



南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

基于副产品实验的碳中子全截面最新测量

肖友淳¹, 肖敏¹, 陈永浩^{2,3}, 黄文鑫¹, 易晗^{2,3}, 郑波¹, 程品晶¹, 栾鹏¹, 刘静¹, 冯松¹

1.南华大学核科学技术学院

2.中国科学院高能物理研究所

3.散裂中子源科学中心

中国·六安 2025年7月23-25日



✓ 2025年上半年束流申请：**氢的中子全截面测量与弹性散射截面实验技术探索。**

→ 氢的中子全截面测量与分析，详见7月24日“中子测量和应用”分会场报告：肖敏（报告人）

→ 中子弹性散射截面实验技术探索，详见7月24日“中子测量和应用”分会场报告：冯松（报告人）

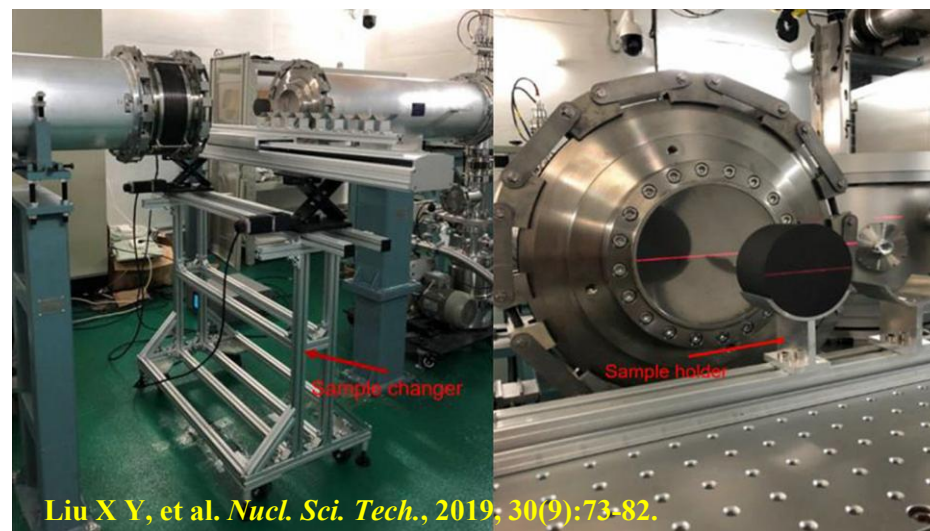
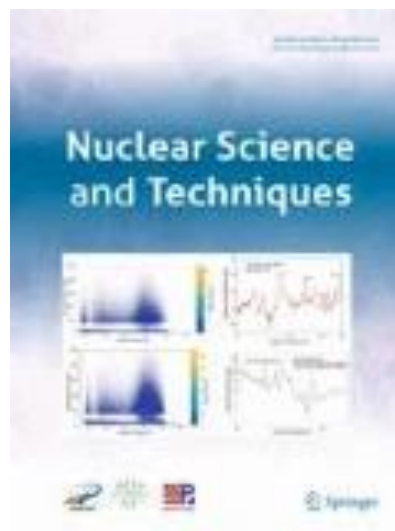
✓ 氢中子全截面实验采用**聚乙烯靶**与**碳靶**，以获得氢中子全截面数据。

✓ 空靶与碳靶的实验可获得碳中子全截面，其实验结果相对较多，且较为准确，可用来验证实验的可靠性。

✓ 基于Back-n实验装置的碳中子全截面数据已于**2019年发表于NST（封面文章）**。

✓ **碳的中子全截面在1 keV - 1.8 MeV能区可等效为碳的弹性散射截面，其为标准截面，因此，丰富该能区的碳中子全截面数据具有参考价值。**

样品靶	束流时间(h)
空靶(无束流)	9
空靶(在束)	36
碳靶(25 mm)	67
聚乙烯靶(3 mm)	56
聚乙烯靶(15 mm)	19

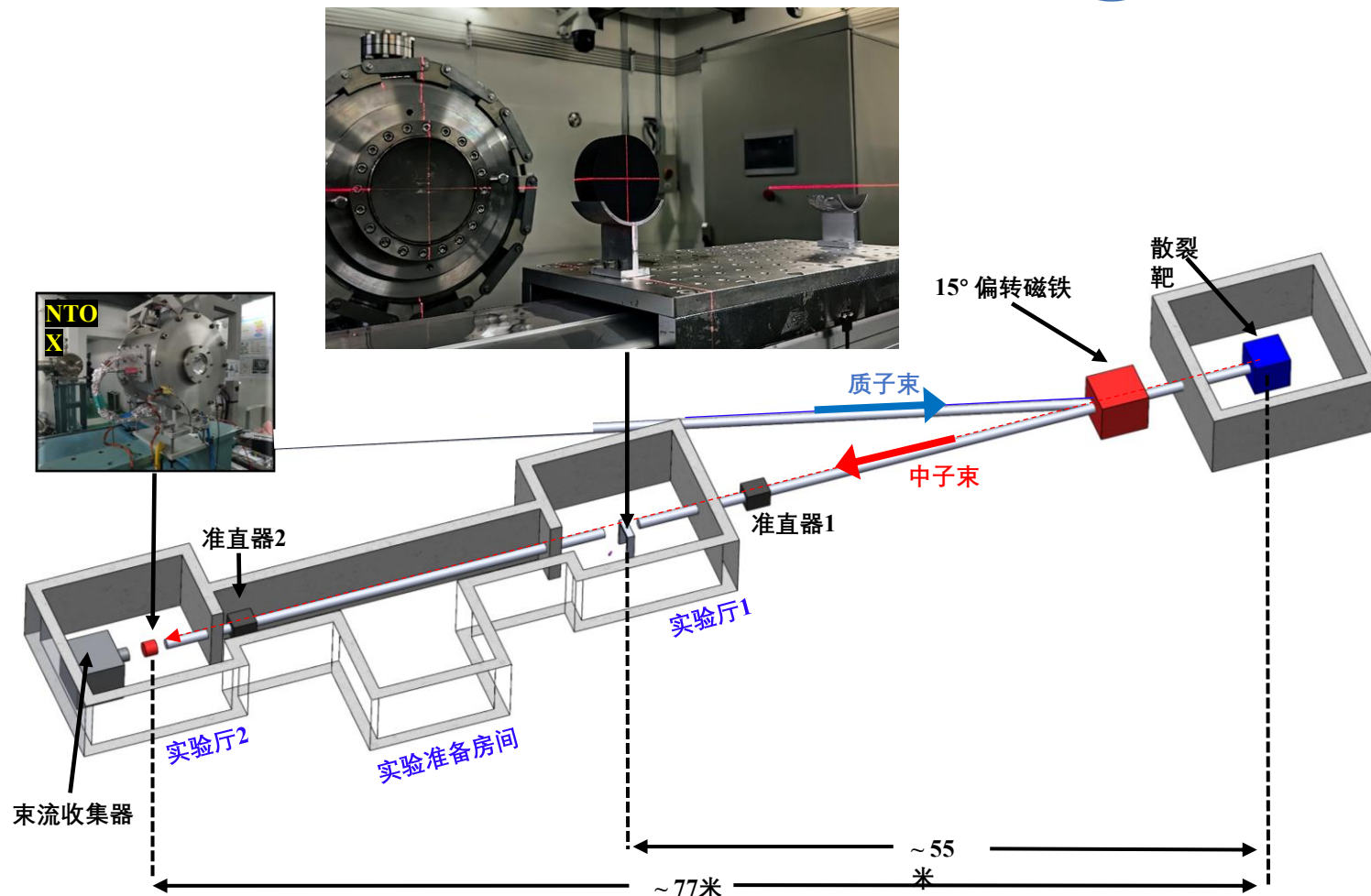


Liu X Y, et al. Nucl. Sci. Tech., 2019; 30(9):73-82.

➤ 实验时间：2025年4月

质子打靶功率：170 kW
 束团模式：双束团
 频率：25 Hz

样品靶	束流时间(h)
空靶(无束流)	9
空靶(在束)	36
碳靶(25 mm)	67
聚乙烯靶(3 mm)	56
聚乙烯靶(15 mm)	19



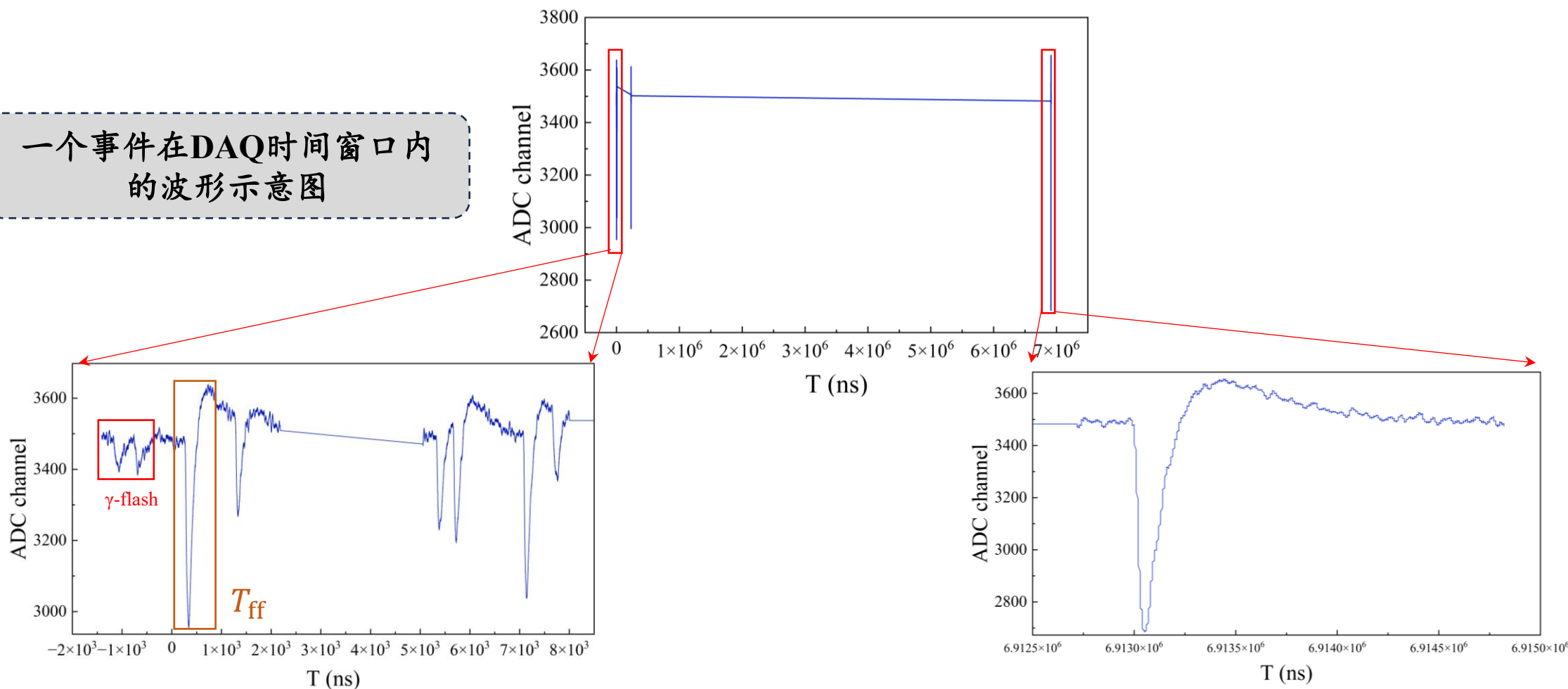
➤ 实验方法：透射法结合飞行时间法

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

脉冲时间与幅度信息提取:

- 对每个裂变单元的信号均进行单独的时间与幅度提取
- 质子打靶的瞬间，除了会产生中子，靶核退激还会产生高强度的能量为 $1 \sim 2\text{MeV}$ 的 γ 射线，称为 γ -Flash (GF)；
- 裂变室对 GF 有响应，因此可利用 GF 来标定中子飞行时间。

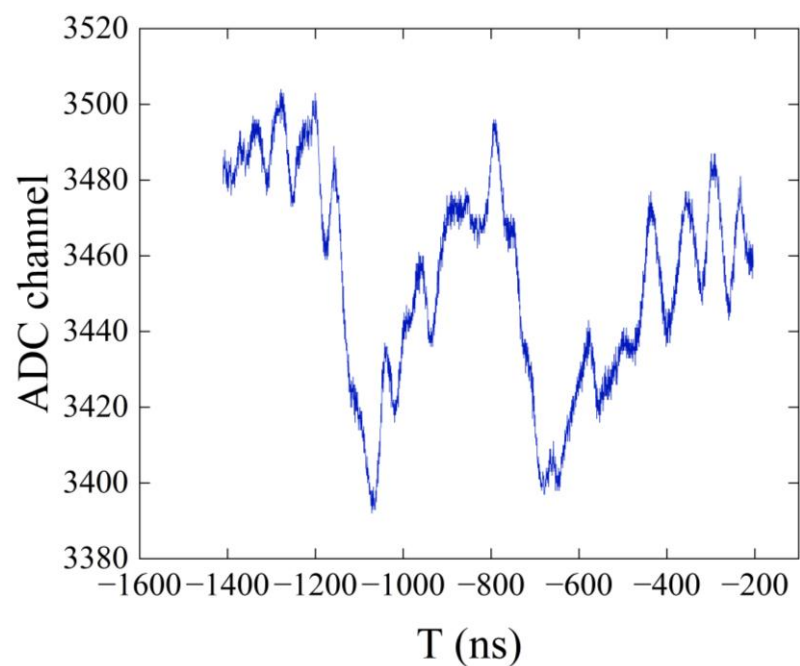
一个事件在DAQ时间窗口内的
波形示意图



□ 飞行时间定时:

- 选取多个小幅度的 γ -flash信号进行叠加，以有效抑制随机噪声，同时增强 γ -flash信号的特征

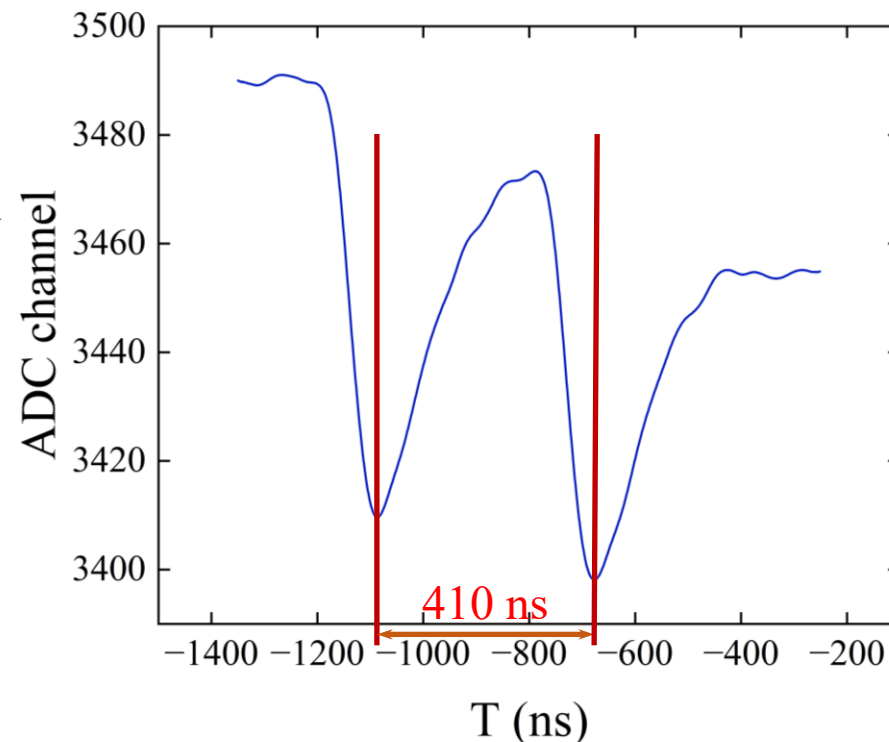
γ -flash信号受到噪声的干扰，导致其时间
(T_γ) 确定存在较大的不确定性



多个 γ 信号叠加处理

$$TOF_n = T_{ff} - T_0 = T_{ff} - (T_\gamma - ToF_\gamma)$$

多个信号叠加后平滑处理

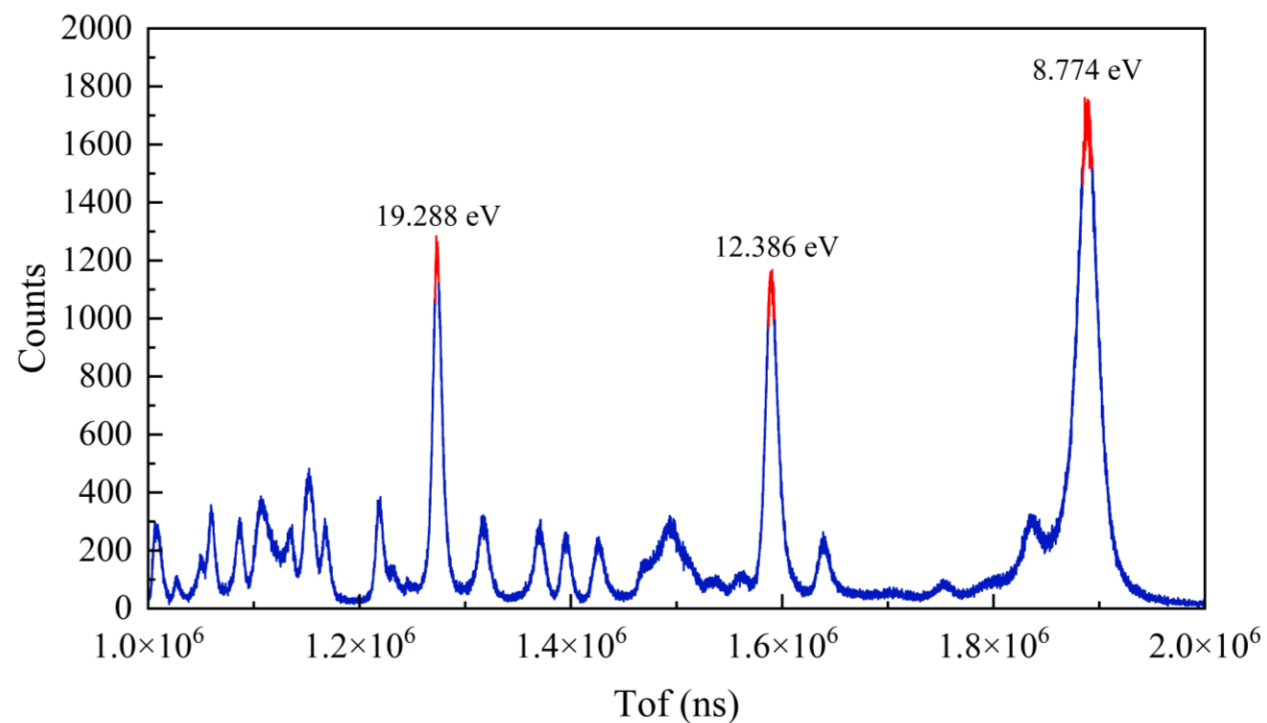
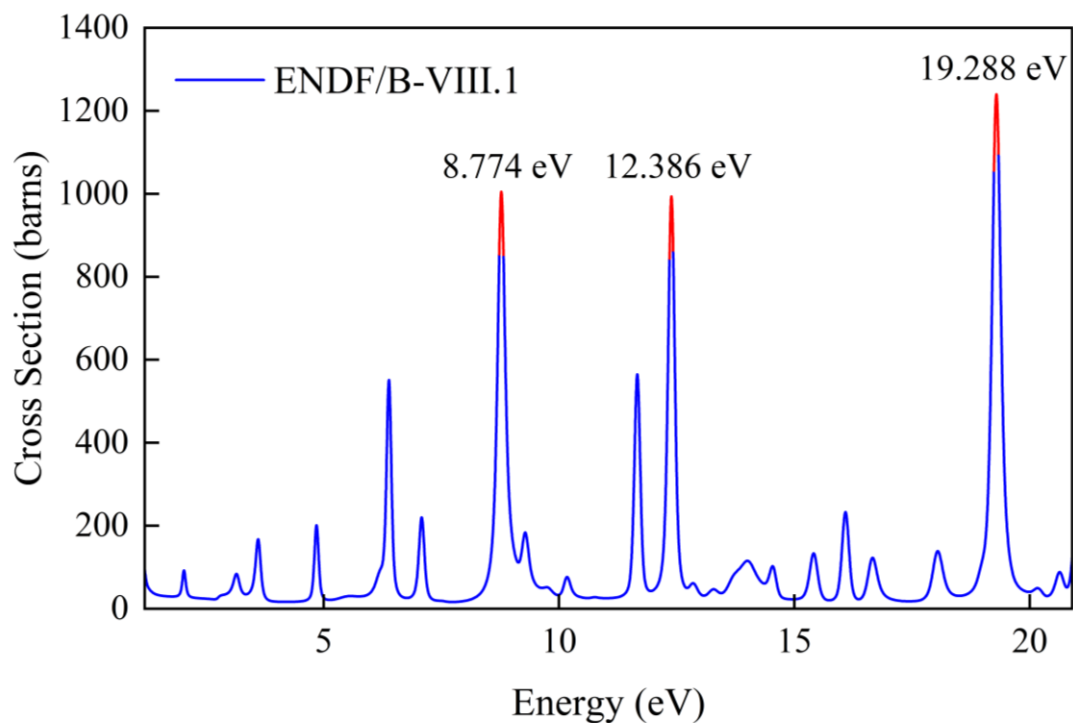


利用 ^{235}U 裂变片的共振峰标定飞行距离

- ENDF/B-VIII.1数据库中1-20 eV能区 $^{235}\text{U}(n, f)$ 反应截面，该截面数据反映了 ^{235}U 在这一能区的共振吸收特征，可用于刻度实验测量的中子能量

$$T_{ff} - T_{gamma} = \frac{L}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{En}{m_n c^2} + 1\right)^2}}} - 1 \right]$$

Fission	^{235}U -1	^{235}U -2	^{235}U -3	^{235}U -4
L/m	77.45526	77.47288	77.48815	77.50434

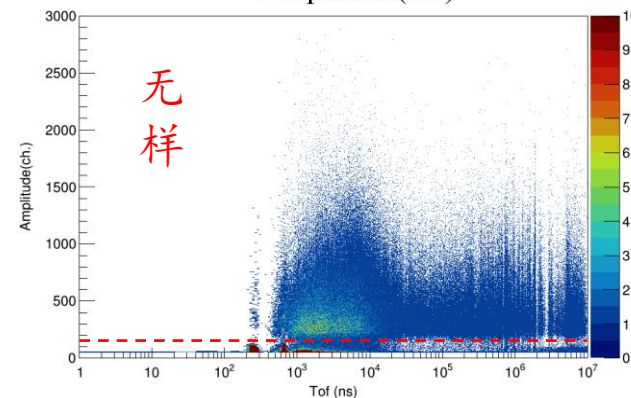
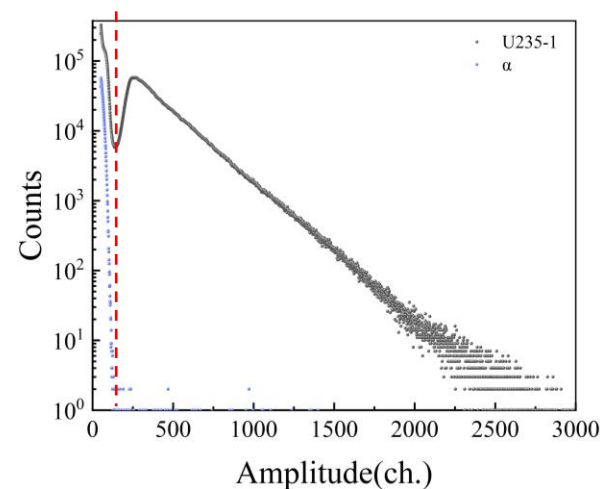
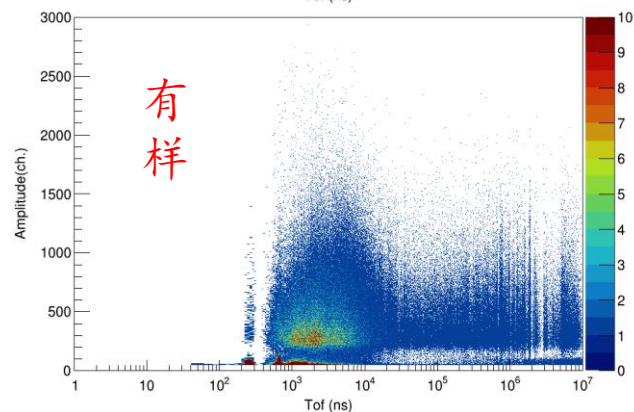
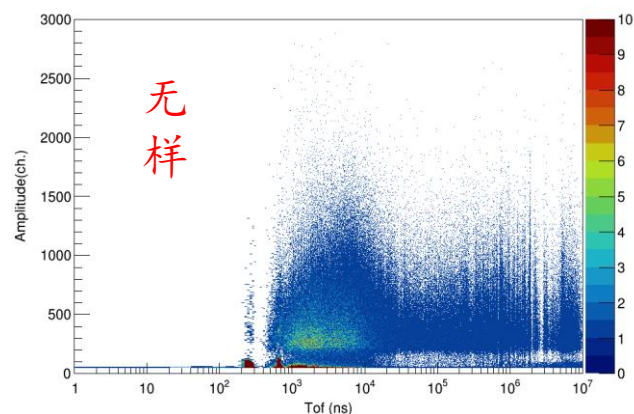


□ 实验本底的扣除

- 实验本底信号影响数据准确性，需详细分析并有效扣除。本底噪声主要包括：电子噪声、 α 本底信号以及环境中子本底信号。

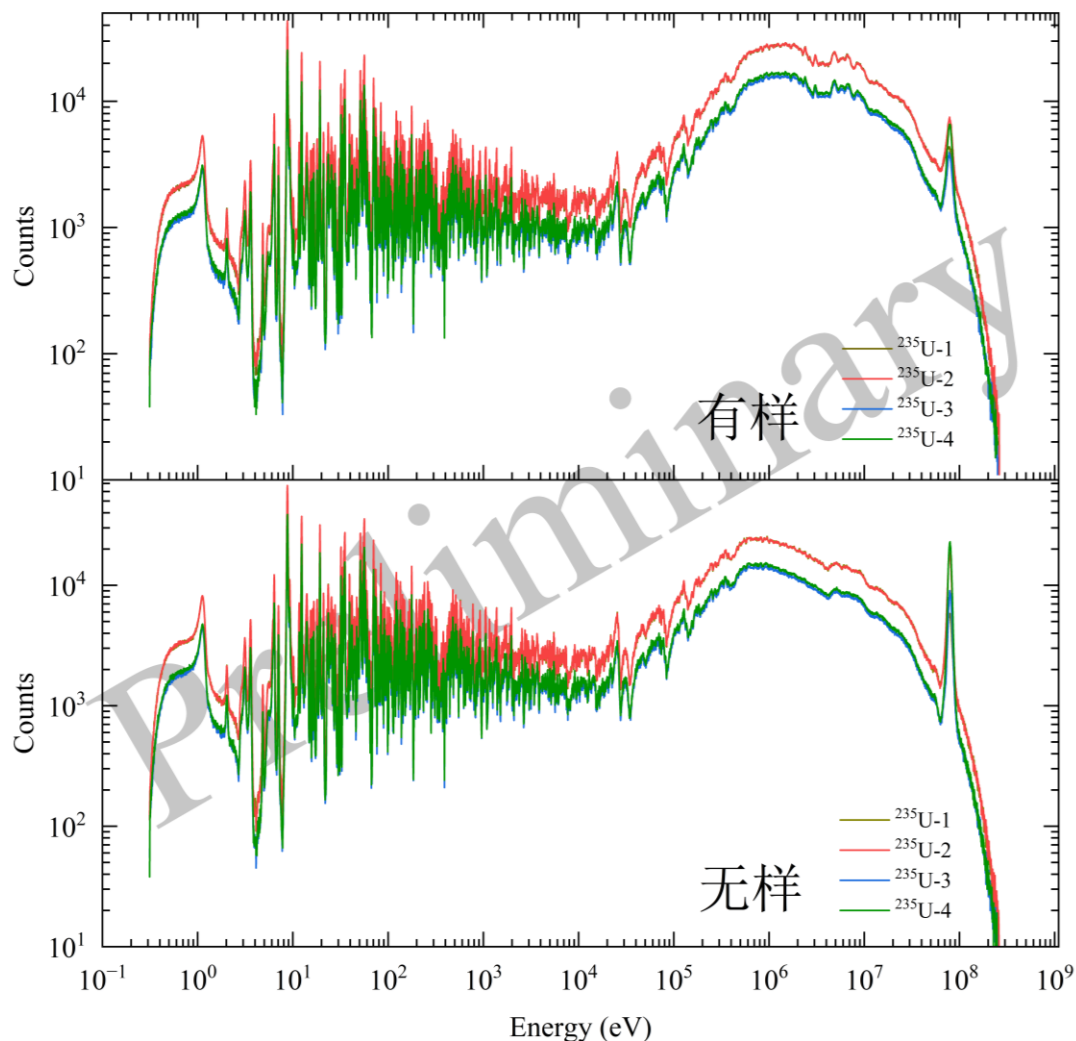
· 统计所有信号的时间与幅度信息，得到无样和有样时间-幅度二维谱；

· 对实验本底扣除，选择甄别阈值，将小幅度的本底信号与大幅度的裂变信号区分开。

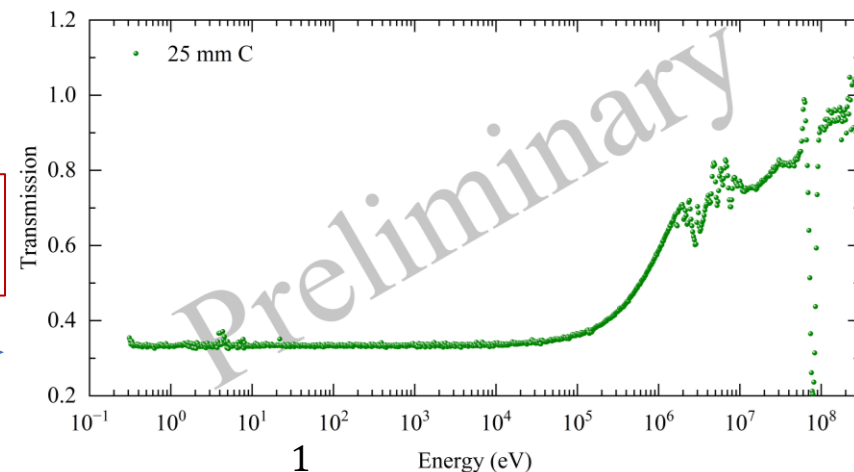


利用计数谱求截面

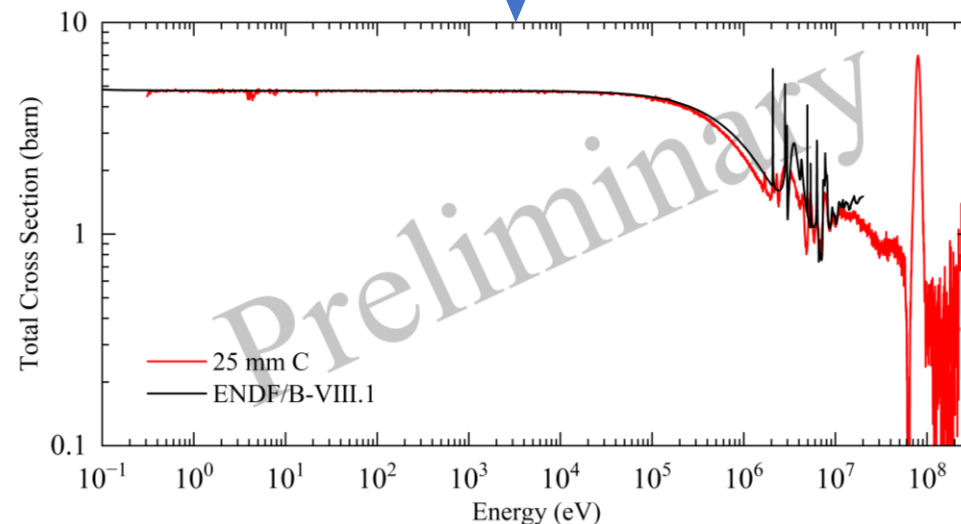
- 对幅度超过阈值的裂变信号进行统计。结合确定的中子飞行时间 (TOF_n) 和飞行距离 (L), 即可得到探测器记录的中子计数随能量 (E_n) 的分布关系, 并利用打靶质子束进行归一, 获得归一化计数求出透射率。



$$T(E_i) = \frac{(N_i(E_i) - B_i(E_i)) / P_i}{(N_o(E_i) - B_o(E_i)) / P_o}$$

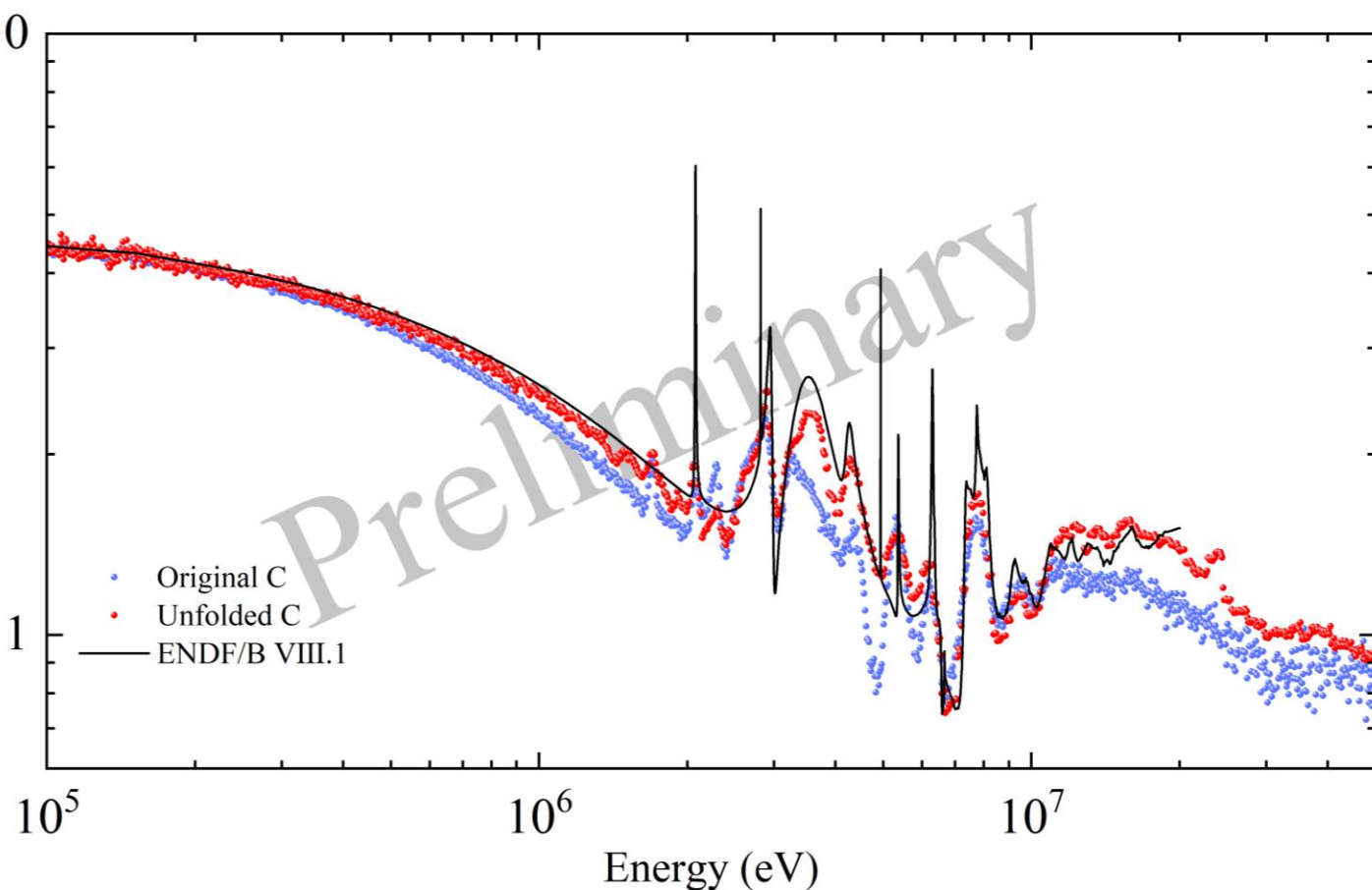
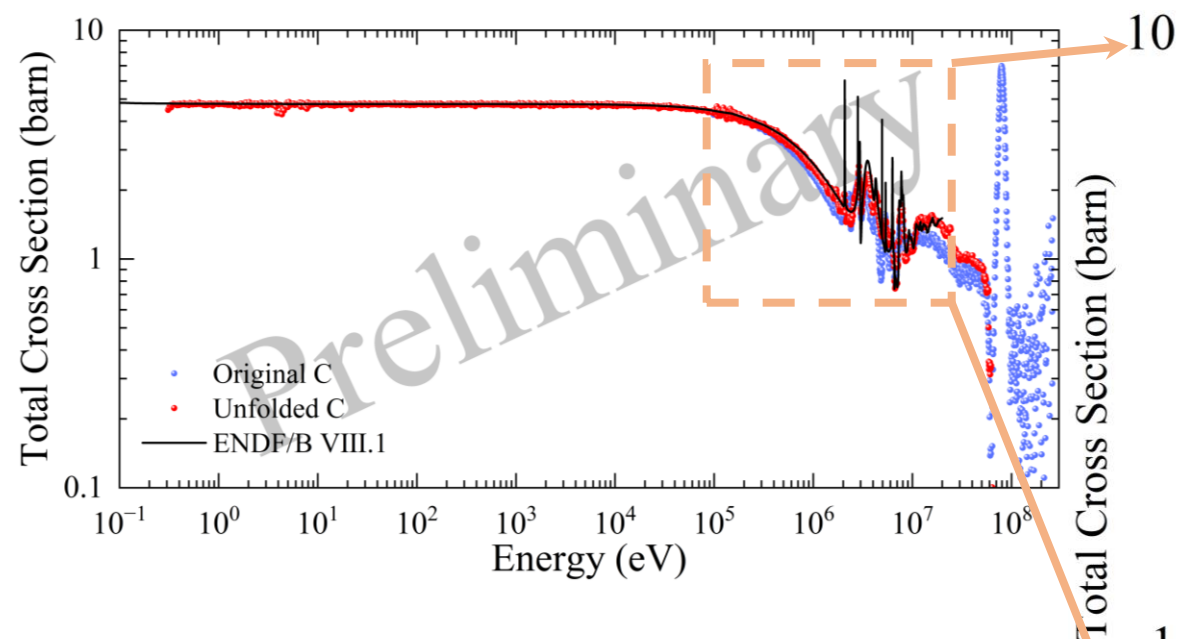


$$\sigma_{tot} = -\frac{1}{nd} \ln T$$



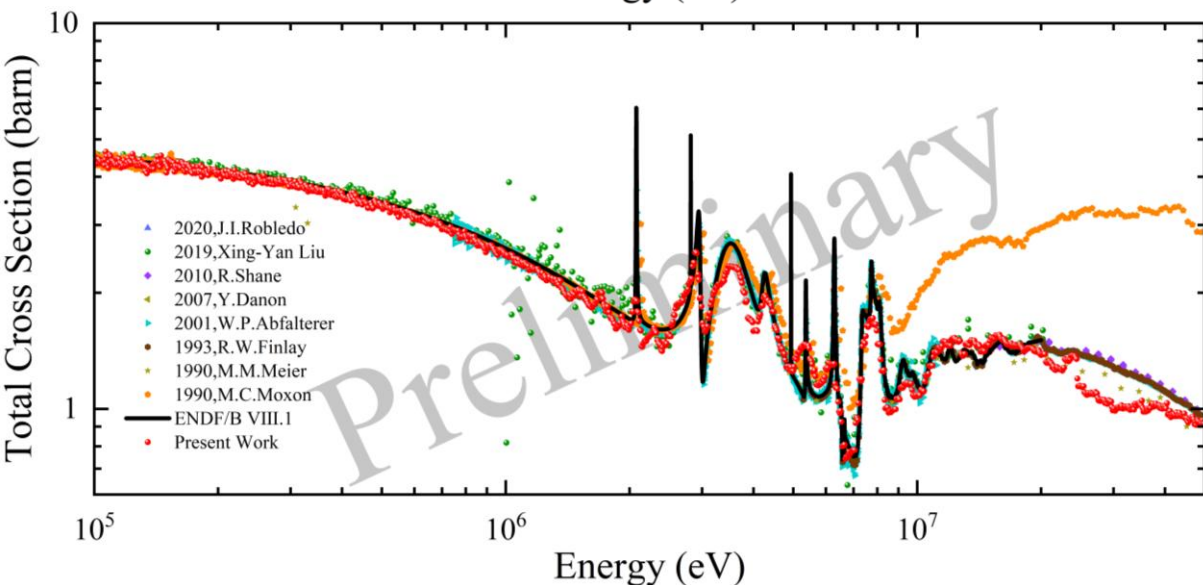
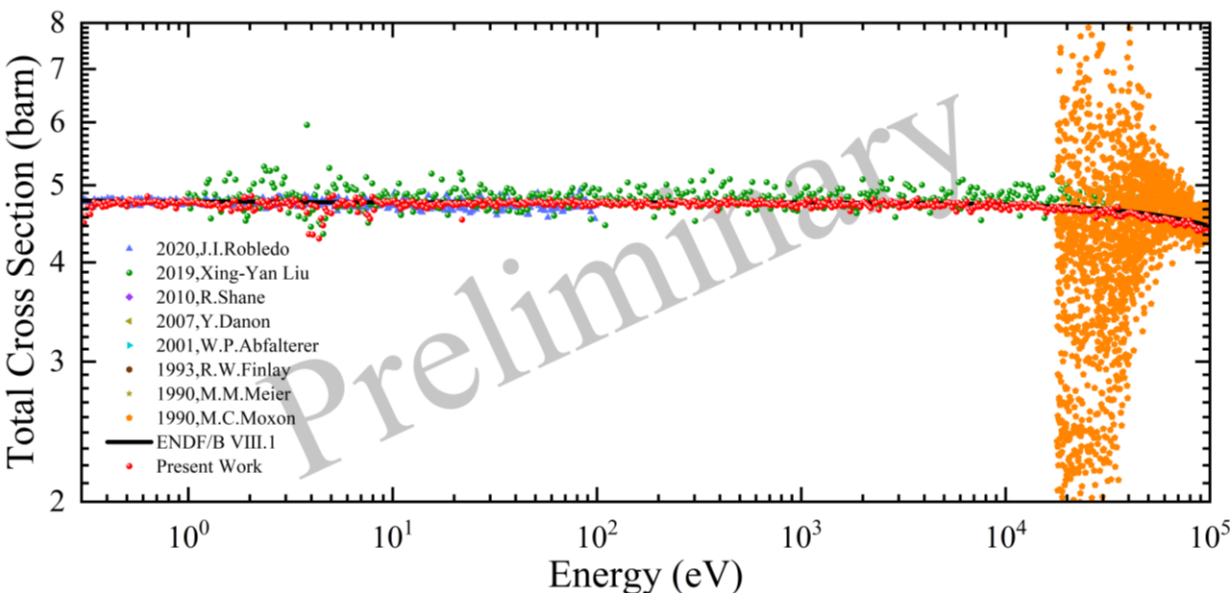
□ 双束团解谱

- 双束团效应导致第二个束团产生的高能中子与第一个束团产生的低能中子同时到达探测器，在时间上无法区分，造成飞行时间谱（TOF谱）与能量谱的重叠。这会对高能中子计数引入偏差，影响反应截面数据的准确性。



解谱后的数据与解谱前相比差异显著，且更接近评价数据库ENDF/B-VIII.1。碳在低能区无共振结构，截面近似为常数。为确保数据精度，低能区采用每数量级**100 bin**的分bin方式以控制不确定度。对于能量高于100 keV的能区，则采用每数量级**500 bin**的分bin方式并结合解谱处理，以解析更多的共振结构信息。

□ 实验数据对比



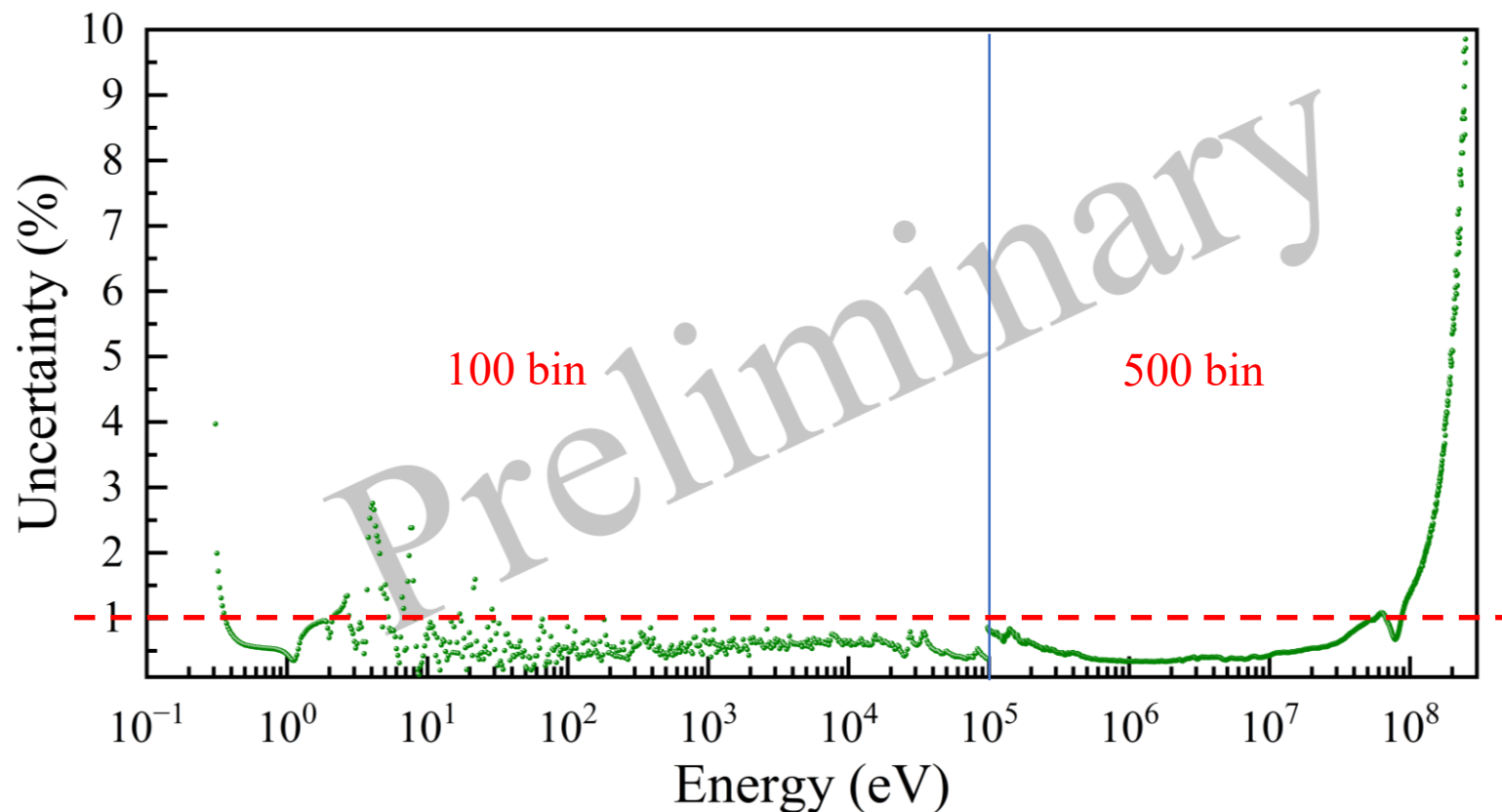
通过与评价数据库以及EXFOR上的实验数据对比，在 $0.3 \text{ eV} \sim 100 \text{ keV}$ 能区的数据与评价数据库吻合度很好，这为后续获取氢低能区中子全截面提供了很好的数据支持

$100 \text{ keV} \sim 50 \text{ MeV}$ 能区初步解谱结果与评价数据库、EXFOR实验数据较吻合，但仍有一定偏差。后续可对解谱过程优化以缩小误差

□ 不确定度分析

统计不确定度

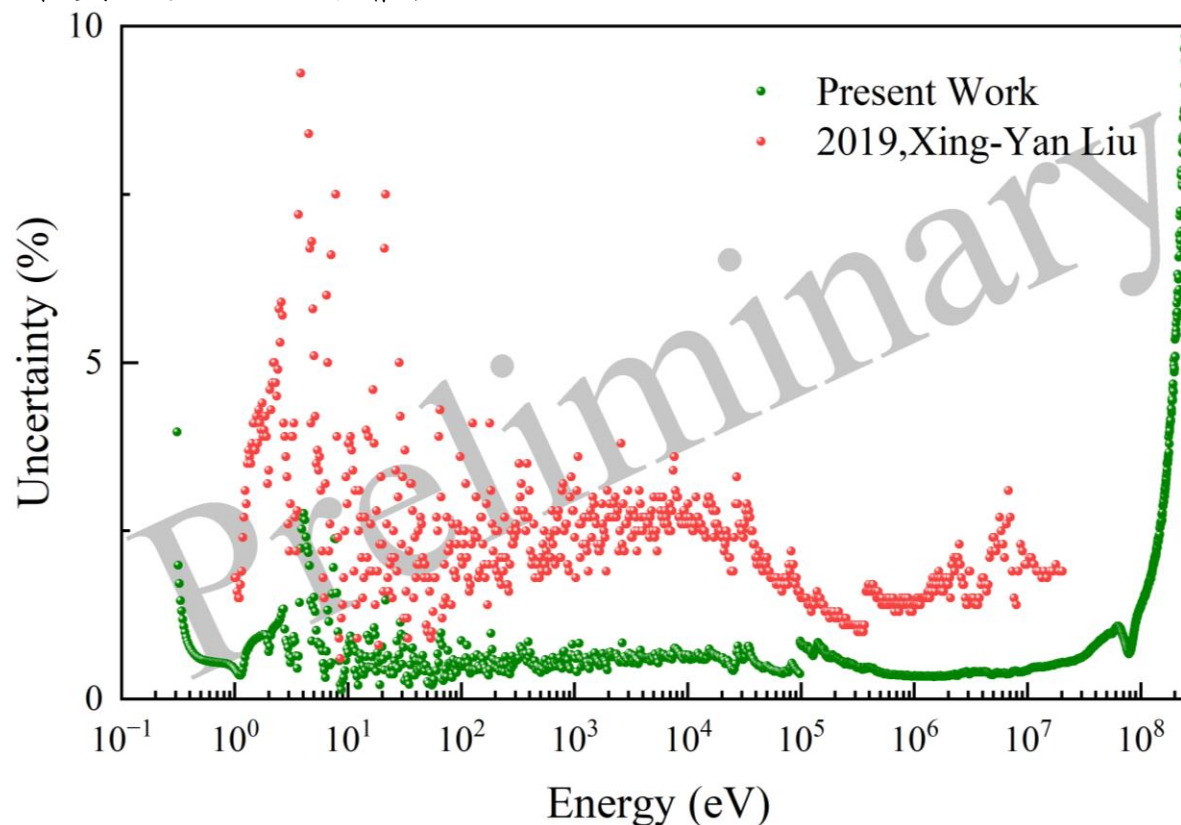
$$\sigma_{err} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$



从整体来看，由于实验照射时间较长，有**85.8%**的数据点统计不确定度控制在1%以内。这表明实验数据在主要能区内具有较高的统计精度。

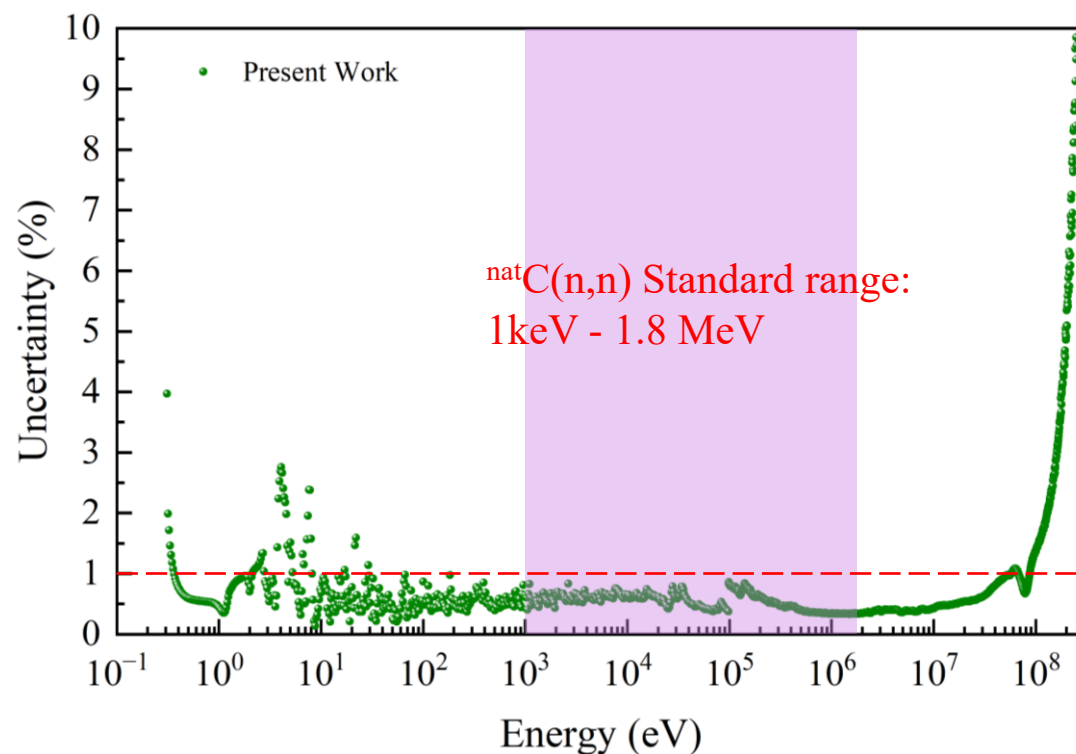
□ 不确定度分析

由于无法获取刘星言等人的原始数据，本实验基于EXFOR数据库中相关实验的相对不确定度数据进行了对比分析，以间接验证本实验数据的可靠性。



本实验在低能区（0.3 eV – 100 keV）获得的碳中子全截面数据具有较小的统计不确定度，这主要得益于较长的测量时间积累和较高的束流功率输入，其精度满足后续聚乙烯与碳截面扣除的要求，为氢中子全截面的测量提供了关键且可信的数据支撑。

- ✓ 通过延长测量时间与增加束流功率，在0.3 eV ~ 100 keV范围内获得高吻合度、高精度的碳全截面数据，这些数据，为我们最终准确获取聚乙烯截面数据奠定了坚实基础，是本次实验的关键成果之一。同时也为氢截面计算提供可靠的数据支持；
- ✓ 在1 keV ~ 1.8 MeV区间碳弹性散射截面等效为全截面（标准截面），丰富了该能区的碳中子全截面数据；
- ✓ 实验数据后续可优化解谱过程，提供更高能区的数据。





南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

Thanks for your attention!

