



MTPC探测器实验技术与实验测量研究进展

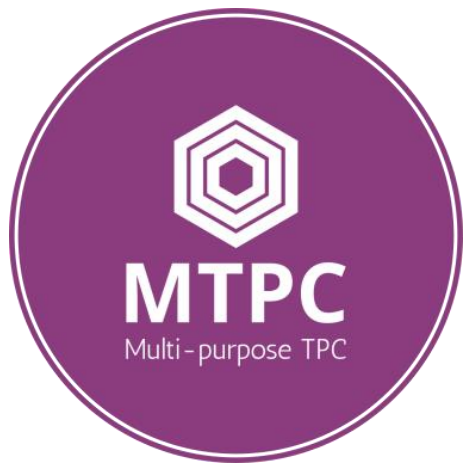
报告人：易晗

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

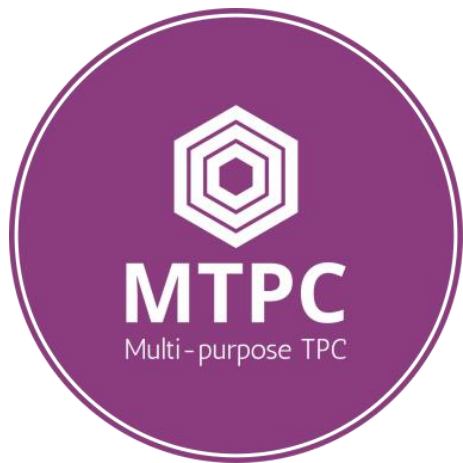
CSNS反角白光中子实验装置（第九届）用户研讨会

2025年7月23日@安徽·六安



报告内容

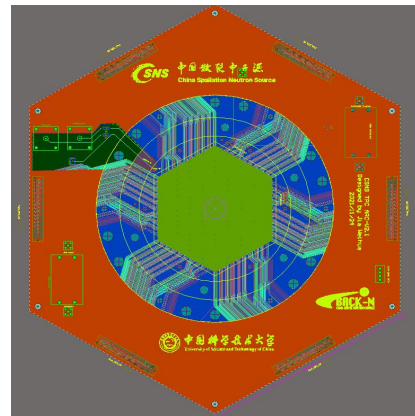
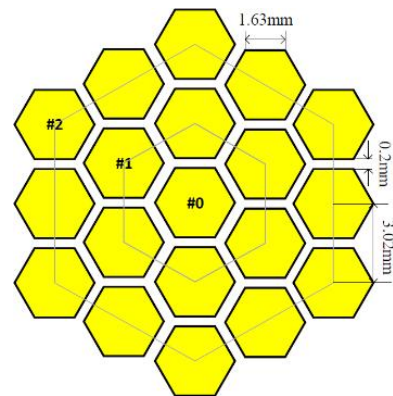
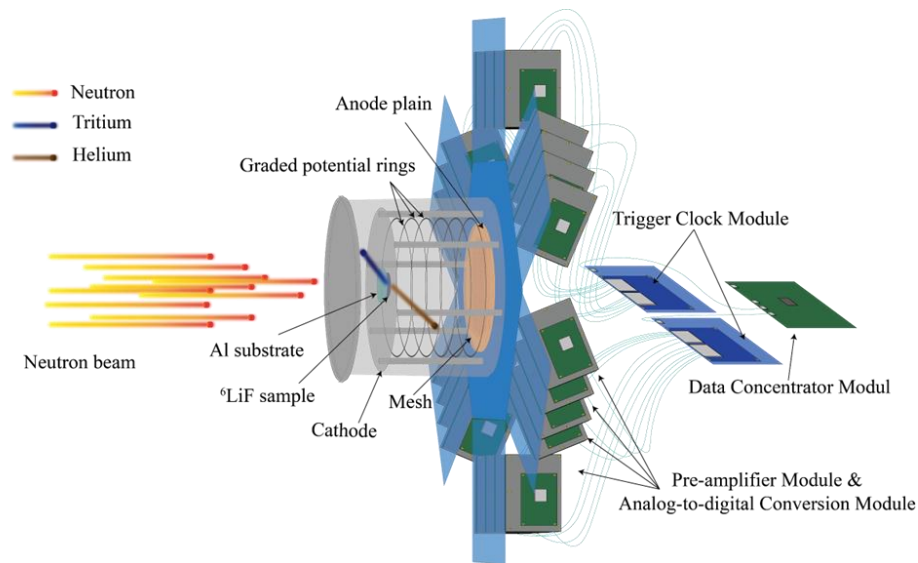
- MTPC概况
- 实验研究进展
- 关键技术研究
- 未来研究规划



报告内容

- MTPC概况
- 实验研究进展
- 关键技术研究
- 未来研究规划

探测器结构

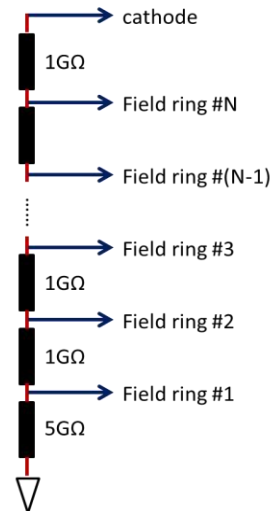
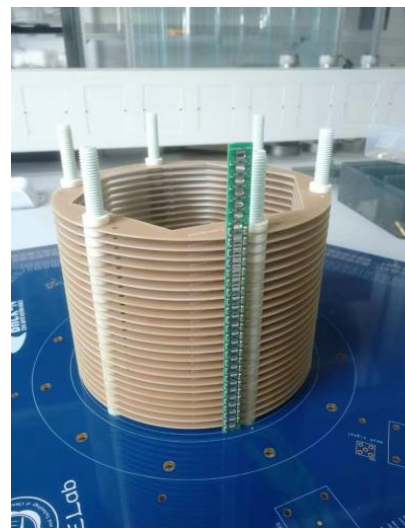
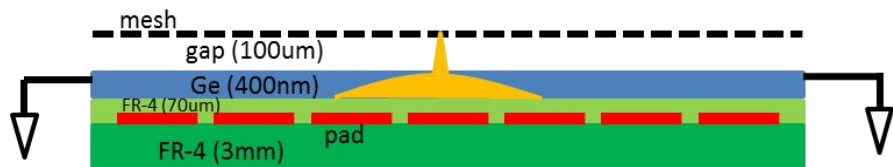


- 场笼结构为圆柱体，兼容单端双端读出模式,单端模式漂移区距离可调，适应不同实验需求
- 读出阵列采用六边形密堆结构,1519个阳极pad，每个pad边长64mil，阳极区边长约68mm

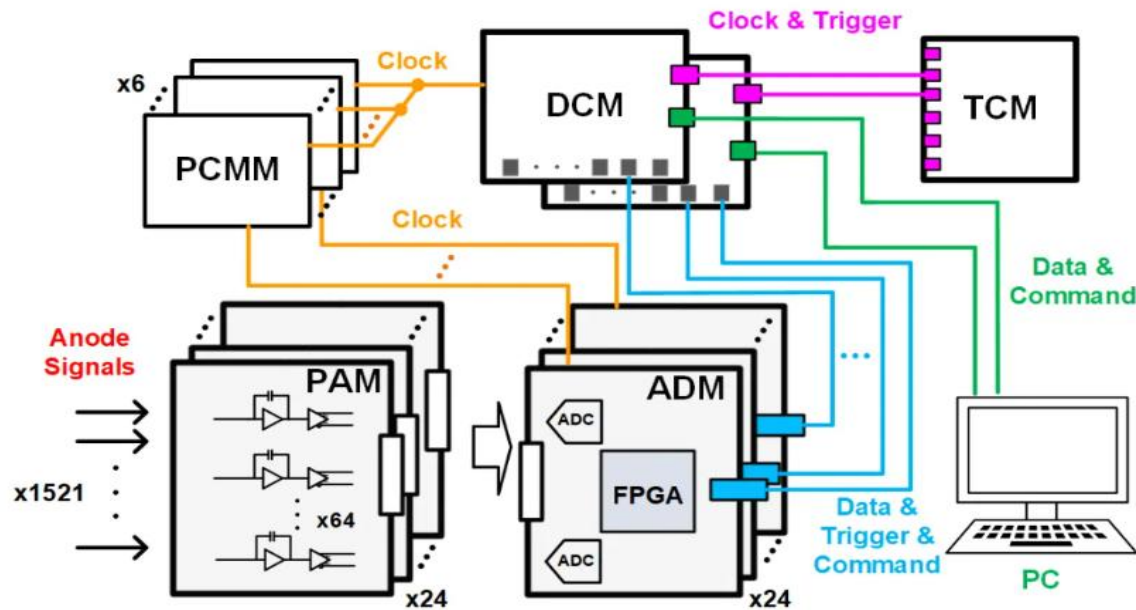
- Weihua Jia, You Lv, Zhiyong Zhang et al. Gap uniformity study of a resistive Micromegas for the Multi-purpose Time Projection Chamber (MTPC) at Back-n white neutron source. NIMA, 1039, 2022.
- Yang Li, Han Yi et al., Performance study of the Multi-purpose Time Projection Chamber (MTPC) using a four-component alpha source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1060 (2024) 169045.

探测器结构

- 热压接技术制作Micromegas增益结构@USTC, 阳极板表面镀400nm高阻锗层, 增加高压下的稳定性
- mesh参数: 不锈钢丝直径24 μm 、厚度25 μm 、LPI-325, 透过率55%、张力30N
- 增益区厚度100 μm , 支撑柱直径1mm, 间隔10mm
- 均压环采用PCB制作, 间隔5mm, 电阻值按照雪崩漂移场强比200配置, 对应最高电子透过率



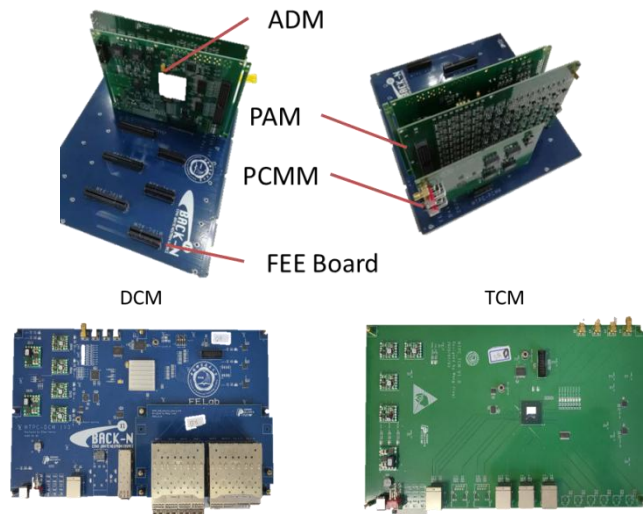
- J. Feng, Z. Zhang, J. Liu, B. Qi, A. Wang, M. Shao, Y. Zhou, A thermal bonding method for manufacturing micromegas detectors, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 989 (2021) 164958.
- J. Feng, Z. Zhang, J. Liu, M. Shao, Y. Zhou, A novel resistive anode using a germanium film for micromegas detectors, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1031 (2022) 166595.



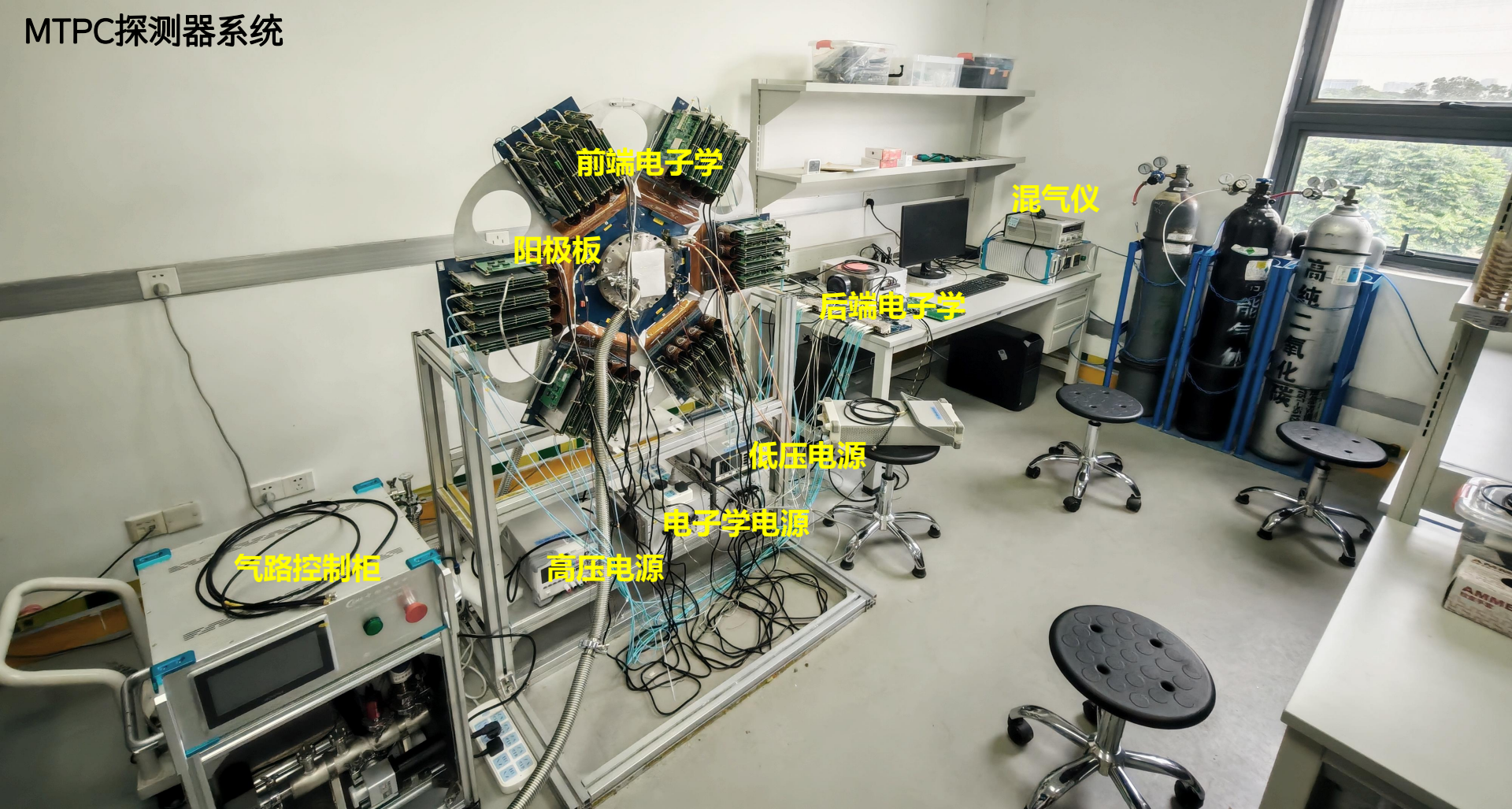
● 电子学系统主要参数：

- 共1536通道（MTPC使用1521通道）
- 波形采样频率：40MHz
- 触发采样窗宽度：1024采样点
- ADC位数：12bit

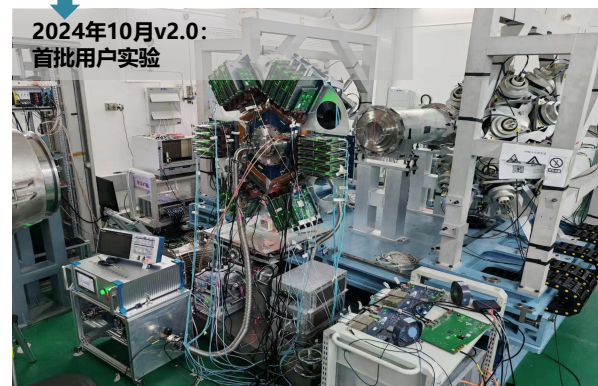
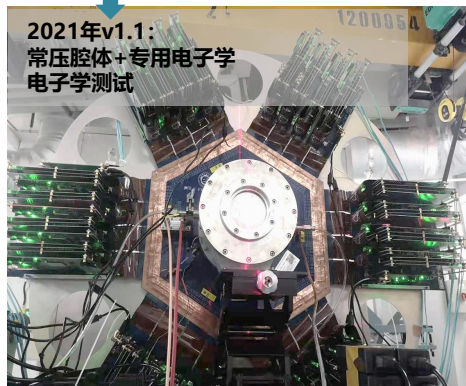
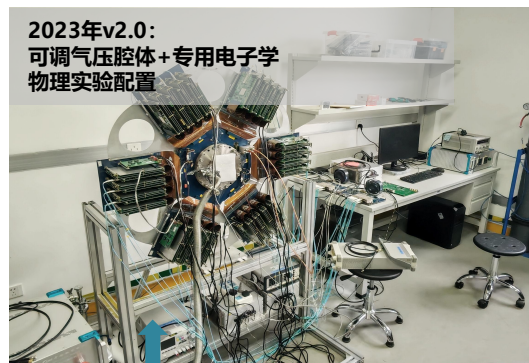
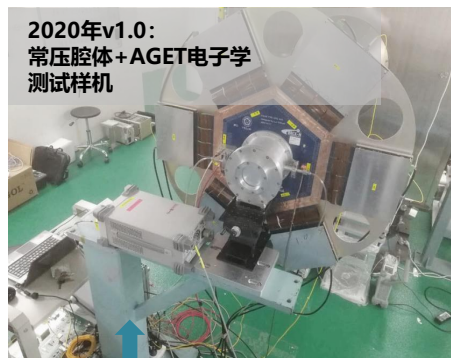
■ Z. Chen et al, Readout system for a prototype multi-purpose time projection chamber at CSNS Back-n, 2022 JINST 17 P05032



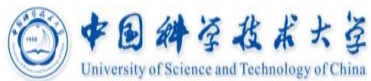
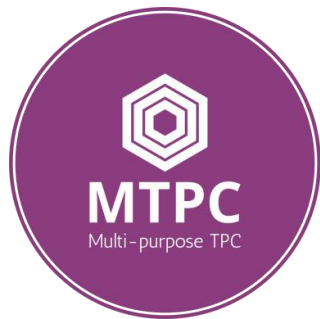
MTPC探测器系统

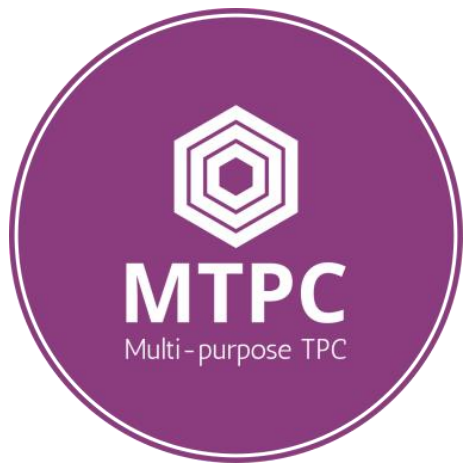


项目概况



MTPC研究团队





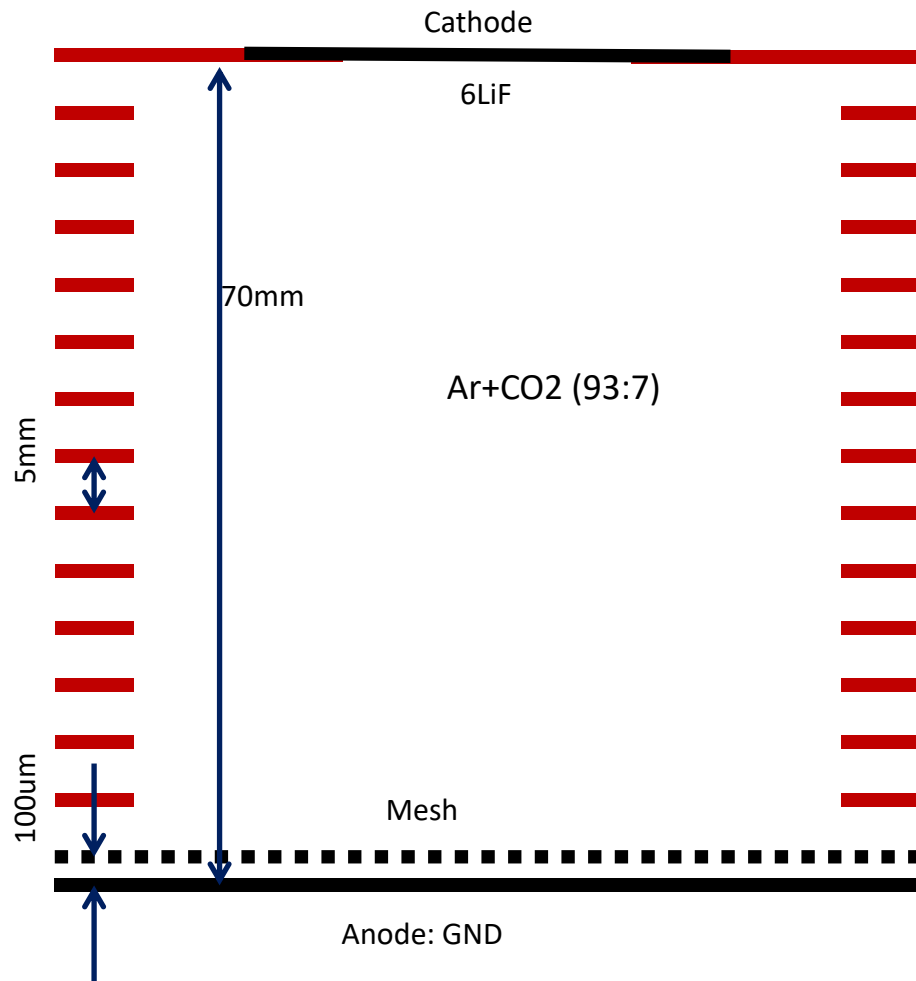
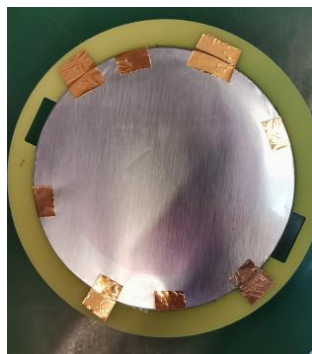
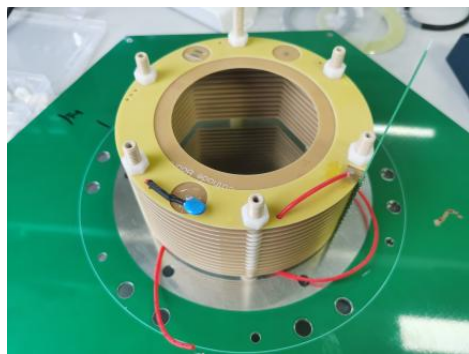
报告内容

- MTPC概况
- 实验研究进展
- 关键技术研究
- 未来研究规划

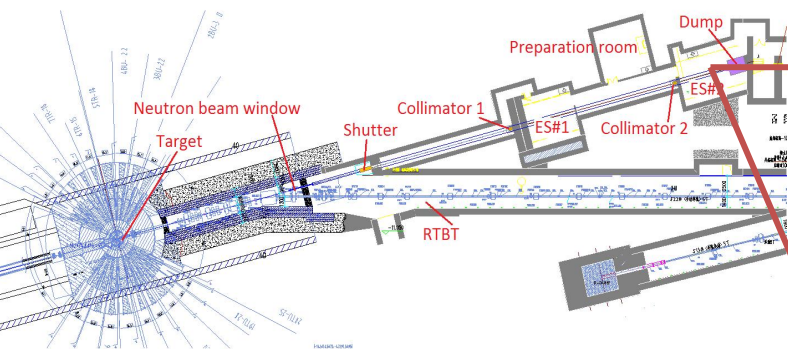
反应	实验时间
${}^6\text{Li}(\text{n},\text{t})$	2023年2月
${}^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$	2024年10月
$\text{H}(\text{n},\text{n})$	2024年10月
${}^{17}\text{O}(\text{n},\alpha)$	2024年10月

${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应测量

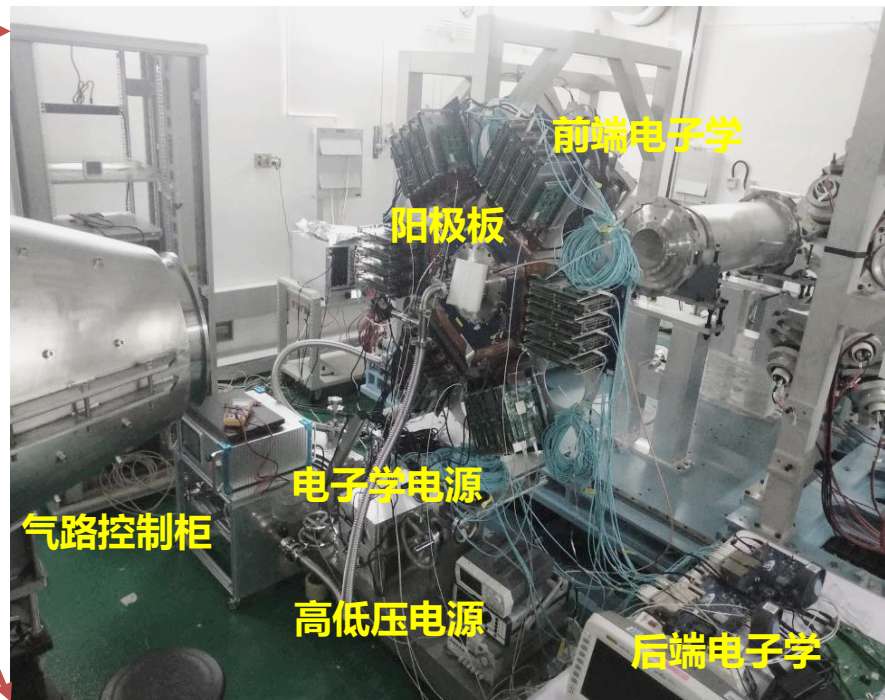
- 实验时间：2023年2月
- 漂移区距离70mm，阴极中心放置6LiF样品
- 样品参数：
 - ▣ 厚度560nm，Al衬直径89mm、厚度10.8um
 - ▣ 6Li丰度95%，6LiF面密度148ug/cm²、直径66mm



${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应测量



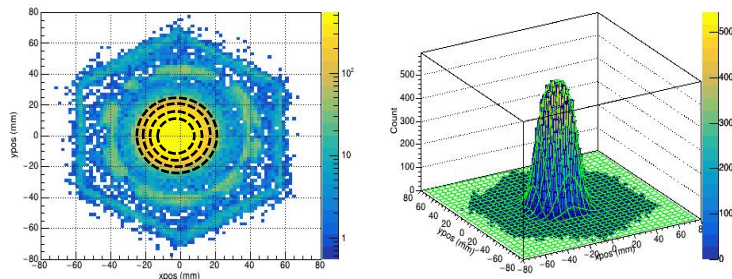
- MTPC位于厅二，阳极板距离散裂靶中心约77m
- 束斑：1mmGd-6cmPb- ϕ 12- ϕ 15- ϕ 40组合（加铅砖 ϕ 30）
 - ▣ 0.93bar气压：针对氚粒子进行测量（133h）
 - ▣ 0.5bar气压：针对 α 粒子进行测量（143h）



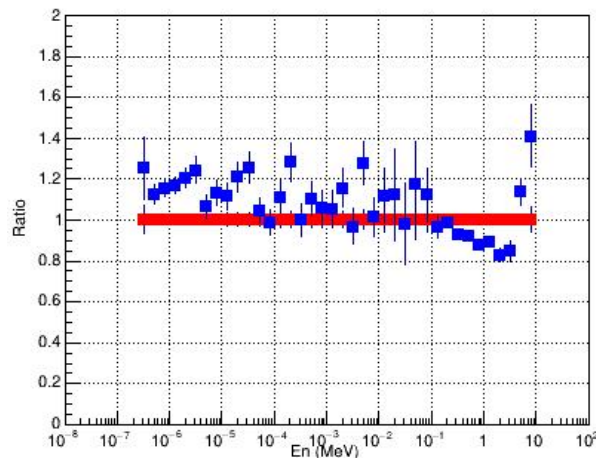
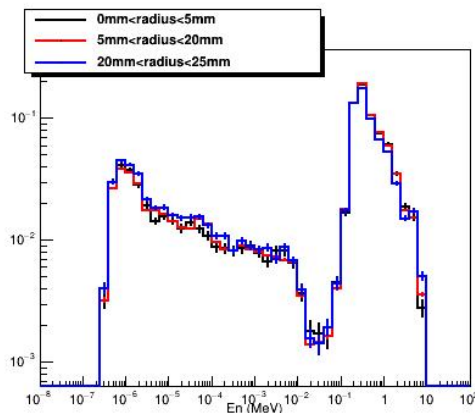
${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应测量

- 利用t和 α 粒子分析中子束斑特征参数
- 对比不同区域能谱，束核能谱比束晕能谱偏硬
- 详见“核数据与核物理”分会场：白灿报告

$$f(x,y) = B + \frac{A}{2} \left[\text{Erf} \left(\frac{r(x,y) + r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left(\frac{r(x,y) - r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right], \quad r(x,y) = \sqrt{\left(\frac{x - x_0}{e} \right)^2 + (y - y_0)^2}$$

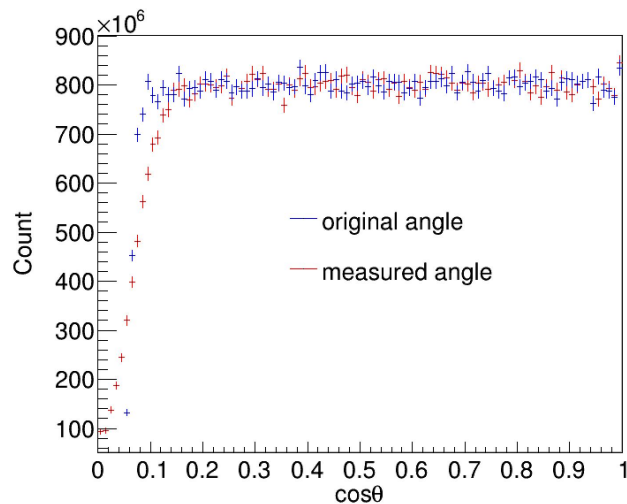
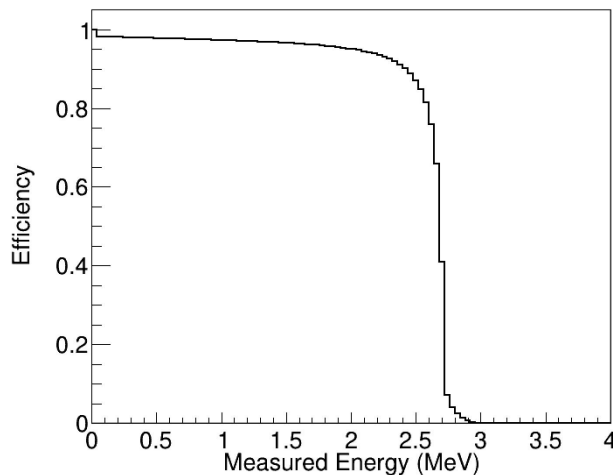
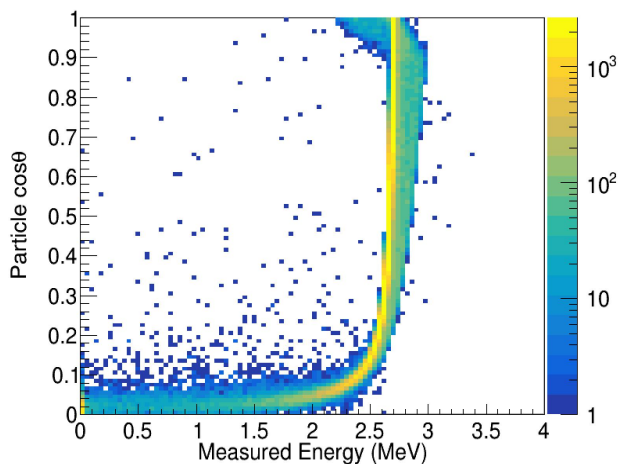


束斑中心(mm)	50%半径(mm)	边缘锐利度(mm)	XY半径比
(x_0, y_0)	r_0	σ	e
$(-2.95 \pm 0.05, 0.80 \pm 0.03)$	17.14 ± 0.01	4.95 ± 0.06	0.974 ± 0.005



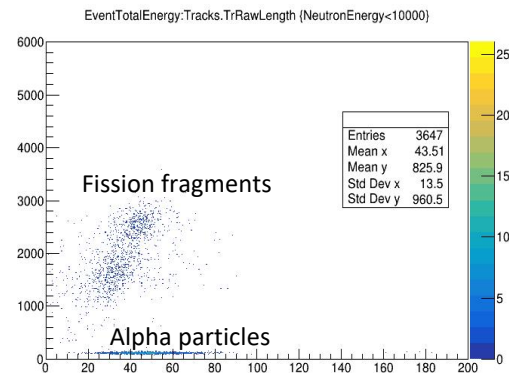
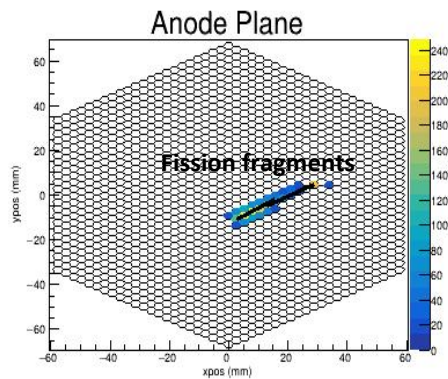
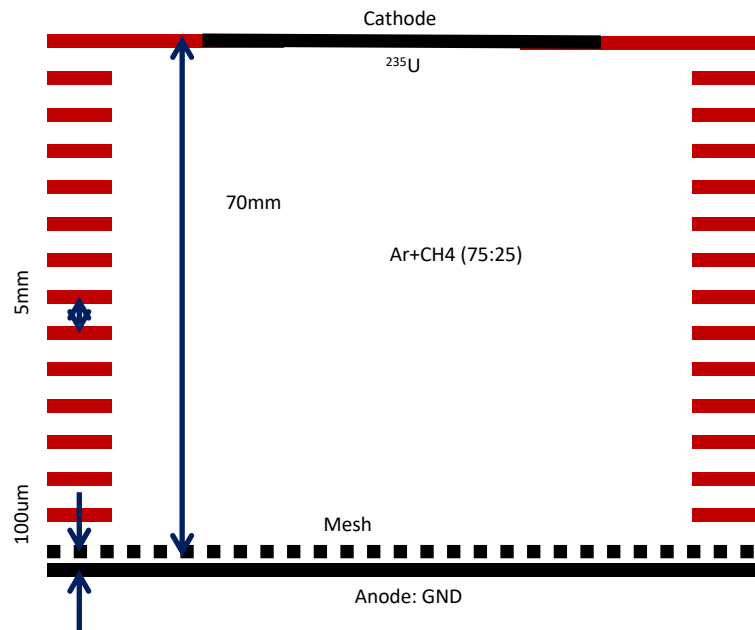
${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应测量

- 探测器效率研究
- 粒子角度较大时角度测量效率降低，极限测量角度为 $\cos\theta=0.06$
- 统计 $\cos\theta<0.06$ 事例数随测量能量的变化，找到测量能量下限 $E=2.2\text{MeV}$
- 测量能量大于 2.2MeV 的事例占比93.5%，测量角度的 $\cos\theta$ 分布与粒子角度符合
- 电子学效率模拟正在进行

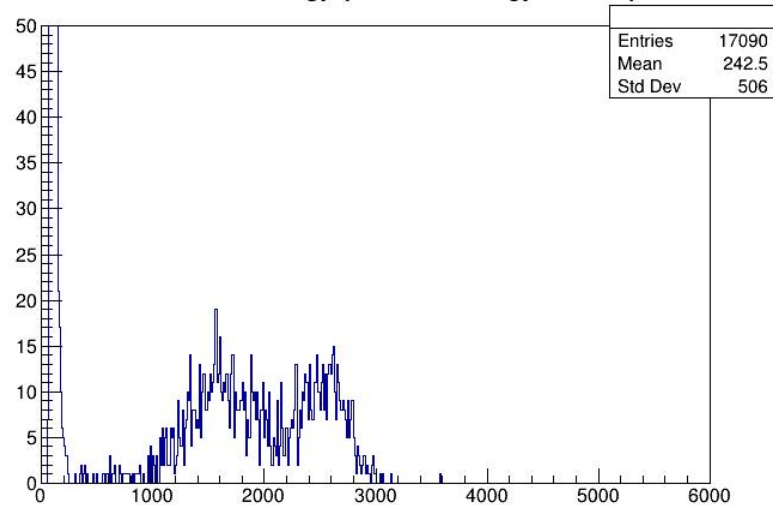


$^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 反应测量

- 实验时间：2024年10月
- 采用0.6bar气压进行测量
- 采用低Mesh电压减少 α 粒子计数率
- 采用能量射程二维关联对裂变碎片和 α 进行鉴别

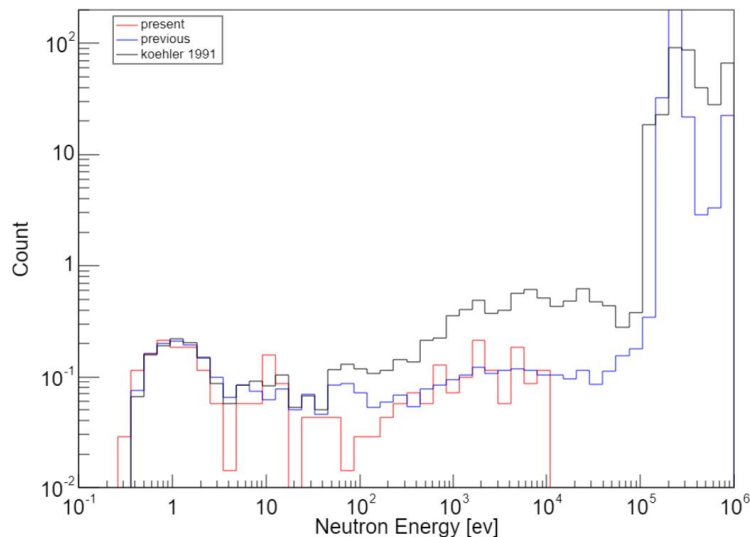
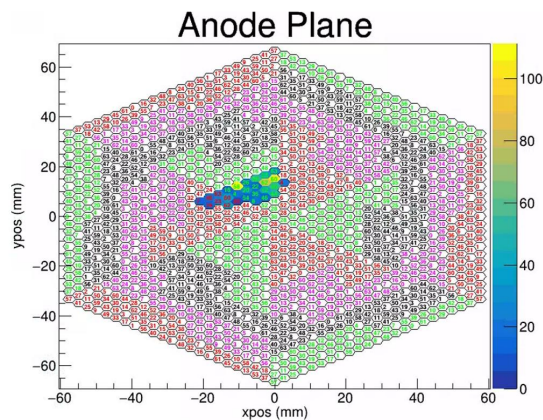
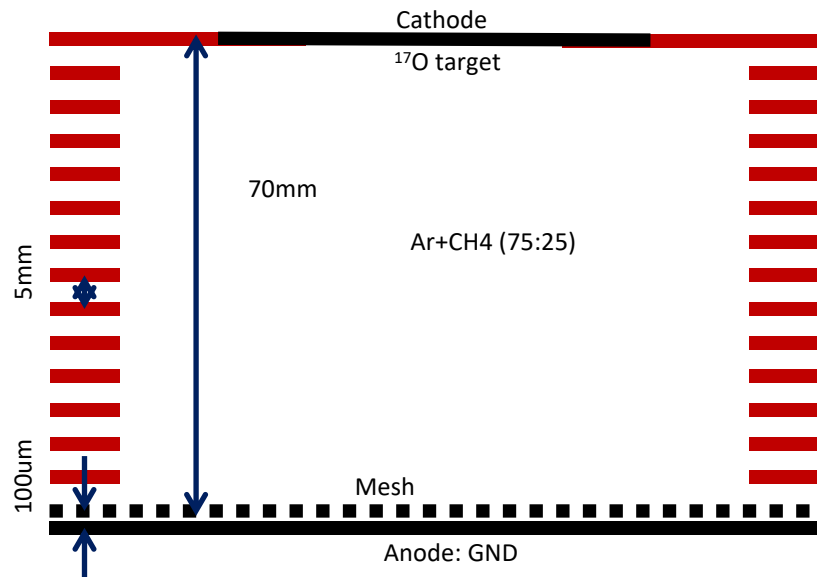


EventTotalEnergy {NeutronEnergy<10000}



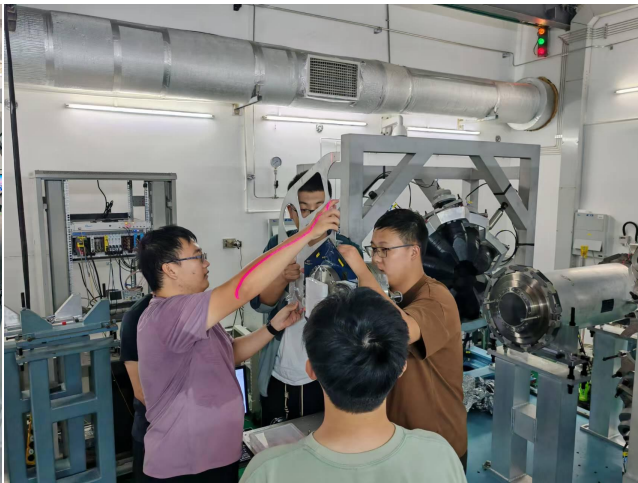
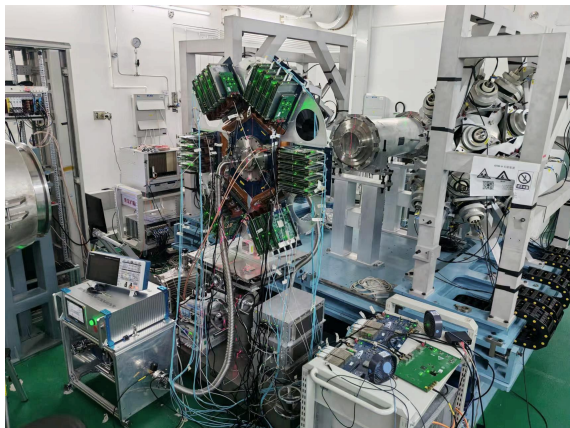
$^{17}\text{O}(n,\alpha)$ 反应测量

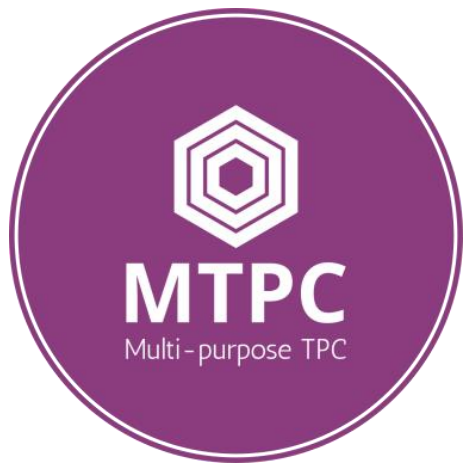
- 实验时间：2024年10月
- 前期已采用SiC探测器测量
- 采用MTPC开展测量提高统计量减小误差
- 采用0.15bar气压开展测量
- 初步结果验证了SiC测量结果的准确性
- 详见“核数据与核物理”分会场：刘亦辉报告



束流实验

- 束流实验集锦





报告内容

- MTPC概况
- 实验研究进展
- 关键技术研究
- 未来研究规划

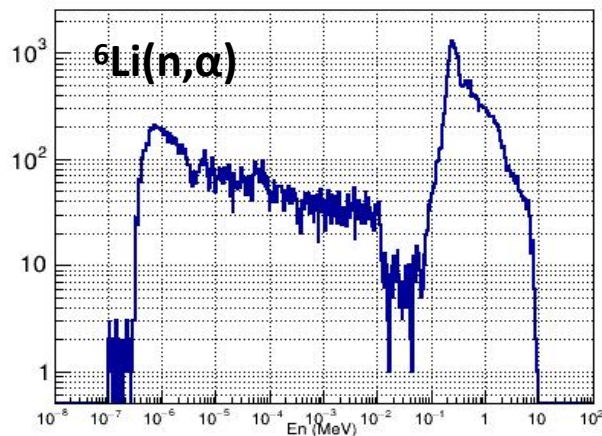
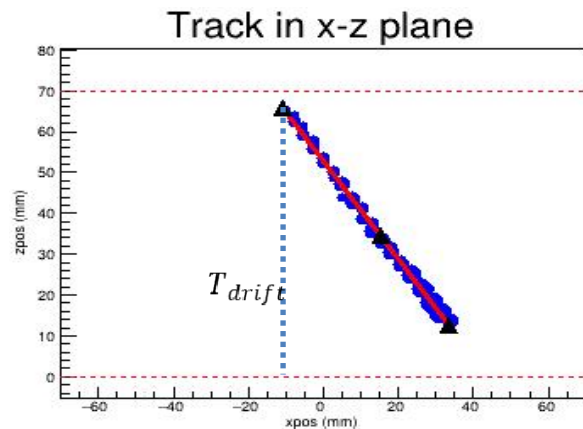
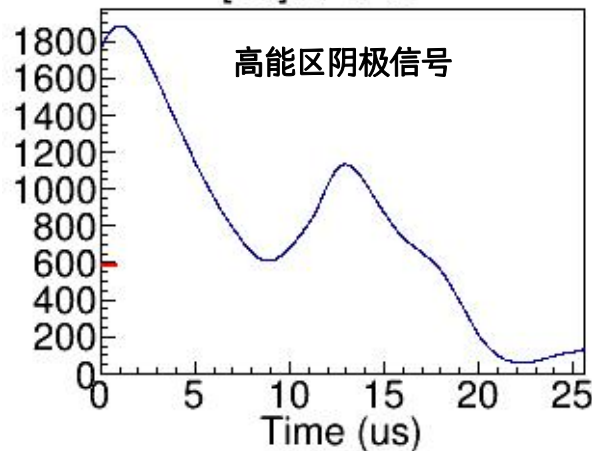
关键技术研究

- MTPC已开展实验与规划实验，最大的技术制约在高能区的测量
 - ▣ γ -flash干扰
 - ▣ 高计数率
 - ▣ 多重事例叠加
 - ▣ 径迹重建
 - ▣ 时间分辨
 - ▣ 能量分辨
- 前期的实验技术和实验方法，有效测量的中子能区上限为百keV
- 针对以上技术问题，开展了关键技术研究
 - ▣ 扩散函数积分算法
 - ▣ 信号成形卷积算法
 - ▣ 径迹端点定时算法
 - ▣ 高能区径迹重建算法
 - ▣ 电子学信号成形算法
 - ▣ 电子学死时间修正

径迹端点定时方法

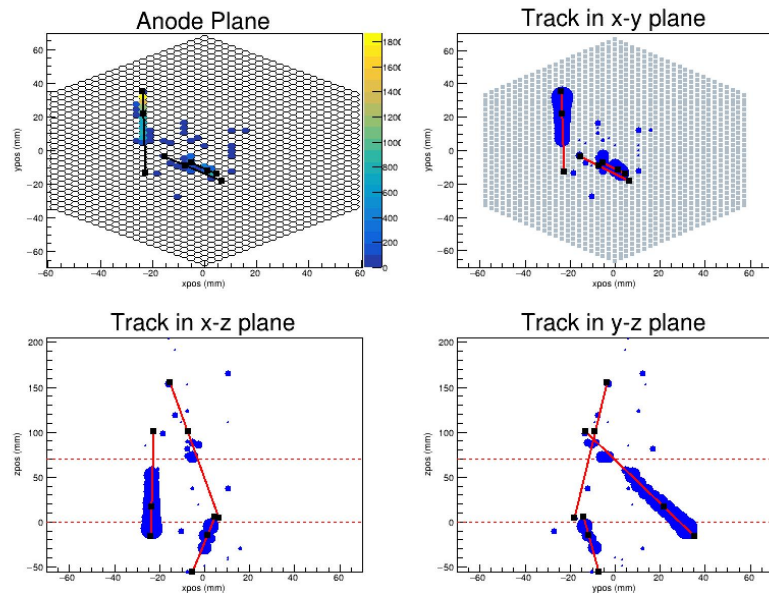
- 已有方法：通过阴极信号定时得到TOF
- 阴极定时问题：噪声大、多事例叠加、高能区饱和
- 新方法：通过径迹顶点得到TOF值
- 假设：径迹从阴极表面出射，针对固体样品
- $TOF = T_{vertex} - L/V_{drift}$
- 中子能量测量区间扩展至MeV能区
- 详见“核数据与核物理”分会场：白灿报告

[40]: 1-3-57



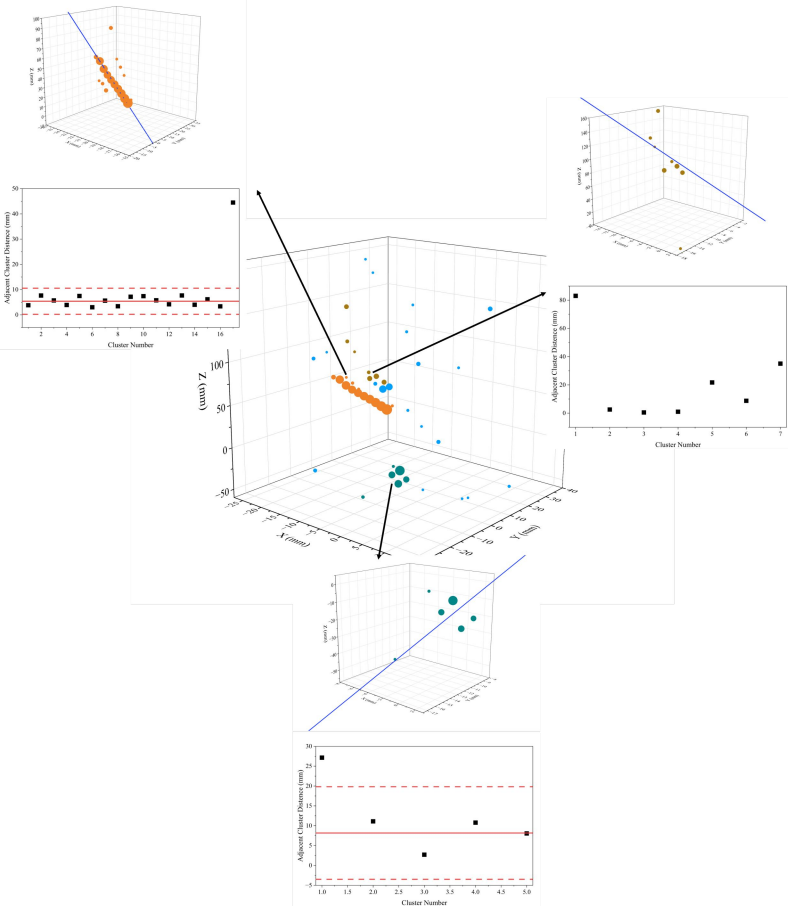
高能区径迹重建方法

- 高能区中子通量高且有 γ flash影响，hit点数较多，
- 前期的径迹查找算法，未判断hit点的连续性
- 无关hit点误重建为同一径迹，造成高能区事例重建的误差

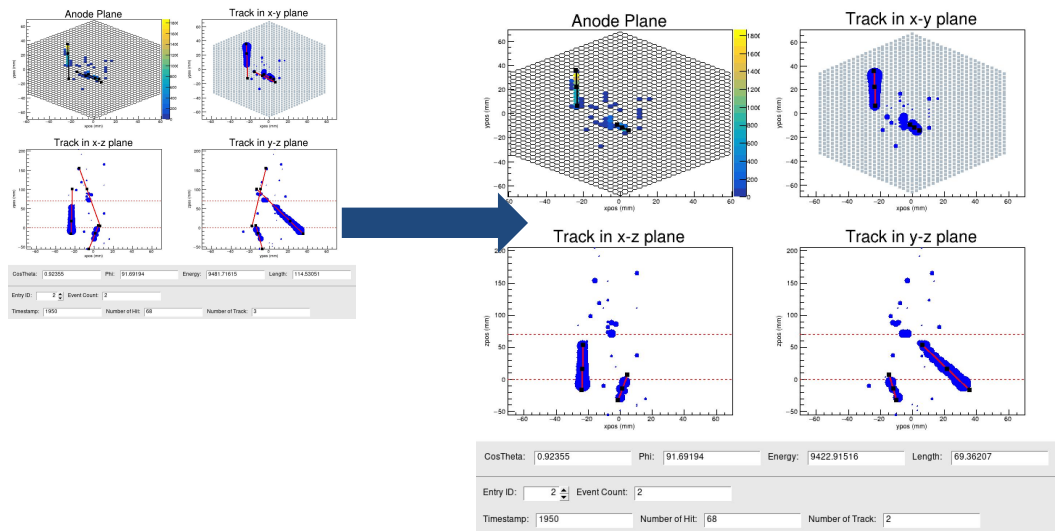


CosTheta:	0.92355	Phi:	91.69194	Energy:	9481.71615	Length:	114.53051
Entry ID:	2	Event Count:	2				
Timestamp:	1950	Number of Hit:	68	Number of Track:	3		

高能区径迹重建方法

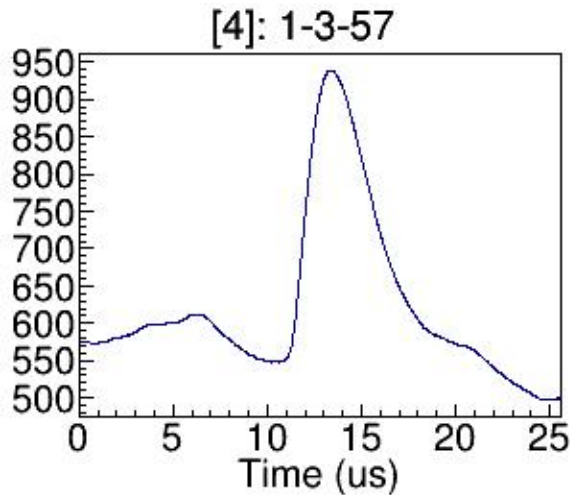
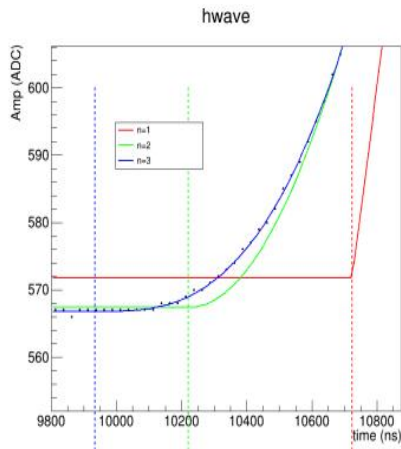
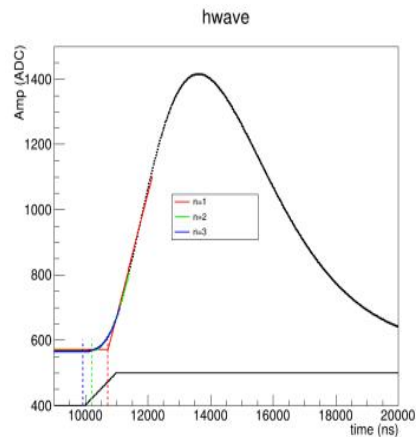
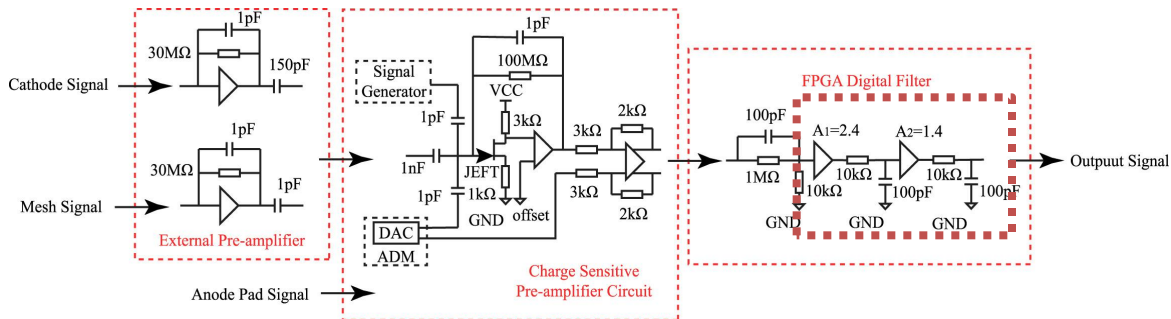


- 增加孤立hit点的排除算法：
- 通过Hough变换选中可能的hit点，hit点按映射到直线z轴位置排序，判断相邻pad的距离是否存在统计偏离
- 可对 γ flash事例进行筛选
- 提高径迹重建准确率



电子学信号成形算法

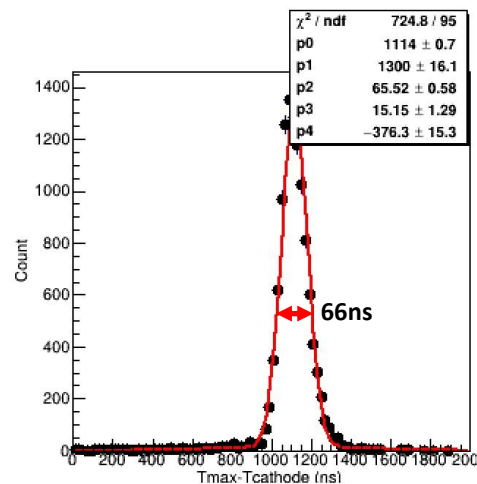
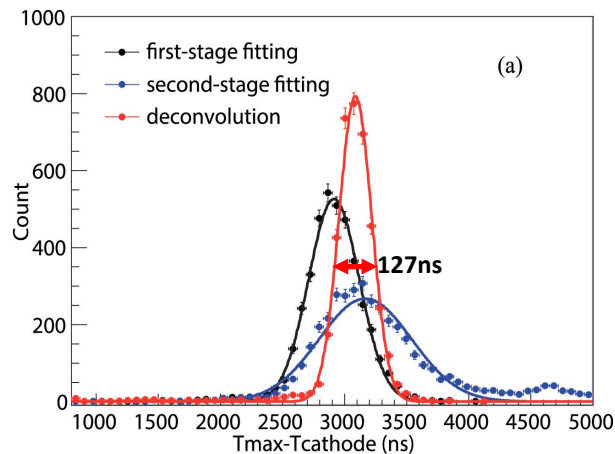
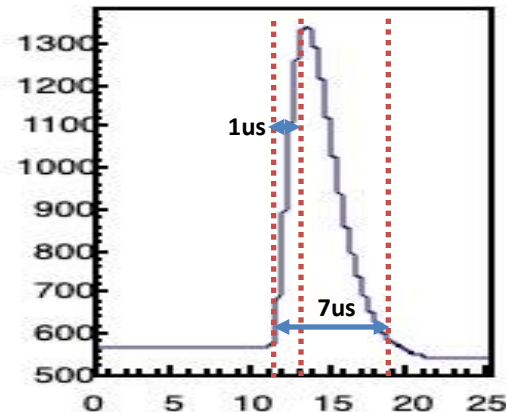
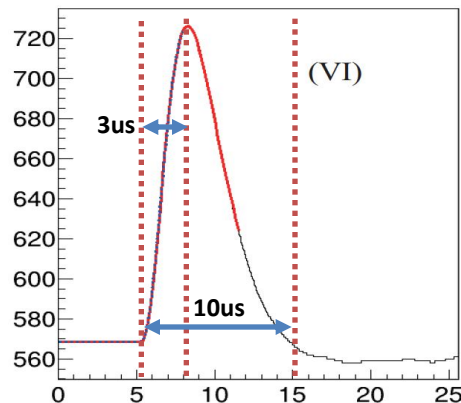
- 电子学FPGA逻辑中设计了2级RC滤波，带来波形分析的问题：
- 2级RC滤波造成信号前沿变慢，影响定时精度
- RC滤波时间常数(带宽) 设置不合适，降低了高频信号幅度且无法过滤低频噪声，造成信噪比下降影响能量分辨和时间分辨



■ Hongkun. Chen et al, Improving timing precision of the Multi-purpose Time Projection Chamber (MTPC) with waveform deconvolution technique, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A Volume 1080, November 2025, 170751

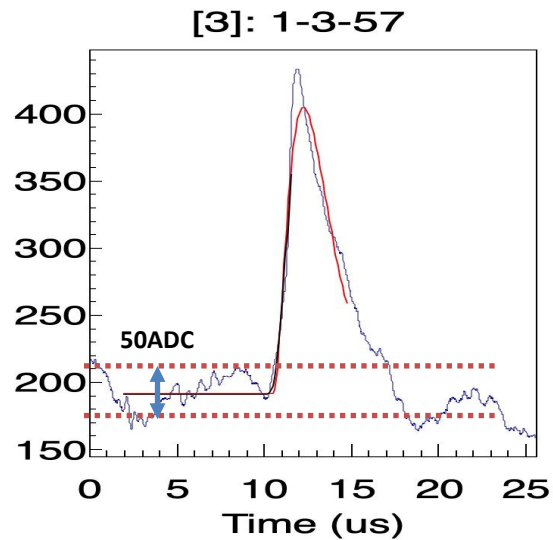
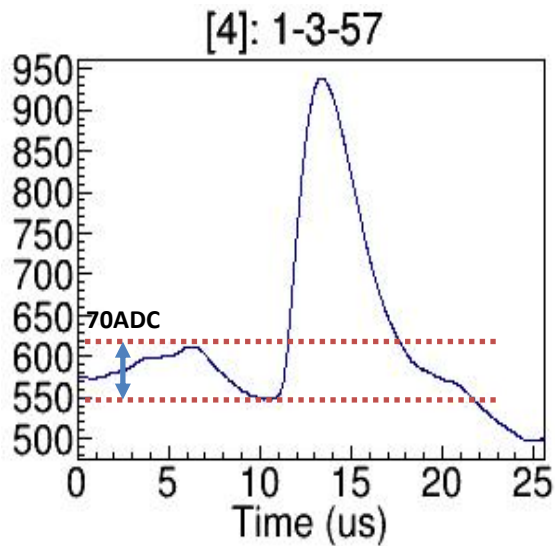
电子学信号成形算法

- 在FPGA逻辑中取消2级RC滤波：
- 提升信号前沿速度，减小脉冲宽度，提高时间分辨和计数率



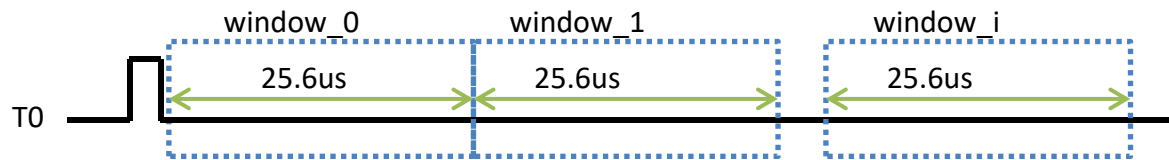
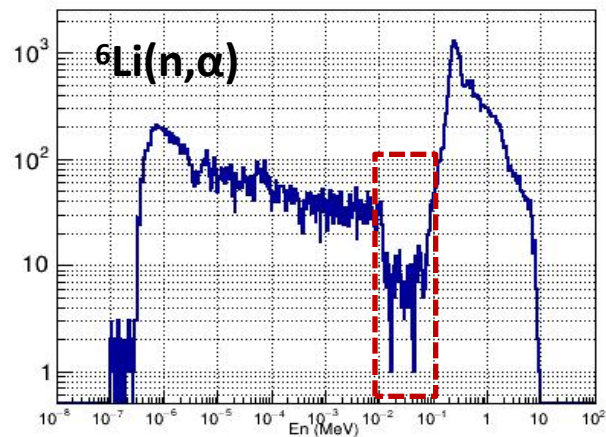
电子学信号成形算法

- 在FPGA逻辑中取消2级RC滤波：
- 提高信噪比，提高能量分辨



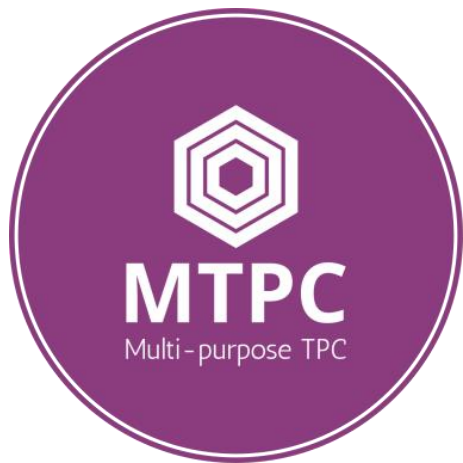
电子学死时间修正

- 已开展实验中，电子学为常规触发模式，高能区计数率较高带来死时间问题
- 为得到准确高能区计数率谱，需要对死时间影响进行修正 (待开展)
- 新版电子学逻辑：增加高能区强制双触发功能，保证高能区数据有效采集



关键技术研究：小结

- 已开展的实验： ${}^6\text{Li}(\text{n},\text{t})$ 、 ${}^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 、np散射、 ${}^{17}\text{O}(\text{n},\alpha)$
- MTPC已开展实验与规划实验，最大的技术制约为高能区的测量方法
- 针对高能区测量的难点问题，开展了关键技术研究，各难点问题均已有可行的解决方法
- 为MTPC已开展实验的数据分析和后续实验规划，打下了坚实的技术基础
- 可将MTPC的高精度测量能区扩展至MeV及更高能区，充分发挥MTPC的测量技术优势



报告内容

- MTPC概况
- 实验研究进展
- 关键技术研究
- 未来研究规划

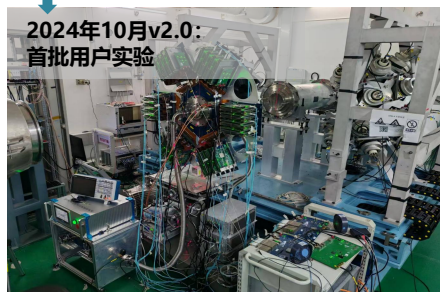
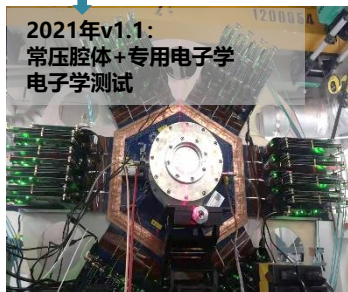
未来研究规划

- 已开展的实验： ${}^6\text{Li}(n,t)$ 、 ${}^{235}\text{U}(n,f)$ 、np散射、 ${}^{17}\text{O}(n,\alpha)$
- 采用最新的分析方法和模拟方法，对实验数据进行更详细深入的分析研究，提升数据质量

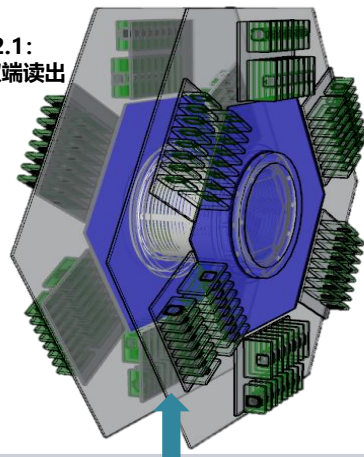
反应	实验时间
${}^6\text{Li}(n,t)$	2023年02月
${}^{235}\text{U}(n,f)$	2024年10月
$\text{H}(n,n)$	2024年10月
${}^{17}\text{O}(n,\alpha)$	2024年10月

未来研究规划

- 探测器发展规划：升级探测器为双端读出模式



2026~2027年v2.1:
可调气压腔体+双端读出
4 π 测量实验配置



未来研究规划

- 基于MTPC的双端读出模式配置，规划新实验并开展实验测量

反应类型	反应道	实验进展
标准截面	${}^6\text{Li}(n,t)$	2023
	$\text{H}(n,n)$	2024
	${}^{235}\text{U}(n,f)$	2024
	${}^{10}\text{B}(n,\alpha)$	规划
核天体物理	${}^{17}\text{O}(n,\alpha)$	2024
	${}^{25}\text{Mg}(n,\alpha)$	规划
重要反应	$n + {}^7\text{Li} \rightarrow t + n + \alpha$	规划
	$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow t + \alpha + \alpha$	规划
	${}^{239}\text{Pu}(n,f)$	规划

ND2025 16TH NUCLEAR DATA FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY CONFERENCE
JUNE 27-30TH, 2025, SUDBURY, ONTARIO, CANADA

The expansion of TPCs in fission

3D tracking capability

NIFFTE: Neutron Induced Fission Fragment Tracking Experiment

TPC Observables:

- Neutron time-of-flight
- 3D ionization profile:
 - Track length, energy & direction
 - Track origin (vertex) and end (Bragg peak)

Physics output: *Hensle et al., PRC, 2020*

- Neutron energy
- Cross section
- Mass distribution
- Charge distribution
- Angular distribution
- Anisotropy

More important:

- Control of systematics

[@NIFFTE
 @CSNS Back-n
 @

14

A group of five mountaineers are seen from behind, ascending a steep, snow-covered mountain slope. They are wearing colorful outdoor gear and using ice axes and ropes. The background features jagged, snow-capped mountain peaks under a clear blue sky with some wispy clouds. The snow on the slope is marked with tracks from previous ascents.

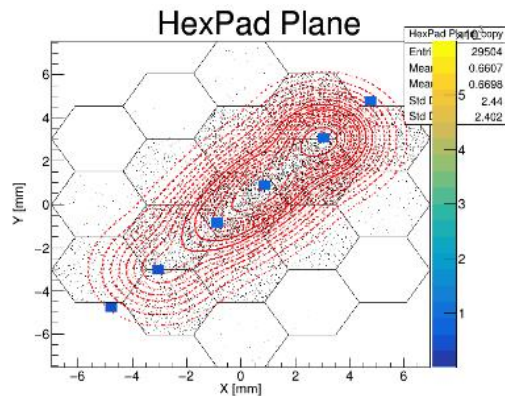
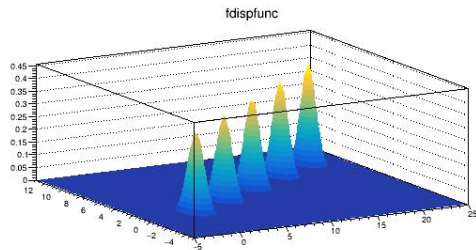
感谢各位专家同行对MTPC项目的支持！
期待更多成员加入MTPC实验研究团队！

谢谢！

扩散函数积分算法

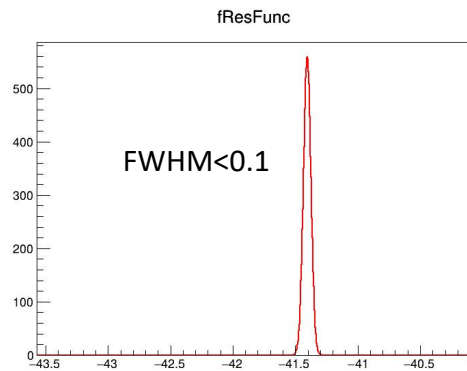
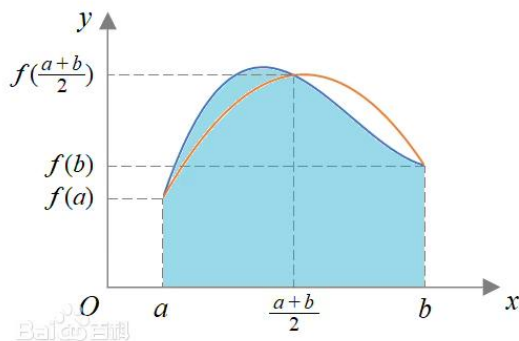
- 电荷在阻性层的扩散过程由扩散函数描述
- pad的电荷波形由扩散函数在t时刻的二维积分得到
- 最早采用随机抽样方法在六边形区域进行积分
- 抽样方法计算量大耗时长

$$f(x, y, t) = \left(\frac{RC}{4\pi t} \right) e^{-RC(x^2+y^2)/4t}$$



- 尝试使用辛普森积分算法;
- 修改后的bin大小 (约0.12mm) 不满足远小于高斯分布宽度的需求, 不适配扩散函数的特征尺度

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a) = \frac{b-a}{6} [f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b)]$$



扩散函数积分算法

$$f(x, y, t) = \left(\frac{RC}{4\pi t} \right) e^{-RC(x^2+y^2)/4t}$$

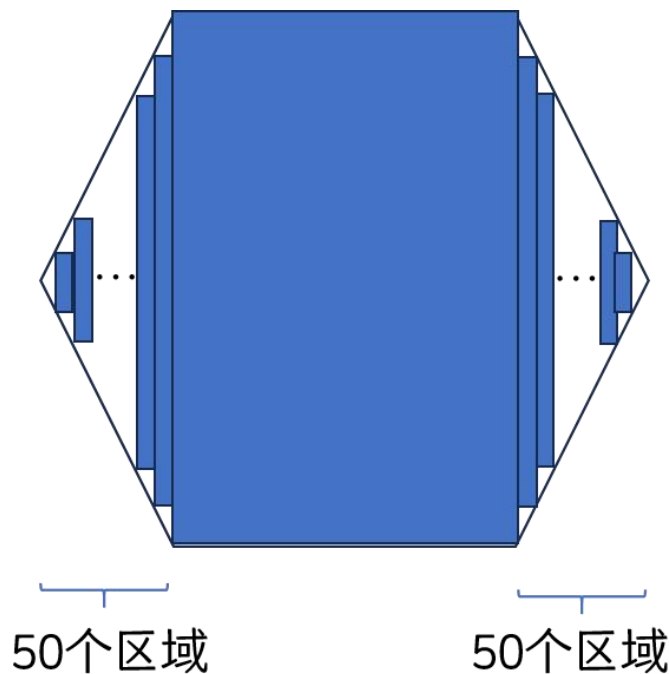
- 扩散函数中 x 、 y 相互独立：
- 坐标平移、拆分后，一维分布为：

$$f(x, t) = \sqrt{\frac{\tau}{4\pi t}} e^{-\tau(x-\mu)^2/4t}$$

- 任意区间的积分为

$$F(b) - F(a) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{b - x_0}{2\sqrt{t/\tau}} - \operatorname{erf} \frac{a - x_0}{2\sqrt{t/\tau}} \right)$$

- 对一个Pad划分为 (100+1) 个区间进行积分，如右图
- 将六边形区域的积分转换为误差函数的计算，提升计算速度



信号成形卷积算法

- 前期采用root的TF1Convolution类进行卷积
- 方便代码开发，但是需要有TF1的转换过程，效率低速度慢
- 直接数值卷积，提升卷积计算速度

