



廣西大學
GUANGXI UNIVERSITY

空间探测应用微结构气体探测器研究

封焕波

代表TRD、LPD、CXPB合作组

广西大学

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，2024.7.16

汇报内容

contents



一、微结构气体探测器

二、HERD-TRD设计

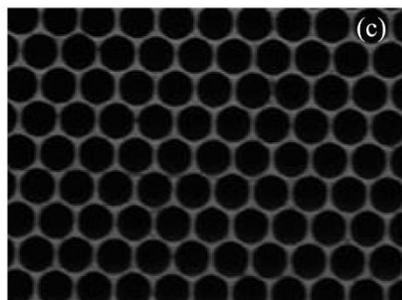
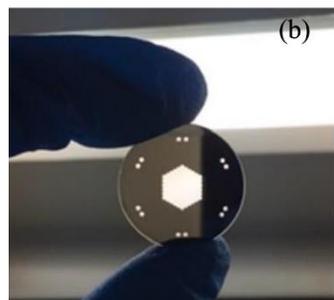
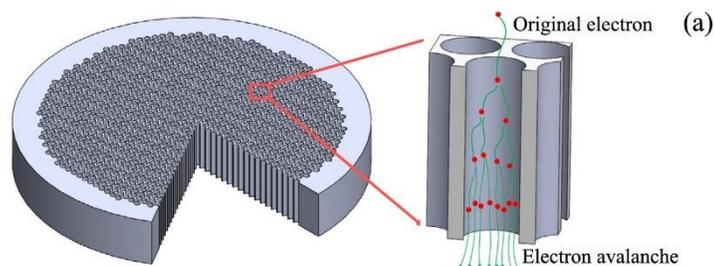
三、TRD研制与性能测试

四、LPD-GMPD设计

五、GMPD研制与性能测试

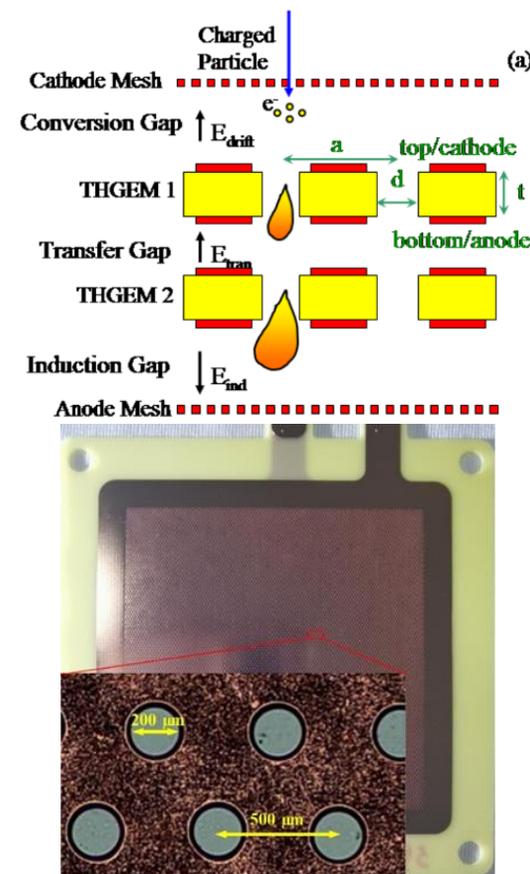
微结构气体探测器

- 微结构气体探测器：电极距离小($<1\text{mm}$)的高颗粒度气体探测器
- 性能特点（趋势）：高计数率、高位置分辨、好的时间分辨、抗辐照、离子和光子反馈小
- 主要类型：GEM、THGEM、GMCP
- 空间实验：IXPE、极光、CXPDP等



孔径： $50\ \mu\text{m}$
孔间距： $60\ \mu\text{m}$
厚度： $300\ \mu\text{m}$
电极深度： $25\sim 30\ \mu\text{m}$
斜切角： 0°
体电阻： $5\ \text{G}\Omega$

气体微通道板(GMCP)



孔径： $200\ \mu\text{m}$
孔间距： $500\ \mu\text{m}$
厚度： $200\ \mu\text{m}$

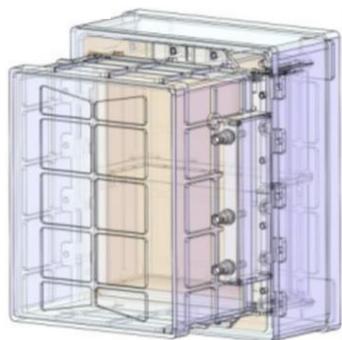
厚型气体电子倍增器 (THGEM)

空间高能宇宙辐射探测设施 (HERD)

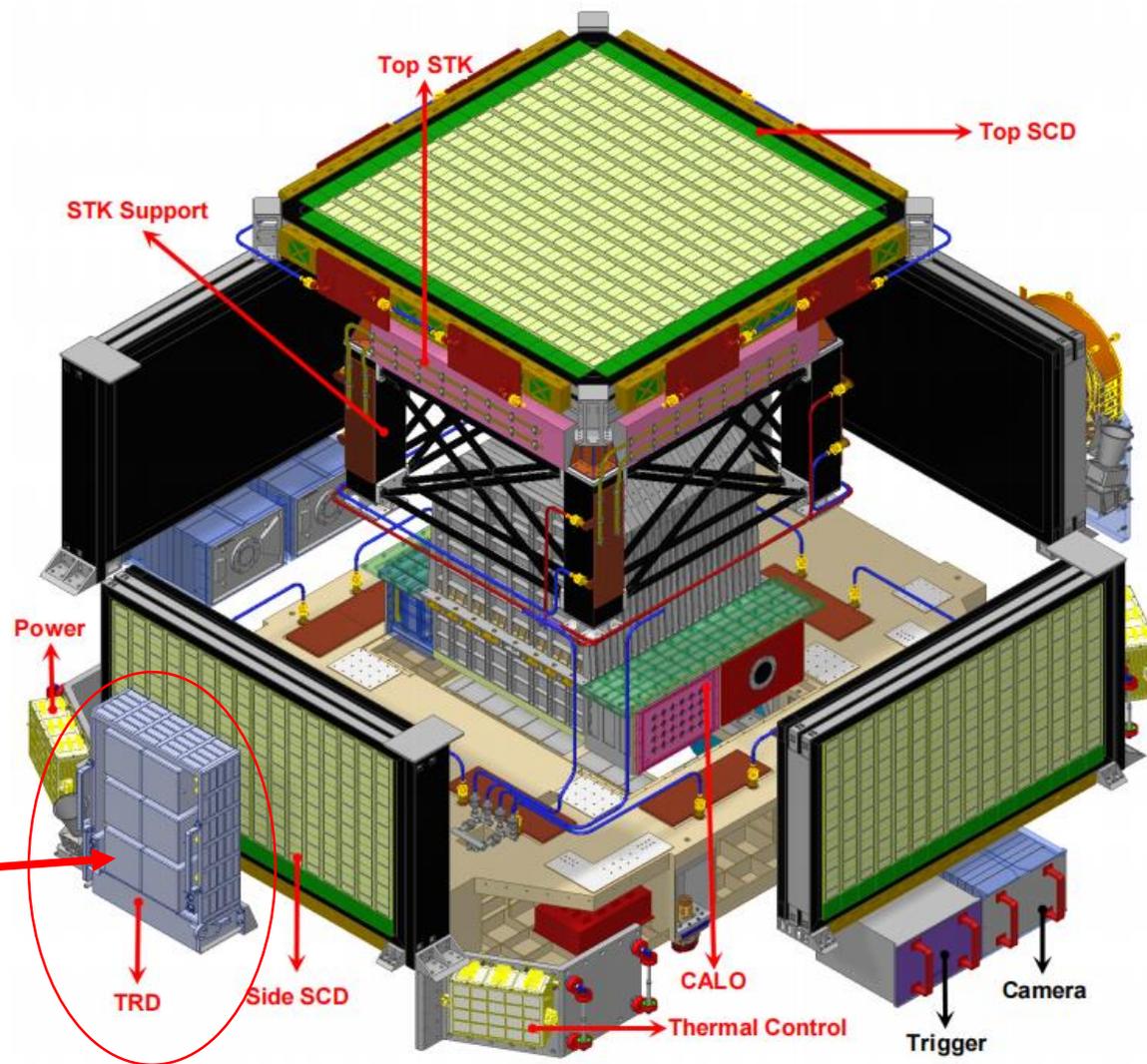
- 搜寻暗物质、探究宇宙线起源
- 开展高灵敏度的高能伽马射线巡天和监视

穿越辐射探测器(TRD)

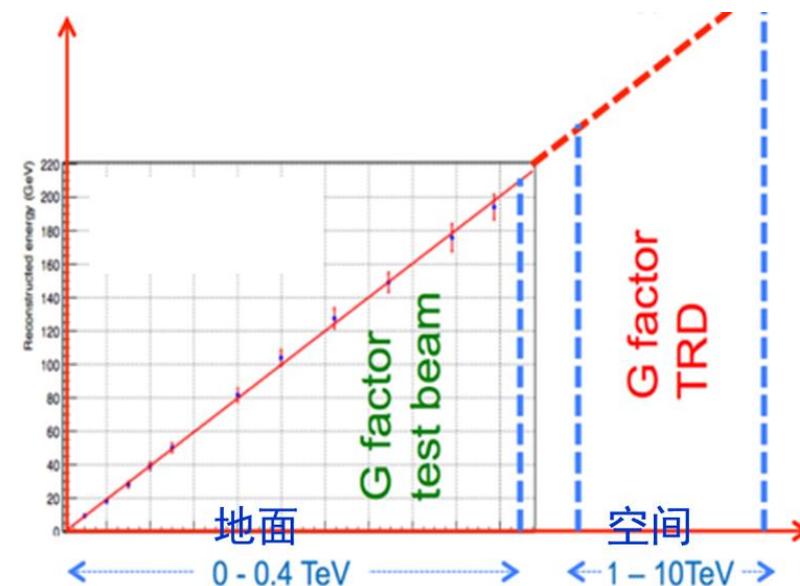
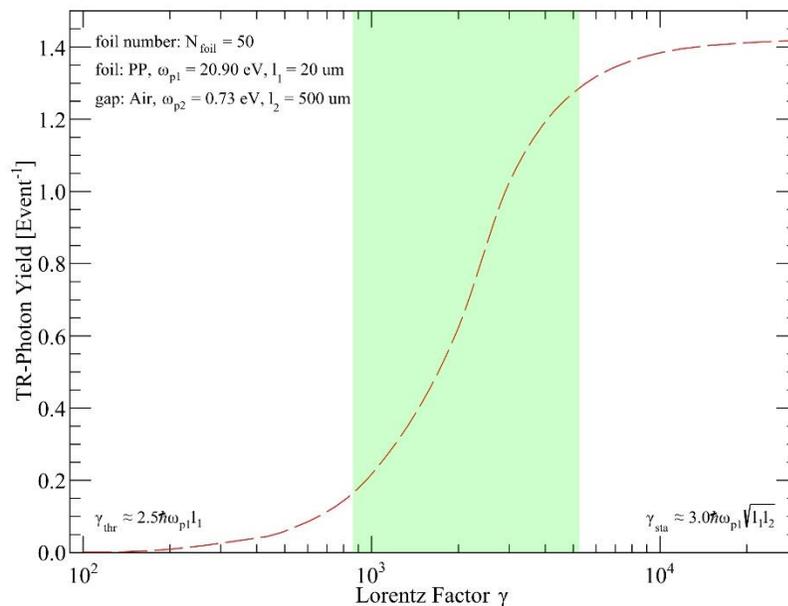
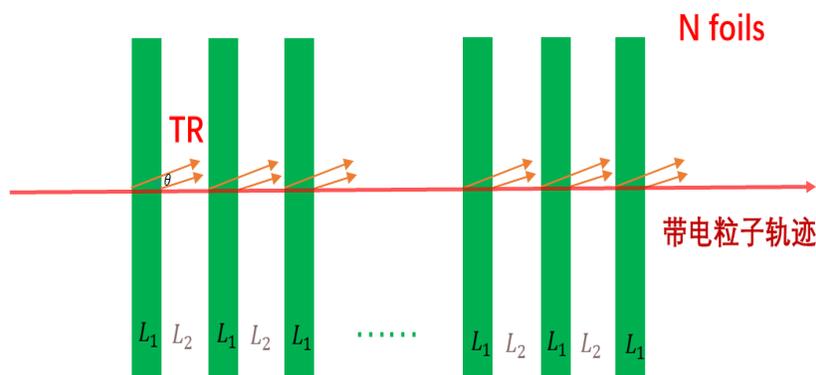
- Tev粒子能量的校准
- 独立开展X射线巡天观测和GRB监测



规则辐射体 + THGEM探测器



穿越辐射 (TR) 及能量标定

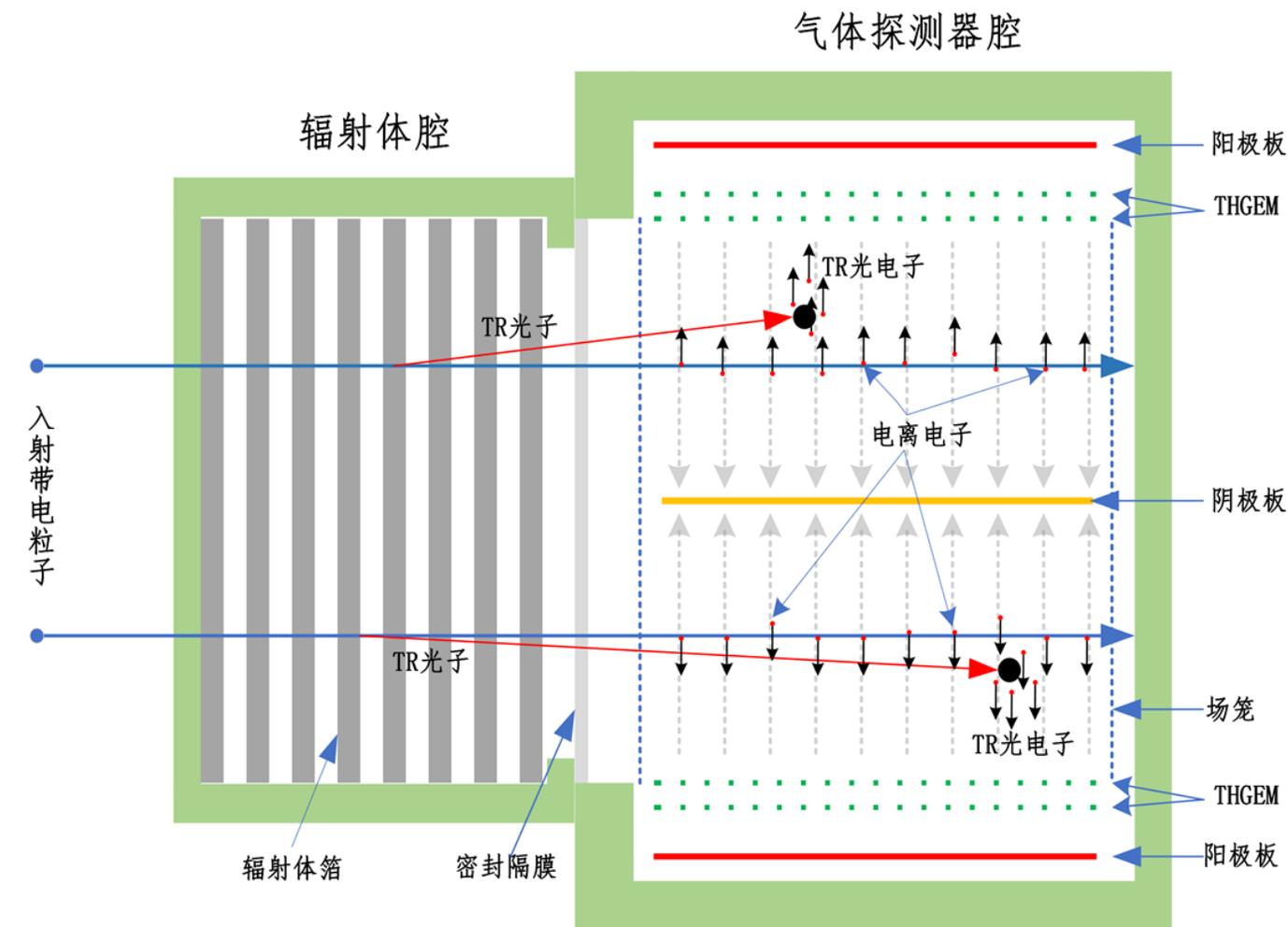


- 穿越辐射发生在不同介质的交界面
- 发射角 $\theta=1/\gamma$, $\gamma=E/m$ 为入射粒子洛伦兹因子

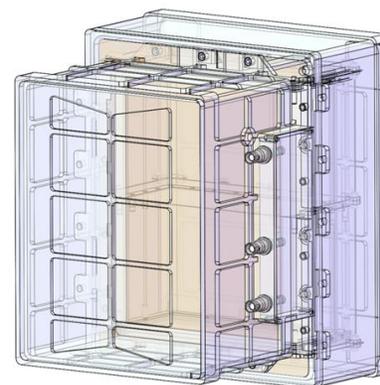
- 辐射信号强度与带电粒子的洛伦兹因子 γ 成正比, 与粒子种类无关
- 洛伦兹因子 γ 与入射带电粒子能量成正比
- GeV量级电子的 $\gamma \leftrightarrow$ TeV量级电子的 γ

- 地面标定GeV量级电子, 获取刻度曲线
- 在轨通过与量能器符合测量, 根据地面刻度曲线获取质子的洛伦兹因子 (质子能量)

穿越辐射探测

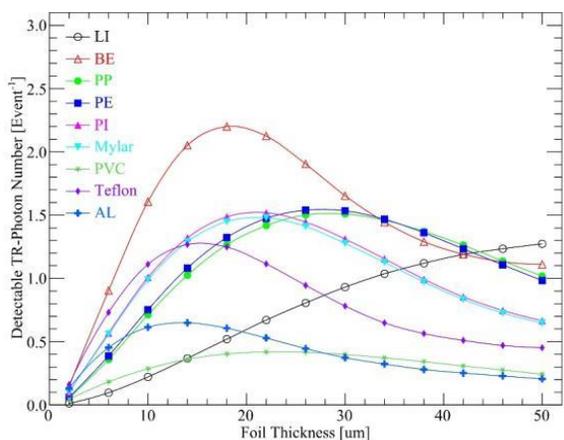


- ❑ 规则辐射体，精确分析TR光子的产额和能谱分布，可利用干涉相长的条件提高辐射体的TR光子产额。
- ❑ 侧窗共腔，采用侧窗入射和条读出相结合的方式，电离能损背景分散减弱，穿越辐射信号的信噪比显著提高；
- ❑ THGEM探测器，技术成熟高、具备高增益、高计数率、抗辐照。

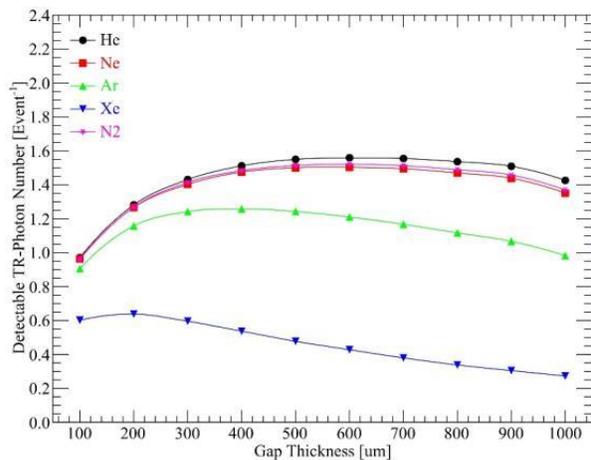


高光子产额辐射体

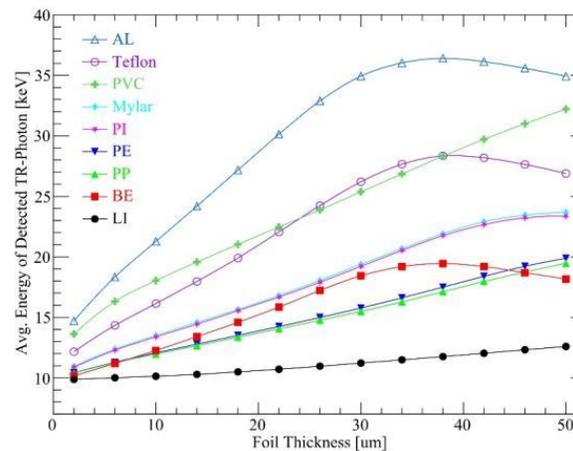
辐射体由两种具有不同介电常数的材料交替堆叠而成，实现高能带电粒子向TR光子的转换。



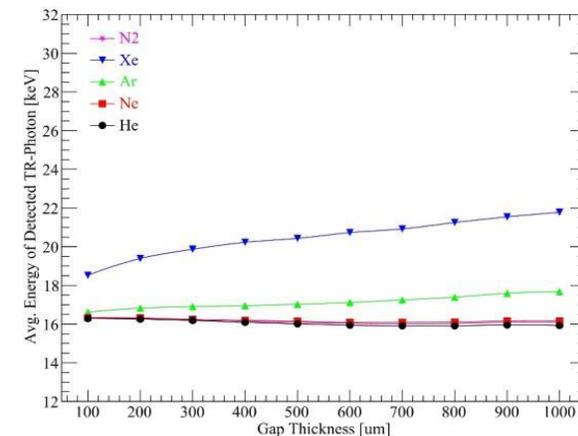
光子产额与箔片厚度



光子产额与间隙气体厚度

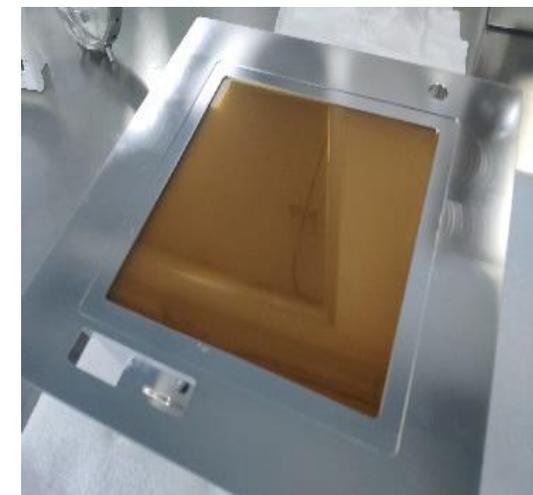
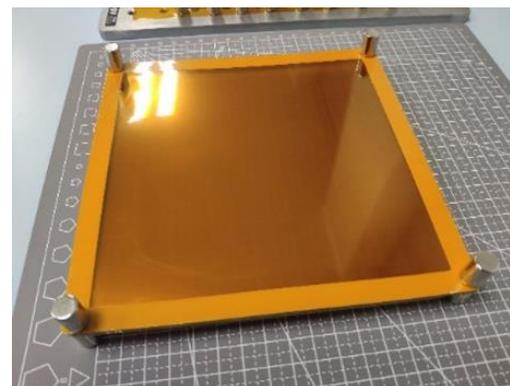


光子能量与箔片厚度



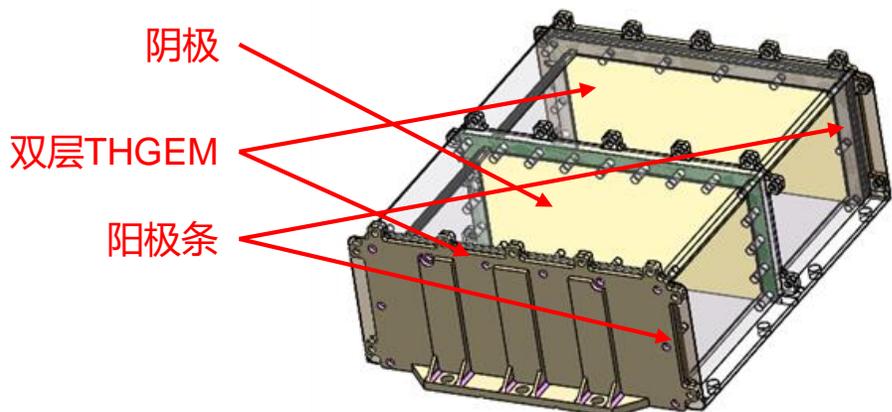
光子能量与间隙气体厚度

序号	参数名称	设计值
1	辐射体类型	规则辐射体
2	辐射体尺寸	200 mm×150 mm
3	辐射体箔片	PI膜, 厚度20 μm
4	辐射体间隙气体	N ₂ , 间隙厚度500 μm
5	辐射体间隙气体压力	0.5 atm
6	辐射体层数	≥200

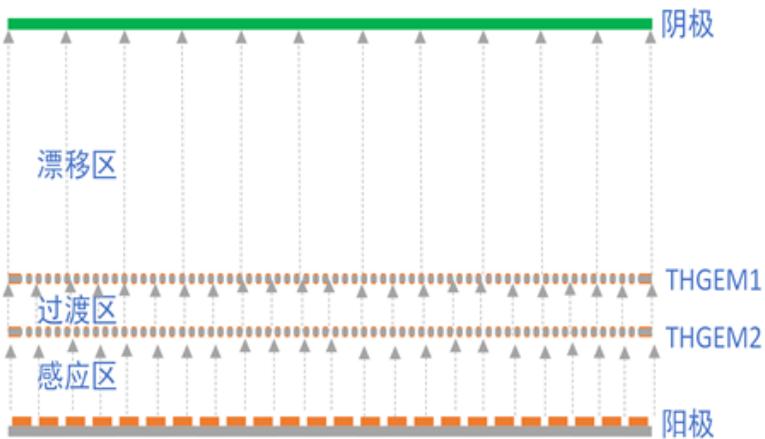


X射线探测器

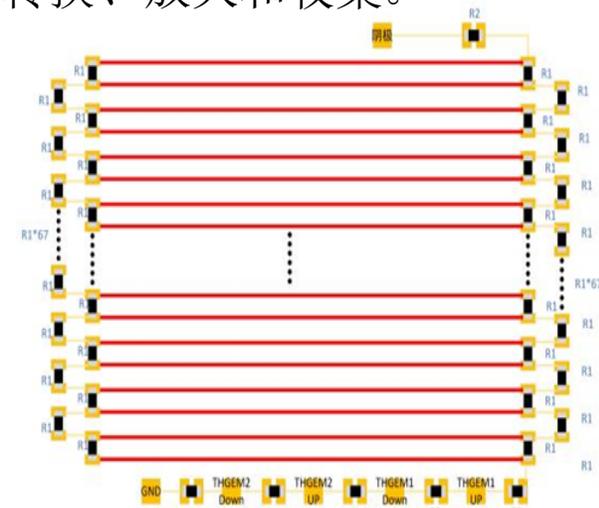
□ 探测器由阴极、双层级联THGEM、收集阳极及填充的工作气体组成，实现光电信号的转换、放大和收集。



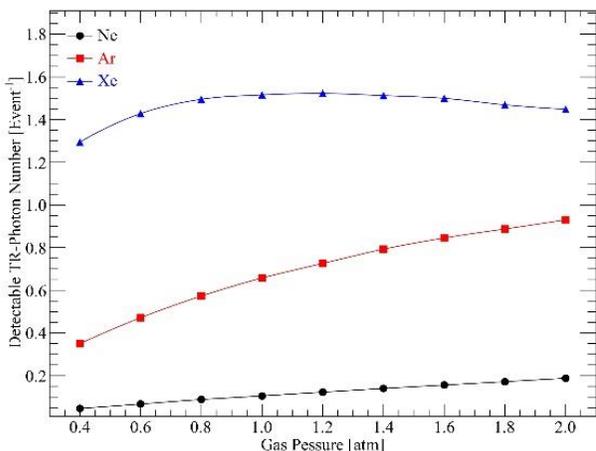
对称结构的设计



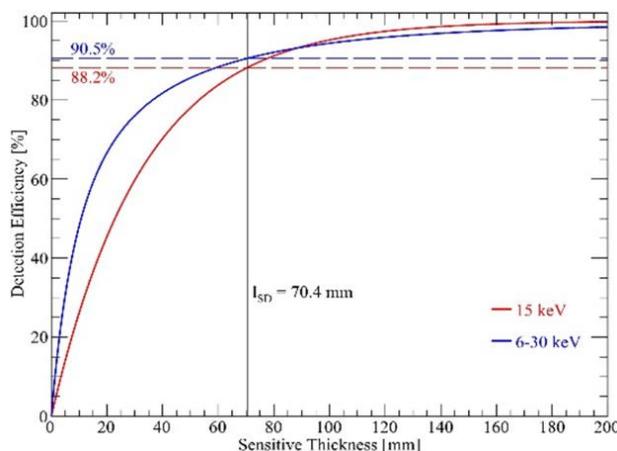
THGEM的气体探测器示意



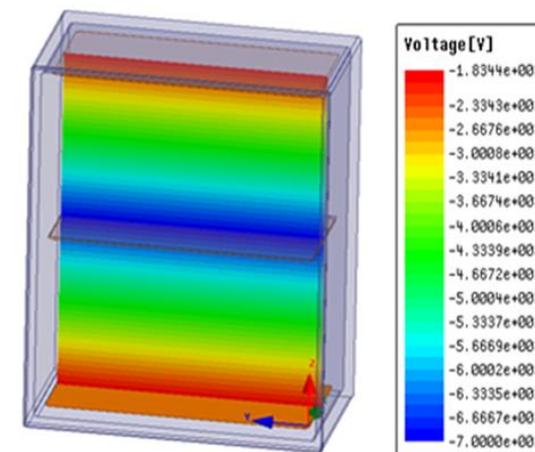
高压场笼分压电路设计



可探测TR光子数与气体压强



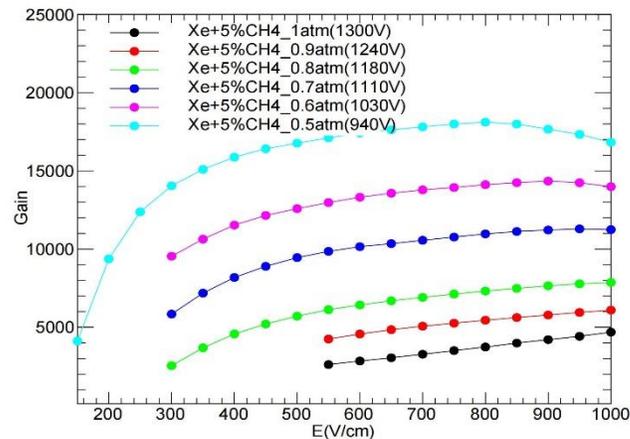
探测效率与气体灵敏厚度



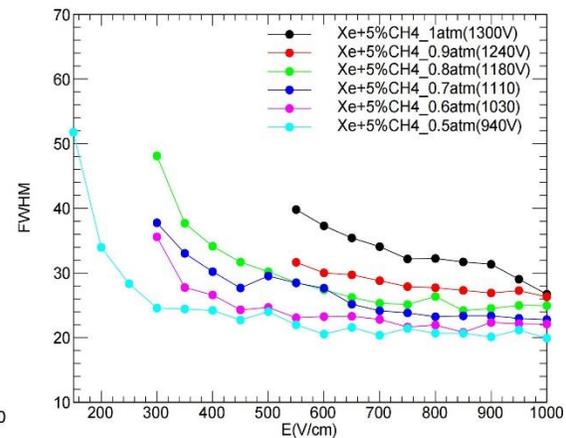
高压场笼电场分布仿真

□ 优化设计参数，以提高TR光子的探测器效率。

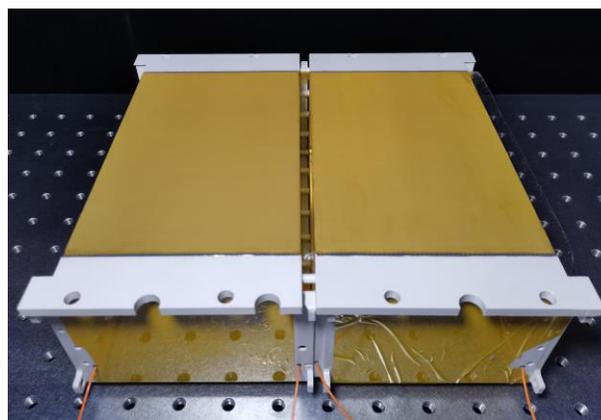
序号	参数名称	设计值
1	工作气体成分与比例	95%Xe+5%CH ₄
2	工作气体压力	0.5atm
3	工作气体灵敏区厚度	70.4mm
4	THGEM设计参数	孔径200μm; 孔间距50μm; 基板厚度200μm
5	高压场笼设计参数	场笼丝宽度1.33mm; 场笼丝中心距2mm
6	漂移区电场	400 V/cm
7	THGEM倍增电压	700V
8	过渡区电场	1000 V/cm
9	感应区电场	1300 V/cm



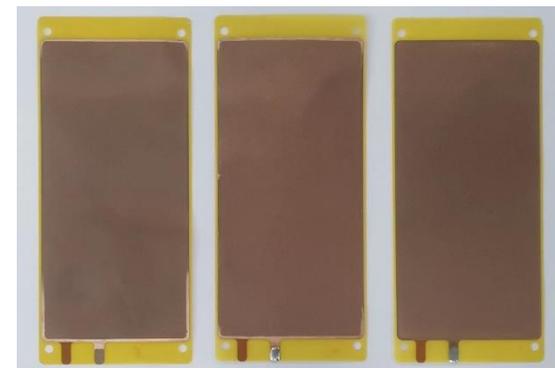
增益曲线与漂移电场



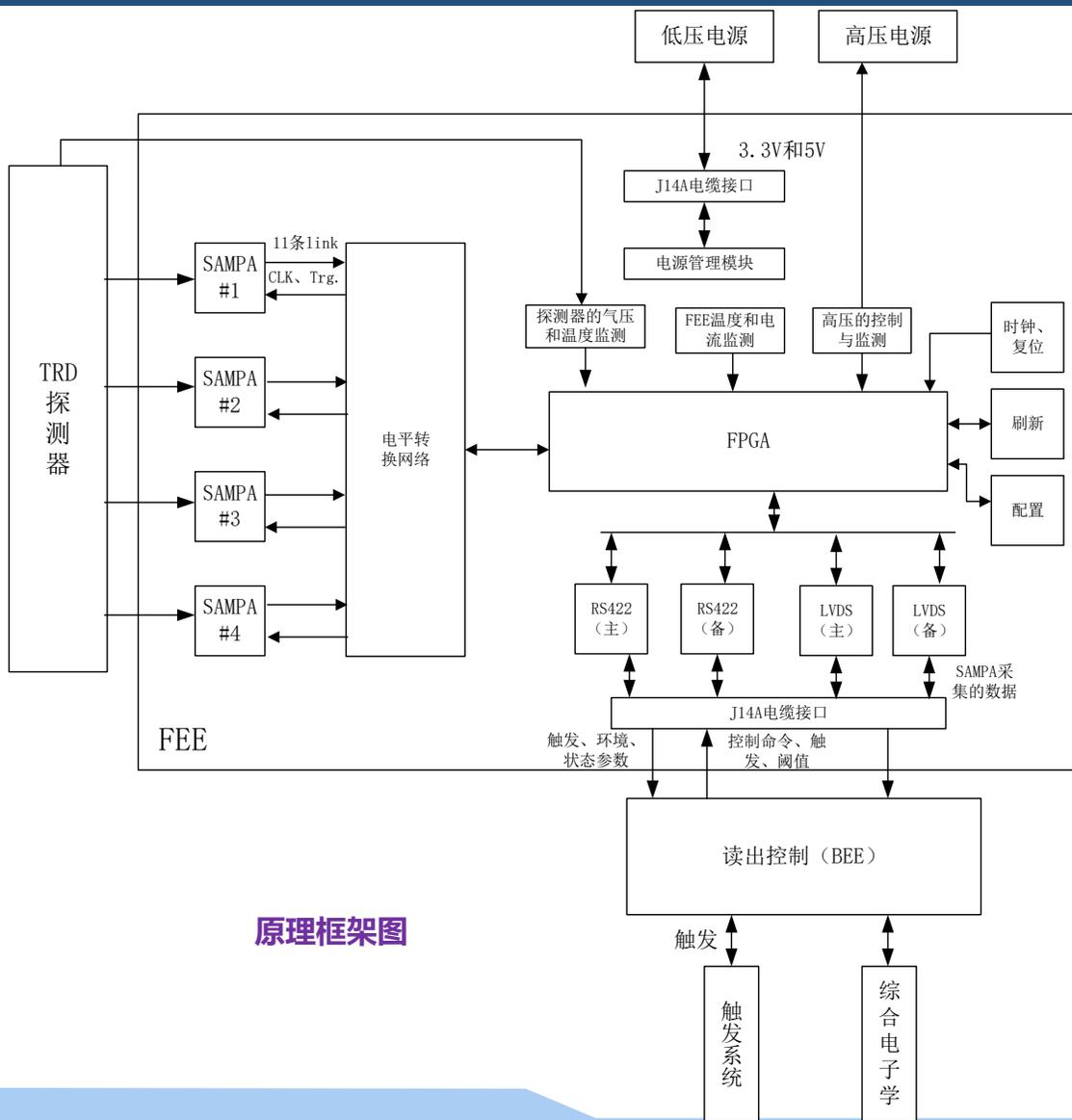
能量分辨与漂移电场



高压场笼



THGEM

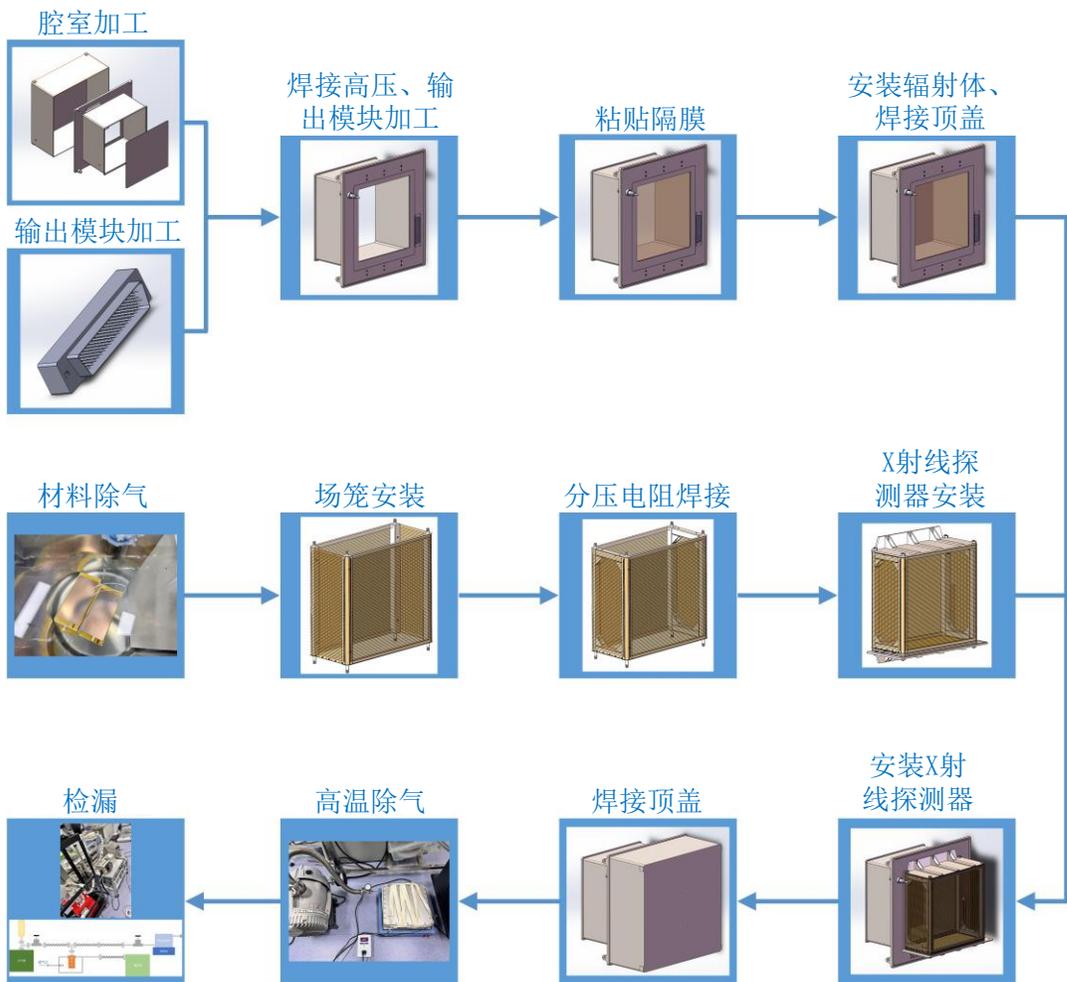


- ❑ 电子学方案采用ASIC+FPGA的构架，具有高集成度、低噪声、低功耗的优点
- ❑ 包含4片SAMPA芯片、电平转换网络、FPGA电路、温度/电流监测电路、时钟/复位电路、刷新/配置电路、电源管理电路、电气接口等



128路读出电子学系统

TRD封装



封装流程



腔体气密性焊接

接插件金锡钎焊、进气管氩弧焊接、腔体电子焊接

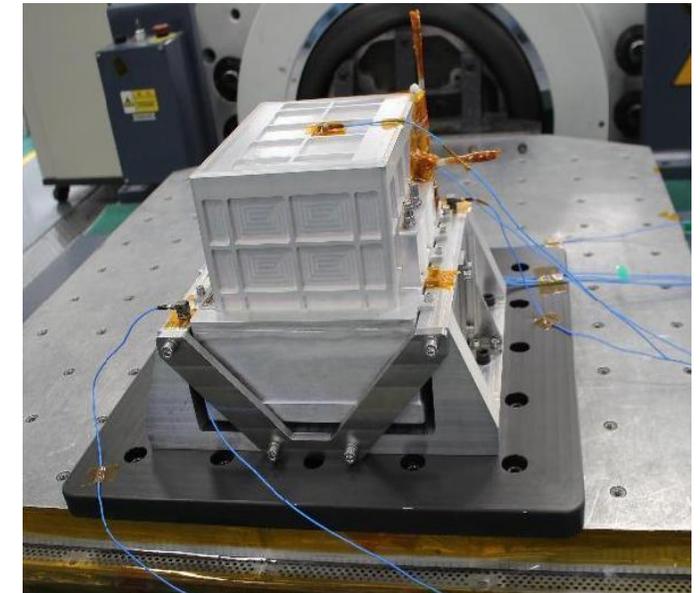


- 氦质谱检漏仪进行漏气率测试结果为：
 $3.2 \text{ E-10 Pa m}^3/\text{s}$ 。



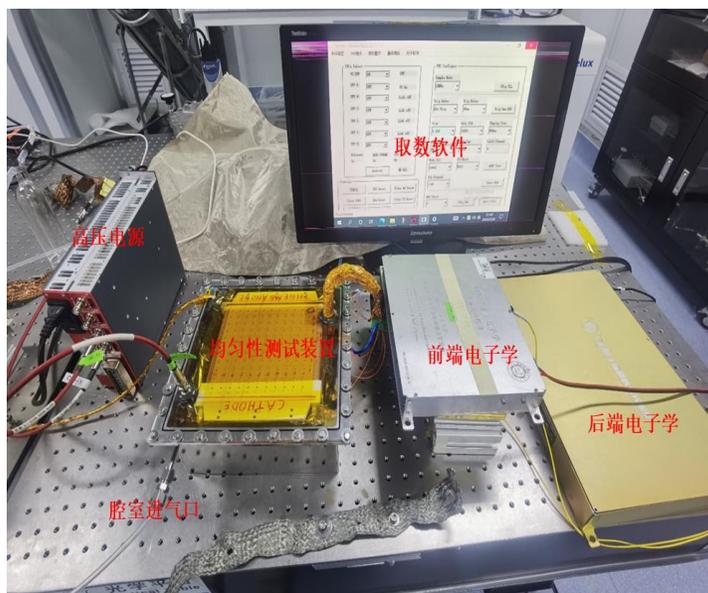
压力试验现场照片

- 通过力学摸底试验和内外压试验TRD单元结构完整、性能正常。

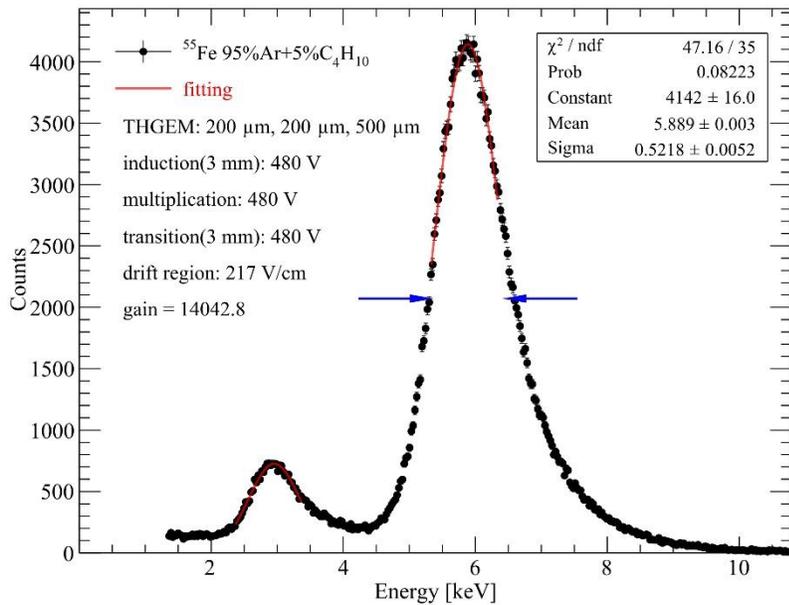


力学试验现场照片

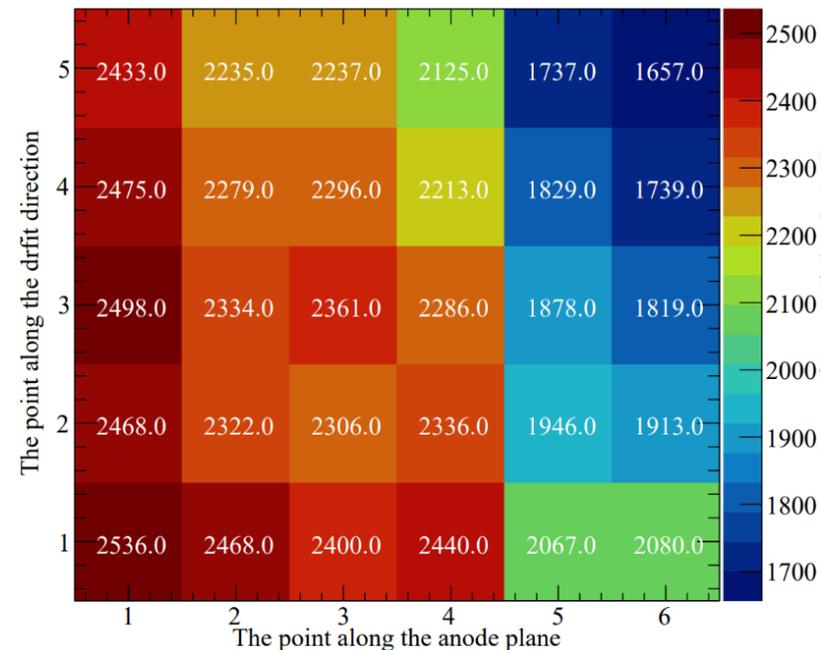
TRD探测器性能测试



性能测试系统

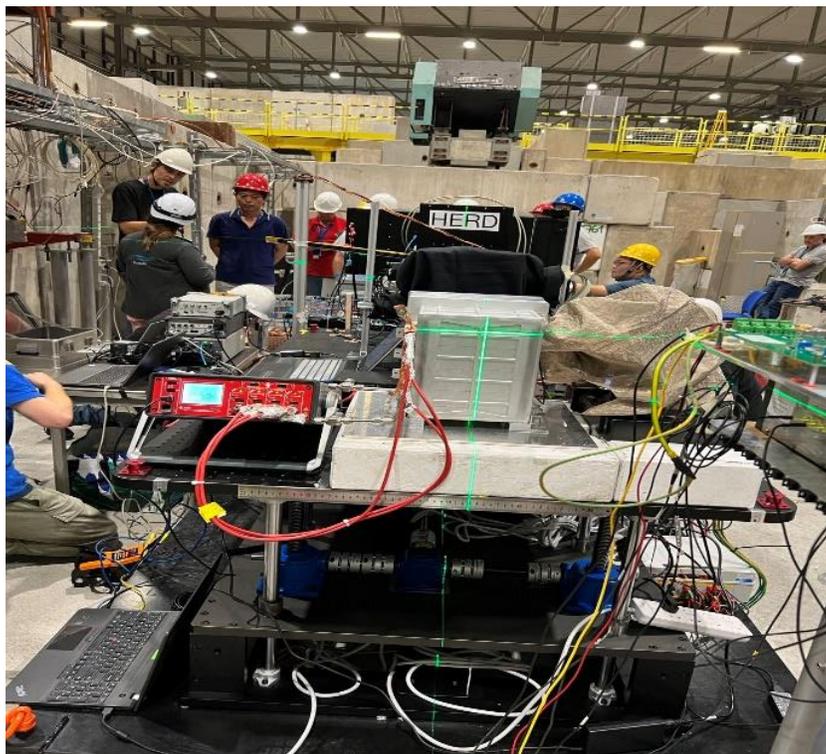


探测器能谱测量

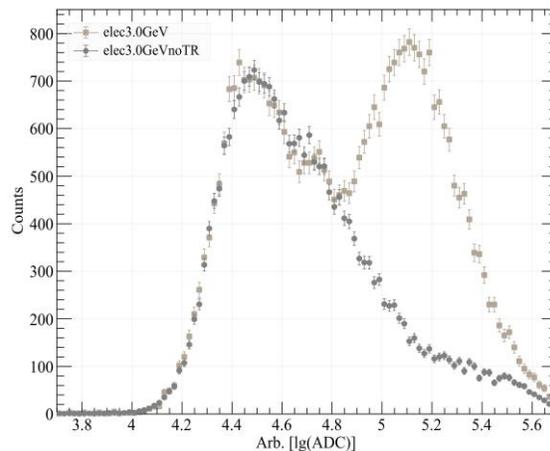


探测器漂移区增益扫描测量

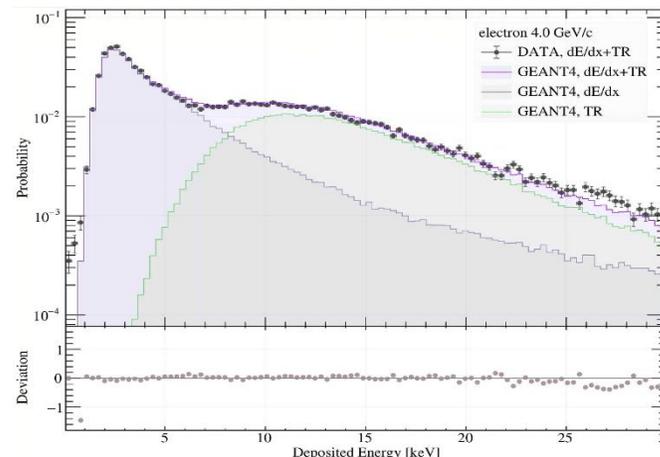
- 能谱峰值位置为5.889 keV， 1σ 为0.5218 keV，气体探测器能量分辨率为20.9%。
- 总体不均匀性(标准差与平均增益比值)为 5.5%，最大不均匀处对应增益不均匀性为 9.7%。



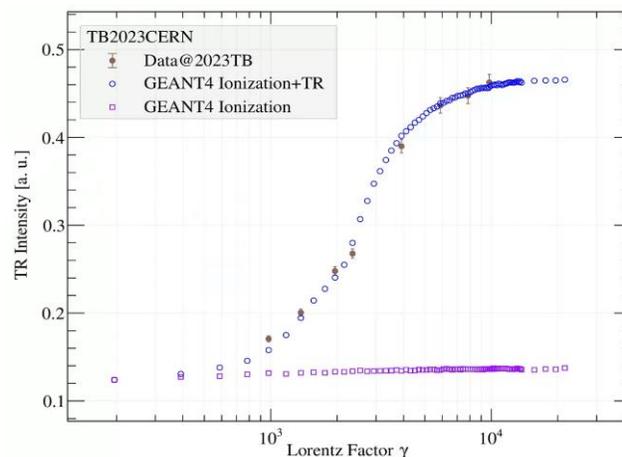
- ▶ 在欧洲核子中心开展了束流实验，获取到了显著的穿越辐射信号。



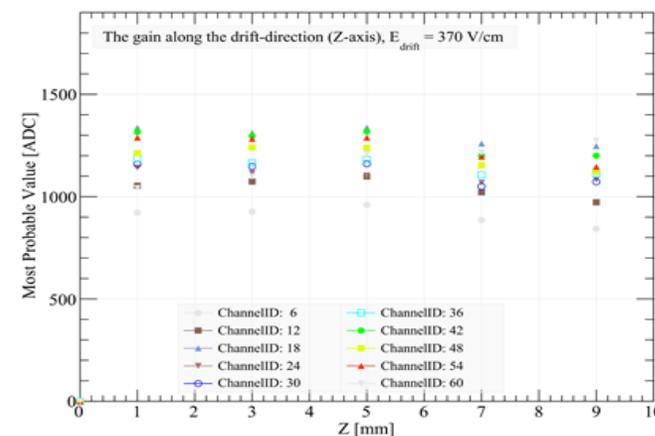
TR+dE/dx谱和dE/dx谱



模拟结果与测试数据的比较



穿越辐射强度随洛伦兹因子的变化曲线



增益均匀性分布

伽马暴偏振探测仪POLAR-2

- 高精度测量GRB的软X射线至伽马射线的偏振状态，研究GRB瞬时辐射的物理机制、辐射区域磁场构型等问题

低能偏振探测器(LPD)

- 测量GRB本身及其极早期 X 射线余辉的偏振。
- 采用大面积拼接、宽视场的设计方案，可以对GRB等暂现源的X射线偏振进行巡天观测。

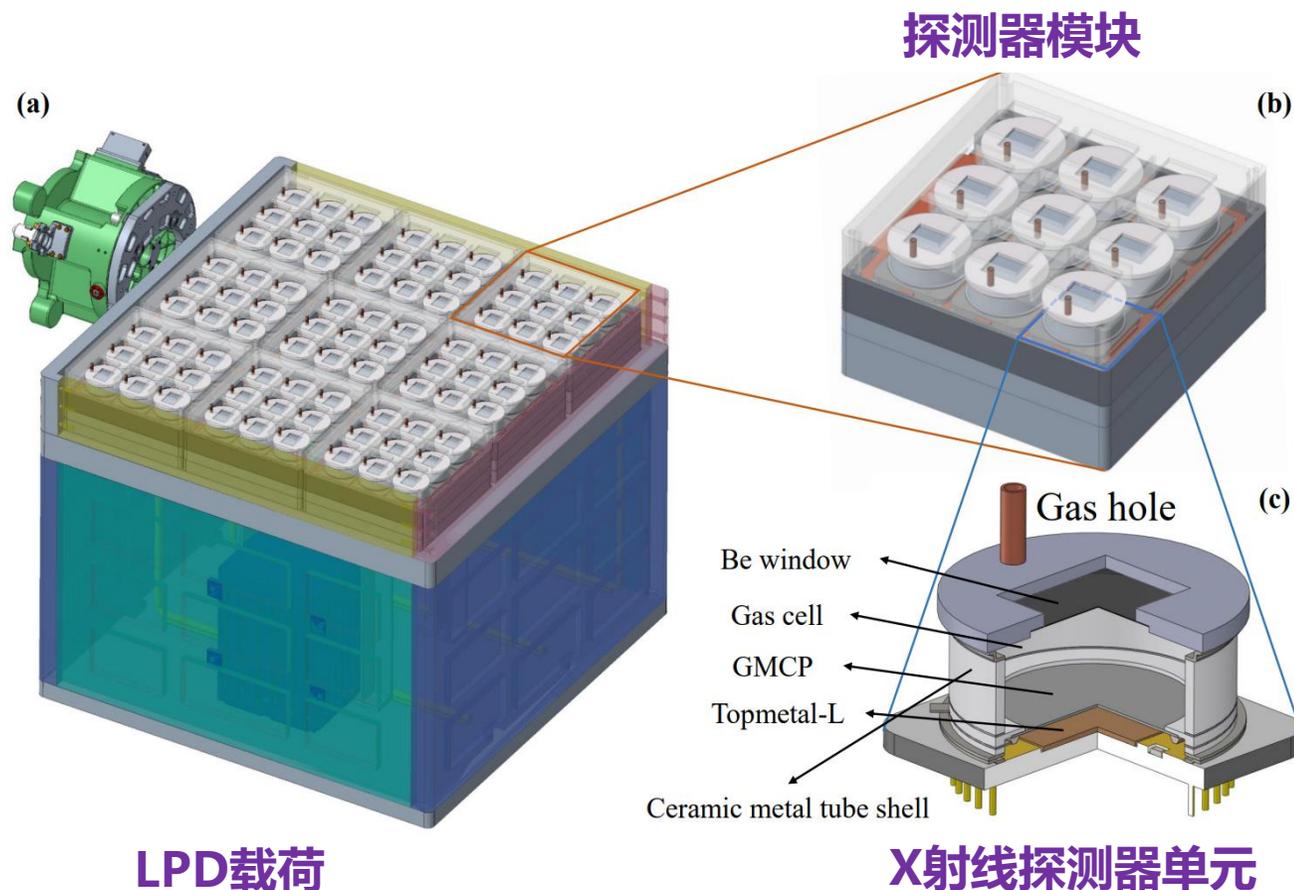
能区： 2-10 keV

有效探测面积： $\sim 298 \text{ cm}^2$

视场： $\sim 90^\circ \times 90^\circ$

能量分辨率： $\leq 20 \% @ 5.9 \text{ keV}$

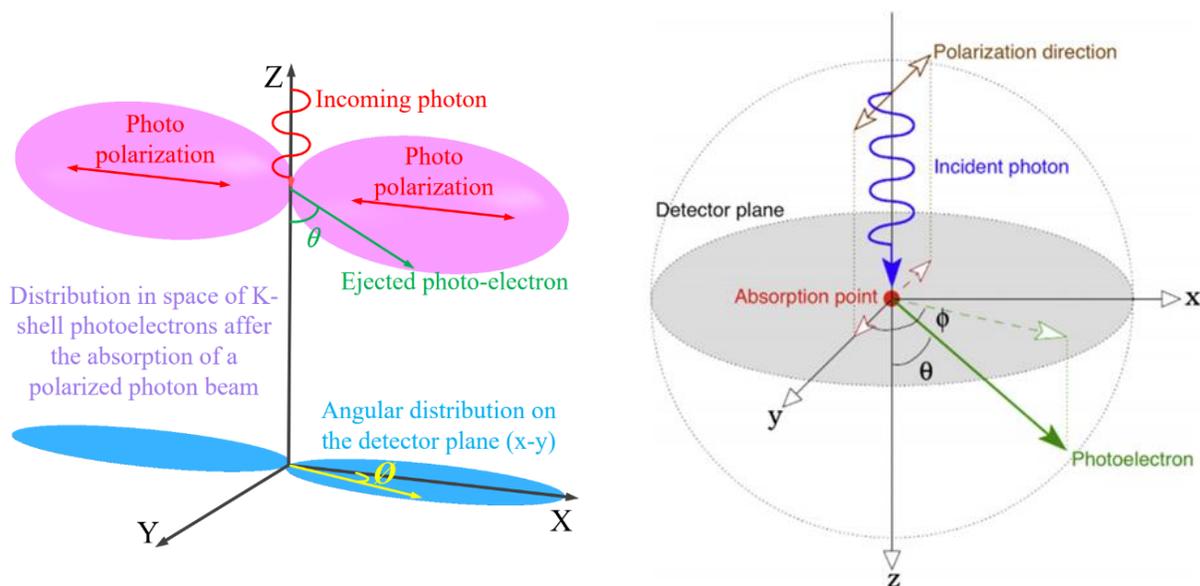
最最小可探测偏振度： $\sim 10.6\% @ \text{GRB210619B}$



LPD载荷

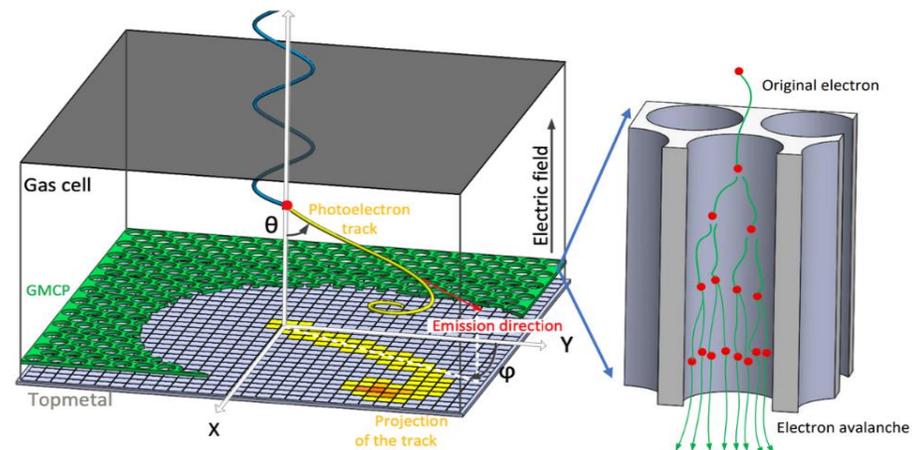
X射线探测器单元

X射线偏振探测原理

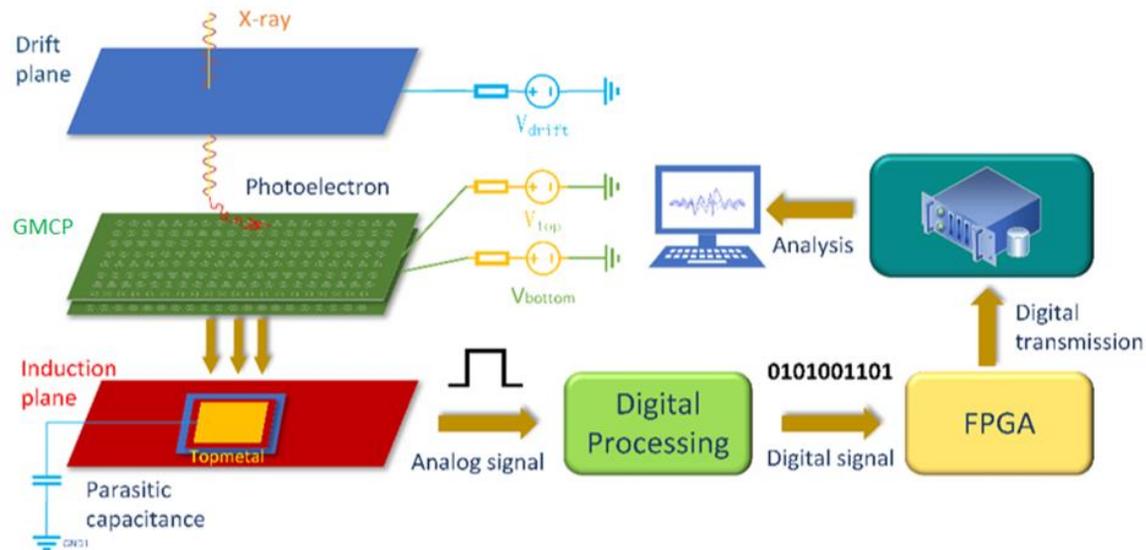


光电效应测量X射线偏振的原理示意图

- ▲ 光电效应占主导作用
- ▲ 在X-Y平面上投影为 $\cos^2\theta$
- ▲ 像素读出，二维成像
- ▲ 精确重建光电子出射方向



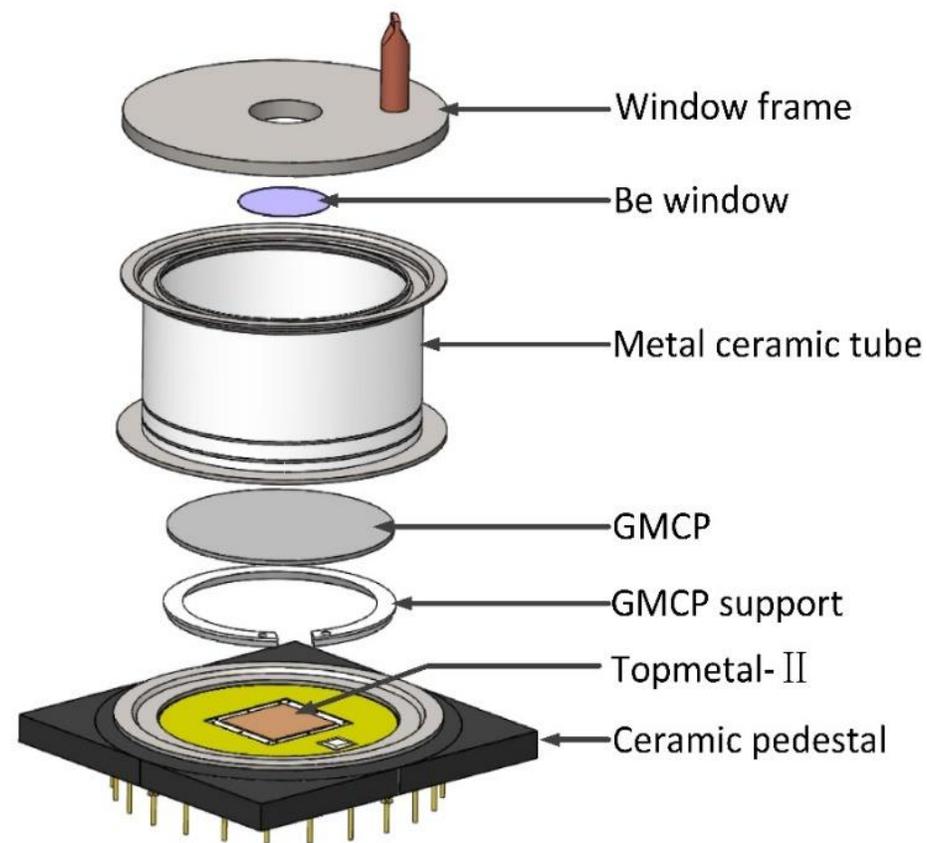
X射线偏振探测原理

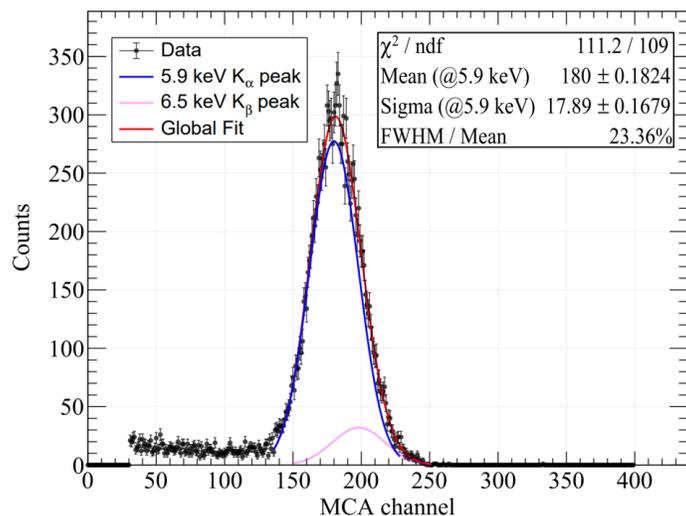
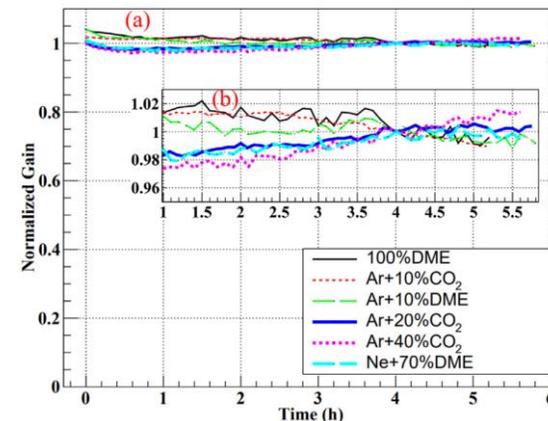
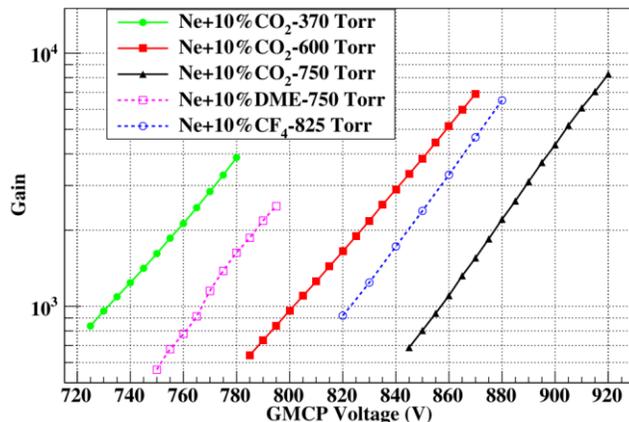
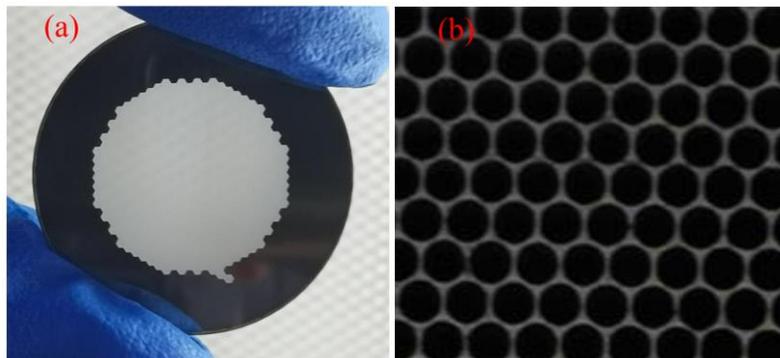


探测器工作原理

气体微通道板像素探测器 (GMCPD)

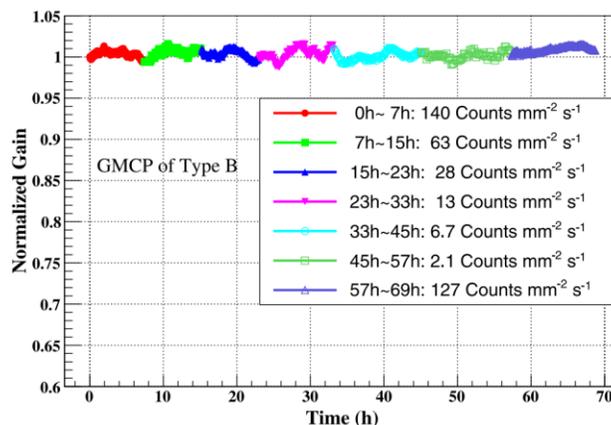
- ❑ 气体微通道板 (GMCP)，具备高增益、高计数率、高颗粒度、抗辐照优点，基于GMCP的具备体电阻的特征，探测器消除了电荷累积效应。
- ❑ Topmetal像素芯片，具备高位置分辨、电荷灵敏、低噪声特点，与GMCP结合可实现高精度光电子径迹成像。
- ❑ 探测器采用闭气式设计，具备极低漏气率和材料出气率，避免了携带额外气体的需求。
- ❑ 探测器内具备工作气体状态的监测。





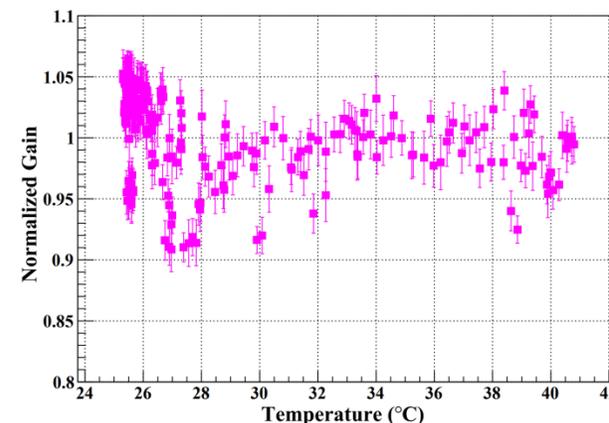
5.9 keV单能X射线能谱

增益与GMCP电极间施加电压的关系



计数率对GMCP增益的影响

GMCP相对增益随着工作时间的变化



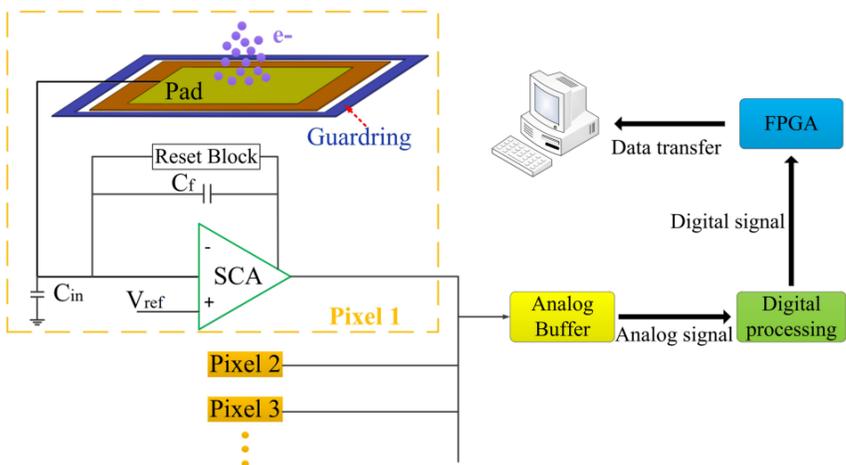
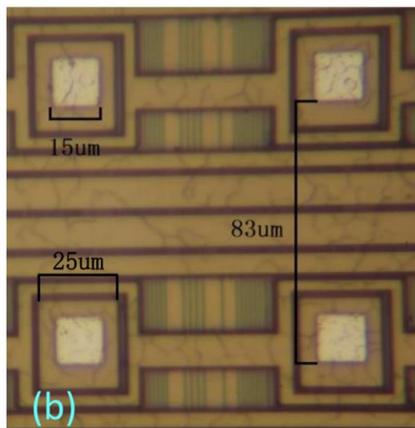
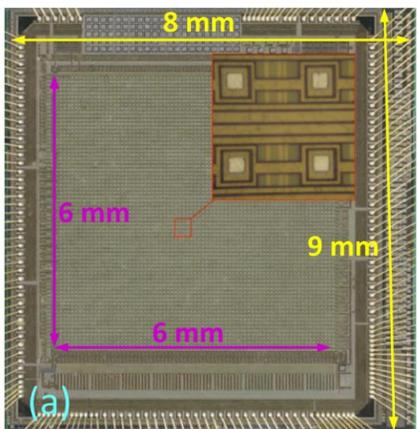
温度的对GMCP增益的影响

- * 无电荷累积效应，适应南大西洋异常区开关机操作；
- * 计数率不敏感，适用于强度急剧变化的伽马暴等暂现源观测。

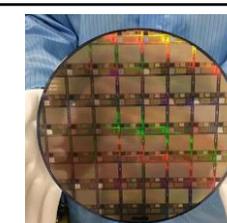
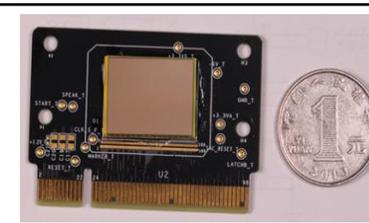
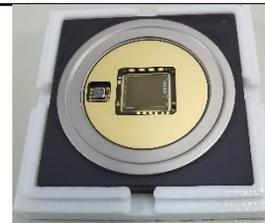
- * 温度不敏感，热控要求可适当降低；

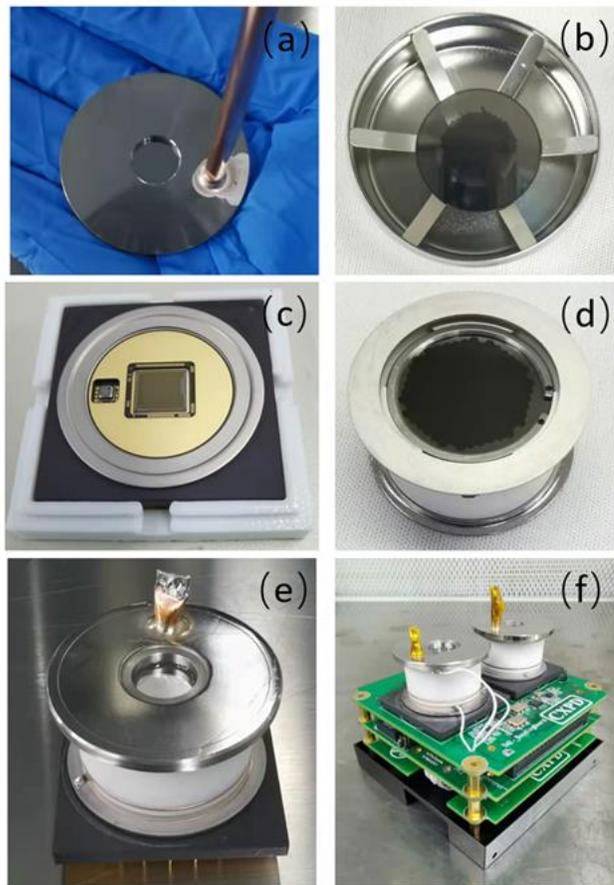
Topmetal 系列芯片

像素芯片: Topmetal-II

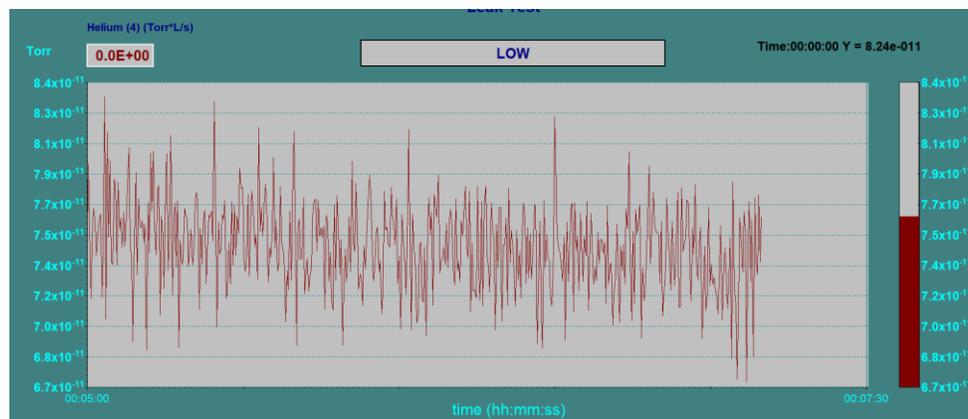


	Topmetal-II ⁺	Topmetal-M1/M2	Topmetal-L
Chip Size /mm ²	6 × 6	18 × 23	17 × 24
Pixel Array	72 × 72	400 × 512	356 × 512
Pixel Size /um ²	83 × 83	45 × 45	45 × 45
Pixel Electrode / um ²	15 × 15	10 × 20	26 × 26
ENC	~ 13.4e-	~ 15.4e-	~ 20.0e-
Power Consumption	~ 1W @3.3V	~ 4.3W @3.3V	~ 0.8W @3.3V
Clock	40MHz	5MHz	20MHz
Frame Rate	2.5ms	2.4ms	0.37ms @Sentinel Readout
Readout Mode	Rolling Shutter	Rolling Shutter	Rolling Shutter /Sentinel Readout
Readout Channel	1	16	1

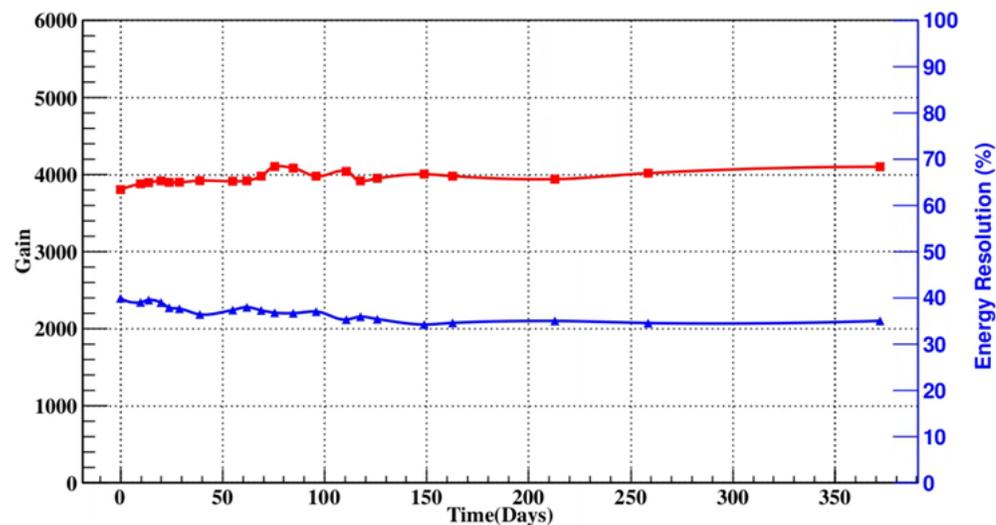




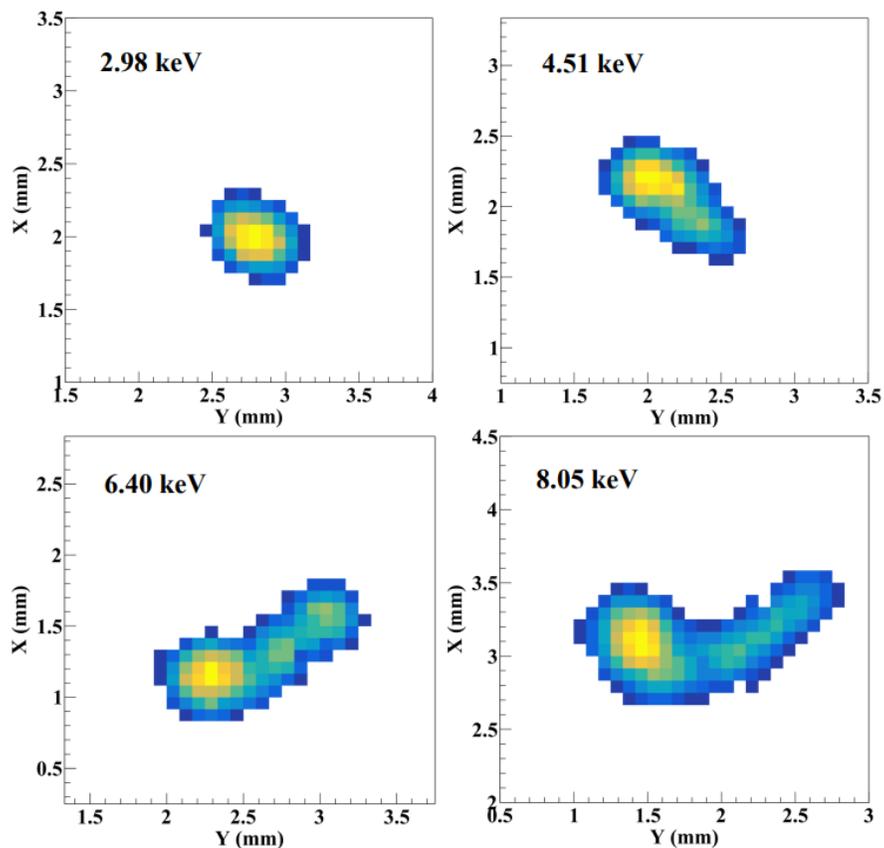
- 低出气率的材料：陶瓷、可伐合金、铍、玻璃等
- 焊接技术：钎焊、激光焊接、超声波焊接
- 空间环境中长期稳定工作



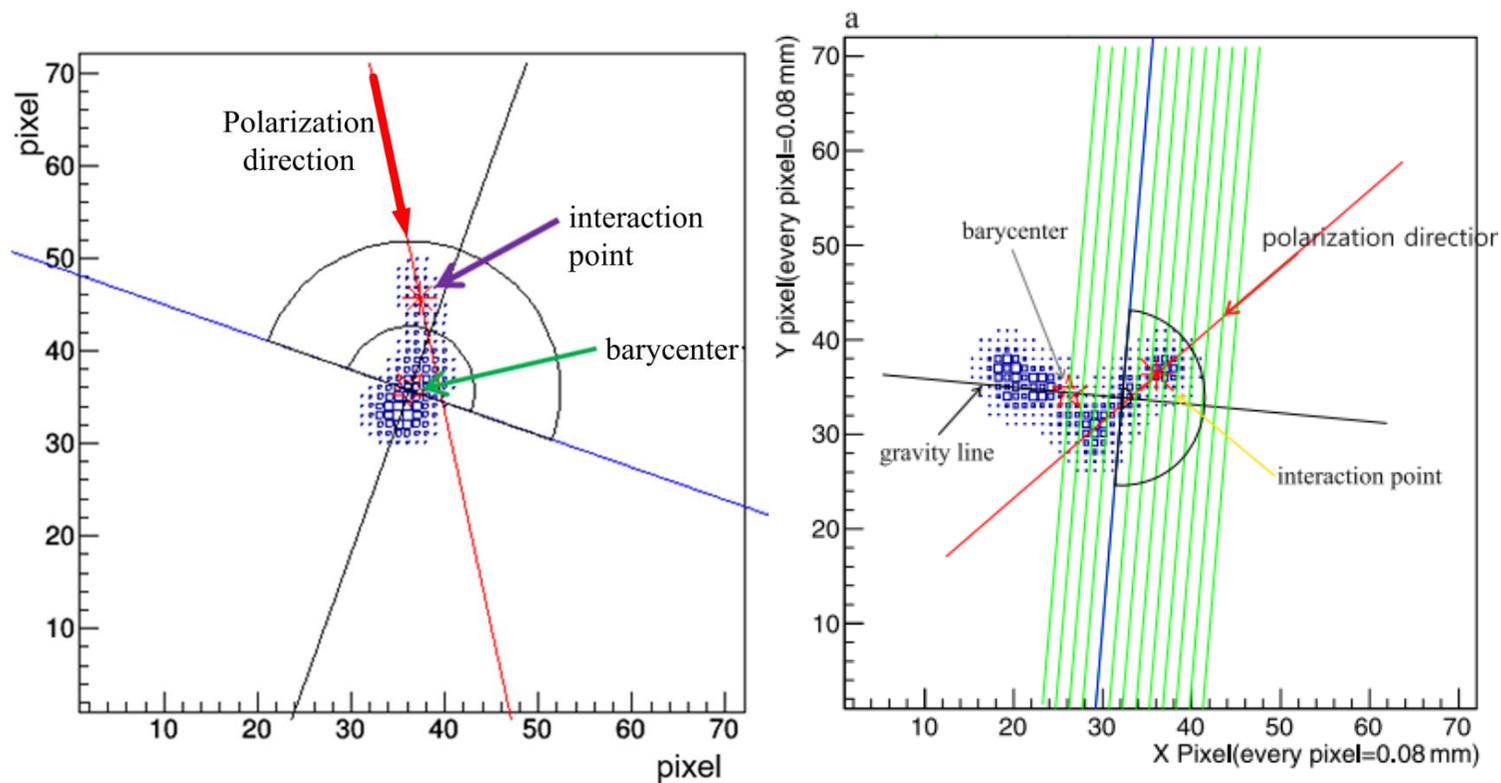
漏气率： 7.6^{-11} Torr*L/s



长期稳定性测量



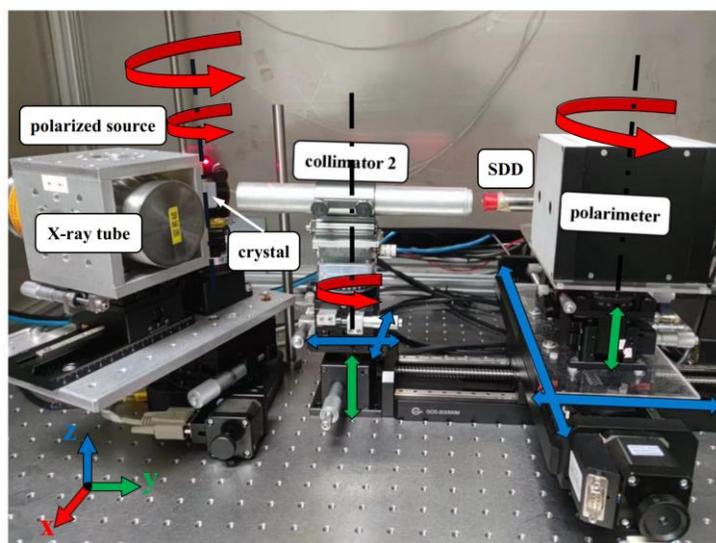
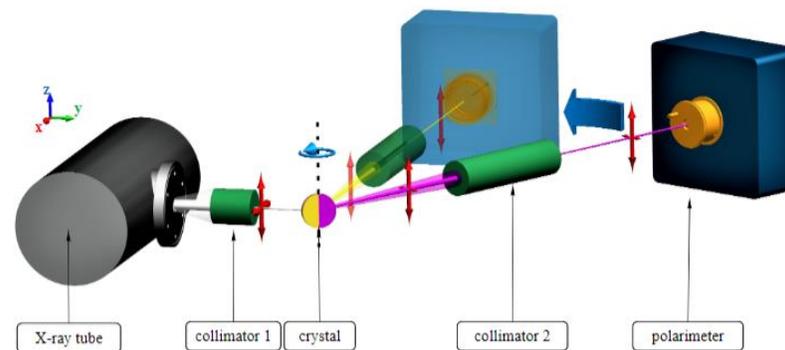
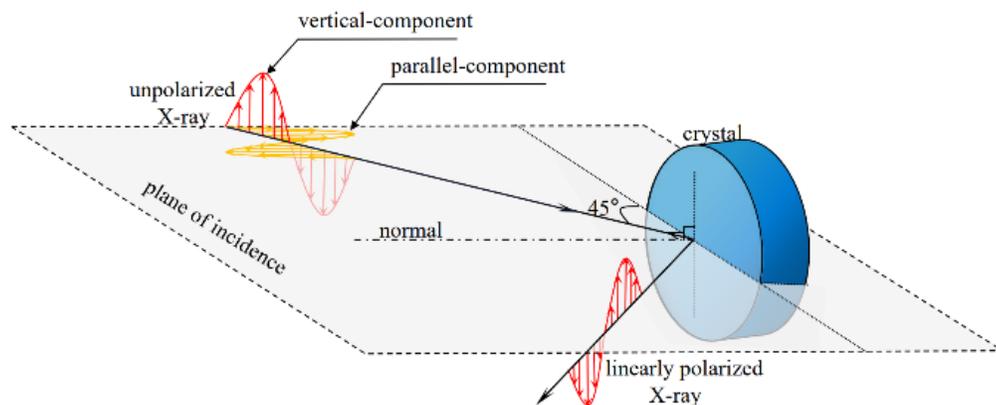
实验测量的光电子径迹



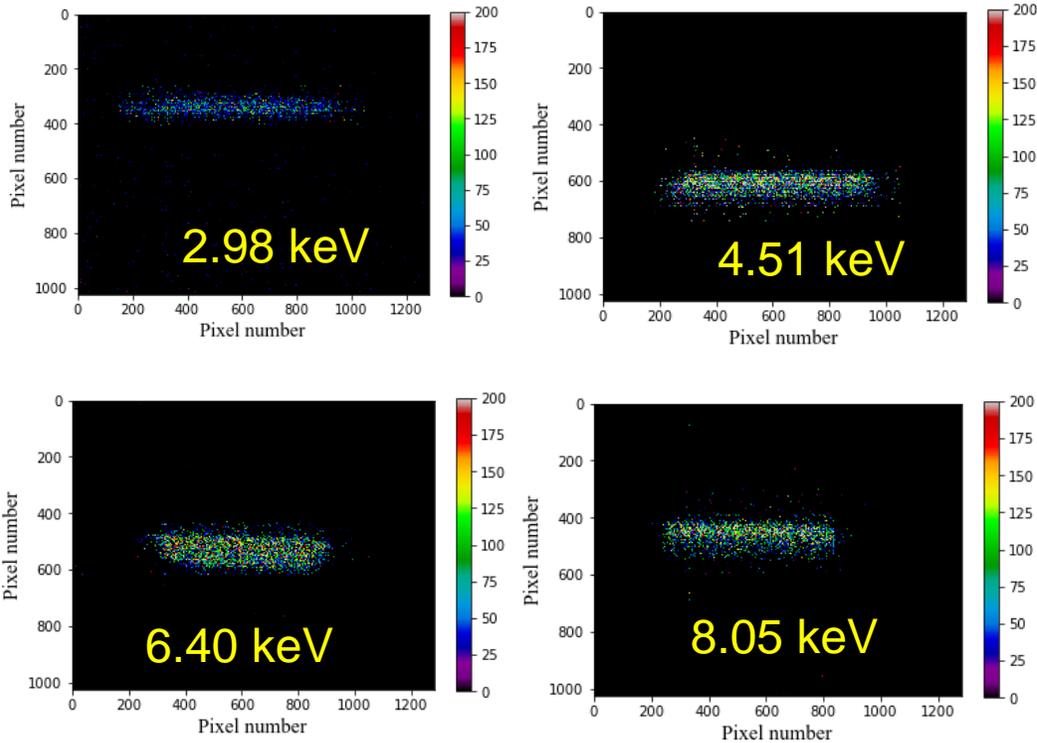
光电子径迹重建

- 获取清晰的光电子径迹
- 精确重建光电子的出射方位角

X射线偏振标定平台



➤ 基于布拉格衍射原理，在实验室内构建了X射线偏振标定平台，产生单能偏振的X射线，用于对探测器进行标定。



偏振X射线的光斑

TABLE II. Configurations and performance list of 8.05 keV linear polarized sources. The polarization degree is calculated using Eq. (3).

Energy(keV)	2.98	4.51	5.40	6.40	7.06	8.05
Crystal	Si(111)	Si(220)	Si(311)	Si(400)	Si(331)	Si(224)
Incident radiation	Ag $L\alpha$	Ti $K\alpha$	Cr $K\alpha$	Fe $K\alpha$	Fe $K\beta$	Cu $K\alpha$
Diffraction angle(deg)	41.6	45.8	44.5	45.5	44.9	44.1
Rate(cts/s)	207.52	375.49	370.49	375.8	426.77	439.25
Proportion of monochromatic light ^a (%)	93.04	97.91	98.31	98.64	97.40	97.32
FWHM(eV)	139.38	146.69	149.39	142.42	158.62	159.73
X-ray tube settings	8.0 kV, 0.49 mA	6.5 kV, 0.19 mA	7.0 kV, 0.19 mA	8.0 kV, 0.31 mA	9.8 kV, 0.44 mA	9.5 kV, 0.58 mA
Polarization(%)	97.4	99.8	99.9	99.8	99.9	99.8

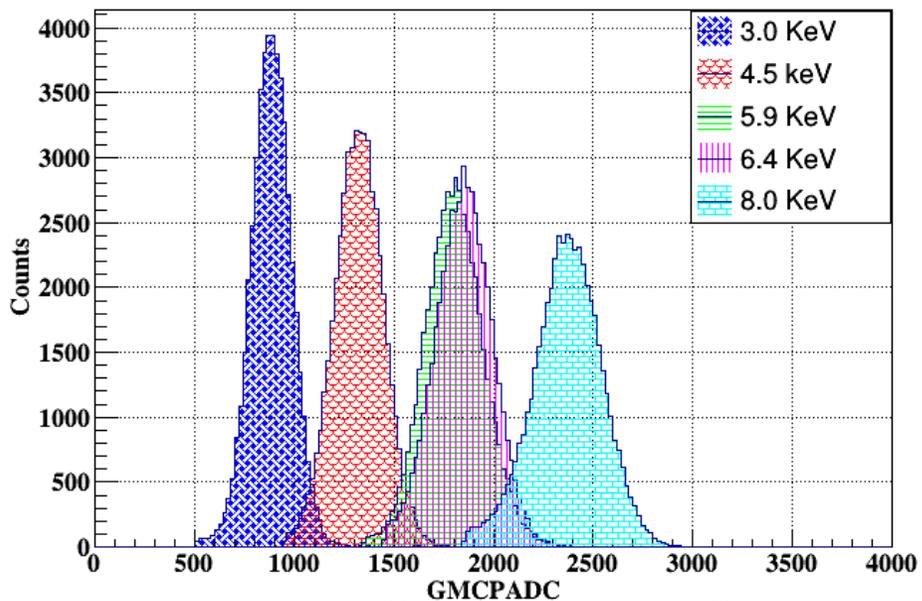
^a The proportion of monochromatic light is defined as the ratio of the number of photons falling within three times the sigma of the target peak centre value to the total photons.

TABLE III. Configurations and performance list of 8.05 keV partially polarized sources. The copper $K\alpha$ characteristic line diffracted by silicon crystal to generate beams with different degrees of polarization. The polarization degree is calculated using Eq. (3).

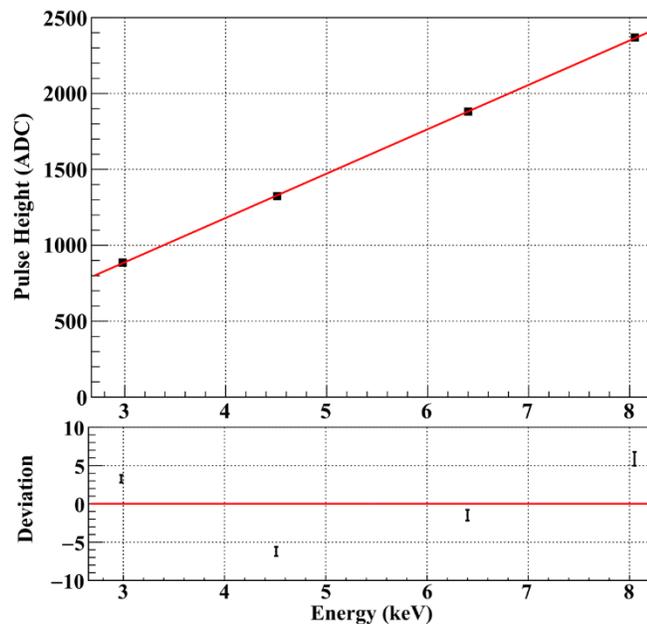
Energy(keV)	8.05	8.05	8.05	8.05	8.05	8.05
Crystal	Si(111)	Si(220)	Si(311)	Si(400)	Si(331)	Si(224)
Incident radiation	Cu $K\alpha$	Cu $K\alpha$	Cu $K\alpha$	Cu $K\alpha$	Cu $K\alpha$	Cu $K\alpha$
Diffraction angle(deg)	14.2	23.7	28.1	34.6	38.2	44.1
Rate(cts/s)	277.75	166.66	224.14	657.92	146.97	555.92
Proportion of monochromatic light ^a (%)	92.82	96.84	98.32	98.40	98.36	98.37
FWHM(eV)	193.05	162.63	159.61	159.24	159.11	159.73
X-ray tube settings	9.3 kV, 0.19 mA	9.4 kV, 0.39 mA	10.3 kV, 0.19 mA	11.5 kV, 0.29 mA	10.0 kV, 0.19 mA	10.5 kV, 0.29 mA
Polarization(%)	12.8	37.0	52.6	77.5	89.5	99.8

^a The proportion of monochromatic light is defined as the ratio of the number of photons falling within three times the sigma of the target peak centre value to the total photons.

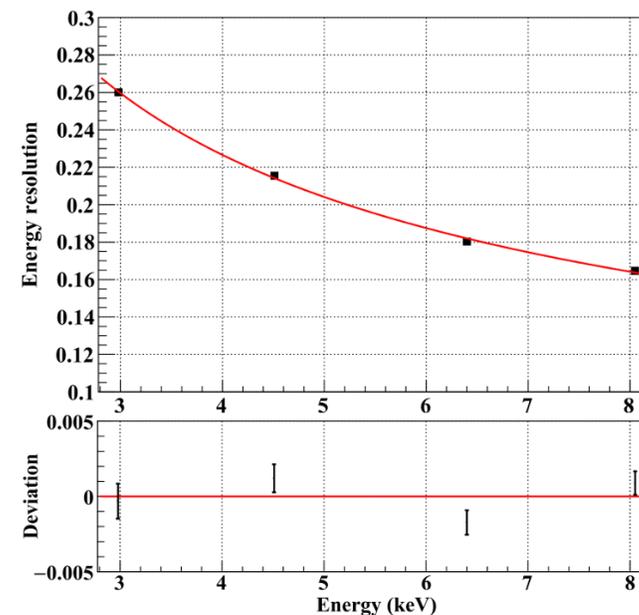
- X射线偏振标定平台产生不同参数的X射线光束进行标定实验，包括不同能量点、不同偏振方向、不同偏振度以及斜入射的X射线光束。



探测器对单能偏振X射线测量的能谱

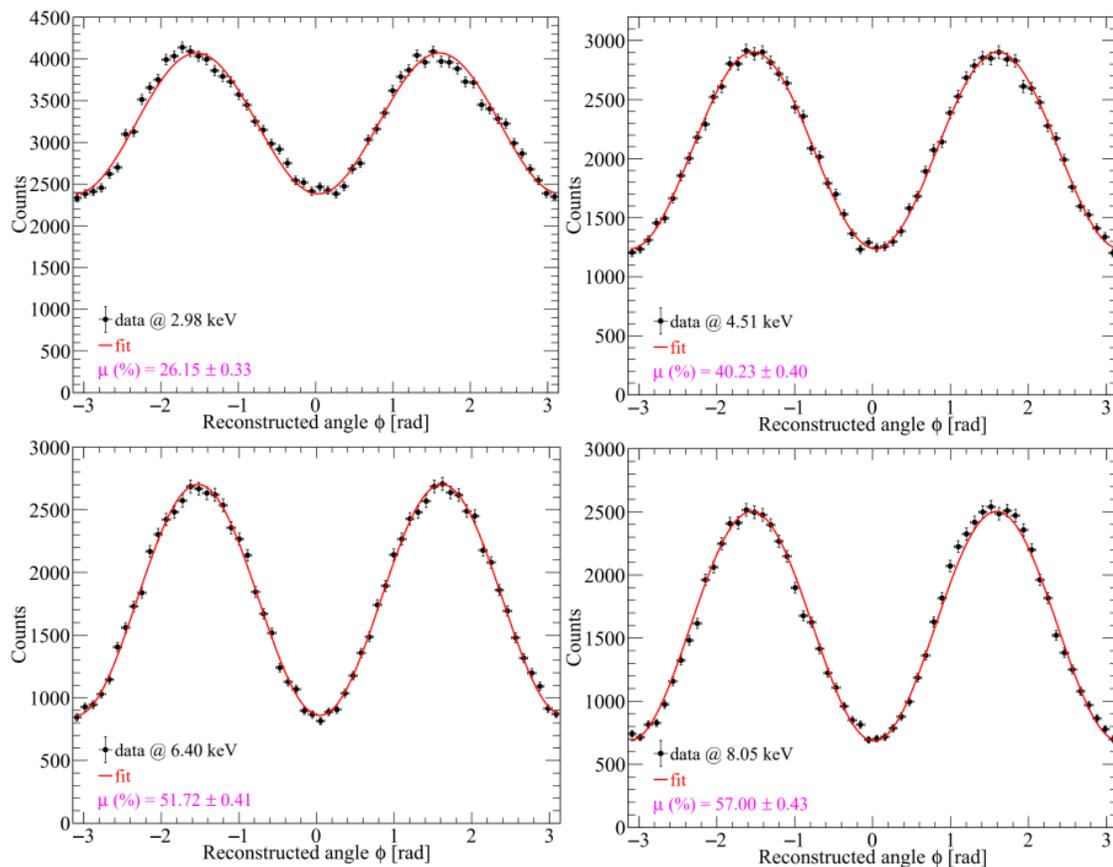


ADC值与入射X射线能量的关系

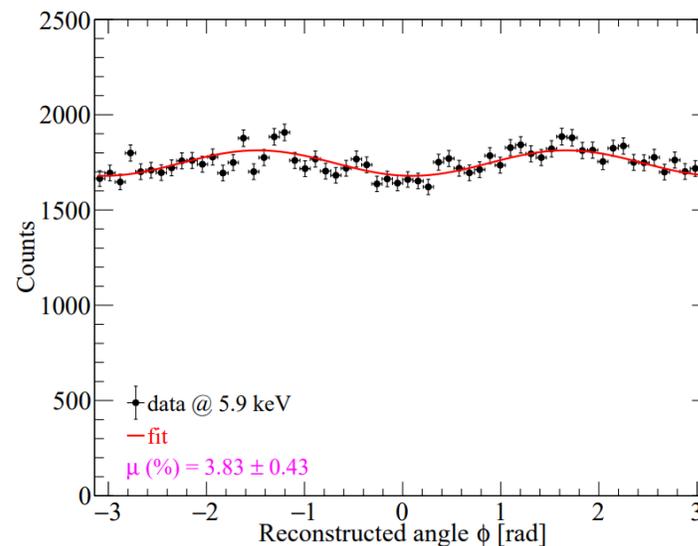


能量分辨率与X射线能量的关系

- 探测器能量分辨率为18.8% @5.9 keV。
- 能量测量具有良好的线性。

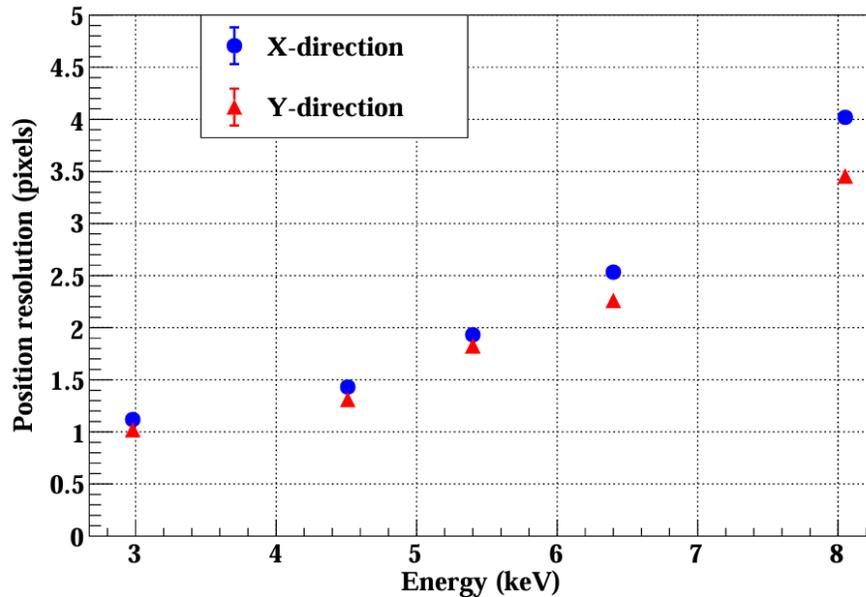


全偏X射线测量的调制曲线

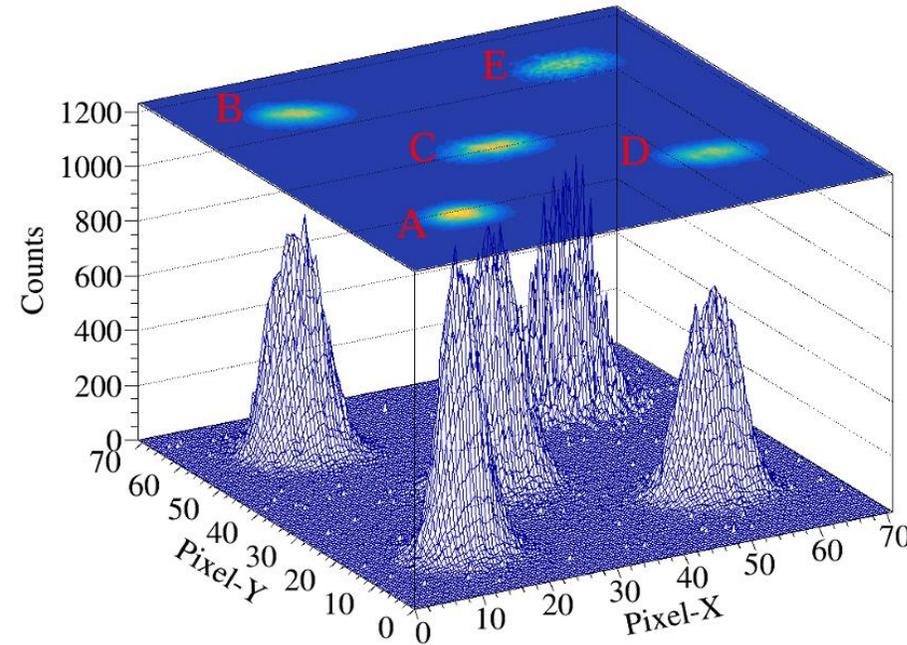


无偏X射线测量的调制曲线

- 探测器的调制因子为51.72% @6.4 keV。
- 探测器存在较大的残除调制因子，需要进行系统误差的修正。



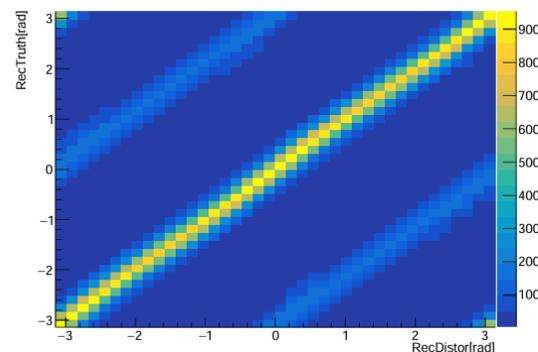
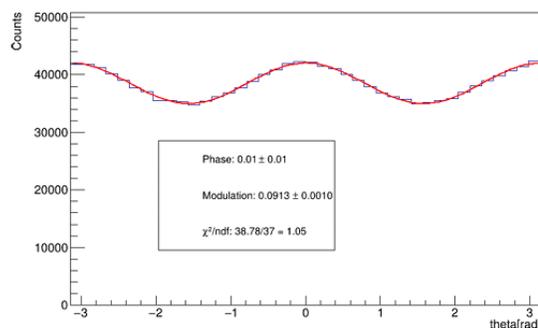
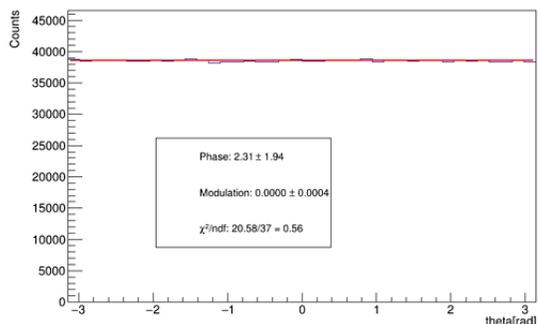
不同能量的X射线测量得到探测器的位置分辨率



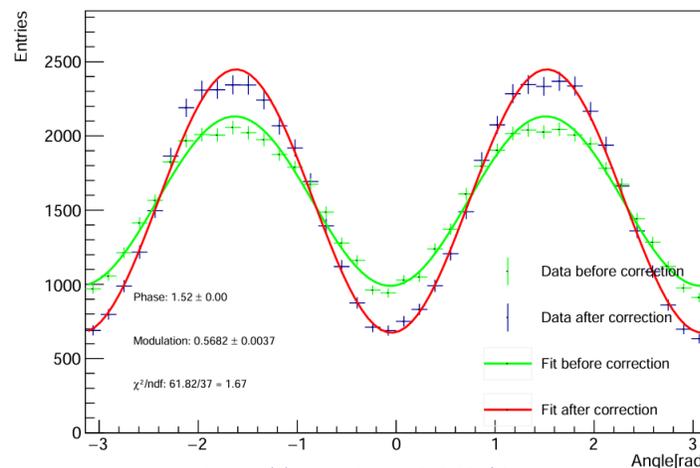
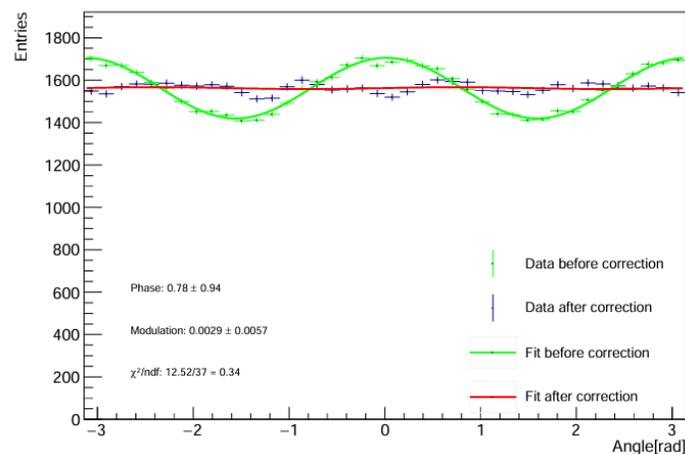
探测器的小孔成像的实际图像

- 探测器在X、Y方向上的位置分辨率分别为2.533个像素（210.2 μm ）和2.261个像素（187.7 μm ）。
- 探测器在Y方向上的位置分辨率优于X方向，这种正交方向上的成像能力差异导致了较大的系统误差。

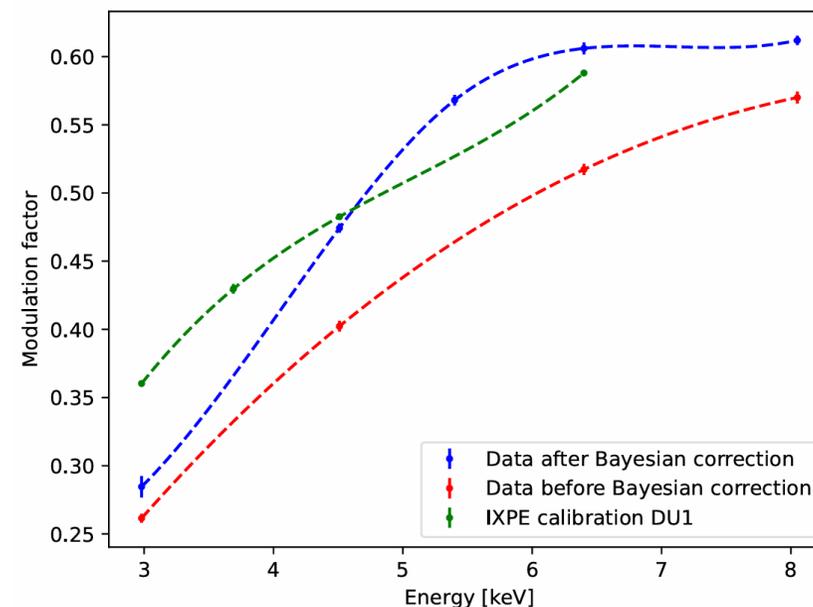
GMPD系统误差修正



系统误差修正方法



修正前后的调制曲线



修正前后的调制因子曲线

- 蒙特卡罗模拟得到响应矩阵，贝叶斯方法消除残余调制对调制曲线的贡献。
- 修正后残余调制因子低于1%，X射线偏振调制因子显著提高。

- **HERD-TRD**载荷采用了规则辐射体+**THGEM**的技术途径，结构上采用了侧窗共腔的一体化结构，显著提升了对穿越辐射信号的测量精度，将实现**1-10TeV**宇宙线质子绝对能量的测量；
- **TRD**已完成原型样机研制及相关研究，并完成关键技术攻关，将着手开展电性件及结构热控件的研制工作；
- 提出了中国空间站**POLAR-2**任务的**LPD**方案，采用大面积拼接、宽视场的设计方案，用于测量伽马暴瞬时辐射及其极早期X射线余辉的偏振；
- 已完成**GMPD**的研制，并在实验室搭建了X射线偏振标定台平，对**GMPD**进行了性能测试、标定以及系统误差修正；
- **TRD**和**GMPD**均采用闭气式、紧凑型设计，无需额外携带气体，有效解决了气体探测器长期在轨工作的寿命问题。

谢谢!