



# 用于光核物理的 多用途活性靶时间投影室研制

王曦阳 (代表复旦TPC课题组)

复旦大学现代物理研究所

第十二届全国先进气体探测器研讨会·山东青岛

2024年7月16日

## 01 研究背景

## 02 f Meta-TPC的结构

- 探测器主腔体
- 电子学与数据获取系统
- 慢控制系统

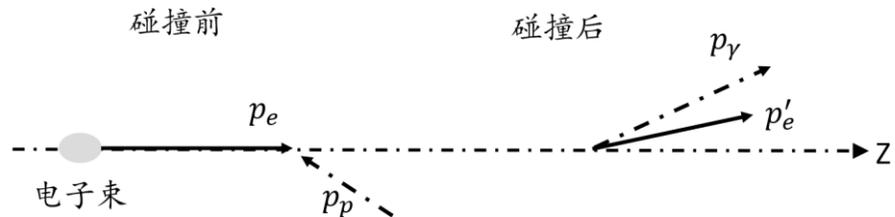
## 03 f Meta-TPC的性能研究

- 离线性能测试  
(放射源测试、激光测试等)
- 辅助探测器电子学开发及测试
- 在线束流测试

## 04 总结



# 实验背景-新型康普顿伽马源



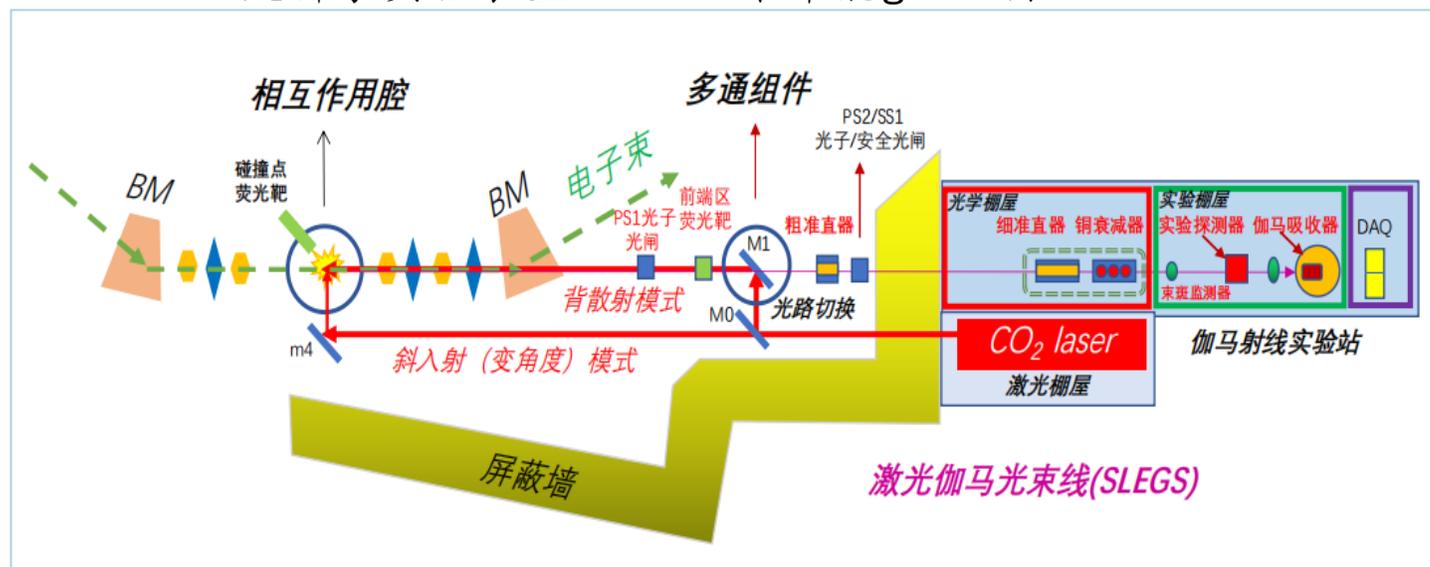
$$E_\gamma \equiv \hbar\omega' = \frac{\hbar\omega (1 - \beta \cos\theta_i)}{1 - \beta \cos\theta_f + \frac{\hbar\omega}{\epsilon_e} (1 - \cos\theta_{ph})}$$

激光康普顿  $\gamma$  源优点：准单能、高亮度、高极化度、能量连续可调

相比较与核-核反应，光核反应具有如下优点：

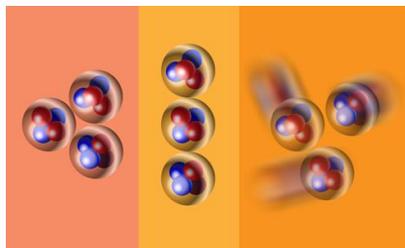
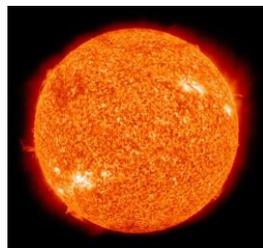
- ✓ 反应机制简单，电磁相互作用
- ✓ 能够选择性的布局目标核能级
- ✓ 末态产物干净

大科学实验装置SLEGS：准单能gamma源



# 实验背景-alpha团簇结构研究

- $^{12}\text{C}$  Hoyle态解释了天体物理中 $^{12}\text{C}$ 核合成过程以及 $^{12}\text{C}$ 丰度问题。
- $^{12}\text{C}$  Hoyle态及其激发态性质是碳基生命的基础，是所有重元素合成的基石

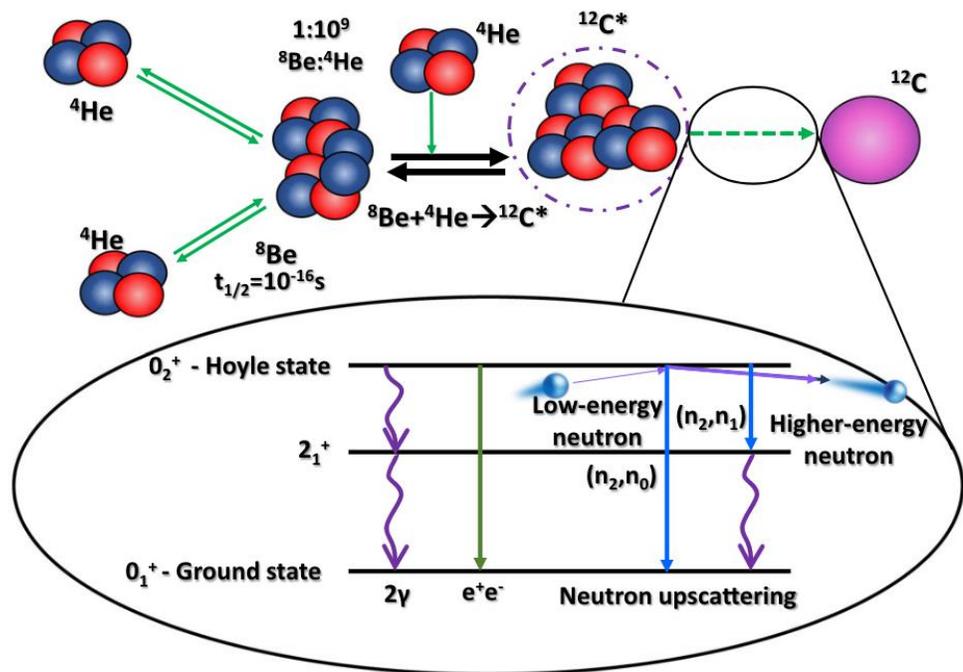


Hoyle态  
激发态研究

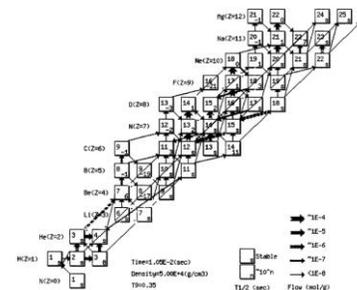
碳基生命形成  
➡



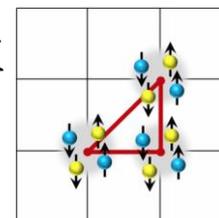
恒星元素核合成理论开创者  
弗雷德·霍伊尔  
1954



天体核合成及核状态方程  
➡



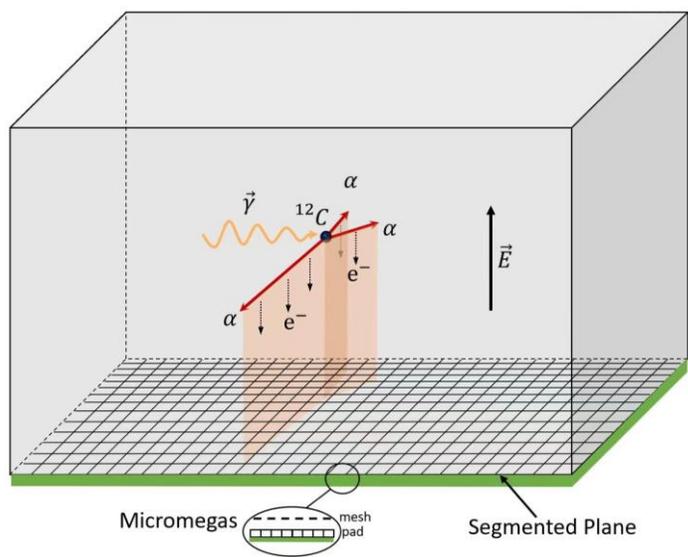
核力及第一性原理  
计算精确检验  
➡



# 活性靶时间投影室

## 活性气体靶:

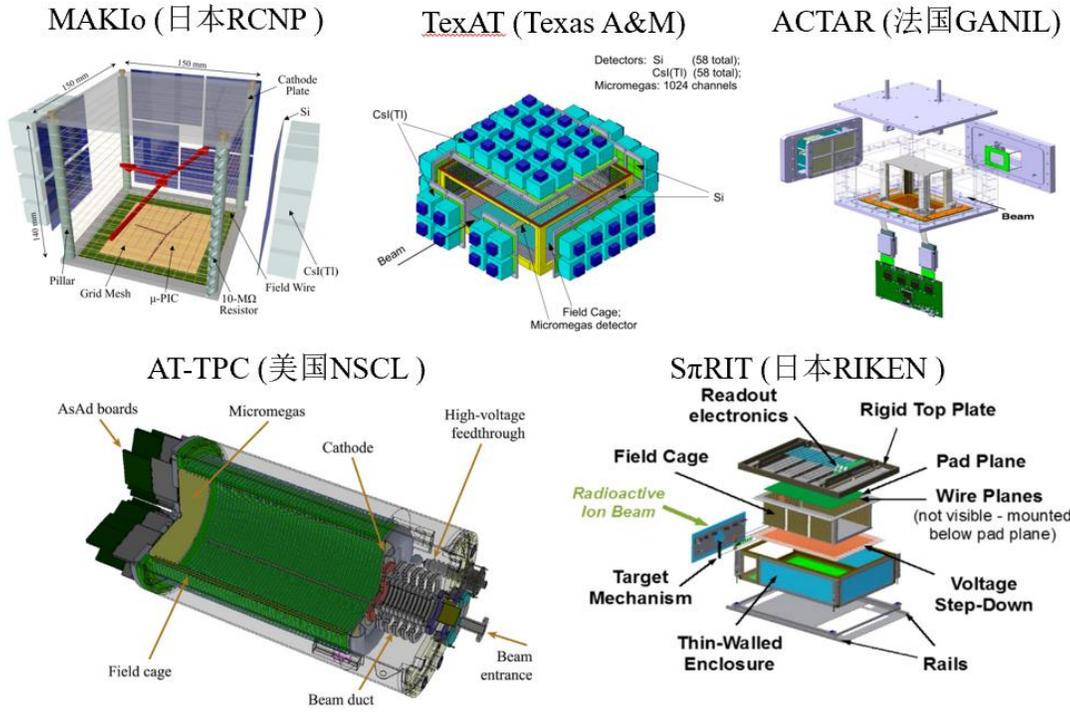
探测器的气体作为探测介质同时也充当实验靶



### AT-TPCs的优势

- (1) 近 $4\pi$ 探测立体角
- (2) 低探测阈值
- (3) 高探测效率
- (4) 高空间分辨
- (5) 3D 径迹

将AT-TPC用于激光康普顿 $\gamma$ 源, 可大大提升 $(\gamma, p)(\gamma, t)(\gamma, \alpha)$ 等反应道测量精度和效率, 解决低能光核反应探测难题。

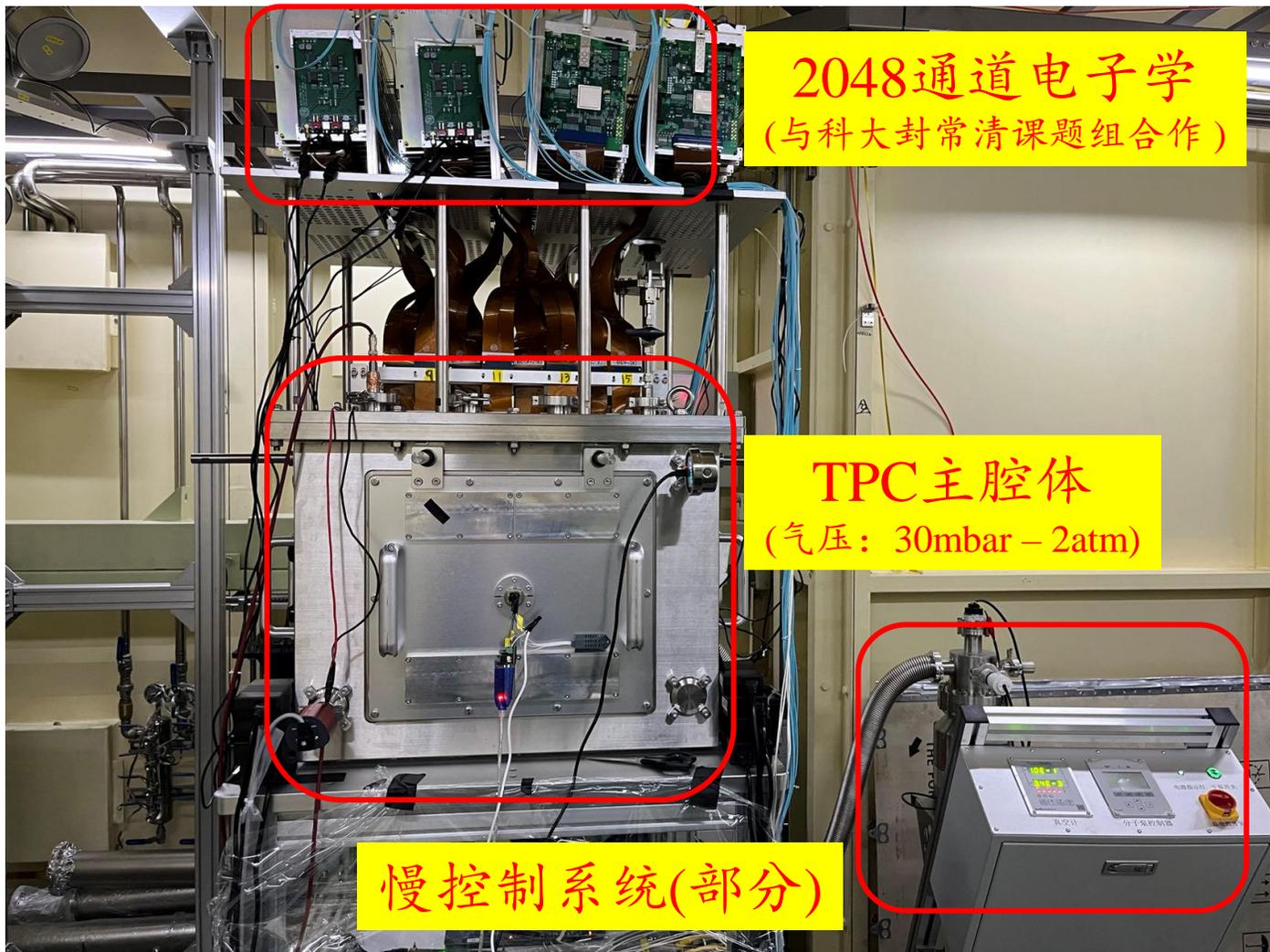


国际上代表性的活性靶时间投影室

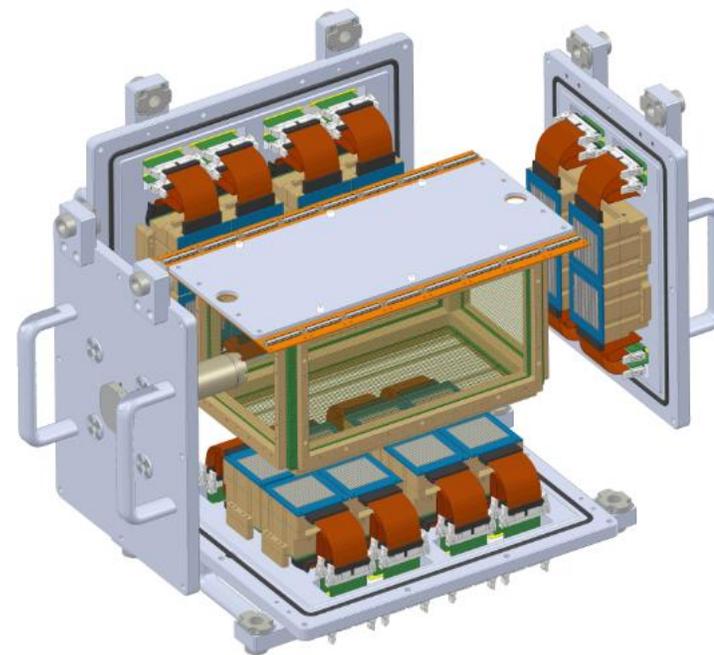
### 高能带电粒子的测量方案

1. 辅助探测器(Si+CsI 探测器,  $\Delta E$ -E 望远镜)
2. 加磁场使得离子能损在有限的气体靶内部

复旦多用途活性靶时间投影室 (Fudan Multi-purpose Active Target Time Projection Chamber, fMeta-TPC)

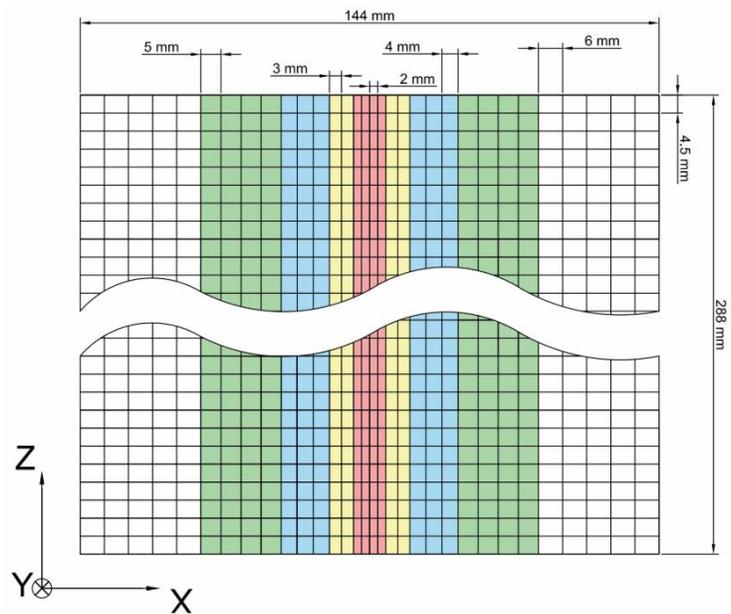


## TPC主腔体



主探测器: 场笼 + 读出阳极板(Micromegas)

辅助探测器(28块): 双面硅条 + 碘化铯



(a)

阳极板采用**长方形构型**：沿着束流方向，阳极板灵敏区长度的增加，有助于提高反应产额，利于低反应截面的光核反应测量。

阳极板灵敏区为 **32 × 64 不等间距矩形像素**。

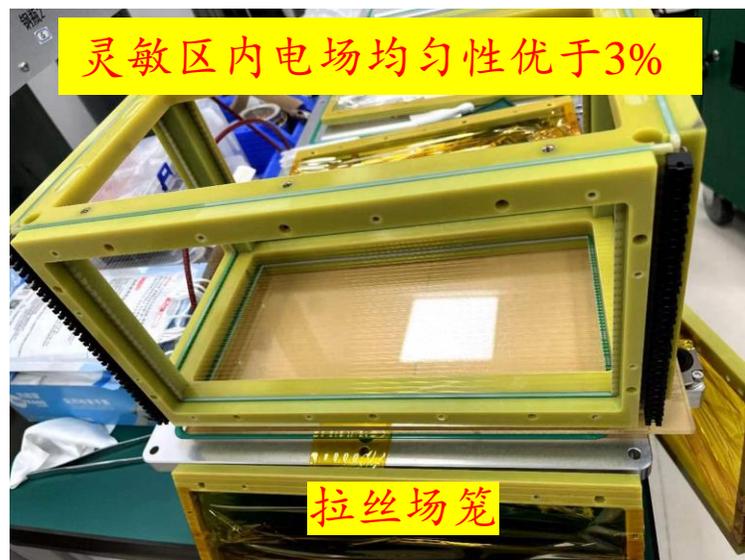
其中像素在  $x$  方向的大小逐渐变大，2 mm → 6 mm。

在  $z$  方向上，像素尺寸为 4.5 mm。

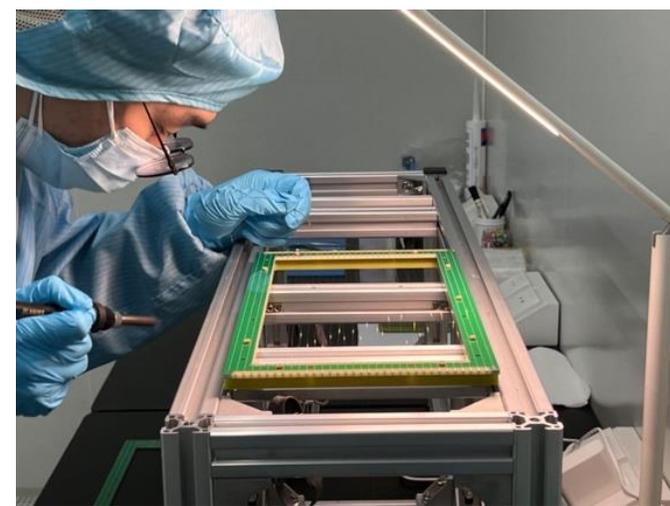
(1) 部分**光核反应产物的能量较低且射程较短**。中心区域的小像素有助于实现对短射程粒子的精准测量。

(2) 外侧的**大像素**则使探测器能够覆盖更大的灵敏区域，从而实现**对长射程粒子的有效测量**。





拆解后的镀金钨丝场笼面



复旦大学拉丝场笼制作平台

设计制作了两套场笼 $18(W)*33(L)*18(H)$  cm<sup>3</sup>用于不同实验目标:

➤ 双层镀金钨丝 ( $\Phi = 50/30 \mu m$ ) → 放射性束流实验

拉丝场笼对出射粒子有接近 99% 的透过率

拉丝场笼容易出现断丝或张力导致的丝形变

➤ 蚀刻印刷电路板 ( $\Phi = 1 mm$ ) → 光核物理

仅束流入射方向采用拉丝面

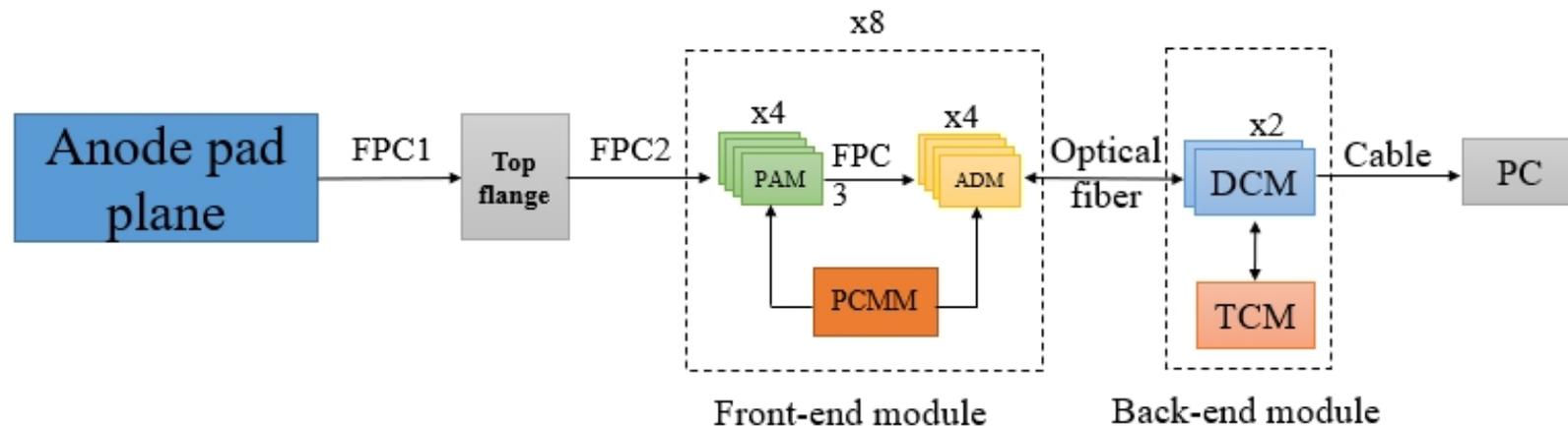
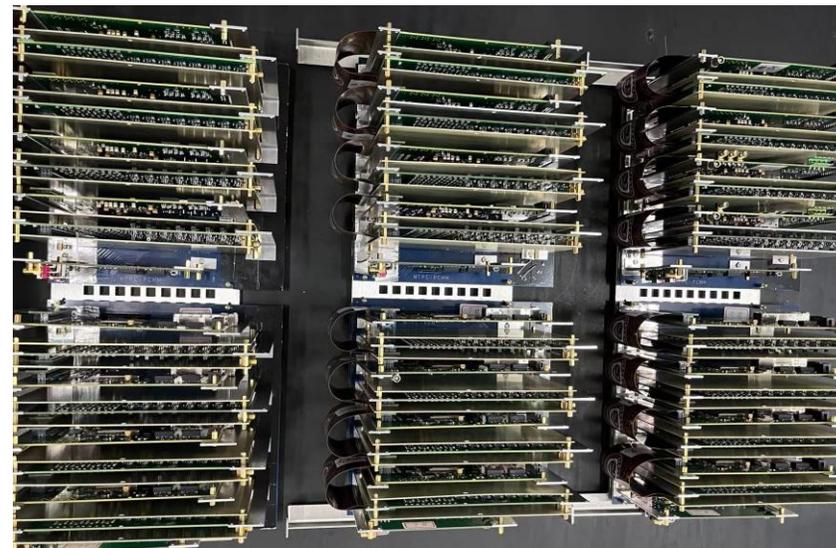
中国科学技术大学—封常清课题组合作

## □ 技术路线:

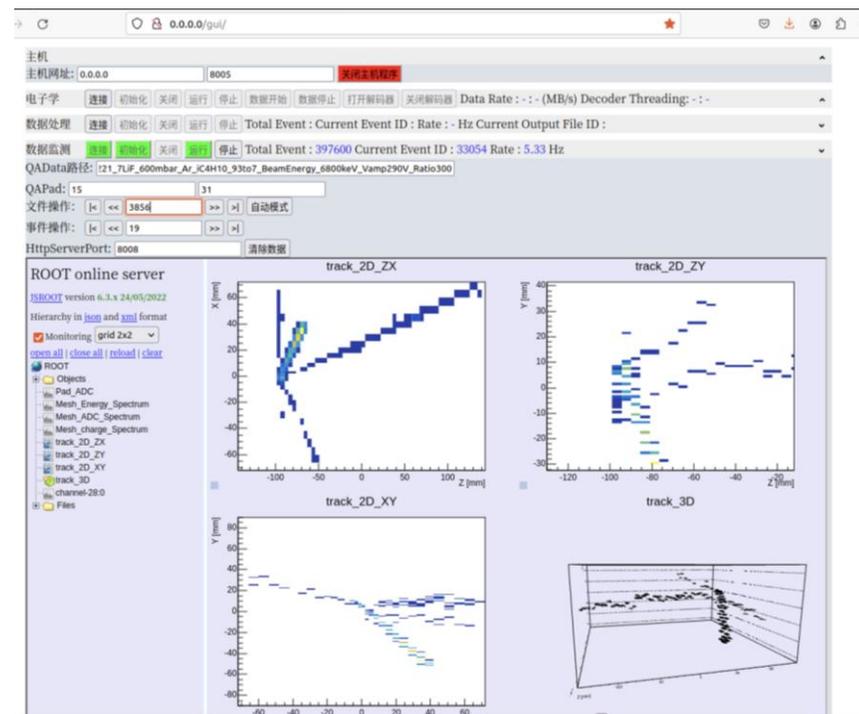
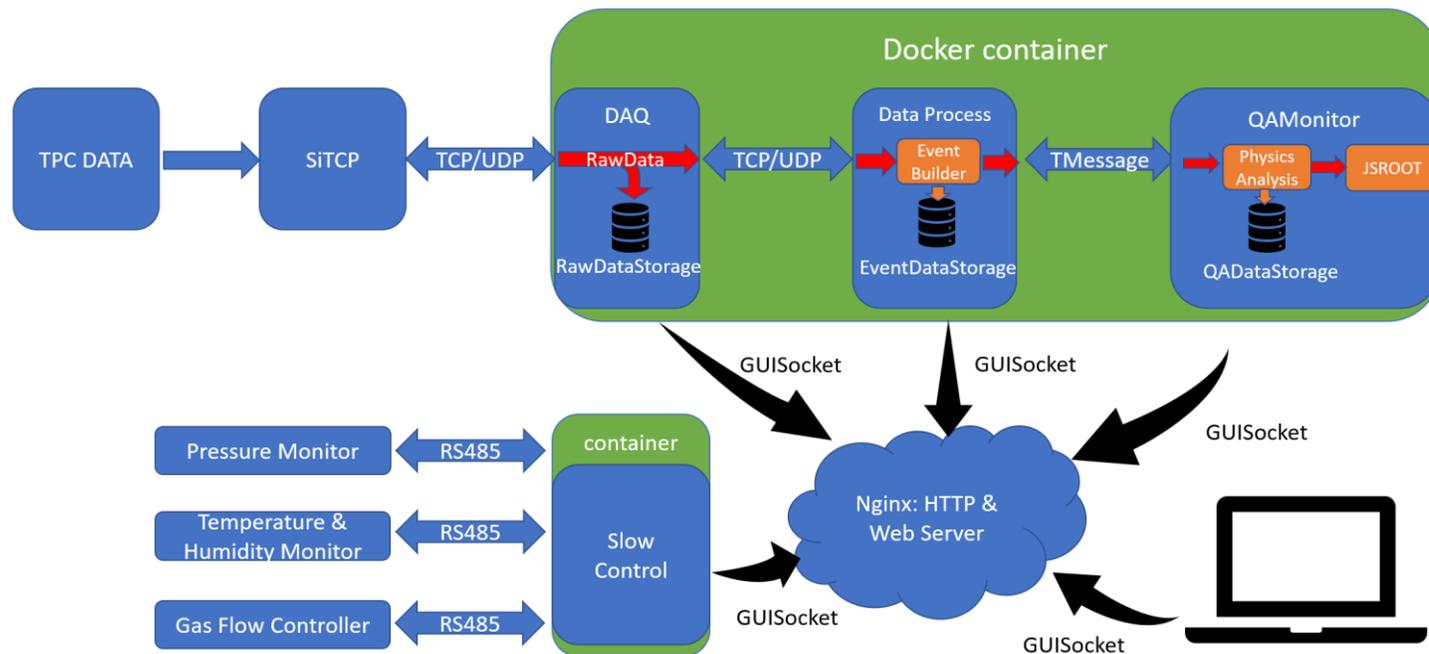
- 基于分立元件的电路
- 电荷灵敏前放+全波形采样+FPGA实时处理+千兆网传输

## □ 电子学性能指标:

- 通道数: 2048;
- 读出死时间: 约25 $\mu$ s;
- 采样率: 40MSPS;
- 采样点数: 1024;
- 采样宽度: 25.6 $\mu$ s;
- 动态范围: 约2fC-3pC;
- 时间精度: <10ns;



陈昊磊.白光中子源多用途时间投影室读出电子学研究[D].中国科学技术大学[2023-07-25].



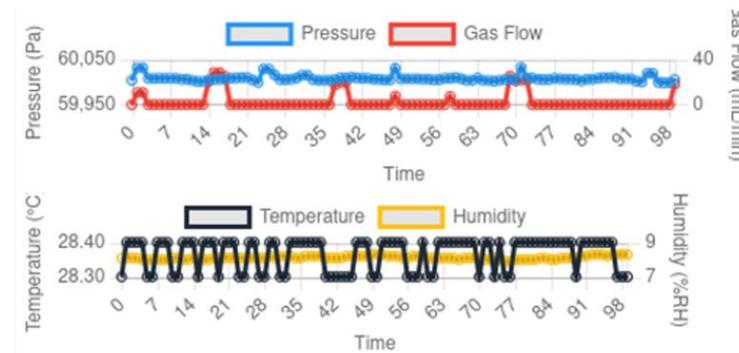
数据获取系统主界面

## 电子学数据获取部分

- 数据获取(对DCM上传的数据流进行**解码**)
- 数据处理(对解码数据的**拼接**和**转化**工作)
- 在线监测(**波形**、**径迹**、**能谱**、**触发率**等)

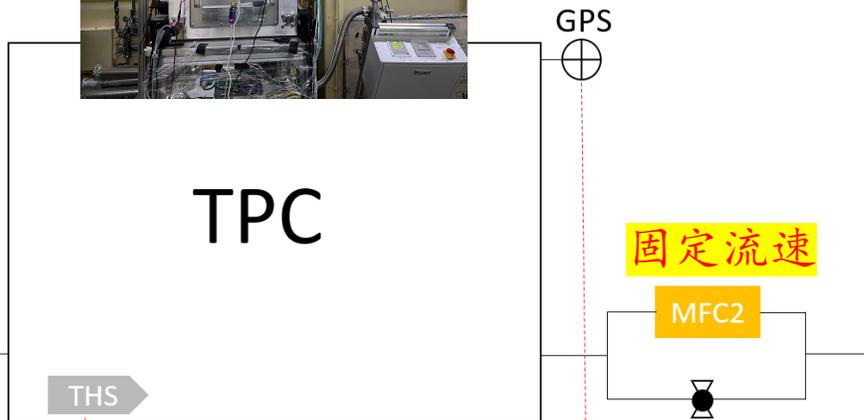
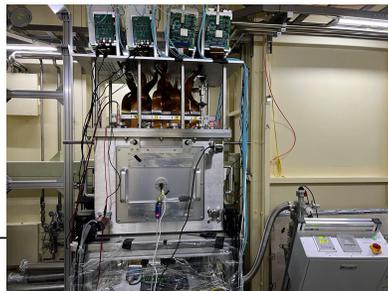
## 慢控制部分

- 气压表
- 质量流量控制器
- 温湿度传感器



# 慢控制系统

- ⊗ 减压阀
- ⊗ 1/4" VCR 阀门
- 球阀门
- ⊕ Gas Pressure Sensor
- MFC Mass Flow Controller
- THS Temperature and Humidity Sensors



流速根据气压确定

固定流速

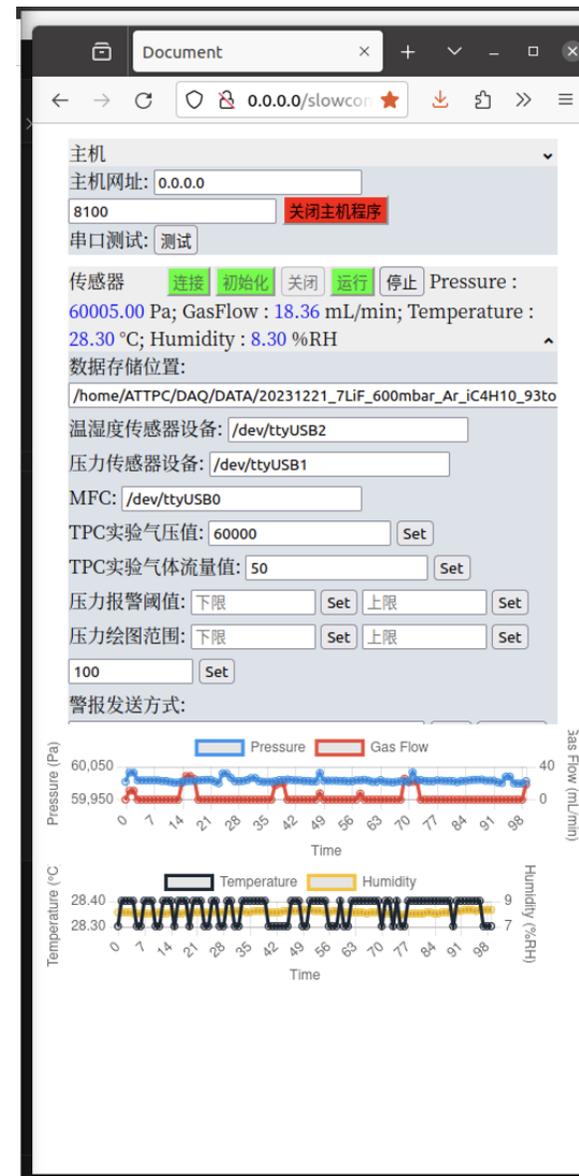
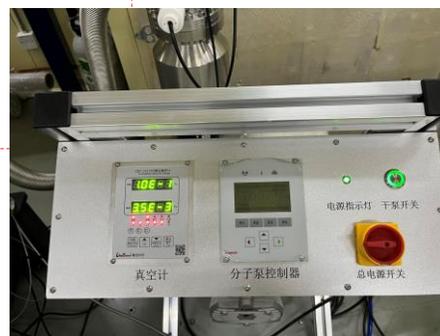
RS485/RS232

RS485/RS232

真空系统：机械泵&分子泵

实验气体：Ar/He+CH4/CF4/iC4H10...

流气面板



慢控制系统软件界面

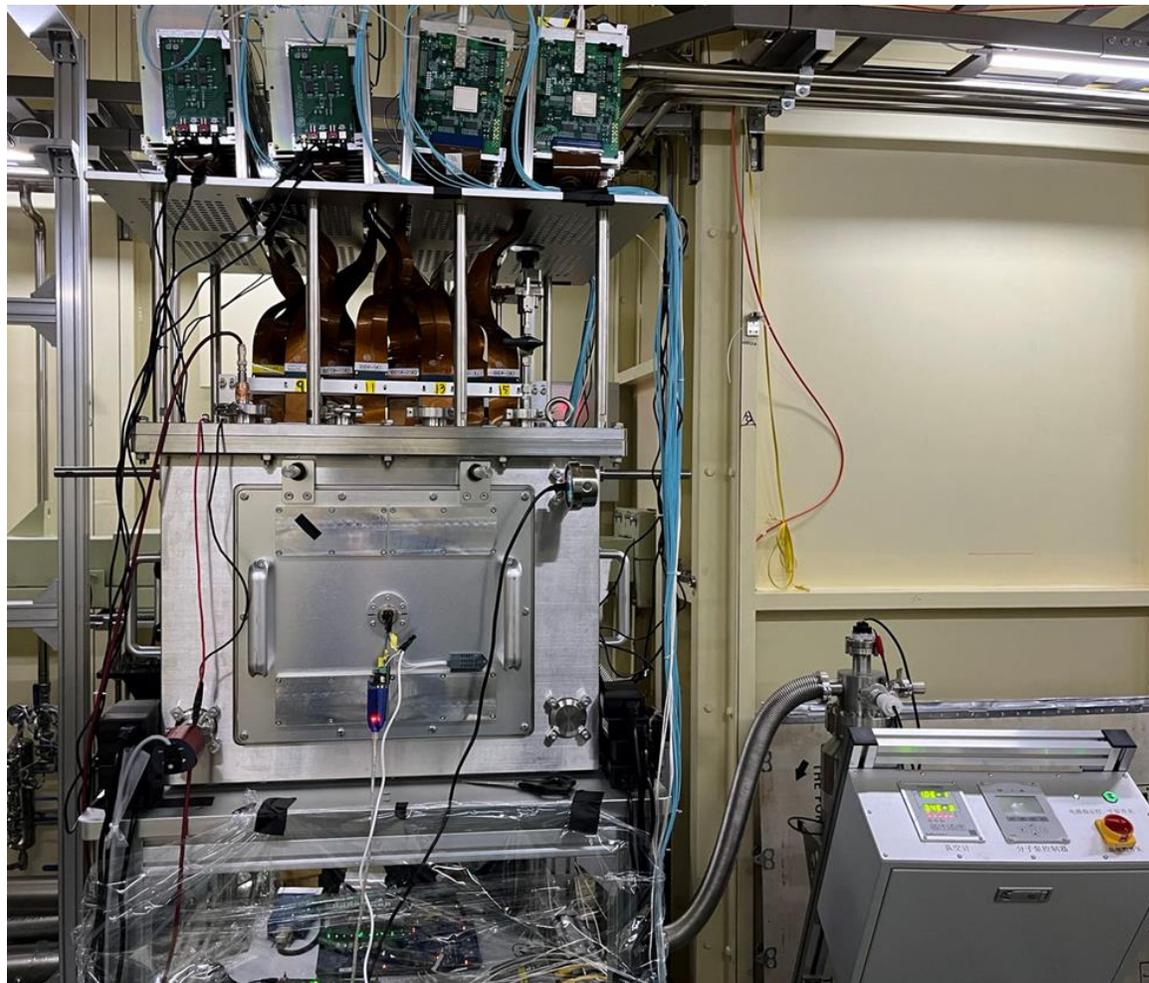
## □ 离线性能测试

- 电子学性能测试
- 放射源测试
- 激光测试
- 外围辅助探测器测试

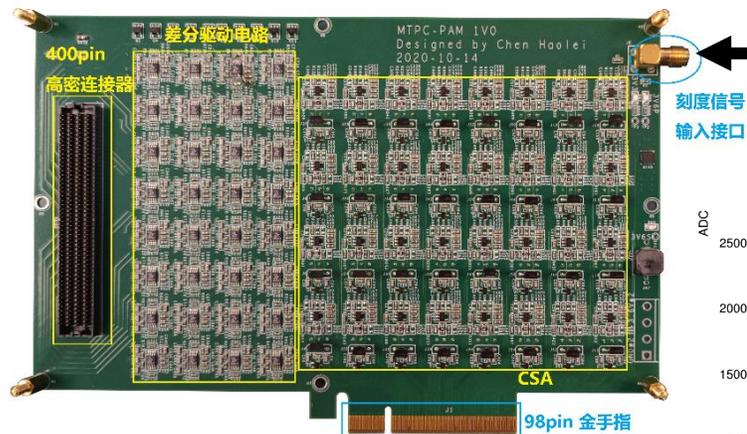
## □ 在线性能测试

- 实验布局 & 参数设置
- 探测系统性能测试

**【arXiv:2406.18599】**



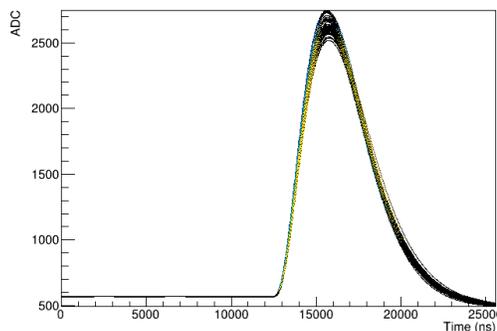
前放模块



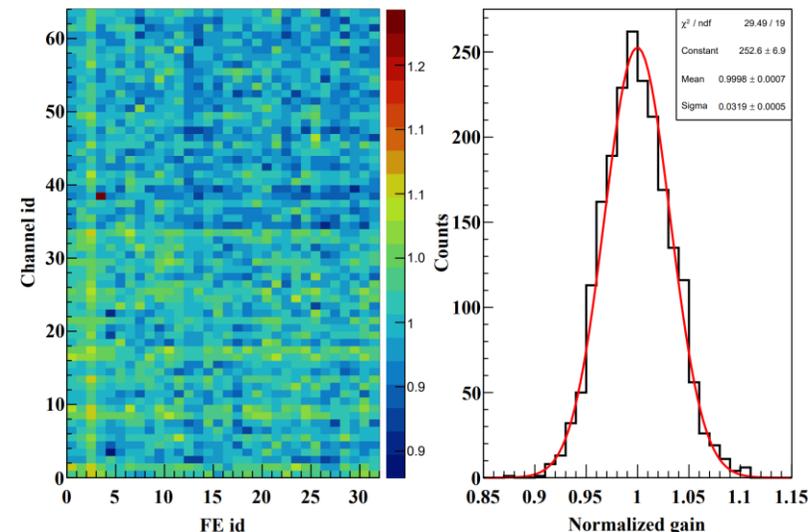
注入信号

信号发生器

刻度信号  
输入接口

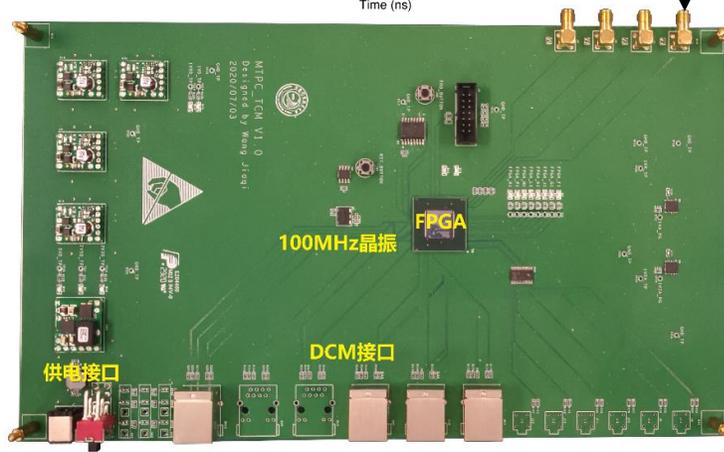
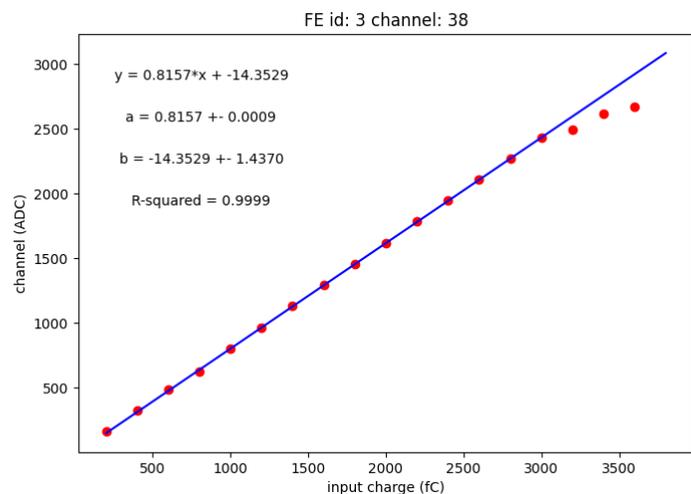


T0信号  
外部触发  
清零时间戳

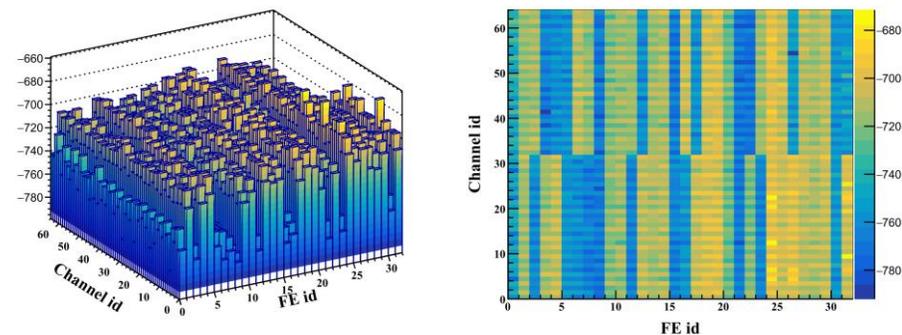


增益涨落在 4% ( $\sigma/\mu$ ) 以内

放大器线性/动态范围测试

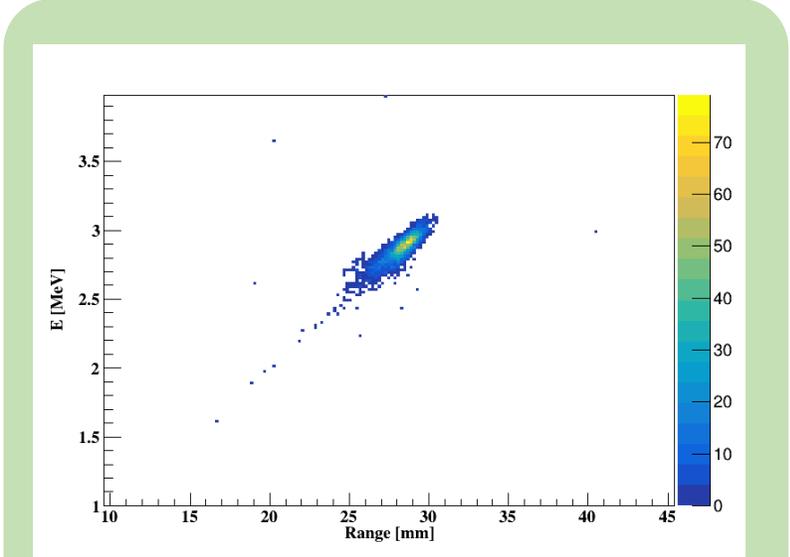
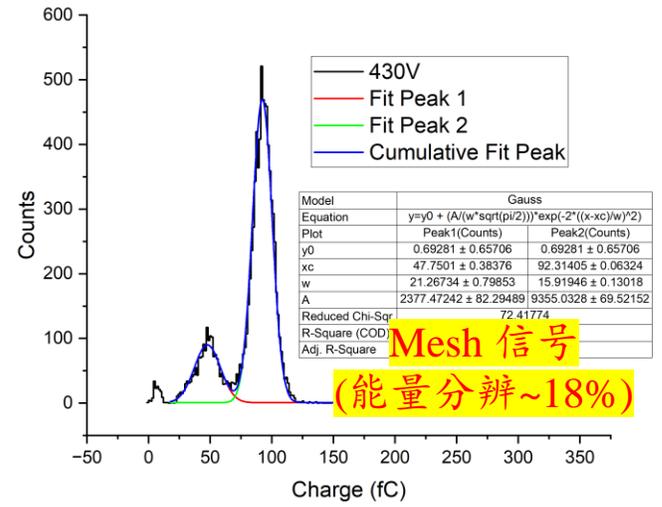
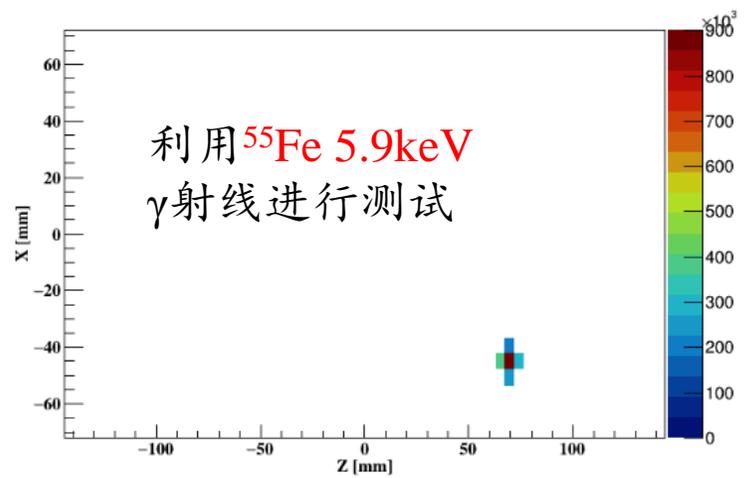


时钟触发模块



电子学时间补偿值确定

# 探测器能量分辨测试



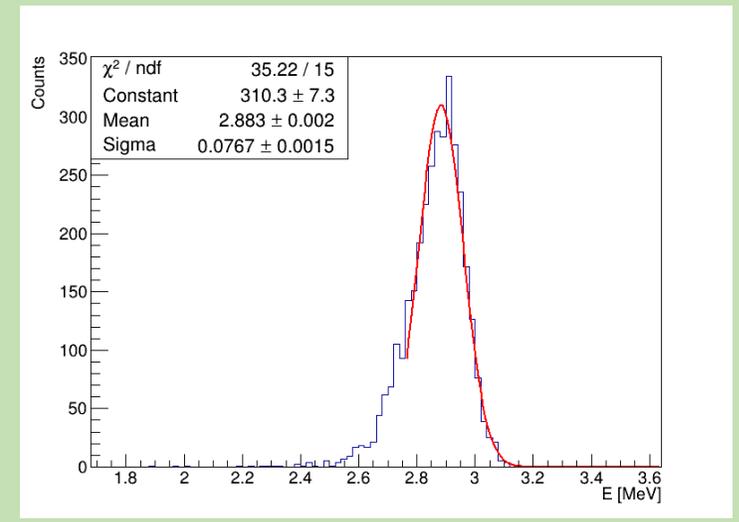
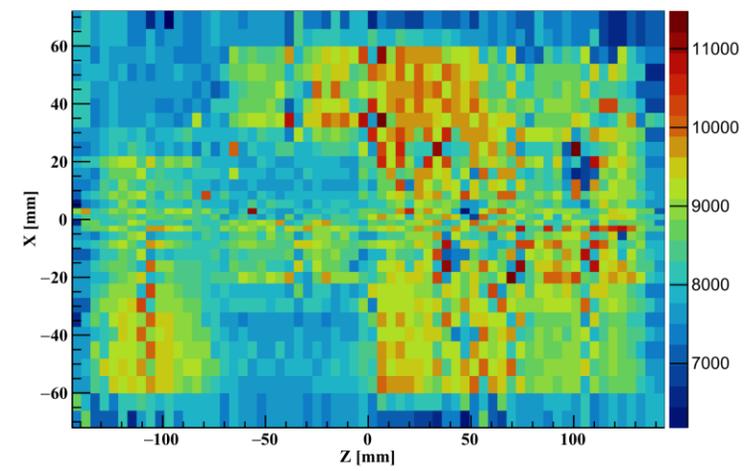
## ➤ 探测器逐像素能量刻度

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{2048} \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{2048}^2 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ x_1^m & x_2^m & \dots & x_{2048}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{2048} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}$$

2048电荷收集  
m个事件

增益值倒数  
 $\theta_i = 1/G_i$

原初电离  
电子数



<sup>241</sup>Am能谱(能量分辨~6%)

# 探测器角分辨测试

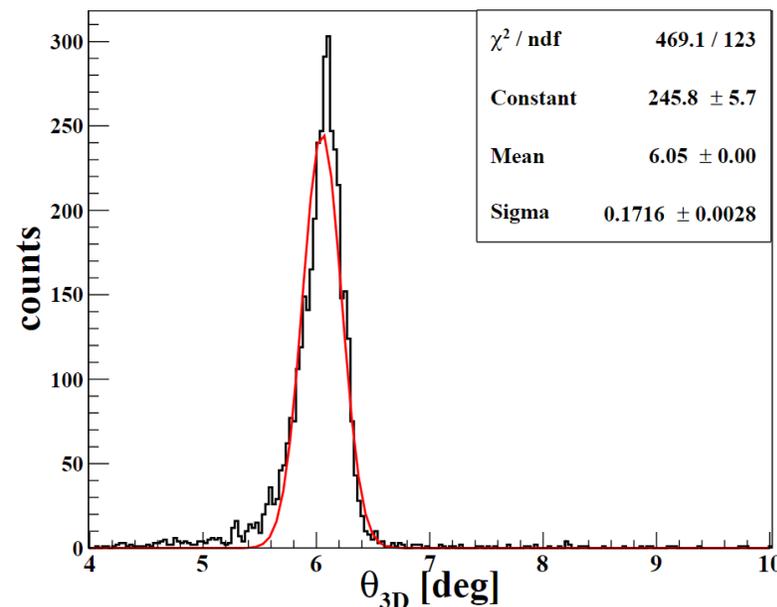
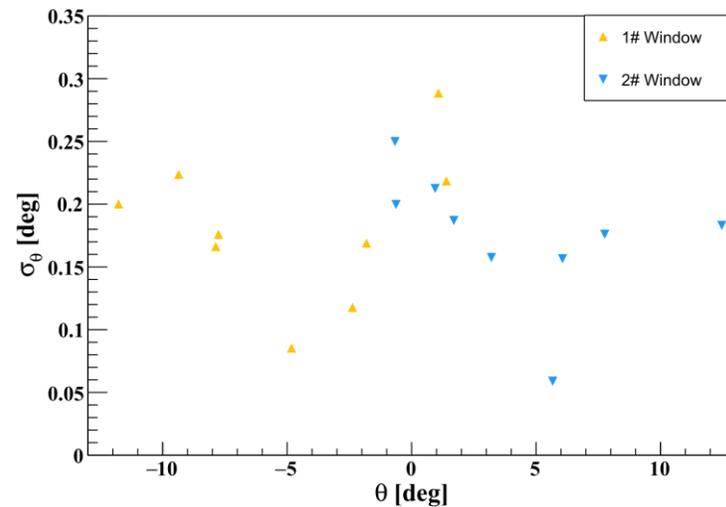
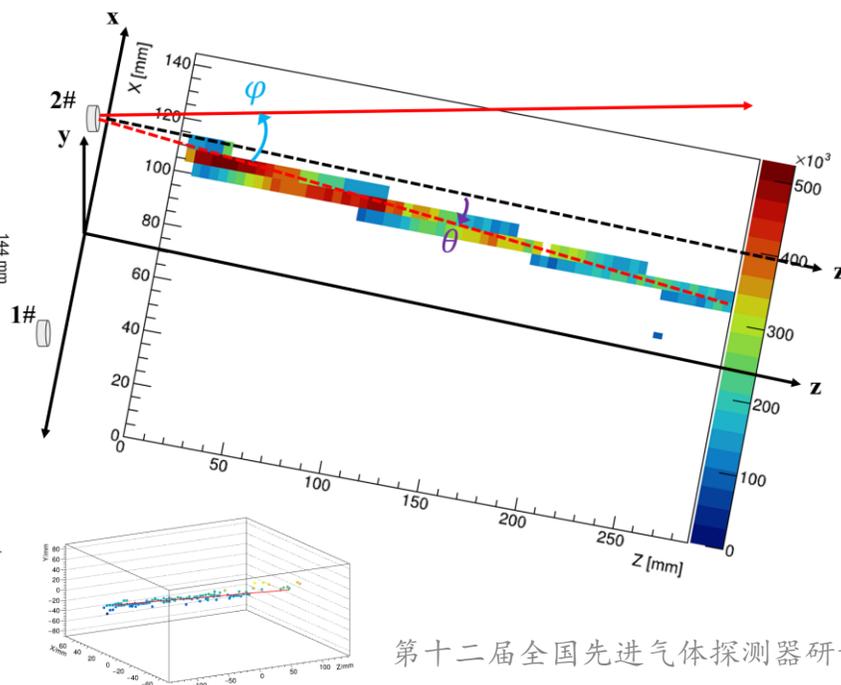
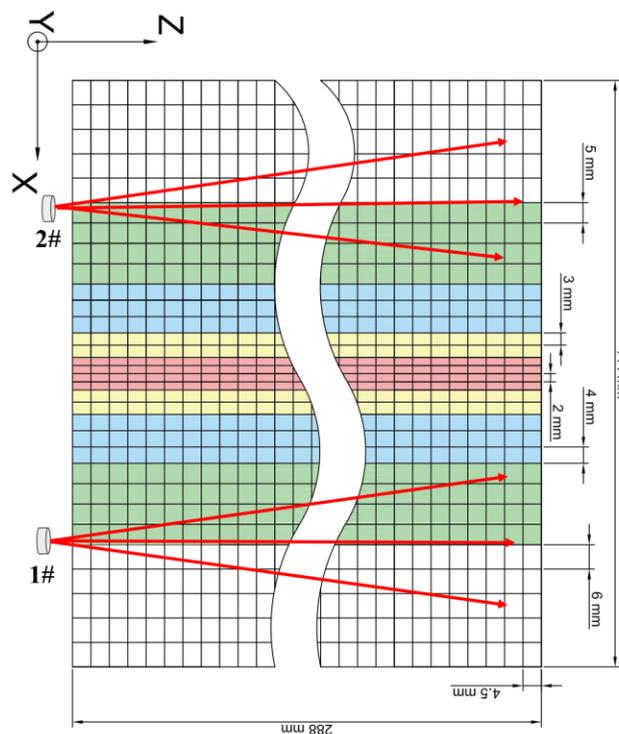
本征角/位置分辨测试:

➤ 测试方式: 266nm 3.58uJ 27.21mW 激光入射TPC, 400 mbar Ar+iC4H10 (93:7)  
 漂移场强度为44 V/cm, 阳极雪崩电压为+345 V

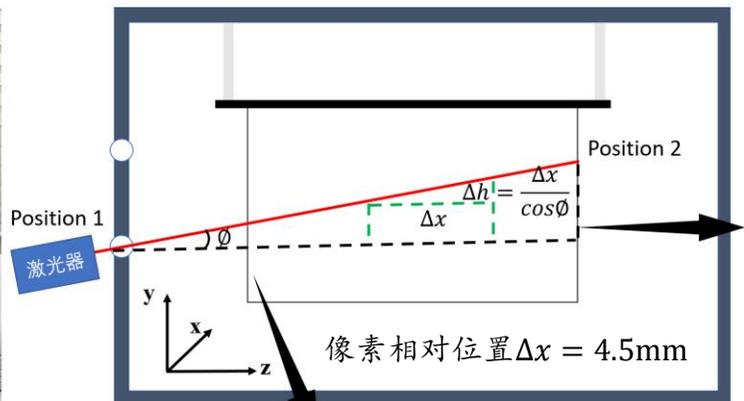
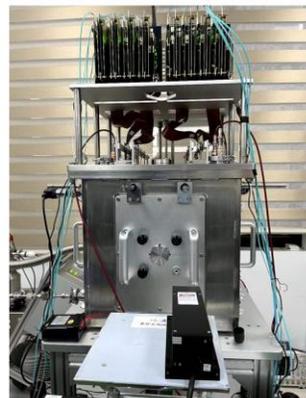
**最佳本征角分辨可达  $0.06^\circ$  ( $\sigma_\theta$ ), 整体结果优于  $0.3^\circ$  ( $\sigma_\theta$ )**

位置分辨:  $FWHM = 2.355 \times \sigma_\theta \times L$   $L = 288$  mm

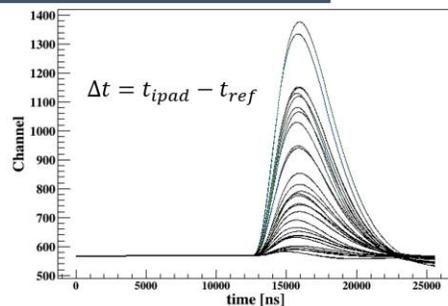
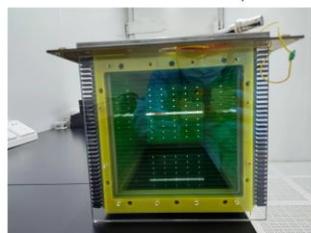
最佳位置分辨率为 0.7 mm (半高全宽), 最差情况优于 3.4 mm (半高全宽)



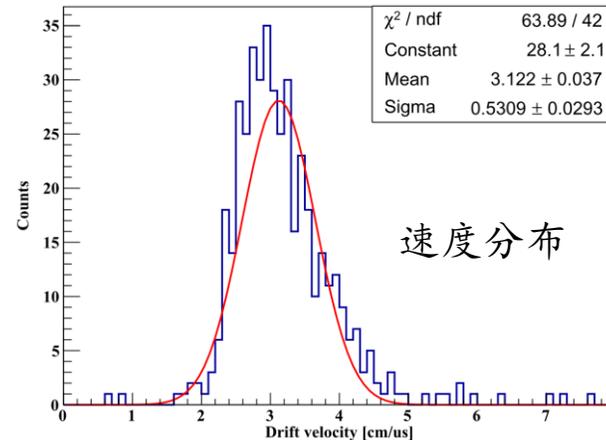
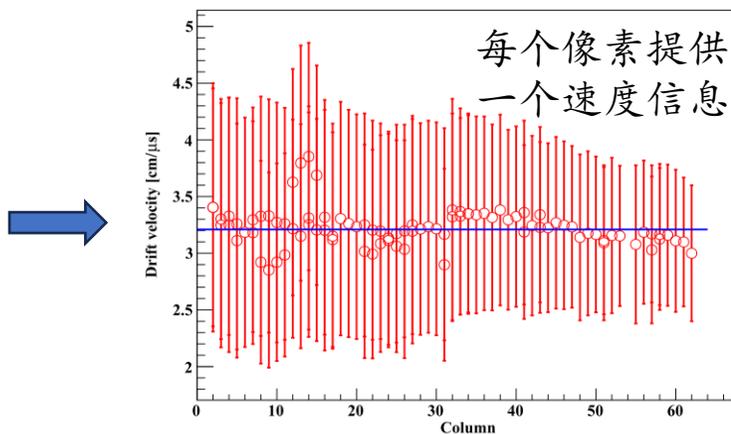
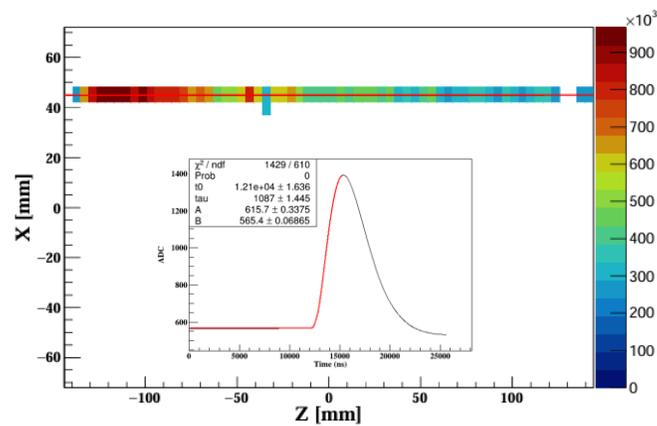
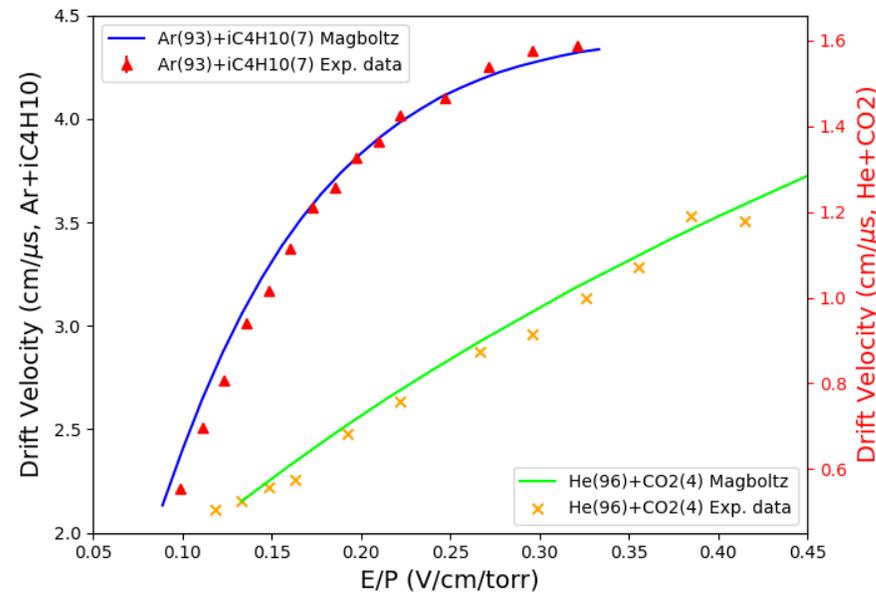
# 探测器电子漂移速度测试



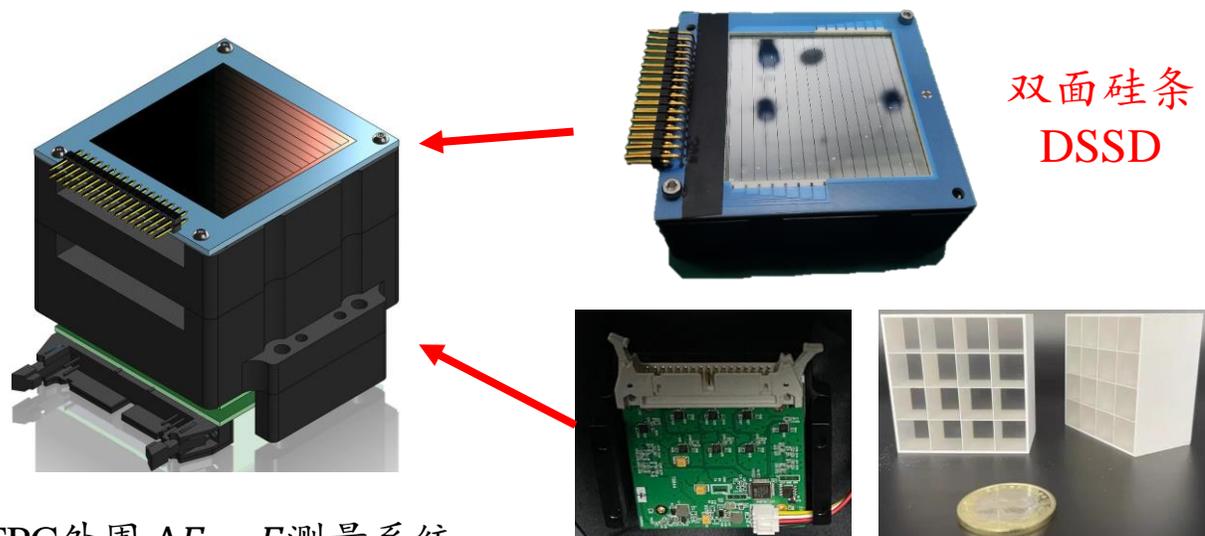
由入射位置、出射位置确定激光角度



## 电子漂移速度测量与模拟



# 外围辅助探测器测试——双面硅条

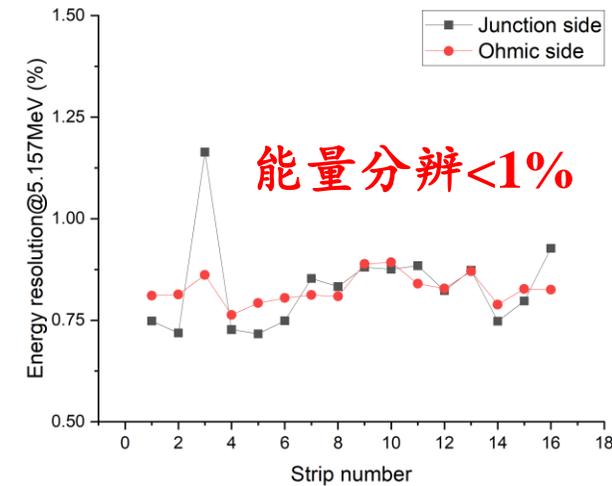
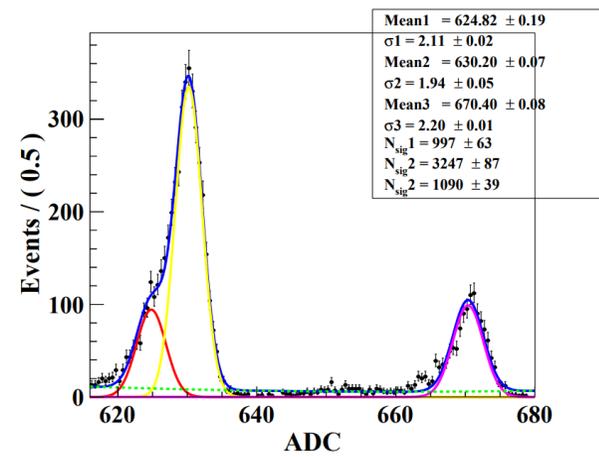
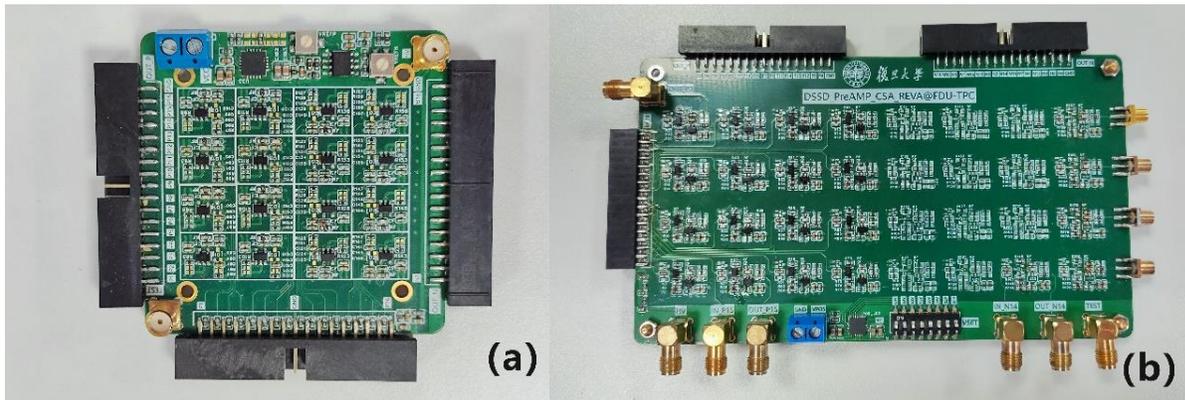


$^{239}\text{Pu}$  放射源

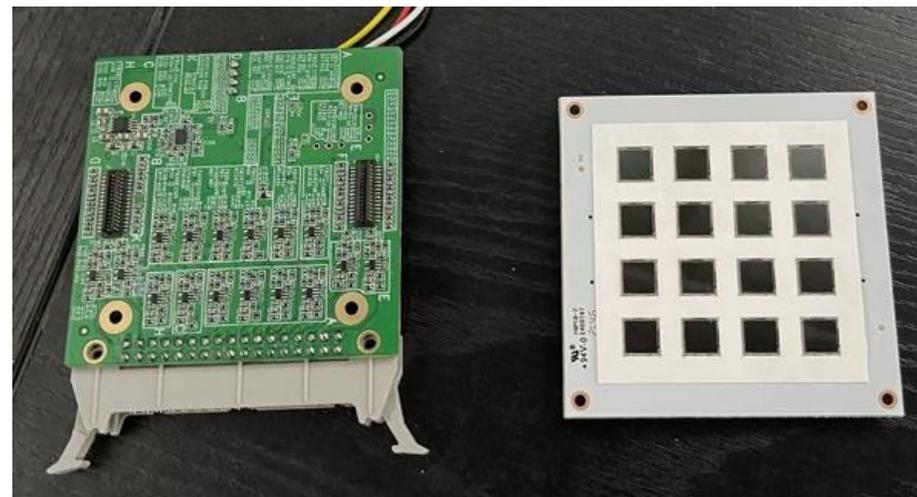


$^{239}\text{Pu}$		$^{238}\text{Pu}$	
能量 (keV)	几率 (%)	能量 (keV)	几率 (%)
5156.6	70.77	5499.0	70.91
5144.3	17.11	5456.3	28.98
5105.5	11.94	5357.7	0.105

32通道电荷灵敏前放



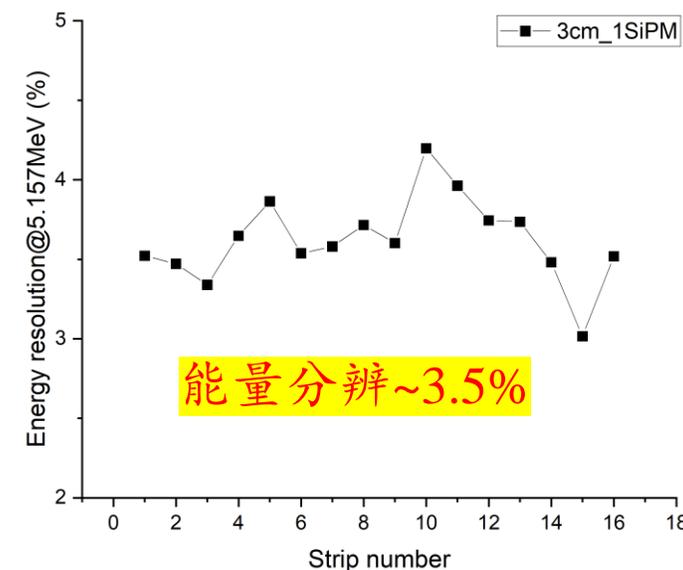
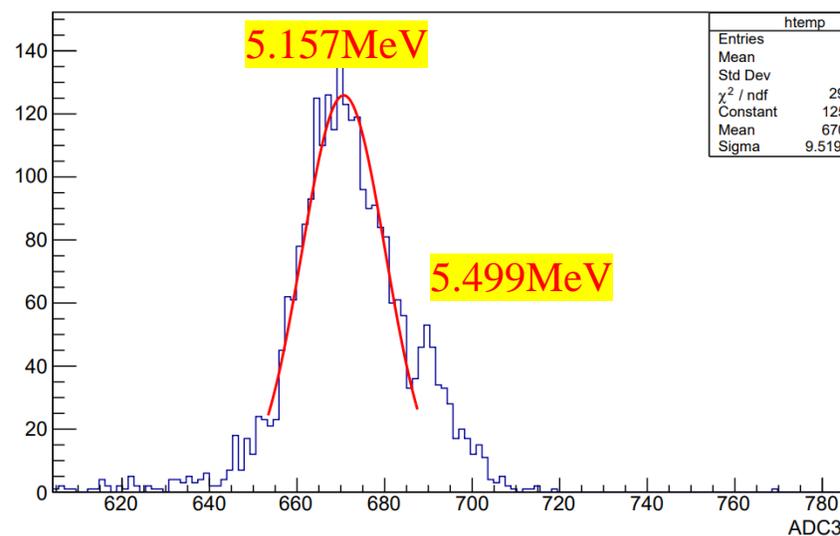
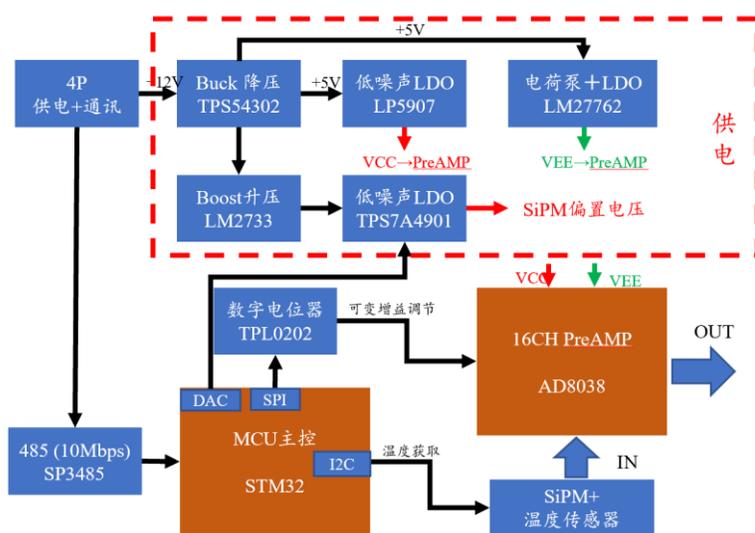
# 外围辅助探测器测试——碘化铯



SENSL C-Series  
Sensor Size: 6 mm  
Microcell Size: 35um

碘化铯探测器结构

SiPM读出电子学



前放增益可调、SiPM偏压可调、温度补偿

$^{239}\text{Pu}$ 放射源能谱

$\gamma$  束流能量: 6.8 MeV; 流强:  $\sim 10^5$  光子/秒

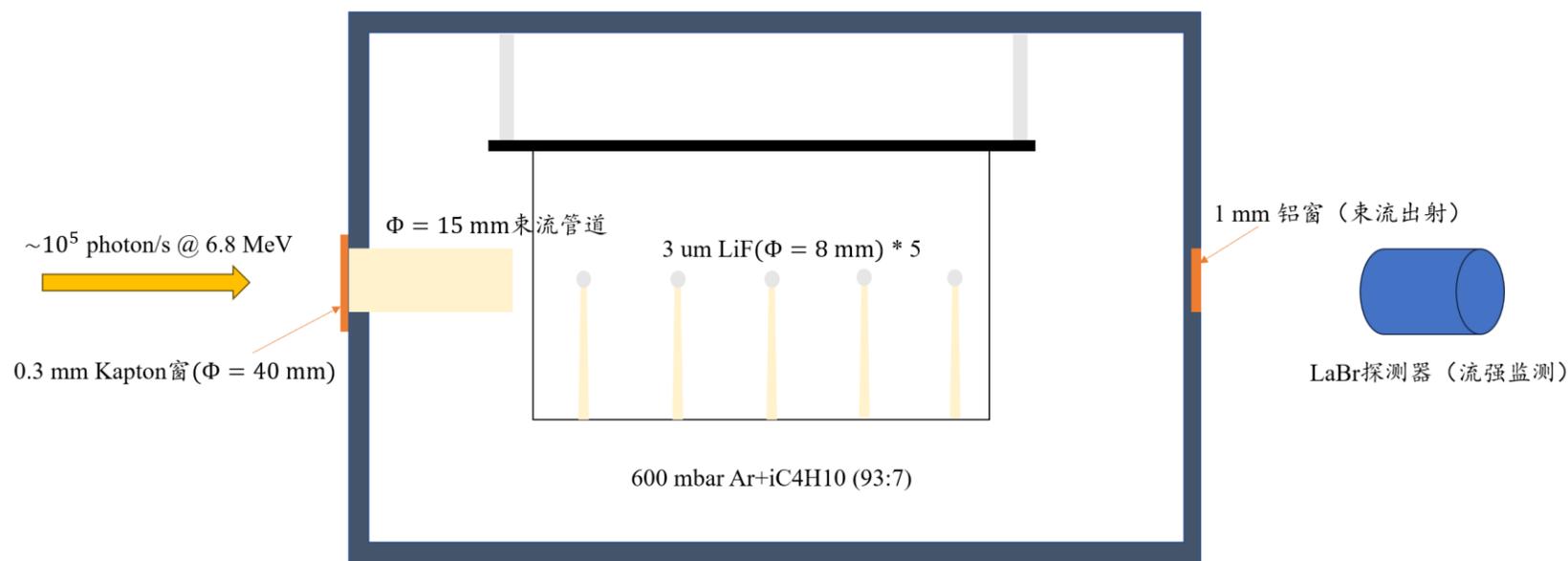
TPC 气体:

Ar+iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (93:7); 气压: 600 mbar; Pad: 290 V; 场笼: -1740 V

靶参数:

**LiF**, 厚度 3  $\mu$ m, 直径 10 mm, 有效直径 8 mm; 靶的数量: 5 个;

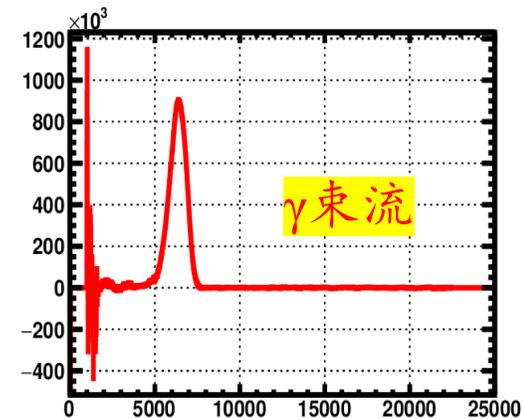
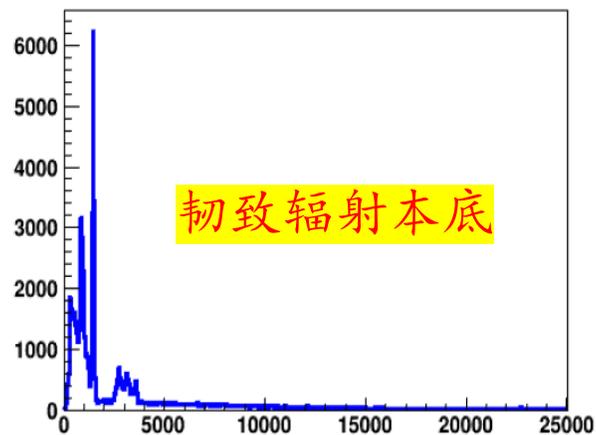
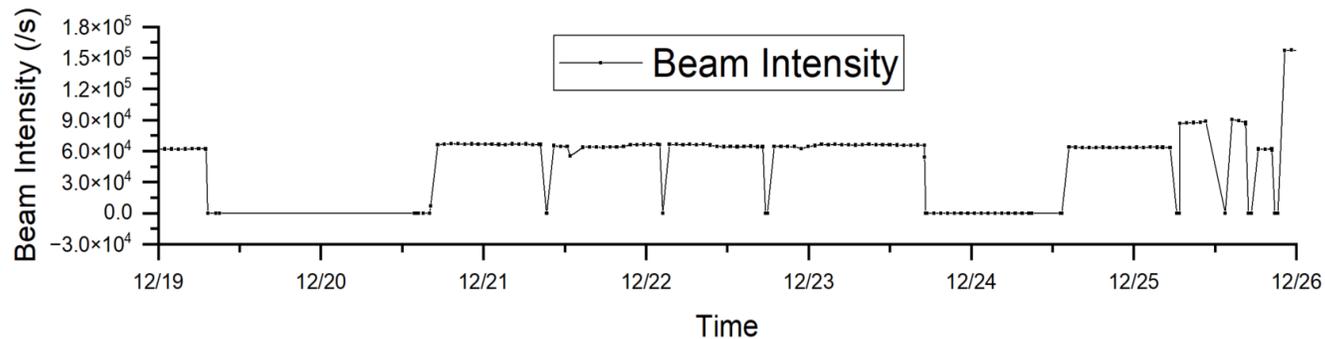
实验布局 & 参数设置:



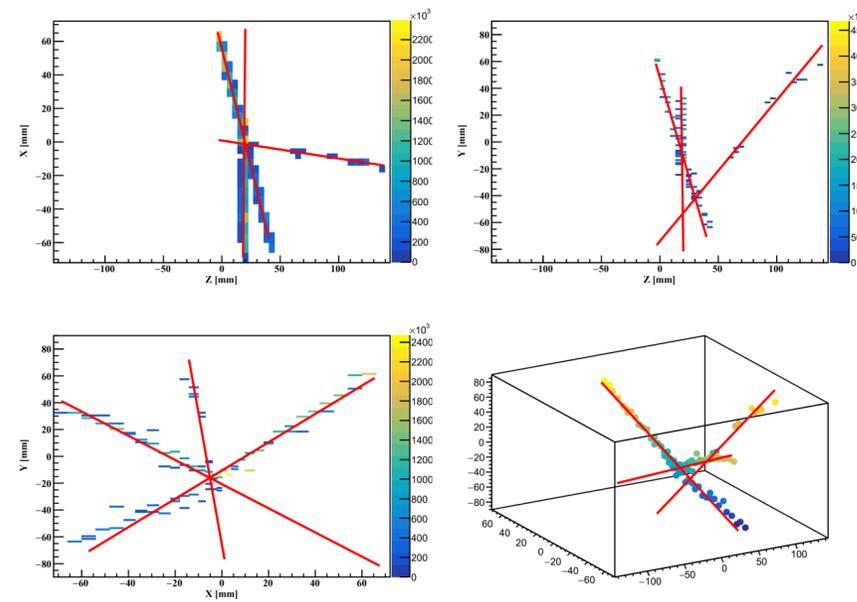
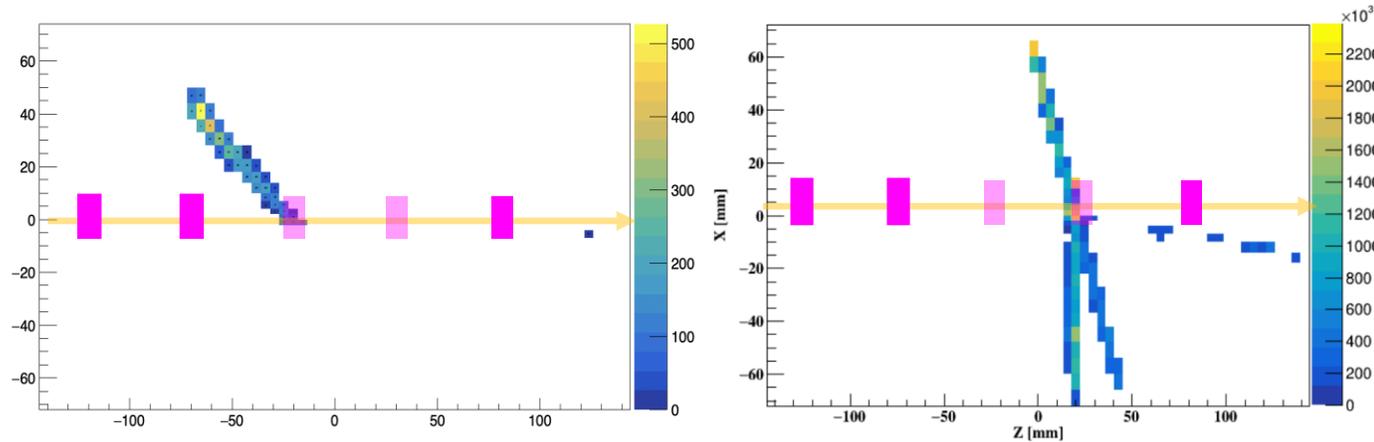
# SLEGS线站第一轮实验



## ➤ SLEGS束流流强、能量分析



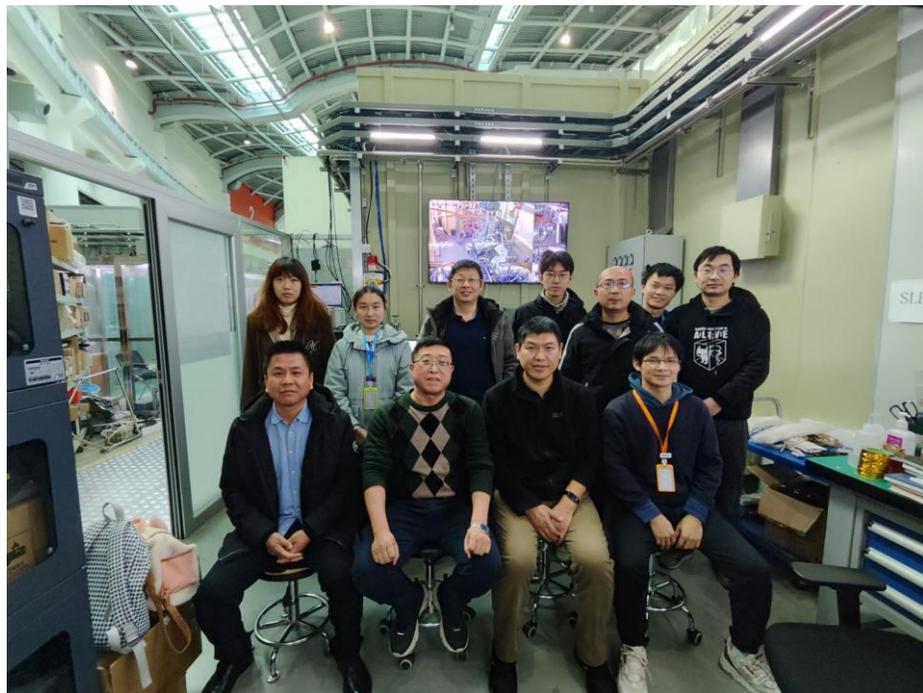
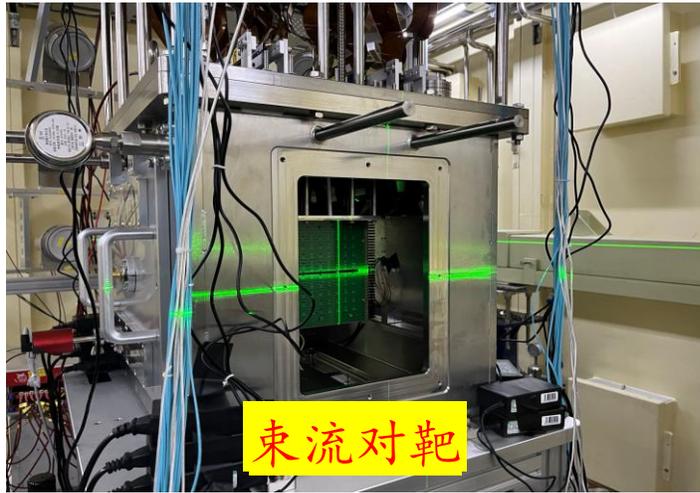
## ➤ 径迹重建与PID



${}^7\text{Li}(\gamma, t)\alpha$ 裂解事件

韧致辐射本底造成的多径迹裂解事件

数据处理工作正在有序的进行当中...



- 2048通道电子学已完成测试。
- 两版场笼电场均匀性达到实验要求。
- 辅助探测器前端电子学部分设计完成并达到能量分辨要求。

待后端电子学开发完成后，将进行束流测试以及能量刻度。

- TPC的离线测试已经初步完成。

角分辨、位置分辨能力达到设计要求，能量分辨有待进一步提高，探测器能量刻度方案有待完善。

- TPC已经在SLEGS线站上完成了第一轮实验，数据正在分析中。

2024年9月计划在上海光源SLEGS线站开展第二轮实验。

谢谢！

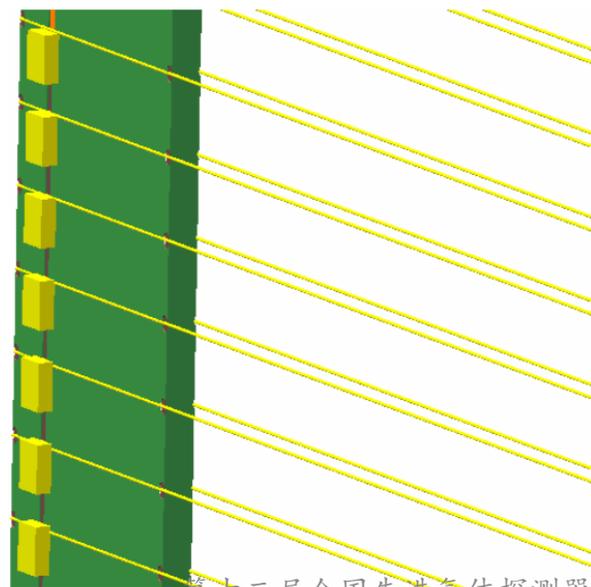
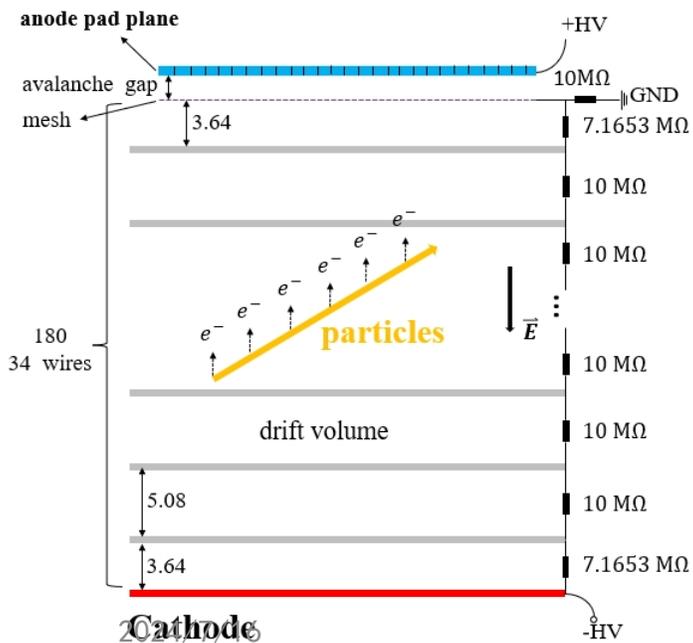
敬请批评指正

**back up**

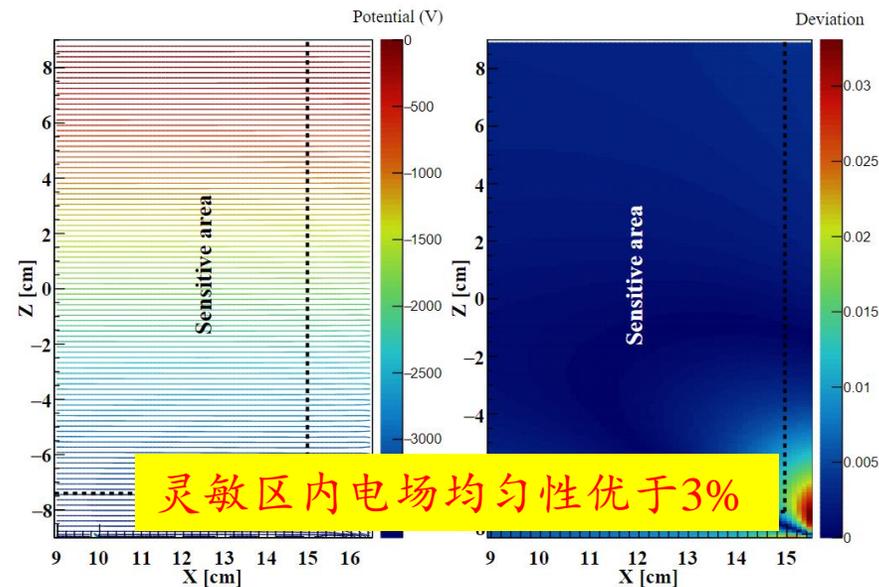
# 电场均匀性模拟

## ❖ Garfield++ neBEM电场有限元模拟

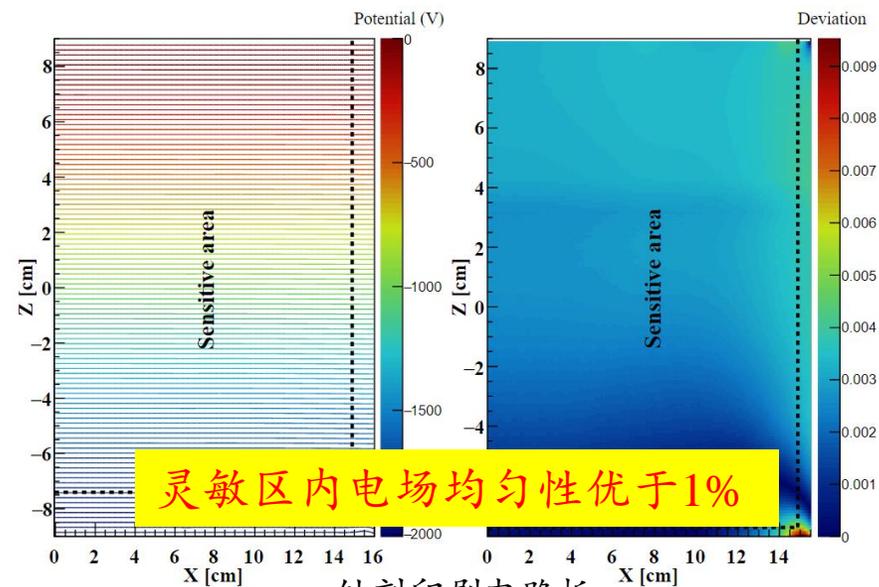
- 内外两层丝平行排布距离3mm
- 场笼侧面竖直方向相邻丝间距5.08mm ( $\Phi = 50 \mu\text{m}$ )，其中一个侧面镀有34个10M $\Omega$ 贴片电阻
- 场笼底面相邻丝间距3mm ( $\Phi = 30 \mu\text{m}$ )，蚀刻电路板场笼底面为一块覆铜PCB板



第十二届全国先进气体探测器研讨会



双层镀金钨丝



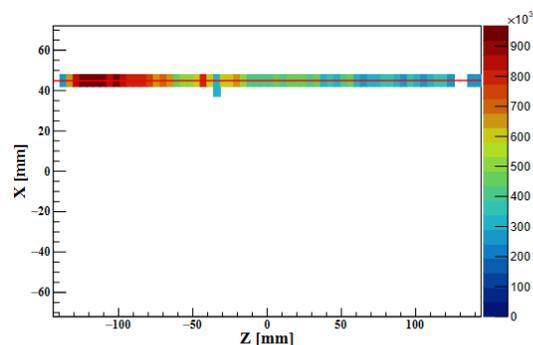
蚀刻印刷电路板

# 电场均匀性测试

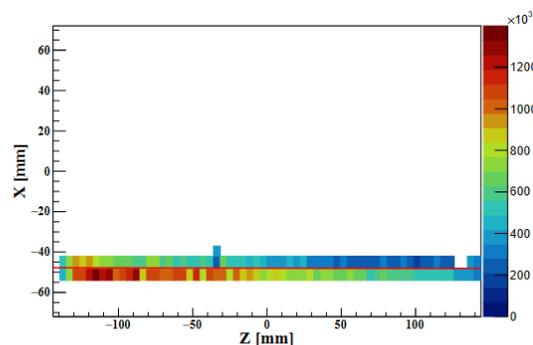
电场均匀性测试:

- 测试方式: 266nm 3.58uJ 27.21mW 激光入射TPC, 600 mbar  
Ar+iC4H10 (93:7)

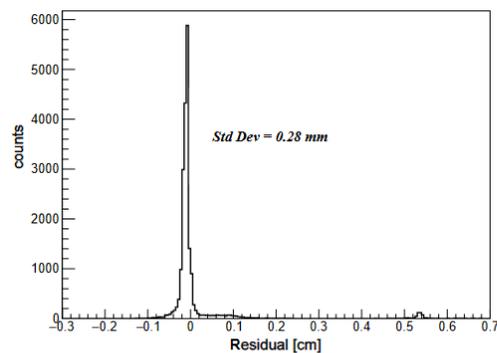
计算像素中心到重构径迹之间的距离, 求残差分布  $d = \frac{|ax_i + by_i + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$



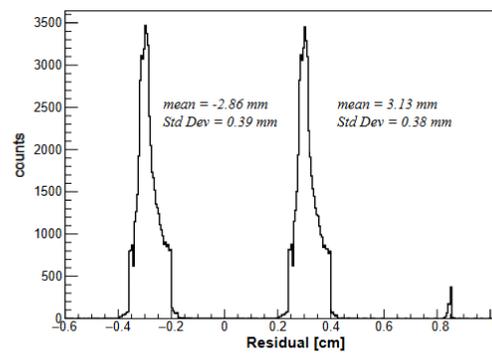
(a)



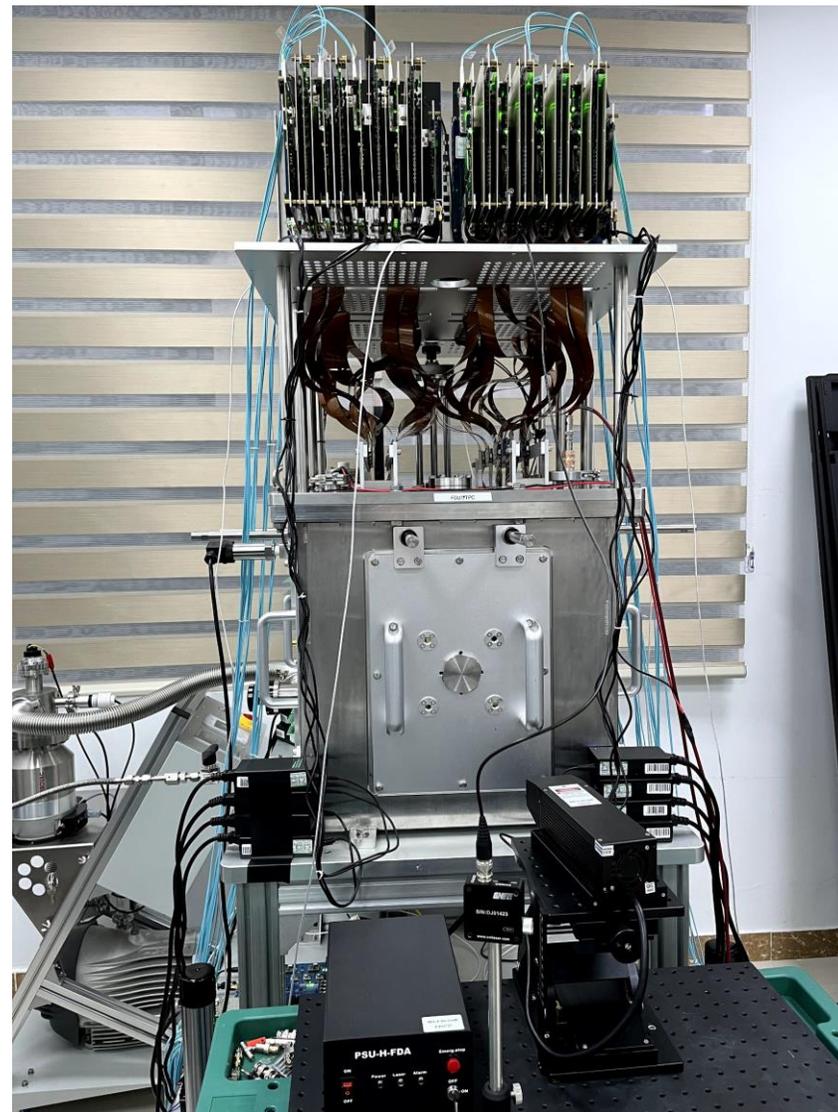
(b)

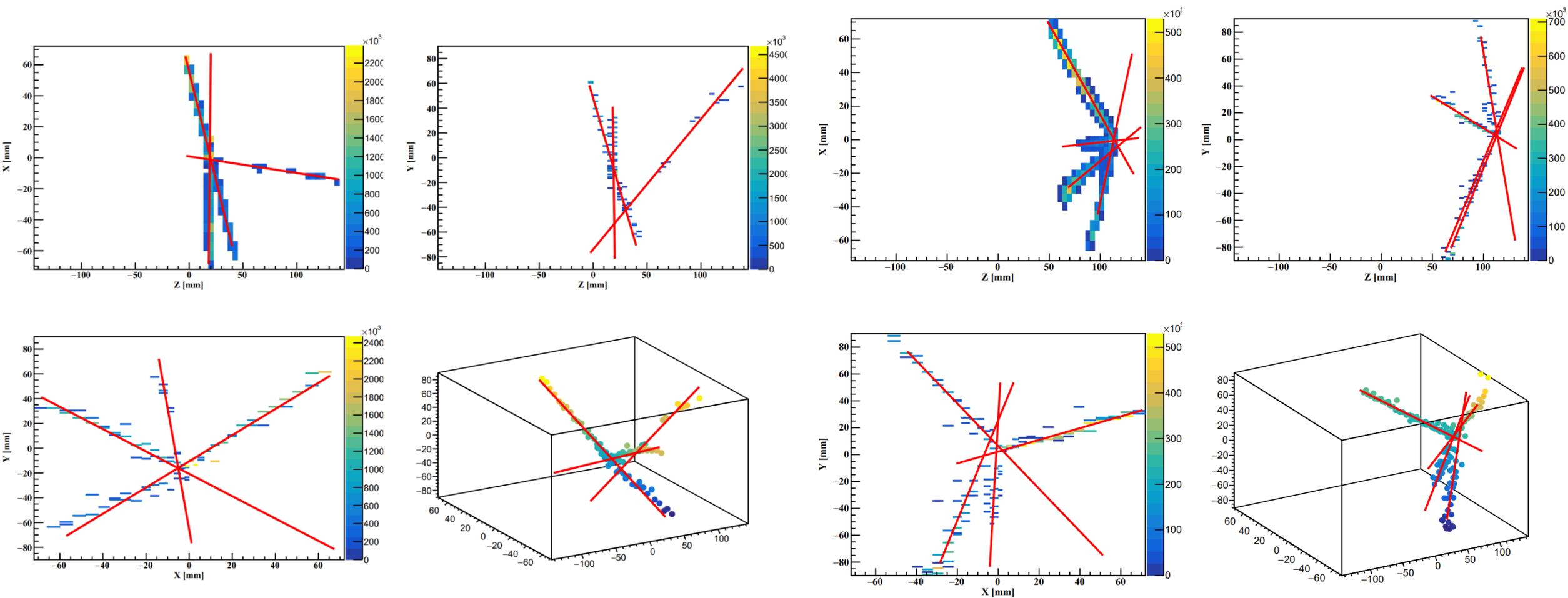


(c)



(d)





探测系统的分析软件能较好地识别并重构多粒子事件径迹