

C_6D_6 探测器系统升级和测量技术优化方案

任 杰

核数据全国重点实验室
中国原子能科学研究院

以身许国
敢为人先 严谨求实



Contents

1. C_6D_6 研究现状
2. 探测器升级方案
3. 测量技术优化方案
4. 数据获取优化方案

□ 中子辐射俘获截面

中子辐射俘获反应是中子消失的主要核反应之一，其截面值 ($\sigma_{n\gamma}$) 在核物理基础研究、核工程设计、核天体物理、核技术应用等领域都有重要的应用价值。

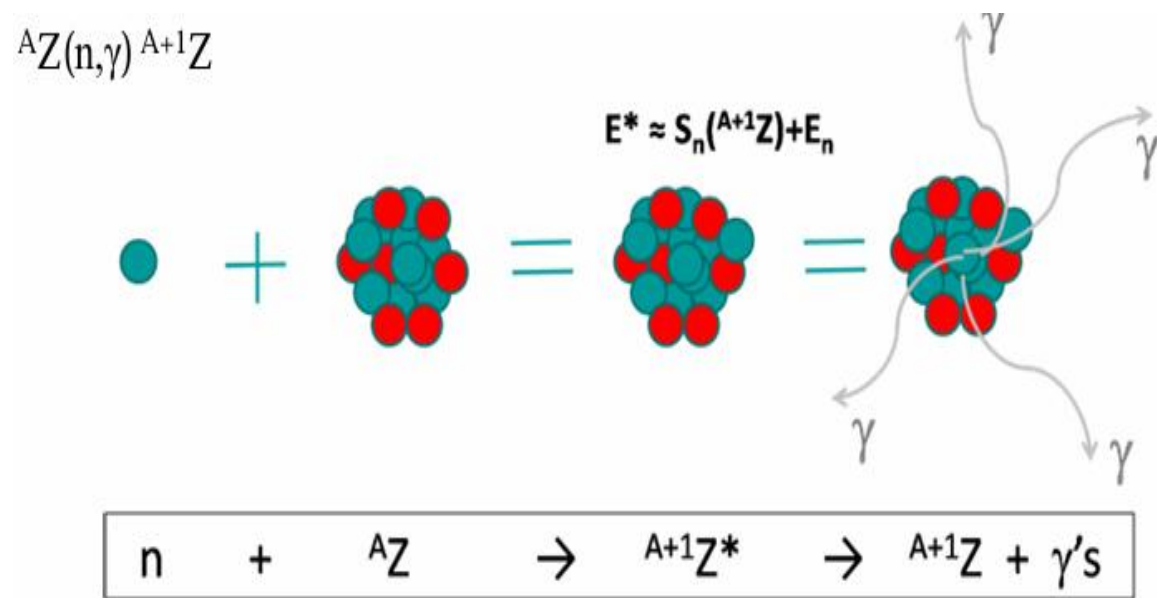


图. 中子辐射俘获反应

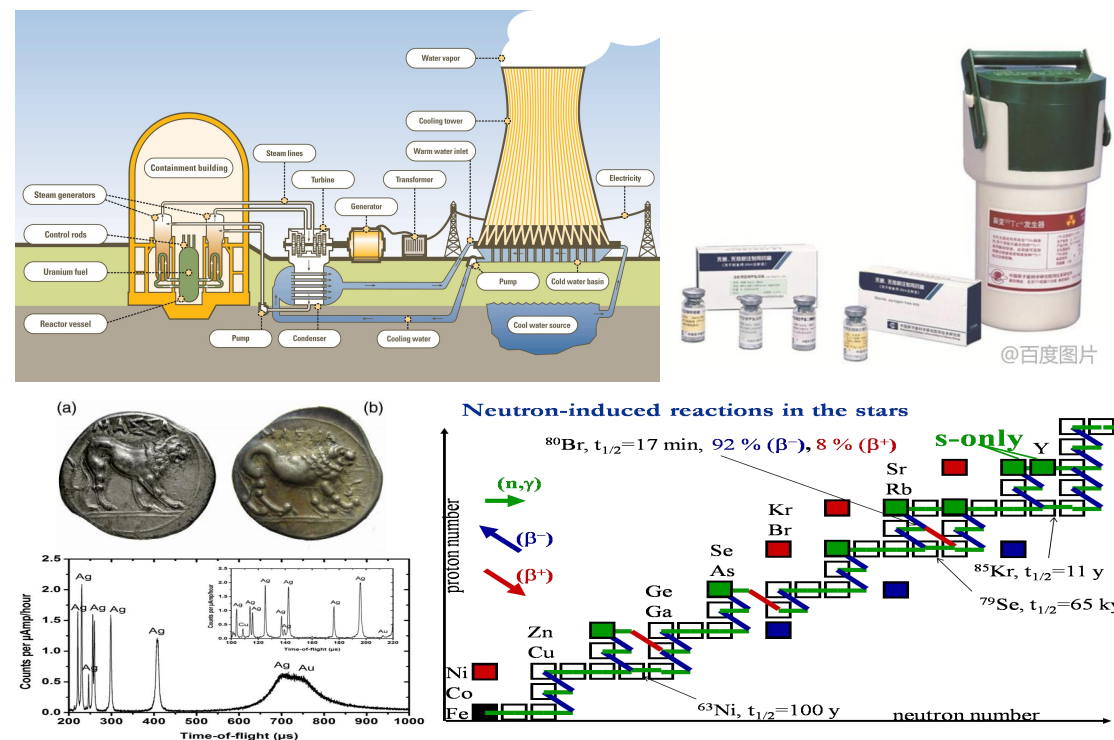


图. 中子辐射俘获截面应用

□ $\sigma_{n\gamma}$ 测量原理

根据实验观测物理量的不同，中子辐射俘获反应截面的测量方法可以分为**活化法**和**瞬发伽马射线法**。

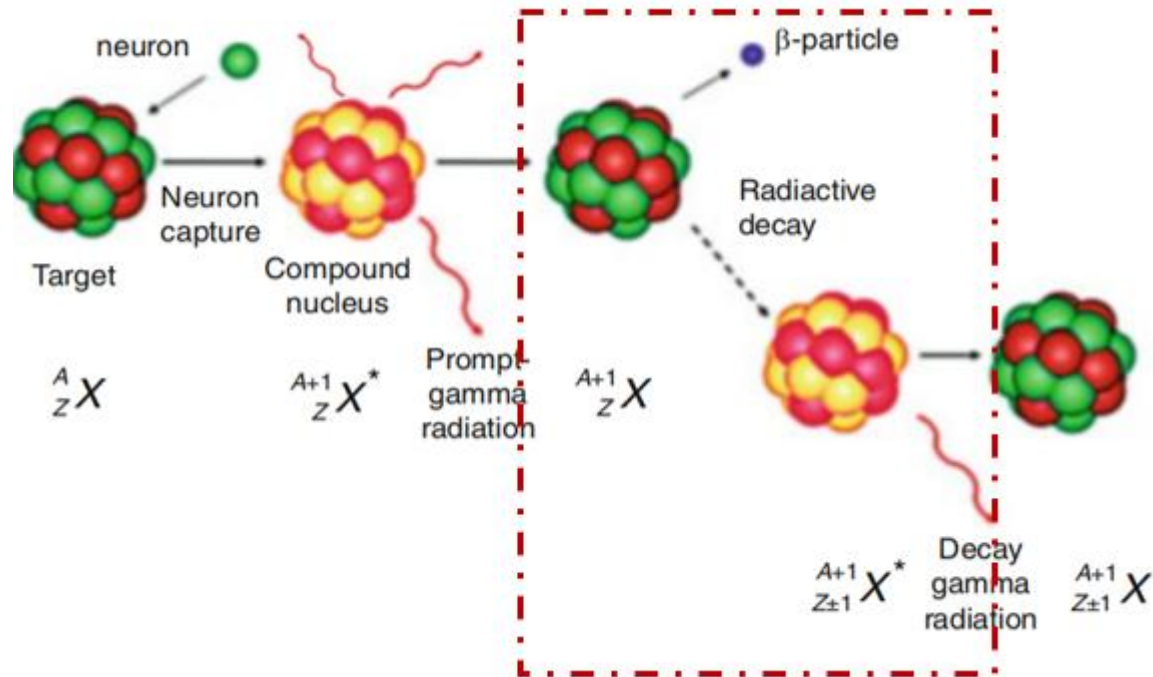


图. 活化法

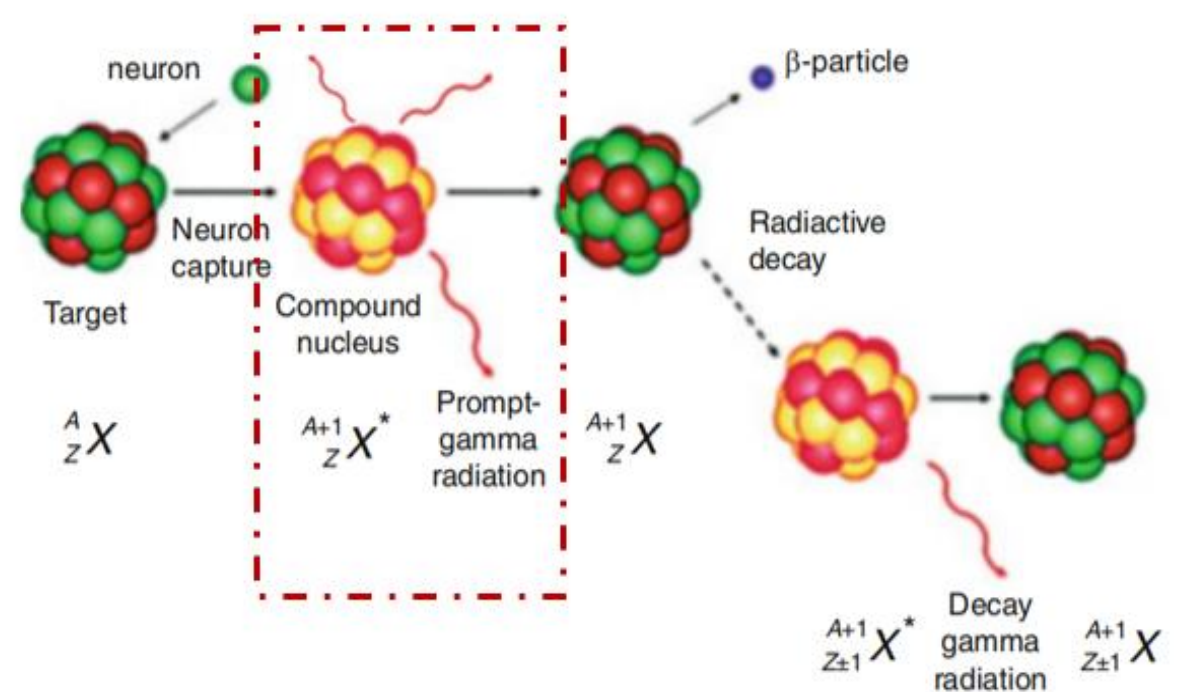


图. 瞬发伽马射线法

□ 基于瞬发伽马射线法的 $\sigma_{n\gamma}$ 测量系统

- ✓ 全吸收型探测器系统 (Total γ -ray absorption) : 4π 闪烁体 (BaF_2 , NaI等) 阵列探测器
- ✓ 总能量型探测器系统 (Total energy detectors) : Moxon-Rae探测器, C_6F_6 、 C_6D_6 探测器
- ✓ 高分辨型探测器系统 (γ -ray spectroscopic) : HPGe探测器阵列

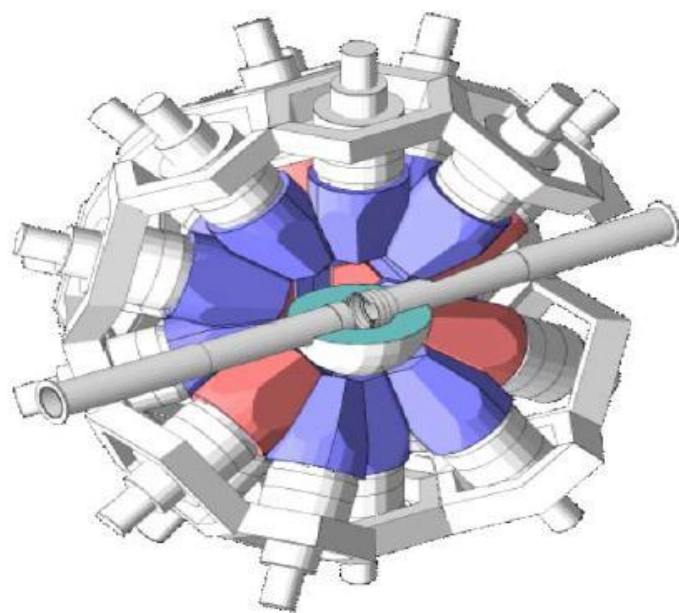


图. 全吸收型探测器系统

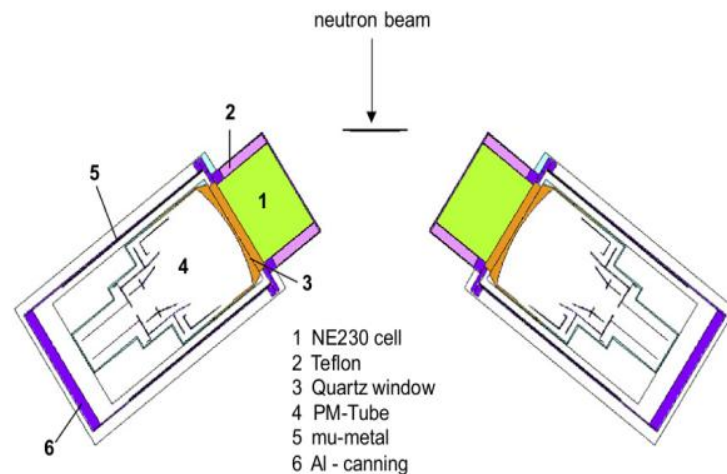


图. 总能量型探测器系统

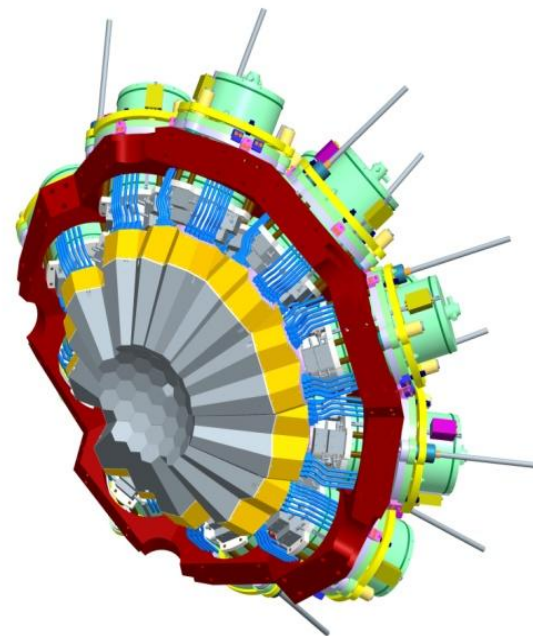
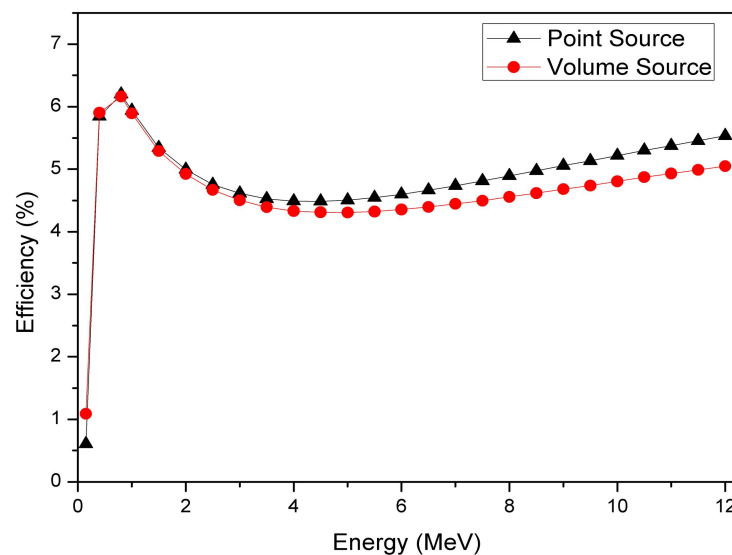
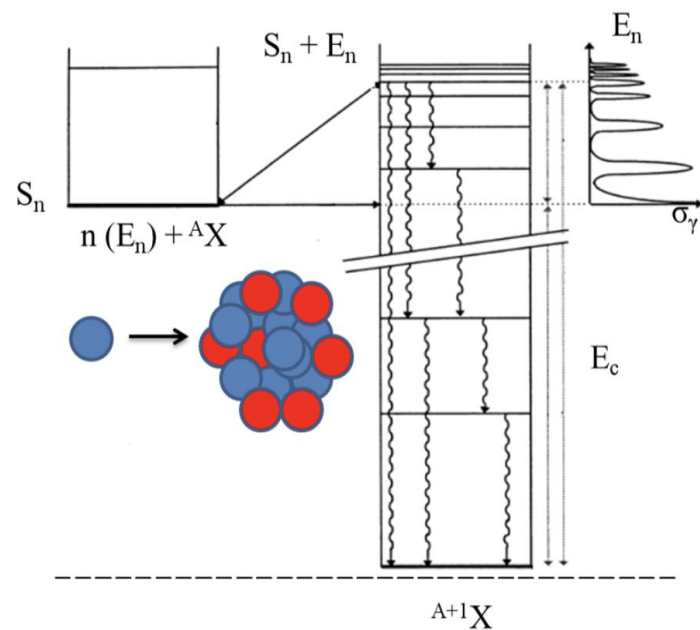


图. 高分辨型探测器系统

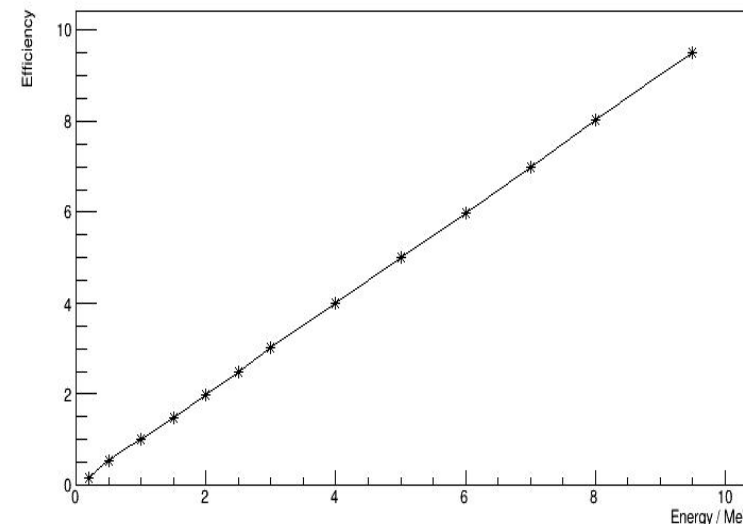
□ 总能量型探测器系统

随机测量复合核退激过程中的**某一条伽马射线**，根据能量沉积谱和**单能伽马探测效率**计算中子辐射俘获反应数。**需要引入脉冲高度权重技术（PHWT）。**

- ✓一次俘获过程，有且仅有一条级联 γ 射线被探测到（低探测效率）
- ✓探测器的探测效率 ε_γ 与 γ 射线能量 E_γ 成正比



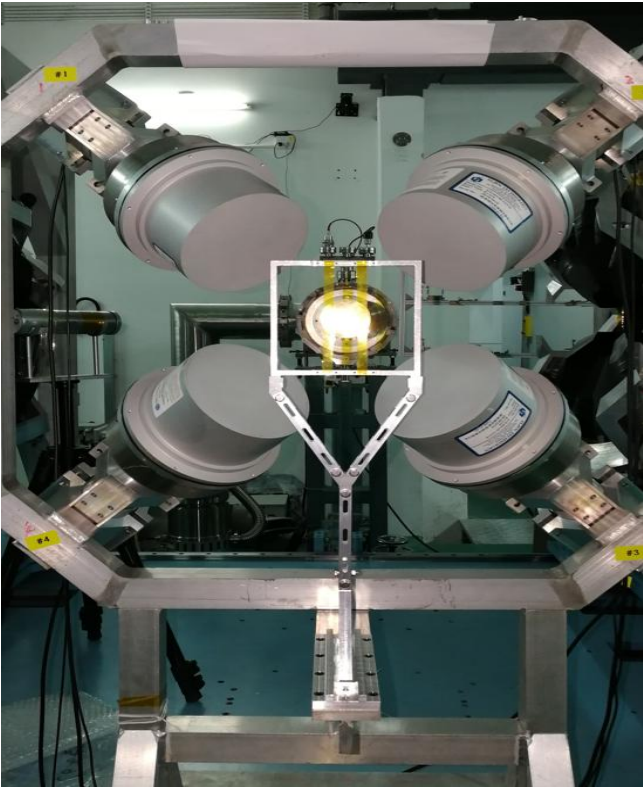
原始的探测效率曲线



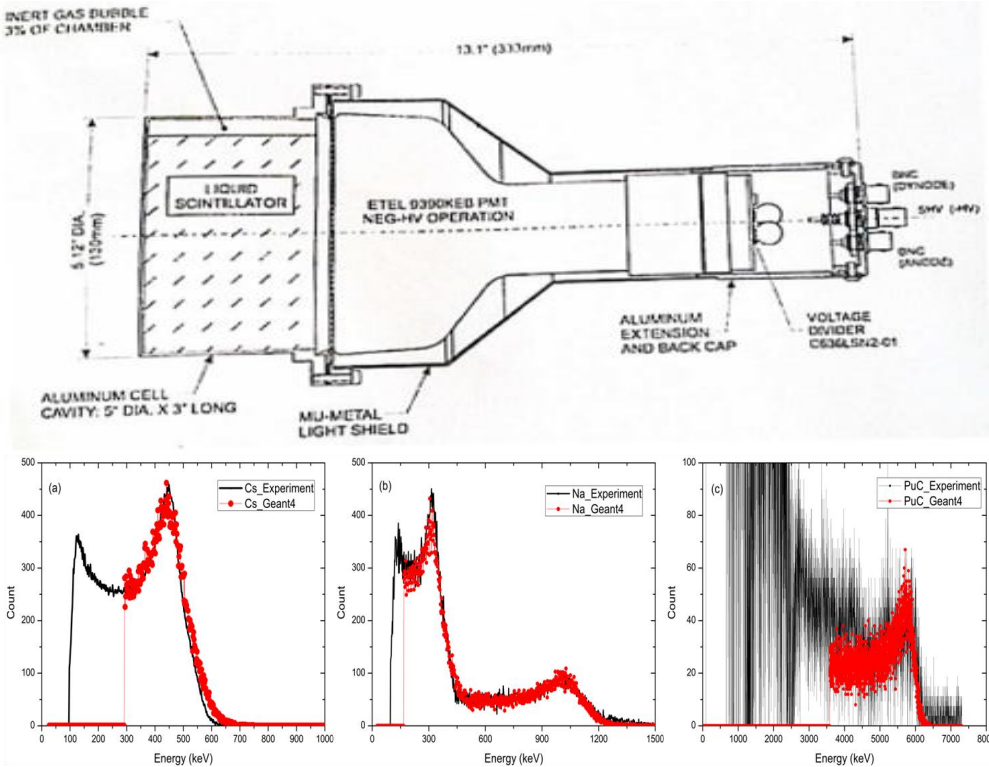
加权的探测效率曲线

Back-n的C₆D₆测量系统

2016年完成性能测试，2018年4月开始用于中子辐射俘获截面测量。由4个商用EJ315闪烁体组成，尺寸Φ5.0x3.0英寸，匹配ET9390KEB光电倍增管。匹配中科大自主研发的全波形数字化采集系统，可开展eV-数百keV能区的中子辐射俘获截面测量。



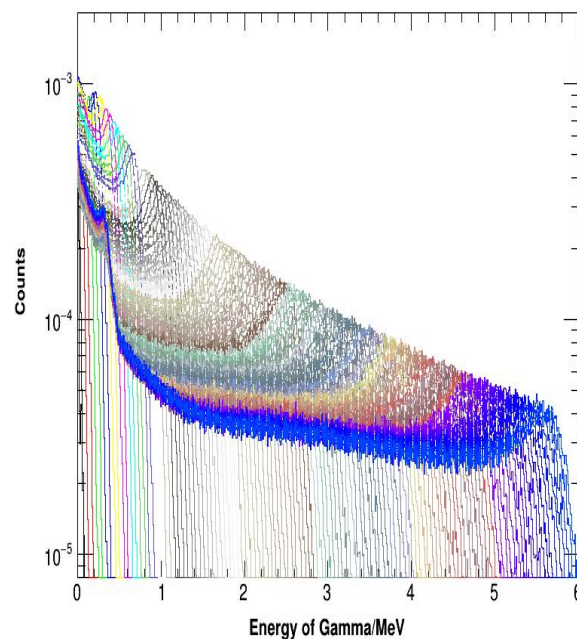
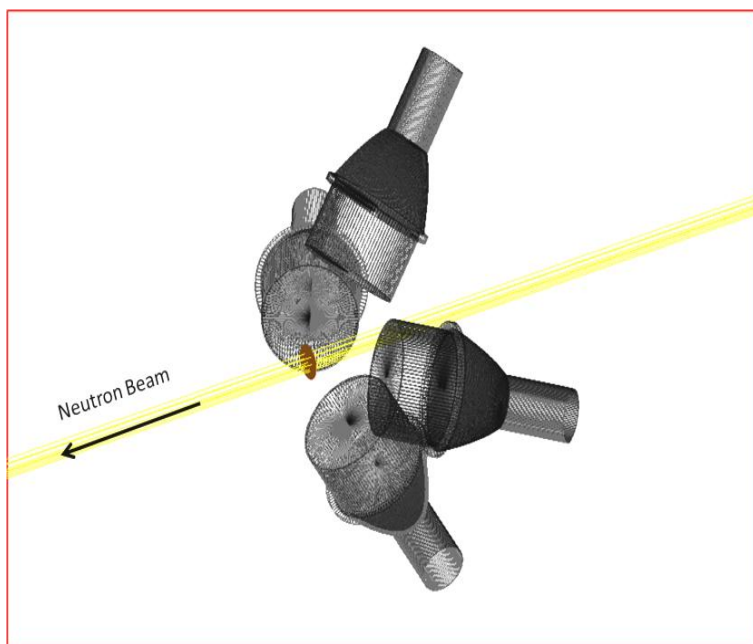
PROPERTIES	EJ-315
Light Output (% Anthracene)	60
Scintillation Efficiency (photons/1 MeV e-)	9,200
Wavelength of Maximum Emission (nm)	425
Decay Time, Short Component (ns)	3.5
Bulk Light Attenuation Length (m)	>3
Specific Gravity	0.954
Refractive Index	1.498
Flash Point (°C)	-11
Boiling Point (°C at 1 atm)	79
D Atoms per cm ³ (×10 ²²)	4.06
H Atoms per cm ³ (×10 ²²)	0.0287
C Atoms per cm ³ (×10 ²²)	4.10
Electrons per cm ³ (×10 ²³)	2.87



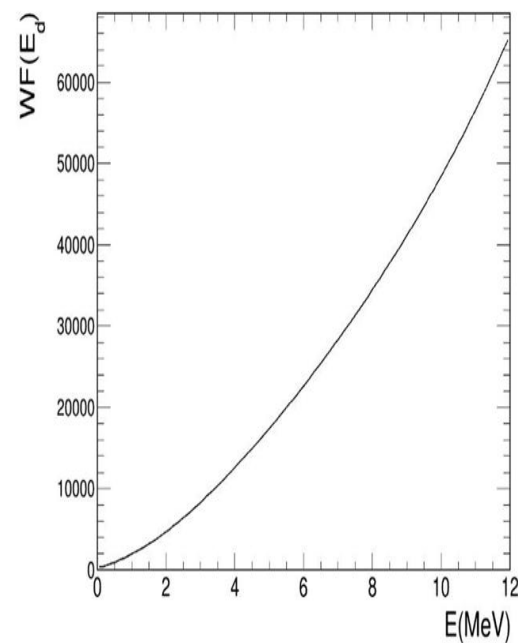
C₆D₆探测器系统及参数

基于C6D6探测器开展中子辐射俘获截面测量和分析的关键步骤包括：权重函数计算、中子飞行距离标定，本底测量与分析、产额归一、数据修正，共振参数和平均截面分析等。

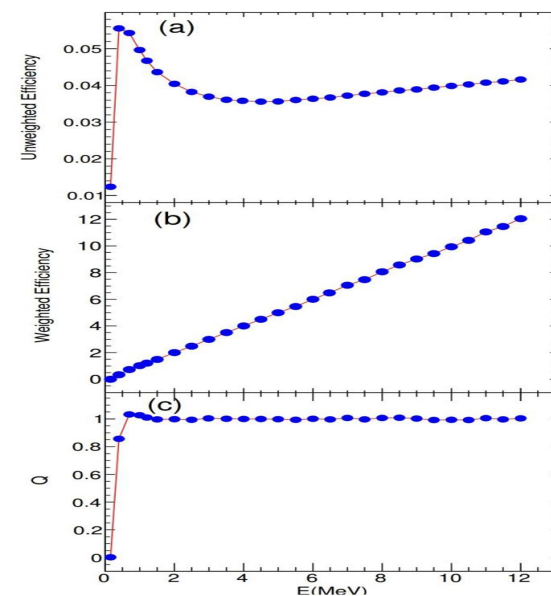
权重函数



模拟的能量沉积谱

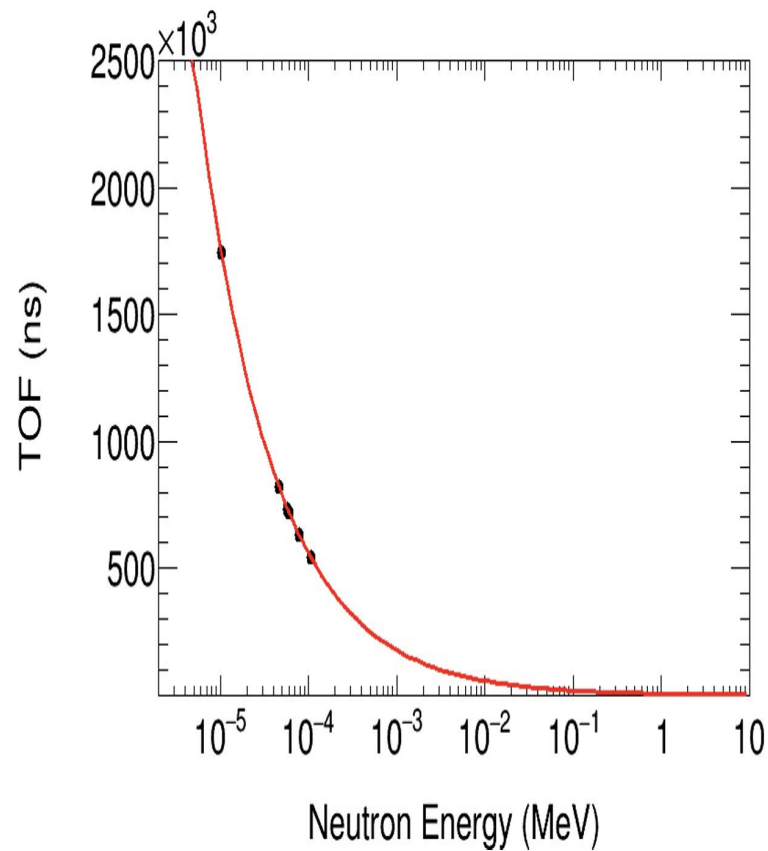
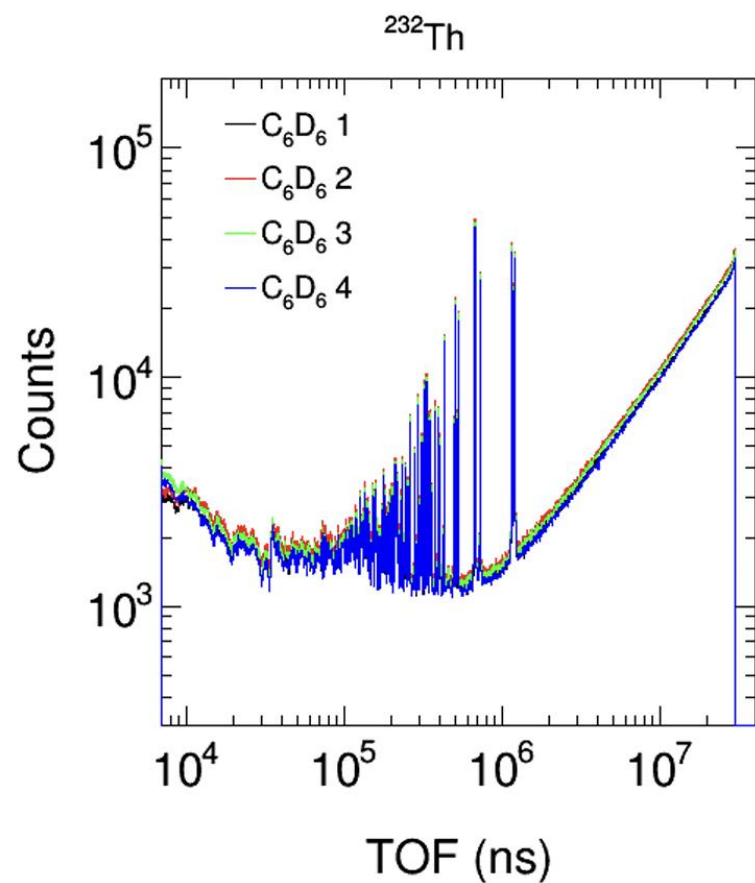


权重函数

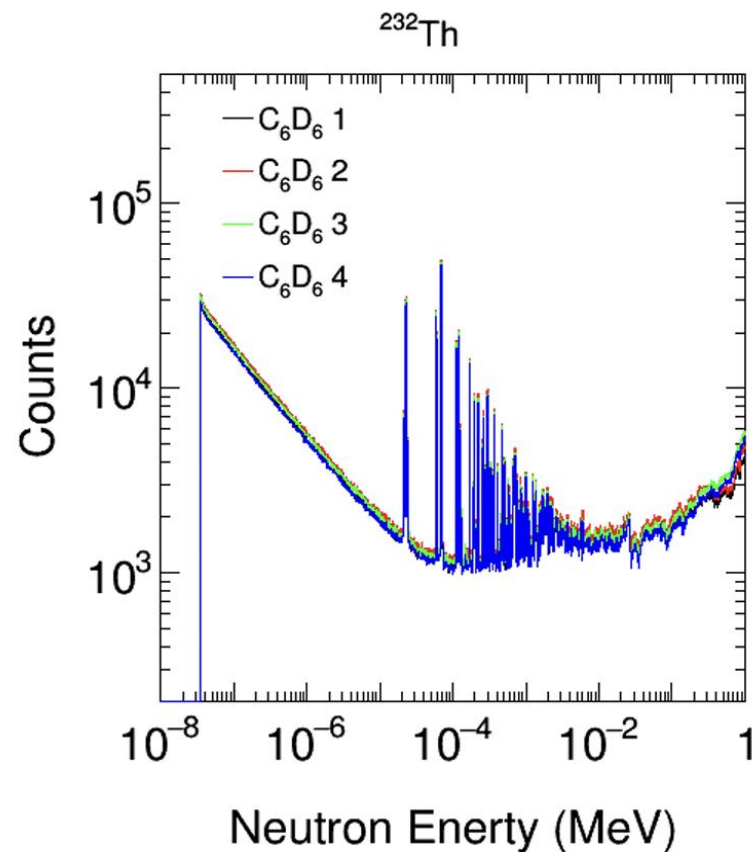


加权探测效率

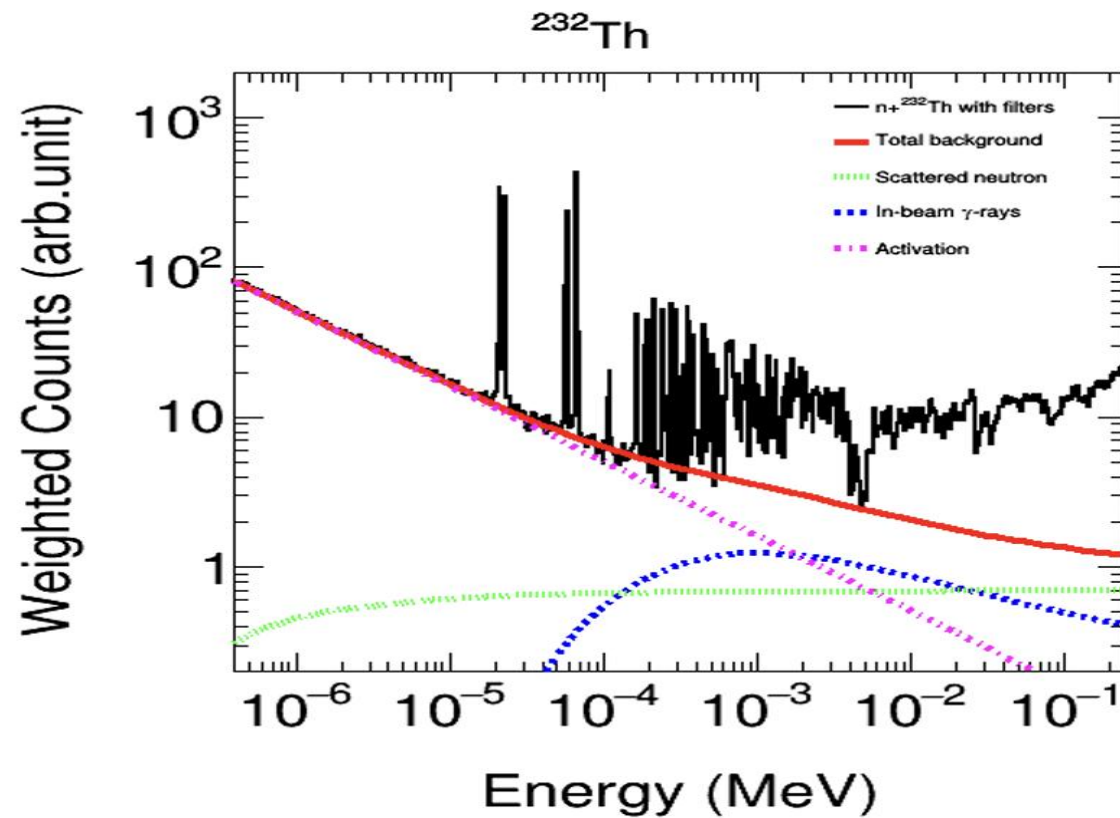
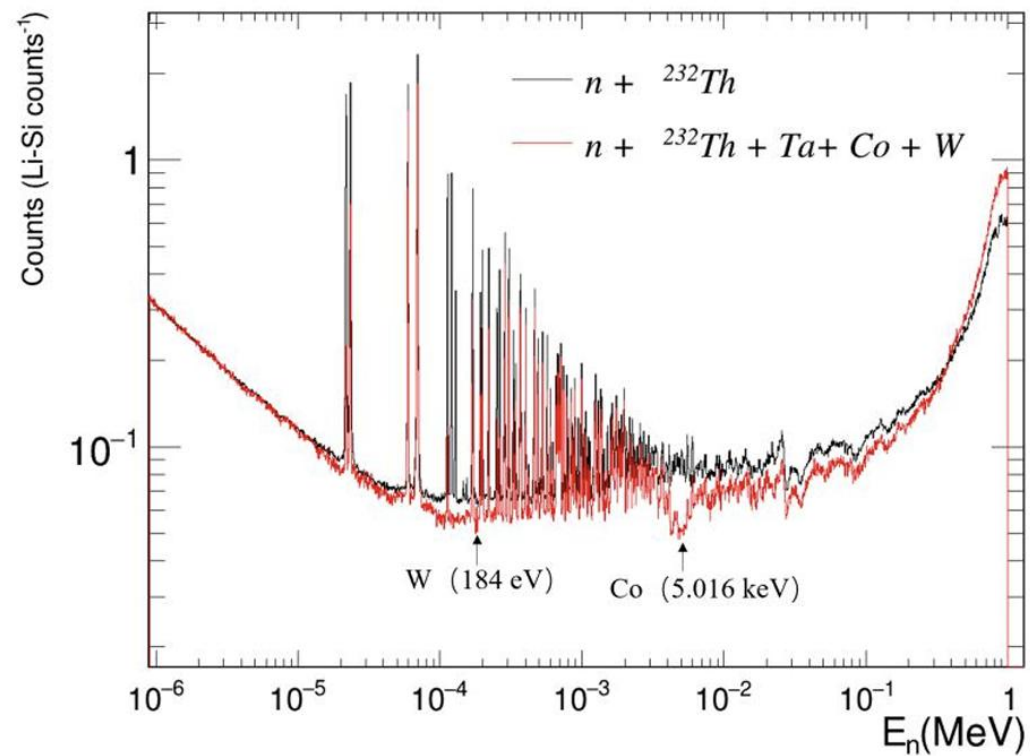
飞行时间标定



中子飞行距离标定

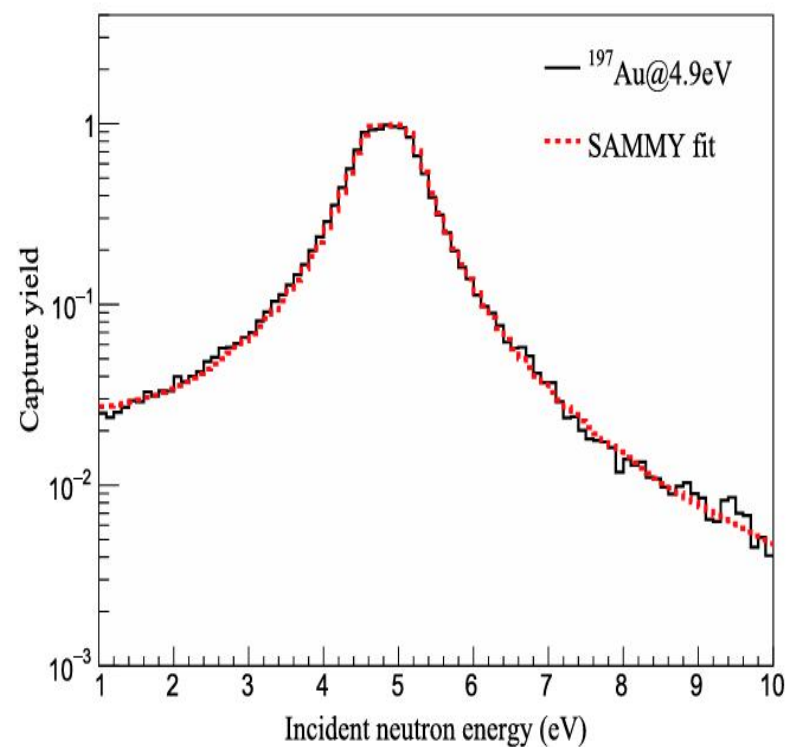


本底测量和分析

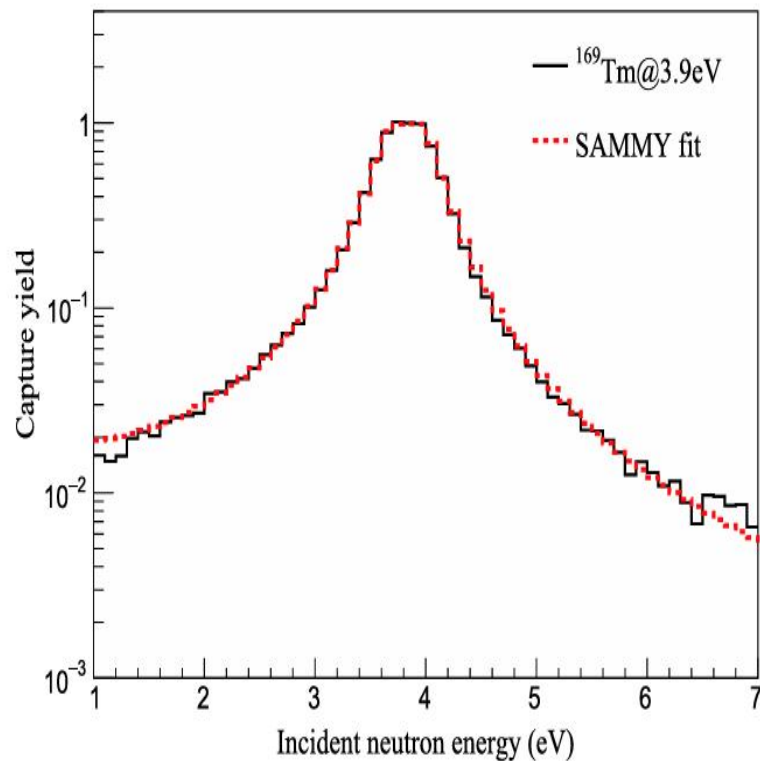


实验本底分析

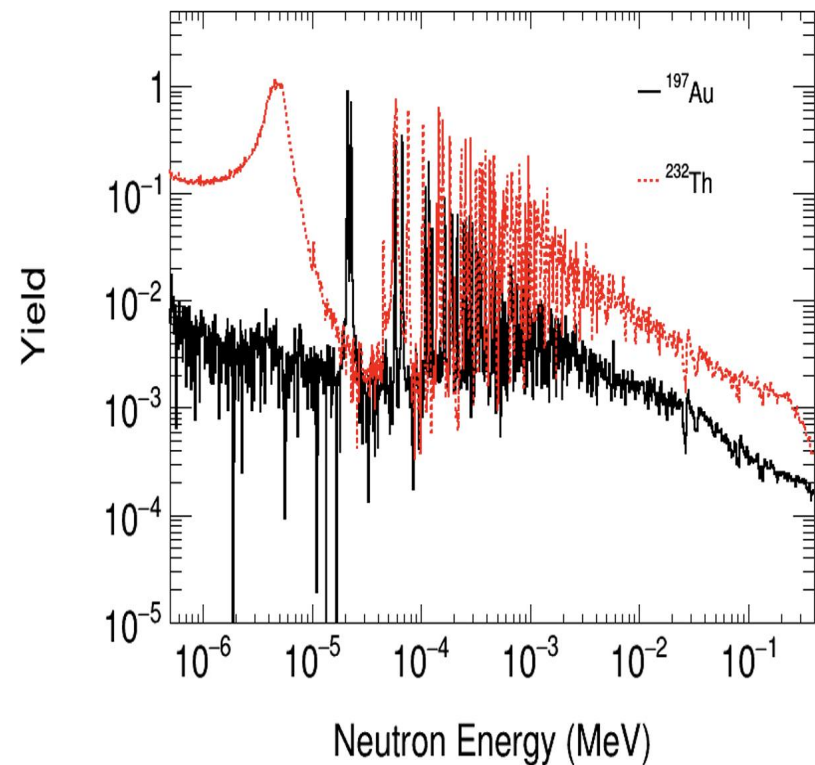
产额归一



^{197}Au 产额归一



^{169}Tm 产额归一



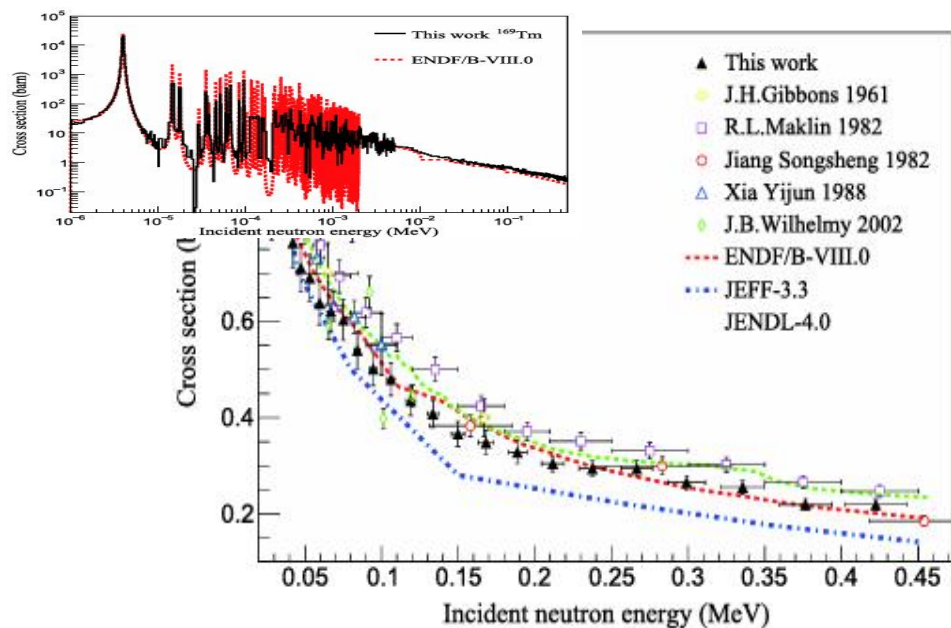
^{232}Th 产额归一

基于该C₆D₆测量系统的中子辐射俘获截面实验测量技术和数据分析方法已基本成熟，原子能院和美国Los Alamos对同一种核素 (¹⁶⁹Tm) 采用不同测量系统得到的σ_{nγ} 值具有较好的一致性。

Chinese Physics C Vol. 46, No. 4 (2022) 044002

Neutron capture cross section of ¹⁶⁹Tm measured at the CSNS Back-n facility in the energy region from 30 to 300 keV*

Jie Ren(任杰)^{1†} Xichao Ruan(阮锡超)^{1‡} Wei Jiang(蒋伟)^{2,3} Jie Bao(鲍杰)¹ Jincheng Wang(王金城)¹
Qiwei Zhang(张奇玮)¹ Guangyuan Luan(栾广源)¹ Hanxiong Huang(黄翰雄)¹ Yangbo Nie(聂阳波)¹
Zhigang Ge(葛智刚)¹ Qi An(安琪)^{4,5} Huaiyong Bai(白怀勇)⁶ Yu Bao(鲍煜)^{2,3} Ping Cao(曹平)^{4,5}
Haolei Chen(陈昊磊)^{4,5} Qiping Chen(陈琪萍)⁷ Yonghao Chen(陈永浩)^{2,3} Yukai Chen(陈裕凯)^{2,3}

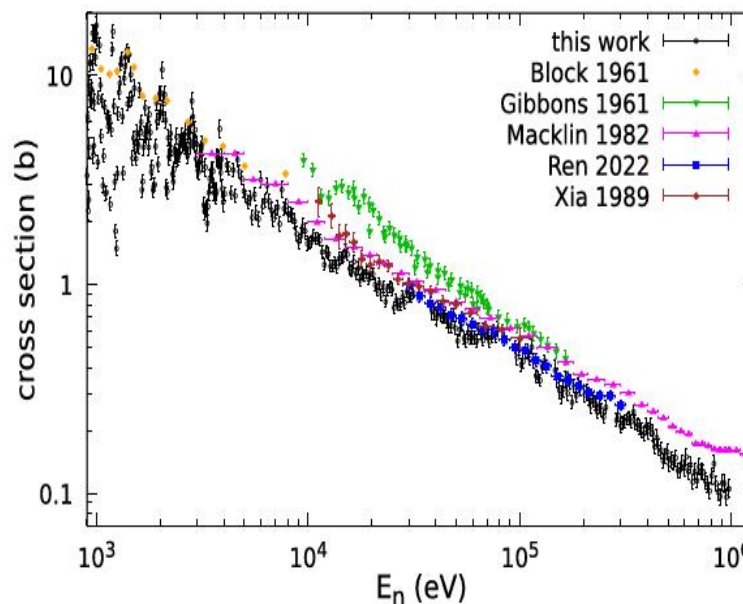


C₆D₆测量结果 (2019)

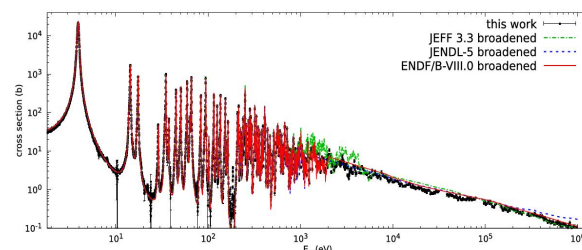
PHYSICAL REVIEW C **112**, 014612 (2025)

¹⁶⁹Tm(*n*, γ) cross section and statistical decay properties from measurements at the DANCE facility

I. Knapová^{1,*} K. Horčíčková^{2,†} A. Couture¹ C. Fry¹ F. Gunsing³ T. Kawano¹ K. J. Kelly¹ M. Krtička²
E. Leal Cidoncha¹ C. J. Prokop¹ R. Reifarh¹ G. Rusev¹ J. L. Ullmann¹ and S. Valenta²
¹Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA
²Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague 180 00, Czech Republic
³CEA Irfu, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France



DANCE测量结果 (2025)



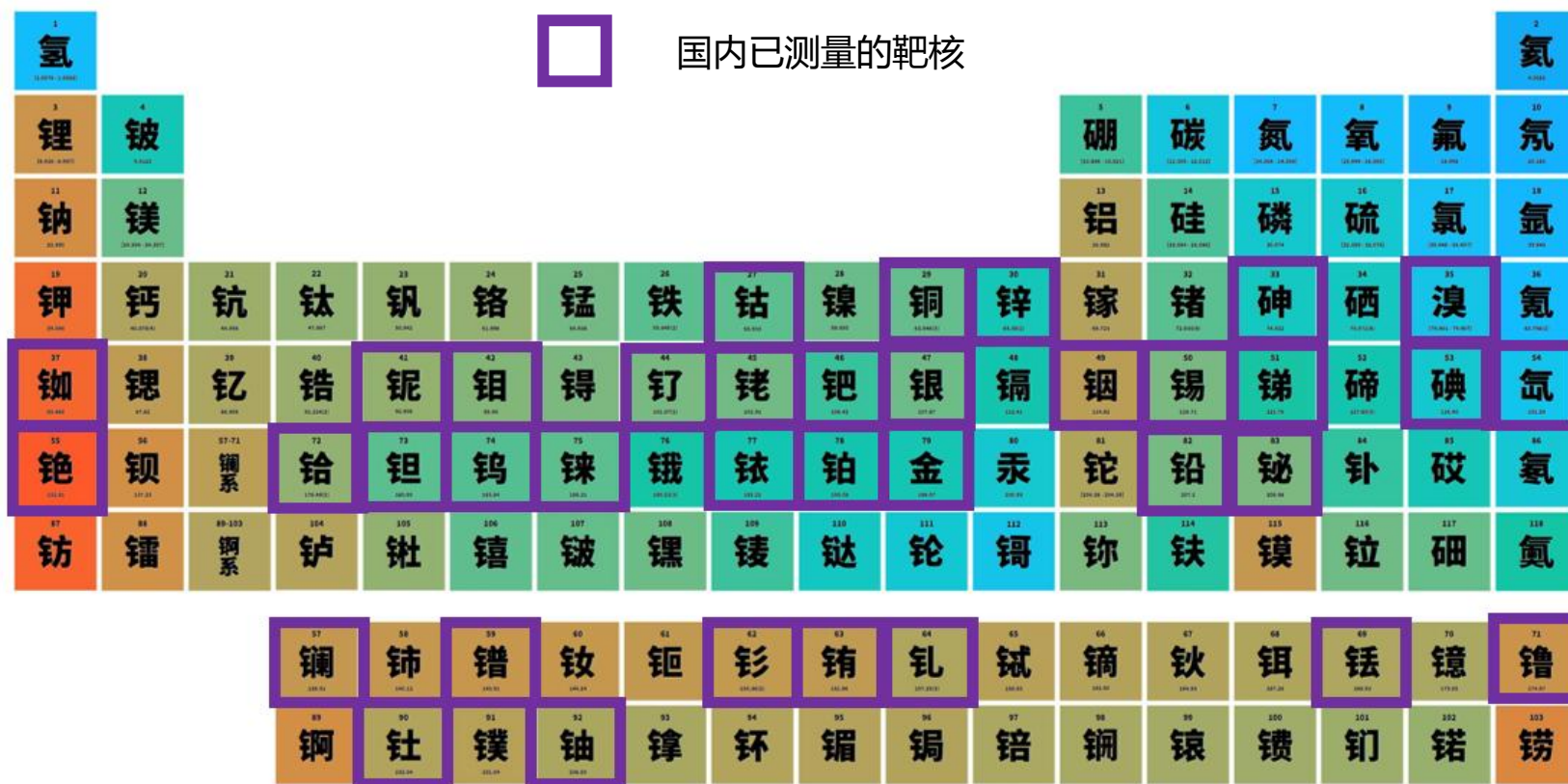
VII. CONCLUSIONS

The ¹⁶⁹Tm(*n*, γ) reaction was measured with DANCE at LANSCE using the time-of-flight technique. The neutron capture cross section was determined for *E_n* = 1.8 eV–0.97 MeV. Cross section values in the URR are generally smaller than the latest evaluations [6–8]. In the RRR, we report eight new resonances that are not included in any of the evaluations. We confirmed the results of the latest measurement by Ren *et al.* [9] in the URR and extended them to a larger energy range.

2018年至今，C6D6探测器系统已支持国内十余家科研院所和高校的研究团队开展了数十种核素的中子辐射俘获截面测量研究，产出了丰硕的科研成果。

但随着实验条件的变化，C₆D₆探测器系统到了做出升级和改进的时候。

原子能院；
 中科院高等研究院；
 中科院应物所；
 中科院高能所；
 中科院近物所；
 中山大学；
 南华大学；
 成都理工大学；
 南方科技大学；
 内蒙古民族大学；





Contents

1. C_6D_6 系统研究现状

2. 探测器升级方案

3. 测量技术优化方案

4. 数据获取优化方案

□ 升级探测器的动机

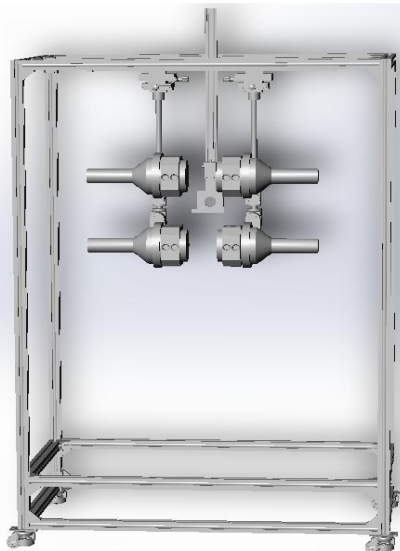
✓ 散裂二期升级

CSNS束流功率逐年提升，目前是185kW，二期建成后升级到500kW。功率提升后，现有 C_6D_6 探测器将面临计数率过高和信号堆积的问题。

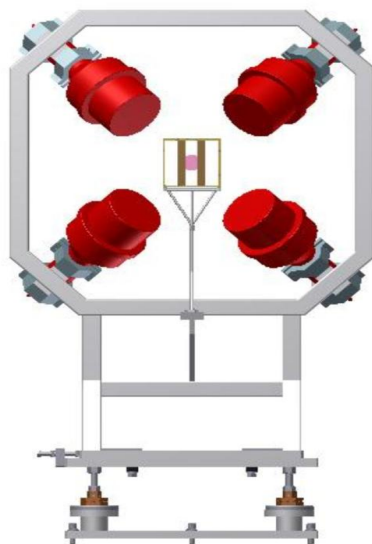
✓ C_6D_6 探测器老化

现有 C_6D_6 探测器已使用10年，闪烁体和光电倍增管都有老化的迹象。信号幅度衰减、信号拖尾和震荡，将影响PHWT方法和中子飞行时间测量的准确度。

2018



2020



2027



升级方案

计划新建一个由6~8个Φ3.0x3.0英寸的C₆D₆探测器组成的测量系统，同样使用EJ315闪烁体，匹配上升时间更快的光电倍增管。

仍采用将探测器置于样品的束流上游，根据计数率和伽马暴的影响调节探测器与样品的距离。

优势：单个探测器体积小，信号堆积减少，灵敏区可以更靠近样品，提高信噪比。

可能存在的问题：多个探测器之间的串扰（cross talk），需要通过模拟和测试优化结构设计。



	unit	min	typ	max
photocathode: bialkali				
active diameter	mm		67	
quantum efficiency at peak	%		30	
luminous sensitivity	μA/lm		75	
with CB filter		8	12	
with CR filter			2	
dynodes: 12LFBcCu				
anode sensitivity in divider B:				
nominal anode sensitivity	A/lm		500	
max. rated anode sensitivity	A/lm		2000	
overall V for nominal A/lm	V		2000	2600
overall V for max. rated A/lm	V		2250	
gain at nominal A/lm	x 10 ⁶		7	
dark current at 20 °C:				
dc at nominal A/lm	nA		10	50
dc at max. rated A/lm	nA		40	
dark count	s ⁻¹		500	
pulsed linearity (-5% deviation):				
divider A	mA		50	
divider B	mA		150	
pulse height resolution:				
single electron peak to valley	ratio		2	
rate effect (I_s for Δg/g=1%):				
	μA		1	
magnetic field sensitivity:				
the field for which the output decreases by 50 %				
most sensitive direction	T x 10 ⁻⁴			
temperature coefficient:	% °C ⁻¹		± 0.5	
timing:				
single electron rise time	ns		2.1	
single electron fwhm	ns		3.2	
single electron jitter (fwhm)	ns		2.2	
transit time	ns		42	
weight:	g		260	
maximum ratings:				
anode current	μA			100
cathode current	nA			200
gain	x 10 ⁶		27	
sensitivity	A/lm		2000	
temperature	°C	-30	60	
V (k-a) ⁽¹⁾	V		2900	
V (k-d1)	V		600	
V (d-d) ⁽²⁾	V		450	
ambient pressure (absolute)	kPa		202	

拟使用的C₆D₆探测器和PMT参数



Contents

1. C_6D_6 系统研究现状
2. 探测器升级方案
- 3. 测量技术优化方案**
4. 数据获取优化方案

□ 优化测量技术的动机

✓ CSNS改变状态带来的中子能谱变化

2018年至今，CSNS除了不断提升功率外，还改变了质子束斑、束窗、冷却水厚度、散裂靶结构和材料，等。每一项改变都直接影响Back-n的中子能谱。

中子能谱是计算中子辐射俘获截面的必要参数。

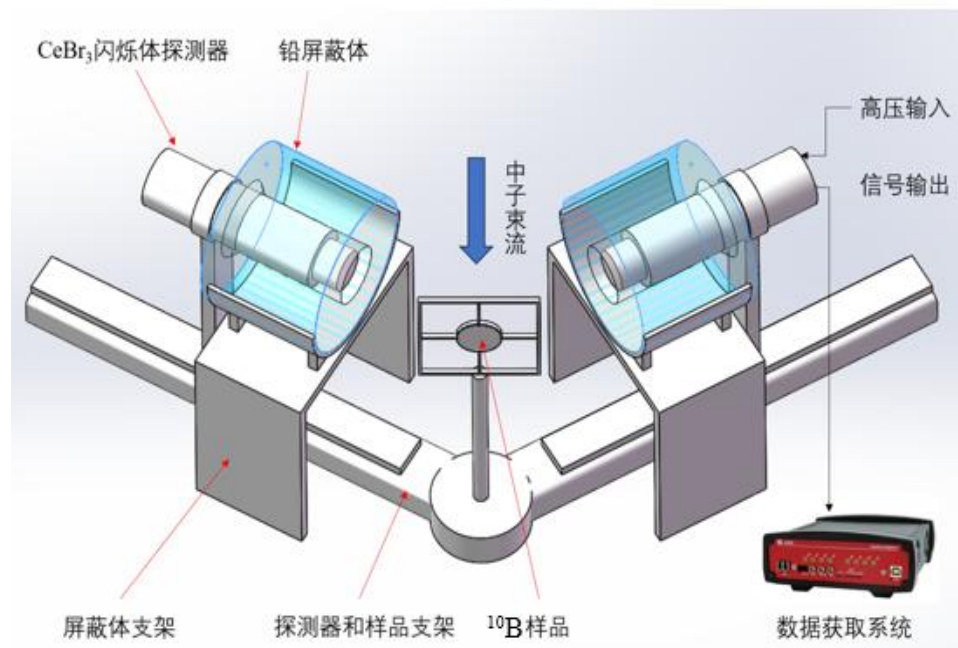
但是，中子能谱具有滞后性，当前可使用的能谱往往是半年甚至一年前的测量结果。当CSNS状态改变时， C_6D_6 实验的数据分析就面临无能谱可用的情况。

□ 优化方案

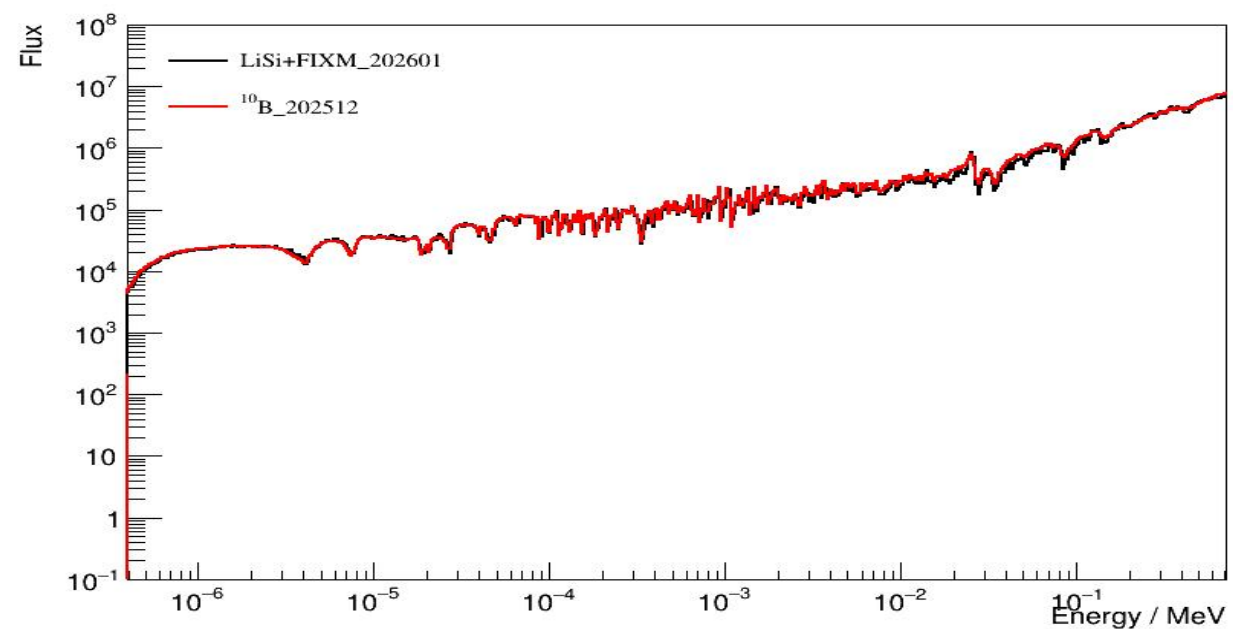
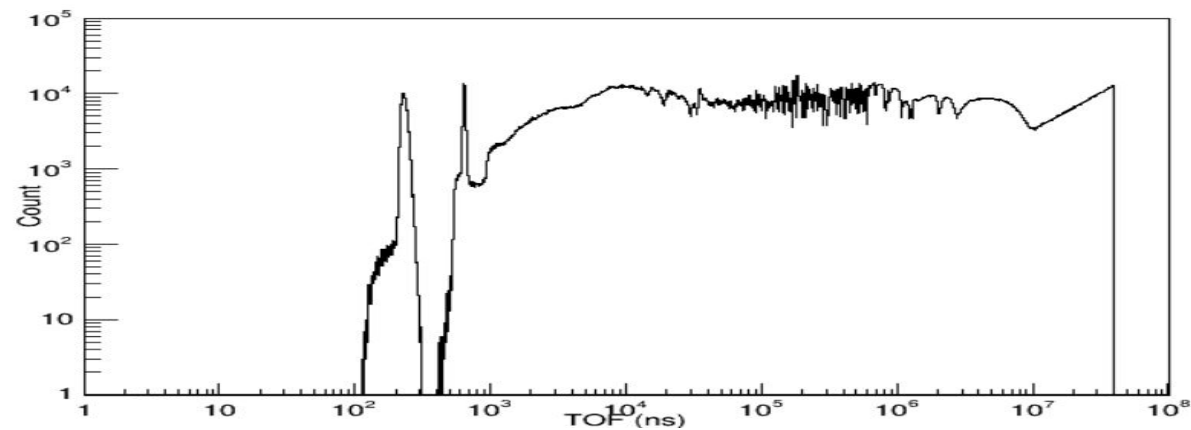
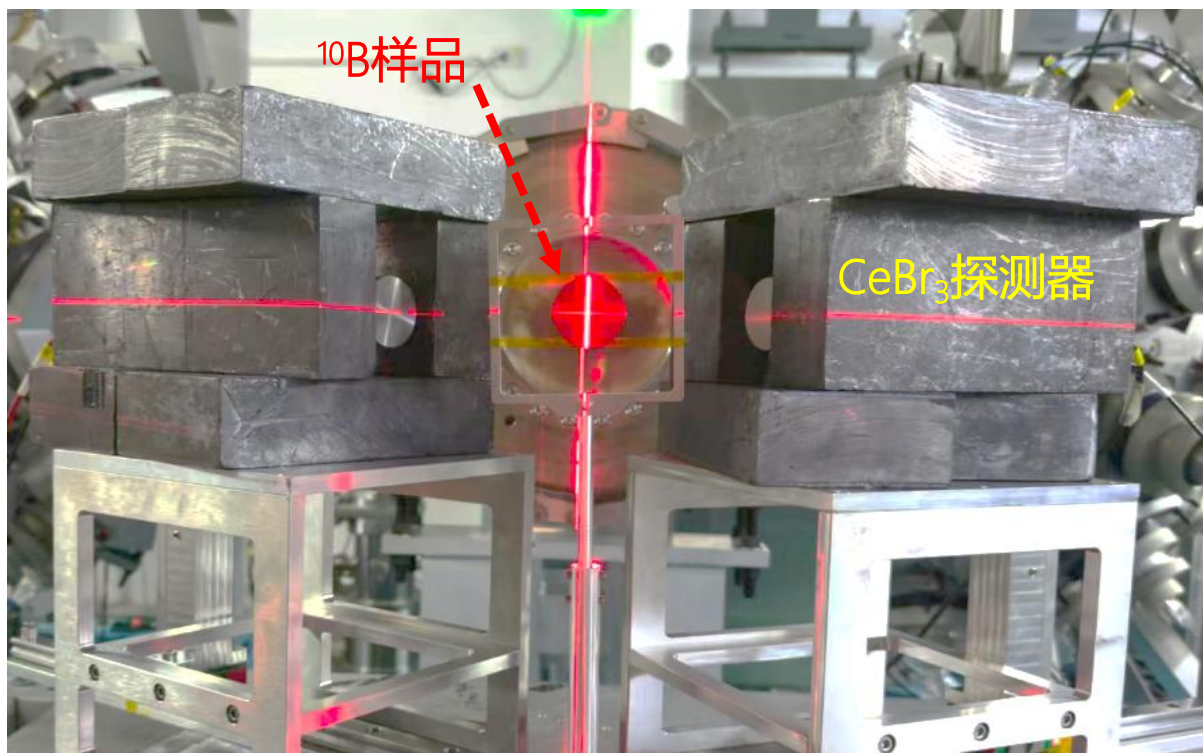
✓ 在每次 C_6D_6 实验前开展样品位置的能谱测量

原子能院在2025年12月测试了基于 $^{10}B(n, \alpha_1)^7Li^*$ 反应的中子能谱和全截面测量系统。该系统具有以下显著优势：

- $^{10}B(n, \alpha_1)^7Li^*$ 的反应截面在1MeV以下是标准截面；
- 该系统在1MeV以下探测效率曲线平滑；
- 探测效率较高，约6小时可完成EH2的60-30-30孔径能谱测量，100bpd条件下统计不确定度**小于1.5%**；
- 系统构造简单，信噪比较高，配合数字化仪在线分析，数据量较小。



测试结果表明： ^{10}B 测量结果与LiSi+FIXM测量结果在0.4 eV-700 keV能区具有较好的一致性 (EH2@60-30-30)。





Contents

1. C_6D_6 系统研究现状
2. 探测器升级方案
3. 测量技术优化方案
- 4. 数据获取优化方案**

□ 优化数据获取系统的动机

✓ 实验测量和数据分析相对成熟

C_6D_6 探测器作为Back-n使用率最高的探测器系统之一，其测量技术和数据分析方法已基本成型，保留全波形的意义不大。

✓ 第二代共用电子学系统基本完成

第二代共用电子学系统具备信号在线分析功能，可实现在线PH、PSD、CFD、TOF等参数分析。

✓ 节省成本

目前 C_6D_6 一次实验的数据量在1.5T左右，数据传输时间长，数据存储成本高。

□ 优化方案

- ✓ 完成一次对比实验：将 C_6D_6 探测器信号扇出2路，一路采集波形，一路在线分析，对比最终测量结果。
- ✓ 若二者结果一致，则后续以在线分析方式为主。
- ✓ 除第二代共用电子学外，也可尝试CAEN、XIA等常用数据采集软硬件优化 C_6D_6 探测器的数据获取方案。



谢 谢!
请各位专家批评指正!

以身许国
敢为人先 严谨求实