

eXTP卫星上的可成像X射线偏振探测器

姜维春¹, 刘小桦¹, 张雅聪², 王科³, 李红¹, 王娜³, 吴琮¹, 魏微³, 魏可², 孙亮¹, 蒋杰臣¹, 杜园园¹, 刘晓静¹,
施元², 罗天², 王清龙¹, 朱磊¹, 邓新艺¹, 冯骅¹, 徐玉朋¹, 何会林¹, 刘聪展¹, 张双南¹

1.中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理中心 粒子天体物理全国重点实验室,北京100049;

2.北京大学 集成电路学院, 北京 100871;

3.中国科学院高能物理研究所 实验物理中心,北京100049

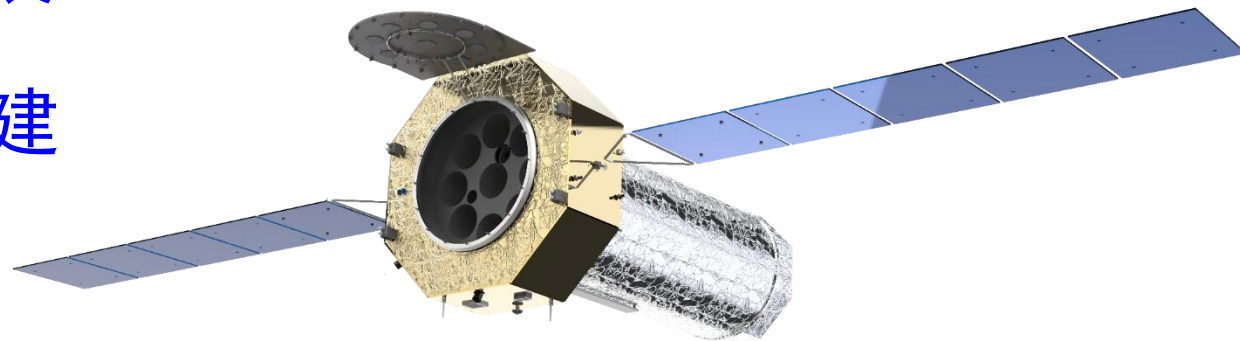
NED2026, 河南登封, 2026-08-11



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



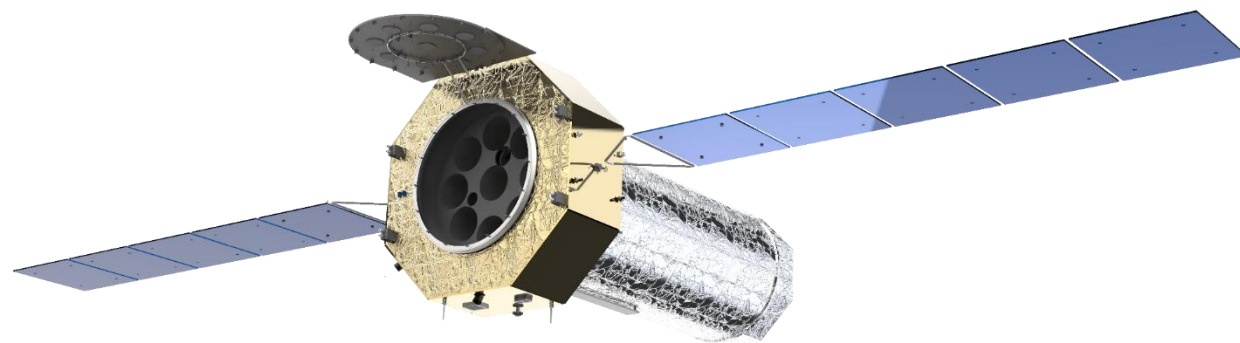
1. eXTP卫星上的PFA载荷
2. PFA载荷可成像偏振探测器工作原理
3. PFA可成像偏振探测器研制进展
4. 基于深度学习的光电子径迹重建算法研究进展
5. 总结与展望



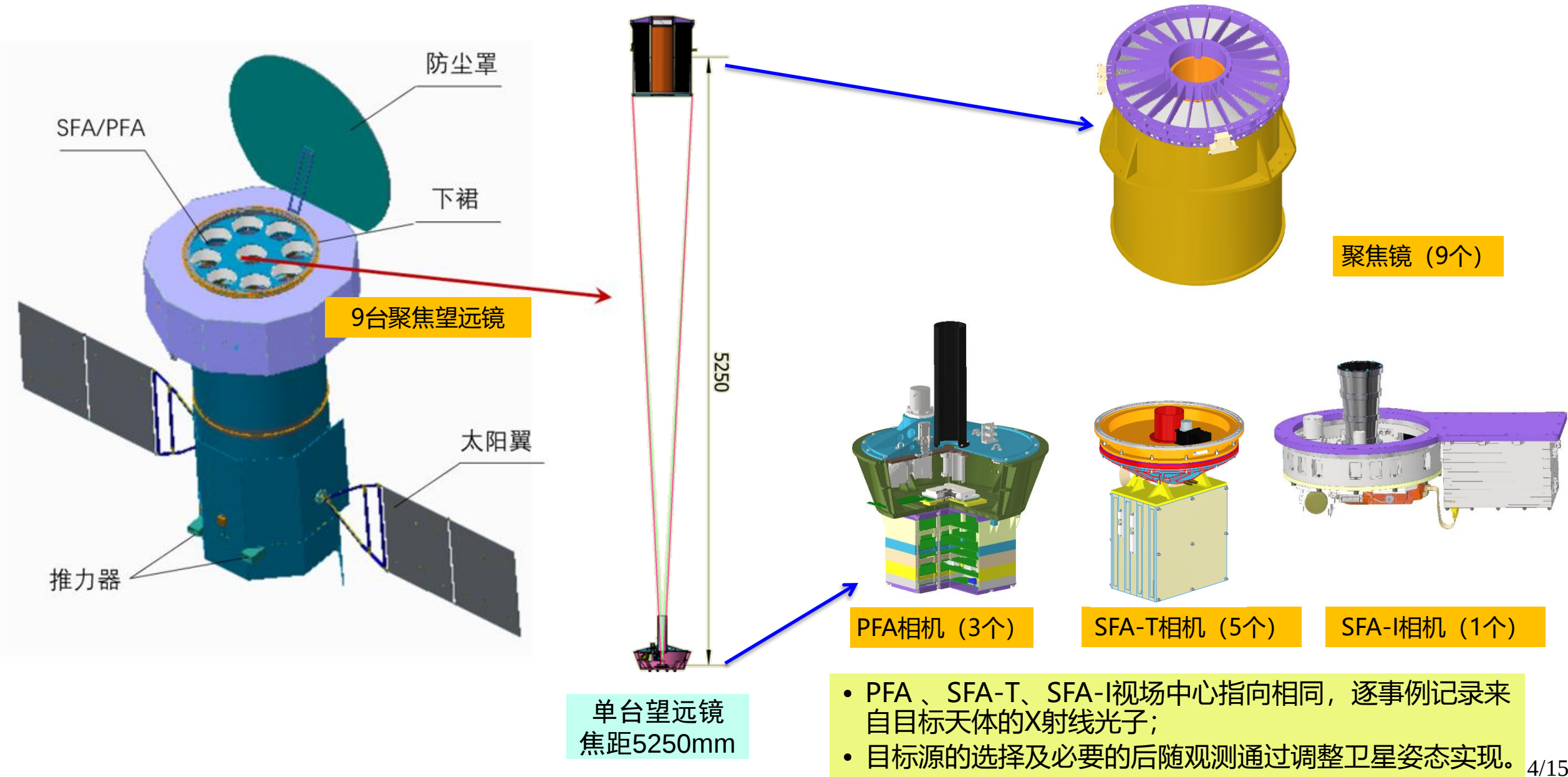
增强型X射线时变与偏振空间天文台（eXTP）

enhanced X-ray Timing and Polarimetry Mission

- 科学目标：“一奇二星三极端”：通过观测黑洞、中子星或夸克星理解极端引力、极端磁场和极端密度条件下的极端宇宙物理规律
- 探测能力：0.5-10 keV, $\sim 2700 \text{ cm}^2 @ 6 \text{ keV}$; 高时间分辨、高能量分辨、高精度偏振探测，综合能力比以往的X射线天文卫星有显著提升
- 总重量约5.0吨，设计寿命5（8）年
- 已经立项，计划2030年发射



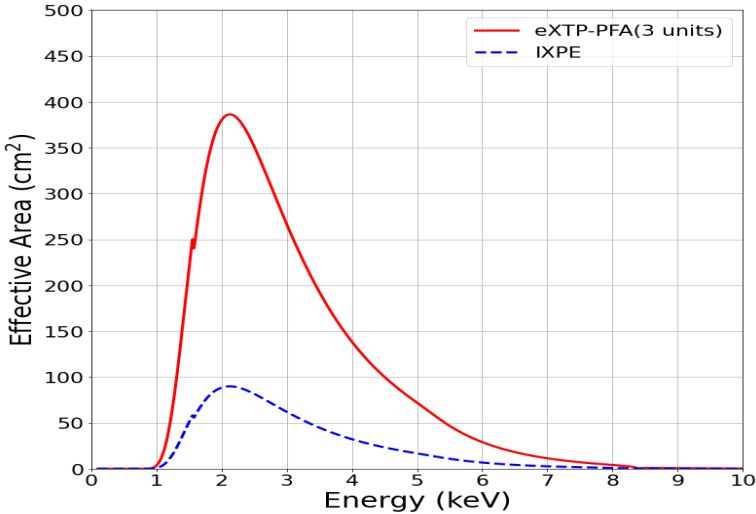
eXTP卫星上的偏振测量X射线聚焦望远镜阵列-PFA



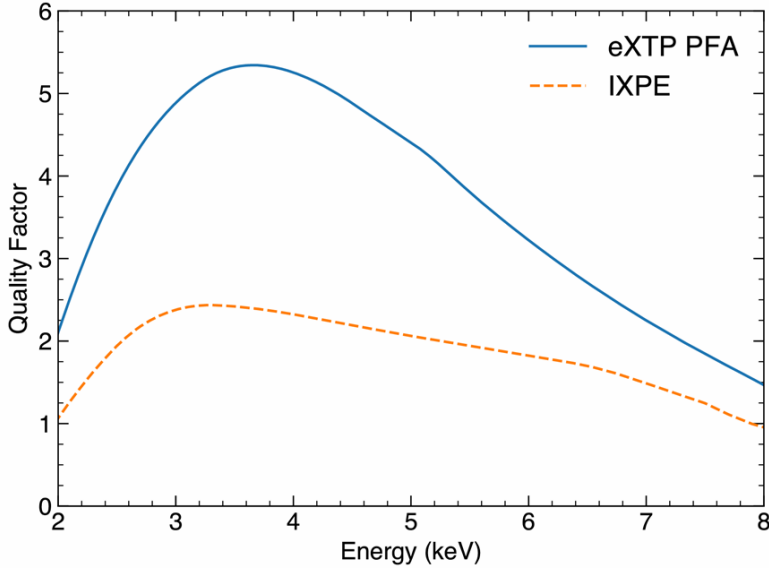


PFA载荷技术指标

主要参数	指标要求
阵列中望远镜数量	3
X射线光学	Wolter-I 型
探测器	气体像素探测器GPD
焦距	5.25m
★总有效面积	$\geq 180 \text{ cm}^2 @ 3 \text{ keV}$
★能量范围	2-8 keV
★能量分辨 (FWHM)	$\leq 1.8 \text{ keV} @ 6 \text{ keV}$
视场	$8' \times 8'$
聚焦镜角分辨	$\text{HPD} \leq 30'' @ 3 \text{ keV}$
调制因子	$\geq 50\% @ 6 \text{ keV}$
★时间分辨	$\leq 10 \mu\text{s}$
★定时精度	$\leq 4 \mu\text{s}$
★总死时间	$\leq 30\% @ 1 \text{ Crab}$
偏振响应稳定度	$\Delta P/P \leq 5\%$
★最小可测偏振度 (MDP)	$\leq 3\% (10^6 \text{ s}, 1 \text{ mCrab})$
★背景 (含粒子本底和宇宙弥漫背景)	$\leq 0.8 \text{ cts/s (2-8 keV)}$
★亮源观测能力	15 Crab



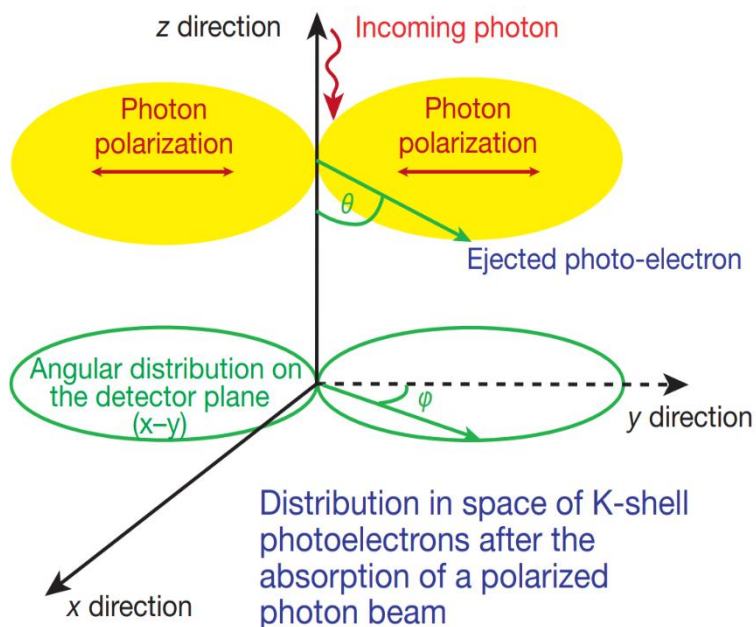
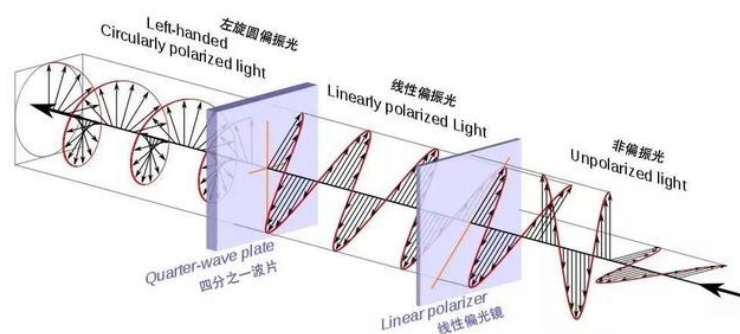
PFA的有效面积



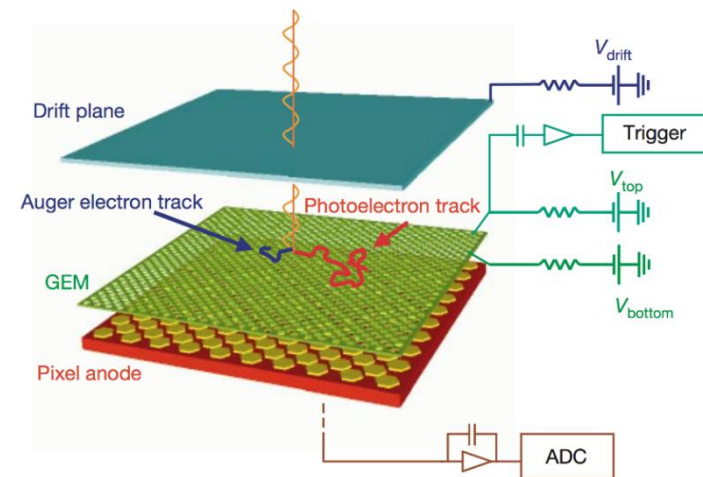
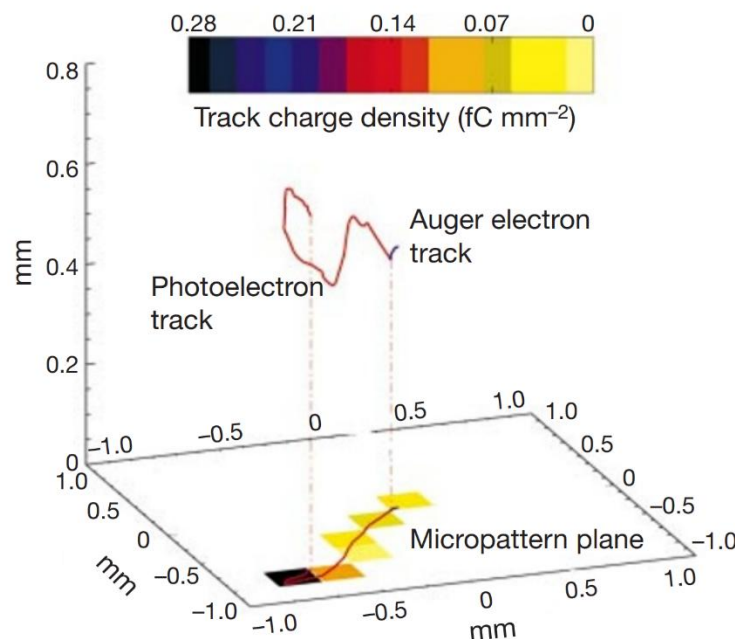
PFA的品质因子

PFA载荷X射线偏振探测原理

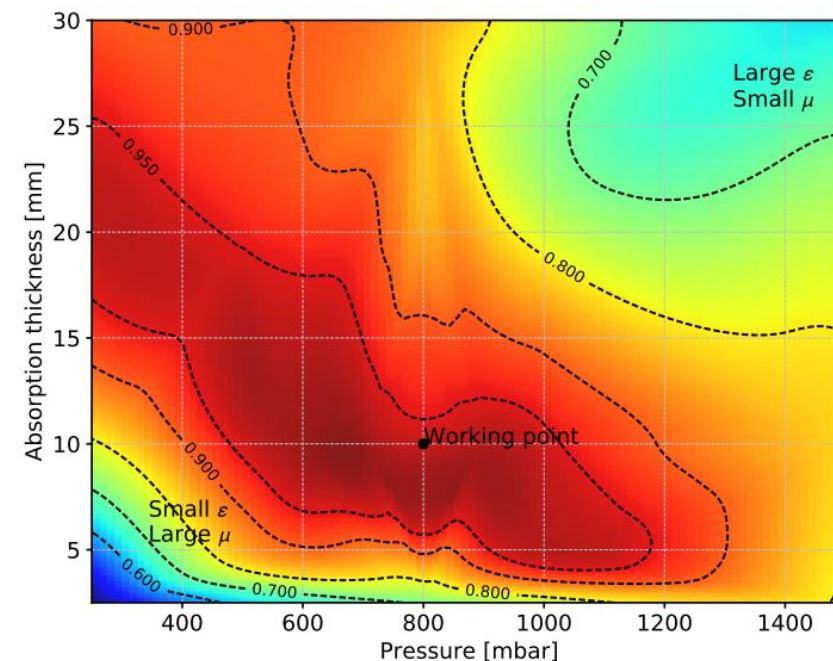
$$\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} = r_0^2 \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{mc^2}{h\nu} \right)^{7/2} \frac{4\sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}{(1 - \beta \cos \theta)^4}$$



E. Costa, et al., Nature 411, 662–665, (2001)



E. Costa, et al., Nature 411, 662–665, (2001)



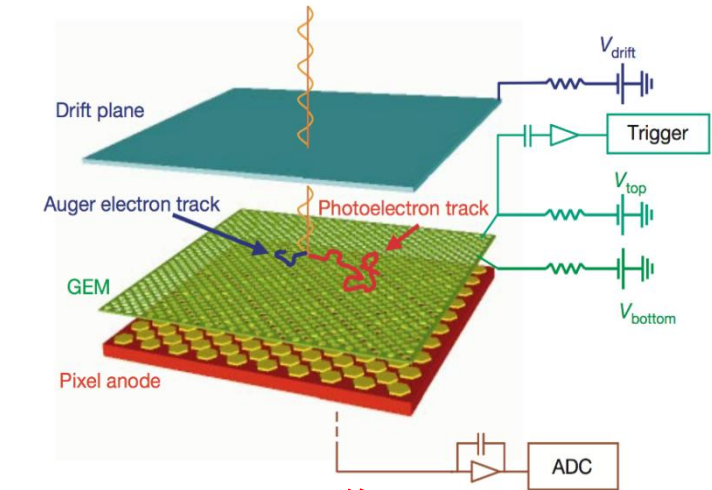
Baldini L. et al, AstroParticle Phys, 133, (2021)

$$\text{品质因子 } Q = \mu \sqrt{\epsilon}$$

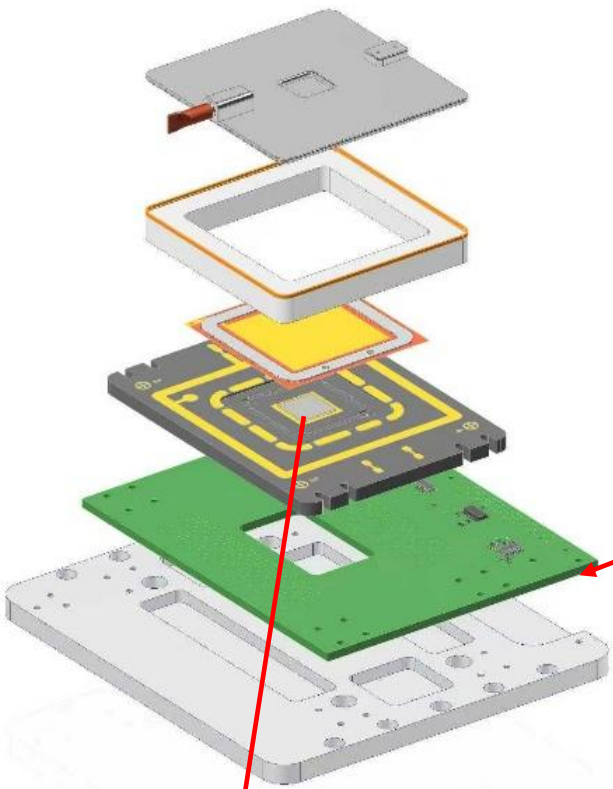
PFA焦平面相机



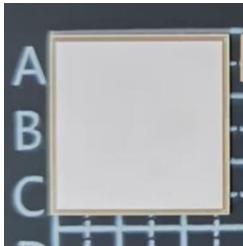
	PFA
基本配置	成像型气体探测器（GPD）， 通过光电子径迹方向分布测量X射线偏振
探测器面积	$\geq 12 \times 12 \text{ mm}^2$ (8')
位置分辨	$\leq 0.2 \text{ mm}$ (8")
能量范围	2-8 keV
能量分辨	$\leq 1.8 \text{ keV @ } 6 \text{ keV}$
调制因子	$\geq 0.5 @ 6 \text{ keV}$
时间分辨	$\leq 10 \mu\text{s}$



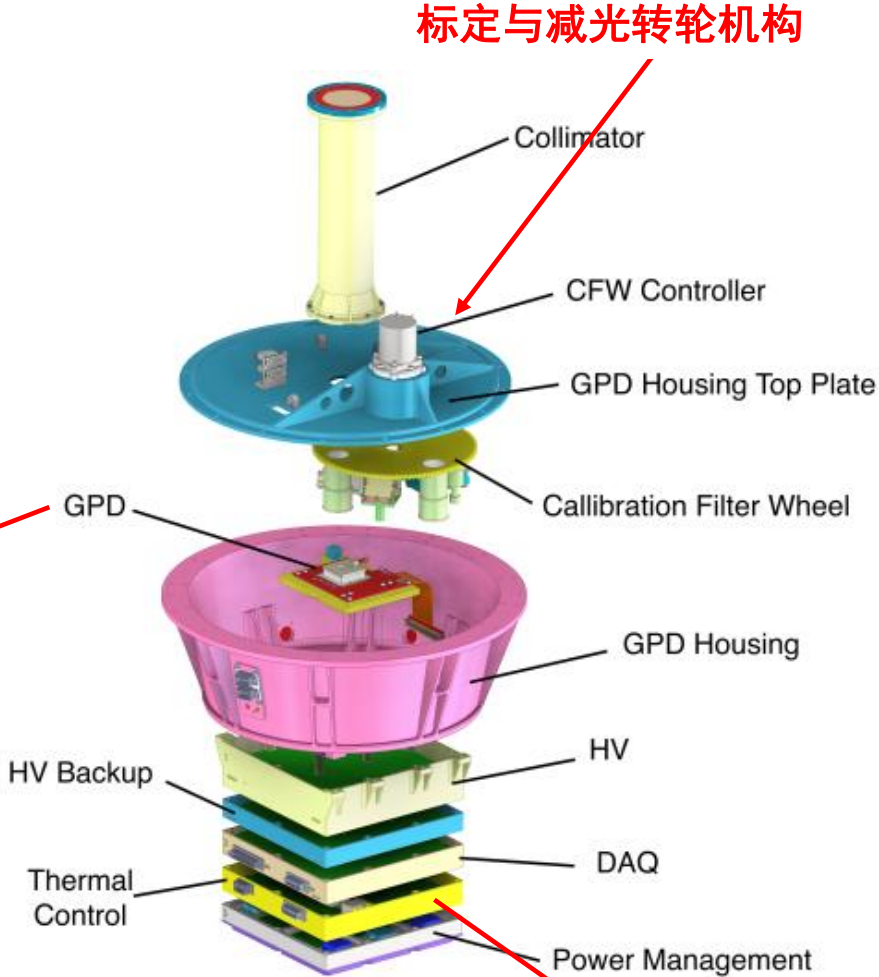
GPD 工作原理



GPD 构成



偏振读出ASIC（像素数：304×352）



标定与减光转轮机构

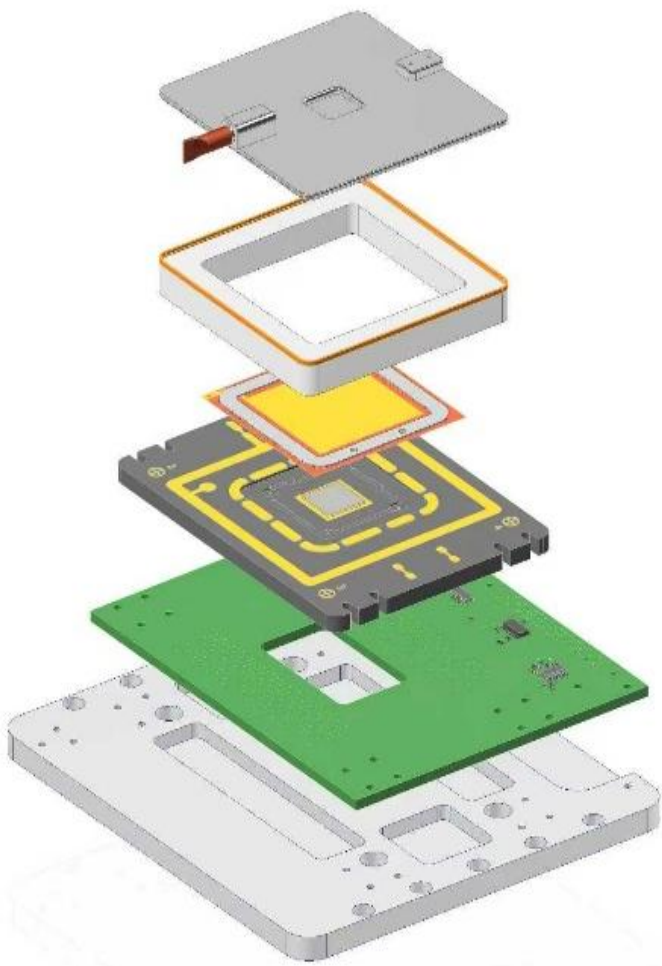
电子学

PFA焦平面相机

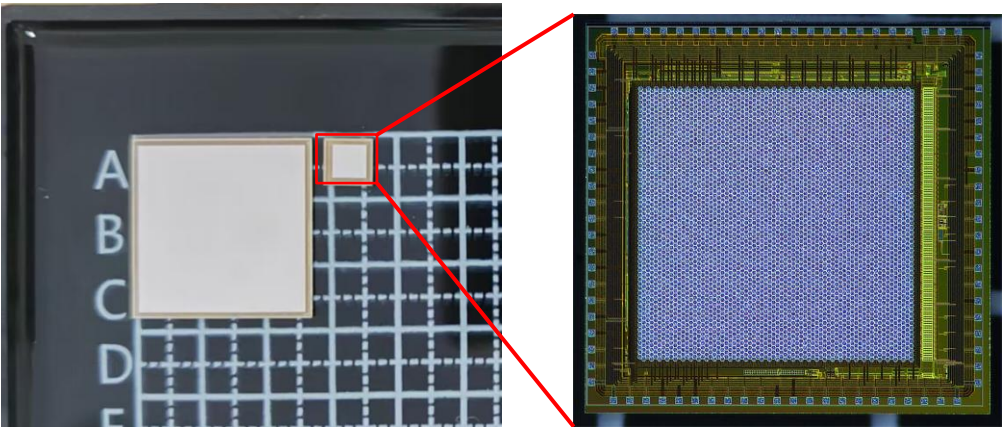
GPD的构成及关键器件



高能所联合北京大学完成偏振读出ASIC研制

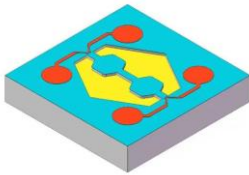
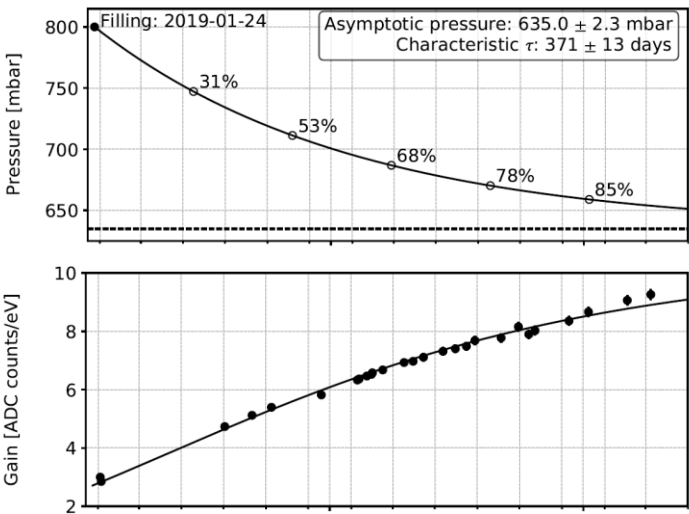


序号	技术指标名称	考核指标值
1	像素数目	$\geq 304 \times 352$
2	相邻像素间距	$\leq 50 \mu\text{m}$
3	像素噪声	$\leq 30 \text{ e}^- \text{ ENC}$
4	线性动态范围	30k e^-
5	最小触发阈值	$\sim 150 \text{ e}^-$
6	读出频率	$\geq 10\text{M Hz}$
7	功耗	$\leq 2 \text{ W}$



气压传感器

$$G(p) = G_0 \exp \left\{ -\frac{(p - p_0)}{p_{\text{scale}}} \right\},$$



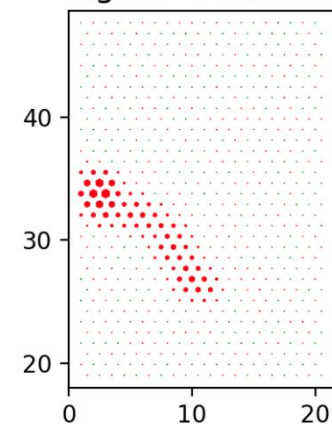
气压传感器

测量精度千分之一

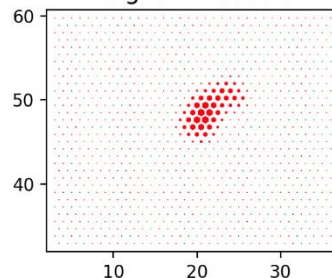
ASIC研制进展情况

- 完成小阵列ASIC研制 (60×70 像素)
- 完成基于小阵列ASIC的GPD封装, 完成能量分辨率和调制因子测量
- 完成全阵列 (304×352 像素) 流片, 正在进行电测试

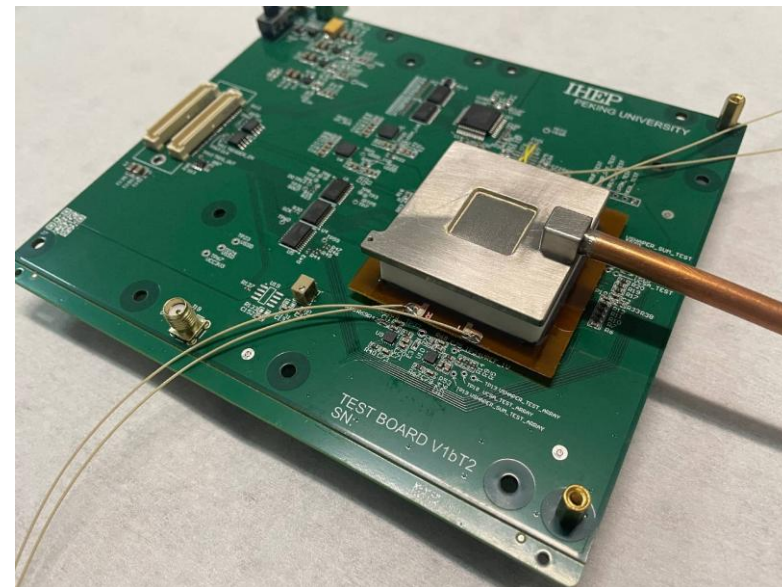
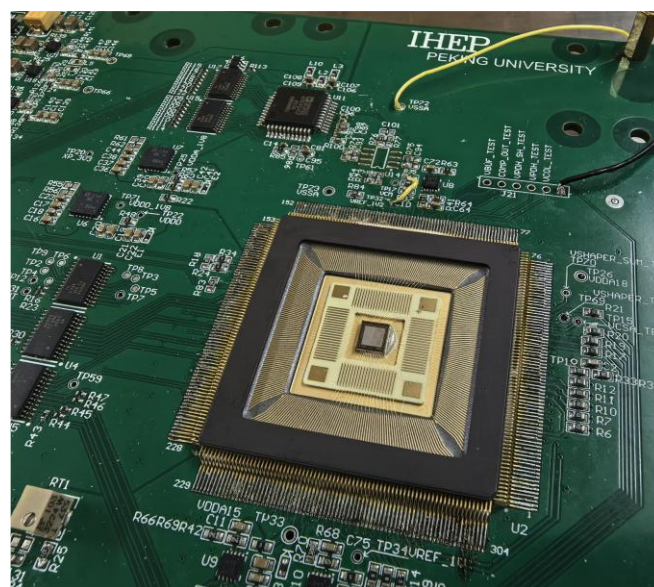
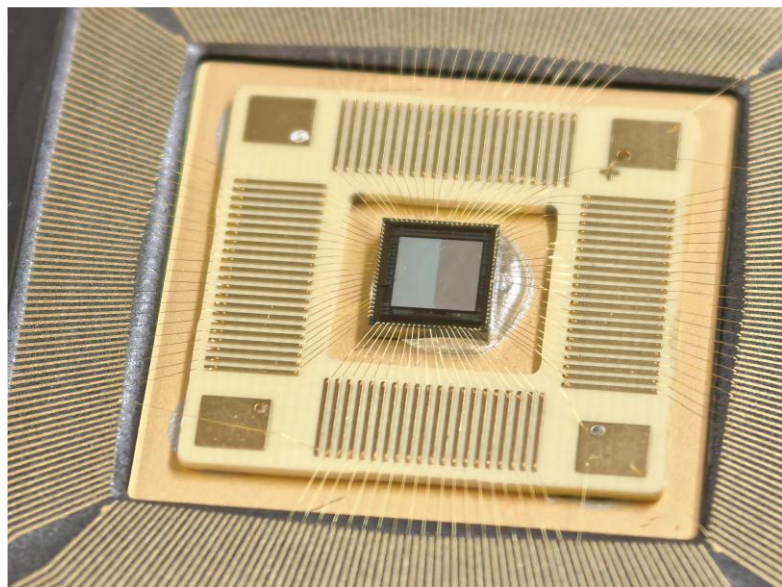
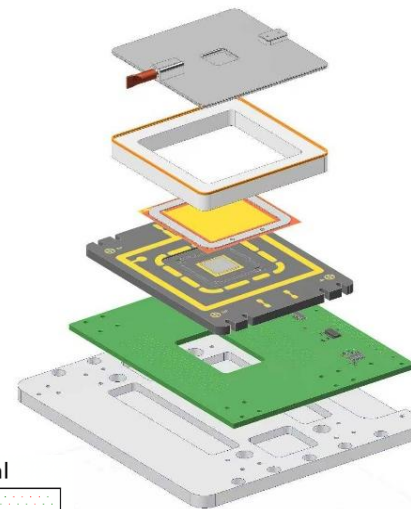
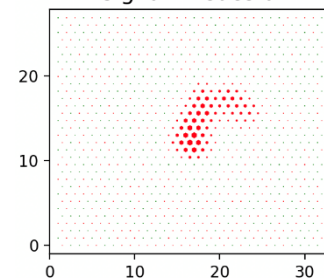
Signal - Pedestal



Signal - Pedestal



Signal - Pedestal

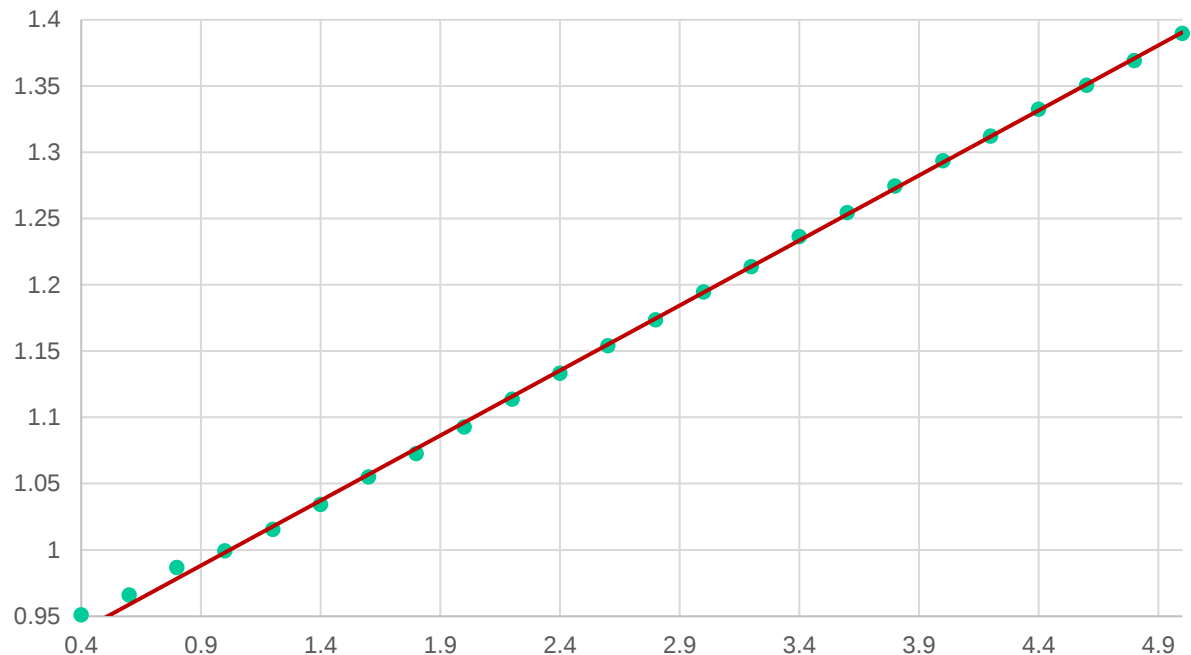


小阵列ASIC像素动态范围及线性

阵列中 (33, 30) 输入-输出曲线

$$y = 0.0981x + 0.9$$

$$R^2 = 0.9993$$

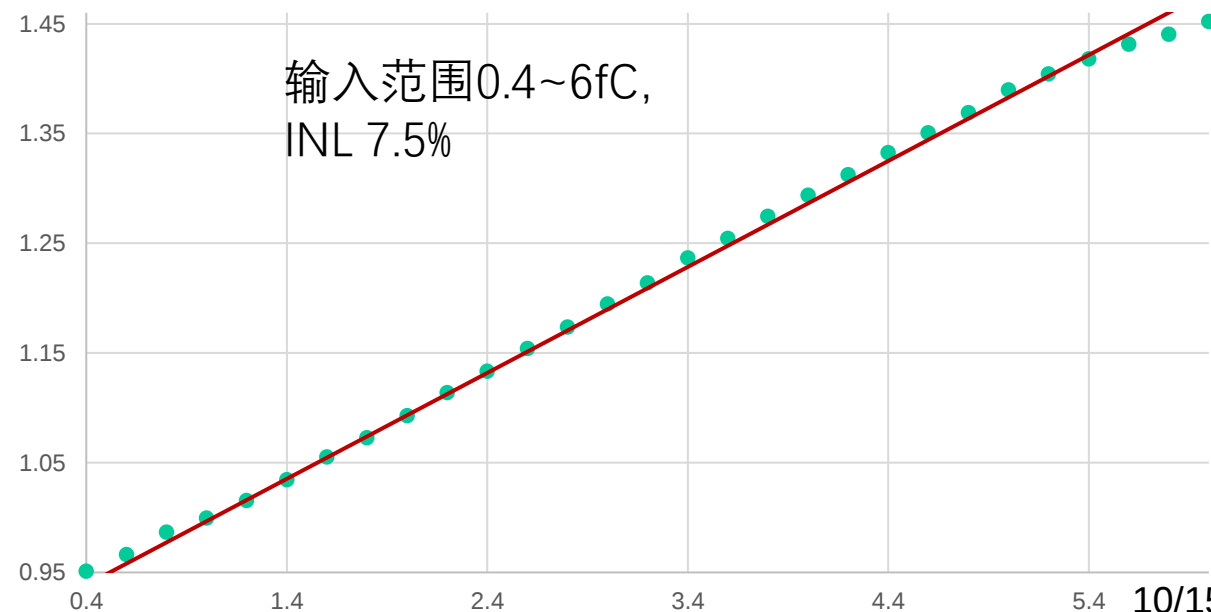


输入范围0.4~5fC,
INL2.4%,

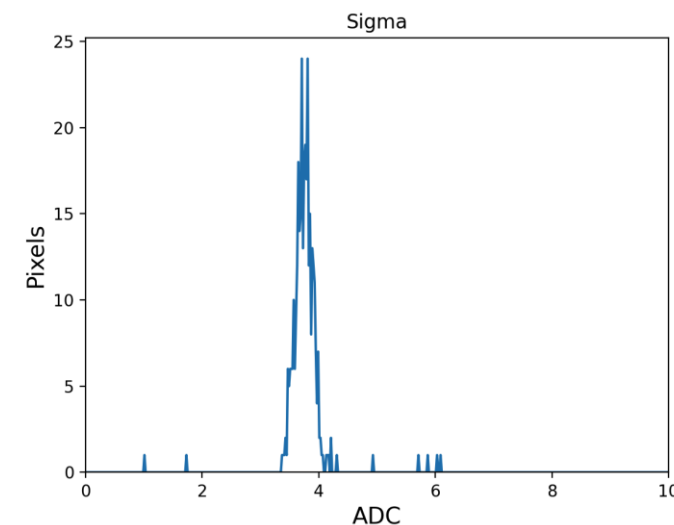
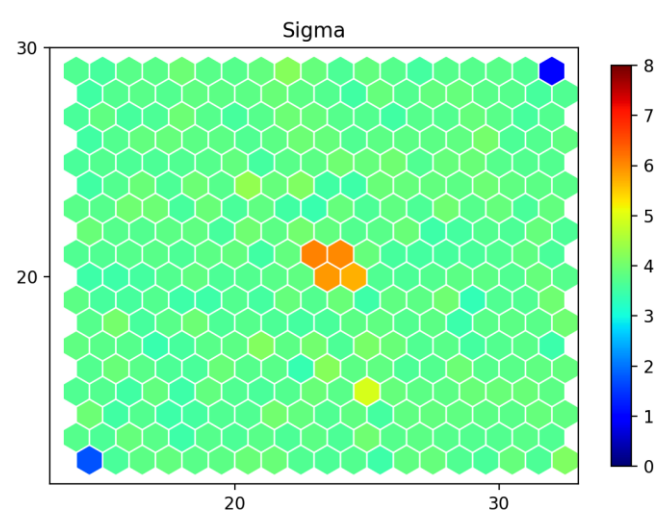
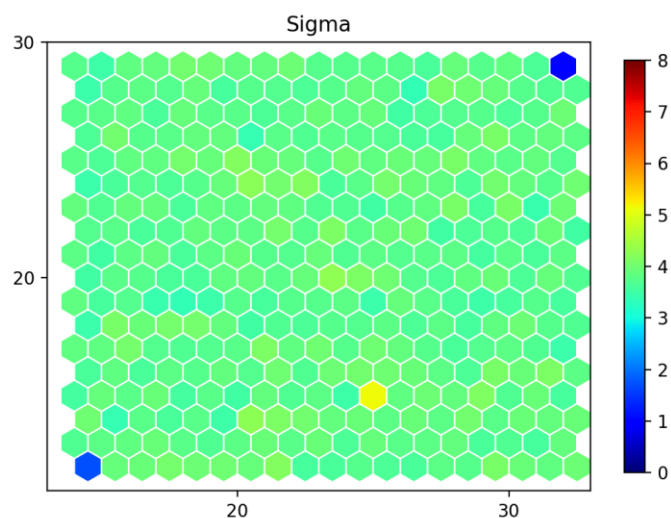
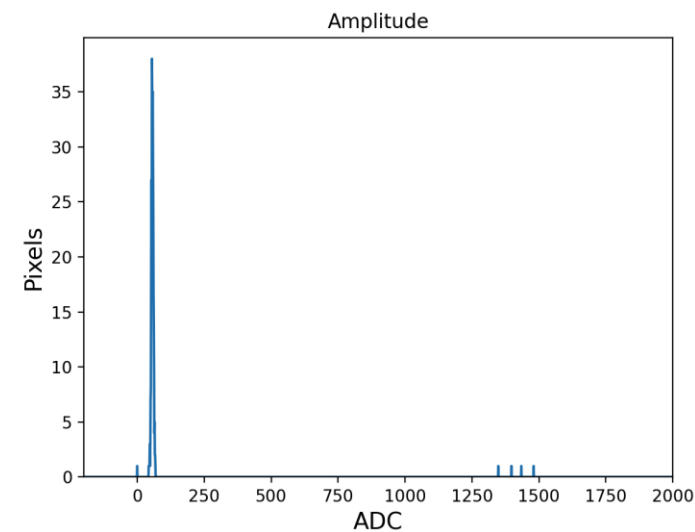
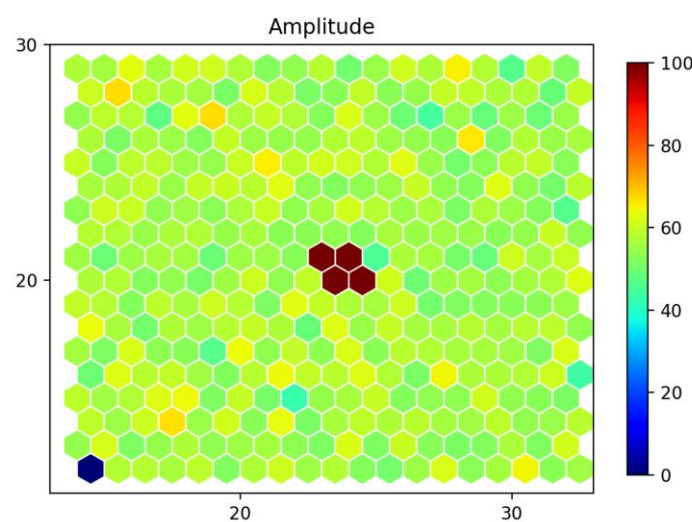
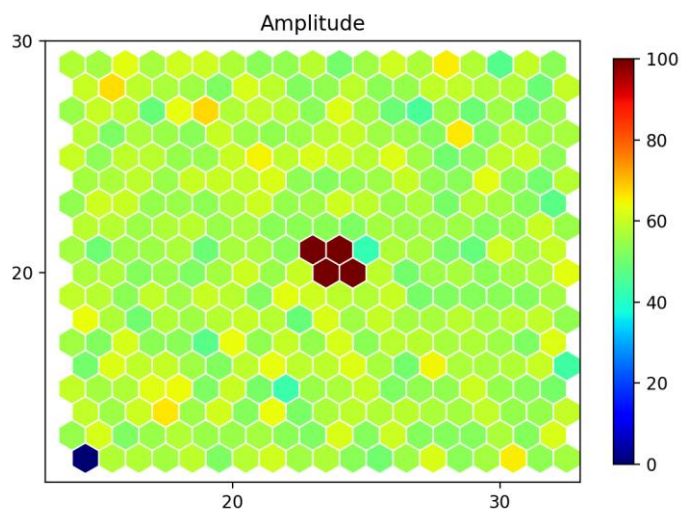
阵列中 (33, 30) 输入-输出曲线

$$y = 0.0966x + 0.9$$

$$R^2 = 0.9978$$



输入范围0.4~6fC,
INL 7.5%



输入激励: $5\text{fC} = 31.25 \text{ ke-}$

输入激励: $1.9\text{fC} = 11.88 \text{ ke-}$

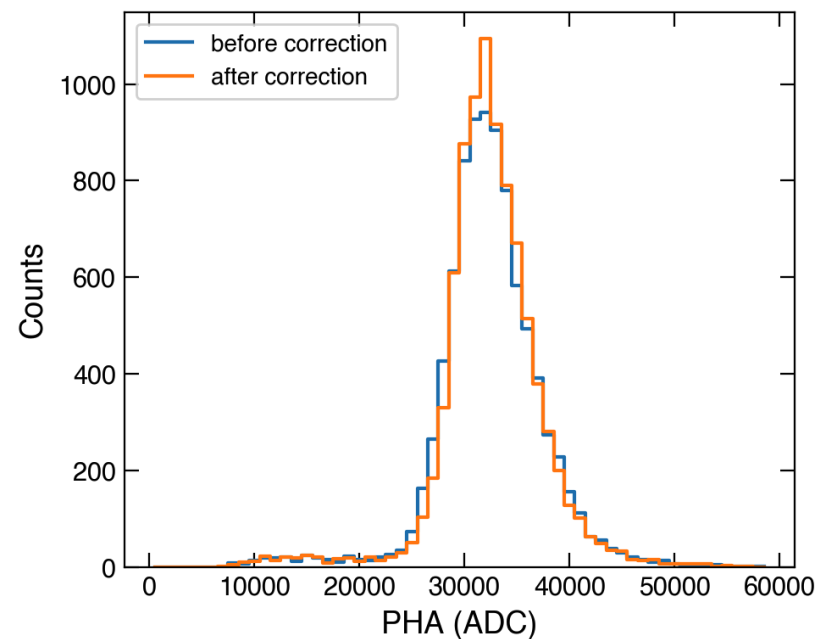
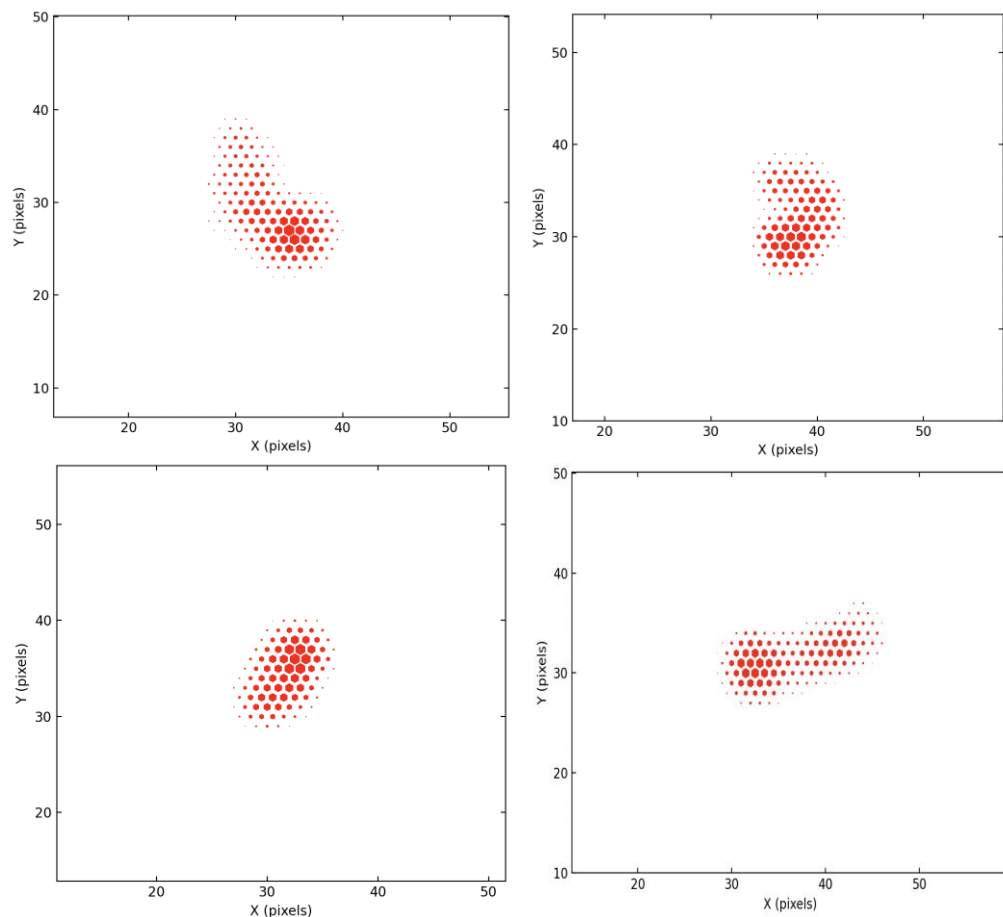
小阵列读出GPD性能测试—光电子径迹与能量分辨率



- ^{55}Fe 能谱测试

- 能量分辨率 23%@5.9keV

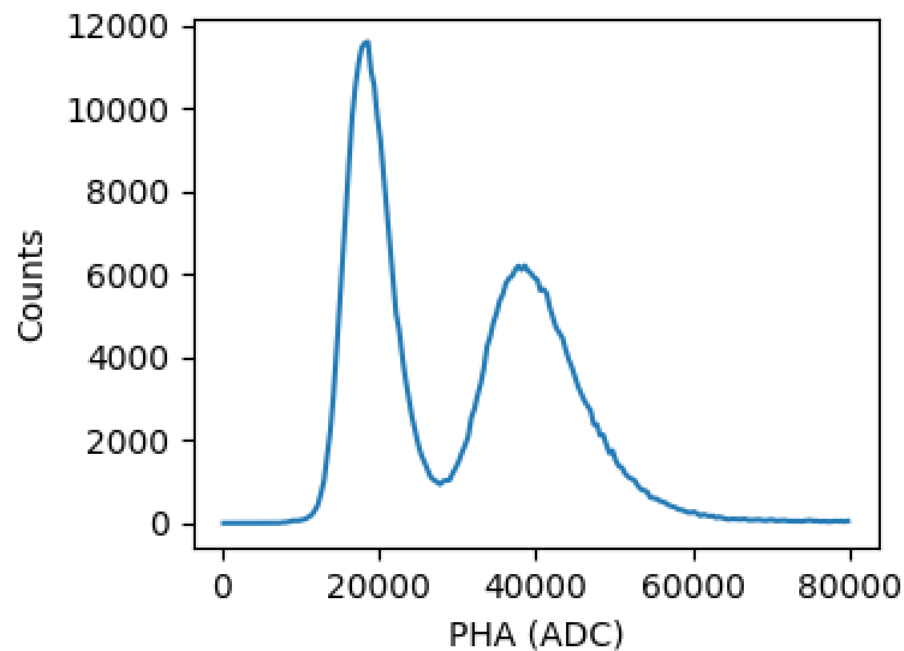
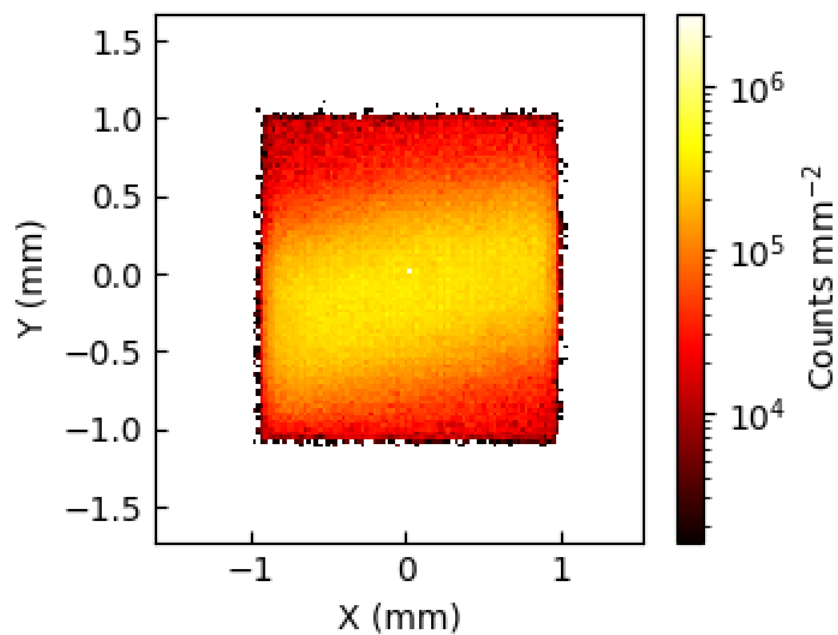
项目需求 30%@5.9keV



校正前25%@5.9 keV, 校正后
23%@5.9keV)

小阵列读出GPD性能测试——偏振响应

- GPD偏振响应测量——能谱、调制曲线
- MgF_2 偏振源 (2.67 keV, 5.33 keV)



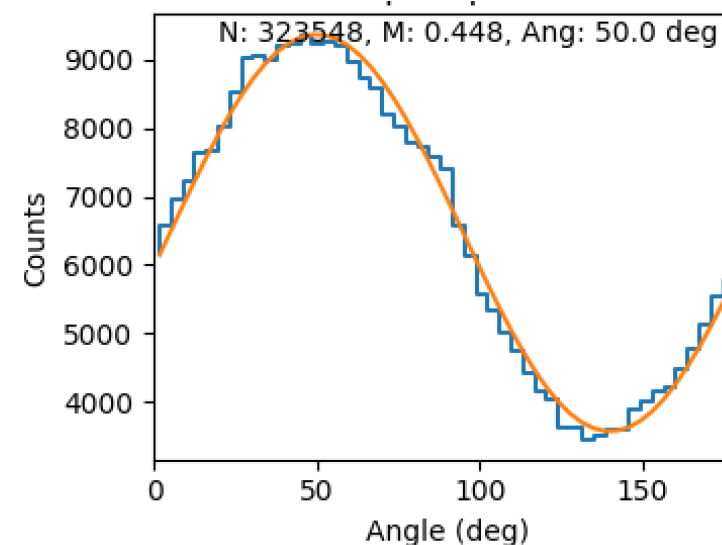
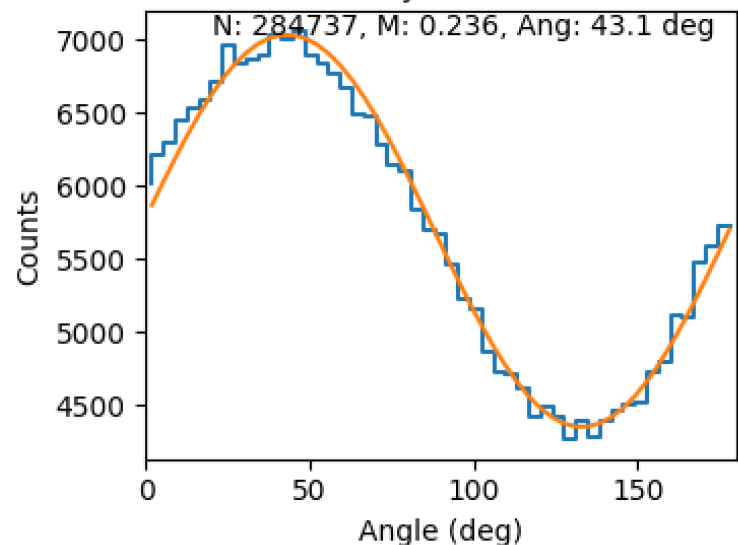
小阵列读出GPD性能测试——调制因子

品质因子 $Q = \mu\sqrt{\varepsilon}$

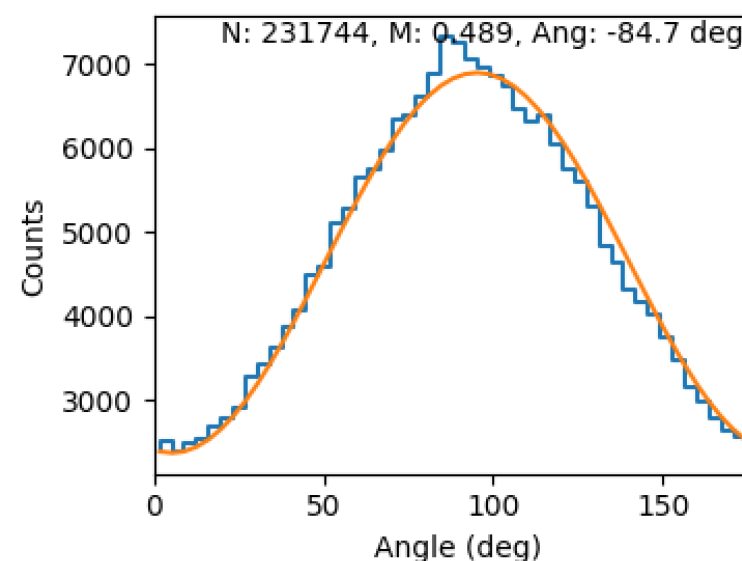
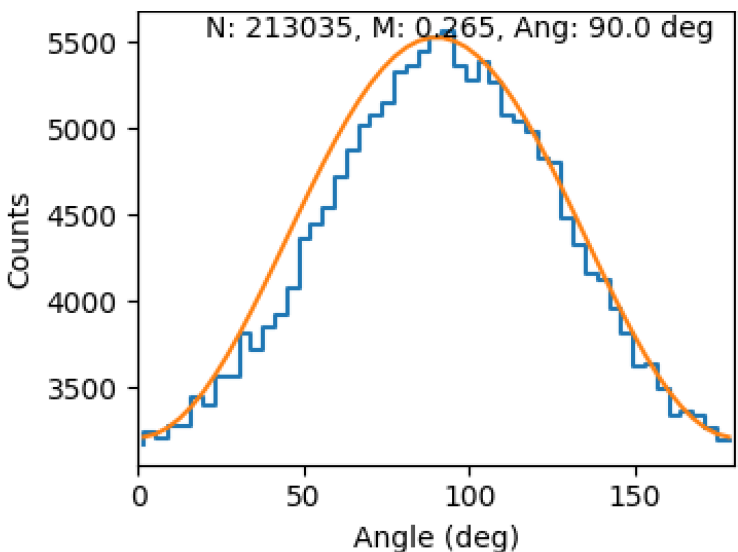
2.67 keV

5.33 keV

偏振方向45°



偏振方向90°





总结与展望

- eXTP卫星PFA载荷已经完成基于小阵列（ 60×70 像素）ASIC的可成像偏振探测器研制与测试，主要性能指标满足项目需求
- 目前已经完成全阵列（ 304×352 像素）ASIC的流片，相关测试和GPD封装工作正在进行中
- eXTP卫星PFA载荷将于2027年开始飞行件研制工作，计划2030年发射

谢谢！