



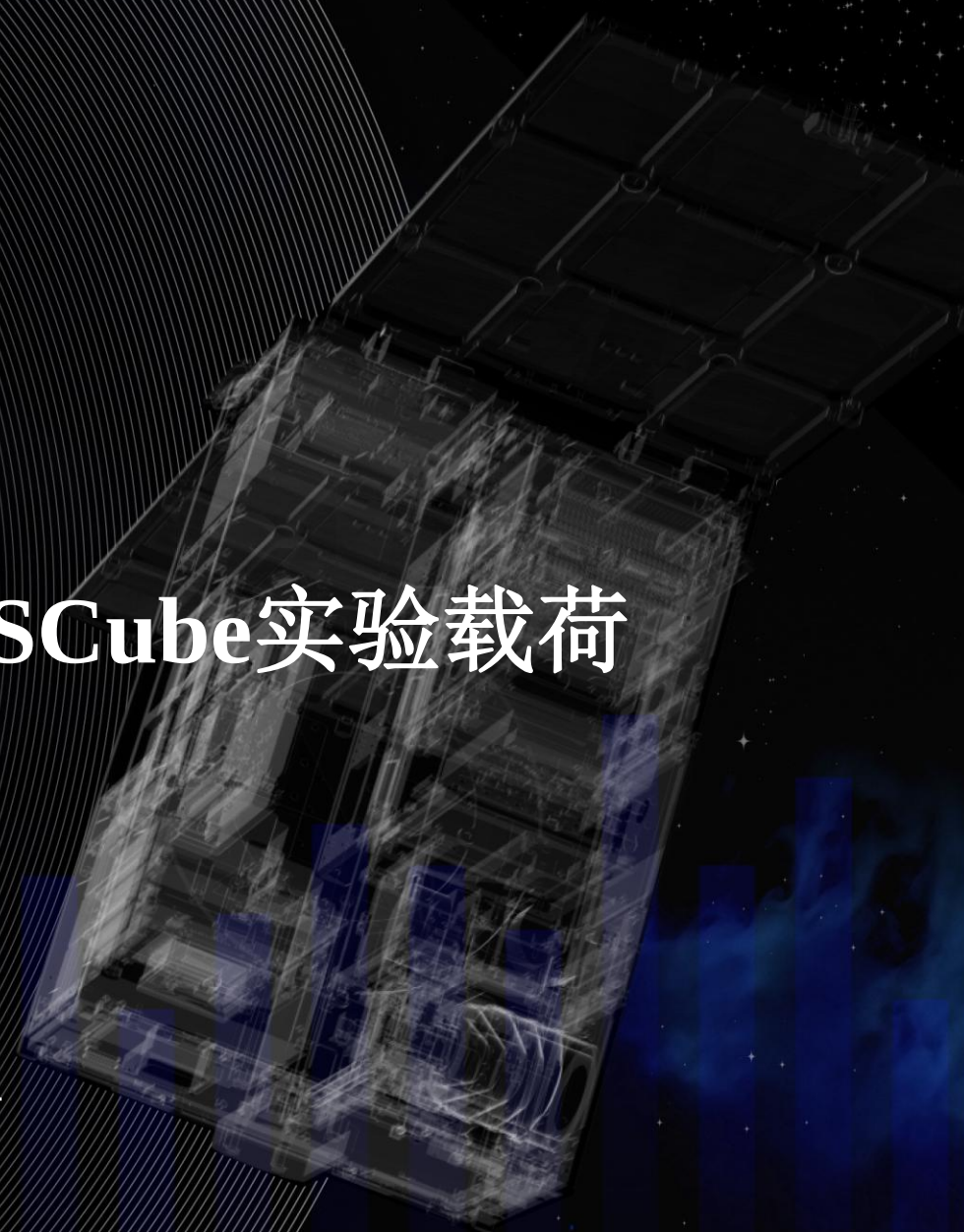
**THU** Gamma Ray  
Integrated Detectors

# 针对MeV核天体物理谱线的 下一代软伽马空间探测技术与MASSCube实验载荷

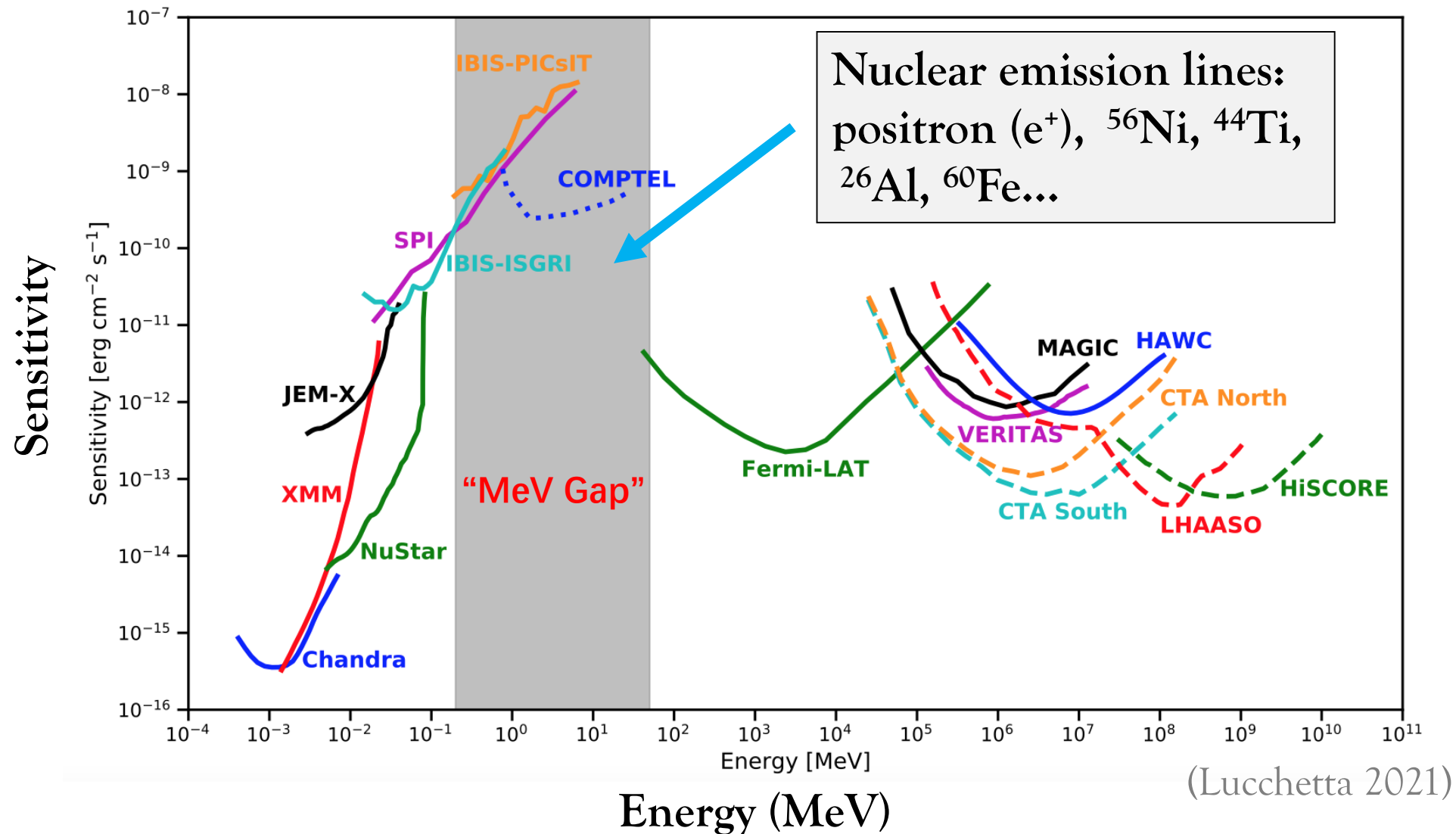
曾鸣, 李玉兰, 郑煦韬, 朱佳欢, 常昊  
冯骅, 王夕露

清华大学  
中科院高能所

2026.08.10 · 第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会 (NED2026) · 登封

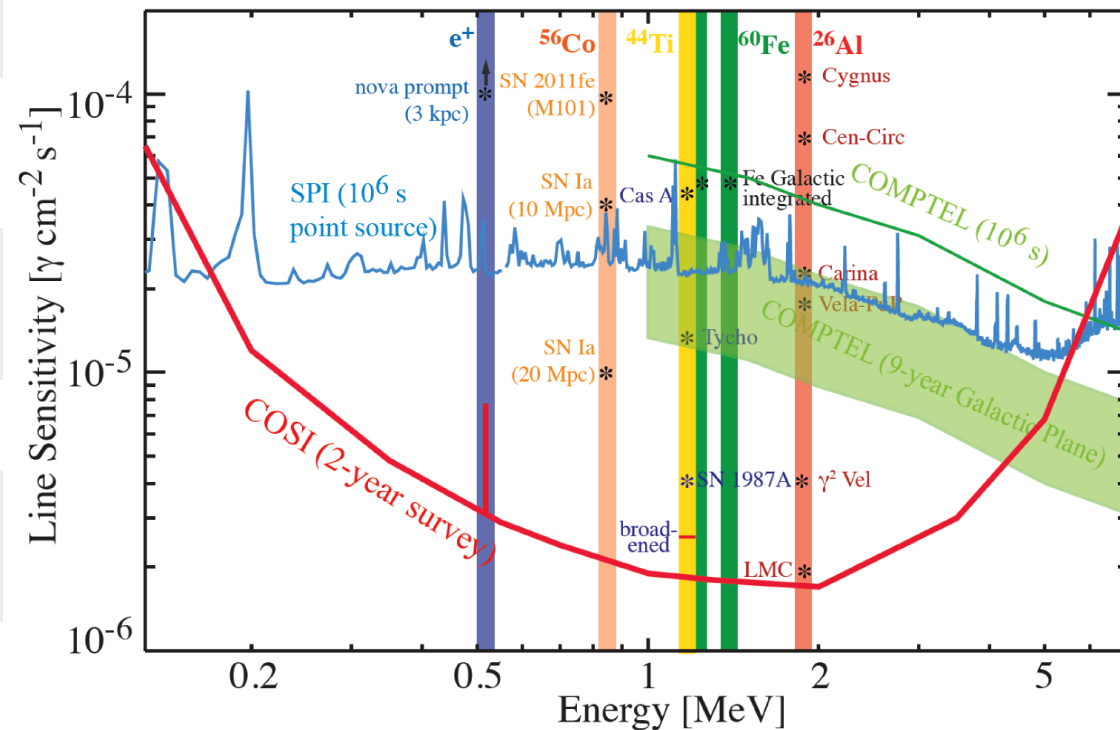


# MeV 伽玛射线天文学与 “MeV Gap”



# MeV 能段 - 丰富的谱线

| 核素               | 起源                               | 衰变过程                                                           | 半衰期                 | 特征 $\gamma$ 射线能量(keV) |
|------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| $^7\text{Be}$    | 新星                               | $^7\text{Be} \xrightarrow{\epsilon} ^7\text{Li}^*$             | 53.2 d              | 478                   |
| $^{56}\text{Ni}$ | Ia型超新星,<br>核坍缩超新星                | $^{56}\text{Ni} \xrightarrow{\epsilon} ^{56}\text{Co}^*$       | 6.075 d             | 158, 812              |
|                  |                                  | $^{56}\text{Co} \xrightarrow{\epsilon(0.81)} ^{56}\text{Fe}^*$ | 77.2 d              | 847, 1238             |
| $^{57}\text{Ni}$ | Ia型超新星,<br>核坍缩超新星                | $^{57}\text{Ni} \xrightarrow{\epsilon(0.56)} ^{57}\text{Co}^*$ | 1.48 d              | 1378                  |
|                  |                                  | $^{57}\text{Co} \xrightarrow{\epsilon} ^{57}\text{Fe}^*$       | 272 d               | 122, 136              |
| $^{22}\text{Na}$ | 新星                               | $^{22}\text{Na} \xrightarrow{\beta^+(0.90)} ^{22}\text{Ne}^*$  | 2.6 y               | 1275                  |
| $^{44}\text{Ti}$ | 核坍缩超新星,<br>Ia型超新星                | $^{44}\text{Ti} \xrightarrow{\epsilon} ^{44}\text{Sc}^*$       | 60 y                | 68, 78                |
|                  |                                  | $^{44}\text{Sc} \xrightarrow{\beta^+(0.94)} ^{44}\text{Ca}^*$  | 3.97 h              | 1157                  |
| $^{26}\text{Al}$ | 核坍缩超新星,<br>沃尔夫-拉叶星,<br>渐进巨星支, 新星 | $^{26}\text{Al} \xrightarrow{\beta^+(0.82)} ^{26}\text{Mg}^*$  | $7.2 \times 10^5$ y | 1809                  |
| $^{60}\text{Fe}$ | 核坍缩超新星                           | $^{60}\text{Fe} \xrightarrow{\beta^-} ^{60}\text{Co}^*$        | $2.6 \times 10^6$ y | 59                    |
|                  |                                  | $^{60}\text{Co} \xrightarrow{\beta^-} ^{60}\text{Ni}^*$        | 5.27 y              | 1173, 1332            |

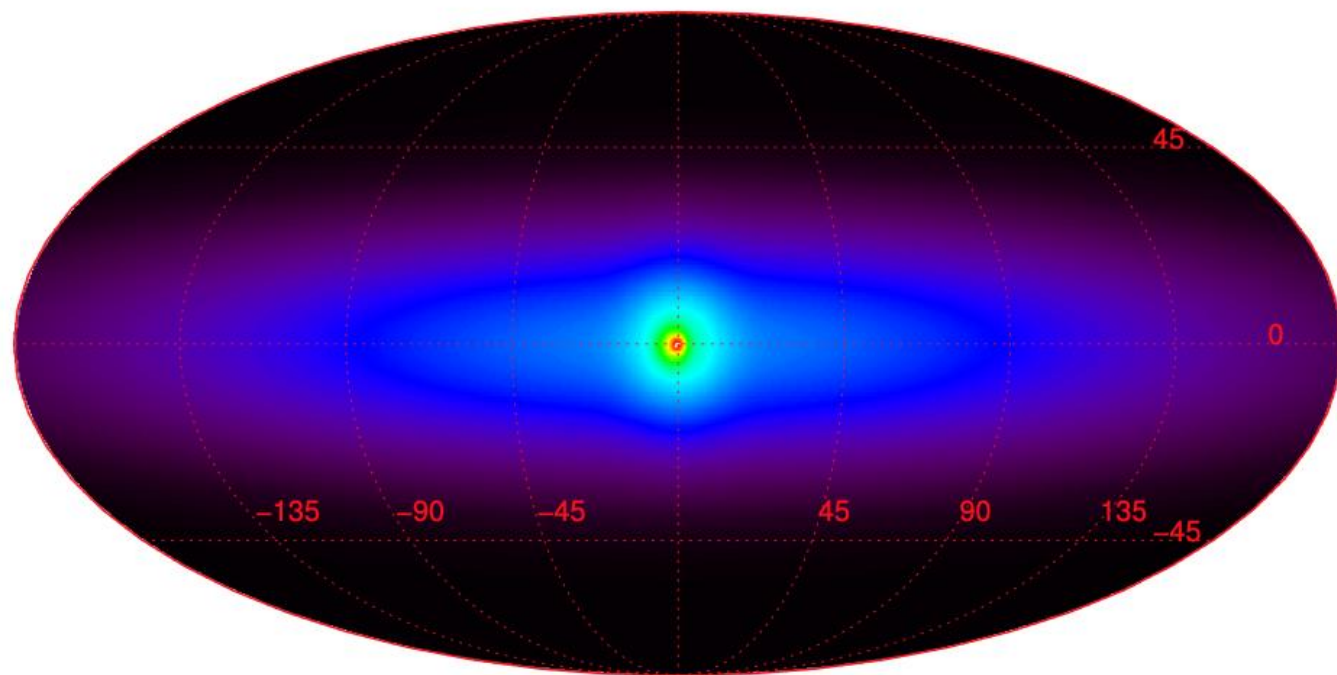


Tomsick et al. 2019

Adapted from A. De Angelis et al. 2018

# 科学问题：511 keV 正负电子湮灭线

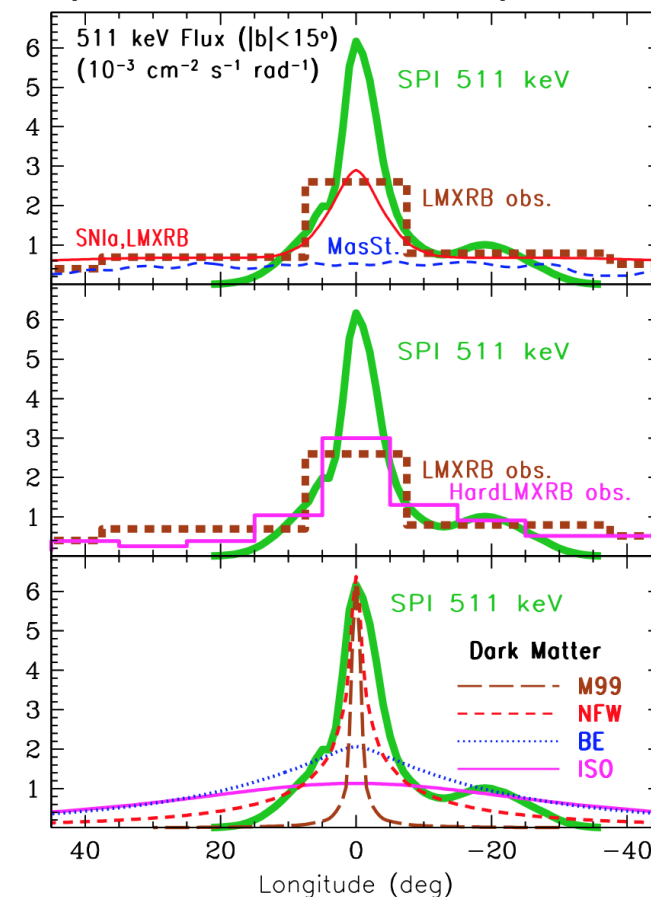
INTEGRAL/SPI 11-year 511 keV map (Siegert et al. 2016)



- Bulge-to-disk 光度比 =  $1.0 \pm 0.1$

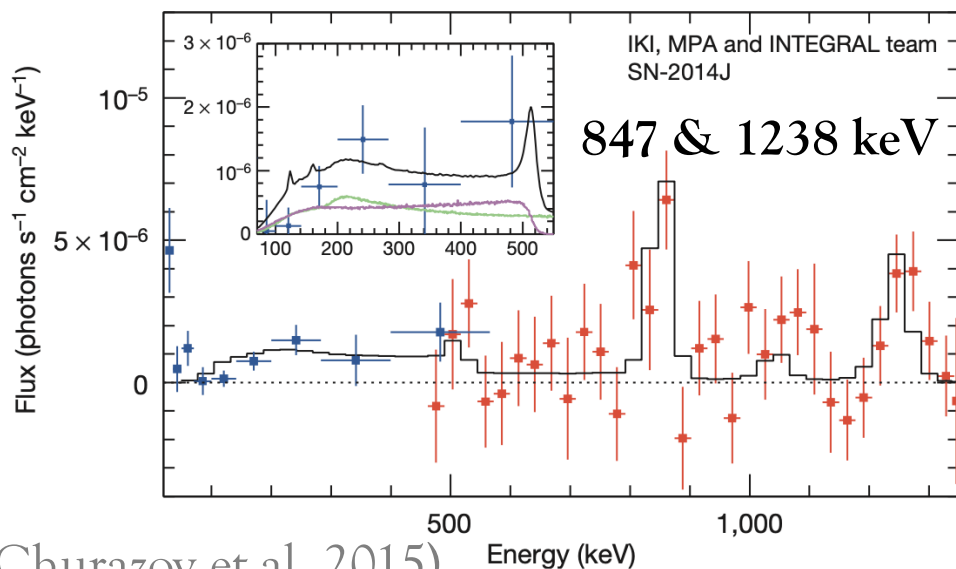
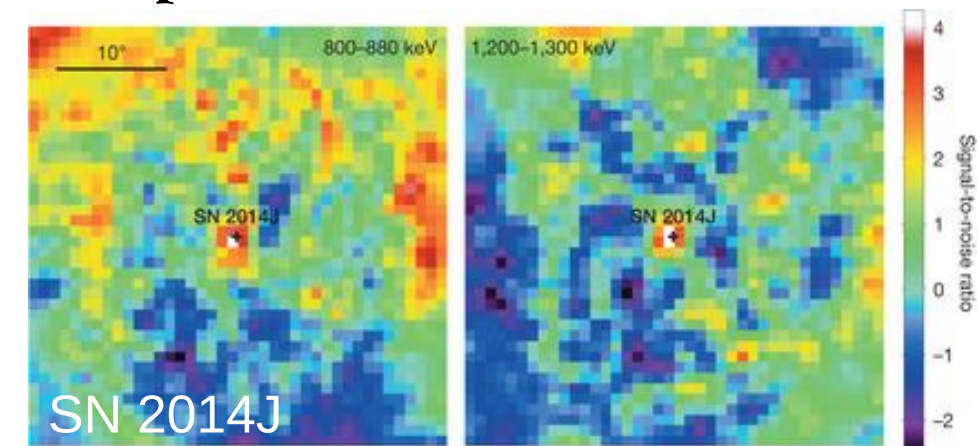
银心正电子的起源？天体物理？暗物质？

(Prantzos et al. 2011)

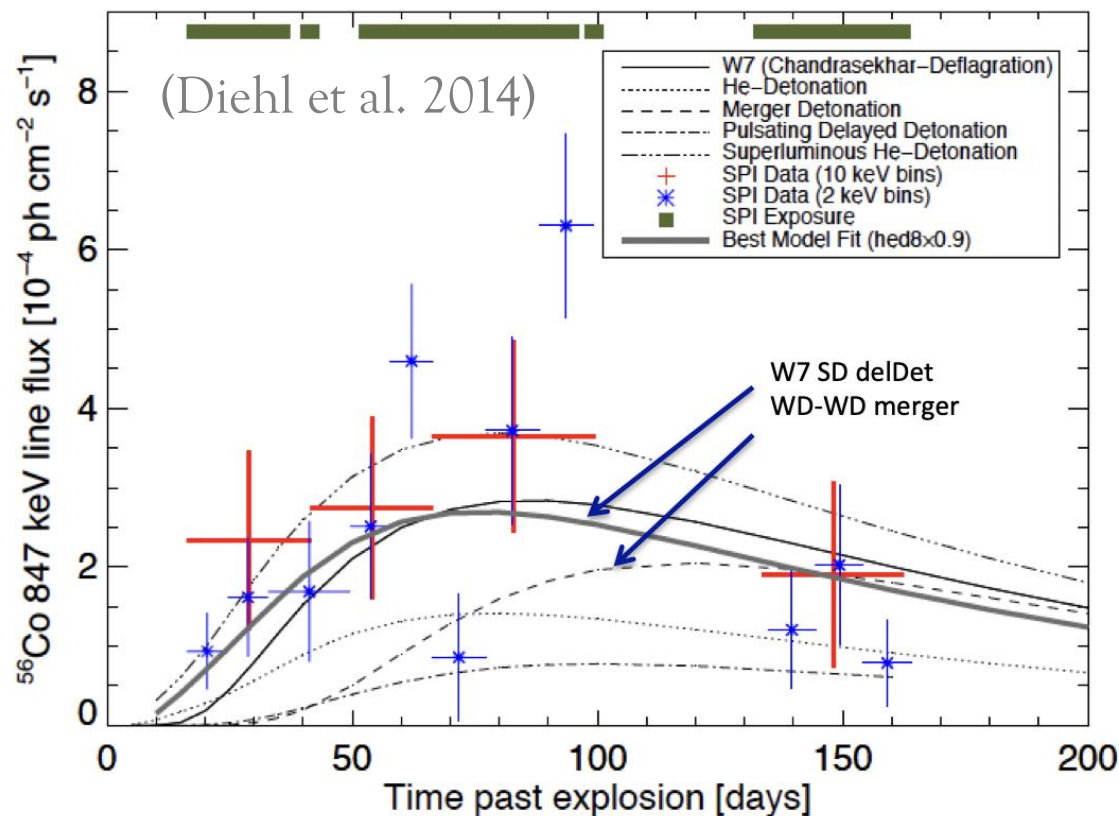


# 科学问题：银河系核合成与超新星衰变谱线

- Ia Supernovae ( $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ )



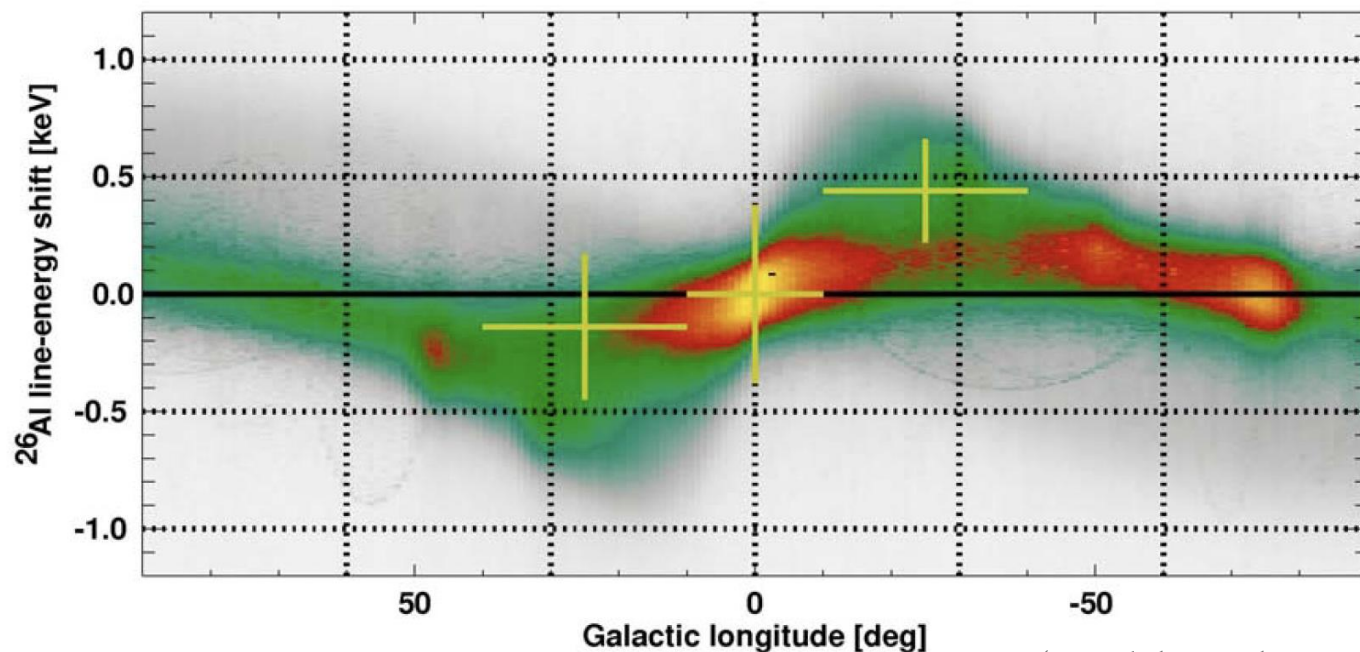
(Churazov et al. 2015)



- 不同的前身星和爆炸模型

# 科学问题：银河系核合成与超新星衰变谱线

- Origin of  $^{26}\text{Al}$  ( $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}$ , 1.809 MeV)
  - Supernova
  - Stellar wind



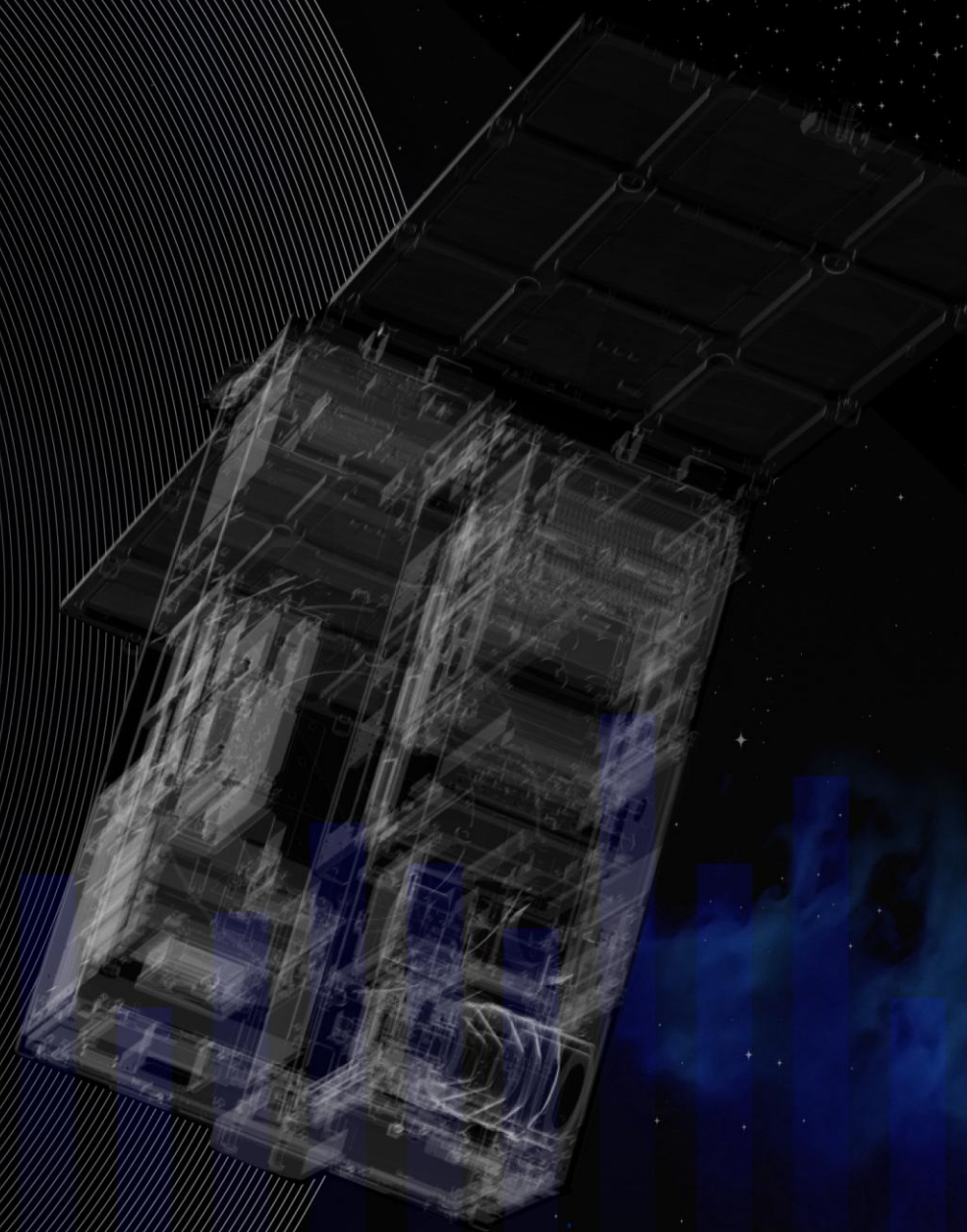
(Diehl et al. 2006)

- $^{26}\text{Al}$ 的起源与银盘上的大质量恒星相关
- $^{26}\text{Al}$ 可以起源于超新星爆发过程，也可能产生于大质量恒星的星风
- 结合对  $^{60}\text{Fe}$ 的观测，区分 $^{26}\text{Al}$ 的不同物理起源

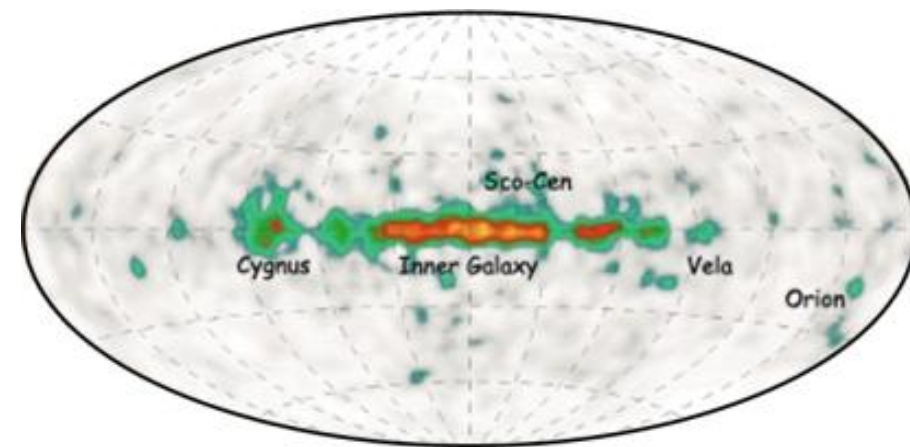
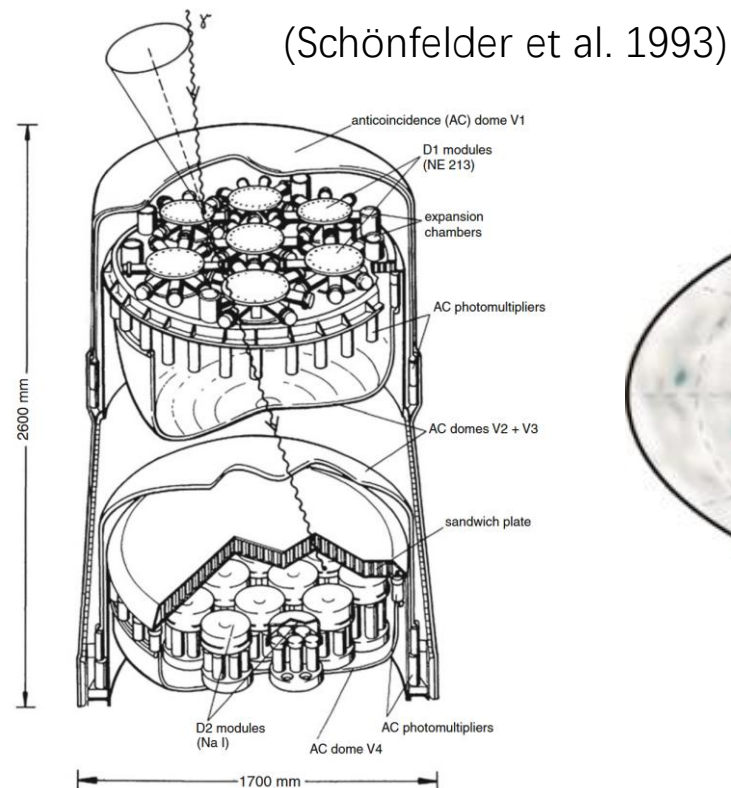


**THU** Gamma Ray  
Integrated Detectors

# 历史：MeV 成像与谱线的空间任务



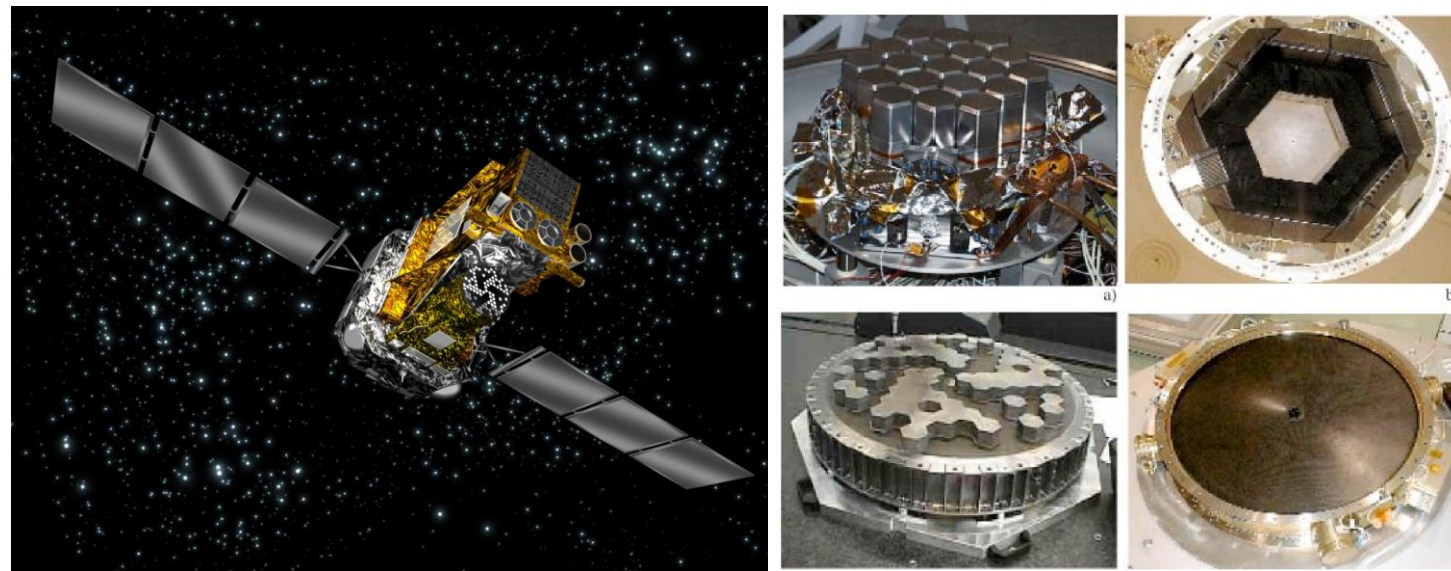
# MeV 空间望远镜：COMPTEL 的开创与局限



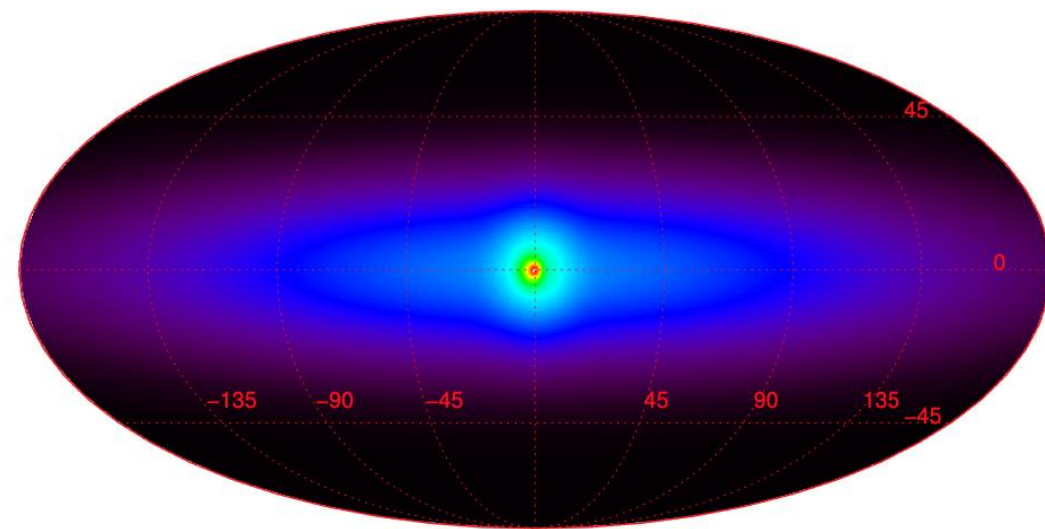
(Diehl et al. 1995)

- 1991至2000年，NASA旗舰级伽马射线天文台，首个成功在轨运行的康普顿望远镜
- 首次对1809 keV谱线全天成像，证明 $^{26}\text{Al}$ 主要来自大质量恒星及其超新星爆发
- 受时代与技术条件限制，使用 液闪 + NaI 技术方案

# 高能空间天文台：INTEGRAL 的贡献与瓶颈



(Vedrenne et al. 2003)



(Siegert et al. 2016)

- 欧空局ESA中型卫星任务，2025年刚刚退役
- 对银河系511 keV正电子湮灭线进行了长达11年的成像观测，但观测结果的银心正电子起源问题仍待解决
- 采用了高纯锗探测器，能量分辨率极佳，开展了谱线多普勒展宽与星系运动学研究
- 采用编码孔径成像方法，对暗弱源、弥散源观测并非长项，有待其他直接成像手段补充

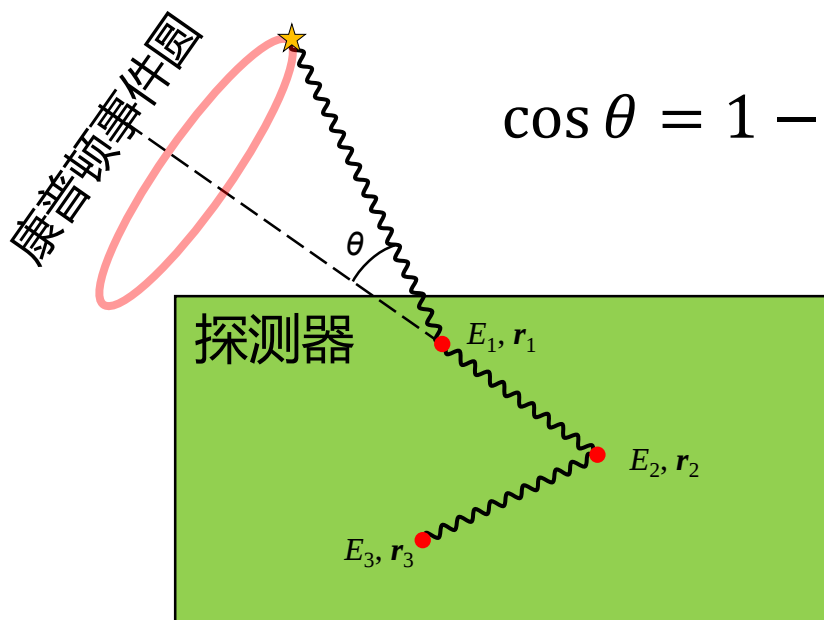
# MeV谱线观测新需求

- 谱线观测
- 高分辨率直接成像
- 高灵敏度

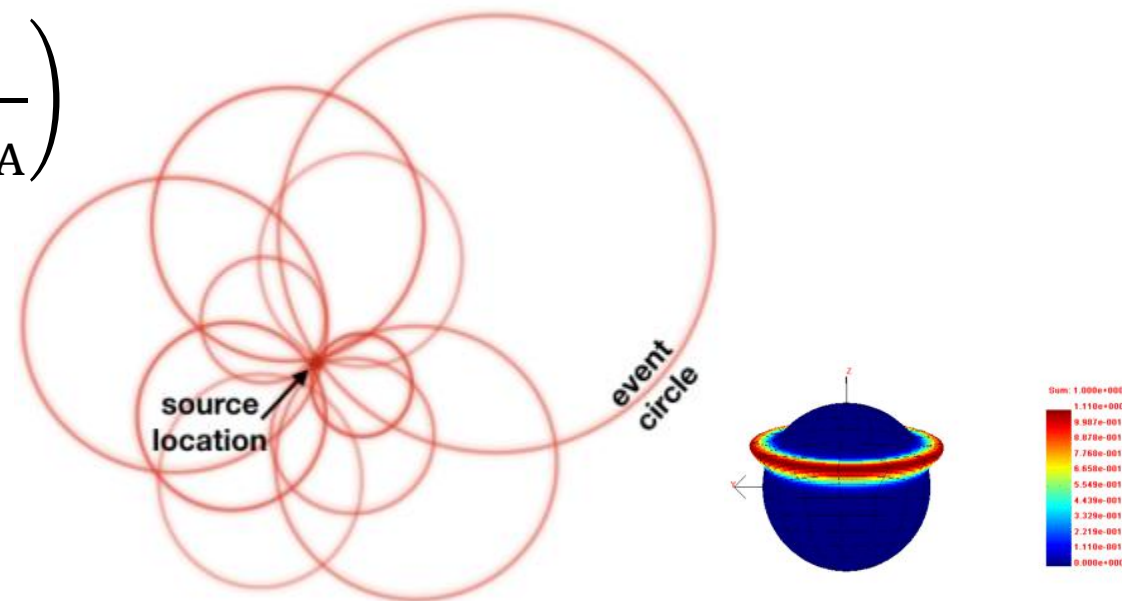
## 康普顿成像谱仪

- ✓ 高能量分辨率
- ✓ 三维高位置分辨
- ✓ 大面积

FWHM/E < 1% @ ~MeV  
康普顿成像ARM ~ 角度  
灵敏度 ~  $10^{-5} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$$\cos \theta = 1 - m_0 c^2 \left( \frac{1}{E_A} - \frac{1}{E_S + E_A} \right)$$



# 新一代项目提案

共识：2030年前的“窗口期”

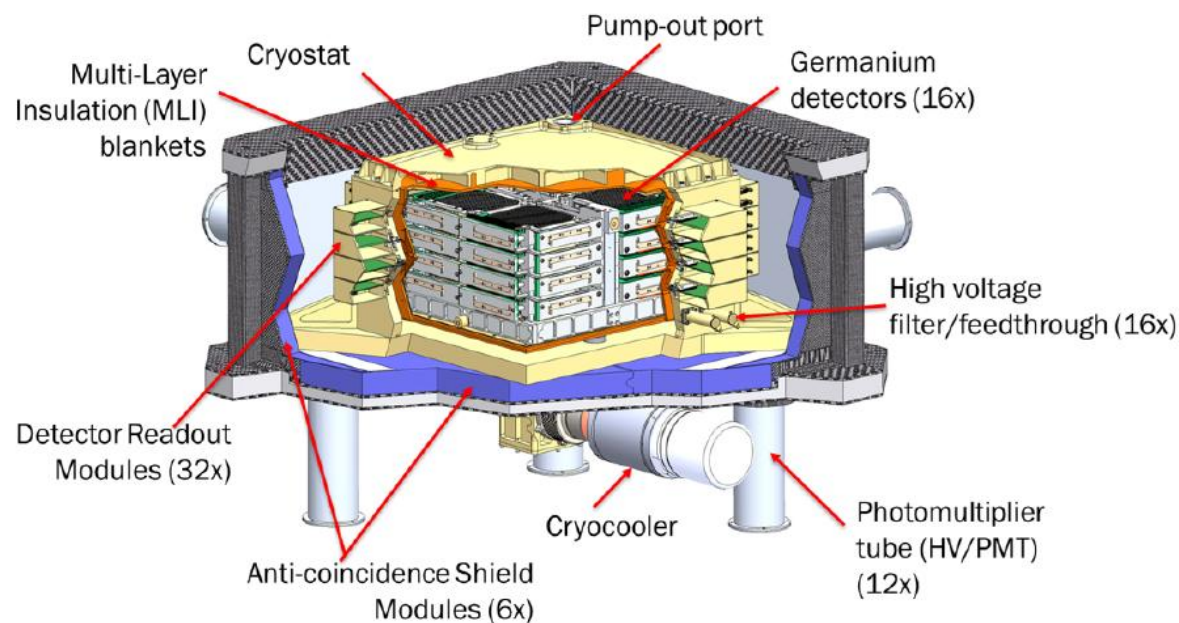
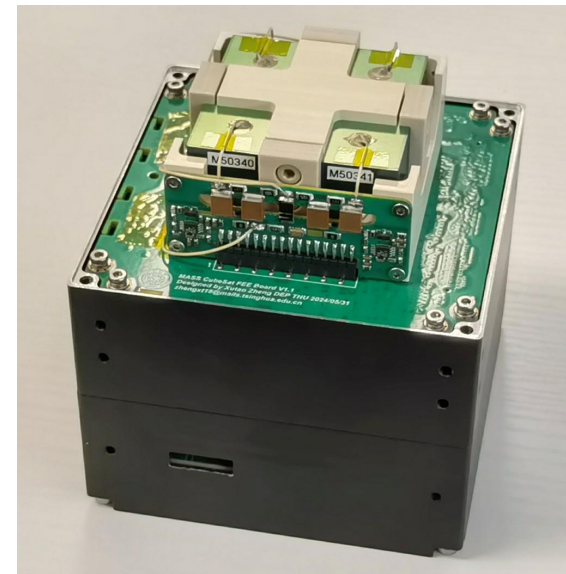
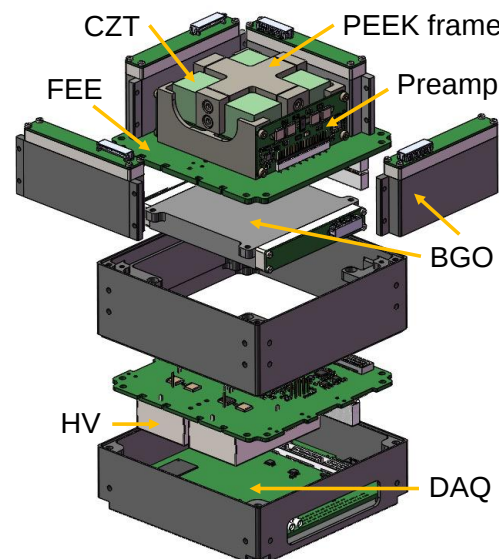


Figure 4: Cutaway view of the COSI instrument. Each germanium detector is  $8 \times 8 \times 1.5 \text{ cm}^3$ . The BGO shield box is  $42 \times 46 \times 20 \text{ cm}^3$ .

**COSI 小卫星项目 (\$145,000,000)**

**NASA以Small Explorer (SMEX)支持, 预计2027年发射**

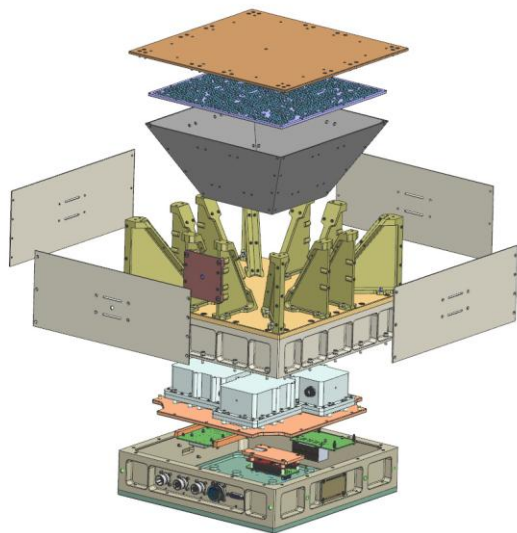
**核心技术: 高纯锗探测器 (工作温度低于零下193°C)**



- **MASS 室温、微纳、星座——与 COSI 互补的差异技术路线**
- **凝聚同行的科学团队**

- 白雪宁 (清华)、葛明玉 (高能所)、纪龙 (中山)、李剑 (科大)、谌阳平 (原子能院)、王伟 (武汉)、王夕露 (高能所)、杨睿智 (科大)、张彬彬 (南大)、张晋 (北理工)、张祥光 (新竹清华)
- 科学白皮书: MeV astrophysical spectroscopic surveyor (MASS): a compton telescope mission concept. Exp Astron 57, 2 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10686-024-09920-4>

# Compton telescope proposals based on (entirely) CZT

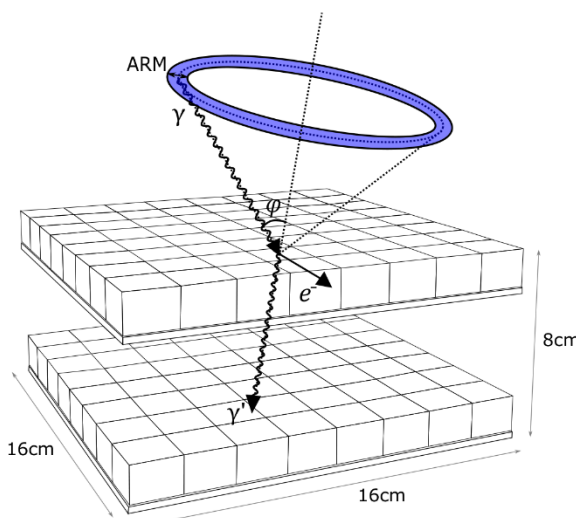


TERI (Shy et al. 2024)



## TERI

- Pixelated CZT (+ Coded Mask)
- Pixel pitch 1.72 mm
- 1.3% (FWHM) @662 keV
- **Launched to ISS on 2025.04.21**

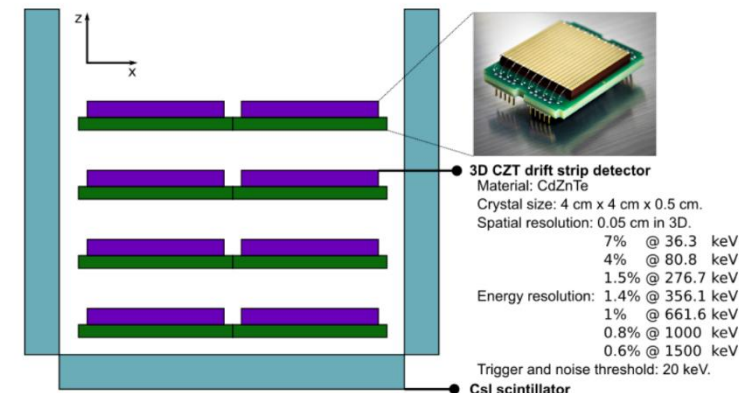


**MeVCube** concept design  
(Lucchetta et al. 2022)



## MeVCube

- Pixelated CZT
- Pixel pitch 2.45 mm
- 2.8% (FWHM) @662 keV
- 6U CubeSat concept



**DTU CubeSat proposal**  
(Owe et al. 2024)

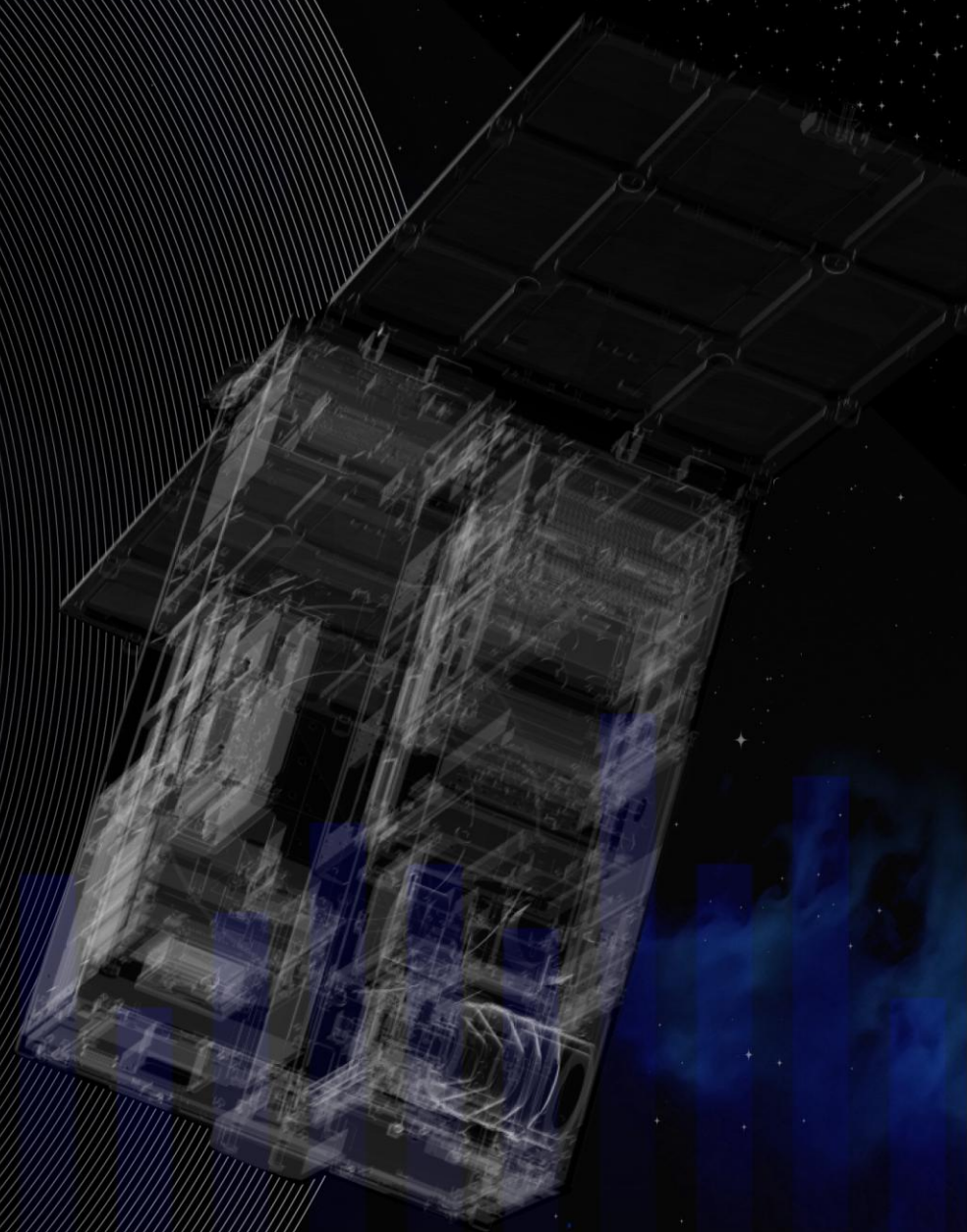


**HKU CubeSat proposal**  
(Kuijper et al. 2024)

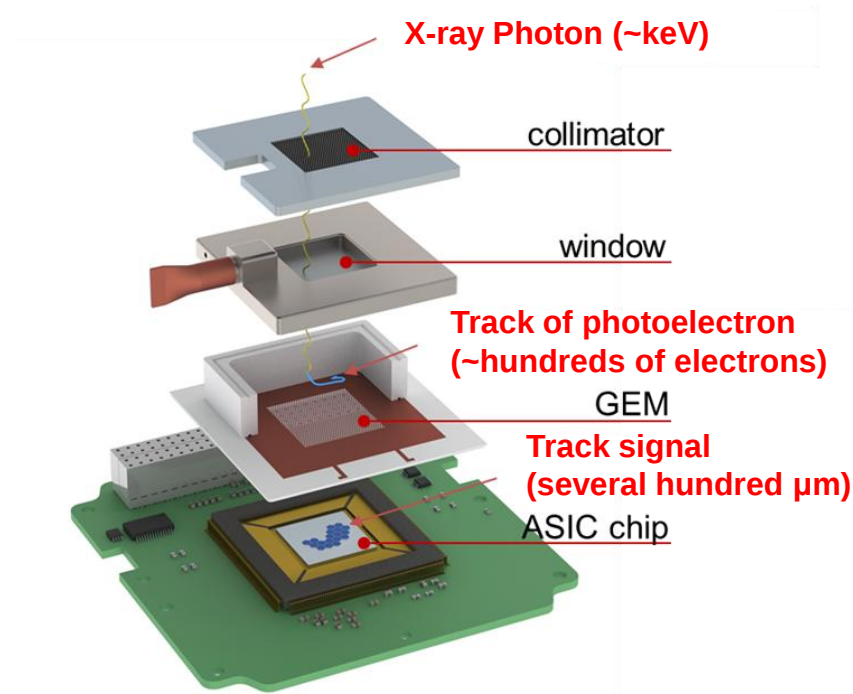
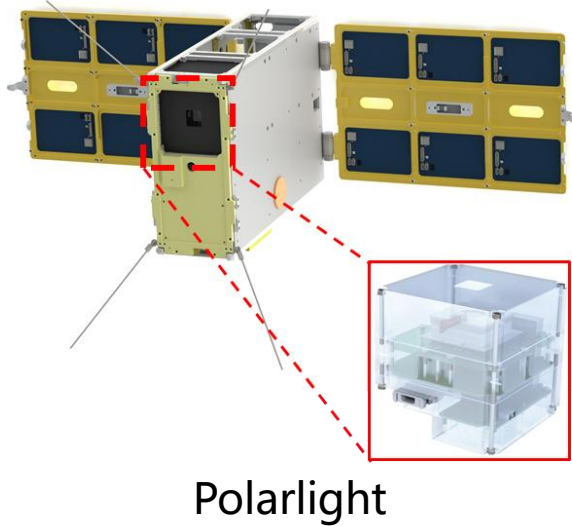


**THU** Gamma Ray  
Integrated Detectors

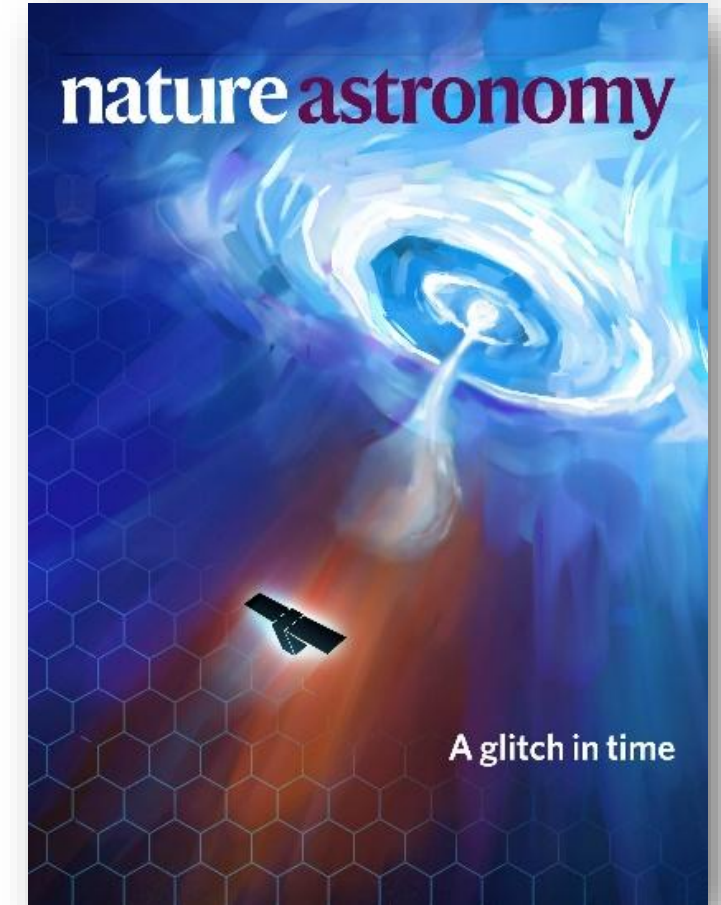
# 3D CdZnTe — MASS 与 MASS-Cube 任务



# 极光计划 Polarlight - the X-ray polarimetry



Re-detection and a possible time variation of soft X-ray polarization from the Crab, *Nature Astronomy*. 4 (2020) 511–516.



The success of the authors is threefold: they have reopened a polarimetric window that has been closed for more than 40 years, observed changes in the polarization

# 天格计划 GRID: Gamma-Ray Burst



| GRID ID  | Belonging | Launch date | Orbit                  | Catalog Number |
|----------|-----------|-------------|------------------------|----------------|
| GRID-01  | 清华        | 2018.10.29  | 502 × 519 km 97.4° LEO | 43663          |
| GRID-02  | 清华        | 2020.11.06  | 457 × 467 km 97.2° LEO | 46838          |
| GRID-03B | 清华        | 2022.02.27  | 523 × 550 km 97.5° LEO | 51830          |
| GRID-04  | 清华        | 2022.02.27  | 523 × 550 km 97.5° LEO | 51830          |
| GRID-05B | 清华        | 2023.01.15  | 492 × 503 km 97.4° LEO | 55254          |
| GRID-06B | 南大 & 川大   | 2023.01.15  | 494 × 507 km 97.4° LEO | 55252          |
| GRID-07  | 北师大       | 2023.01.15  | 475 × 489 km 97.4° LEO | 55261          |
| GRID-08B | 川大 & 南大   | 2023.01.15  | 475 × 489 km 97.4° LEO | 55261          |
| GRID-10B | 清华 & 川大   | 2024.06.22  | 625 × 632 km 29.0° LEO | 60088          |
| GRID-11B | 清华 & 川大   | 2024.11.11  | 513 × 532 km 97.5° LEO | 61897          |
| GRID-12B | 清华        | 2024.11.27  | 303 × 495 km 50.0° LEO | 62112          |
| GRID-13B | 清华        | 2024.11.27  | 304 × 494 km 50.0° LEO | 62111          |
| GRID-09  | 清华        | 2025.05.17  | 517 × 522 km 97.4° LEO | 64052          |

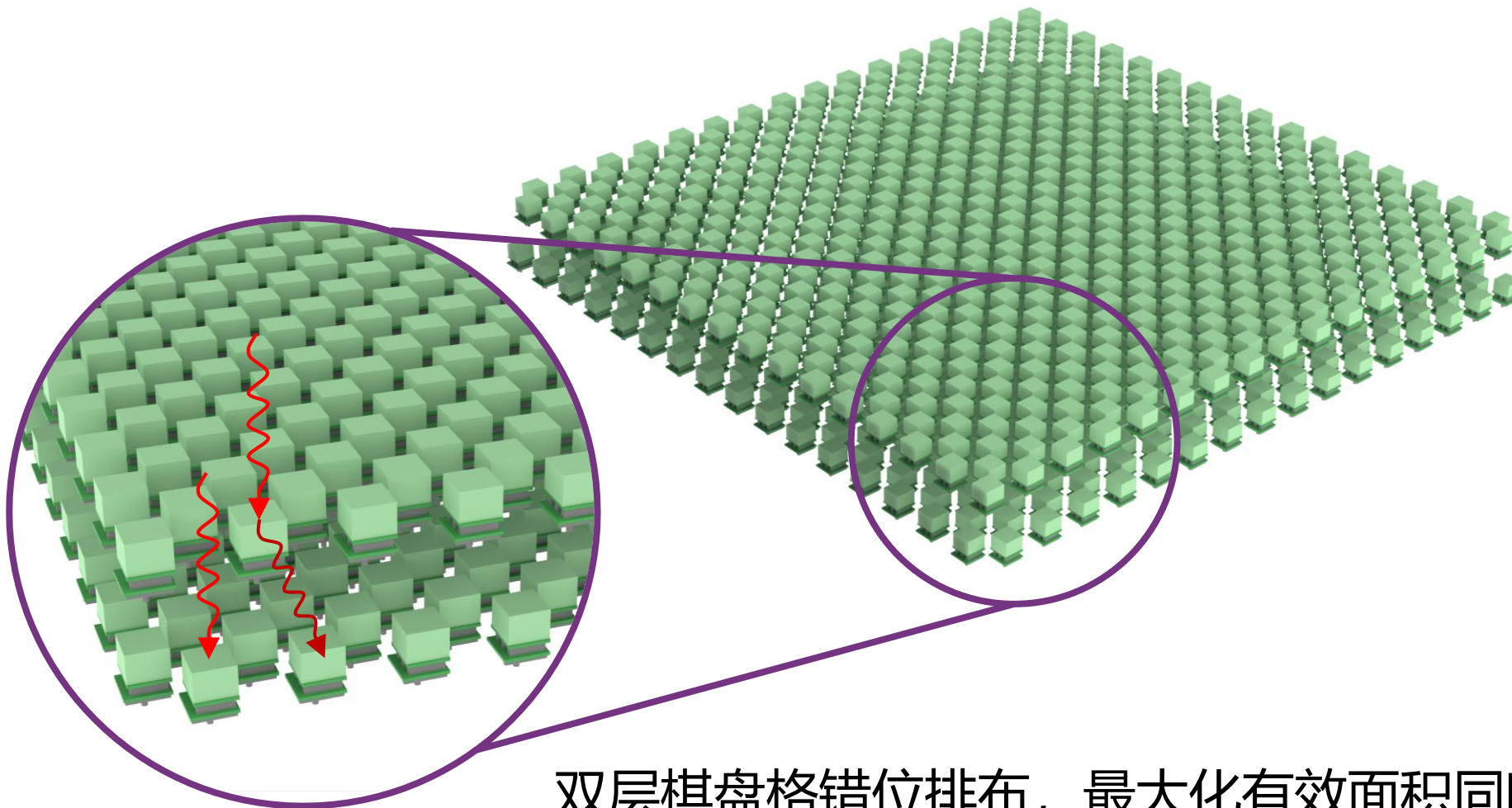
UTC 2018-11-01 03:25:00 + 1 orbit



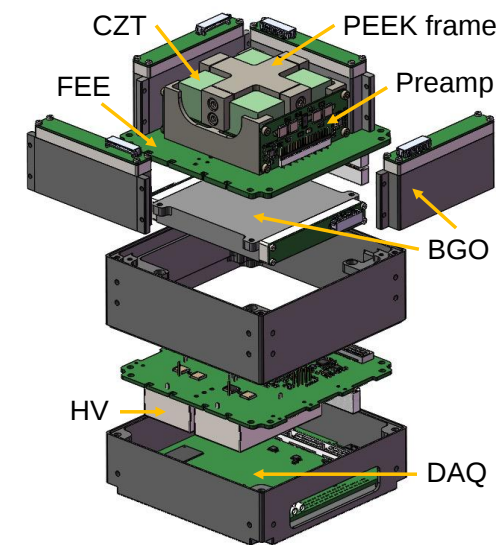
# MASS 任务设计与 MASS-Cube

$32 \times 16 \times 2 = 1024$  个像素型碲锌镉(CZT)探测器, 几何面积  $4096 \text{ cm}^2$

详见科学白皮书 <https://doi.org/10.1007/s10686-024-09920-4>

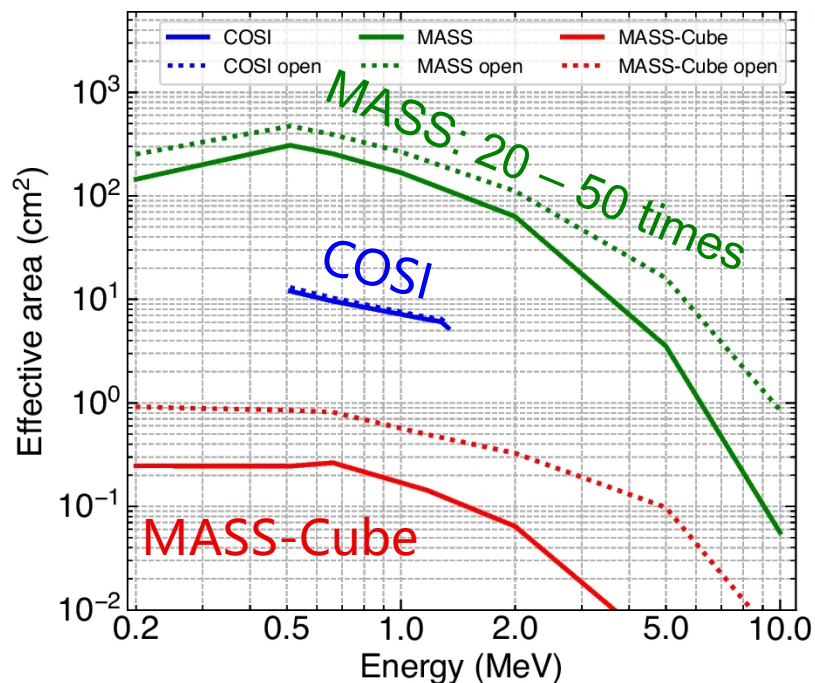


双层棋盘格错位排布, 最大化有效面积同时提高ARM

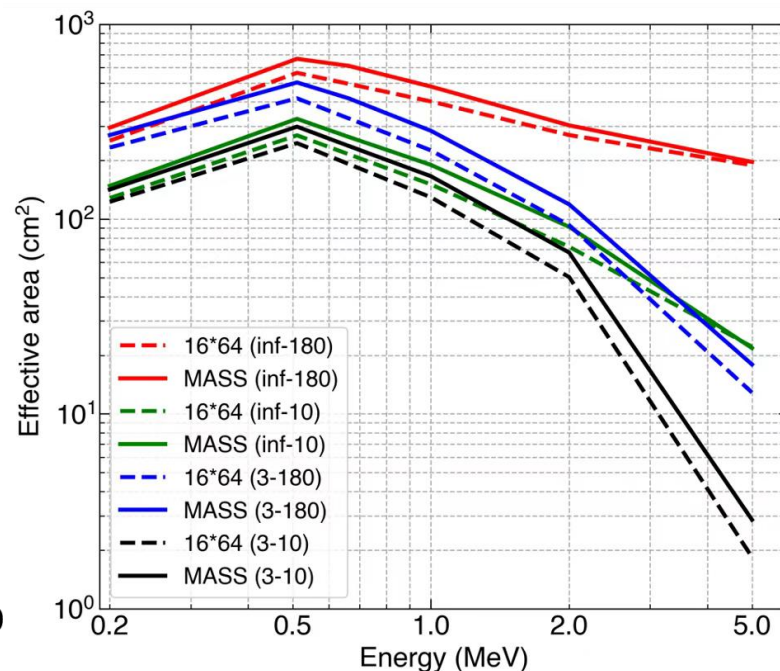


纳卫星技术验证载荷  
MASS-Cube  
同时作为纳卫星星座首星

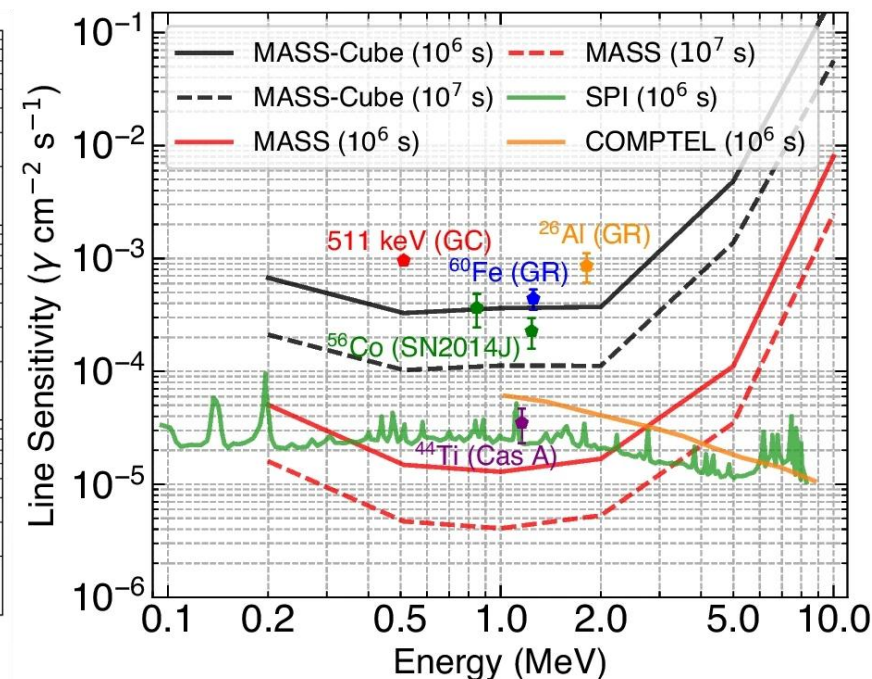
# MASS-Cube 微纳载荷与星座方案



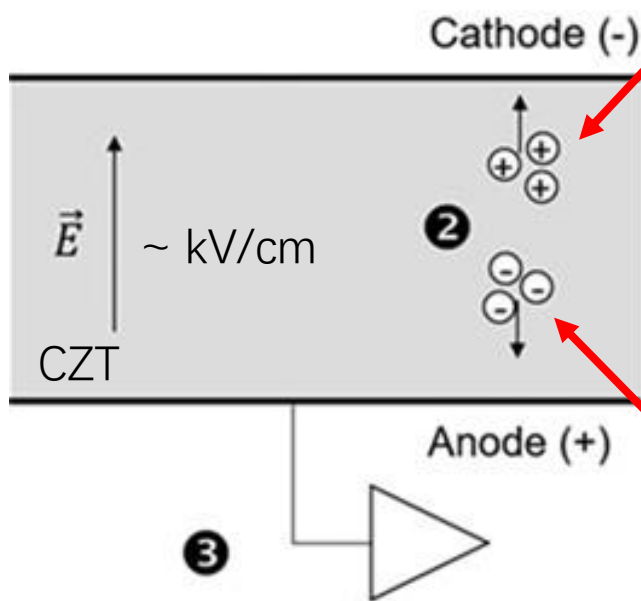
- 有效面积: MASS-Cube、MASS 和 COSI



- 有效面积: MASS对比16个MASS-Cube星座, CZT总数均为1024



- 灵敏度: MASS-Cube和MASS



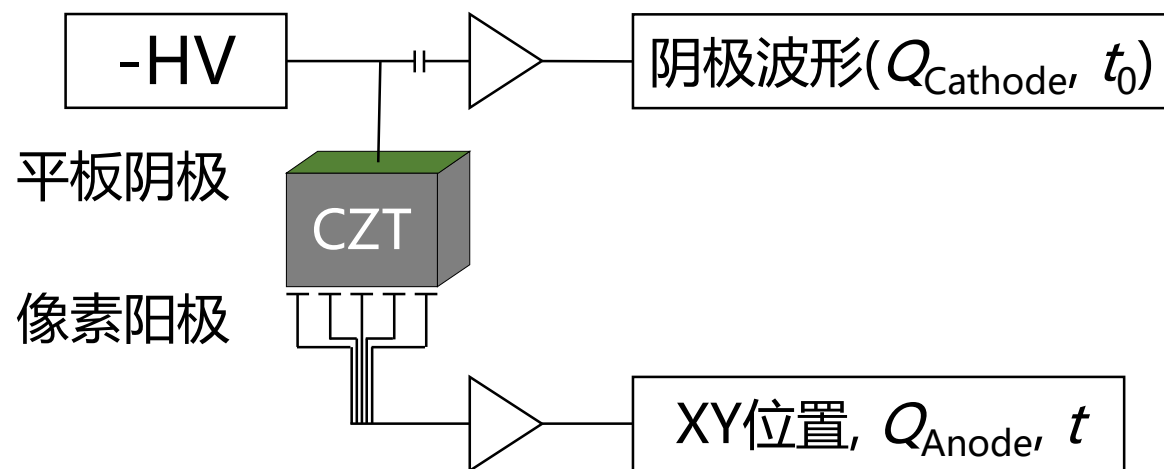
| Properties                                                                     | CdTe                         | Cd <sub>0.9</sub> Zn <sub>0.1</sub> Te | Si         |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|------------|
| Electron mobility $\mu_e$ (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ) | ~1000                        | ~1000                                  | 1400       |
| Hole mobility $\mu_h$ (cm <sup>2</sup> .V <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )     | 75–100                       | 20–50                                  | 500–1900   |
| Electron lifetime $\tau_e$ (s)                                                 | $2\text{--}5 \times 10^{-6}$ | $3\text{--}30 \times 10^{-6}$          | $>10^{-3}$ |
| Hole lifetime $\tau_h$ (s)                                                     | $2\text{--}5 \times 10^{-6}$ | $0.3\text{--}1 \times 10^{-6}$         | $10^{-3}$  |

## 电子俘获损失、权重电势损失

- 提高电阻率
- 减小极化效应
- 提高电子寿命 $\tau_e$

# 3D CZT

# 像素CZT读出与事件重建(1)



- ✓ 阳极像素提供XY位置信息
- ✓ 深度Z通过两种深度重建方法获得
  - 1) 阴极/阳极电荷量比(C/A比)
  - 2) 漂移时间

$$Q_{\text{Cathode}} = Ne \cdot z$$

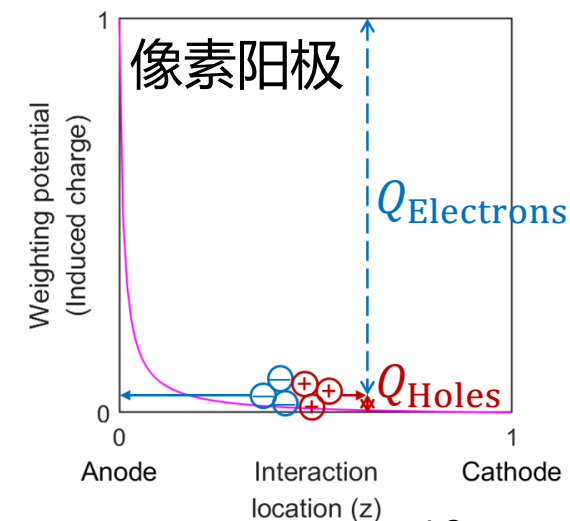
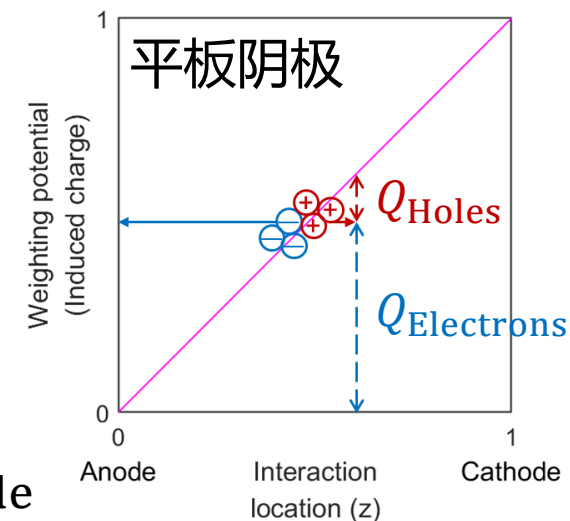


$$z = Q_{\text{Cathode}} / Q_{\text{Anode}}$$

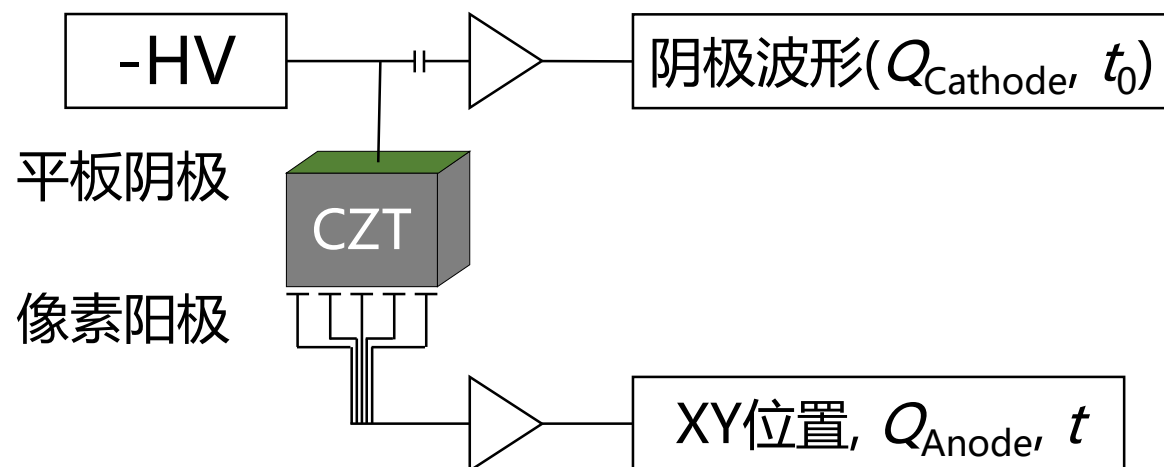


$$Q_{\text{Anode}} \approx Ne$$

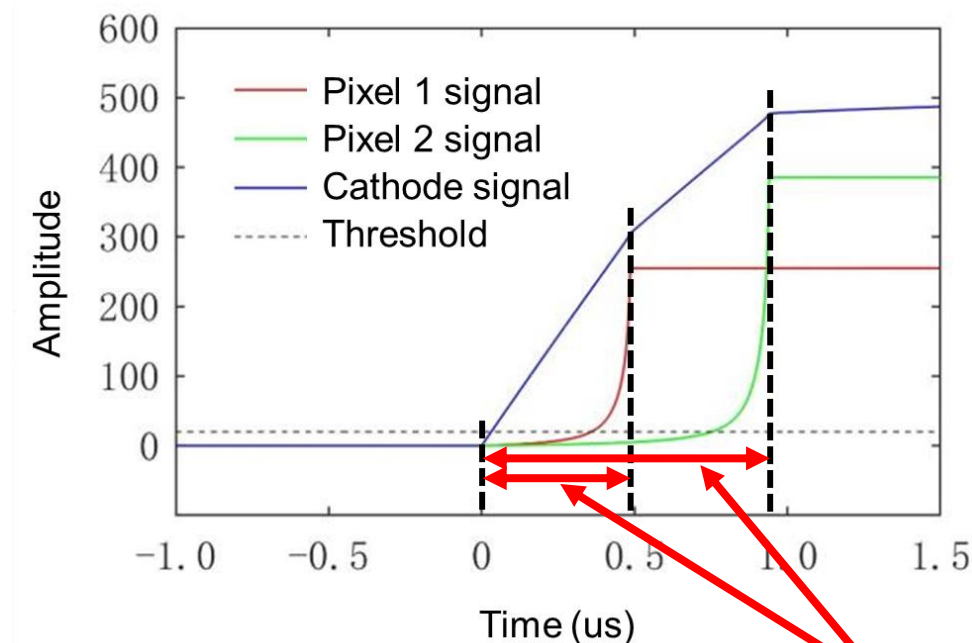
“小像素效应”



# 像素CZT读出与事件重建(2)

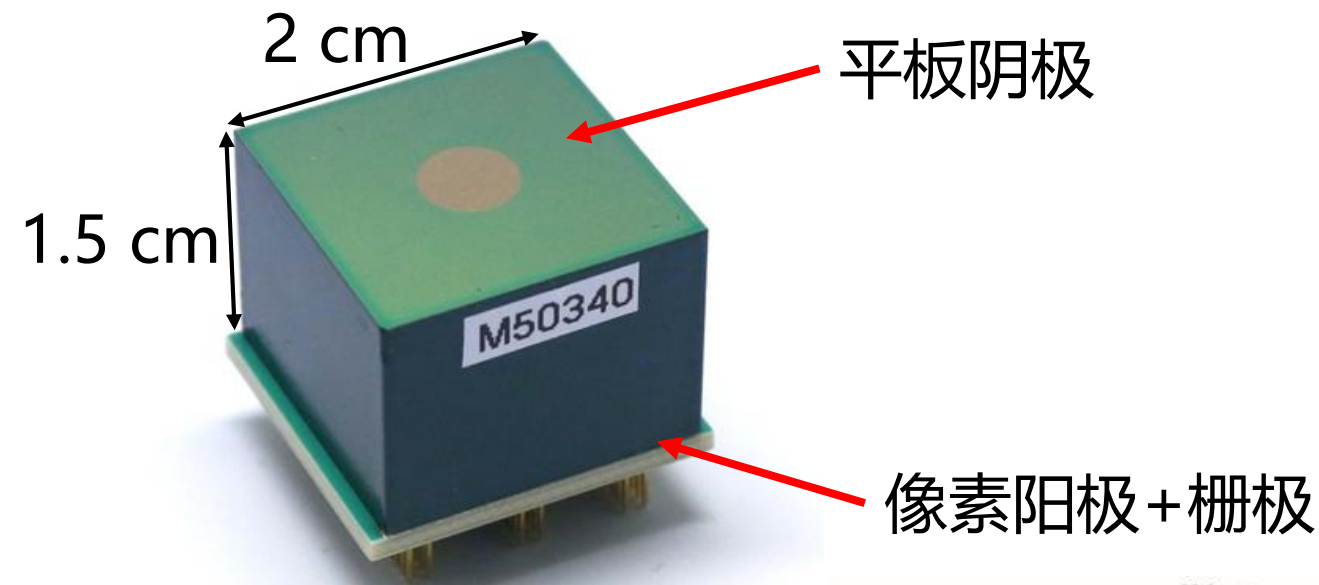


- ✓ 阳极像素提供XY位置信息
- ✓ 深度Z通过两种深度重建方法获得
  - 1) 阴极/阳极电荷量比(C/A比)
  - 2) 漂移时间



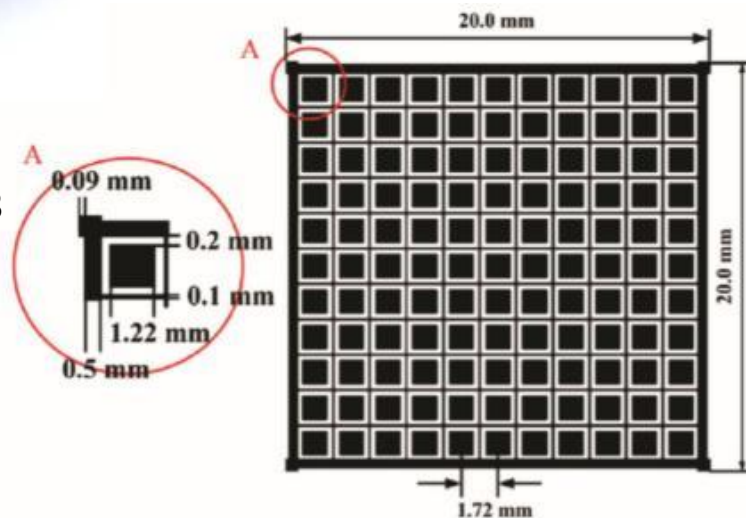
✓ 深度重建与电荷损失深度校正是取得高能量分辨率的关键

# 像素CZT探测器模块

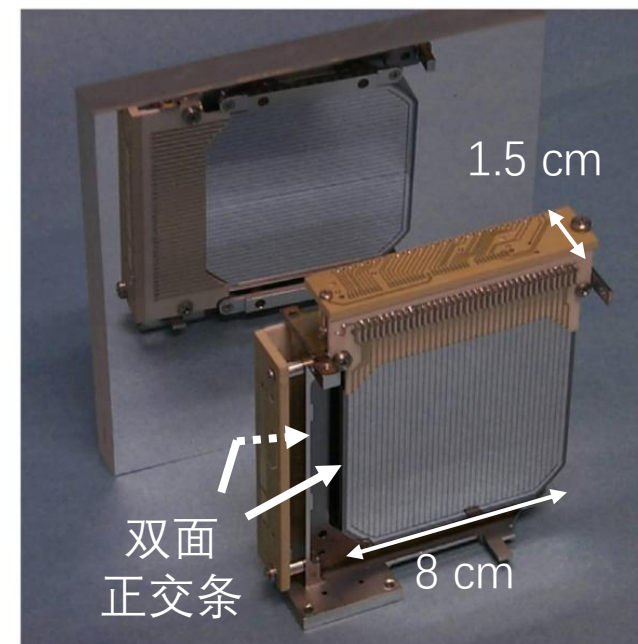


## CZT模块典型参数

- 主流尺寸  $2 \times 2 \times 1.5 \text{ cm}^3$
- 可选 4 cm
- 阳极  $11 \times 11$  像素
- 像素中心距 1.72 mm

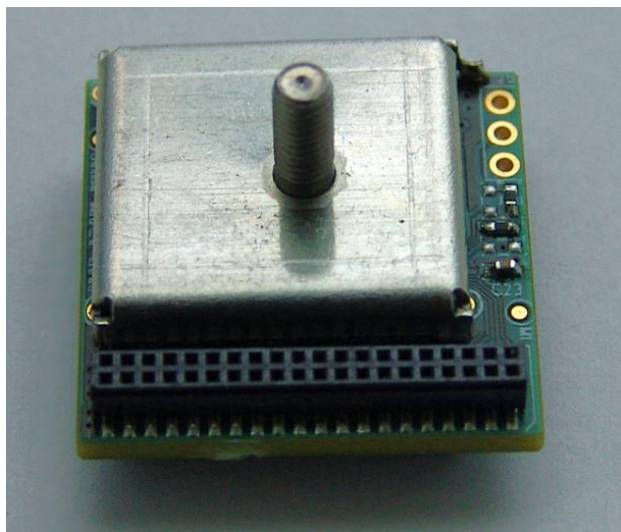


## 对比双面正交条高纯锗探测器(COSI)



- 位置分辨率和能量分辨率，二者相当
- 需要液氮低温，增加工程设计难度

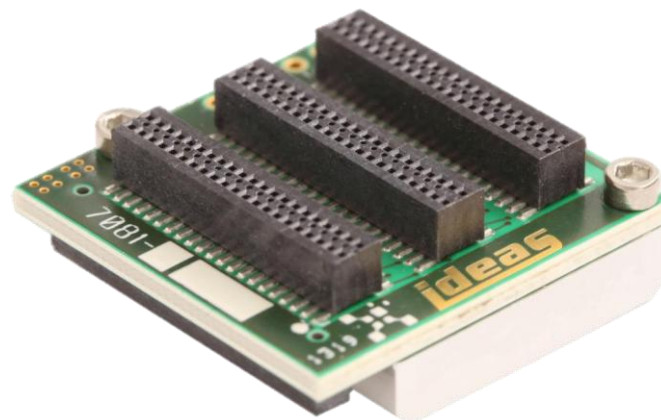
# 读出 ASIC 芯片对比与选型



## VAS\_UM2.3/TAT4

- 挪威IDEAS, **已停产**
- 模拟读出+模拟输出
- 只能获得每个像素的幅度与触发时间信息

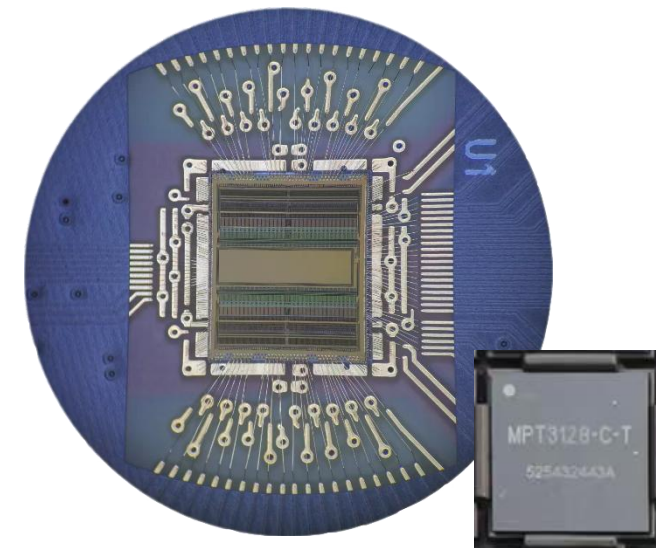
MASS-Cube使用



## GDS-10

- 挪威IDEAS, **在产**
- 波形采样+模拟输出
- 相邻未触发像素可提供亚像素位置信息

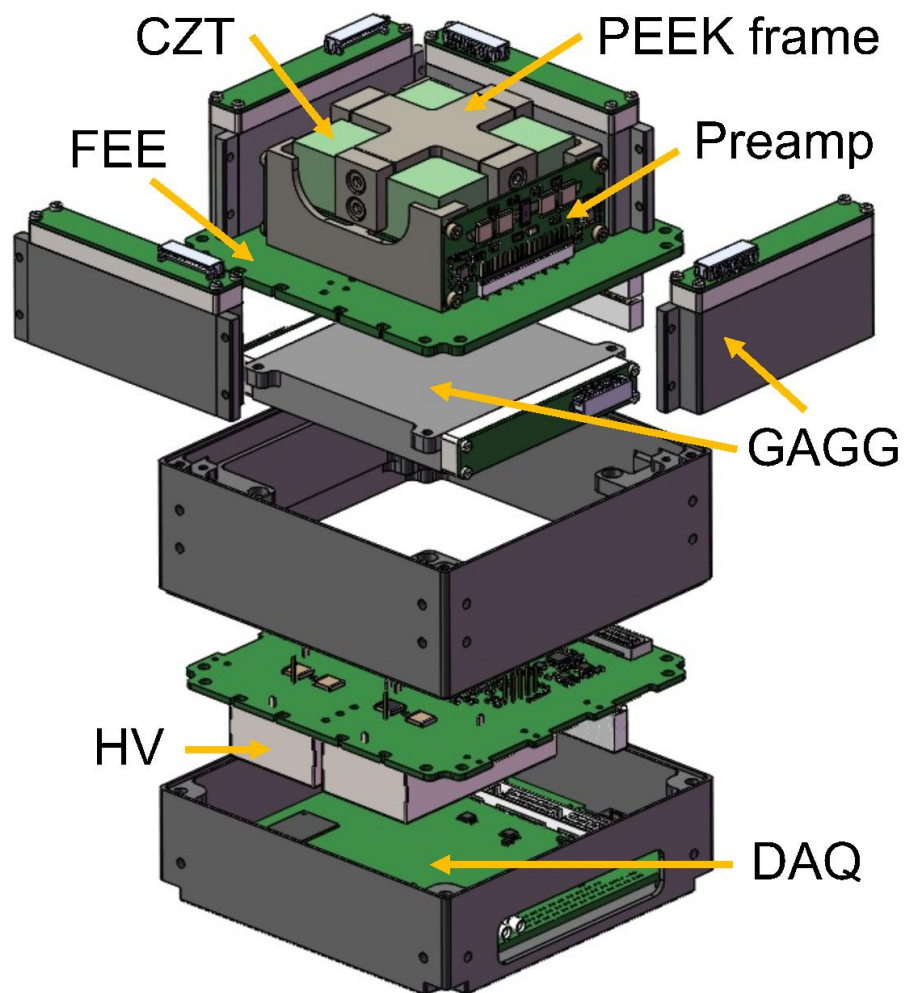
后续载荷在研



## MPT3128

- 杭州宇称电子, **在产**
- 模拟读出+集成ADC/TDC
- 全数字化输出

# MASS-Cube载荷硬件设计



## ➤ 纳卫星平台兼容

- 尺寸:  $9.4 \times 9.4 \times 11 \text{ cm}^3$  ( $\sim 1.1 \text{ U}$ )
- 质量:  $\sim 1.7 \text{ kg}$
- 功耗:  $\sim 14 \text{ W}$

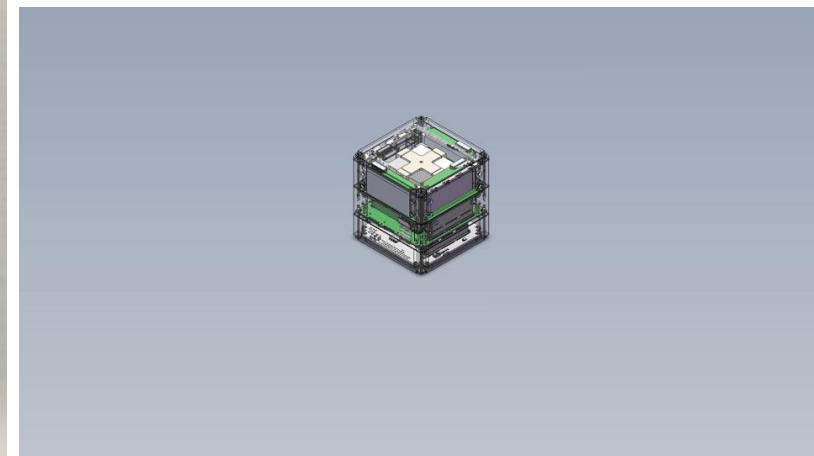
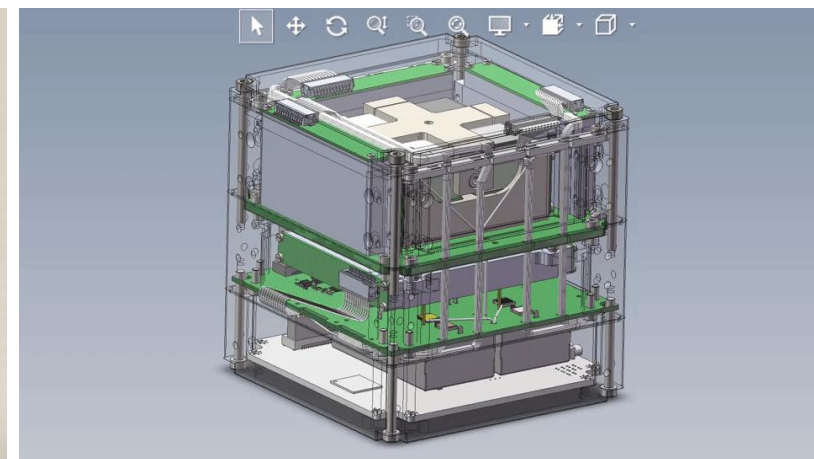
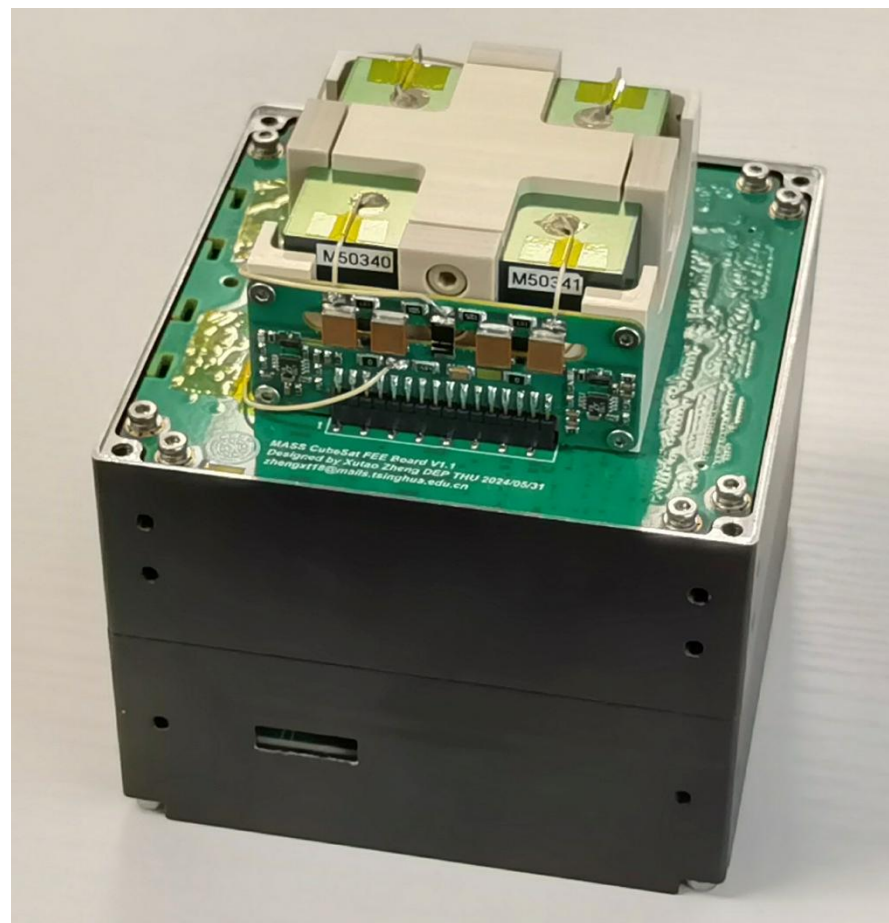
## ➤ 像素CZT主探测器

- $2 \times 2$  阵列,  $16 \text{ cm}^2$
- 深度分辨率( $\sigma$ )  $< 1 \text{ mm}$
- 能量分辨率  $< 1\%$  @  $662 \text{ keV}$
- 死时间  $\sim 160 \mu\text{s}$

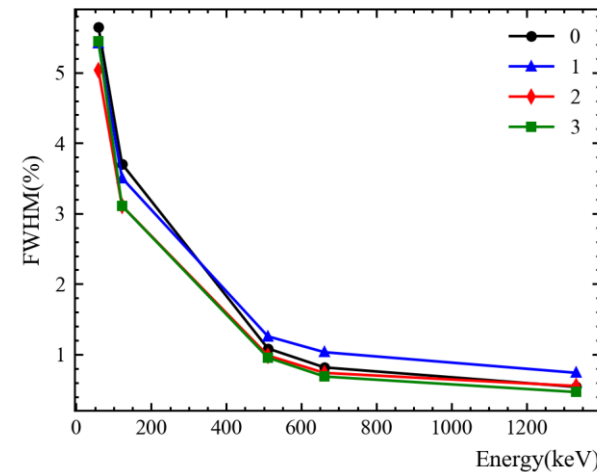
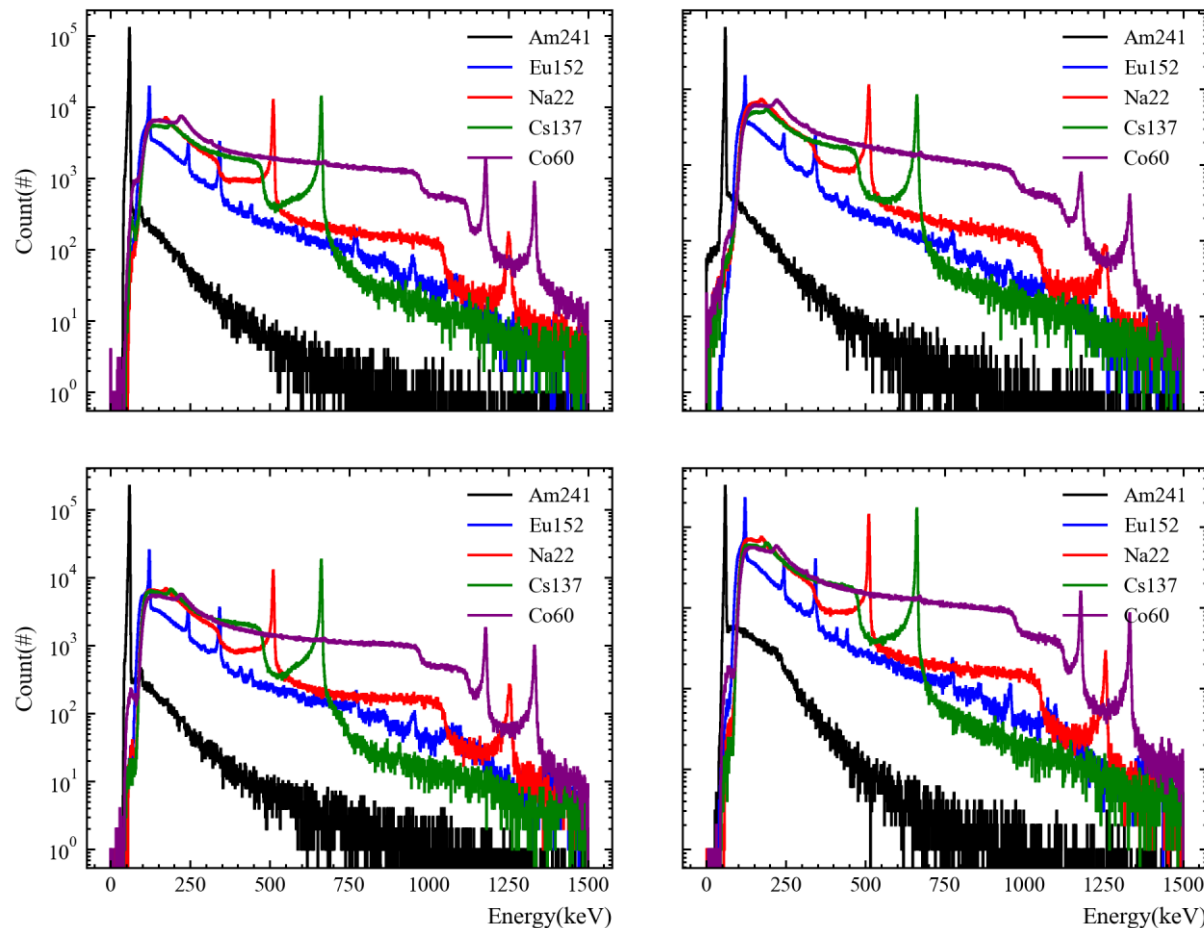
## ➤ GAGG反符合探测器 (未安装)

- 8 mm GAGG + SiPM读出
- 覆盖四周与底面, 顶面开窗
- 首个载荷未安装反符合探测器, 以验证在轨本底

# MASS-Cube载荷硬件设计



# 地面标定实验结果：能量分辨率



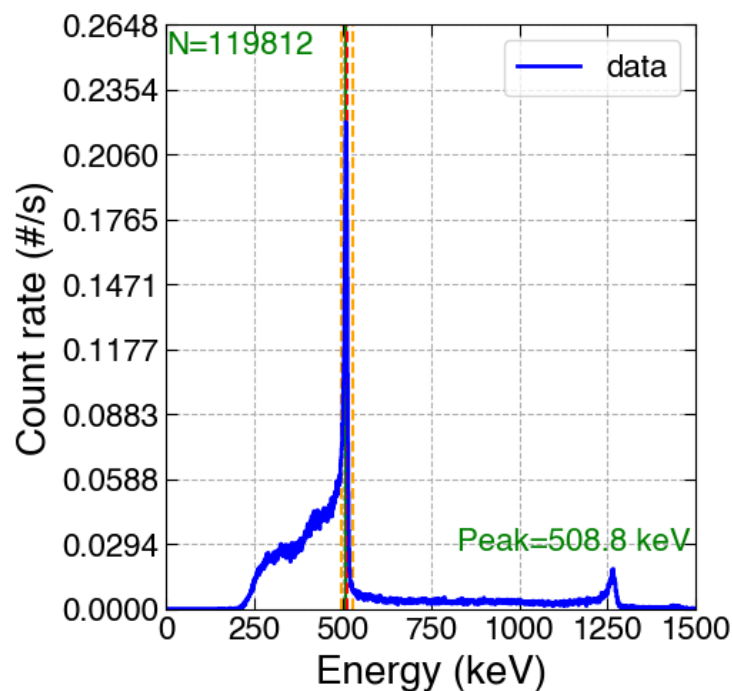
不同能量下的能量分辨率结果(FWHM/E)

| 能量<br>(keV) | CH0   | CH1   | CH2   | CH3   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 59.5        | 5.64% | 5.41% | 5.04% | 5.44% |
| 122         | 3.70% | 3.50% | 3.11% | 3.11% |
| 511         | 1.08% | 1.26% | 0.98% | 0.95% |
| 662         | 0.82% | 1.03% | 0.74% | 0.69% |
| 1332        | 0.54% | 0.74% | 0.55% | 0.47% |

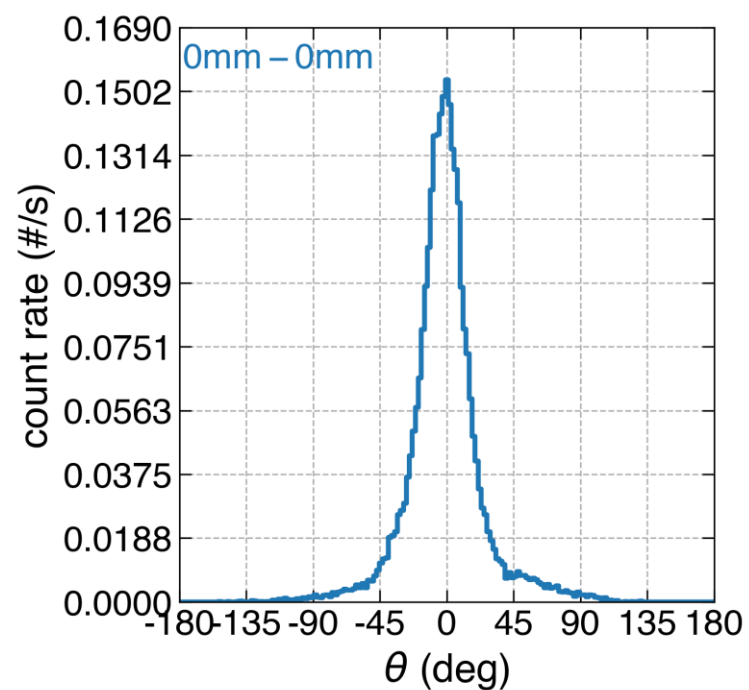
# 地面标定实验结果：成像验证

- @511 keV点源：康普顿重建→成像

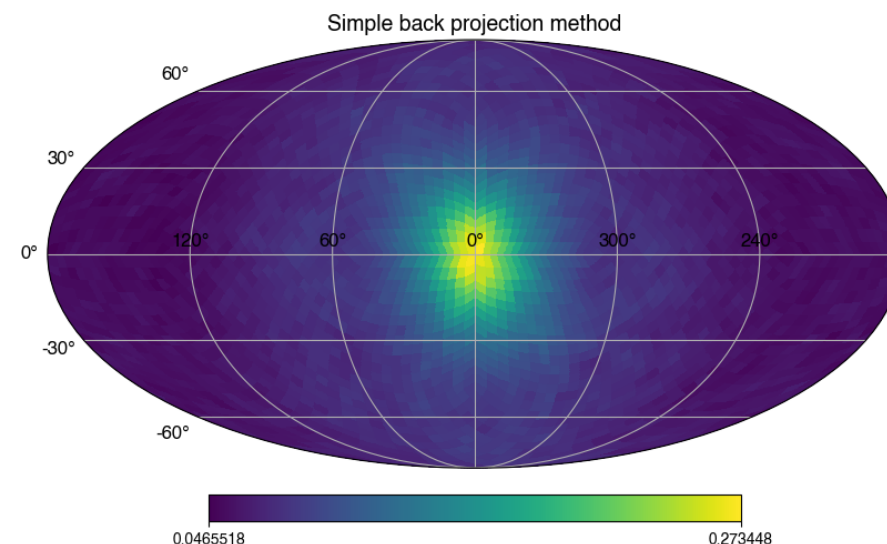
## 康普顿事例能谱



## ARM



## 成像效果



# CZT 质子辐照损伤原因

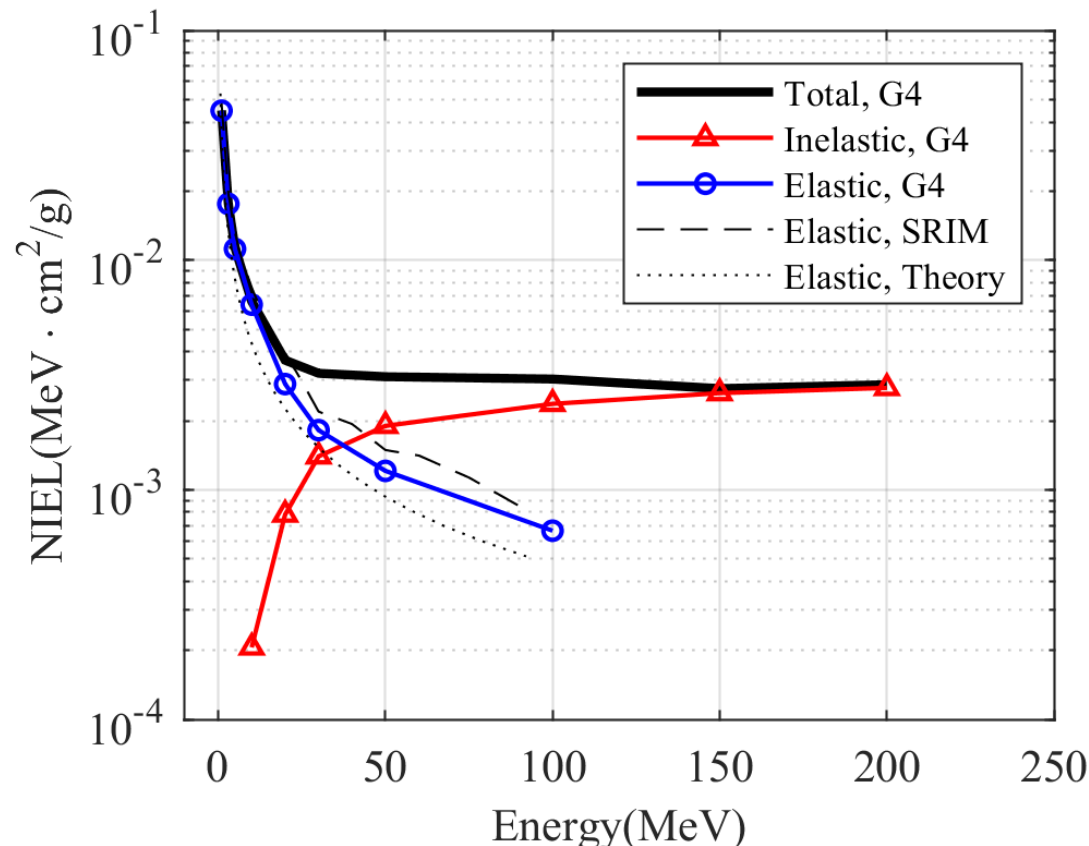
CZT中辐照损伤来源:

- 电离能损: ✕
- 非电离能损(晶格位移损伤): ✓
  - 弹性碰撞: (卢瑟福散射)
  - 非弹性碰撞: (核反应过程)

非电离能损(NIEL)计算公式:

$$NIEL(T_0) = \frac{N_A}{A} \int_{T_{min}}^{T_{max}} dT Q(T) T \left( \frac{d\sigma}{dT} \right)_{T_0}$$

- $Q(T)$ : Linhard辐照因子
- $T$ : 入射粒子动能
- $\left( \frac{d\sigma}{dT} \right)_{T_0}$ : 微分散射截面
- $T_d$ : 原子离位阈能,  $T_{min} = 2T_d$



使用SRIM, Geant4, 理论公式得到不同质子能量下CZT材料的非电离能损曲线(黑实线为Geant4包含强子物理列表给出, 红线为禁用强子列表给出)

# 地面100 MeV质子辐照实验

- 辐照束流设置

- 辐照质子能量: 100MeV
- 辐照质子束流大小:  $1 \times 10^7$  p / (cm<sup>2</sup> · s)
- 束流不均匀度: <10%

- CZT探测器设置:

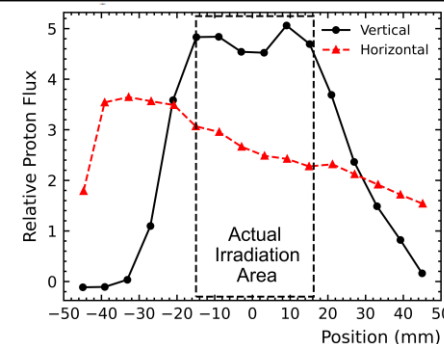
- 晶体尺寸:  $2 \times 2 \times 1$  cm<sup>3</sup>
- 测试放射源: Na22 (511keV)
- 辐照时: 一个晶体施加1333V高压  
一个晶体未施加高压

表 4.2 100 MeV 质子辐照注量变化表

| 轮次 | 加偏压                |                    | 不加偏压               |                    |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|    | $\Delta\Phi_{p^+}$ | $\Phi_{p^+}$       | $\Delta\Phi_{p^+}$ | $\Phi_{p^+}$       |
| 1  | $3.44 \times 10^7$ | $3.44 \times 10^7$ | $3.40 \times 10^7$ | $3.40 \times 10^7$ |
| 2  | $6.74 \times 10^7$ | $1.02 \times 10^8$ | $6.58 \times 10^7$ | $1.00 \times 10^8$ |
| 3  | $2.06 \times 10^8$ | $3.08 \times 10^8$ | $1.97 \times 10^8$ | $2.97 \times 10^8$ |
| 4  | $7.43 \times 10^8$ | $1.05 \times 10^9$ | $7.19 \times 10^8$ | $1.02 \times 10^9$ |
| 5  | $2.03 \times 10^9$ | $3.08 \times 10^9$ | $2.06 \times 10^9$ | $3.08 \times 10^9$ |



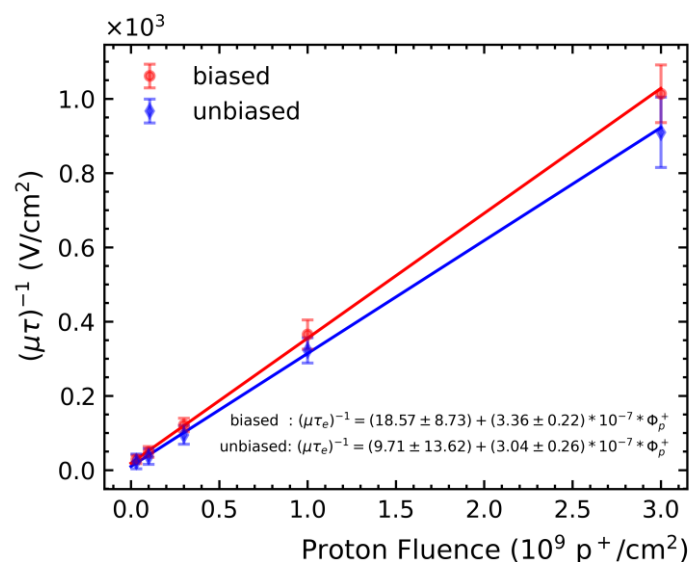
西安200MeV质子应用  
装置(XiPAF)



质子束流二维剖面分  
布 (水平 & 垂直)

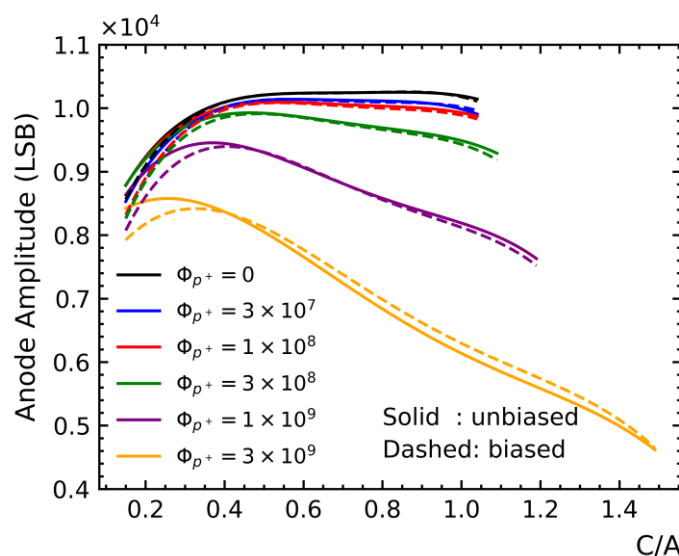
# CZT地面辐照损伤一般规律

## 晶体 $\mu\tau$ vs. 累计质子通量 $\Phi$



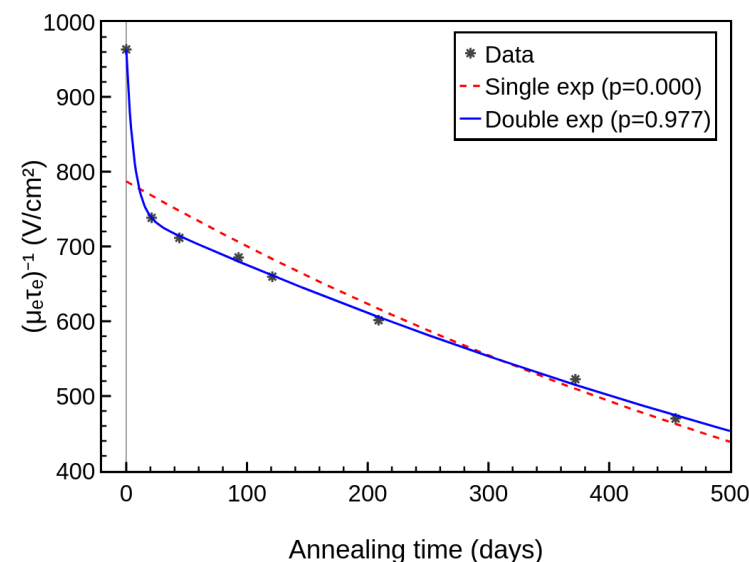
- 晶体 $(\mu\tau)^{-1}$  线性正比质子通量 $\Phi$
- 偏压略微增强辐照损伤效应

## 深度-能量曲线 vs. 累计质子通量 $\Phi$



- 随累计质子通量增加, 深度-能量曲线逐渐趋于陡峭。
- 精准的深度定位对能量校正变得越发重要。

## 晶体 $\mu\tau$ vs. 室温退火时间

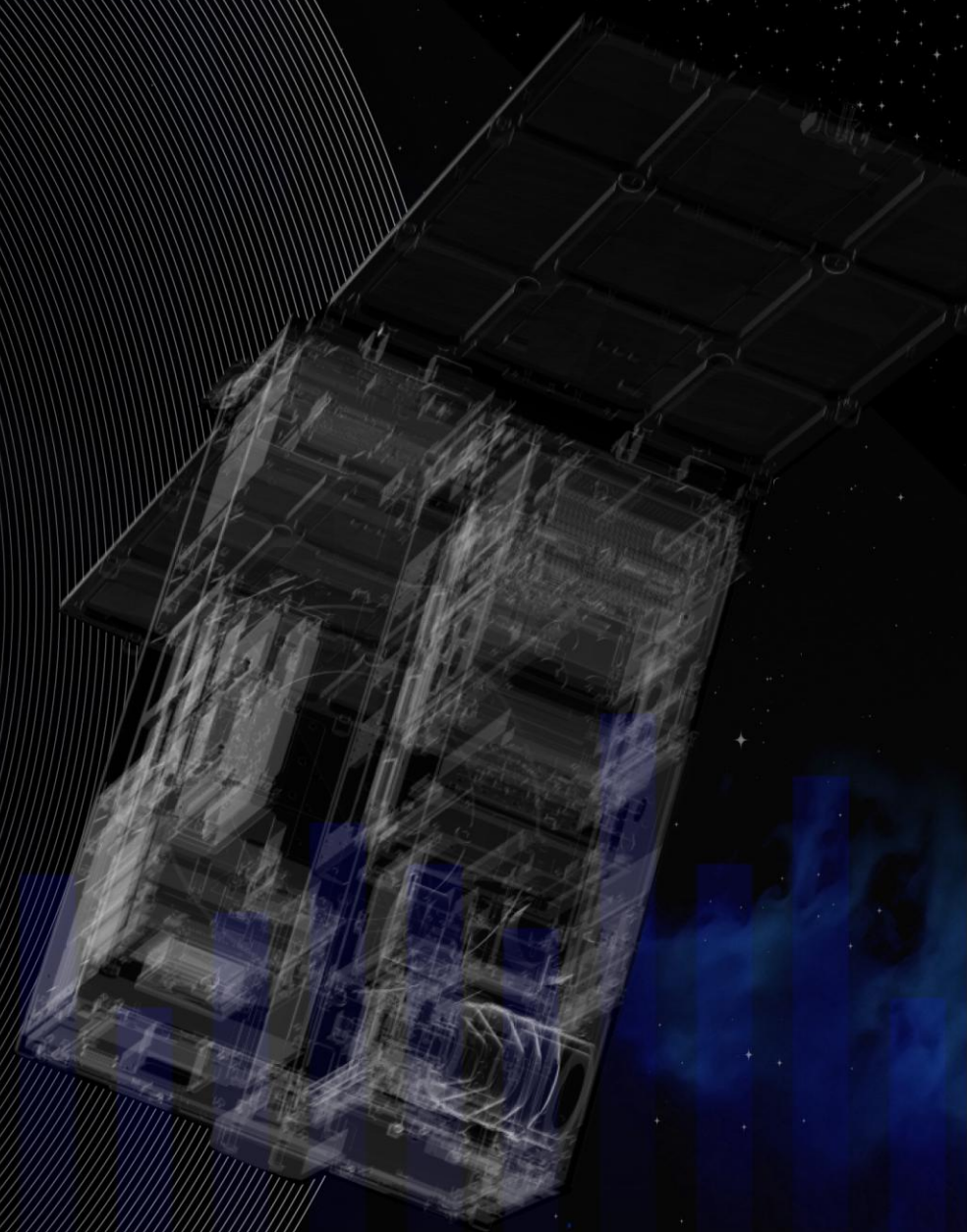


- 存在快、慢两种缺陷退火成分
- 快/慢成分比例约为 22 : 78
- 慢成分退火时间常数约 1004 天



**THU** Gamma Ray  
Integrated Detectors

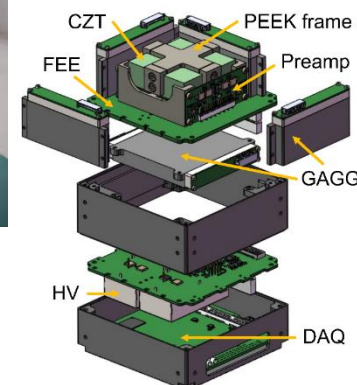
# MASS-Cube 在轨运行与结果



# 首个技术验证载荷MASS-Cube发射



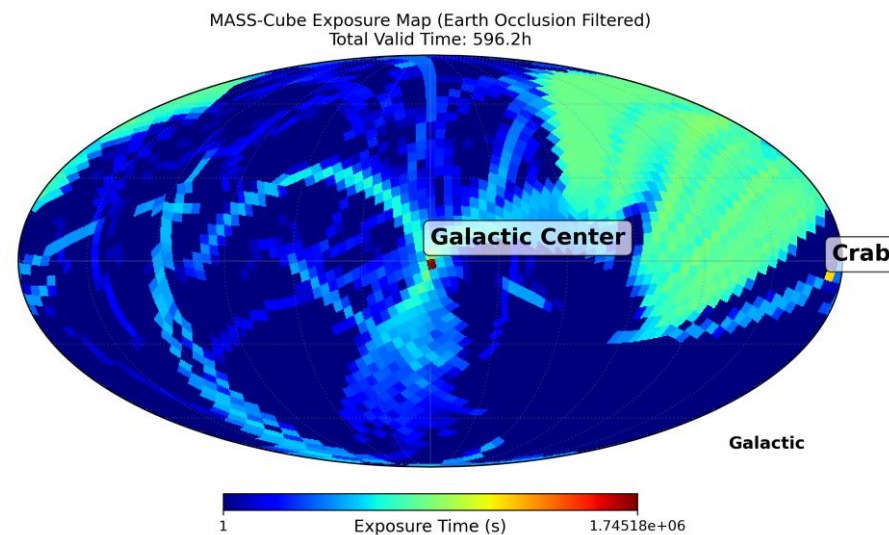
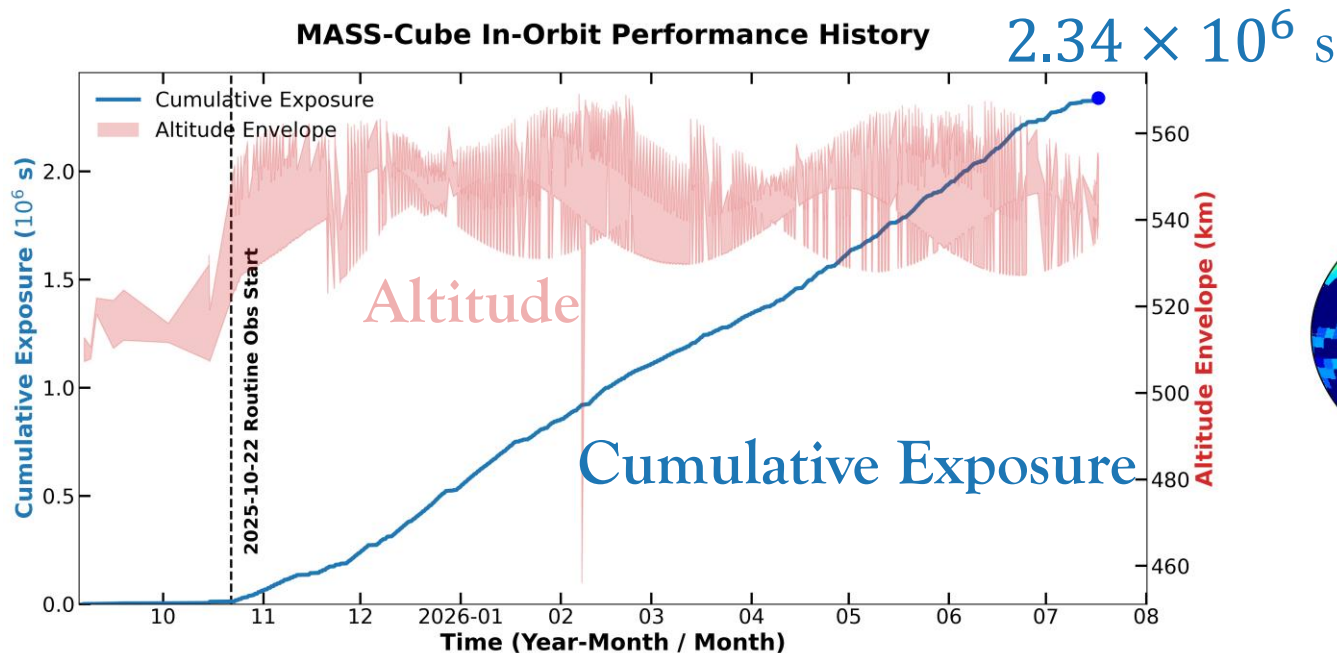
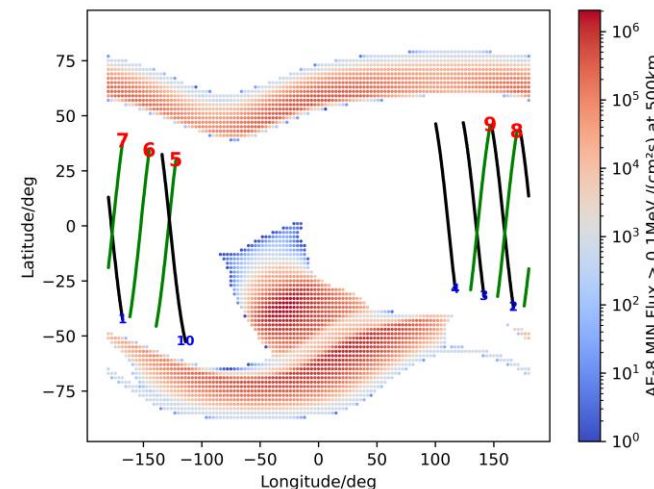
MASS-Cube



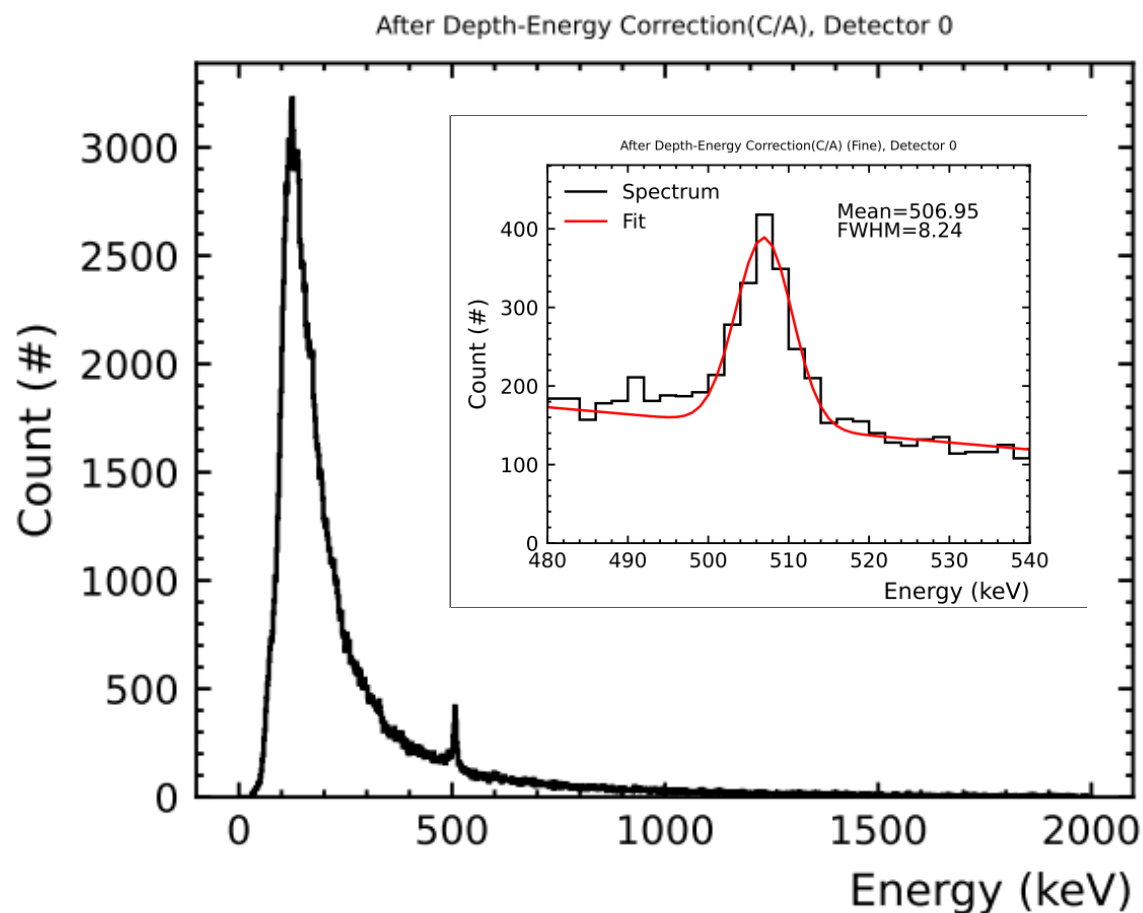
- 首个MASS-Cube载荷在2025年9月5日于酒泉发射
  - 空间飞行器目录编号：65488
  - 轨道：525 x 543 km, 97.4° SSO
- 经过在轨联调与测试后，于2025年10月22日开始日常观测，主要目标为银心
- 大幅提高像素CZT探测器的技术成熟度，为MASS、MeVGRO等任务积累技术经验

# 日常观测

- 观测策略：高本底区外长度 $\geq 20$ 分钟的轨次开机观测
- 观测目标：优先银心，近期开始引入蟹状星云
- 累积观测时间： $\sim 2.34 \times 10^6$  s (Up to 2026.7.21)
  - 银心： $\sim 1.75 \times 10^6$  s (74.8% of Total Duration)
  - 随机： $\sim 5.9 \times 10^5$  s
- 数传完整性： $\sim 90\%$

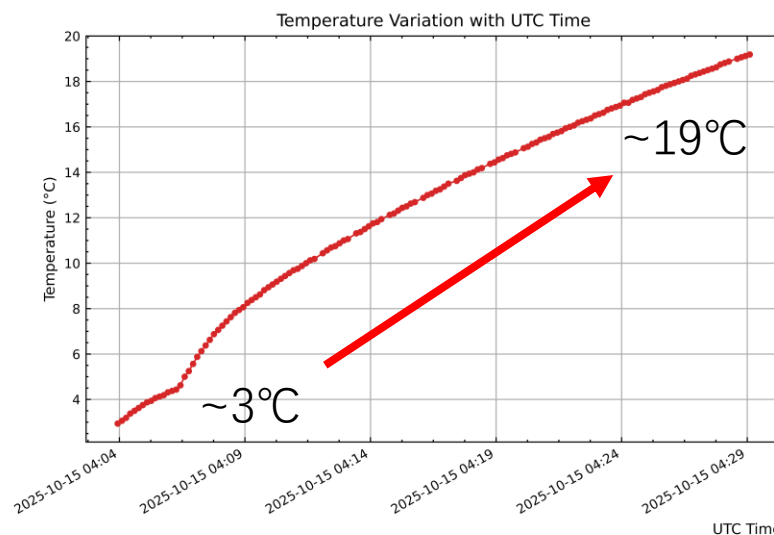


# 在轨运行结果 — 单像素能谱



CH0单像素能谱

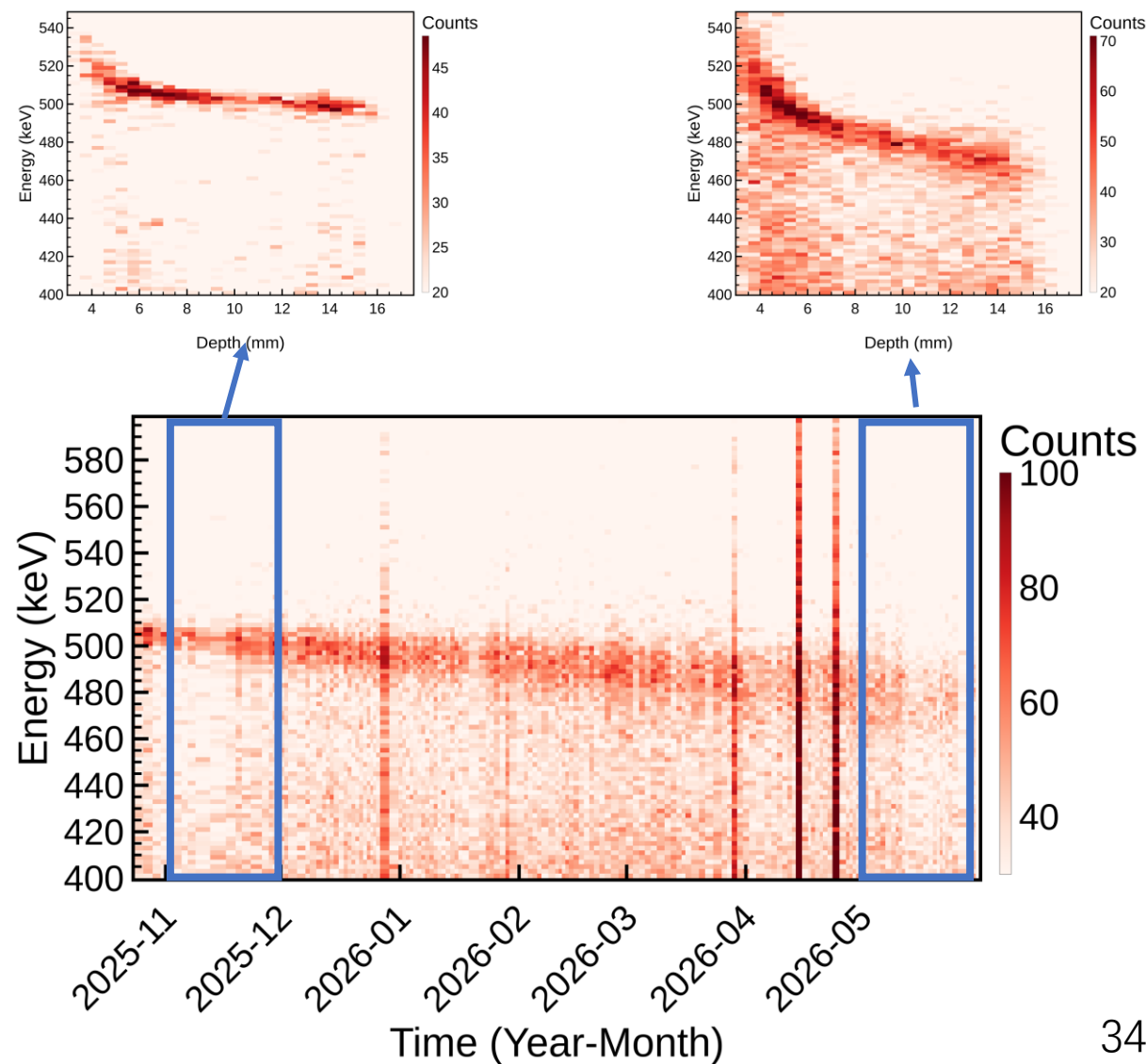
- ✓ 深度校正, 像素增益校正, 温度校正
- 峰位漂移:  $\sim 4$  keV
- 能量分辨率(FWHM):  $8.24$  keV@511 keV



一轨观测时间内的温度变化

# MASS-Cube 在轨损伤结果

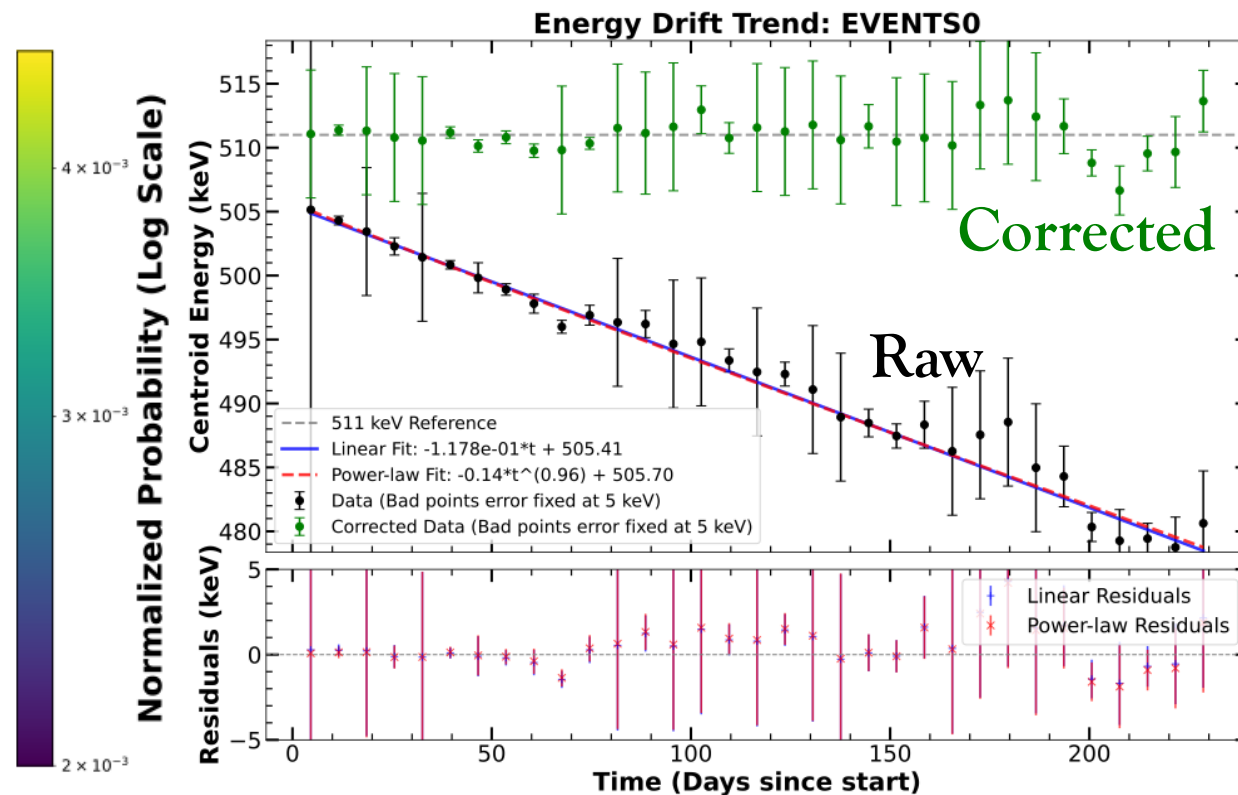
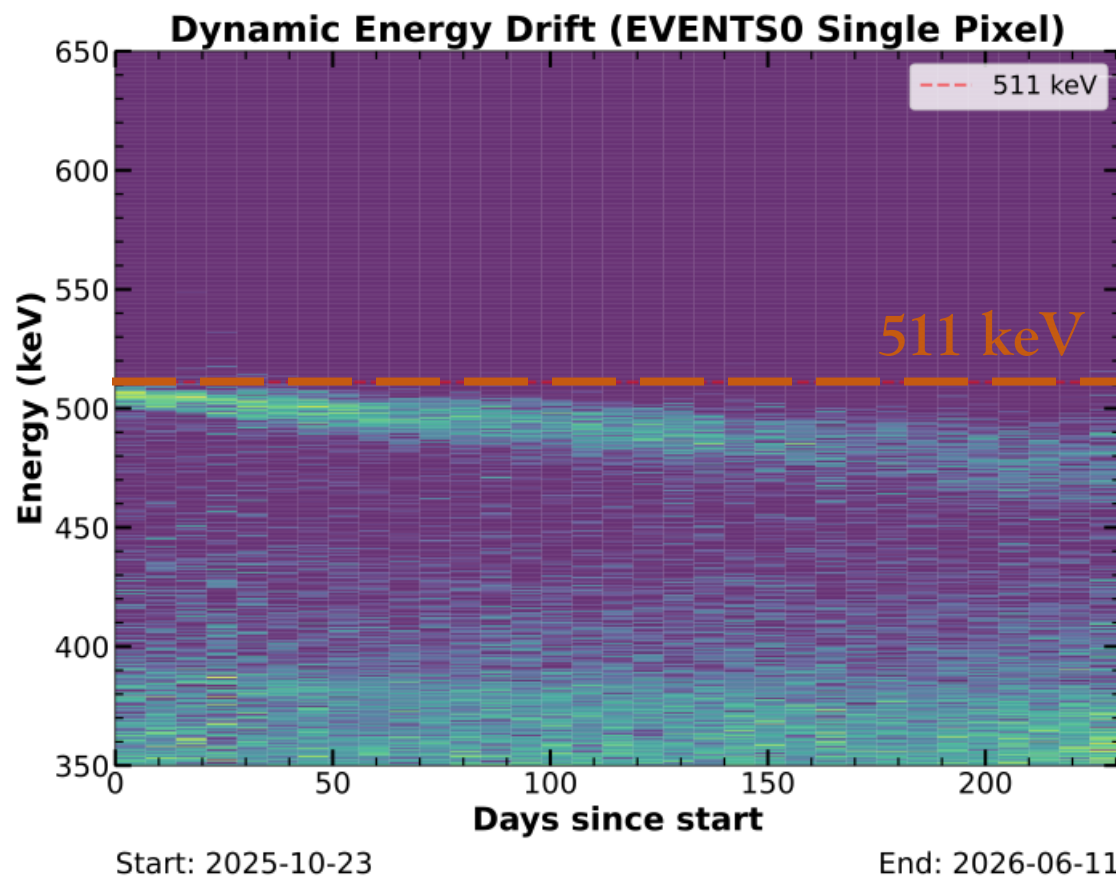
- 25年10月最大峰位下降至500 keV
- 26年5月最大峰位下降至470 keV
- 等效于地面质子实验中  $\Phi = 3 \times 10^8 \text{ p}^+ / \text{cm}^2$  注量造成的损伤水平
- 考虑快慢缺陷成分占比, 慢成分缺陷室温退火以及卫星自身屏蔽, 与外部空间环境  $1 \times 10^9 \text{ p}^+ / \text{cm}^2$  近似相当



# MASS-Cube 在轨损伤初步校正

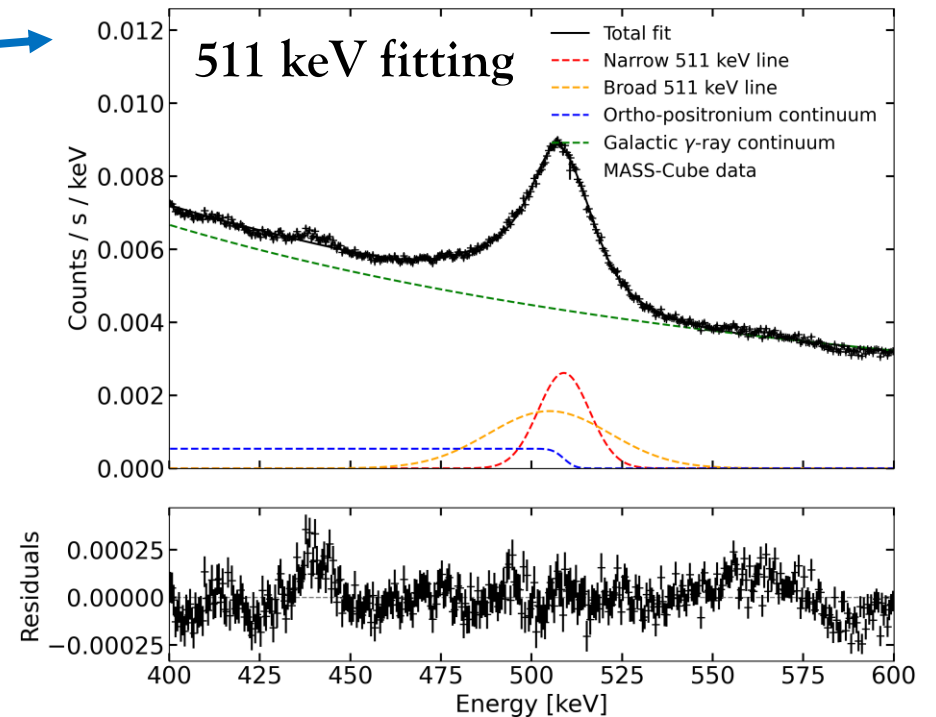
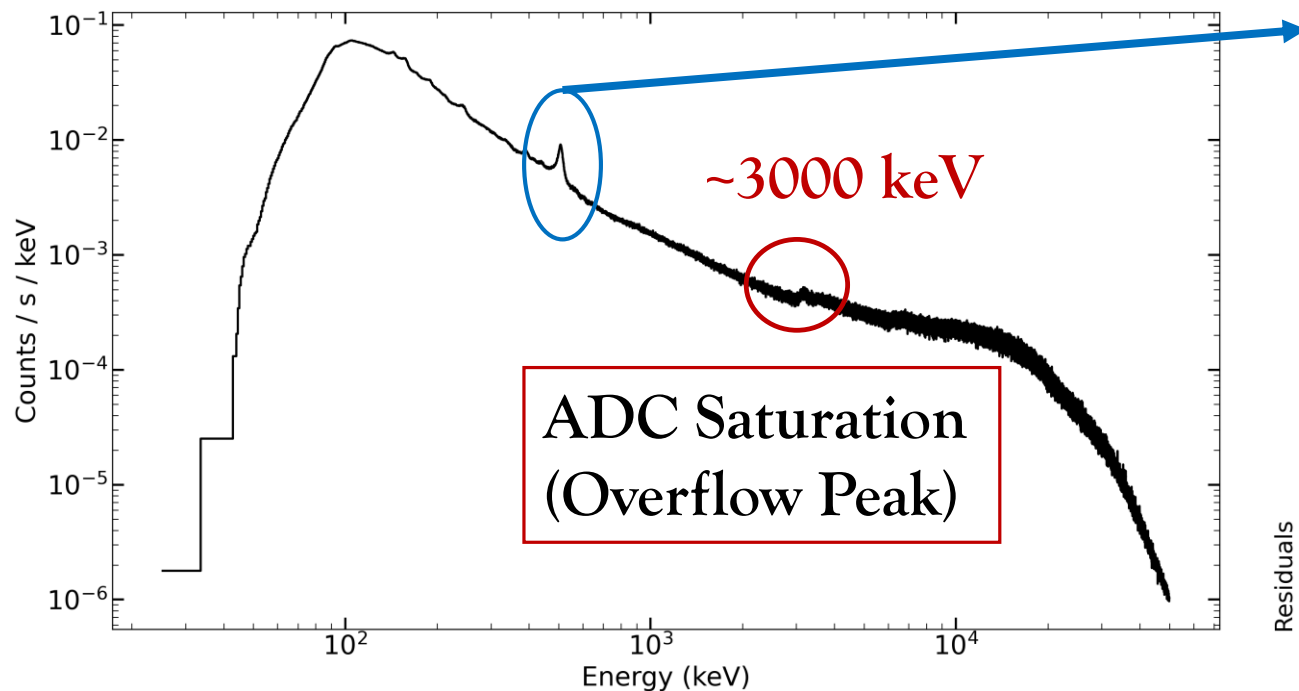
- 511 keV Peak **Downward** Shift
- Gain Variation & Radiation Damage

- Power-Law Fitting Correction



# 观测数据合并能谱

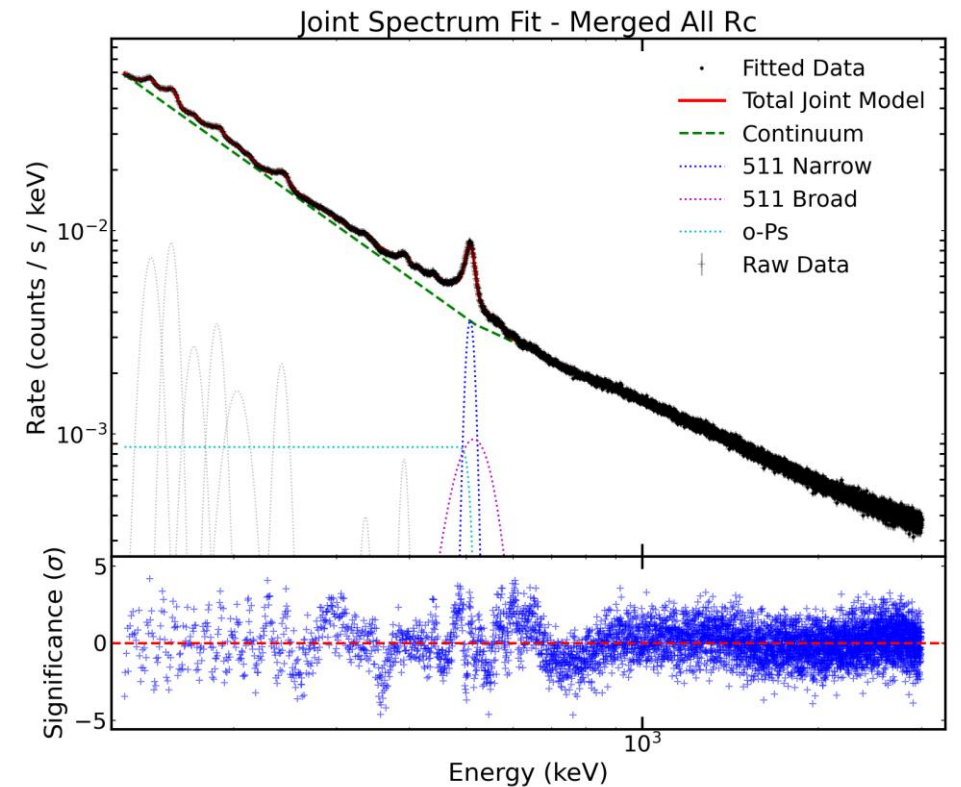
- Instrumental Range: 50 – 50,000 keV
- Current Analysis Range: 100 – 3,000 keV
- 511 keV Line: Successfully Modeled with 4-Component Fit (the same as INTEGRAL)



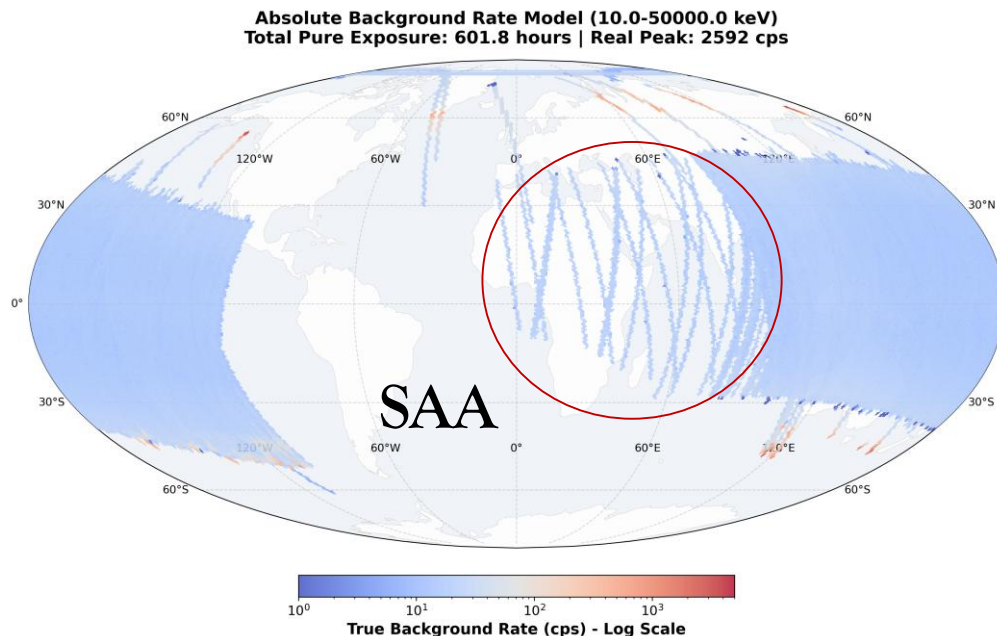
# 在轨活化谱线

- Background Lines (100– 3000 keV): **Dominated by Internal CZT**
- Activation Lines

| Fitted Energy (keV) | Activation Line    | Reaction Channel                                  | Significance |
|---------------------|--------------------|---------------------------------------------------|--------------|
| 144.5               | $^{125m}\text{Te}$ | $^{124}\text{Te}(n,\gamma)/^{125}\text{Te}(n,n')$ | $71\sigma$   |
| 156.5               | $^{123m}\text{Te}$ | $^{122}\text{Te}(n,\gamma)/^{123}\text{Te}(n,n')$ | $81\sigma$   |
| 188.0               | $^{114m}\text{In}$ | $^{114}\text{Cd}(p,n)$                            | $28\sigma$   |
| 391.2               | $^{113m}\text{In}$ | $^{113}\text{Cd}(p,n)$                            | $35\sigma$   |
| 413.3               | $^{198}\text{Au}$  | $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$                       | $9\sigma$    |
| 443.4               | $^{128}\text{I}$   | $^{128}\text{Te}(p,n)$                            | $28\sigma$   |



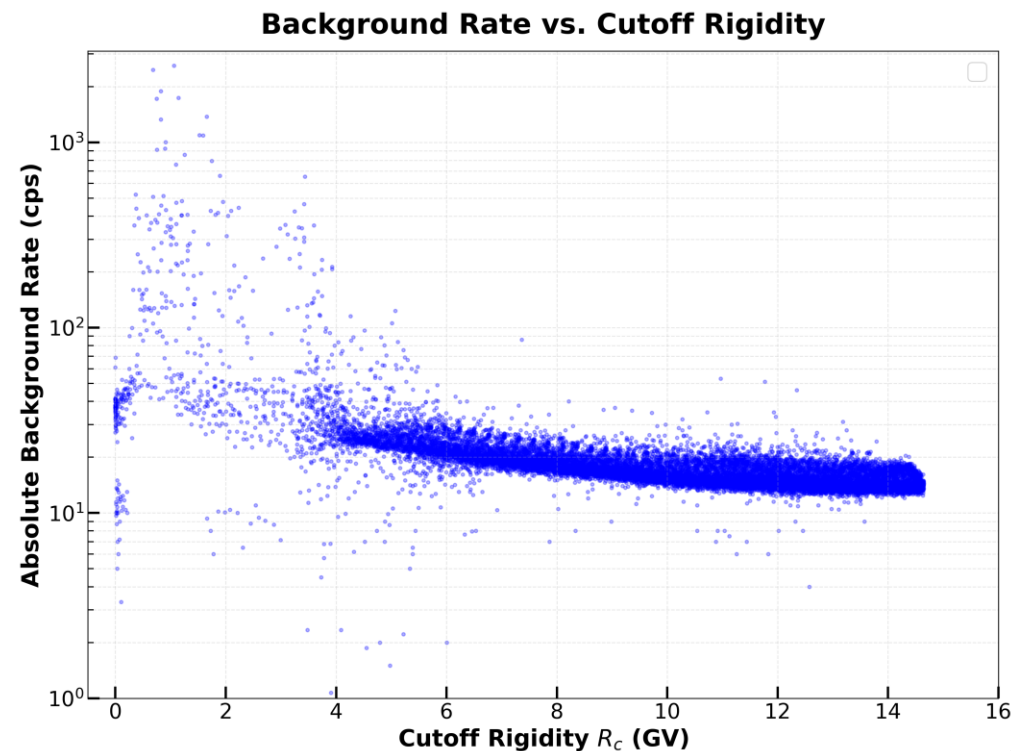
# 在轨本底地理位置分布



- $R_c$  Correlation: Higher Rates at Lower  $R_c$

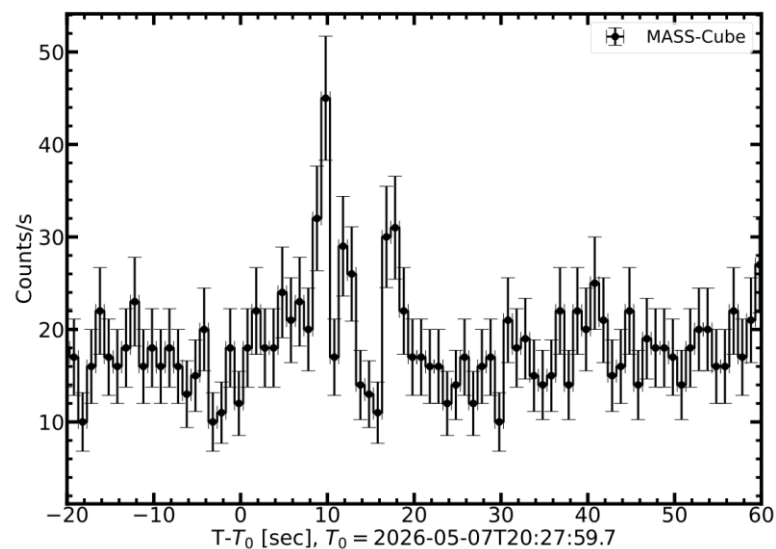
Consistent with Geographical Expectations

- Orbit Track: SAA Avoided Initially, Recent Passes Near SAA
- High Background Rates at High Latitudes (Polar Regions)

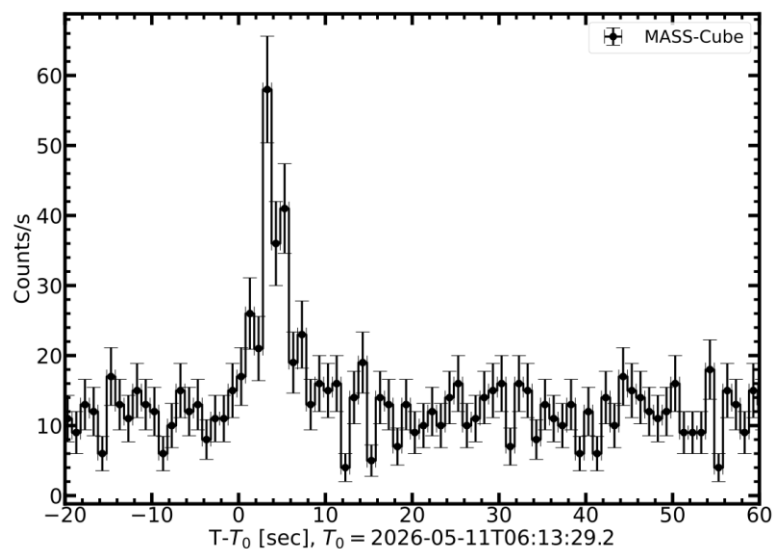


# 瞬变源探测：GRB 光变曲线

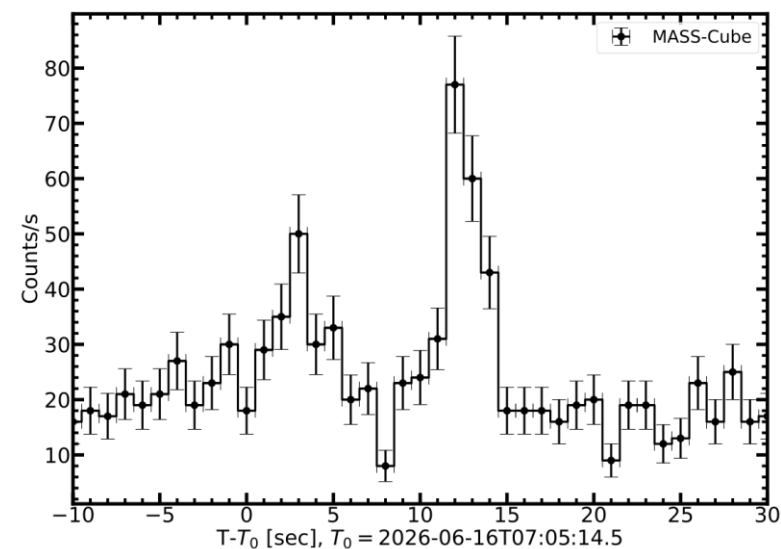
GRB 260507A



GRB 260511A



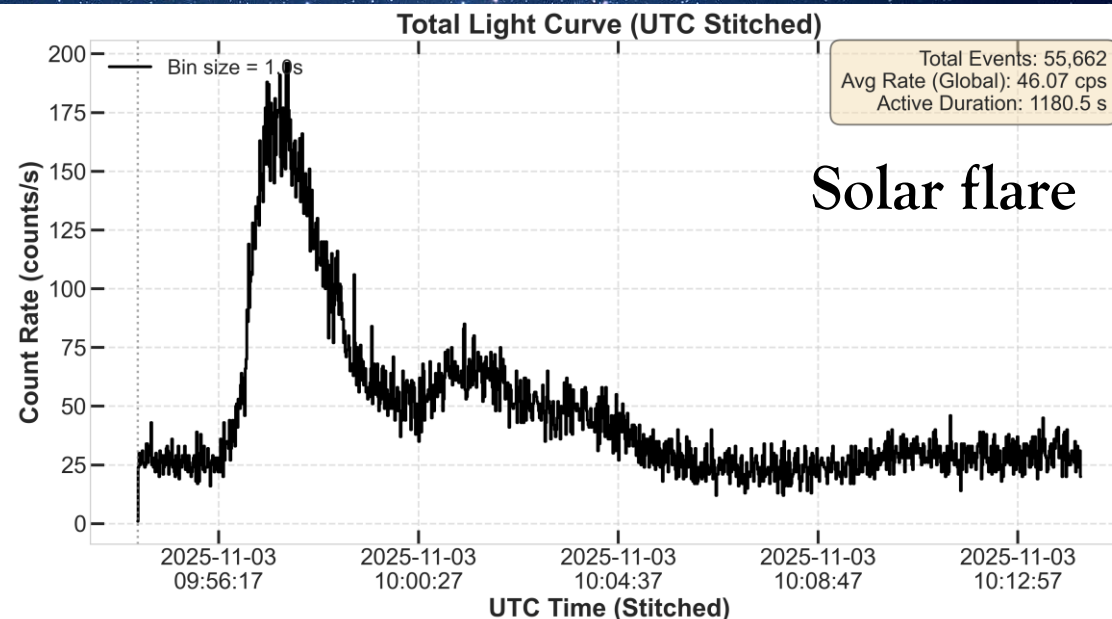
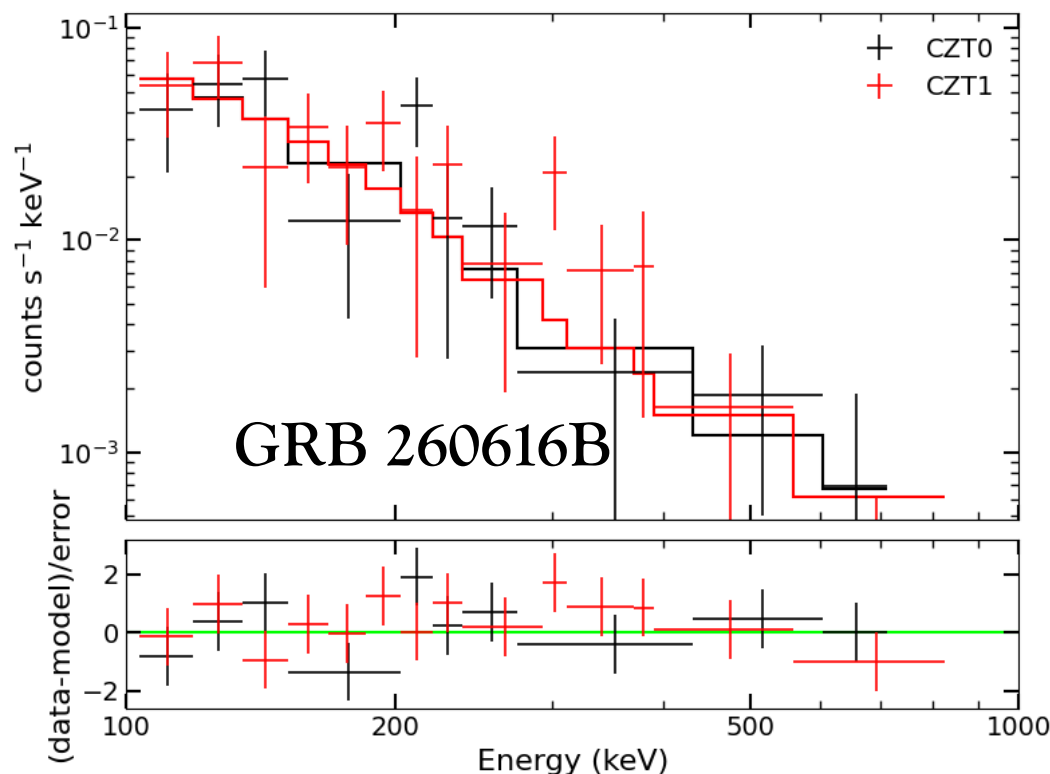
GRB 260616B



# 瞬变源探测

☐ Transients: 1 solar flare and 3 GRBs (GRB 260507A, GRB 260511A, GRB 260616B)

- Solar Flare Light Curve: No instrument saturation



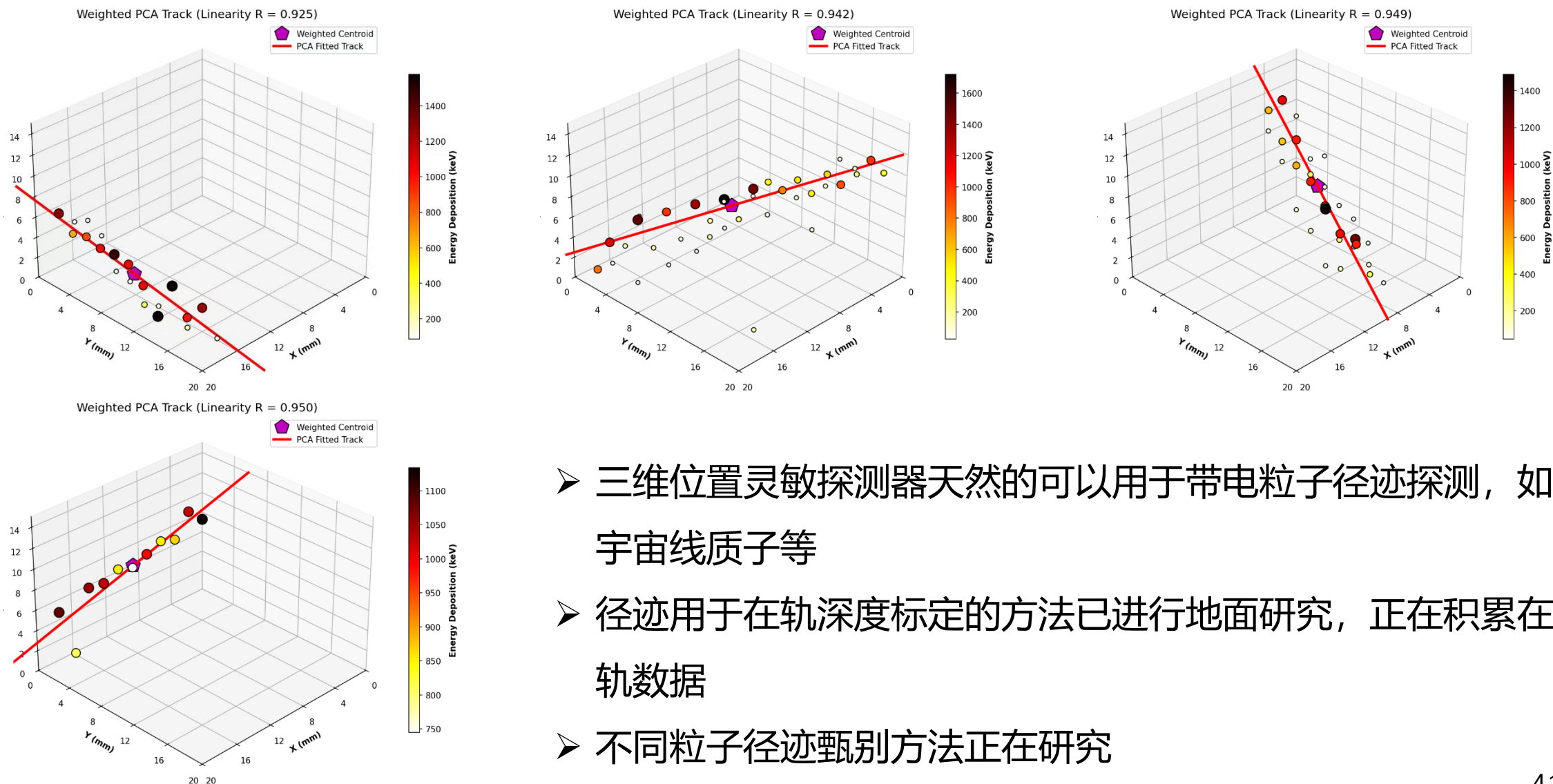
- Mass-Cube  $T_0 - T_0 + 15 \text{ s}$
- Energy range: 100 keV - 1 MeV
- Alpha =  $1.81^{+0.28}_{-0.18}$
- Fermi Alpha =  $1.70^{+0.18}_{-0.15}$

Consistent

† Fermi/GBM data re-fitted with the same method for a direct comparison.

Reliable transient detection capability

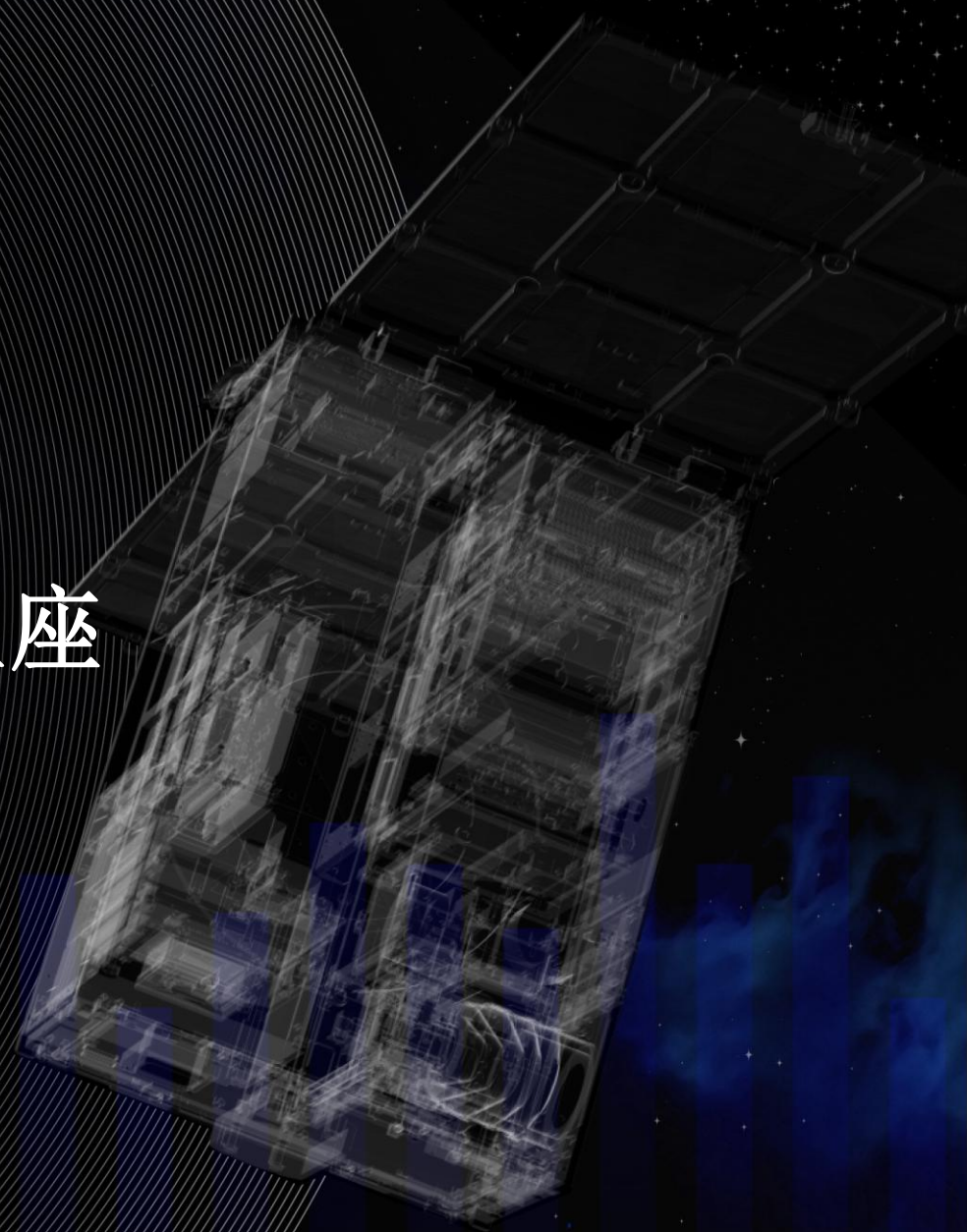
# 在轨运行 — 带电粒子径迹初步结果





**THU** Gamma Ray  
Integrated Detectors

# 天格计划 2.0：下一代纳卫星科学星座



# 天格计划2.0 – 下一代微纳卫星星座

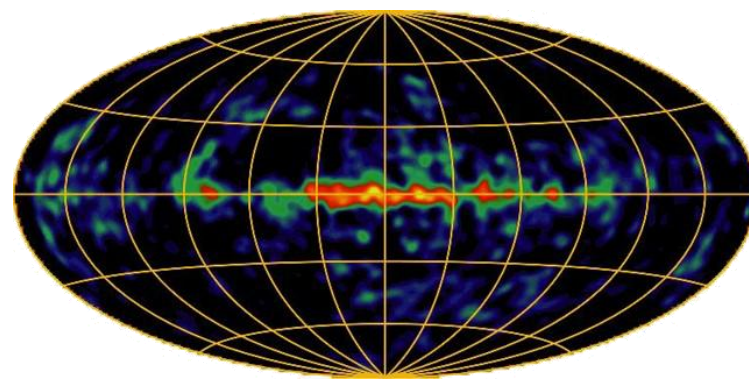


清华大学2030创新行动计划重大项目：

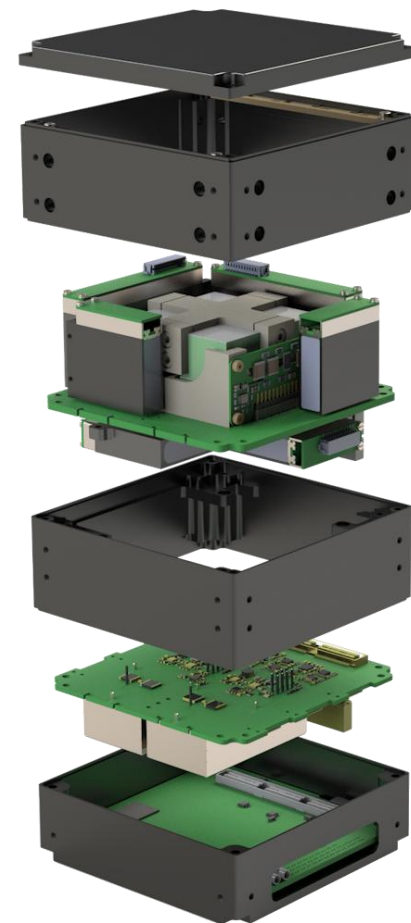
天格计划 2.0：MeV伽马探测纳卫星星座  
(MASS核天体物理谱线巡天)

技术挑战：国际上自美国NASA的COMPTEL康普顿望远镜（1991-2000）后，已经停滞20年，科学界称之为“MeV GAP”。

2025.9.5 首颗载荷发射，基于三维位置灵敏碲锌镉（CdZnTe）探测器技术、专为MeV能区伽马谱线探测设计的纳卫星康普顿望远镜MASS-Cube



铝-26核素伽马谱线的银河系图像



MASS-Cube  
技术验证纳卫星探测器



大质量恒星

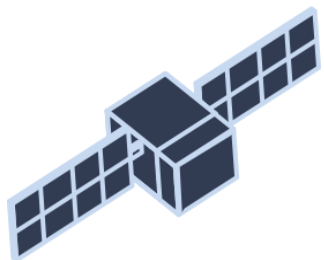


超新星爆发



中子星并和

# 天格计划 2.0：下一代纳卫星科学星座



× 30 颗卫星

**四大科学目标**

紧密联系商业航天卫星产业、多学科交叉前沿研究基础平台的微纳卫星科学计划。

**天格计划 + MASS康普顿 + 多科学目标载荷 + 空间态势感知**

高灵敏度  
的空间伽马暴  
探测任务

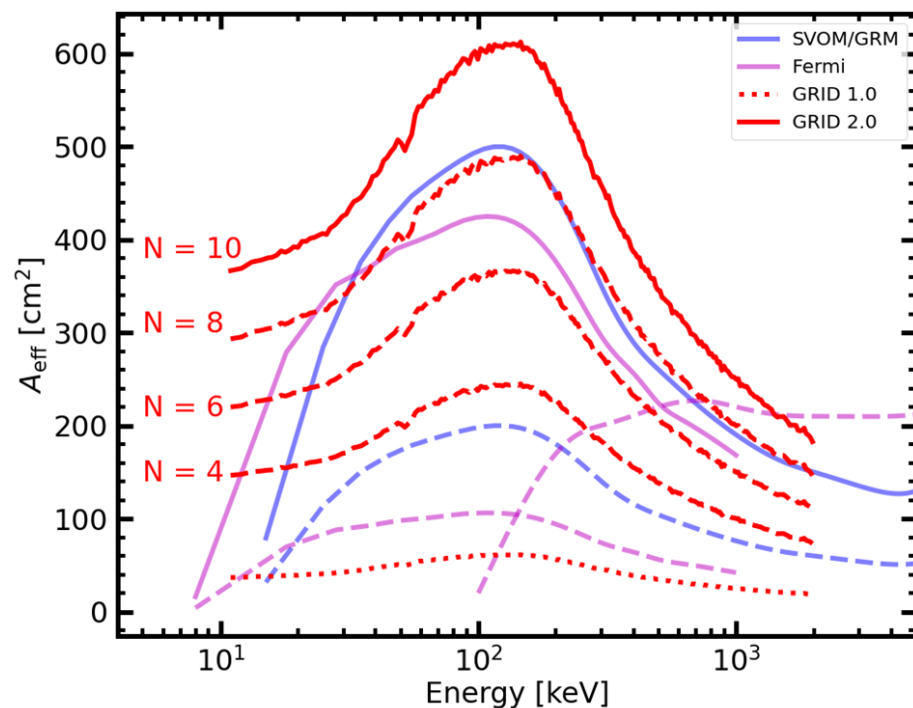
空间伽马康普顿  
卫星任务

高校合作的“科学航次”  
前沿科学国际合作

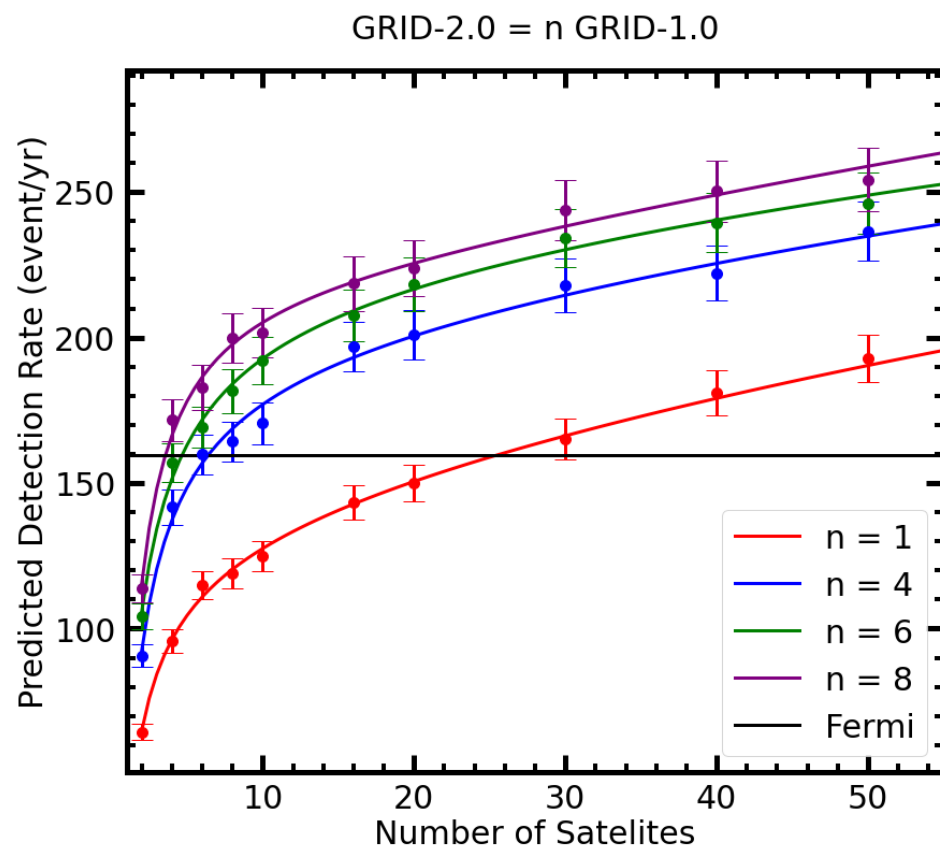
太空交通管理  
太空天气预报

# 天格计划2.0 – 天格载荷伽马暴探测

- 实现10颗天格计划2.0纳卫星在轨
- 有望成为**国际上最高灵敏度的空间伽马暴探测任务之一**
- 并且克服地球遮挡，以星座**实现全天、全时覆盖**，预期每年探测到超过160个伽马暴事例，有望获取第一批与引力波成协的伽马暴事例样本和有趣的科学事例

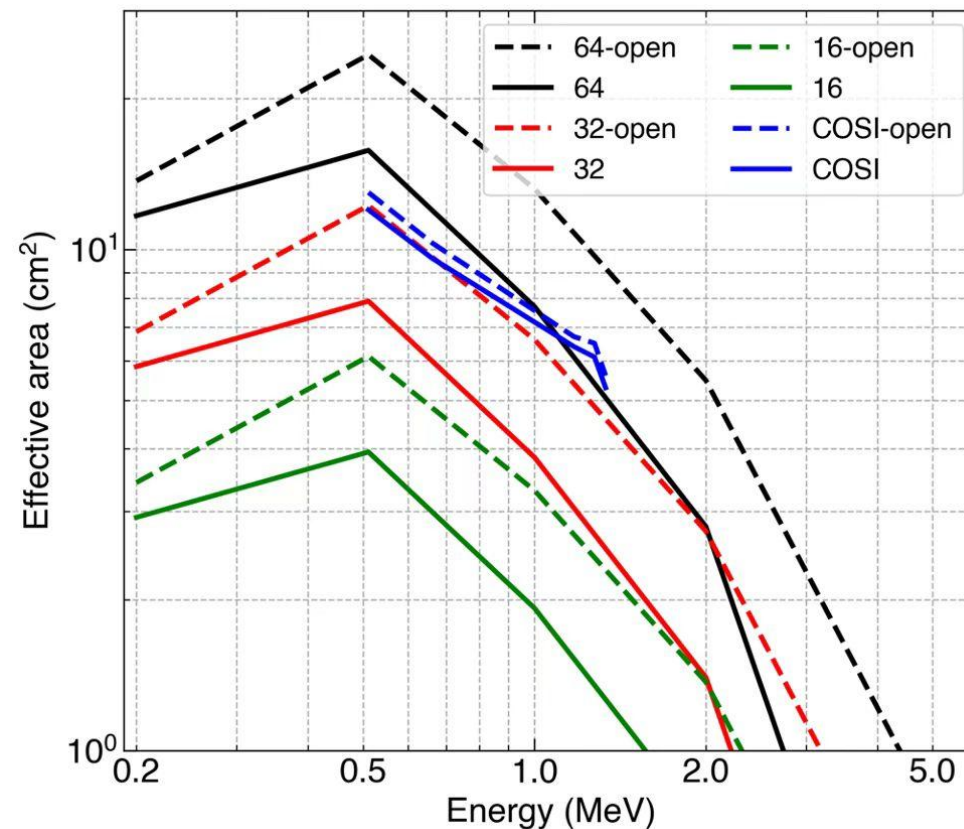
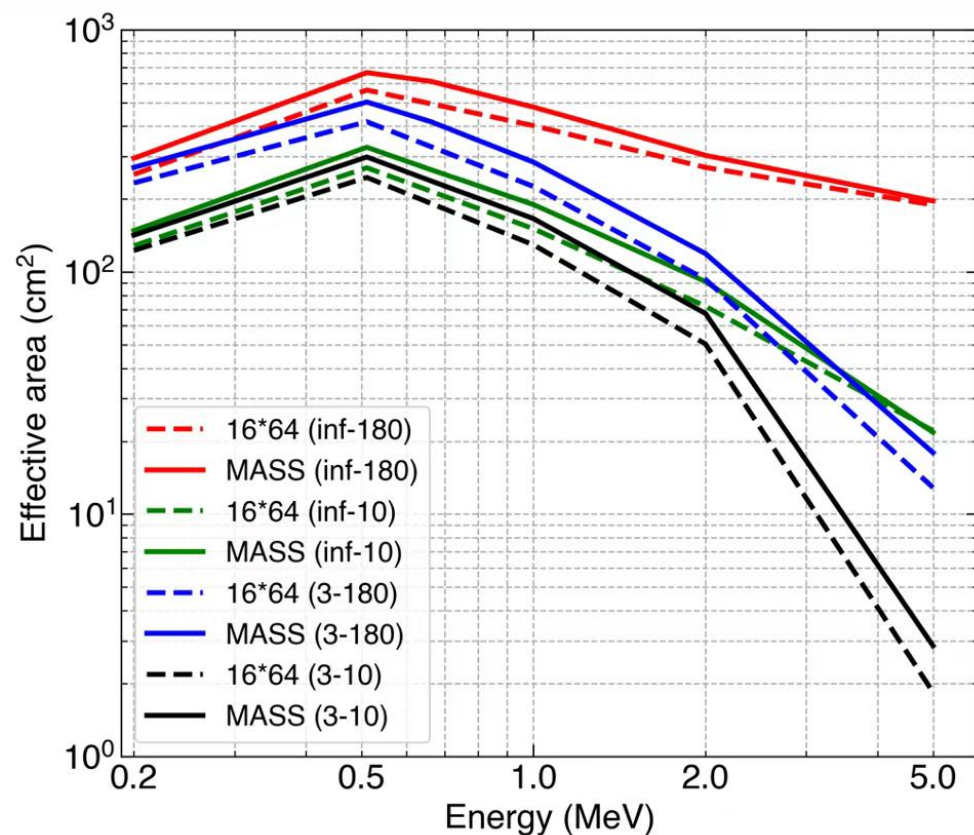


GRID 2.0 = 4 GRID 1.0  
Average Effective Area



GRID-2.0 = n GRID-1.0

# 天格计划2.0 – MASS-Cube载荷预期性能

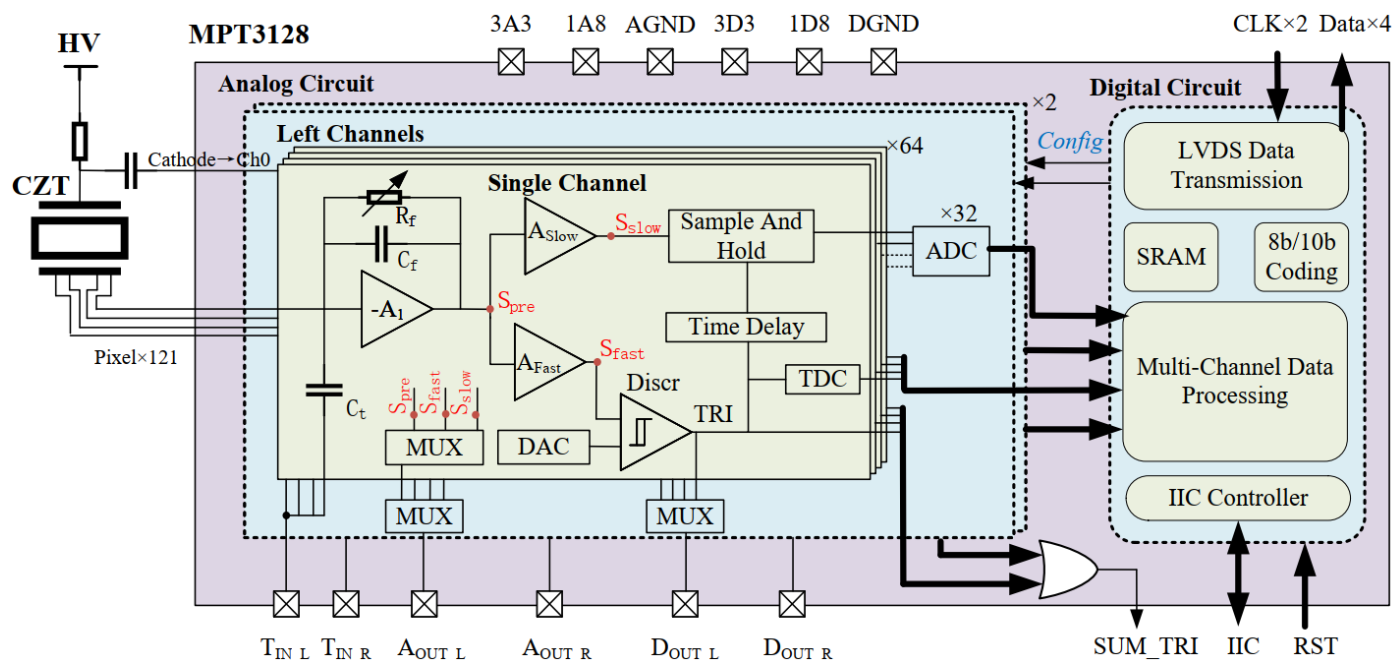


左图：MASS对比16个MASS-Cube星座，探测器总数均为1024个

右图：每个MASS-Cube纳卫星配备不同数量探测器

# 面向3D-CZT的128通道数模混合ASIC研制

与 杭州宇称电子 合作开发针对3D-CZT的ASIC



- 高性能:
  - **<300 e<sup>-</sup> rms** 等效噪声电荷
  - **< 2 ns rms** 定时抖动
  - **~1%@511 keV FWHM** 能量分辨率
  - **55 k/s** 有效数据触发
- 数模混合架构:
  - 经典 CSA + 快慢成型器
  - ADC: 12 bit
  - TDC: 312.5 ps
  - 全数字控制和读出
- 阴阳极异构设计:
  - 阴极: 多阈线性插值定时/可调快成型时间
  - 阳极: 单阈值定时/ 固定快成型时间

# ASIC研发历程

23年6月 项目立项  
23年12月 V1 版本流片

24年9月 V2 版本流片

25年5月 V3 版本流片

26年4月 相关论文在  
IEEE TNS发表

24年5月  
芯片测试与改进

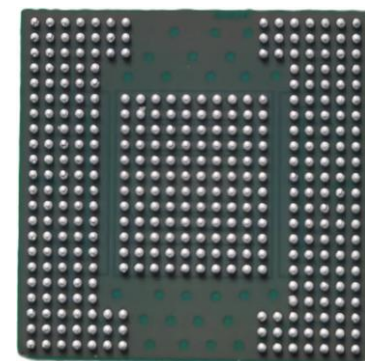
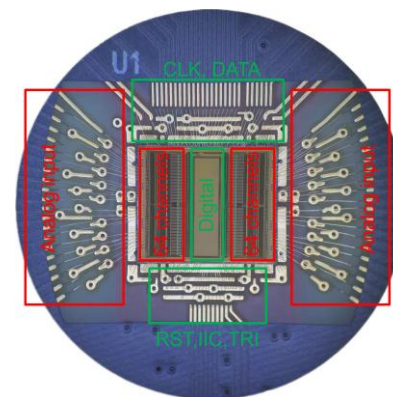
- ~10% @511 keV
- 阴极多阈值定时
- 增加阳极漏电流补偿

25年1月  
芯片测试与改进

- ~2.2% @511 keV
- 阴极快成型时间可调

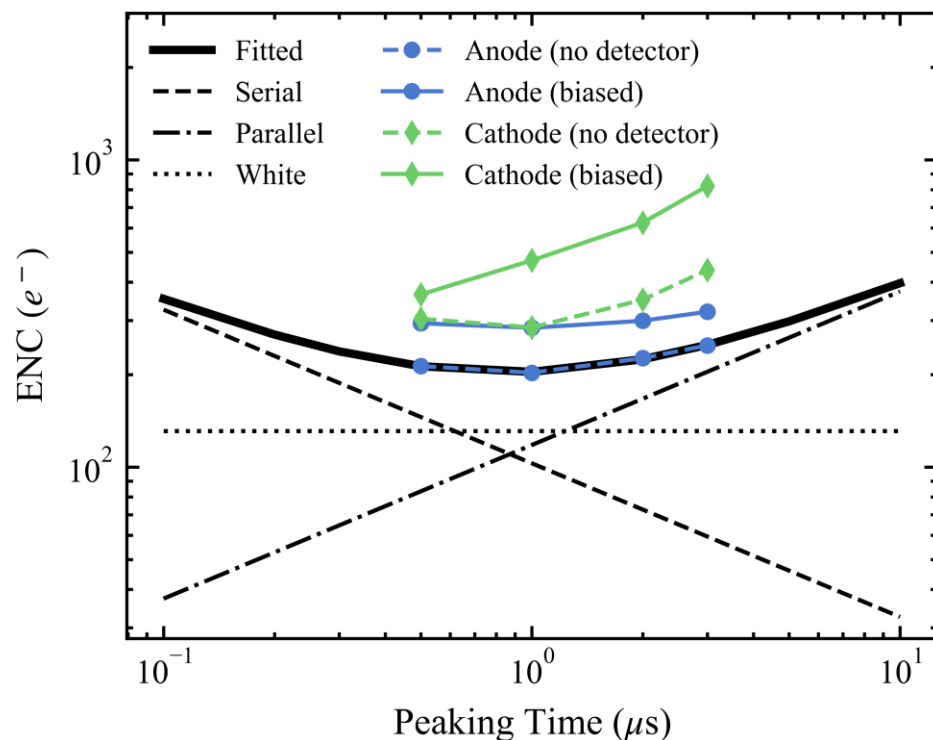
25年9月  
芯片测试与改进

- ~1.0 % @511 keV
- 提高hold delay 时钟
- 噪声-电容斜率优化

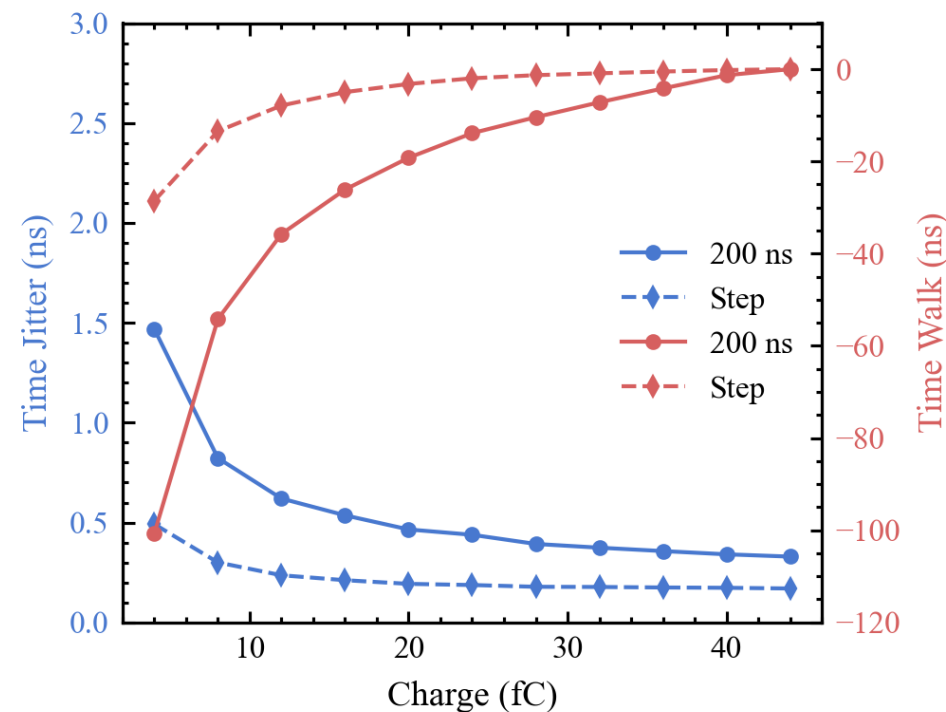


# ASIC电子学测试：噪声与定时特性

- 电子学噪声测试：对比了阴阳极在无探测器与连接探测器（+2000V偏压）不同成型时间下的结果。
- 定时抖动与时间幅度游走随输入电荷变化

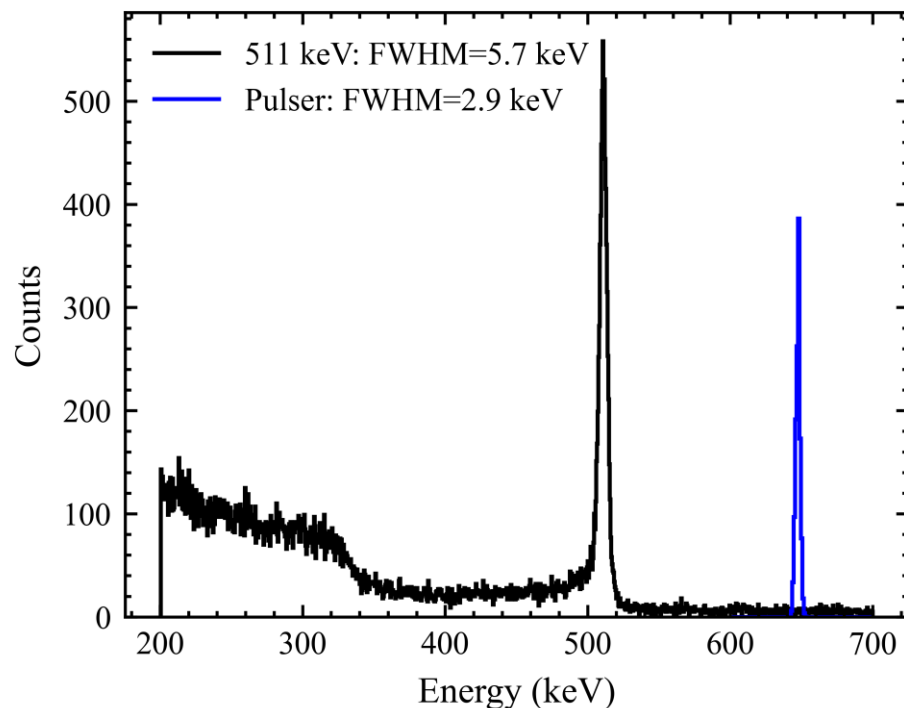


等效噪声电荷: < 300  $e^-$  rms

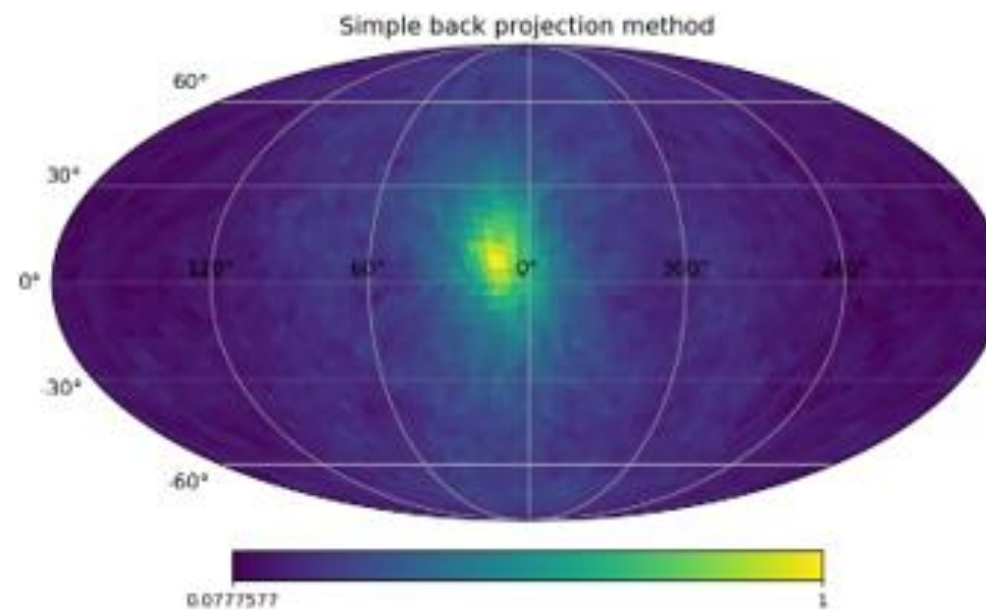


定时抖动: < 2ns rms

# 芯片-晶体集成测试：能谱与初步成像表现



- 511峰能量分辨率： 5.7 keV ( $\sim 1\%$ ) FWHM
- 电子学脉冲： 2.9keV FWHM

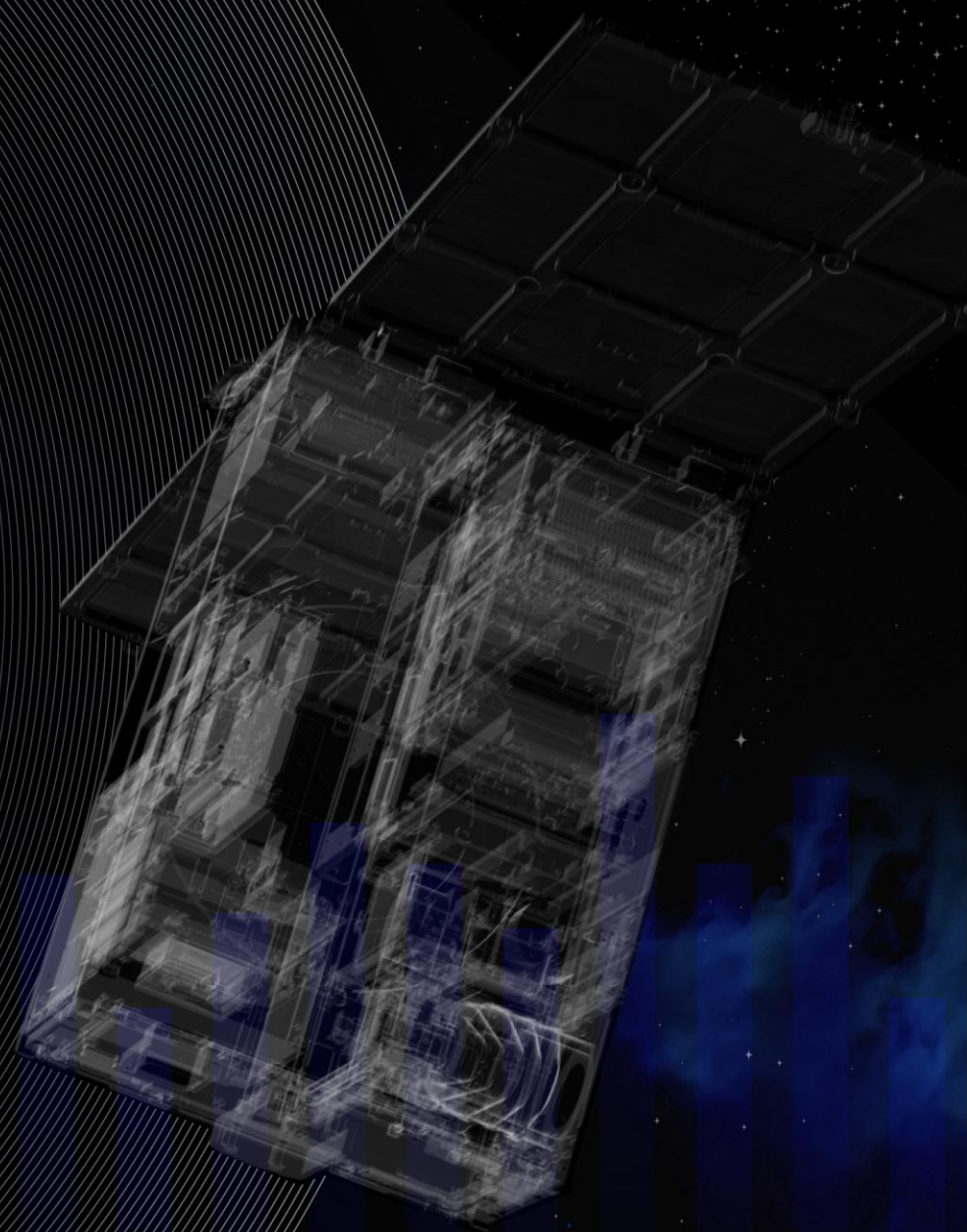


- 511 keV康普顿成像：  $\sim 20^\circ$  ARM



**THU** Gamma Ray  
Integrated Detectors

# 规划中的下一代 MeV 空间任务



# 下一代 MeV 天文望远镜

- 主要问题: “MeV Gap” → 现有 MeV 探测敏感度落后其他波段 3–6 个数量级。
- 小型任务 & 微纳卫星星座:
  - 天格计划2.0 MASS-Cube —— 全天全时、时域爆发监测与全天谱线巡天  
同时: 技术探索 & 人才培养
- 战略布局 (两个方向):
  - 宽视场巡天: MeVGRO (女娲) —— 大视场、宽能段 (0.2–5 MeV/延伸至 100 MeV)、时域爆发监测与全天谱线巡天。
  - 高精度聚焦成像: PAIRS / FIONA —— 劳厄透镜聚焦 + 超导微热测卡仪 (TES), 专注 511 keV 等谱线极致分辨率。

# MeVGRO (女娲, NuWa)

- MeVGRO (MeV Gamma-Ray Observatory)

*Aim to observe 0.2~5MeV (extendable to 100 MeV) gamma-rays in wide-field*

- Energy : nuclear lines and continuum
- Imaging
- Timing
- Polarization

- *Proposed by IHEP to Chinese Academy of Sciences (CAS) in 2017.*

- Concept research funded by CAS (~2020)
- Prototype development funded by NFSC and CNSA (~2024)
- Proposed to CAS as a candidate mission for Intensive Study in 2022

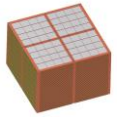
*Collaboration: PMO, THU, NPU, BUAA, SU, Microsat*



Sensitivity is expected to be improved by  
1~2 orders of magnitude

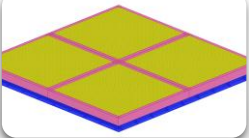
# MeVGRO payloads

Aim to observe 0.3~3MeV(100MeV) gamma-rays in wide-field



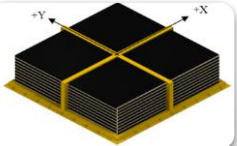
## *Gamma-ray converter tracker(GCK)*

- 50 layers DSSD
- Converter and tracker



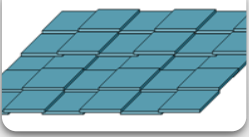
## *Low Energy Calorimeter(LECA)*

- 3D CZT (2 layer)
- Precise energy measure, Compton camera



## *High Energy Calorimeter(HECA)*

- Scintillators(CeBr3 or new material)
- Absorber, high energy measure



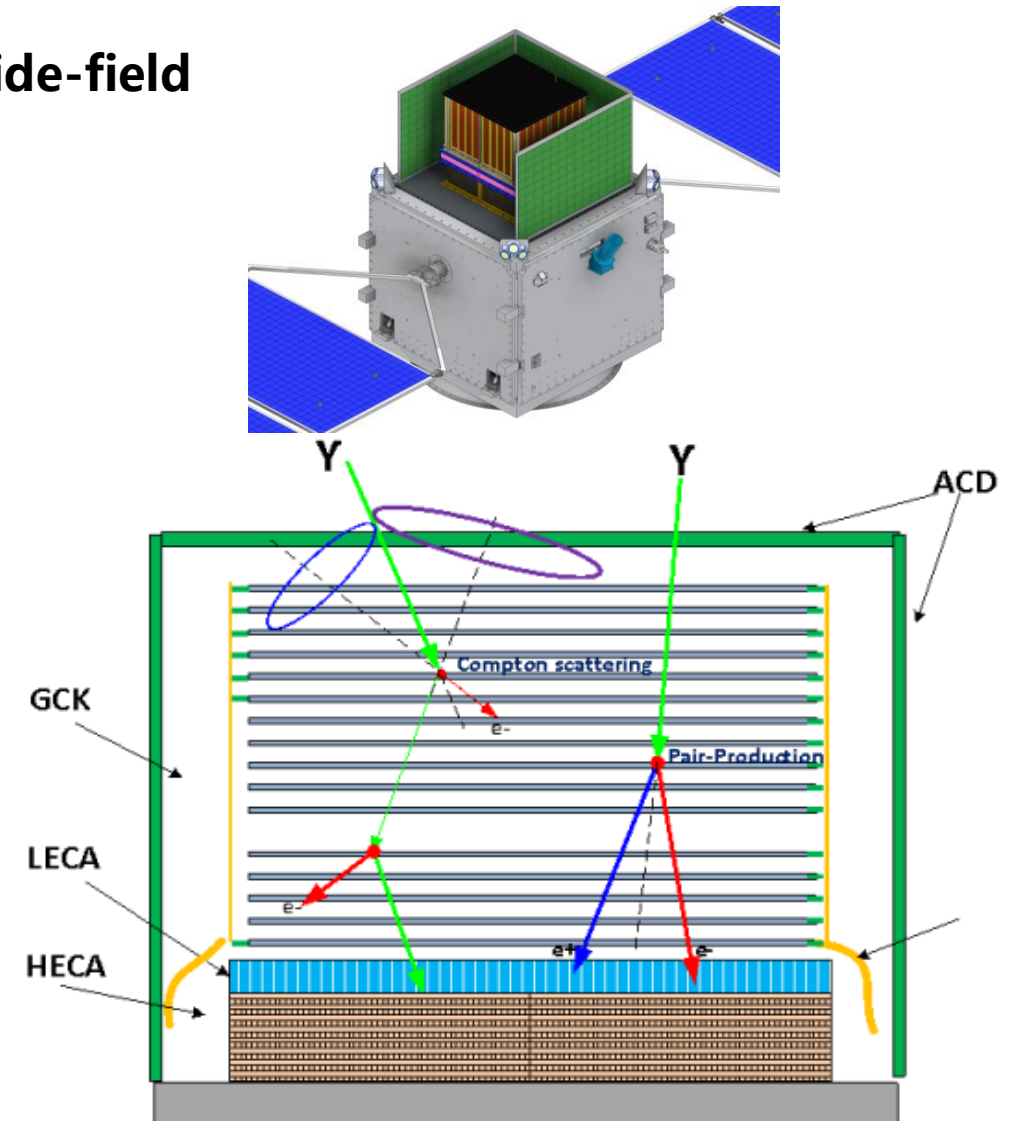
## *Anti-concident Detector (ACD)*

- PSD+MAPMT, Veto for charge particles



## *Cosmic burst monitor(CBM)*

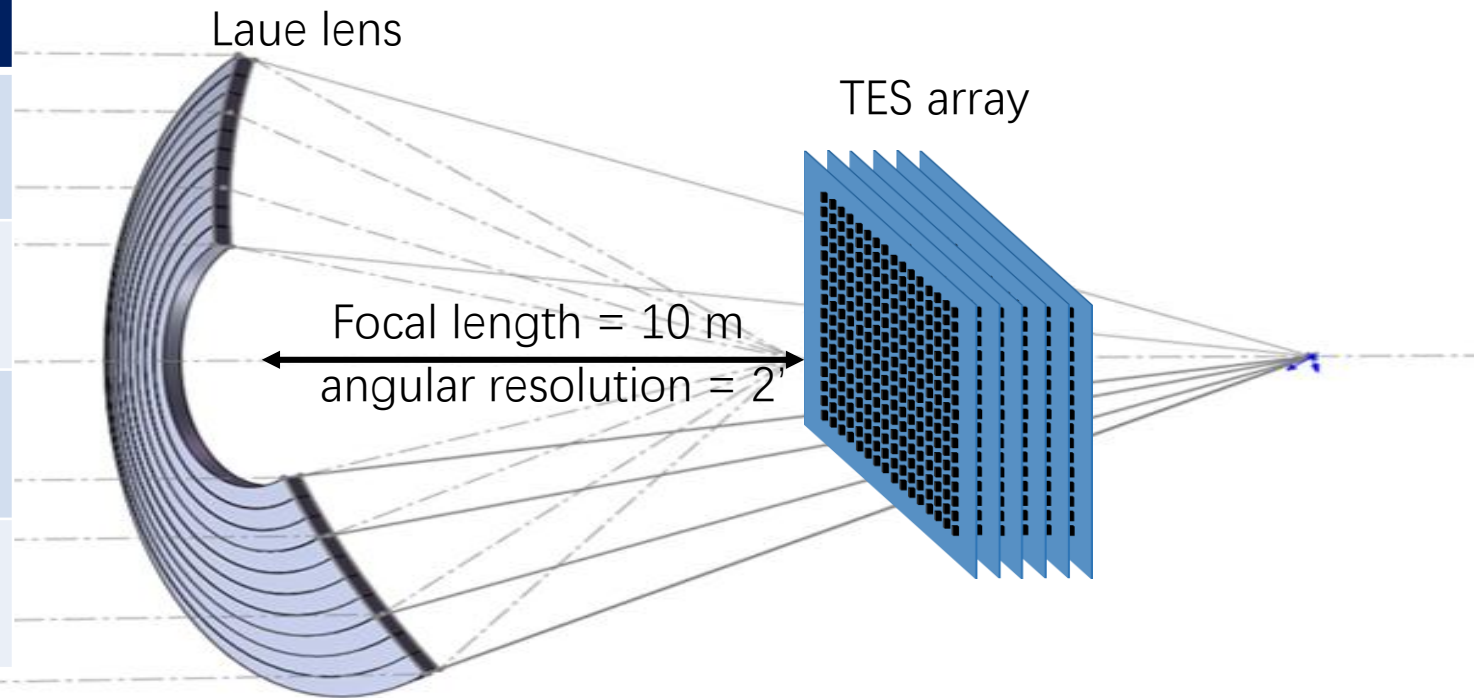
- LaBr3+SiPM array



# PAIRS balloon project (2025-2029)

## Positron Annihilation Imaging high-Resolution Spectrometer

|                    | <i>Performance</i>                             |
|--------------------|------------------------------------------------|
| Energy range       | 450 keV ~ 550 keV                              |
| Angular resolution | ~2 arcminutes @511keV                          |
| Energy resolution  | <0.1%@511keV                                   |
| Lines sensitivity  | ~1.E-06<br>ph/cm <sup>2</sup> /s@0.511MeV(1Ms) |



Observation time: 12 days

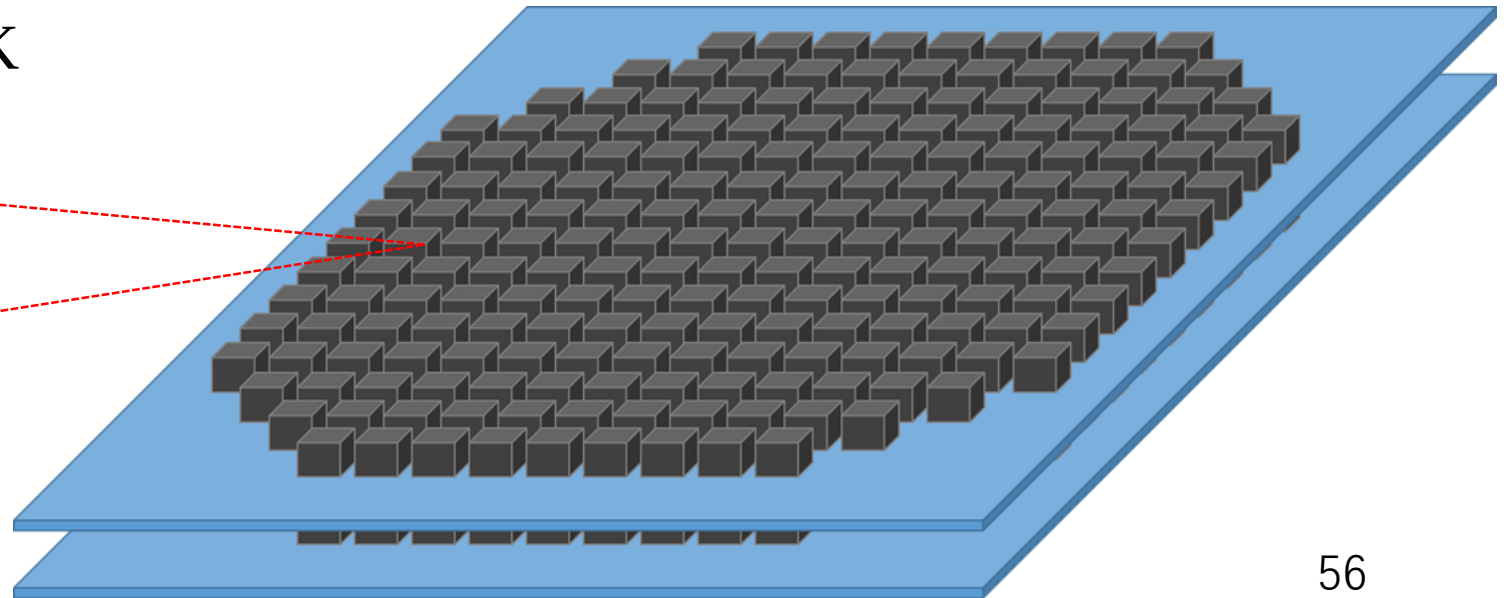
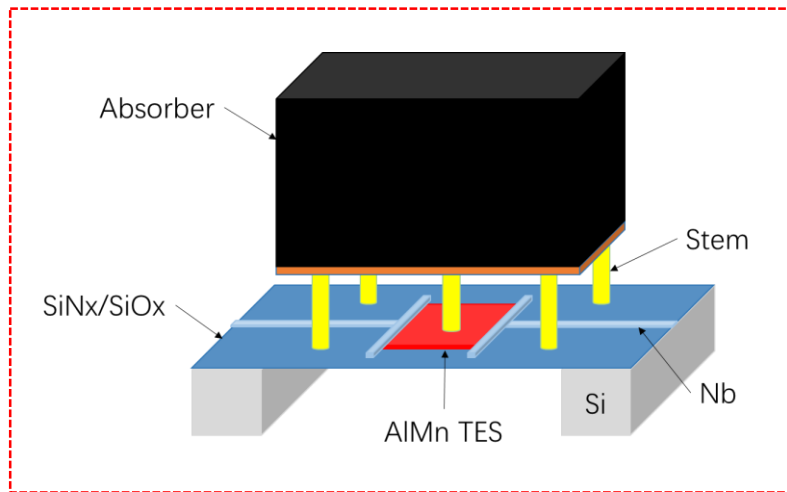
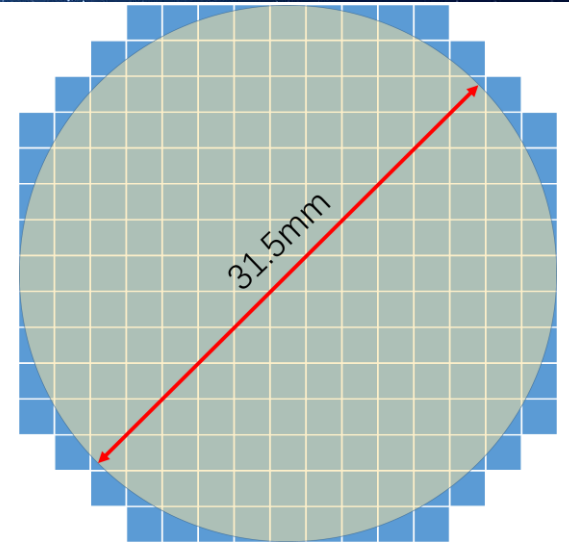
- multiple 24h~48h flights in China
- or continuous flight around South Pole

Altitude: 30 km ~ 40 km

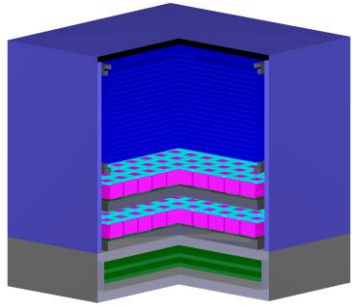
Laue direct imaging  
+  
superconducting microcalorimeter

# TES microcalorimeter: design

- Transition-Edge Sensor (TES) material: AlMn alloy
- Absorber material: Ta, Pb, Bi or other heavy metals
- Absorber size: 2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  2 mm (2' angular resolution)
- Geometry: 201 pixels per layer, 2 layers (402 pixels in total)
- Effective area: 8 cm<sup>2</sup> per layer
- Resolution: 0.5keV @ 511 keV ( $E/\Delta E = 1000$ )
- Total QE: 50% @ 511 keV
- Working temperature:  $\sim 100$  mK

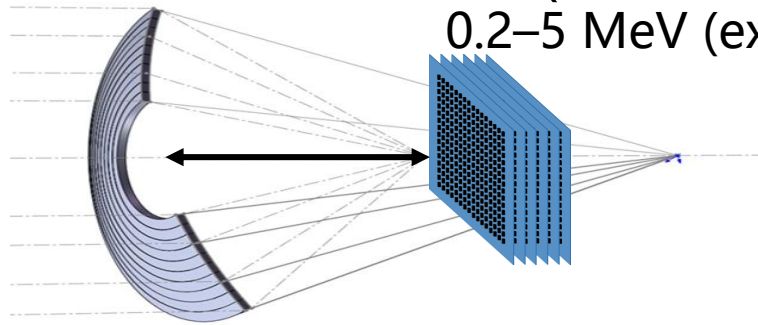
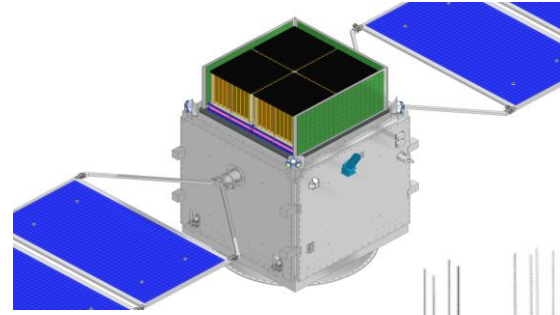


# Outlooks-development plan



MeVGRO & MeVGRO prototype  
(MeV Gamma-Ray Observatory)

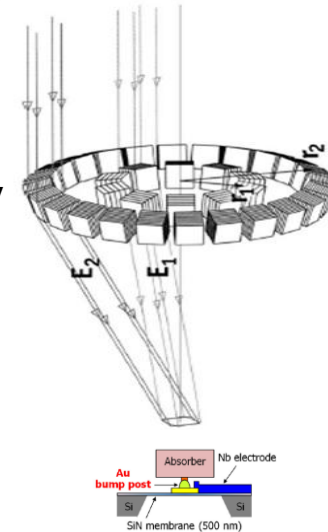
0.2–5 MeV (extendable to 100MeV); large FOV



PAIRS

(Positron Annihilation Imaging high-Resolution Spectrometer)

511 keV high angular & energy resolution



FIONA

Focusing Imager Of Nuclear Astrophysics

0.1–2 MeV; high angular resolution; high lines sensitivity

Late 2020s

- MeVGRO prototype
- PAIRS-balloon

2030s and beyond

- MeVGRO
- FIONA (satellite)

- **领域：** MeV 软伽马空间天文探测，关联诸多重要科学问题，已停滞 20 余年，亟需突破；
- **路线：** 室温像素 CdZnTe 三维位置灵敏技术，是空间 MeV 谱线望远镜一条现实可行的路线；
- **验证：** MASS-Cube 在轨近一年，以  $16\text{ cm}^2$  微小面积观测到银心 511 keV 谱线——性能、本底与辐照损伤可测、可控、可校正；
- **布局：** 天格计划 2.0 星座与国产 ASIC 正在推进；面向"MeV Gap"，一系列 MeV 空间任务正在规划，期待更多合作与共同探索。



**THU** Gamma Ray  
Integrated Detectors

谢谢!





THU Gamma Ray  
Integrated Detectors

天道酬勤 格物致知