

基于多用途时间投影室 (MTPC) 的径迹重建算法研究



报告人：陈海铮

西安交通大学

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

2026年7月24日

2026年第十四届全国先进气体探测器研讨会@惠州

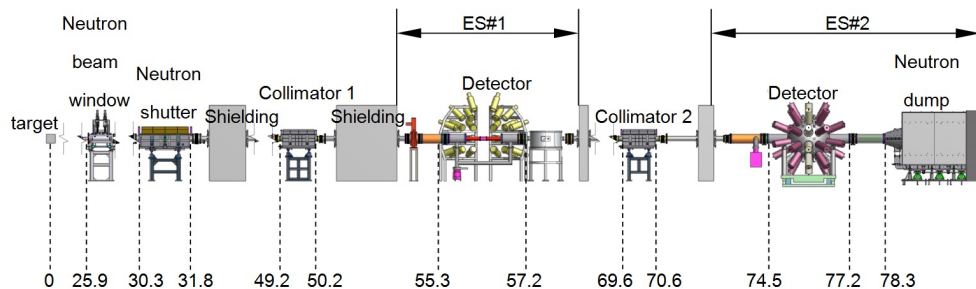
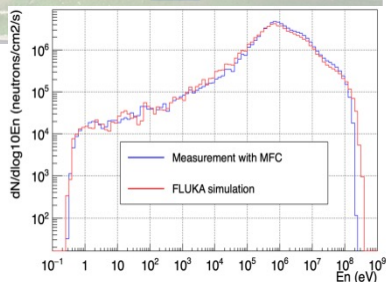
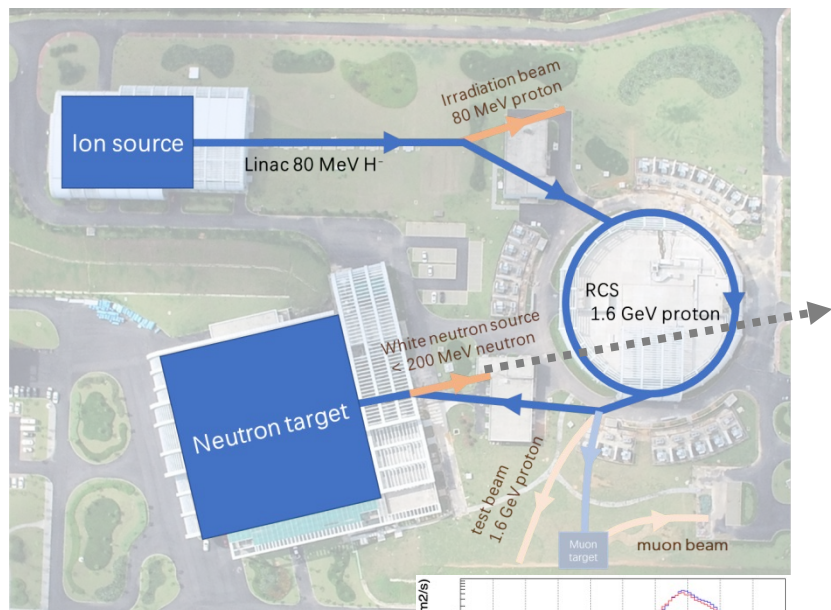
报告内容

- 研究背景
- 实验需求
- 径迹重建算法研究
- 截面数据分析
- 后续规划

报告内容

- 研究背景
- 实验需求
- 径迹重建算法研究
- 截面数据分析
- 后续规划

CSNS反角白光中子实验装置



- CSNS反角白光中子实验装置(Back-n): 国内首条宽能区强流白光中子束线
- 覆盖能区: 热中子 $\sim 300\text{MeV}$, 流强: $\sim 10^7/\text{cm}^2/\text{s}$
- 中子核数据测量研究:
 - 裂变截面
 - 全截面测量
 - 轻带电粒子出射反应截面测量
 - 中子俘获反应截面测量

项目概况

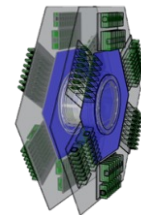


2019年8月：
探测器设计加工



2021年1月：
完成专用电子学
系统研制和测试

2021年4月：
模拟与数据分析程
序框架开发



2021年8月：
开始v2版本探测
器设计和加工

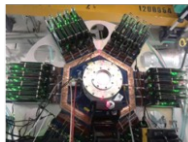
2022年4月：
完成v2版本读出板转
接板和气压腔体加工

2019年12月：
v1版本探测器研
制及DAQ开发



2020年3月：
开始专用电子学
系统研制

2021年2月：
开展专用电子学和探
测器联合束流测试

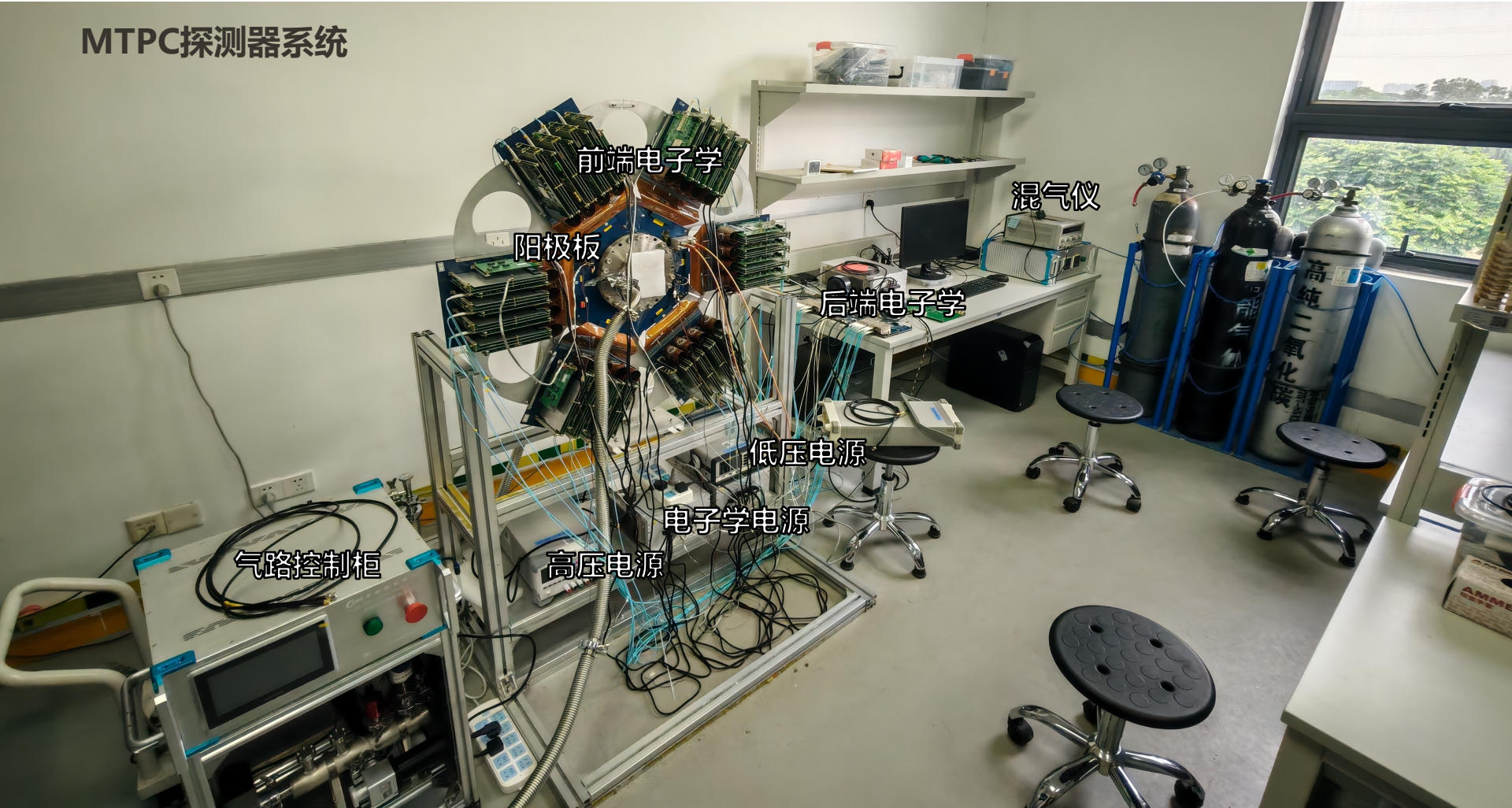


2022年3月：
完成v2版本DAQ及
在线显示开发



至今：
开展多个物理实验

MTPC探测器系统

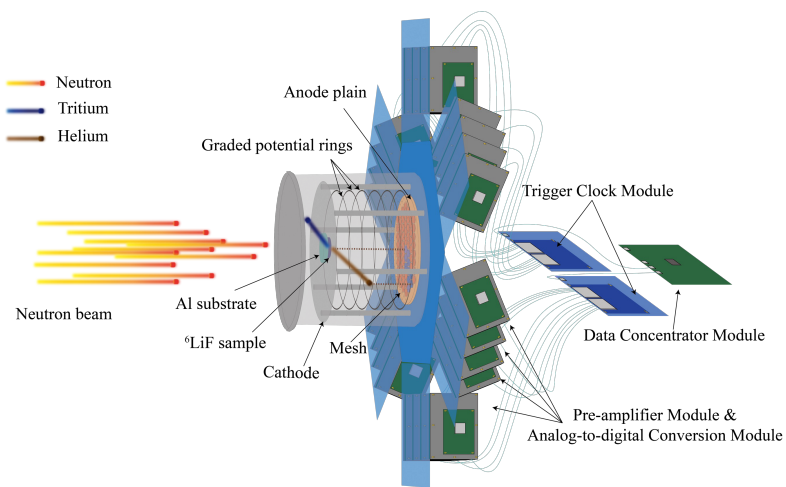


报告内容

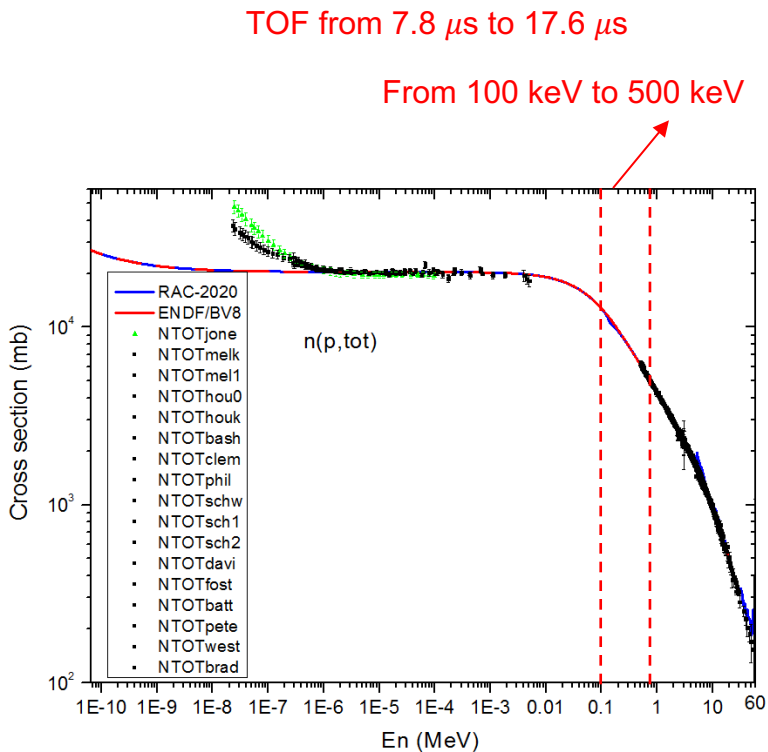
- 研究背景
- 实验需求
- 径迹重建算法研究
- 数据分析结果
- 后续规划

实验目标

- MTPC技术应用
- 白光中子源束流测试
- n-p散射标准截面测量



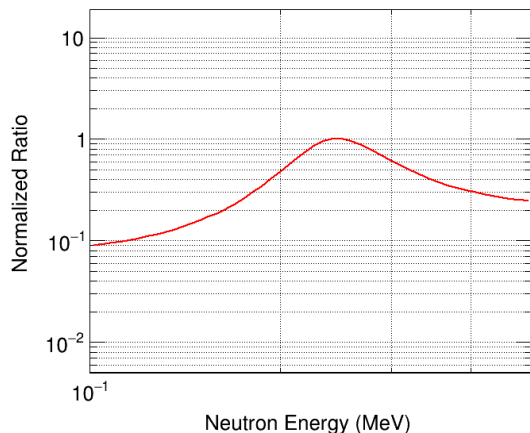
MTPC结构框架图



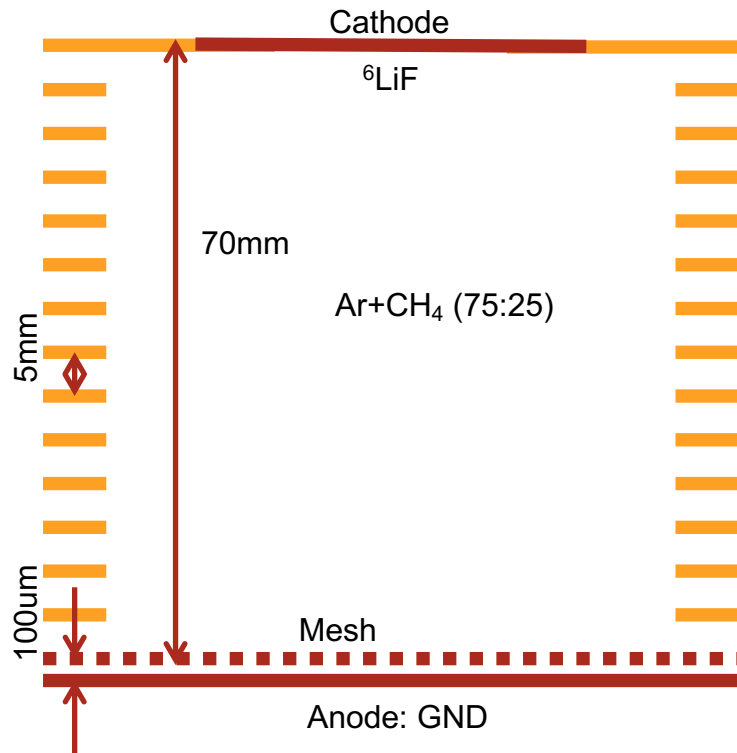
n-p标准截面

实验方法

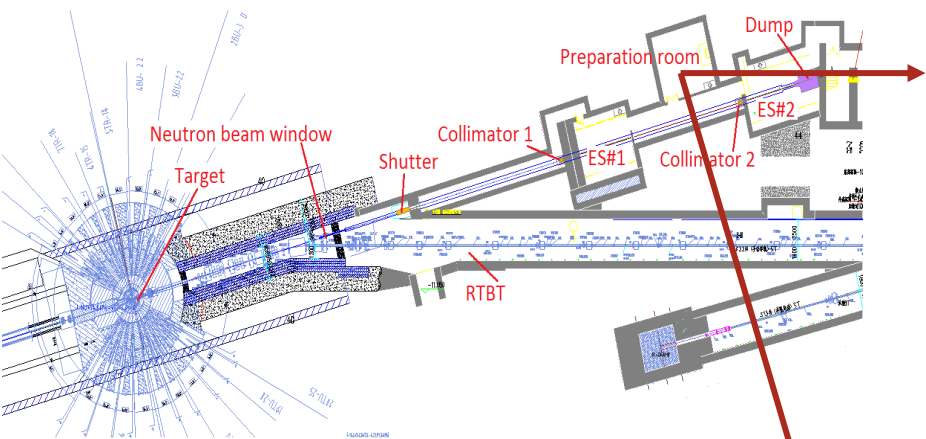
- 目标中子能量：100keV-500keV
- 漂移长度：70mm
- 工作气体：0.15 bar 75% Ar+25% CH₄
- 靶材料：⁶LiF、H核
- 截面参考： $\sigma(\text{Li-6}) / \sigma(\text{n-p})$



$\sigma(\text{Li-6}) / \sigma(\text{n-p})$ 标准截面比



实验布局



● 束流参数: $\varphi 3-15-40$ 束斑 + 铅砖

Shutter (mm)	Coll#1 (mm)	Coll#2 (mm)	ES#1 spot (mm)	ES#1 flux (n/cm ² /s)	ES#2 spot (mm)	ES#2 flux (n/cm ² /s)
$\Phi 3$	$\Phi 15$	$\Phi 40$	$\Phi 15$	1.27E5	$\Phi 20$	4.58E4
$\Phi 12$	$\Phi 15$	$\Phi 40$	$\Phi 20$	2.20E6	$\Phi 30$	7.81E5
$\Phi 50$	$\Phi 50$	$\Phi 58$	$\Phi 50$	4.33E7	$\Phi 60$	1.36E7
78×62	76×76	90×90	75×50	5.98E7	90×90	2.18E7



数据分析流程



二进制转换

根据编码规则转换有效信息、
通道校正

00101010

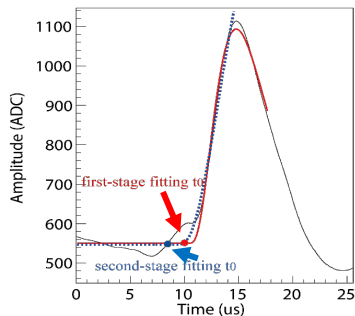
Double BoardID
Double ChipID
Double ChannelID

...



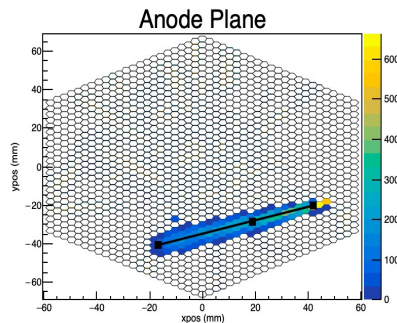
波形分析

从信号中提取时间、幅度参数



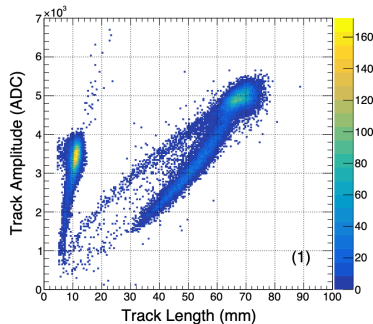
径迹重建

将不同通道的信号识别为一
个事例



事例鉴别

区分粒子类型、归纳反应通
道



分析测试

形状特征

宽长 (alpha)
细长 (triton)
团簇 (proton)

幅度特征

triton、proton
能量沉积小
alpha能量沉积大

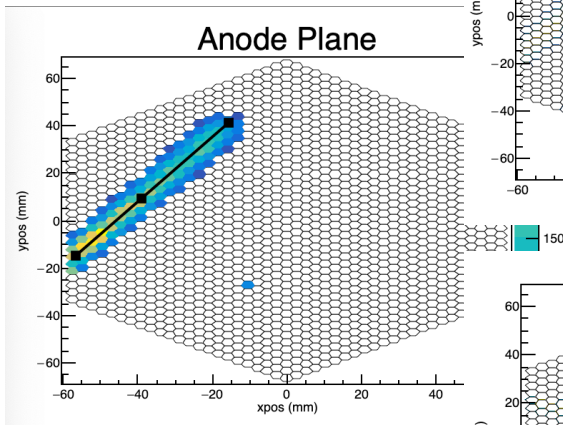
事例叠加

n-p散射反
应率较高

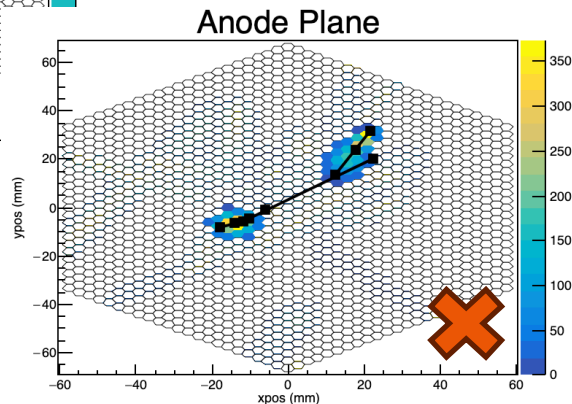
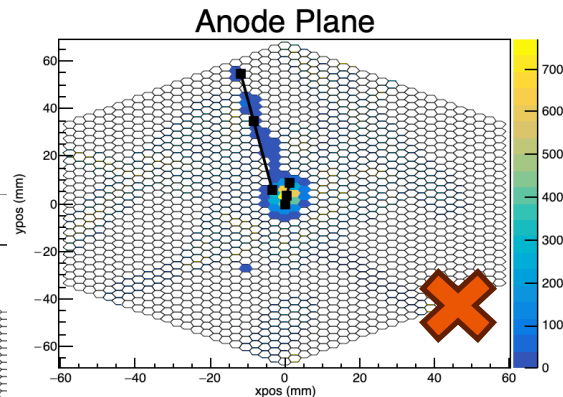
错误识别

Hough变换会导致
两个识别为一个

alpha



alpha?+triton

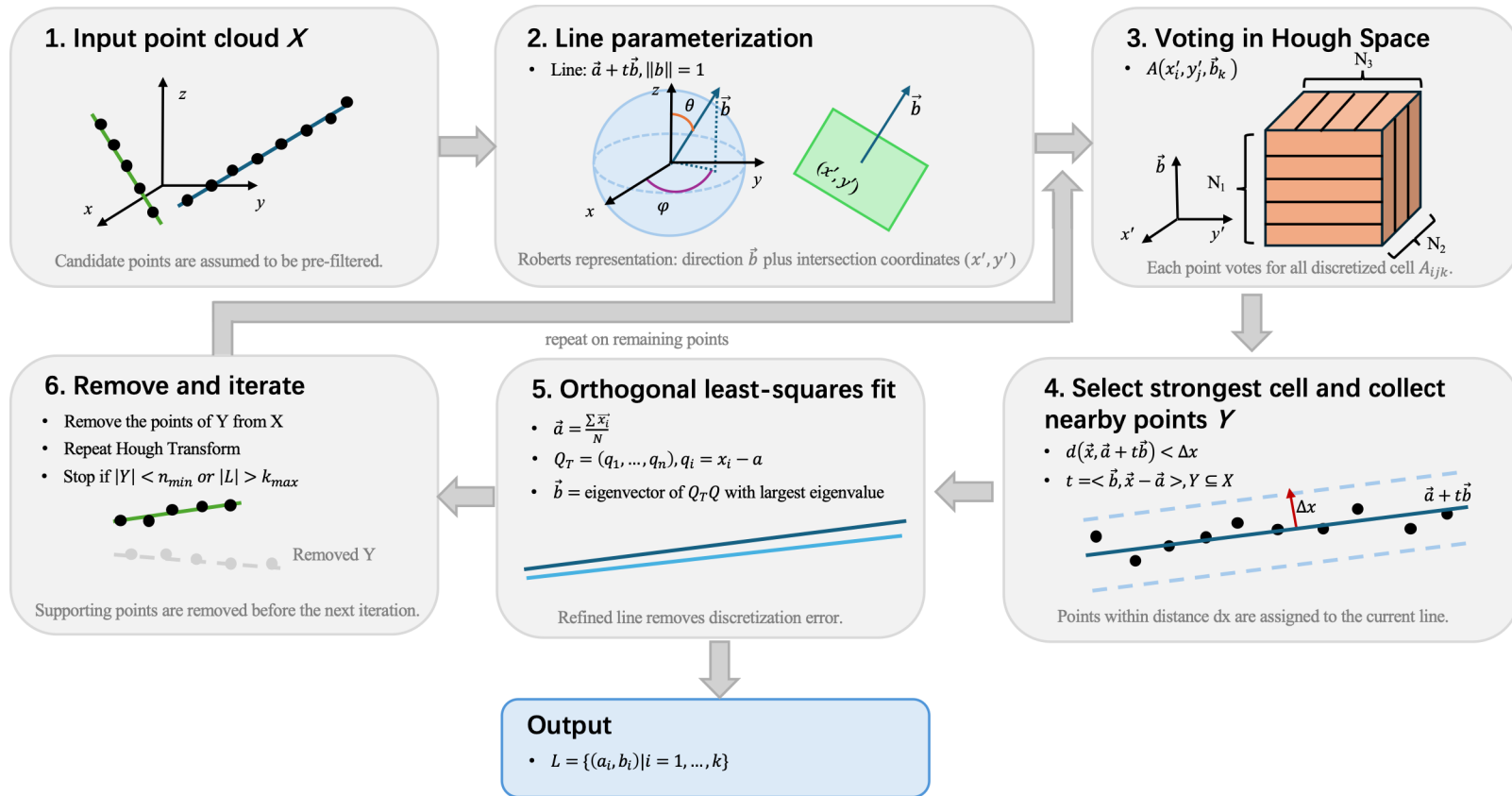


2 * proton

报告内容

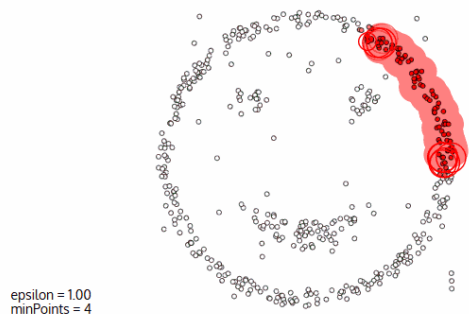
- 研究背景
- 实验需求
- 径迹重建算法研究**
- 数据分析结果
- 后续规划

原径迹重建算法：三维迭代Hough变换



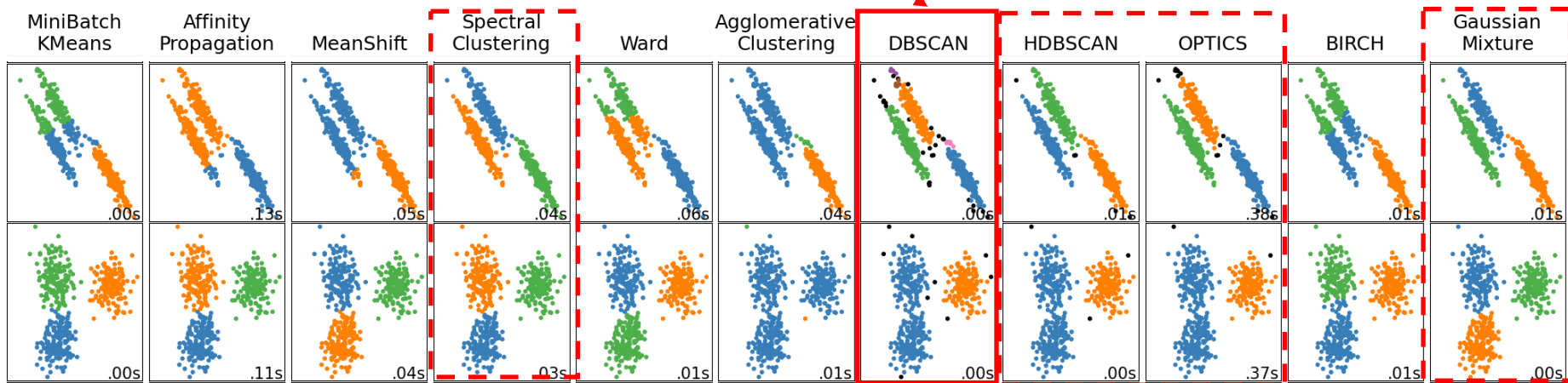
无监督学习算法：密度聚类 (DBSCAN)

- 基于密度的聚类，根据密度对点进行分组，识别任意形状的簇并隔离噪声点。
- 优点：密度敏感、可拓展性强、无需预先确定簇数量
- 缺点：参数敏感 (ϵ 、MinPts)、计算量大、对噪声和异常值敏感



Restart

Pause

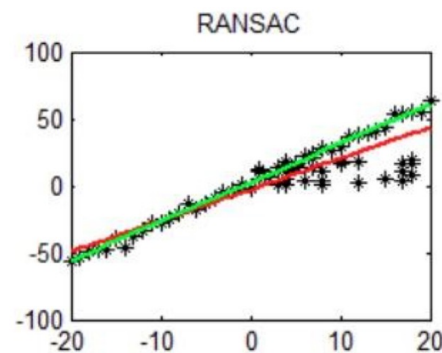
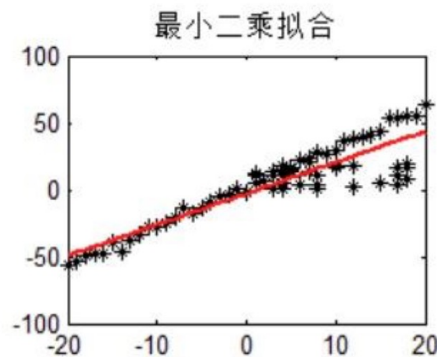
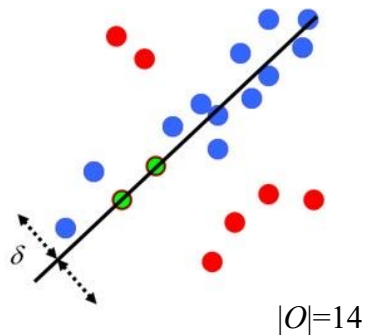
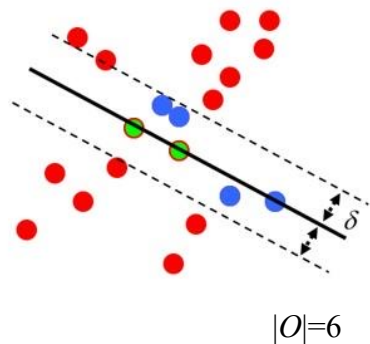


官方案例

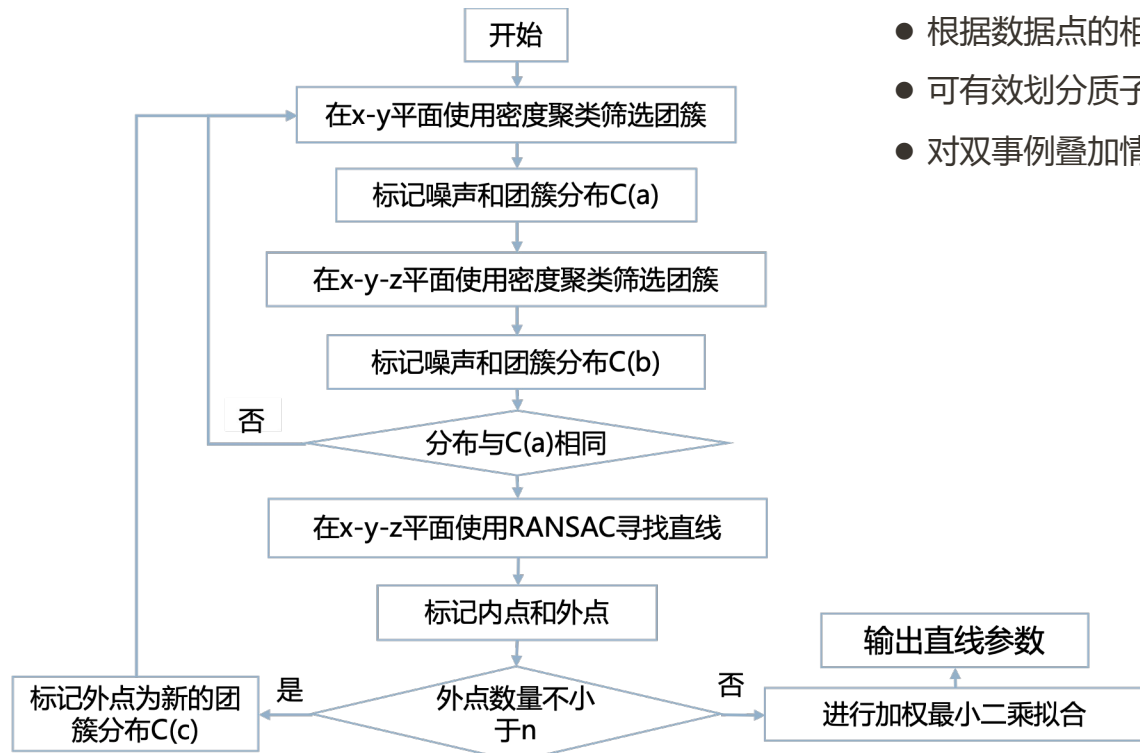
<https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html>

直线查找：随机抽样一致算法 (RANSAC)

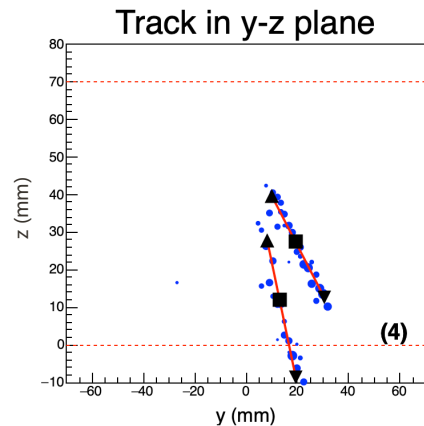
- 随机抽取2个样本点，进行直线拟合
- 找出拟合直线半径范围 (δ) 内的点，并统计点的个数
- 重新随机选取点，重复第1~2步的操作，直到找到最多的内点。



新径迹重建算法：DBSCAN+RANSAC



- 根据数据点的相似性将点集进行分组，再从中重建径迹
- 可有效划分质子“团簇”事例
- 对双事例叠加情况同样有实现区分



双事例叠加情况

报告内容

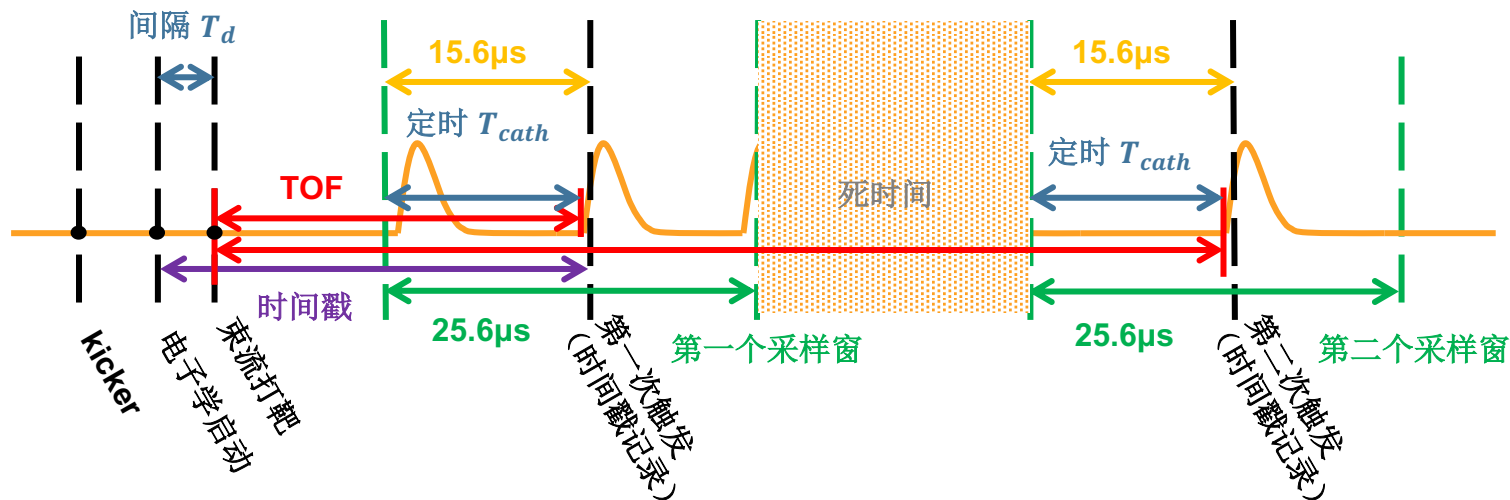
- 研究背景
- 实验需求
- 径迹重建算法研究
- 截面数据分析**
- 后续规划

中子能量刻度

- TOF方法需要准确的**飞行距离** L
- 对于中子信号有: $TOF_n = T_n - T_d = L/v_n$
- 对于 γ -flash信号有: $TOF_\gamma = T_\gamma - T_d = L/c$
- 确定 T_d 需要对 γ -flash进行时间刻度

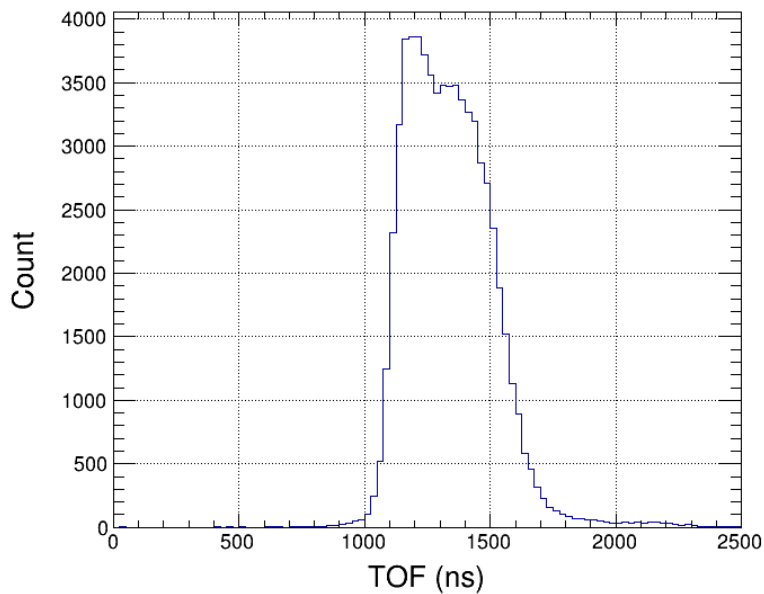
$$v_n = c \cdot \sqrt{1 - (E_n/(m_n c^2) + 1)^{-2}}$$

$$T_n - T_\gamma = \frac{L}{c} \left[1 / \sqrt{1 - \left(\frac{E_n}{m_n c^2} + 1 \right)^{-2}} - 1 \right]$$



γ -flash刻度

- 使用同期U-235数据进行刻度, 阴极信号幅度更大
- $\text{TOF} = \text{StampTime} - \text{TriggerDelay} + \text{CathodeTime}$
- 最终结果为1212.5ns



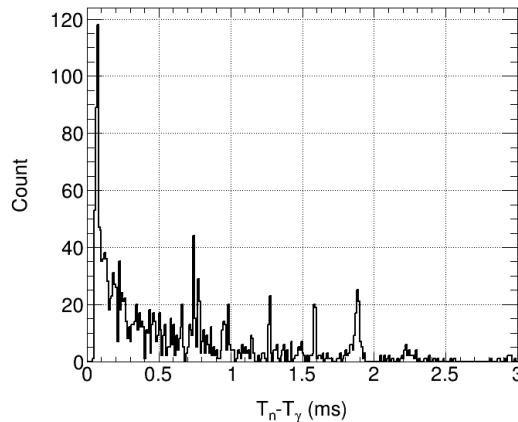
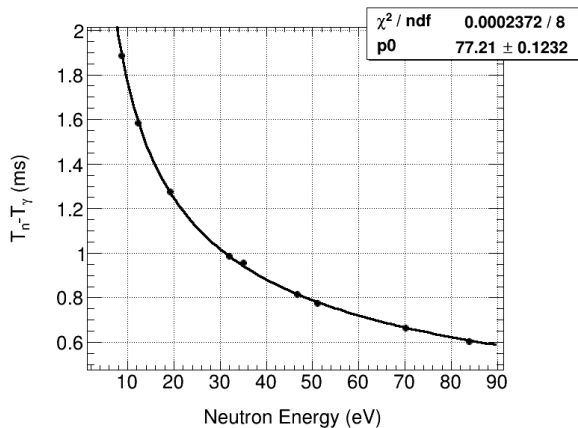
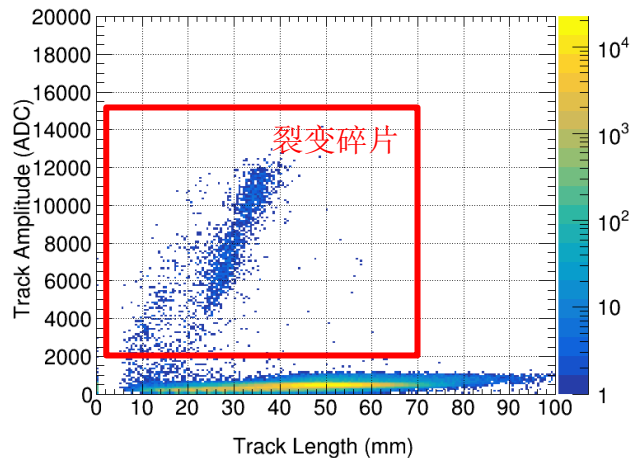
飞行距离刻度

- 使用U-235的共振峰进行中子能量刻度
- 统计幅度大于2000ADC的事例，刻度距离为77.2075m
- 拟合公式：

$$T_n - T_\gamma = \frac{L}{c} \left[1 / \sqrt{1 - \left(\frac{E_n}{m_n c^2} + 1 \right)^{-2}} - 1 \right]$$

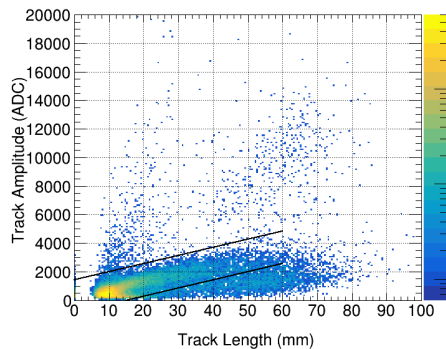
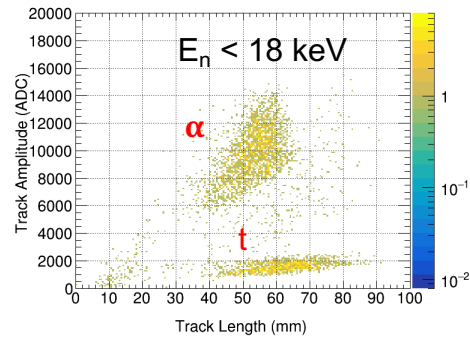
$$\bullet T_d = T_\gamma - L/c = 955.2ns$$

E_n	$T_n - T_\gamma(\text{ms})$
8.75	1.885
12.33	1.585
19.21	1.275
31.94	0.985
35.05	0.955
46.72	0.815
51.06	0.775
70.19	0.665
83.825	0.605

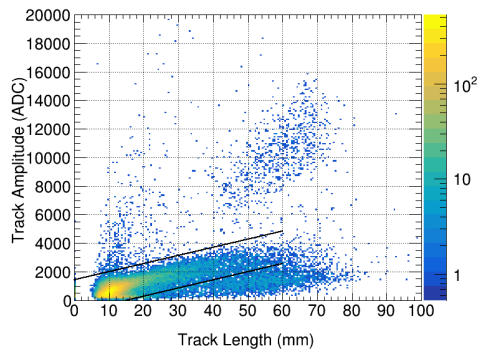


目标能区统计

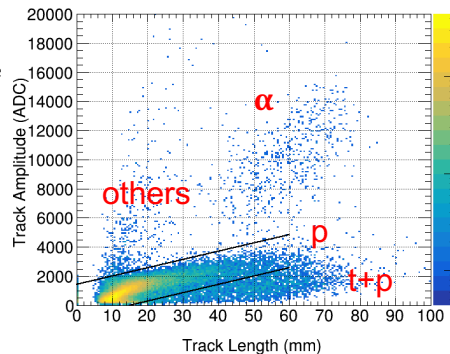
- 筛选0.1-0.5MeV中子能量的事例
- 黑线中间的粒子视为proton
- 部分proton和triton重叠



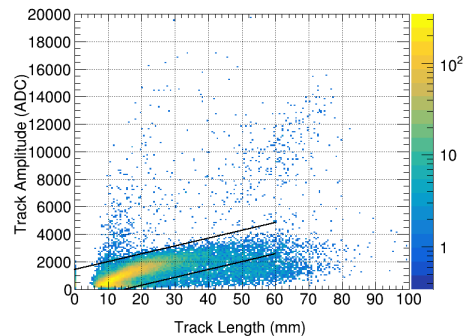
$100 < E_n < 200 \text{ keV}$



$200 < E_n < 300 \text{ keV}$



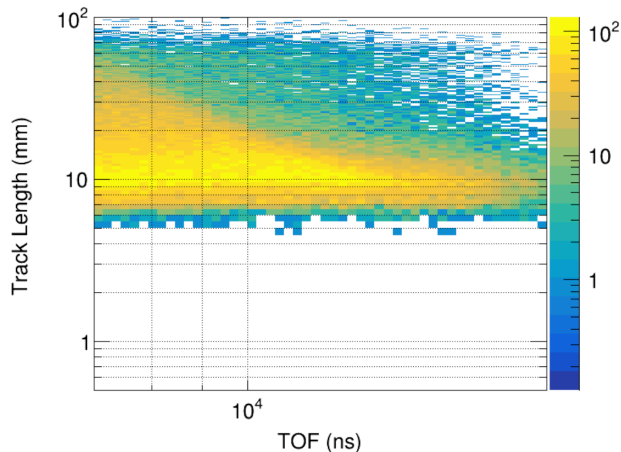
$300 < E_n < 400 \text{ keV}$



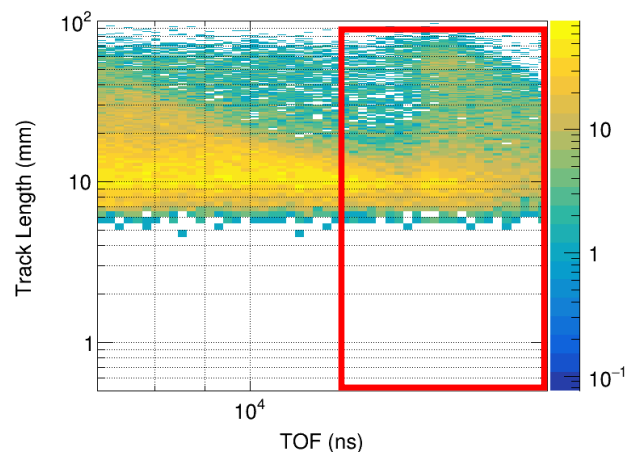
$400 < E_n < 500 \text{ keV}$

截面统计与问题

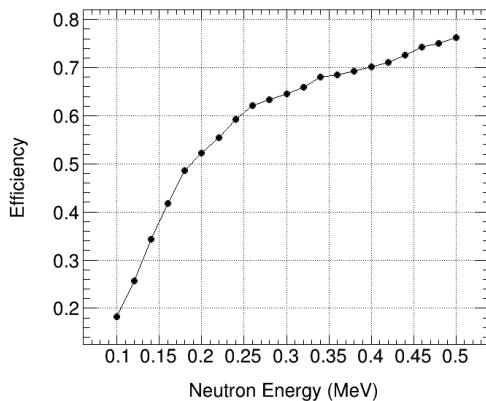
- 实验数据在100-200keV存在TOF错位
- 整体趋势与参考截面相近
- 证明了目前径迹重建方法的有效性



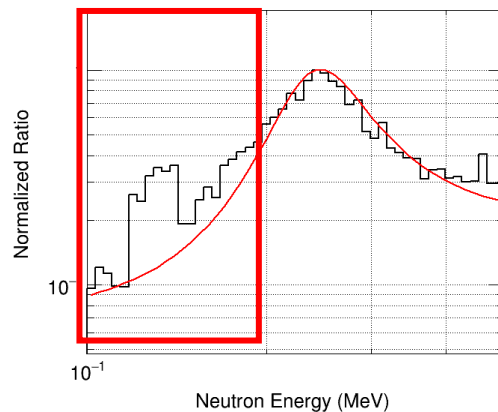
正常文件



数据错位文件



质子探测效率



截面比对比

报告内容

- 研究背景
- 实验需求
- 径迹重建算法研究
- 截面数据分析
- 后续规划

后续计划

1. 增加模拟验证的过程，评估径迹重建算法的事例重建效率
2. Li-6作为参考截面反应率较低
 - 考虑加厚Li-6的靶材料厚度
3. 部分proton和triton难区分
 - 优化实验参数，如提高气压（比如0.5bar），目标proton能量范围修改为0.3-0.7 MeV



谢谢!