



白光中子源MTPC阻性Micromegas探测器的气隙均匀性研究

报告人：吕游

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

2022年高能所博士后学术论坛

报告概要

- 白光MTPC研究背景
- 阻性Micromegas探测器气隙均匀性研究
 - 模拟研究
 - 实验刻度
- 总结

研究背景

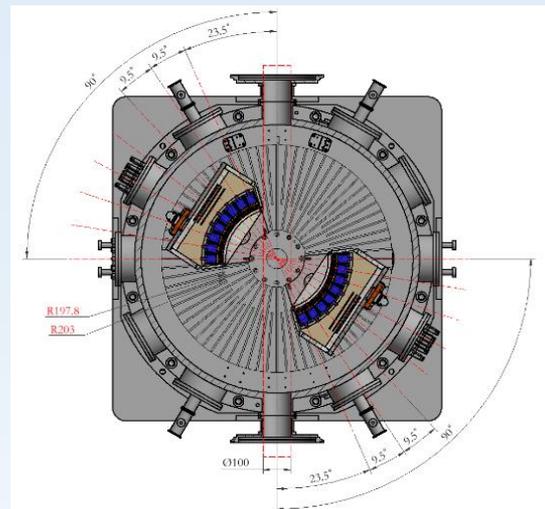
◆ CSNS反角白光中子源主要研究方向之一

- 两体反应
 - ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ 的(n, α)反应
 - ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 的(n,p)、(n,d)、(n,t)、(n, α)反应
- 三体反应：
 - ${}^{12}\text{C}$ 的(n, 3α)反应

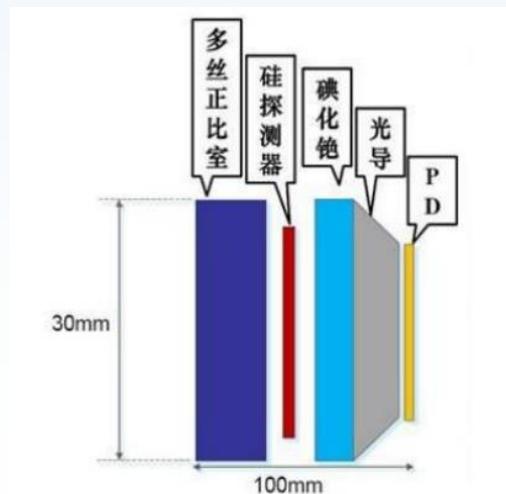
◆ 现有实验装置：轻带电粒子探测器阵列(LPDA)

- 8个 ΔE - ΔE -E探测单元，每个单元由MWPC、Si和CsI组成
- 覆盖立体角小 (0.2%)
- 粒子探测能量阈值高，约为0.5MeV (Proton)
- 主要针对(n,p/d/t)(n, α)等轻带电粒子反应的测量

◆ LPDA的限制：小截面、低能产物和多产物反应的测量有较大难度



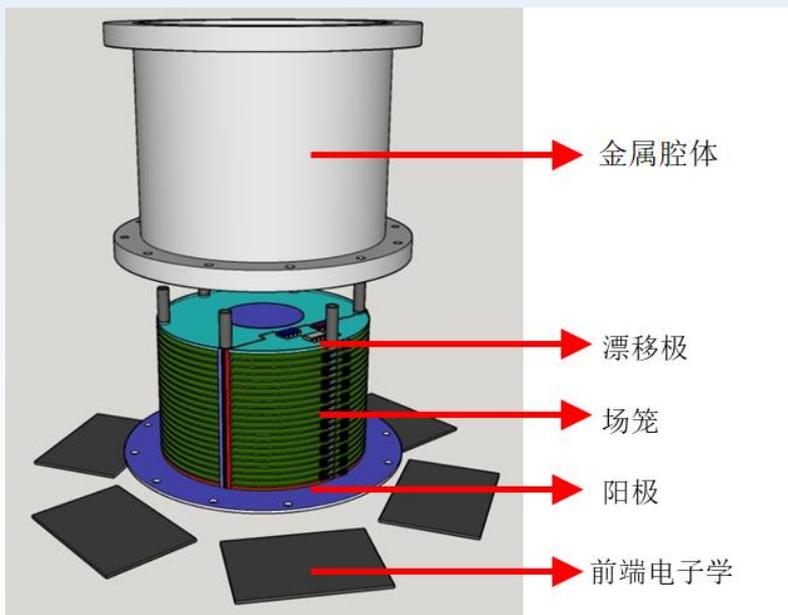
轻带电粒子探测器阵列示意图



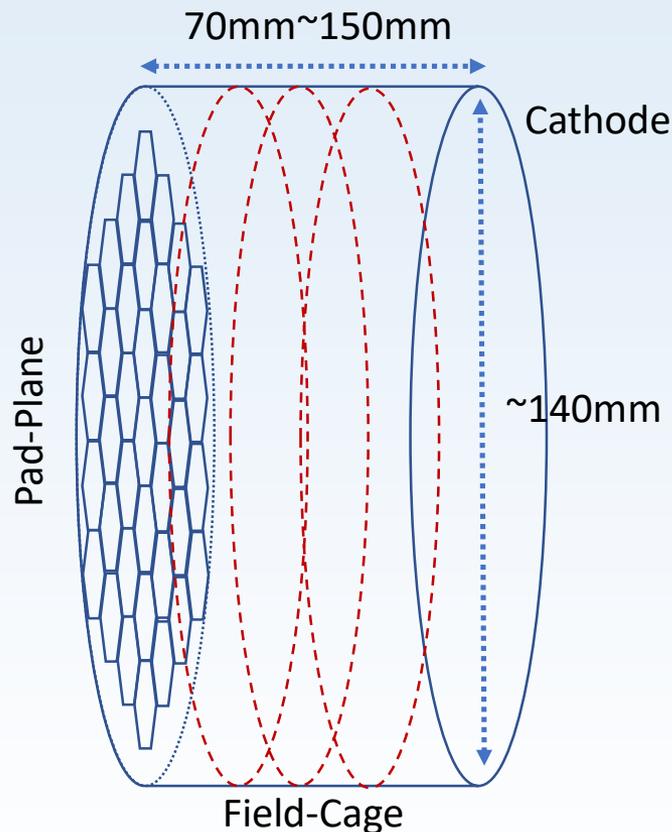
白光MTPC探测器方案

◆ 研制一台主要针对轻带电粒子测量的多用途TPC (Multi-purpose TPC)

- 径迹测量、能量测量、粒子鉴别
- 大立体角覆盖、能量探测阈值低
- 粒子甄别与复杂反应道甄别



MTPC机械设计简图



MTPC结构示意图

◆ MTPC核心部件之一：阻性Micromegas探测器作为放大结构

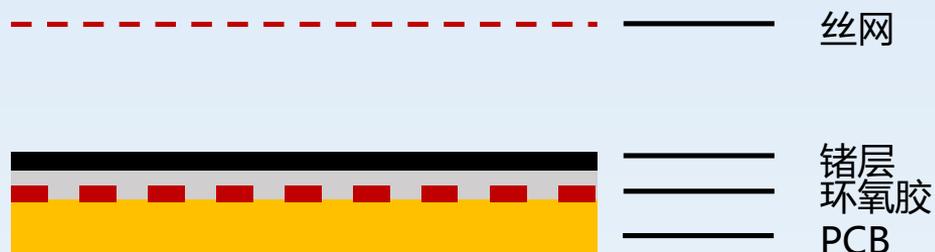
阻性Micromegas探测器

◆阻性Micromegas探测器

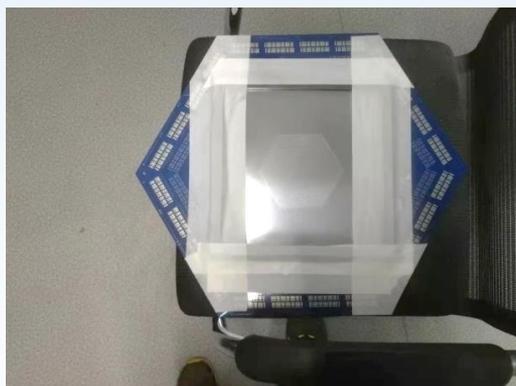
- 工艺成熟、国产化、大面积
- 高增益、高精度

◆阻性阳极

- 猝灭探测器的打火放电，提升工作稳定性
- 扩展阳极信号的宽度，提升位置重建精度



阻性Micromegas放大区结构示意图



热压接技术制备Micromegas探测器

◆影响MTPC性能的关键参数

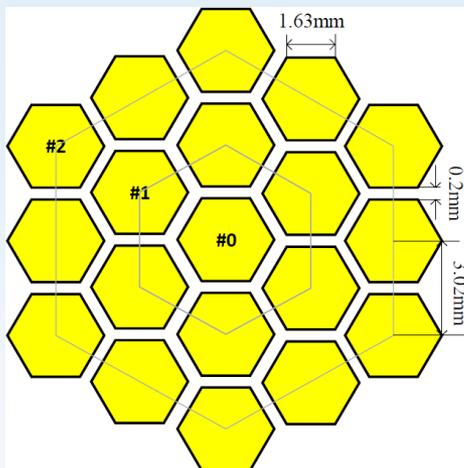
- 位置重建精度：读出单元尺寸、阻性电极阻值
- **能量重建精度：探测器增益均匀性、雪崩放大气隙**

报告概要

- 白光MTPC研究背景
- **阻性Micromegas探测器气隙均匀性研究**
 - 模拟研究
 - 实验刻度
- 总结

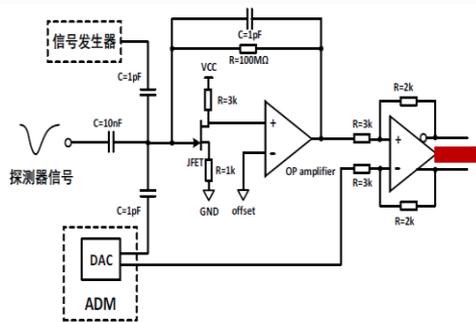
实验设置

- ◆ Micromegas探测器参数：阻性层面电阻率约 $100\text{M}\Omega/\text{sq}$ ，六边形密堆Pad读出方式，读出Pad边长 1.63mm ，共1519个阳极pad，灵敏区边长约 68.5mm ，使用 Fe^{55} 放射源测试。

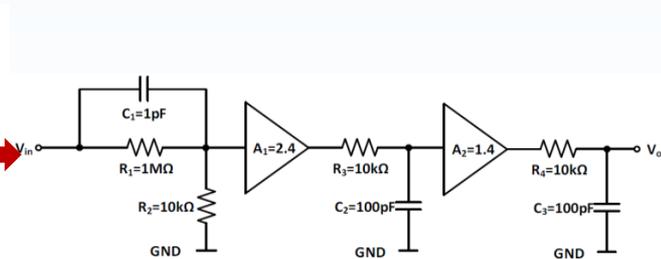


- ◆ 读出电子学：基于分立元件实现电荷灵敏前放，波形采样技术

模拟硬件电路：电荷灵敏前放



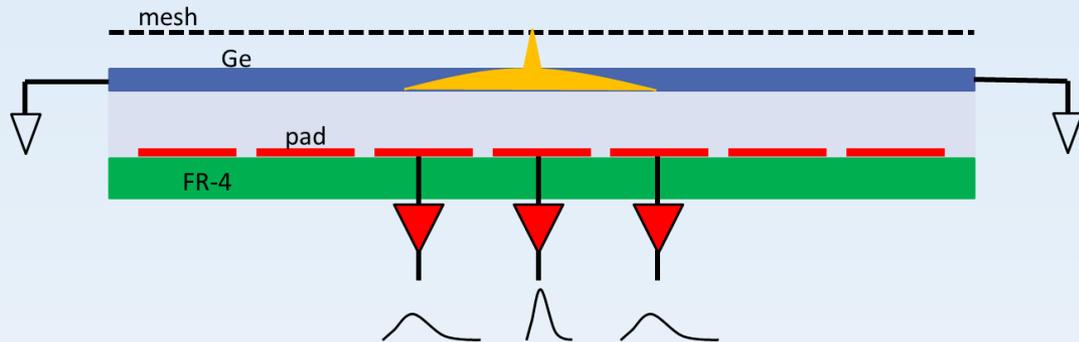
FPGA数字波形处理：极零-RC-RC



阻性层电荷扩散

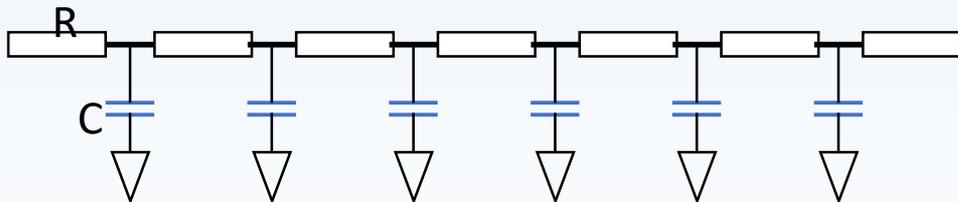
◆ 读出pad上的信号成分:

- 电子雪崩放大过程中产生的感应信号
- 电子在阻性层上扩散产生的感应信号
- 不同区域的pad具有不同的响应函数(PRF)



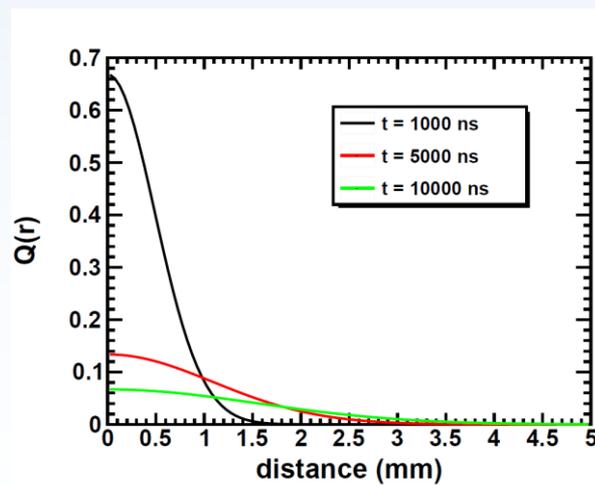
◆ 电子在阻性层上的扩散过程参数化为二维RC网络的电荷扩散问题

◆ 模拟计算得到读出Pad的PRF, 结合实验刻度出探测器雪崩区的气隙厚度



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = h \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho_{\delta}(x, y, t) = \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi th}} \right)^2 \exp \left[-(x^2 + y^2) / 4th \right]$$



不同时刻阻性层上的电荷分布

模拟过程

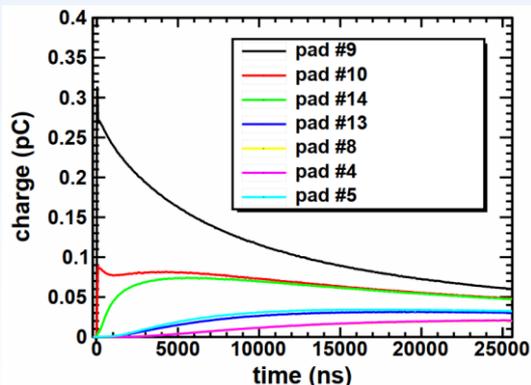
求解电荷扩散方程，得到探测器原始信号波形



电子学响应函数



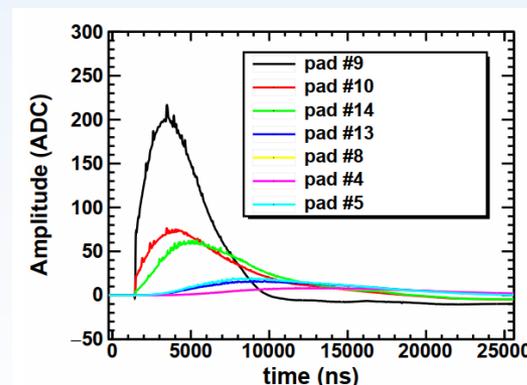
模拟得到探测器信号波形



原始信号波形

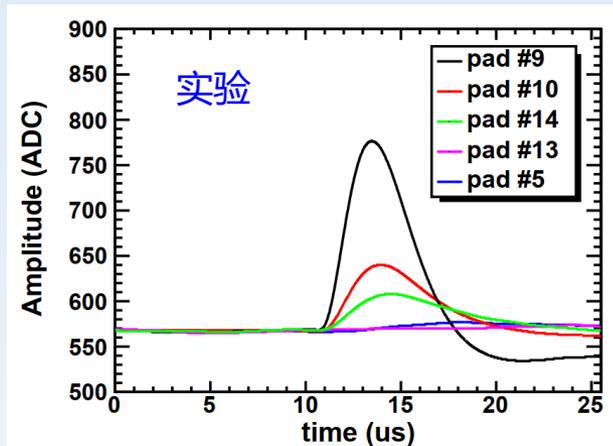
$$H_1(t) = \frac{1}{C_0} \left(-\frac{e^{-\frac{t}{\tau_0}}}{\tau_0} + \frac{e^{-\frac{t}{\tau_r}}}{\tau_r} \right)$$
$$H_2(t) = \delta(t) + \frac{1}{\tau_0} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$
$$H_3(t) = \frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

响应函数

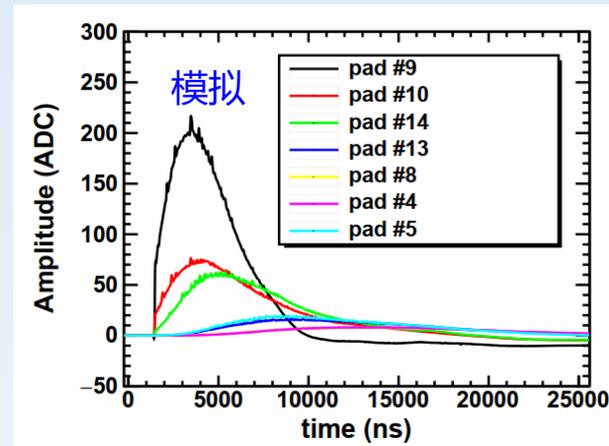


探测器信号波形

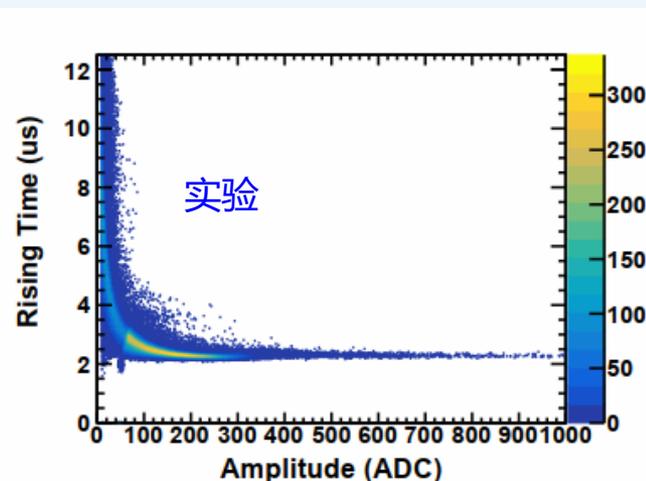
实验 vs. 模拟



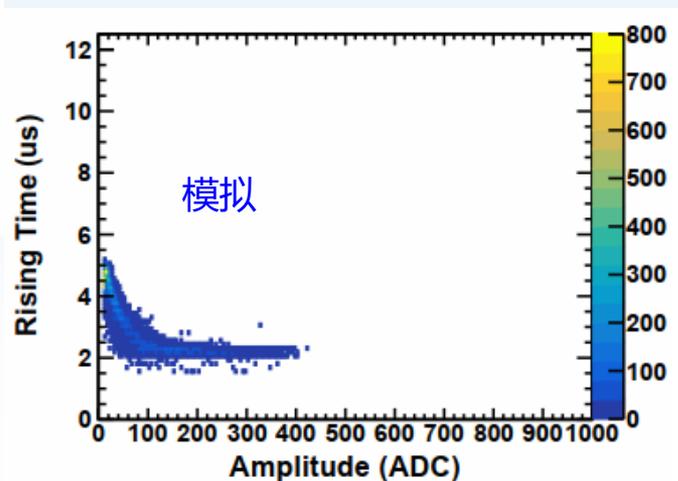
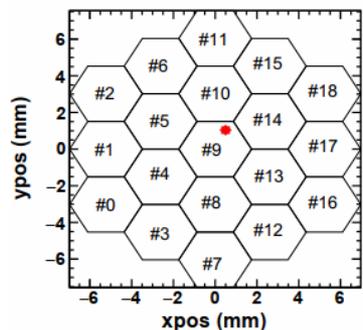
测试得到的信号波形



模拟得到的信号波形



上升时间 Vs. 幅度

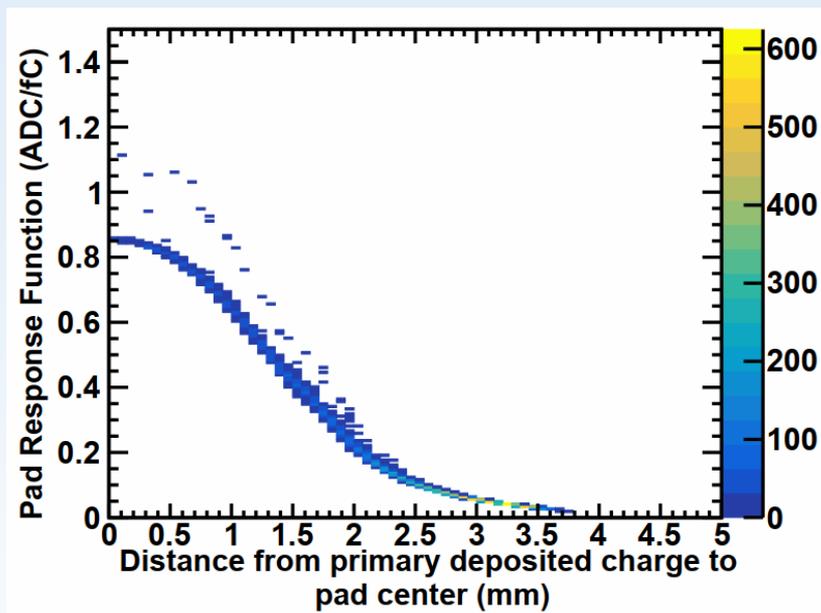


上升时间 Vs. 幅度

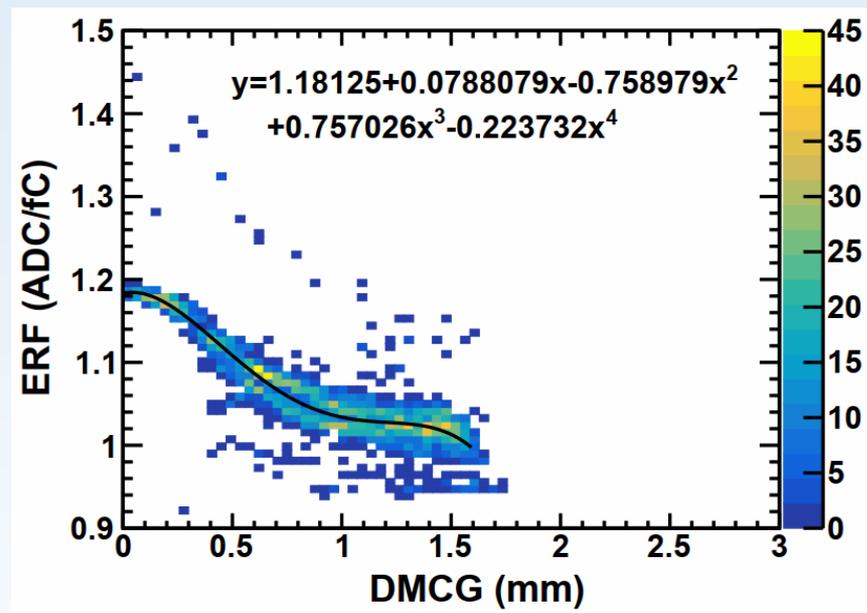
模拟结果与实验测试结果吻合较好

探测器能量修正

- ◆ 计算得到读出pad的响应函数，对实验测试得到的探测器能量进行修正



模拟得到的Pad响应函数



探测器能量响应函数

- ◆ 探测器能量修正

$$\text{Sum}E_1 = 1.18125 * \text{Sum}E_0 / y(x)$$

$$y(x) = 1.18125 + 0.0788079x - 0.758979x^2 + 0.757026x^3 - 0.223732x^4$$

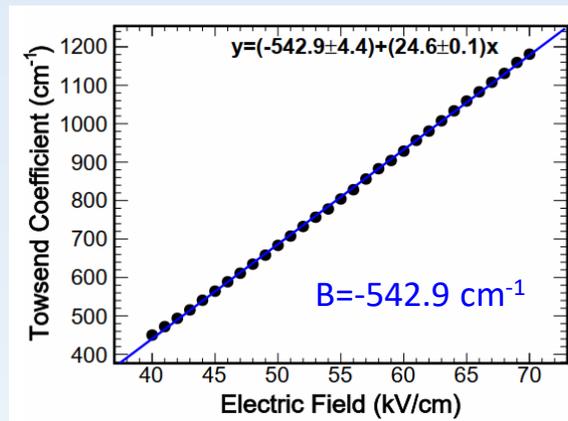
DMCG: distance from the center of pad with maximum amplitude to the position calculated by charge of centroid (通过实验进行测量)

气隙刻度方法

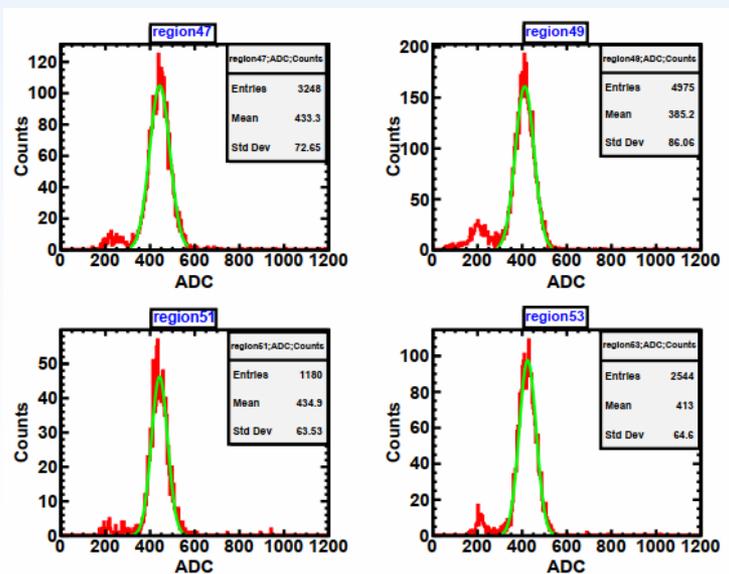
◆ 探测器气隙刻度

1. Garfield++模拟得到气体汤生系数
2. 测试探测器不同区域、不同电压下的能谱，并对其能量进行修正
3. 拟合探测器不同区域的增益曲线
4. 得到探测器不同区域的雪崩区的气隙厚度

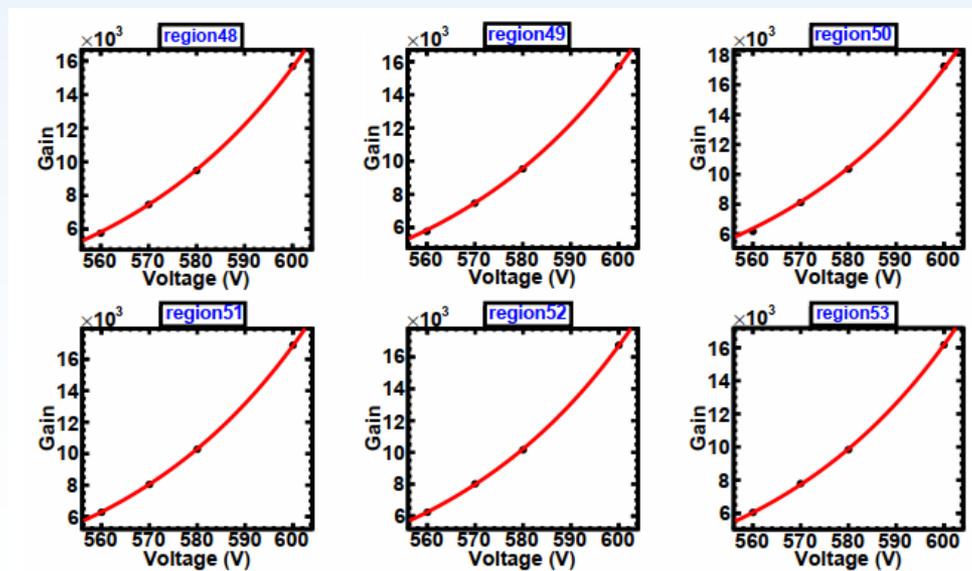
$$G = e^{\alpha d} = e^{(AE+B)d} = e^{AV+Bd}$$



模拟得到的气体汤生系数

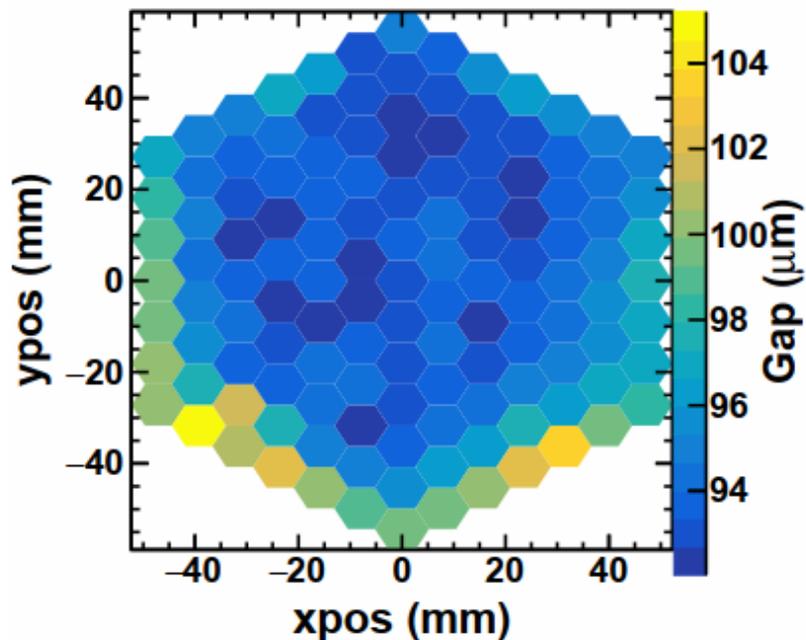


探测器不同区域的X射线能谱

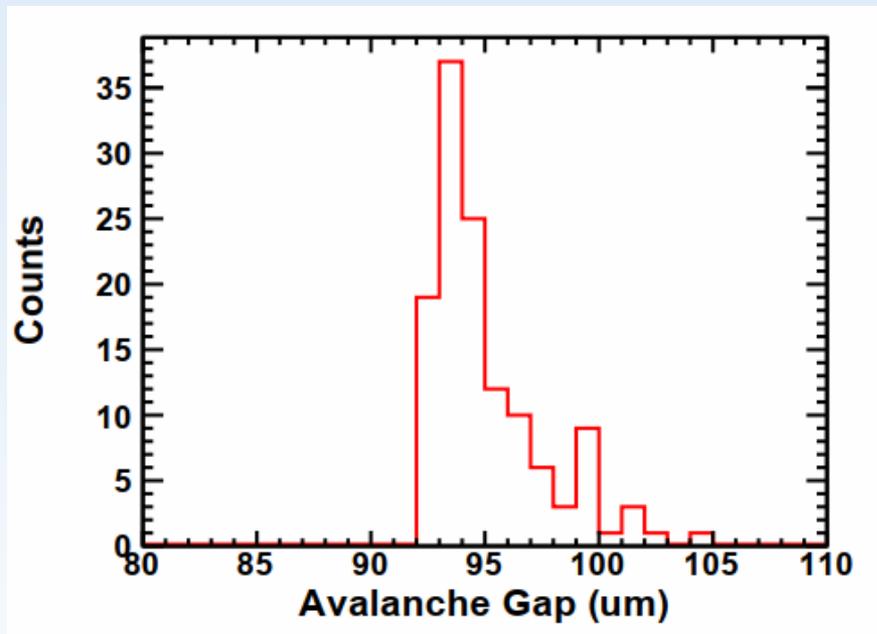


探测器不同区域的增益曲线拟合

气隙刻度结果



探测器灵敏区内气隙厚度分布



探测器灵敏区内气隙厚度分布

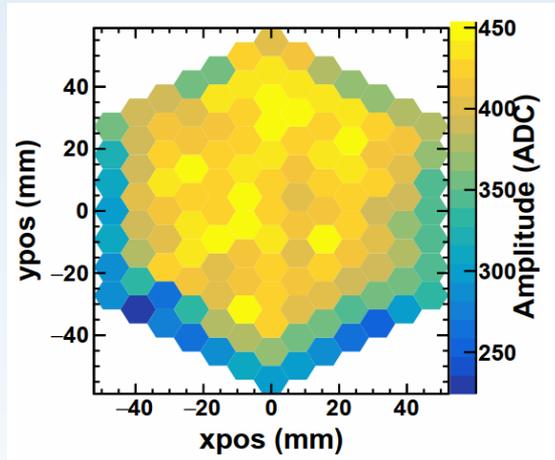
◆ Micromegas探测器雪崩区气隙

1. 灵敏区分成127个小区域，平均气隙厚度为95 μm
2. 气隙厚度非均匀性约2.8% (RMS/Mean)

探测器边缘具有较大的气隙厚度，可能是由于热压过程当中，边缘区域受力较小，导致气隙厚度较大。

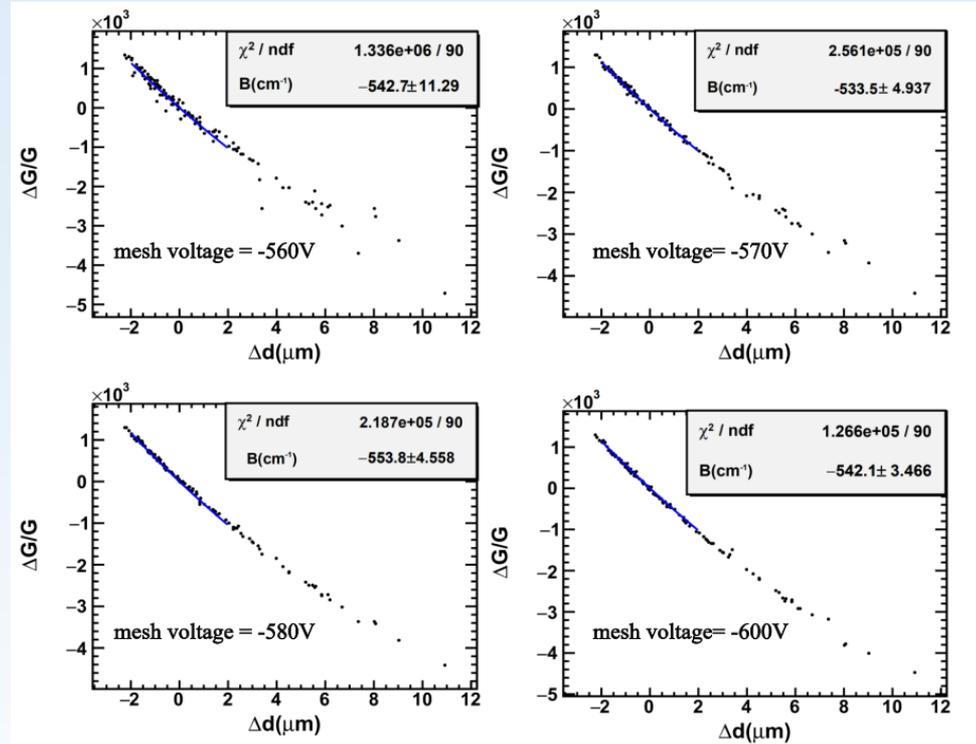
增益均匀性 vs. 气隙均匀性

- ◆ 相同工作电压，可以通过探测器不同区域的信号幅度以及气隙反推出汤生系数(B)值



$$\frac{\sigma_G}{G} = B\sigma_d + \frac{B^2}{2!}\sigma_d^2$$

- ◆ 模拟得到的B和实验测测量的B在误差范围内是一致的，进一步验证了该结果的自洽性



不同工作电压下的增益偏差以及气隙厚度偏差依赖关系

Voltage(V)	-560	-570	-580	-600
$B_i(\text{cm}^{-1})$	-542.7	-533.5	-553.8	-542.1
$\sigma_i(\text{cm}^{-1})$	11.3	4.9	4.6	3.5
$ B_i - B / \sqrt{\sigma^2 + \sigma_i^2}$	0.02	1.43	1.71	0.14

总结

1. 通过模拟和实验研究了Micromegas探测器中电子在阻性层上的扩散效应, 计算得到探测器读出Pad的响应函数, 进一步得到探测器的能量修正函数。
2. 结合模拟和实验, 刻度了Micromegas探测器雪崩区气隙厚度, 结果显示探测器雪崩区气隙厚度平均值为95 μm , 气隙厚度非均匀性约为2.8%。通过探测器的增益涨落和气隙涨落的依赖关系, 进一步验证了结果的自治性。
3. 通过对探测器灵敏区内雪崩区气隙的刻度, 可以给阻性Micromegas探测器的工艺优化提供依据, 并且可以给出任意工作条件下探测器灵敏区内的能量修正函数, 从而优化MTPC探测器的性能。
4. 该研究结果已撰写成文投到NIMA期刊上, 并已经被接收。

谢谢！