

2026年CSNS反角白光中子实验装置（第十届）用户研讨会|2026. 07. 衡阳



南华大学中子俘获截面测量 与光中子截面评估进展

李鑫祥

南华大学 核科学技术学院

Contents

01

背景与动机

02

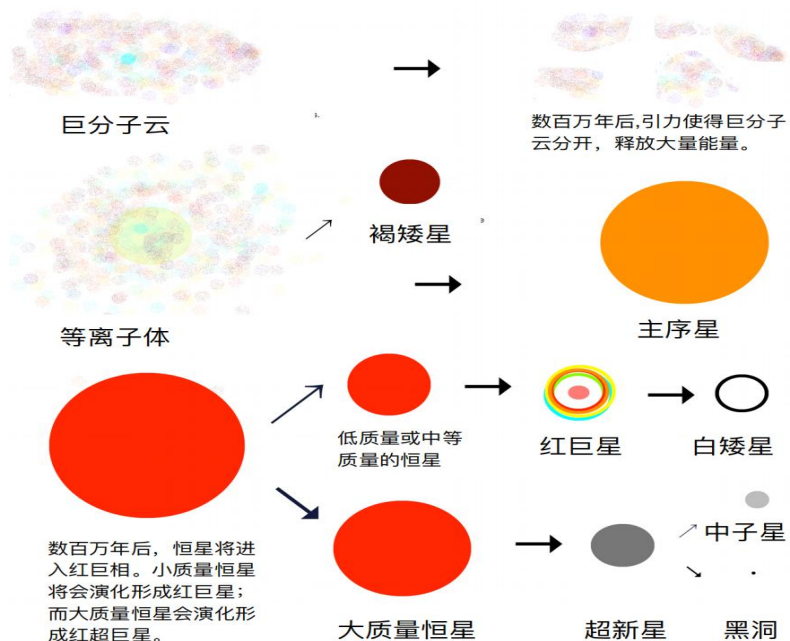
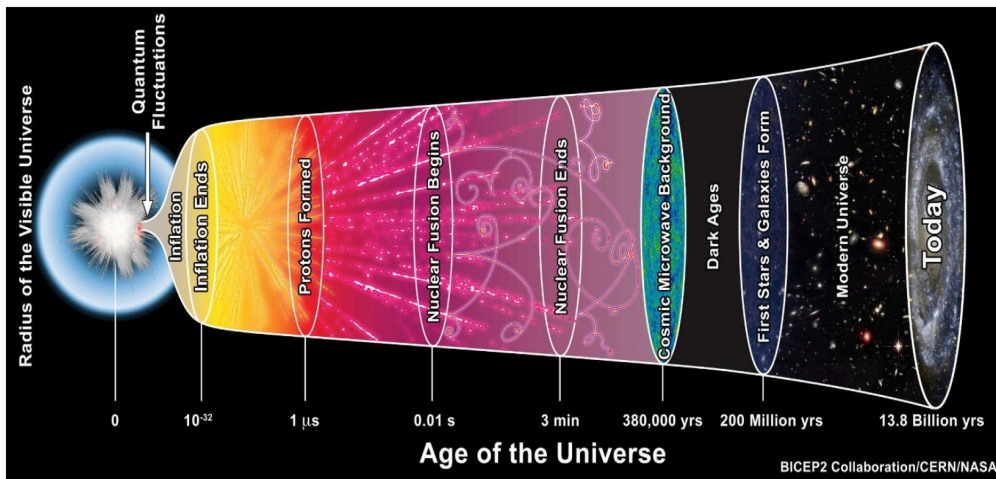
南华大学中子俘获截面
实验研究进展

03

光中子截面数据评估

04

总结

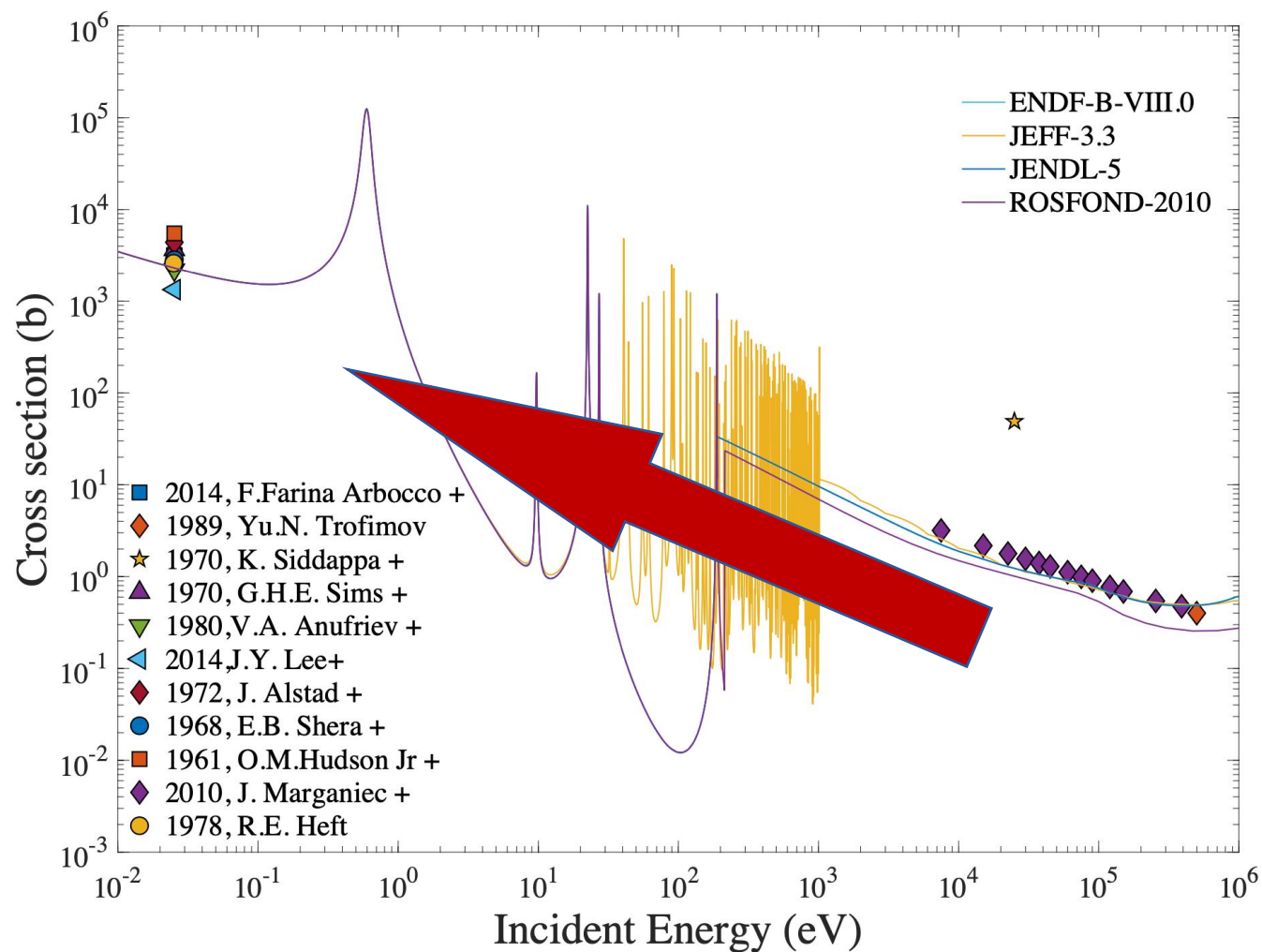


宇宙中重元素是如何形成的？ ——21世纪物理学未解之谜

大爆炸理论可以解释宇宙中轻元素（如H、He等）的形成；恒星中核燃烧（核聚变）过程可以解释从碳到铁元素的起源。

对于超铁元素，两个因素导致了其无法被恒星中核聚变过程产生：

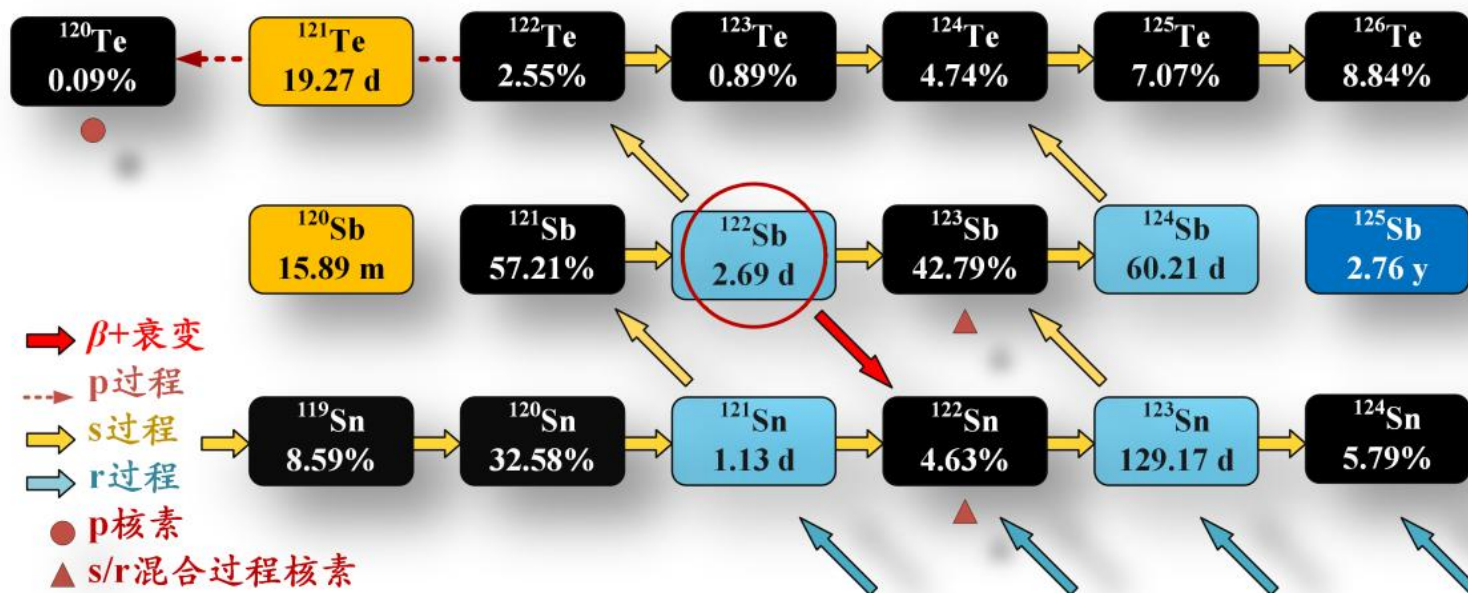
- 库伦位垒
- 比结合能



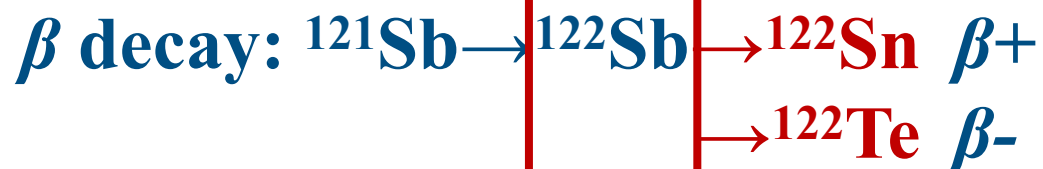
- 中子不带电;
- 中子俘获截面随着系统能量降低反而有升高的趋势;

中子俘获反应是宇宙中比铁重元素合成的主要途径。重元素的中子俘获反应截面是解释其合成机制重要核物理参数。

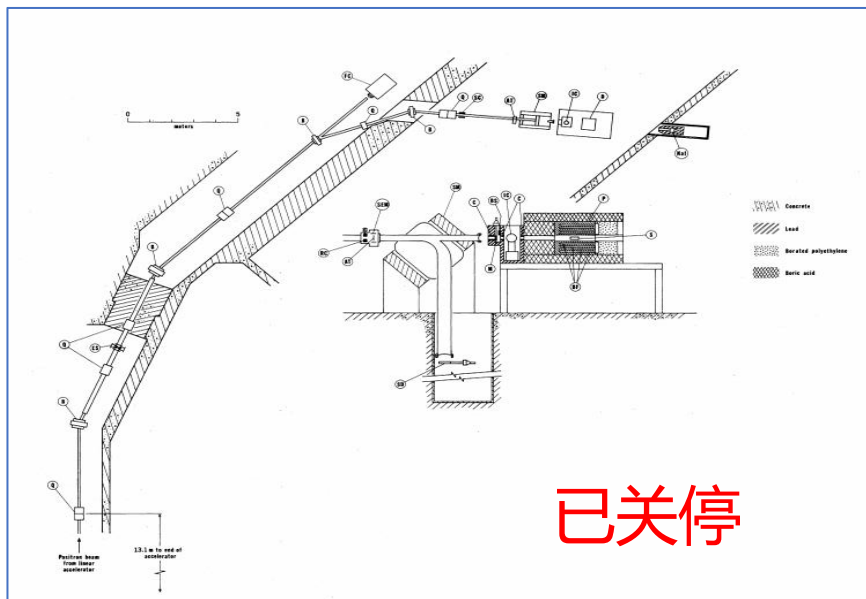
光中子反应是中子俘获反应的逆反应，对于部分不稳定核素，直接测量其 (n, g) 反应截面极其困难。



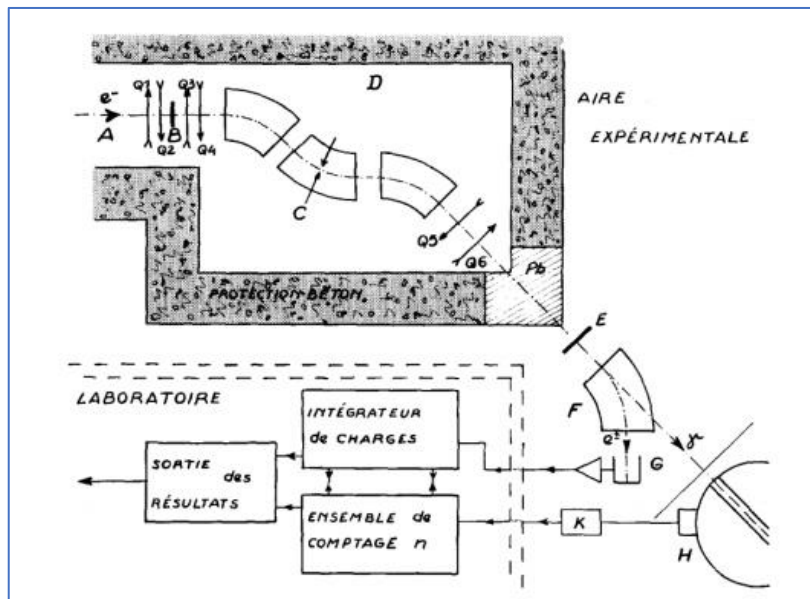
通过对其s过程下游稳定核素的 (g, n) 反应截面的测量，推导该不稳定核素的中子俘获截面是可行的办法。



20世纪60至80年代，美国Livermore国家实验室 和法国Saclay实验室装置利用不同的测量手段开展了80多个天然核素的光中子截面测量。



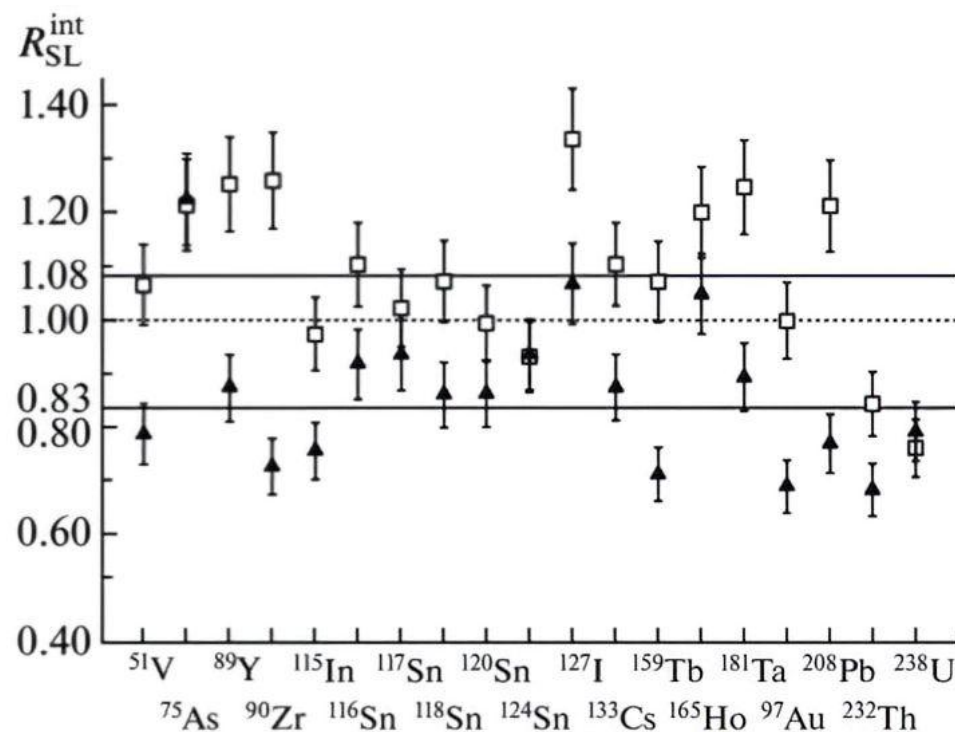
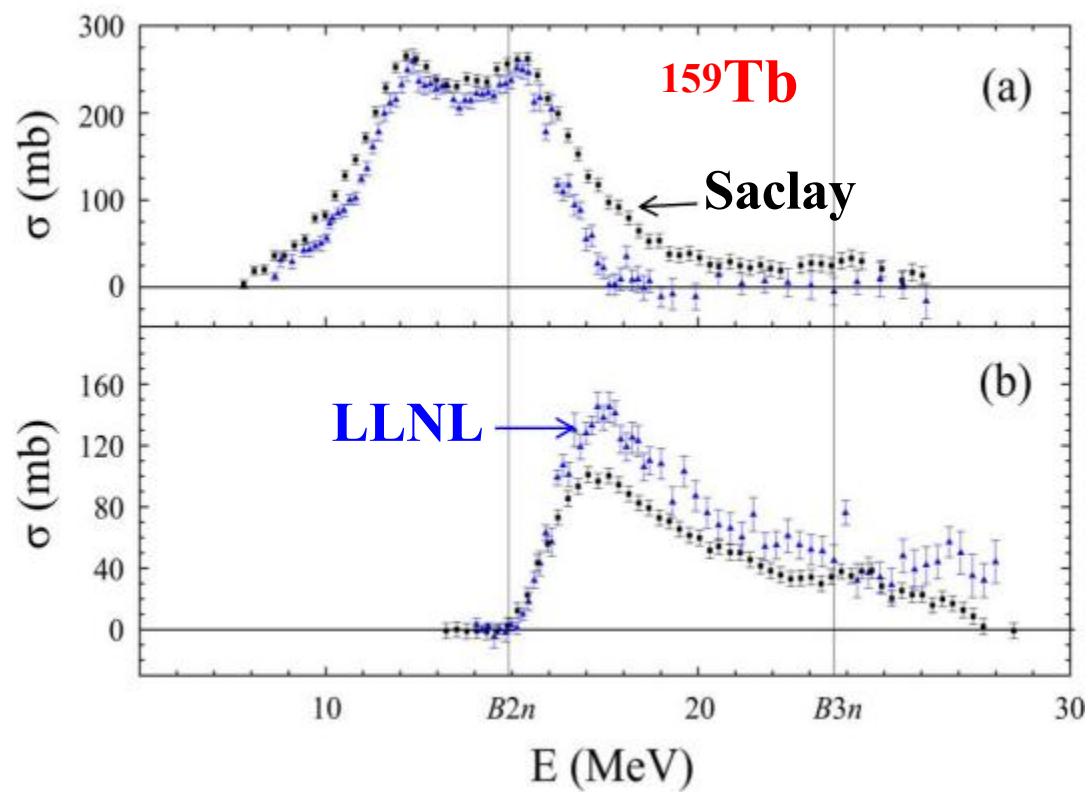
LLNL使用的是 "环比 "方法：将中子计数器放入石蜡慢化剂中，在目标周围形成同心环。但由于多次散射，高能中子肯定有机会返回内环。



Saclay 使用大容量钆载液体闪烁体进行中子能量测量。它的本底率很高，由大量的单中子事件组成。

Livermore 和 Saclay 实验室开展了成系统的光中子截面测量，并且具有重叠的核素。

两家实验室结果具有**系统性偏差**，定量评估他们的实验数据，并找出数据分歧的原因，有助于今后利用国内同类装置开展光中子实验。



Contents

01

背景与动机

02

**南华大学中子俘获截面
面实验研究进展**

03

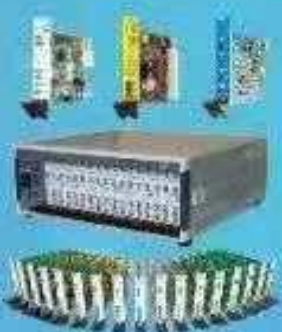
光中子截面数据评估

04

总结

CSNS 反角白光中子源

Back-n White Neutron Source



电子学



DAQ 系统



束流监测器



FIXM 谱仪



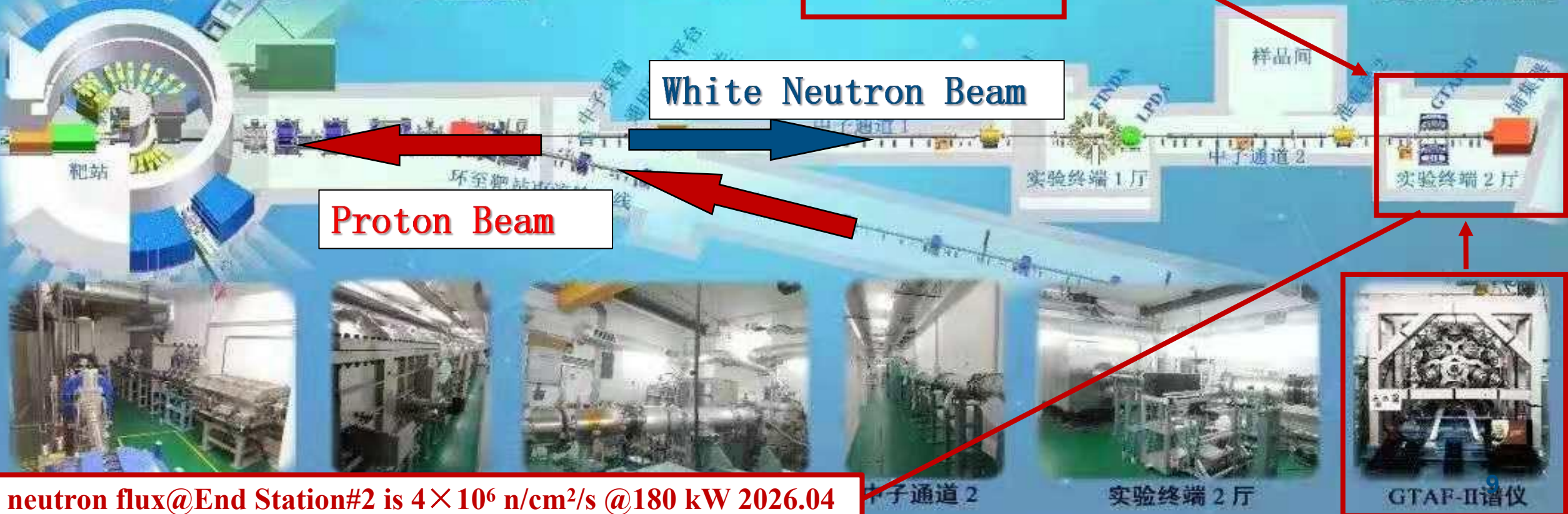
C6D6 谱仪



LPDA 谱仪



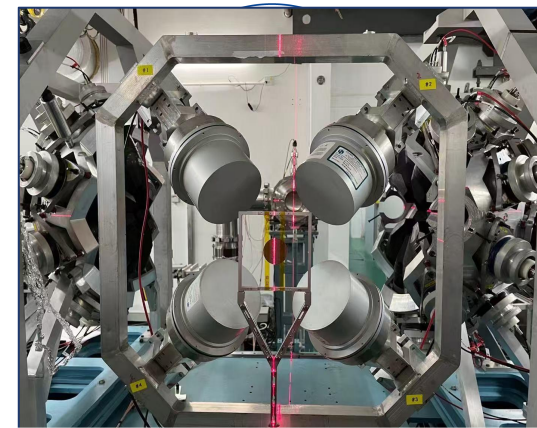
NTOX 换样机构



neutron flux@End Station#2 is 4×10^6 n/cm²/s @180 kW 2026.04

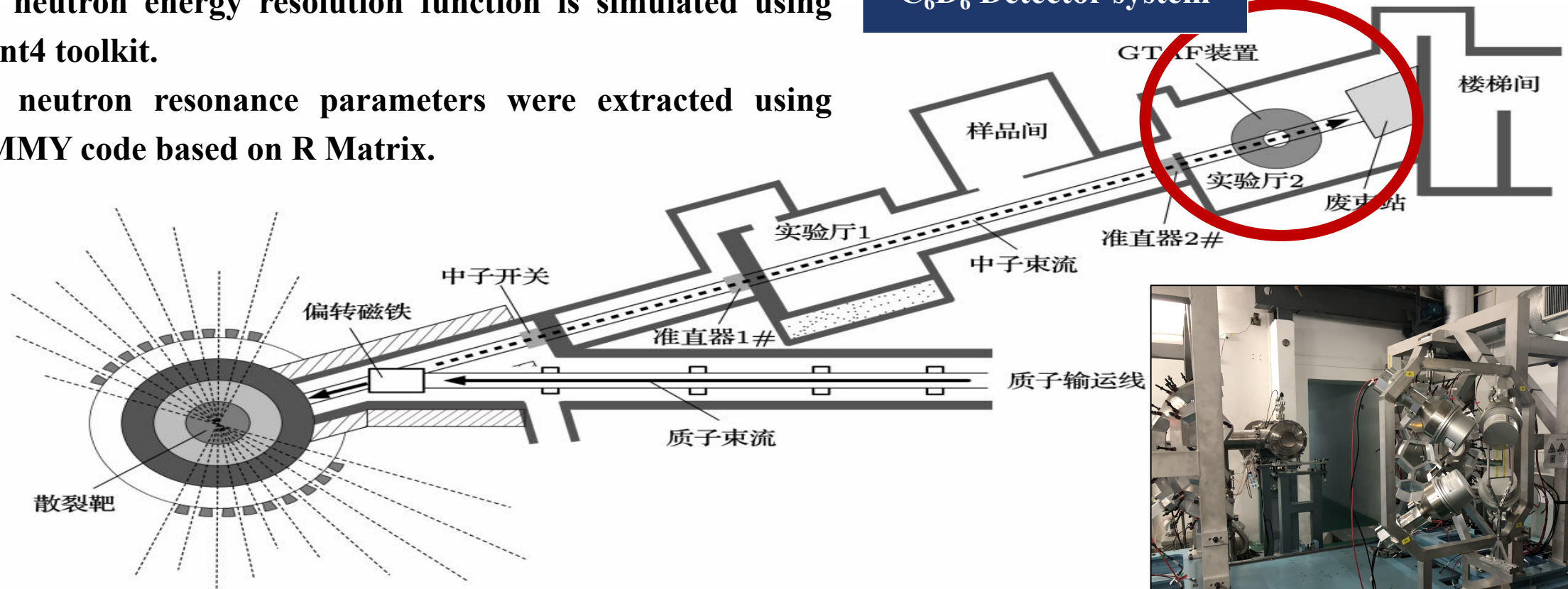
Experimental setup: C_6D_6 setector system

- The C_6D_6 detection system is used to detect the cascade of γ rays emitted by the neutron capture reaction.
- The neutron capture yield is determined using pulse height weighting technique (PHWT).
- The neutron energy resolution function is simulated using Geant4 toolkit.
- The neutron resonance parameters were extracted using SAMMY code based on R Matrix.

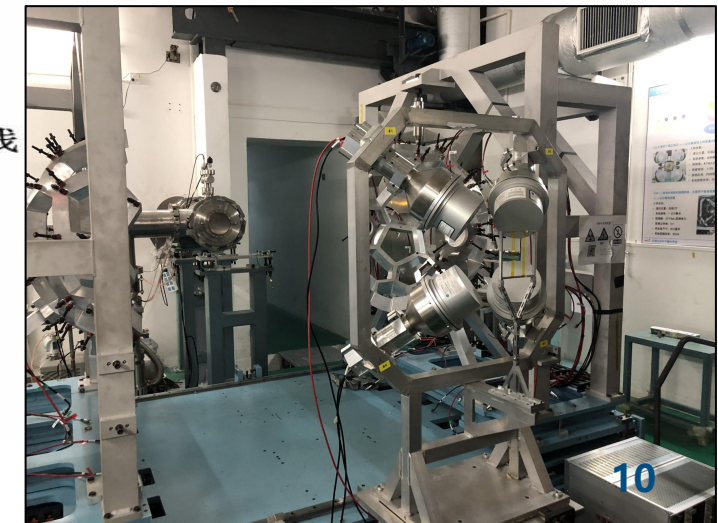


C_6D_6 Detector system

End Station#2



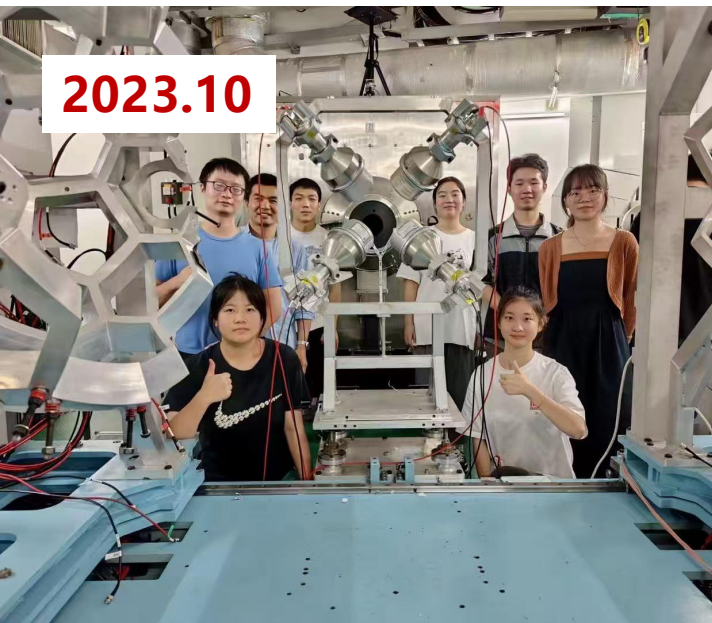
* Figure from reference: Q.W. Zhang et al., Acta Phys. Sin. 70(22): 222801. (2021)

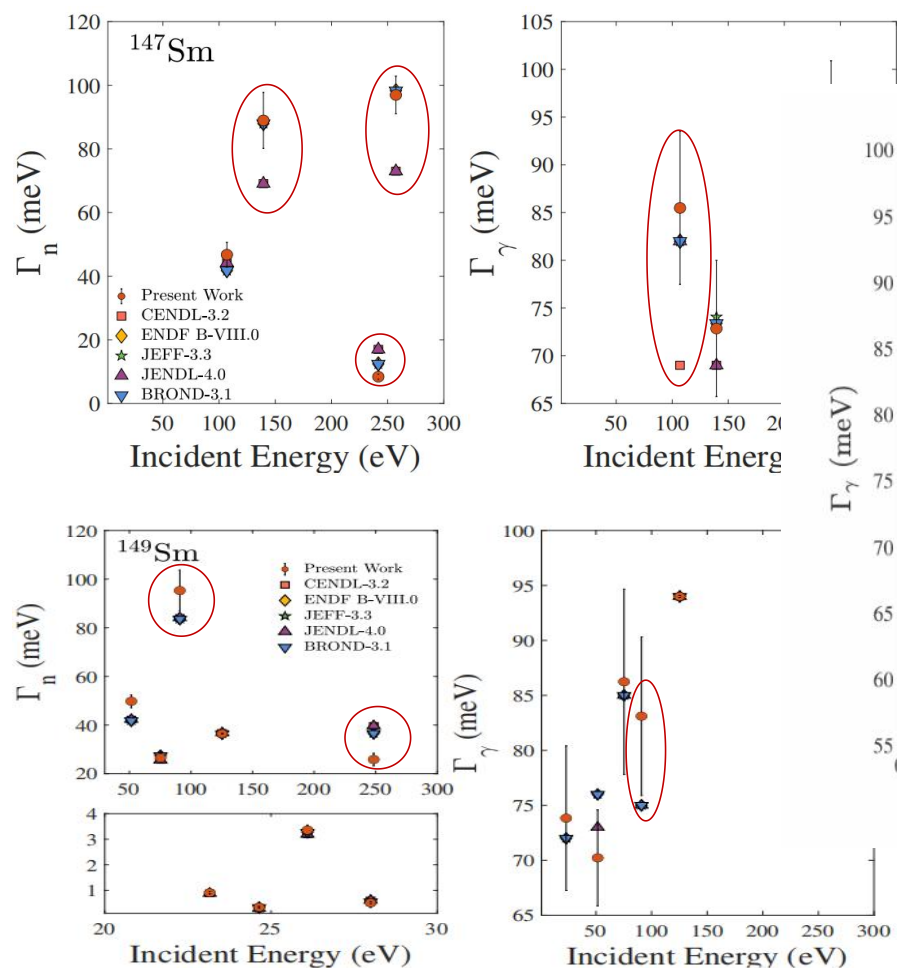


From 2019 to 2026, more than 1000 hours

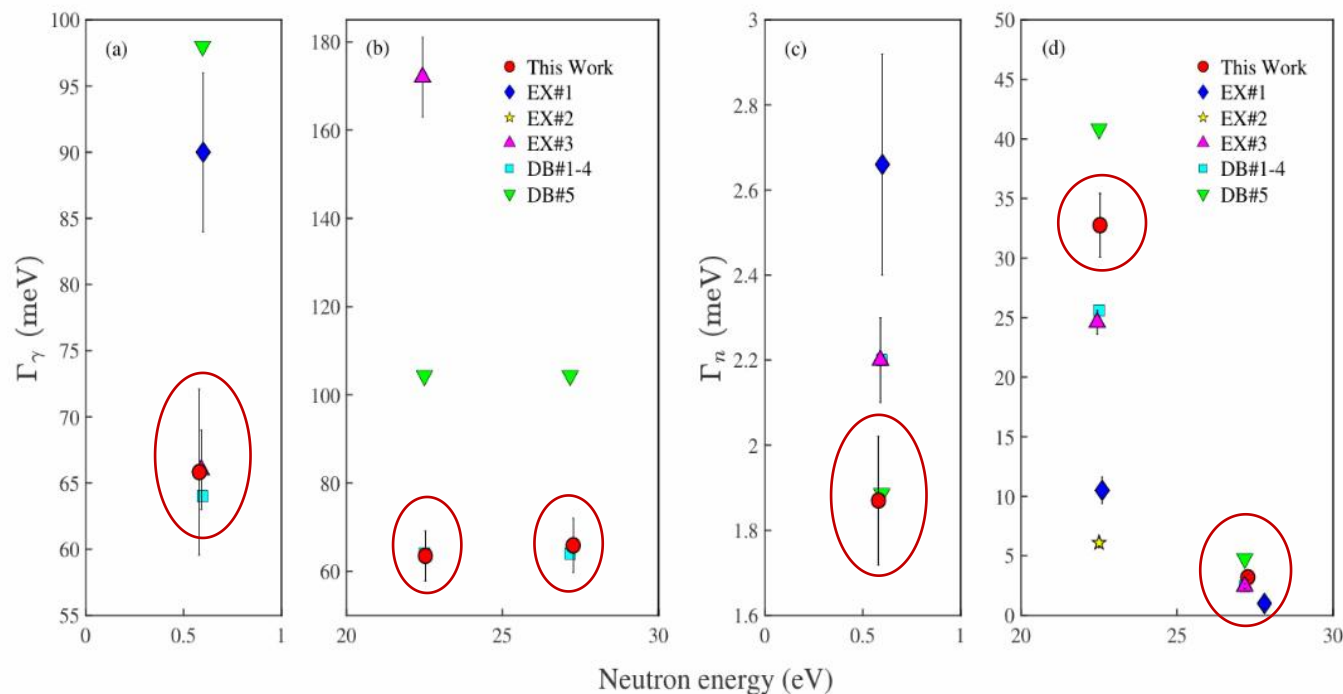
Date	Target	BeamPower (kW)	Beam Time	Publish
2019.01	¹⁹⁷ Au ^{nat} Se ⁸⁹ Y	~34	204 h	Nucl. Sci. Tech. (2021) Chin. Phys.B (2022) Analyzing by CDUT
2019.05	¹⁹⁷ Au ^{nat} Er ^{nat} Sm	~50	147 h	Nuclear Techniques (in Chinese) Phys.Rev.C (2021, 2022) Nucl. Sci. Tech. (2025)
2020.10	⁶³ Cu ⁶⁵ Cu	~80	156 h	Analyzing
2021.04	¹⁰⁷ Ag ¹⁰⁹ Ag	~100	145 h	Chin. Phys.B (2022)
				Acta. Phys. Sin. (2026)
2022.07	^{nat} Ag	~150	100 h	Analyzing
2022.11	^{nat} Yb	~150	100 h	Phys. Rev. C (2025)
2023.10	⁶⁵ Cu ²⁰⁹ Bi	~150	144 h	Analyzing
				Chin. Phys. C (2026)
2024.11	⁴⁵ Sc	~170	96 h	Preparing
2026.04	^{nat} Sb/ ^{nat} Te ^{nat} Se	~180	90 h	Analyzing

From 2019 to 2026, more than 1000 hours



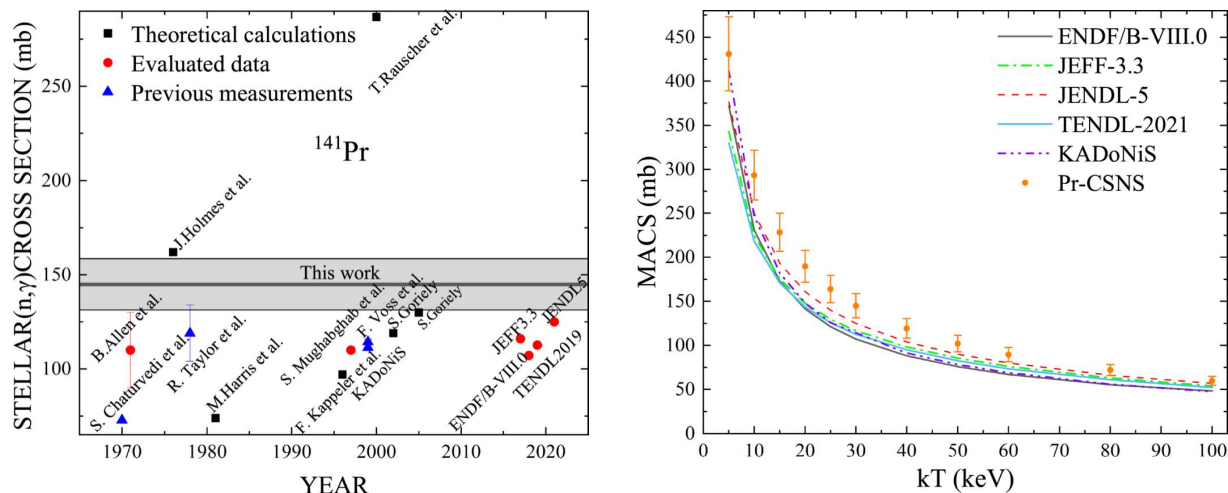
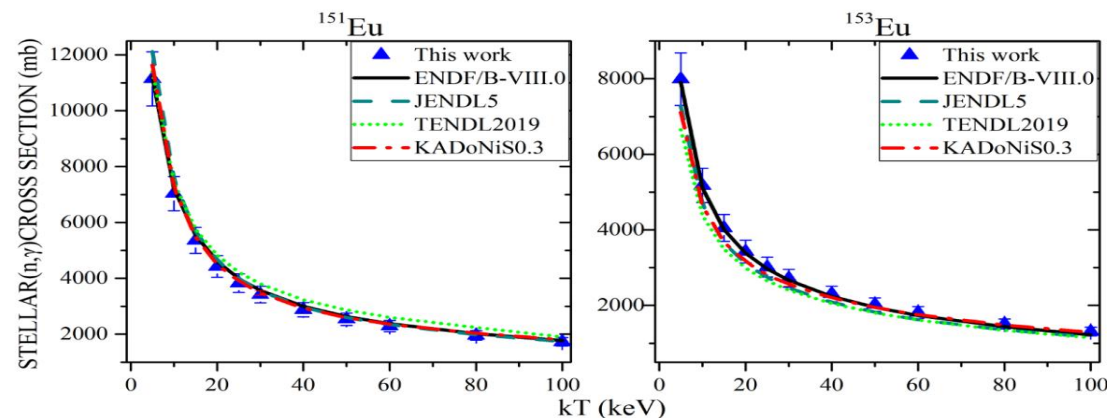
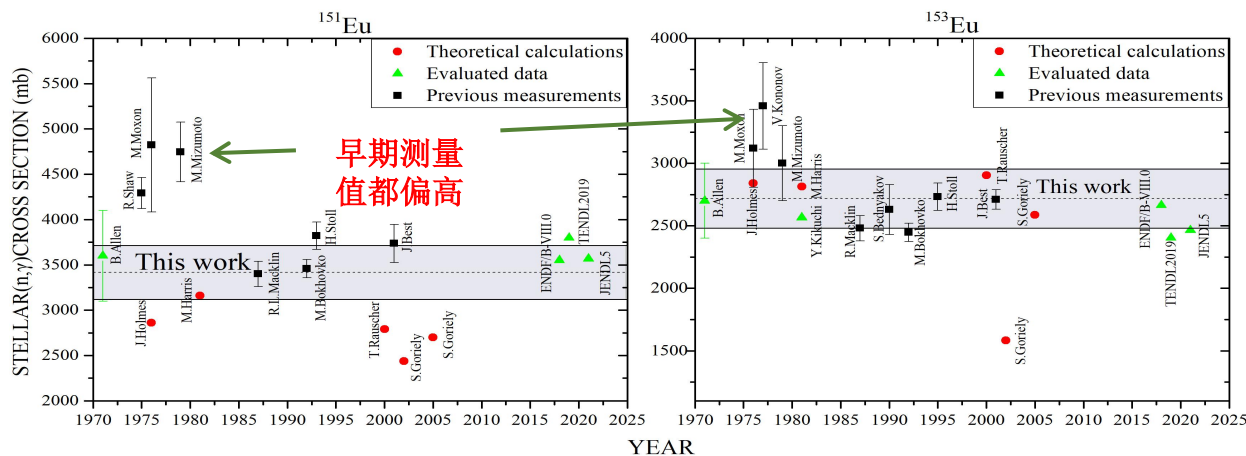
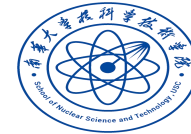


Y.J. Chen, X.X. Li*, W. Luo* et al., Phys. Rev. C. 111, 054607 (2025)
X.X. Li*, H.W. Wang*, W. Luo* et al., Nucl. Sci. Tech. 36:178 (2025)

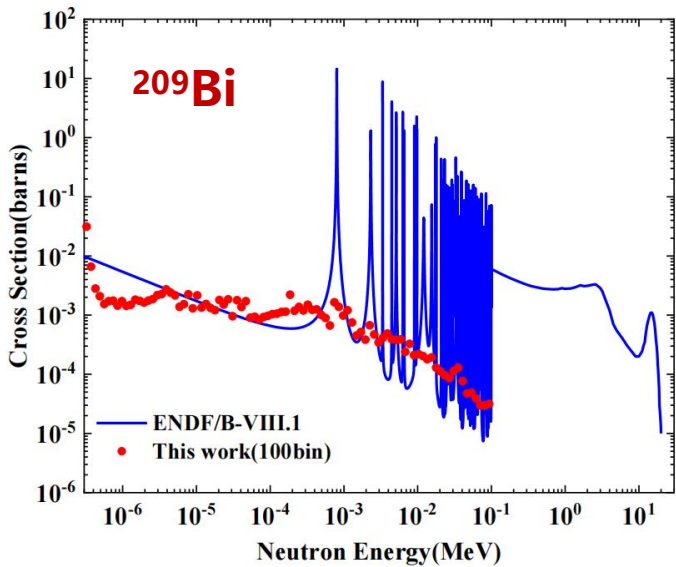
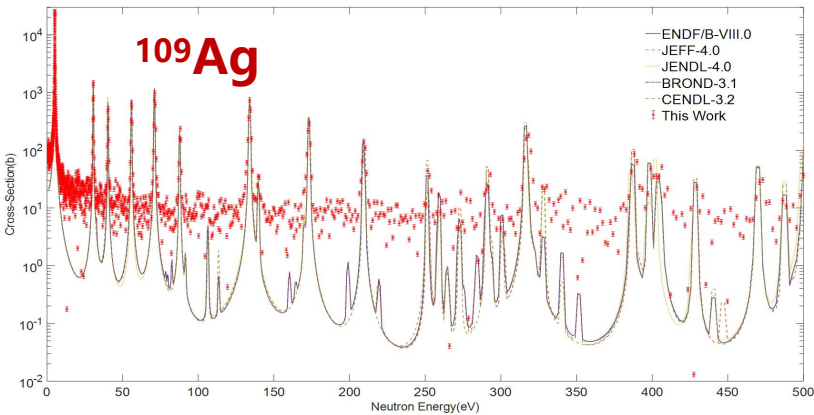
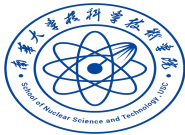


- 使用SAMMY程序提取了共振能区 $^{147,149}\text{Sm}$ 、 ^{168}Yb 的中子俘获共振参数；首次实验获得了27.17 eV处 ^{168}Yb 的中子共振参数 Γ_γ 值为 65.88 ± 5.80 meV。

最近工作: Eu/Pr中子俘获截面及麦克斯韦平均截面计算



- 在s-过程核合成模型的温度范围内, 计算了 $kT = 5 \sim 100$ keV范围内的MACS。特别是在 $kT = 30$ keV时, ^{141}Pr 的 MACS 值为 145.0 ± 13.7 mb, 略高于 Karlsruhe 天体物理数据库 KADoNiS 推荐值 111.4 ± 1.4 mb。
- 将100 eV 到 500 keV的测量结果与恒星等离子体中的中子速度分布卷积获得了 $kT=5-100$ keV时 ^{151}Eu 、 ^{153}Eu 的MACS, 与评价库数据具有较好的一致性。



基于C₆D₆探测器开展低截面测量的挑战

实验参数	2006年 C. Domingo-Pardo	本工作 (This work)
飞行距离	185 m	77 m
中子源	20 GeV 质子, 0.4 Hz	1.6 GeV 质子, 25 Hz
C ₆ D ₆ 探测器外壳	碳纤维薄壁	1.5 mm铝制外壳
探测器支架	细绳悬挂	铝制支架及样品架
样品厚度	6.1 mm	1 mm
测量时间	60 h	40 h

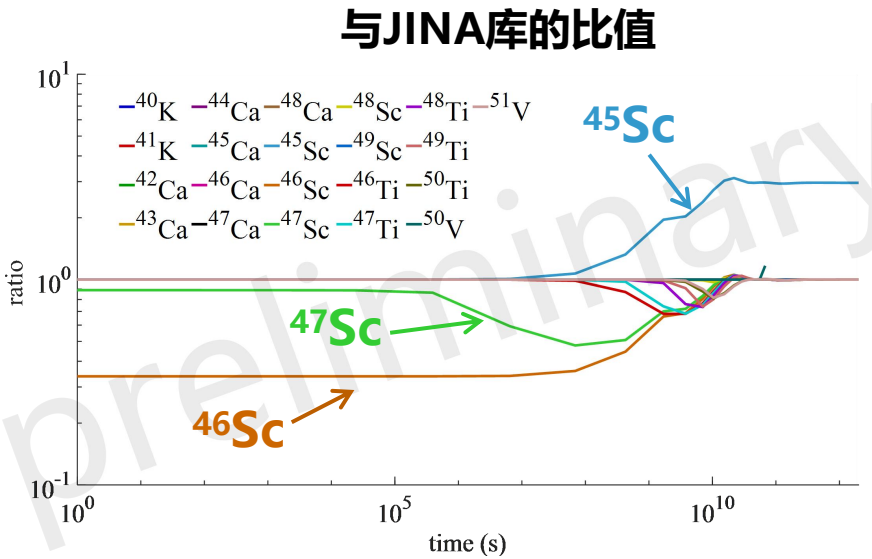
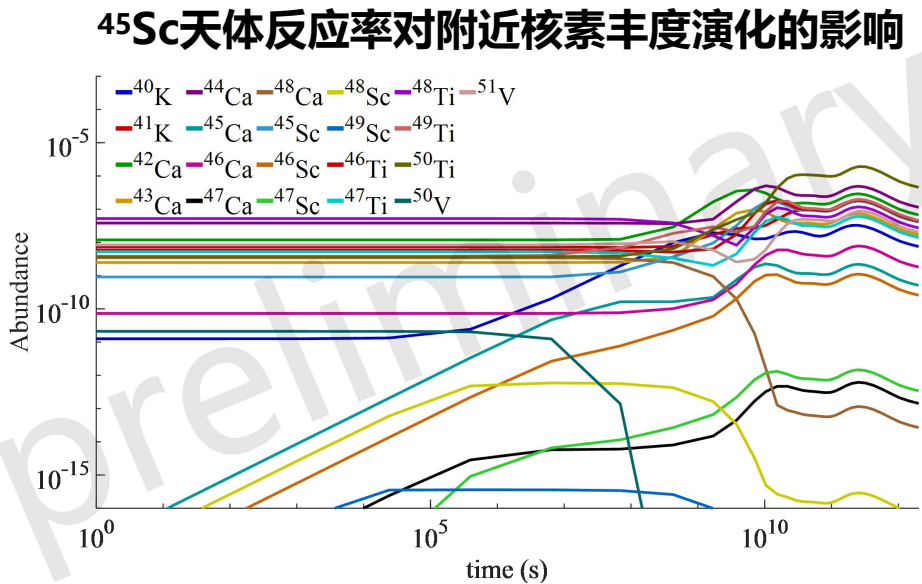
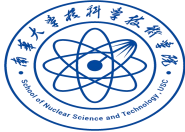
	信噪比(×10 ⁻⁴)
基准配置 (Al外壳,1mm靶, 有支架)	2.07(1%)
碳纤维 (替换铝制外壳)	2.07(1%)
6.1mmBi靶 (替换1 mm支架)	3.01(0.43%)
无支架 (移除样品支架)	2.06(1%)

Geant4进行模拟验证

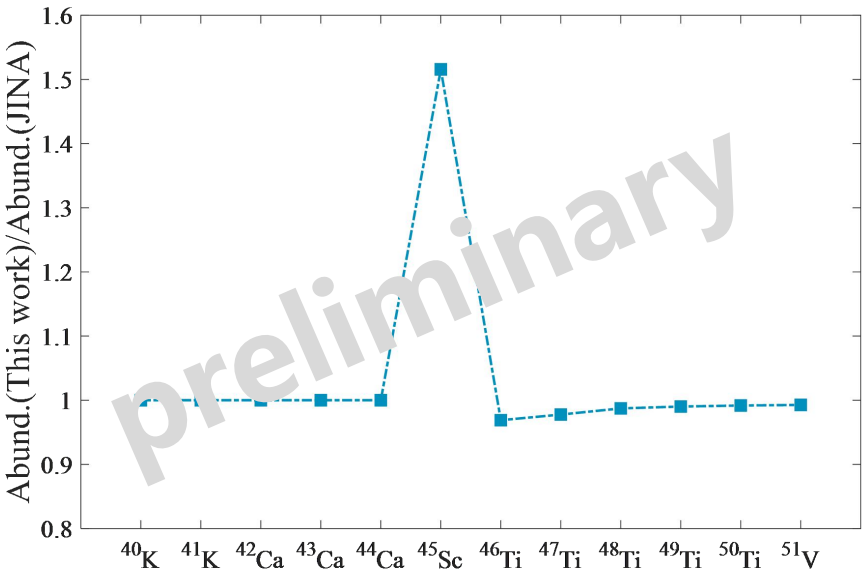
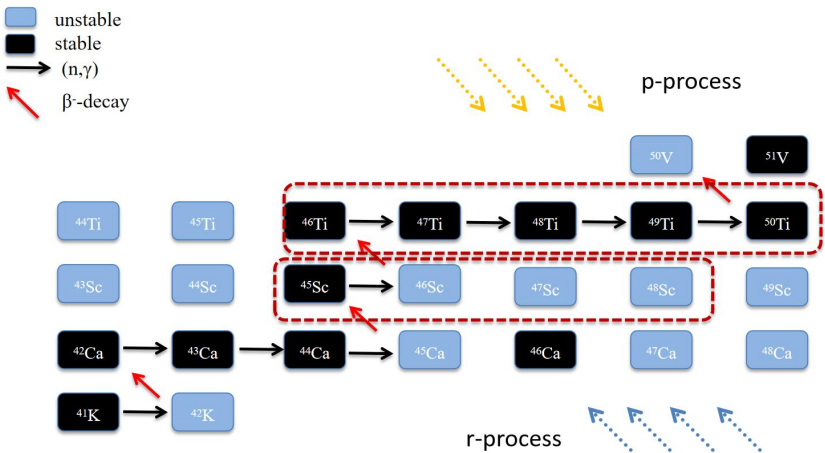
仅仅优化某些局部材料，难以从根本上改善信噪比

提高有效信号

最近工作：⁴⁵Sc 中子俘获截面对s过程演化影响分析



改变⁴⁵Sc的MACS值对附近核素丰度的平均影响 (于JINA库对比)



- ⁴⁵Sc的反应率变化引起了 45-47Sc和46-49Ti的丰度变化;
- 45-47Sc的丰度变化与JINA库有明显差异;
- 在10⁸-10¹¹s 范围内, ⁴⁵Sc 反应率对附近核素丰度的影响实验值与JINA库存在不同程度差异;
- 以JINA库为基准, ⁴⁵Sc的 MACS的变化并不明显改变周围其他核素的丰度, 展现了⁴⁵Sc良好的局域独立性。

详见林子昂报告

Contents

01

背景与动机

02

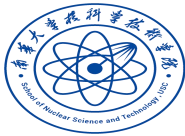
南华大学中子俘获截面
实验研究进展

03

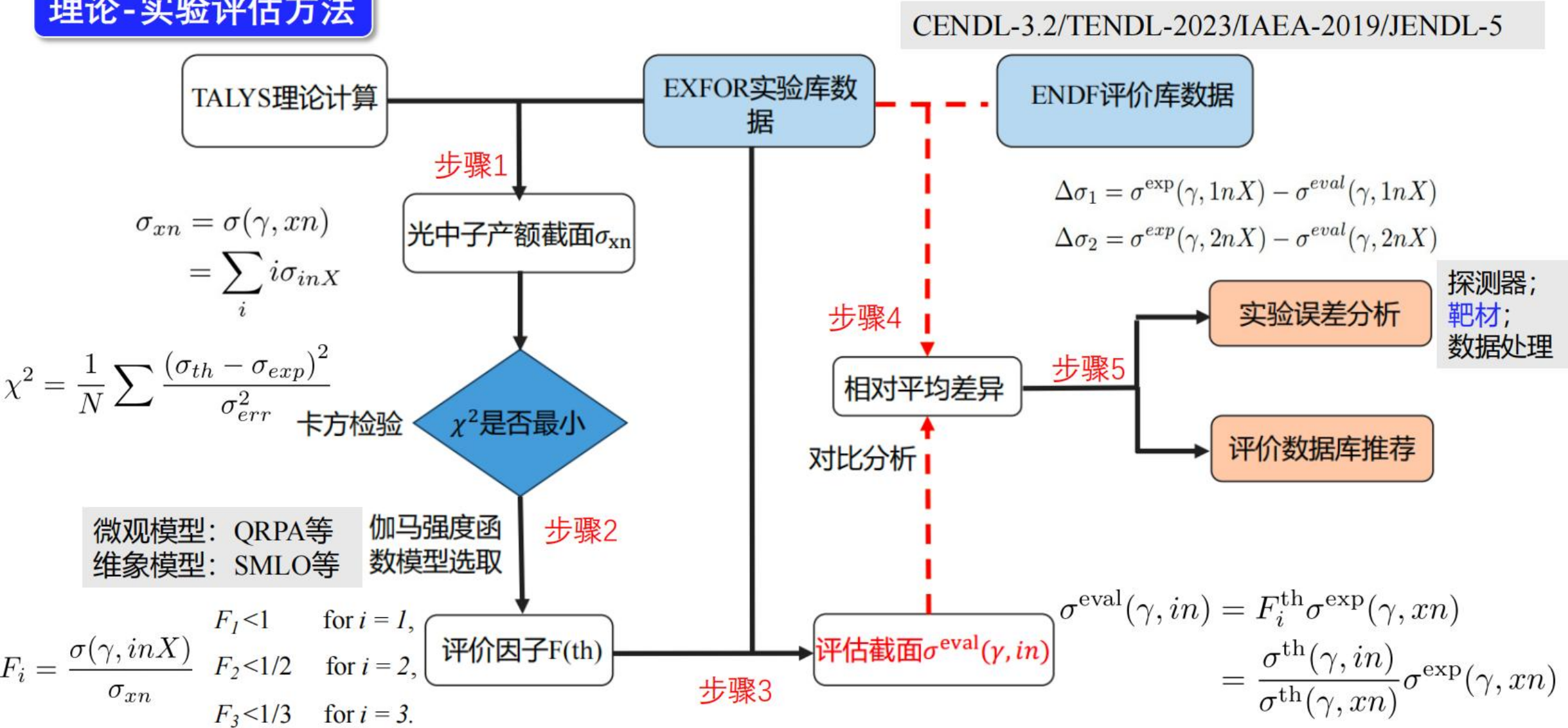
光中子截面数据评估

04

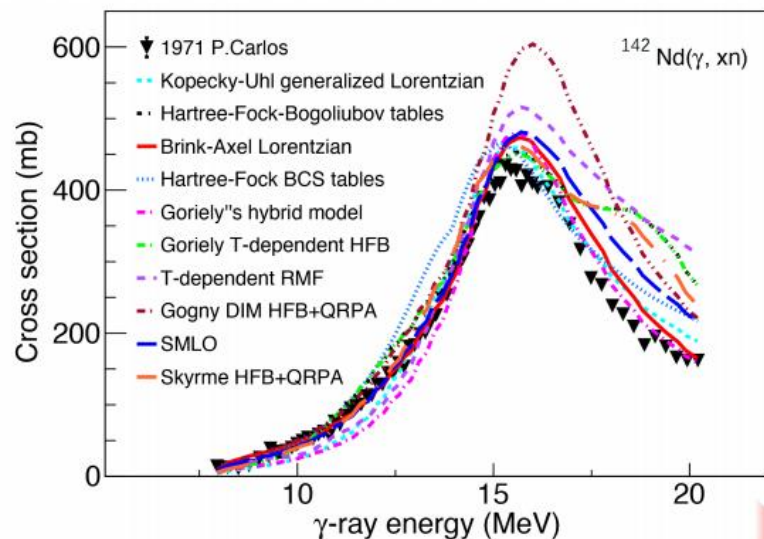
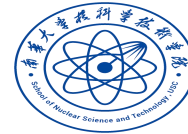
总结



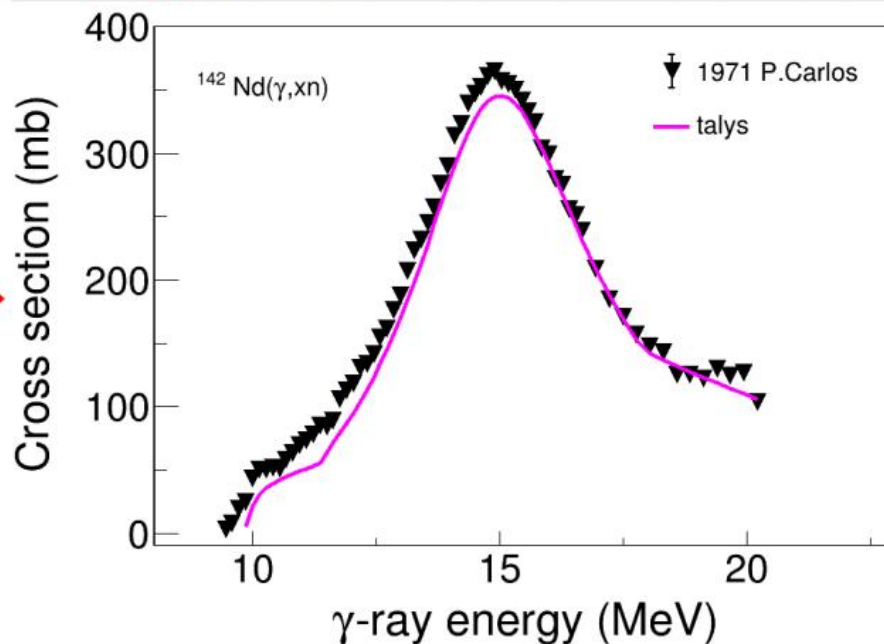
理论-实验评估方法



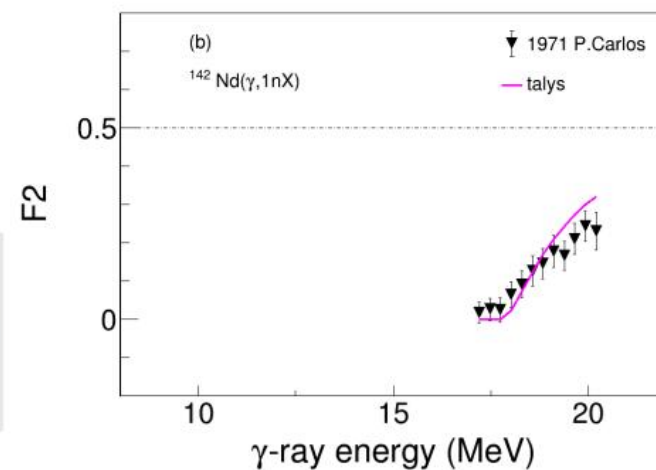
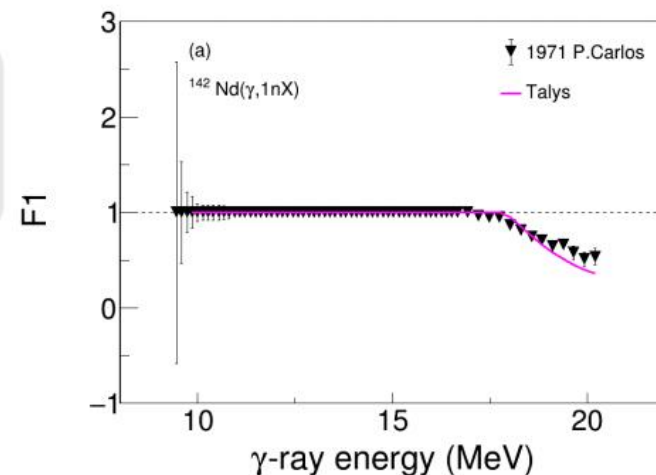
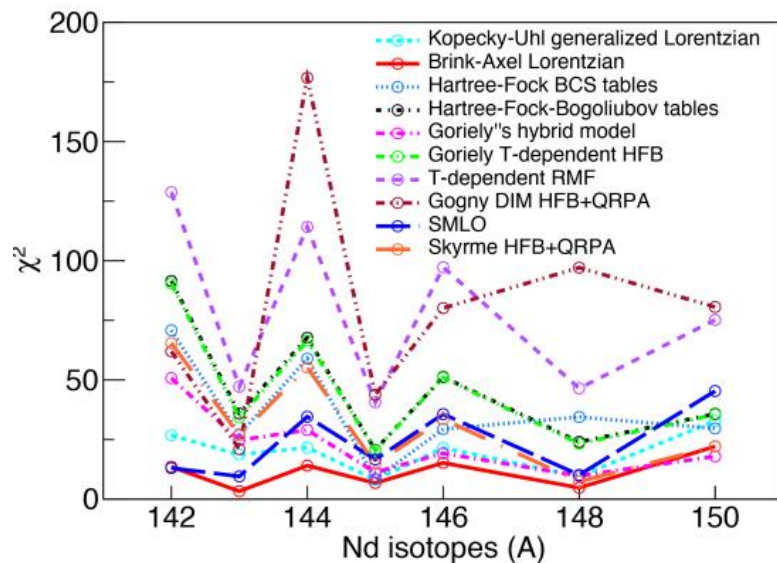
最近工作: Nd同位素链的光中子截面数据评估



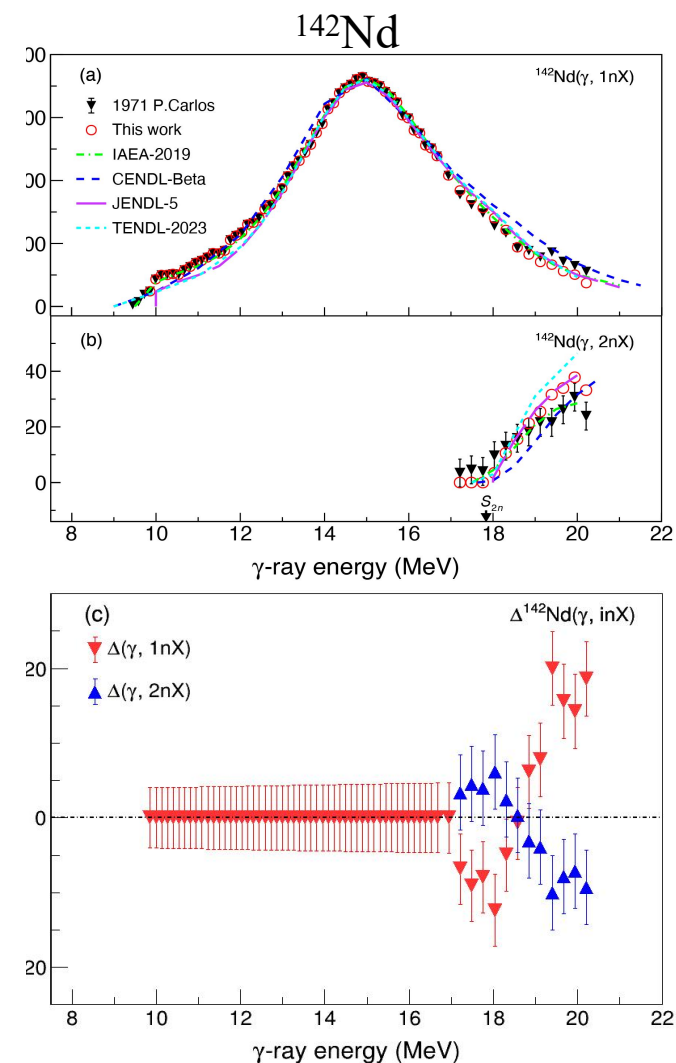
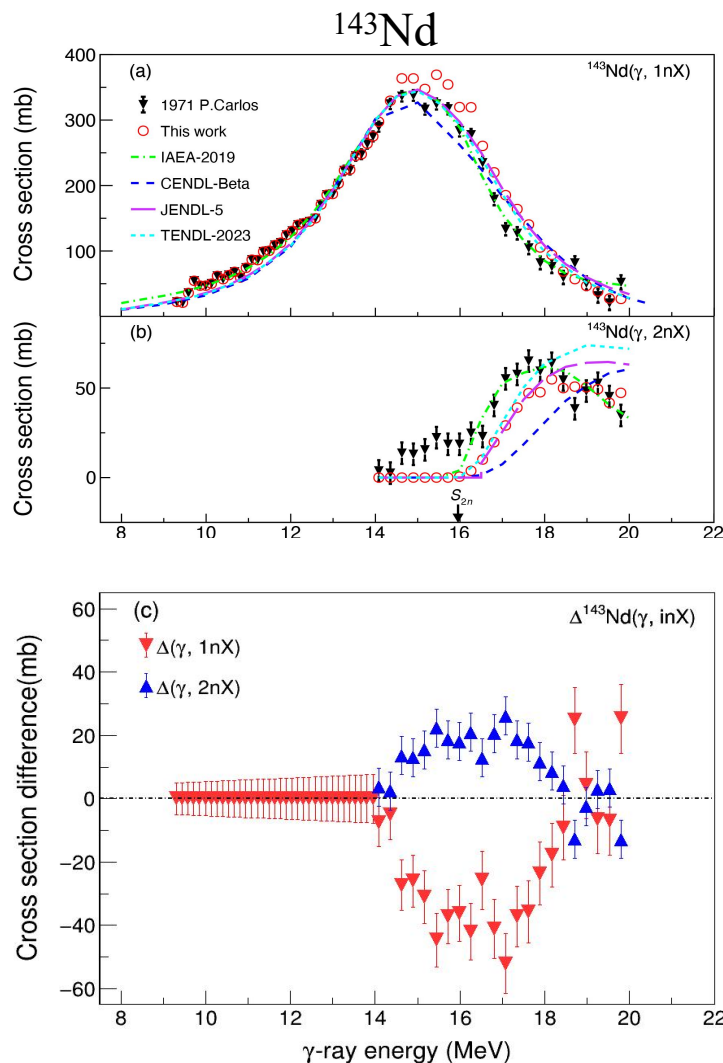
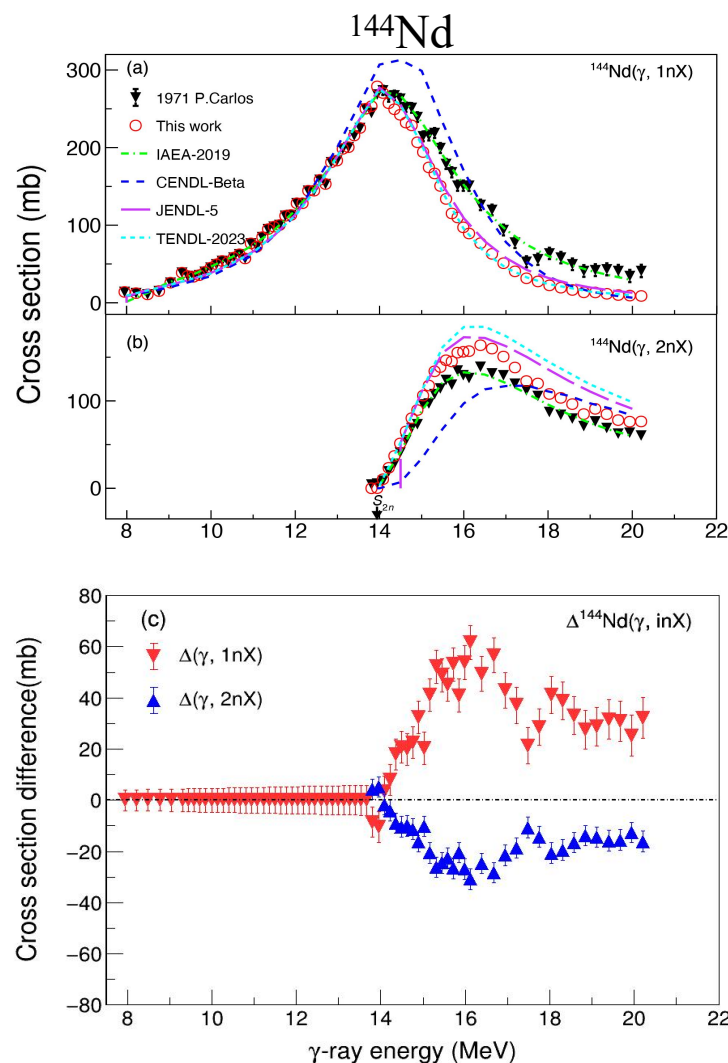
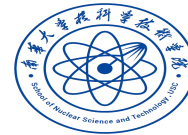
通过对不同伽马强度函数下光中子产额截面的比较, 选取最接近实验情况的理论模型, 以 χ^2 体现。



对于Nd同位素链的测量情况: **Brink-Axel Lorentzian** 模型下整体符合度最佳, 因此理论计算基于这个伽马强度函数模型展开。

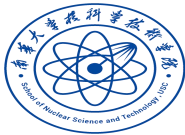


最近工作: Nd同位素链的光中子截面数据评估



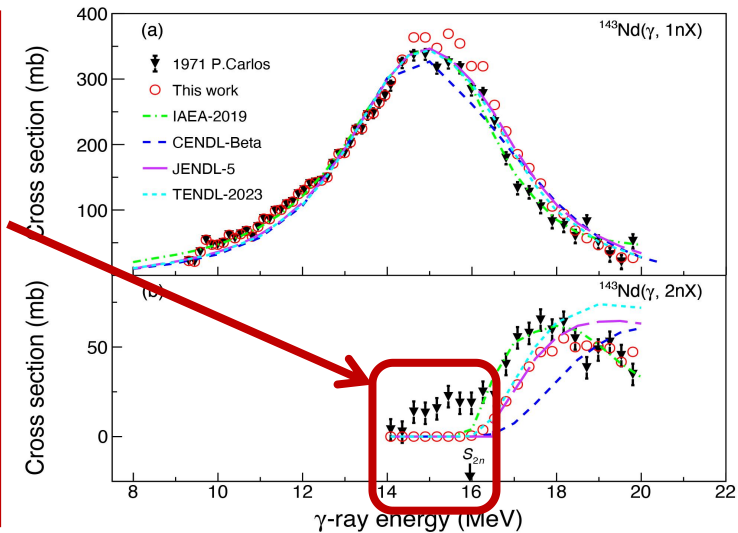
通过结果分析, 可以根据 Δ_i 把Nd同位素光中子截面结果大致分为三种情况: (1) 实验的光中子 $\sigma(\gamma, 1nX)$ 偏大, $\sigma(\gamma, 2nX)$ 偏小 (^{144}Nd); (2) 实验的光中子 $\sigma(\gamma, 2nX)$ 偏大, $\sigma(\gamma, 1nX)$ 偏小 (^{143}Nd); (3) 两种情况都存在 (^{142}Nd)。

最近工作：Nd同位素链的光中子截面数据评估

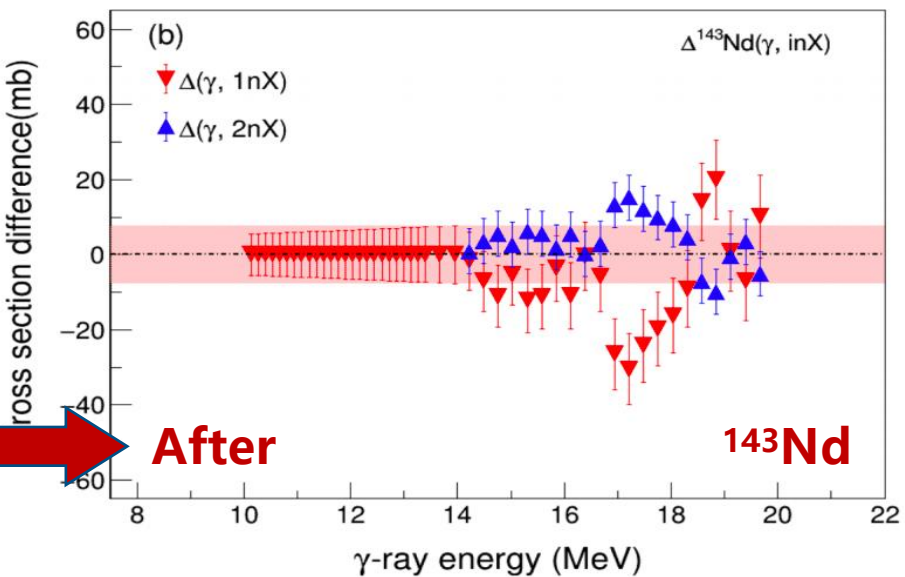
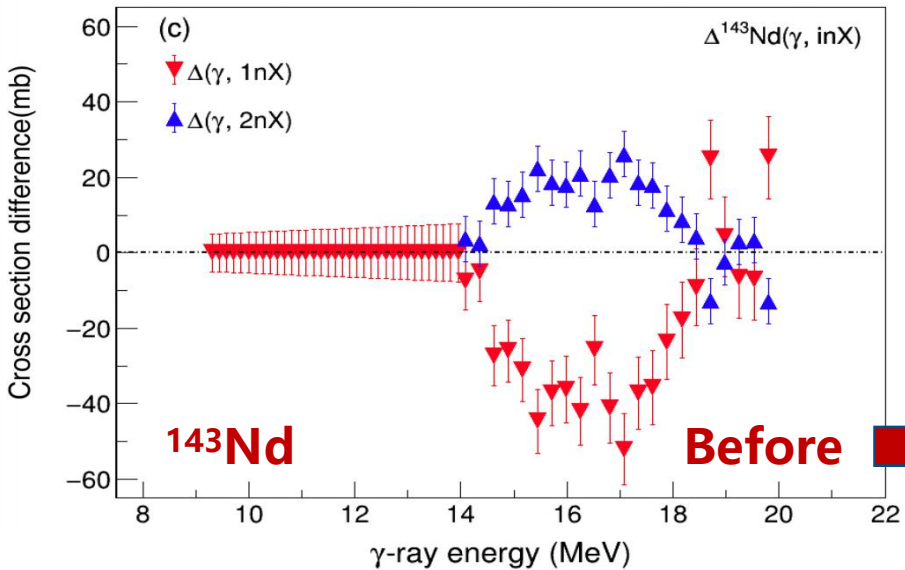


在2n阈值前出现的2n计数可能是由同位素杂质引起的

	S_{2n}/MeV	Mass/g	Chemical Form	Purity/%	Principal Isotope Impurity/%
^{142}Nd	17.83	100.30	Oxide	95.00	^{143}Nd : 3.00%
^{143}Nd	15.95	30.00	Oxide	81.20	^{144}Nd : 11.80%
^{144}Nd	13.94	50.20	Oxide	91.50	^{145}Nd : 4.00%
^{145}Nd	13.57	20.00	Oxide	71.00	^{146}Nd : 18.80%
^{146}Nd	13.32	49.00	Oxide	94.70	negligible
^{148}Nd	12.62	40.00	Oxide	89.40	^{146}Nd : 4.00%
^{150}Nd	12.41	20.00	Oxide	88.50	^{148}Nd : 4.00%



^{143}Nd 靶中含有 ^{144}Nd 杂质超过10%，且 $S_{2n}(^{143}\text{Nd})$ 与 $S_{2n}(^{144}\text{Nd})$ 差值相对大 (约2 MeV)，杂质对 ^{143}Nd 的实验结果影响更大。



扣除同位素杂质后的结果情况：在阈值附近的截面差得到改善，其中 ^{143}Nd 的变化最为显著。

Y.L. Shen, X.X. Li*, R.R. Xu*, W. Luo* et al., Nucl. Sci. Tech. (2026) 37:120



Contents

01

背景与动机

02

南华大学中子俘获截面
实验研究进展

03

光中子截面数据评估

04

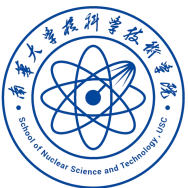
总结

大科学装置是开展核物理实验研究及其应用的重要工具。本报告主要介绍了南华大学团队利用国内核物理大科学装置开展了系列**光子/中子核反应截面数据测量及评价**方面的工作，主要进展如下：

1. 基于**CSCN的Back-n装置**，开展了 ^{141}Pr 、 $^{\text{nat}}\text{Eu}$ 、 $^{\text{nat}}\text{Sm}$ 、 $^{\text{nat}}\text{Yb}$ 、 ^{107}Ag 、 ^{209}Bi 等核素的中子俘获截面实验，利用SAMMY拟合中子俘获产额并**提取了相应的共振参数**，澄清了现有数据的部分分歧。进一步计算了 ^{45}Sc 的MACS和天体反应率，并分析了其对s过程演化的影响。

2. 开展了Nd同位素链光中子截面数据评估，**分析了Saclay实验是开展相关实验的可能误差来源**，并对实验结果进行了靶纯度修正。

Collaboration



南华大学：罗文、冯松、李鑫祥、姜炳、李志才、林子昂、尹铭杨、吴婷 ...



TOHOKU
UNIVERSITY

东北大学（日本）：
伊藤正俊、足立智 等



中国科学院上海高等研究院：王宏伟、范功涛、刘龙祥、张岳、郝子锐、杨宇萱



中国原子能

科学研究所：

续瑞瑞 等；

贺创业 等；

任杰；



中国散裂中子源：
蒋伟、杨高乐



中国科学院近代物理研究所：安振东



内蒙古民族大学：
张苏雅拉吐、王德鑫



中国科学院上海应用物理研究所：
陈金根、王小鹤、胡继峰、黄勃松



复旦大学：
何建军



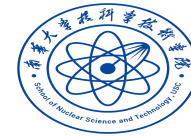
河南师范大学：
马春旺



湘潭大学：
刘应都



成都理工大学：
胡新荣



南華大學核科學技術學院
School of Nuclear Science and Technology, U.S.C

请大家批评指正！