



南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

基于Back-n中子实验装置氢标准截面测量与分析

肖友淳¹, 肖敏¹, 陈永浩^{2,3}, 陈振鹏⁴, 黄文鑫¹, 薛洁明⁵, 易晗^{2,3}, 樊瑞睿^{2,3}, 韩旭⁶, 郑波¹, 程品晶¹, 栾鹏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

4.清华大学物理系

5.中国原子能科学研究院

6.西安交通大学

中国·衡阳 2026年7月14-16日



目录



01

研究背景

02

实验过程

03

数据处理

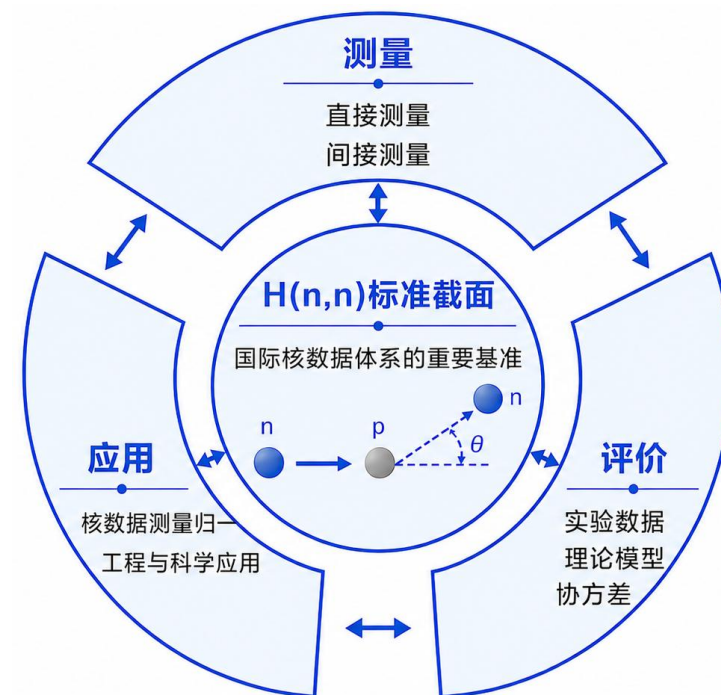
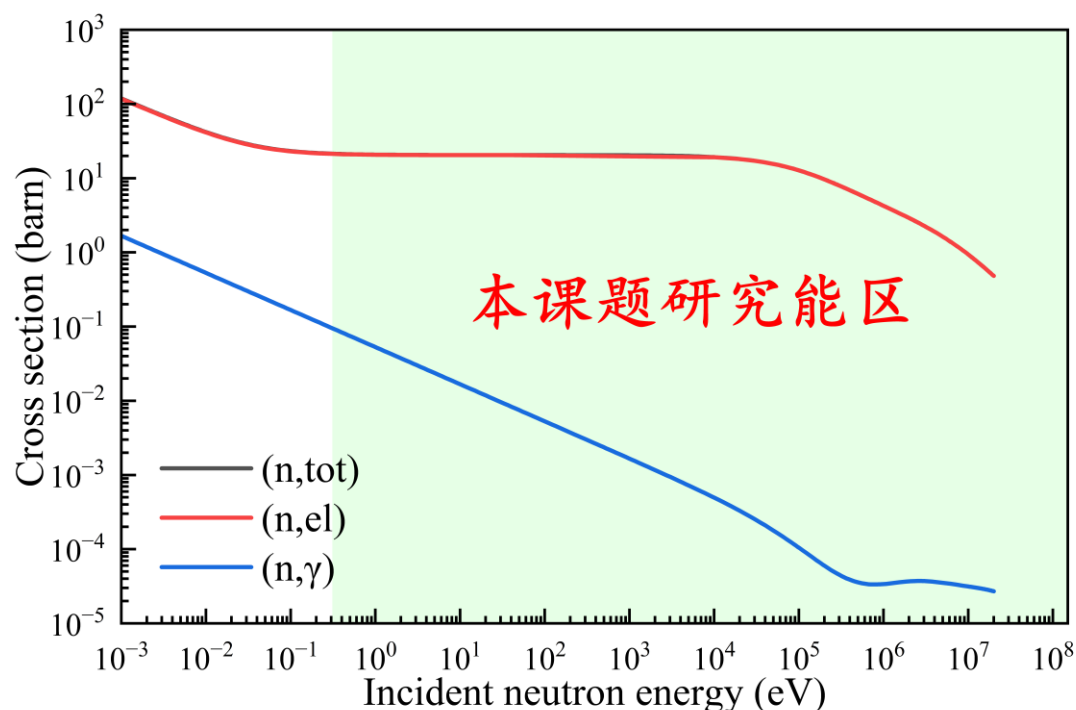
04

结果分析

05

总结展望

- 氢中子弹性散射反应 $H(n,n)H$ 是国际核数据体系中的重要标准反应，广泛用于中子核反应截面测量的归一化及核数据评价；
- 氢是核工程中重要的中子慢化与屏蔽材料，其截面数据精度直接影响反应堆物理计算、中子输运模拟及辐射防护设计的可靠性；
- 在本研究能区内， $H(n,\gamma)$ 截面远小于弹性散射截面，在一般实验不确定度范围内，氢的中子全截面可等效为弹性散射截面。因此，通过透射法测量氢中子全截面，可有效获得标准截面数据。

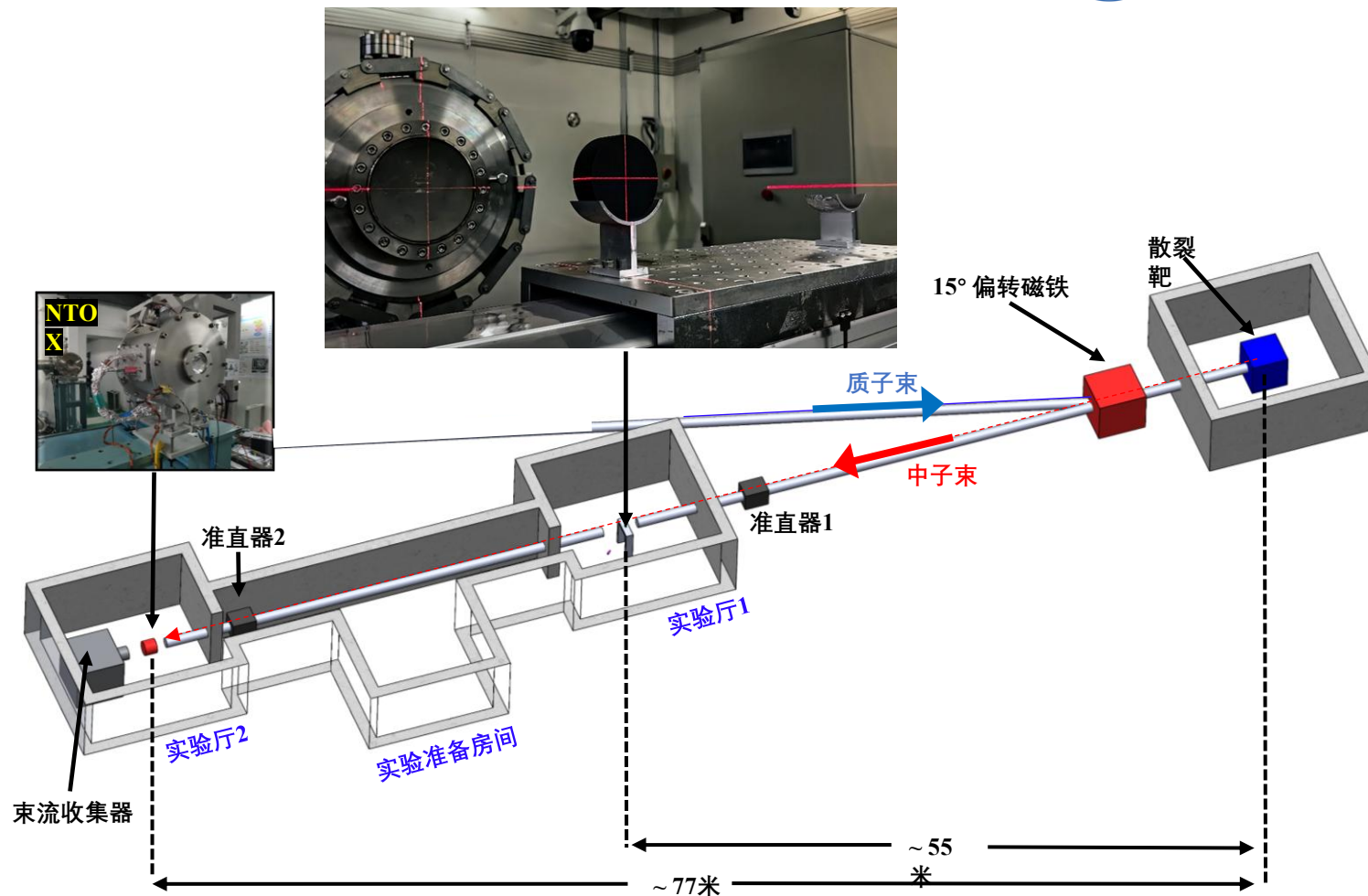




➤ 实验时间：2025年4月

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

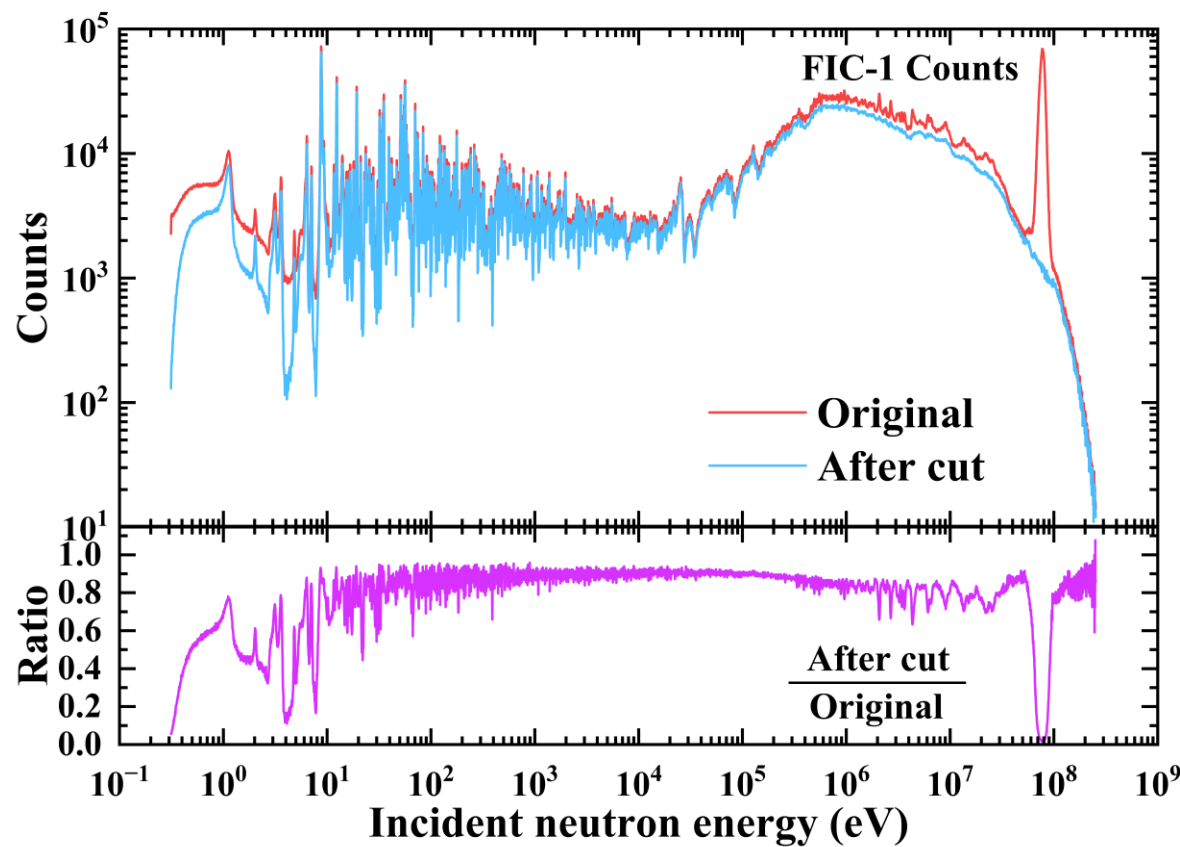
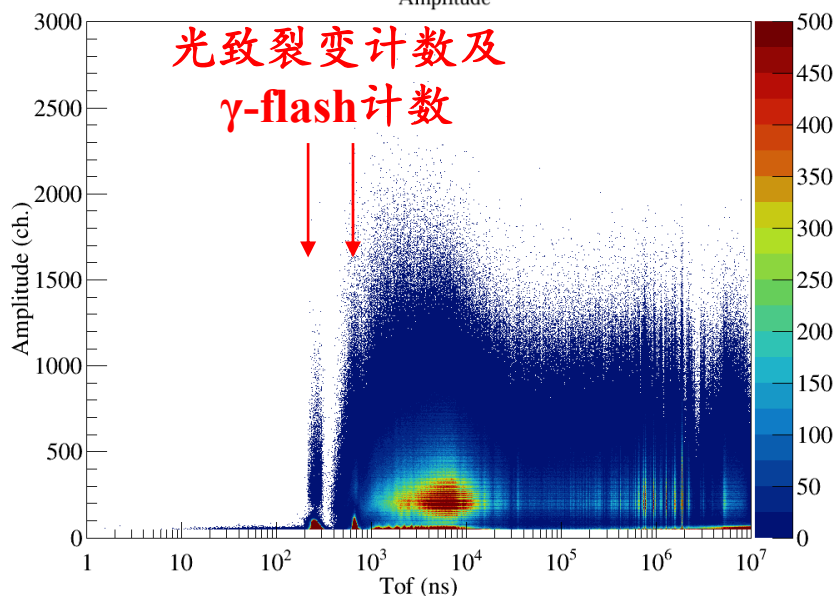
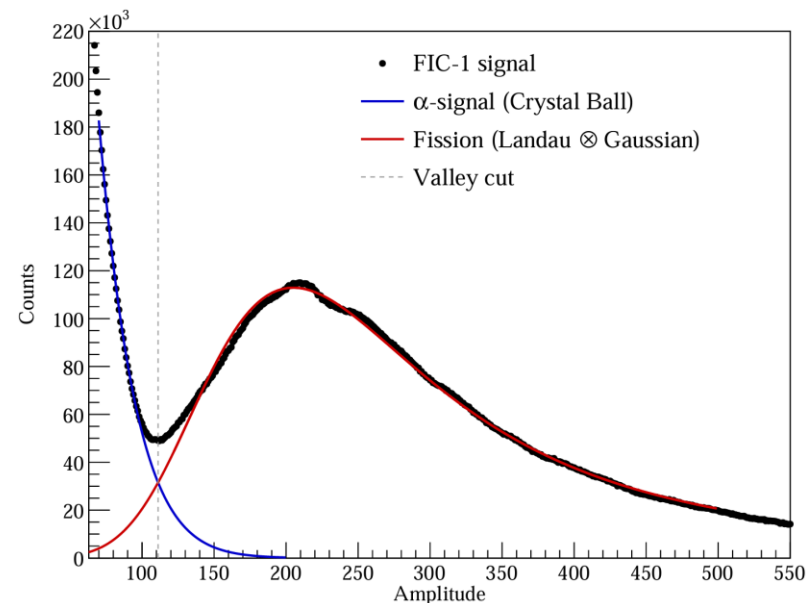


➤ 实验方法：透射法结合飞行时间法

➤ 截面确定： $\sigma(H) = \frac{1}{2} [\sigma(CH_2) - \sigma(C)]$

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

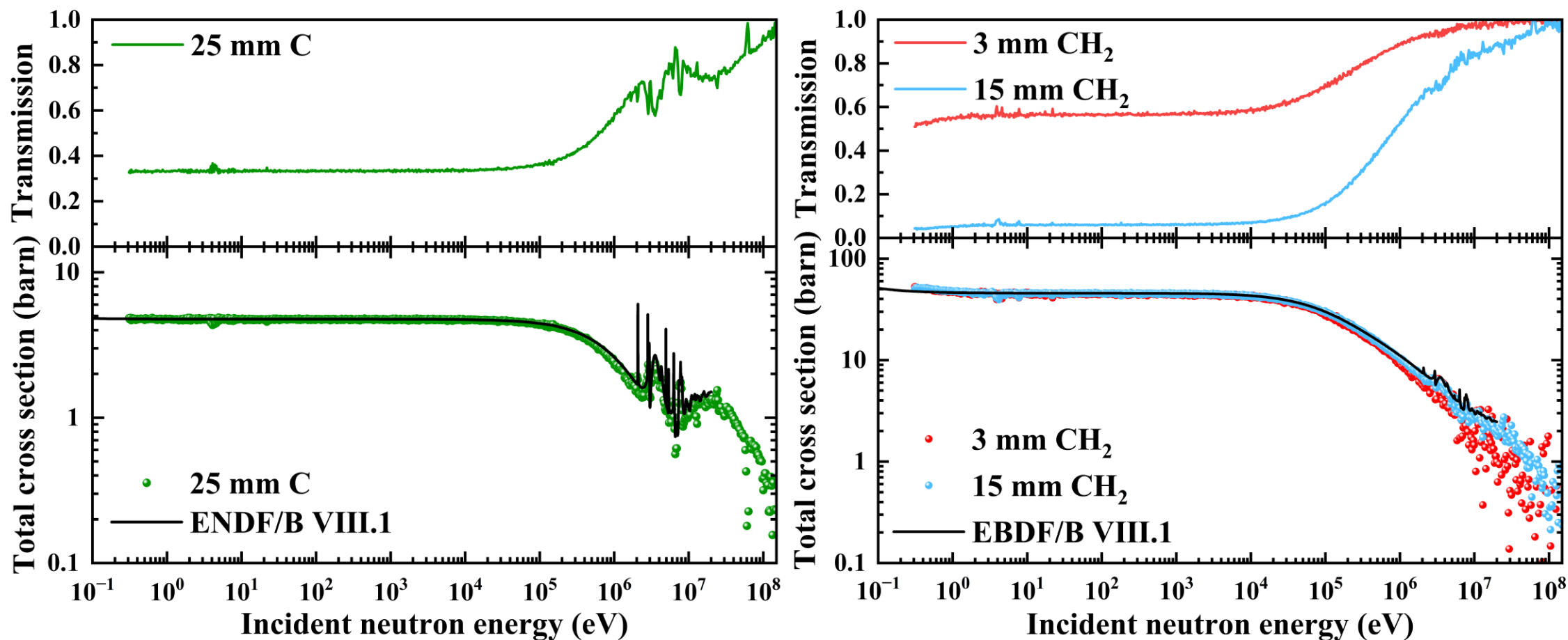
➤ 本底扣除



- 分别拟合 α 本底信号和裂变信号，区分本底与裂变；
- 利用第一束团 γ -flash的计数及其产生的光致裂变计数作为参考，识别并扣除第二束团 γ -flash及其诱发的光致裂变计数；

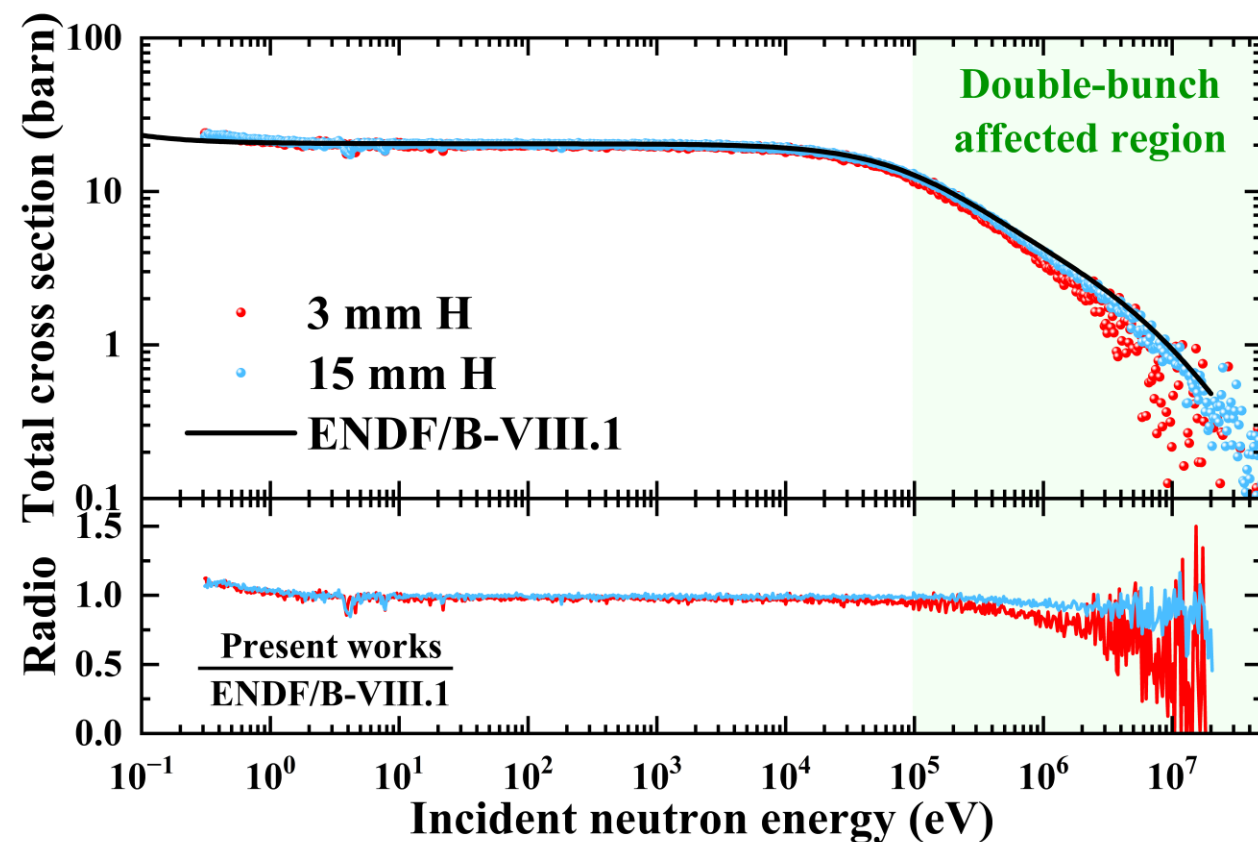
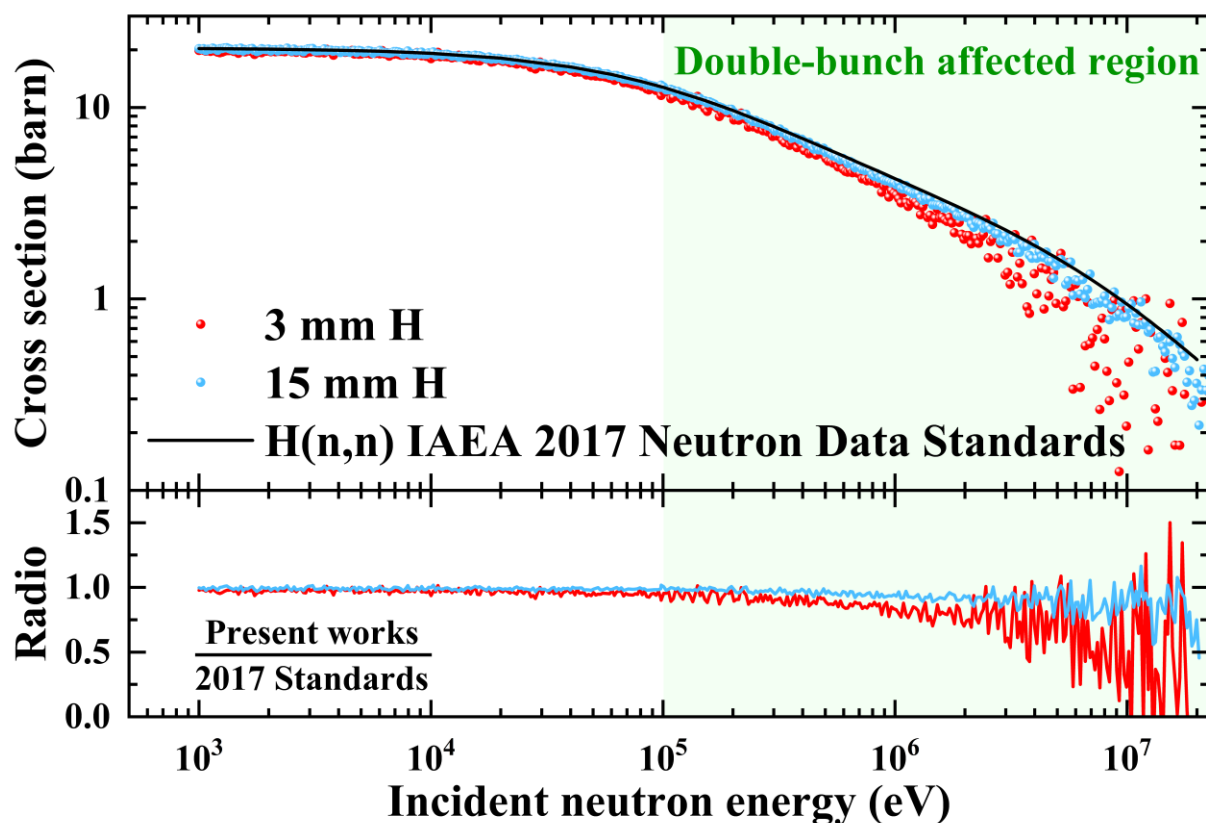
➤ 双束团解谱

- 高能区受双束团影响较大, 采用基于贝叶斯算法的解谱程序(doublebunchunfolder-V4.0) 对结果进行解谱。
- 解谱之后分别获得空靶、3 mm、15 mm聚乙烯和25 mm碳的4通道总计数, 对计数进行质子数归一后得到相应的透射率。



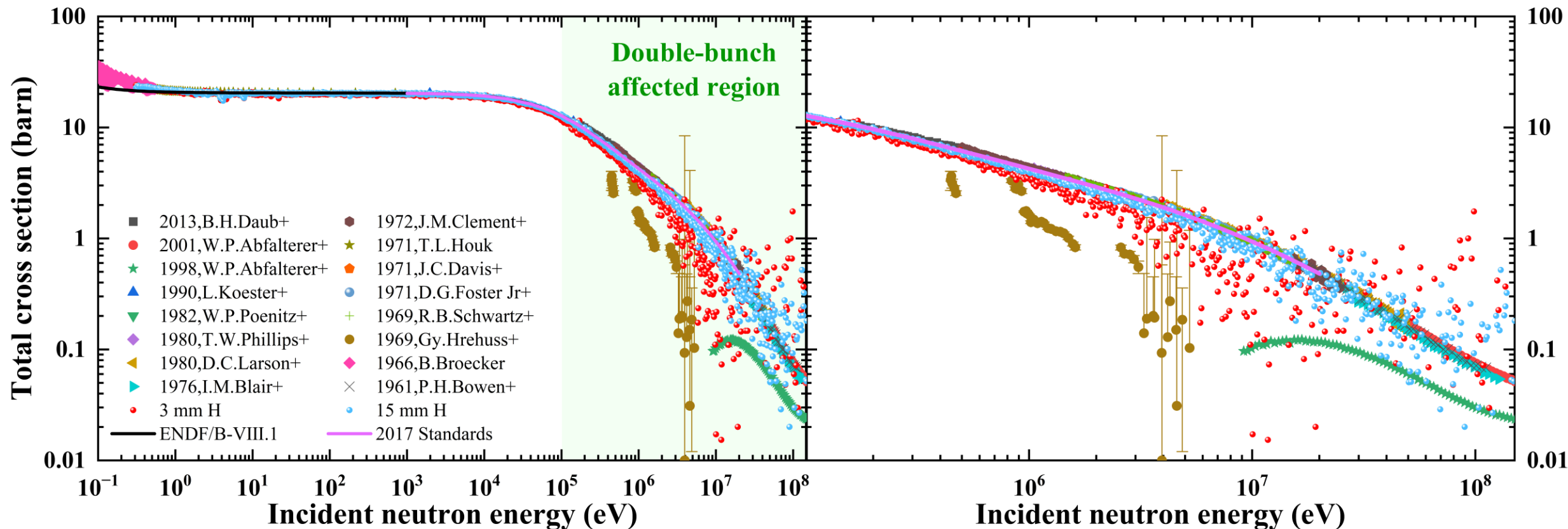
➤ 结果对比

- 在低中能区, 3 mm与15 mm样品测量结果**总体一致**, 并与 **IAEA 2017标准截面及ENDF/B-VIII.1评价数据**符合较好;
- 3 mm样品透射率在高能区较高, 高能区统计涨落**相对更明显**; 15 mm样品在高能区涨落较小;
- 当中子能量高于约100 keV后, 受双束团影响, 实验数据稍偏于评价数据, 但总体效果较好。



➤ 结果对比

- 本次测量结果与历史实验数据**总体变化趋势一致**，主要能区符合良好；
- 高能区实验数据统计涨落有所增大，但**20 MeV**以上仍与历史实验结果保持较好一致；
- 本工作将氢截面有效测量能区拓展至**60 MeV**以上，在最高约**150 MeV**处仍能较好反映截面的整体变化趋势。



➤ 不确定度分析

□ 对统计不确定度的考虑

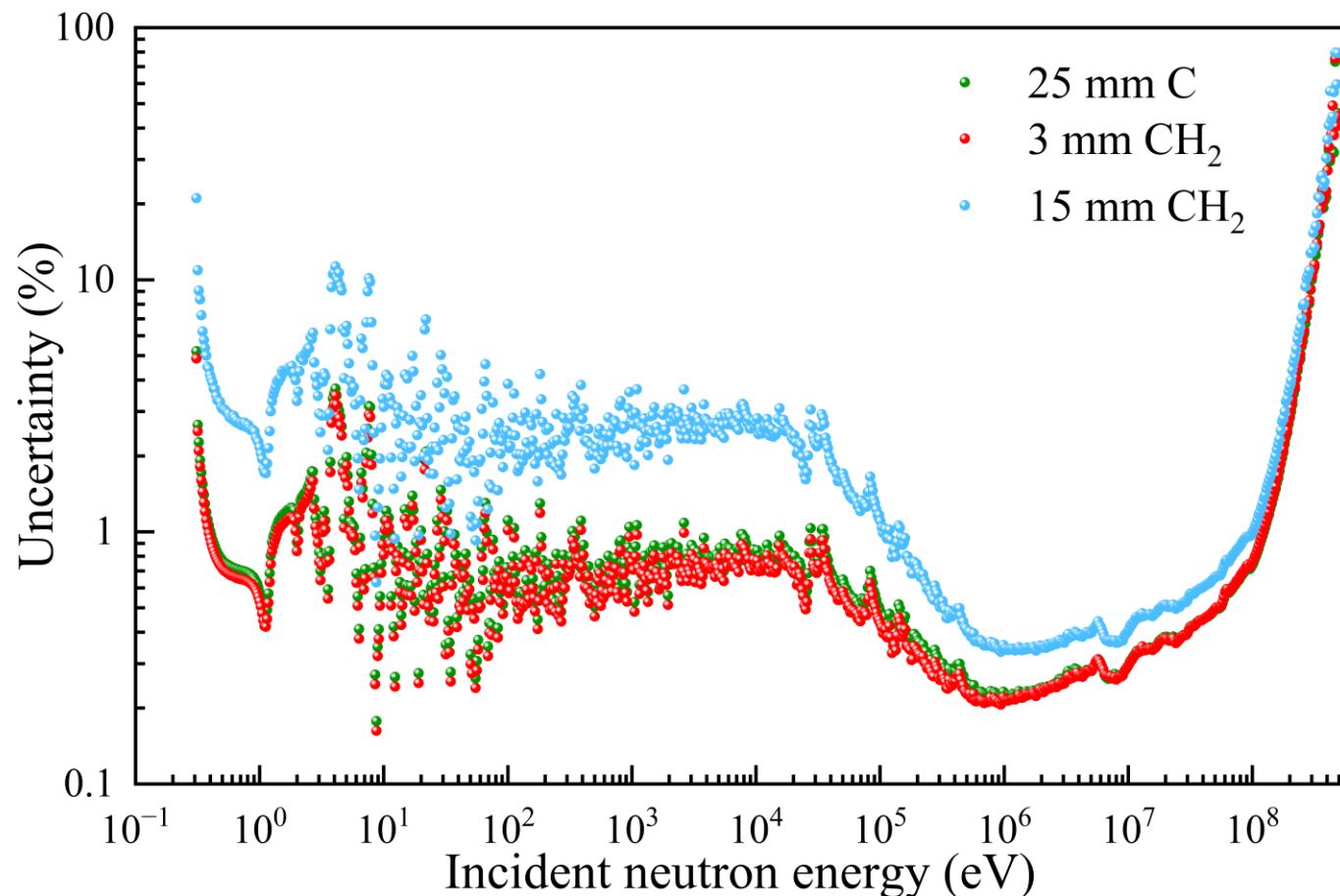
只考虑中子计数统计误差时，靶的透射率为：

$$T = \frac{N_i/P_i}{N_0/P_0},$$

其中 N_i 和 N_0 分别为有靶和空靶计数， P_i 和 P_0 为对应质子数。

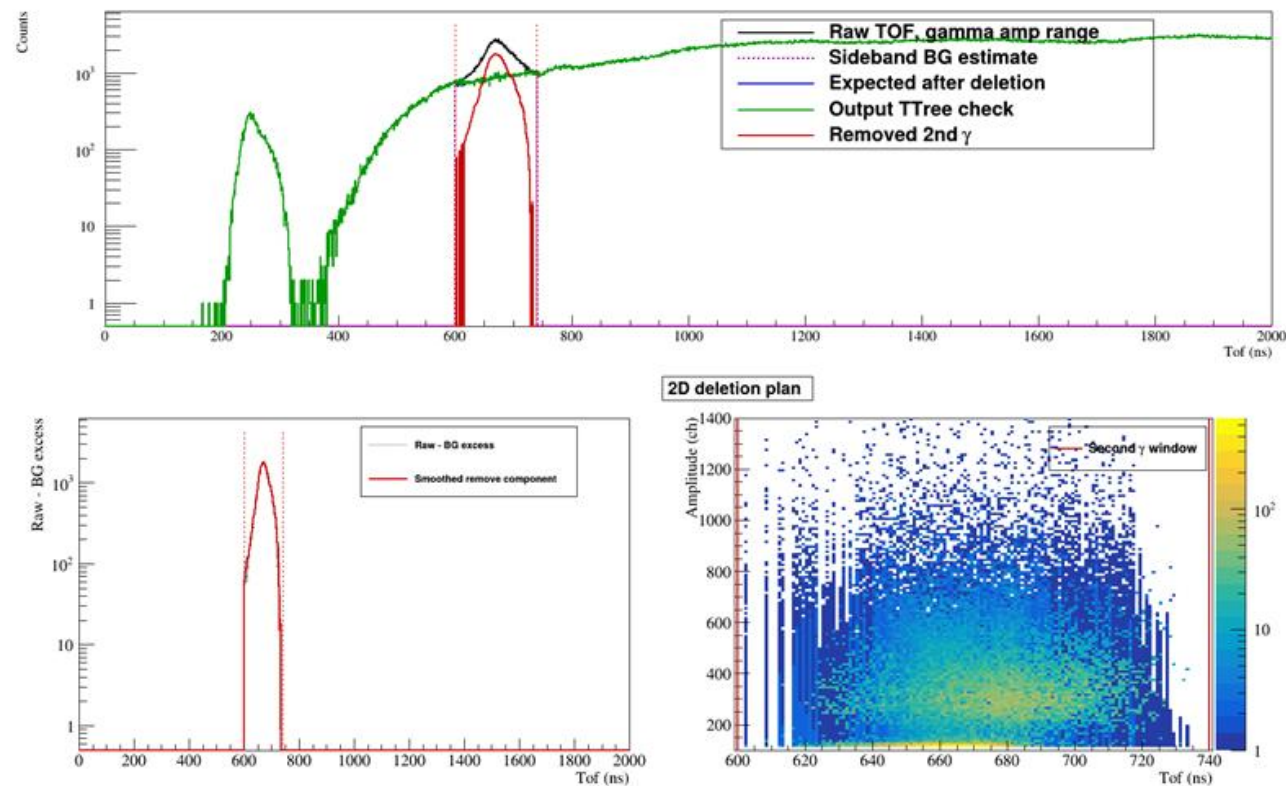
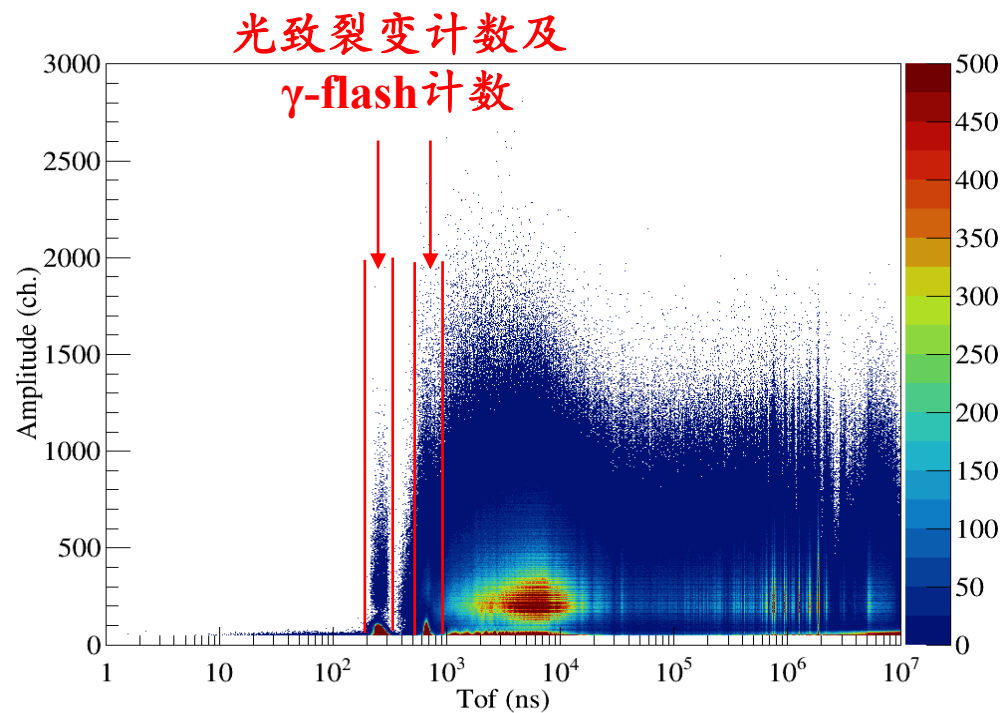
若质子数仅作为归一化常数，不考虑其不确定度，则透射率的相对统计不确定度为

$$\frac{\Delta T}{T} = \sqrt{\frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_0}}$$



► 不确定度分析

□ 对扣除光致裂变计数误差的考虑



扣除后的计数 $N_{\text{after}} = N_{\text{before}} - N_{\gamma}$

若只把被扣除的光致裂变计数看作泊松统计量，则其绝对不确定度为： $u(N) = \sqrt{N_{\gamma}}$

相对不确定度为： $\frac{u(N)}{N_{\text{after}}} = \frac{\sqrt{N_{\gamma}}}{N_{\text{after}}}$

► 不确定度分析

□ 对质子束团脉宽带来误差的考虑

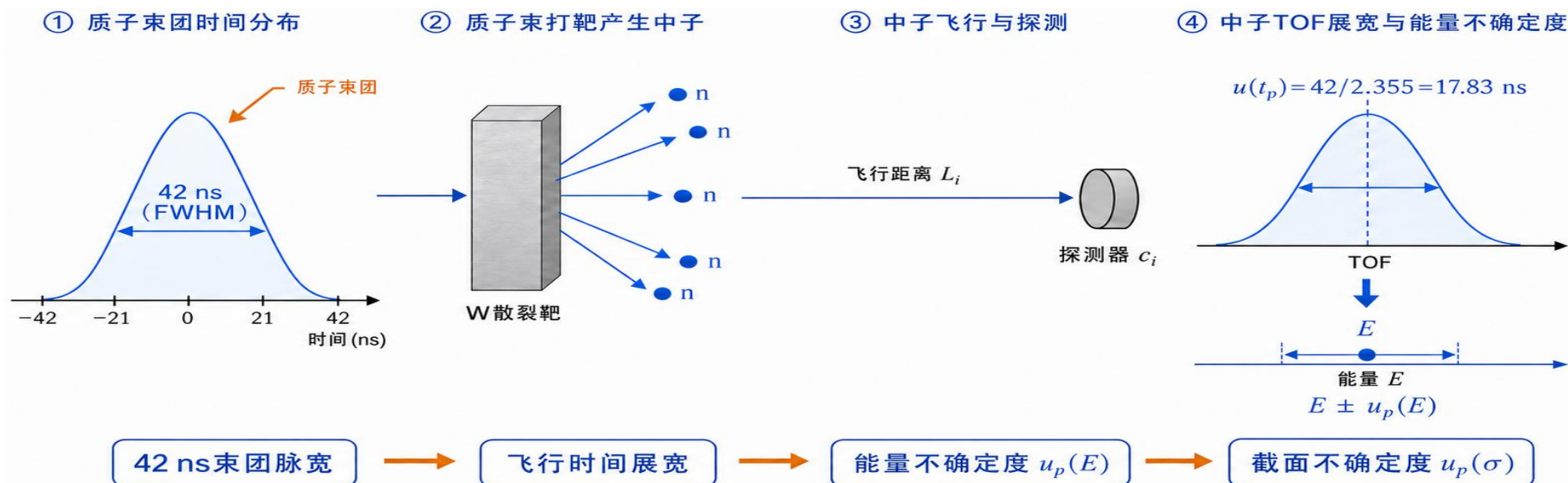
质子束团脉宽通过中子飞行时间传递至能量。结合实际飞行距离，计算质子束团脉宽引起的中子能量校定不确定度。

根据飞行距离公式，质子束团脉宽引起的能量校定不确定度为

$$u_{p,i}(E) = \frac{m_n c^3 u(t_p)}{L_i} \left(1 + \frac{E}{m_n c^2}\right)^3 \left[1 - \left(1 + \frac{E}{m_n c^2}\right)^{-2}\right]^{3/2}$$

质子束团脉宽首先引起中子能量不确定度，再通过截面随能量的变化率传播到截面：

$$u_{p,i}(\sigma) = \left| \frac{d\sigma}{dE} \right| u_{p,i}(E)$$



➤ 不确定度分析

□ 对计算氢截面误差传递的考虑

由于氢截面并非直接测量得到，而是由**聚乙烯样品截面扣除碳截面**后获得，因此其不确定度需由聚乙烯截面与碳截面的不确定度**共同传播**。考虑聚乙烯截面与碳截面之间的相关性，氢截面数据的方差可写为：

$$(\Delta\sigma_H)^2 = \frac{1}{4} [(\Delta\sigma_{CH_2})^2 + (\Delta\sigma_C)^2 - 2\text{Cov}(\sigma_{CH_2}, \sigma_C)]$$

上式协方差主要来源于两组透射率计算中使用的共同误差源，包括共同**空靶计数、共同空靶解谱误差以及共同系统误差**等：

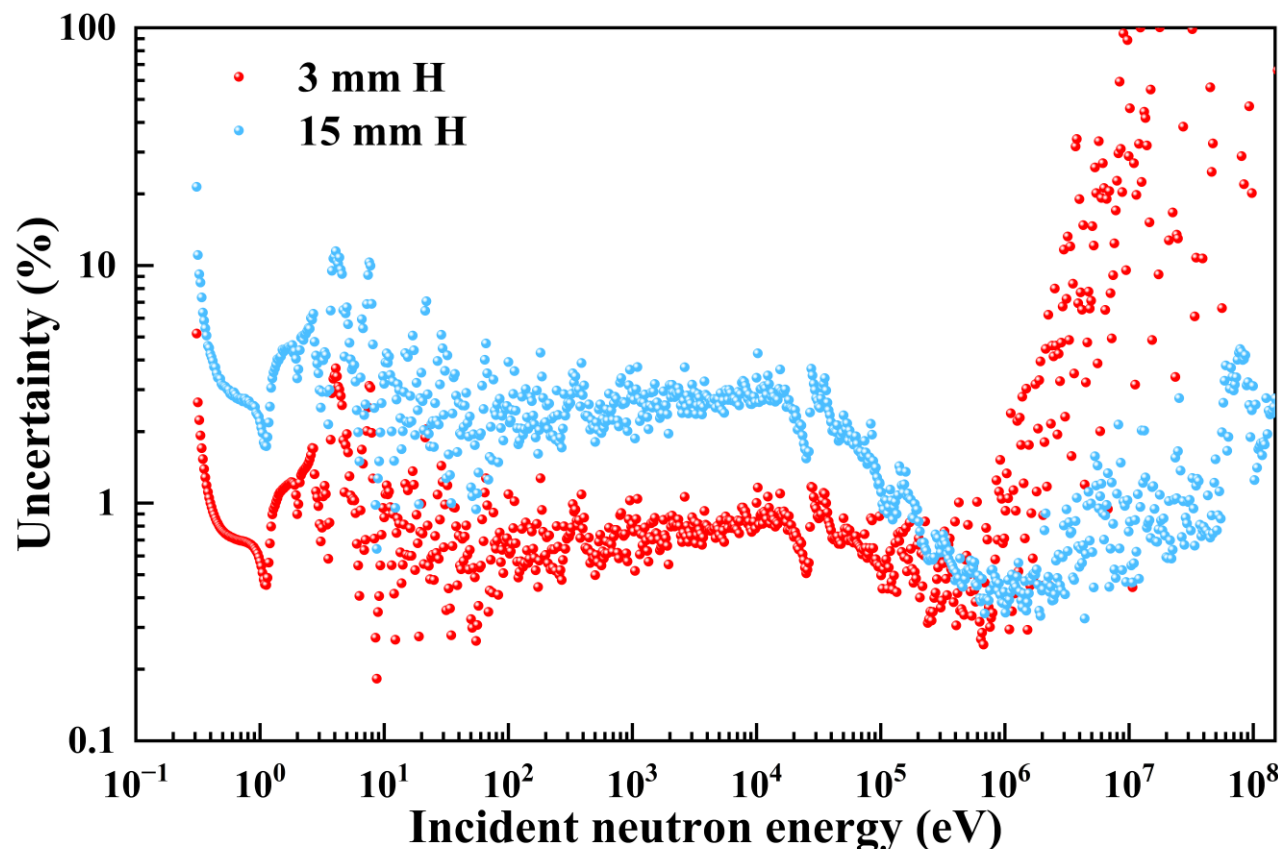
$$\text{Cov}(\sigma_{CH_2}, \sigma_C) = \sigma_{CH_2}\sigma_C \left[\frac{1}{N_0} + e_0^2 + e_{\text{sys}}^2 \right]$$

氢截面的总不确定度为

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{1}{\ln T} \left\{ -\sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + (\ln T)^2 \left[\left(\frac{\Delta nd}{nd}\right)^2 + (e_i)^2 + (e_0)^2 + u_\gamma^2 + u_{\text{sys}}^2 + u_{\text{beam}}^2 \right]} \right\}$$

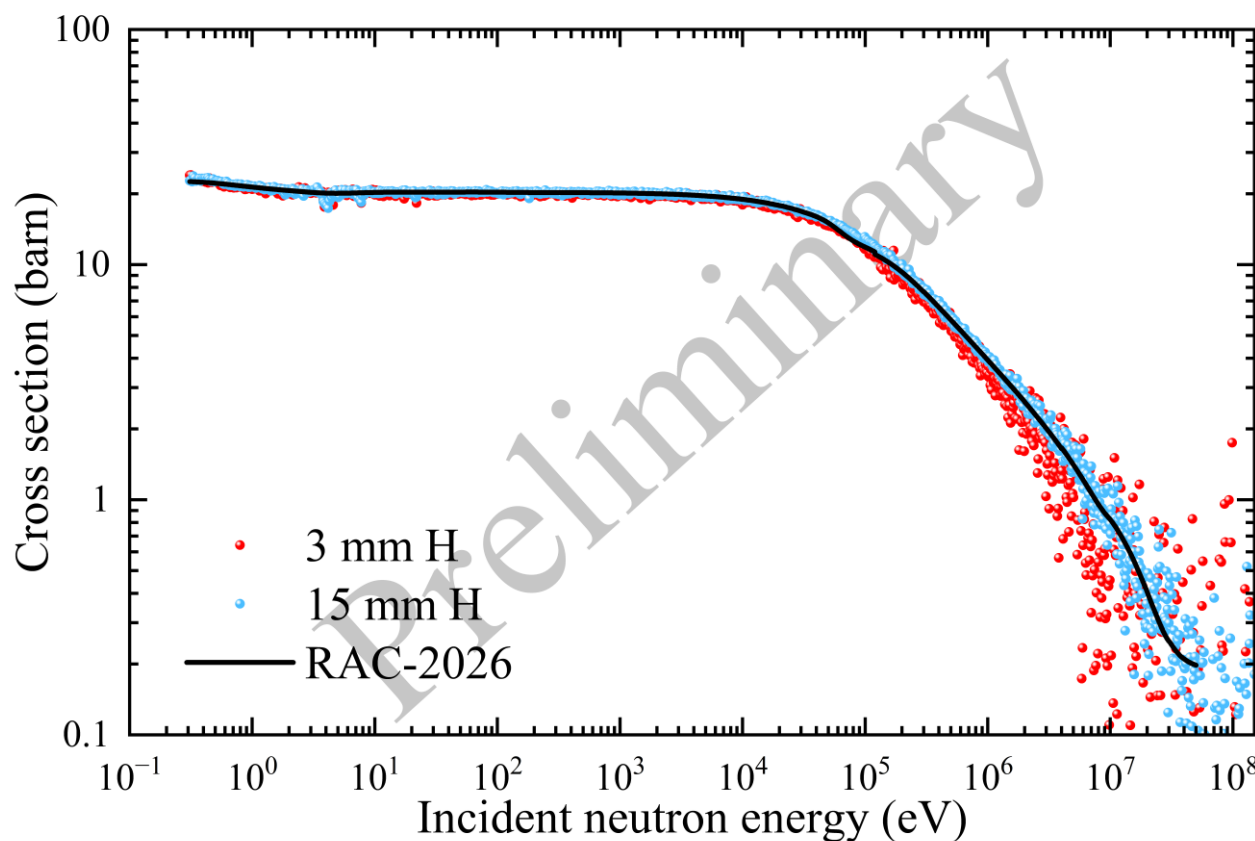
► 不确定度分析

- 在 **eV - keV** 能区, 3 mm H 总不确定度总体维持在约 **0.5% ~ 1%**, 明显低于 15 mm H, 主要得益于 3 mm 聚乙烯在该能区透射率维持在 0.6 左右以及更长的测量时间;
- 在 **MeV** 以上, 3 mm H 不确定度快速增大, 主要是薄样品透射率逐渐接近 1, 使 $\ln T$ 变小, 并在聚乙烯与碳截面相减得到氢截面时进一步放大误差; 而 15 mm 靶透射率在高能区维持较好, 总不确定度也较为低。



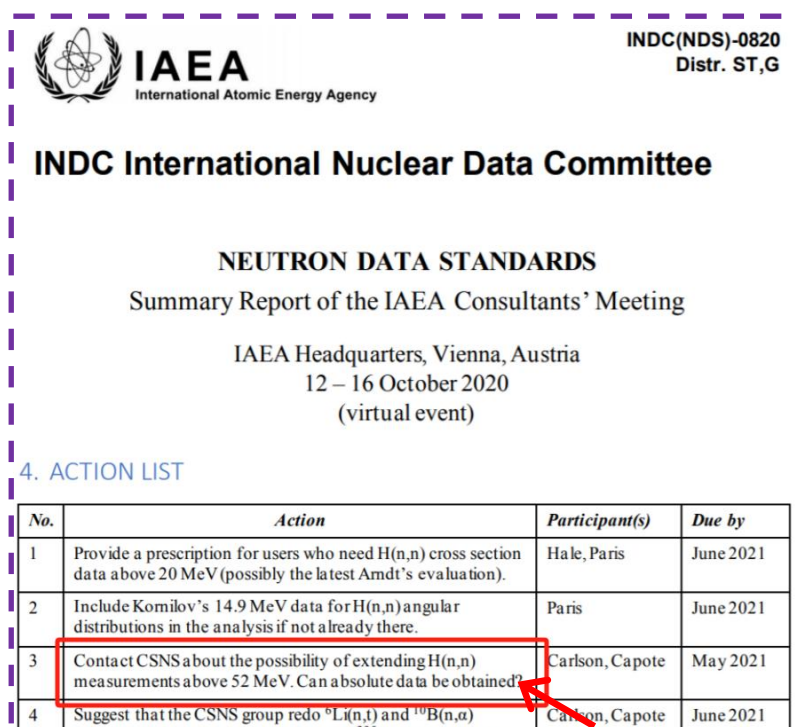
➤ 基于RAC程序 R矩阵理论计算

- 采用R矩阵理论对氢截面进行计算，初步获得RAC理论计算结果；
- 理论曲线较好地再现实验数据，3 mm H和15 mm H实验数据在主要能区内均围绕理论曲线分布，表明两种厚度样品获得的截面结果具有较好的一致性。
- MeV以上实验数据离散程度增大，R矩阵曲线仍能够给出连续、平滑的截面变化趋势。

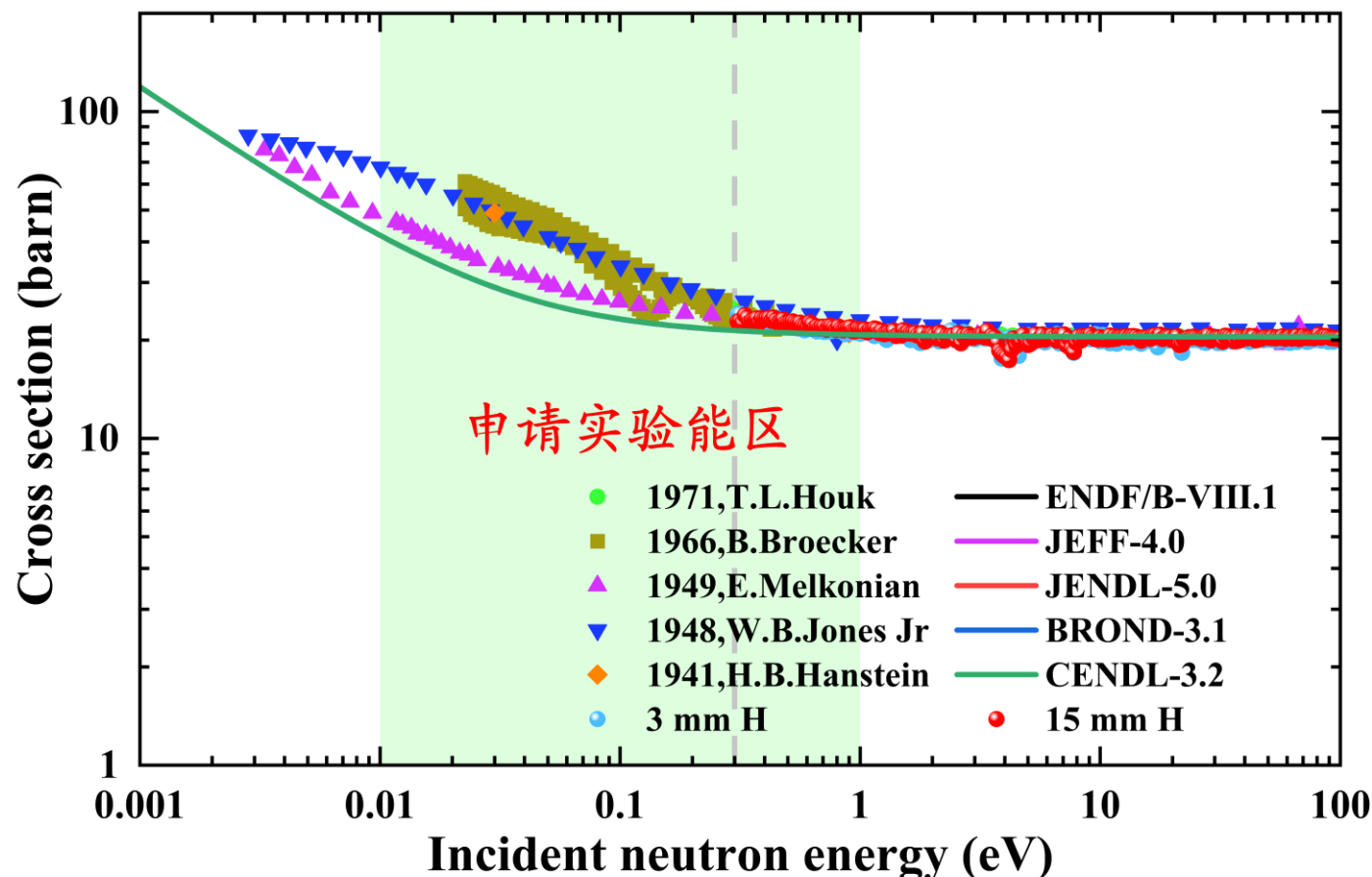




- 验证了CSNS Back-n宽能区氢截面测量的可行性，将实验分析能区拓展至百MeV量级，为国际氢标准截面评价提供新的数据与方法基础。
- 现有3 mm与15 mm实验结果在低能区均呈现相对评价库偏高的趋势，各实验数据同样出现分歧，为进一步验证该现象并提高测量精度，我们已申请新一轮CSNS Back-n实验束流，重点开展0.01 - 1 eV能区的高统计测量。



Contact CSNS about the possibility of extending H(n,n) measurements above 52 MeV. Can absolute data be obtained?





南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

Thanks for your attention!

