



空间MeV伽马望远镜的高精度时间 投影室读出电子学研究进展

刘阳，赵懋源，付学成，封常青*，刘树彬

中国科学技术大学

2026年8月11日

报告提纲

■研究背景

■需求分析

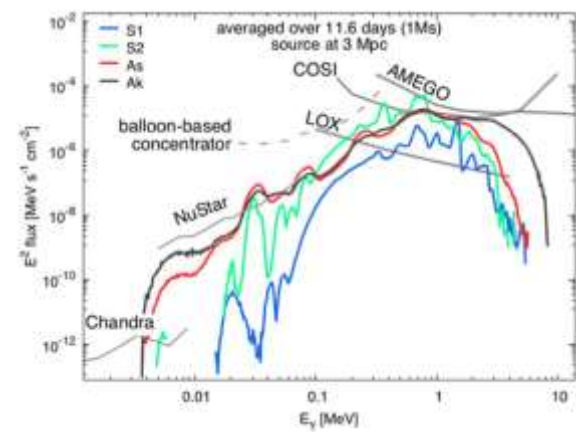
■电子学设计

■测试结果

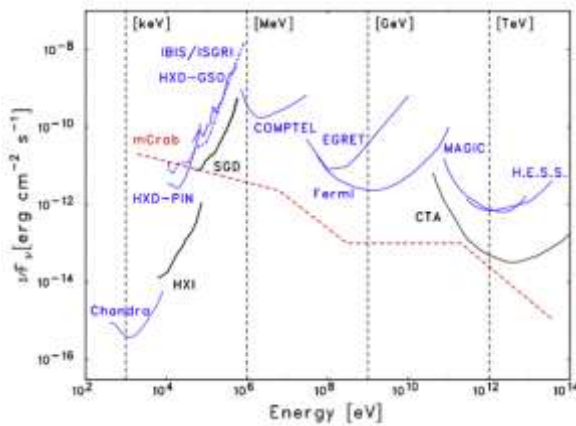
MeV伽马天文观测意义

- 崭新的天文观测窗口
- MeV 谱线天文学
- Sub-GeV 暗物质与原初黑洞
- 超高能中微子与超高能宇宙线

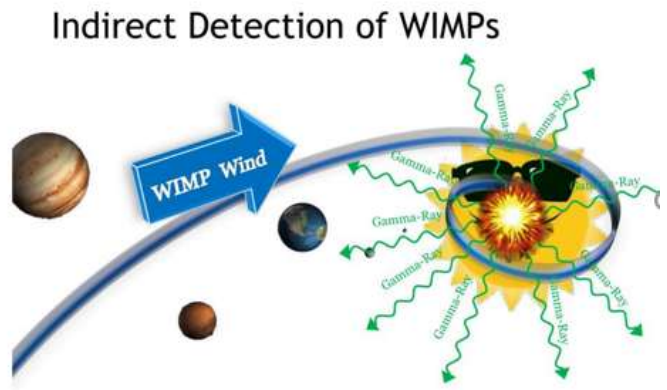
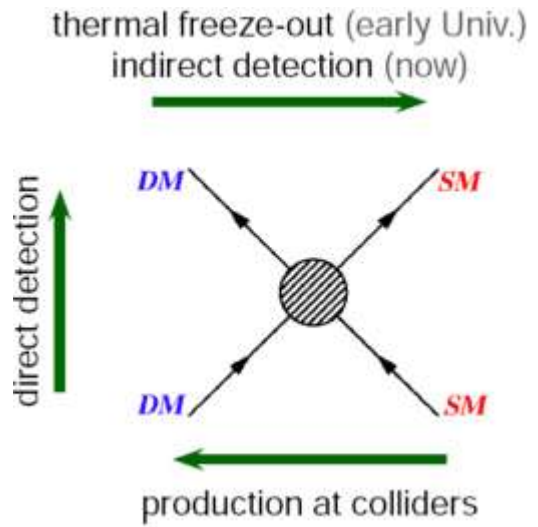
高精度的MeV伽马探测
将打开一扇新的天文观测窗口！



Oleg Korobkin et al 2020 ApJ 889 168

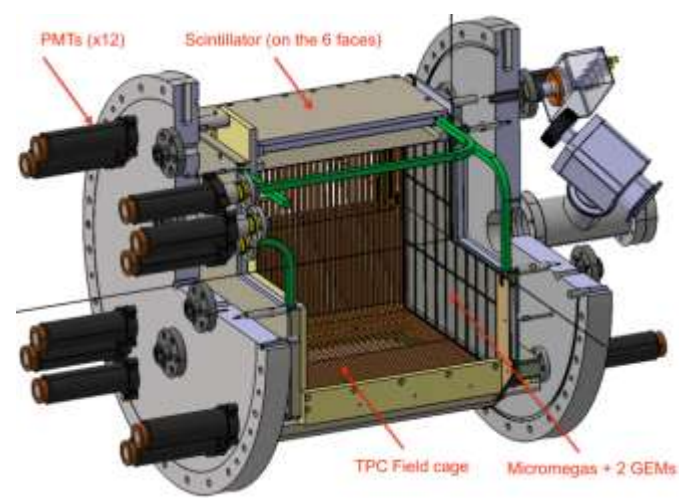


Alessandro De Angelis (2021)

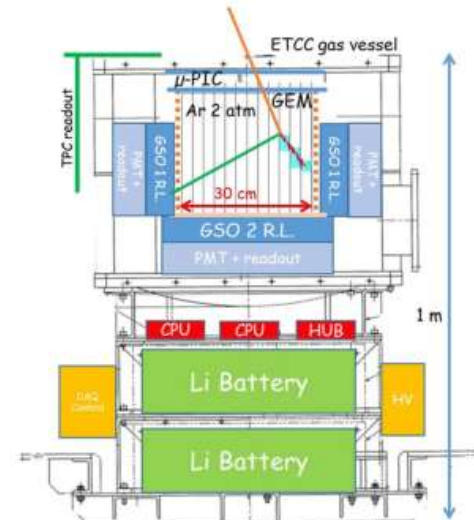


MeV伽马天文观测研究现状

实验	技术方案	能段	角分辨(PSF)	实验进展
HARPO	TPC	MeV-GeV	0.5°@100MeV	原理样机
SMILE-2	TPC+GSO	0.3MeV-3MeV	10°@662keV	气球实验 (2018)
SMILE-3			5°@662keV	预研
SMILE-satellite			2°@662keV	预研



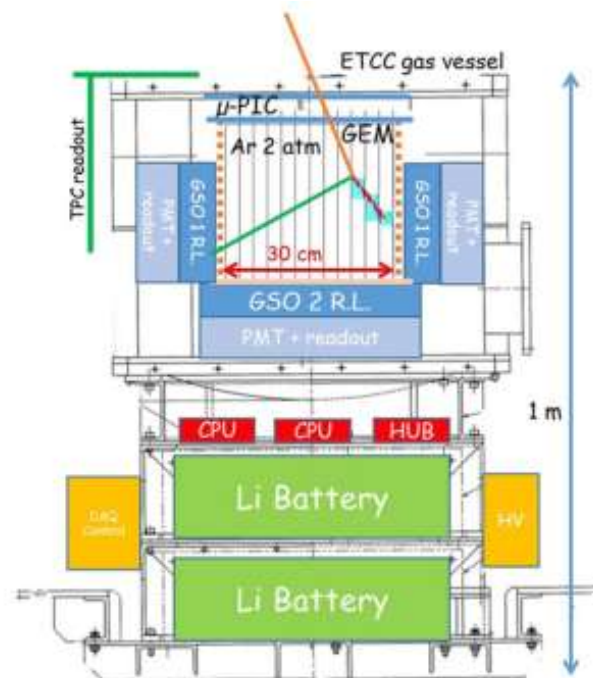
HARPO
TPC伽马偏振测量仪



SMILES 系列
TPC康普顿相机

SMILE-2技术指标

- **TPC (2 bar)**
 - $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$
 - x-y 条读出 (0.8 mm pitch)
 - 768 读出通道
 - **能量分辨 : 45.9% @ 43 keV (FWHM)**
- **GSO ($\text{Gd}_2\text{SiO}_5\text{:Ce}$)+PMT**
 - 厚度: 底部26mm, 侧壁13mm
 - **6mm*6mm像素**
 - 6912 pixel, 432 电子学通道
 - **GSO能量分辨: 13.4% @ 662 keV (FWHM)**
- **功耗: 250W 重量: 511 kg**
- **角分辨: 10° @662keV**



First Observation of the MeV Gamma-Ray Universe with Bijective Imaging Spectroscopy Using the Electron-tracking Compton Telescope on Board SMILE-2+, Takada et al., The Astrophysical Journal, 930:6 (13pp), 2022 May 1, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6103>.

能量分辨和位置分辨严重限制了角分辨

报告提纲

■研究背景

■需求分析

■电子学设计

■测试结果

系统总体设计方案与指标

➤ 高精度MeV伽马望远镜

- $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 3D径迹+能量测量
- 高角分辨 (PSF) : 2° @MeV
- 宽能量范围: 0.3MeV -100 MeV

➤ 新型微结构气体探测器读出

- 高能量分辨 (15% @ 5.9 keV)
- 高位置分辨 (0.65 mm pitch)

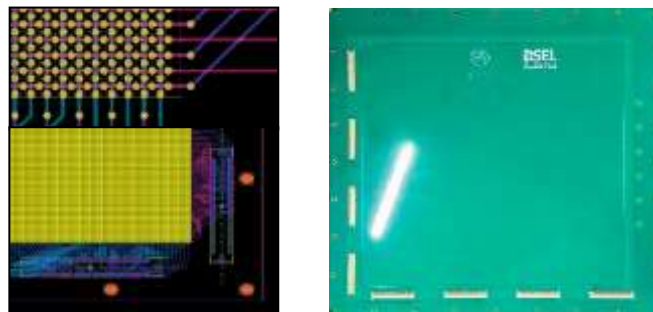
➤ 像素型CdZnTe伽马探测器

- 高能量分辨 (2% @ 662keV)
- 高位置分辨 (1.72 mm pitch)
- 提供TPC的T0信号

➤ 符合触发

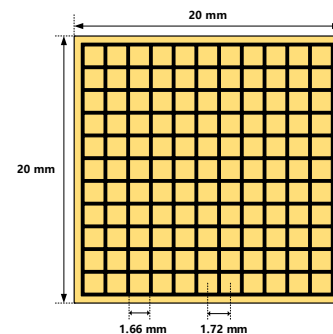
- 仅上传同一个时间窗内TPC和CZT均有信号的事例

Micromegas及读出板

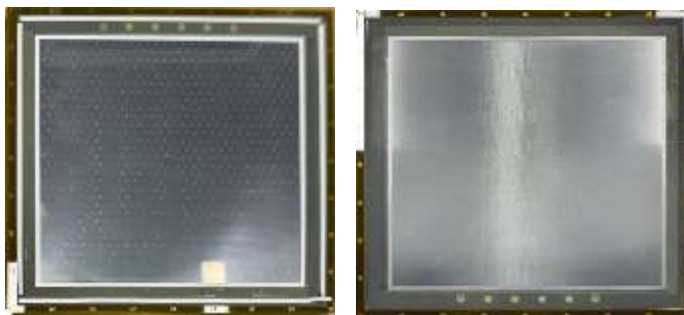


采用2D读出条, 0.65mm间距
灵敏面积为 $30 \times 30 \text{ cm}$

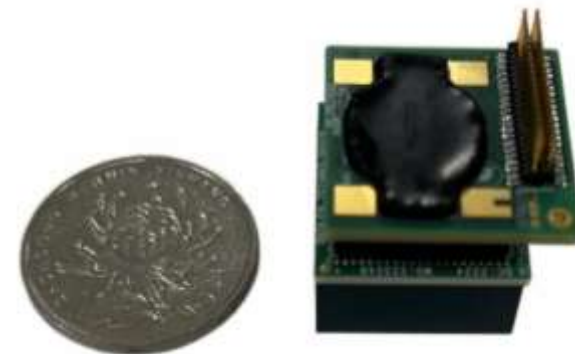
CZT探测器



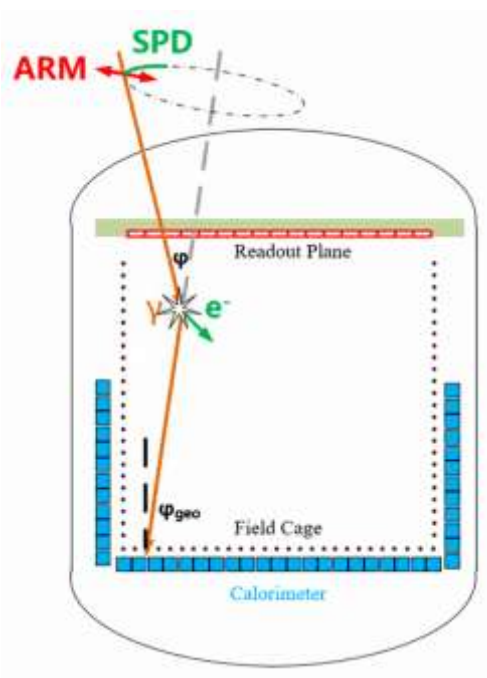
采用像素读出单元, 1.72mm间距
灵敏体积为 $20 \times 20 \times 10 \text{ mm}$



热压接制作探测器



系统需求分析



角分辨率计算原理

$$\cos \varphi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma + K_e} \right)$$

$$\sigma_\varphi^2 = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial K_e} \right)^2 \sigma_e^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial E_\gamma} \right)^2 \sigma_\gamma^2$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial K_e} = \frac{m_e c^2}{\sin \varphi} \cdot \frac{1}{(E_\gamma + K_e)^2}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial E_\gamma} = -\frac{m_e c^2}{\sin \varphi} \cdot \left[\frac{1}{E_\gamma^2} - \frac{1}{(E_\gamma + K_e)^2} \right]$$

$$ARM = \sqrt{\sigma_{\varphi_{geo}}^2 + \sigma_\varphi^2}$$

高角分辨 <=> 高位置分辨、高能量分辨 TPC 和量能器

气体探测器位置、时间分辨需求

$$\sigma_{x_{gas}} = \sigma_{y_{gas}} = 0.5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{z_{gas}} = 20 \text{ mm}/\mu\text{s} \cdot \sigma_t = 0.5 \text{ mm}$$

$$\sigma_t = 25 \text{ ns}$$

量能器位置分辨需求

$$\sigma_{x_{CZT}} = \sigma_{y_{CZT}} = \frac{1.72 \text{ mm}}{\sqrt{12}} = 0.5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{z_{CZT}} = 0.5 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\varphi_{geo}} = 1.5^\circ @ \text{ 散射点距离半导体 } 5 \text{ cm}$$

$$\sigma_\varphi = 0.45^\circ @ \varphi = 60^\circ \text{ \& } 1 \text{ MeV}$$

$$ARM = \sqrt{\sigma_{\varphi_{geo}}^2 + \sigma_\varphi^2} = 1.57^\circ @ \text{ MeV}$$

报告提纲

■研究背景

■需求分析

■电子学设计

■测试结果

读出电子学难点和整体设计

读出电子学难点

➤ 高集成度

- 30 * 30 cm² 的TPC样机共 1024 通道;
- 4*4 的CZT阵列共有1936通道
- 因此需要**采用高集成度多通道 ASIC**

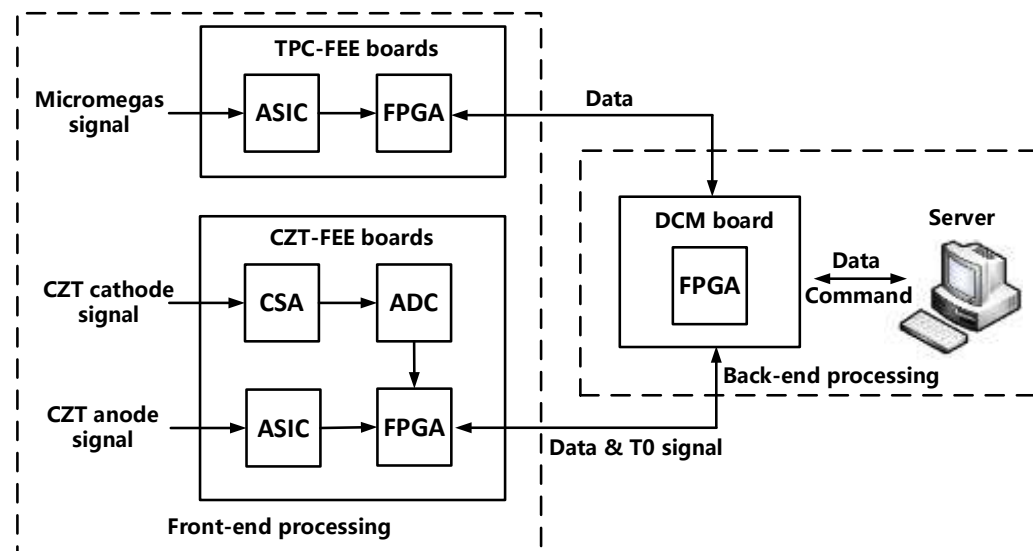
➤ 波形采样与时间测量

- TPC 的 Z 方向位置依赖电子漂移时间, CZT需提供T0信号, 两者均需**保留时间信息**

➤ 基线扣减

- TPC ASIC内部 SCA cell 存在固定基线偏移, 需要逐 cell 校正以保证波形测量准确性

读出电子学整体设计



多类型探测器及读出系统:

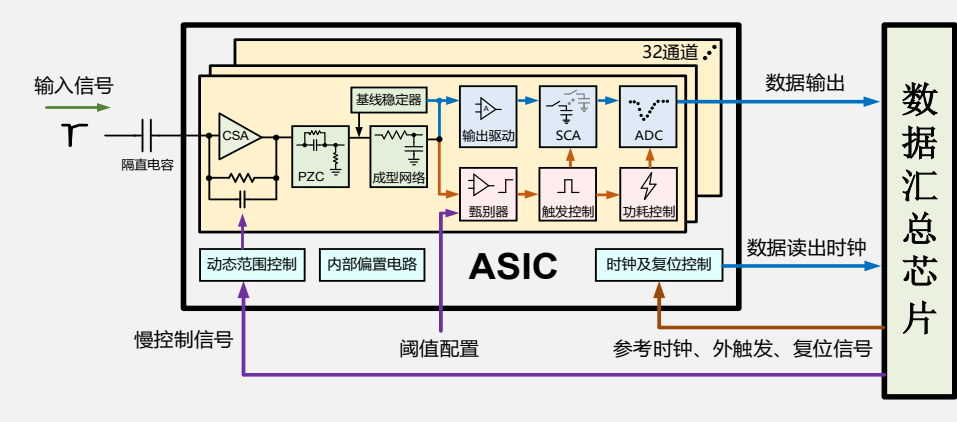
- ✓ 大动态范围低噪声 FEEs;
- ✓ CZT 探测器阴极信号提供系统 T0;
- ✓ 模块化、可扩展读出设计

探测器读出电子学

TPC ASIC

由科大赵雷老师团队开发的ASIC

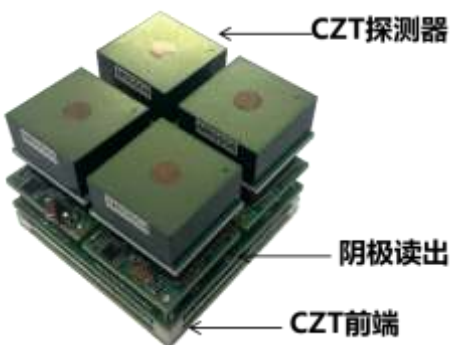
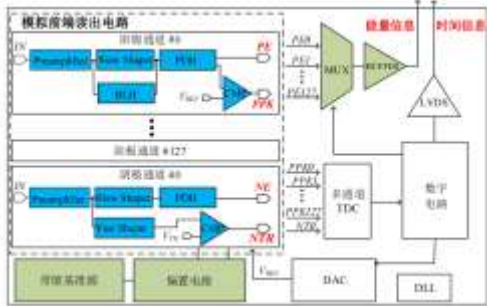
高速电容采样阵列 (SCA) +Wilkinson ADC



CZT ASIC

- 128个阳极通道+2个阴极通道
- 能量和时间测量
- 能量以峰保形式输出，需要外接ADC

动态范围	48 fC-1pC
积分非线性	< 1%
成型时间	70ns-1us
最高采样速率	160 MSPS
采样单元	128 cells
等效电荷噪声 (RMS)	< 0.5 fC @ 48fC
定时精度 (RMS)	< 1 ns @ 48fC
死时间	< 75 μ s @ 120 MSPS



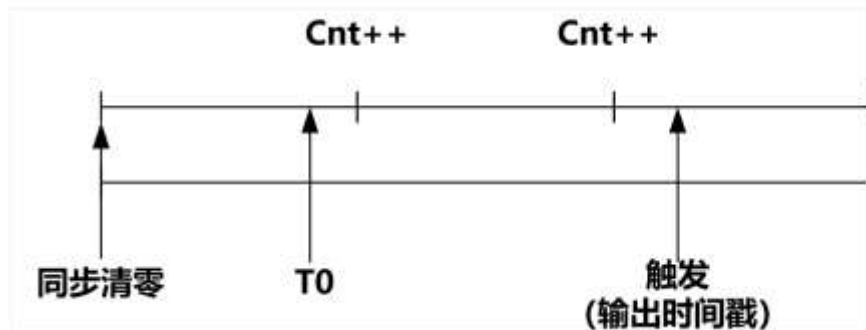
TPC探测器读出电子学设计

触发方案设计

- 自触发同步触发（传统TPC触发模式）
 - 任意通道过阈后上传击中信号，由后端发送全局触发并作为ASIC外触发
 - 同一事例时间戳一致，时间窗较长
- 自触发异步触发（新TPC触发模式）
 - 各通道独立触发，通过时间间隔在线判断是否属于同一事例
 - 同一个事例各通道时间戳不同，可用多个短时间拼接完整事例，降低上传数据量
- 系统外触发
 - 外部触发实现系统同步，并作为ASIC外触发，用于TPC系统单独调试。

时间测量设计

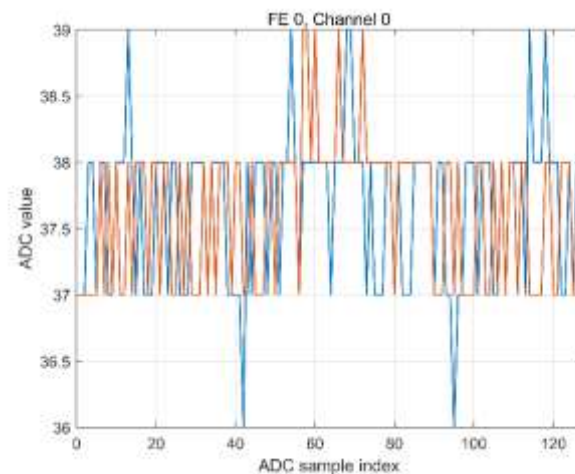
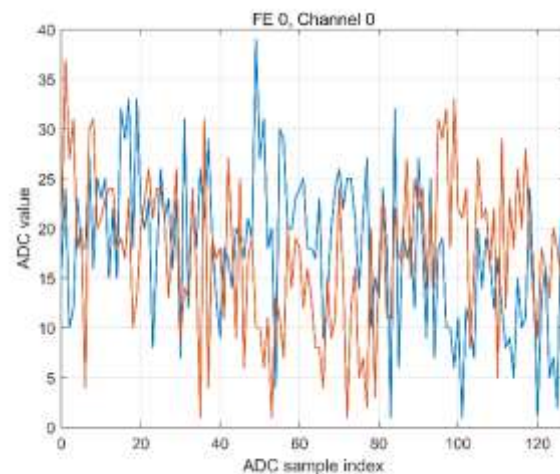
- ASIC内部有时间戳计数器（24bit，计满一次时间为1.6s），输出波形时候直接输出时间戳
- 因此需要将ASIC内部的计数器与FPGA的计数器进行同步
- 最终的测量时间为：
$$T = \text{ASIC的时间戳计数器溢出的次数} \times 1.6\text{s} + \text{ASIC输出时间戳} - T_0\text{信号到达的时间戳}$$



TPC探测器读出电子学设计

在线基线扣减功能

- 扣减原因
 - TPC ASIC内部SCA cell存在固定基线偏移
- 离线标定Offset参数
 - 按板号和通道号分类，根据STOP对齐128个SCA cell，计算各通道cell的基线均值
- FPGA在线基线扣减
 - 上位机下发Offset参数，FPGA存储于RAM中，根据通道号和STOP号匹配对应cell偏差值，完成逐cell基线校正，并将负脉冲转换为正向输出



报告提纲

■研究背景

■需求分析

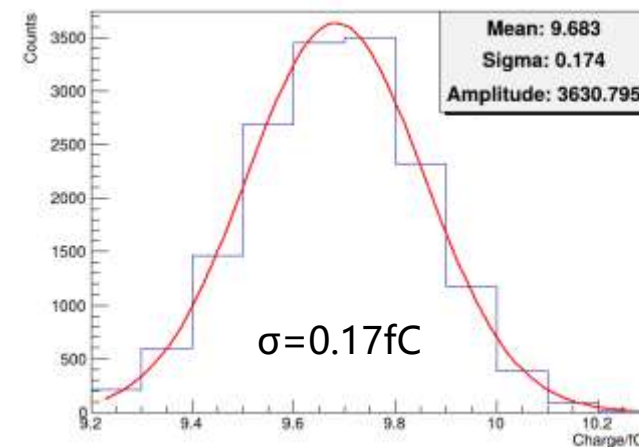
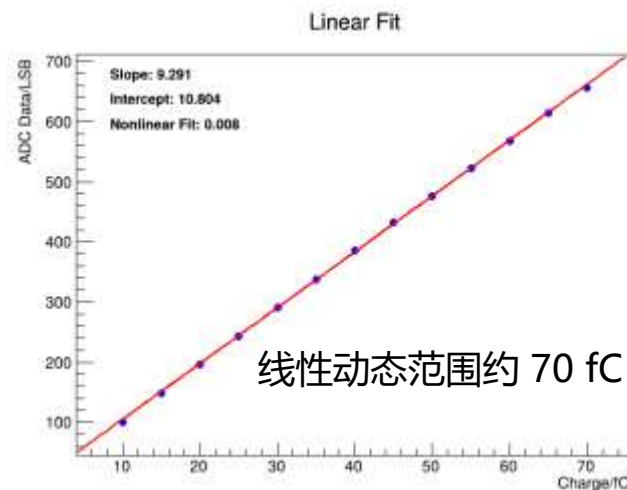
■电子学设计

■测试结果

测试结果

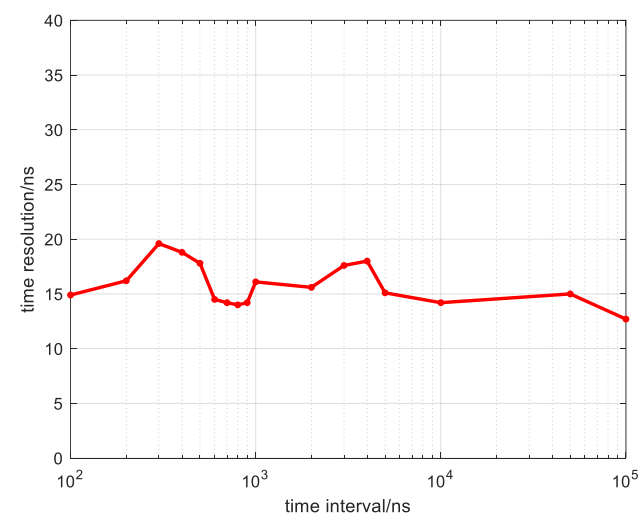
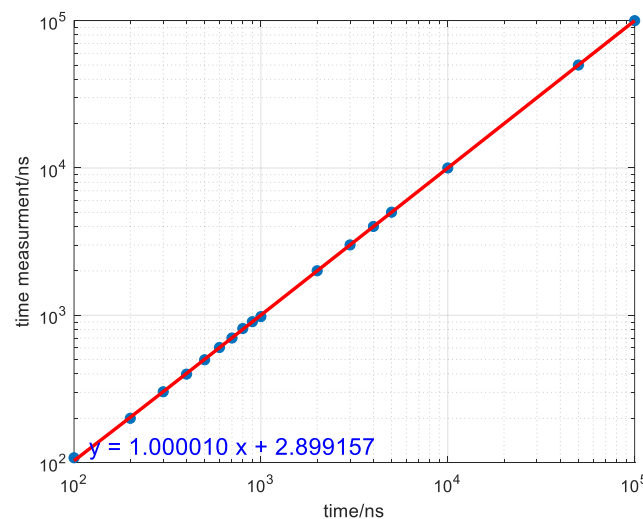
读出电子学刻度测试

- 增益约为 9 LSB/fC
- 非线性约为 1%
- 噪声约为0.2fC



通道间时间间隔与时间分辨测试

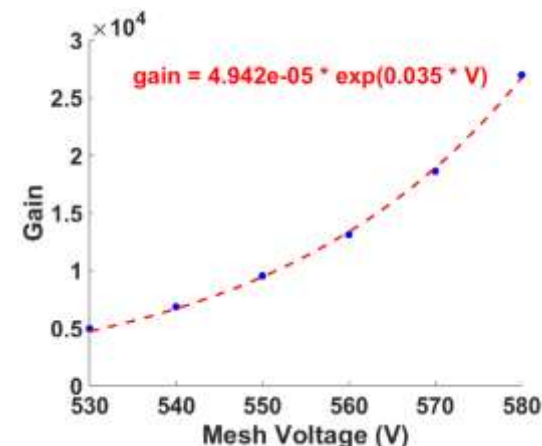
- 测试两通道刻度信号间的时间间隔和时间分辨
- 利用信号发生器同时产生不同间隔的两路信号，输入两个不同通道
- 测试得到10M采样率下的时间分辨小于20 ns



测试结果

MMs探测器-电子学测试

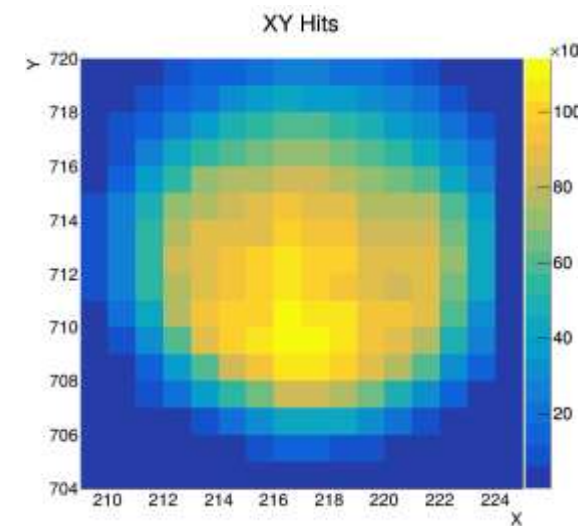
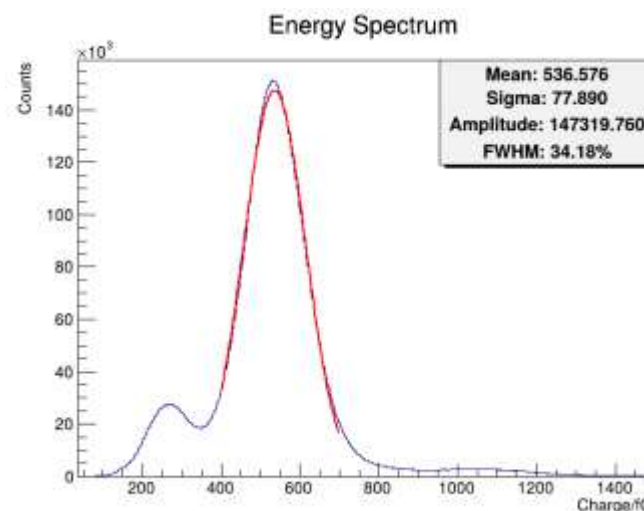
- 工作气体：93% Ar+7% CO₂
- mesh电压：-530V ~ -580V
- 阳极接地
- 大部分通道噪声约为1.5fC，所有通道噪声小于4fC（接探测器）



探测器增益与mesh电压关系测试

放射源测试

- Fe-55点状放射源能谱测试
(-840V -560V)
- 全能峰电荷量约为536.6 fC
- 能量分辨率约为34.18%



测试结果

常压TPC宇宙线测试

- 利用宇宙线穿过 TPC 产生的电离径迹进行测试
- X/Y 方向位置由二维读出条给出
- Z 方向位置由电子漂移时间得到
- 分别重建 X-Z、Y-Z 方向径迹投影，最终实现宇宙线三维径迹重建



X-Z方向径迹



Y-Z方向径迹



宇宙线三维径迹

谢谢！
