

基于CSNS的^{nat}Gd俘获截面实验测量研究 及上海应物所小白光简介

余呈刚、冯澳，黄勃松，胡继峰

中国科学院上海应用物理研究所

2025.07.24

目录



实验目的



实验测量



实验数据分析



应物所小白光简介

Gd-155、Gd-157中子俘获截面研究目的

钷的用途

- 反应堆控制棒重要毒物材料
- 热中子屏蔽材（结构功能一体化材料）
- 探测器转换材料

中子俘获截面数据现状

- 实验数据：热能点差异大，1 eV~1000 eV实验数据少，尤其是可分辨共振区
- 评价数据：快区差异较大

预期目标：解决1~1000eV ¹⁵⁵Gd, ¹⁵⁷Gd 实验数据缺乏

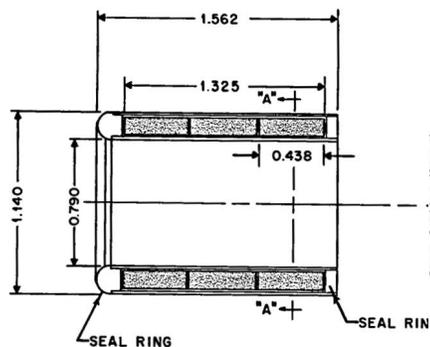
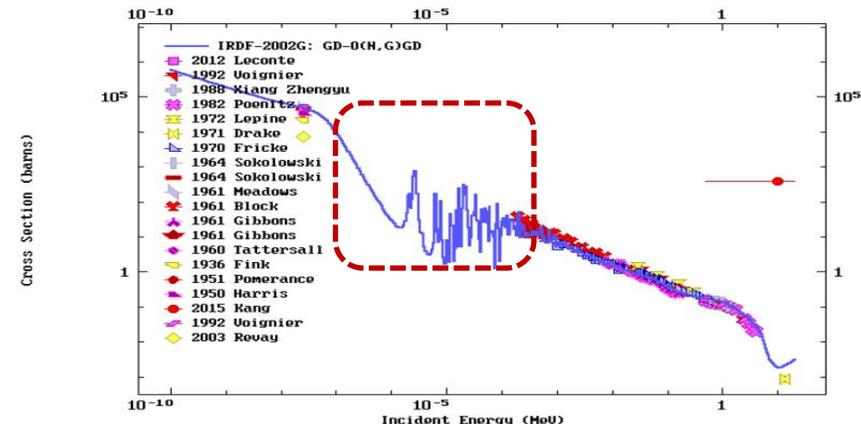
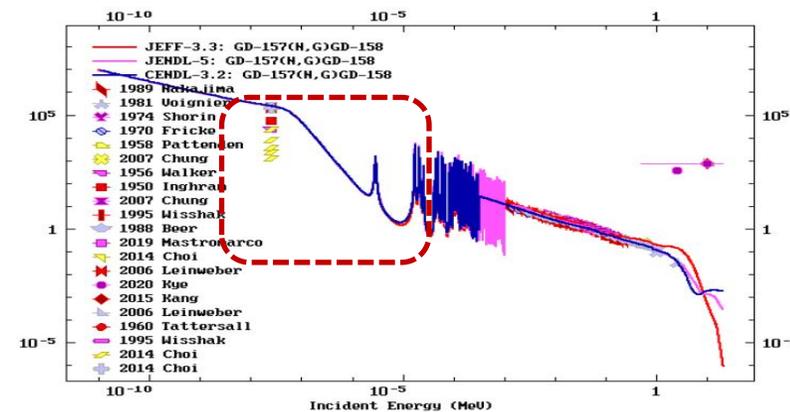


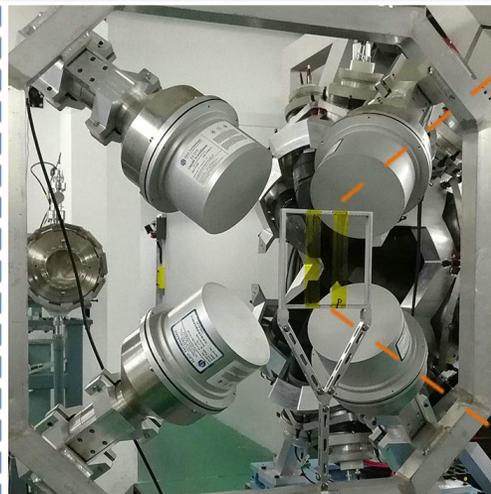
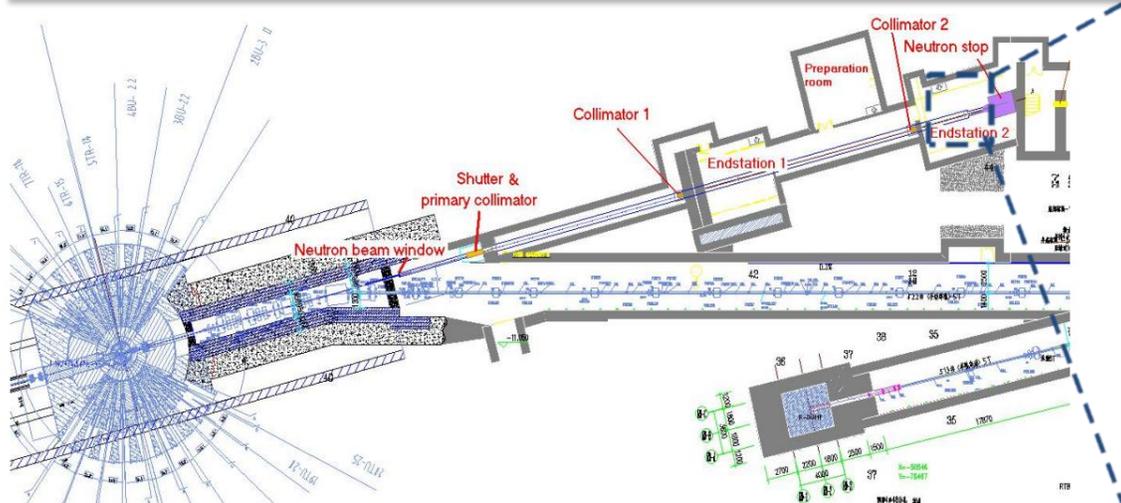
Fig. 5.13. Control Rod Pois



¹⁵⁷Gd+¹⁵⁵Gd中子吸收率贡献 ~ 99.9%

	¹⁶⁰ Gd	¹⁵⁸ Gd	¹⁵⁶ Gd	¹⁵⁴ Gd	¹⁵⁵ Gd	¹⁵⁷ Gd	¹⁵² Gd
丰度	21.86	24.84	20.47	2.18	14.80	15.65	0.2
热中子截面	0.82 ± 0.05	2.30 ± 0.10	1.80 ± 0.08	85 ± 4	60,900	254,000	735 ± 30

CSNS白光中子平台开展nat-Gd, 157-Gd实验



实验条件及探测方法

- ❑ 飞行时间谱仪
- ❑ C6D6探测器阵列
- ❑ 全波形数据采集方式
- ❑ 基于脉冲高度权重技术(PHWT)的总能量型探测原理

测量环境

- 信号 → ❑ 束流中子在厅2被Gd俘获产生 γ 由C₆D₆探测
- ❑ 中子经样品散射后被探测器周围材料俘获产生 γ
- 本底 → ❑ 束流中夹杂的 γ 经样品散射击中探测器
- ❑ 样品活化及环境物质活化放出 γ

实验测量方案 (10 d)

序号	样品	尺寸(Φ *L) [mm]	测量目的	测量时长[h]	
				无吸收片	有吸收片
1	^{157}Gd	40x 0.00475	俘获截面测量	23	21
2	natGd	40x0.45	俘获截面测量	16	11
3	natGd	40x0.0988	俘获截面测量	18	7
4	natGd	40x 0.00498	俘获截面测量	23	8
5	^{197}Au	40x0.20	数据分析 流程检验	10	4
6	natPb	40x1.95	束内 γ 本底扣除	3	5
7	empty	-	束流本底扣除	5	7
8	natC	40x1.00	散射中子 本底扣除	10	-

□ 宽能谱 → **中子能量0.3eV-1MeV**

□ 100kW中子通量 $7.81 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
→ **测量时长使统计不确定度~1%**

□ 飞行距离~76.5m

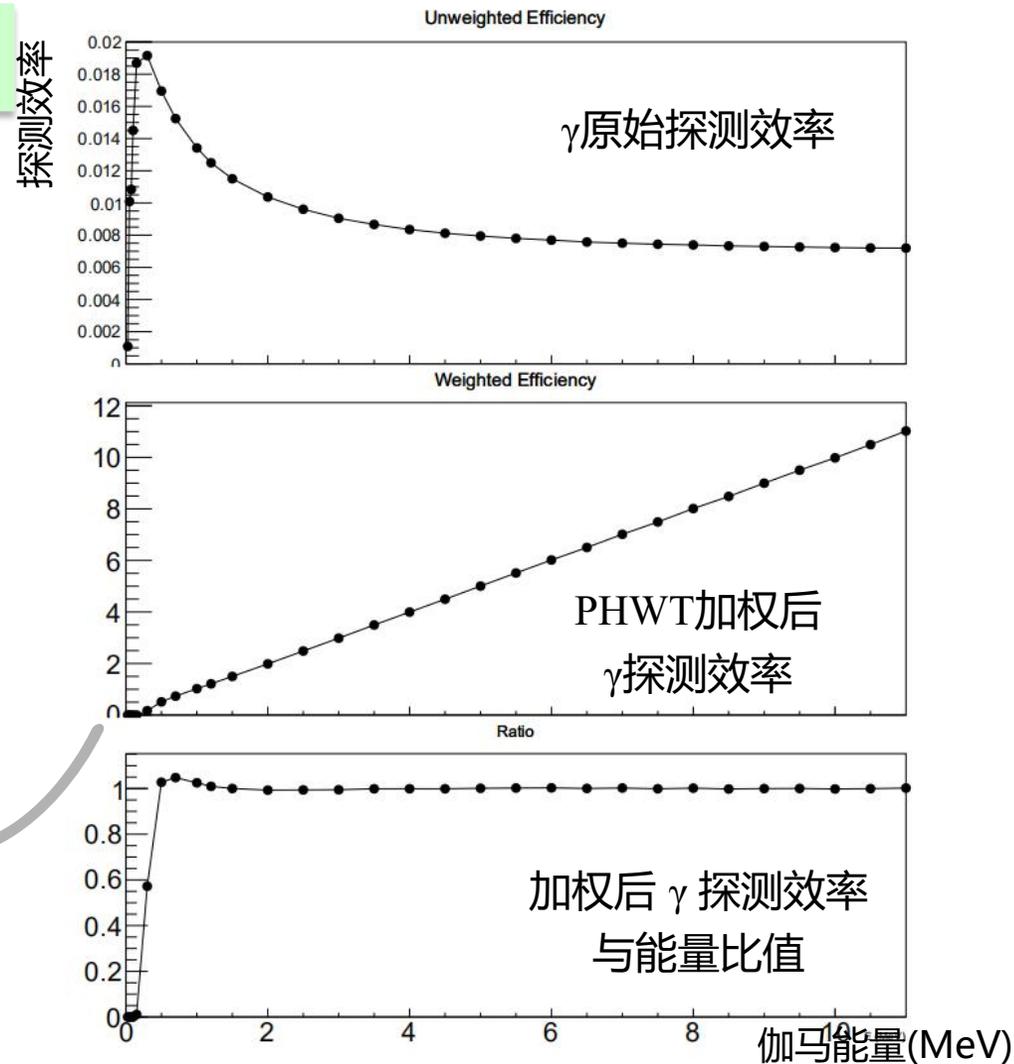
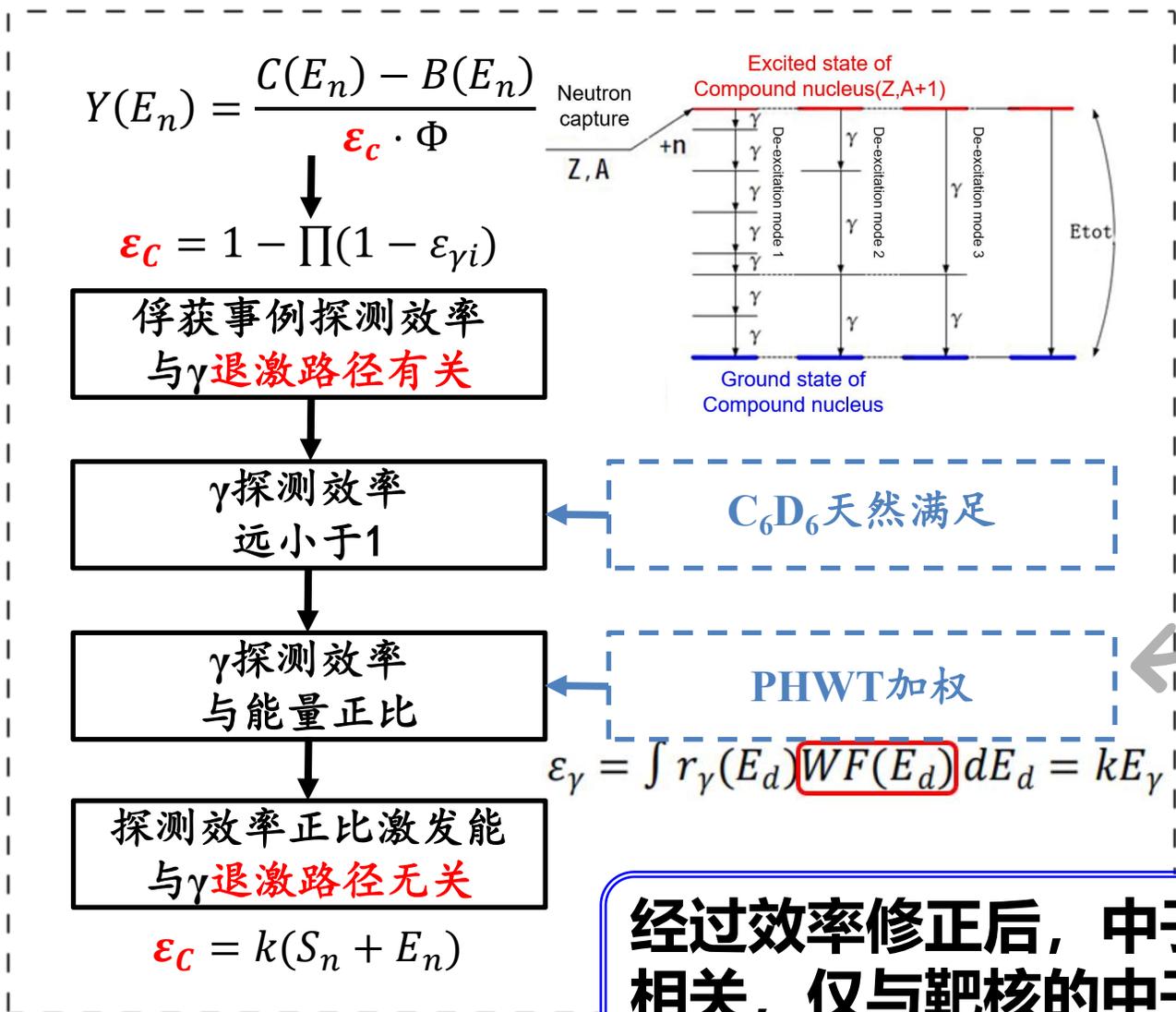
→ **能量分辨率在1MeV以下好于1%**

□ 吸收片测量辅助**归一**

□ 靶测量用于扣除散射中子和束内 γ

□ ^{197}Au : 中子注量及验证数据处理

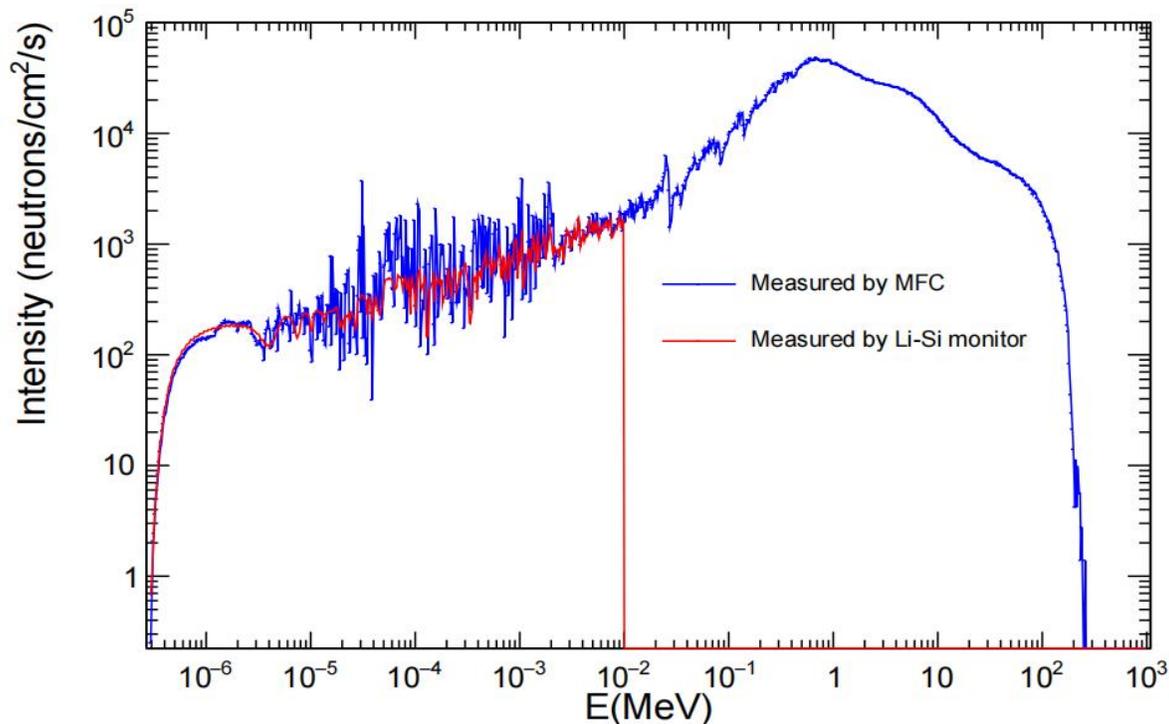
探测效率修正：基于脉冲高度权重技术PHWT方法



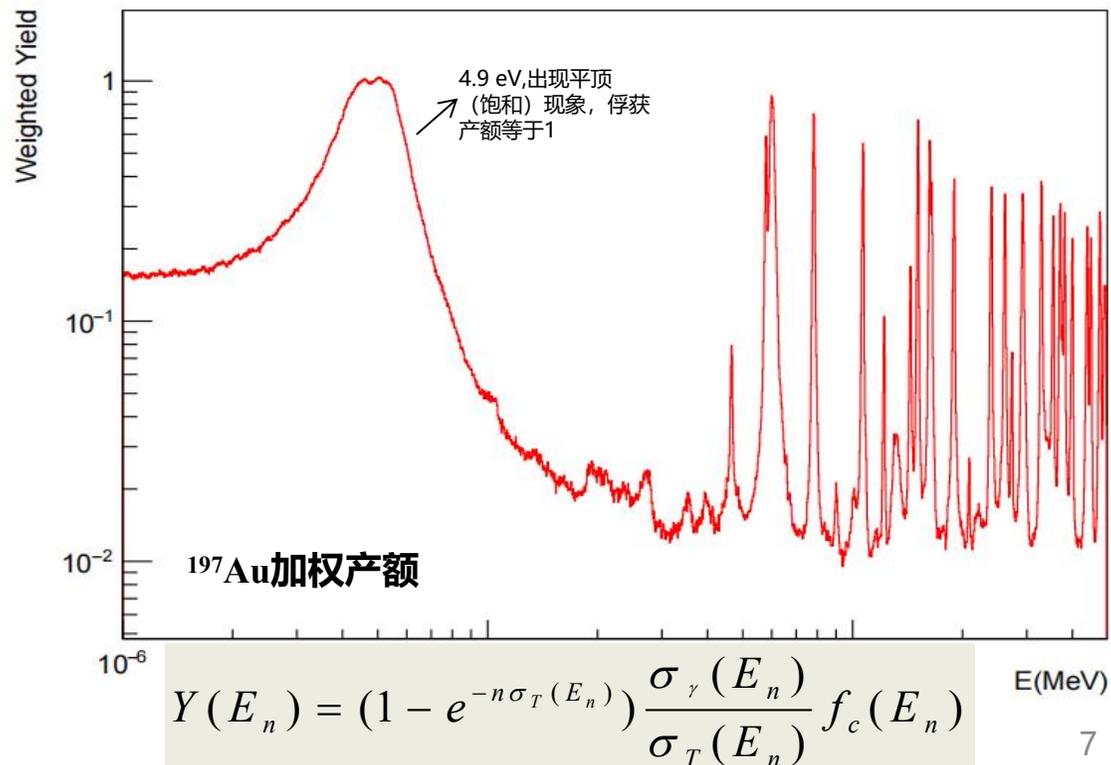
经过效率修正后，中子俘获产额计算不再与 γ 射线级联过程相关，仅与靶核的中子结合能 S_n 以及入射中子能量 E_n 相关。

中子注量：结合中子能谱、金靶饱和共振峰确定绝对入射中子注量

数据分析中**中子能谱**
使用之前的版本

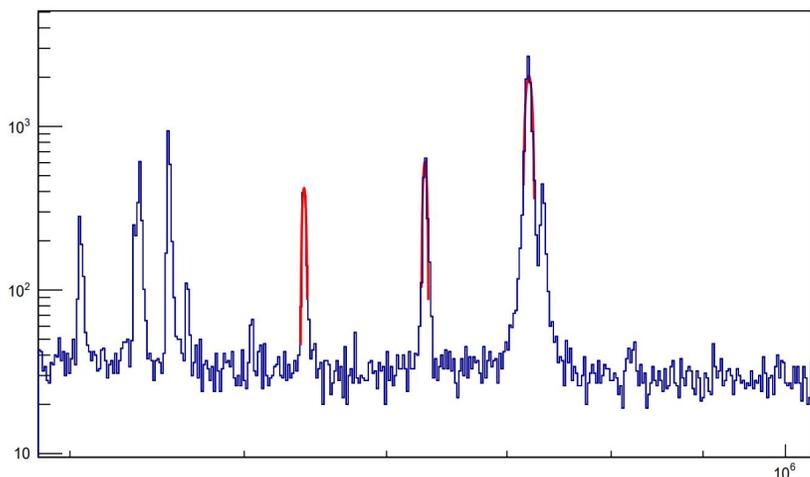


测量过程中**绝对中子通量未知**
利用¹⁹⁷Au靶**4.9eV**的共振峰的产额结合实验测量的源中子能谱来确定全能谱范围的产额

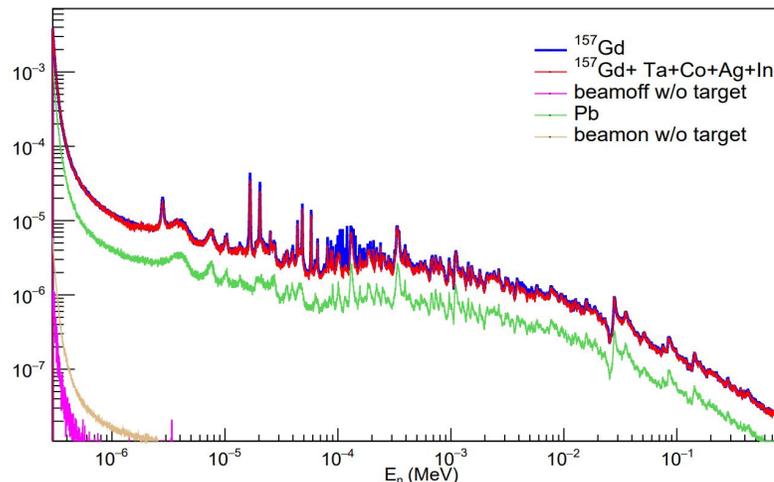


中子俘获产额及本底测量

Au峰位拟合来刻度TOF距离



测量的本底



中子俘获产额

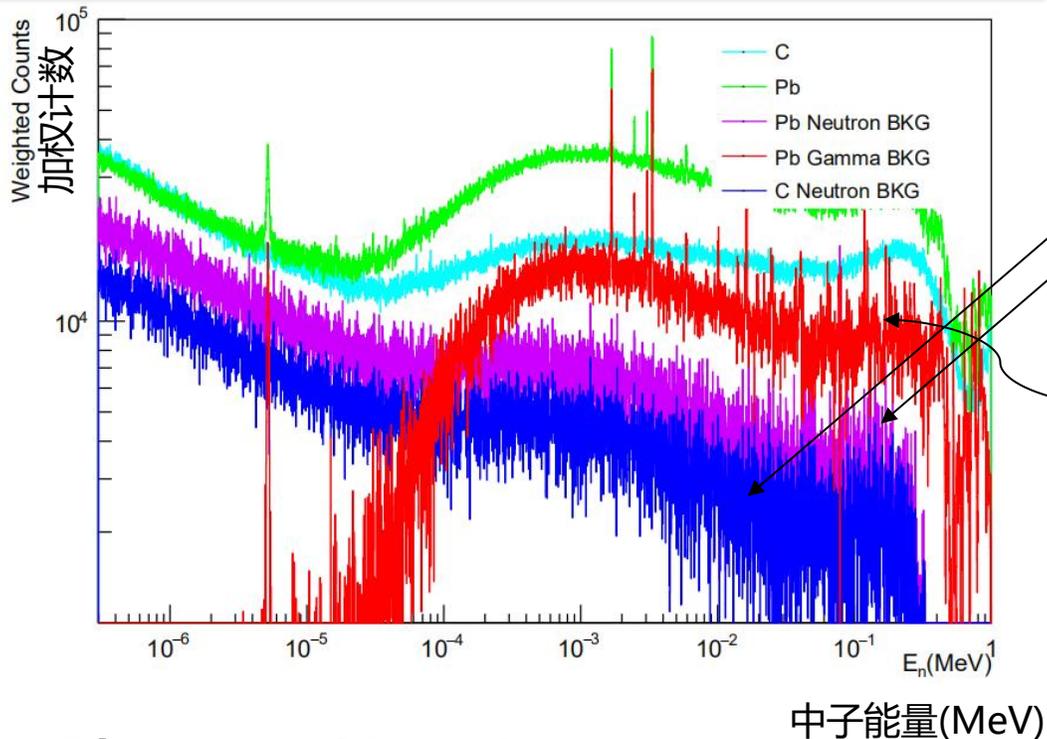
$$\begin{aligned}
 A &= Y(\text{Gd}) \\
 B &= Y(\text{Empty}) - Y(\text{Beam_off}) \\
 C &= (Y(\text{nat C}) - Y(\text{Empty})) \times \text{Ratio} \\
 D &= Y(\text{gamma in_Beam}) \\
 Y(\text{Sample}) &= A - B - C - D
 \end{aligned}$$

既包含中子本底，又包含 γ 本底，采用Pb的靶进行本底测量，吸收片本底校正

不同成分的本底归一方式

- 有中子束流情况下的本底，用Li-Si探测器的积分计数来归一。
- 无中子束流情况下的本底，用测量时间来进行归一。

本底扣除：借助实验+蒙卡模拟进行



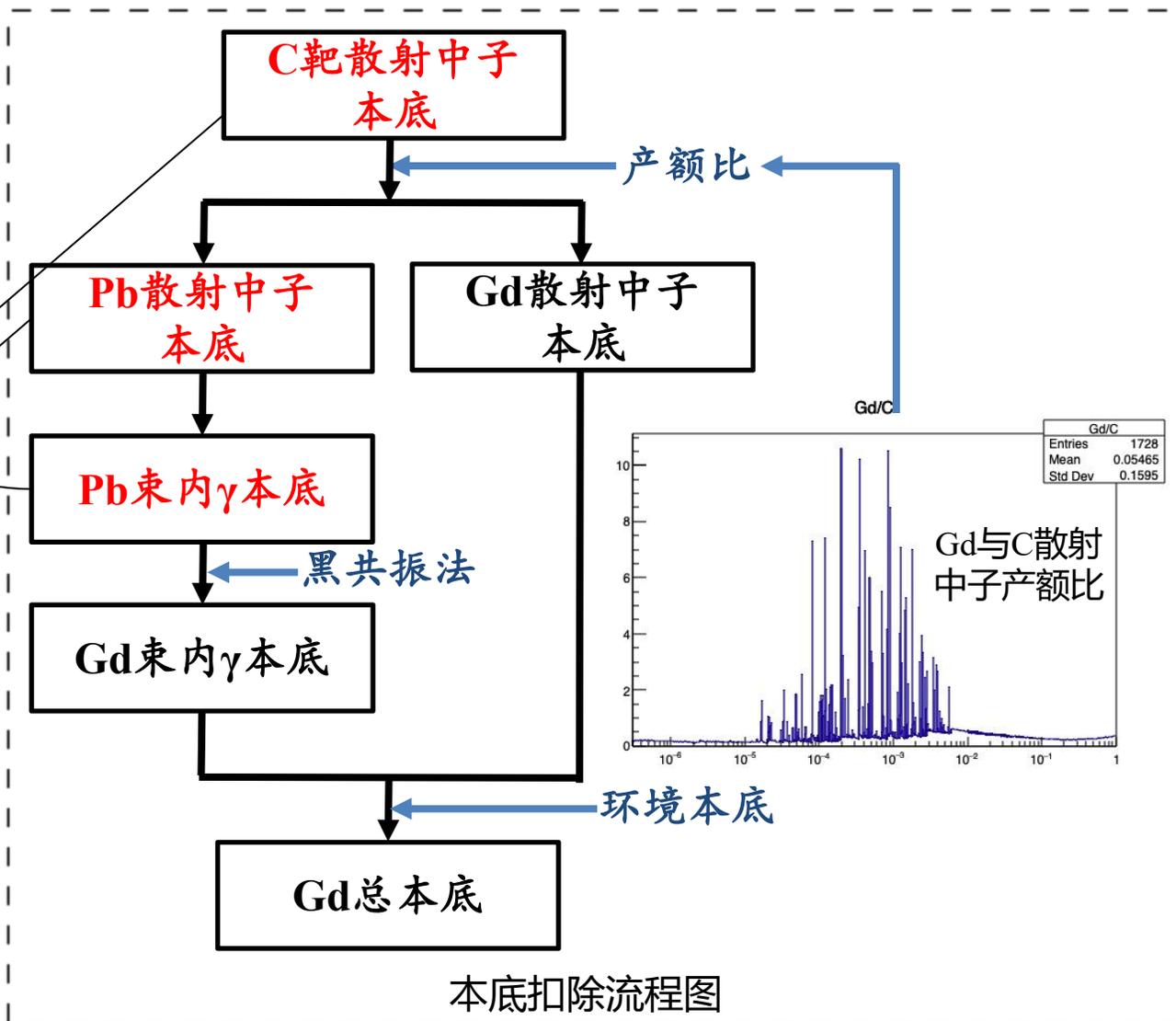
$$B_{sample}^{Gd} = B_{sn}^{Gd} + B_{sy}^{Gd} + Activation$$

$$\checkmark B_{sn}^{Gd} = Q_C^{Gd} \cdot B_{sn}^C \approx Q_C^{Gd} \cdot N_{residual}^C$$

$$\checkmark B_{sy}^{Gd} = K \cdot (N_{residual}^{Pb} - Q_C^{Pb} \cdot N_{residual}^C)$$

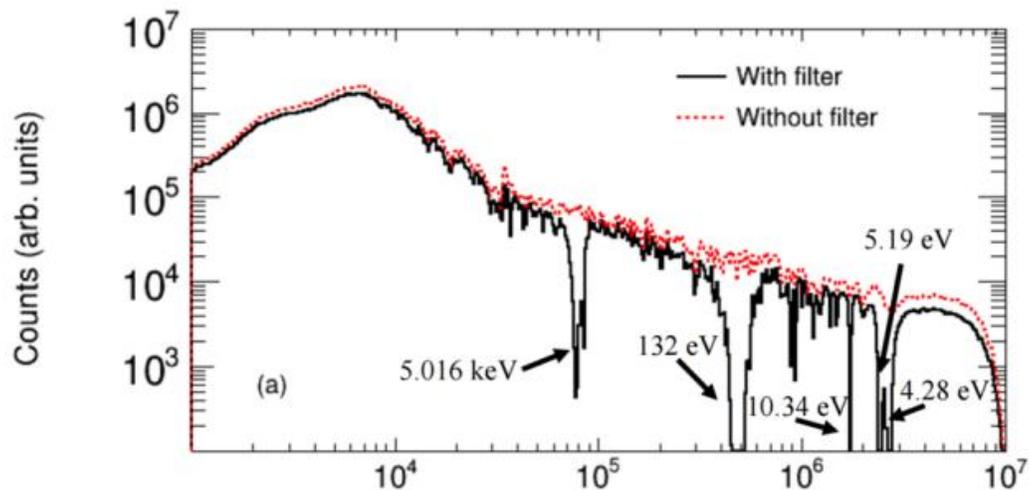
(Q :产额比; $B_{sn}^{Gd/C/Pb}$:散射中子本底; $B_{sy}^{Gd/C/Pb}$:

束内 γ 本底; $N_{residual}^{Pb/C}$:扣除环境本底后计数)

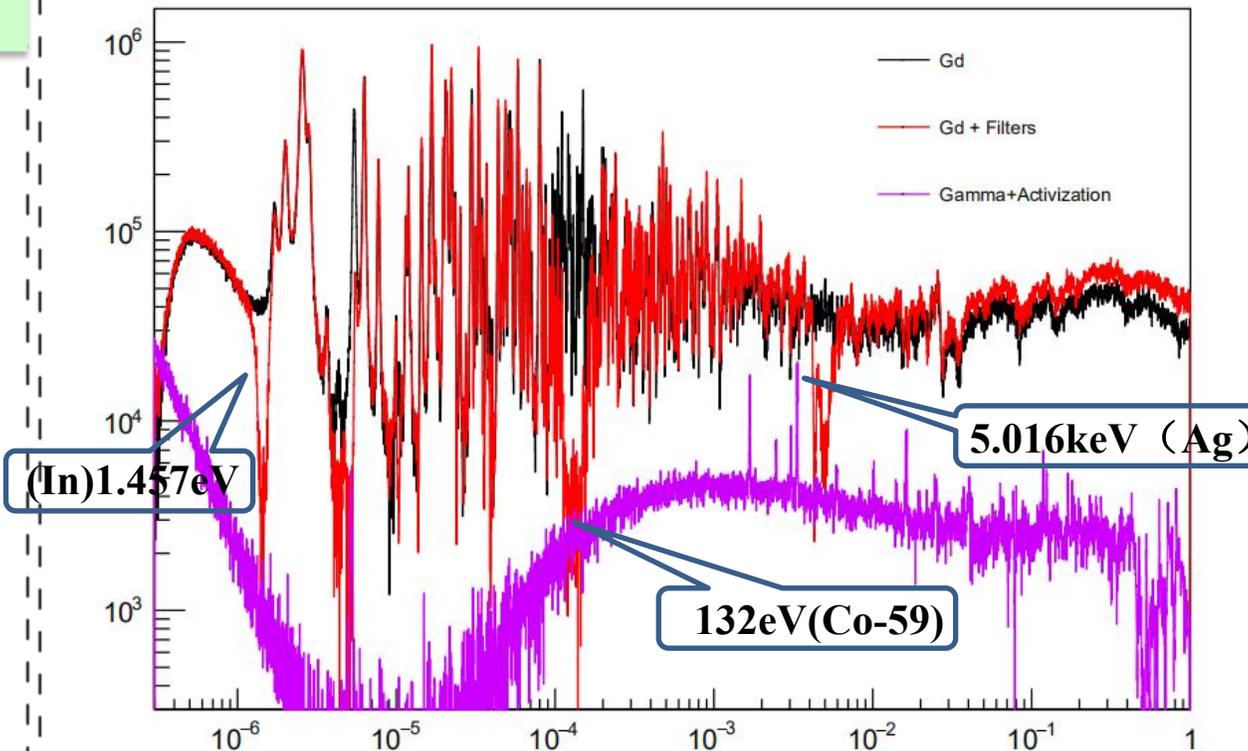
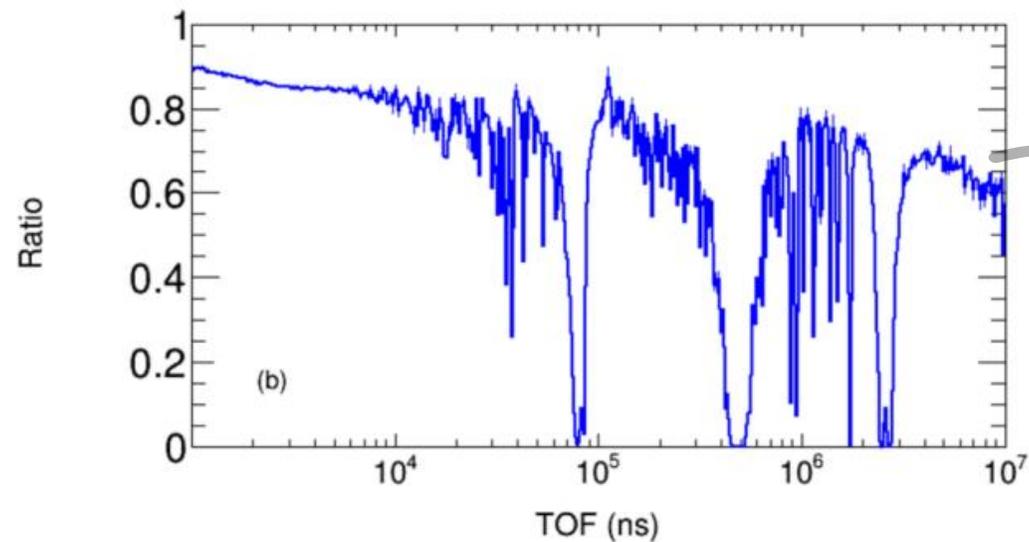


利用C靶、Pb靶实现散射中子及束内 γ 本底扣除

利用黑共振法进行本底归一



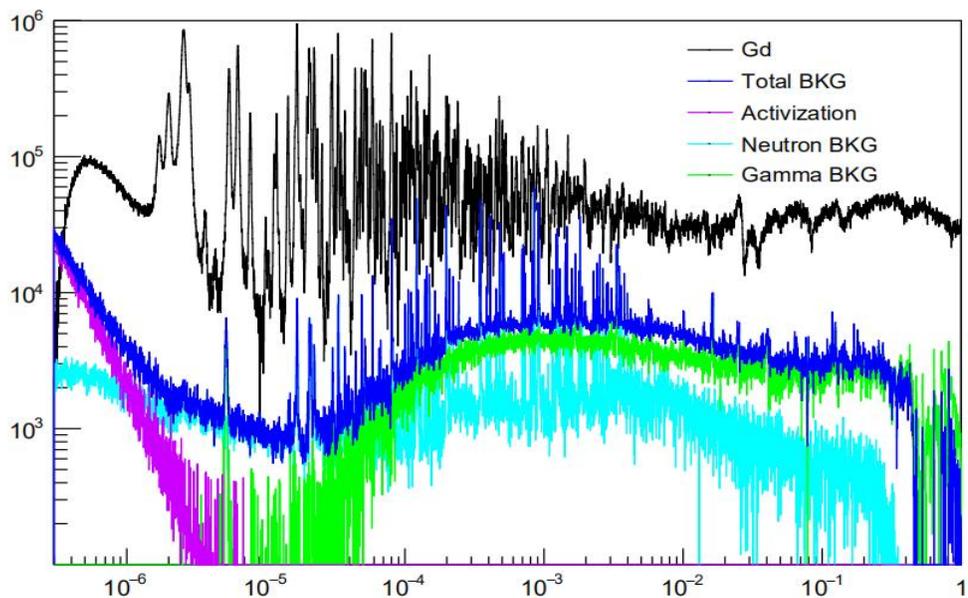
吸收片黑共振峰处中子吸收率



- 吸收片黑共振峰处束流中子被**全部吸收**
- 黑共振谷处计数**仅由本底贡献**
- 对齐谷底计数与本底计数可实现归一

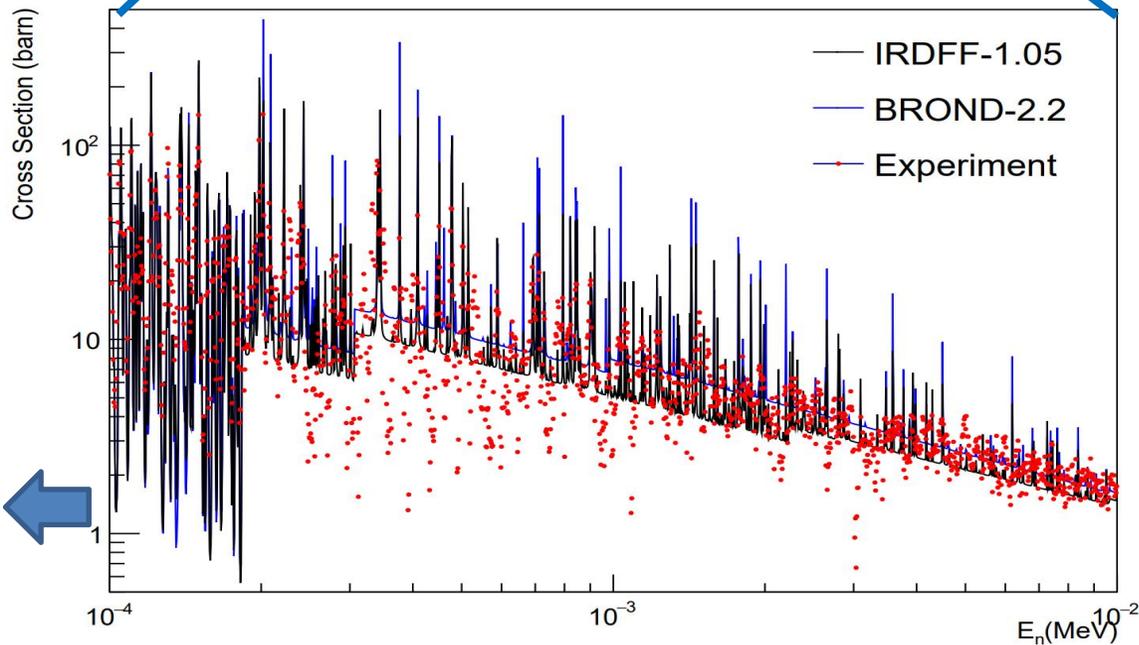
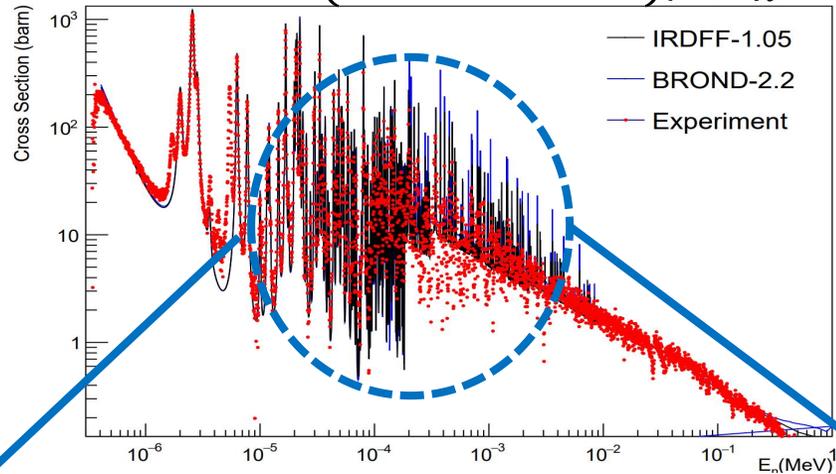
natGd中子俘获截面测量结果

- natGd样品及各本底组分加权计数谱
- 中子束流情况下采用Si-Li计数归一
- 非束流本底采用测量时间归一



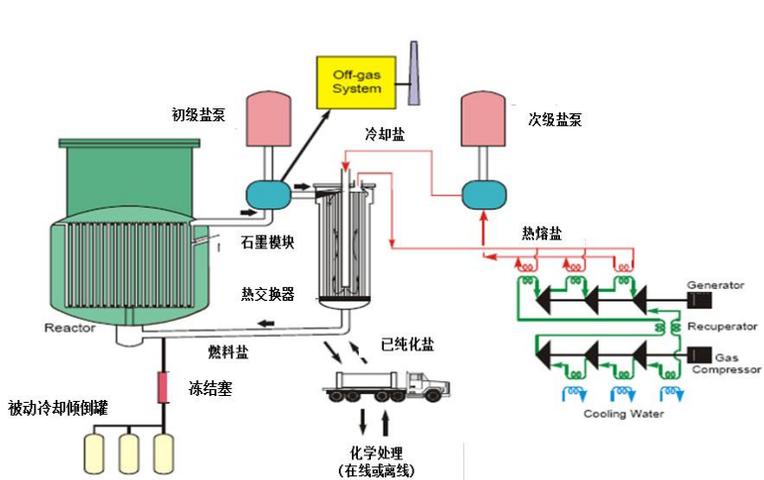
<100eV及>10keV, 与评价数据表现出**较为一致性**
 100eV-10keV本底扣除存在问题需要进一步研究分析
 总不确定度~**10%**

$$\sigma_{\gamma}(E_n) = \frac{Y(E_n) \cdot \sigma_T(E_n)}{(1 - e^{-n\sigma_T(E_n)})\mu(E_n)}$$

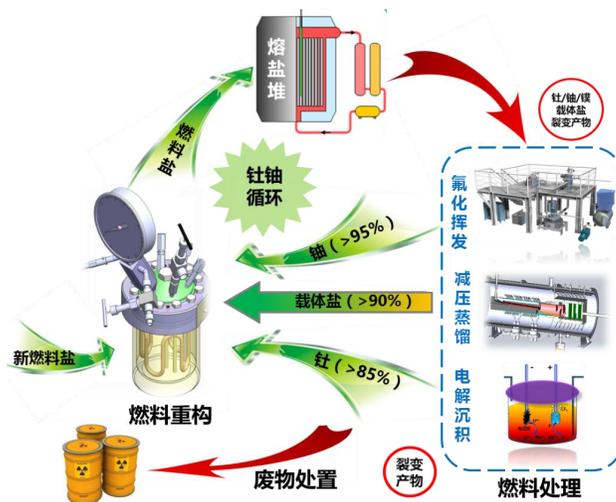


TMSR-PNS白光中子源装置建设意义

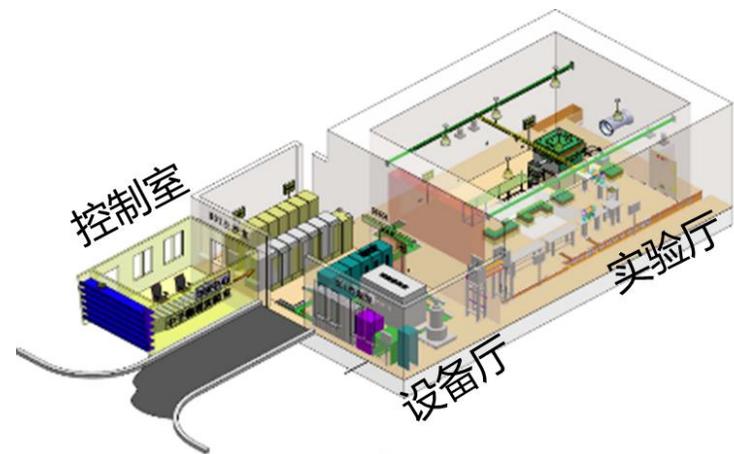
- 精准核数据是确保反应堆安全可靠的基础参数，**建设钍基熔盐堆专用数据库**是TMSR专项的核心任务之一；
- TMSR缺乏钍铀关键截面核数据、高温FLiBe中子热散射数据等，**研制TMSR-PNS中子源**为TMSR核设计提供重要的基础核数据。



钍基熔盐堆核能系统



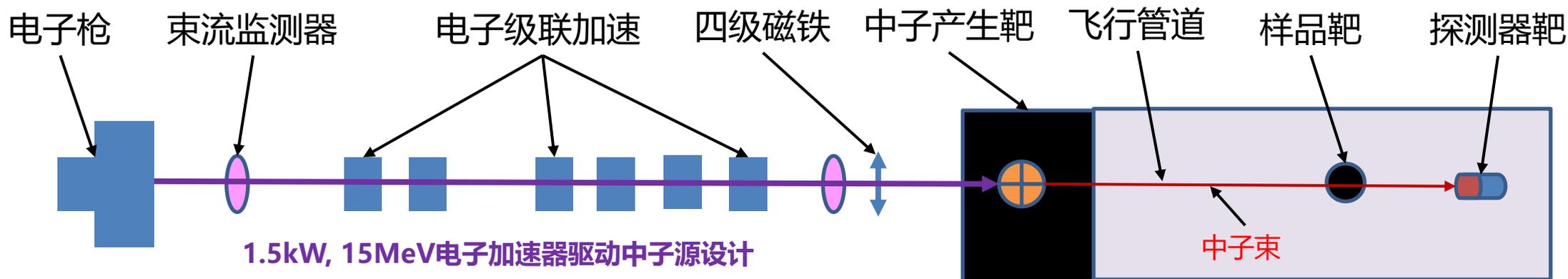
熔盐堆核燃料走向



TMSR-PNS白光中子源装置

TMSR-PNS中子源系统设计与建设

原理



建设



系统

加速器系统

中子产生靶系统

自动换样系统

准直系统

安全连锁系统

屏蔽系统

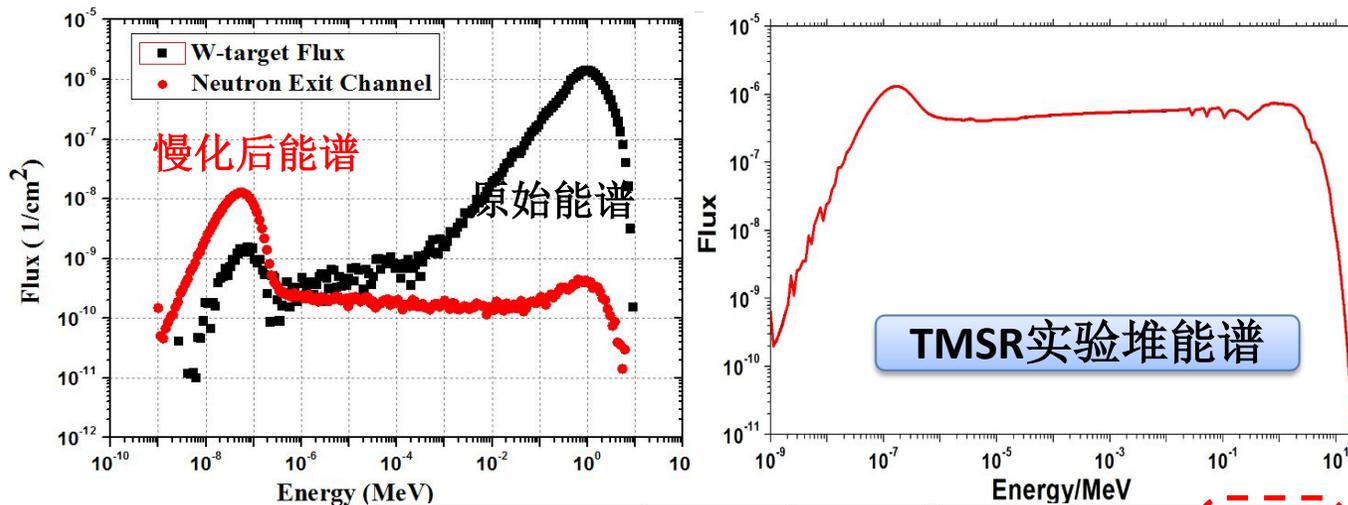
数据获取系统

探测系统

TMSR-PNS主要性能参数

TMSR-PNS主要参数

- ❖ 伽马产额: $\sim 10^{15} \gamma/s$
- ❖ 中子产额: $\sim 10^{12} n/s$
- ❖ 中子能量: 0.01eV~10 MeV
- ❖ 中子通量: $\sim 10^8 n/cm^2.s$



参数	数值/说明		
电子束流能量	15 MeV		
脉冲模式	短	中	长
中子能量测量区间	100 keV-5 keV	5 keV-1 eV	1eV-0.01 eV
电子脉冲宽度	3~5 ns	15-50 ns	0.5-3.0 μs
脉冲频率	1-266 Hz	1-266 Hz	1-266 Hz
中子飞行距离	6 m	6 m	6 m

	FZD	FZD	IRMM	PAL	SINAP
	ELBE	ELBE (SRF)	GELINA	PNF	-
类型/国别	大型源/德国	大型源/德国	大型源/欧盟	紧凑型/韩国	紧凑型/中国
电子能量/MeV	40	40	100	70	15
电子平均流强/mA	0.125	1.000	0.096	0.004	0.100
功率/kW	5.00	40.00	9.60	0.26	1.50
脉冲频率/Hz	1.6E+06	5.0E+05	800	15	266
中子脉冲宽度/ns	0.4	0.4	0.67-11	1000	3-3000
靶	Liquid Pb	Liquid Pb	U-Mo	Ta	W
中子产额* $10^{13}/s$	0.54	2.70	3.20	0.05	0.07
飞行距离/m	4	4	8-400	12	6
中子能量范围	50KeV -10 MeV	50KeV -10 MeV	0.01 eV -10 MeV	0.1 eV -200 eV	0.01 eV -100 keV

TMSR白光中子源 (TMSR-PNS)



物理规律研究

- ◆ 关键核数据测量
- ◆ 新型探测器研发测试
- ◆ 燃料转换性能实验研究

宽能谱



高产额

工程应用研究

- ◆ 堆材料硼当量测量
- ◆ 新型屏蔽材料性能测试
- ◆ 半导体材料、合金、生物等辐照

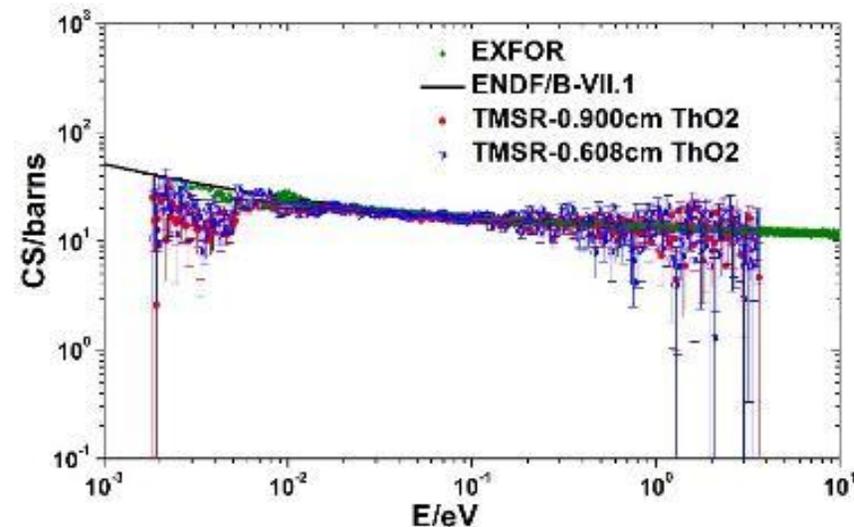
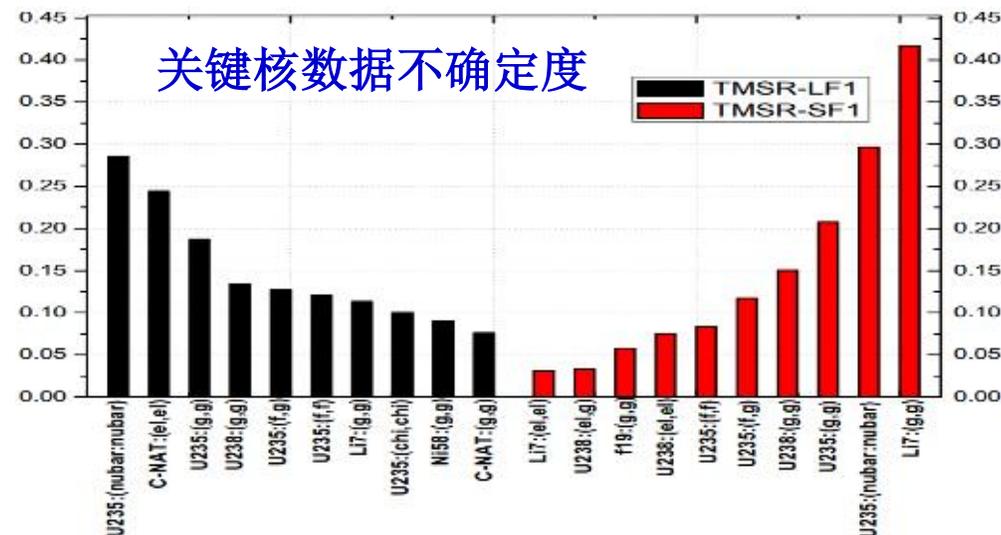
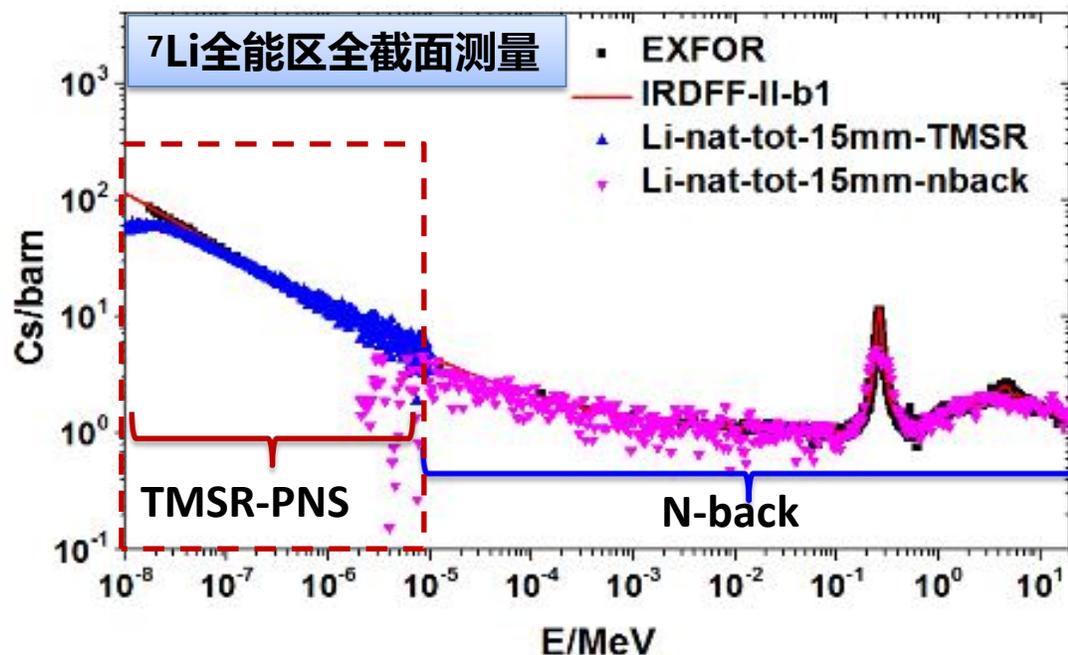
空间紧凑

中子/ γ 辐射场

在热中子能区性能指标
优于国外同类装置！！

1. 反应堆关键核素热中子截面测量

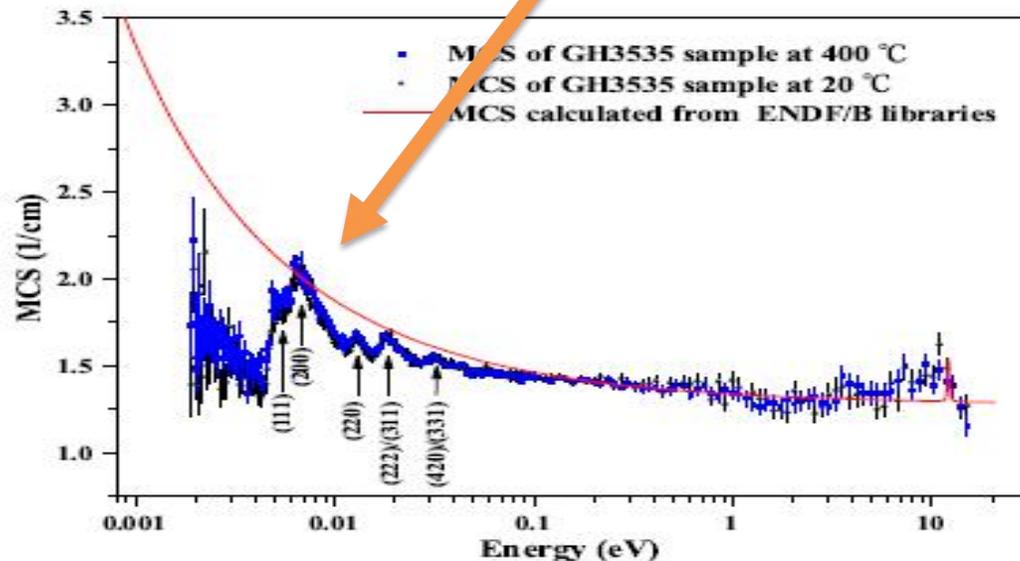
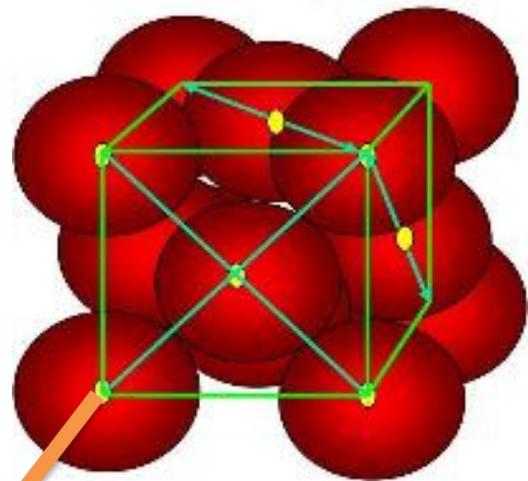
- ◆ 已测量的关键核素： ^{232}Th 、石墨、 ^7Li 、Be、Fe;
- ◆ 热区测量精度明显提高：以 ^{232}Th 为例;
- ◆ 能区扩展：与CSNC的反角白光中子源 (N-back) 能区互补。



^{232}Th 热区全截面测量

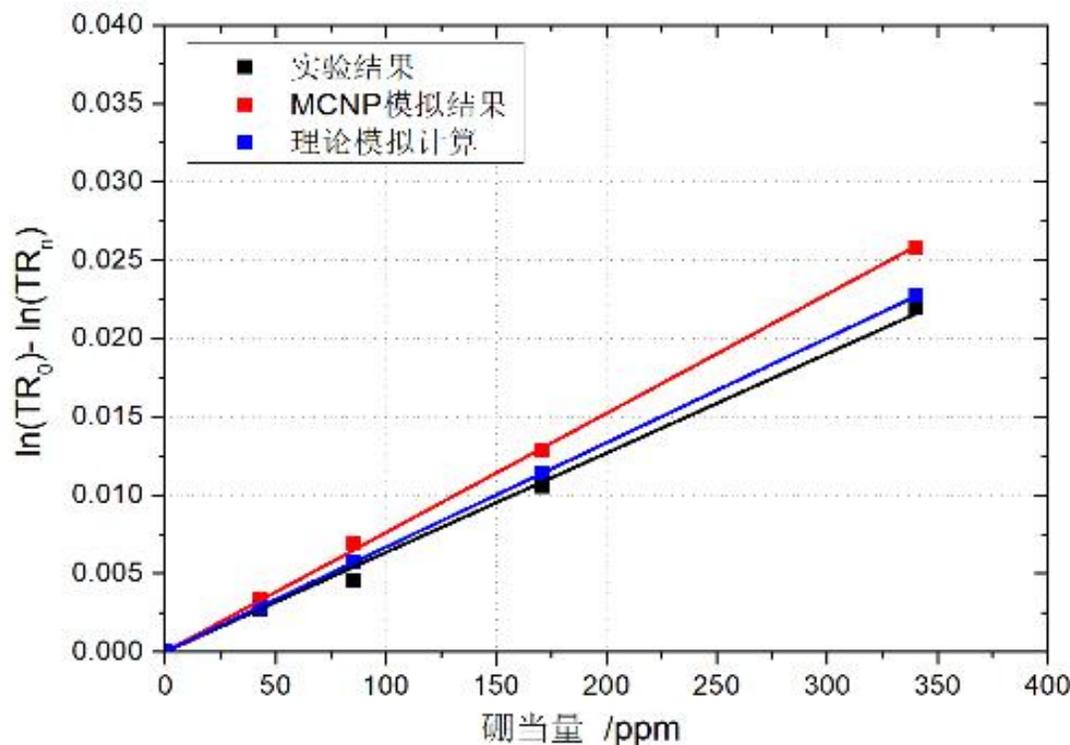
2. 反应堆关键材料高温核数据测量

- ◆ 熔盐堆中高温熔盐、合金的热中子散射数据**缺乏**；
- ◆ 石墨、合金等材料热中子散射数据 (TSL) 对反应堆影响较大 (约 2000pcm)，可能会导致反应堆不临界；
- 📖 **首次**测量了高温GH3535合金TSL截面 (最高温度850°C) ；
- 📖 测量结果得到的TSL布拉格峰边界**与理论值一致**。



3. 关键材料杂质硼当量测量

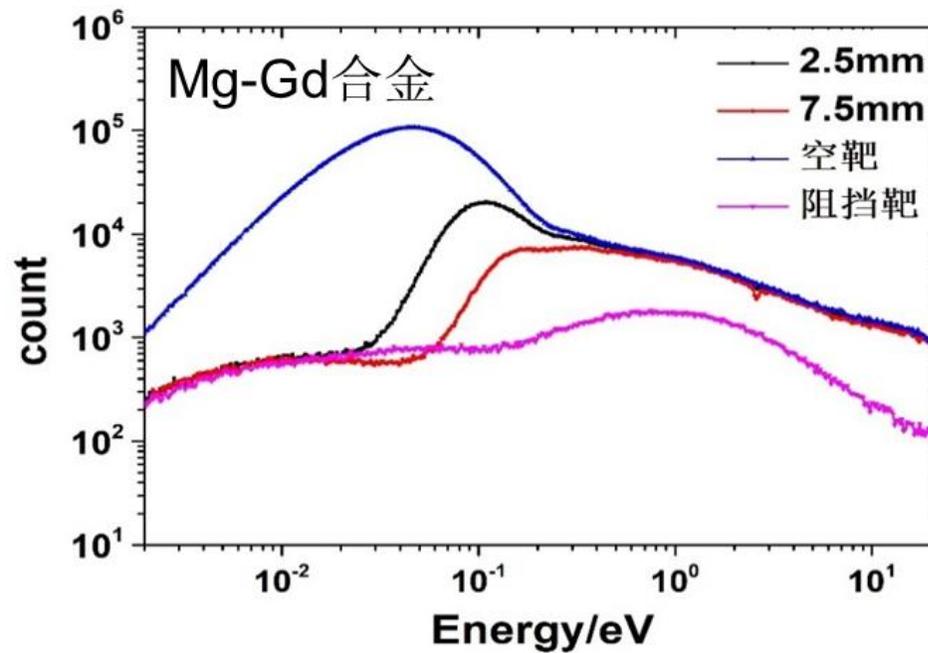
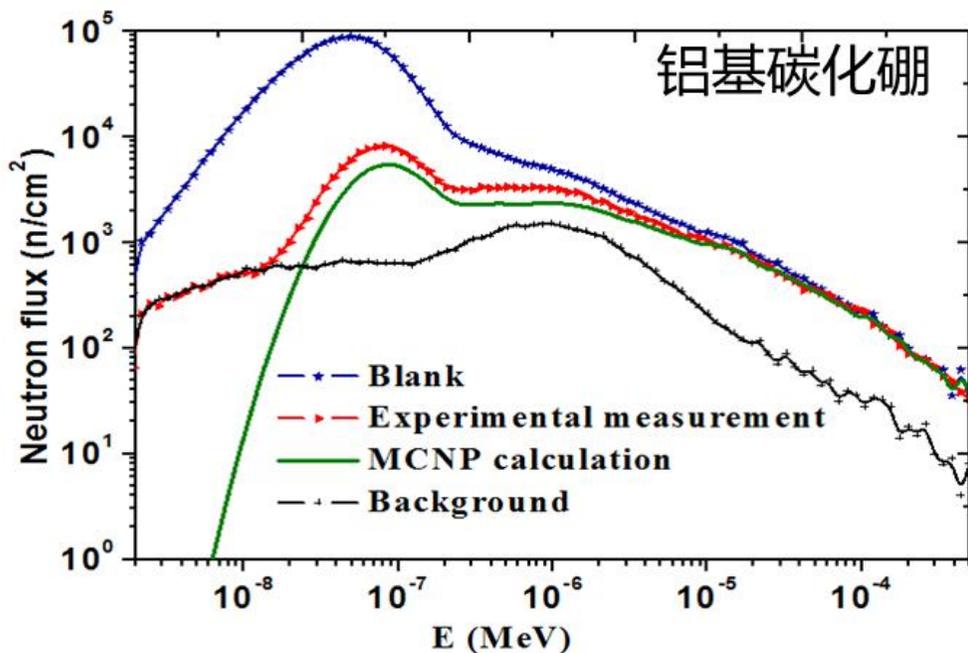
- ◆ 硼当量是核材料的纯度重要指标，也将影响反应堆运行安全。
- ◆ 基于TMSR-PNS白光中子源，可对大体积核材料进行**大批量、快速、有效**的检测。
- ◆ 石墨硼当量、熔盐的硼当量测量，结果**用于熔盐堆设计**。



4. 新型屏蔽材料研制与性能测试

- 宽能谱，一次测量多样品
- 中子 γ 辐射场复合测量

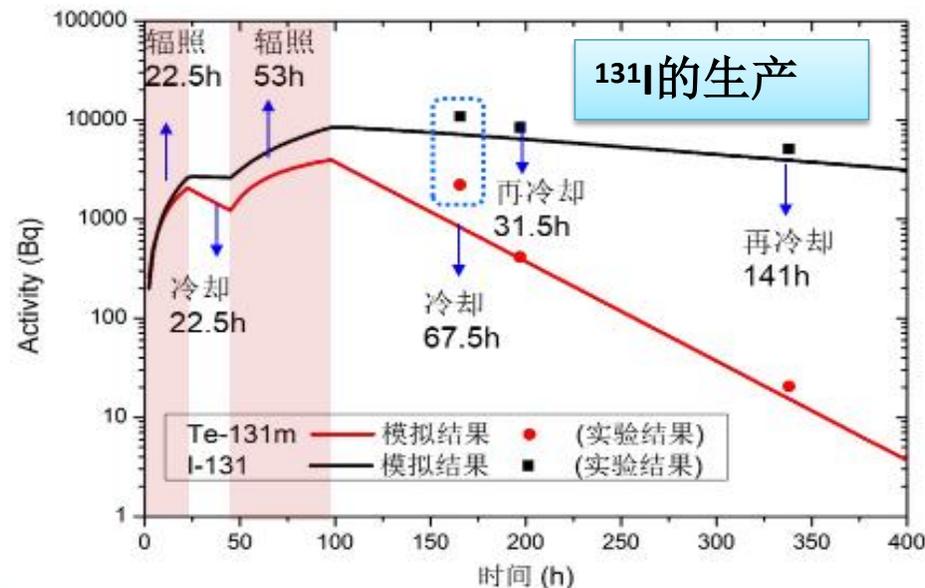
不同厚度和硼含量的铝基碳化硼复合材料的屏蔽性能测：1.5mm厚， B_4C 含量31%（质量百分比）的复合材料可屏蔽90%的热中子。



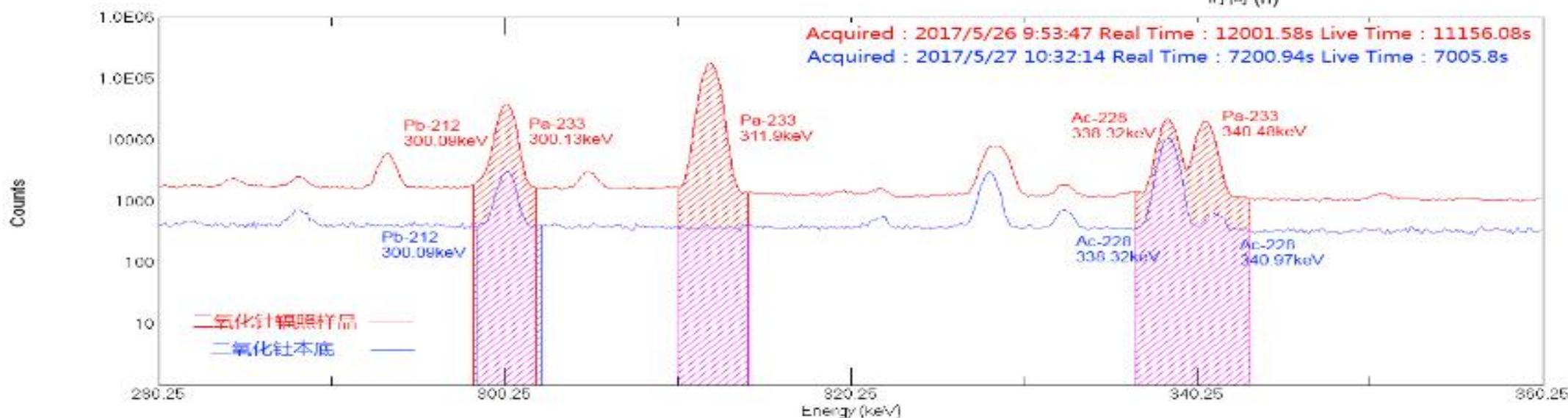
新型屏蔽材料
19

5. 中子活化技术应用

- ◆ **痕量元素检测：** 对样品中的痕量元素进行测量评估；
- ◆ **同位素生产原理验证：** 实验测量 ^{131}I 的含量，确定研究可能性；



痕量元素检测





请批评指正!

感谢Back-N课题组的实验支持
欢迎大家到上海应用物理研究所指导

