



南華大學中子/光子/帶電粒子核反應數據研究進展

羅 文 (15211819698)

南華大學核科學技術學院

Email address: wen.luo@usc.edu.cn; wenluo-ok@163.com





目录

CONTENTS

- ❖ 研究背景与动机
- ❖ 中子核反应截面测量
- ❖ 光子核反应截面测量
- ❖ 带电粒子核截面测量
- ❖ 中子俘获反应截面提取
- ❖ 小结

团队简介



团队负责人：罗文，博士，教授，博士生导师，教育部青年长江学者，南华大学核科学技术学院党委副书记、院长，长期从事光子/中子核数据及其应用（医用同位素产生、核废物高效嬗变、核材料无损检测）研究。

核反应与高能 量密度物理



李小华

博导\教授



袁赞

硕导\讲师



张泊丽

讲师



刘佳

师资博士后

核反应数据 测量与评价



李鑫祥

硕导\讲师



姜炳

硕导\副教授



李志才

硕导\副教授

核数据在核能与 核技术中的应用



朱志超

硕导\副教授



程品晶

硕导\副教授



杨钧翔

博士\讲师



刘丽艳

讲师



罗凯军

工程师

现有教授3名、副教授4名、博士和工程师8名，其中国家级青年人才1名、中国核能行业协会青年创新人物1名，省部级青年人才2名、硕/博士生30余名。

主要合作者

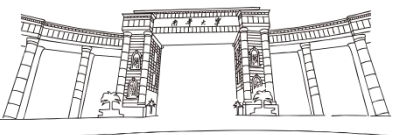
- 中科院上海高等研究院: SLEGS@SSRF 王宏伟、范功涛、刘龙祥等
- 北京大学: 颜学庆、吴迪、蓝浩洋等
- 中科院上海应用物理研究所: 蔡翔舟、陈金根等
- 中科院近代物理研究所: 安振东等
- 中物院八所: 赵宗清、谷渝秋、周维民等
- 中国原子能科学研究院: 续瑞瑞、贺创业等
- 中国散裂中子源: Back-n团队、APEP团队
- 欧洲极端光基础设施-核物理部 (ELI-NP) : Y. Xu, D. L. Balabanski
- 日本甲南大学: H. Utsunomiya (宇都宫弘章)
- 日本东北大学: M. Itoh (伊藤正俊)



研究背景与动机



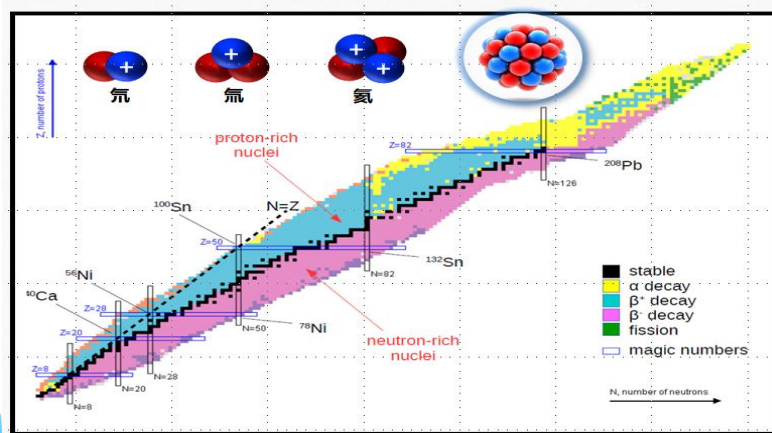
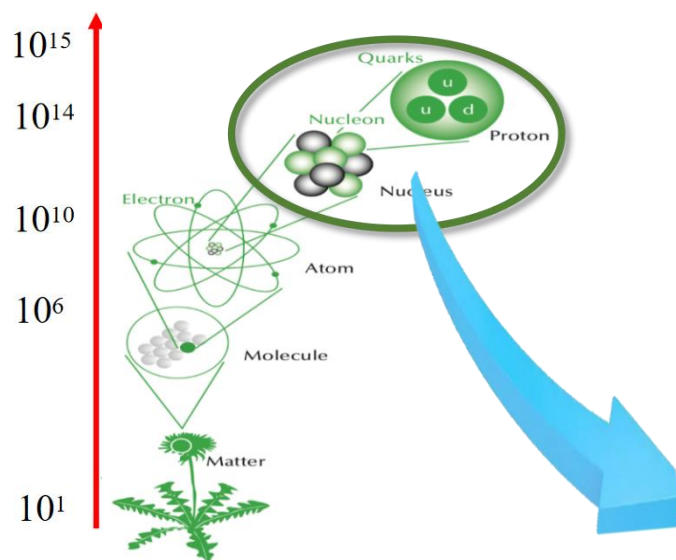
南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



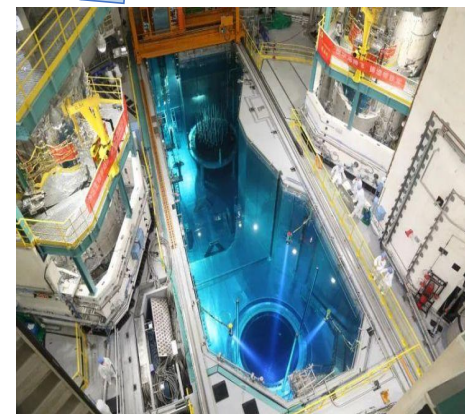
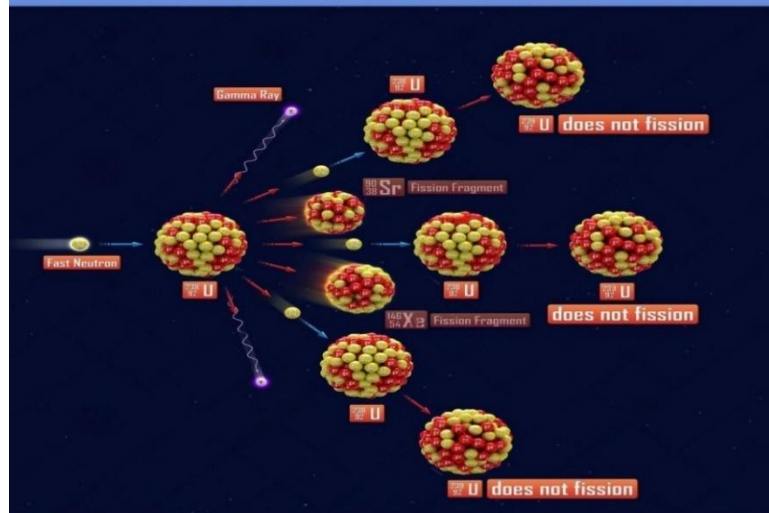
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

01 核反应截面数据的重要性

核数据研究跨越了从基础粒子到重大工程应用的完整过程

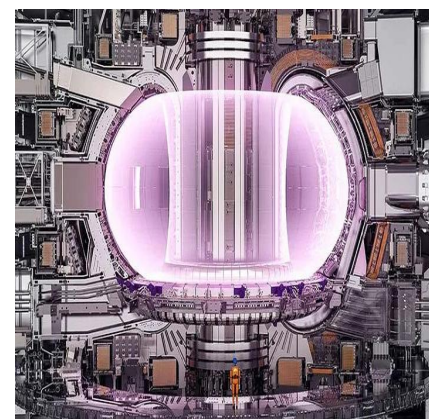


Fast Neutron and Reaction U-238

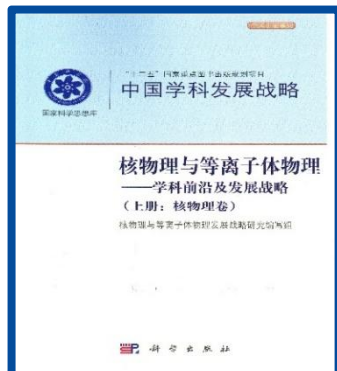
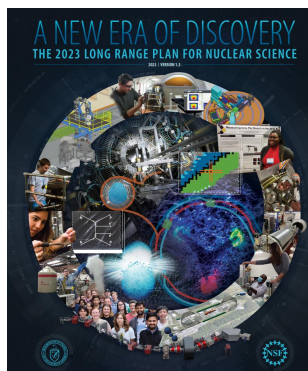


Pressurized Water Reactor (PWR)

Space Reactor

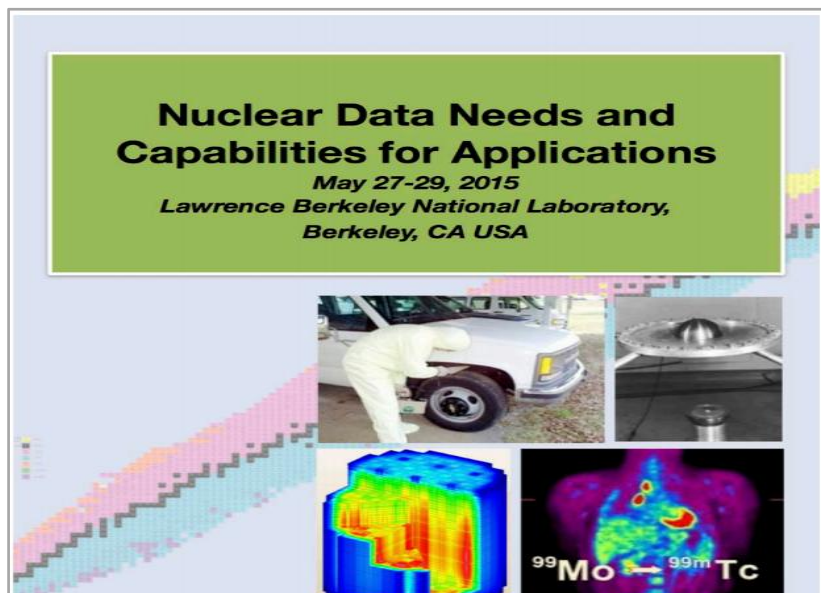


Fusion



01 核反应截面数据的重要性

- 核反应截面数据在反应堆设计、国防需求、核物理基础以及核嬗变等领域发挥至关重要的作用。
- 高温气冷堆、钍基熔盐堆等第四代核能系统对核反应截面数据提出了更高、更新要求。



A “third class” of facility discussed here is the High Intensity Gamma Source (HIGS), which produces monoenergetic photon beams through the use of a free electron laser: This provides a unique capability for measuring (γ,γ') and (γ,n) cross sections. These cross sections are needed for a number of national security applications, and were specifically called out as requiring additional measurement in the talks by Quiter and Cerjan.

- 《美国核数据需求白皮书》：核反应截面数据是一系列国家安全应用的前提



IAEA

International Atomic Energy Agency

INDC(NDS)-0682
Distr. AC/AD/G/IN/J/RD/SC

INDC International Nuclear Data Committee

Summary Report of the First Research Coordination Meeting on

Testing and Improving the International Reactor Dosimetry and Fusion File (IRDFF)

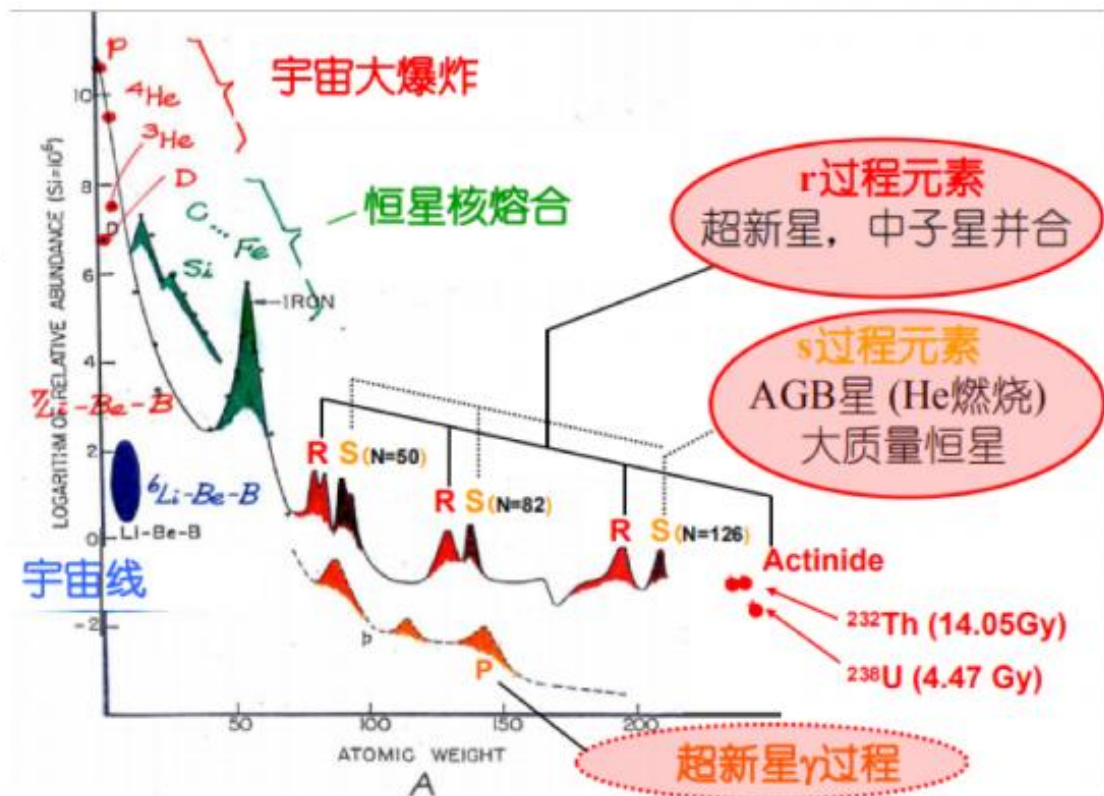
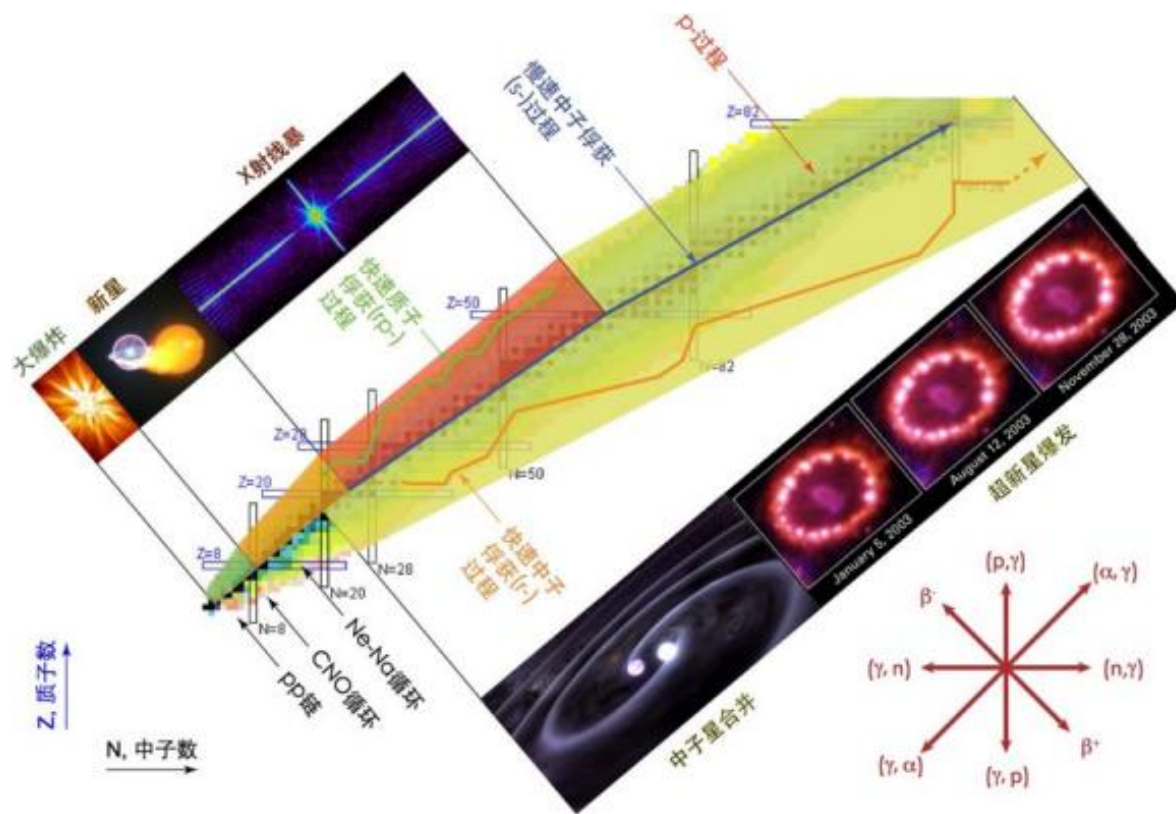
Action: V. Pronayev, K. Zolotarev, G. Noguere

There is a 15% discrepancy between the IRDFF and measured spectrum averaged cross section for $^{238}\text{U}(n,2n)$ in the ^{235}U thermal neutron field. The reason could be due to the contribution from the competing reaction (γ,n) which also leads to ^{237}U . A similar problem may exist with $(n,fission)$ and photo-fission reactions for ^{238}U . Additional effort is needed to simulate such experiments and to determine how to properly use current nuclear data. Validation of photonuclear data on SINBAD benchmarks with MCNP will be done.

- 《国际反应堆剂量与聚变库》测试与改进研究报告：光核反应数据可用于澄清关键核素中子数据分歧原因 7

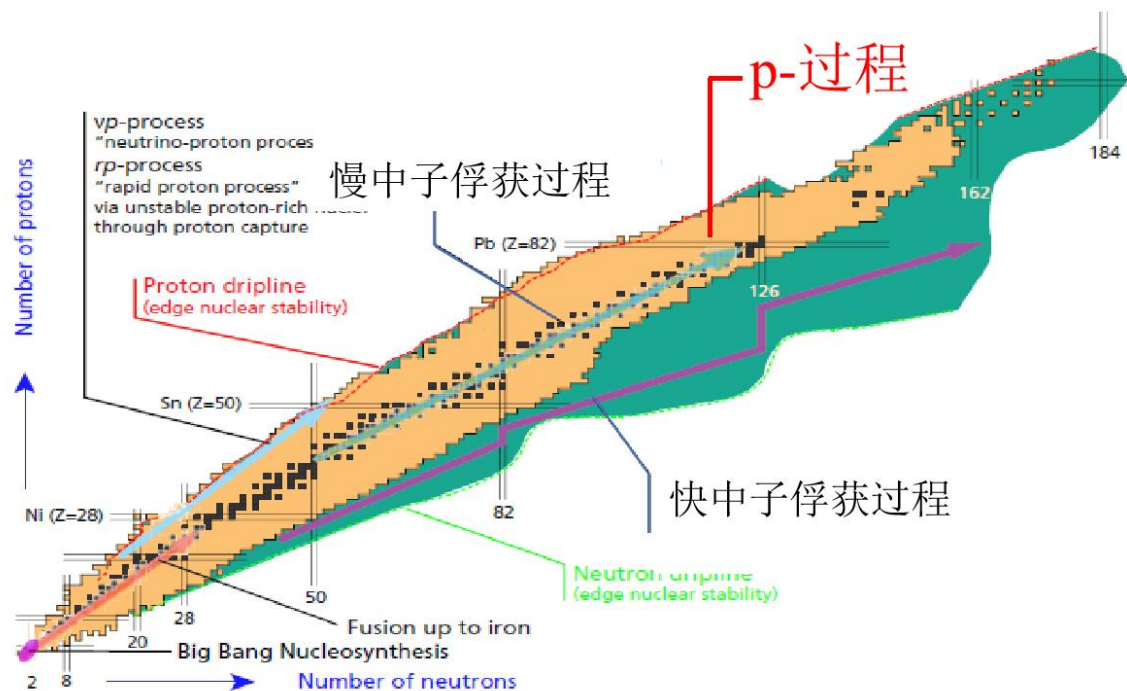
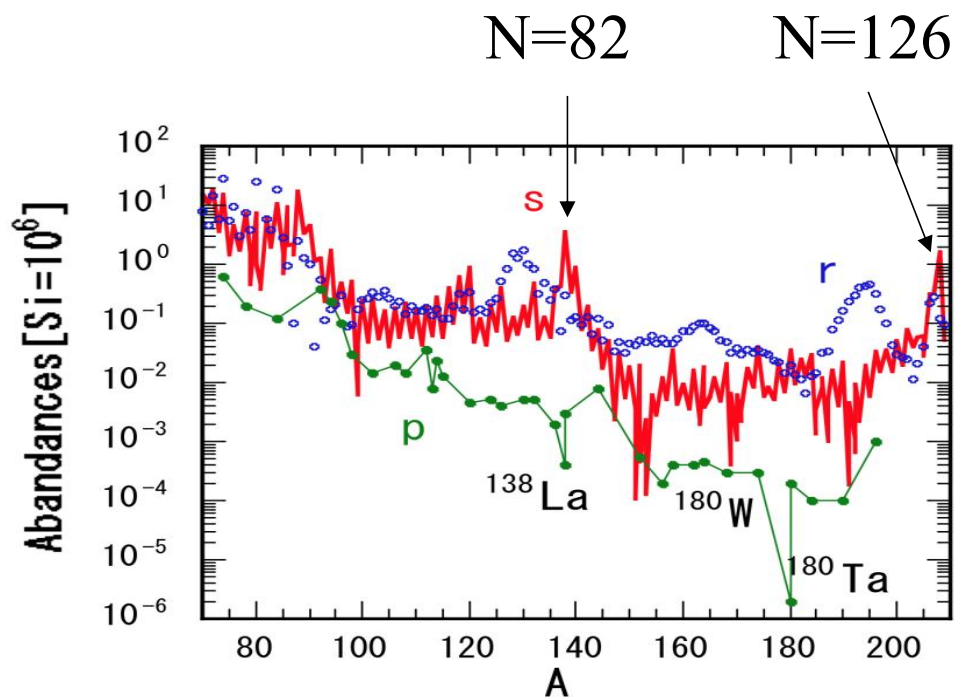
01 核反应截面数据的重要性

- 中子俘获反应是宇宙中比铁重的元素核合成的主要路径（**s-过程**、**r-过程**）。重元素的中子俘获截面是核天体网络计算的关键的输入量，对理解宇宙演化具有重要意义。



01 核反应截面数据的重要性

- 在 β 稳定线的丰质子一侧，存在着35个缺中子同位素（从 ^{74}Se 到 ^{196}Hg ），它们是不能被慢中子俘获和快中子俘获过程（s-过程和r-过程）合成的，这些核被称为p-核素。
- 在大质量恒星晚期和坍缩型的超新星中，**p-过程（或 γ -过程）**被假定由一系列的 (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) 等光致蜕变反应组成。



01 核反应截面数据的重要性

➤ 目前，尚有一部分p-核素的丰度观测值在现有的天体模型中难以被准确预估，光致蜕变过程有助于解释p-核素的核合成之谜。通过考虑热化的 $^{113\text{m}}\text{Sn}$ 成功解释了 ^{112}Sn 的丰度被现有模型低估的难题；这一方法并可应用于其他p-核素的丰度研究。

1. Temperature: high enough for photoreaction

$$1.5 \leq T[10^9 \text{K}]$$

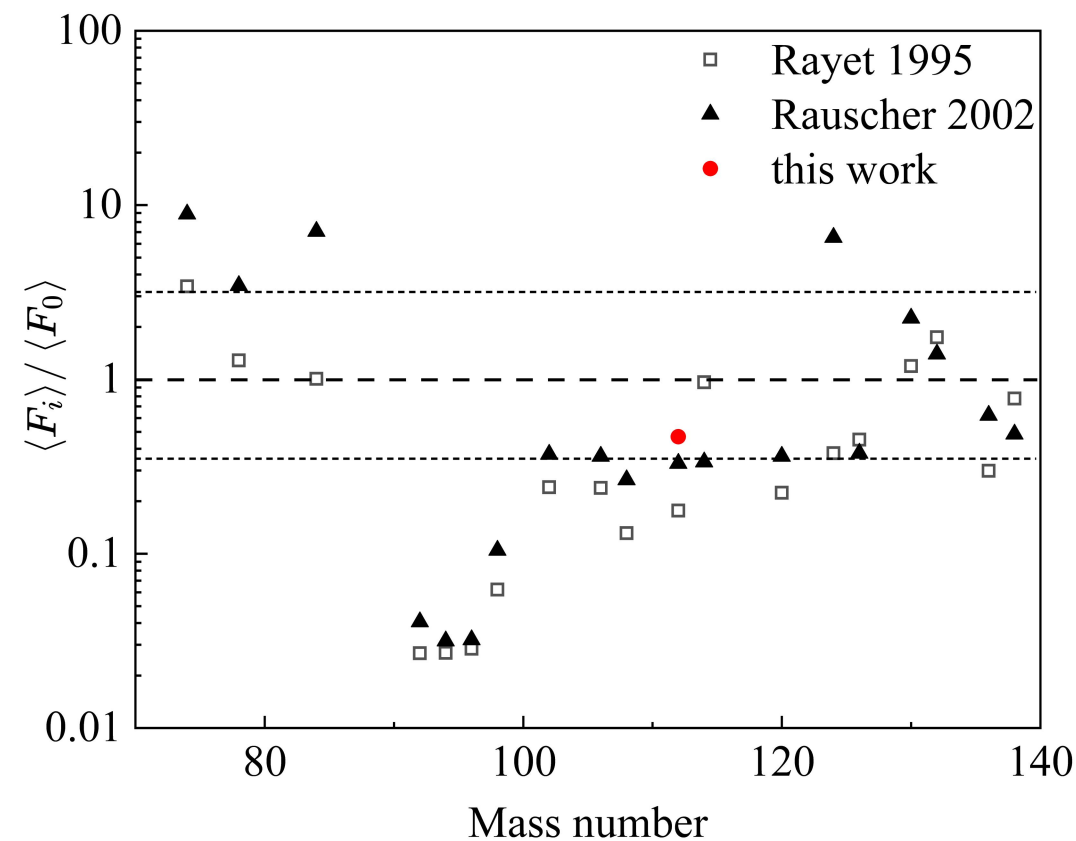
2. *Temperature: not too high to prevent*

photoerosion of all elements to iron-group

nuclei

$$T[10^9\text{K}] \leq 3.5$$

3. Photoreaction is frozen in a short time scale



01 光中子截面数据研究的紧迫性

- 2019年，国际原子能机构发布了第二次光核反应数据汇编中指出：光核数据相比中子数据量而言总量小，130多个核素（稀土区）的光核反应数据来自于理论计算，没有实验数据指导，且已测量的数据质量参差不齐、分歧明显。



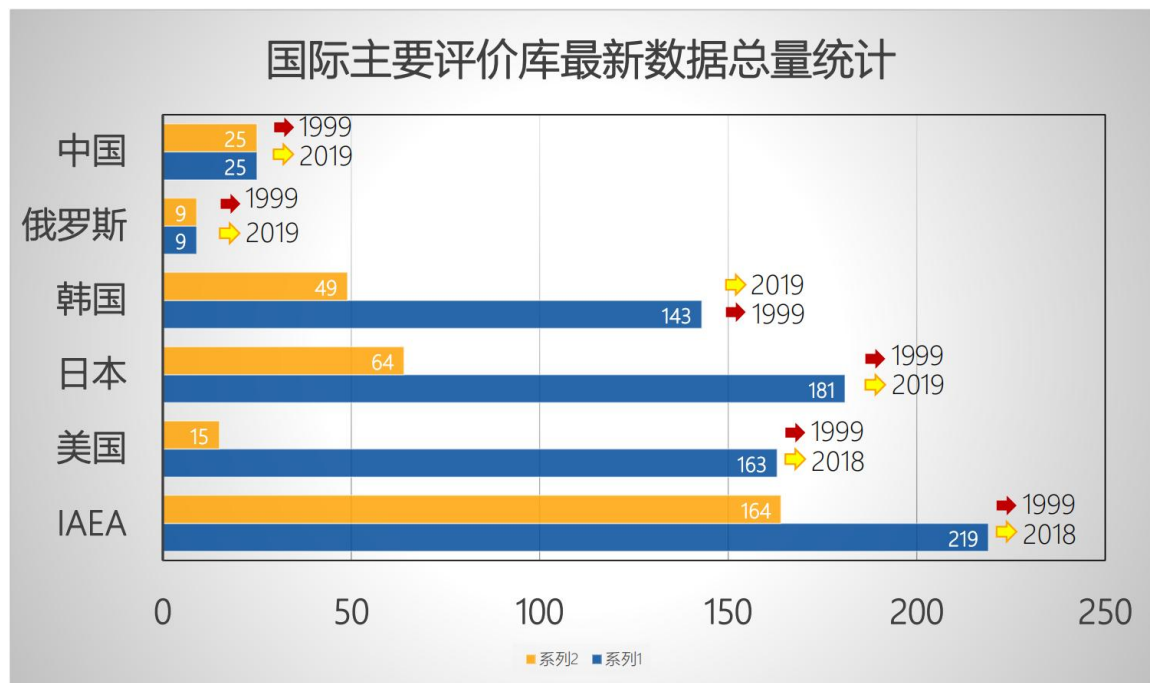
Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect
Nuclear Data Sheets 163 (2020) 109–162
www.elsevier.com/locate/nds

Nuclear Data Sheets

IAEA Photonuclear Data Library 2019

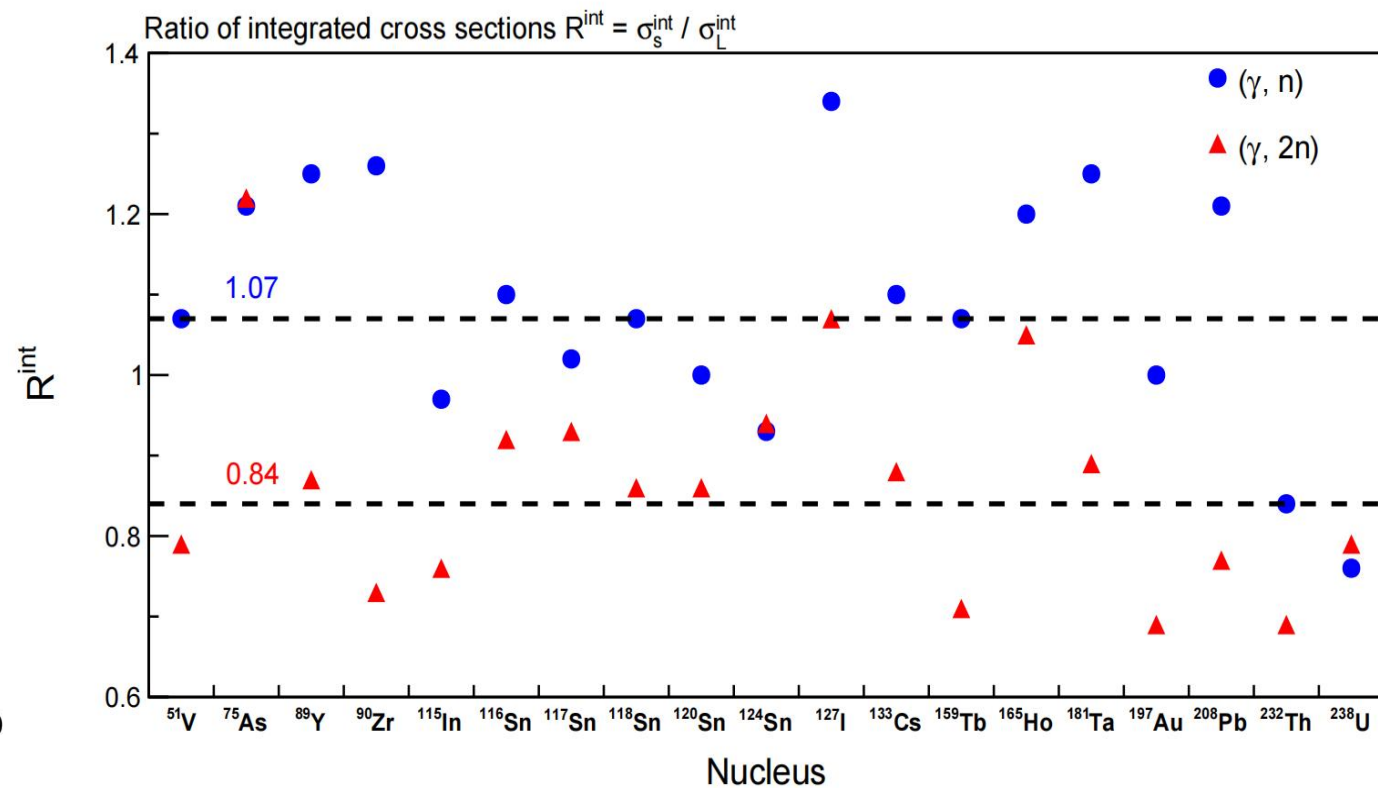
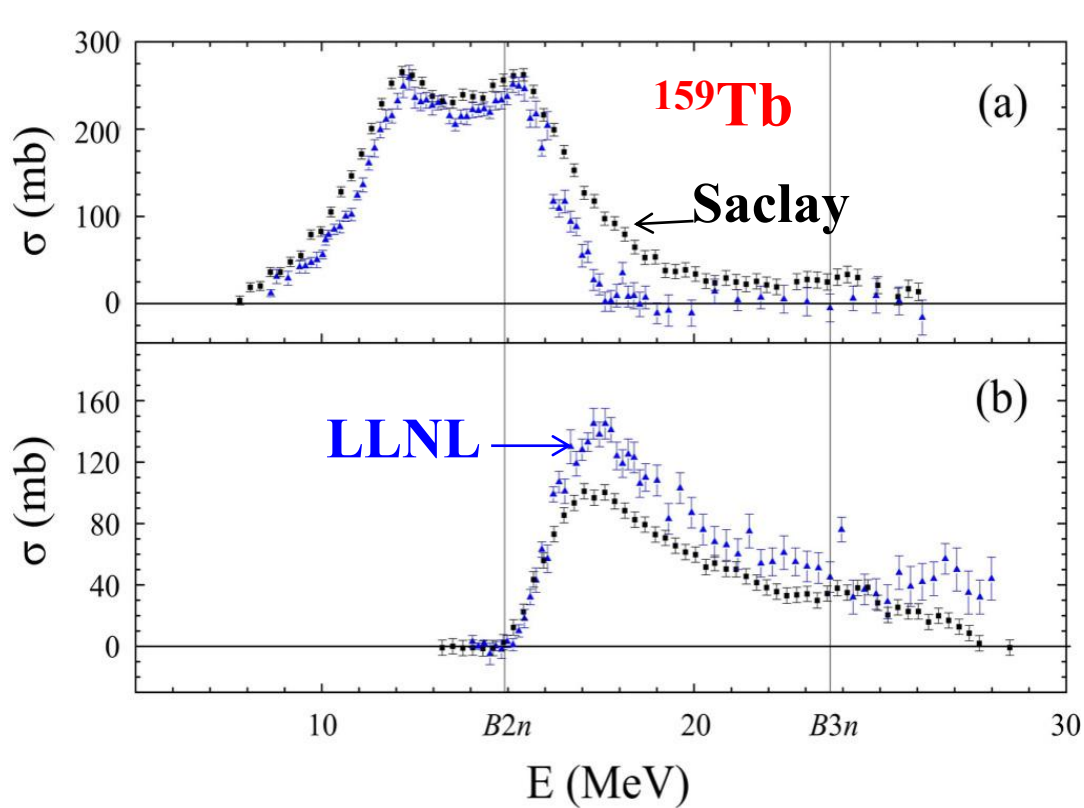
T. Kawano,^{1,*} Y. S. Cho,² P. Dimitriou,³ D. Filipescu,⁴ N. Iwamoto,⁵ V. Plujko,⁶ X. Tao,⁷ H. Utsunomiya,⁸ V. Varlamov,⁹ R. Xu,⁷ R. Capote,³ I. Gheorghe,⁴ O. Gorbachenko,⁶ Y.L. Jin,⁷ T. Renström,¹⁰ M. Sin,¹¹ K. Stopani,⁹ Y. Tian,⁷ G.M. Tveten,¹⁰ J.M. Wang,⁷ T. Belgia,¹² R. Firestone,¹³ S. Goriely,¹⁴ J. Kopecky,¹⁵ M. Krčička,¹⁶ R. Schwengner,¹⁷ S. Siem,¹⁰ and M. Wiedeking¹⁸

We report our coordinated efforts to address these data needs and present the results of the new up-to-date evaluations included in the new updated IAEA Photonuclear Data Library consisting of 219 nuclides. The new library includes 188 new evaluations produced by the CRP evaluators, and one evaluation taken from the JENDL/PD-2016 library, while 20 evaluations were retained from the previous 1999 IAEA Photonuclear Data Library. In most of the cases, the photon energy goes up to 200 MeV. A total of 55 nuclides are new in this library reflecting the progress in measurements but also the developing data needs. In this paper we discuss the new assessment method and make recommendations to the user community in cases where the experimental data are discrepant and the assessments disagree. In addition, in the absence of experimental data, we present model predictions for photo-induced reaction cross section on nuclides of potential interest to medical radioisotope production.



01 光中子截面数据研究的紧迫性

- 俄罗斯国立大学 (MSU) 的 V. Valarmov 教授指出: **LLNL和Saclay的两家数据存在系统性偏差, 无法解决, 需要重新测量!**

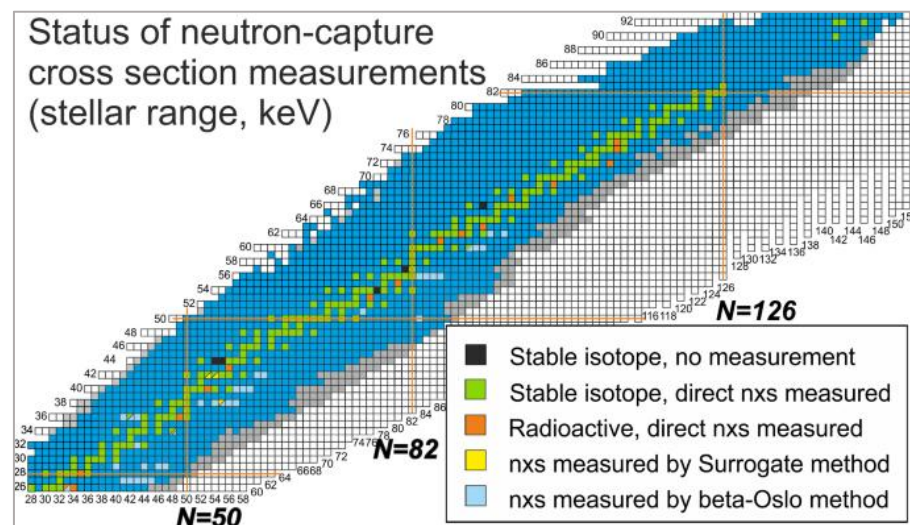
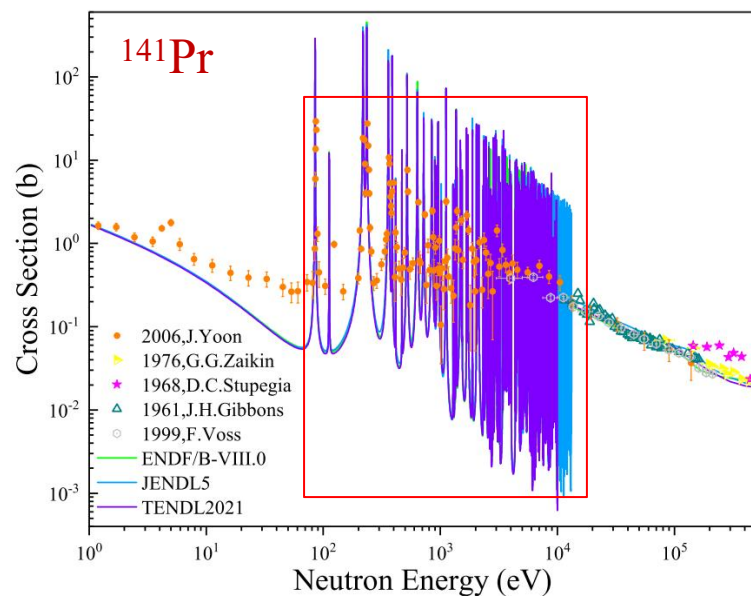
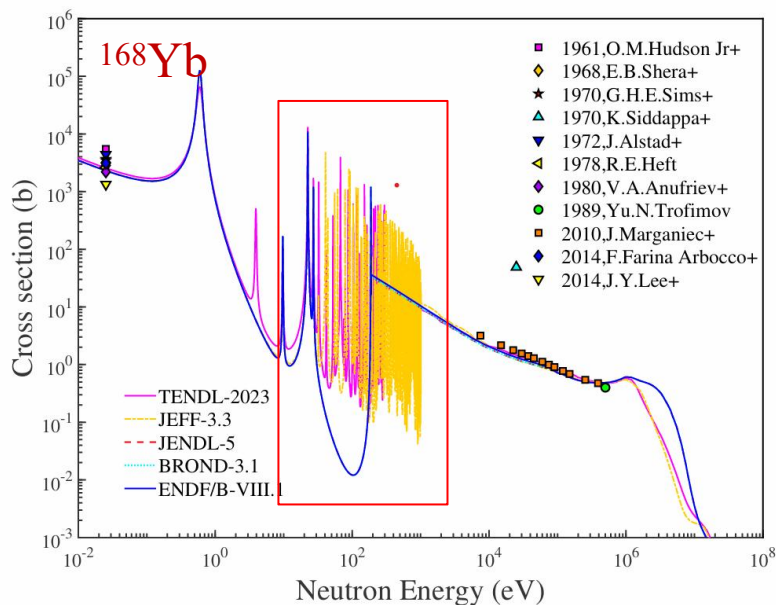


Varlamov, V. V. et al., Moscow University Physics Bulletin 78 (2023): 303-315.

Varlamov, V. V. et al., Physical Review C 95 (2017): 054607.

01 中子俘获截面数据研究的紧迫性

- 国际上在**共振能区的中子俘获截面实验数据严重缺乏**，且不同评价数据库也存在明显分歧，亟待高精度实验以期丰富实验数据以及澄清相关分歧。
- 对于不稳定核素，开展**中子俘获截面的直接测量是非常具有挑战的**。替代反应或 beta-Oslo 方法已成为获取不稳定核素的中子俘获截面数据的重要方法。



01 核反应截面数据研究的重要平台——Back-n

CSNS 反角白光中子源 (**Back-n**)是国内首条专用于中子核数据测量研究的线站

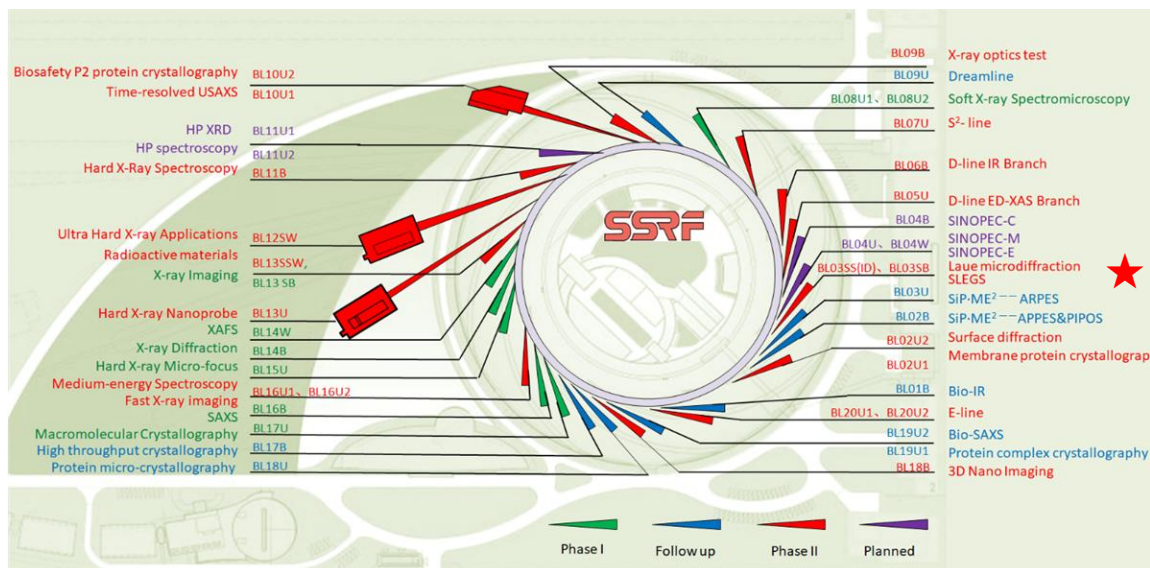


典型的白光中子特性:

- 能区: 热能区到百MeV
- 能量分辨率: $<1\%$
- 中子通量: $10^7/\text{cm}^2/\text{s}$
- 质子脉冲: 1.6 GeV, 100 kW
- ES#1: 56 m, (n, lcp)
- ES#2: 76 m, (n, γ), (n, tot), (n, f)

01 核反应截面数据研究的重要平台——SLEGS

- 上海光源-上海激光电子伽马源（**SLEGS@SSRF**）是一台基于加速器的高能准单能伽马射线束线站，为光核反应截面的研究提供了极佳的平台条件。



- SLEGS@SSRF是国际首台同时具备连续可调“斜入射”和“背散射”两种运行模式的LCS装置。

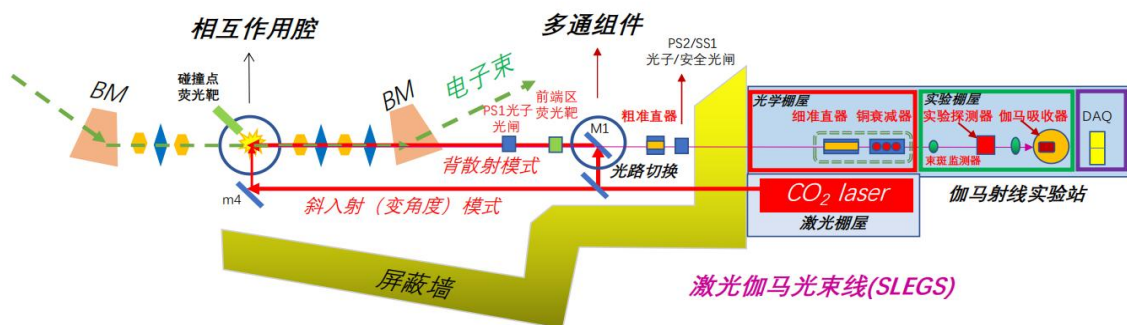
设计指标:

能量范围: 0.6-21.7 MeV

能量分辨率: <5%

发射度: 0.5 mrad

总积分流强: $10^5 - 10^7$ photons/s



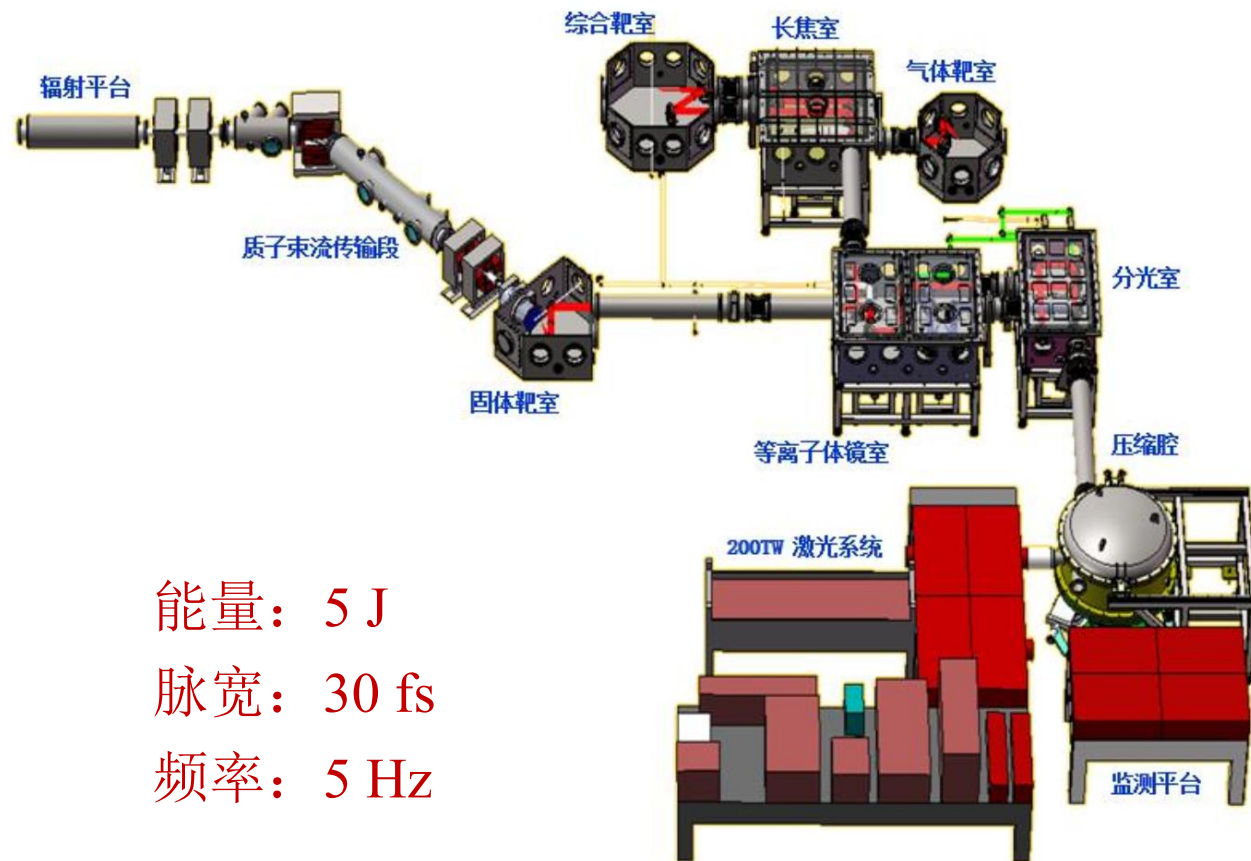
01 核反应截面数据研究的重要平台——高功率激光装置（部分）

中物院星光-III激光装置



峰值功率： 10^{15} W；零延时输出三种脉宽：ns束波长： $800\text{nm} \pm 30\text{nm}$ ；
ps束波长： $1053\text{nm} \pm 5\text{nm}$ ；ns束波长： $527\text{nm} \pm 2\text{nm}$ 。

北京大学200 TW 激光装置, CLAPA



能量：5 J
脉宽：30 fs
频率：5 Hz

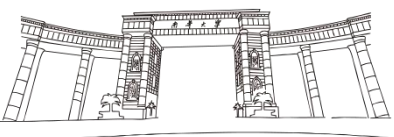
超强超短激光 γ 源，通量达 $10^{19}/\text{s}$



中子核反应截面测量



南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA

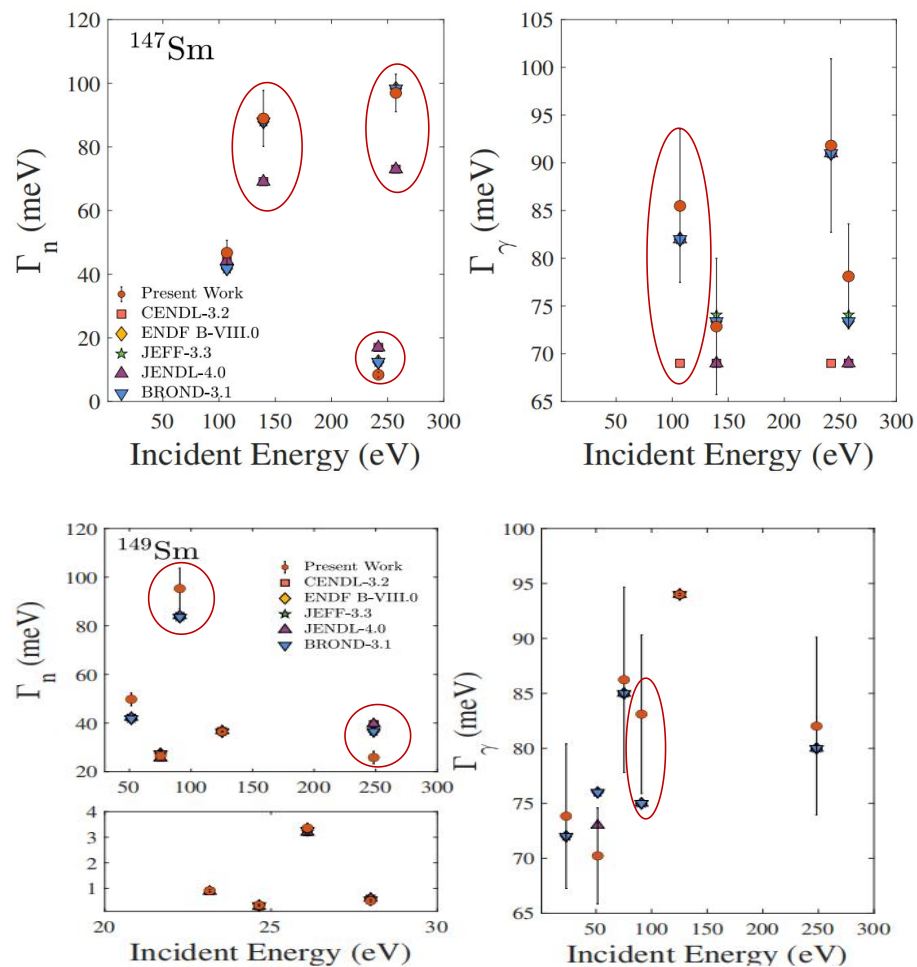


02中子俘获反应截面测量

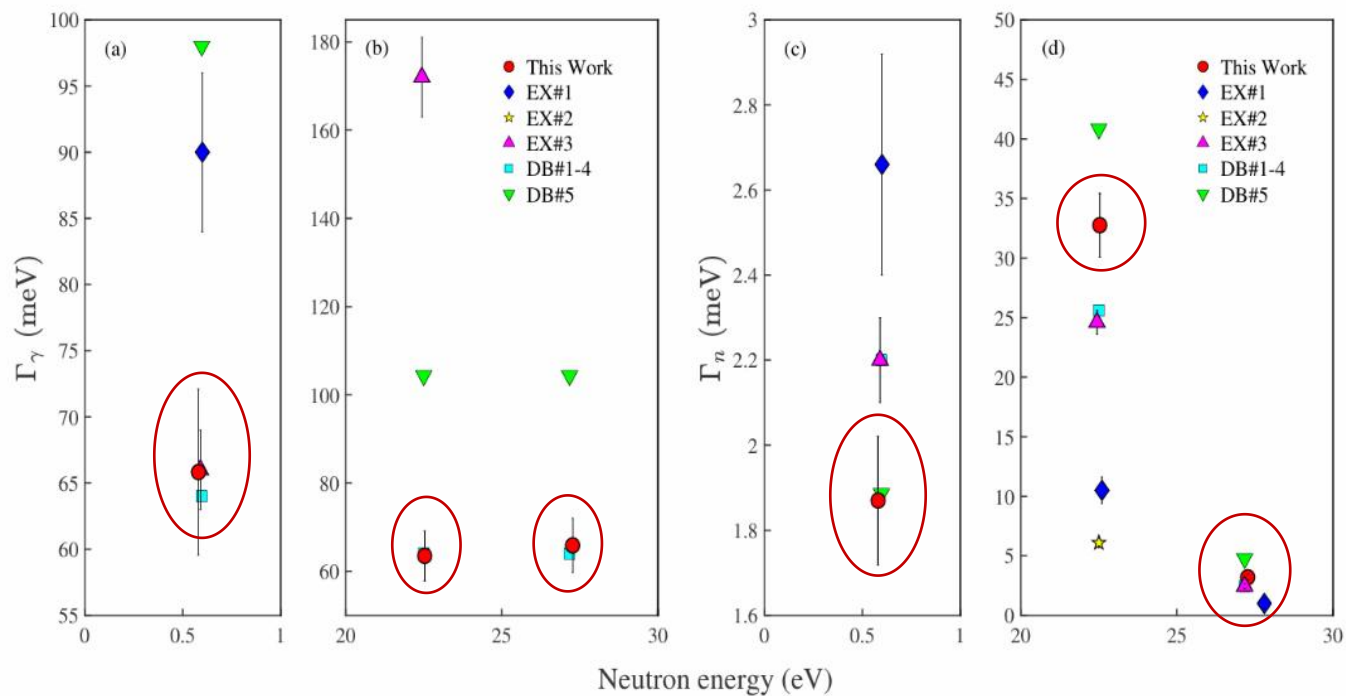
靶材料	靶直径(mm)	厚度(mm)	束流功率	成果发表
^{nat} Yb	30.0	0.1	~150 kW	PRC (2025)
^{nat} Eu	40.0	1.0	~125 kW	EPJA (2022)
¹⁴¹ Pr	40.0	2.0		PRC (2023)
^{nat} Sm	50.0	1.0	~80 kW	NST (2025)
²⁰⁹ Bi	40.0	1.0	~150 kW	CPC (2026)
⁶⁵ Cu	30.0	0.1		实验数据分析中
⁴⁵ Sc	50.0	1.0	~170 kW	
	50.0	0.2		
^{nat} Sb	50.0	1.0	~185 kW	
^{nat} Te	50.0	1.5		

18

02Yb/Sm中子共振参数提取

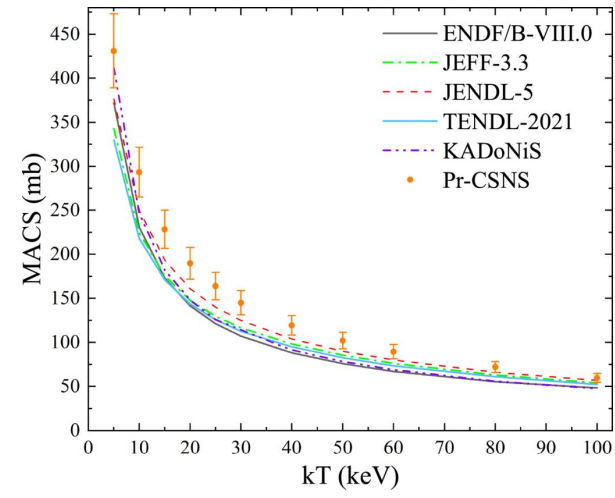
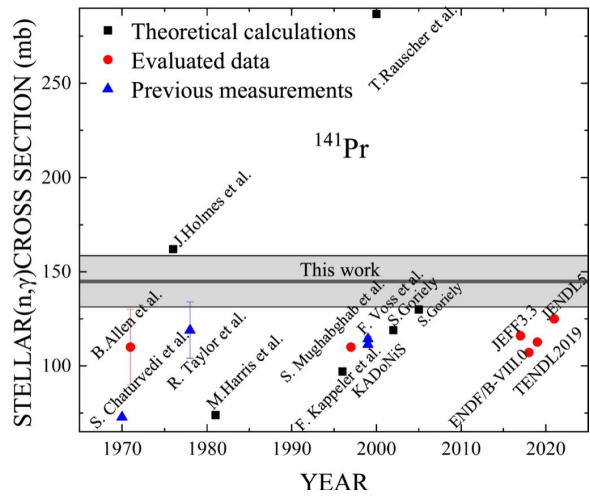
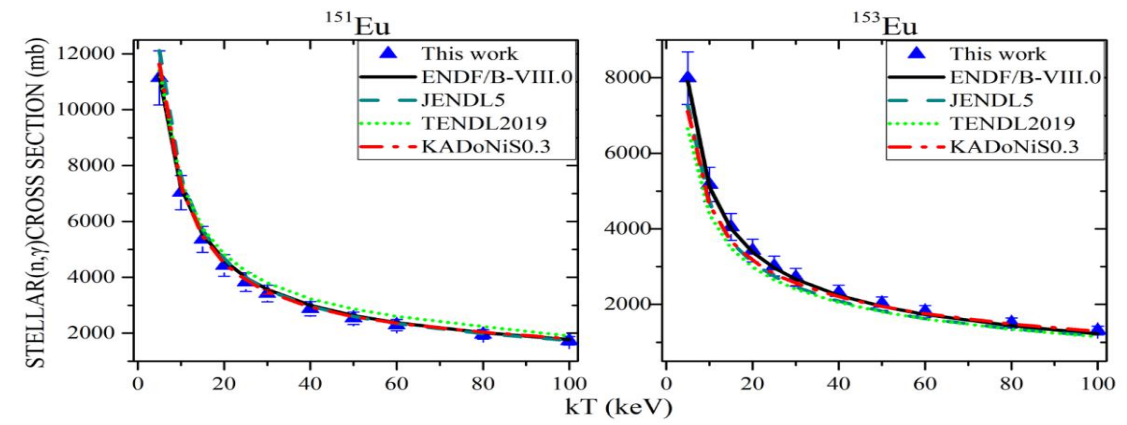
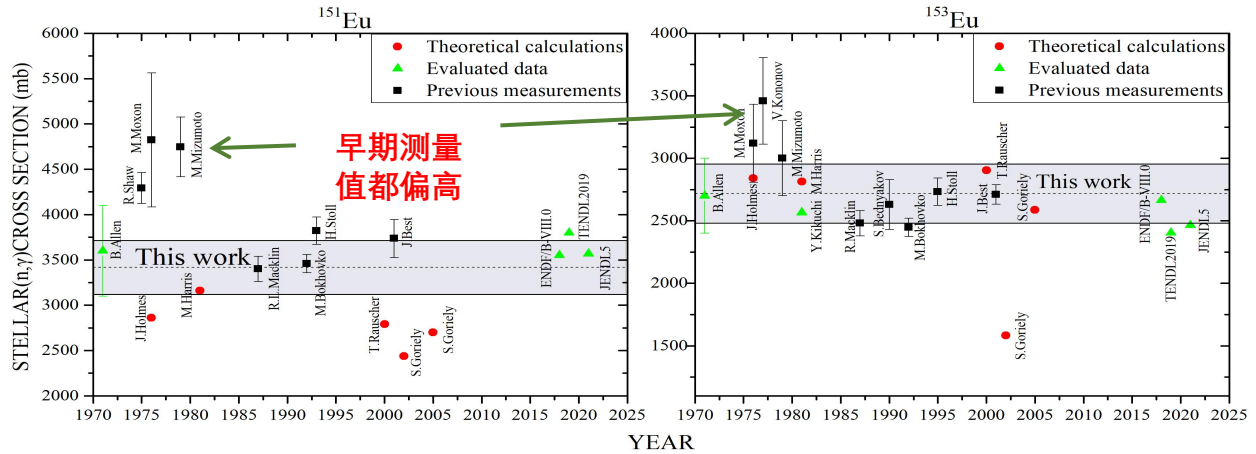


Y.J. Chen, X.X. Li*, W. Luo* et al., Phys. Rev. C. 111, 054607 (2025)
X.X. Li*, H.W. Wang*, W. Luo* et al., Nucl. Sci. Tech. 36:178 (2025)



➤ 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。

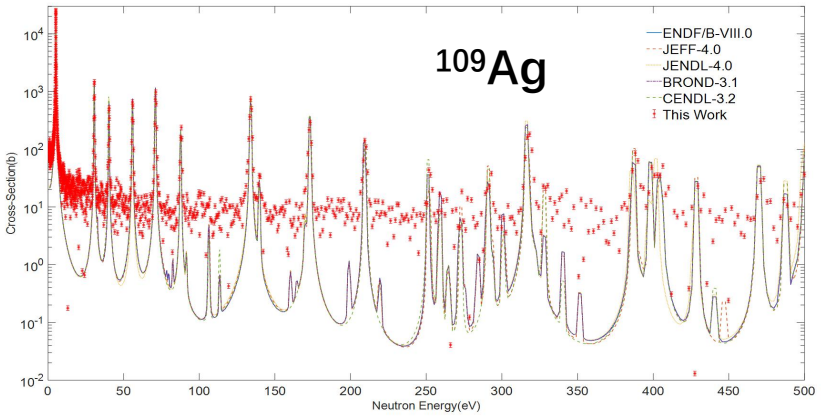
02Eu/Pr中子俘获截面及麦克斯韦平均截面计算



- 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 $^{151}, ^{153}\text{Eu}$ 的MACS，与评价库数据具有较好的一致性。

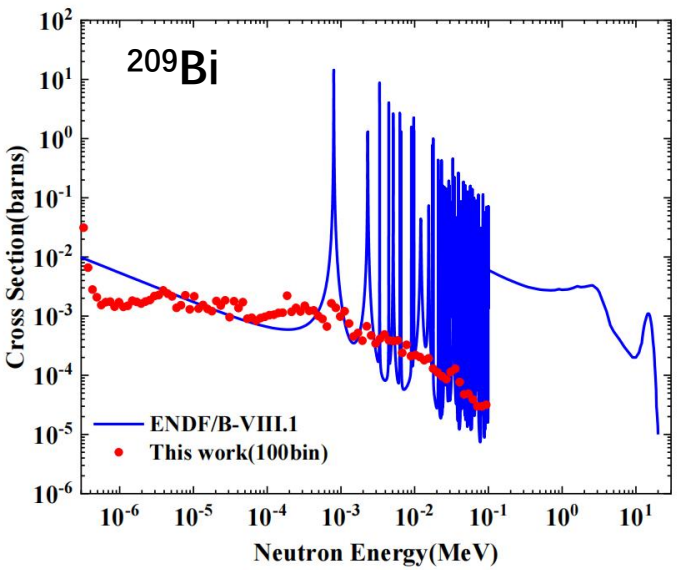
X.K. Li, Z.D. An*, X.X. Li* et al., Phys. Rev. C.108.035802 (2023)
X.K. Li, Z.D. An* et al., Eur. Phys. J. A 58:251 (2022)

02中子核反应截面测量和提取：Ag/Bi低截面靶的实验探索



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%)

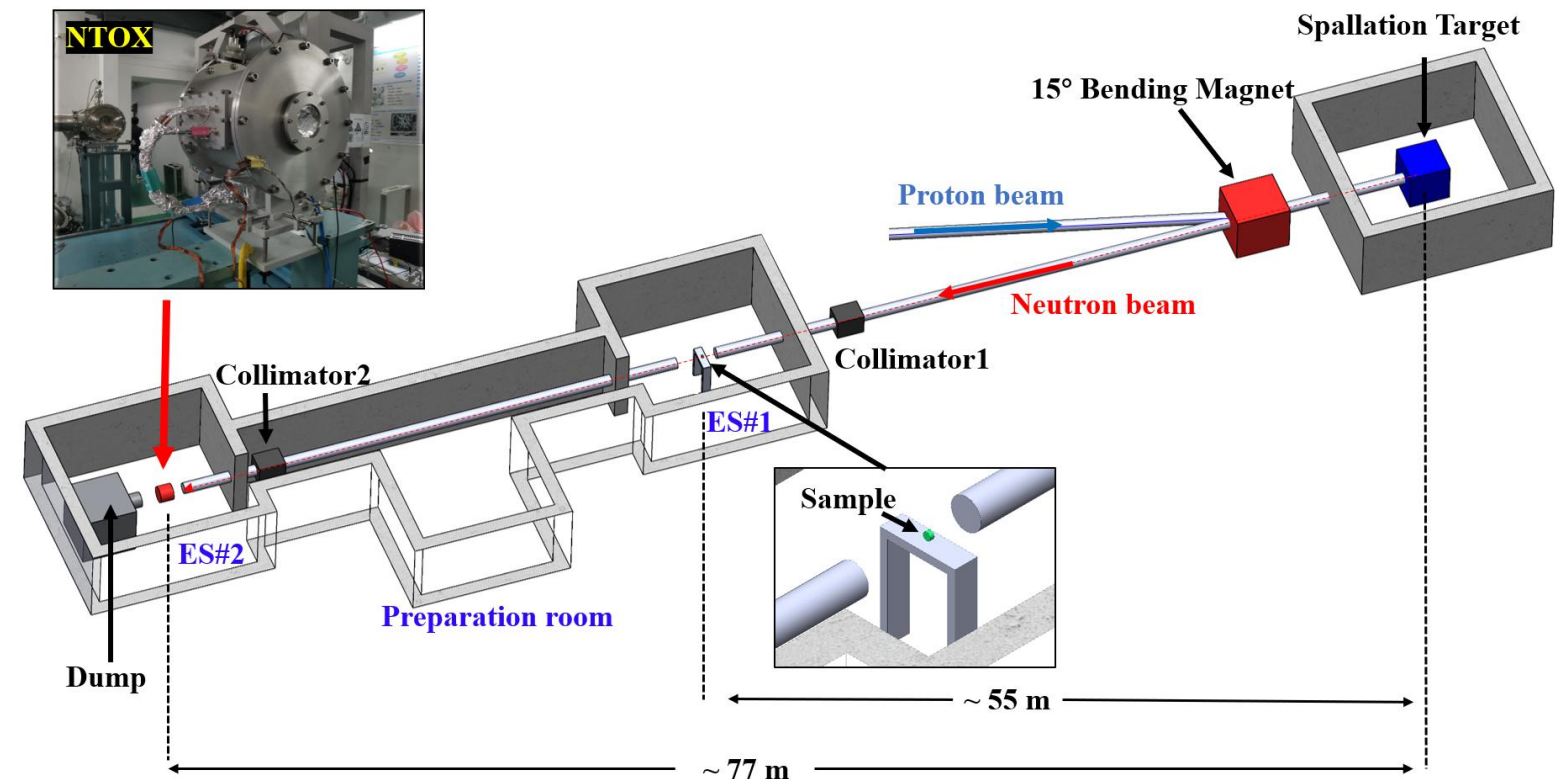
Geant4进行模拟验证

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

02中子全截面实验研究

先进核能系统 (^{nat}Pb 、 ^{209}Bi 、 ^{nat}Cr)、标准截面 (^1H 、 ^{nat}C)、医用同位素 (^{nat}Lu 、 ^{165}Ho)。



团队在CSNS白光中子源装置开展中子全截面实验研究情况

靶材料		靶直径 (mm)	厚度 (mm)	束流功率(kW)	成果发表
^{209}Bi		70	6	100	CPC (2023)
		70	20		
^{nat}Pb		70	10	125	NST (2024)
^{nat}Cr		70	15	125	CPC (2024)
^{nat}Lu		70	10	170	物理学报 (2026) PLB (投稿)
^1H	^{nat}C	70	25		
	PE	70	3		
		70	15		

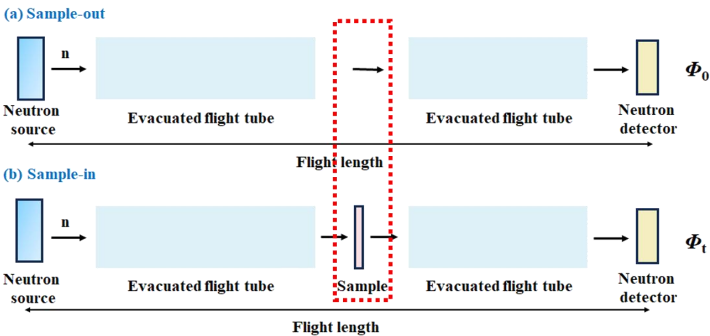
计算中子全截面
透射法

$$d\theta = -\theta(x) n \sigma_t dx$$

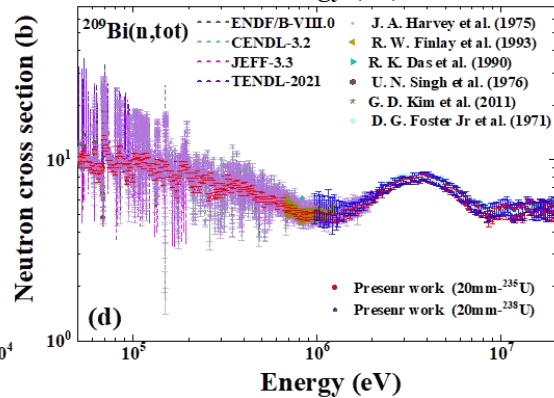
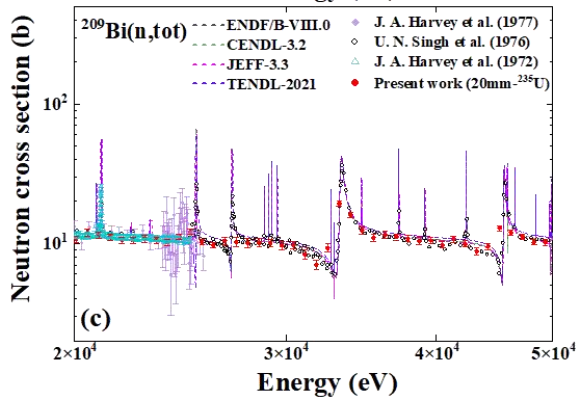
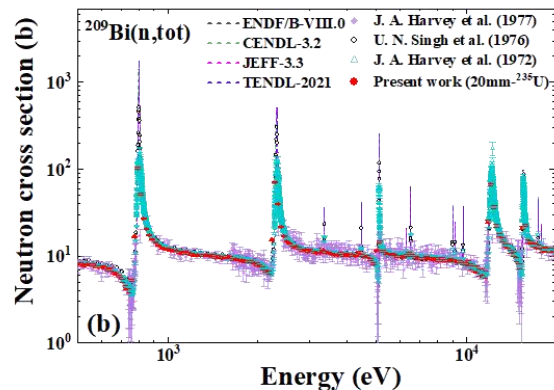
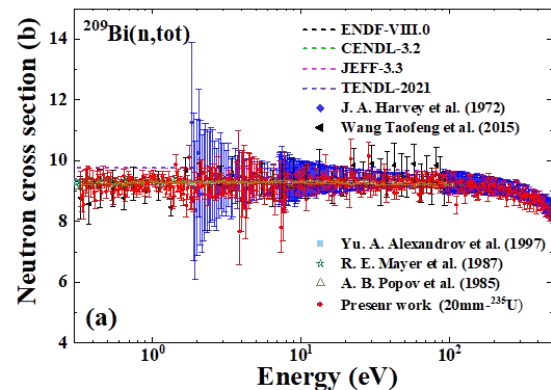
积分

$$\sigma_{tot} = \frac{-1}{nt} \ln T \quad (T = \frac{\phi_t}{\phi_0})$$

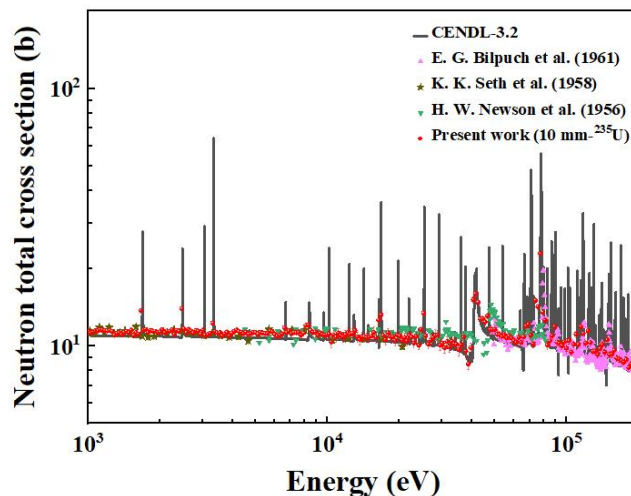
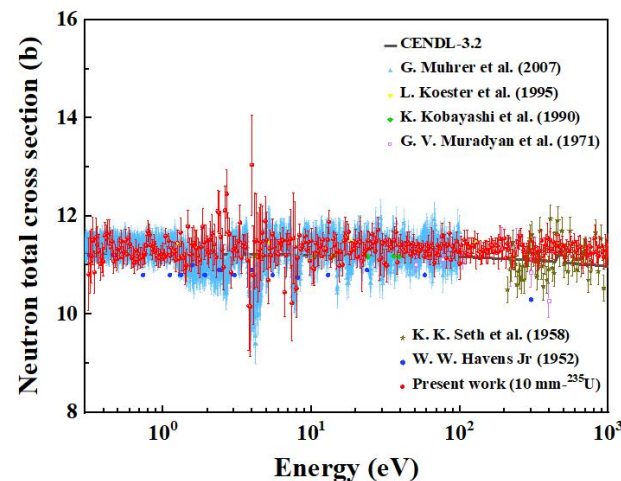
相对测量，精度较高



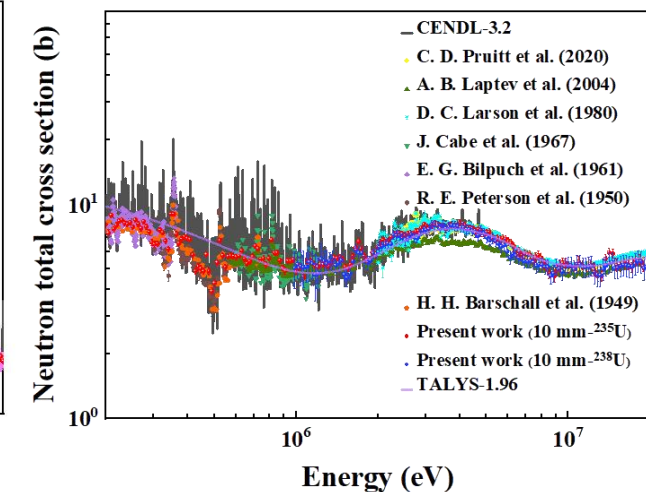
02 Bi/Pb中子全截面实验研究



➤ 使用基于 R-矩阵的SAMMY程序对实验透射率进行拟合，
获得了 ^{209}Bi 中子共振参数。

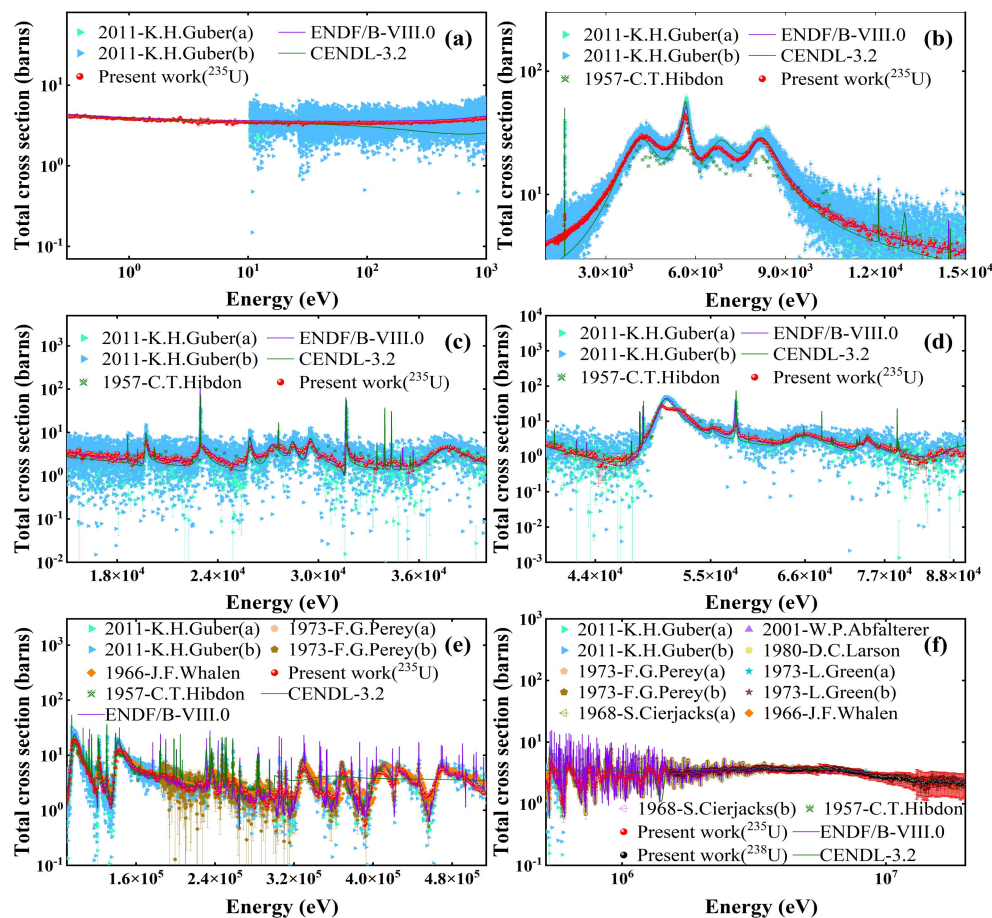


➤ 获得全能区(0.3 eV-20 MeV)
的 ^{nat}Pb 中子全截面实验数据，
与评价库以及其他实验数据
整体符合较好。

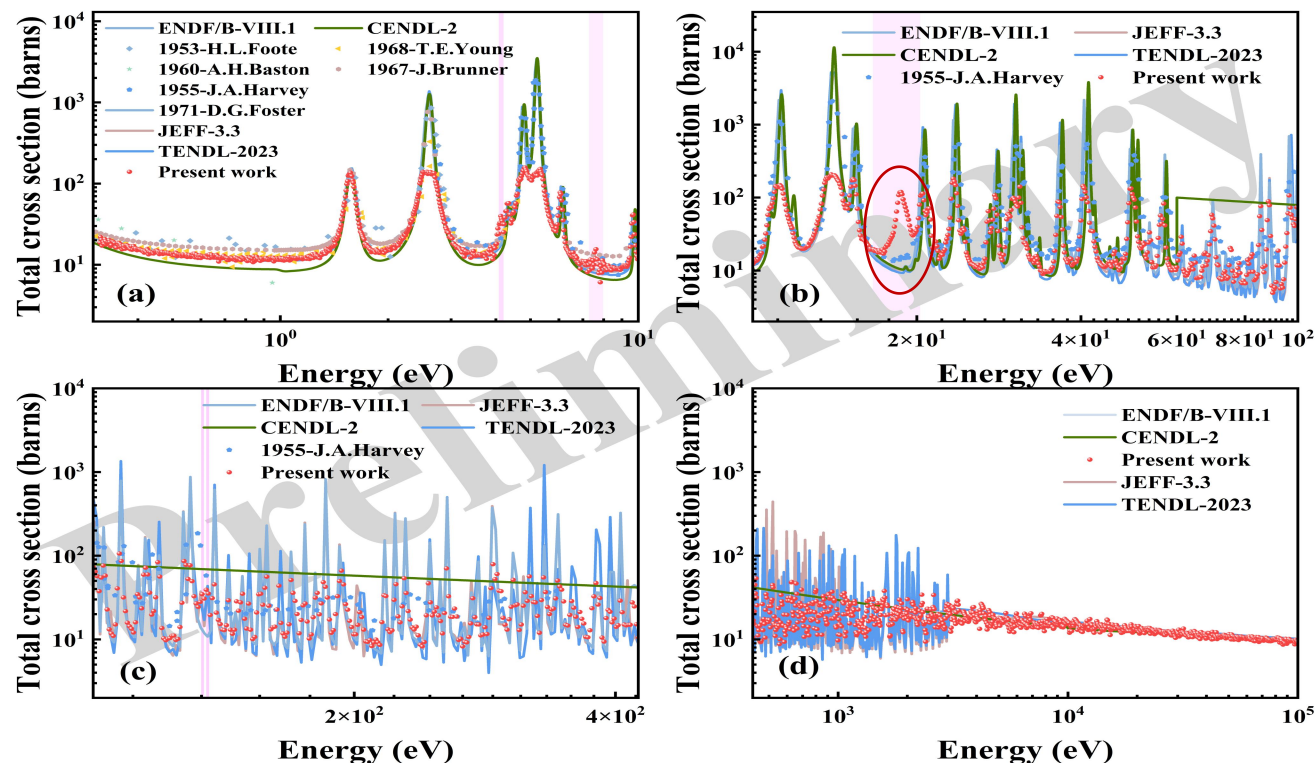


J.M. Xue, S. Feng*, Y.H. Chen et al., Chin. Phys. C, 47: 124001. (2023)

J.M. Xue, S. Feng*, Y.H. Chen et al., Nucl. Sci. Tech. 35: 18. (2024)



➤ 在低能区发现新的共振峰，并为国内 ^{nat}Lu 中子全截面评价数据在几百eV到keV的共振峰更新提供实验数据支撑；

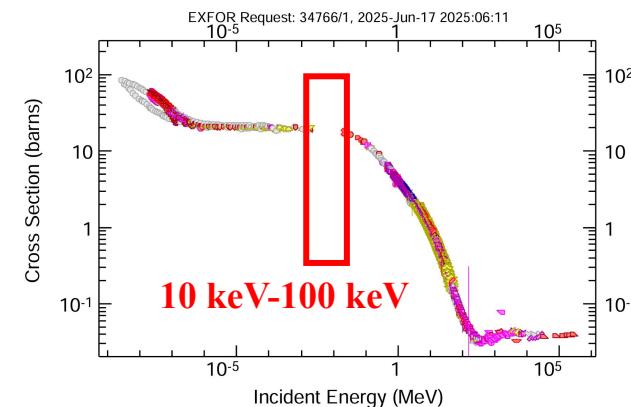
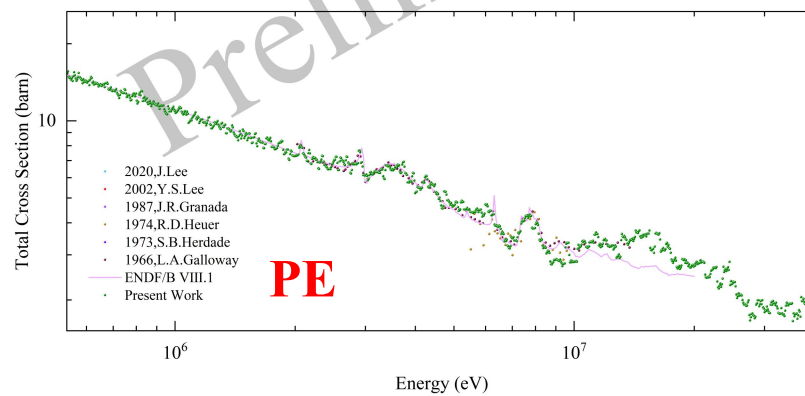
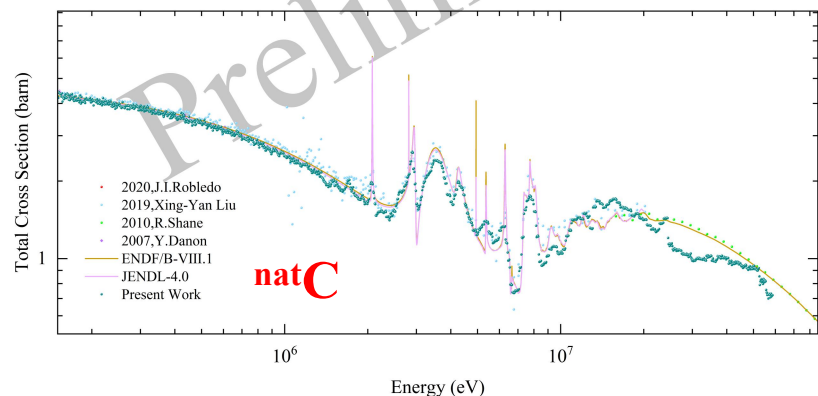
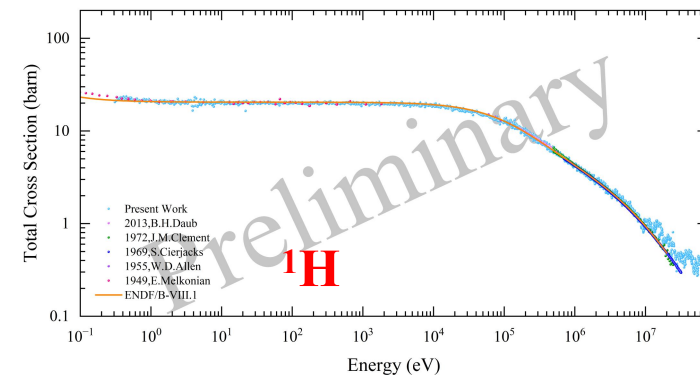
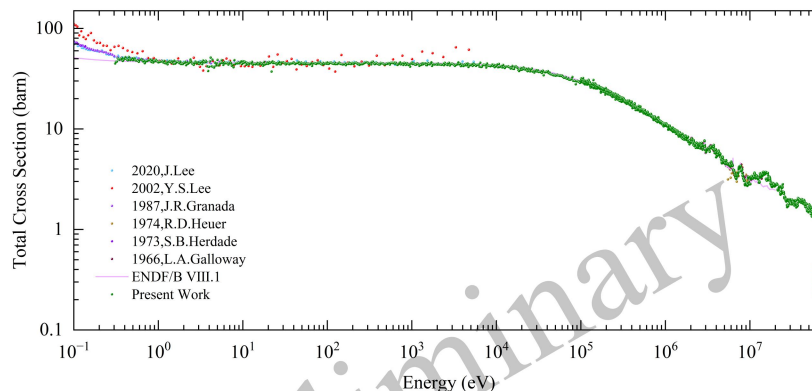
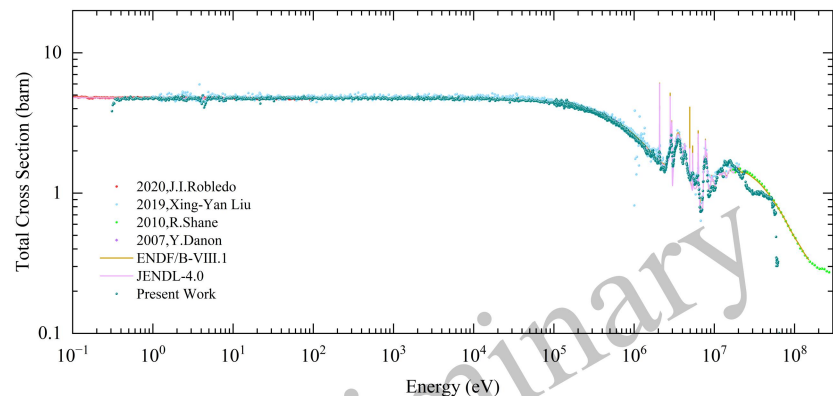


- 系统性开展了全能区的实验数据分析、评价、取舍和归并，并对误差进行了必要的调整和处理。
- 基于各类评价程序，获得了一组天然Cr中子全截面评价推荐值。

B.Q. Li, M. Xiao*, S. Feng* et al. Chin. phys. C.48:10 (2024)

02¹H中子全截面实验研究

详见肖友淳报告



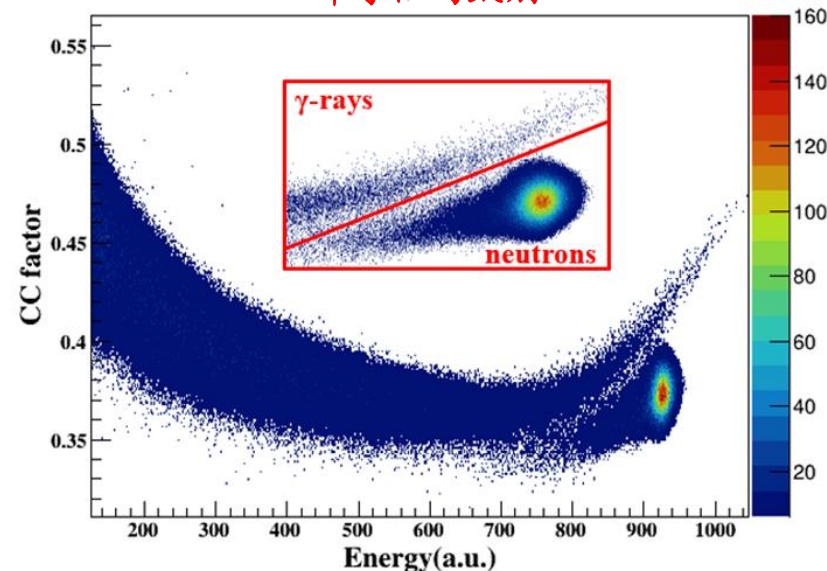
- 结合测量的**碳中子全截面**数据对**聚乙烯中子全截面**进行扣除，得到氢的截面 $\sigma(H)=1/2[\sigma(CH_2)-\sigma(C)]$ ；**填补EXFOR在10 keV-100 keV能区的实验数据空白**；
- 在10 MeV之前数据吻合度较好，后续需改进10 MeV -20 MeV能区内数据处理所带来的差异。

02 基于双模式闪烁体的中子全截面谱仪FAST

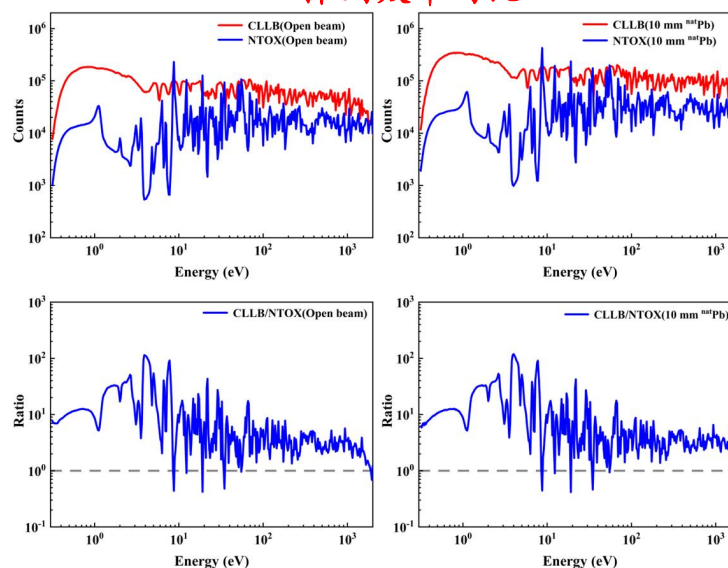
详见栾鹏报告

- 为了提高探测效率以及降低裂变共振区引入的不确定度，采用双模式无机闪烁体 $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ 来升级NTOX谱仪
- 目前完成了FAST谱仪物理设计、初步实验室测试；

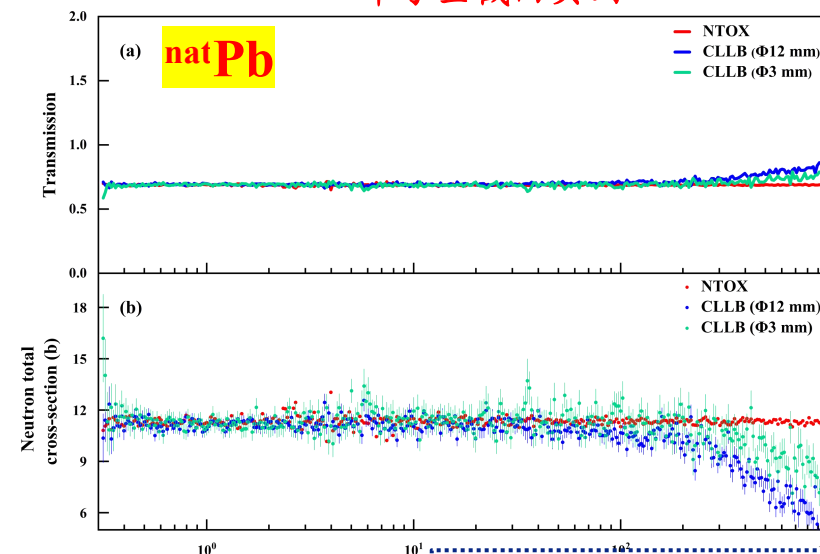
中子伽马甄别



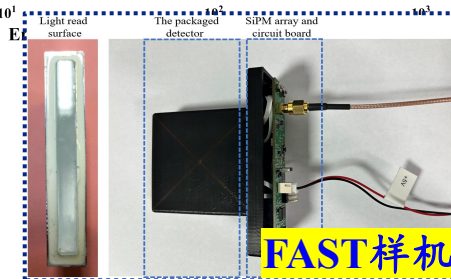
探测效率对比



中子全截面实测



- 在0.3 eV-100 eV能区，探测器样机与NTOX测量的 ^{208}Pb 中子全截面基本一致，特点是不受裂变截面的共振影响且探测效率更高，可与NTOX测量能区互补；
- 下一步拟采用门控技术，使用时间窗避开γ-flash，进一步拓展FAST谱仪的能区覆盖范围。



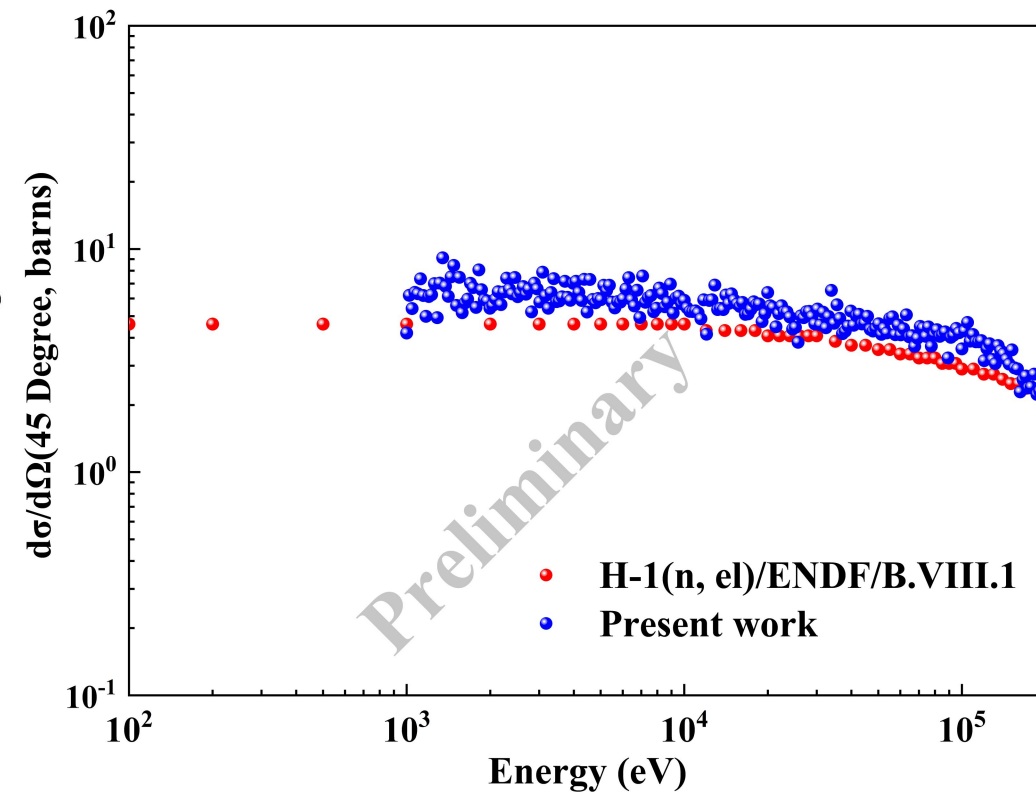
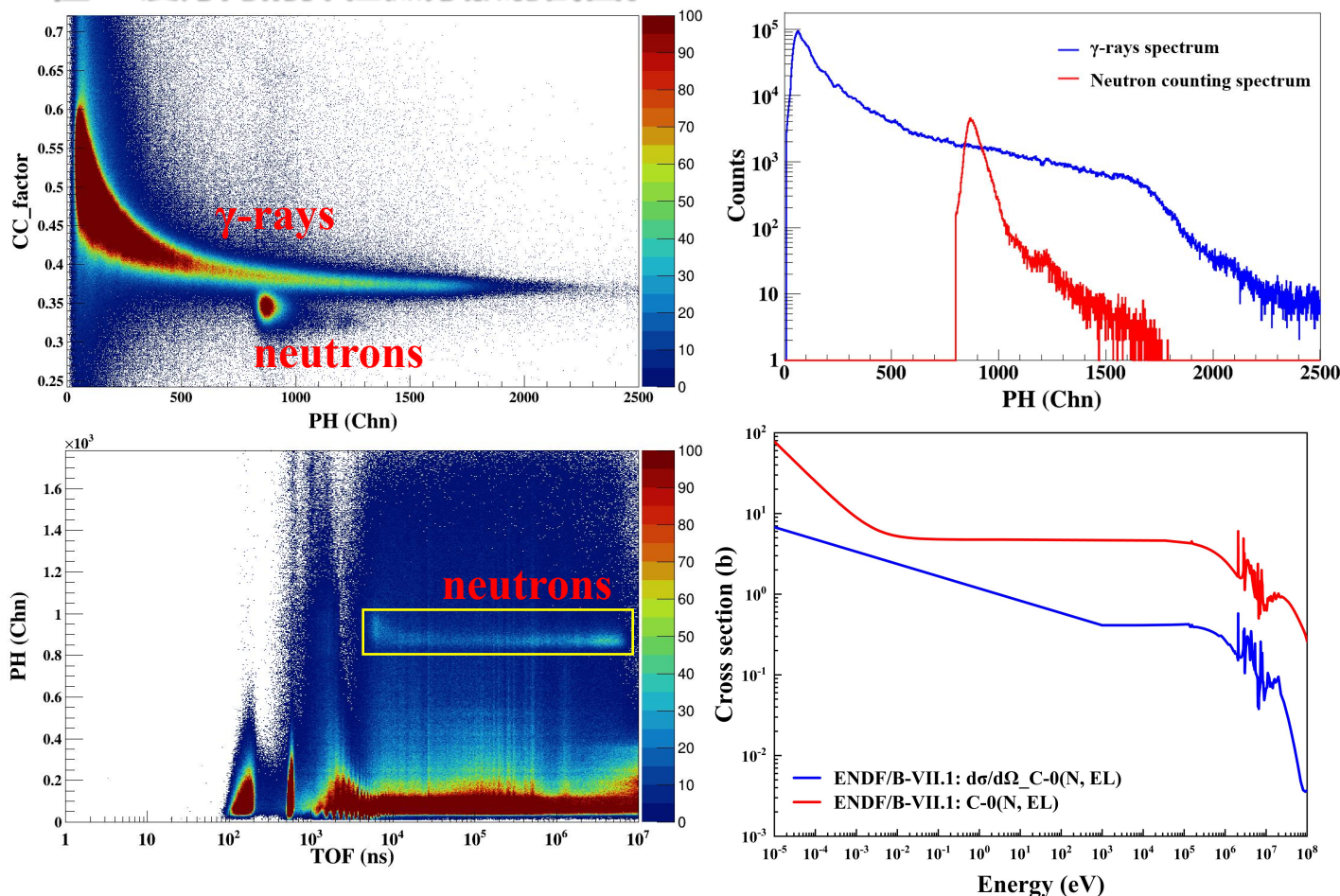
D.J. Zhao, S. Feng* et al. Nucl. Sci. Tech. 34. (2023)

P. Luan, S. Feng* et al. Nucl. Sci. Tech. (2026)

02弹性散射截面实验研究

详见唐诗琦报告

➤在相同实验条件下，分别测量了^{nat}C和聚乙烯样品的中子散射响应，通过扣除本底贡献及聚乙烯中碳原子的散射效应，提取出¹H在45度方向的弹性微分散射截面。



➤初步分析获得1 keV-200 keV氢的45度微分散射截面，趋势上与ENDF.VIII.1库基本一致。

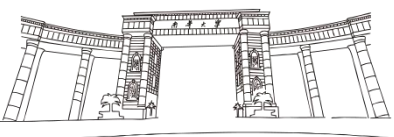
➤未来拟采用探测器阵列布局，进一步获得¹H及其他轻核高精度弹性散射截面。



光子核反应截面测量



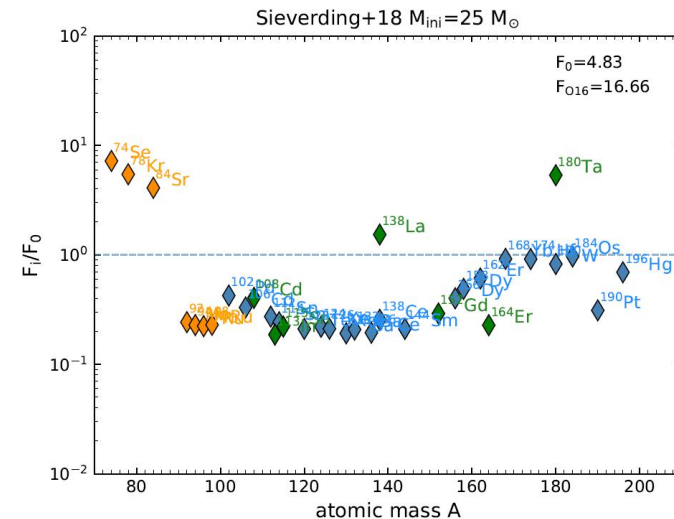
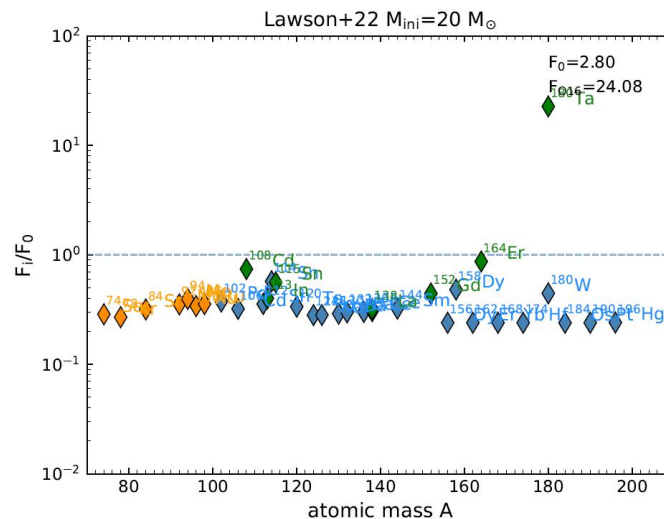
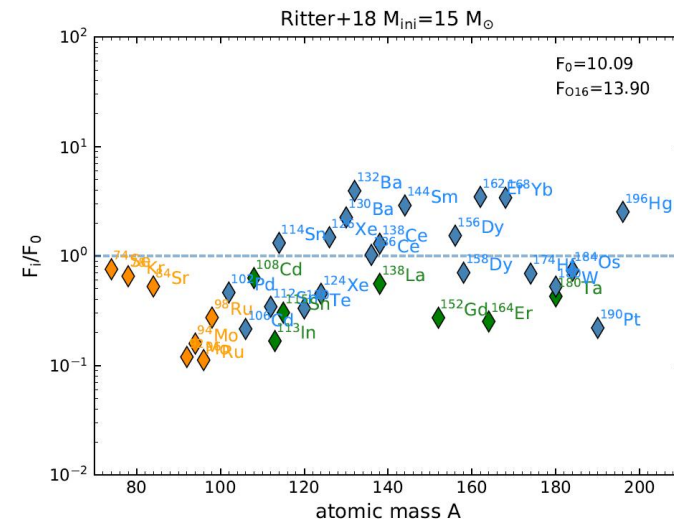
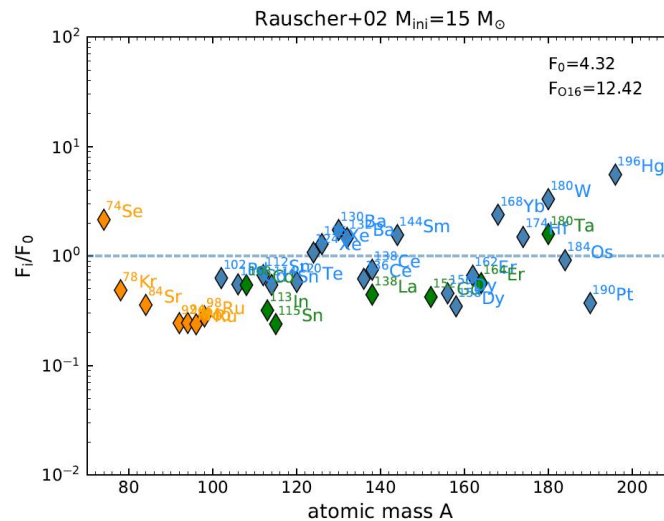
南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



03 光致带电粒子截面理论计算（剩余核处于基态）

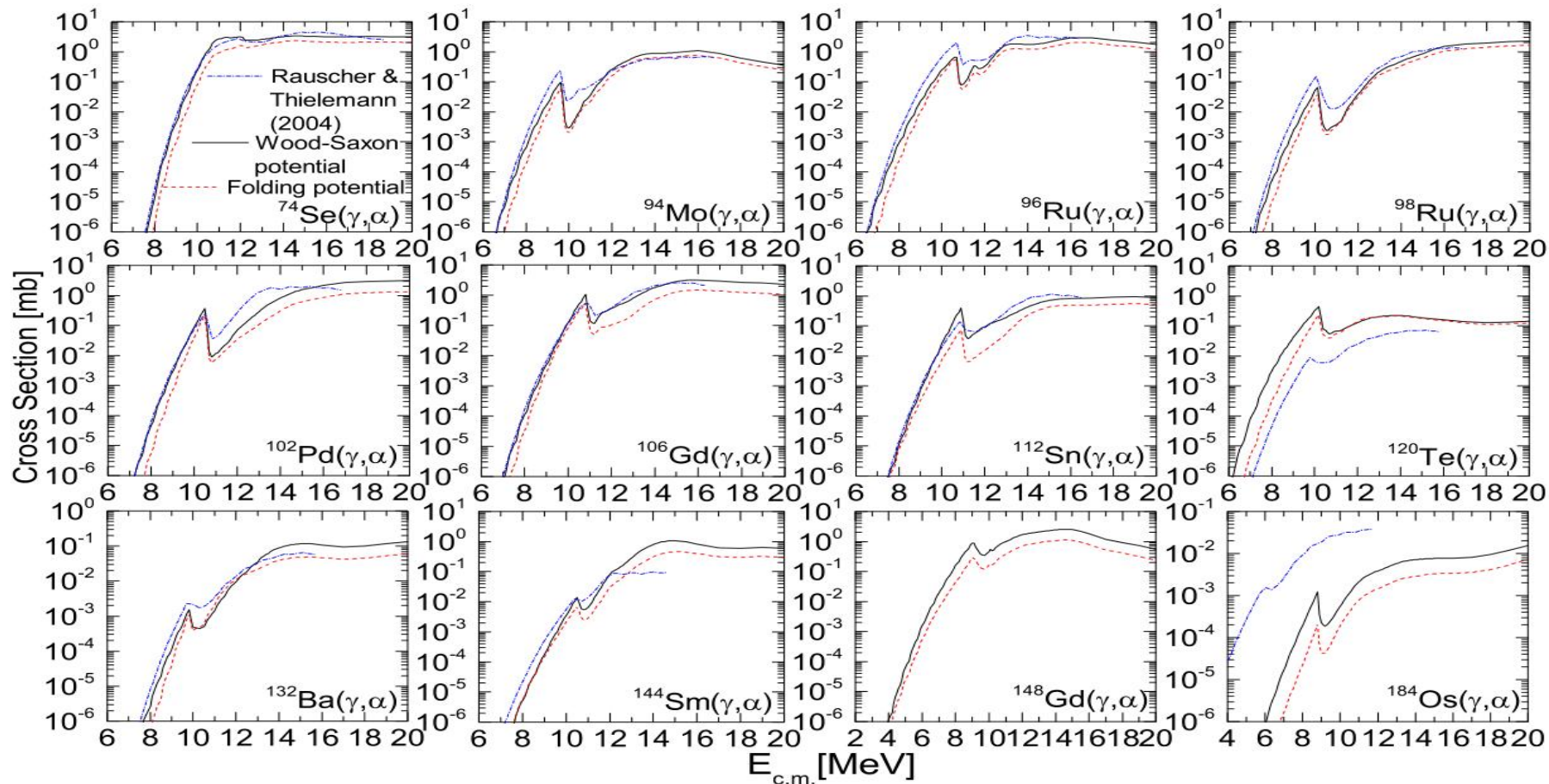
公开问题：开展p-过程核合成的模型计算高度依赖理论推导的光致蜕变反应率，但当前不能准确重现实验观测的丰度。

解决方案：需要约束由理论推导的光致蜕变反应率，进而明确模型中的不确定度以及最终识别p-过程核合成的来源。



03 光致带电粒子截面理论计算 (剩余核处于基态)

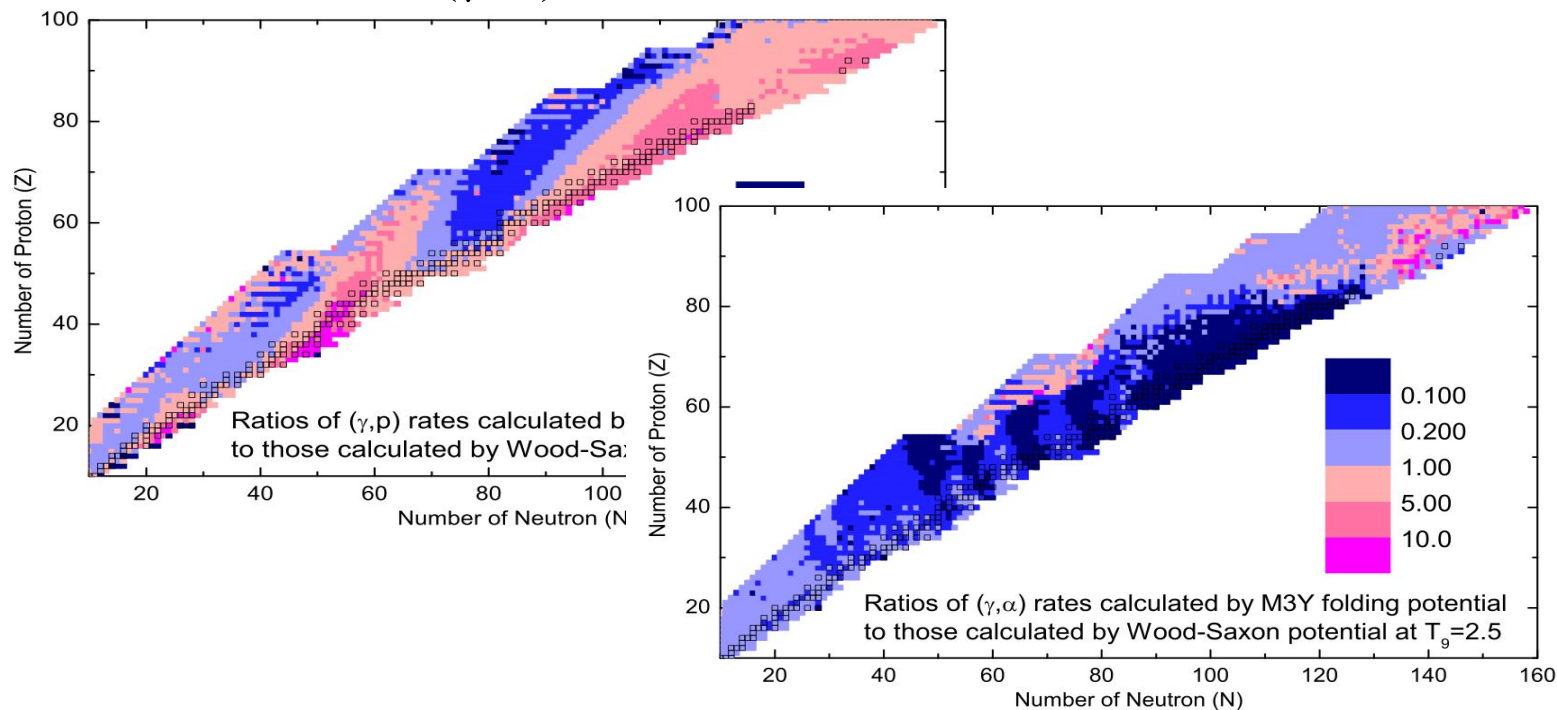
由不同光学势(OMP)计算得到的 $(\gamma, p/\alpha)$ 反应截面比较



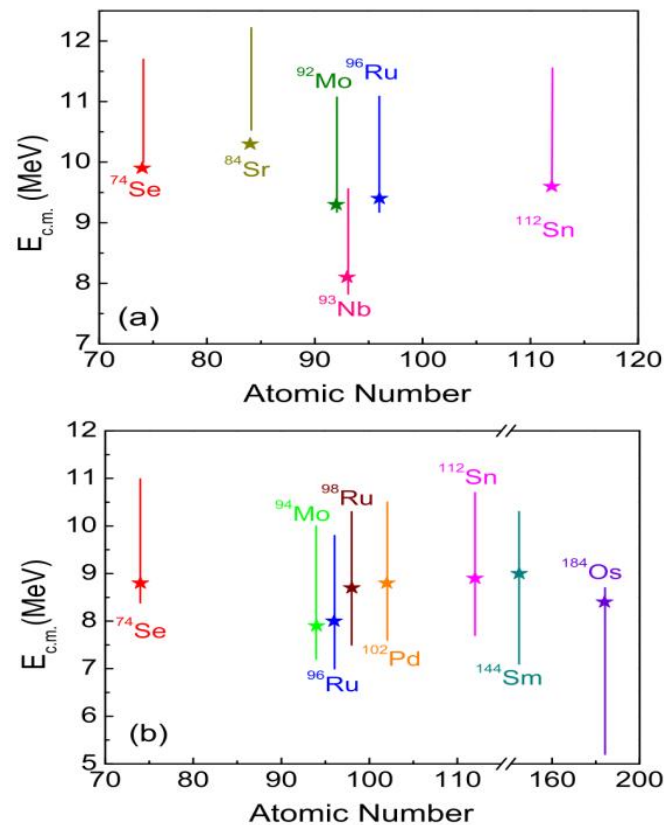
(γ, α) 截面之间的显著差异表明, 天体物理能区内的 α OMP还没有得到很好的确定。

03 光致带电粒子截面理论计算（剩余核处于基态）

对于 $40 < Z < 80$ 的丰质子核素，不同光学势下的 (γ, α) 反应率差异高达一个数量级



有望在Gamow窗区开展p-核素的光致蜕变截面直接测量

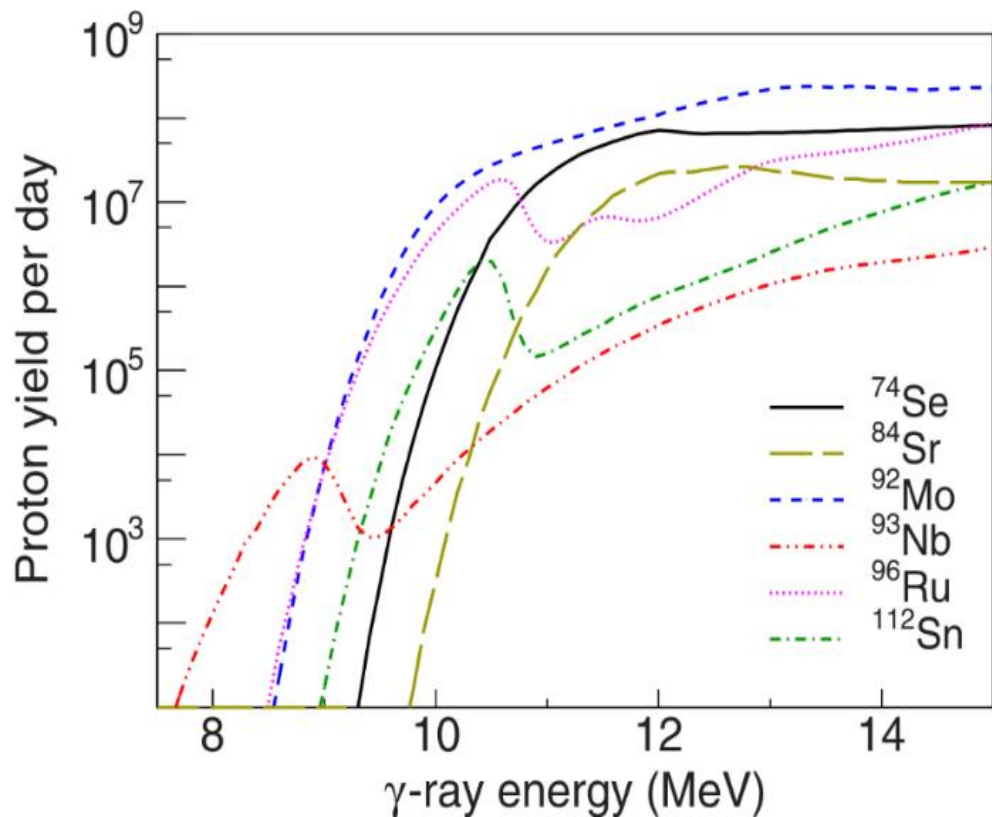


开展~3000个稳定核素和丰质子核素光致蜕变反应率的模拟计算，发现光学势对p-核素的光致蜕变反应率有显著影响！

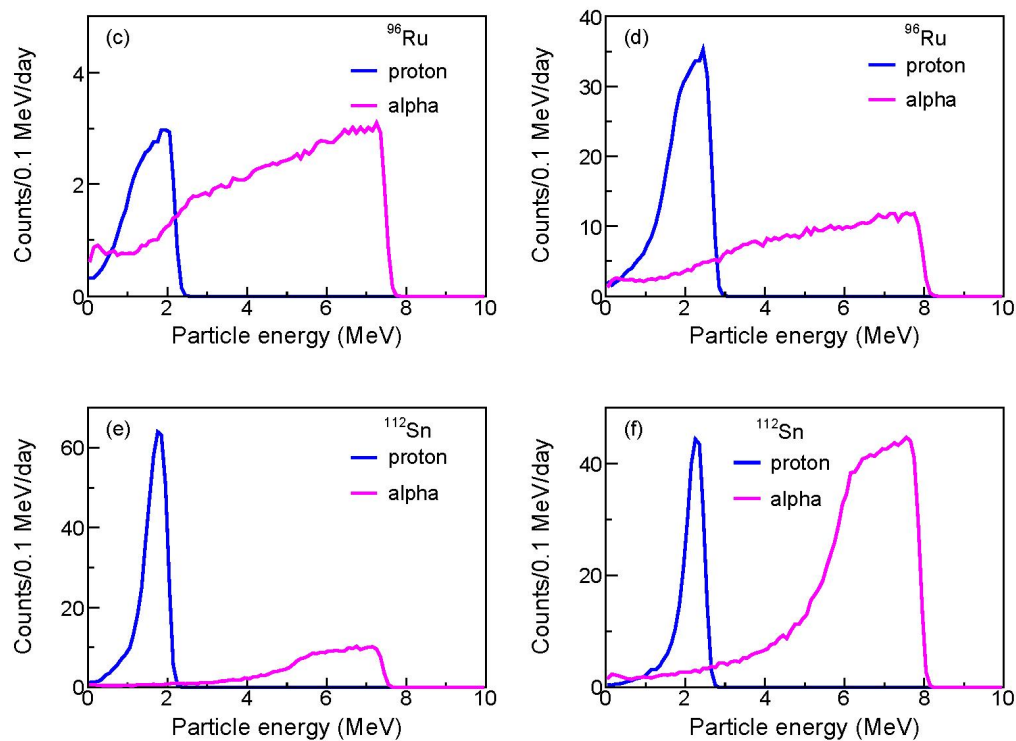
03 光致带电粒子截面理论计算（剩余核处于基态）

针对p-过程中的关键(γ, α)和(γ, p)反应进行Geant4模拟，得到光致蜕变的反应产额与出射带电粒子能谱

部分光致蜕变反应产额



出射带电粒子能谱

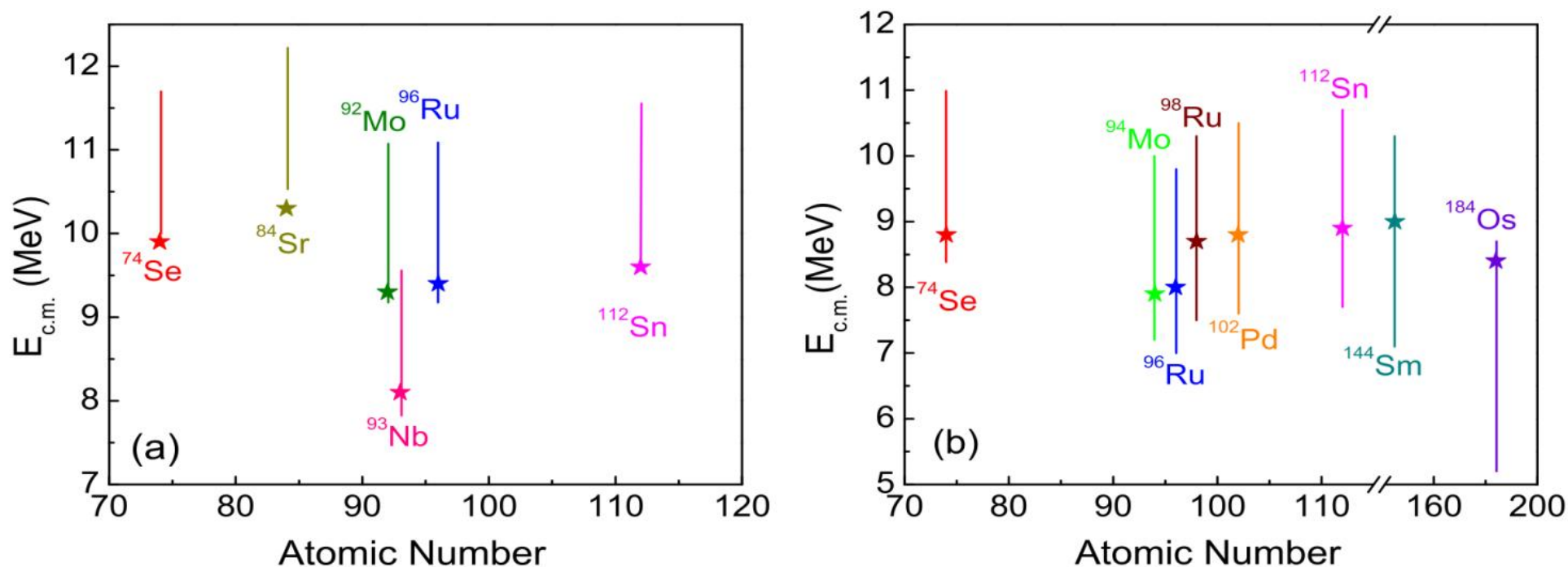


- 在同时满足最小可测产额以及质子/ α 粒子分辨的情况下，可预估测量这些反应所需的伽马源最小能量（探测阈值）。

03 光致带电粒子截面理论计算（**剩余核处于基态**）

利用高通量的ELI-NP伽玛源和高分辨率的带电粒子探测器阵列，有望在Gamow窗区开展p-核素的光致蜕变截面直接测量。

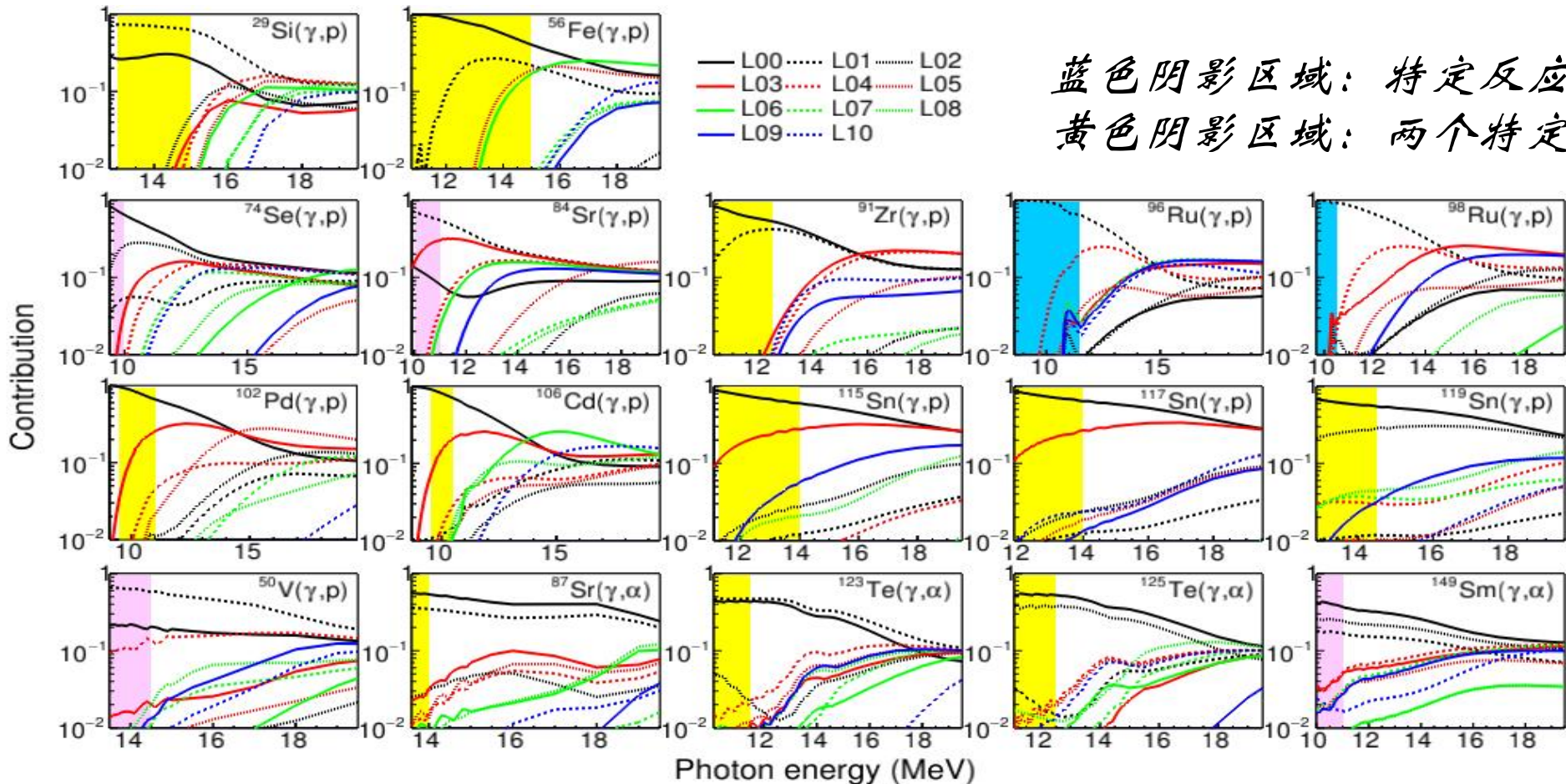
探测阈值（五角星）与Gamow能区（线段）的对比



伽玛光流强 10^{11} /秒，辐照1天的计算结果

03 光致带电粒子截面理论计算 (剩余核处于激发态)

$(\gamma, p/\alpha)_{L0i}$ 反应道产额对总产额的贡献率

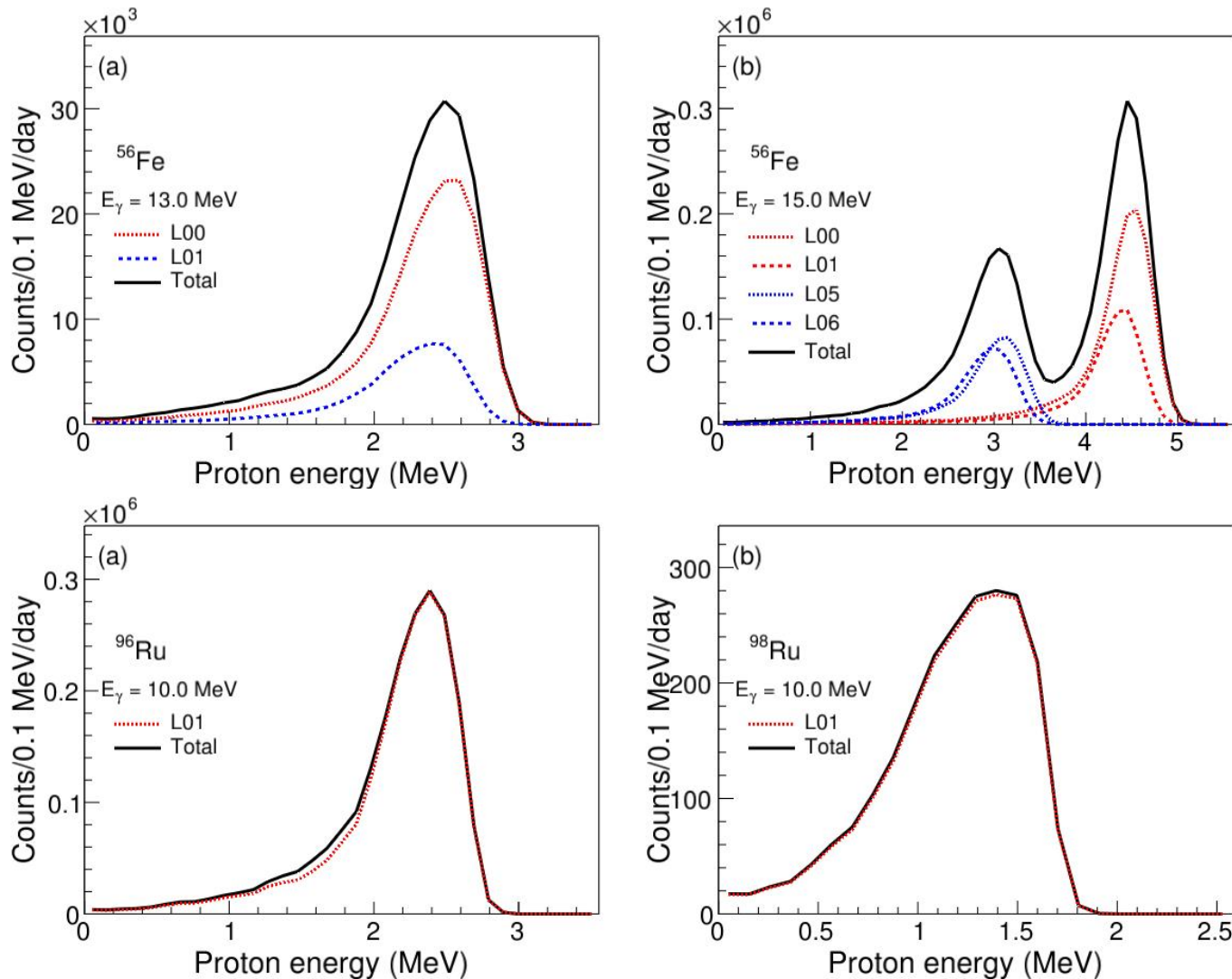


在较低的能量下 (阴影部分), 一些 $(\gamma, p/\alpha)_{L0i}$ 反应道的产额占主导地位。进一步地, 通过模拟计算了带电粒子的出射能谱, 从而探明这些反应道是否可测。

H. Y. Lan, W. Luo* et al., Physical Review C 105, 044618 (2022)

03 光致带电粒子截面理论计算（**剩余核处于激发态**）

$(\gamma, p/\alpha)_{L0i}$ 反应道产额对总产额的贡献率



伽玛光流强 10^{11} /秒，辐照1天的计算结果

- 预计从带电粒谱探测中可以获得1-3个 $(\gamma, p/\alpha)_{L0i}$ 反应道的总产额，这一结果可为获取**单一反应道的截面数据**提供一些约束条件。
- 可探测的总产额中往往伴随 $(\gamma, p/\alpha)_{L00}$ 反应道的贡献。这一贡献可以由 (p, γ) 或 (α, γ) 反应的实验数据逆推得到并予以扣除。

03 光中子反应截面实验研究

光中子截面实验测量方法

• 准单能实验截面

$$\sigma_{exp}^{E_{max}} = \int_{S_n}^{E_{max}} n_{\gamma}(E_{\gamma}) \sigma(E_{\gamma}) dE_{\gamma} = \frac{N_n}{N_{\gamma} N_t \xi \epsilon_n g}$$

N_n : 中子计数

N_{γ} : 伽马计数

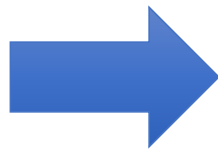
N_t : 靶材面密度

$n_{\gamma}(E_{\gamma})$: 伽马能谱分布

ξ : 靶厚自吸收修正因子, $\xi = \frac{1-e^{-\mu d}}{\mu d}$, d 为靶厚

ϵ_n : 中子探测效率

g : 伽马计数修正因子, $g = \frac{\int_{S_n}^{E_{max}} n_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}}{\int_0^{E_{max}} n_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}}$



• 展开迭代法求解单能截面

$$\sigma_f = D\sigma,$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_N \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & \cdots & D_{1M} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & \cdots & D_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{N1} & D_{N2} & \cdots & \cdots & D_{NM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_M \end{pmatrix}$$

(1) 令 $\sigma_0 = 1$, 计算卷积截面 $\sigma_f = D \cdot \sigma_0$, 其中 D 为响应矩阵 (伽马能谱分布);

$$(2) \sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_{exp} - \sigma_f,$$

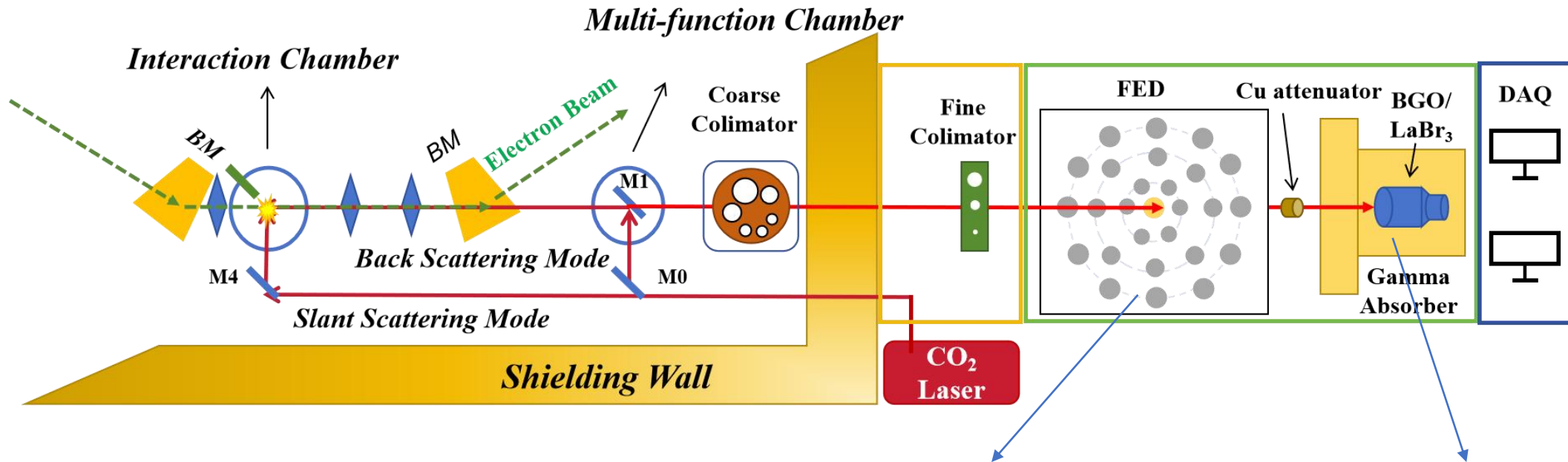
$$\sigma_f^i = D \cdot \sigma^i$$

$$\sigma^{i+1} = \sigma^i + (\sigma_{exp} - \sigma_f^i)$$

(3) 当 $\sigma_f^{i+1} \approx \sigma_{exp}$ 时, 结果收敛, 结束迭代, 最终计算的单能结果应为得到 σ_f^{i+1} 的 σ_f^i .

03 光中子反应截面实验研究

光中子截面实验布局



镱靶



铜靶



定位靶

效率刻度 (ϵ_n)

中子计数测量 (N_n)

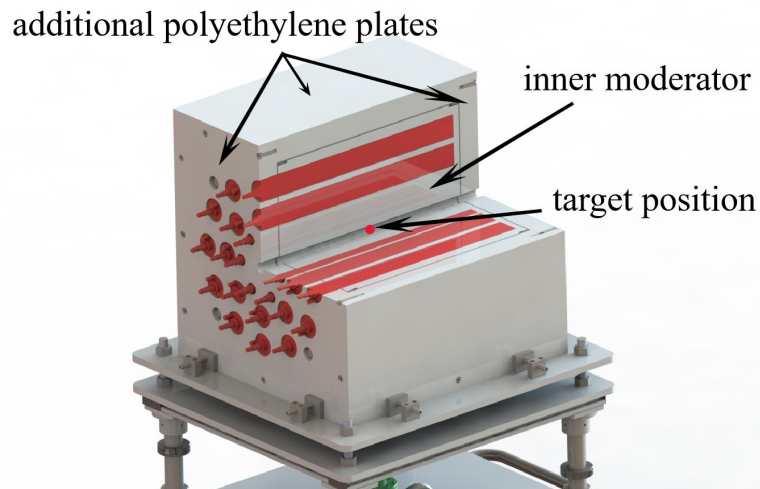
伽马计数测量 (N_γ)

伽马能谱分布测量 ($n_\gamma(E_\gamma)$)

- 开展了⁶³, ⁶⁵Cu、⁷⁶Ge同位素靶和天然Lu靶的光中子截面实验测量

03 光中子反应截面实验研究

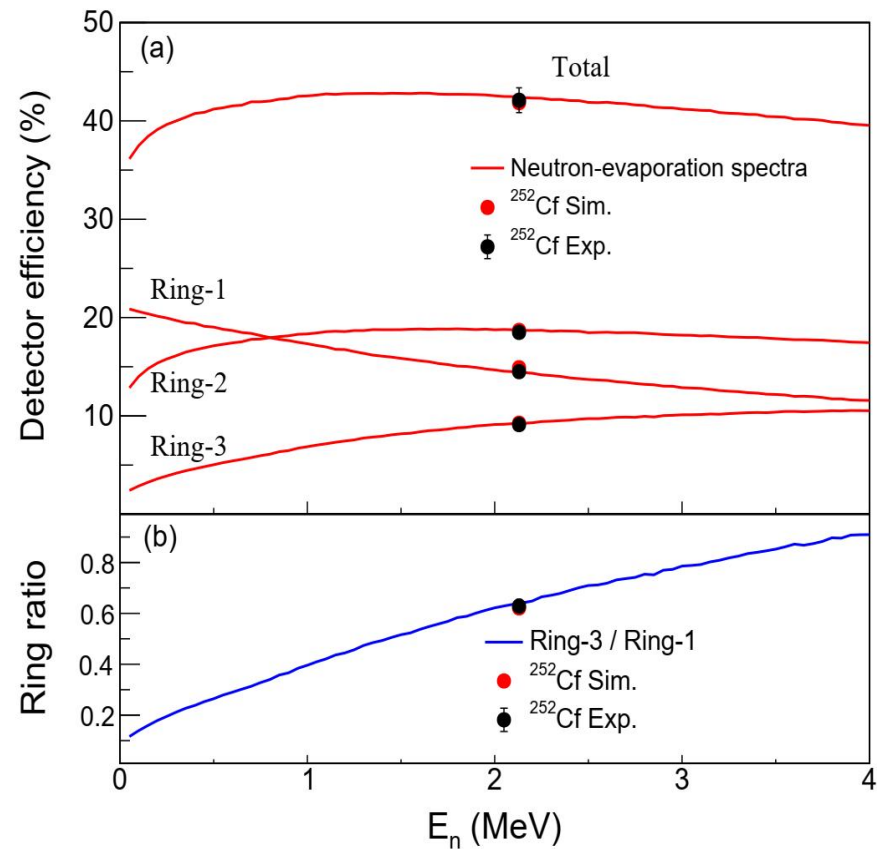
^3He 平坦效率探测器效率刻度 (ϵ_n) 与环比 (R-R)



慢化体: 45 mm×45 cm×55 cm 聚乙烯
正比计数器: ^3He ×26 (2 atm)
排列状态: 3环 (6-8-12) 距离中心 65 mm, 110 mm, 175 mm

探测器效率: 42.32% - 34.83%

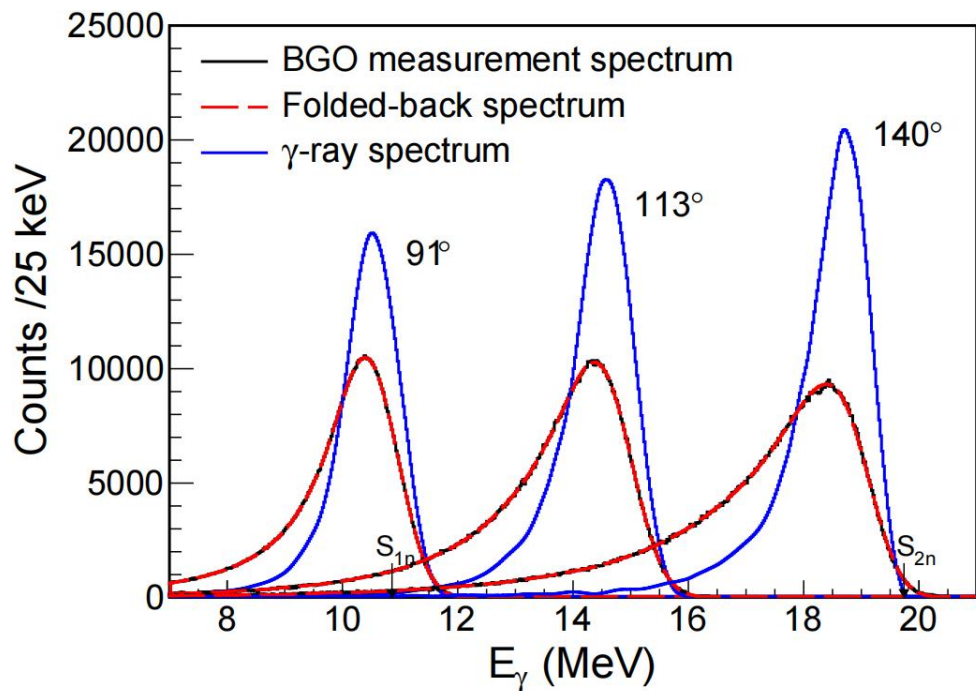
探测器系统误差: 3.02%



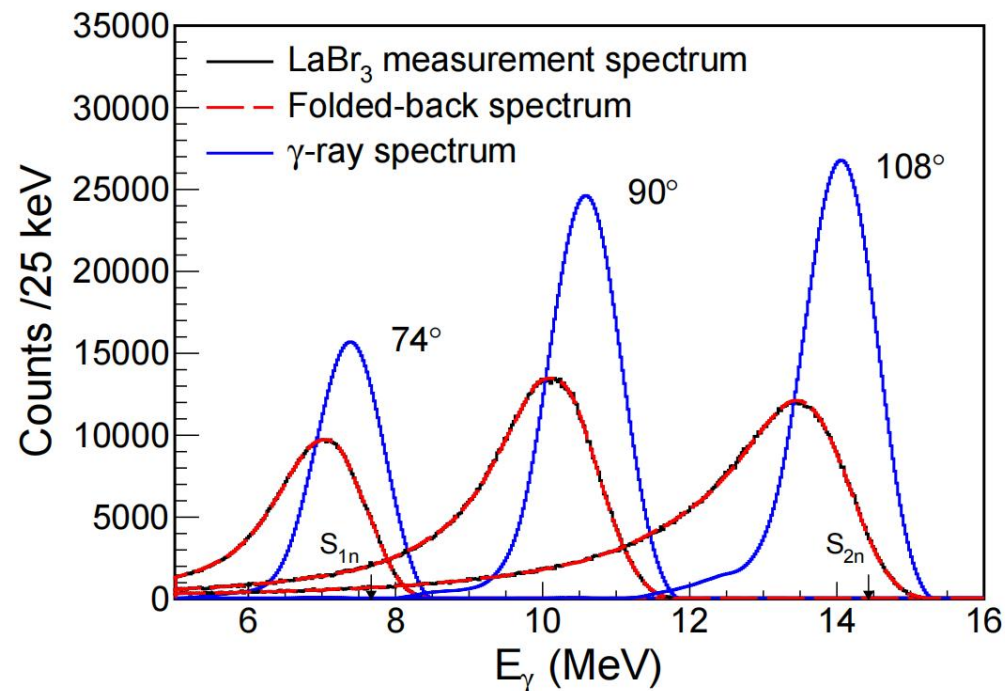
FED效率曲线与环比

03 光中子反应截面实验研究

BGO/ LaBr₃实验测得的伽马能谱与采用**最小二乘拟合迭代算法**获得靶前能谱
($n_\gamma(E_\gamma)$) , 进而对能谱进行积分获得伽马计数 (N_γ)



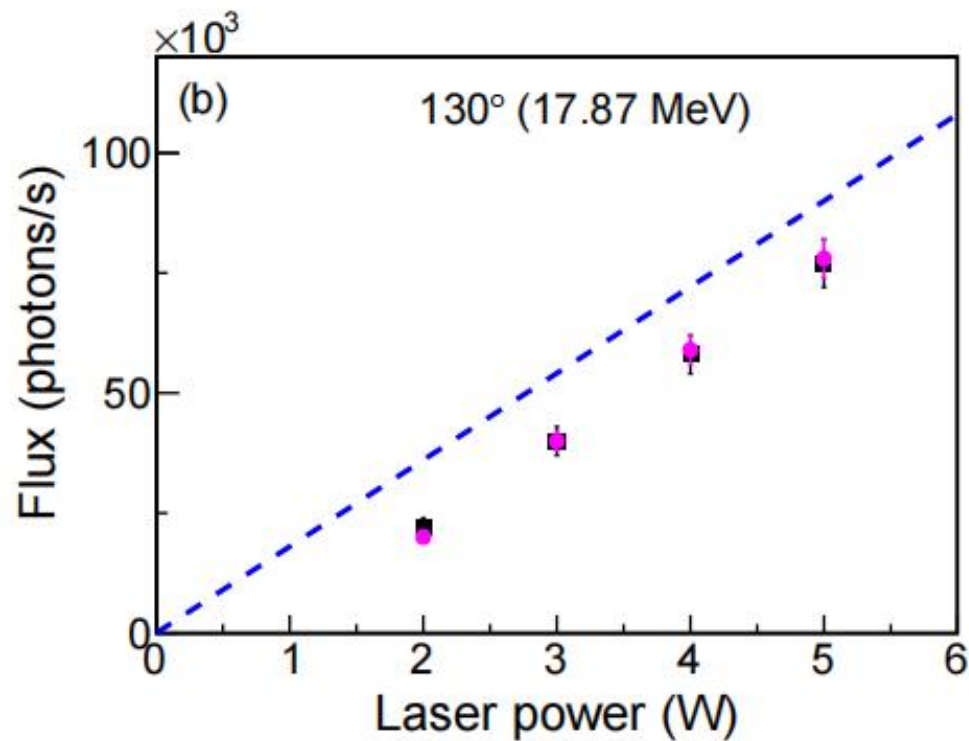
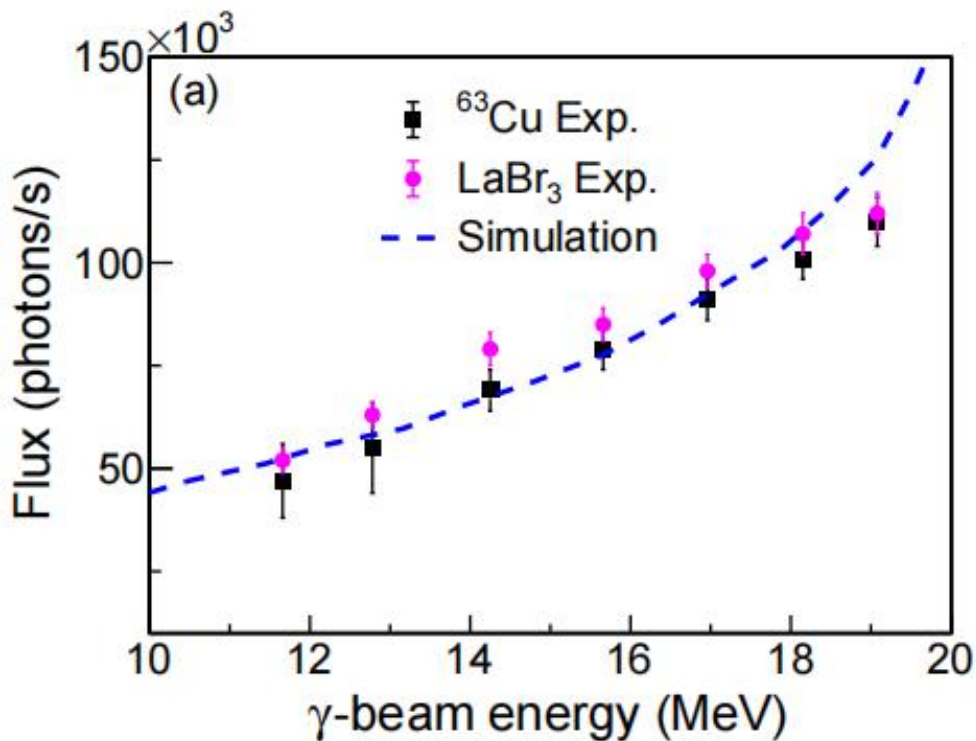
BGO实测的⁶³Cu光中子实验的伽马能谱（黑线）
及靶前能谱（蓝线）



LaBr₃实测的^{nat}Lu光中子实验的伽马能谱
（黑线）及靶前能谱（蓝线）

03 光中子反应截面实验研究

发展一种基于 ^{63}Cu 活化的快速测量准单能MeV伽马通量（计数 N_γ ）的方法



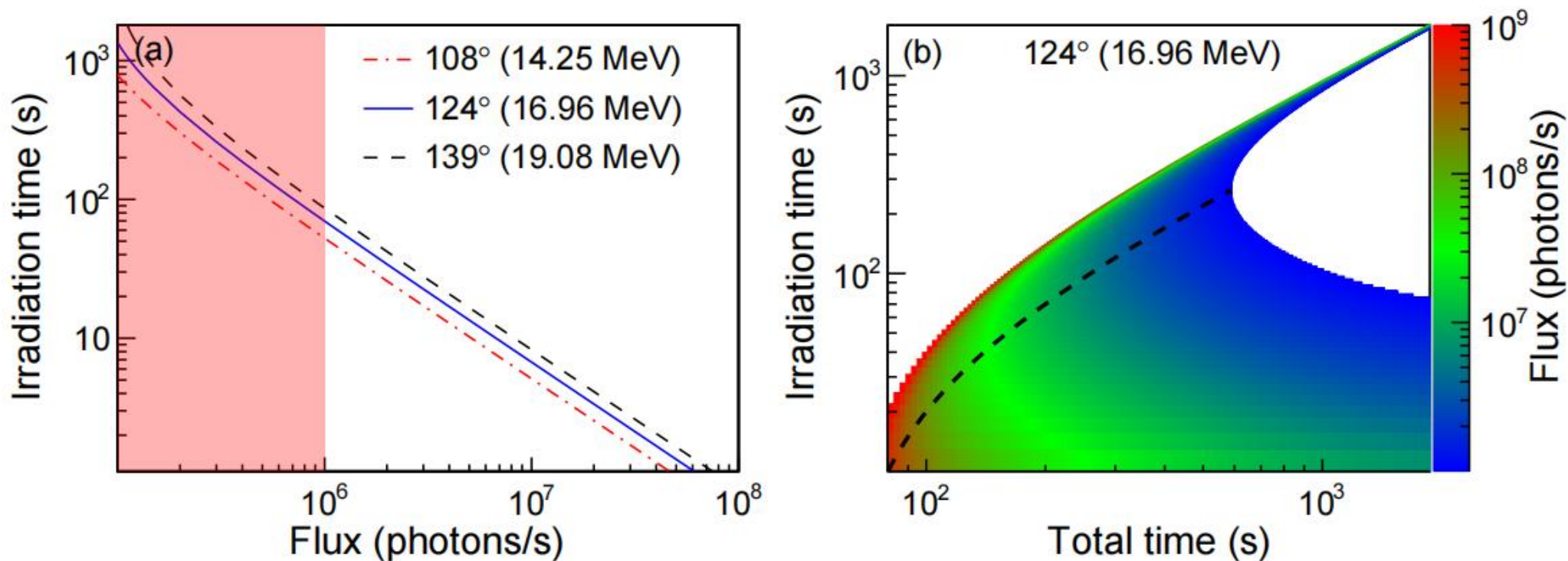
由于实测时的电子束流变动，导致测量值相对理论值有整体下降。

- 伽马通量随 γ 能量的增加而缓慢增加，且随激光功率成比例增加。在误差范围内， ^{63}Cu 活化法测得的 γ 束流通量与 LaBr_3 探测器、GEANT4的模拟结果一致。

$$\phi_L = \frac{\lambda N_{det}}{N_0 \varepsilon_\gamma \sigma(E_\gamma) I_\gamma k_e (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_d})}$$

03 光中子反应截面实验研究

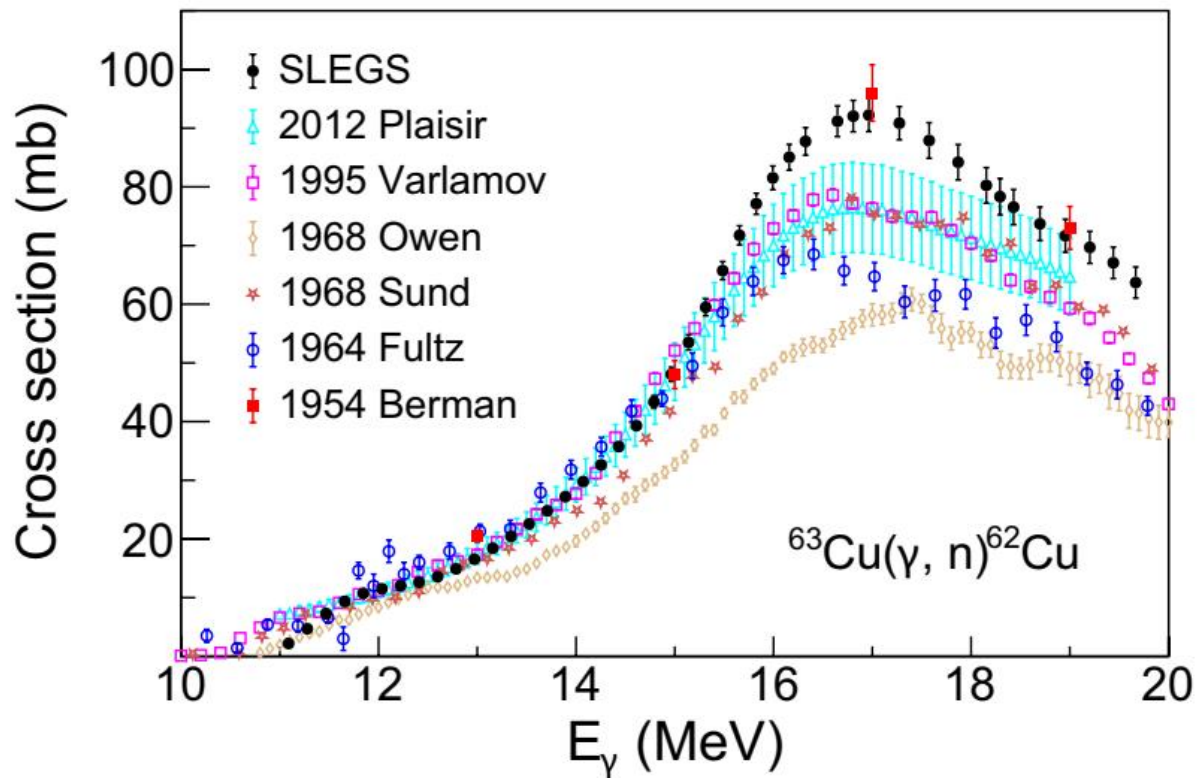
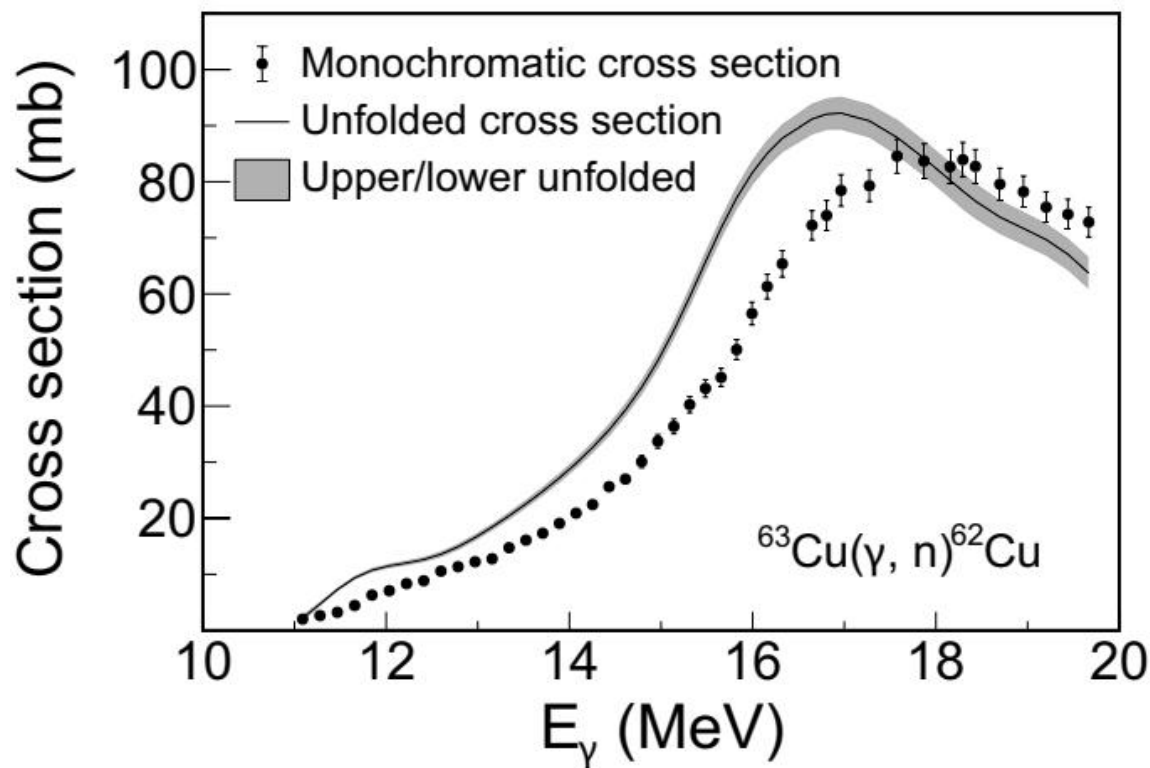
探讨 ^{63}Cu 活化法快速测量准单能MeV伽马束流通量的潜力



- 当通量高于10⁶光子/s时，所需的总时间可控制为30 min；当通量增加两个数量级时，总时间减少至约100 s。 ^{63}Cu 活化法可用于快速测量LCS伽马射线束流通量，并有望用于准实时测量高通量准单能MeV伽马射线束通量。

03 光中子反应截面实验研究

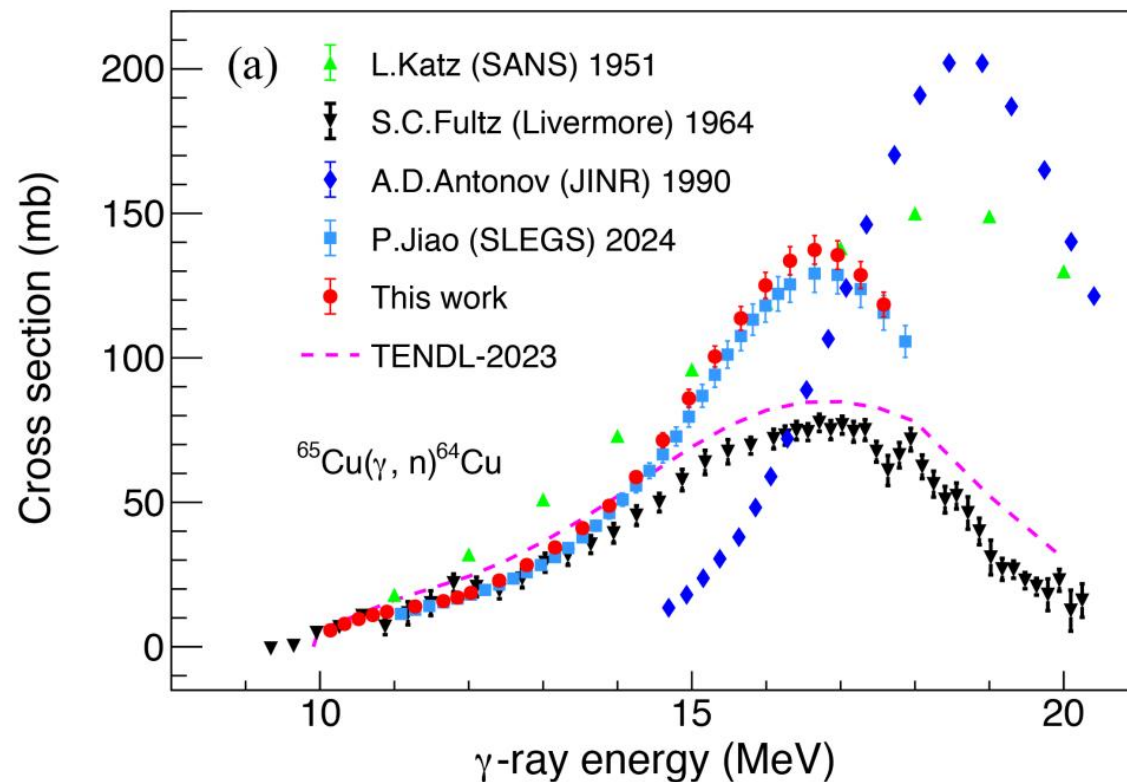
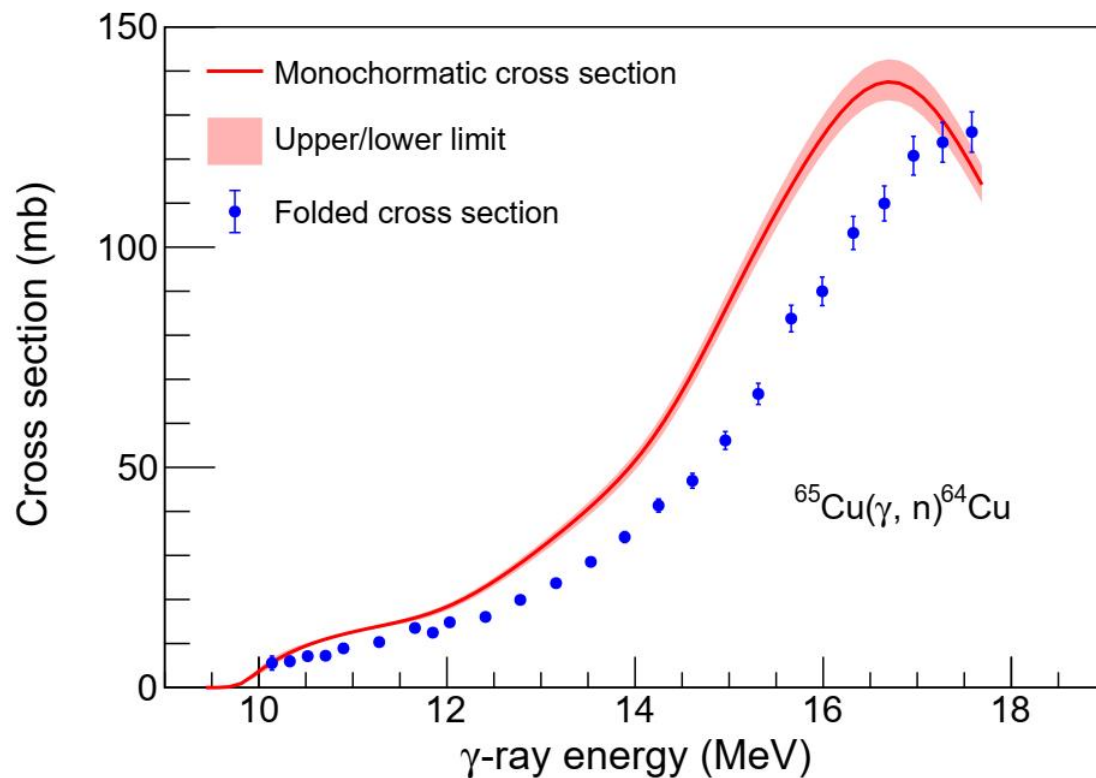
实验测量的 ^{63}Cu 的光中子截面



- 基于SLEGS装置测量获得了高精度（4%）的 ^{63}Cu 光中子截面数据，有望澄清 ^{63}Cu 现有实验数据的分歧。

03 光中子反应截面实验研究

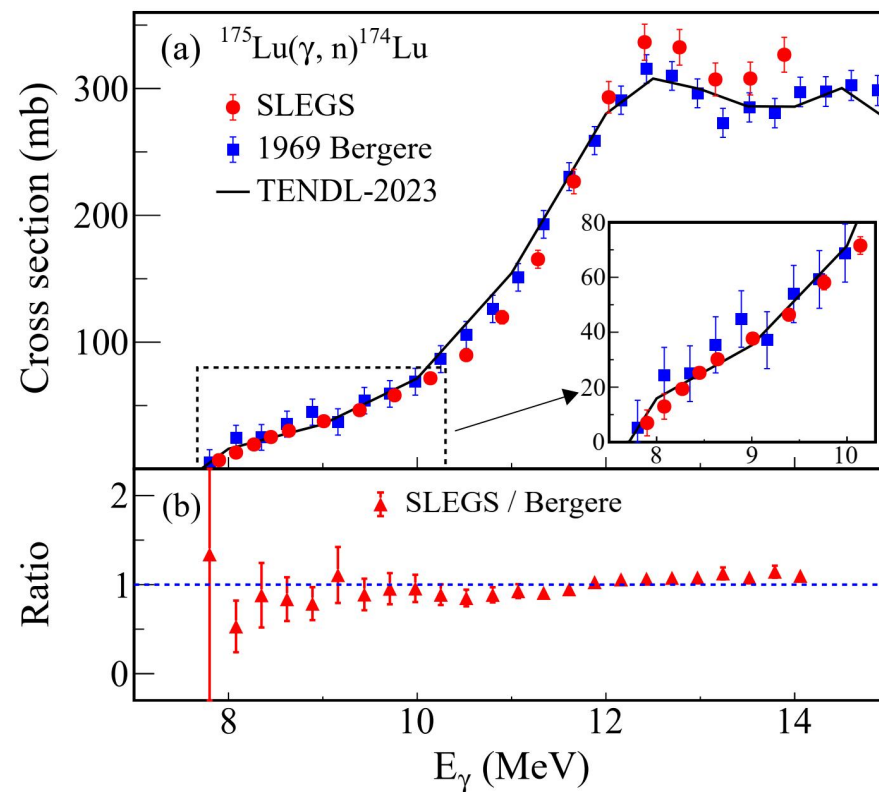
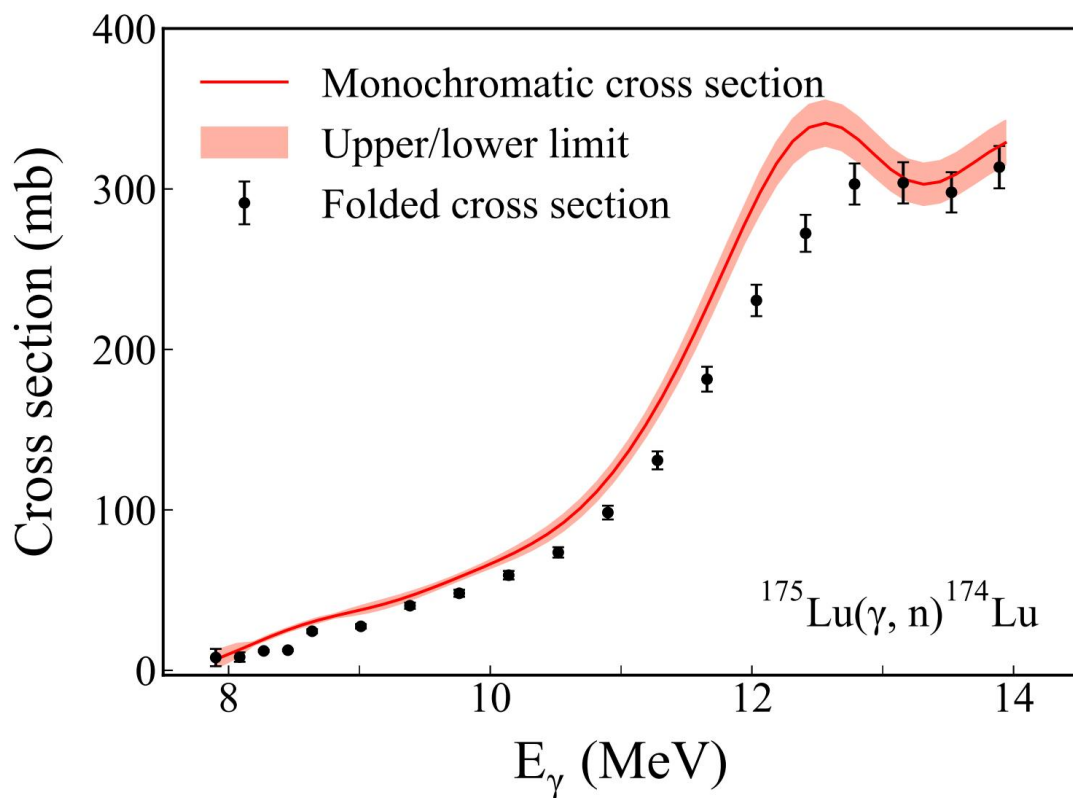
实验测量的 ^{65}Cu 的光中子截面



- 基于SLEGS装置测量获得了高精度（5%）的 ^{65}Cu 光中子截面数据，有望澄清 ^{65}Cu 现有实验数据的分歧。

03 光中子反应截面实验研究

实验测量的 ^{175}Lu 光中子截面



- 基于SLEGS装置测量获得了高精度（5%）的 ^{175}Lu 光中子截面数据，为我国光核数据库CENDL的进一步完善提供数据支撑。

03 光中子反应截面实验研究

实验测量的⁷⁶Ge光中子截面

冷压法结果

实验靶片



ZEISS CALYPSO

零件名称
图号
订单号
变体
公司
部门
CMM 类型
CMM 号
操作者
文本

DURAMAX
425423070034
Master

最后的测量值 1
▶ 批准 # 集合
零件标识符
时间/日期
运行
测量值数量
编号数值: 红色
测量时长

名称	测量值	名义值	上公差
上平面度	0.0061 mm	0.0000	0.0300
下平面度	0.0006 mm	0.0000	0.0300
平行度	0.0769 mm	0.0000	0.1000
高度	1.0140 mm	1.0000	

Description

ISOTOPE	Ge-76
ENRICHMENT	99.98%
ELEMENT WEIGHT	
FORM	Metal Powder

PLEASE FIND OUR SAI
www.isofox.com/re

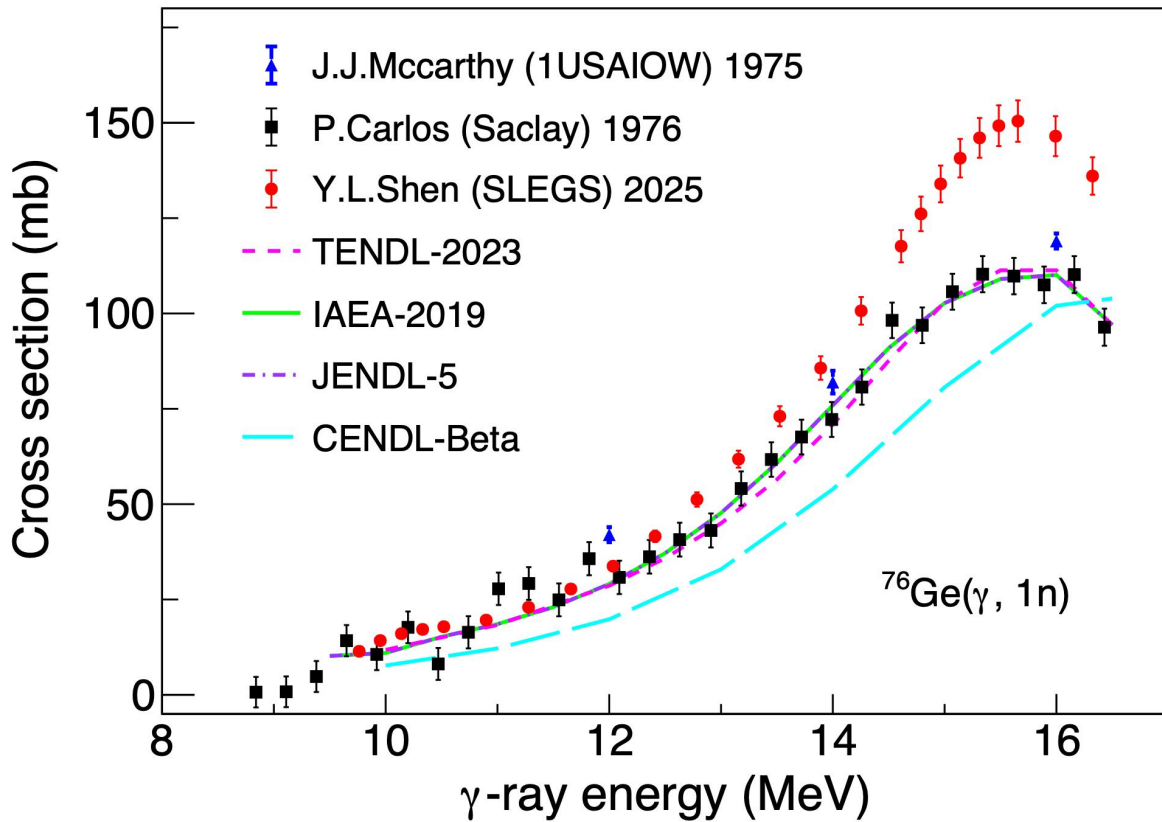
Isotopic Distribution

ISOTOPE	Ge-70	Ge-72	Ge-73
CONTENT (%)	0.003(±0.001)	0.001(±0.0005)	0.001(±0.0005)

Chemical Admixtures

ELEMENT	Al	As	B	Be	Ca
CONTENT (ppm)	<8	<200	<7	<0.2	58±6

ELEMENT	Mg	Mn	Na	Ni	Sc
CONTENT (ppm)	24±2	1.3±0.6	16±1.6	<27	<1

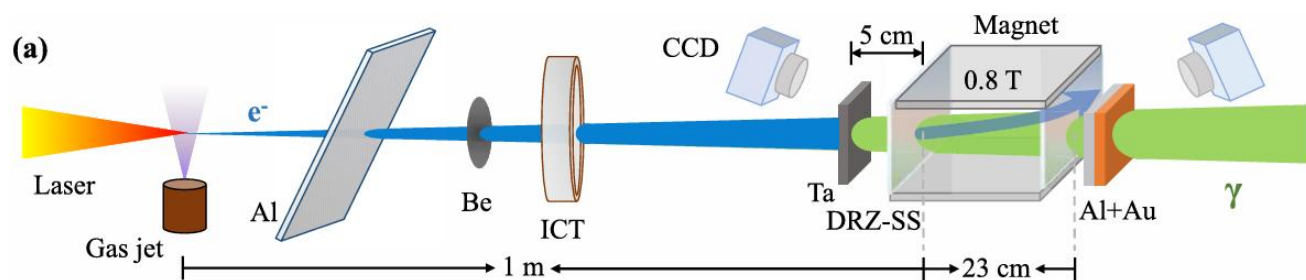


由于同位素颗粒原材料尺寸不均，且金属 Ge 脆性较大，冷压法和热压法均难以制备出厚度为 1 mm 的靶片。最终采用熔融法并在保护气条件下完成制靶，成功获得了满足直接测量所需平面度和纯度要求的实验靶片。

03 光致带电粒子截面实验测量

$^{27}\text{Al}(\gamma, x)^{24}\text{Na}$ 截面测量与超强激光韧致辐射 γ 源能量监测

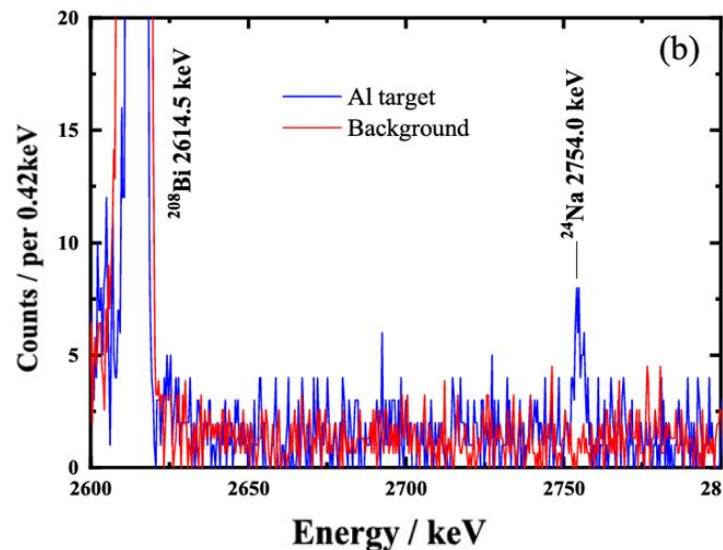
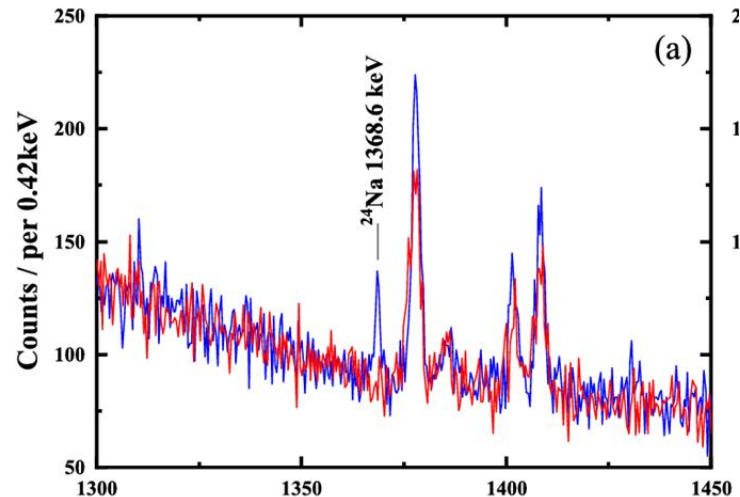
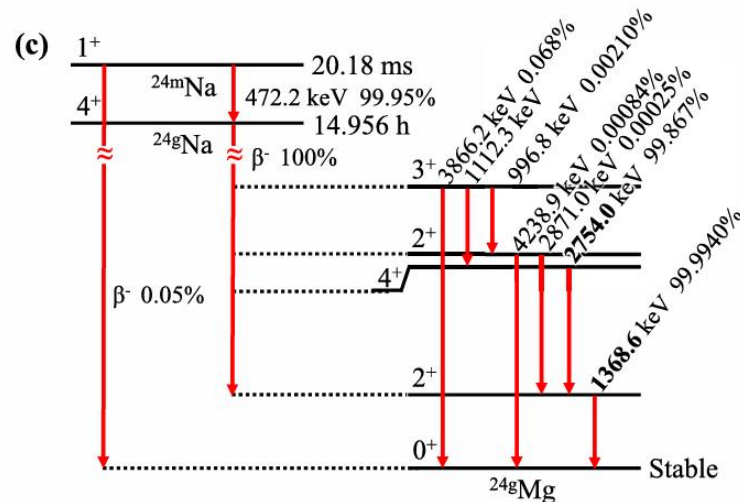
北京大学CLAPA1: 200 TW 5 J, 30 fs, 5 Hz



(b)

^{25}Al 7.183 s ϵ :100%	^{26}Al 7.17×10^5 y ϵ :100%	^{27}Al Stable 100%
^{24}Na 78.99%	^{25}Na 10.00%	^{26}Mg Stable 11.01%
^{23}Na Stable 100%	^{24g}Na & ^{24m}Na	^{25}Na 59.1 s β^- :100%
^{22}Ne Stable 9.25%	^{23}Ne 37.24 s β^- :100%	^{24}Ne 3.38 min β^- :100%

多反应道



03 光致带电粒子截面实验测量

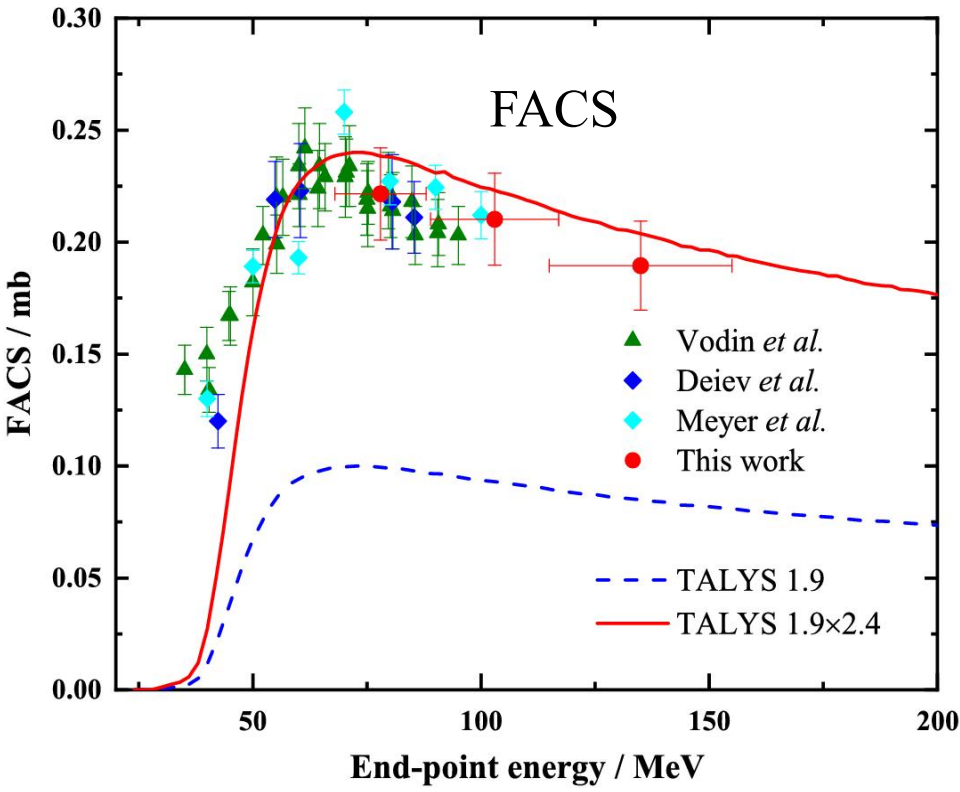
$^{27}\text{Al}(\gamma, x)^{24}\text{Na}$ 的束流平均截面(FACS)

$$\sigma_{FA}(E) = \frac{\int_{E_{thr}}^{E_{\gamma max}} \sigma(E) \cdot \Phi(E) dE}{\int_{E_{thr}}^{E_{\gamma max}} \Phi(E) dE}, \quad (1)$$

E_{thr} : 反应阈值-多反应道 $\Phi(E)$: 韧致辐射通量

$E_{\gamma max}$: 韧致辐射截止能量 $\int_{E_{thr}}^{E_{\gamma max}} \Phi(E) dE$: 有效 γ 通量积分

$\sigma(E)$: 反应微分截面



◆公式(1)(2)在电子直线加速器韧致辐射源或激光康普顿 γ 源适用。本实验在重频激光下韧致辐射 γ 源完成，将考虑每次激光脉冲下产物的衰减情况，用以下公式计算截面。

$$\sigma_{FA}(E) = \frac{N_0}{N_s \int_{E_{thr}}^{E_{\gamma max}} \phi(E) dE \cdot \sum_{i=1}^n N_i^e \exp(-\lambda \frac{n-i}{f})}$$

$$\sigma_{EQ}(E) = E_{cent} \frac{N_0}{N_s \int_0^{E_{\gamma max}} E \phi(E) dE \cdot \sum_{i=1}^n N_i^e \exp(-\lambda \frac{n-i}{f})} \quad 47$$

03 光致带电粒子截面实验测量

$^{27}\text{Al}(\gamma, x)^{24}\text{Na}$ 的量子平均截面(ACSEQ)

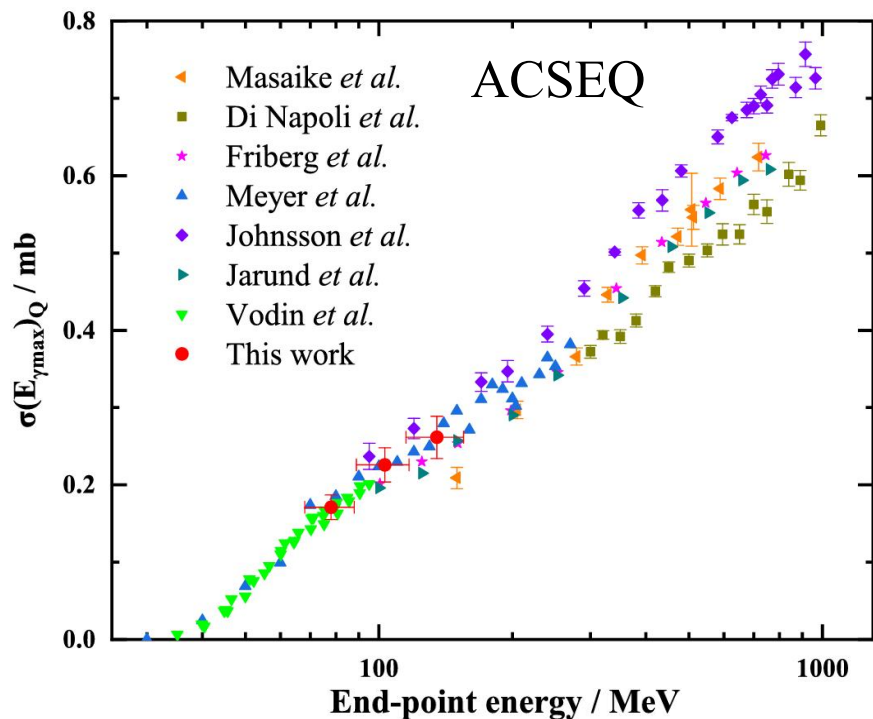
$$\sigma_{EQ}(E) = E_{\gamma\max} \frac{\int_0^{E_{\gamma\max}} \sigma(E) \cdot \Phi(E) dE}{\int_0^{E_{\gamma\max}} E \cdot \Phi(E) dE}, \quad (2)$$

◆ 计算与反应阈值无关，适合**多反应道**截面计算。

◆ ACSEQ能量范围从MeV至GeV，通常在**高能加速器**中作电子和**超强激光** γ 源能量监测。

E_{cent} : 电子中心能量

$E_{\gamma\max}$: 韧致辐射截止能量

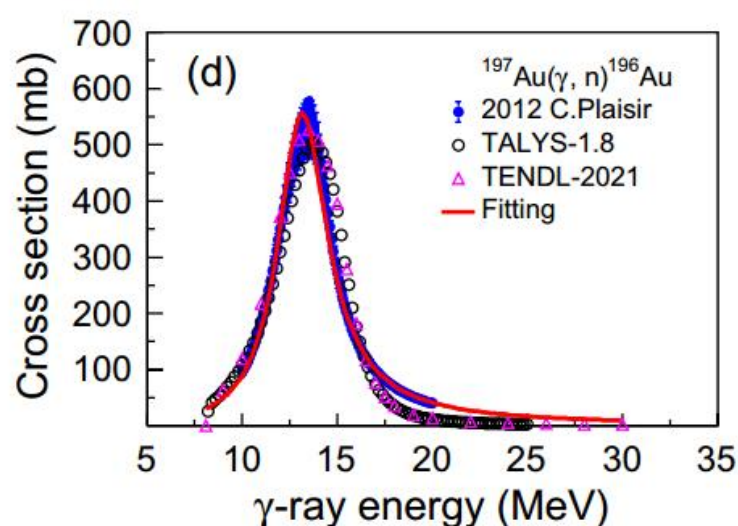
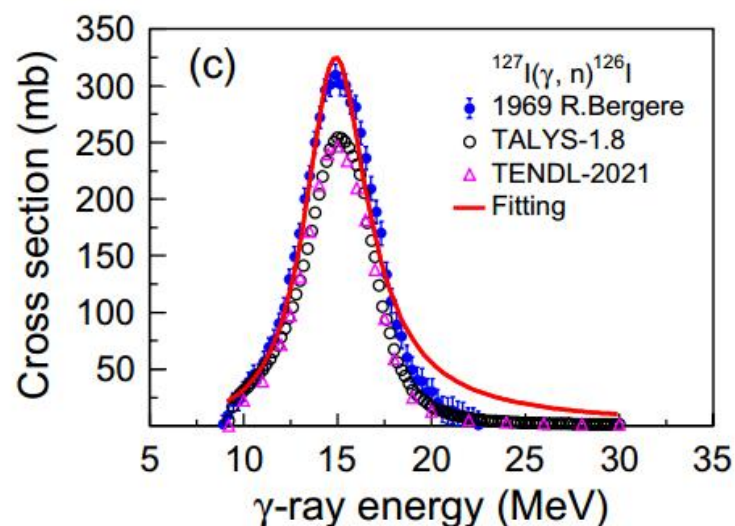
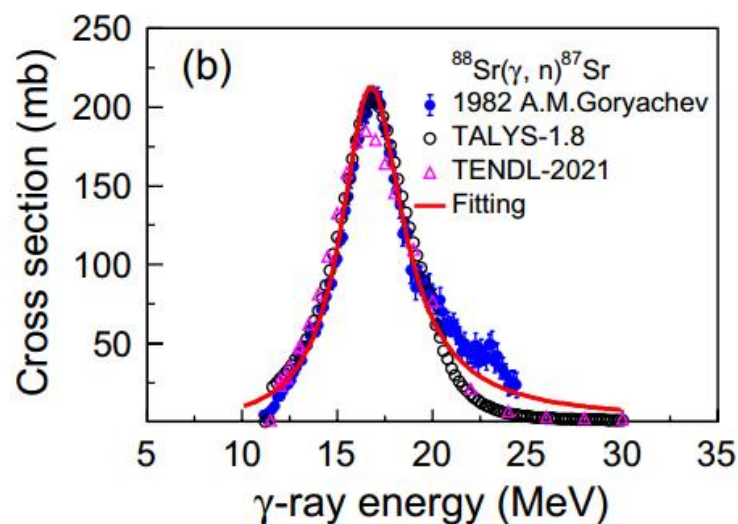
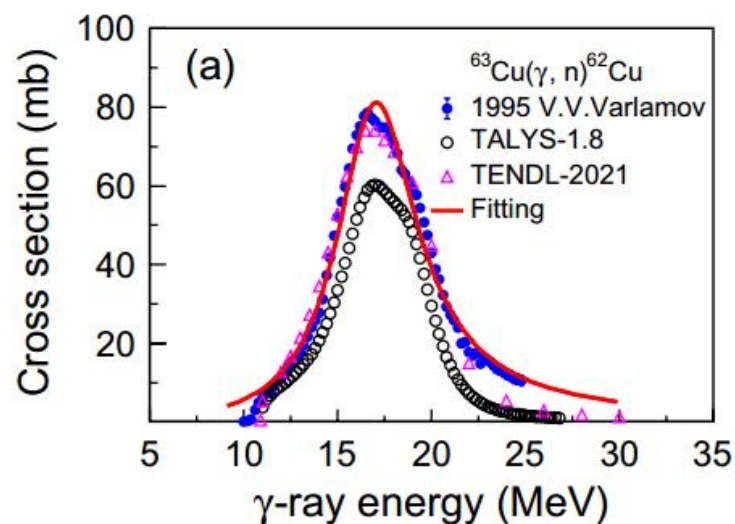


EXFOR数据收录!

ENTRY	G0092001	20250312
SUBENT	G0092001	20250312
BIB	10	20
TITLE	Cross section measurements of $^{27}\text{Al}(\gamma, x)^{24}\text{Na}$ reactions as monitors for laser-driven Bremsstrahlung gamma-ray	
AUTHOR	(M.Z.Wang, D.Wu, H.Y.Lan, J.Y.Zhang, J.X.Liu, H.G.Lu, J.F.Lv, X.Z.Wu, H.Zhang, J.Cai, Q.Y.Ma, Y.H.Xia, Z.N.Wang, Z.Y.Yang, X.L.Xu, Y.X.Geng, Y.Y.Zhao, H.R.Wang, F.L.Liu, J.Q.Yu, K.J.Luo, W.Luo, X.Q.Yan)	
INSTITUTE	(3CPRBJS, 3CPRAEP) (3CPRCPR) Beijing Laser Acceleration Innovation Center, Beijing; University of South China , Hengyang; Hunan University, Changsha	

03 光中子反应截面分布提取

提出基于产额比法的光中子截面分布提取方法



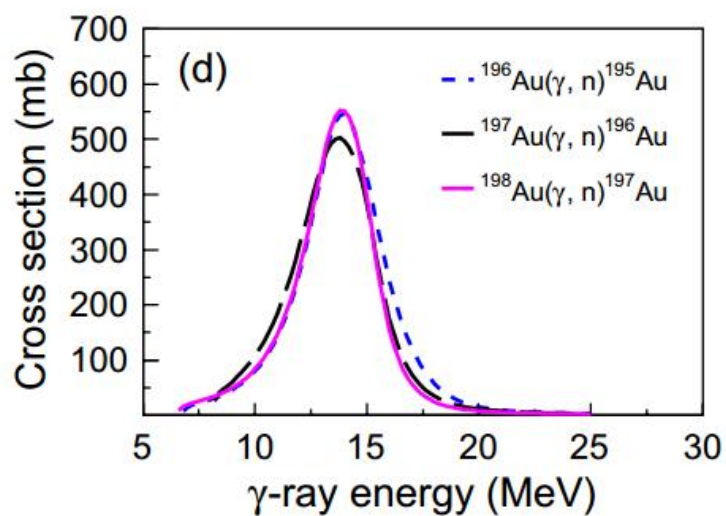
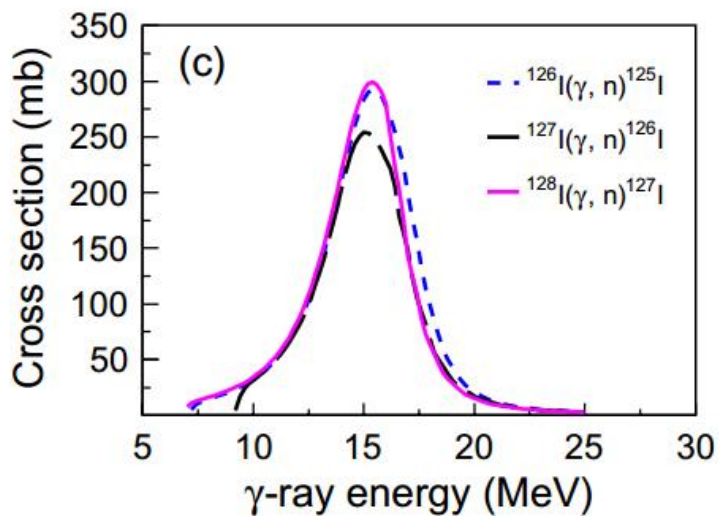
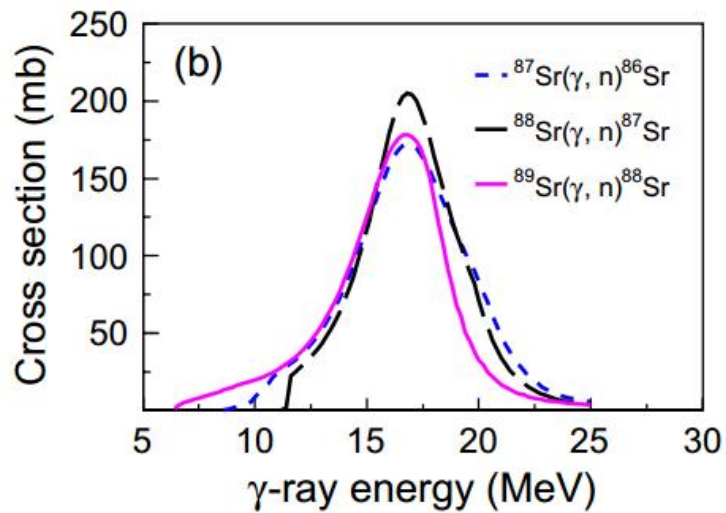
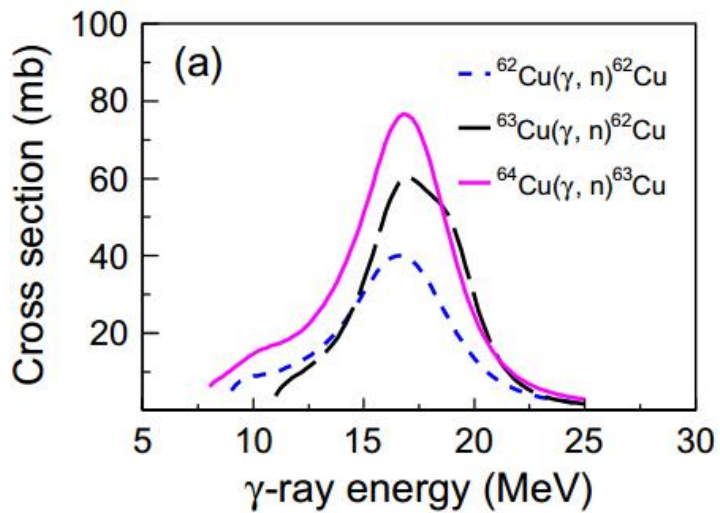
$$\sigma(E) = \frac{\sigma_m}{1 + [(E^2 - E_m^2)^2 / E^2 \Gamma^2]}$$

- 对于球形核，三参数的洛伦兹分布函数可以很好的描述光中子反应截面分布

Z.C. Li, W. Luo*, et al., NST 34, 170 (2023)

03 光中子反应截面分布提取

提出了基于产额比的光中子截面分布提取方法

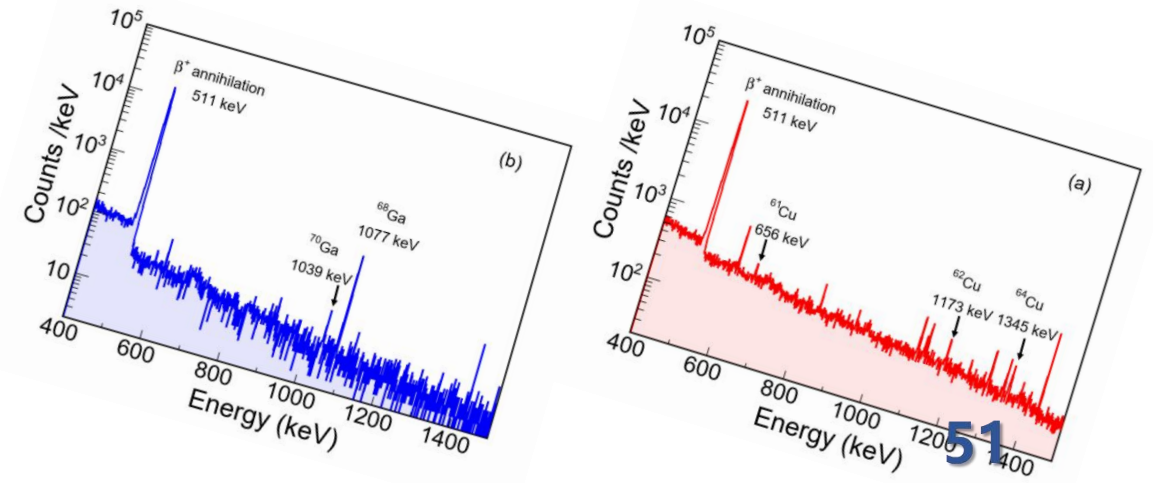
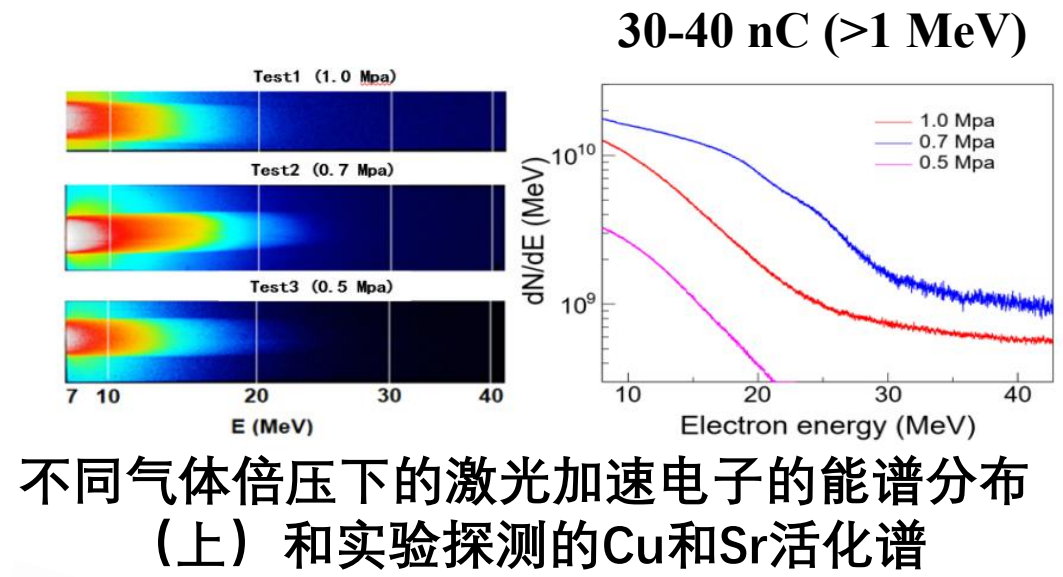
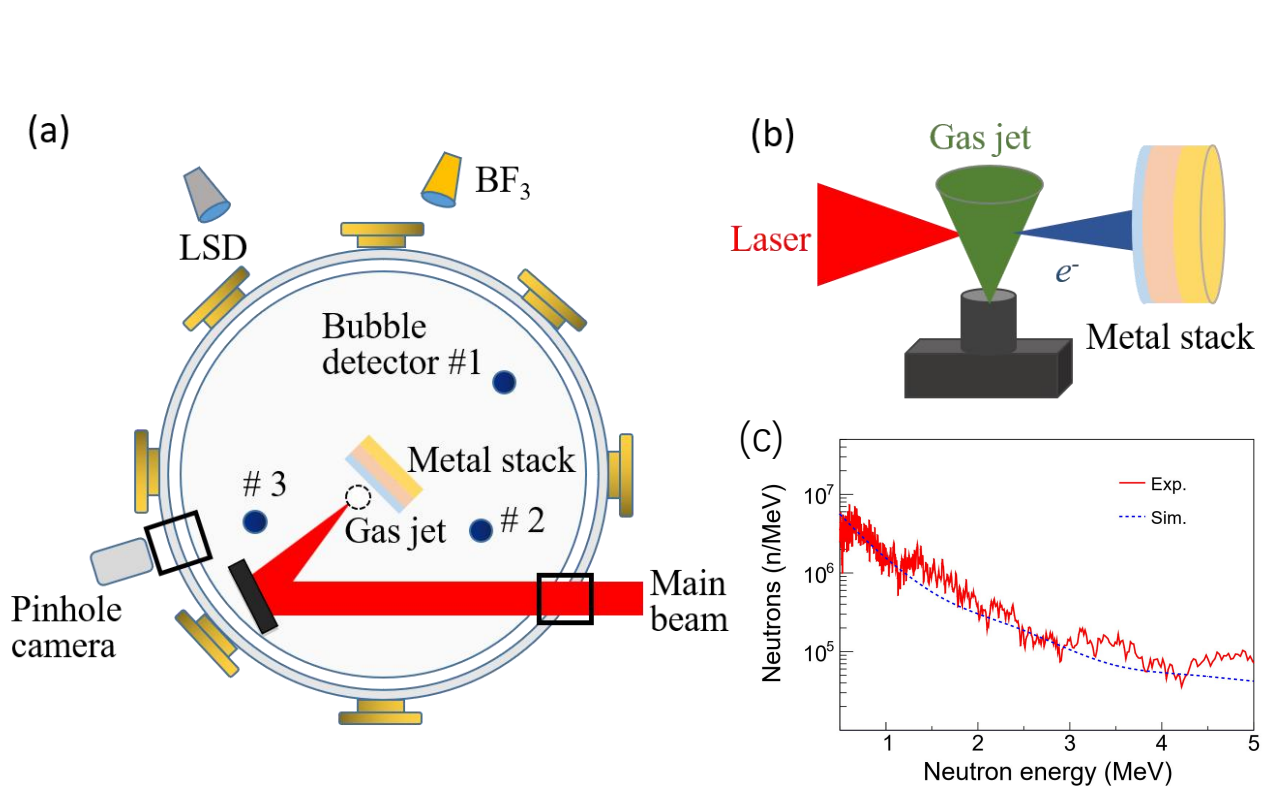


$$\begin{aligned}\frac{Y_{A'}}{Y_{B'}} &= \frac{n_A}{n_B} \cdot \frac{\int \sigma_A(E) \exp \{-E/k_B T_\gamma\} dE}{\int \sigma_B(E) \exp \{-E/k_B T_\gamma\} dE} \\ &= \frac{n_A}{n_B} \cdot \frac{\sigma_{mA}}{\sigma_{mB}} \cdot \frac{\int \frac{\exp \{-E/k_B T_\gamma\}}{1 + [(E^2 - E_{mA}^2)^2 / E^2 \Gamma_A^2]} dE}{\int \frac{\exp \{-E/k_B T_\gamma\}}{1 + [(E^2 - E_{mB}^2)^2 / E^2 \Gamma_B^2]} dE} \\ &\approx \frac{n_A}{n_B} \cdot \frac{\sigma_{mA}}{\sigma_{mB}}.\end{aligned}$$

- 相邻同位素的光中子反应产额比近似等于峰值截面比与元素丰度比的乘积

03 光中子反应截面分布提取

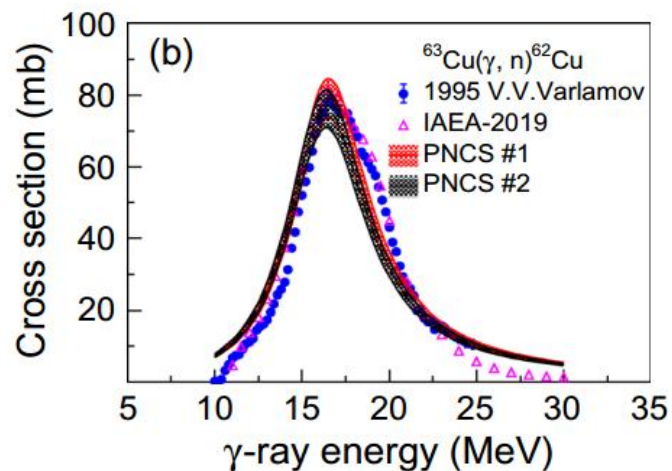
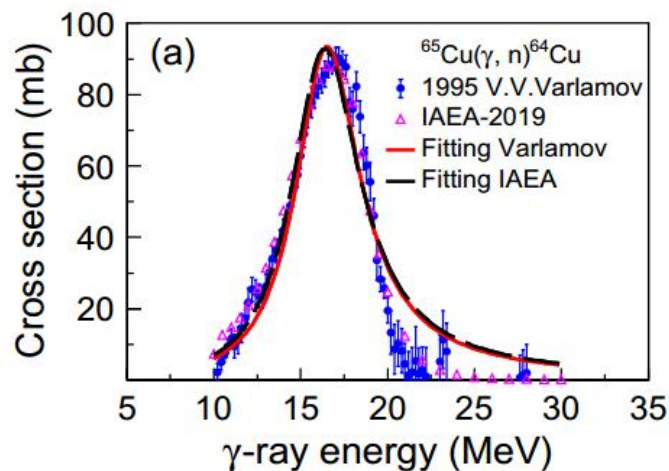
基于星光-III激光装置开展了激光核反应生成 $^{62}, ^{64}\text{Cu}$ 和 $^{85\text{m}}, ^{87\text{m}}\text{Sr}$ 同位素的实验



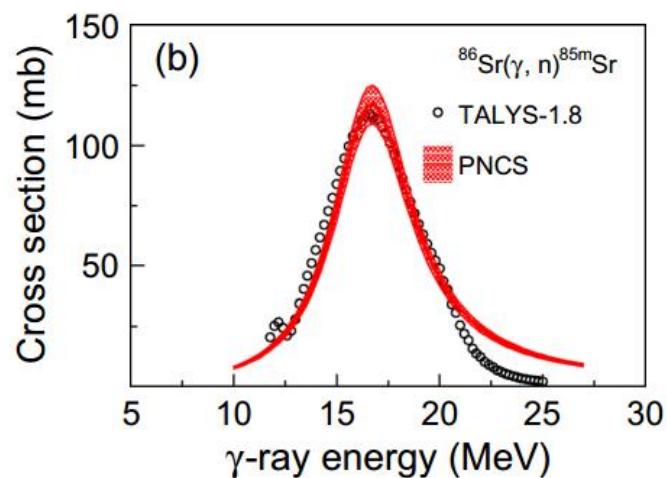
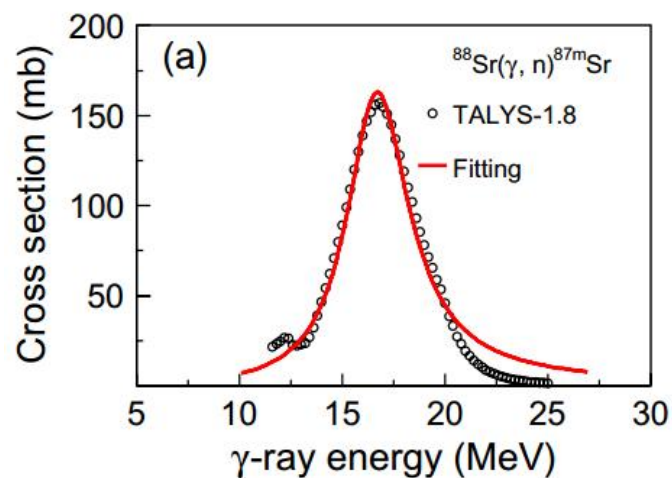
星光-III装置开展光核反应的实验布局示意图

03 光中子反应截面分布提取

成功提取了 $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ 、 $^{86}\text{Sr}(\gamma, n)^{85\text{m}}\text{Sr}$ 的截面分布



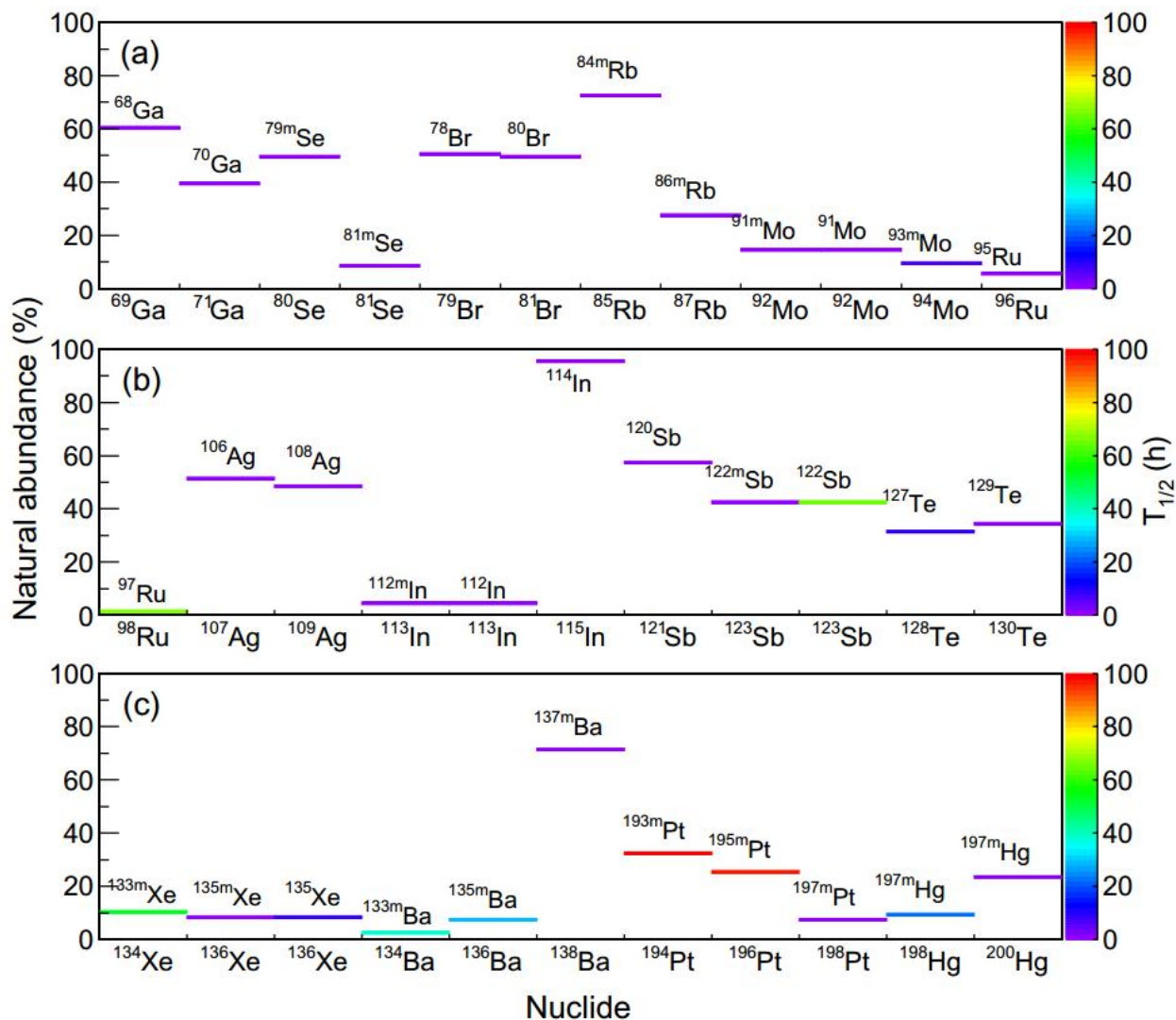
- 计算出 ^{63}Cu 与 ^{65}Cu 的峰值截面比值为0.82，并利用洛伦兹公式提取出 ^{63}Cu 的光中子截面分布



- 计算出 ^{86}Sr 与 ^{88}Sr 的峰值截面比值为0.72，并利用洛伦兹公式提取出 ^{86}Sr 的光中子截面分布

03 光中子反应截面分布提取

基于产额比的光中子截面分布提取方法的应用潜力



- 前提条件：产物具有合适的半衰期；靶材具有合适的天然丰度，给出了适用于本方法的30种同位素。
- 优点：不需要知道韧致辐射谱的通量；不需要扫描入射光子的能量；任何具有覆盖GDR中心区域的连续光谱的伽马源都适合本方法。

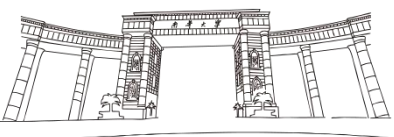
Z.C. Li, W. Luo*, et al., NST 34, 170 (2023)

四

带电粒子核截面测量



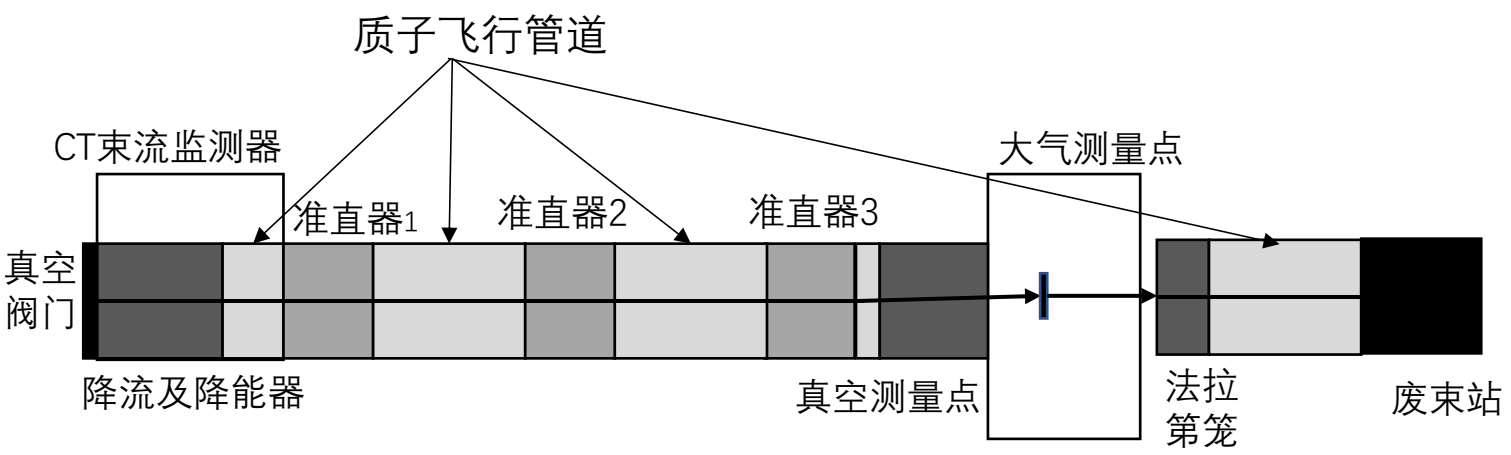
南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



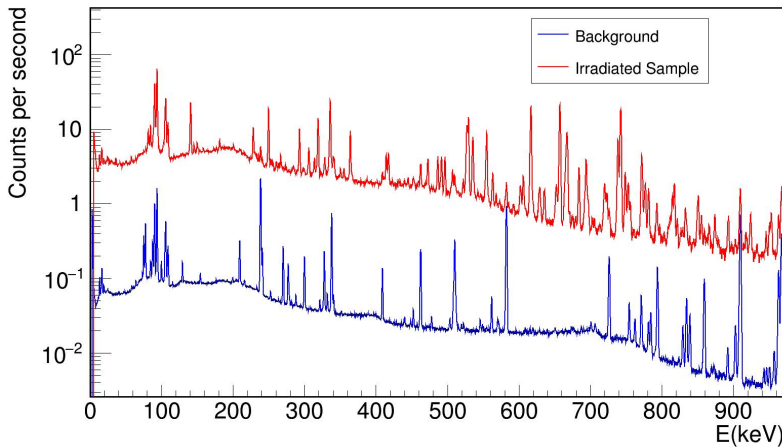
04 质子与钍核反应截面测量

质子-核反应截面实验布局

➤ CSNS伴生质子束线



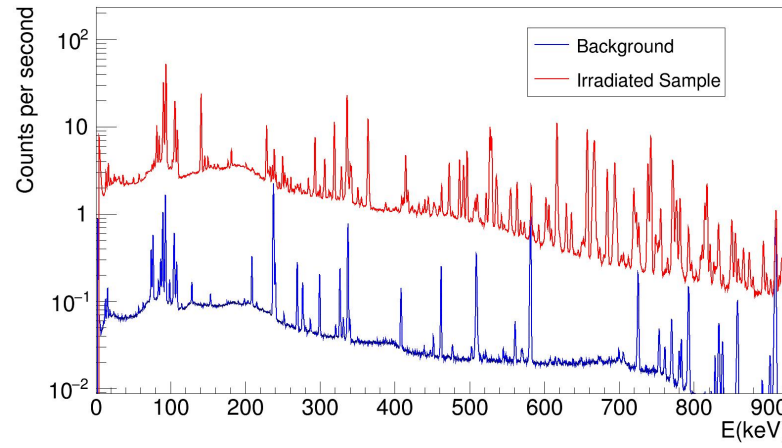
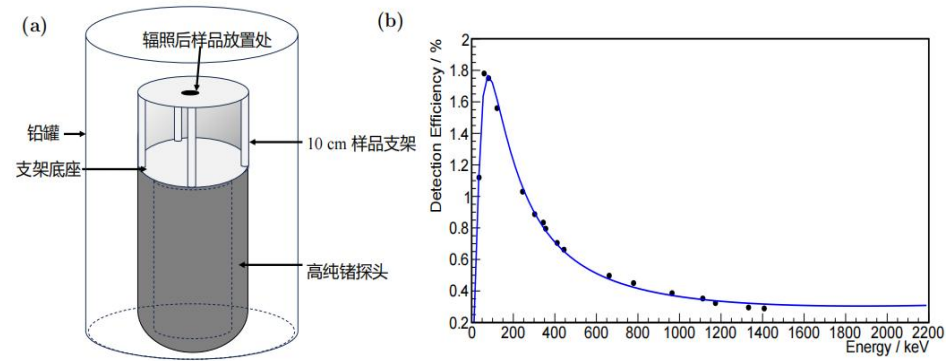
➤ 活化钍靶特征伽马射线测量



➤ p+²³²Th核反应测量实验布局

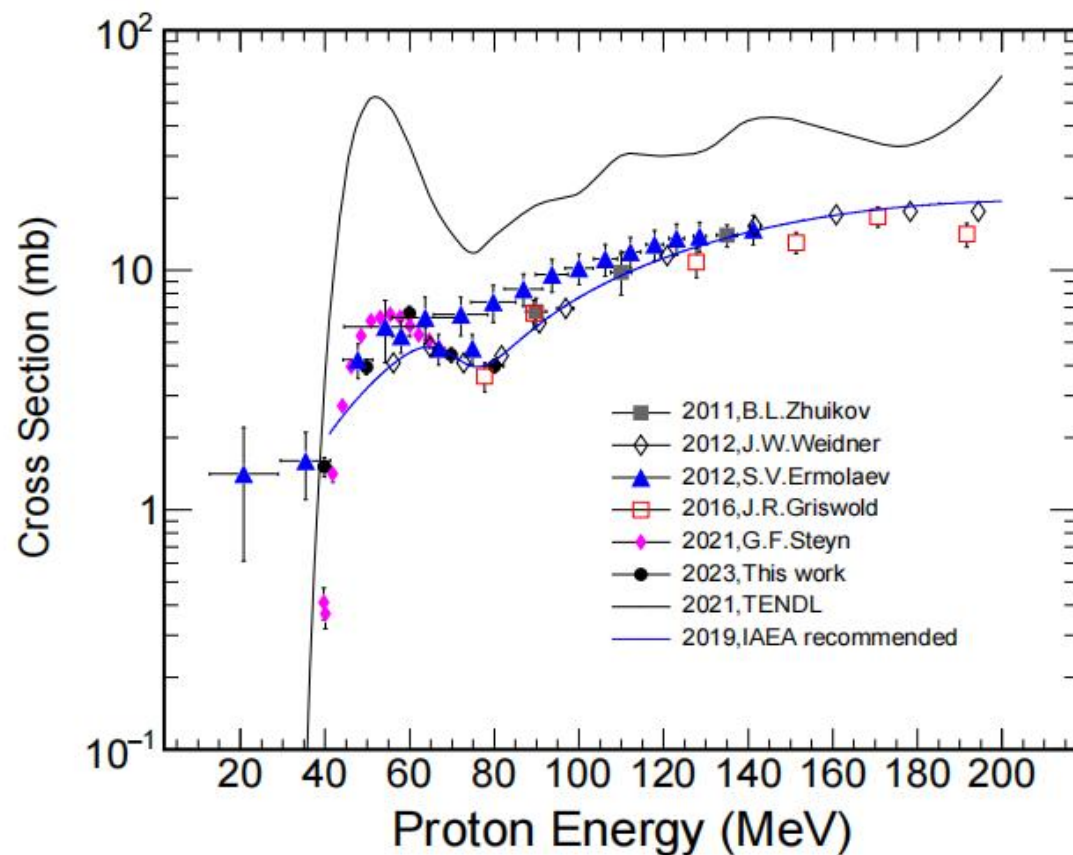


➤ 高纯锗探测器及对应探测效率



04 质子与钍核反应截面测量

40 - 80 MeV 能区 $^{232}\text{Th}(p,x)^{225}\text{Ac}$ 反应截面实验测量结果

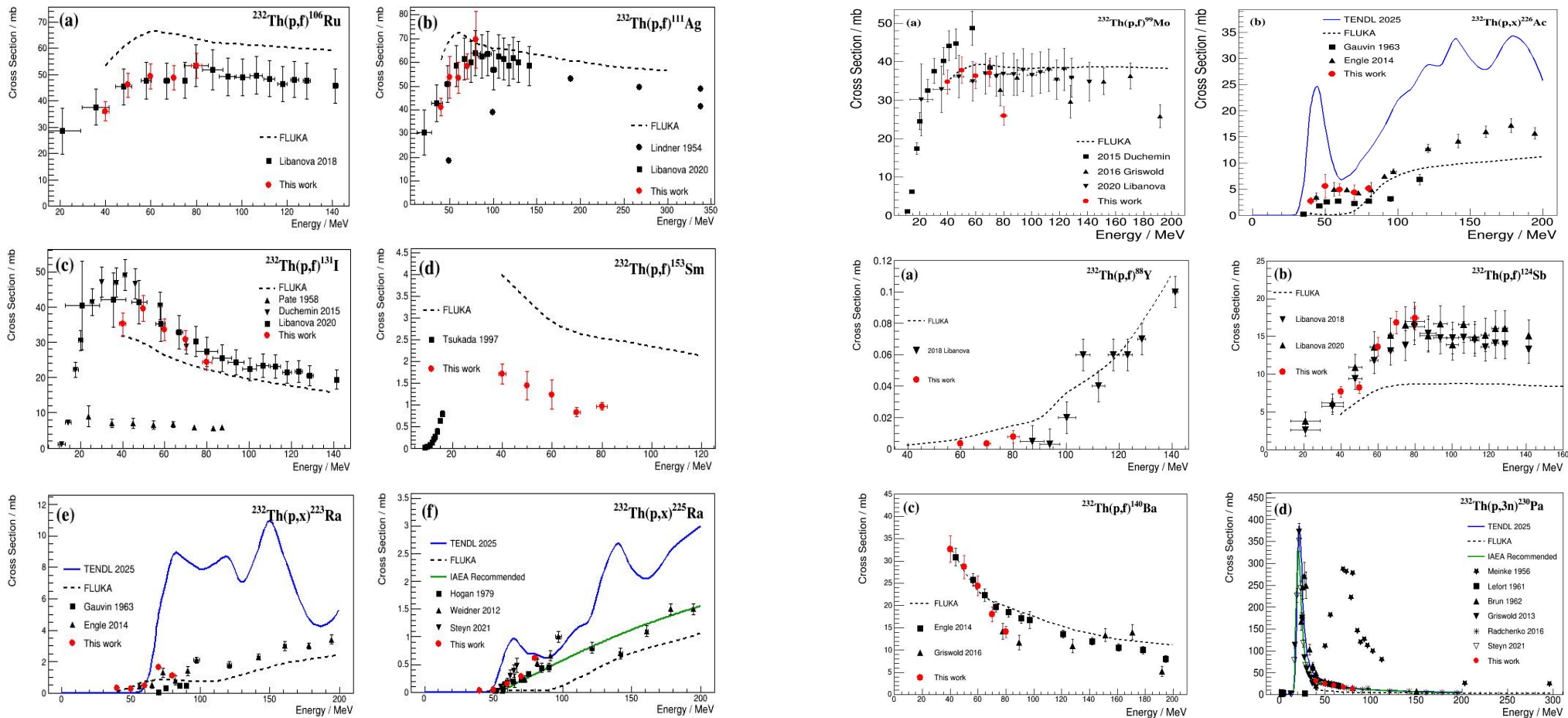


基于中国散裂中子源伴生质子束（CSNS APEP）开展的首个质子-核反应截面实验测量，验证了CSNS APEP具备质子-核反应截面测量能力（稳定的质子束流和高分辨的高纯锗探测器），补充了 $^{232}\text{Th}(p,x)^{225}\text{Ac}$ 反应截面数据，实验数据有助于通过质子辐照 ^{232}Th 进行 ^{225}Ac 的规模化生产

B. Jiang, H.T. Jing* et al., NST 36, 54 (2025)

04 质子与钍核反应截面测量

40 - 80 MeV 能区 $p+^{232}\text{Th}$ 核反应产生其它放射性医用同位素的反应截面实验测量



系统测量了40 - 80 MeV 能区 $p+^{232}\text{Th}$ 核反应产生重要放射性医用核素的反应截面，包括诊断类医用核素 ^{99}Mo 和 ^{226}Ac ，治疗类核素 ^{106}Ru 、 ^{111}Ag 、 ^{131}I 、 ^{153}Sm 、 ^{223}Ra 和 ^{225}Ra ，以及其它医用核素 ^{88}Y 、 ^{124}Sb 、 ^{140}Ba 和 ^{230}Pa

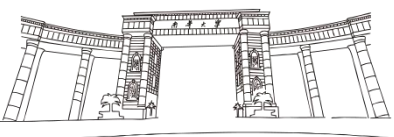
姜炳, 罗文*, 敬罕涛* 等, 物理学报 (投稿)

五

中子俘获反应截面提取

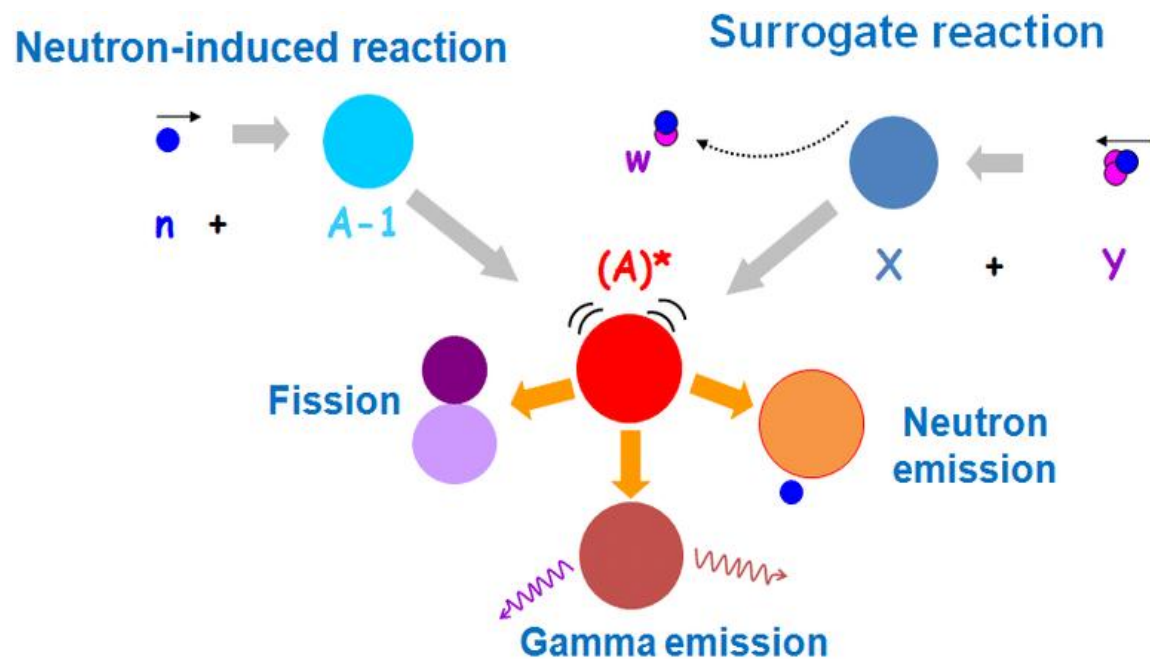


南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法）

替代反应法是一种间接测量核反应截面的方法，它使用实验上易于进行的带电粒子反应（替代反应）来产生与感兴趣的中子反应相同的复合核体系，对于难以直接测量的不稳定核素而言，具有十分重要的意义。



替代反应法模型一般将核反应分为两个阶段：

- (1) 入射粒子与靶核作用后形成一个激发的复合核
- (2) 复合核衰变阶段：复合核失去其形成信息，从而后续衰变过程与形成过程无关

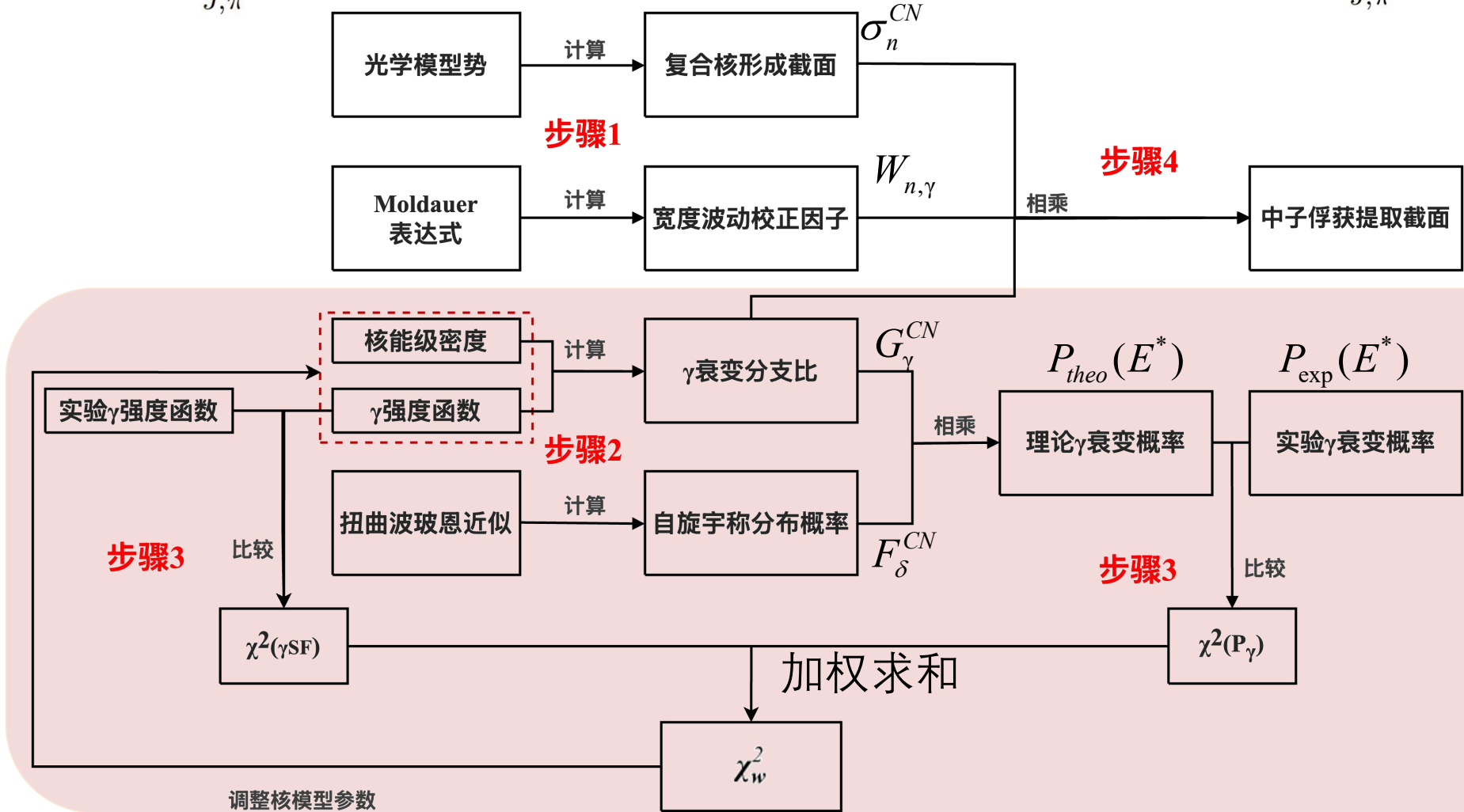
➤ 使用 $^{89}\text{Y}(p, p')^{89}\text{Y}^*$ 和 $^{232}\text{Th}(^3\text{He}, p)^{234}\text{Pa}^*$ 分别作为 $^{88}\text{Y}(n, \gamma)^{89}\text{Y}$ 和 $^{233}\text{Pa}(n, \gamma)^{234}\text{Pa}$ 的替代反应

05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法）

基于替代反应的中子俘获截面提取方法

$$\sigma_{n\gamma}(E_n) = \sum_{J,\pi} \sigma_n^{CN}(E^*, J, \pi) G_\gamma^{CN}(E^*, J, \pi) W_{n,\gamma}(E_n, J, \pi),$$

$$P_{\delta\gamma}(E^*) = \sum_{J,\pi} F_\delta^{CN}(E^*, J, \pi) G_\gamma^{CN}(E^*, J, \pi).$$

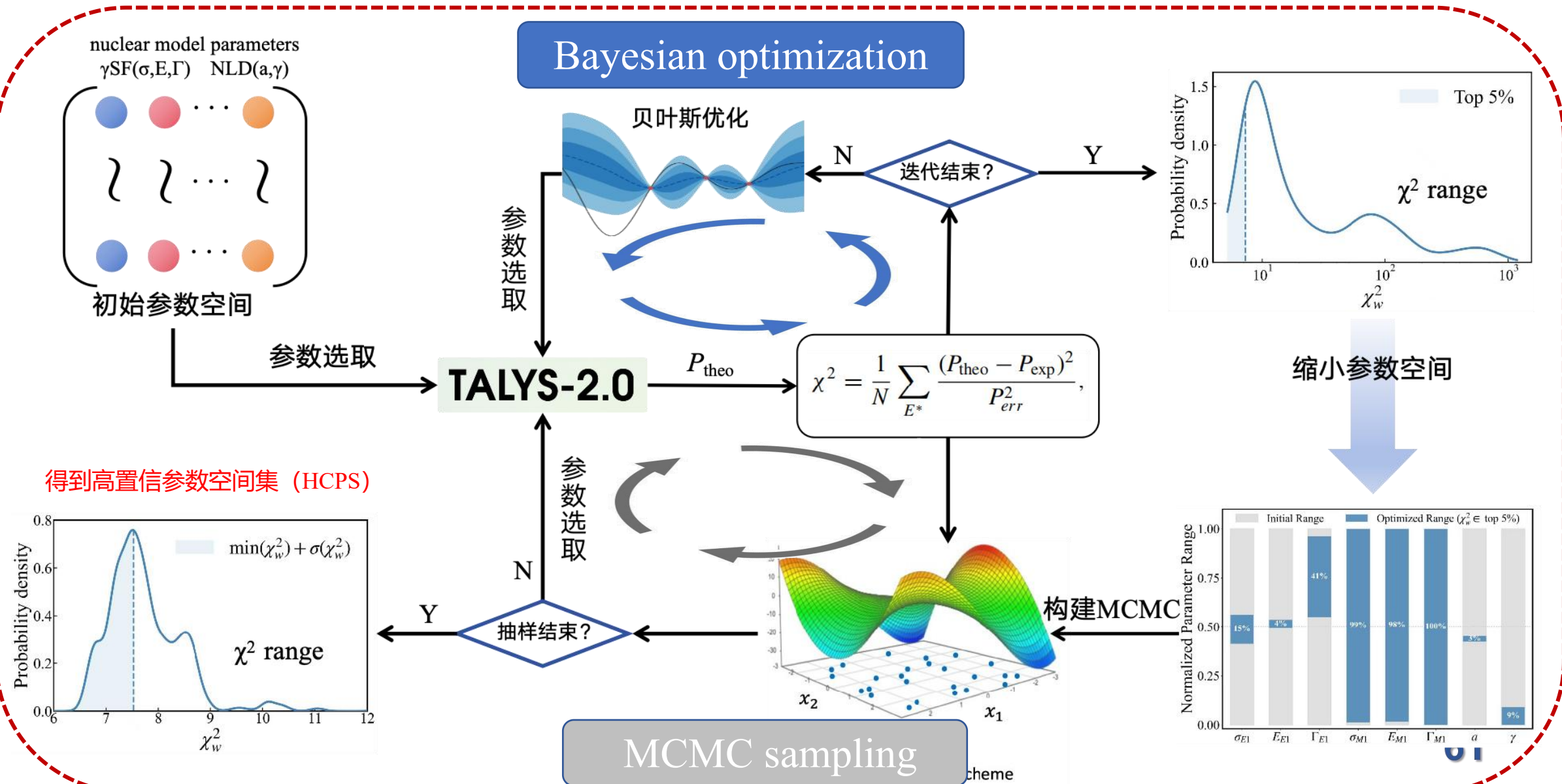


引入机器学习

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{E^*} \frac{(P_{theo} - P_{exp})^2}{P_{err}^2},$$

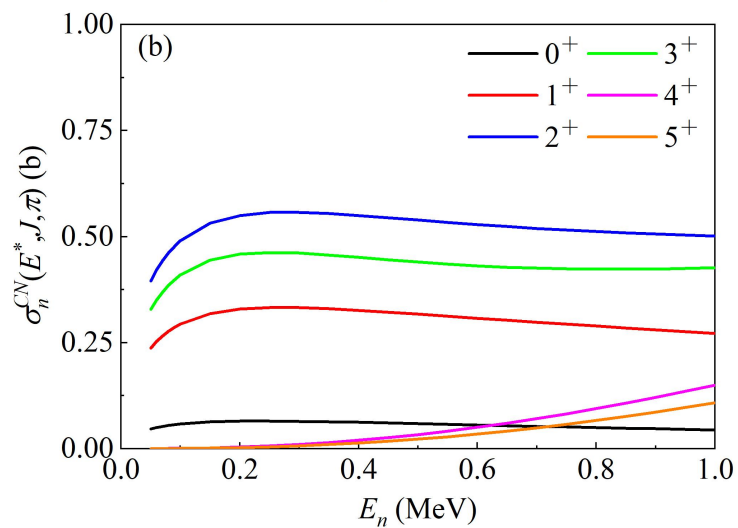
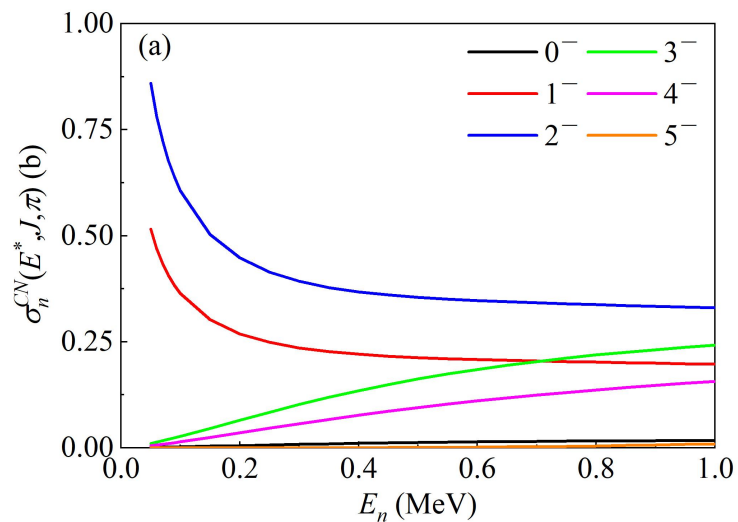
05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法）

Bayesian optimization and Markov chain Monte Carlo joint optimization framework



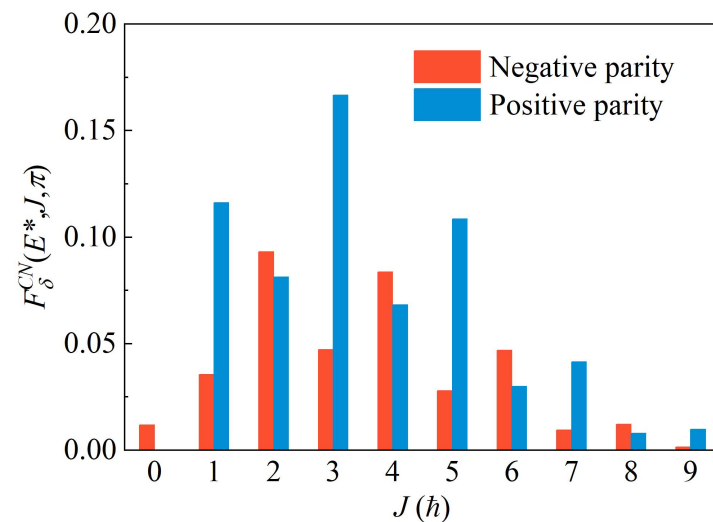
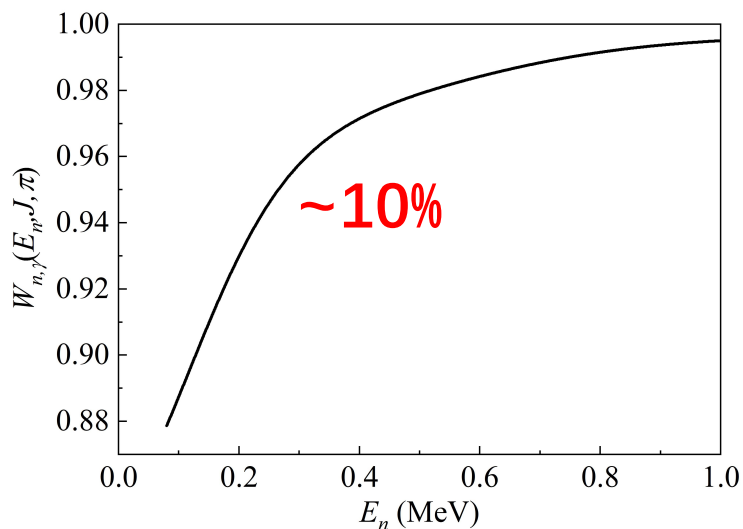
05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法—²³³pa）

- ²³⁴Pa*复合核形成截面计算 ➤ ²³³Pa宽度波动校正因子计算 ➤ ²³⁴Pa*复合核的自旋宇称分布计算



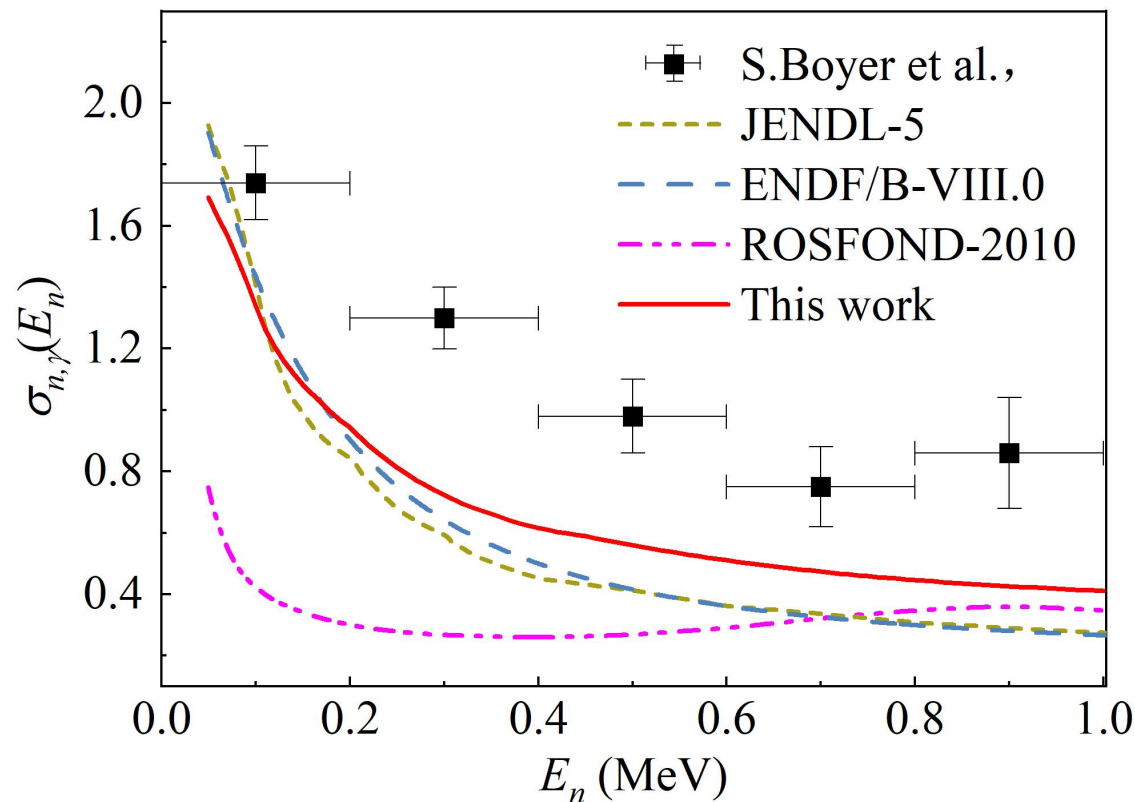
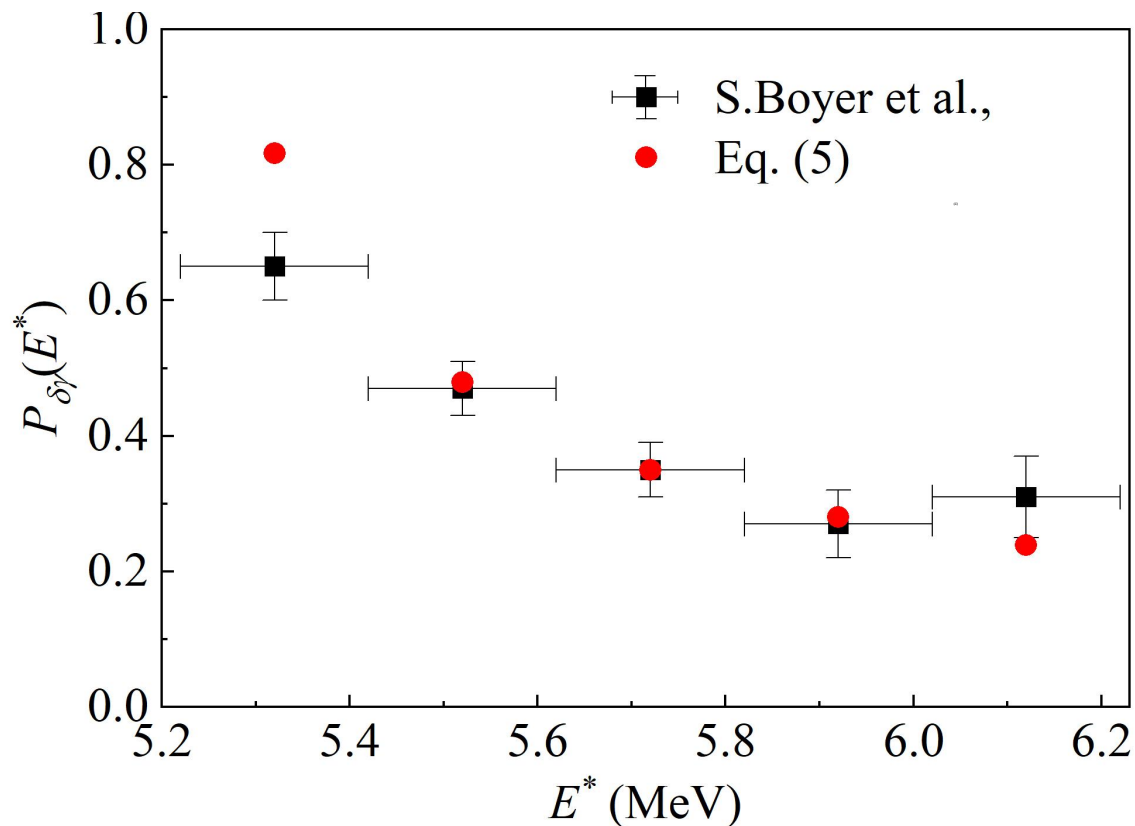
$$P_{\delta\gamma}(E^*) = \sum_{J,\pi} F_{\delta}^{CN}(E^*, J, \pi) G_{\gamma}^{CN}(E^*, J, \pi).$$

$$F_{\delta}^{CN}(E^*, J, \pi) = \frac{\sigma_{\delta}^{CN}(E^*, J, \pi)}{\sum_{J',\pi'} \sigma_{\delta}^{CN}(E^*, J', \pi')}$$



05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法—²³³Pa）

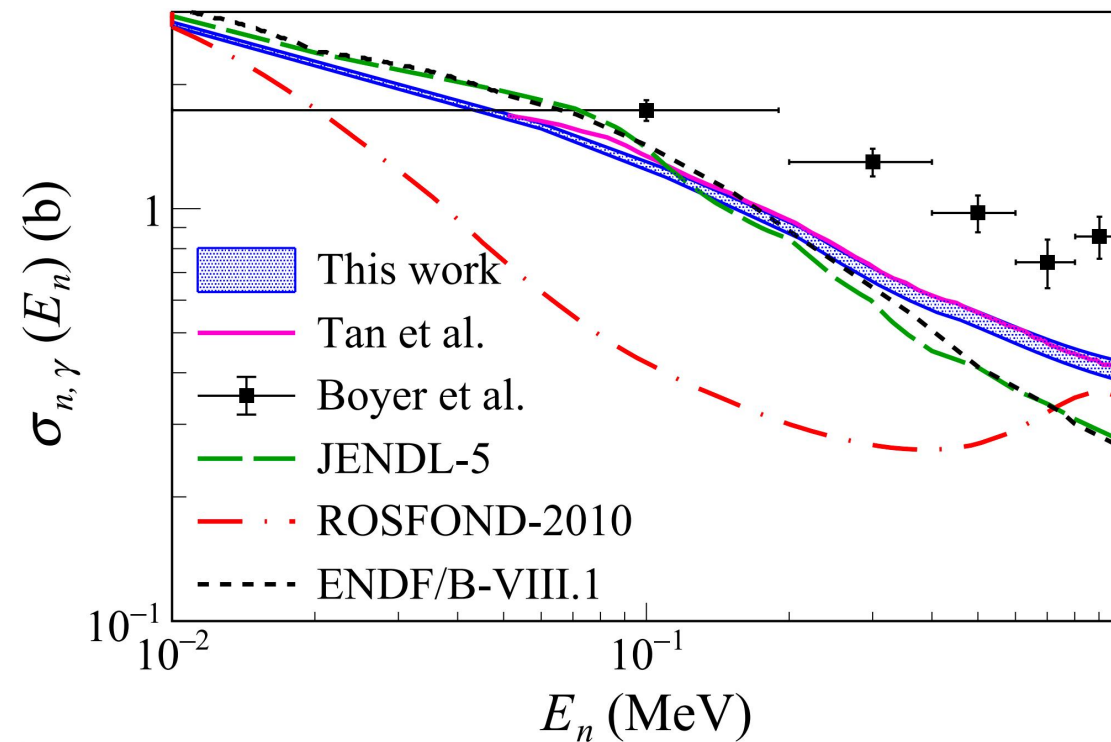
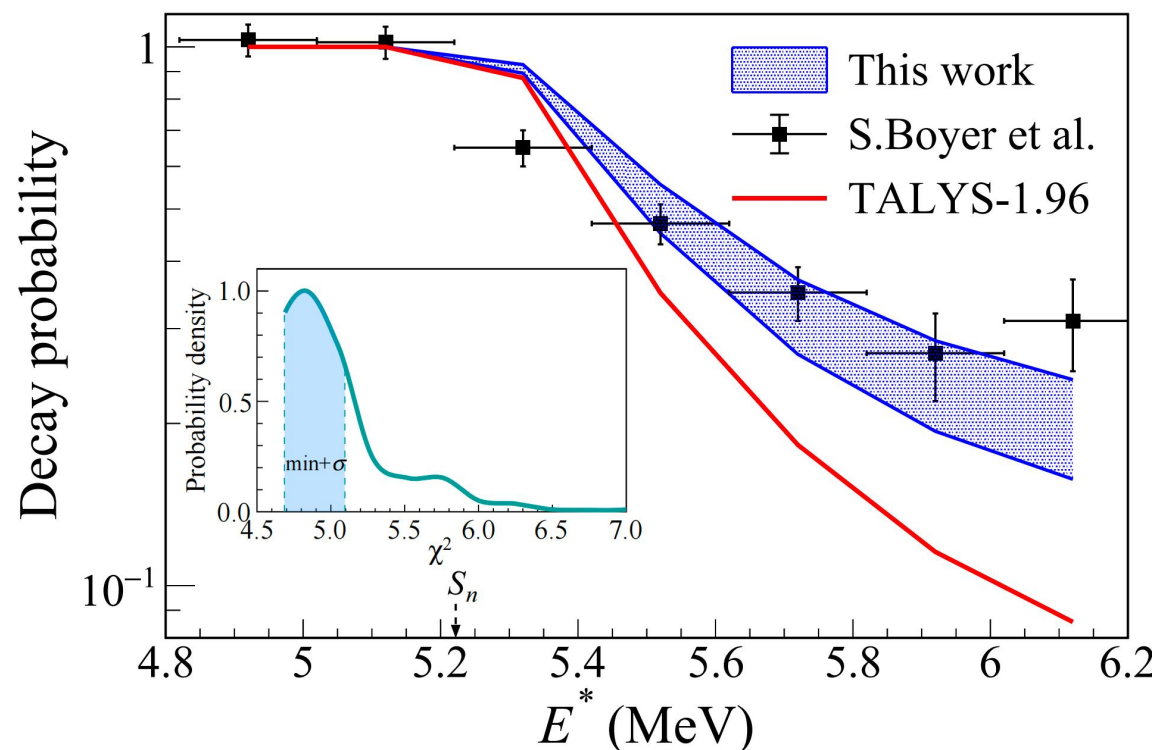
²³⁴Pa*衰变概率 $P_\gamma(E^*)$ 拟合与²³³Pa(n, γ)反应截面（未引入机器学习）



- 考虑自旋宇称分布的²³³Pa(n, γ)截面在 $E < 0.3$ MeV范围内与ENDF/B-VII.0 和 JENDL-5评价库中的截面值符合较好，在 $E > 0.3$ MeV开始偏高但差异小于50%。
- Boyer等人忽略自旋宇称影响的结果在 $E > 0.2$ MeV时与ENDF/B-VIII.0 和 JENDL-5至少有2倍的差异。

05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法—²³³Pa）

²³⁴Pa*衰变概率 $P_\gamma(E^*)$ 拟合与²³³Pa(n, γ)反应截面（引入机器学习）



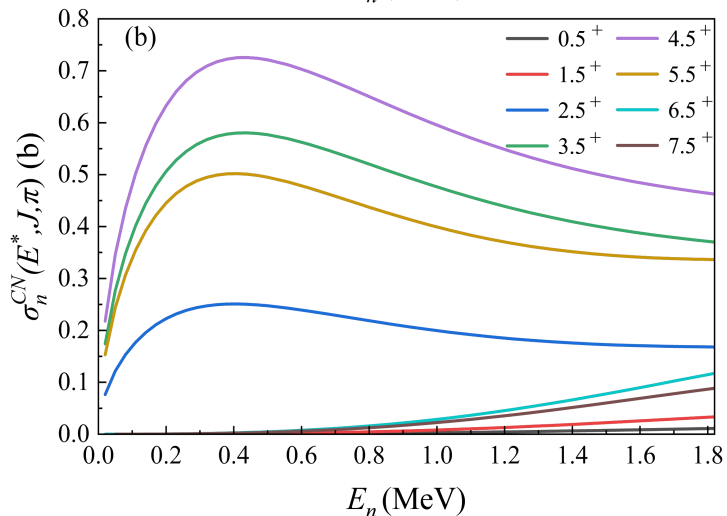
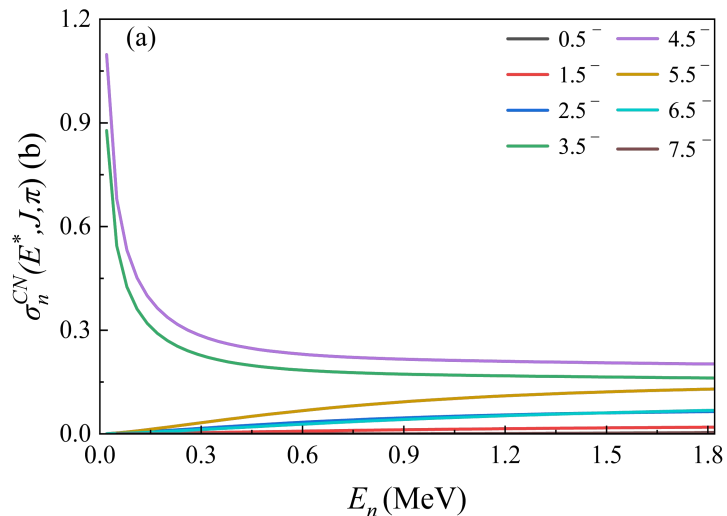
- 引入机器学习，开展能级密度和伽马强度函数的多参数调优，相较于只调节归一化系数，得到的²³³Pa(n, γ)反应截面与评价库的差距更小，同时能获得可靠的不确定性区间(3.4%-4.4%)。

05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法—⁸⁸Y）

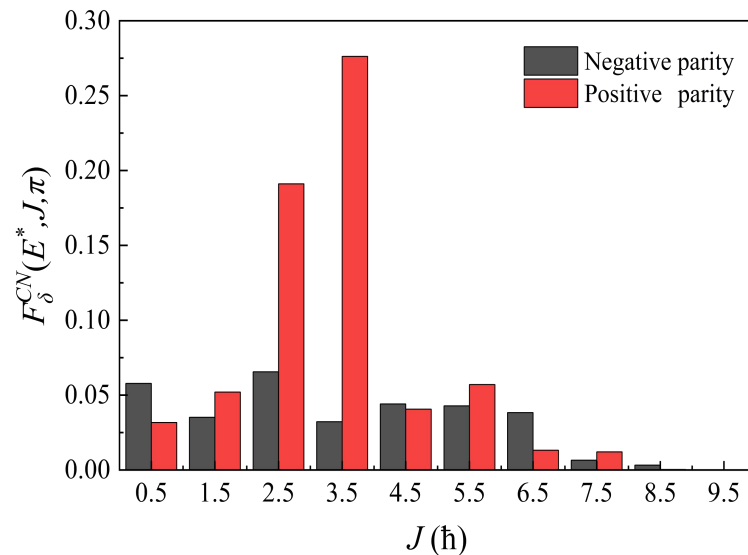
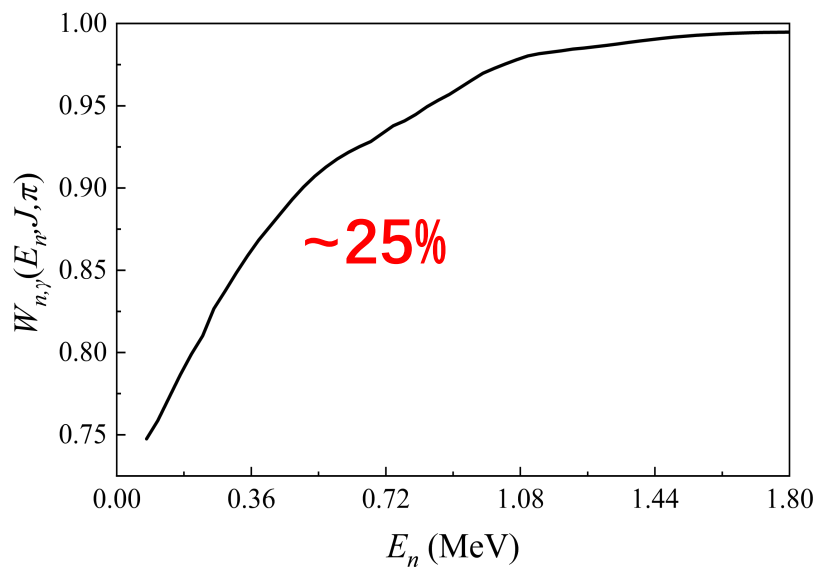
➤ ⁸⁹Y* 复合核形成截面计算

➤ ⁸⁸Y 宽度波动校正因子计算

➤ ⁸⁹Y* 复合核的自旋宇称分布计算



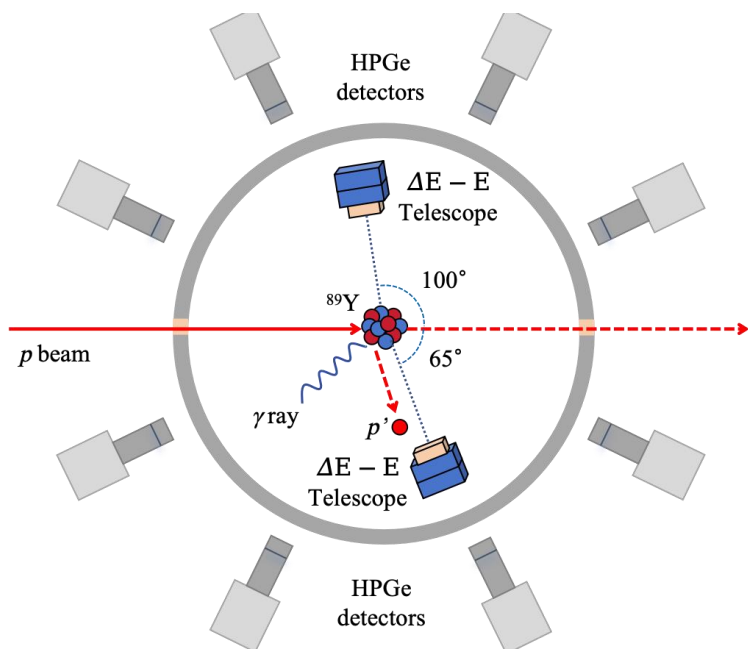
$$P_{\delta\gamma}(E^*) = \sum_{J,\pi} F_{\delta}^{CN}(E^*, J, \pi) G_{\gamma}^{CN}(E^*, J, \pi). \quad F_{\delta}^{CN}(E^*, J, \pi) = \frac{\sigma_{\delta}^{CN}(E^*, J, \pi)}{\sum_{J',\pi'} \sigma_{\delta}^{CN}(E^*, J', \pi')}$$



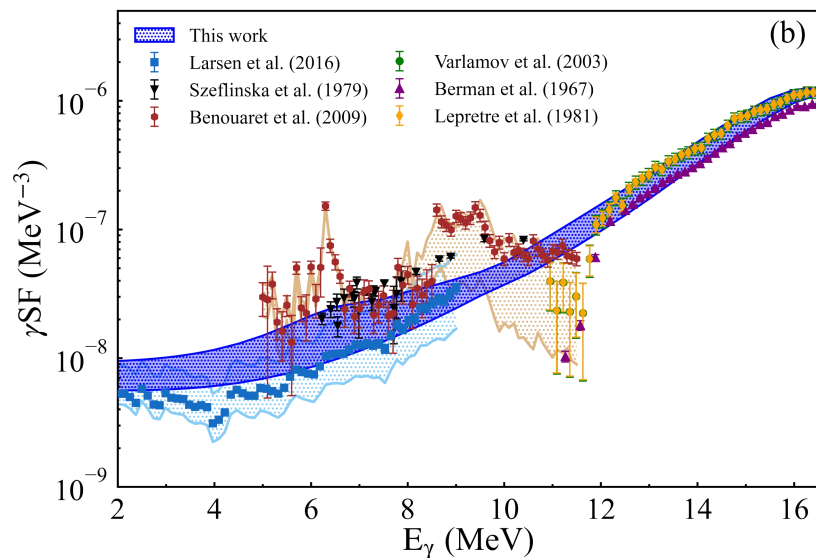
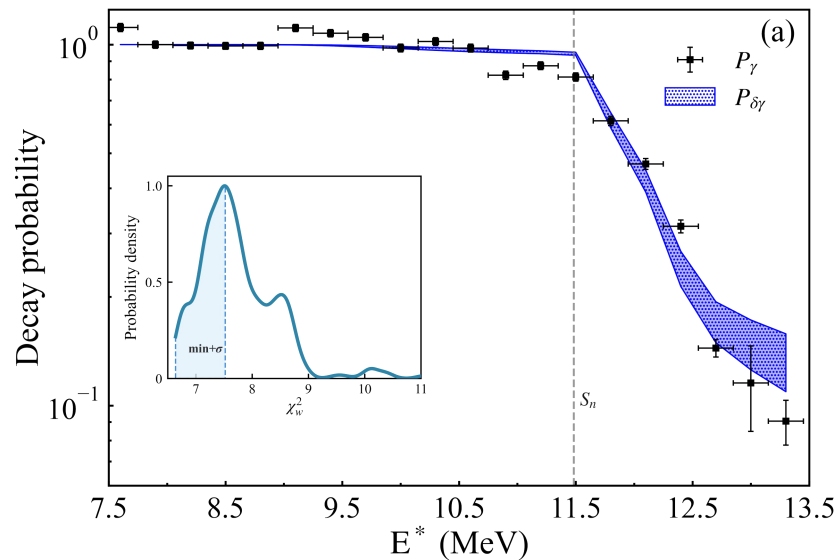
05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法— ^{88}Y ）

$^{89}\text{Y}^*$ 的 P_γ 与 γSF 同时拟合（引入机器学习）

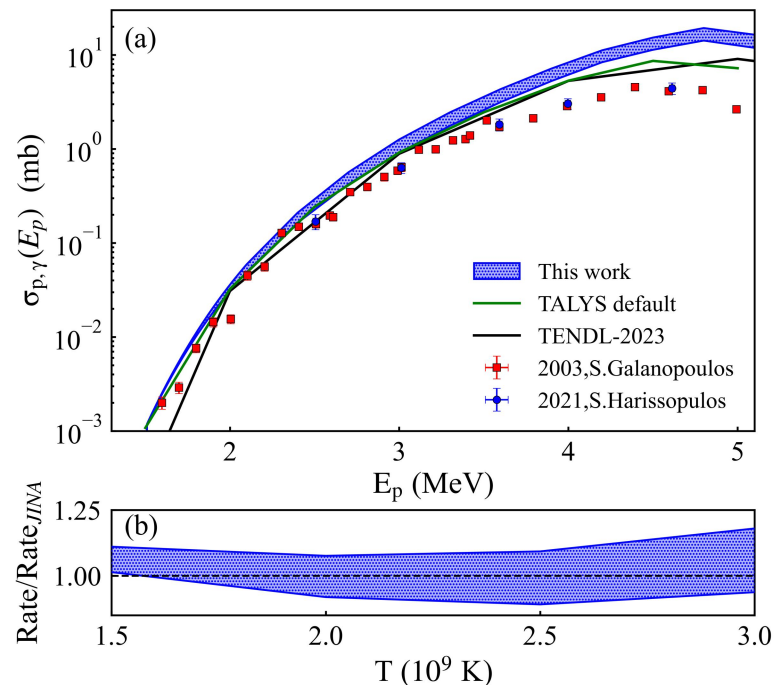
➤ $^{89}\text{Y}(\text{p}, \text{p}')$ 替代反应实验布局



中国原子能科学研究院阮锡超、冯晶教授团队开展

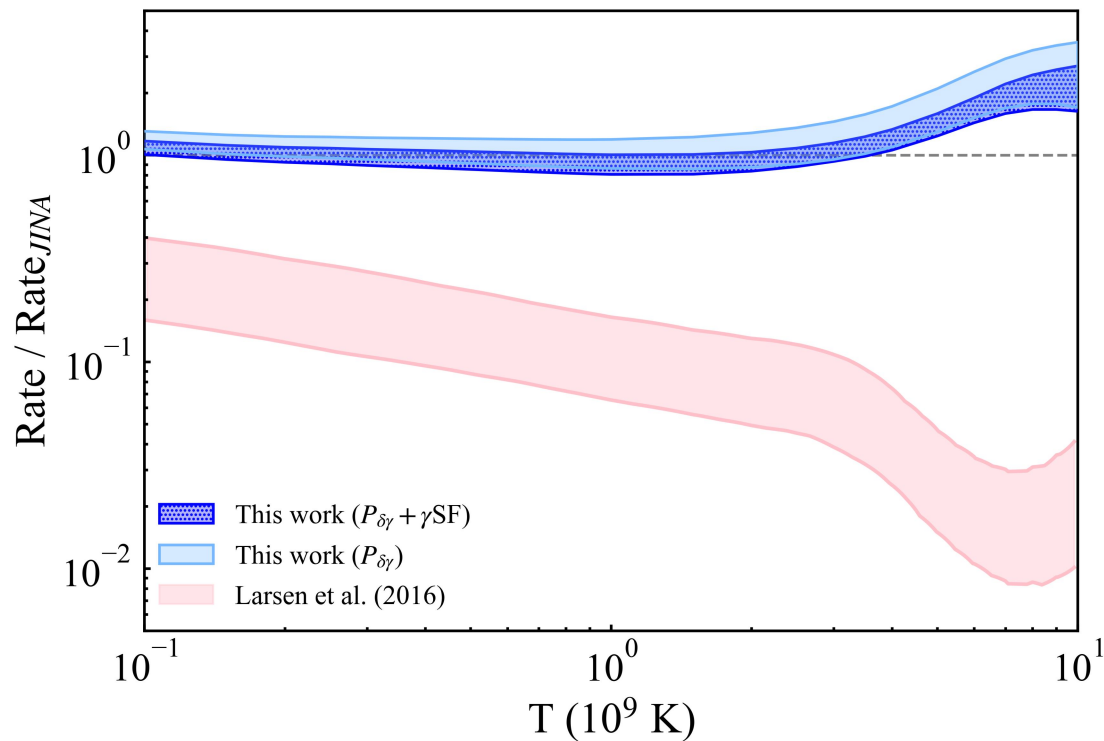
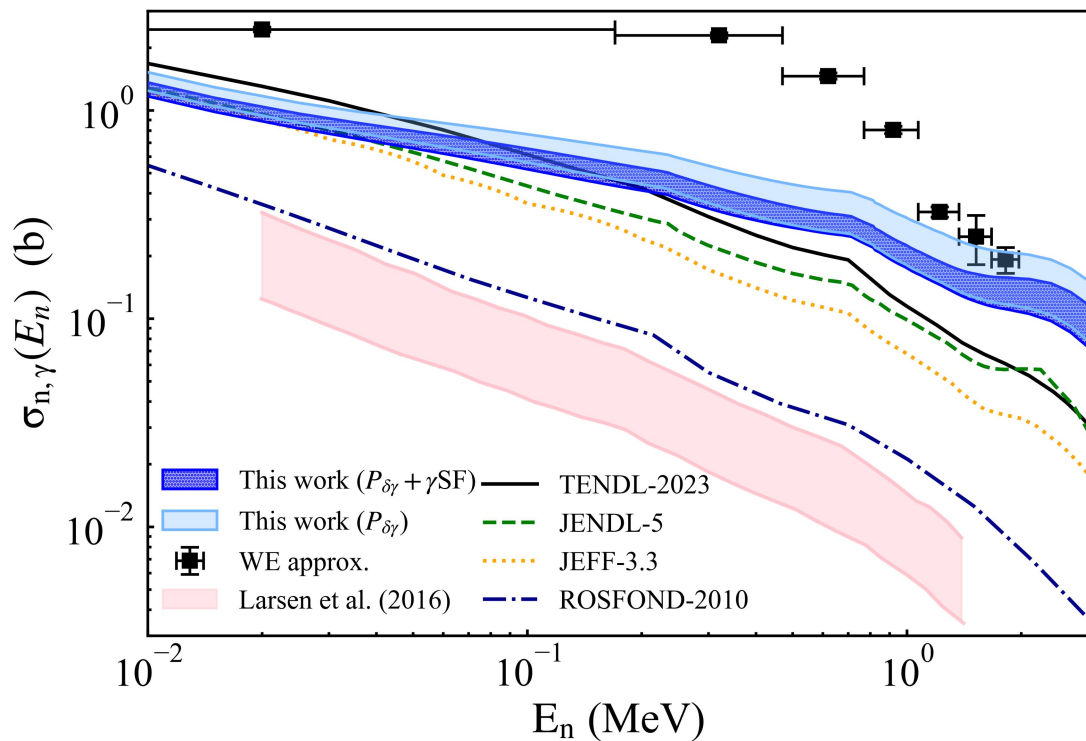


➤ $^{88}\text{Sr}(\text{p}, \gamma)$ 反应基准测试



05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法—⁸⁸Y）

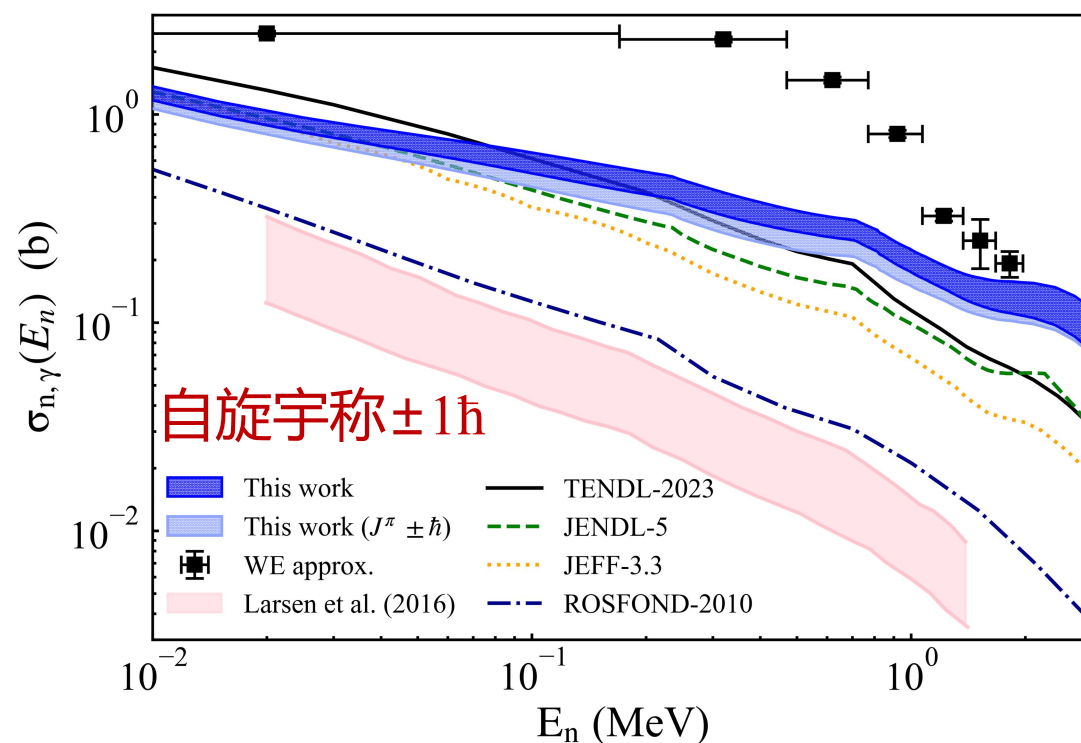
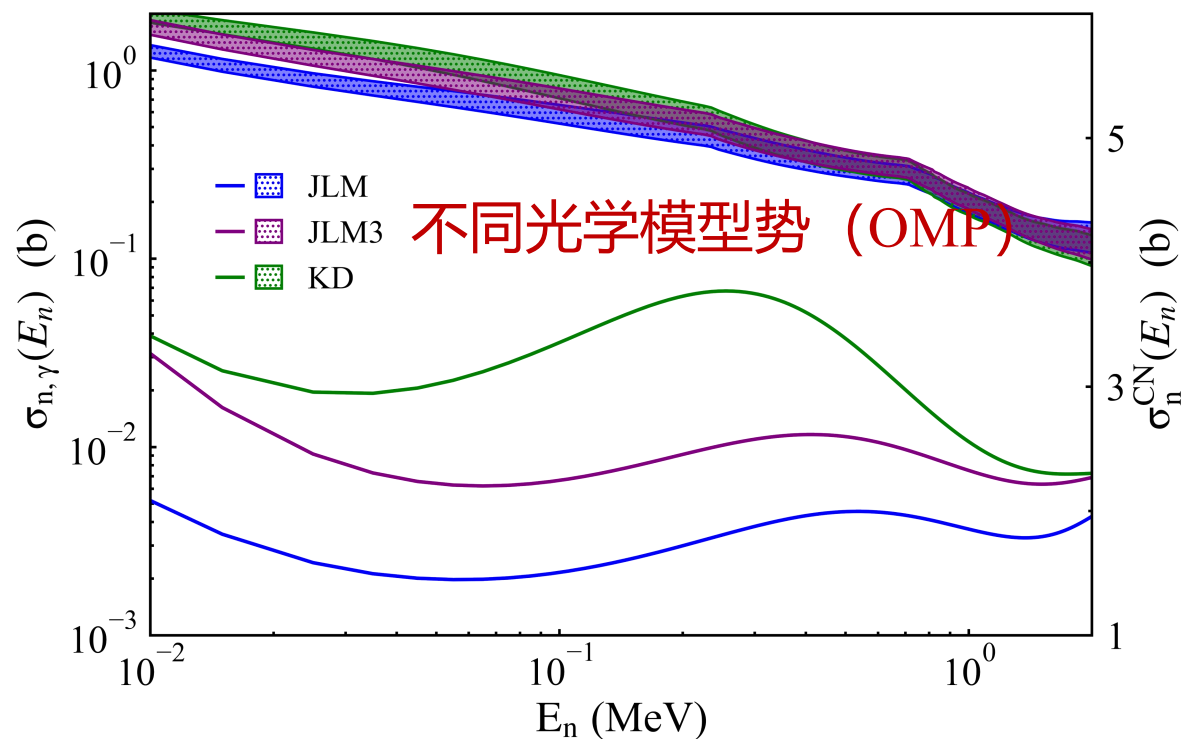
⁸⁸Y(n, γ)反应截面与天体反应率结果



- 本方法提取的⁸⁸Y(n, γ)截面数据与TENDL、JENDL-5等的评价数据有良好的一致性，与JINA的推荐值在天体感兴趣的能区范围高度契合；
- 与单一约束 P_γ 情况下的结果相比，同步约束 P_γ 和 γ SF导致的不确定区间降低了44%。

05 中子辐射俘获截面提取（替代反应法—⁸⁸Y）

核模型对⁸⁸Y(n, γ)反应截面的影响



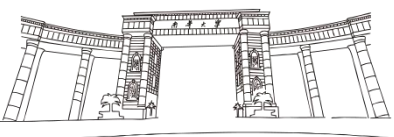
- 尽管复合核形成截面对于OMP的选择有强烈依赖，但研究发现通过不同OMPs提取的⁸⁸Y(n, γ)截面数据有良好的一致性，存在的差异主要体现在低能区 (<0.1 MeV)。
- 相比之下，考虑自旋宇称分布的移动 ($\pm 1\hbar$) 后，计算结果的不确定性区间扩大了近一倍。



小结



南華大學
UNIVERSITY OF SOUTH CHINA



06 总结

核物理大科学装置是开展核物理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/中子核反应截面实验测量方面的工作，主要进展如下：

1. 利用CSNS的Back-n装置，开展了 ^{141}Pr 、 $^{\text{nat}}\text{Eu}$ 、 $^{\text{nat}}\text{Sm}$ 和 $^{\text{nat}}\text{Yb}$ 等稳定核素的中子俘获截面实验，利用SAMMY拟合提取了相应的共振参数，提取获得了共振能区的中子俘获截面，澄清了现有数据的部分分歧。

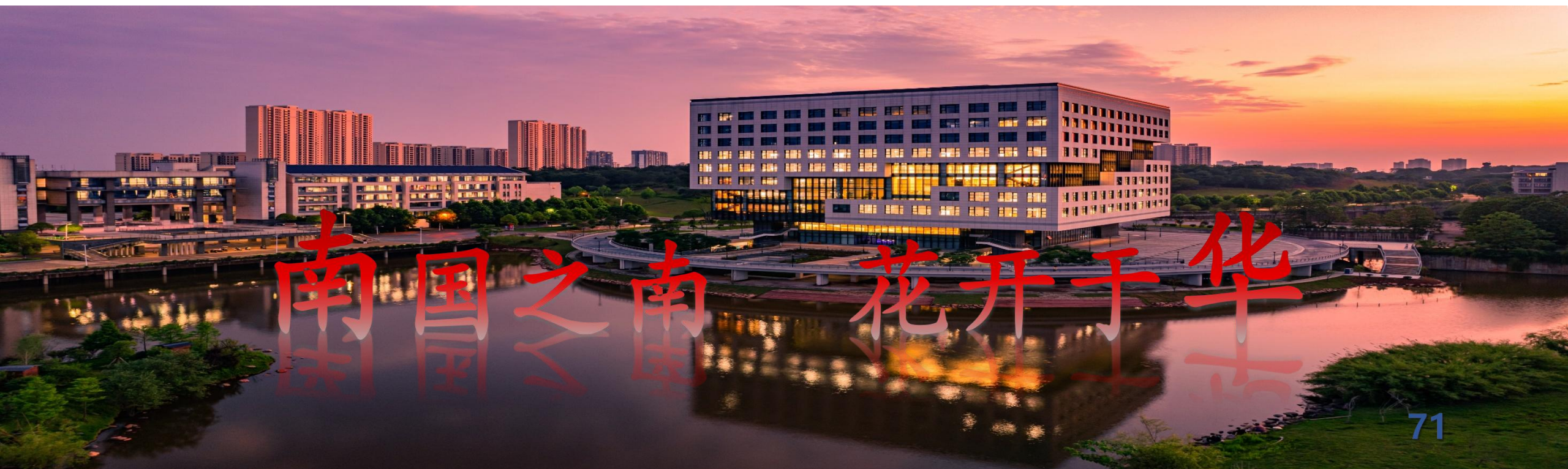
2. 针对光中子数据缺乏和显著分歧问题，系统的开展了光致带电子粒子反应截面计算，以及利用SLEGS开展了 $^{63,65}\text{Cu}$ 、 ^{76}Ge 和 ^{175}Lu 的光中子反应截面测量，获得了精度好于5%的 $(\gamma, 1n)$ 的截面数据。并开展了超强激光驱动的伽马活化测量，成功提取了 $^{27}\text{Al}(\gamma, x)^{24}\text{Na}$ 反应的量子平均截面，以及发展了基于同位素产额比的光中子截面分布提取方法。

3. 基于中国散裂中子源伴生质子束（CSNS APEP）系统测量了40 - 80 MeV 能区 $p+^{232}\text{Th}$ 核反应产生重要放射性医用核素的反应截面，包括诊断类医用核素 ^{99}Mo 和 ^{226}Ac ，治疗类核素 ^{106}Ru 、 ^{111}Ag 、 ^{131}I 、 ^{153}Sm 、 ^{223}Ra 和 ^{225}Ra ，以及其它医用核素 ^{88}Y 、 ^{124}Sb 、 ^{140}Ba 和 ^{230}Pa 。

4. 发展了基于Brink假说（结合光中子实验测量数据）的中子俘获截面提取方法学，有效约束 γSF 以及结合核能级密度模型，研究获得了 $^{62,64}\text{Cu}$ 、 ^{174}Lu 、 $^{153,159}\text{Gd}$ 、 $^{111,113,121,123}\text{Sn}$ 和 $^{141,147,149}\text{Nd}$ 等不稳定核素的中子俘获截面。

5. 发展了基于替代反应（考虑复合核自旋宇称分布）的不稳定核素的中子俘获截面提取方法学，研究获得了可靠的 $^{233}\text{Pa}(n, \gamma)$ 和 $^{88}\text{Y}(n, \gamma)$ 的中子俘获截面，平均不确定性分别为3.4%和15%。

感谢各位同行抽空莅临南华指导交流！



南国之南 花开于华

人才类别	申请条件	待遇
学科顶尖人才	具有世界一流学术水平，在相关领域取得国际学术界公认、具有重大科学价值的原始创新成果，在上述领域取得卓越成就或获得国际权威机构认可的杰出人才。 年龄不限。	一事一议
学科领军人才	学术造诣高深, 产出重大技术装备、重大技术体系以及系统解决方案, 支撑引领行业产业技术进步作用显著的国家级领军人才；或海内外相当水平优秀人才。 年龄要求55岁以下，女性年龄可放宽2岁（下同）	1.年薪：120万元（人民币，税前，下同），安家费：160万元； 2.科研启动经费1000万元； 3.提供科研用房，办公用房。配备专职人员。

人才类别	申请条件	待遇
学科拔尖人才	在本学科领域具有较高的学术影响力和学术声誉，产出具有重大带动和影响的创新成果，为地方政府提供重大战略咨询和服务的省部级拔尖人才；或海内外相当水平优秀人才。 年龄要求50岁以下	1.年薪： 60万元左右 ，安家费： 100万元 ； 2.科研启动经费 400万元 ； 3. 提供科研用房，办公用房。配备专职人员。
青年创新人才	已取得较为突出学术成果的国家级青年人才或经论证与其水平相当者。 年龄要求40岁以下	1.年薪： 90万元 ，安家费： 100万元 ； 2.科研启动经费 600万元 ； 3. 提供科研用房，办公用房。配备专职人员。
青年优秀人才	学术基础深厚，富有创新精神，凸显较强发展潜质的青年学者；或优势特色学科急需的相当水平人才及海外优秀博士。 年龄要求35岁以下	1.年薪： 50万元左右 ，安家费： 80万元 ； 2.科研启动经费 300万元 ； 3. 提供科研用房，办公用房。配备专职人员。

人才类别	申请条件	待遇
I类博士	国内外高水平大学、科研院所的博士后研究人员、博士研究生，取得高水平的代表性学术成果，在本学科领域内具有一定学术贡献和学术影响力，经同行专家学术综合评价认定学术能力强、发展潜力大。年龄原则上35岁及以下。	1.提供 安家费45万元 （税前）； 2.提供 科研启动费理工、医学类45万元，人文社科类30万元 ； 3.初聘为 校聘教授岗位 ，享受教授（专业技术四级）岗位的绩效工资待遇； 4.对于来学校报到前已婚的博士，其配偶有全日制本科以上学历或硕士以上学位，学校以人事代理方式安排工作。
II类博士	在国内外高水平大学、科研院所的博士后研究人员、博士研究生，取得较高水平的代表性学术成果，经同行专家学术综合评价认定学术能力较强，发展潜力较大。年龄原则上35岁及以下。	1.提供 安家费40万元 （税前）； 2.提供 科研启动费理工、医学类30万元，人文社科类20万元 ； 3.初聘为 校聘副教授岗位 ，享受副教授（专业技术七级）岗位的绩效工资待遇； 4.对于来学校报到前已婚的博士，其配偶有硕士及以上学位，学校以人事代理方式安排工作。
III类博士	获得博士学位，取得一定水平的代表性学术成果，经同行专家学术综合评价认定在教学、科研方面具有发展潜力。年龄原则上35岁及以下，其中理工医学类男性年龄原则上32岁及以下。	1.提供 安家费35万元 （税前）； 2.提供 科研启动费理工、医学类20万元,人文社科类15万元 ； 3.初聘为 讲师岗位 ，享受讲师最高级（专业技术八级）岗位的绩效工资待遇。