

基于Back-n的 ^{124}Xe 中子辐射俘获截面测量

薛洁明, 任杰, 阮锡超

中国原子能科学研究院 核数据重点实验室

湖南衡阳·2026年7月14日-16日

目录

CONTENTS

01

研究背景

02

实验测量与方法

03

实验数据分析

04

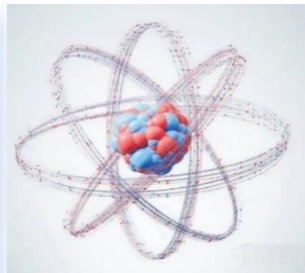
实验结果

01

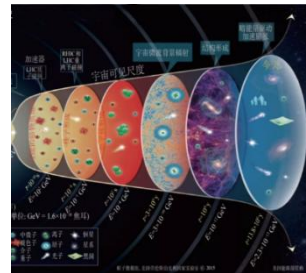
研究背景

中子辐射俘获反应截面是定量衡量特定原子核俘获一个中子并释放 γ 射线的概率，是核物理研究、天体元素合成模拟以及核能应用中不可或缺的核心参数

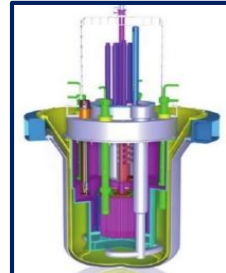
- 揭示了微观世界中子与原子核相互作用的强度，是理解恒星中重元素合成过程（如s-过程）的关键数据；
- 作为检验核模型理论精度与预言可靠性的核心实验基准，其测量数据直接约束着核能级密度、 γ 强度函数及光学模型势等基础参数的确定；
- 服务于核反应堆设计、燃料循环优化及核废料处理等实际应用，是连接基础核物理与天体演化及核能技术的重要桥梁。



核理论模型检验



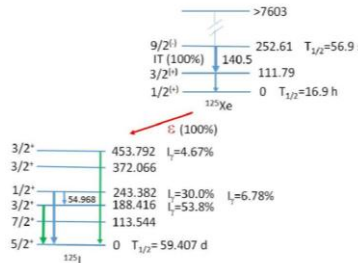
核天体物理研究



核能发展

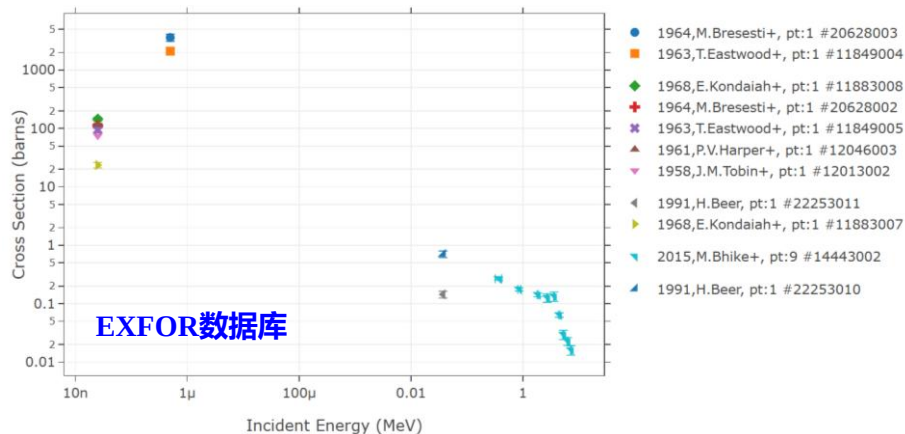
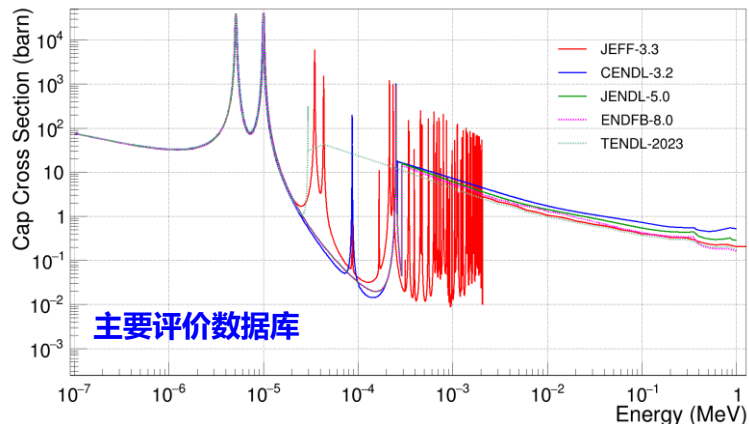
中子与氙反应的截面数据，在核能开发、核武器核查、核衰变研究和核模型构建中均具重要价值，同时是揭示核反应机制与核结构的基础数据

- 高纯度的氙同位素被广泛应用于医疗诊断、惯性导航、基础物理以及放射性同位素生产等领域，其中 ^{124}Xe 被用来生产放射性同位素 ^{125}I ；
- ^{124}Xe 是胶囊掺杂剂的主要选择；
- 氙同位素的中子俘获截面对于核天体物理学 also 具有重要意义，可为唯象模型中的s过程计算提供关键的核物理输入；
- $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)$ 反应可作为惯性约束聚变(ICF)的“诊断探针”，用于探测下散射中子（能量已降低的中子）；



国内外研究现状：评价数据分歧大，实验数据少

- 由于难以制备合适的气体靶进行辐照，关于氙的实验数据很少；
- 国际上公开数据中未见共振能区的 $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)$ 数据，数据的数量和质量都有待提升；
- 现有评价数据库之间存在明显分歧，需要高精度实验数据的澄清；

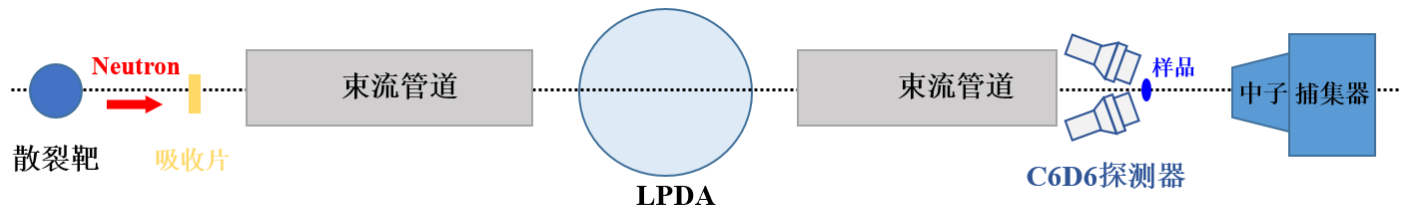


- ✓ Back-n 具有超宽能谱、高通量、高分辨时间结构的特点，为核数据测量、探测器标定、材料研究等提供多学科研究平台；
- ✓ 在Back-n上使用C6D6探测器系统测量中子辐射俘获截面的实验技术和数据分析方法都已比较成熟；

02

实验测量与方法

➤ **实验开展** 2024.04 质子打靶功率: 160 kW (双束团模式) 束斑尺寸: $\Phi 12-15-40$ 吸收片: Cd+Ag+Co

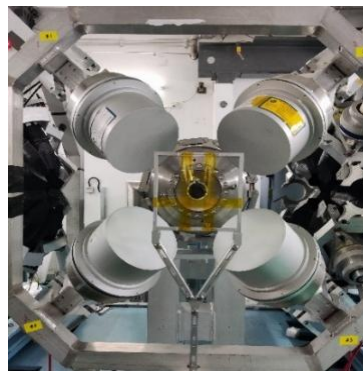


实验靶	尺寸/mm	吸收片	时长/h
Xe-124	$\Phi 28 \times 14$	Cd	29.8
Xe-124	$\Phi 28 \times 14$	Cd+Ag+Co	9.6
空靶	\	Cd	12.7
对照样品	$\Phi 28 \times 14$	Cd+Ag+Co	10
对照样品	$\Phi 28 \times 14$	Cd	30
Au	$\Phi 40 \times 0.2$	Cd+Ag+Co	7.8
Au	$\Phi 40 \times 0.2$	Cd	10

样品制备:
活性炭吸附高纯 ^{124}Xe 气体



Enrichment: 99.991%



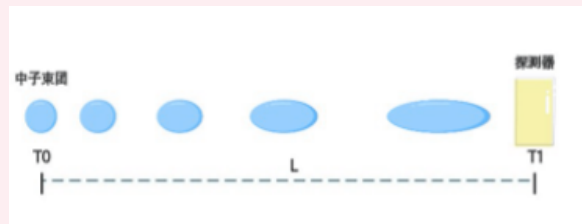
- EJ-315液体闪烁体，具有较快的时间响应；
- ET9390KB 光电倍增管；
- 采用全波形数字化采集，1 GS采样率，12 bit分辨率。

利用高纯度 ^{124}Xe 样品，在宽中子能区开展 $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)$ 反应截面的测量

确定中子能量

中子飞行时间法 (TOF)

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



修正探测器探测效率

脉冲高度权重技术 (PHWT)

■ C6C6探测器

- (1) 对中子的灵敏度很低 (2) 对单个伽马射线的探测效率很低

$$\int R(E_d, E_\gamma) W(E_d) dE_d = k E_\gamma$$

让探测器的“有效探测效率”与事件释放的总伽马能量(E_γ)成正比

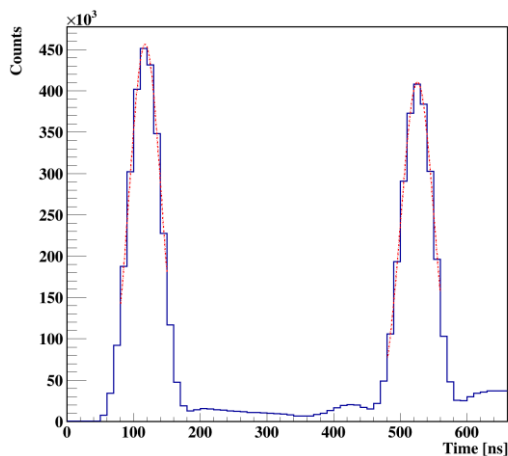
03

实验数据分析

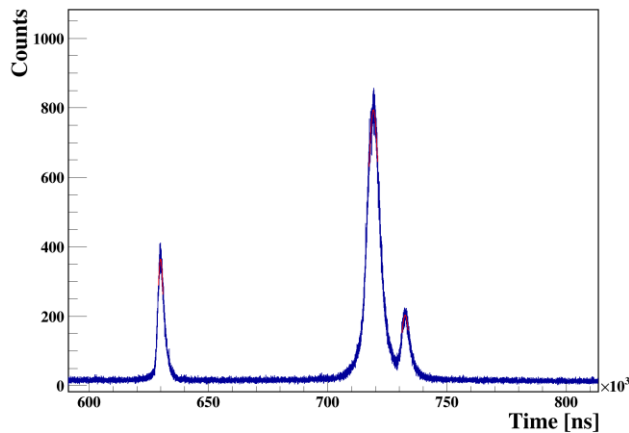


$$Tof_n = T_n - T_0 = T_n - (T_\gamma - Tof_\gamma)$$

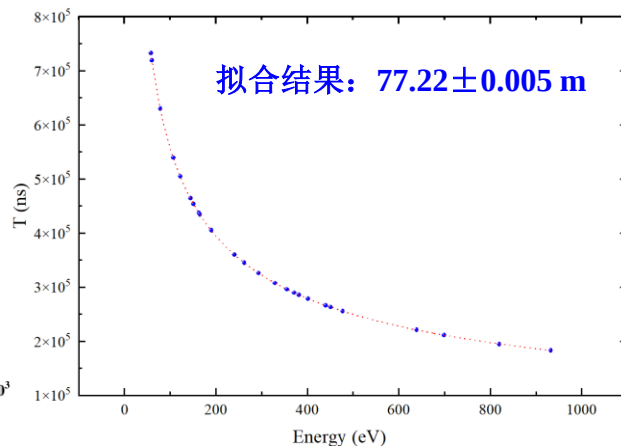
- 利用 ^{197}Au 的共振峰
- 提取探测到的信号分布，高斯拟合共振峰得到对应时间



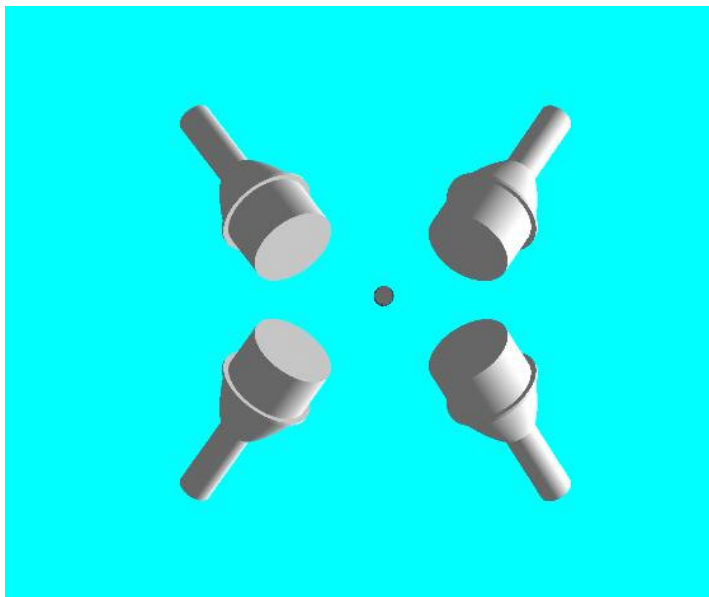
中子飞行时间定时



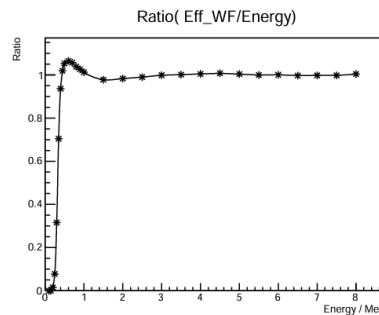
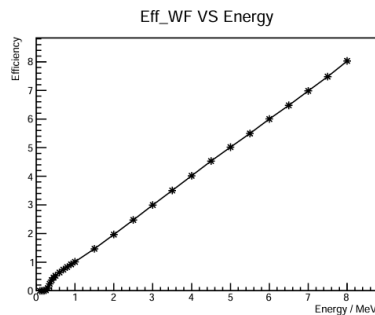
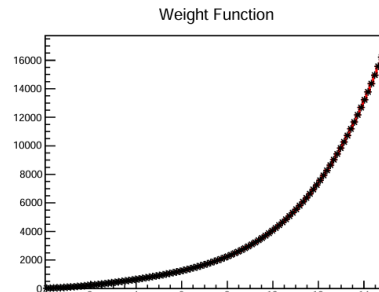
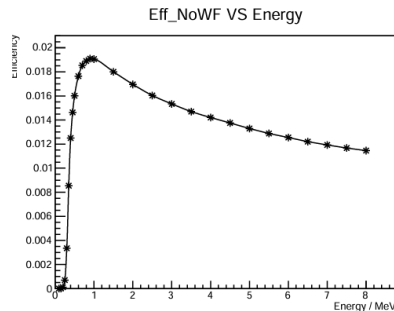
^{197}Au 共振峰拟合



中子飞行距离拟合



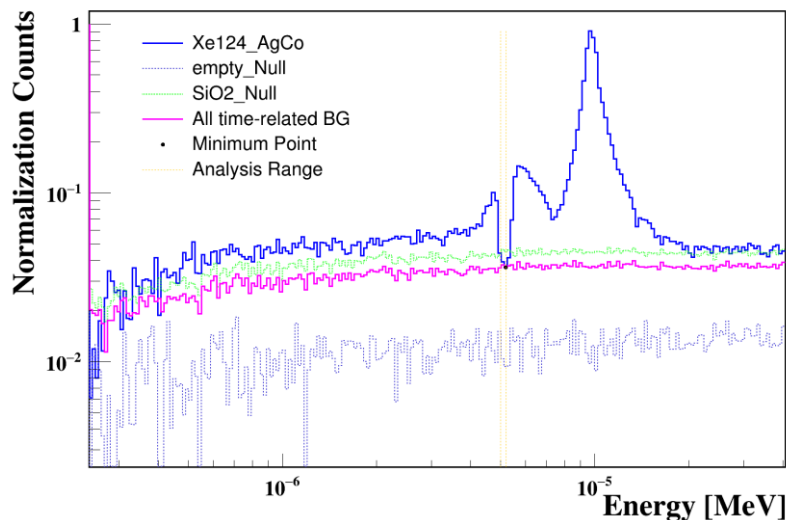
Geant4构建的几何模型



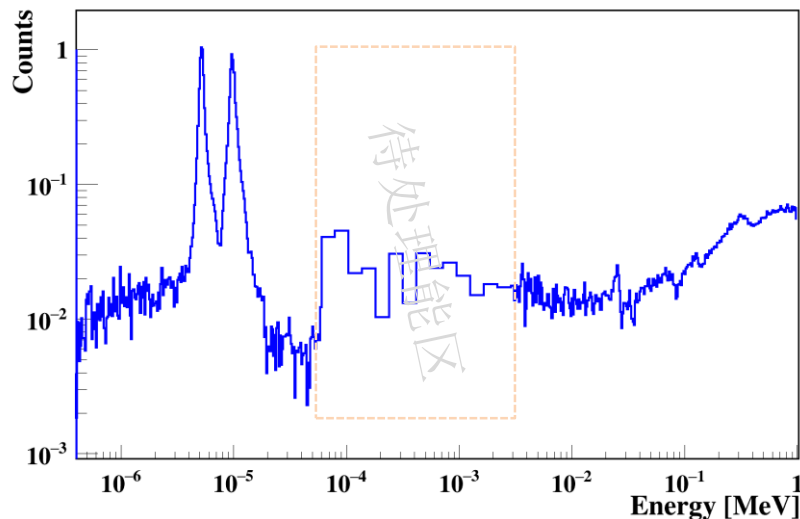
^{124}Xe 的多项式权重函数计算

- 与时间无关的本底：电子学噪声、环境本底等；
- 与时间相关的本底：中子输运本底、中子散射本底、散裂靶产生的 γ 本底(束内伽马本底)等

$$BG_{all} = BG_0 + BG_{tran} + BG_{SiO2+C}$$



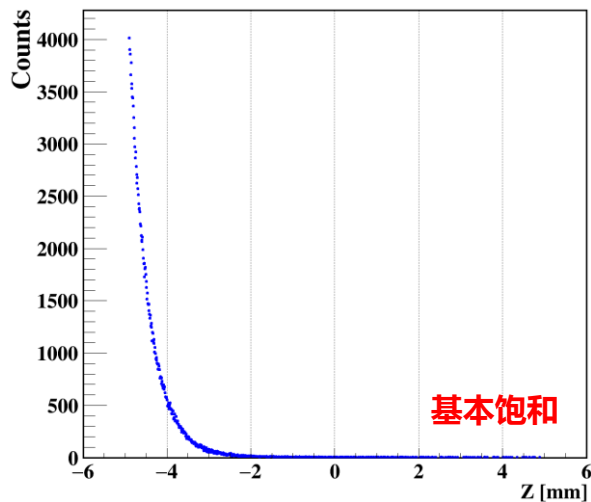
加权后的归一化能谱



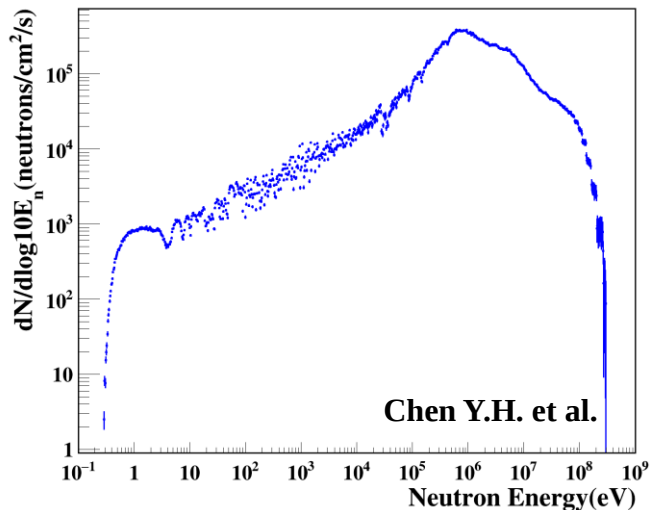
扣除本底后的净计数谱

强共振峰能量处，所有中子均被样品吸收而无法穿透靶($\Gamma_n \ll \Gamma_\gamma$)，此时中子辐射俘获反应产额 $Y \approx 1$

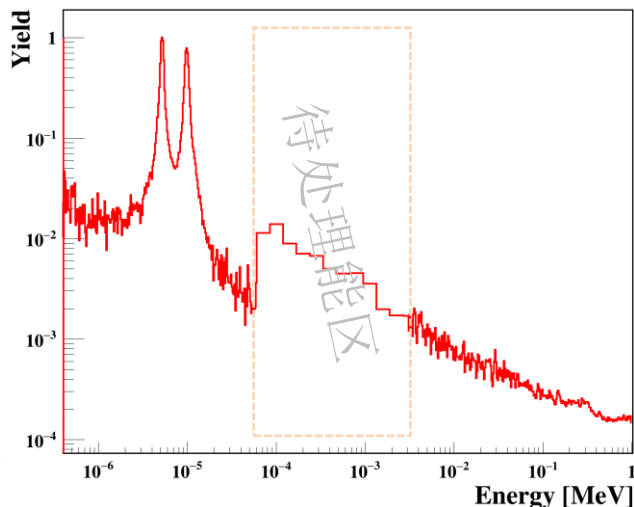
$$Y(E_n) = \frac{1}{A} \cdot f \cdot \frac{Net(E_n)}{\Phi(E_n)E_C}$$



模拟在样品深度方向伽马射线产生位置



Back-n中子能谱

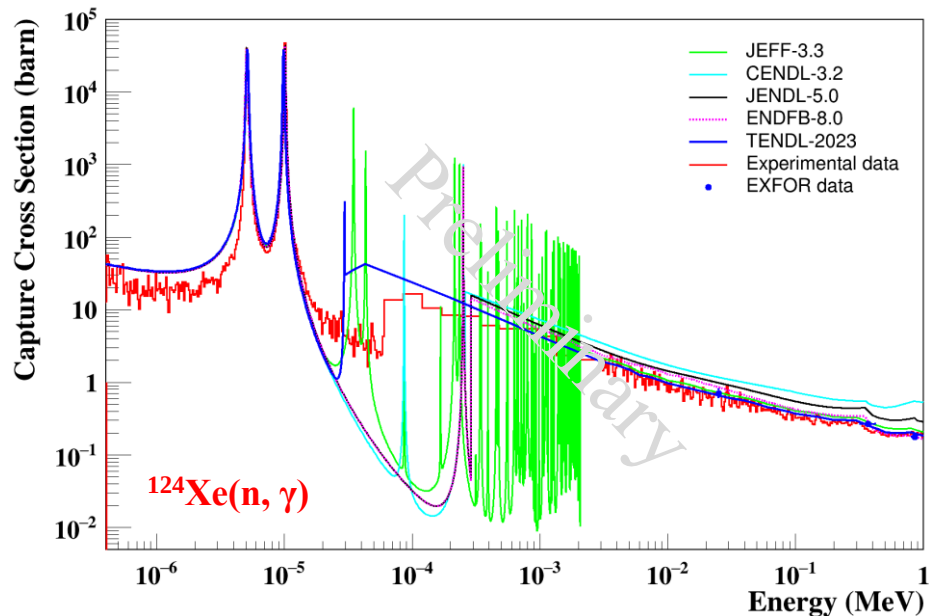


修正后的中子俘获产额

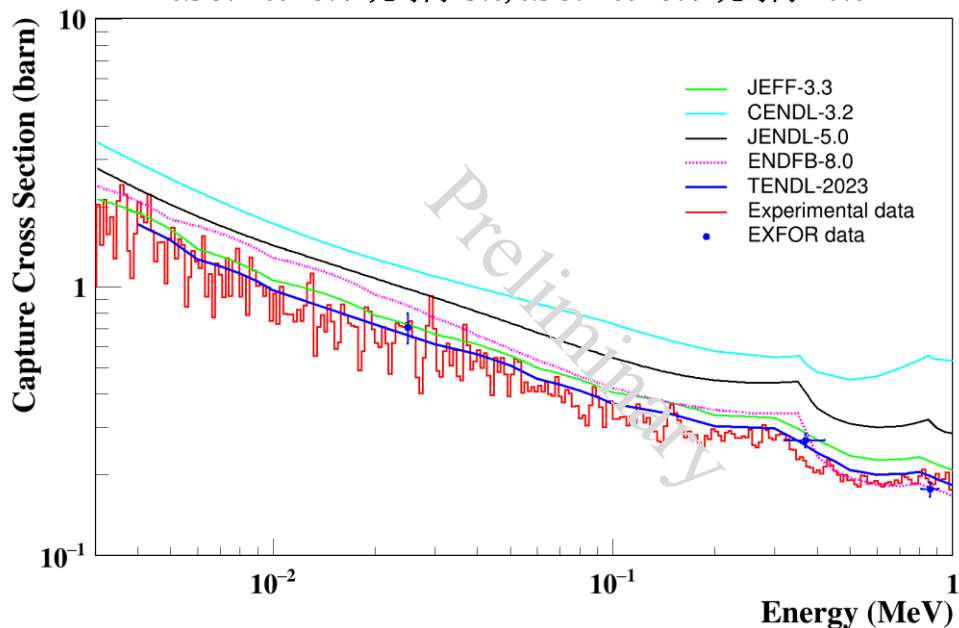
04

实验结果

初步结果分析 $\sigma_{cap} = Y(E_n) \times \frac{\sigma_{tot}}{(1 - e^{-N \cdot t \cdot \sigma_{tot}})}$



0.3 eV-100 keV: 死时间<5%, 0.3 eV-200 keV: 死时间<10%



- 在低能区，实验值较评价数据整体偏低；
- 在不可分辨共振区，实验结果与TENDL-2023评价数据吻合良好；
- 两个共振峰峰位与各评价数据库符合较好；
- 实验数据与 H.Beer (1991), M.Bhike(2015)等人的测量结果符合较好；

小结

➤ $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)$ 中子俘获截面实验

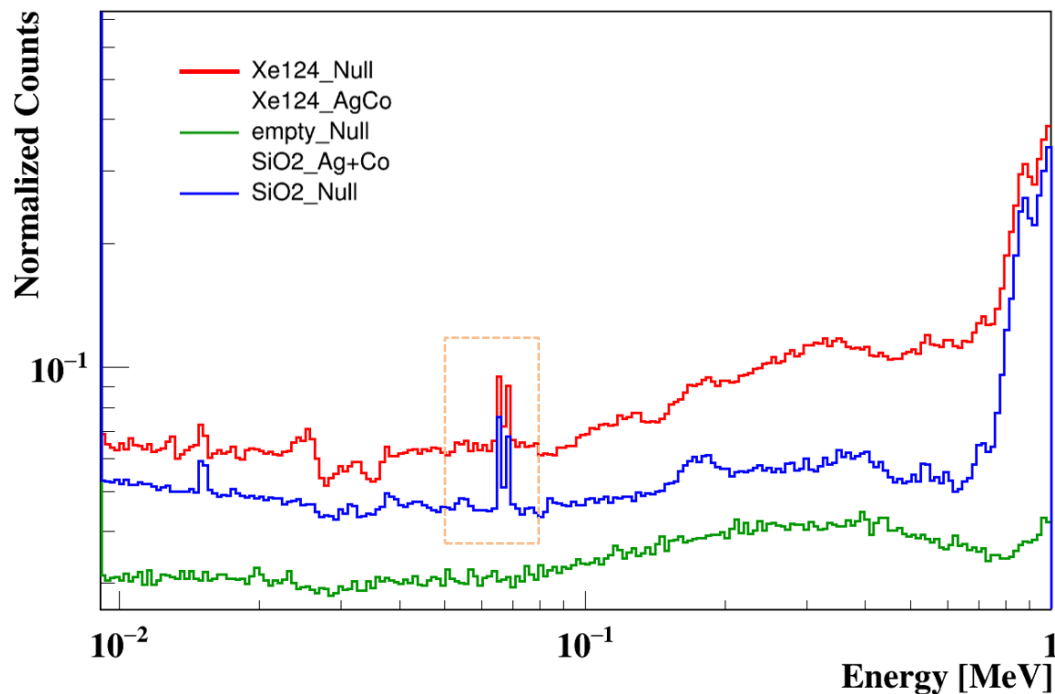
- 样品制备：采用活性炭吸附高纯 ^{124}Xe 气体
- 实验测量：基于CSNS反角白光中子源，利用 C_6D_6 探测器开展 ^{124}Xe 中子俘获截面测量，获取了0.3 eV ~ 200 keV宽能区范围内的实验数据
- 可分辨共振区：低能区两个共振峰的峰位与各评价数据库符合较好
- 不可分辨共振区：实验结果与TENDL-2023评价数据吻合良好
- 实验数据一致性：测量数据与EXFOR数据库中已有实验数据符合较好

填补相关实验数据的空缺，澄清现有评价数据库的数据分歧

敬请各位老师批评指正！

基于Back-n的 ^{124}Xe 中子辐射俘获截面测量

Back-up



经质子数归一后的能谱

该共振结构由 $^{28}\text{Si}(n,\gamma)$ 反应引起，还可作为评估本底扣除效果的重要判据