

# 白光中子能谱系统性测量研究

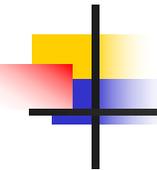
陈永浩

*Credits:*

邱奕嘉, 唐生达, 彭俊勇

中国科学院高能物理研究所  
散裂中子源科学中心

2025年CSNS反角白光中子实验装置（第九届）用户研讨会, 2025.07.22-25, 六安

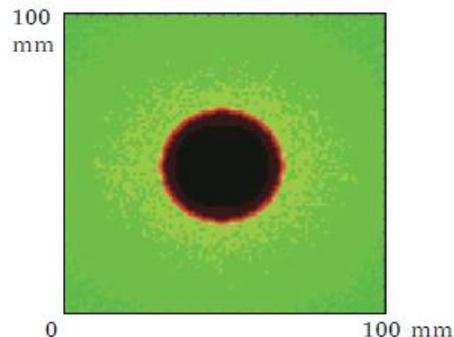


# 目录

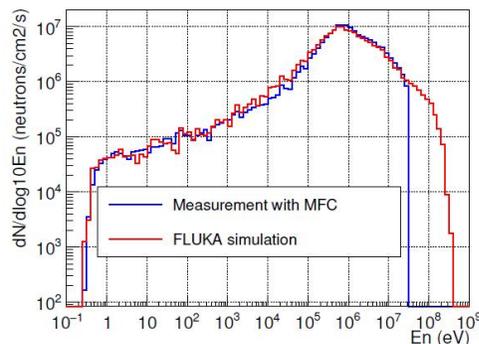
- 一、研究动机
- 二、研究内容
- 三、总结展望

# 一、研究动机

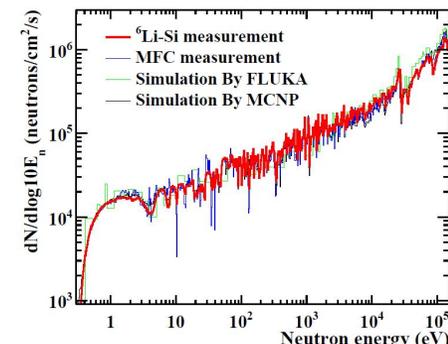
## CSNS Back-n装置能谱测量研究时间线



- 鲍杰, 陈永浩\*等, *物理学报* (2019) 68: 080101
- Back-n装置首次束流特征测量
- 《物理学报》2022年度“最有影响论文”

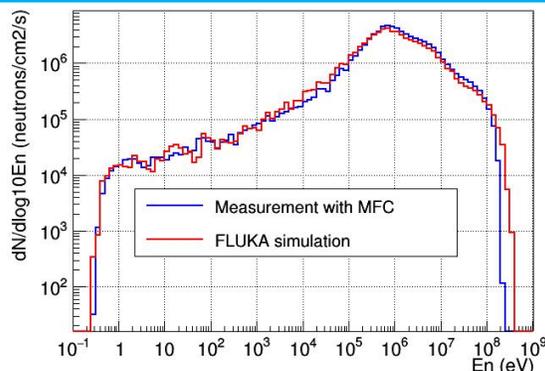


- Y.H. Chen et al., *EPJ WC* (2020) 239: 17018
- Back-n装置实验厅一首次能谱测量
- 2019 国际核数据大会 (顶级会议) 口头报告



- Y.J. Qiu, Y.H. Chen\* et al. *NIMA* (2025) 1075: 170383
- Back-n装置低能区能谱测量精度提升
- 2025 IAEA中子数据标准技术国际会议邀请报告

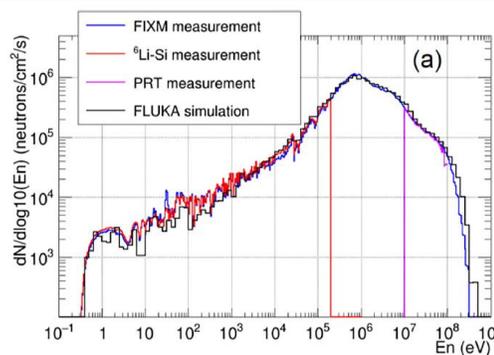
● 2019



- Y.H. Chen et al., *Eur. Phys. J. A* (2019) 55: 115
- Back-n装置首次能谱测量
- 单篇论文总引用次数~100

● 2020

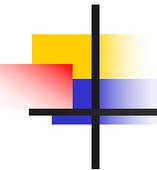
● 2024



- Y.H. Chen\* et al., *Eur. Phys. J. A* (2024) 60: 63
- 基于多套探测器系统的能谱测量对比研究
- 测量至装置最高中子能量 (300 MeV)

● 2025

**装置最核心的束流特征参数**  
**物理研究必不可少的输入参数**  
**长期坚持 (死磕到底)、深入研究、精益求精**



# 目录

- 一、研究动机
- 二、研究内容**
- 三、总结展望

## 二、研究内容

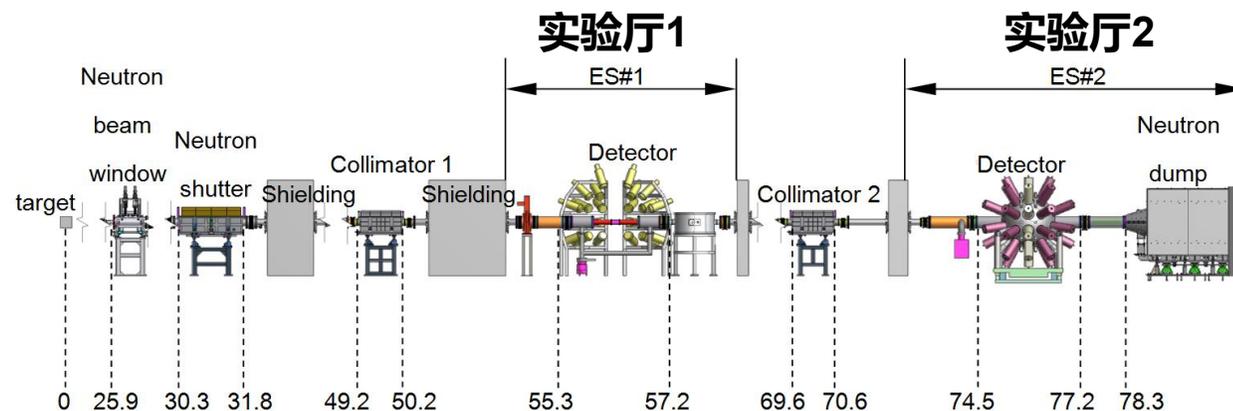
### 1. Back-n能谱常规测量研究 (2024年8月以前状态)

- ES#1  $\varphi 12 - \varphi 15$  ( $\varphi 30 - \varphi 30$ ) (单位: mm, 下同)
- ES#1  $\varphi 50 - \varphi 50$  ( $\varphi 60 - \varphi 60$ )
- ES#2  $\varphi 12 - \varphi 15 - \varphi 40$  ( $\varphi 30 - \varphi 30 - \varphi 30$ )
- ES#2  $\varphi 50 - \varphi 50 - \varphi 58$  ( $\varphi 60 - \varphi 60 - \varphi 60$ )
- ES#2  $\varphi 50 - \varphi 15 - \varphi 40$  ( $\varphi 60 - \varphi 30 - \varphi 30$ )

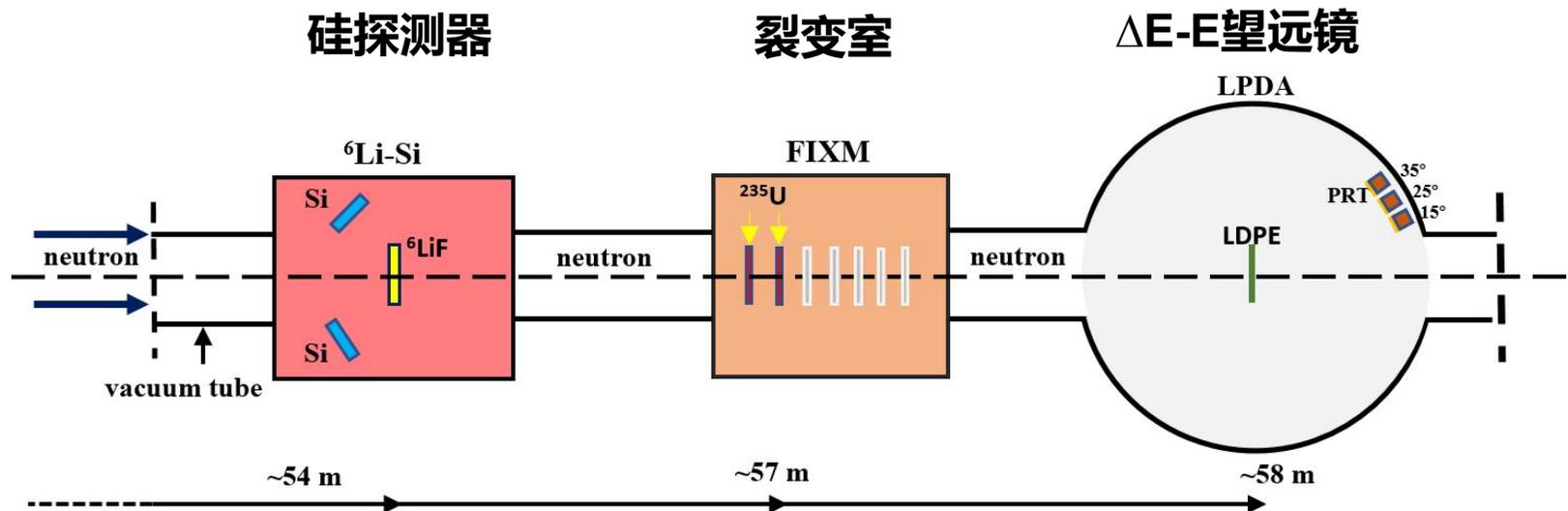
### 2. Back-n其他束流特征测量研究

### 3. Back-n热中子能区探索研究

### 4. Back-n新中子能谱测量研究 (2024年8月以后状态)



# 1. Back-n能谱常规测量研究

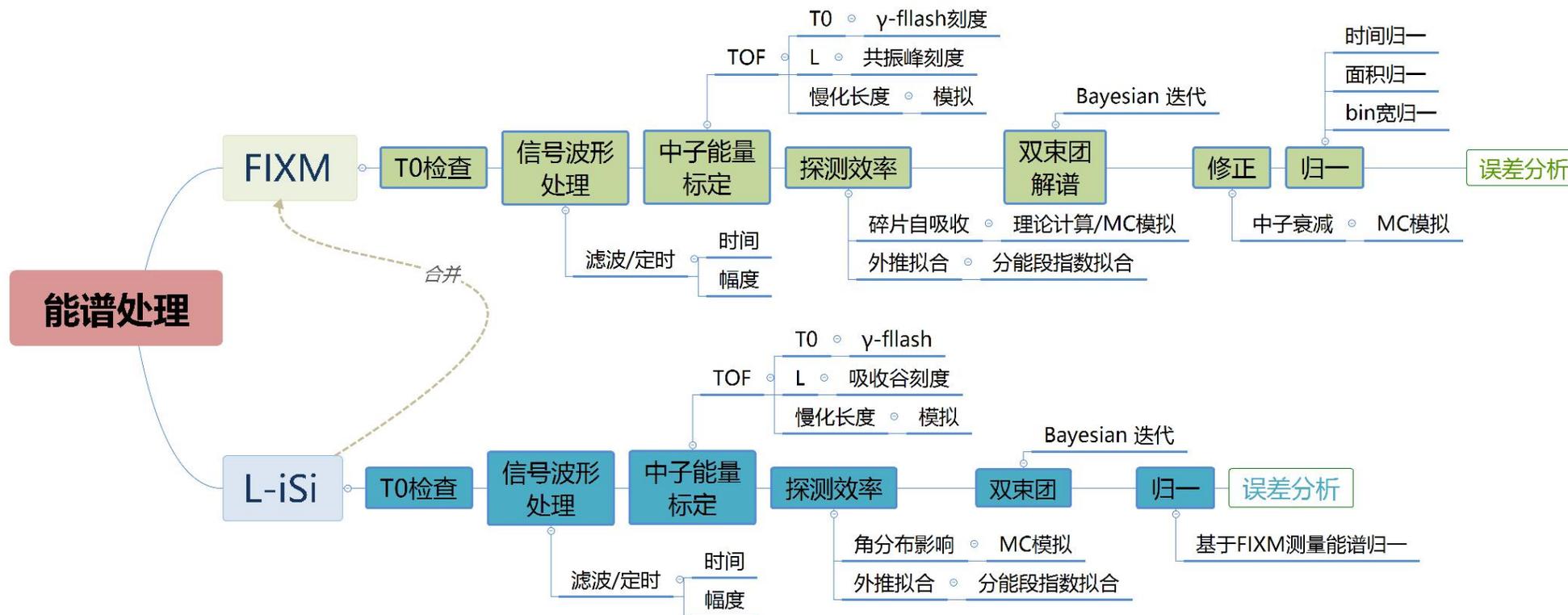


中子转换反应及测量能区

Detectors	Samples and reactions	Energy range
${}^6\text{Li} - \text{Si}$	${}^6\text{LiF}/{}^6\text{Li}(n, t)$	0.3eV – 150keV
FIXM	${}^{235}\text{U}/{}^{235}\text{U}(n, f)$	0.3eV – 300MeV
PRT	LDPE/H(n, n)	10MeV – 70MeV

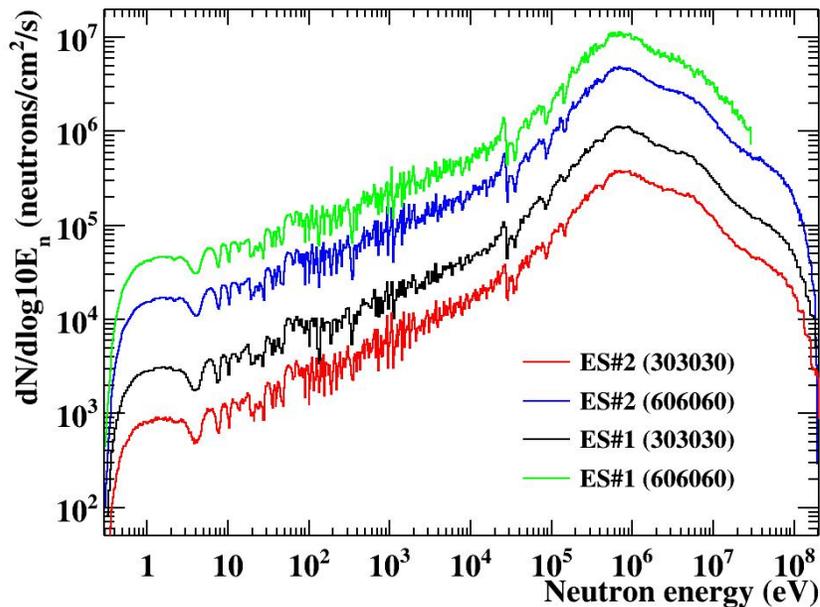
# 1. Back-n能谱常规测量研究

$$\Phi(E_n) = \frac{R(E_n)}{\sigma(E_n) \varepsilon(E_n) N_s}$$



# 1. Back-n能谱常规测量研究

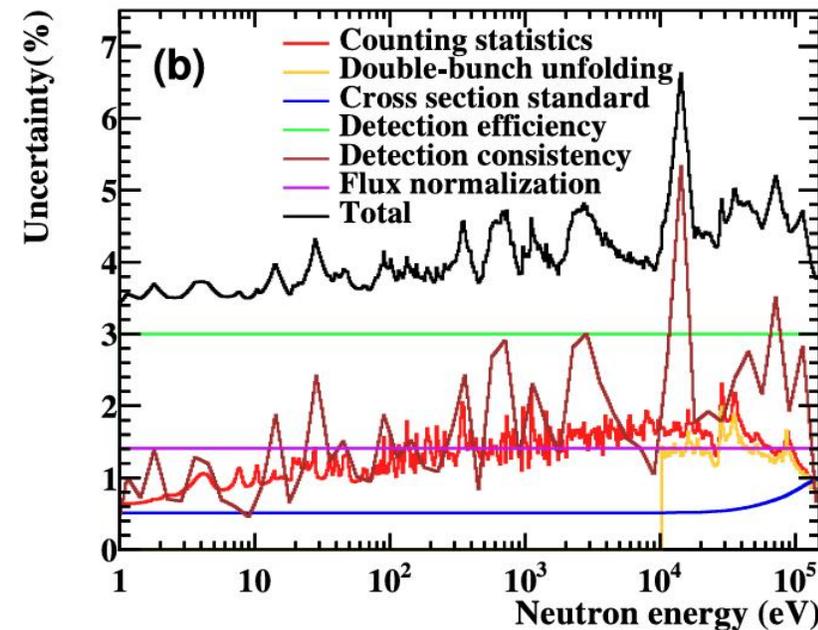
### 中子能谱比较



### 中子通量比较

实验终端/束线配置	积分能区	积分通量 @ 100 kW
ES#2 / 30-30-30	0.3 eV – 200 MeV	$5.41 \times 10^5$ n/cm <sup>2</sup> /s
ES#2 / 60-60-60	0.3 eV – 200 MeV	$7.03 \times 10^6$ n/cm <sup>2</sup> /s
ES#1 / 30-30	0.3 eV – 300 MeV	$1.64 \times 10^6$ n/cm <sup>2</sup> /s
ES#1 / 60-60	0.3 eV – 30 MeV	$1.55 \times 10^7$ n/cm <sup>2</sup> /s

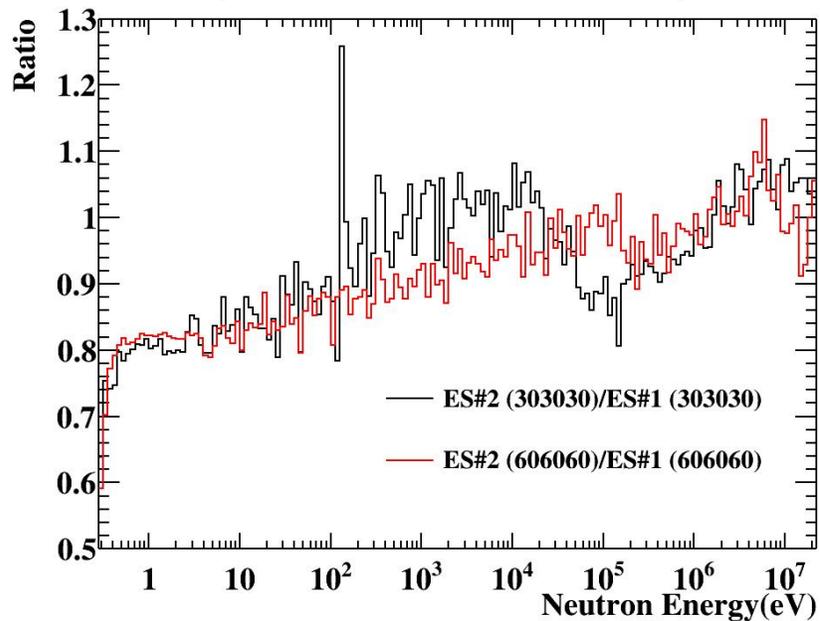
### 误差分析 (ES#2 60-60-60低能区)



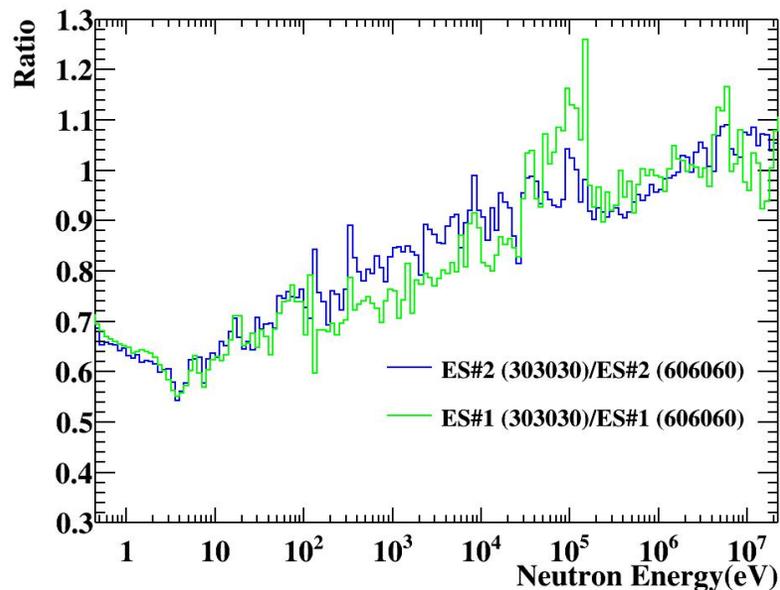
Source of uncertainty	Uncertainty
Counting statistics	0.6%–5.8%
Double-bunch unfolding	0.9%–2.0%
<sup>6</sup> Li( <i>n, t</i> ) cross-section	0.5%–1.0%
Detector efficiency	3.0%
Detector consistency	0%–5.3%
Flux normalization	1.4%
Total	3.4%–6.7%

# 1. Back-n能谱常规测量研究

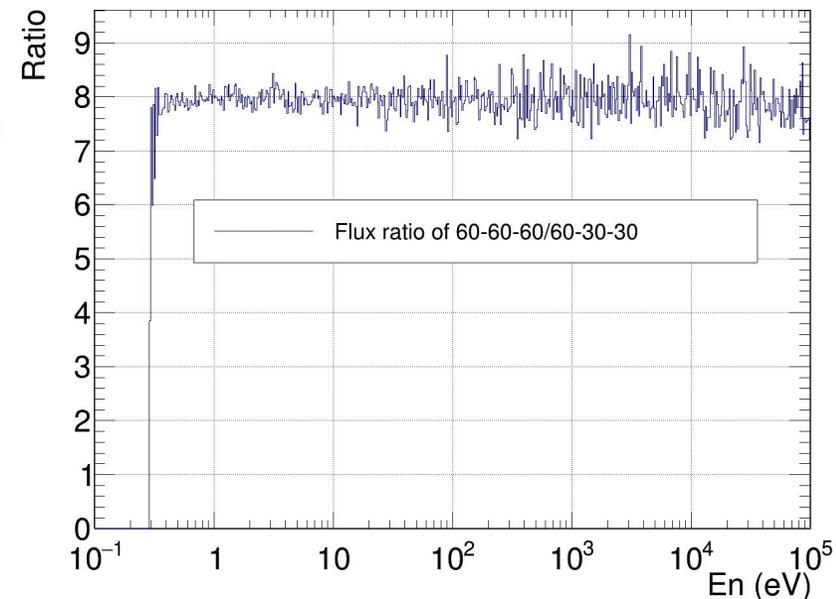
不同终端下的能谱形状比较



不同束斑下的能谱形状比较-1



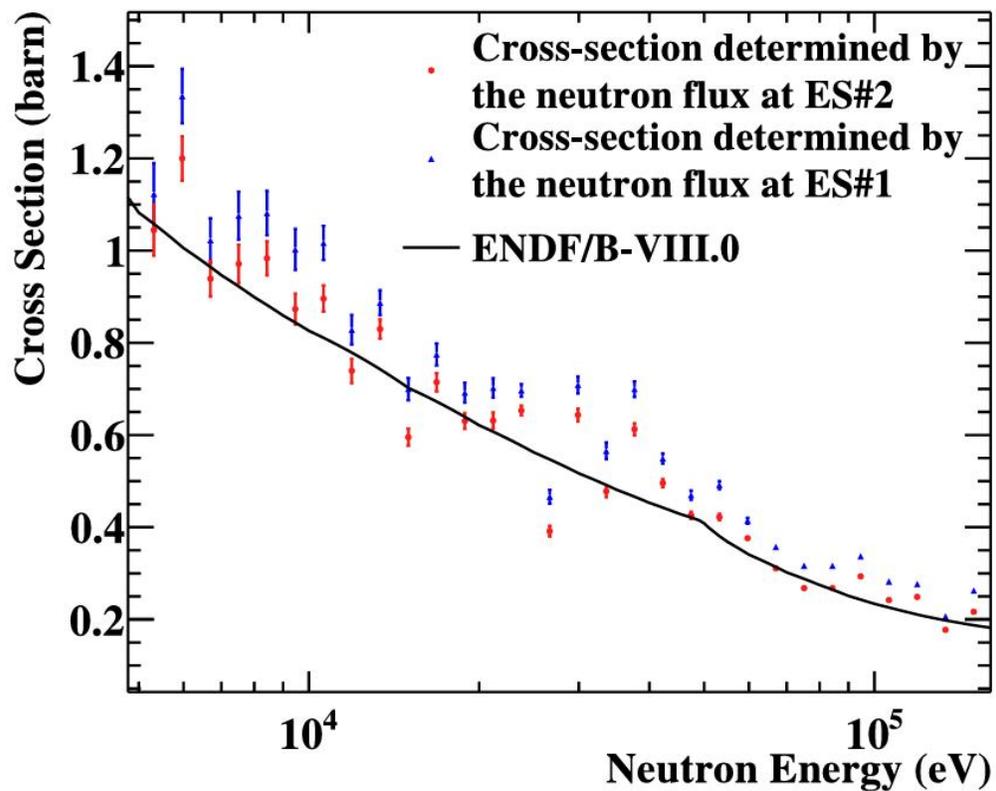
不同束斑下的能谱形状比较-2



**Take away: 不同实验厅、不同束斑条件下，中子能谱形状有所不同!**

# 1. Back-n能谱常规测量研究

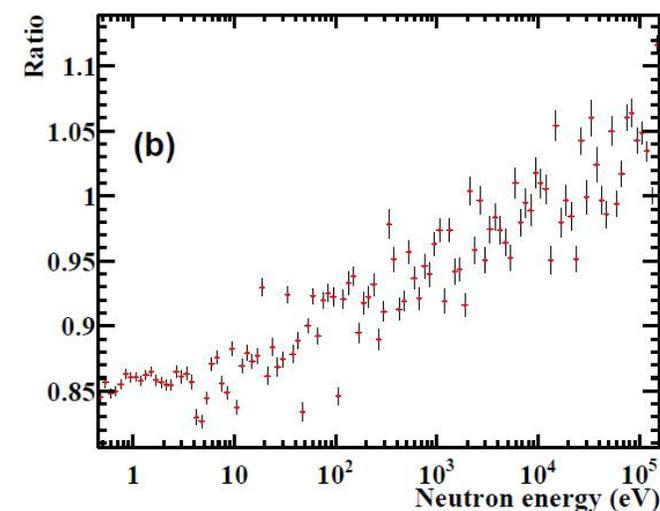
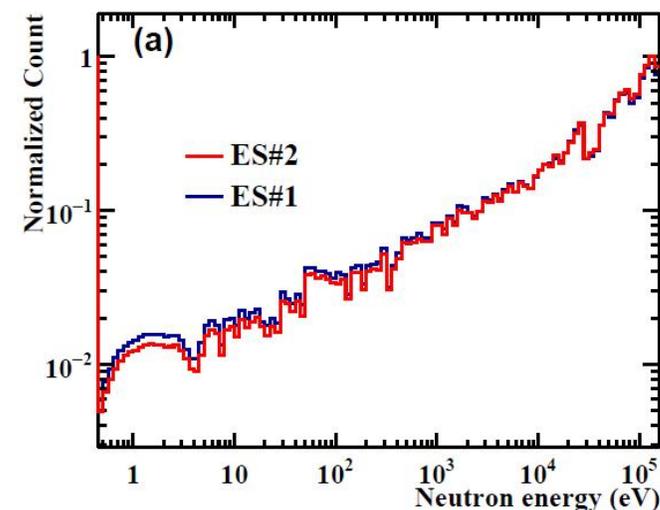
验证：准确的能谱数据大幅提升 $^{232}\text{Th}$ 中子俘获截面测量精度



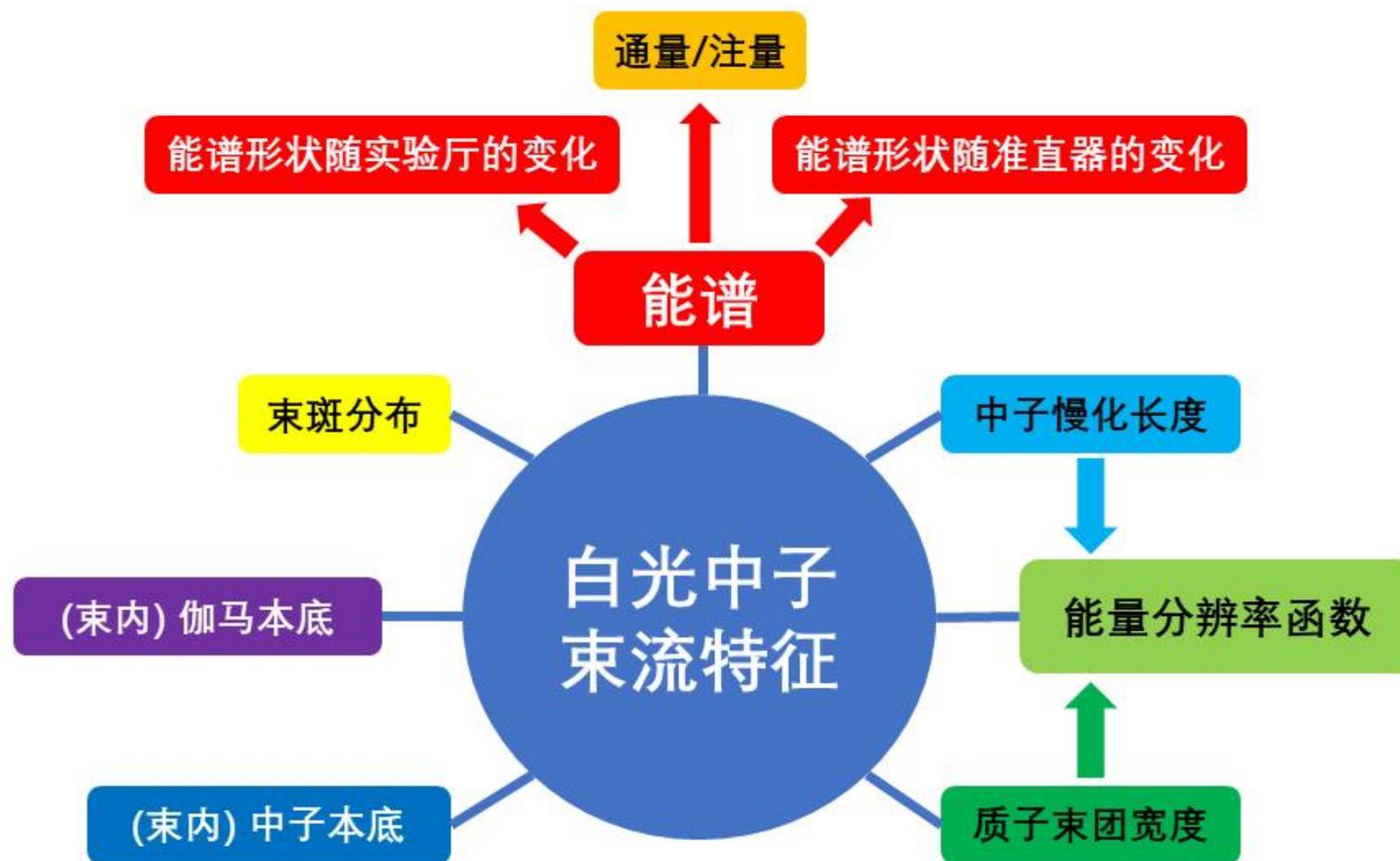
J. C. Wang, J. Ren et al., *EPJA* (2023) 59: 224

Y.J. Qiu, Y.H. Chen\* et al. *NIMA* (2025) 1075: 170383

## 实验厅1和实验厅2能谱对比



## 2. Back-n其他束流特征测量研究

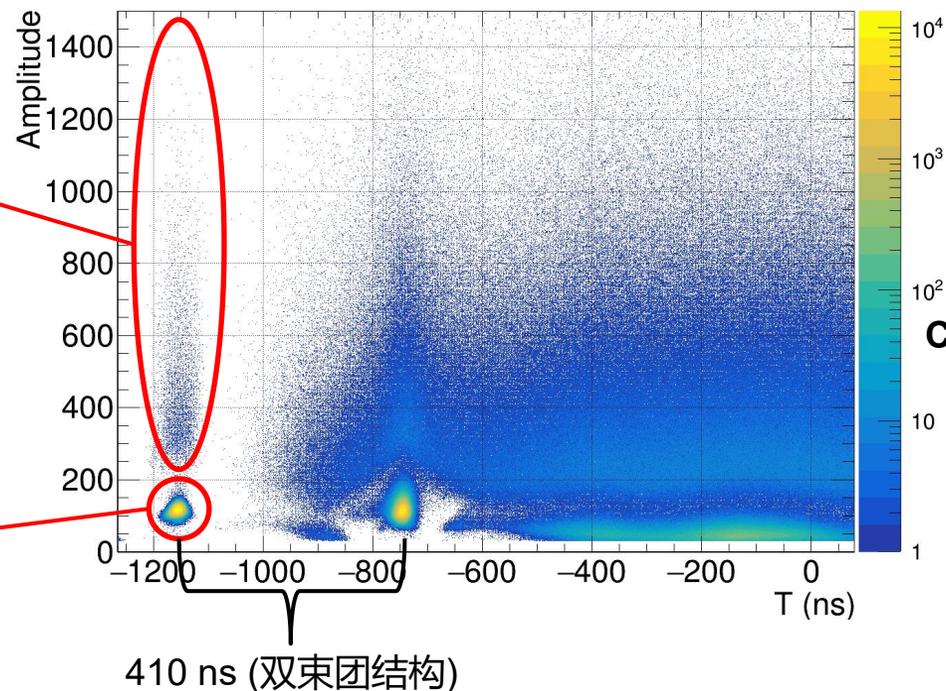
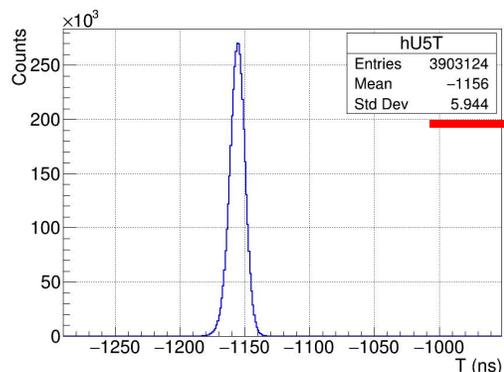
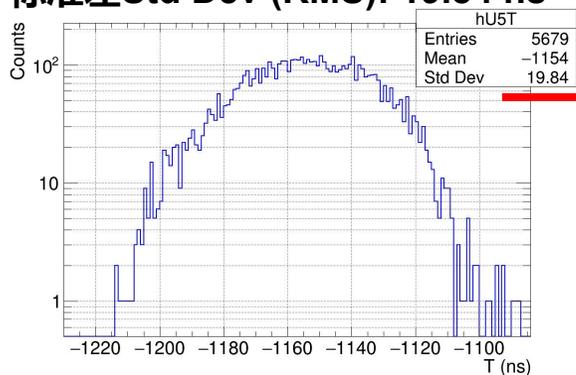


除能谱测量外，深入研究其他束流特征，综合刻画白光中子束流的全貌！

## 2. Back-n其他束流特征测量研究

通过测量质子打钨靶时产生的瞬发 $\gamma$ 射线 ( $\gamma$ -flash), 研究**加速器质子束团宽度**

- $\gamma$ 诱发裂变 (单光子信号), 代表质子束团时间展宽 (含探测器时间分辨)
- 底宽 (全宽):  $\sim 120$  ns, 与加速器物理提供的底宽 ( $\sim 130$  ns)相符!
- 标准差Std Dev (RMS): 19.84 ns



质子束团宽度标准差: **18.93 ns**

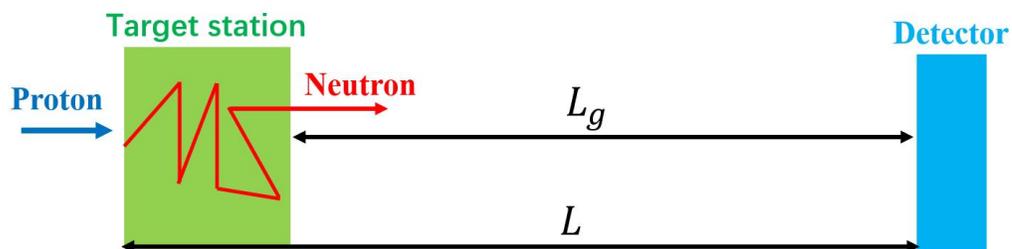
$$\delta_{beam\_width} = \sqrt{\delta_{mea}^2 - \delta_{det}^2}$$

CERN n\_TOF 质子束团 (PS加速器)标准差: 7ns

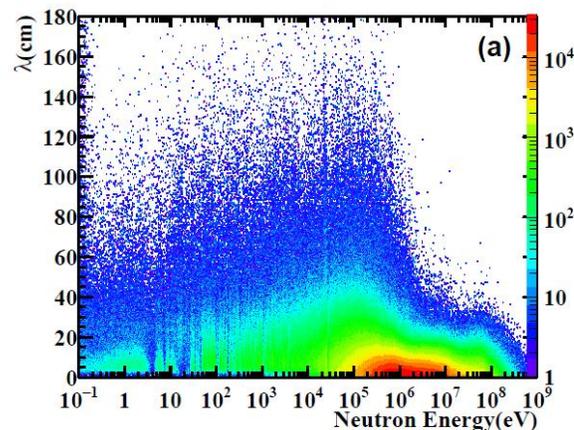
- $\gamma$ -flash信号, 代表探测器 (含电子学)的时间分辨
- 标准差Std Dev (RMS): 5.94 ns

## 2. Back-n其他束流特征测量研究

### 中子慢化长度及能量分辨率函数研究

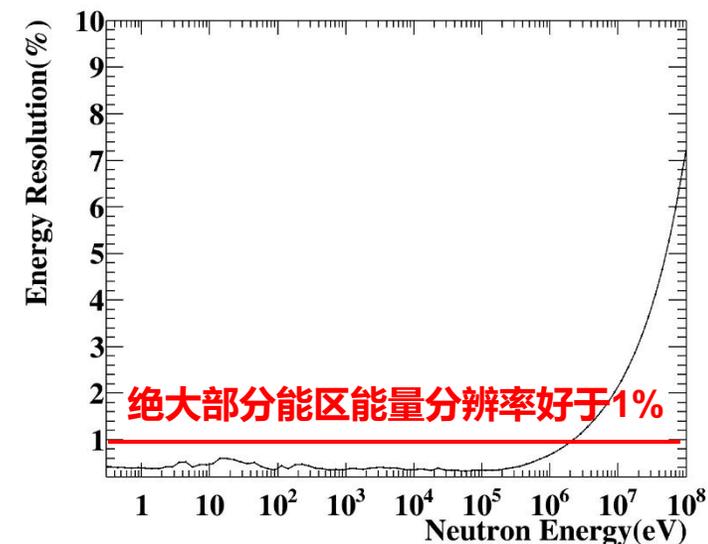
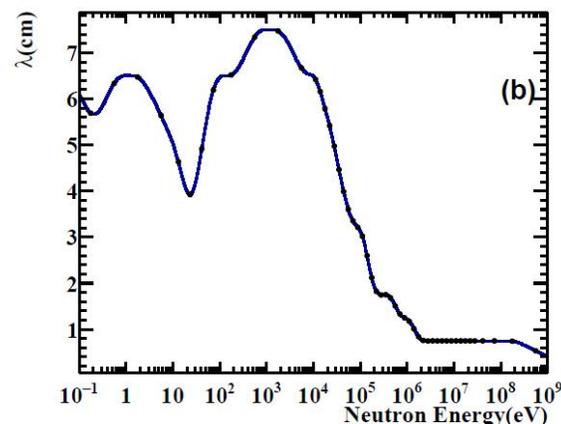


$$\beta = \frac{L_{geom} T_{mes}}{c T_{mes} T_{OF}} = \frac{L_{geom}}{c T_{mes}} \left( 1 + \frac{t_{mod}}{T_{OF}} \right) = \frac{L_{geom} + \lambda}{c T_{mes}}$$



$$\frac{\Delta E}{E} = \gamma(\gamma + 1) \sqrt{\left( \frac{\Delta T}{T} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2}$$

- 质子束团宽度 ( $\Delta T$ )主导高能区能量分辨率
- 慢化长度 ( $\Delta L$ )主导低能区能量分辨率

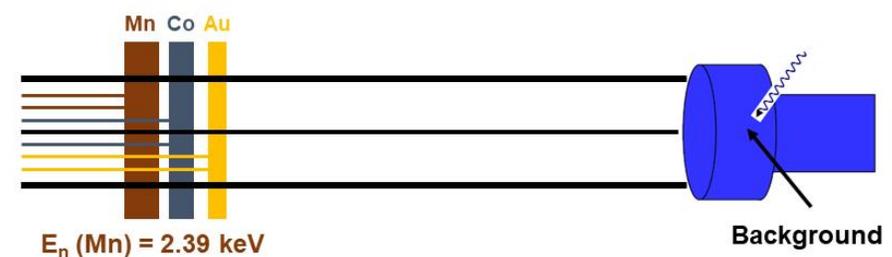


基于散裂反应的白光中子并非严格意义上的匀速飞行，中子最初产生时在厚靶内发生多重散射（随机过程），离开靶体后才开始匀速飞行！

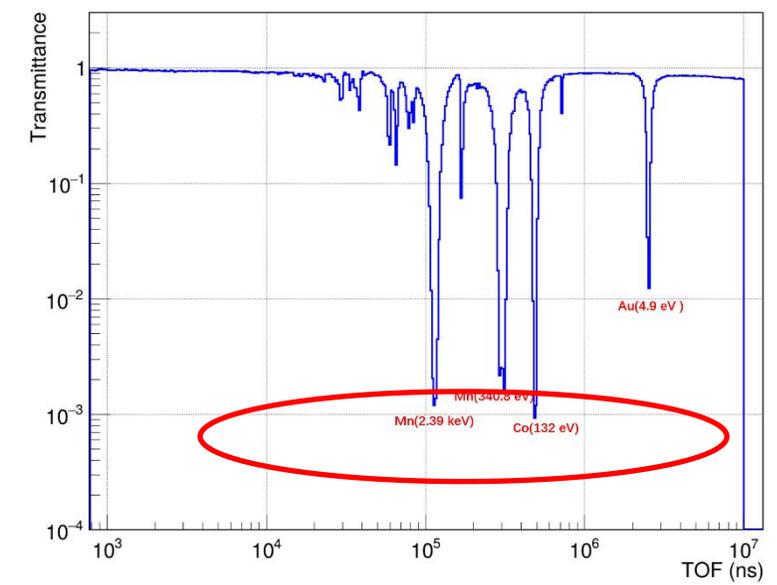
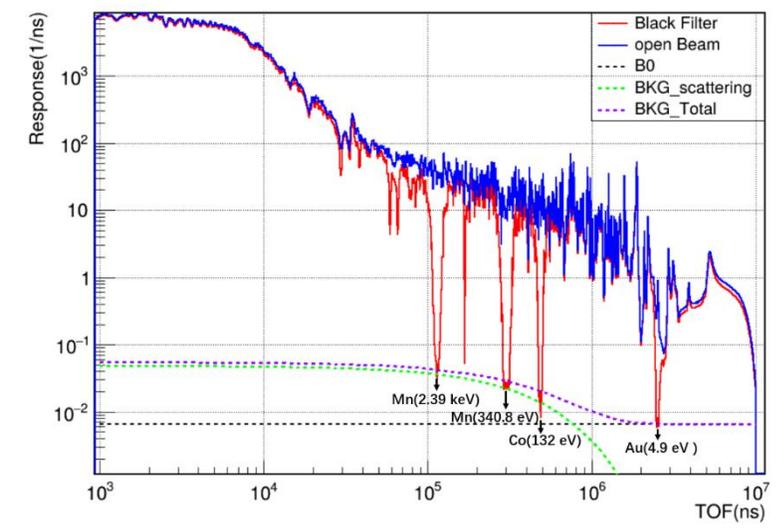
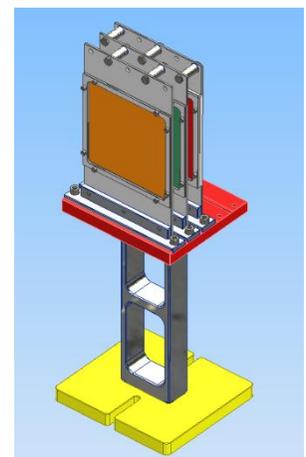
将多重散射慢化过程等效为长度，从而运用飞行时间方法

## 2. Back-n其他束流特征测量研究

通过黑共振吸收法 (Black resonance filter)研究 中子本底

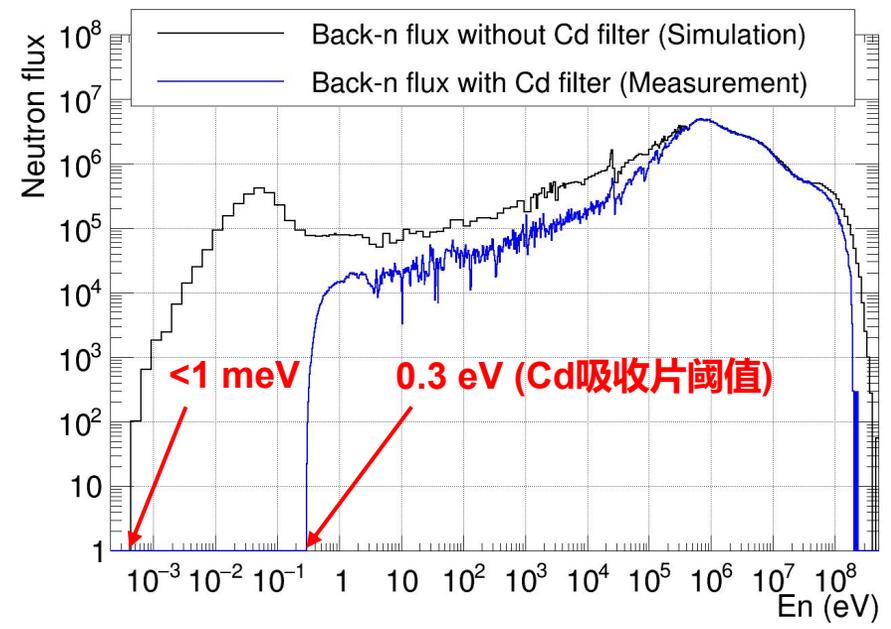


- $E_n$  (Mn) = 2.39 keV
- $E_n$  (Mn) = 340.8 eV
- $E_n$  (Co) = 132 eV
- $E_n$  (Au) = 4.9 eV



约0.1%的中子本底水平 (大多数情况可忽略)

### 3. Back-n热中子能区探索研究



不同能量中子飞行73.5 m (实验厅2)所需时间

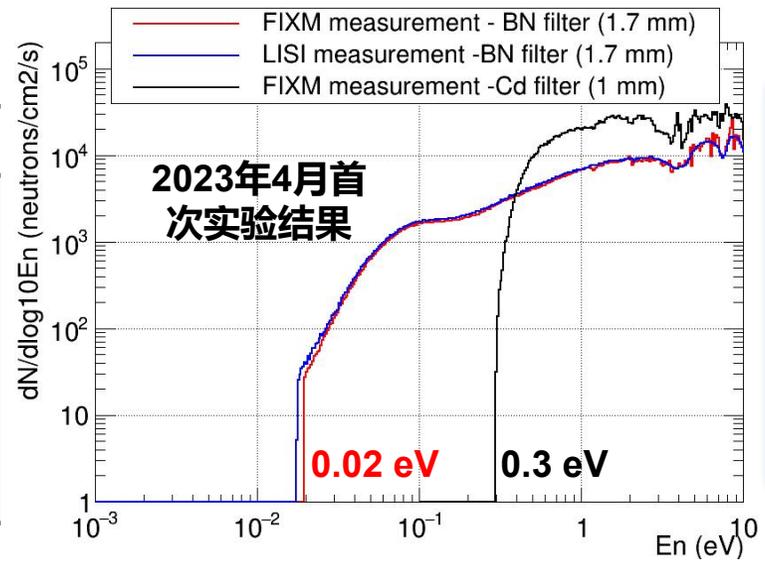
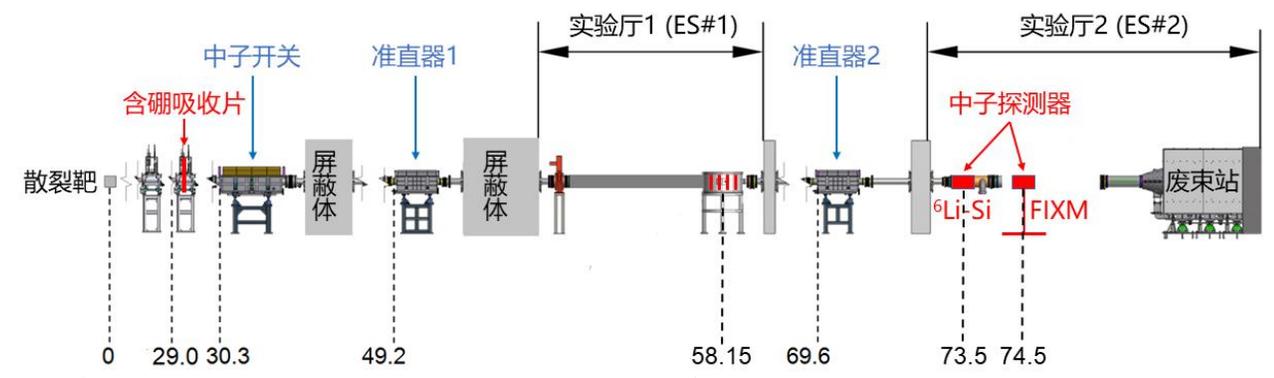
中子能量	飞行时间
$\gamma$ (光速)	245 ns
300 MeV (Back-n最高能)	376 ns
0.3 eV (Cd吸收阈值)	9.70 ms
0.0253 eV (热中子)	33.41 ms
0.0176 eV	40 ms (开始重叠到第二个脉冲)

**能区浪费!**

问题：是否有一种方法，既能在Back-n得到热中子，又能避免不同脉冲间的重叠（去除飞行时间大于40 ms的低能中子）？

**有！用含硼样品替代镉吸收片，充分利用 $^{10}\text{B}$ 反应截面在低能区的 $1/v$ 规律，调控低能区能谱！**

#### 实验方案



**Highlights:**  
**在Back-n首次成功测量到热中子，将能区向下延伸1个量级以上，为开展热中子区研究奠定了基础，扩展了装置的应用范围，进一步提升了装置性能！**

### 3. Back-n热中子能区探索研究

#### 基于Back-n热中子测量<sup>3</sup>He极化率

M.F. Zhang et al., *NIMA* (2025) 1072: 170184

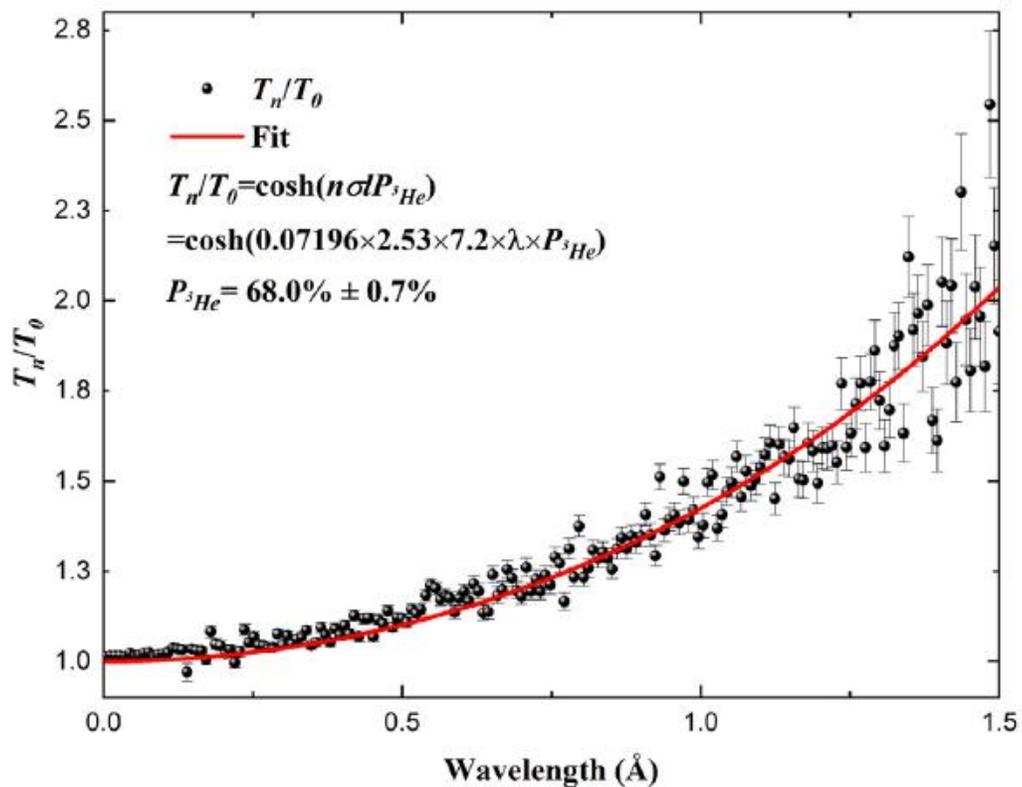
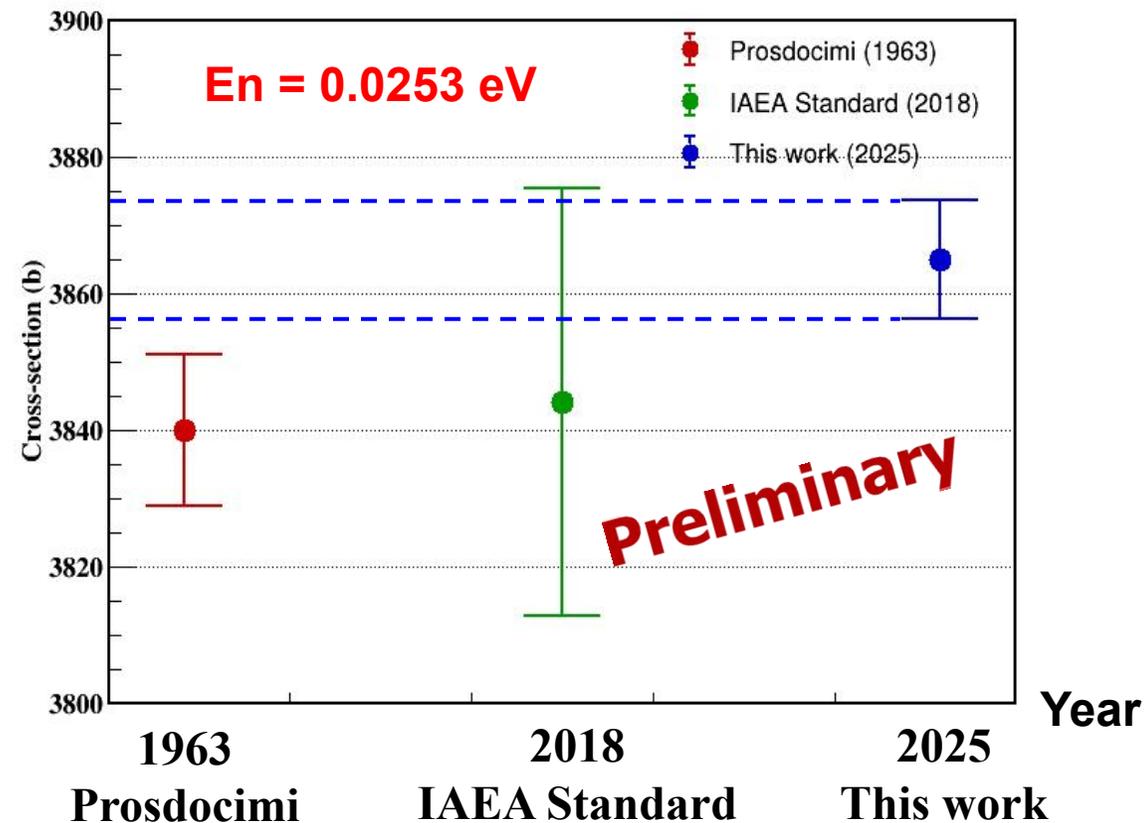


Fig. 4. Fitting result for the <sup>3</sup>He polarization measured on Back-n with the NTOX detector. The y-axis is the ratio of polarized ( $T_n$ ) vs unpolarized ( $T_0$ ) <sup>3</sup>He transmission data.  $T_n$  refers to the polarized <sup>3</sup>He transmission. The x-axis is neutron energy in wavelength (Å).

#### 热中子能点<sup>10</sup>B(n, α)截面测量

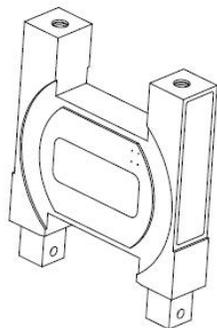
热中子能区首次物理测量，有望修改IAEA标准!



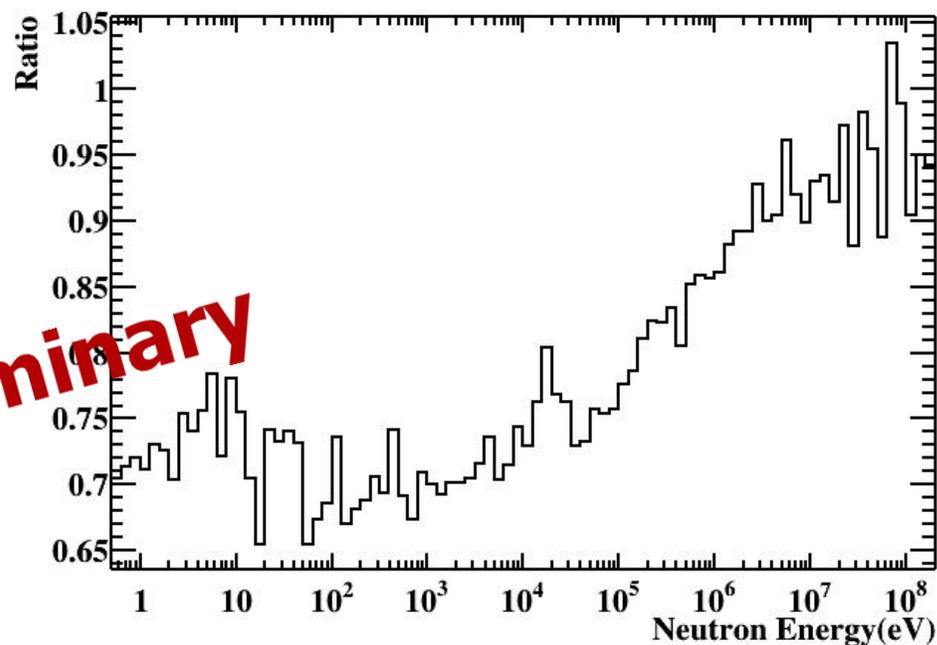
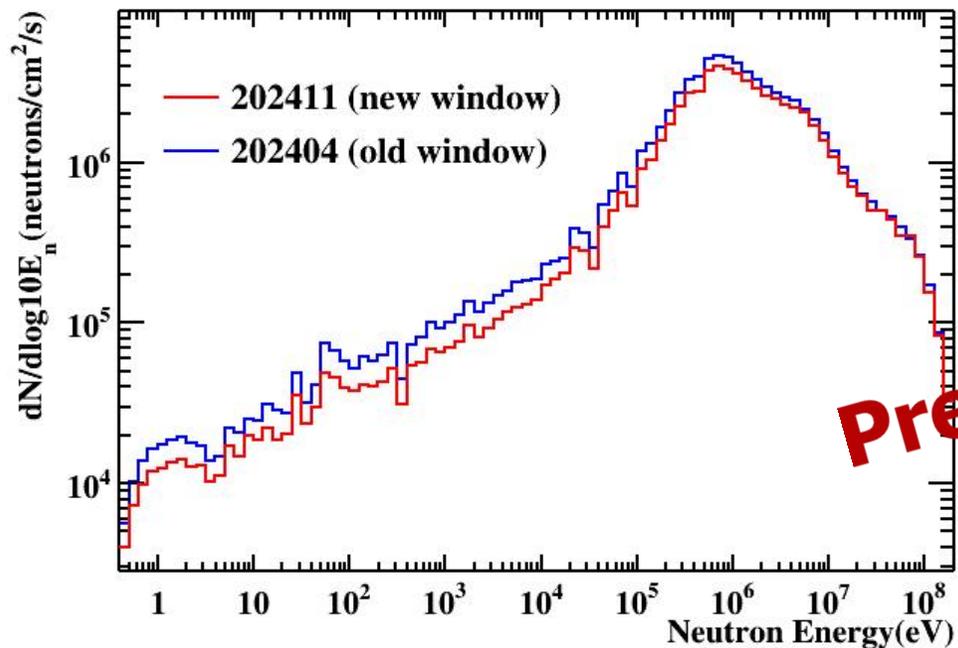
详见彭俊勇报告：24日“核数据”分会场最后一个报告（16:15）

## 4. Back-n新中子能谱测量研究

### 新质子束窗更换前后的能谱/通量比较

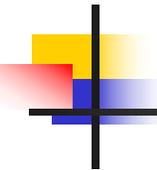


- 由于CSNS-II升级需要, 2024年8月更换了质子束窗 (正对Back-n方向)
- 新束窗: 2 mm Al + 3 mm H<sub>2</sub>O + 2 mm Al
- 旧束窗: 2 mm Al



能谱/通量呈衰减趋势, 低能区衰减相对较多

详见孔誉谦报告: 24日“中子测量与应用”分会场 11:45



# 目录

- 一、研究动机
- 二、研究内容
- 三、总结展望**

## 总结

1. 系统测量研究了Back-n能谱，阐明了能谱随实验厅、束斑的变化规律，提升了用户实验的精度；
2. 将Back-n中子束流延伸至热中子能区，扩展能区覆盖范围1个量级以上，实现了热中子能区的物理测量与应用；
3. 测量研究了Back-n其他束流特征参数，明确了中子本底、能量分辨率、加速器质子束团宽度等基本参数；
4. 初步研究了最新能谱现状（2024年8月以后），确定了新质子束窗对Back-n的影响。

## 展望

Back-n能谱测量（束流特征测量）方面仍然需要开展大量深入研究

但是，我们的人力资源非常有限

数据分析速度赶不上测量速度，有时测量的速度甚至赶不上能谱变化的速度！

所以，诚挚欢迎对Back-n中子能谱测量感兴趣的老师和同学加入我们，与我们开展合作！

我认为，白光中子能谱测量工作是非常好的科研训练，涵盖了实验、模拟、分析、核数据测量等基本功！

更为重要的是，我们已累积了大量的实验数据，等着与您分享成果！！！！

**由衷感谢各位领导和老师们对我们工作的支持！**