



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<sup>1</sup>, 赵大俊<sup>1</sup>, 易晗<sup>2,3</sup>, 蒋伟<sup>2,3</sup>, 羊奕伟<sup>4</sup>, 程品晶<sup>1</sup>, 薛洁明<sup>1</sup>, 赵继荣<sup>1</sup>, 李宝钱<sup>1</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 郑波<sup>1</sup>, 冯松<sup>1,\*</sup>

- 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**

**探测器概念设计**

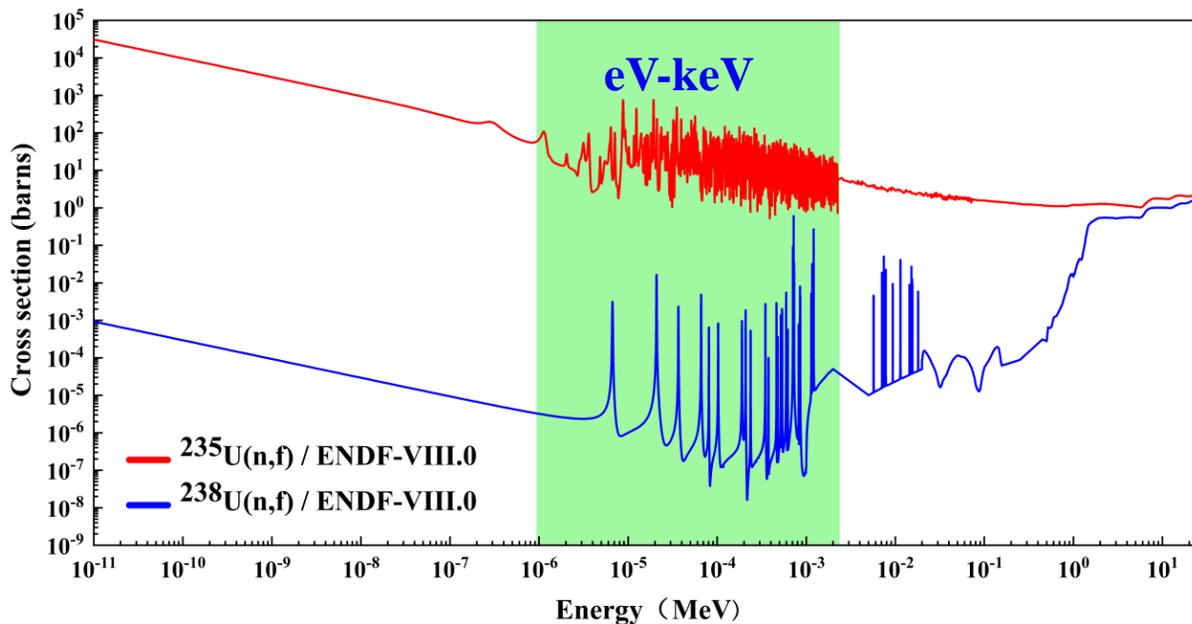
**03**

**探测器实验测试**

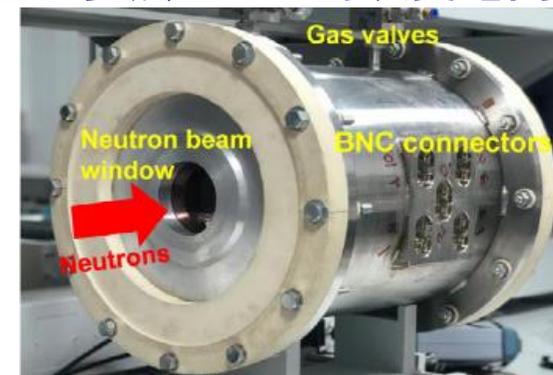
**04**

**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。

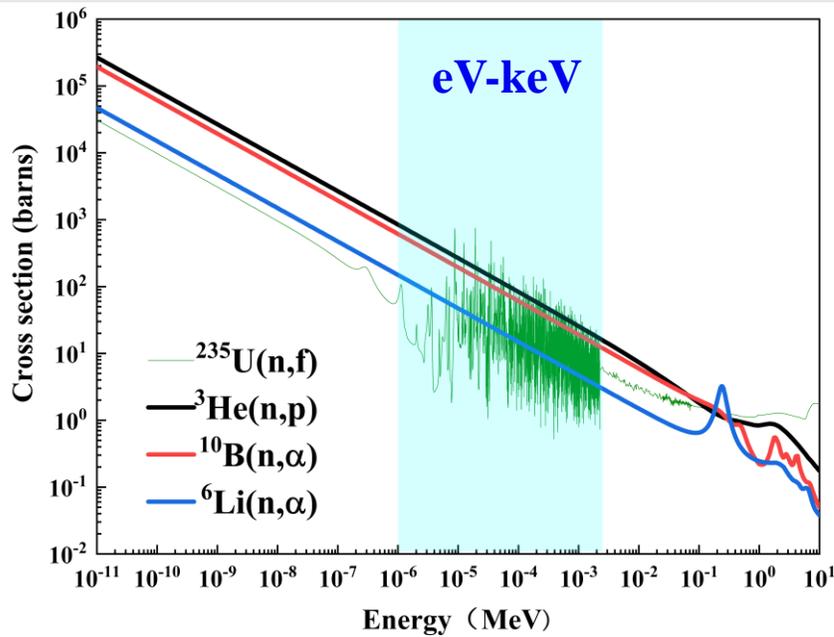


## 基于多层<sup>235,238</sup>U的裂变电离室



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。

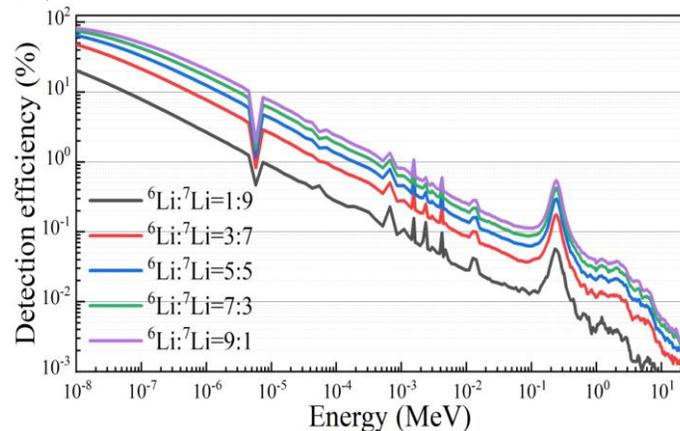
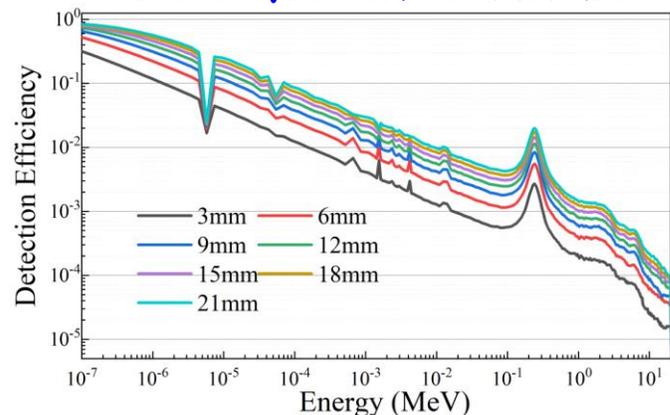


- $\gamma$ -flash干扰
- 全能区响应
- 中子/ $\gamma$ 甄别

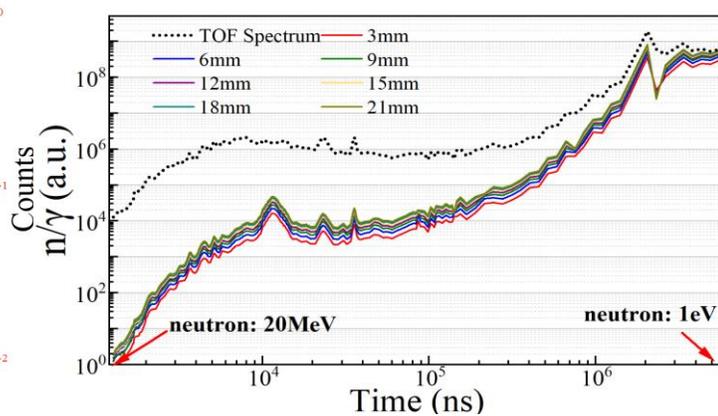
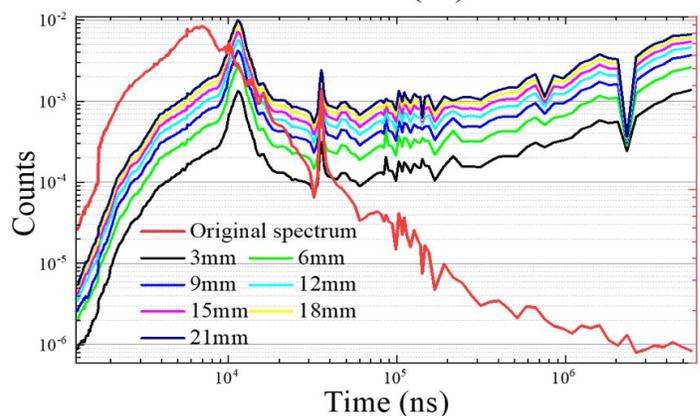


- Li基钾冰晶石晶体:  $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$  (CLLB)
- 探测效率高: 热中子吸收厚度约3 mm
- 优异的中子伽马甄别性能 ( $Q=4.78$  MeV)
- 时间响应较快: 快时间衰减常数180 ns
- 光产额: 40000 Photons/MeV

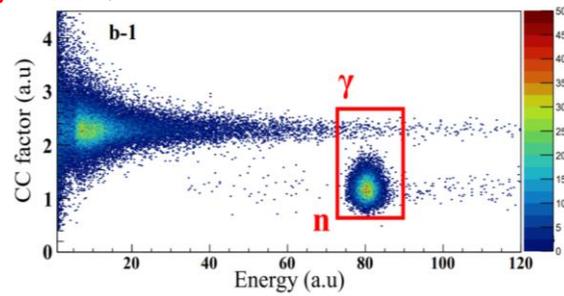
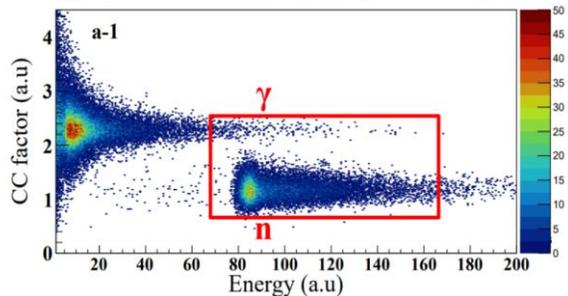
## 对 中子/ $\gamma$ 探测效率模拟 (探测效率)



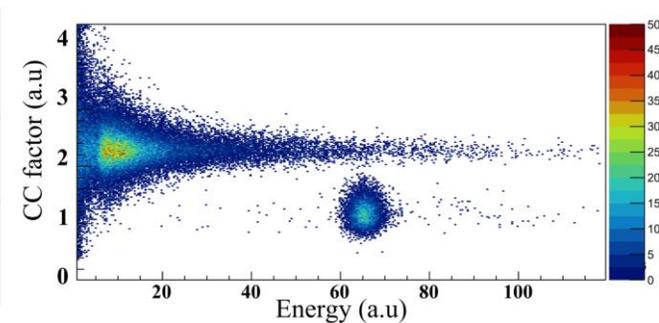
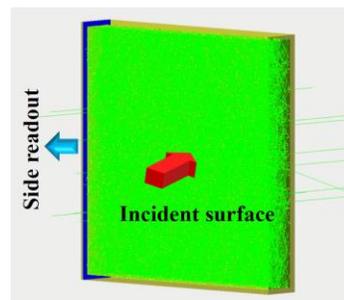
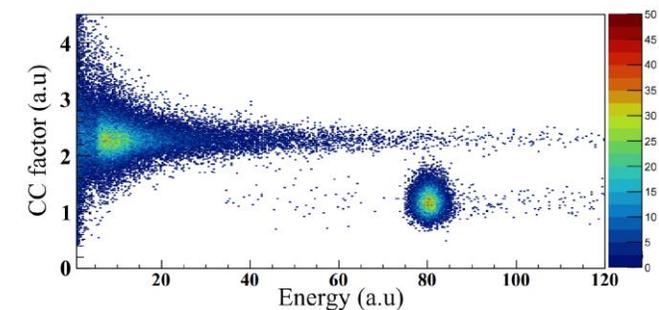
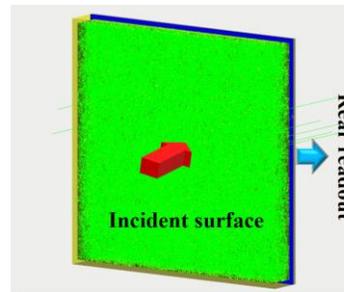
## 对 Back-n 中子/ $\gamma$ 束响应模拟 (全能区响应)



## 基于 $^{252}\text{Cf}$ 源展开 PSD 模拟 (中子/ $\gamma$ 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>



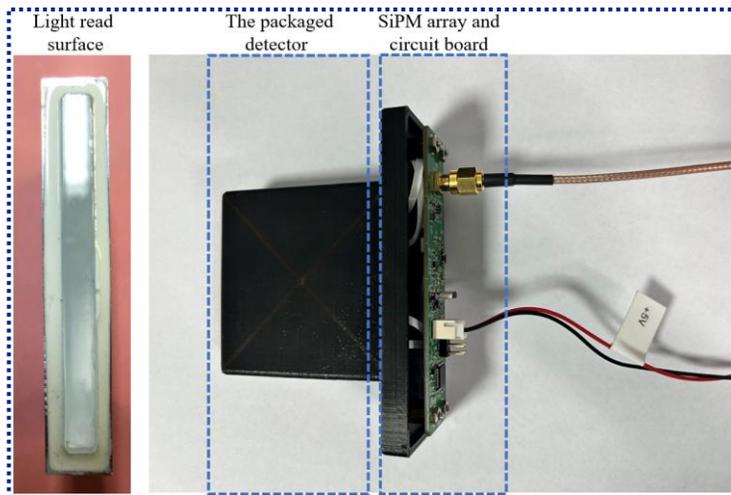
### Conceptual design of a $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ scintillator-based neutron total cross section spectrometer on the back-n beam line at CSNS

Da-Jun Zhao<sup>1</sup> · Song Feng<sup>1</sup> · Pin-Jing Cheng<sup>1</sup> · Rong Liu<sup>2</sup> · Wen Luo<sup>1</sup> · Hao-Qiang Wang<sup>1</sup> · Jie-Ming Xue<sup>1</sup> · Kun Zhu<sup>1</sup> · Bo Zheng<sup>1</sup>

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

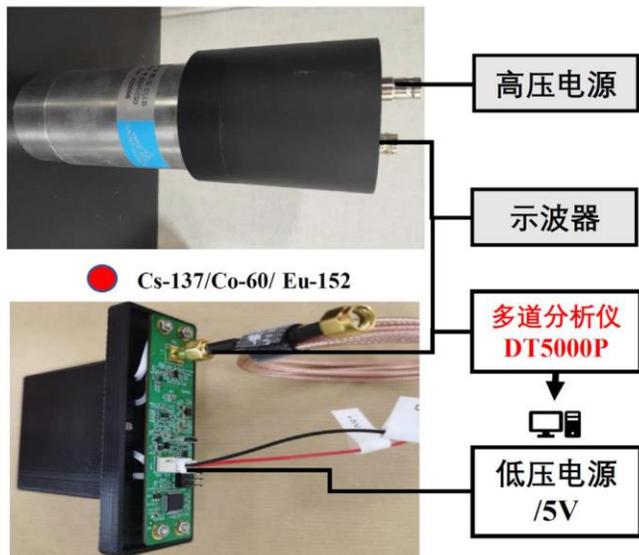
## ➤ FAST谱仪样机

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



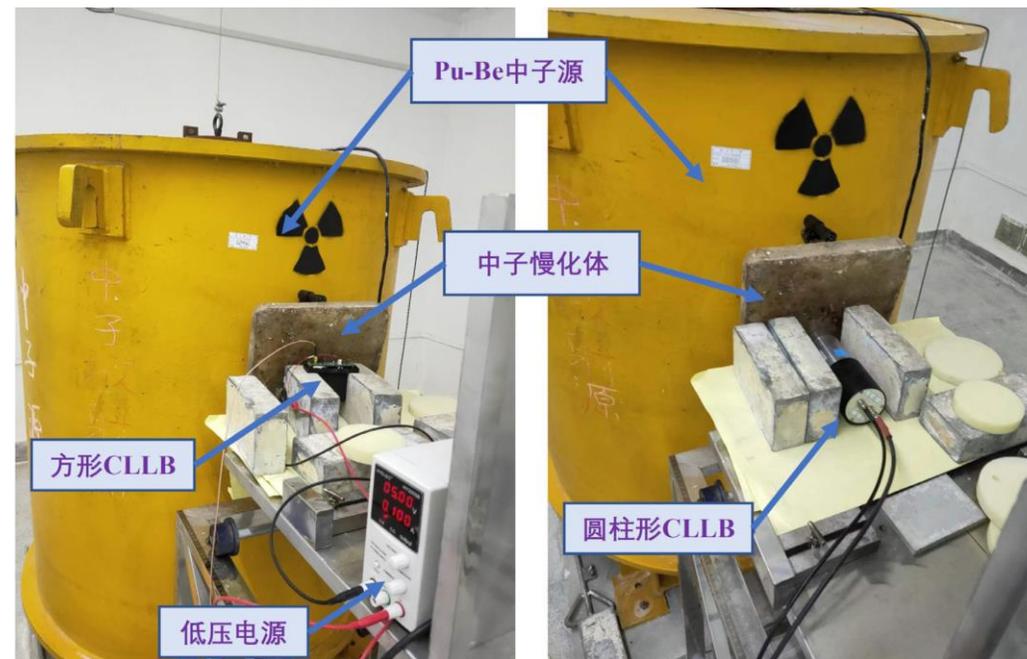
## ➤ 基于标准 $\gamma$ 源测试(南华大学)

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



侧读出到SiPM的方形CLLB探测器  $50.8 \times 50.8 \times 6$  mm

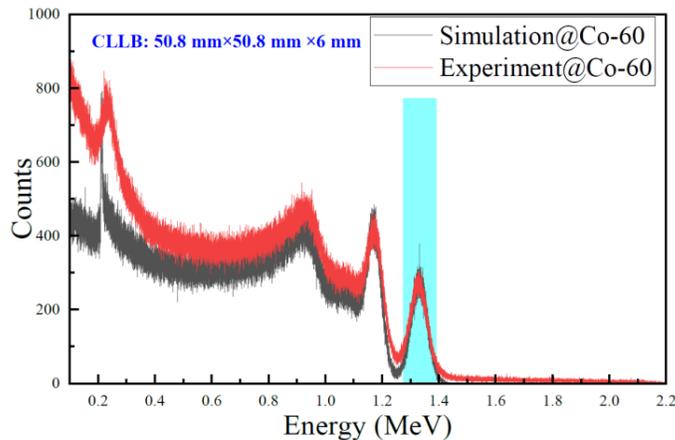
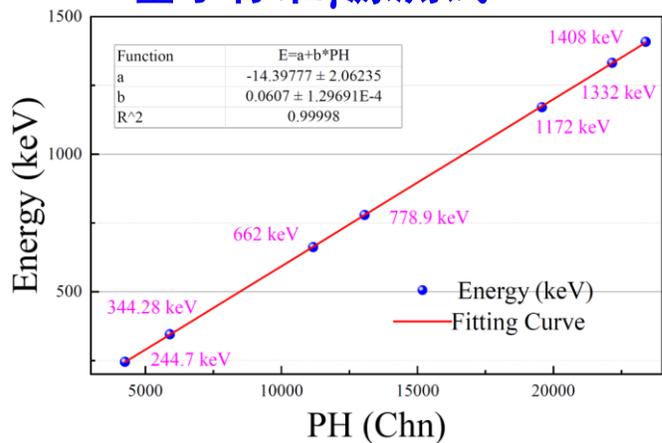
## ➤ 基于Pu-Be中子源测试(南华大学)



## ➤ 基于DT中子发生器测试(九院二所)

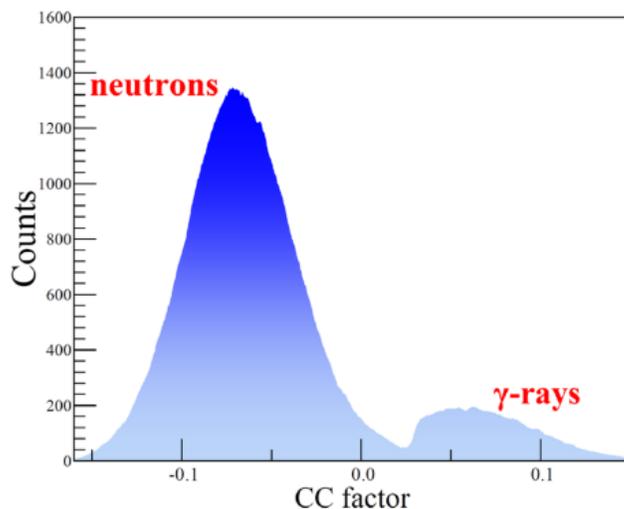
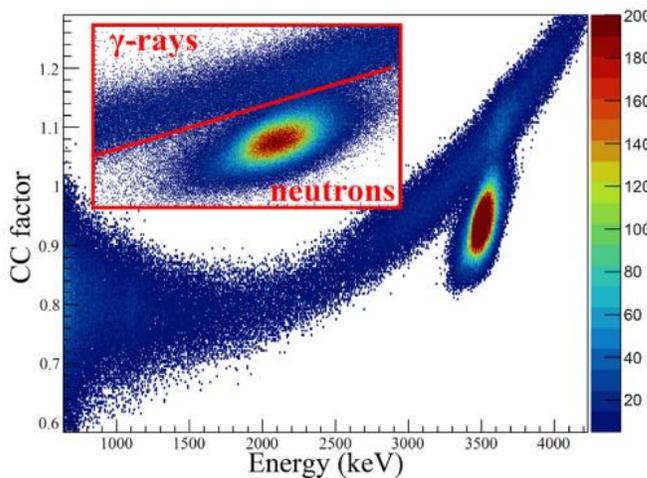


## 基于标准 $\gamma$ 源测试



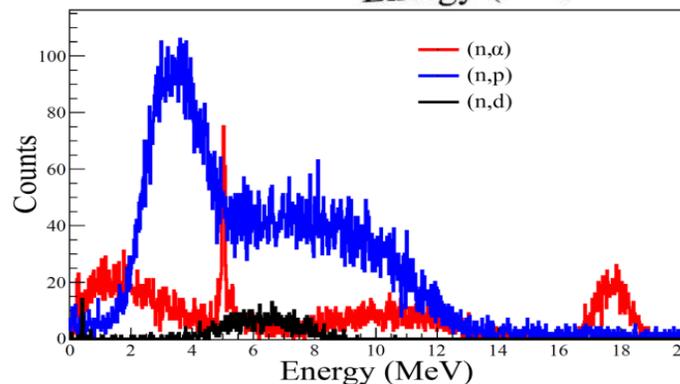
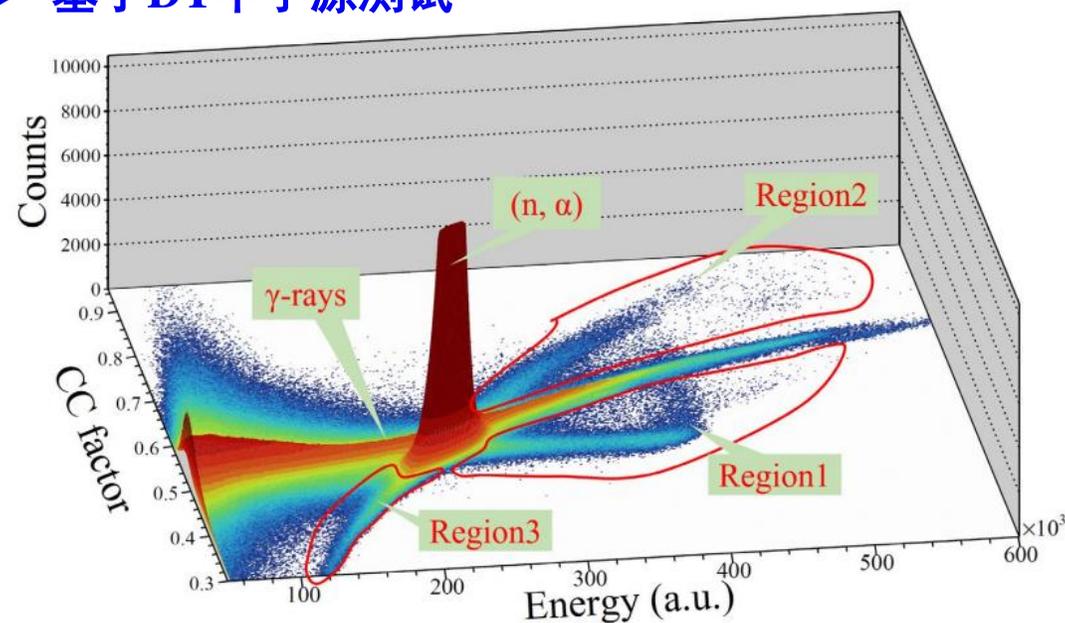
□ CLLB能量分辨率约8.4%；良好的能量线性响应；1.33 MeV处 CLLB的 $\gamma$ 本征峰探测效率，与模拟差异小于3%

## 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

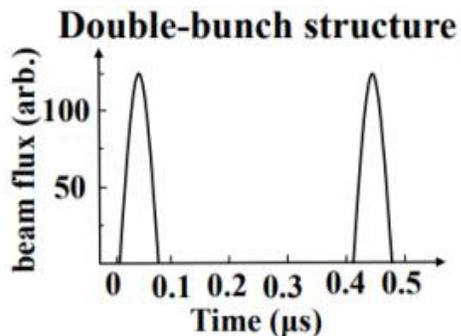


□ 入射中子能量大于3 MeV时，CLLB闪烁体中材料的更多中子反应道被打开，包括(n,p)，(n,d)，(n,  $\alpha$ )；  
□ Region1区域(n,  $\alpha$ )计数测量值与模拟结果基本一致。

## 实验安排

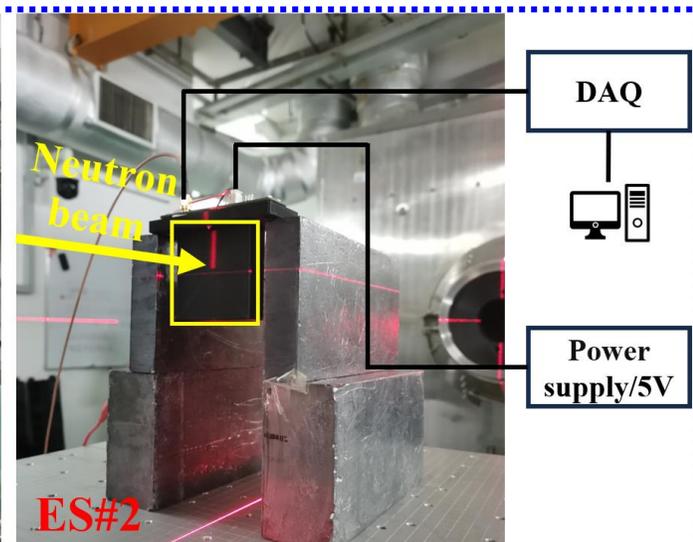
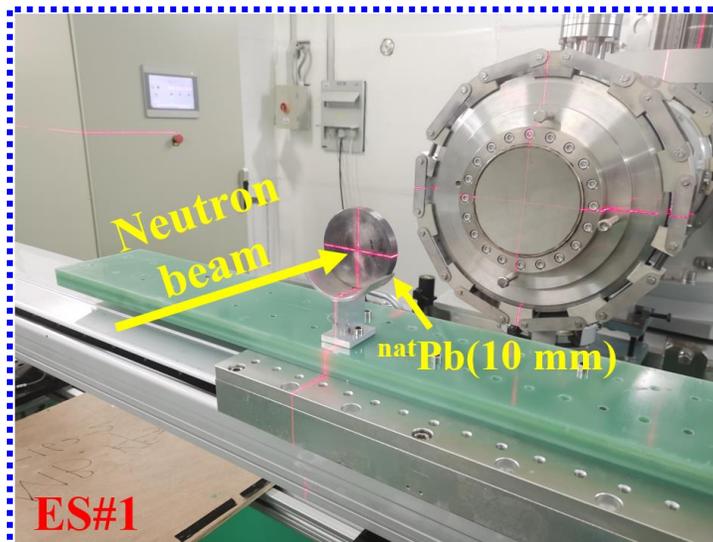
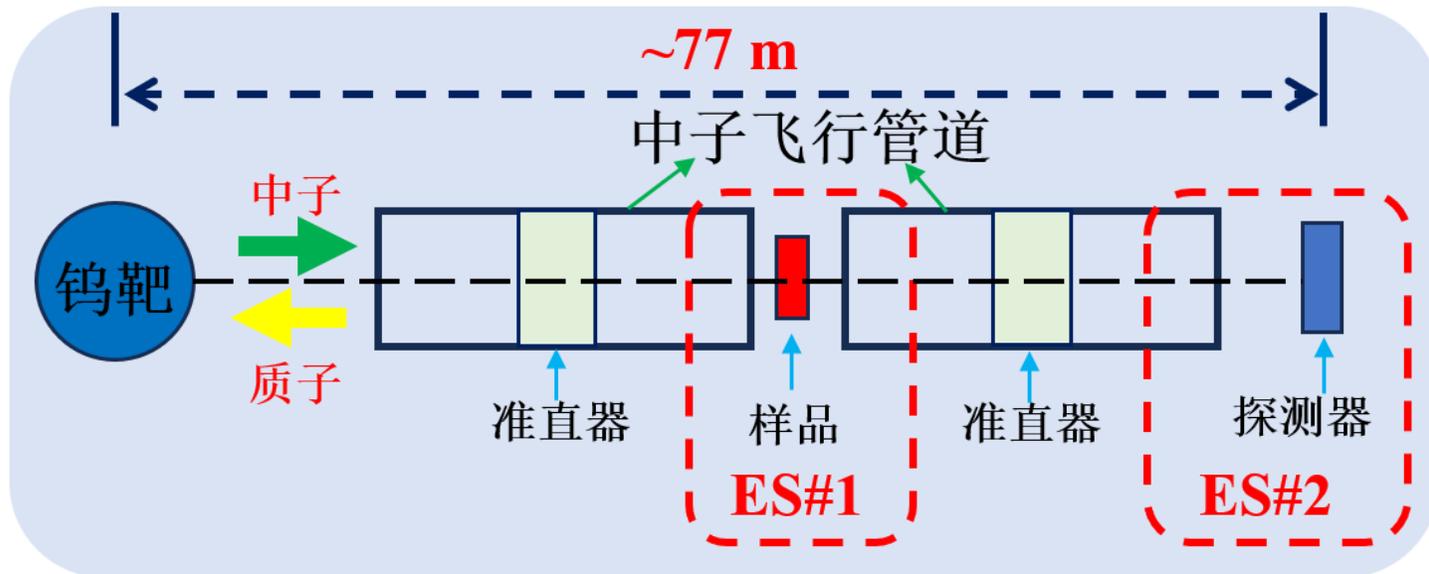
实验时间：2023年6月8日-11日 (48h束流)

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

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



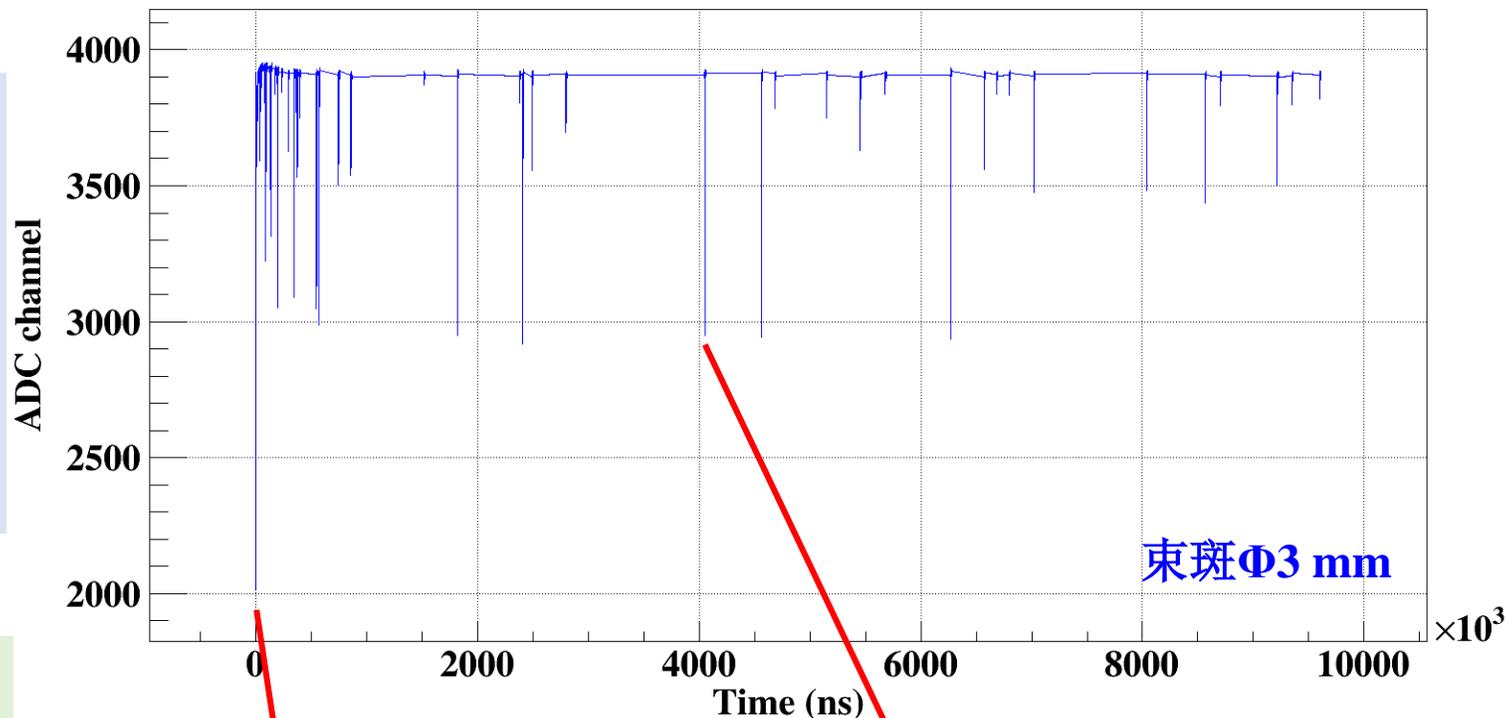
$$T(E) = \frac{\Phi(E)}{\Phi_0(E)} = e^{-N \cdot \sigma_{total}}$$

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

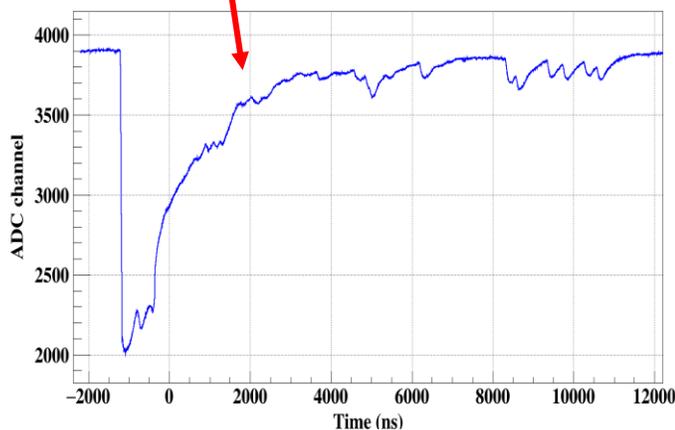
中子飞行时间法

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

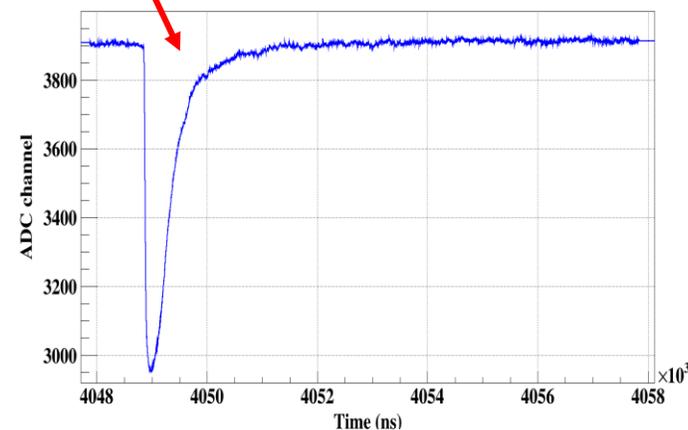
RunNumber: 18242, EventNumber: 3026, ChannelID: 1



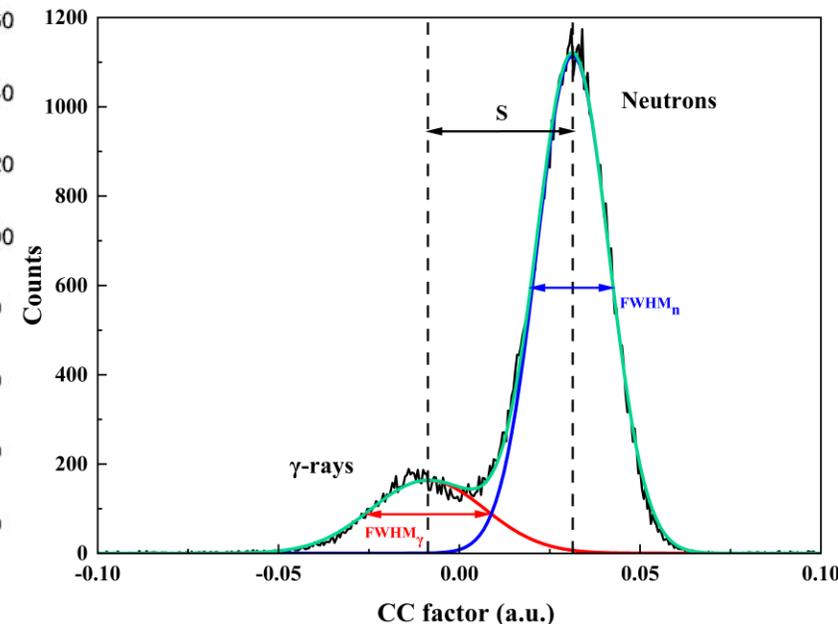
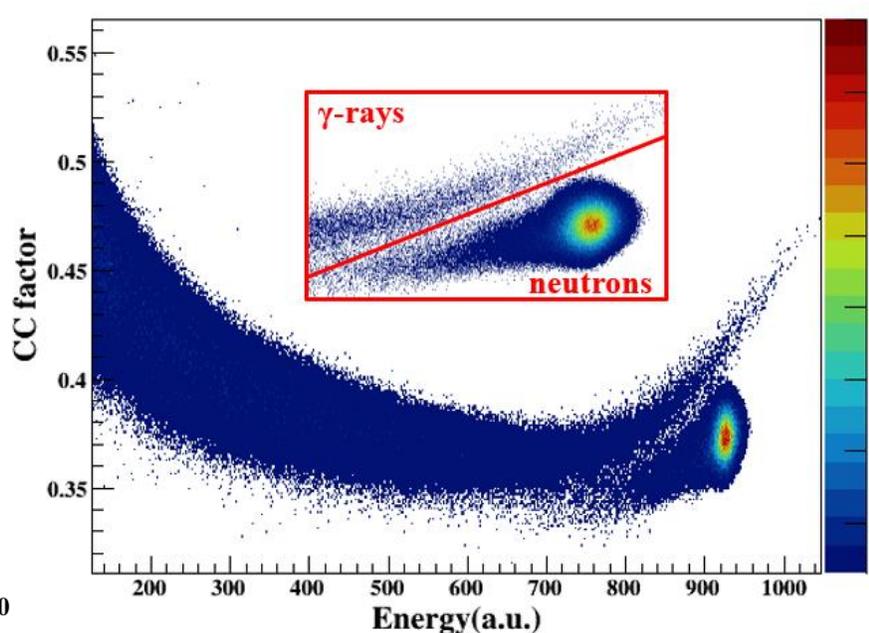
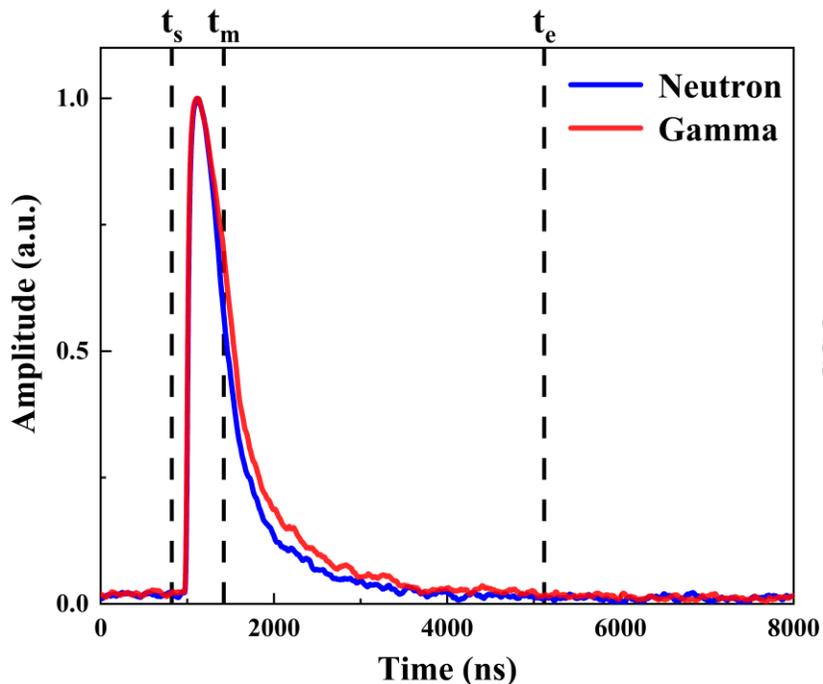
RunNumber: 18242, EventNumber: 3026, ChannelID: 1



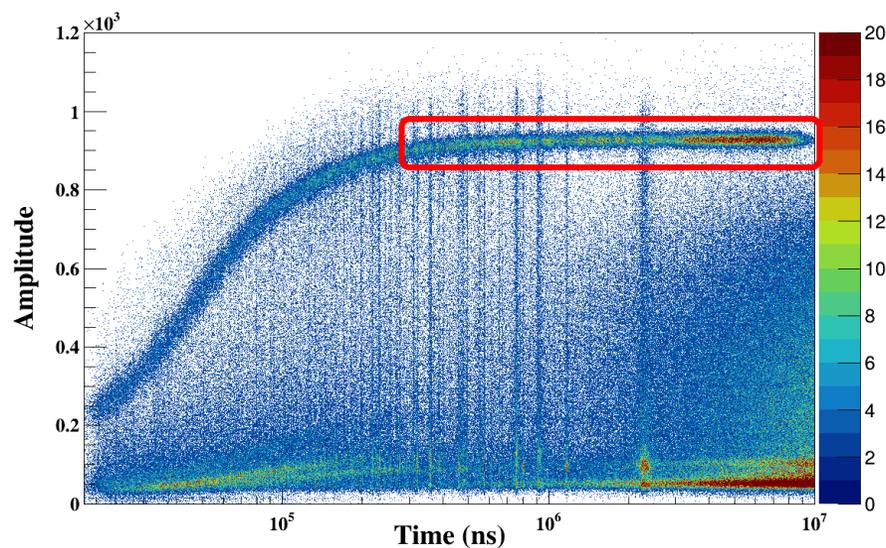
RunNumber: 18242, EventNumber: 3026, ChannelID: 1



## 中子-Gamma甄别



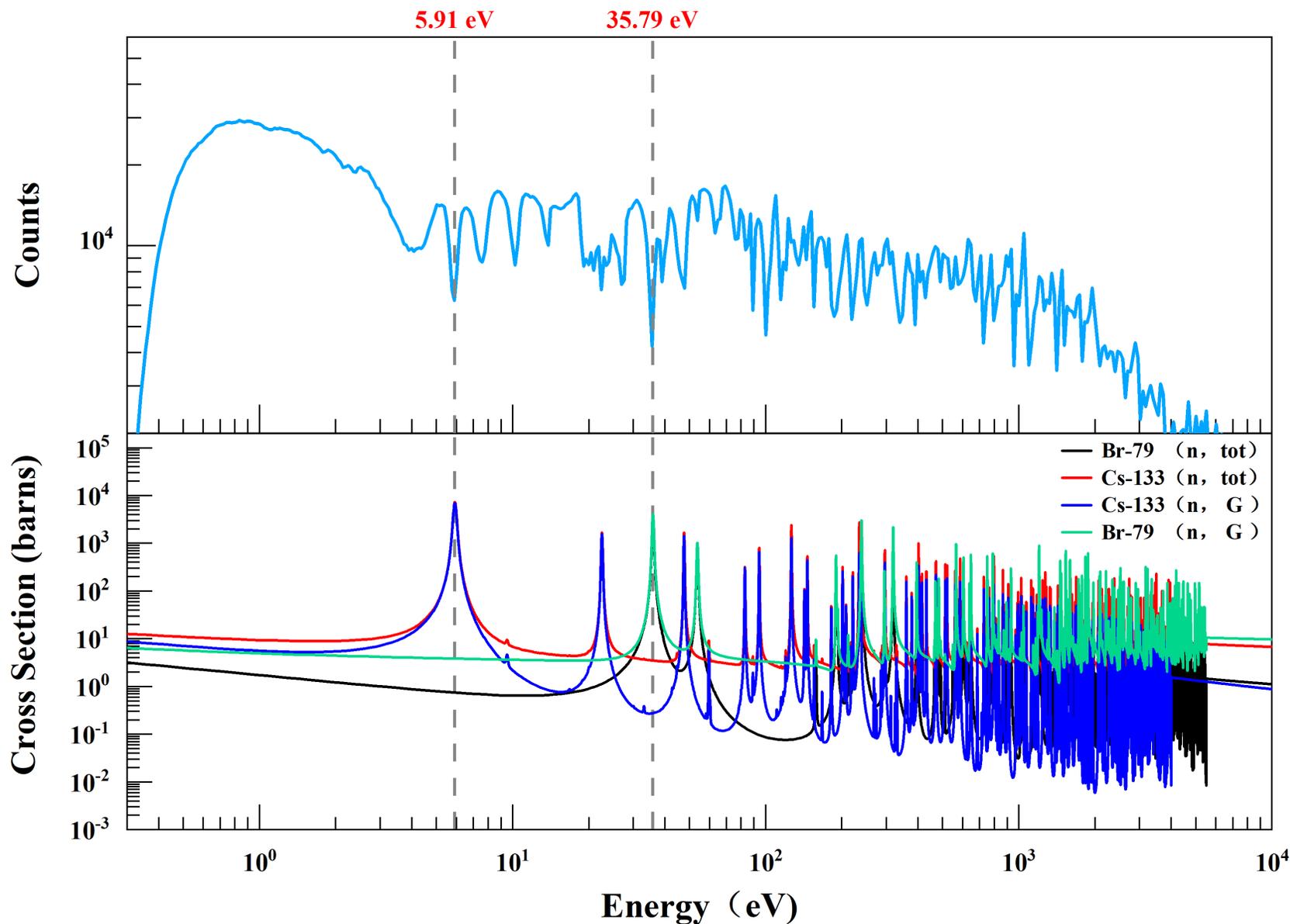
$$CC\ factor = \frac{Q_s}{Q_l} = \frac{\int_{t_m}^{t_e} I(t) dt}{\int_{t_s}^{t_e} I(t) dt}$$



- ✓ 电荷比较法得到CLLB闪烁体的 FOM = 0.77;
- ✓ 受强 $\gamma$ -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  $\mu$ s。

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

### ➤ 飞行距离刻度



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

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



### ◆ 中子飞行距离拟合结果

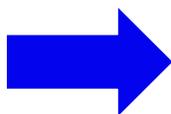
能量(eV)	5.91	35.79
刻度距离 (m)	<b>77.473</b>	<b>77.474</b>

✓ 结果符合实验布局

## ➤ 探测效率对比

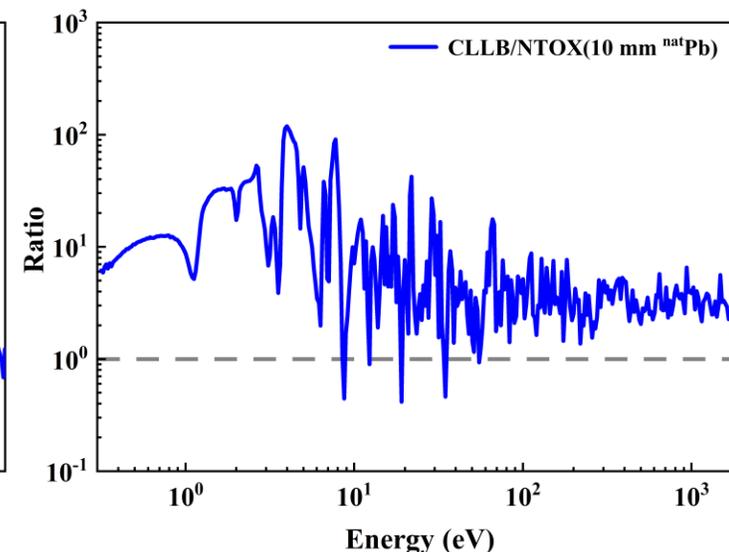
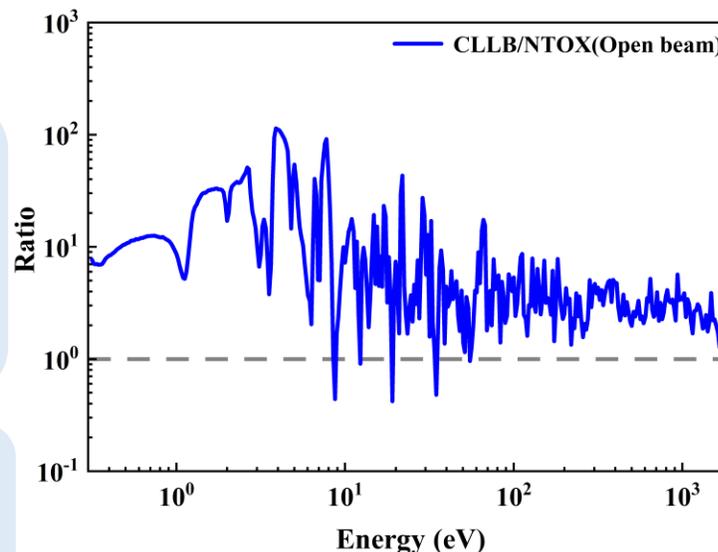
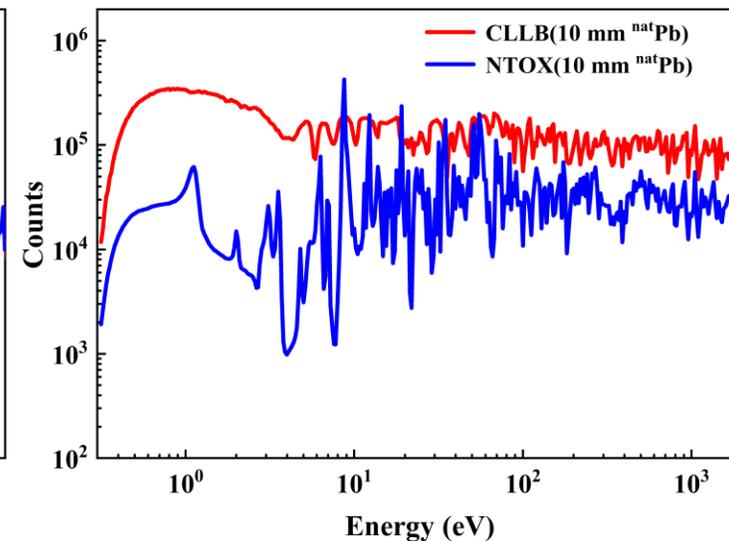
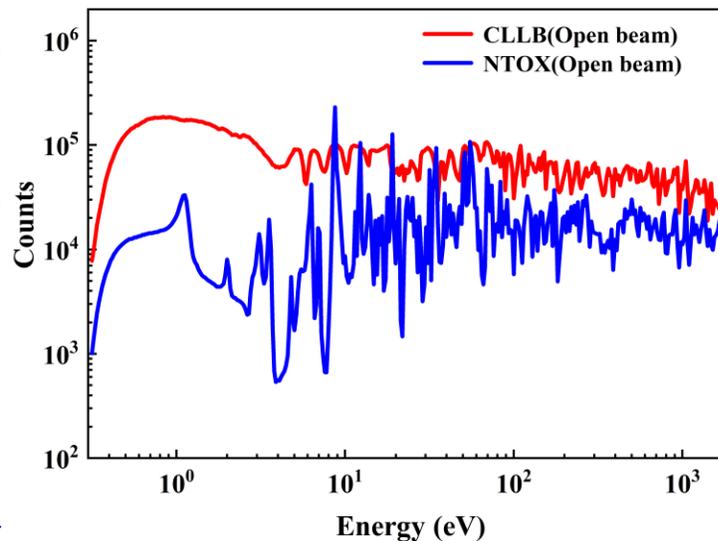
	功率 (kW)	测量时间 (h)	
		无样品	10 mm <sup>nat</sup> Pb
CLLB	140	7	4
NTOX	125	50	142

将以上两次实验的**功率**、**测量时间**参数归一化处理

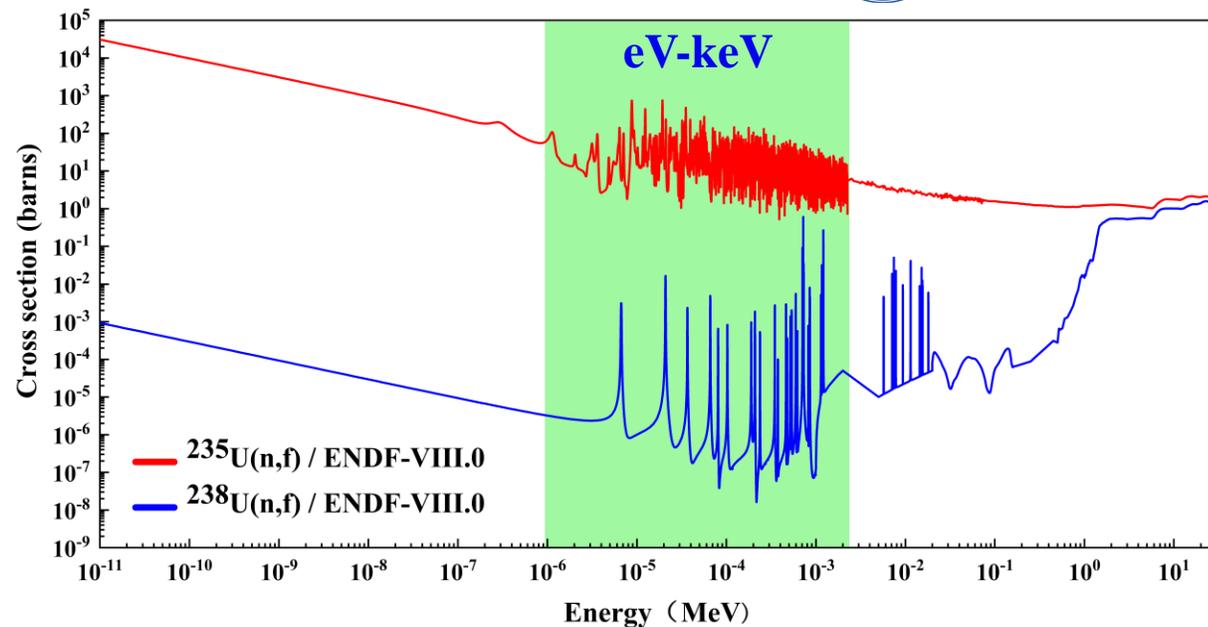
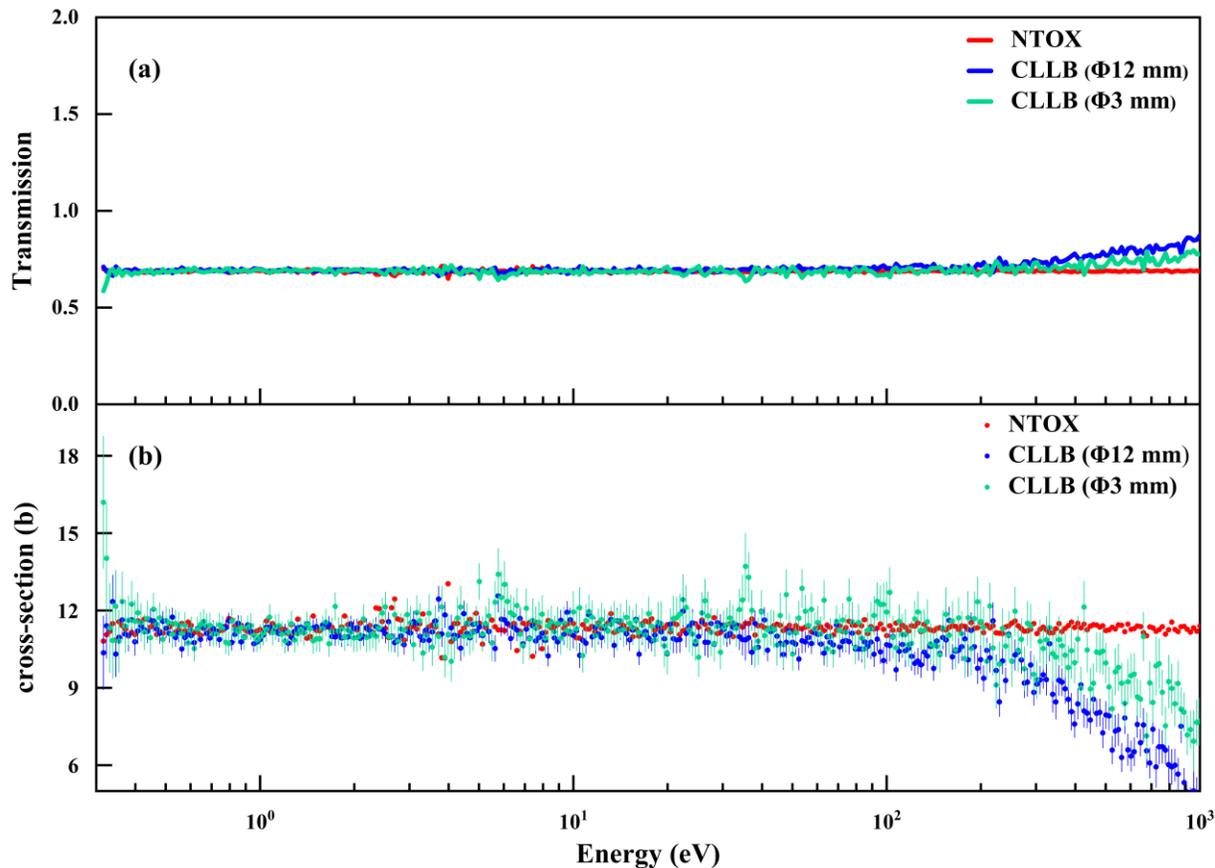


✓ 在0.3 eV-1 keV能区，CLLB闪烁体比多层裂变电离室的单个测量单元**探测效率更高**，可在裂变共振能区互补。

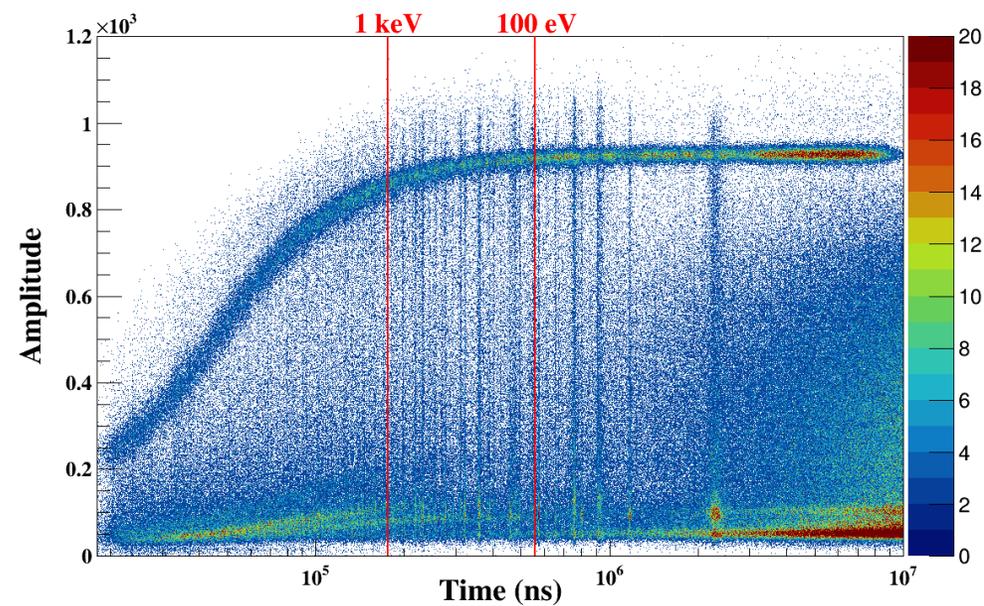
✓ CLLB的能谱响应较为平缓，**不受共振的影响**。



## 测试结果



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



- 以中子/ $\gamma$ 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 $^6\text{Li}$ 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- $\gamma$ 计数比**、**中子- $\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ -flash引起的信号堆积仍然十分严重。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 $^{\text{nat}}\text{Pb}$ 中子全截面基本一致，但是**不受裂变截面的共振影响且探测效率更高**。测试表明**FAST谱仪可在裂变共振中子能区与裂变电离室在全截面测量方面形成很好的补充**，期望后续能进一步提高谱仪测量能区的覆盖能力。



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](mailto:songfeng@usc.edu.cn)



## ➤ 飞行时间定时

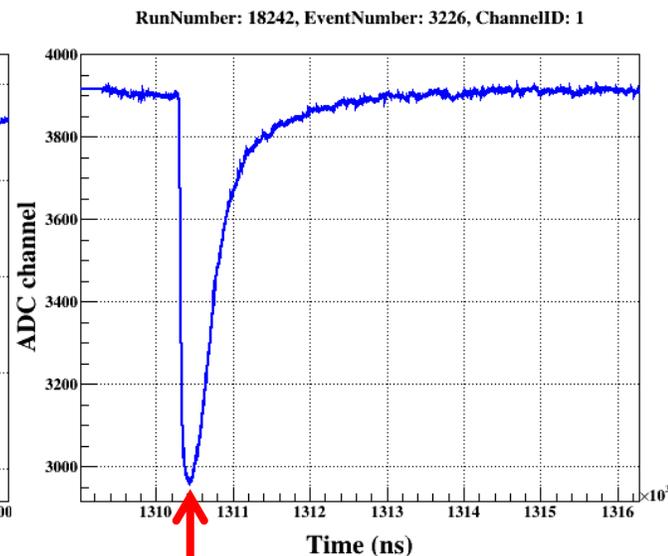
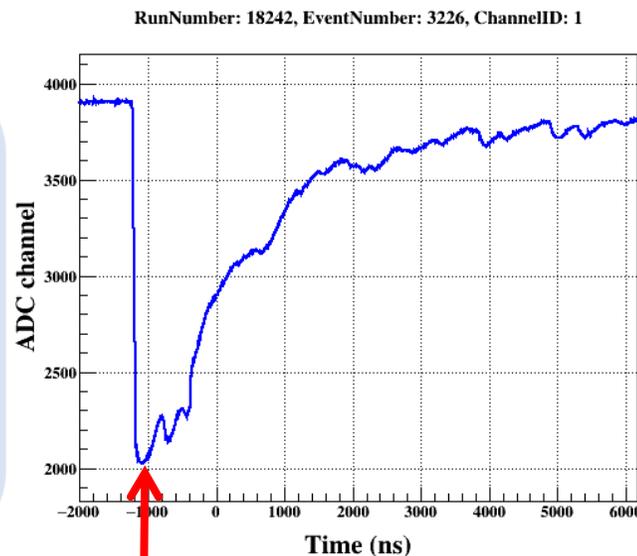
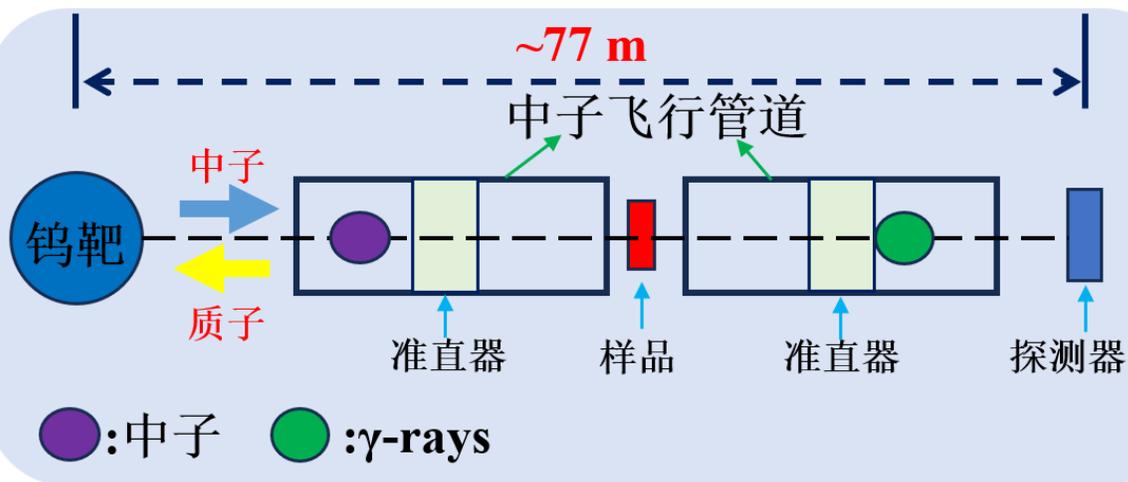
- 当1.6 GeV的高能质子在轰击钨靶后，会产生伴生的瞬发 $\gamma$ 射线，被称为“ $\gamma$ -flash”；
- 可以利用探测到的“ $\gamma$ -flash”来标定中子的飞行时间。

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

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

$T_N$ : 中子被探测到的时间       $T_{N0}$ : 中子的起飞时间

$TOF_{\gamma}$ :  $\gamma$  飞行时间       $T_{\gamma}$ :  $\gamma$  被探测到的时间



$T_{\gamma}$

$\Delta T$

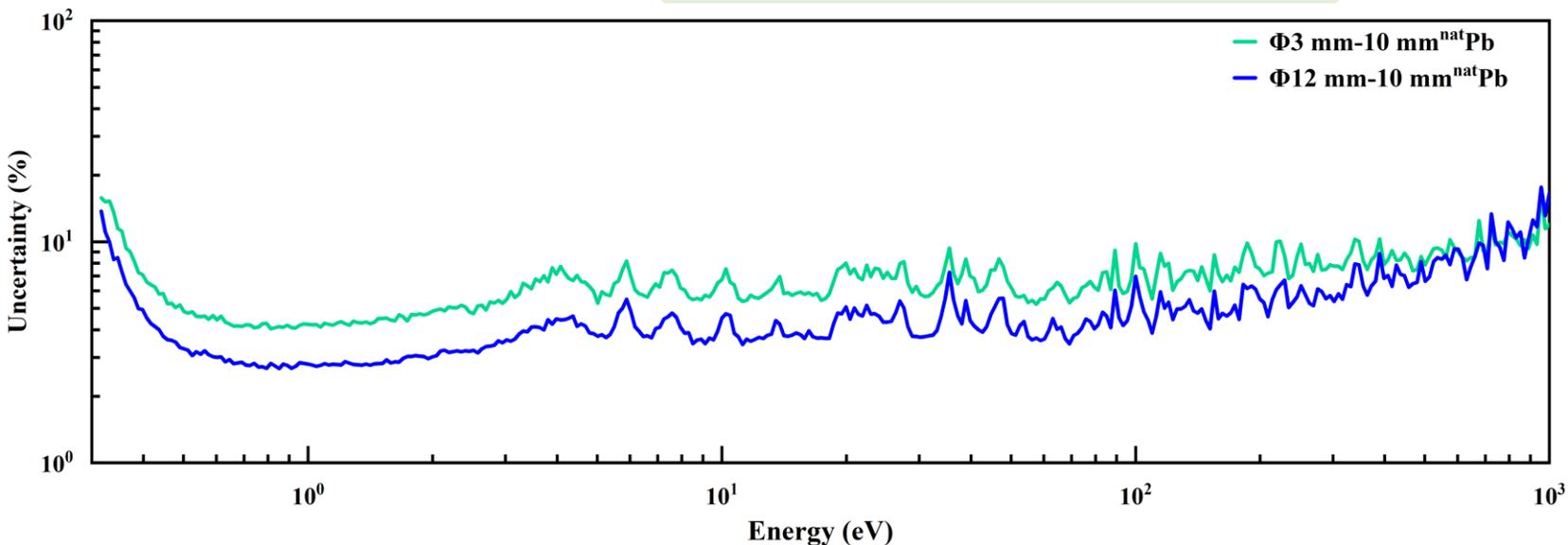
$T_N$

## ➤ 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%