



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

2023年CSNS反角白光中子实验装置（第七届）用户研讨会

## 基于时间投影室的快中子诱发Th-232裂变截面测量

白浩帆，崔增琪，胡益伟，刘杰，邬泽鹏，夏聪，任文凯，张国辉\*

北京大学物理学院重离子物理研究所

樊瑞睿，易晗，李样，蒋伟，陈永浩，吕游，唐靖宇

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

CSNS反角白光中子源合作组

张志永，陈昊磊，陈朕，赵懋源，封常青，刘树彬等

中国科学技术大学

# 报告目录

---

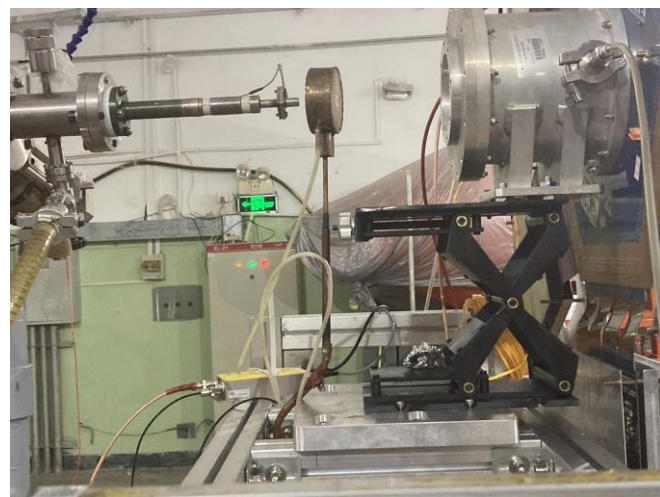
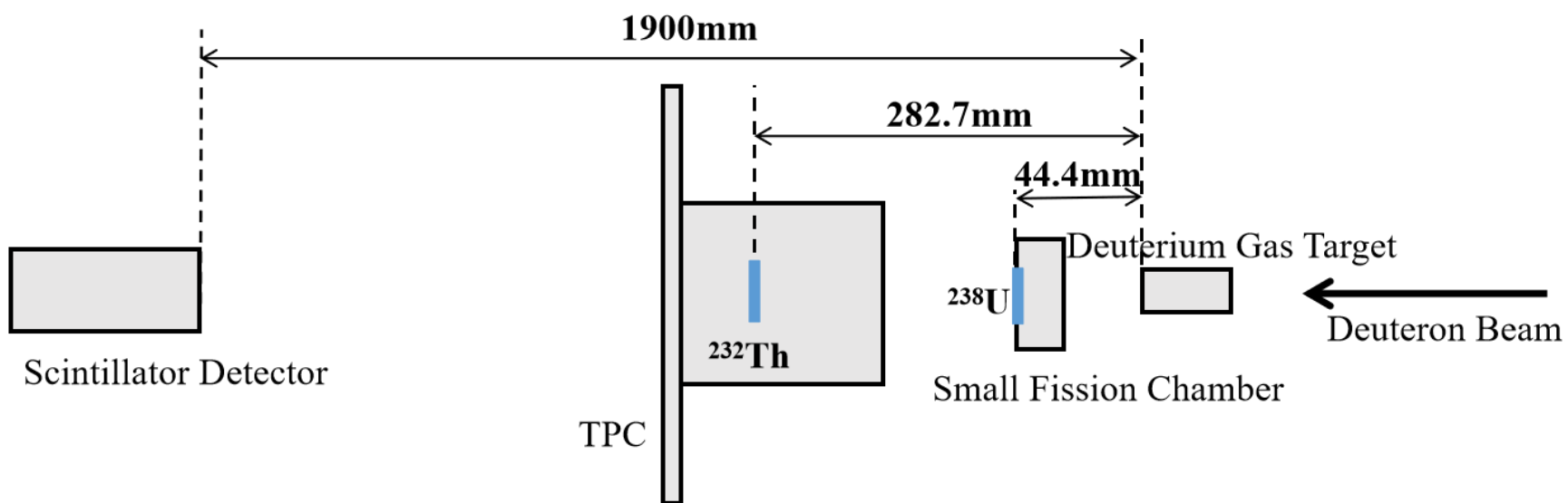
- 1. 单能点裂变测量测试实验 (2022)**
- 2. 多能点裂变截面测量实验 (2023)**

# 1. 单能点裂变测量测试实验

---

# 1. 单能点裂变测量测试实验

## 1.1 实验布局



- TPC: CSNS Back-n研发
- 工作气体: Ar+CH<sub>4</sub> (90/10)
- Th-232样品: 产生待测的裂变事件
- 小裂变室: 利用U-238的裂变事件监测绝对中子通量
- 液闪探测器: 测量中子能谱, 低能中子诱发裂变事件修正
- 氘气体靶: 利用 $D(d,n)^3\text{He}$ 反应产生快中子, 0°方向上中子能量5 MeV
- 实验时间: 2022.4

# 1. 单能点裂变测量测试实验

## 1.2 实验流程

---

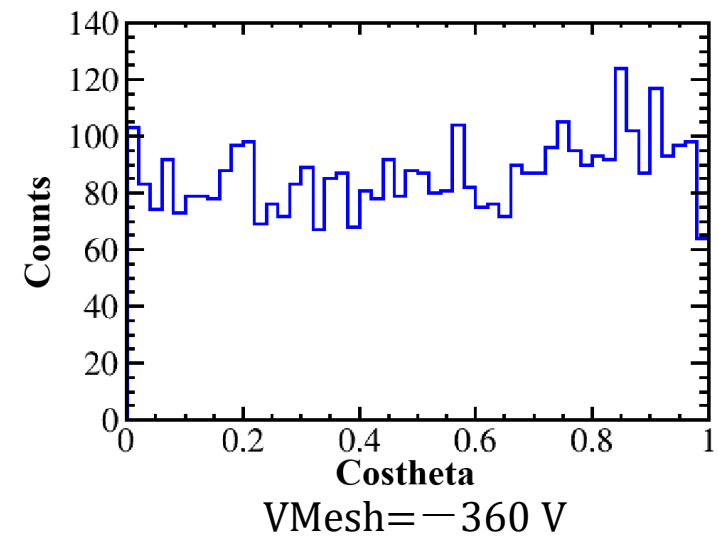
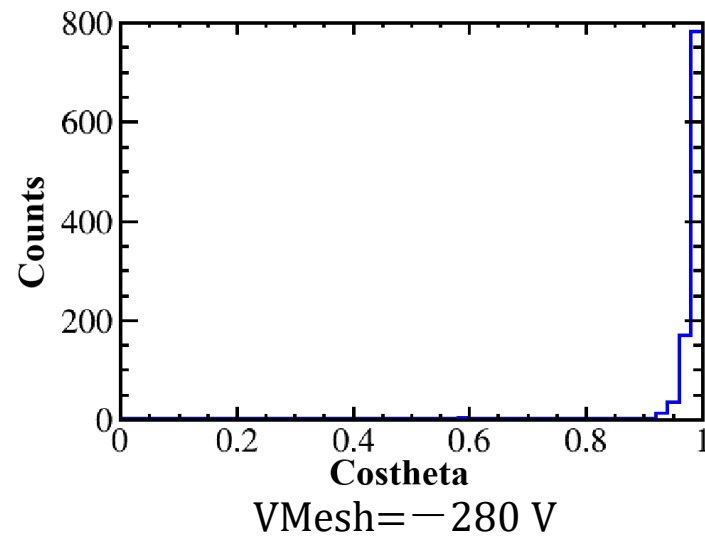
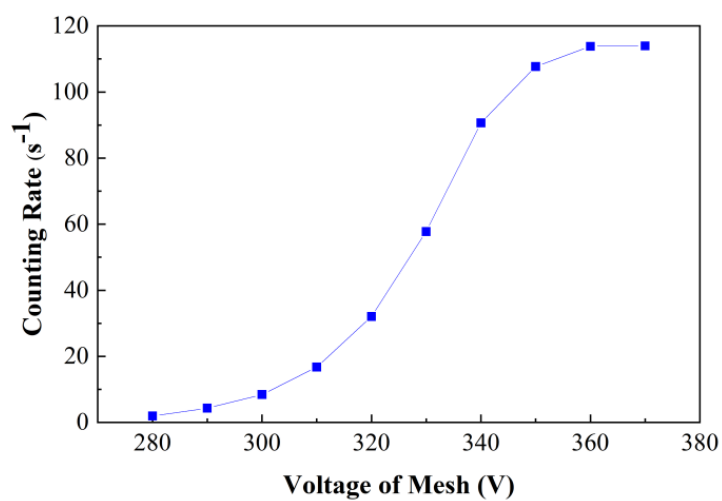
1 无中子束流, Th-232  
 $\alpha$ 衰变事件测量

2 有中子束流, 选定长时间测量的电压

3 合适电压下长时间测量, 目标得到裂变截面

# 1. 单能点裂变测量测试实验

## 1.3 Th-232 $\alpha$ 衰变事件测量 (电压粗调)



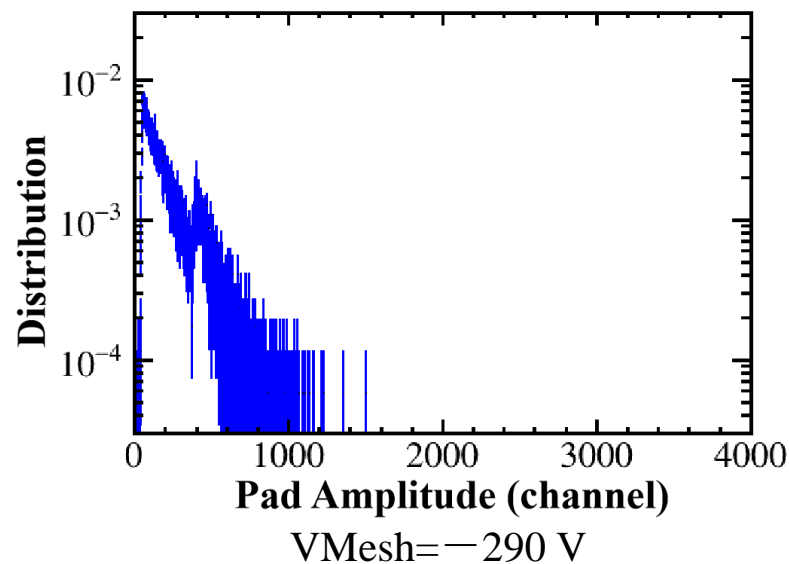
$\alpha$ 事件计数率与丝网电压的关系曲线

不同电压下Costheta分布谱

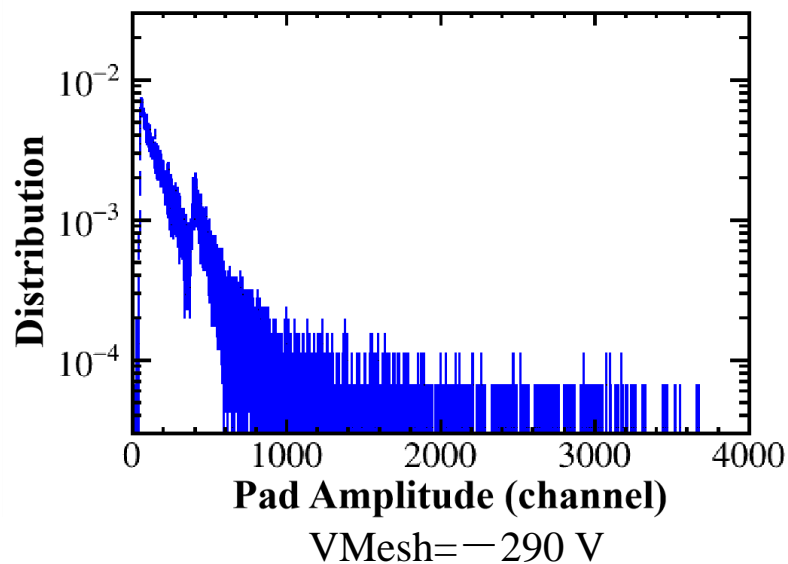
- 基于 $\alpha$ 衰变事件测量进行实验电压的粗调
- 在较高电压下，使用Magboltz计算的漂移速率重建径迹，Costheta接近于均匀分布
- 为尽量减少 $\alpha$ 事件的干扰，在正式实验时应使得 $\alpha$ 事件保持低计数率
- 当电压低于VMesh = -280 V时， $\alpha$ 衰变事件计数率小于1 s<sup>-1</sup>，该电压为电压细调的起点

# 1. 单能点裂变测量测试实验

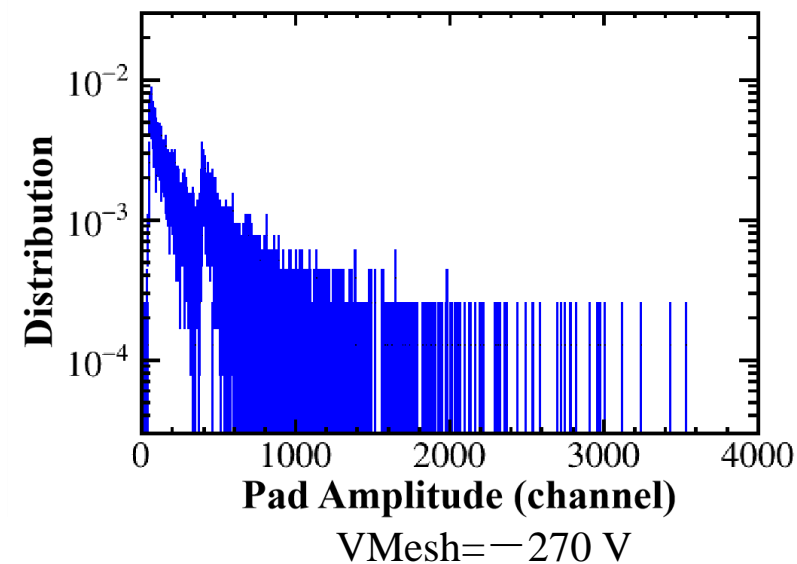
## 1.4 Th-232 中子束流测试 (电压细调)



无束流，阳极读出单元幅度分布谱



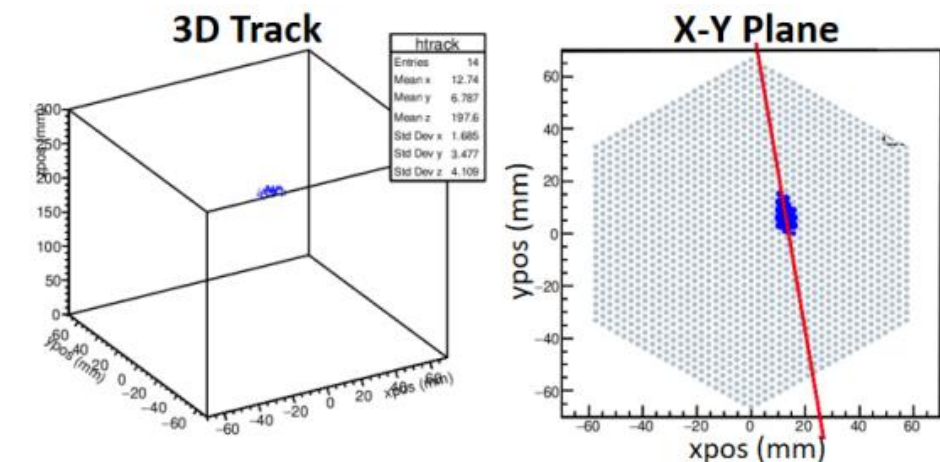
有束流，阳极读出单元幅度分布谱



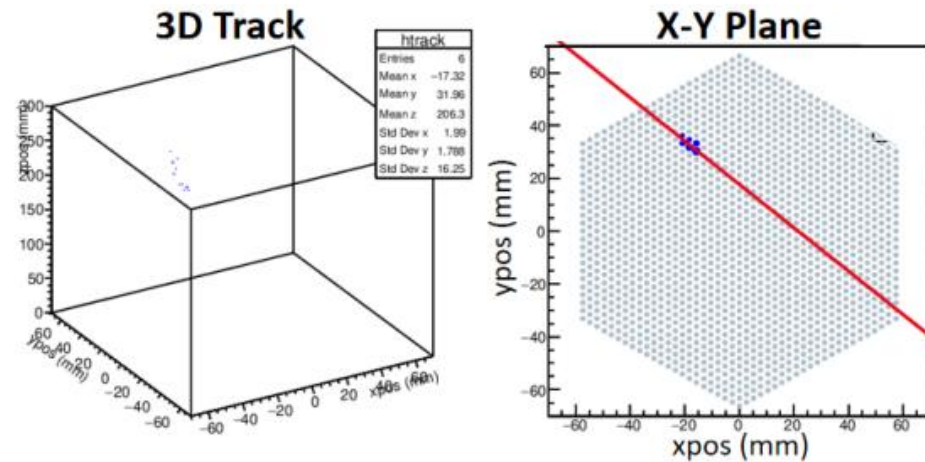
- 裂变事件贡献阳极读出单元幅度谱的高能部分
- 电压细调的原则为尽量减少超界的阳极读出单元信号，同时还要能够记录部分 $\alpha$ 事件
- 选取的正式实验电压为VMesh = -270 V，VCathode = -1215 V
- 模拟结果显示当丝网电压高于-220 V时，触发效率基本不变。选定的正式实验电压合理

# 1. 单能点裂变测量测试实验

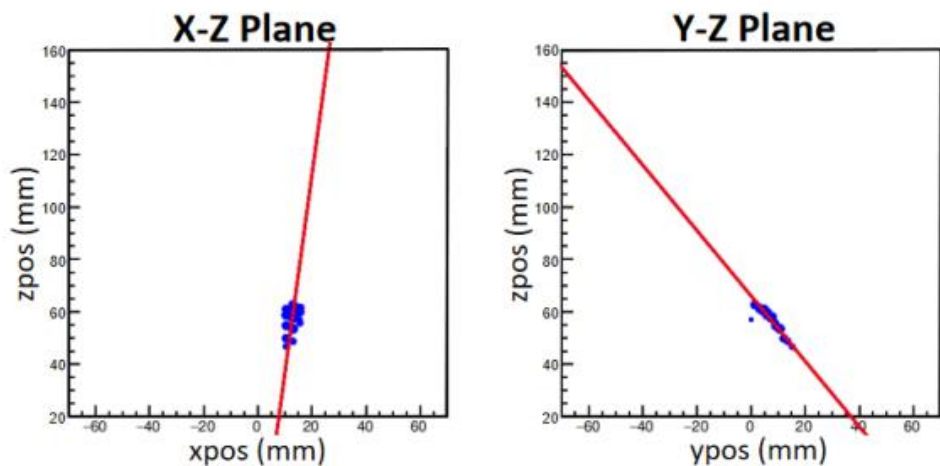
## 1.5 典型事件径迹



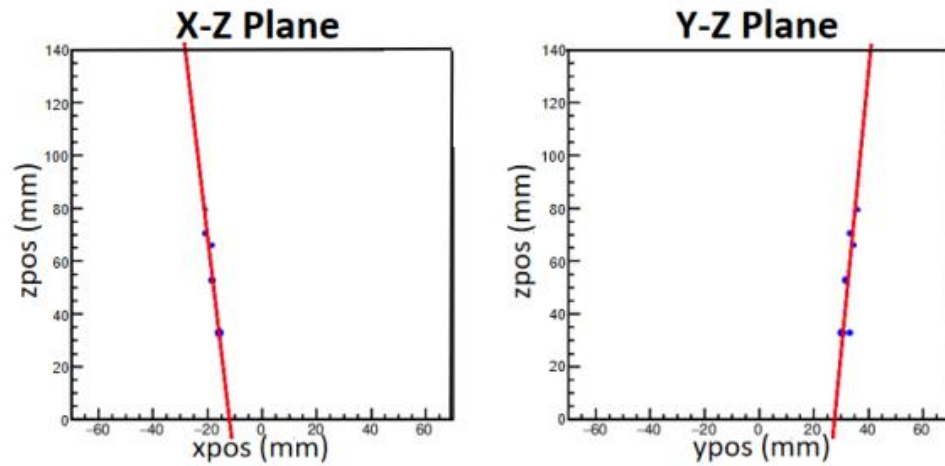
(a)



(b)



裂变碎片径迹

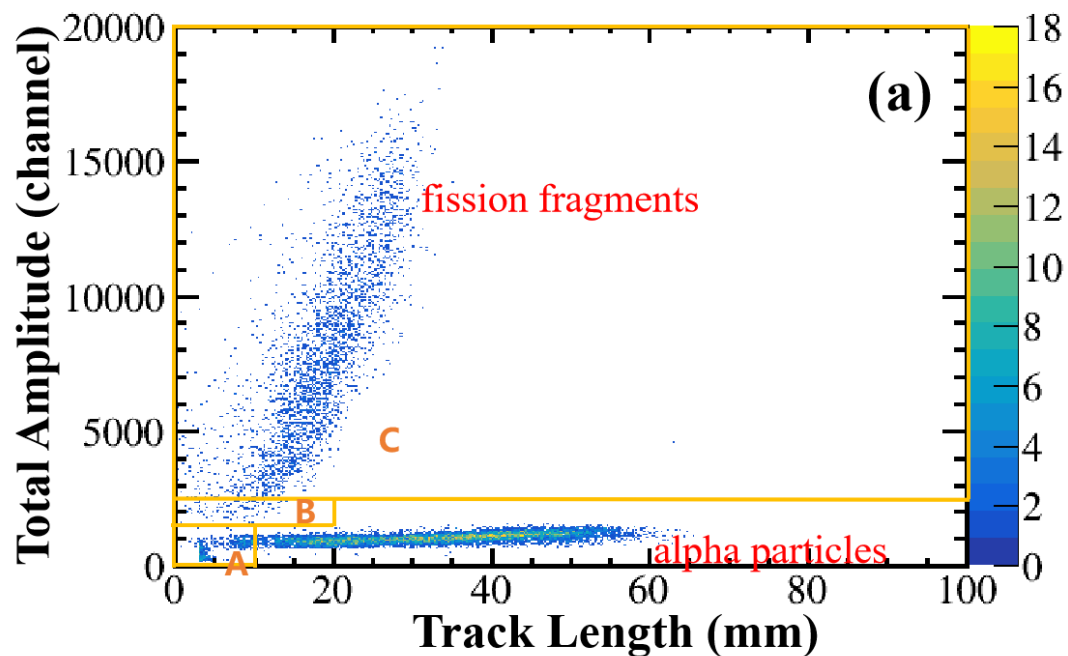


$\alpha$ 粒子径迹

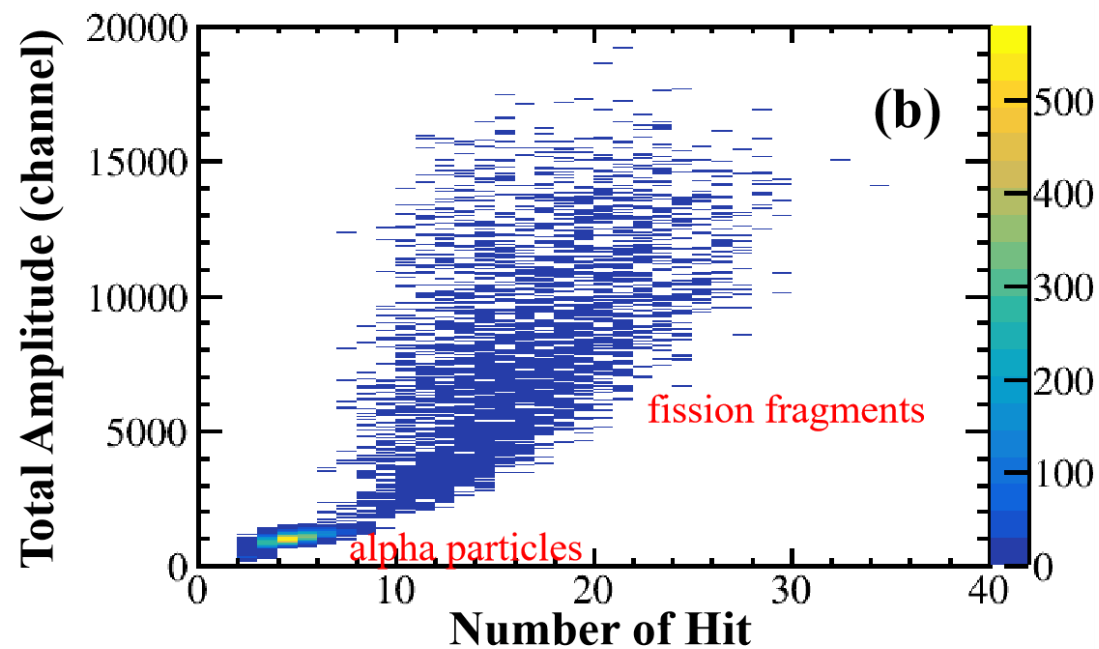


# 1. 单能点裂变测量测试实验

## 1.6 测量事件的二维谱分布情况



事件总信号幅度-径迹长度二维谱

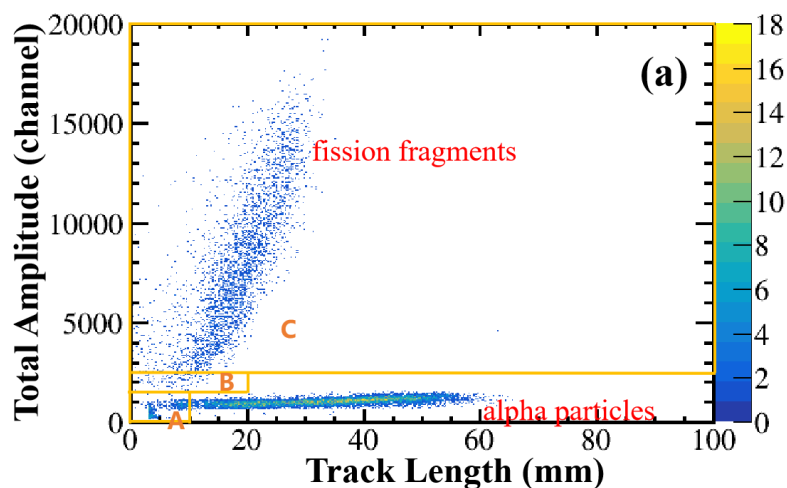


事件总信号幅度-击中单元数二维谱

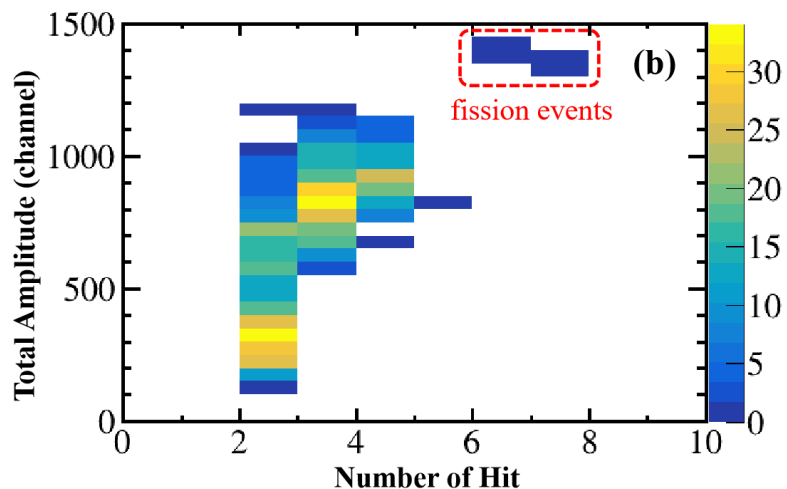
- 裂变碎片与 $\alpha$ 粒子的能量存在较大差异
- 裂变事件数的计算  $N_{Th,f} = N_{Th}^A + N_{Th}^B + N_{Th}^C + N_{Th}^R$
- 对于A、B区事件以及未拟合出径迹参数的事件，主要依据径迹形状筛选裂变事件

# 1. 单能点裂变测量测试实验

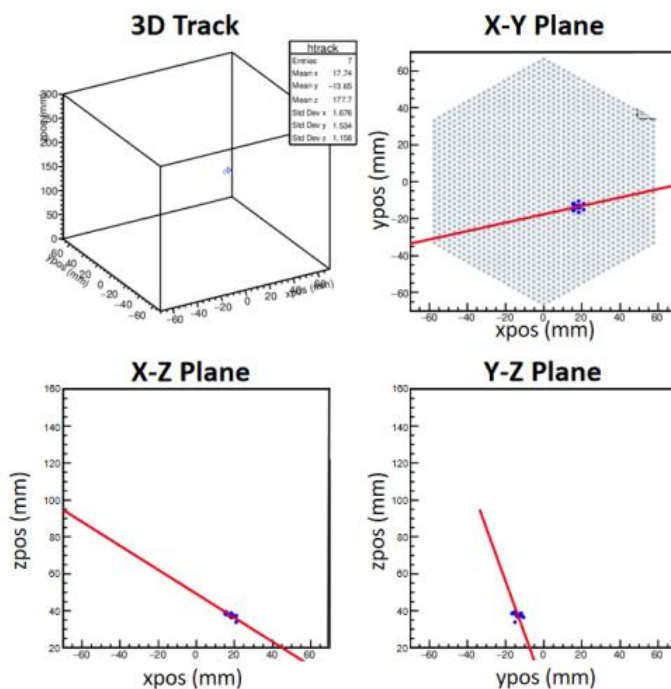
## 1.7 A、B区事件展示



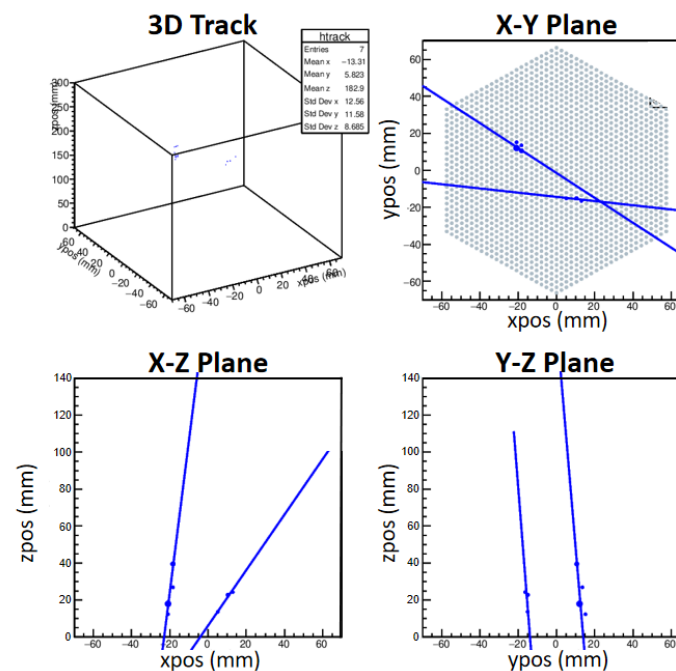
事件总信号幅度-径迹长度二维谱



A区总信号幅度 - 击中单元数二维谱



A区裂变事件

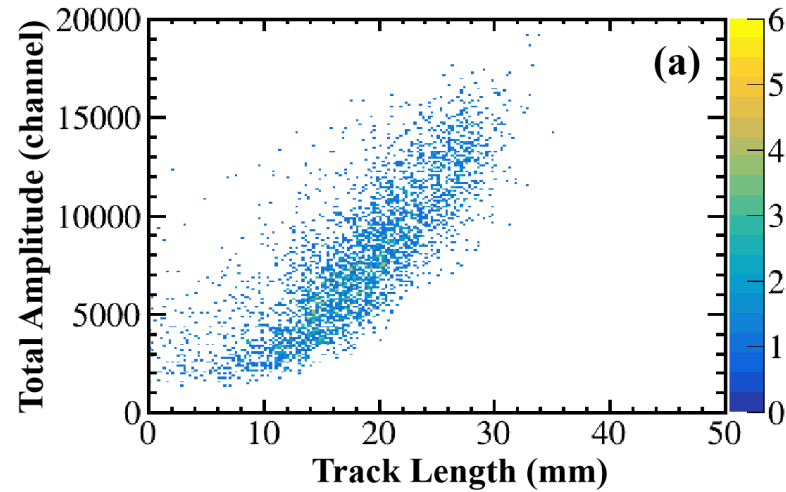


B区双 $\alpha$ 事件

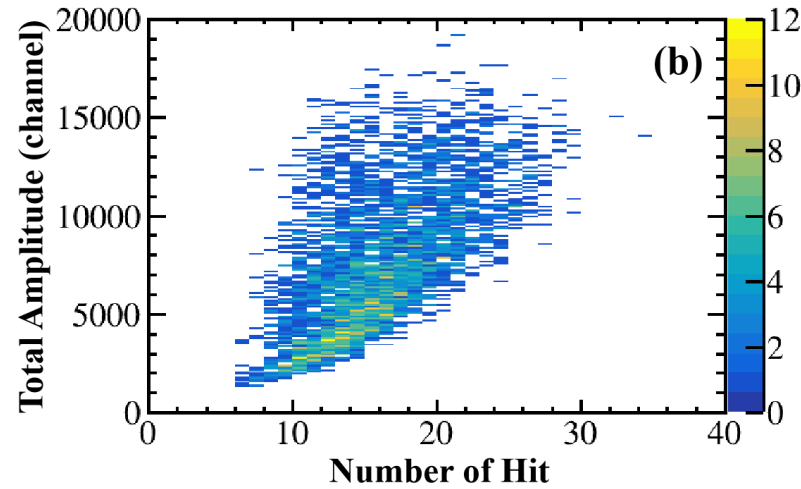
- A区：非裂变事件（大量）+ 裂变事件（少量）
- B区：裂变事件（大量）+ 非裂变事件（少量，双 $\alpha$ 事件）
- C区：裂变事件

# 1. 单能点裂变测量测试实验

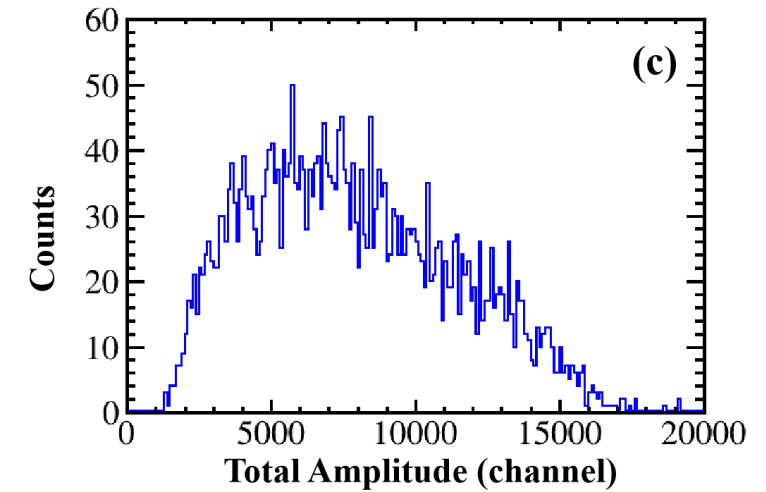
## 1.8 裂变事件径迹参数分布谱



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



裂变事件总信号幅度谱

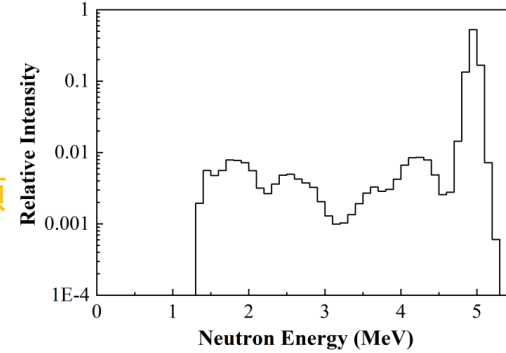
- 根据前篇所述方法挑选出所有裂变事件，TPC测量到的裂变事件总数为3518个
- 结合小裂变室的裂变计数和液闪探测器得到的中子能谱，对数据进行进一步分析，计算得到中子能量在5 MeV时的Th-232的裂变截面

# 1. 单能点裂变测量测试实验

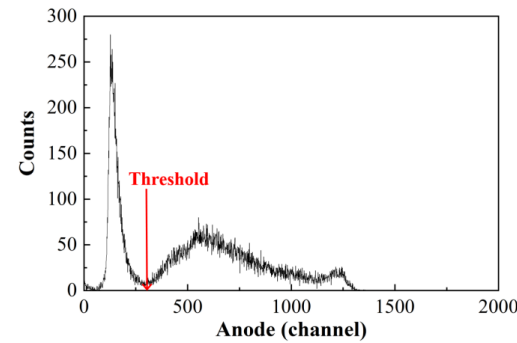
## 1.9 裂变截面测量结果

$$\sigma_{\text{Th}} = \frac{1}{N_{\text{Th}}} \cdot \frac{N_{\text{Th},f}}{\varepsilon_{\text{Th}}} \cdot \frac{1}{\Phi_{\text{Th}}} \cdot \rho^{\text{low}}$$

靶核数    事件数    中子通量    低能中子诱发裂变修正项



由液闪反解中子能谱得到  $\rho^{\text{low}}$



$$\Phi_{\text{Th}} = \frac{\Phi_{\text{U}}}{G} = \frac{N_{\text{U},f}}{\varepsilon_{\text{f}}} \cdot \frac{1}{\sigma_{\text{U}} N_{\text{U}}} \cdot \frac{1}{G}$$

Source	Magnitude (%)
$\sigma_{\text{U}}$	1.5
$N_{\text{U}}$	1.0
$N_{\text{Th}}$	1.5
$N_{\text{Th},f}$	1.7
$N_{\text{U},f}$	0.6
$\varepsilon_{\text{f}}$	1.0
$\varepsilon_{\text{Th}}$	2.0
$\rho^{\text{low}}$	3.7
$G$	8.6
$E_{\text{n}}$	3.8
$\sigma_{\text{Th}}$	10.1

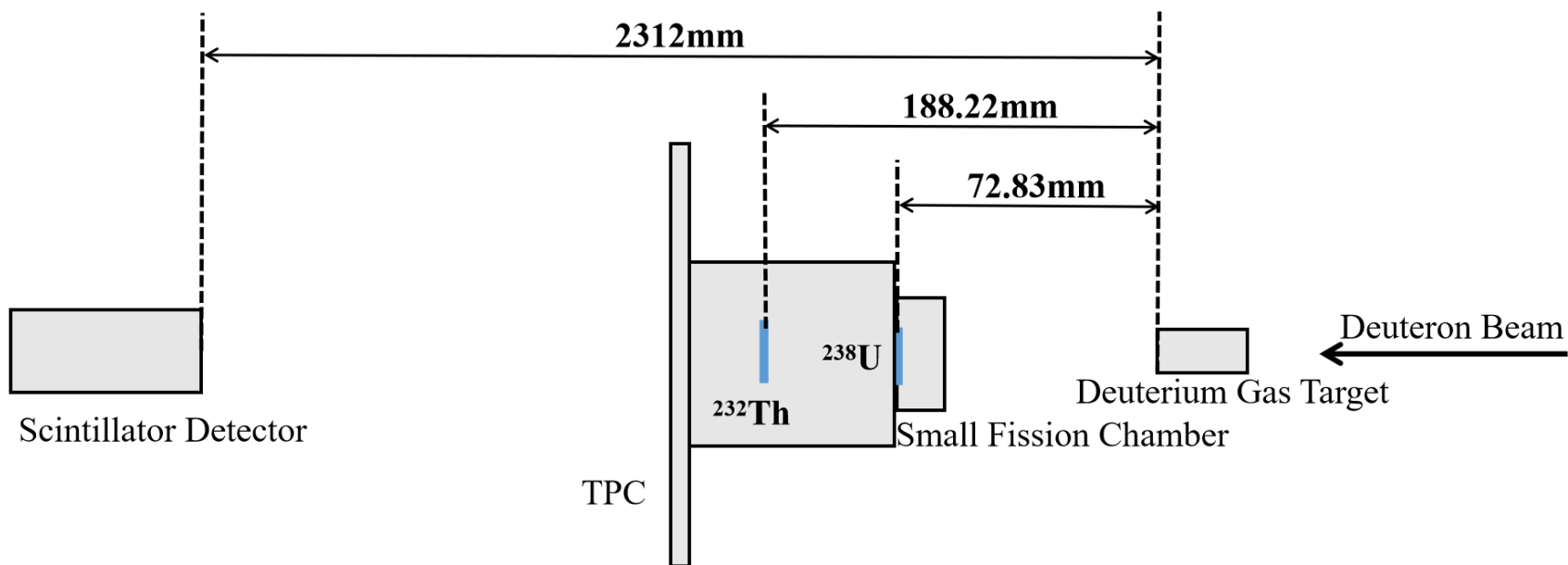
- 5 MeV中子能量下的Th-232裂变截面为  $0.135 \pm 0.014$  b
- 使用TPC测量裂变截面的方案可行

## 2. 多能点裂变截面测量实验

---

# 2. 多能点裂变截面测量实验

## 2.1 实验布局



- 工作气体: Ar+CH<sub>4</sub> (90/10)
- 关键修改: 将小裂变室固定在TPC前端, 缩小两种样品的间距
- 测量能点: 4.50~5.40 MeV, 共5个能点
- 实验时间: 2023.5



## 2. 多能点裂变截面测量实验

### 2.2 每个能点下的实验流程

---

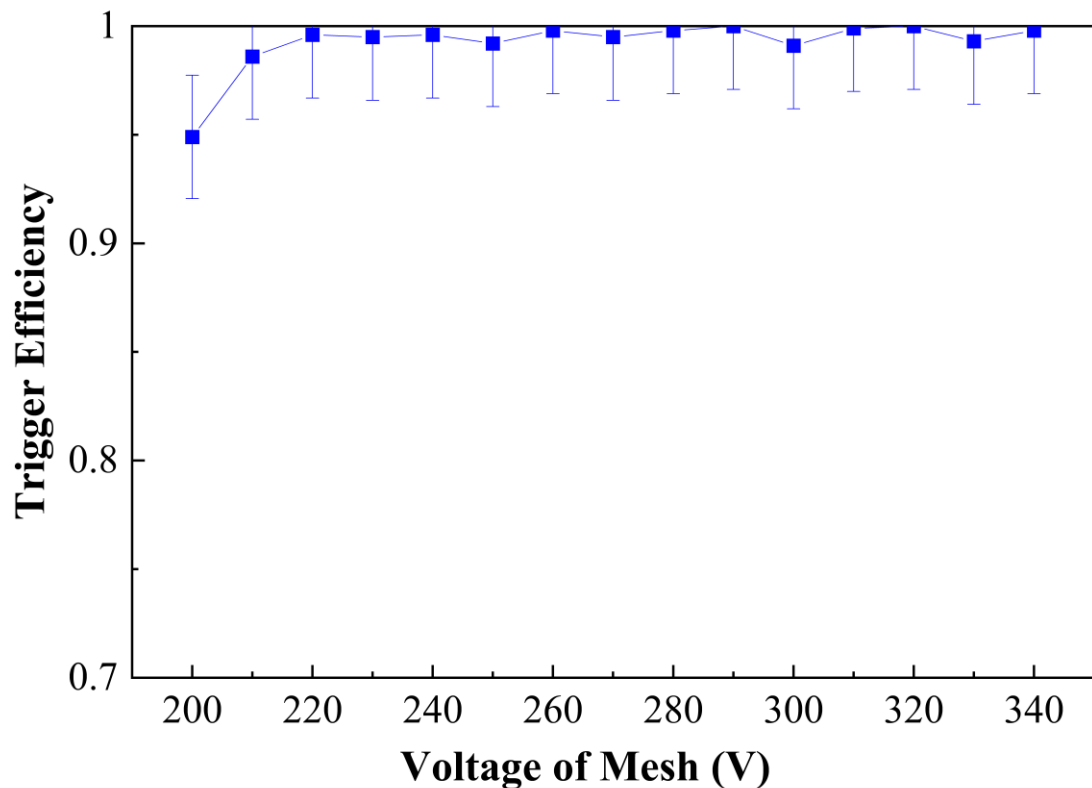
1 根据BluetSim模拟结果  
选定实验电压

2 中子束流下短时测量，  
确保记录到裂变事件

3 长时间测量，得到该能  
点下的裂变截面

## 2. 多能点裂变截面测量实验

### 2.3 基于Bluet模拟的电压选择



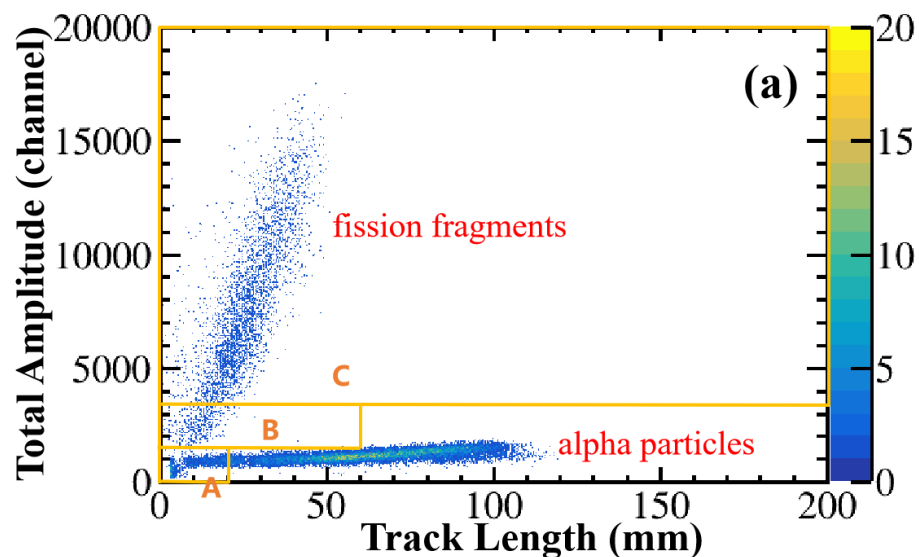
模拟裂变事件触发效率与丝网电压的关系曲线

- 倍增区增益系数与电压有关
- 信号足够大时才能引起探测器触发
- 丝网电压高于-220 V时，裂变触发率趋近1
- 选定电压 $V_{\text{Mesh}} = -270 \text{ V}$ ， $V_{\text{Cathode}} = -1215 \text{ V}$ （与单能点实验一致）

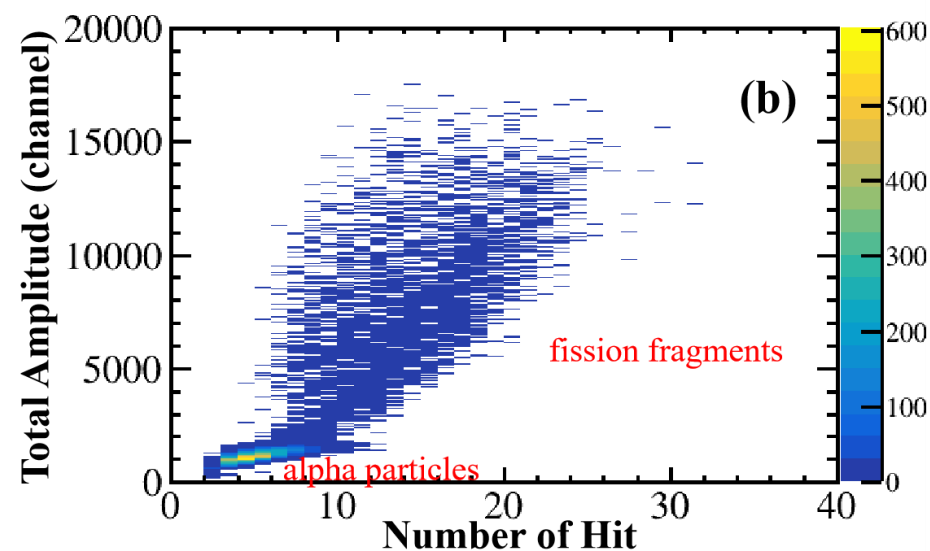


## 2. 多能点裂变截面测量实验

### 2.4 测量事件的二维谱分布情况



5.0 MeV事件总信号幅度-径迹长度二维谱



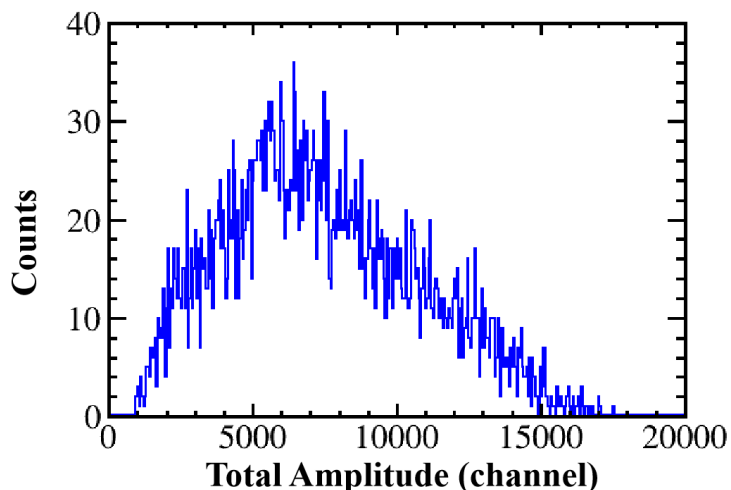
5.0 MeV事件总信号幅度-击中单元数二维谱

$$N_{Th,f} = N_{Th}^A + N_{Th}^B + N_{Th}^C + N_{Th}^R$$

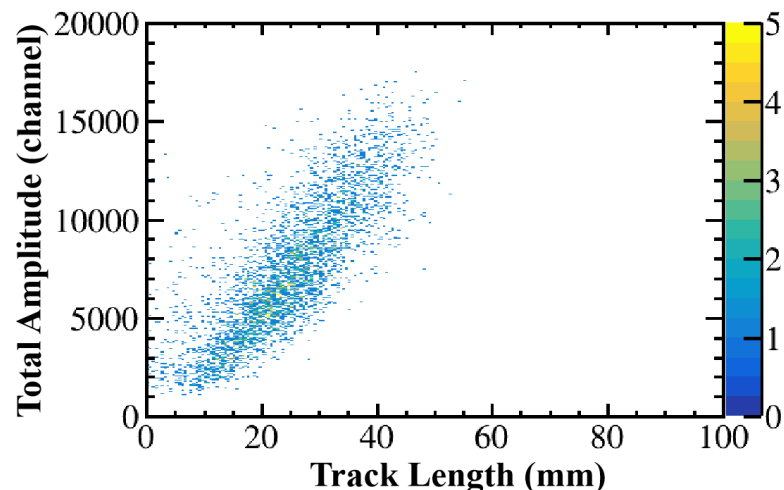
$E_n / \text{MeV}$	$N_{Th,f}$	Proportion / %			
		$N_{Th}^A$	$N_{Th}^B$	$N_{Th}^C$	$N_{Th}^R$
4.5	2636	0.83	10.17	88.13	0.87
4.7	2822	0.67	12.05	86.54	0.74
5.0	4340	0.48	11.29	87.17	1.06
5.2	3973	0.58	11.43	87.19	0.80
5.4	3002	0.67	10.09	88.24	1.00

# 2. 多能点裂变截面测量实验

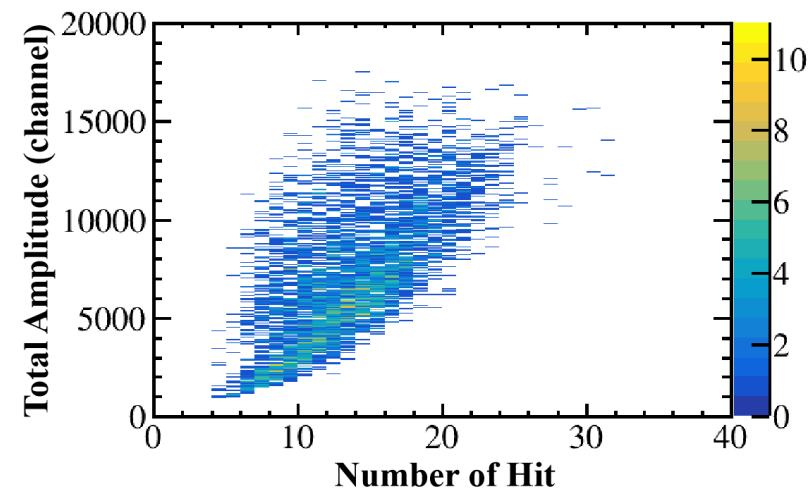
## 2.5 裂变事件测量结果



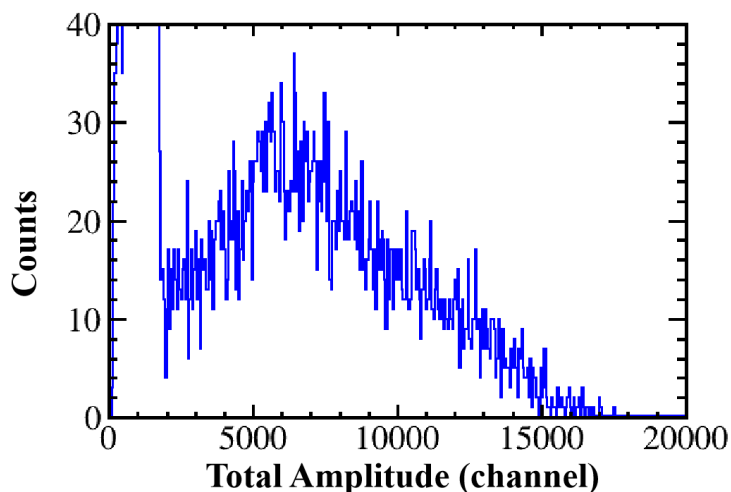
5.0 MeV裂变事件总信号幅度谱



5.0 MeV裂变事件总信号幅度-径迹长度二维谱



5.0 MeV裂变事件总信号幅度-击中单元数二维谱



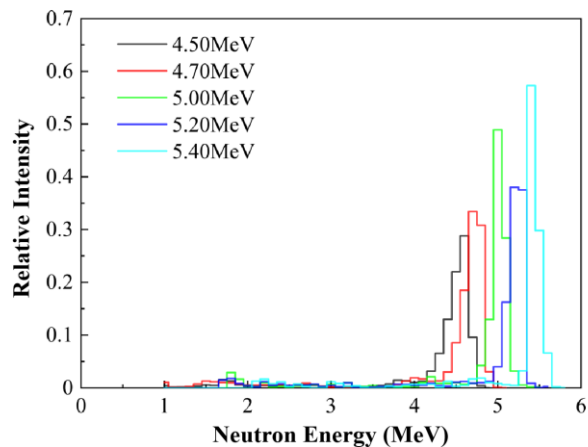
5.0 MeV全部事件总信号幅度谱

- 在总信号幅度谱中， $\alpha$ 事件区会延伸到2000道
- 基于TPC的径迹重建能力，可以通过径迹形状等参数，将低能的 $\alpha$ 事件和裂变事件进行区分
- 需要通过模拟确定的非自吸收裂变事件份额显著减小

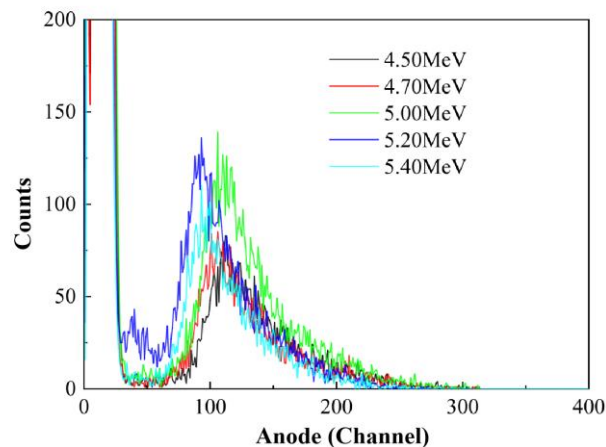
# 2. 多能点裂变截面测量实验

## 2.6 裂变截面测量结果

$$\sigma_{Th} = \sigma_U \frac{N_U \cdot N_{Th,f} \cdot \epsilon_f}{N_{Th} \cdot N_{U,f} \cdot \epsilon_{Th}} \rho^{low} \cdot G$$



不同能点液闪反解中子能谱

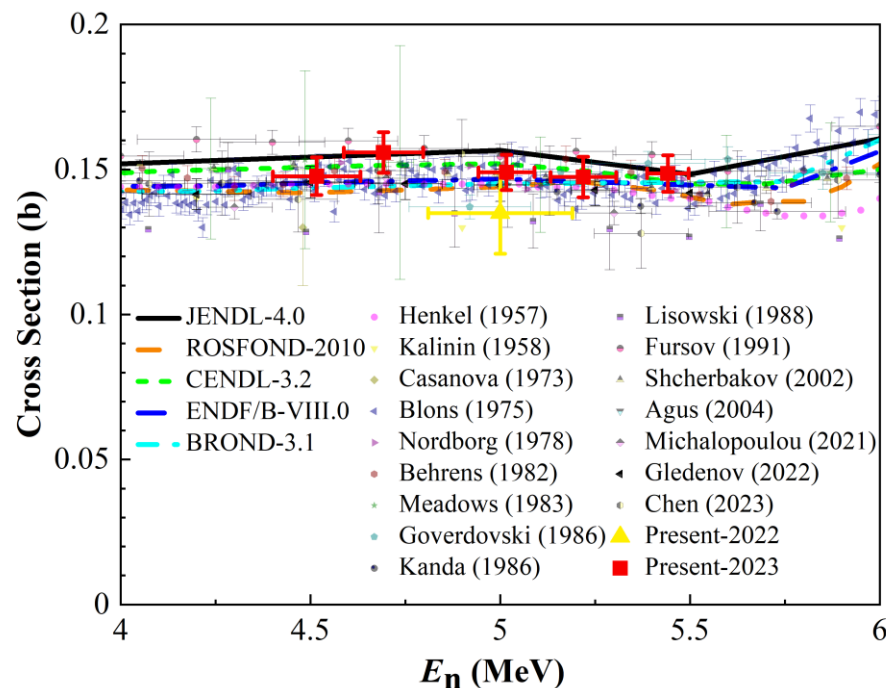
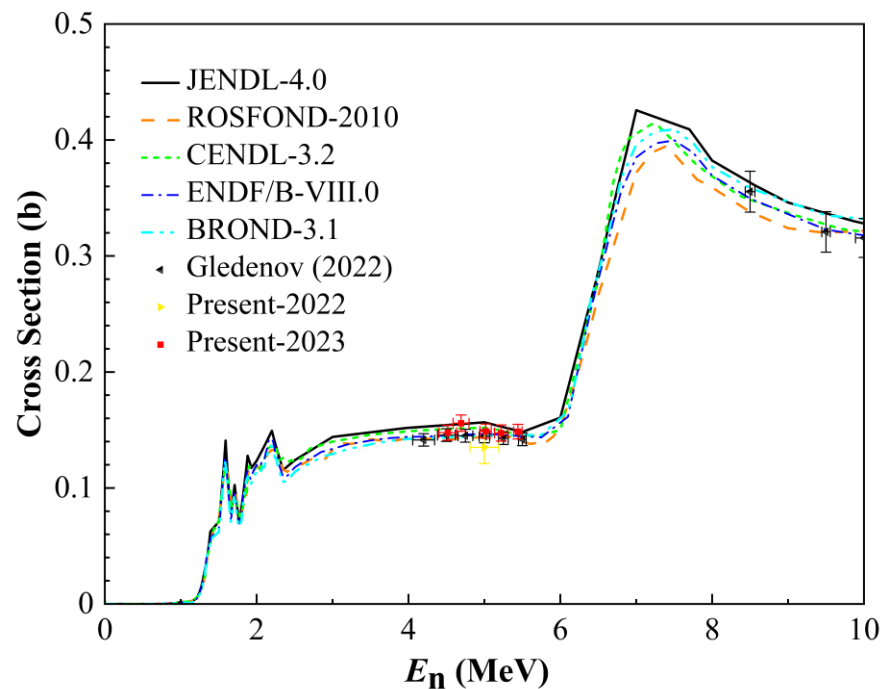


不同能点小裂变室阳极谱

En / MeV	Cross Section / b
$4.52 \pm 0.12$	$0.148 \pm 0.007$
$4.69 \pm 0.10$	$0.156 \pm 0.007$
$5.02 \pm 0.07$	$0.149 \pm 0.006$
$5.22 \pm 0.09$	$0.147 \pm 0.007$
$5.44 \pm 0.05$	$0.149 \pm 0.006$

# 2. 多能点裂变截面测量实验

## 2.6 裂变截面测量结果



Source	Magnitude (%)
$\sigma_U$	1.3 - 1.4
$N_U$	1.0
$N_{Th}$	1.5
$N_{Th,f}$	1.5 - 2.0
$N_{U,f}$	1.1 - 3.0
$\epsilon_f$	0.3
$\epsilon_{Th}$	1.4 - 2.2
$\rho^{low}$	1.4 - 1.8
$G$	1.3 - 1.8
$E_n$	1.0 - 2.6
$\sigma_{Th}$	4.1 - 4.7

- 在误差允许范围内，Th-232裂变截面测量结果与评价库结果保持一致
- 在修改实验布局后，截面测量不确定度显著减小
- 使用TPC进行高精度裂变截面测量具有广泛前景

# 总结展望

---

- 1、设计基于北京大学单能中子源，使用时间投影室（TPC）测量Th-232裂变截面的实验方案；
- 2、在5.0 MeV单能点下进行测试实验，验证了测量方案的可行性；
- 3、在4.5 - 5.4 MeV能量范围内测量5个能点下的裂变截面，得到低不确定度的截面结果；
- 4、随着时间投影室的发展，裂变截面的精确测量有望实现新的突破，误差有望降低至1 %以内。



北京大學

PEKING UNIVERSITY



欢迎各位老师提出宝贵建议