



南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

天然鐳中子全截面測量與數據再評價

黃文鑫¹, 張澤¹, 陳永浩^{3,4}, 肖友淳¹, 薛潔明⁵, 王記民⁶, 李鑫祥^{1,2}, 劉靜¹, 唐詩琦¹, 栾鵬¹, 樊瑞睿^{3,4}, 程品晶^{1,2},
陶璐燕¹, 鄧存志¹, 陳奕熙¹, 王孟艷¹, 袁世青¹, 韓思佳¹, 黃浩軒¹, 鄭波^{1,2}, 馮松^{1,2,†}, 肖敏^{1,2,†}

1. 南華大學 核科學技術學院
2. 南華大學 先進核能技術設計與安全教育部重點實驗室
3. 中國科學院 高能物理研究所
4. 中國科學院 散裂中子源科學中心
5. 中國原子能科學研究院 核數據重點實驗室
6. 中國原子能科學研究院 中國核數據中心



目录



01

研究背景及意义

02

实验内容

03

测量结果

04

实验数据再评价

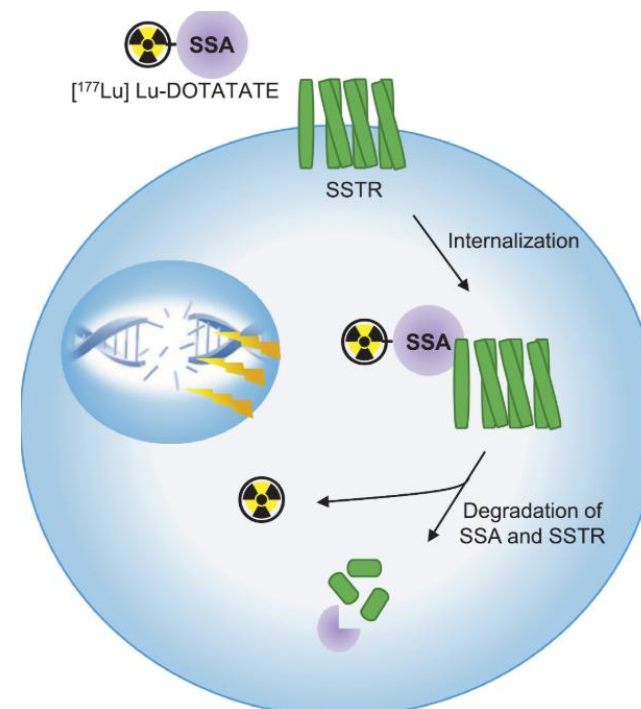
05

小 结

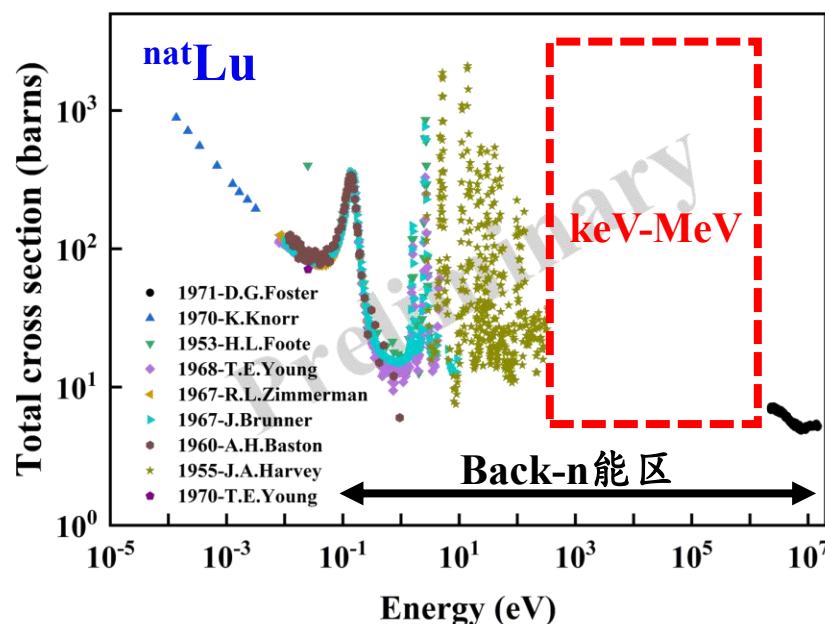
- 在基础物理方面， ^{176}Lu 及其衰变产物 ^{176}Hf 都是纯 s 过程起源的核素，研究镨的中子反应截面对于理解天体核合成 s 过程，尤其是 Yb 和 Hf 的元素丰度，具有重要意义；
- 在核技术应用方面， ^{177}Lu 是肿瘤 RNT 药物中最常用的 β^- 衰变治疗型核素，基于反应堆和加速器优化生产 ^{177}Lu 依赖于相关中子核数据，而这些核数据的评价都依赖于高精度的中子全截面。

^{173}Ta 3.14 h ϵ :100%	^{174}Ta 1.14 h ϵ :100%	^{175}Ta 10.5 h ϵ :100%	^{176}Ta 8.09 h ϵ :100%	^{177}Ta 56.6 h ϵ :100%	^{178}Ta 9.31 min ϵ :100%	^{179}Ta 1.82 yr ϵ :100%	^{180}Ta 8.15 h ϵ :100%	^{181}Ta STABLE 99.99%
^{172}Hf 1.87 yr ϵ :100%	^{173}Hf 23.6 h ϵ :100%	^{174}Hf 2.0×10^5 yr ϵ :100%	^{175}Hf 70 d ϵ :100%	^{176}Hf STABLE 5.26%	^{177}Hf STABLE 18.60%	^{178}Hf STABLE 27.28%	^{179}Hf STABLE 13.62%	^{180}Hf STABLE 35.08%
^{171}Lu 8.24 d ϵ :100%	^{172}Lu 6.70 d ϵ :100%	^{173}Lu 1.37 yr ϵ :100%	^{174}Lu 3.31 yr ϵ :100%	^{175}Lu STABLE ϵ :100%	^{176}Lu 3.8×10^{10} yr 2.60% β^- :100%	^{177}Lu 6.65 d β^- :100%	^{178}Lu 28.4 min β^- :100%	^{179}Lu 4.59 h β^- :100%
^{170}Yb STABLE 2.98%	^{171}Yb STABLE 14.09%	^{172}Yb STABLE 21.68%	^{173}Yb STABLE 16.10%	^{174}Yb STABLE 32.03%	^{175}Yb 4.19 d β^- :100%	^{176}Yb STABLE 2.98%	^{177}Yb 1.19 h β^- :100%	^{178}Yb 74 min β^- :100%
^{169}Tm STABLE 100%	^{170}Tm 128.6 d ϵ :0.1% β^- :99.9%	^{171}Tm 1.92 yr β^- :100%	^{172}Tm 63.6 h β^- :100%	^{173}Tm 8.24 h β^- :100%	^{174}Tm 5.4 min β^- :100%	^{175}Tm 15.2 min β^- :100%	^{176}Tm 1.9 min β^- :100%	^{177}Tm 90 s β^- :100%

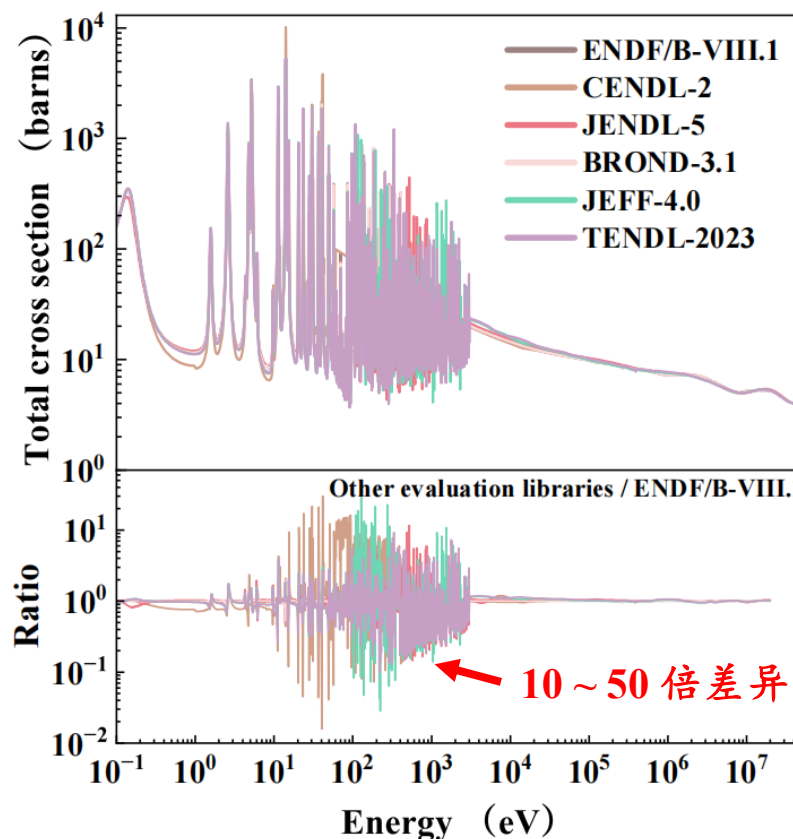
- (p,xn)
- (p,x α)
- β -decay



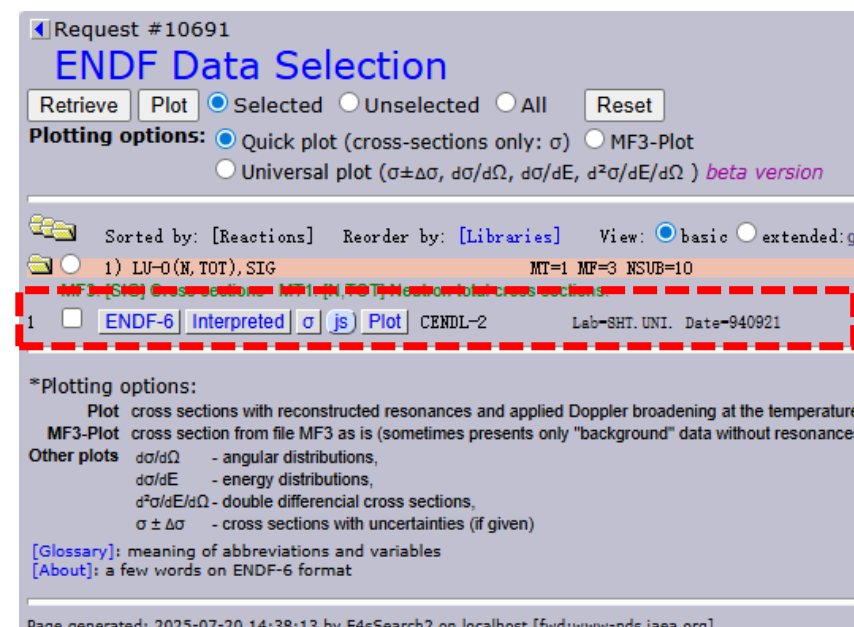
- EXFOR中 ^{nat}Lu 中子全截面实验数据较少，覆盖能区有限；
- 评价方面，不同主流评价数据库中的 ^{175}Lu 和 ^{176}Lu 中子全截面存在较大差异；
- ^{nat}Lu 中子全截面评价数据只有 CENDL-2，且在 CENDL-3.2 中没有镱相关的中子全截面评价数据。



EXFOR实验数据对比



天然镱同位素加权后的评价数据库对比



天然镱的评价数据库现状

实验时间：2025 年 4 月（80 h束流）

模式：双束团模式 质子打靶功率：
170 kW

频率：25 Hz 中子能区：
0.3 eV-200 MeV

束团宽度：70 ns 两束团间隔：
410 ns

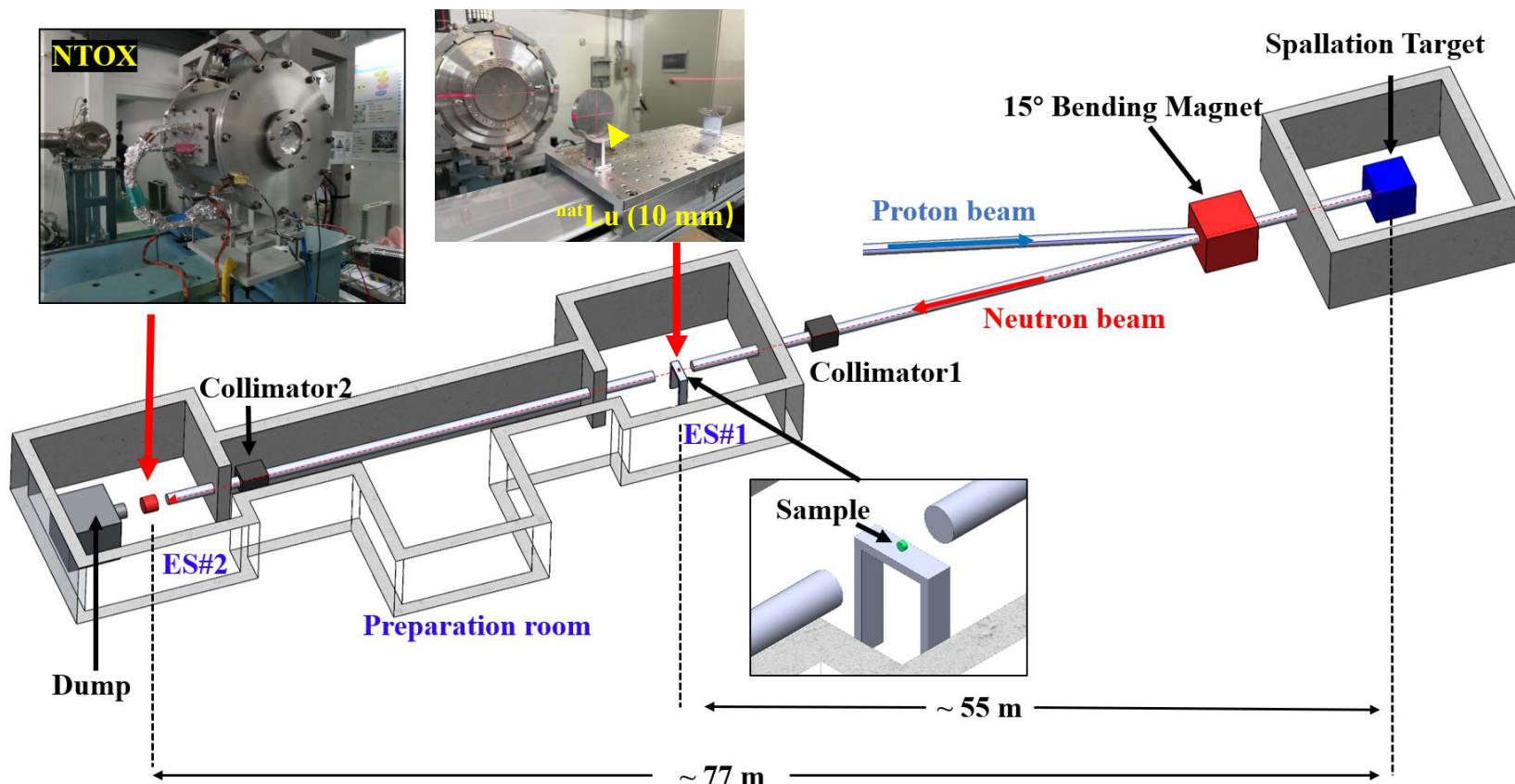
探测裂变片

^{235}U -1 (厚)

^{235}U -9 (厚)

^{235}U -4 (薄)

^{235}U -5 (薄)



束斑尺寸	样品	实验时间
$\Phi 50 \times 50 \times 40 \text{ mm}$	无	32 h
$\Phi 50 \times 50 \times 40 \text{ mm}$	10 mm $^{\text{nat}}\text{Lu}$	48 h

透射法

$$d\Phi(E) = -\Phi(E) \times N \times \sigma_{total} dx$$

$$\downarrow$$

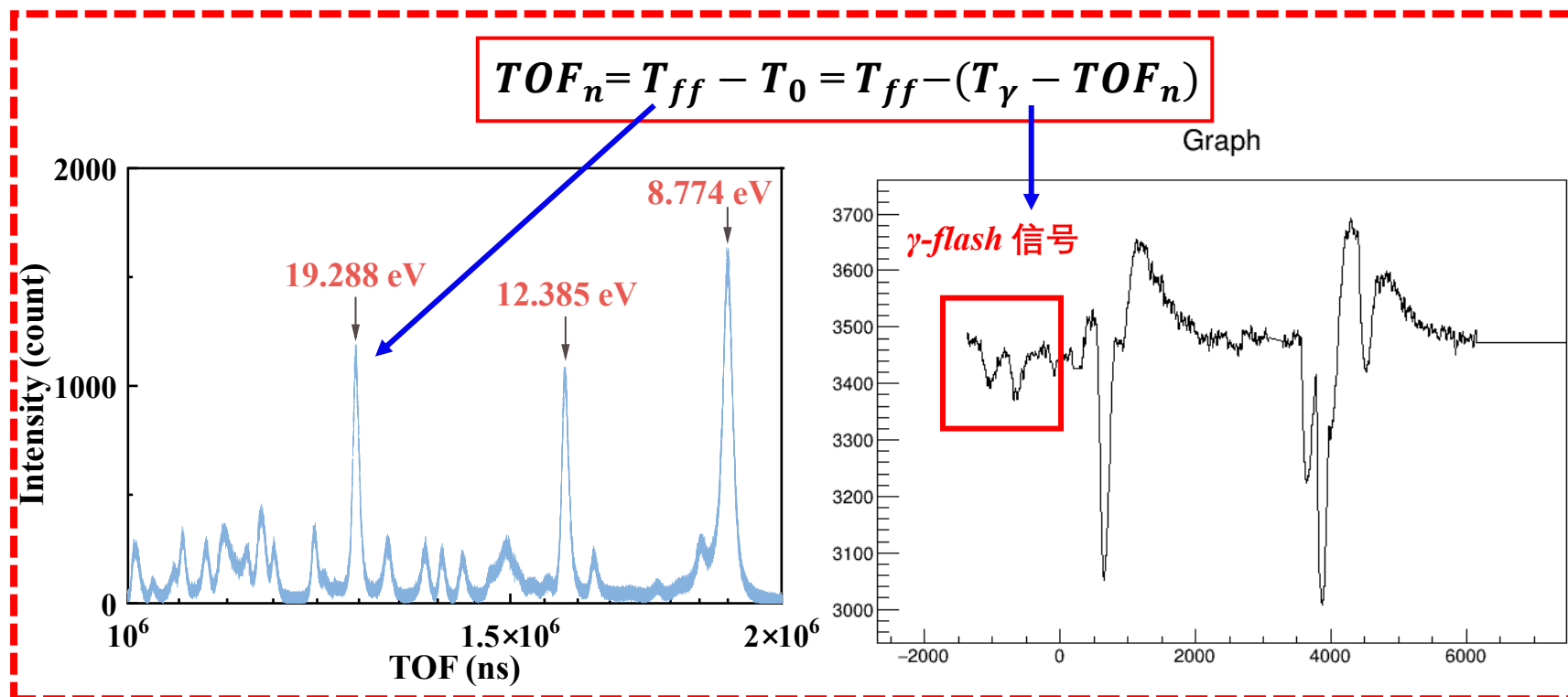
$$T(E_i) = \frac{[N_I(E_i) - B_I(E_i)]/P_I}{[N_0(E_i) - B_0(E_i)]/P_0} = e^{-Nd \cdot \sigma_{total}}$$

$$\Rightarrow \sigma_{total} = \frac{-\ln(T(E))}{N \cdot d}$$

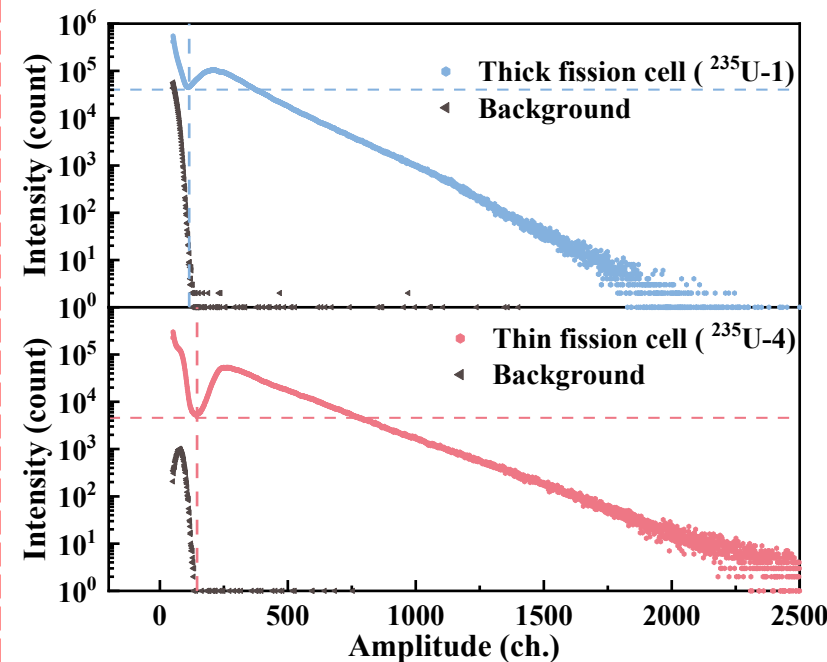
中子飞行时间法

$$E = m_n c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{TOF_n \cdot c} \right)^2}} - 1 \right]$$

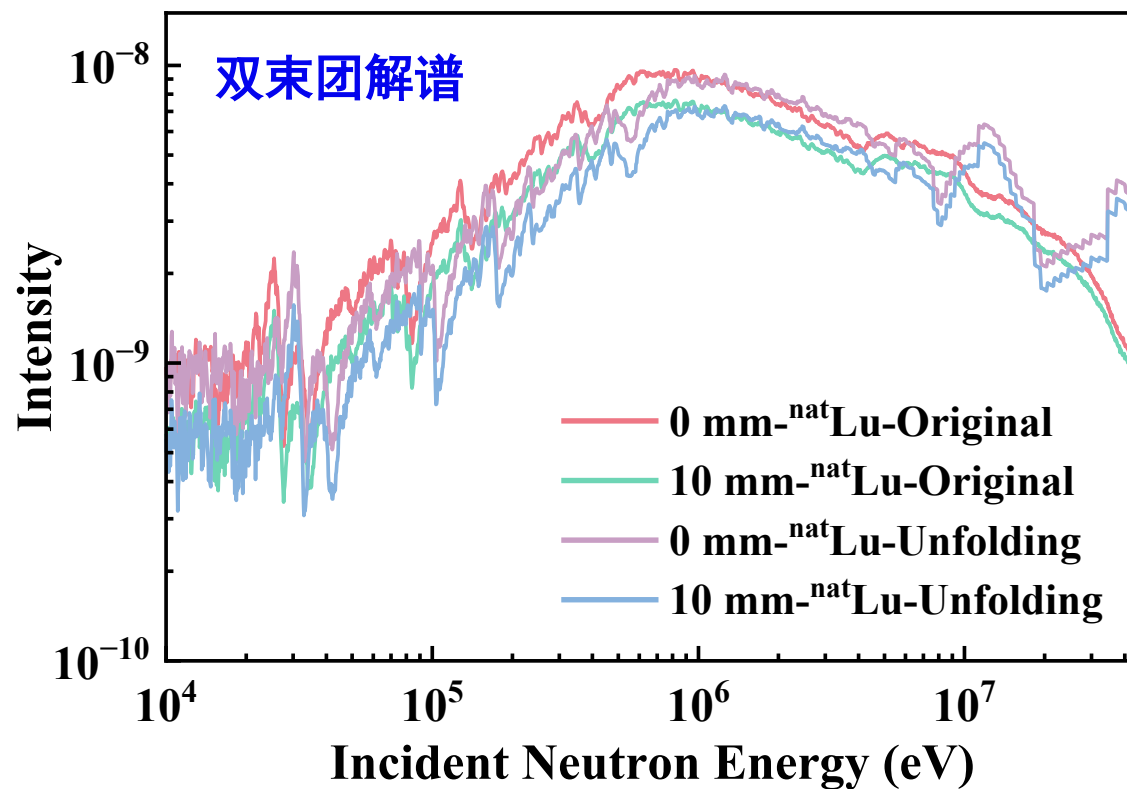
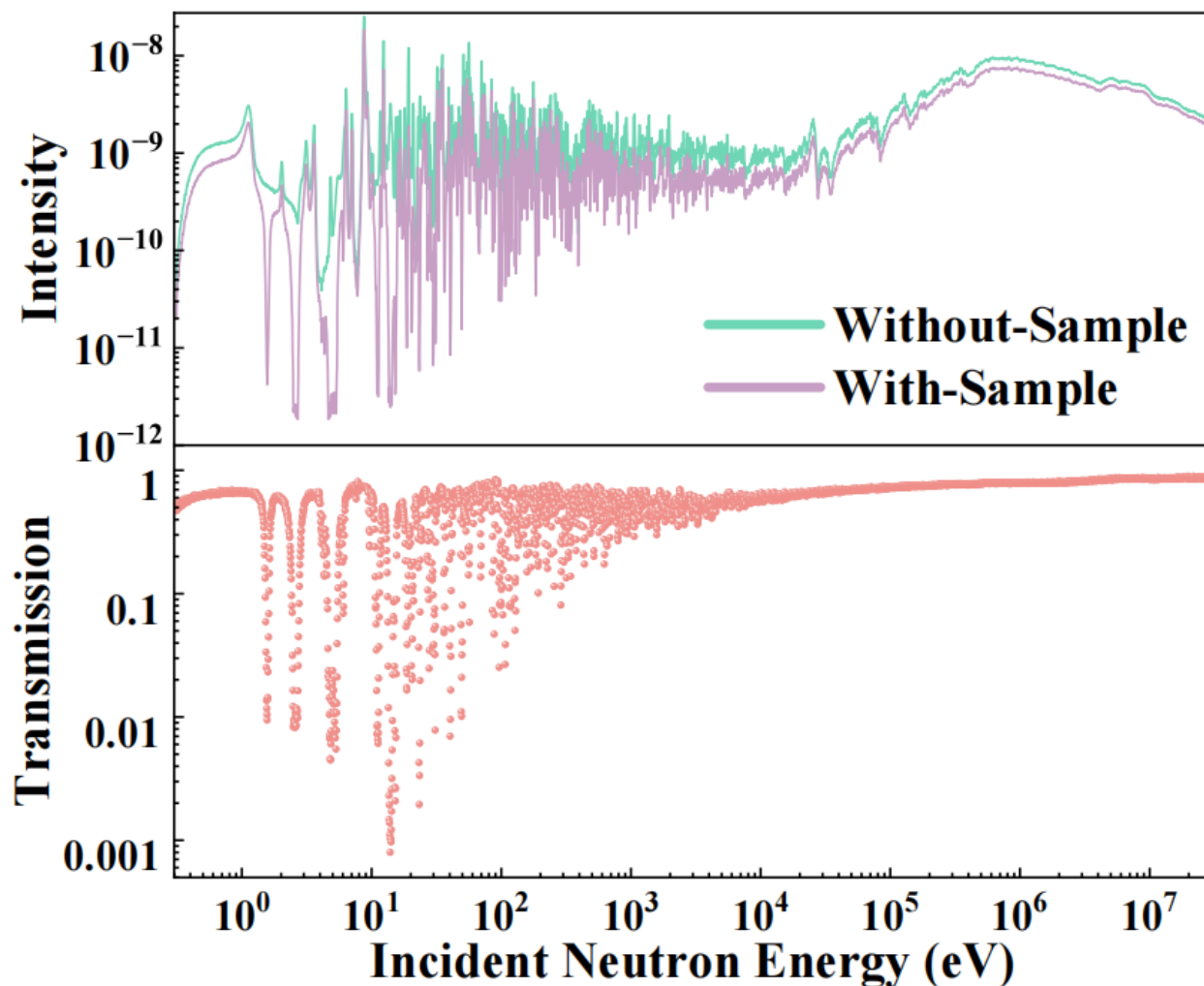
◆ 利用 γ -flash 和裂变信号确定中子飞行时间



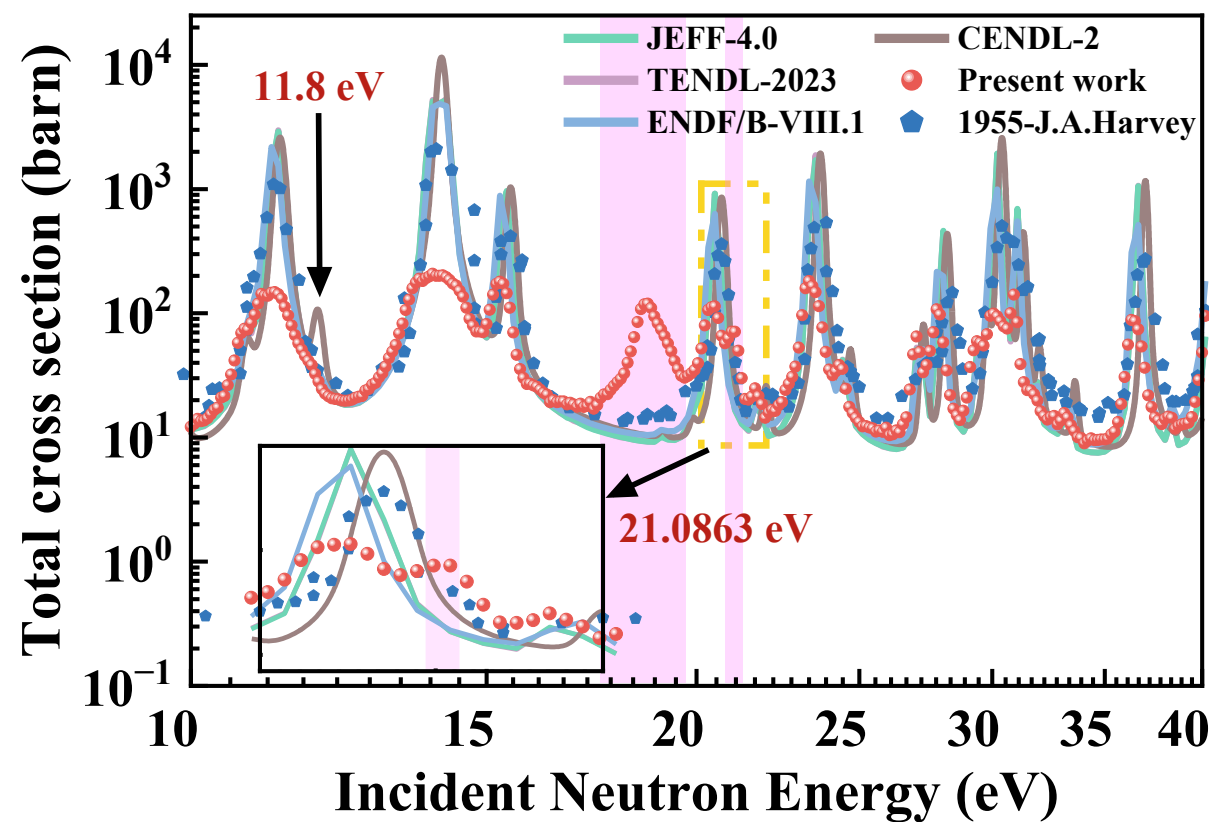
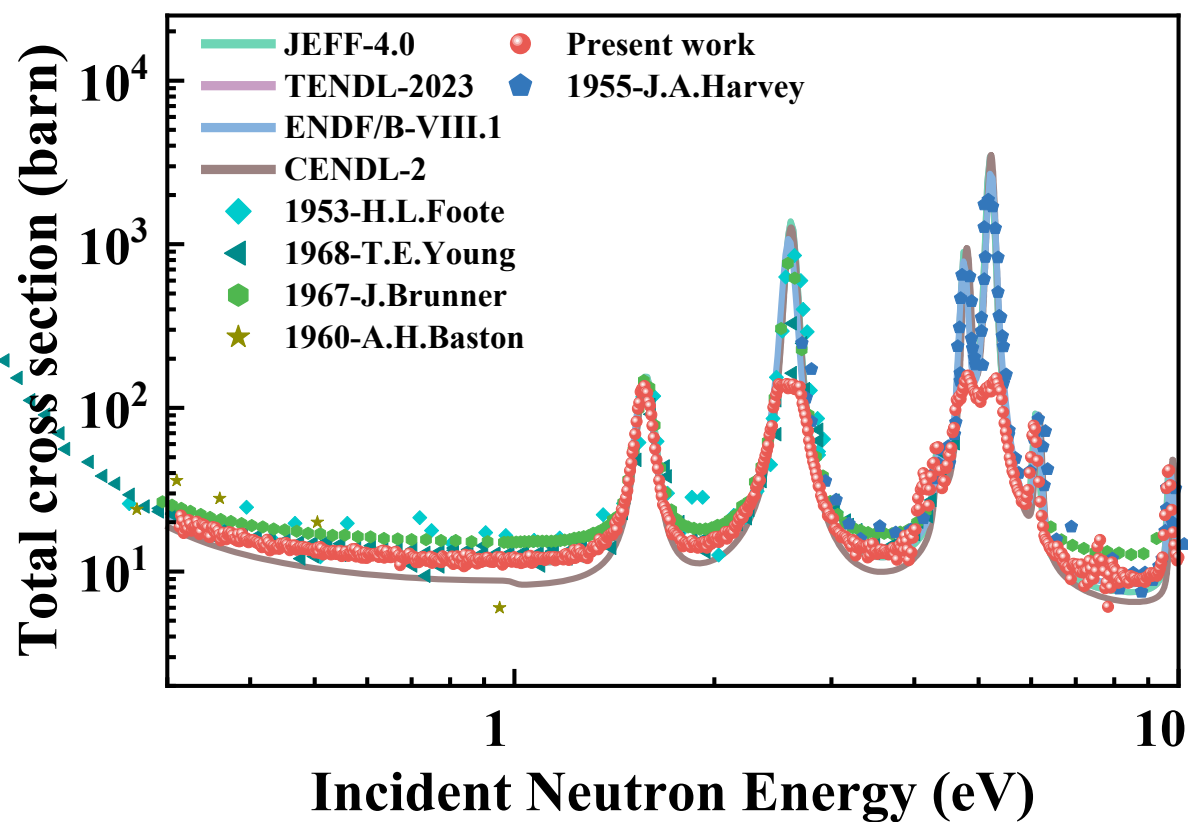
◆ 通过设置阈值扣除实验本底



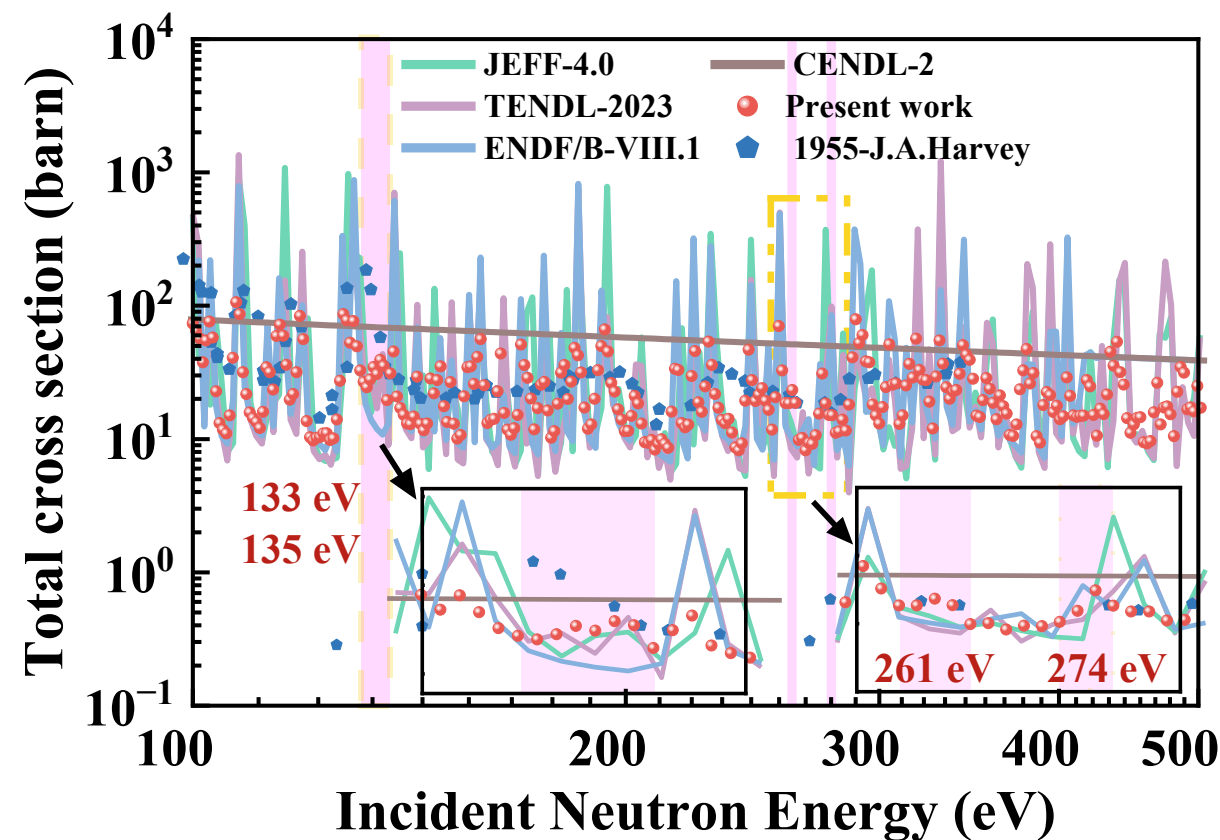
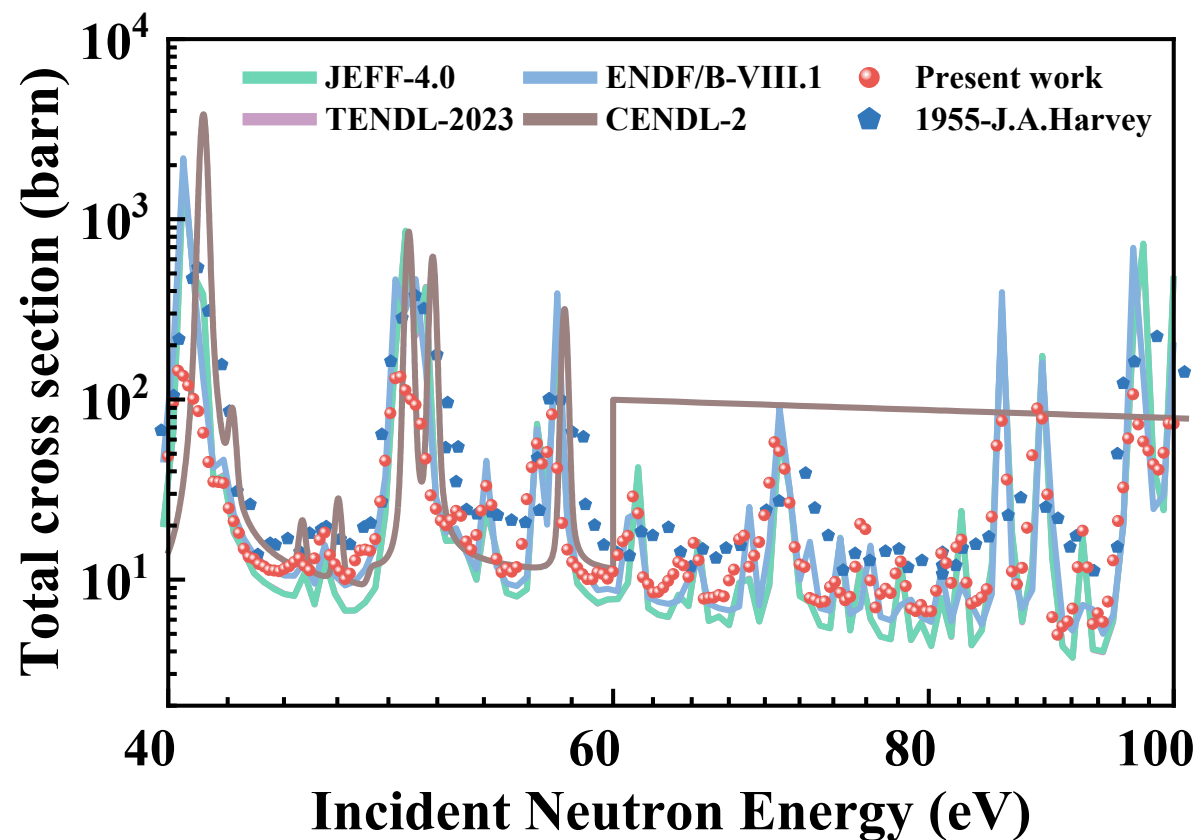
- 统计裂变碎片甄别阈值以上的裂变计数，并分别将U-235的四个通道计数叠加；
- 对10 keV以上的裂变计数率谱数据开展双束团解谱。
- 再利用打靶质子束进行归一，获得归一化中子计数率谱进而得到相应透射率；



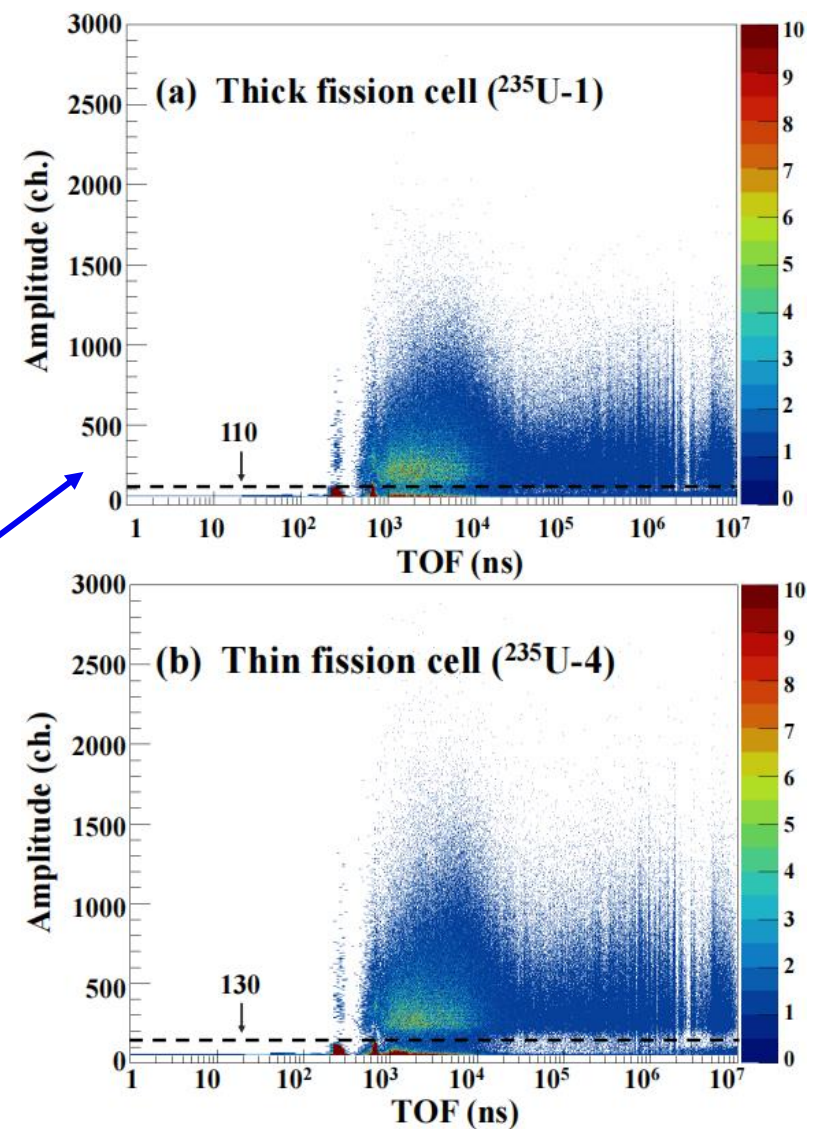
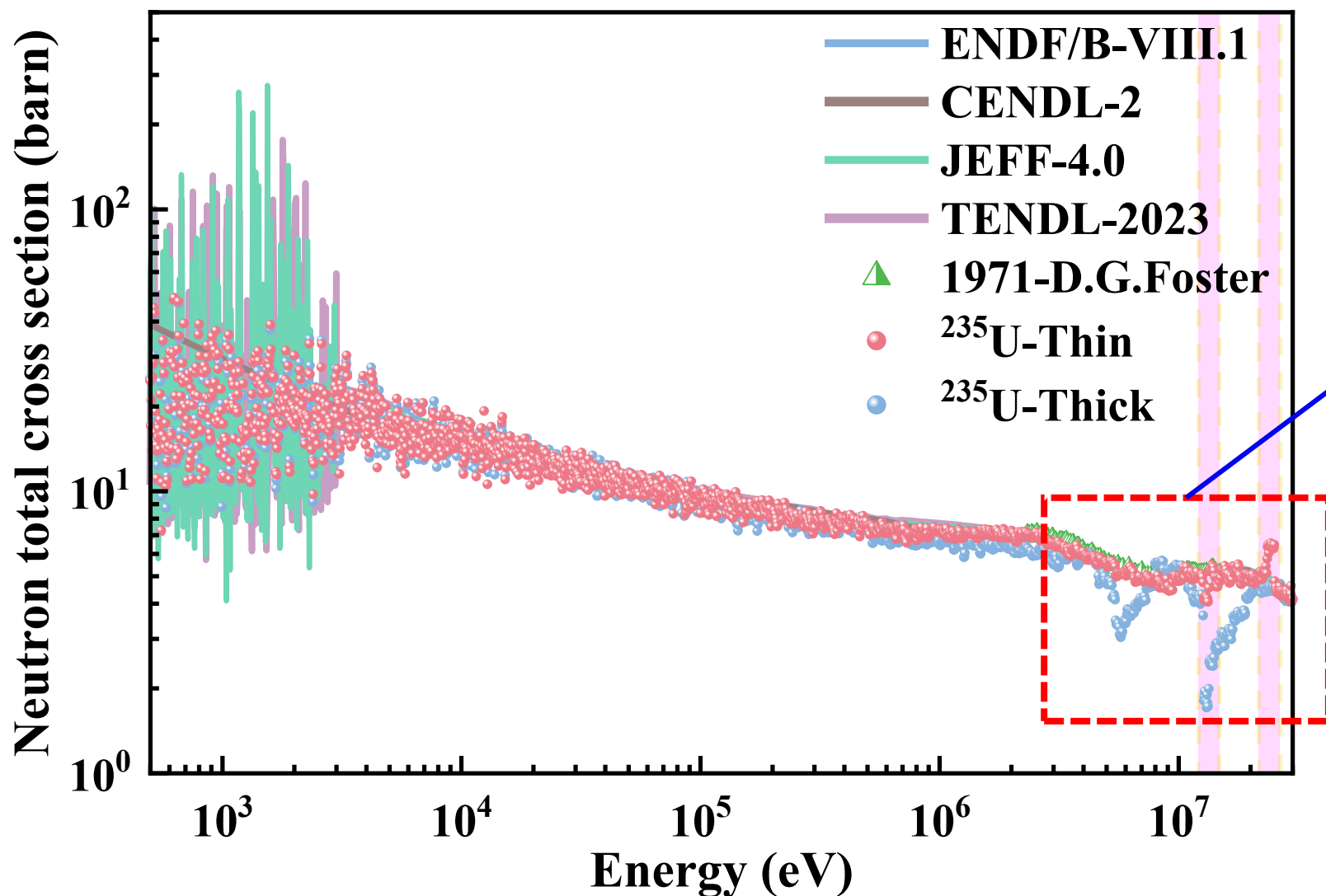
- 通过透射率计算得到中子全截面，并与EXFOR实验数据、ENDF/B-VIII.1等主要评价数据库进行对比；
- 由于样品厚度较厚，部分共振峰存在**饱和**现象；
- 实验数据与评价数据在 **11.8、21.08 eV** 处存在差异，在 **18.6 eV**处测量得到一个非常明显的**新共振峰**。



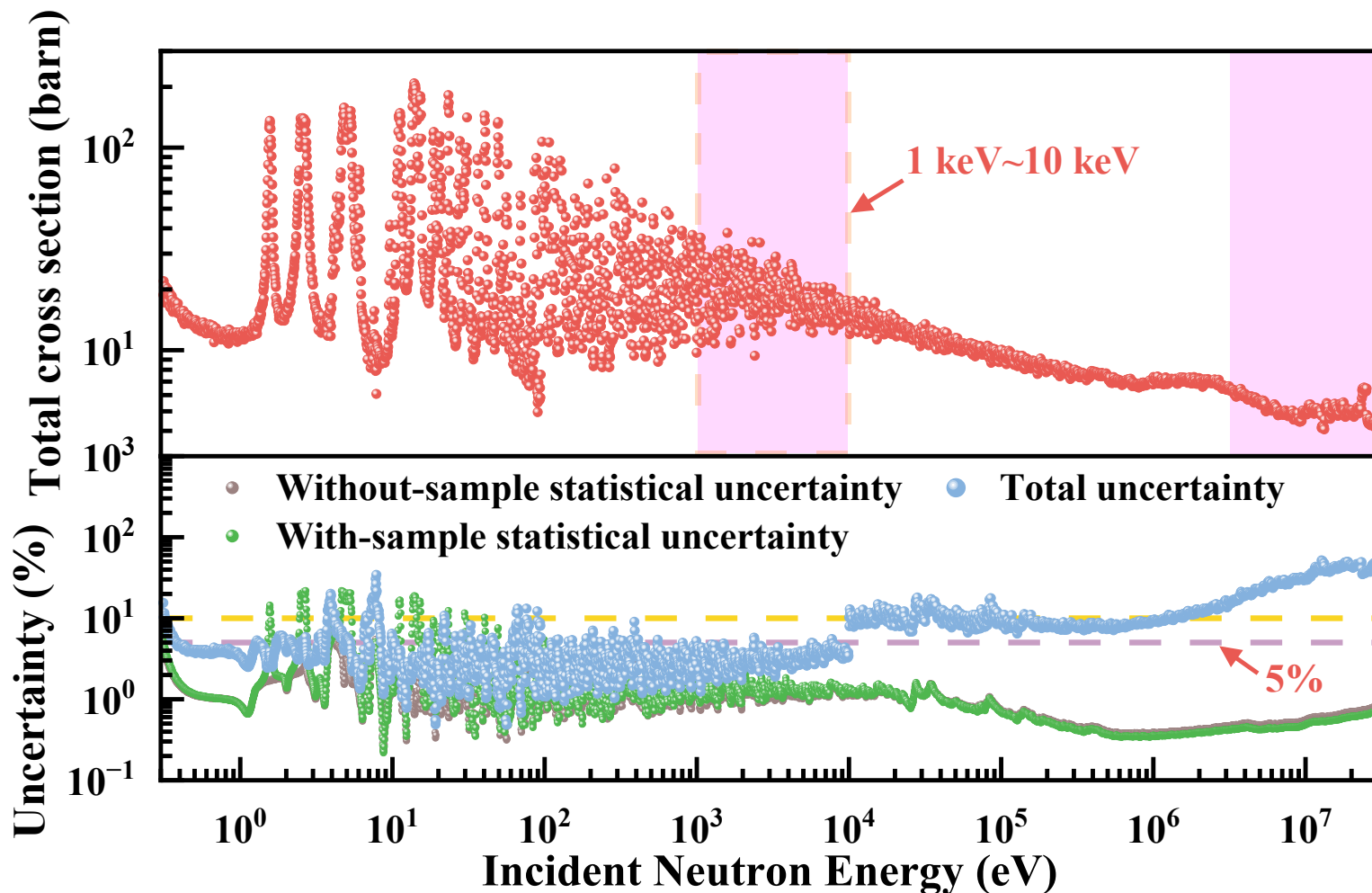
- 133、135 eV处的共振结构与ENDF/B-VIII.1存在差异，但与JEFF-4.0和TENDL-2023比较相似；
- 261 eV处测量得到的共振结构与各评价数据存在差异，274 eV处的共振结构与JEFF-4.0比较相似。



- 通过对两种厚度的U-235裂变片测量结果进行比较，发现两者解谱后的测量结果在**高能区存在差异**；
- 时间幅度二维谱显示厚裂变片的裂变信号与本底信号存在串扰。

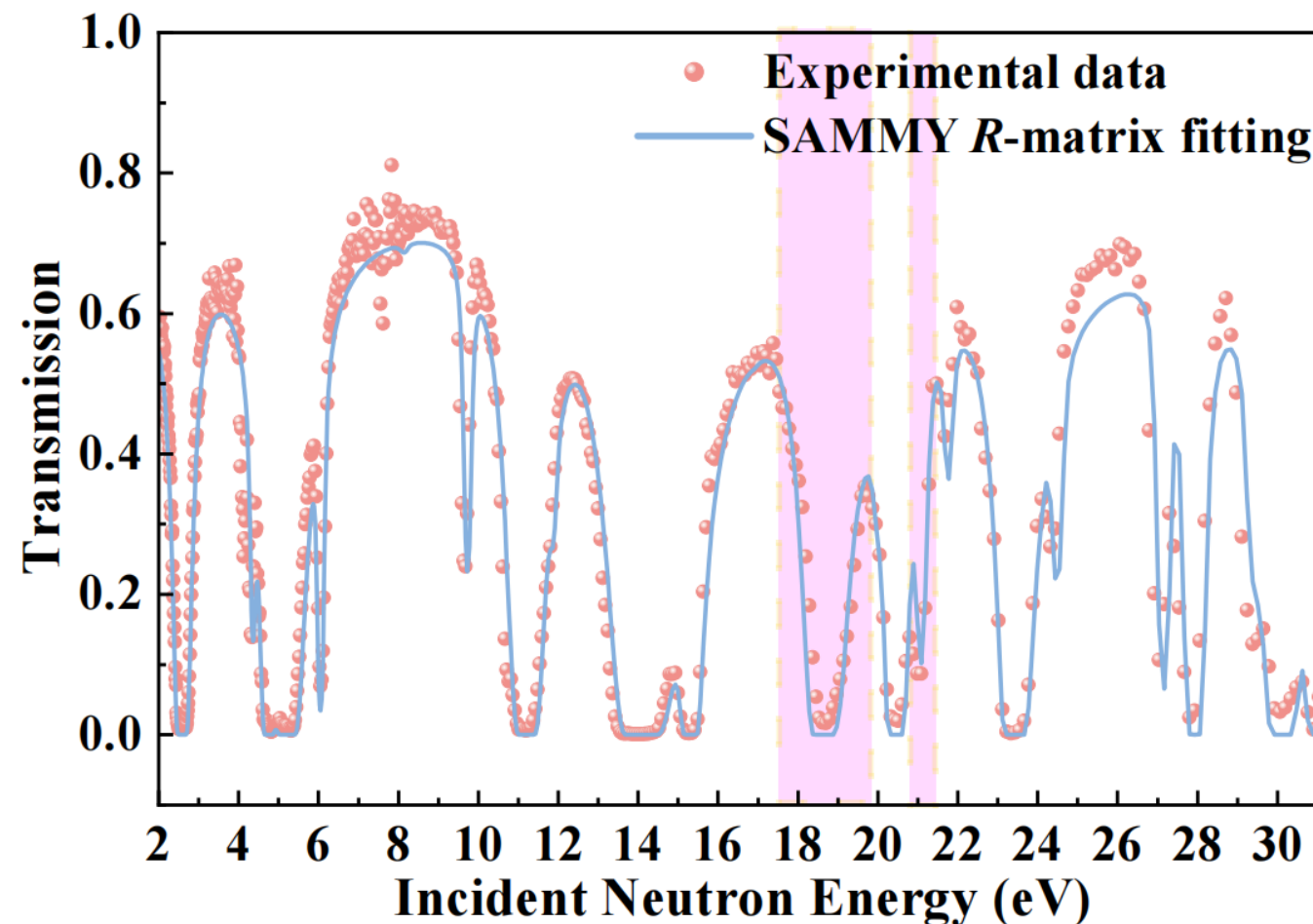


- 获得 **0.3 eV - 30 MeV**之间的天然镭中子全截面数据，其中 4 MeV 之后仅展示薄裂变单元测量的结果；
- 可分辨共振能区 (RRR) 的评价数据建议**达到 10 keV**；
- 同步开展了不确定度分析，结果显示85%的数据点统计不确定度**低于3%**，绝大部分数据点的总不确定度**低于5%**。





- 基于 SAMMY 开展了在 2 eV 至 32 eV 能量之间的共振拟合分析;
- 在 18.6 eV 处新测量得到的共振峰进行了共振参数提取。

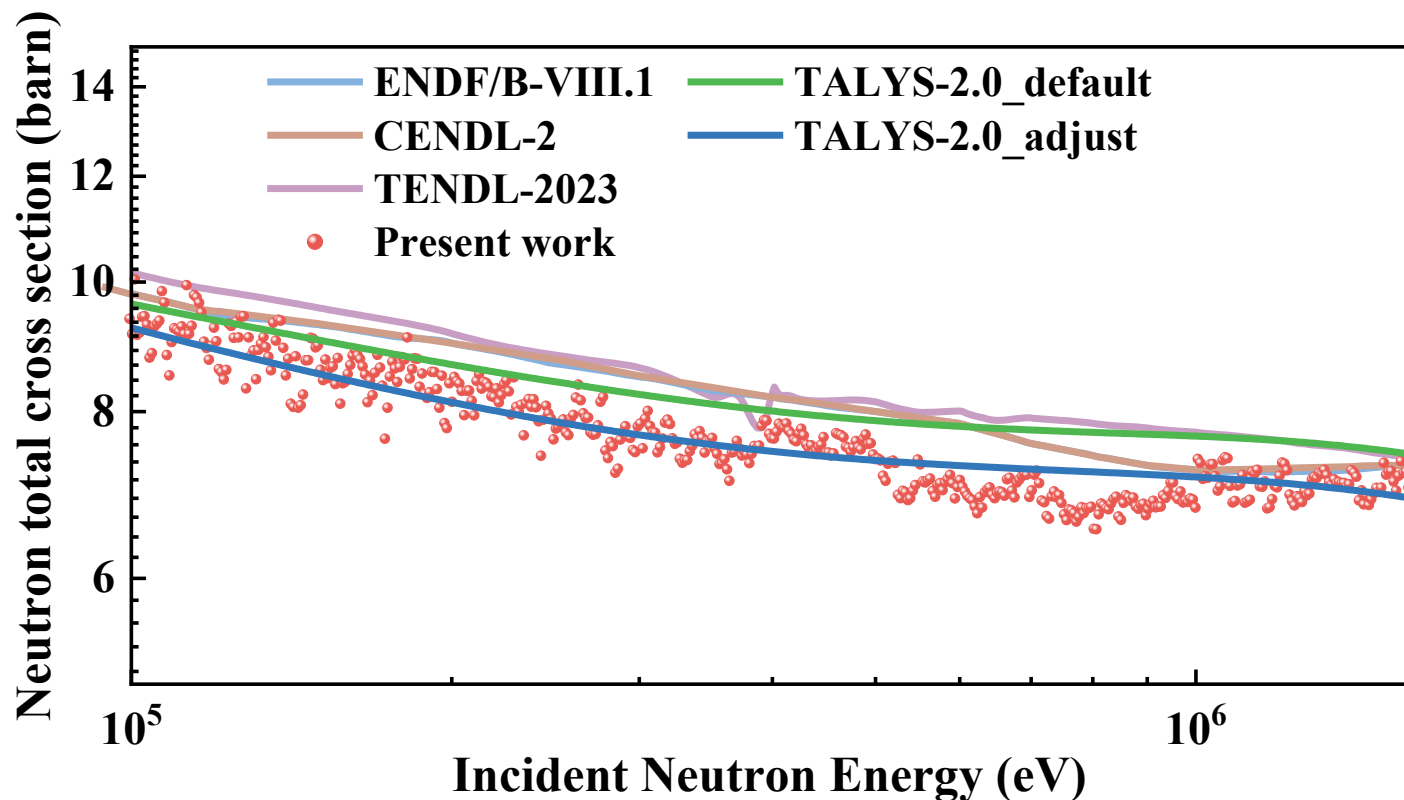


E_{res} (eV)	J^{π} (h^{-})	Γ_{γ} (meV)	Γ_n (meV)
2.59 ± 0.0457	4^{+}	70.8 ± 7.08	0.19 ± 0.019
4.36 ± 0.0476	7.5^{+}	68 ± 6.8	0.4 ± 0.04
4.753 ± 0.0467	4^{+}	65 ± 6.5	0.27 ± 0.027
5.22 ± 0.055	3^{+}	79 ± 7.9	1.6 ± 0.16
6.05 ± 0.0452	7.5^{+}	57 ± 5.7	1.4 ± 0.14
8.14 ± 0.1072	6.5^{+}	177 ± 17.7	0.03 ± 0.003
9.73 ± 0.0705	7.5^{+}	98.5 ± 9.85	1.3 ± 0.13
10.79 ± 0.0578	6.5^{+}	72 ± 7.2	0.17 ± 0.017
11.20 ± 0.0639	3^{+}	80 ± 8	3.5 ± 0.35
11.44 ± 0.0565	7.5^{+}	68 ± 6.8	0.1 ± 0.01
11.88 ± 0.0576	6.5^{+}	69 ± 6.9	0.47 ± 0.047
13.9699 ± 0.061	4^{+}	65 ± 6.5	6.9 ± 0.69
14.16 ± 0.0668	3^{+}	74 ± 7.4	9.26 ± 0.926
15.31 ± 0.0626	4^{+}	71 ± 7.1	1.55 ± 0.155
16.90 ± 0.1663	7.5^{+}	277 ± 27.7	0.05 ± 0.005
18.6199 ± 0.0676	4^{+}	70 ± 7	6.63 ± 0.663
19.06 ± 0.095	6.5^{+}	129 ± 12.9	1.49 ± 0.149
19.994 ± 0.0736	7.5^{+}	86 ± 8.6	0.384 ± 0.038
20.45 ± 0.0726	3^{+}	81 ± 8.1	2.5 ± 0.25
21.0863 ± 0.070608	6.5^{+}	74 ± 7.4	4.5 ± 0.45
21.76 ± 0.0692	6.5^{+}	73 ± 7.3	1.5 ± 0.15
23.42 ± 0.08	3^{+}	87 ± 8.7	6.63 ± 0.663
24.49 ± 0.0767	7.5^{+}	82 ± 8.2	3.3 ± 0.33
27.15 ± 0.085	6.5^{+}	86 ± 8.6	11.8 ± 1.18
27.92 ± 0.0784	4^{+}	82 ± 8.2	1.5 ± 0.15
29.34 ± 0.0674	6.5^{+}	57 ± 5.7	2.4 ± 0.24
29.53 ± 0.1316	6.5^{+}	184 ± 18.4	3.5 ± 0.35
30.0999 ± 0.09	4^{+}	97 ± 9.7	6.4 ± 0.64
31.01 ± 0.086	3^{+}	91 ± 9.1	3.3 ± 0.33



- 基于TALYS-2.0开展了在 **100 keV 至 1.57 MeV** 能量范围内的理论激发函数计算；
- 同步开展光学势模型参数调节，并与默认模型计算结果进行对比。

光学势模型参数表



Parameter	Unit	Default Value	Adjust Value	Factor
rv	fm	1.231	1.182	0.96
av	fm	0.652	0.619	0.95
aw	fm	0.652	0.619	0.95
rvd	fm	1.254	1.204	0.96
rwd	fm	1.254	1.191	0.95



- ◆ 获得 **0.3 eV 至 30 MeV** 能量范围的^{nat}Lu的中子全截面，填补了 keV 至 MeV 能量范围内的实验数据；
- ◆ 开展了不确定度分析，85%的数据点统计不确定度低于**3%**，大部分数据点的总不确定度低于**5%**；
- ◆ 在18.6 eV附近测量得到一个非常明显的新共振峰，并在 **11.8、21.08、133、135、261 和 274 eV**处的共振结构与主要评价数据库存在差异；
- ◆ 基于 SAMMY 和 TALYS-2.0 开展了数据再评价，分别得到了部分共振参数和调整后的光学势模型参数；
- ◆ 发现厚 U-235 裂变片与薄 U-235 裂变片的测量结果在高能区存在明显差异。



南華大學

UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

Thanks for your attention!

黄文鑫, 张泽, 陈永浩, 肖友淳, 薛洁明, 王记民, 李鑫祥, 刘静, 唐诗琦, 栾鹏, 樊瑞睿, 程品晶, 陶璐燕, 邓存志, 陈奕熙, 王孟艳, 袁世青, 韩思佳, 黄浩轩, 郑波, 冯松, 肖敏

songfeng@usc.edu.cn

