



# 白光中子诱发 $^{236}\text{U}$ 裂变截面实验研究

STUDY OF NEUTRON INDUCED FISSION CROSS SECTION OF  $^{236}\text{U}$

汇报人：任智洲

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

2024年8月23日 散裂中子源科学中心

# CONTENTS

01

中子诱发 $^{236}\text{U}$ 裂变截面

02

$^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面实验进展

03

$^{236}\text{U}$ 未来实验设想



PART 01

中子诱发 $^{236}\text{U}$ 裂变截面

# 研究背景

## 为什么进行“裂变核数据”测量？

中子裂变核数据在基础与应用核物理领域有不可替代的作用，为解决我国现代化强国目标中能源与环境问题至关重要[1]。提供真实可信的实验数据是核数据科研人员最大的责任，也是最大的挑战[2]。



大量科研人员实验  
提供实验数据



核数据评价质量  
不断提升



应用多个领域  
惠及社会大众

[1] 高树超. 专访叶奇蓁院士. 中国核电, 12(5): 486-490 (2019)

[2] R. Capote, et al. Nuclear Data Sheets 131 1-106 (2016)

# 研制背景

## 中子诱发裂变截面数据在基础和应用核领域都有重要应用



### 核工业与核技术应用的基础

---

新型先进的核燃料循环，核能系统的设计开发需要精确的中子诱发裂变截面数据，该数据质量直接影响放能设计的准确性与可靠性

### 核物理基础前沿研究

---

核裂变是一个高度复杂的多体量子力学问题。在研究裂变反应理论模型等方面，也需要裂变截面实验数据进行支持。

# 研究背景

## Uranium-236



$Q^+ 4573.1 \text{ keV } 9$

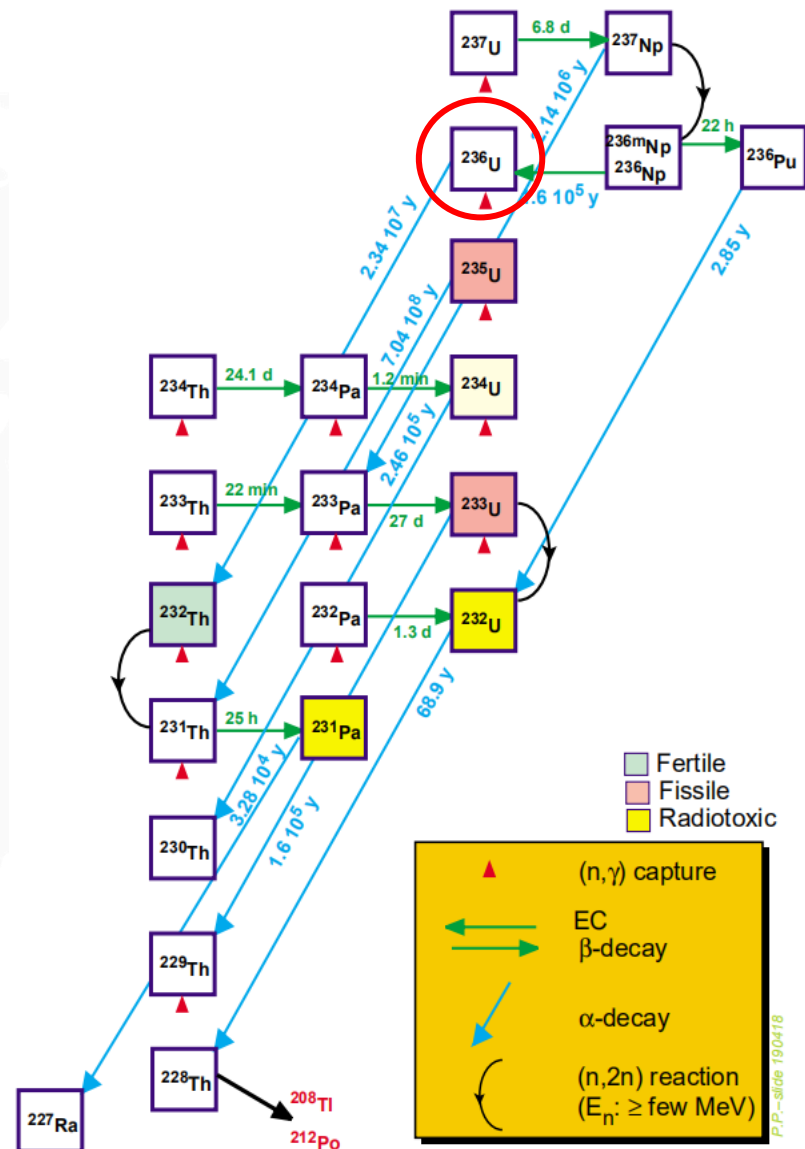
$A : 100.0 \% 0 \rightarrow$   $^{232}_{90}\text{Th}_{142}$

En [keV]	I%	HF	#	Jp	En [keV]
4168	0.00014	1160	3	6+	333.40
4332	0.149	27.3	2	4+	162.25
4445	26.1	1.2	1	2+	49.46
4494	73.8	1	0	0+	0

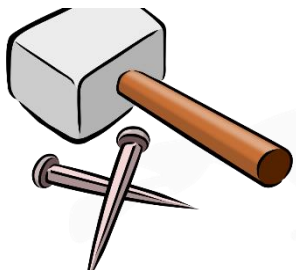


$^{236}\text{U}$ 参与构建Th-U燃料循环的平衡，在快堆以及ADS系统中，它的裂变截面精度需求为5%，被国际原子能机构列为优先测量的核素之一。

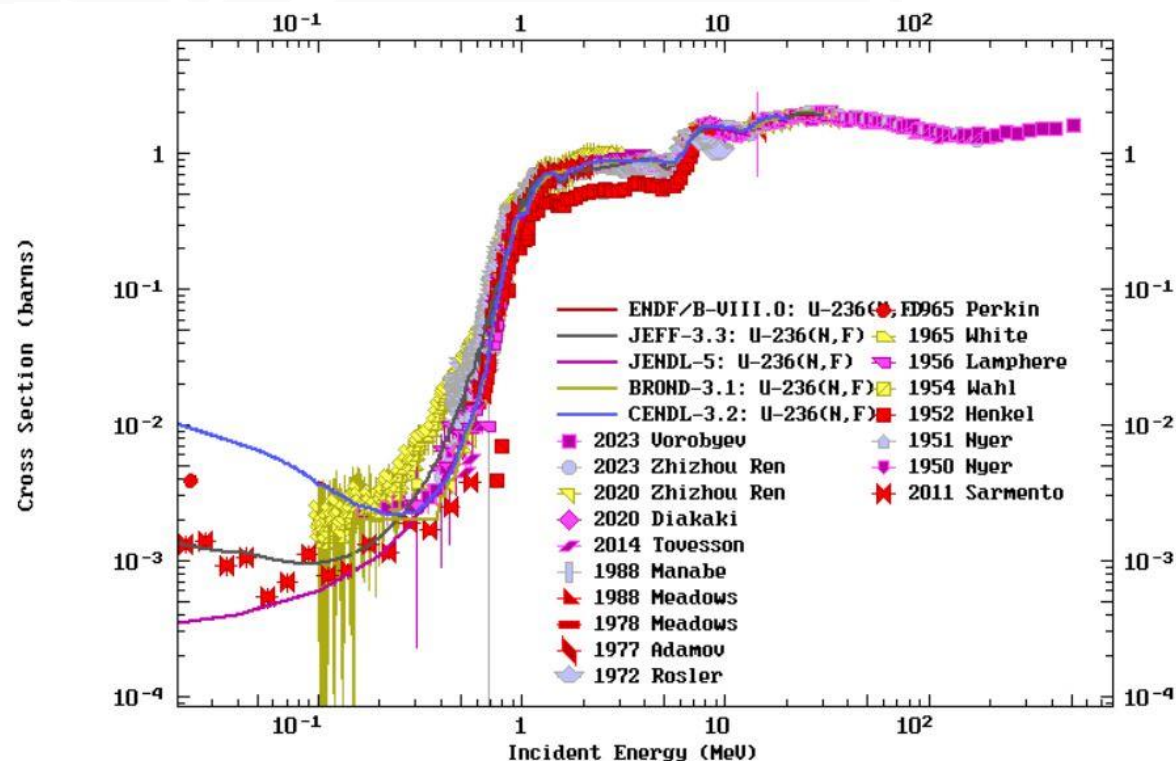
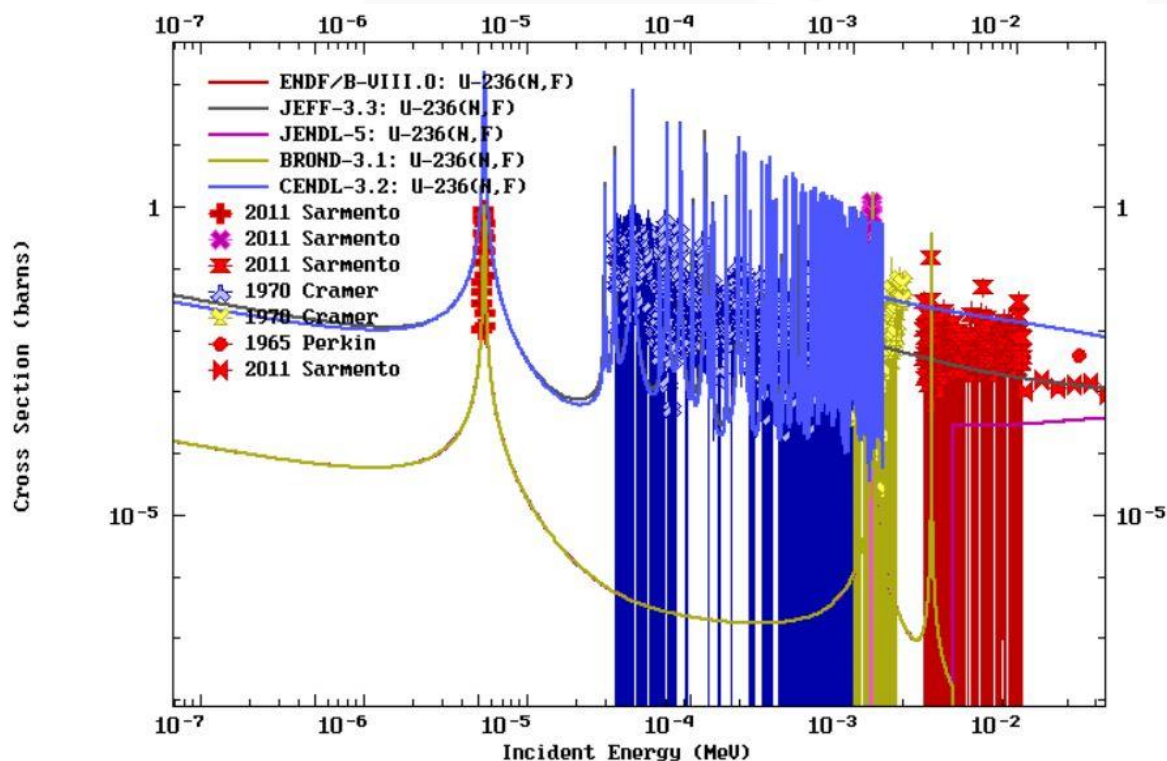
[3] Abbondanno U, et al. CERN/INTC 2001-25, 08 Aug 2001.



# 具体需求



目前， $^{236}\text{U}$ 各主流评价数据库公布的中子诱发裂变截面最新数据上限只到20/30 MeV。且数据库之间差异很大。实验数据十分匮乏，部分能区只有几组甚至一组数据，裂变阈值附近以及10 MeV以上能区数据间普遍存在较大差异，**很有必要开展精确实验测量。**





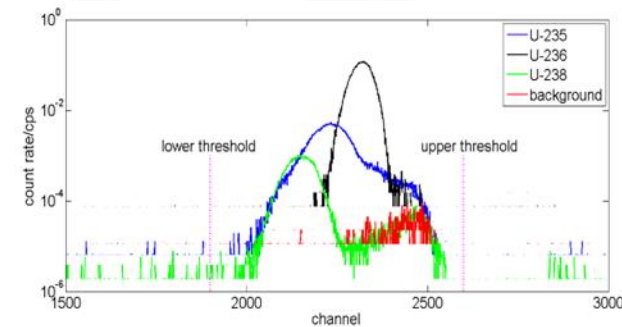
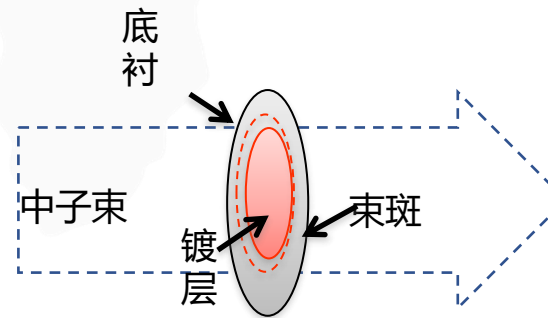
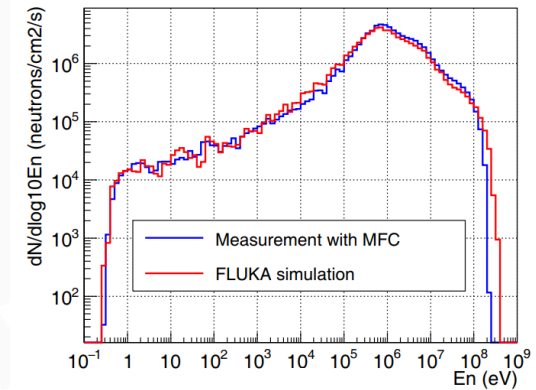
# 研究基础

## 裂变截面测量谱仪(FIXM)——采用多层快裂变室，建立探测系统，实现宽能区裂变截面测量

- 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 $^{235,236,238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ 以及 $^{\text{nat}}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Fe}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Li}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Pb}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Cr}$ 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。



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

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

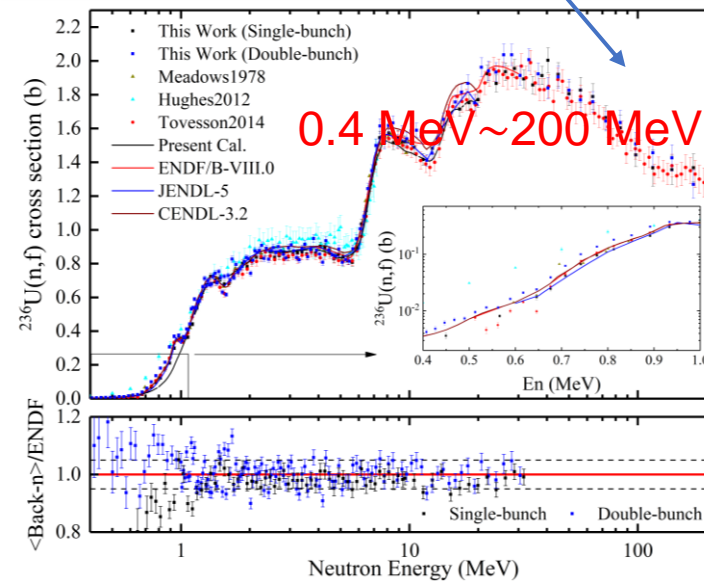
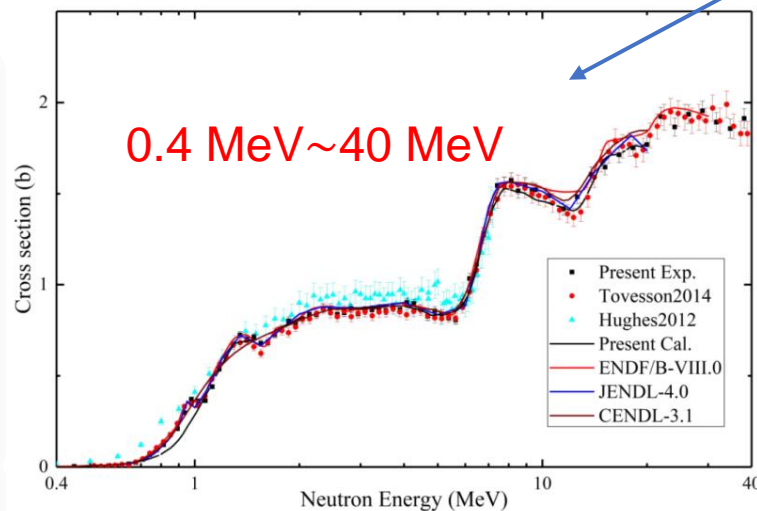
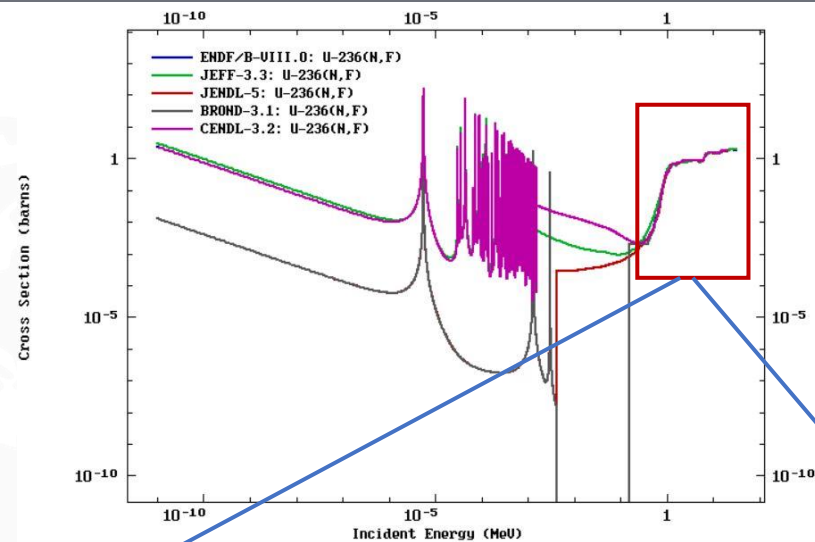


# 研究基础

## 研究基础——快中子能区裂变截面测量实验

获得了宽能区高精度的 $^{236}\text{U}$  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。

测量能区0.4-200 MeV, 阈下裂变截面数据仍然严重缺乏。



[6] Zhizhou Ren, et al. Phys. Rew. C, 102, 034604 (2020).

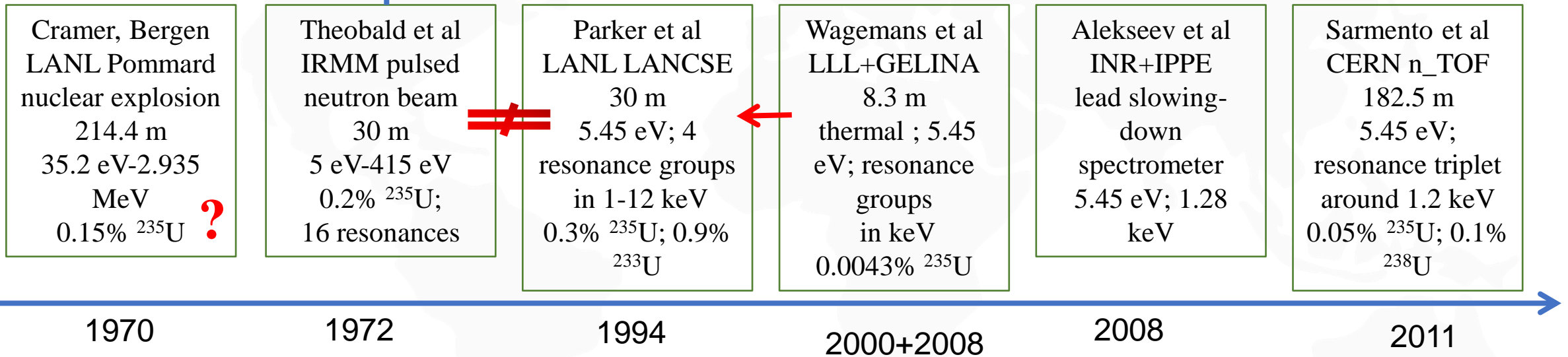
[7] Zhizhou Ren, et al. Eur. Phys. J. A 59:5 (2023).

# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面

## $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面——国际以往研究

Cross Section Measurements for the Subthreshold Fission of  $^{236}\text{U}$

ENDF,JEFF,JENDL



$^{236}\text{U}(n,f)$  的测量与评价在热中子裂变截面值、5.45 eV共振、29 eV ~ 415 eV共振、1 keV以上中能共振结构的存在和强度以及不可观测共振区的截面值是需要澄清的问题。这些问题的根源与裂变阈值(690 keV)以下的早期实验数据质量不足与实验数据缺乏直接相关。



## PART 02

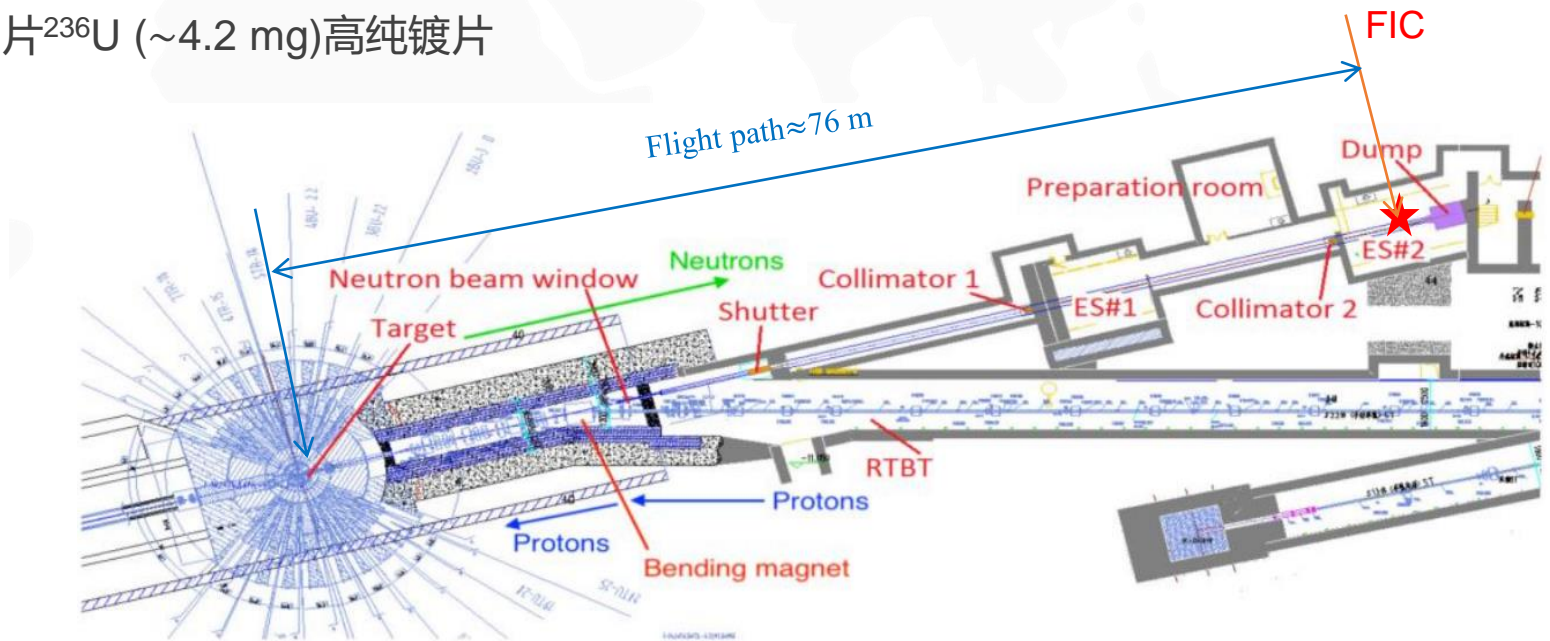
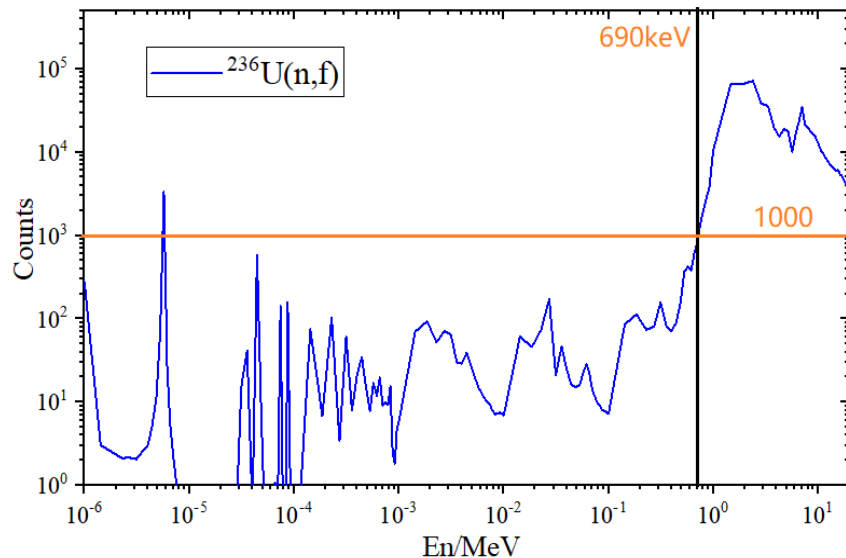
# 236U 阈下裂变截面实验进展

# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面实验进展

## $^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面——整体实验方案

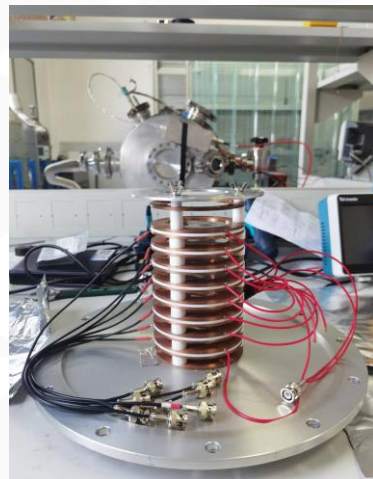
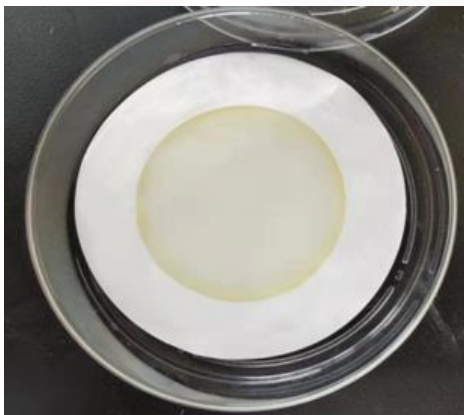
着重测量低能区(阈值690 keV附近)与共振区(典型5.5 eV共振峰等)的中子诱发 $^{236}\text{U}$ 裂变截面, 为澄清现有数据分歧提供重要的实验数据支撑。

- 2023年3月, 实验厅二
- CSNS Back-n双束团模式(140 kW; 25 Hz;  $\phi 60$  mm束斑; 76 m; 159 h; 0.3 eV~ 200 MeV)
- 90%Ar+10%CF<sub>4</sub>; 800 mbar 2片 $^{235}\text{U}$ , 2片 $^{236}\text{U}$  (~4.2 mg)高纯镀片



# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面实验进展

## $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面——实验基本情况



n ↓

样品	质量(mg)	质量厚度 (mg/cm <sup>2</sup> )	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

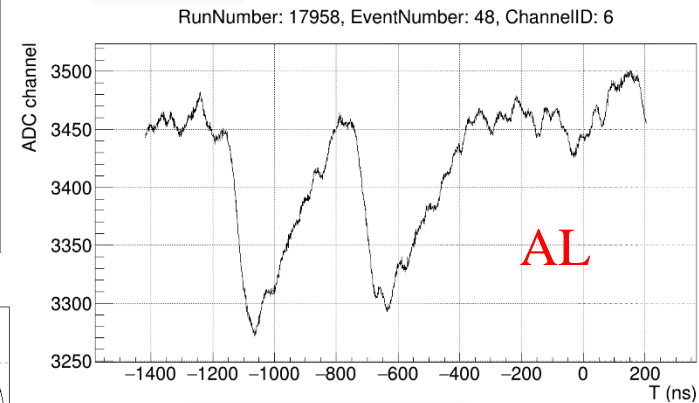
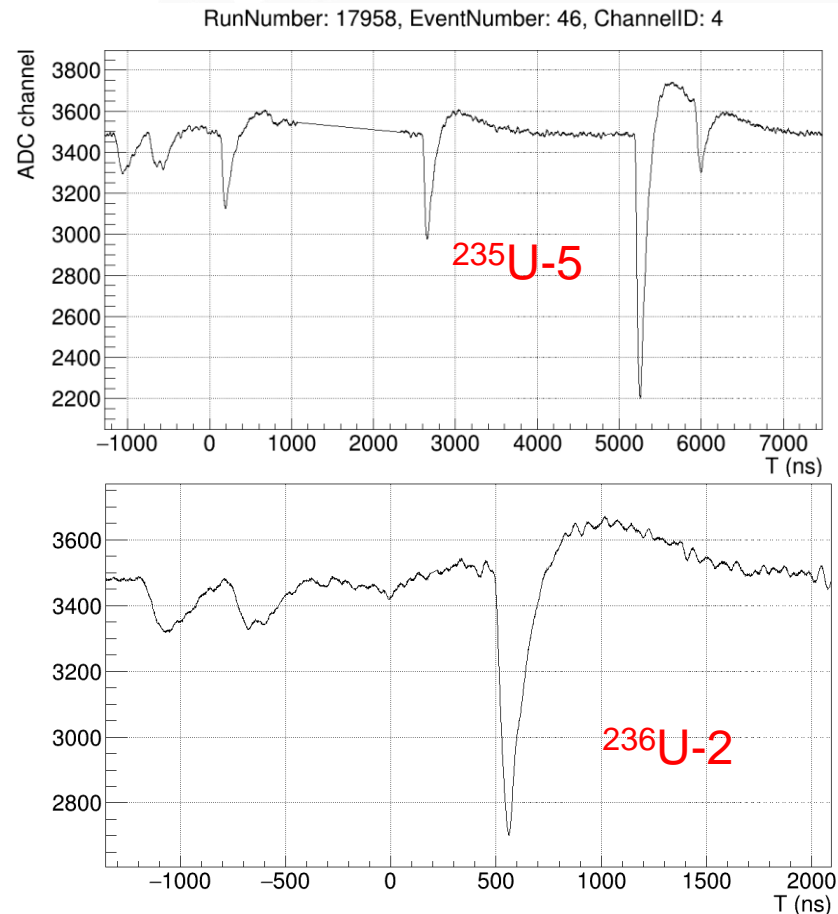
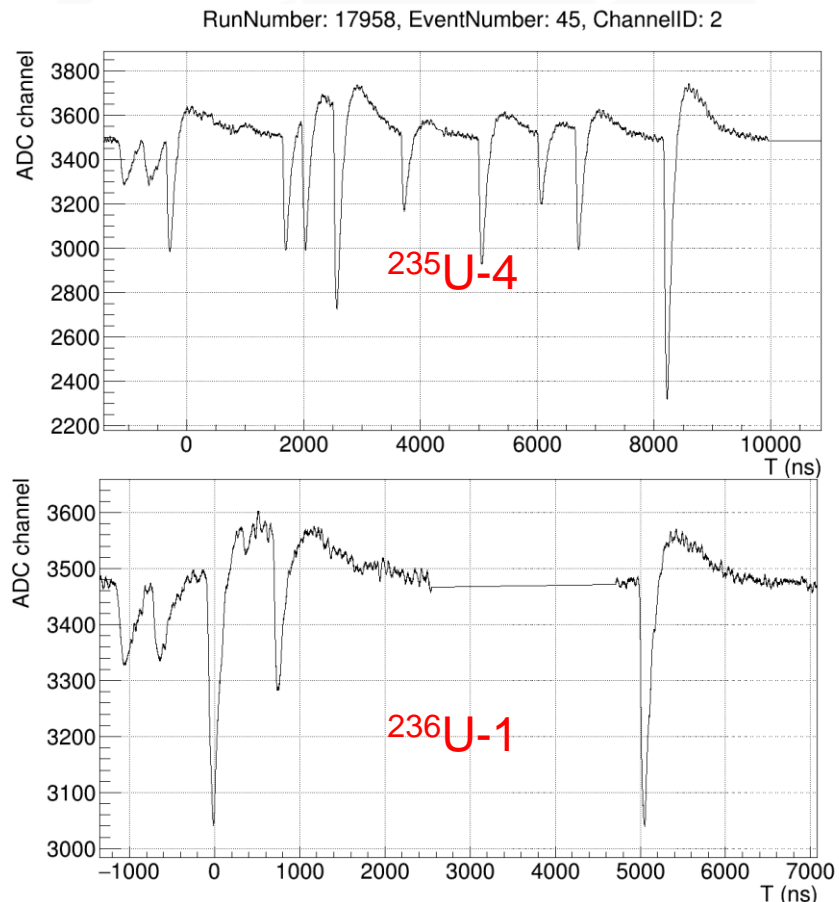
[8] Jie Wen, et al. Applied Radiation and Isotopes, 164 (2020) 109300



# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面实验进展

## 数据分析——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。进行原始数据解码。

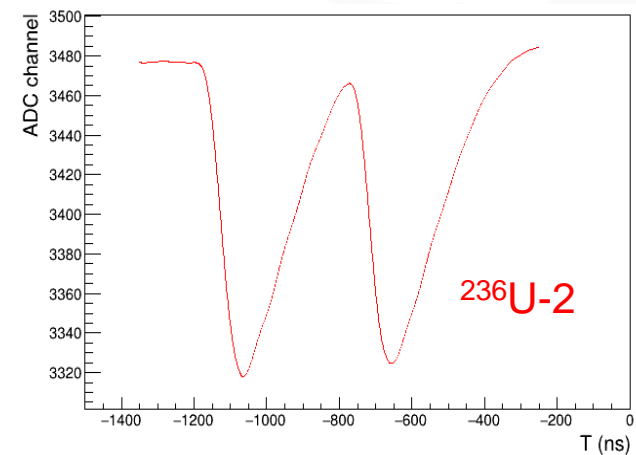
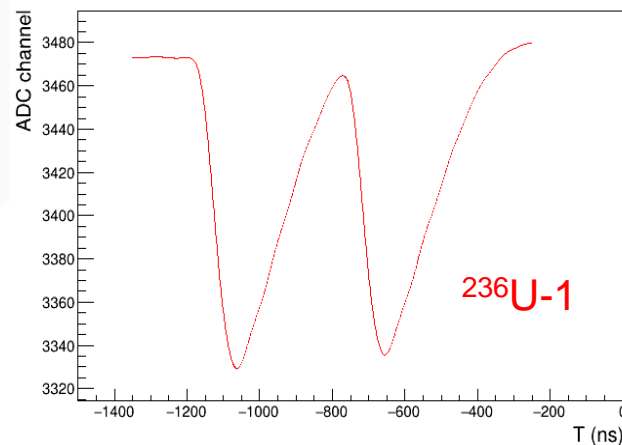
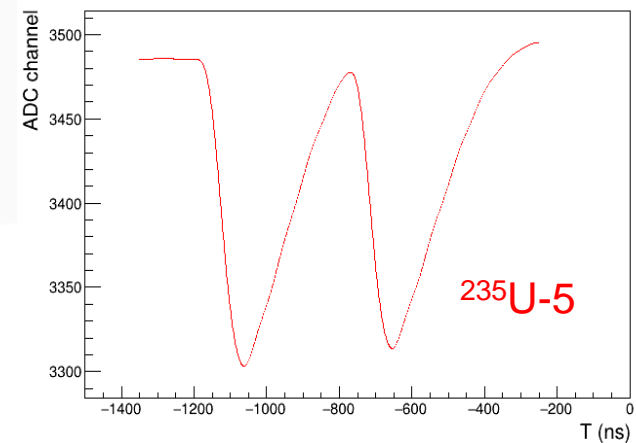
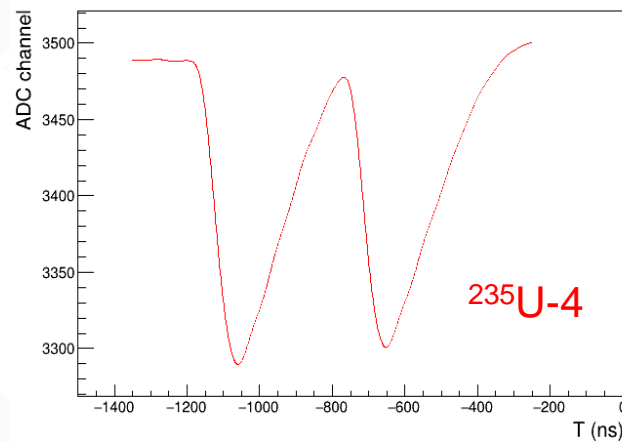


# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面实验进展

## 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。

Channel ID	Start Time
$^{235}\text{U}$ -4	-1130
$^{236}\text{U}$ -1	-1132
$^{235}\text{U}$ -5	-1131
$^{236}\text{U}$ -2	-1133
AL	-1133





# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面实验进展

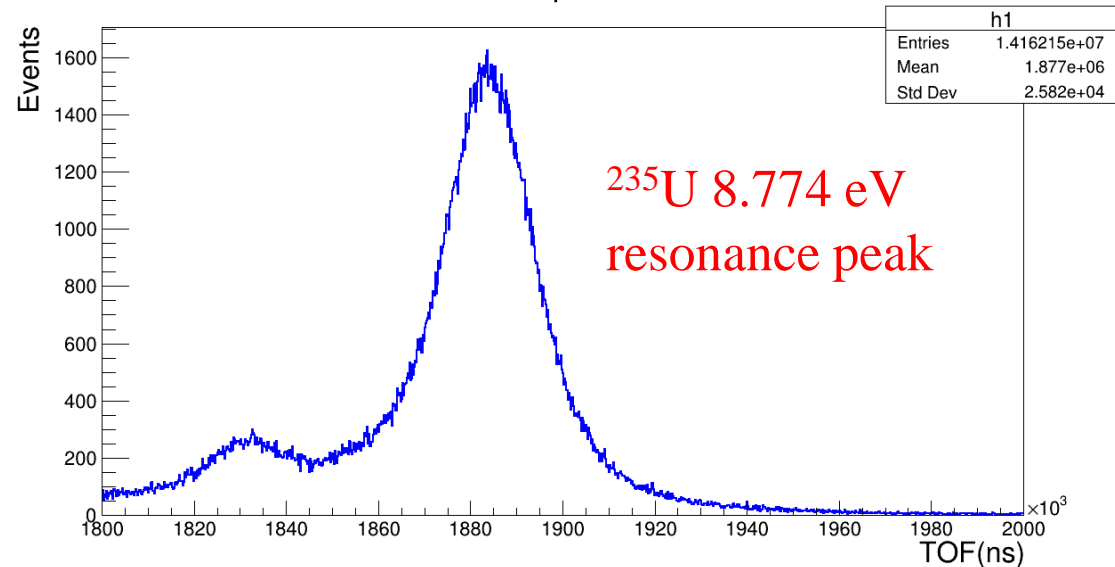
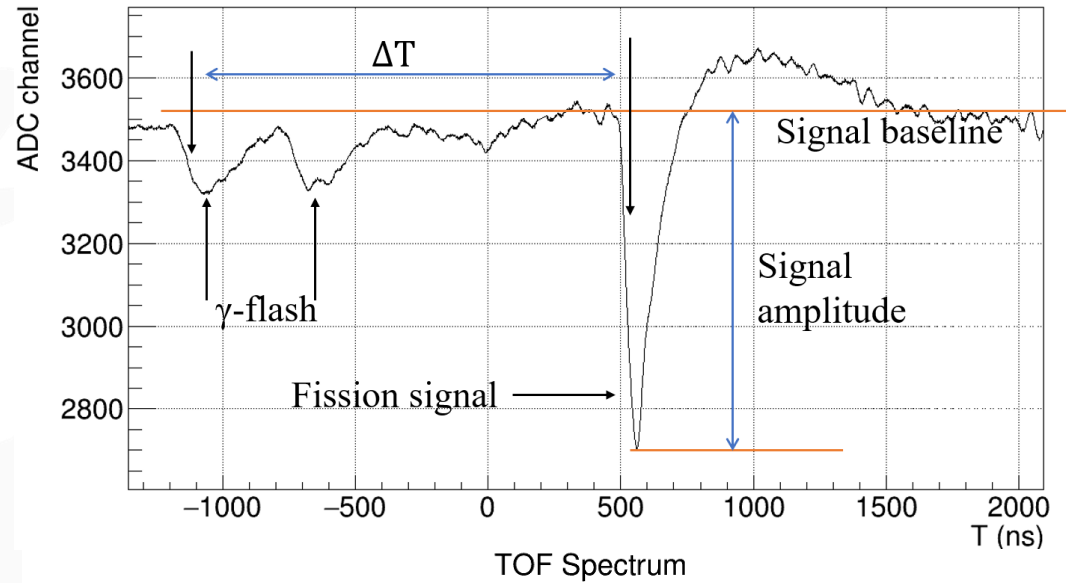
## 数据分析——中子飞行距离标定

- 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

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

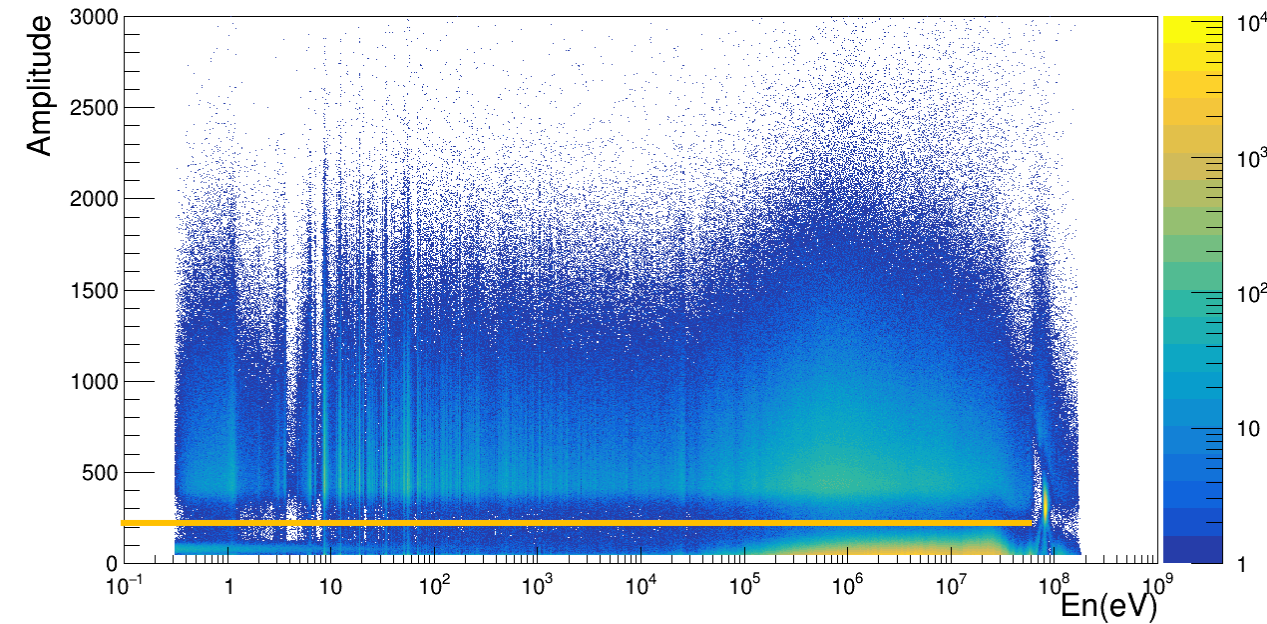


# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面实验进展

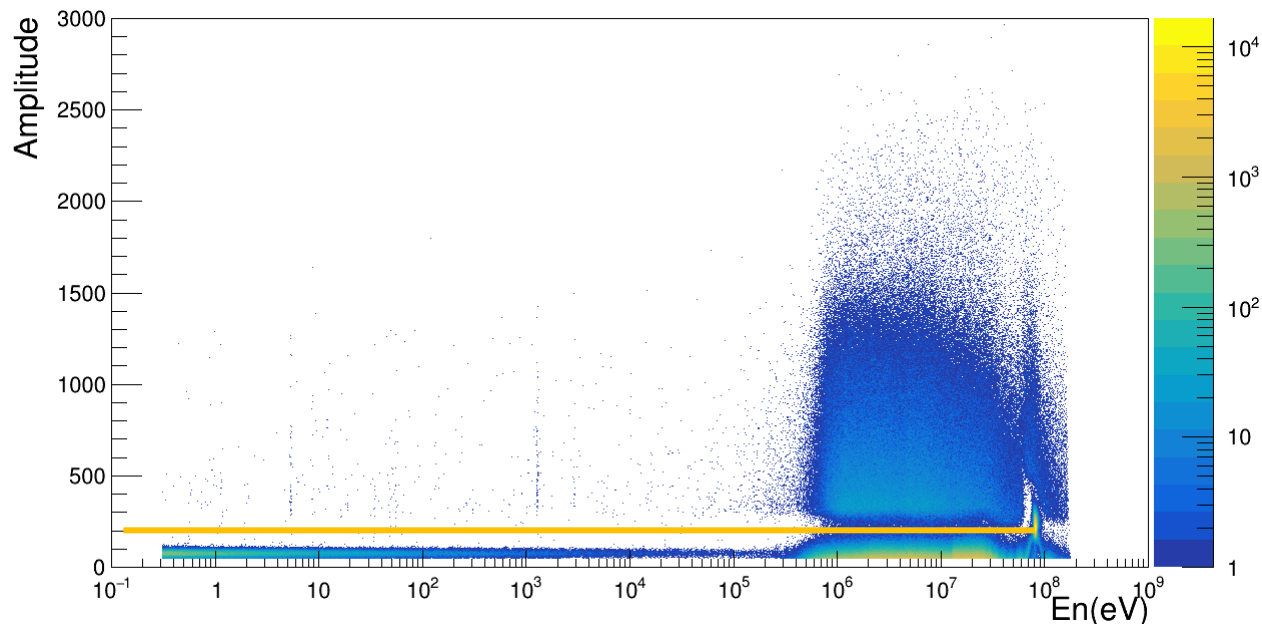
## 数据分析——中子能量标定

- 脉冲幅度-中子能量二维谱

大幅度的裂变信号与小幅度的本底信号之间存在明显的间隙。可以看到 $^{235}\text{U}$ 共振峰。在高能区，由于中子通量的降低，裂变事件的计数也相应的减少。还可以清晰地观察到 $^{236}\text{U}$ 裂变阈值。



$^{235}\text{U}$ -4 fission cell



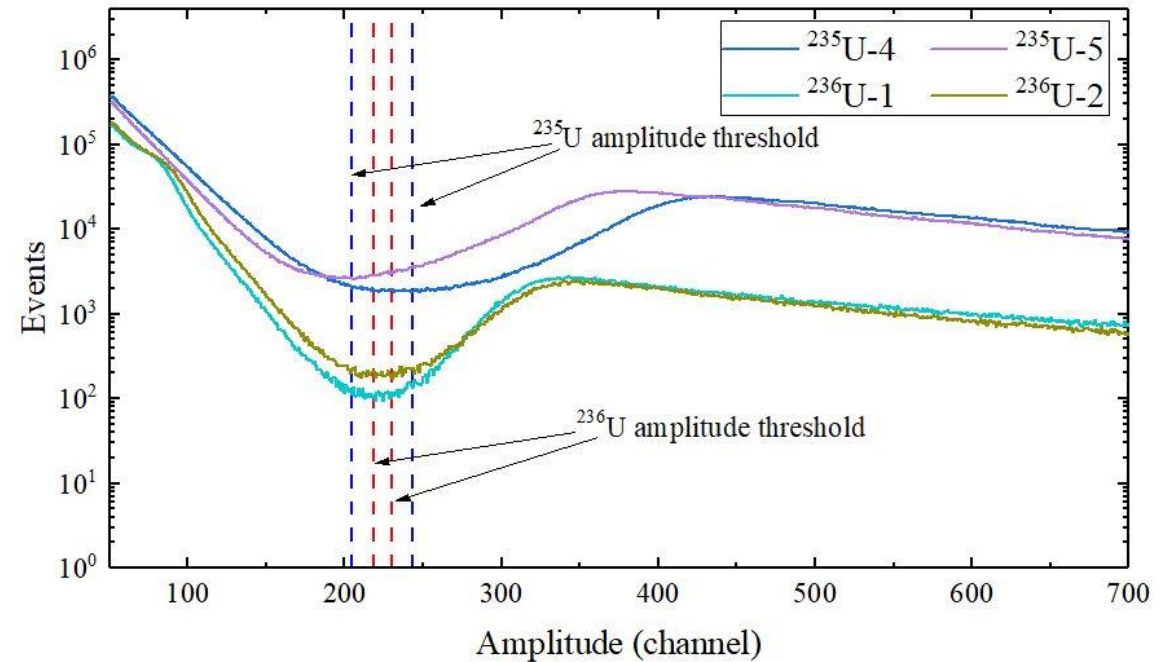
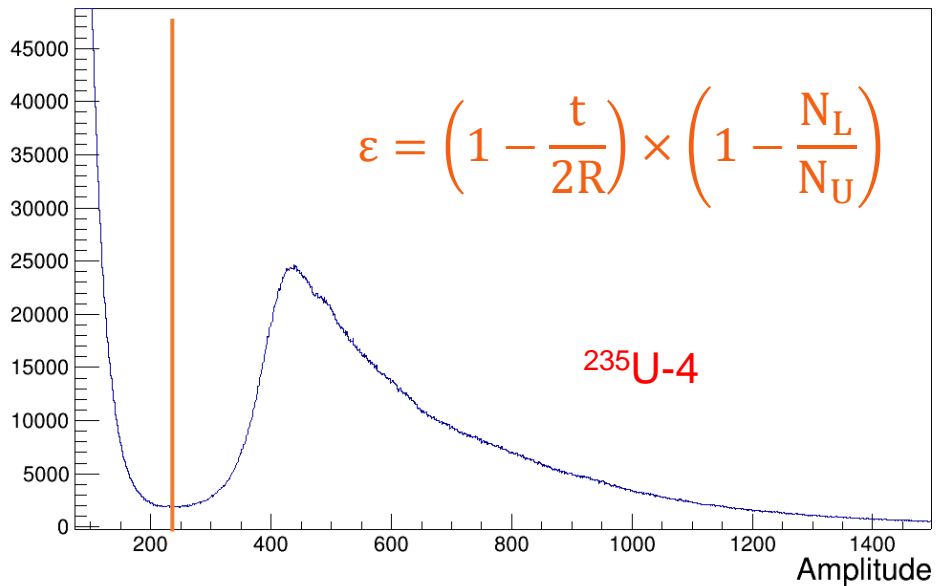
$^{236}\text{U}$ -1 fission cell

# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面实验进展

## 数据分析——阈值甄别与探测效率

- 脉冲幅度谱 (0.3 eV ~ 20 MeV)
- 探测效率计算—矩形外推并考虑自吸收

样品	阈值 (ch)	探测效率 (%)	不确定度 (%)
$^{235}\text{U-4}$	240	94.70	-
$^{235}\text{U-5}$	205	95.47	-
$^{236}\text{U-1}$	225	97.85	-
$^{236}\text{U-2}$	230	97.58	-

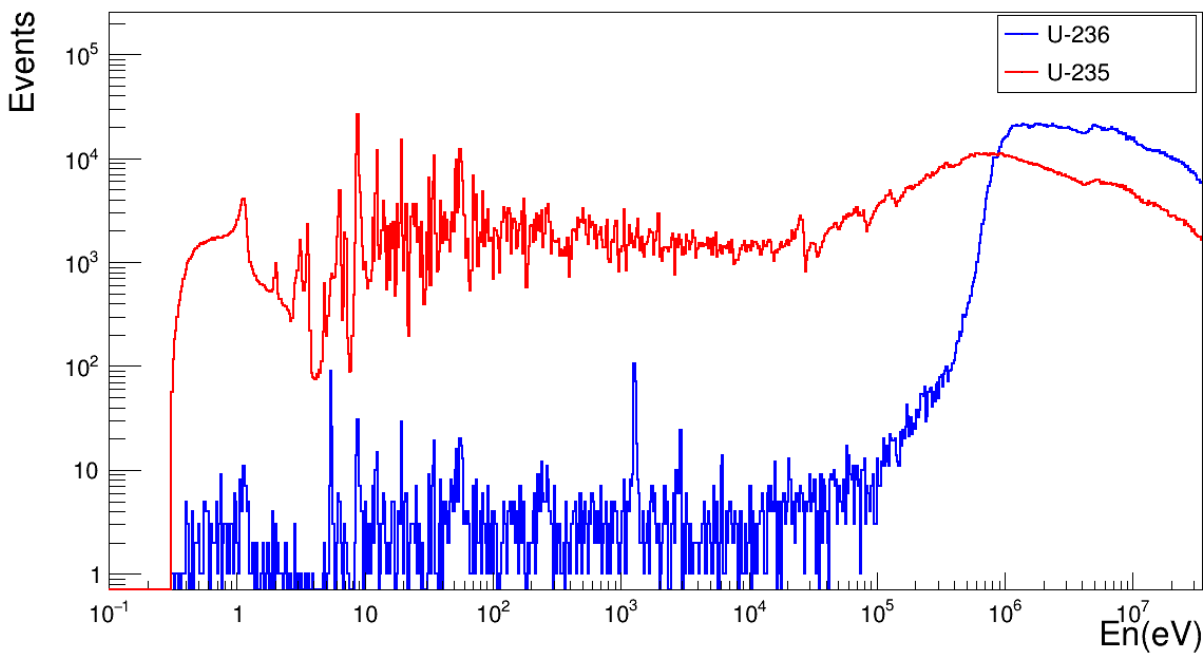


# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面实验进展

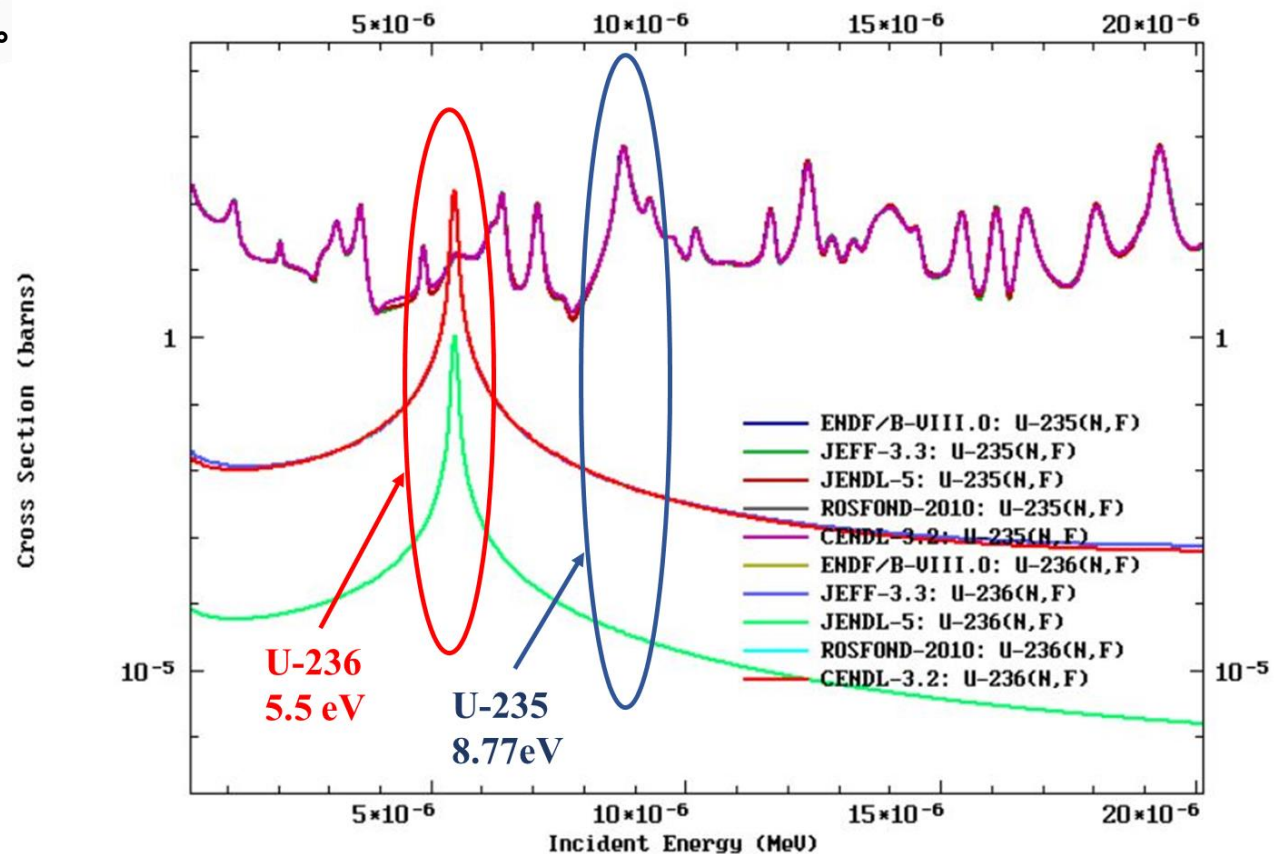
## $^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面——裂变-中子能谱

- 1 eV~10 keV能区 $^{236}\text{U}$ 裂变计数-中子谱, 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。

Spectrum of Neutron Energy



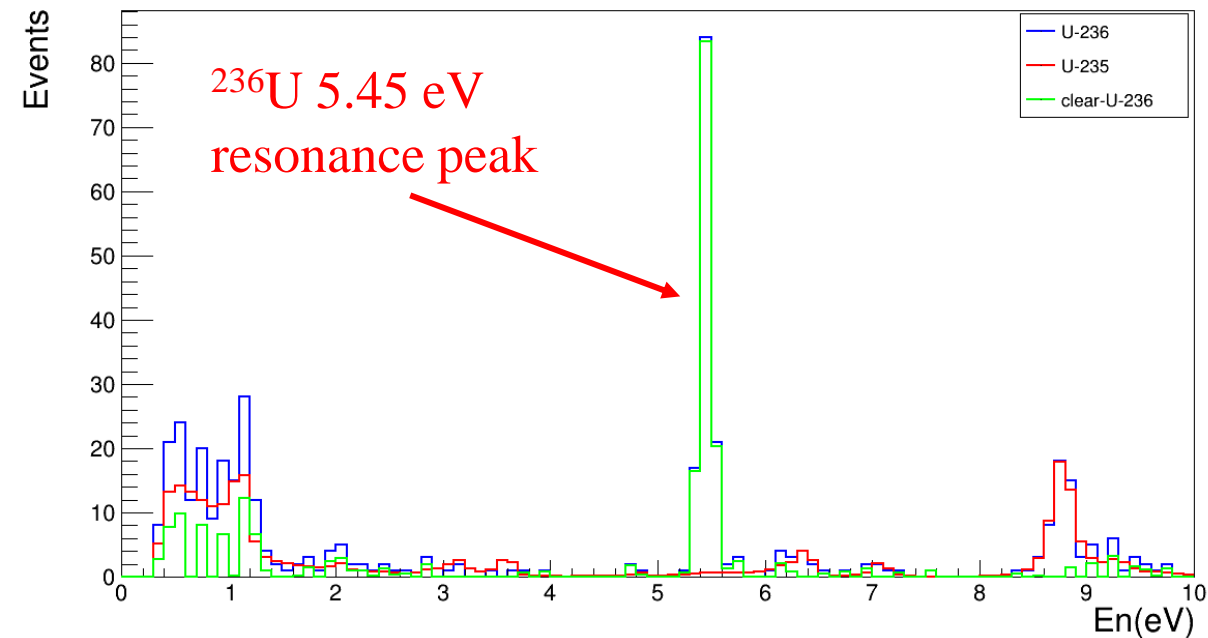
$$C_{5(6)}(En) = \frac{C_{5(6)}(8.77\text{eV})}{C_5(8.77\text{eV})} C_5(En)$$



# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面实验进展

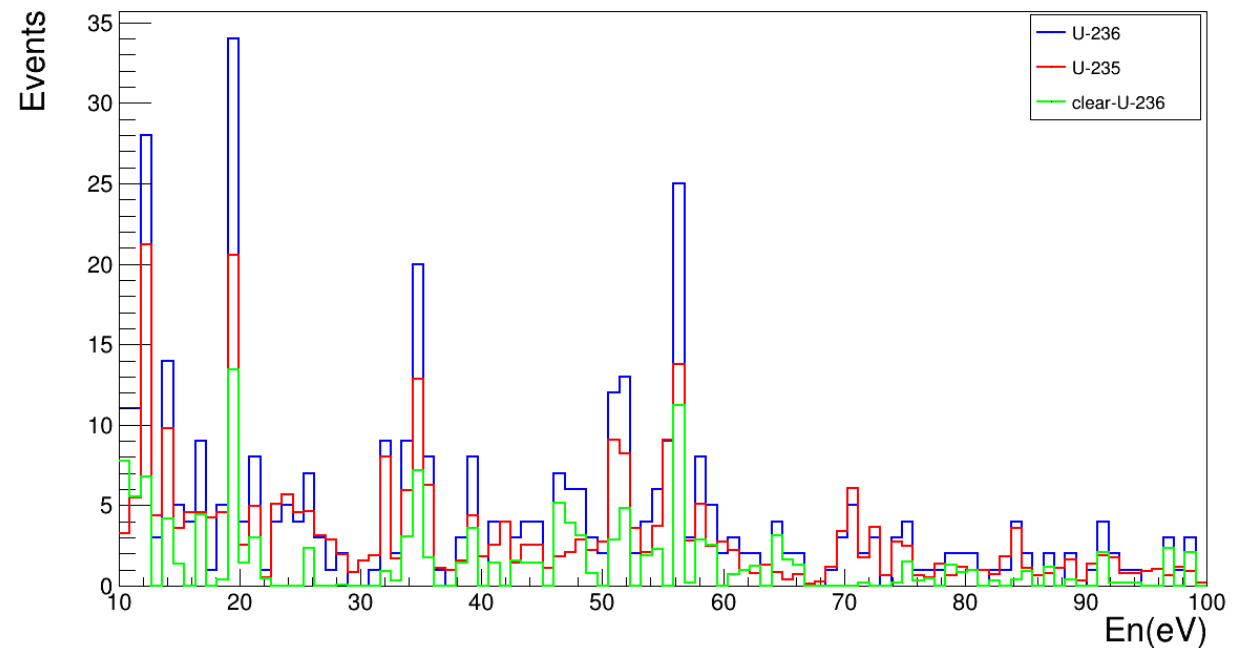
## $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面——多个共振峰初步结果

Spectrum of Neutron Energy



0.3 eV ~ 10 eV

Spectrum of Neutron Energy

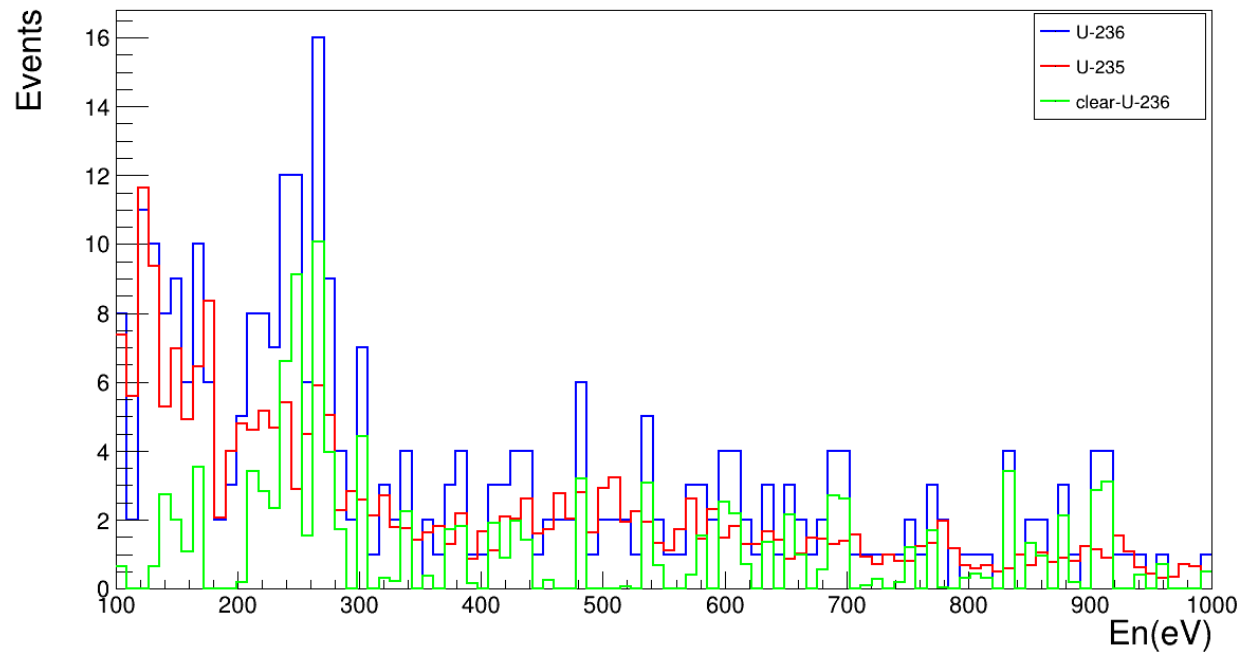


10 eV ~ 100 eV

# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面实验进展

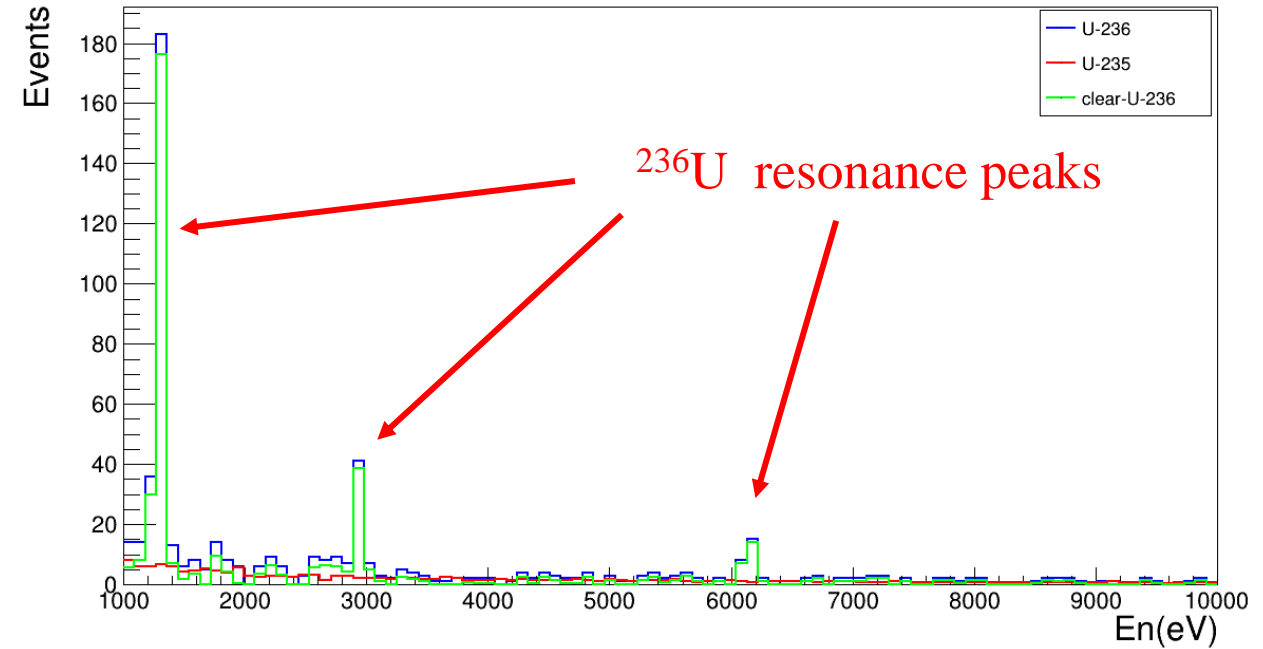
## $^{236}\text{U}$ 阈下裂变变截面——多个共振峰初步结果

Spectrum of Neutron Energy



100 eV ~ 1 keV

Spectrum of Neutron Energy



1 keV ~ 10 keV



# $^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面实验进展

## $^{236}\text{U}$ 阈下裂变截面——后续工作

### 标定各修正量

进行束流、靶片不均匀性修正，核素丰度修正，中子束流衰减修正。

### 精确计算裂变截面

合理划分能区，得到裂变阈值附近以及典型共振峰附近裂变截面。

### 解谱处理10 keV ~ 10 MeV数据

10 keV以上能区需要进行解谱，获得相应单束团模式下能谱。

### 不确定度分析

分析各分量不确定度，给出详细的不确定度定量分析结果。

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支持协助！





## PART 03

# 236U未来实验设想

# $^{236}\text{U}$ 未来实验设想

## 更宽能区

热中子能区现仅有一组实验数据且EXFOR库没有数据，可策划热中子能区实验。  
高能区受伽马暴影响，可策划使用PPAC进行测量。

## 更多参数

计划发展位置分辨PPAC探测器，进行裂变碎片角分布测量。  
可利用GTAF装置进行中子俘获截面测量。



## 更高精度

现在测量精度已经达到裂变室极限3%左右，未来可基于我们TPC高精度裂变截面实验装置结合短束团模式将测量精度提高至1%。

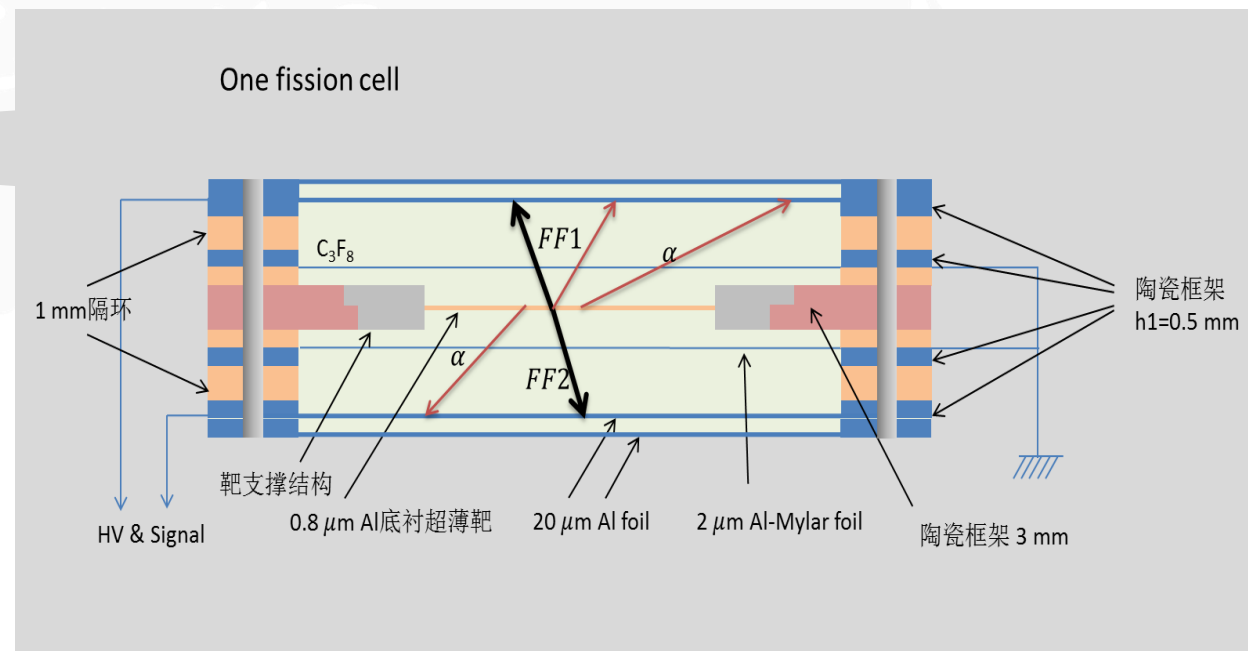
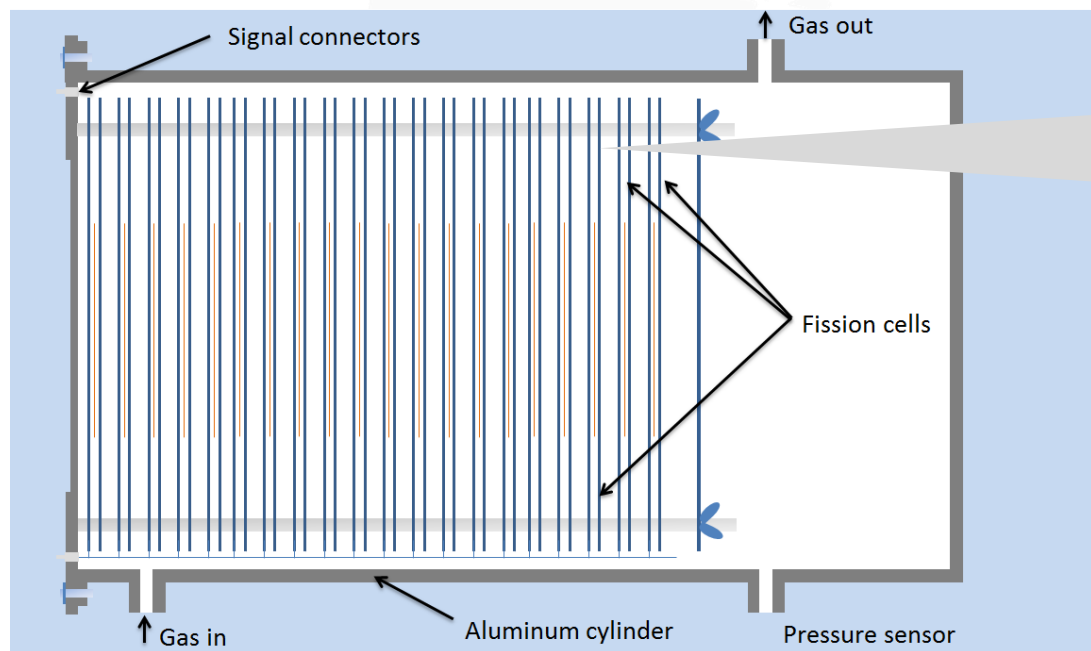
• • •  
更多可能性!

# 高本底抑制能力PPAC

## 整体方案——多层平行板雪崩电离室PPAC

PPAC整体设计为铝制圆柱腔室，厚度为3 mm，尺寸 $\Phi 150 \times 280$  mm，可安装20个基础探测单元。

每个基础探测单元包括两个单层的雪崩电离室与其之间的超薄靶结构，用以符合测量。



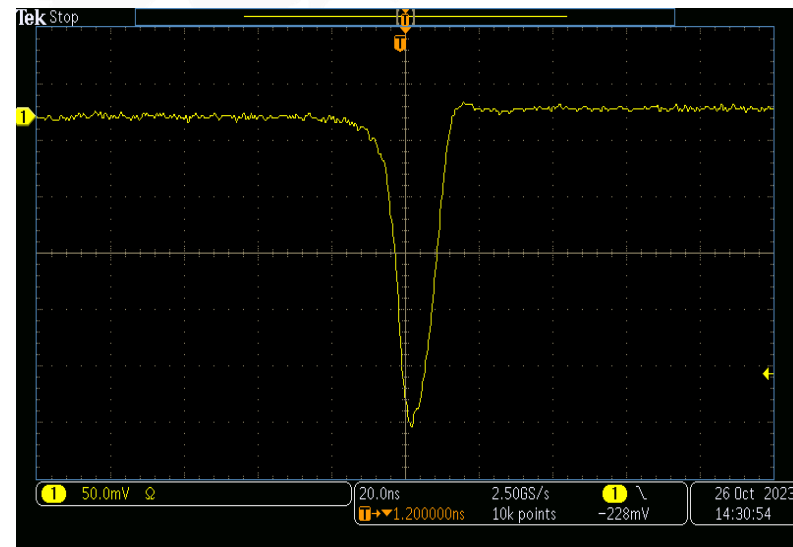
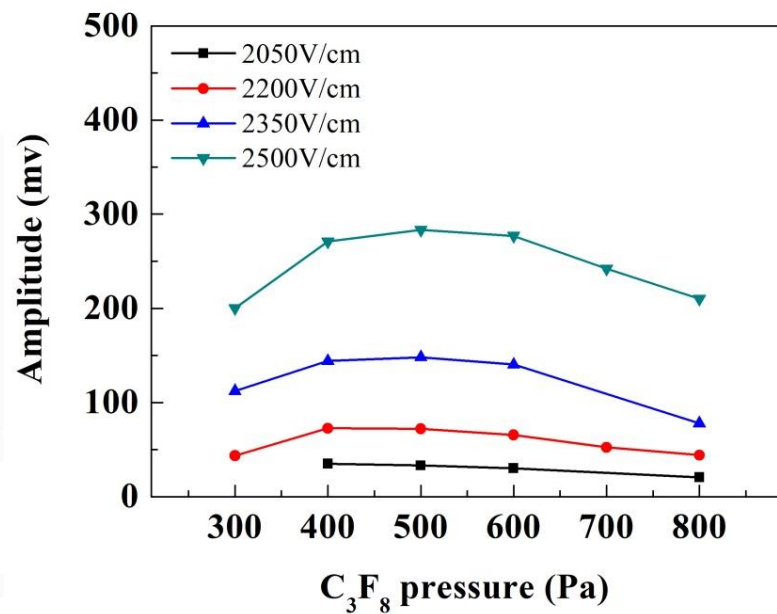
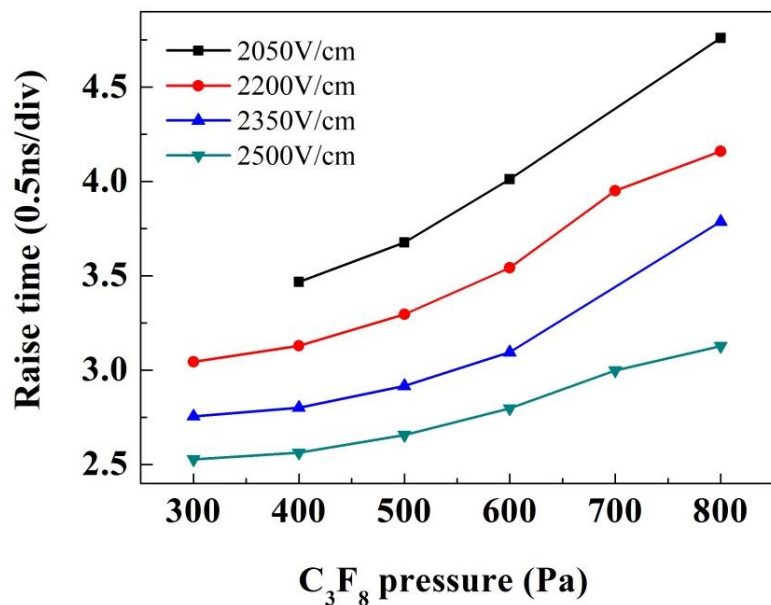
特殊设计的电极：粘到陶瓷PCB板上的2  $\mu m$ 镀铝麦拉膜，极间距2 mm。

特殊设计的超薄高纯裂变靶。

# 高本底抑制能力PPAC

## 测试结果——2 mm单层雪崩电离室

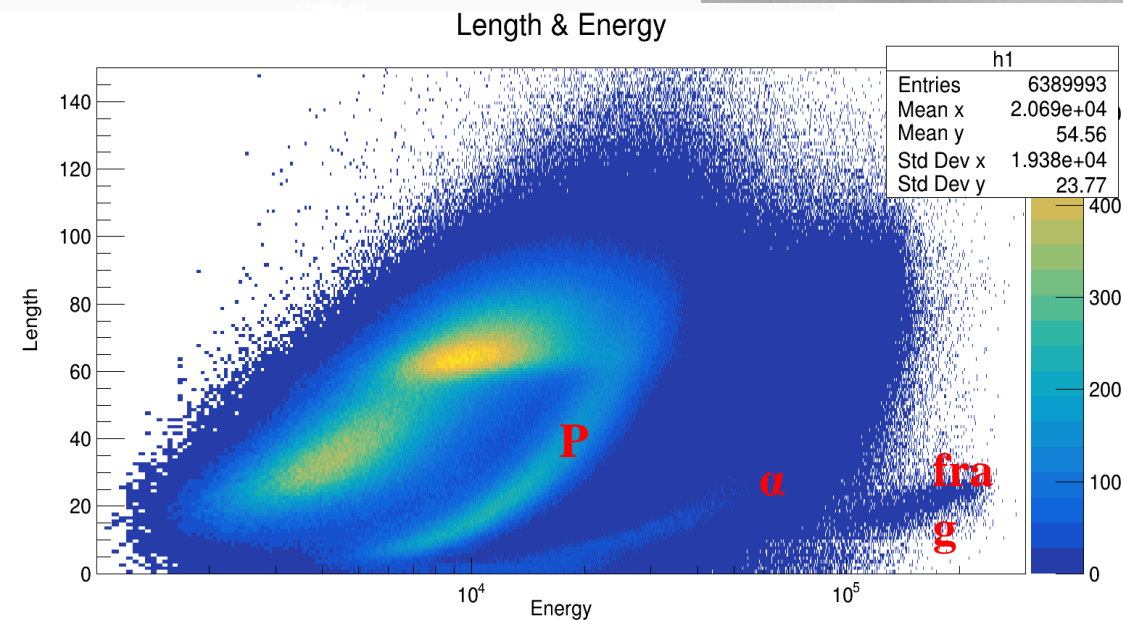
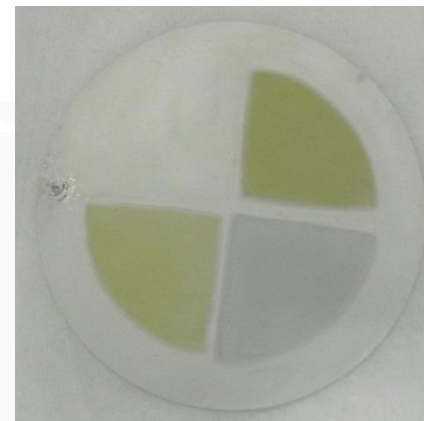
- 每个点大于1天测量时间，摸清了最佳工作状态 (99.99% $C_3F_8$ +3SCCM)
- 气压在400~500 Pa、电压接近500 V时性能最好，裂变波形上升时间小于2 ns，幅度均值大于200 mV。
- 采用1.5 mm间距后，PPAC信号幅度大幅减小，裂变信号探测效率显著降低，不足20%。
- 不同状态下 $\alpha$ 抑制能力在1700~3000之间，PPAC探测裂变碎片效率：98%，符合测试 $\alpha$ 抑制比大于 $10^6$ 。



# Fission TPC

## 高精度裂变截面测量——裂变时间投影室 (Fission TPC)

- 专为裂变核参数设计的三维径迹重建探测器，超高精确度粒子甄别能力。
- 总通道数9216路，采样率50 MCPS，采样位数14位。
- 专用TPC超薄分区靶件，镀不均匀性达到8%左右。



更多详细信息，欢迎关注中物院二所郑普、李玲相关报告！



欢迎大家提出宝贵建议与疑问!

THANKS FOR VALUABLE SUGGESTIONS AND QUESTIONS!

任智洲 0816-2482138 zhizhouren@qq.com