

基于 C_6D_6 探测器的 ^{232}Th 中子辐射俘获截面测量进展

任杰、王金成、阮锡超

中国原子能科学研究院，核数据重点实验室

Back-n合作组

目录

研究意义

测量与分析

束内伽马测量

总结和展望

目录

研究意义

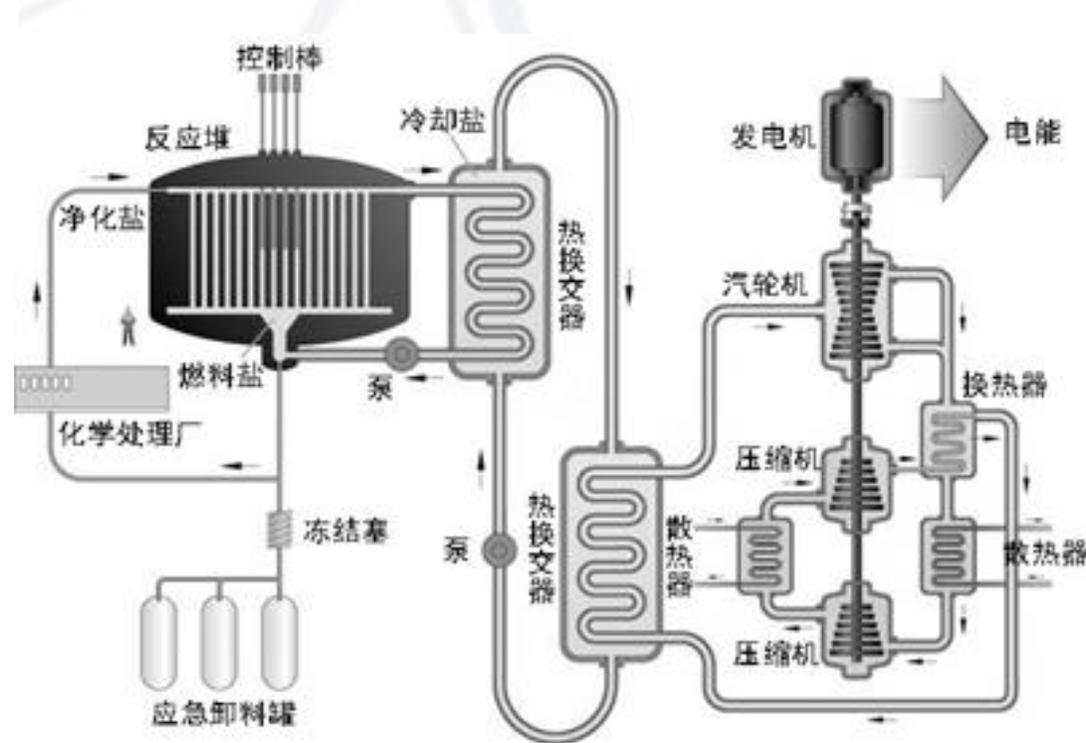
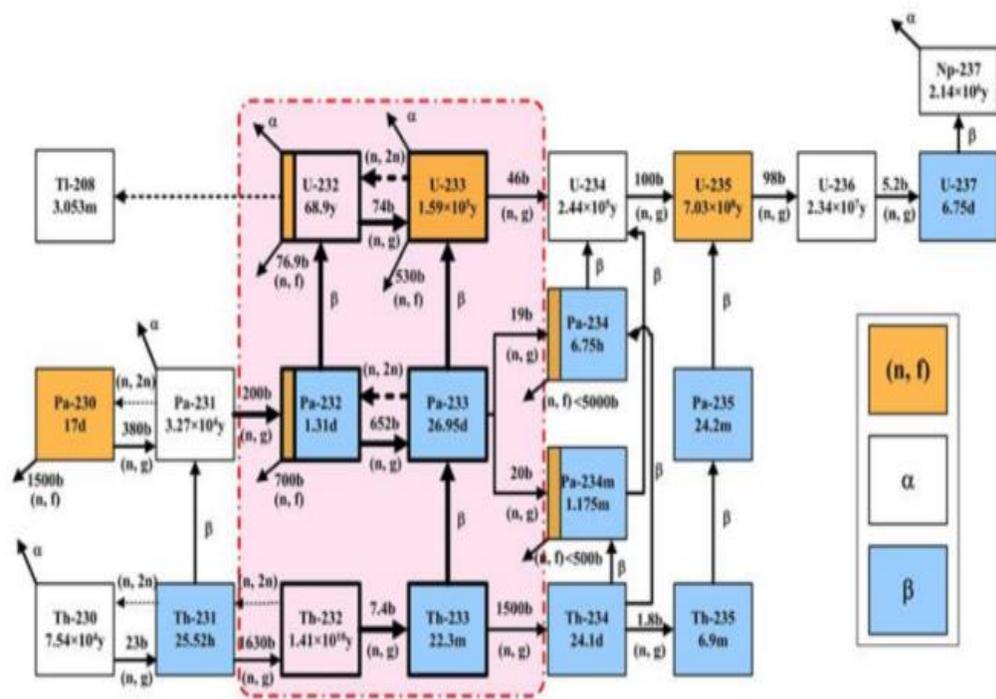
测量与分析

束内伽马测量

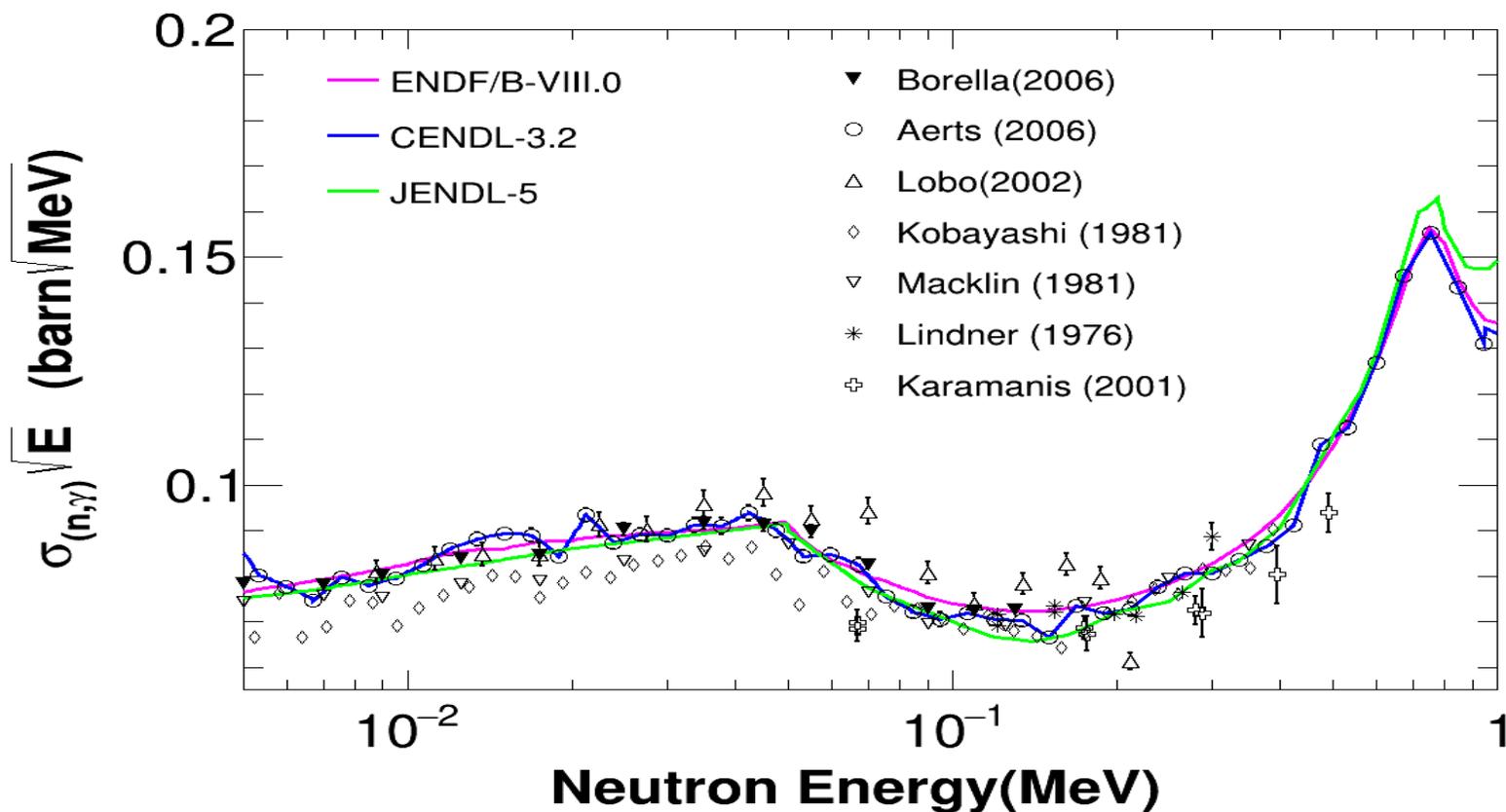
总结和展望

钍-铀循环具有乏燃料放射性低、 ^{233}U 平均中子数多、 ^{232}Th 的转换效率高，资源丰富等优点。

^{232}Th 的中子辐射俘获反应截面是钍-铀循环装置设计的关键数据。



^{232}Th 的中子辐射俘获反应截面数据（评价数据和实验数据）在部分能区仍然存在明显的差异，10keV-500keV能区的差异可达10%。



目录

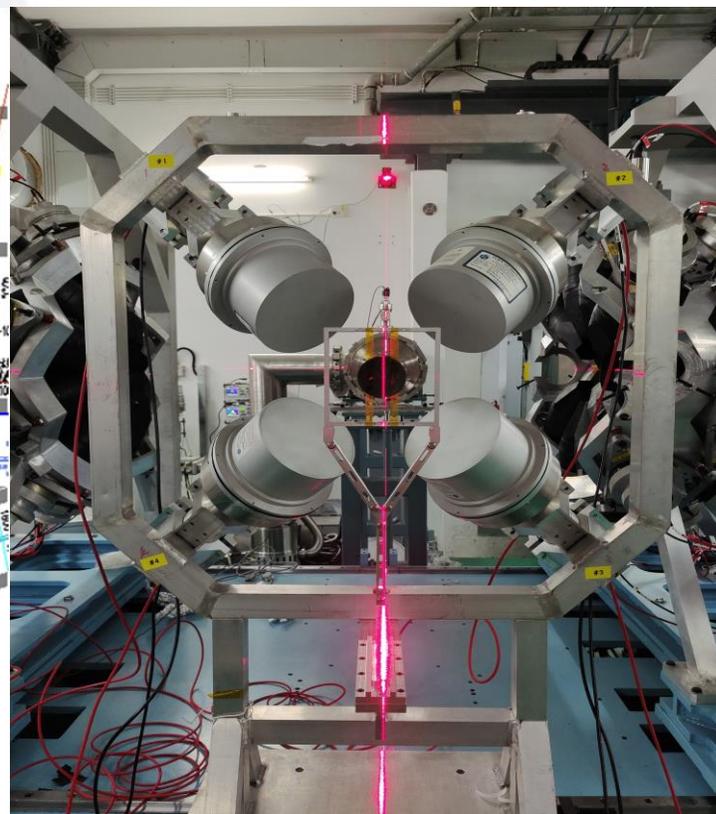
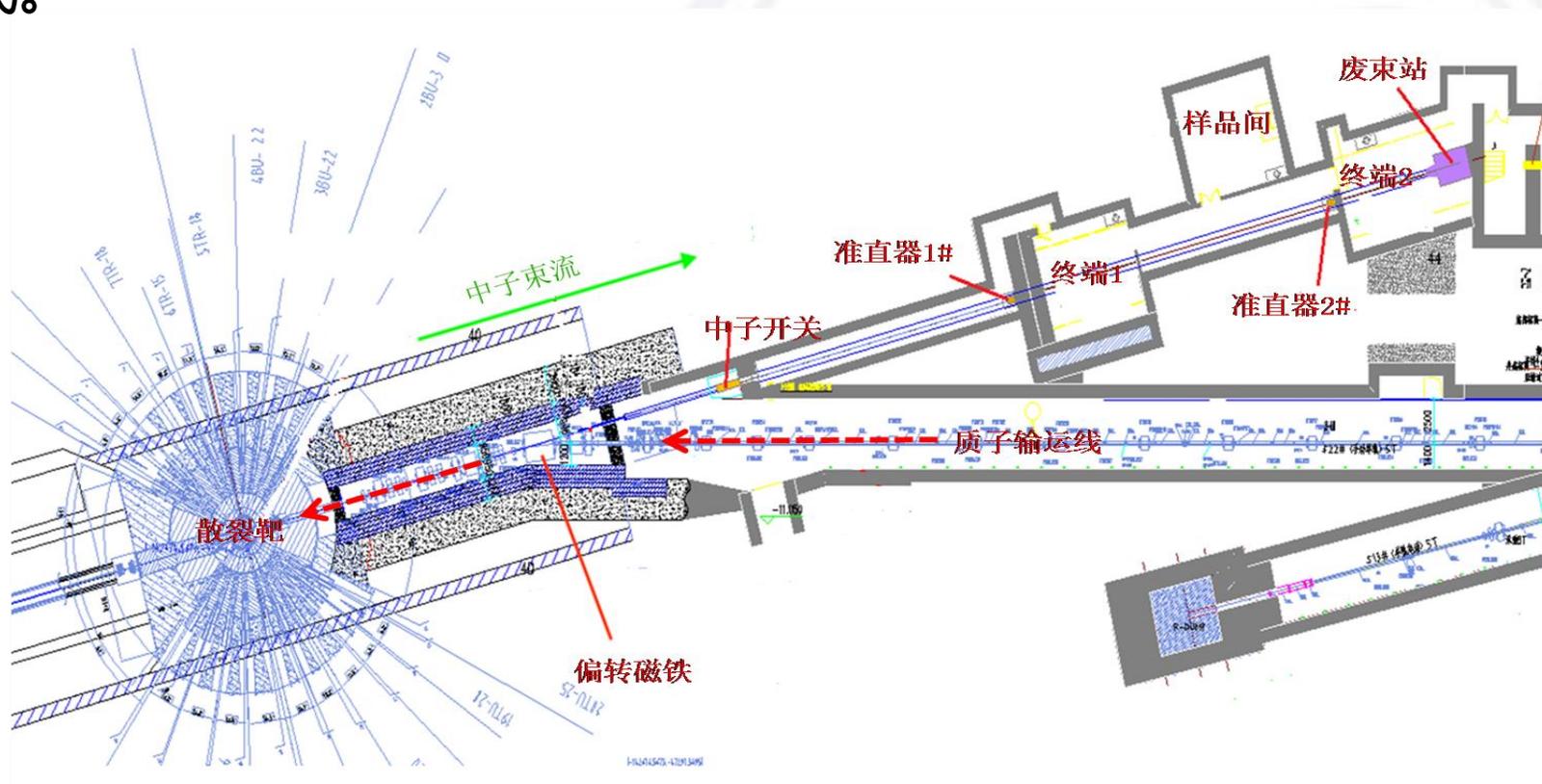
研究意义

测量与分析

束内伽马测量

总结和展望

2021年11月在反角白光中子束线（Back-n）的终端二开展了 ^{232}Th 中子辐射俘获反应截面测量，使用 C_6D_6 探测器系统和共用电子学。实验由原子能院和上海应物所合作完成。



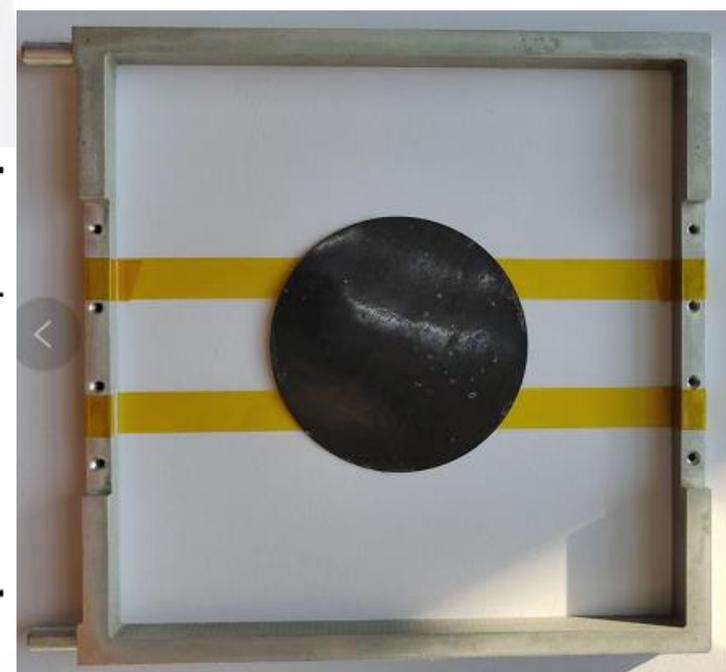
束流条件:

- ◆ CSNS功率: 100kW;
- ◆ 脉冲模式: 双束团;
- ◆ 束斑几何: $\Phi 30$ mm (12mm-15mm-40mm)

样品条件:

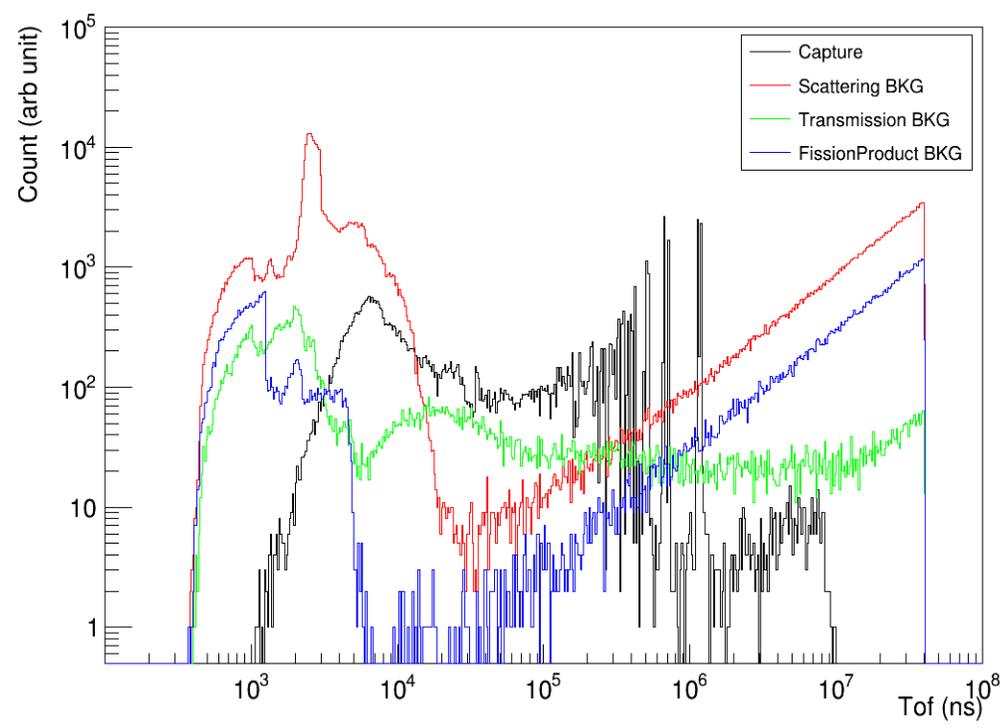
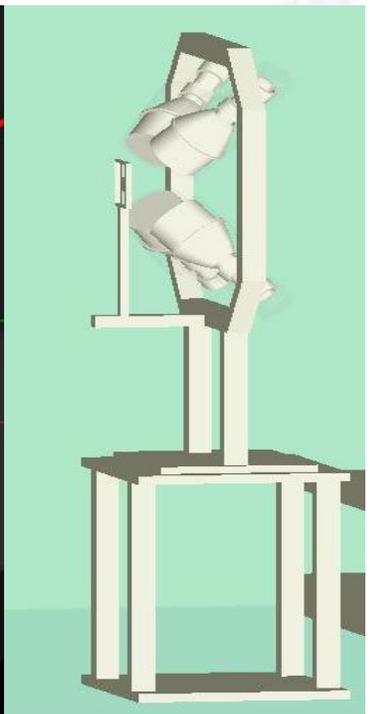
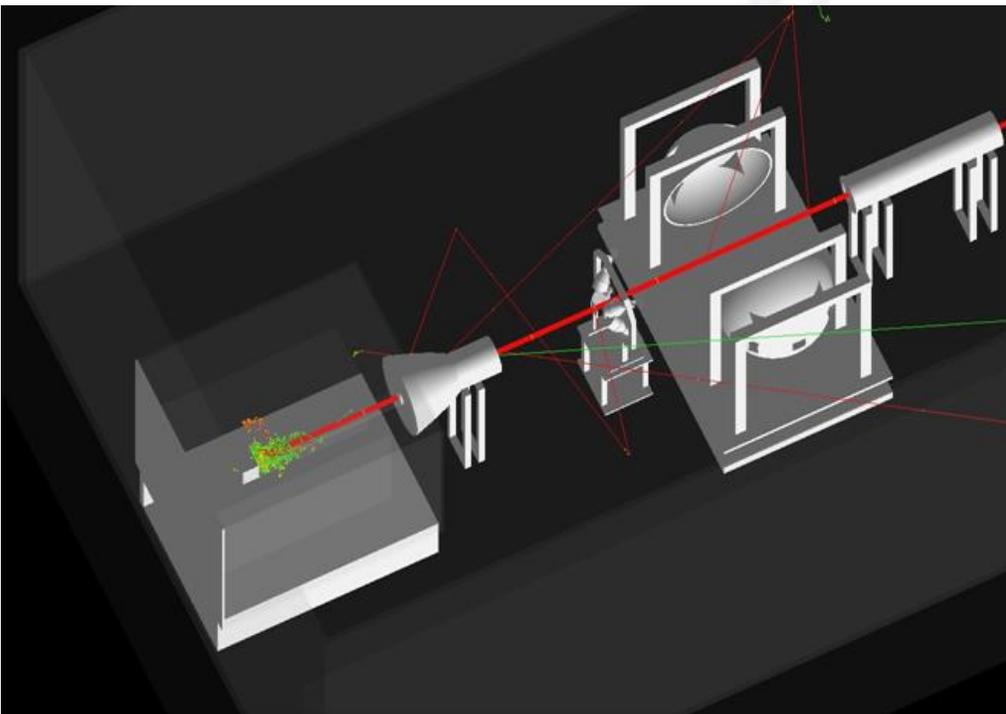
Sample	Shape	Diameter (mm)	Thickness(mm)	Purity(%)
^{232}Th	circular	50.0	0.5	99.5
^{197}Au	circular	50.0	1.0	99.995
^{nat}Pb	circular	50.0	1.0	99.99

(钍样品由上海应物所胡继峰提供)



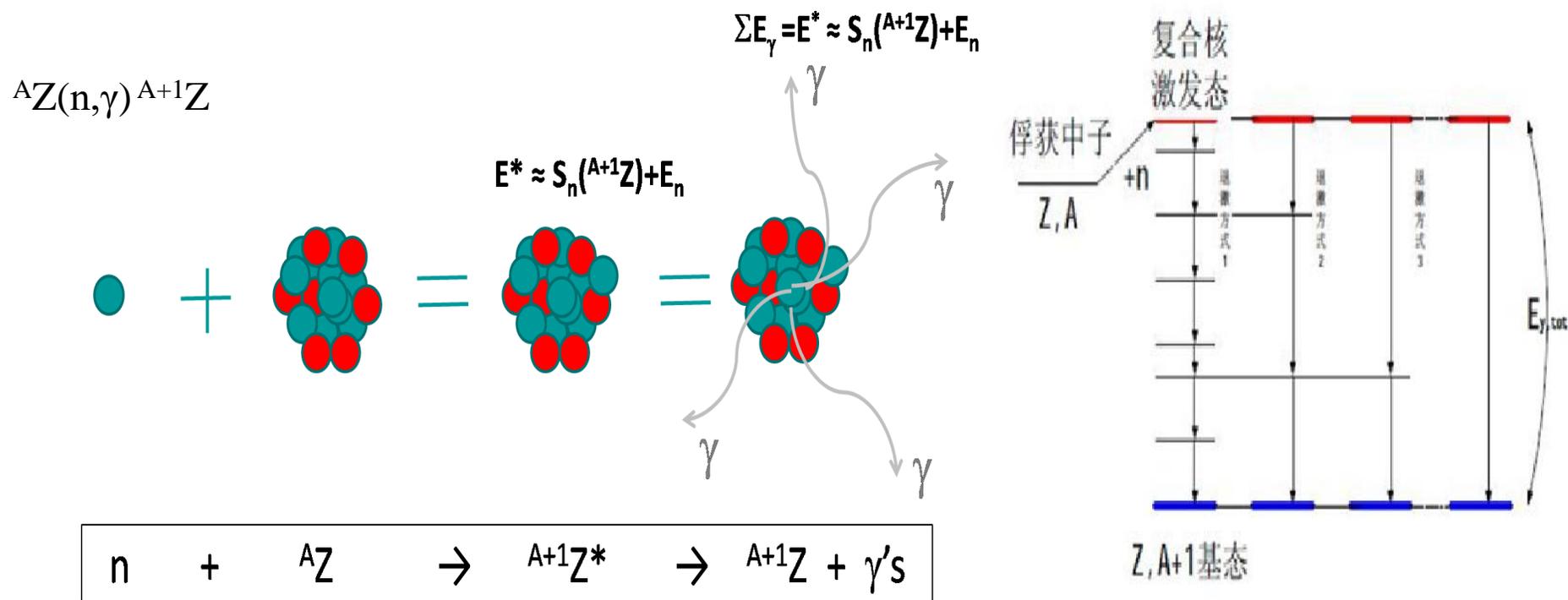
蒙卡模拟

通过全空间的蒙卡模拟分析实验本底来源和时间、能量分布，用于指导实验测量和数据分析。特别指出， ^{232}Th 的裂变产物带来的实验本底不可忽略。



数据分析

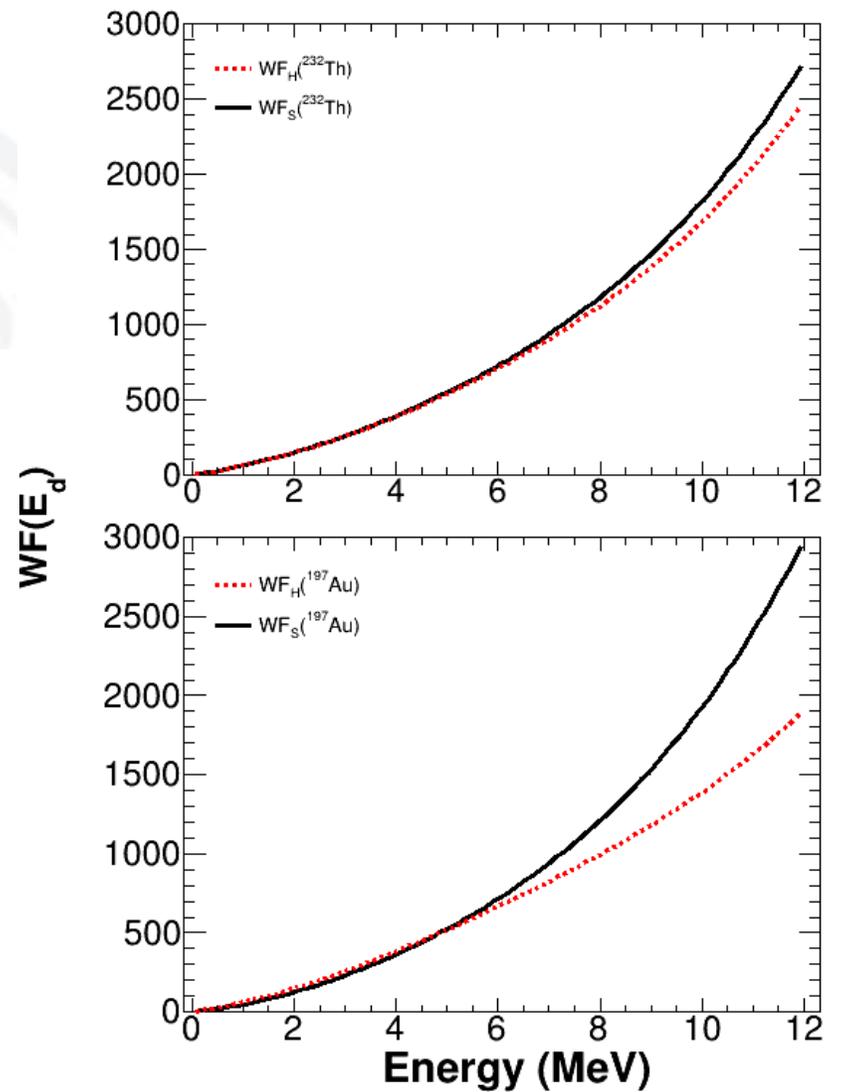
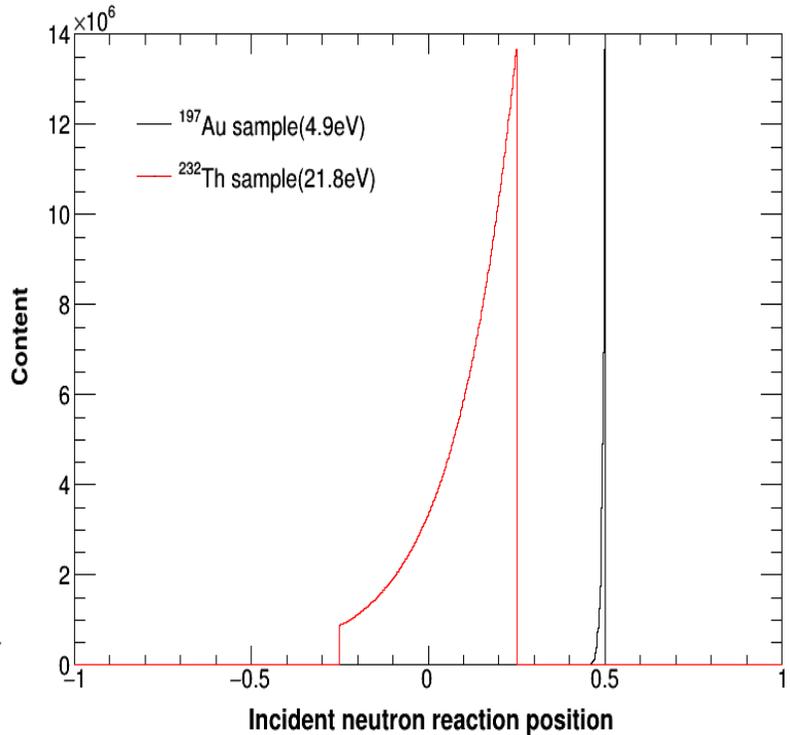
基于 C_6D_6 探测器的中子辐射俘获截面测量实验的数据分析主要包括：波形分析、计算脉冲高度**权重函数 (WF)**、**扣除实验本底**、**产额归一**、**修正实验数据**、**计算反应截面**，等。



权重函数计算

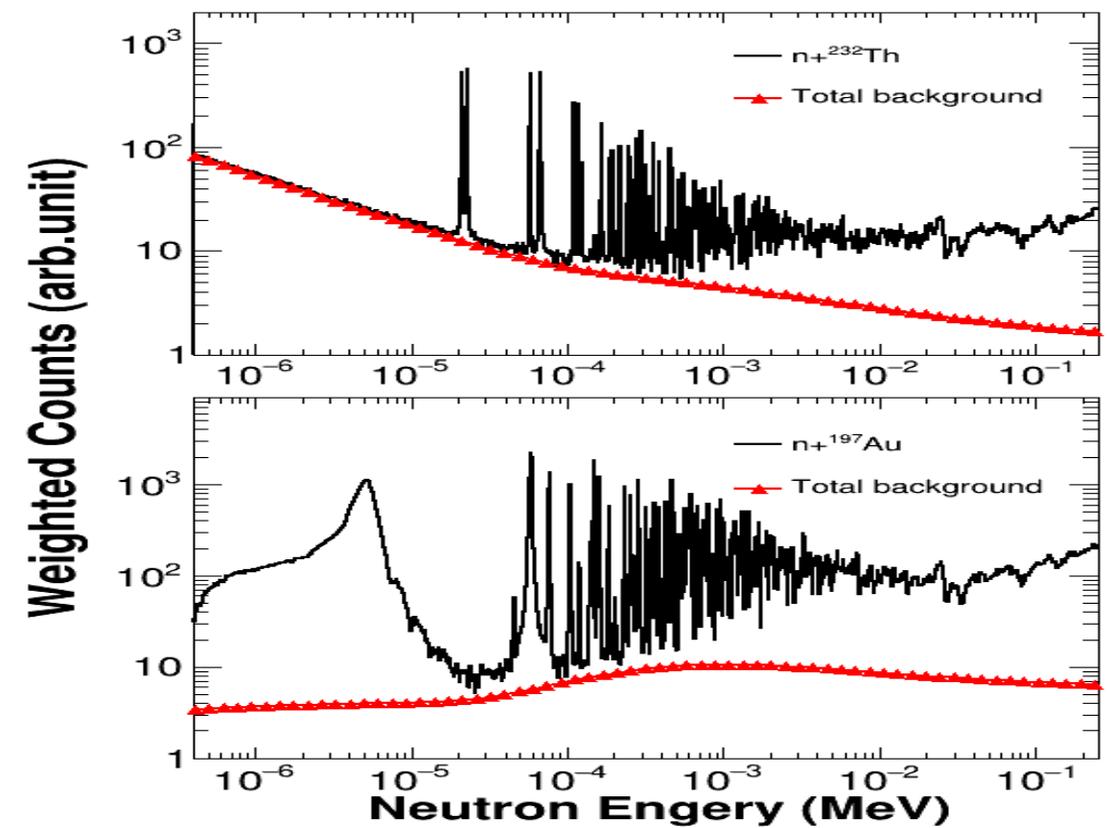
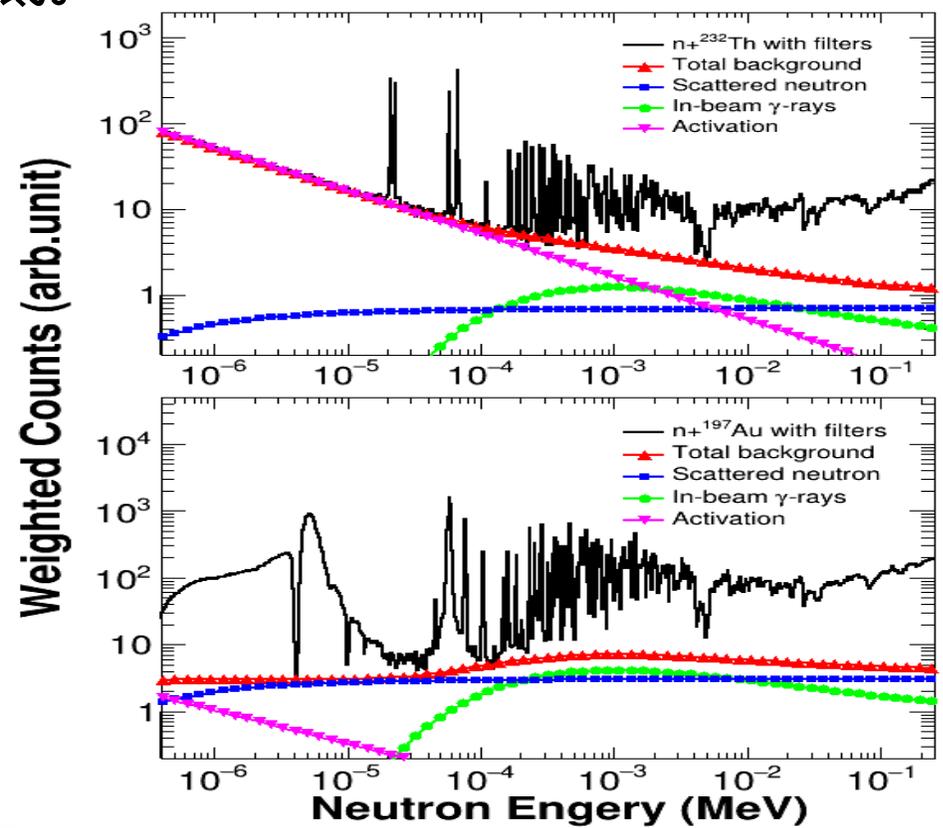
本工作充分考虑了伽马产生位置（深度）对自屏蔽效应的影响，得到了较精确的权重函数。

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_c &= 1 - \prod_i (1 - \varepsilon_{\gamma i}) \approx \sum_i \varepsilon_{\gamma i} \quad \boxed{\varepsilon_{\gamma} = kE_{\gamma}} \\
 &\Downarrow \\
 \varepsilon_c &\approx k \sum_i E_{\gamma i} \approx kE_x = k(S_n + E_{n,c}) \\
 &\Downarrow \\
 Yield(E_n) &= \frac{N(E_n)}{N_n(E_n) \times \varepsilon_c} \propto \frac{N(E_n)}{N_n(E_n) \times (S_n + E_n)}
 \end{aligned}$$



实验本底分析

本工作使用石墨和铅样品测量散射中子和散射伽马本底，结合蒙卡模拟准确扣除实验本底。

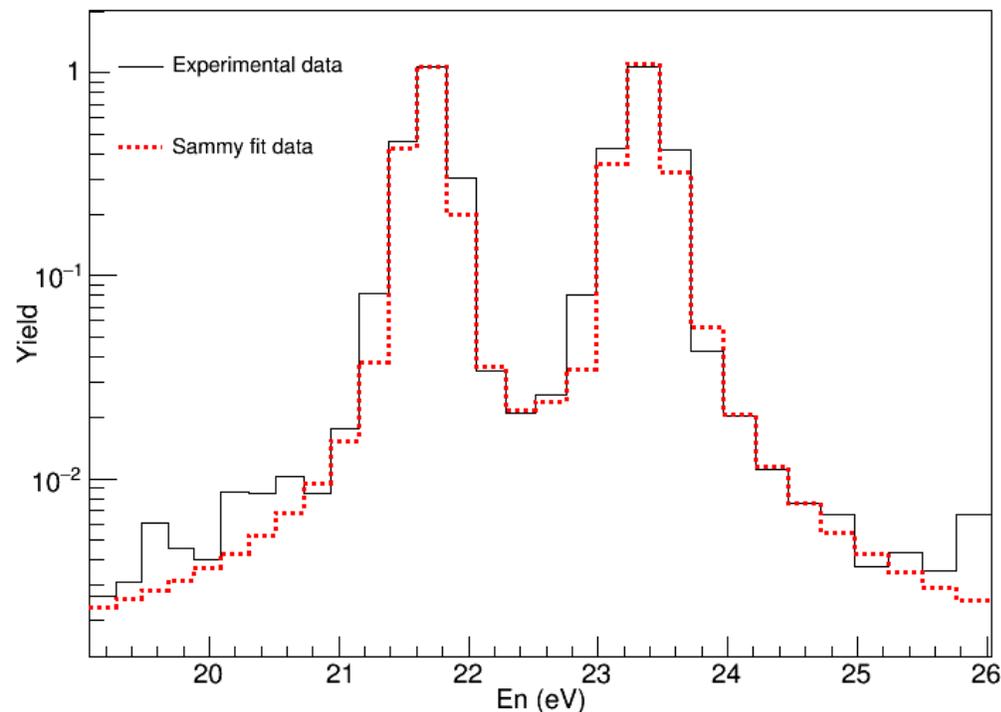


产额归一

使用SAMMY拟合和Geant4模拟两种方法得到产额归一因子，产额计算不再依赖绝对中子注量。同时考虑自吸收-自屏蔽效应的影响和实验阈值的修正。

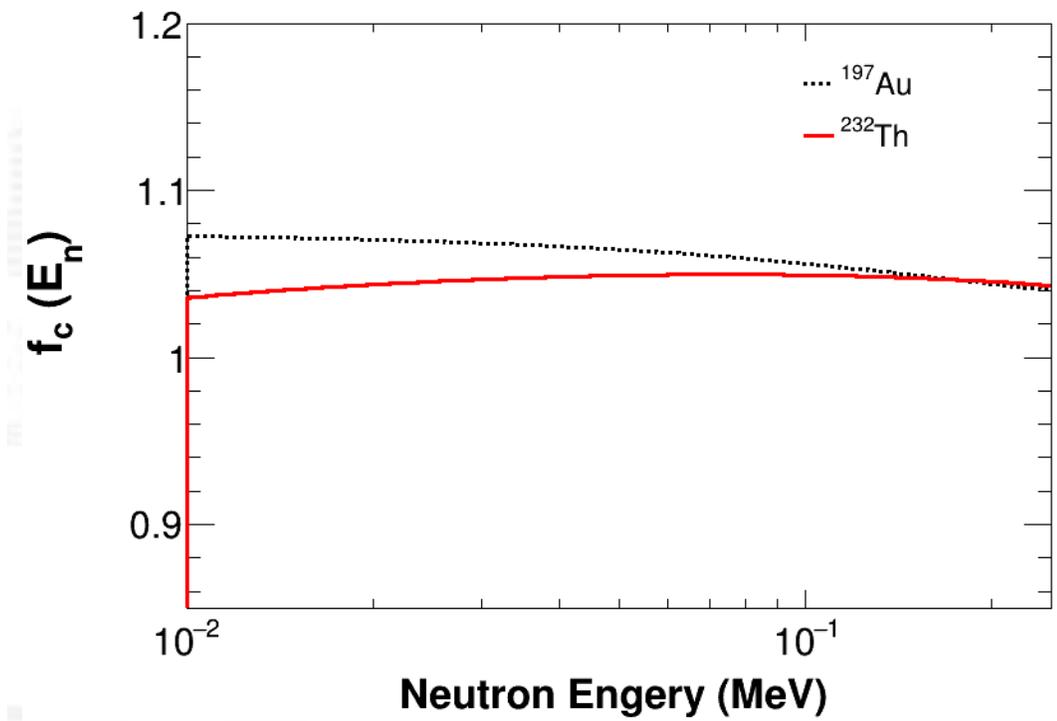
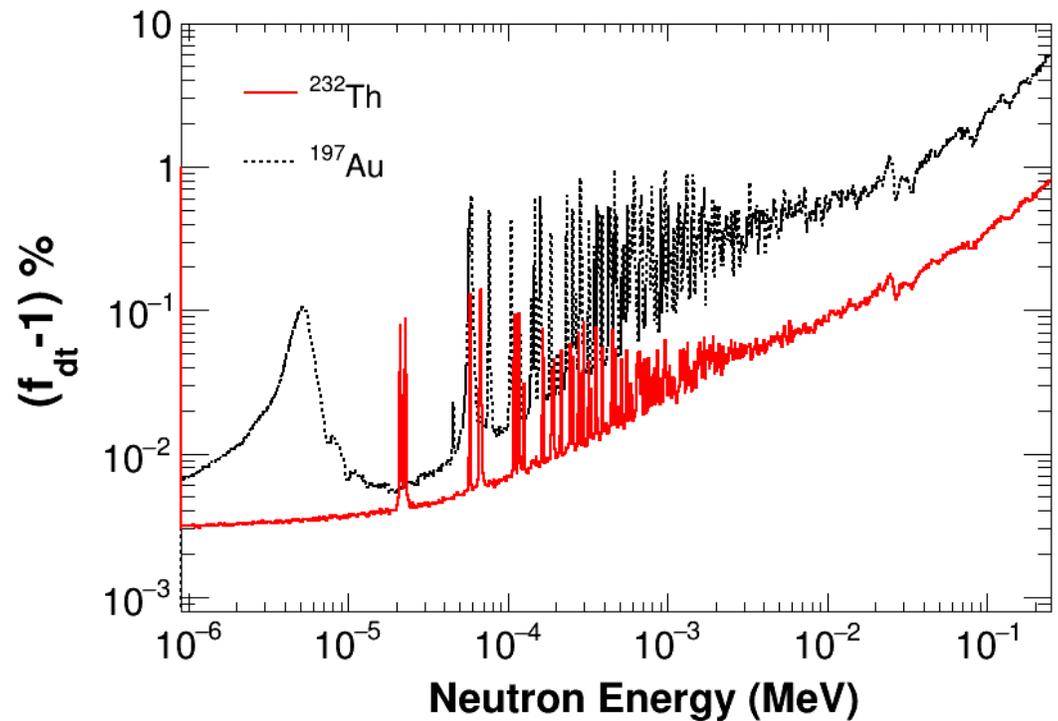
$$Y(E_n) = \frac{1}{K_a} \cdot f \cdot \frac{C_w(E_n) - B_w(E_n)}{\Phi(E_n)E_c}$$

K_a 是产额归一因子， K_a 通过饱和共振峰确定。 f 是修正因子， f 考虑了归一因子的修正、阈值修正、死时间修正和多次散射修正。



数据修正

本工作的数据修正主要是死时间修正和多次散射-自屏蔽修正。



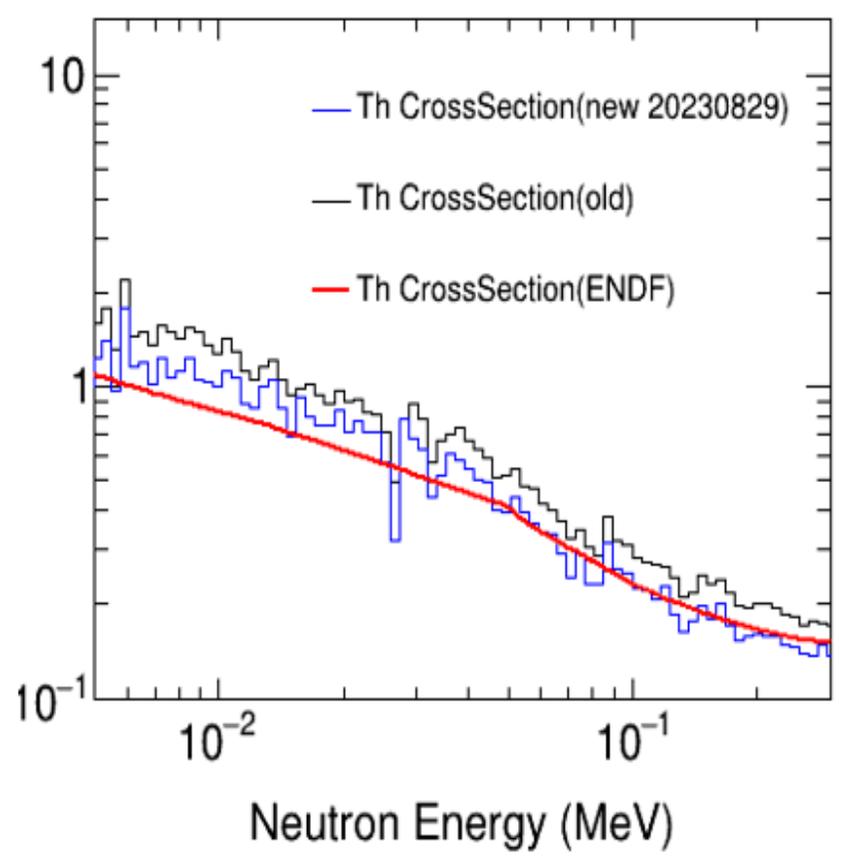
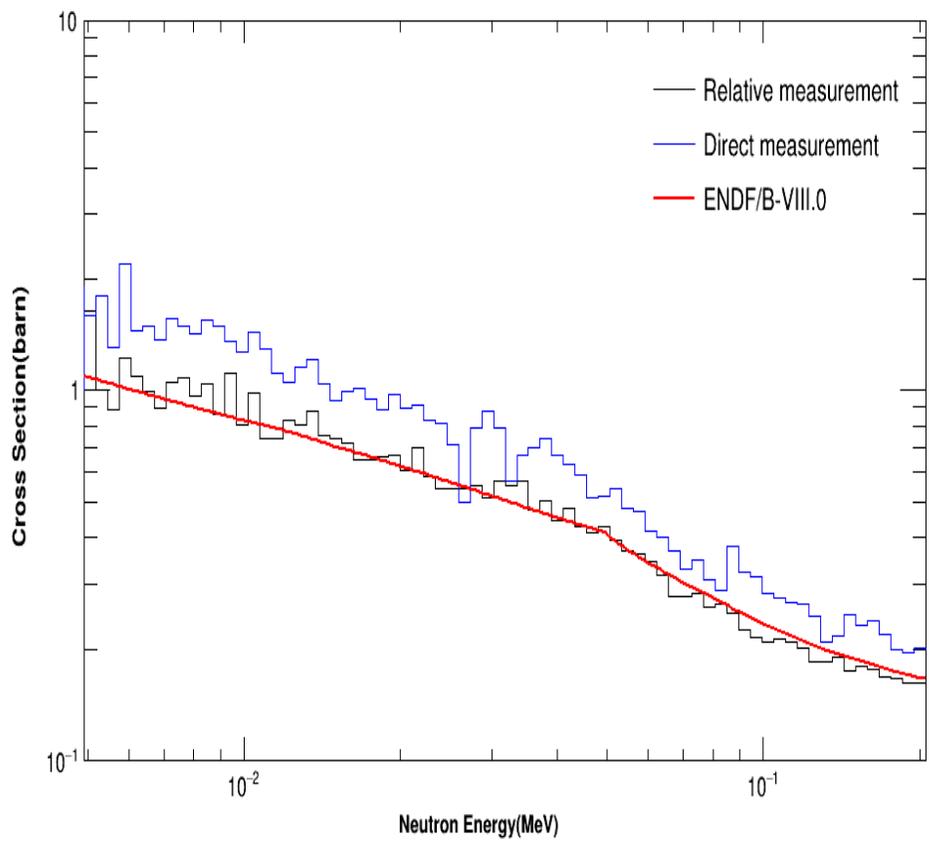
截面计算

本工作使用直接测量法和相对测量法分析 ^{232}Th 在中子辐射俘获截面。

$$Y(E_n) = \frac{C(E_n) - B(E_n)}{\Phi(E_n) \cdot \varepsilon}$$

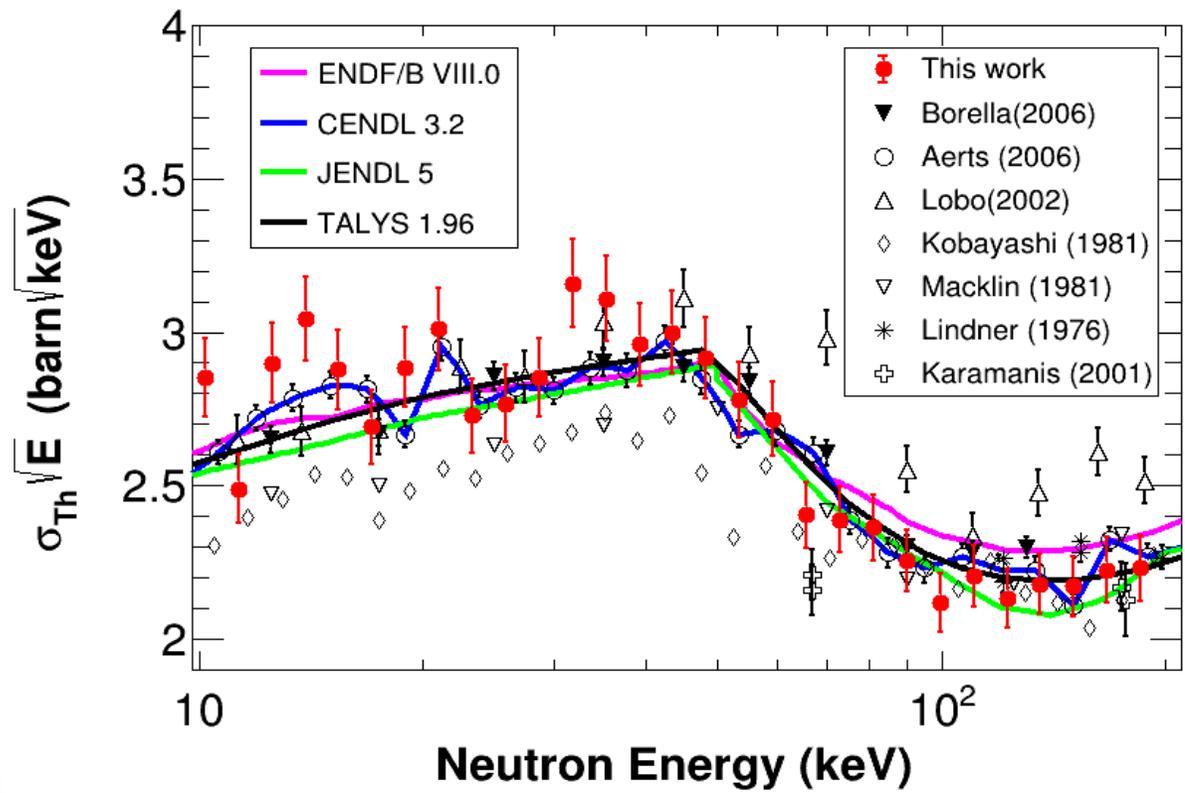
$$\langle Y_{\text{exp}} \rangle = f_{\text{ms}} \cdot \rho \cdot \langle \sigma_{\gamma} \rangle$$

$$\sigma_{\text{Th}} = \frac{\langle \sigma_{\text{Th}} \rangle}{\langle \sigma_{\text{Au}} \rangle} \cdot \sigma_{\text{Au}}$$



测量结果

本工作根据相对测量结果给出了 ^{232}Th 在10 keV-200 keV能区的中子辐射俘获截面，不确定度小于5%，为该能区的数据评价提供了新的实验数据。



Source of uncertainty	^{232}Th (%)	^{197}Au (%)
PHWT		1.2
Normalization	2.0	1.0
Background subtraction	1.5	1.0
Correction		1.3
Counting statistics		1.0
Relative measurement	3.2-3.9	

本工作投稿EPJA, 已接收, 第一作者 王金成 博士生。

目录

研究意义

测量与分析

束内伽马测量

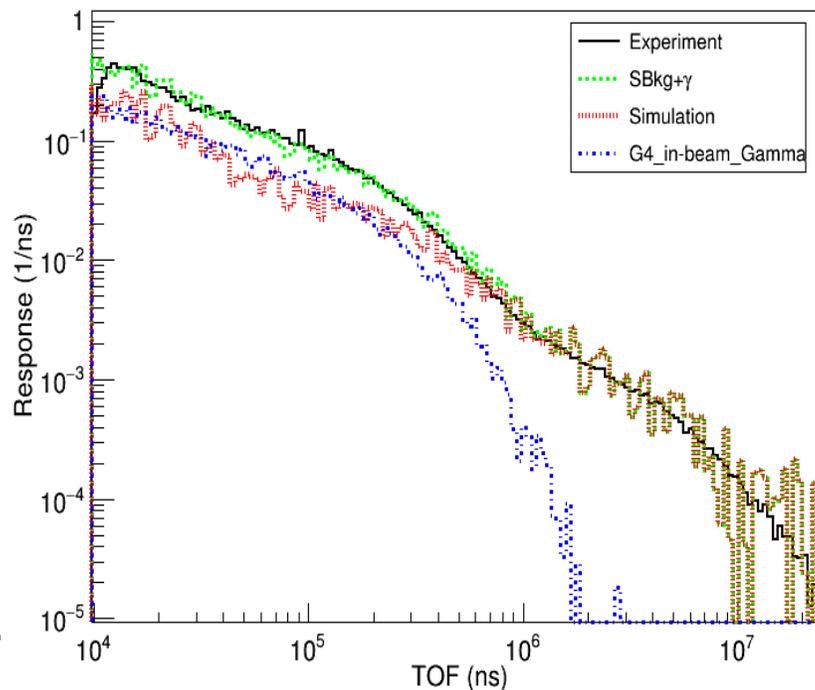
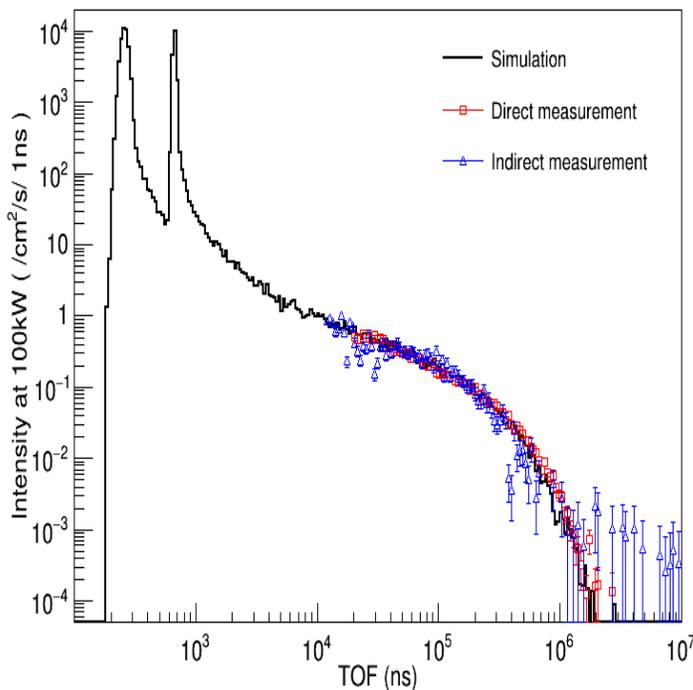
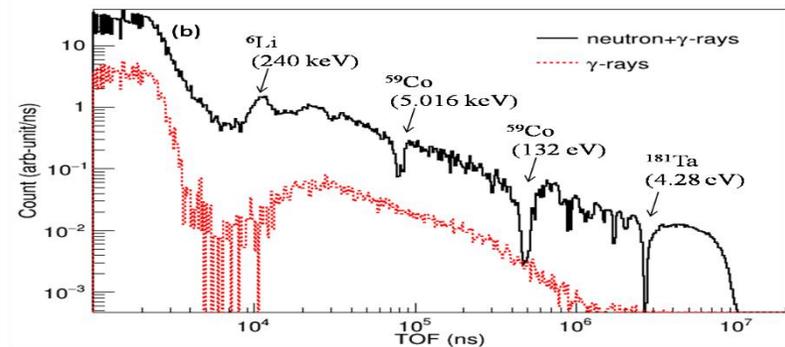
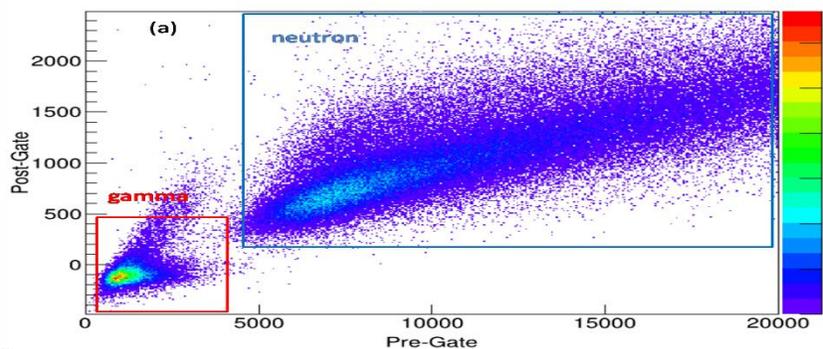
总结和展望

束内伽马本底

高能质子打靶会产生大量的 γ 射线，中子在散裂靶中的输运过程也会产生伽马射线。

这些伽马射线通过中子束线进入实验终端，形成实验本底。

(@ 任杰, 阮锡超, 陈永浩, 等. 物理学报, 69, 172901 (2020))

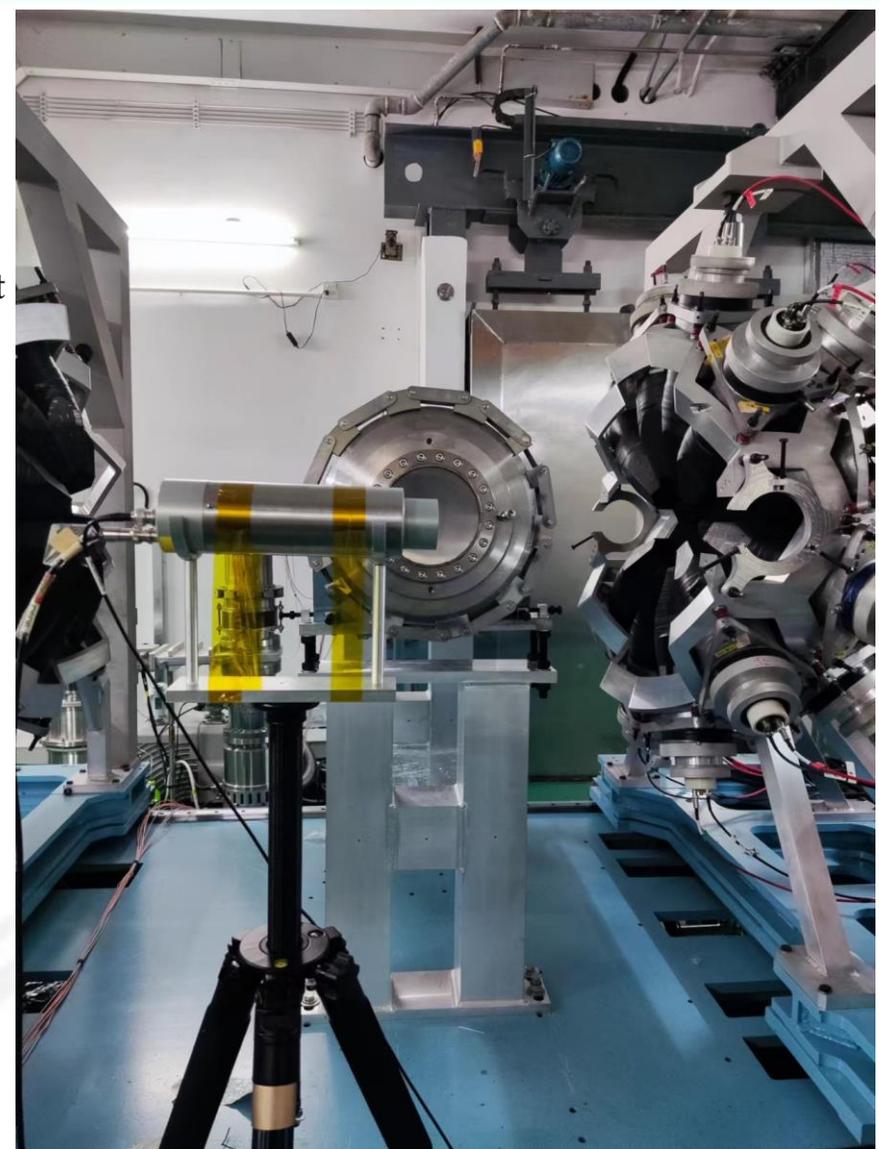
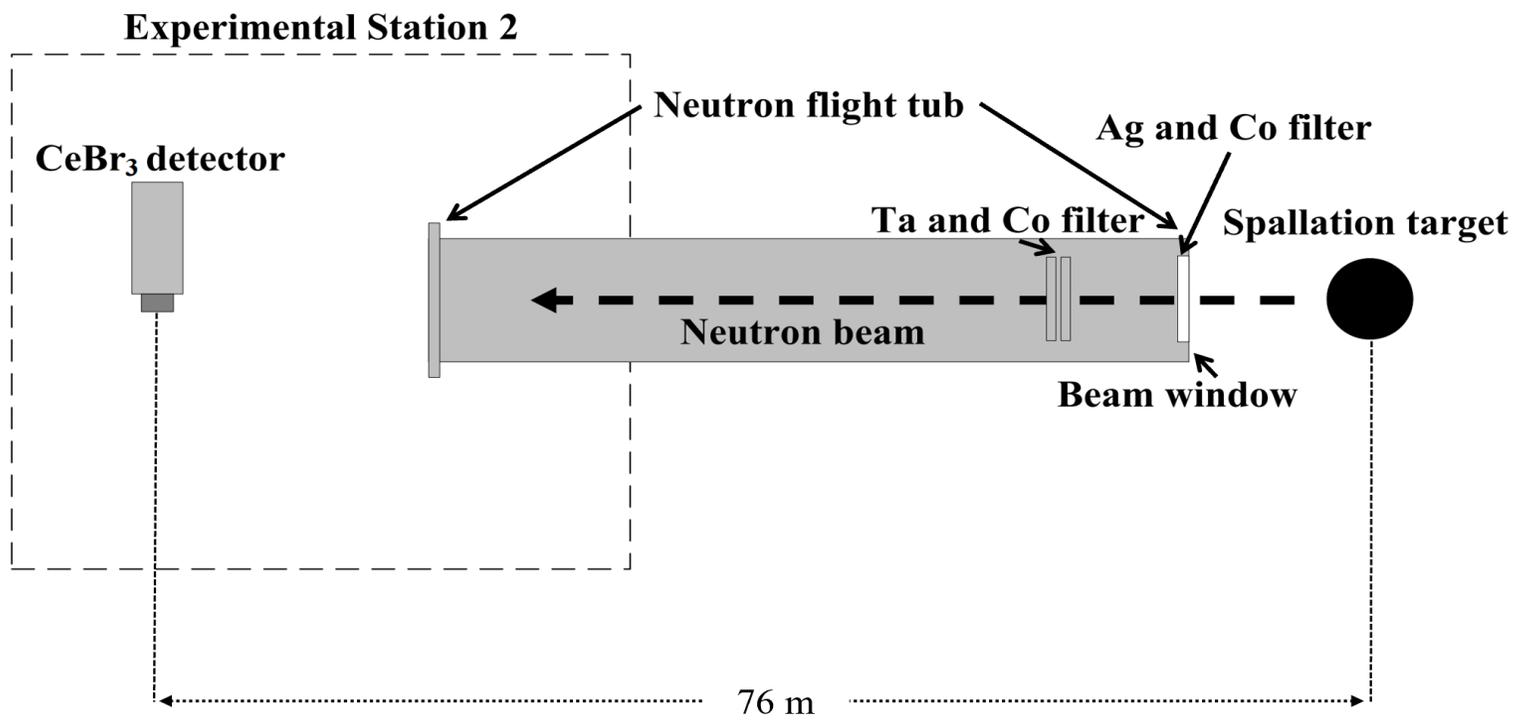


束内伽马能谱测量

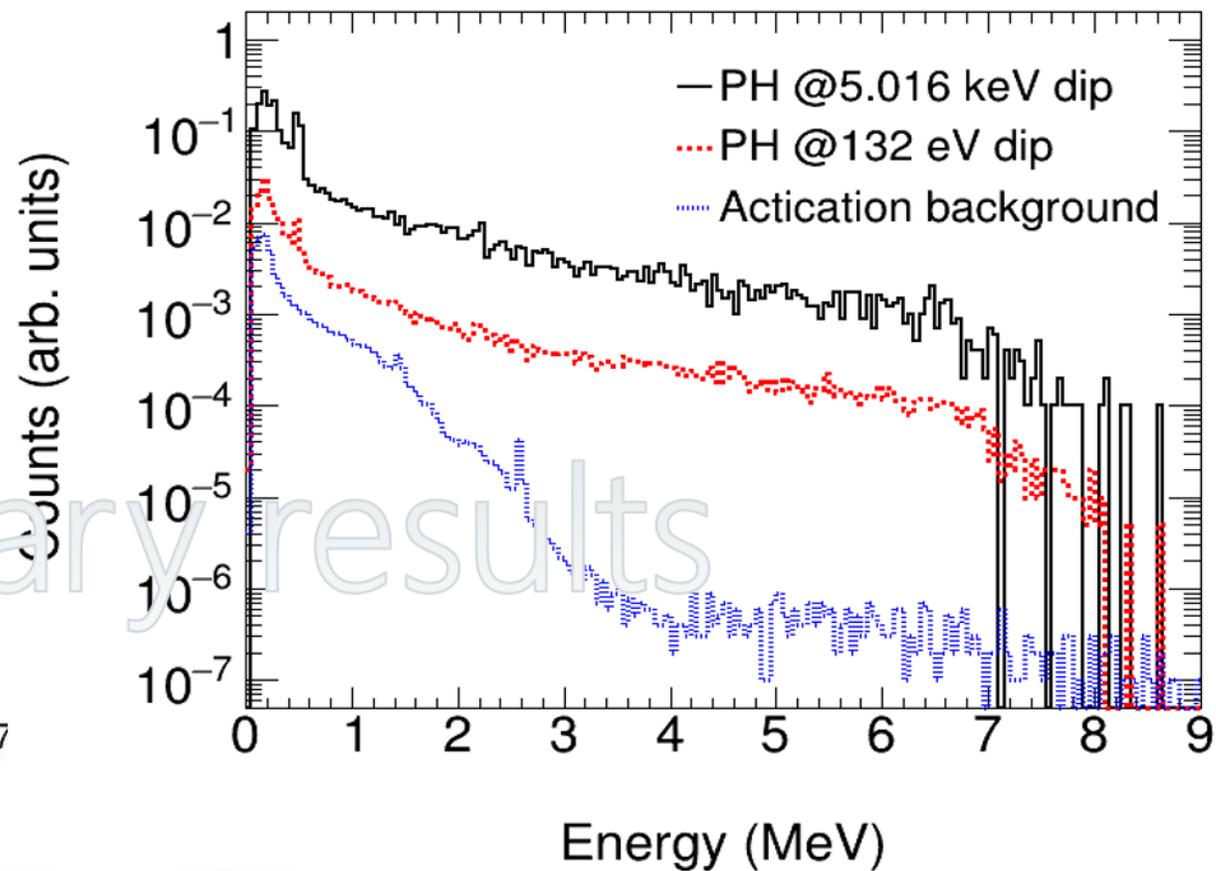
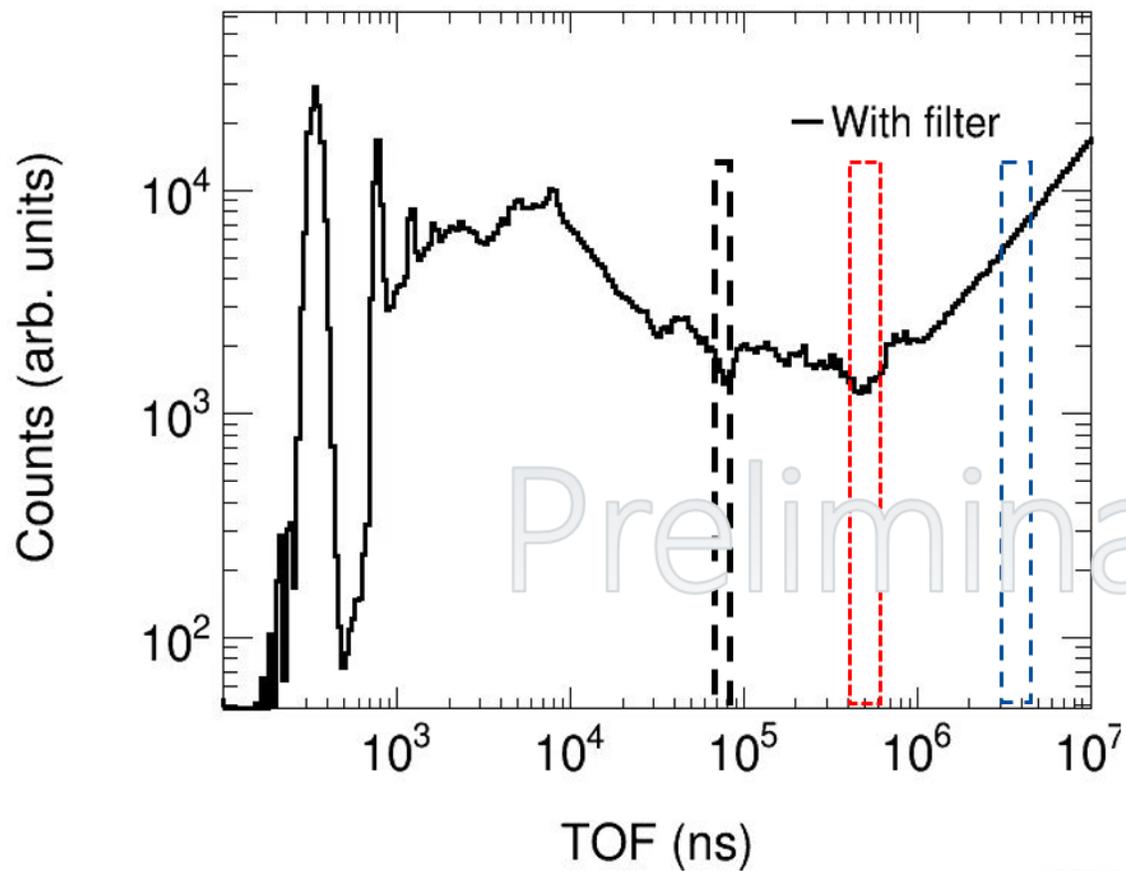
2023年6月，再次开展束内伽马测量，重点研究了能谱结构和不同条件下束内伽马的差异。

本工作解决了以下问题：

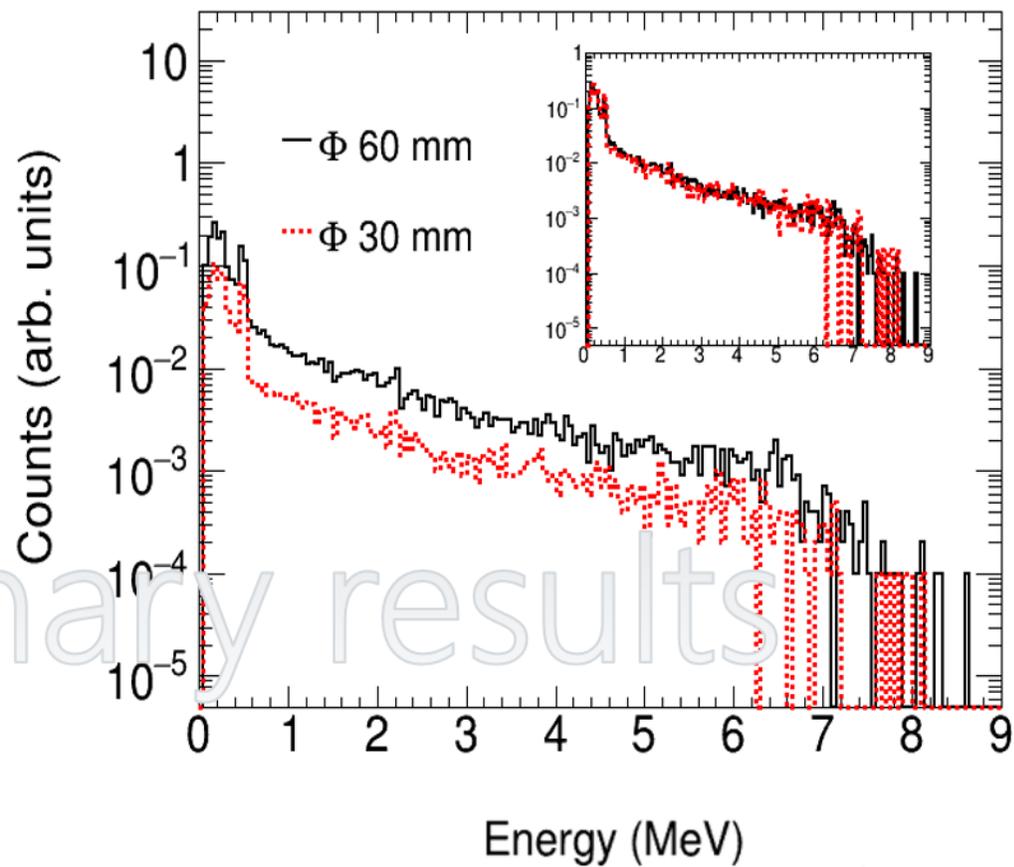
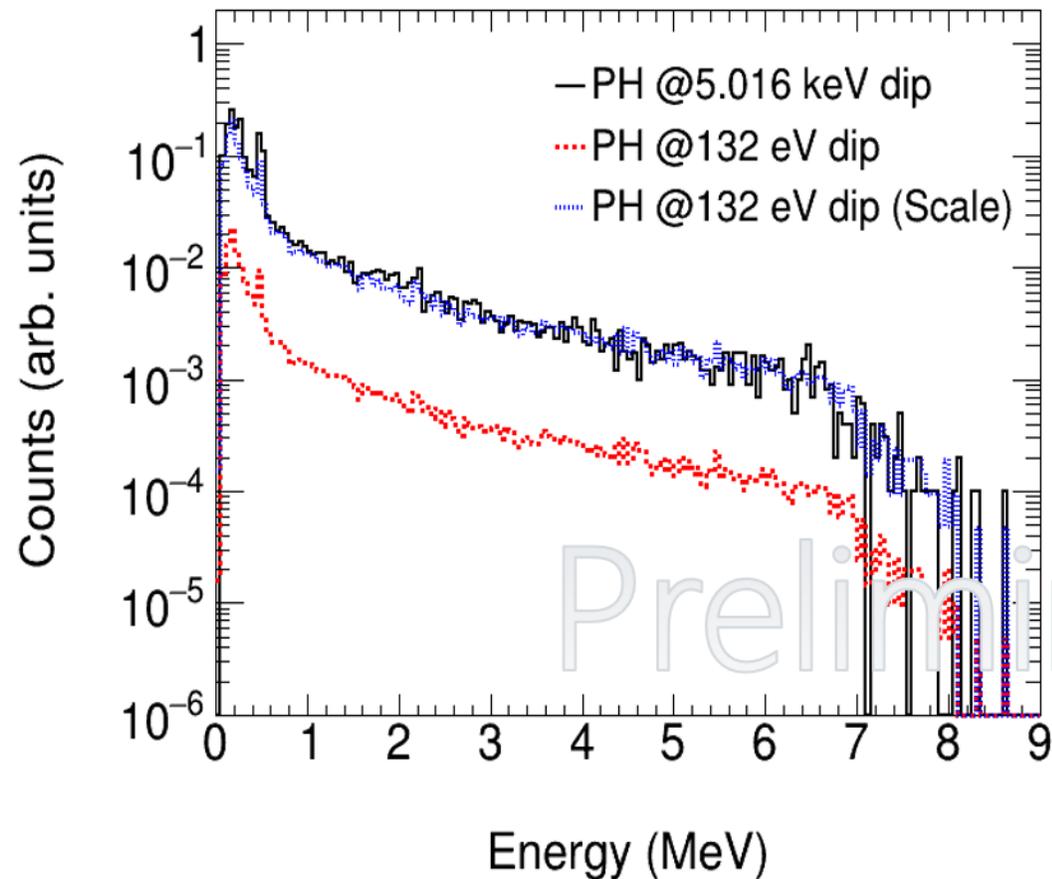
- ◆ **扣除源中子的影响**：黑共振吸收法结合飞行时间技术，扣除特定能量的中子；
- ◆ **降低探测器本底**：CeBr₃闪烁体，具有较好的能量分辨率，同时活化本底能量低；
- ◆ **降低 γ -flash影响**：优化CeBr₃闪烁体的体积和位置，避免饱和。



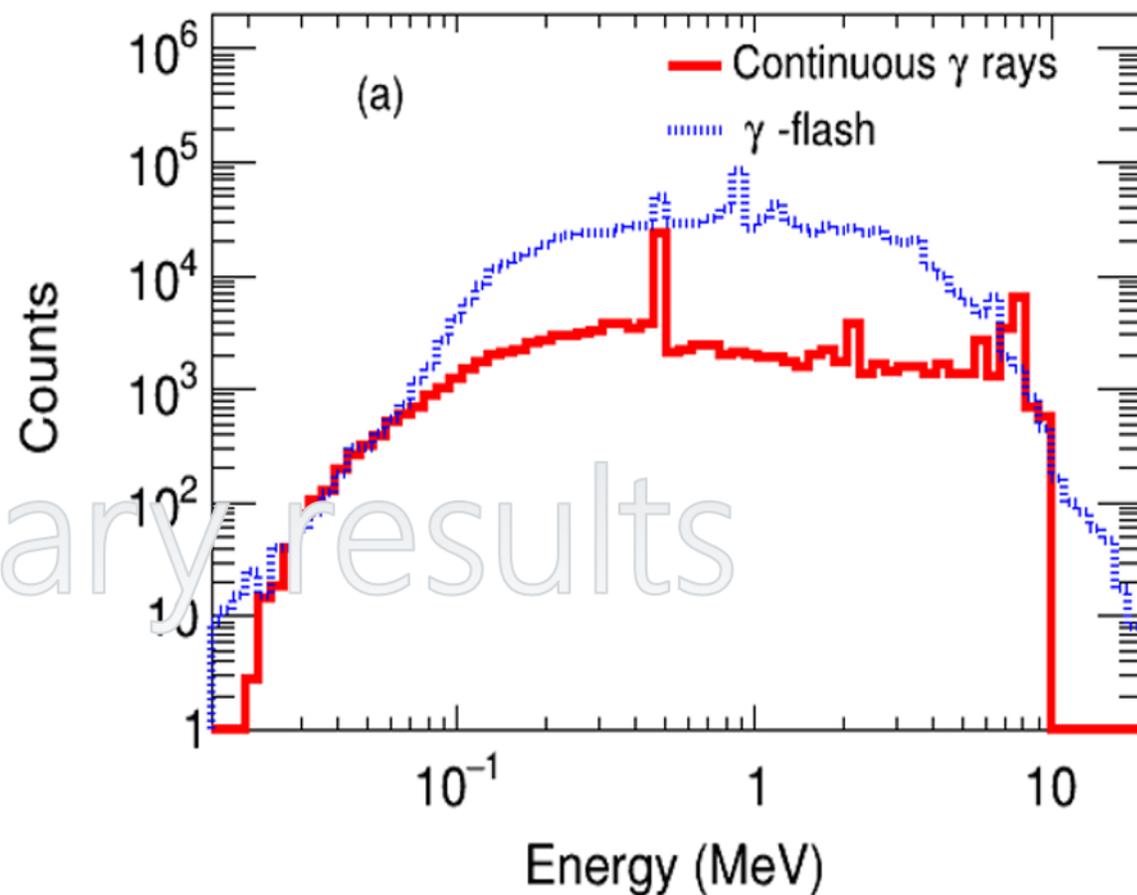
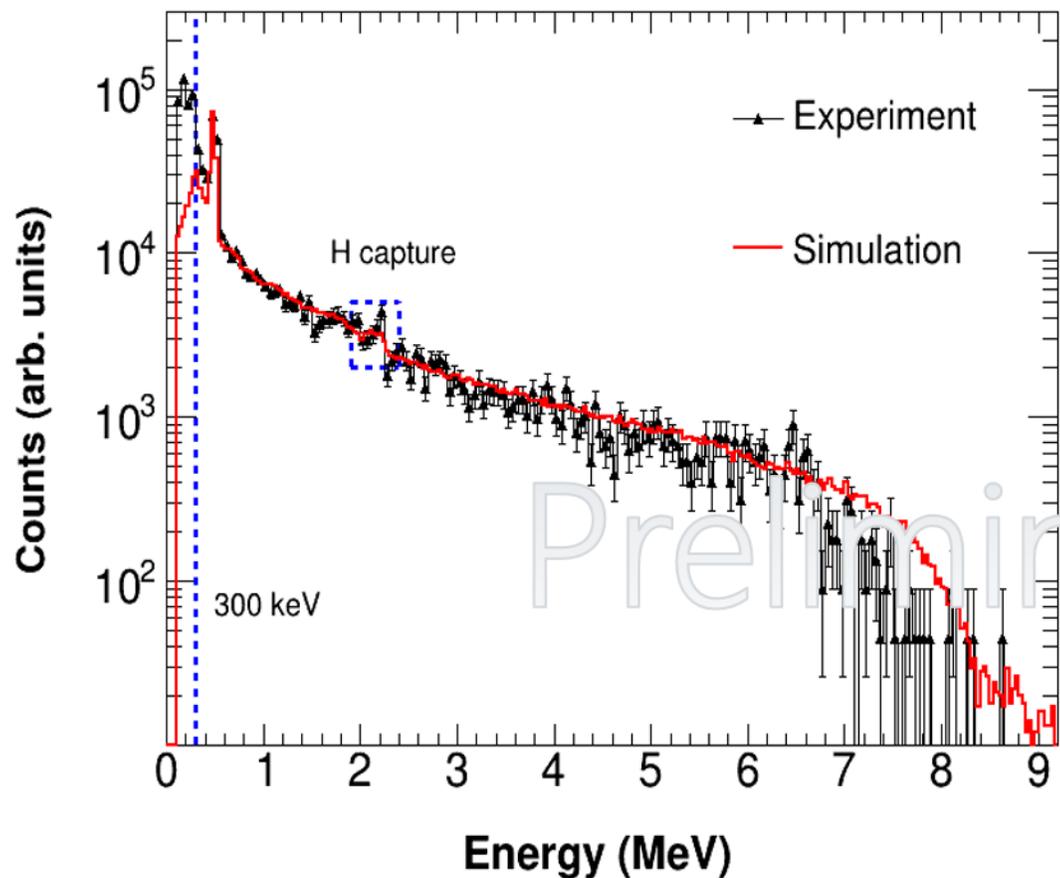
黑共振吸收法



不同TOF时间、不同束斑条件下的测量结果



模拟结果与实验测量结果具有较好的一致性



Preliminary results

目录

研究意义

测量与分析

束内伽马测量

总结和展望

总结:

- C_6D_6 探测器的实验测量技术和数据分析方法都已比较成熟, 能够较好地满足核数据、核天体物理等研究的需求, 并且开始应用于核技术领域;
- 目前, 实验本底仍是制约测量精度的主要因素之一;
- 准确的蒙卡模拟能够较好地评估实验本底, 甚至预测实验可行性;
- 相对测量法能够避免能谱精度的影响, 但是会引入双重的不确定度;
- 新发布的中子能谱提高了测量结果的准确度, 但仍需进一步提高精度。

CHINA NUCLEAR DATA CENTER

展望：

- 继续优化改进 C_6D_6 探测器和实验测量技术，提高实验测量精度；
- 继续开展源中子能谱和能量分辨率的测量与分析工作，提高辐射俘获截面数据的准确度；
- 与 4π BaF_2 阵列探测器（GTAF）联合开展中子辐射俘获截面的系统性测量；
- 发展新的探测器和测量方法，拓展可测量核素和可测量能区的范围；

更多的团队使用 C_6D_6 探测器系统开展研究工作，产出更多更好的成果！

精心做好核数据工作

小规模高水平有特点

跨入国际先进行列

李光亚

谢谢!

请各位专家批评指正!

CHINA NUCLEAR DATA CENTER