

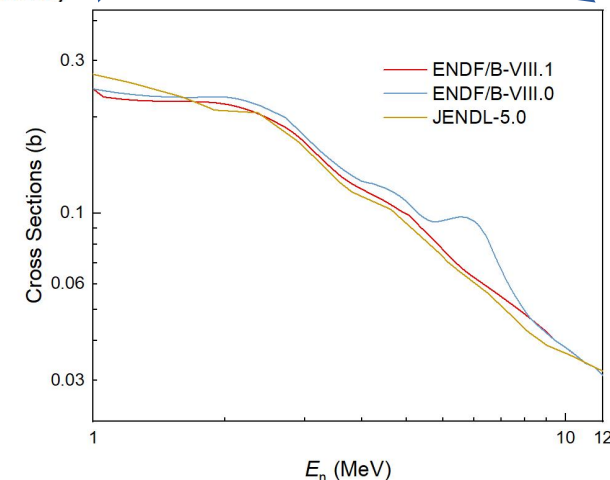
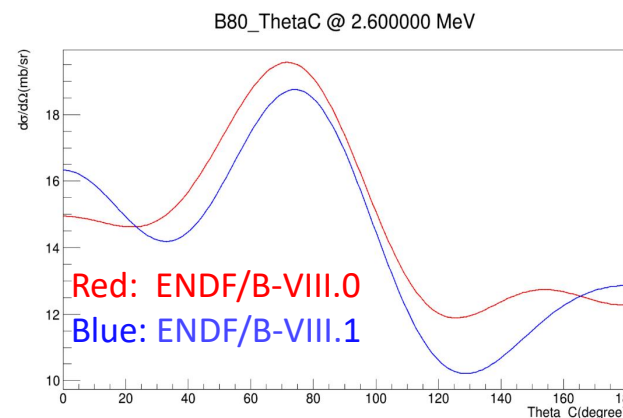
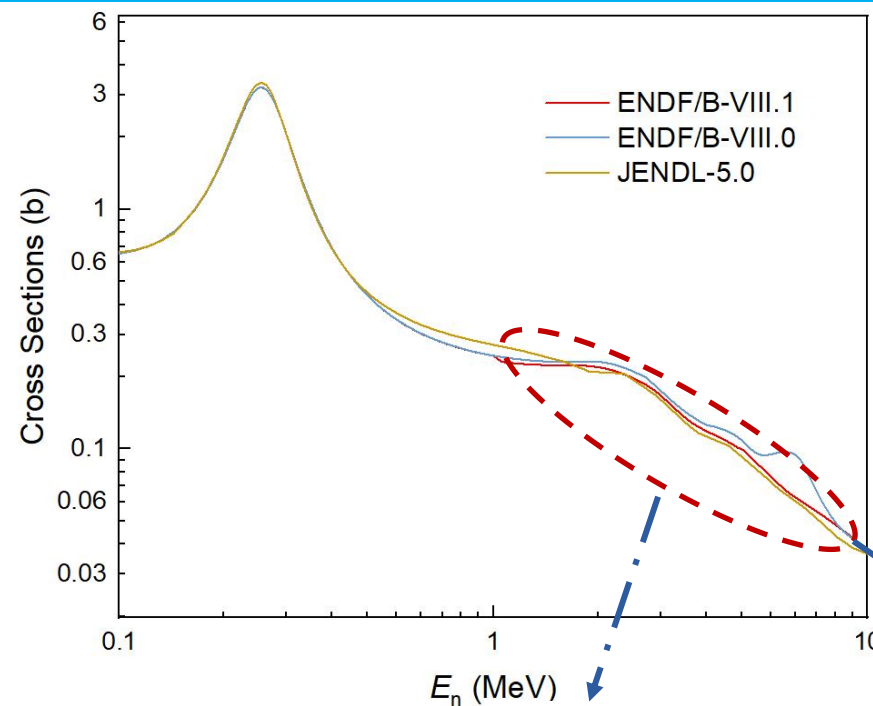
MeV中子能区 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应截面测量

蒋伟，孙晓慧，孙康，罗秋月，樊瑞睿
中国科学院高能物理研究所
散裂中子源科学中心

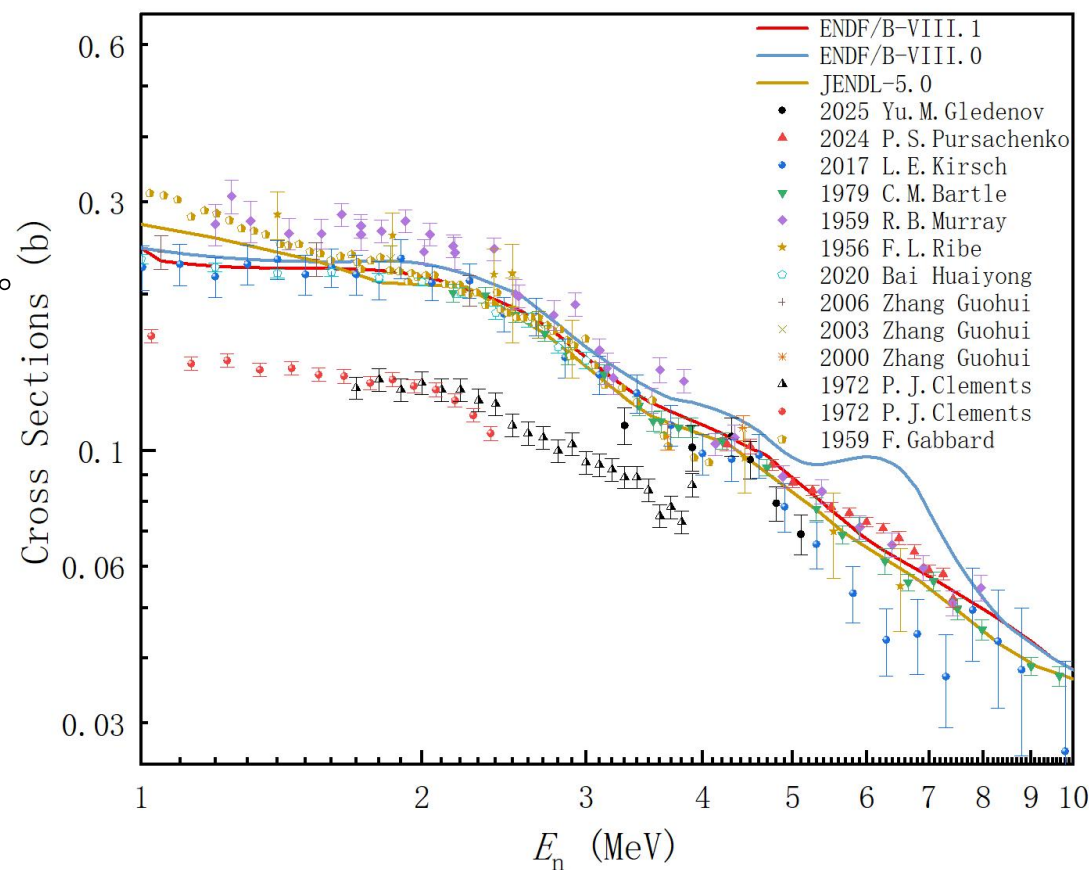
2026.7.15

- 研究背景
- 实验设置
- 数据分析
- 初步实验结果
- 总结

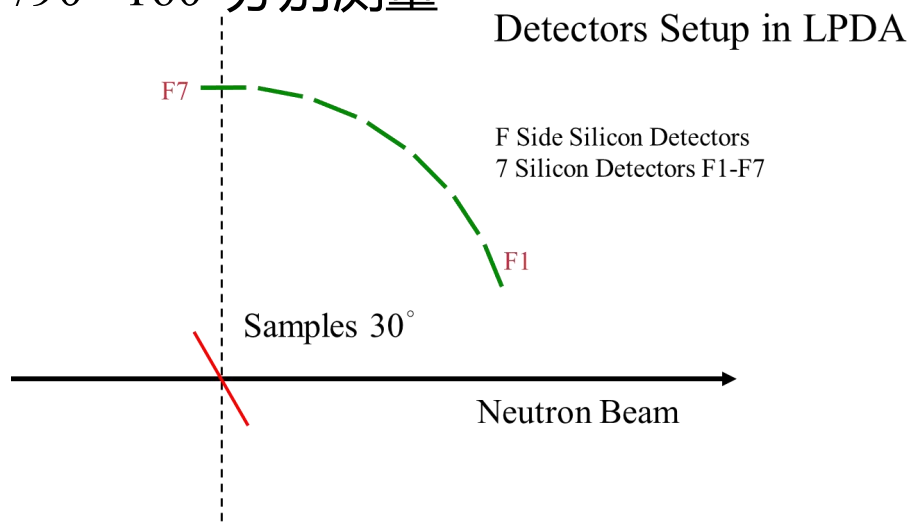
- ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反应的截面数据在核工程与核物理领域至关重要。
- 热中子至1MeV中子能区的该反应截面已被广泛采用为中子标准截面。
- MeV中子能区，不同数据库给出的评估截面数据存在10%至50%的显著偏差。
- 在5至8 MeV中子能区，ENDF/B-VIII.0数据库的评估数据存在共振结构，而ENDF/B-VIII.1及其他数据库的评估结果均无此共振特征。



- 能量高于3 MeV的 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反应截面测量结果相对匮乏。
- 近期，P. S. Prusachenko (2024) 和 Yu. M. Gledenov(2025)完成了最高至7.5 MeV的截面测量工作。
- 我们此前基于Back-n装置开展的 ${}^6\text{Li}(n, t)\alpha$ 反应测量 (Chinese Physics C 44(2020)014003)，其中子能量上限为3 MeV。
- 进行R矩阵拟合计算时，需要采用MeV对应的激发态参数。
- 微分截面是核数据评价工作不可或缺的基础数据。



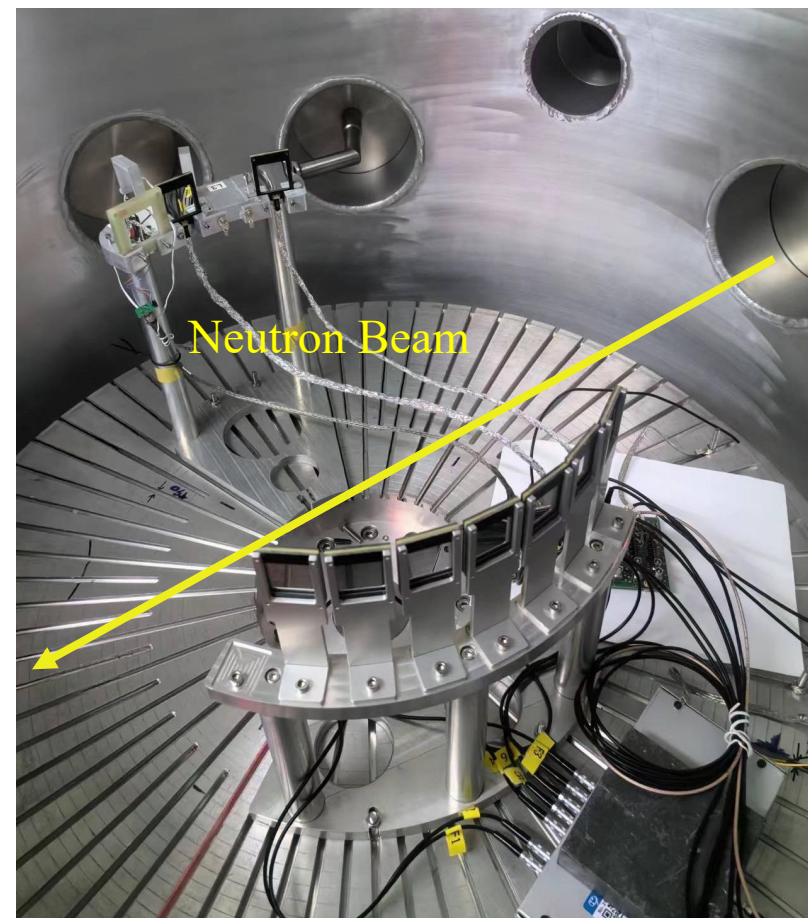
- 7 Si-PIN;
- 实验厅—LPDA真空靶室, 飞行距离: ~ 58 m
- 20° - 90° / 90° - 160° 分别测量



Detector	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Angle($^\circ$)	21.4	32.86	44.29	55.71	67.14	78.57	90
D(mm)	189.5	189.5	189.5	189.5	189.5	189.5	189.5

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Detectors	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Angle($^\circ$):	91.4	102.86	114.29	125.71	137.14	148.57	160

准直器组合: 50mm&15mm
 ^6Li 样品处的束斑直径: $\sim 14\text{mm}$



- 1# ^{241}Am : 能量刻度用标准 α 源;
- 2# Al: 10.8 μm 厚Al 衬底;
- 3# Al+ ^6LiF : 单面 ^6LiF , 360 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 10.8 μm 厚铝衬; 直径6 cm.
- 4# **Al+ ^6LiF** : **单面** ^6LiF , 588 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 10.8 μm 厚铝衬; 直径3 cm. ^6Li 富集度95%.

测量时间:

20-90° : 72 h

90-160° : 18 h



1# Amplitude vs E_n 二维谱

- 粒子能量刻度
- 飞行时间刻度

2# 双束团解谱

3# 本底扣除

4# 氚事件选择

- 1D histogram of count vs. neutron energy

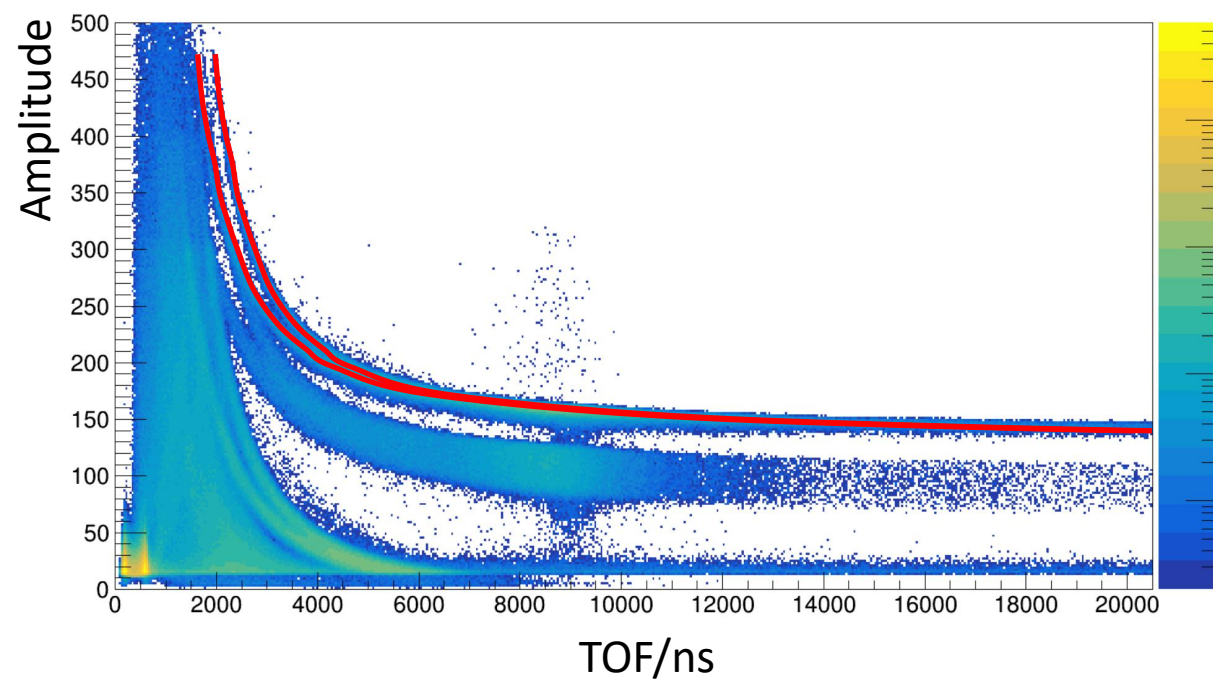
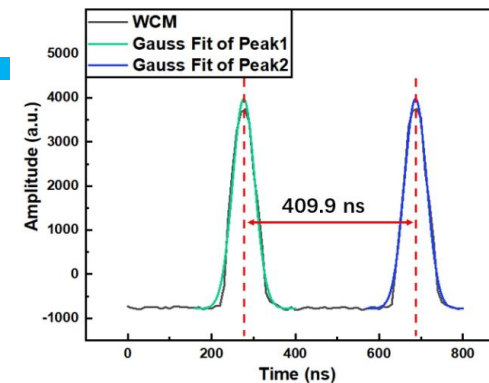
5# 微分截面归一

- 归一至0.1-0.4 MeV

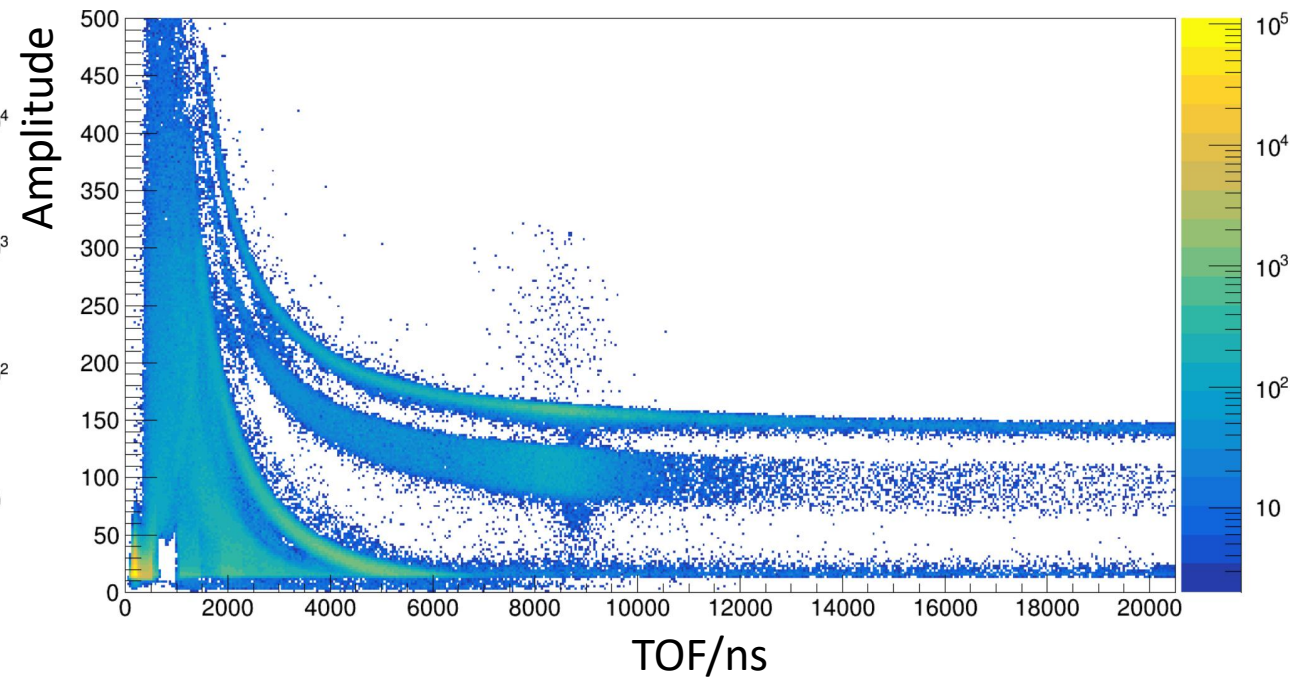
6# 勒让德多项式拟合

- 微分截面&角度积分截面

■ 双束团解谱

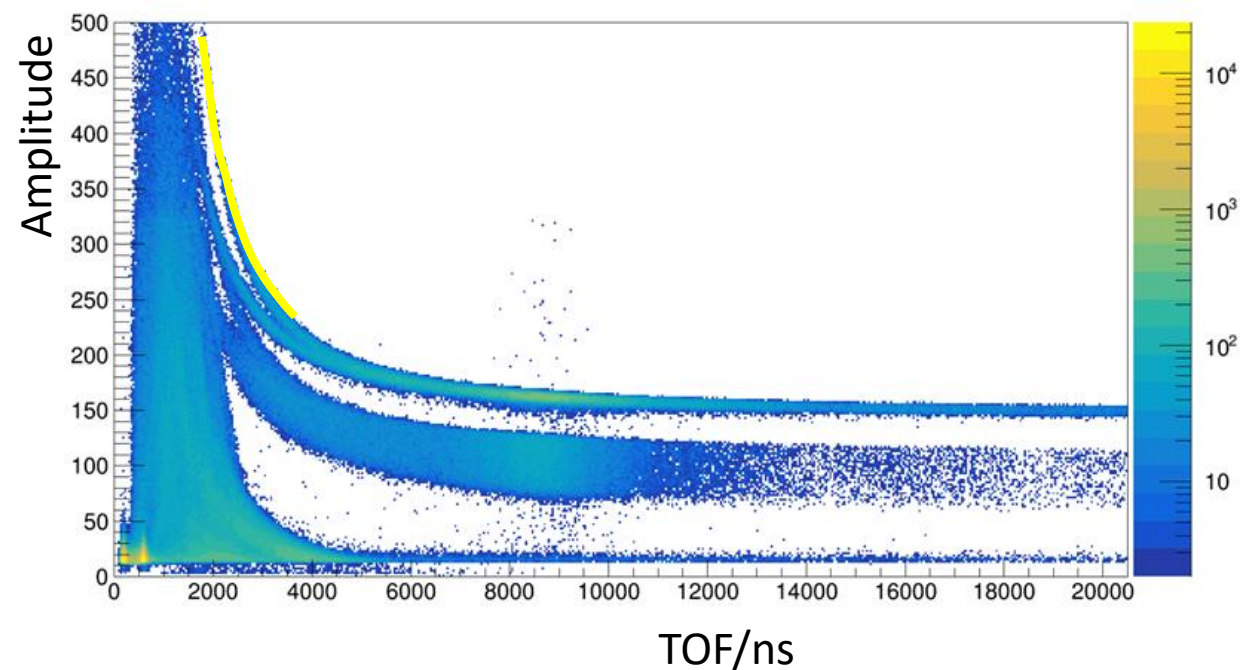
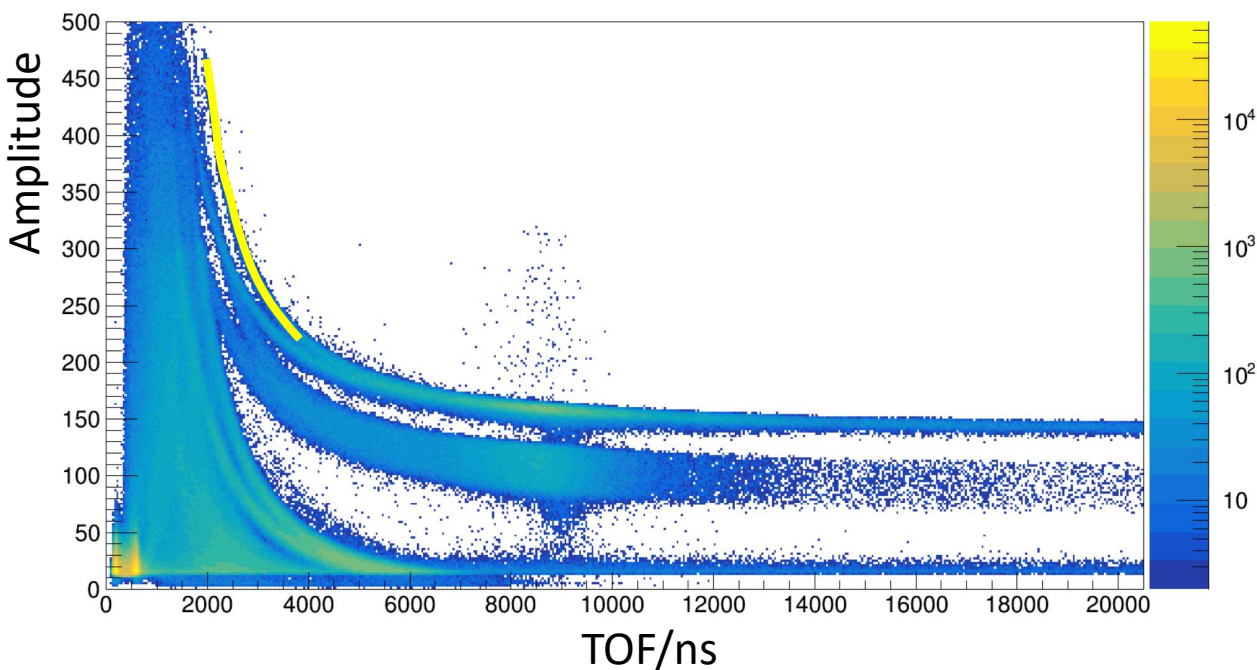


解谱前



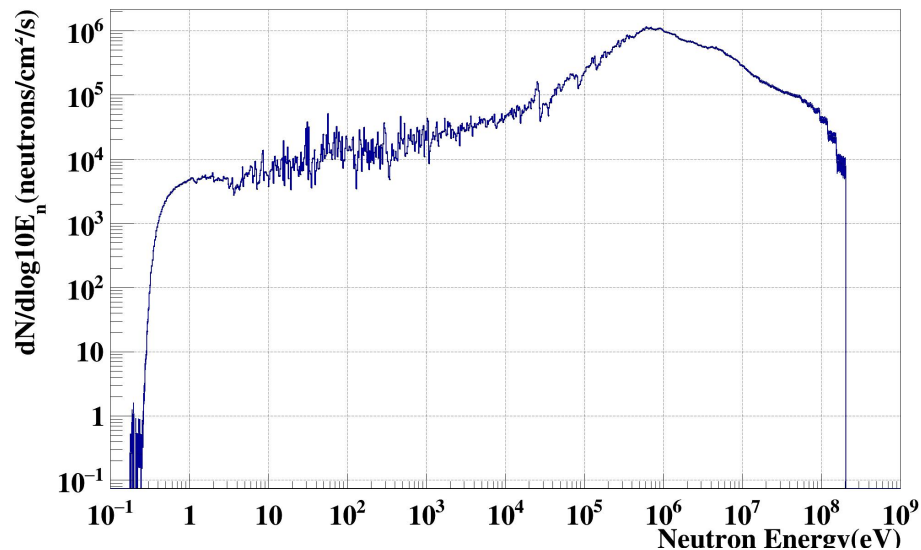
解谱后

- 在更高能量区间（例如大于4 MeV），两束团反应产生的氚核可在幅度 - 飞行时间谱中区分开，可选取第二束产生的氚核。
- 不同探测器对应不同能量区间，该方法主要适用于中子能量大于4 MeV的能区。



$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{E_n} = \frac{\text{count}(E_n)}{N_n(E_n) \cdot N_{\text{target}} \cdot \Omega_{\text{det}} \cdot \epsilon_{\text{det}}} = k_{\text{det}} \cdot \frac{\text{count}(E_n)}{N_n(E_n) \cdot N_{\text{target}}} \quad (1)$$

- $\text{count}(E_n)$: count of tritons at E_n
- $N_n(E_n)$: the number of the incident neutrons whose energy is equal to E_n , $\propto \text{flux}_{E_n} \times \text{proton}(t)$
- N_{target} : the number of target nuclei
- $\Omega_{\text{det}}, \epsilon_{\text{det}}$: the solid angle and the detecting efficiency of the detectors



ES#1中子能谱

■ 对于实验测量的微分截面:

- Fit it with Legendre Polynomials

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \cos \theta)$$
$$= \frac{\sigma_{n,x}(E)}{4\pi} \sum_{l=0}^L (2l+1) f_l(E) P_l(\cos \theta)$$

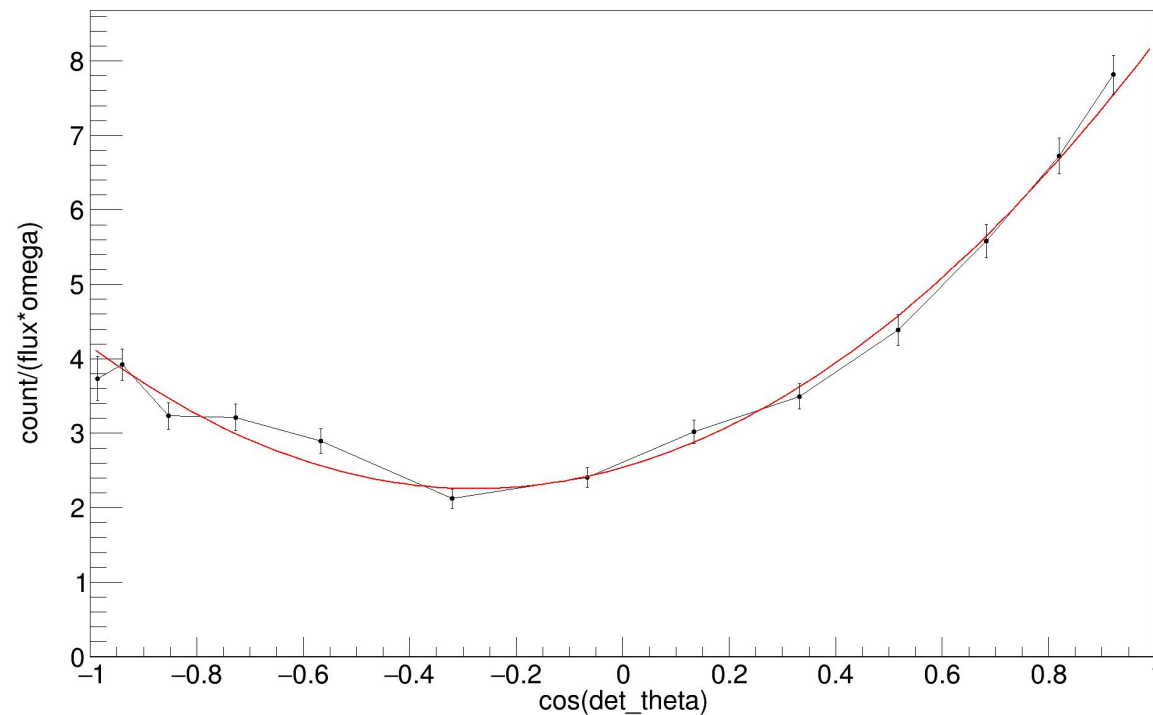
$$= \sum_{l=0}^L A_l P_l(\cos \theta) \quad (3)$$

■ 对于未归一的实验测量角分布

Integrate the fitting Legendre Polynomials along $\cos(det_theta)$

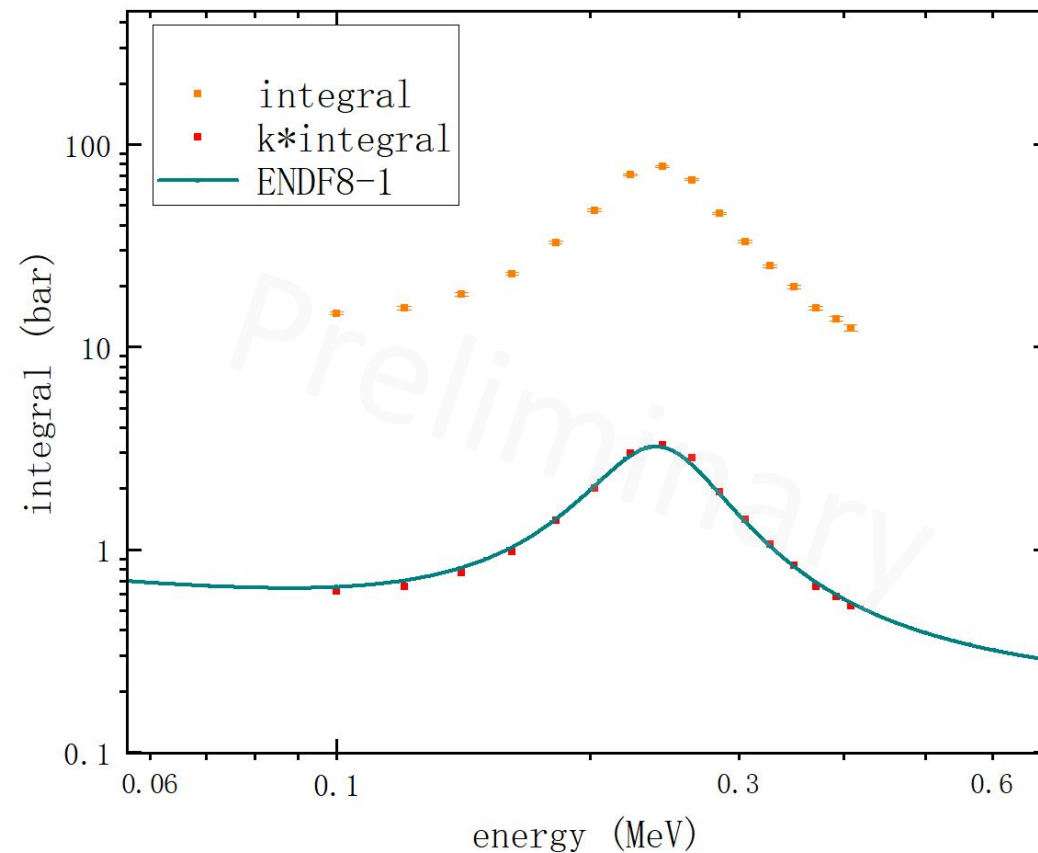
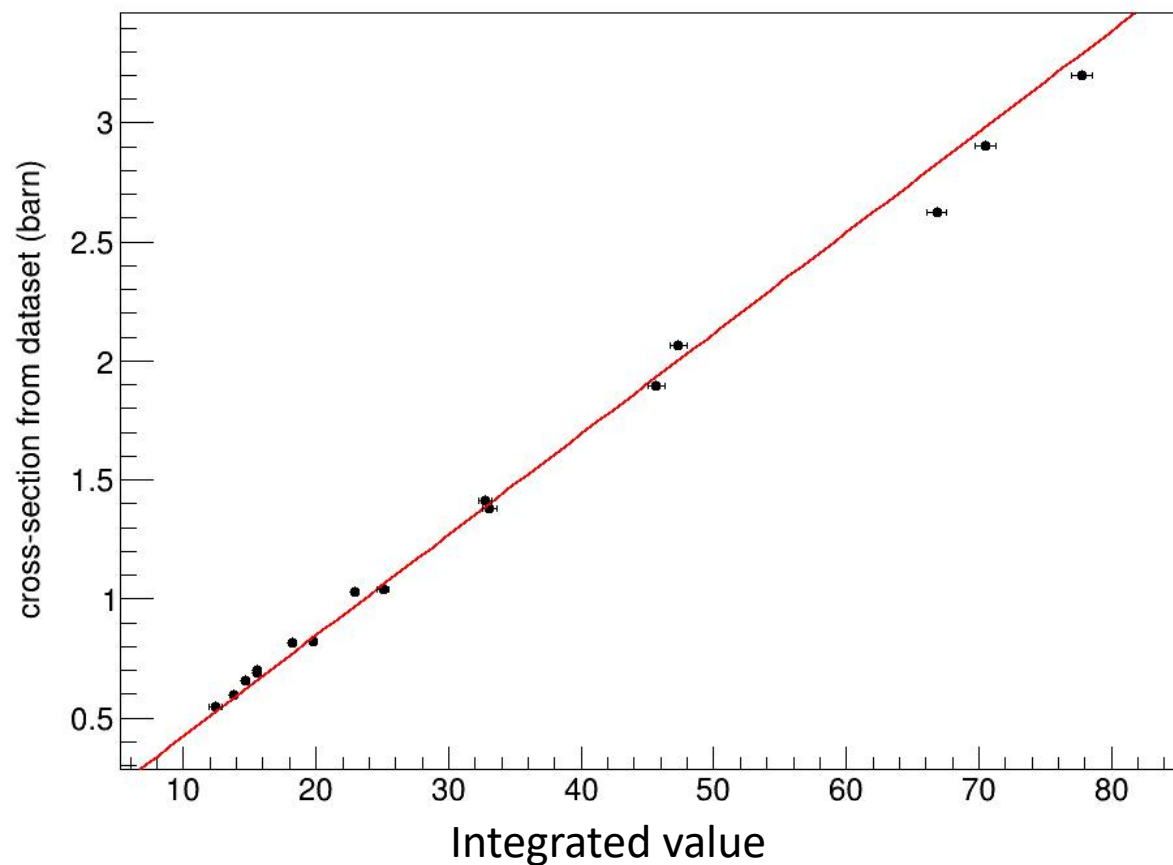
- Integral: $\sigma_{n,x}(E) = \int_{-1}^1 2\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \cos \theta) d\cos \theta \quad (4)$

Legendre Fit of Angular Distribution ($E_n=0.2023$ MeV)



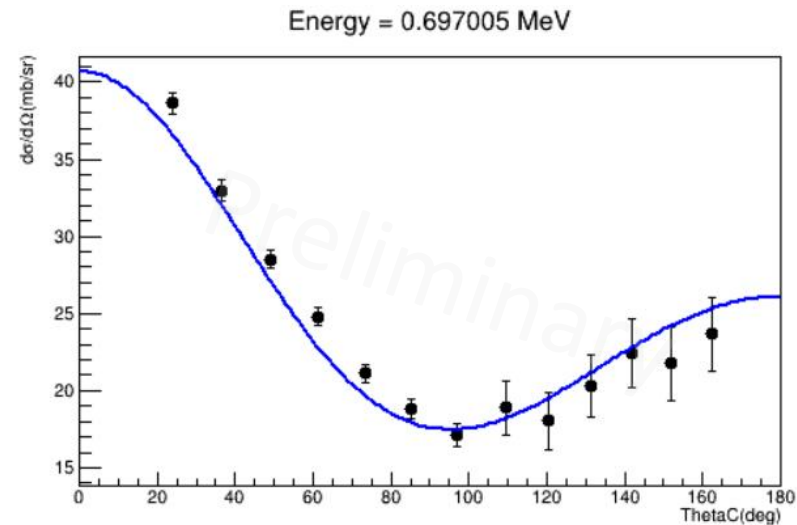
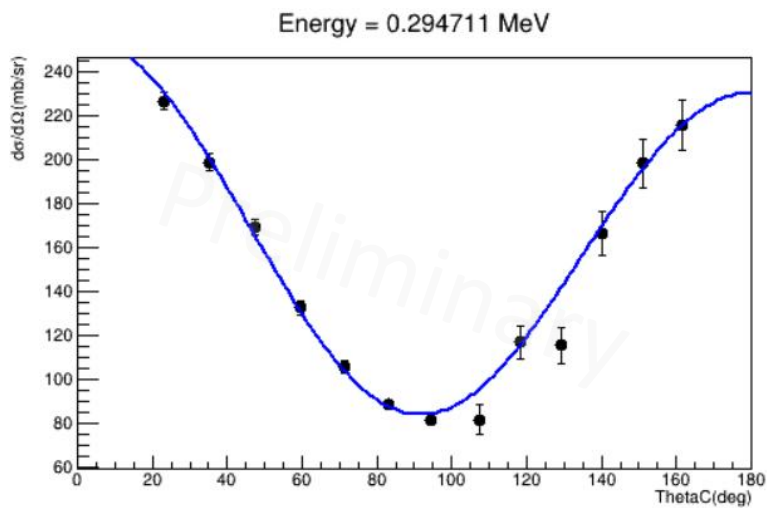
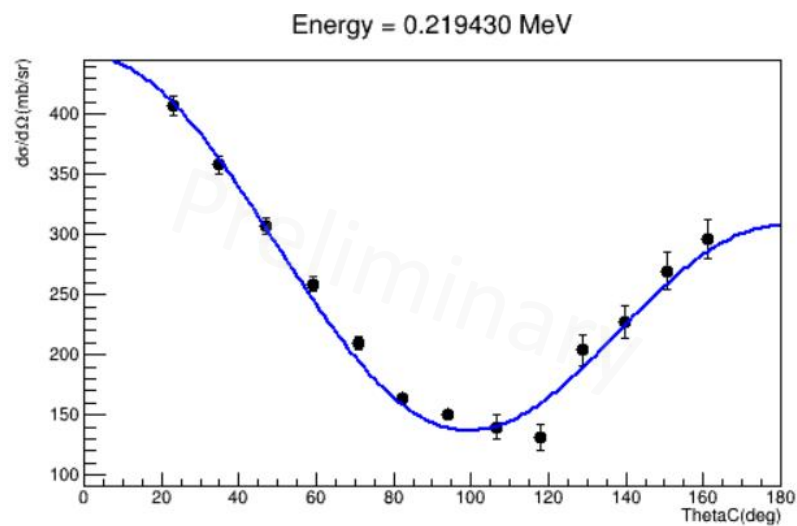
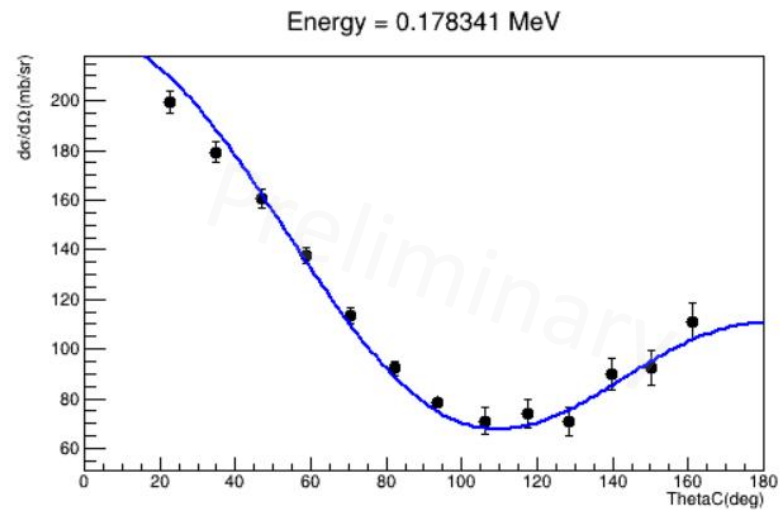
■ 归一至0.1-0.4MeV中子能区

$$-\sigma_{\text{ENDFB8-1}} = \mathbf{k} \times I_{\text{integral}} \longleftrightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega}(\text{Li6})|_{E_i} / \frac{\text{count}(\text{Li})_{E_i}}{\text{flux}_{E_i}} = \mathbf{k} / \Omega(\text{detector})$$

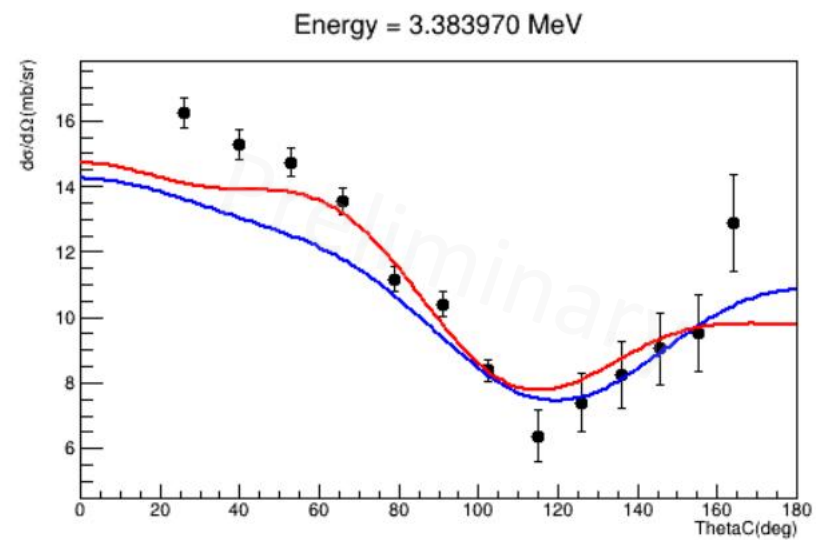
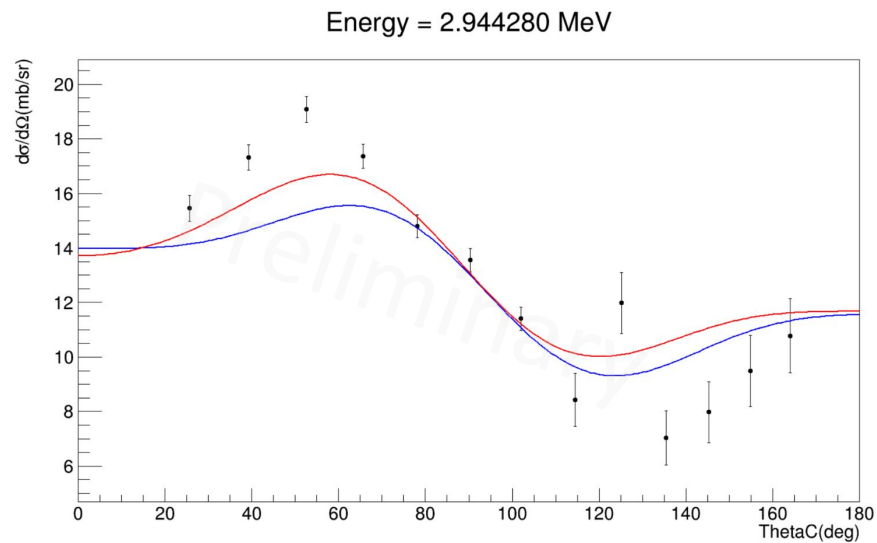
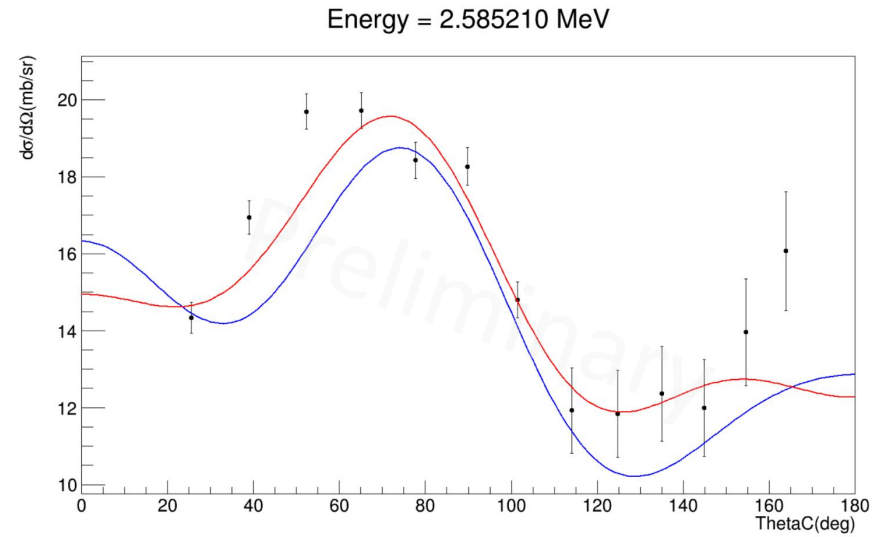
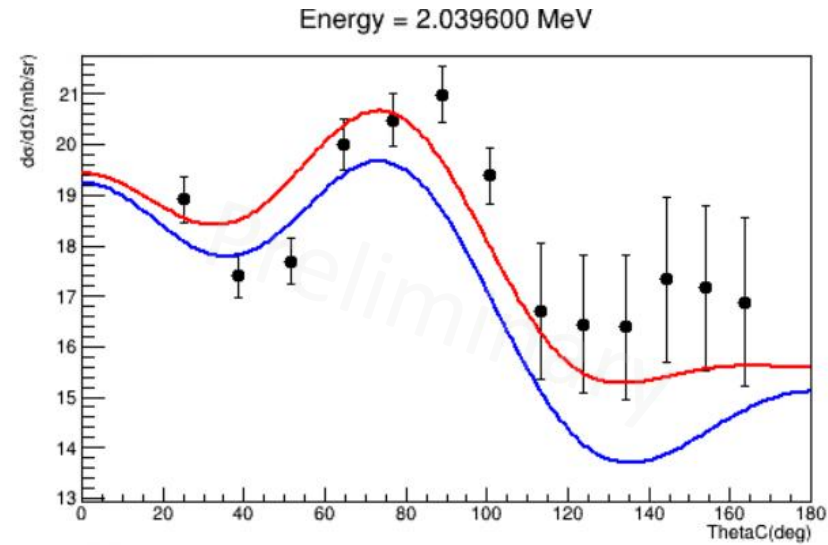


${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应微分截面

- Range of neutron energy: 0.1—7 MeV Blue: ENDF/B-VIII.1



${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应微分截面



Red: ENDF/B-VIII.0
Blue: ENDF/B-VIII.1

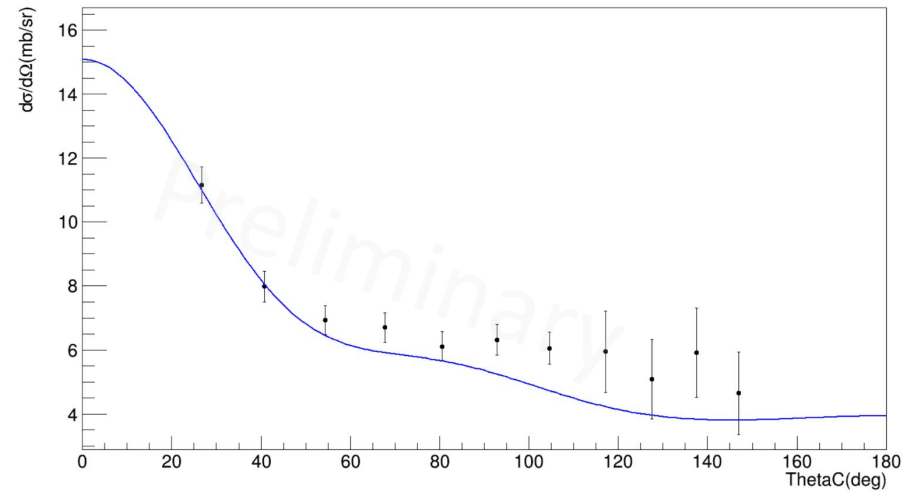
${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应微分截面



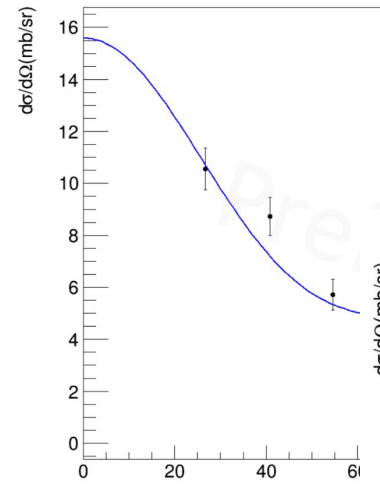
■ Range of neutron energy: 4—7 MeV

Blue: ENDF/B-VIII.1

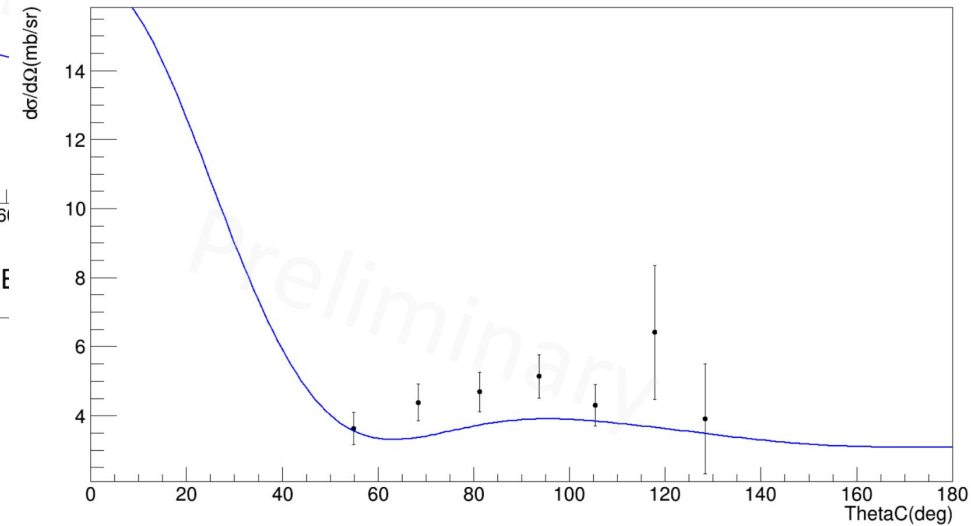
Energy = 5.748240 MeV



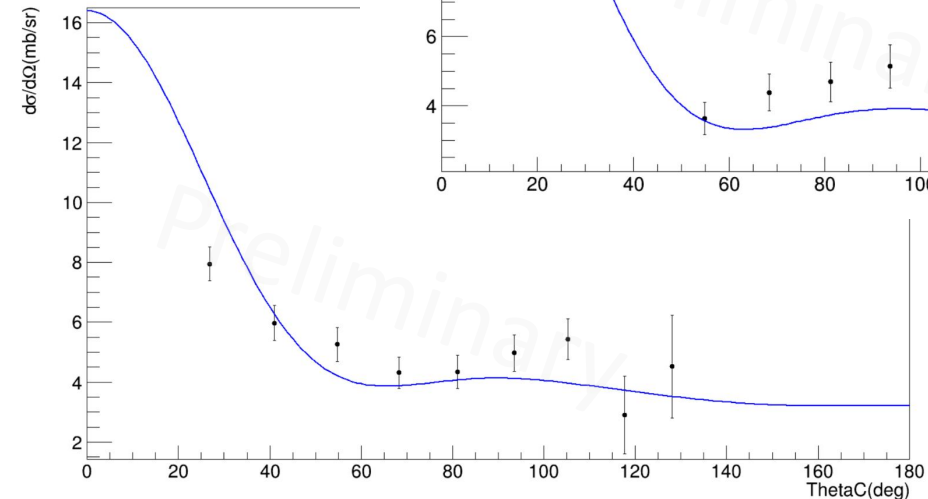
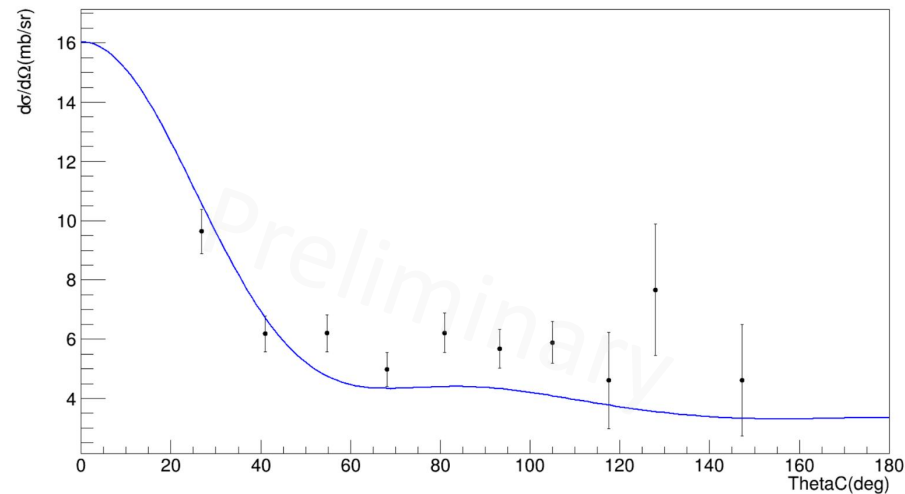
Energy = 6.167980 MeV



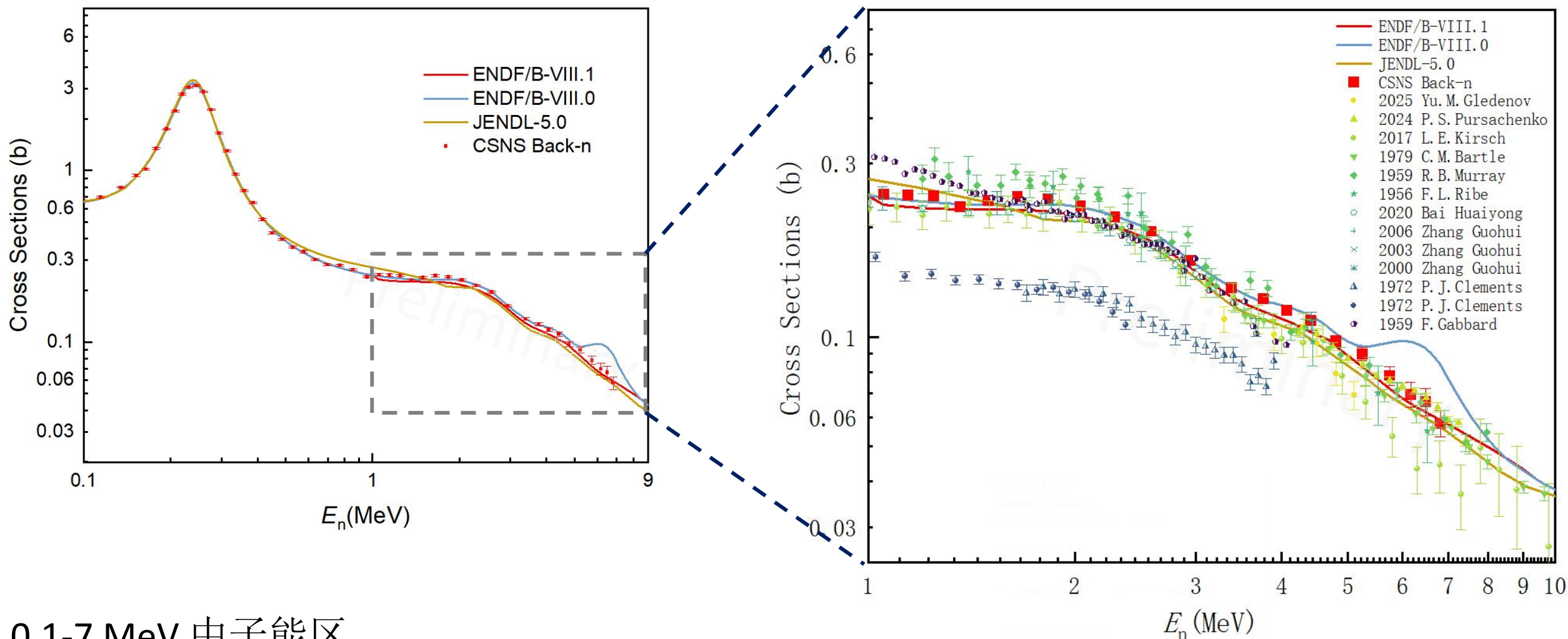
Energy = 7.178670 MeV



Energy = 6.479680 MeV



${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 角度积分截面



0.1-7 MeV 中子能区

相对于ENDF/B-VIII.0 数据库, 本研所得截面在 4-7 MeV区间与 ENDF/B-VIII.1 数据库吻合度更高

1-7 MeV n-p散射反应微分截面测量

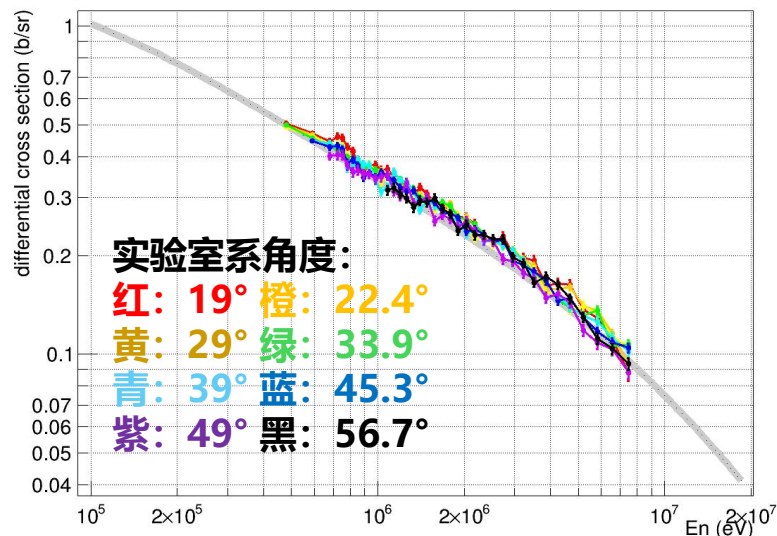
- 通过TOF方法计算每个能点的 E_n 。
- 根据Back-n的中子能谱对数据进行归一化。
- L-C系转换。
- 归一到ENDF/B-VIII.0库，给出相对微分截面。

实验结果的误差主要来源有:

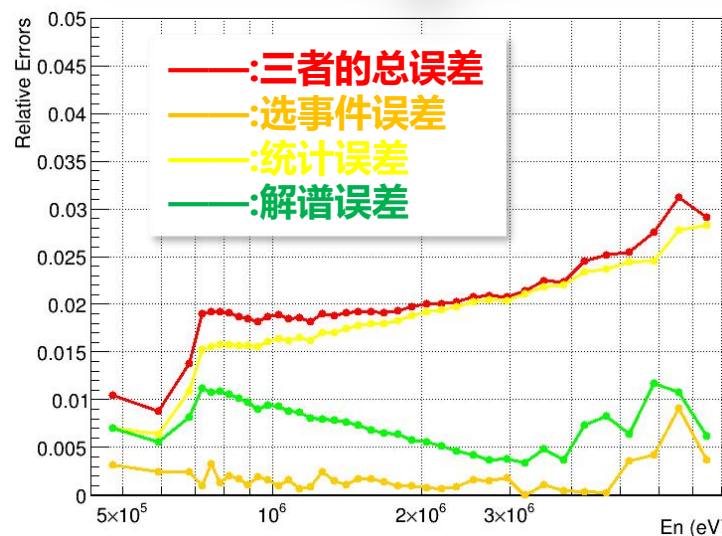
- 统计误差: **0.6%-2.8%**
- 解谱误差: **0.3%-1.2%**
- 选事件误差: **0.1%-0.8%**
- 能谱误差: **2%-3%**

总计约**2.5%-5%**

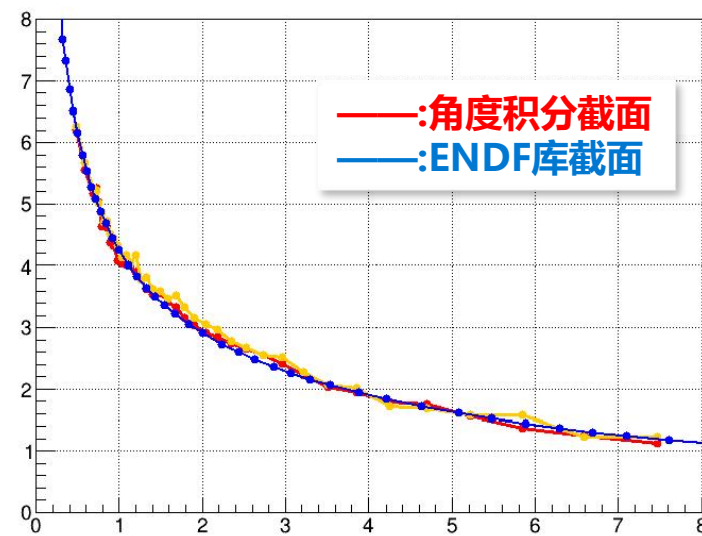
- 对于不同角度下 n - p 散射的相对微分截面，使用一阶勒让德多项式对每个能量点的实验数据进行拟合。
- 对其积分可以获得 n - p 散射的角积分截面。



实验室系微分截面测量结果



部分误差分布 (以A2探测器为例)



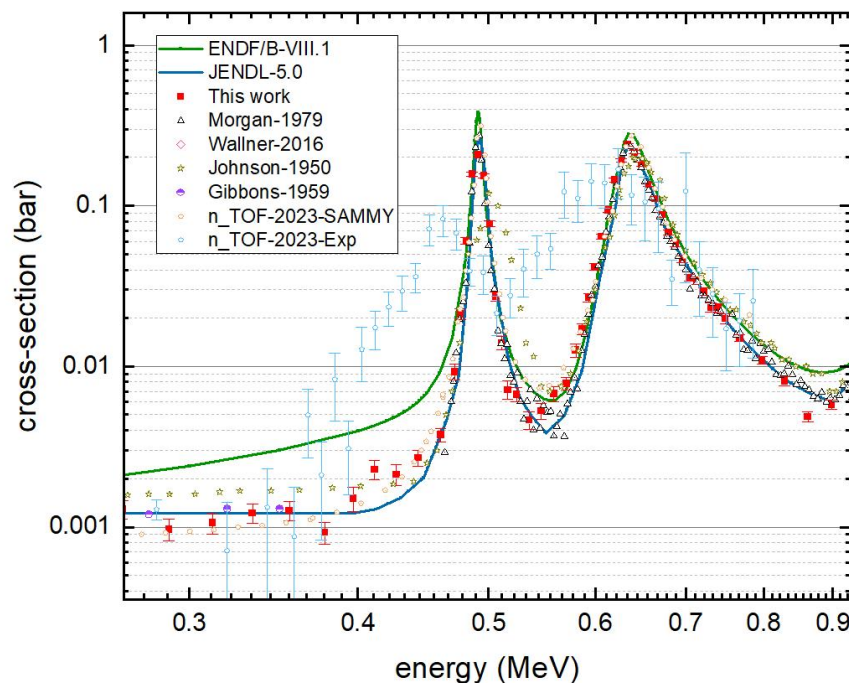
角度积分截面vs ENDF库截面

0.1-6 MeV $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反应微分截面测量



$^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})$ 是s过程中子源的最重要中子毒药反应；反应截面值影响s过程合成重元素的丰度。 $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})$ 是生成 ^{19}F 反应链中的重要一环；

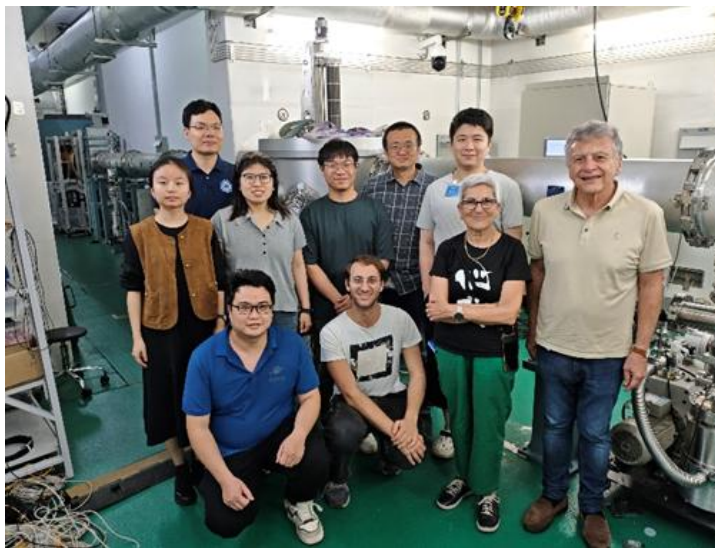
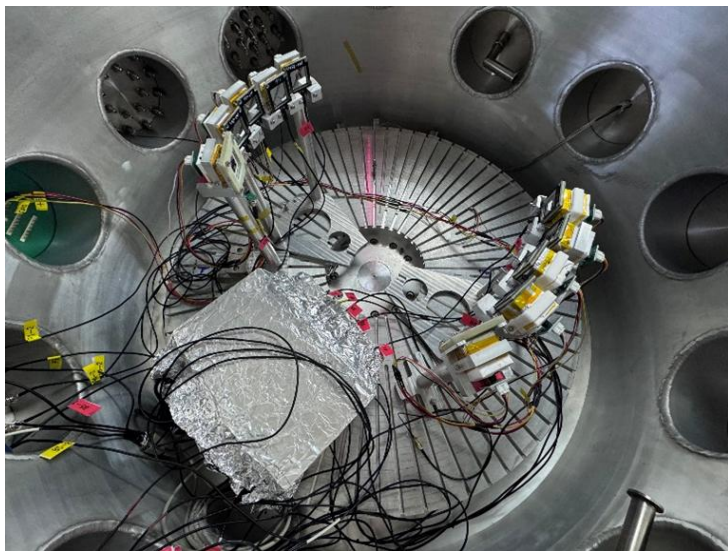
Wallner等(2016): 预测在493 keV处共振峰的实验数据比Morgan(1979)的实验结果小3.3倍。



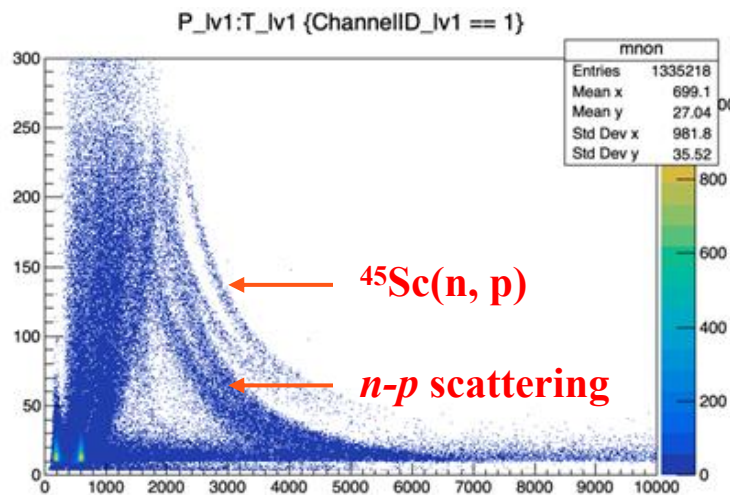
	Energy (MeV)	Cross section (barn)
This work	$\sim 0.4911 \pm 0.0051$	0.2079 ± 0.0055
JENDL-5.0	0.4927	0.27744
ENDF/B-VIII.1	0.491	0.382958
Morgan	~ 0.492	~ 0.2739

About half of the evaluation of ENDF/B-VIII.1.
Lower (about 3/4) than Morgan(1979)'s results.
Wallner(2016) suggested ~ 3.3 lower than Morgan(1979)'s results.

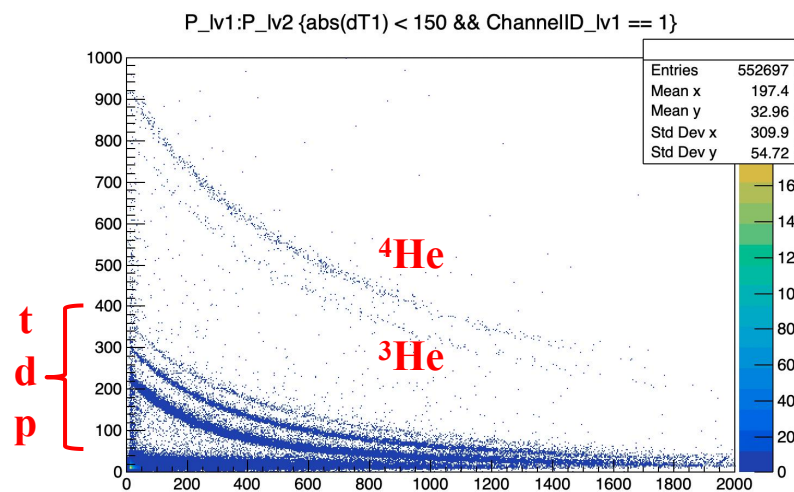
$^{45}\text{Sc}(n, p)^{45}\text{Ca}$ 反应截面测量



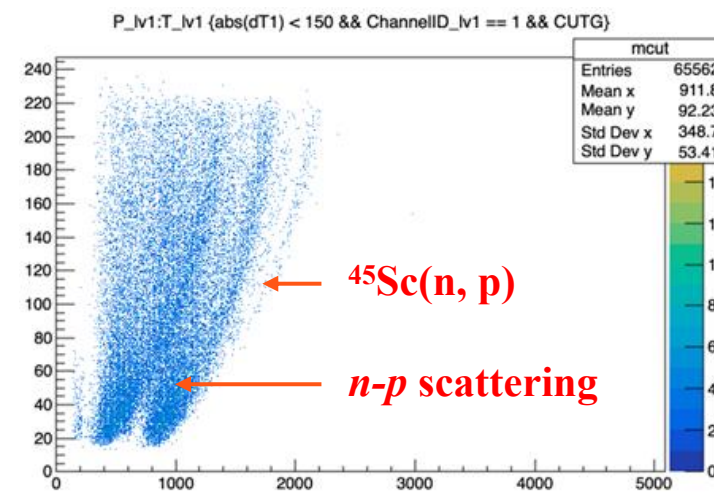
$^{45}\text{Sc}(n, p)^{45}\text{Ca}$ 反应可用于生产 ^{45}Ca ，这是一种对研究海洋酸化下珊瑚钙化至关重要的放射性示踪剂，有助于监测全球变暖对海洋带来的影响。
实验将在1-20 MeV测量 $^{45}\text{Sc}(n, p)$ 反应截面；实验由Giacomo和Berta教授主持，由西班牙巴伦西亚大学、意大利INFN-LNL与Back-n合作开展；



36° Si探测器信号-TOF二维谱



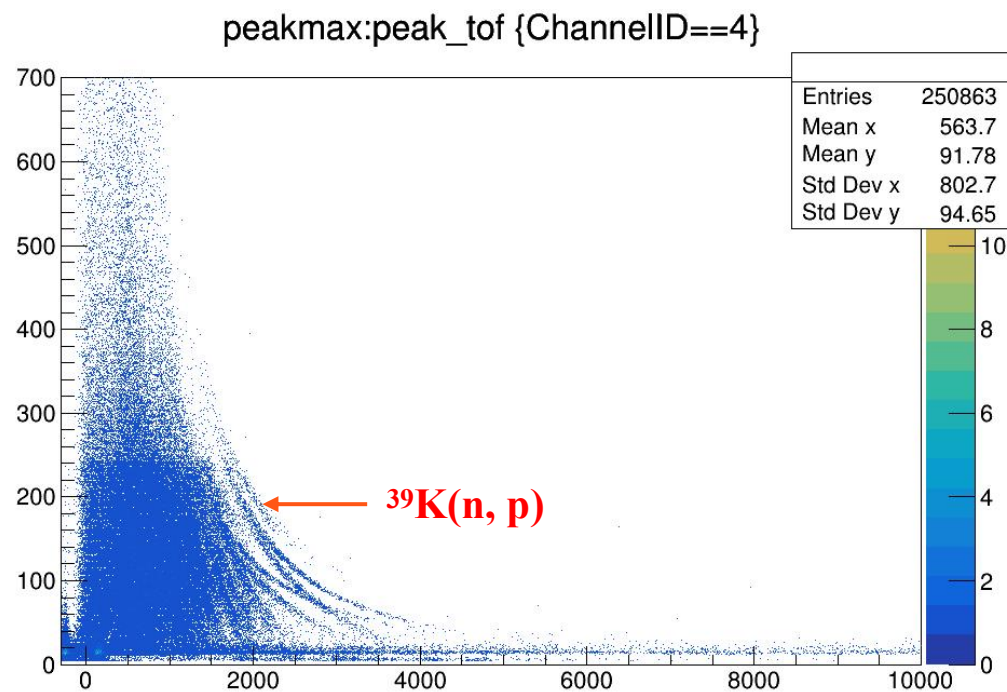
36° 两级探测器 ΔE - E 二维谱



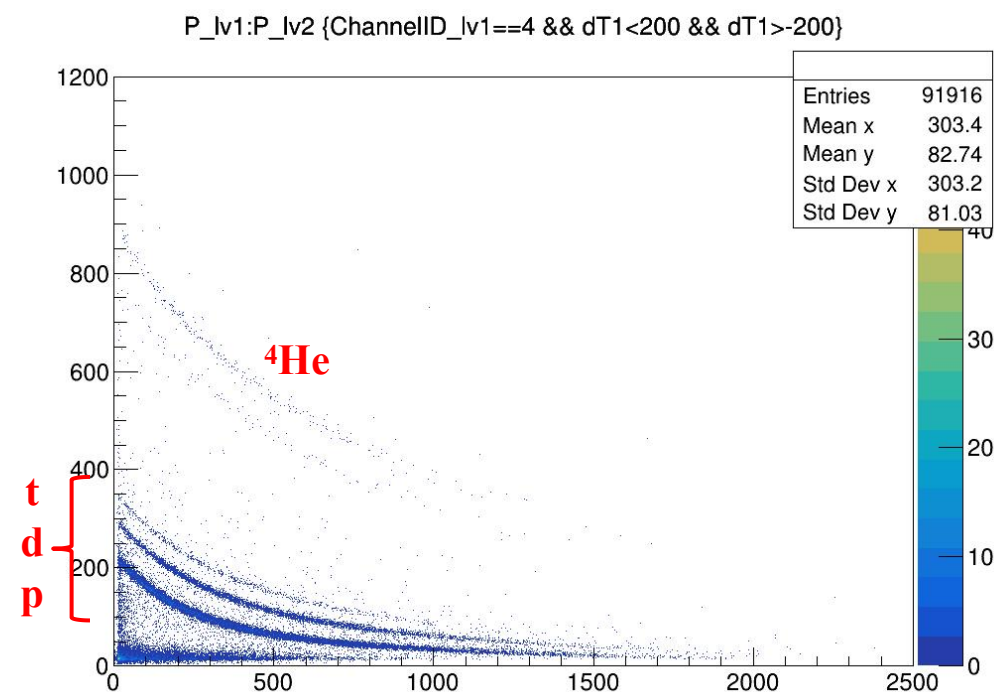
ΔE - E 筛选后Si探测器信号-TOF二维谱

$^{39}\text{K}(\text{n}, \text{p})^{39}\text{Ar}$ 反应截面测量

- $^{39}\text{K}(\text{n}, \text{p})^{39}\text{Ar}$ 反应截面在多个前沿科学领域具有关键意义。在地球科学领域，该反应是 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 地质定年法的核心核反应，这种定年法用于测定各种地质事件的时间范围，
- 与 $^{45}\text{Sc}(\text{n}, \text{p})^{45}\text{Ca}$ 反应截面测量实验使用了相同的探测器系统设置，即使用10套Si-PIN + CsI(Tl)组成的 ΔE - E 望远镜开展实验测量；覆盖实验室系角度 36° - 160° 。

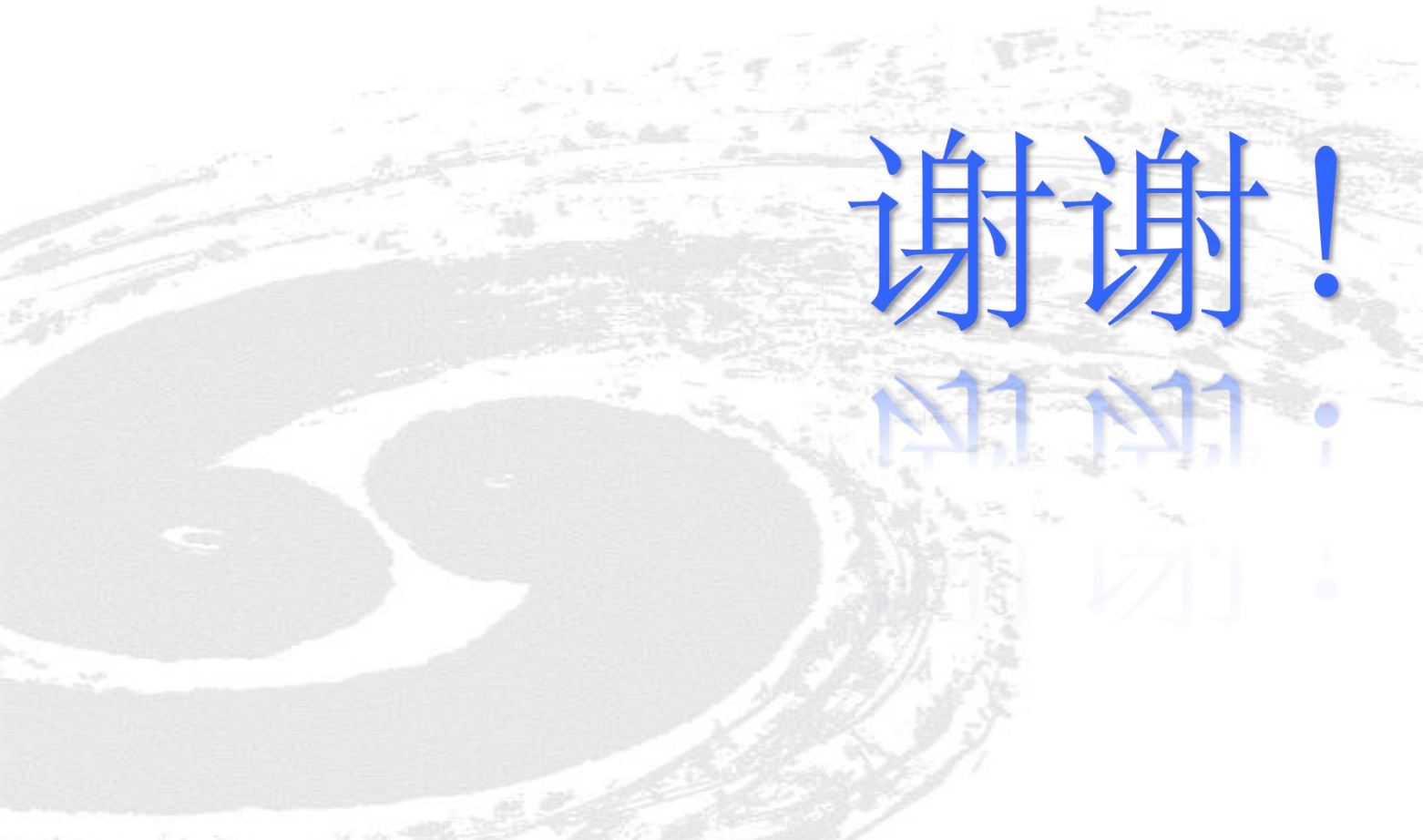


74° Si探测器信号-TOF二维谱



74° 两级探测器 ΔE - E 二维谱

- 利用中国散裂中子源反角白光中子束流装置，测量了 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应的微分截面与角积分截面。
- 在 0.1 至 1 MeV，微分截面数值与评价数据库结果相符。在 4 至 7 MeV，微分截面与角积分截面数据均佐证了 ENDF/B-VIII.1 数据库的评价结果。
- 微分截面相关测量数据可完善 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应的核数据评价工作。
- 利用Back-n在MeV中子能区的中子通量优势，开展了np散射、 ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$ 、 ${}^{39}\text{K}(n, p){}^{39}\text{Ar}$ 等反应的截面测量实验研究。

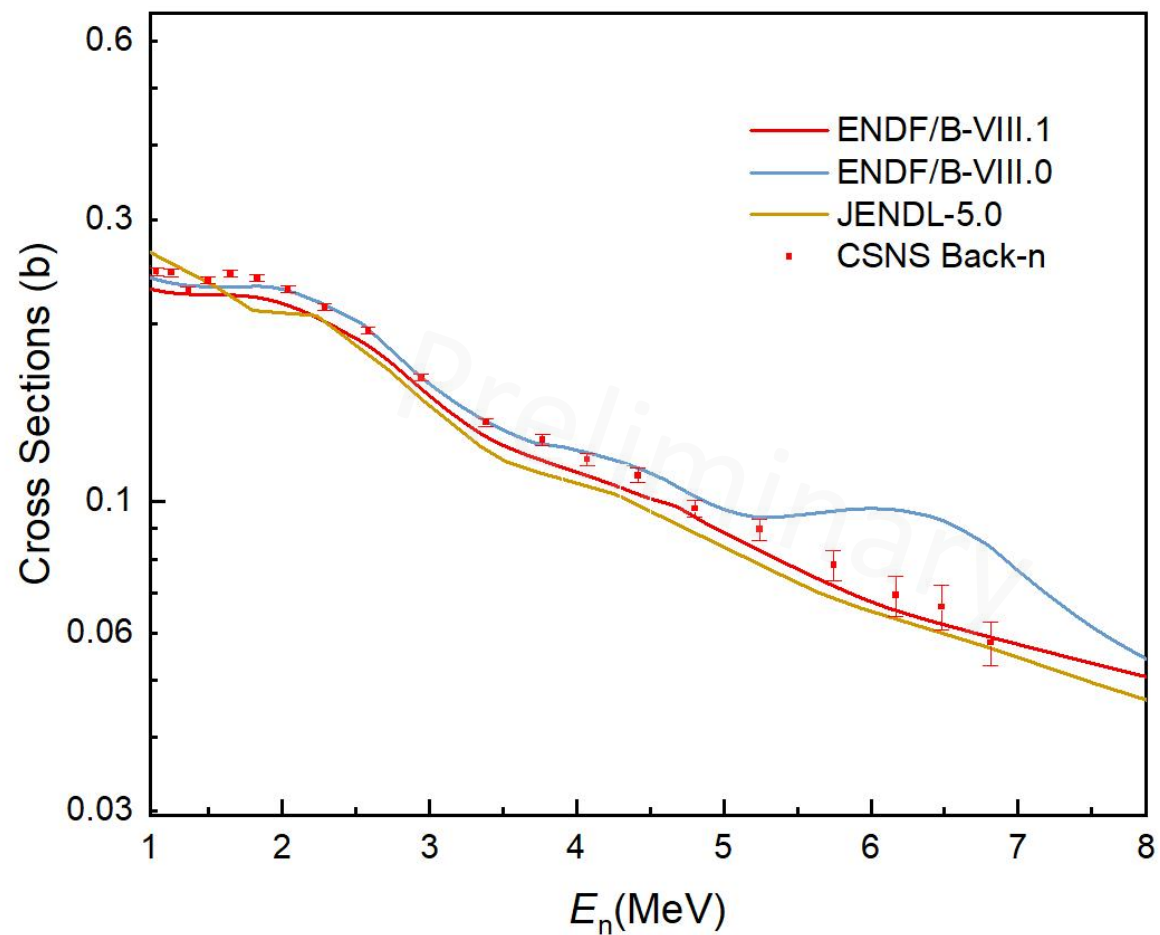
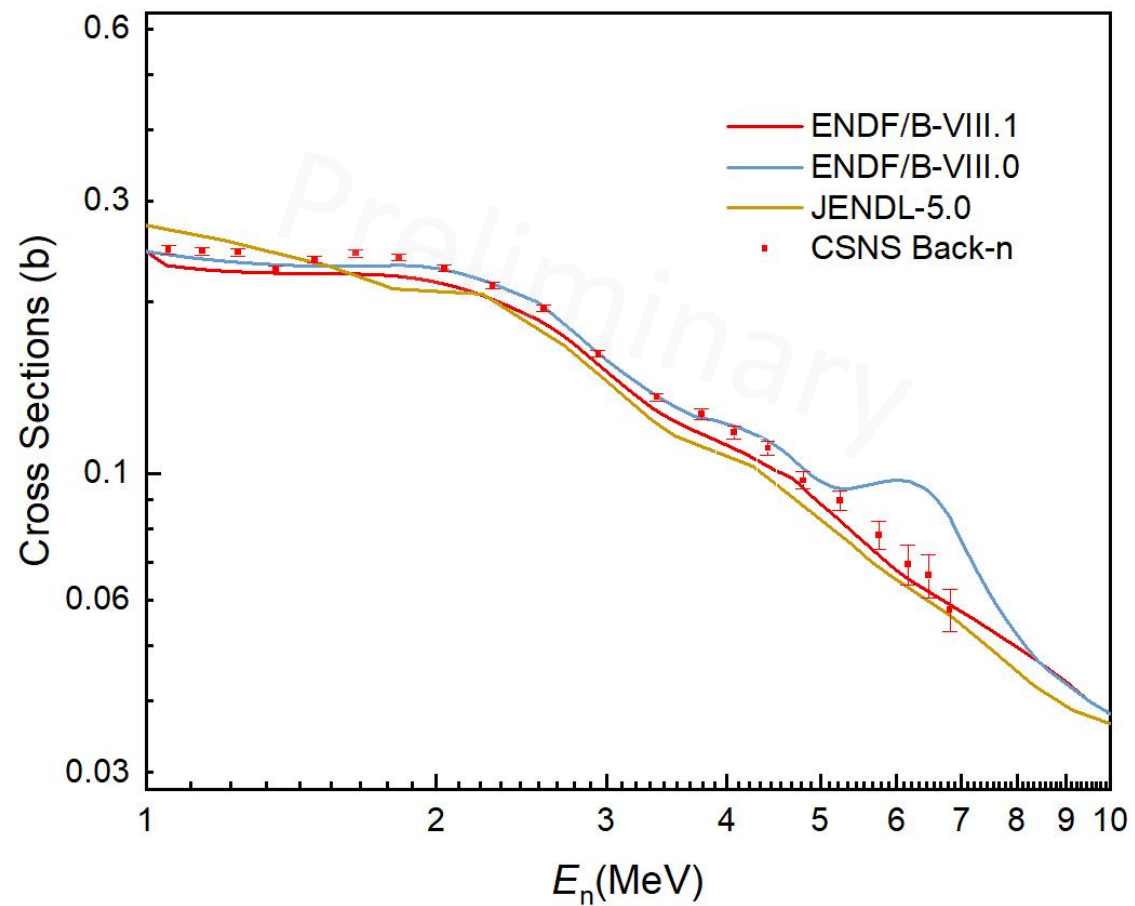


谢谢！

谢谢！

谢谢！

Appendix



- The substrate is much thinner than our previous measurement
- Beam spot is smaller