



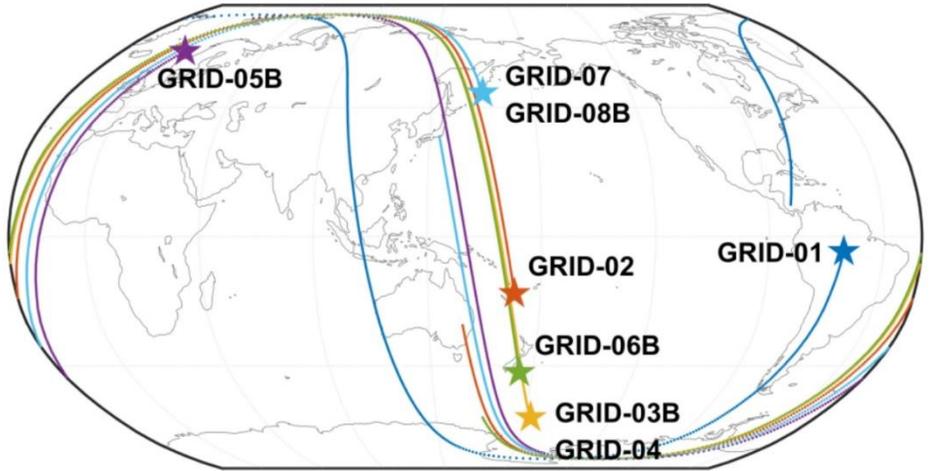
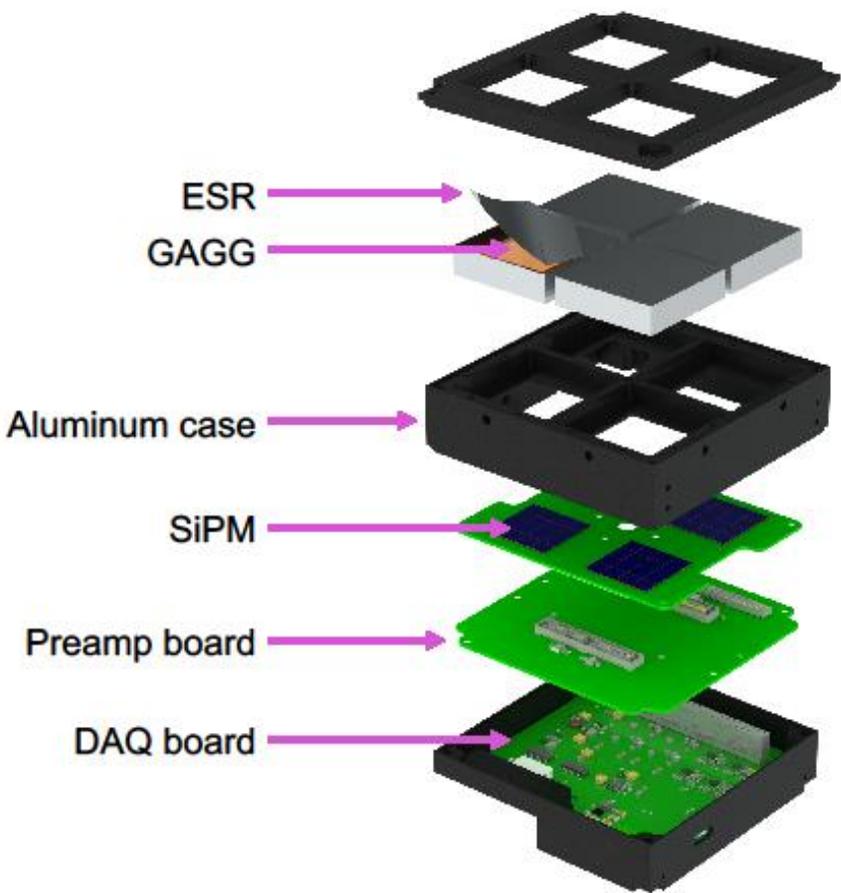
清华大学
Tsinghua University

像素型碲锌镉探测器与GRID-MASS研究进展

清华大学工程物理系

郑煦韬

天格计划(GRID)伽马射线暴监测纳卫星星座

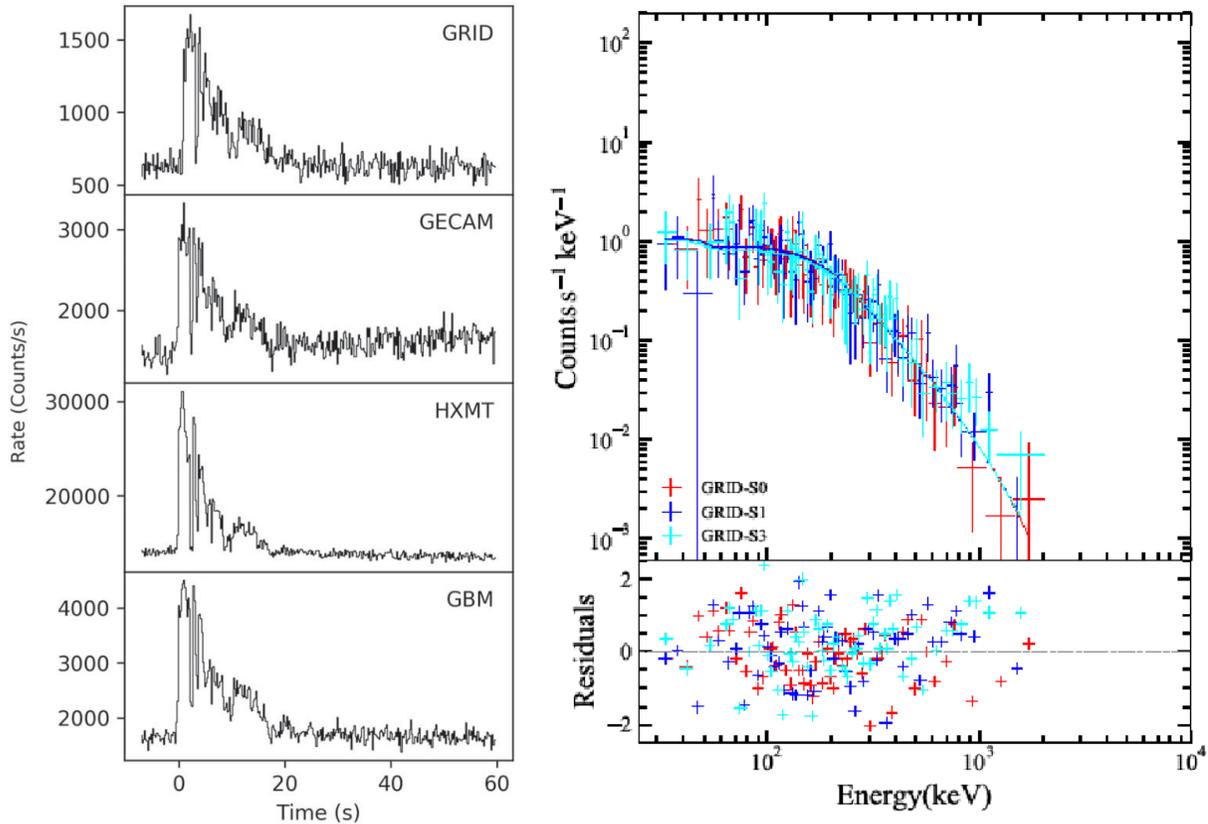


2016年清华第一代成员合影



发射时间	发射地点	载荷	负责高校
2018-10-29	酒泉	GRID-01	清华大学
2020-11-06	太原	GRID-02	清华大学
2022-02-27	文昌	GRID-03B	清华大学
		GRID-04	清华大学
2023-01-15	太原	GRID-05B	清华大学
		GRID-06B	南京大学、四川大学
		GRID-07	北京师范大学
		GRID-08B	四川大学、南京大学

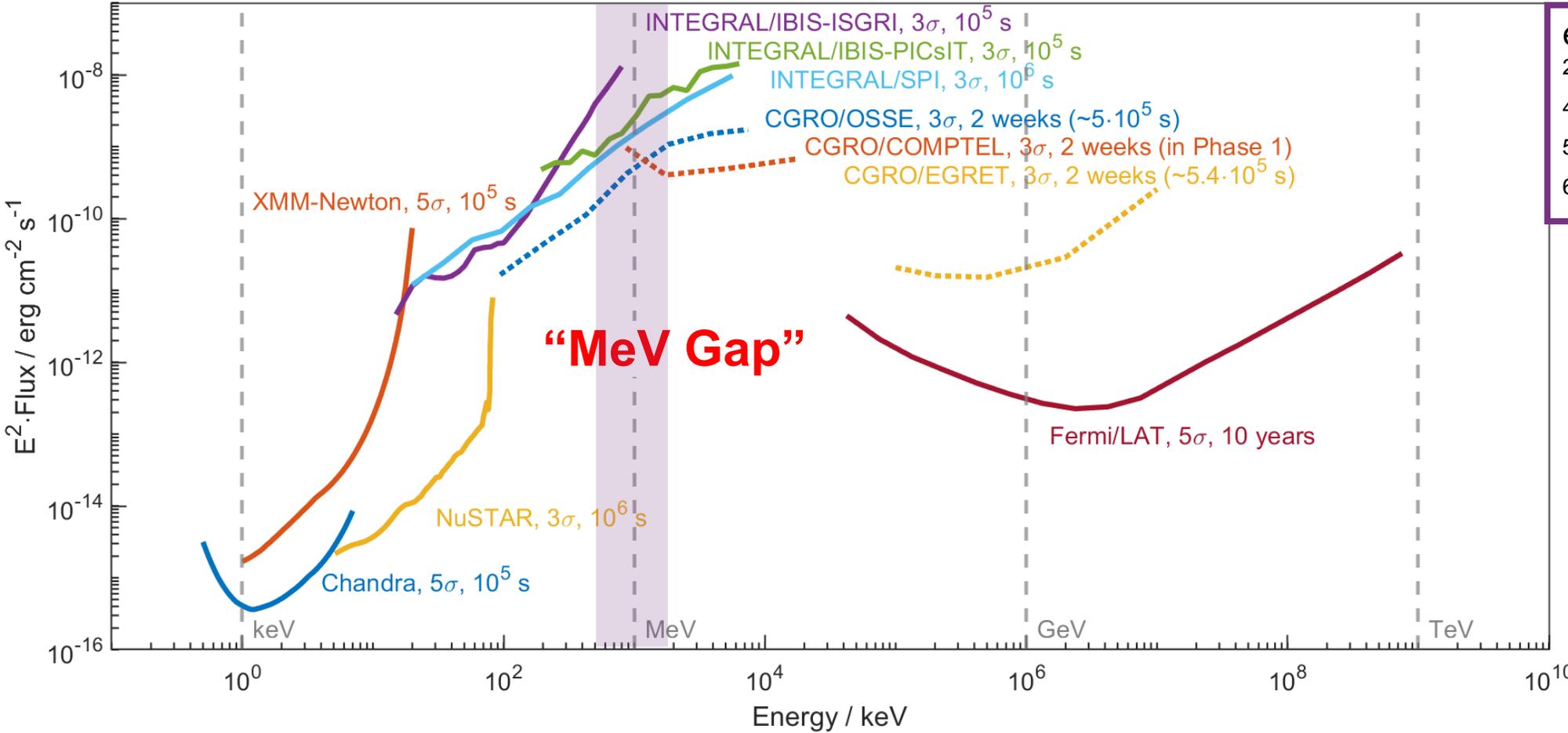
科学成果



GRB 210121A光变曲线与能谱
(Wang et al. 2021)

GRB Number	GCN Number	GRID Detector(s)
GRB 230625A	34149	GRID-03B
GRB 230628C	34171	GRID-07
GRB 230703A	34188	GRID-03B, GRID-04, GRID-07
GRB 230812B	/	GRID-05B
GRB 230818A	34523	GRID-03B
GRB 230827A	34642	GRID-03B, GRID-04
GRB 231004A	34868	GRID-03B, GRID-04, GRID-07
GRB 231020A	34903	GRID-04, GRID-06B
.....		

科学背景：“MeV Gap”

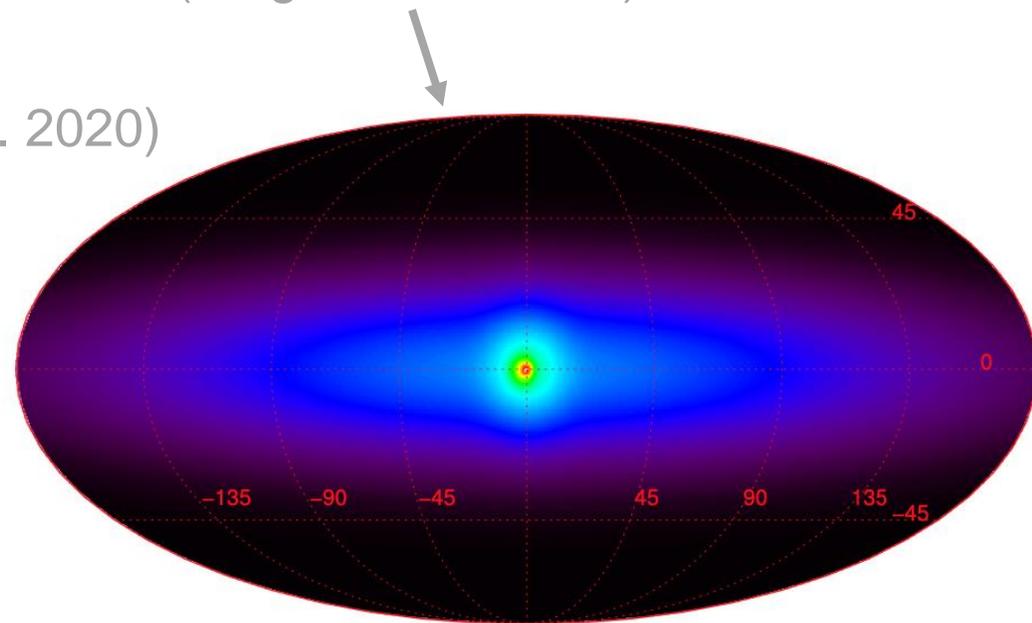


e^+	0.511 MeV
^{26}Al	1.809 MeV
^{44}Ti	1.157 MeV
^{56}Co	0.847, 1.238 MeV
^{60}Fe	1.173, 1.332 MeV

受限于技术困难，MeV能段伽马射线天文观测的灵敏度仍然较差，比相邻的keV和GeV能段差3到6个数量级，被称为“MeV Gap”。

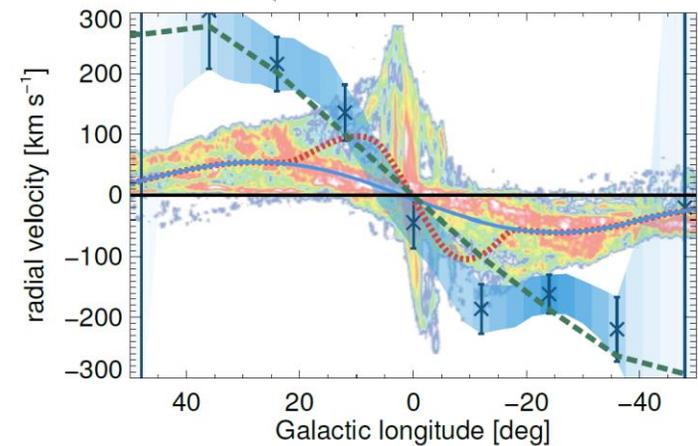
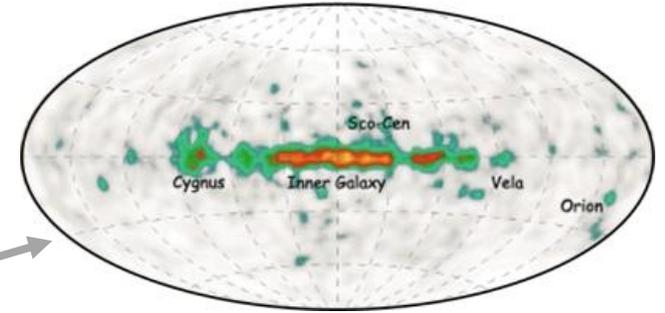
0.511 MeV正电子湮灭线

- INTEGRAL/SPI对银河系0.511 MeV谱线进行了11年的成像观测 (Siegert et al. 2016)
 - Bulge-to-disk flux ratio = 0.58 ± 0.13
- 2016年, COSI气球实验观测结果与之一致 (Siegert et al. 2020)
- 银心正电子起源问题:
 - Sgr A* (Totani et al. 2006)
 - 银心分子云核合成 (Alexis et al. 2014)
 - 暗物质? (Ascasibar et al. 2006)
- INTEGRAL/SPI采用编码孔径方法成像, 需要直接成像手段加以验证



1.809 MeV ^{26}Al 衰变线

- 1979-1981, HEAO-3首次探测到 ^{26}Al 谱线 (Mahoney et al. 1982)
 - 证明银河系内正在进行核合成
- 1991-2000, CGRO/COMPTEL对谱线进行成像观测 (Diehl et al. 1995)
 - 证明 ^{26}Al 主要来自大质量恒星及其超新星爆发
- 2002至今, INTEGRAL/SPI测量谱线多普勒展宽并沿经度方向成像 (Kretschmer et al. 2013)
- 2016年, COSI气球实验测量银心附近谱线通量 (Beechert et al. 2022)
 - Inner Galaxy: $8.6 \times 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - Extended: $17.0 \times 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 有待解决:
 - 更高成像分辨率: 大质量恒星区域、银河系纬度方向
 - 更高灵敏度: 暗弱区域、河外星系



MeV能段谱线观测需求

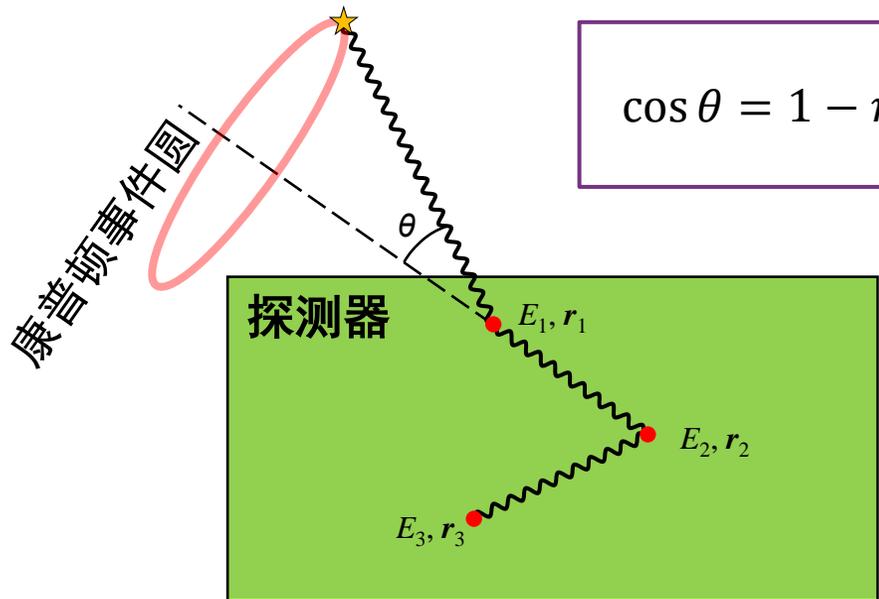
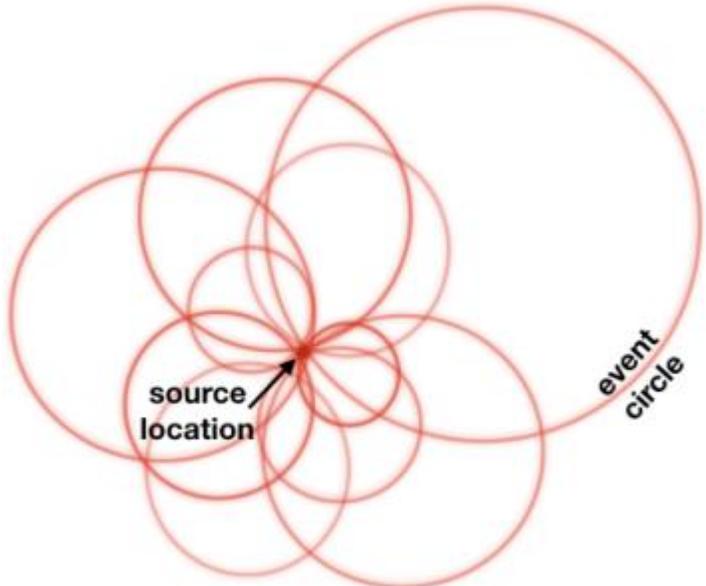
- 谱线观测
- 更高分辨率直接成像
- 更高灵敏度



康普顿成像谱仪

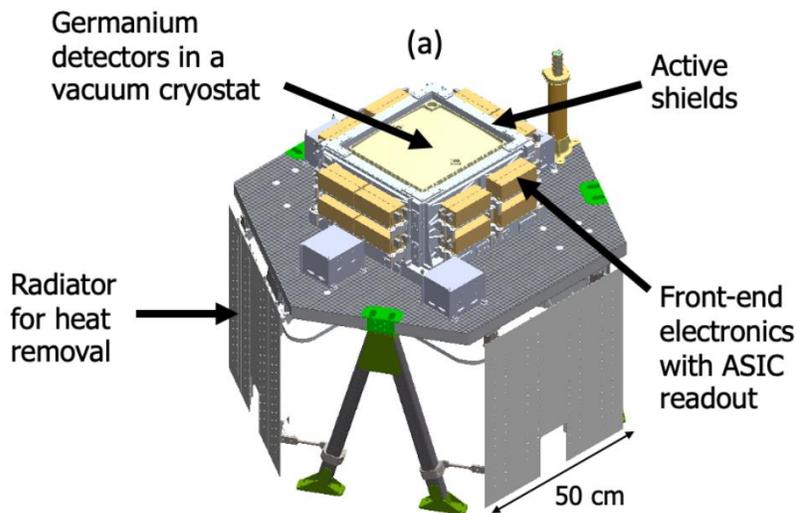
- ✓ 高能量分辨率
- ✓ 三维高位置分辨
- ✓ 大面积

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



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

基于小型卫星或微纳卫星的康普顿成像谱仪任务提案

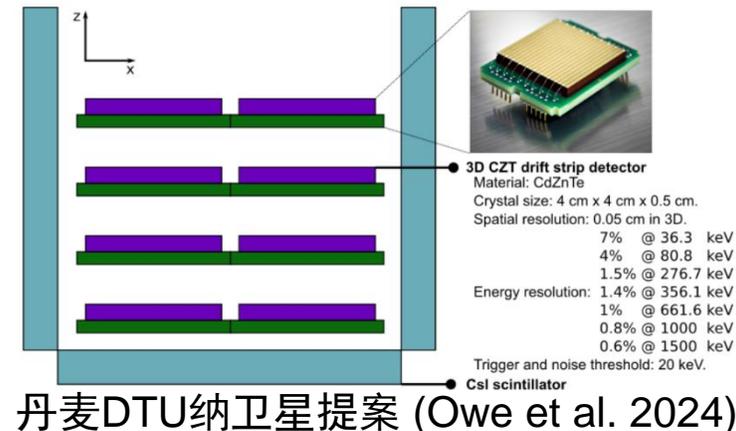


COSI SMEX (Tomsick et al. 2023)



COSI

- 双面正交条高纯锗探测器
- 机械制冷, 80 K ~ 90 K
- Strip pitch 1.162 mm
- FWHM 0.8% @662 keV
1.2% @511 keV
- 入选NASA SMAll EXplorer, 计划2027年发射

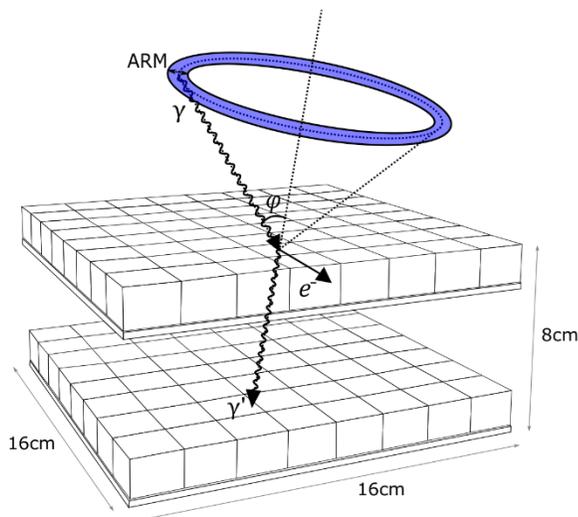


丹麦DTU纳卫星提案 (Owe et al. 2024)

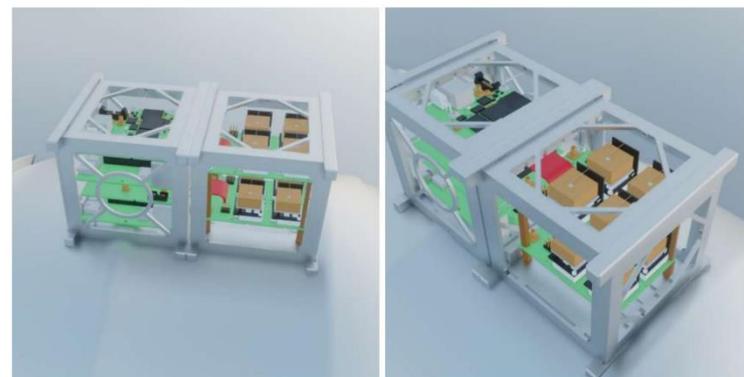


MeVCube

- 像素型碲锌镉探测器
- Pixel pitch 2.45 mm
- FWHM 2.8% @662 keV
- 6U纳卫星



MeVCube概念设计 (Lucchetta et al. 2022)

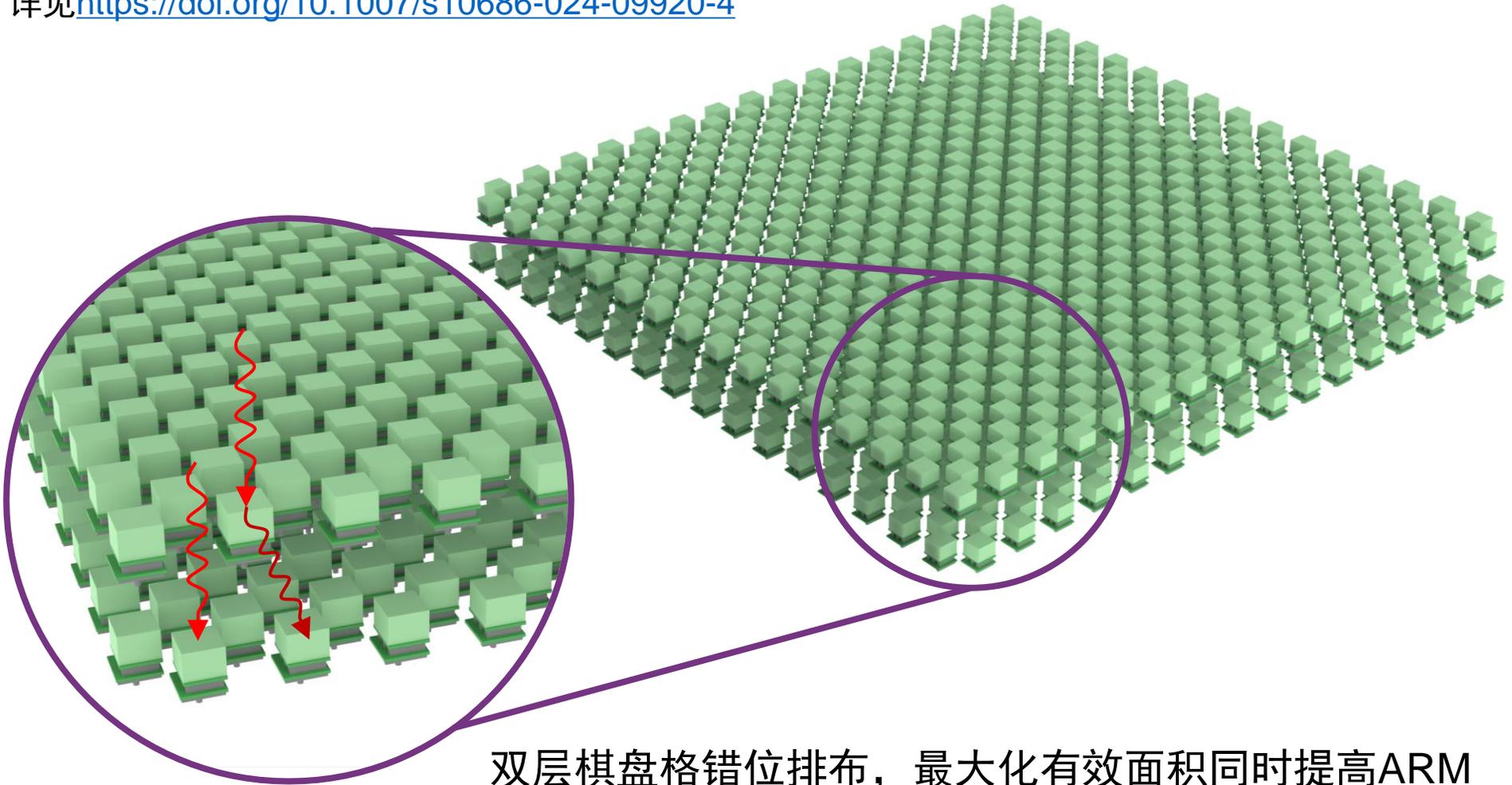


香港HKU纳卫星提案 (Kuijper et al. 2024)

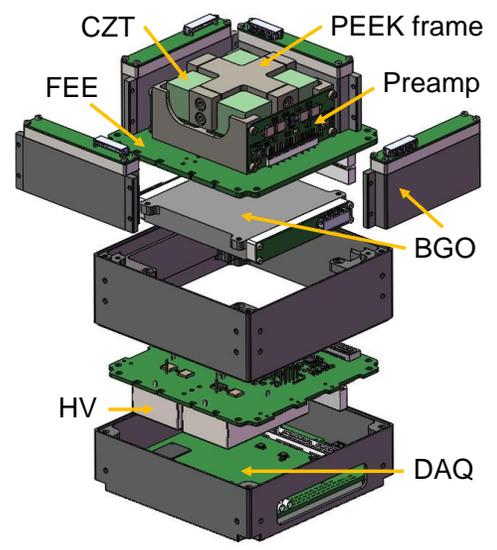
MeV天体物理谱线巡天(GRID-MASS)任务概念设计

32 × 16 × 2 = 1024个像素型碲锌镉(CZT)探测器，几何面积4096 cm²

详见<https://doi.org/10.1007/s10686-024-09920-4>

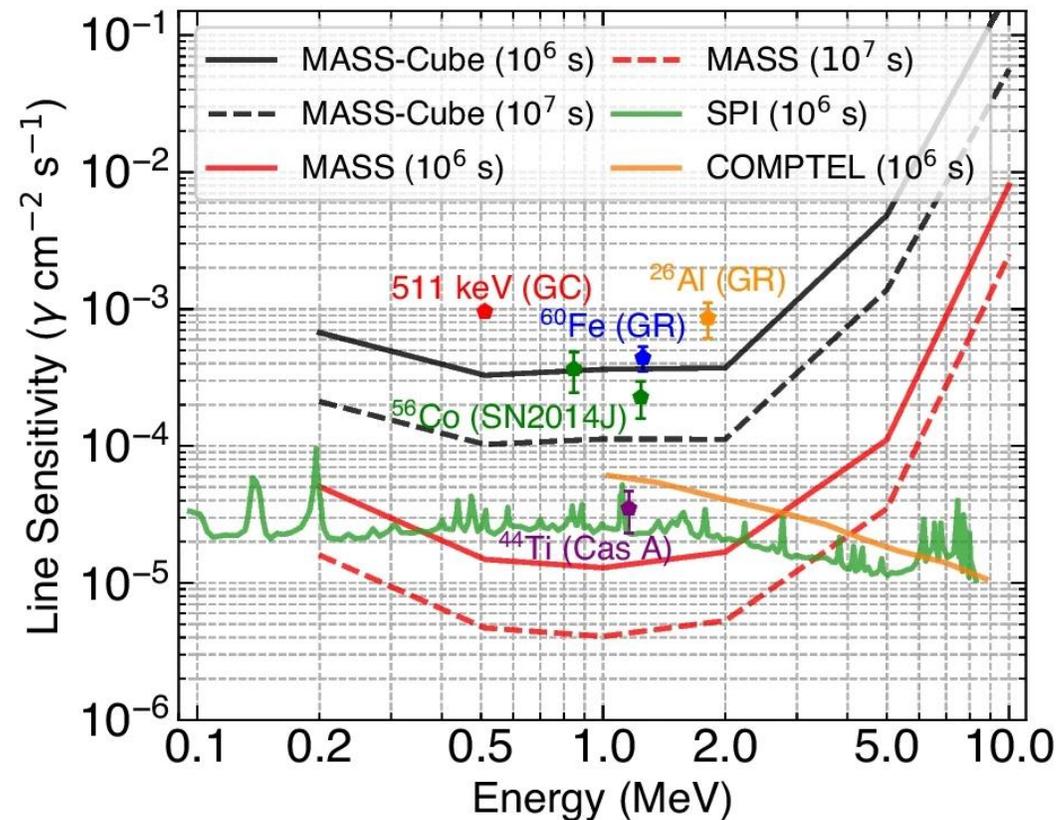
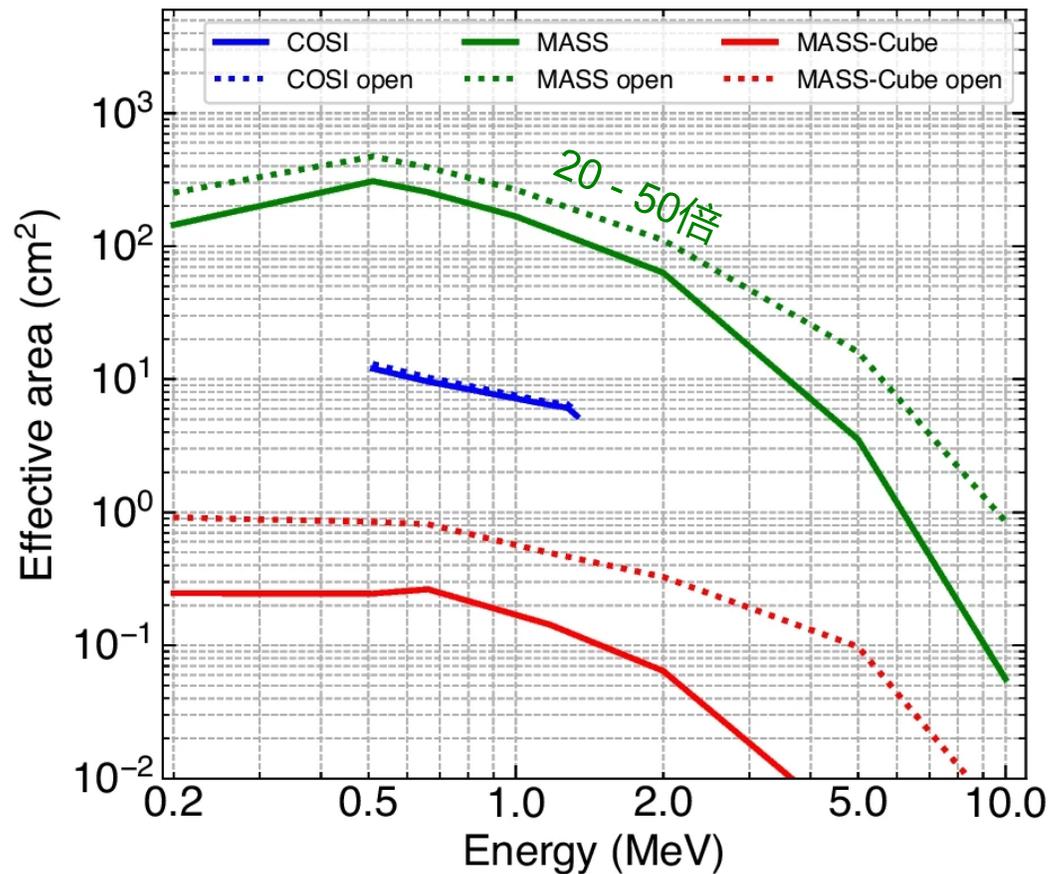


双层棋盘格错位排布，最大化有效面积同时提高ARM



纳卫星技术验证载荷
GRID-MASS-Cube

预期性能

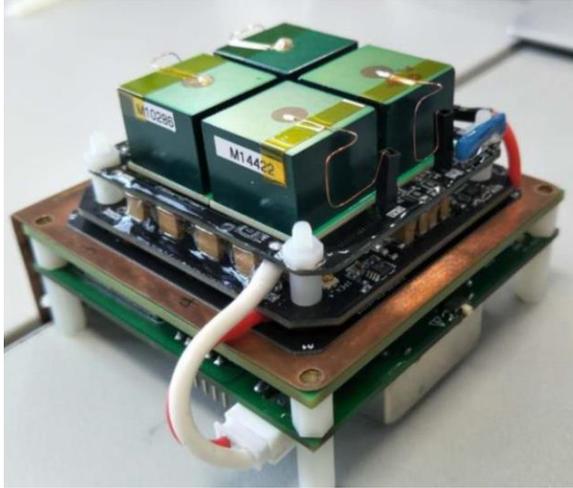


康普顿事例筛选条件：
 虚线：≥ 2 hits, ±2σ
 实线：≥ 2 hits, ±2σ, 5mm, 3mm

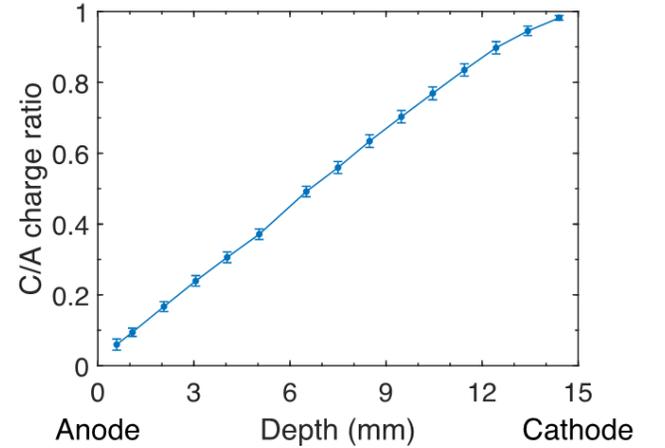
像素型CZT探测器研究基础



Redlen CZT晶体模块
 $2 \times 2 \times 1.5 \text{ cm}^3$
Pixel pitch = 1.72 mm



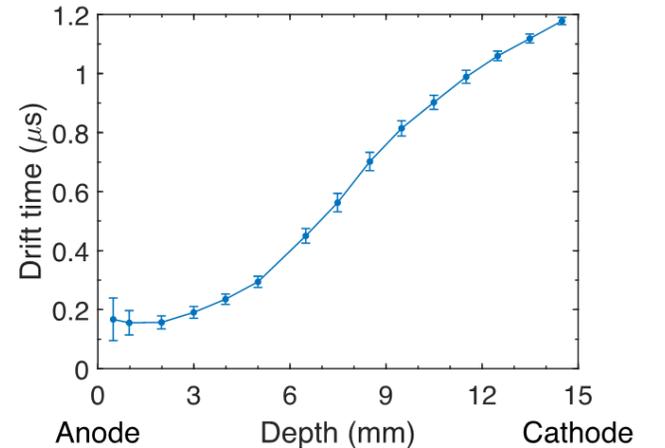
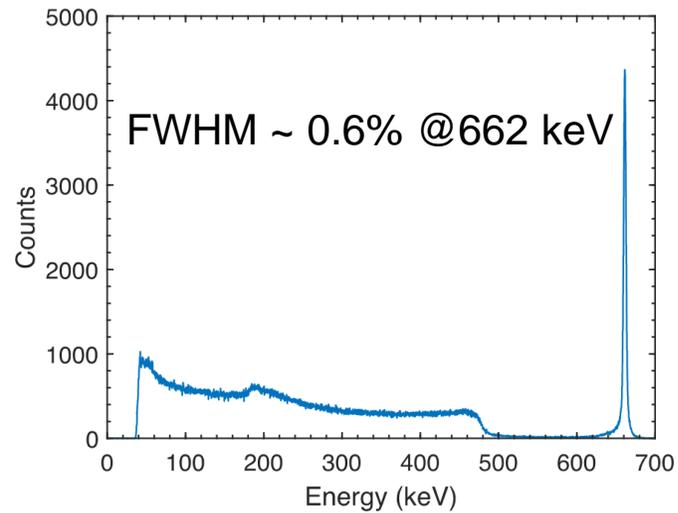
手持式康普顿伽马相机原型系统
(Yang et al. 2020)



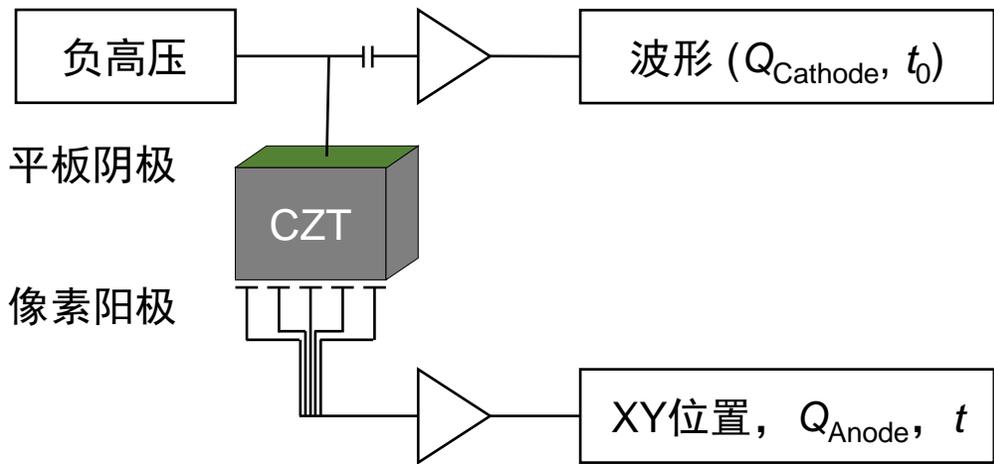
深度分辨率(FWHM) $\sim 0.6 \text{ mm}$



IDEAS ASIC模块
VAS_UM2.3/TAT4



像素型CZT探测器读出与事件重建方法

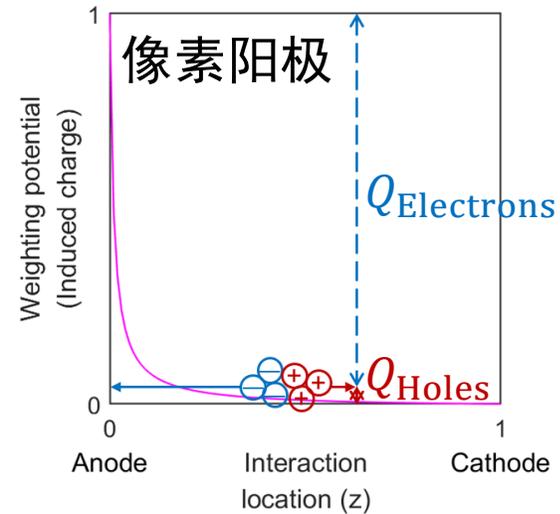
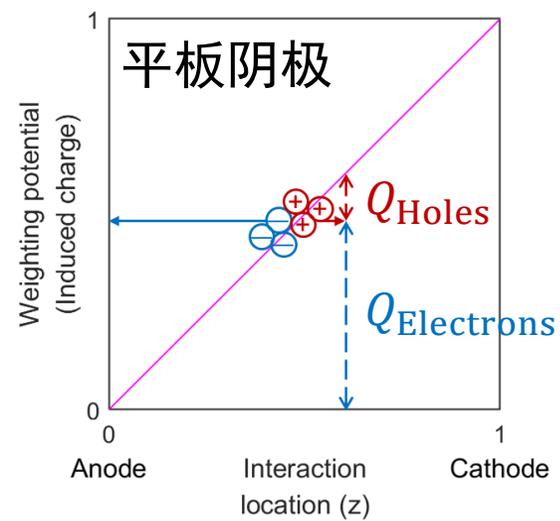


$$Q_{\text{Cathode}} = Ne \cdot z$$

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

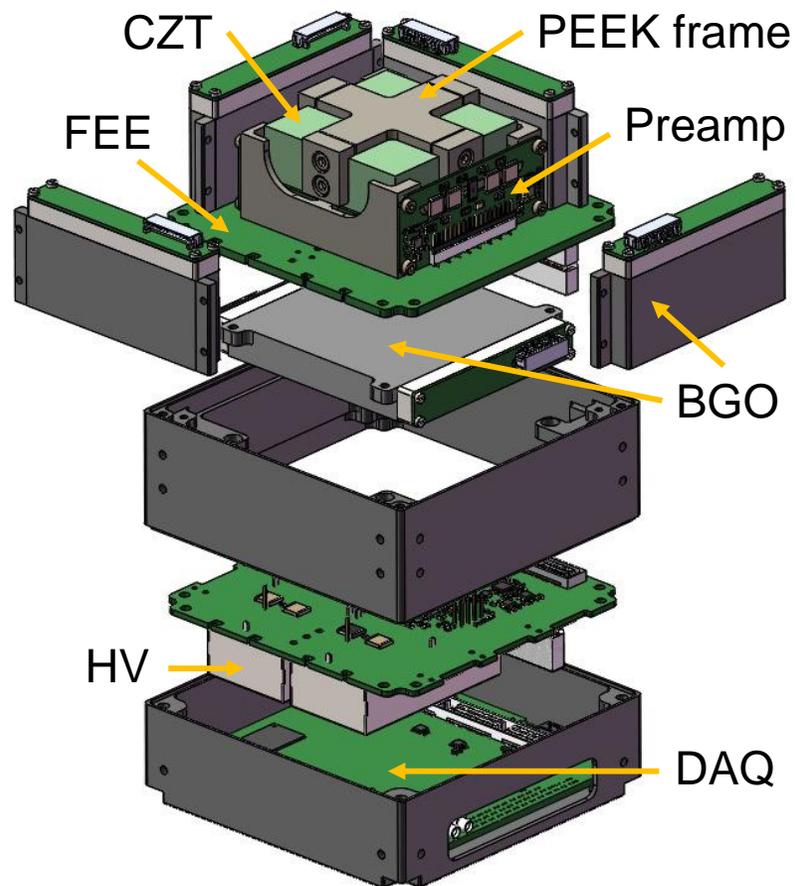
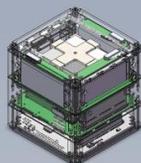
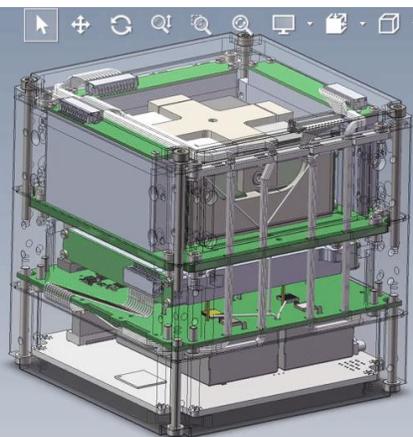
- ✓ 阳极像素提供XY位置信息
- ✓ 深度Z信息通过C/A电荷量比或漂移时间法获得

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



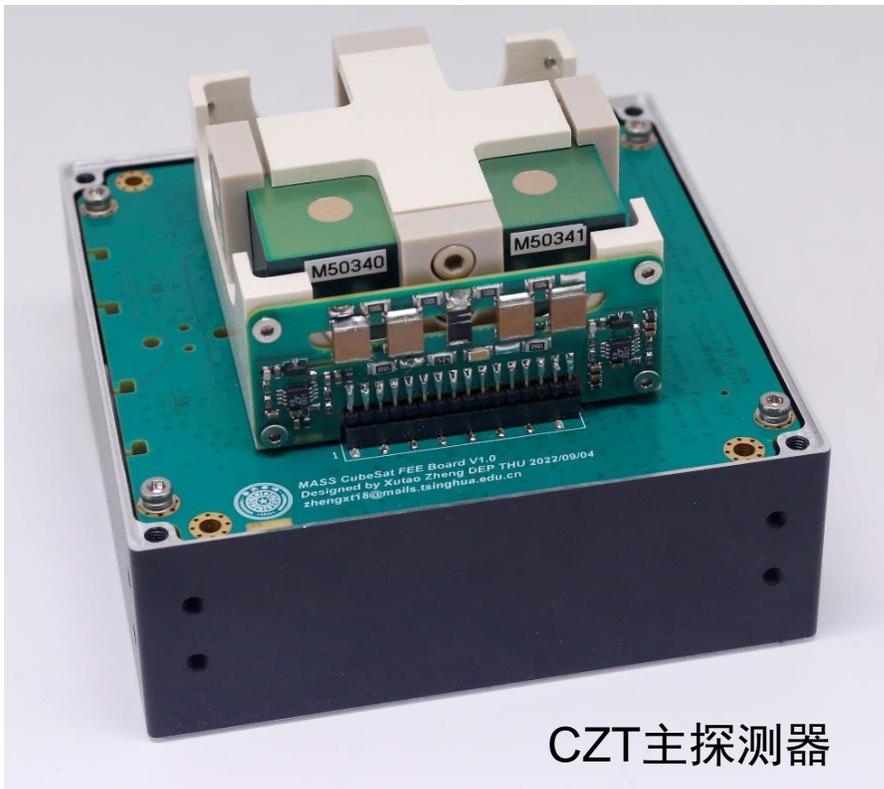
深度信息用于校正漂移过程中的电荷损失，是实现高能量分辨率的关键

纳卫星技术验证载荷GRID-MASS-Cube任务设计

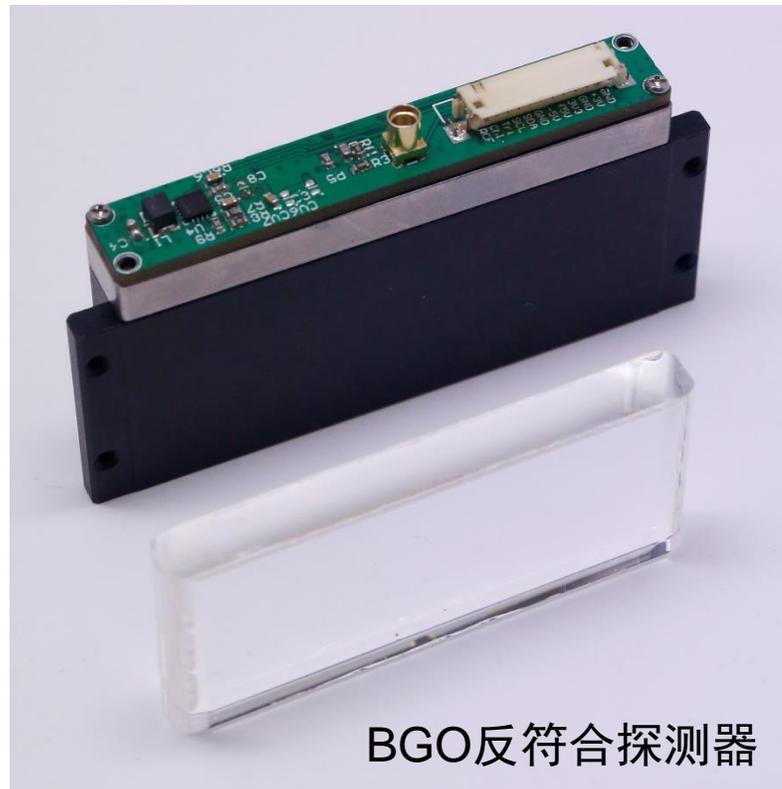


- 载荷整体适配纳卫星平台
 - 体积 $9.4 \times 9.4 \times 11 \text{ cm}^3$ ($\sim 1.1\text{U}$)
 - 质量 $\sim 1.7 \text{ kg}$
 - 功耗 $\sim 14 \text{ W}$
- 像素型CZT主探测器
 - 2×2 CZT晶体阵列, 16 cm^2
 - 深度分辨率(FWHM) $\sim 0.6 \text{ mm}$
 - 能量分辨率 $\sim 0.6\% @ 662 \text{ keV}$
 - 死时间 $\sim 160 \mu\text{s}$
- 反符合探测器
 - 8 mm BGO晶体 + SiPM读出
 - 包围侧面和底面

GRID-MASS-Cube硬件研发进展



CZT主探测器

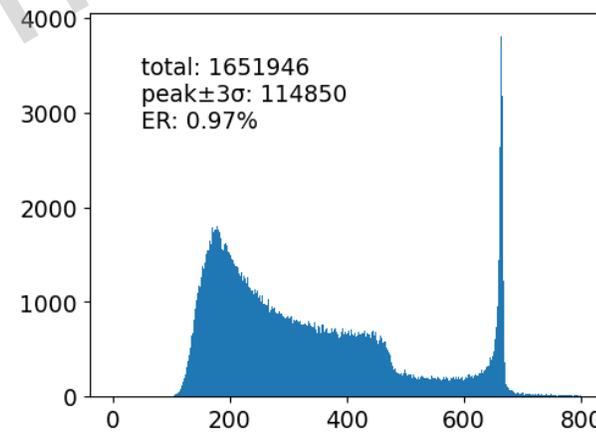
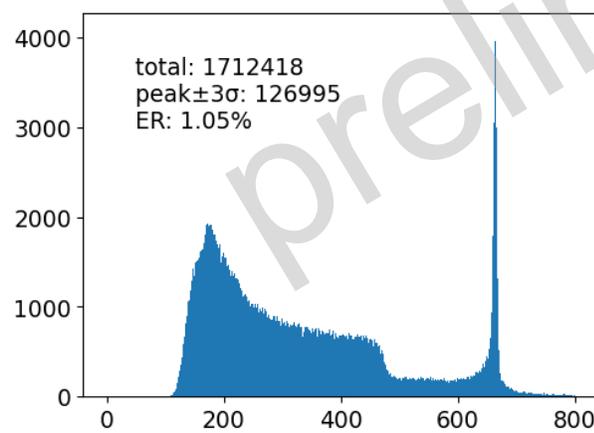
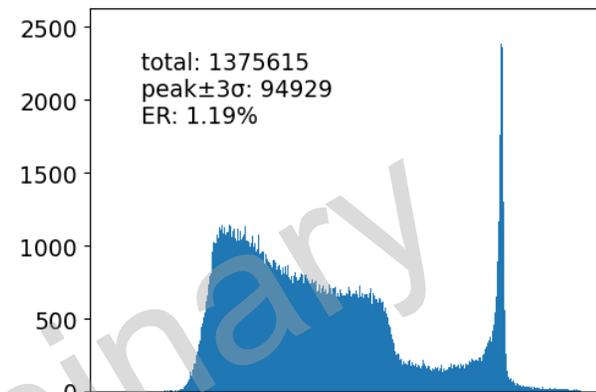
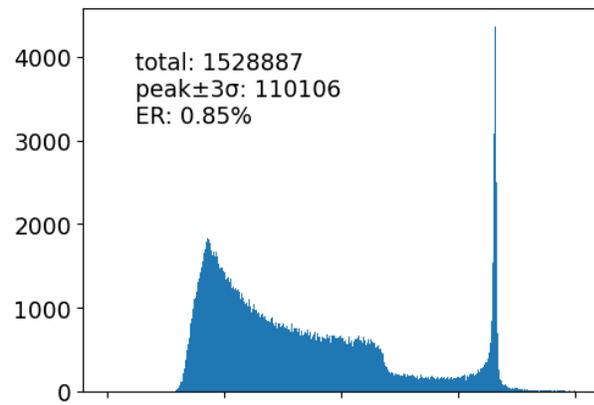
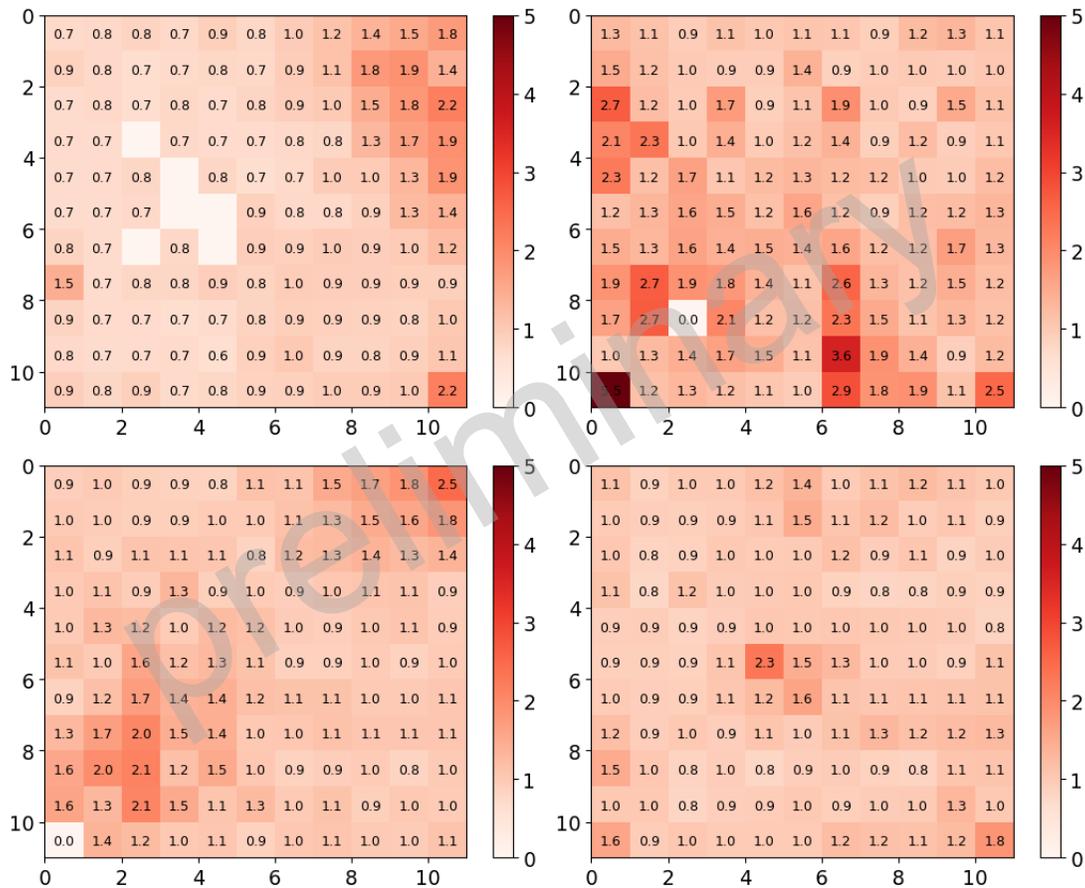


BGO反符合探测器

- ✓ 电性件
- 空间环境试验
 - ✓ 真空
 - 力学
 - 热学
- 正样件
- 地面标定
- 计划2024年底发射

初步地面测试结果

- 662 keV单像素事件能量分辨率(FWHM)与能谱
- 工作电压: -2000 V
- 工作温度: 38°C ~ 46°C



后续规划

- GRID-MASS-Cube
 - 2024年底发射，进行在轨技术验证
 - 纳入GRID 2.0任务规划，低轨多星组网、协同观测，提高总有效面积、观测时间
- 发挥CZT室温工作、模块化灵活组合的优势，搭建中等规模（如： 8×8 ）探测器阵列，定制纳卫星平台，实现与COSI相当的几何面积（ 256 cm^2 ）
- GRID-MASS
 - 大规模CZT阵列，中型卫星任务

总结

- 提出了基于像素型CZT探测器的中型康普顿望远镜任务GRID-MASS
- 研制了纳卫星技术验证载荷GRID-MASS-Cube，即将进入正样件与地面标定阶段，计划2024年底发射
- 2018年以来，我们研制、发射、在轨运行了2个“极光计划” X射线偏振探测载荷和8个“天格计划”伽马暴监测载荷。GRID-MASS-Cube及其后续任务将继续推动纳卫星天文观测技术发展



谢谢，请各位老师批评指正