



MTPC径迹重建方法的现状与改进计划

INSTITUTE OF HIGH ENERGY PHYSICS



报告人：李样



散裂中子源科学中心，高能所

CSNS束流扩展应用

- ① 反角白光中子源
- ② 伴生质子束
- ③ 高能质子试验束
- ④ 缪子源



MTPC



多用途时间投影室

项目背景

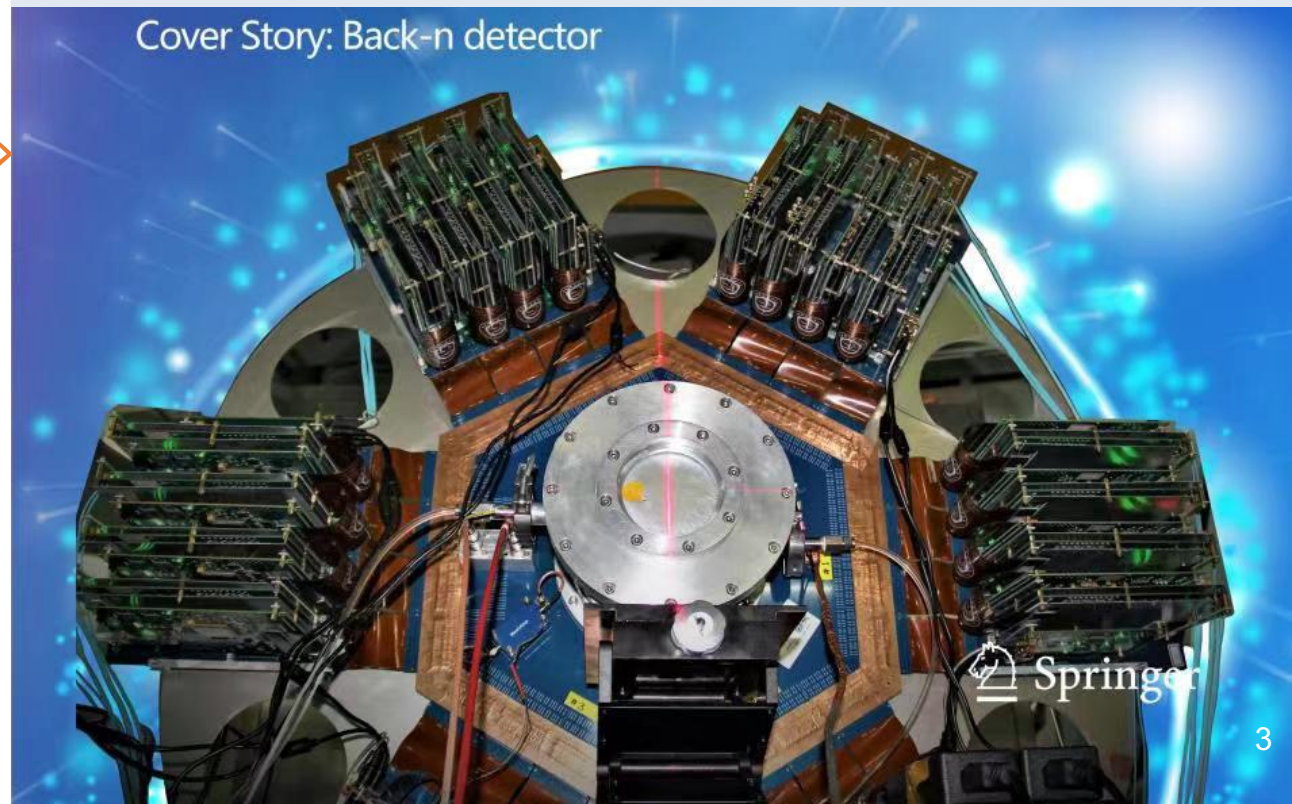


- **CSNS反角白光中子源(Back-n):** 国内首条宽能区强流白光中子束线
- **研究内容**
 - 裂变截面测量
 - 轻带电粒子出射反应截面测量——多用途时间投影室(Multi-purpose TPC, MTPC)是该研究方向的探测器升级项目
 - 中子俘获截面测量
 - 白光中子共振成像
 -

MTPC性能测试

- 放射源: 一个四组分 α 源 ($^{234}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu} + ^{244}\text{Cm}$)
- 研究目标:
 - 测试波形分析和径迹重建方法
 - 联调读出电子学、DAQ软件和在线事例显示功能
 - 获得漂移速度和 α 粒子出射角分布
 - 获得 α 粒子的射程和能量分辨率

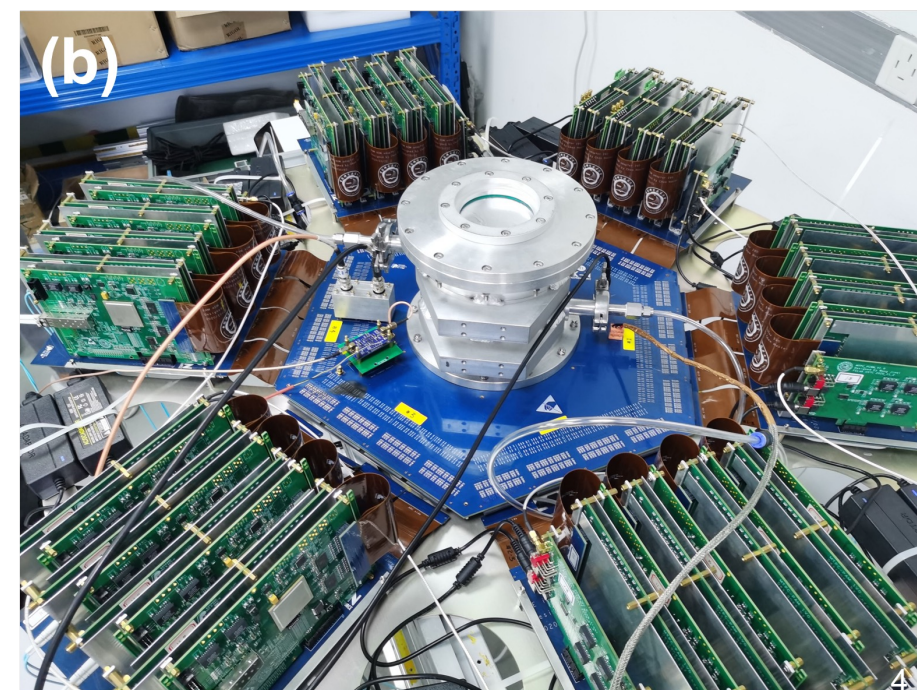
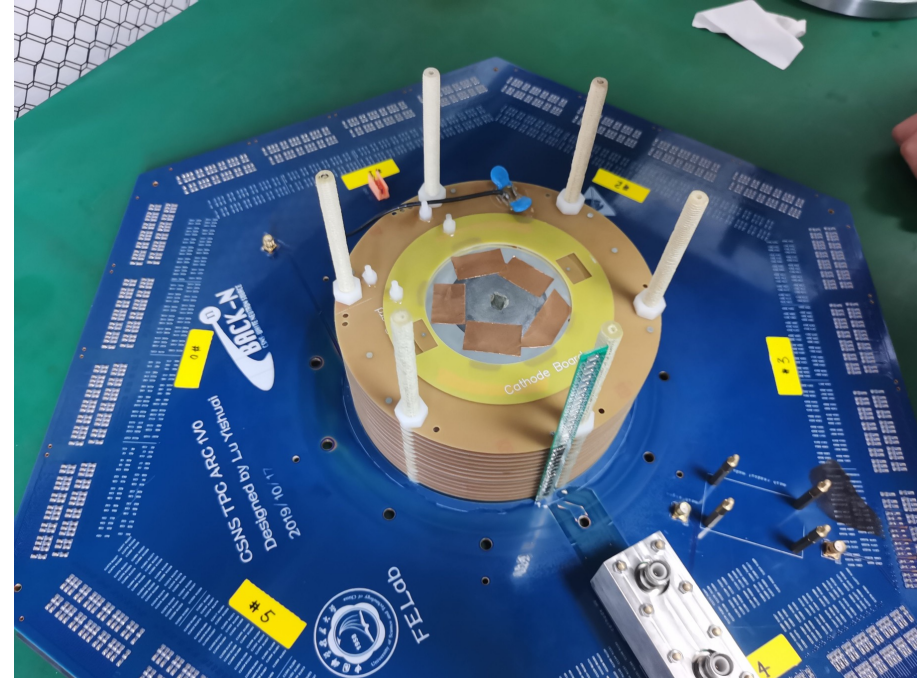
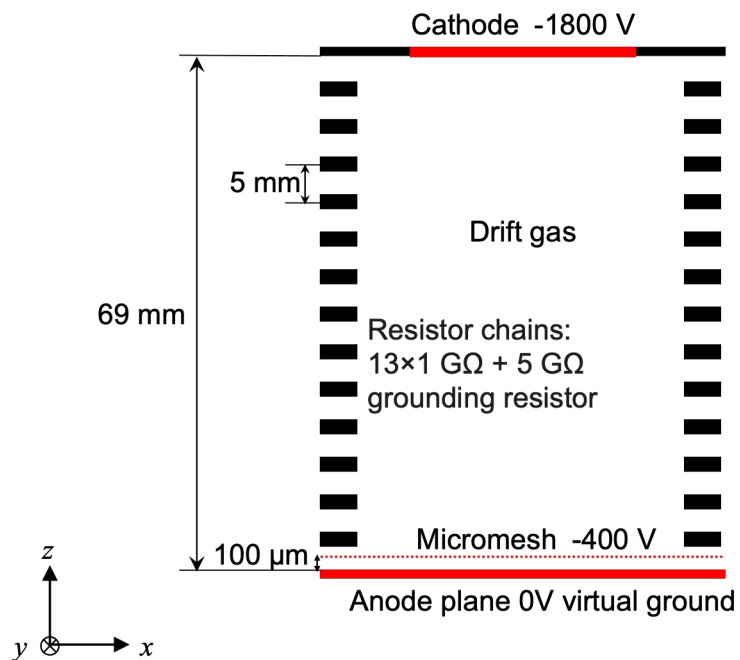
Cover Story: Back-n detector



实验设置

测试条件设置

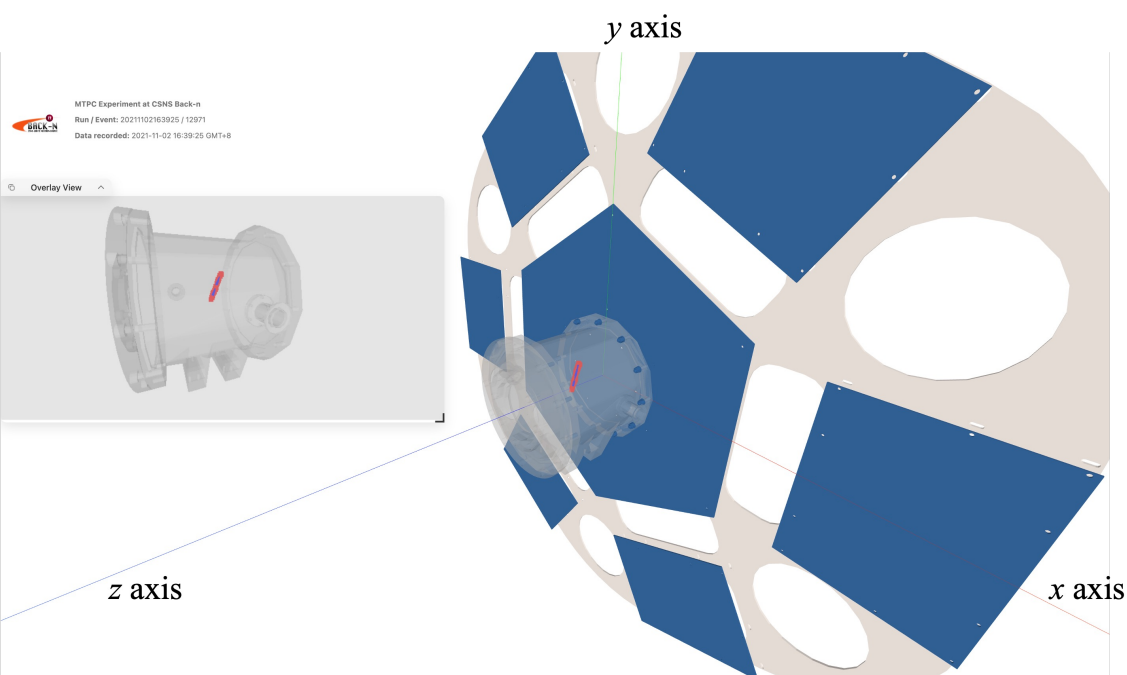
- PCB均压环间隔5 mm，漂移区距离约70 mm
- 阻性Micromegas，增益区厚度100 μm
- 阴极电压-1800 V，mesh电压-400 V，漂移电场200 V/cm
- 工作气体：
Ar (93%) + CO₂ (7%)，1 atm
- α 源放在阴极中心（探测器顶部）
- 基于分立器件的读出电子学
- 电子学波形采样频率：40 MHz



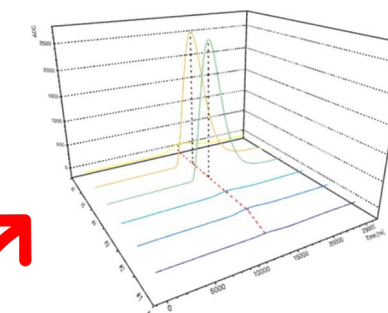
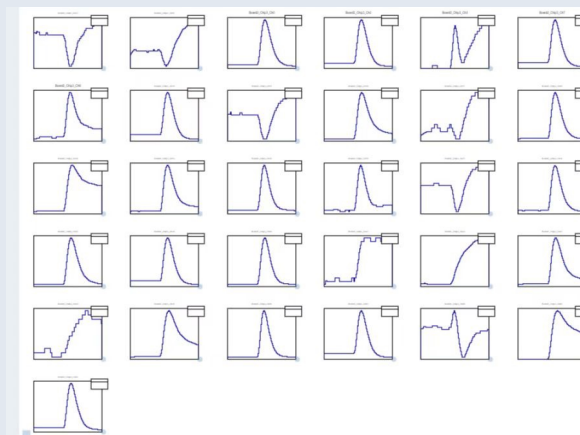
DAQ和事例显示

结合DAQ实现在线事例显示

- ✓ 显示物理信息一维和二维直方图：击中的波形、幅度和坐标，出射粒子束斑剖面，漂移时间等
- ✓ 三维事例显示：探测器几何、击中、粒子径迹



与高能所顾旻皓老师
合作开发



MTPC的波形显示例子被CERN JSROOT
软件用作官方例子

α 源数据分析

波形拟合

- 读出电子学的理论函数拟合波形得到击中时间和幅度

漂移速度

- 通过漂移速度和漂移时间得到击中的z坐标

径迹重建

- 基于击中的三维坐标和幅度进行径迹寻找和径迹拟合

探测器性能

- 通过径迹重建获得粒子的射程和沉积能量，以及分辨率

波形拟合

- 读出电子学的理论函数拟合波形得到击中时间和幅度

漂移速度

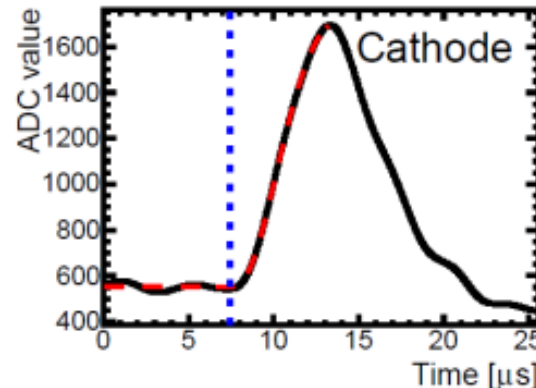
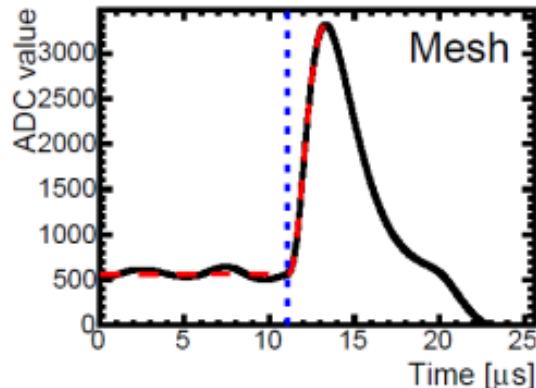
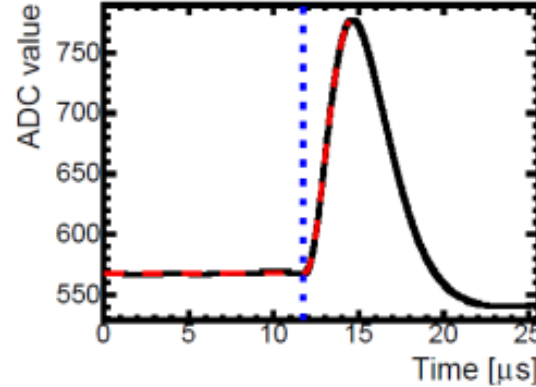
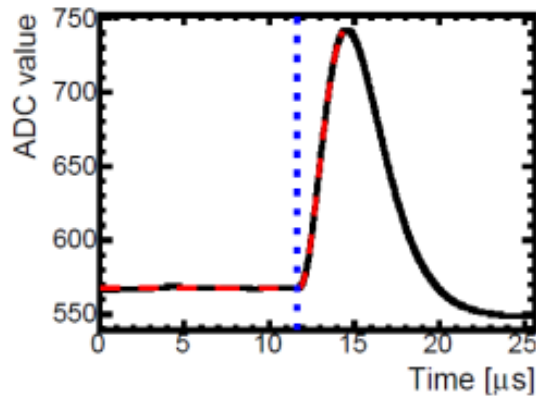
- 通过漂移速度和漂移时间得到击中的z坐标

径迹重建

- 基于击中的三维坐标和幅度进行径迹寻找和径迹拟合

探测器性能

- 通过径迹重建获得粒子的射程和沉积能量，以及分辨率



$$f(t) = B + A \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right)^3 \exp \left(-\frac{t - t_0}{\tau} \right) \Theta(t - t_0),$$

where B represents the baseline, A is a constant related to the amplitude of the waveform, t_0 is the start time, τ is the shaping time of the electronics, and Θ is the Heaviside step function.

- 正在开发基于快速Fourier变换的波形反演重建方法，得到信号进入前放之前的波形，可以提高定时精度、分离pile-up事例

波形拟合

- 读出电子学的理论函数拟合波形得到击中**时间和幅度**

漂移速度

- 通过漂移**速度**和漂移**时间**得到击中的**z坐标**

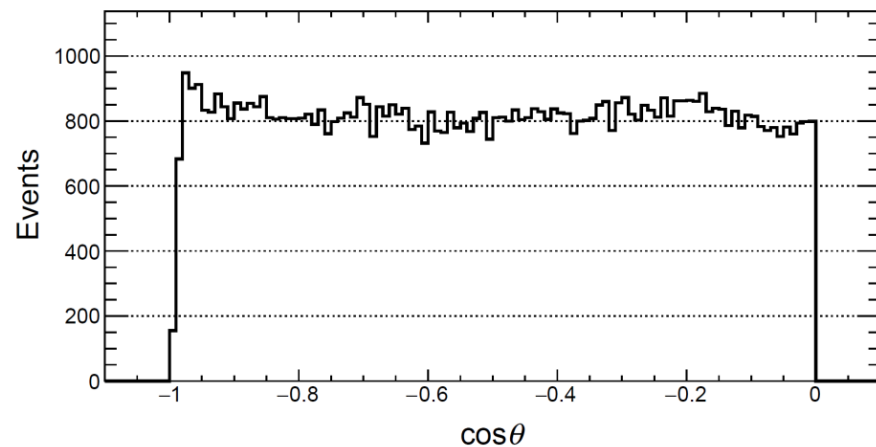
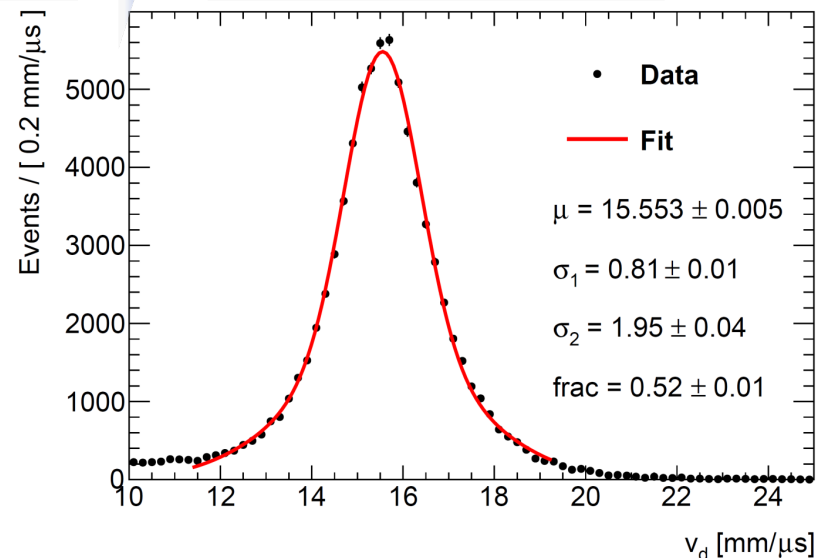
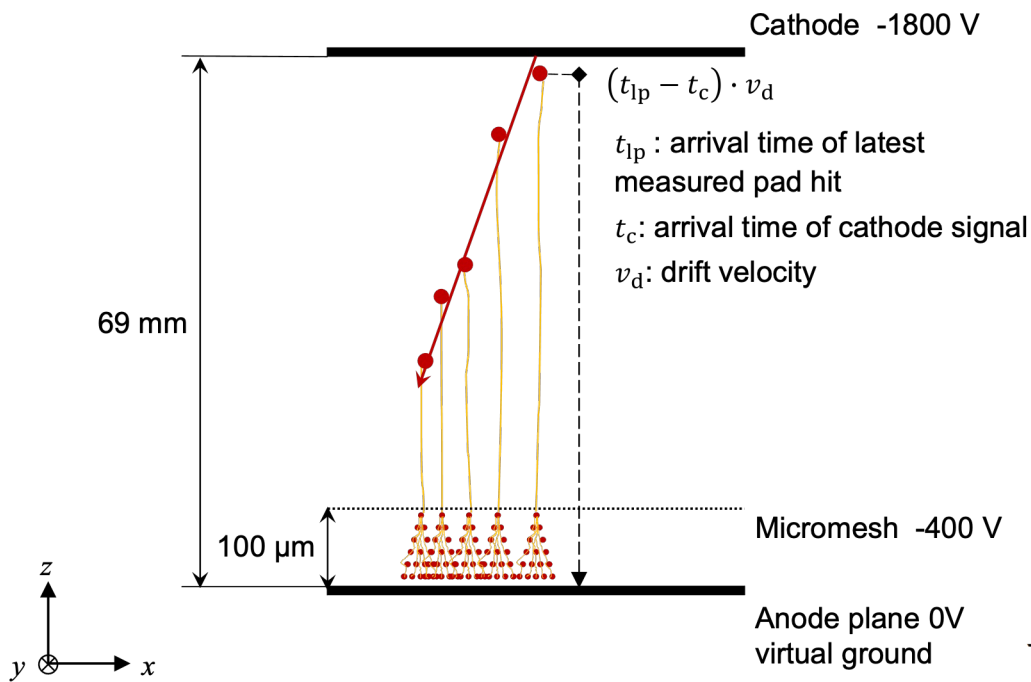
径迹重建

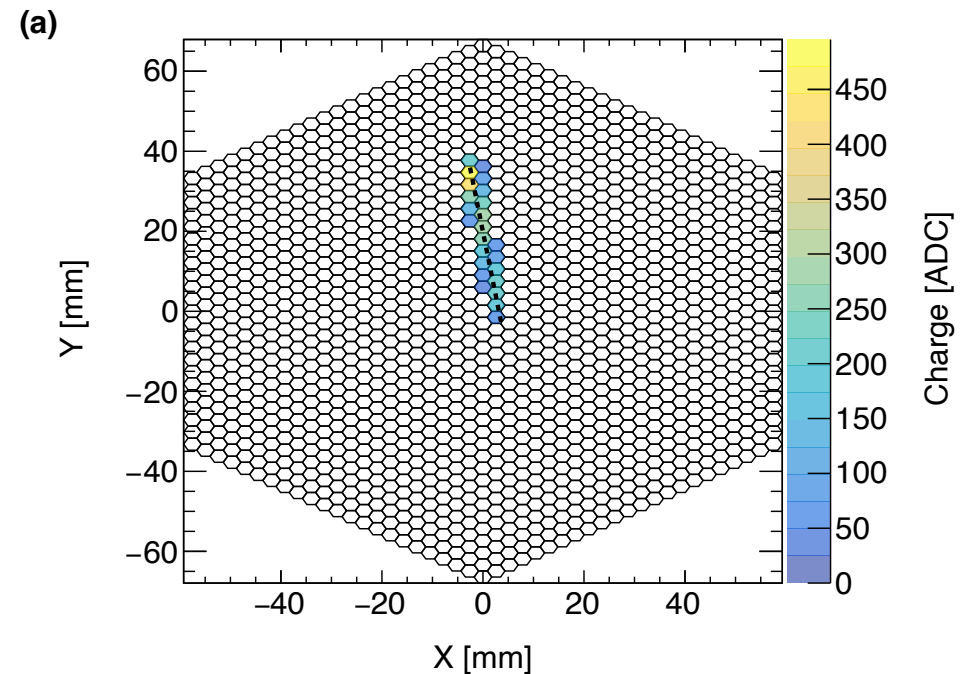
- 基于击中的三维坐标和幅度进行径迹寻找和径迹拟合

探测器性能

- 通过径迹重建获得粒子的射程和沉积能量，以及分辨率

1. 利用已知的漂移距离和径迹中所有击中的最长漂移时间得到漂移速度的分布
 2. 高斯拟合得到漂移速度均值
 3. 更新击中z坐标，重新进行径迹重建
 4. 迭代至漂移速度均值变化小于0.1%
- ✓ 初次迭代使用Garfield++的计算值
 - ✓ α 粒子出射角度 $\cos\theta$ 分布均匀，说明漂移速度估算合理





径迹重建

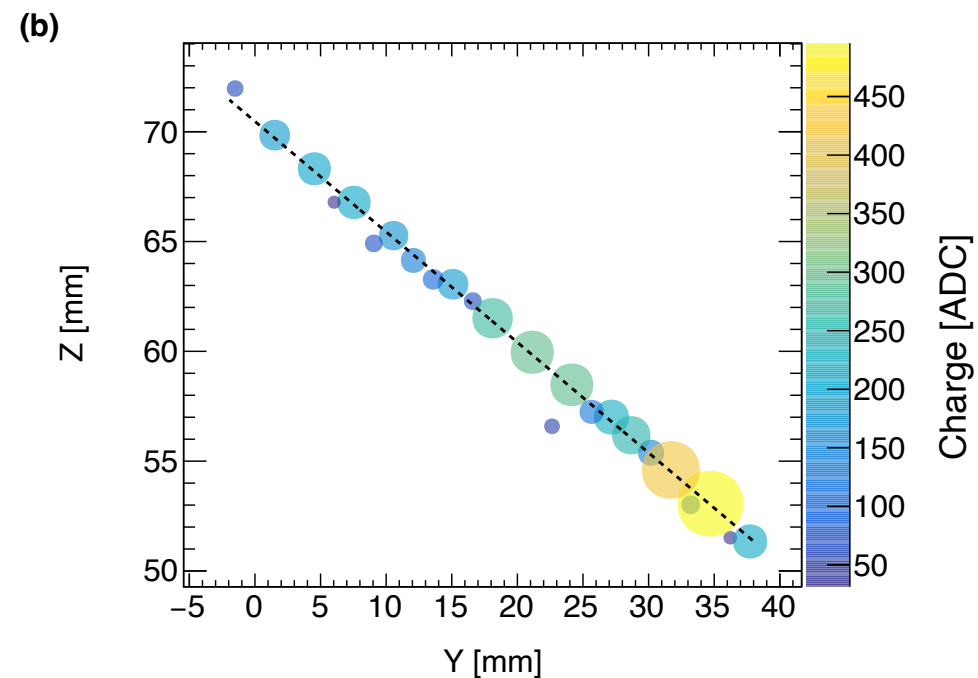
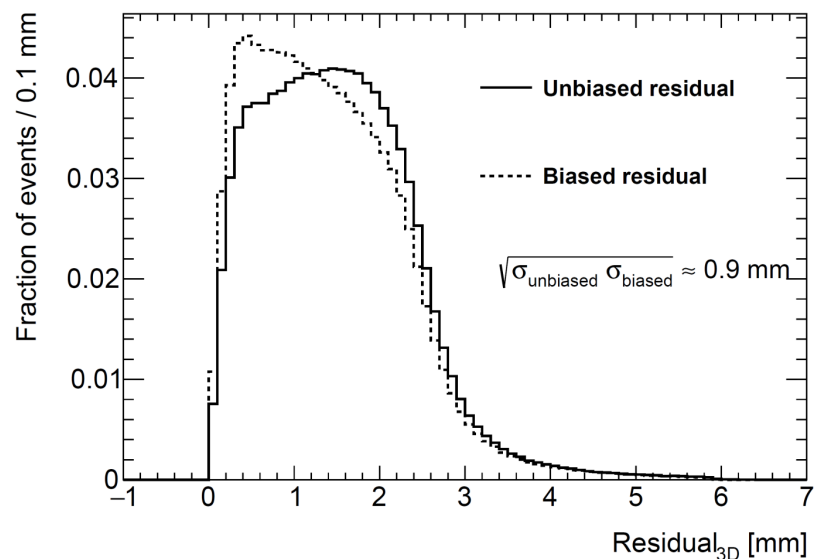
- 基于击中的三维坐标和幅度进行径迹寻找和径迹拟合

探测器性能

- 通过径迹重建获得粒子的射程和沉积能量，以及分辨率

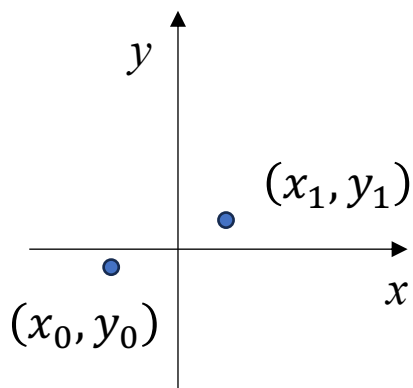
1. 三维Hough变换寻找直线
2. 正交最小二乘法拟合径迹
3. 优化：以击中幅度为权值，对步骤1和2做加权处理（步骤1：加权表决，步骤2：加权拟合），提高 α 粒子径迹重建精度

- Single point resolution 0.9 mm (σ)



Hough变换

- 将空间坐标系中的点映射到参数空间中的线
- 通过统计参数空间中所有线的交叉次数（局部峰值）得到实际空间坐标系中的直线
- 全局检测问题转换为参数空间中相对容易解决的局部峰值检测问题



参数空间离散化

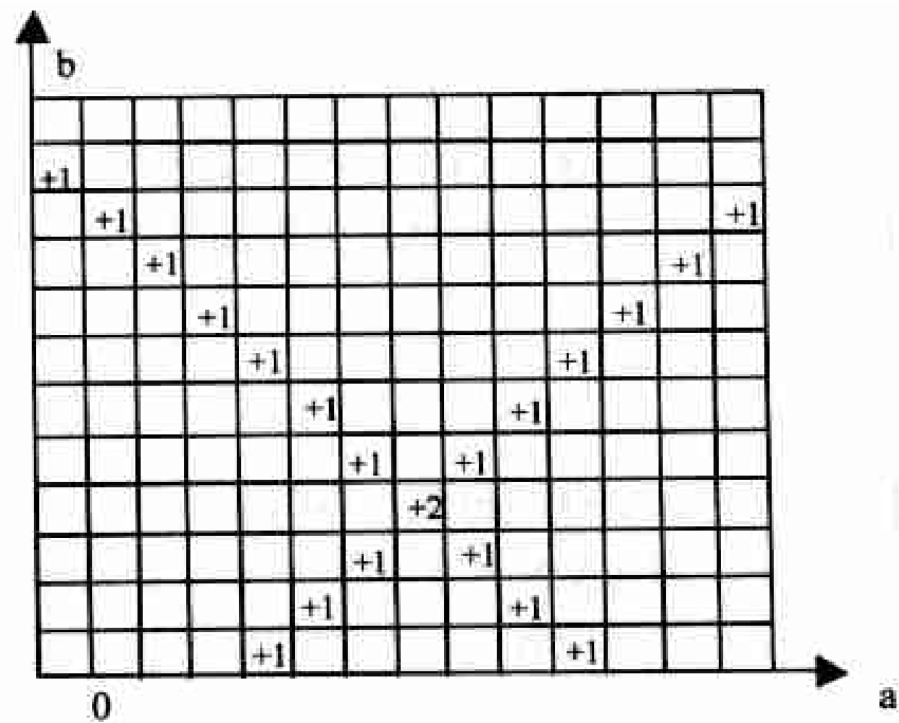


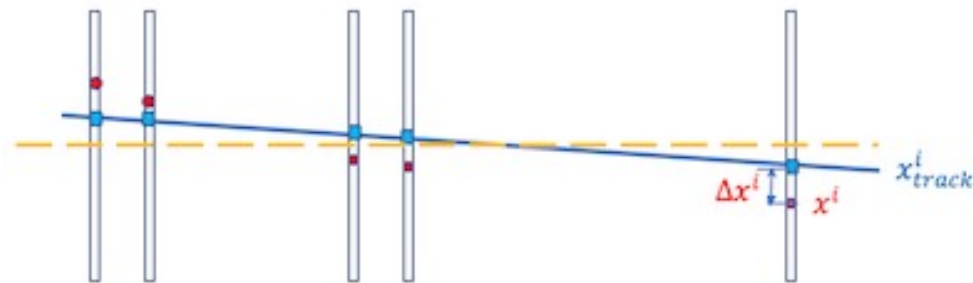
图 参数空间表决结果

$$y = ax + b$$

$$b = -x_0 a + y_0$$

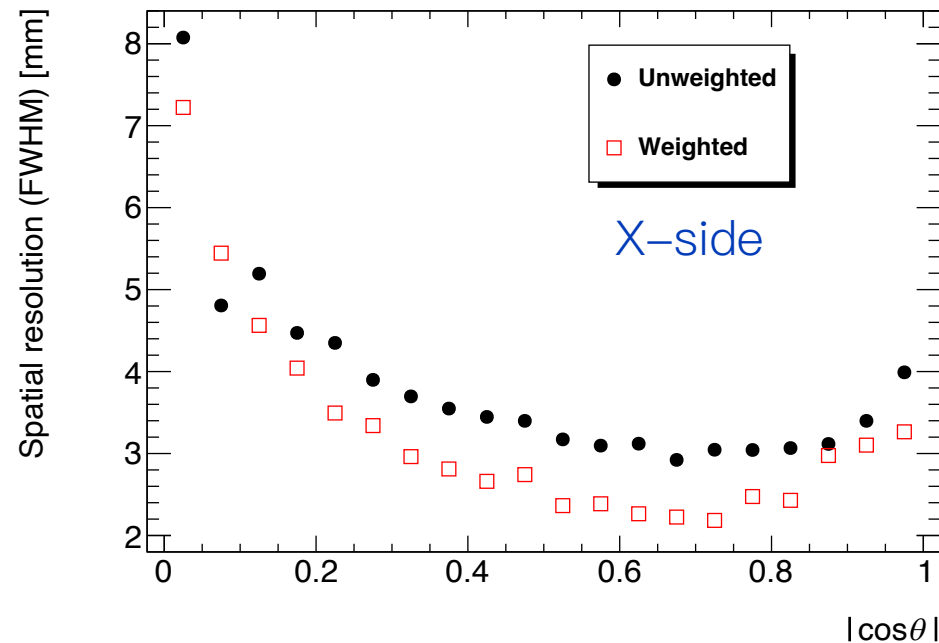
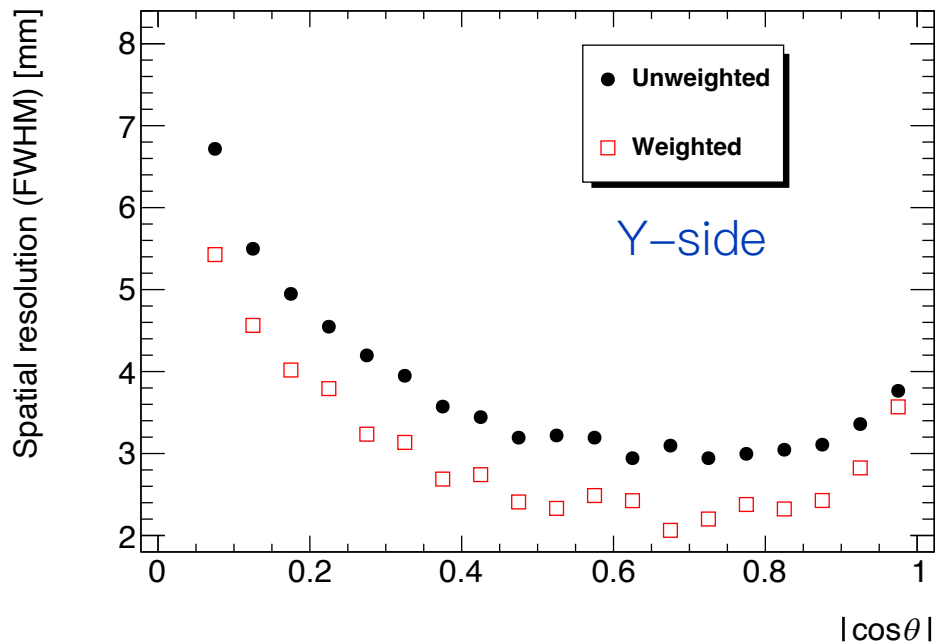
$$b = -x_1 a + y_1$$

位置分辨率



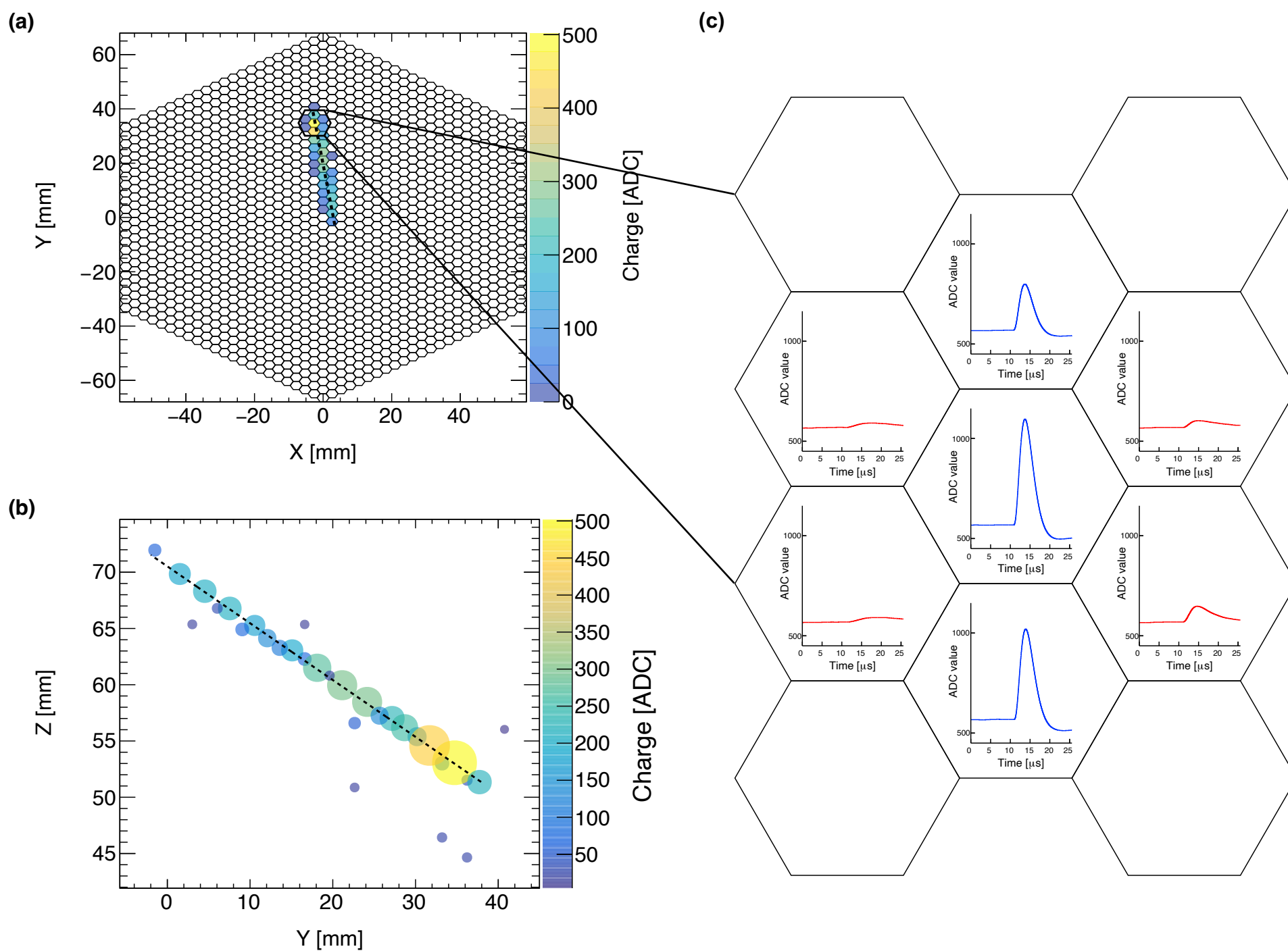
1. 径迹重建，得到径迹拟合残差分布
 - 径迹内插/外推到击中所在的z坐标，得到坐标 x_{track}^i 和 y_{track}^i
 - 残差 $\Delta x^i = x^i - x_{\text{track}}^i$ ，其中 x^i 和 x_{track}^i 分别为测量和径迹内插/外推得到的位置
2. 无偏残差 (unbiased track-hit residual)
 - $\Delta x_{\text{unb}}^i = x^i - x_{\text{track}}^i$ ，其中 x_{track}^i 为不包含击中 i 的径迹重建，然后内插/外推得到的位置
3. 两种残差分布的半高全宽的几何平均作为位置分辨率 $\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{biased}} \cdot \sigma_{\text{unbiased}}}$

AGET MTPC 2021年
5月 α 源数据



电荷扩散

- 击中信号幅度要求大于30 ADC，降低阳极阻性层电荷扩散信号对径迹能量重建的影响



波形拟合

- 读出电子学的理论函数拟合波形得到击中**时间和幅度**

漂移速度

- 通过漂移**速度**和漂移**时间**得到击中的**z坐标**

径迹重建

- 基于击中的三维坐标和幅度进行径迹**寻找**和径迹**拟合**

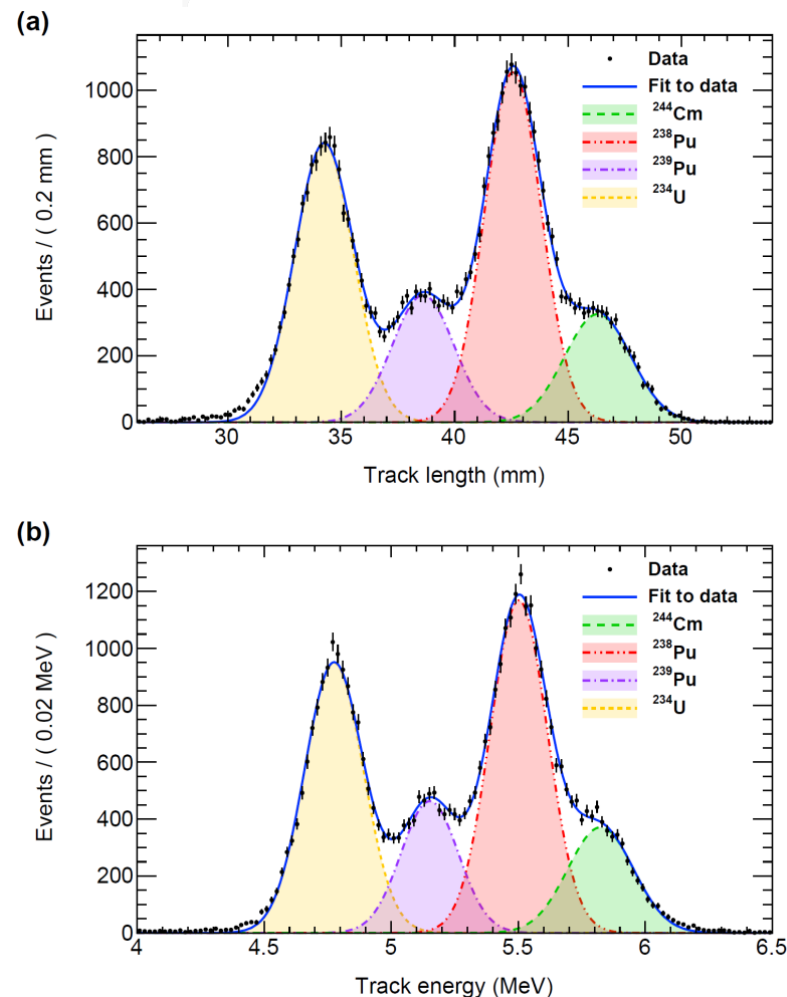
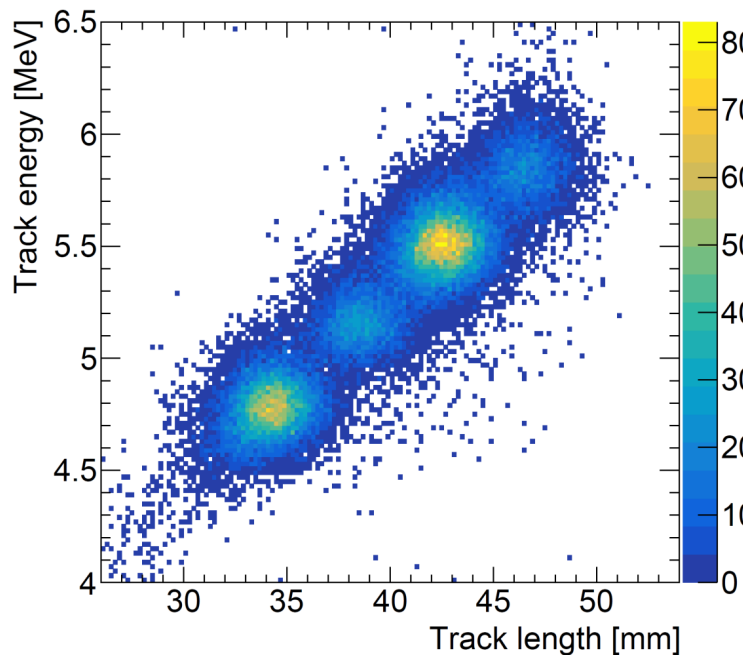
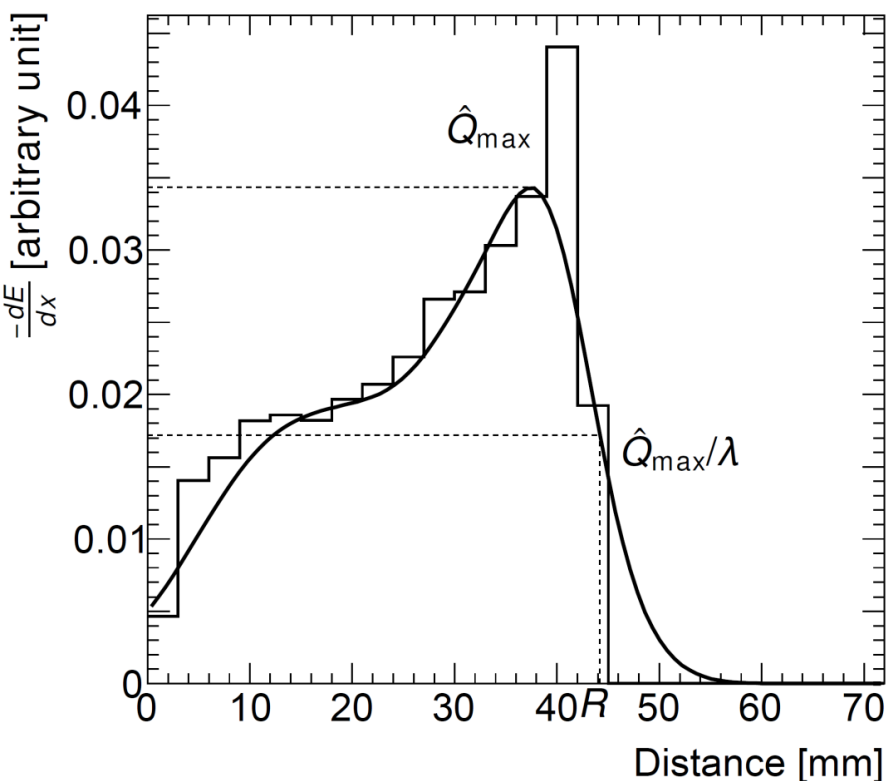
探测器性能

- 通过径迹重建获得粒子的**射程**和沉积**能量**，以及**分辨率**

1. 根据沿径迹方向的 dE/dx 分布确定射程
2. 径迹击中的幅度总和作为沉积能量

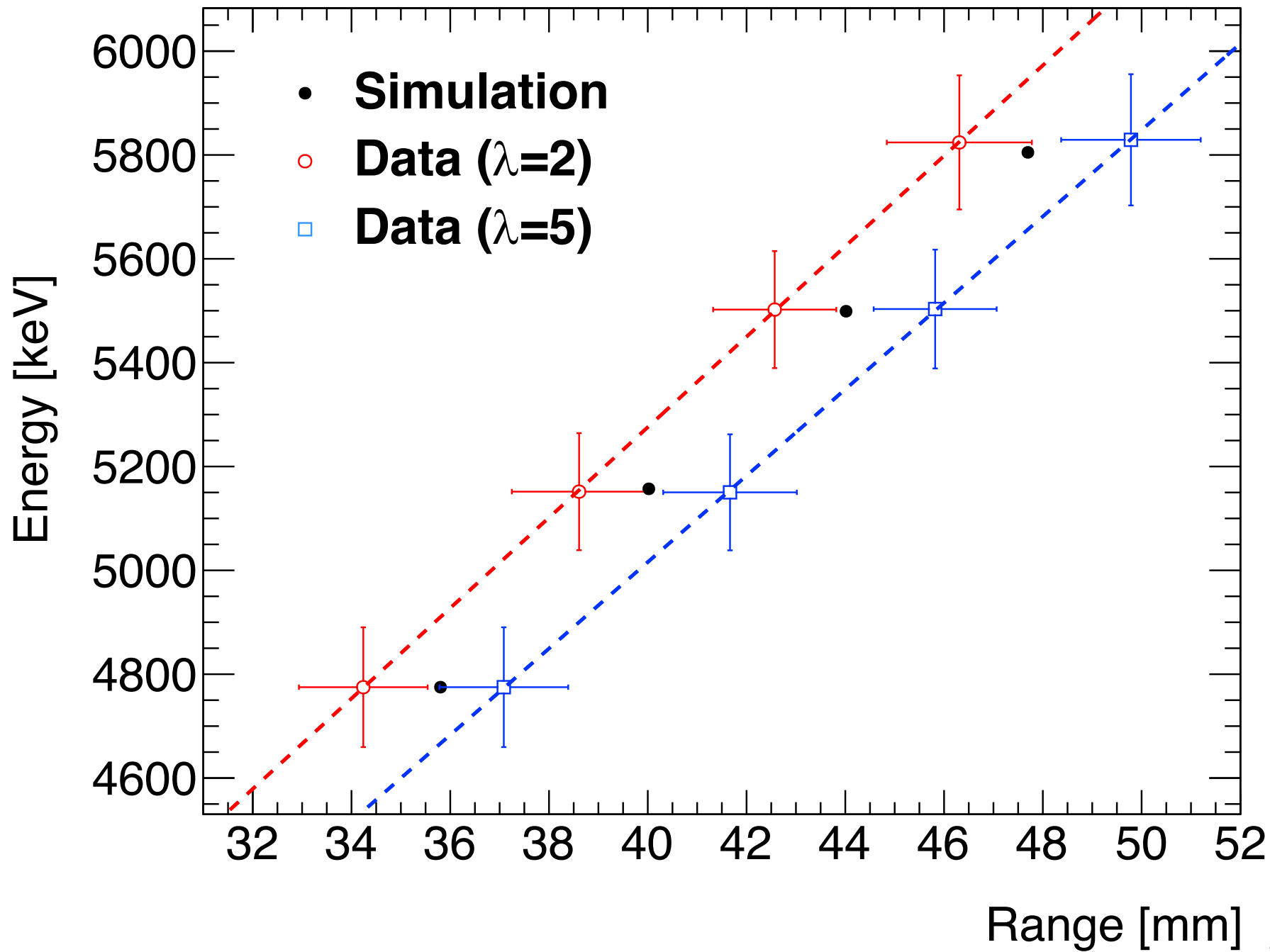
射程分辨率约3.3% (σ)

能量分辨率约2.2% (σ)



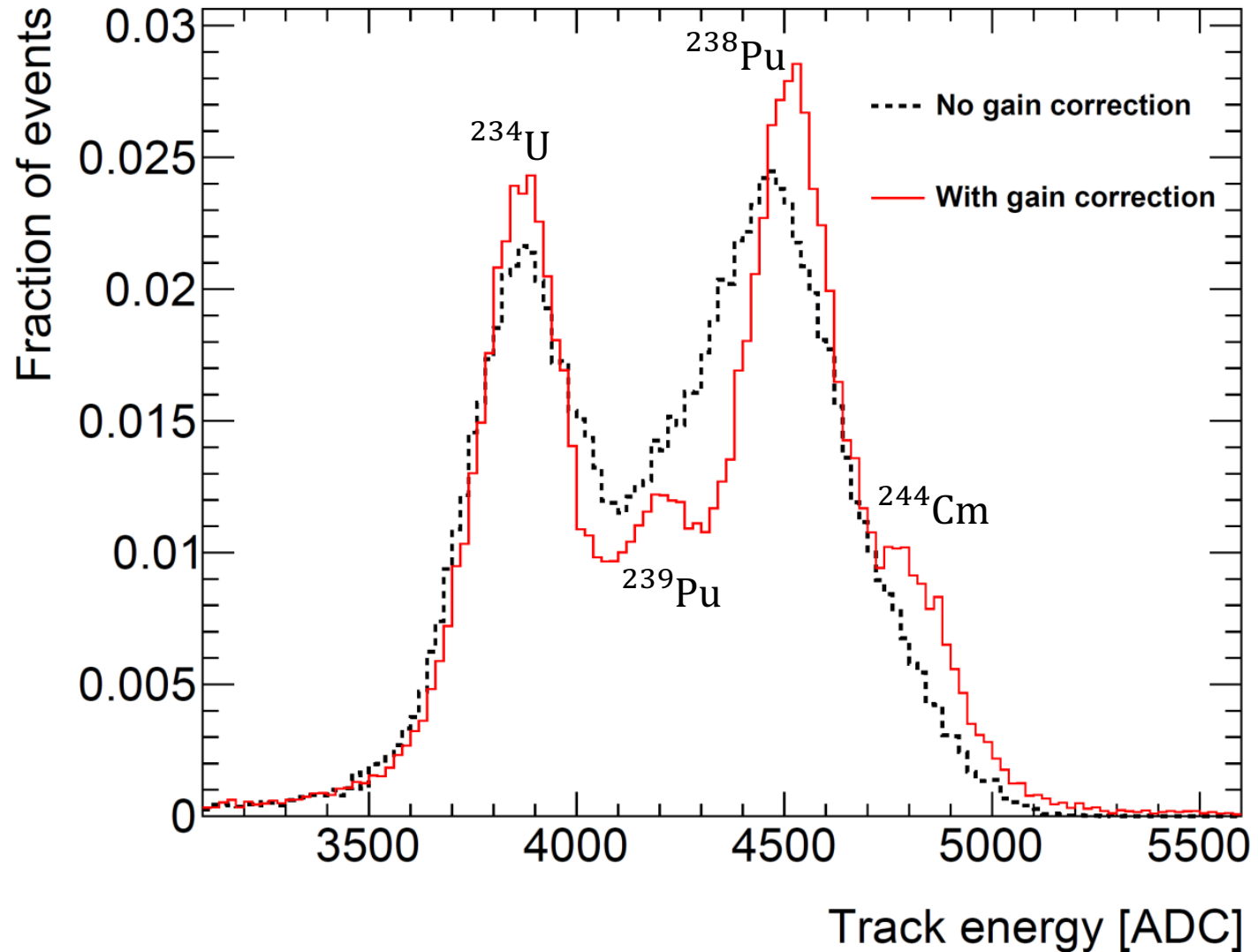
射程对比

与Geant4模拟结果对比

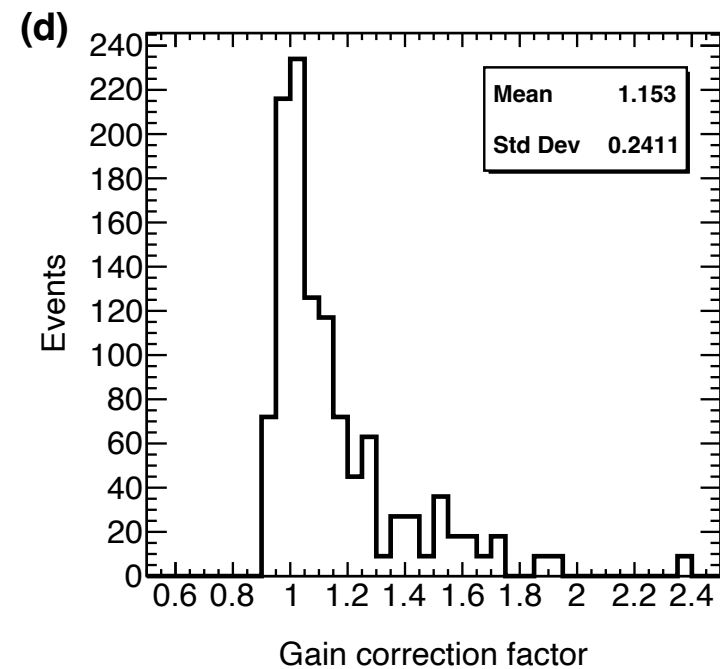
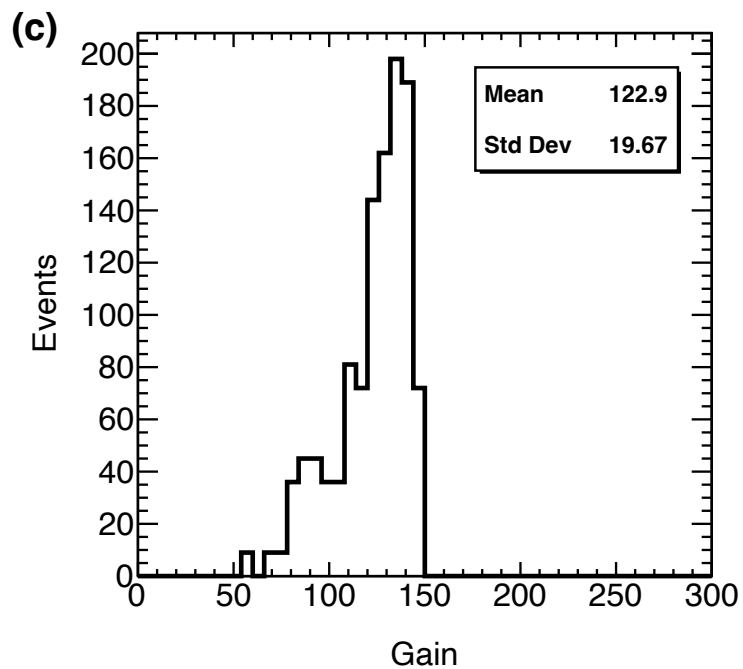
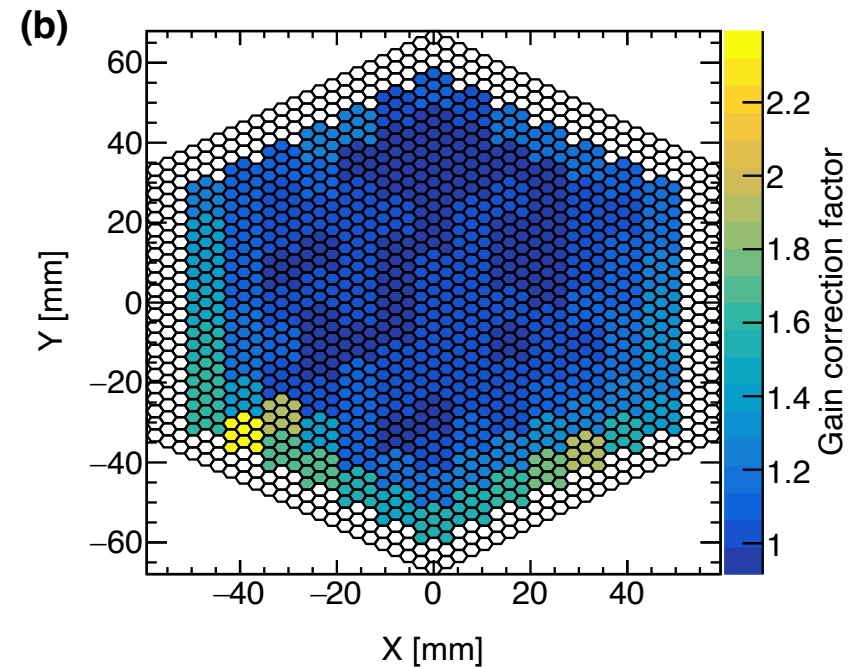
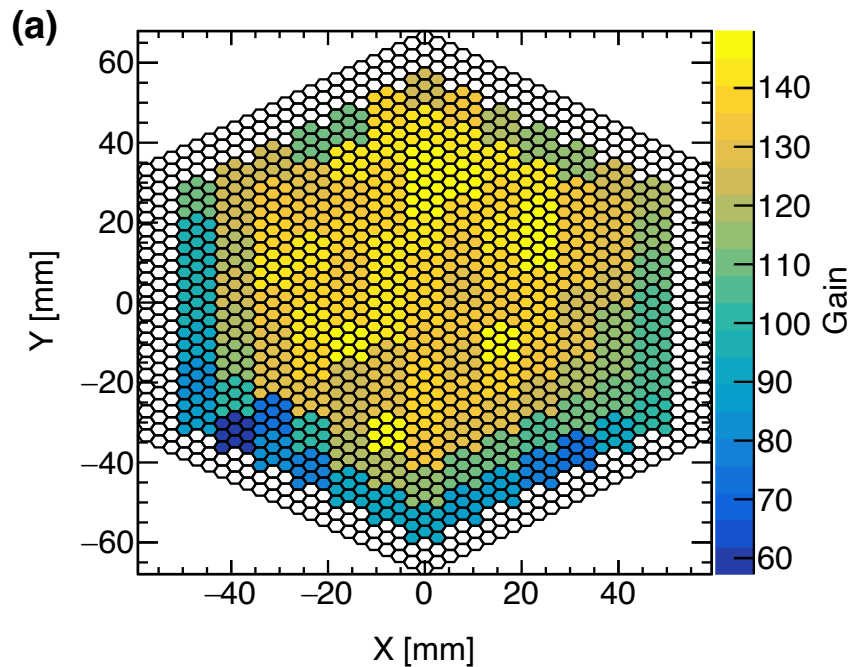


增益修正

增益修正利用MTPC Micromegas的气隙刻度结果，可提高能量分辨率



增益修正Map



MTPC径迹信息

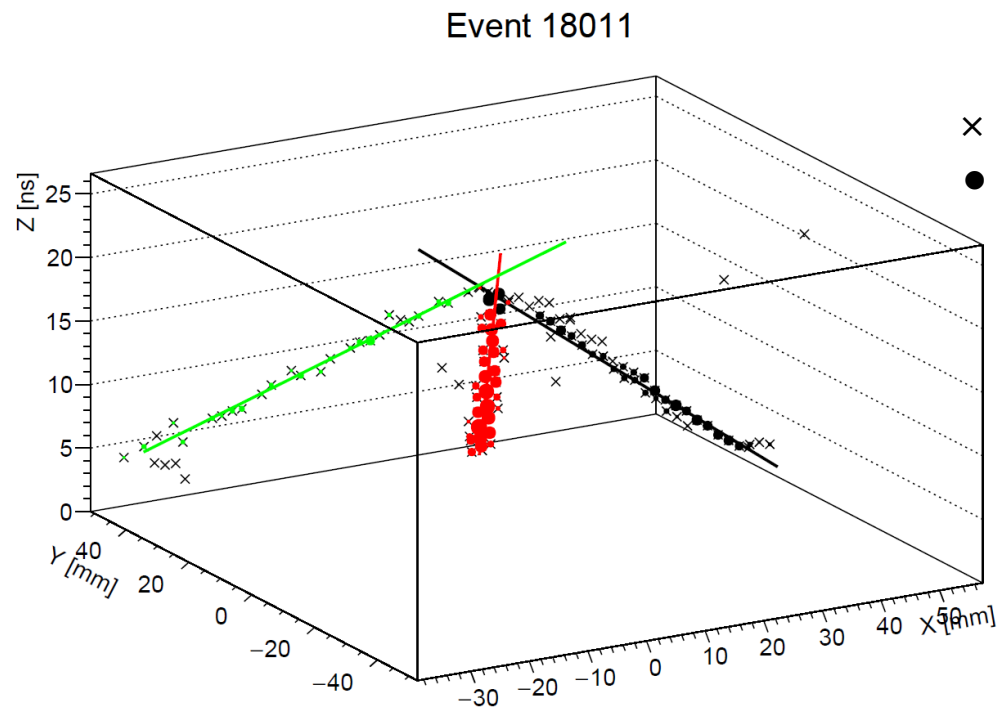
目前，用BLUET可获取MTPC径迹相关的信息：

- 径迹数
- 径迹Phi角, $\cos\theta$
- 径迹外推/内插至特定z（或x或y）所对应的xy（或yz或xz）
- 径迹外推/内插至zmax所对应的xy
- 该条径迹的击中数
- 该条径迹zmax和zmin击中的坐标和index
- zmax和zmin两个击中的距离，投影到径迹上
- 径迹上的击中幅度之和
- 径迹上某个击中到zmax击中的距离，投影到径迹上
- 径迹与击中的残差

存在的问题

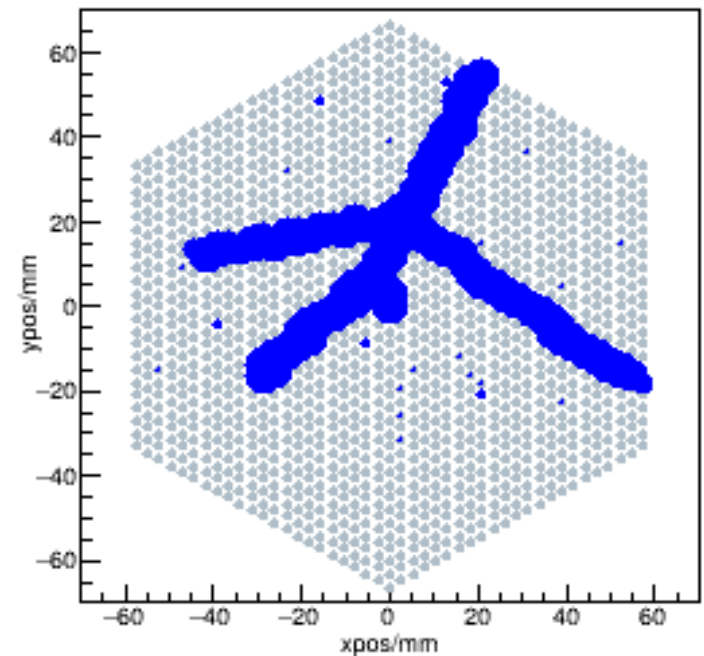
顶点重建

- 白光中子束流实验中，对多径迹事例重建反应顶点可提供核反应的动力学信息，例如：
 - 通过各径迹的角度和顶点位置信息，计算出反应的质心能量
 - 对有多次相互作用的事例，可识别primary相互作用点



2020年白光束流实验数据

Event track display in x-y plane.

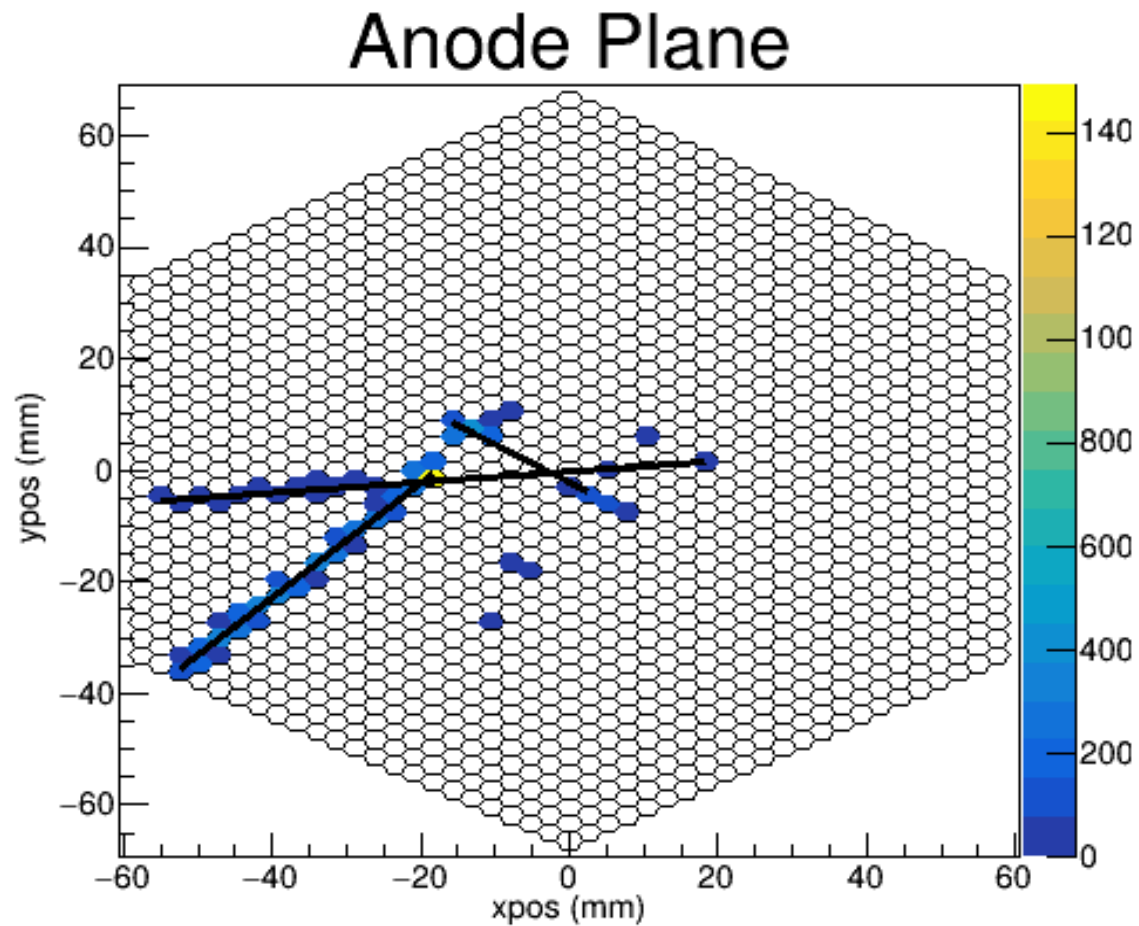


摘自易晗2023年5月的PPT@USTC

存在的问题

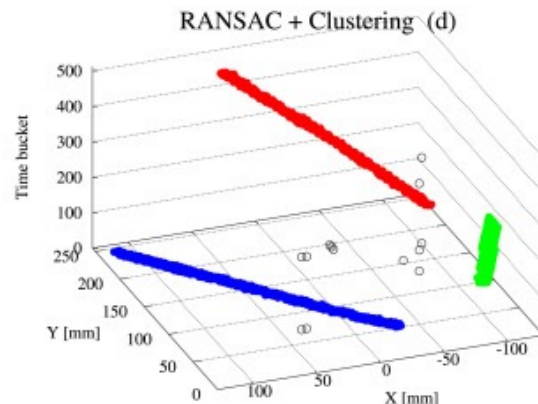
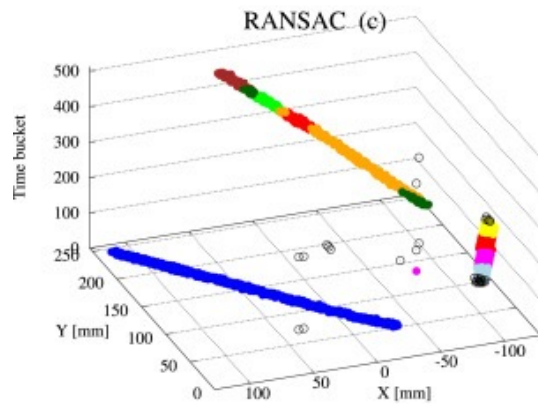
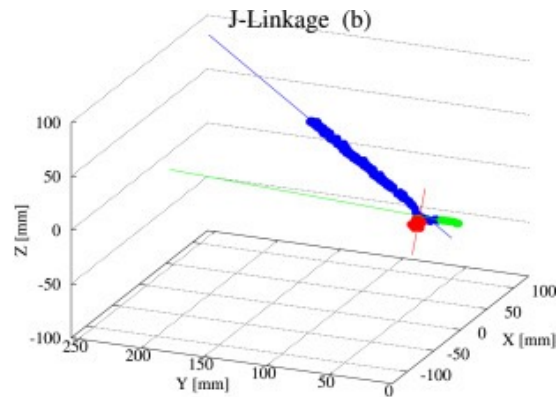
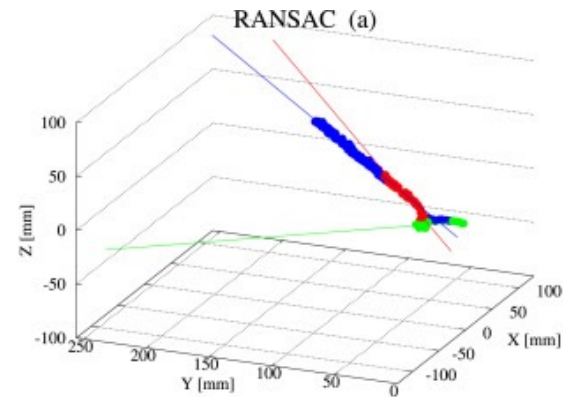
多径迹重建效率

- 在高中能中子区，点火pad数多的情况下，非连续径迹容易被误判为同一径迹



改进计划

- 结合计算机图像识别的**RANSAC算法和聚类算法**
- 其应用于AT-TPC、ACTAR、TexAT的径迹重建，对长短多径迹的重建效率较高





中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

汇报完毕

恳请各位老师批评指正

