



南華大學

UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

基于中国散裂中子源Back-n束线的侧读出 CLLB闪烁探测器测试与性能分析

栾鹏¹, 赵大俊¹, 易晗^{2,3}, 蒋伟^{2,3}, 羊奕伟⁴, 程品晶¹, 薛洁明¹, 郑波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.中国工程物理研究院应用电子学研究所



目录



01

研究背景

02

谱仪概念设计

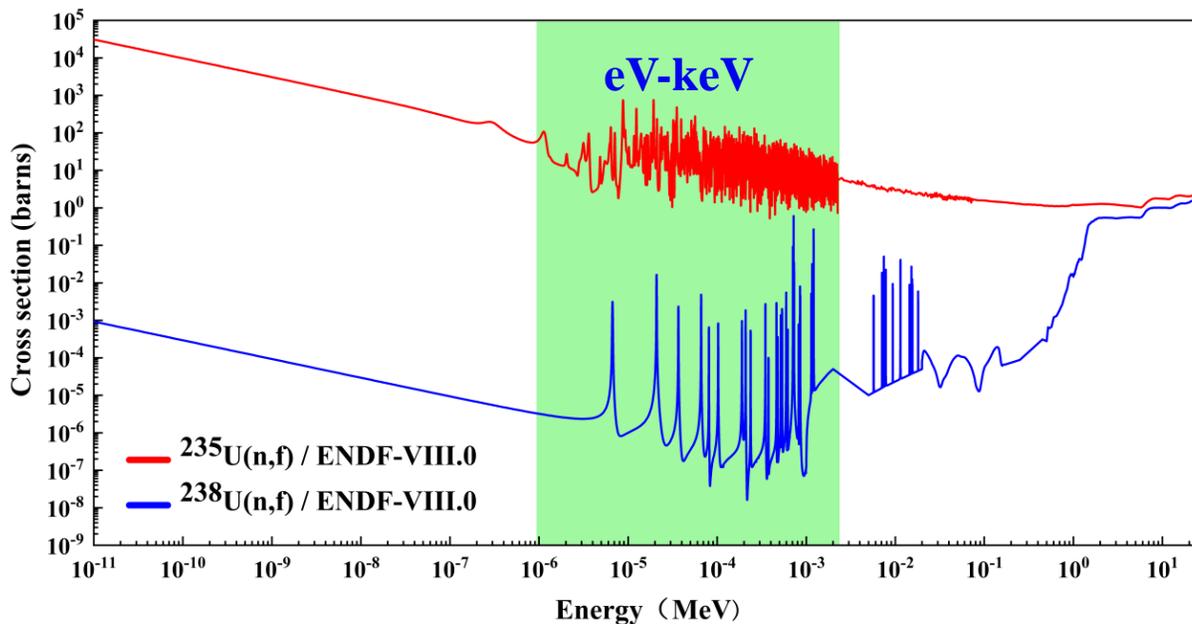
03

谱仪实验测试

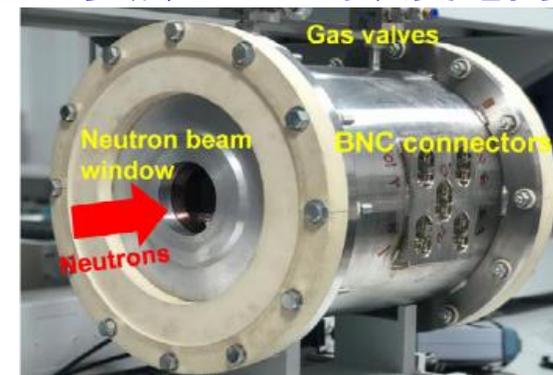
04

小结

中子全截面是最基础也是最重要的截面数据之一，它反映的是中子与原子核发生所有核反应的概率总和。

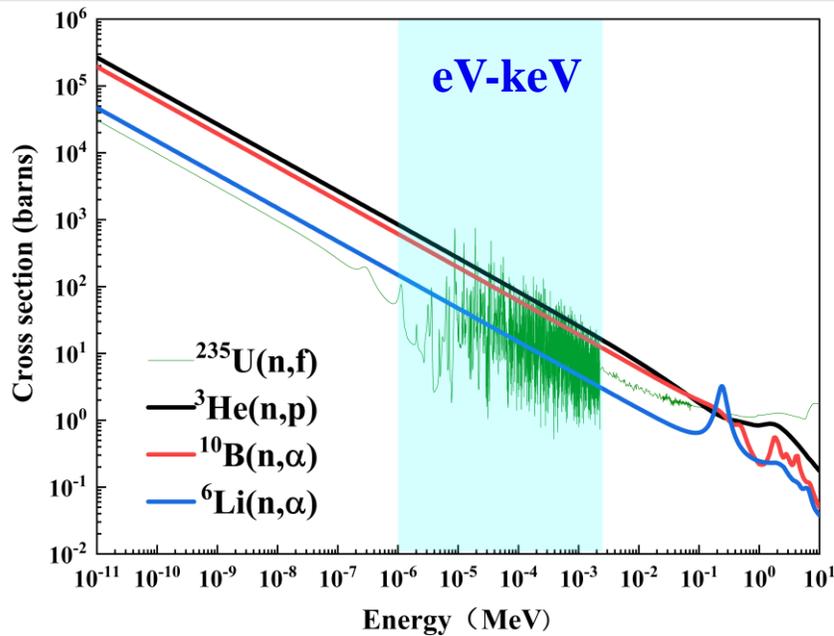


基于多层^{235,238}U的裂变电离室



Yiwei Yang, et al. *NIM-A*, 940 (2019) 486–491.

- 存在严重的中子共振区；
- 探测效率相对较低。

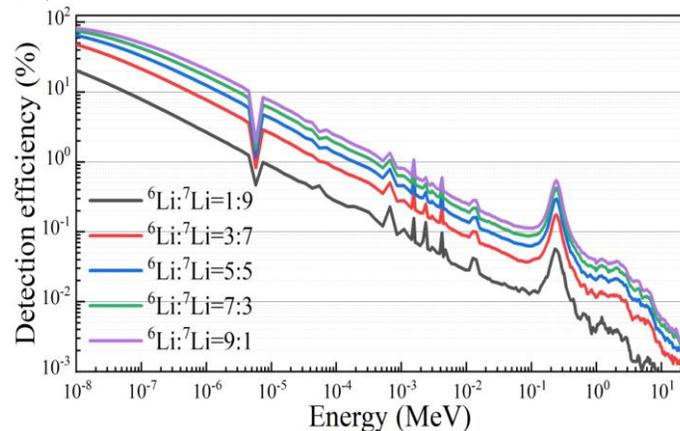
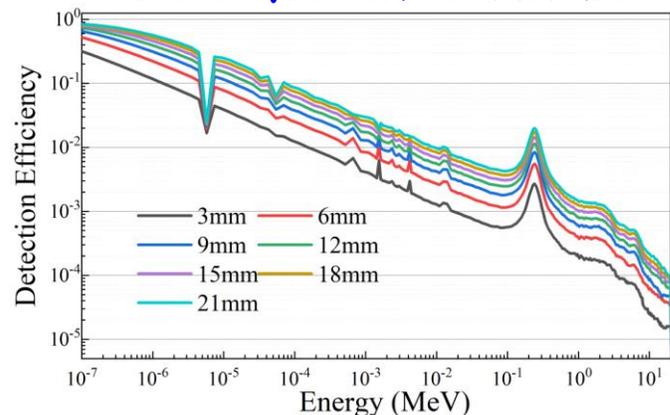


- γ -flash干扰
- 全能区响应
- 中子/ γ 甄别

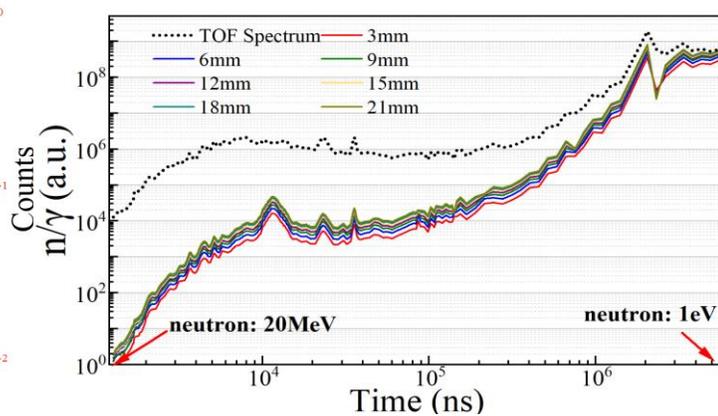
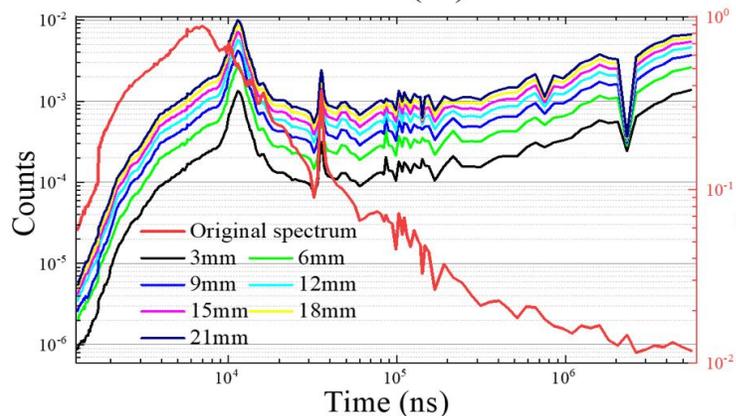


- Li基钾冰晶石晶体: $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ (CLLB)
- 探测效率高: 热中子吸收厚度约3 mm
- 优异的中子伽马甄别性能 ($Q=4.78$ MeV)
- 时间响应较快: 快时间衰减常数180 ns
- 光产额: 40000 Photons/MeV

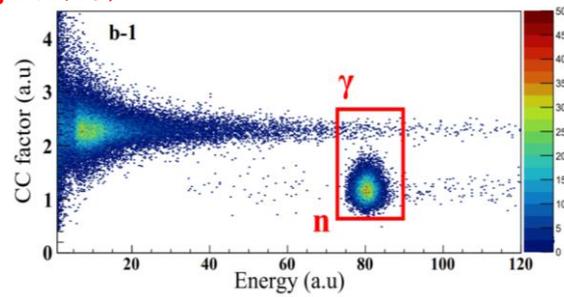
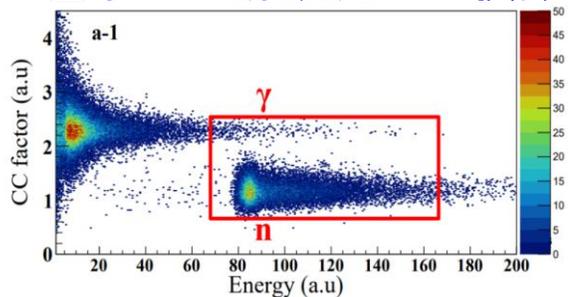
对 中子/ γ 探测效率模拟 (探测效率)



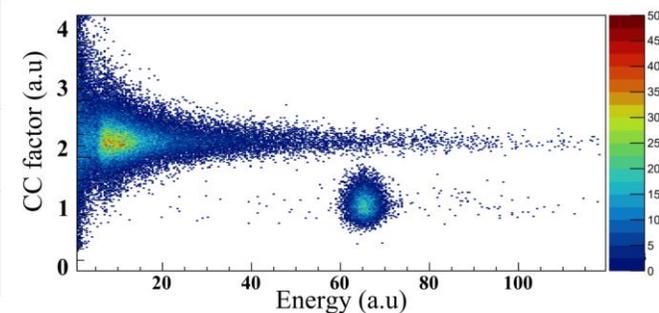
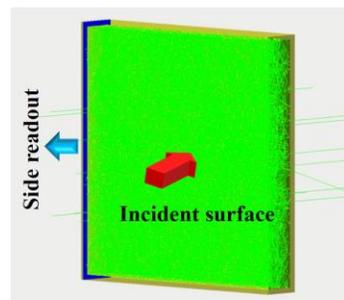
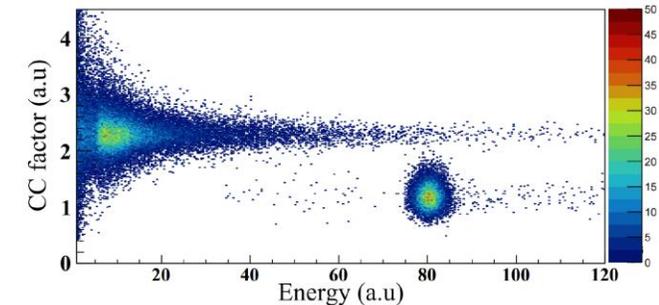
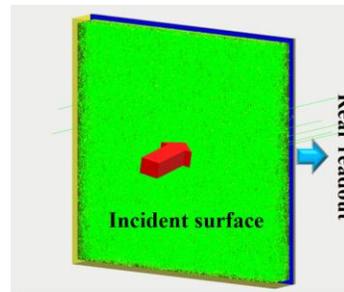
对 Back-n 中子/ γ 束响应模拟 (全能区响应)



基于 ^{252}Cf 源展开 PSD 模拟 (中子/ γ 甄别)



CLLB ($\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$)



Dajun Zhao, et al. *Nuclear Science and Technology*. 34, 3 (2023).

Nuclear Science and Techniques (2023) 34:3
<https://doi.org/10.1007/s41365-022-01152-5>



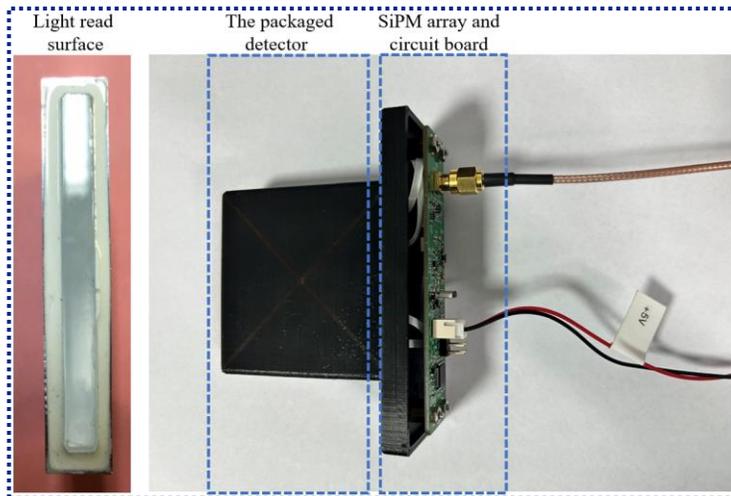
Conceptual design of a $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ scintillator-based neutron total cross section spectrometer on the back-n beam line at CSNS

Da-Jun Zhao¹ · Song Feng¹ · Pin-Jing Cheng¹ · Rong Liu² · Wen Luo¹ · Hao-Qiang Wang¹ · Jie-Ming Xue¹ · Kun Zhu¹ · Bo Zheng¹

Received: 4 September 2022 / Revised: 25 October 2022 / Accepted: 3 November 2022 / Published online: 6 January 2023
 © The Author(s), under exclusive licence to China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press), Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Chinese Nuclear Society 2023

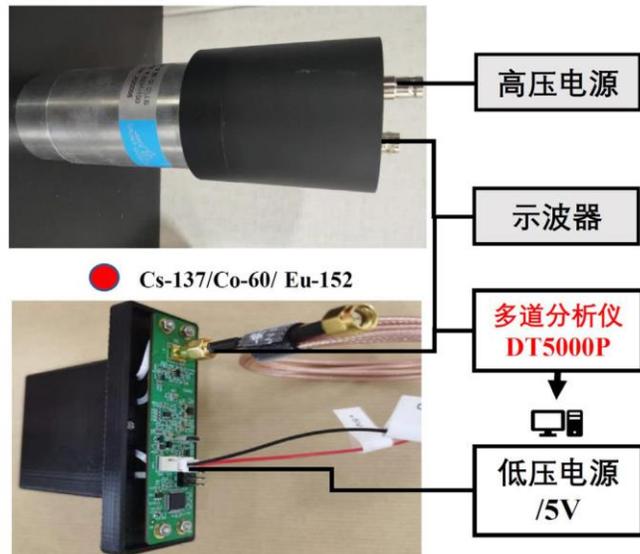
➤ FAST谱仪样机

- ✓ CLLB设计厚度为6 mm
- ✓ Li-6丰度 > 95%
- ✓ 入射面为50.8×50.8 mm
- ✓ 闪烁体侧读出耦合SiPM阵列



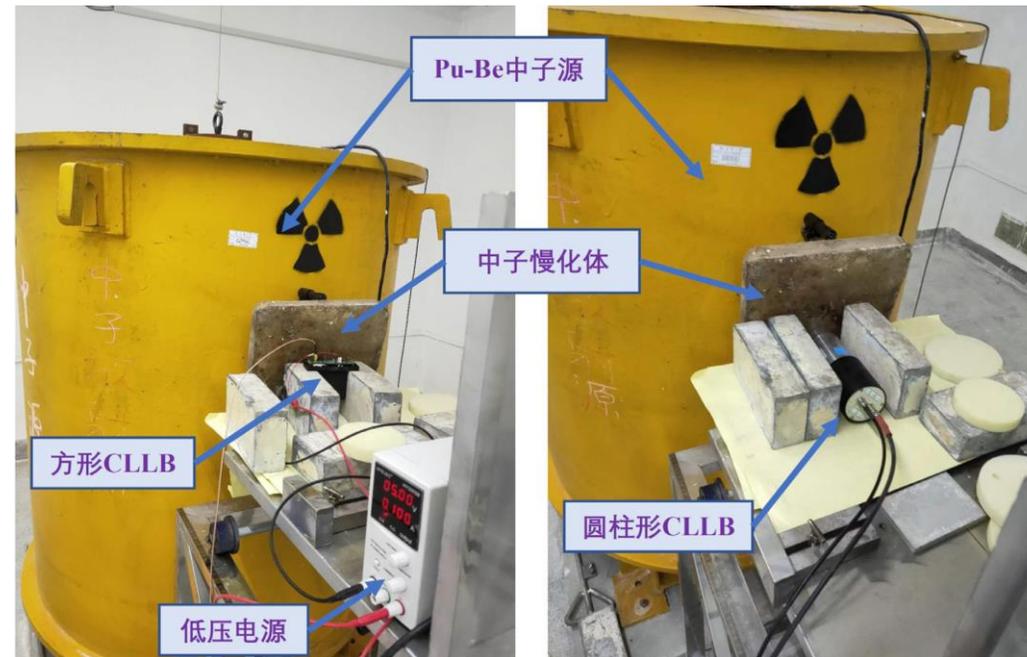
➤ 基于标准γ源测试(南华大学)

后读出到PMT的圆柱形CLLB探测器 Φ50.8×50.8 mm



侧读出到SiPM的方形CLLB探测器 50.8×50.8×6 mm

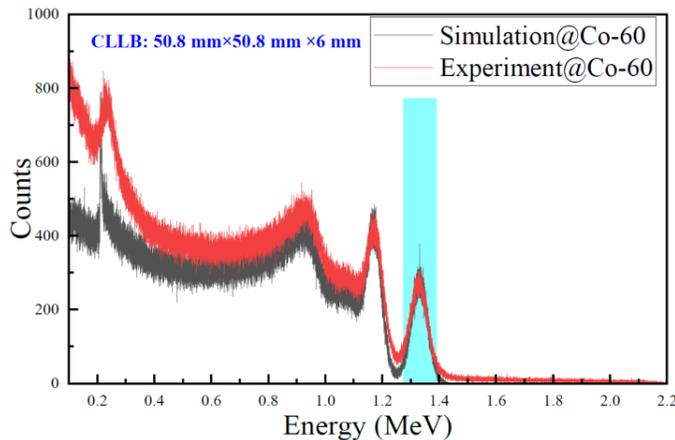
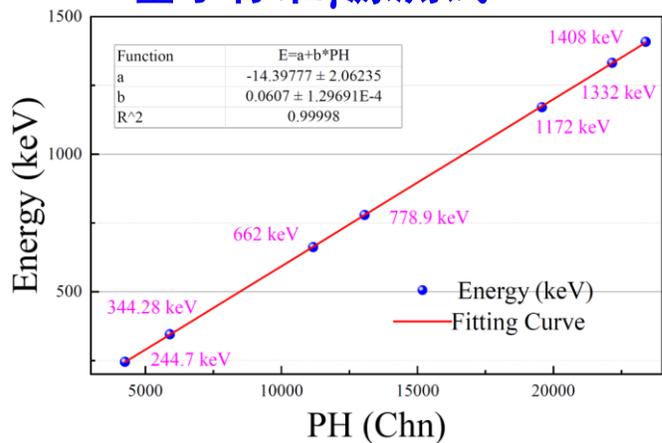
➤ 基于Pu-Be中子源测试(南华大学)



➤ 基于DT中子发生器测试(九院二所)

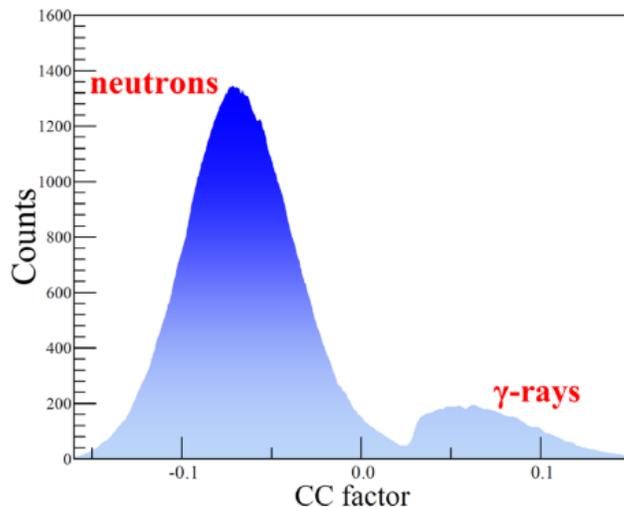
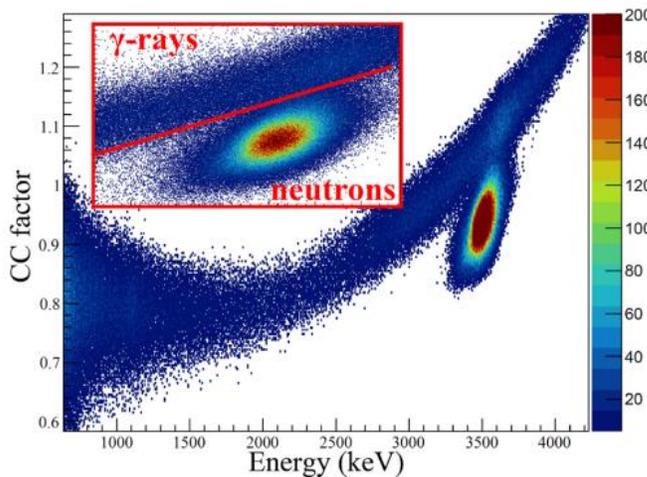


基于标准 γ 源测试



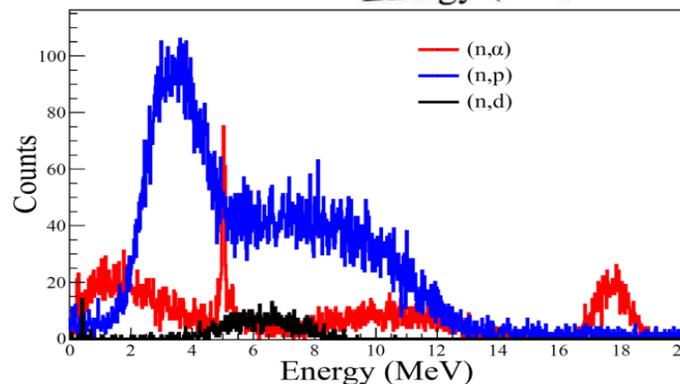
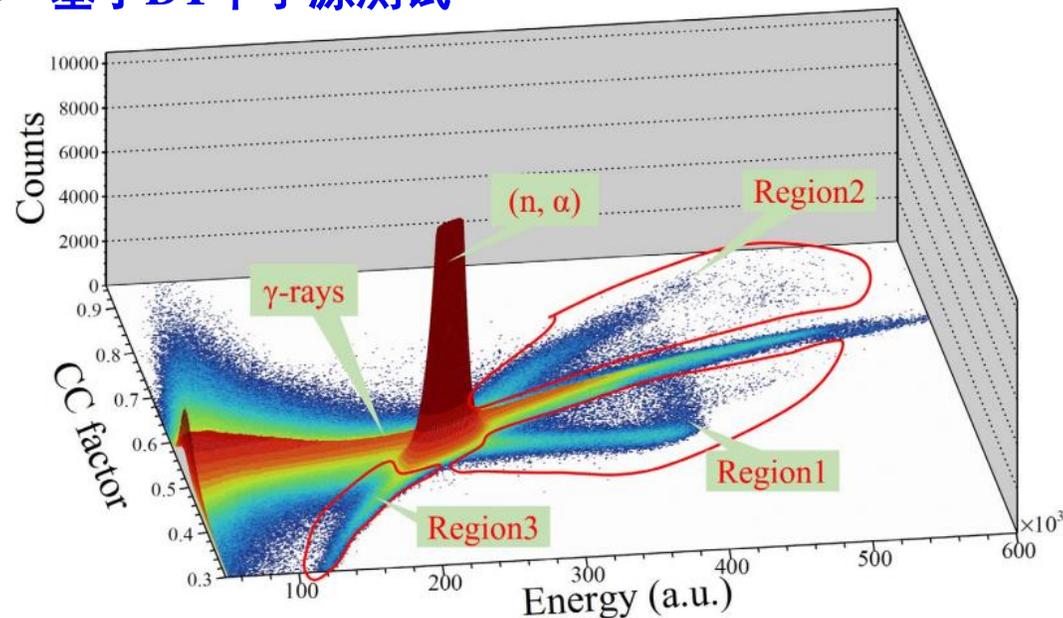
□ CLLB能量分辨率约8.4%；良好的能量线性响应；1.33 MeV处CLLB的 γ 本征峰探测效率，与模拟差异小于3%

基于Pu-Be中子源测试



□ 基于电荷比较法得到方形CLLB闪烁体的FoM值为0.88

基于DT中子源测试

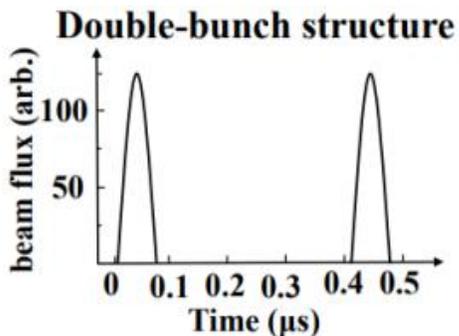


□ 入射中子能量大于3 MeV时，CLLB闪烁体中材料的更多中子反应道被打开，包括(n,p)，(n,d)，(n, α)；
□ Region1区域(n, α)计数测量值与模拟结果基本一致。

实验安排

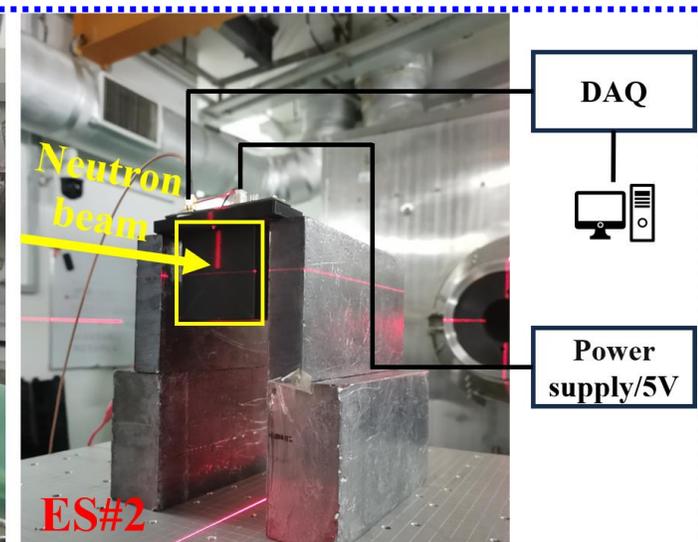
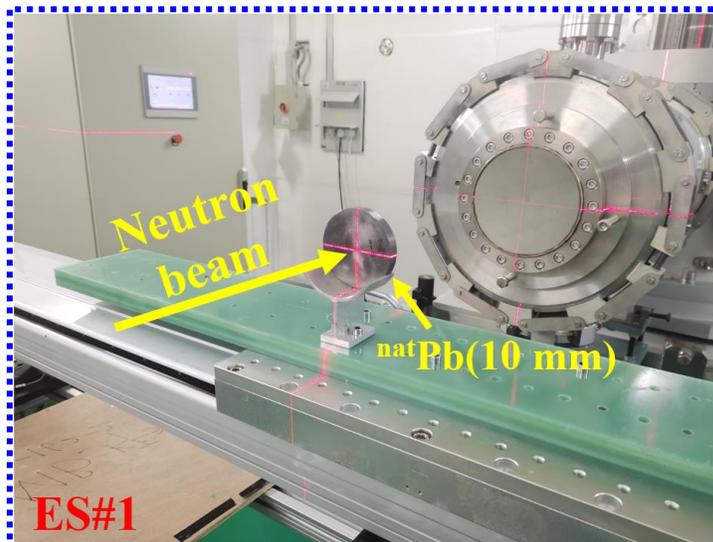
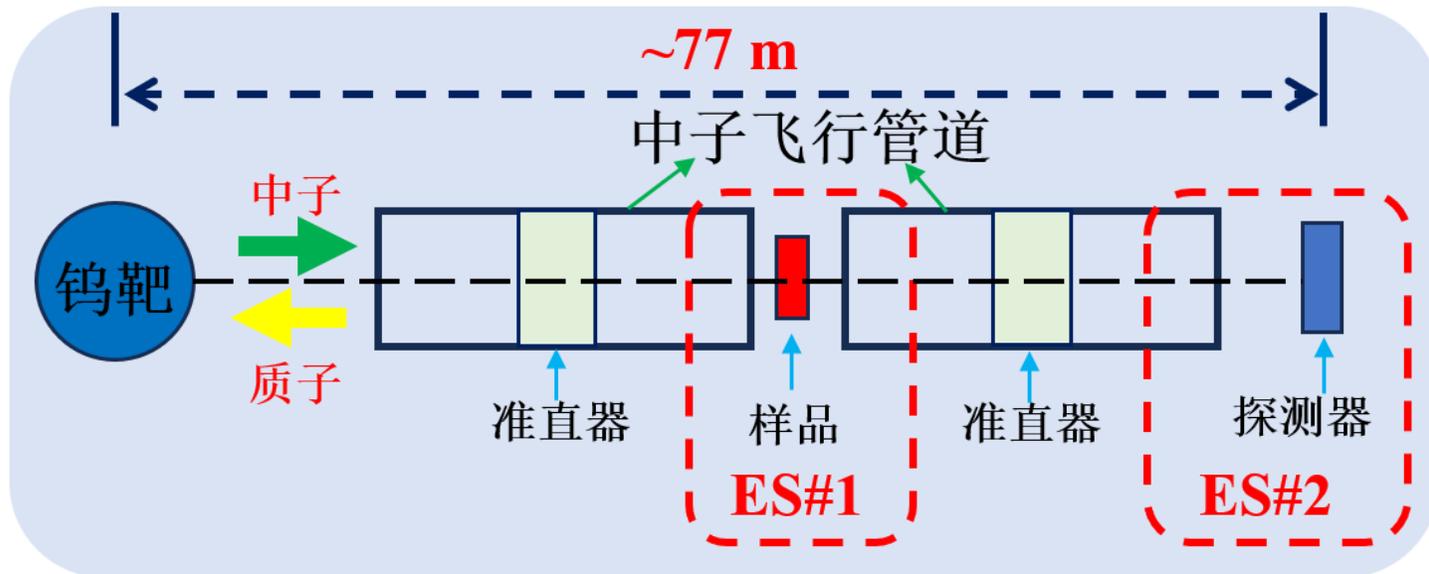
实验时间：2023年6月8日-11日 (48h束流)

模式：双束团模式 质子打靶功率：140 kW
 频率：25 Hz 中子能区：1 eV-200 MeV
 束团宽度：70 ns 两束团间隔：410 ns



双束团打靶模式

束斑尺寸	条件	样品	实验时间
Φ3 mm	无屏蔽	无	7 h 8 min
Φ3 mm	无屏蔽	10 mm Pb	3 h 51 min
Φ12 mm	60 mm Pb屏蔽	无	3 h 19 min
Φ12 mm	60 mm Pb屏蔽	10 mm Pb	4 h 28 min



实验方法

透射法

$$d\Phi(E) = -\Phi(E) \times N \times \sigma_{total} dx$$



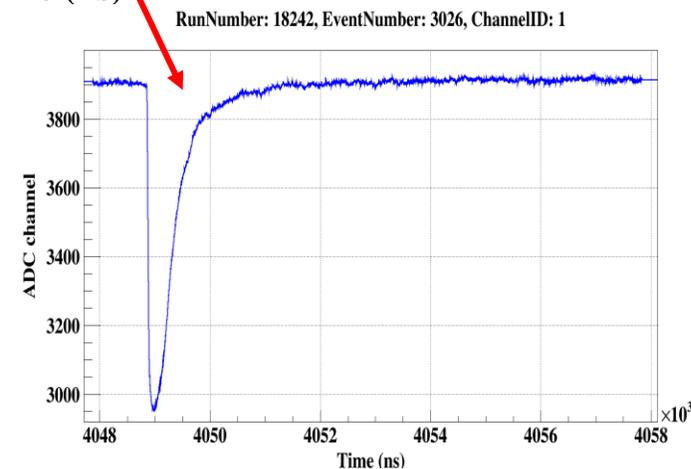
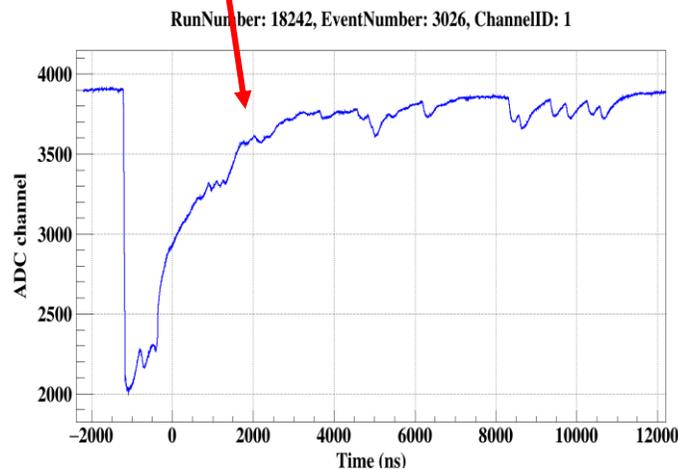
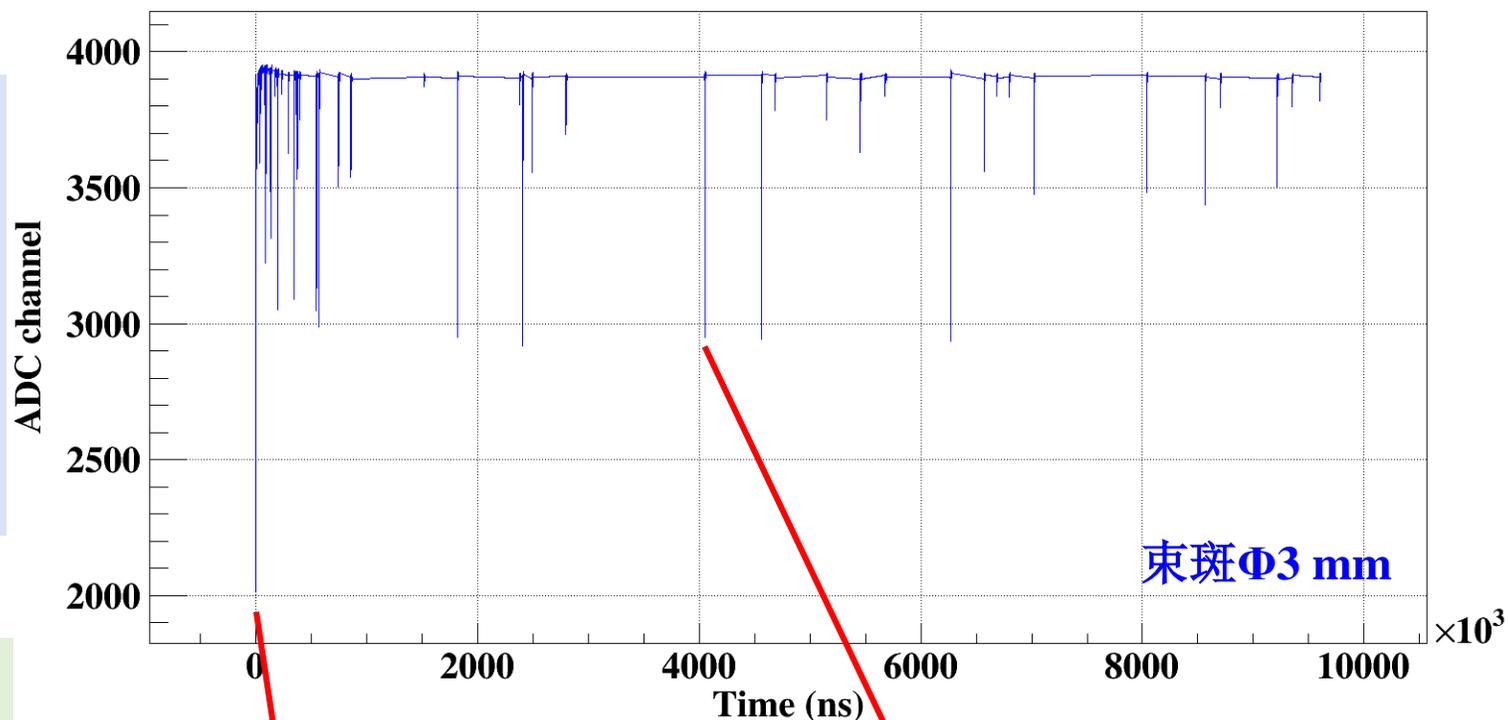
$$T(E) = \frac{\Phi(E)}{\Phi_0(E)} = e^{-N \cdot \sigma_{total}}$$

$$\Rightarrow \sigma_{total} = \frac{-\ln(T(E))}{N \cdot t}$$

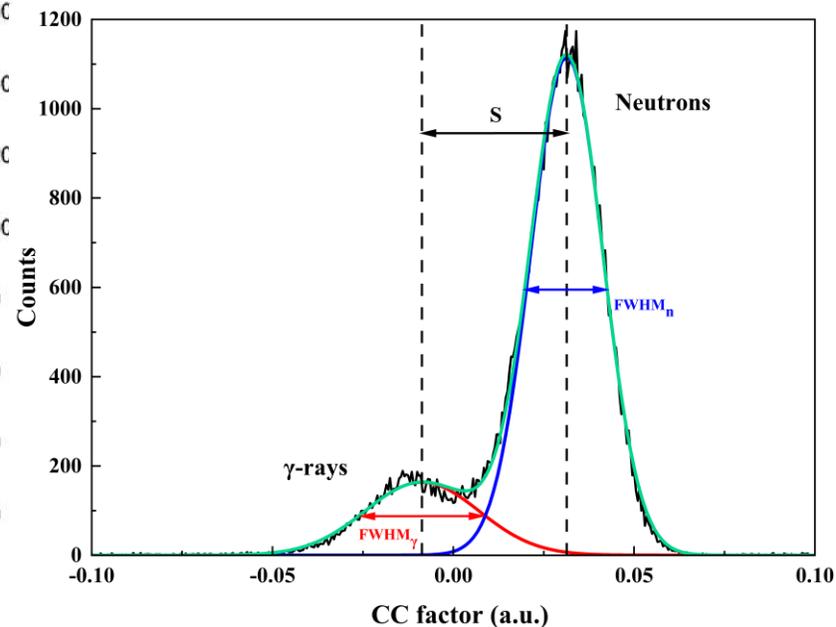
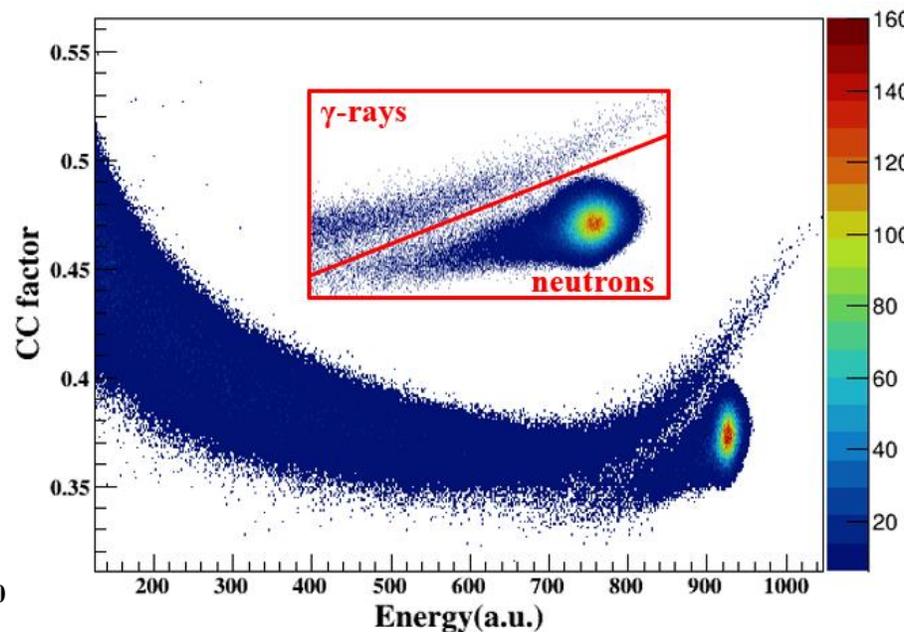
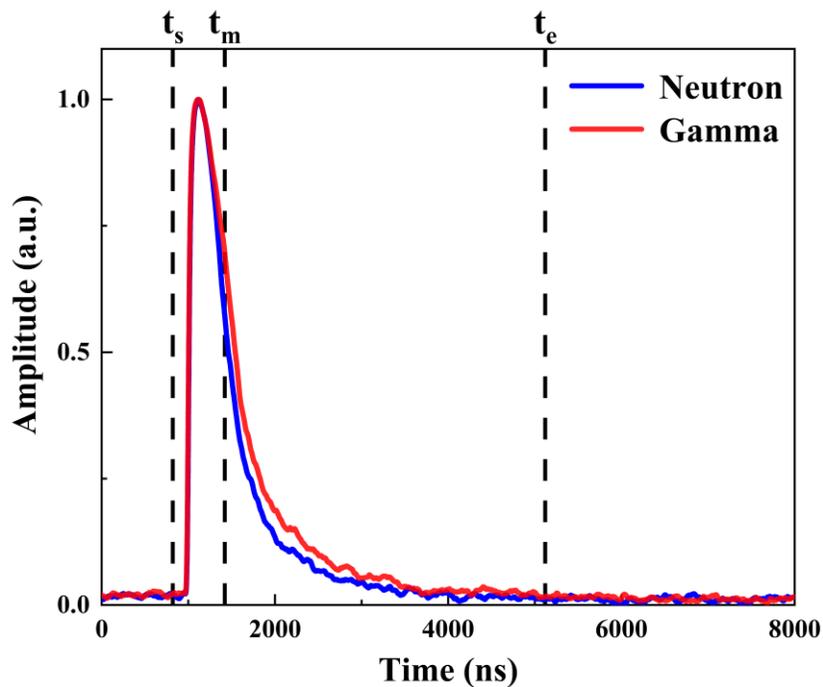
中子飞行时间法

$$E = m_n c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{TOF_n \cdot c} \right)^2}} - 1 \right]$$

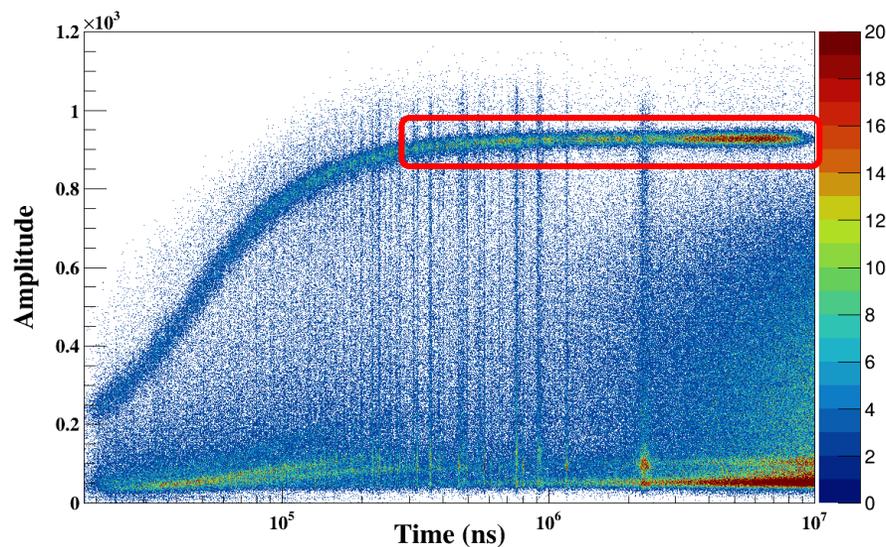
RunNumber: 18242, EventNumber: 3026, ChannelID: 1



中子-Gamma甄别



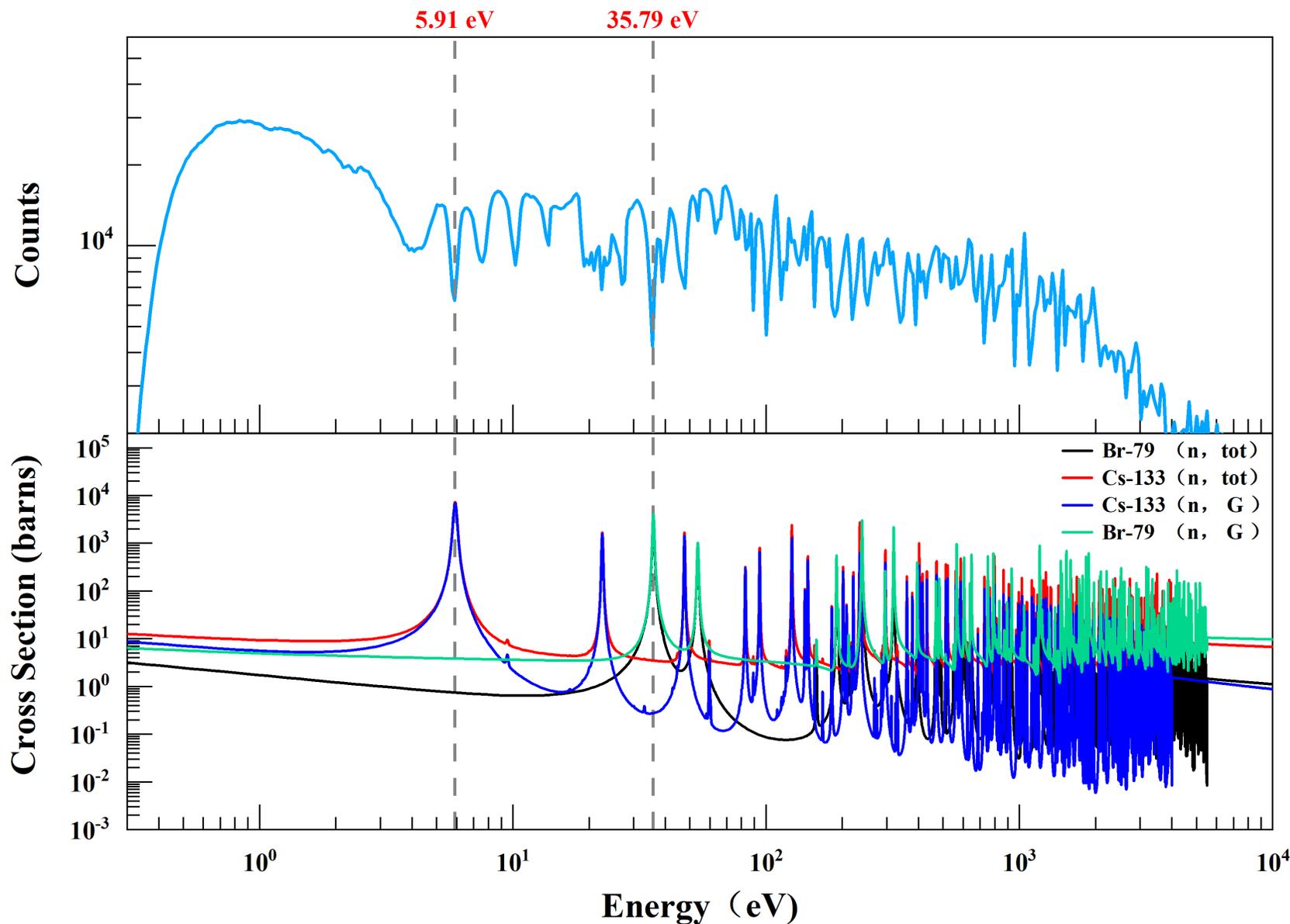
$$CC\ factor = \frac{Q_s}{Q_l} = \frac{\int_{t_m}^{t_e} I(t) dt}{\int_{t_s}^{t_e} I(t) dt}$$



- ✓ 电荷比较法得到CLLB闪烁体的 FOM = 0.77;
- ✓ 受强γ-flash影响, 闪烁体发光效率在瞬间强辐照下被抑制, 恢复过程约 378 μs。

➤ 飞行距离刻度

CLLB (Cs₂LiLaBr₆)



- 利用CLLB核素中¹³³Cs和⁷⁹Br的共振峰：**5.91eV、35.79 eV**
- 高斯拟合共振峰得到对应时间。

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



◆ 中子飞行距离拟合结果

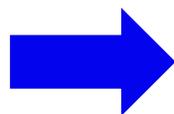
能量(eV)	5.91	35.79
刻度距离 (m)	77.473	77.474

✓ 结果符合实验布局

➤ 探测效率对比

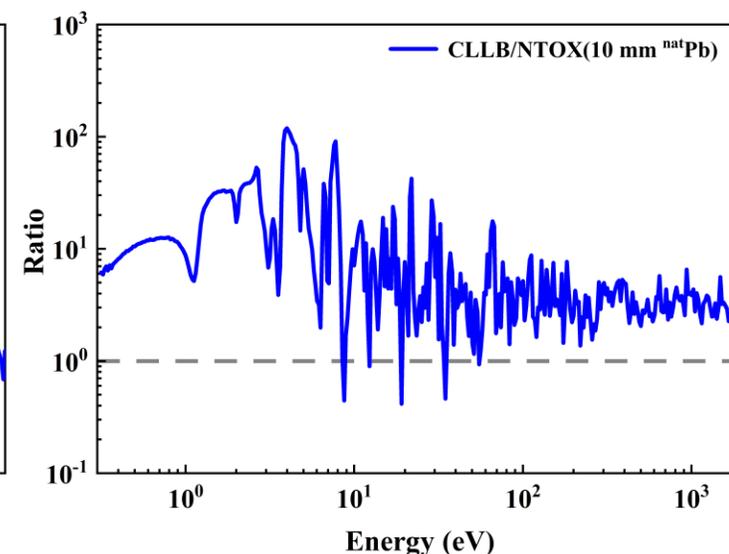
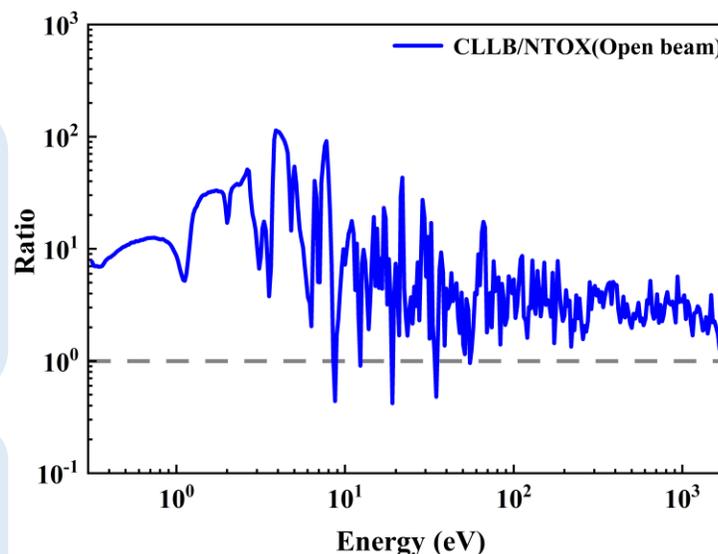
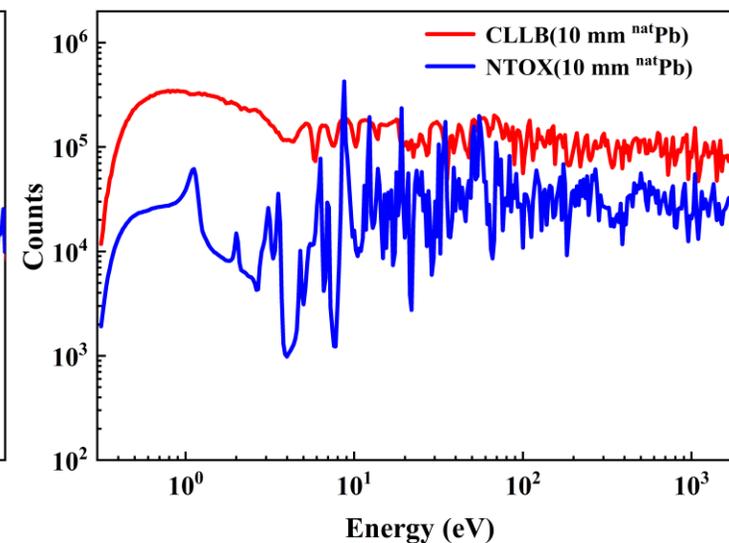
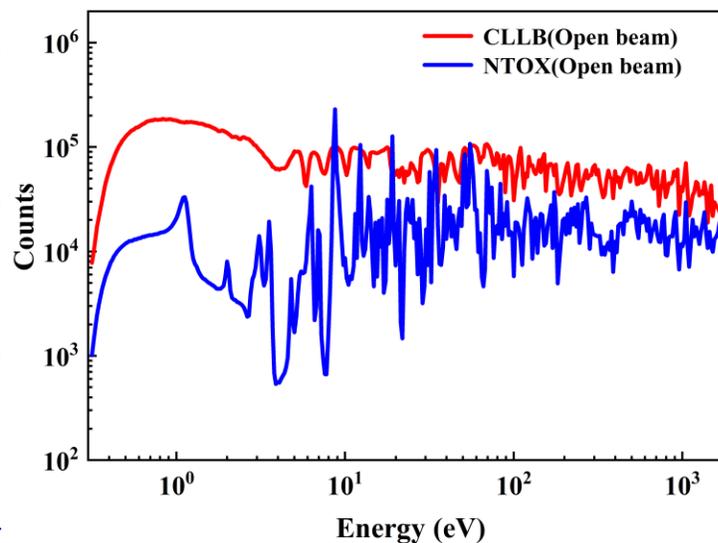
	功率 (kW)	测量时间 (h)	
		无样品	10 mm ^{nat} Pb
CLLB	140	7	4
NTOX	125	50	142

将以上两次实验的**功率**、**测量时间**参数归一化处理

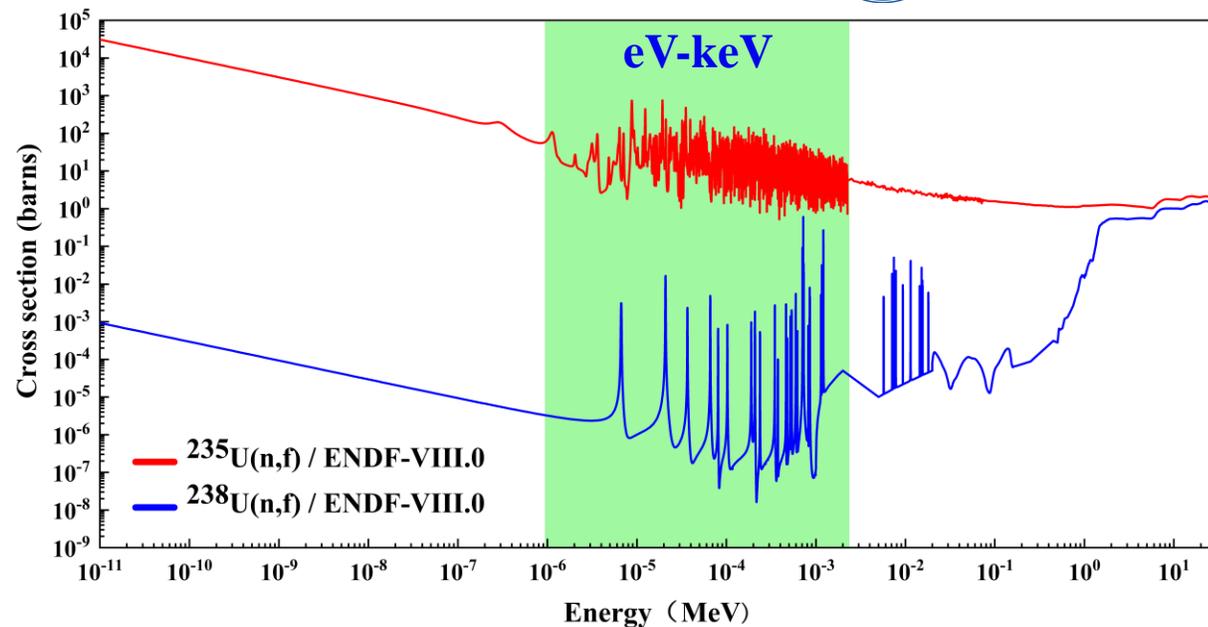
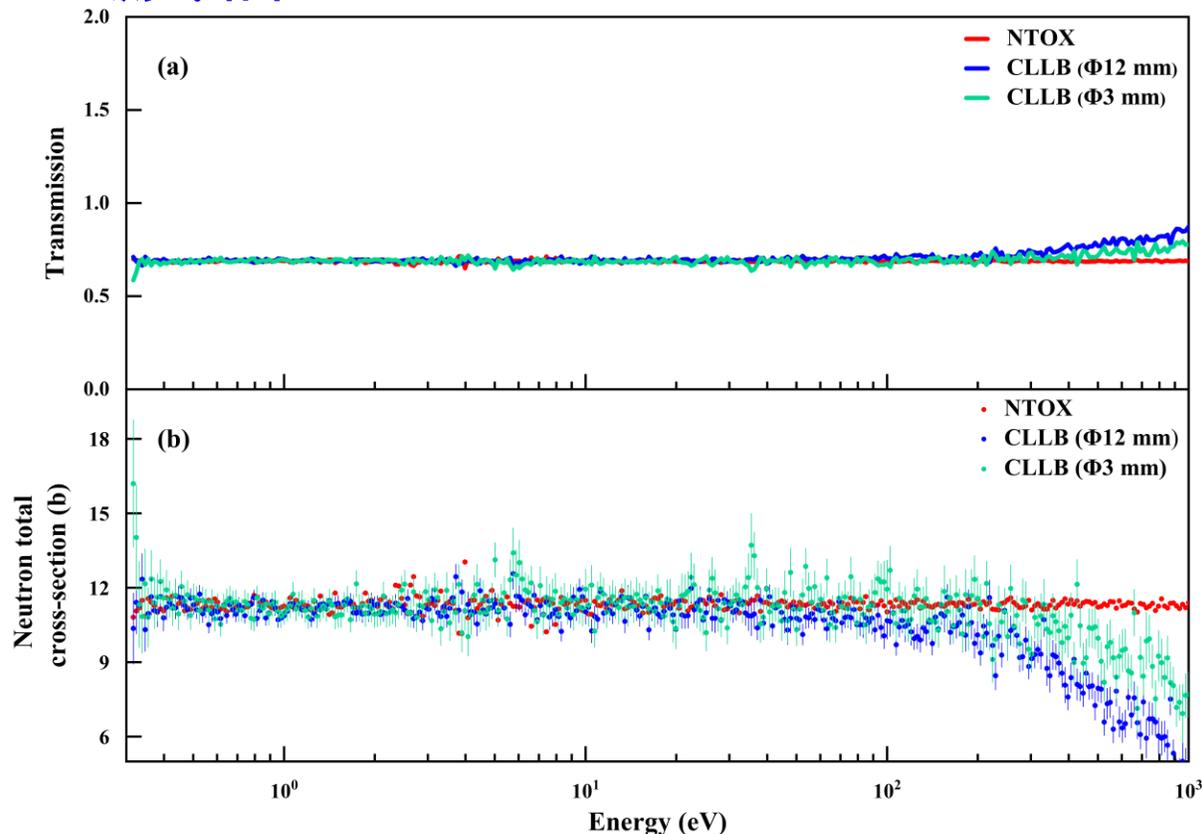


✓ 在0.3 eV-1 keV能区，CLLB闪烁体的探测效率比NTOX的**探测效率更高**，可与NTOX测量能区互补。

✓ CLLB的能谱响应较为平缓，**不受共振的影响**。

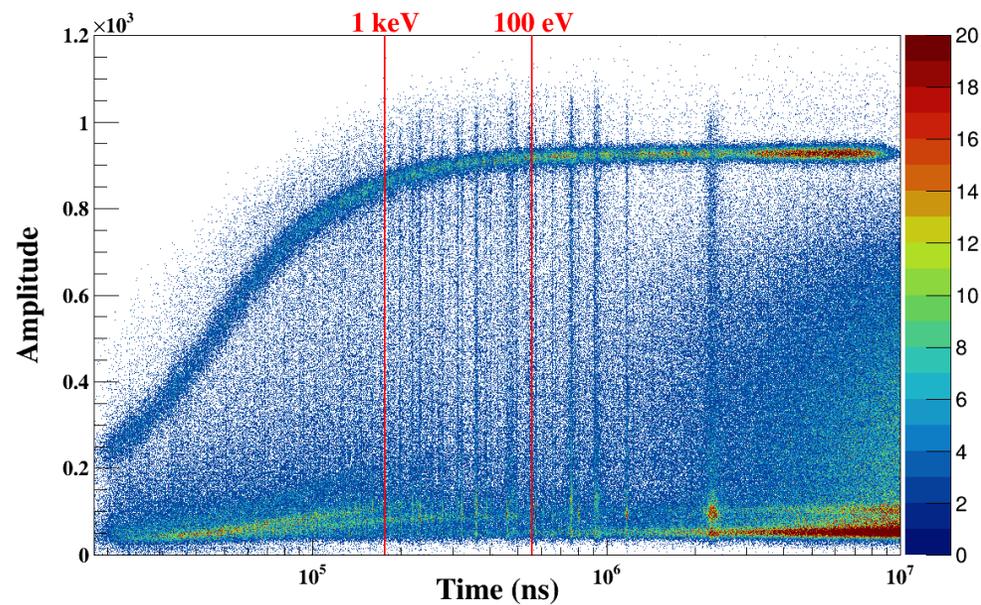


测试结果



在0.3 eV-100 eV能区，探测器样机与基于多层裂变电离室测量的 $^{\text{nat}}\text{Pb}$ 中子全截面高度一致，但是不受裂变截面的共振影响。

✓ 验证了谱仪可测低能区中子全截面



- 以中子/ γ 双模式探测的钾冰晶石无机闪烁体**CLLB**为研究对象，利用Geant4程序开展了闪烁体对Back-n束流环境的响应模拟，分析了 ^6Li 富集度、闪烁体厚度、形状、荧光快慢成分、读出方式等因素对探测器**探测效率、中子- γ 计数比、中子- γ 脉冲形状甄别**等性能的影响；
- 研制了侧读出方形**CLLB**闪烁探测器样机，利用标准 γ 源、Pu-Be中子源、加速器DT中子源对CLLB的响应和关键性能进行了验证测试，**模拟与实验具有很好的一致性**；
- 在Back-n束线上利用不同束斑中子束开展了响应测试，探测器大于1000 ns的脉宽使得 γ -flash引起的信号堆积仍然十分严重。闪烁体发光效率在瞬间强辐照下被抑制，恢复过程378 μs 。在**0.3 eV-100 eV能区**，探测器样机与基于多层裂变电离室的中子全截面谱仪NTOX测量的 $^{\text{nat}}\text{Pb}$ 中子全截面高度一致，但是不受裂变截面的共振影响且**探测效率更高**，可与NTOX测量能区互补。**验证了FAST谱仪测量低能区中子全截面的可能性，期望后续能提高测量的准确性和能区覆盖能力。**



南華大學

UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

Thanks for your attention!

栾鹏, 赵大俊, 易晗, 蒋伟, 羊奕伟, 程品晶, 薛洁明, 赵继荣, 李宝钱, 刘静, 郑波, 冯松*

songfeng@usc.edu.cn



➤ 飞行时间定时

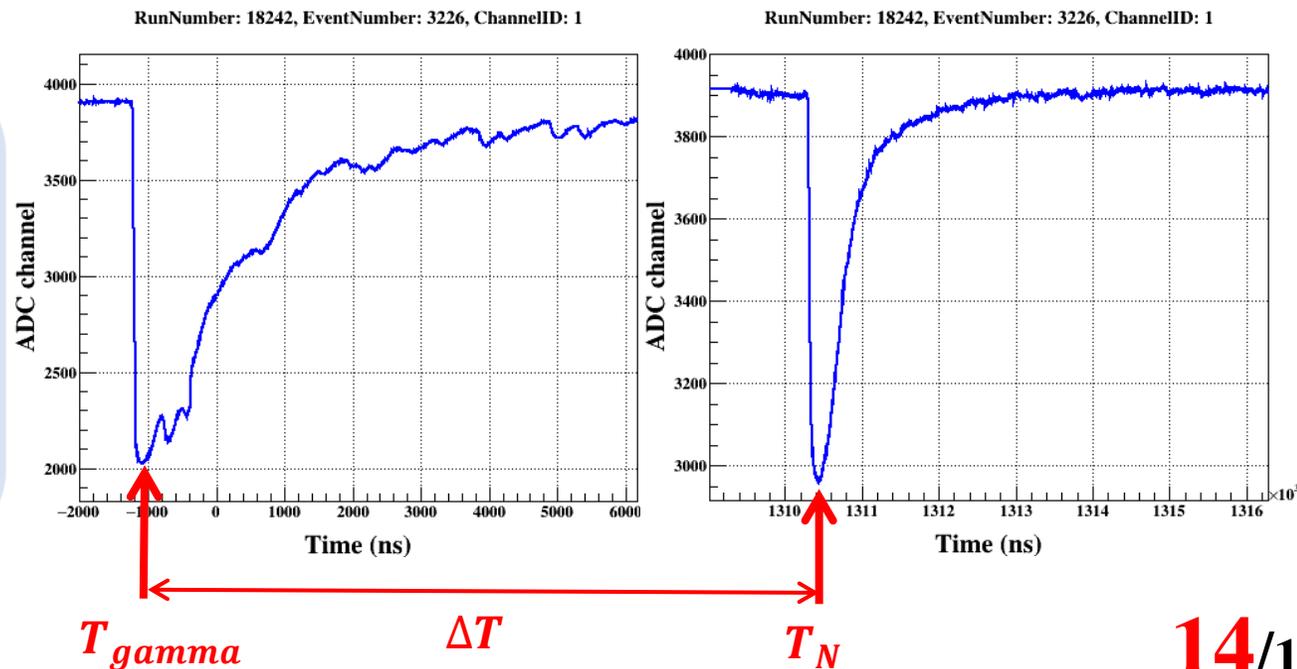
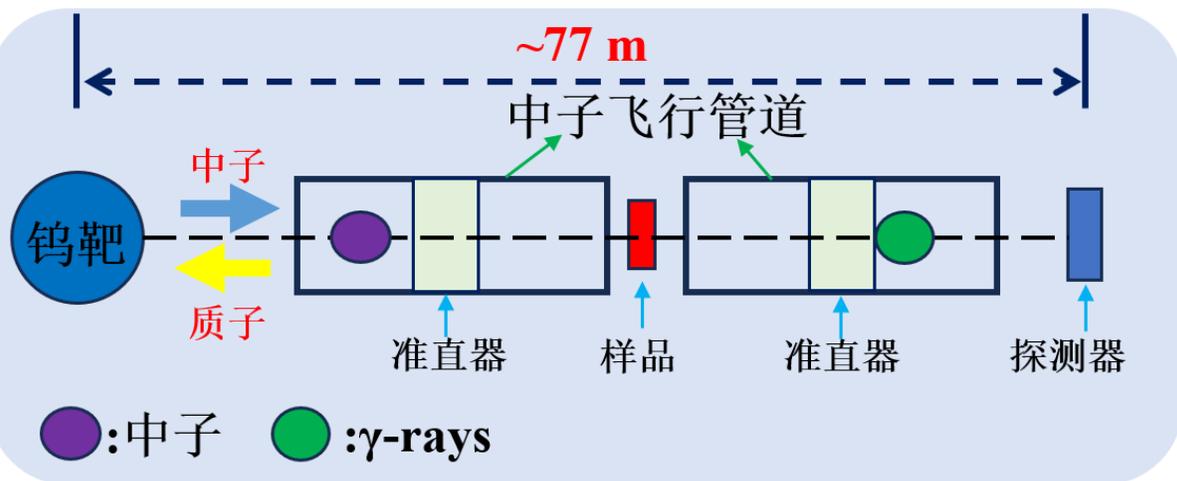
- 当1.6 GeV的高能质子在轰击钨靶后，会产生伴生的瞬发 γ 线，被称为“ γ -flash”；
- 可以利用探测到的“ γ -flash”来标定中子的飞行时间。

$$TOF_N = T_N - T_{N0} = T_N - (T_{\gamma} - TOF_{\gamma})$$

$$\text{其中, } TOF_{\gamma} = \frac{L}{c}$$

T_N : 中子被探测到的时间 T_{N0} : 中子的起飞时间

TOF_{γ} : γ 飞行时间 T_{γ} : γ 被探测到的时间

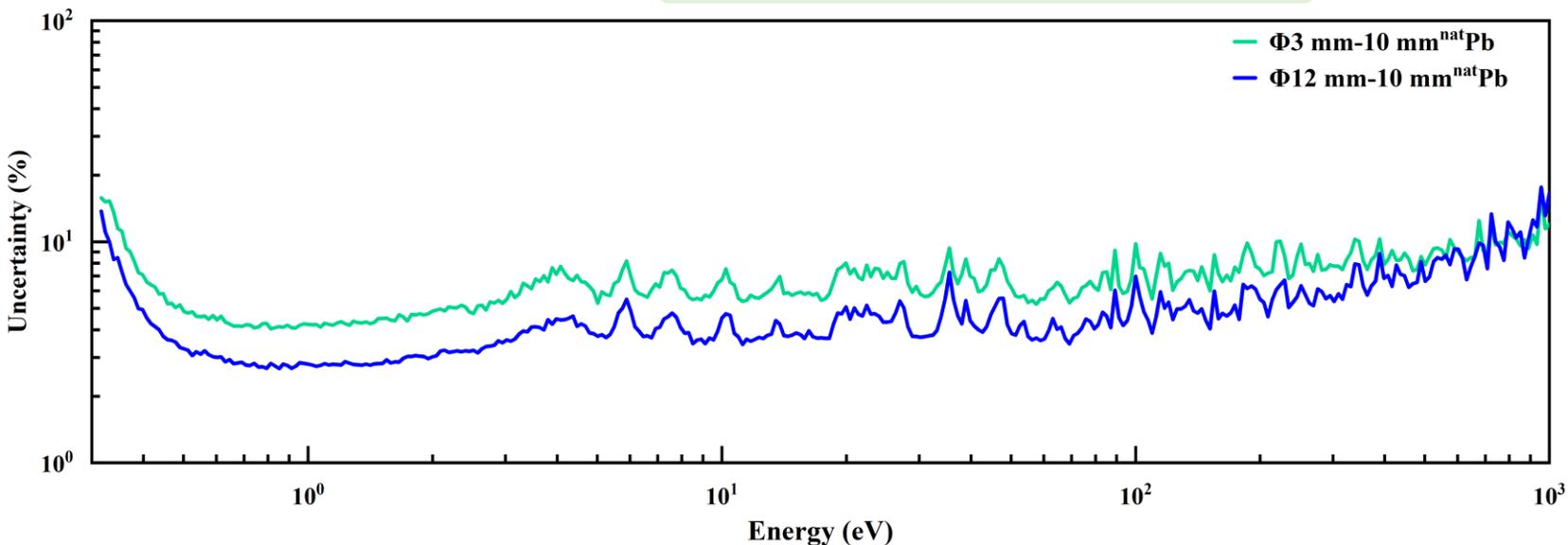


➤ 不确定度分析

□ 截面不确定度

$$\sigma_{\text{total}} = \frac{-\ln(T(E))}{N \cdot t}$$

$$\frac{\Delta\sigma(E_i)}{\sigma(E_i)} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + (\ln T)^2 \left(\frac{\Delta nt}{nt}\right)^2}}{-\ln T}$$



束斑	能量点	不确定度范围	< 5%	< 10%
Φ3 mm	351	4.04 % ~ 16.89 %	19.08%	93.73%
Φ12 mm	351	2.67 % ~ 17.68 %	69.23%	96.01%