



复旦多用途活性靶时间投影室 (fMeta-TPC)研制和研究进展

报告人：吴黄恺

活性靶TPC团队

符长波¹，邓先概¹，周波¹，马维虎¹，何万兵¹，张国强²，曹喜光²，马余刚¹，
方德清¹，吴黄恺¹，王曦阳¹，刘怡帆¹，李鑫悦¹，王友敬¹，王煜淼¹

1. 复旦大学 现代物理研究所|核科学与技术系

2. 上海高等研究院

01 研究背景

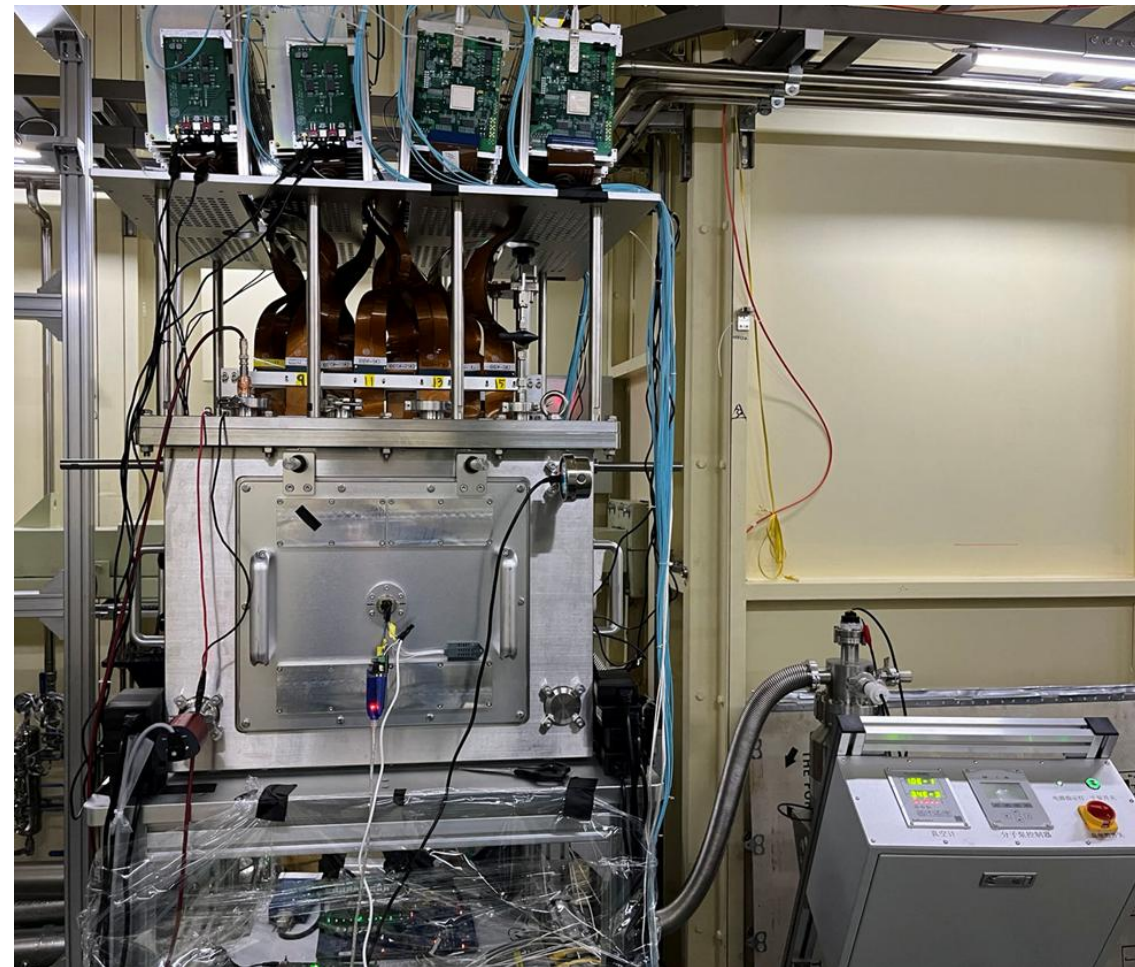
02 fMeta-TPC的结构

- 探测器主腔体
- 电子学与数据获取系统
- 慢控制系统

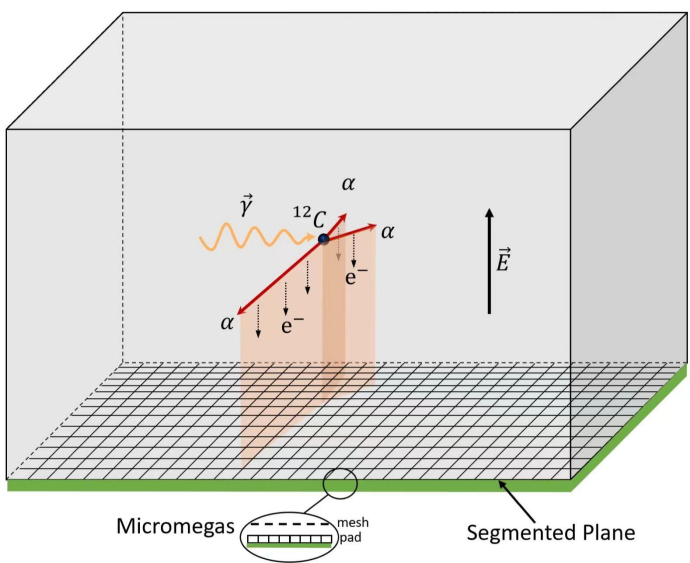
03 fMeta-TPC的性能研究

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

04 总结



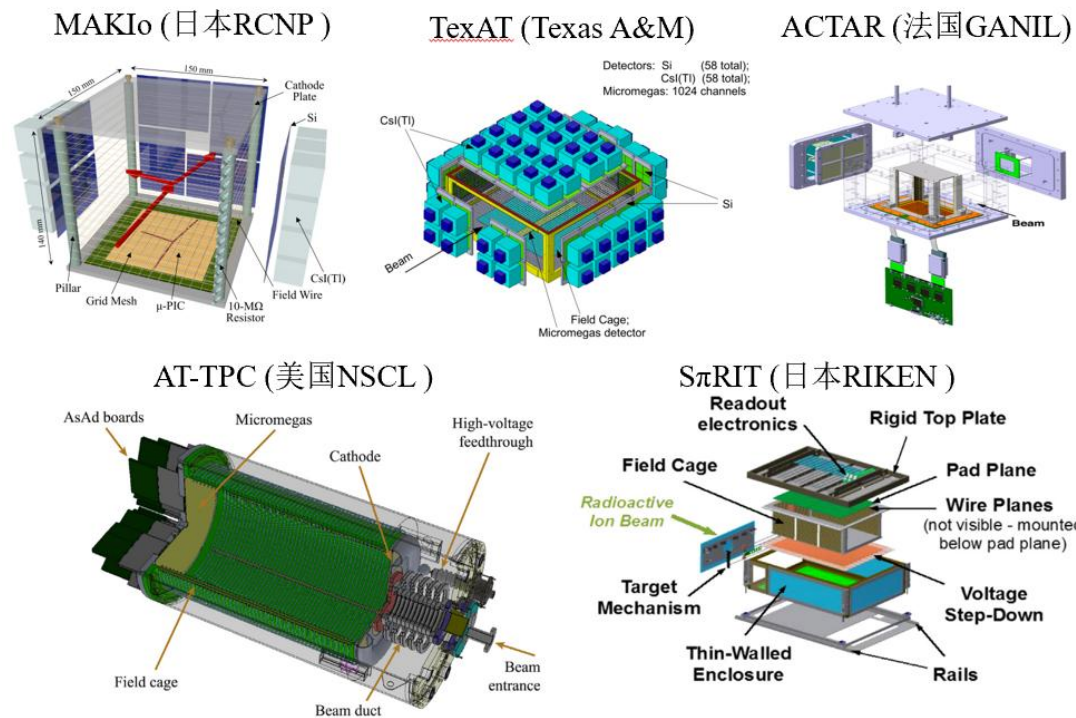
活性气体靶： 探测器的气体作为探测介质同时也充当实验靶



AT-TPCs的优势：

- (1) 近 4π 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 γ 源，可大大提升 (γ, p) (γ, t) (γ, α) 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

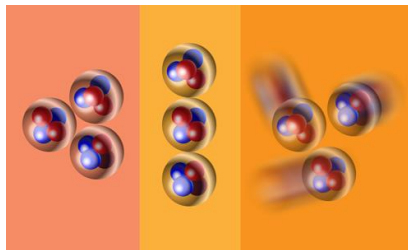
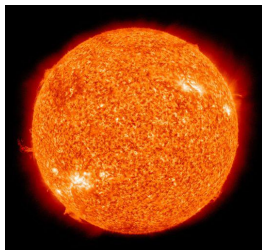
高能带电粒子的测量方案：

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

alpha团簇结构研究

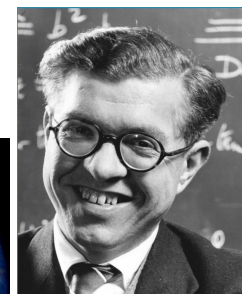
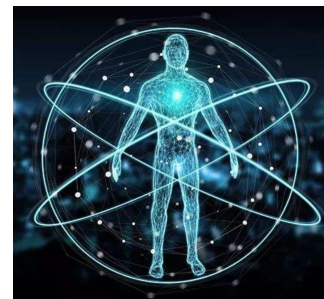


- ^{12}C Hoyle态解释了天体物理中 ^{12}C 核合成过程以及 ^{12}C 丰度问题。
- ^{12}C Hoyle态及其激发态性质是碳基生命的基础，是所有重元素合成的基石

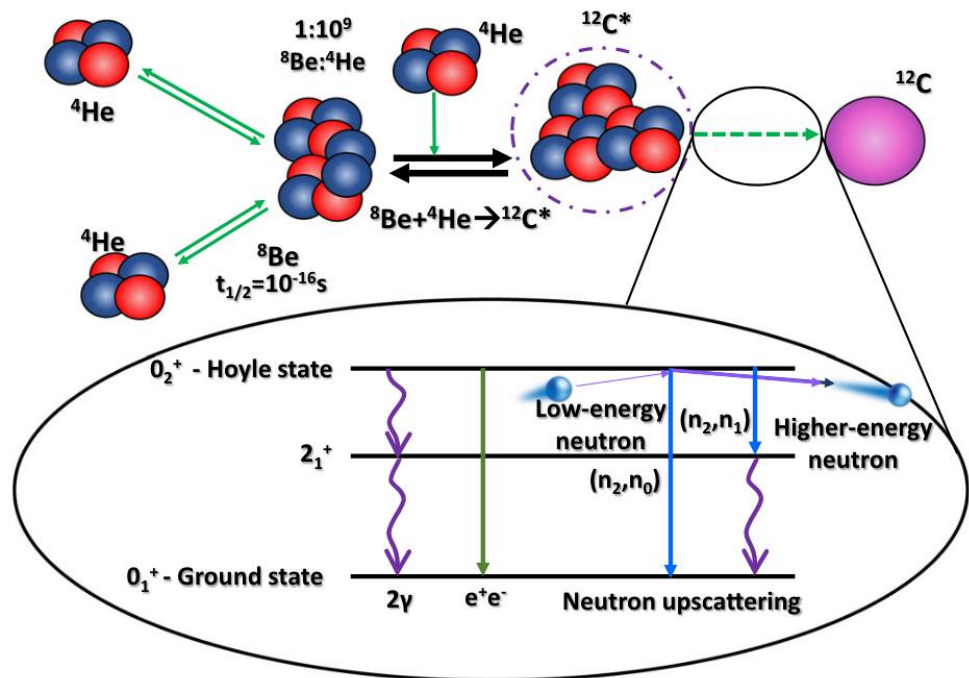


Hoyle态
激发态研究

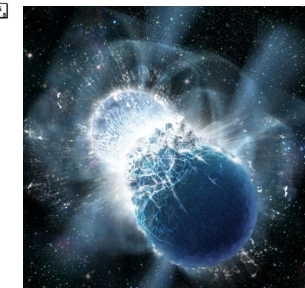
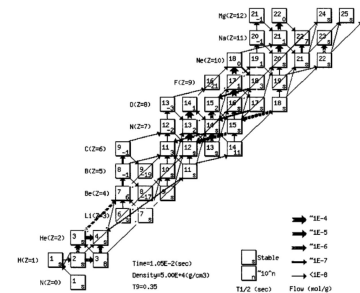
碳基生命形成
⇒



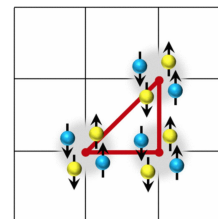
恒星元素核合成理论开创者
弗雷德·霍伊尔
1954



天体核合成及核状态方程
⇒

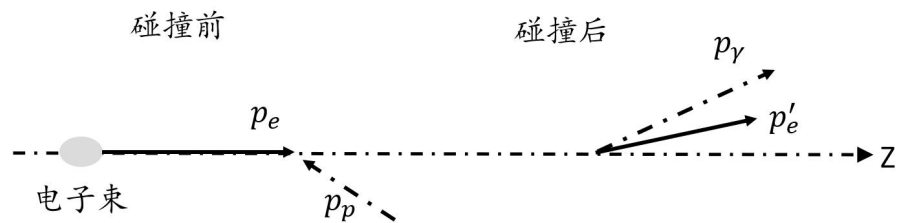


核力及第一性原理
计算精确检验
⇒



J. Bishop et al., Nat Commun 13, 2151 (2022)
E. Epelbaum et. al, PRL 109, 252501 (2012); Physics 4, 94 (2011)

新型康普顿伽马源SLEGS

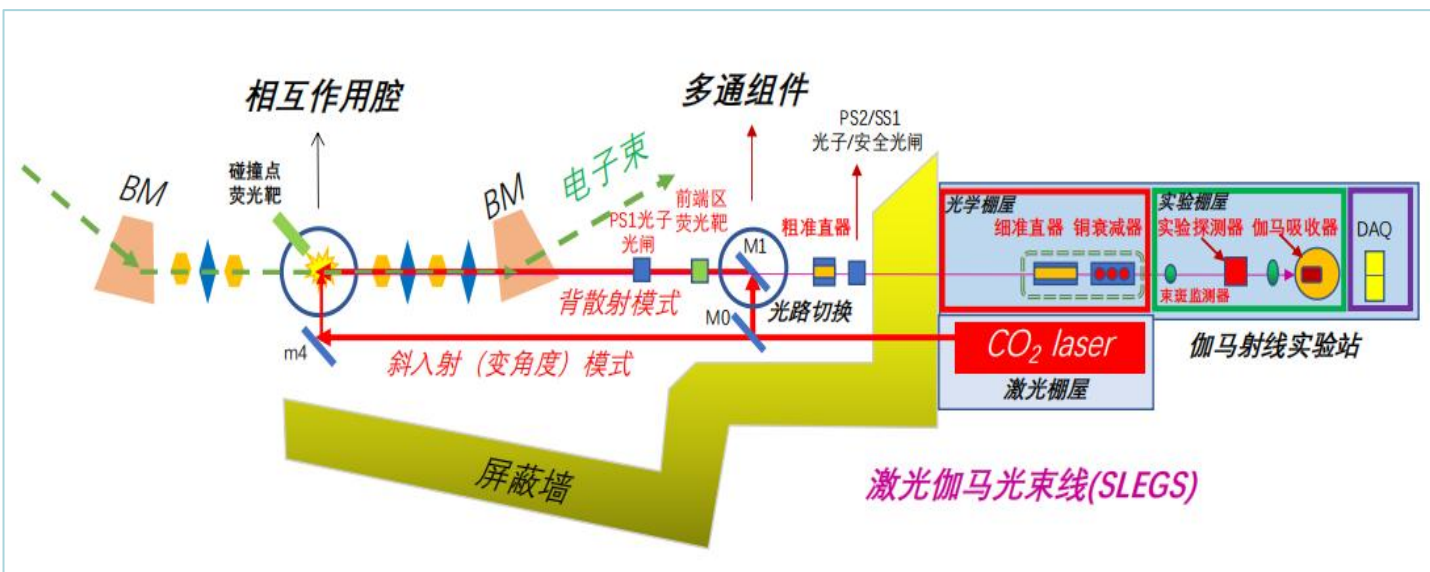


$$E_\gamma \equiv \hbar\omega' = \frac{\hbar\omega (1 - \beta \cos\theta_i)}{1 - \beta \cos\theta_f + \frac{\hbar\omega}{\varepsilon_e} (1 - \cos\theta_{ph})}$$

激光康普顿 γ 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：

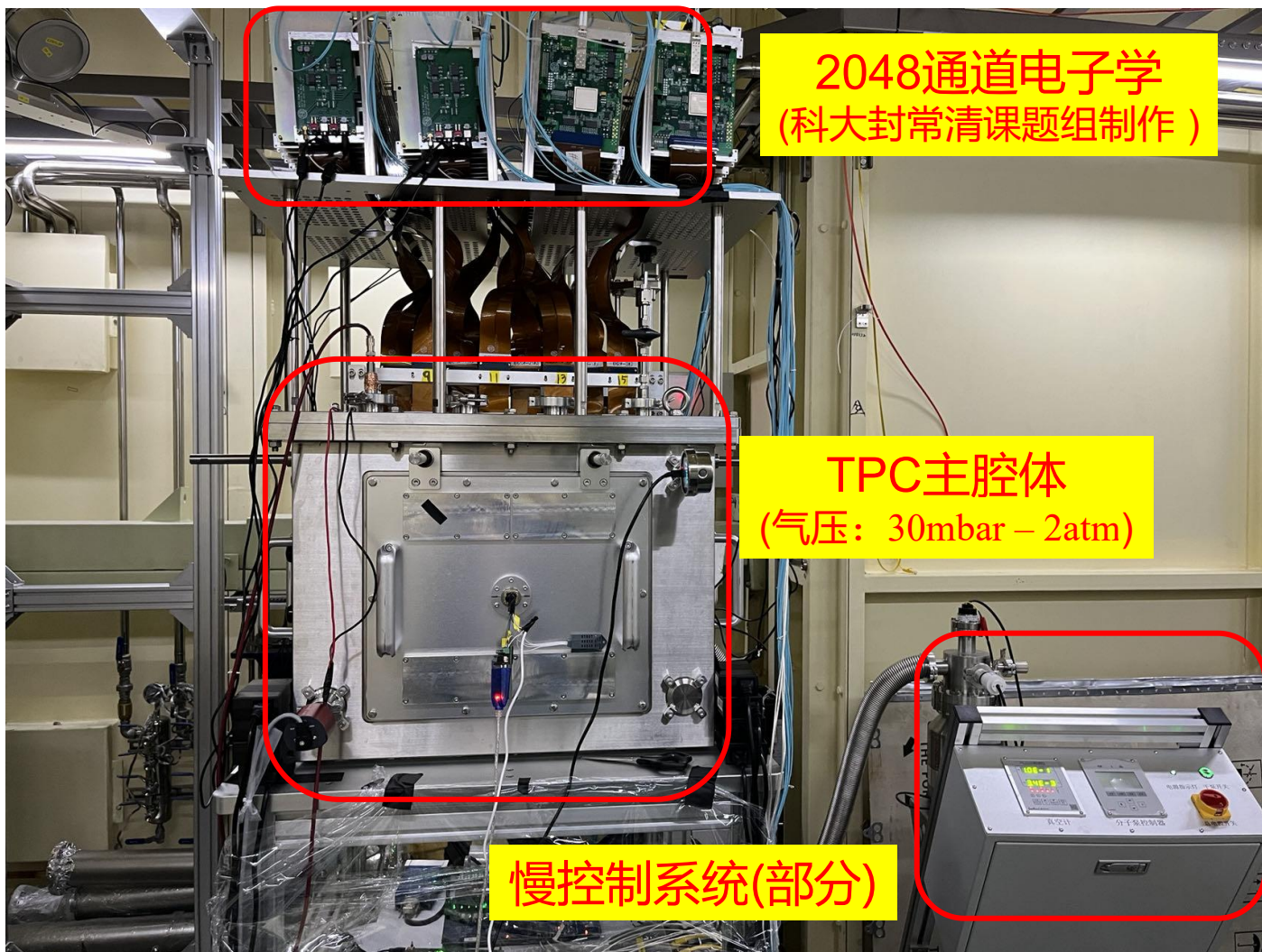
- ✓ 反应机制简单，电磁相互作用
- ✓ 能够选择性的布局目标核能级
- ✓ 末态产物干净



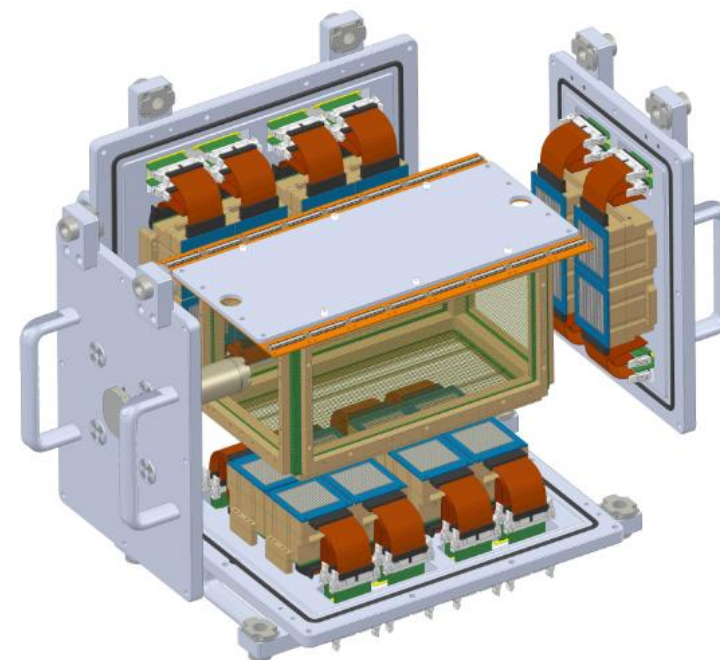
大科学实验装置SLEGS：准单能gamma源

fMeta-TPC探测器结构

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

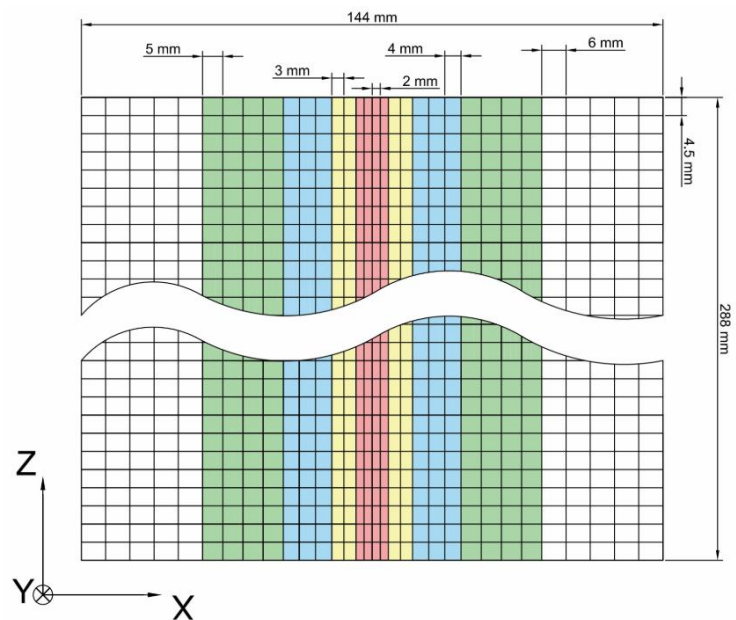


TPC主腔体



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， $2 \text{ mm} \rightarrow 6 \text{ mm}$ 。

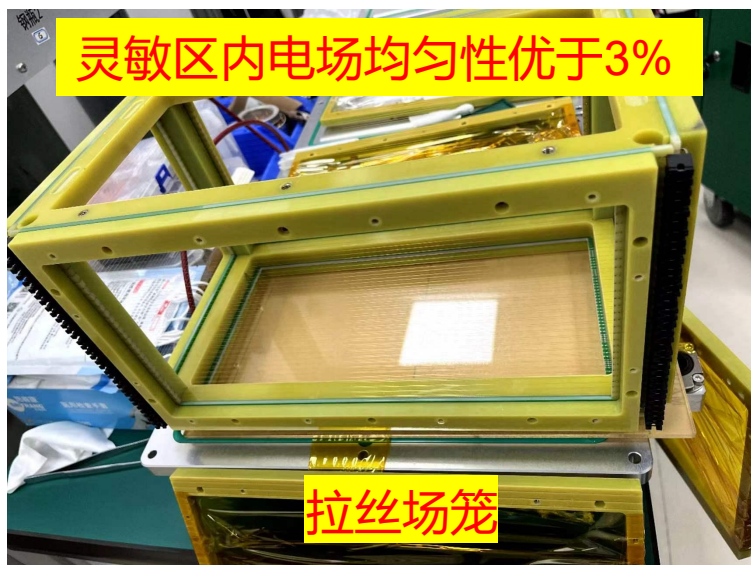
在 z 方向上，像素尺寸为 4.5 mm 。

(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。

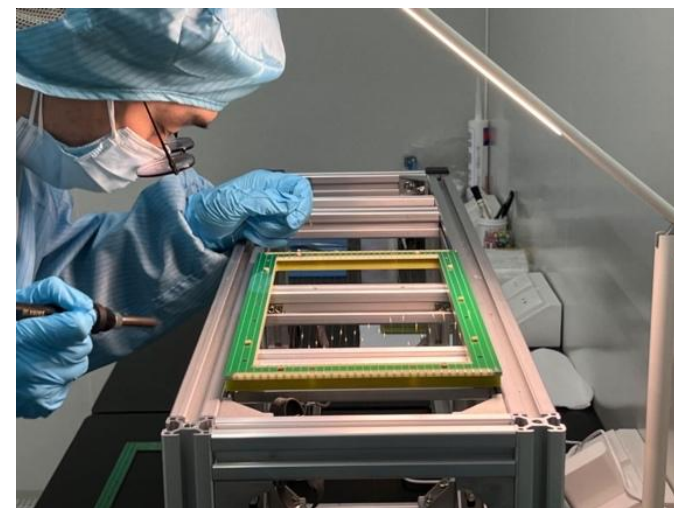
(2) 外侧的**大像素**则使探测器能够覆盖更大的灵敏区域，从而实现对长射程粒子的有效测量。



TPC探测器结构-漂移场笼



拆解后的镀金钨丝场笼面



复旦大学拉丝场笼制作平台



➤ 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

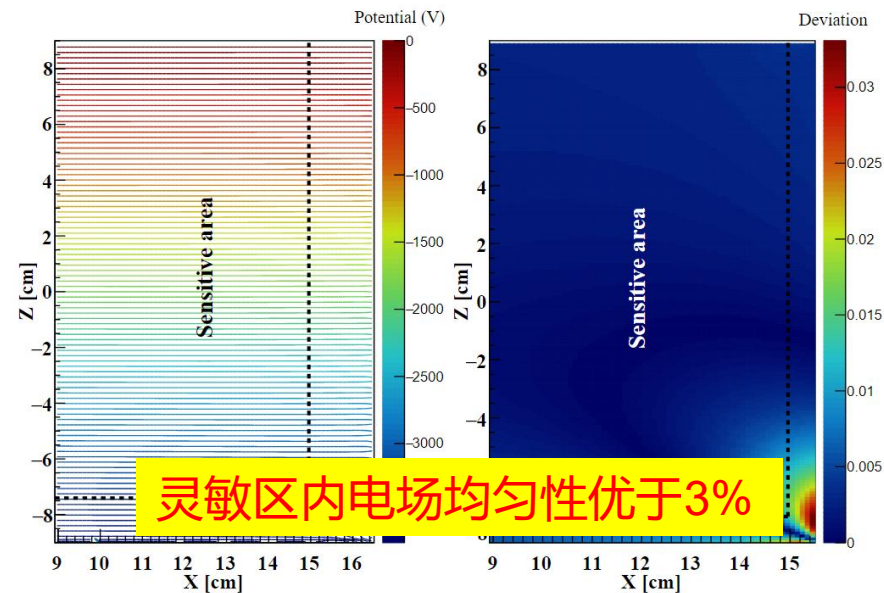
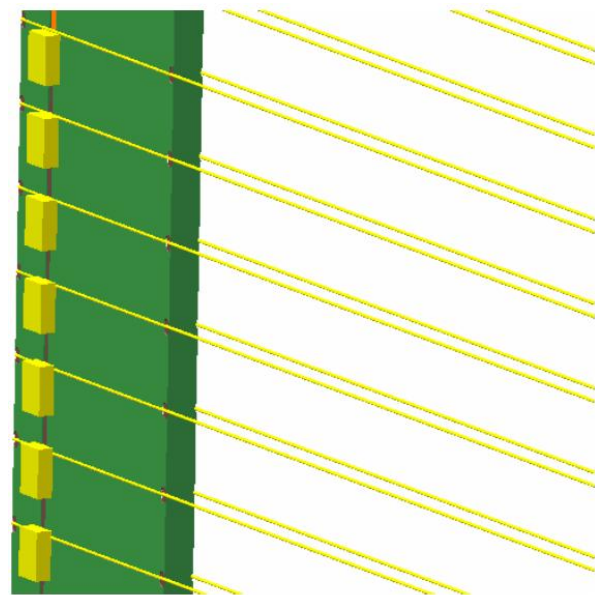
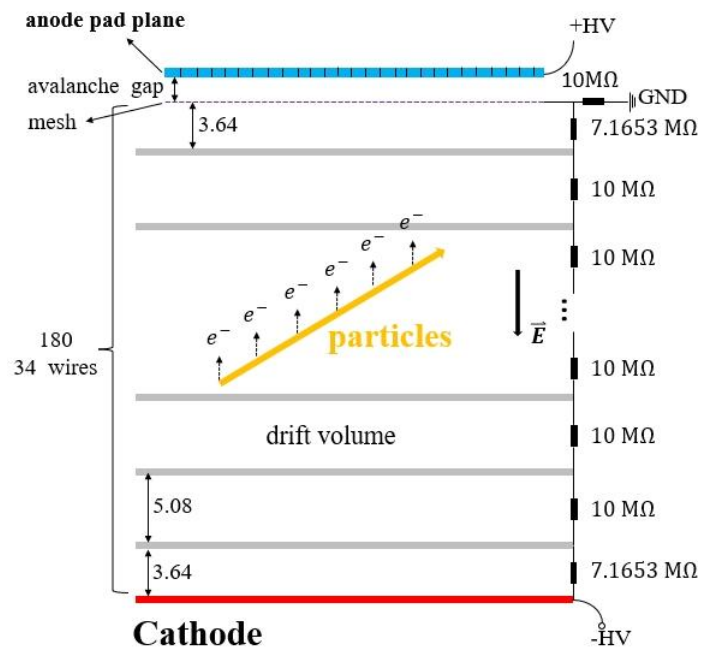
➤ 蚀刻印刷电路板 ($\Phi = 1 \text{ mm}$) → 光核物理

仅束流入射方向采用拉丝面

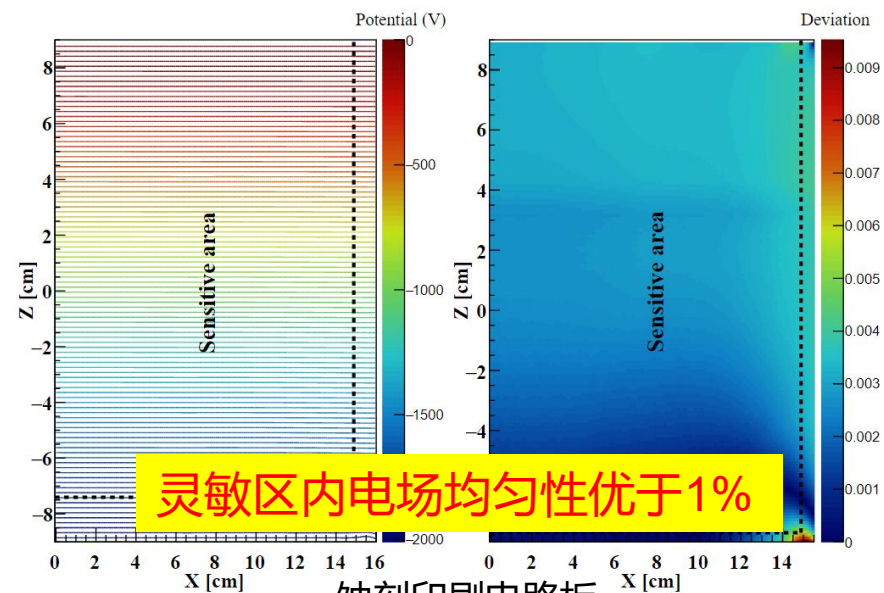
电场均匀性模拟

❖ 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 ($\Phi = 50 \mu m$)，其中一个侧面镀有34个10M Ω 贴片电阻
- 场笼底面相邻丝间距3mm ($\Phi = 30 \mu m$)，蚀刻电路板场笼底面为一块覆铜PCB板



双层镀金钨丝

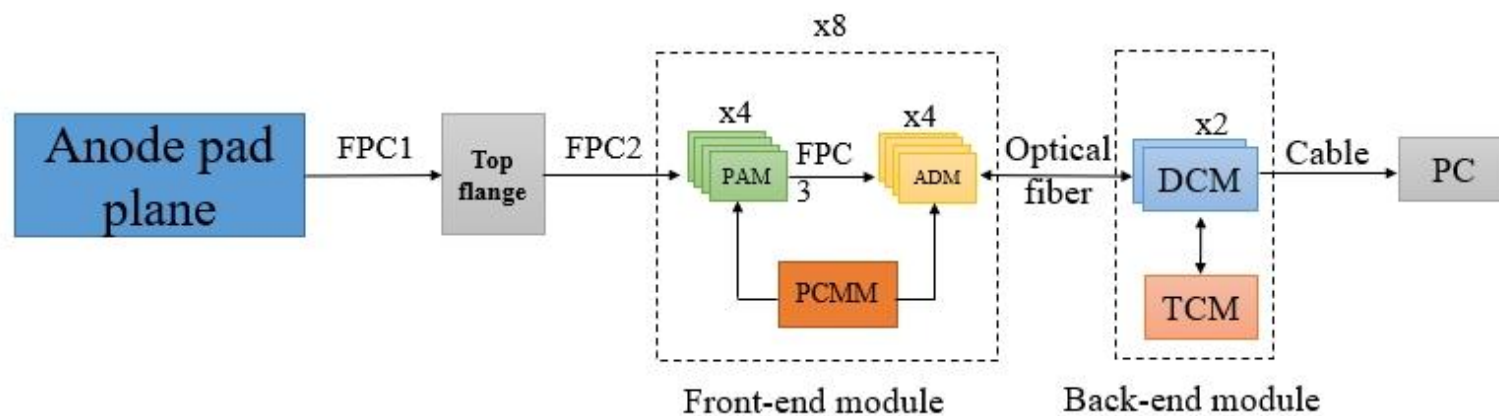


蚀刻印刷电路板

中国科学技术大学—封常清课题组合作

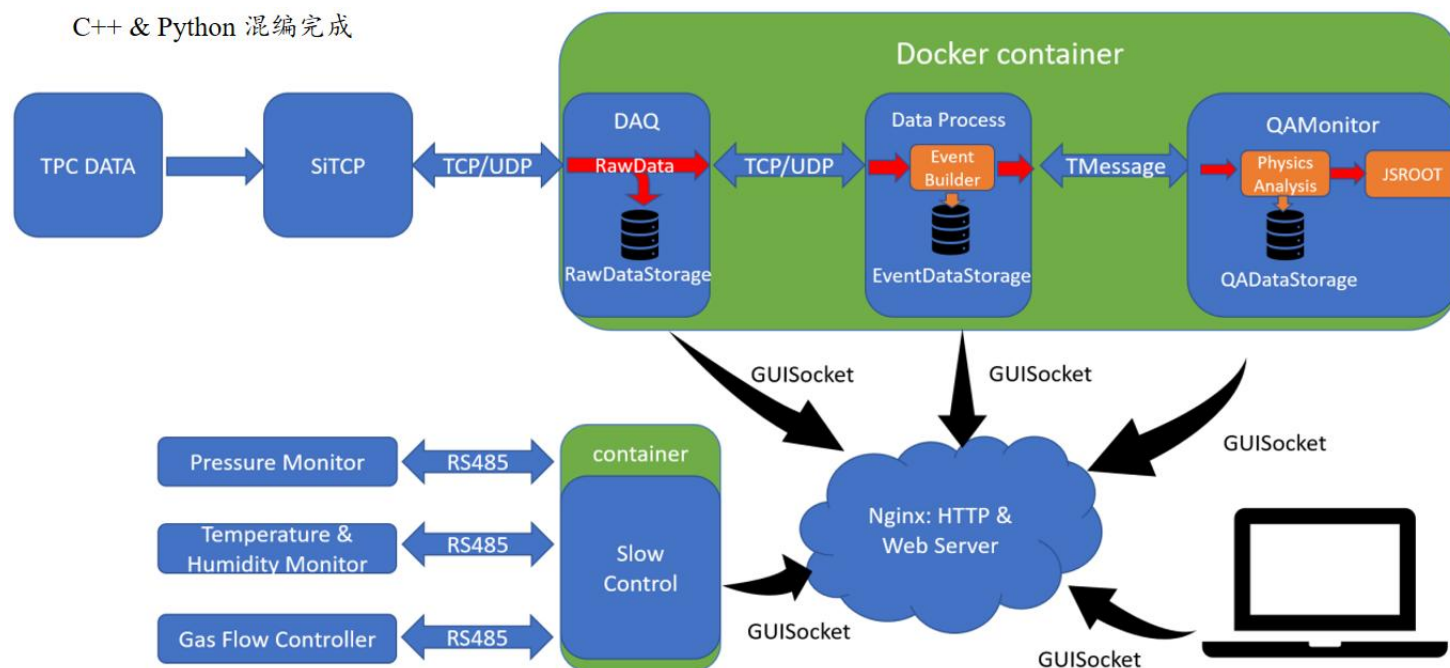
□ 电子学技术路线:

- 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

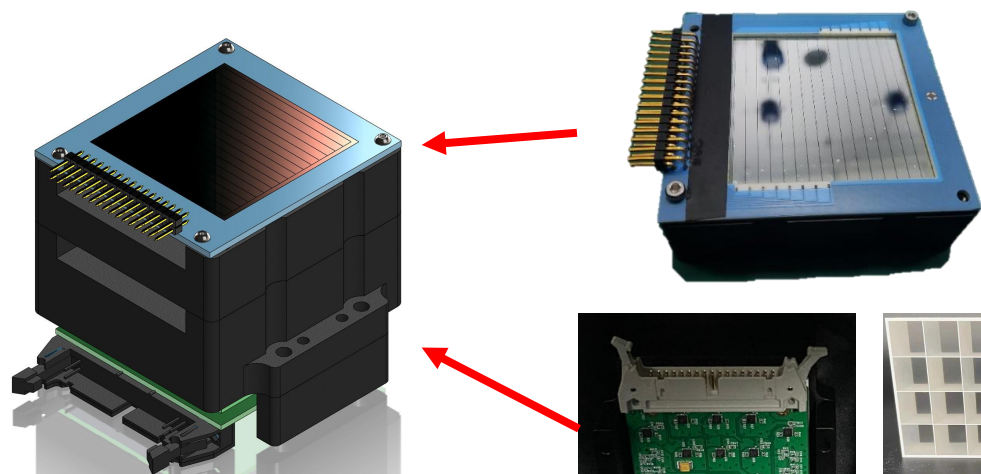


□ 数据获取系统

- 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、流量、温度)

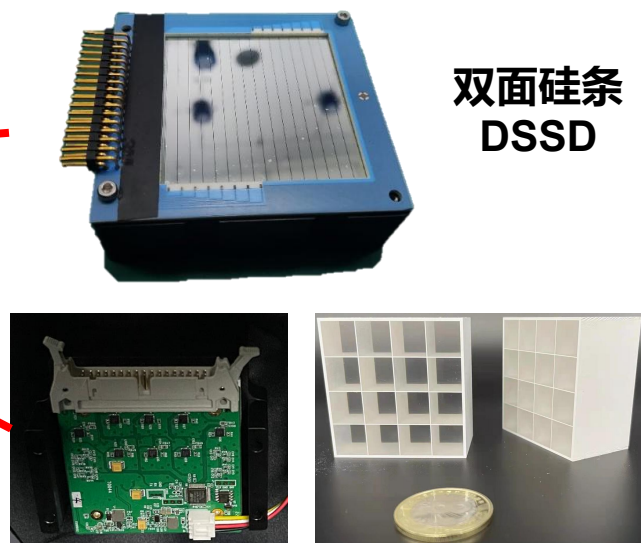


TPC辅助探测器电子学研发

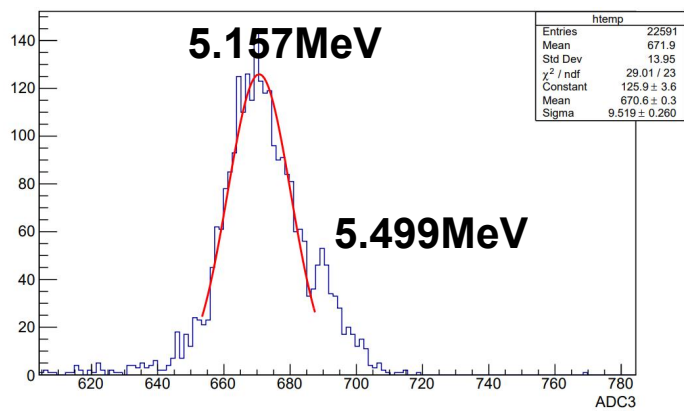
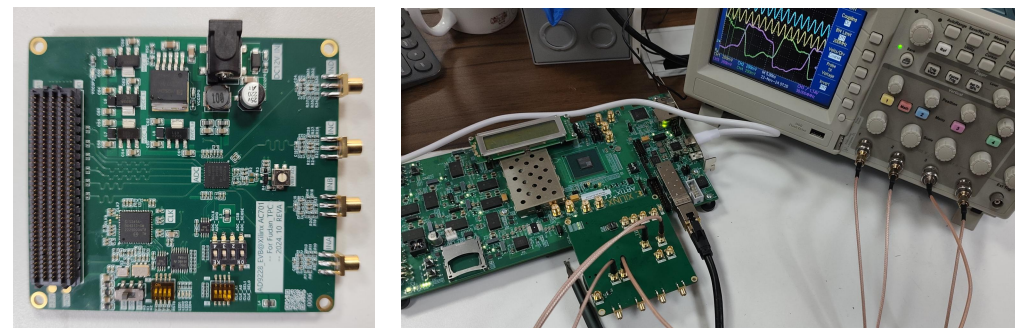
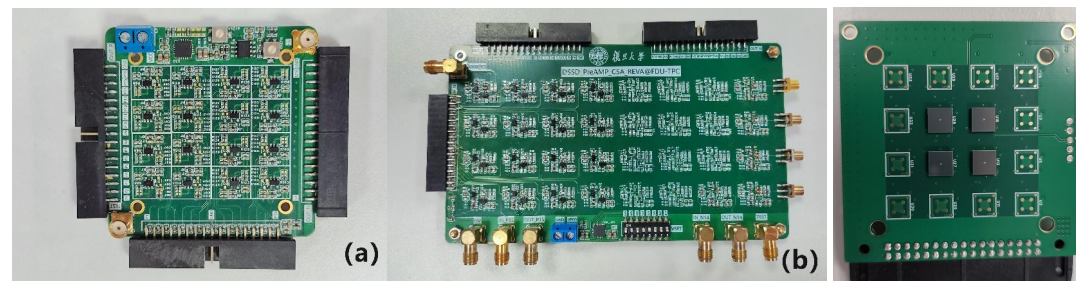


TPC外围 $\Delta E - E$ 测量系统

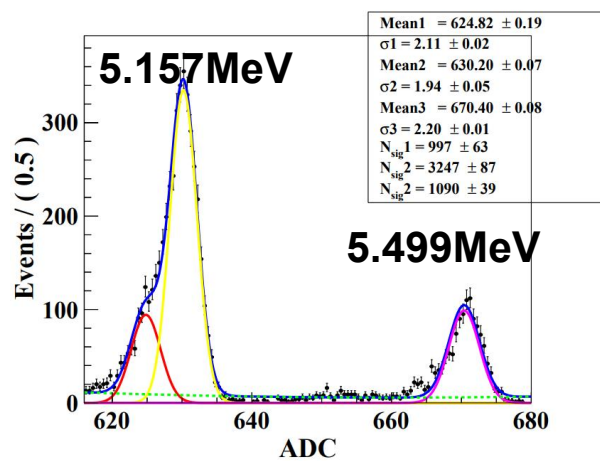
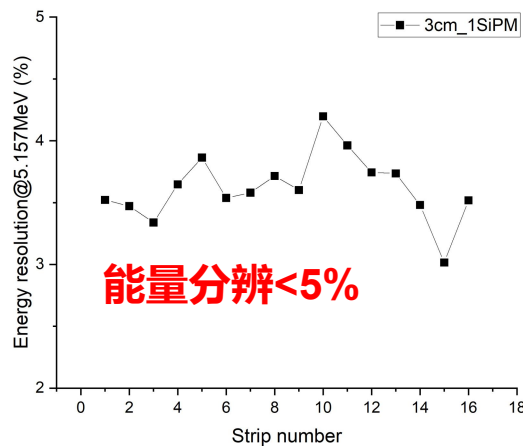
双面硅条
DSSD



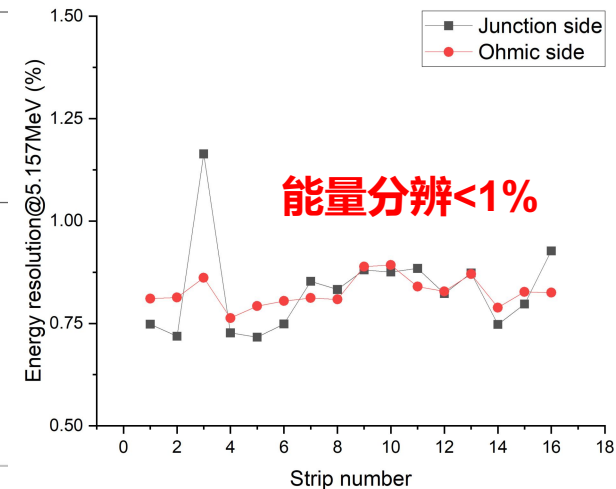
碘化铯探测器 (碘化铯+SiPM)



^{239}Pu 放射源能谱@CsI



^{239}Pu 放射源能谱@DSSD



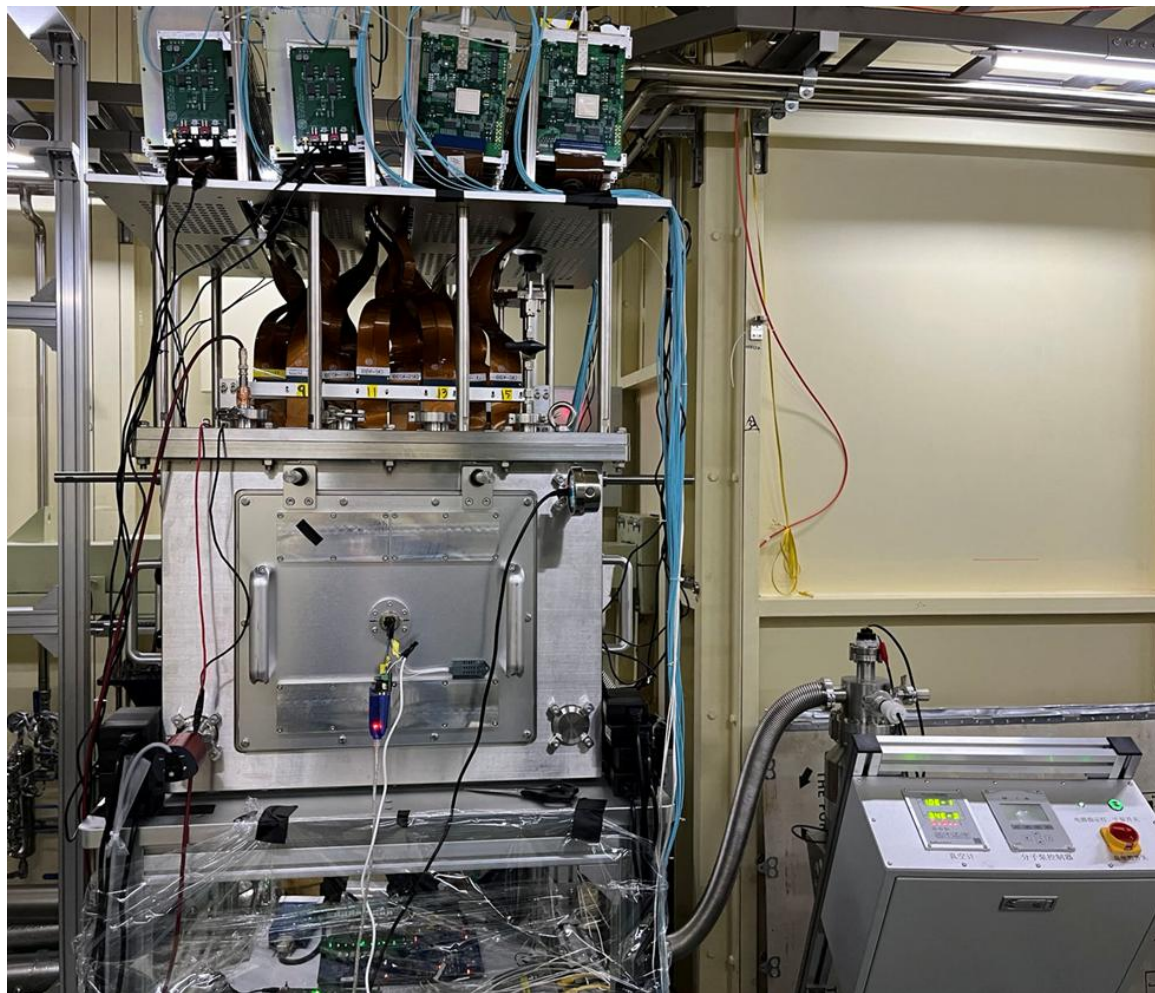
□ 离线性能测试

- 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

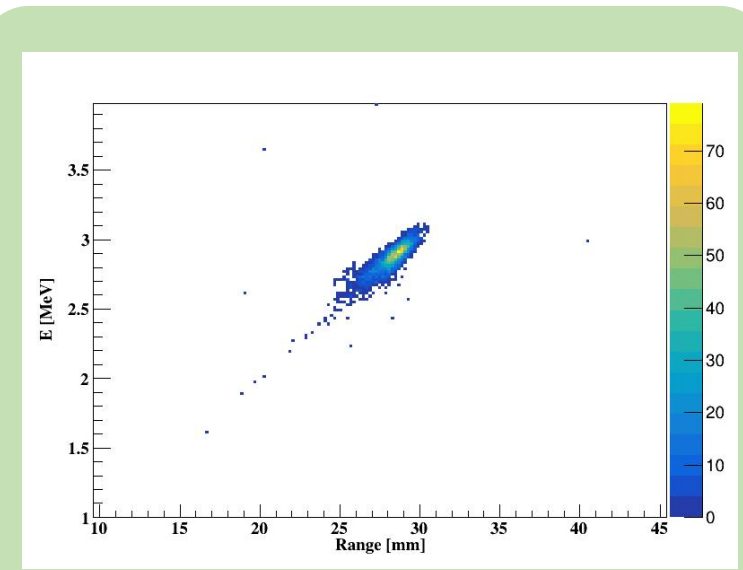
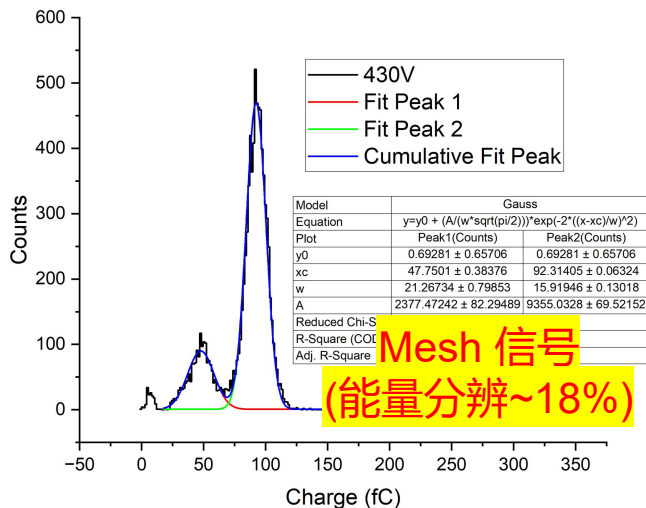
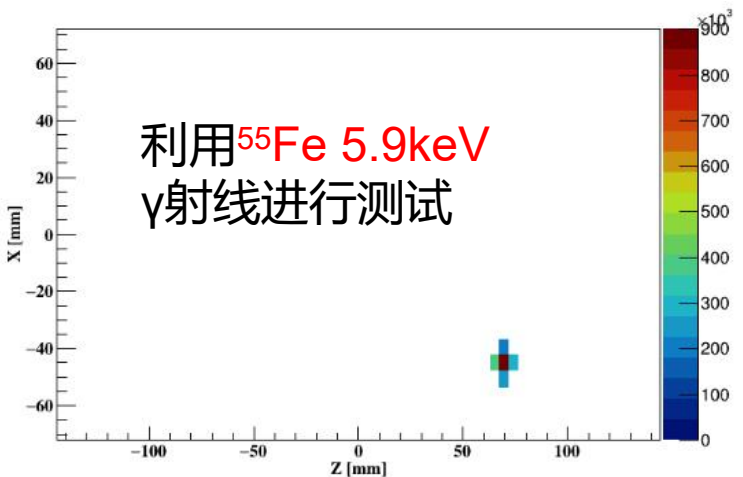
□ 在线束流测试

- 实验布局 & 参数设置
- 探测系统性能测试

【Nucl. Sci. Tech, 35, 200 (2024)】



➤ X射线/α粒子能量分辨测试



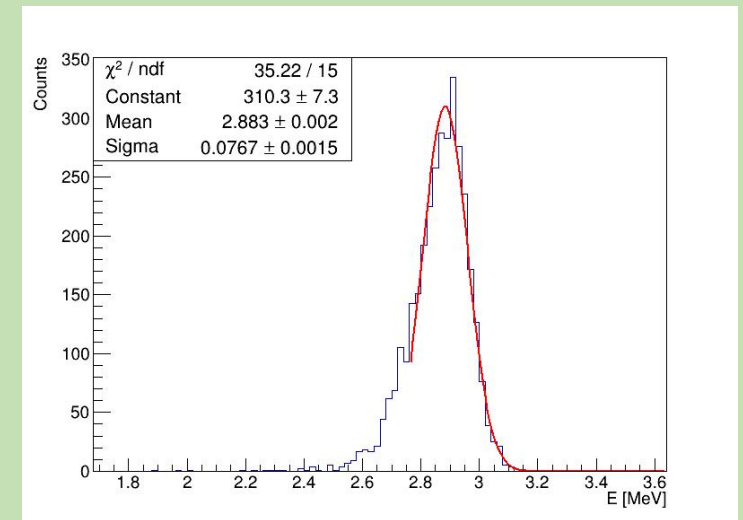
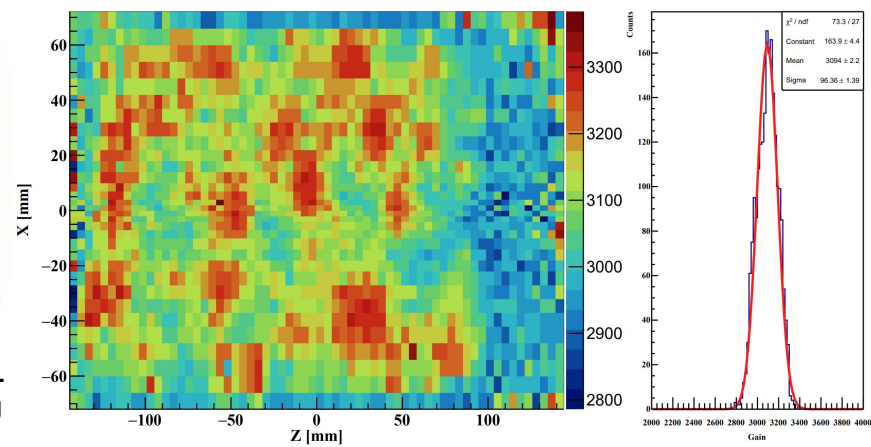
➤ 探测器逐像素能量刻度

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

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



α粒子能量分辨~6% @3MeV

探测器角分辨测试



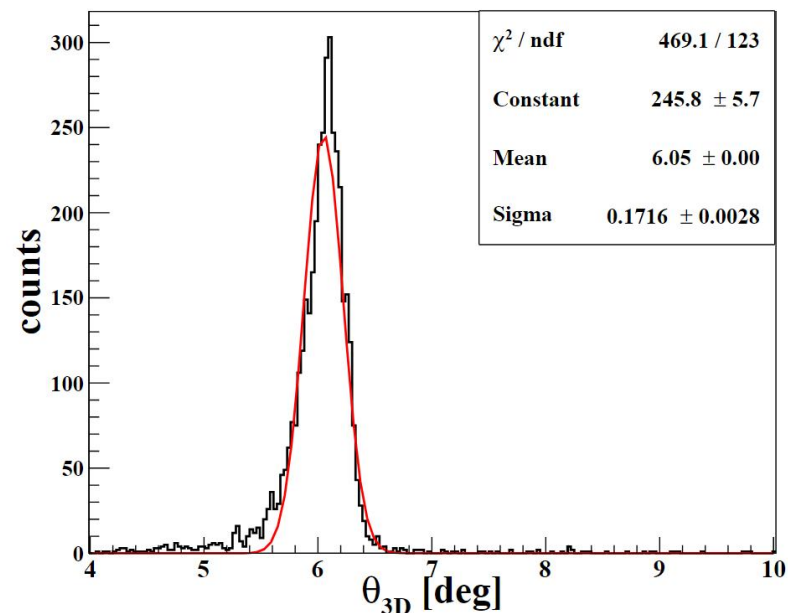
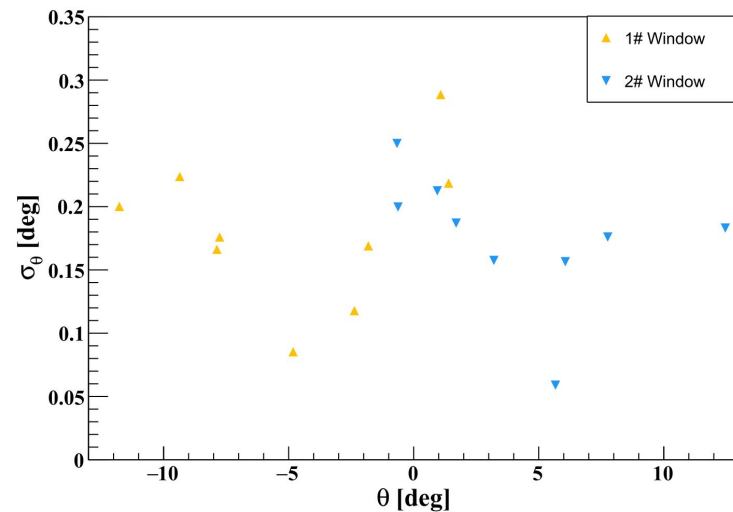
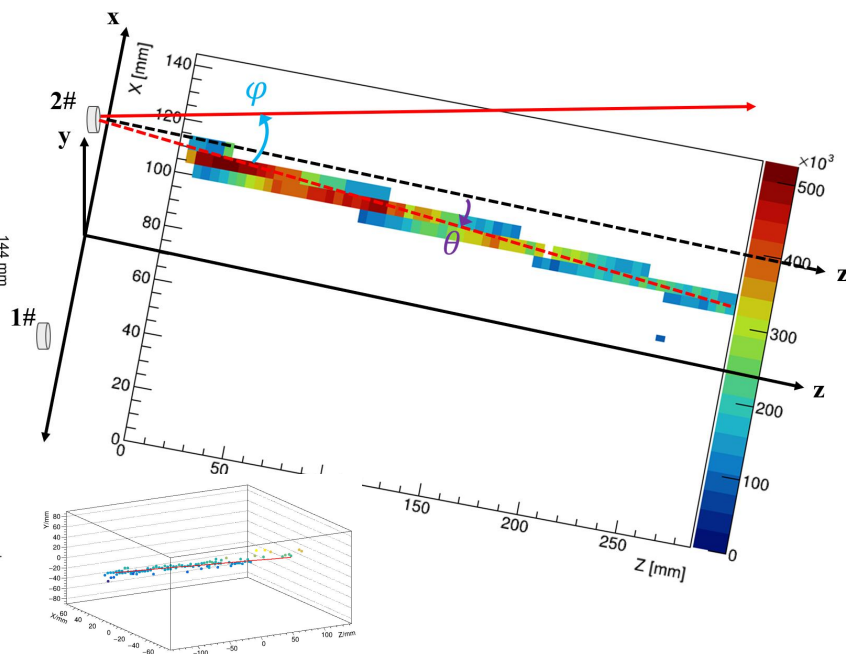
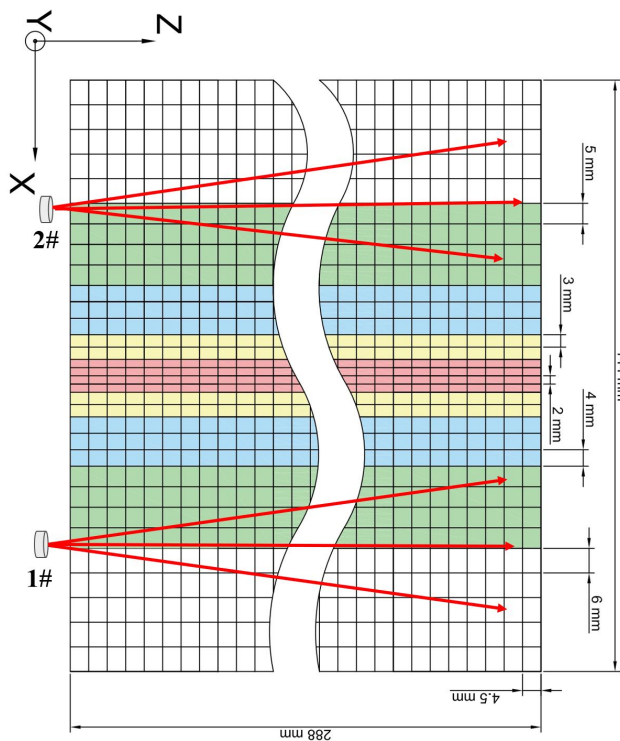
本征角/位置分辨测试:

➤ 测试方式: 266nm 3.58uJ 27.21mW 激光入射TPC

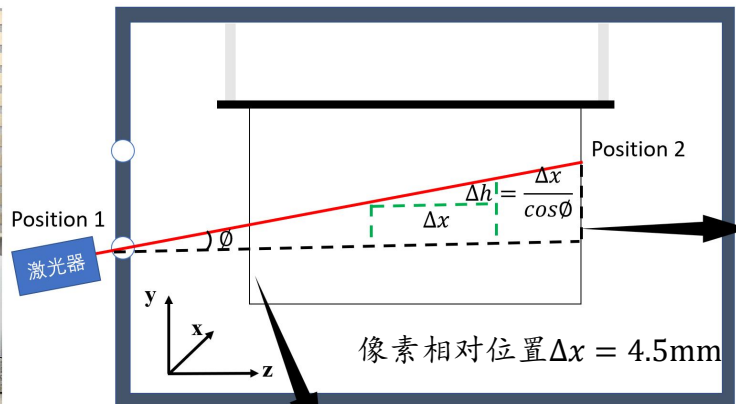
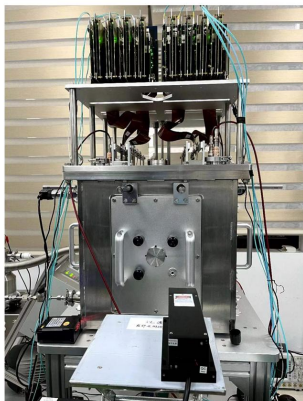
最佳本征角分辨可达 0.06° (σ_θ), 整体结果优于 0.3° (σ_θ)

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

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)

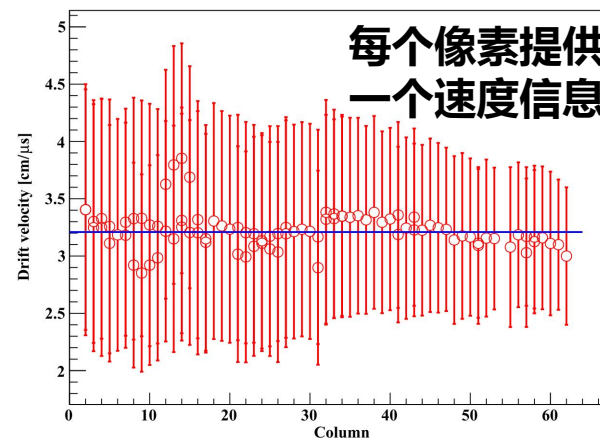
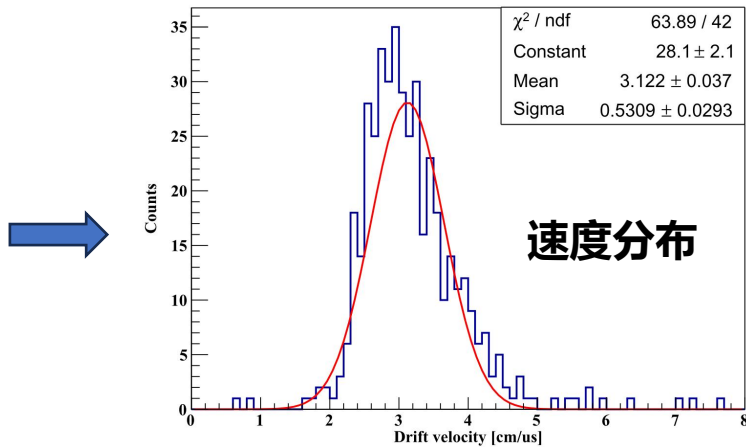
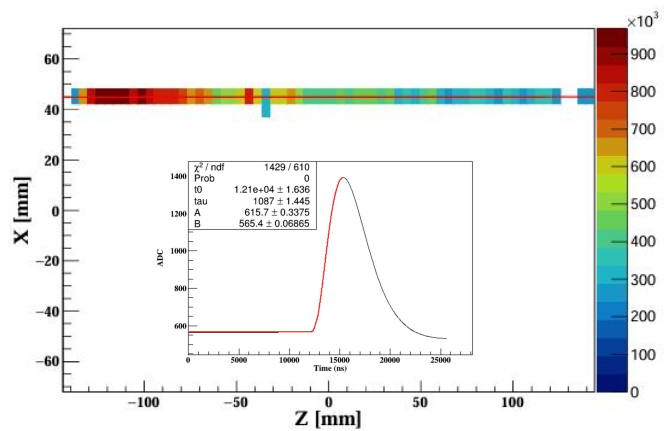
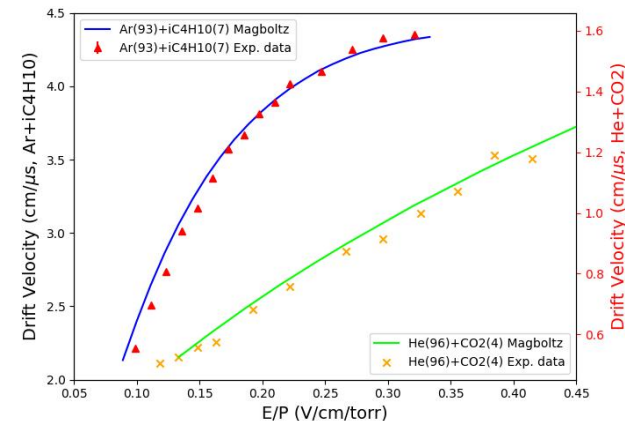
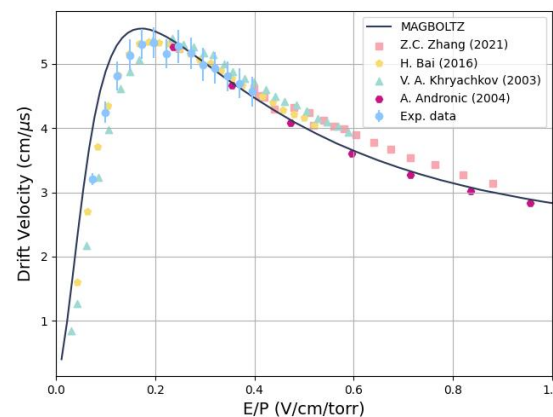
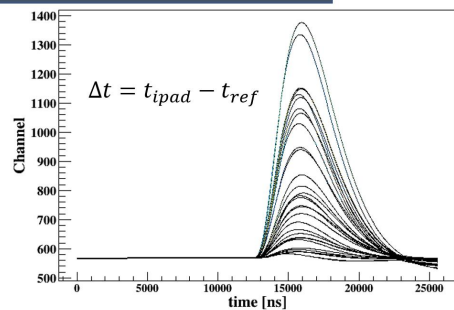
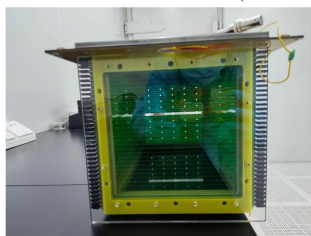


探测器电子漂移速度测试



电子漂移速度测量与MAGBOLTZ模拟

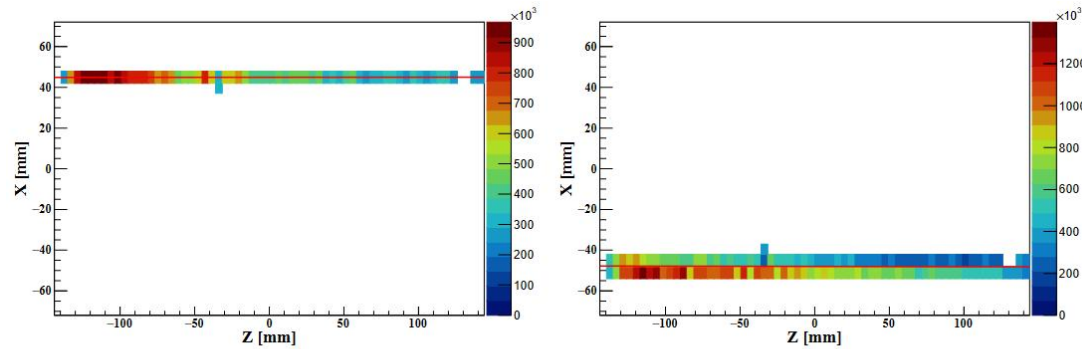
由入射位置、出射位置确定激光角度



电场均匀性测试:

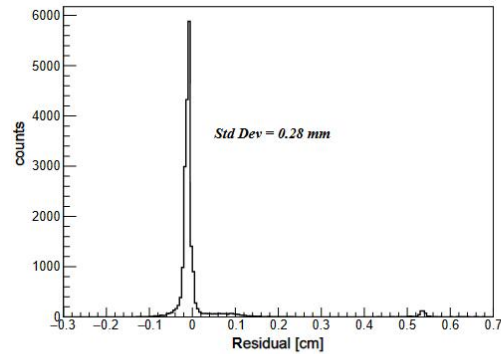
- 测试方式: 266nm 3.58uJ 27.21mW 激光入射TPC, 600 mbar
Ar+iC4H10 (93:7)

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

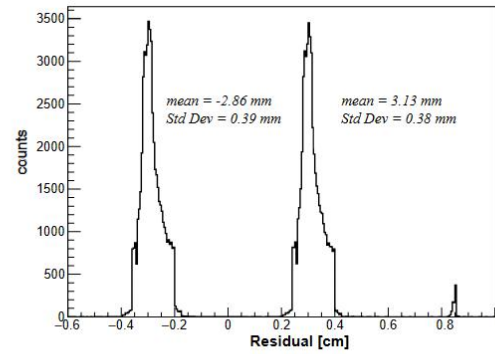


(a)

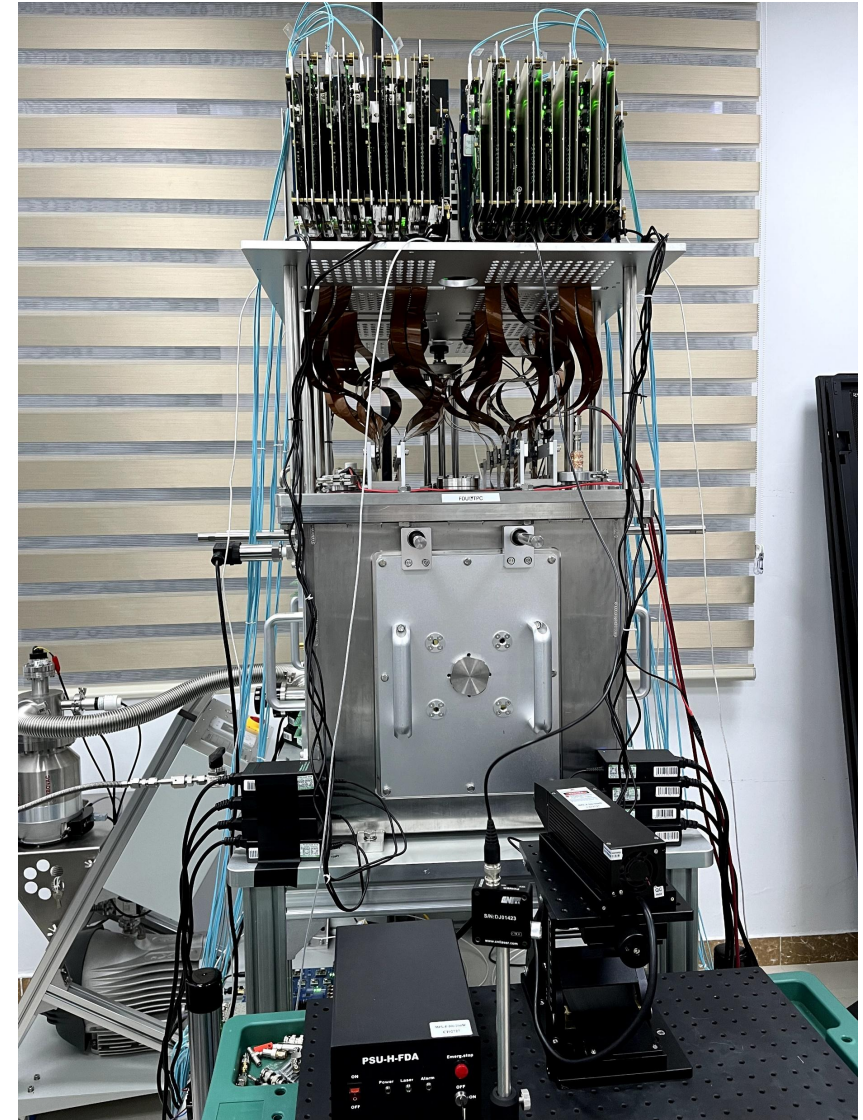
(b)



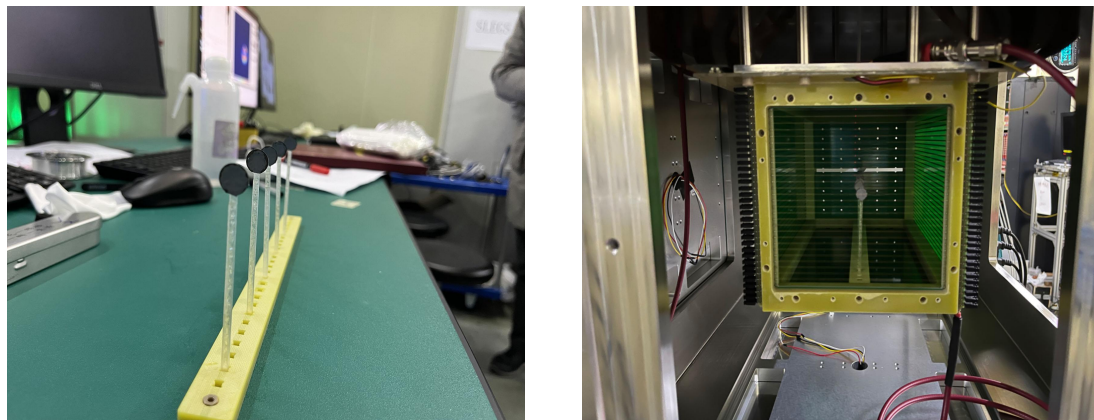
(c)



(d)

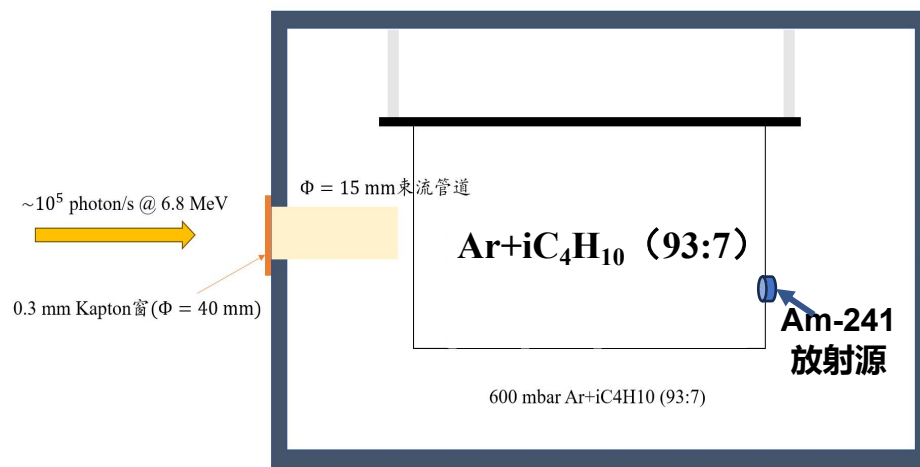


SLEGS 第一轮实验: ${}^7\text{Li}(\gamma, t)\alpha$ (固体靶)

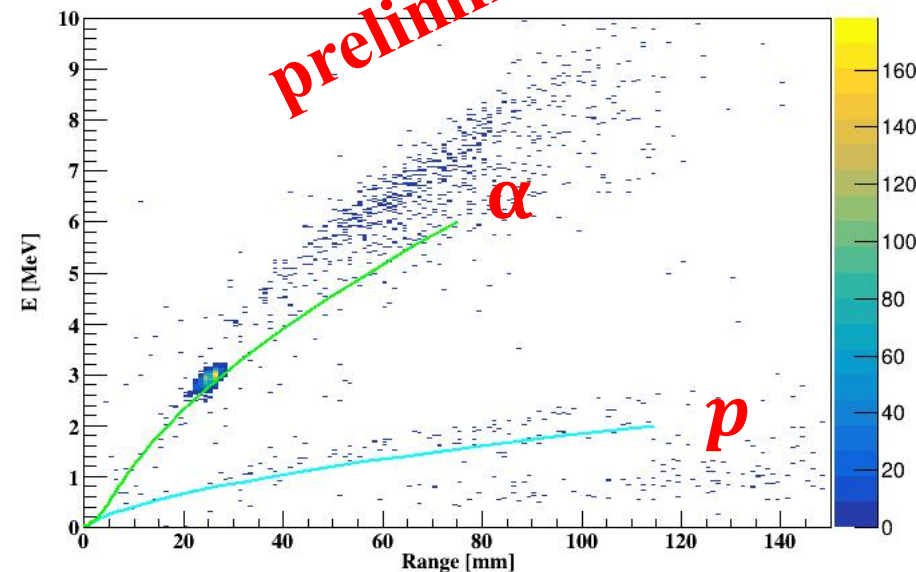
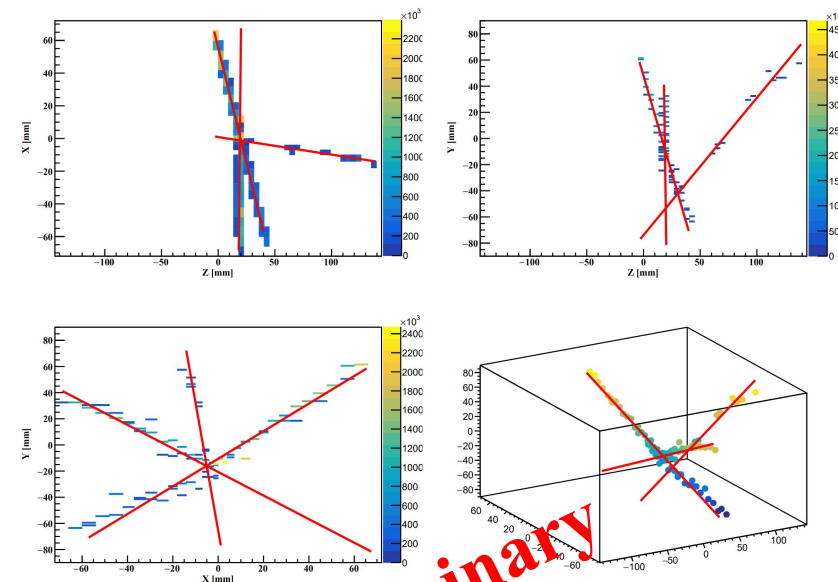


电源噪声问题、数据统计量不足、缺少能量标定

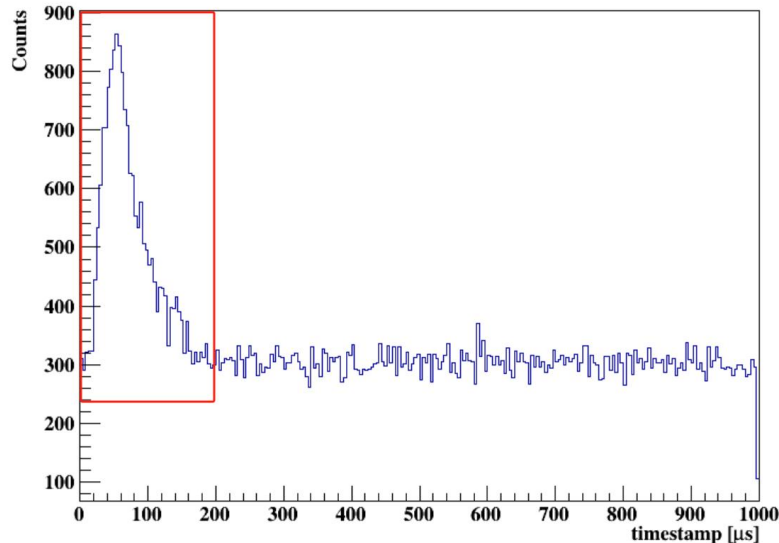
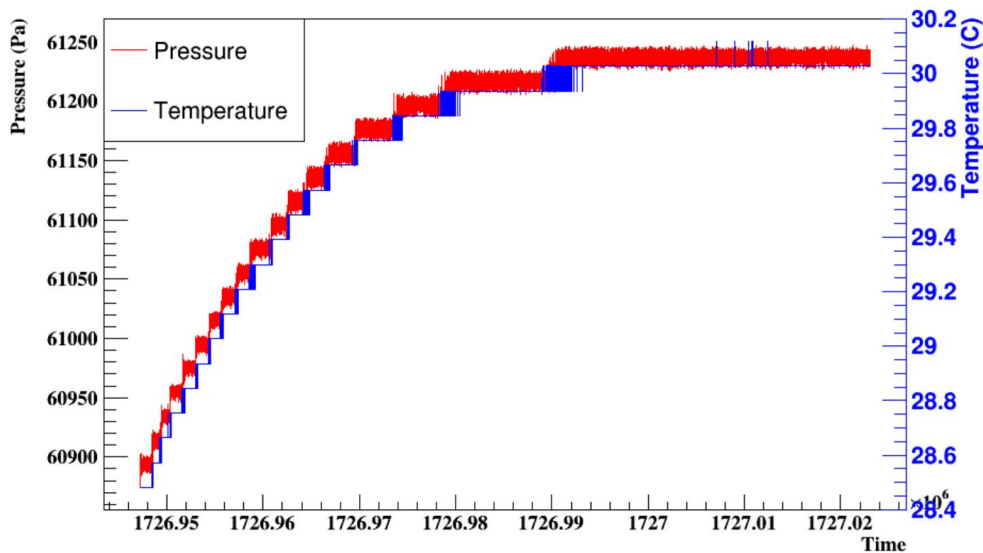
SLEGS 第二轮实验: ${}^7\text{Li}(\gamma, t)\alpha$, ${}^{12}\text{C}(\gamma, p){}^{11}\text{B}$, ${}^{16}\text{O}(\gamma, \alpha){}^{12}\text{C}$



径迹重建与PID

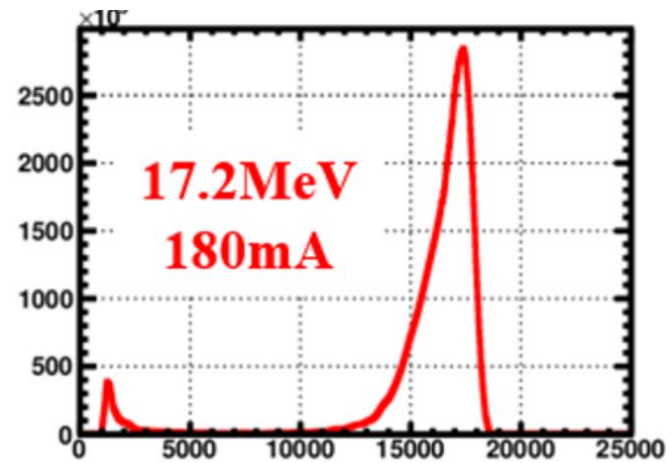
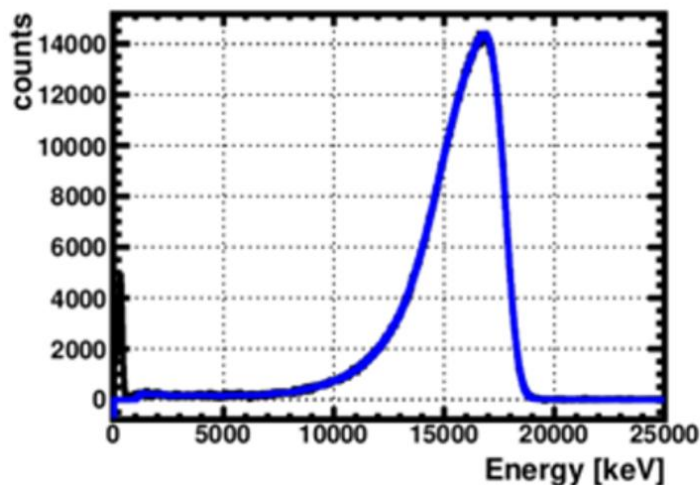
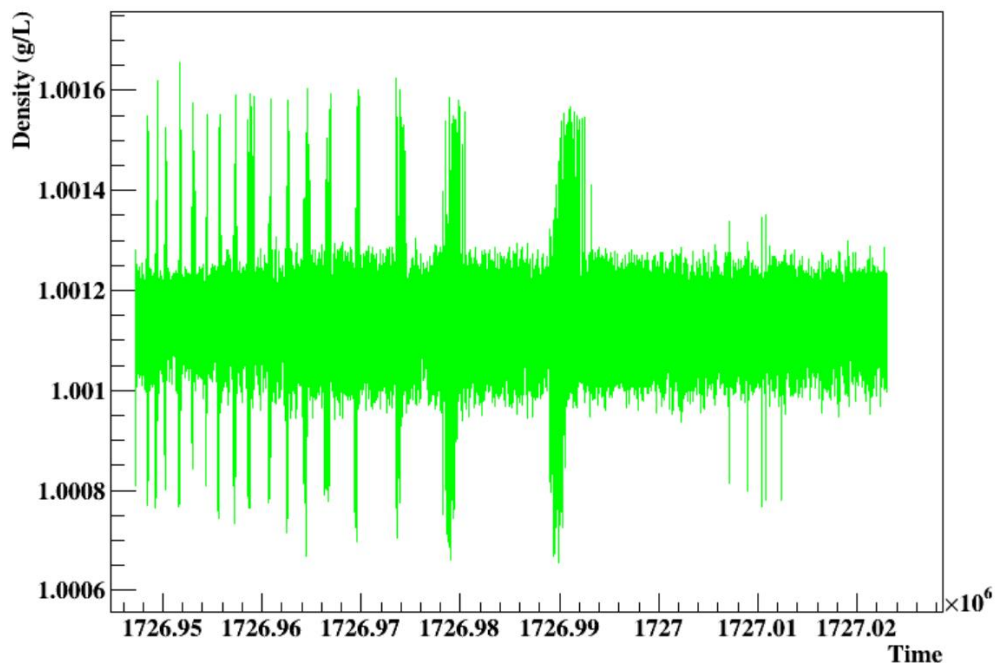


在线 γ 束测试-- $^{12}\text{C}(\gamma, p)^{11}\text{B}$



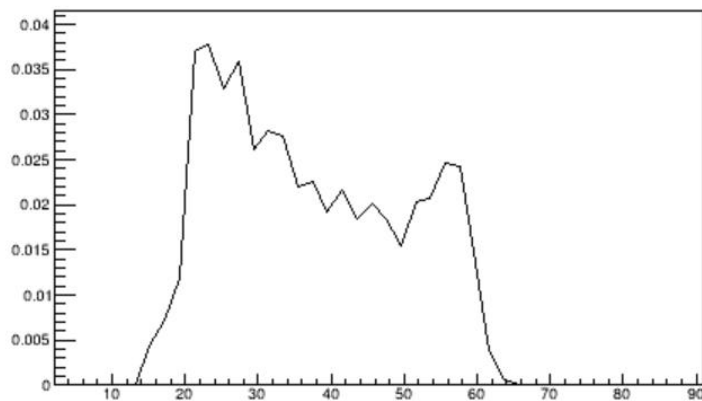
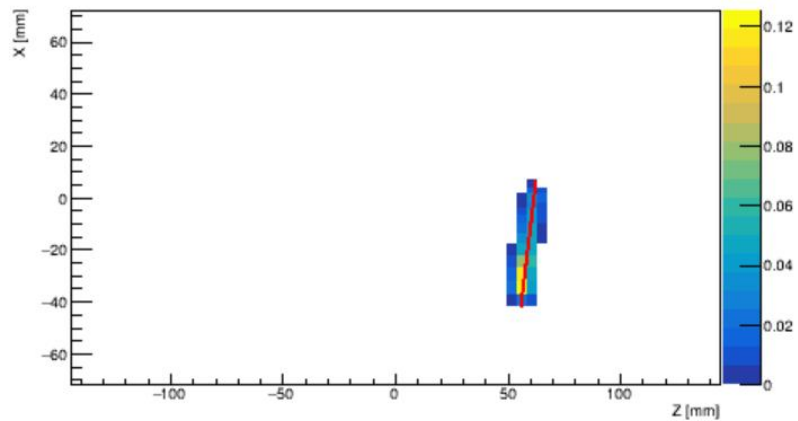
CO2激光器提供TTL信号
作为时间戳清零信号

时间戳分布可知，束流时间在
0-200us内

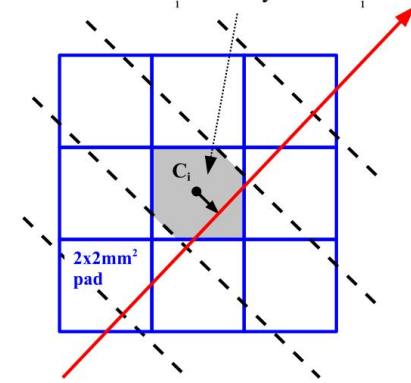


Beam Intensity : 1.2E4 photons/sec @ 17-17.4 MeV γ

在线 γ 束测试



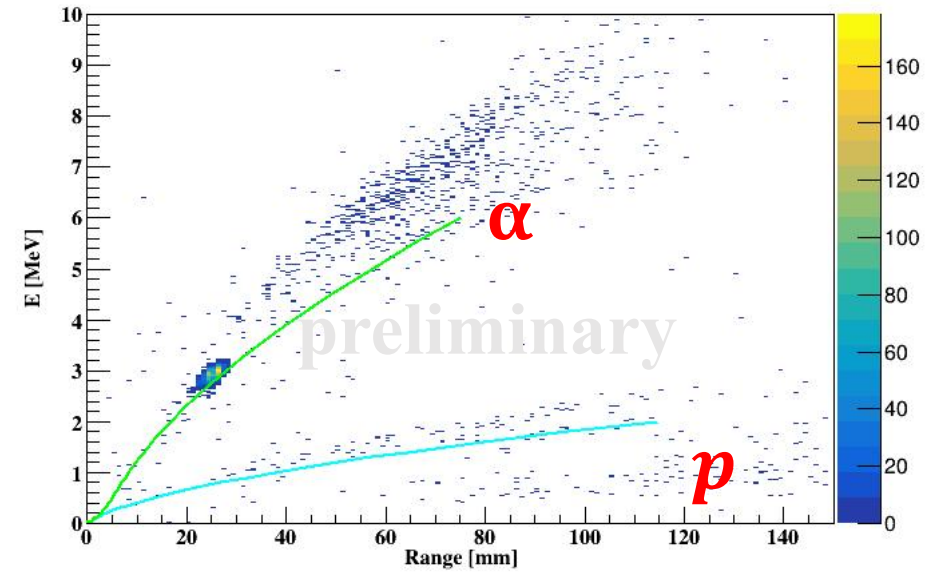
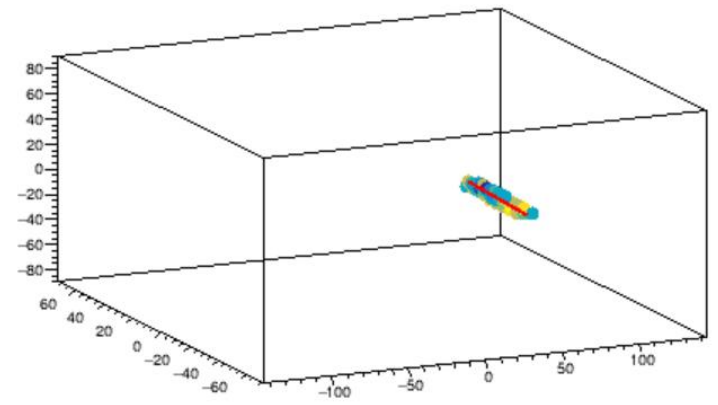
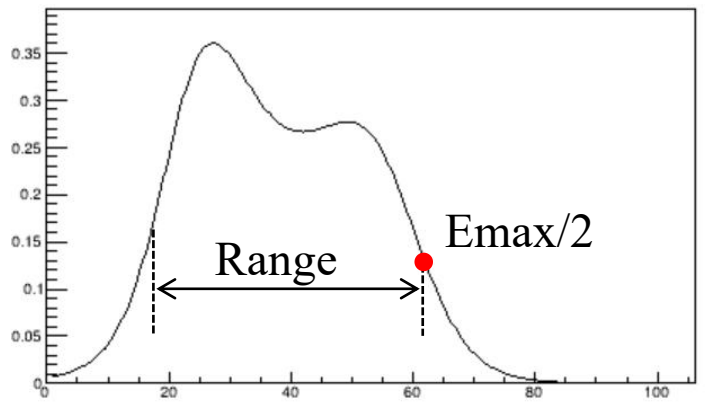
Projected region on slice number i with surface dS_i and barycenter C_i



$$Q^{slice} = \sum_{i=1}^N \frac{dS_i}{S^{pad}} Q_i^{pad}$$

doi:10.1016/j.nima.2019.02.013

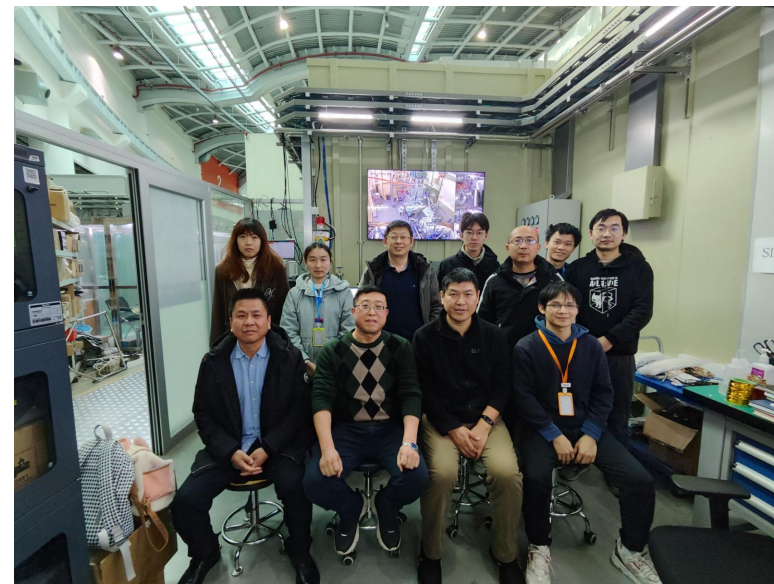
Projected Track



- TPC电子学、数据获取、慢控制系统已搭建完成。
- 外围探测器电子学系统的研发正在进行中。
- 两版场笼电场均匀性达到实验要求。
- TPC所有的离线测试工作已经完成（放射源、激光）。
- 已经完成了第二轮束流实验，数据正在分析中。

谢谢！

敬请批评指正



back up

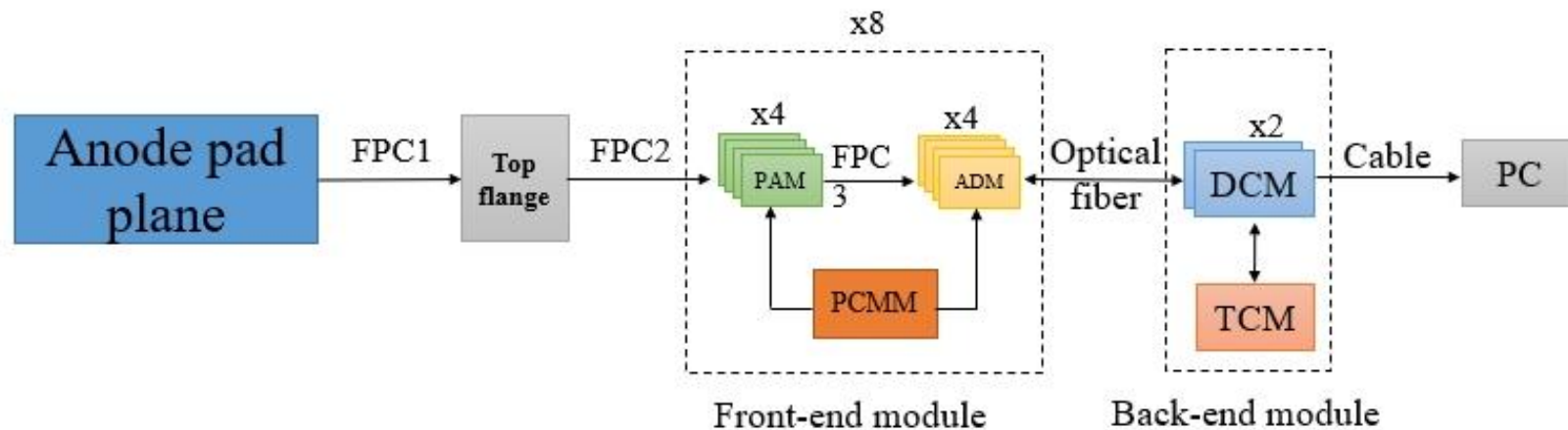
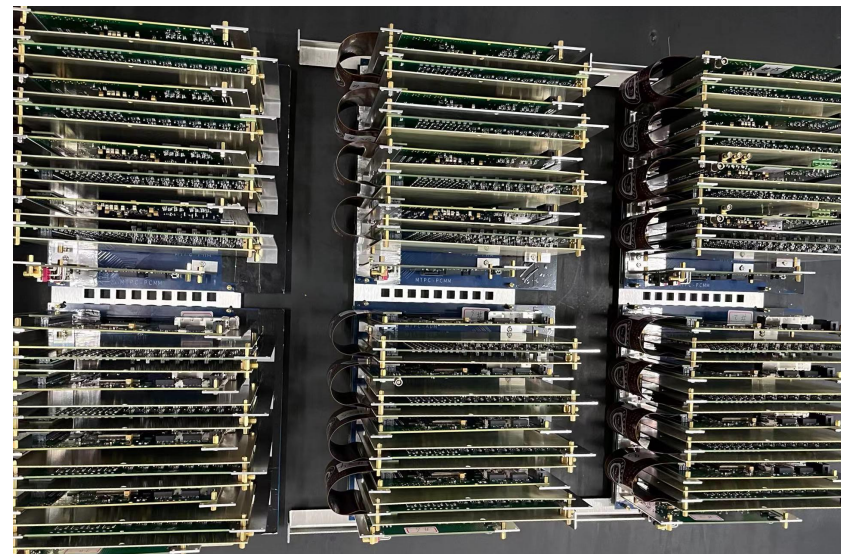
中国科学技术大学—封常清课题组合作

□ 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:

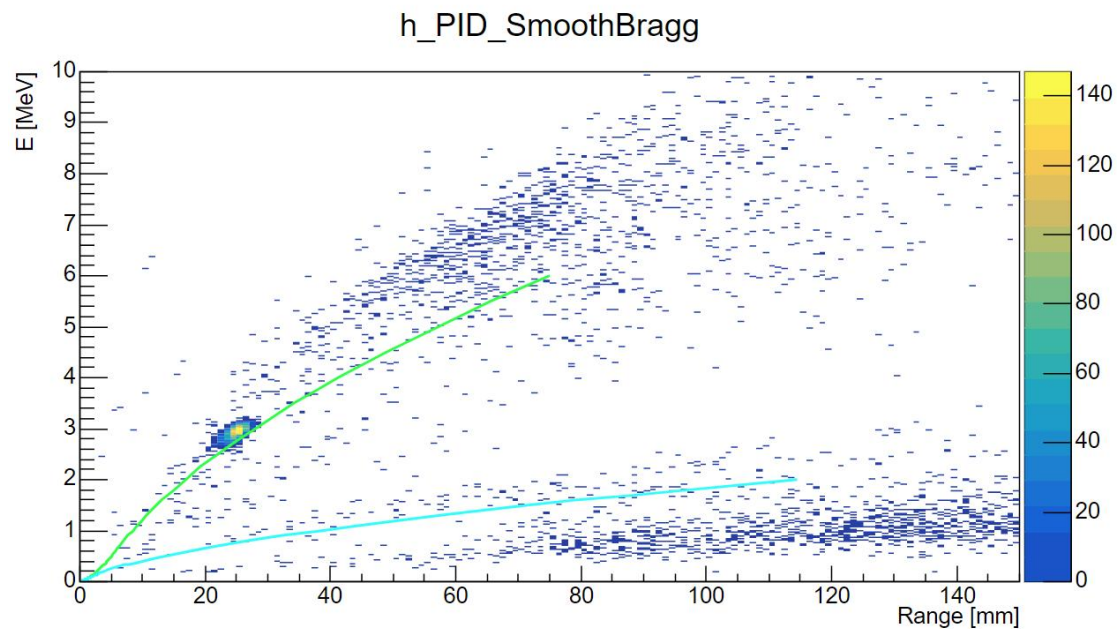
- 通道数: 2048;
- 读出死时间: 约 $25\mu\text{s}$;
- 采样率: 40MSPS;
- 采样点数: 1024;
- 采样宽度: $25.6\mu\text{s}$;
- 动态范围: 约 2fC - 3pC ;
- 时间精度: $<10\text{ns}$;



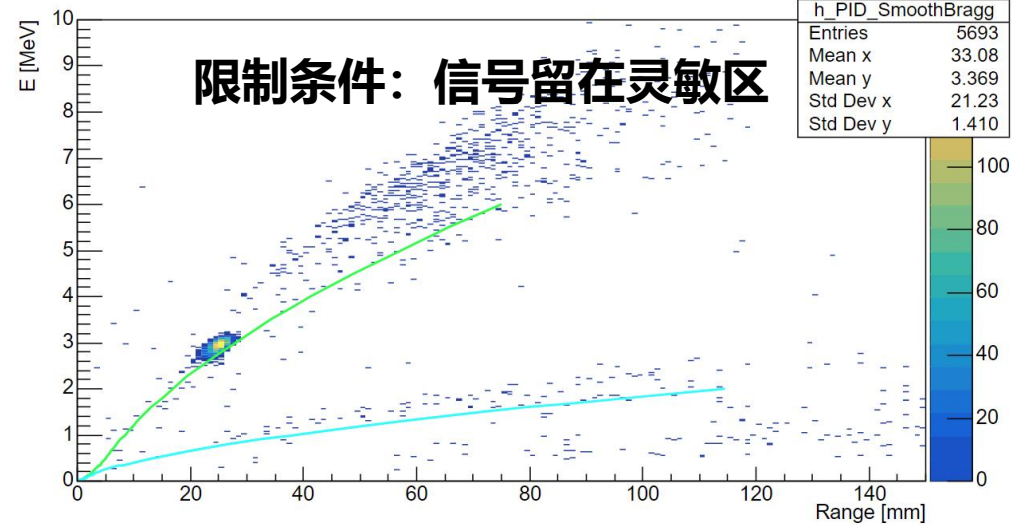
陈昊磊.白光中子源多用途时间投影室读出电子学研究[D].中国科学技术大学[2023-07-25].



无限制条件：信号 + 本底



h_PID_SmoothBragg



限制条件：仅保留本底

