



STARLIGHT 探测器研制进展

鞠旭东

Xudong JU

代表 STARLIGHT 合作组

2026.04.17



上海硬X射线自由电子激光装置：SHINE，硬线工程

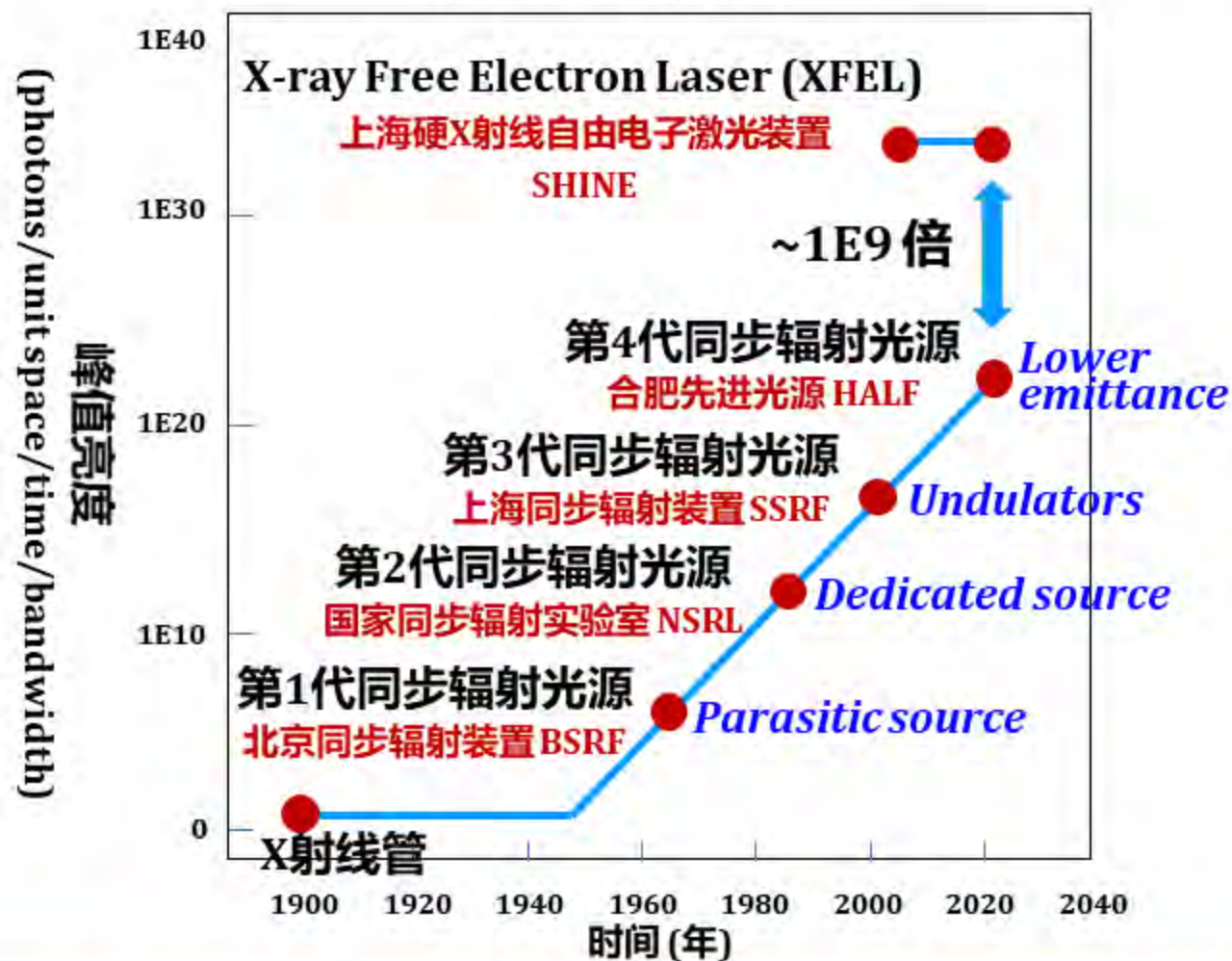
- SHINE: **S**hanghai **H**igh repetitio**N** rate XFEL and **E**xtrême light facility, 2018 - 2025
 - 10段隧道：全长3.1km；地下29m；5个工作井
 - 1台8GeV超导电子直线加速器，1条软XFEL，1条硬XFEL，6个实验站，1台100PW激光器

Station	Name	beamline	Detector
SES	Spectrometer for Electronic Structure	Soft	
SSS	Soft X-ray Scattering and Spectroscopy Endstation	Soft	PAD
AMO	Atomic, Molecular and Optical Science Endstation	Soft	
CDS	Coherent Diffraction Endstation for Single Molecules and Particles	Hard	PAD
HSS	Hard X-ray Scattering and Spectroscopy Endstation	Hard	PAD
SEL	Station of Extreme Light	Hard	

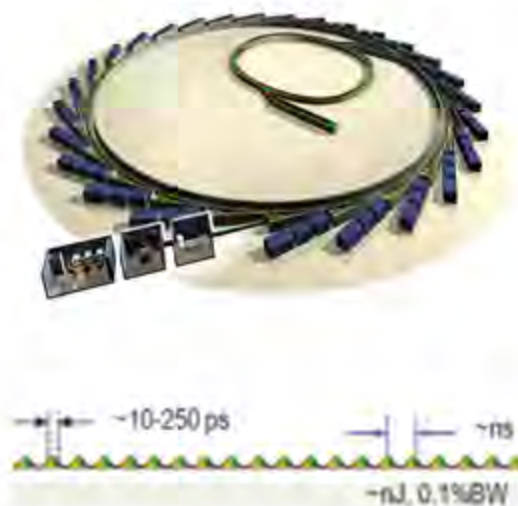


同步辐射 SR、X 射线自由电子激光 XFEL

光源峰值亮度 @ 12keV



同步辐射
SR



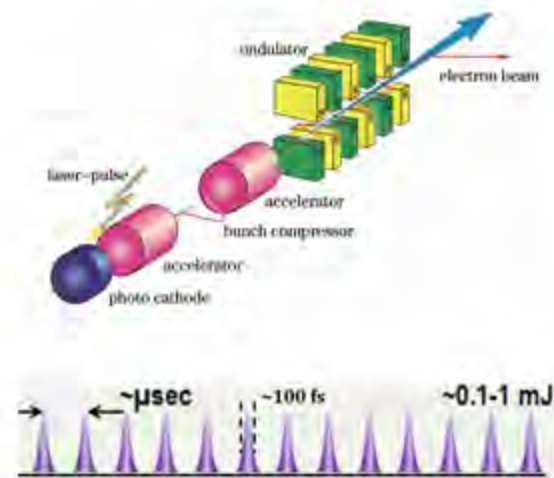
累积光子成像

(光子/像素/秒)

电荷积分、光子计数

Photon Counting (PC)

X射线自由电子激光
XFEL



单脉冲成像

(光子/像素/脉冲)

电荷积分

Charge Integrating (CI)

光源亮度: 50年增长 10^{22} 倍 \Rightarrow XFEL: 超强相干激光、超高峰值亮度、超短飞秒脉冲

面探测器 @ SHINE : 科学需求

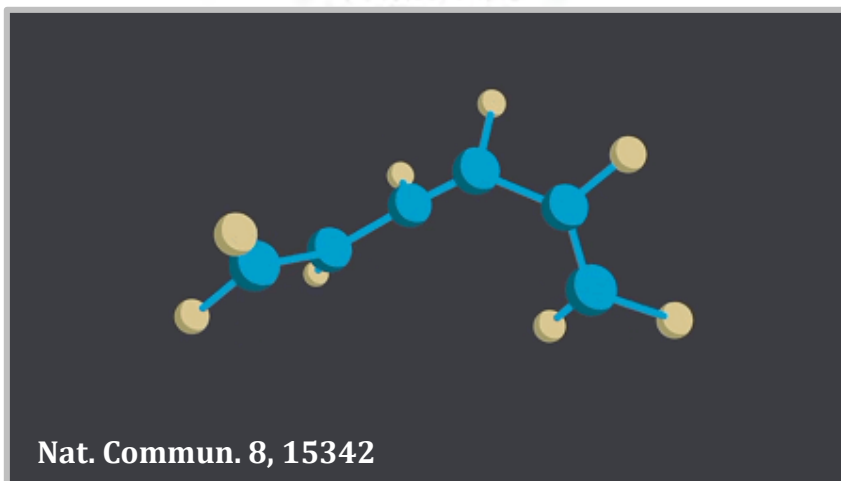
相干衍射成像CDI、泵浦探测PP、串行晶体学SFX、X射线光子关联谱学XPCS...

Diffraction before Destruction

单脉冲成像



分子照片 → 分子电影
泵浦探测

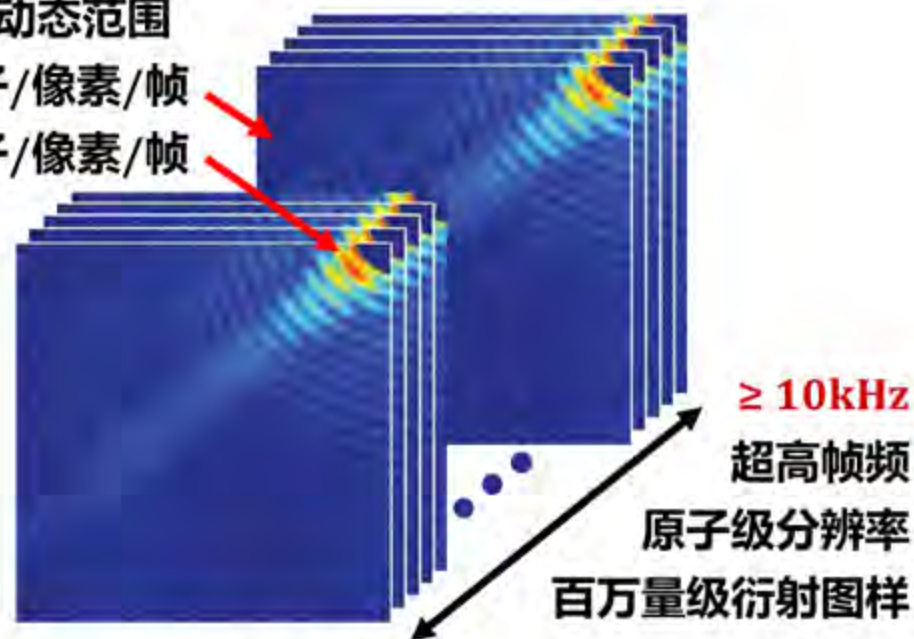


相干衍射成像

超大信号动态范围

0 或 1 光子/像素/帧

$\geq 10^4$ 光子/像素/帧

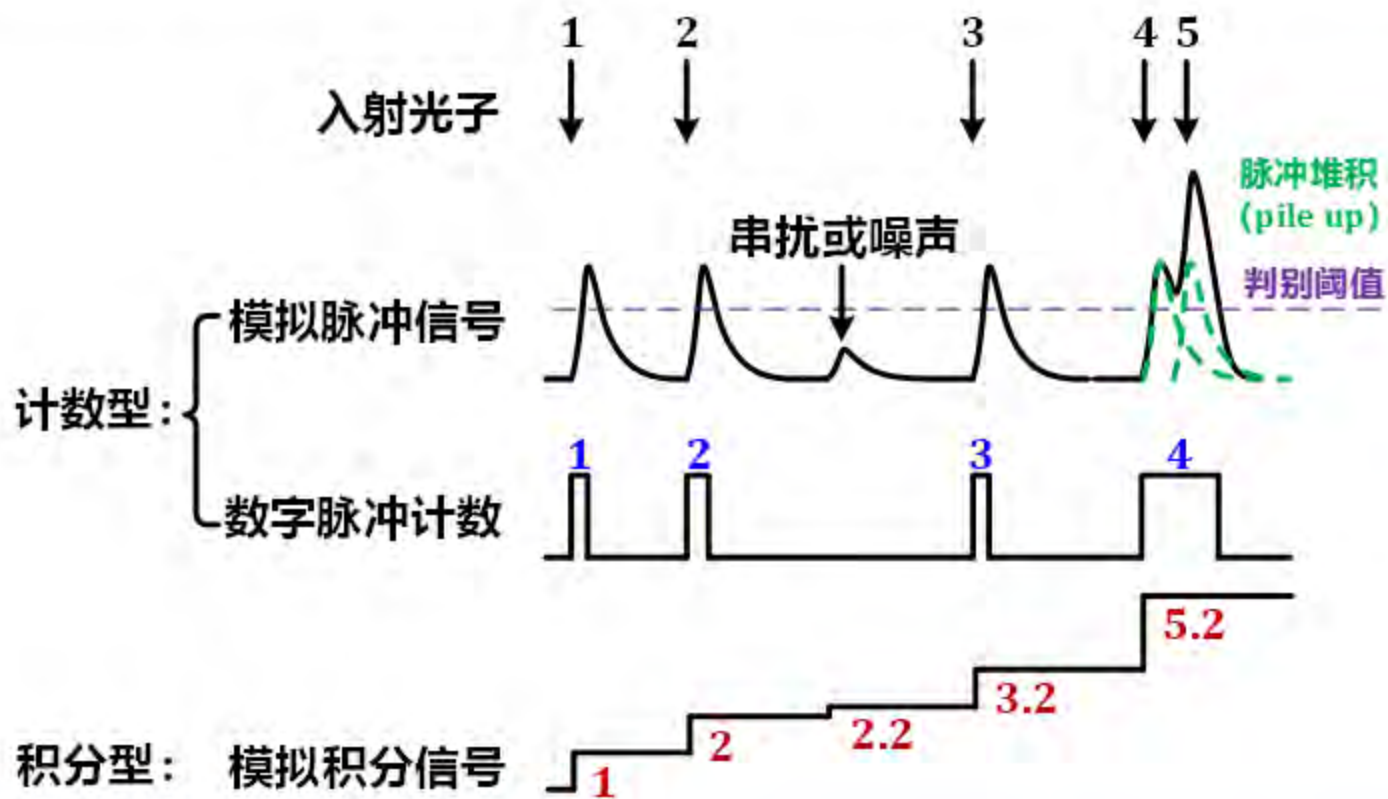


小像素: $\leq 150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$

大面板: ≥ 100 万像素, 百 cm^2 量级

大数据: $\sim 300\text{TB}$ @ 1h, 4M, 10kHz

面探测器 @ SHINE : 方案, JUNGFR AU、STARLIGHT



Facility	PAD	Pixel Size (μm)	ENC (e^-)	Dynamic Range (ph./Pixel/Pulse)	Frame Rate (Hz)
LCLS	CSPAD	110	~ 330	2.5k @ 8keV	120
SACLA	MPCCD	50	~ 250	2.5k @ 6keV	60
	SOPHIAS	30	~ 180	1.14k @ 6keV	60
	CITIUS	72.6	~ 60	1800 @ 12keV	5k
European XFEL	AGIPD	200	~ 265	10k @ 12keV	4.5M
	DSSC	200	< 50	6k @ 1keV	4.5M
	LPD	500	~ 1000	100k @ 12keV	4.5M
SwissFEL	JUNGFRAU	75	~ 65	10k @ 12keV	2.4k
LCLS-II	ePix100	50	< 60	100 @ 8keV	2k
	ePix10k	100	~ 120	10k @ 8keV	5k
SHINE	STARLIGHT	100	~ 180	10k @ 12keV	10k

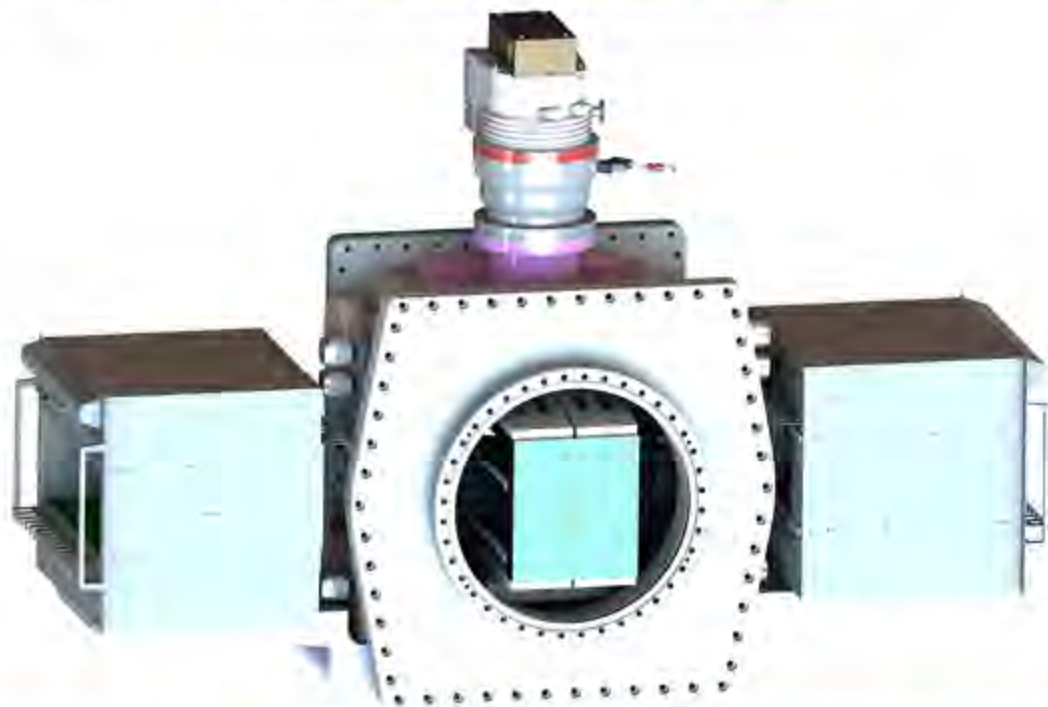
1. 在SR上广泛应用的**光子计数型**面探, 无法应用于XFEL。针对XFEL的脉冲型光子, 面探需采用**电荷积分**读出方式。
2. 当前国际上尚无成熟的电荷积分型面探。各大XFEL针对各自光子特征, 普遍开展了电荷积分型面探的自主研发。
3. 瑞士PSI研发的**JUNGFRAU**探测器被选为SHINE面探的基本方案。同时, SHINE开展了更高帧频面探的自主研发。

面探测器 @ SHINE : 自主研发, STARLIGHT

“星光”系列探测器: 2018年 - 至今

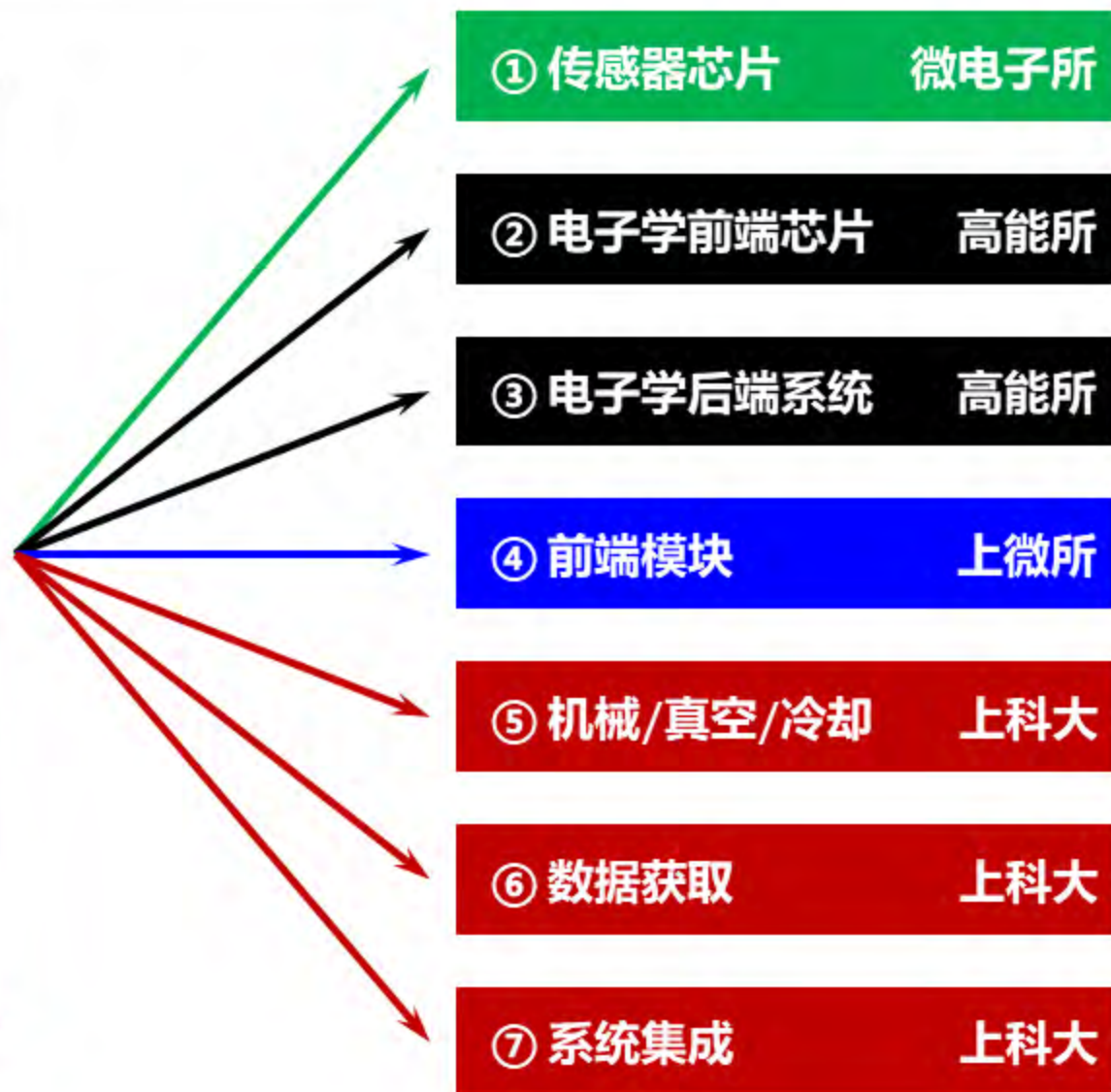
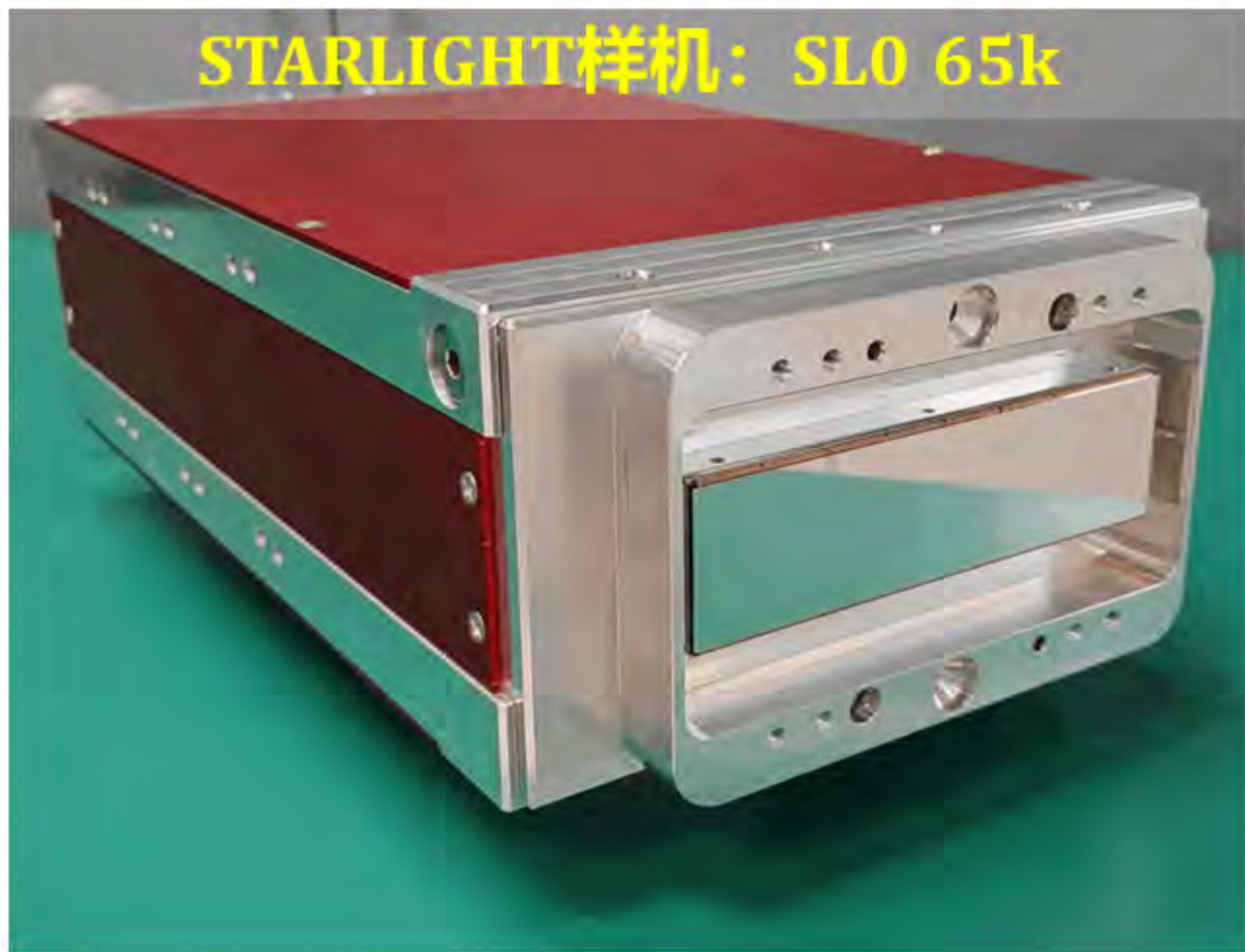
- **STARLIGHT** : *SemiconducTOR Array detectoR with Large dynamIc ranGe and cHarge inTegrating readout*
 - **STARLIGHT0 / SLO**: 刘志, 中科院重大科研仪器研制项目, [面向自由电子激光的大阵列硅基探测器关键技术研制](#)
 - **STARLIGHT1 / SL1**: 刘志, 基金委国家重大科研仪器研制项目-部门推荐, [超高帧频大动态范围X射线探测系统](#)

参数	STARLIGHT0/SLO	STARLIGHT1/SL1
工作模式	电荷积分, 连续采样	电荷积分, 连续采样
帧刷新率	$\geq 1\text{ k Hz}$	$\geq 10\text{ k Hz}$
单光子灵敏	是, @ 12keV	是, @ 12keV
动态范围	$0, 1 - 10^4$ ph./pixel/pulse @ 12keV	$0, 1 - 10^4$ ph./pixel/pulse @ 12keV
能量范围	5keV - 20keV	5keV - 20keV
量子效率	$\geq 80\%$ @ 8keV	$\geq 80\%$ @ 8keV
像素尺寸	$\leq 200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$	$\leq 100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$
模块像素	65k Pixels	256k Pixels
模块通量	$\geq 135\text{ MB/s}$	$\geq 5\text{ GB/s}$
模块尺寸	107cm×30cm	105cm×30cm
兼容真空	$\leq 10^{-6}\text{ mBar}$	$\leq 10^{-6}\text{ mBar}$



电荷积分读出、大动态范围、高帧频 \Rightarrow 国内首款

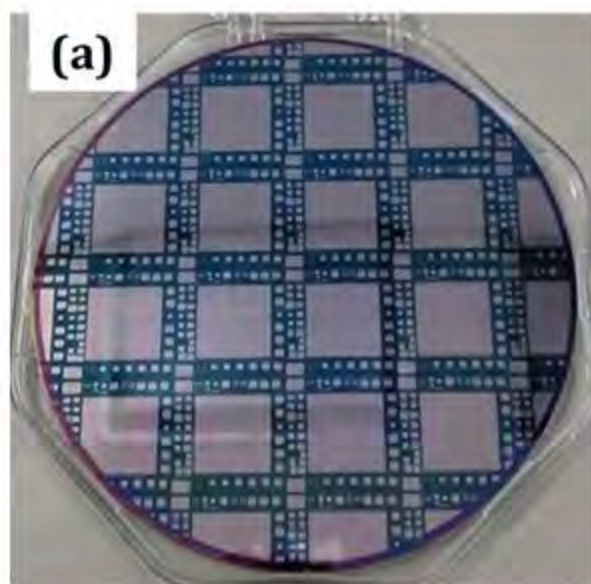
STARLIGHT: 研发团队与任务分工



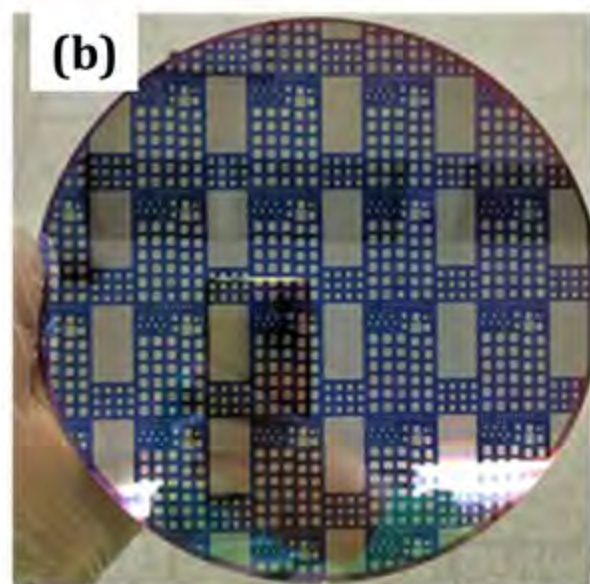
STARLIGHT : Sensor, 传感器芯片

基于微电子所8寸先导工艺平台，开展多轮工艺试制，研制多款不同规格的传感器芯片。

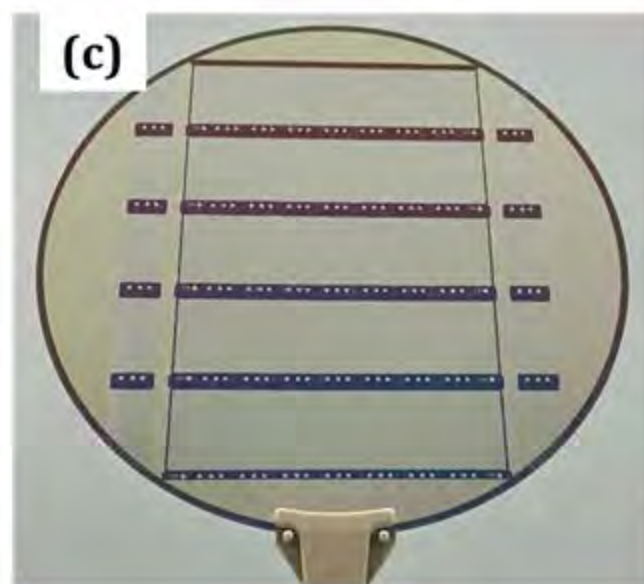
成功开发了光刻拼接技术，制作出晶圆级器件，暗电流性能达到国际先进水平。



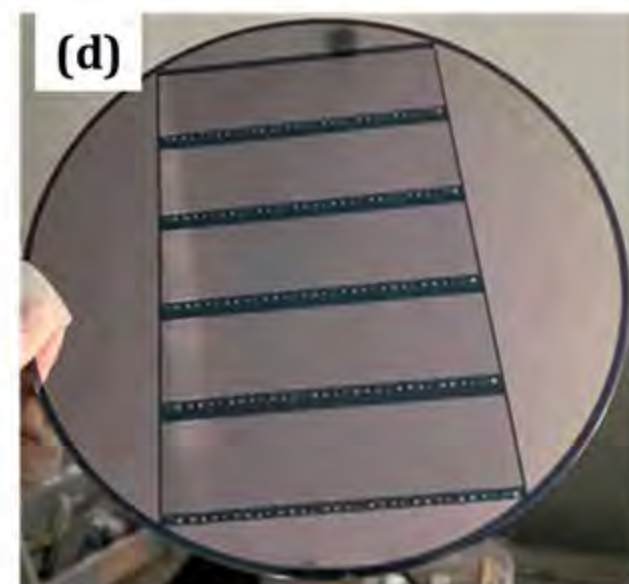
SPS 200FT
像素尺寸: 200 μ m
像素数目: 128 \times 128



SPS 100FT
像素尺寸: 100 μ m
像素数目: 128 \times 256



SPS 200F
像素尺寸: 200 μ m
像素数目: 128 \times 512



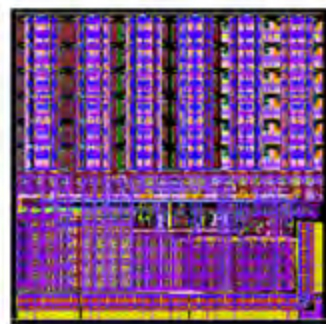
SPS 100F
像素尺寸: 100 μ m
像素数目: 256 \times 1024

STARLIGHT：ASIC，电子学前端读出芯片

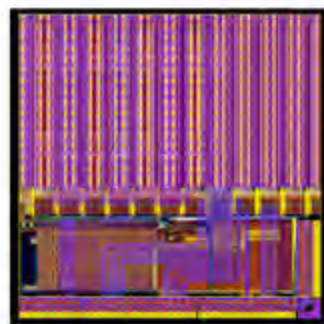
基于国产 CMOS 130nm 工艺，研发了“HYLITE”系列读出芯片，4次MPW、2次NTO。

三级增益自适应放大 → 动态范围最大 10^4 光子/像素/帧。像素内ADC → 帧频10kHz。

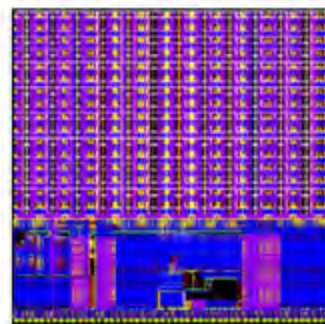
ASIC 芯片	说明
HYLITE 0.1	2020, MPW, 200 μ m, 像素前端设计方案
HYLITE 0.2	2021, MPW, 100 μ m, 小像素、电源完整性研究
HYLITE 200S	2022, MPW, 200 μ m, 高速串行接口、芯片定版
HYLITE 200F	2022, NTO, 200 μ m, 全尺寸、64 \times 64
HYLITE 100F	2023, NTO, 100 μ m, 全尺寸、128 \times 128



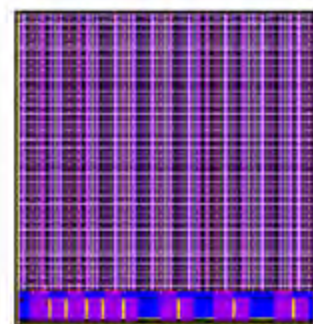
HYLITE 0.1



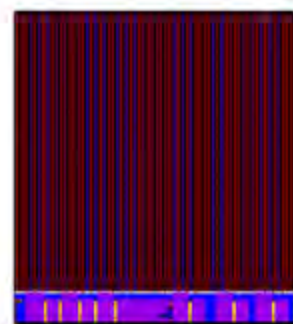
HYLITE 0.2



HYLITE 200S

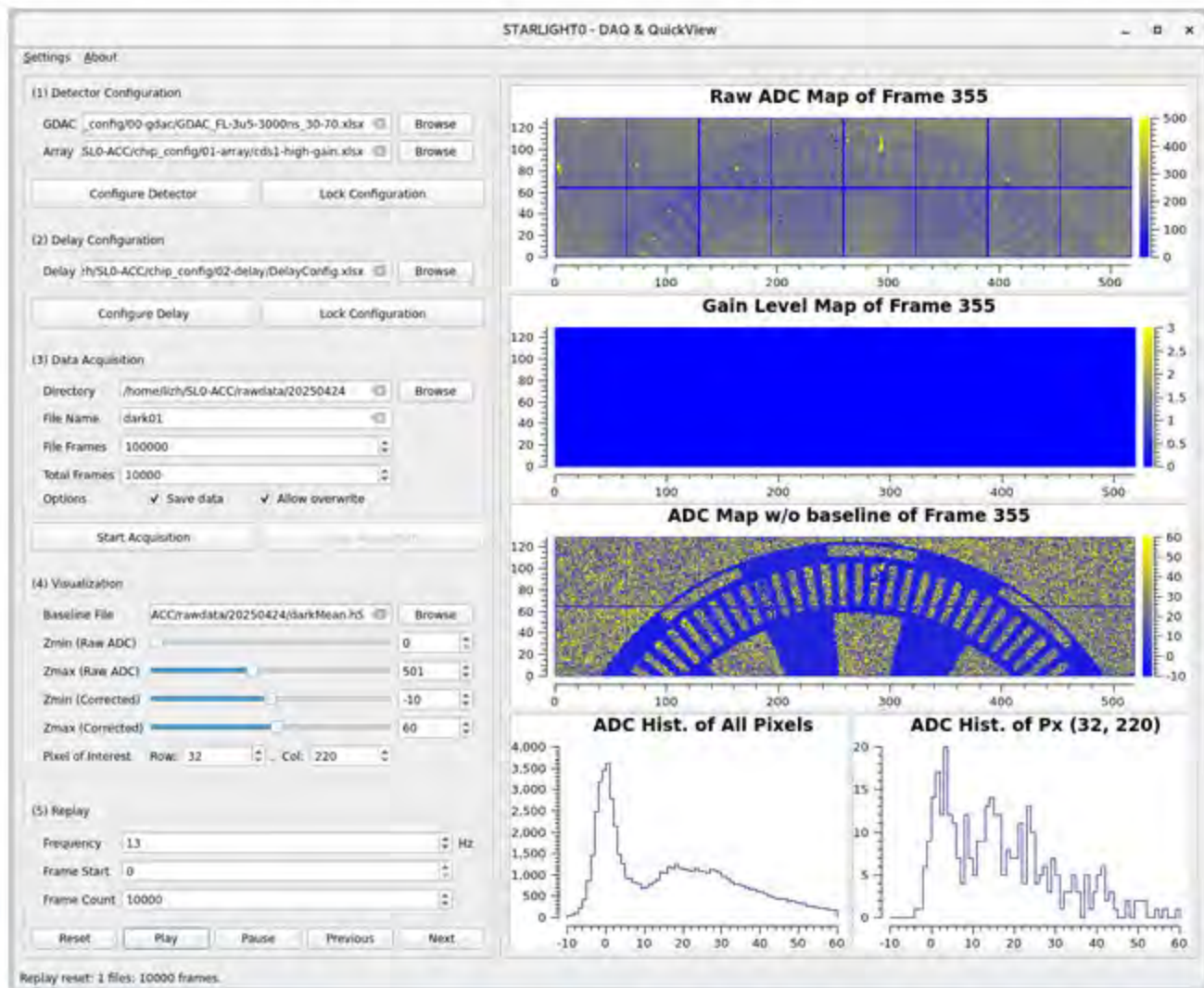


HYLITE 200F



HYLITE 100F

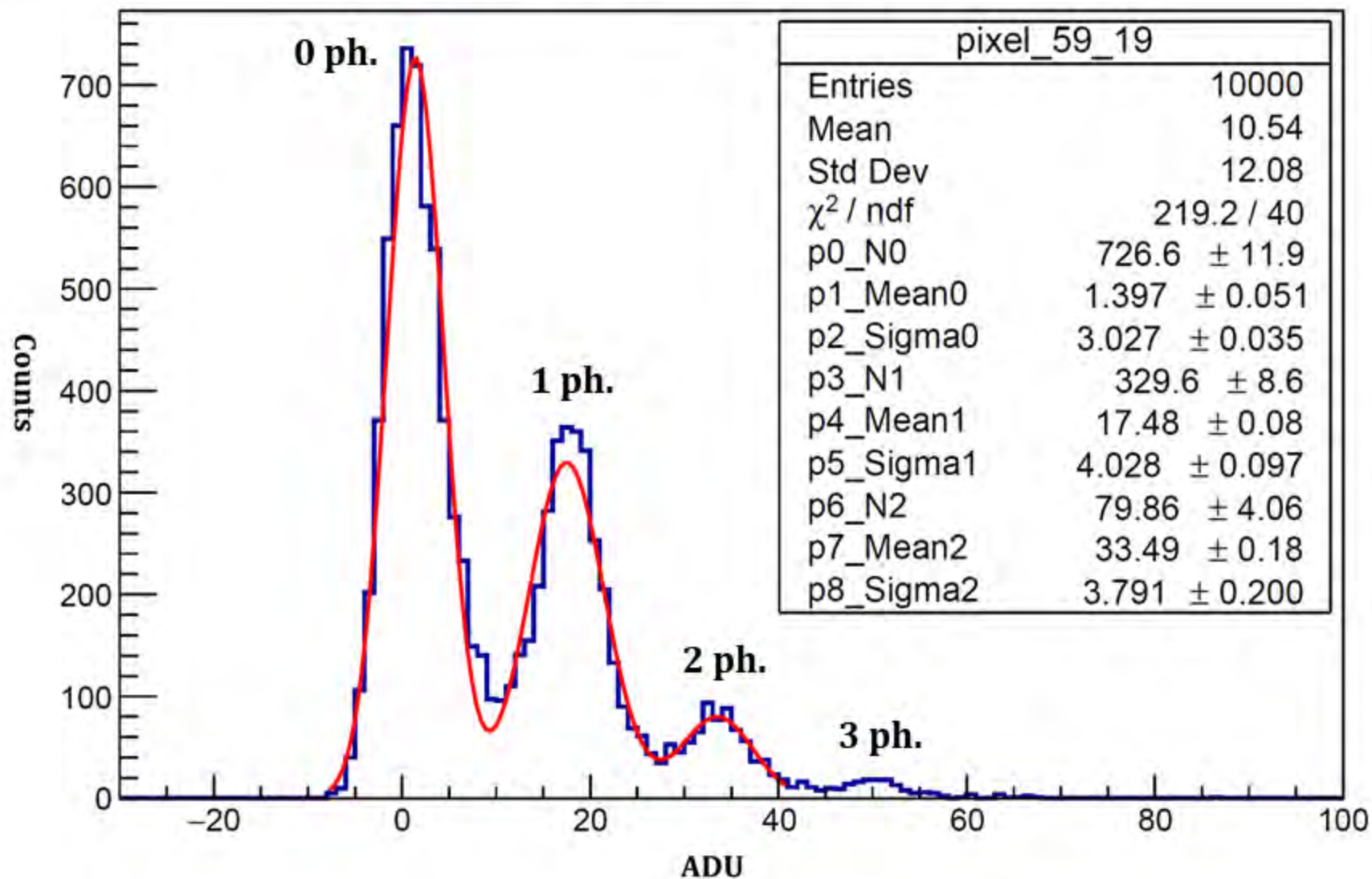
STARLIGHT : DAQ, 数据获取系统



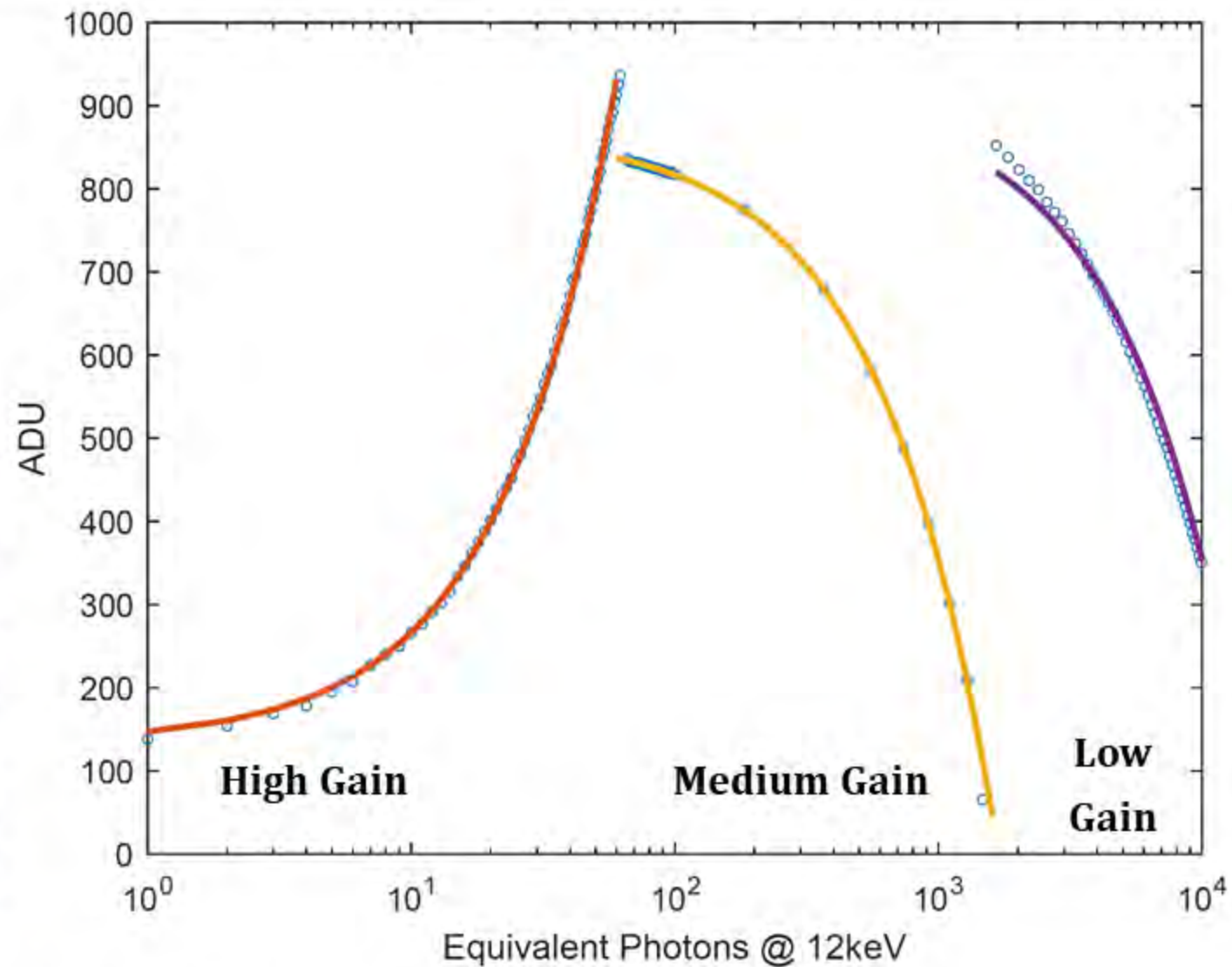
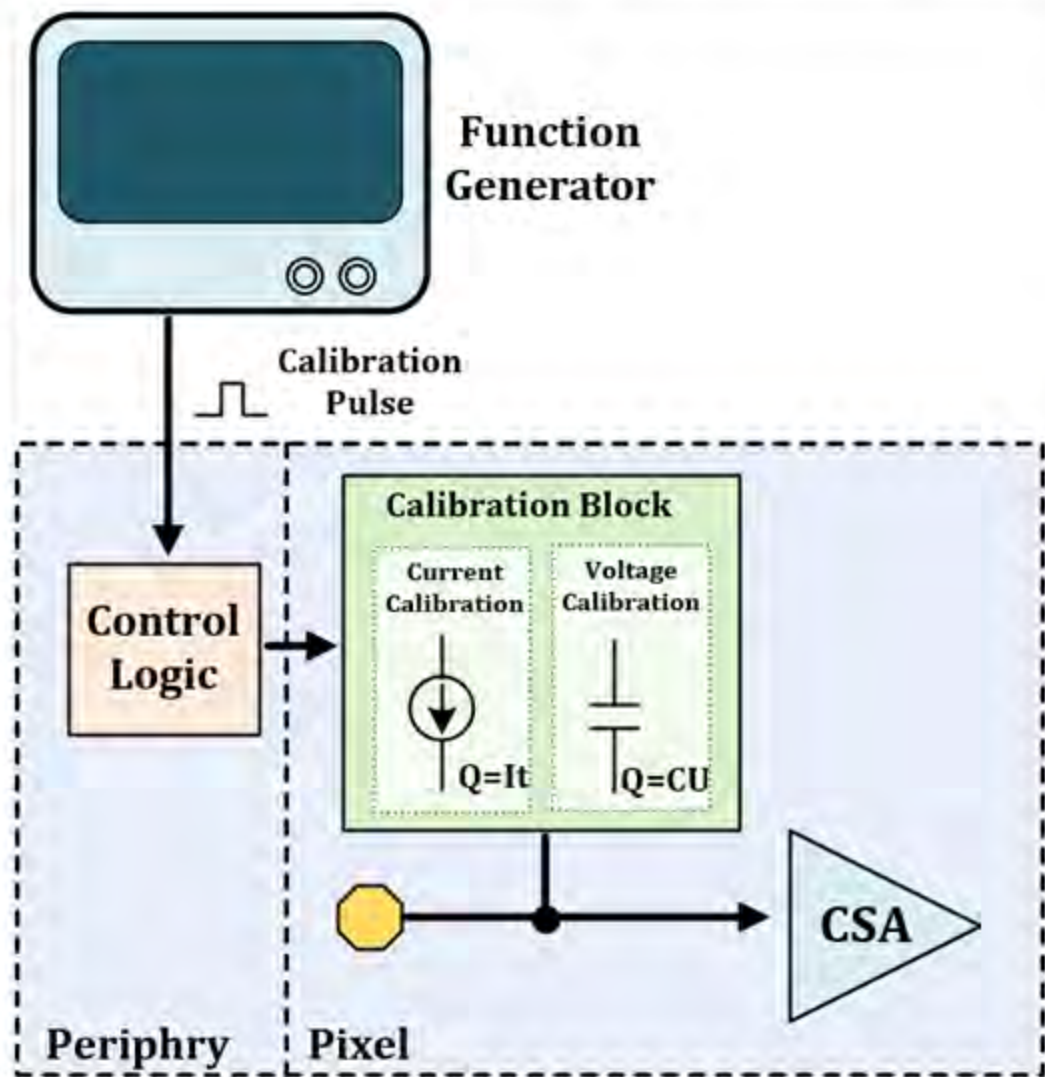
多节点分布式架构, 基于GPU、FPGA的异构方案, 数据传输带宽最高可达100GB/s。

STARLIGHT : 单光子灵敏, SNR ~ 9 @ 12keV

ADC spectrum of pixel_59_19 @ 12keV



STARLIGHT : 大动态范围, $\geq 10^4$ ph./pixel/pulse

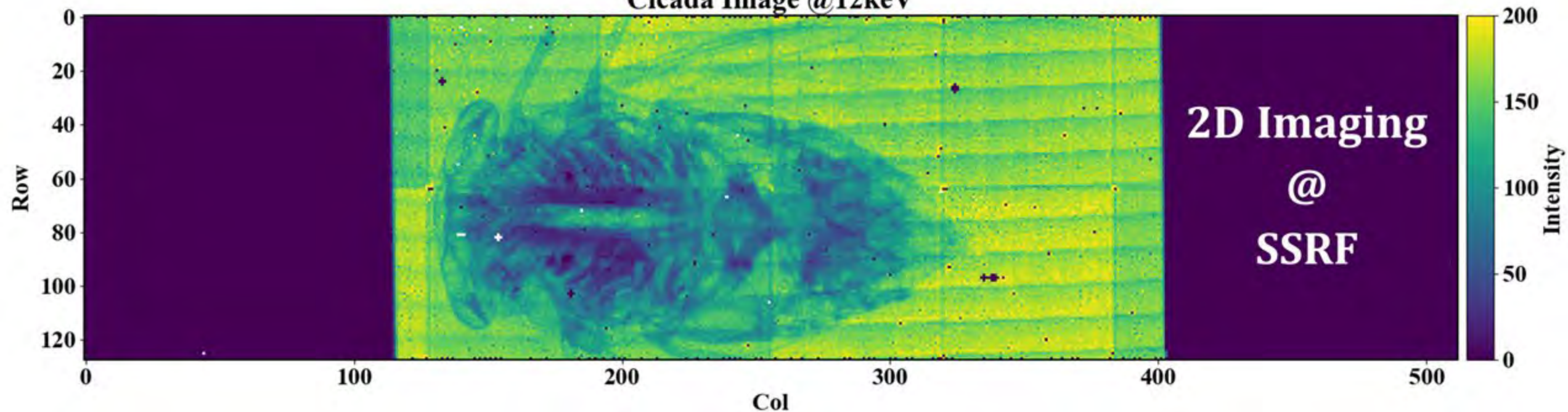


STARLIGHT : 帧刷新频率, 帧频-1kHz





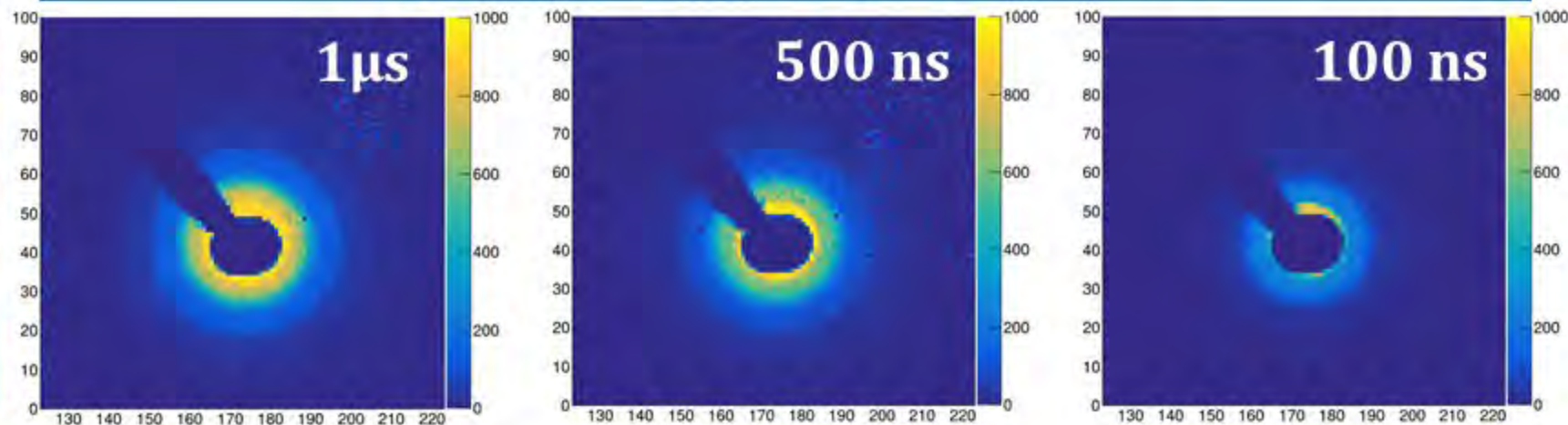
Cicada Image @12keV





星光 @ HEPS-SDB, 2025.10.14

小角散射时间分辨, 纳米硅粉 @ 21.8keV



验证实验: 超快X射线衍射, 带织构多晶珠光体钢激光单点重熔过程

1. 捕捉到材料快速熔凝过程的晶格旋转、晶粒析出等动态演化行为 @ 帧频1kHz、曝光时间 $3\mu\text{s}$, 实现了增材制造原位表征。

2. 验证了超快X射线衍射探测。



总结

1. 电荷积分型面探测器是SHINE装置上的主要探测器，也是当前XFEL领域的技术难点和研究热点。
2. STARLIGHT是面向SHINE需求，布局研发的一款通用型、高帧频、大动态范围、电荷积分读出的混合型硅基像素阵列探测器。
3. STARLIGHT已经完成了第一代样机制备，并顺利开展了束流实验，性能获得初步验证，欢迎试用。
4. STARLIGHT的研发离不开合作单位的倾力配合。
5. 软韧X射线能区的面探测器：国际上正在尝试解决的难点。
6. 更高帧频的探测器： $\geq 100\text{kHz}$ 的电荷积分型硅微条探测器。

STARLIGHT 研发团队 @ 2026.04

负责人	刘志
传感器芯片	殷华湘、许高博、吕志勇、翟琼华
电子学前端读出芯片	魏微、李木槿
电子学后端读出系统	张杰、李航旭、廖辛海
前端模块	盛振、孙涛、陈俊博
数据获取系统	李正恒、怀平、史武军
机械、真空、冷却	刘鹏、李为、刘芳
系统集成与刻度	鞠旭东、陈绍飞、仇季玉
管理、档案、质量	石相军、金莉莉