



南華大學

UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

基于Back-n中子源的中子弹弹性散射截面实验探索

—— 2025年CSNS反角白光中子源(第九届)用户研讨会

冯松^{1,4}, 肖敏¹, 陈永浩^{2,3}, 樊瑞睿^{2,3}, 栾鹏¹, 唐诗琦¹, 肖友淳¹, 黄文鑫¹, 刘静¹, 程品晶¹, 郑波^{1,4}

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.先进核能技术设计与安全教育部重点实验室

安徽·六安 2025年7月23-25日



目录



01

研究背景

02

实验测量与方法

03

实验数据分析

04

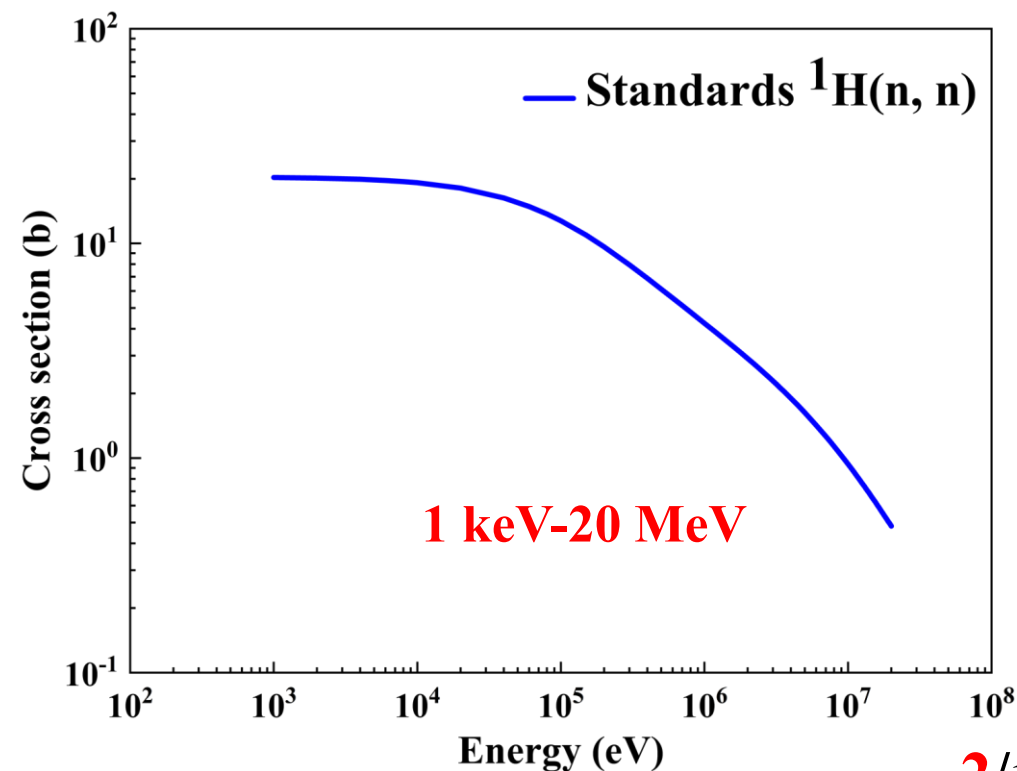
实验初步结果

05

总结

- 中子散射是研究核子间相互作用（NN相互作用）和核力性质的重要途径，其截面数据对于理解核子间的双体相互作用具有重要参考价值；
- 尝试在Back-n实验装置上搭建弹性散射截面测量系统，开展弹性散射截面测量技术探索，为未来搭建相关探测系统提供技术支持。
- 为验证该技术的可行性，选取具有标准截面参考的氢作为研究对象。

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





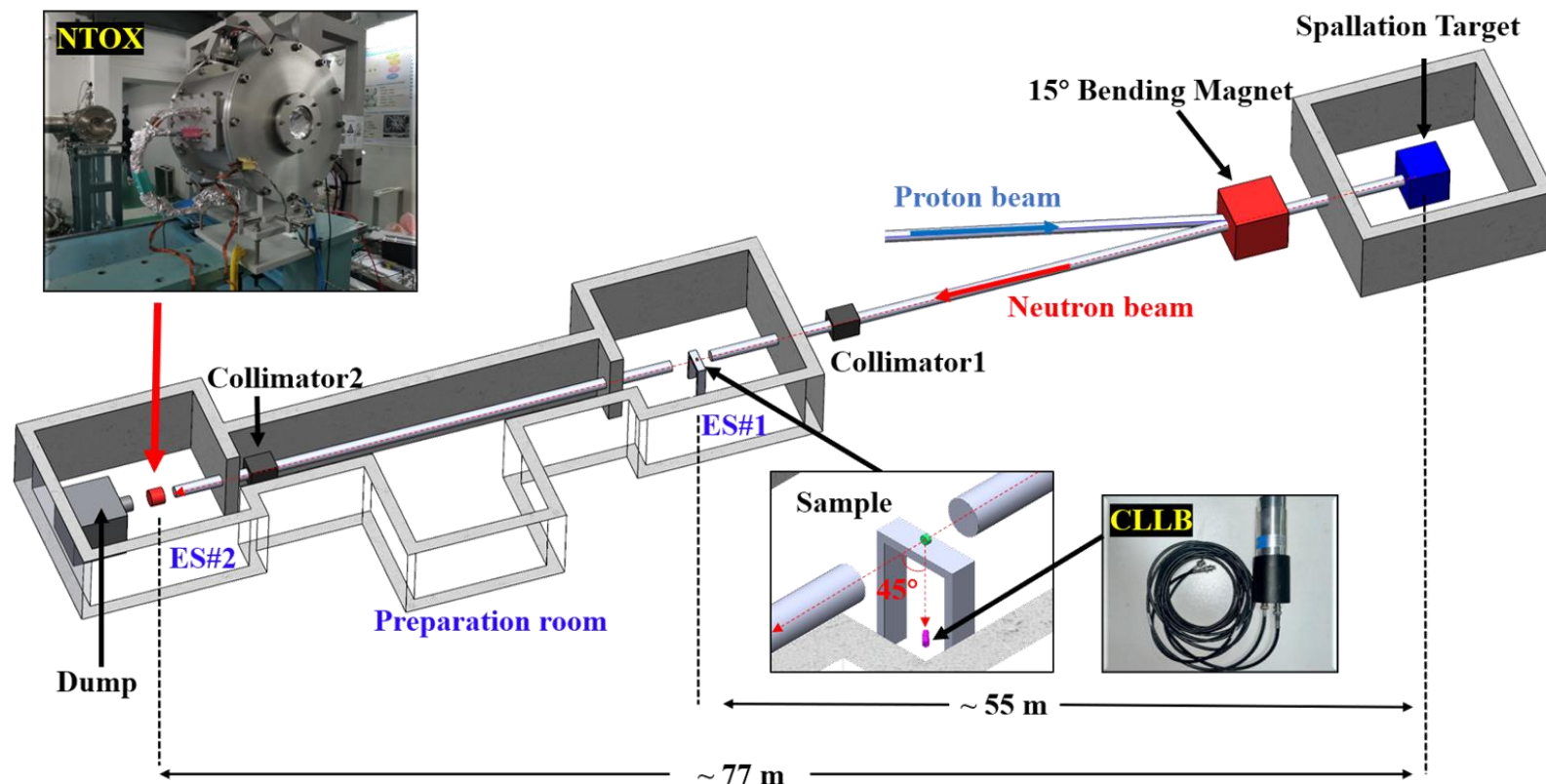
✓ 2025年上半年束流实验：**氢的中子全截面测量与弹性散射截面实验技术探索（2025年4月）**。

→ 氢的中子全截面测量与分析，详见7月24日“中子测量和应用”分会场报告：肖敏（报告人）

→ 基于副产品实验的碳中子全截面最新测量，详见7月24日“中子测量和应用”分会场报告：肖友淳（报告人）

✓ 项目支持：湖南省科技创新计划“湖湘青年英才”资助（2024RC3205）。

➤ **测量中子与 ^1H 相互作用后在45度出射角方向的弹性散射微分截面。**

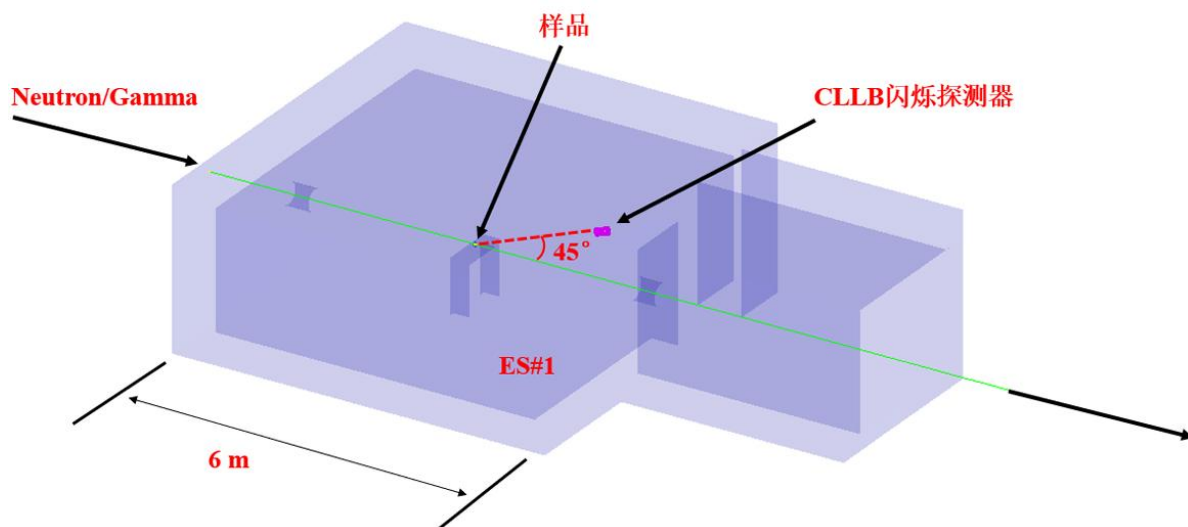


➤ 实验安排：

样品	条件	实验时长
25 mm natC	无	28 h
	影锥棒	92 h
3 mm PE	无	35 h
	影锥棒	55 h
15 mm PE	无	19 h
空靶	无	3 h

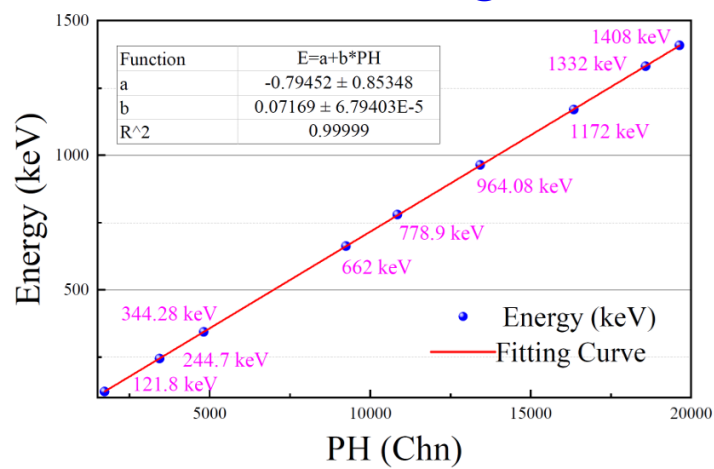
➤ 散射截面探测系统设计

□ 基于Geant4程序开展ES#1本底评估，设计了简易屏蔽体与准直体；

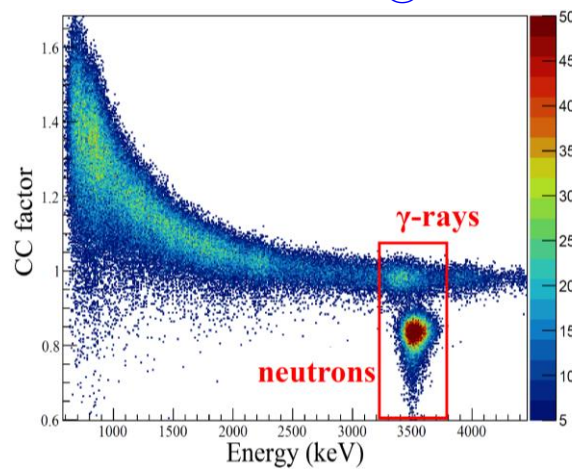


□ 实验前探测器完成实验室测试(多种标准 γ 源、Pu-Be中子源、DT中子发生器)。

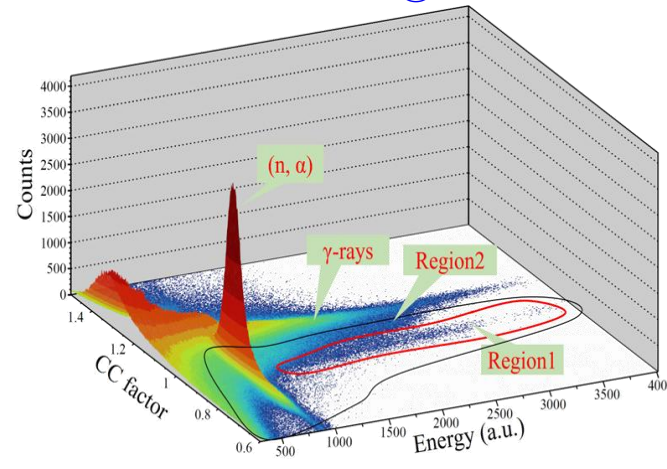
能量线性响应@USC



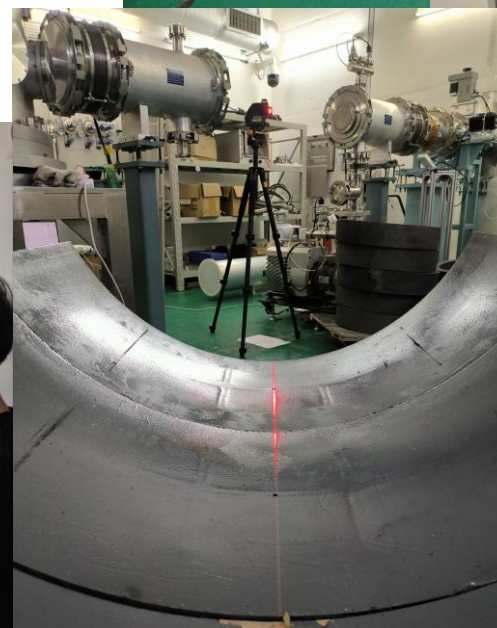
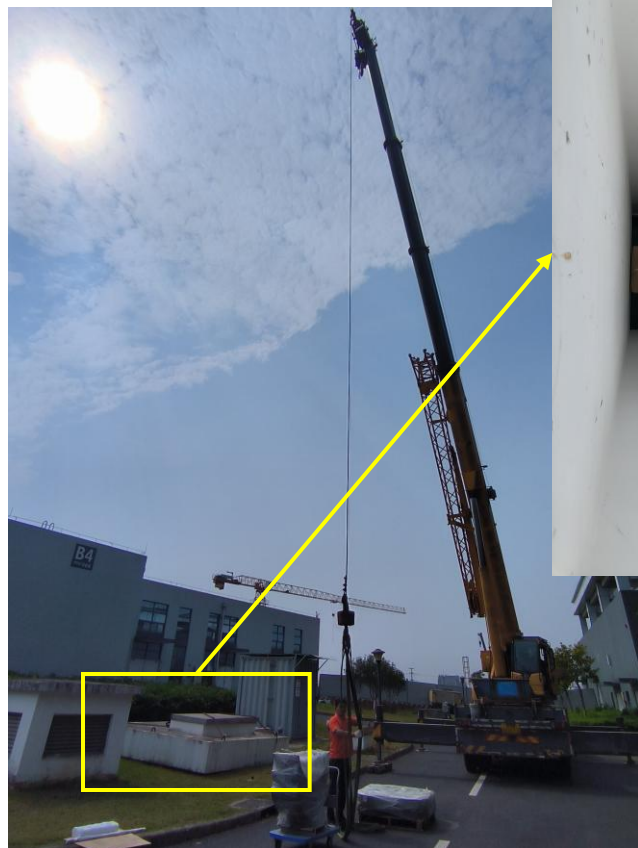
中子伽马甄别@USC



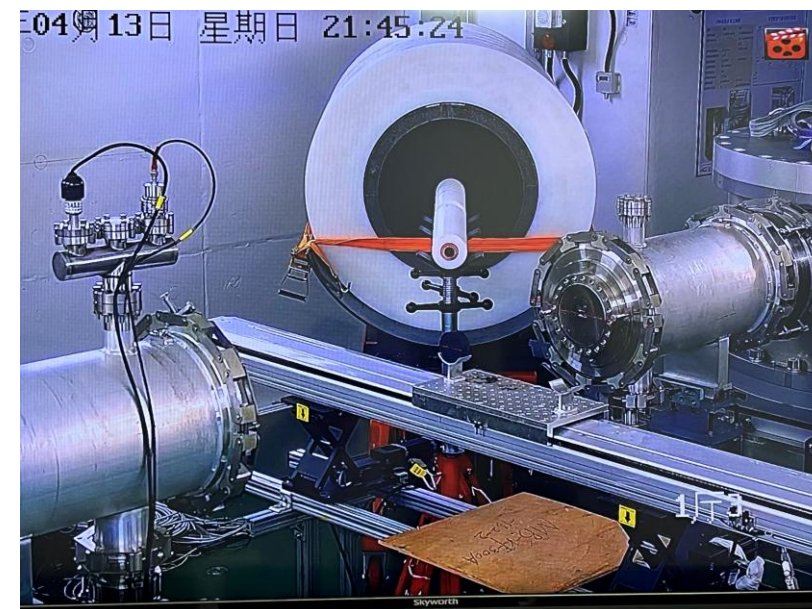
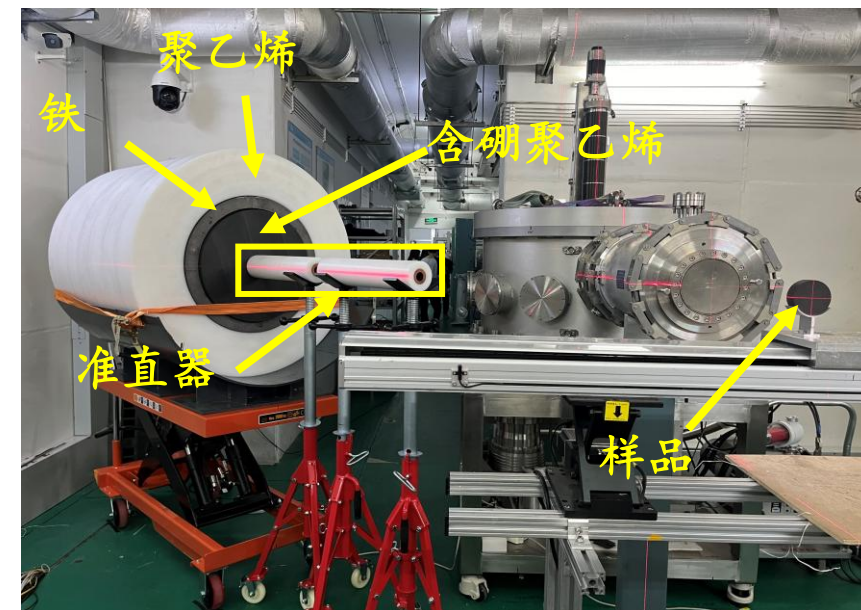
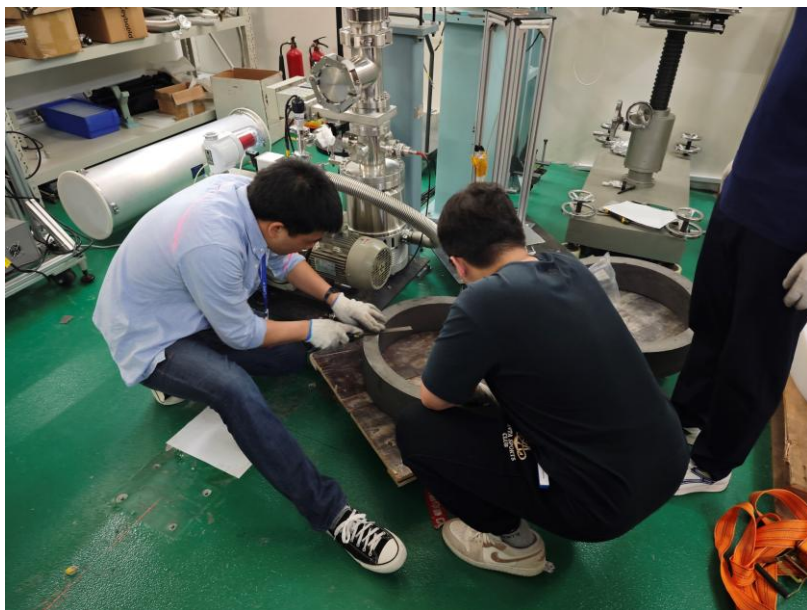
探测效率刻度@CAEP



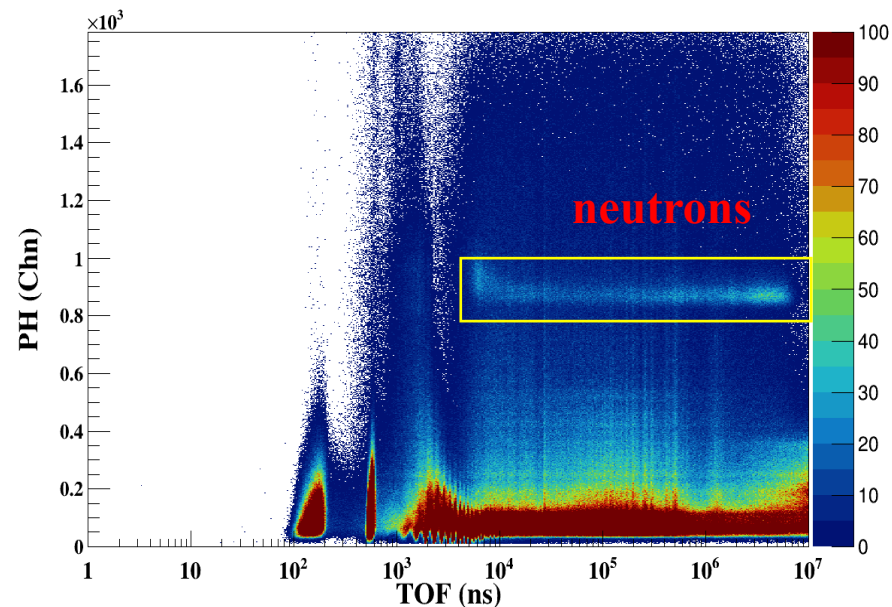
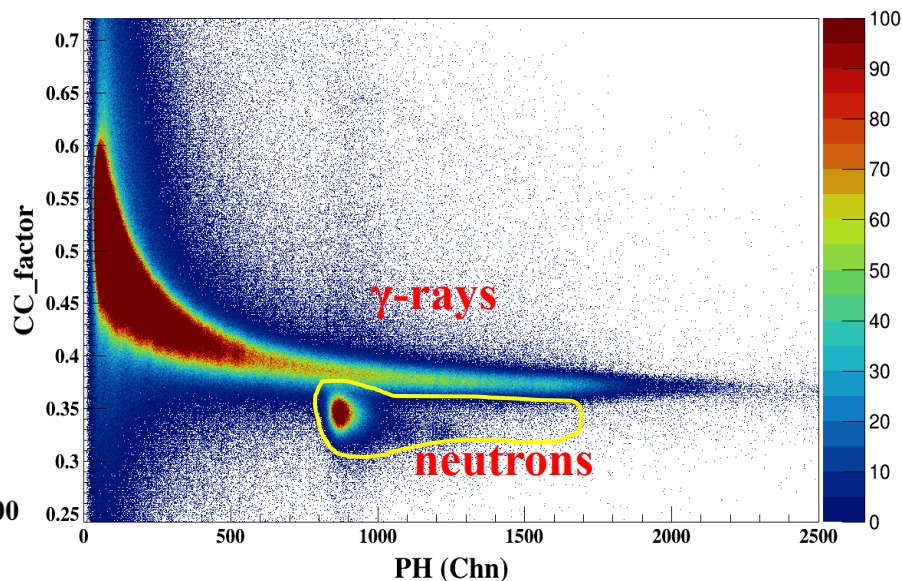
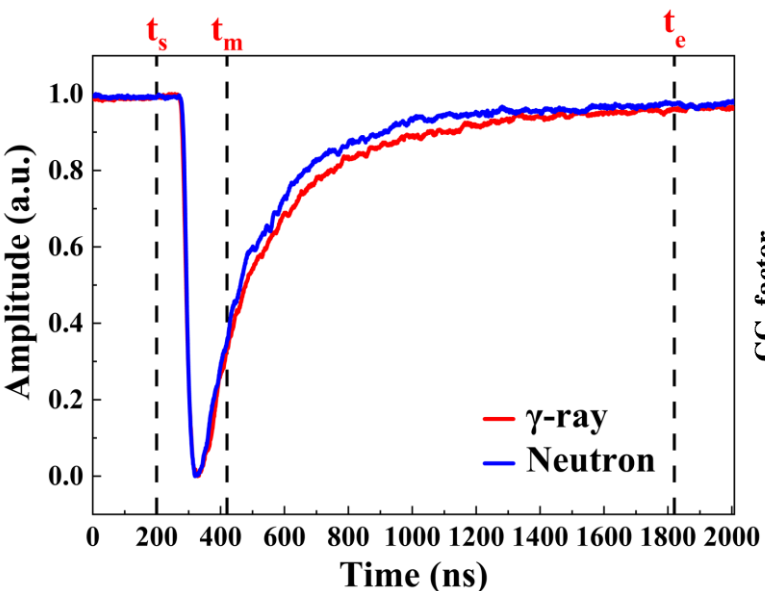
➤ 实验过程:



➤ 实验过程:



➤ 中子/伽马甄别



- 前期在Pu-Be中子源下对探测器进行PSD测试，比较三种时域方法后发现**电荷比较法甄别效果最佳**，故本实验选用该方法。
- 中子与伽马信号在**脉冲衰减段****差异明显**，支持其有效性。

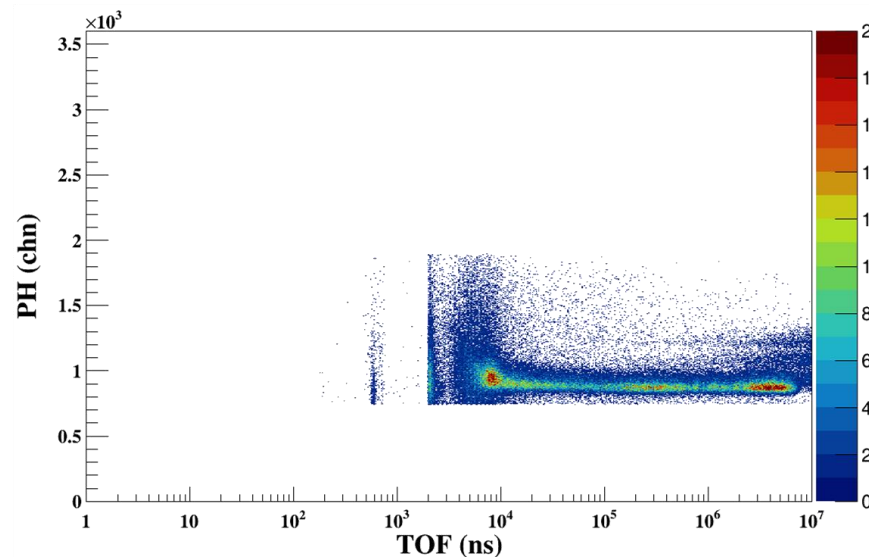
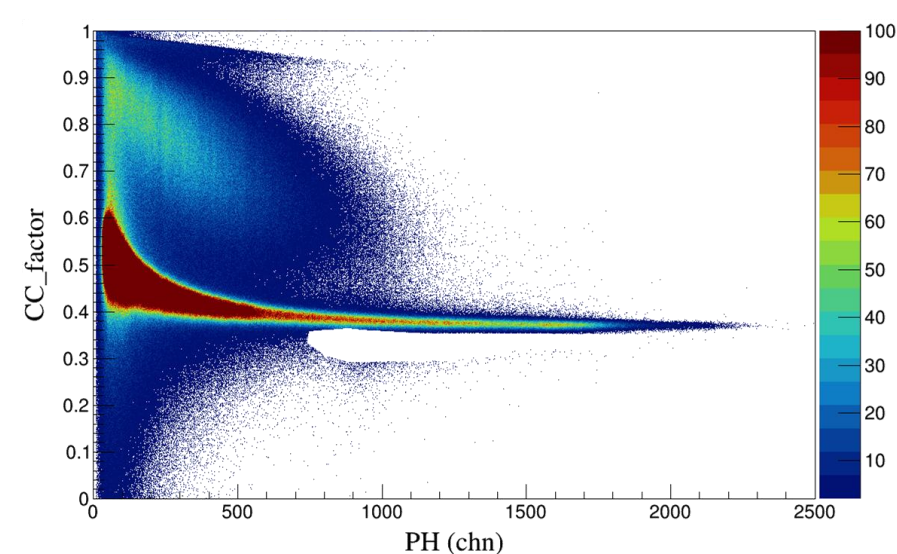
电荷比较法：

$$CC\ factor = \frac{Q_s}{Q_l} = \frac{\int_{t_m}^{t_e} I(t) dt}{\int_{t_s}^{t_e} I(t) dt}$$

最佳时间窗：

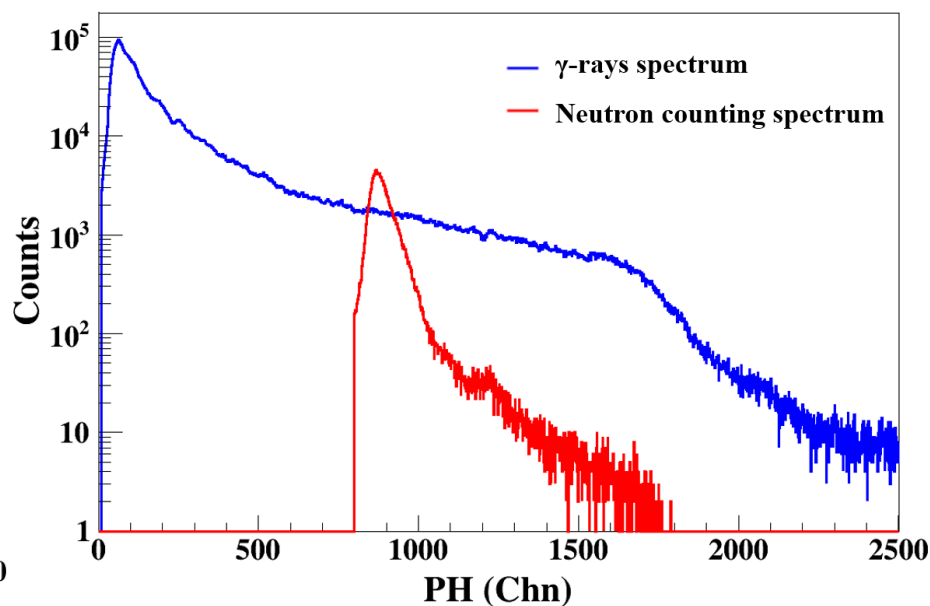
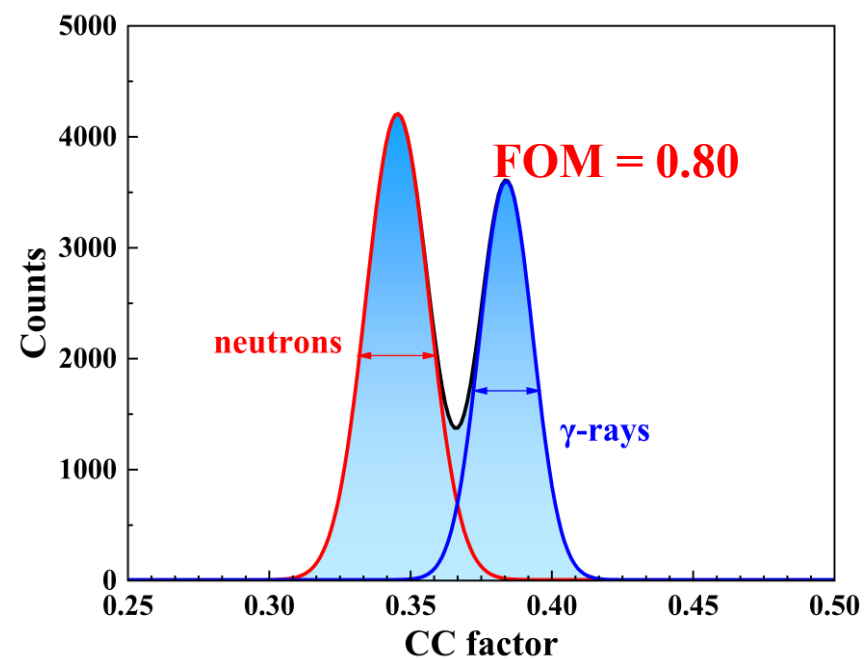
t_e : 峰位后1500 ns;
 t_m : 峰位后300 ns;
 t_s : 峰位前150 ns;

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/ γ 甄别准确性。

甄别FOM值为0.8。



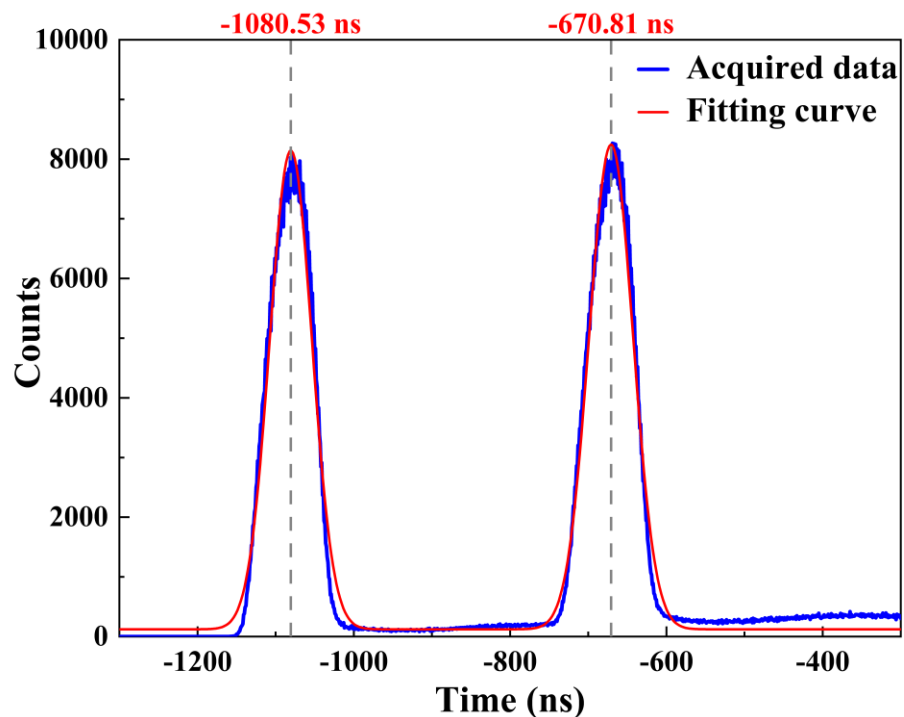
CLLB闪烁体探测器在Back-n束流下对天然碳样品的响应中, 弹性散射中子与 γ 射线呈现明显区分特征。

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。

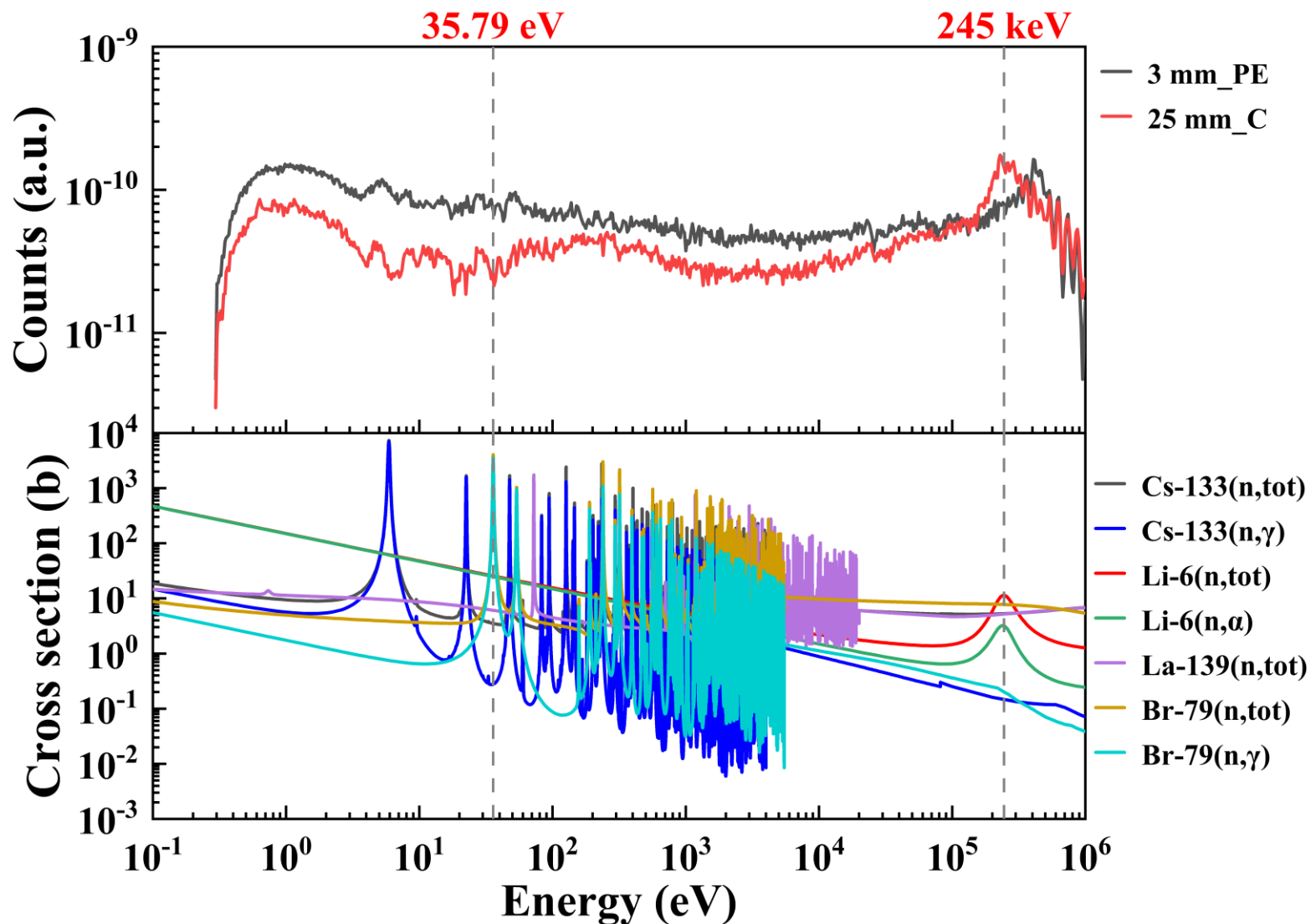
3.实验数据分析



➤ 飞行时间定时与飞行距离刻度



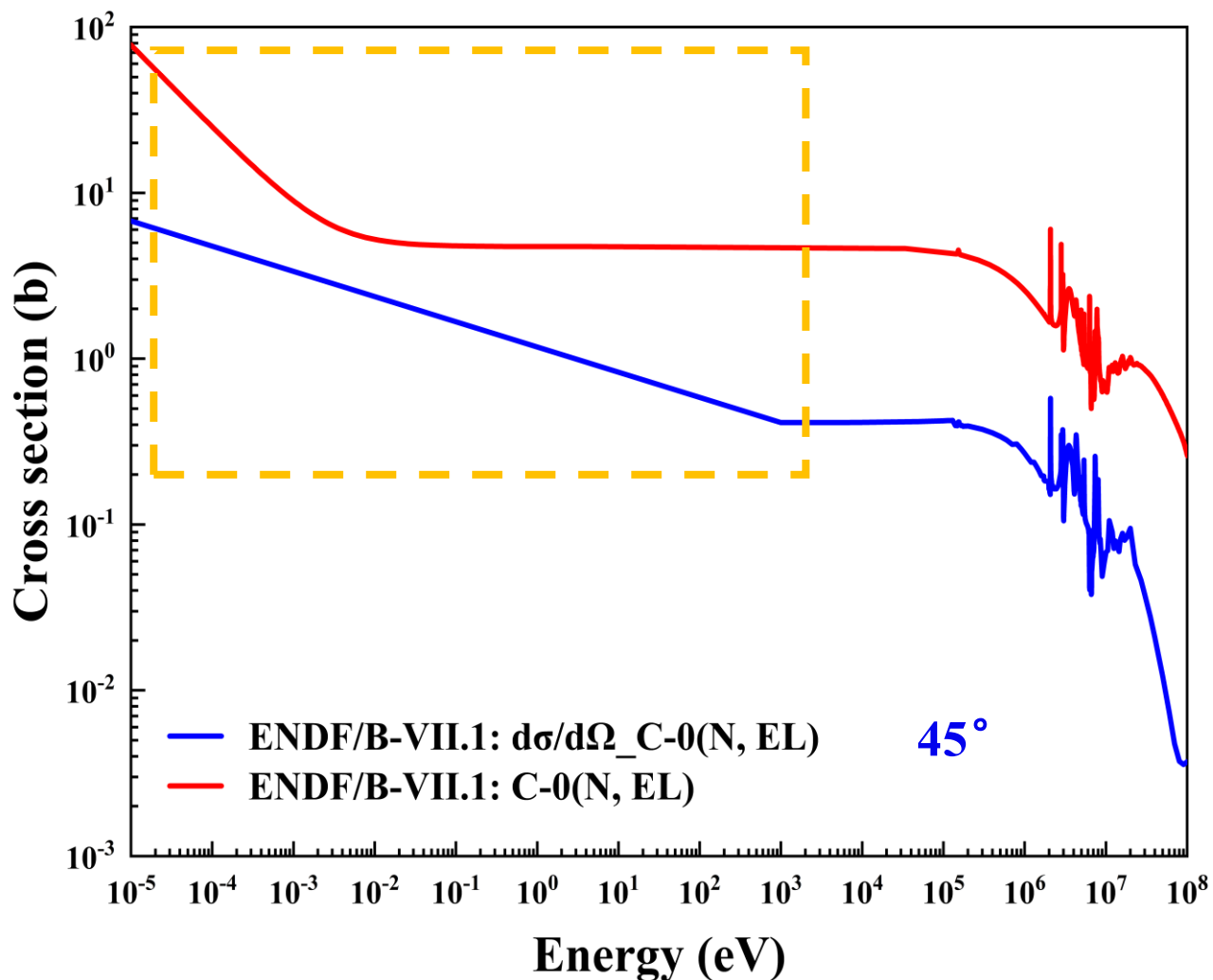
➤ 两个质子束团产生的 γ -flash事件的时间间隔为**409.72 ns**，用**第一个**质子束团的 γ -flash事件的时间作为**时间零点**。



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

➤ 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。



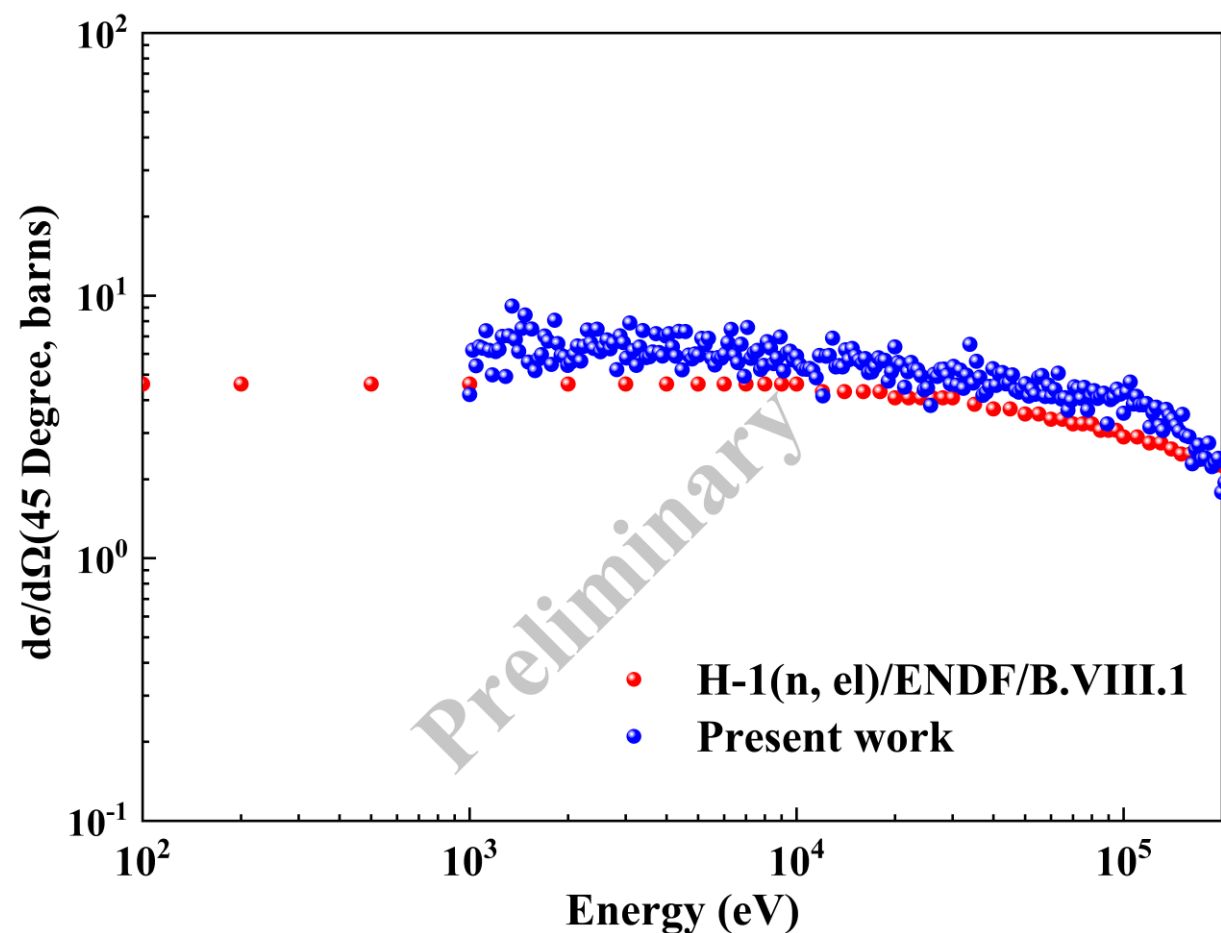
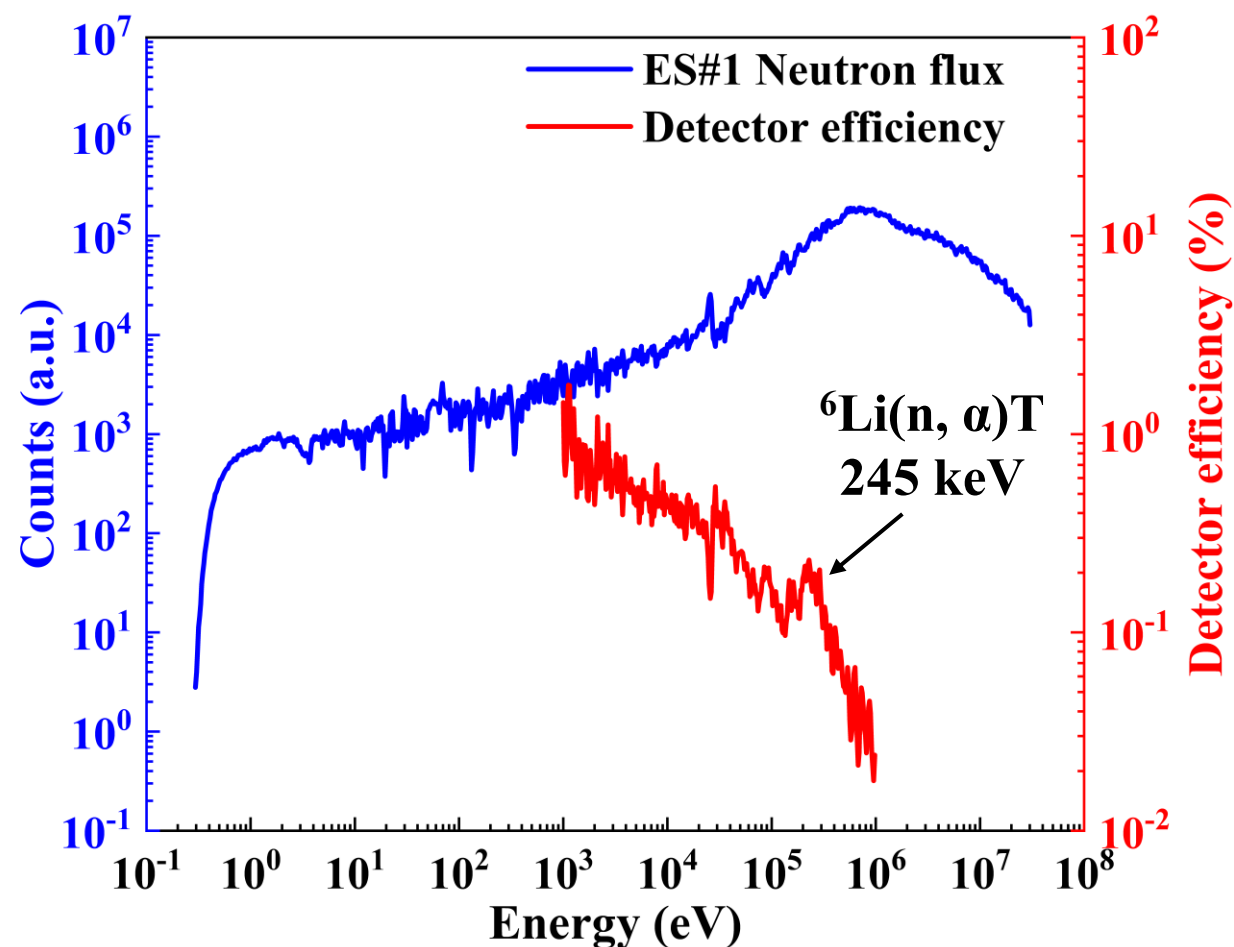
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E) = \frac{N_{counts}}{\varphi(E) \times n \times \Delta\Omega \times \varepsilon(E)}$$

$$\varepsilon(E) = \frac{N_{C_counts}(E)}{\Phi(E) \times n_c \times \frac{d\sigma_c}{d\Omega}(E) \times \Delta\Omega}$$

式中：

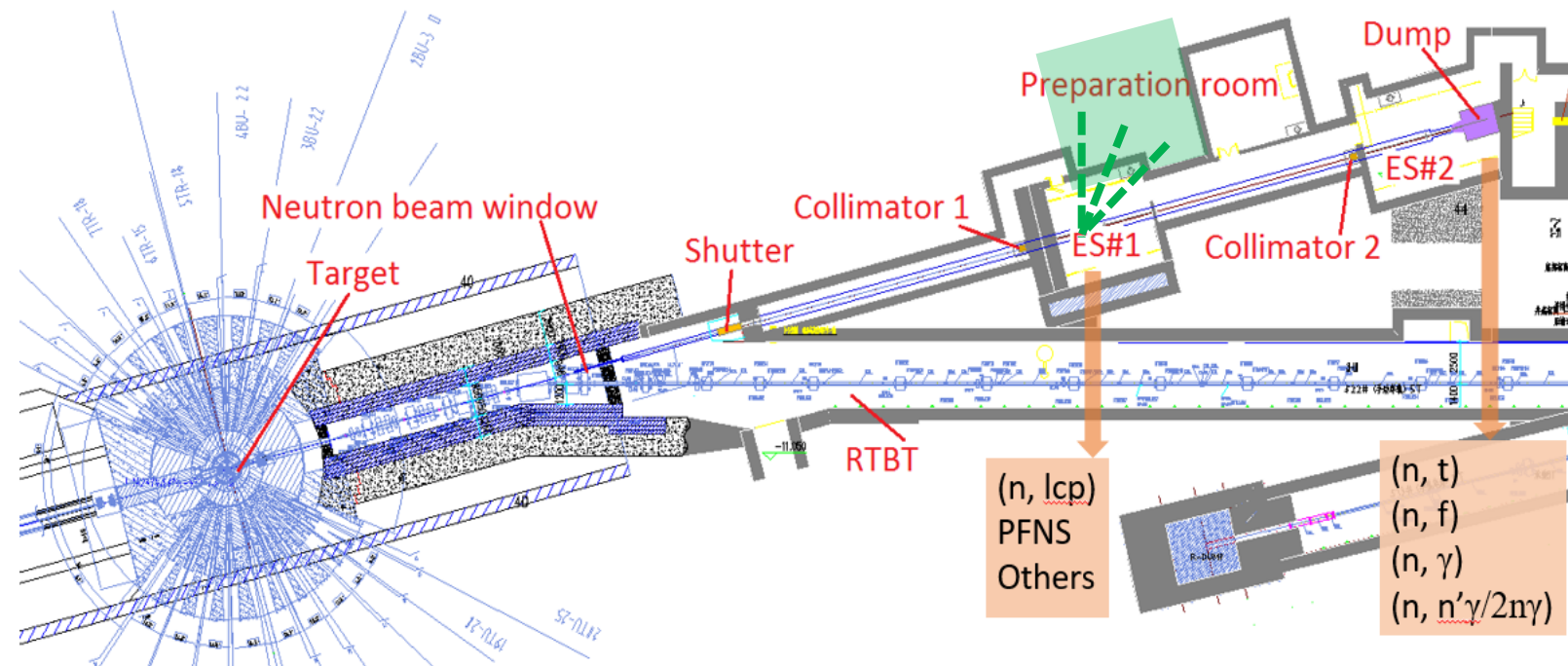
N_{counts} : 探测器中子计数、 $\varphi(E)$: 中子通量、 n : 样品原子面密度、 $\Delta\Omega$: 探测器立体角、 $\varepsilon(E)$: 探测器探测效率

➤ 初步实验结果



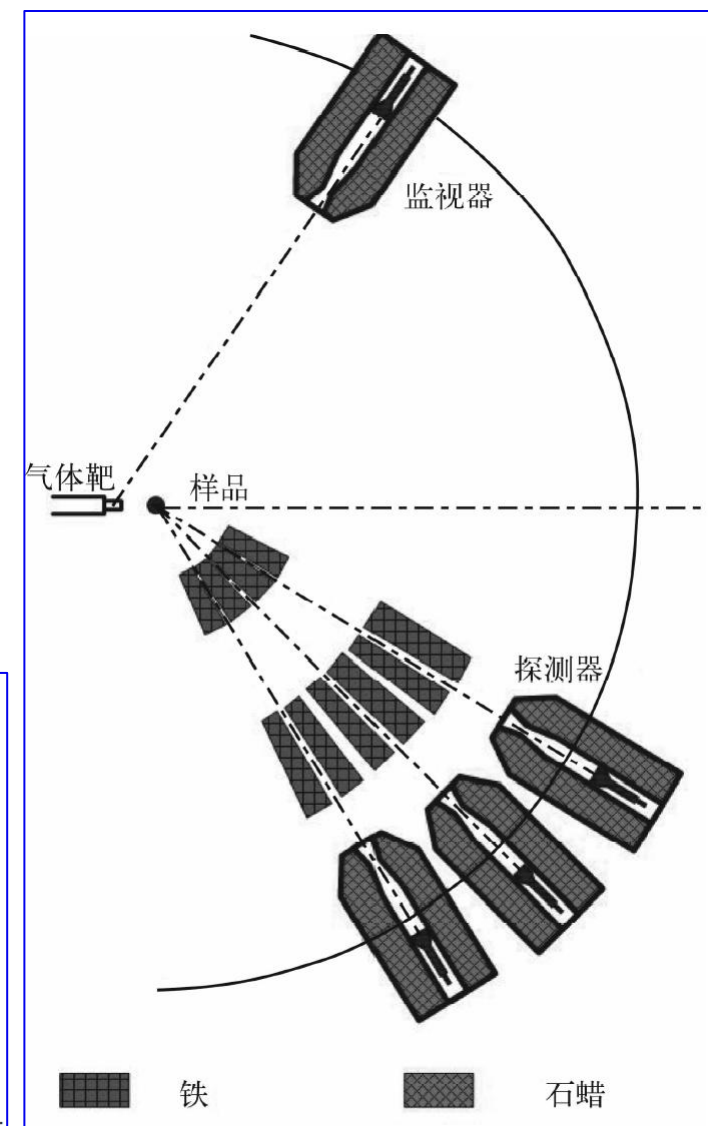
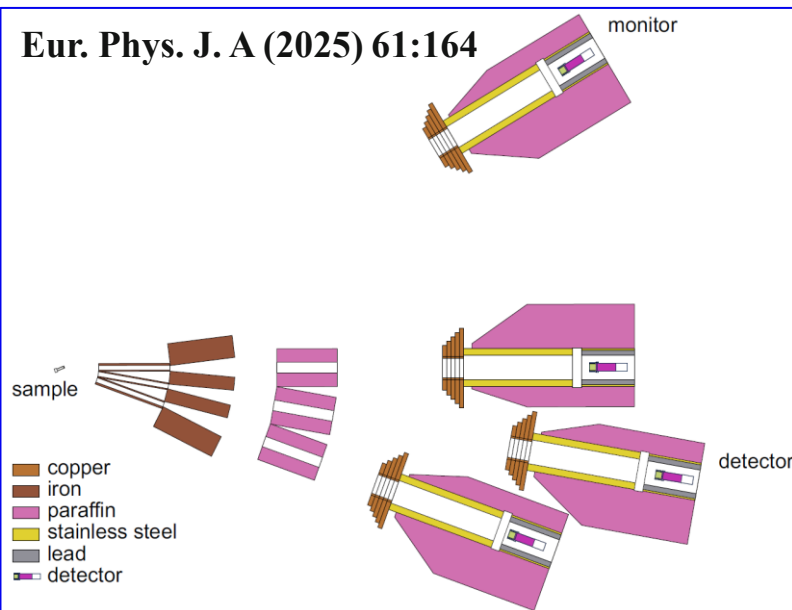
- 探测效率趋势与 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反应率一致;
- 初步分析获得1 keV-200 keV氢的45度微分散射截面, 趋势上与ENDF.VIII.1库基本一致;
- 未来有待进一步优化探测器效率刻度, 开展其他轻核高精度弹性散射截面实验。

5.总结



JINST, 2017, 12: P07022.

Eur. Phys. J. A (2025) 61:164



阮锡超, 等. 原子能科学技术. 2009, 43(9): 793-797.

- 在开展基于天然碳(^{nat}C)和氢的中子全截面测量实验(ES#2)的同时, 同步进行了弹性散射截面测量方法的探索性实验(ES#1)。两项实验共用束流时间, 实验过程相互独立, 互不干扰。
- 在ES#1实验中, 采用**CLLB闪烁体探测器**布置于**样品后方与其位于同一水平面、散射角为45度的位置**, 用于探测弹性散射中子信号。为有效抑制实验厅1及其周边环境产生的中子散射本底, 基于Geant4程序对实验环境进行了本底模拟评估, 并据此**设计了多层结构的探测器屏蔽系统**, 自外向内依次为**聚乙烯、铁、含硼聚乙烯与铜**。此外, 在样品与探测器之间设置了**专用准直系统**。
- 实验通过测量25 mm厚的天然碳样品以及3 mm和15 mm厚的聚乙烯样品的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 ^1H 在45度方向的弹性微分散射截面。初步分析结果表明, **在1 keV–200 keV能区内所获得的 ^1H 在45度微分弹性散射截面在趋势上与ENDF/B-VIII.1库保持较好一致性**。
- 后续研究中, 将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, 并计划采用阵列式探测器布局, 以**实现对 ^1H 及其他轻核弹性散射截面的高精度测量**。



诚邀各位专家学者前来衡阳指导交流！





南華大學

UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

Thanks for your attention!

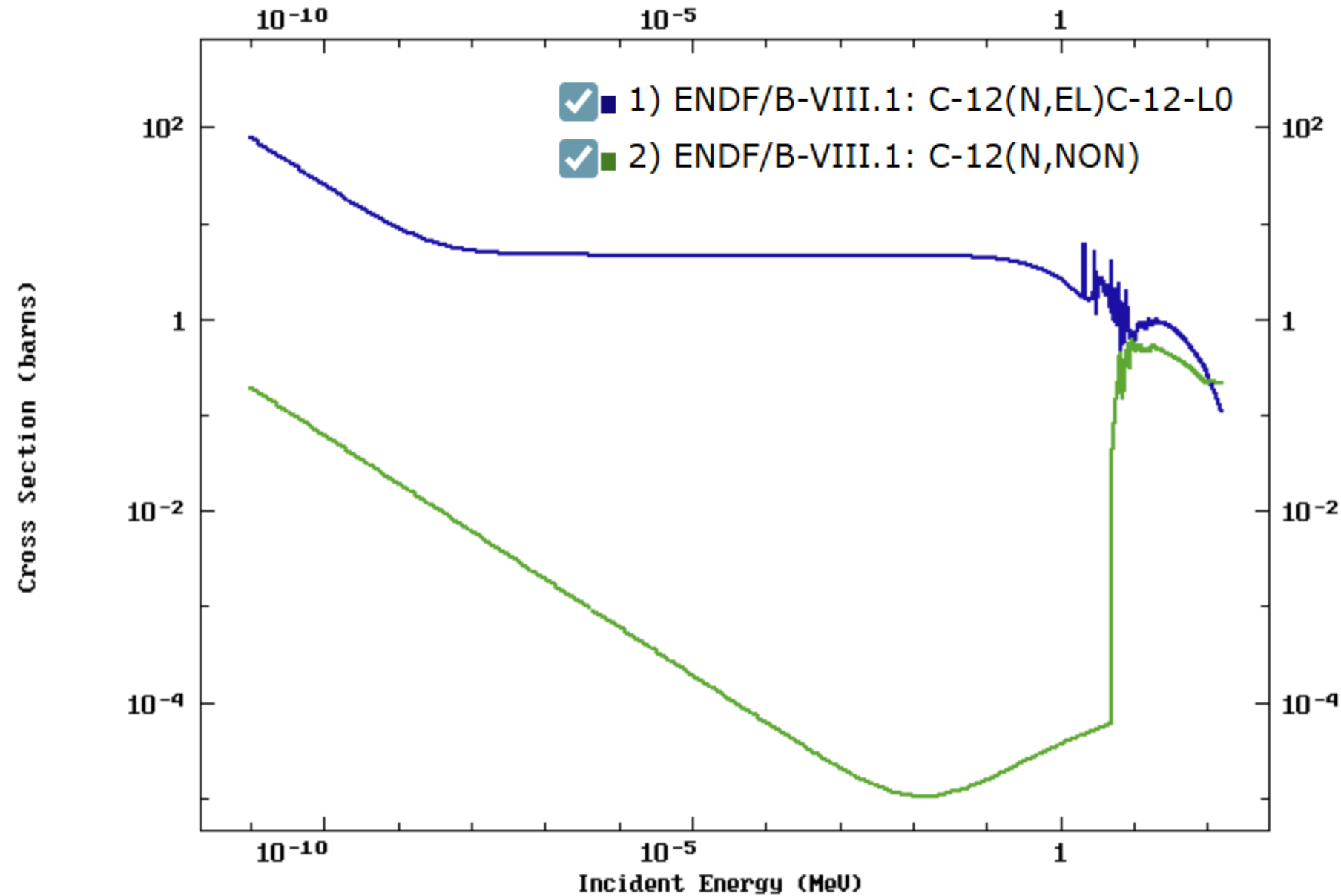
冯松，肖敏，陈永浩，樊瑞睿，栾鹏，唐诗琦，肖友淳，黄文鑫，刘静，程品晶，郑波

songfeng@usc.edu.cn





ENDF Request 94687, 2025-Jul-23,14:01:41

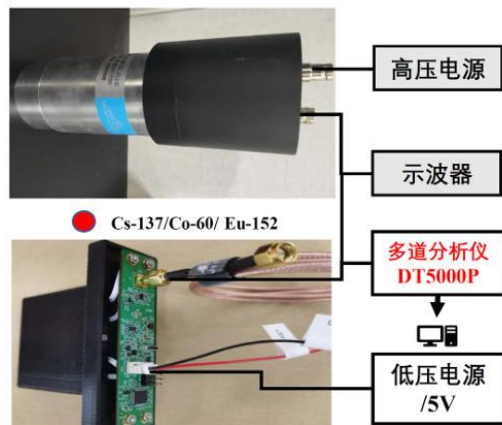




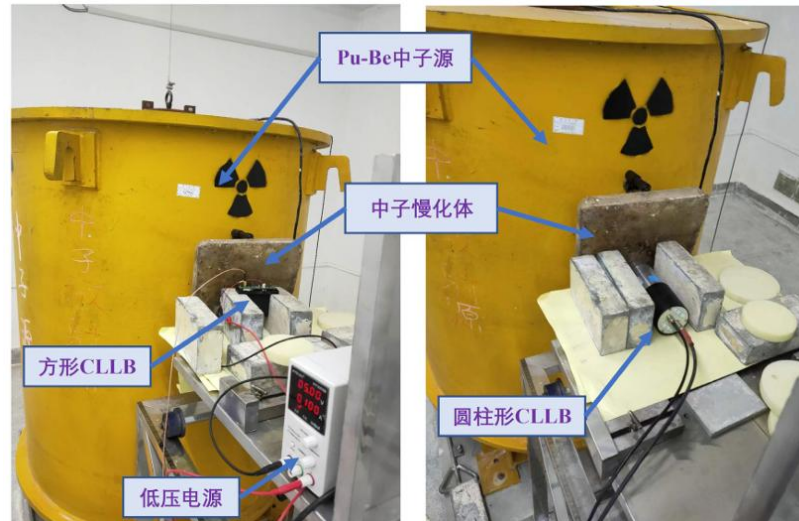
➤ 探测器实验室测试

标准伽马源-能量线性响应

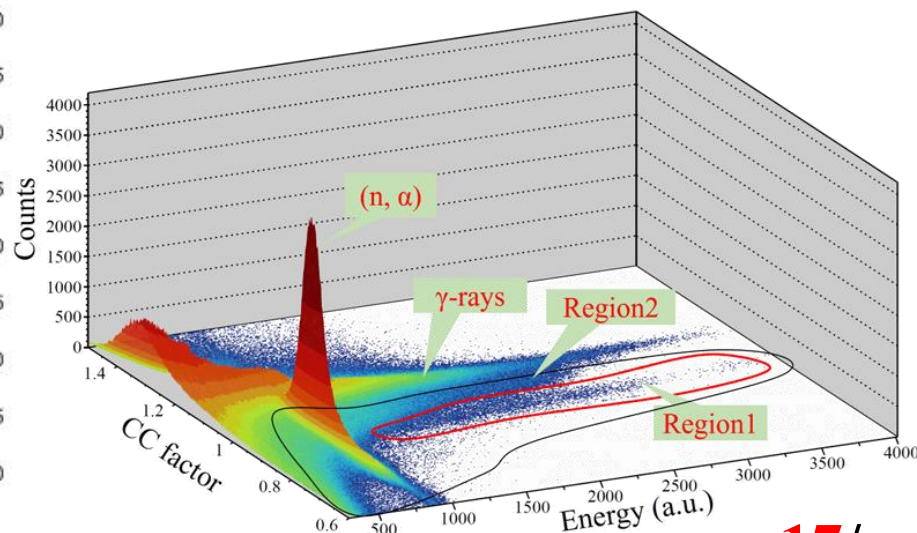
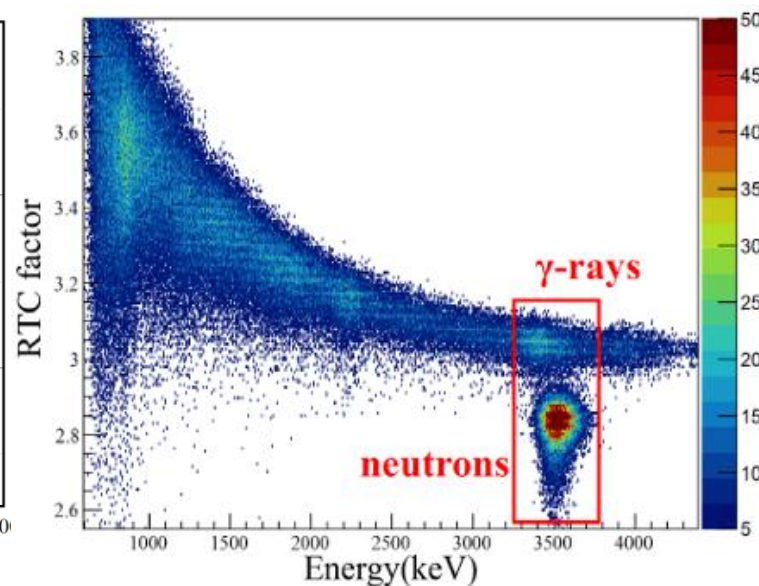
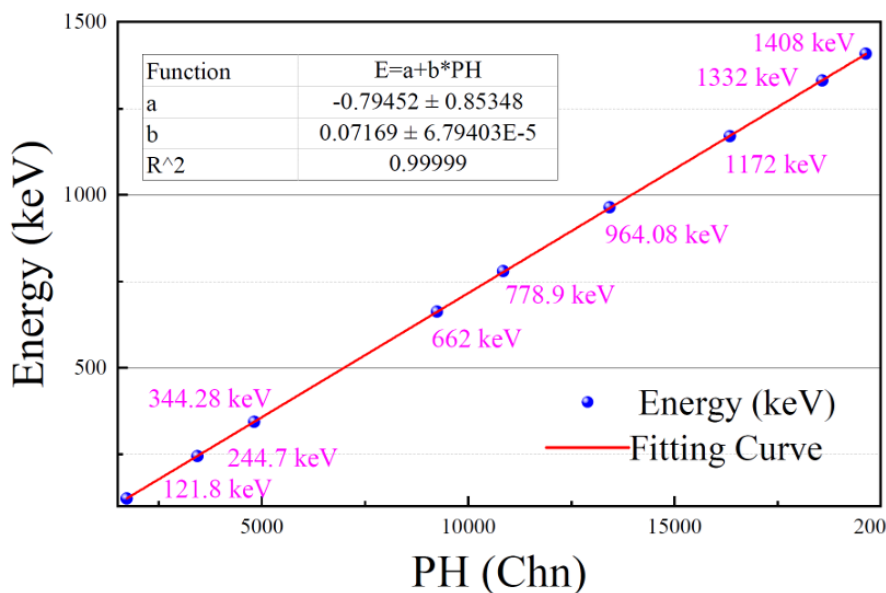
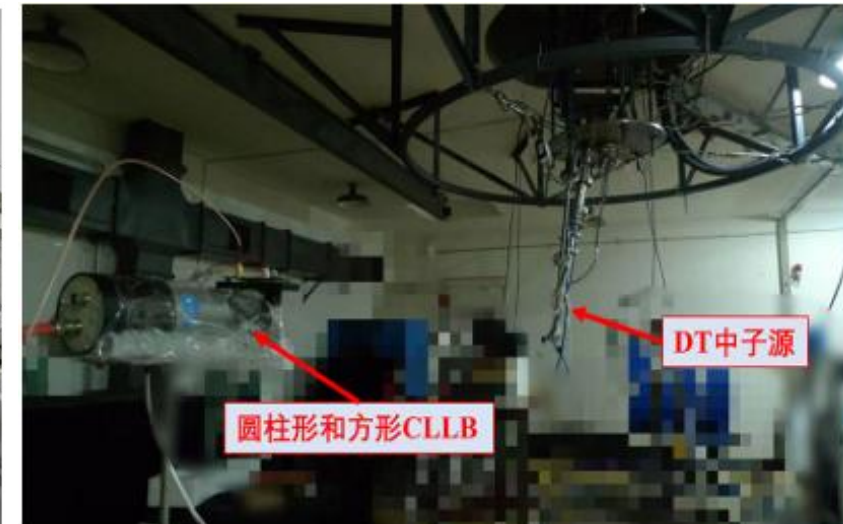
后读出到PMT的圆柱形CLLB探测器 $\Phi 50.8 \times 50.8$ mm



Pu-Be中子源-中子伽马甄别



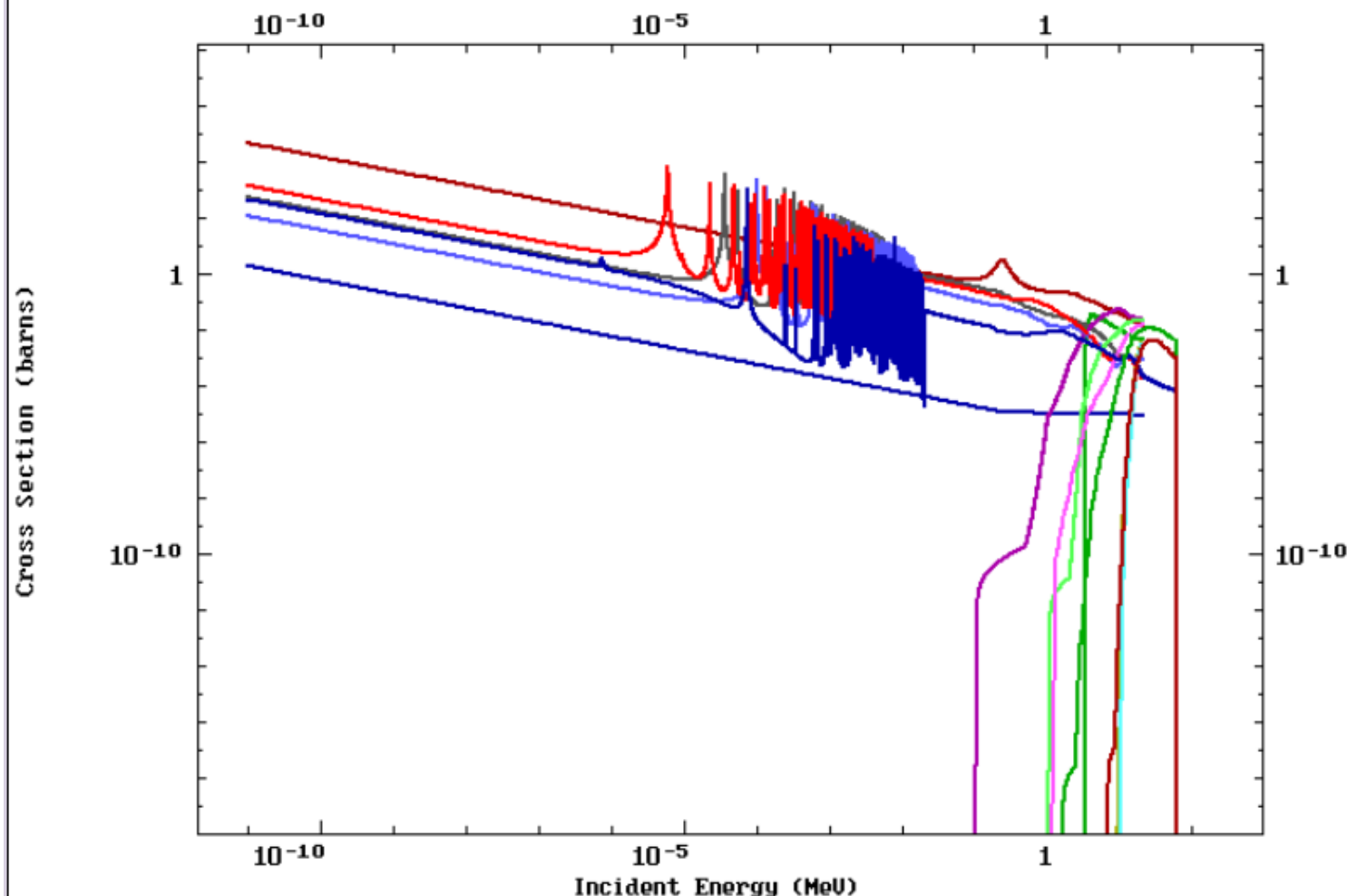
DT中子源-探测效率刻度





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