

基于MTPC的 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 反应截面测量

易晗¹, 白浩帆², 任文凯², 邬泽鹏², 陈海铮², 刘杰², 夏聪², 张国辉², 樊瑞睿¹, 李样¹, 蒋伟¹, 陈永浩¹,
吕游¹, 宁常军¹, 褚天志¹, 陈宏昆¹, 张志永³, 陈昊磊³, 陈朕³, 赵懋源³, 封常青³, 刘树彬³等

(MTPC团队)

¹ 中国科学院高能物理研究所, 散裂中子源科学中心

² 北京大学物理学院重离子物理研究所

³ 中国科学技术大学

2025.07.23

1. 研究背景、意义与现状

2. 实验装置与方法

3. 结果分析与讨论

4. 总结与展望

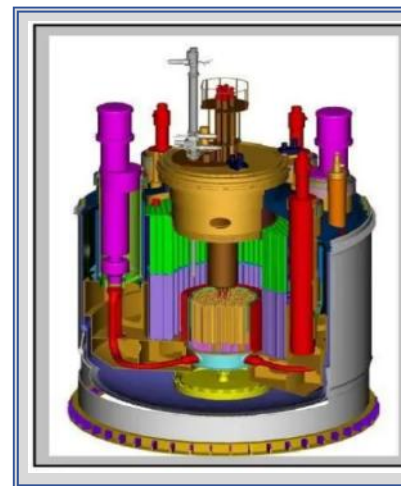
1. 研究背景、意义与现状

裂变核反应(n, f): 释放大量能量, 核能利用的基础

中子核反应截面 σ : 描述中子与原子核之间发生相互作用的概率

随着核科学与技术的发展, 在以下三个方面需要精度更高的截面数据^[1]

- 新型反应堆模拟计算
- 新型核武器设计
- 核融合计算



- ✓ CEFR中国实验快堆
- ✓ 快中子能区的核反应截面对快堆设计至关重要
- ✓ 快中子能区截面精度需进一步提高

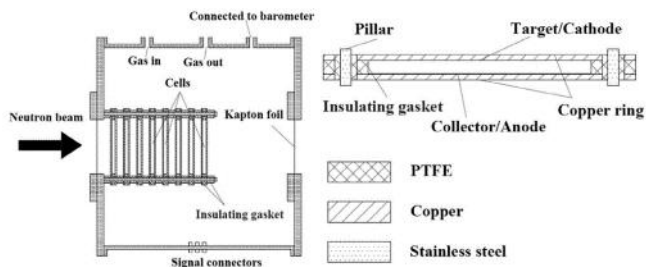
[1] J.W.Meadows, et al., Nucl. Sci. Eng. 68 (3) (1978) 360-363

高精度裂变核反应截面测量是国际前沿, 要求误差 $< 1\%$

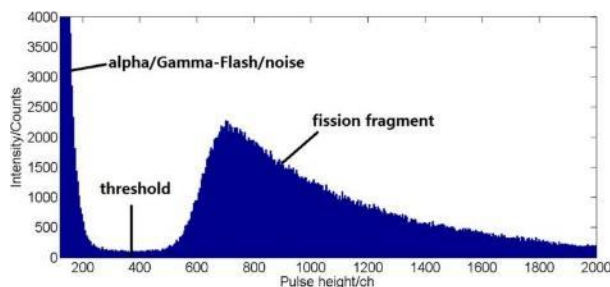
对裂变核反应截面测量方法的研究是实现高精度裂变反应截面测量的基础

1. 研究背景、意义与现状

➤ 基于电离室的裂变反应截面测量：



FIXM裂变电离室结构图



电离室典型实验测量结果

电离室的优势^[1]:

- 能量分辨率好
- 探测器结构简单

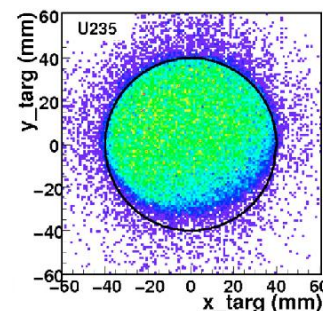
电离室的劣势:

- 输出信息较少
- PID能力有限

➤ 基于PPAC的裂变反应截面测量：



CERN n_TOF PPAC结构图



PPAC典型实验测量结果

PPAC的优势^[2]:

- 良好的时间与位置分辨率
- 对裂变碎片的高探测效率
- 高计数率下能够稳定运行

PPAC的劣势:

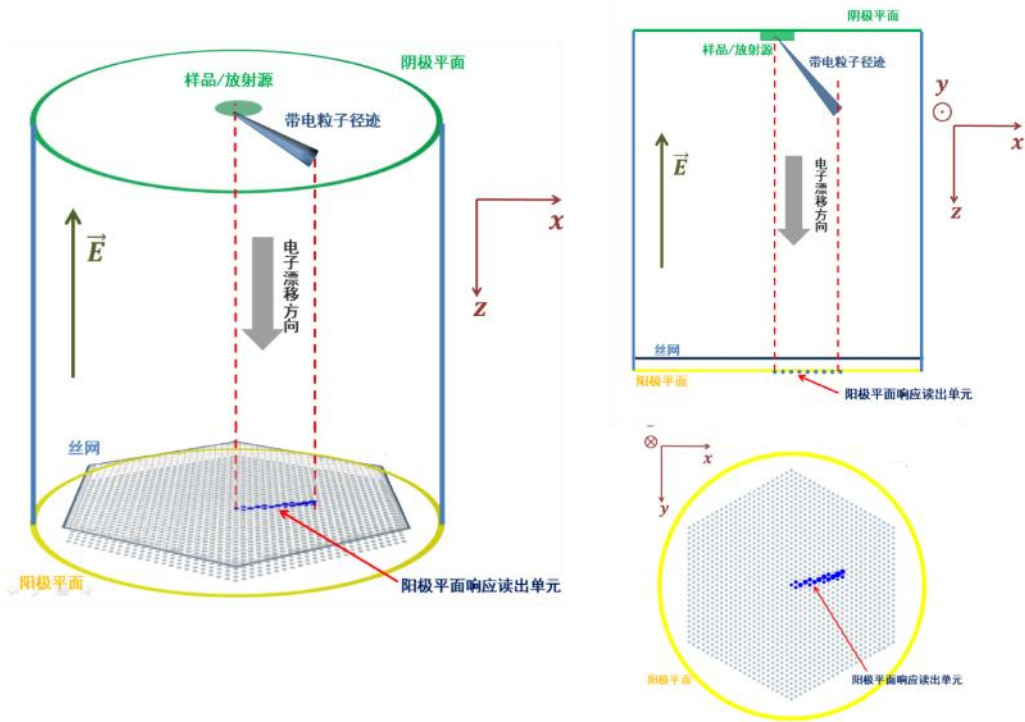
- 能量分辨率略差

[1] J. Wen, et al., Ann. Nucl. Energy 140 (2020) 107301

[2] D. Tarrio, et al., J. Korean Phys. Soc. 59 (2) (2011) 1904-1907

1. 研究背景、意义与现状

➤ 基于TPC的裂变反应截面测量:



TPC探测器原理示意图

- **时间投影室** (Time Projection Chamber, TPC) [1]
Z轴 X-Y平面
- 三维径迹重建 → 粒子种类鉴别
- 调研发现采用时间投影室有望提高测量精度 [2]
- 裂变反应截面测量是国际上TPC应用的前沿领域 [3]

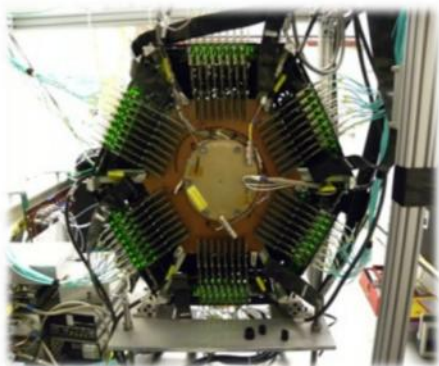
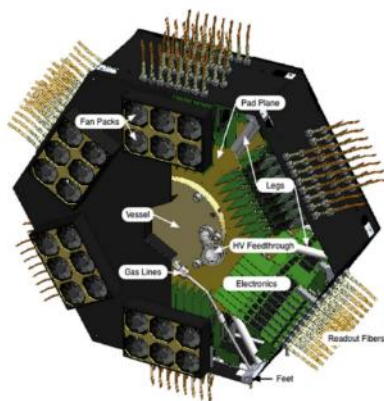
[1] D. R. Nygren, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **907** (2018), 22-30

[2] **Haofan Bai** and Guohui Zhang, *Measurement methods of the cross sections for neutron-induced fissions*, Radiat. Detect. Technol. Methods (Published Online)

[3] M. Heffner, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **759** (2014), 50-64

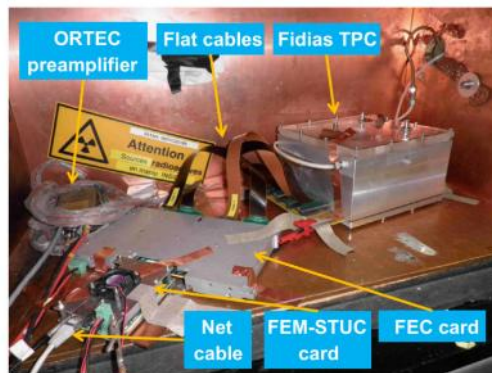
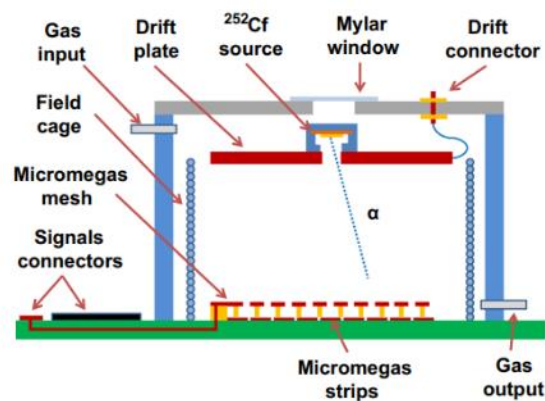
1. 研究背景、意义与现状

➤ 国际上主要的采用TPC开展裂变反应截面测量的研究：



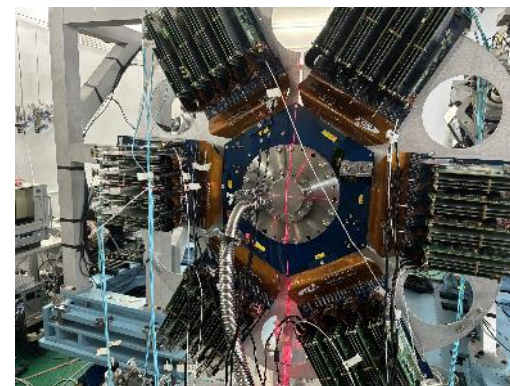
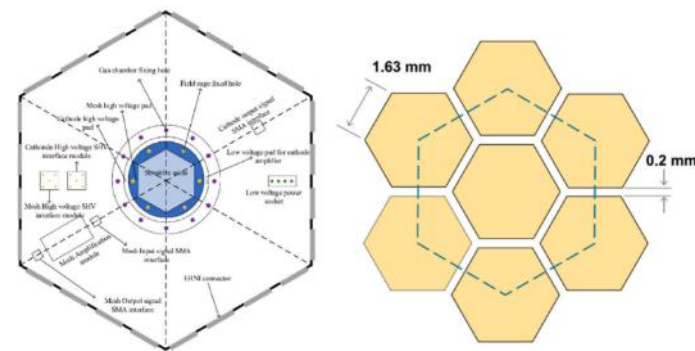
NIFFTE项目^[1]

[1] J. Ruz, et al., J. Instrum. 8 (2013) C12018



FIDIAS项目^[2]

[2] F. J. Iguaz, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 735 (2014) 399-407

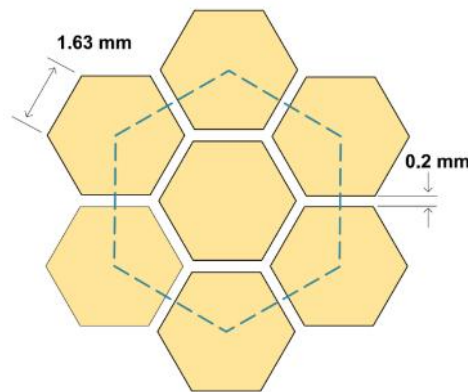
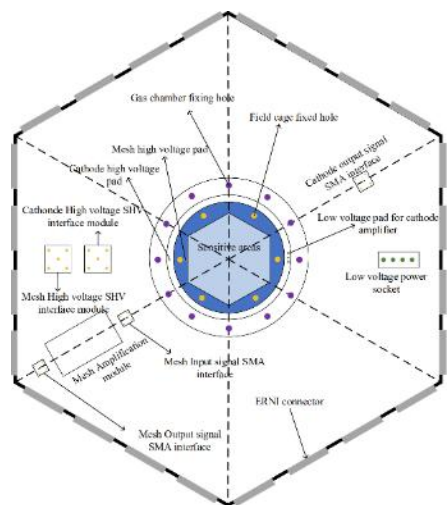
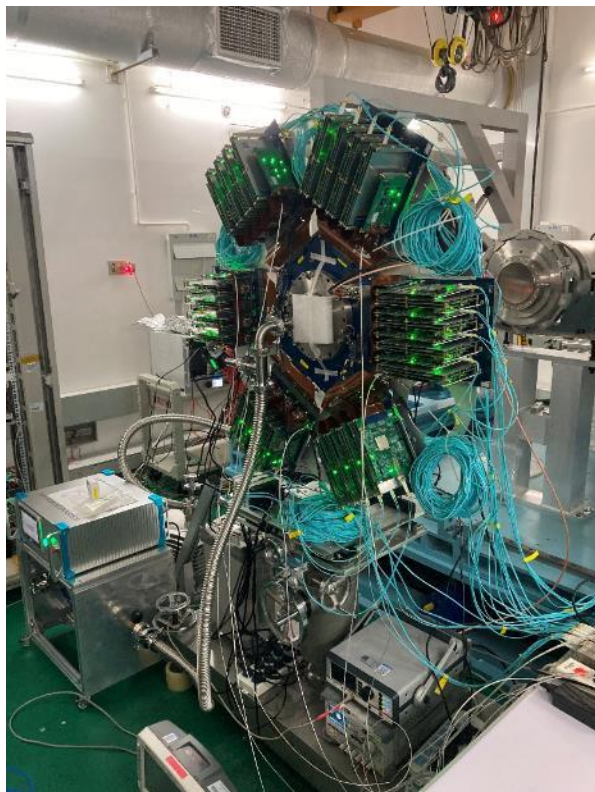


MTPC项目^[3]

[3] Y. Li et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 1060 (2024) 169045

1. 研究背景、意义与现状

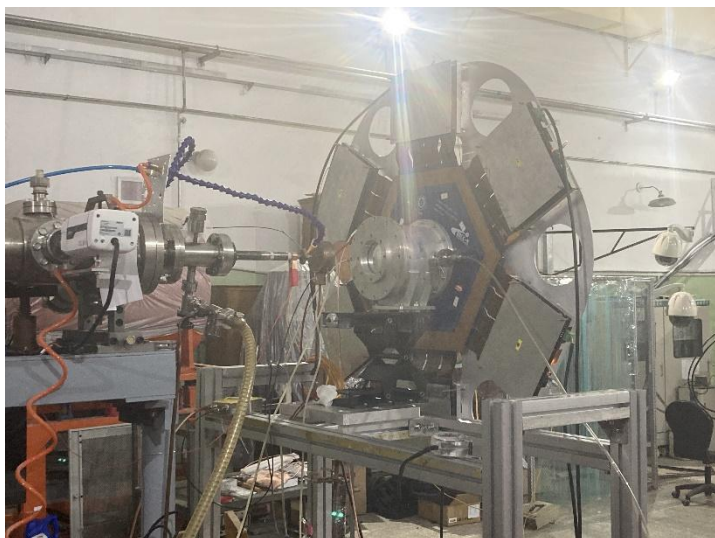
合作组初步建立了一套采用MTPC探测器测量裂变反应截面的方法



- 多用途时间投影室 (Multi-purpose Time Projection Chamber, MTPC)
- 中国散裂中子源CSNS束流扩展应用小组设计组装
- 中国科学技术大学制作
- 设计目标：在反角白光中子源Back-n开展多种核反应截面实验测量
- 增益结构：Micromegas

1. 研究背景、意义与现状

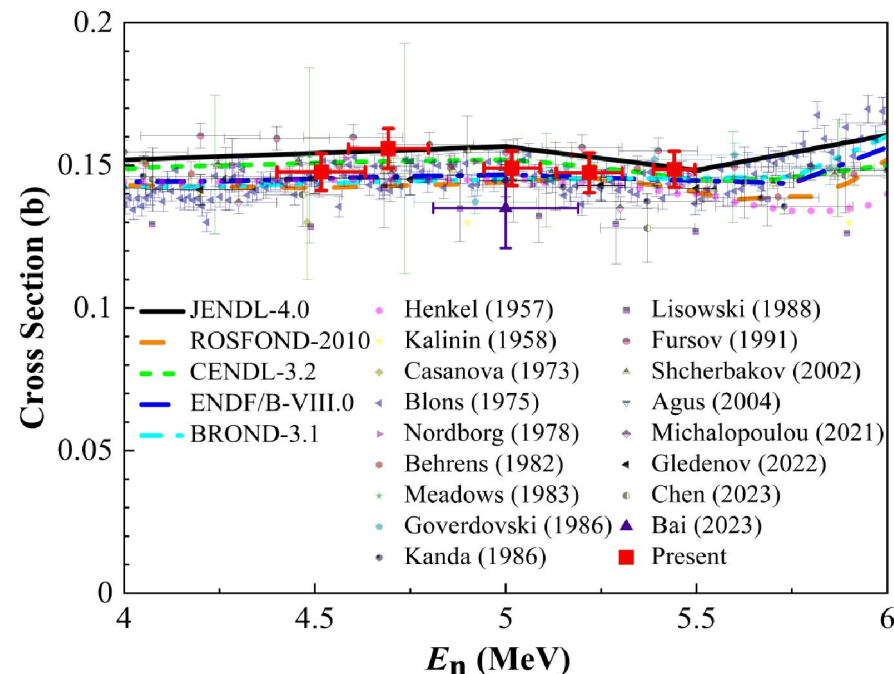
基于北京大学4.5MV静电加速器单能中子源:



2022.4 单能点测试



2023.5 多能点测量



- 基于北京大学单能中子源，采用MTPC探测器，在4.50 ~ 5.40 MeV能区5个中子能点开展了 $^{232}\text{Th}(n, f)$ 反应截面测量，得到了精度较高的截面结果 [1,2]
- 国际上首次采用TPC测量得到 $^{232}\text{Th}(n, f)$ 反应截面
- 本报告：将基于MTPC的裂变反应截面测量从单能中子源拓展至白光中子源

[1] Haofan Bai, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 1058 (2024) 168912

[2] Haofan Bai, et al., *Chin. Phys. C* 48 (2024) 104001

1. 研究背景、意义与现状

2. 实验装置与方法

3. 结果分析与讨论

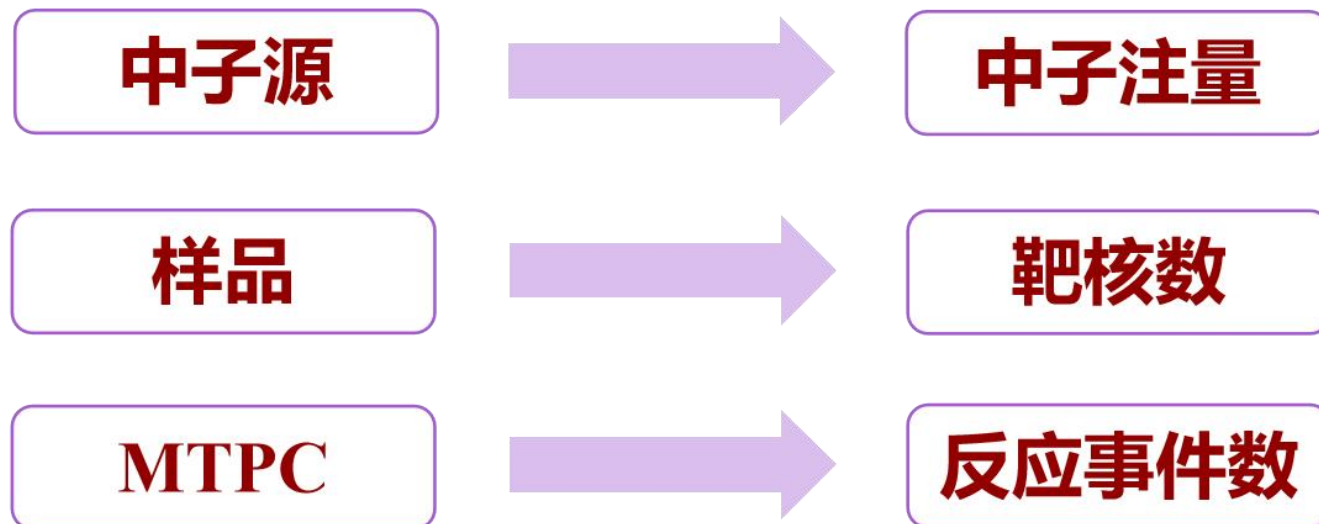
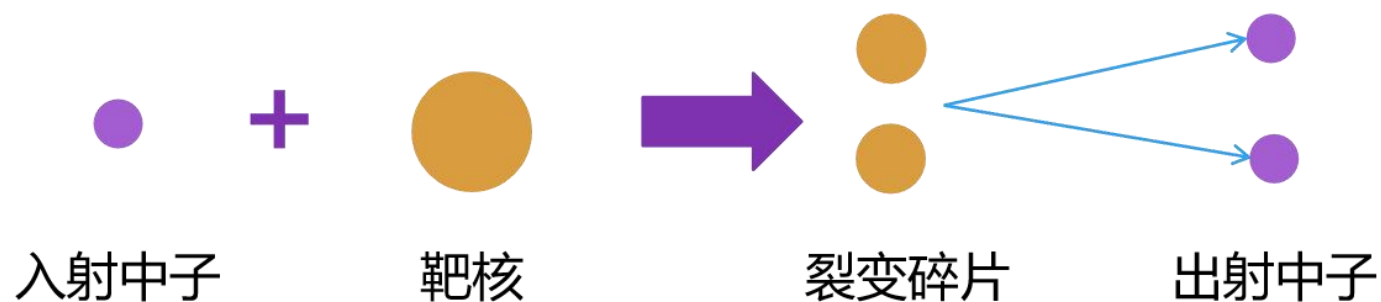
4. 总结与展望

2. 实验装置与方法

③ 反应事件数

$$\sigma = \frac{N'}{N_S \cdot \Phi}$$

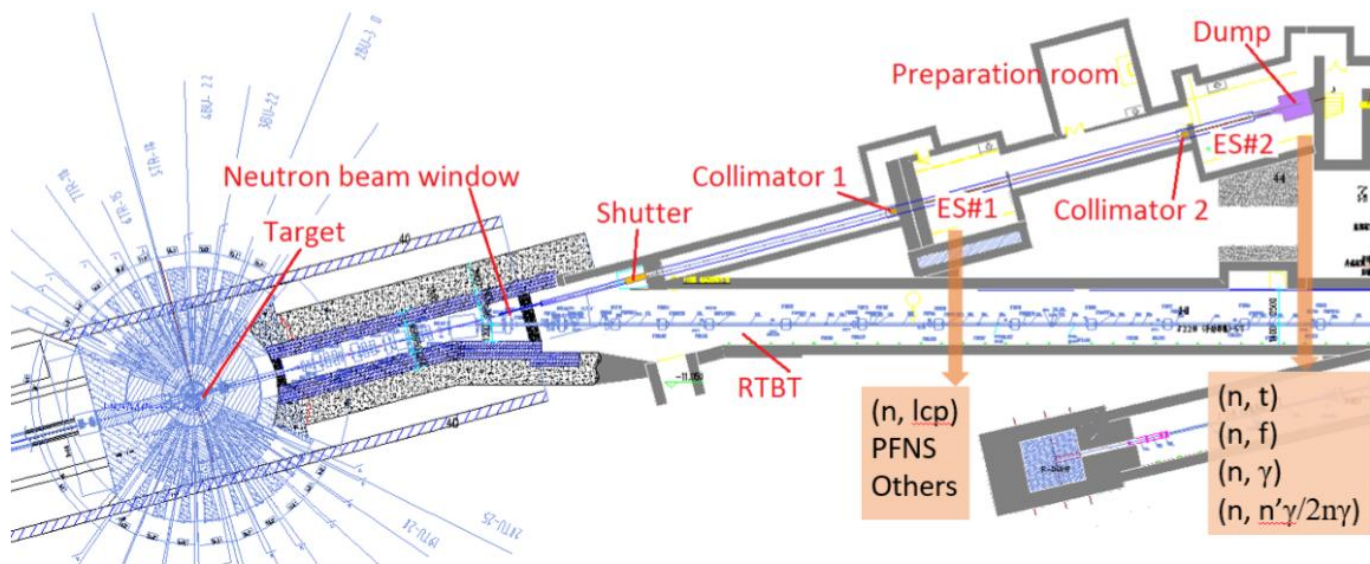
② 靶核数 ① 中子注量



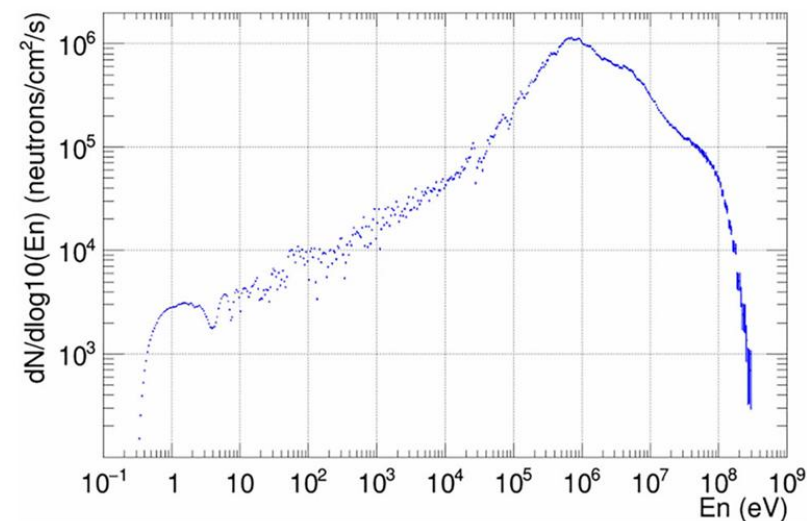
2. 实验装置与方法

中国散裂中子源CSNS：我国首台，世界第四台脉冲型散裂中子源

反角白光中子实验装置Back-n：核数据测量研究工具



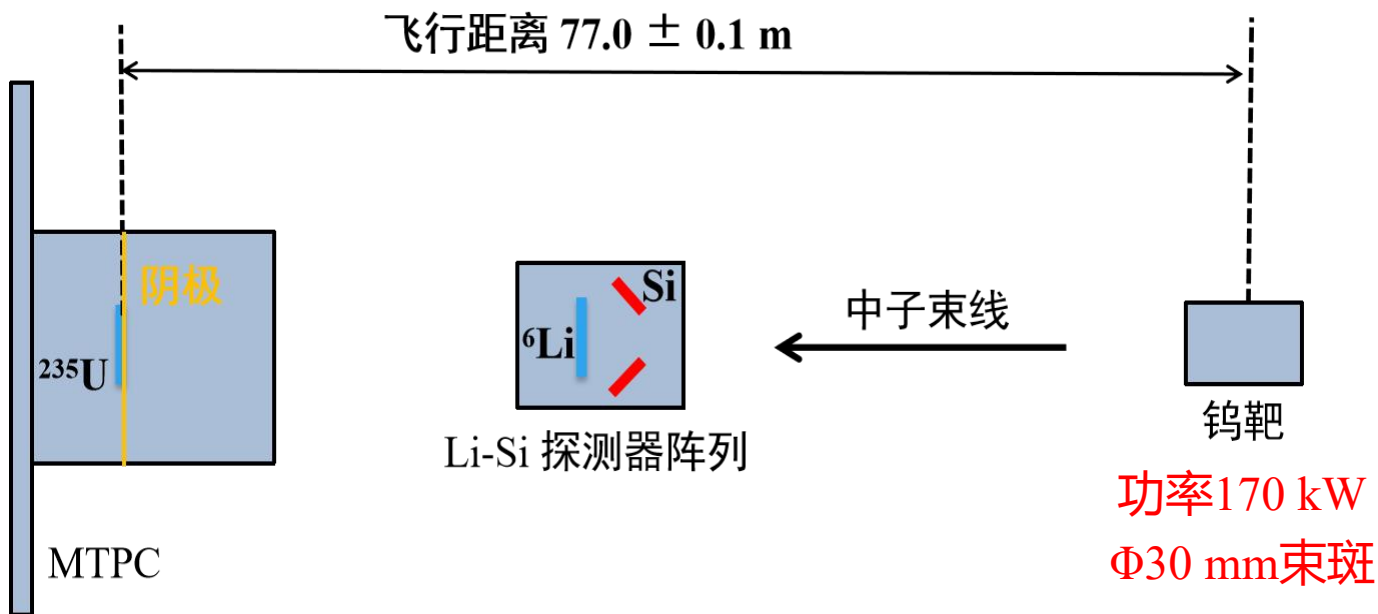
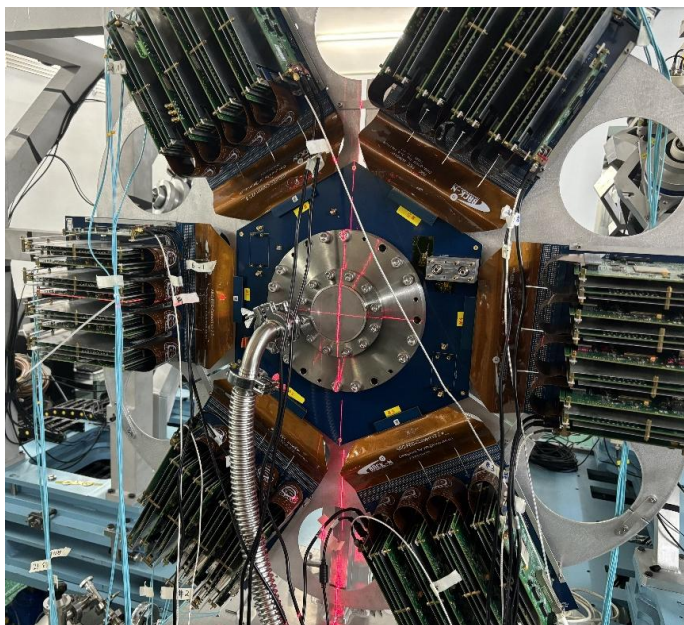
中国散裂中子源CSNS 反角白光中子实验装置Back-n示意图



中子能谱

2. 实验装置与方法

硬件装置:



- MTPC: 探测 ^{235}U 裂变事件
- 样品: $^{235}\text{U}(\text{OH})_4$



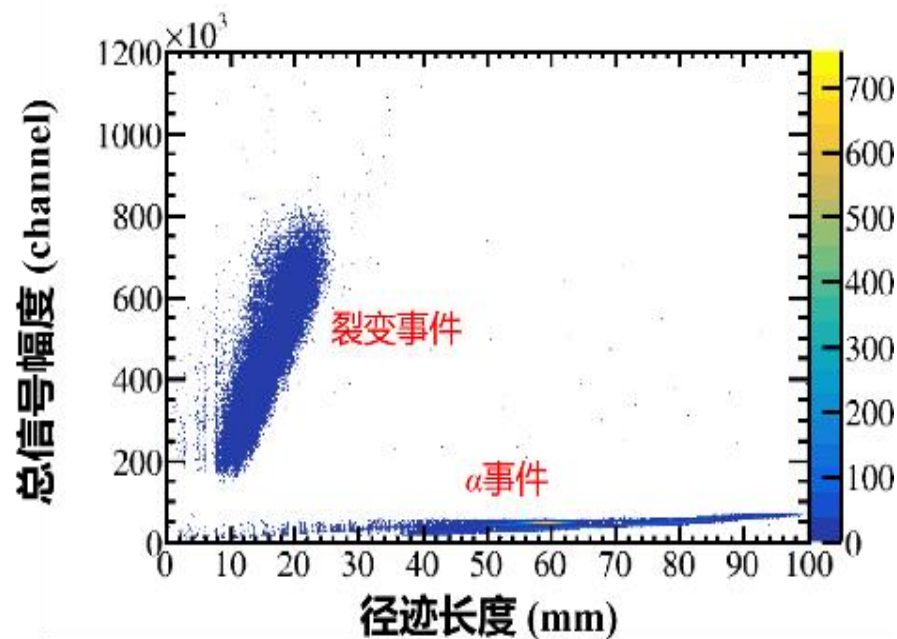
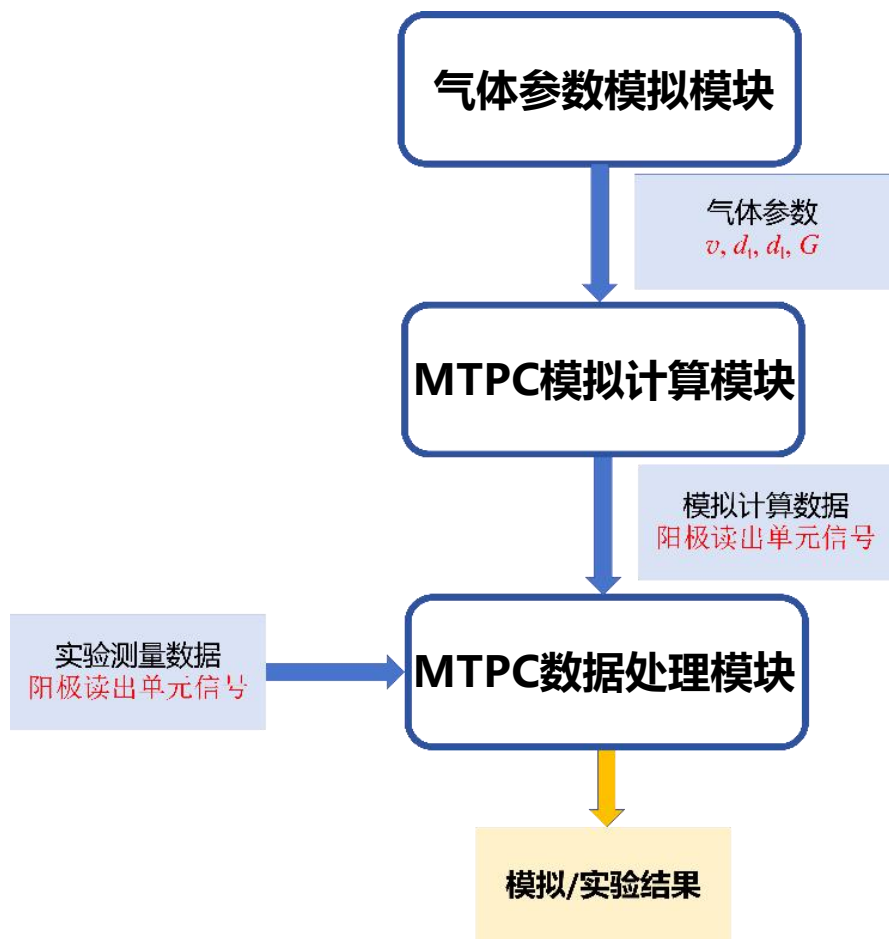
西核院提供

- CSNS Back-n 白光中子源
- 能区: 0.5 eV ~ 10 keV
- ~100小时束流时间
- 中子能谱: Li-Si探测器阵列

2. 实验装置与方法

软件算法： **BLUET程序框架**，MTPC配套的模拟计算与数据处理软件程序

➤ **裂变事件模拟：**

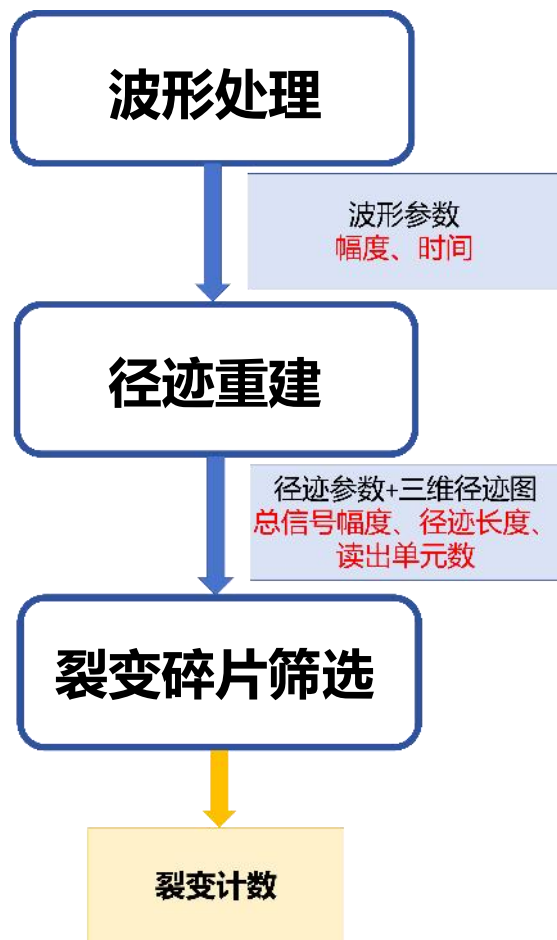


目标：

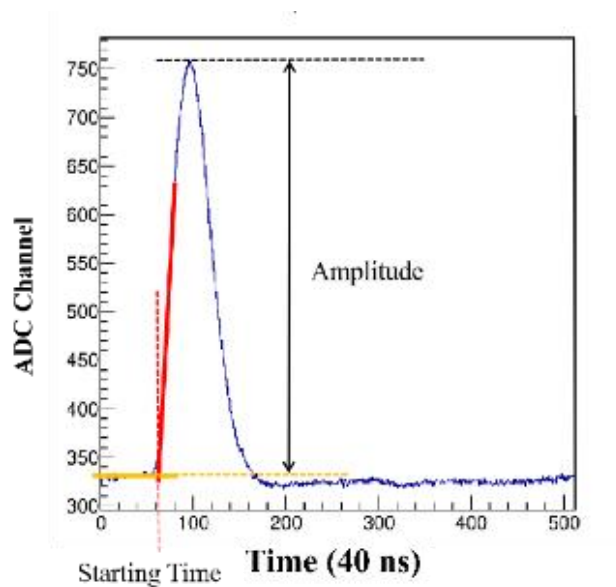
- 判断裂变反应截面测量可行性
- 计算探测效率

2. 实验装置与方法

数据处理： 基于ROOT，针对裂变核反应截面测量

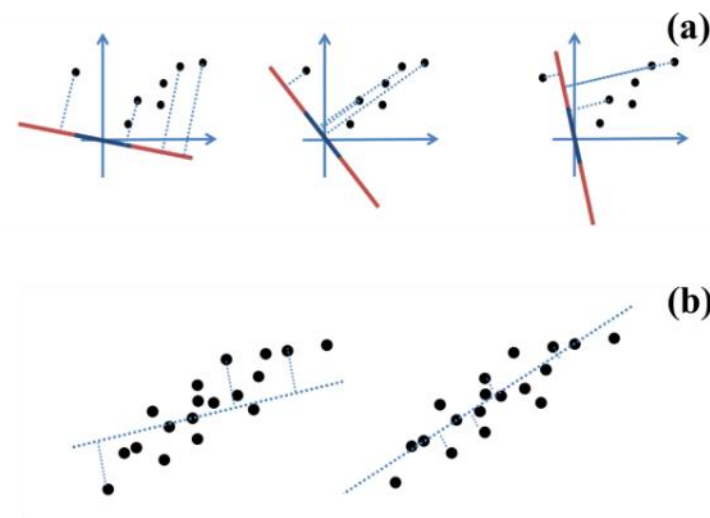


□ 波形处理



BLUET-v5：波形函数拟合

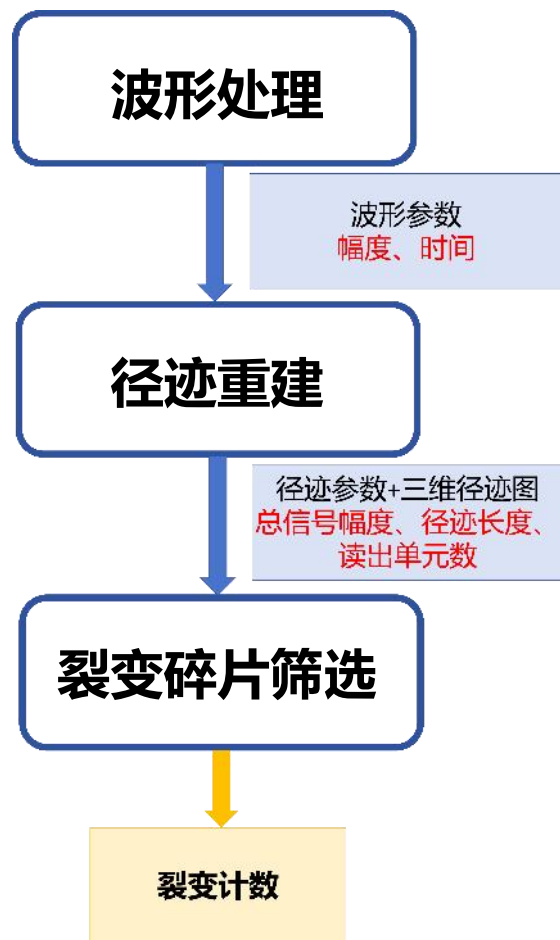
□ 径迹重建



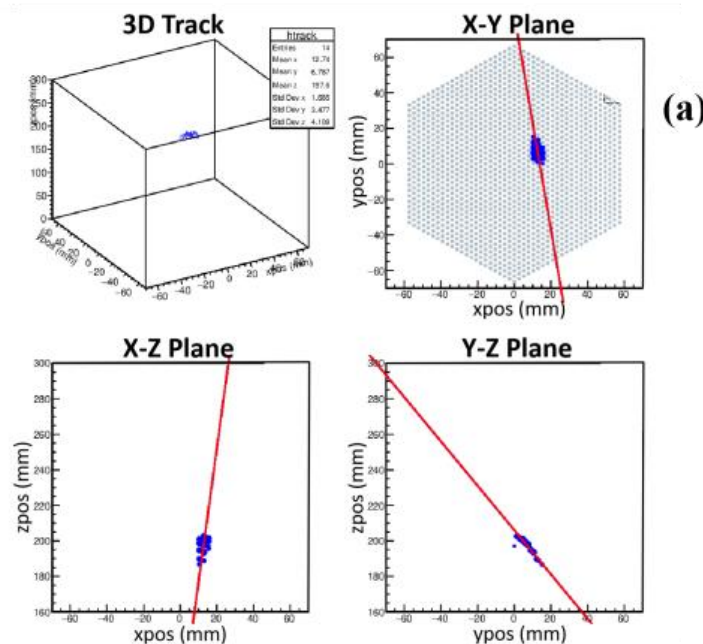
Hough变换算法
径迹寻找+径迹参数确定

2. 实验装置与方法

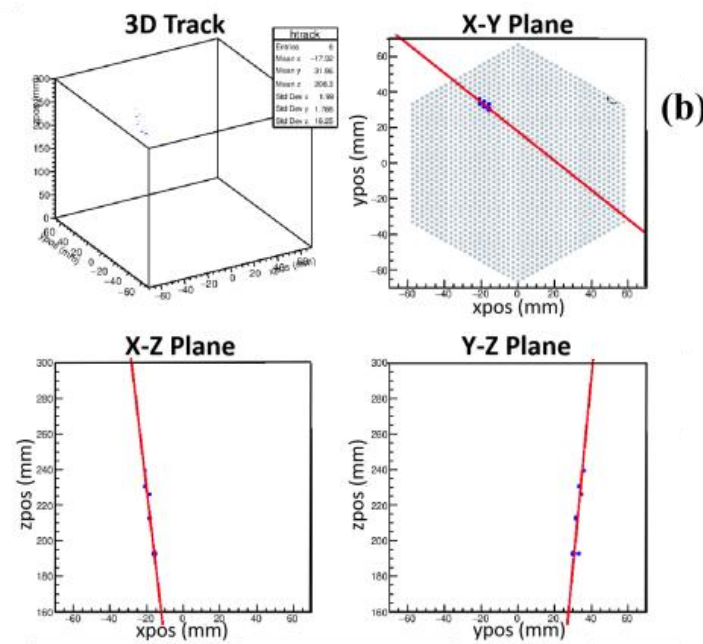
数据处理：基于ROOT，针对裂变核反应截面测量



□ 裂变碎片筛选



裂变碎片



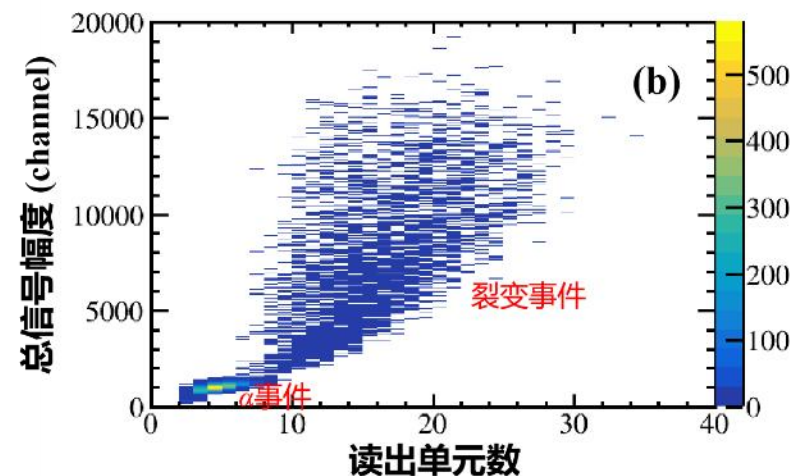
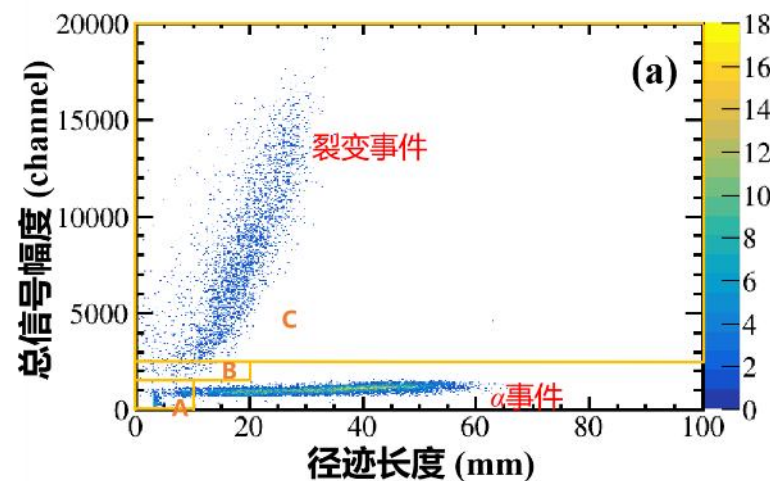
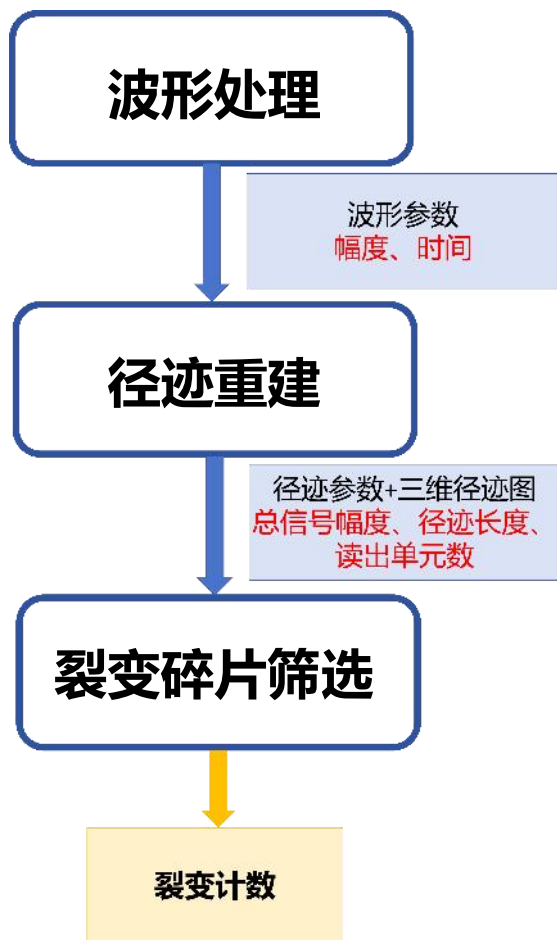
α 粒子

2. 实验装置与方法

数据处理： 基于ROOT，针对裂变核反应截面测量

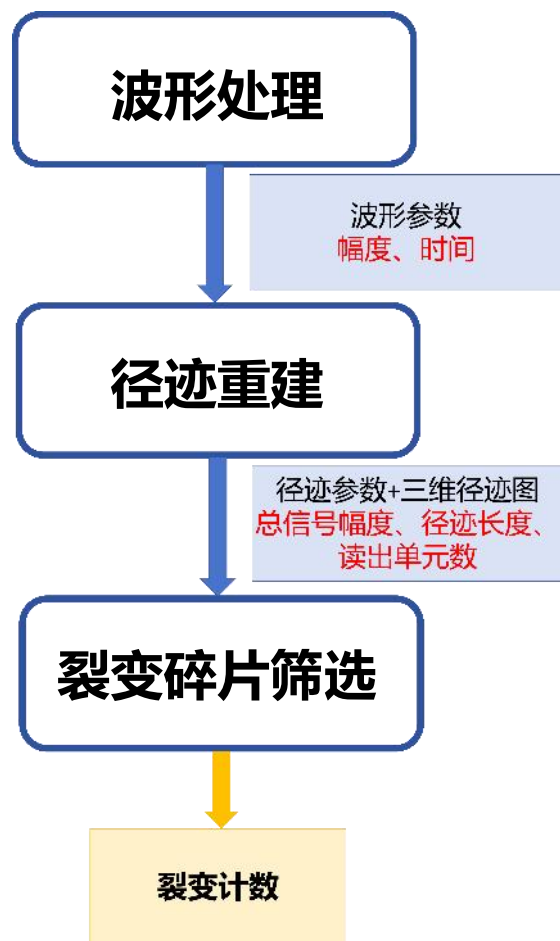
□ 裂变碎片筛选

$$C = C^A + C^B + C^C$$

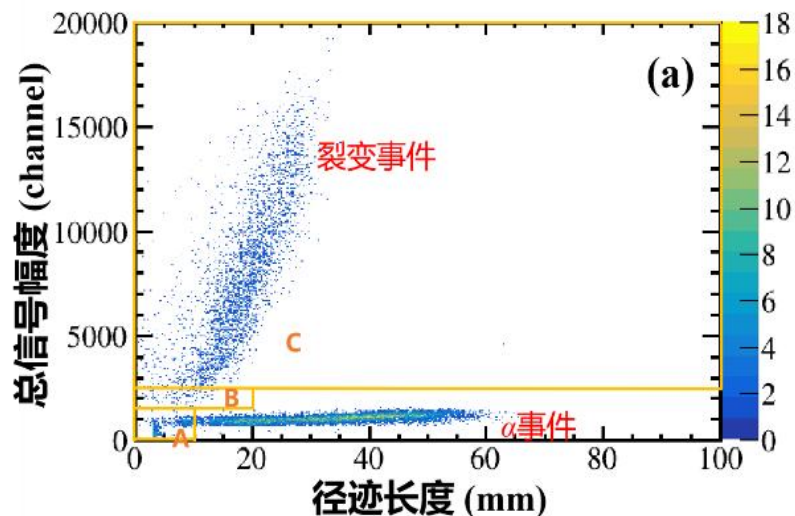


2. 实验装置与方法

数据处理：基于ROOT，针对裂变核反应截面测量



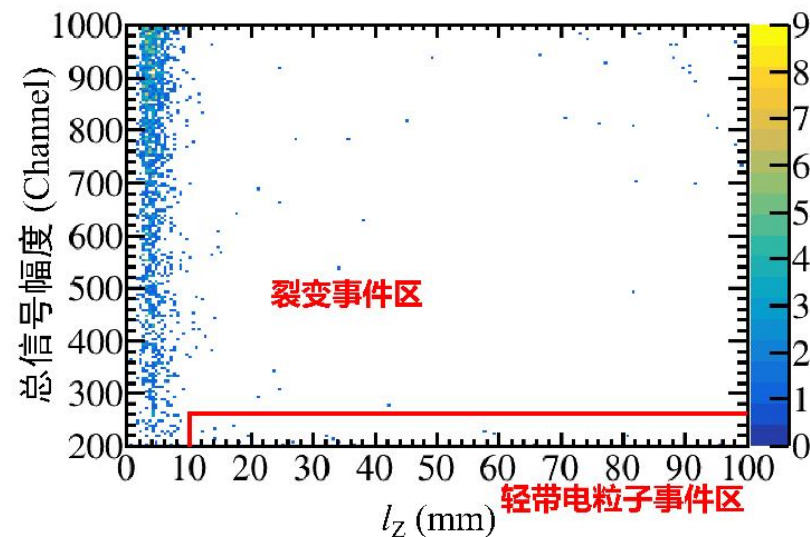
□ 裂变碎片筛选



确定裂变计数

引入Z方向hit点到中心标准差 l_z

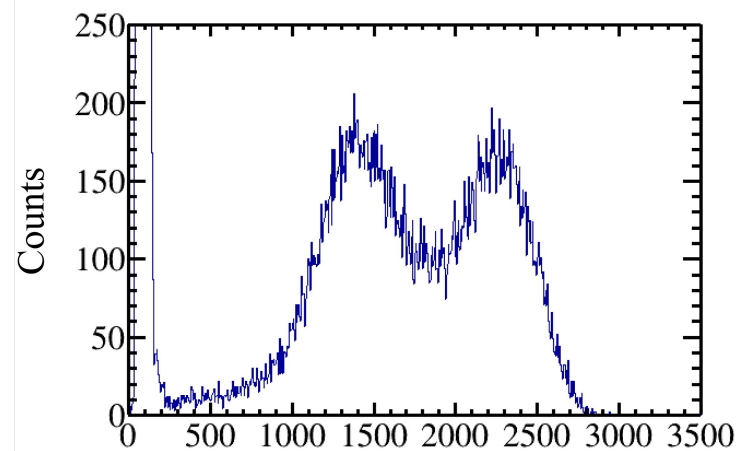
$$Z_C = \frac{\sum_i A_i \cdot Z_i}{\sum_i A_i} \quad l_z = \sqrt{\frac{\sum_i A_i \cdot (Z_i - Z_C)^2}{\sum_i A_i}}$$



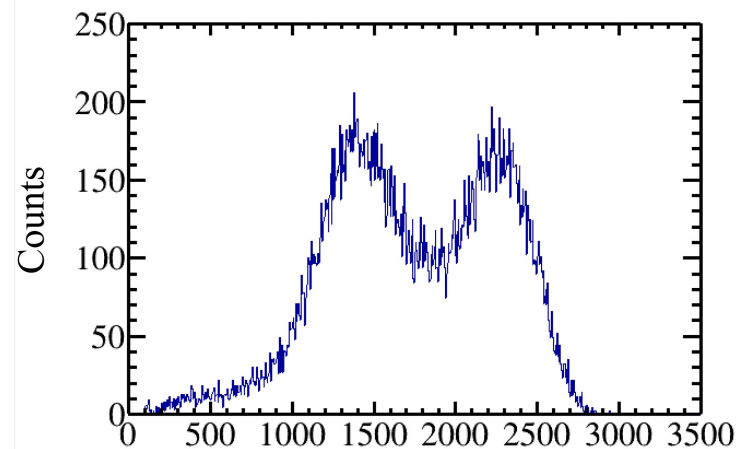
低能区裂变事件筛选示例

2. 实验装置与方法

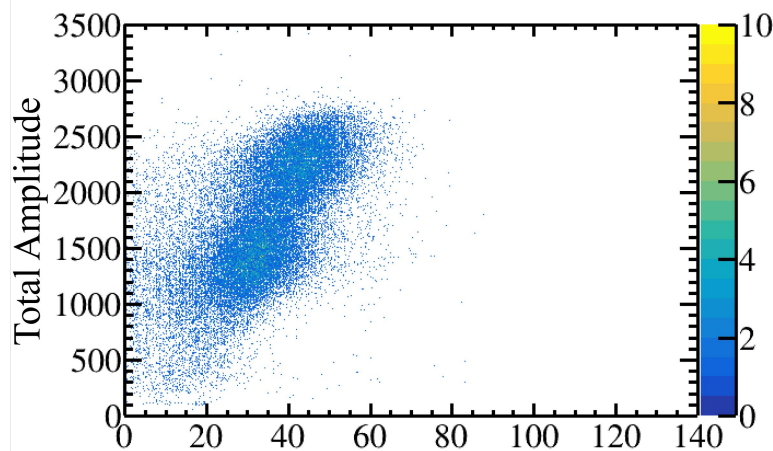
数据处理：基于ROOT，针对裂变核反应截面测量



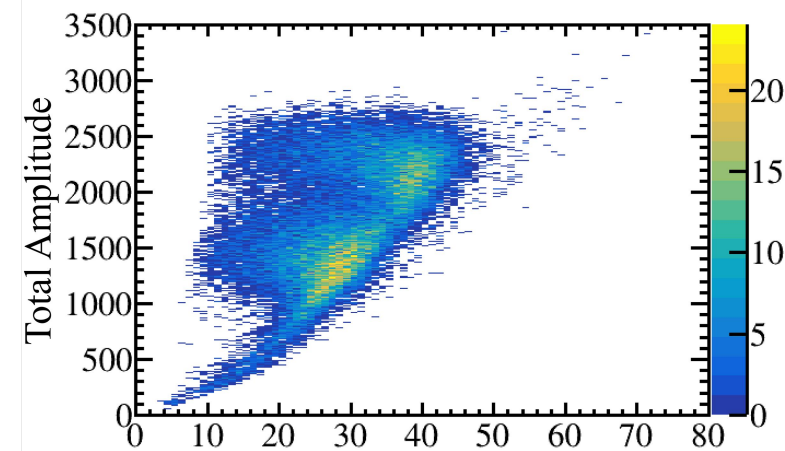
全部事件总信号幅度谱



裂变事件总信号幅度谱



裂变事件总信号幅度-径迹长度二维谱



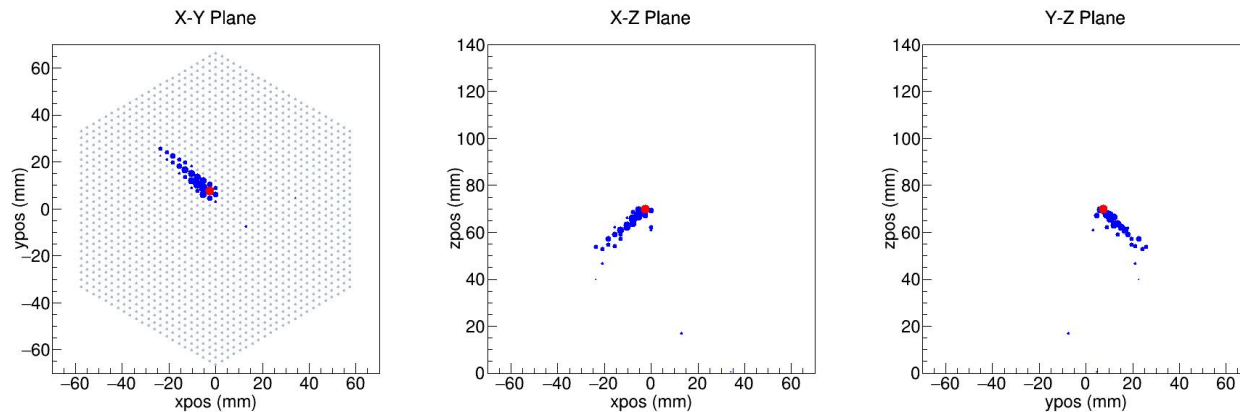
裂变事件总信号幅度-击中单元数二维谱

- 在总信号幅度谱中， α 事件区会延伸到300道
- 基于MTPC的径迹重建能力，可以通过径迹形状等参数，将低能的 α 事件和裂变事件进行区分
- 由于样品较薄，可以看到裂变谱的双峰结构

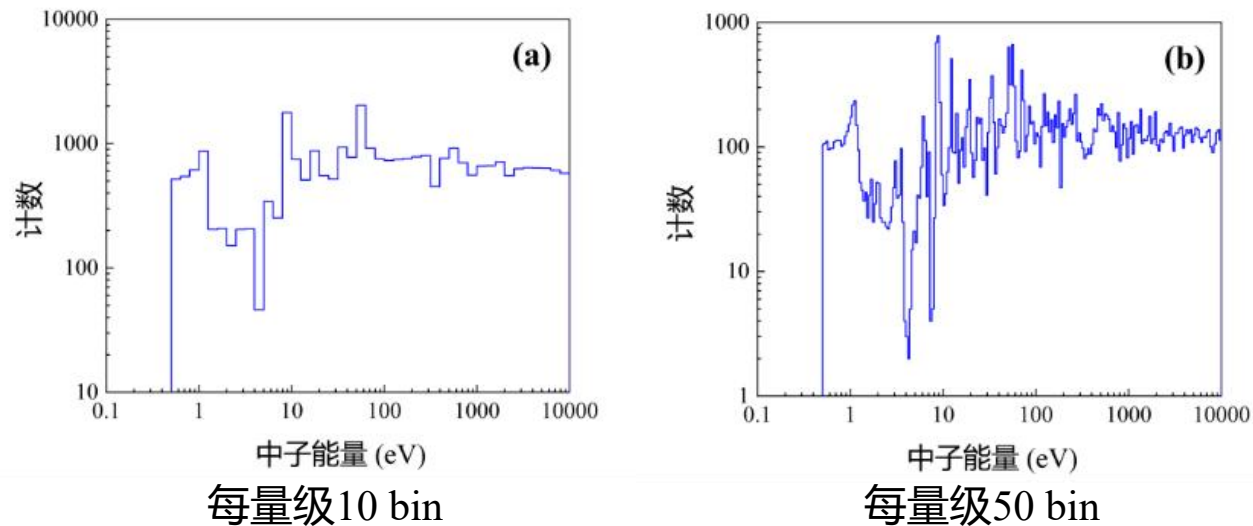
2. 实验装置与方法

中子能量确定 TOF方法, pad信号定时

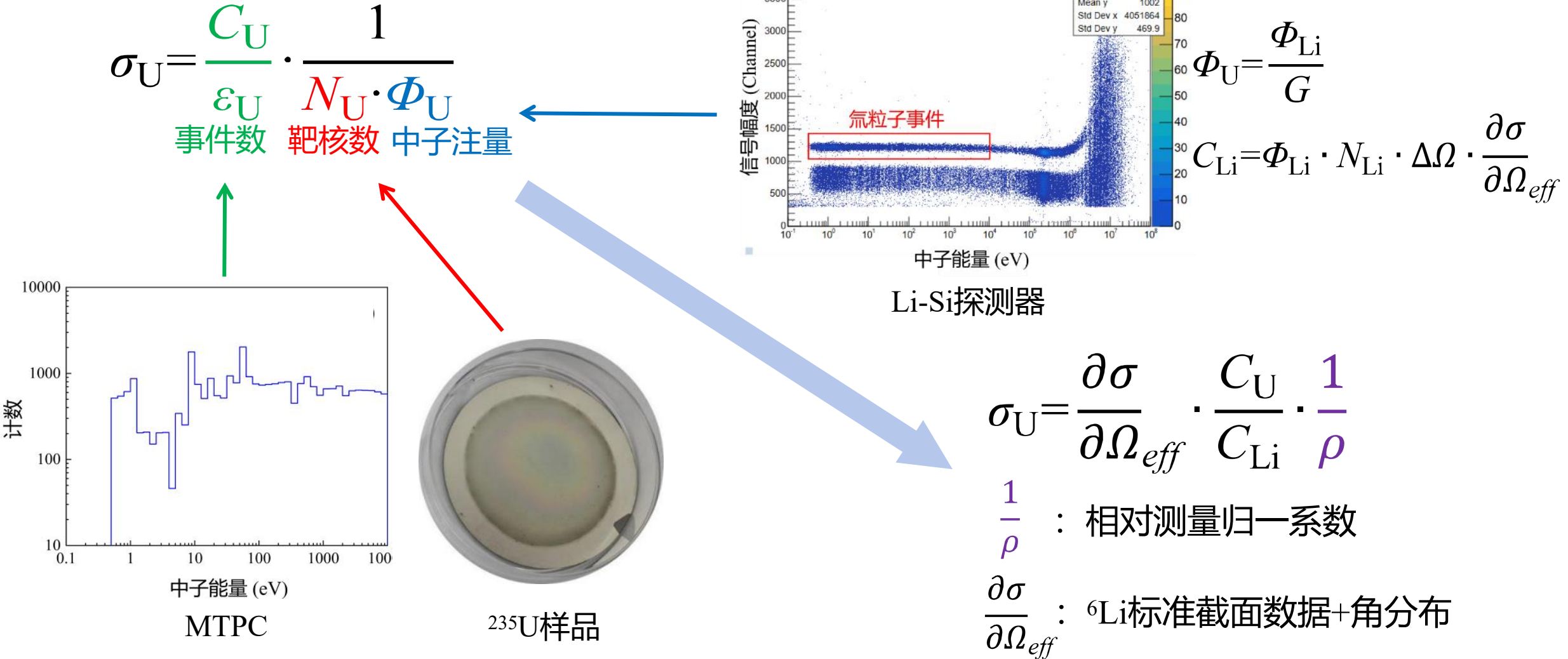
径迹起点寻找



裂变事件计数的入射中子能量分布曲线

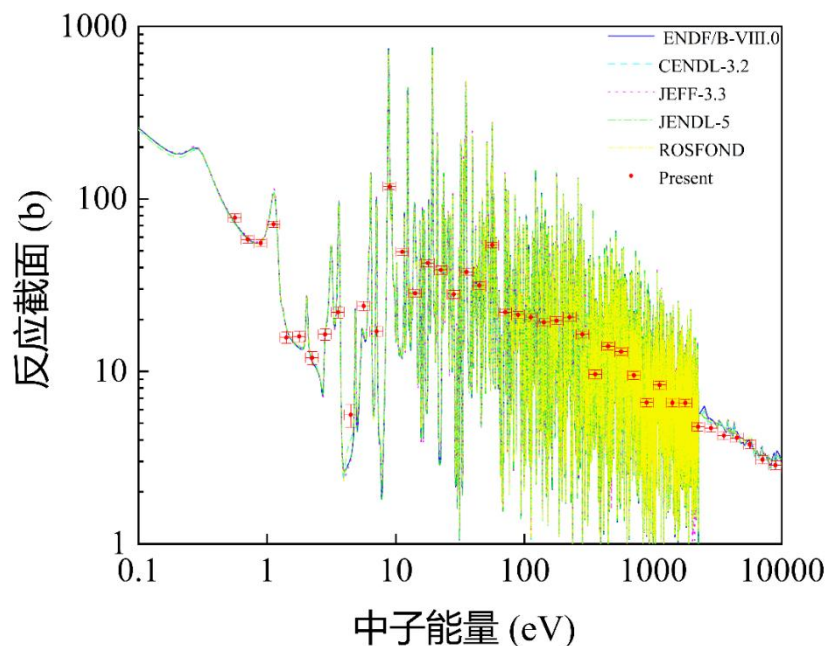


2. 实验装置与方法

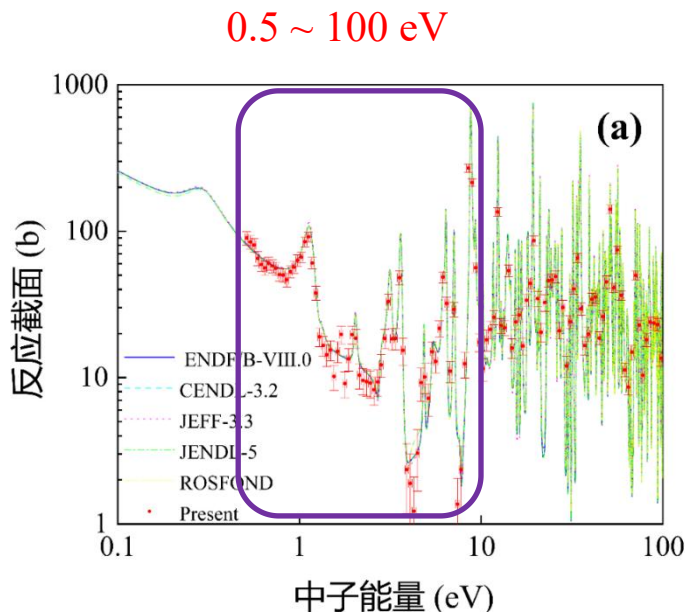


1. 研究背景、意义与现状
2. 实验装置与方法
- 3. 结果分析与讨论**
4. 总结与展望

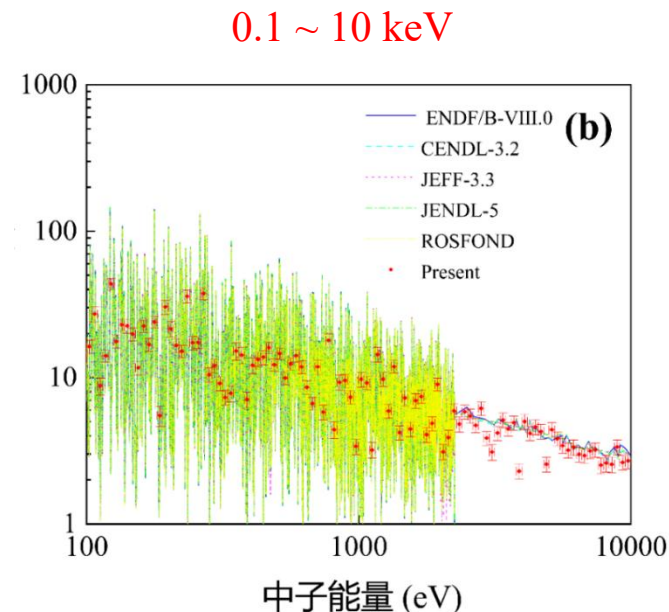
3. 结果分析与讨论



每个能量量级分成10个能bin的截面结果



每个能量量级分成50个能bin的截面结果



- 本工作建立了基于MTPC探测器和白光中子源的裂变反应截面测量方法，测量结果与已有评价结果吻合，初步证实了本方法的可靠性 [1]
- 本测量结果为基于白光中子源，采用MTPC探测器首次测量得到核反应截面

[1] Han Yi, Haofan Bai (Equal Contributions), et al., Cross section measurement for the $^{235}\text{U}(n, f)$ reaction using MTPC at CSNS Back-n white neutron source, submitted to Chin. Phys. C

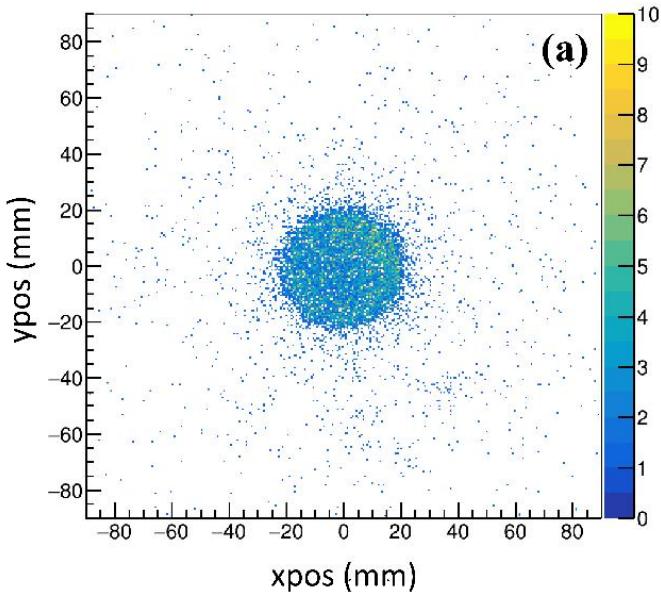
3. 结果分析与讨论

误差分析与讨论:

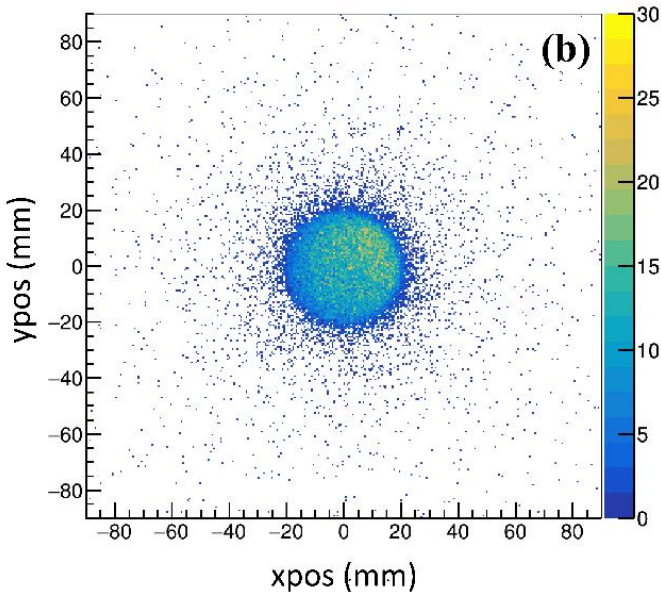
截面误差来源

Source	Magnitude (%)
$\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega_{\text{eff}}}$	1.1
C_U	1.5 ~ 8.5
C_{Li}	1.2 ~ 3.2
ρ	1.5
σ_U	3.1 ~ 9.0

自发衰变 α 粒子



裂变碎片



带电粒子事件径迹起点分布

- 统计性误差是最主要的误差来源，提高测量精度的关键是增加束流时长
- 基于MTPC的径迹重建能力，有望对样品分布均匀性与核反应事件分布均匀性进行评估
- 未来可使用小样品、“束包靶”模式，实现绝对测量，减小归一过程带来的误差
- 使用MTPC探测器同时测量 ^6Li 样品与 ^{235}U 样品

1. 研究背景、意义与现状
2. 实验装置与方法
3. 结果分析与讨论
- 4. 总结与展望**

4. 总结与展望

□ 总结:

- 1) 建立了基于CSNS Back-n白光中子源与MTPC探测器测量 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应截面的实验方法
- 2) 测量得到了0.5 eV ~ 10 keV能区的 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应截面
- 3) 基于白光中子源与MTPC探测器首次测量得到核反应截面结果
- 4) 误差分析表明, 增加束流时间可以有效提高测量结果的精度

4. 总结与展望

□ 展望：

- 1) MTPC探测器硬件与软件的升级：背靠背TPC，模拟计算，机器学习方法
- 2) 建立测量裂变反应角分布的实验方法
- 3) 更多核素的裂变反应测量
- 4) 三体裂变反应测量
- 5) 轻带电粒子出射反应测量，尤其是轻核多体反应

**谢谢各位老师！
欢迎大家批评指正！**