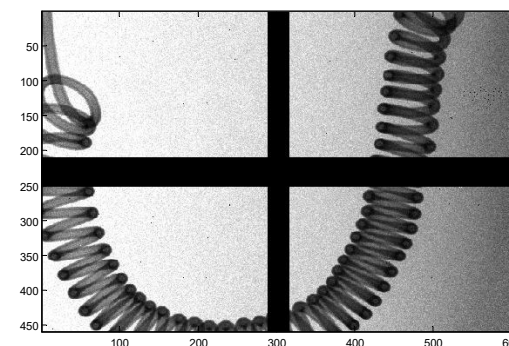
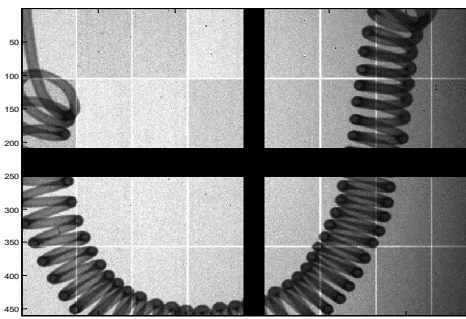
HEPS-超高帧频像素探测器-研发内容



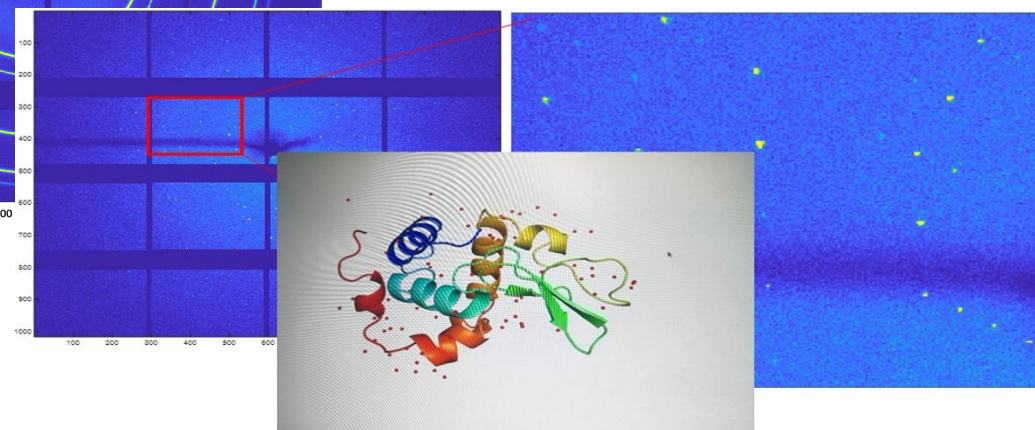
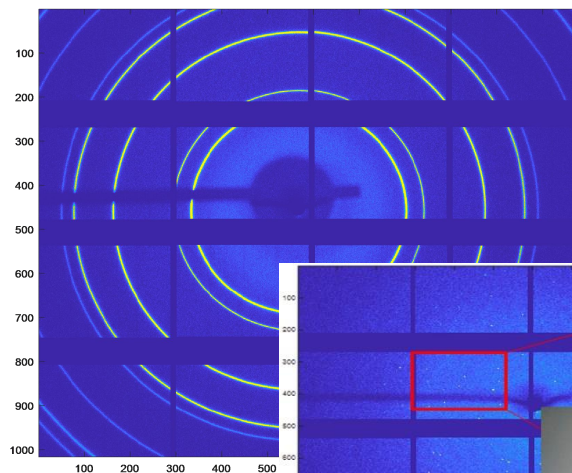
能量刻度



计数率刻度



位置、强度刻度



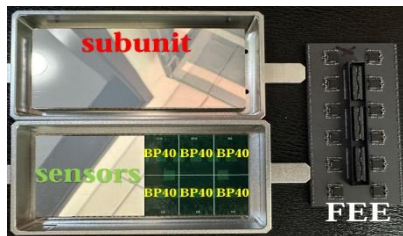
线站应用

- 探测器刻度标定
 - 新型探测器的常规刻度优化（能量、响应、位置）
 - 超高帧频应用的时间特性刻度
- 探测器系统应用研究
 - 超高帧频应用的时钟全局同步问题
 - 超高帧频应用的触发和线站接口协同设计问题
 - 探测器长期可靠性和用户接口设计

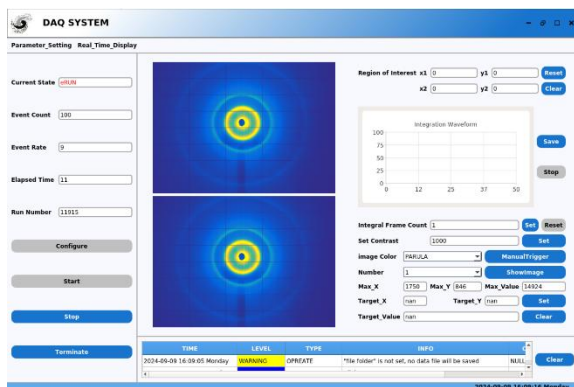
HEPS-超高帧频像素探测器-年度计划

[illegible]

总结：从探测器关键技术到科学仪器



探测器模块和读出电子学



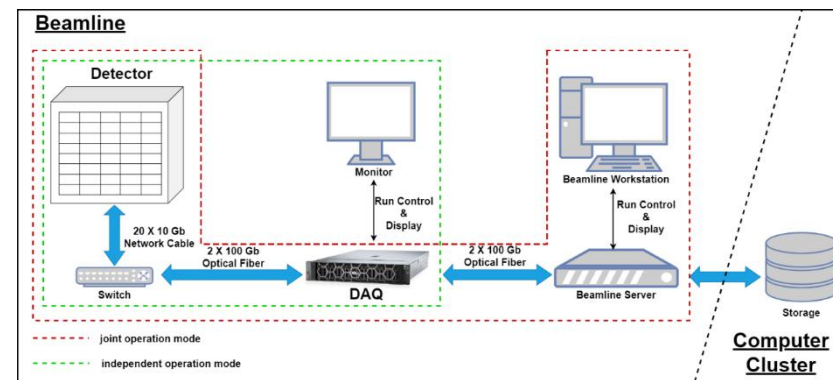
用户界面



线站探测器



整机集成和读出



线站接口和数据集群

- 线站探测器服务于普通非专业用户，**不仅仅是关键技术的集成，更是一台产品级科学仪器**
- 从不同需求下的特定关键技术，到通用接口的线站落地，有大量共性问题，需要进行长期迭代，按照产品标准设计，保证长期可靠性。当然，也有广泛的合作空间

期待：共性技术挑战及未来合作

先进封装工艺 先进制造工艺	➢ 高可靠性倒装焊封装工艺 ➢ 先进冷却及散热方案 ➢ 高纯度传感器材料制备 ➢ 高精度刻蚀、注入工艺
专用集成电路	➢ 高速前端芯片、后端电子学设计方法 ➢ 抗辐照芯片设计方法学 ➢ 超低噪声前端电子学设计方法
系统集成和用户接口	➢ 高精度探测器模块组装 ➢ 高精度探测器机械设计 ➢ 用户软件和线站接口
探测器刻度及表征	➢ 探测器能量刻度及定标 ➢ 探测器位置刻度及成像接口 ➢ 探测器数据标准化

- 各大光源高端探测器有大量共性需求，也将有大量共性技术挑战
- 在各方差异化发展，研制特定需求探测器的同时，其共性技术挑战或可以合作方式来解决
- 例：
 - 已完成初步研制的探测器（面阵、SDD、BPM等）可以以试用等形式，逐步在国内相关领域推广，形成规模化效应
 - 具体需求不同，但主要技术相通的探测器（如面阵、成像探测器等），可以开展合作研发，加速这类探测器成熟和落地

谢谢！

