



南華大學

UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

# 基于CSNS Back-n的中子散射微分截面实验探索

——第十届反角白光中子实验装置用户研讨会

唐诗琦<sup>1</sup>, 冯松<sup>1,2</sup>, 陈永浩<sup>3,4</sup>, 樊瑞睿<sup>3,4</sup>, 肖敏<sup>1</sup>, 栾鹏<sup>1</sup>, 肖友淳<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 黄文鑫<sup>1</sup>, 邓存志<sup>1</sup>, 易秋琪<sup>1</sup>,  
王孟艳<sup>1</sup>, 陈奕熙<sup>1</sup>, 程品晶<sup>1</sup>, 郑波<sup>1,2</sup>

1.南华大学核科学技术学院

2.先进核能技术设计与安全教育部重点实验室

3.中国科学院高能物理研究所

4.散裂中子源科学中心

湖南·衡阳 2026年7月14-16日



# 目录



**01**

**研究背景**

**02**

**实验测量与方法**

**03**

**实验数据处理**

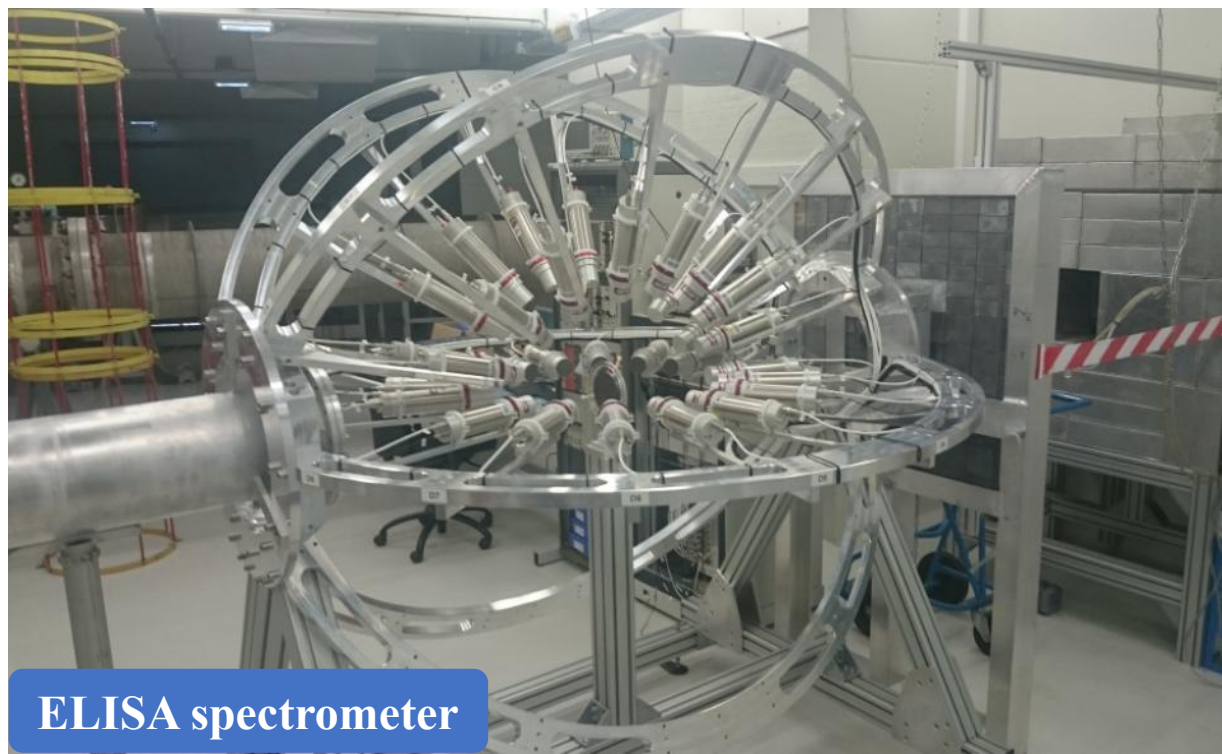
**04**

**实验初步结果**

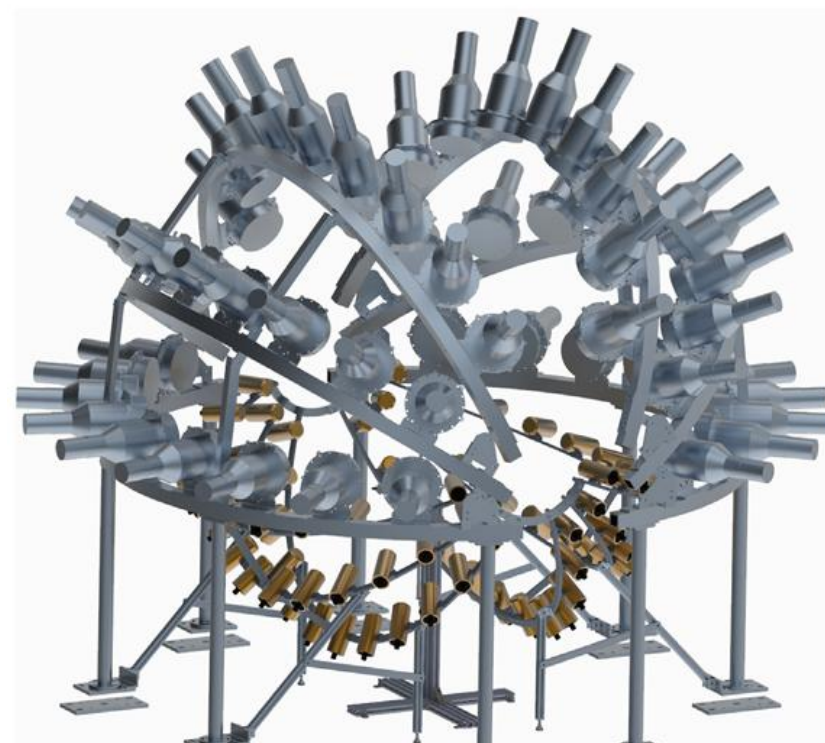
**05**

**总结及展望**

- 中子散射微分截面为研究核子间相互作用及核力在核介质中的有效行为提供关键实验约束，可用于检验和改进核反应模型与R矩阵理论，是基础核反应数据。
- 现有中子散射微分截面实验主要集中于MeV以上能区，受限于传统单能中子源条件，缺乏keV及以下能区实验数据，导致相关能区的评价数据主要依赖理论计算，且无不确定度数据参考。
- 尝试在Back-n实验装置上搭建中子散射微分截面测量系统(Neutron-induced Differential Scattering Cross-section spectrometer, 简称N-DiSC谱仪)，开展中子散射微分截面测量技术探索，为未来搭建相关探测系统提供技术支持。

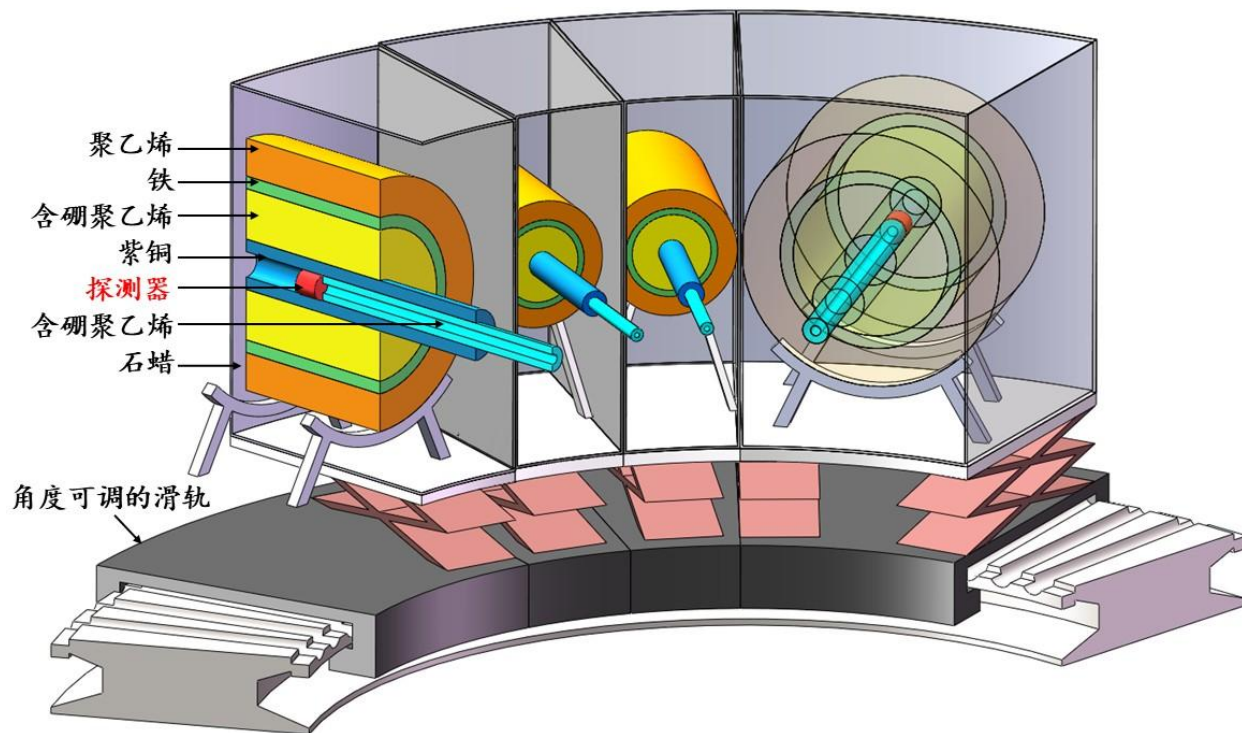
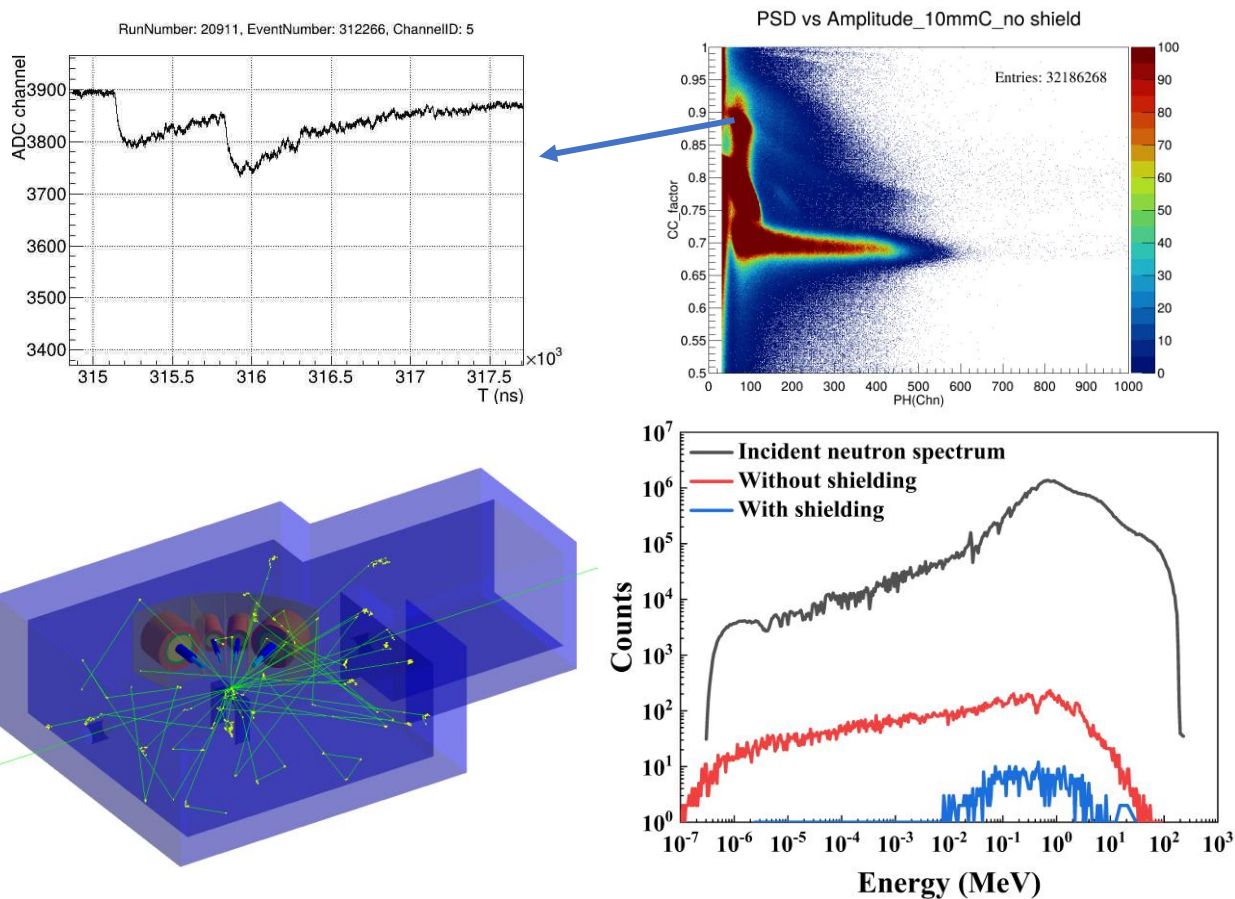


ELISA spectrometer



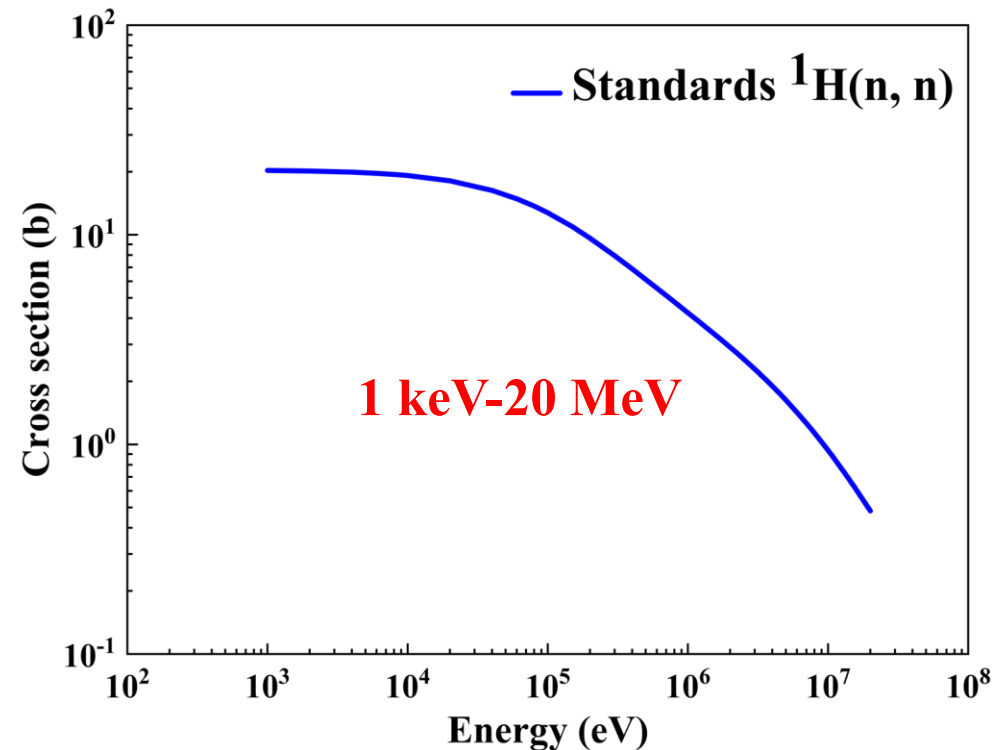
CoGNAC experimental setup

- 根据 Back-n 束线环境分析, 若不设置屏蔽体, 探测器将承受高计数率, 导致信号堆积, 难以实现中子/ $\gamma$  甄别。因此, 对 N-DiSC 谱仪进行了概念设计与探测器响应模拟, 初步设计的屏蔽体可有效抑制散射本底, 满足实验测量需求。
- 目前谱仪的概念设计满足四个中子出射角方向同时测量, 核心探测单元采用具有优异中子- $\gamma$  甄别性能的钾冰晶石, 并在中子束水平面设计可旋转的模块式屏蔽体加以屏蔽。



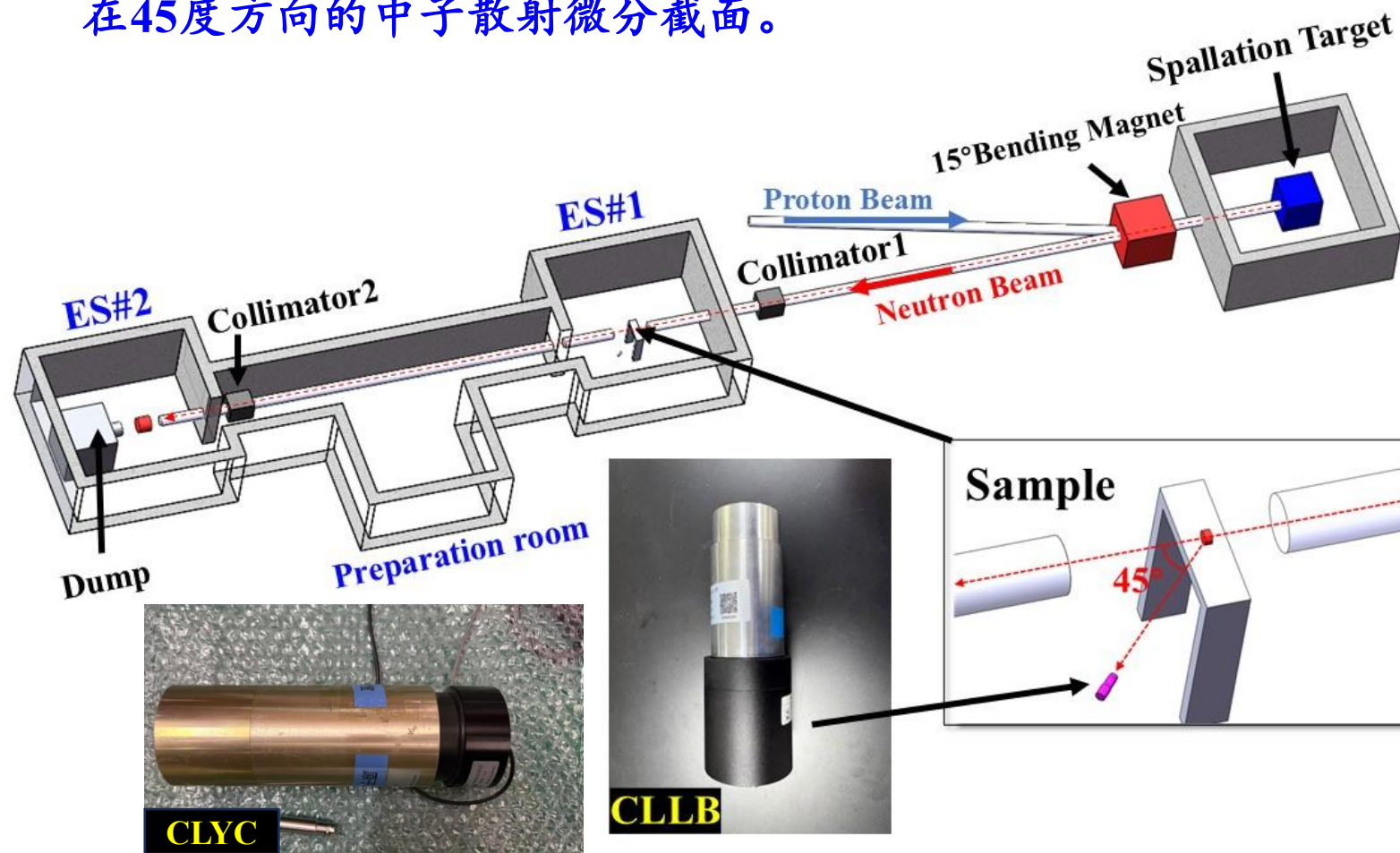
- 为验证该技术的可行性，选取具有标准截面参考的氢和天然碳作为研究对象。
- 研制基于圆柱形屏蔽体的中子散射截面谱仪原理样机，利用碳的标准弹性散射微分截面特征，在Back-n束线上开展氢的 $45^\circ$ 方向的中子散射微分截面探索实验。

|  IAEA.org<br>International Atomic Energy Agency |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                      |                                       |                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| IAEA NEUTRON DATA STANDARDS (2017)                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                      |                                       |                                       |
| A.D. Carlson, et al., <a href="#">Nuclear Data Sheets 148 (2018) 143-188</a>                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                      |                                       |                                       |
| #                                                                                                                               | Reaction                                                                                                                                                                                                                                                                | Energy Range                                                                         | ENDF-6 formatted data                 | Free text format                      |
| 1                                                                                                                               | H(n,n)                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1e-5 eV to 20 MeV<br>(Standard range: 1 keV - 20 MeV)                                | <a href="#">std17-001_H_001.endf</a>  | <a href="#">std17-001_H_001.txt</a>   |
| 2                                                                                                                               | $^3\text{He}(n,p)$                                                                                                                                                                                                                                                      | 1e-5 eV to 20 MeV<br>(Standard range: Thermal - 50 keV)                              | <a href="#">std-002_He_003.endf</a>   | not available                         |
| 3                                                                                                                               | $^6\text{Li}(n,t)$                                                                                                                                                                                                                                                      | 1e-5 eV to 4 MeV<br>(Standard range: Thermal - 1 MeV)                                | <a href="#">std17-003_Li_006.endf</a> | <a href="#">std17-003_Li_006.txt</a>  |
| 4                                                                                                                               | $^{10}\text{B}(n,\alpha);(n,\alpha_1\gamma)$                                                                                                                                                                                                                            | 1e-5 eV to 1 MeV<br>(Standard range: Thermal - 1 MeV)                                | <a href="#">std17-005_B_010.endf</a>  | <a href="#">std17-005_B_010.txt</a>   |
| 5                                                                                                                               | $\text{natC}(n,n)$                                                                                                                                                                                                                                                      | up to 6.45 MeV<br>(Standard range: 1keV - 1.8 MeV,<br>angular distribution standard) | <a href="#">std17-006_C_000.endf</a>  | <a href="#">std17-006_C_000.txt</a>   |
| 6                                                                                                                               | $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$                                                                                                                                                                                                                                             | 1.5 keV to 2.8 MeV<br>(Standard range: 200keV - 2.5MeV)                              | <a href="#">std17-079_Au_197.endf</a> | <a href="#">std17-079_Au_197.txt</a>  |
| 7                                                                                                                               | $^{235}\text{U}(n,f)$                                                                                                                                                                                                                                                   | 150 eV to 200 MeV<br>(Standard range: 100eV - 20MeV)                                 | <a href="#">std17-075_U_235.endf</a>  | <a href="#">std17-075_U_235.txt</a>   |
| 8                                                                                                                               | $^{238}\text{U}(n,f)$                                                                                                                                                                                                                                                   | 0.5 to 200 MeV<br>(Standard range: 100eV - 20MeV)                                    | <a href="#">std17-078_U_238.endf</a>  | <a href="#">std17-078_U_238.txt</a>   |
| 9                                                                                                                               | Thermal Neutron Constants (17): Total nubar, $(n_{\text{th}},f)$ , $(n_{\text{th}},el)$ , $(n_{\text{th}},\gamma)$ cross sections for fissile targets $^{233}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ . Total nubar $^{252}\text{Cf}(sf)$ . | 0.0253 eV (2200 m/s)                                                                 |                                       | <a href="#">Standards2017_TNC.txt</a> |
| 10                                                                                                                              | $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$                                                                                                                                                                                                                                             | Thermal: 98.66(0.14) b<br>MACS (30 keV)= 620(11) mb                                  |                                       |                                       |
| 11                                                                                                                              | $^{235}\text{U}(n,f)$                                                                                                                                                                                                                                                   | Integral from 7.8 eV to 11 eV<br>= 247.5(3.3) b*eV                                   |                                       |                                       |



### 实验设计及安排

- 2025年4月，在Back-n束线的实验厅一搭建圆柱形屏蔽体的谱仪原理样机，通过分别测量 $^{nat}\text{C}$ 和聚乙烯样品的中子散射响应，通过扣除本底贡献及聚乙烯中碳原子的散射效应，提取出 $^1\text{H}$ 在45度方向的中子散射微分截面。



### 实验安排:

| 样品                     | 条件  | 实验时长 |
|------------------------|-----|------|
| 25 mm $^{nat}\text{C}$ | 无   | 28 h |
|                        | 影锥棒 | 39 h |
| 3 mm PE                | 无   | 24 h |
|                        | 影锥棒 | 31 h |
| 15 mm PE               | 无   | 19 h |
| 空靶                     | 无   | 3 h  |

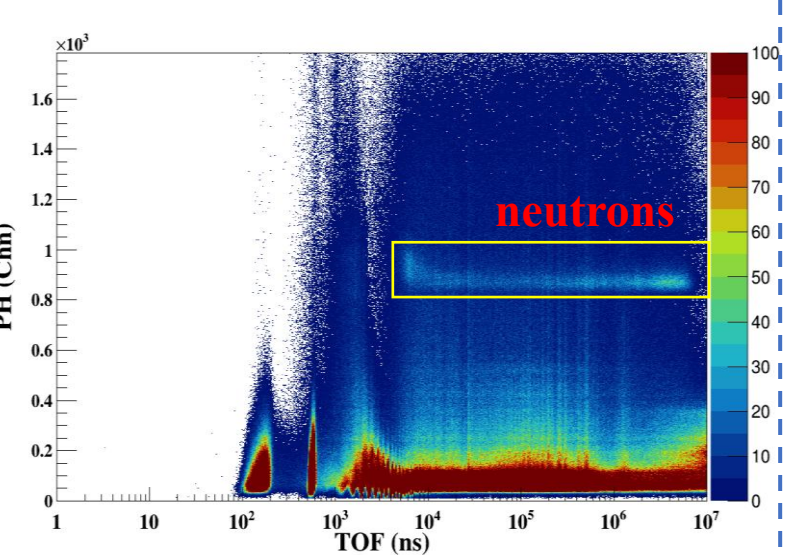
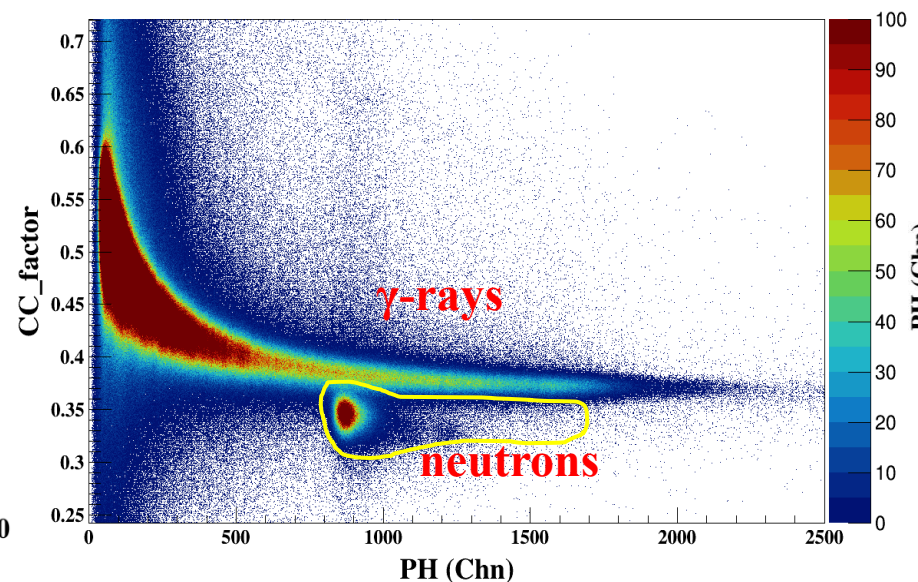
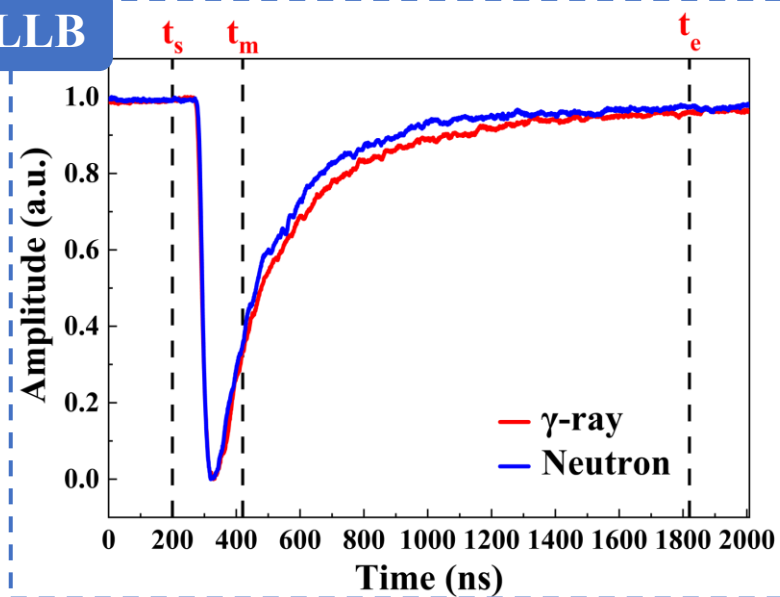


### 3.实验数据处理

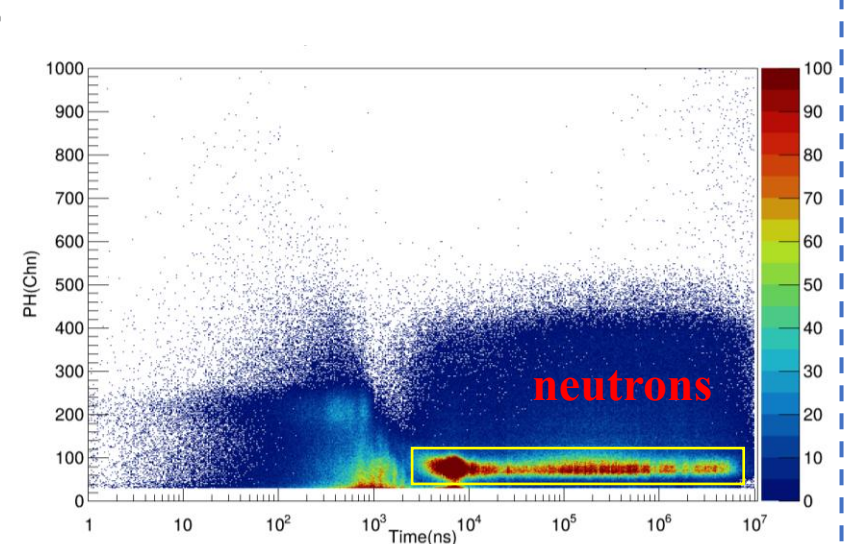
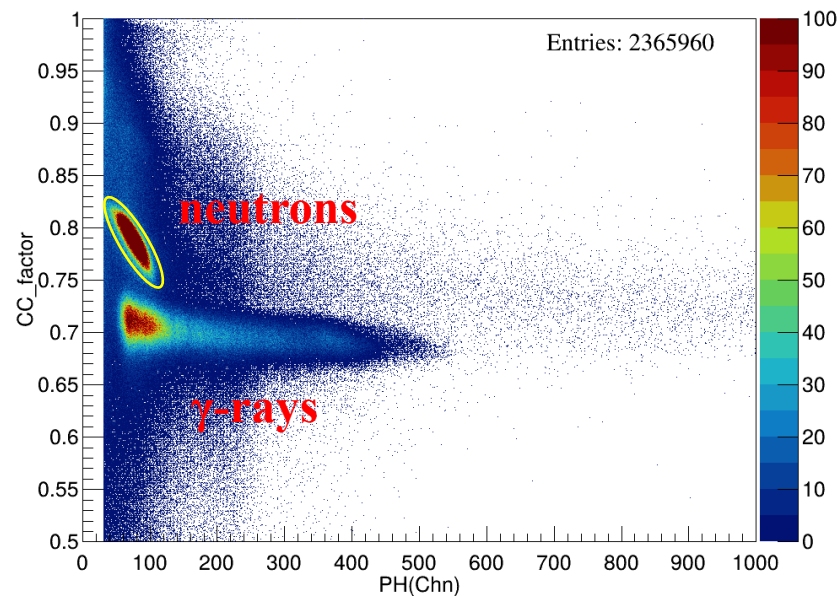
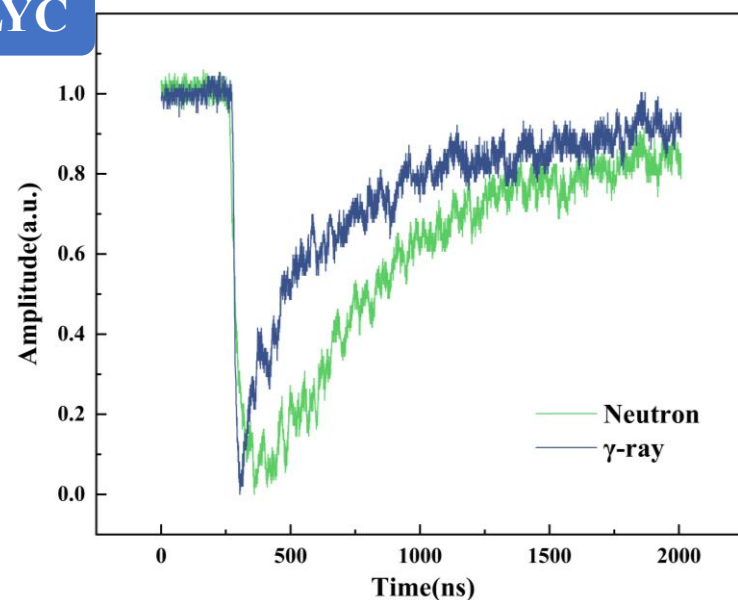


#### 中子/伽马甄别

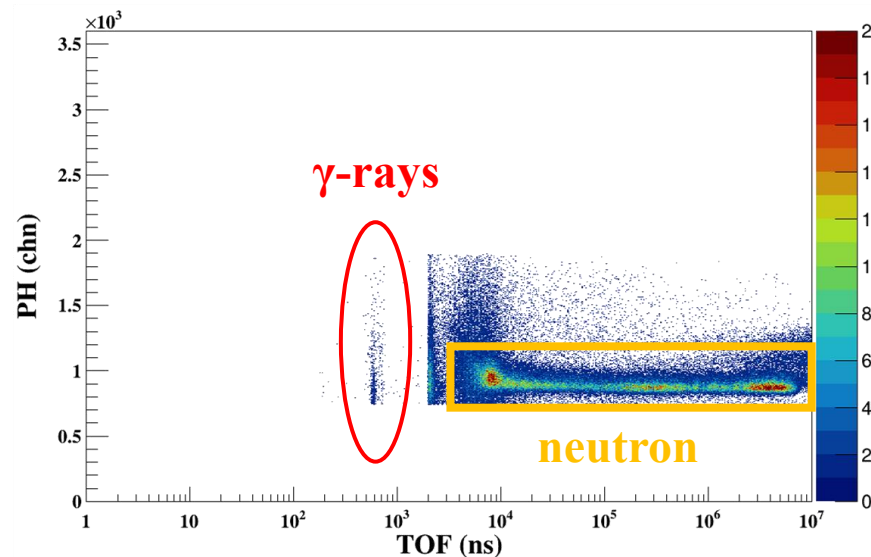
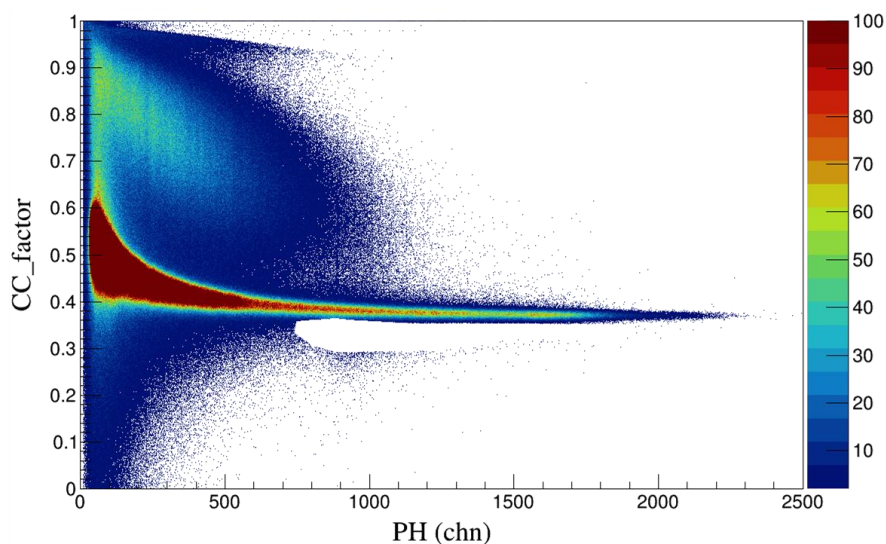
CLLB



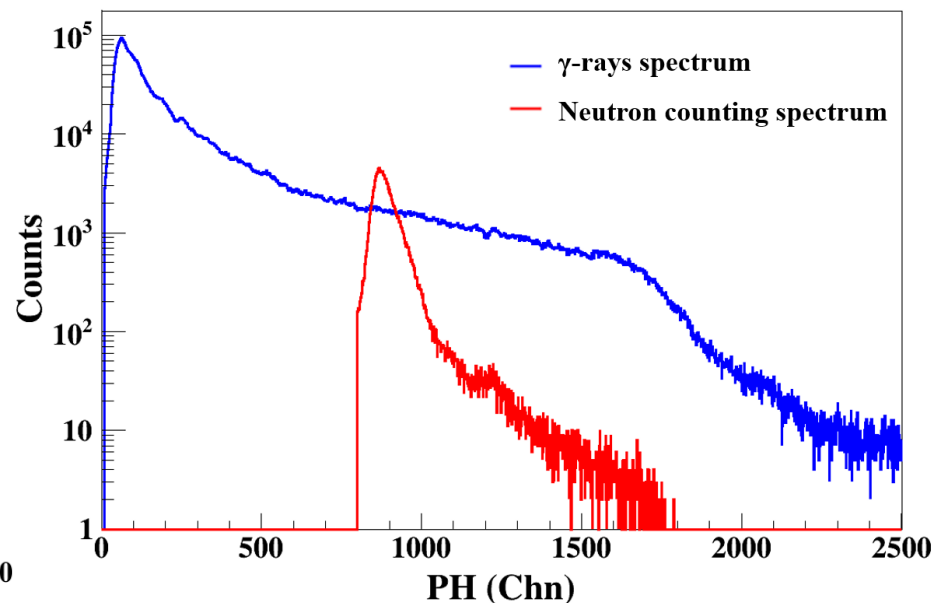
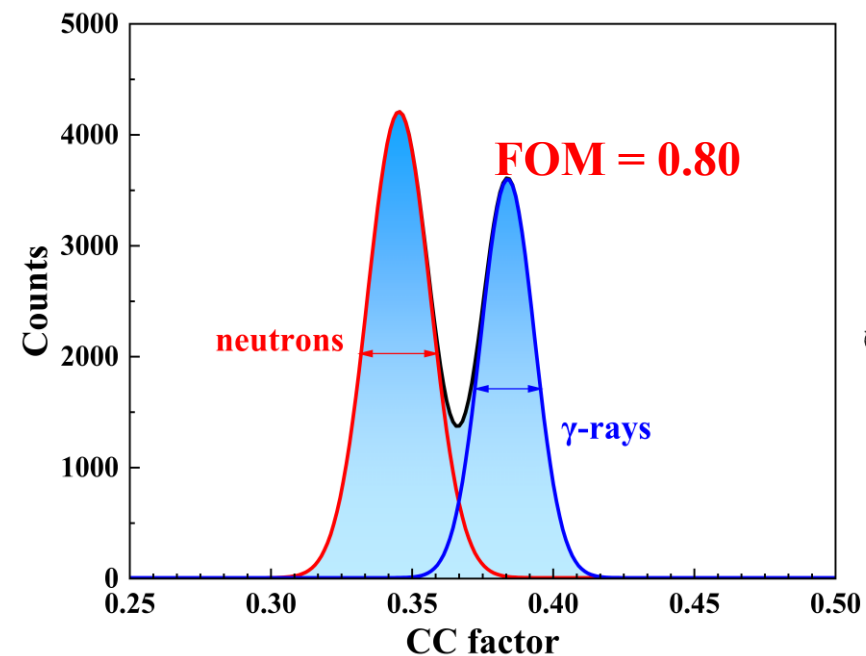
CLYC



## ➤ 中子/伽马甄别

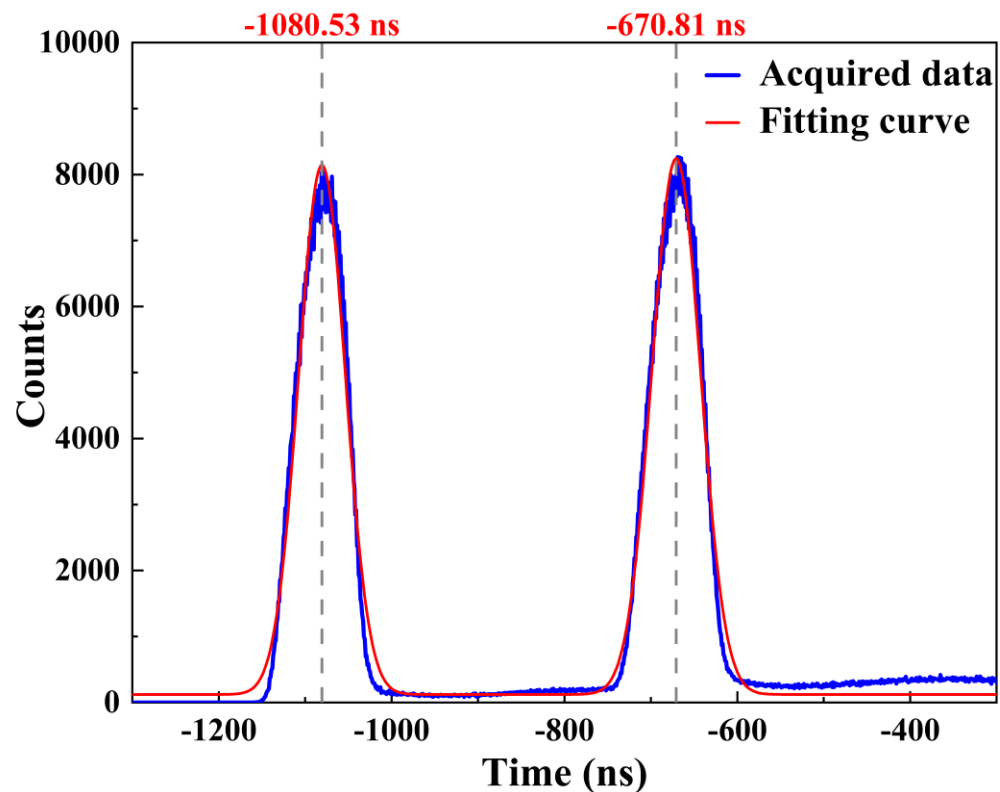


- 结合电荷比较因子与TOF-幅度二维谱，可进一步明确中子信号分布，提升n/ $\gamma$ 甄别准确性。
- 甄别FOM值为0.8。

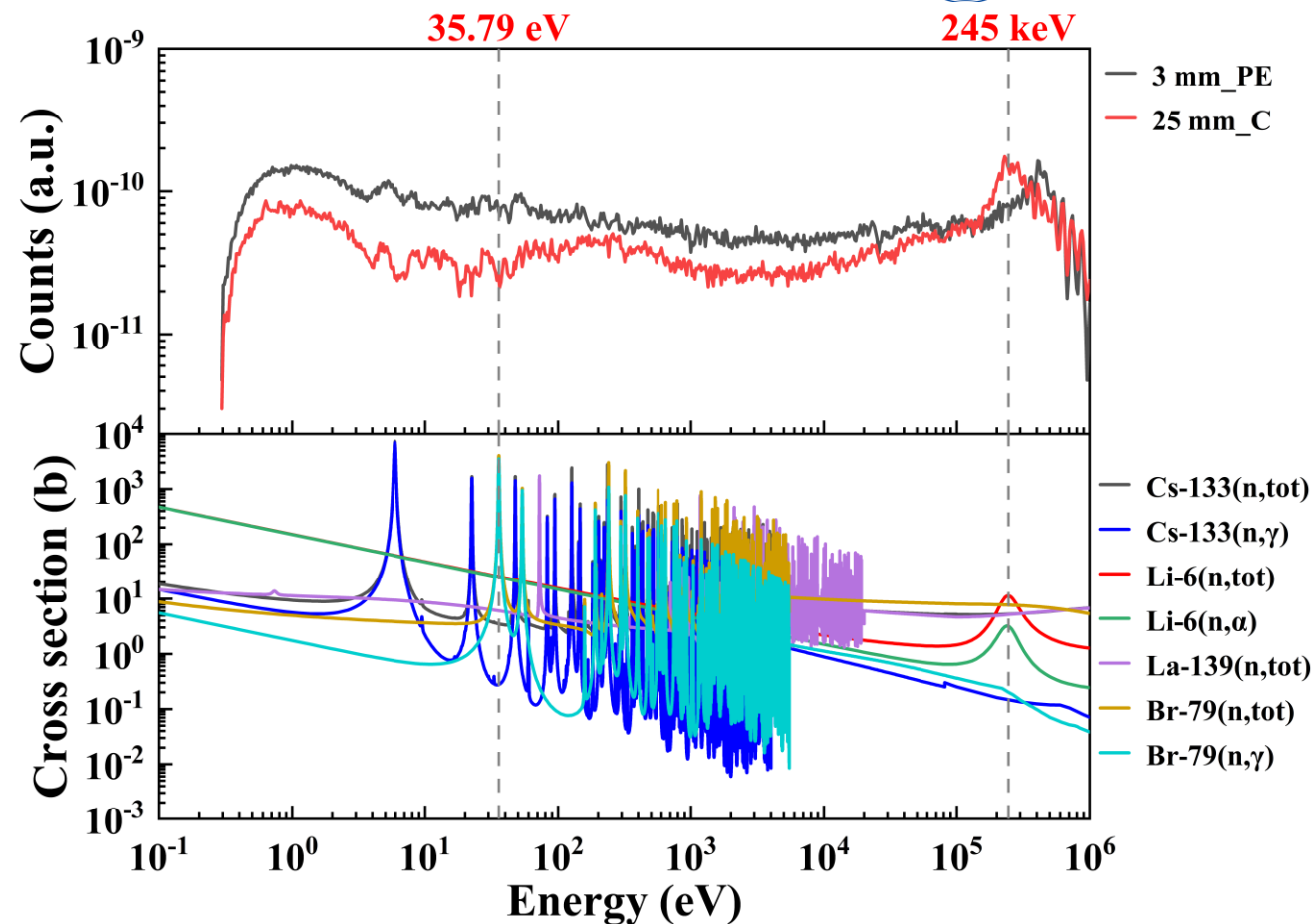


- CLLB闪烁体探测器在Back-n束流下对天然碳样品的响应中，弹性散射中子与 $\gamma$ 射线呈现明显区分特征。
- 中子计数谱中出现单一峰结构，对应的等效电子能量约为3.2-3.5 MeVee。

#### ➤ 飞行时间定时与飞行距离刻度



□ 两个质子束团产生的 $\gamma$ -flash事件的时间间隔为**409.72 ns**，用**第一个质子束团**产生的 $\gamma$ -flash事件的时间作为**时间零点**。

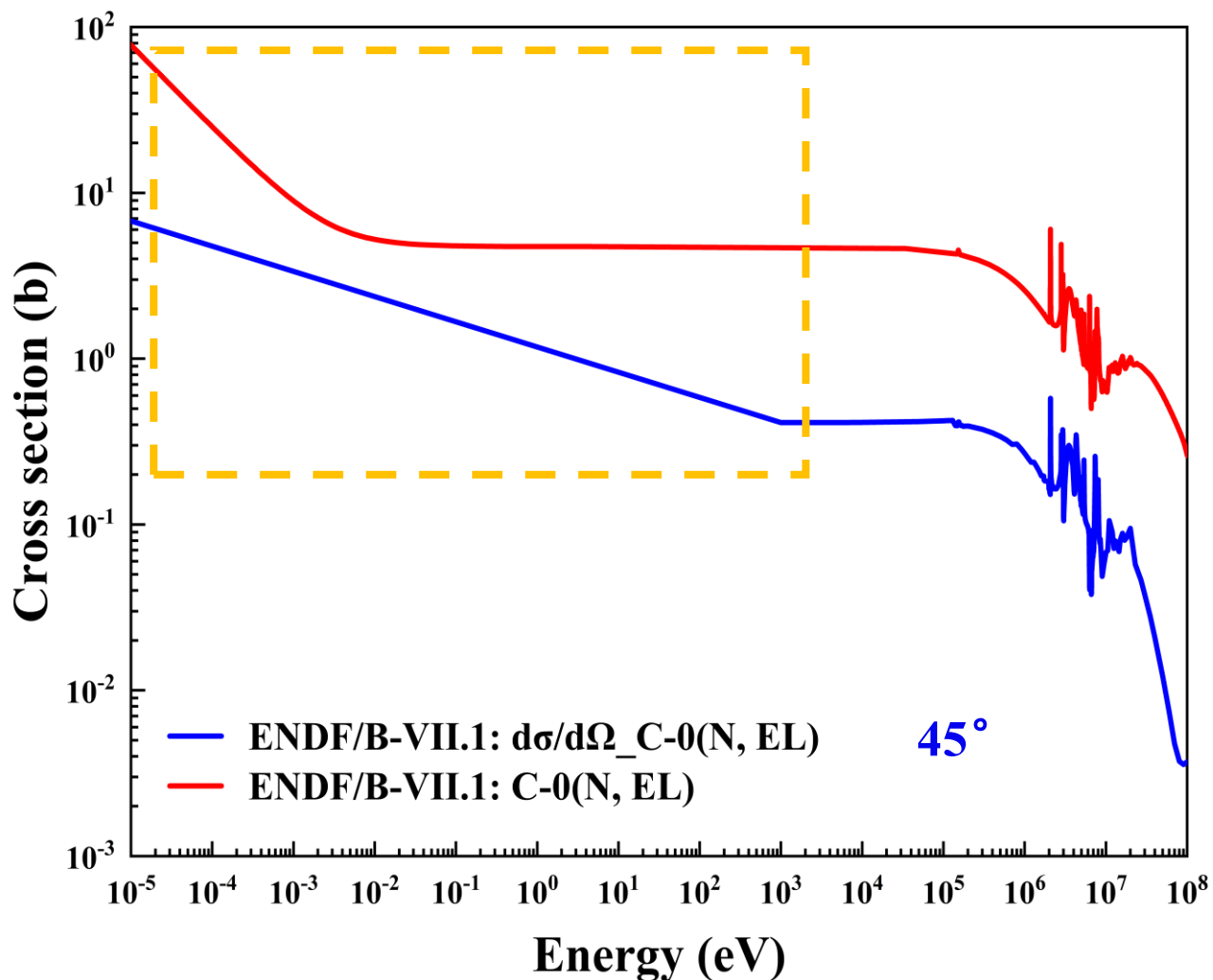


□ 选用CLLB组成核素的 $^{79}\text{Br}$ 在**35.79 eV**和 $^6\text{Li}$ 在**245 keV**的两个共振峰来进行**飞行距离刻度**。

Flight path length: 58.04 m

### ➤ 探测效率刻度

□ 考虑到碳和氢的弹性散射截面均为标准截面，可通过碳的中子计数谱与厅一束流通量数据，反推出探测器的探测效率曲线。



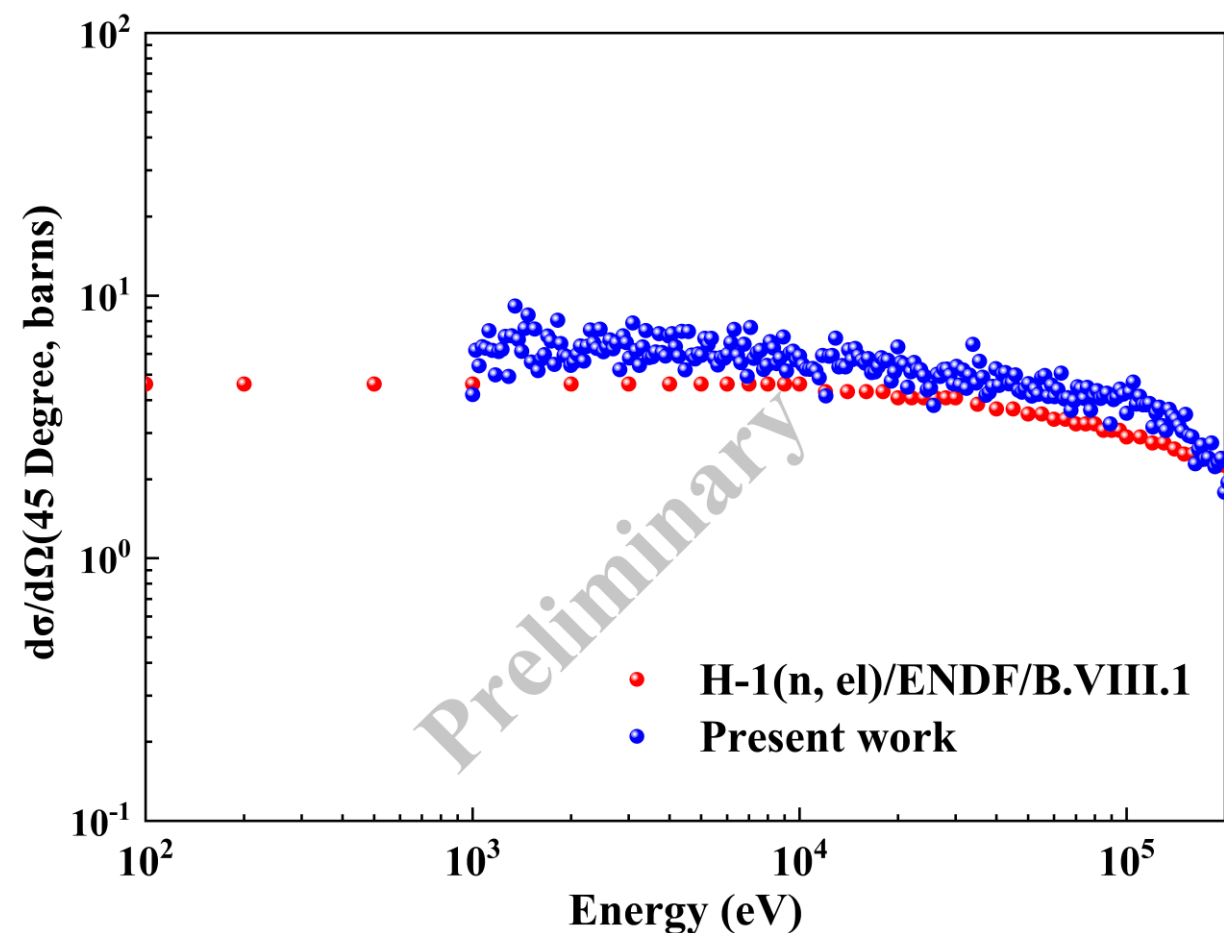
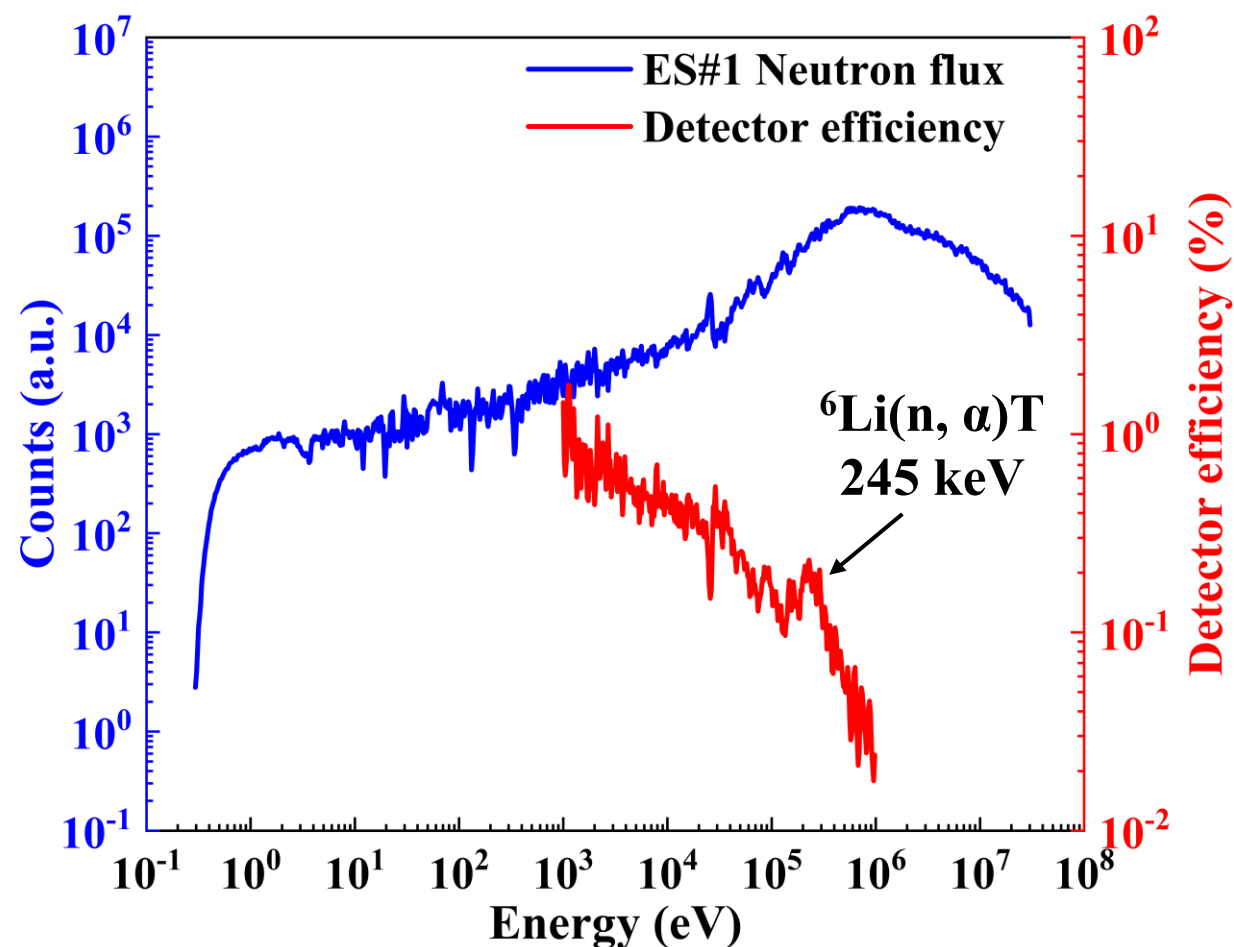
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E) = \frac{N_{counts}}{\varphi(E) \times \rho \times \frac{N_A}{M} \times t \times \Delta\Omega \times \varepsilon(E)}$$

$$\varepsilon(E) = \frac{N_{C\_counts}(E)}{\Phi(E) \times \rho_C \times \frac{N_A}{M_C} \times t_C \times \frac{d\sigma_C}{d\Omega}(E) \times \Delta\Omega}$$

式中：

$N_{counts}$ : 探测器中子计数、 $\varphi(E)$ : 中子通量、 $\rho$ : 样品密度、 $t$ : 样品厚度、 $M$ : 样品摩尔质量、 $\Delta\Omega$ : 探测器立体角、 $\varepsilon(E)$ : 探测器探测效率

## 实验结果



- 探测效率趋势与 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反应率一致;
- 分析获得1 keV-200 keV氢的45度中子散射微分截面, 趋势上与ENDF.VIII.1库基本一致;
- 未来可采用N-DiSC谱仪布局, 进一步获得 ${}^1\text{H}$ 及其他轻核高精度多角度中子散射微分截面。

总结:

- 在开展基于天然碳( $^{nat}\text{C}$ )和氢的中子全截面测量实验(ES#2)的同时, **同步**进行了微分中子散射截面测量方法的探索性实验(ES#1)。
- 实验采用**CLLB闪烁体探测器**测量天然碳样品以及聚乙烯样品的45度方向中子散射响应, 结合本底扣除及对聚乙烯中碳散射贡献的修正, 成功提取出 $^1\text{H}$ 在45度方向的弹性散射微分截面。结果表明, **在1 keV–200 keV能区内所获得的 $^1\text{H}$ 在45度中子散射微分截面在趋势上与ENDF/B-VIII.1库保持较好一致性。**
- 但是目前测量技术方面存在以下问题: 1) CLLB闪烁探测器的**中子/ $\gamma$ 甄别能力不足**, 导致中子计数增多, 得到的截面值相对于参考值偏大约20%; 2) **飞行距离刻度精度低**, 共振结构不明显, 导致低能区中子能量刻度存在一定偏差; 3) 探测器和屏蔽体的**机械支撑不够**, 液压系统随时间呈现显著不稳定问题, 导致探测器在长时间测量时水平位置逐渐降低。
- 后续研究中, 将针对以上问题**完善对N-DiSC谱仪的物理设计**, 进一步开展探测器探测效率的精确标定与中子通量的同步监测工作, 以**实现对 $^1\text{H}$ 及其他轻核多角度中子散射微分截面的高精度测量。**



南華大學

UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

***Thanks for your attention!***

唐诗琦，冯松，陈永浩，樊瑞睿，肖敏，栾鹏，肖友淳，刘静，黄文鑫，邓存志，  
易秋琪，王孟艳，陈奕熙，程品晶，郑波

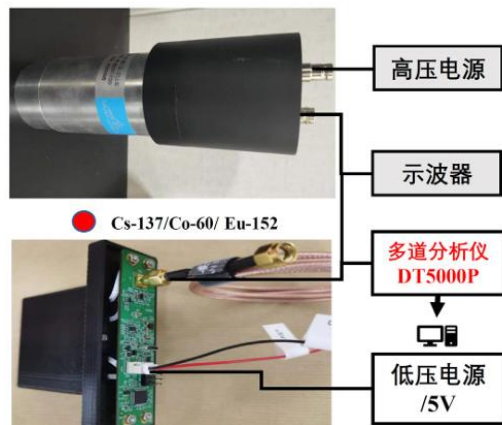




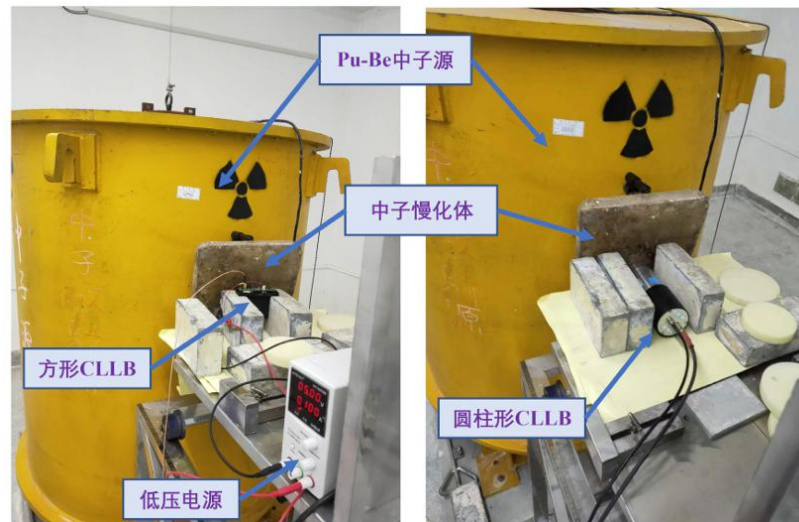
## ➤ 探测器实验室测试

### 标准伽马源-能量线性响应

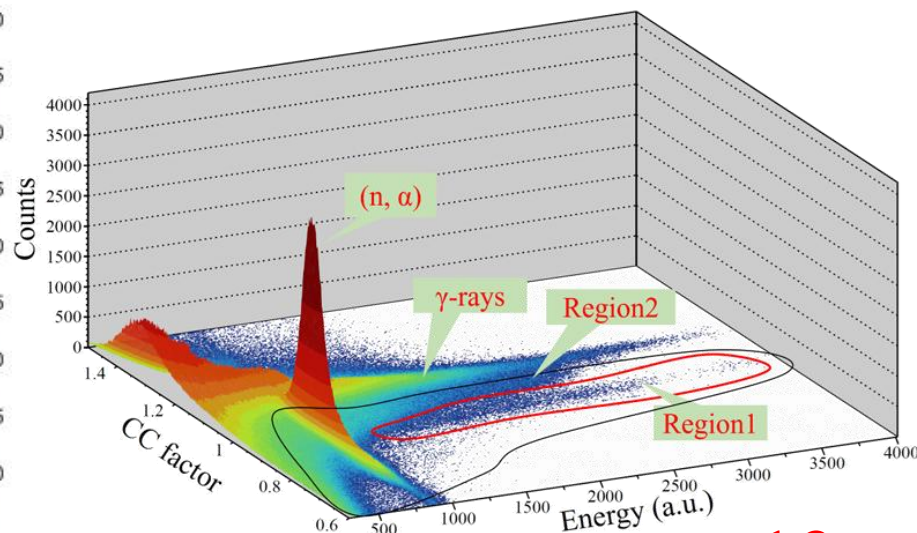
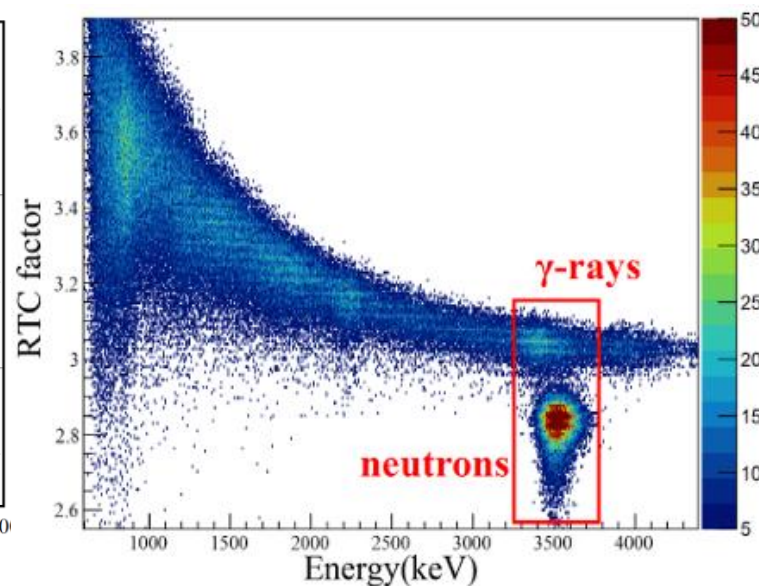
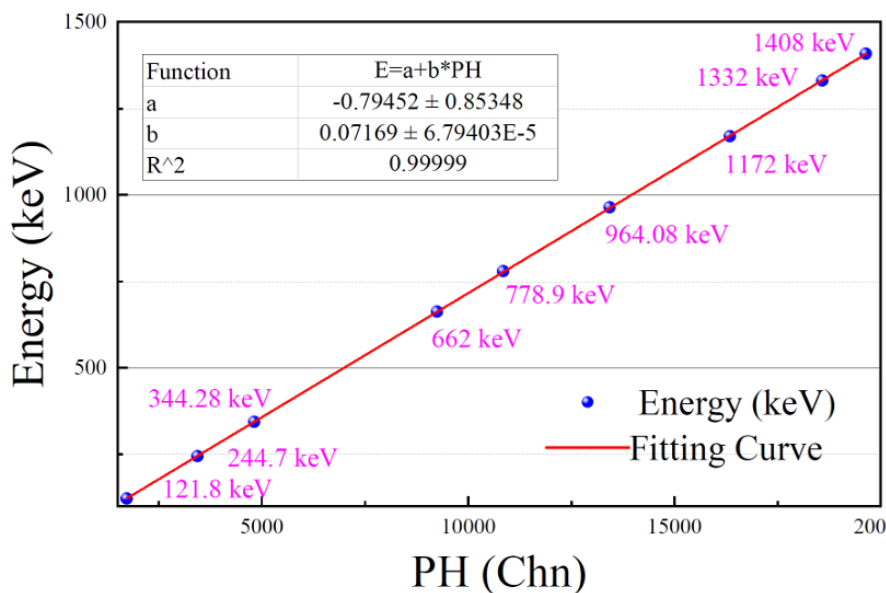
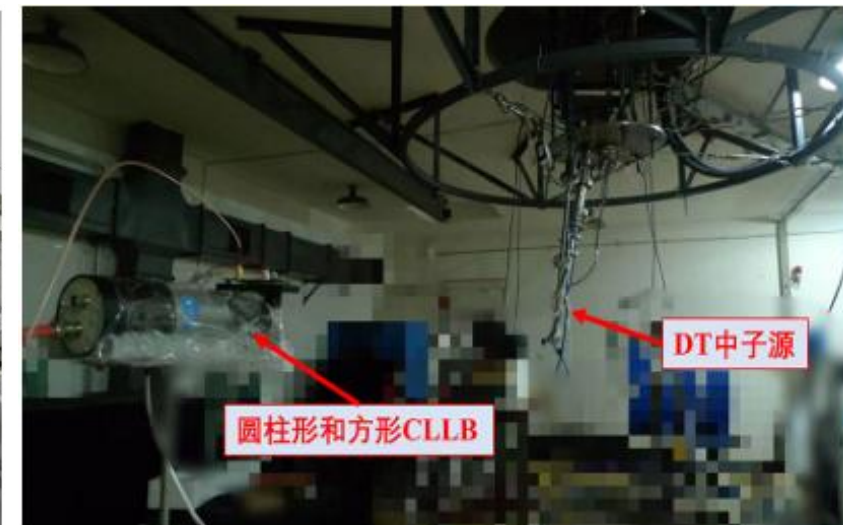
后读出到PMT的圆柱形CLLB探测器  $\Phi 50.8 \times 50.8$  mm



### Pu-Be中子源-中子伽马甄别



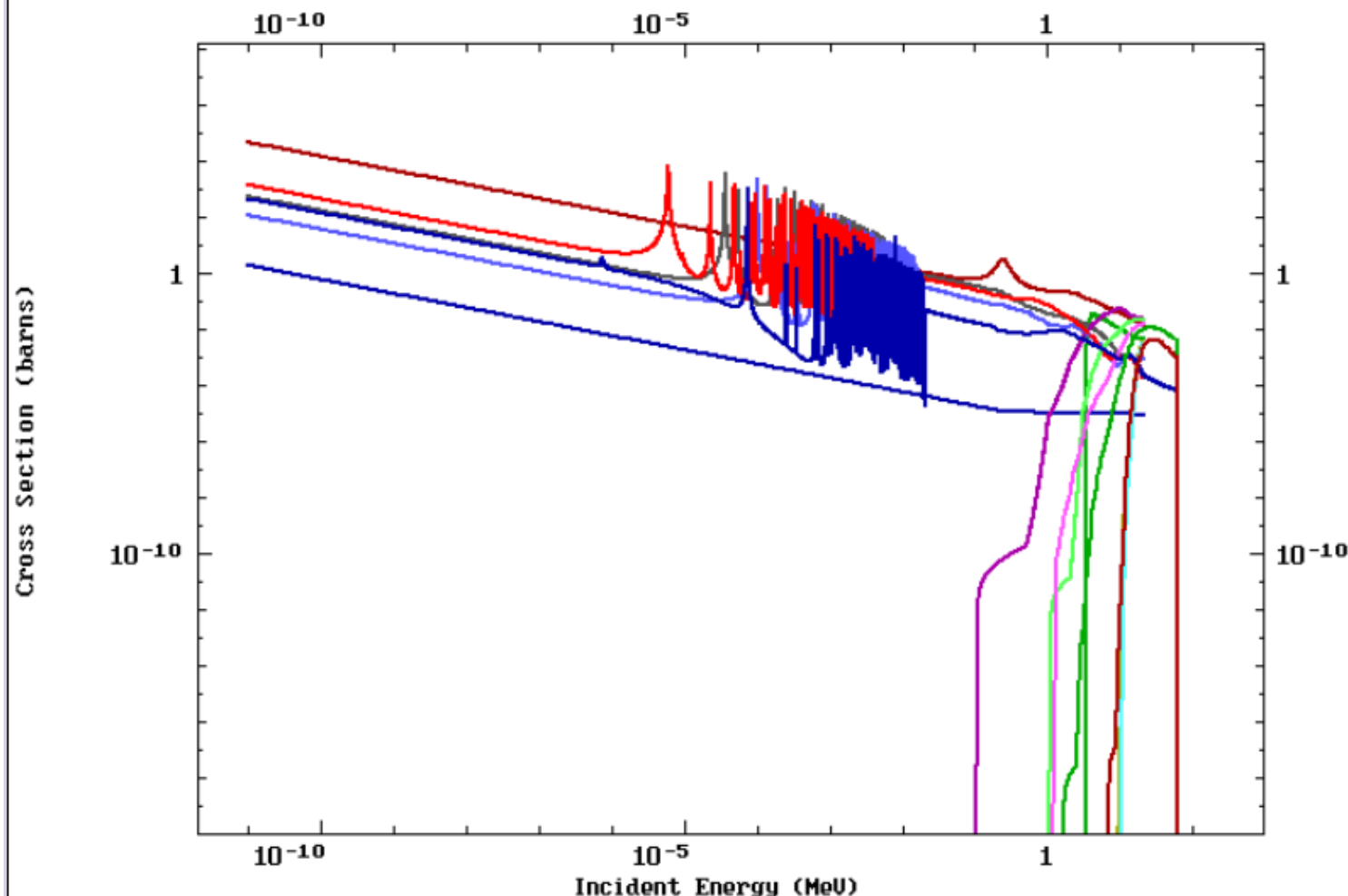
### DT中子源-探测效率刻度





## Cross Section

ENDF Request 10513, 2025-Jul-19,12:14:22



EXFOR

Find and add to the plot  
experimental data

Select data for plotting [all] [none]

- ☒ 1) ENDF/B-VIII.1: LI-6(N,G)LI-7
- ☒ 2) ENDF/B-VIII.1: LI-6(N,P)HE-6
- ☒ 3) ENDF/B-VIII.1: LI-6(N,T)HE-4
- ☒ 4) ENDF/B-VIII.1: BR-79(N,G)BR-80
- ☒ 5) ENDF/B-VIII.1: BR-79(N,P)SE-79
- ☒ 6) ENDF/B-VIII.1: BR-79(N,T)SE-77
- ☒ 7) ENDF/B-VIII.1: BR-81(N,G)BR-82
- ☒ 8) ENDF/B-VIII.1: BR-81(N,P)SE-81
- ☒ 9) ENDF/B-VIII.1: BR-81(N,T)SE-79
- ☒ 10) ENDF/B-VIII.1: CS-133(N,G)CS-134
- ☒ 11) ENDF/B-VIII.1: CS-133(N,P)XE-133
- ☒ 12) ENDF/B-VIII.1: LA-139(N,G)LA-140
- ☒ 13) ENDF/B-VIII.1: LA-139(N,P)BA-139
- ☒ 14) ENDF/B-VIII.1: LA-139(N,T)BA-137

☐ 15) Use my data [example][2]

☒ Use my control file [init] [help]

See: [plotted data](#) (3733Kb) out: e6 json:+ plotly2

Log: [XY](#) [X](#) [Y](#) Lin: [XY](#) [X](#) [Y](#) Auto-range: [XY](#) [X](#) [Y](#) Page: [>>](#) [<<](#) Zoom: [<>](#) [>>](#) Grid: [VH](#) [0](#) [V](#) [H](#) Pts: [Txt](#) [Box](#) [PL](#) [Print](#)

[Reset](#) [Repaint](#) ☐ Legend ☒ Authors ☐ Info+ [PostScript](#) Plotting options: [\[+\]](#) Clipboard: [Copy](#)

Shift legend: x=10 y=10 Split: 0 1:xy;2:y Marker: ☐ Plot data or ratio: 0 0:data; 1:ratio to dataset-1; 2:ratio to 2-nd, etc.

Data for plotting: [ZVD](#) (3477Kb); [download](#) ZVView; [upload](#) and plot your ZVD file