



廣西大學
GUANGXI UNIVERSITY

气体微通道板像素探测器研究及其应用

汇报人：封焕波（代表CXPB合作组）

广西大学

第十四届全国先进气体探测器研讨会，惠州，2026.07.23

汇报内容

contents



一、背景

二、GMPD探测器

三、CXPd系列立方星

四、Migdal效应实验

五、总结

汇报内容

contents



一、背景

二、GMPD探测器

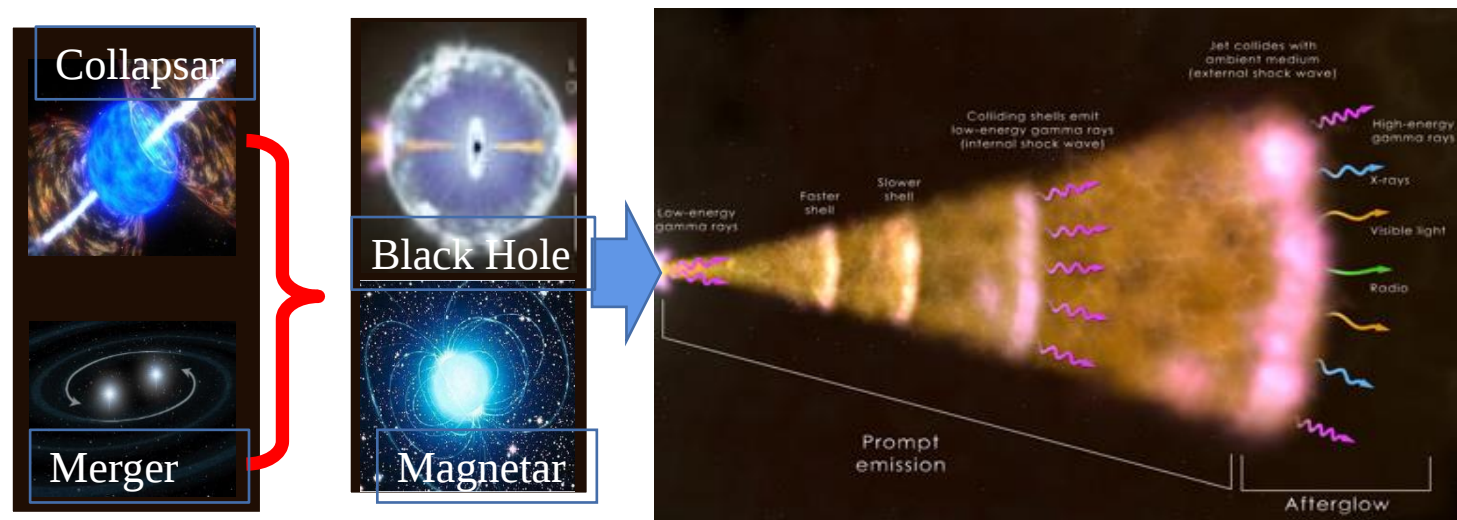
三、CXPd系列立方星

四、Migdal效应实验

五、总结

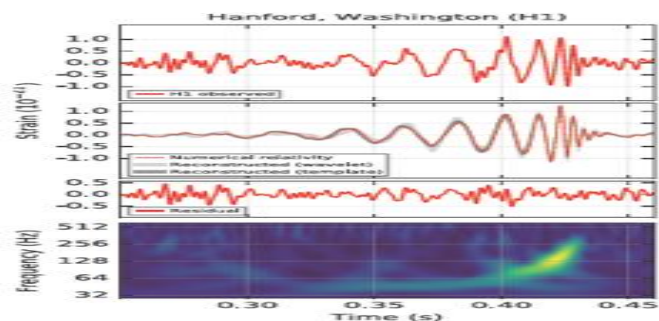
背景：GRB X射线偏振

伽马射线暴——恒星爆炸或致密天体并合

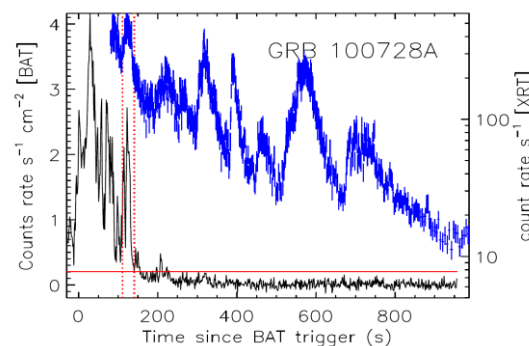


当今多信使天文、
极端条件天体物理
研究的最佳对象！

发展暂现源的X射线
偏振探测技术，为研
究伽马暴辐射机制和
新生天体性质及其极
早期演化服务。



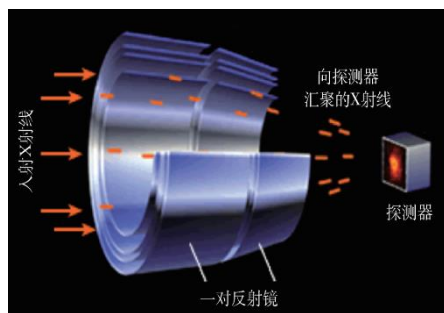
引力波



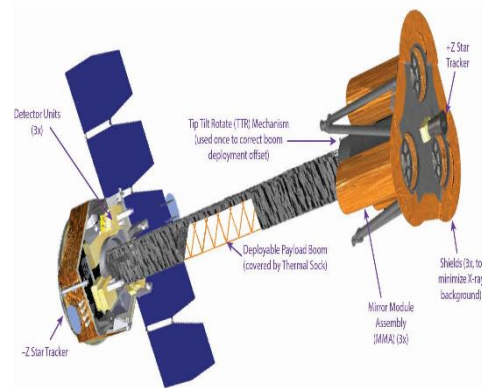
伽马暴和X射线耀发

偏振、光变、能谱、成像是电磁辐射测量四个维度

- 成熟的X射线偏振探测技术：
掠射聚焦、窄视场
- 目标对象：稳定X射线源，如
Crab, Vela, 磁星等
- 典型在轨项目：IXPE卫星

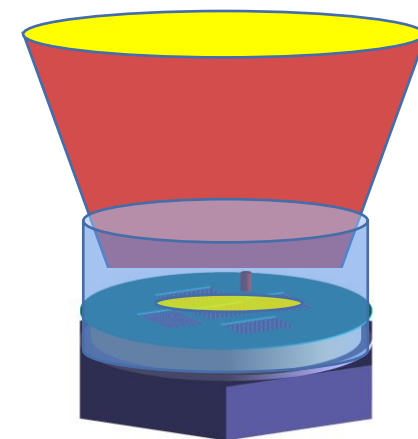
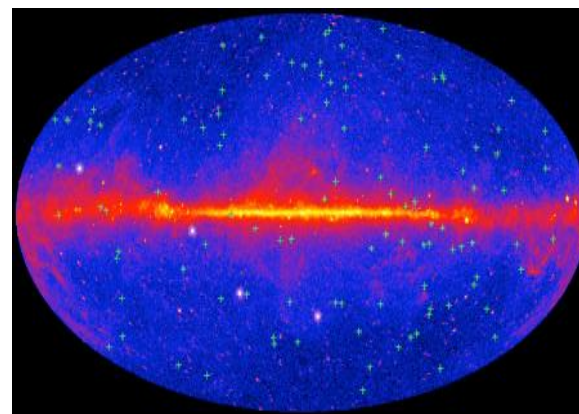


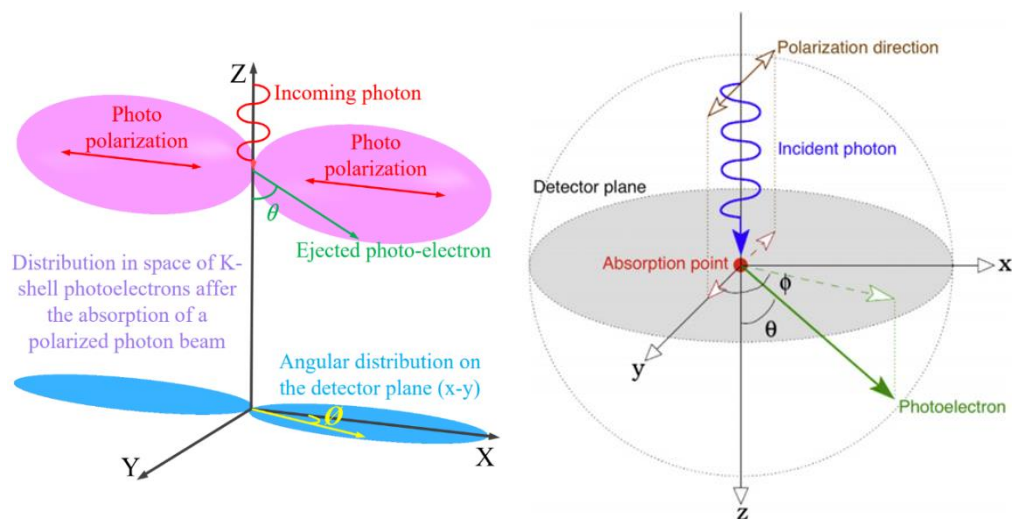
《物理》2021年第8期



任务和挑战：

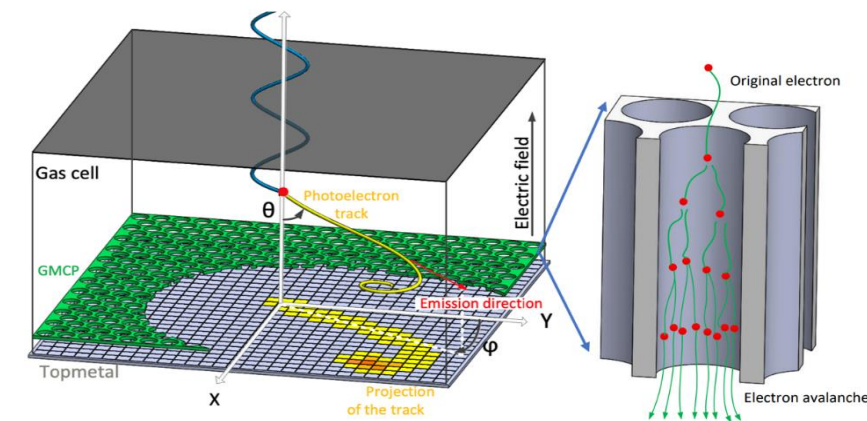
- 任务——宽视场X射线暂
现源偏振巡天技术
- 挑战——**暂现源**积分时间
短，**随机性**需**大视场**监测



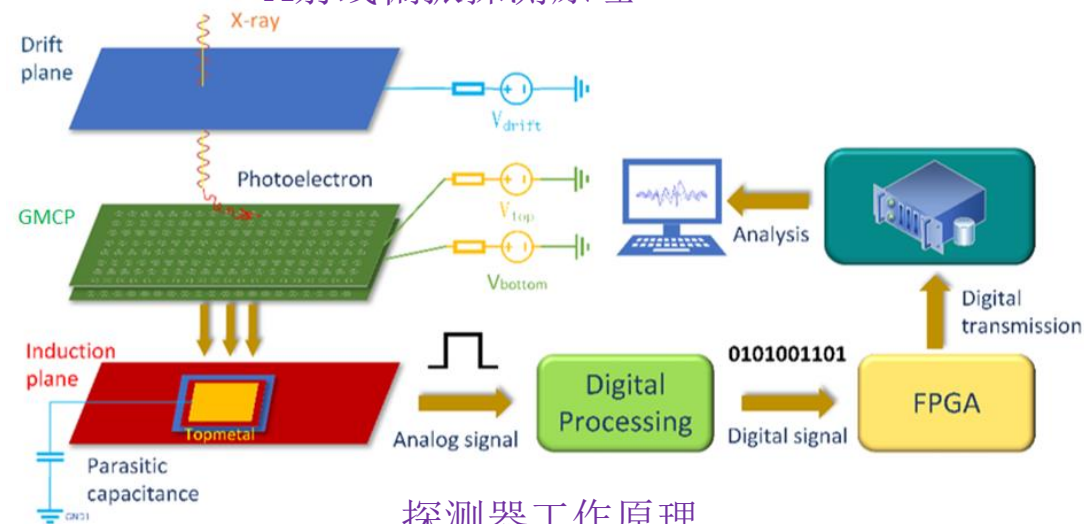


光电效应测量X射线偏振的原理示意图

- ▲ 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

高灵敏度的X射线偏振探测技术

汇报内容

contents



一、背景

二、GMPD探测器

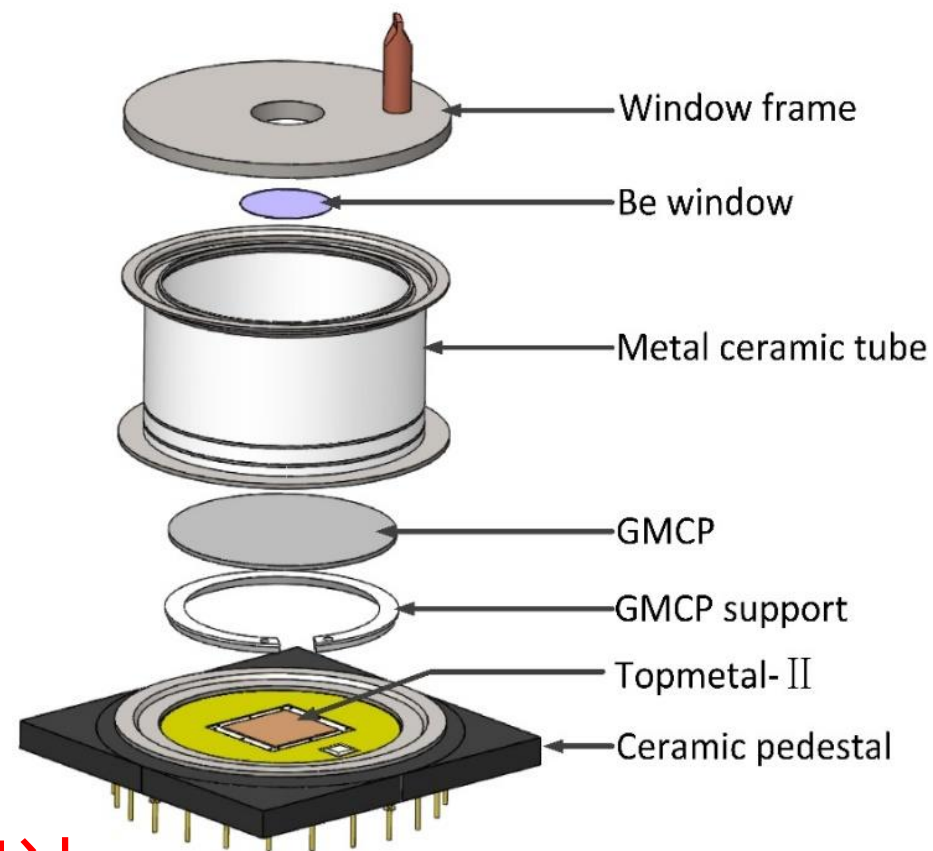
三、CXPDP系列立方星

四、Migdal效应实验

五、总结

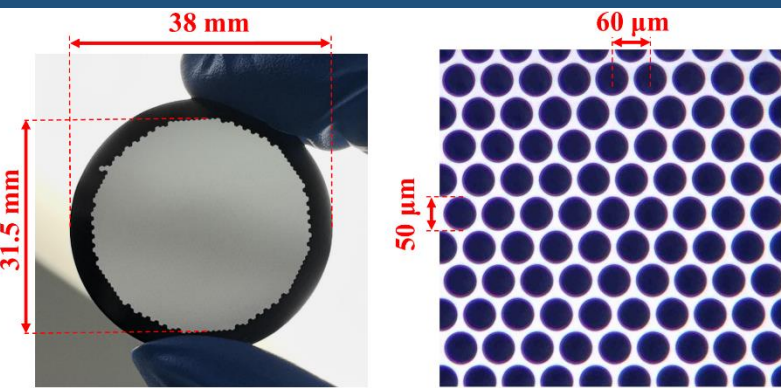
气体微通道板像素探测器（GMPD）

- ❑ 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，探测器具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。

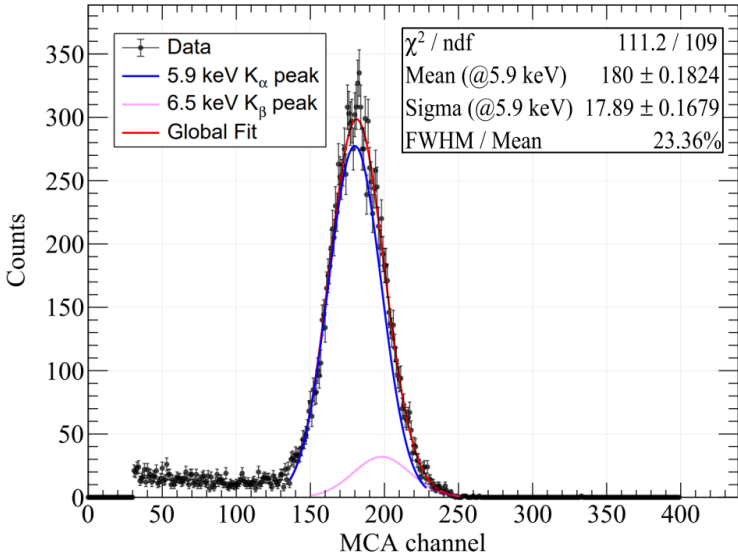


气体探测器空间适应性设计

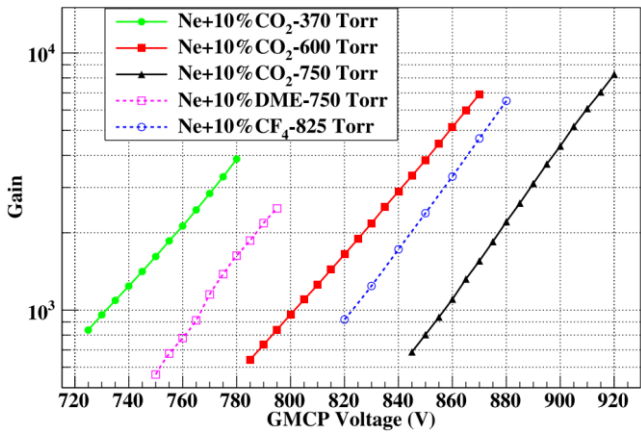
气体微通道板 (GMCP)



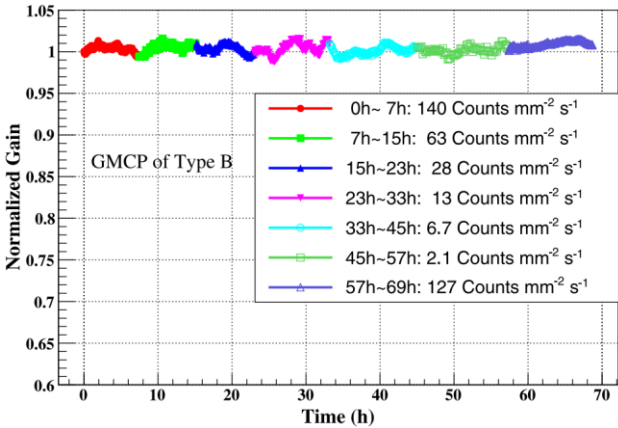
GMCP实物图



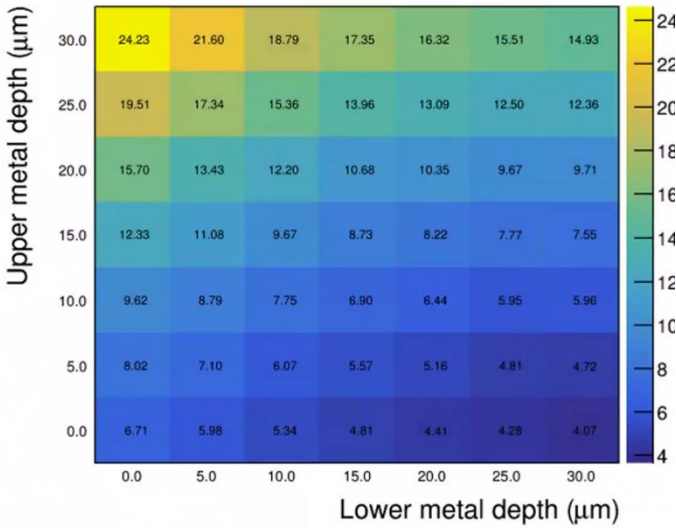
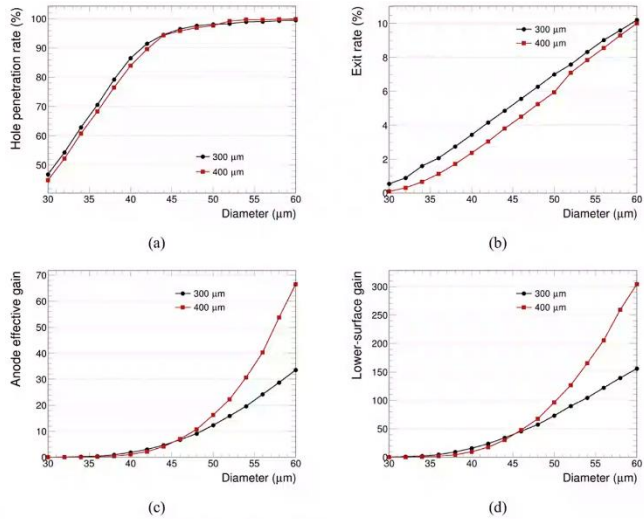
55Fe放射源的能谱图



增益曲线



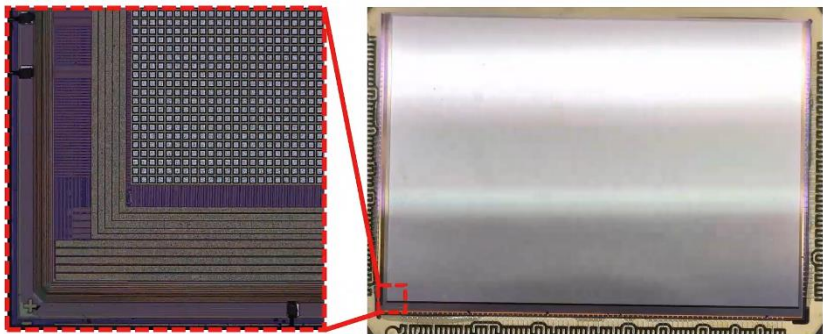
增益稳定性研究



GMCP结构模拟优化

将GMCP直接应用到微结构气体探测器中。

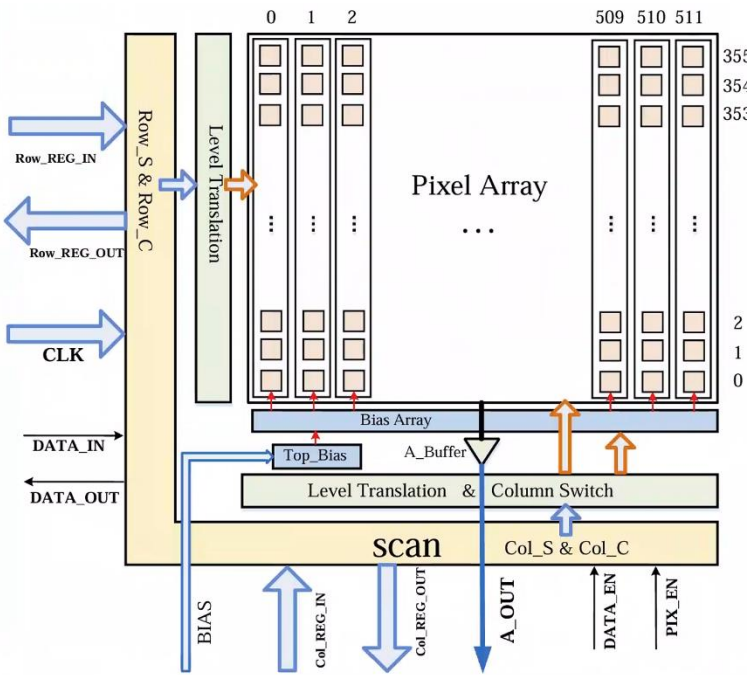
像素芯片：Topmetal-L



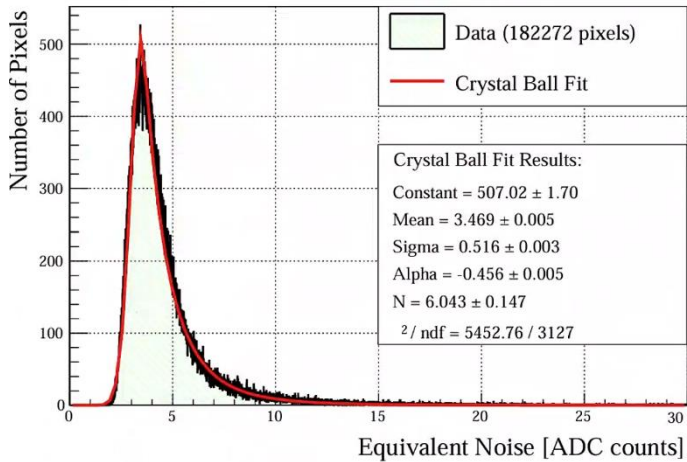
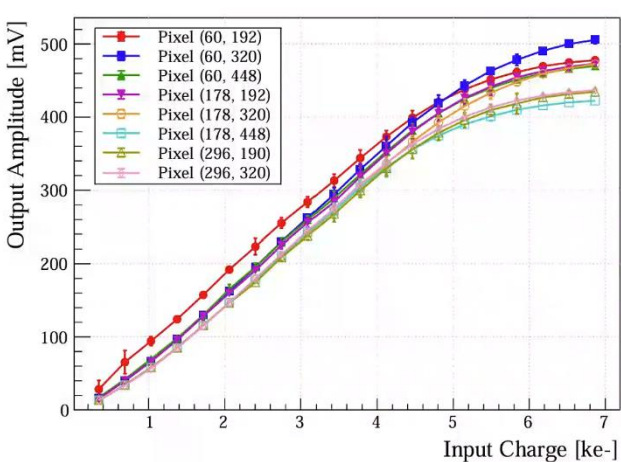
Topmetal-L芯片的实物图

	Topmetal-II ⁺	Topmetal-L	XPOL-I	XPOL-III
Chip size [mm ²]	8 × 9	17 × 24	-	-
Active area [mm ²]	6 × 6	16.02 × 23.04	15 × 15.2	15 × 15.2
Pixel array	72 × 72	356 × 512	300 × 352	300 × 352
Pixel density [pixels/mm ²]	145	494	462 (hexagon)	462 (hexagon)
Power density [W/cm ²]	2.778	0.195	0.350	-
Pixel gain [$\mu\text{V}/\text{e}^-$]	-	76.04	64.1	32.0
ENC [e^-]	13.9	22.8	22.5	30
Readout mode	Rolling Shutter	Rolling Shutter / Sentinel	Self-trigger	Self-trigger
Time cost	2.6 ms/frame	0.73 ms/frame @ Sentinel	1 ms/event	0.15 ms/event @ 2.5 keV

系列像素芯片的参数

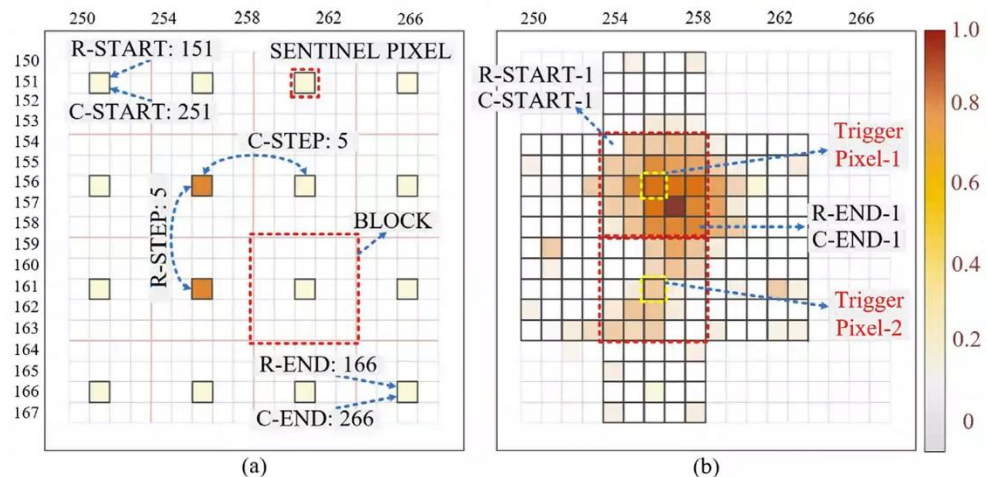


Topmetal-L芯片的设计示意图

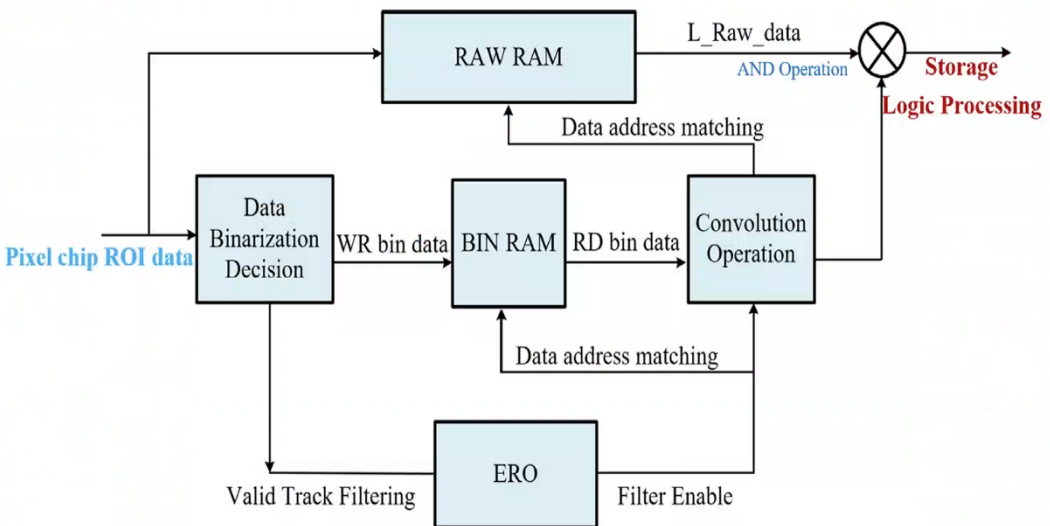


芯片像素的响应和等效噪声

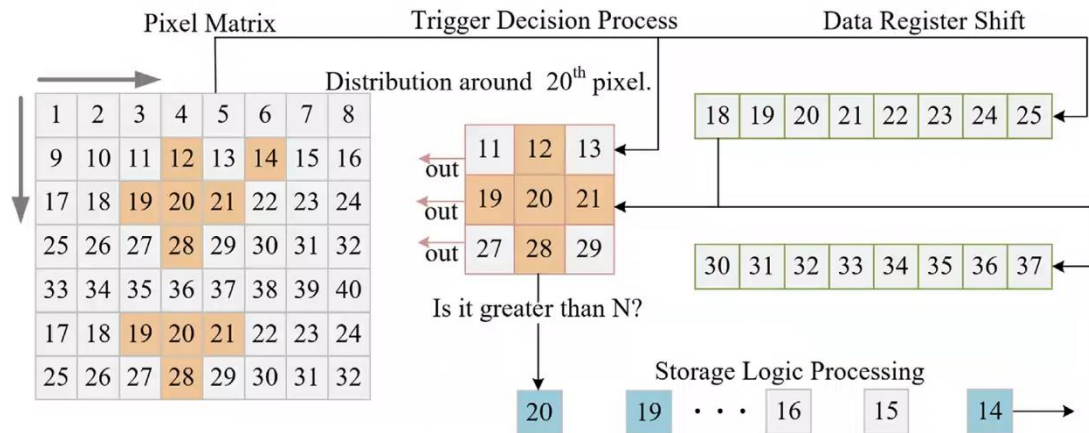
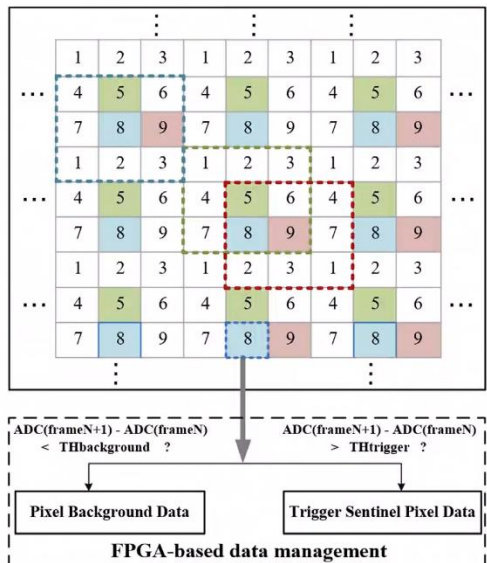
Topmetal-L芯片的读出



设计了哨兵读出的方式



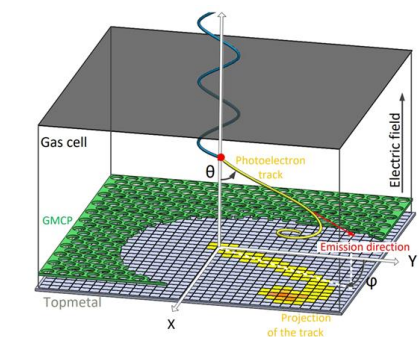
动态本底更新



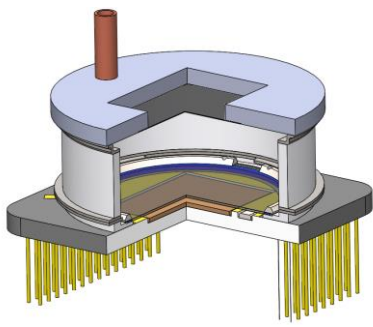
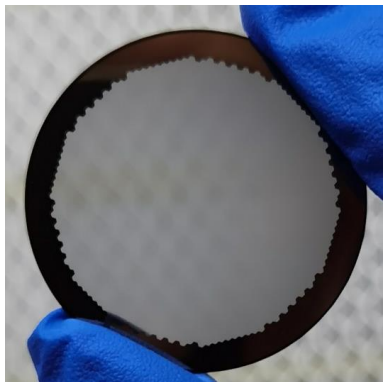
数据压缩算法

GMPD探测器的封装

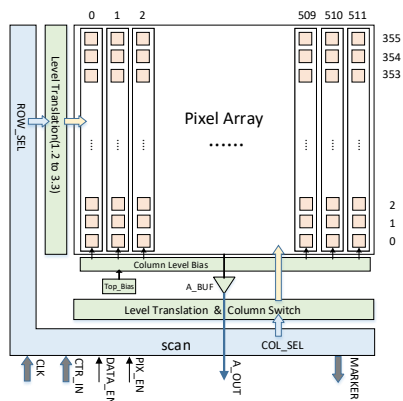
新型大面积微通道板像素探测器研制



X射线偏振测量原理



探测器结构示意图



Topmetal-L结构示意图

有效探测面积	23×16 mm ²
X射线窗口	100 μm厚的铍
工作气体	40%He+60%DME
气体压力	0.8 atm
漂移区高度	1.4 cm
感应区高度	1 mm
GMCP厚度	300 μm
GMCP孔径	50 μm
GMCP孔间距	60 μm
像素大小	45 μm (四边形)
像素阵列	356×512

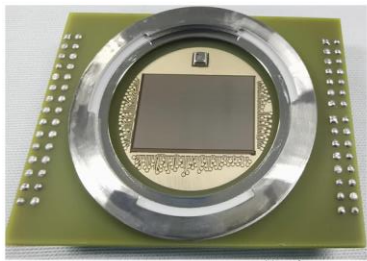
探测器技术参数



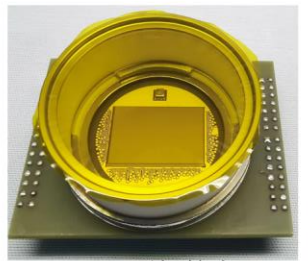
(a) 底座



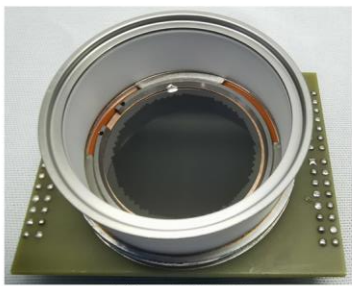
(b) +气温芯片、底座管壳



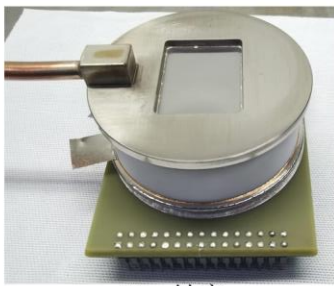
(c) +Topmetal-L芯片



(d) +阴极管壳



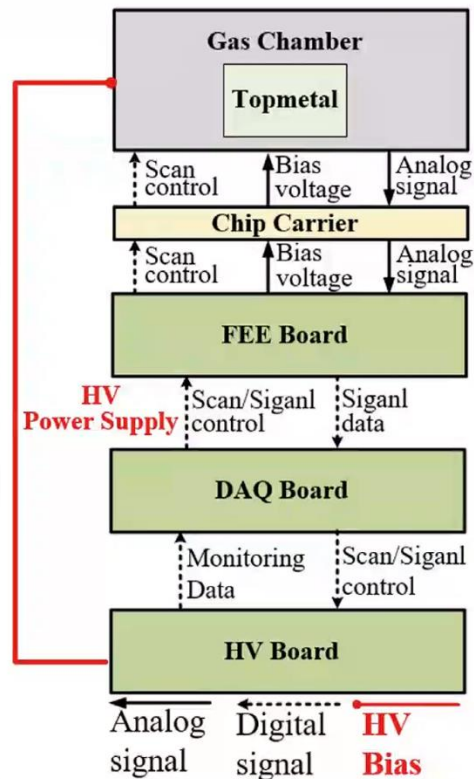
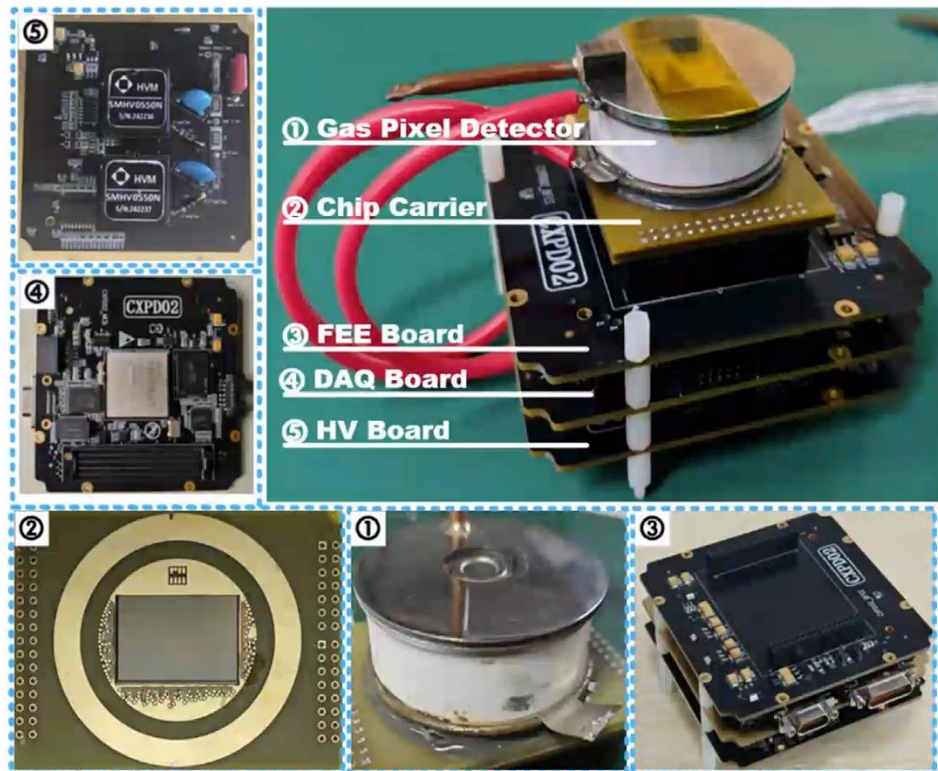
(e) +GMCP



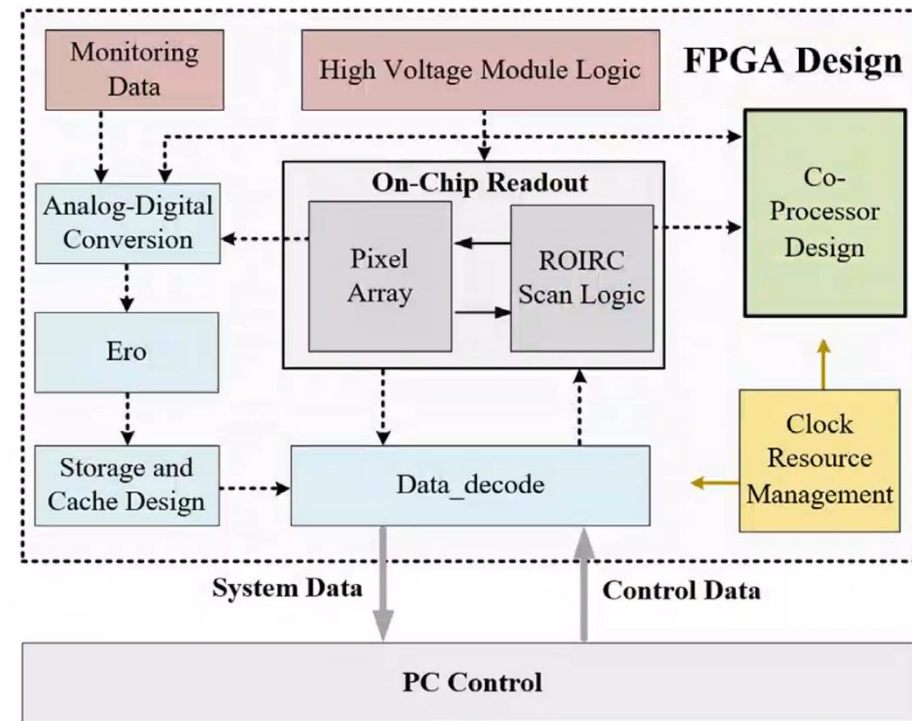
(f) +铍窗

探测器封装过程

- 基于Topmetal-L像素芯片，完成大面积气体微通道像素探测器(GMPD)研制。探测器面积3.6 cm²，比之前原理样机的有效面积大了10倍，功耗小于1 W。

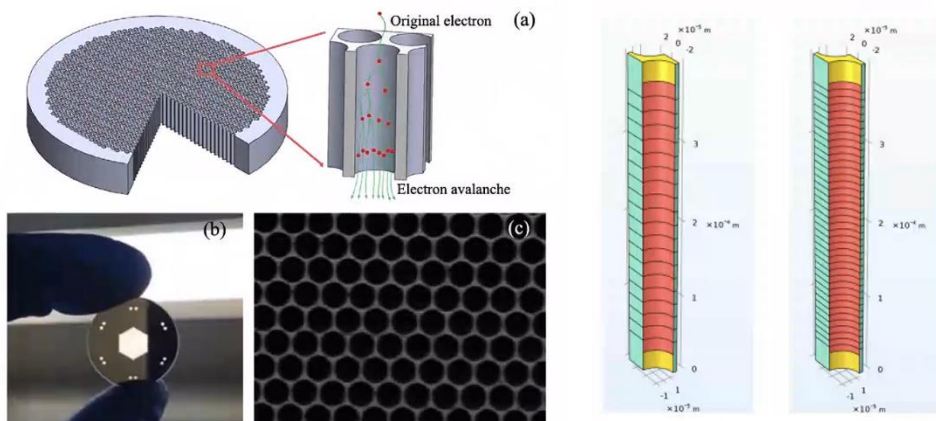


电子学硬件功能模块

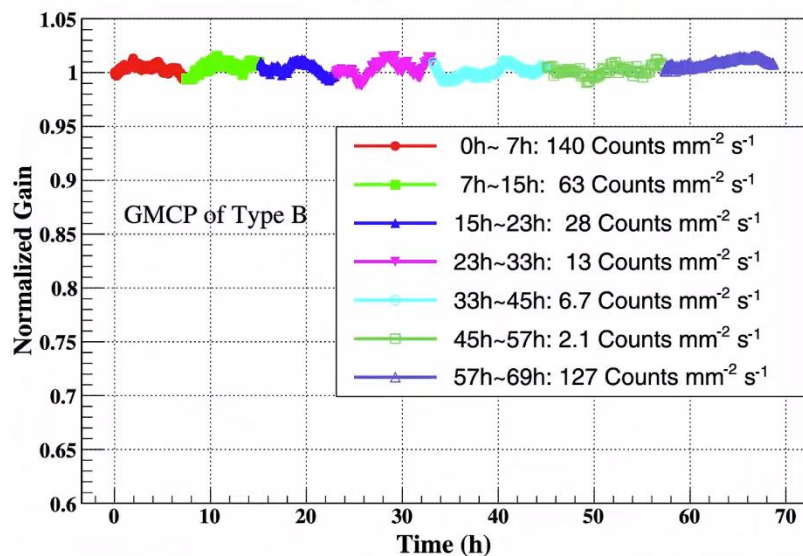


FPGA固件功能模块

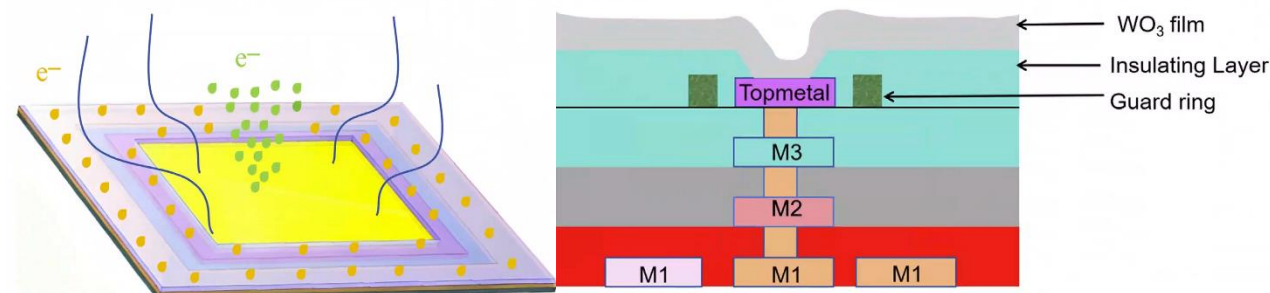
探测器性能稳定性研究



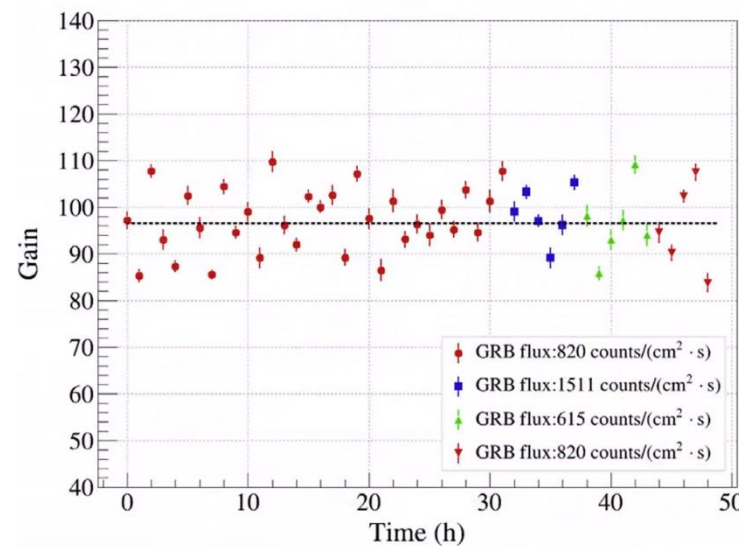
GMCP基于氢还原工艺，行成GΩ的体电阻，避免短电荷累积效应。



不同计数率的GMCP增益的响应

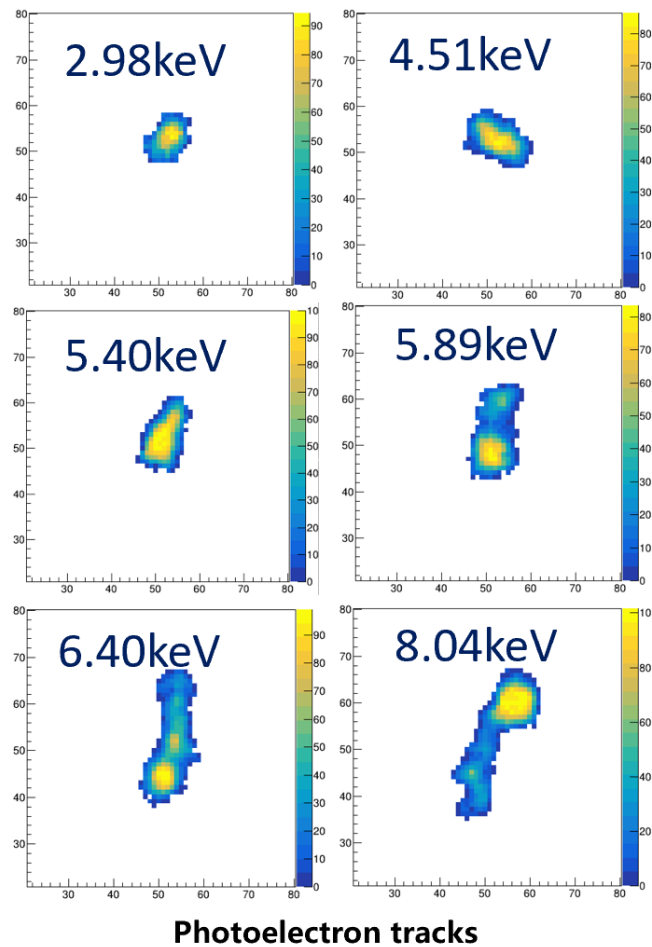


Topmetal芯片表面镀了阻性薄膜，消除电荷累积的效应。

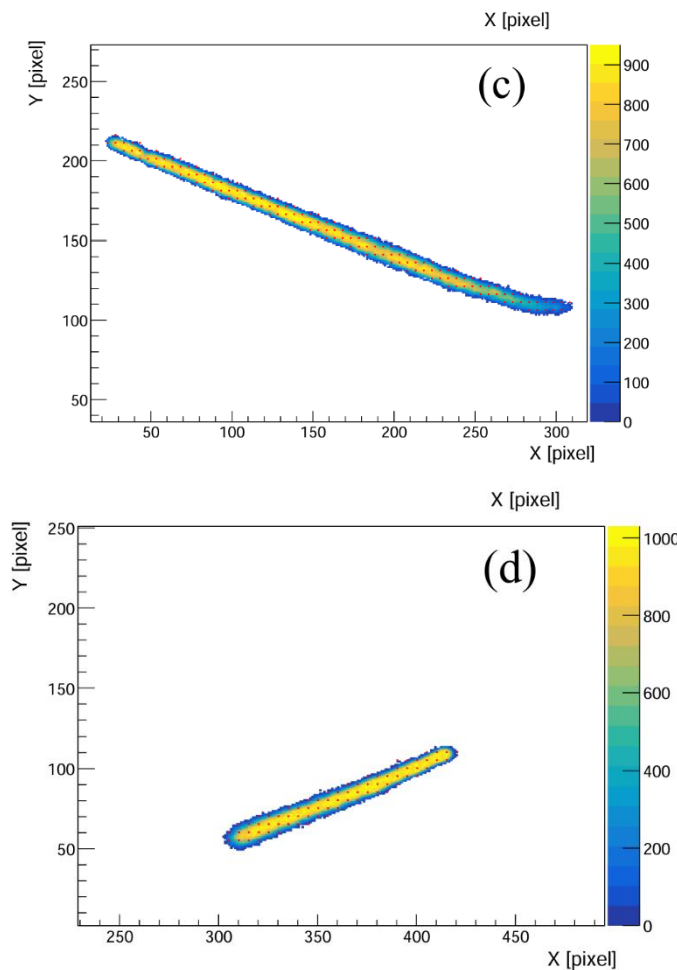


不同X射线流强Topmetal芯片的增益响应

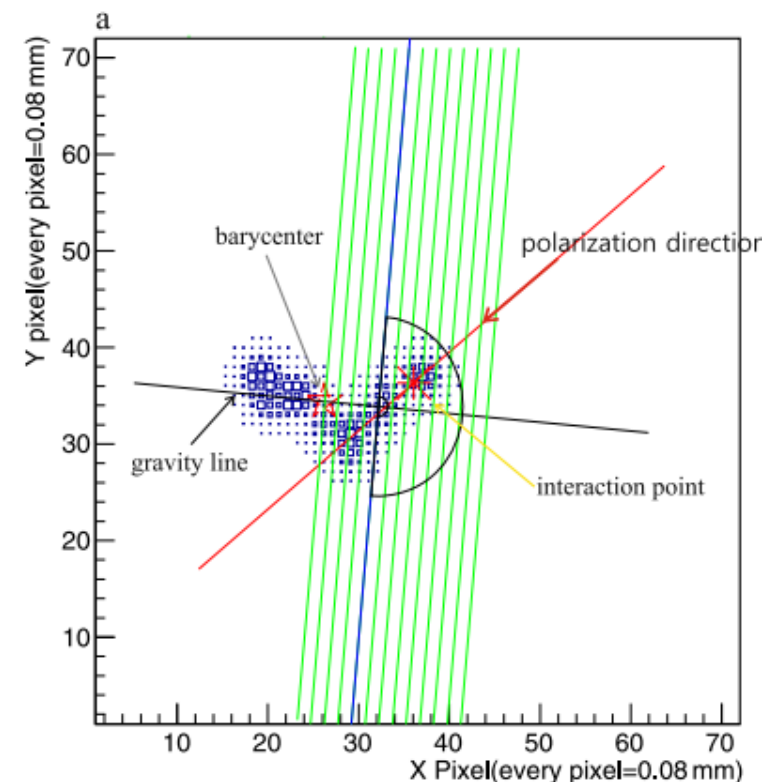
探测器对径迹的成像



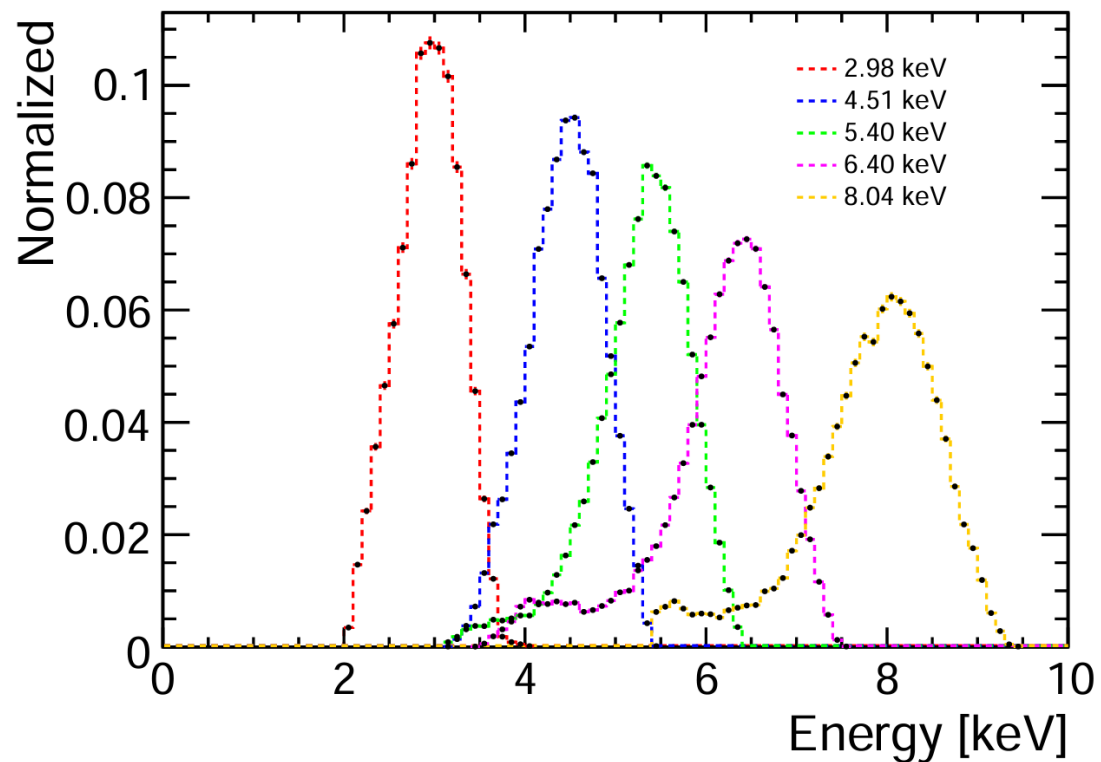
X-ray 的光电子径迹



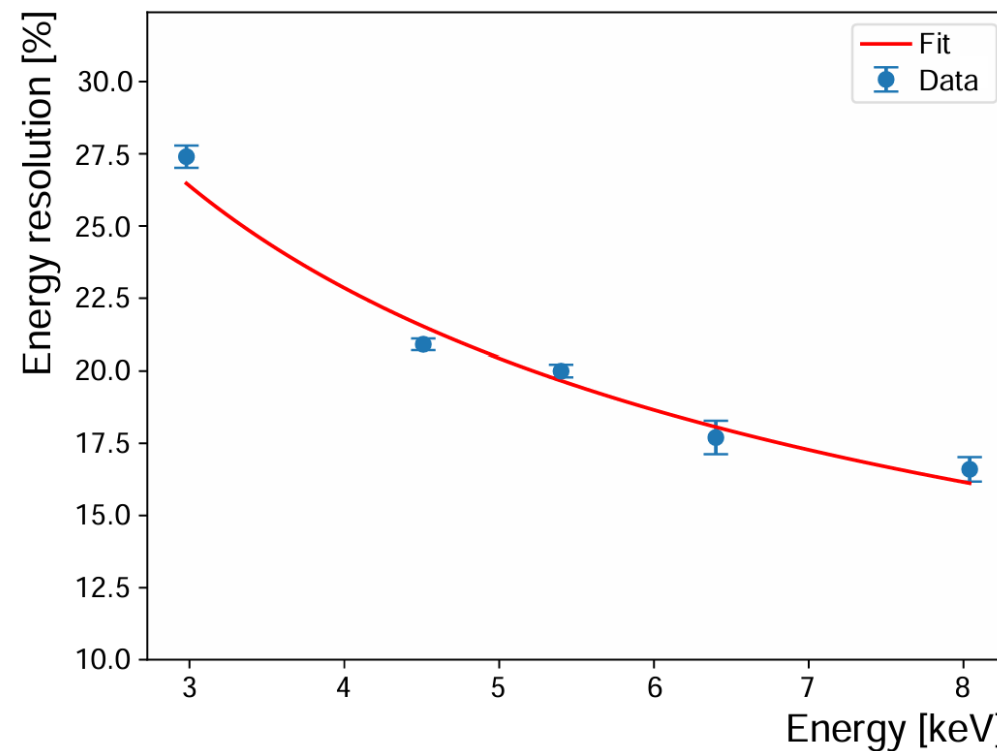
带电粒子的径迹



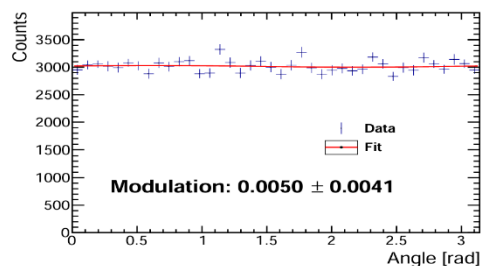
光电子径迹的重建



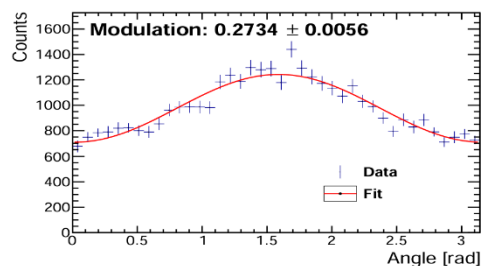
探测器对单能X射线的能谱响应



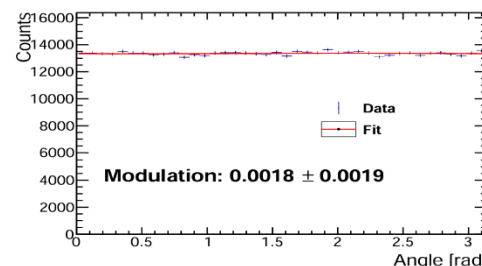
探测器对应的能量分辨率



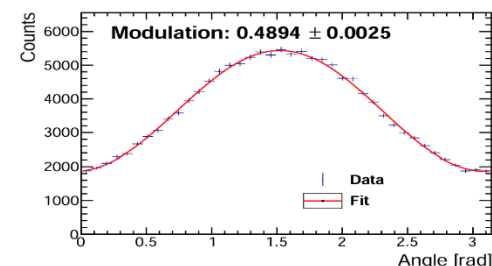
(a) 2.98 keV, unpolarized



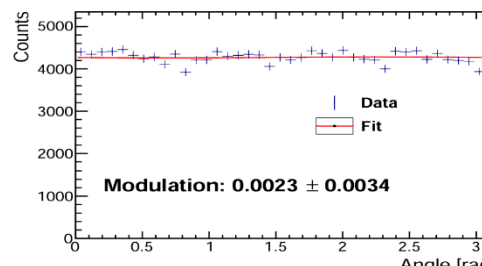
(b) 2.98 keV, polarized



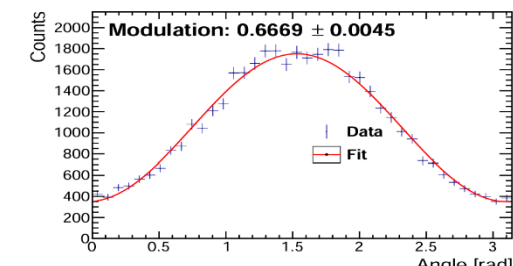
(e) 5.40 keV, unpolarized



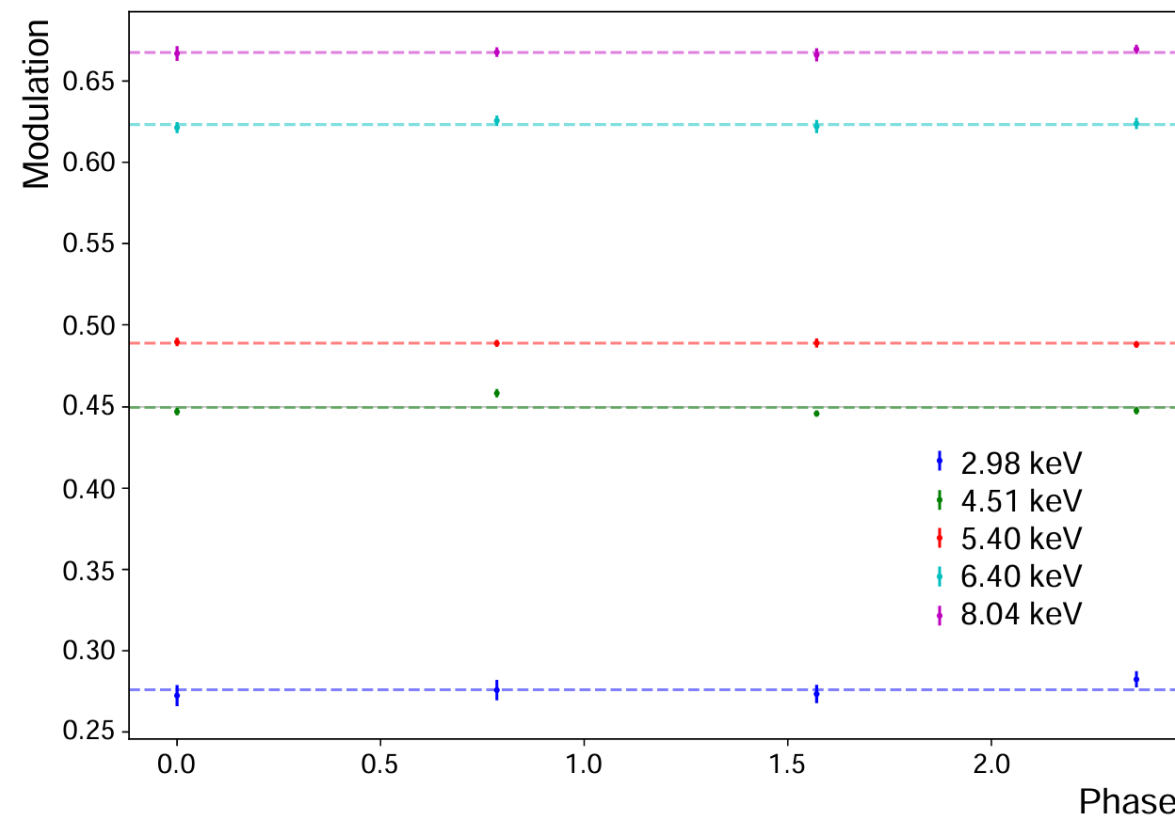
(f) 5.40 keV, polarized



(i) 8.04 keV, unpolarized

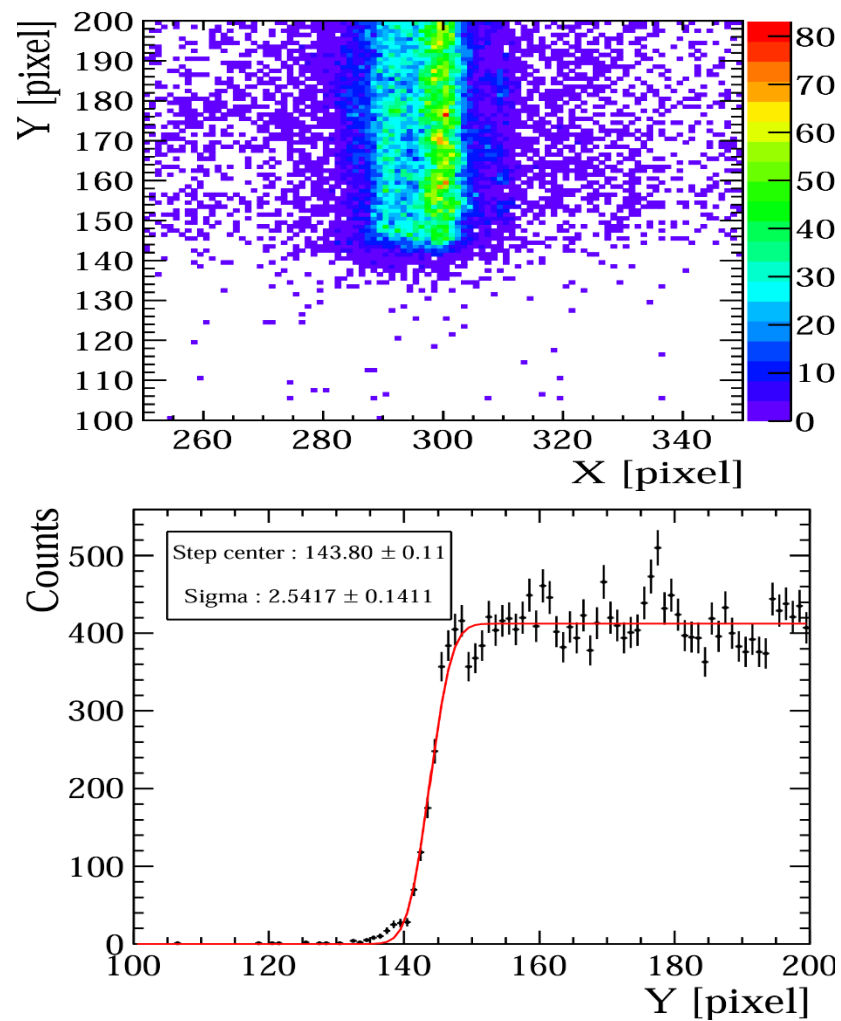


(j) 8.04 keV, polarized

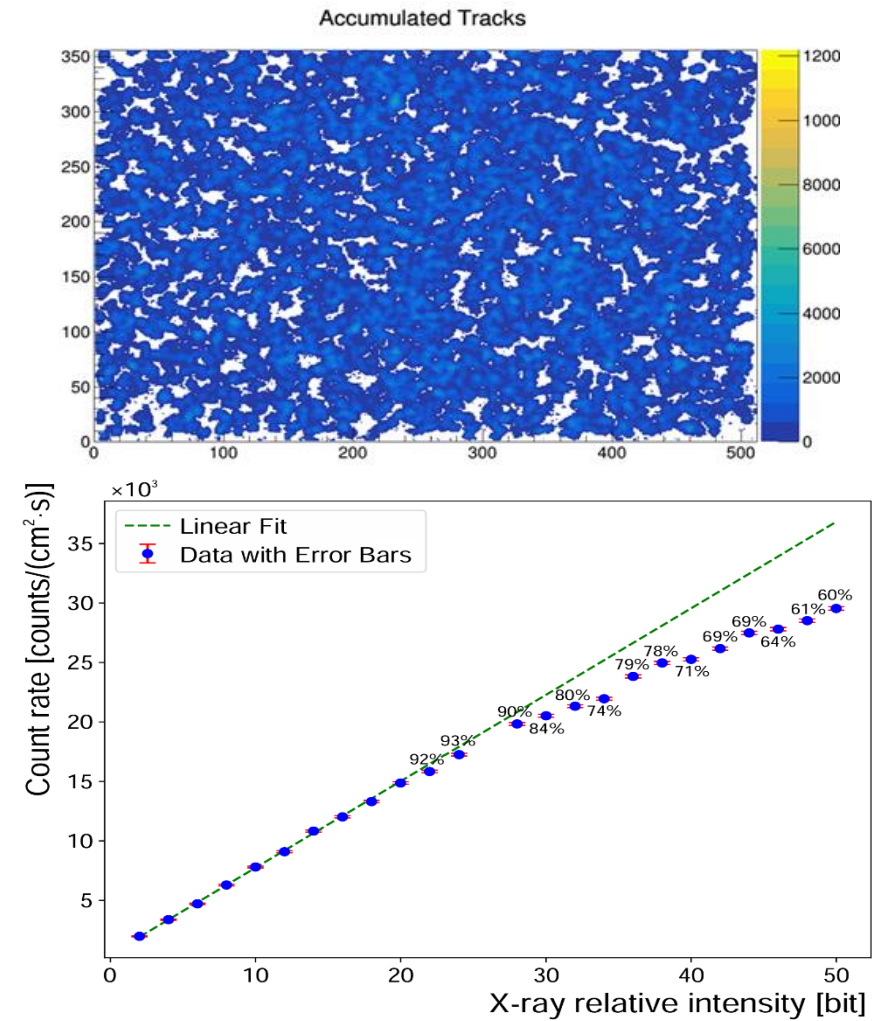


探测器对单能偏振X射线的调制曲线图

探测器对应的调制因子



位置分辨率的测量结果



探测器对X射线测量的计数率极限

汇报内容

contents



一、背景

二、GMPD探测器

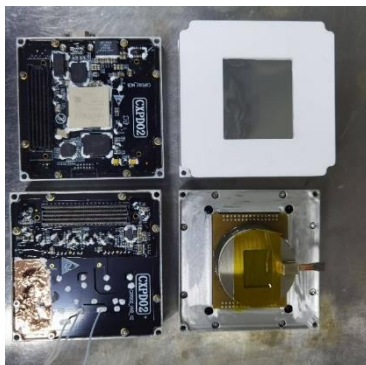
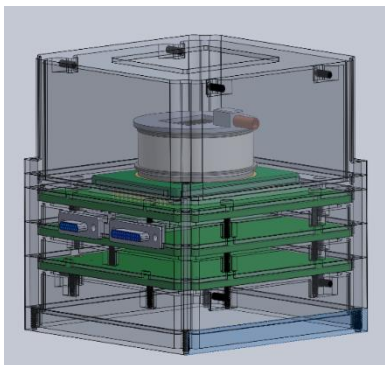
三、CXPB系列立方星

四、Migdal效应实验

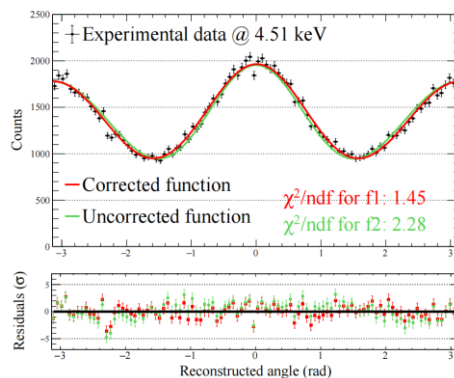
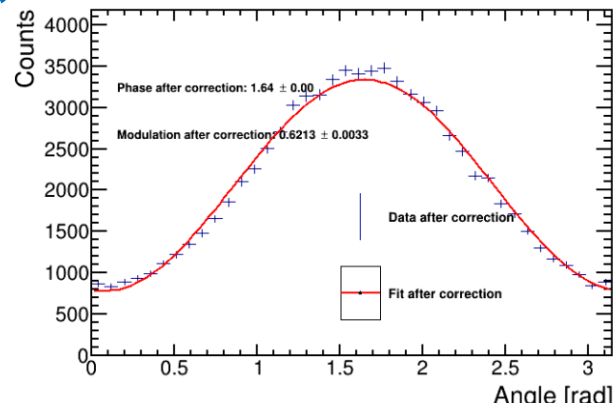
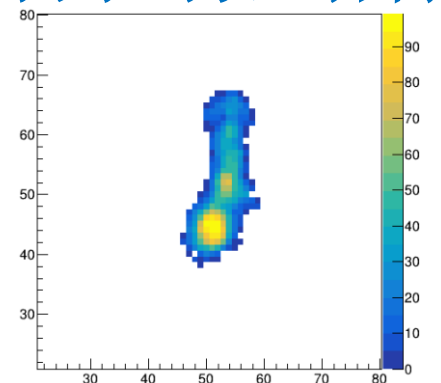
五、总结

系列CXPД立方星

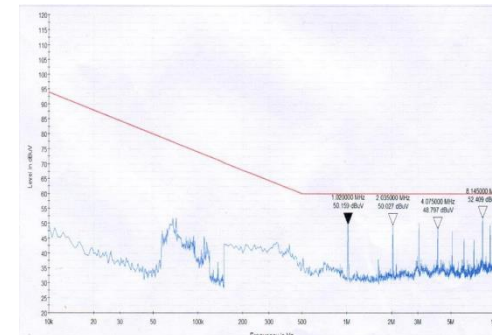
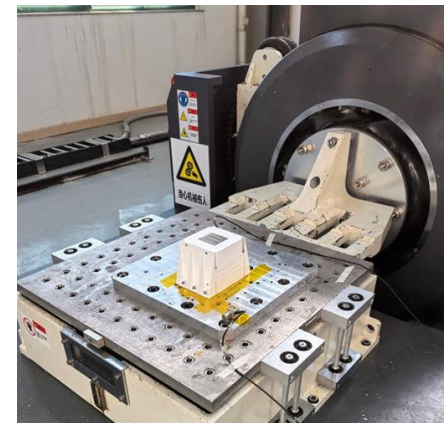
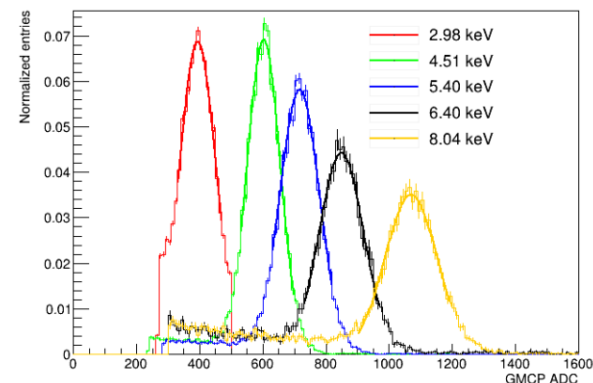
宇宙X射线偏振探测 (CXPД) 系列立方星研制



CXPД立方星组装



性能测试和标定



空间环境模拟试验

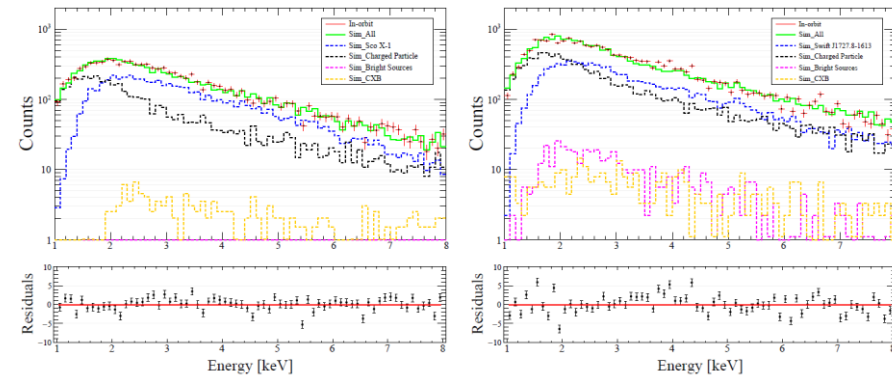
- 完成宇宙X射线偏振探测(CXPД)01/02/03/04立方星载荷的组装、性能测试和标定、环境试验。对6.4 keV的全偏X射线测量的调制因子为62.13%，能量分辨率为18.5%。

宇宙X射线合作组CXPB的首星成功在轨运行

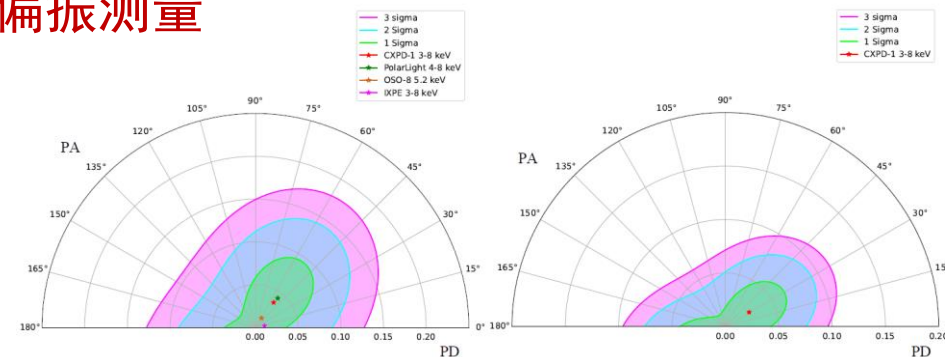
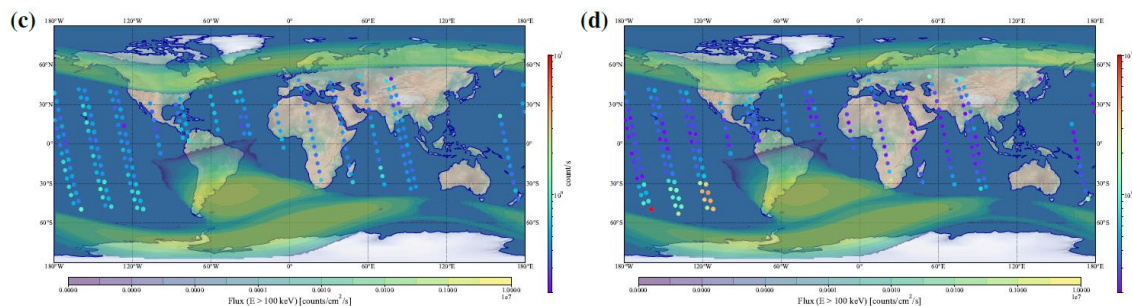
2023年6月9日, CXPB-01立方星成功发射



能谱测量

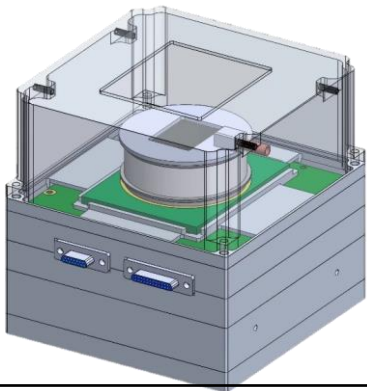


偏振测量

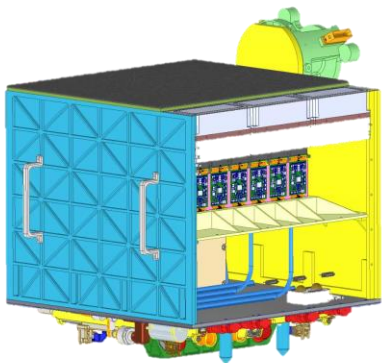
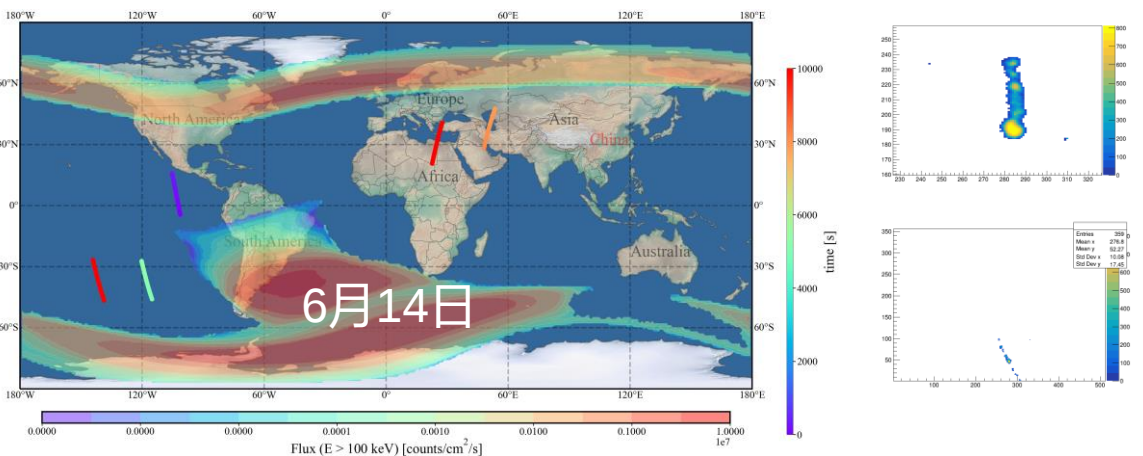


- 完成宽视场X射线偏振探测技术空间飞行验证。
- 并对Sco-X1和Swift J1727.8-1613两个天体源进行了科学观测。

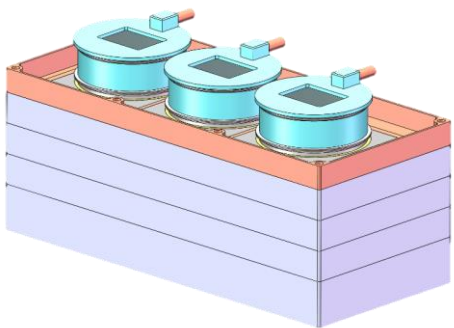
LPD全尺寸工程样机--CXPD-02星成功发射



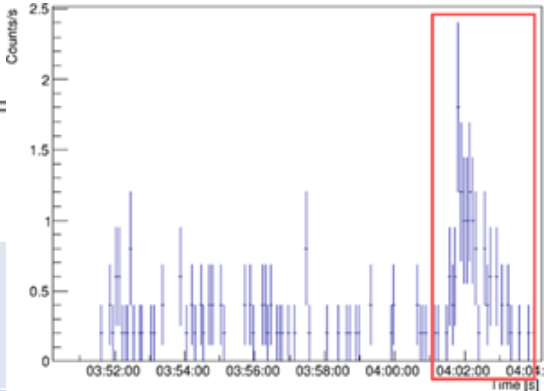
2025 年 5 月 17 日
CXPD-02 立 方 星
成功发射



低能偏振探测器 (LPD)



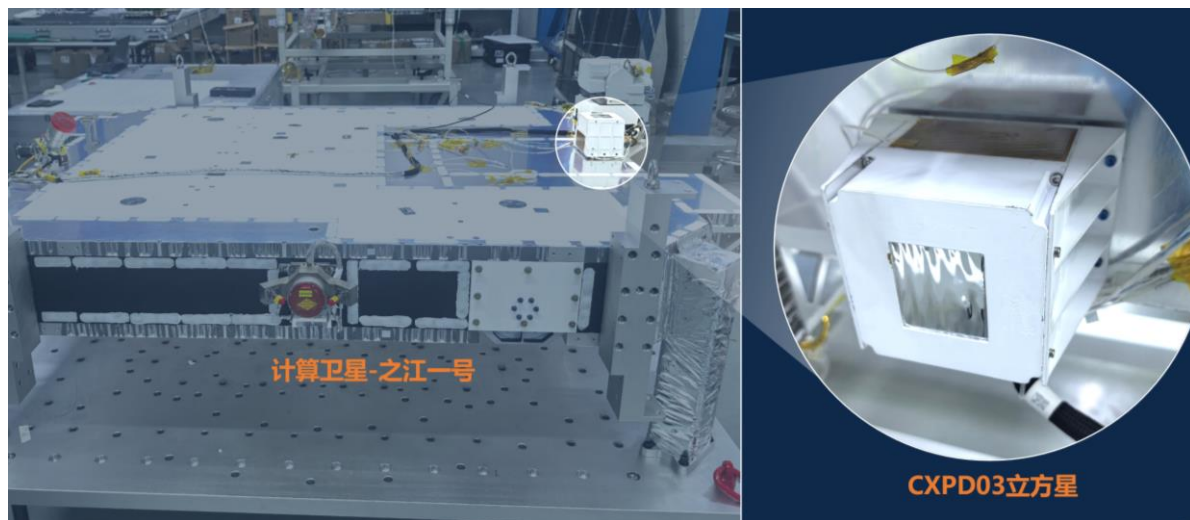
GRB 事件	T0 时间	事件坐标 (RA,Dec)	探测器指向 (RA,Dec)	观测夹 角	CXPD 工作 时 间	GCN 链接
GRB 251014C	2025-10-14 20:45:58	133.36,14.24	83.63,22.01	47.69°	20:44-20:52	circulars/42272
GRB 250806A	2025-08-06 07:58:14	348.42,1.38	16.04,-31.29	41.9°	07:53-08:01	circulars/41243
GRB 250728A	2025-07-28 09:25:45	260.94,16.20	231.58,56.03	45.7		



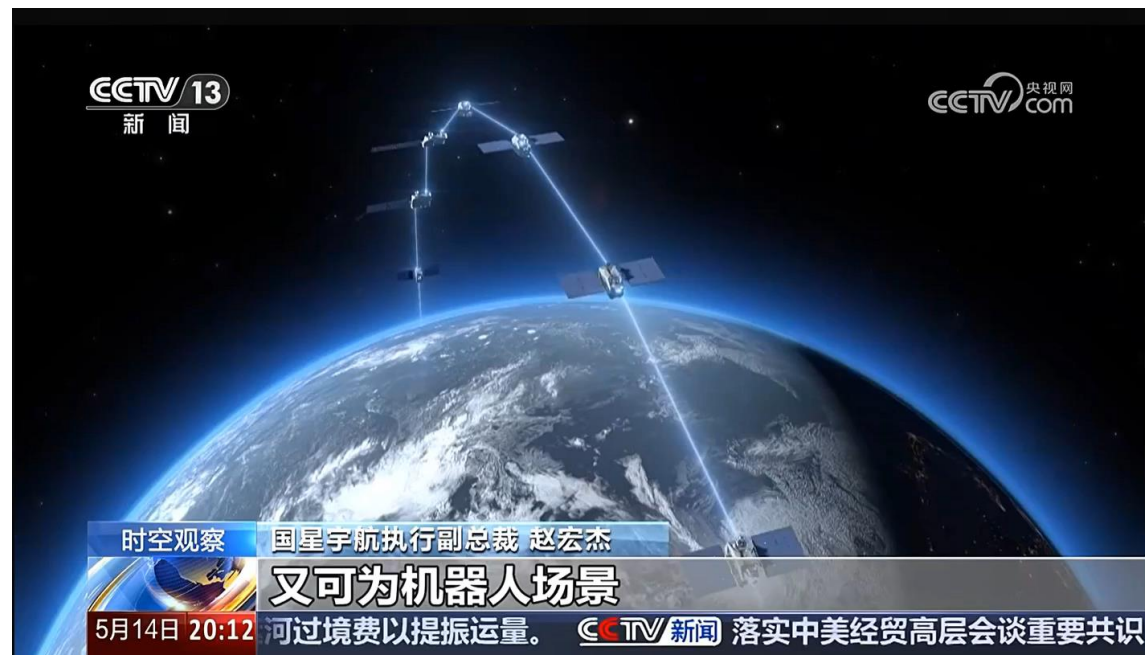
中国空间站POLAR-2项目**低能偏振探测器 (LPD)**的全尺寸工程样机，
将在国际上首次采用宽视场设计方案对GRB暂现源开展X射线偏振观测。

AI智能体伽马暴偏振观测星座--CXPD03、04立方星成功发射

CXPD03、CXPD04立方星作为“三体计算星座”首发星座的科学载荷。



X射线偏振探测器+天基天文大模型部署在计算卫星上，开辟GRB瞬变源观测新模式



AI智能体识别

利用伽马暴AI智能体对观测数据在轨实时分析，产出GRB触发

星间即时通信

通过星间通信，调用多星进行协同观测

汇报内容

contents



一、背景

二、GMPD探测器

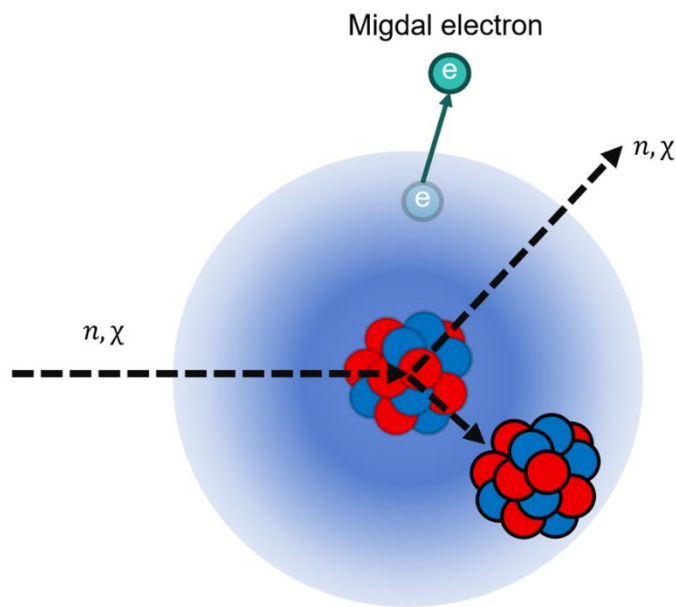
三、CXPD系列立方星

四、Migdal效应实验

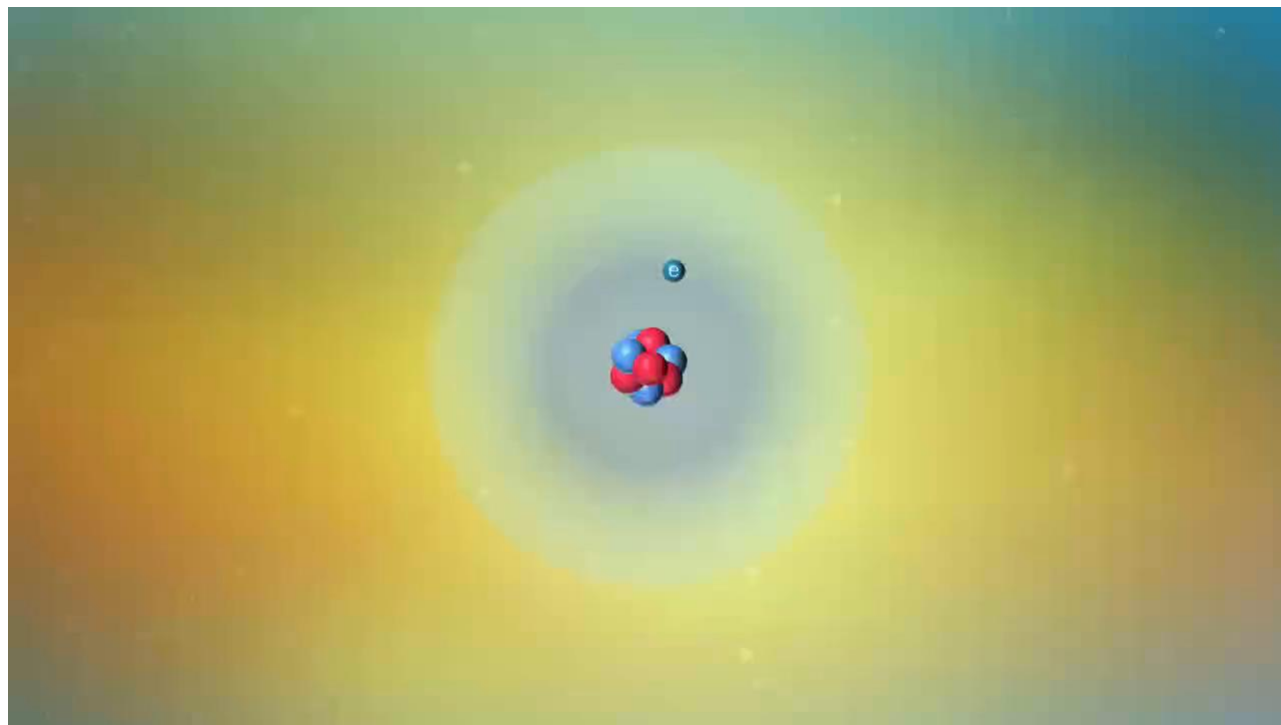
五、总结

Migdal效应

Migdal效应（又称**米格达尔效应**）是一个量子力学现象，描述的是当原子核因碰撞等原因突然加速时，核外电子有一定概率被“震”出来的过程。



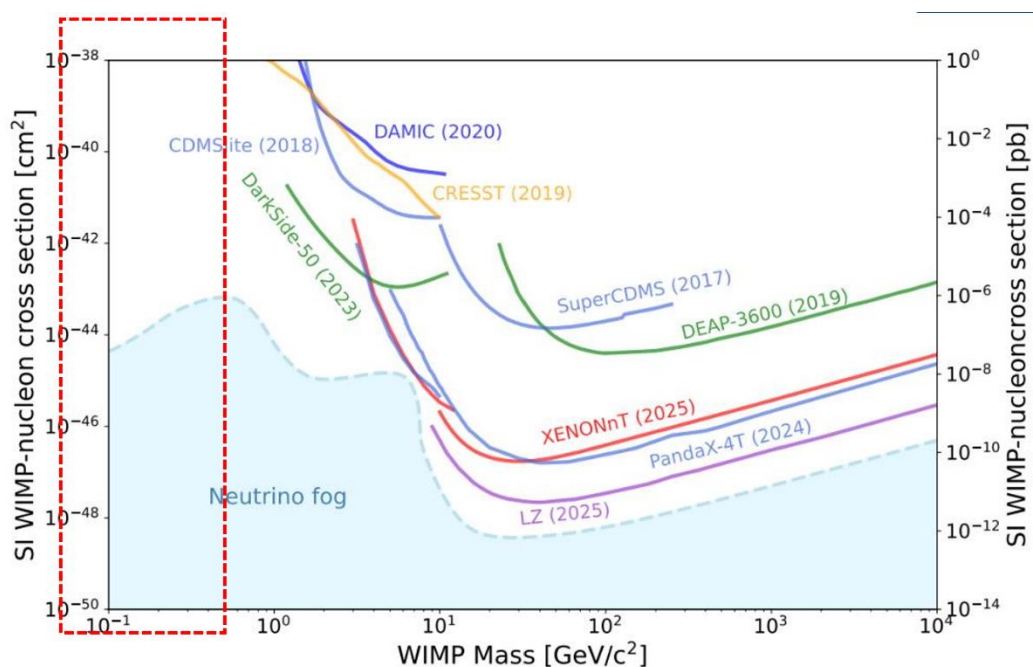
这个效应最初由苏联物理学家阿尔卡季·米格达尔（Arkady Migdal）于1939年通过量子力学计算预言。



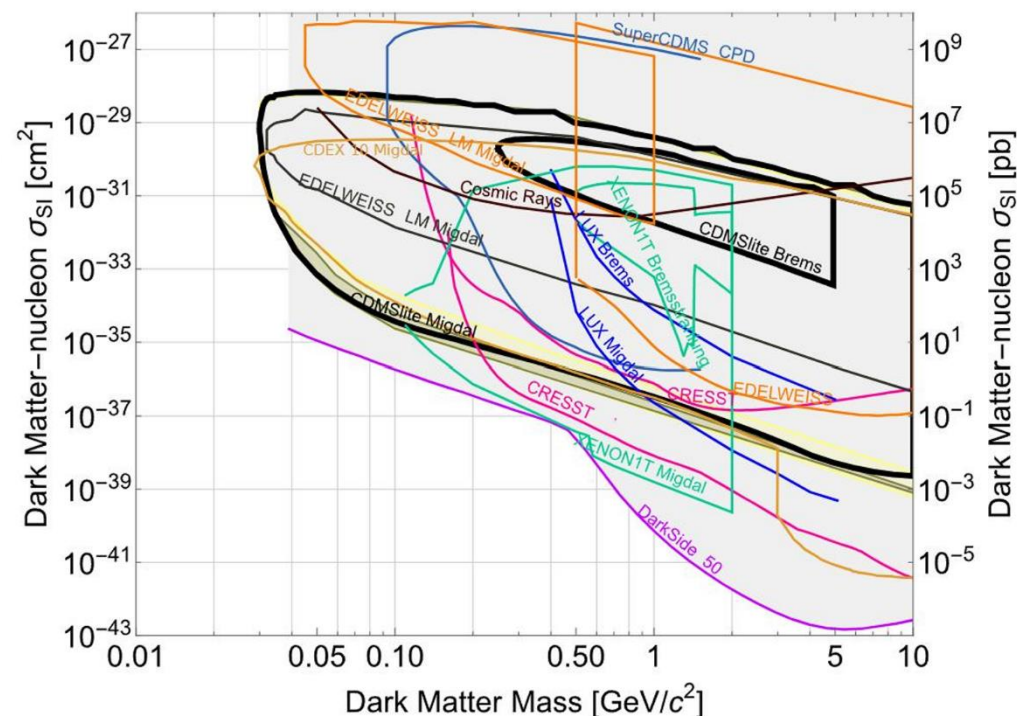
Migdal效应之所以重要，**主要在于它为探测轻质暗物质提供了全新可能。**

Migdal效应

Migdal效应的优势：将原本难以探测的微弱核反冲信号，转化为可以被探测器清晰捕捉的电子信号。这能大幅提升对轻暗物质的探测灵敏度。

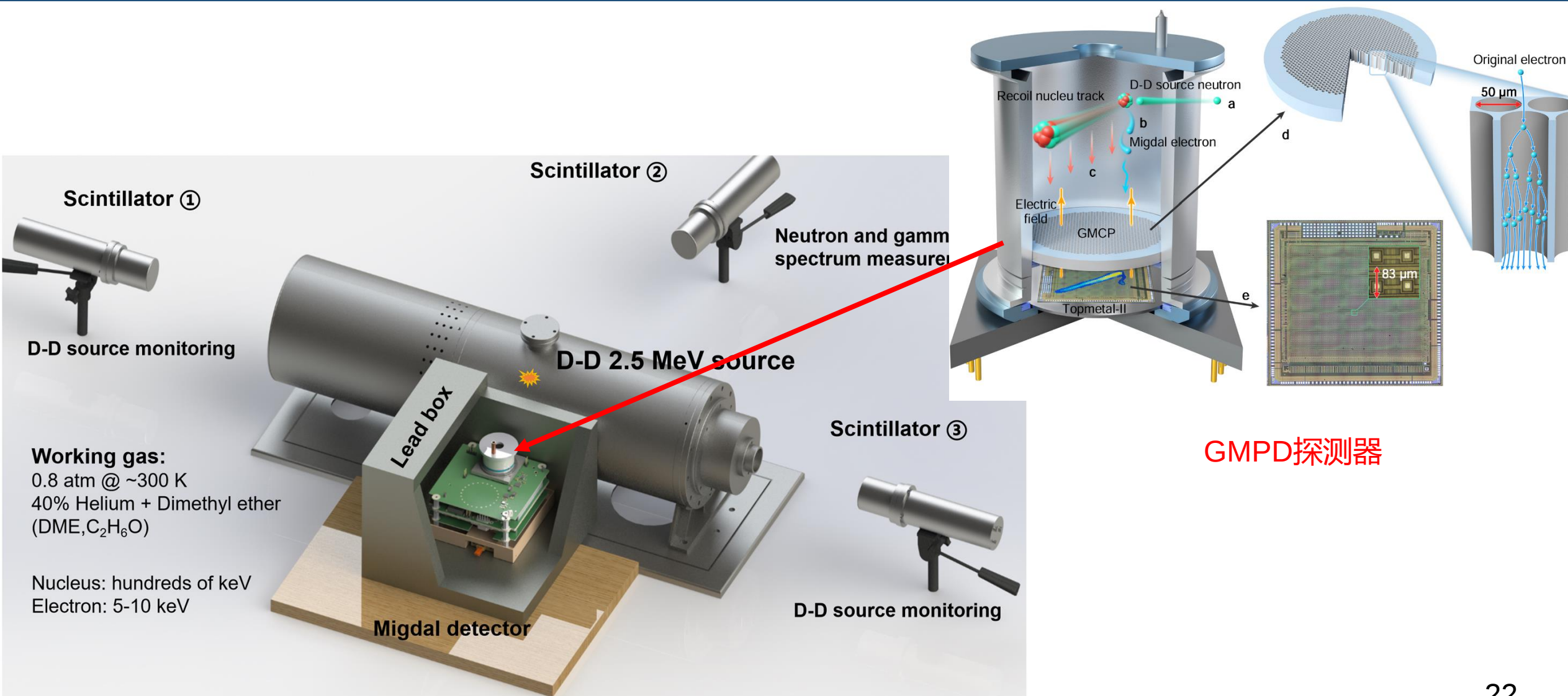


自旋无关暗物质-核子散射截面测量上限结果

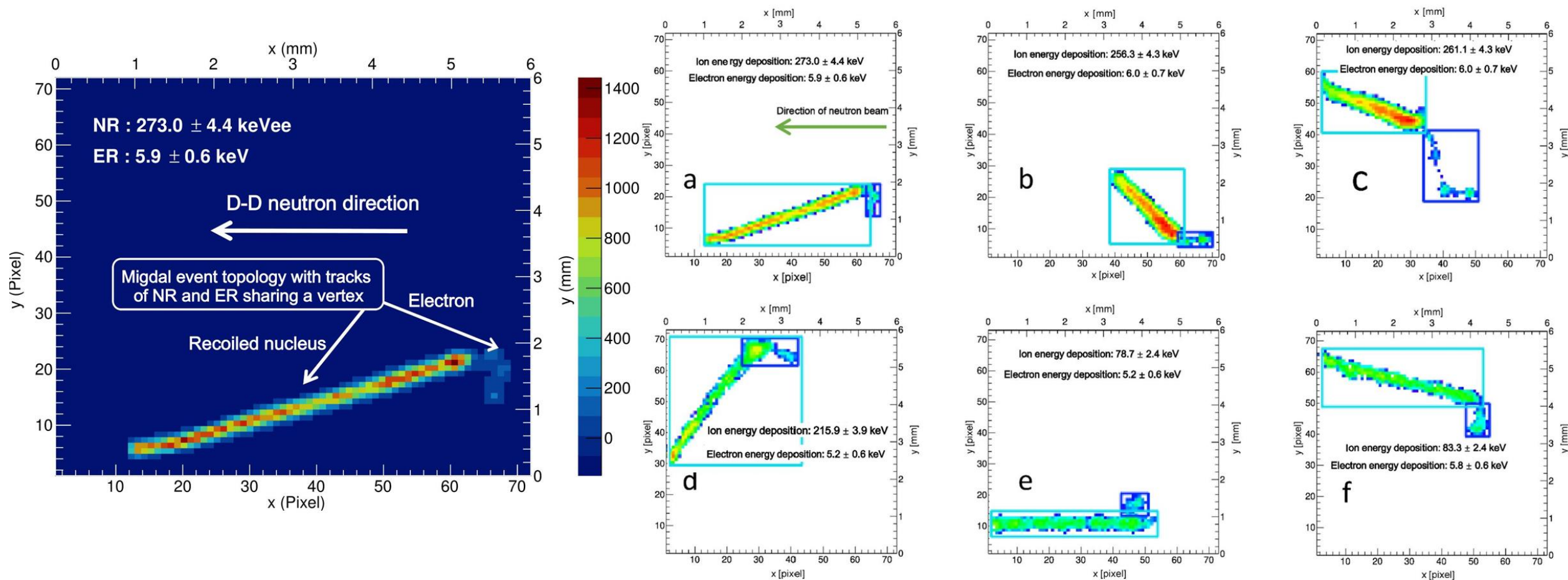


自旋无关的亚GeV直接探测下，Migdal非弹性暗物质搜索的结果

Migdal 效应实验方案



Migdal 效应的事件



原子核与电子从同一点出发的“共顶点”轨迹，从而直接证实了Migdal效应。

- 面向伽马暴等暂现源的X射线偏振探测的需求，设计了气体微通道板像素探测器（GMPD），用于宽视场X射线偏振巡天观测。
- 完成了大面积GMPD的研制和性能测试研究。
- 基于GMPD，研发了系列CXPDP立方星载荷，完成了宽视场X射线偏振巡天观测技术的在轨验证。实现Sco-X1和Swift J1727.8-1613两个天体源的科学观测。结合AI智能体，开辟暂现原观测的新模式。
- 利用自主研制的高精度气体微通道板像素探测器，首次在实验上直接观测到Migdal效应，为轻暗物质探测提供了新的技术路径与实验支撑。



廣西大學
GUANGXI UNIVERSITY



中國科學院大學
University of Chinese Academy of Sciences



中國建築材料科學研究總院有限公司
China Building Materials Academy Co., Ltd.

X射线偏振仪器与科学研讨会暨空间X射线偏振探测CXPD合作组会 2023. 08. 12



2023.8 第5届，广西大学



廣西大學
GUANGXI UNIVERSITY

谢谢!