

机器学习在多用途时间投影室 (MTPC) 中粒子鉴别的应用前景

报告人：陈海铮

中国散裂中子源，加速器技术部，束流扩展应用

指导老师：樊瑞睿、易晗

2025年02月11日

加速器技术部机器学习研讨会, 东莞

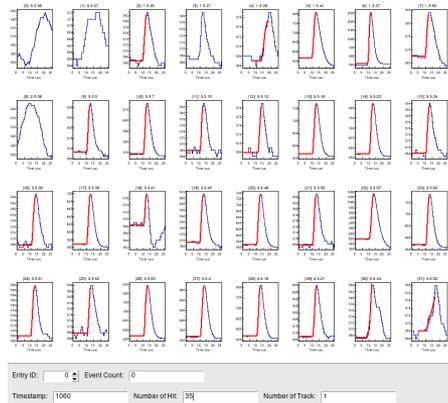
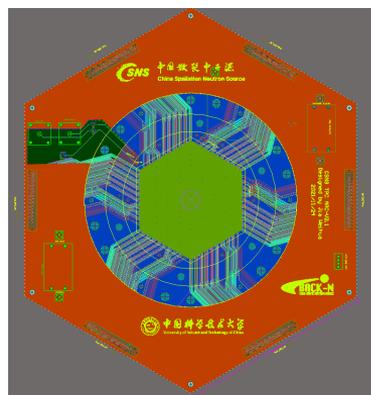
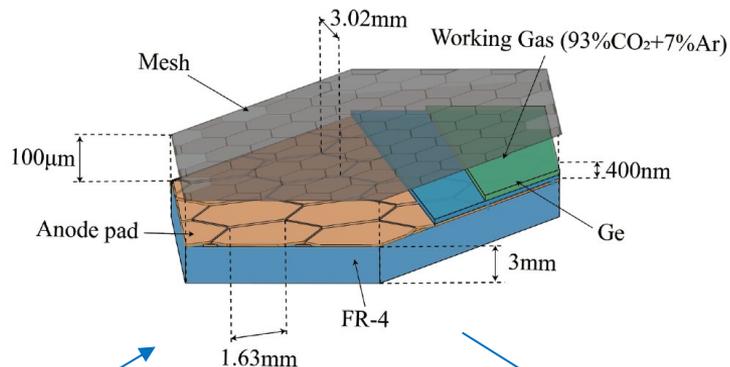
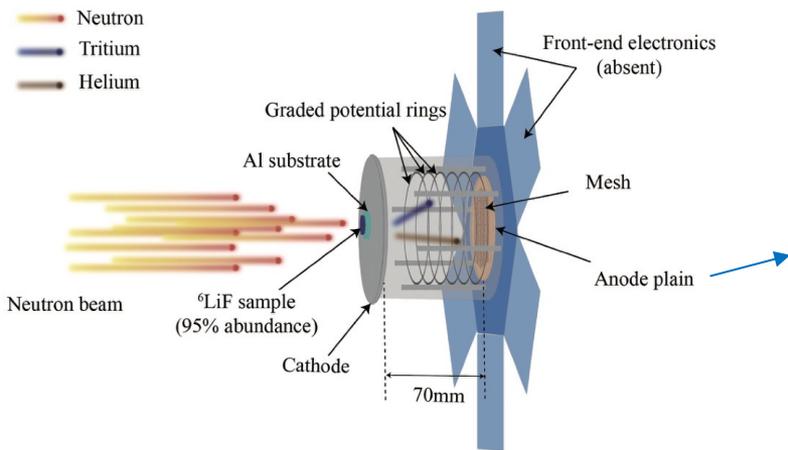


报告内容

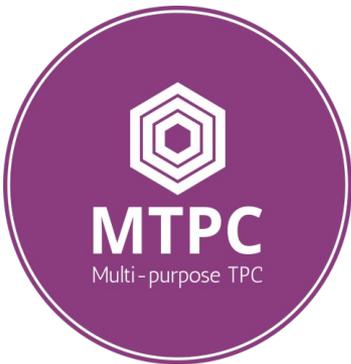
- 项目概况
- 实验需求
- 模拟与分析程序研发
- 应用前景

探测器原理及结构

- 多用途时间投影室 (MTPC) 设计用于探测 (n, cp) 核反应截面
- 测量对象为：带电粒子产物
- 场笼结构为圆柱体
- 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



项目历史

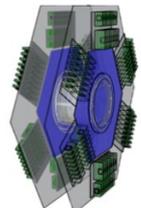


2019年8月：
探测器设计加工



2021年1月：
完成专用电子学
系统研制和测试

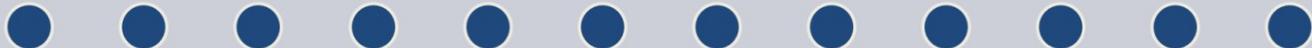
2021年4月：
模拟与数据分析程
序框架开发



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

2024年10月：
开展n-p散射实验



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

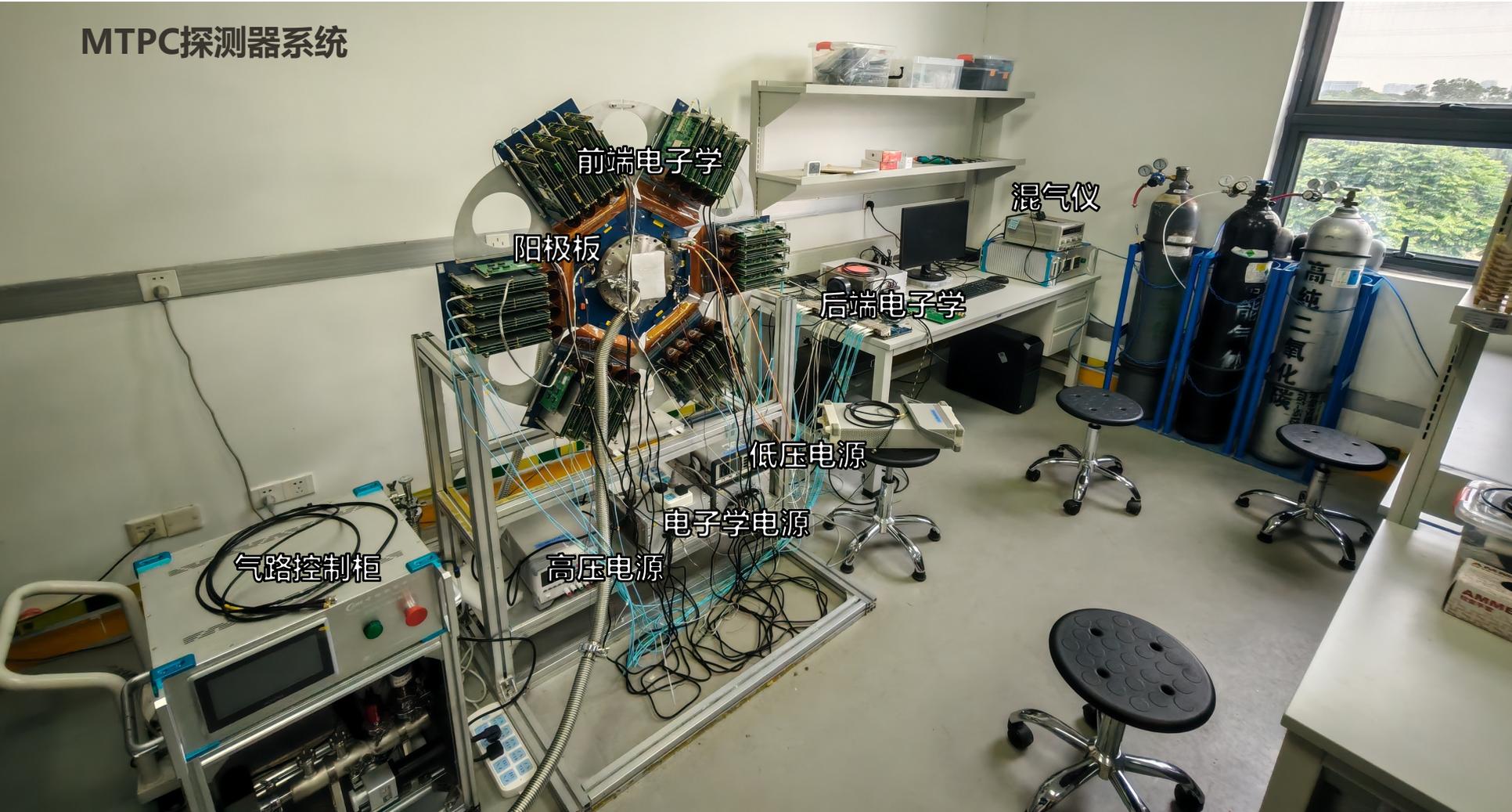


2022年3月：
完成v2版本DAQ及
在线显示开发



2023年2月：
开展首个物理实验

MTPC探测器系统



报告内容

- 项目概况
- 实验需求
- 模拟与分析程序研发
- 应用前景

中子核反应标准截面

- 中子标准截面数据是核数据测量的重要基础数据
- 在10MeV以下能区，适合使用MTPC进行测量
- 自主开展成体系的标准截面实验测量及数据评价有重要意义

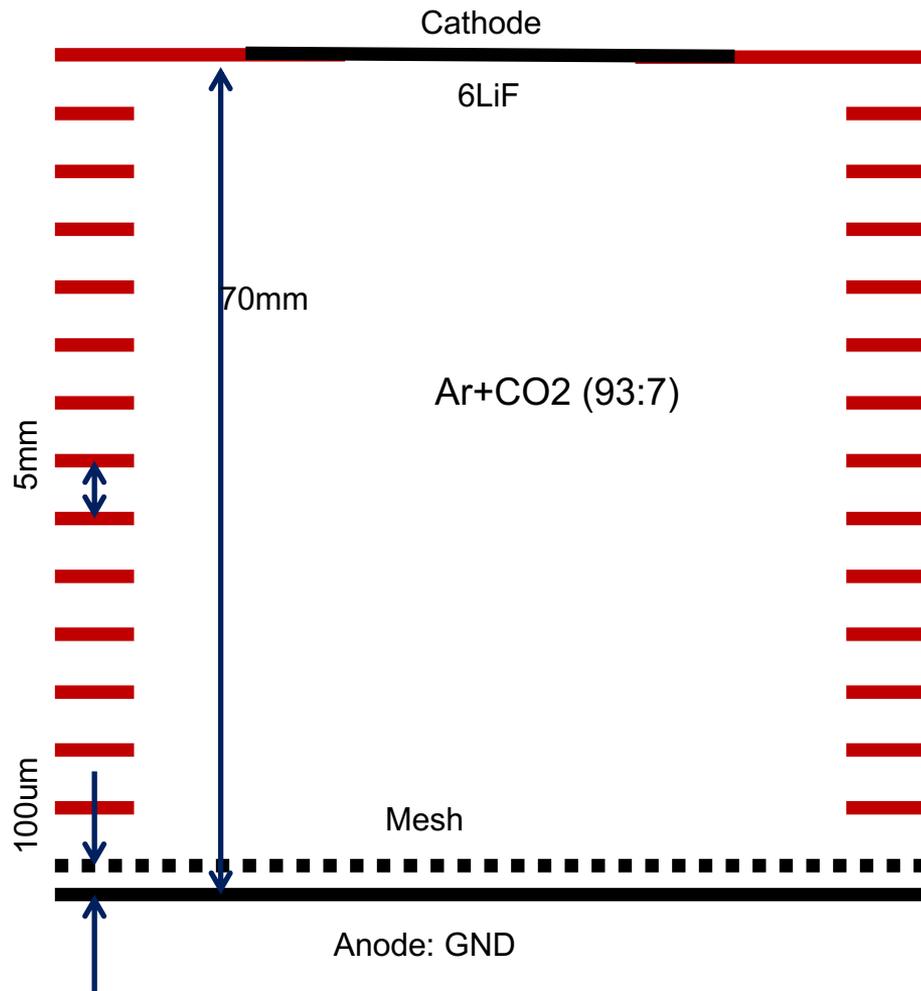
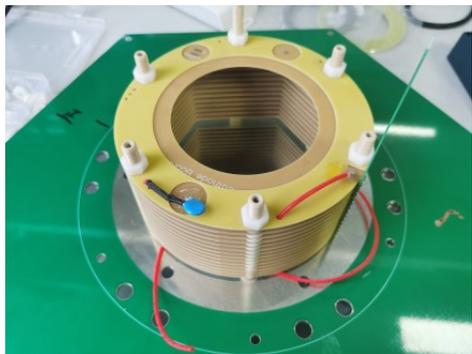
TABLE I. Cross section standards and reference data, release 2017.

Neutron cross section standards	
Reaction	Standards incident neutron energy range
H(n,n)	1 keV to 20 MeV
³ He(n,p)	0.0253 eV to 50 keV
⁶ Li(n,t)	0.0253 eV to 1 MeV
¹⁰ B(n,α)	0.0253 eV to 1 MeV
¹⁰ B(n,α ₁ γ)	0.0253 eV to 1 MeV
C(n,n)	10 eV to 1.8 MeV
Au(n,γ)	0.0253 eV, 0.2 to 2.5 MeV, 30 keV MACS
²³⁵ U(n,f)	0.0253 eV, 7.8-11 eV, 0.15 MeV to 200 MeV
²³⁸ U(n,f)	2 MeV to 200 MeV

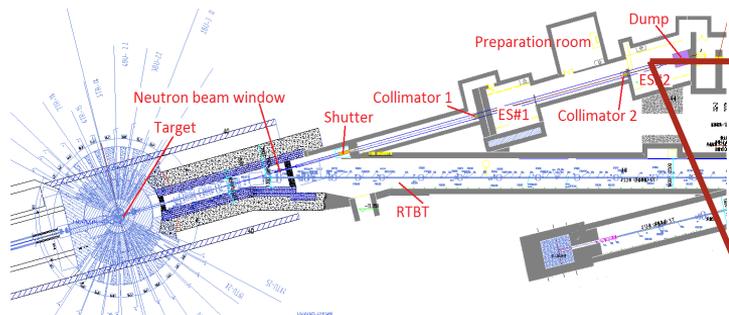
反应	实验时间
⁶ Li(n,t)	2023年2月
H(n,n)	2024年10月
²³⁵ U(n,f)	2024年10月
¹⁰ B(n,α)	2025年~2027年

标准截面测量： ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应

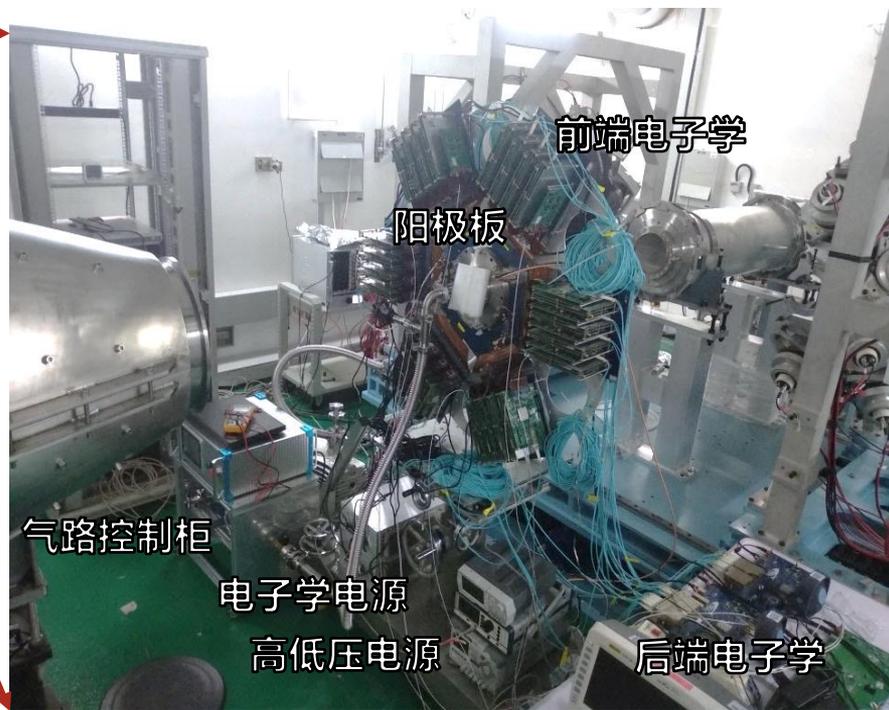
- ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应截面测量，中子能区1eV~500keV
- 漂移区距离70mm，阴极中心放置 ${}^6\text{LiF}$ 样品
- 样品参数：
 - 厚度560nm，Al衬直径89mm、厚度10.8um
 - ${}^6\text{Li}$ 丰度95%， ${}^6\text{LiF}$ 面密度148ug/cm²、直径66mm
- 实验时间：2023年2月



标准截面测量： ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反应



- 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- ϕ 12- ϕ 15- ϕ 40组合（加铅砖 ϕ 30）
- 0.9bar气压：针对氦粒子进行测量（133h）
- 0.5bar气压：针对 α 粒子进行测量（143h）



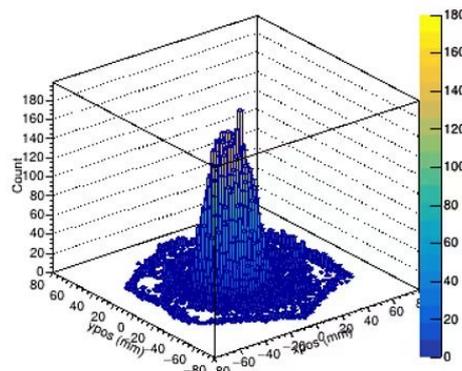
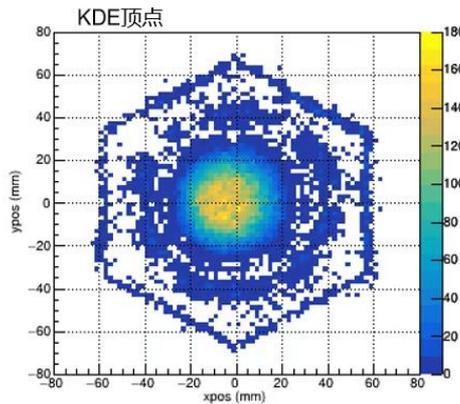
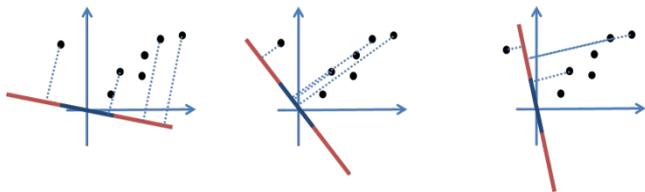
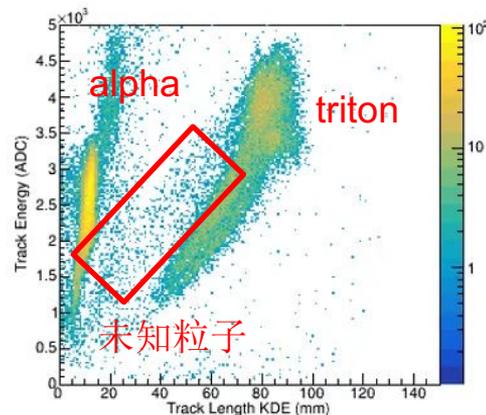
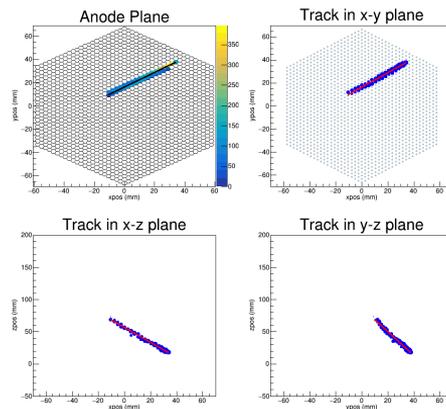
径迹重建 (现有算法: Hough)

- 径迹查找:

- 在Hough空间中找到最大值, 落在最大值bin内的点认为属于一条直线;

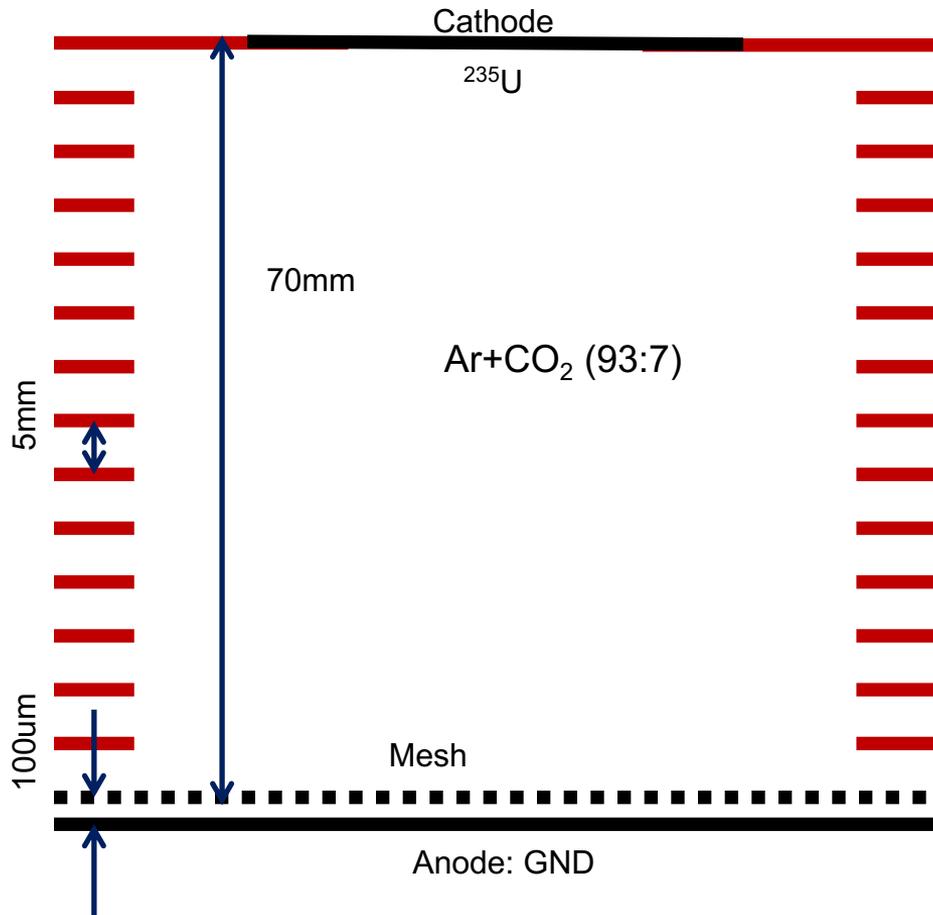
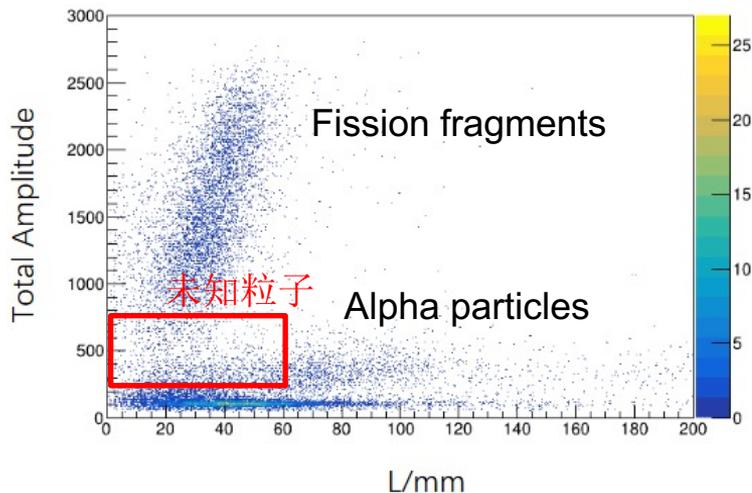
- 径迹长度:

- 将重建之后的数据径迹的点火pad向径迹方向投影, 得到沿径迹方向的dE/dx分布
- 使用KDE算法对dE/dx分布进行平滑
- 取径迹起点至 Q_{max}/λ 对应点位粒子射程, $\lambda=2$



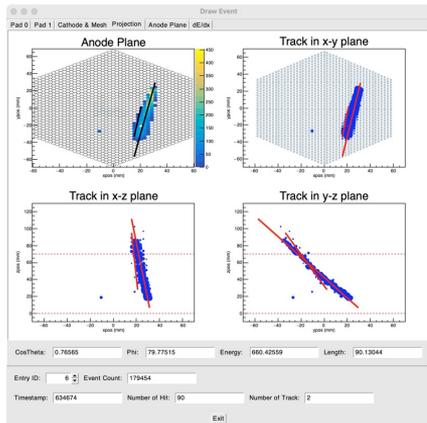
标准截面测量： $^{235}\text{U}(n,f)$ 反应

- 实验时间：2024年10月
- 漂移区长度70mm
- 工作气体为Ar与 CO_2 混合气体(93:7)

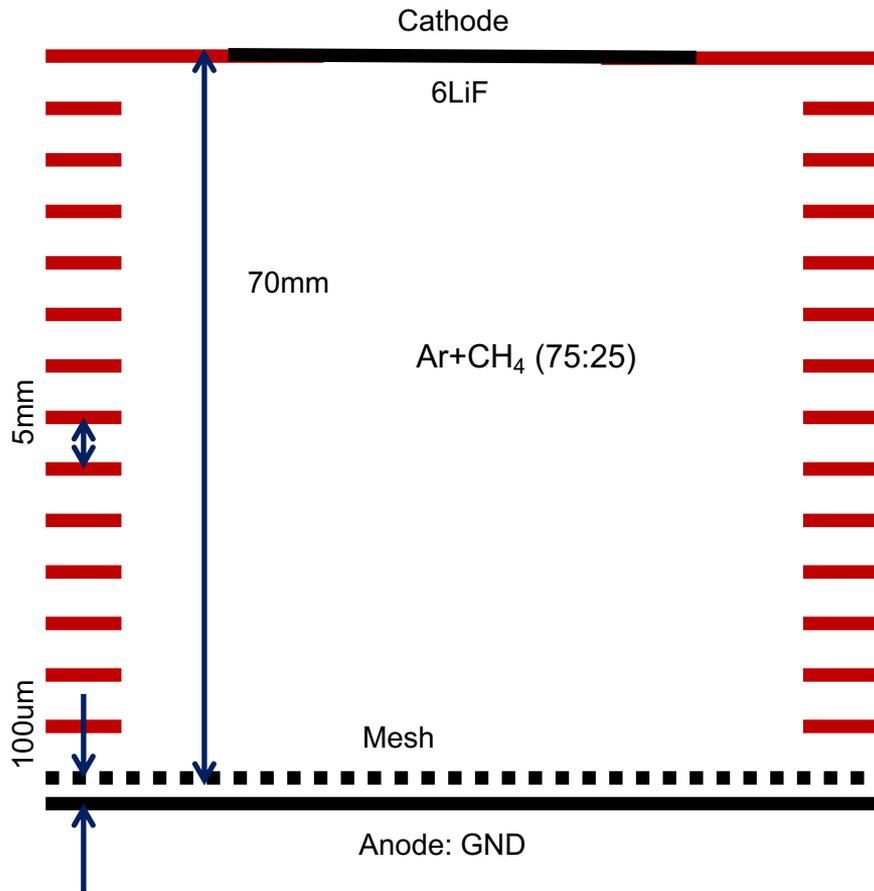


标准截面测量：H(n,n)反应

- H(n,n)截面测量，中子能区100keV~500keV
- 漂移区长度70mm
- 工作气体为Ar与CH₄混合气体(75:25)，其中H作为靶核
- 阴极中心放置⁶LiF样品，作为探测器参数检验标准样品
- 实验时间：2024年10月



错误径迹识别



报告内容

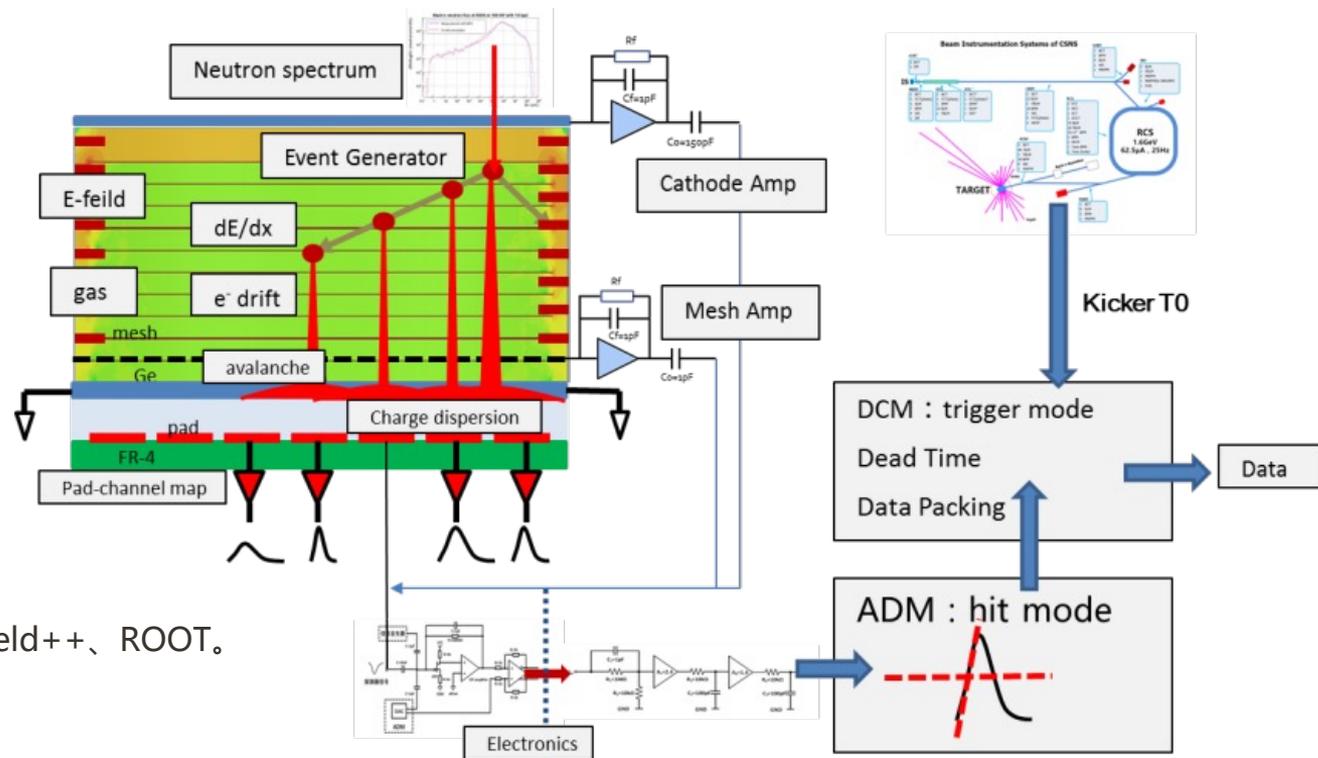
- 项目概况
- 实验需求
- **模拟与分析程序研发**
- 应用前景

模拟框架 (BLUET)

● 模拟程序框架包含所有的物理和电荷过程

- 气体参数
- 中子能谱
- 事例产生器
- 电离过程
- 电子漂移
- 电子雪崩
- 电荷扩散
- 电子学模型
- 阴极和mesh波形
- Hit与Trigger

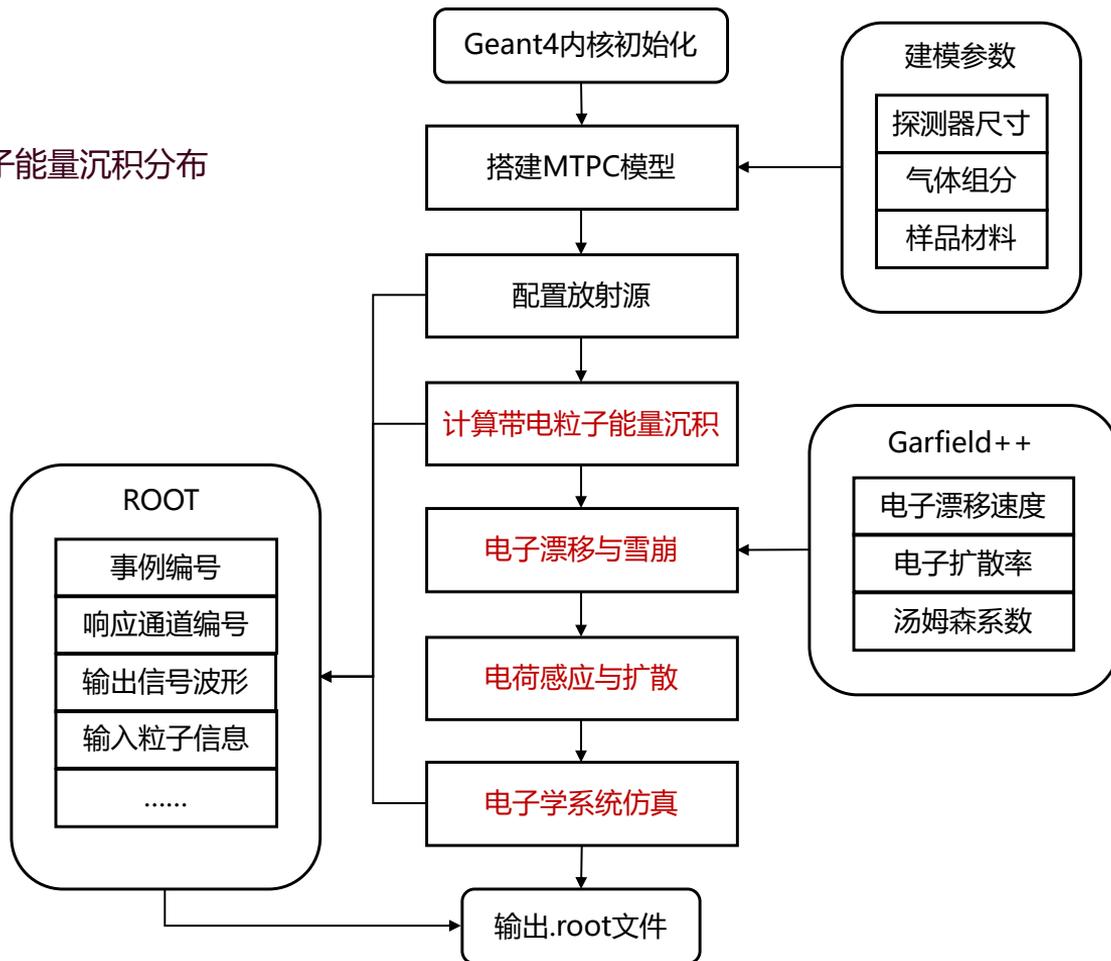
● 依赖程序: Geant4、Garfield++、ROOT。



模拟流程

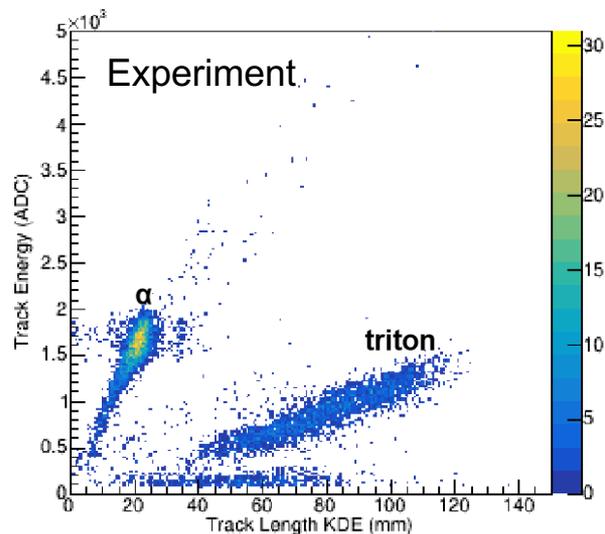
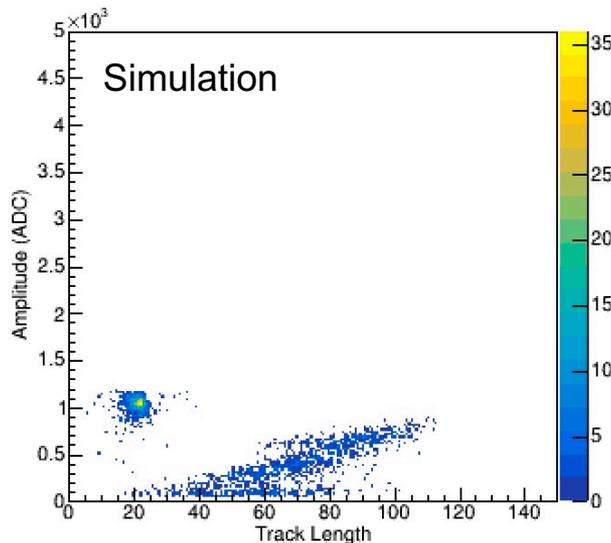
- 模拟流程:

- Geant4计算中子核反应过程、带电粒子能量沉积分布
- Garfield++计算气体参数
- 电荷感应计算信号波形
- ROOT统计数据



模拟验证 (正在进行)

- 与2023年Li-6束流实验进行对比
 - ▣ 气体: 93%Ar + 7%CO₂, 0.5bar, 阴极-1350V, 栅极-300V
 - ▣ 粒子: alpha (2.05MeV) ; triton (2.73MeV) 。
 - ▣ 靶材: Li-6, 厚度561nm, 直径66mm, 密度148μg/cm², 丰度95%
 - ▣ 衬底: Al, 直径89mm, 厚度10.8μm
- 射程分析结果与实验匹配, 但能量统计偏低, 还在研究问题所在。



报告内容

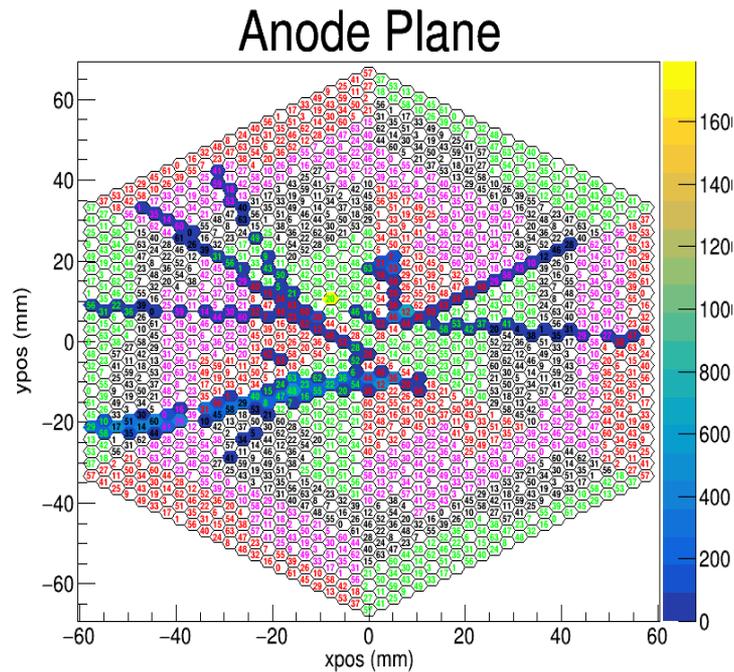
- 项目概况
- 实验需求
- 模拟与分析程序支持
- 应用前景

应用前景

机器学习算法适用于MTPC粒子径迹重建

● 径迹查找本质上是模式识别 (Pattern Recognition) 的过程, 可用到下列方法:

- 图像识别算法 (如Hough、Template Matching) 等
 - 滤波预测算法 (如CKF、GSF) 等
 - 随机抽样一致 (RANSAC) 算法
 - 聚类 (如SCT、DBSCAN等) 算法
 - 神经网络 (如GNN、TRT、TSF等) 算法
 -
- 径迹拟合常用到最小二乘法、龙格库塔积分、卡尔曼滤波等
- 模拟算法的开发对粒子鉴别起到积极作用
- 对于复杂核反应与小截面核反应, 需要机器学习算法充分发挥MTPC探测器性能





谢谢!