



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



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



基于多用途时间投影室的 白光中子束斑测量



汇报人：白灿

散裂中子源科学中心

中国科学院高能物理研究所

2025年7月24日

□ 实验设置

□ 束斑分析

□ 报告总结

□ 实验设置

□ MTPC介绍

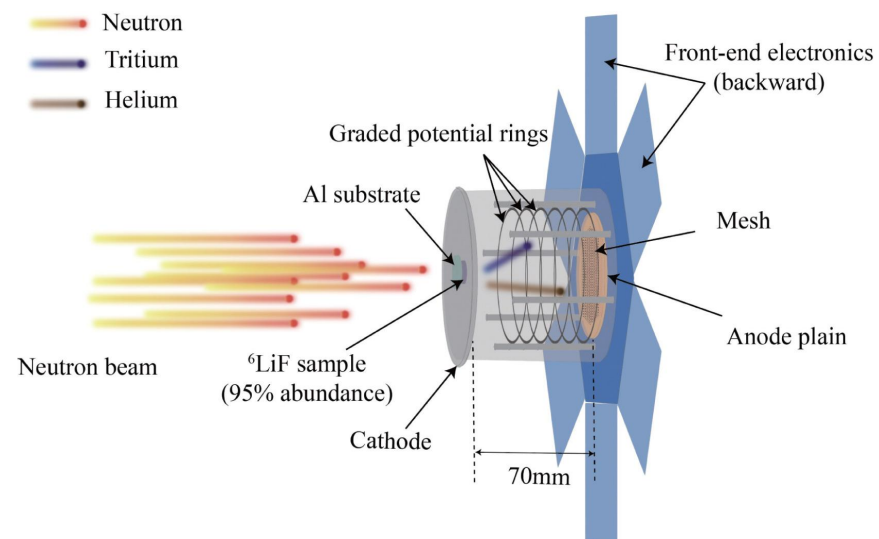
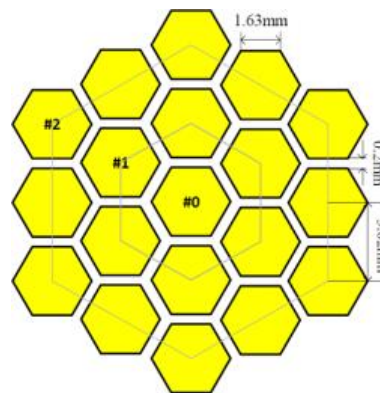
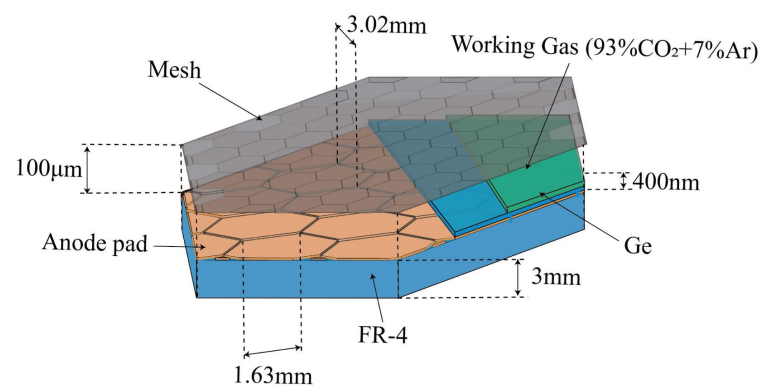
□ 束流实验配置

□ 束斑分析

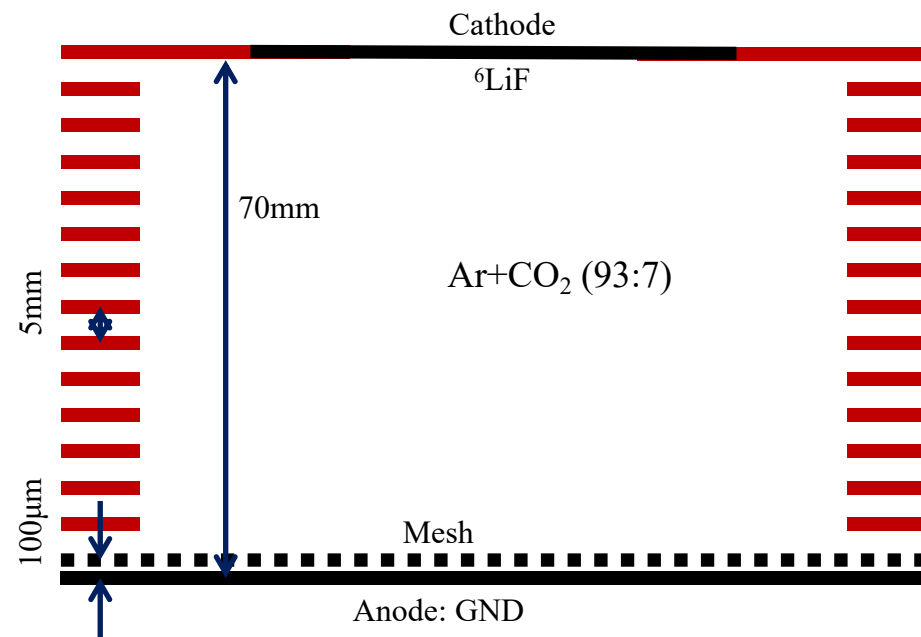
□ 报告总结

MTPC介绍

- 用于复杂中子核反应及低截面中子核反应的实验研究
- 场笼结构为圆柱体，兼容单端双端读出模式
- 读出阵列采用六边形密堆结构
- 1519个阳极pad，每个pad边长1.63mm，阳极区边长约68mm

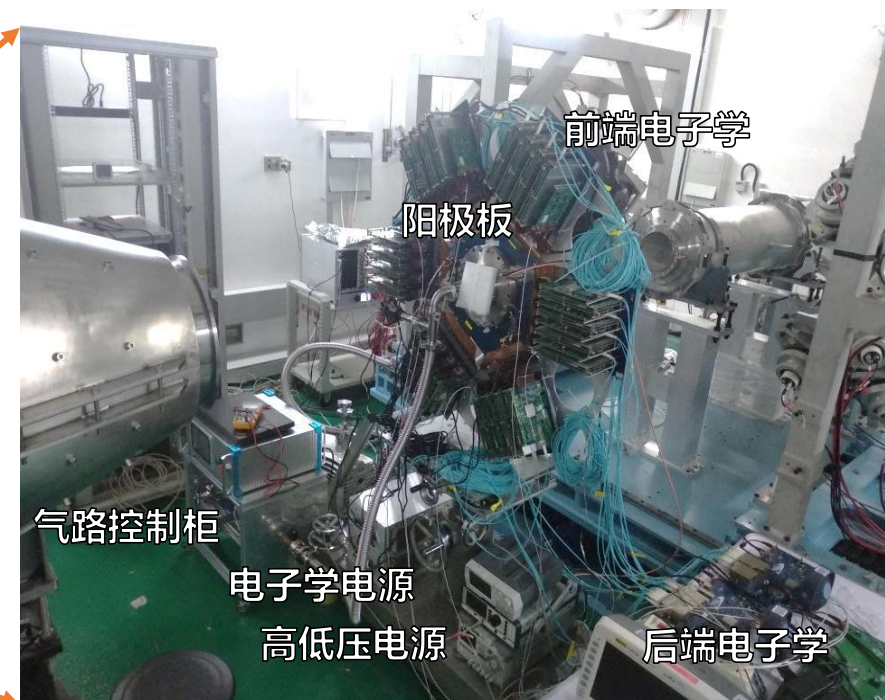
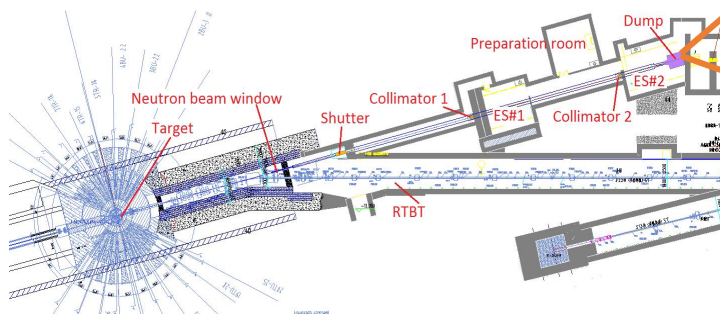


- 漂移区距离70mm
- 阴极中心放置 ${}^6\text{LiF}$ 样品
 - 厚度560nm
 - ${}^6\text{Li}$ 丰度95%
 - ${}^6\text{LiF}$ 面密度 $148\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、直径66mm
 - Al衬直径89mm、厚度 $10.8\mu\text{m}$
- 工作电压
 - 0.9bar: $V_{\text{mesh}}=-400\text{V}$, $V_{\text{cathode}}=-1800\text{V}$
 - 0.5bar: $V_{\text{mesh}}=-300\text{V}$, $V_{text{cathode}}=-1350\text{V}$



束流实验配置

- TPC位于厅二，阳极板距离散裂靶中心77m
- 主要测量目标
 - 反应 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$
 - 束斑测量
- 束斑：1mmGd-6cmPb- $\phi 12$ - $\phi 15$ - $\phi 40$ 组合（加铅砖 $\phi 30$ ）
 - 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）



□ 实验设置

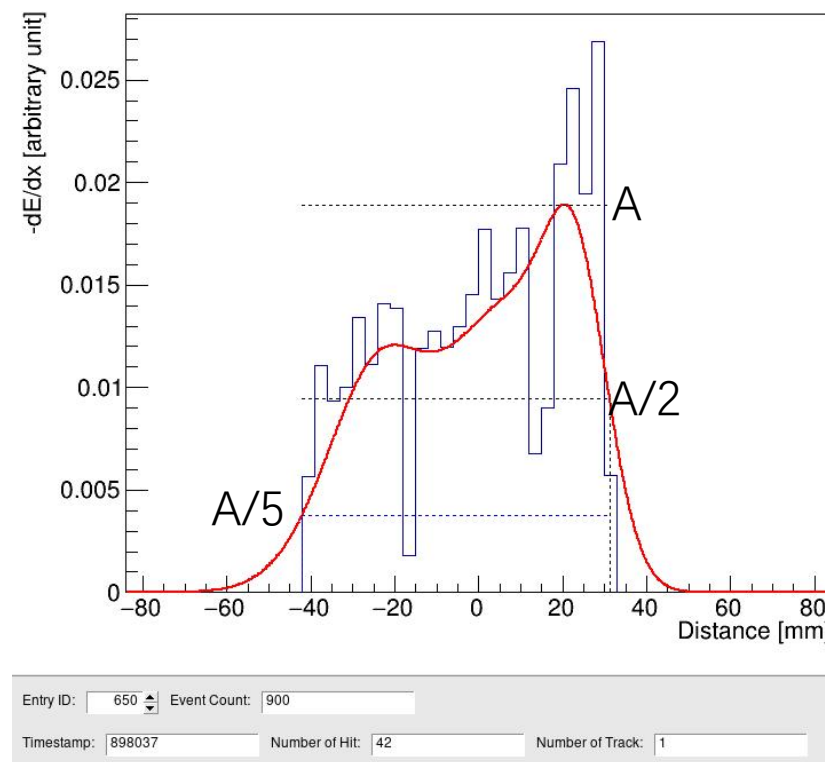
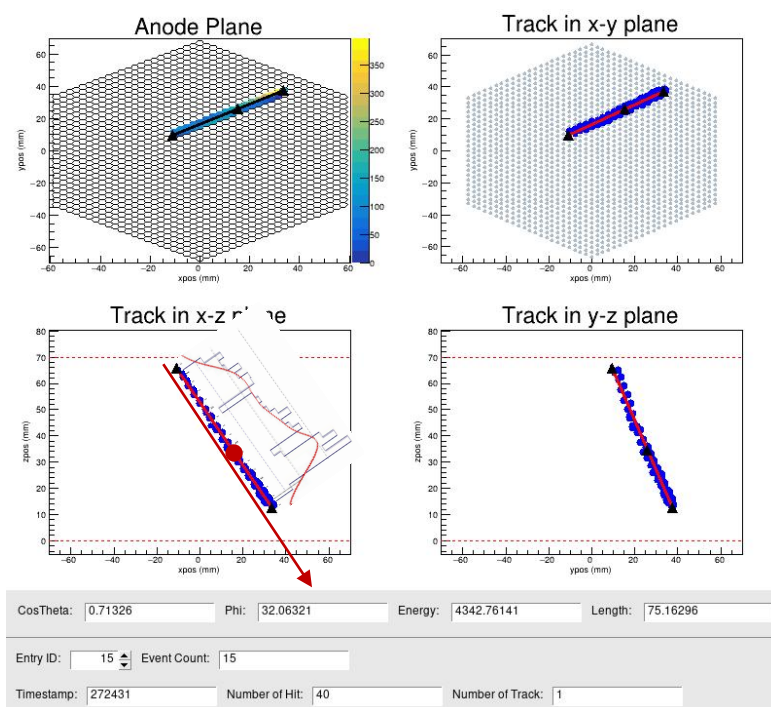
□ 束斑分析

- 径迹分析
- 束斑参数分析
- 能谱分析

□ 报告总结

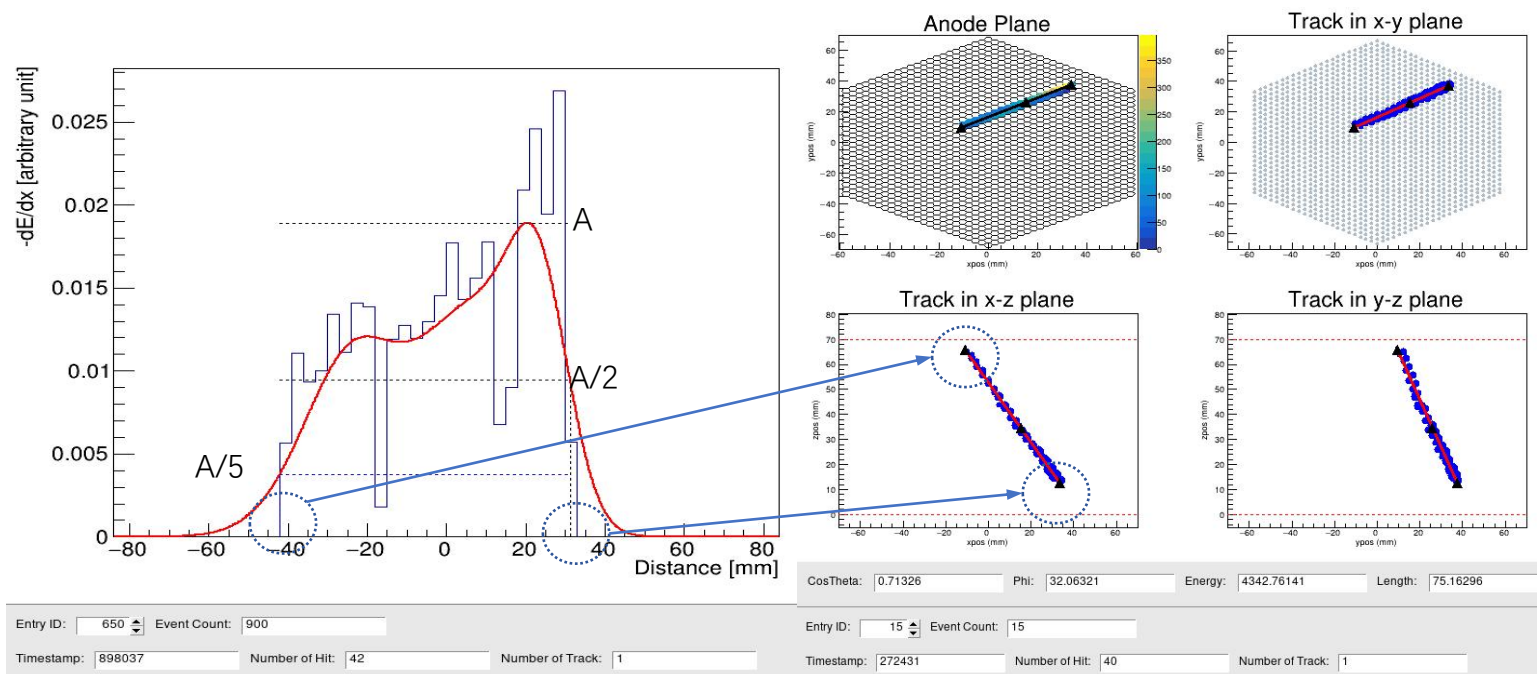
径迹分析：能损与径迹

- Tracking: 查找(Hough变换)+拟合(主值分析)
- 采用KDE算法对 dE/dx 分布进行平滑, 得到KDE函数曲线
- 通过 dE/dx 投影中最大值的坐标判断径迹方向



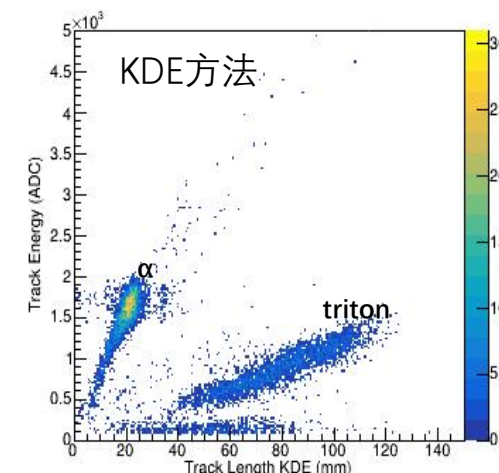
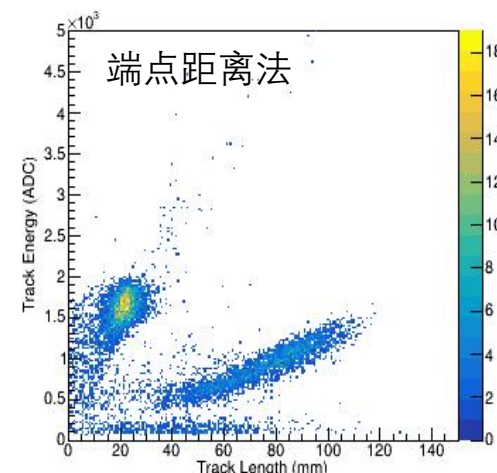
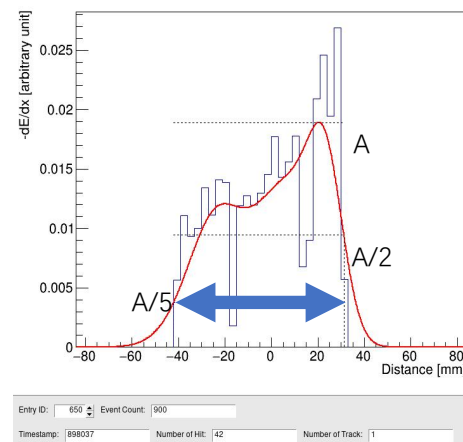
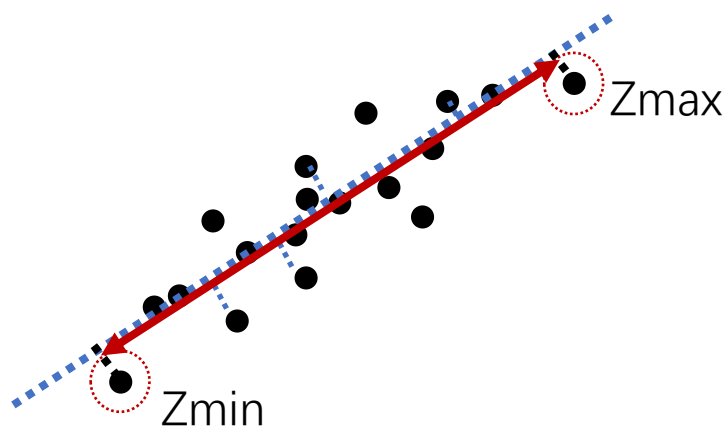
径迹分析：顶点分析

- 取 A/λ_1 和 A/λ_2 处为径迹顶点
- $\lambda_1 = 5, \lambda_2 = 2$
- 通过重心点和方向向量进行坐标系转换
- 得到径迹顶点在探测器坐标系的坐标



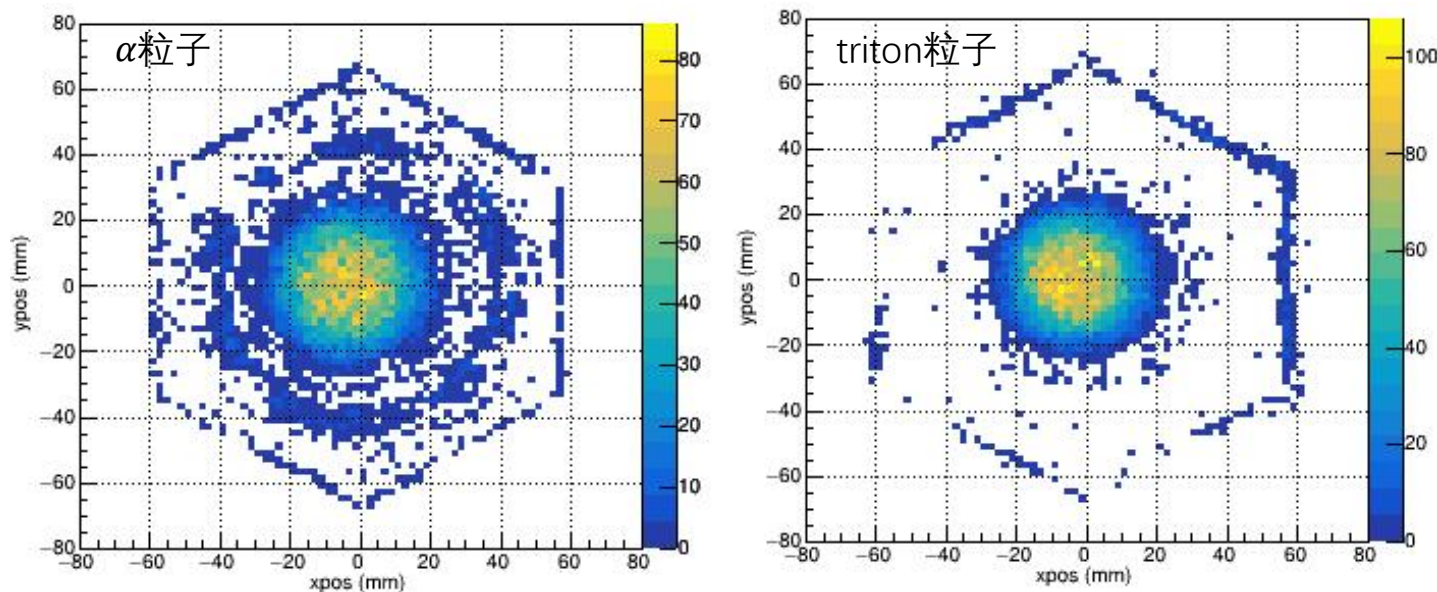
径迹分析：射程分析

- 端点距离法
 - 通过Zmax和Zmin点在径迹方向投影上的距离得到径迹射程
- KDE方法
 - 将dE/dx分布中重建顶点距离定义为径迹射程
- KDE方法具有更好的径迹分辨

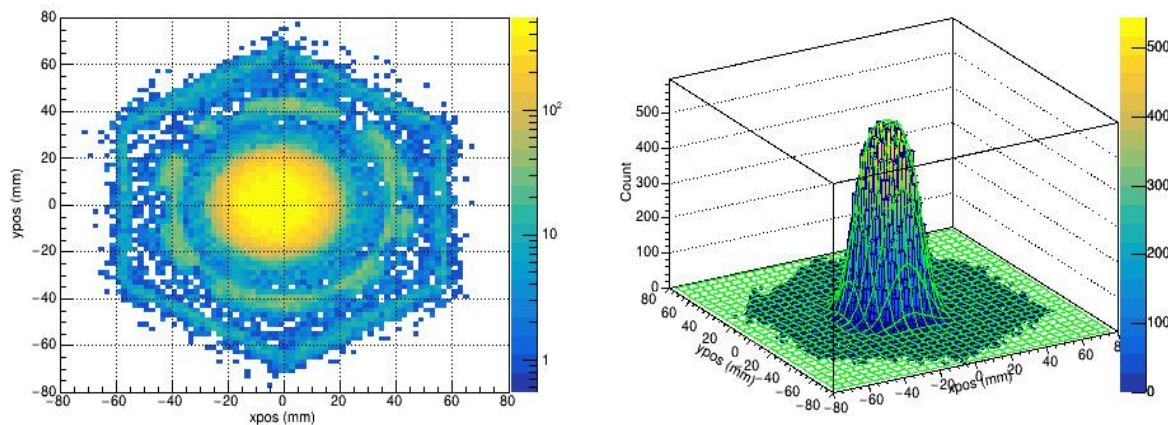


束斑分析：粒子分布

- 分别统计 α 粒子和triton粒子径迹顶点坐标得到 $\Phi 30\text{mm}$ 束斑分布
- α 粒子重建束斑（左）：环形PCB样品支撑和均压环存在 α 本底
- triton粒子重建束斑（右）：部分triton径迹顶点误判为边缘位置



- 拟合阳极平面内 $r < 35\text{mm}$ 区域内的束斑分布
- 采用二维误差函数进行整体拟合

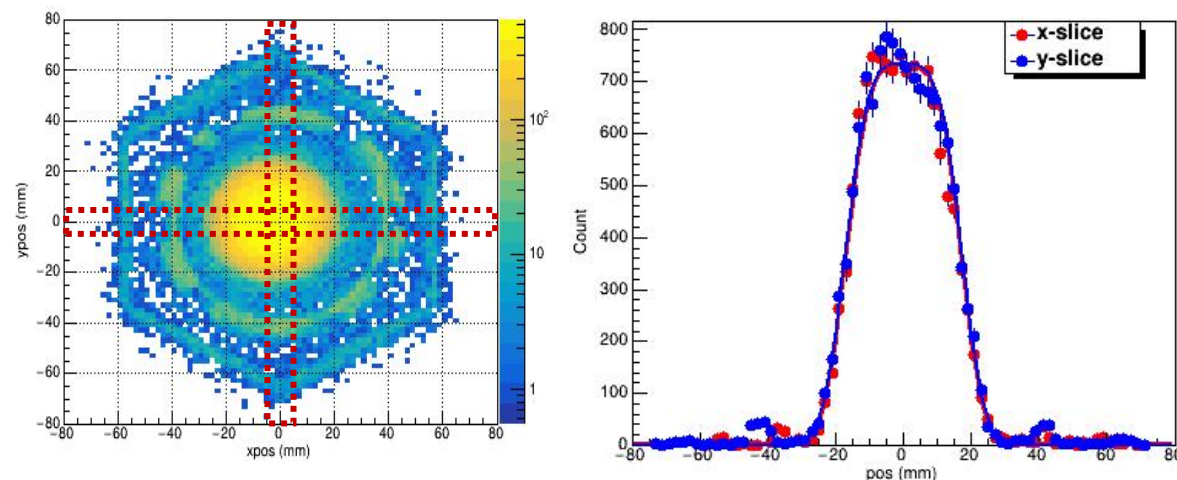


$$f(x, y) = B + \frac{A}{2} \left[\text{Erf} \left(\frac{r(x, y) + r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left(\frac{r(x, y) - r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right], \quad r(x, y) = \sqrt{\left(\frac{x - x_0}{e} \right)^2 + (y - y_0)^2}$$

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

束斑分析：XY方向拟合

- 截取过圆心，x和y方向宽度为5mm的切片作束斑分布图
- 函数拟合得到束斑参数，与直接二维拟合结果相符

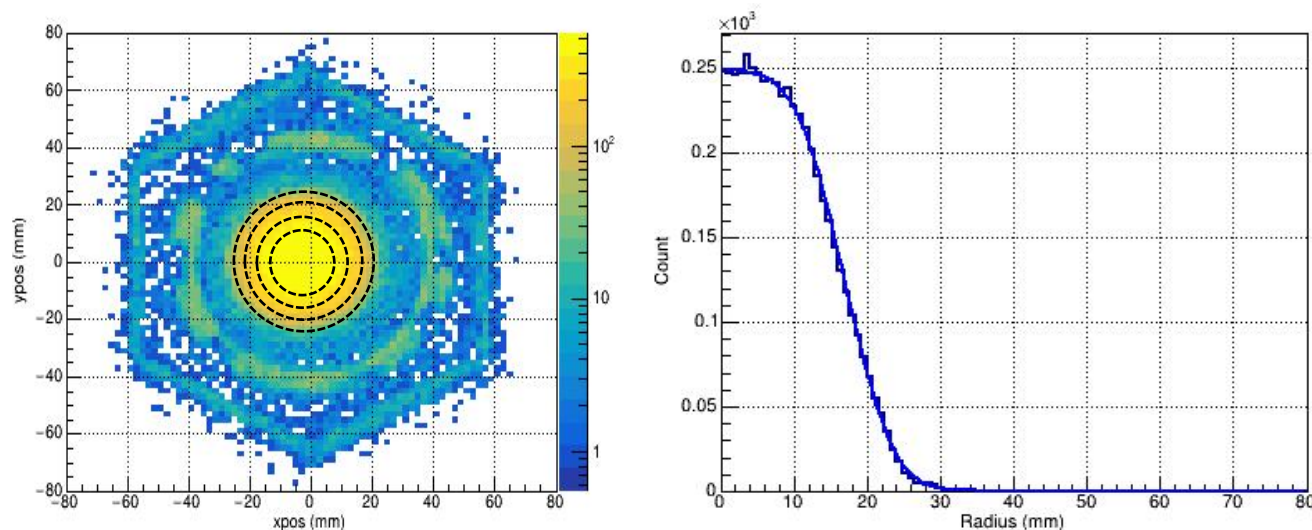


$$f(s) = B + A \left[\text{Erf} \left(\frac{s - r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \text{Erf} \left(\frac{s + r_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]$$

X-50%半径(mm)	X-边缘锐利度(mm)	Y-50%半径(mm)	Y-边缘锐利度(mm)	XY半径比
16.30±0.11	5.35±0.08	16.89±0.07	5.25±0.07	0.965

束斑分析：r方向拟合

- 将r分布一维直方图每个bin的计数按该bin对应的圆环面积归一
- 用Sigmoid函数拟合r分布得等束斑参数，与前面2个分析结果相符



$$f(r) = B + \frac{A}{1 + e^{(r-r_0)/\sigma}}$$

50%半径(mm)	10%半径(mm)	边缘锐利度(mm)
16.92	23.61	5.20±0.28

束斑分析：三种方法对比

- 二维直接拟合

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

- XY方向切片拟合

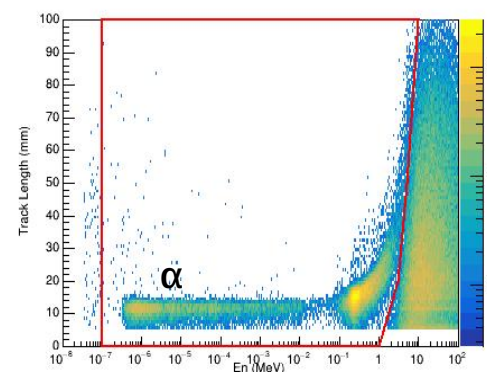
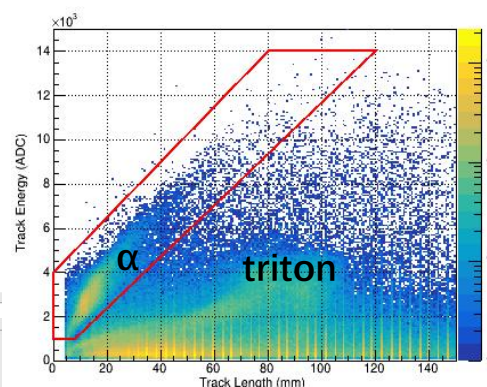
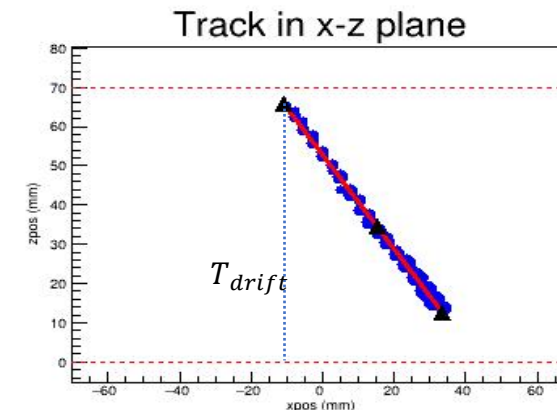
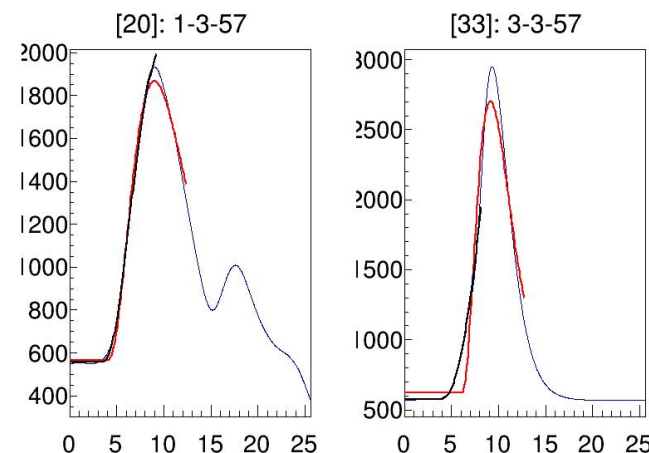
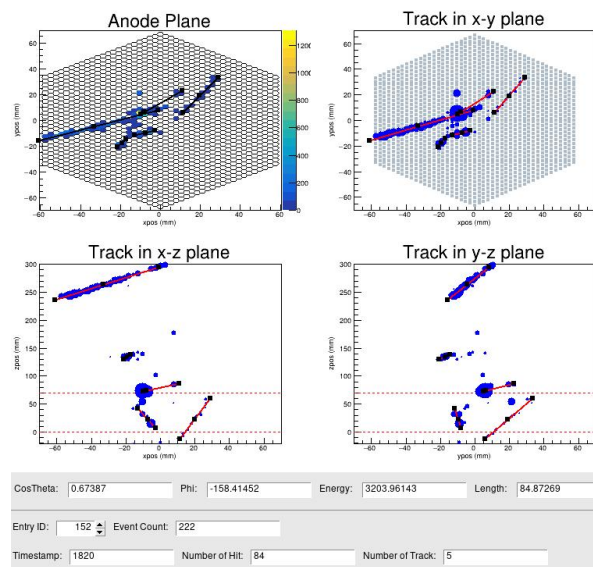
X-50%半径(mm)	X-边缘锐利度(mm)	Y-50%半径(mm)	Y-边缘锐利度(mm)	XY半径比
16.30 ± 0.11	5.35 ± 0.08	16.89 ± 0.07	5.25 ± 0.07	0.965

- R方向拟合

50%半径(mm)	10%半径(mm)	边缘锐利度(mm)
16.92	23.61	5.20 ± 0.28

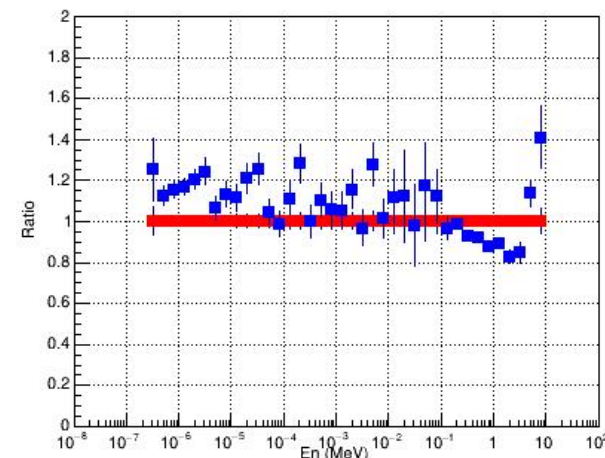
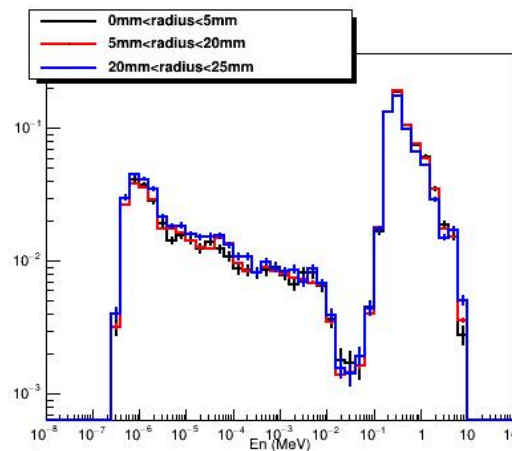
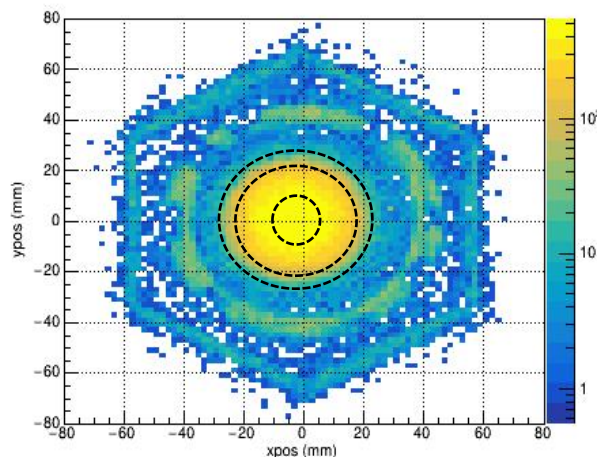
能谱分析：高能区事例

- 采用粒子径迹端点进行TOF测量
 - $TOF = T_{vertex} - L/v_{drift}$
- 高能区有孤立的hit会被误重建，干扰PID效率
- 高能区triton事例无法有效筛选， α 事例可以筛选



能谱分析：不同区域能谱

- 将束斑分为3个区域进行统计 α 能谱
 - 区域1：0~5mm，区域2：5~20mm，区域3：20~25mm
- 3个区域能谱按面积归一，对比能谱差异
- 分析区域3与区域2的计数率比值
 - 束核（区域2）能谱比束晕（区域3）能谱偏硬



□ 实验设置

□ 束斑分析

□ 报告总结

- 数据分析总结
 - 针对 ${}^6\text{Li}$ 数据分析的算法、程序和流程已初步成形
 - 得到了 $\Phi 30\text{mm}$ 束斑分布的主要参数
 - 通过径迹端点定时测量至MeV及更高能区的事例
 - 分析了束斑不同区域的能谱差异：束核偏硬，束晕偏软
- 后续计划
 - 完善分析中的细节，增加统计量提高分析精度
 - 分析不同实验配置的束斑和能谱分布情况
 - 针对高能区寻迹算法增加识别离散hit点功能，提高高能区粒子鉴别效率 (近期解决)
 - 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



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



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



Thanks for listening!

白灿^{1,2}, 白浩帆³, 易晗^{1,2}, 褚天志^{1, 2, 4}, 陈宏昆^{1,2,5}, 陈海铮^{1,2,6}, 李样^{1,2}, 樊瑞睿^{1,2}

¹散裂中子源科学中心, 东莞 523803

²中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

³北京大学物理学院, 北京 100871

⁴深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060

⁵中山大学物理学院, 广州 510275

⁶西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049