



基于Back-n中子源的 ^{19}F 中子全截面测量

胡志强¹, 任智洲¹, 陈永浩^{2,3}, 严小松¹, 易晗^{2,3}, 朱通华¹, 张翔宇⁴

1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所

2. 中国科学院高能物理研究所

3. 散裂中子源科学中心

4. 四川大学原子核技术研究所

中国·衡阳 2026年7月14-16日

责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所



1.研究背景

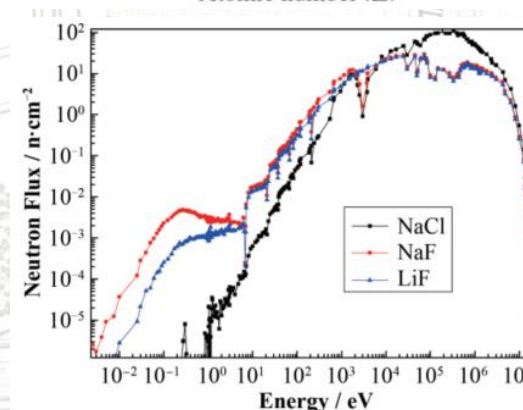
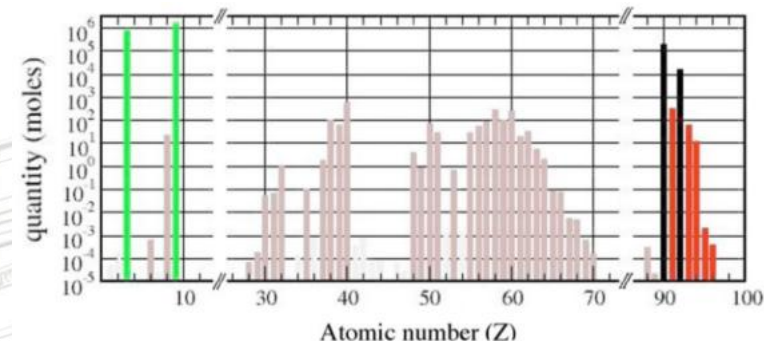
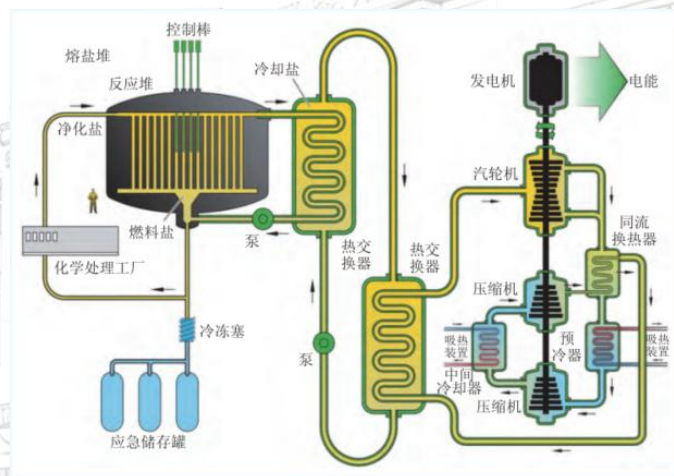
(1) ^{19}F 截面数据的应用价值

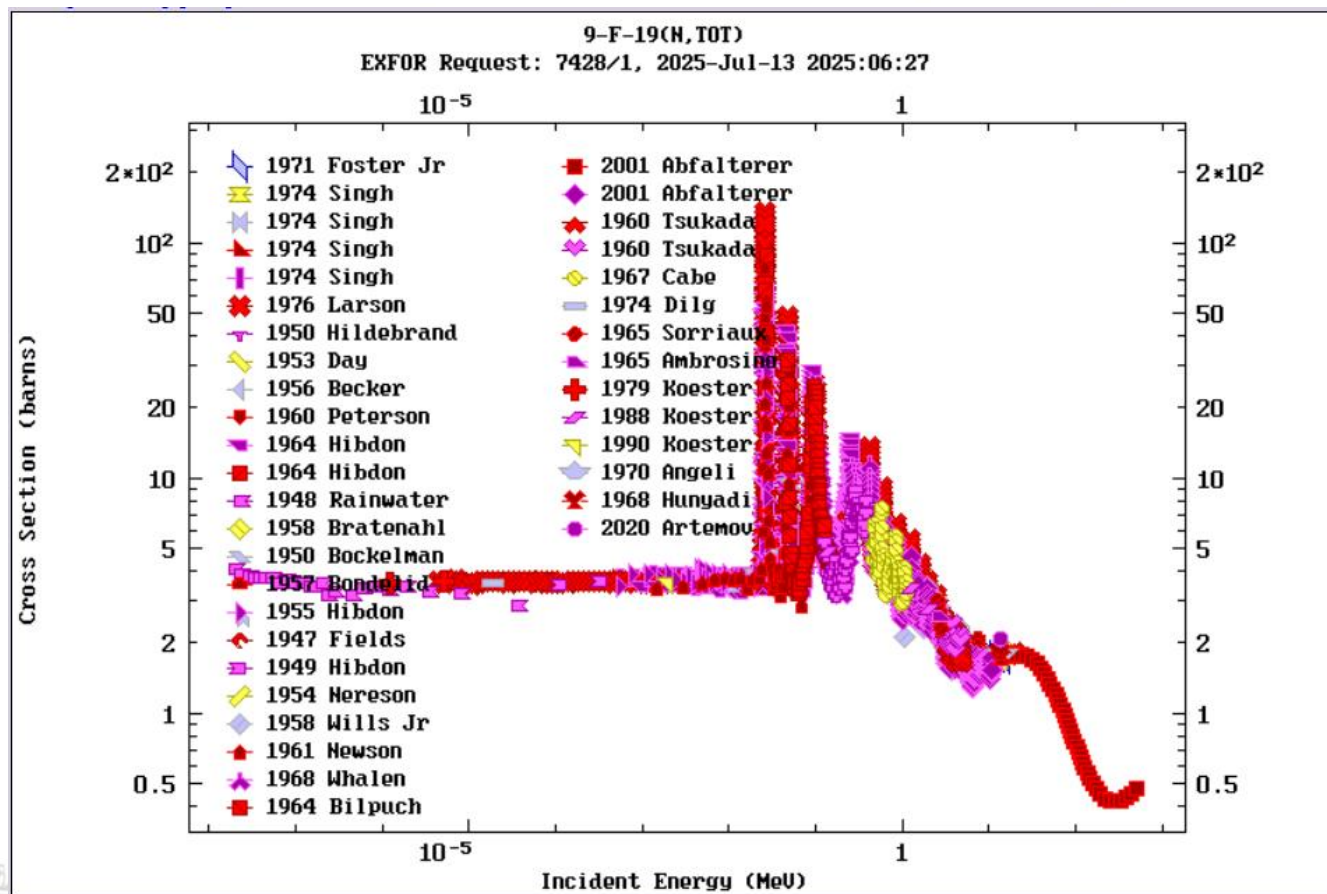


核物理与化学研究所
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY

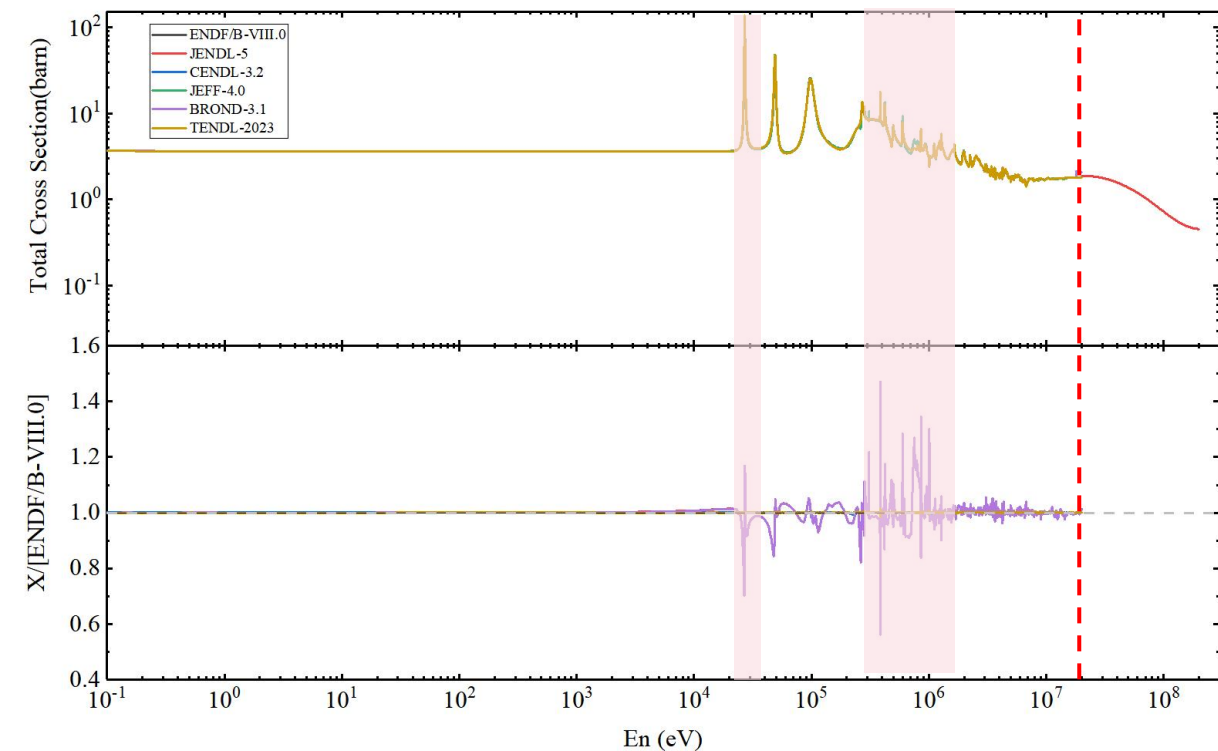
中子全截面是中子与物质发生所有反应的截面之和，是中子散射实验中最基础的核物理参数之一，在核物理理论、核技术及核能应用领域占据重要地位。

- 氟盐因其优异的导热性、低熔点、低蒸气压等物理化学特性，在熔盐堆Thorium Molten Salt Reactor (TMSR)、Molten Salf Fast Reactor (MSFR) 和MOlten-Salt Actinide Recycler and Transmuter (MOSART) 中常作为燃料载体和传热介质， ^{19}F 在这些系统中的原子含量通常占50%至60%，其中子行为对熔盐堆的设计与稳定运行至关重要。涉及能量范围为0.01 eV-20 MeV
- 聚四氟乙烯常作为慢化体和结构件广泛存在于核系统中。
- BaF_2 等含氟材料被广泛应用于中子探测。





- 针对 ^{19}F 中子总截面的实验研究已持续开展数十年，覆盖了多个能量范围。然而，在0.1-2 MeV的共振能区，不同实验结果之间仍存在差异。
- 覆盖30 MeV以上能区只有2组实验。
- 所有这些实验均采用对 γ 射线高度敏感的闪烁探测器，在测量中子全截面时需考虑 γ 射线鉴别，这可能影响截面测量结果。



- 主要评价核数据库（如ENDF/B-VIII.0、JEFF-4.0、JENDL-5、CENDL-3.2和BROND-3.1）在20 keV以下能区和2 MeV以上能区具有较为一致的数据。
- CENDL-3.2与ENDF/B-VIII.0在20 keV附近和0.3-2 MeV的共振区域存在差异。
- 目前只有JENDL-5有20 MeV以上的数据，其他四个数据库在20 MeV以上能区存在空白。



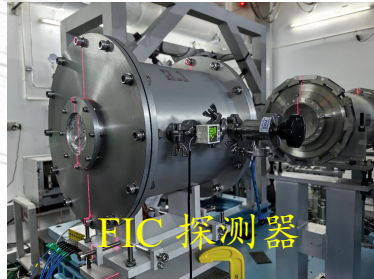
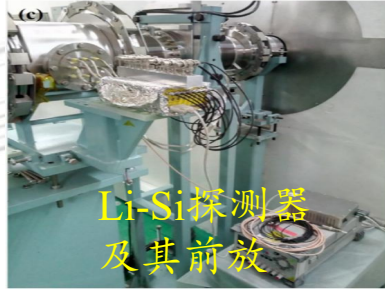
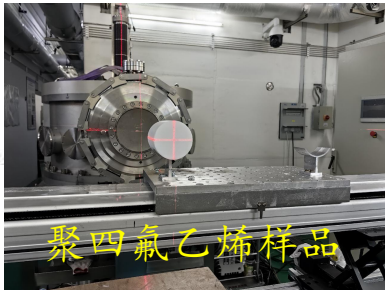
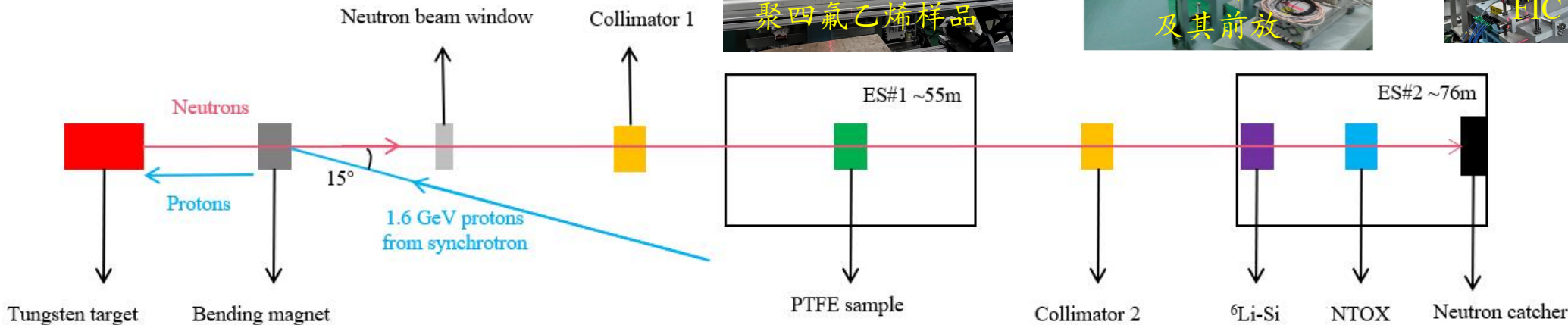
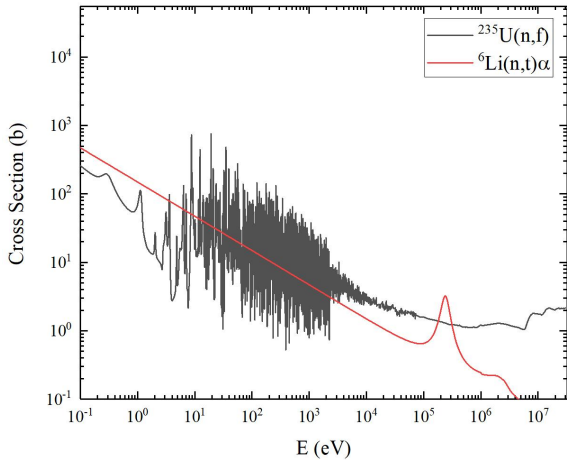
2.实验过程

(1) 实验布置

样品参数	直径/mm	厚度/mm	质量/g
数值	70.00±0.02	100.00±0.02	849.16±0.01

通道	3	4	11	12	14	17	18
靶材	²³⁵ U-4	²³⁵ U-5			⁶ Li		

- 实验条件
- 束流功率: 170 kW
 - 工作模式: Double Bunch Mode
 - Shutter: 60 mm
 - Collimator1,2: 60 mm+60 mm
 - 吸收片: 1mm 镉

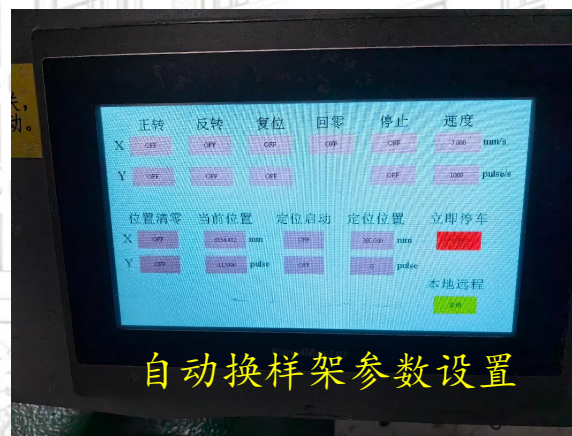
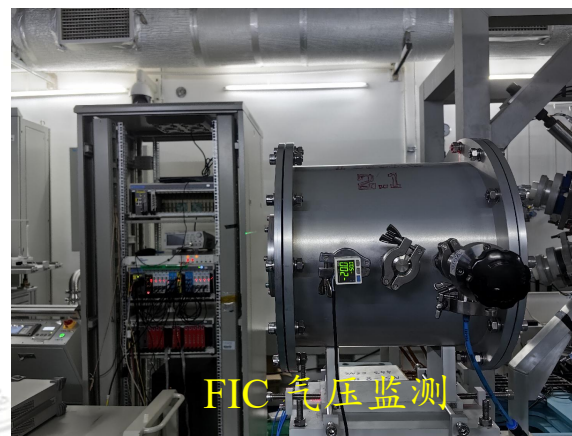




在2025年5月6-10日使用NTOX谱仪和Li-Si束流监测器进行聚四氟乙烯的全截面测量实验。

- 实验前：连接好探测器及电子学设备，放置探测器核样品时使用激光进行**对中**。
- 实验中：监测电源高压、低压、FIC探测器的气压以及各通道信号和计数率，使用自动换样架更换样品状态。
- 实验后：拷贝数据。

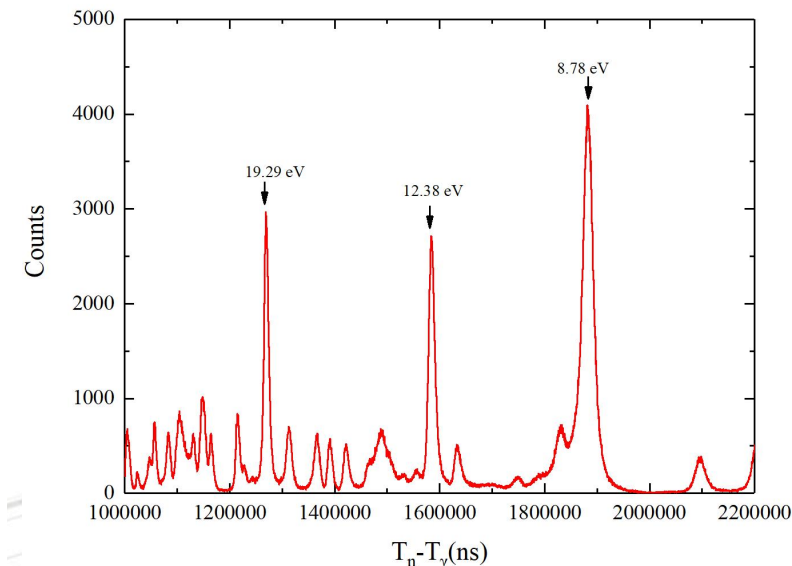
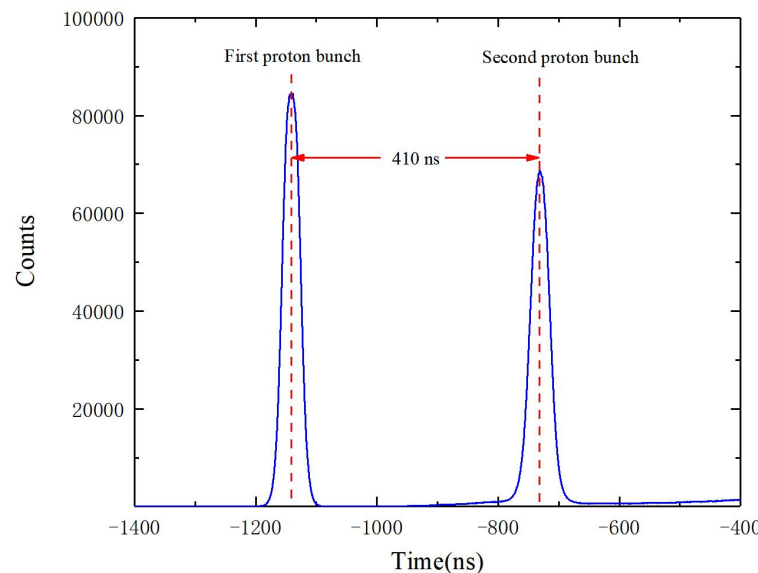
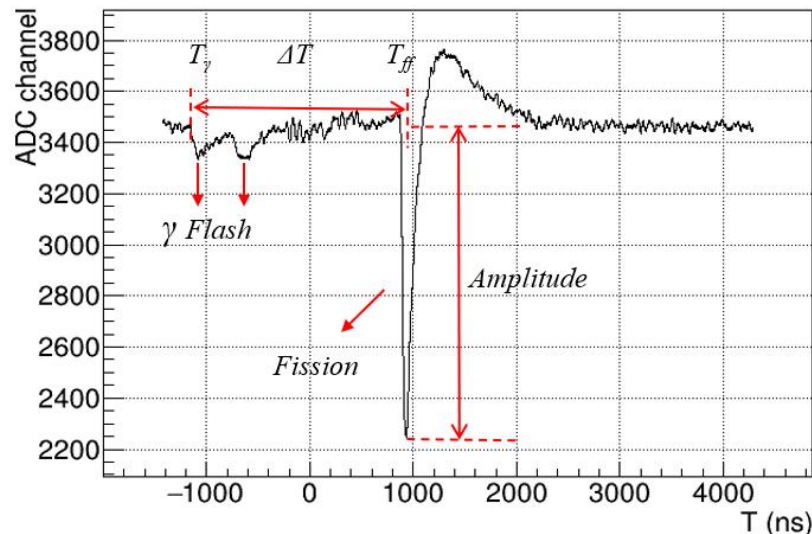
日期	样品状态	持续时间	质子计数
2025.5.6-5.8	有样品	68h	1.2×10^{12}
2025.5.8-5.10	无样品	28h	0.8×10^{12}





3. 数据处理

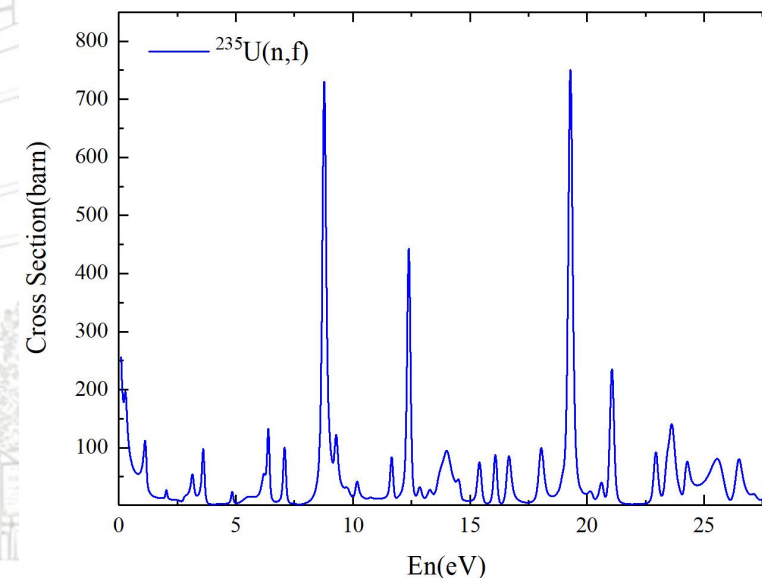
(1) 定时方法和距离标定 ($\text{By } ^{235}\text{U}$)



- 在高能质子轰击钨靶时产生中子的同时会产生高强度的 γ -flash, 以光速飞行的 γ -flash会比中子更早到达探测器, 通过测量探测器记录的中子信号和 γ -flash信号的时间差计算出中子的飞行时间。
- 通过拟合高斯拟合 ^{235}U 的8.774eV、12.385eV和19.288eV共振峰得到 ^{235}U 到钨靶的中子飞行距离;

$$TOF_n = T_n - T_{n0} = T_n - (T_\gamma - L/c)$$

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

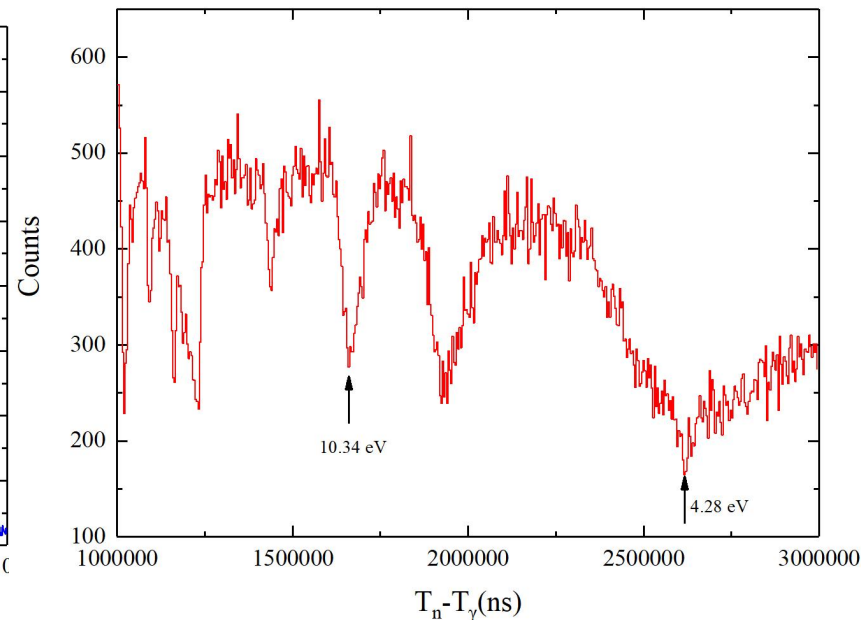
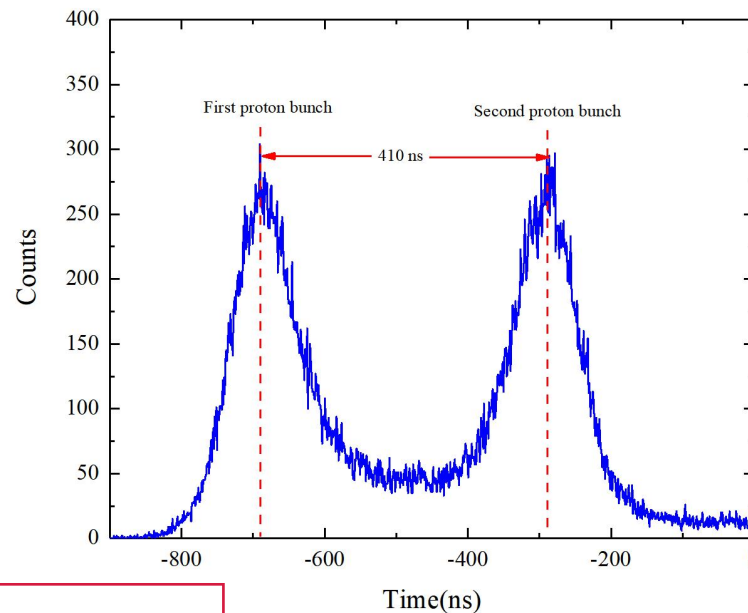
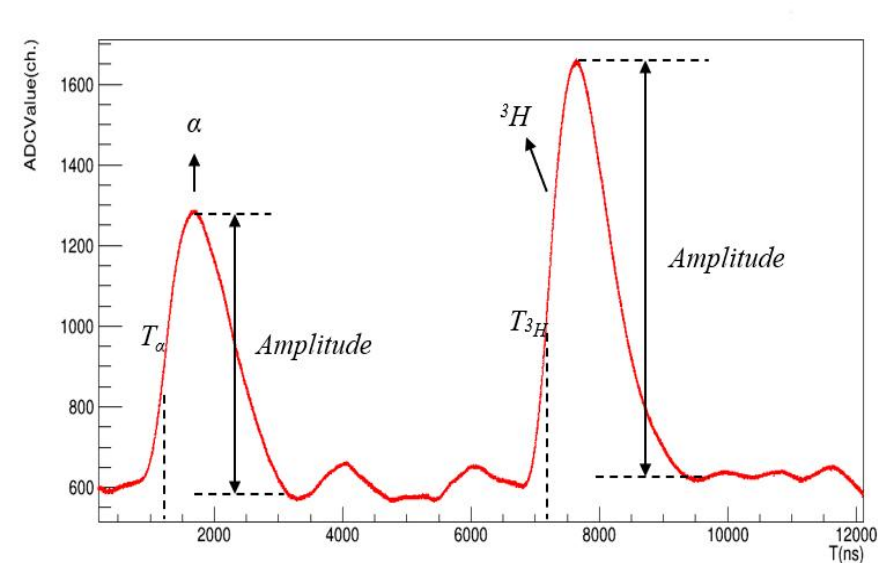


FIC number	T_γ /ns	L/m
^{235}U -4	-1143	77.1397
^{235}U -5	-1140	77.1575



3. 数据处理

(1) 定时方法与距离标定 (By ${}^6\text{Li}$)

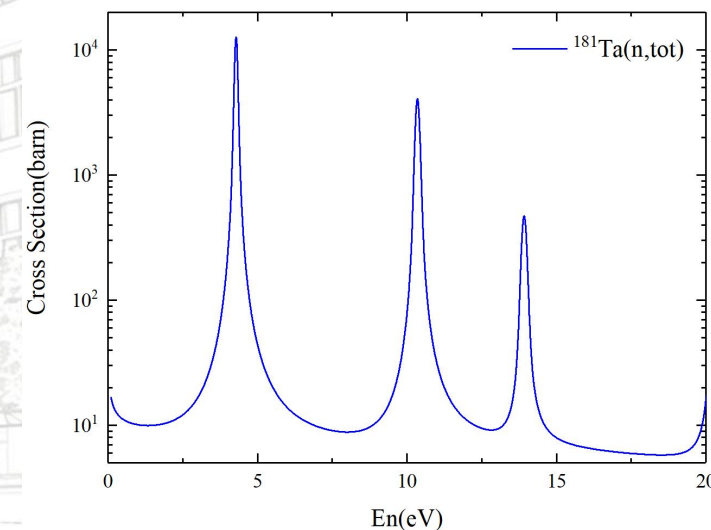


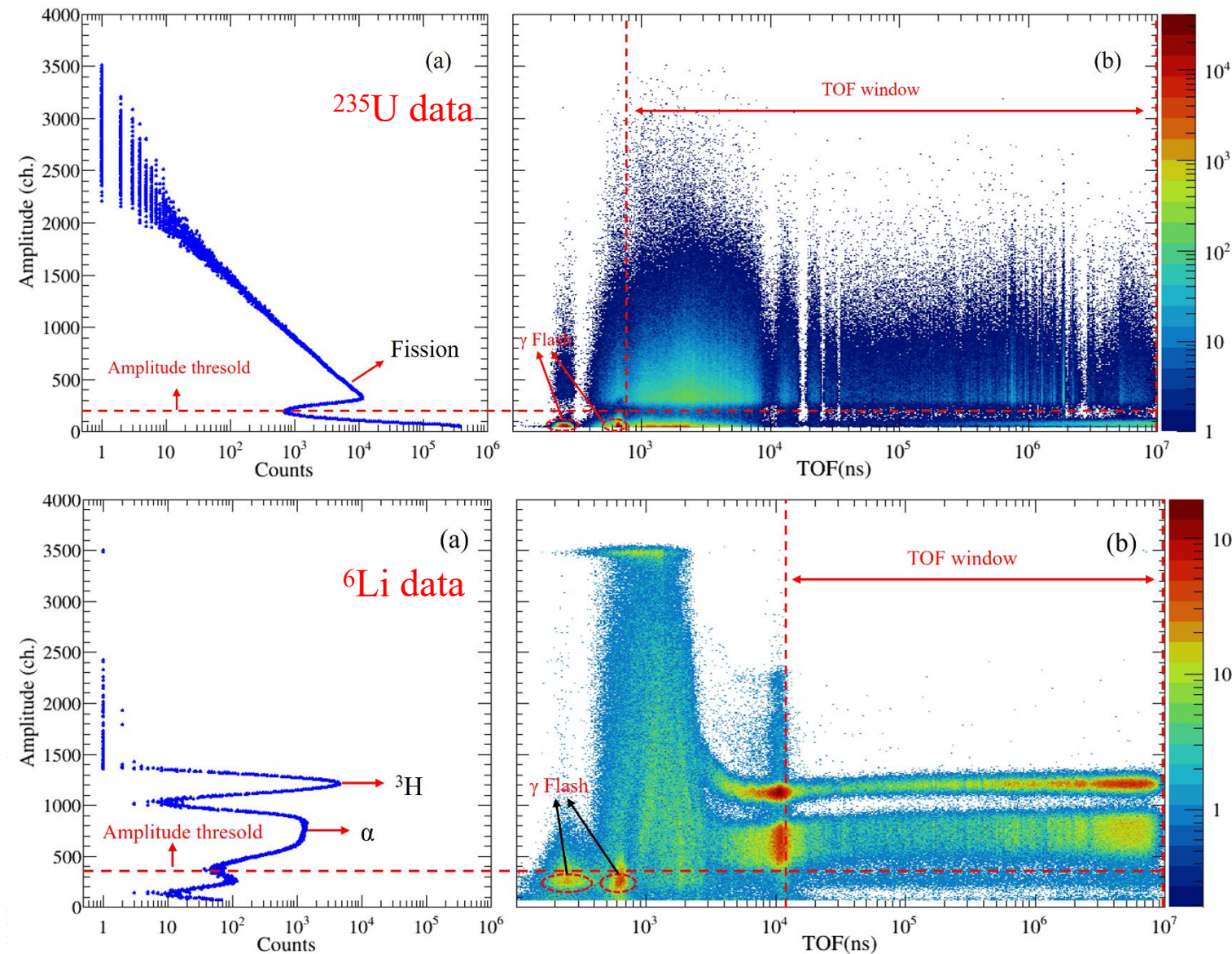
➤ 高斯拟合 ${}^{181}\text{Ta}$ 的10.34eV共振吸收峰得到Li-Si探测器到钨靶的中子飞行距离。

Li-Si number	T_γ/ns	L/m
Li-Si-1	-687	74.3030
Li-Si-2	-685	74.2894
Li-Si-4	-696	74.3369
Li-Si-7	-707	74.3098
Li-Si-8	-705	74.2827

$$TOF_n = T_n - T_{n0} = T_n - (T_\gamma - L/c)$$

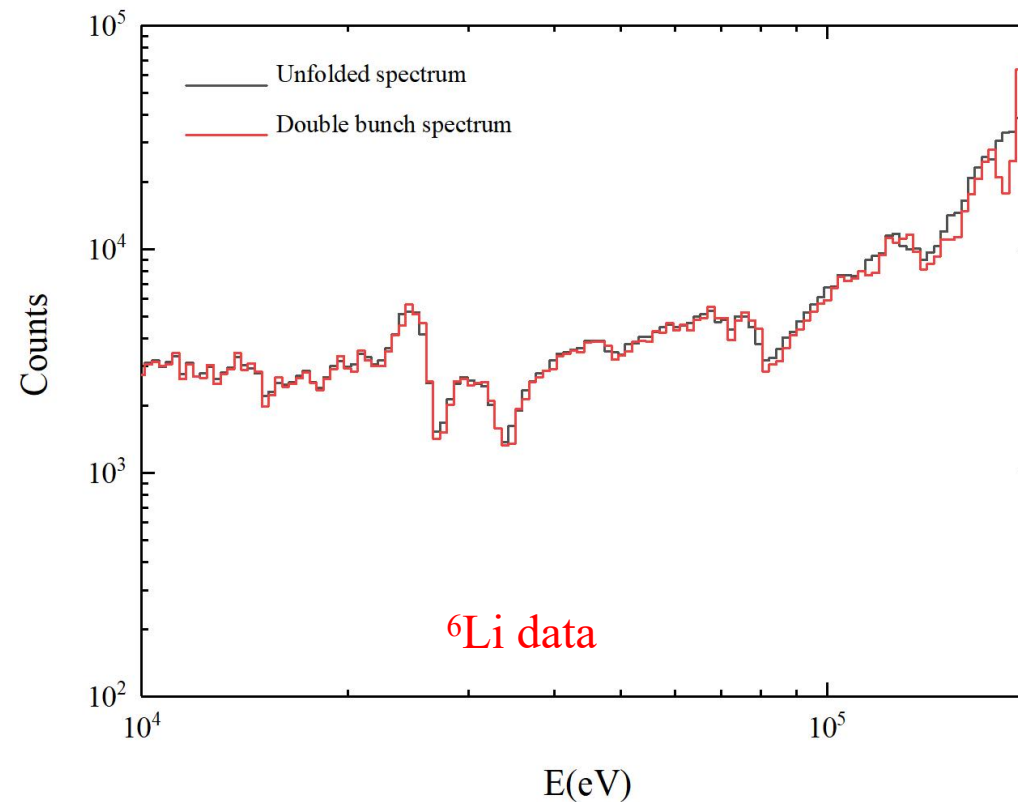
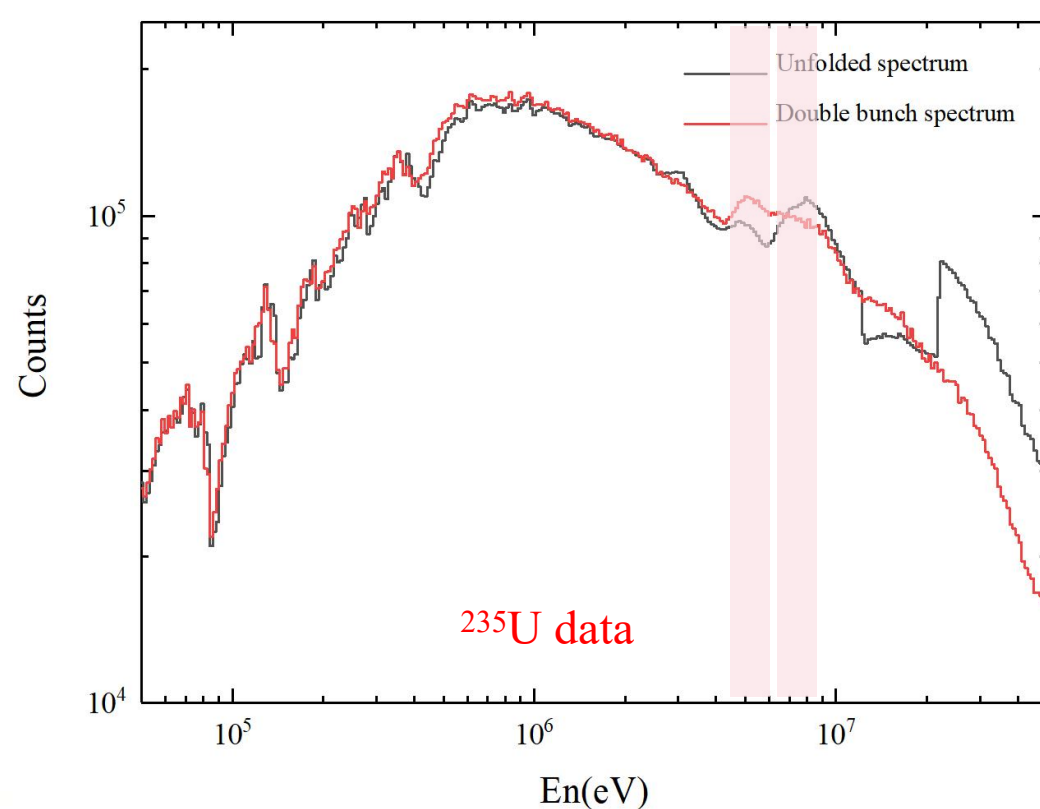
$$T_n - T_\gamma = \frac{L}{c} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left[\frac{E_n}{m_n c^2} + 1 \right]^{-2}}} - 1 \right)$$



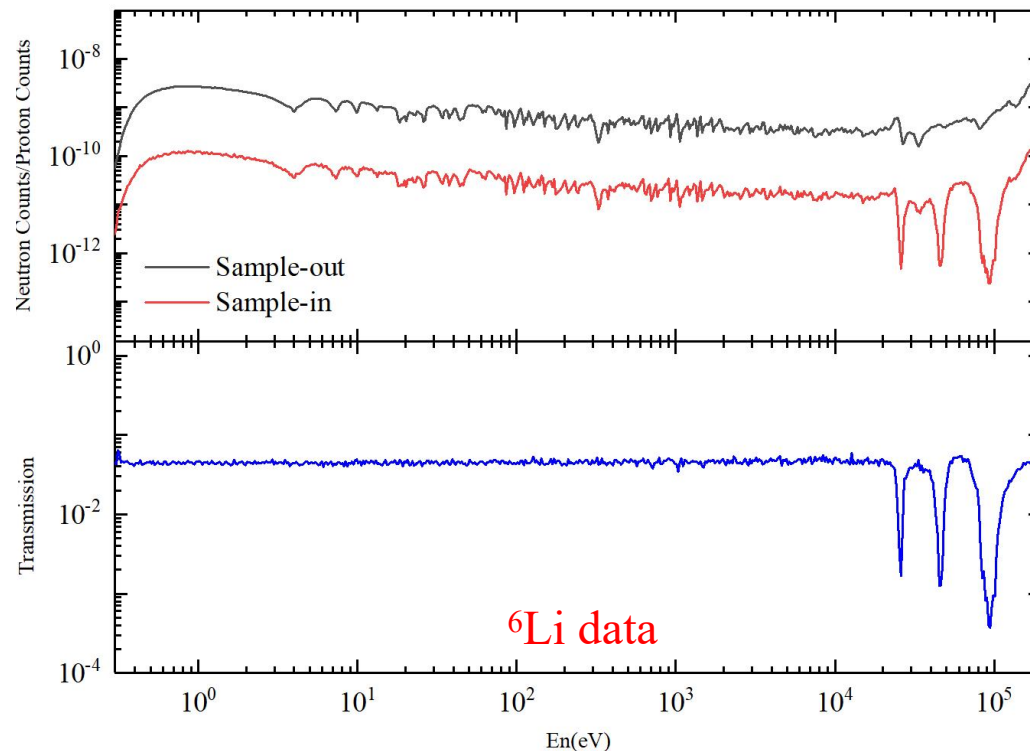
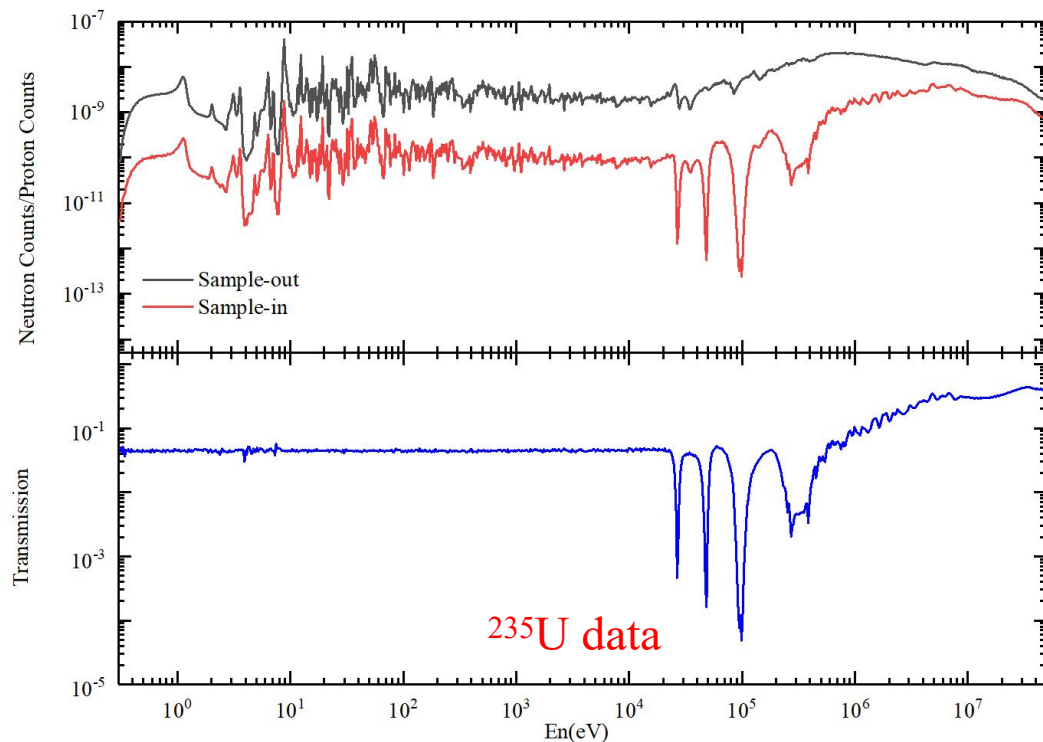


- 对于 γ -Flash信号、裂变室 ^{235}U 自发衰变放出的 α 信号本底可以通过设置脉冲幅度阈值、飞行时间窗的方式进行扣除；
- 对于散射中子本底、天然中子、 γ 本底，其影响可以忽略；



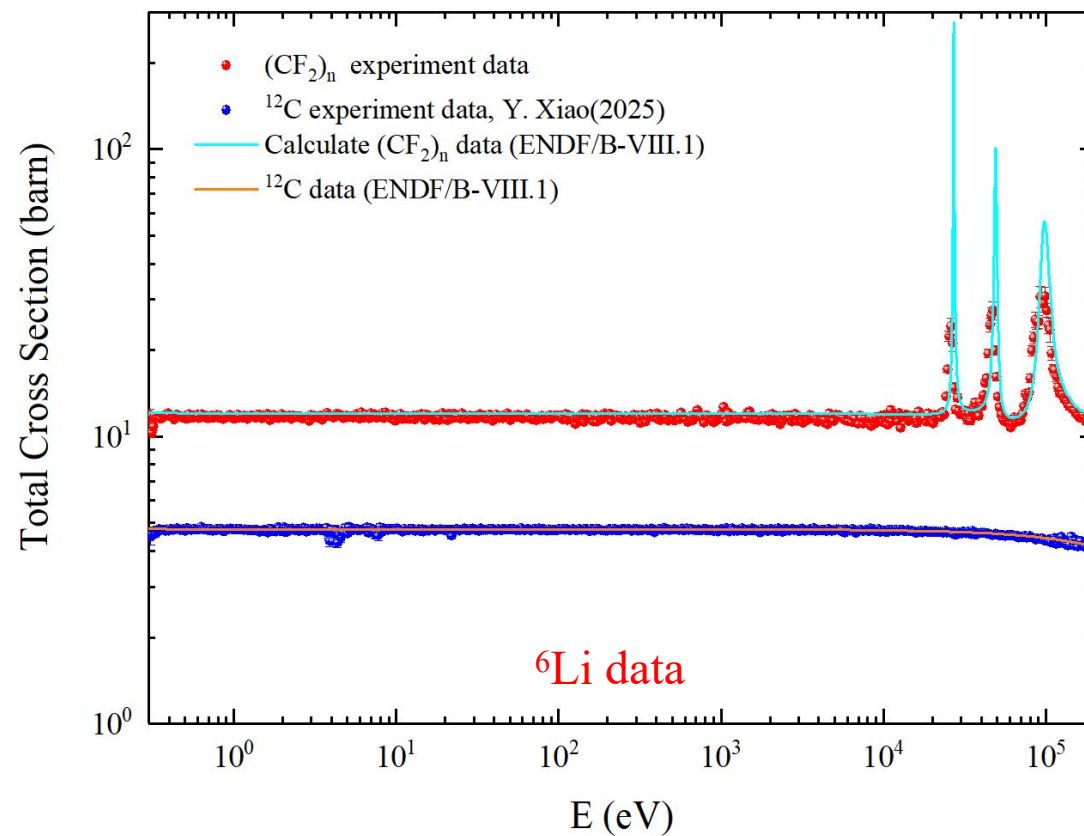
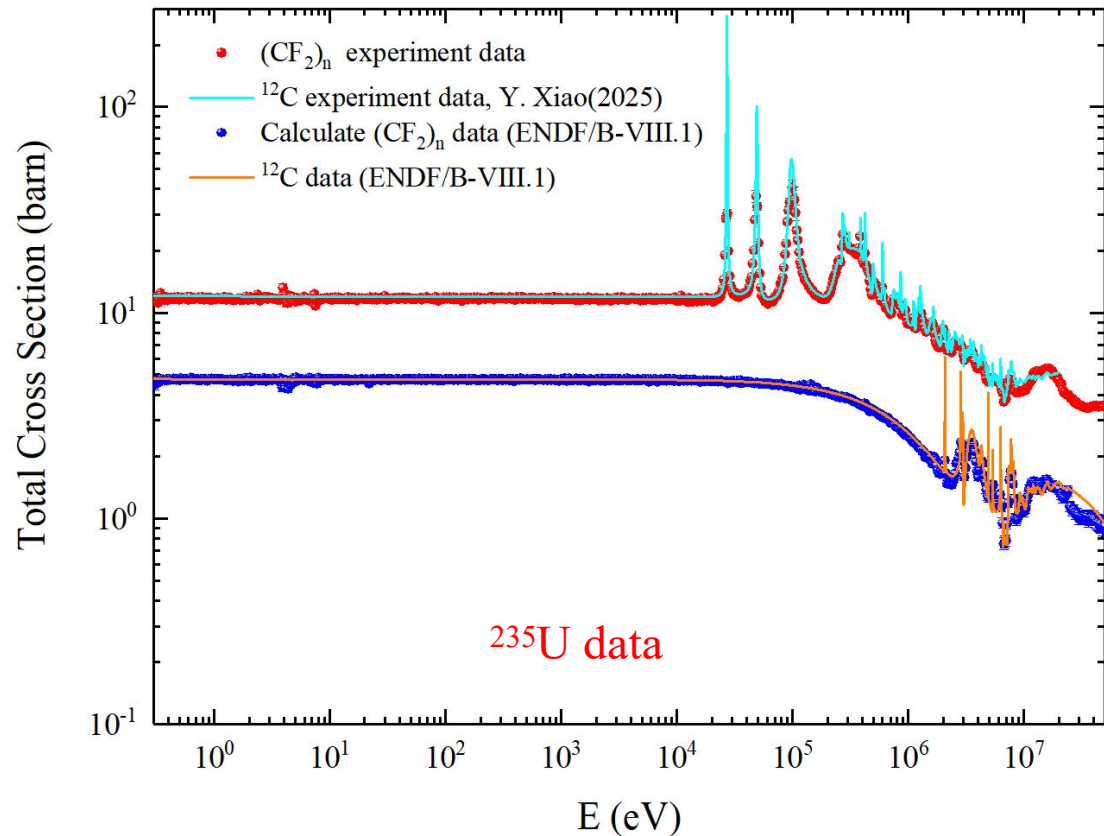


- 使用DemoUnfolding v3.1进行飞行时间谱和对数中子能谱的解谱。
- 对100 keV到20 MeV的 ^{235}U 数据进行解谱，设置TOF谱的bin宽度为40ns，TOF为200-55600 ns。可以观察到解谱前后发生显著变化，高能区（3-10 MeV）对应的双峰恢复成单峰。
- 对10 - 200 keV的Li-Si数据进行解谱，分bin方式和FIC相同可以看到在此能量范围内双束团效应并不显著。



- 为减小统计不确定度，将2个 ^{235}U 通道数据和5个 ^6Li 通道数据分别合并，使用对数分bin、设置每数量级100 bin的方式对0.3 eV到50 MeV的数据进行分析。
- 使用监测质子累计计数对裂变计数-中子能谱进行归一化。

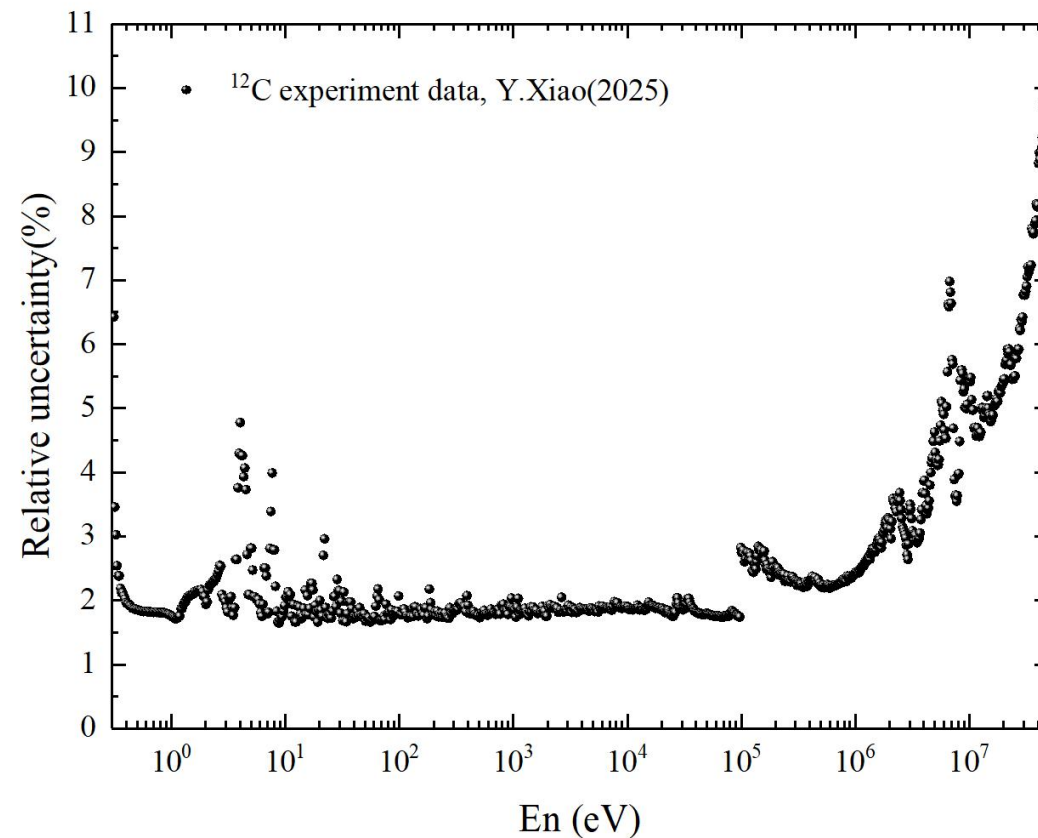
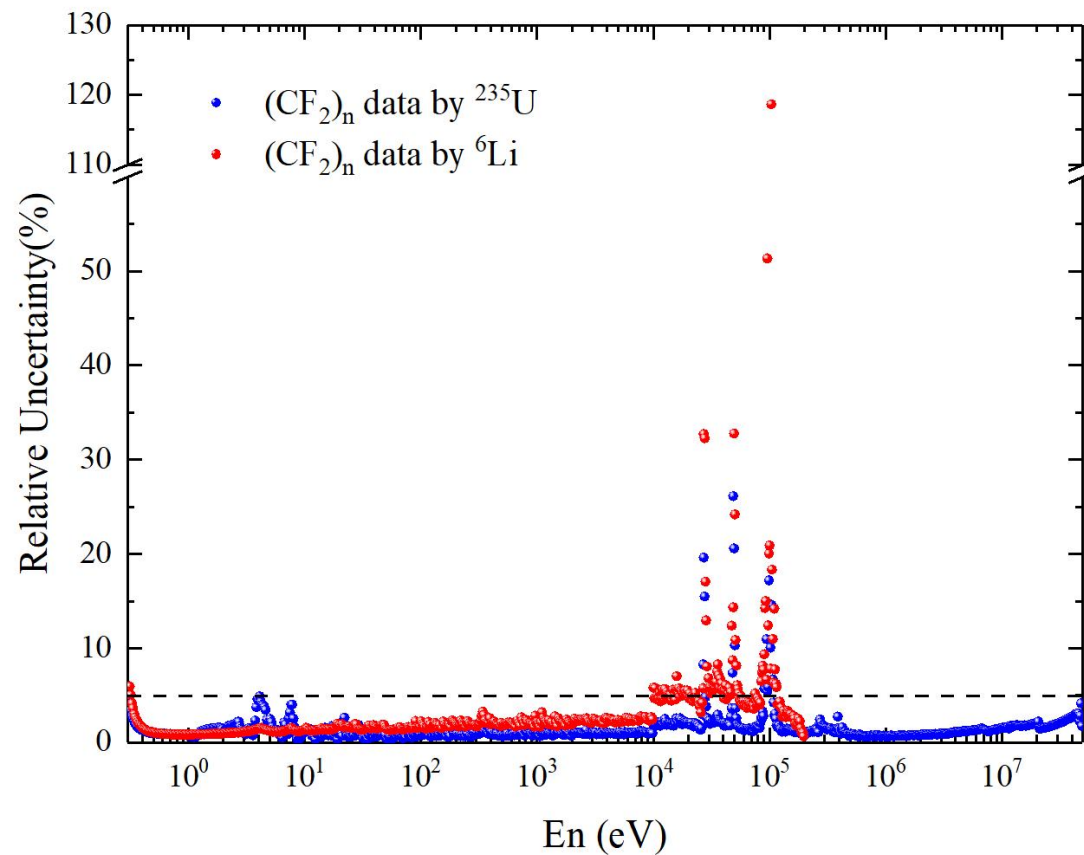
$$T(E) = \frac{[N_I(E) - B_I(E)]/P_O}{[N_O(E) - B_O(E)]/P_I}$$



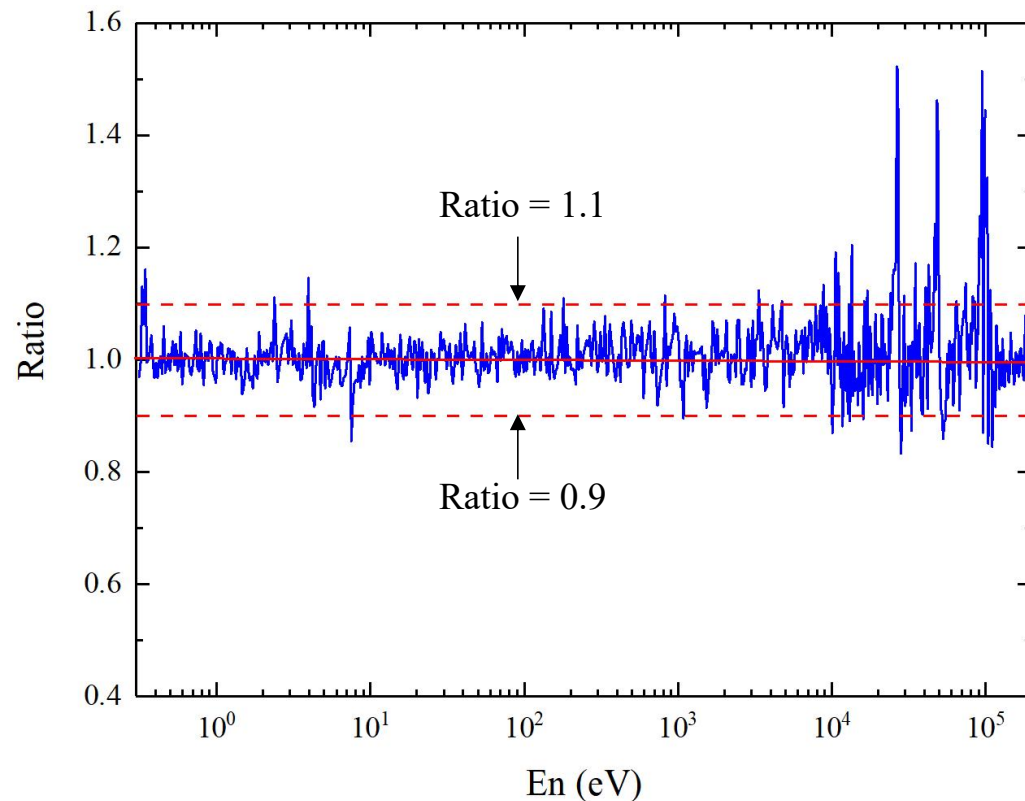
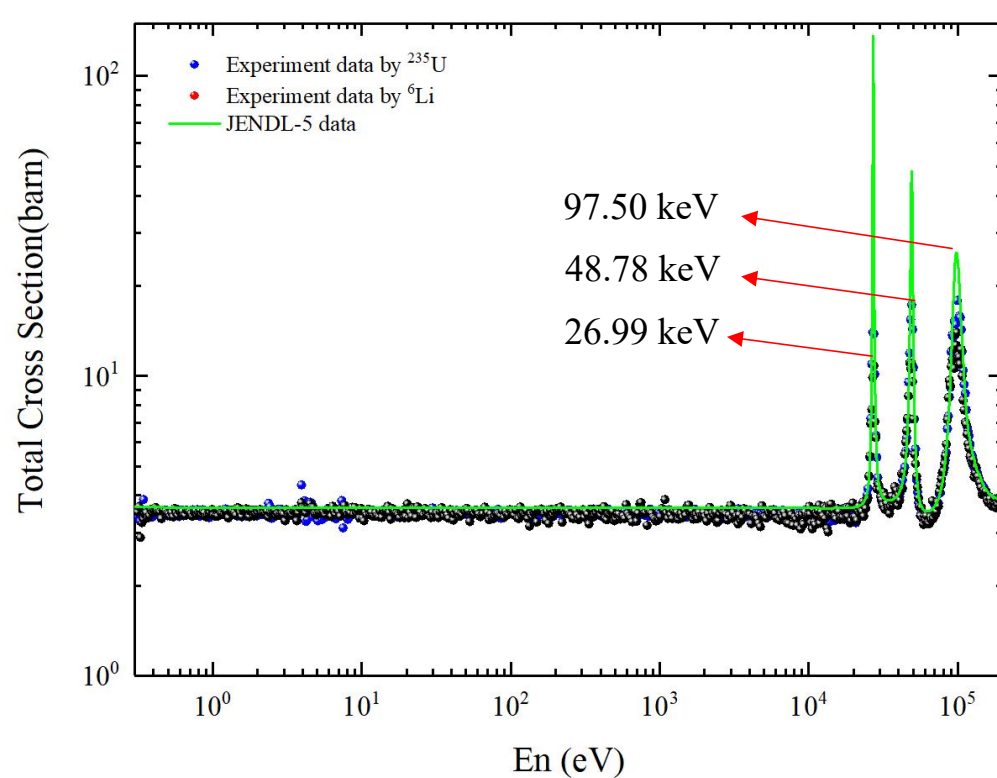
- 通过透射率计算聚四氟乙烯的截面，使用ENDF/B-VIII.1的 ^{19}F 和 ^{12}C 截面的数据，通过线性插值的方式计算出理论上的聚四氟乙烯截面数据。
- 使用南华大学冯松老师课题组2025年测得的 ^{12}C 截面数据进行扣除，得到 ^{19}F 的截面数据。

$$[\sigma_{tot}]_{(\text{CF}_2)_n} = -\frac{1}{nl} \ln(T(E))$$

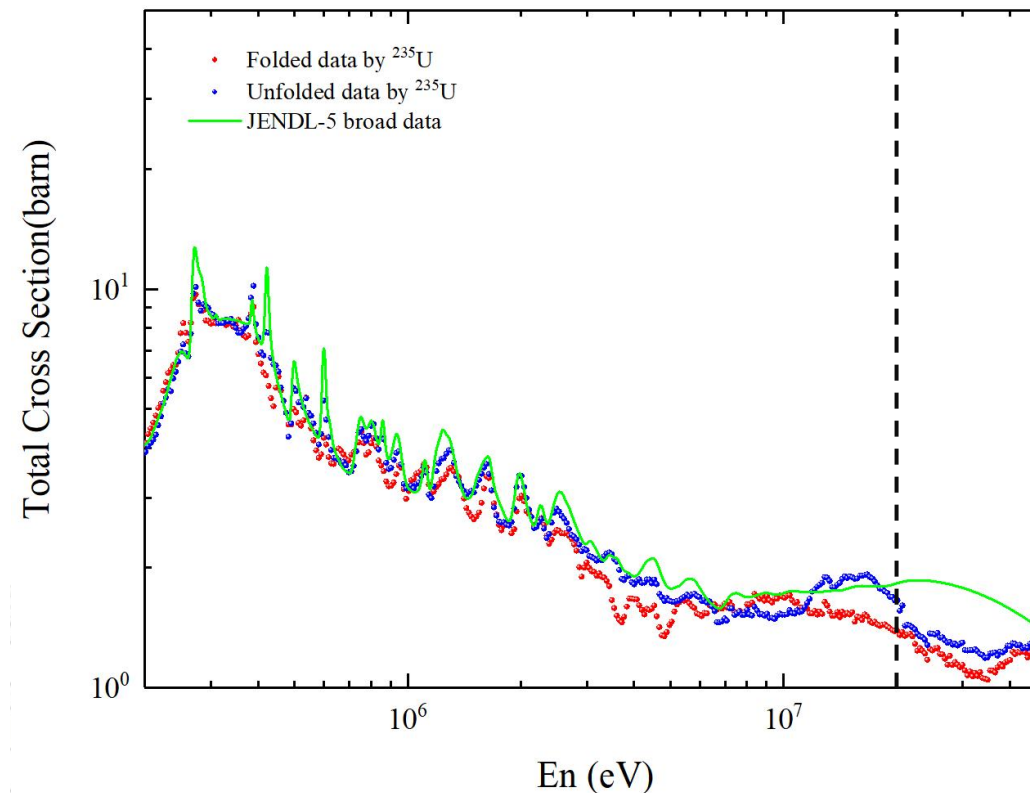
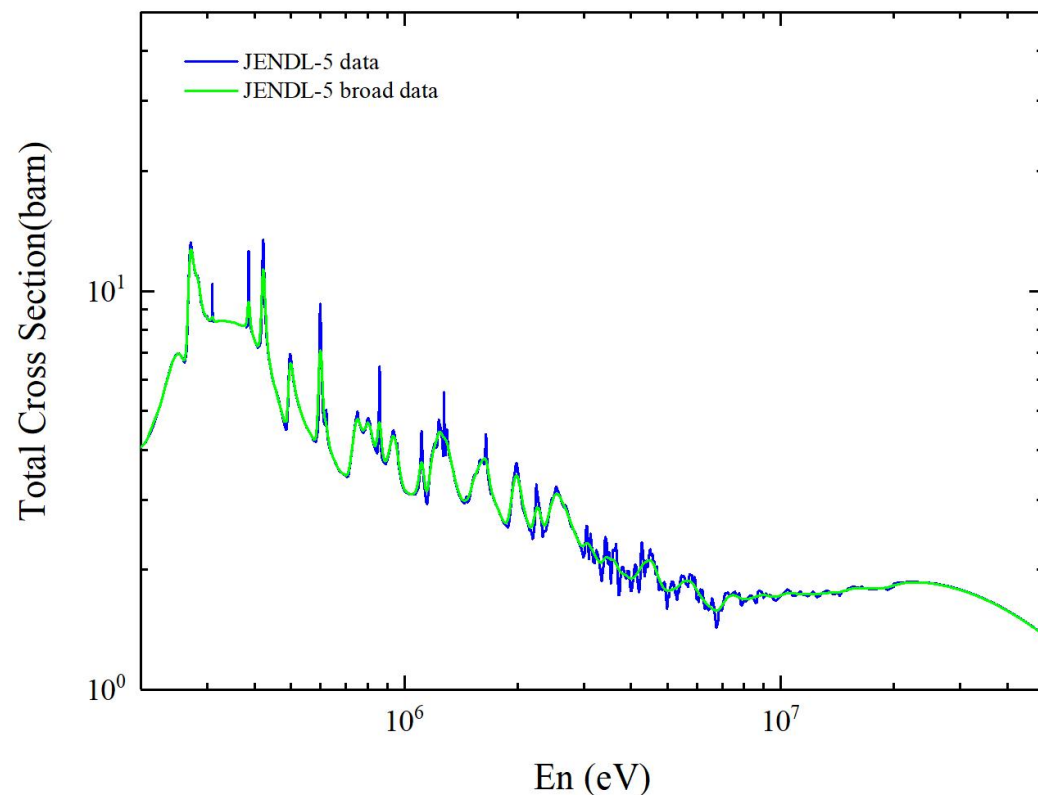
$$[\sigma_{tot}]_{^{19}\text{F}} = \frac{1}{2} ([\sigma_{tot}]_{(\text{CF}_2)_n} - [\sigma_{tot}]_{^{12}\text{C}})$$



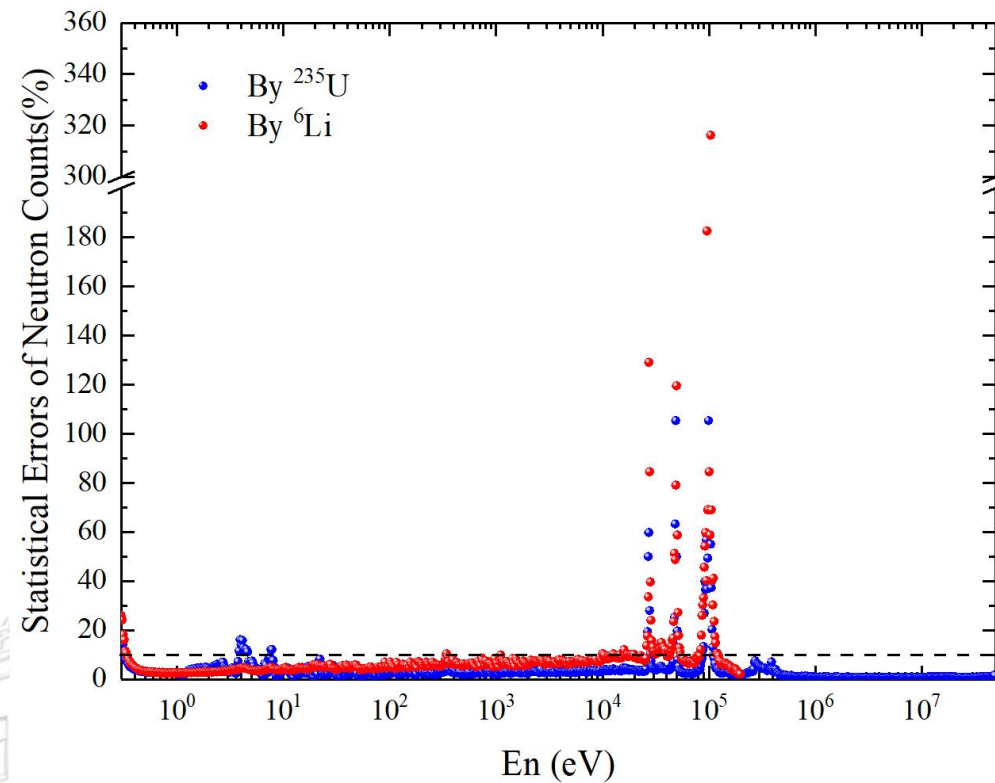
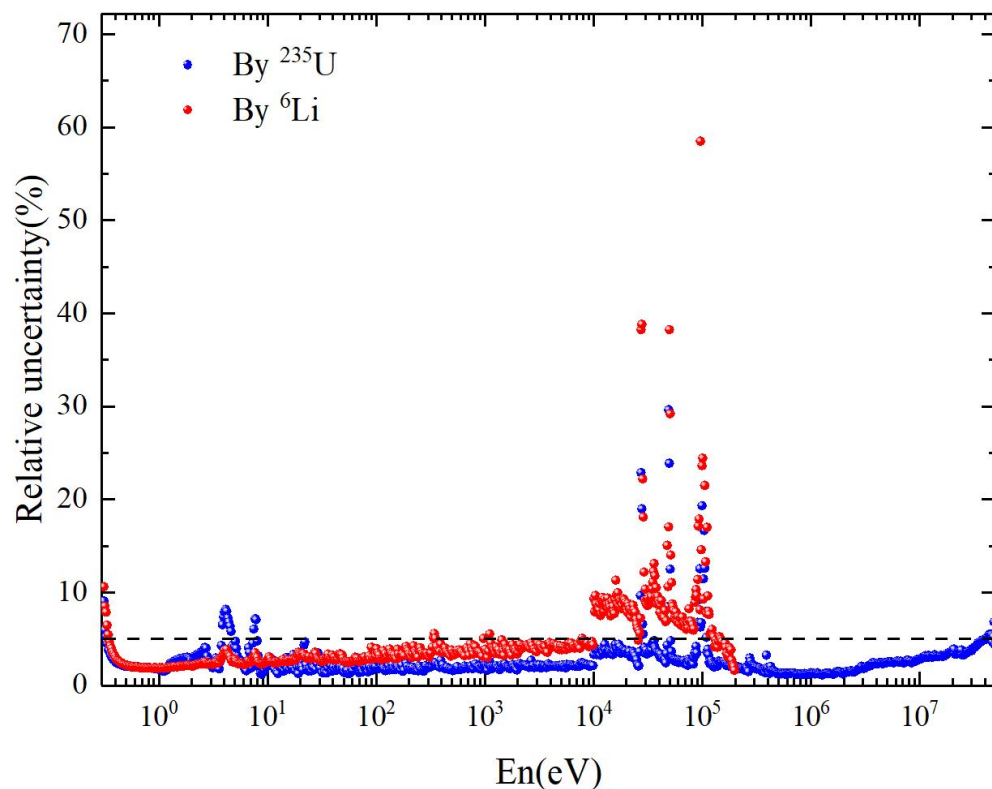
$$\left[\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right]_{(\text{CF}_2)_n} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + (\ln T)^2 \left[\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2\right] + e_l^2 + e_o^2}}{-\ln T}$$



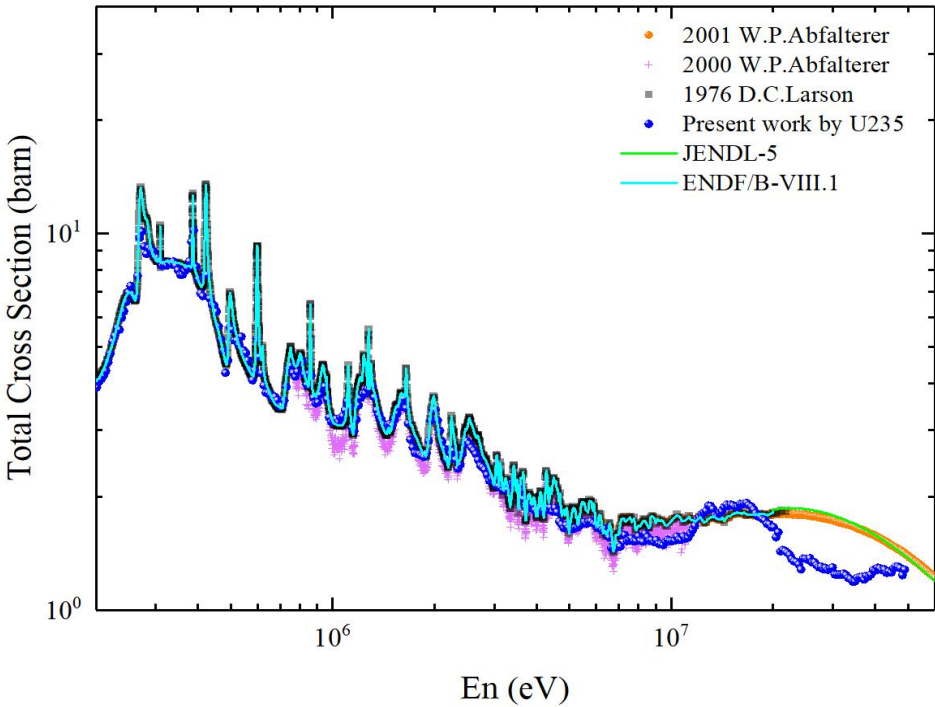
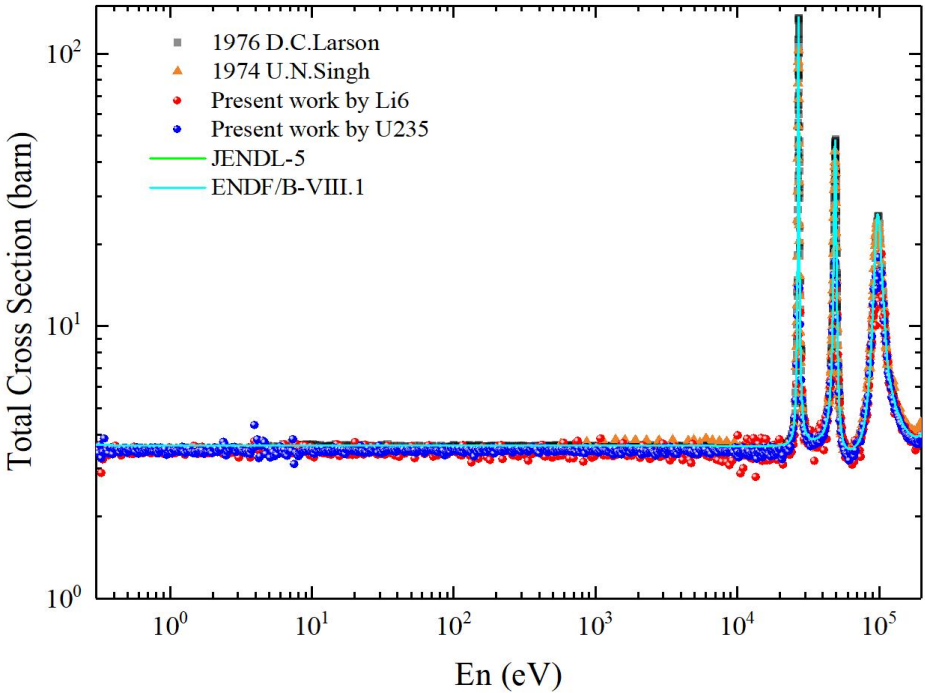
- 两种探测器在0.27MeV、0.49 MeV和0.98 MeV的共振峰的测量结果与评价核数据的峰位值比较吻合。
- 对比两个探测器在重叠能区的截面测量结果的比值，可以看到在100 keV以下两者的测量结果比较一致，在100-200 keV，由于中子能谱计数偏少，统计不确定度较大，两者的测量结果偏差增大。



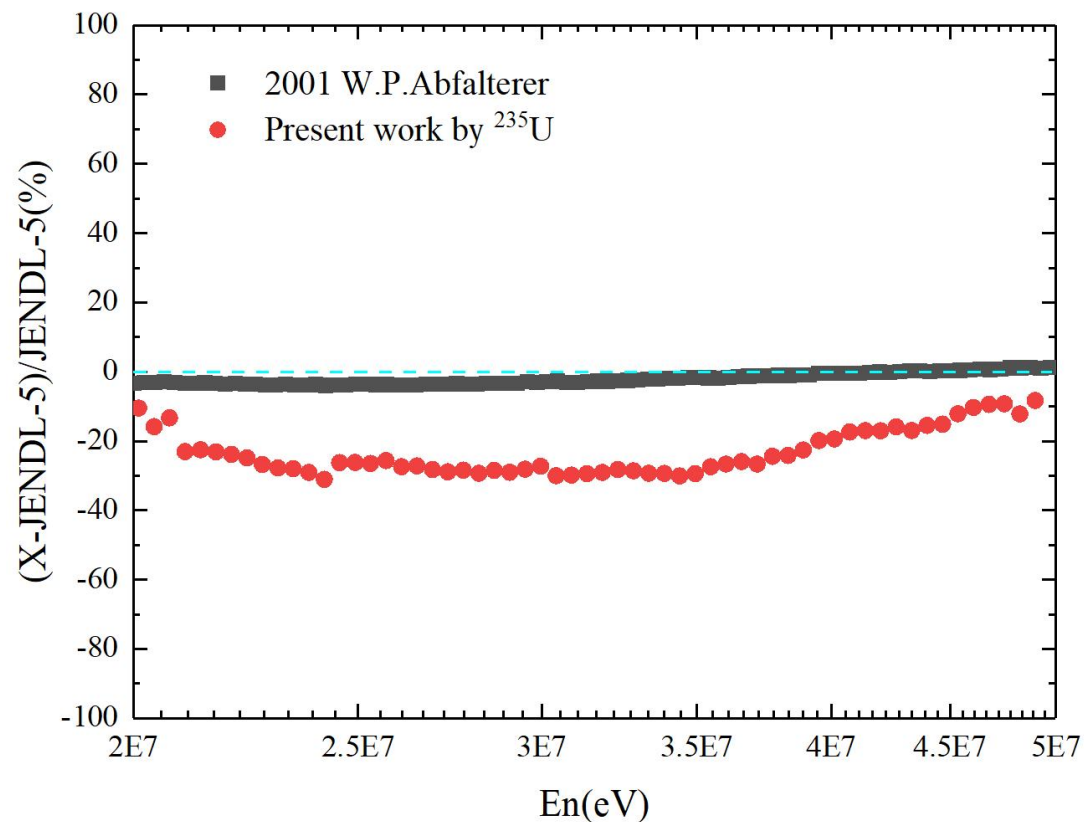
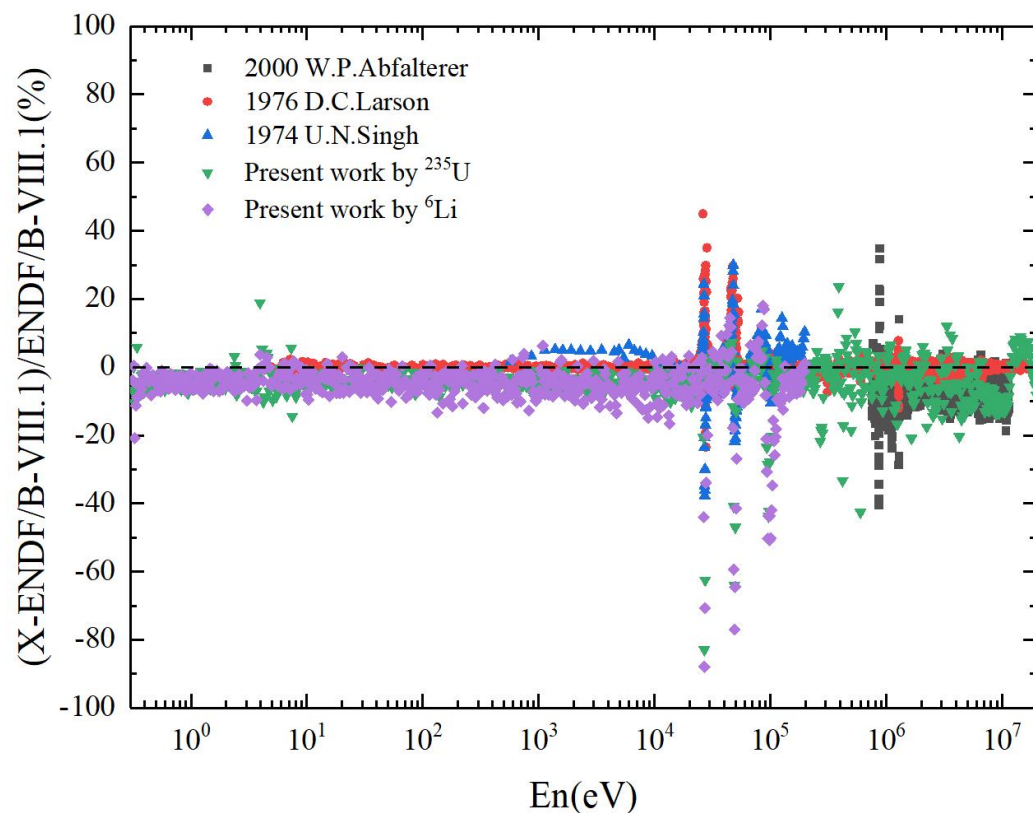
- 考虑到质子束团的宽度(70 ns)和探测器的固有时间分辨(4.2 ns)和对100 keV以上JENDL-5得数据进行展宽;
- 解谱后的数据对比解谱前的数据其结果更加贴合评价核数据, 验证了解谱方法的正确性;
- 在20 MeV以上的测量结果整体偏小。



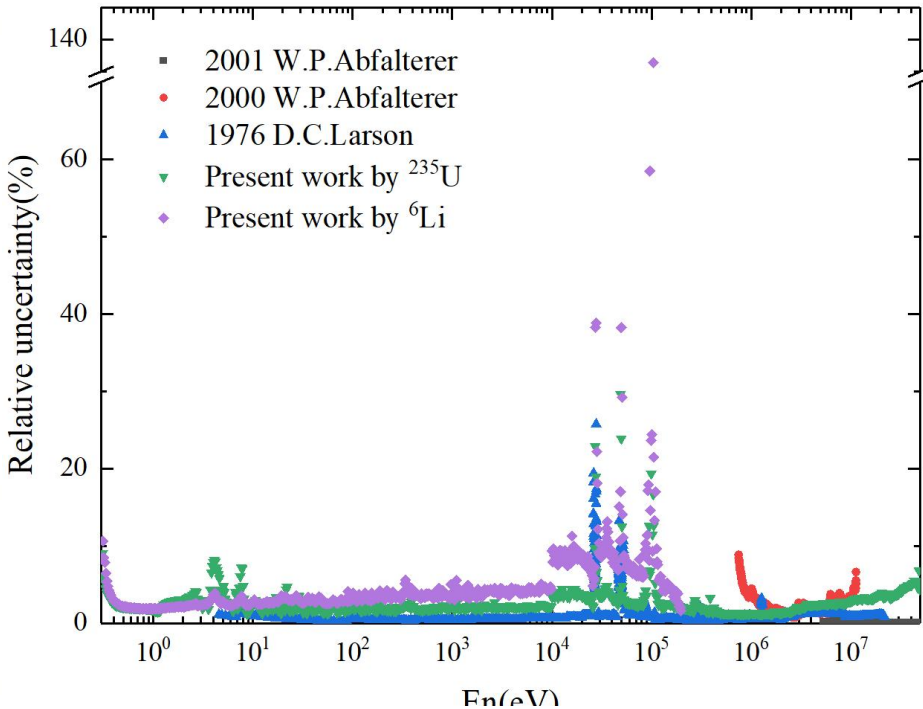
- 在100keV以上能区，双束团解谱会引入误差，平均为3.2%。在100 keV到200 keV的共振能区，两个探测器的不确定度较大，这主要是统计不确定度带来的。
- ^{235}U 测量结果的不确定度为0.1%-29.5%，平均不确定度为2.7%。
- ^6Li 测量结果的不确定度为0.1%-140%，平均不确定度为5.5%。
- 由于 ^{12}C 和聚四氟乙烯是在同一实验装置下进行实验，在计算氟的不确定度时会因为系统误差相抵消使得 ^{19}F 部分能区的相对不确定度小于 ^{12}C ，但是 ^{19}F 的绝对不确定度始终大于 ^{12}C 和聚四氟乙烯。



年份	作者	能量下限 (eV)	能量上限 (eV)	能点数	不确定度 (%)	加速器装置	探测器	样品
2001	W.P.Abfolger+	5.29E+06	5.59E+08	467	1.4-1.5	WNR	BC404塑闪	C ₈ F ₁₈ , LiF, KF, CaF ₂
2000	W.P.Abfolger+	7.50E+05	1.13E+07	1977	0.7-8.8	Van de Graaff Accelerator at Ohio University	NE213液闪	(CF ₂) _n
1993	R. W. Finlay+	5.00E+06	5.7E+08	474	-	WNR	BC404塑闪	CaF ₂
1976	D.C.Larson+	4.56E+00	2.18E+07	2389	0.2-26	LINAC at ORELA	⁶ Li玻璃探测器 NE110塑闪	多种厚度的(CF ₂) _n
1974	U.N.Singh+	5.68E+02	1.97E+05	297	-	Nevis Synchrocyclotron at Columbia University	塑闪 NaI探测器	(CF ₂) _n



➤ 对比ENDF/B-VIII.1和JENDL-5，两种探测器的测量结果总体都偏小。



Energy range(eV)	0.3-1E4	10 ⁴ -2×10 ⁵	2E5-7E5	7E5-5E6	5E6-1E7	1E7-2E7	2E7-5E7
Present work by ⁶ Li	3.21	9.71	-	-	-	-	-
Present work by ²³⁵ U	2.35	4.14	1.70	1.61	2.59	3.21	4.25
2001 W.P.Abhalterer	-	-	-	-	0.23	0.28	0.15
2000 W.P.Abhalterer	-	-	-	-	2.50	-	-
1976 D.C.Larson	0.58	3.37	0.61	0.91	1.34	0.98	-



- 本研究基于CSNS Back-n装置使用NTOX谱仪和Li-Si束流监测器对聚四氟乙烯样品进行基于飞行时间法的中子透射实验并对 ^{12}C 的影响进行扣除, 得到 ^{19}F 的中子全截面实验测量值。
- 通过GammaFlash事件的到达时间分布得到中子飞行时间计算的定时起点, 通过裂变计数-中子能谱、带电粒子计数-中子能谱的共振峰拟合计算得到较为准确中子飞行距离, 实现中子能量的标定。通过对中子能谱进行双束团解谱可以计算得到准确的中子透射率和中子全截面。
- 同ENDF/B-VIII.1和JENDL-5数据对比, 实验测量结果在20 MeV以下能区与评价数据较为接近, 在20 MeV以上的测量结果整体偏小。两种探测器在0.3 eV到200 keV的测量结果一致性揭示了 ^{235}U 的共振能区对基于飞行时间法的中子全截面实验测量干扰较小。两个探测器不确定度较大的区域集中在100 keV-200 keV的共振区。本研究测得的20 MeV以上数据, 平均不确定度为4.25%, 可以为该能区进行数据补充。
- 未来将选用更薄的样品开展氟在共振区的全截面测量实验, 获得keV能区精确实验数据。由于在50-100 MeV处存在较强得GammaFlash的干扰, 数据分析上限现在做到50 MeV, 未来开展精细数据分析或补充实验实现高能区的氟中子全截面数据。





核物理与化学研究所
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY

Thank you for your attention!

