

# 中子诱发 $^{236}\text{U}$ 裂变低能区截面测量

报告人：任智洲

中国工程物理研究院  
核物理与化学研究所

2023年9月20日 ★西安

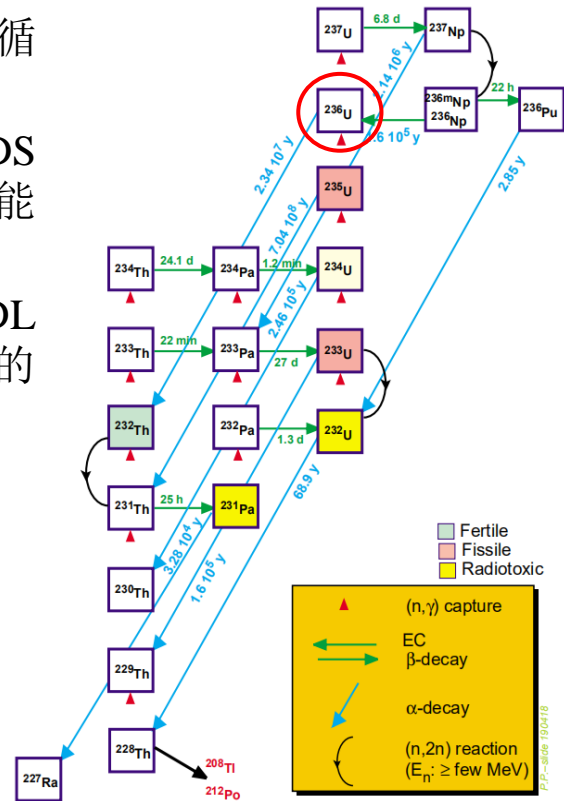
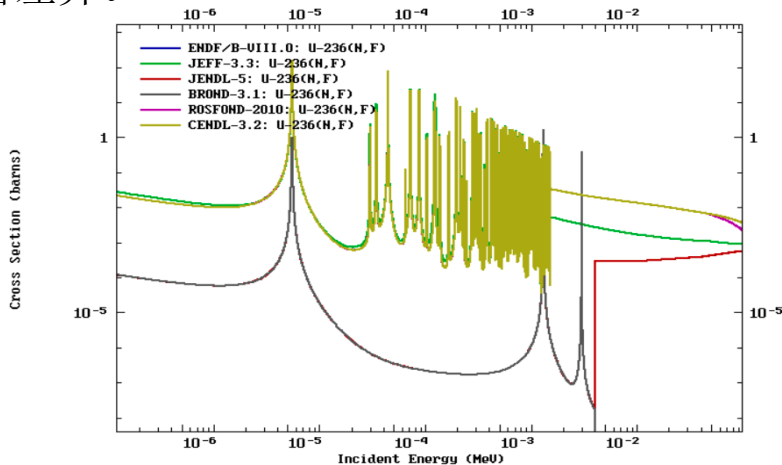


# 目录

- 一. 背景现状
- 二. 实验测量
- 三. 数据分析
- 四. 后续工作

# 背景现状

- 核能的可持续性发展需要新型核能系统。基于Th-U循环的核系统设计需要新的高质量实验与评价数据。
- $^{236}\text{U}$ 参与构建Th-U燃料循环的平衡，在快堆以及ADS系统中，它的裂变截面精度需求为5%，被国际原子能机构列为优先测量的核素之一。
- 主流评价核数据库 (ENDF, JEFF, CENDL, JENDL, BROND)  $^{236}\text{U}(n,f)$ 阈下截面存在一个数量级以上的显著差异。



# 背景现状

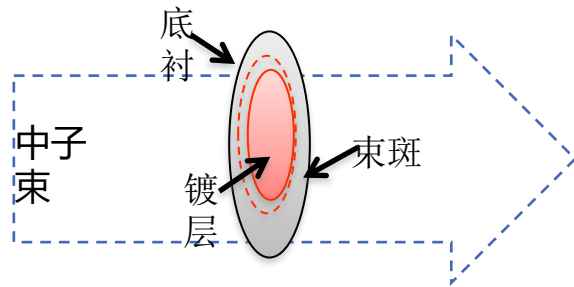
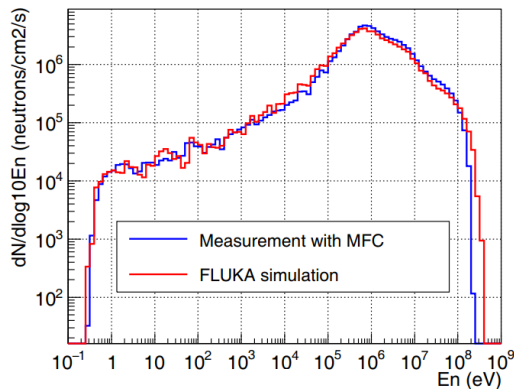
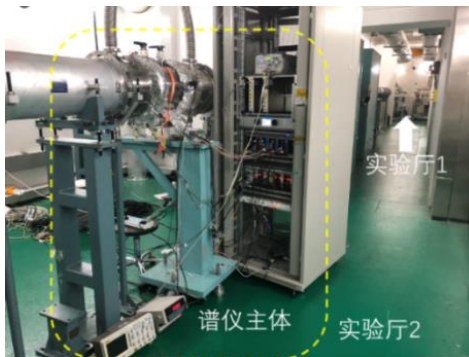
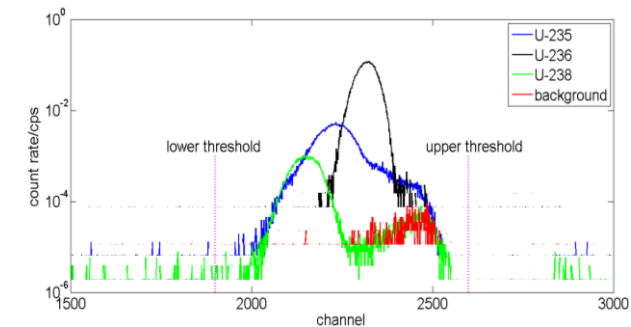
核物理与化学研究所(INPC)中子学参数团队



中国散裂中子源(CSNS)反角白光中子源(Back-n)



采用多层快裂变室，建立了裂变截面测量谱仪(FIXM)，实现宽能区裂变截面测量。



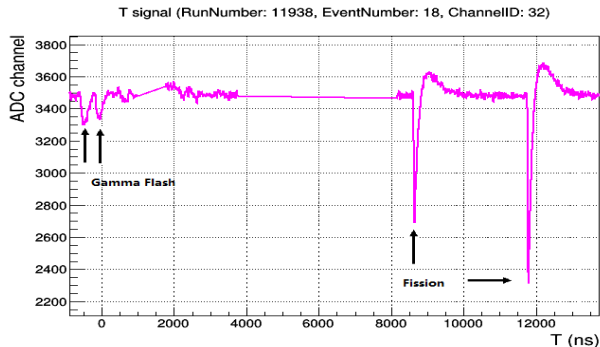
207 室



# 实验测量

## ➤ 多层快裂变室

- 轻量化、通用化、精密化、快响应时间、噪声本底小。
- 多路 $^{235,236,238}\text{U}$ 裂变单元，高纯(> 99.9%)核素镀片。
- Gamma-flash + 裂变信号，裂变信号上升时间 < 30 ns。



现为Back-n裂变截面测量谱仪(FIXM)与全截面测量谱仪(NTOX)的基础探测器，完成了 $^{235,236,238}\text{U}$ ， $^{232}\text{Th}$ 以及 $^{nat}\text{C}$ ， $^{27}\text{Al}$ ， $^9\text{Be}$ ， $^{nat}\text{Fe}$ ， $^{nat}\text{Li}$ ， $^{209}\text{Bi}$ ， $^{nat}\text{Pb}$ ， $^{nat}\text{Cr}$ 多种核素裂变截面与全截面测量，也用于能谱测量等方面。

总体性能处于国际水平，获得了丰富的实验数据，得到了国内外同行高度认可。

[1] Jie Wen et al., Journal of Instrumentation 13 P07020 (2018).

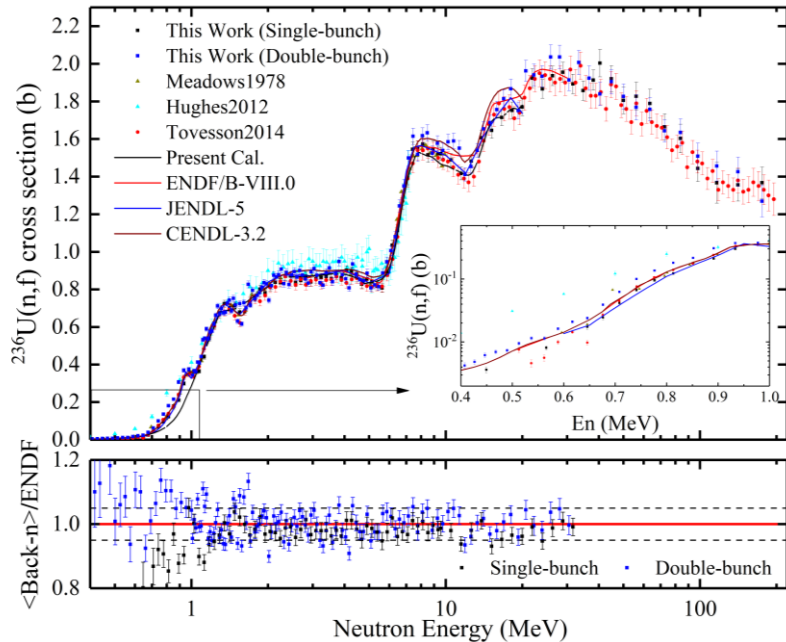
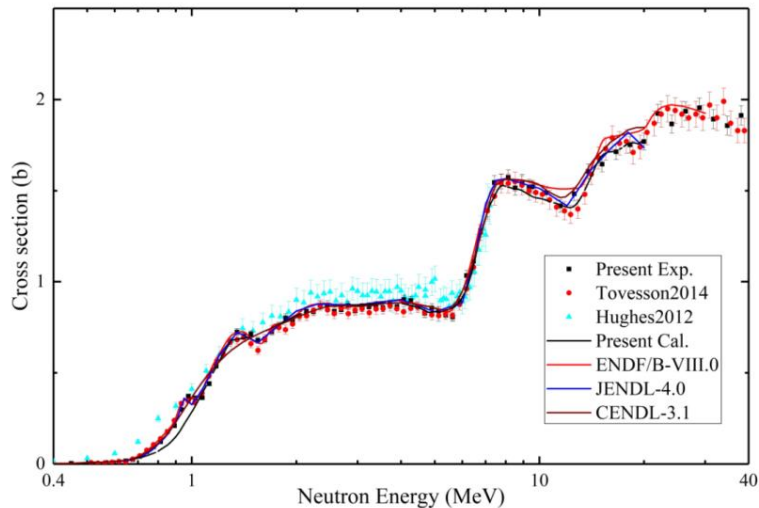
[2] Yiwei Yang et al., NIM A 940 486–491 (2019).

[3] 羊奕伟等，CN 214704019 U，2021.

# 实验测量

## ◆ $^{236}\text{U}$ 快中子能区裂变截面实验

国家自然科学基金重大项目支持，国内首次获得宽能区高精度的 $^{236}\text{U}$ 裂变截面，审稿人评论有助于解决相关实验数据分歧，提供核数据评价支持。测量数据均被IAEA EXFOR实验数据库收录。



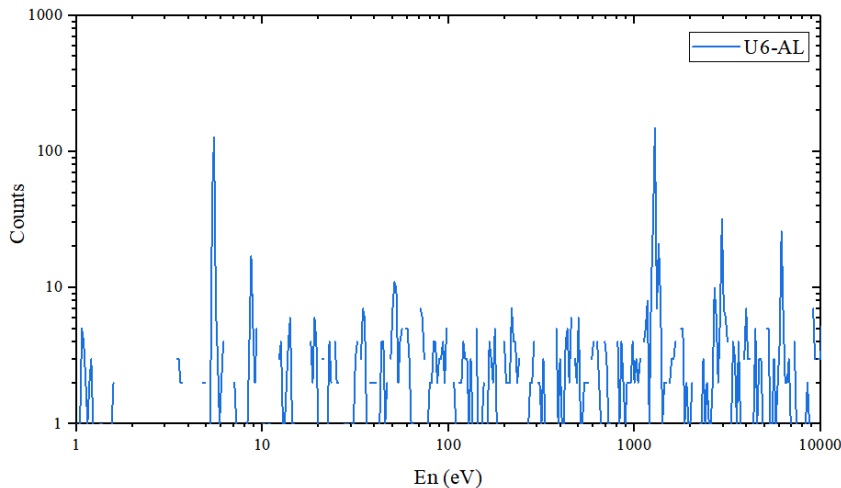
- [1] Zhizhou Ren, et al. Phys. Rev. C, 102, 034604 (2020).  
 [2] Zhizhou Ren, et al. Eur. Phys. J. A 59:5 (2023).

# 实验测量

## ◆ $^{236}\text{U}$ 快中子能区裂变截面实验低能段分析

基于双束团快中子能区实验数据，开展了共振区裂变截面分析方法研究。

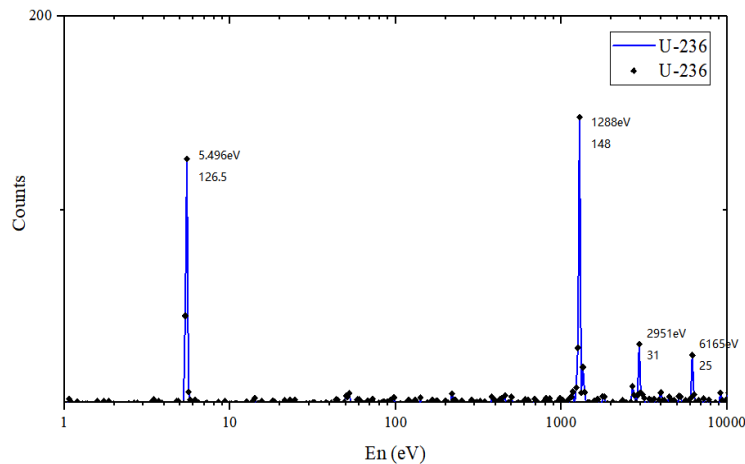
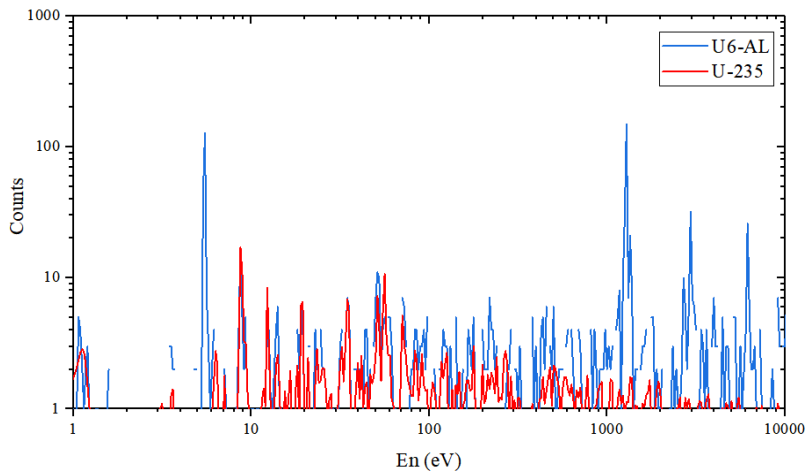
- CSNS Back-n双束团模式(40-50 kW; 25 Hz;  $\phi 60$  mm束斑; 76 m; 170 h)
- 90%Ar+10%CH<sub>4</sub>; 800 mbar
- 2片 $^{235}\text{U}$ , 1片 $^{236}\text{U}$ 镀片
- 得到了1 eV-10 keV 能区 $^{236}\text{U}$ 扣除本底得到的能谱
- **必须考虑 $^{235}\text{U}$ 杂质的影响**
- 在8.77 eV,  $^{236}\text{U}$ 不存在共振, 用 $^{235}\text{U}$ 共振峰结合 $^{235}\text{U}$ 镀片能谱进行归一扣除



$$C_{5(6)}(En) = \frac{C_{5(6)}(8.77\text{eV})}{C_5(8.77\text{eV})} C_5(En)$$

# 实验测量

- 1 eV-10 keV能区 $^{236}\text{U}$ 裂变计数-中子能谱
- 用 $^{235}\text{U}$  裂变8.77 eV 共振峰归一扣除谱中 $^{235}\text{U}$ 杂质核素裂变计数
- 测到了低能区中子诱发 $^{236}\text{U}$  多个共振峰



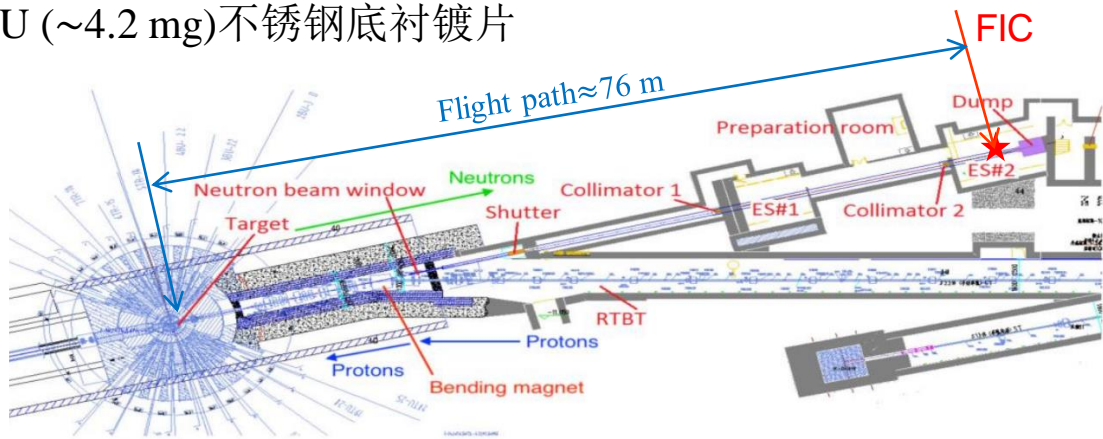
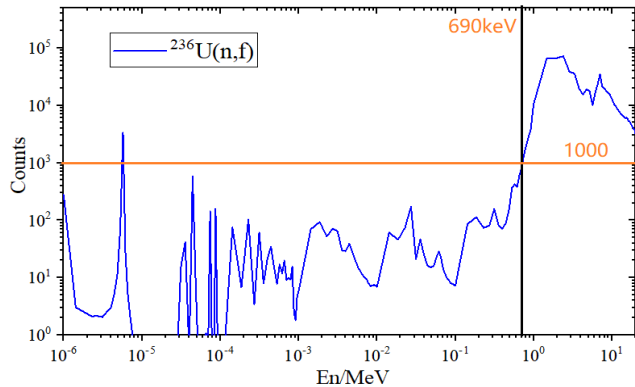


# 实验测量

## ◆ $^{236}\text{U}$ 共振区裂变截面实验

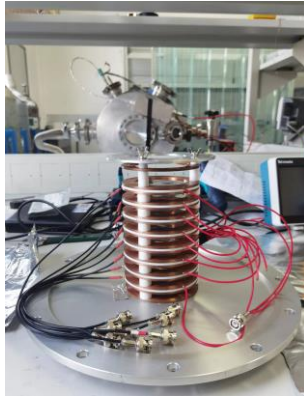
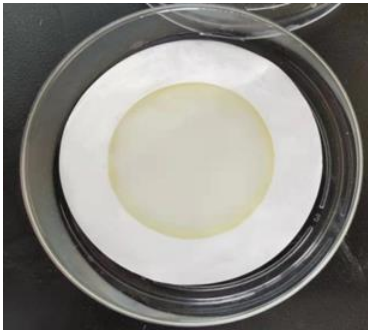
着重测量低能区(阈值690 keV附近及以下)与共振区(典型5.5 eV共振峰等)的中子诱发 $^{236}\text{U}$ 裂变截面, 为澄清现有数据分歧提供重要的实验数据支撑。

- 2023年3月1日至9日, 实验厅二; 刘荣、任智洲、白江博、陈永浩
- CSNS Back-n双束团模式(140 kW; 25 Hz;  $\phi 60$  mm束斑; 76 m; 159 h; 0.3-200 MeV)
- 90% Ar+10% CF<sub>4</sub>; 800 mbar
- 2片 $^{235}\text{U}$ (~12.6 mg), 2片 $^{236}\text{U}$ (~4.2 mg)不锈钢底衬镀膜片



# 实验测量

## ◆ $^{236}\text{U}$ 共振区裂变截面实验



样品	质量(mg)	质量厚度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	不确定度 (%)
$^{235}\text{U}$ -4	6.331	0.322	1.0
$^{235}\text{U}$ -5	6.319	0.322	1.0
$^{236}\text{U}$ -1	2.210	0.113	1.0
$^{236}\text{U}$ -2	2.040	0.104	/

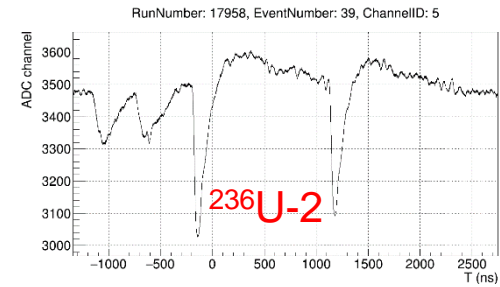
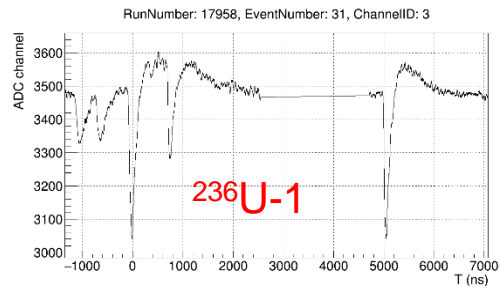
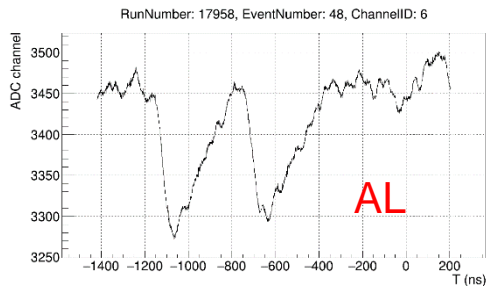
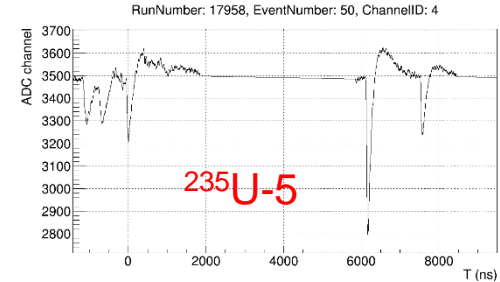
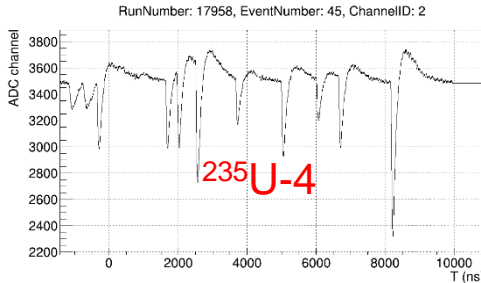
镀片	核素	丰度(%)	不确定度(%)
$^{236}\text{U}$	$^{234}\text{U}$	2.7660E-5	4.0E+0
	$^{235}\text{U}$	6.3447E-3	6.5E-2
	$^{236}\text{U}$	<b>9.9944E+1</b>	5.7E-5
	$^{238}\text{U}$	4.9554E-2	1.2E-1

[1] Jie Wen, et al. Applied Radiation and Isotopes, 164 (2020) 109300

# 数据分析

## ➤ Raw-to-Root: 原始数据解码与波形

各路的波形信号正常，  
无明显叠加，丢失等异常情况。

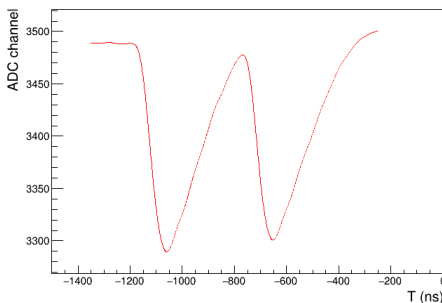


# 数据分析

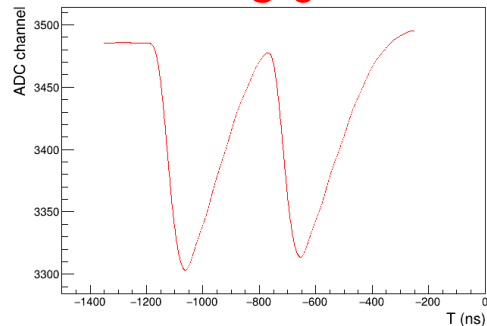
## ➤ $\gamma$ -flash信号处理与起始时刻标定

对 $\gamma$ -flash信号进行叠加平均，得到每路起始信号，结合裂变信号作为终止信号，得到中子飞行时间。

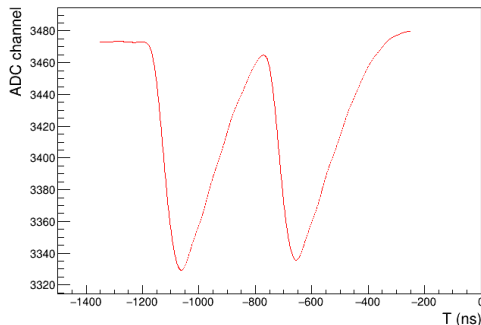
235U-4



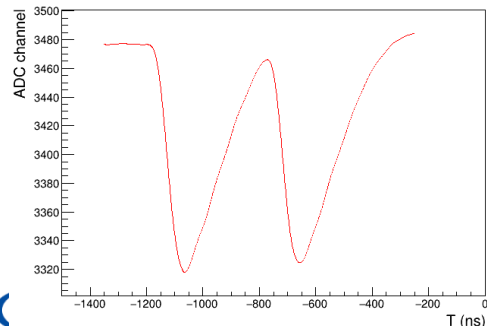
235U-5



236U-1



236U-2



# 数据分析

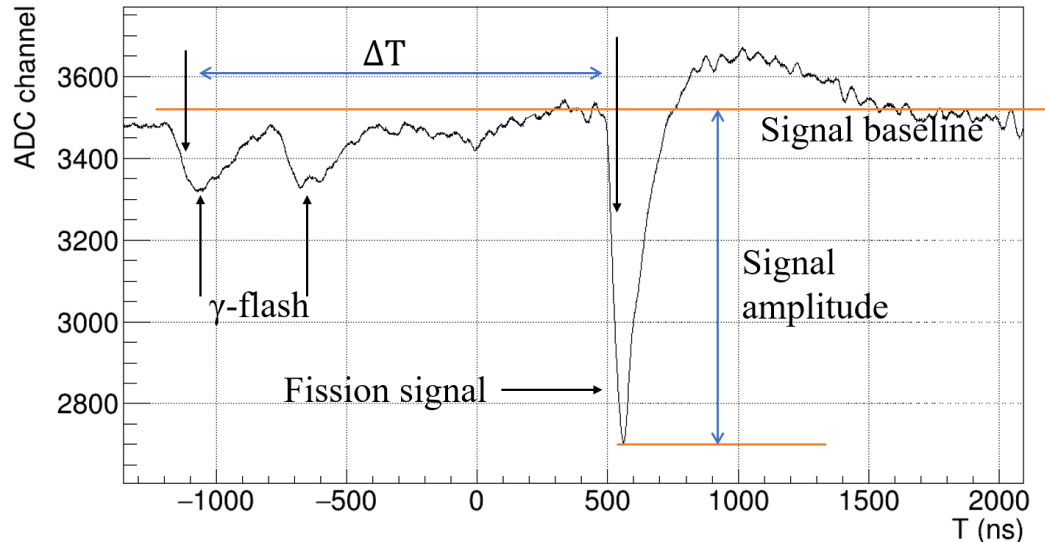
## ➤ 中子能量标定：确定裂变事例对应的中子能量

- 波形的 $T_f$ 和 $T_\gamma$ 定时

$$\begin{aligned}
 TOF_n &= T_f - T_n \\
 &= T_f - (T_\gamma - TOF_\gamma + T_{pulse}) \\
 &= T_f - T_\gamma + TOF_\gamma
 \end{aligned}$$

- $^{235}\text{U}(n,f)$ 的8.77 eV共振峰标定距离

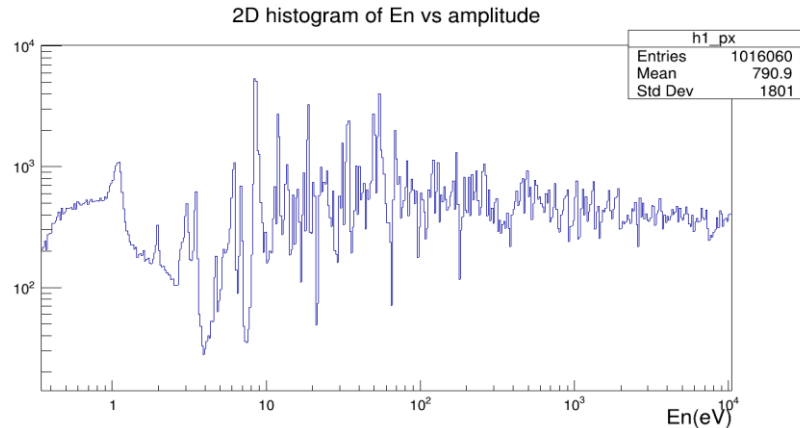
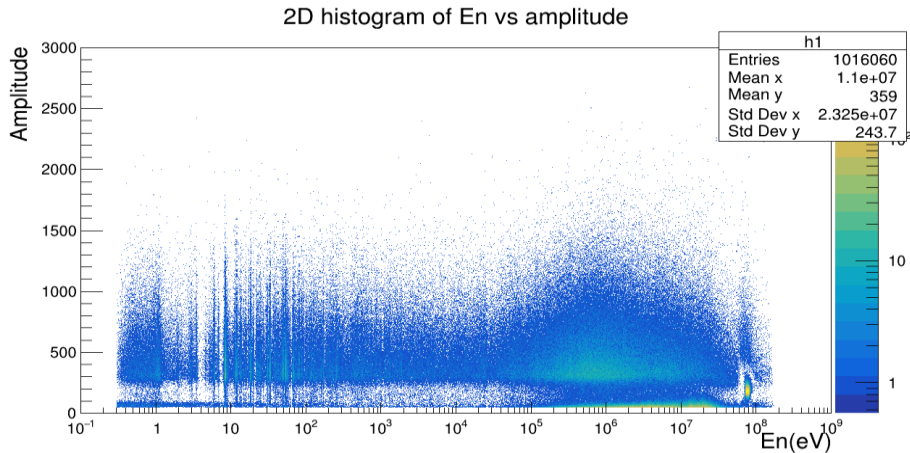
$$T_f - T_\gamma = \frac{L}{c} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{E_n}{m_n c^2} + 1\right)^2}}} - 1 \right)$$



# 数据分析

## ➤ 脉冲幅度-中子能量二维谱

- 裂变计数-中子能谱
- 脉冲幅度谱-探测效率



$$\varepsilon = \left(1 - \frac{t}{2R}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_L}{N_U}\right)$$

# 数据分析

## ➤ 存在的问题：漏气

一、本次实验进行中出现了轻微漏气问题，1.2 kPa/天。3月4日晚8点重新充气并清洁裂变室端盖接口处后解决了这一问题。经分析为裂变室端盖未完全对齐以及接口处清洁未到位所致。

二、经过对漏气前后不同气压情况下测得的 $\gamma$ -flash幅度进行标定，表明气压变化对信号波形影响不大，但信号幅度发生了变化。给数据分析带来了困难。

三、需要针对不同气压下采的数据分别处理，做信号甄别。后续基于多层裂变室的实验需要关注这一问题。

# 后续工作

## 工作小结

- 完成了快中子能区 $^{236}\text{U}$ 实验低能区数据分析
- 完成了低能区 $^{236}\text{U}$ 裂变截面测量实验
- 进行了实验数据初步处理

## 后续计划

- 完成低能区 $^{236}\text{U}$ 测量实验数据分析
- 完成测量结果与不同评价及实验对比分析
- 撰写发表科技论文一篇

感谢陈永浩、陈鑫泽、洪杨、王丽娇、周志浩及Back-n合作组成员在实验上的大力协助！







请批评指正!

15528556889, zhizhouren@qq.com

