



# 应用于反应堆中微子能谱精确测量的 时间投影室研究

祁辉荣

余信, 曹国富, 丁雪峰, 黄金浩, 李依宸, 曹俊

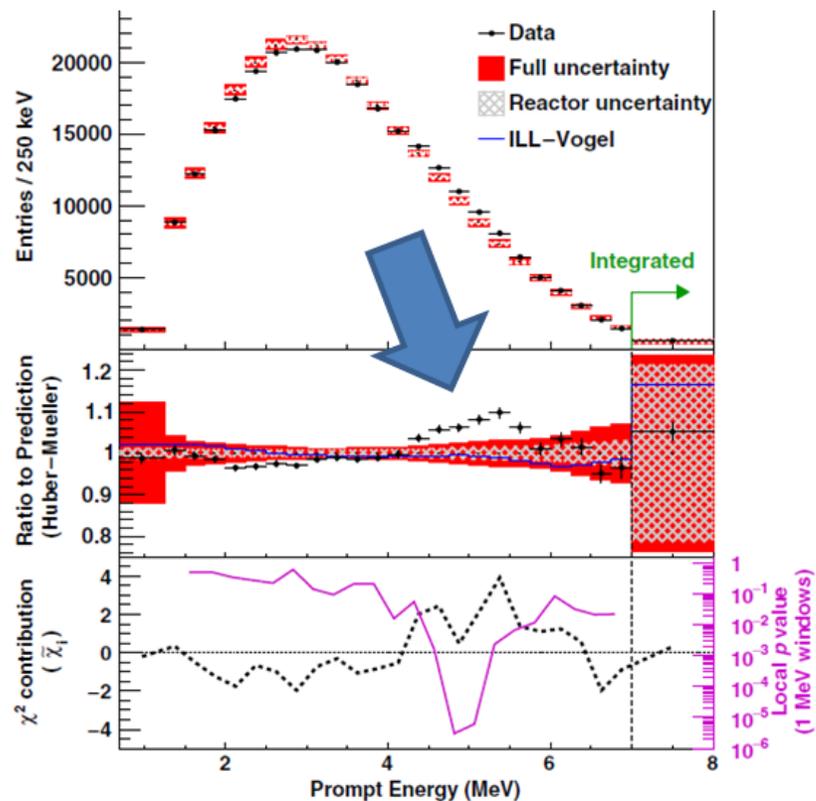
2024.05.08, COUSP2024, 西昌

- 物理需求
- 时间投影室探测器研制基础
- 高压型时间投影室研制进展
- 小结

- 物理需求

# 中微子物理需求-中微子能谱反常

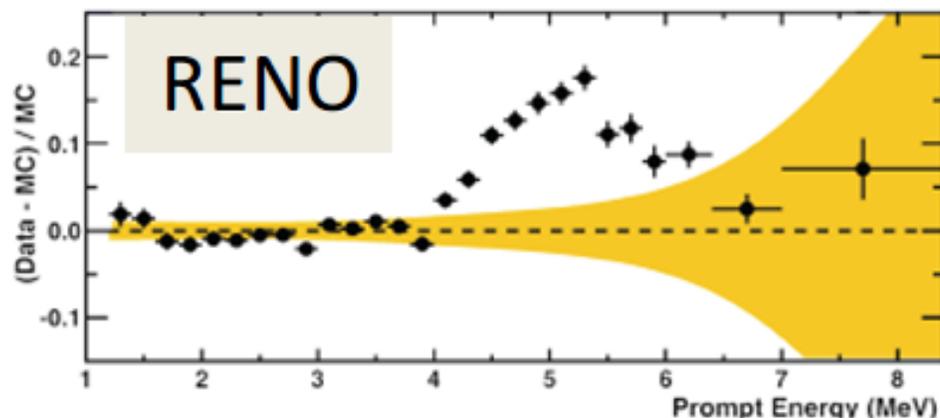
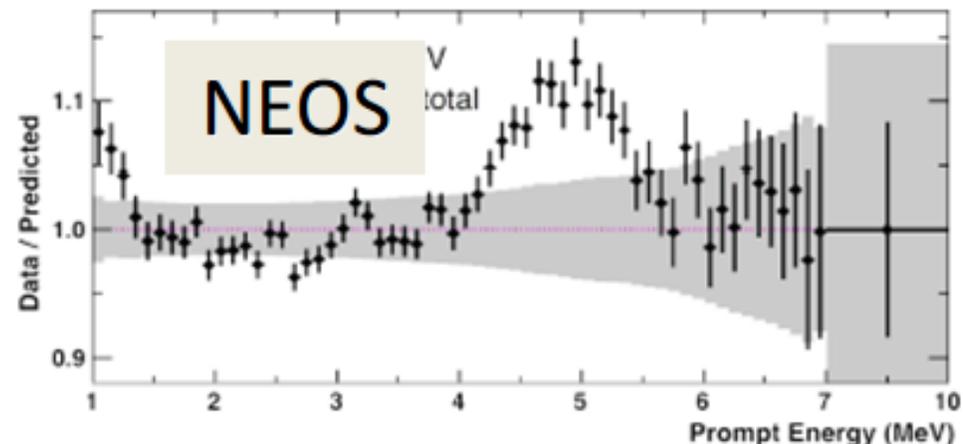
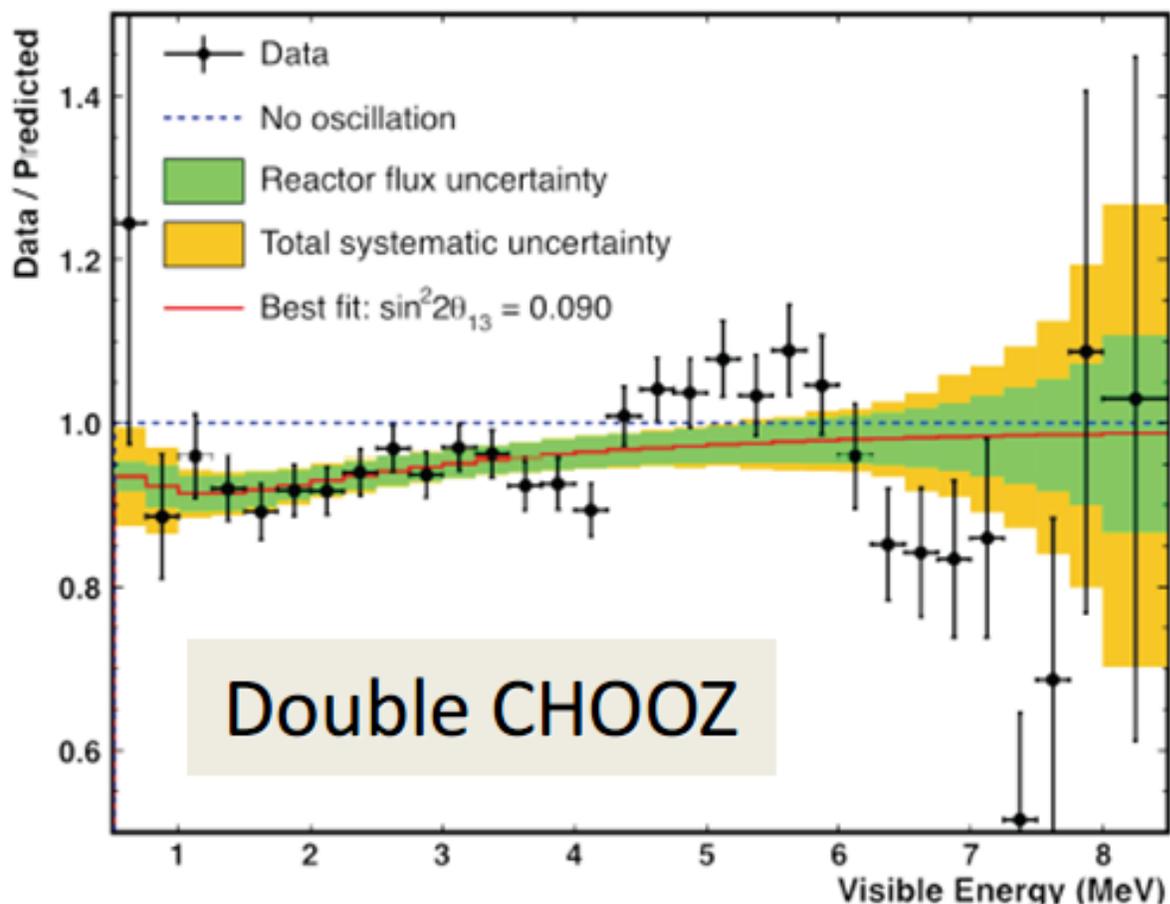
- 近年来，测量反应堆中微子流强和能谱，发现与理论模型有差异
  - 中微子总数**低于理论预期（比模型预期Huber+Mueller）6%**
  - 正电子能谱**5MeV 存在超出**
  - 近点绝对测量：确定反应堆中微子流强和能谱



PRL(2016), CPC(2017), PRL(2017)

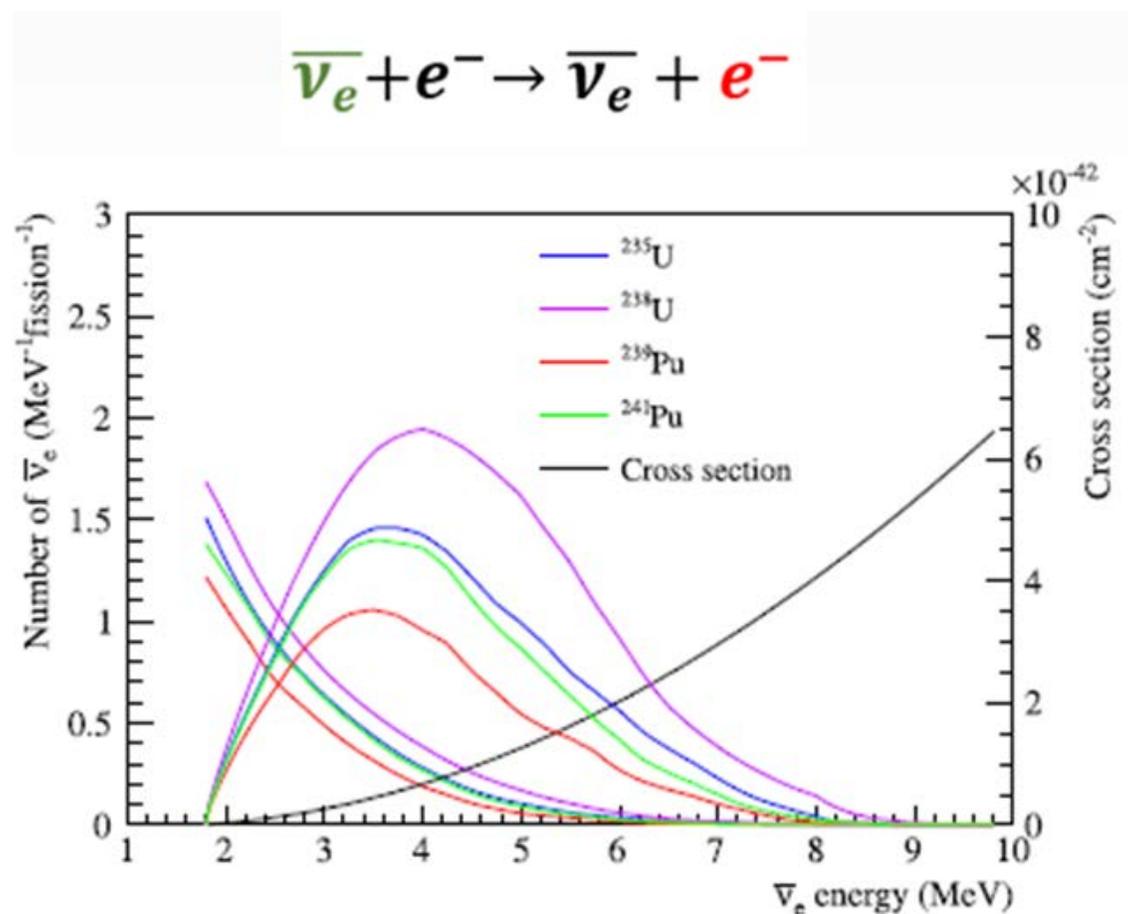
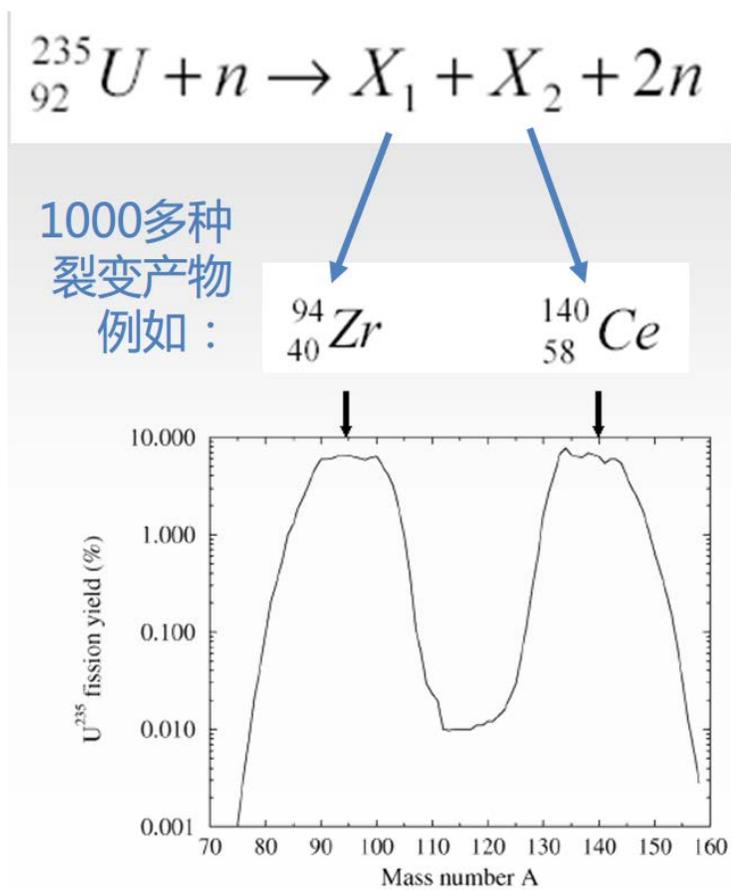
# 中微子物理需求-中微子能谱反常理论解释

- 除了中微子事例率反常，实验还发现能谱反常(4-6 MeV)
  - 惰性中微子振荡无法引起4—6MeV凸起
  - 基本排除探测器能标刻度不准，未知衰变等原因
  - 目前所有模型还**无法解释4—6 MeV凸起**



# 中微子物理需求-反应堆中微子测量

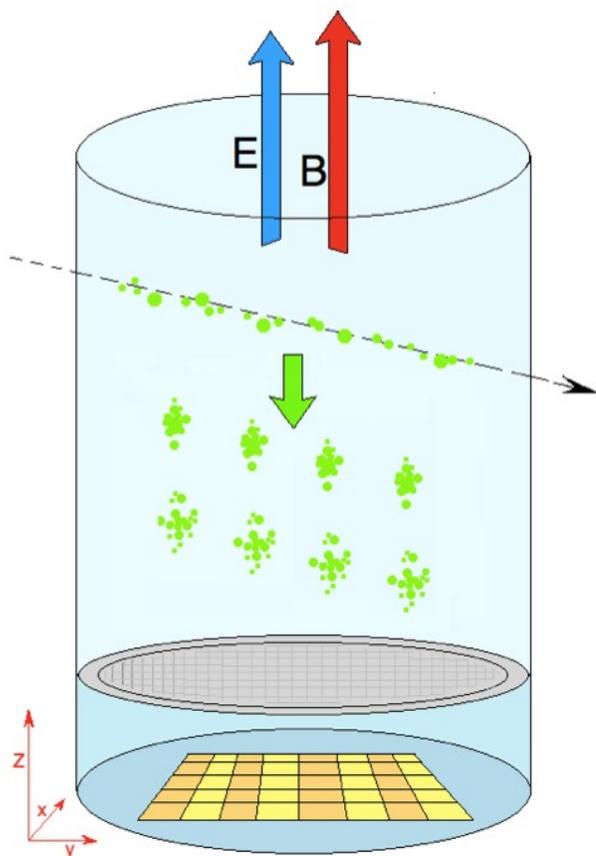
- 裂变碎片的  $\beta$ 衰变释放出中微子，称为反应堆中微子
- 每裂变约释放 小于200MeV能量和 6个中微子
  - 用富含氢的液体闪烁体捕获反应堆中微子 (TAO实验)
  - 用高电子密度靶材料**测量中微子反应电子径迹，获得中微子能谱**



- **时间投影室探测器研制基础**

# 研究基础 1—时间投影室探测技术

- 工作原理：电场和磁场在时间投影室中平行存在，实现三维径迹测量
  - 高精度的三维 (x、y、z) 信息
  - 可实现粒子鉴别 (3-4%)
  - 保持极低的三维物质质量



## Momentum resolution

$$\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} = \sqrt{\underbrace{\left(\frac{\alpha' \sigma_x}{BL^2}\right)^2 \frac{720}{N+4}}_{\text{measurements}} p_{\perp}^2 + \underbrace{\left(\frac{\alpha' C}{BL}\right)^2 \frac{10}{7} \left(\frac{X}{X_0}\right)}_{\text{multiple scattering}}}$$

$p_{\perp}$  : transverse momentum     $B$  : strength of B-Field     $L$  : track detection length     $\alpha', C$  : constant  
 $\sigma_x$  : position resolution     $N$  : #of measurement points     $\frac{X}{X_0}$  : radiation length of gas

R.L. Gluckstern, NIM 24 (1963), 381

TPC only...  $\frac{\sigma_{p_{\perp}}}{p_{\perp}} \approx 1 \times 10^{-4} p_{\perp} \text{ GeV}/c$

## Position resolution

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{C_d^2 \cdot z}{N_{\text{eff}}}}$$

$z$ : drift length  
 $N_{\text{eff}}$ : effective number of electron  
 $C_d$ : diffusion constant of gas

depends on drift length

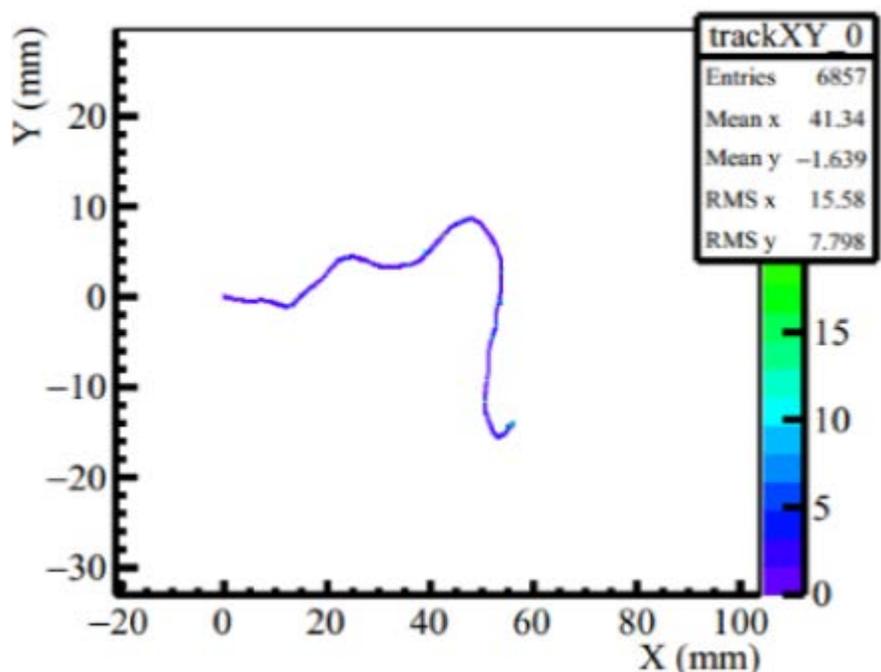
small position resolution  $\sigma_x$

$$\sigma_x \approx 100 \mu\text{m}$$

even at the large drift length of 2.2 m

## 研究基础 2— 时间投影室TPC技术

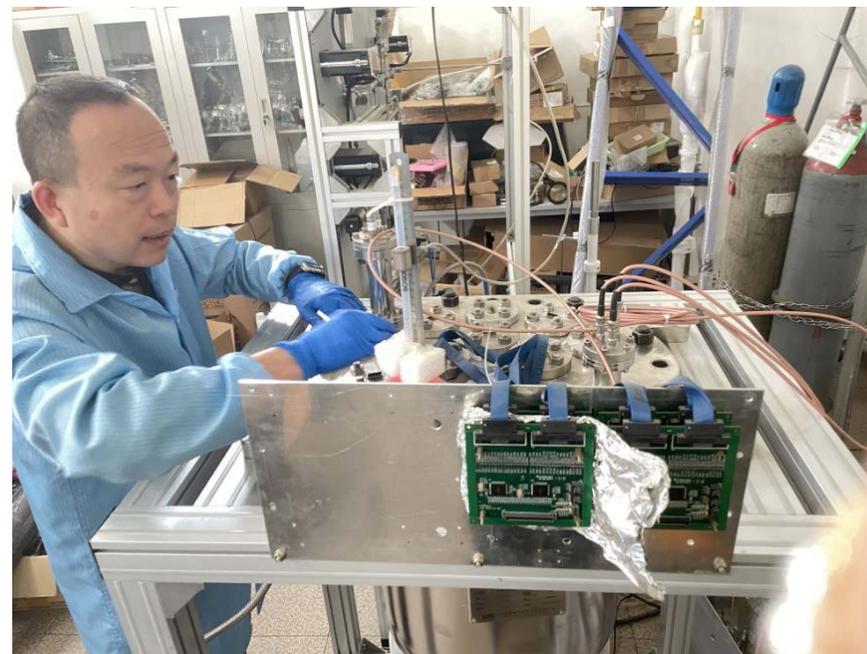
- 高能物理研究所中微子研究组，已研制了一套充入4.5L的工作气体的时间投影室原型机，采用THGEM读出，进行Ar/Iso=97/3和纯CF<sub>4</sub>气体1atm的初步性能研究
  - THGEM读出实现大部分性能测量，未实现测量电子径迹
  - 未实现高压加载测量
  - 读出模块及电子学还需优化



模拟的1MeV电子径迹



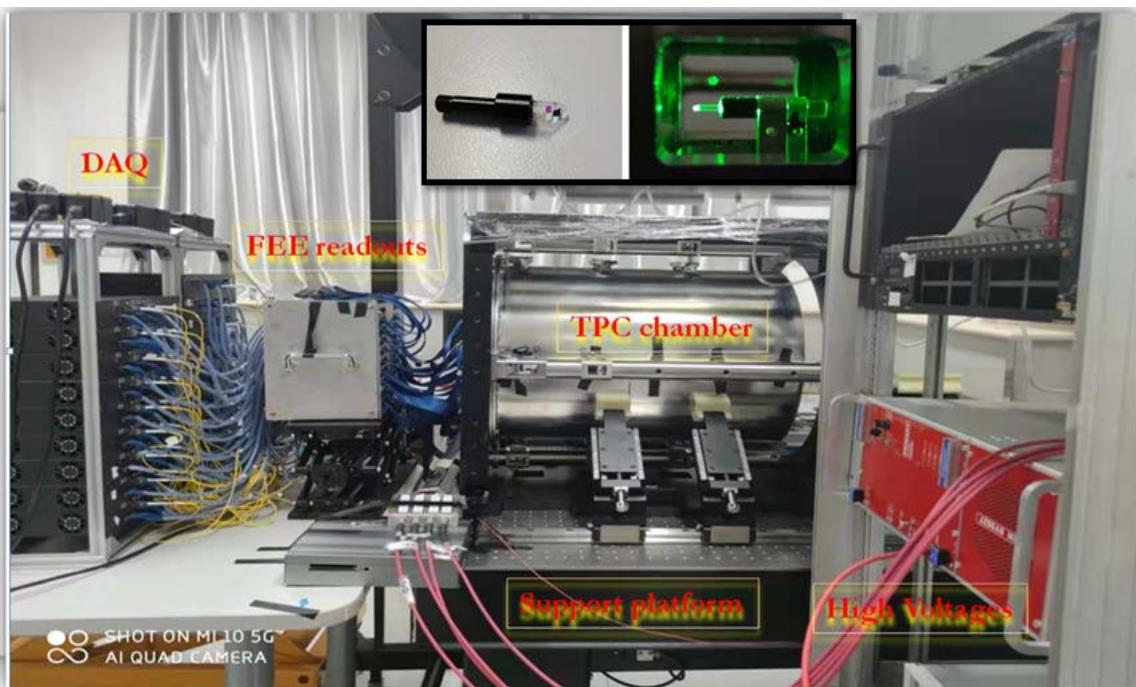
160mm漂移距离TPC



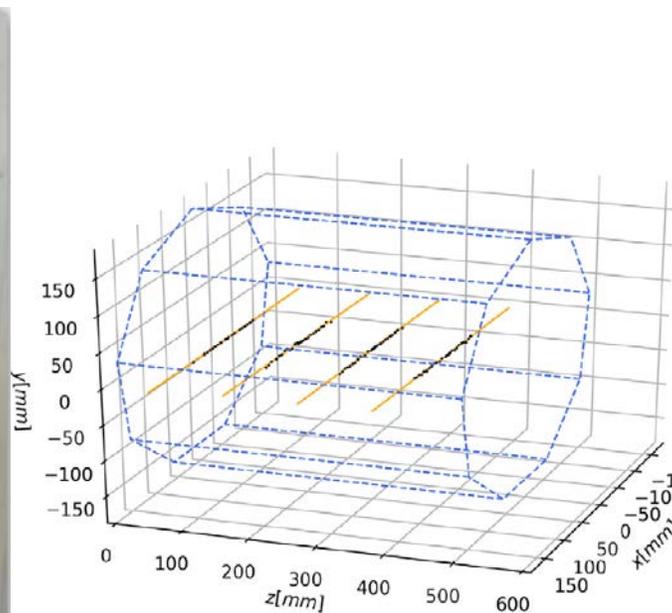
优化和改进高压加载

# 研究基础 3— 时间投影室TPC技术

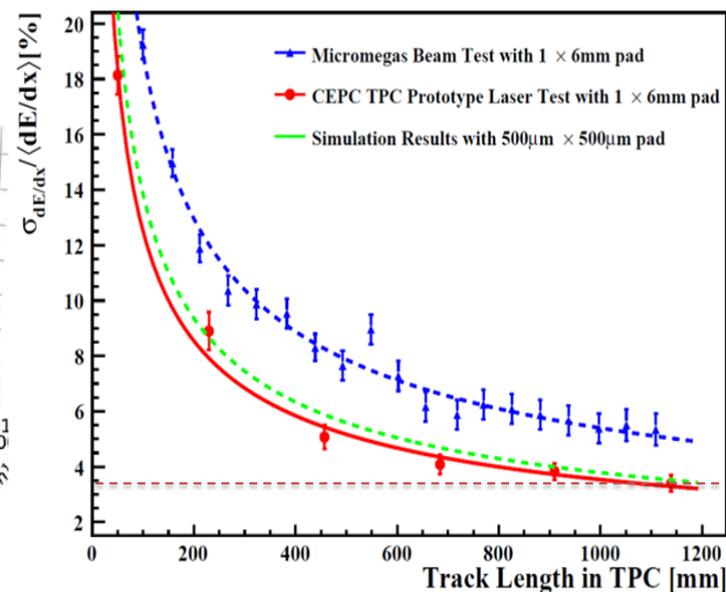
- 研究前沿基础物理性质和新物理的对撞机径迹探测器中，时间投影室TPC探测器是设计中的“基准主径迹探测器”的重要选型
- 解决共性关键技术难点（国际LCTPC、ILC、FCCee合作组共性技术问题）
  - 完成漂移距离500mm、读出面积 $200 \times 200 \text{mm}^2$ 、Micromegas和GEM读出，1000路电子学数据采集
  - 完成**正离子流控制** ( $\text{IBF} \times G \leq 1$ )、**紫外激光径迹** ( $< 100 \mu\text{m}$ ) 和**粒子鉴别PID** ( $< 3.6\%$ )技术应用研究



激光TPC原型机



激光径迹重建结果



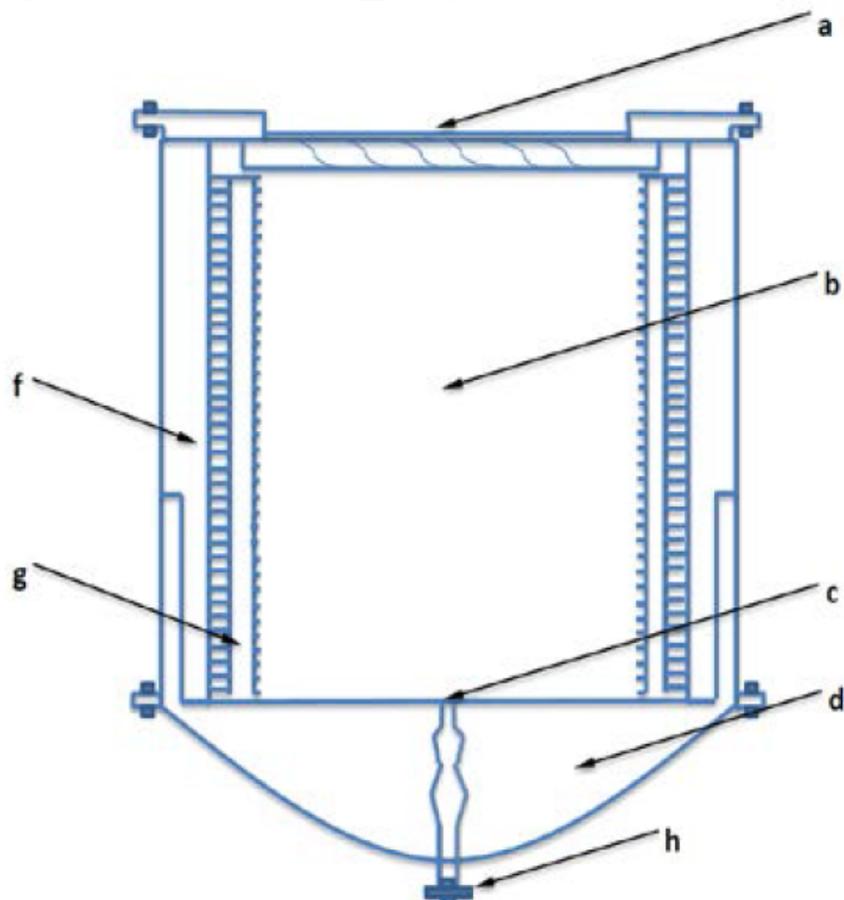
粒子鉴别PID研究

- 高气压型时间投影室研制

- 整体设计方案
- 读出设计方案
- 读出探测器实验研究
- 高精度 $T_0$ 信号实验研究

# 高压CF<sub>4</sub>型 TPC-初步方案

- 采用小于10atm高压CF<sub>4</sub>型TPC方案（相对于Xe、Ar方案），优势
  - 更低的吸附系数（较常温电场值低）、更高的漂移速度、较低的电离率
  - 适合更长覆盖角度、长漂移距离的时间投影室
  - 适用于计数率低的物理实验

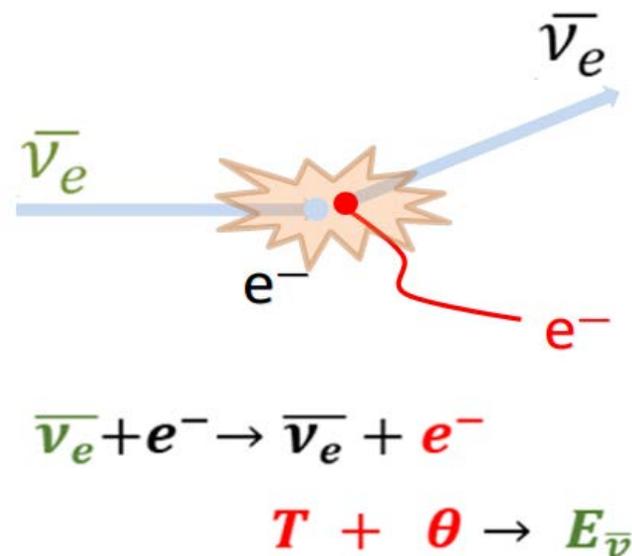
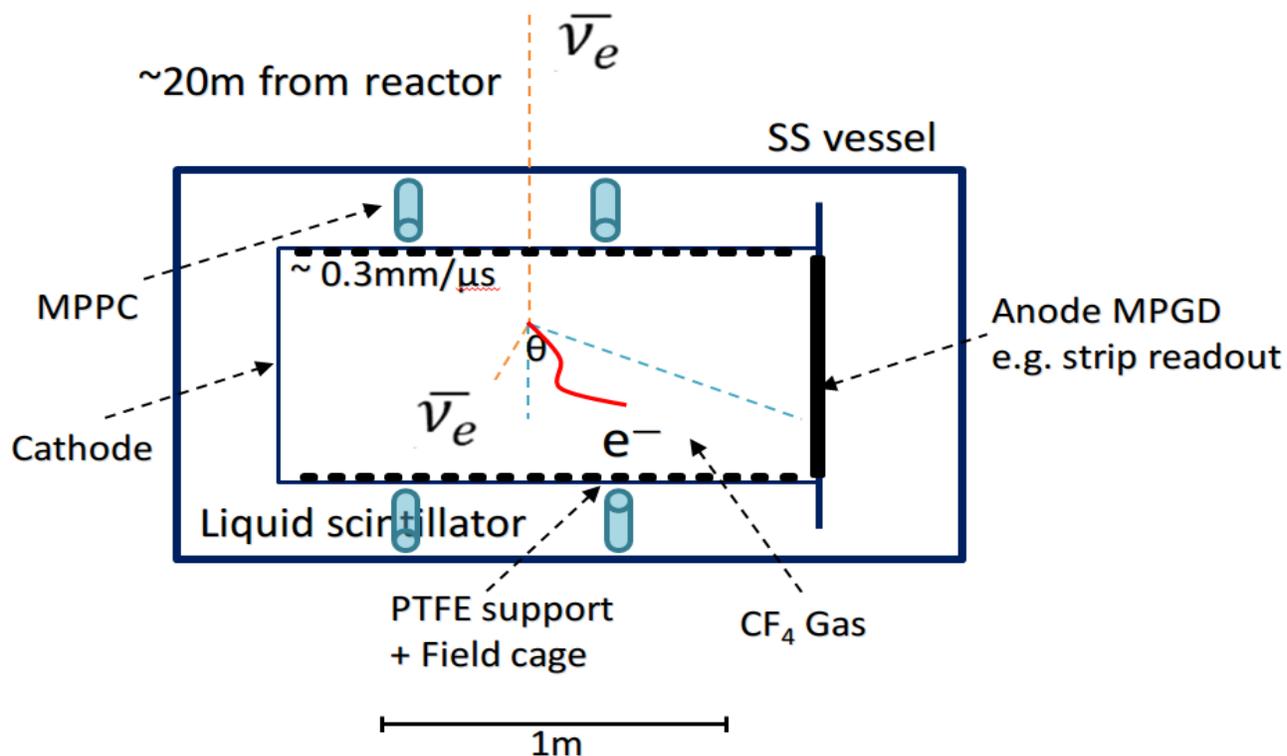


初步方案示意图

- a. 读出平面，微结构探测器和前端读出电子学
- b. 工作腔体，不同气压的混合工作气体
- c. 阴极平面，连接负高压，提供均匀高压面
- d. 连接部件，高压绝缘体，能量吸收填充物，具有密封和充入工作腔体的高气压气体，材料如聚乙烯等
- e. 贯通式高压模块
- f. 高压绝缘体、提供均匀高压漂移场强，填充吸收体，如 d 部分填充，保证均匀高压场强
- g. 塑料闪烁体或条形波形液体闪烁体，转换为可测量的波长信号，提供中微子物理事例的起始时间信号

# 反应堆中微子时间投影室设计方案

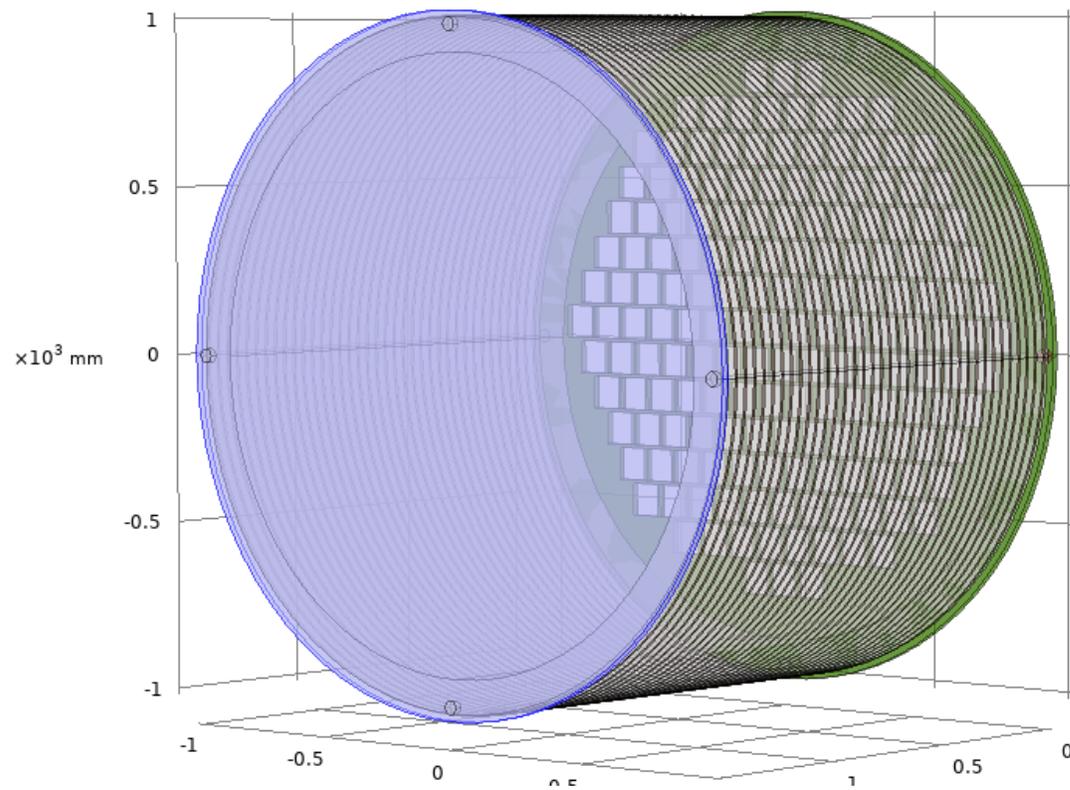
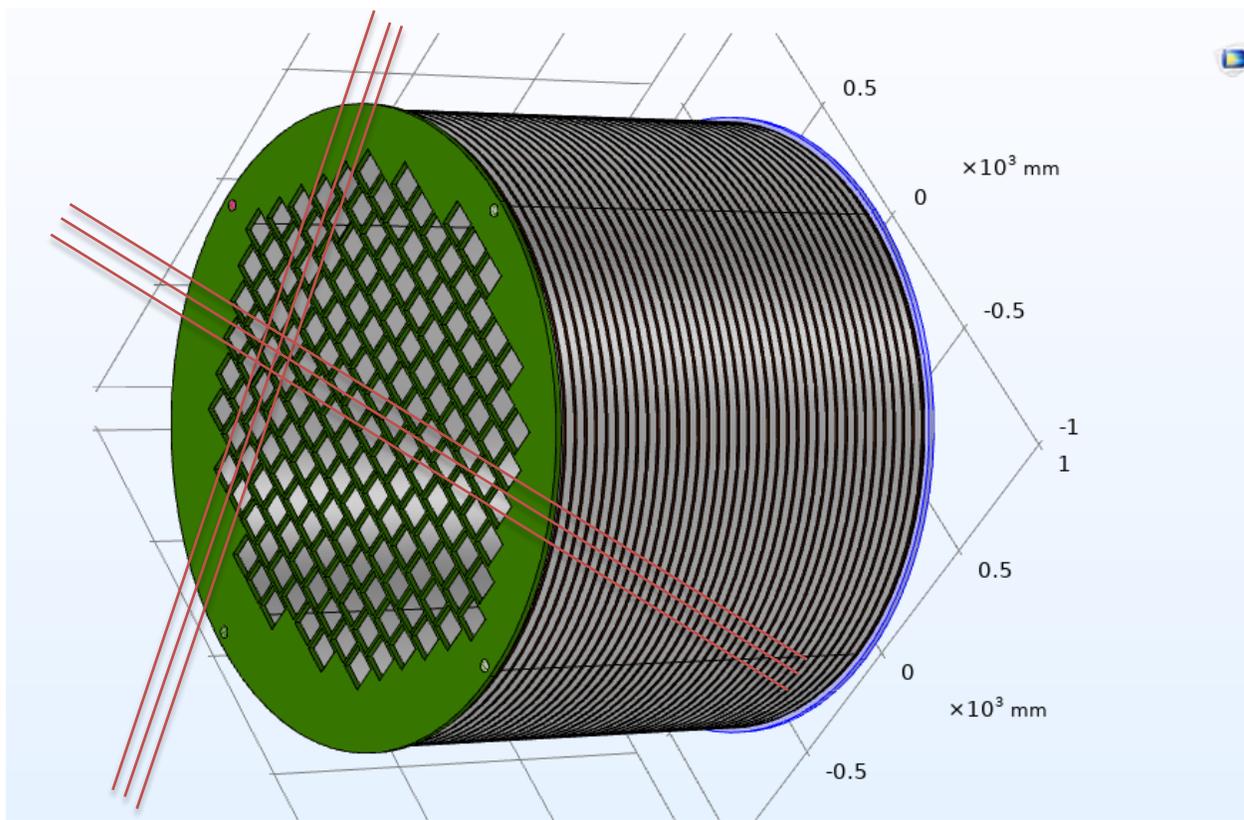
- **物理需求**: 200keV - 1MeV中微子探测, 输入反应堆中微子能谱能量分辨率好于 <10%
- 高电子密度的气体作为靶材料: >500kg的高气压CF<sub>4</sub>, 关键是**吸附的控制和初始发光T<sub>0</sub>**
- 反应堆裂变产生的中微子穿过TPC探测器, 会与气体中自由电子发生弹性散射, 在探测器中产生一条电离径迹, 通过探测电子电离能量及气体中散射方向重建中微子能谱, 深入研究中微子性质 (需要测量**径迹方向和能量**)



反应堆中微子与靶材料中电子发生弹性散射及初步设计方案

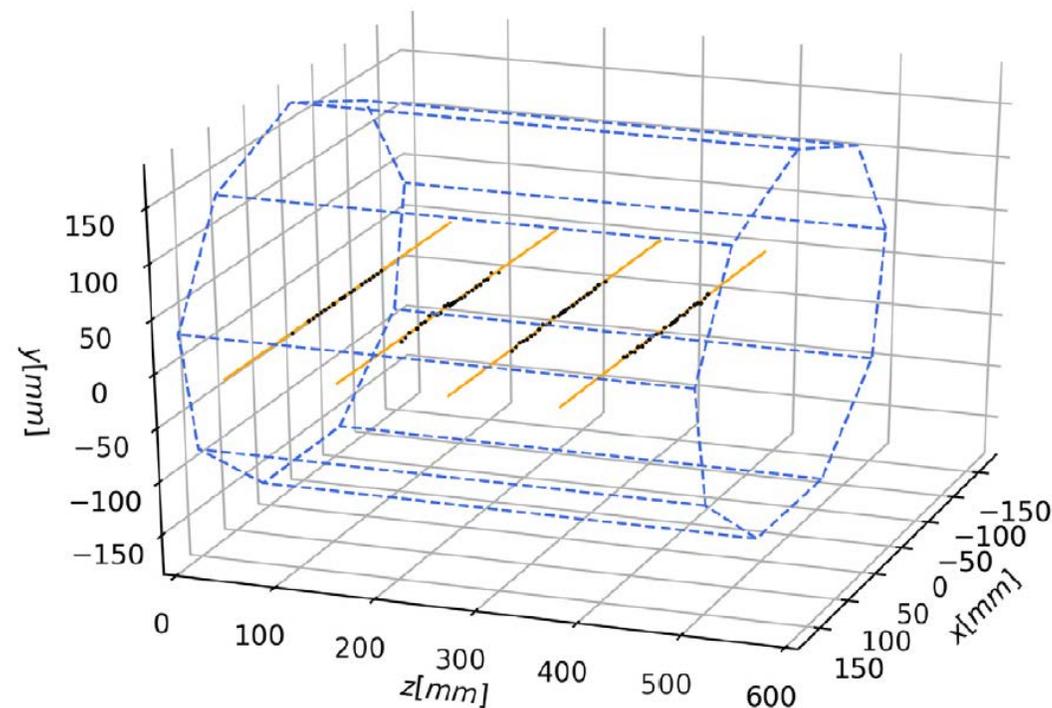
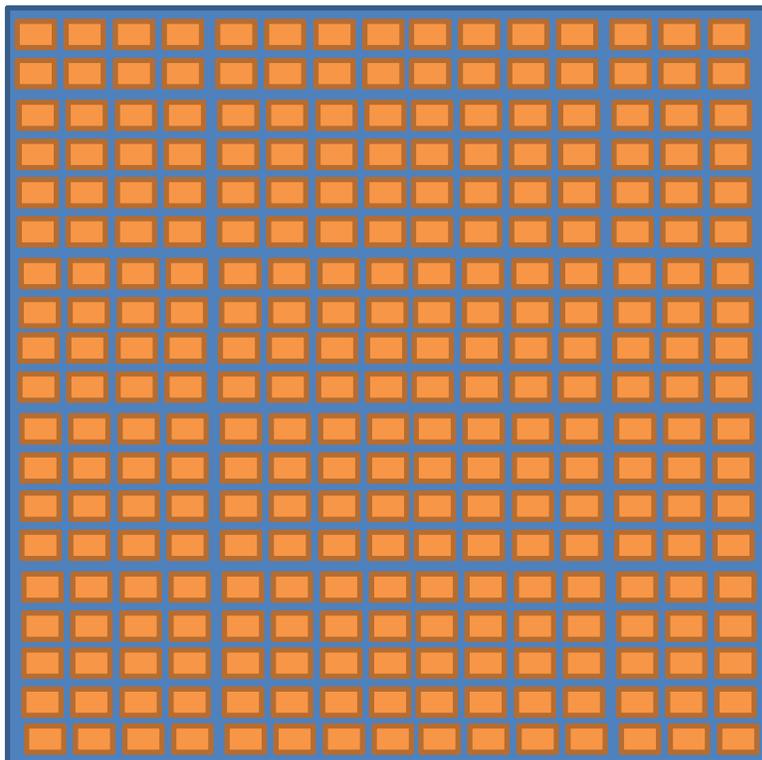
# 时间投影室三维总体设计

- Micromegas探测器 (**100 $\mu\text{m}$ 倍增区域可以优化电子倍增的不确定性**)
  - 252个读出模块 (读出覆盖率>95%)
  - 100mm $\times$ 100mm有效面积
- 读出端盖直径: 2000mm
- 漂移长度: 1500mm-1750mm



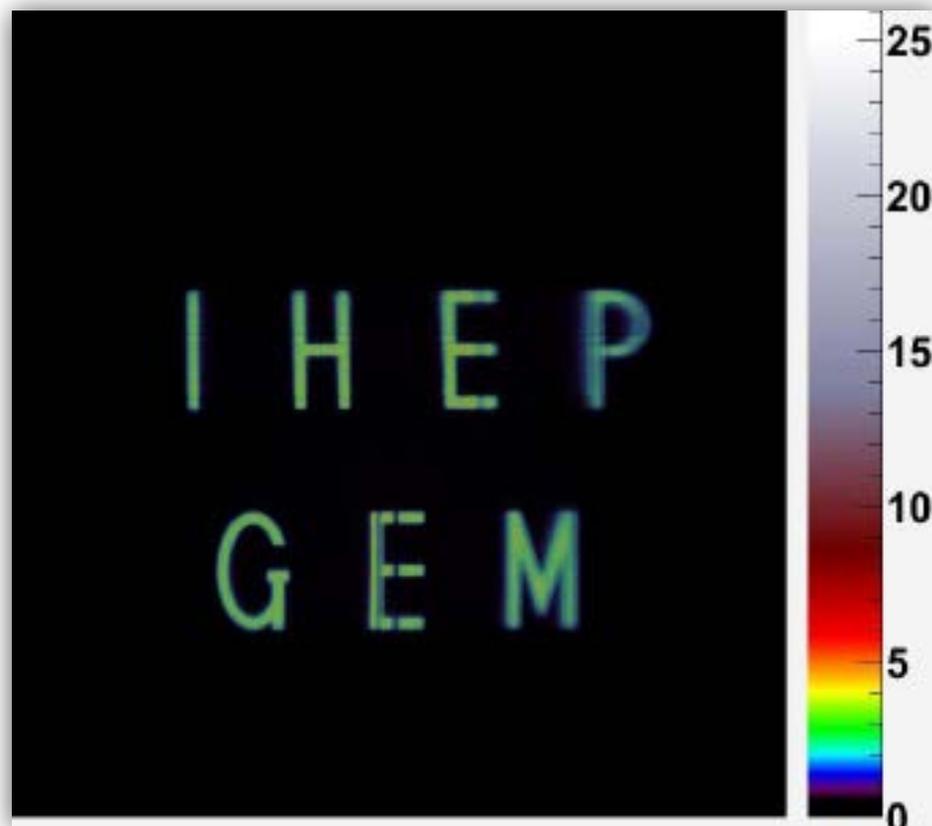
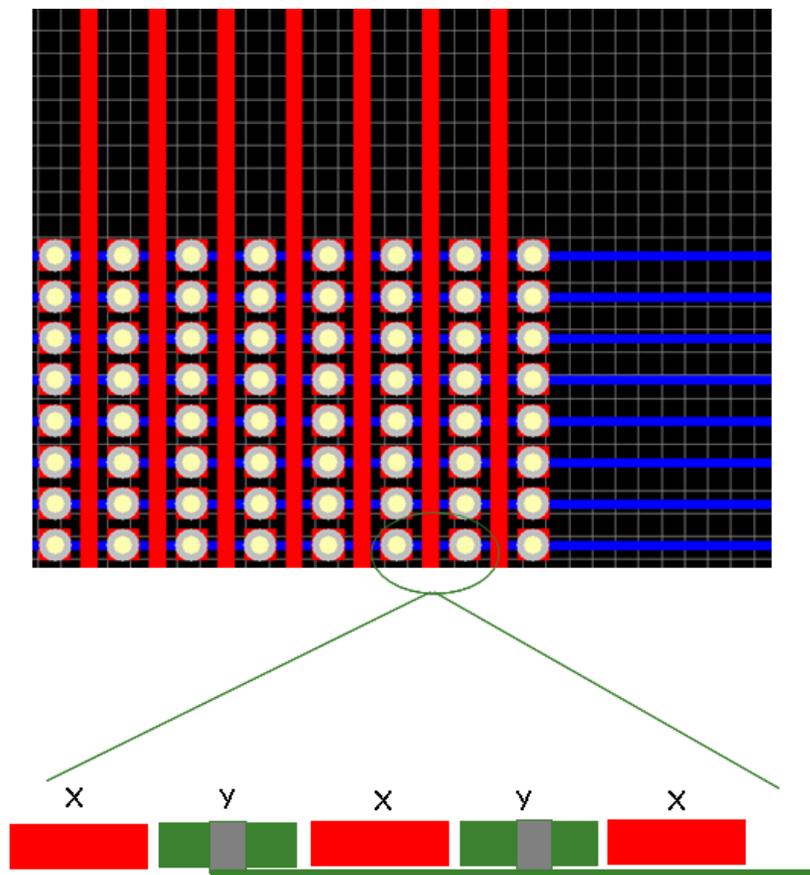
# 时间投影室三维总体设计初步考虑 - I

- 252个读出模块（读出覆盖率>95%）
  - 100mm×100mm有效面积，Micromegas探测器
- 二维读出方案
  - Pad size: 3mm×3mm读出
  - 单module: 900路读出；总体:  $240 \times 900 = 216000$ 路读出



## 时间投影室读出总体设计初步考虑 - II

- 252个读出模块（读出覆盖率>95%）
  - 100mm×100mm有效面积，Micromegas探测器
- 二维读出方案
  - Pad size: 0.74mm×100mm X-读出; 0.52mm×100mm Y-读出
  - 单module: 320路读出; 总体:  $240 \times 320 = 76800$ 路读出



# 时间投影室读出电子学芯片

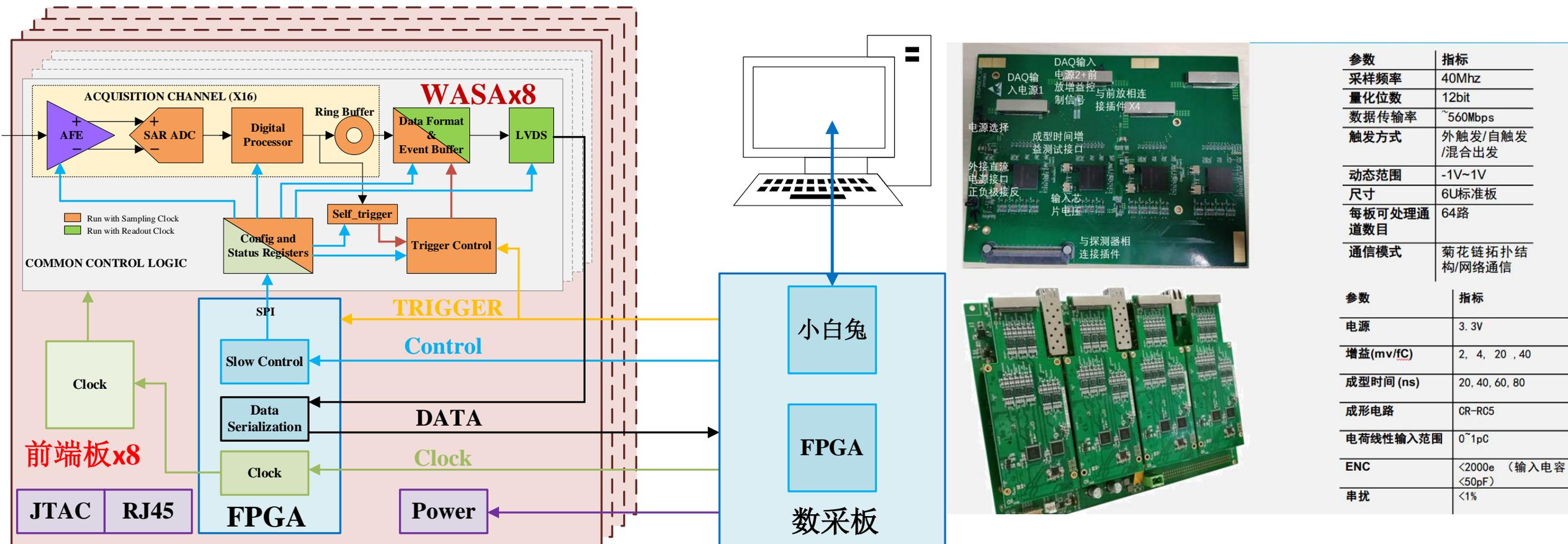
- 读出总功耗：需要着重考虑的因素
  - 与大体积时间投影室技术有类似的需求

	PASA+ALTRO	Super-ALTRO	SAMPA	WASA_v1
TPC	ALICE	ILC	ALICE upgrade	CEPC
Pad Size	4x7.5 mm <sup>2</sup>	1x6 mm <sup>2</sup>	4x7.5 mm <sup>2</sup>	1x6 mm <sup>2</sup>
No. of Channels	5.7 × 10 <sup>5</sup>	1-2 × 10 <sup>6</sup>	5.7 × 10 <sup>5</sup>	2 × 10 <sup>6</sup>
Readout Detector	MWPC	GEM/MicroMegas	GEM	GEM/MicroMegas
Gain	12 mV/fC	12-27 mV/fC	20/30 mV/fC	10-40 mV/fC
Shaper	CR-(RC) <sup>4</sup>	CR-(RC) <sup>4</sup>	CR-(RC) <sup>4</sup>	CR-RC
Peaking time	200 ns	30-120 ns	80/160 ns	160-400 ns
ENC	370+14.6 e/pF	520 e	246+36 e/pF	569+14.8 e/pF
Waveform Sampler	Pipeline ADC	Pipeline ADC	SAR ADC	SAR ADC
Sampling Rate	10 MHz	40 MHz	10 MHz	10-100 MHz
Sampling Resolution	10 bit	10 bit	10 bit	10 bit
Power: AFE	11.7 mW/ch	10.3 mW/ch	9 mW/ch	1.4 mW/ch
Power: ADC	12.5 mW/ch	33 mW/ch	1.5 mW/ch	0.8 mW/ch@40 MHz
Power: Digital Logics	7.5 mW/ch	4.0 mW/ch	6.5 mW/ch	2.7 mW/ch@40 MHz
<b>Total Power</b>	<b>31.7 mW/ch@10MHz</b>	<b>47.3 mW/ch@40 MHz</b>	<b>17 mW/ch@10 MHz</b>	<b>4.9 mW/ch@40 MHz</b>
CMOS Process	250 nm	130 nm	130 nm	65 nm

# 读出电子学系统初步设计方案

## 二维读出方案

- Pad size: 0.74mm × 100mm X-读出; 0.52mm × 100mm Y-读出
- 单module: 320路读出; 总体: 240 × 320 = **76800路读出**
- 两个模块可以共用一数采卡



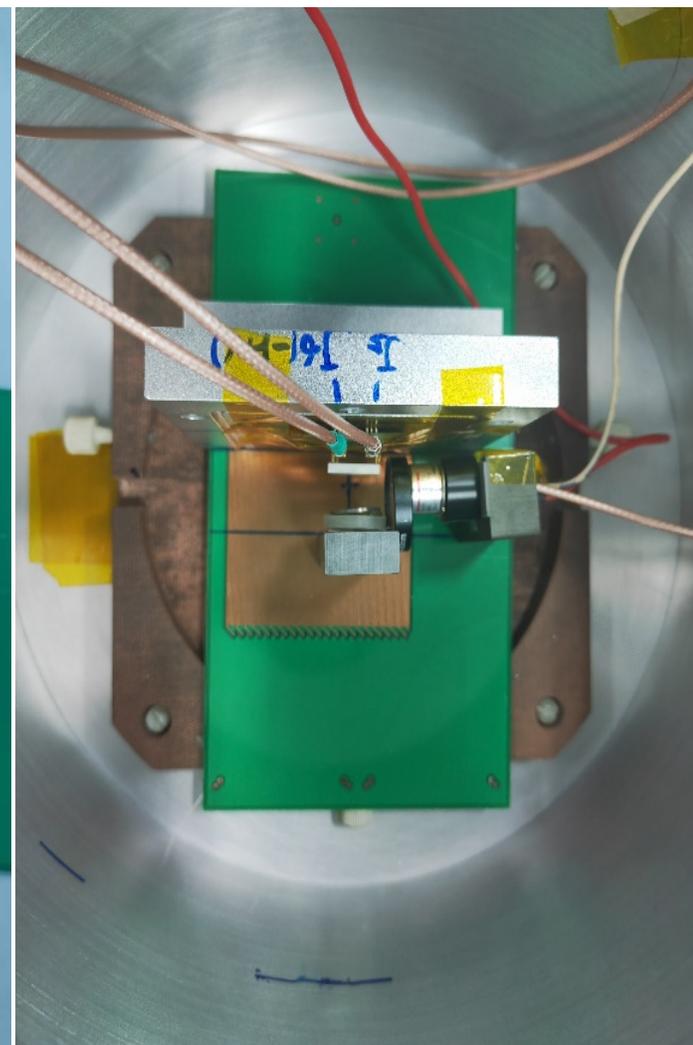
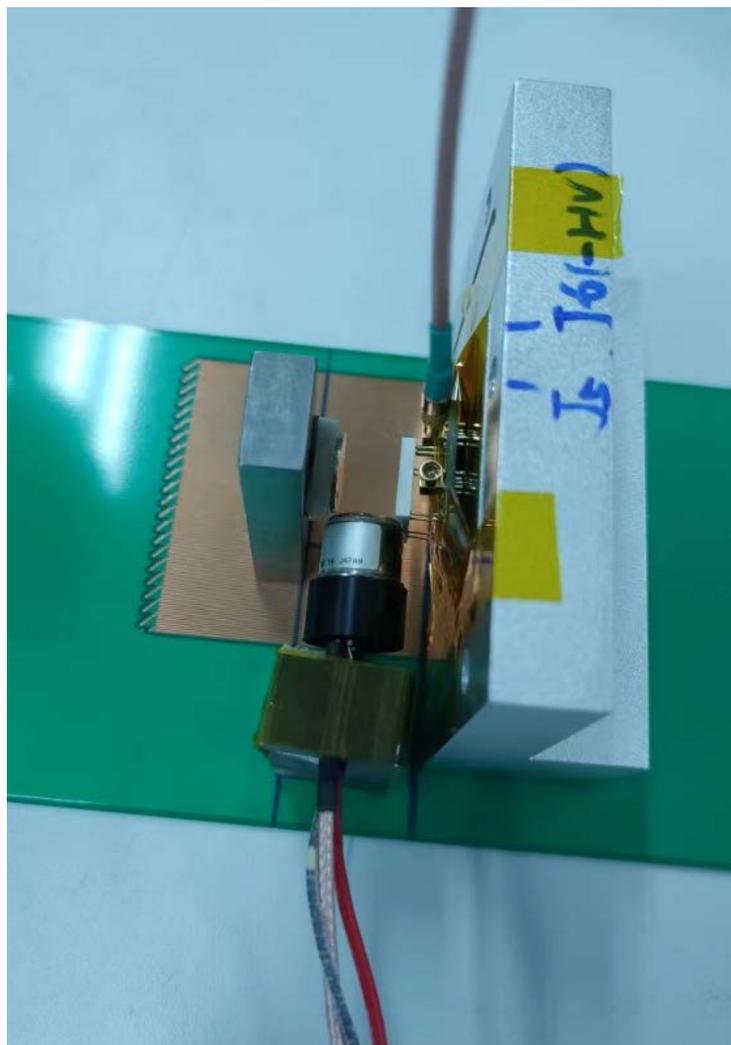
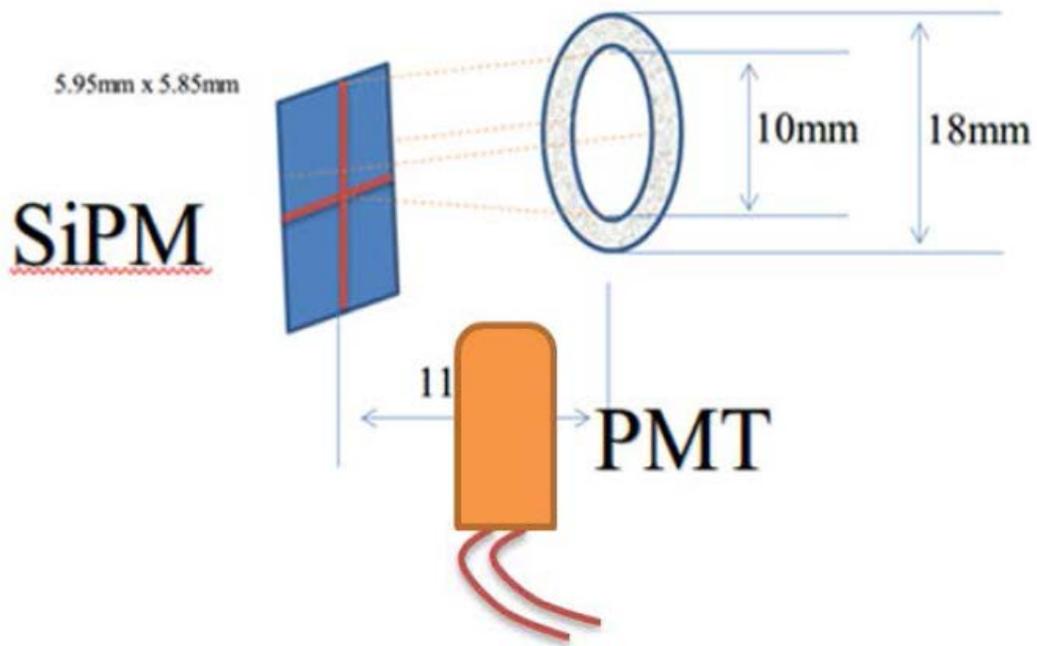
参数	指标
采样频率	40Mhz
量化位数	12bit
数据传输率	~560Mbps
触发方式	外触发/自触发/混合出发
动态范围	-1V~1V
尺寸	6U标准板
每板可处理通道数目	64路
通信模式	菊花链拓扑结构/网络通信

参数	指标
电源	3.3V
增益(mv/fC)	2, 4, 20, 40
成型时间(ns)	20, 40, 60, 80
成型电路	CR-RC5
电荷线性输入范围	0~1pC
ENC	<2000e (输入电容 <50pF)
串扰	<1%

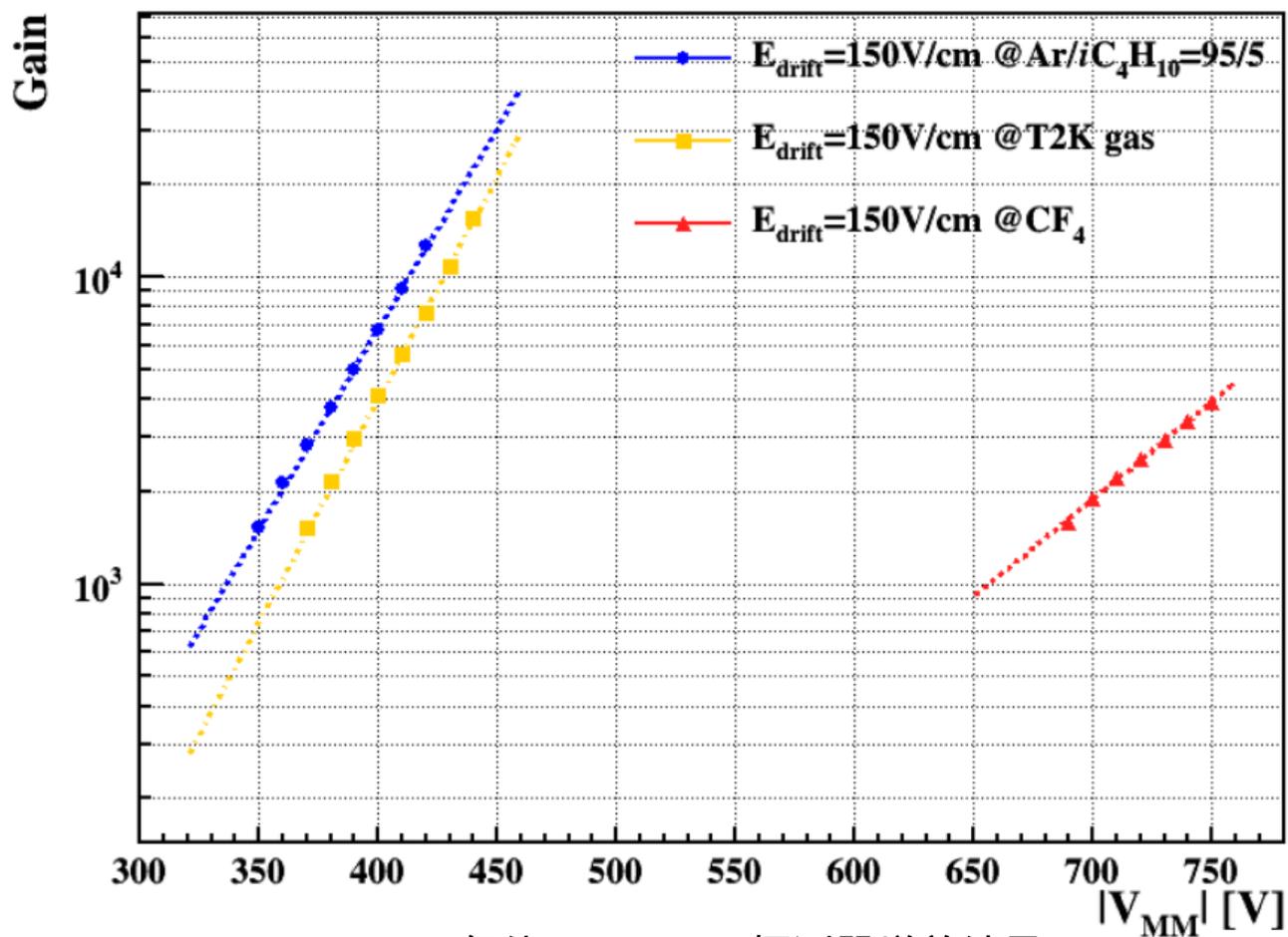
# 读出探测器主要性能实验研究

- 定位安装SiPM与PMT，进行实验测量（**电子吸附研究和原初发光 $T_0$ 信号**）
  - 放射源Am-241下，进行测量（~200Hz的Alpha计数率）
  - SiPM/PMT/放射源中心高度保持一致
    - 高度35mm
    - HAMAMATSU R7400U



# 1、读出探测器增益实验研究

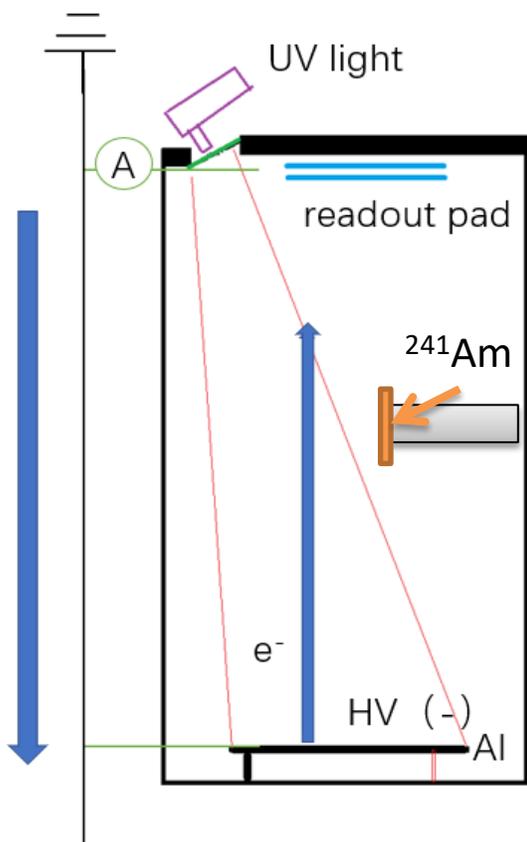
- Micromegas探测器在CF4工作气体中，状态良好。
  - 工作气体为纯的CF4气体，CF4的纯度为99.99%。
  - 测试结果：CF4气体Micromegas探测器增益相对较低，相同增益下，需要工作高压更高（约T2K气体2倍）



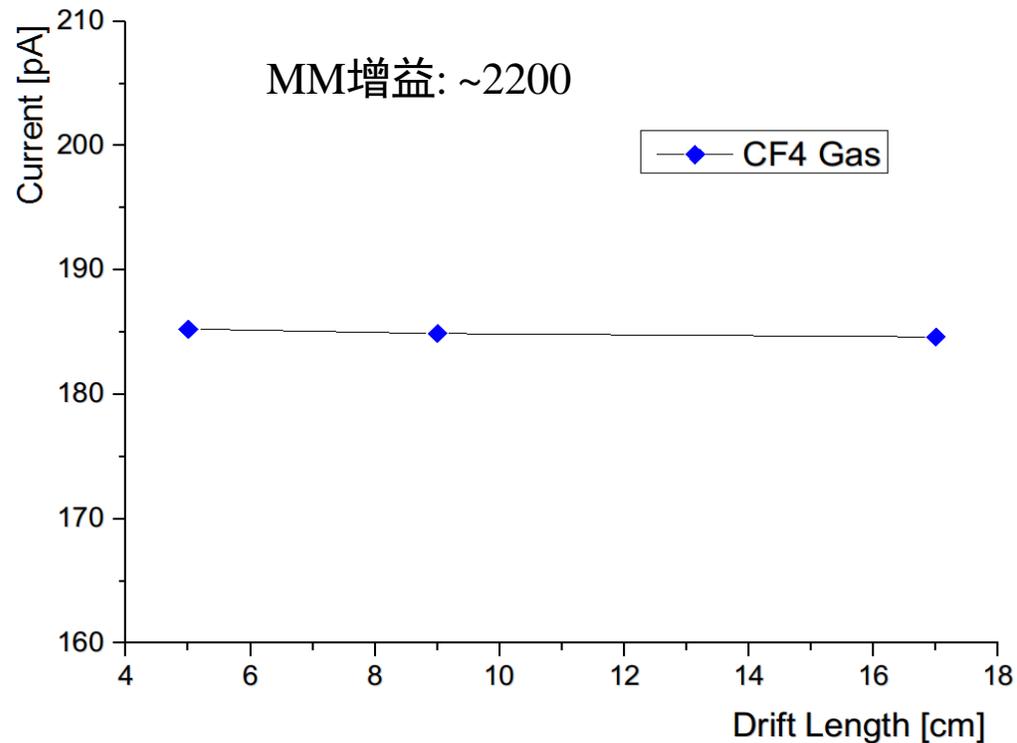
CF4气体Micromegas探测器增益结果

## 2、CF4吸附测量进展

- 实验测量
  - 沿漂移区不同的漂移距离放射 $^{241}\text{Am}$ 放射源，重复测量 $^{241}\text{Am}$ （18mm外径，10mm电镀源，1mCi）
  - 测量Micromegas上的电流，工作气体采用CF4的纯度(99.999%，天津液空)
    - 需纯化，抽取真空充入气体，气体纯度的提升对于电流有明显改善
    - 纯化后结论：在~170mm漂移距离上， $^{241}\text{Am}$ 放射源，没有明显电子吸附现象

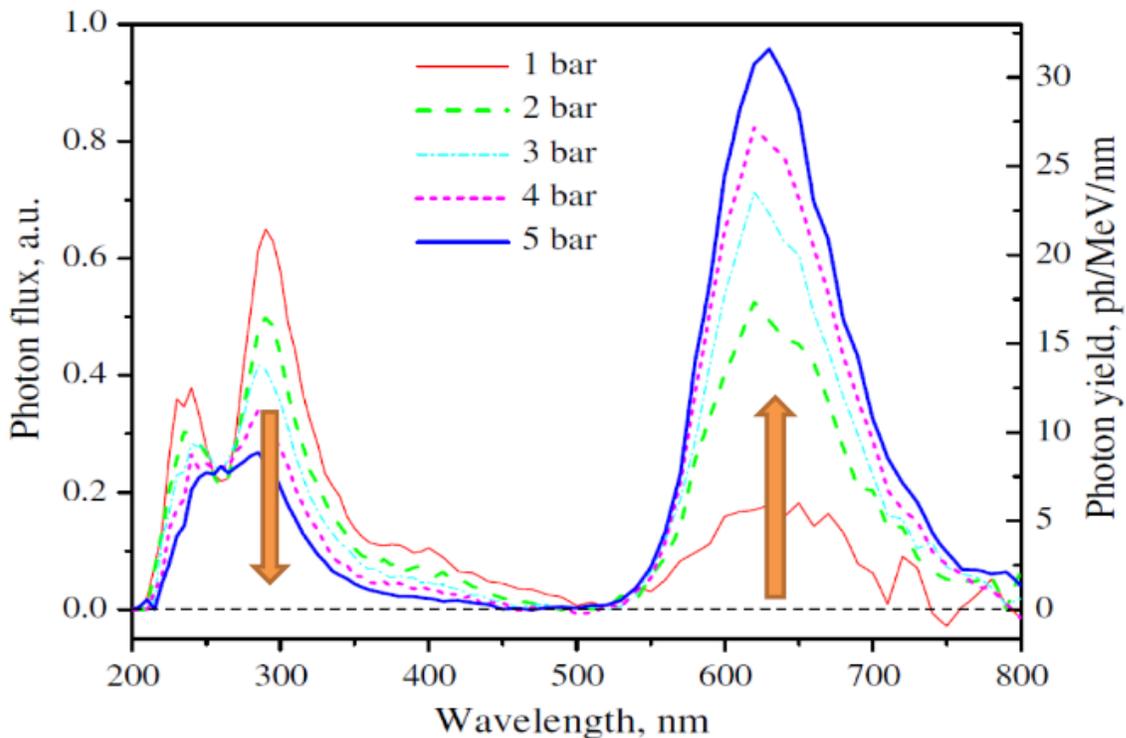


测试Micromegas探测器的系统

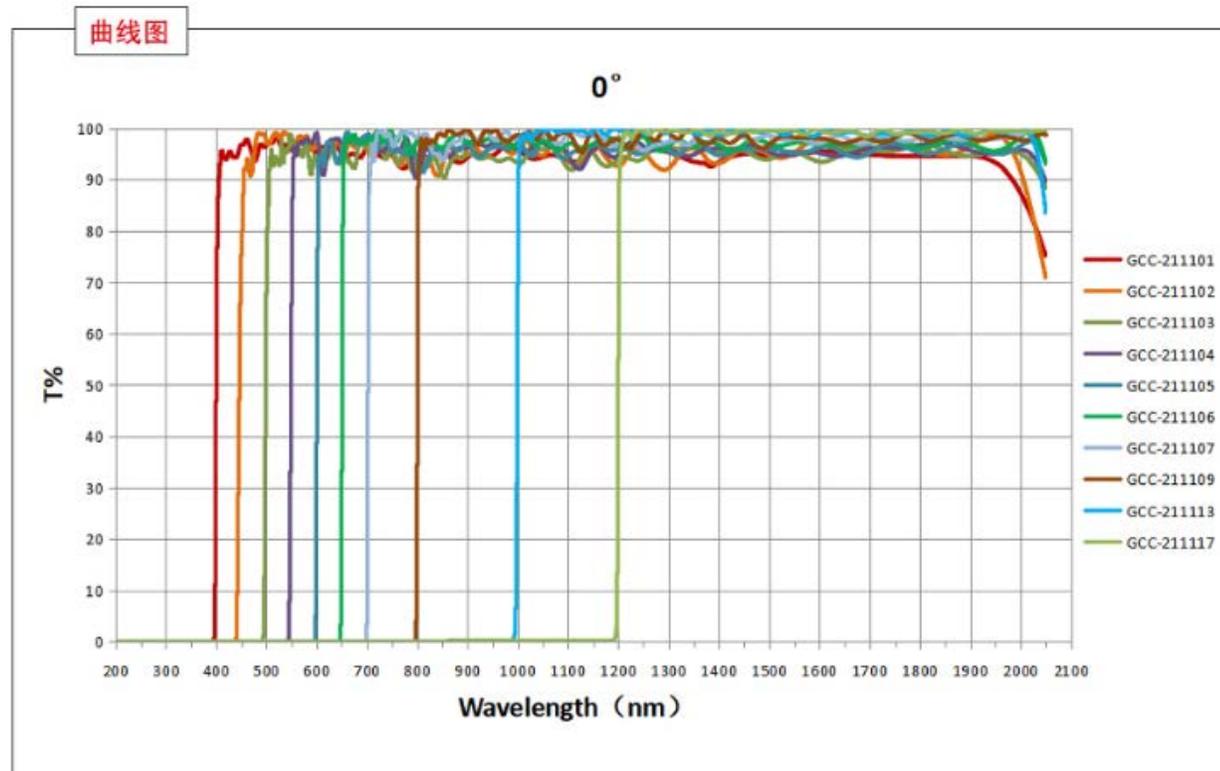


### 3、CF4发光测试实验分析——不同波长

- CF4 的初级闪烁非常快（有效衰减时间为 $<15\text{ ns}$ ）非常适合在时间投影室中用于 $T_0$ 触发
- **不同波长的选取，主要目标：**选取不同波长的范围，进行对比测量
  - 1atm的工作气体，纯化CF4工作气体（99.999%）
    - 400nm以上部分，透过率~95%
    - 小于400nm以下部分，透过率~95%

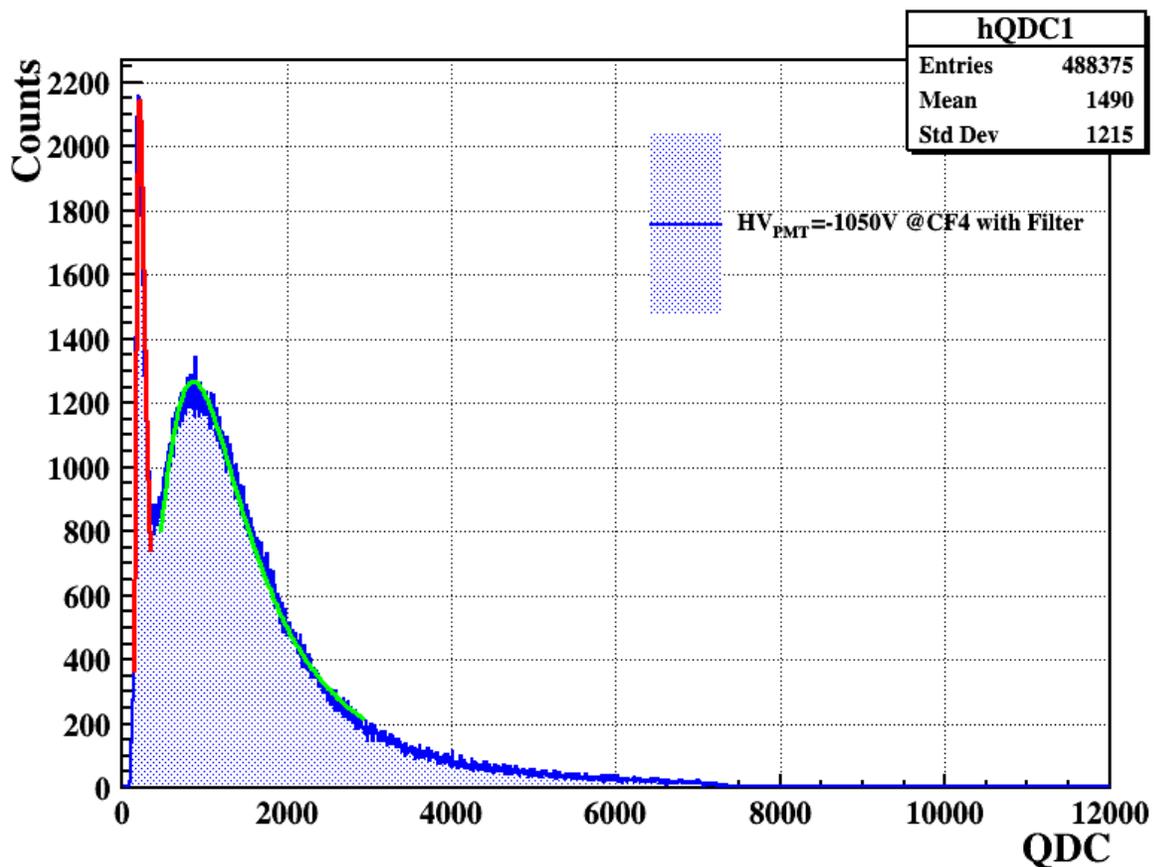


CF4气体的发光波长及产额

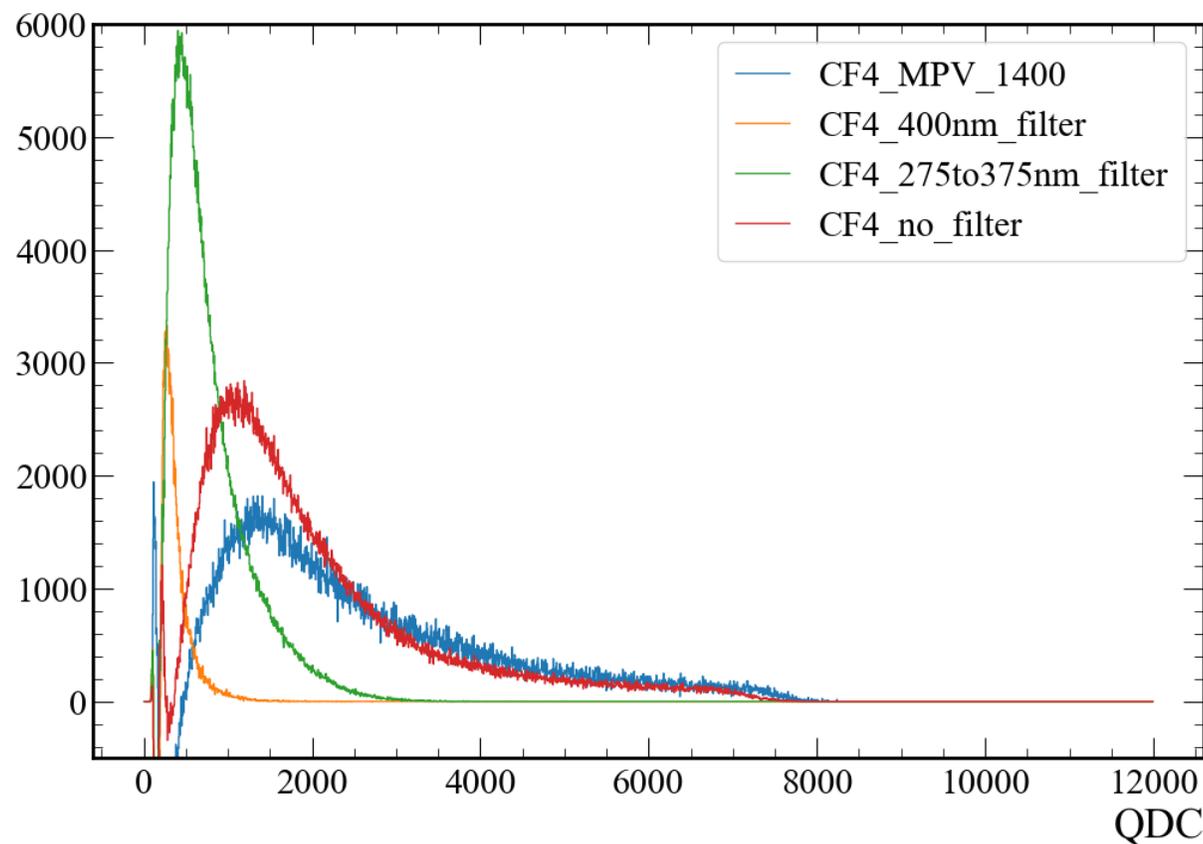


## 4、CF4发光研究 – 滤光片测试对比

- 滤波片方案测试对比
  - 有滤光片，单光子信号后无明显结构，滤光片只通过400nm以上波长，PMT探测效率以及本身发射400nm以上光子少。
  - 无滤波片，多光子信号部分出现。



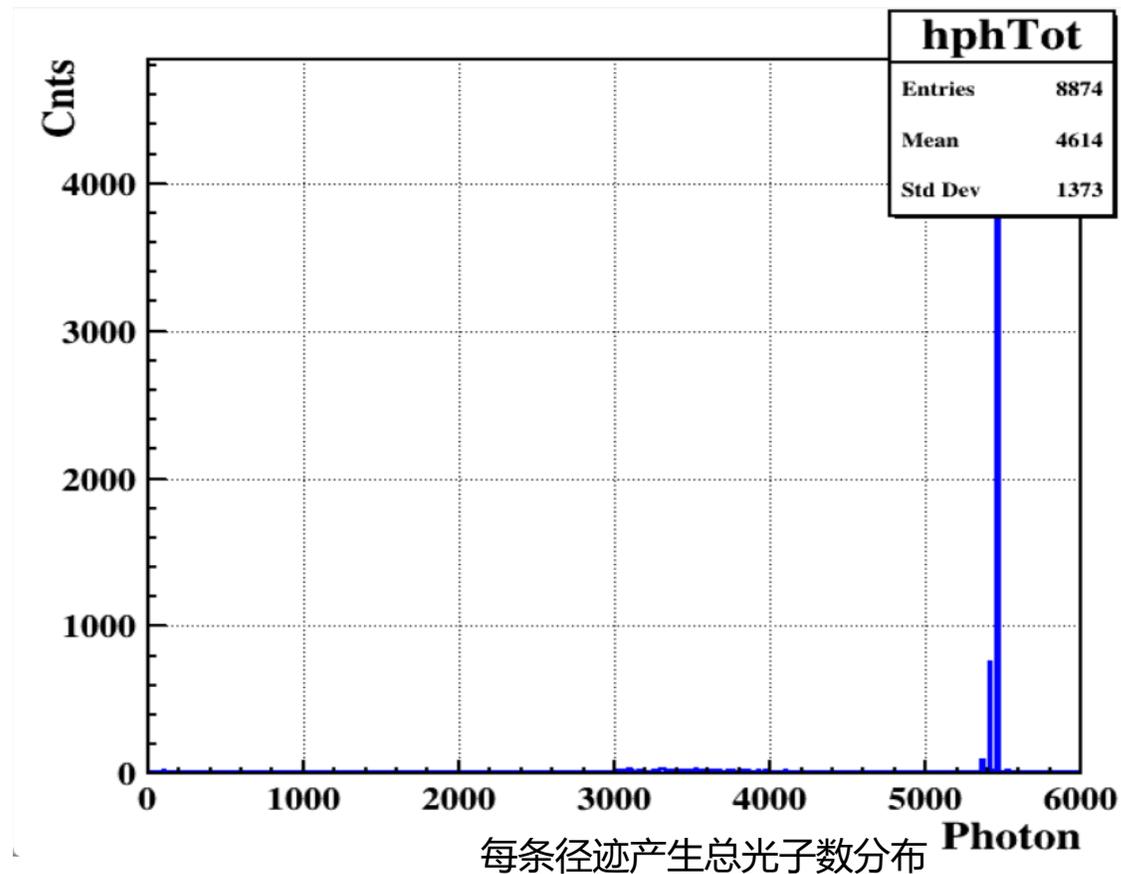
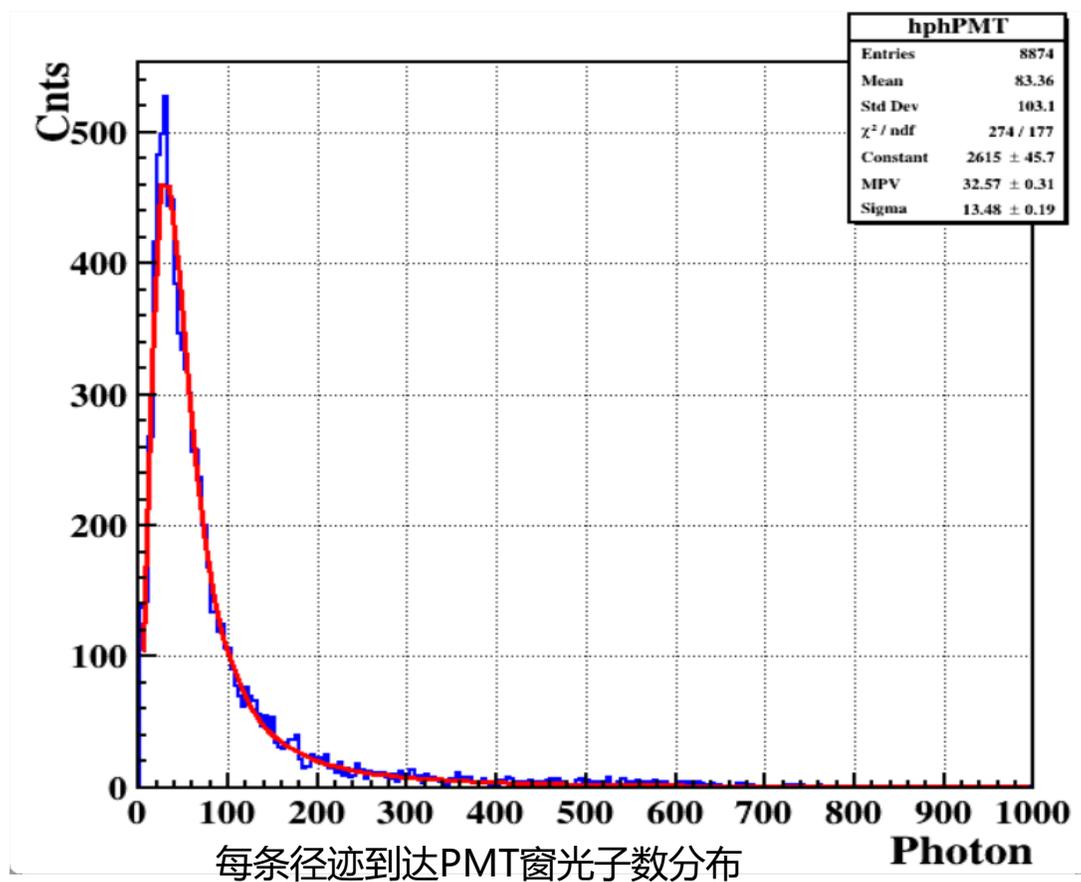
无滤波片



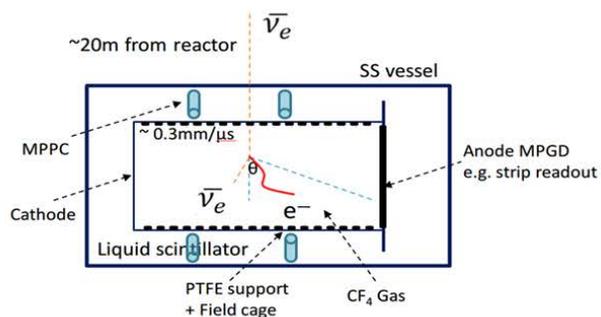
解谱后的结果

## 4、CF4发光研究 – 原初 $T_0$ 光电子估算

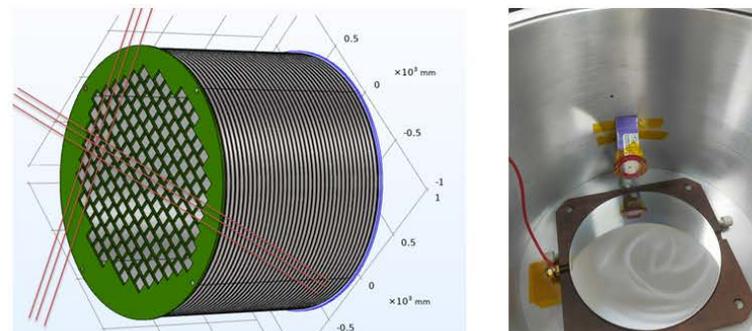
- 考虑探测器几何，考虑PMT对不同波长光子探测效率，估计每条径迹上产生的光子约1.8%到达PMT窗
- Number of photon in PMT window distribution，最可积值MPV~32.57，PMT探测效率按15%计算，实际探测光子数~10个
  - Light Yield : 1000 photon/MeV, 平均每条 $\alpha$ 径迹产生总的光子数 $phTot \sim Edep \times LightYield \sim 4600$
  - 该结果与MUNU和文献CF4的光电子结果相符



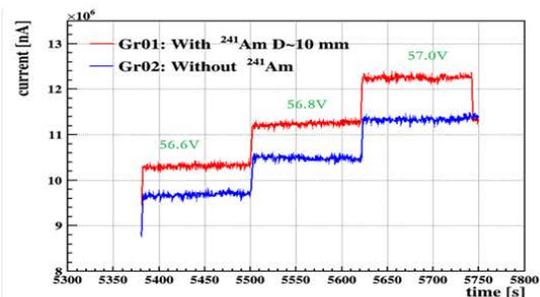
- 低本底高电子密度的气体作为靶材料：CF<sub>4</sub>@1-10atm，需要研究的关键：吸附控制和初始发光T<sub>0</sub>方案研究
  - **主要进展及结论1**：在0.2-1.0米漂移距离，实验研究CF<sub>4</sub>气体电子吸附（验证和确定：控制CF<sub>4</sub>纯度方案）
  - **主要进展及结论2**：1-1.2atm下，CF<sub>4</sub>在漂移距离上测量到T<sub>0</sub>信号（验证和确定：径迹起始时间方案）
- 为下一步中微子时间投影室总体设计和实现，完成了关键的实验确证



反应堆中微子时间投影室原理



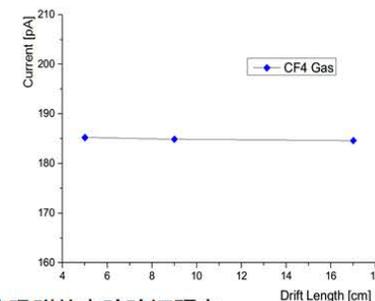
反应堆中微子时间投影室示意图及原型机



CF<sub>4</sub>气体中T<sub>0</sub>发光的实验验证研究



CF<sub>4</sub>气体中气体吸附的实验验证研究



**Many thanks!**