



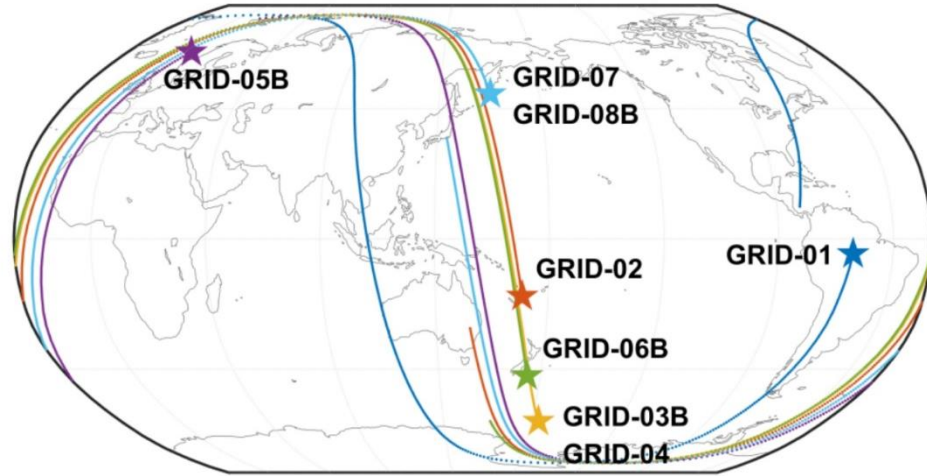
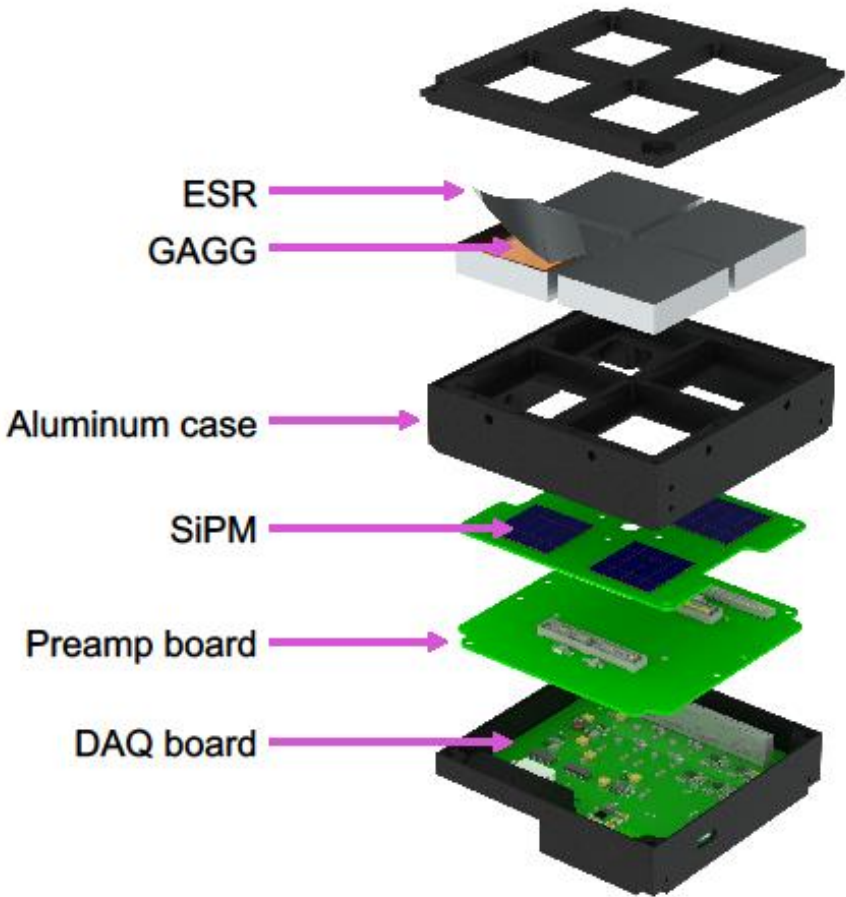
清华大学  
Tsinghua University

# 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

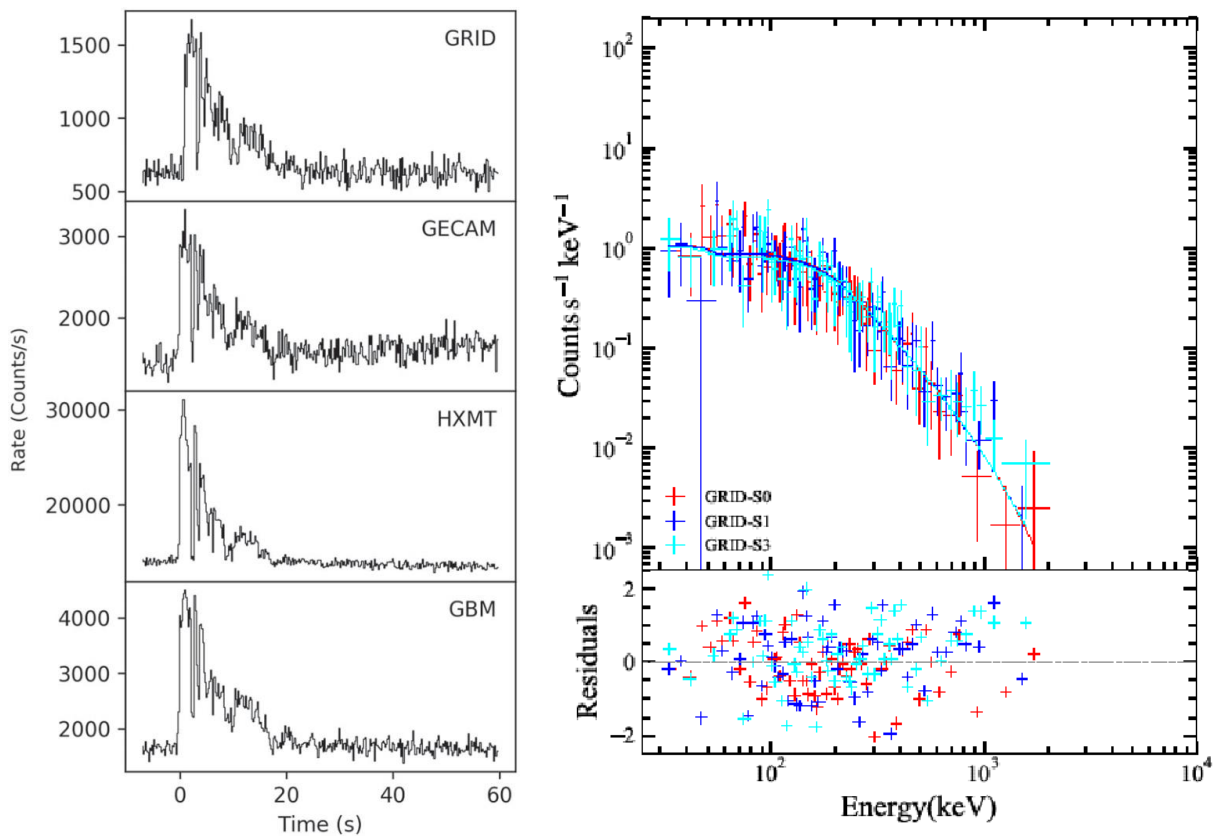
郑煦韬

# 天格计划(GRID)伽马射线暴监测纳卫星星座



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

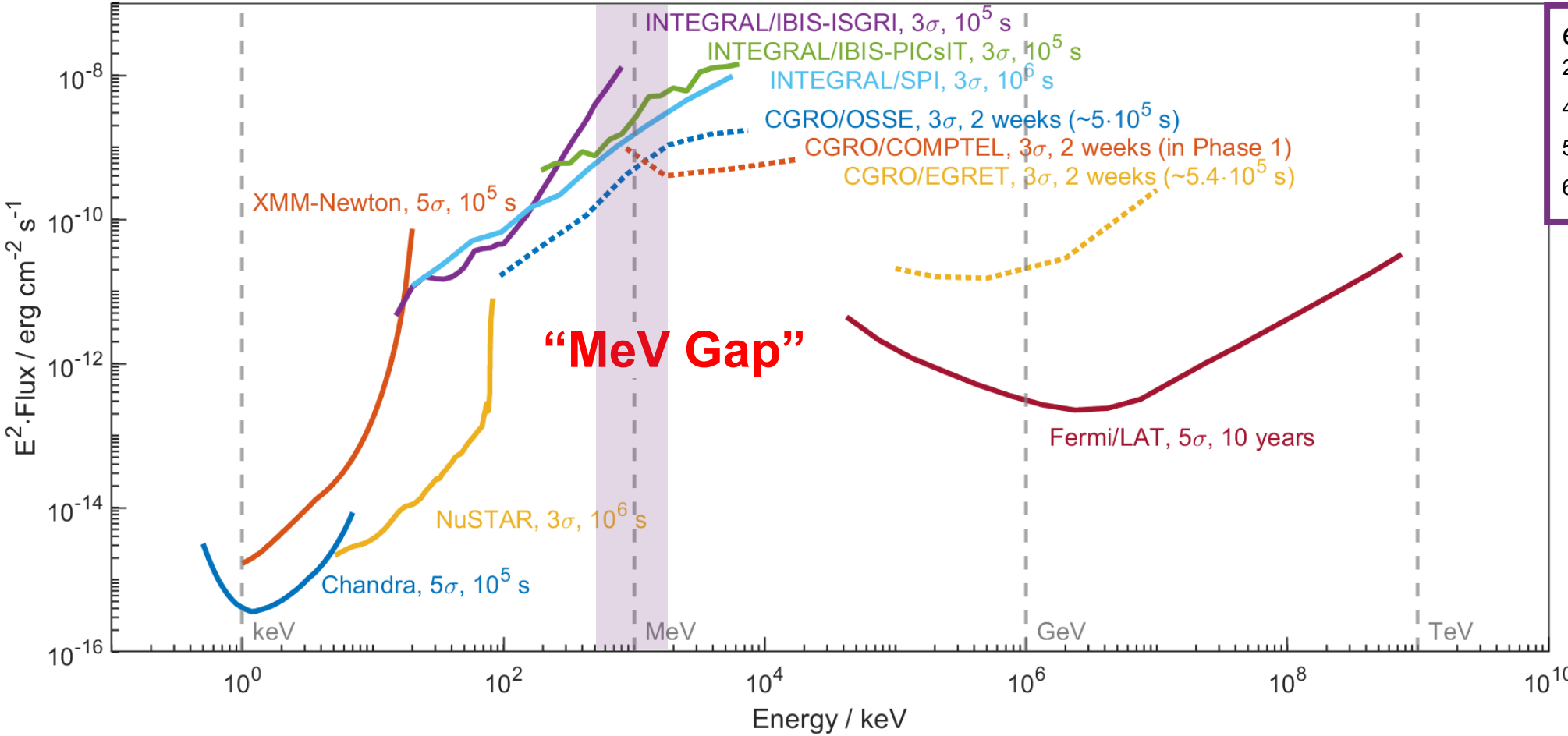
# 科学成果



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”

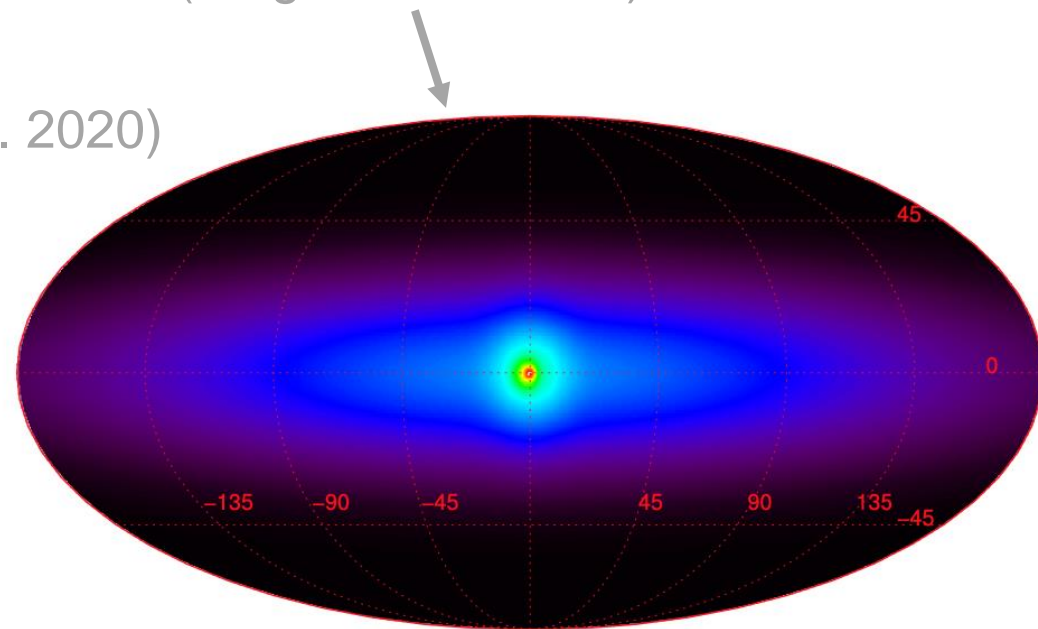


$e^+$	0.511 MeV
$^{26}\text{Al}$	1.809 MeV
$^{44}\text{Ti}$	1.157 MeV
$^{56}\text{Co}$	0.847, 1.238 MeV
$^{60}\text{Fe}$	1.173, 1.332 MeV

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”。

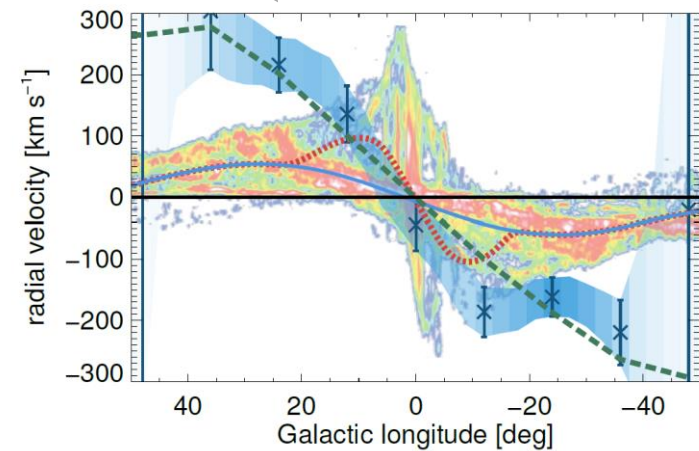
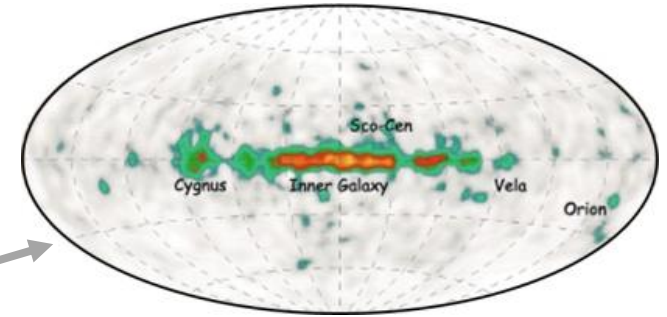
# 0.511 MeV正电子湮灭线

- 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 =  $0.58 \pm 0.13$
- 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 $^{26}\text{Al}$ 衰变线

- 1979-1981, HEAO-3首次探测到 $^{26}\text{Al}$ 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 $^{26}\text{Al}$ 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

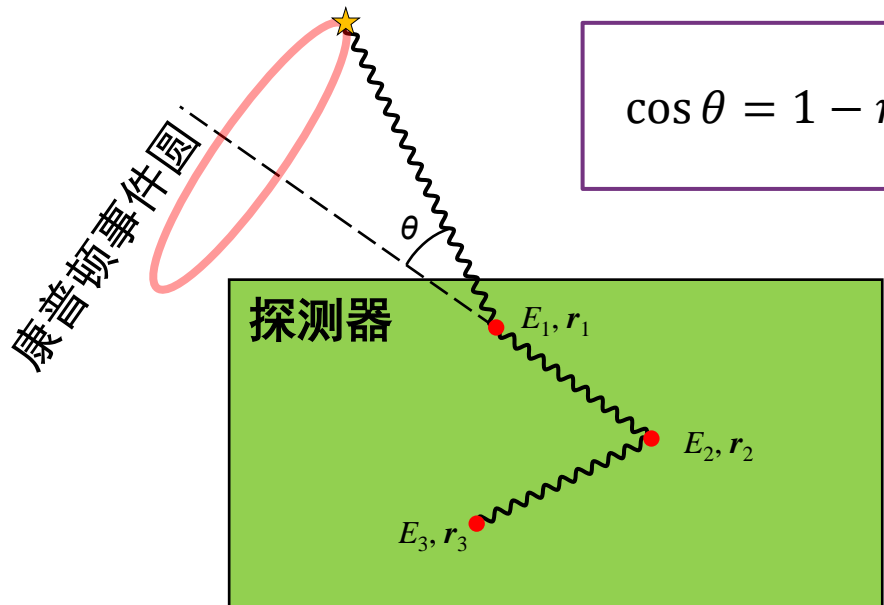
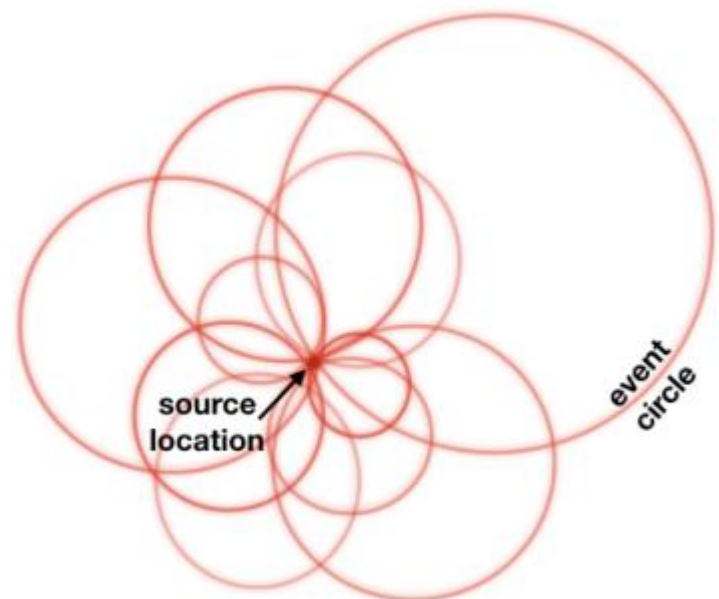
- 谱线观测
- 更高分辨率直接成像
- 更高灵敏度



## 康普顿成像谱仪

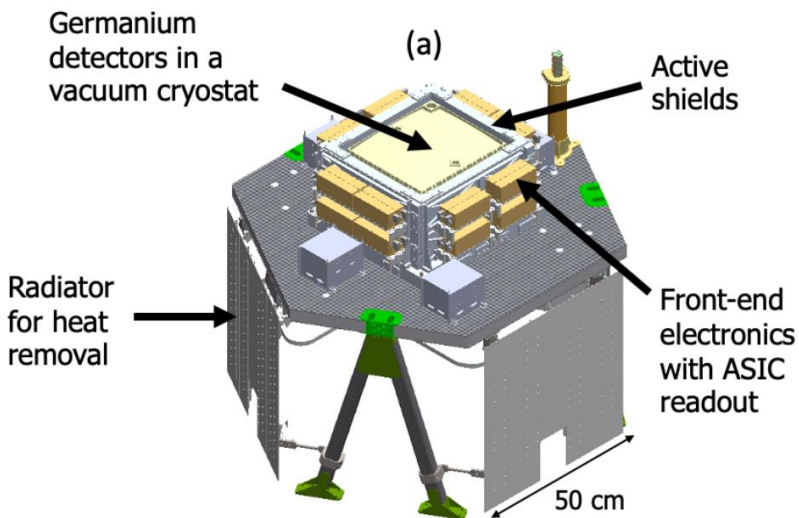
- ✓ 高能量分辨率
- ✓ 三维高位置分辨
- ✓ 大面积

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



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

# 基于小型卫星或微纳卫星的康普顿成像谱仪任务提案

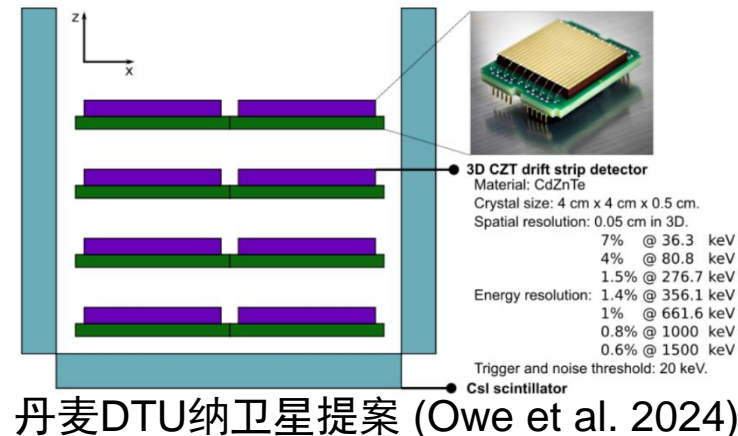


COSI SMEX (Tomsick et al. 2023)



## 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

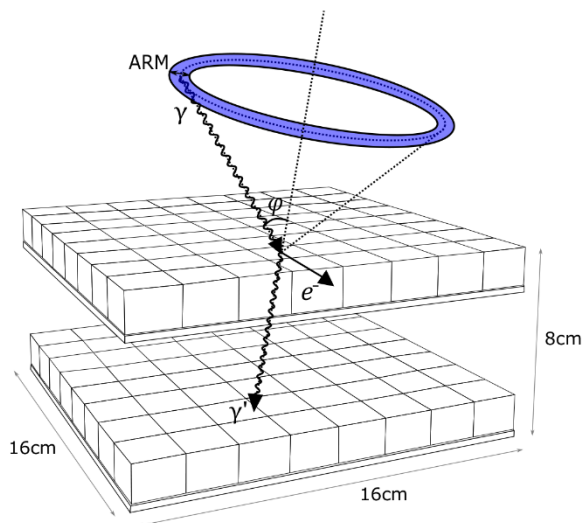


丹麦DTU纳卫星提案 (Owe et al. 2024)

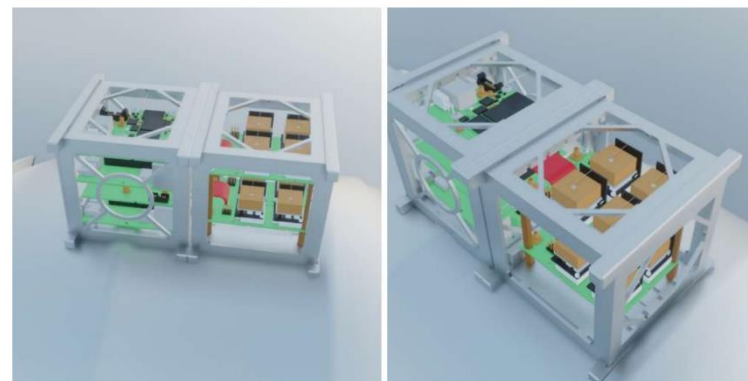


## MeVCube

- 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)



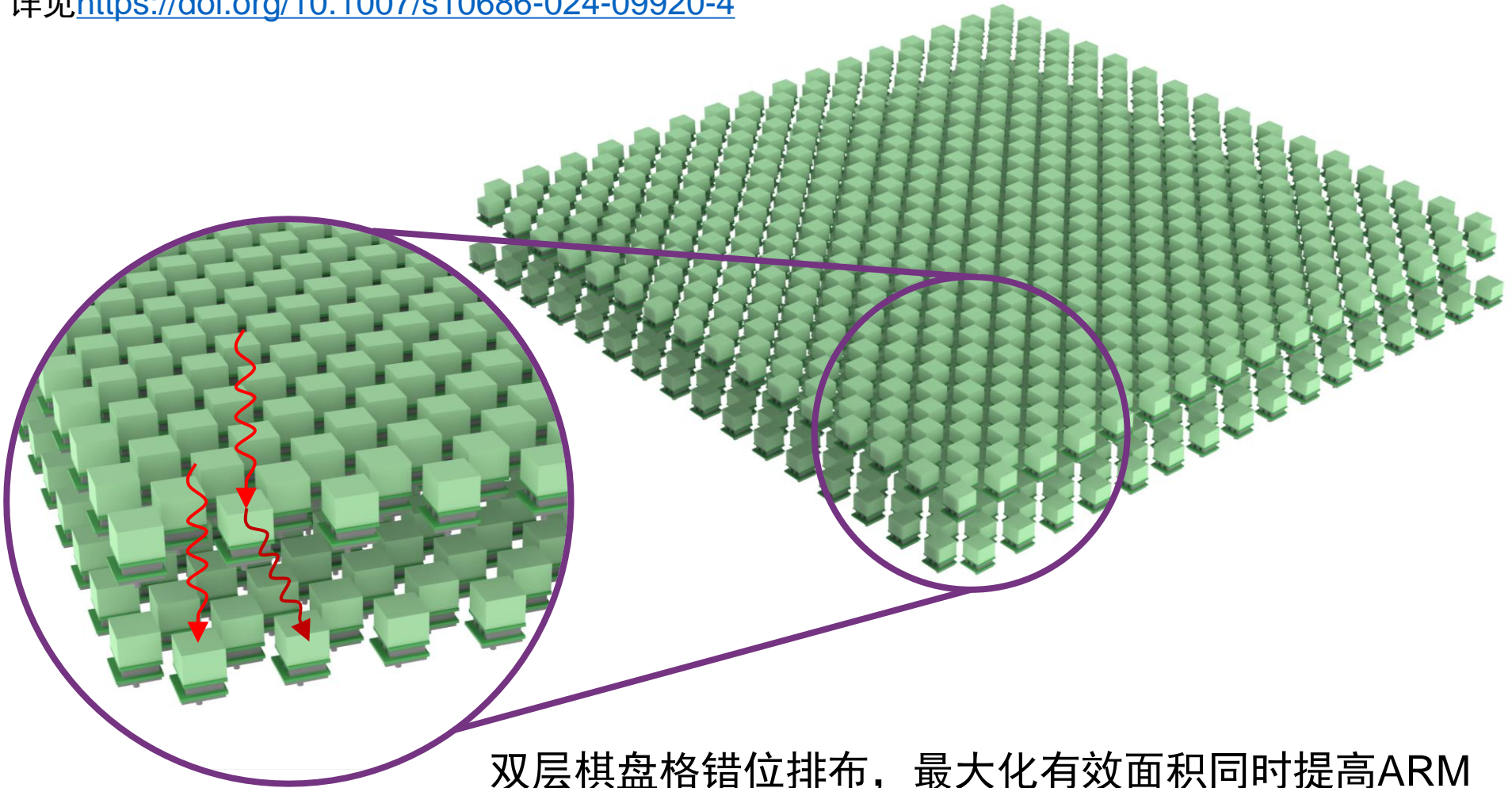
香港HKU纳卫星提案 (Kuijper et al. 2024)



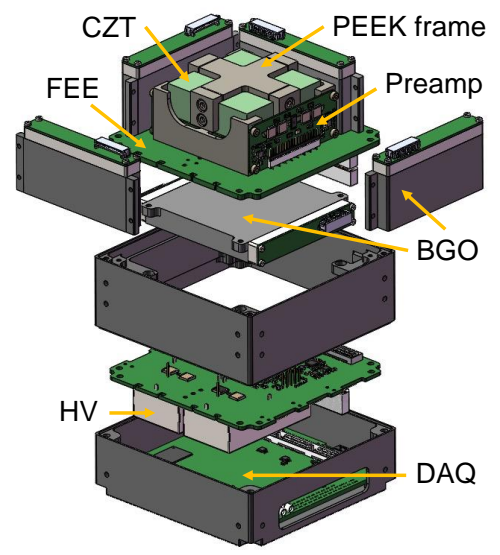
# MeV天体物理谱线巡天(GRID-MASS)任务概念设计

32 × 16 × 2 = 1024个像素型碲锌镉(CZT)探测器，几何面积4096 cm<sup>2</sup>

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

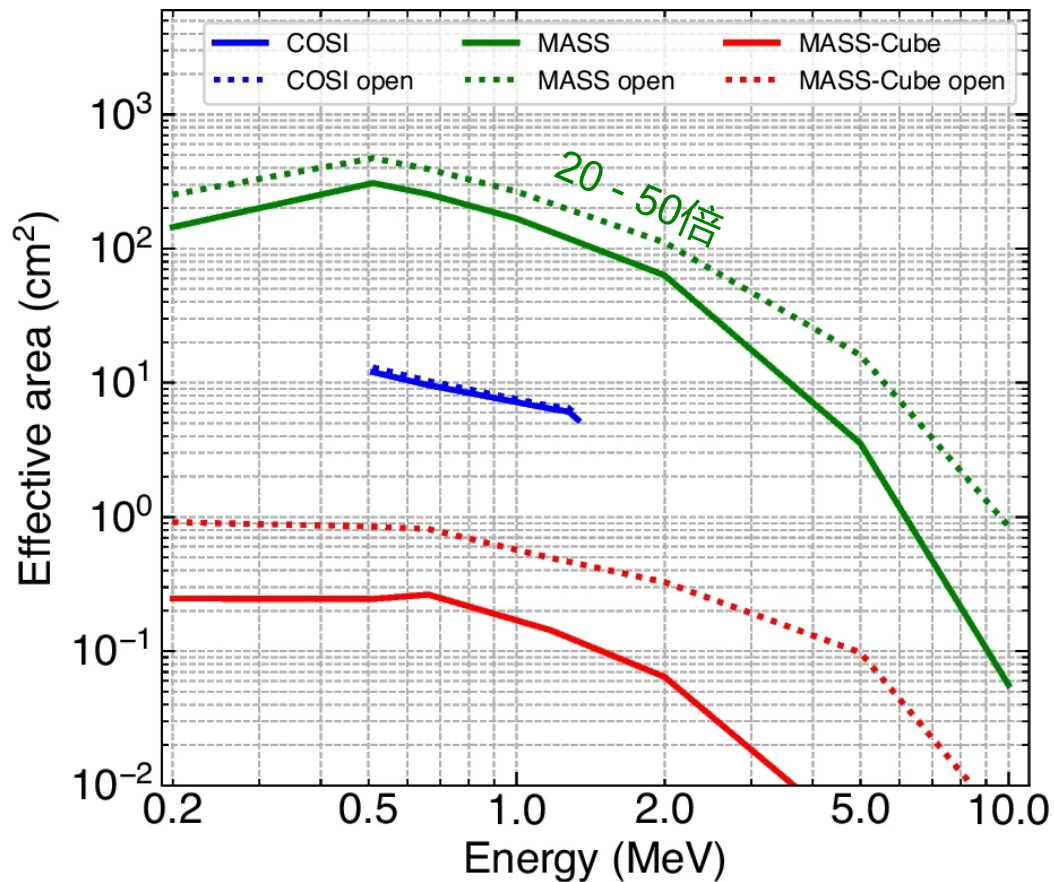


双层棋盘格错位排布，最大化有效面积同时提高ARM

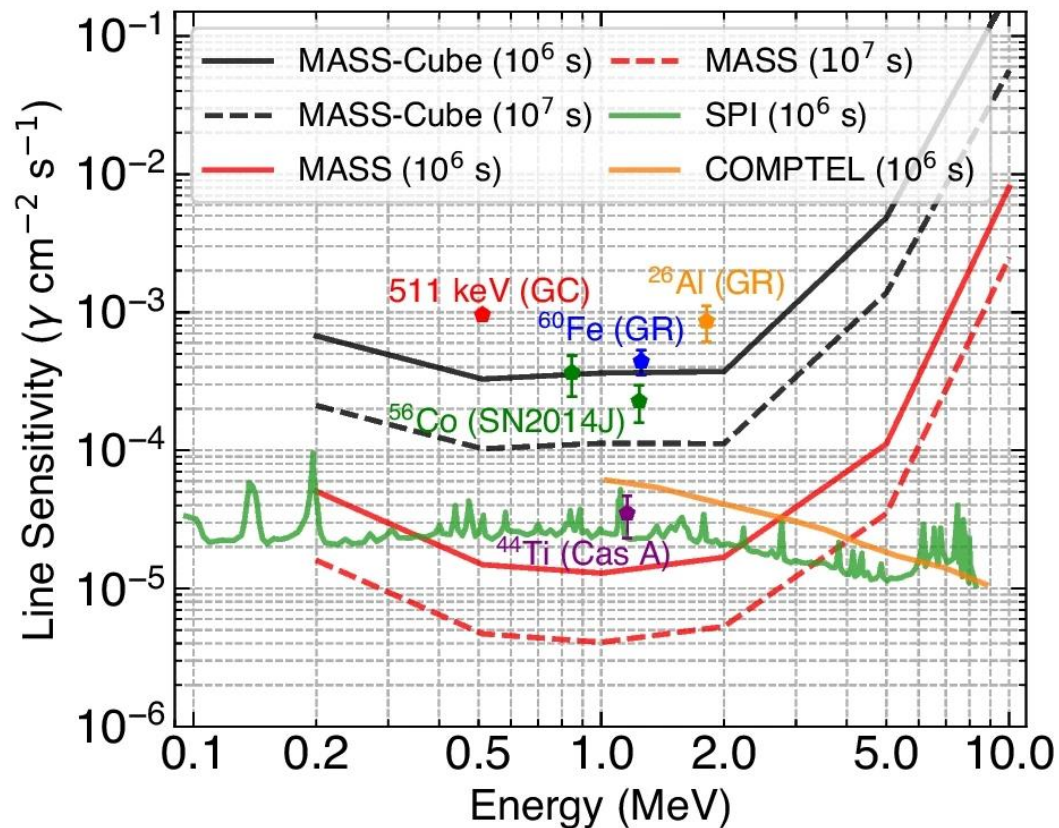


纳卫星技术验证载荷  
GRID-MASS-Cube

# 预期性能



康普顿事例筛选条件：  
 虚线： $\geq 2$  hits,  $\pm 2\sigma$   
 实线： $\geq 2$  hits,  $\pm 2\sigma$ , 5mm, 3mm

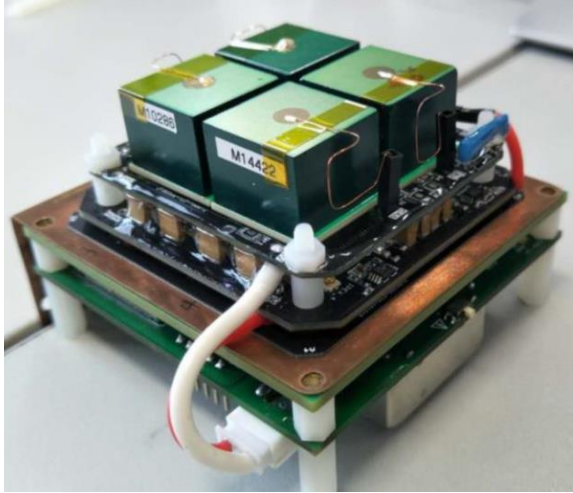




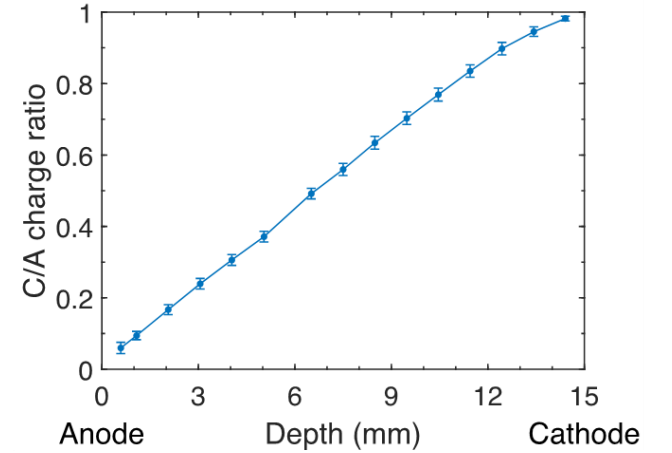
# 像素型CZT探测器研究基础



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



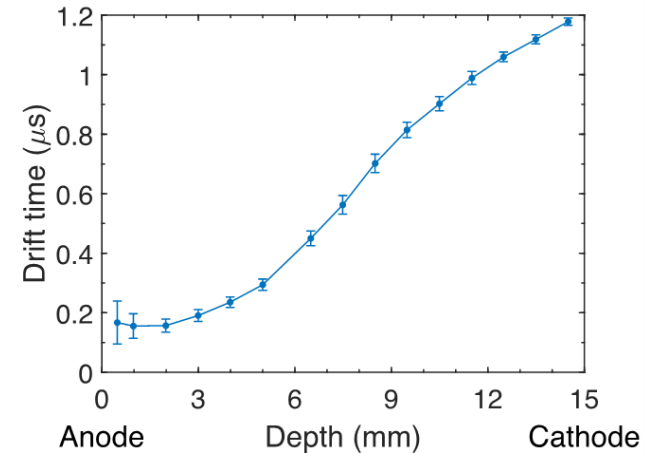
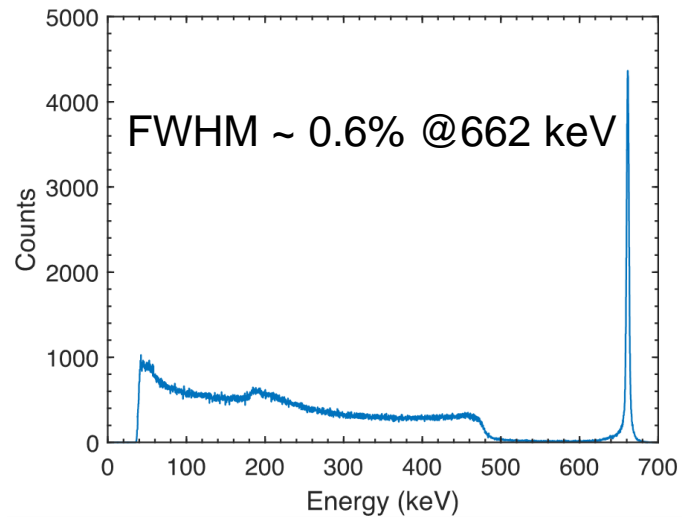
手持式康普顿伽马相机原型系统  
(Yang et al. 2020)



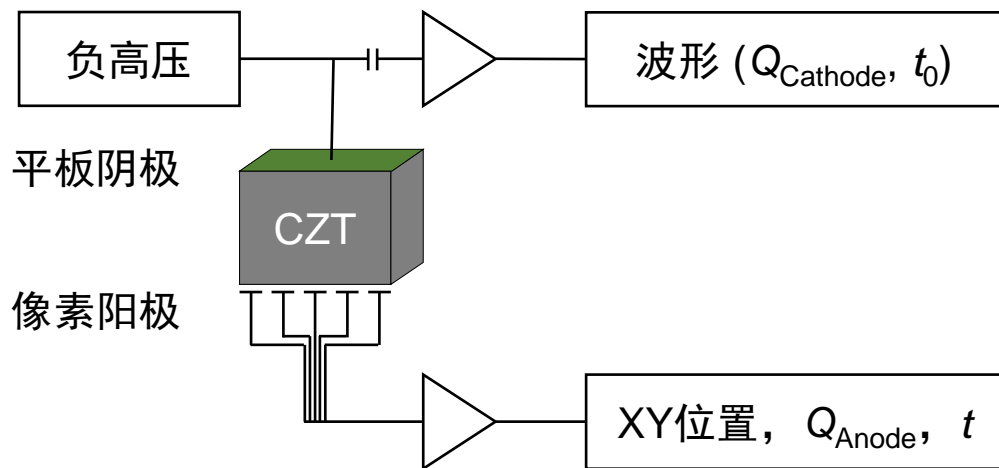
深度分辨率(FWHM)  $\sim 0.6 \text{ mm}$



IDEAS ASIC模块  
VAS\_UM2.3/TAT4



# 像素型CZT探测器读出与事件重建方法

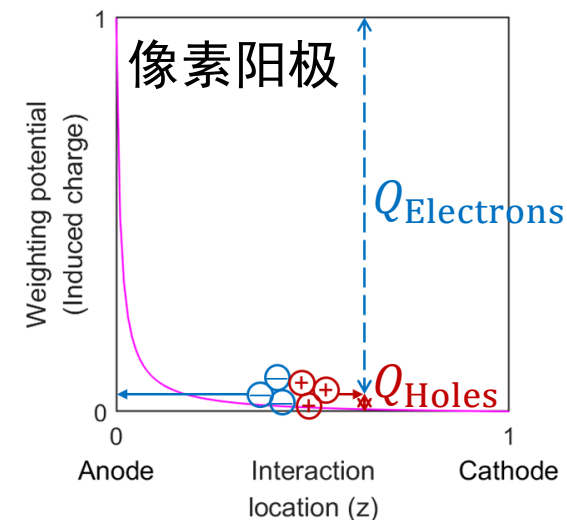
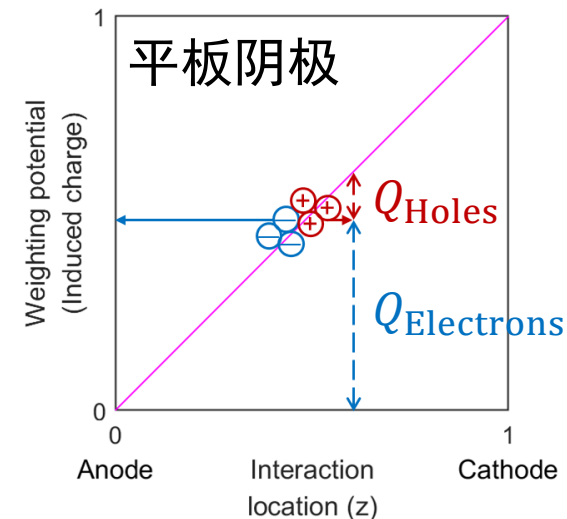


- ✓ 阳极像素提供XY位置信息
- ✓ 深度Z信息通过C/A电荷量比或漂移时间法获得

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

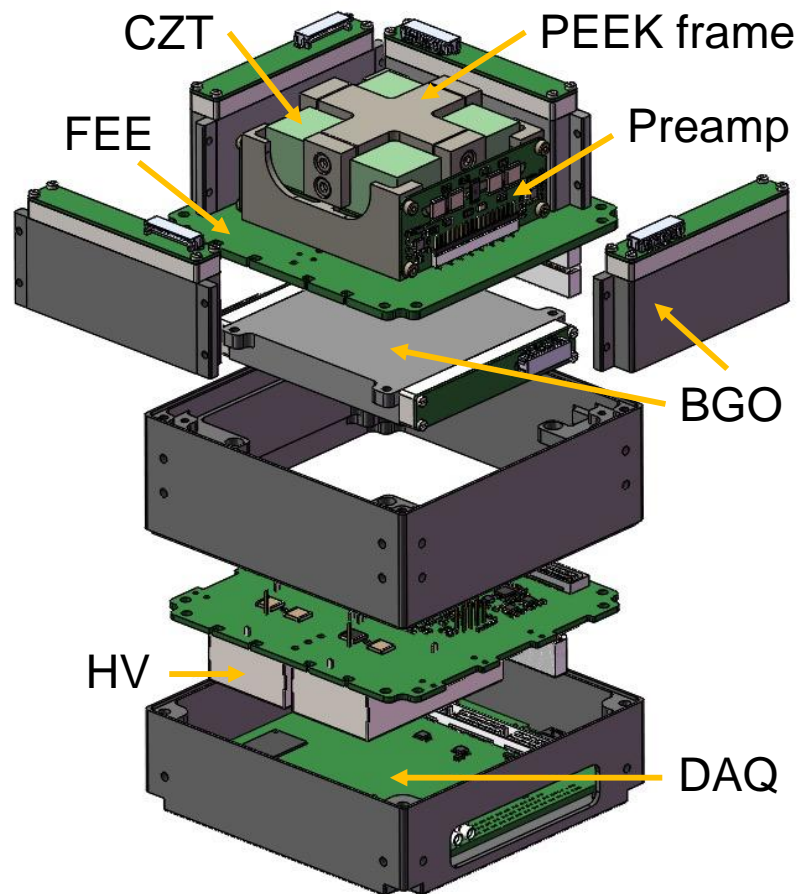
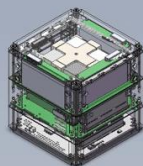
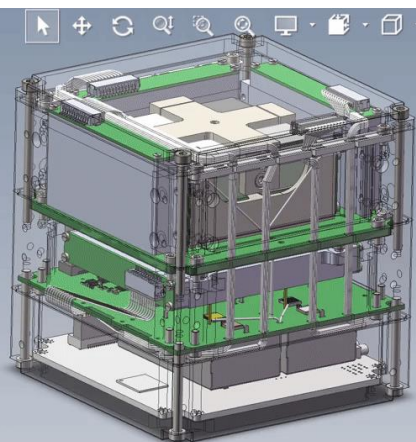
$$z = Q_{\text{Cathode}} / Q_{\text{Anode}}$$

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



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

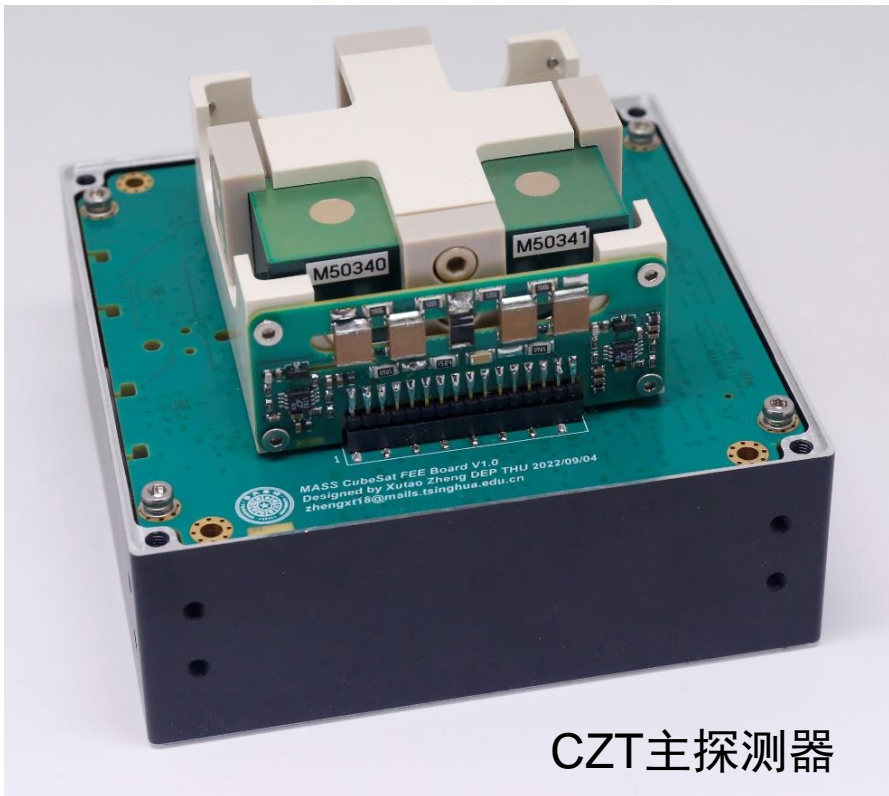
# 纳卫星技术验证载荷GRID-MASS-Cube任务设计



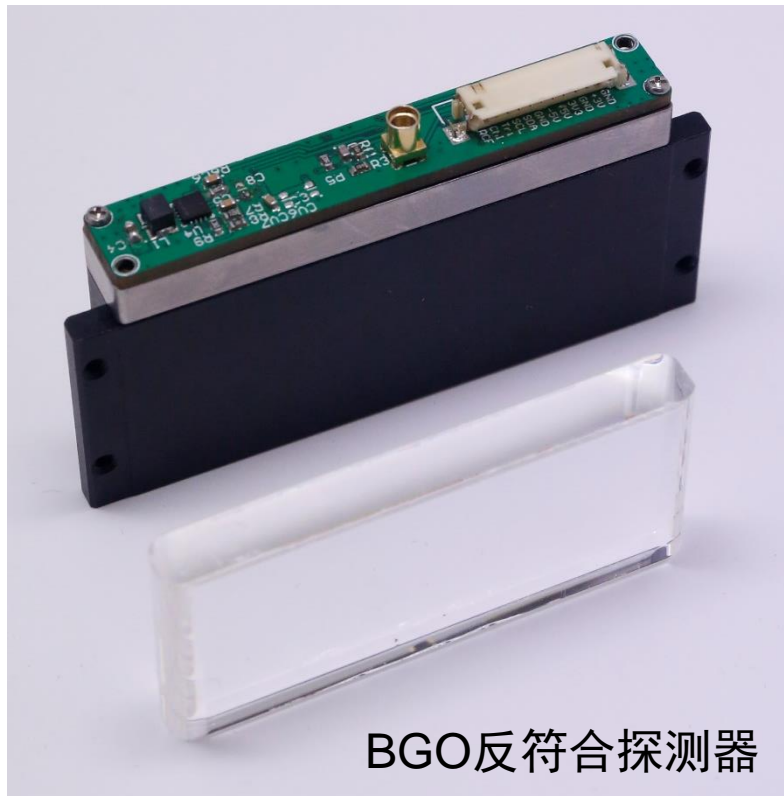
- 载荷整体适配纳卫星平台
  - 体积  $9.4 \times 9.4 \times 11 \text{ cm}^3$  ( $\sim 1.1\text{U}$ )
  - 质量  $\sim 1.7 \text{ kg}$
  - 功耗  $\sim 14 \text{ W}$
- 像素型CZT主探测器
  - $2 \times 2$  CZT晶体阵列,  $16 \text{ cm}^2$
  - 深度分辨率(FWHM)  $\sim 0.6 \text{ mm}$
  - 能量分辨率  $\sim 0.6\% @ 662 \text{ keV}$
  - 死时间  $\sim 160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

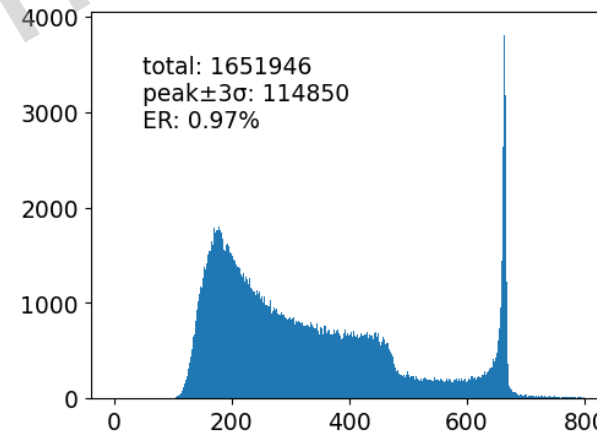
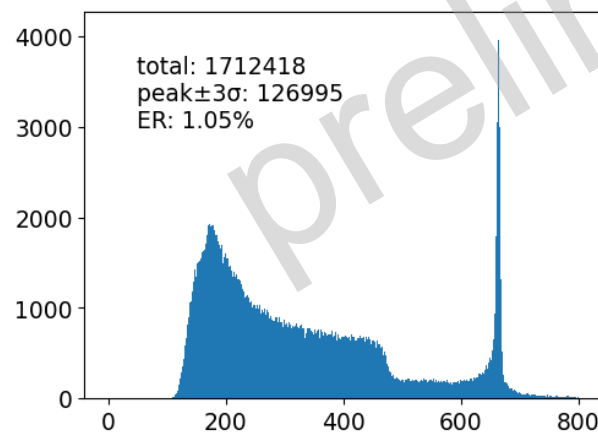
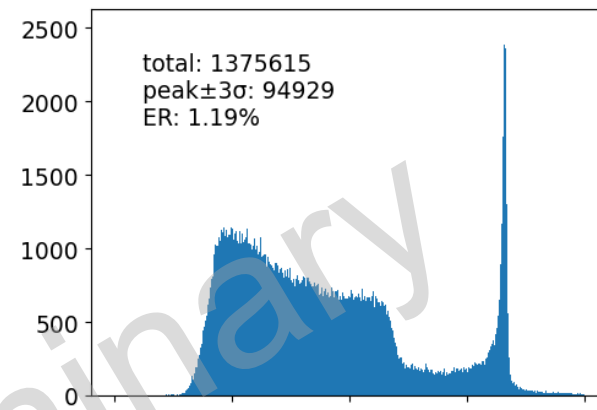
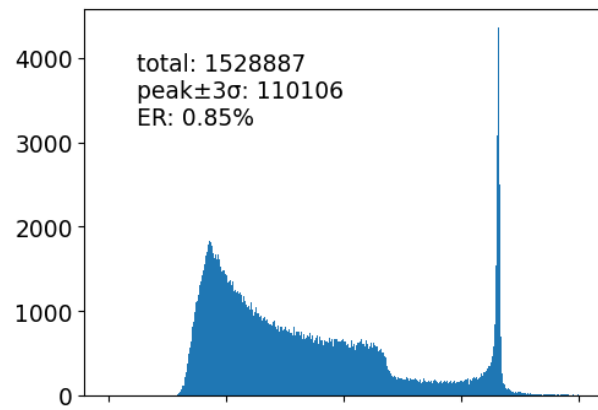
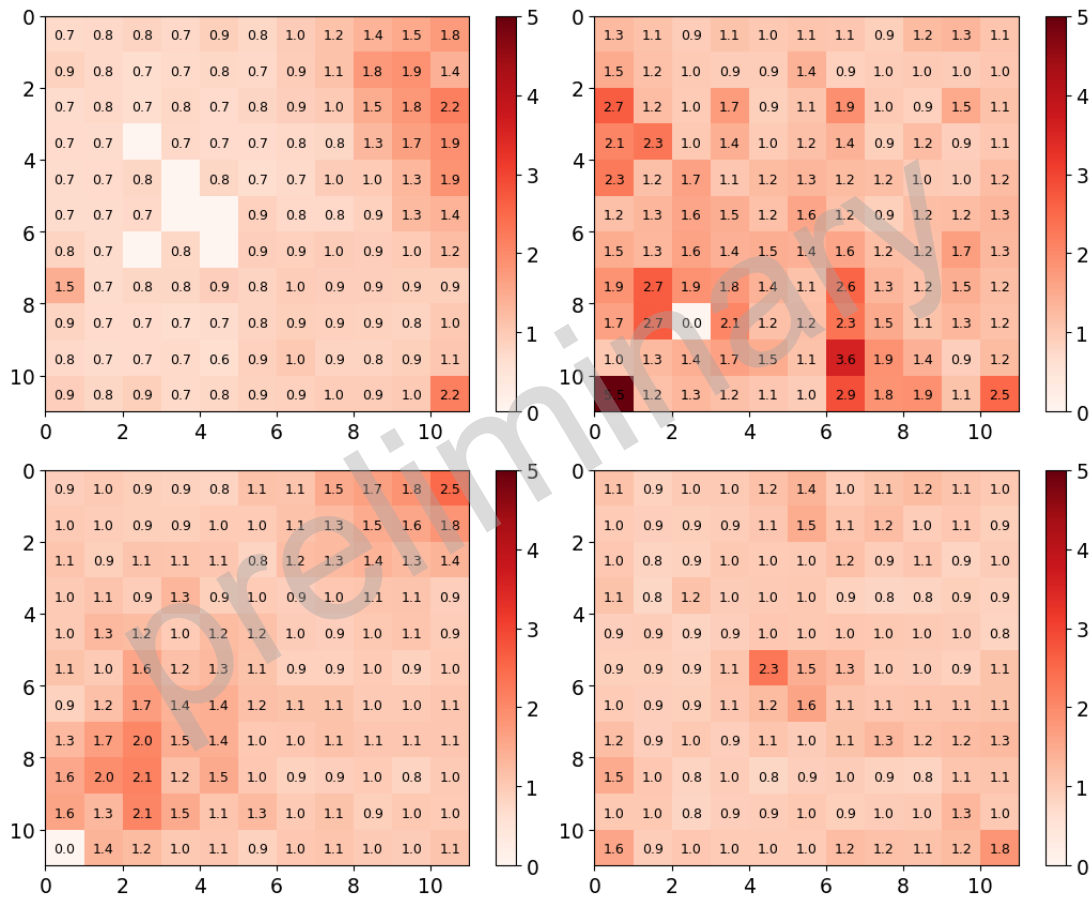


BGO反符合探测器

- ✓ 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： $8 \times 8$ ）探测器阵列，定制纳卫星平台，实现与COSI相当的几何面积（ $256 \text{ cm}^2$ ）
- 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