中子截面测量方法调研与讨论

汇报人：陈海铮
时间：2026年10月28日

目录 CONTENTS

01 发展历史

02 组内建设

03 研究经验

04 总结

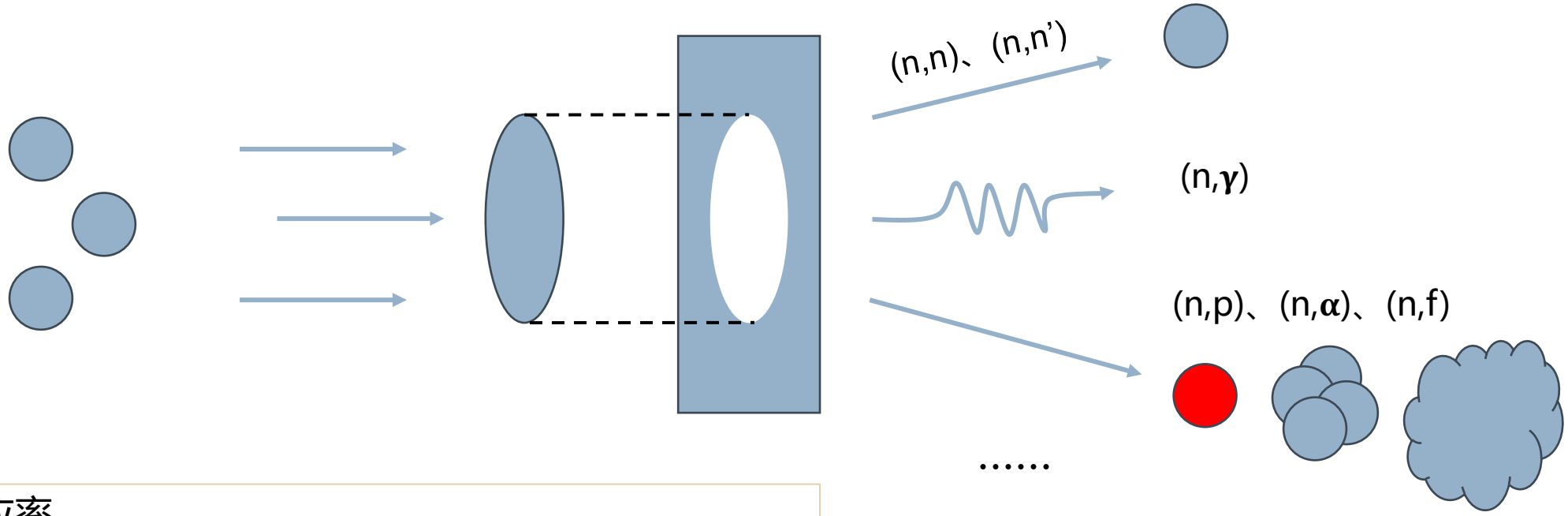
01

发 展 历 史

中 子 截 面

为什么相互作用概率要用面积来度量?

- 本质是中子的时空分布描述为中子通量密度 ϕ（$cm^{-2} \cdot s^{-1}$）
- 用几何语言封装一个非几何的概率，使“概率 = 面密度 × 面积”这一简洁的乘法关系得以成立

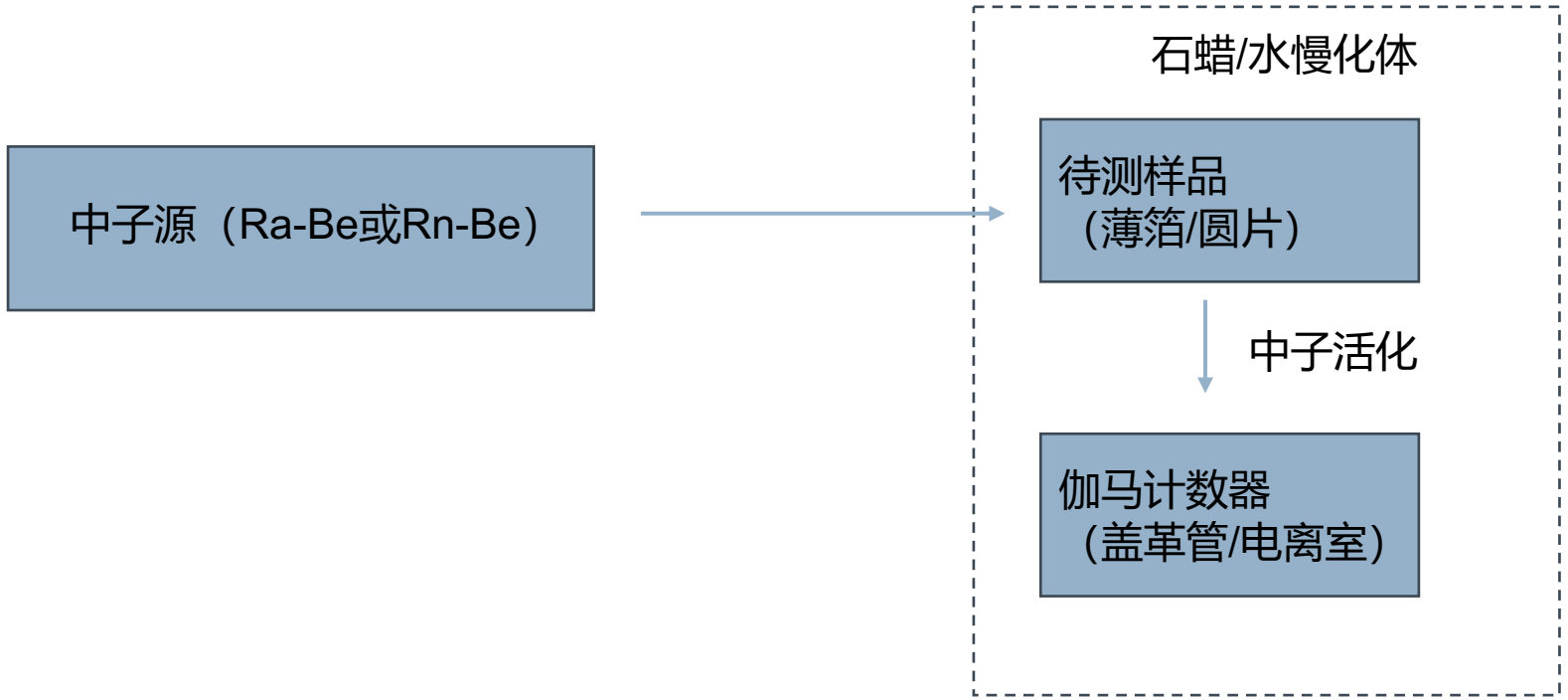


截面与反应率

- $R = \phi\Sigma[\mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1} \times \mathrm{cm}^{-1} = \mathrm{cm}^{-3} \cdot \mathrm{s}^{-1}]$
- $\Sigma = N\sigma[\mathrm{cm}^{-3} \cdot \mathrm{cm}^{2} = \mathrm{cm}^{-1}]$

最早的测量实验

- 在中子被发现（1932年）后不久，研究者利用铍-α中子源进行了大量实验。
- 例如，哥伦比亚大学的邓宁（Dunning）在1935年曾将中子源置于不同直径的球体中，观察中子的透射情况。
- 标志性实验方法，起源于**费米**利用“活化法”测量热中子吸收截面的技术。



第一个标准截面

- 中子截面测量技术的发展，依托于加速器中子源的建设
- Bailey 于 1943年在Los Alamos完成了第一次H核的全截面测量，最高能量达到6MeV
- 据记载，该实验使用投射法，材料为环己烷（C_6H_{12}），探测器为双端电离室
- 束流强度衰减公式：$\frac{I}{I_0} = e^{-n\sigma x}$

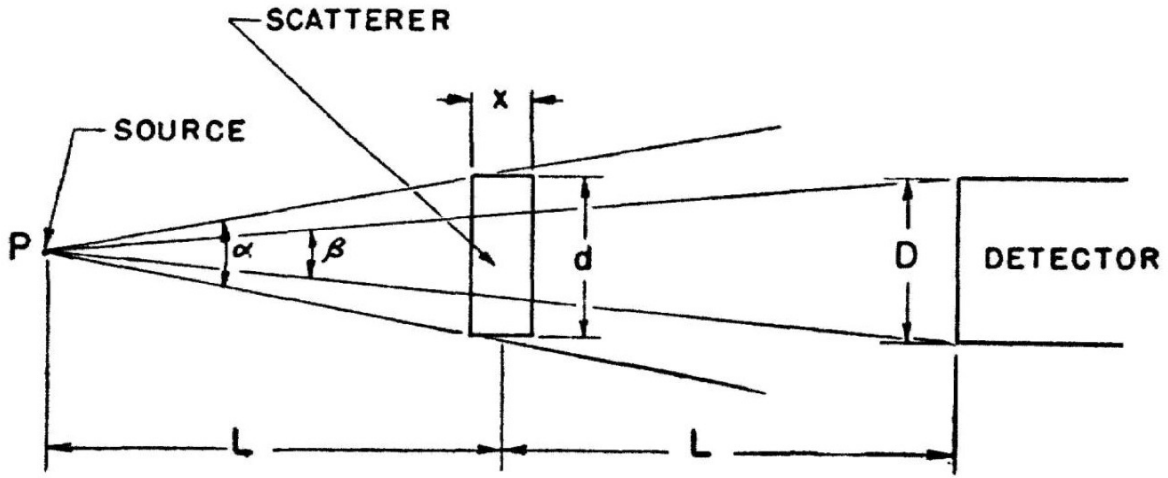
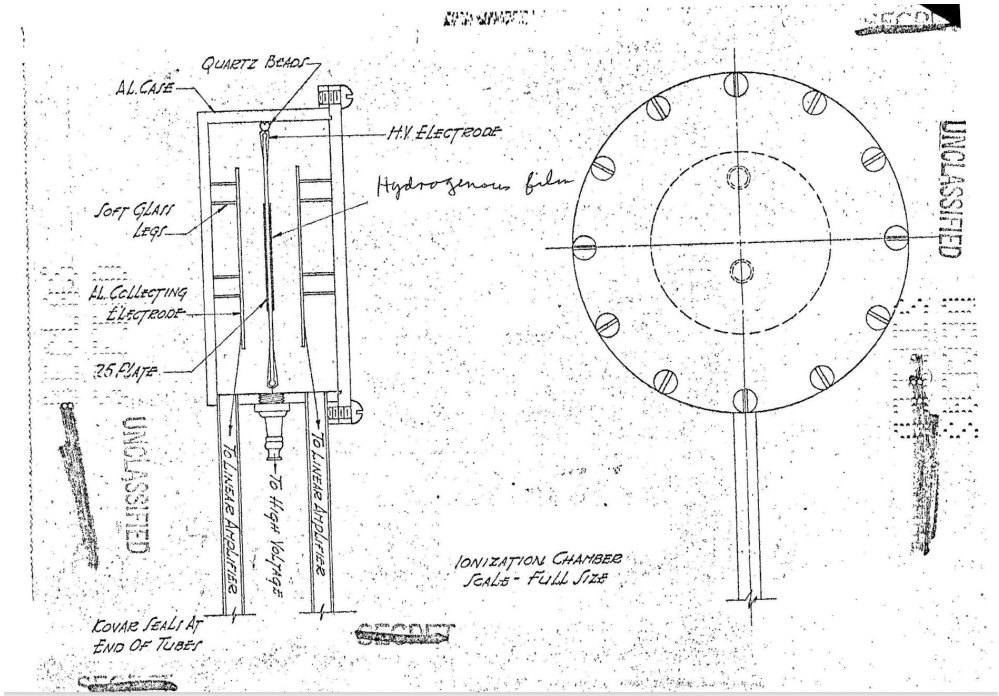


FIG. 1. Geometry of source, scatterer, and detector used in scattering experiment.



系统化和标准化

- 随着反应堆技术的发展，对截面数据的需求变得系统而迫切



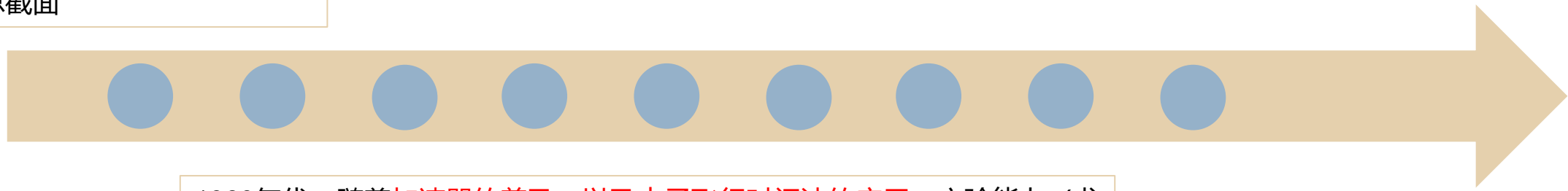
50年代中后期，国内开展第一批核数据测量实验

1975年，中国核数据中心成立

1985年，《中国评价核数据库》第一版（CENDL-1）发布

1949-1954：Barschall团队系统测量了大量元素在keV能区的总截面

1970年代后，ENDF/B（评价核数据文件）体系开始建立，其早期版本（如ENDF/B-III）正式将氢、锂、硼、碳、金、铀-235等反应确立为标准截面



1960年代，随着加速器的普及，以及中子飞行时间法的应用，实验能力（尤其是能量分辨率）大幅提升。这使得在共振区解析出数百个共振峰成为可能，数据量和质量都急剧增长

National Nuclear Data Center

NSDC

IAEA

- 中子截面测量的快速发展，源于加速器中子源的建设与发展

国际先进中子束线

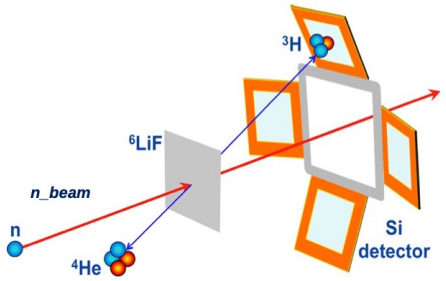
主要加速器平台中子束流参数对比

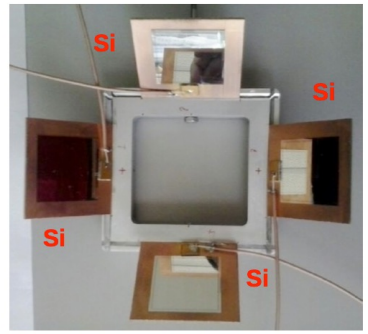
平台名称	驱动加速器	中子产生方式	飞行路径	中子能量范围	中子通量
CERN n_TOF	质子同步加速器 (PS)，20 GeV/c	铅靶散裂	EAR1：185 m EAR2：20 m	热中子～GeV 量级	EAR1：0.5×10^{6} n/pulse EAR2：10^{7}/cm²/s
J-PARC ANNRI	质子加速器，3 GeV (MLF设施)	汞靶散裂	Ge谱仪：21.5 m NaI/其他：27.9-28.5 m	> 0.0015 eV	4.5×10^{6} n/s/cm² (热区)，6.6×10^{5} n/s/cm²(0.9-1.1 keV)
LANSCE (以Lujan中心为例)	质子直线加速器，800 MeV	钨靶散裂	多飞行路径可选 (如FP5：6-60 m)	热区路径：1 meV～1 keV	约 1-2×10^{6} n/cm²/s
GELINA	电子直线加速器，~140 MeV	铀靶 (γ,n) 反应	共 12 条，长度 10 - 400 m	10 meV～20 MeV	2.0–2.5×10^{6} n/cm²/s
CSNS Back-n	质子加速器，1.6 GeV	钨靶散裂	两个实验厅：约 55 m 和 76 m	热中子～300 MeV	>10^{7}/cm²/s

先进中子探测器

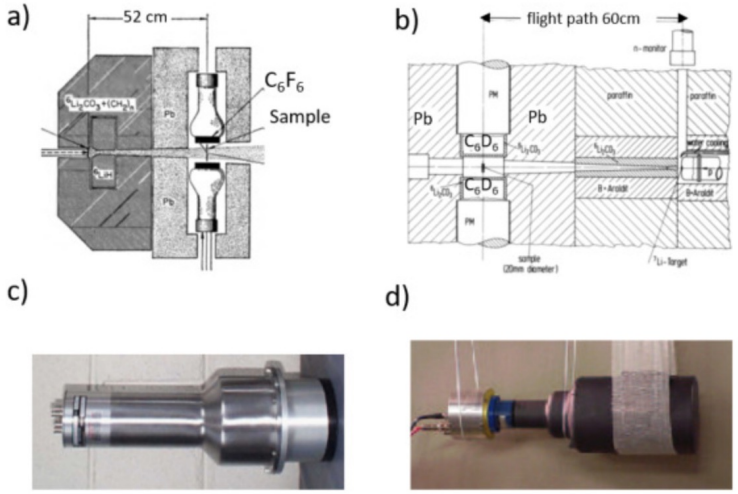
- 中子的测量主要围绕副产物进行间接测量
- 最具代表性的探测器包括：

硅通量监测器（SiMon）

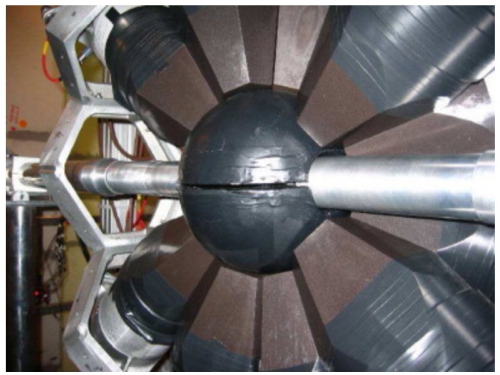




C_6D_6 液体闪烁体

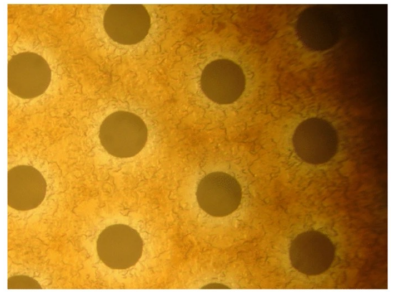


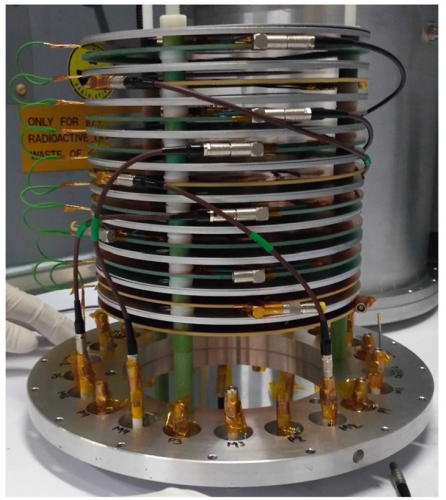
4π 总吸收量热计（TAC）



PPAC、Micromegas 和裂变电离室



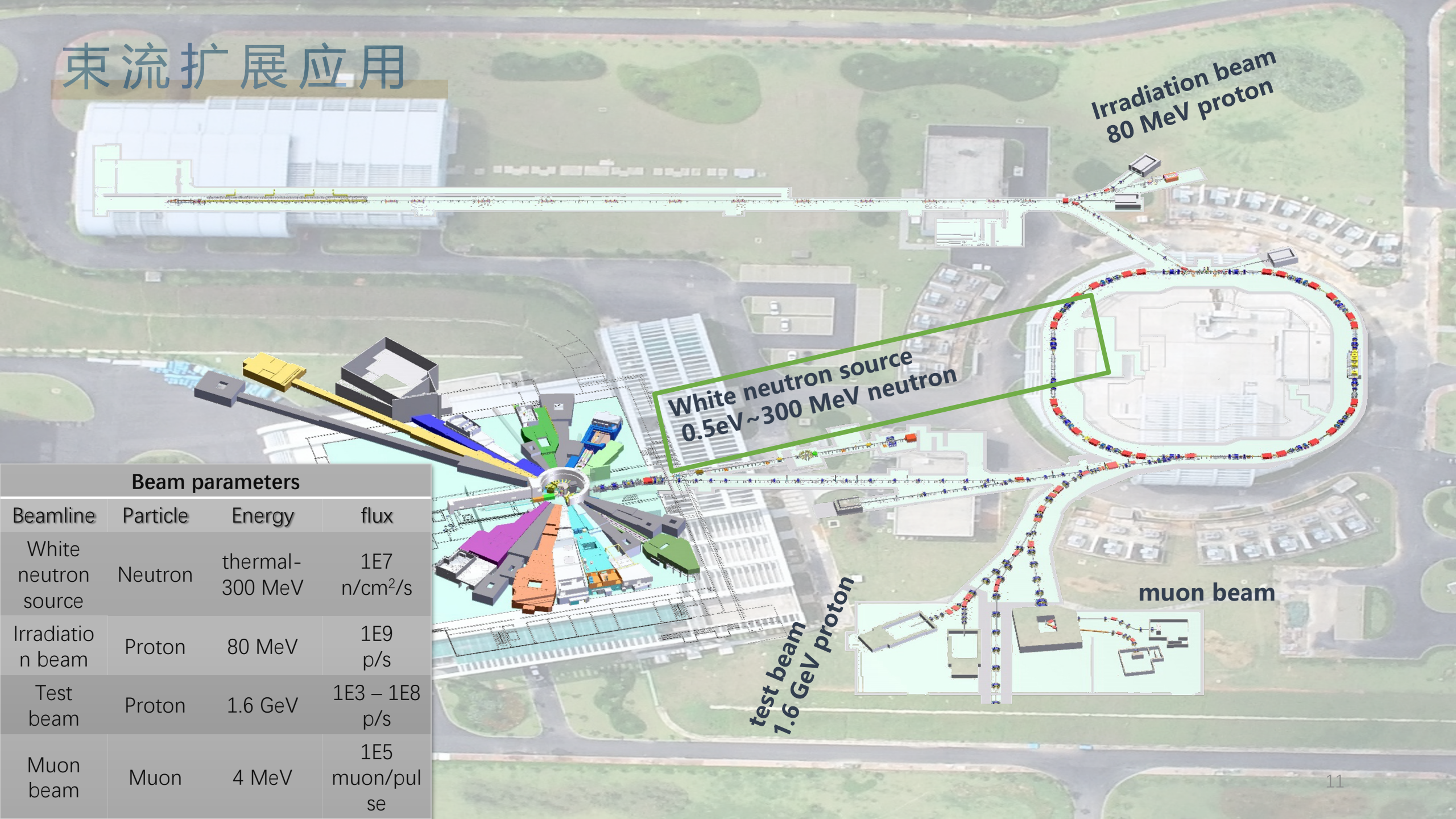




02

组 内 建 设

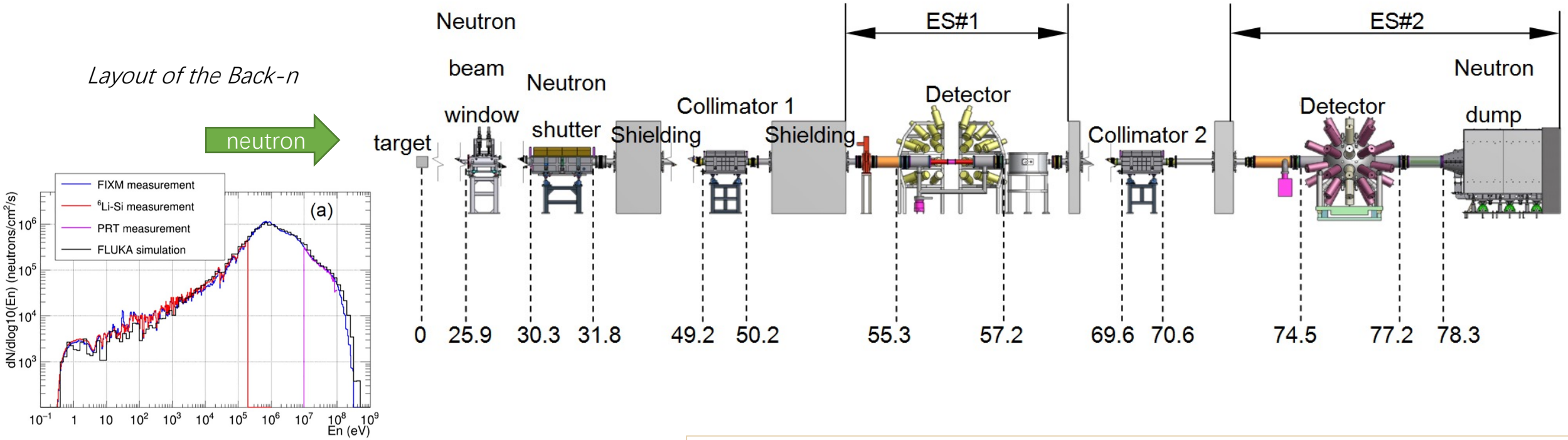
束流扩展应用



Beam parameters			
Beamline	Particle	Energy	flux
White neutron source	Neutron	thermal-300 MeV	1E7 n/cm^2/s
Irradiation beam	Proton	80 MeV	1E9 p/s
Test beam	Proton	1.6 GeV	1E3 – 1E8 p/s
Muon beam	Muon	4 MeV	1E5 muon/pulse

@ B a c k - n

Layout of the Back-n



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)
Φ3	Φ15	Φ40	Φ15	1.27E5	Φ20	4.58E4
Φ12	Φ15	Φ40	Φ20	2.20E6	Φ30	7.81E5
Φ50	Φ50	Φ58	Φ50	4.33E7	Φ60	1.36E7
78×62	76×76	90×90	75×50	5.98E7	90×90	2.18E7

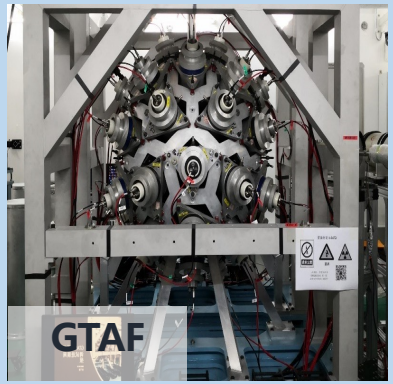
100kW下的束流强度参数

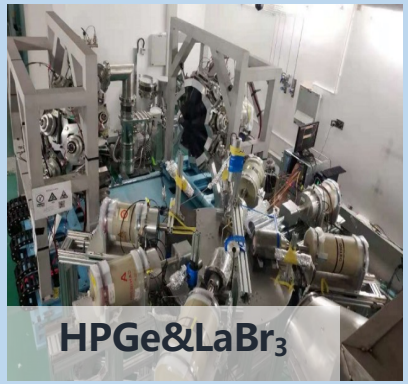
- Back-n 是中国首条具有宽能区、高通量特性的白光中子束线
- 能量范围：热中子—300 MeV
- 通量强度：10^7/cm²/s
- 中子核数据测量研究：
  - 总截面（n，tot）
  - 裂变截面（n，f）
  - 中子俘获截面（n，γ）
  - 中子诱发带电粒子发射反应（n，lcp）

探 测 器 系 统

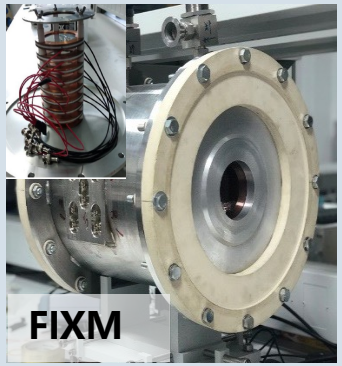
γ detectors

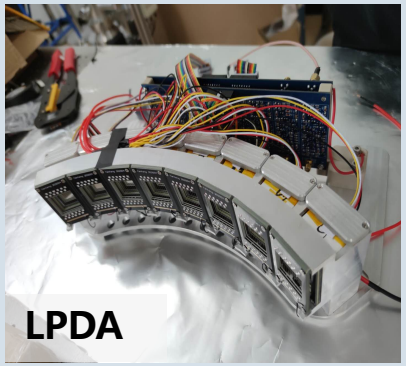


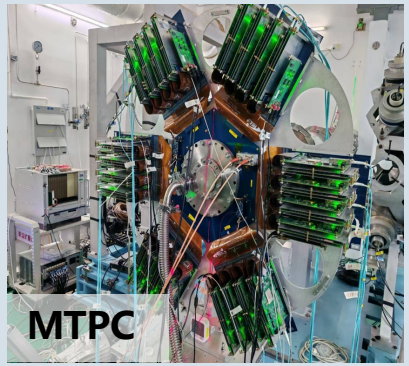




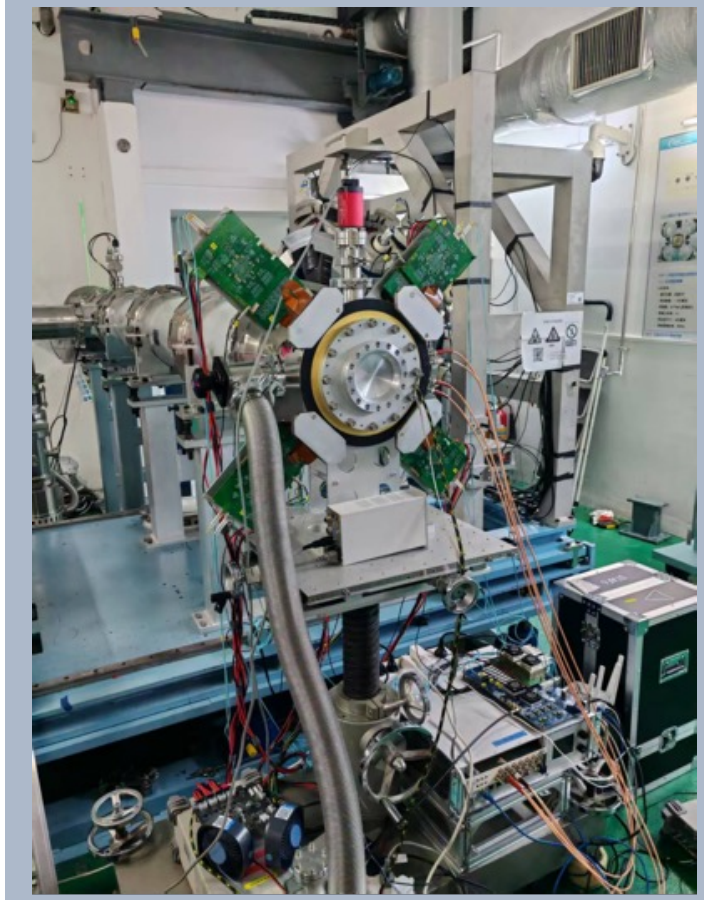
charged-partcle detectors







BMCP-WNRI

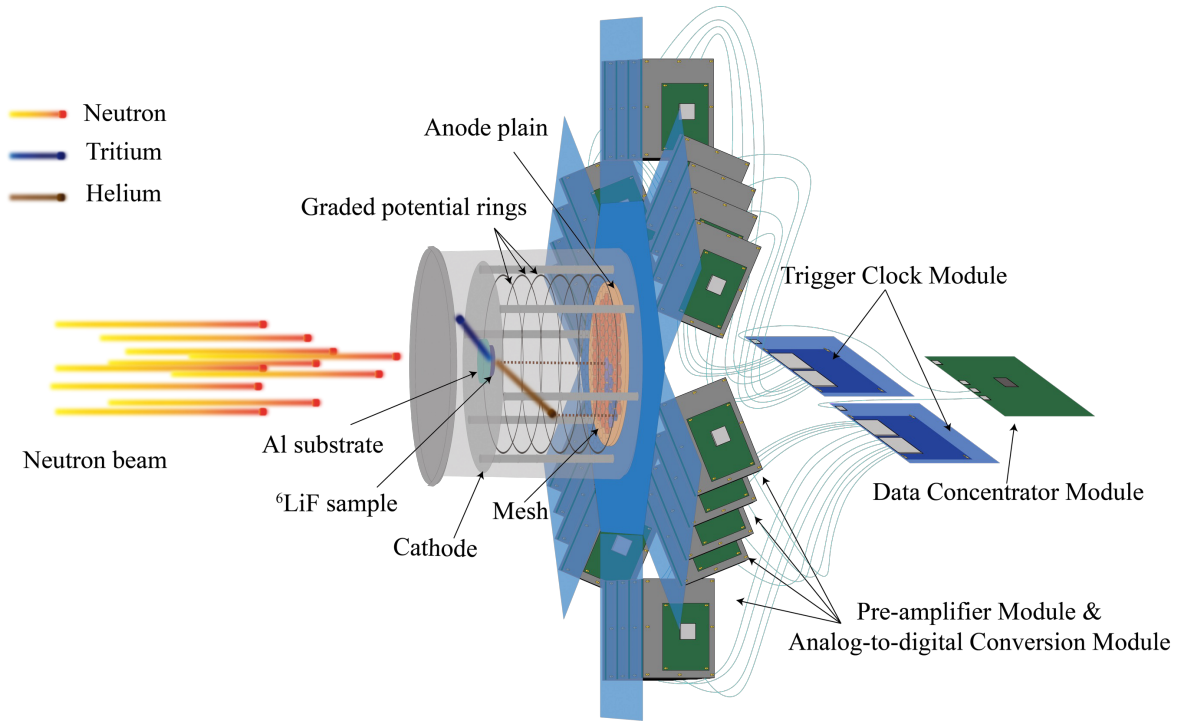


03

研 究 经 验

n(p,tot)测量

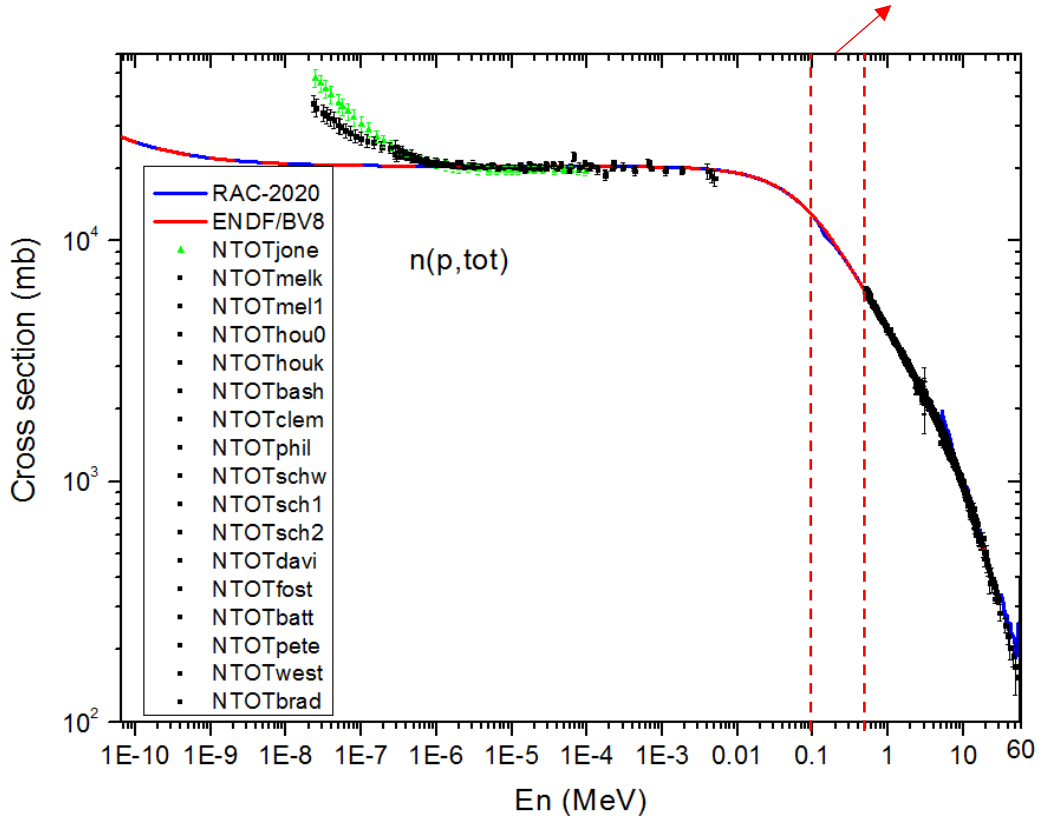
- 对于氢中子全截面，100 eV 至 500 keV 能区可参考的实验数据偏少，具有测量价值
- 多用途时间投影室（MTPC）的优势：
  - 探测效率高
  - 探测立体角范围大
  - 对粒子径迹有三维成像能力，粒子鉴别能力强



MTPC结构框架图

TOF from 7.8 μs to 17.6 μs

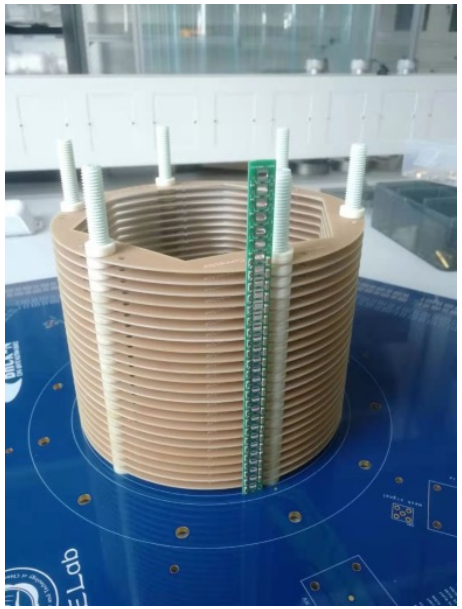
From 100 keV to 500 keV

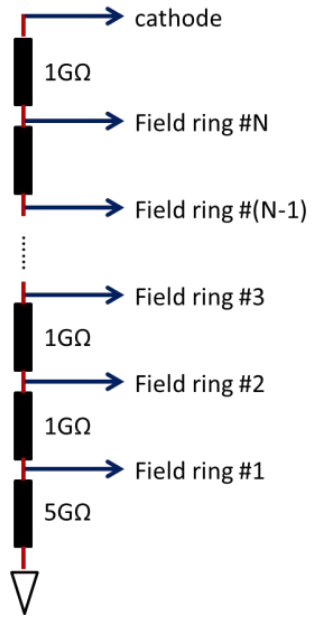


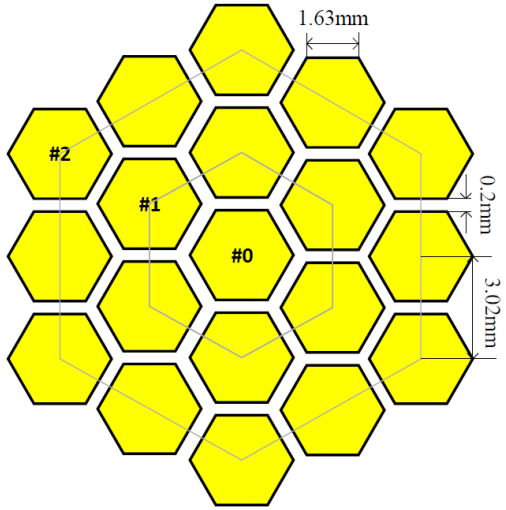
n-p标准截面图

探 测 器 结 构

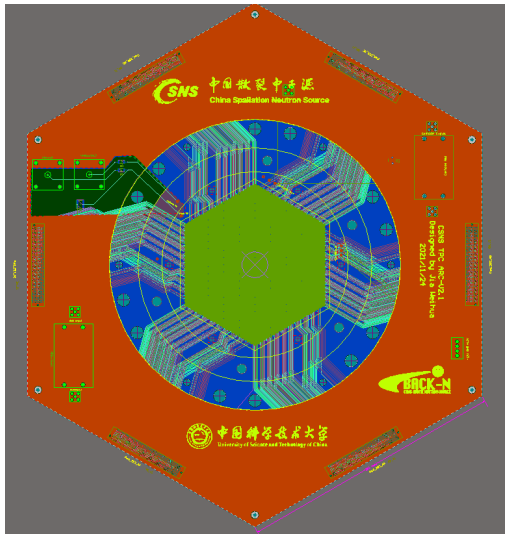
- 腔室形状为圆柱形
- 漂移区为六边形，边长为 68 mm
- 漂移距离可调，以满足不同实验需求
- 分压环用于保持电场均匀







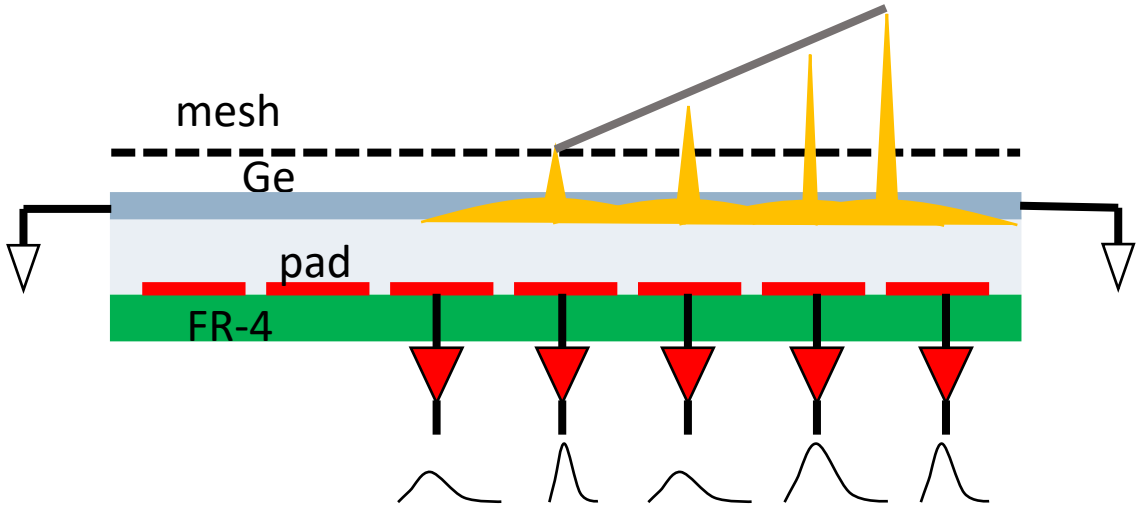
读出像素分布

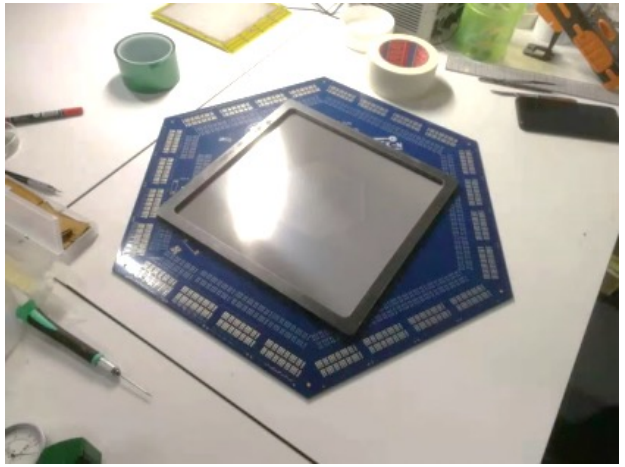


阳极板结构图

- 读出阵列采用六边形密堆叠结构
- 共有 1519 个阳极像素（Pad），每个像素边长为 1.63mm
- 读出像素的x-y坐标是确定的，z坐标根据漂移时间(Δt)、漂移速度(v)确定：$z = v\Delta t$

Micromegas雪崩放大



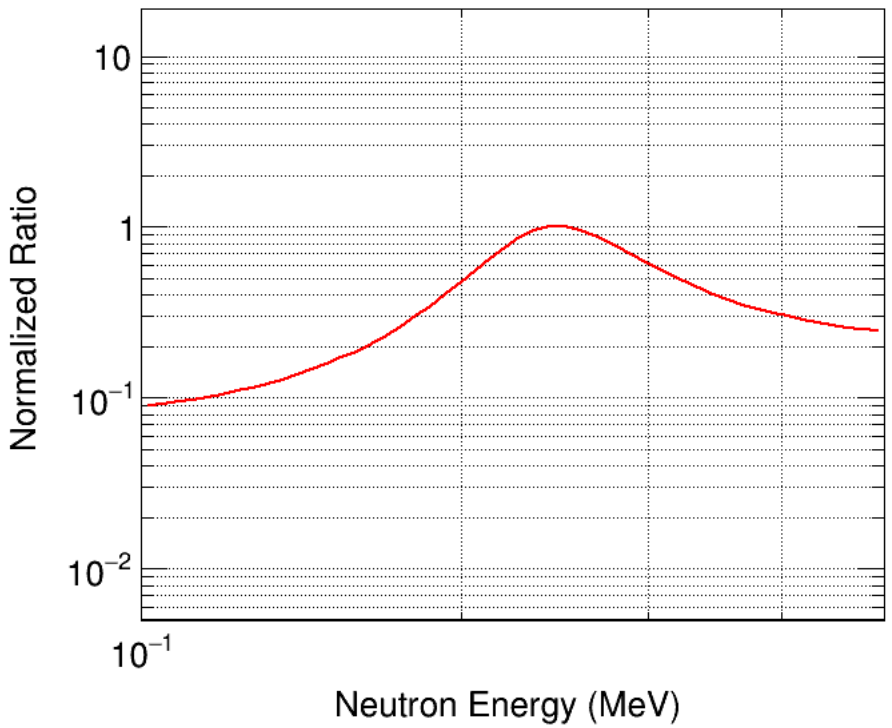




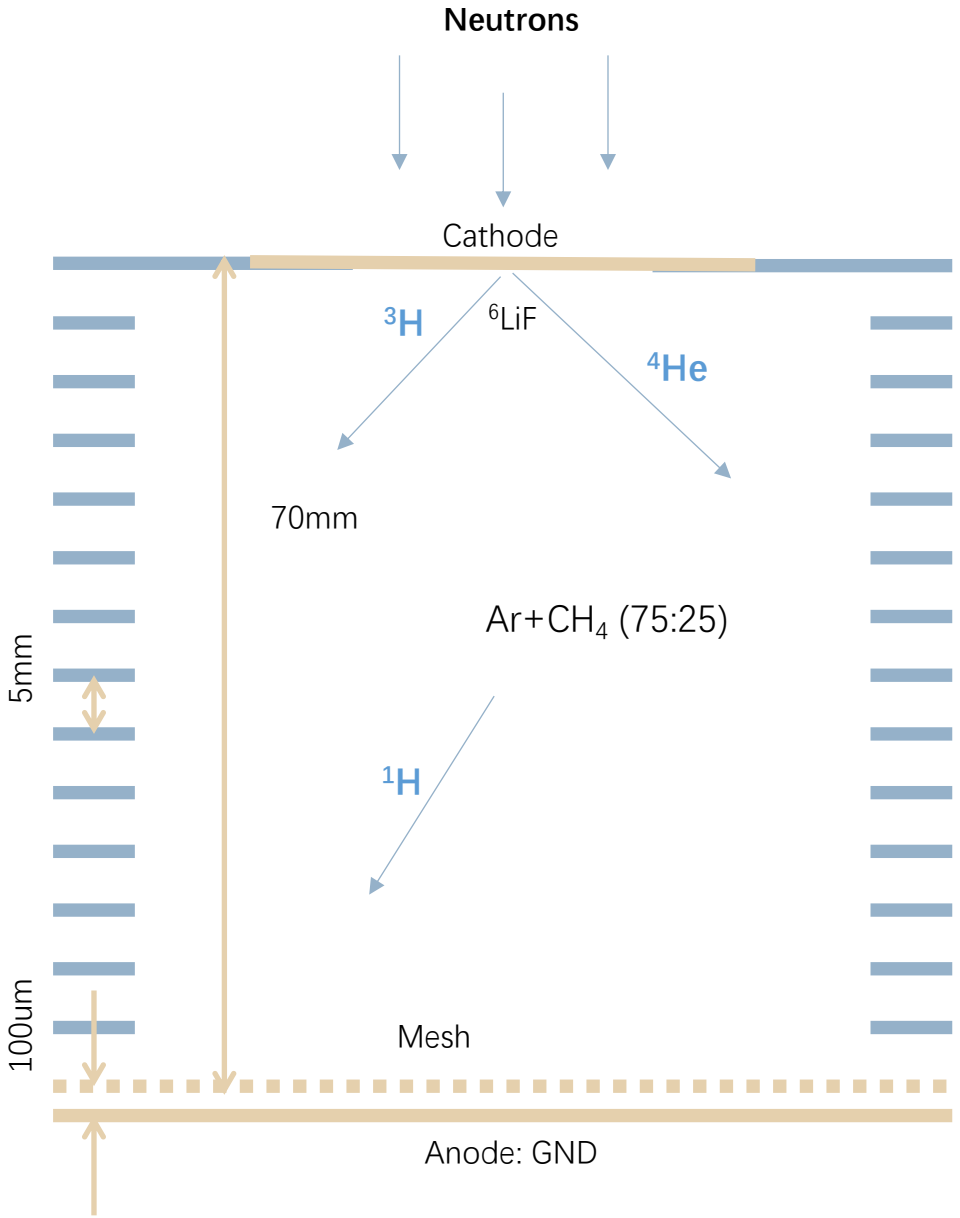
- Micromegas 结构采用热压工艺制成。
- 网状电极与阳极之间的间隙为 100 μm。
- 阳极板表面镀有 400 nm 的高阻锗层，以提高高压下的稳定性。
- 网参数：不锈钢丝直径 16 μm，厚度 25 μm，LPI-400。

研 究 方 法

实验时间：2024年
- np散射截面测量：100keV-500keV
- 工作气体：75%Ar+25%CH_4
- 靶材料：^{6}LiF、H核
- 探测截面：**σ**(Li-6) / **σ**(n-p)

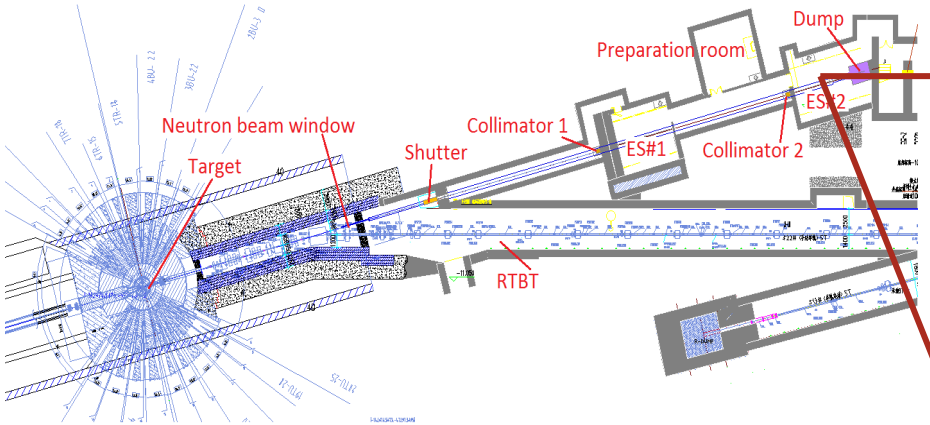


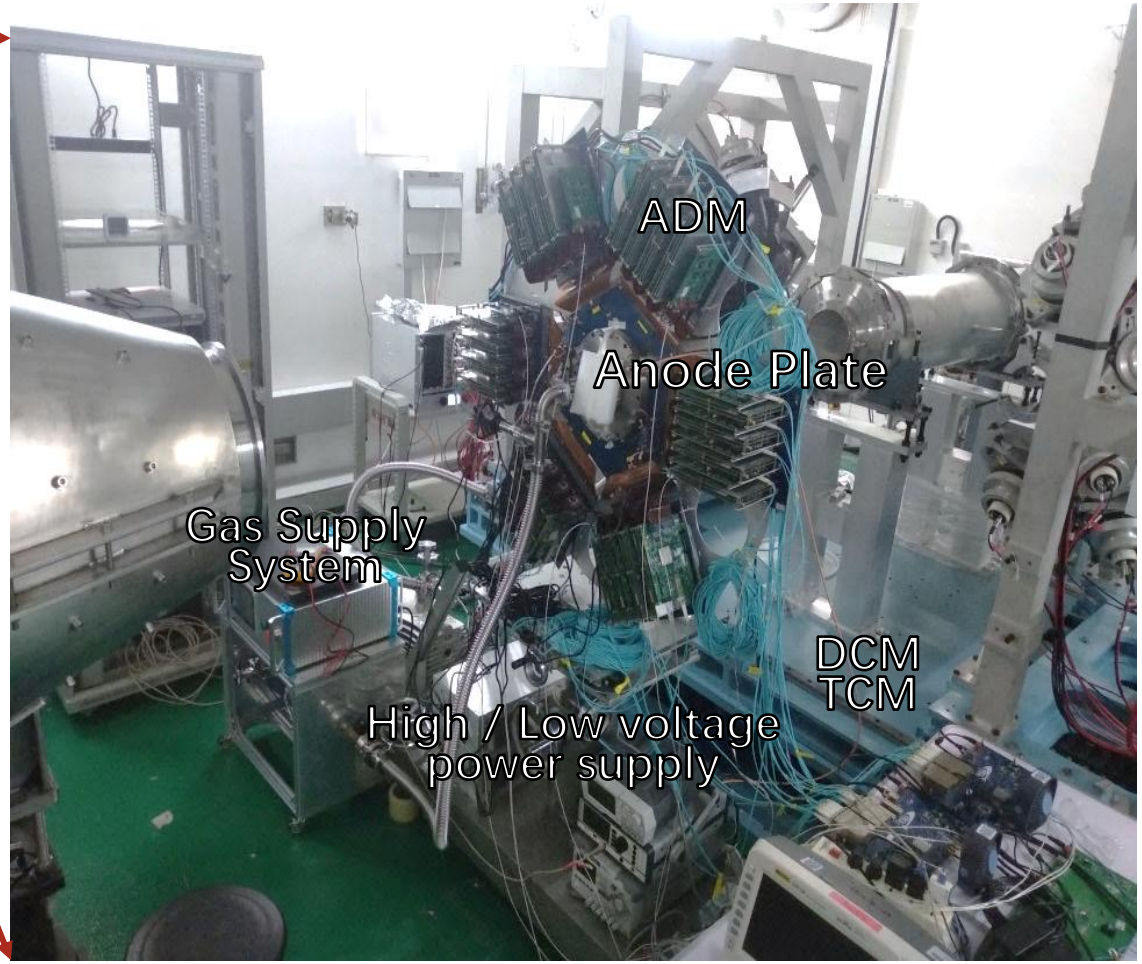
σ(Li-6) / **σ**(n-p) 标准截面比



探测器腔体示意图

实 验 布 局





- 束流参数：φ3-15-40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)
Φ3	Φ15	Φ40	Φ15	1.27E5	Φ20	4.58E4
Φ12	Φ15	Φ40	Φ20	2.20E6	Φ30	7.81E5
Φ50	Φ50	Φ58	Φ50	4.33E7	Φ60	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

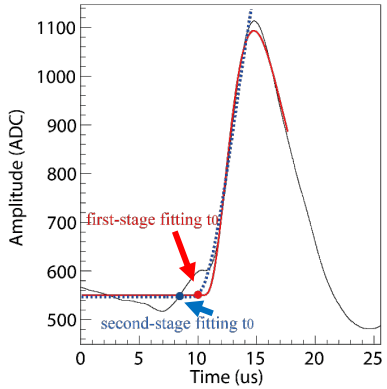
根据编码规则转换有效信息、通道矫正

00101010

Double BoardID
Double ChipID
Double ChannelID
...

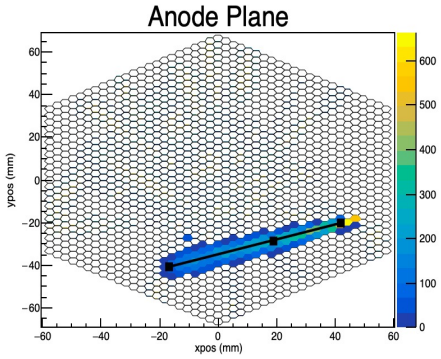
波形分析

从信号中提取时间、幅度参数（此处使用拟合算法）



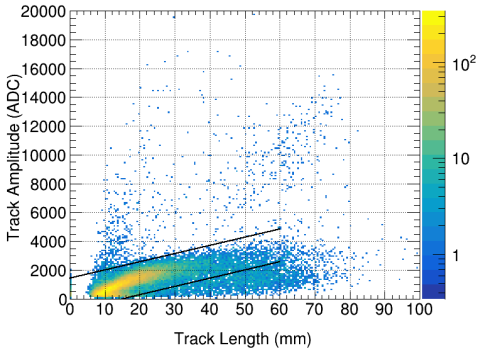
径迹重建

将不同通道的响应识别为一个事例



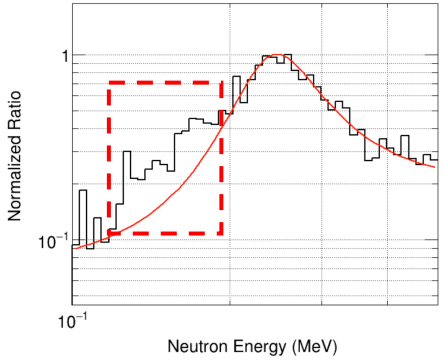
事例鉴别

区分粒子类型、归纳反应通道



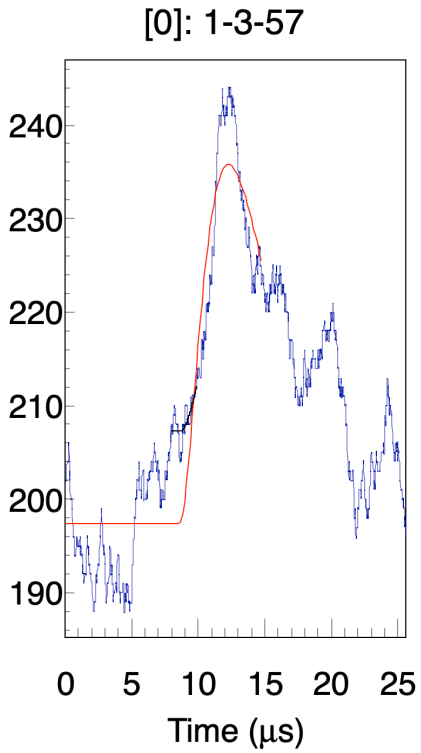
物理量计算

计算截面、角分布

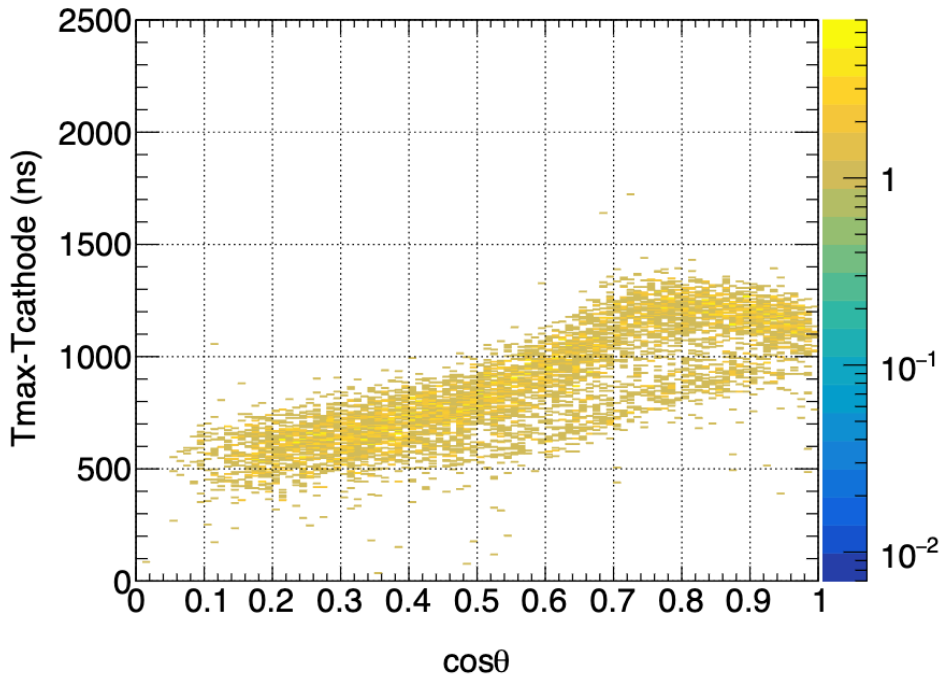


问 题 与 挑 战 (1)

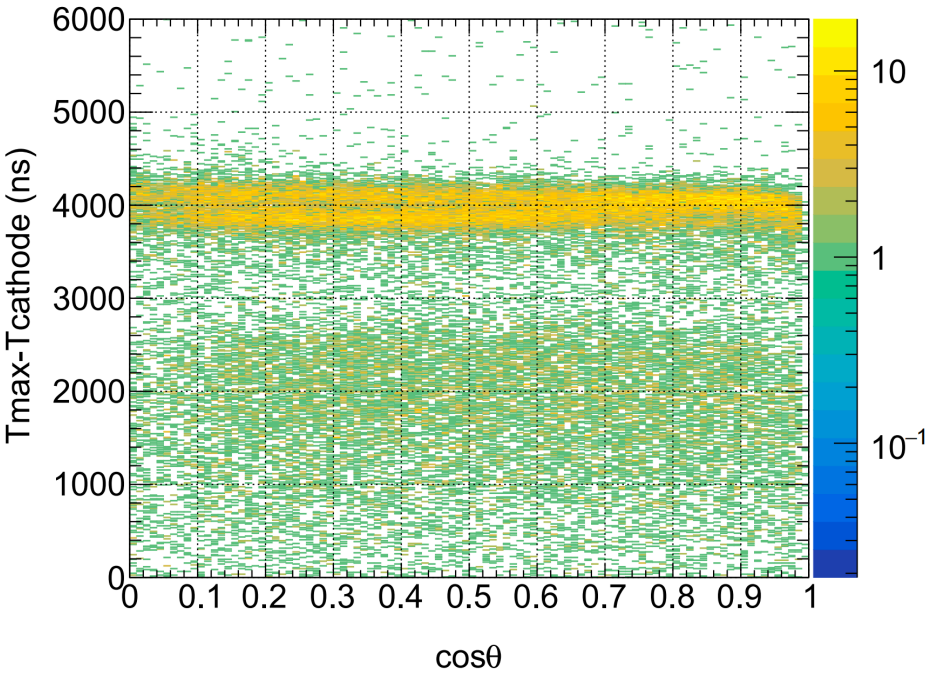
- 信号幅度与电离电子数量相关，低能质子信号幅度小，定时困难
- 低气压、高增益下，电子漂移扩散对电子漂移时间刻度存在影响（待解决）



典型阴极信号形状



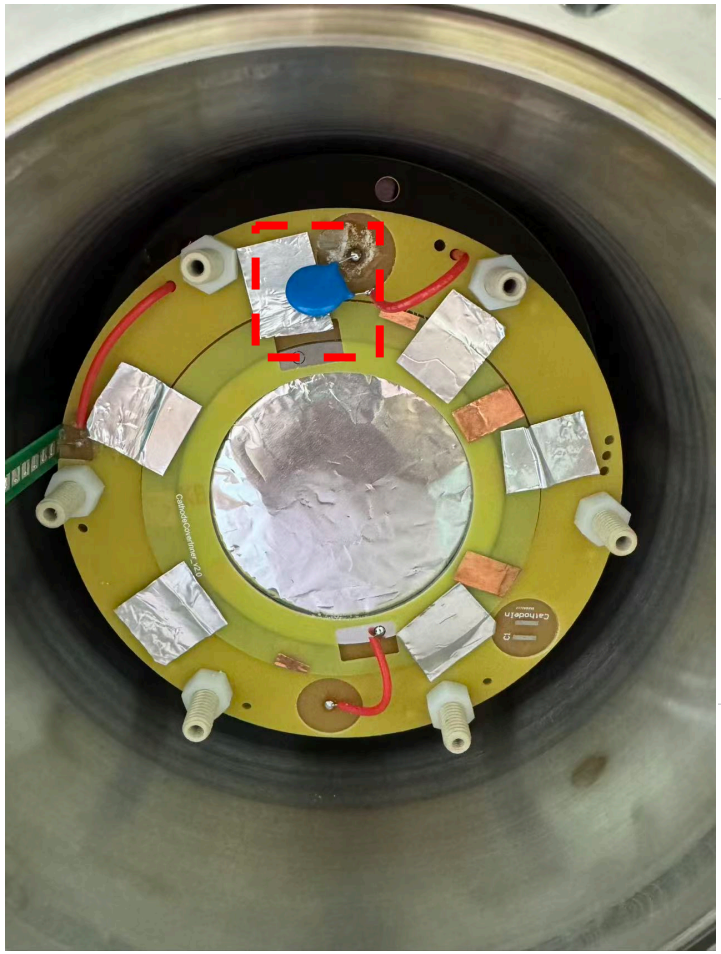
0.15 bar Ar+CH_4（1000增益）
最大漂移时间随cos度的变化

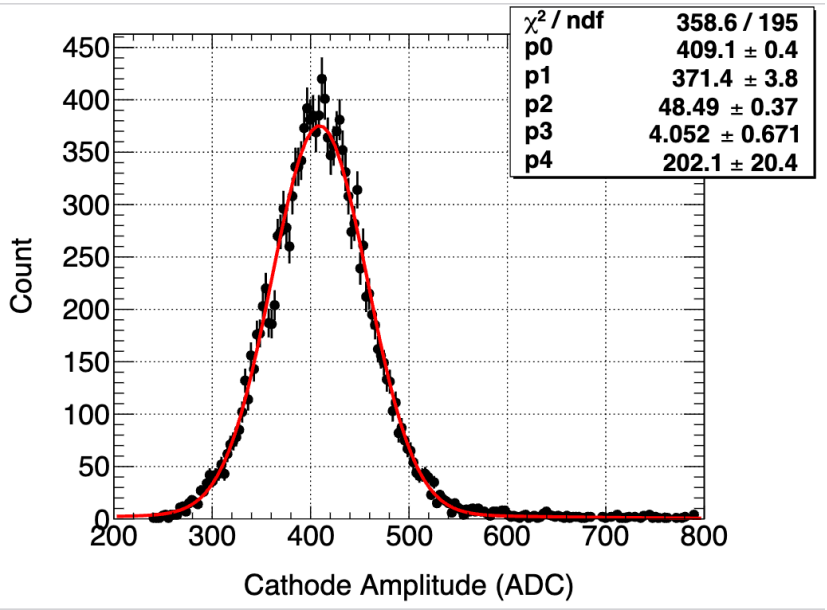


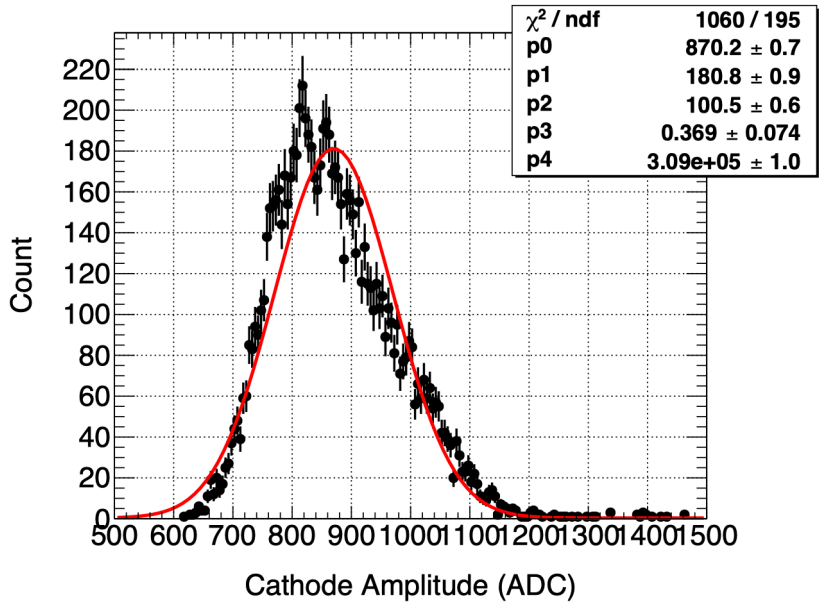
0.4 bar Ar+CO_2（10增益）
最大漂移时间随cos度的变化参考

阴 极 电 容 更 换

- 将阴极电容更换为22nF，原10nF，阴极信号幅度增长倍数近乎为线性增长

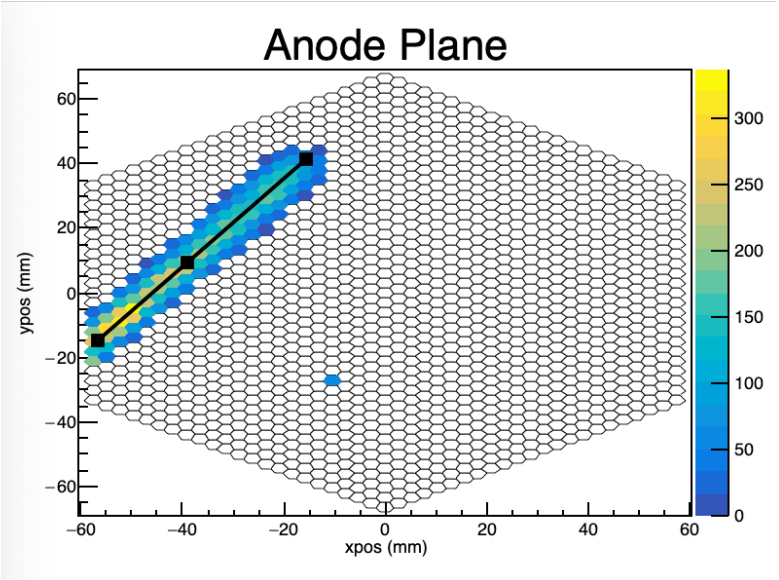




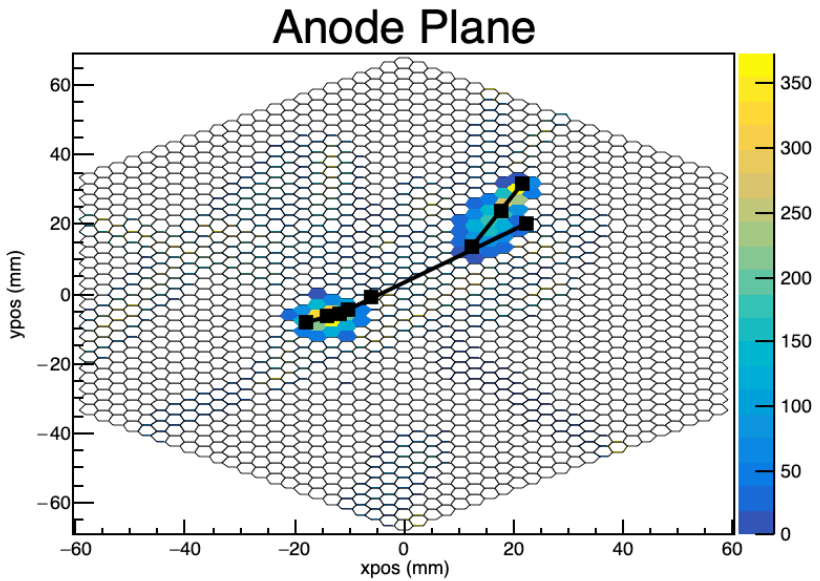


问 题 与 挑 战 (2)

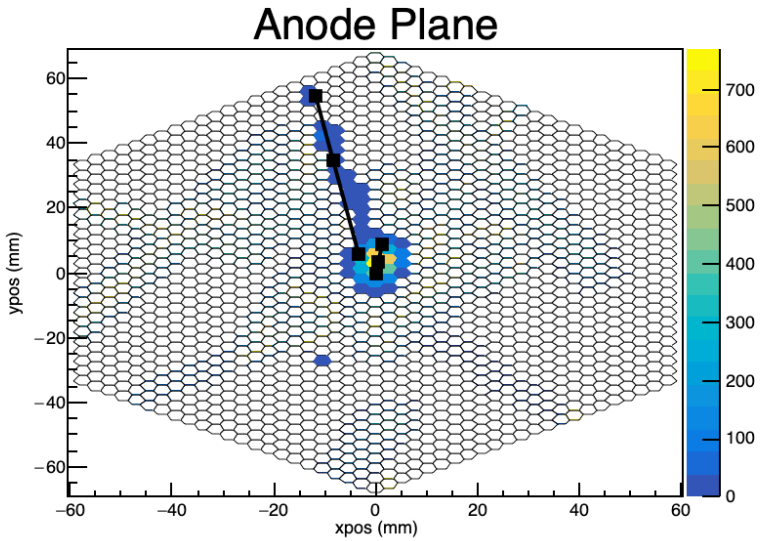
- 事例率较高，有事例重叠现象
- 由于电荷扩散，不同事例的“宽度”不一致
- 传统Hough算法存在一定的局限性



Alpha事例



双质子事例

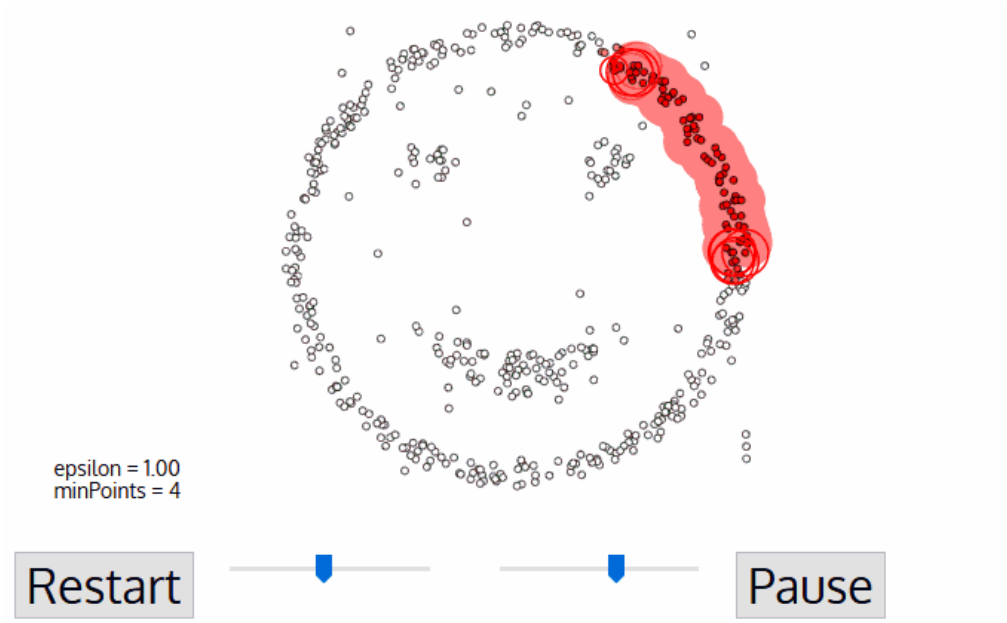


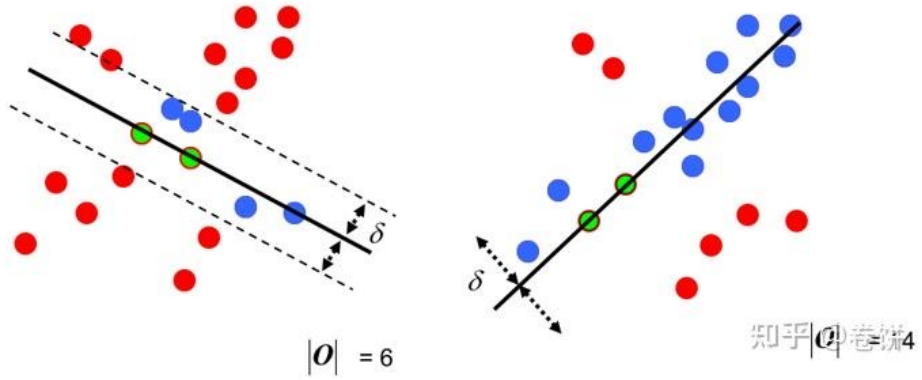
质子+氚核事例

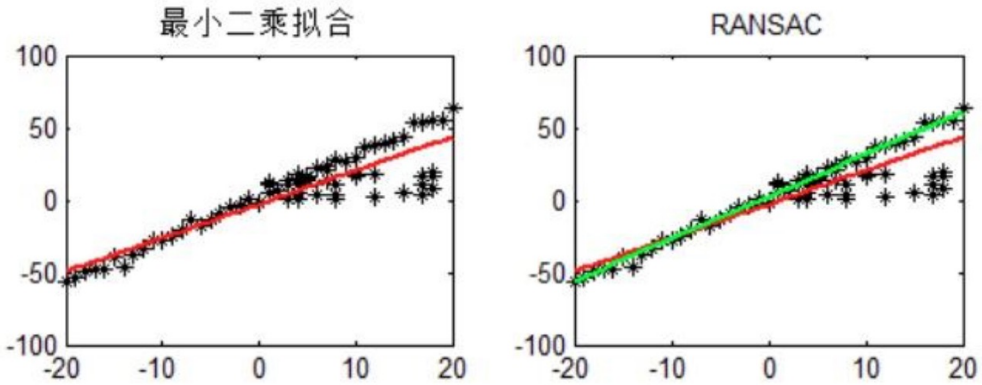
新径迹重建算法

聚类算法： 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





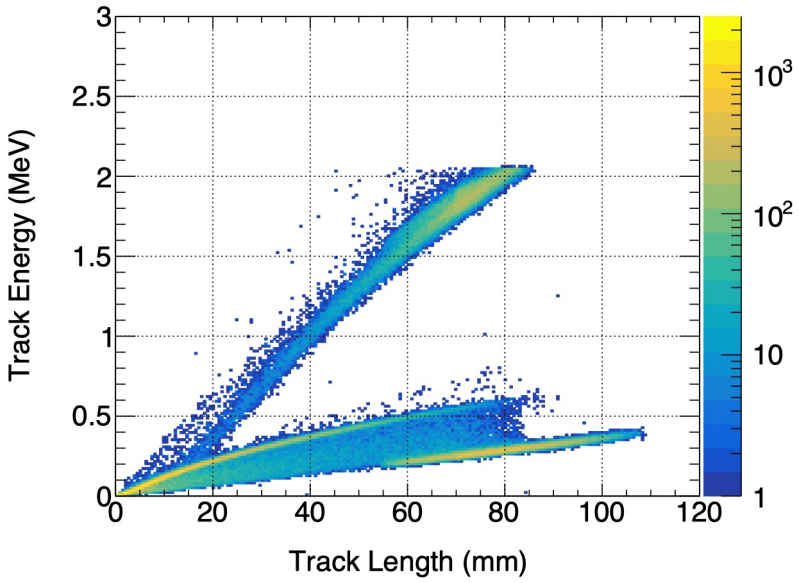


直线查找：RANSAC

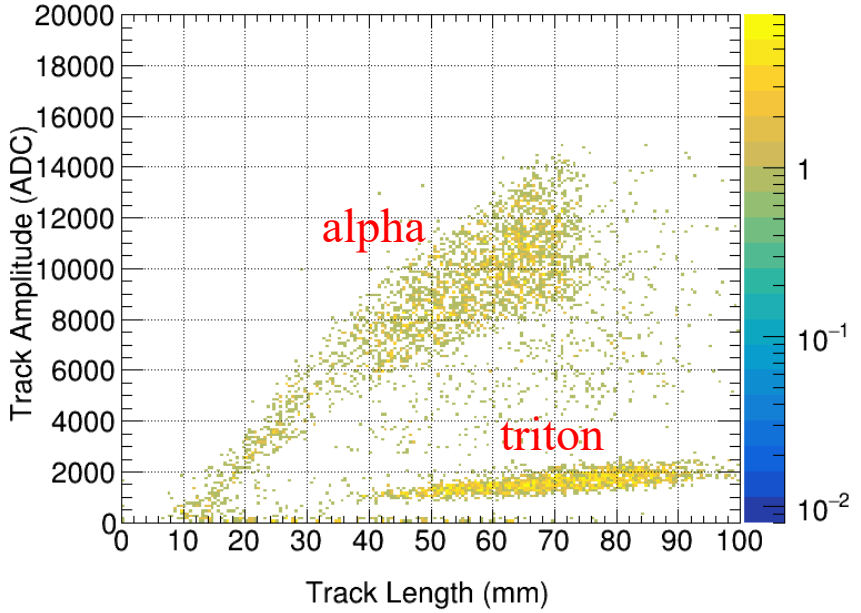
- 随机抽取2个样本点，对模型进行拟合
- 在半径δ范围内迭代寻到最多的“内点”

问 题 与 挑 战 (3)

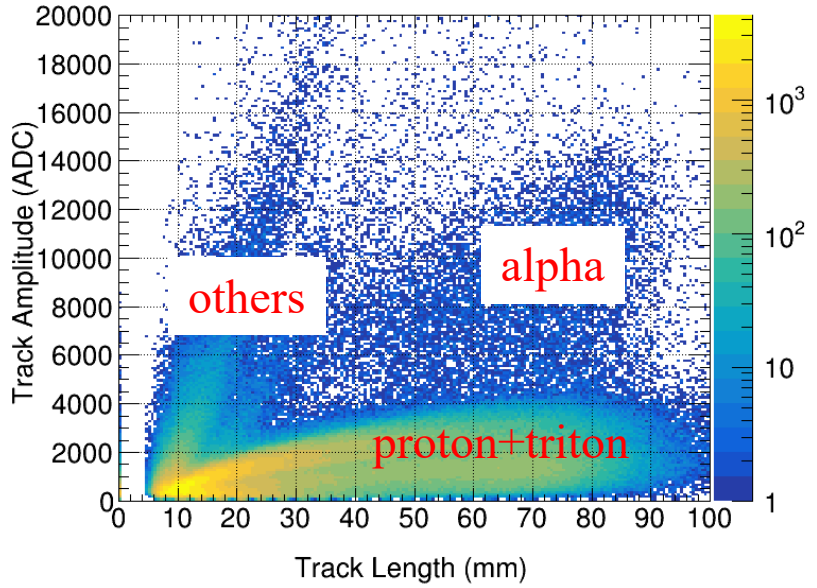
- 事例特征区别小，质子与氚核鉴别困难
- Li-6事例数过低，与np散射事例数比例小于1:20



Geant4模拟粒子特征分布



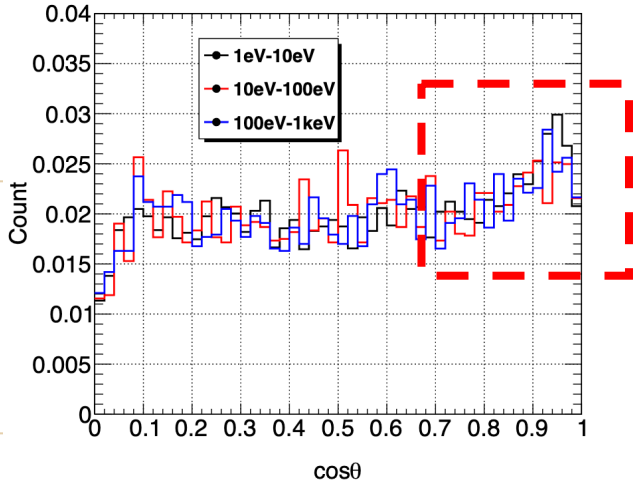
R-E （<20keV）



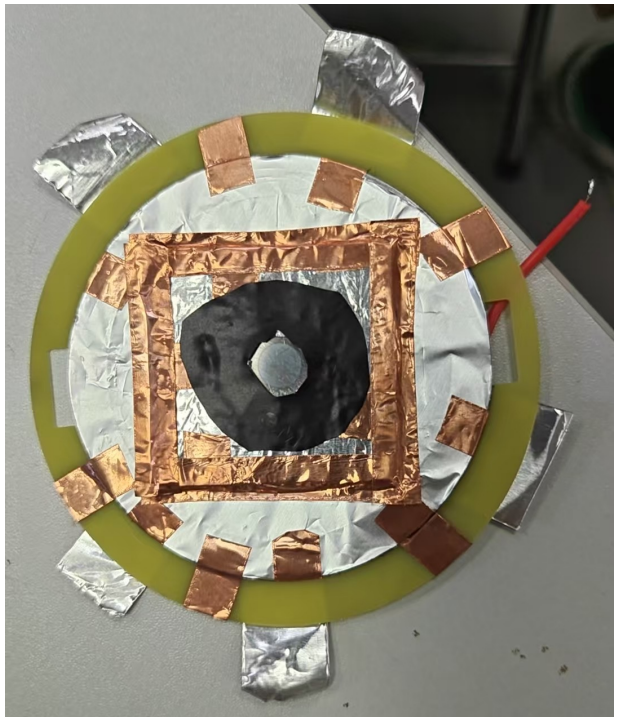
R-E (0.1 MeV< En < 0.5 MeV)

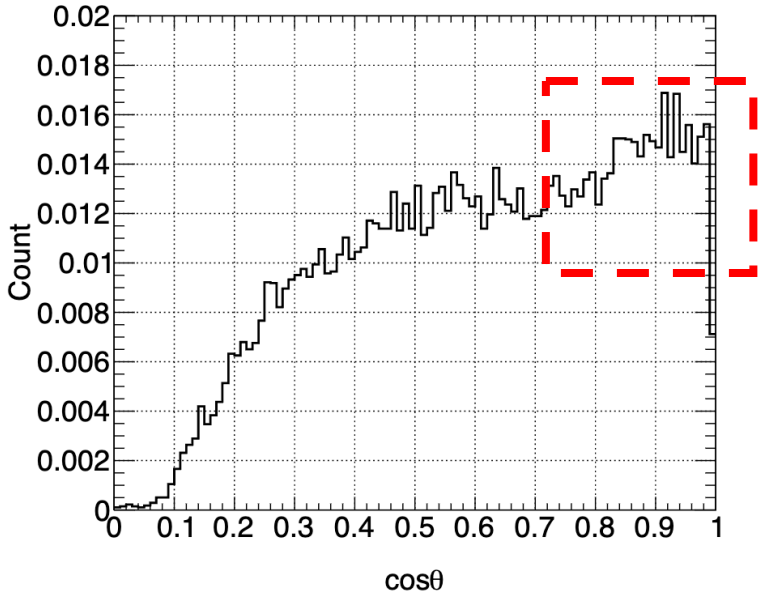
问 题 与 挑 战 (4)

- 推测是LiF材料绝缘特性导致正电荷积累，使电场畸变
- 实验室测量条件：
  - 中心放置^{244}Cm放射源，产生5.8MeV的alpha粒子
  - 周围贴上直径为40mm的绝缘胶带，模仿2023年束流实验情况

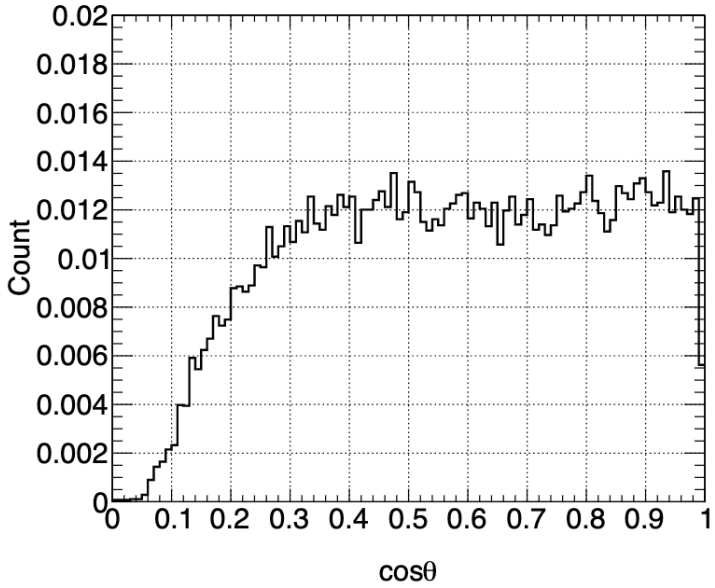


2023年Li-6截面测量实验角分布





有胶带角分布



无胶带角分布

04

总　　结

小　　结

研究感悟

- 散裂中子源是个优秀的中子应用平台，可以开展多样化的中子物理研究
- 简单的实验缺乏创新性，有创新性的工作都是“硬骨头”
- 探测器的研发总会遇到意想不到的问题
- “好”结果需要巧妙地“不探测”干扰粒子
- 随着计算机分析工具的成熟，可以进一步深入挖掘探测器数据的价值（聚类算法径迹重建）

新一轮实验计划

- 11月22日-11月26日，祝获得更好的结果

谢谢！