

CSNS Back-n (第十届) 用户研讨会, 衡阳

天体物理s-过程热核反应率 直接测量研究进展

@CSNS Back-n & SSRF SLEGS



安振东 先进核能中心 高功率靶室
中国科学院 近代物理研究所





目录

CONTENTS

❖ 中子俘获反应与光核反应的重要应用

- 核天体物理：s-、r-与p-过程的重要核物理输入量
- 粒子物理： ^{100}Mo 、 ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变本底反应测量
- 先进核能与核技术应用：医用同位素、核材料无损检测等

❖ 天体物理s-过程热核反应率直接测量研究

- 天体物理s-过程，中子俘获反应截面的直接测量
- CSNS Back-n: (n, γ) 反应截面测量
- SSRF SLEGS: (γ, n) 反应截面测量

❖ 近年来代表性工作介绍

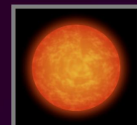
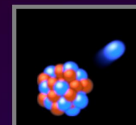
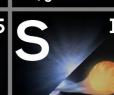
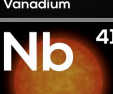
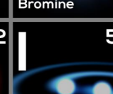
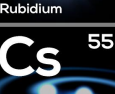
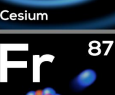
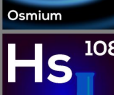
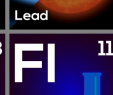
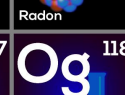
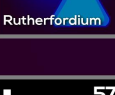
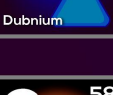
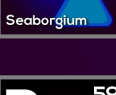
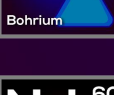
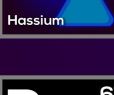
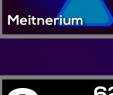
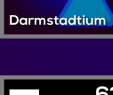
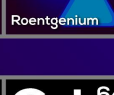
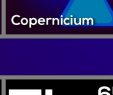
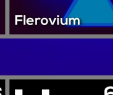
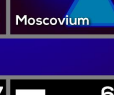
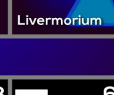
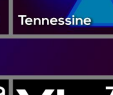
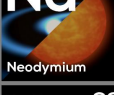
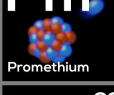
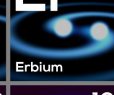
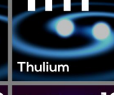
- $^{103}\text{Rh}(n, \gamma)$ 与 (γ, n) 反应截面
- $^{141}\text{Pr}(n, \gamma)$ 与 (γ, n) 反应截面
- ^{127}I 与 $^{133}\text{Cs}(n, \gamma)$ 反应截面测量
- $^{75}\text{As}(n, \gamma)$ 反应截面进展

❖ 总结与展望

1

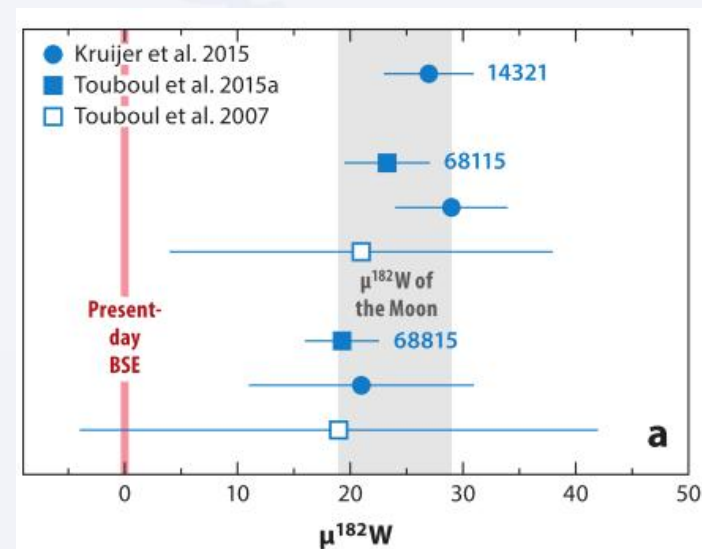
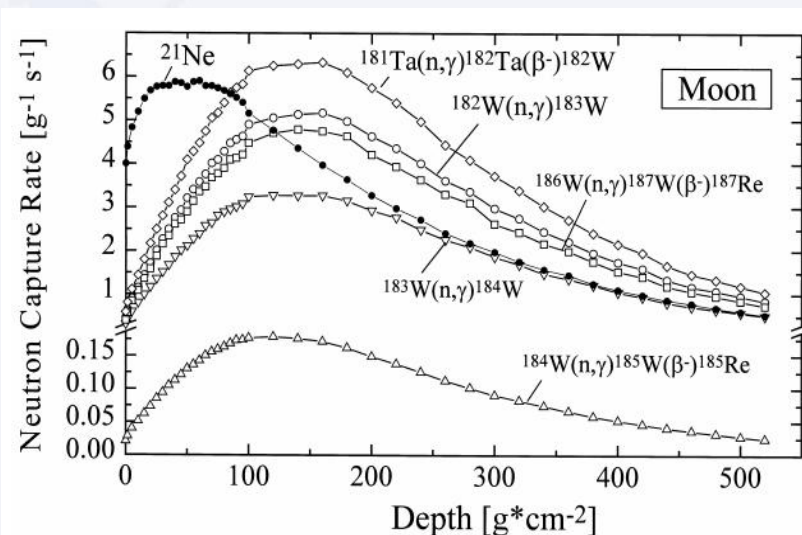
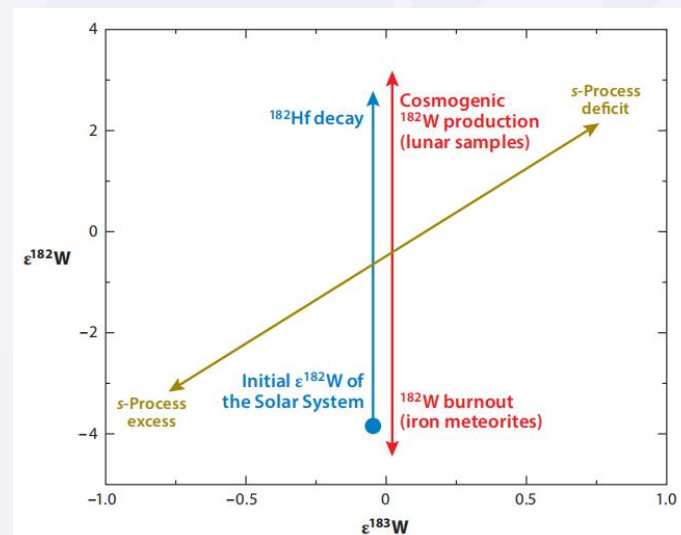
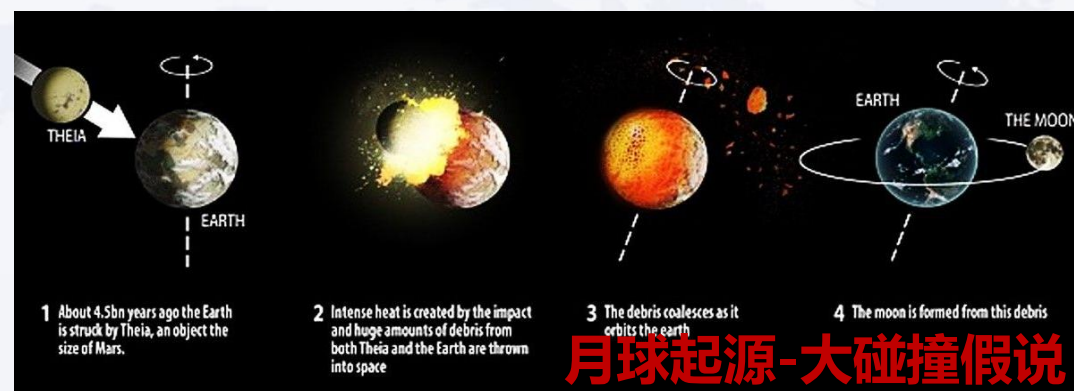
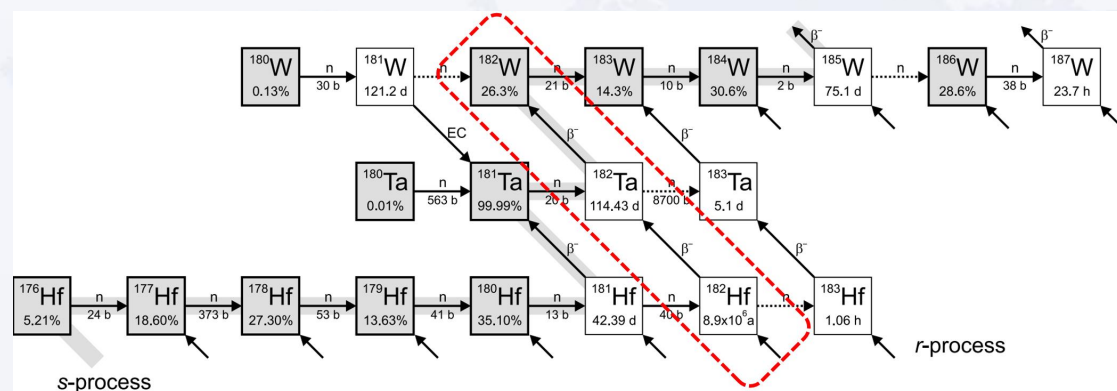
中子俘获反应与光核反应的重要应用

宇宙中元素的起源: s-、r-与p-过程, 超铁元素的产生

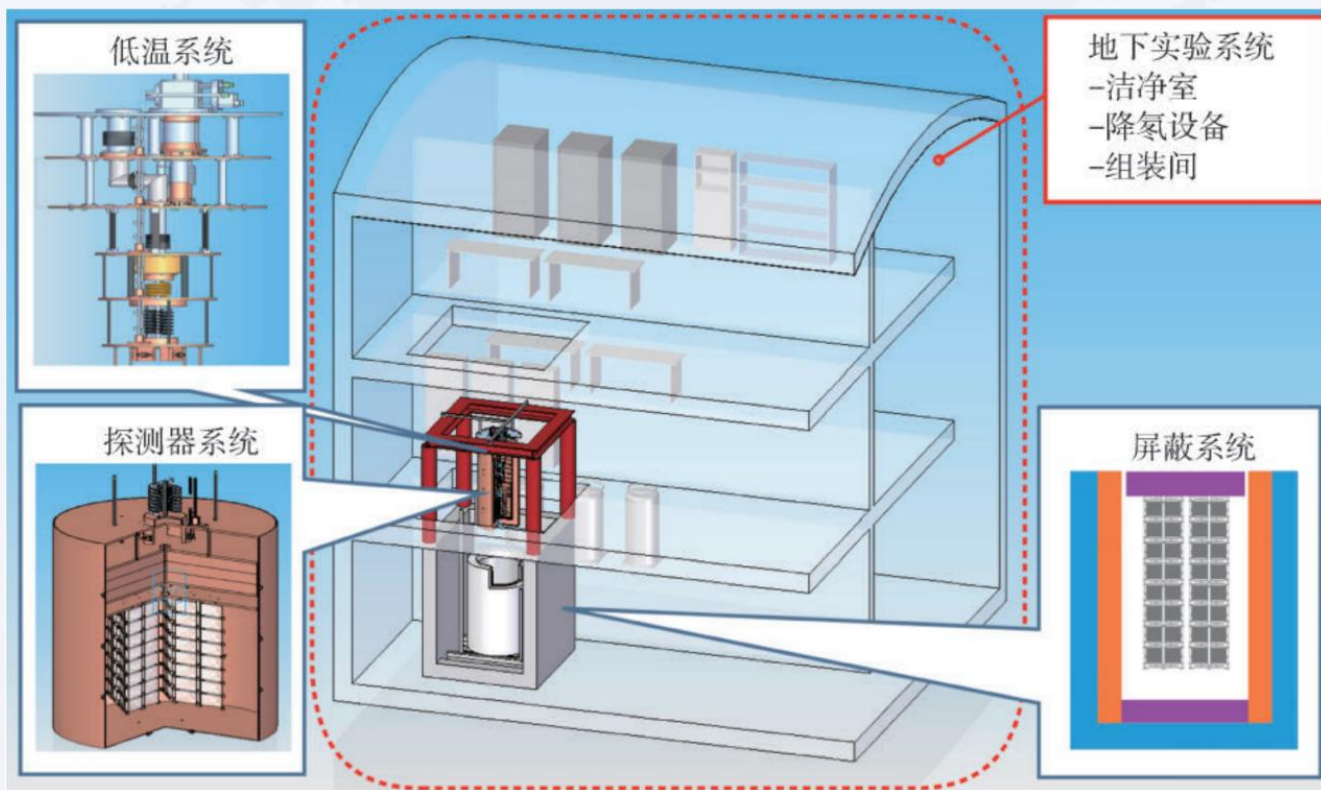
H1  Hydrogen	 The big bang  Dying low-mass stars  White dwarf supernovae  Radioactive decay				He2  Helium													
Li3  Lithium	Be4  Beryllium					B5  Boron	C6  Carbon	N7  Nitrogen	O8  Oxygen	F9  Fluorine	Ne10  Neon							
Na11  Sodium	Mg12  Magnesium					Al13  Aluminum	Si14  Silicon	P15  Phosphorus	S16  Sulfur	Cl17  Chlorine	Ar18  Argon							
K19  Potassium	Ca20  Calcium	Sc21  Scandium	Ti22  Titanium	V23  Vanadium	Cr24  Chromium	Mn25  Manganese	Fe26  Iron	Co27  Cobalt	Ni28  Nickel	Cu29  Copper	Zn30  Zinc	Ga31  Gallium	Ge32  Germanium	As33  Arsenic	Se34  Selenium	Br35  Bromine	Kr36  Krypton	
Rb37  Rubidium	Sr38  Strontium	Y39  Yttrium	Zr40  Zirconium	Nb41  Niobium	Mo42  Molybdenum	Tc43  Technetium	Ru44  Ruthenium	Rh45  Rhodium	Pd46  Palladium	Ag47  Silver	Cd48  Cadmium	In49  Indium	Sn50  Tin	Sb51  Antimony	Te52  Tellurium	I53  Iodine	Xe54  Xenon	
Cs55  Cesium	Ba56  Barium			Hf72  Hafnium	Ta73  Tantalum	W74  Tungsten	Re75  Rhenium	Os76  Osmium	Ir77  Iridium	Pt78  Platinum	Au79  Gold	Hg80  Mercury	Tl81  Thallium	Pb82  Lead	Bi83  Bismuth	Po84  Polonium	At85  Astatine	Rn86  Radon
Fr87  Francium	Ra88  Radium			Rf104  Rutherfordium	Db105  Dubnium	Sg106  Seaborgium	Bh107  Bohrium	Hs108  Hassium	Mt109  Meitnerium	Ds110  Darmstadtium	Rg111  Roentgenium	Cn112  Copernicium	Nh113  Nihonium	Fl114  Flerovium	Mc115  Moscovium	Lv116  Livermorium	Ts117  Tennesse	Og118  Oganesson
		La57  Lanthanum	Ce58  Cerium	Pr59  Praseodymium	Nd60  Neodymium	Pm61  Promethium	Sm62  Samarium	Eu63  Europium	Gd64  Gadolinium	Tb65  Terbium	Dy66  Dysprosium	Ho67  Holmium	Er68  Erbium	Tm69  Thulium	Yb70  Ytterbium	Lu71  Lutetium		
		Ac89  Actinium	Th90  Thorium	Pa91  Protactinium	U92  Uranium	Np93  Neptunium	Pu94  Plutonium	Am95  Americium	Cm96  Curium	Bk97  Berkelium	Cf98  Californium	Es99  Einsteinium	Fm100  Fermium	Md101  Mendelevium	No102  Nobelium	Lr103  Lawrencium		

❖ ^{182}Hf - ^{182}W 放射性衰变体系-半衰期8.9Ma，是追溯太阳系早期重大事件的时间标尺

- 可精确确定月球形成年龄，研究难点在于精确的获得壤样品W同位素组分
- 除天体物理s-过程造的W同位素异常外，月壤长期暴露在宇宙线下也会造成明显的测量偏差



- ❖ $0\nu\beta\beta$ 是当前国际上粒子物理与核物理领域的重要科学前沿
- ❖ $0\nu\beta\beta$ 突破粒子物理标准模型的研究方向之一
- ❖ 对 $0\nu\beta\beta$ 过程进行实验研究，是检验轻子数守恒、确定中微子马约拉纳属性和中微子质量最现实可行的过程



CUPID-China合作组@CJPL, ^{100}Mo 无中微子双贝塔衰变实验



The GERmanium Detector Array

GERDA

*The GERmanium Detector Array
for the search of neutrinoless double beta decay in Ge-76
at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)*

Science 365 (2019) 1445

Phys. Rev. Lett. 131.142501 (2023)



MAJORANA

A search for neutrinoless double-beta decay of germanium-76

The MAJORANA DEMONSTRATOR

Nature Physics 20, 1078 (2024)

Phys. Rev. Lett. 134, 242501 (2025)

LEGEND

Large Enriched
Germanium Experiment
for Neutrinoless $\beta\beta$ Decay

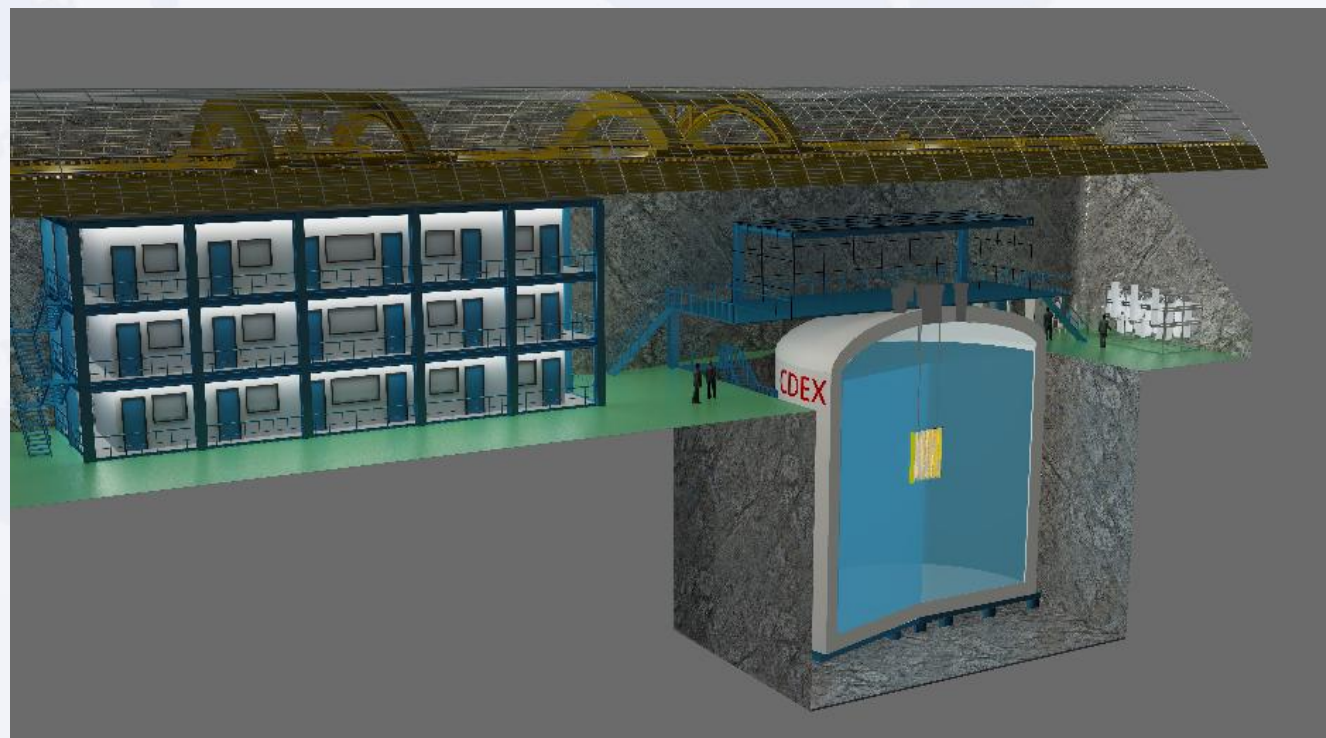
The LEGEND Collaboration

Phys.Rev. Lett. 136, 022701 (2026)

❖ $0\nu\beta\beta$ 实验中子本底的主要来源 (^{76}Ge 为例)

- 铜构件和高纯锗在地面制造过程中因宇宙线中 μ 子、中子和质子产生的宇生核素；
- 环境中原生的放射性核素产生的 γ 或中子，例如U，Th衰变产生的中子；
- μ 子在探测器和屏蔽材料中产生的中子等。

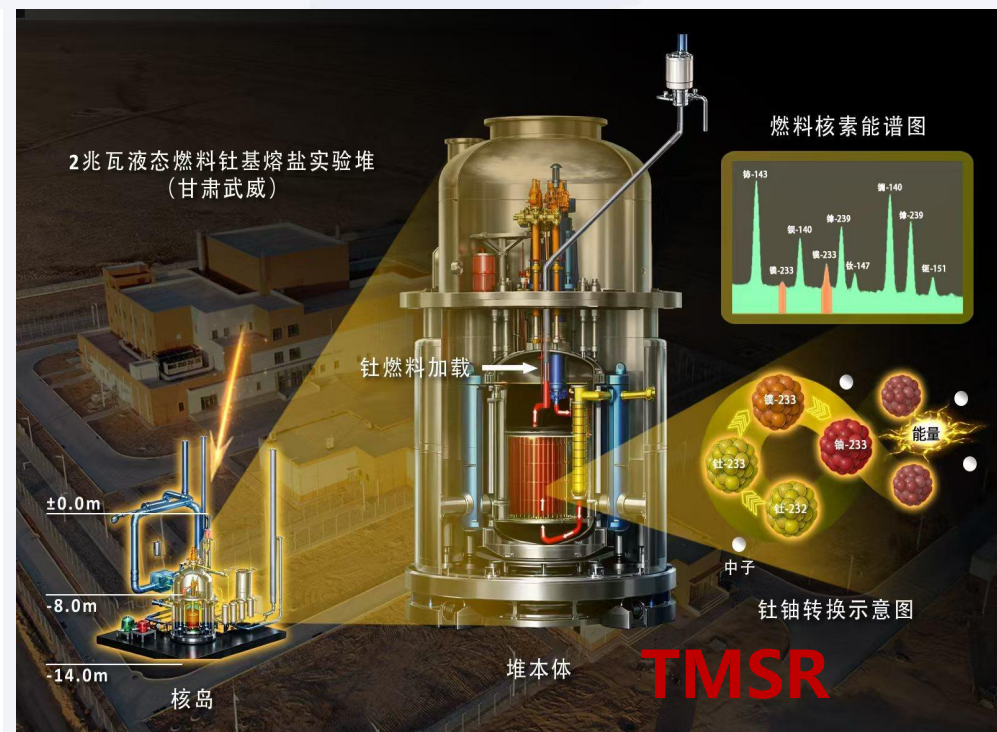
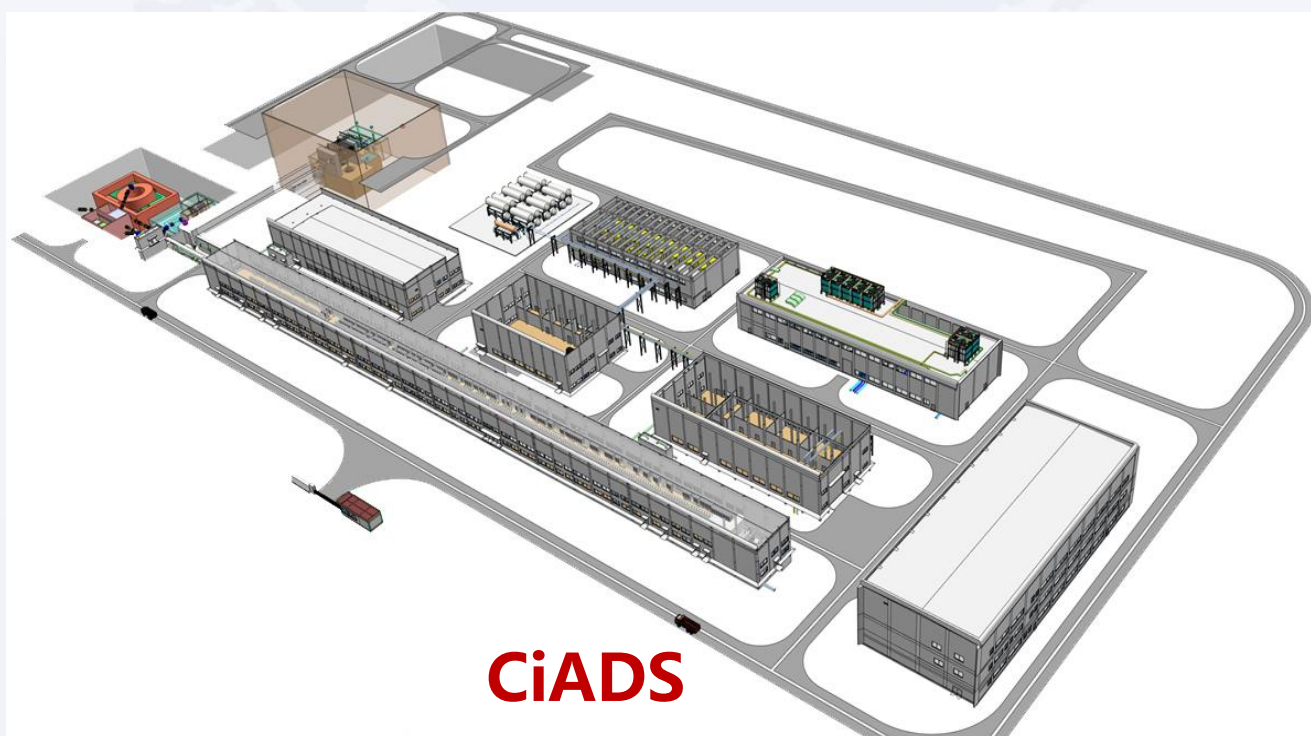
Background contribution	Rate c/(ROI t yr)
Electroformed Cu	0.23
OFHC Cu shielding	0.29
Pb Shielding	0.63
Cables and internal connectors	<0.38
Front Ends	0.6
U/Th within the Ge	<0.07
Plastics + Other	0.39
^{68}Ge , ^{60}Co within the ^{enr}Ge	0.07
^{60}Co within the Cu	0.09
External γ rays, (alpha,n) reactions	0.1
Rn and surface α emission	0.05
Ge, Cu, Pb (n,n' γ) reactions	0.21
Ge(n,n') reactions	0.17
Ge(n, γ)	0.13
Direct μ passage	0.03
ν Induced background	<0.01
Total	<3.5



Majorana实验 各部分对本底的贡献

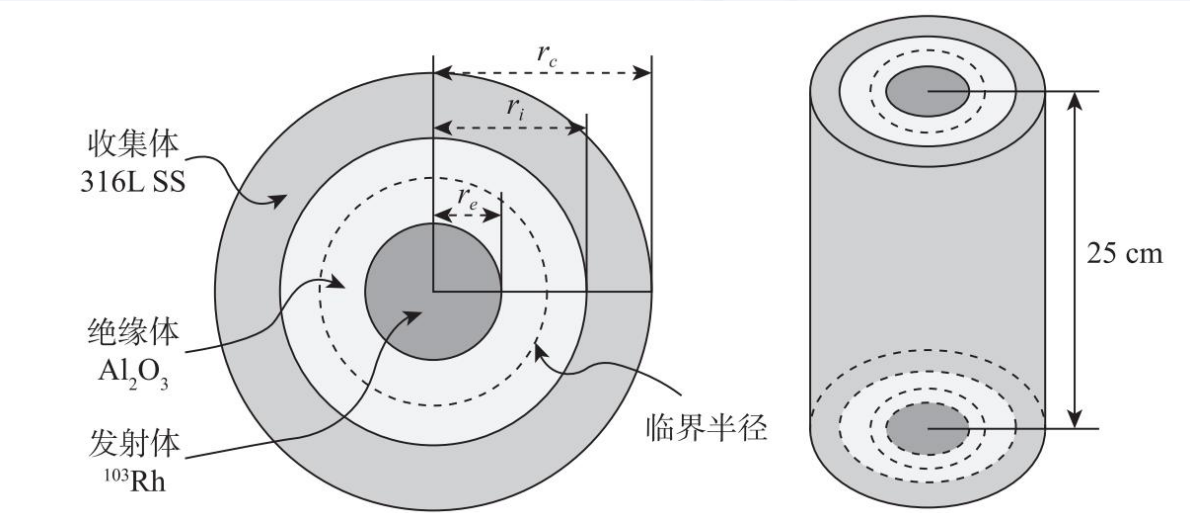
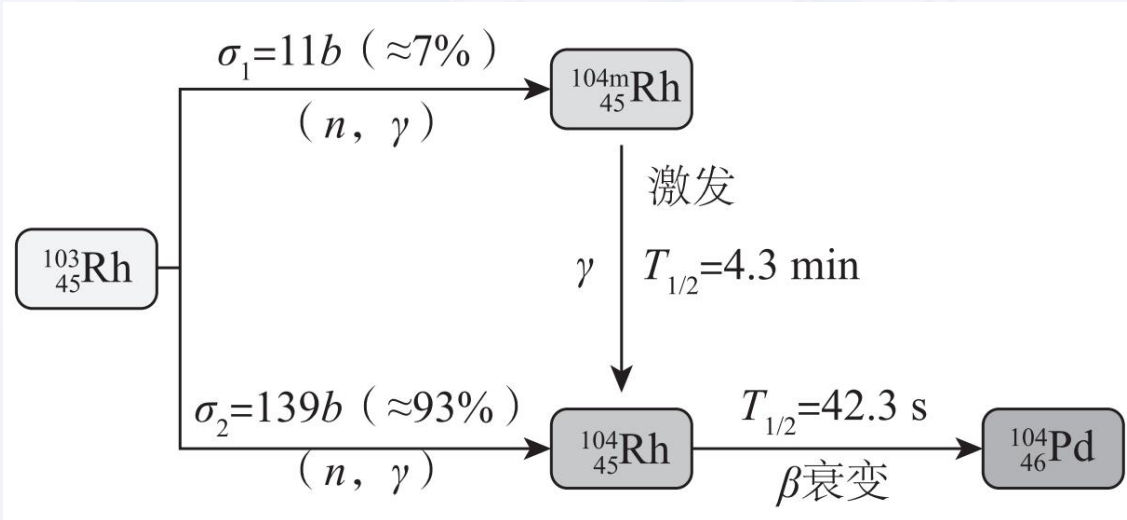
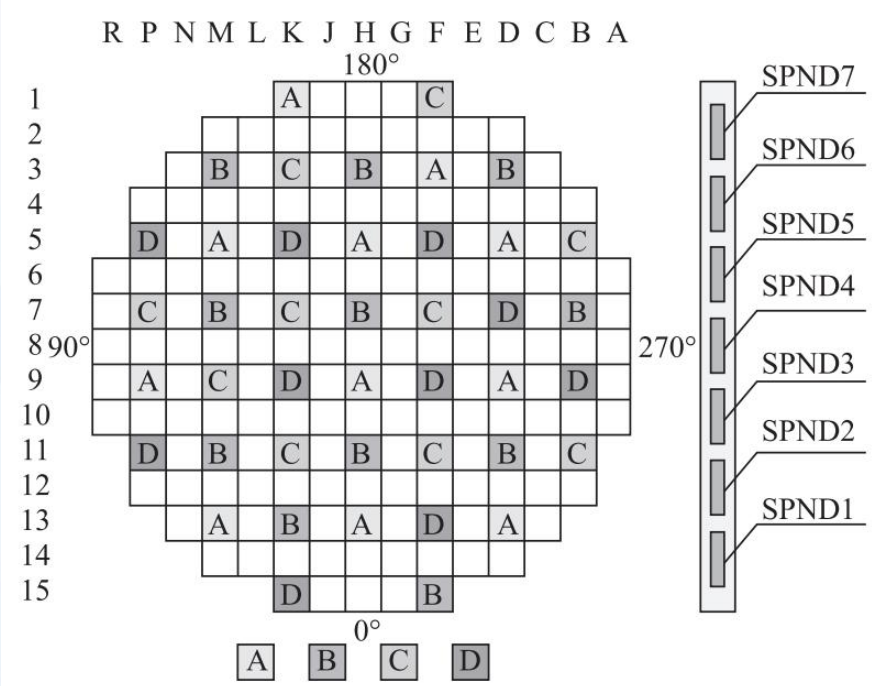
CDEX-1T @CJPL, 清华大学

- ❖ 中子核数据是核物理基础研究、核能开发与利用，以及核技术发展的基础数据。
 - 加速器驱动先进核裂变能、钍基熔盐堆系统、聚变堆、铅冷快堆等，追求的是更高的核燃料利用率、更少的核废料产生率、更高的安全性及更好的经济性等。
 - 上述新型核能系统的设计研发，需要大量的实验测量数据和评价数据的支撑。实验测量数据既可以用于研究靶堆相关材料的中子学特性，又可以检验工程设计所需核数据的可靠性。



- ❖ “华龙一号” 装载177个先进燃料组件，选取42个燃料组件对称布置铈SPND组件（7个），沿堆芯活性段等高分布
- ❖ ^{103}Rh 发射体是铈SPND的核心，决定了探测器的物理特征，铈SPND的信号电流可表示 I_{tot}

$$I_{\text{tot}} = I_n + I_\gamma$$
- ❖ I_n 中子电流，可进一步表示为 ^{103}Rh 中子俘获俘获反应 γ 射线产生的电流，以及 ^{104}Rh 贝塔衰变产生的电流



铈自给能中子探测器SPND

- ❖ 医用同位素，可提供人体分子水平血流、功能和代谢等信息，用于相关疾病的早期诊断
- ❖ 医用同位素，可利用其放射性杀伤病变组织，实现微小病灶的精准清除，达到较好的治疗效果

国家原子能机构
生态环境部
交通运输部
国家卫生健康委
国家医疗保障局
国家药品监督管理局

国原发〔2021〕2号

关于印发《医用同位素中长期发展规划
(2021-2035年)》的通知

各省、自治区、直辖市国防科技工业管理部门、科技厅（委、局）、

公安厅（局）、生态环境厅（局）、交通运输部（委、局）、卫生健康委、医保局、药品监督管理局，中国核工业集团有限公司、中国工程物理研究院，国家电力投资集团有限公司、中国广核集团有限公司，同位素与辐射行业协会、中华医学会核医学分会：
现将《医用同位素中长期发展规划（2021-2035年）》印发你们，请认真贯彻执行。

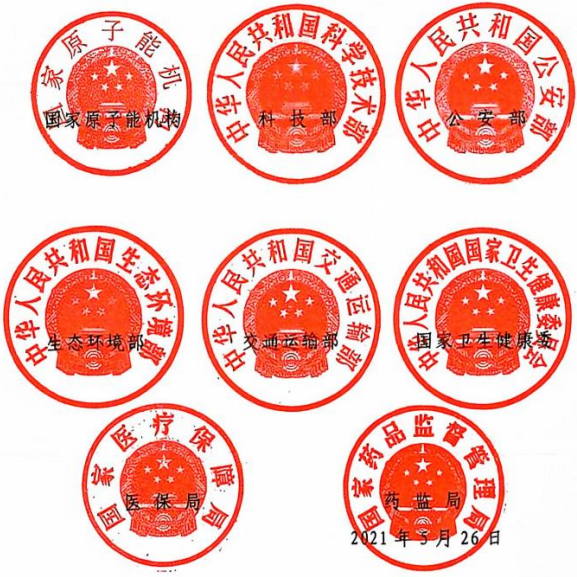
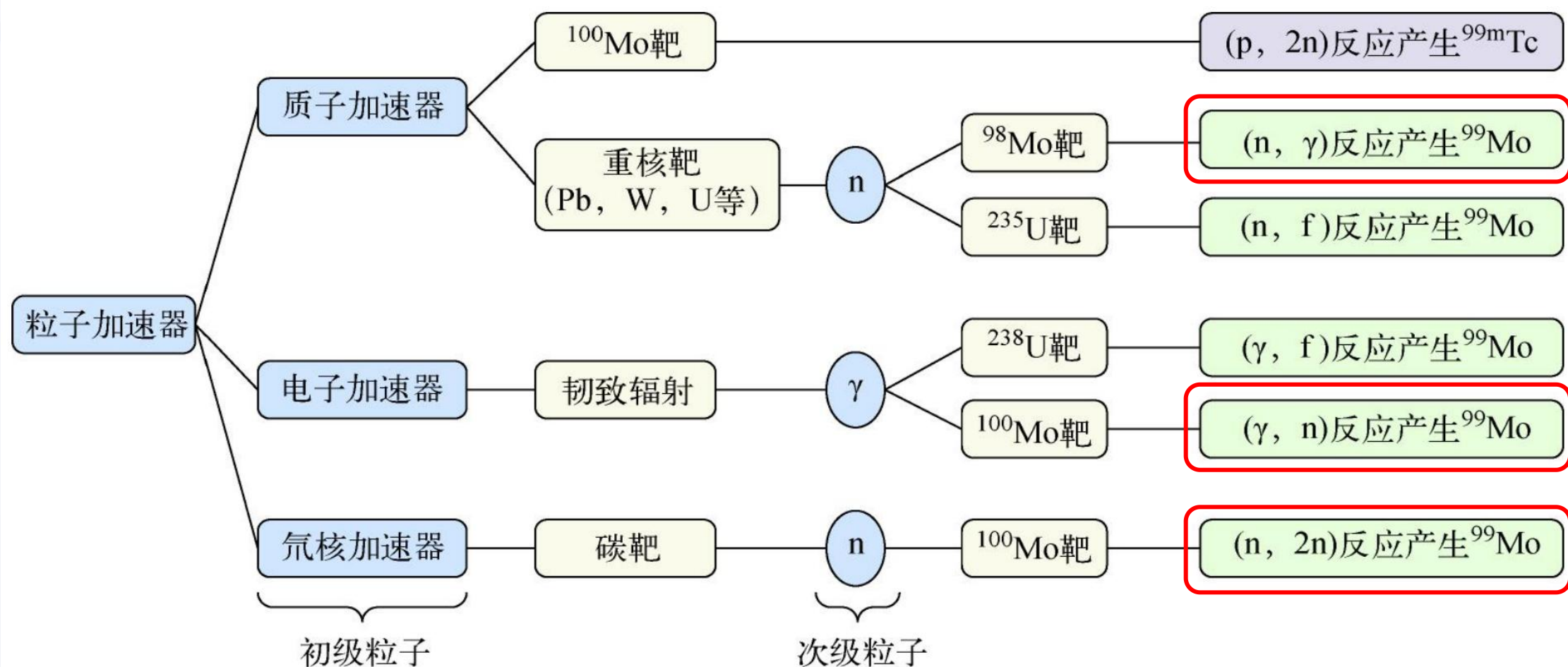


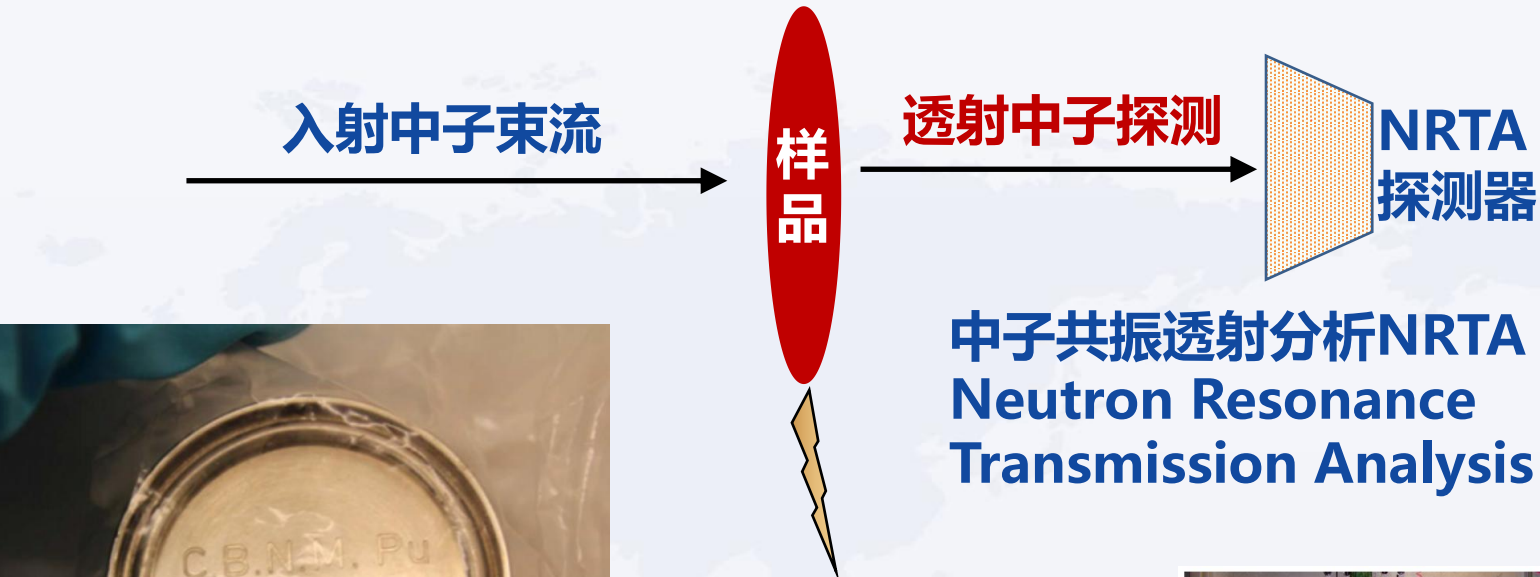
表 1.2 常用医用同位素一览表

序号	名称	半衰期	功能	生产方式	备注
1	钼-99/ 钨-99m	钼-99: 66 小时 钨-99m: 6 小时	用于心、脑、肾、肺等人体器官的 SPECT 显像。	反应堆 加速器	当前，钼-99 主要利用反应堆产生。
2	碘-125	60 天	用于癌症近距离放射性治疗和体外放射性免疫分析。	反应堆	
3	碘-131	8 天	用于甲亢和甲状腺癌的治疗。	反应堆	
4	碳-14	5730 年	用于制备呼吸试验药物及进行药代动力学研究。	反应堆	
5	锿-177	6.7 天	用于神经内分泌肿瘤与前列腺癌的靶向治疗。	反应堆	
6	氟-18	110 分钟	用于肿瘤、心肌、中枢神经系统、骨骼的 PET 显像。	加速器	
7	铱-90	64 小时	用于肝癌、肿瘤靶向、类风湿性关节炎及血液病的治疗。	发生器	
8	锶-89	50 天	用于癌症骨转移的治疗与疼痛缓解。	反应堆	

- ❖ 2009年，OECD/NEA医用同位素高级专家组就 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 生产替代方案给出了具体的指导意见，在多种技术路线中，通过粒子加速器生产 ^{99}Mo 或直接生产 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，因其易于审批与监管、无核扩散风险及建设与生产成本低等特点，被认为是缓解 ^{99}Mo 供应紧张的中长期选择。



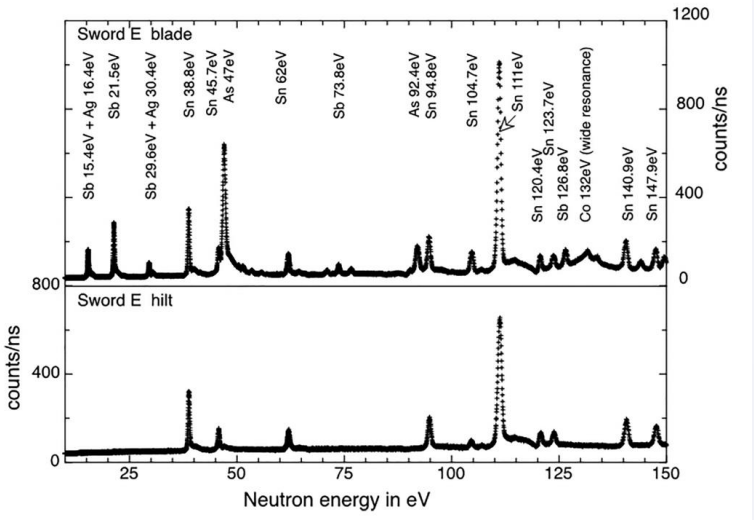
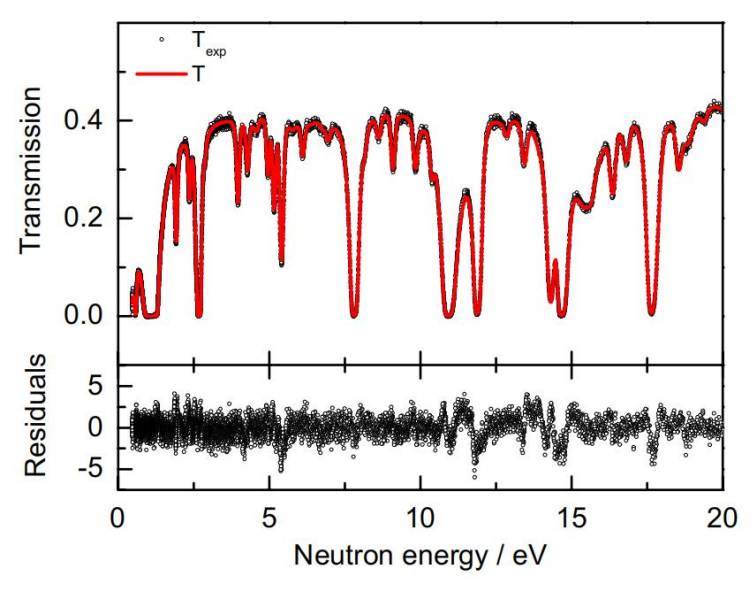
❖ 中子共振分析NRA基本原理：NRTA与NRCA无损检测分析



Nuclide	η_{NRTA}	η_{REF}	η_{NRTA}/η_{REF}
^{238}Pu	0.0098 ± 0.0002	0.00952	1.029 ± 0.020
^{239}Pu	0.625 ± 0.001	0.62602	0.999 ± 0.002
^{240}Pu	0.2625 ± 0.0002	0.25272	1.039 ± 0.001
^{241}Pu	0.0157 ± 0.0001	0.01564	1.007 ± 0.006
^{242}Pu	0.0398 ± 0.0001	0.04149	0.960 ± 0.002
^{241}Am	0.0632 ± 0.0001	0.0629	1.005 ± 0.001

中子俘获
瞬发伽马探测

中子共振俘获分析
Neutron Resonance
Capture Analysis
NRCA



中子无损检测：乏燃料与再生燃料检测分析 CiADS

Assessing the Feasibility of Using Neutron Resonance Transmission Analysis (NRTA) for Assaying Plutonium in Spent Fuel Assemblies

INMM 2012

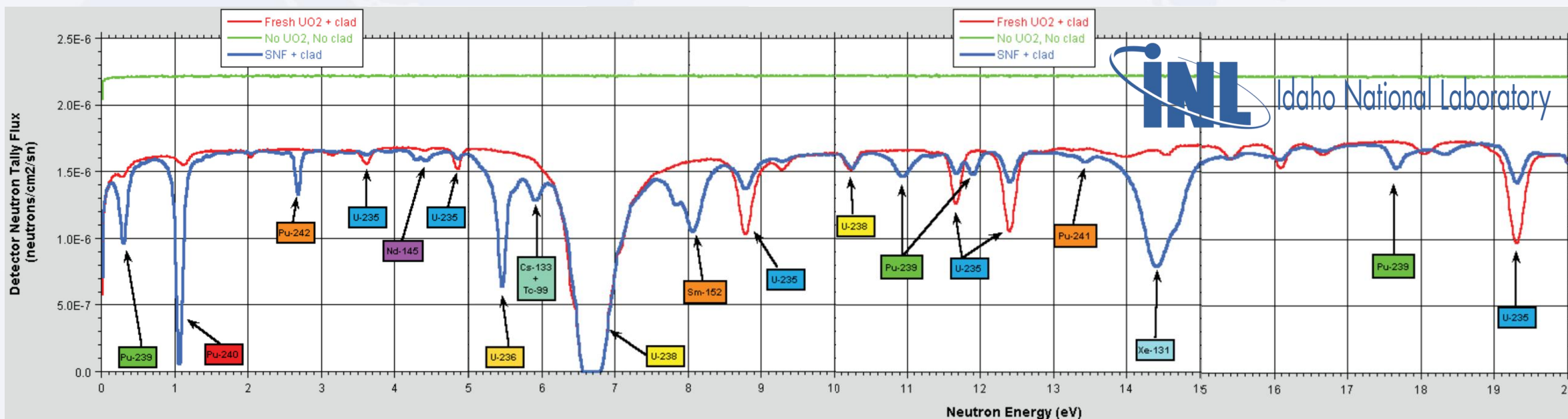
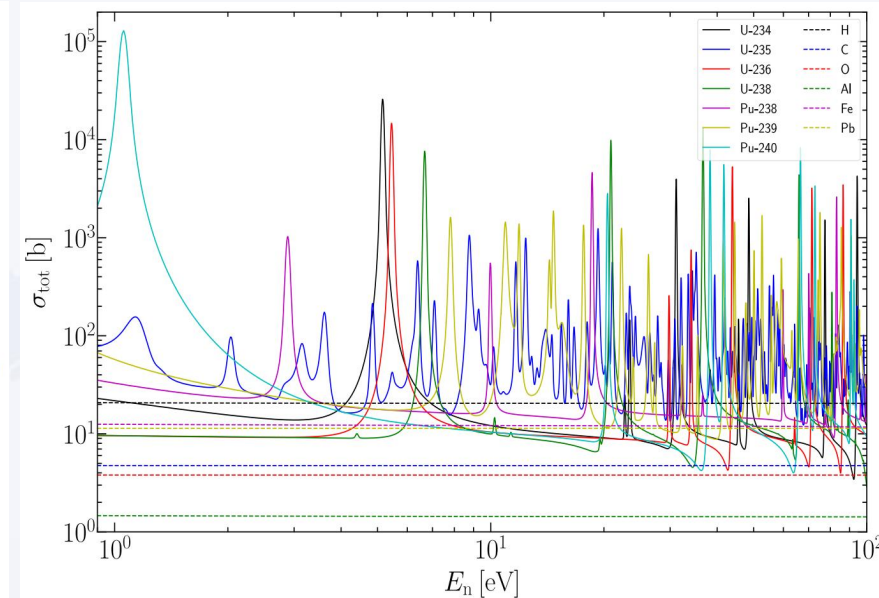
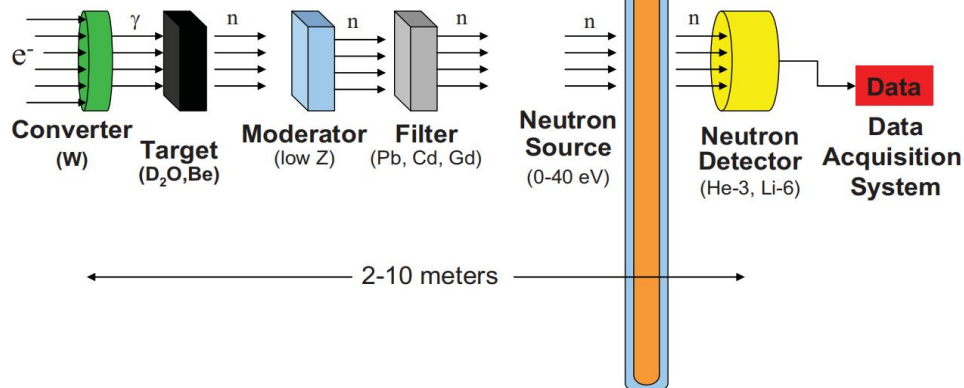
David L. Chichester
James W. Sterbentz

July 2012

INL/CON-12-24555
PREPRINT

Linear Electron Accelerator

(10-12 MeV, 5-500 nS, ≤ 800 Hz, Hi-current)

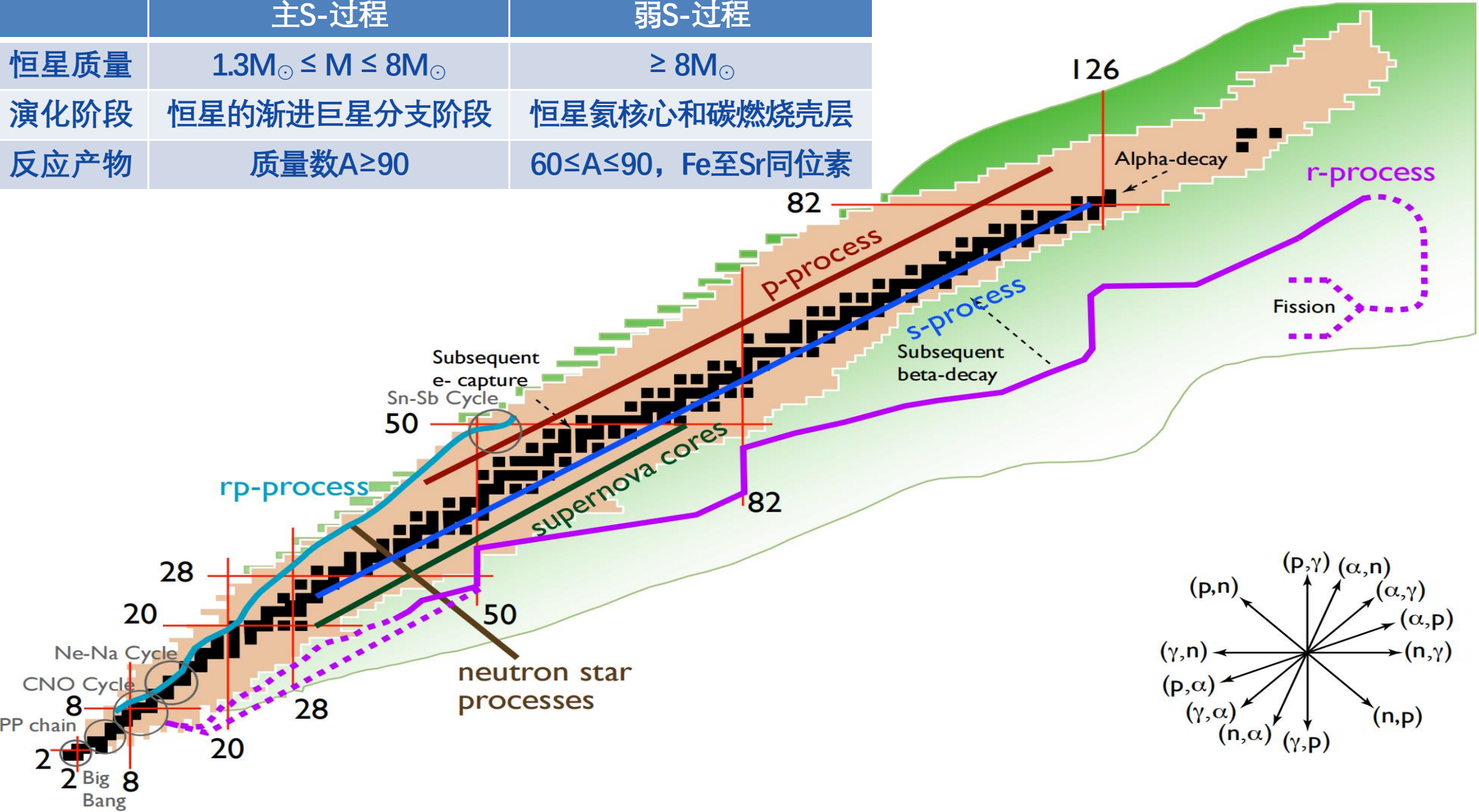


2

s-过程热核反应率直接测量研究

s-/r-过程：中子俘获反应截面的直接测量

	主S-过程	弱S-过程
恒星质量	$1.3M_{\odot} \leq M \leq 8M_{\odot}$	$\geq 8M_{\odot}$
演化阶段	恒星的渐进巨星分支阶段	恒星氦核心和碳燃烧壳层
反应产物	质量数 $A \geq 90$	$60 \leq A \leq 90$, Fe至Sr同位素



❖ 麦克斯韦反应截面MACS

$$\langle \sigma \rangle_{kT} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\int_0^\infty \sigma(E_n) E_n e^{-E_n/kT} dE_n}{\int_0^\infty E_n e^{-E_n/kT} dE_n}$$

■ $kT=5-100$ keV

❖ 天体物理反应率

$$N_A \langle \sigma v \rangle (kT) = N_A \times \text{MACS} \times v$$

❖ 实验截面直接测量

■ **1eV-1MeV截面数据**

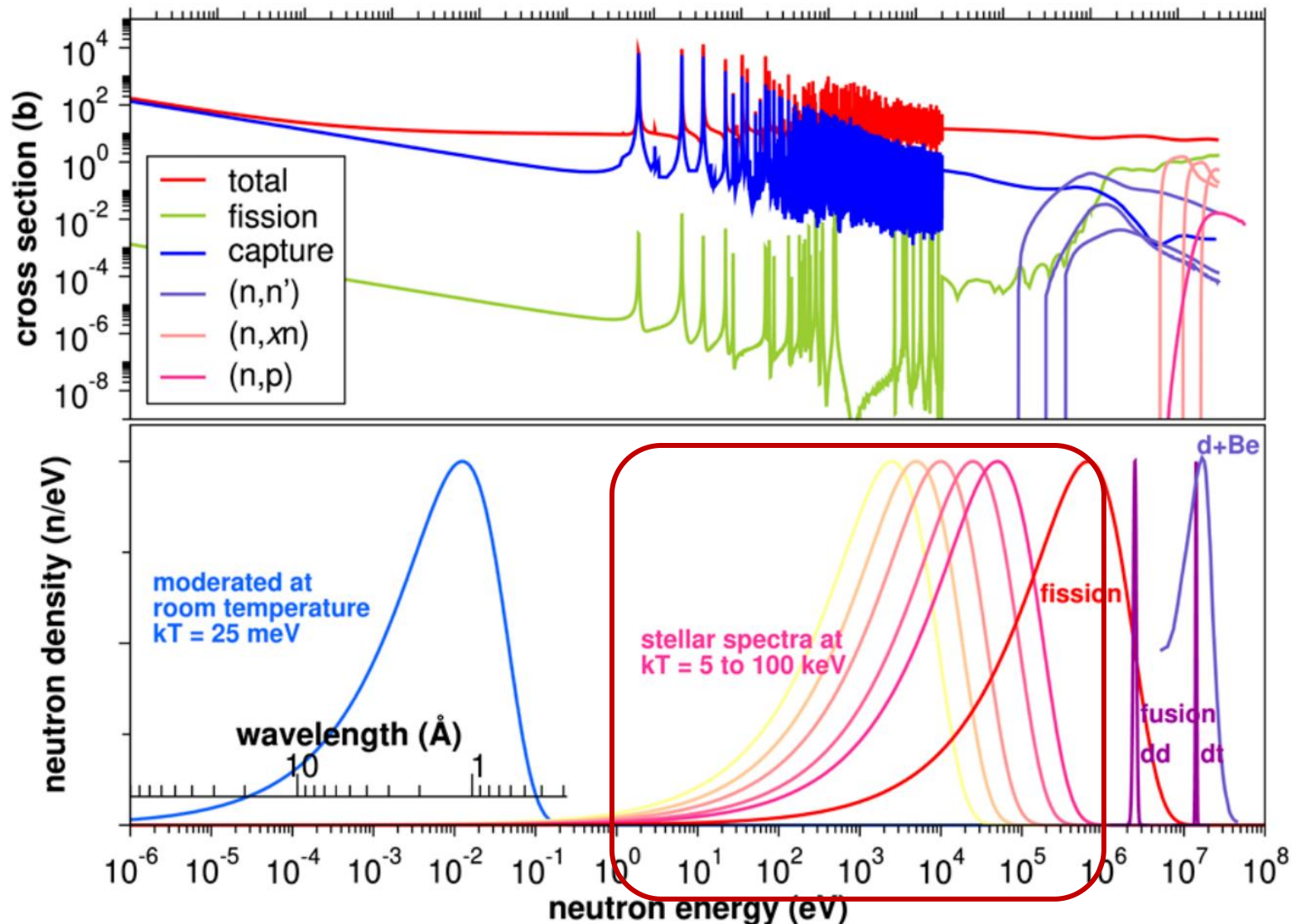
■ CSNS Back-n白光中子源

❖ 理论预测计算

■ 光学势

■ 能级密度 (Back-n)

■ 伽马强度函数 (SLEGS)



Monthly Notices
of the
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY
MNRAS **478**, 4101–4127 (2018)
Advance Access publication 2018 May 5
doi:10.1093/mnras/sty1185

Uncertainties in s-process nucleosynthesis in low-mass stars determined from Monte Carlo variations

Monthly Notices
of the
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY
MNRAS **469**, 1752–1767 (2017)
Advance Access publication 2017 March 22
doi:10.1093/mnras/stx696

Uncertainties in s-process nucleosynthesis in massive stars determined by Monte Carlo variations

Key rates	Nuclide main s-	$r_{\text{cor},0}$ main s-	Nuclide weak s-	$r_{\text{cor},0}$ weak s-
$^{72}\text{Ge}(n, \gamma)^{73}\text{Ge}$	^{72}Ge	−0.93	^{72}Ge	−0.85
$^{74}\text{Ge}(n, \gamma)^{75}\text{Ge}$	^{74}Ge	−0.97	^{74}Ge	−0.44
$^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$	^{75}As	−0.86	^{75}As	−0.50
$^{78}\text{Se}(n, \gamma)^{79}\text{Se}$	^{78}Se	−0.96	^{78}Se	−0.71
$^{84}\text{Kr}(n, \gamma)^{85}\text{Kr}$	^{84}Kr	−0.99	^{84}Kr	−0.49
$^{85}\text{Kr}(n, \gamma)^{86}\text{Kr}$	^{86}Kr	0.88	^{86}Kr	0.84

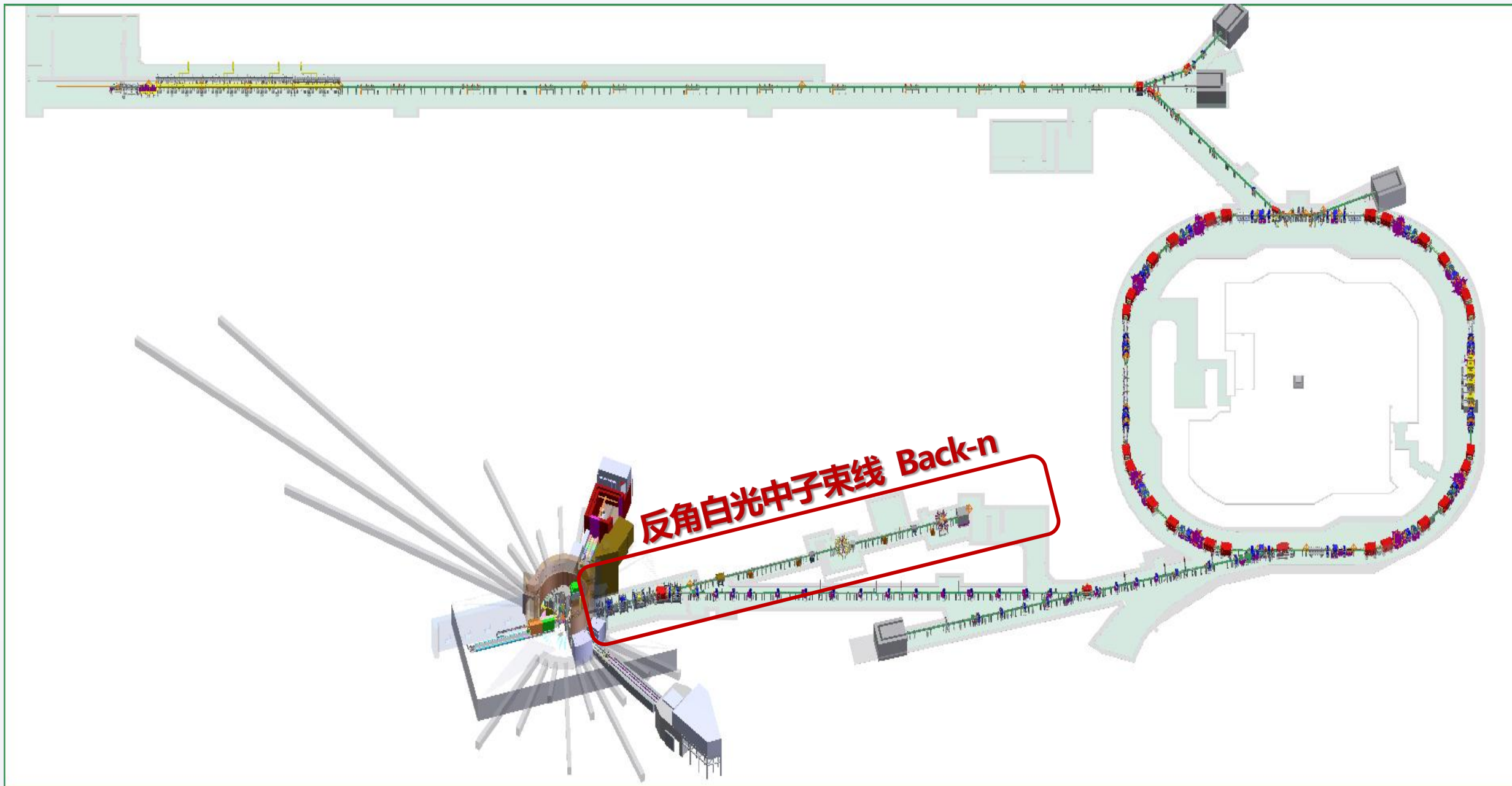
Table 9. Uncertainty and key reactions of *es*-process elements ($z \leq 4$). The columns are the same as Table 8.

Element	Up	Down	r_{cor}	Key reaction
Cu	1.15	0.893	−0.66	$^{65}\text{Cu}(n, \gamma)^{66}\text{Cu}$
Zn	1.30	0.892	−0.90	$^{68}\text{Zn}(n, \gamma)^{69}\text{Zn}$
Ga	1.12	0.930	−0.79	$^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ga}$
Ge	1.29	0.849	−0.74	$^{72}\text{Ge}(n, \gamma)^{73}\text{Ge}$
As	1.33	0.940	−0.97	$^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$
Se	1.53	0.901	−0.74	$^{78}\text{Se}(n, \gamma)^{79}\text{Se}$
Br	1.45	0.823	−0.80	$^{81}\text{Kr}(n, \gamma)^{82}\text{Kr}$
Kr	1.18	0.871		
Rb	1.19	0.874		
Sr	1.16	0.879		
Y	1.21	0.841		
Zr	1.20	0.785		
Nb	1.36	0.760		
Mo	1.31	0.778		
Ru	1.39	0.791		
Rh	2.39	0.756	−0.85	$^{103}\text{Rh}(n, \gamma)^{104}\text{Rh}$
Pd	1.37	0.748		
Ag	1.49	0.744		
Cd	1.35	0.757		
In	2.83	0.776	−0.85	$^{113}\text{In}(n, \gamma)^{114}\text{In}$
Sn	1.36	0.751		
Sb	1.82	0.738	−0.71	$^{121}\text{Sb}(n, \gamma)^{122}\text{Sb}$
Te	1.40	0.731		
I	1.74	0.721	−0.69	$^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}$
Xe	1.46	0.754		
Cs	1.52	0.730		
Ba	1.43	0.781		
La	1.49	0.820		
Ce	1.34	0.853		
Pr	1.30	0.815		
Nd	1.22	0.864		

s-/r-过程：中子俘获反应截面的直接测量

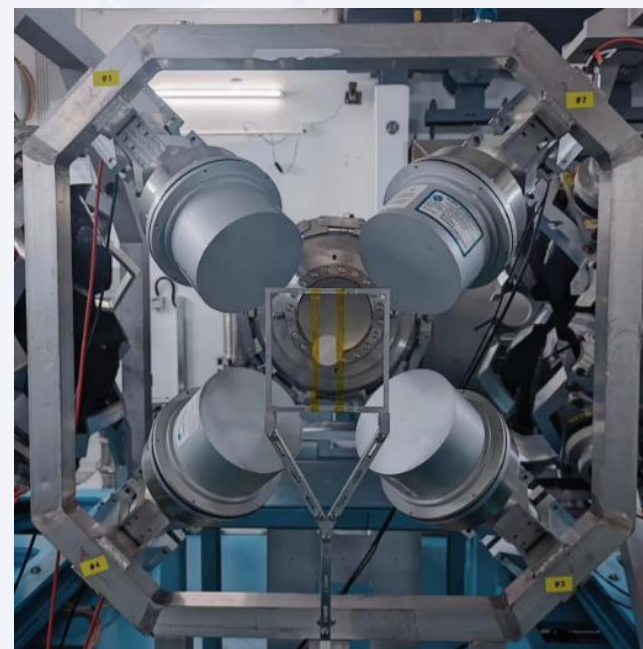
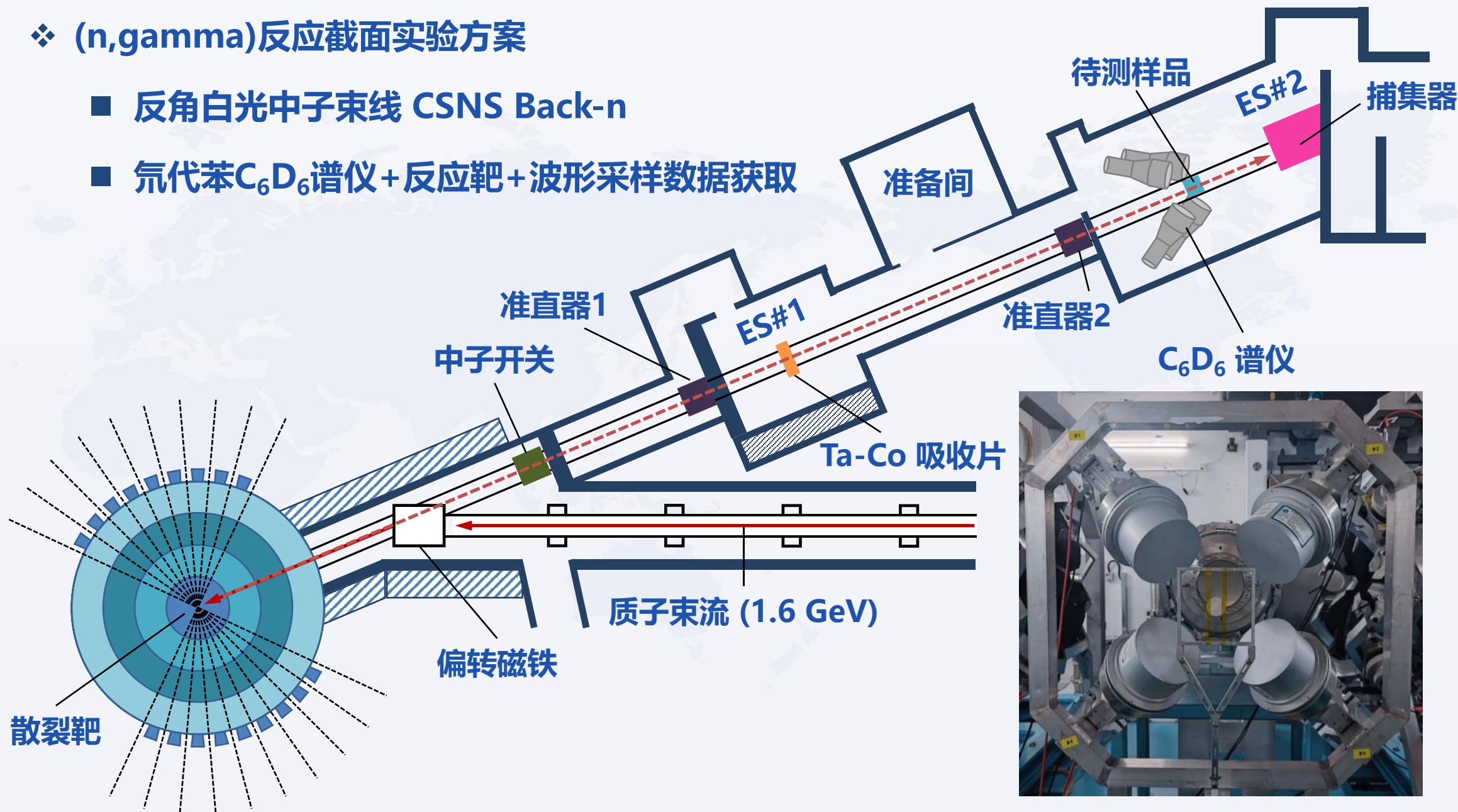


中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



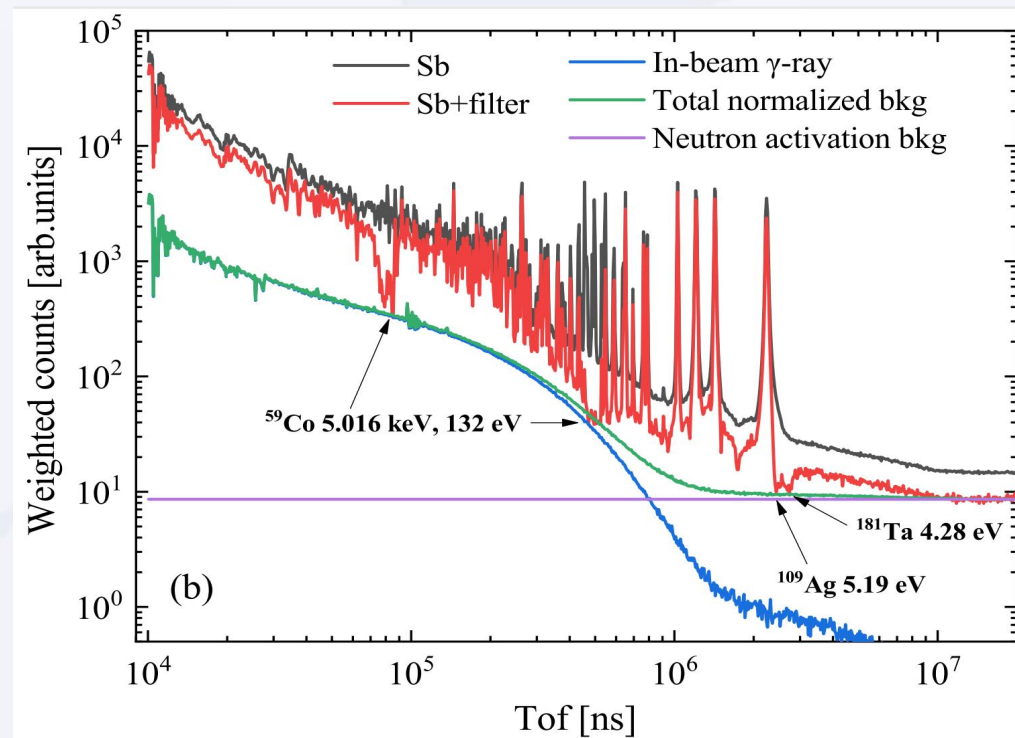
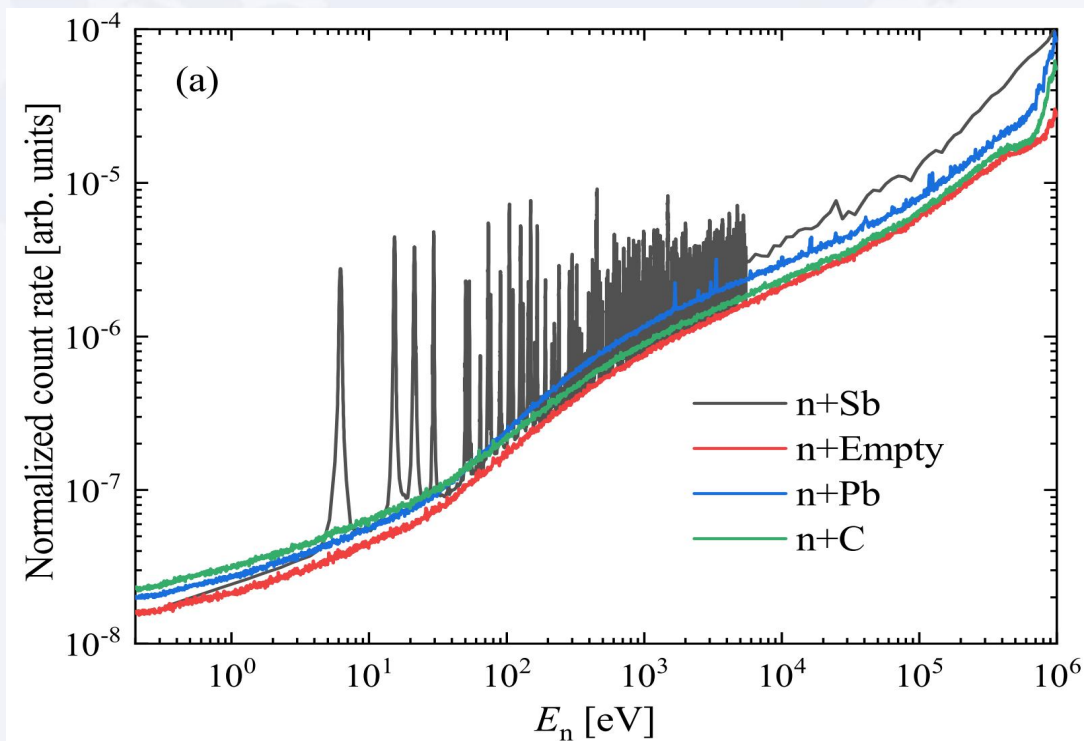
❖ (n,gamma)反应截面实验方案

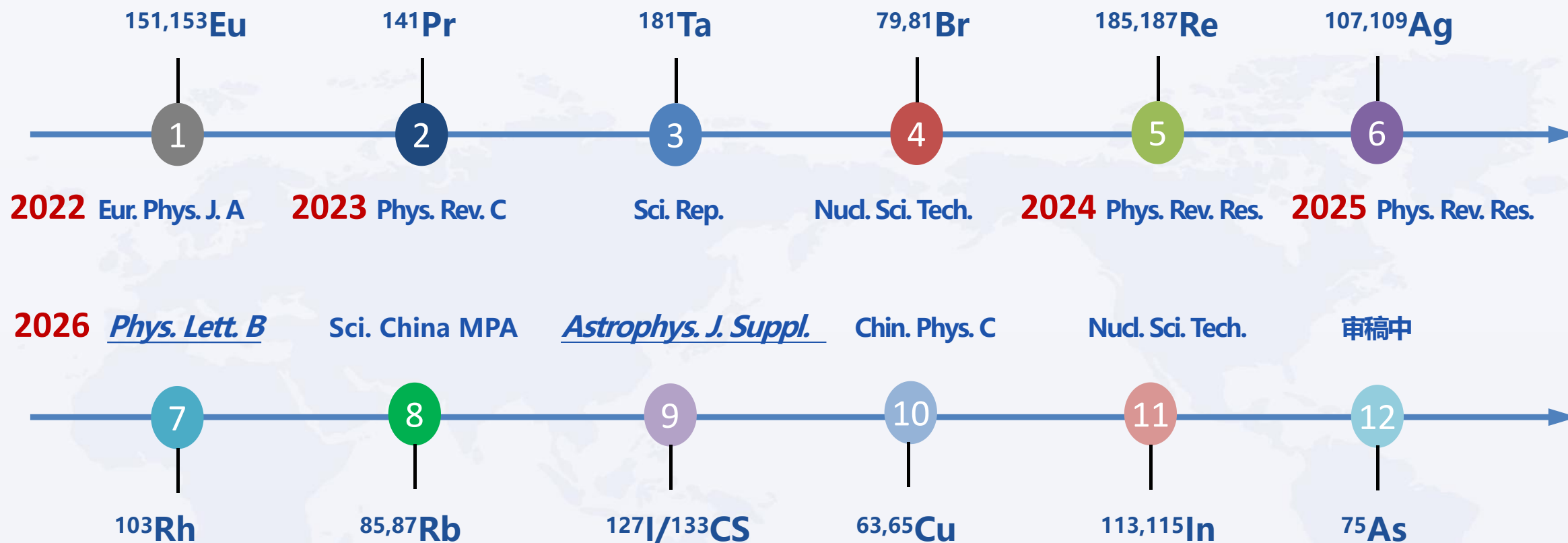
- 反角白光中子束线 CSNS Back-n
- 氘代苯 C_6D_6 谱仪+反应靶+波形采样数据获取



❖ 实验中测量了无束流环境本底、有束流空靶、碳靶，Pb靶本底谱。

- 环境散射中子引起的伽马本底 (有束流空靶, ☑)
- 实验靶散射的中子引起的伽马本底 (有束流碳C靶, ☑)
- 在束伽马本底, 主要影响80eV-100keV部分本底 (有束流铅Pb靶, ☑)
- Ta,Co,Ag吸收片确定最终的本底 (黑色共振技术, ☑)





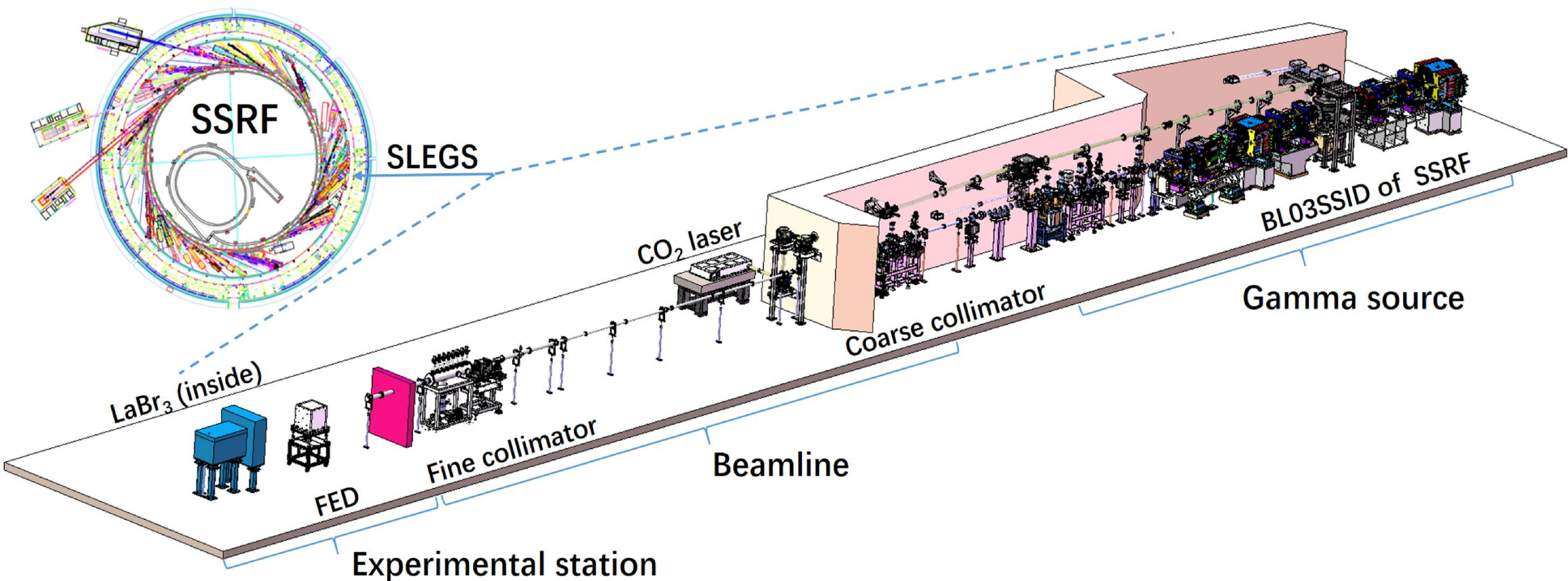
❖ 国家自然科学基金

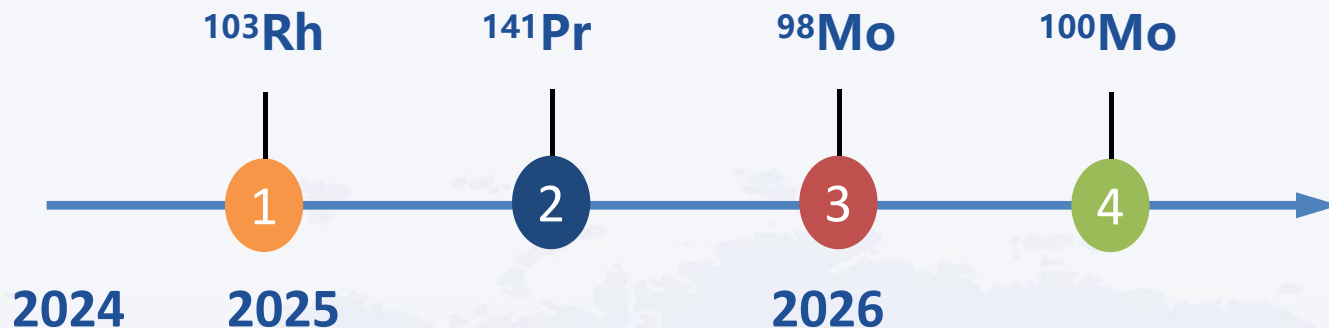
- 面上项目, 天体与先进核能关注能区 $^{182,186}\text{W}$ 中子俘获反应截面高精度测量, 2025.01-2028.12
- 联合基金, 基于CSNS双中子星并合引力波电磁信号 $^{151,153}\text{Eu}(n, \gamma)$ 反应的研究, 2019.01-2021.12

❖ SLEGS线站：逆康普顿效应产生能量连续可调的伽马束线

■ 伽马光能量：0.66-21.1 MeV（改变激光入射角）；能量分辨：<5%；通量： 10^5 - 10^7 photons/s

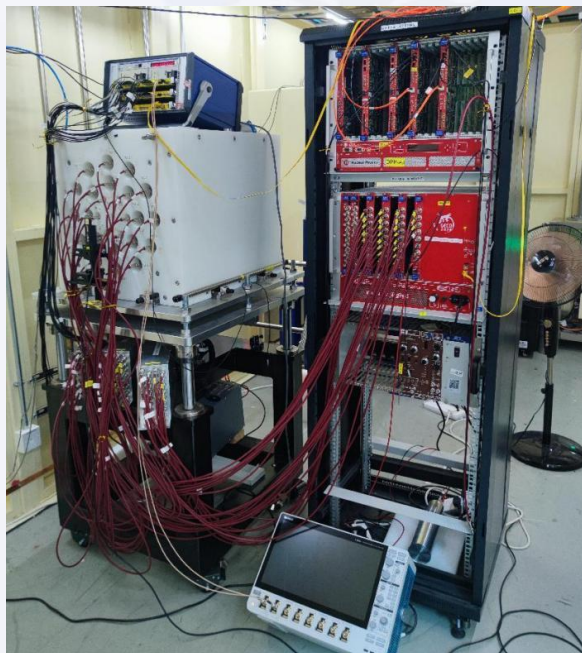
❖ 光中子(γ, n)反应截面在线测量： ^3He 平坦效率探测阵列FED



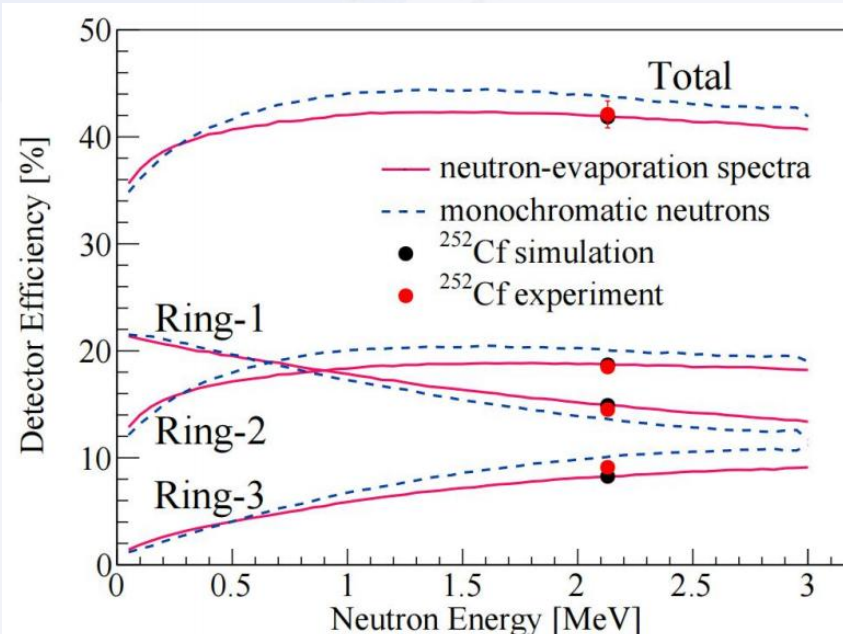


^{103}Rh : Phys. Lett. B. 872, 140105 (2026)

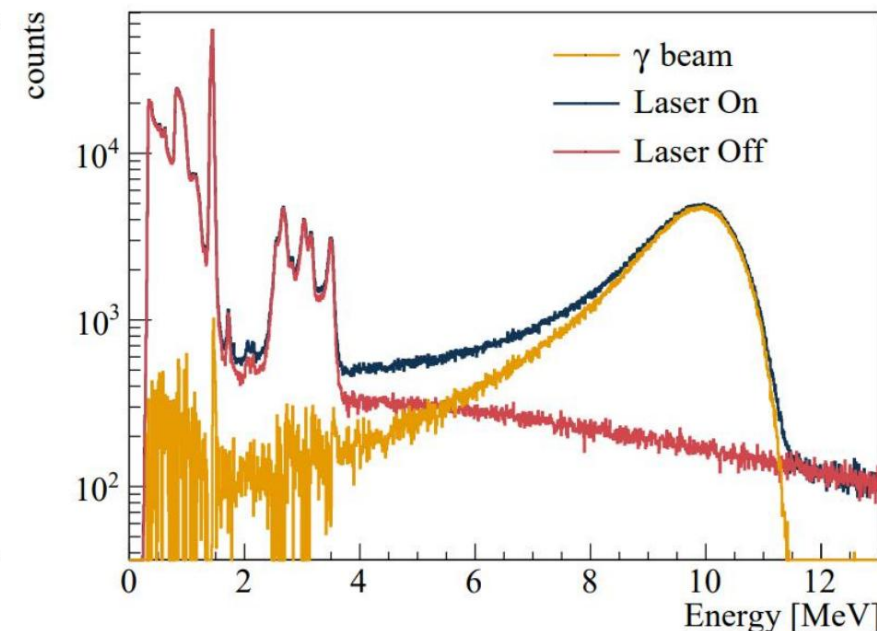
^{141}Pr : Astronomy & Astrophysics, 708, A86 (2026)



^3He 平坦探测器



^3He 平坦探测器效率



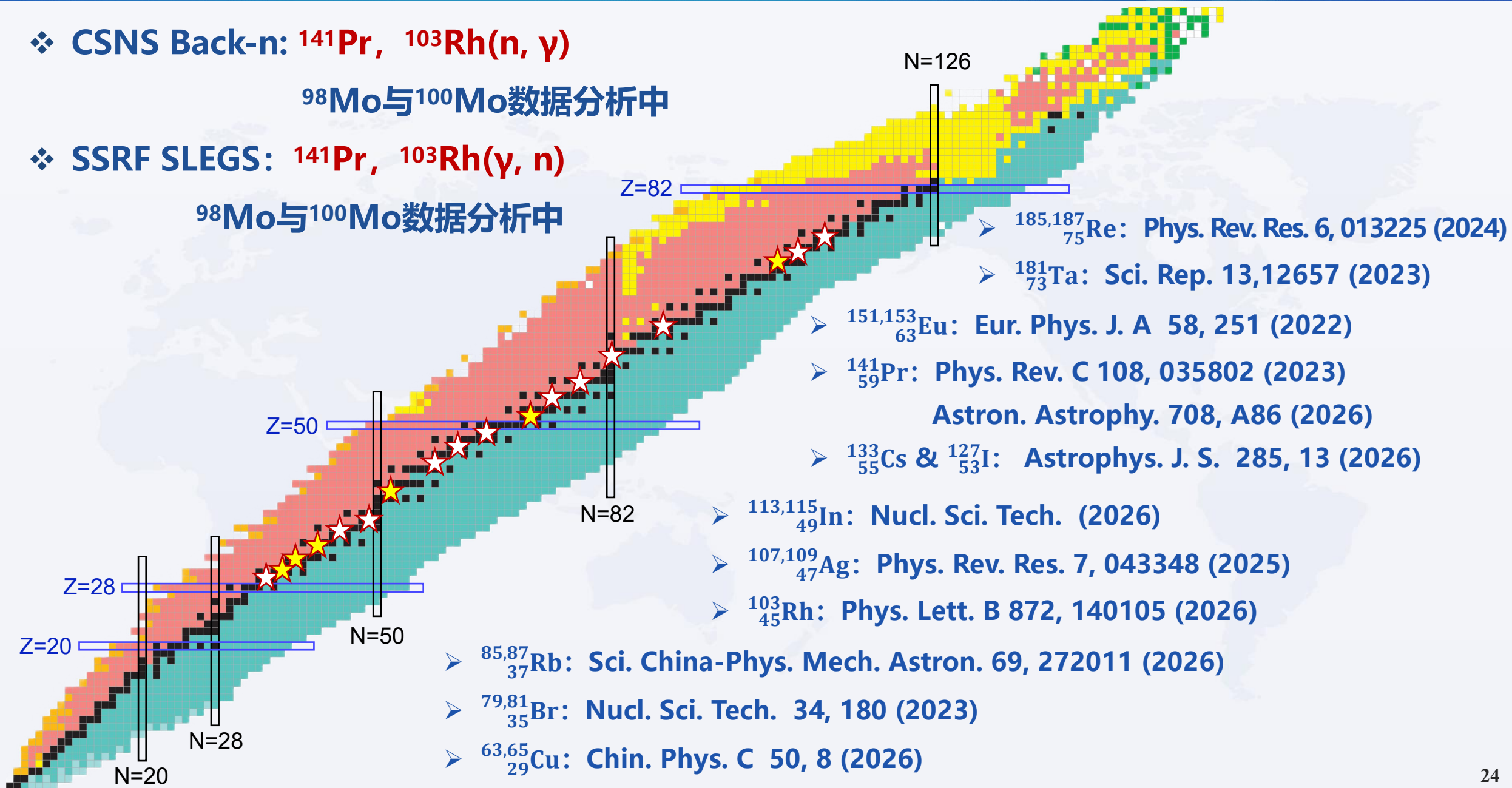
LaBr_3/BGO 监测伽马能谱

❖ CSNS Back-n: ^{141}Pr , $^{103}\text{Rh}(n, \gamma)$

^{98}Mo 与 ^{100}Mo 数据分析中

❖ SSRF SLEGS: ^{141}Pr , $^{103}\text{Rh}(\gamma, n)$

^{98}Mo 与 ^{100}Mo 数据分析中

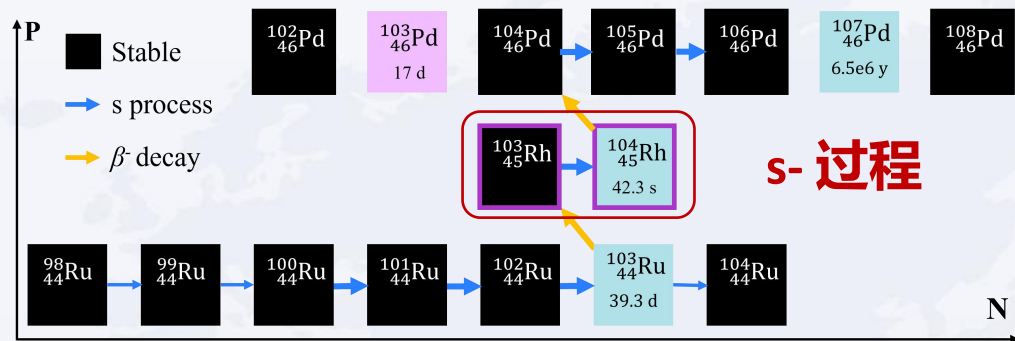


3

近年来的代表性工作介绍

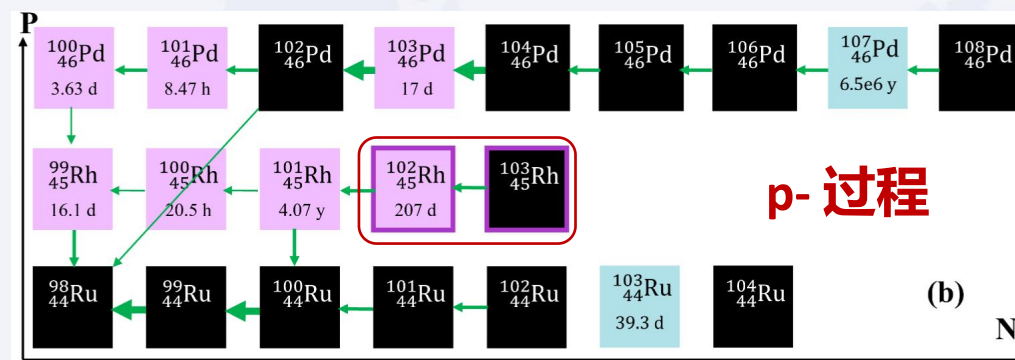
❖ $^{103}\text{Rh}(n,\gamma)$ 反应

■ 直接影响s-过程 ^{103}Rh 与 ^{104}Pd 的丰度



❖ $^{103}\text{Rh}(\gamma,n)$ 反应

■ 影响p核 ^{98}Ru 的丰度



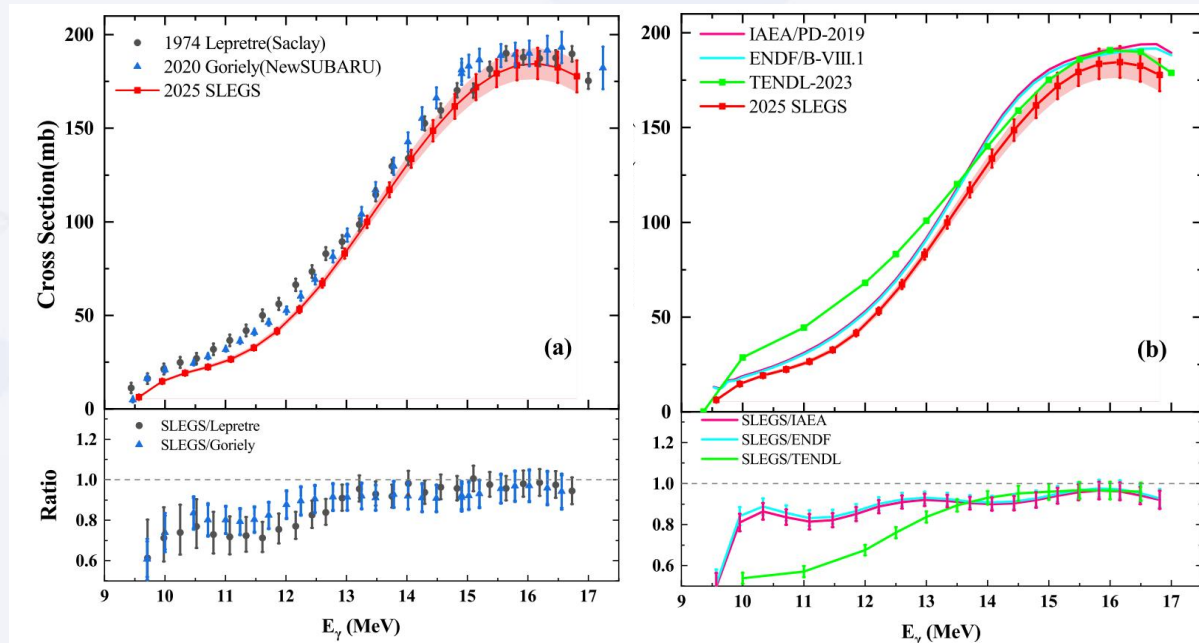
❖ CSNS Back-n束线: $^{103}\text{Rh}(n,\gamma)$ 反应

■ 直接测量给出1eV-1MeV能区的截面

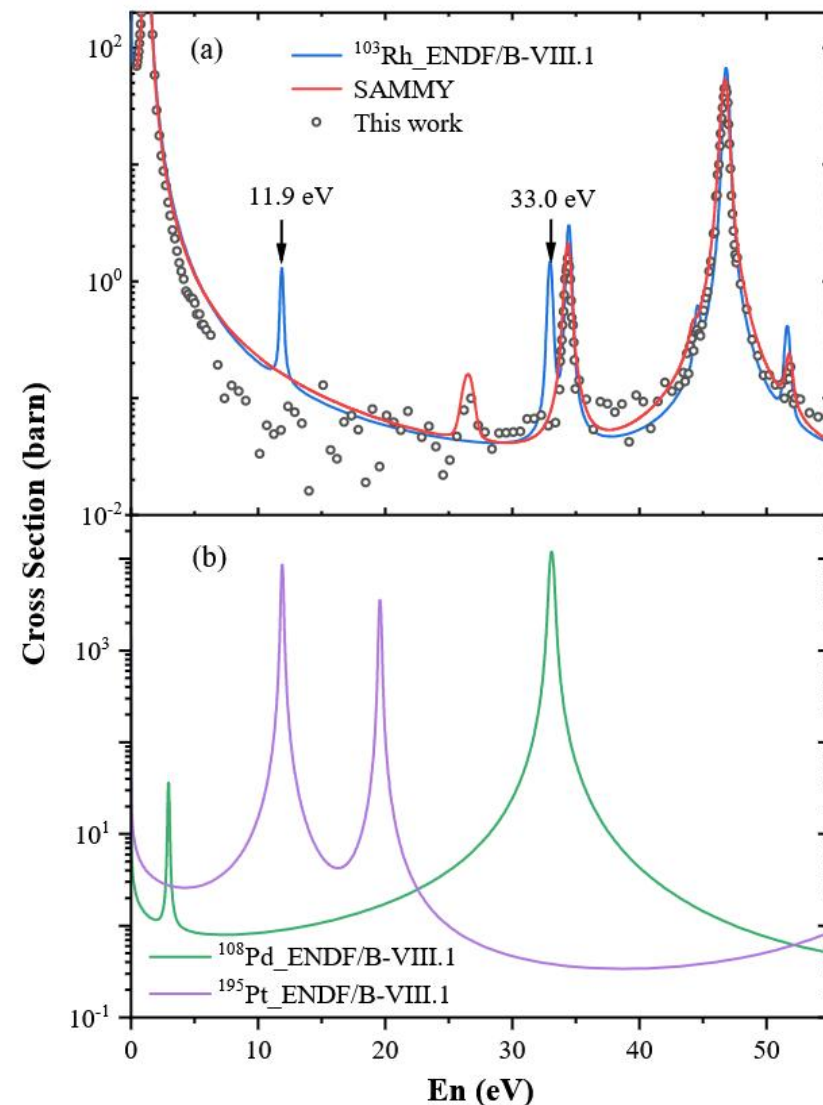
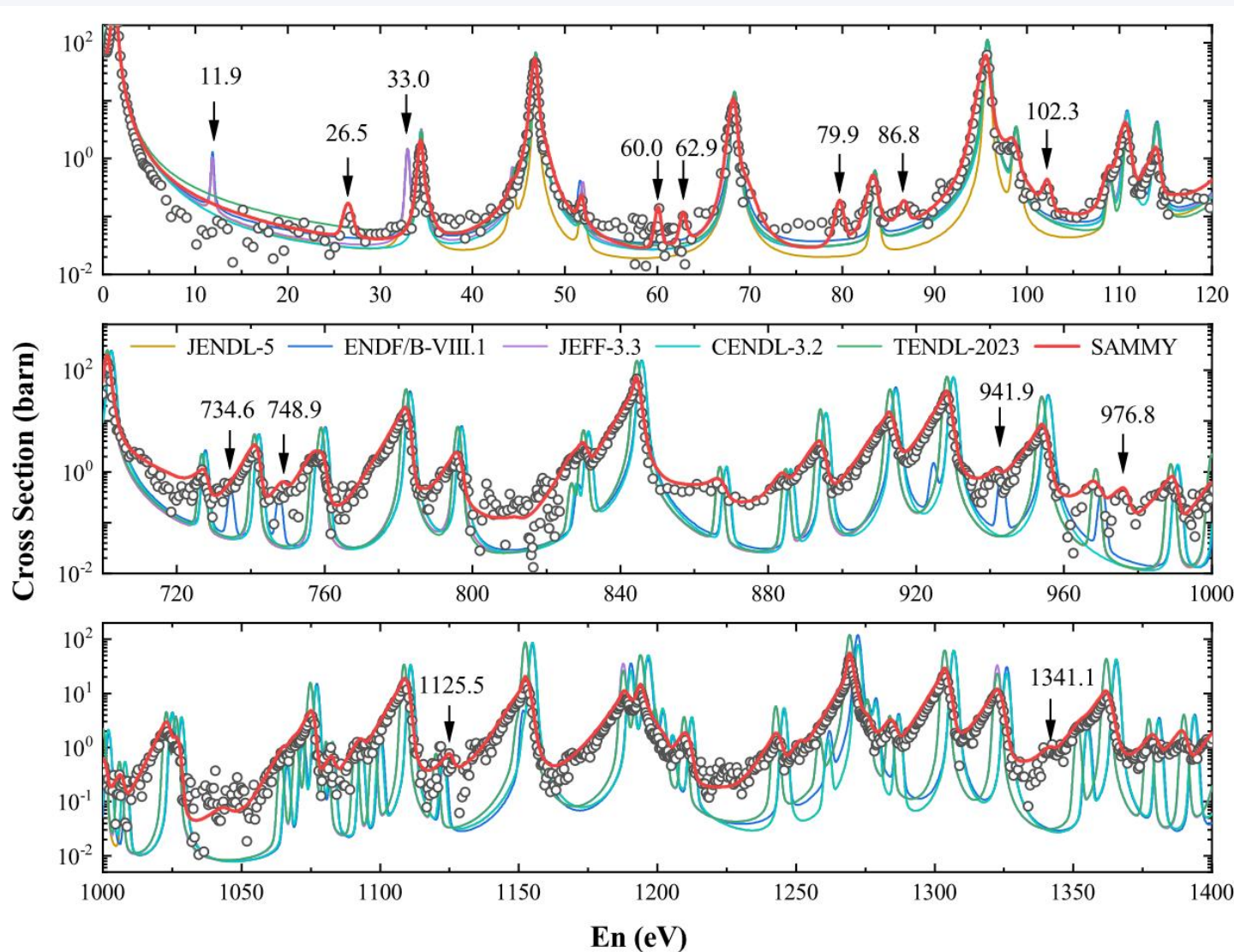
❖ SSRF SLEGS线站: $^{103}\text{Rh}(\gamma,n)$ 反应

■ 直接测量给出S1n-S2n能区反应截面

❖ Phys. Lett. B 872, 140105 (2026)



❖ 共振能区：1-3000eV， 排除了评价库中2个共振峰(铂族元素杂质)， 新发现了8个新的共振结

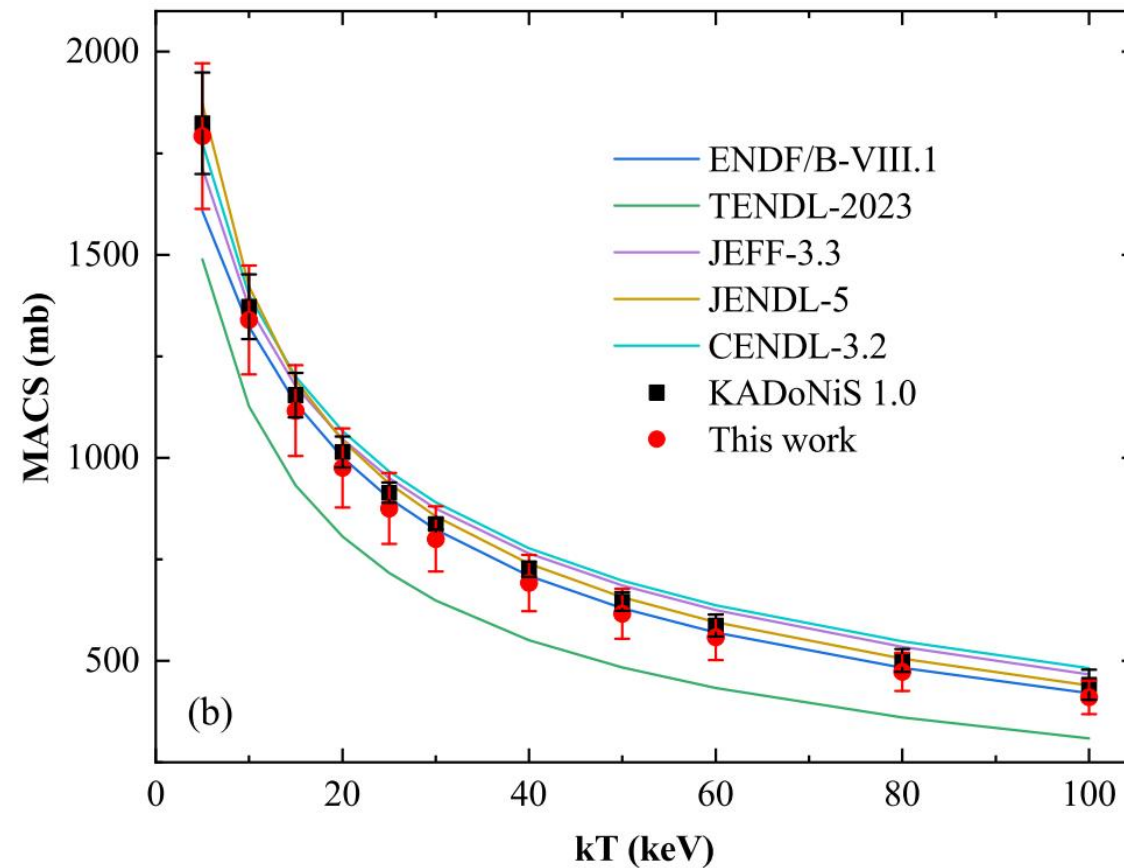
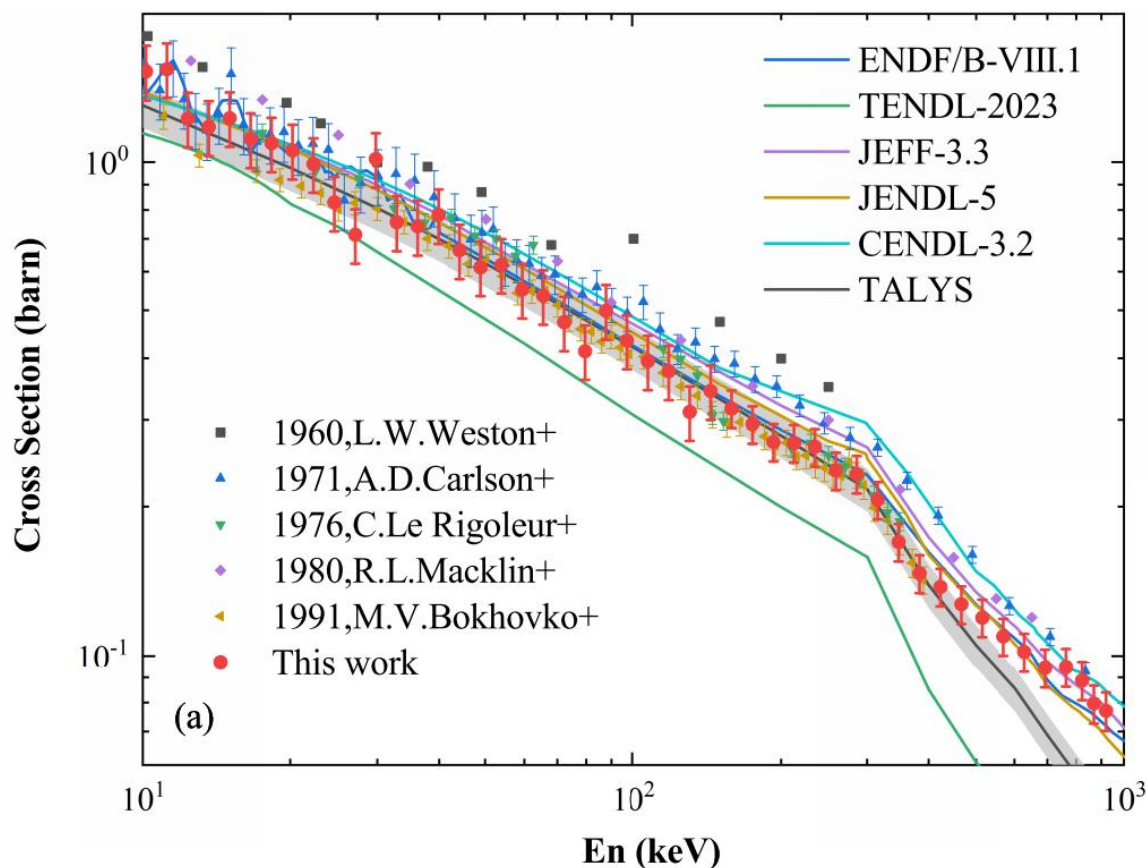


Direct measurement of the $^{103}\text{Rh}(n, \gamma)$ and $^{103}\text{Rh}(\gamma, n)$ cross section up to stellar temperatures at the CSNS Back-n and SSRF SLEGS

Hao Liang ^{ID a,b}, Zhen-Dong An ^{ID a,c,d,*}, Wei Jiang ^{ID e,f}, Zi-Rui Hao ^{ID g,h}, Chen-Chen Guo ^{ID b,*},
Yu-Gang Ma ^{ID c,d,*}, Jie Ren ^{ID i}, Xi-Chao Ruan ^{ID i}, Jing-Yu Tang ^{ID j}, Rui-Rui Fan ^{ID e,f},
Gong-Tao Fan ^{ID g,h}, Hong-Wei Wang ^{ID g,h}, Wen-Qing Shen ^{ID g,h}, Yu-Bing Li ^{ID a,k},
Jun-Heng Hu ^{ID a,b}, Di Sun ^{ID a,l}, Ting Liu ^{ID a,b}, Zi-Jun Liu ^{ID a,b}, Yi Sui ^{ID a,m}

$$\langle \sigma \rangle_{kT} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\int_0^\infty \sigma(E_n) E_n e^{-E_n/kT} dE_n}{\int_0^\infty E_n e^{-E_n/kT} dE_n}$$

$$N_A \langle \sigma v \rangle (kT) = N_A \times \text{MACS} \times v$$

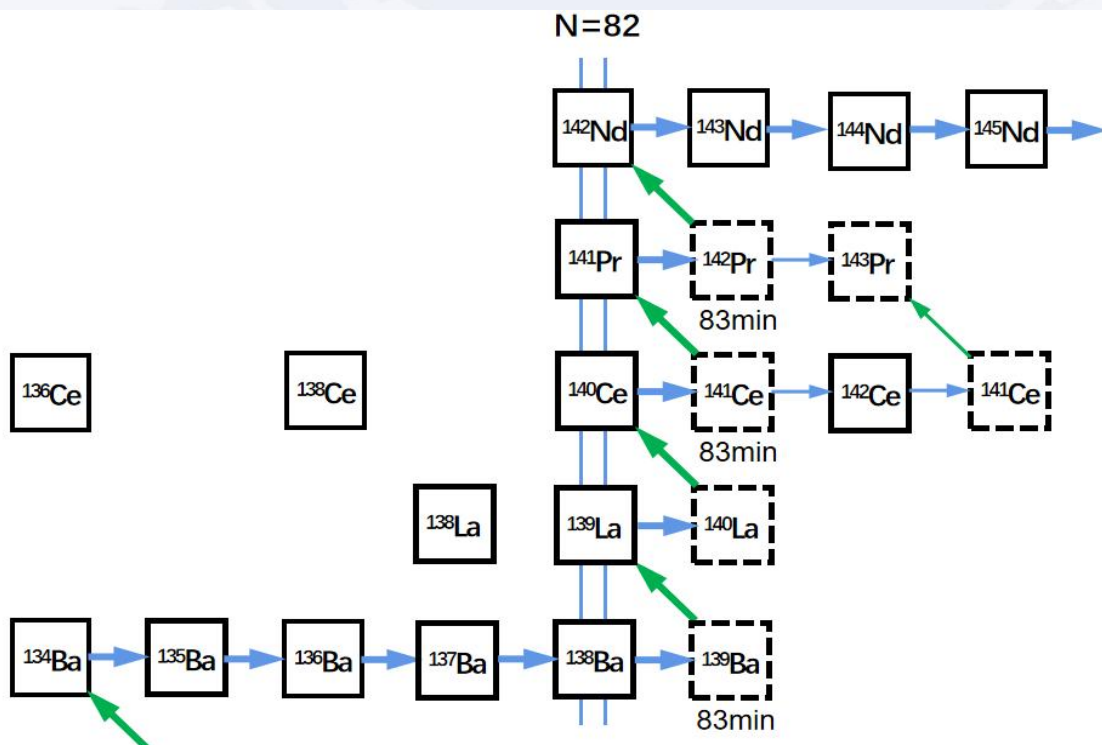
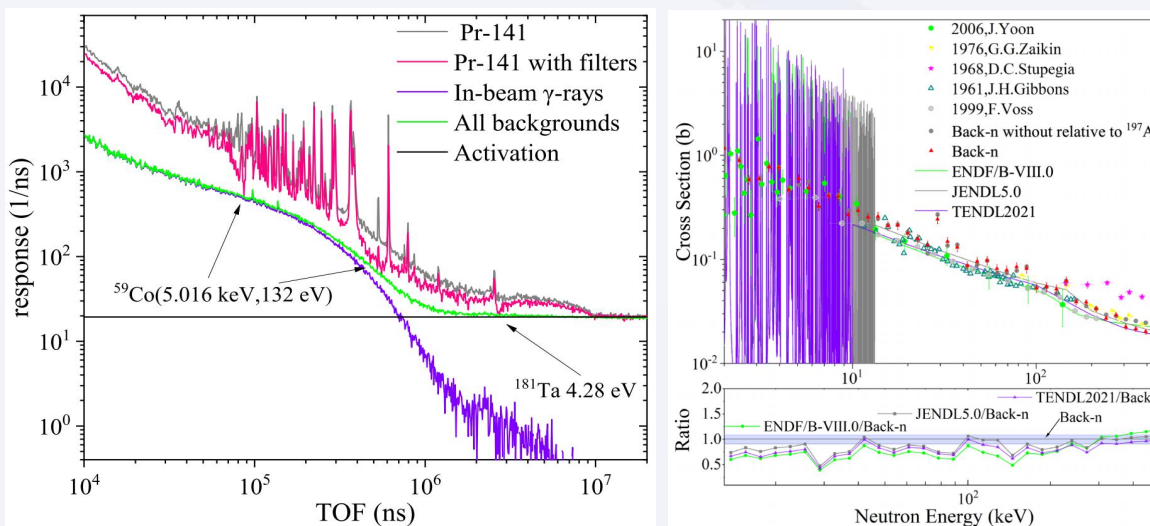
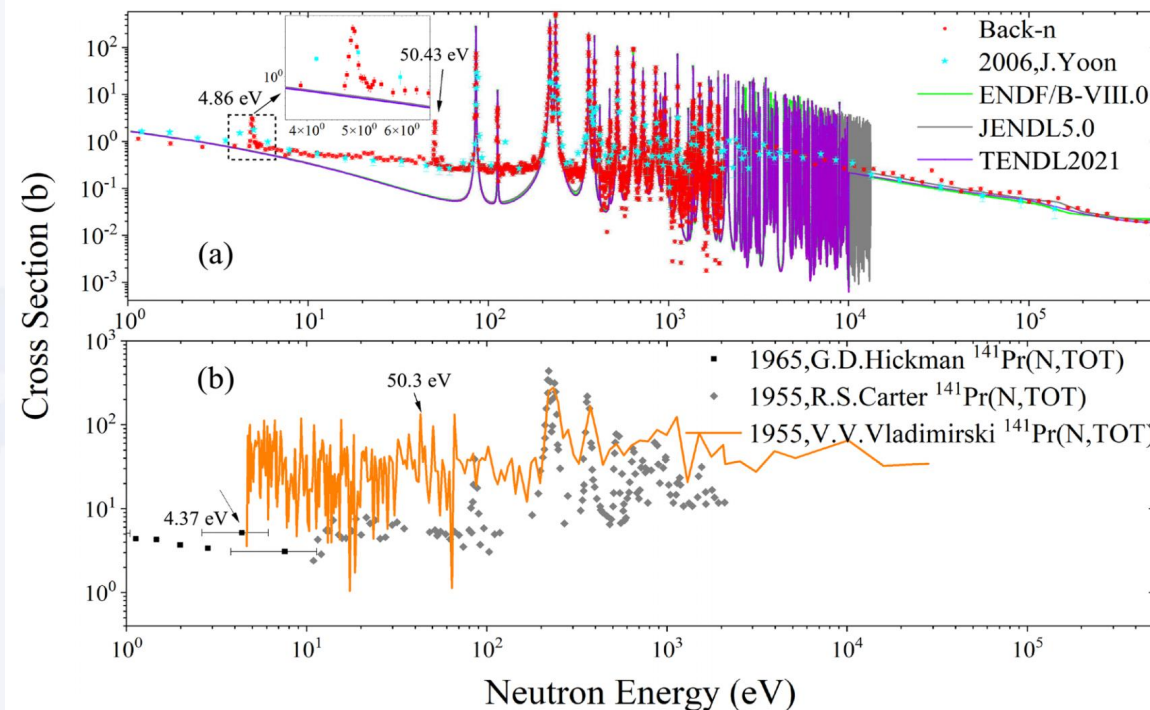


❖ Physical Review C 108, 035802 (2023)

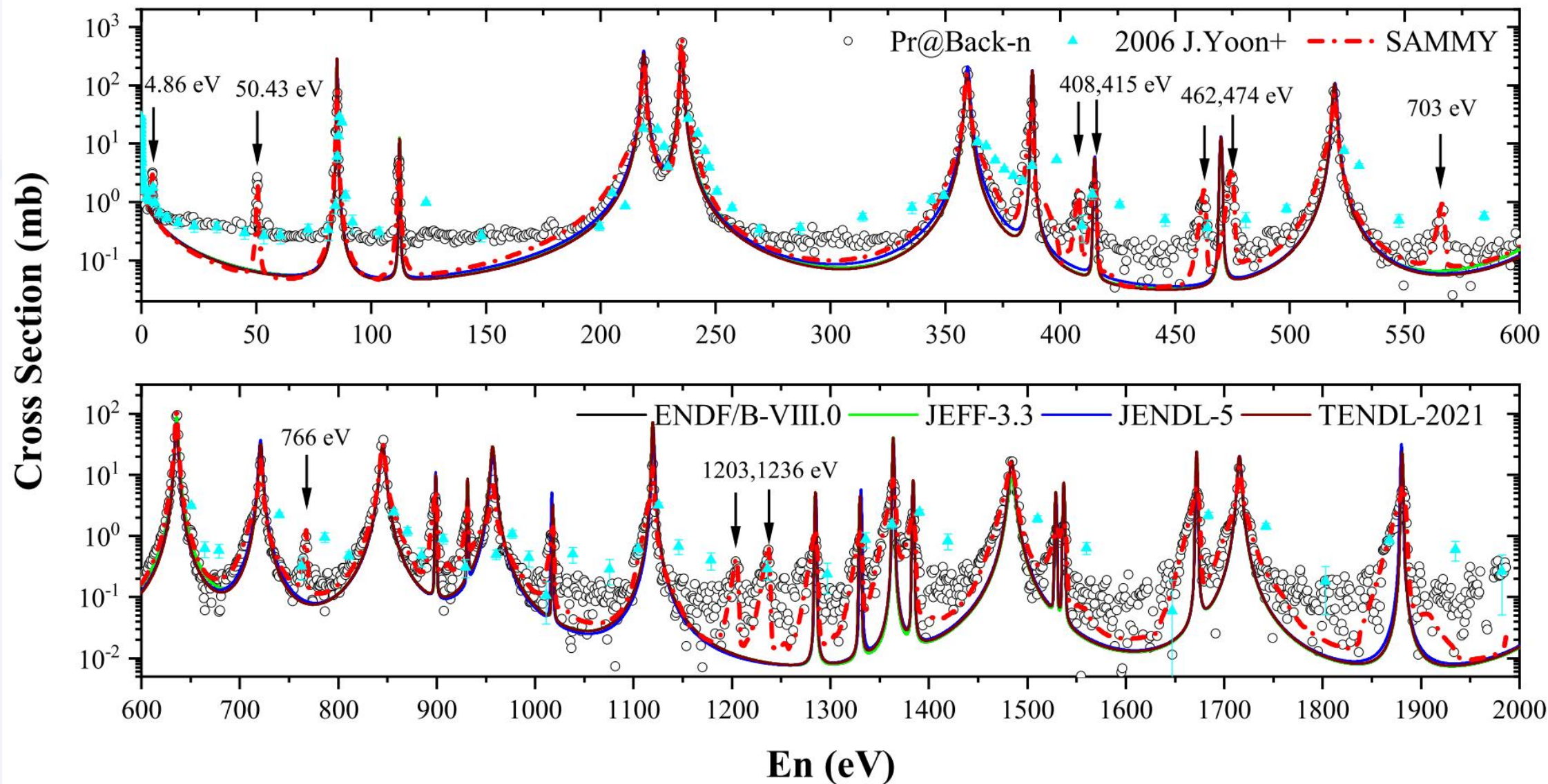
PHYSICAL REVIEW C 108, 035802 (2023)

Measurement of the $^{141}\text{Pr}(n, \gamma)$ cross section up to stellar s -process temperatures at the China Spallation Neutron Source Back-n facility

Xiankai Li,^{1,2} Zhendong An,^{2,3,4,5,*} Wei Jiang,^{6,7} Jingyi Zhang,² Ruoran Bai,² Shaokun Liu,² Xinxiang Li,^{1,3,8,†} Zhichao Zhu,^{1,‡} Gaole Yang,² Weiwei Qiu,^{9,4,5} Zhengfa Liao,^{9,4,5} Ziyue Zhuang,^{9,4,5} Xiaoping Zhang,^{4,5} Shengli Chen,⁹ Chenchen Guo,⁹ Erxi Xiao,⁹ Xiao Fang,⁹ Hongwei Wang,^{3,8,10} Xinrong Hu,^{3,8} Bing Jiang,^{3,8} Wenqing Shen,^{3,10} Jincheng Wang,¹¹ Jie Ren,¹¹ Xichao Ruan,¹¹ Wen Luo,¹ Haoyang Lan,^{1,12,13} Zongwei Cao,¹ Xu Ma,^{14,11} Yingdu Liu,¹⁴ Pusen Wang,¹⁴ Yi Yang,¹⁵ Ping Su,¹⁵ Xiangai Deng,¹⁵ Wanbing He,¹⁵ Yugang Ma,^{15,3} Chunwang Ma,^{16,17} Yuting Wang,^{16,17} Zhitao Dai,¹⁸ Ertao Li,¹⁹ Pengqin He,² RenGuang Tang,² Tao Zhou,² Jing Wang,² Han Yi,^{6,7} Yue Zhang,^{6,7} Yonghao Chen,^{6,7} Ruirui Fan,^{6,7} Keqing Gao,^{6,7} Qiang Li,^{6,7} Kang Sun,^{6,7} Zhixin Tan,^{6,7} Minhao Gu,^{6,7} Hantao Jing,^{6,7} and Jingyu Tang,^{6,7}
(CSNS Back-n Collaboration)

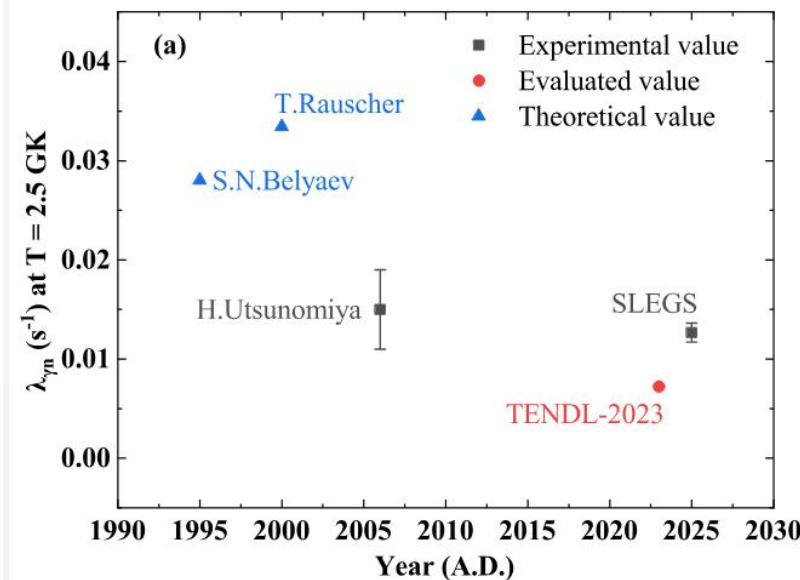
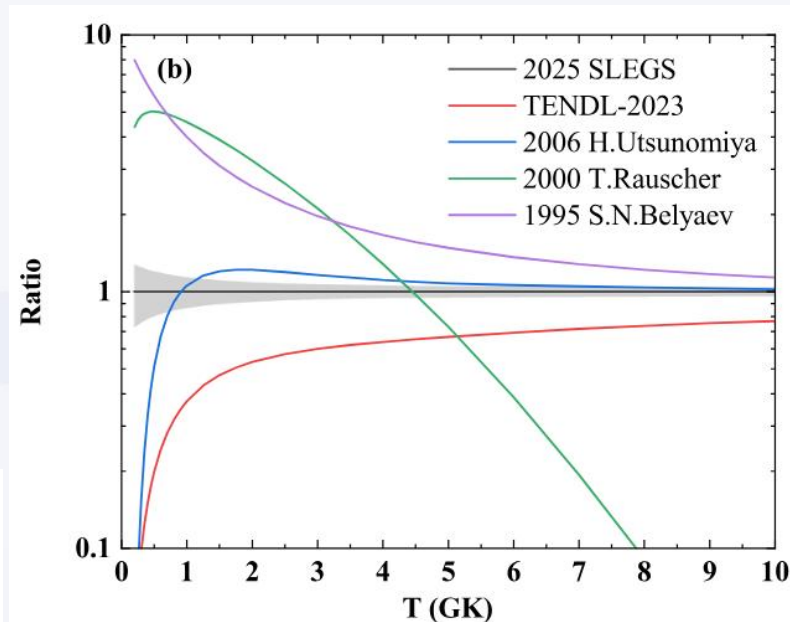
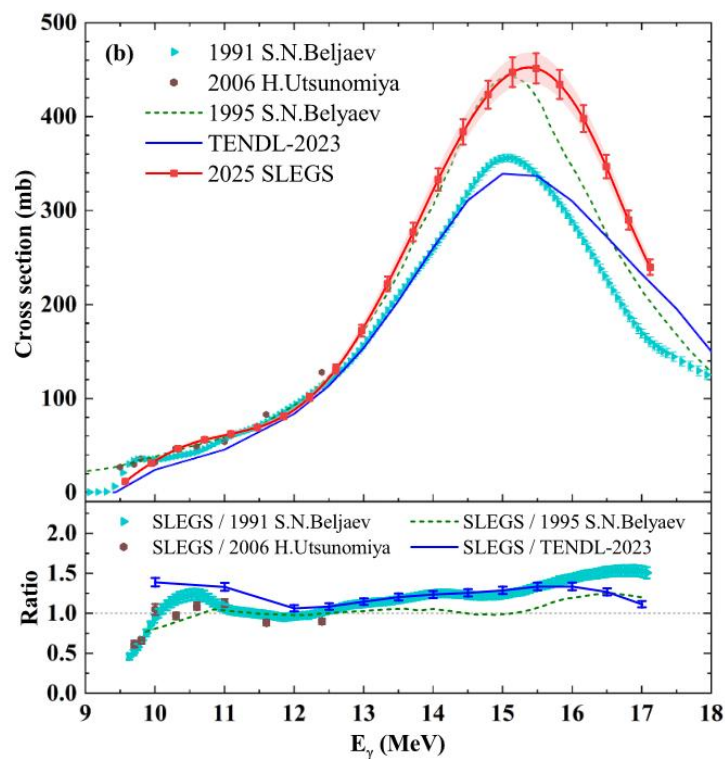
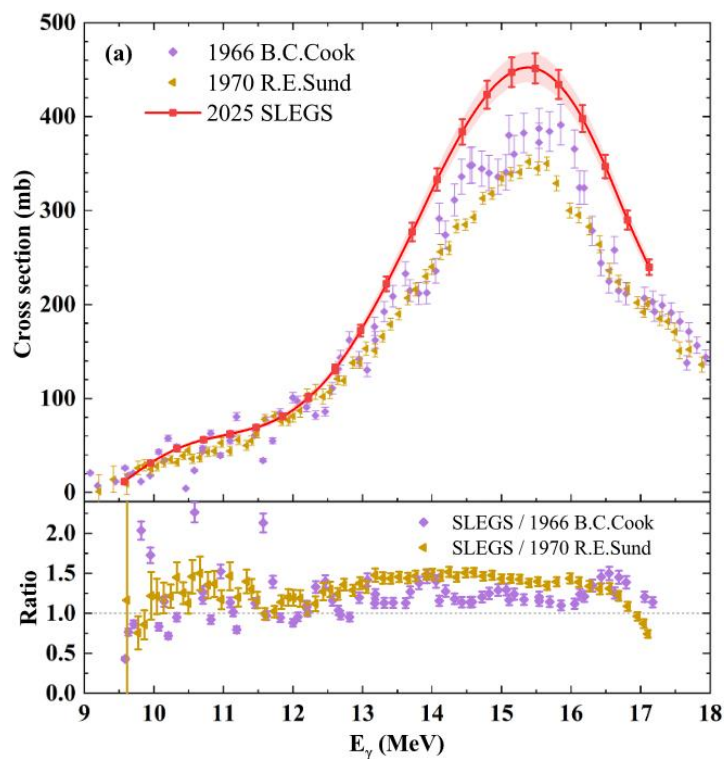


❖ 1eV-2keV能区，发现8个新的共振能级，检验核能级密度理论，评价后可加入CENDL库



❖ SSRF SLEGS线站: $^{141}\text{Pr}(\gamma, n)$ 截面直接测量

- $^{141}\text{Pr}(\gamma, n)$ 反应, 影响p核 $^{136,138}\text{Ce}$ 的丰度; 反应生成物放射性的 ^{140}Pr , 作为医用同位素用于PET分析
- 天体反应率, $T_9=2.5$ 时不确定度明显降低
- Astronomy & Astrophysics, 708, A86 (2026)



Astrophysical Journal Supplement 285, 13 (2026)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 285:13 (17pp), 2026 July

© 2026. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

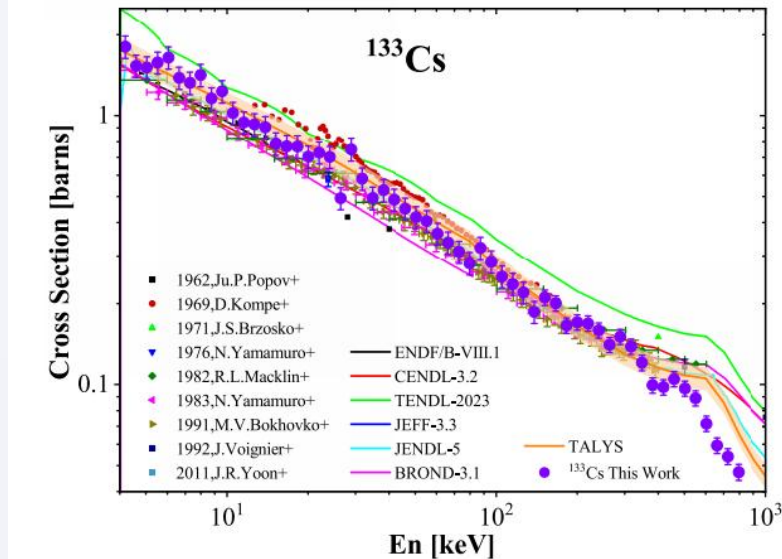
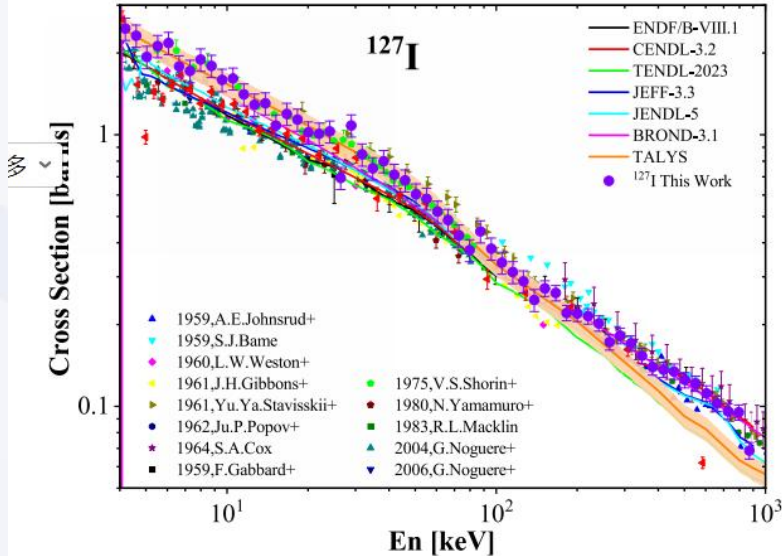
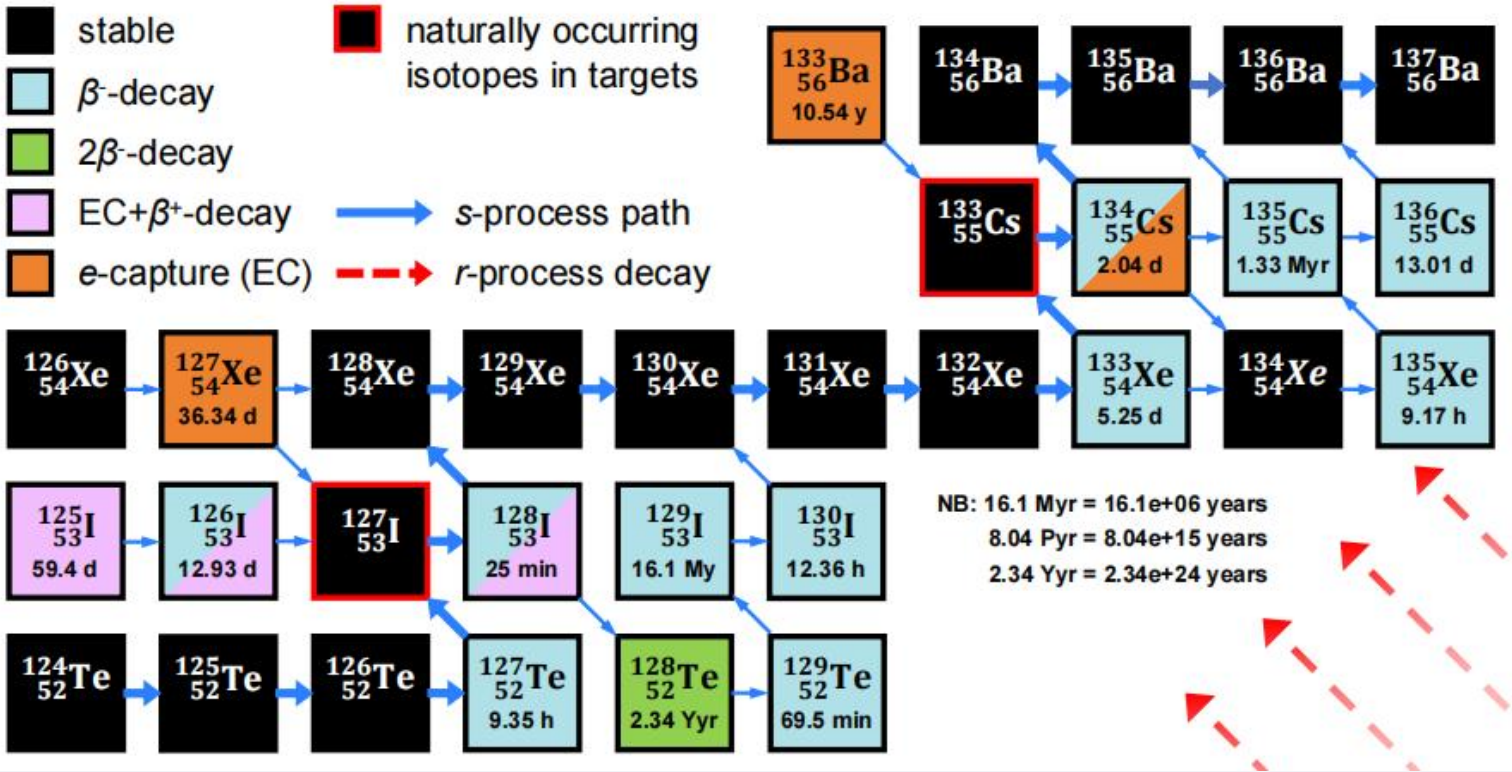
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ae6f9f>



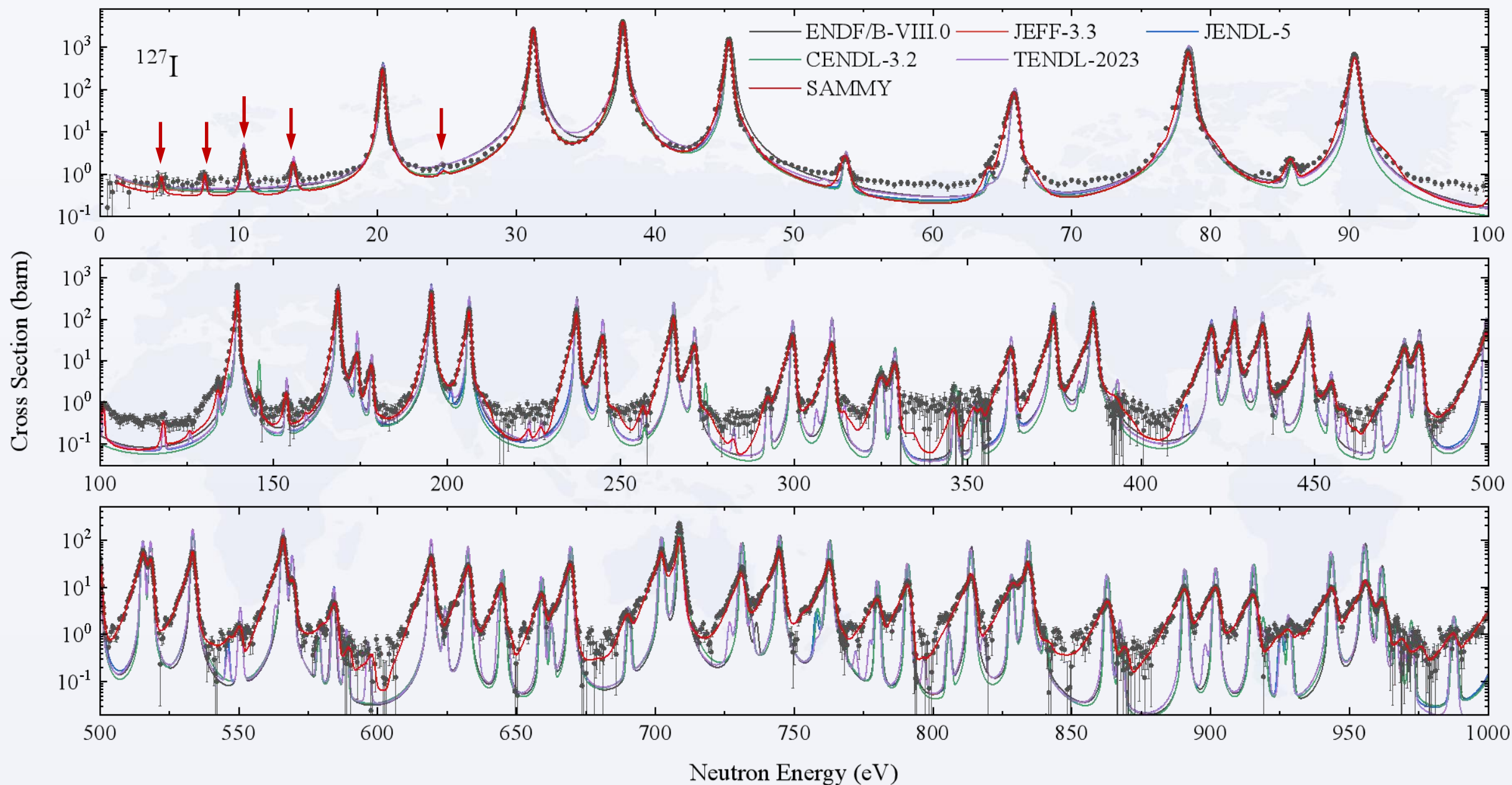
Direct Determination of Neutron Capture Relevant to the s-process of ¹²⁷I and ¹³³Cs at the CSNS Back-n Facility

Ting Liu^{1,2,12}, Junheng Hu^{1,2,12}, Wei Jiang^{3,4}, Zhendong An^{1,5,6}, Yugang Ma^{5,6,7}, Jie Ren⁸, Xichao Ruan⁸, Jingyu Tang⁹, Ruirui Fan^{3,4}, Yijing Sun², Haohua Wen², Chenchen Guo², Yubing Li^{1,10}, Di Sun^{1,11}, and Hao Liang^{1,2}

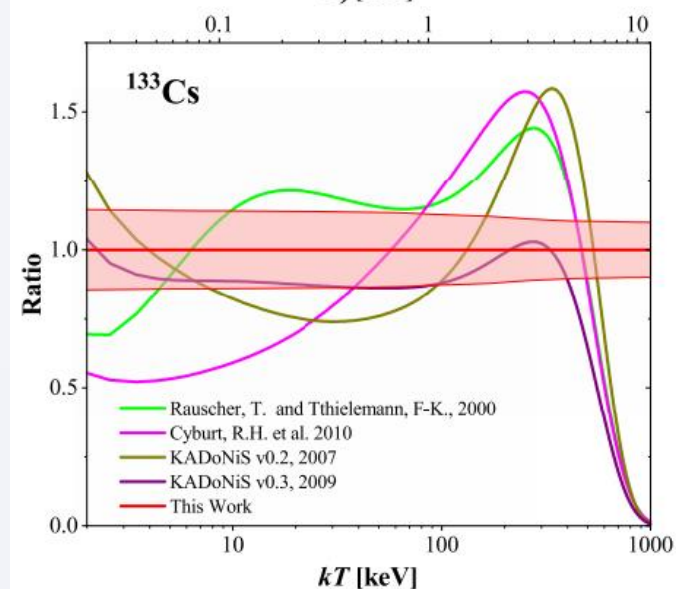
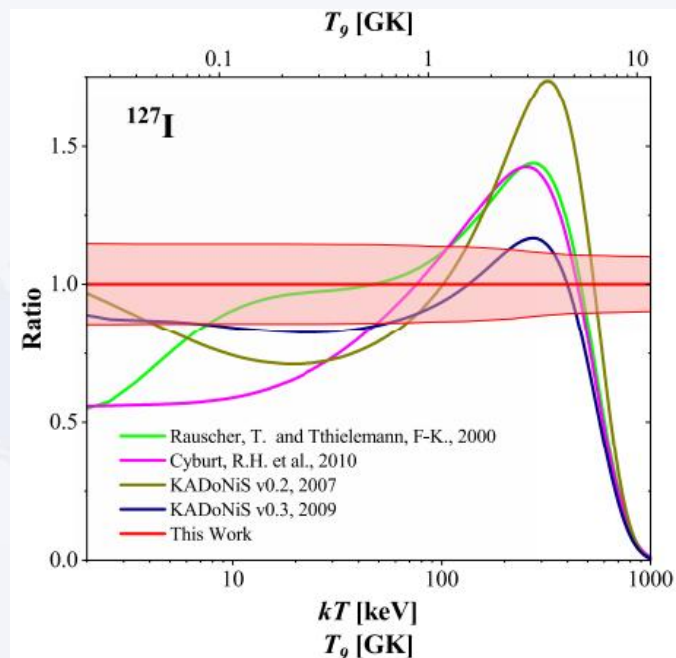
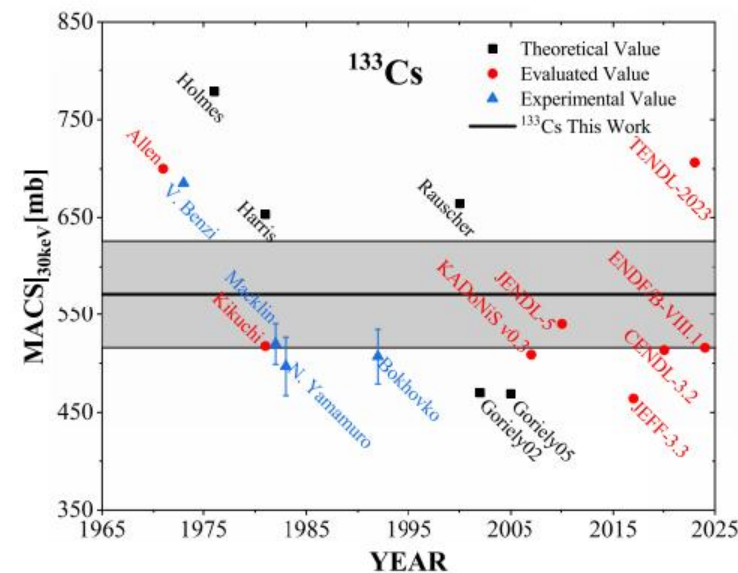
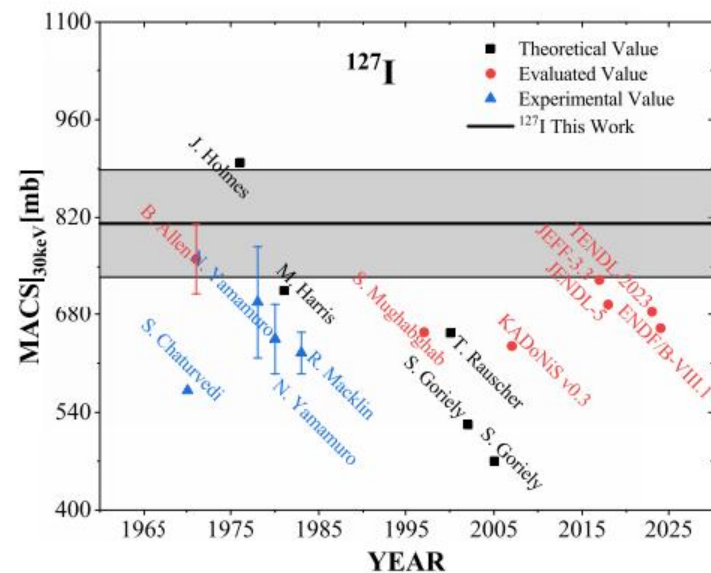
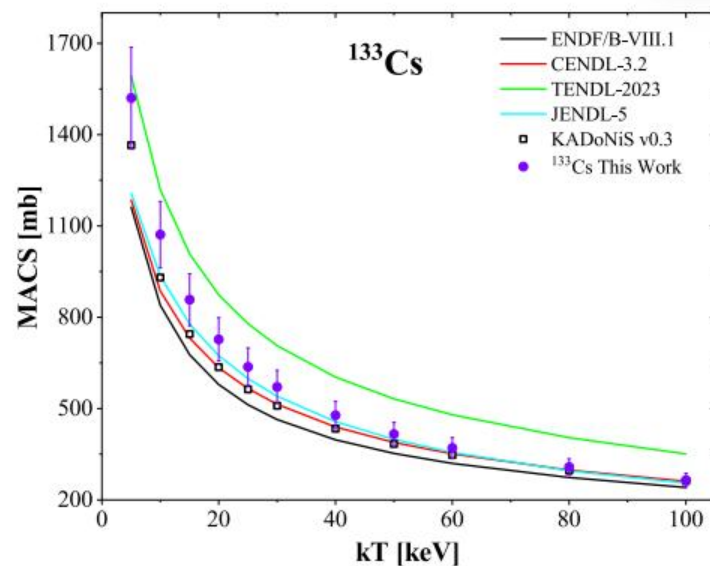
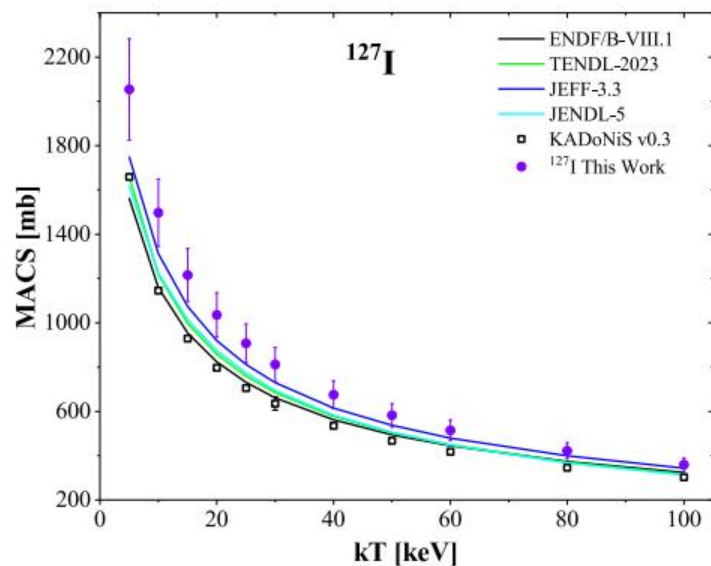
(The CSNS Back-n Collaboration)



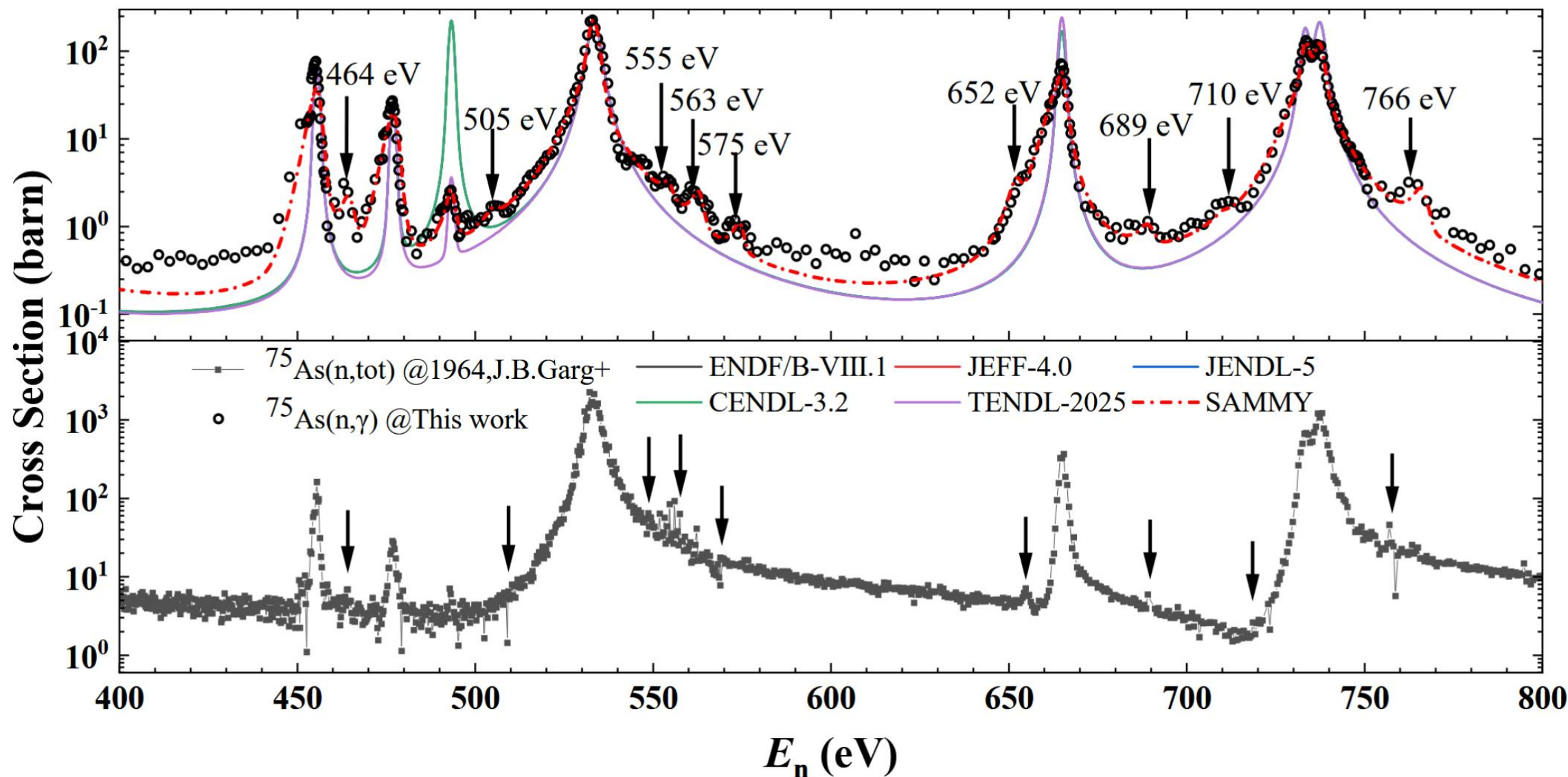
^{127}I 实验数据处理：共振能区R-矩阵拟合(共振能级参数)



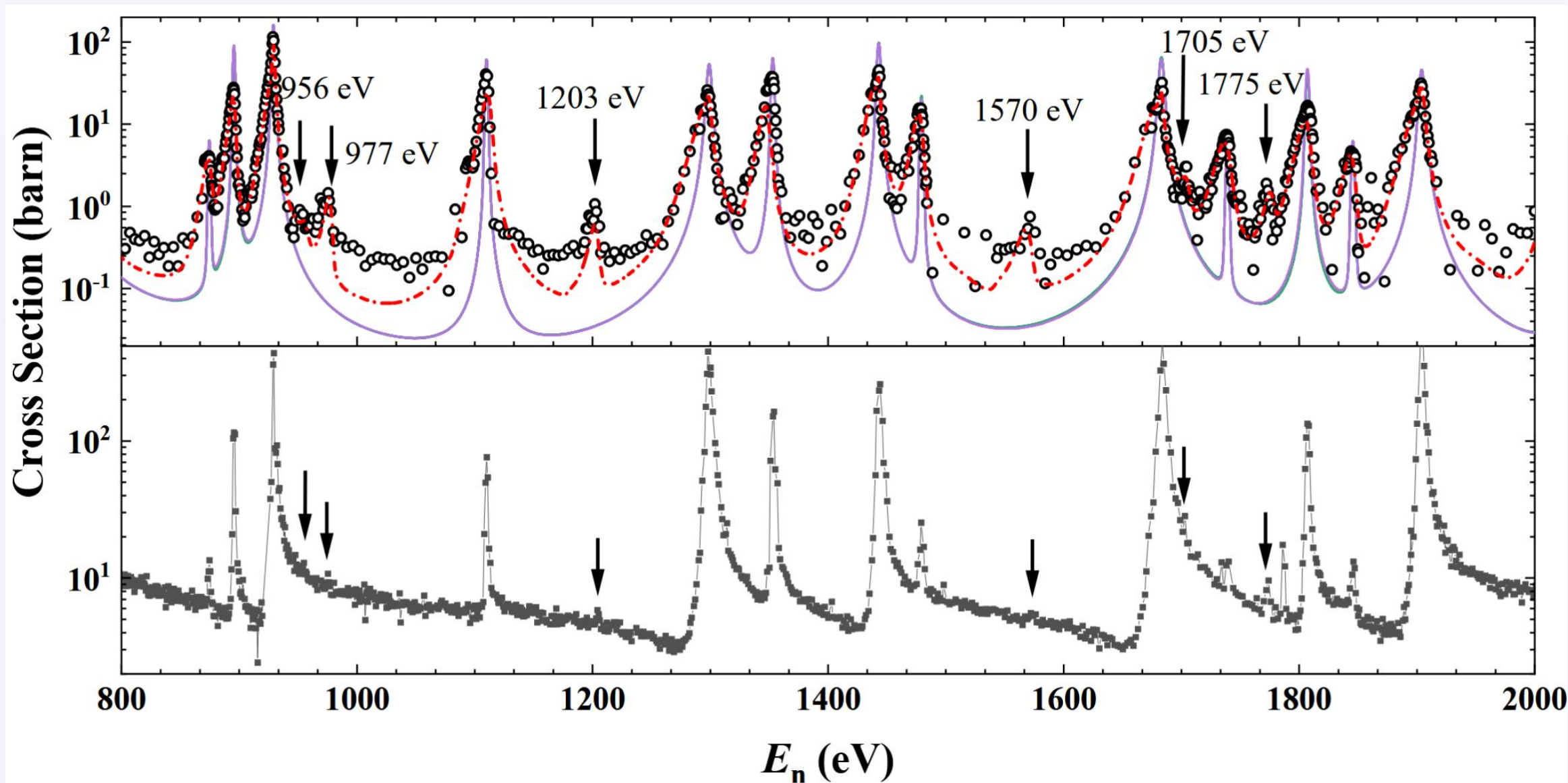
^{127}I 与 $^{133}\text{Cs}(n, \gamma)$ 反应的MACS、天体物理反应率



❖ 共振能区：1-5000eV 新发现了18个新的共振结构，检验核能级密度理论

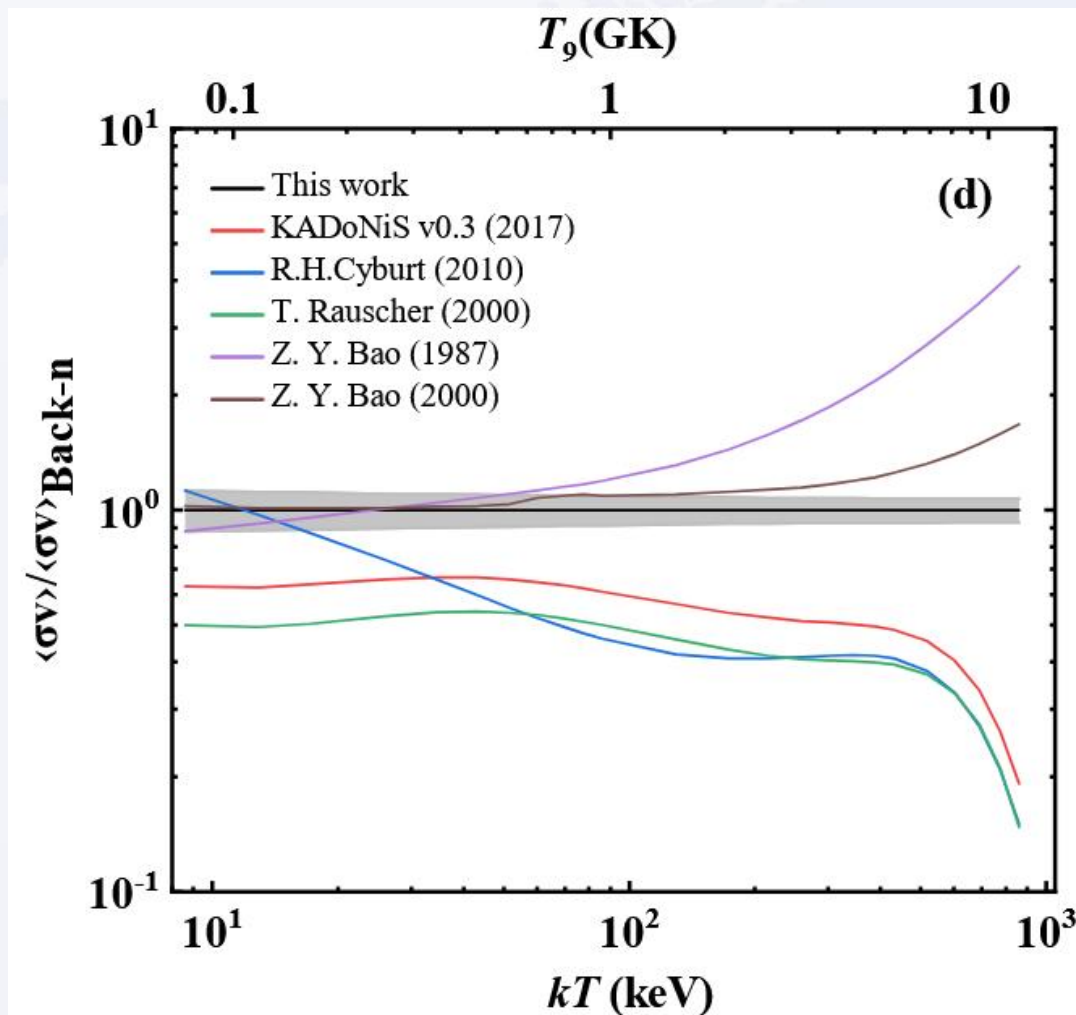
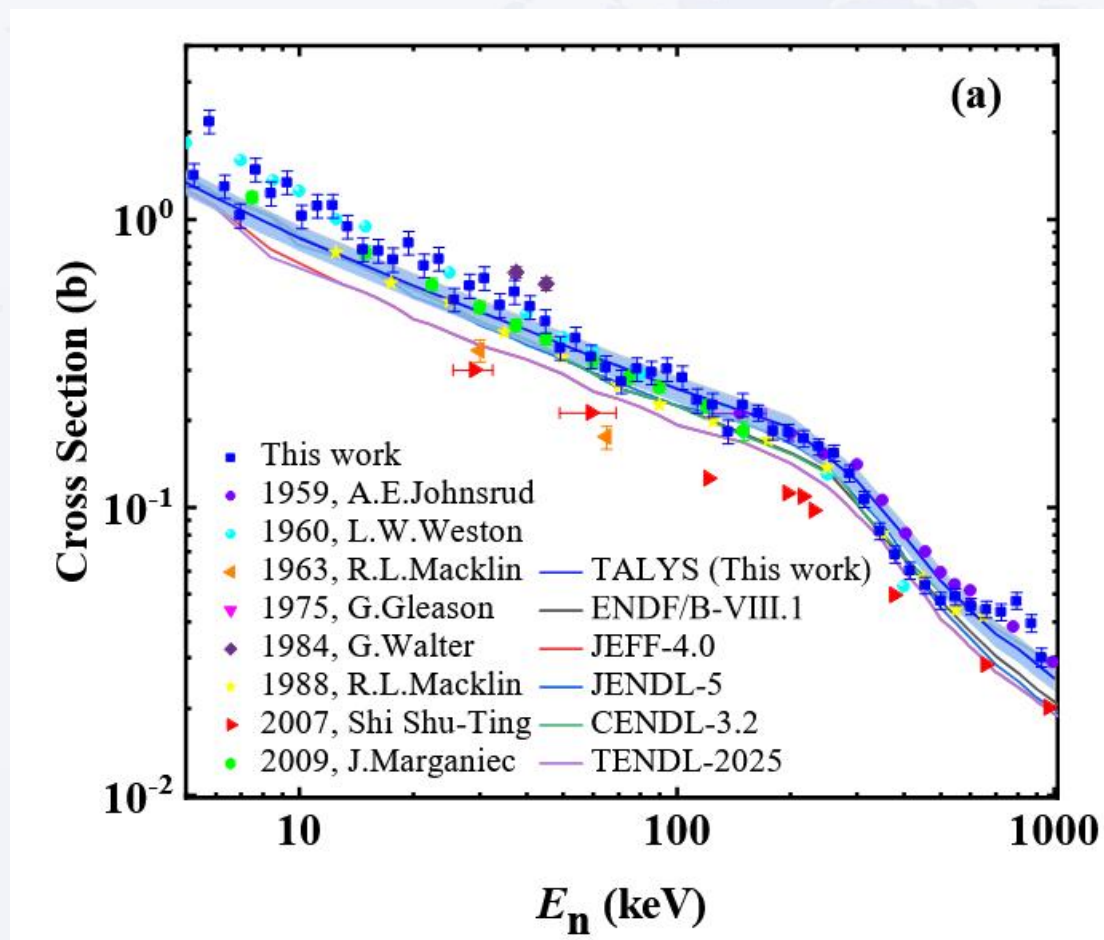


❖ 共振能区：1-5000eV 新发现了19个新的共振结构，检验核能级密度理论



❖ 天体物理特别关注的能区：30keV 处的MACS截面的比较

❖ 计算给出了天体物理热核反应率，不确定度明显的降低（基于1eV-1MeV能区的截面）



CSNS和SSRF，利用光子和中子探针研究物质的相关反应机制、微观结构与性质等，两者优势互补。

中子与光子探针 ① **原子核反应机制研究**：先进核能与天体物理关注能区关键反应截面高精度测量

② **无损检测分析**：嫦娥五号月壤、火星陨石样品分析，核材料无损检测分析



上海同步辐射光源SSRF

中国大陆第一台中能第三代同步辐射光源



中国散裂中子源CSNS

我国首台、世界第四台脉冲型散裂中子源



加速器驱动的嬗变研究装置CiADS

世界首个兆瓦级加速器驱动次临界系统原理验证装置

博士研究生@SSRF



中山大学、博士后@CSNS&SSRF



近代物理研究所CiADS

光核反应： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 圣杯反应

天体物理关键反应过程/月壤样品分析

反应堆核材料中子无损检测
战略与医用同位素生产等

NEXUS: NEutron, X/ γ -ray & mUon Source



中国散裂中子源CSNS



上海同步辐射光源SSRF



HIAF & CIADS

敬请批评指正！



单位：中国科学院近代物理研究所 惠州研究部

Email: anzhendong@impcas.ac.cn