

空间X射线偏振探测器的现状及未来

姜维春

代表eXTP-PFA合作组

第二十二届全国核电子学与核探测技术学术年会暨第十二届全国先进气体探测器研讨会

青岛, 2024-07-16



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



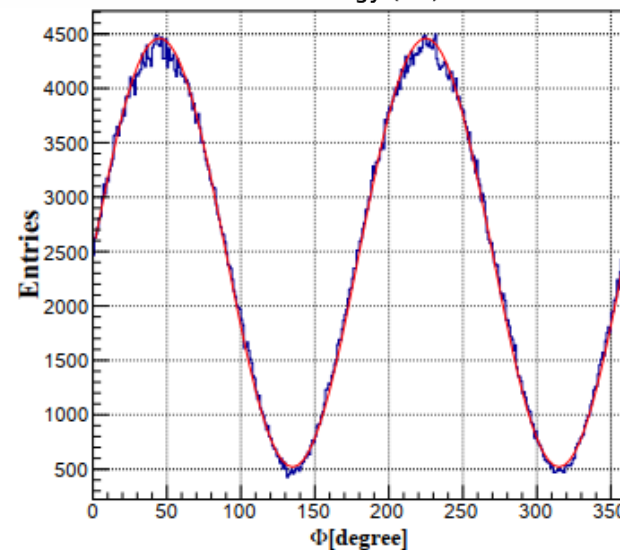
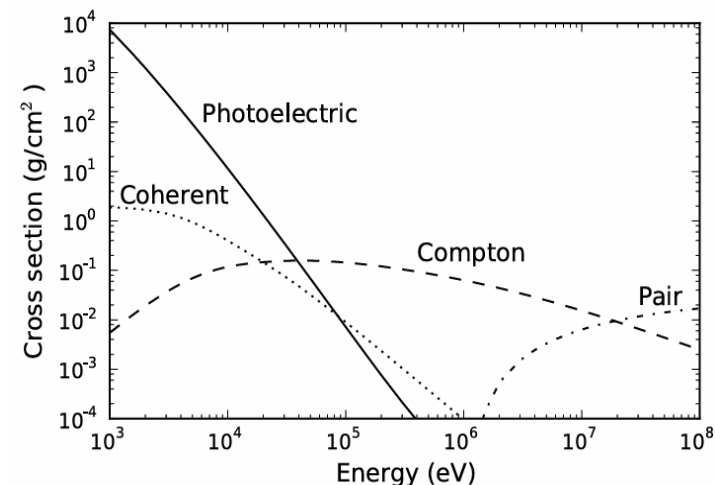
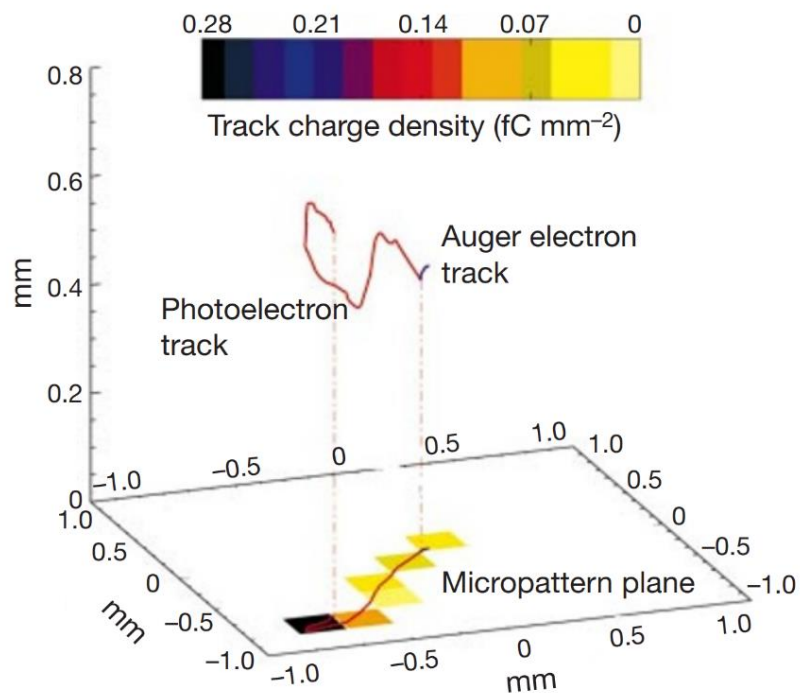
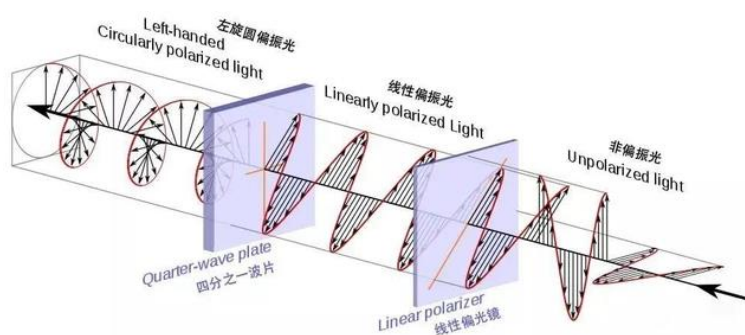
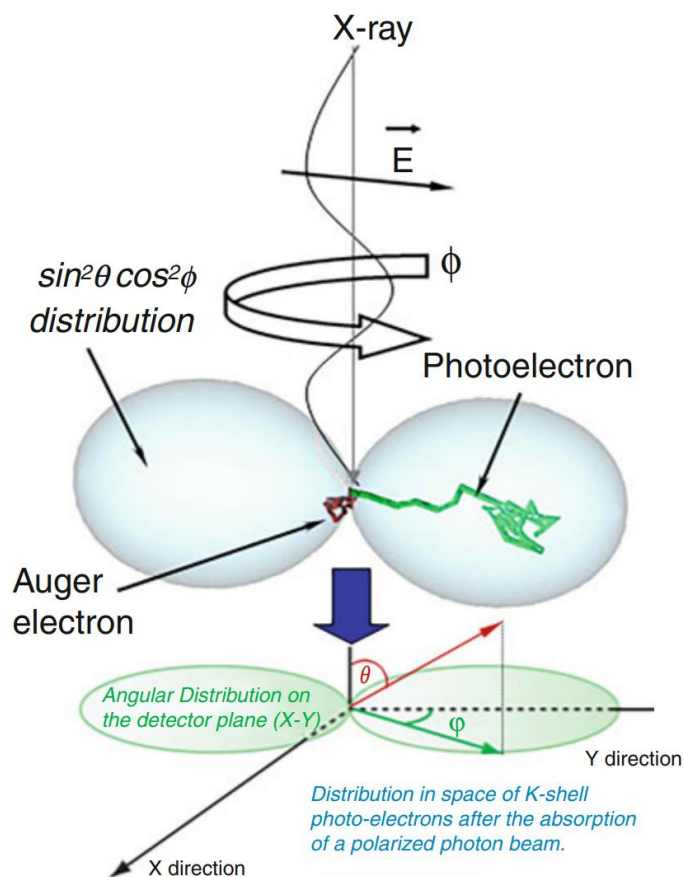
中国科学院粒子天体物理重点实验室
KEY LABORATORY OF PARTICLE ASTROPHYSICS, CAS



1. 空间X射线偏振探测——为什么气体探测器？
2. 气体探测器在空间X射线偏振探测中的应用现状
3. eXTP卫星上的偏振载荷
4. WXPT卫星上的X射线偏振探测器
5. 下一代X射线偏振探测器的有关设想
6. 总结

X射线偏振探测原理

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



调质因子 $\mu = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}}$

空间X射线偏振观测对探测器的技术需求



■ X射线偏振探测

- 偏振度和偏振角

■ 重要技术指标

- 调质因子

$$\mu = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}}$$

- 残余调制——对无偏源的响应

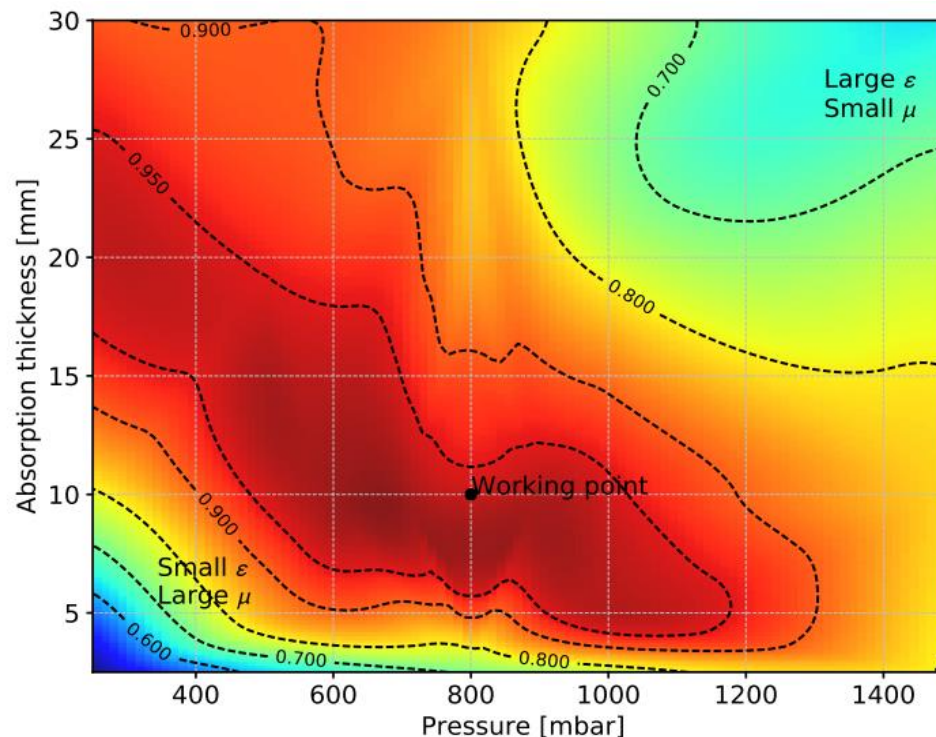
- 有效面积——探测效率

- 能区范围

- 偏振灵敏度——残余调制+最小可测偏振

- 99%置信区间所需的光子数

$$N \approx \frac{\beta^2}{4.1} N_{\text{MDP}} \quad N_{\text{MDP}} = \left(\frac{4.29}{\mu \cdot \text{MDP}} \right)^2$$



- 品质因子 $Q = \mu\sqrt{\epsilon}$

$$\text{MDP} = \frac{4.29}{\mu\epsilon S} \sqrt{\frac{\epsilon S + B}{t}}$$

空间X射线偏振探测天文项目

Aerobee 350
Crab Nebula
 $15.4\% \pm 5.2\%$

Novick, R. et al., ApJ, 174, L1 (1972)



Credit: NASA

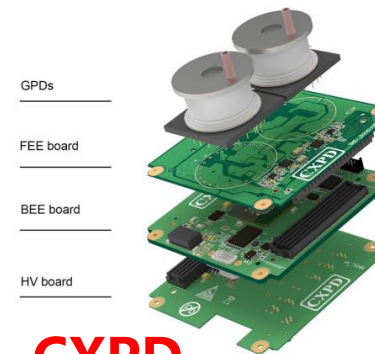
1975

PolarLight
Crab

$15.3\%^{+3.1\%}_{-3.0\%}$

Feng, H. et al., NatAs, 4, 511 (2020)

PolarLight2



CXPDP

2022

2024

1969

OSO-8

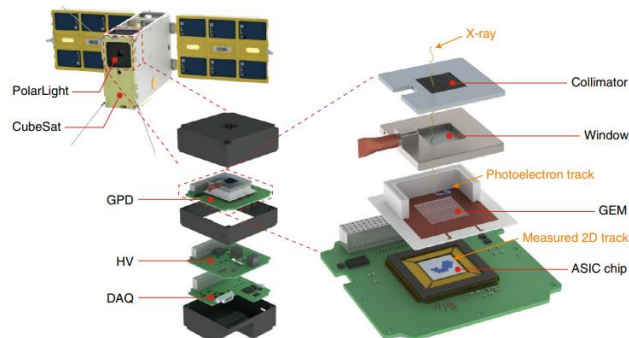
Crab Nebula
 $19.2\% \pm 1.0\%$
Crab

$15.7\% \pm 1.5\%$

Weisskopf, M. C. et al, ApJ, 208, L125 (1976)

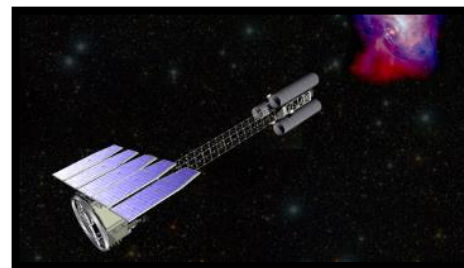
Weisskopf, M. C. et al., ApJ, 220, L117(1978)

2018



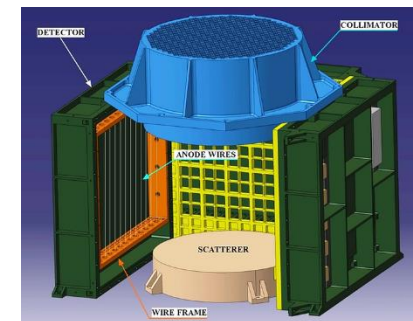
Feng, H. & Bellazzini, R., NatAs, 4, 547 (2020)

IXPE



2023

XPoSat

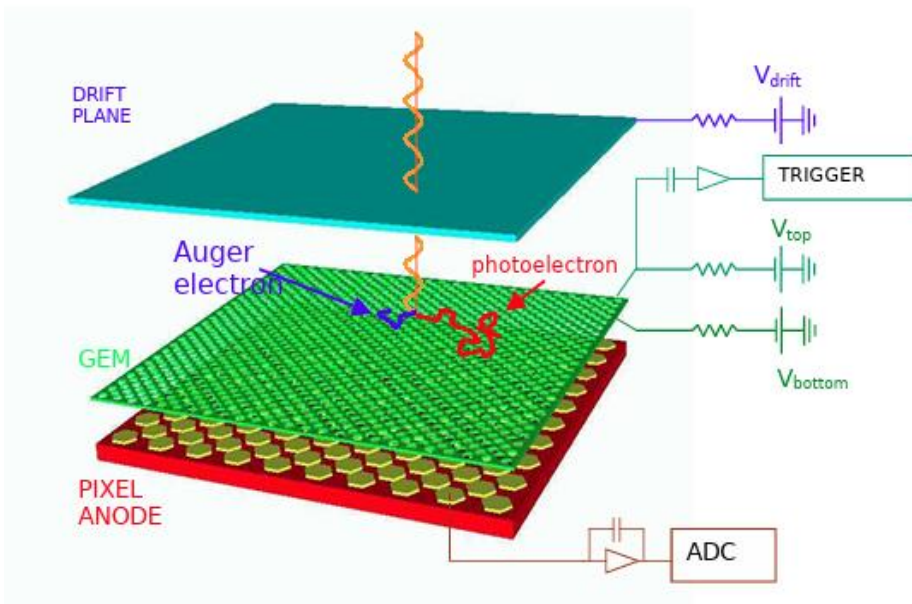


X射线偏振探测原理



■ 读出平面垂直于入射X射线

- 2001年, E.Costa发明气体像素探测器 (GPD)
- 首次实现光电型X射线偏振探测器
- 0.44@ 5.4keV, 0.16(FWHM)@ 5.4keV



Drift/absorption gap
Drift field
Gas filling and pressure
Gas grain
Transverse diffusion in drift
GEM thickness
GEM hole geometry
GEM voltage
Detection efficiency at 5.4 keV
Read-out pixel size
Number of pixels
Read-out plane technology
Track length/pixel size (6 keV)
Sensitivity to Her X1
Sensitivity to 3C-273
Sensitivity to MCG-6-30-15

Present prototype (2–10 keV)

Drift/absorption gap	6 mm
Drift field	$3,000 \text{ V cm}^{-1}$
Gas filling and pressure	(Ne 80%–DME 20%); 1 atm
Gas grain	5,000
Transverse diffusion in drift	$80 \mu\text{m}$
GEM thickness	50- μm copper-clad kapton foil
GEM hole geometry	40- μm diameter; 60- μm pitch
GEM voltage	400 V
Detection efficiency at 5.4 keV	3.8%
Read-out pixel size	$200 \mu\text{m}$
Number of pixels	512
Read-out plane technology	Multilayer advanced PCB
Track length/pixel size (6 keV)	6
Sensitivity to Her X1	$T = 400 \text{ s}; \text{MDP} = 10\%$
Sensitivity to 3C-273	$T = 2.2 \times 10^5 \text{ s}; \text{MDP} = 2\%$
Sensitivity to MCG-6-30-15	$T = 5 \times 10^5 \text{ s}; \text{MDP} = 2\%$

- 直接成像, GEM增益相对较低, 扩散系数与吸收深度相关, 通常为一个独立模块

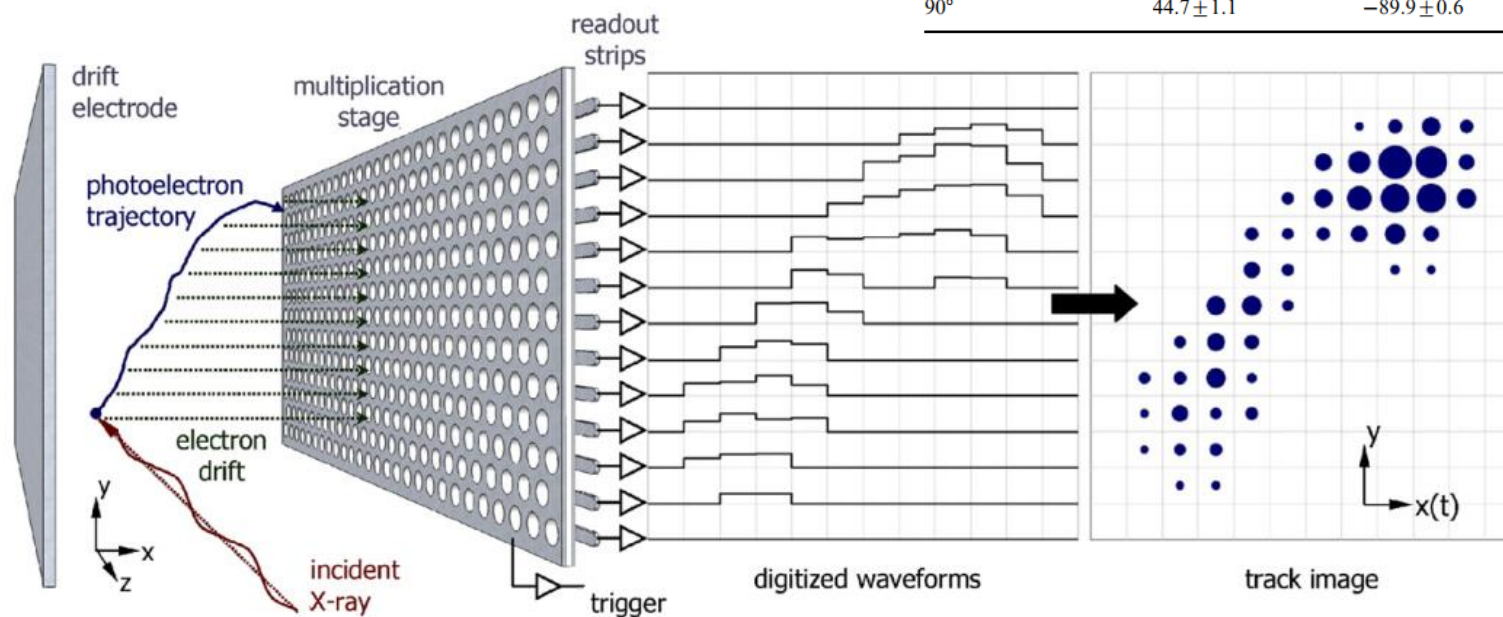
X射线偏振探测原理



- 读出平面平行于入射X射线

- 2007年, J.K. Black发明微结构时间投影室(TPC)
- 时间+位置组成光电子二维图像
- 0.45@ 6.4keV

Polarization phase	Measured parameters		
	Modulation (%)	Phase (degrees)	χ^2
Unpolarized	0.49 ± 0.54	44.6 ± 28.7	1.2
0°	45.0 ± 1.1	0.3 ± 0.6	1.1
45°	45.3 ± 1.1	45.2 ± 0.6	1.0
90°	44.7 ± 1.1	-89.9 ± 0.6	1.4



- 间接成像, GEM增益相对较高, 扩散系数与吸收深度无关, 可级联后端高能探测器

X射线偏振探测器在空间X射线偏振项目中的应用情况

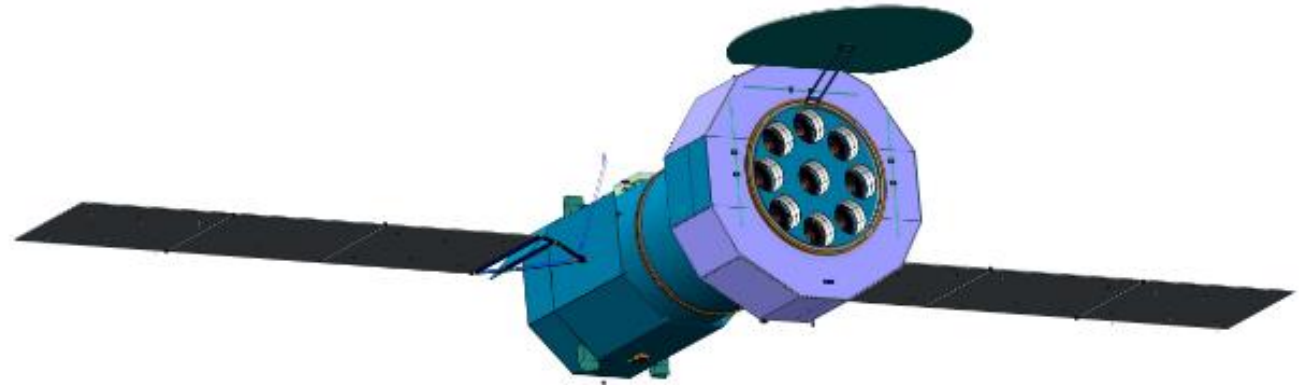


项目	偏振观测能区	探测器类型
“极光”立方星载荷	2-8 keV	GPD
IXPE	2-8 keV	GPD
CXPD立方星	3-8keV	GMPD
eXTP	2-8 keV	GPD
Polar2	3-8keV	GMPD
WXPT	2-70keV	TPC+Compton
CATCH	2-8keV	GPD or GMPD
XPP	0.2-60keV	LGML+TPC+Compton

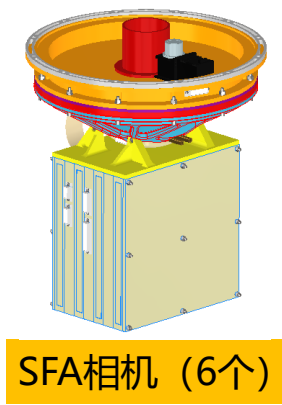
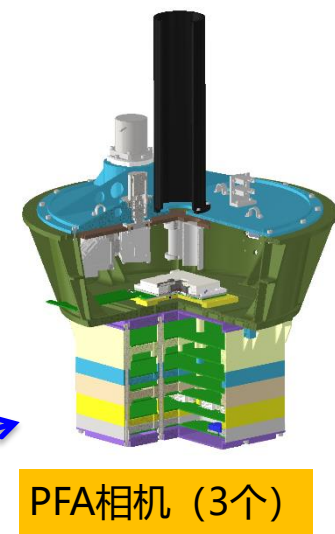
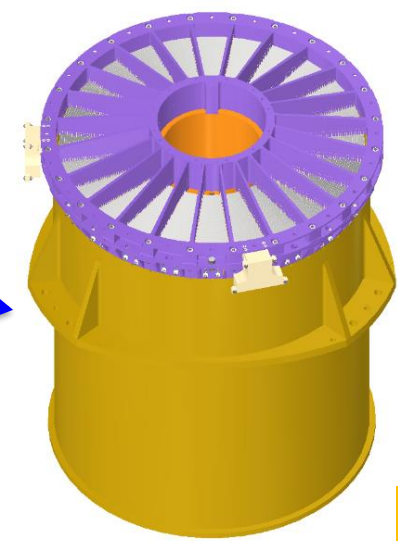
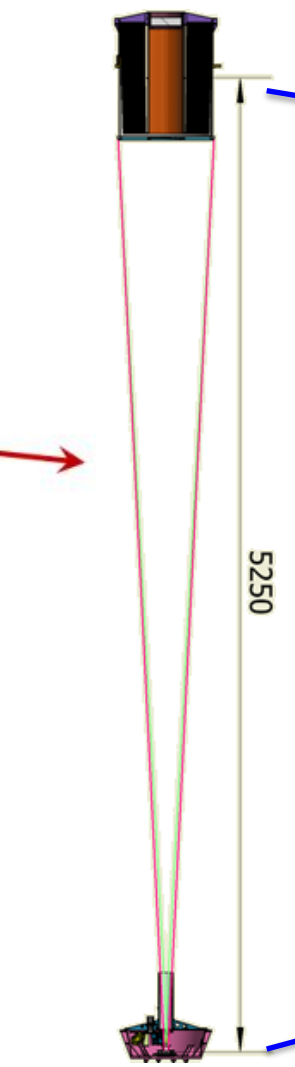
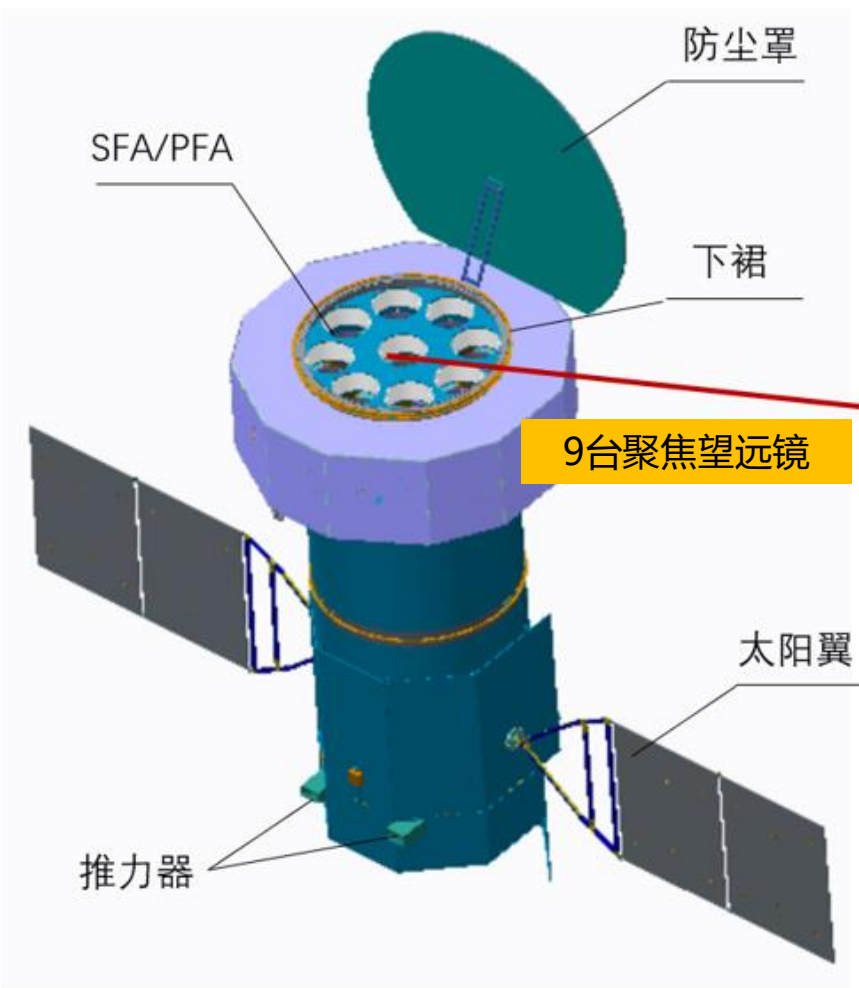
增强型X射线时变与偏振空间天文台（eXTP）

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
- 卫星方案：
 - 远地点高度110000km，大椭圆轨道
 - 高精度、高稳定度定点观测
 - 总重量约4.0吨，设计寿命5（8）年
- 目前状态：
 - 2022年完成方案阶段工作（中科院先导二期重大背景型号），具备进入初样的条件





eXTP有效载荷及卫星构型

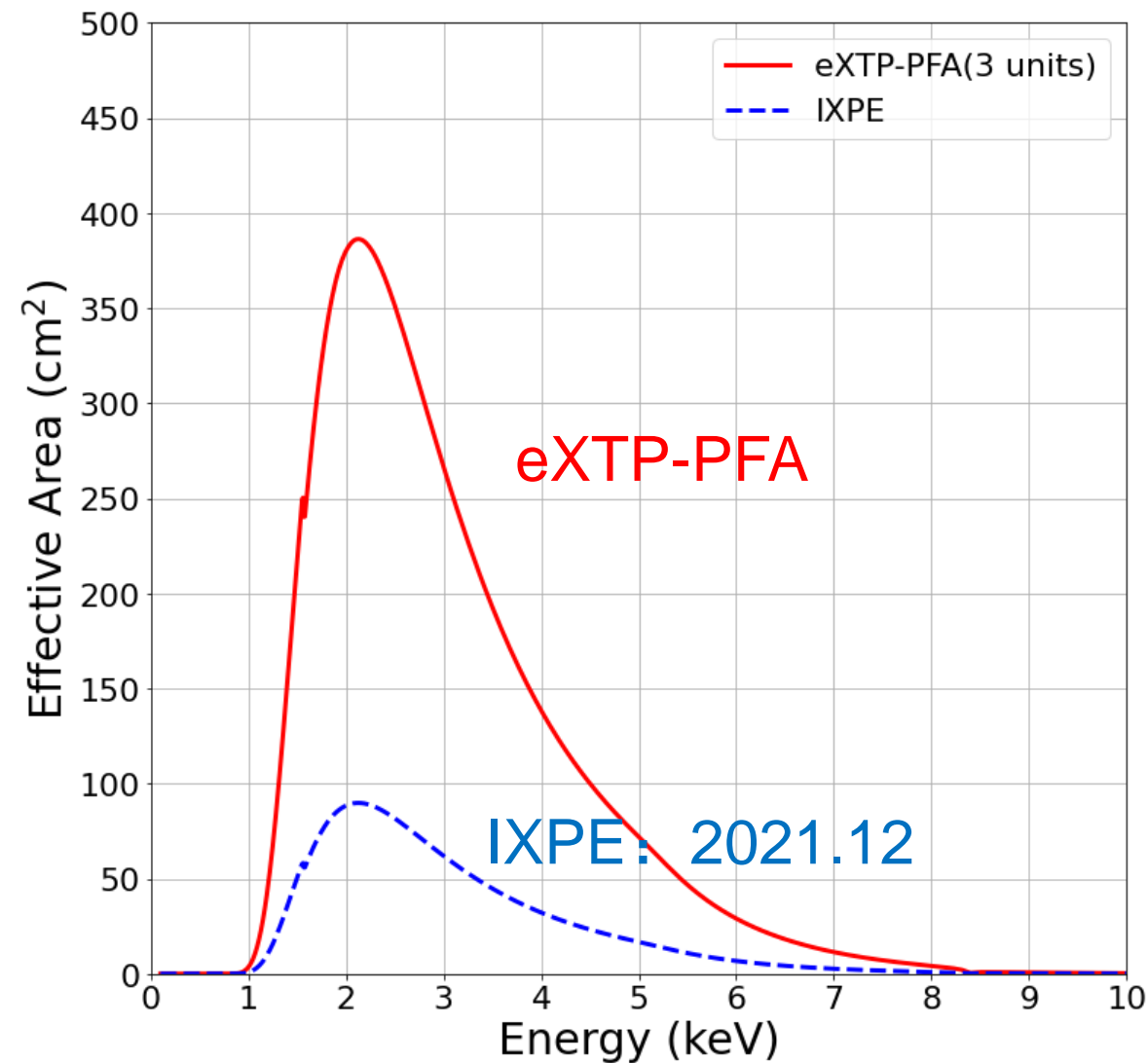
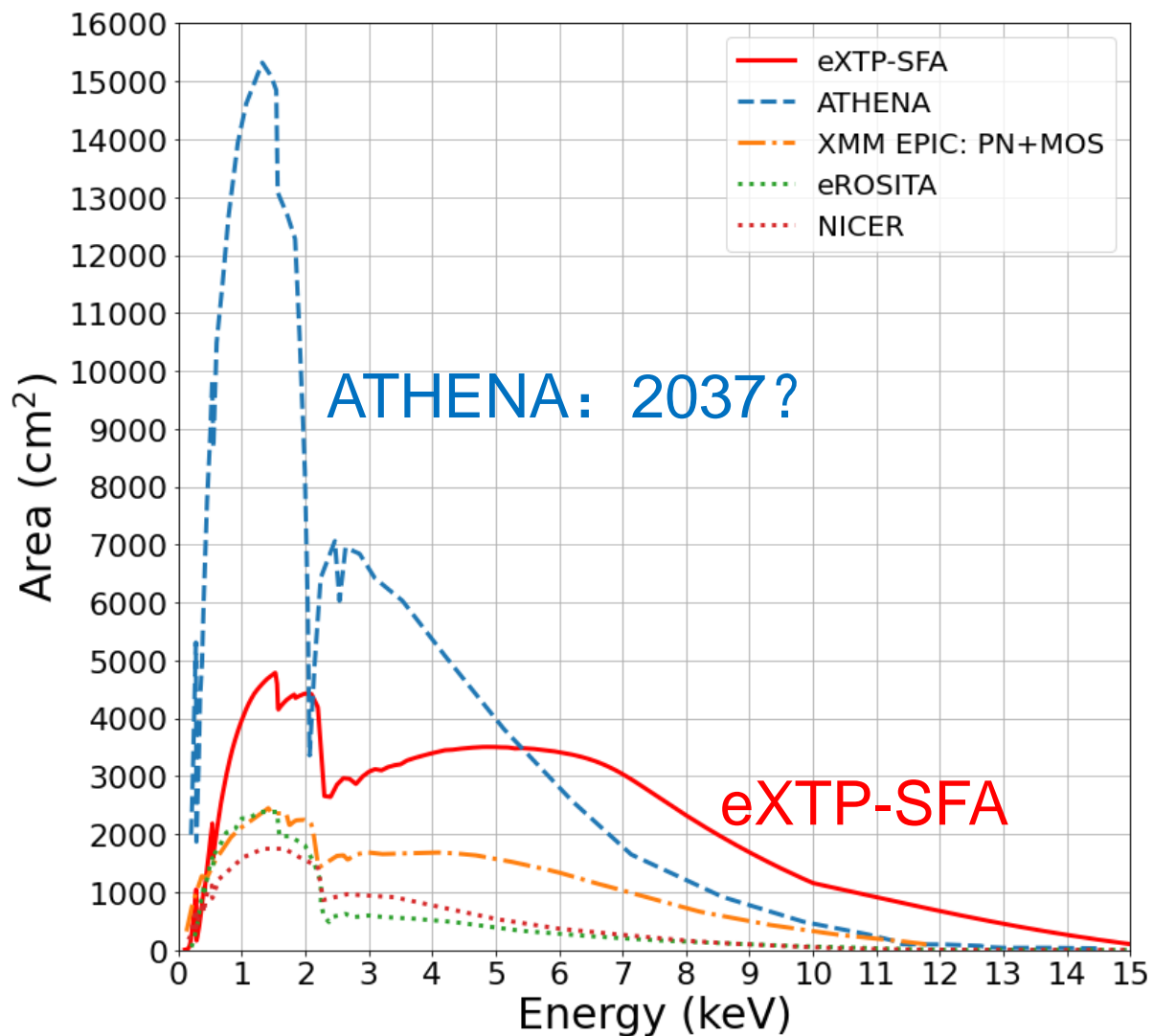


- SFA、PFA视场中心指向相同，逐事例记录来自目标天体的X射线光子；
- 目标源的选择及必要的后随观测通过调整卫星姿态实现。

eXTP有效载荷配置：2组国际先进望远镜阵列

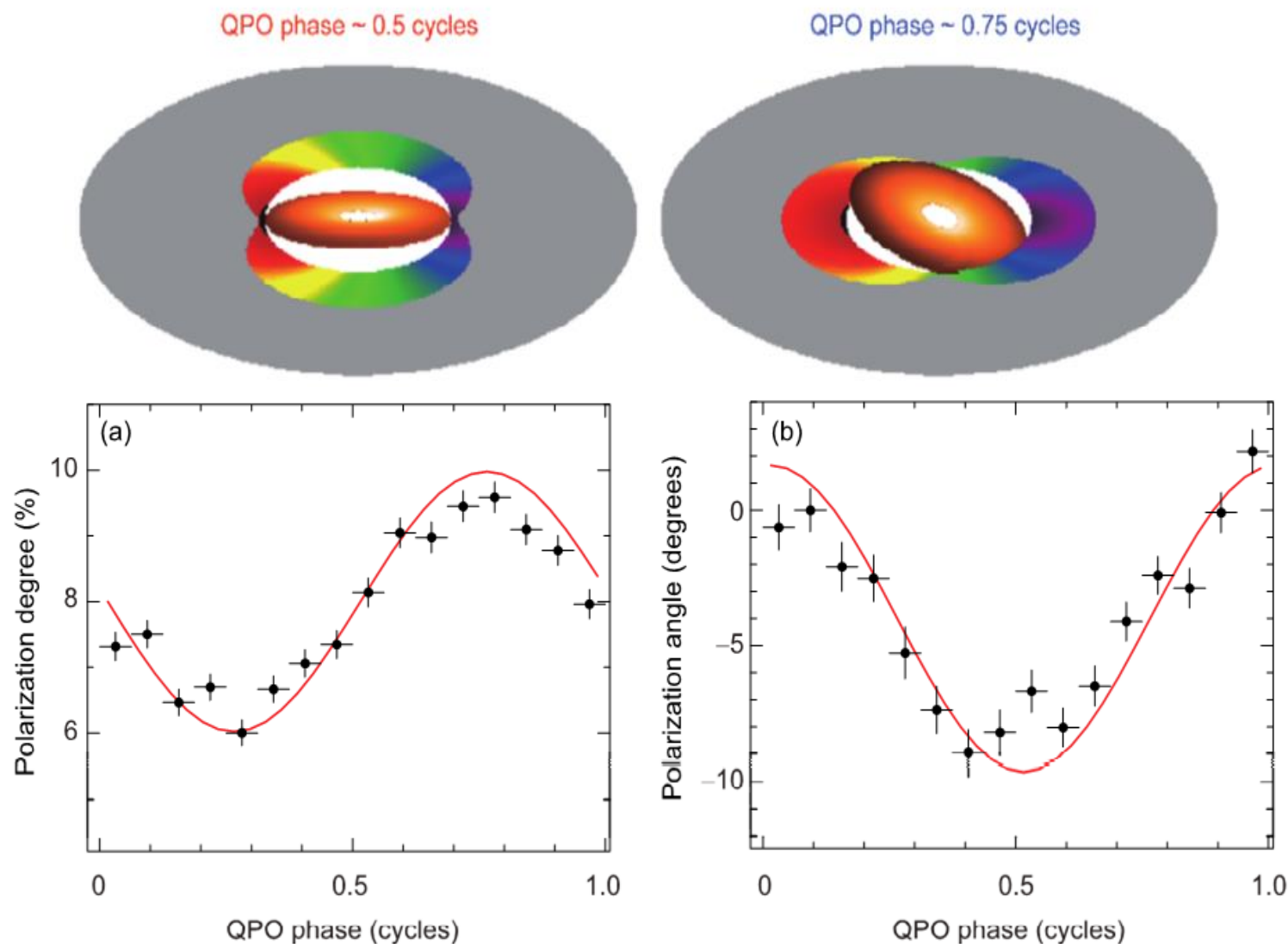
载荷名称	配置	主要技术指标
能谱测量X射线聚焦望远镜阵列 Spectroscopy Focusing Array (SFA) 	6组嵌套掠射聚焦望远镜 焦距：5.25m 焦平面：多像素SDD探测器	有效面积：≥ 3300 (目标4000) cm ² (1-2keV); ≥ 2000 (2700) cm ² @ 6 keV 能区：0.5~10 (0.3-10) keV; 能量分辨：≤ 180 (150) eV@ 6 keV 视场：≥ φ12 arcmin; 聚焦镜：HPD ≤ 1 arcmin, W90 ≤ 3 arcmin 时间分辨：≤ 10 μs; 定时精度 ≤ 1 (0.5) μs 死时间：≤ 6% @ 1 Crab; 信号堆积：≤ 1% @ 1 Crab
偏振测量X射线聚焦望远镜阵列 Polarimetry Focusing Array (PFA) 	3组嵌套掠射聚焦望远镜 焦距：5.25 m 焦平面：GPD偏振探测器	有效探测面积：≥ 180 (220) cm ² @3 keV 能区：2~8 keV; 能量分辨：≤ 1.8 (1.5) keV@ 6 keV 视场：8 arcmin (square), 角分辨：HPD < 30 (15) arcsec 最小可测偏振度 (MDP) : ≤ 3% (1mCrab, 10 ⁶ s) 时间分辨：≤ 10 μs; 定时精度 ≤ 4 μs

eXTP的有效面积和视场：国际领先



科学目标：极端引力—低频准周期振荡QPO

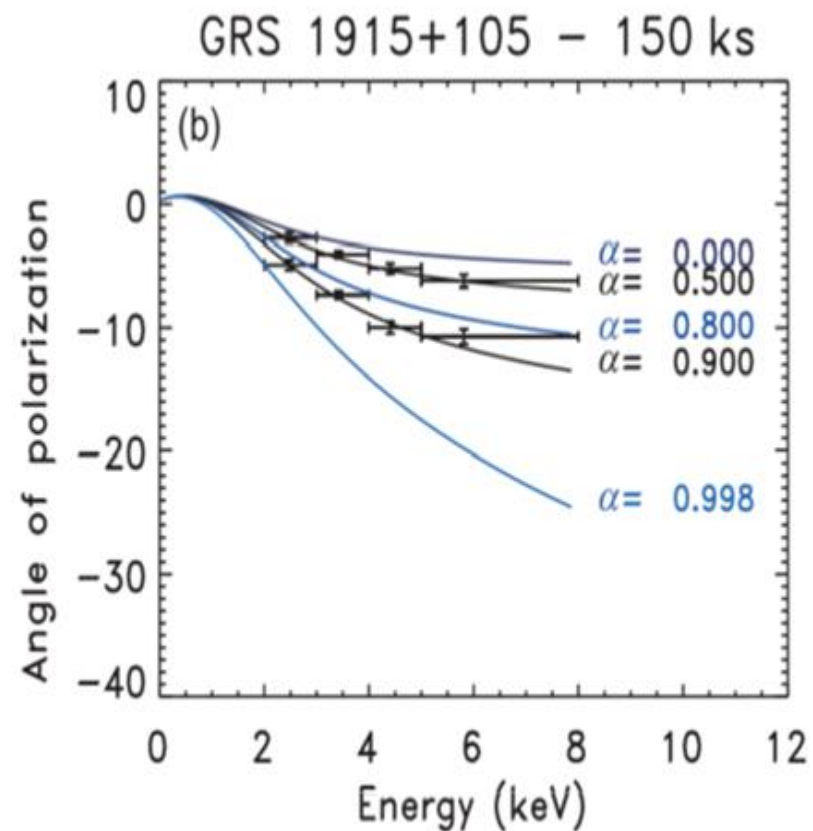
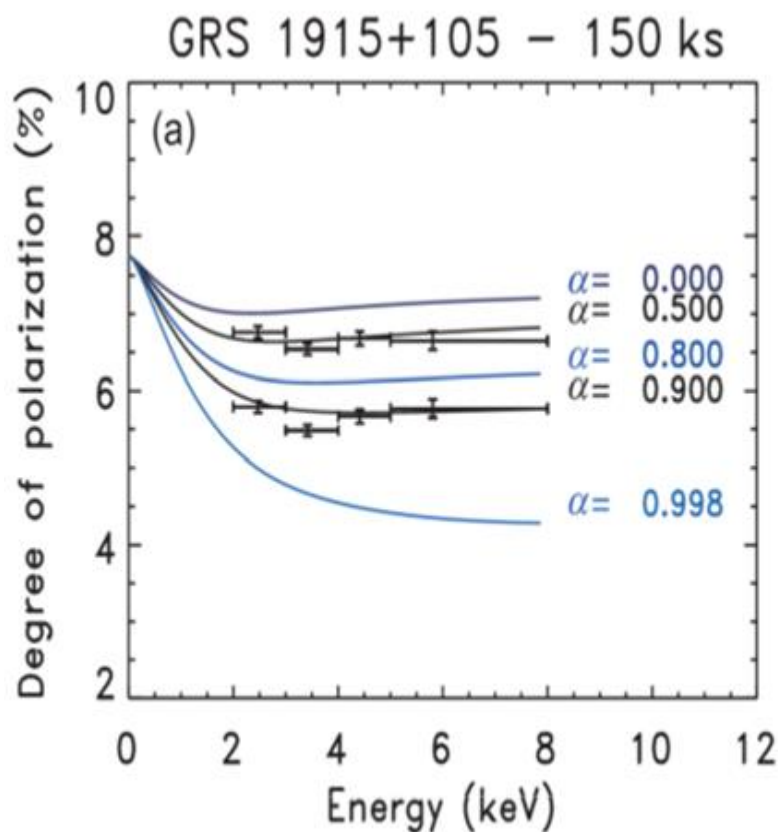
- 广义相对论预测的时空坐标拖拽效应将使得黑洞附近的冕（或者喷流）产生进动
- 冕在吸积盘上反射的偏振特性也会随着改变。
- 观测需求：对偏振度测量精度达到3%。



吸积黑洞低频QPO的进动反照模型预言的X射线偏振信号的准周期调制

科学目标：极端引力—测量黑洞的自旋

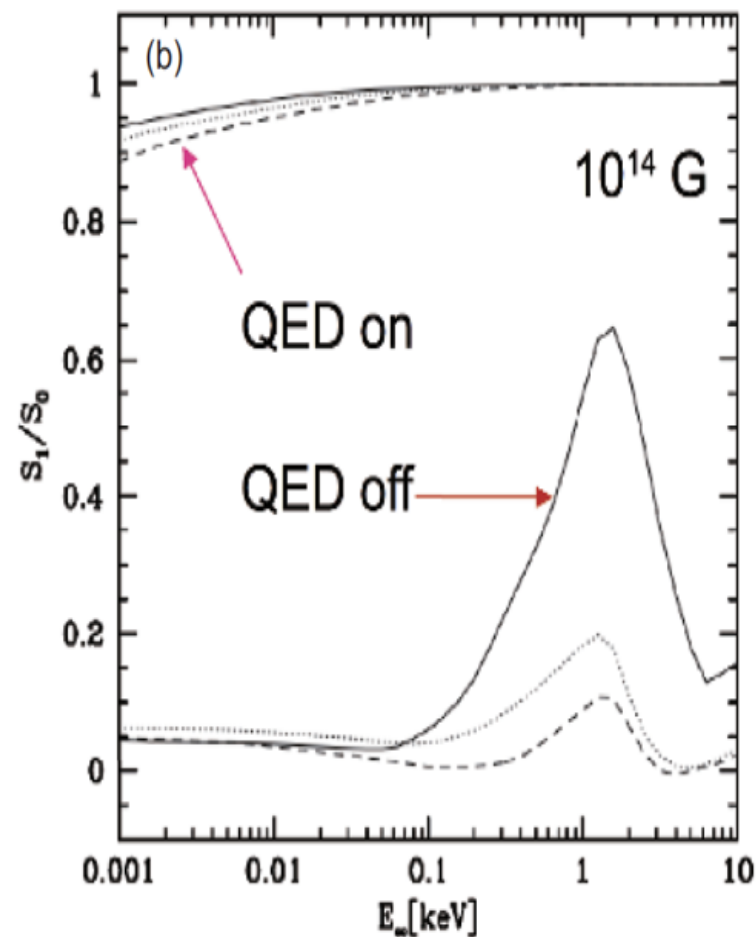
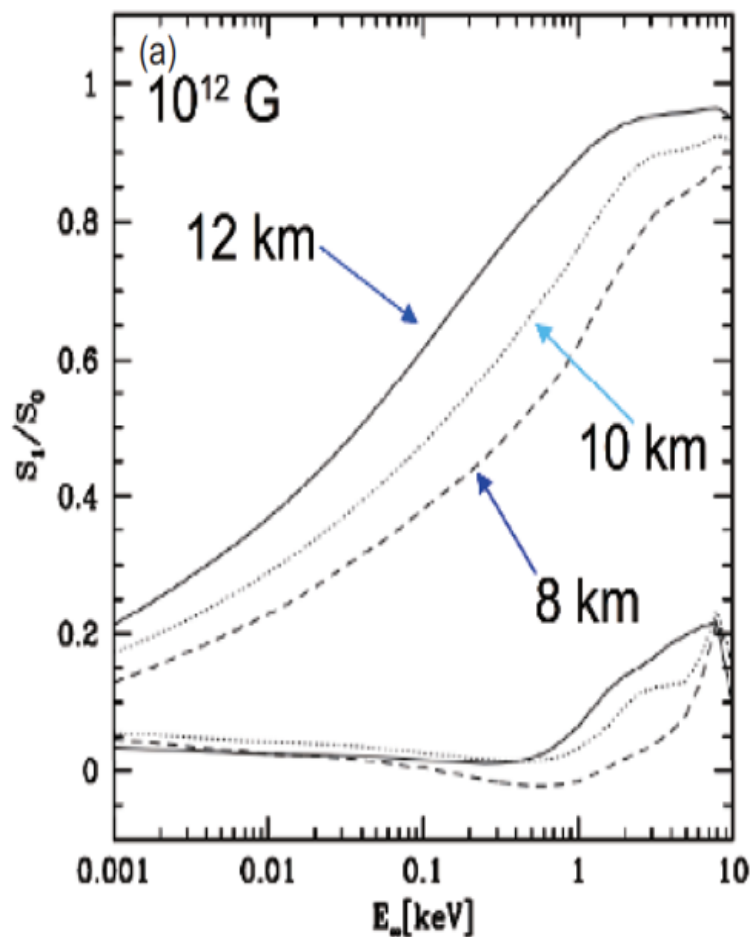
- 不同黑洞自旋下吸积盘的偏振度和偏振角的模拟
- 观测需求：对偏振度和偏振角的测量精度需分别达到1%和3°。



模拟PFA对吸积黑洞双星GRS1915+105的150ks观测

科学目标： 极端磁场—QED效应与中子星半径

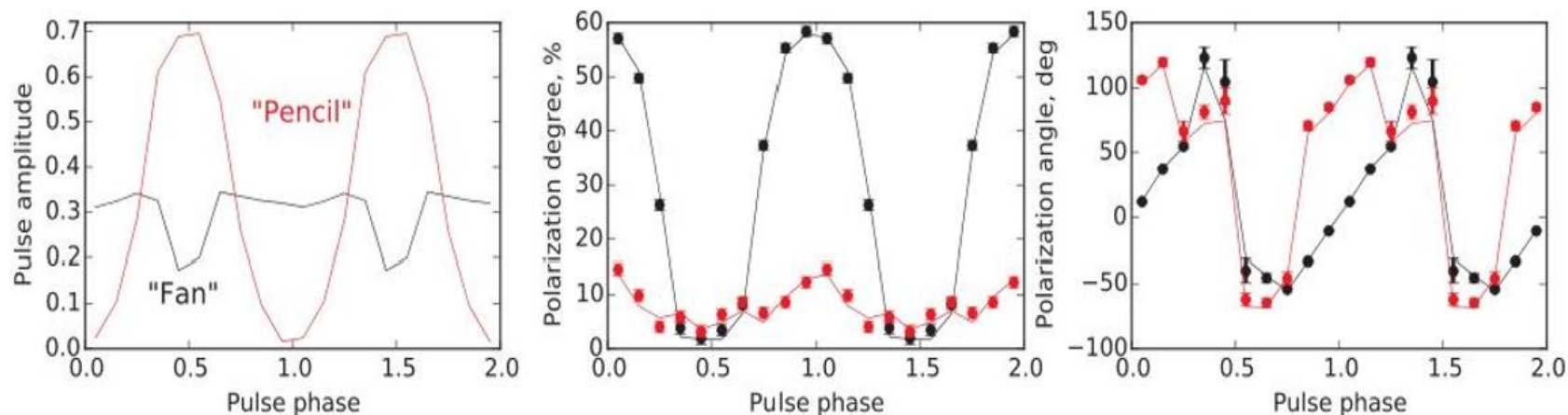
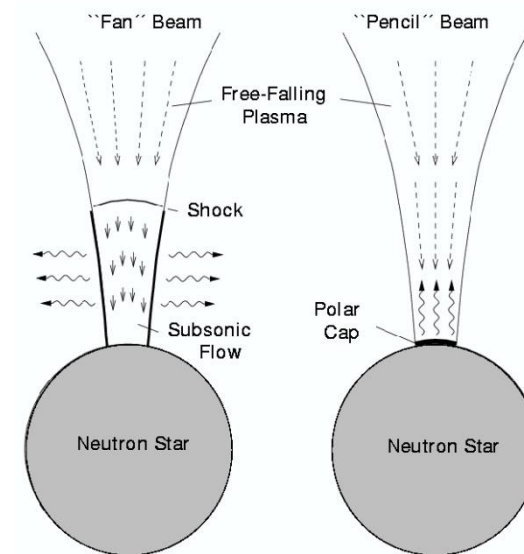
- 检验量子电动力学 (QED) 预言的真空双折射现象
- 限制中子星的半径
- 观测需求： 偏振测量精度1.6%。



eXTP对 Her X-1曝光100 ks观测结果

科学目标：极端磁场—风扇模型和铅笔模型

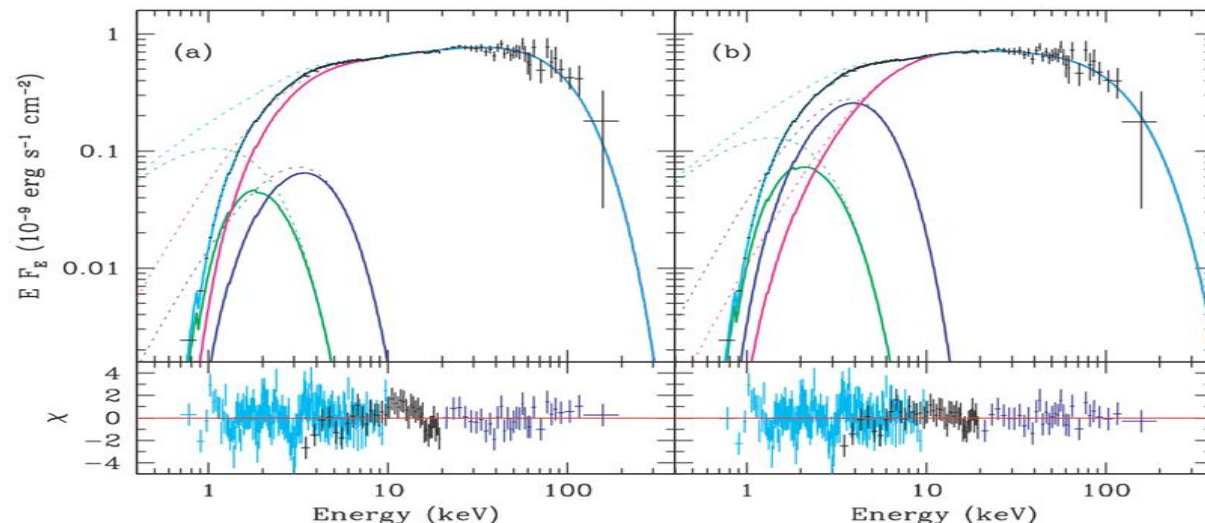
- 发现磁星候选体，检验磁星耀发的辐射模型
- 对普通吸积脉冲星，通过分位相偏振测量，区分风扇模型和铅笔模型
- 观测需求：最小可测偏振度在10%；偏振角测量精度为 20° ；需要时间分辨优于0.1s。



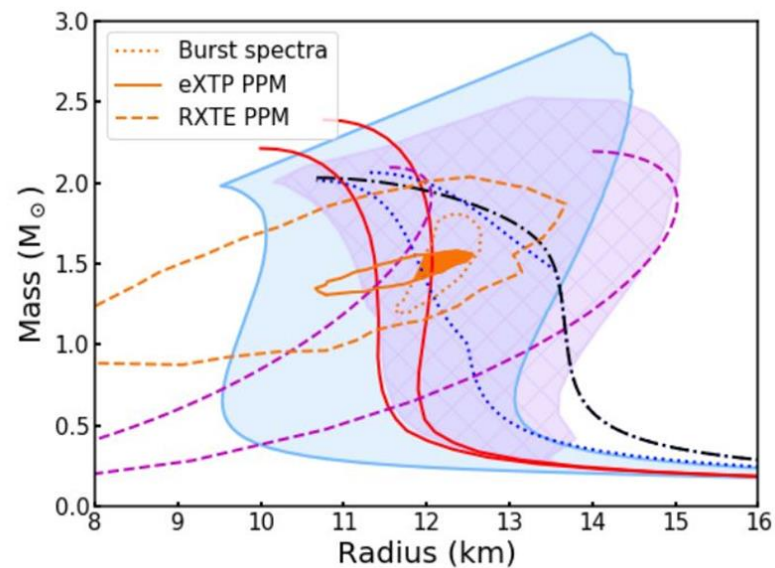
PFA对吸积中子星Vela X-1分位相偏振模拟分析

科学目标：极端密度—刻画致密物质状态方程

- 检验基本物理QCD在极端密度和温度条件下的模型预测。
- 转化成为对 neutron star 质量和半径的精确观测
- 要求同时测量 M 和 R 的精确度达到 5-10% 以内。
- 吸积毫秒脉冲星，分 10 个相位研究
- 观测需求：偏振测量精度 2.3%；需要时间分辨优于 $100\mu\text{s}$ 。



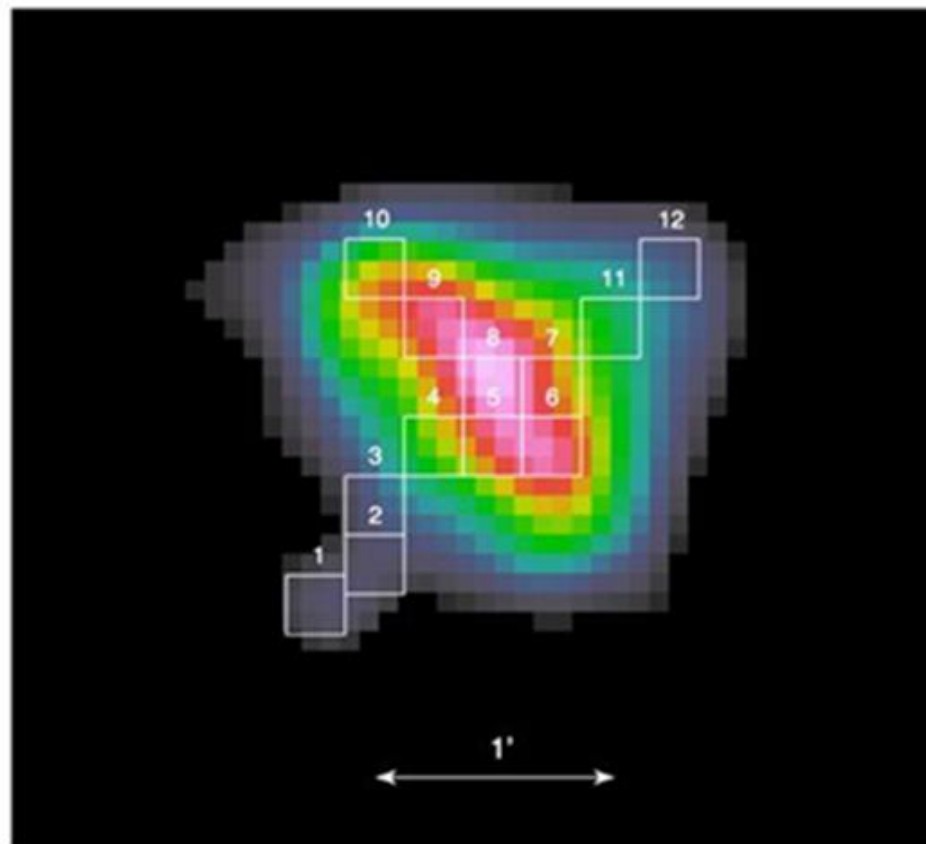
XTE J1751-305 两种辐射模型的能谱分析比较



对 neutron star 质量和半径限制

科学目标：天文台科学—超新星遗迹弥散辐射

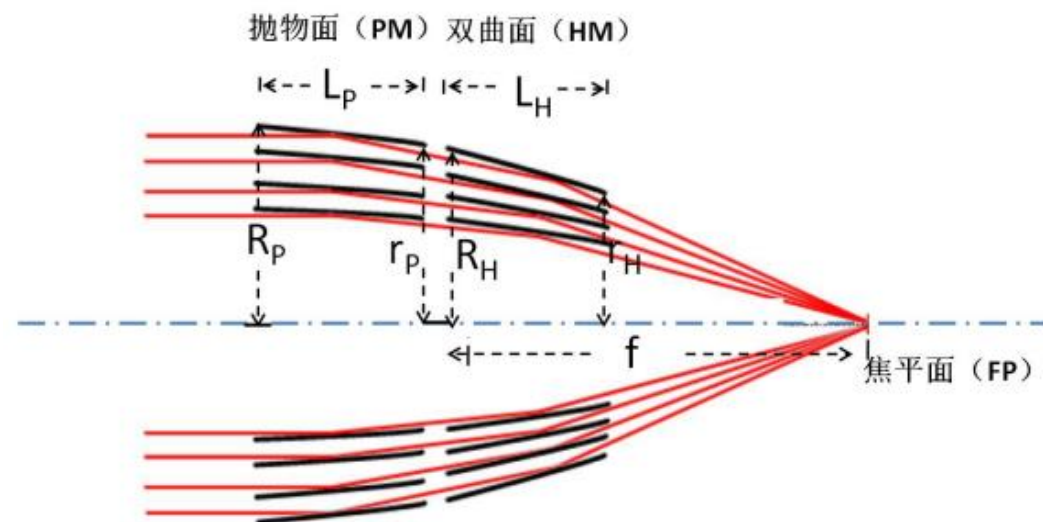
- 分辨出Crab Nebula内部区域的脉冲星、内环和喷流部分，研究不同部分的偏振。
- 观测需求：角分辨不差于 $30''$ （HPD）



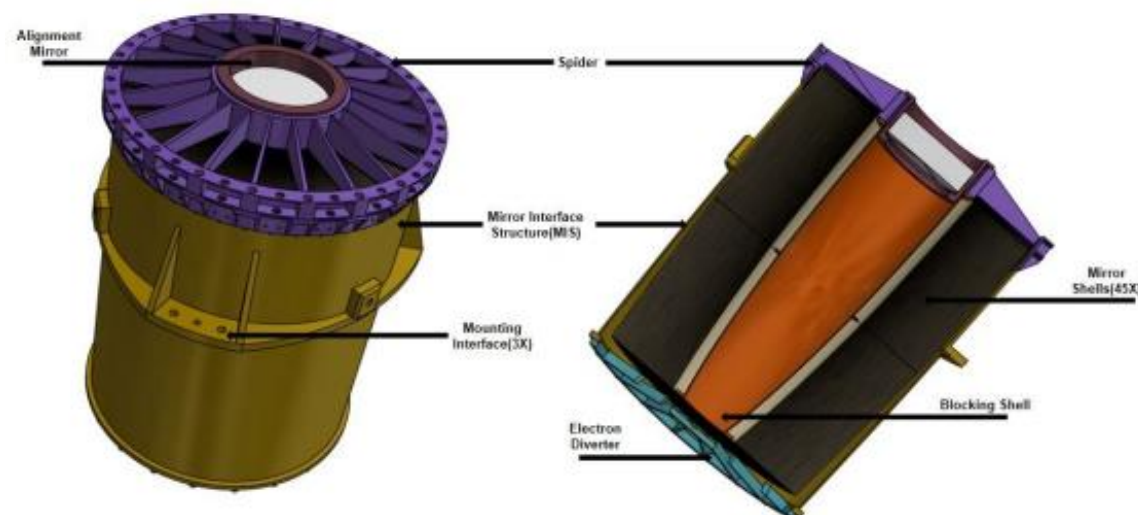
PFA对Crab的偏振成像观测，分为12个区域

PFA 聚焦镜单元设计

	SFA	PFA
基本配置	Wolter-I型, 多层嵌套结构 45层镍基底镜片 抛物面和双曲面各300 mm长	
焦距	5.25 ± 0.05 m	
反射膜	Au	Ni
在轴光收集面积	≥ 820 cm ² @ 1.5 keV ≥ 550 cm ² @ 6 keV	≥ 800 cm ² @ 3 keV ≥ 550 cm ² @ 6 keV
掠射工作能区	0.3~10 keV	
视场	≥ 12'	
角分辨	≤ 1' (HPD), ≤ 3' (W90)	≤ 30" (HPD, 目标15")
外轮廓	≤ 600 mm (直径)	
重量	150 kg (含20%余量)	
工作温度	20 ± 1°C	
力学条件	验收级: 10g (轴向), 6.7g (横向)	



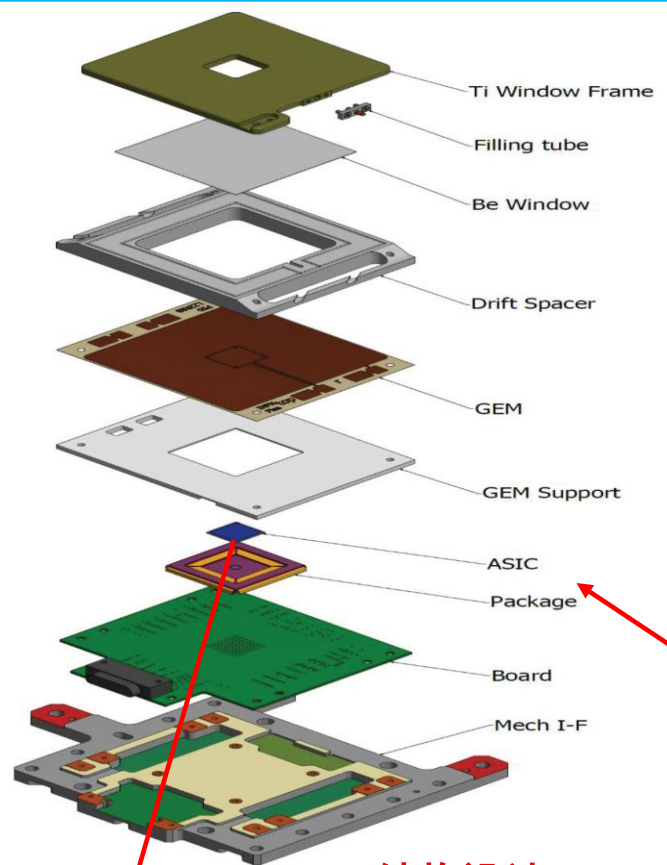
多层嵌套Wolter-I型X射线聚焦镜原理



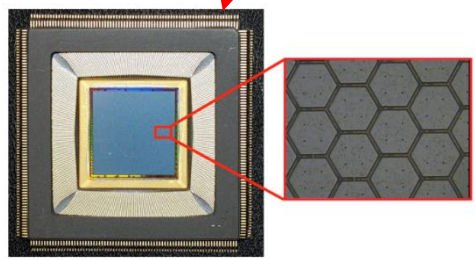
聚焦镜单元设计

PFA焦平面相机设计

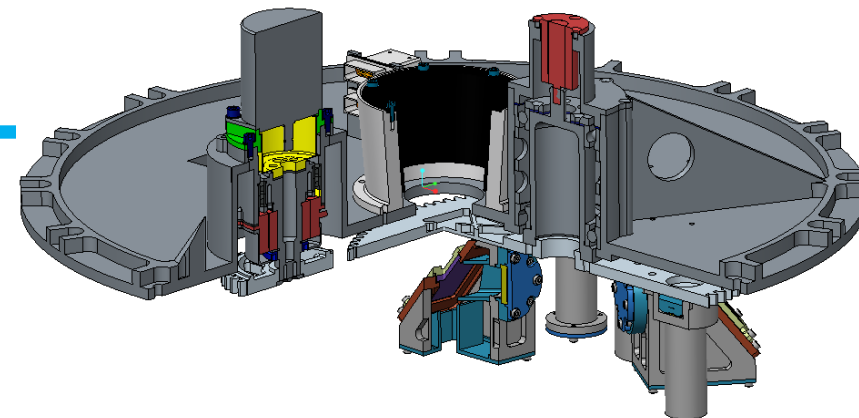
PFA	
基本配置	成像型气体探测器 (GPD), 通过光电子径迹方向分布测量X射线偏振
探测器面积	$\geq 12 \times 12 \text{ mm}^2$ (8')
位置分辨	$\leq 0.2 \text{ mm}$ (8")
能量范围	2-8 keV
能量分辨	$\leq 1.8 \text{ keV @ } 6 \text{ keV}$
调制因子	$\geq 50\% @ 6 \text{ keV}$
时间分辨	$\leq 10 \mu\text{s}$



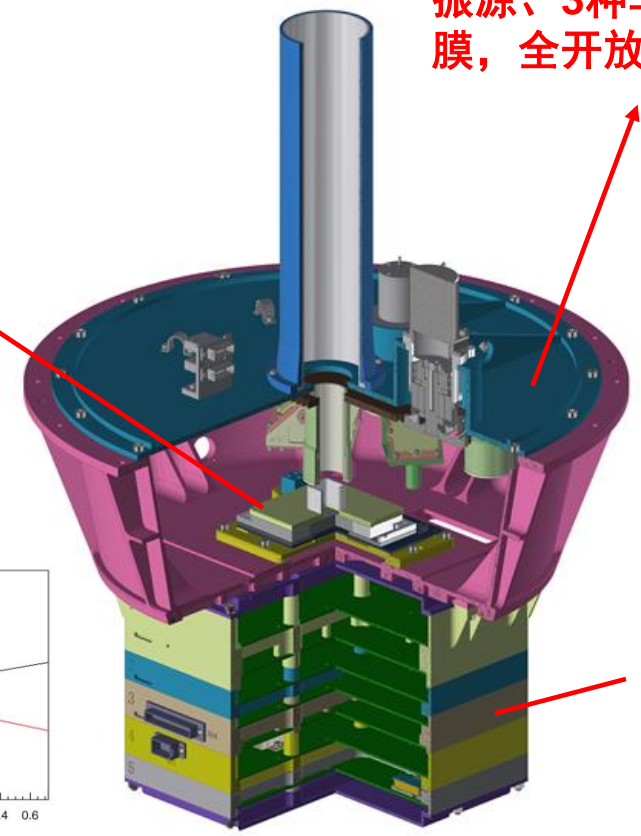
GPD 结构设计



探测、读出ASIC (像素数量 10^5)

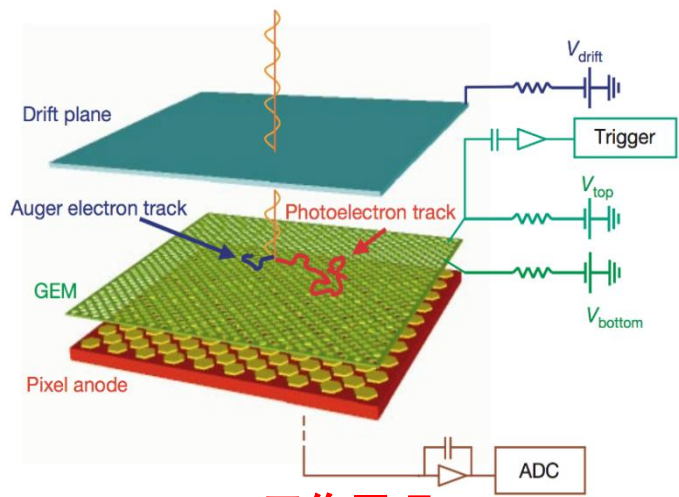


转轮机构, 7个档位: 偏振源、3种非偏振源、厚膜, 全开放、全遮挡

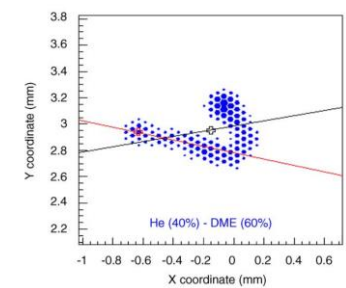


电子学

PFA焦平面相机整体结构



GPD 工作原理



PFA工程样机研制情况

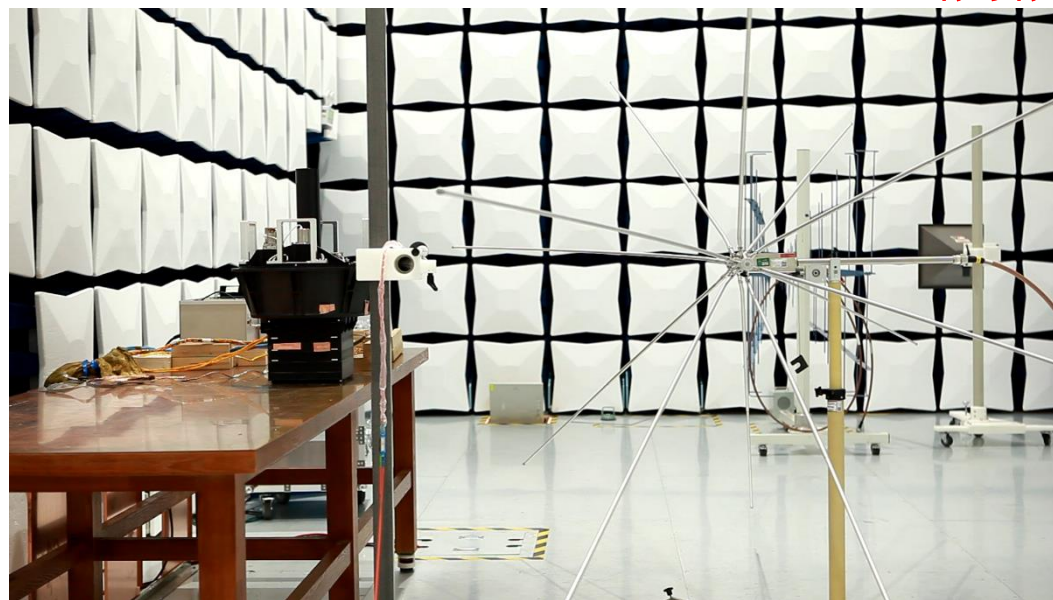
- 聚焦镜工程样机
- PFA焦平面相机工程样机
 - 性能测试
 - 热真空试验
 - EMC试验
- 载荷级联调
 - 性能功能测试



聚焦镜工程样机1



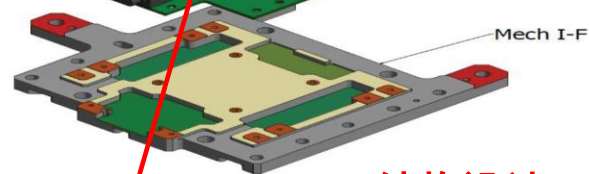
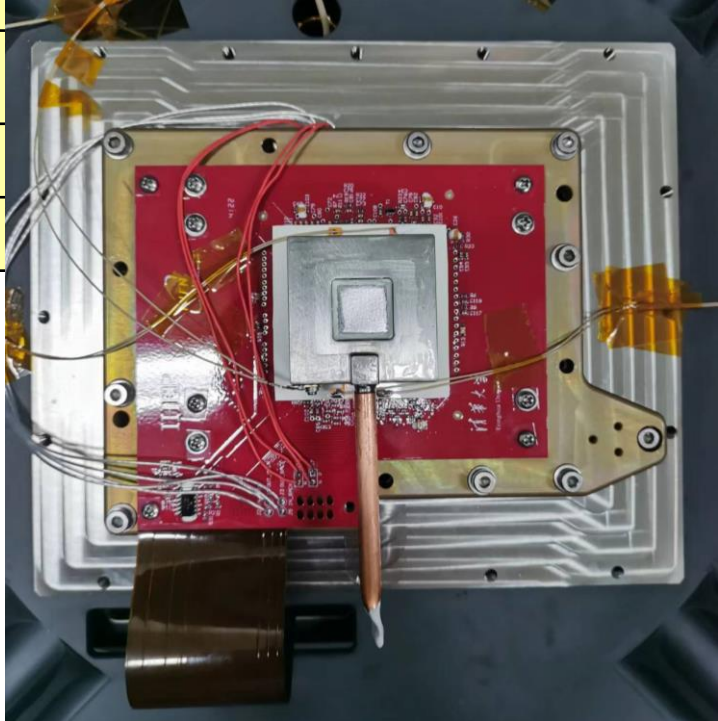
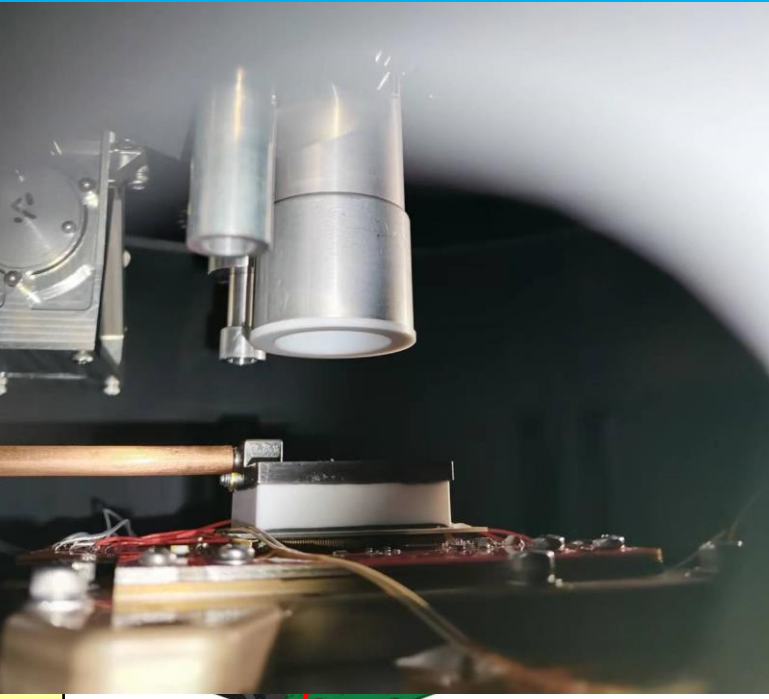
“端到端”测试



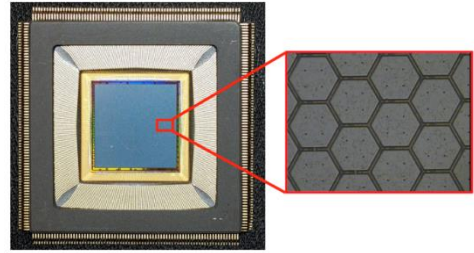
PFA焦平面相机EMC试验

PFA焦平面相机工程样机研制

	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 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



GPD 结构设计



探测、读出ASIC (像素数量 10^5)



时源、厚全遮挡

子学

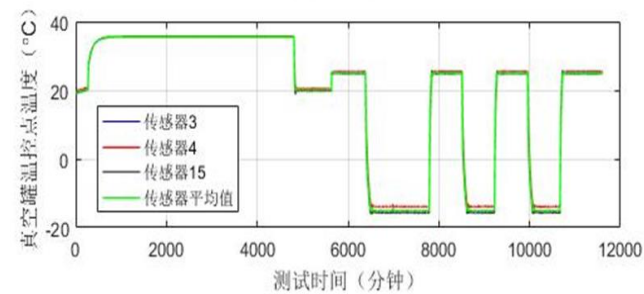
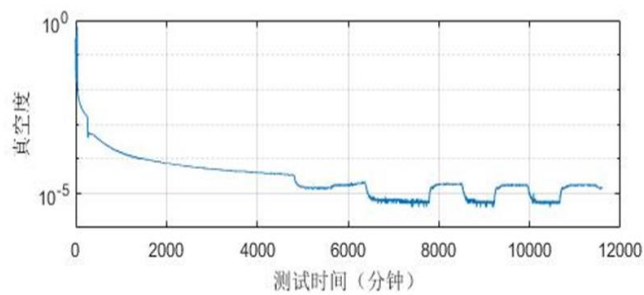
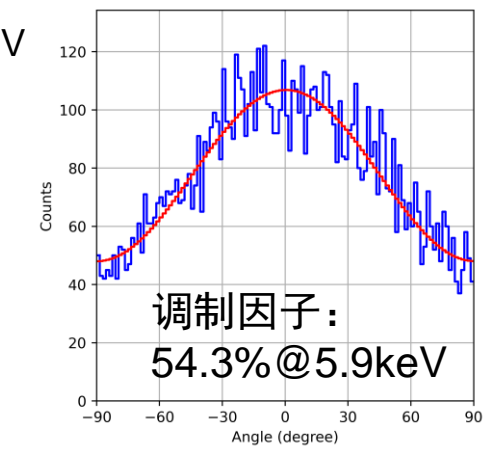
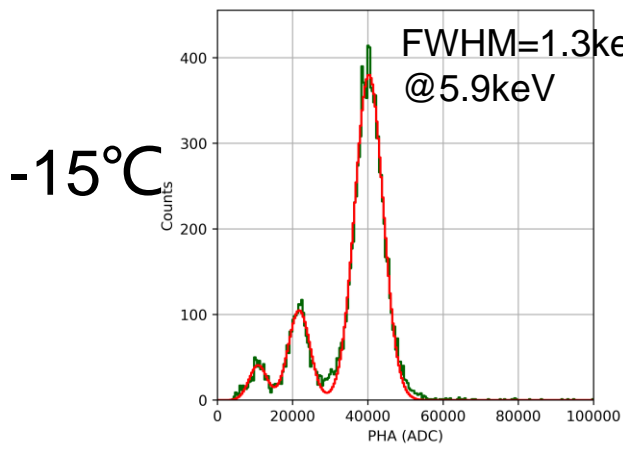
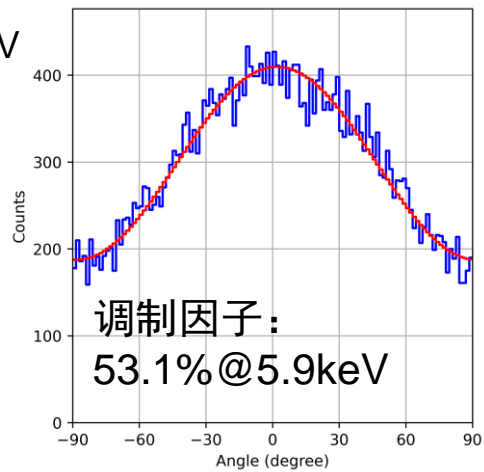
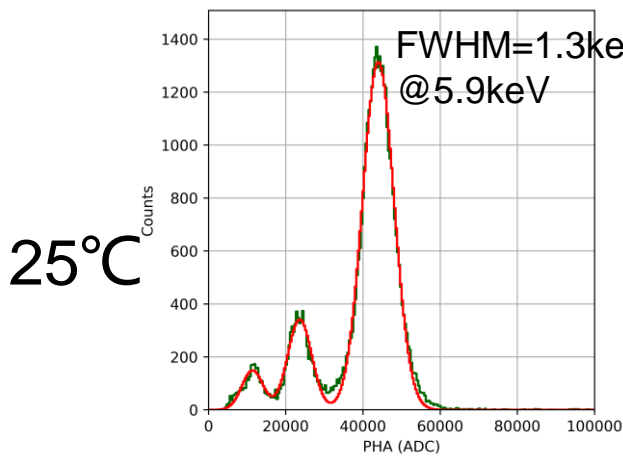
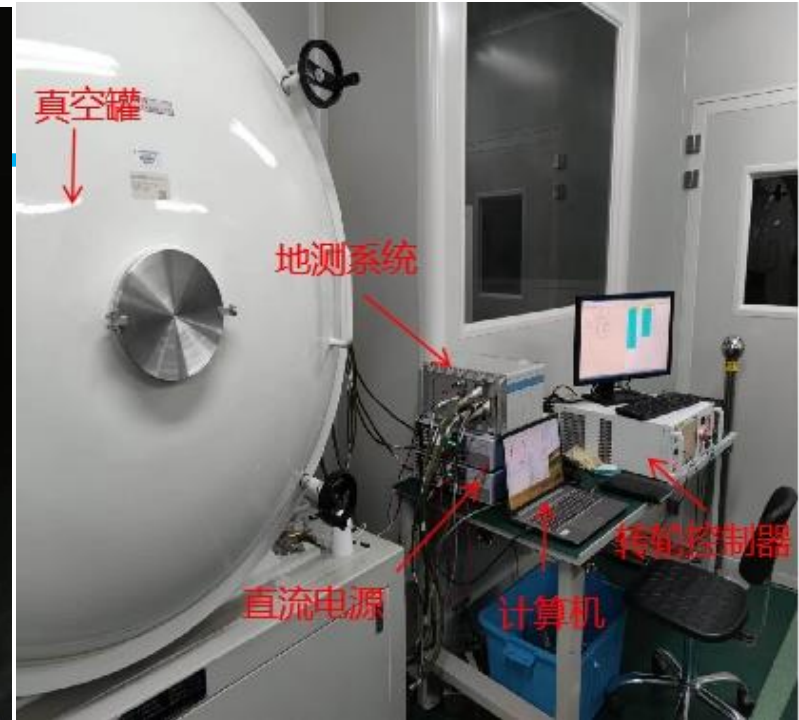
PFA焦平面相机整体结构



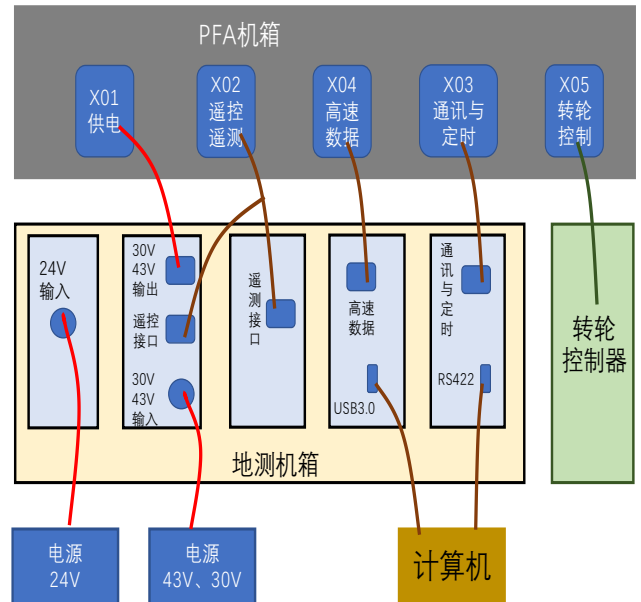
GPD 工作原理

PFA工程样机热真空试验

- 能量分辨: 1.3keV@5.9keV
- 调制因子: 53%@5.9keV
- 主动温控: 控温能力8°C, 温度稳定度0.1°C。

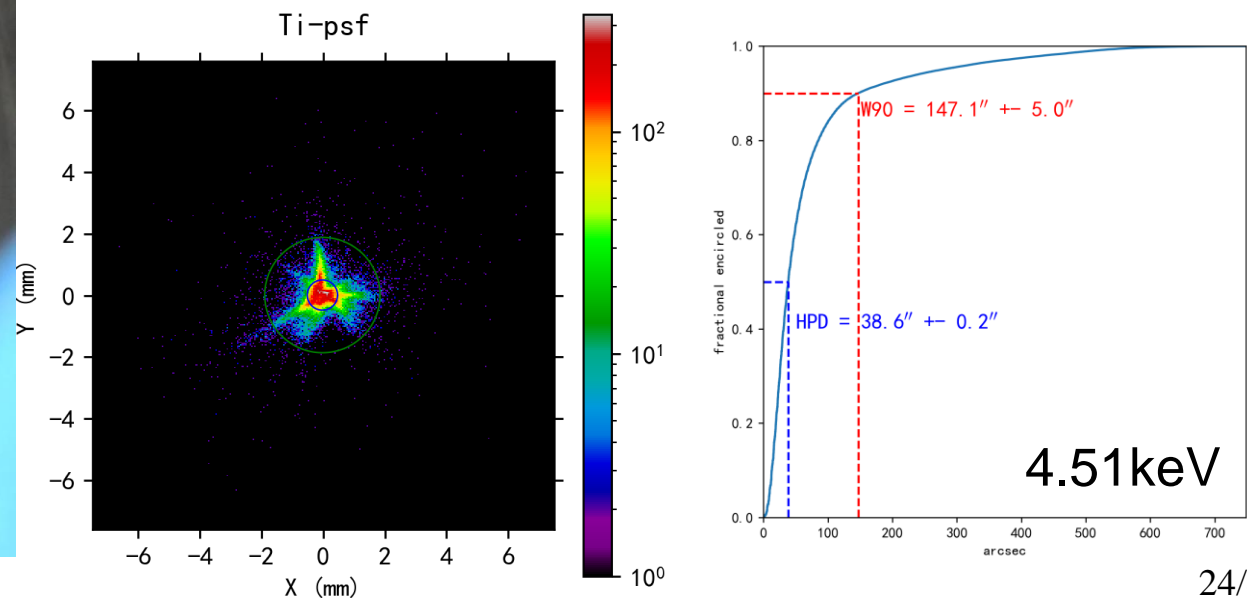
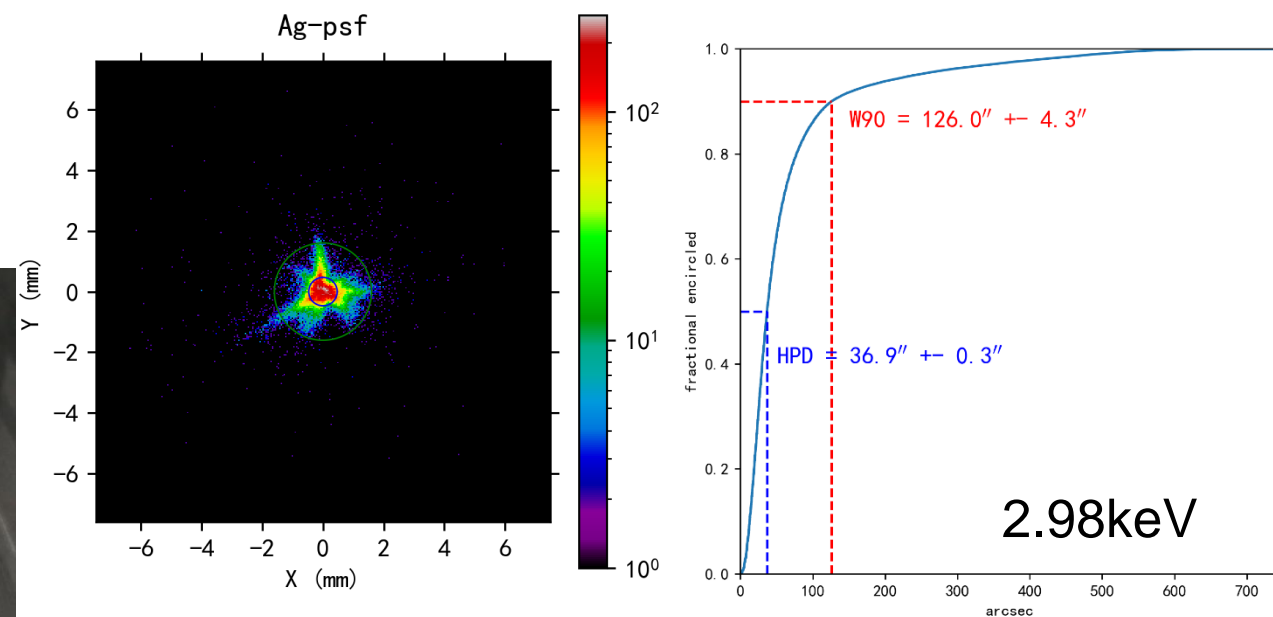
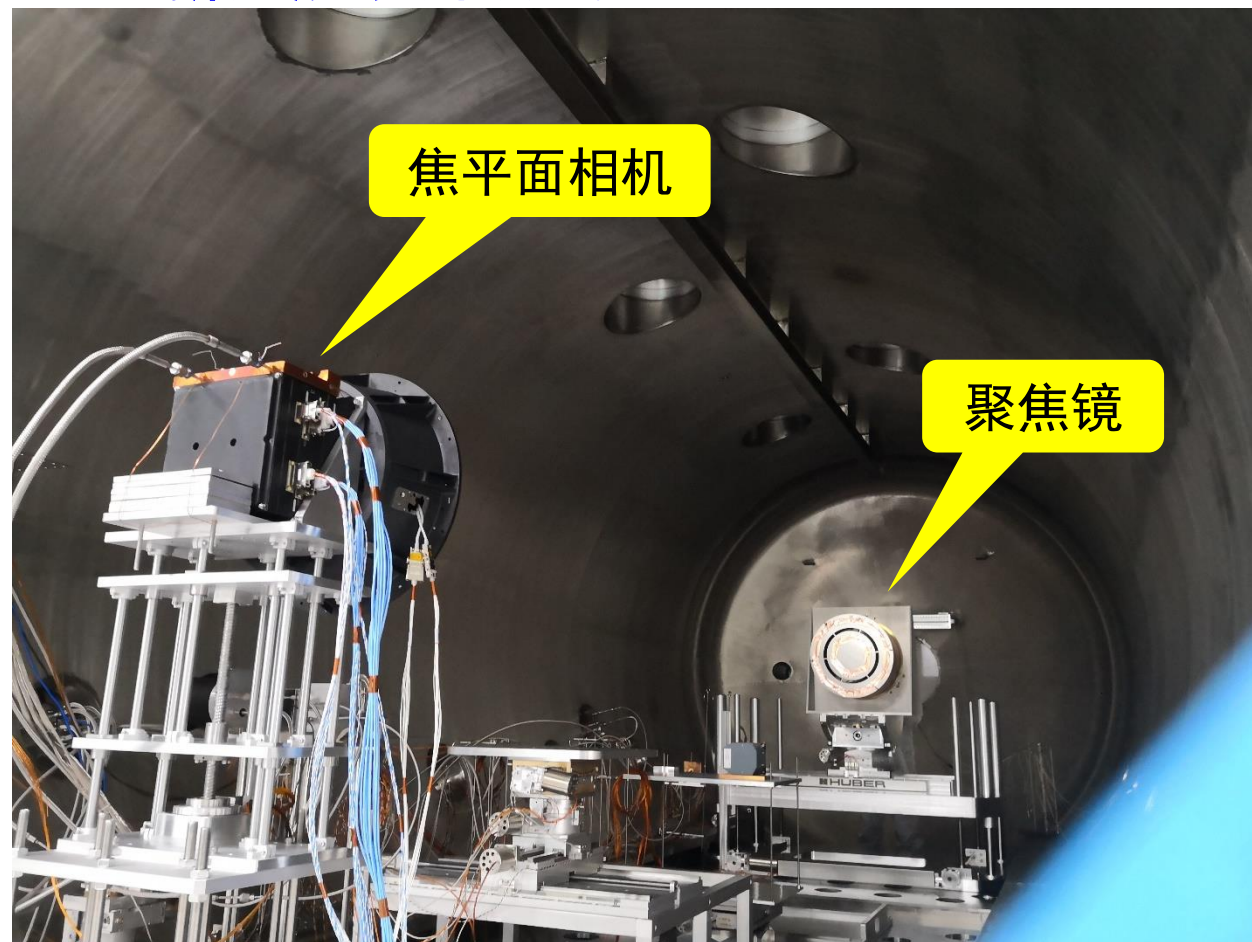


真空度及控温点温度

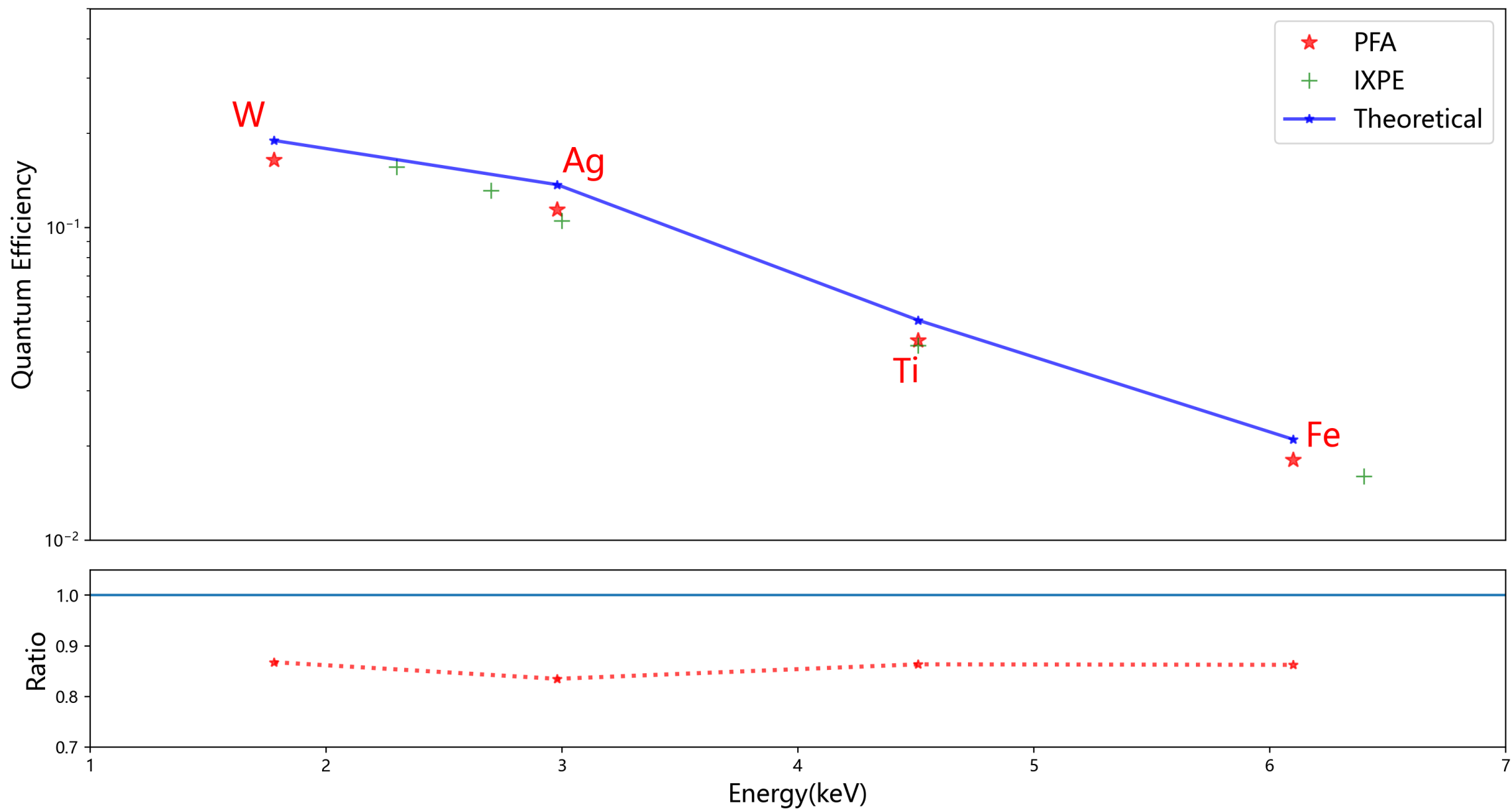


PFA望远镜“端到端”测试（聚焦镜+焦平面相机）

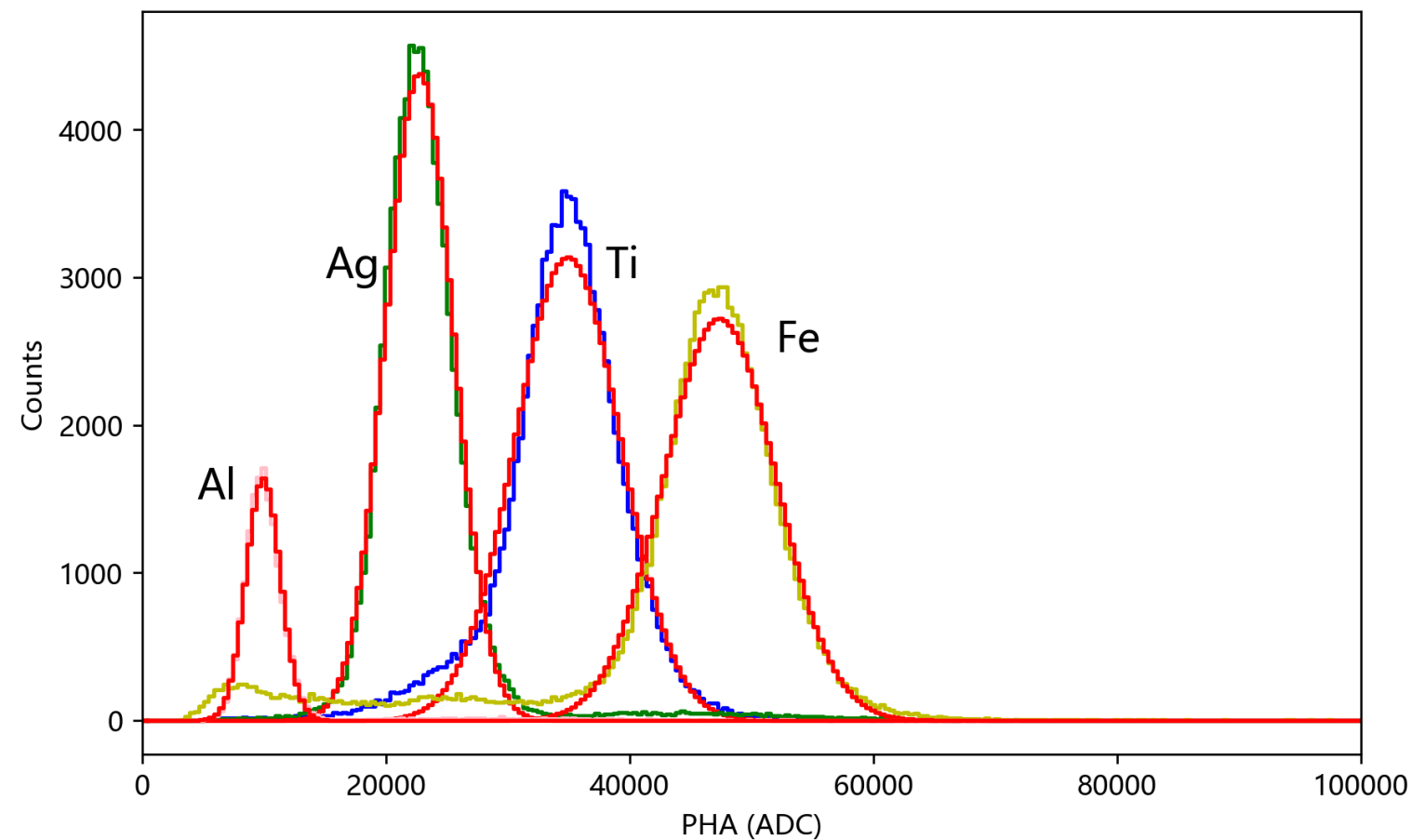
- 在 高能所 百米束线 完成“端到端”测试
- 采用 多靶源 测试 不同能量 下的角分辨
- 最新 聚焦镜片 测试结果 26" (HPD)



GPD探测器探测效率 (标准探测器: 百米束线中的SDD)

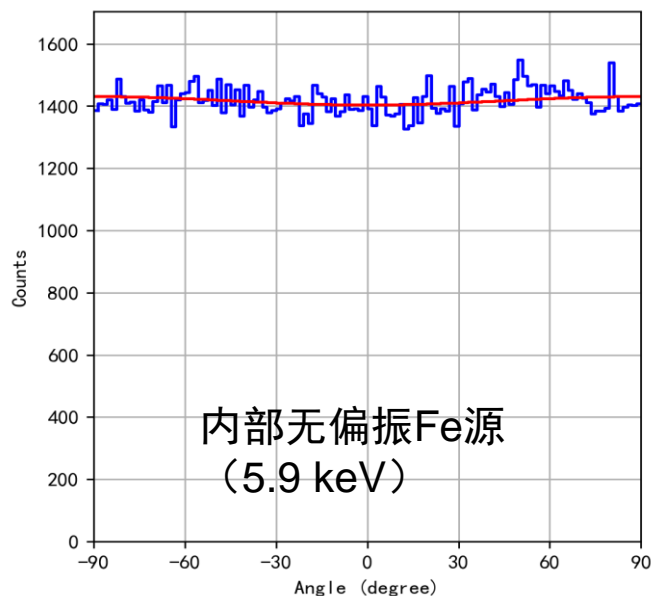
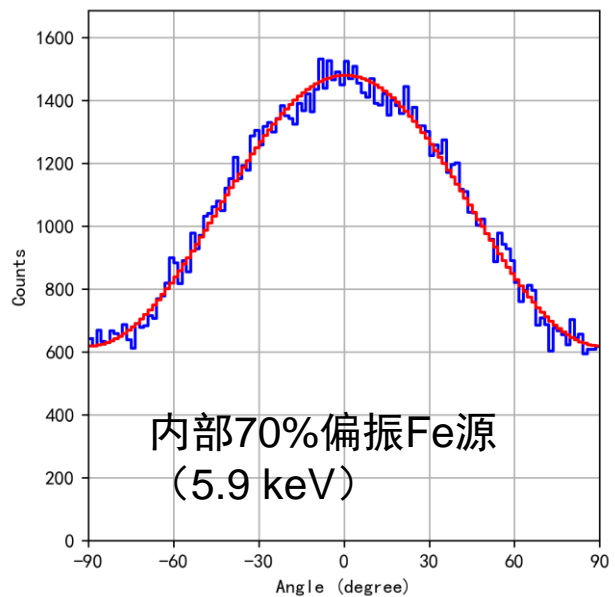
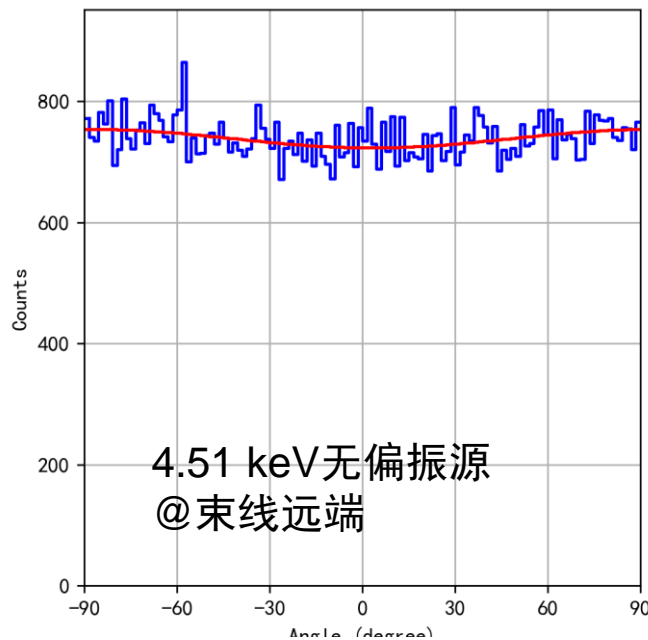
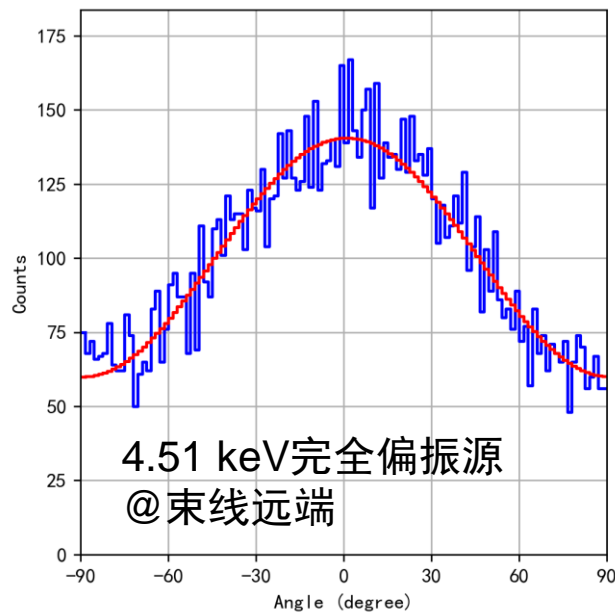


PFA望远镜“端到端”测试：能量分辨



特征线	能量 (keV)	能量分辨 (keV)
Al-K	1.49	0.47
Ag-L	3	0.85
Ti-K	4.51	1.28
Fe-K	6.40	1.47

PFA望远镜“端到端”测试：偏振



调制因子测量结果

4.51 keV 端到端测试：

全偏振源： $\mu = 0.41 \pm 0.01$

无偏源： $\mu = 0.021 \pm 0.005$

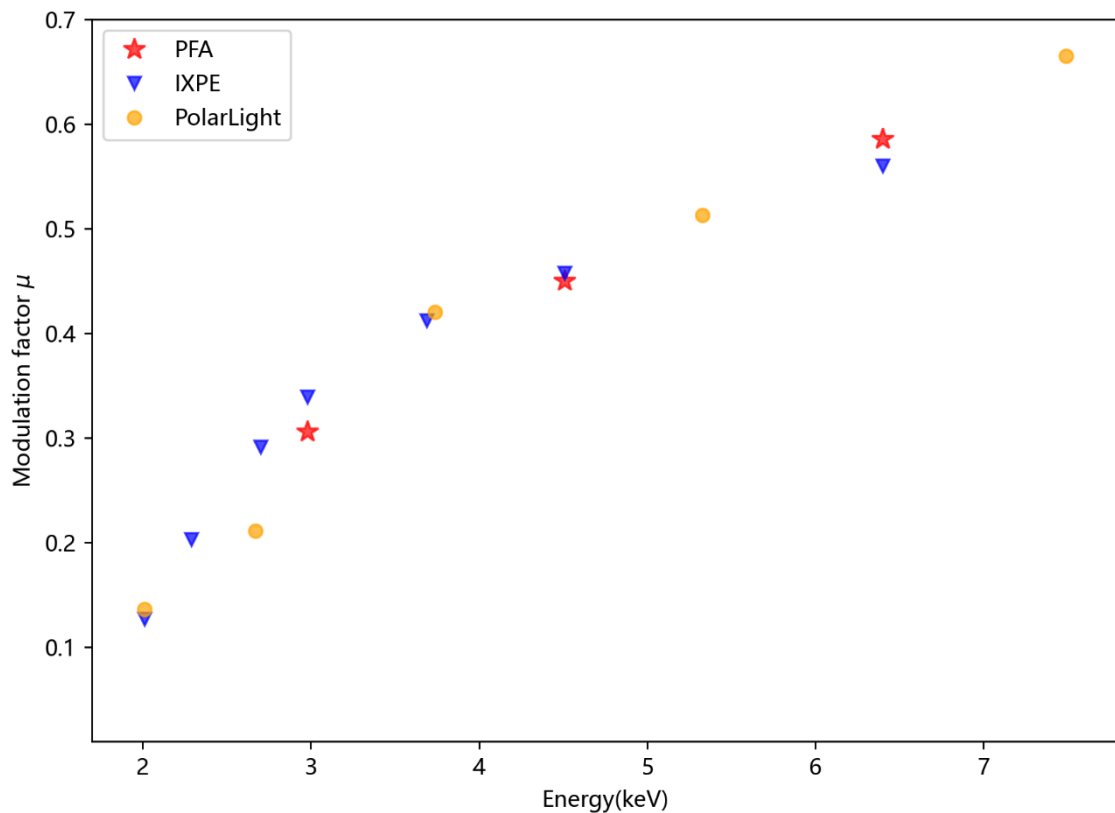
5.9 keV GPD测试

70%偏振源： $\mu = 0.410 \pm 0.004$

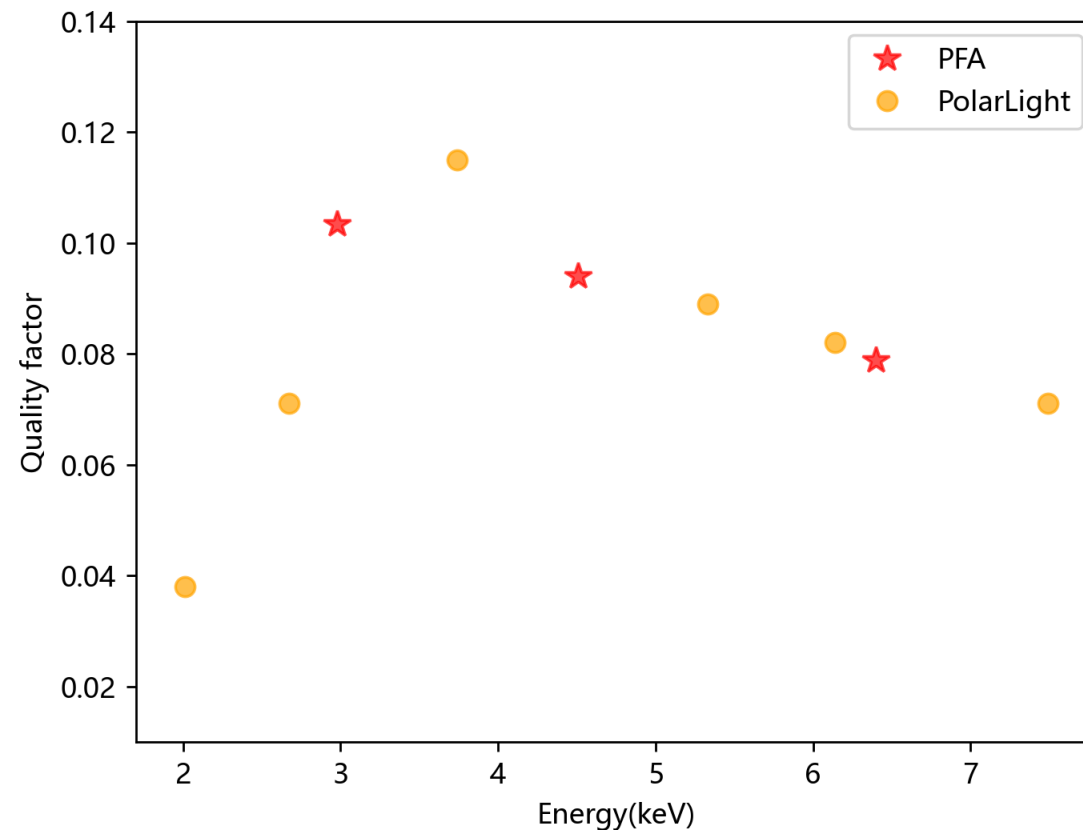
➤ 调制因子： 约0.59

无偏源： $\mu = 0.0095 \pm 0.0038$

PFA望远镜调制因子曲线及品质因子

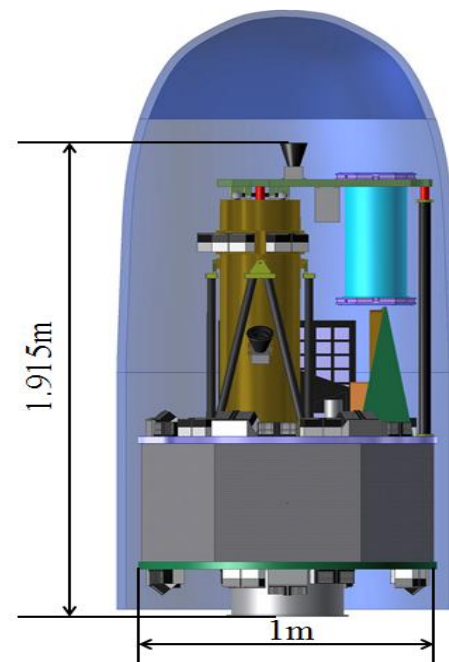
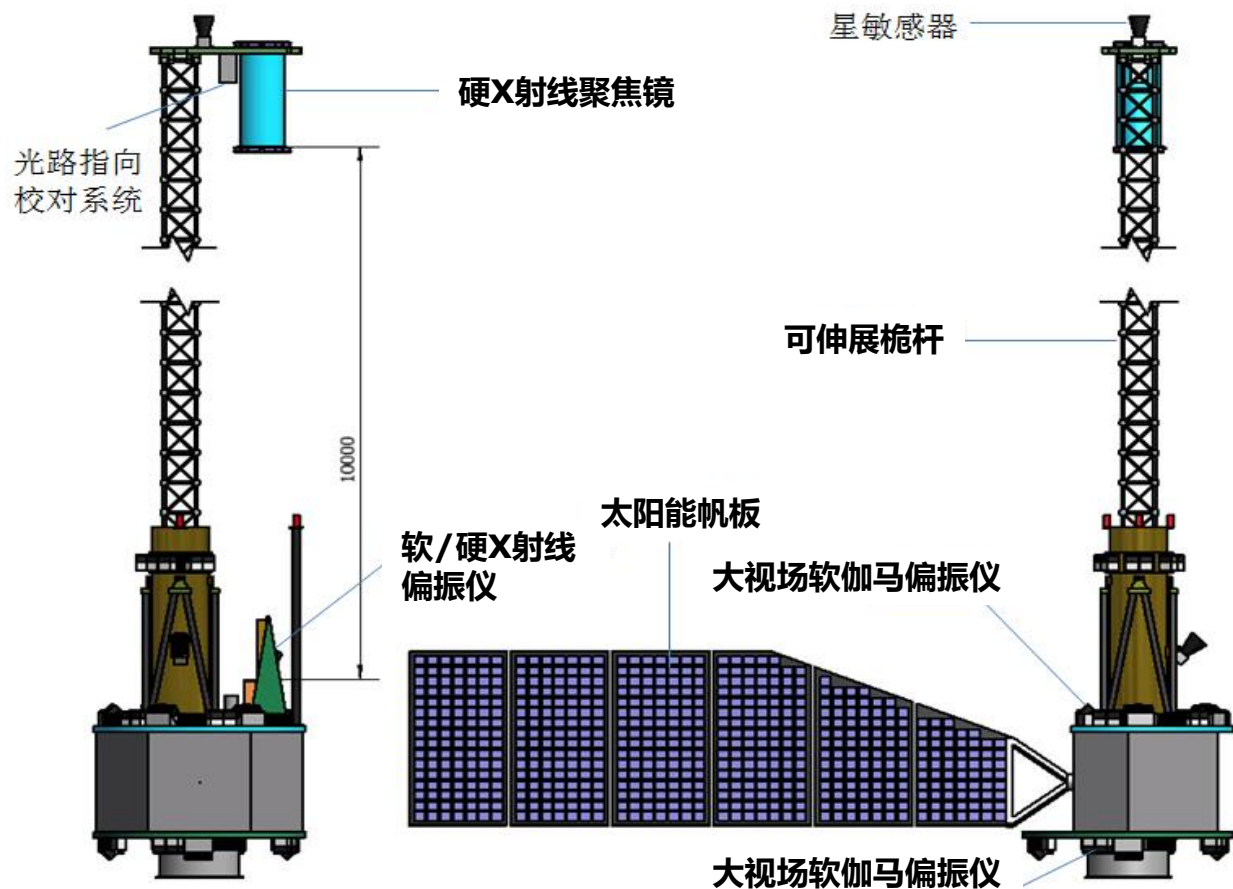


PFA调制因子



PFA焦平面探测器品质因子

WXPT: 宽波段X射线偏振聚焦望远镜



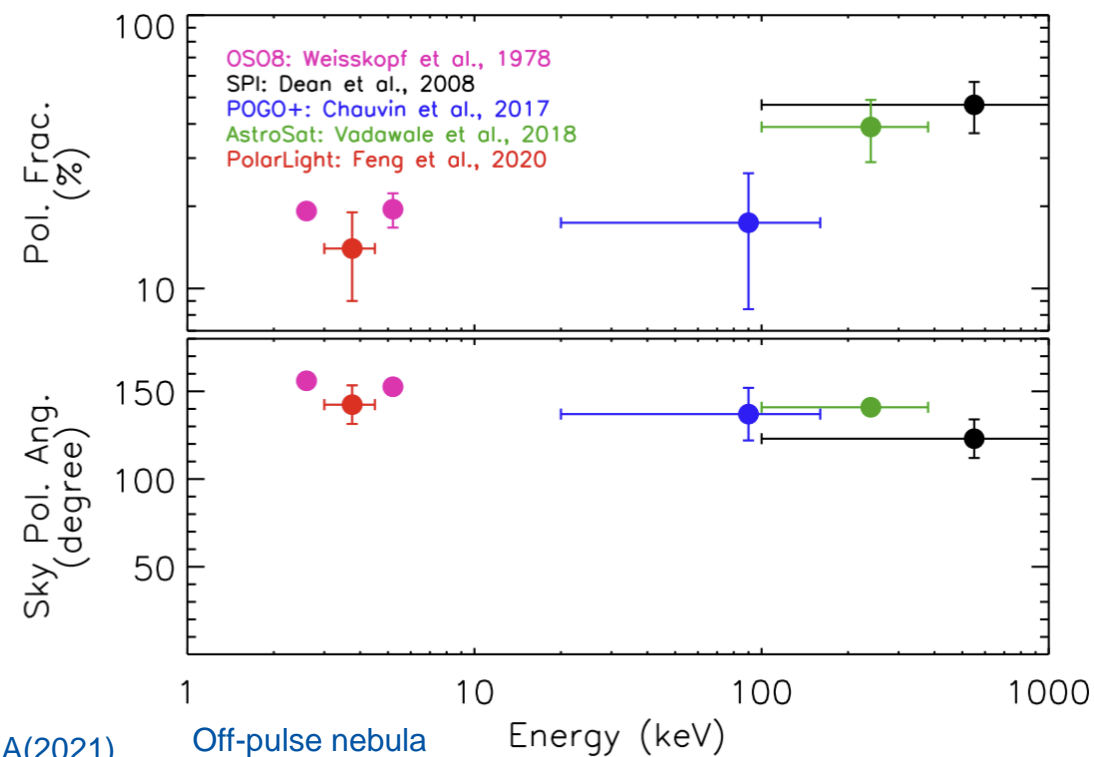
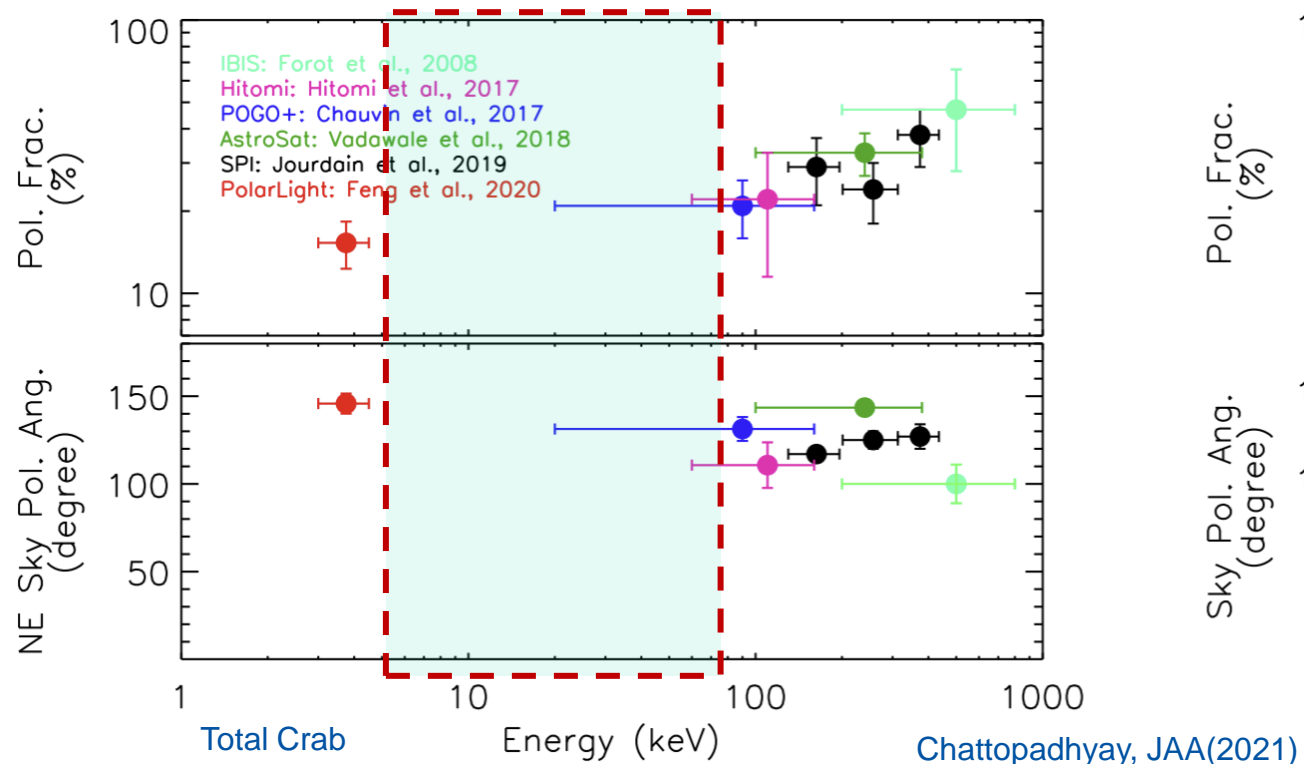
基本特性:

质量: ≤ 500 kg
轨道倾角: 28°
聚焦镜: 3组
长焦距: 20米

特点:

- 小型任务, 针对偏振测量优化设计
- 宽能区覆盖: 3-60keV (聚焦)
50-500keV (大视场)
- 在硬X波段具备最好的偏振测量能力

为什么要WXPT



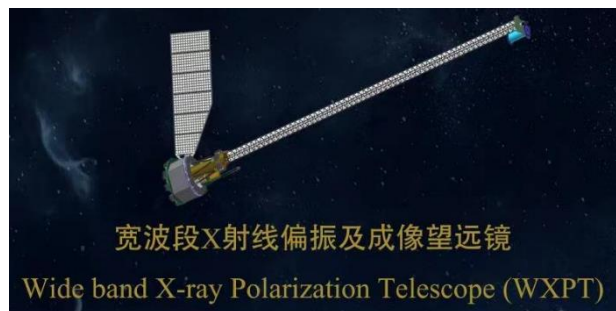
Past : GRAPE, PoGO+, COSI, X-Calibur, **GAP, SGD, POLAR**

Active: INTEGRAL/SPI, AstroSAT/CZTI, **IXPE, XPoSat/POLIX**

Future: POLAR-2, LEAP, eXTP

覆盖硬X射线能段的专用偏振仪器缺失

WXPT基本配置

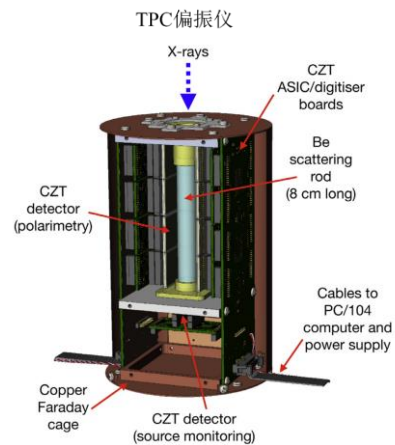
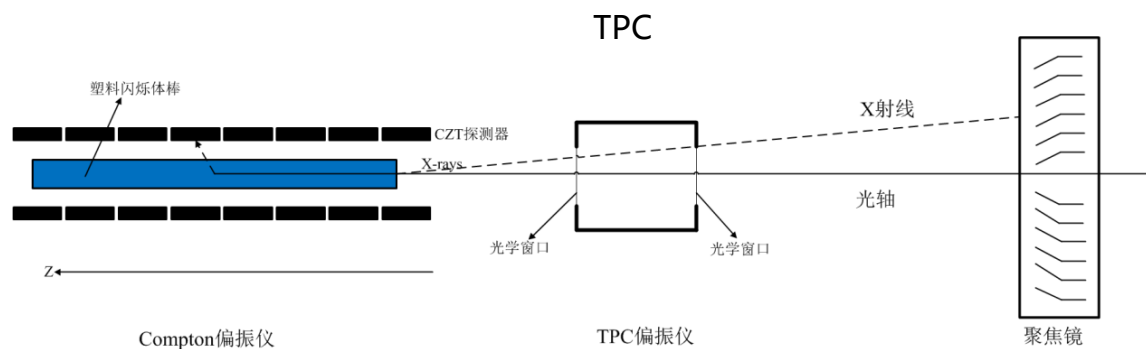
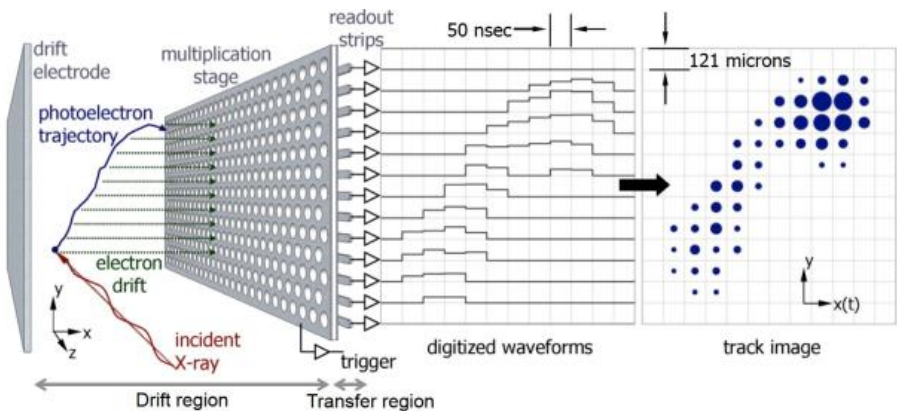
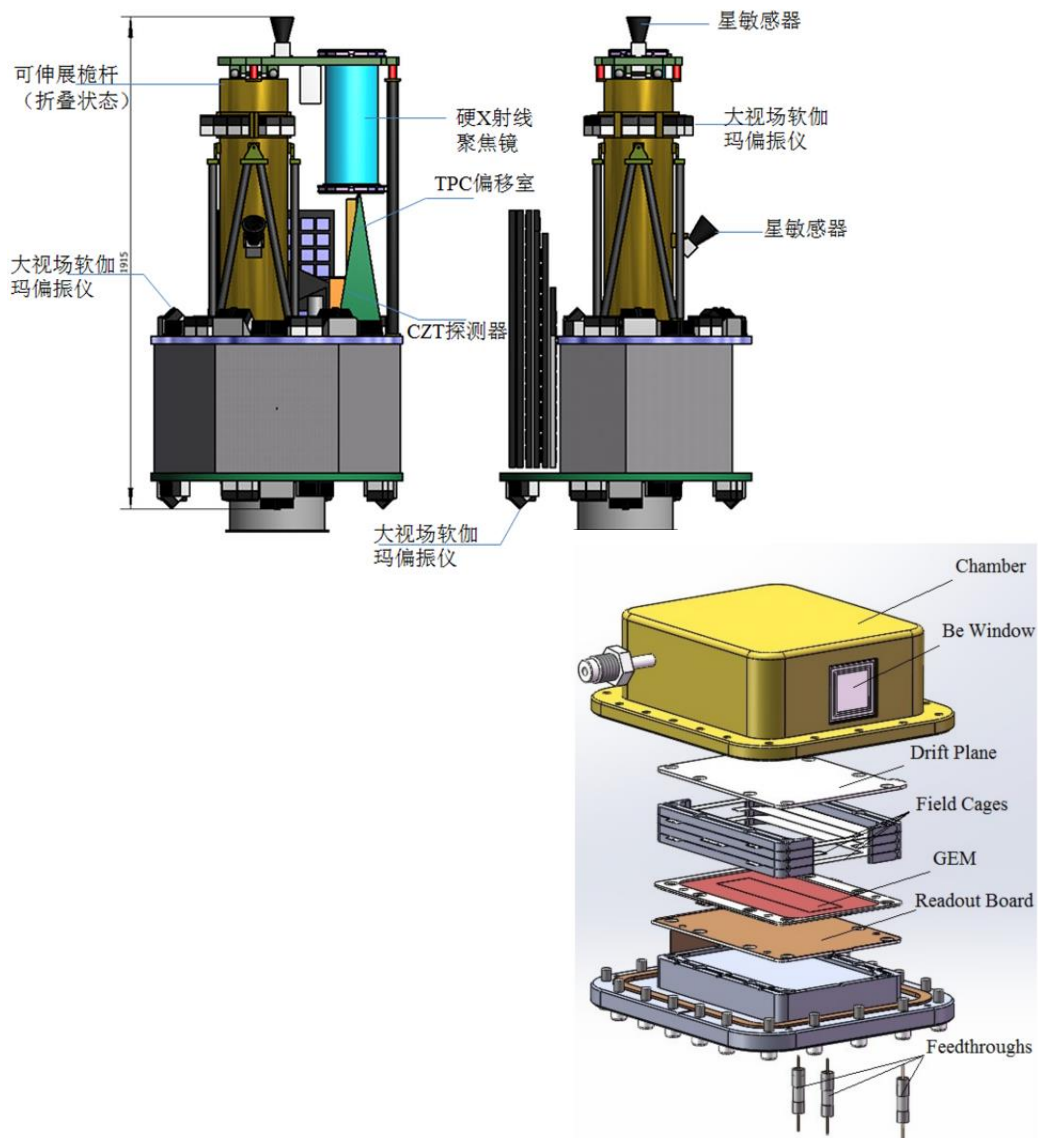


WXPT: 3-60keV (聚焦)
50-500keV (大FOV)

载荷名称	配置	主要技术指标
软/硬X射线偏振仪	3组嵌套掠射聚焦望远镜； 焦平面： TPC探测器（软X射线） 闪烁体+CZT（硬X射线） 或层叠TES阵列	有效面积： $>3*100\text{cm}^2@60\text{keV}$ ； 能区： 3~60 keV 角分辨： $\leq 30''$ (HPD)@10keV MDP：优于1.5%@ (100ks, 1mCrab, 3~10keV)，优于7%@ (100ks, 1mCrab, 10~60keV)
大视场软伽马偏振仪	塑料闪烁体加CsI量能器	有效探测面积： $\geq 3000\text{cm}^2$ 能区：50~500keV 自定位精度： $\leq 1^\circ$ MDP： $<10\% (10^{-6}\text{erg*cm}^{-2})$

硬X射线偏振仪的基本配置

WXPT卫星及载荷

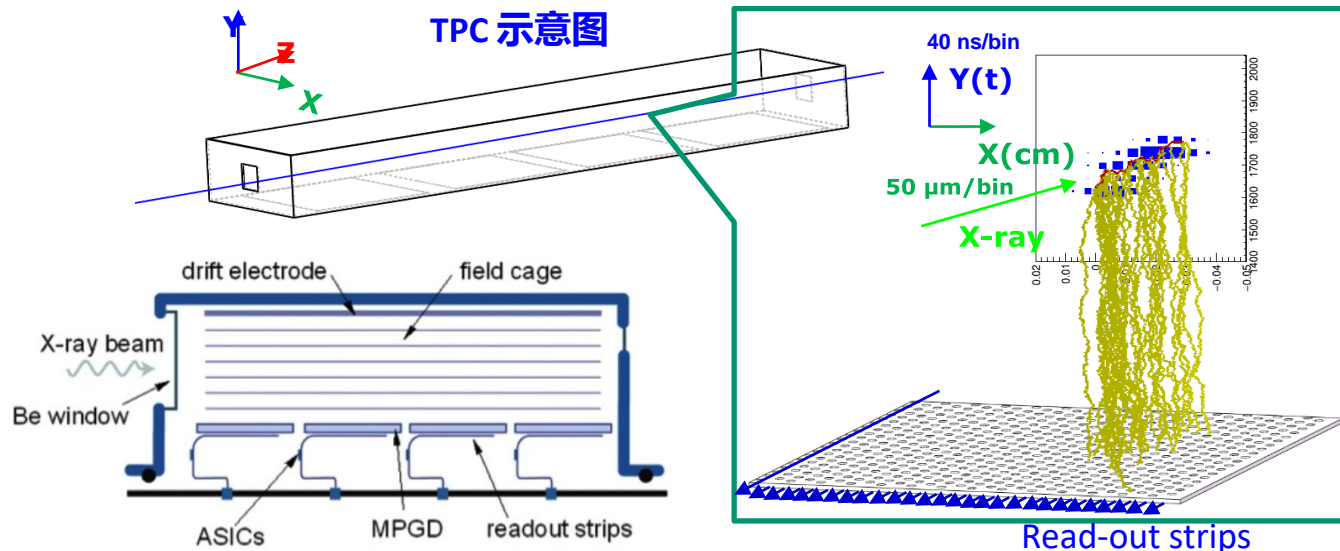


康普顿偏振仪 (Q. Abarr, 2020)

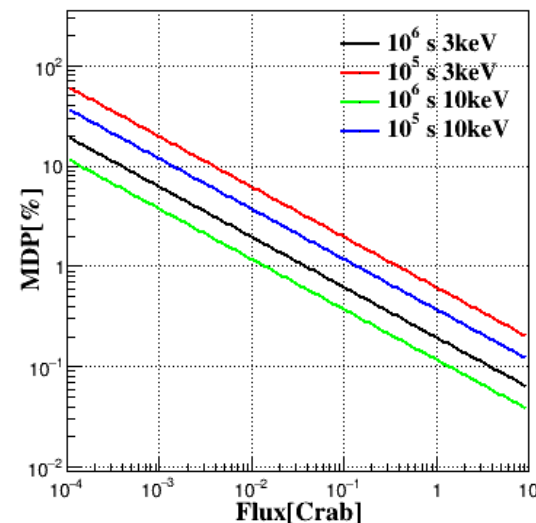
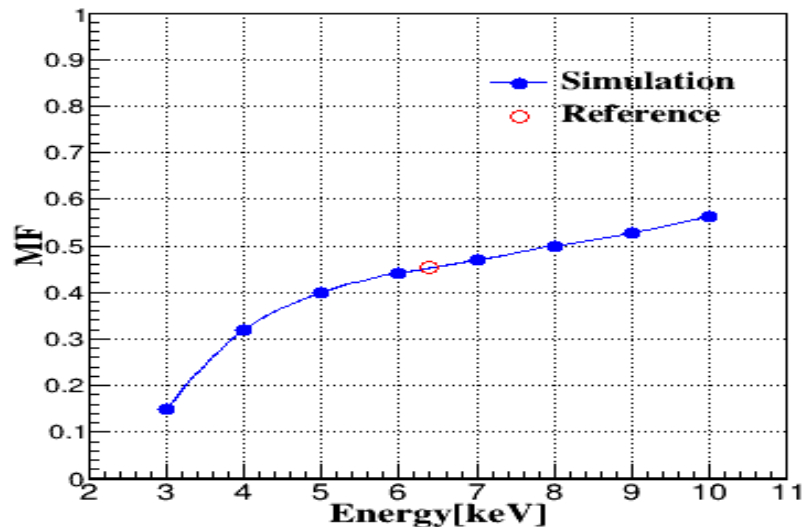
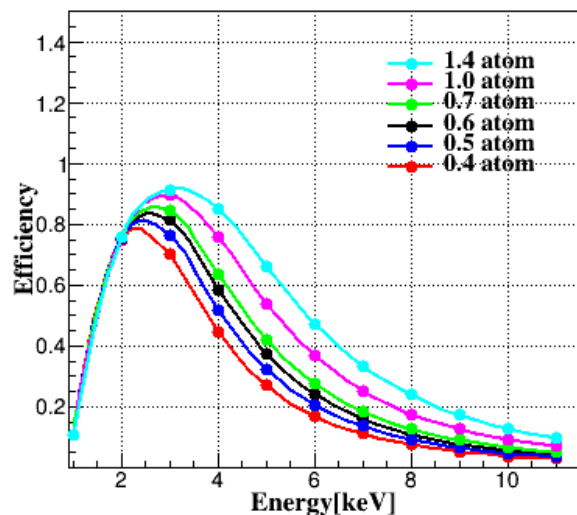
TPC相关进展

- 建立了TPC仿真框架完成了物理仿真设计
- 完成了TPC结构设计和电子学设计

- 气体选择: DME or 0.5MDE+0.5Ne 都可以满足MF>0.4@6 keV
- 纯 DME 有利于优化< 4 keV
- 0.5MDE+0.5Ne 有利于4 ~10 keV

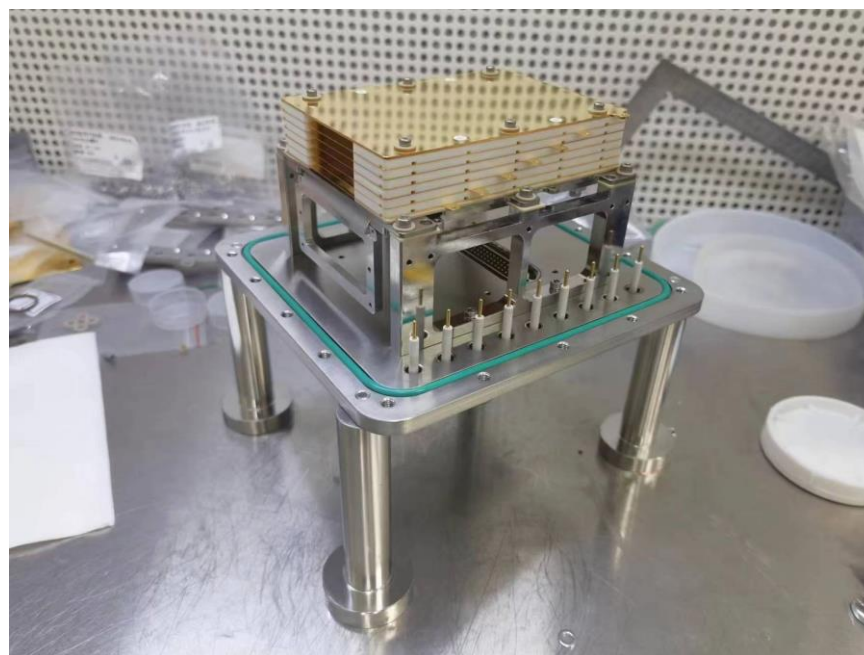
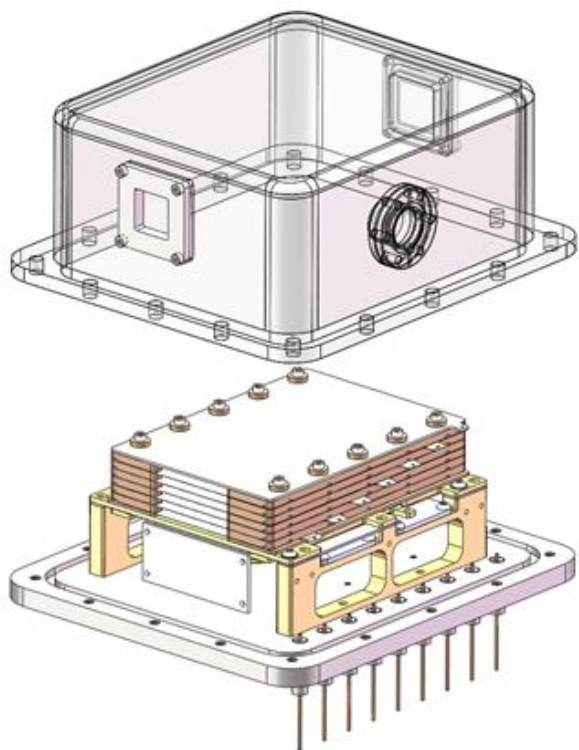


0.5DME+0.5Ne, 10cm, 0.6 atom



TPC研制进展

- 完成TPC部件加工，正在进行组装测试



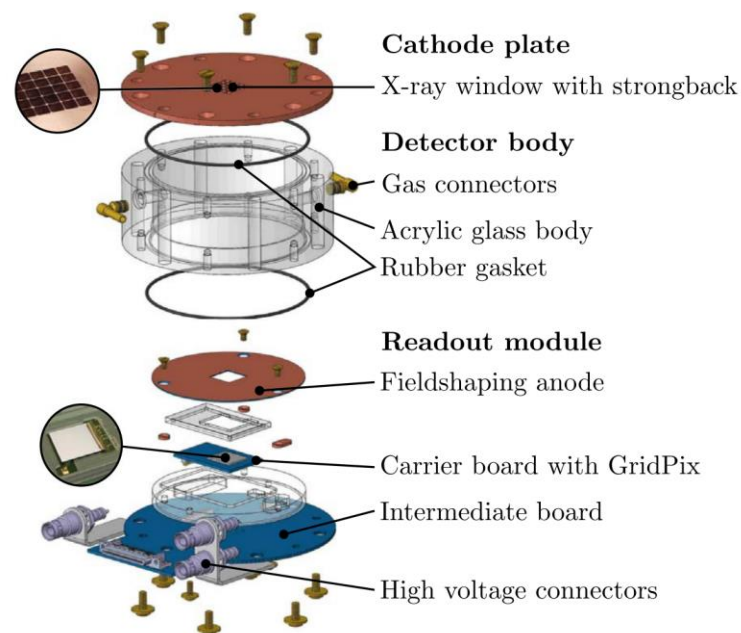
新一代X射线偏振探测器应该具有的特点

- 低残余调制
- 低充电效应
- 宽有效能区或便于扩展能区
- 低死时间

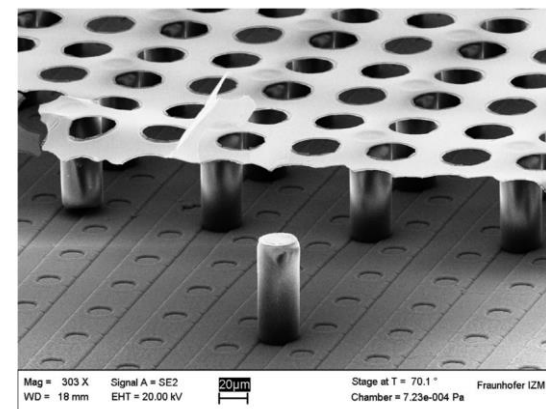
基于GridPixes的新一代3D光电子径迹X射线偏振探测器

基于GridPixes的新一代3D光电子径迹X射线偏振探测器。该探测器基于具有单像素时间分辨、二维位置分辨和能量分辨的4D灵敏ASIC以及直接生长在ASIC上的集成微网结构 (InGrids) 来实现。

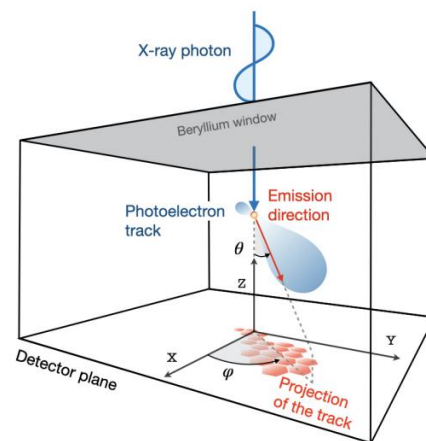
- 利用InGrids更好的增益一致性，更高的位置分辨能力；
- 利用4D灵敏ASIC实现3D光电子径迹读出，从而实现GPD架构和TPC架构合二为一，并且提高低能端调制因子；
- 死时间：由200 μ s提高至几十ns，可以匹配更大面积的聚焦镜；
- 位置分辨：更高的位置分辨、更好的成像和偏振探测能力；
- 从而获得更高的偏振探测灵敏度。



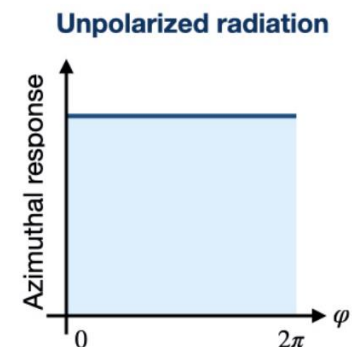
探测器组成示意



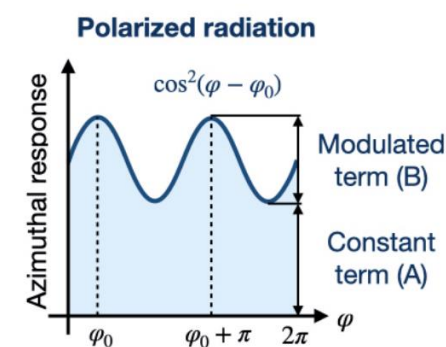
微网结构 InGrid



3D光电子径迹

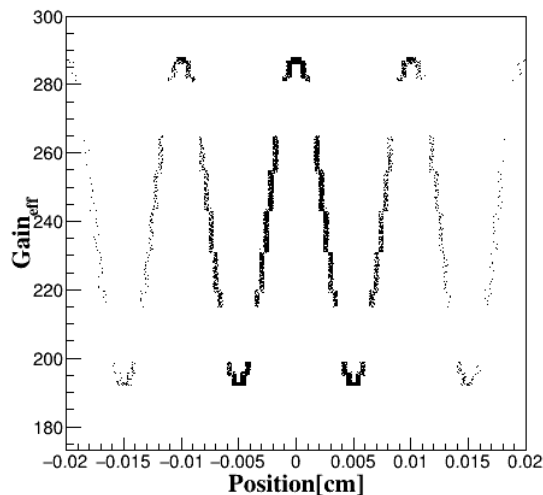


残余调制

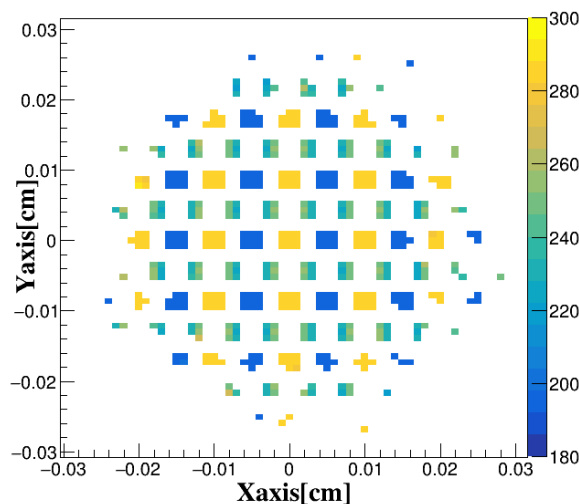


调制因子

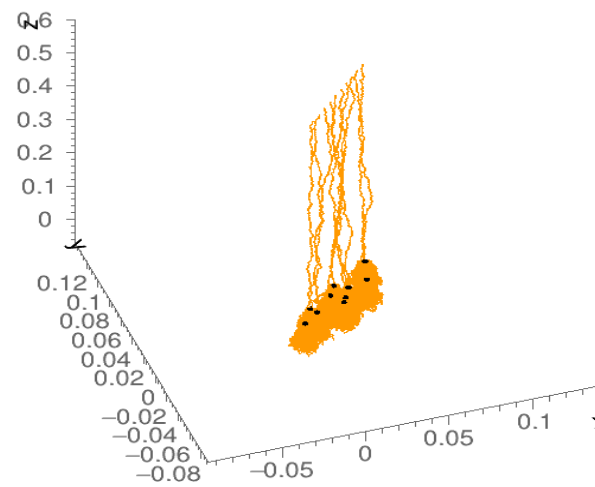
高位置分辨和小像素对消除残余调制的贡献



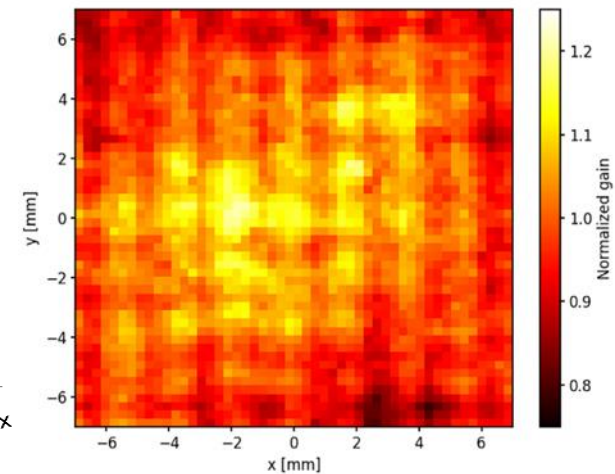
1-D gain distribution



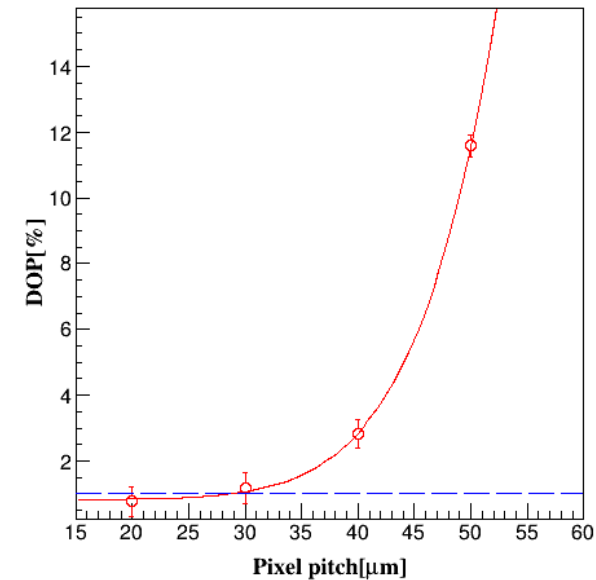
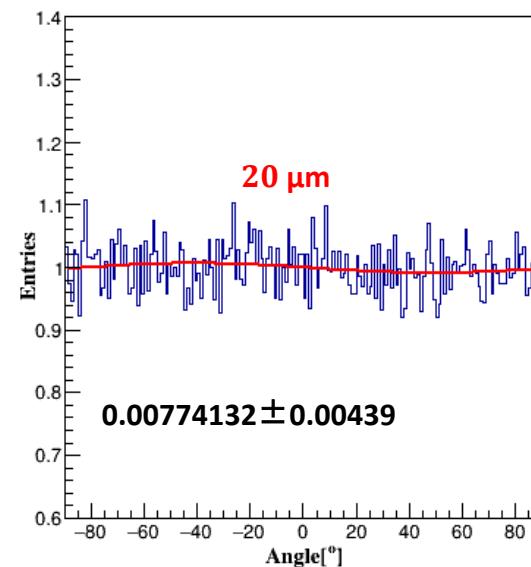
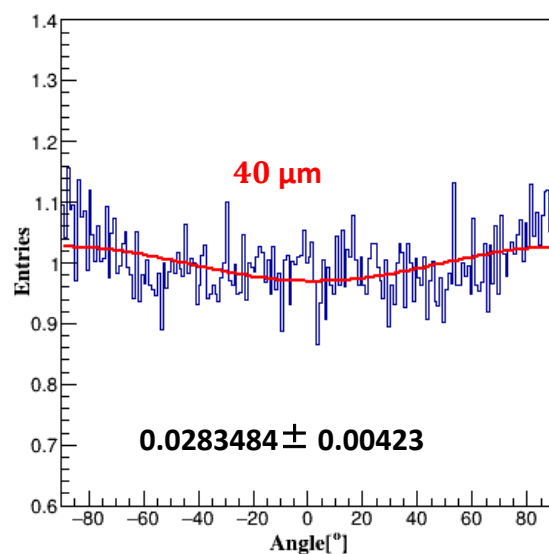
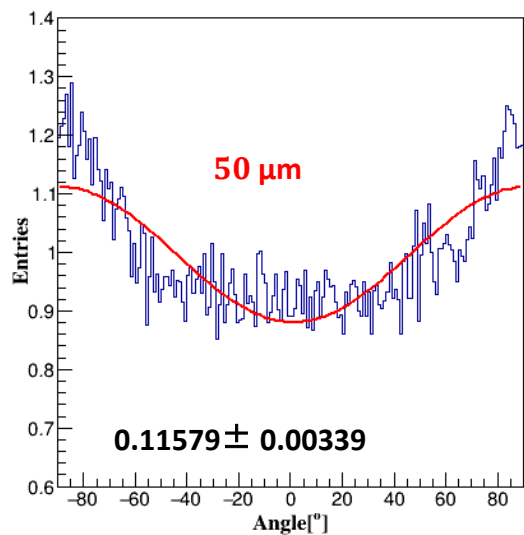
仿真输入增益map



电子扩散系数

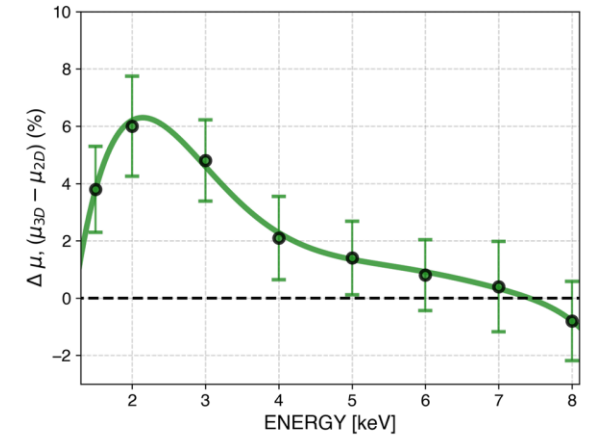
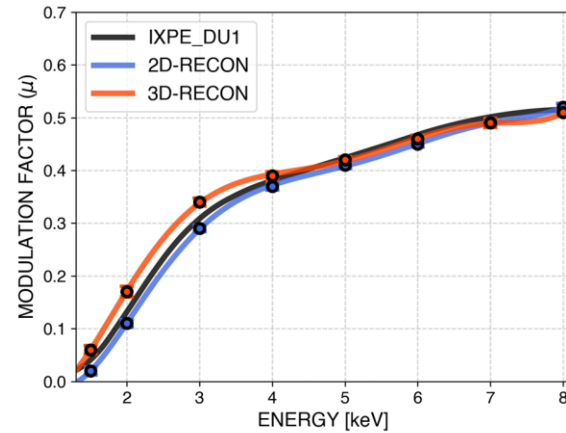
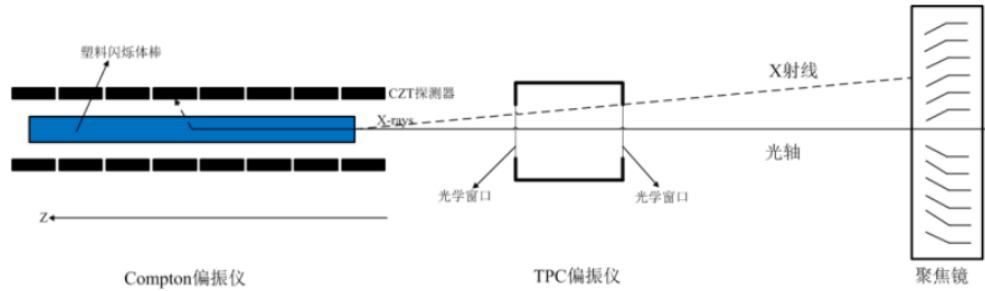
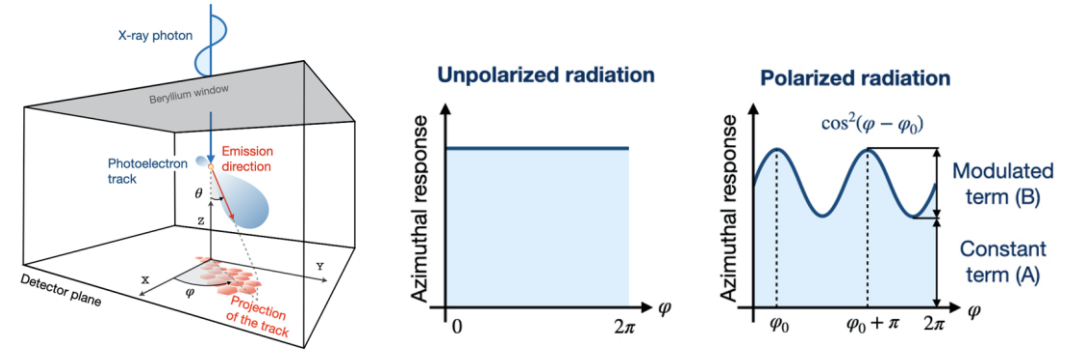


激光打孔增益map



3D光电子径迹测量相比与2D的优势

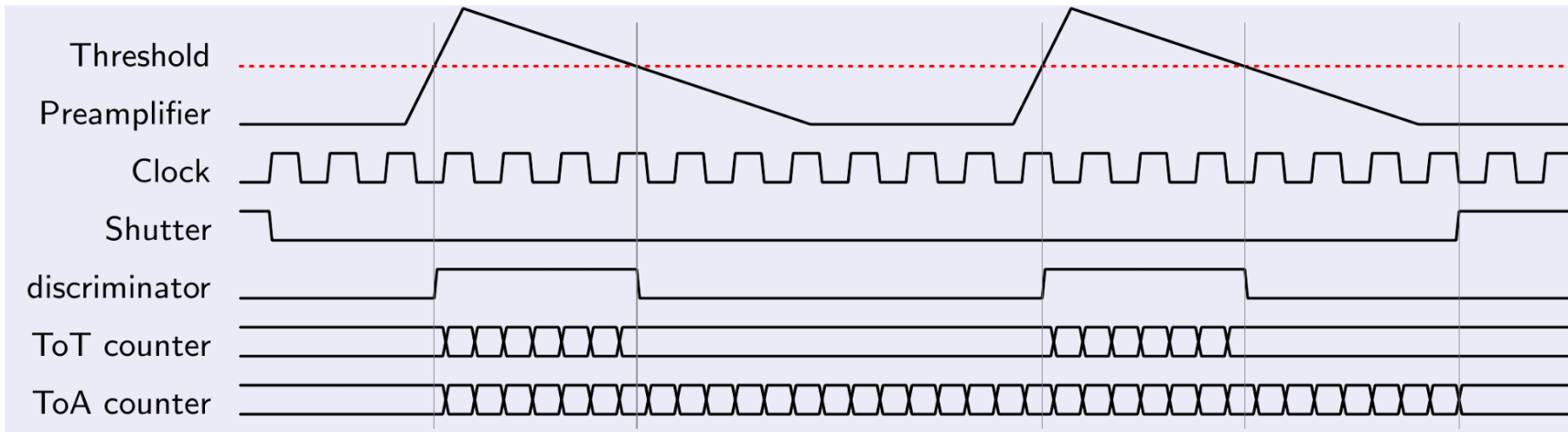
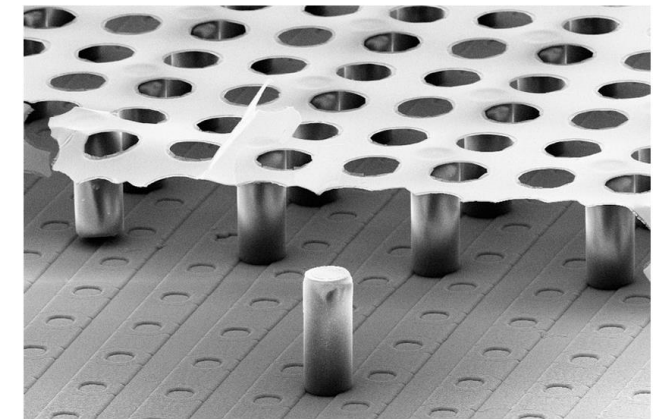
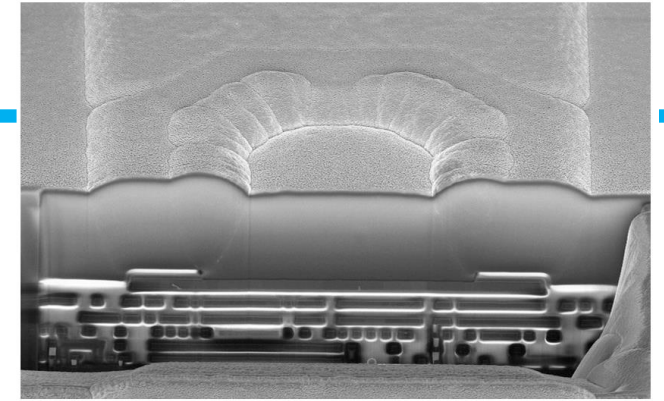
- 低能区调制因子的提升，在2-4keV调制因子提高17%，等效于有效面积增加41%；
- 一套系统实现GPD和TPC的功能—系统优化效率更高—便于有效能区扩展。



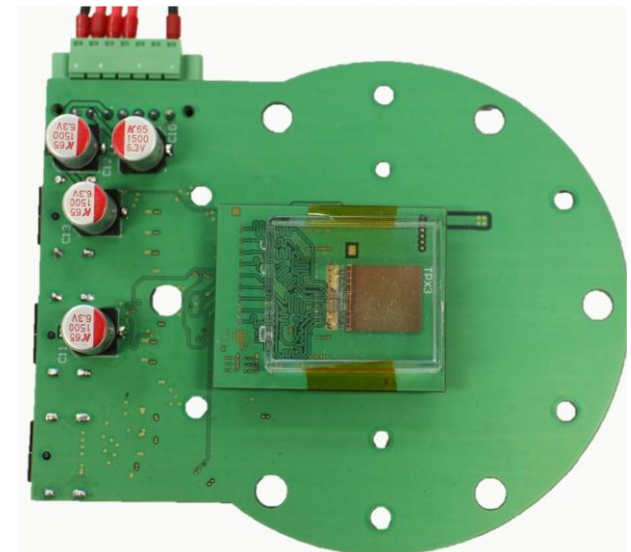
品质因子 $Q = \mu\sqrt{\varepsilon}$

新一代X射线偏振探测器关键技术

- InGrids 集成网格技术
- 具有单像素二维位置、能量、时间分辨能力的4D ASIC — TOT架构ASIC

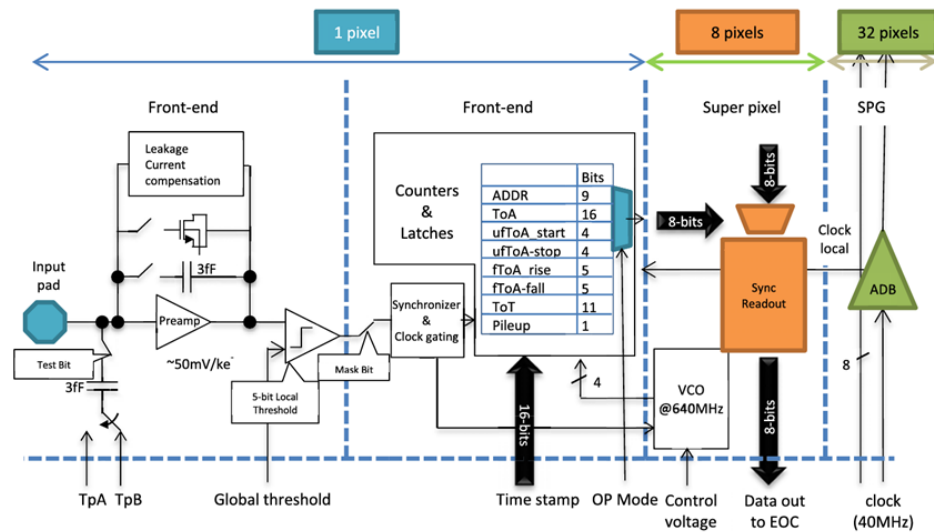


10/11/6/2015 CERN

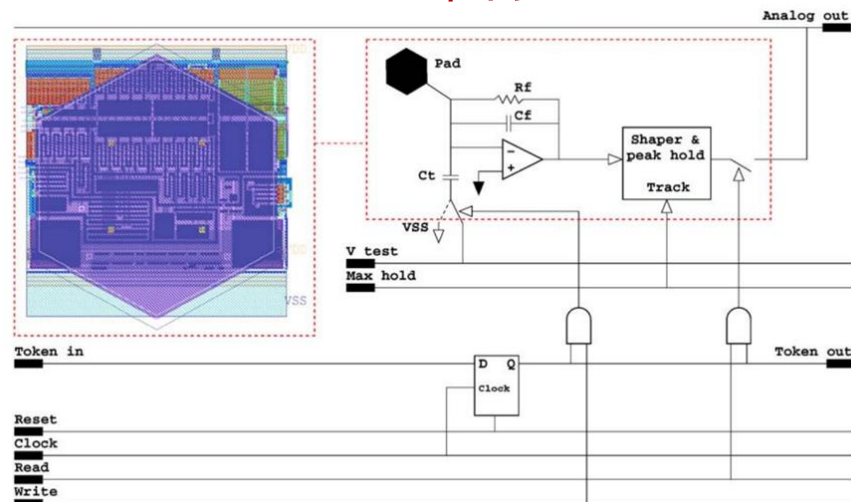


ASIC需求

- 具有单像素二维位置、能量、时间分辨能力的4D灵敏ASIC
- 像素尺寸: $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ (目标 $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$)
- 像素数: 不少于 300×352
- 敏感区面积: 不小于 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$
- 像素噪声: $50 e^- \text{ ENC}$
- 动态范围: $30\text{k} e^-$
- 阈值: $\sim 150 e^-$ (动态范围的 $\sim 0.5\%$)
- 时间分辨: 2ns
- 事例率: 2kcps
- 死时间: 不超过 $100\mu\text{s}$ (事例窗口 1000pixels)



TOT架构

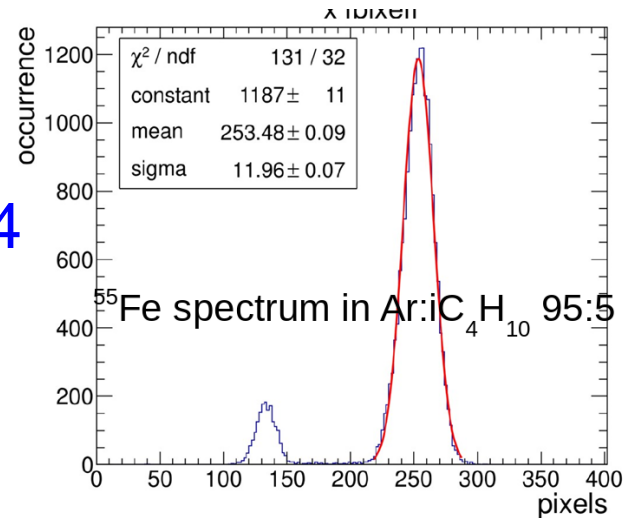
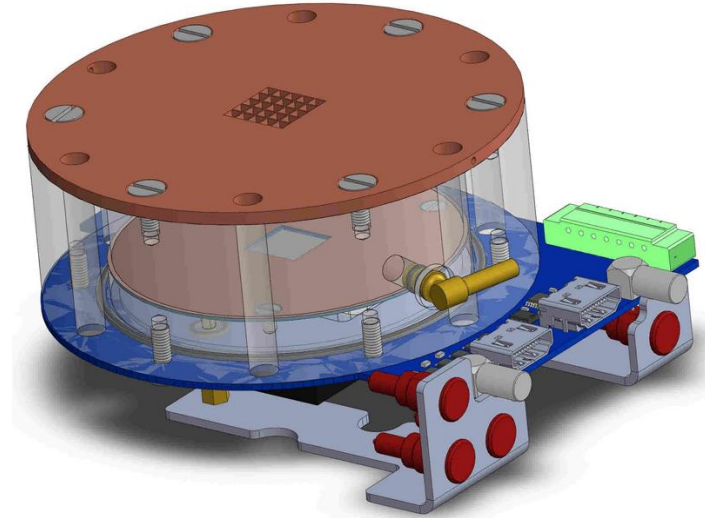
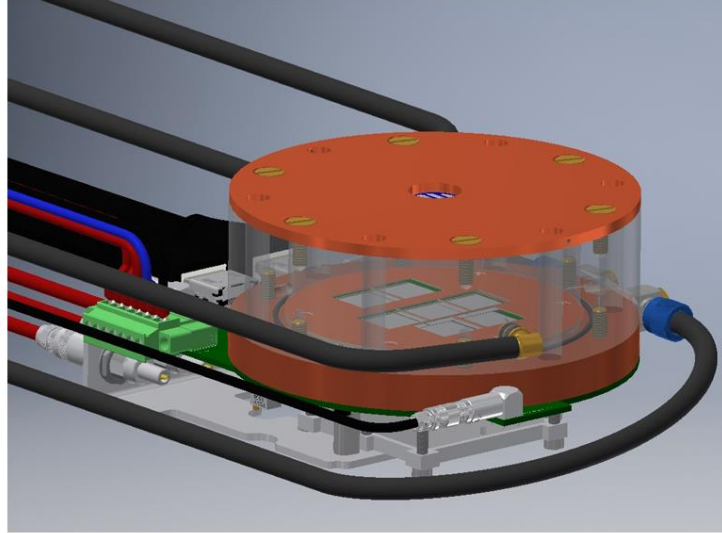


XPOL芯片

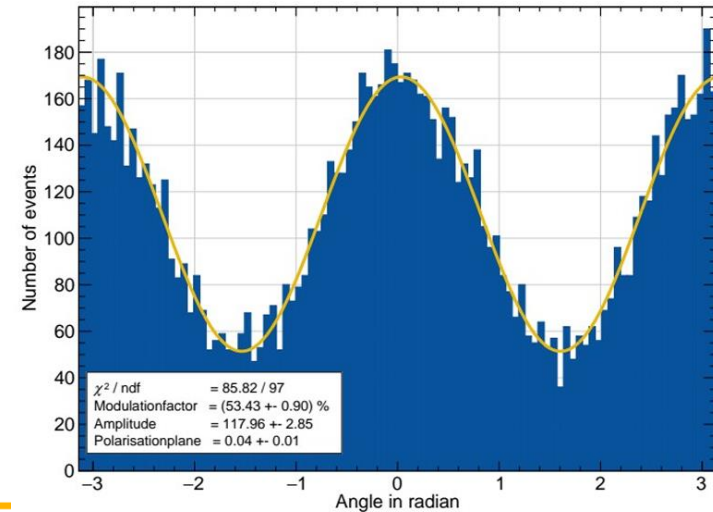
国际现状

- GridPixes 2004年在荷兰NIKHEF被发明;
- InGrids
- 从荷兰到德国波恩大学

- ASIC
- CERN Timepix系列 ASIC
- Timepix 2006年
- Timepix3 => Timepix4



Energy resol.
 σ_E/E of down
to 3.85 % was
reached in
 $\text{Ar}:\text{iC}_4\text{H}_{10}$ 90:10
at 5.9 keV.



总结与展望

- X射线偏振是粒子天体物理研究的重要探针
- GPD在IXPE中已经得到成功应用，并将应用于eXTP中
- TPC将应用于WXPT以便形成组合X射线偏振探测器来扩展能区
- 下一代3D光电子径迹偏振探测器的发展仍然充满挑战

谢谢！