

# Sm/Yb/Ag/Cu中子俘获截面实验研究进展

李鑫祥

南华大学 核科学技术学院



# 目 录

**1、研究背景与意义**

**2、Sm/Yb/Ag/Cu中子俘获截面数据分析进展**

**3、总结与展望**



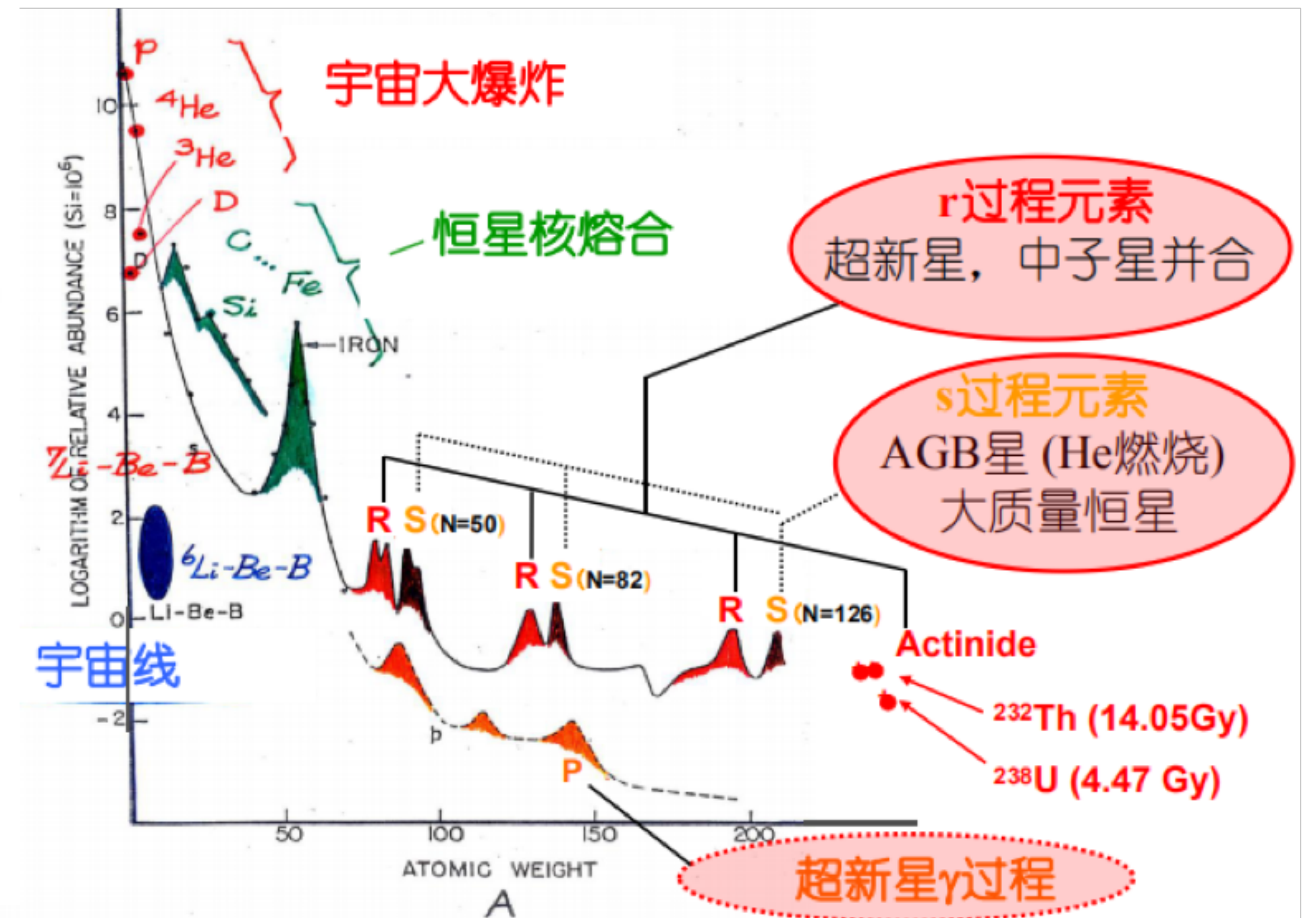
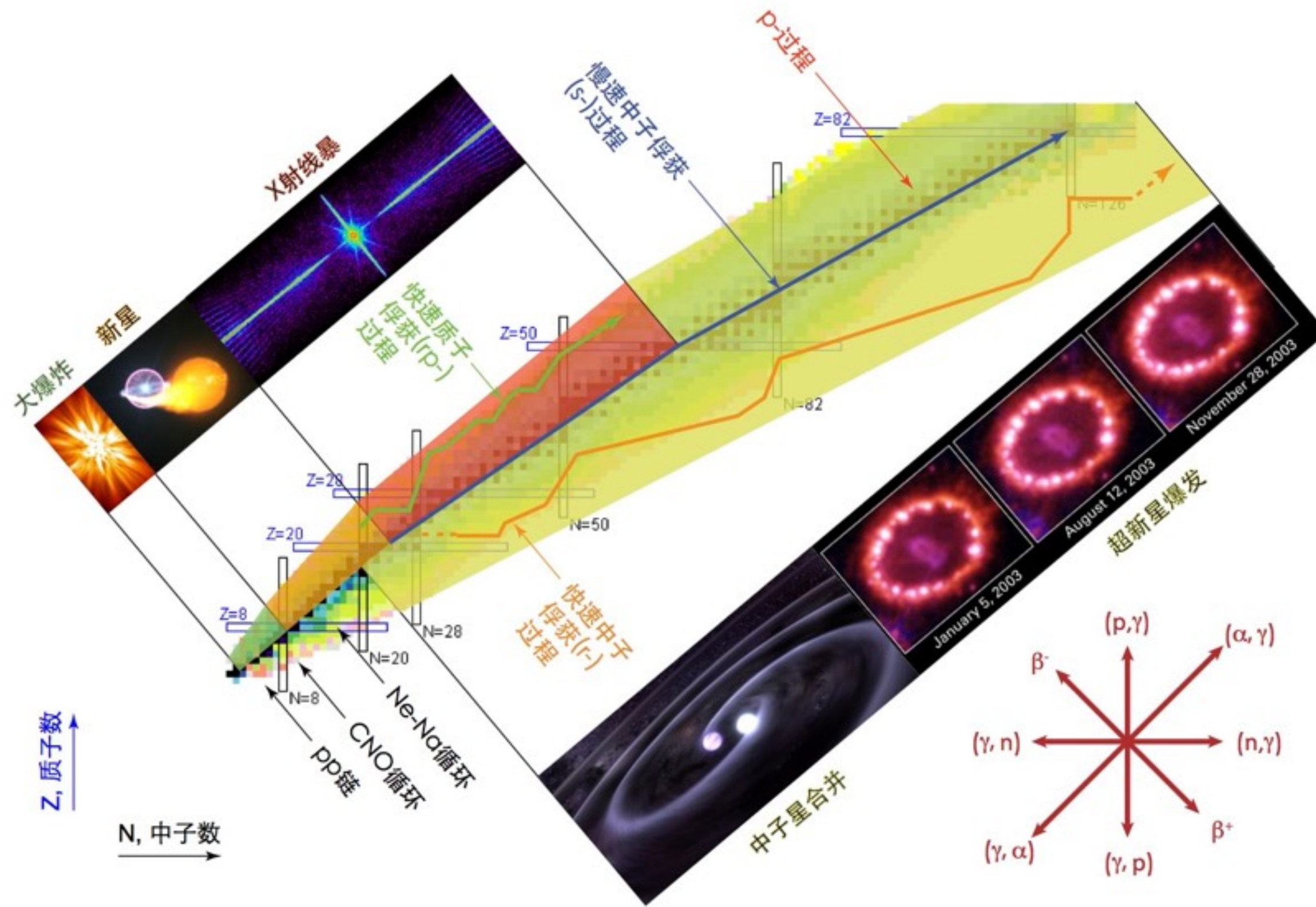




# 核物理与核天体物理：重元素产生机制

宇宙中比铁重的元素是如何产生的？  
21世纪物理学未解之谜

关键科学问题：重元素起源



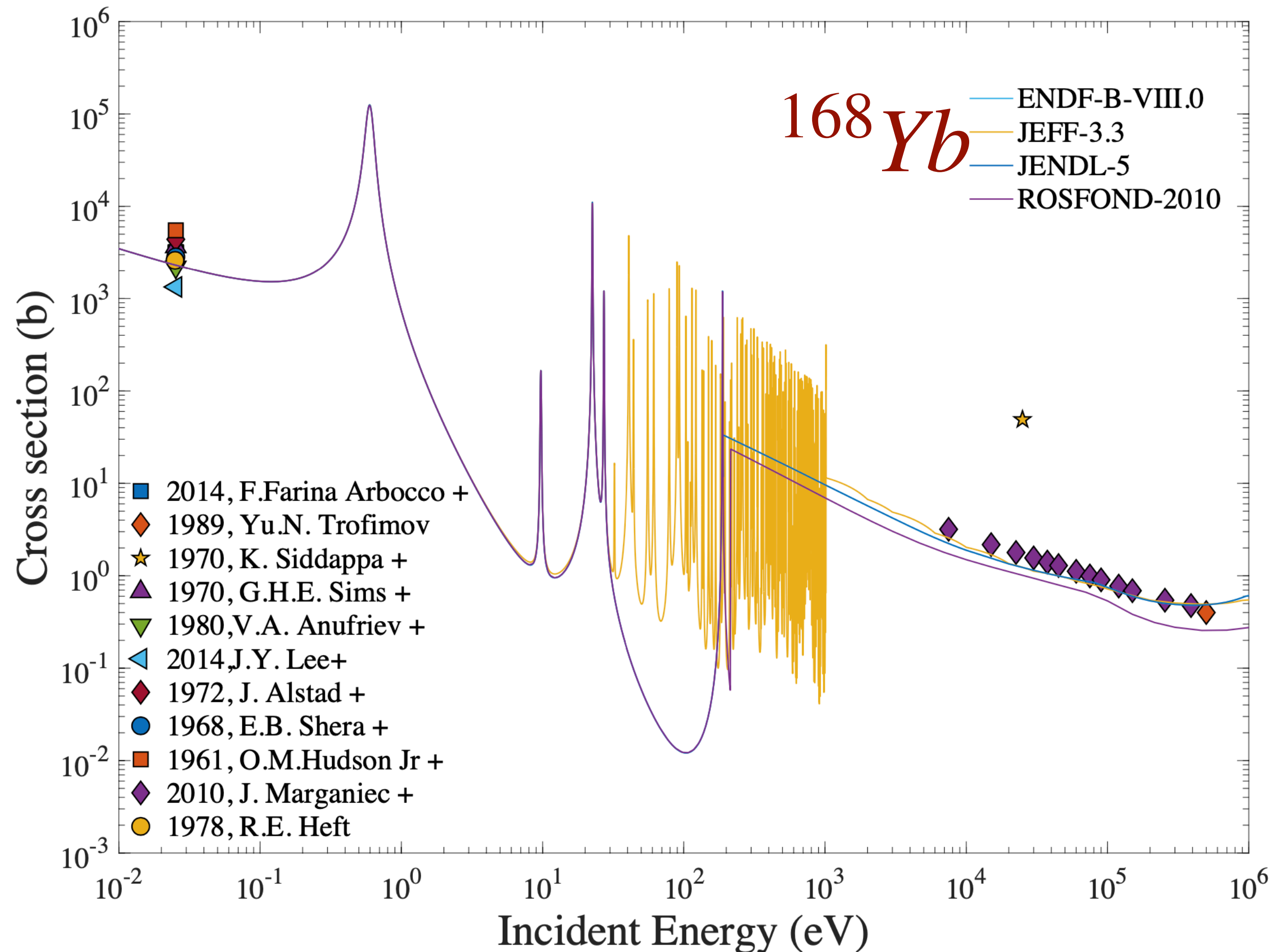
中子俘获反应，是宇宙中比铁重的元素合成的主要途径。重元素的中子俘获反应截面作为核天体网络计算的关键的输入量，对理解宇宙演化和宇宙中重元素合成具有重要意义。





# 核数据需求：更高的精度和更宽的能区

## 国内外研究现状：评价数据分歧大，中国库数据缺失！



1. 目前， $^{168}\text{Yb}(n,\gamma)$ 反应在共振能区的实验数据相当缺乏，现有的实验数据甚至不能完整描述一个共振峰，数据的数量和质量都有待提升。
2. 目前主流的国际核评价数据库中，只有 ENDF/B-VIII.0、JEFF-3.3、JENDL-5 以及 ROSFOND 收录了  $^{168}\text{Yb}(n,\gamma)$  反应的数据。且不同的评价数据库也存在明显的分歧，亟待高精度实验数据的澄清。
3. 中国的核评价数据库 CENDL-3.2 仍未包含  $^{168}\text{Yb}$  的中子俘获截面数据，急需国内相关实验工作的开展。



# 目 录

- 1、研究背景与意义
- 2、Sm/Yb/Ag/Cu中子俘获截面数据分析进展**
- 3、总结与展望







南  
華  
大  
學

# CSNS 反角白光中子源

Back-n White Neutron Source



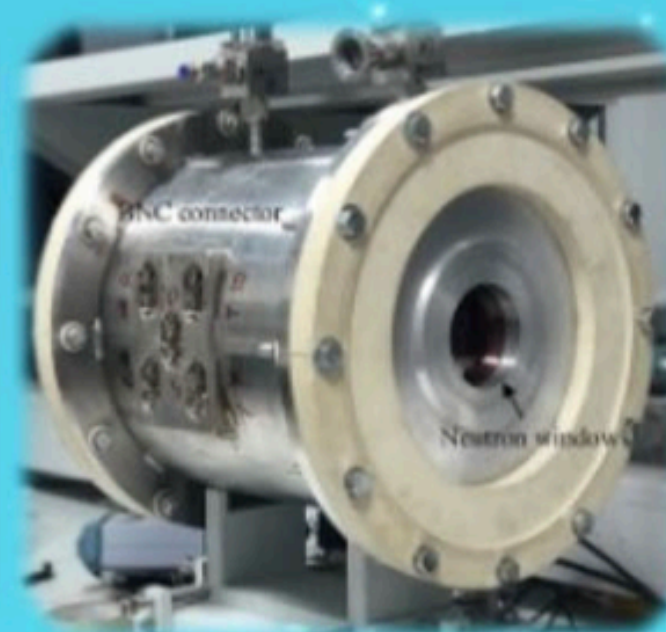
Common Elec.



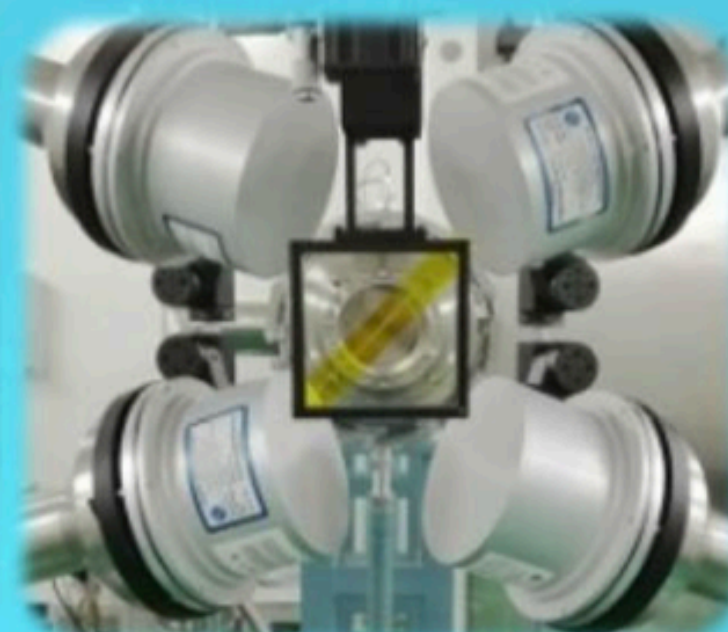
DAQ



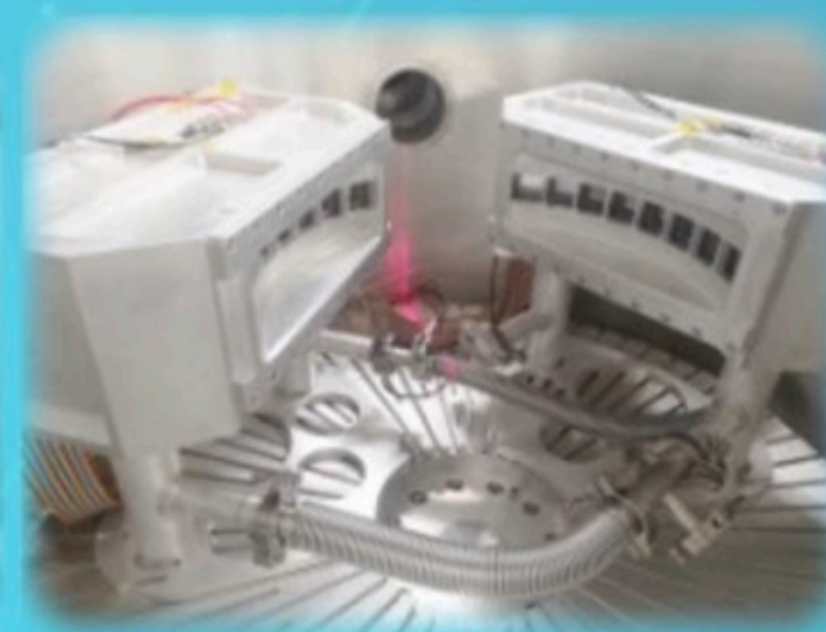
Li-Si Monitor



FIXM Spectro.



C6D6 Spectro.



LPDA Spectro.



NTOX Sample Changer



Neutron Window / Shutter



Neutron Path #1



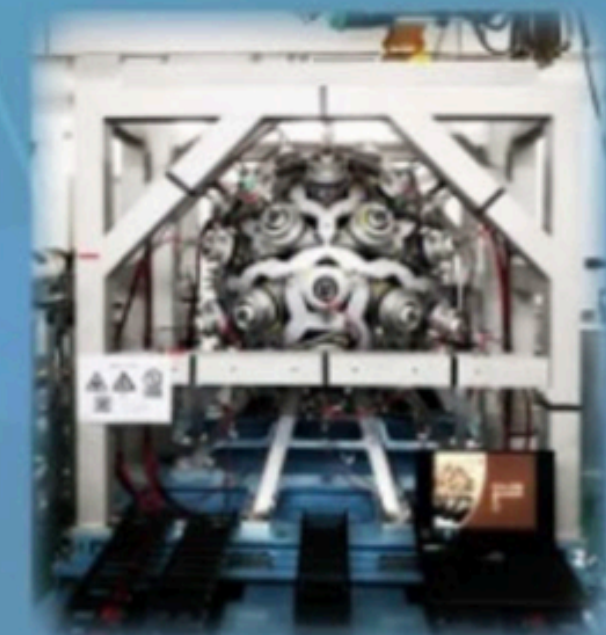
Exp. Hall #1



Neutron Path #2



Exp. Hall #2



GTAF-II Spectro.

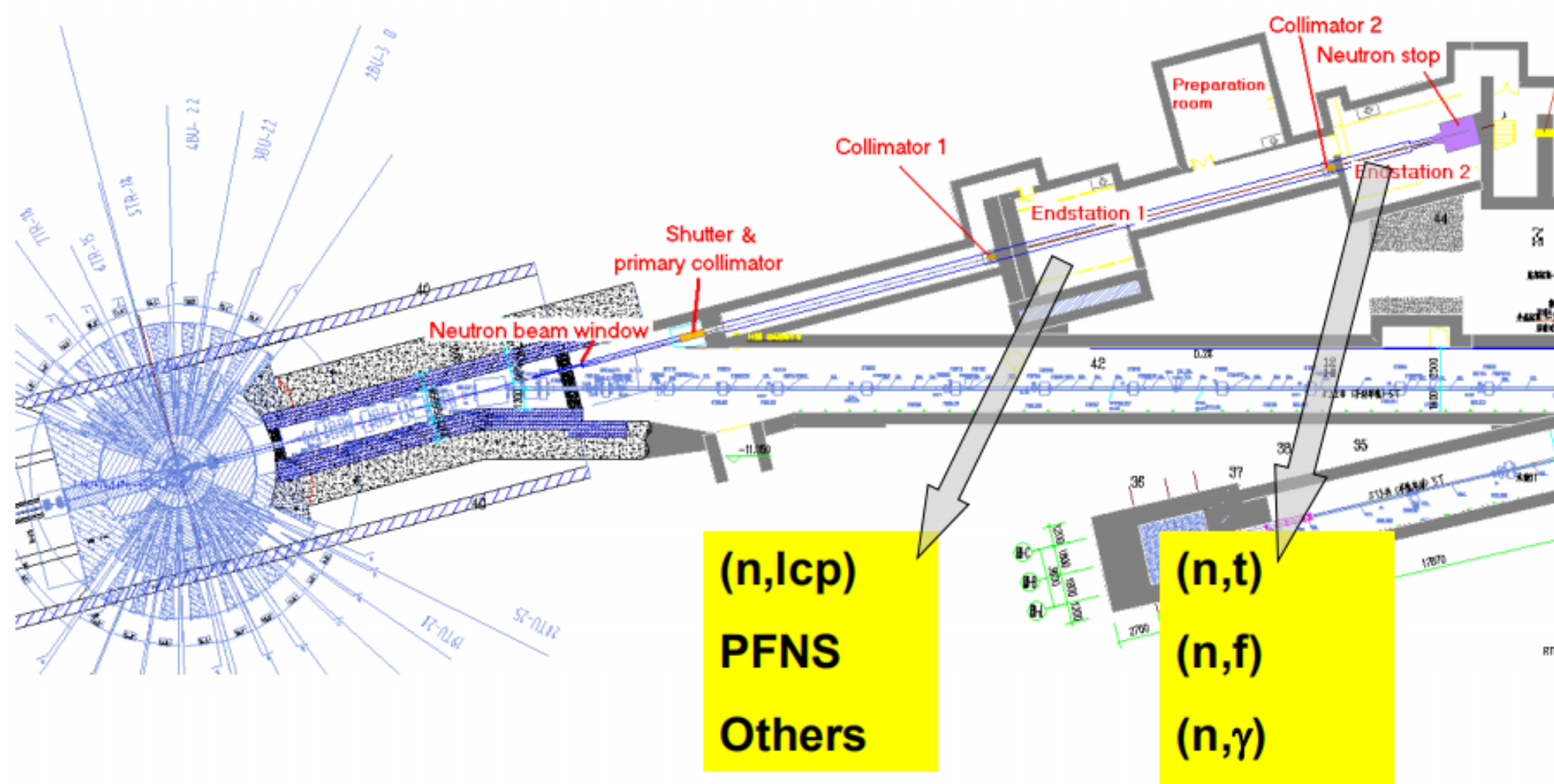




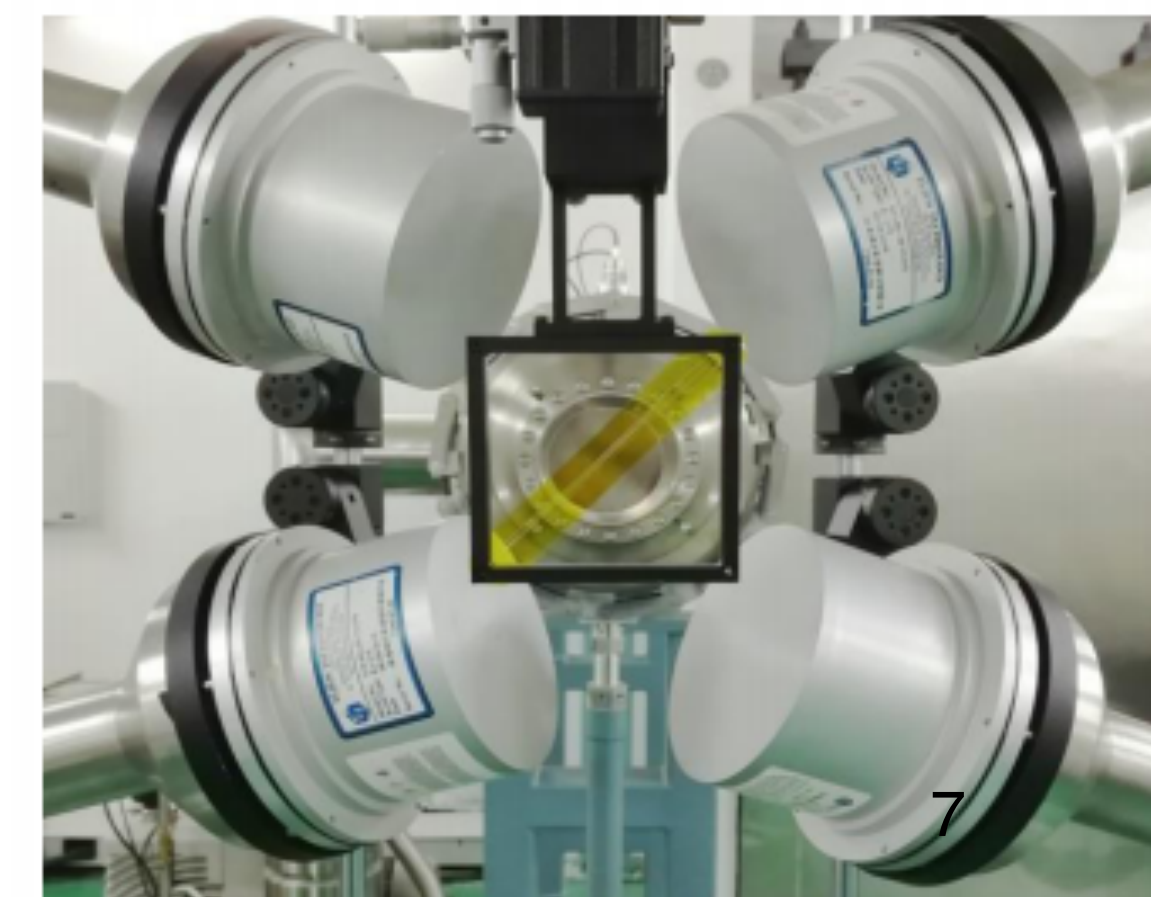
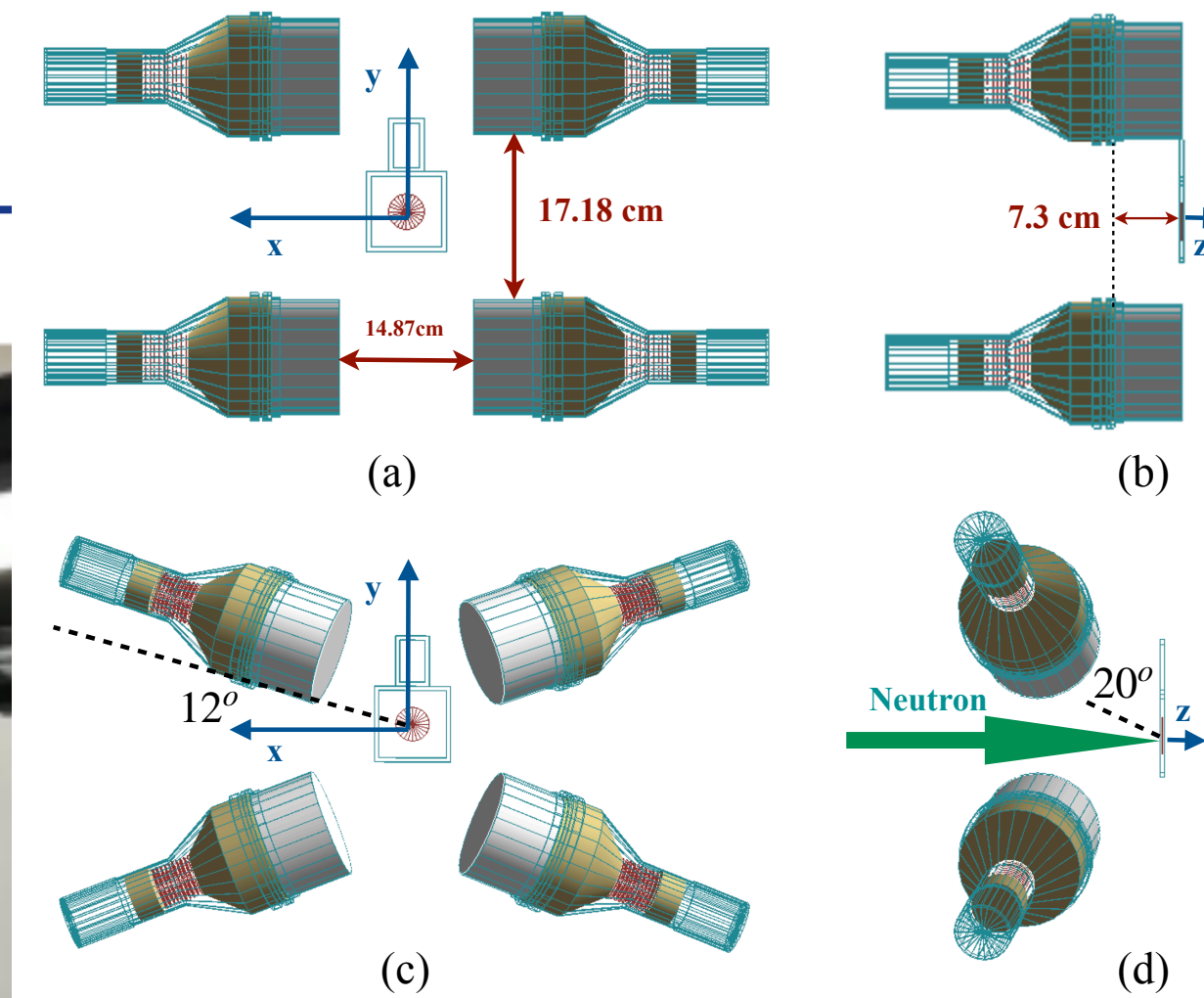
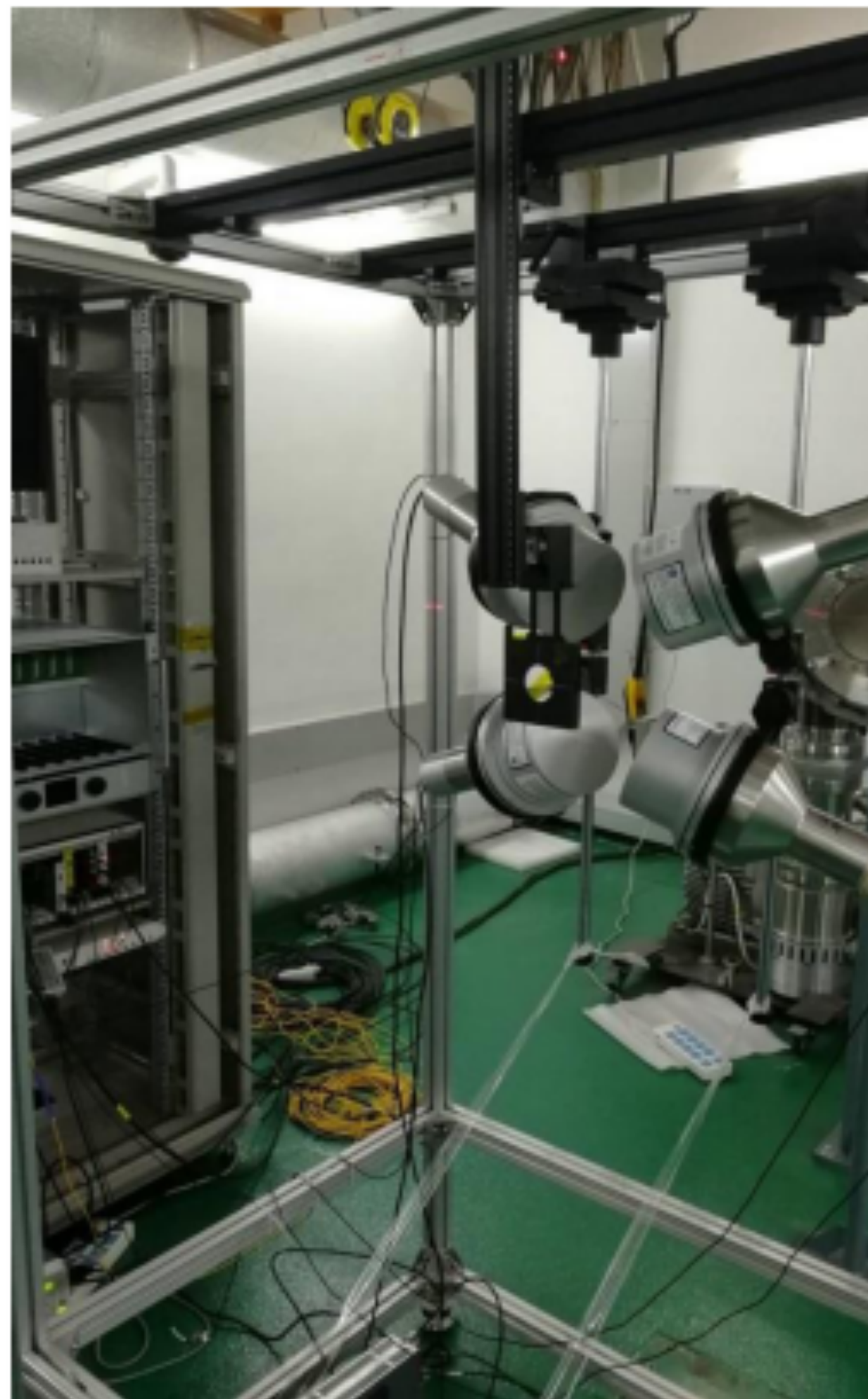
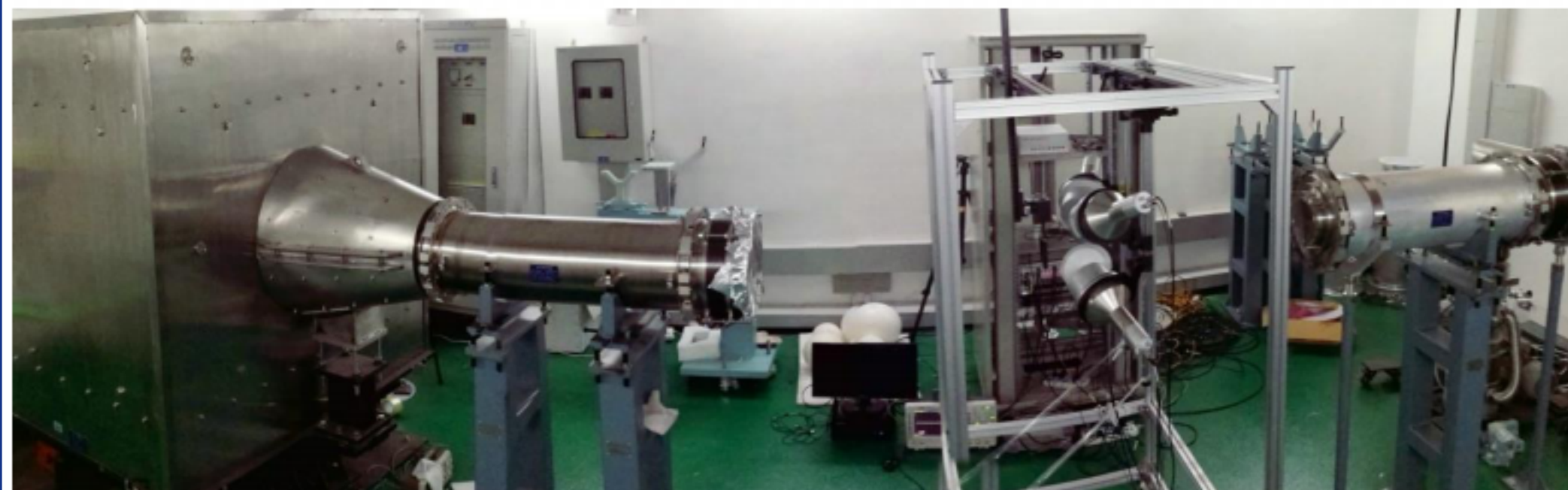
南  
華  
大  
學

# 实验装置与探测设备

## CSNS反角白光中子实验终端布局



## C6D6-俘获截面测量







南  
华  
大  
学

# Overview of Experimental Research on Neutron Capture Cross Section

## Conducted by SARI&USC at Back-n@CSNS (As of April 2024)

Date	Target	diameter (mm)	Thickness (mm)	Beam Power (kW)	Publish
2019.01	$^{197}\text{Au}$	50.0	1.0	~34	Nucl. Sci. Tech. (2021)
	$\text{natSe}$	50.0	2.0		Chin. Phys. B (2022)
	$^{89}\text{Y}$	50.0	1.0		Analyzing by CDUT
2019.05	$^{197}\text{Au}$	30.0	1.0	~50	Nuclear Techniques (in Chinese, 2020)
	$\text{natEr}$	50.0	1.0		Phys. Rev. C (2021, 2022)
	$\text{natSm}$	50.0	1.0		Preparing
2020.01	$^{63}\text{Cu}$	30.0	0.1	~80	Analyzing
	$^{65}\text{Cu}$	30.0	0.1		
2021.04	$^{107}\text{Ag}$	30.0	0.1		Chin. Phys. B (2022)
	$^{109}\text{Ag}$	30.0			
2022.07	$\text{natAg}$	30.0	0.1	~150	Analyzing
2022.11	$\text{natYb}$	50.0	0.1	~150	
2023.10	$^{65}\text{Cu}$	30.0	0.1	~150	
	$^{209}\text{Bi}$	40.0	1.0		

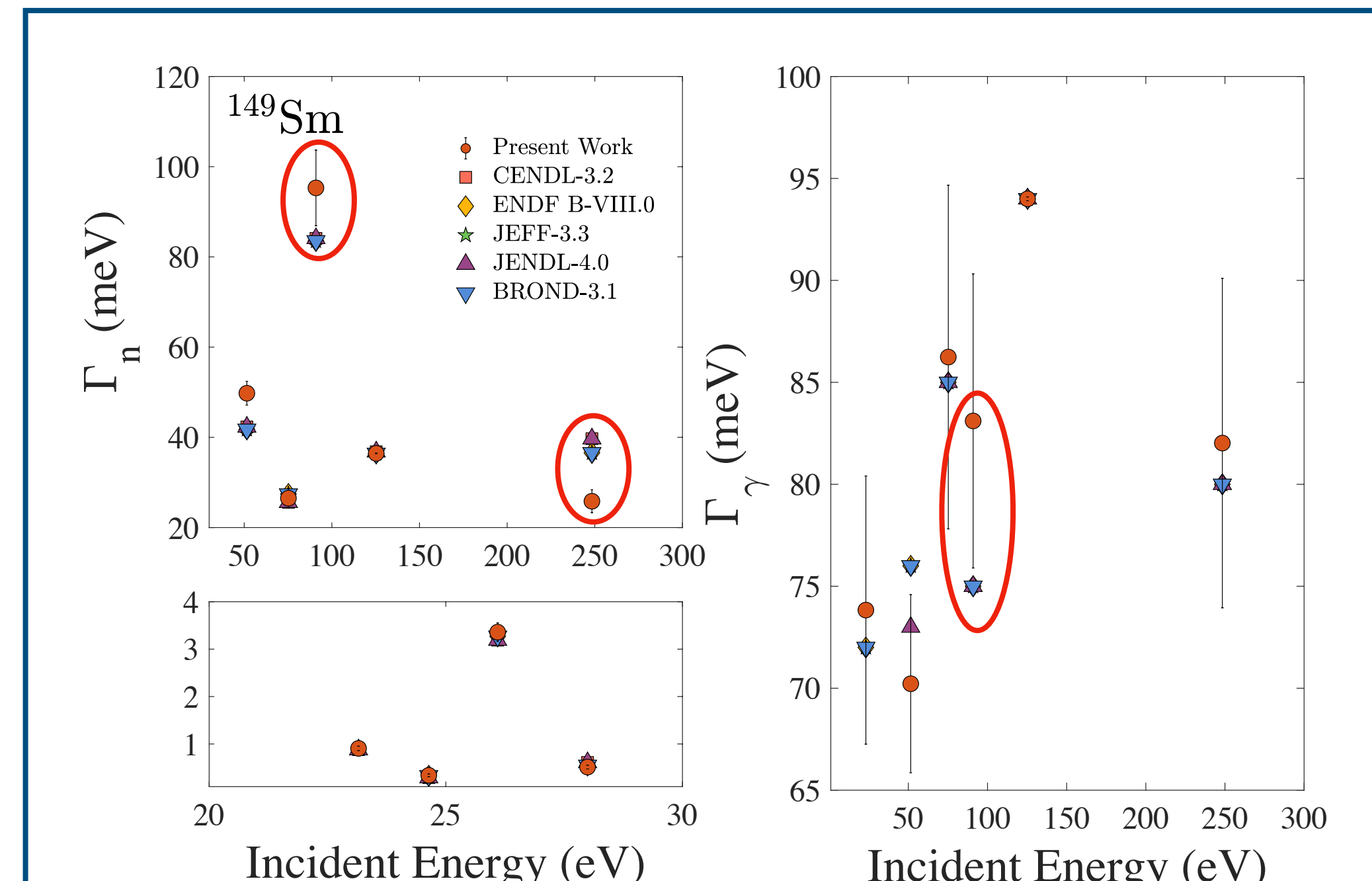
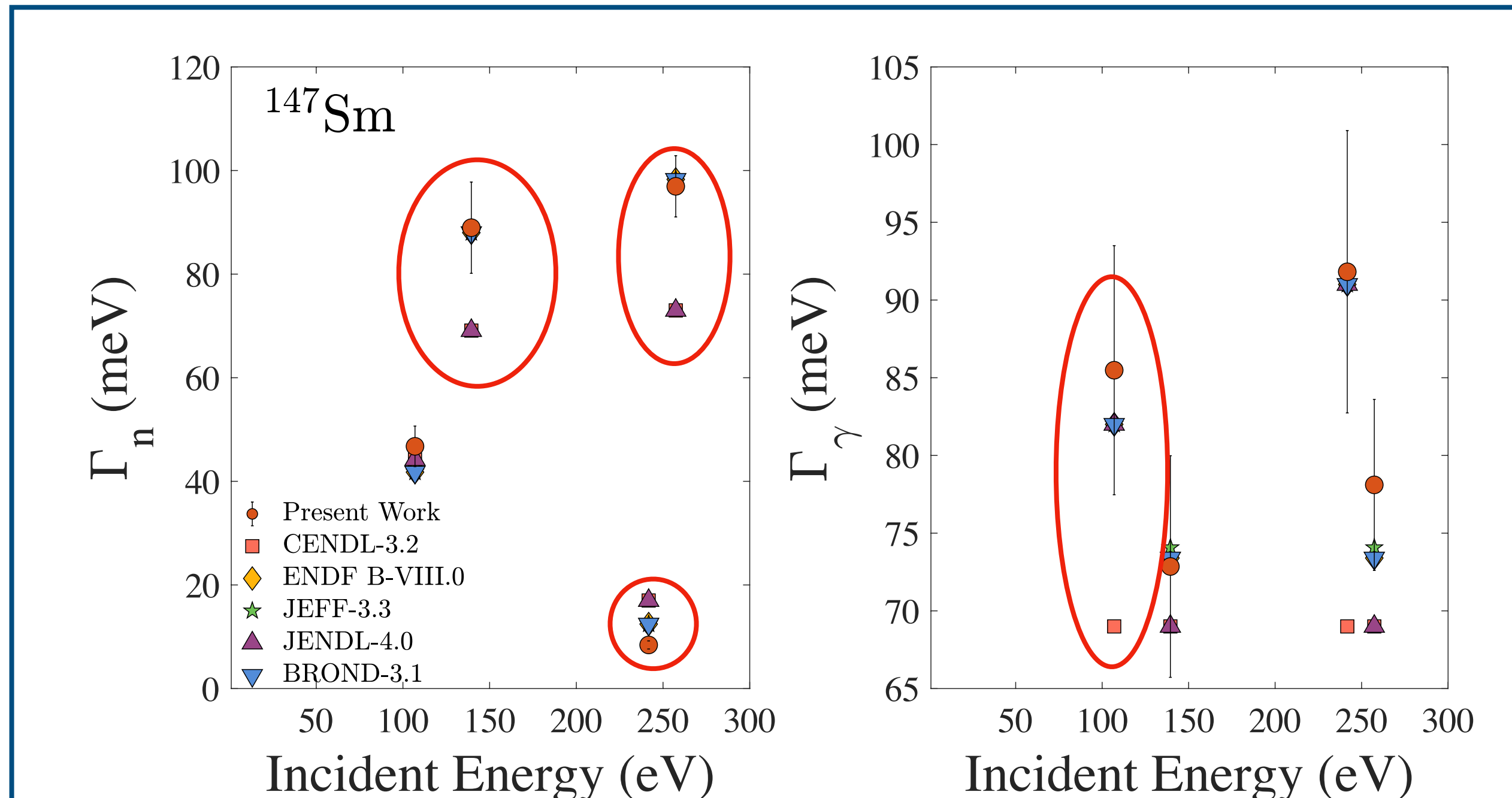
本报告

南华大学 刘静报告





# natSm 中子俘获截面数据分析



1. 使用**SAMMY**程序提取了20-300 eV能区<sup>147,149</sup>Sm的中子俘获共振参数；
2. 本工作能够澄清部分能点不同评价库存在的分歧；
3. 对于部分能点，本工作与目前的主流评价库结果均有差异，需要进一步的实验检验；

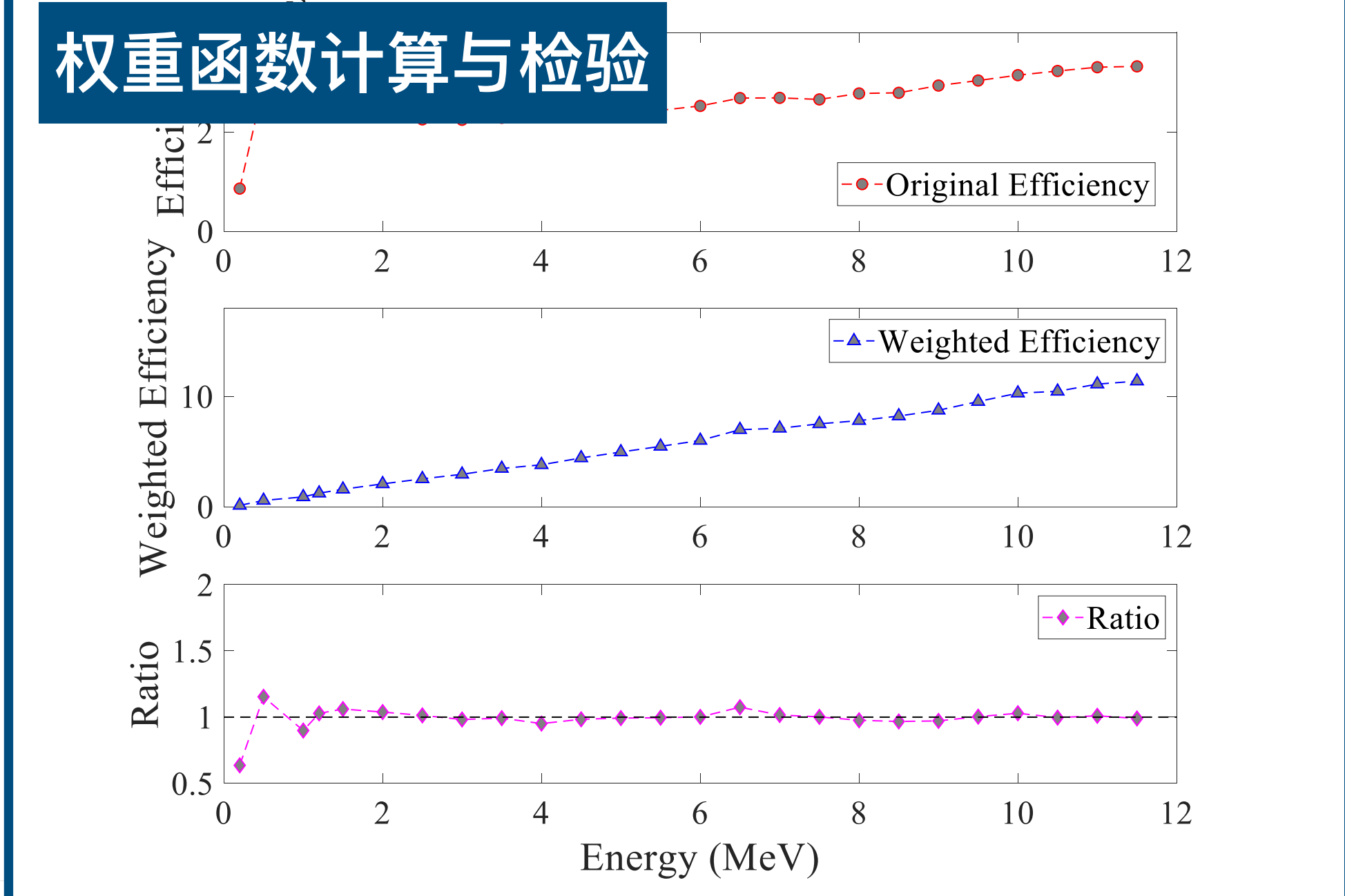
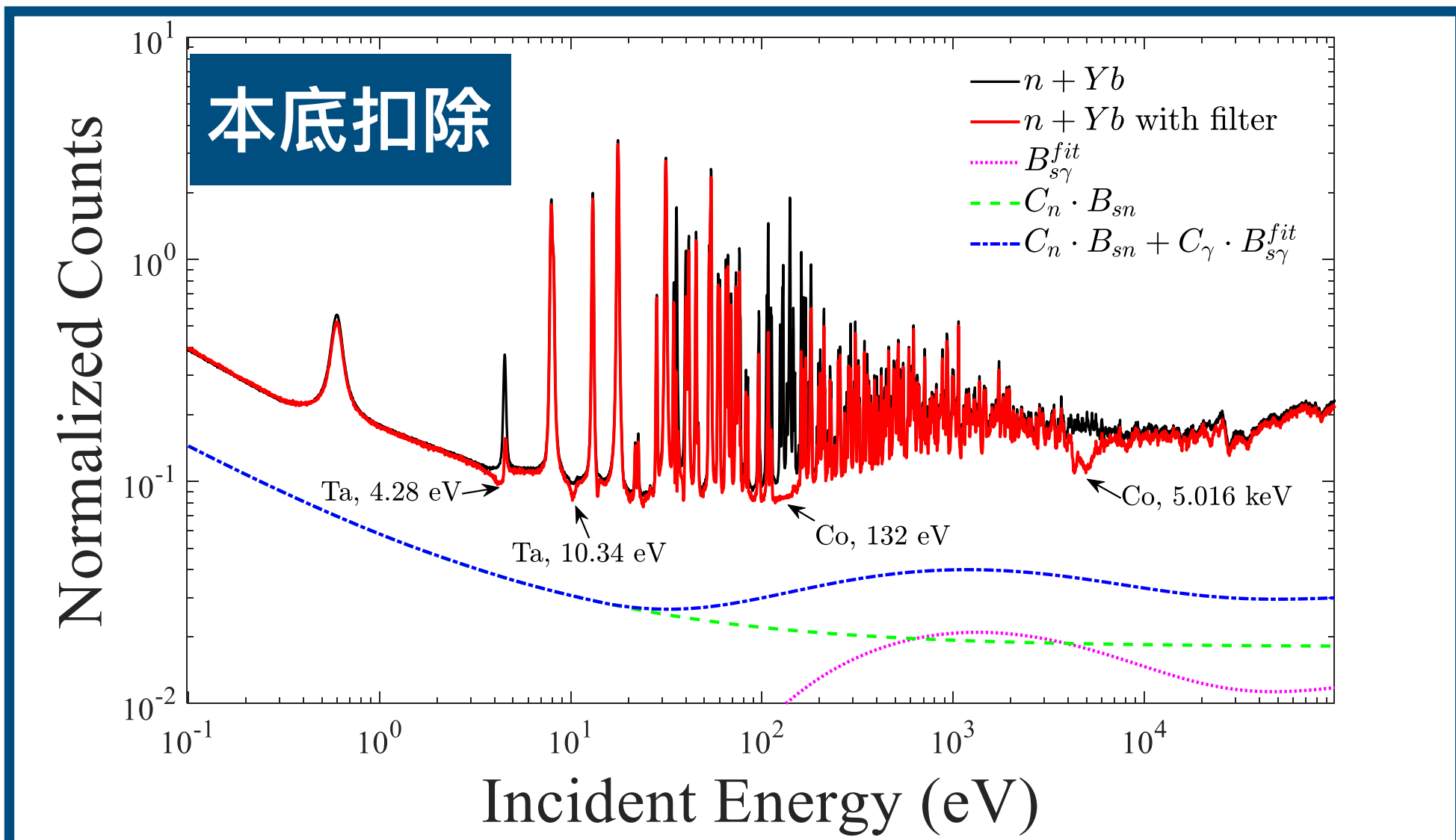
以<sup>147</sup>Sm为例，在1-300 eV能区，提取到的共振峰有42个：其中符合数据库（偏离度<20%）的有30个（约71%），可以澄清数据库分歧的有4个（约10%）。





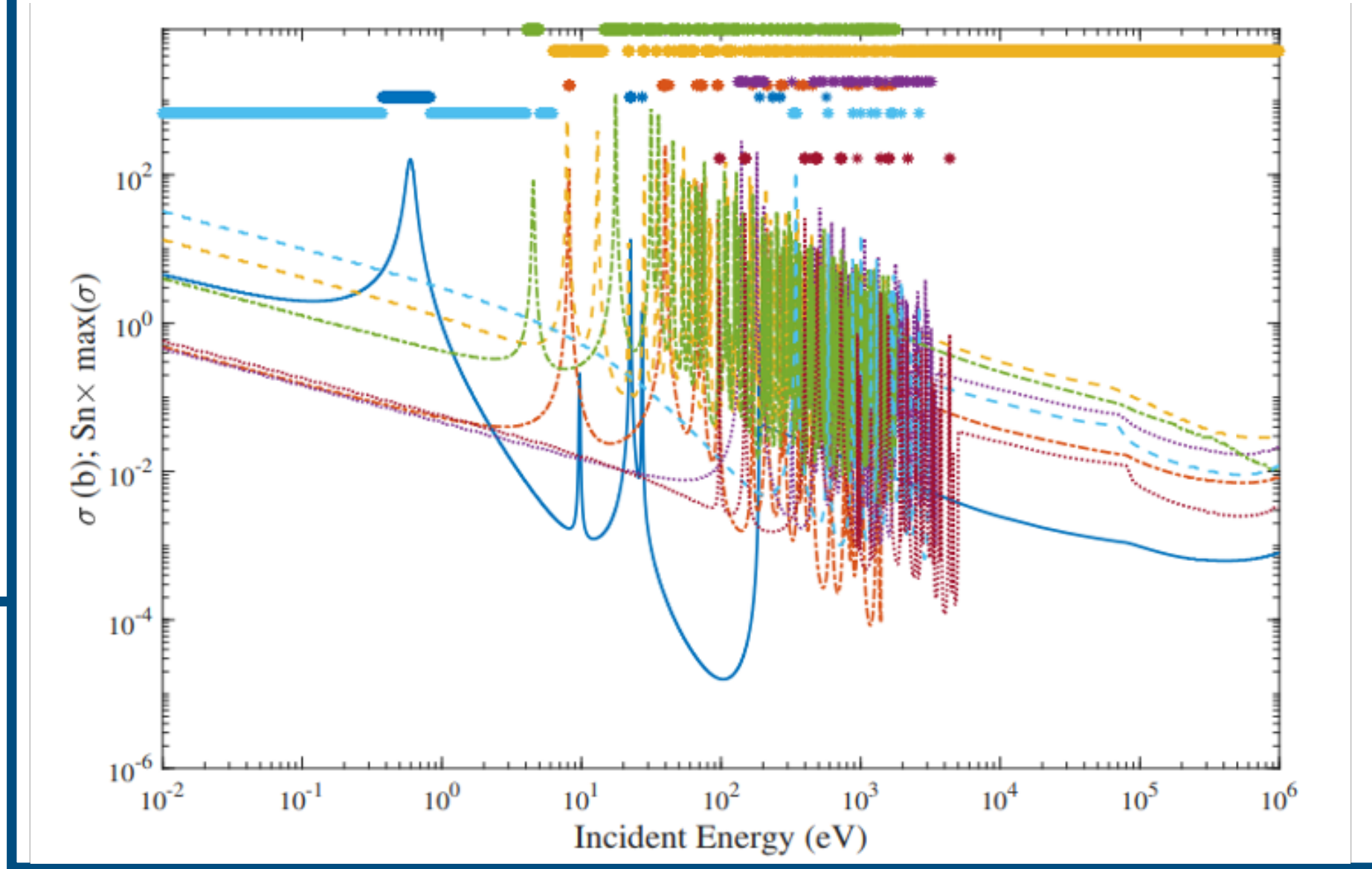
南  
華  
大  
學

# natYb 中子俘获截面数据分析



$N_w$

天然靶的中子结合能：  
考虑了不同共振峰的同位素贡献



$S_n$

$I$

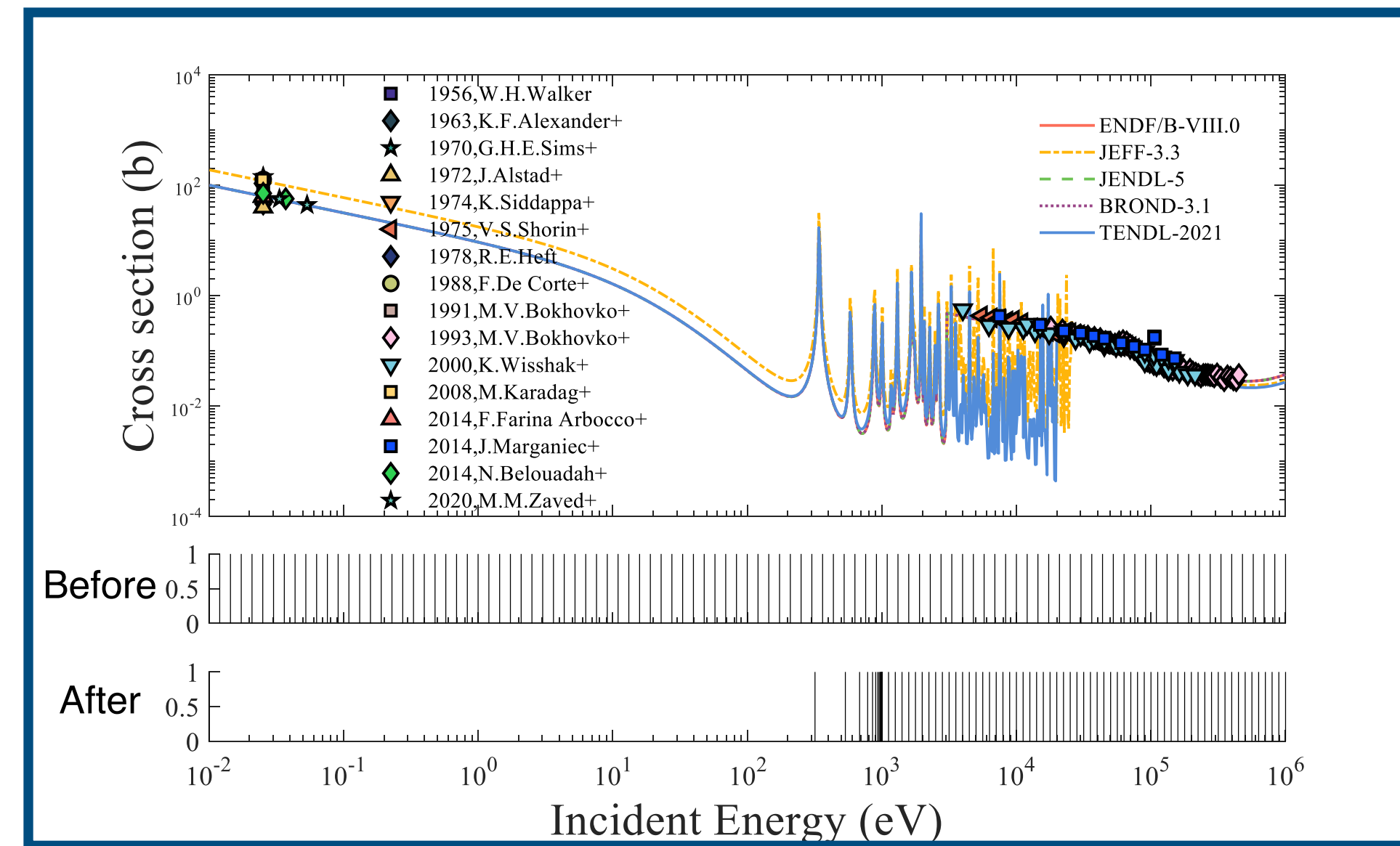
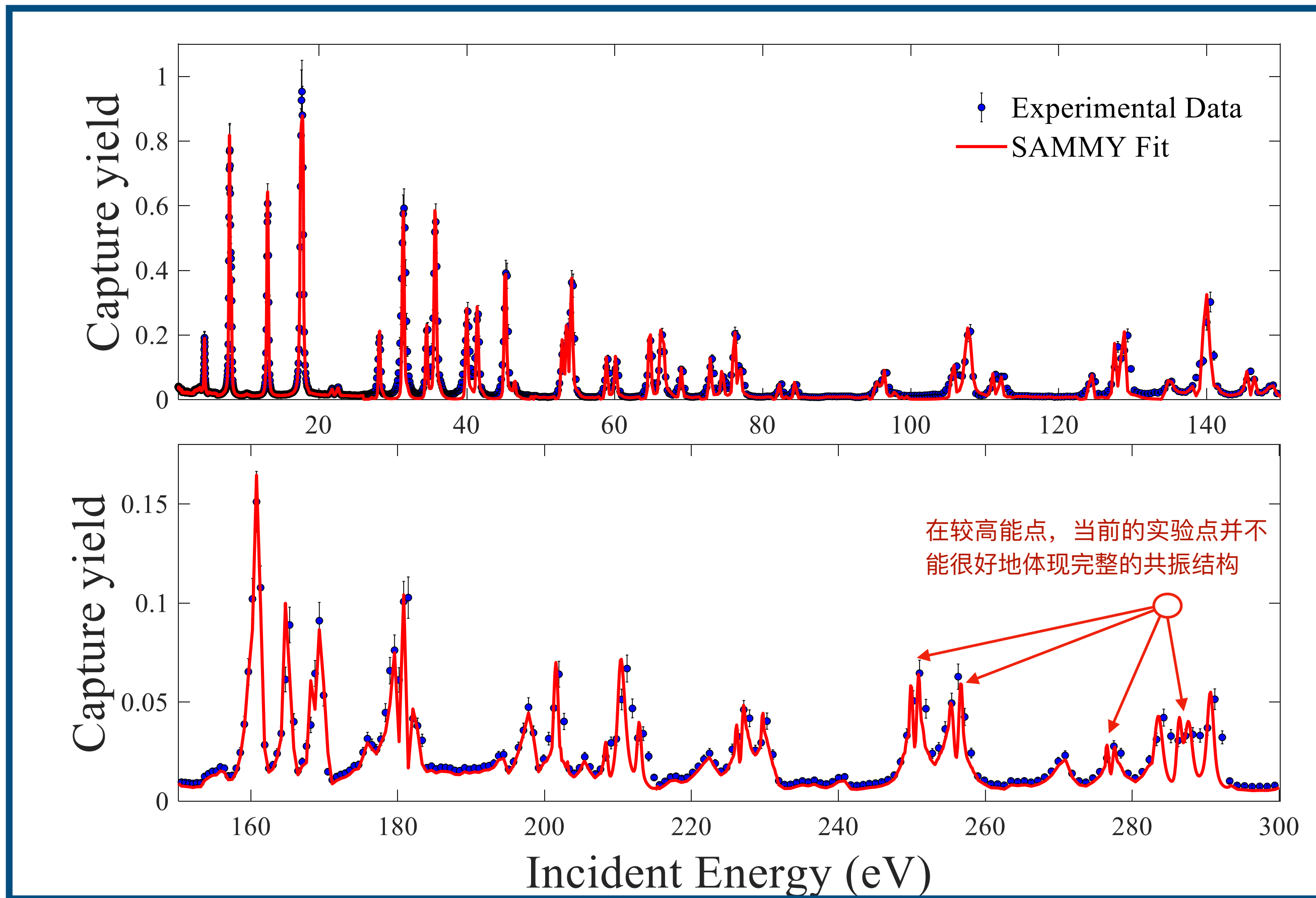
使用陈永浩老师于2023年8月提供的新的中子能谱数据

$$Y_w = \frac{N_w}{N_s I S_n}$$





# natYb 中子俘获截面数据分析



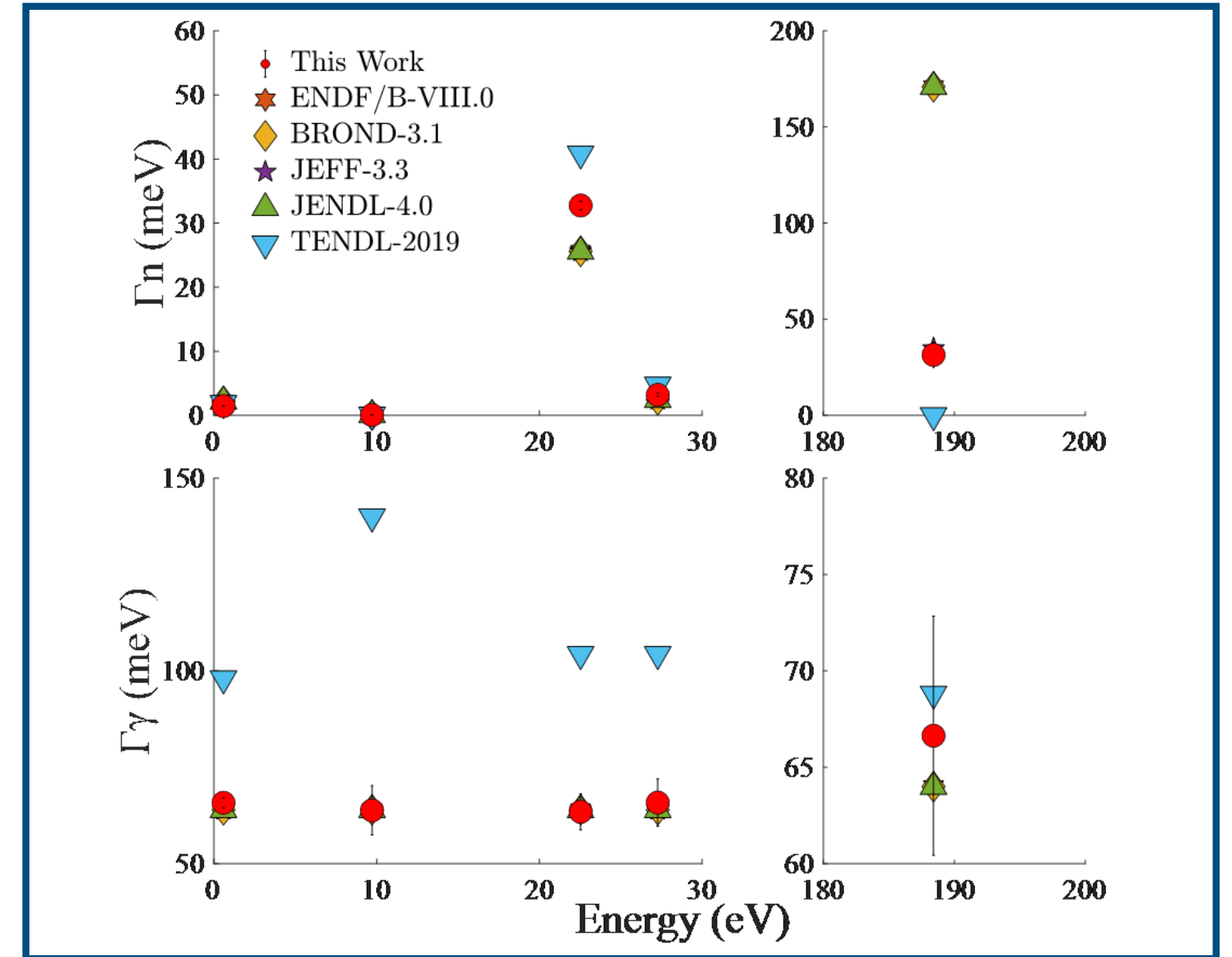
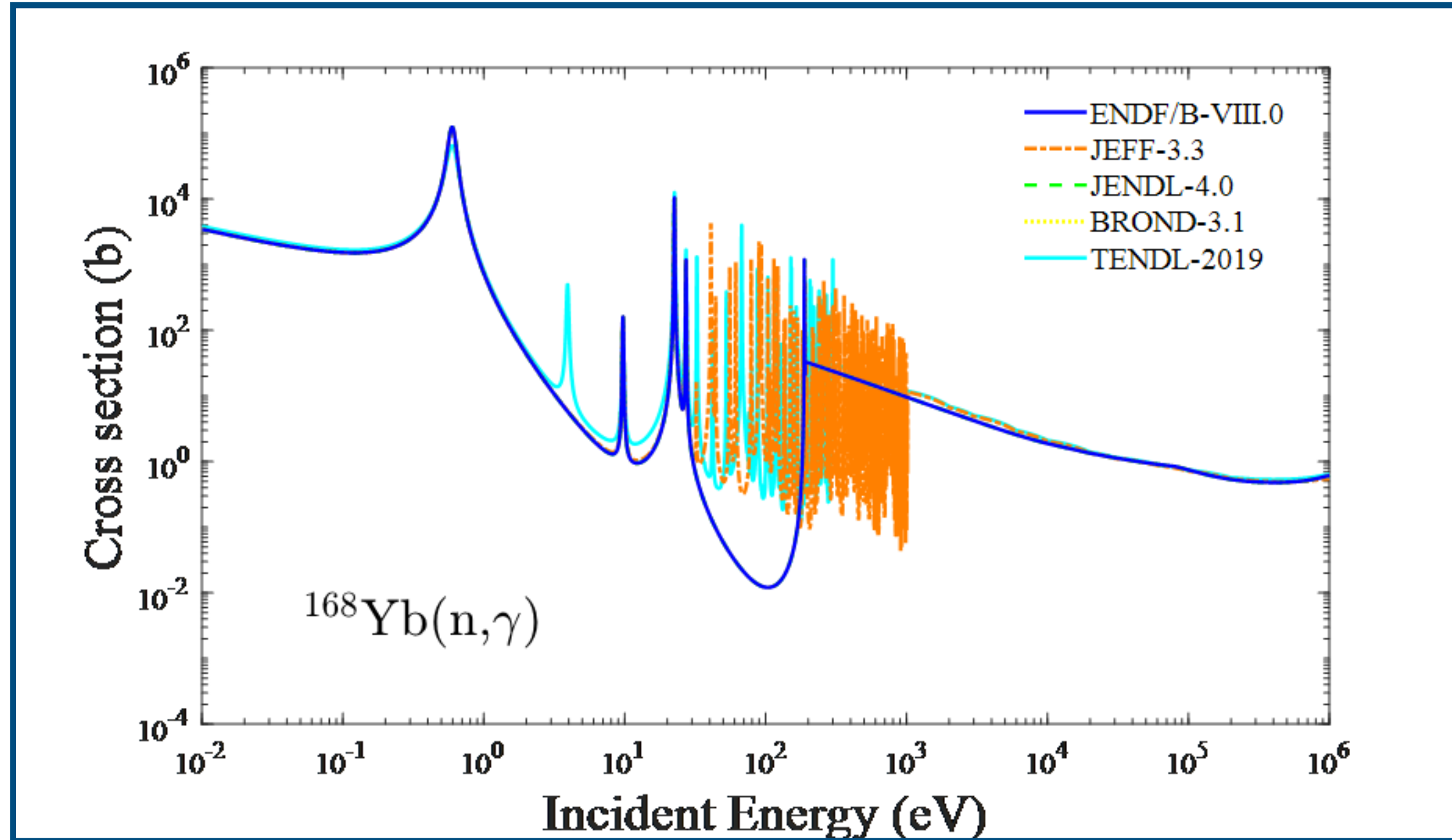
在过去的分析中, 能量箱按对数坐标均匀划分。这使得在越高能区, 能量箱间隔越大, 分布越稀疏, **难以满足精确描述较高能量处共振峰的需要。**

目前考虑根据靶的共振峰分布划分能亮箱, 正在使用Yb的数据分析中。





# natYb 中子俘获截面数据分析

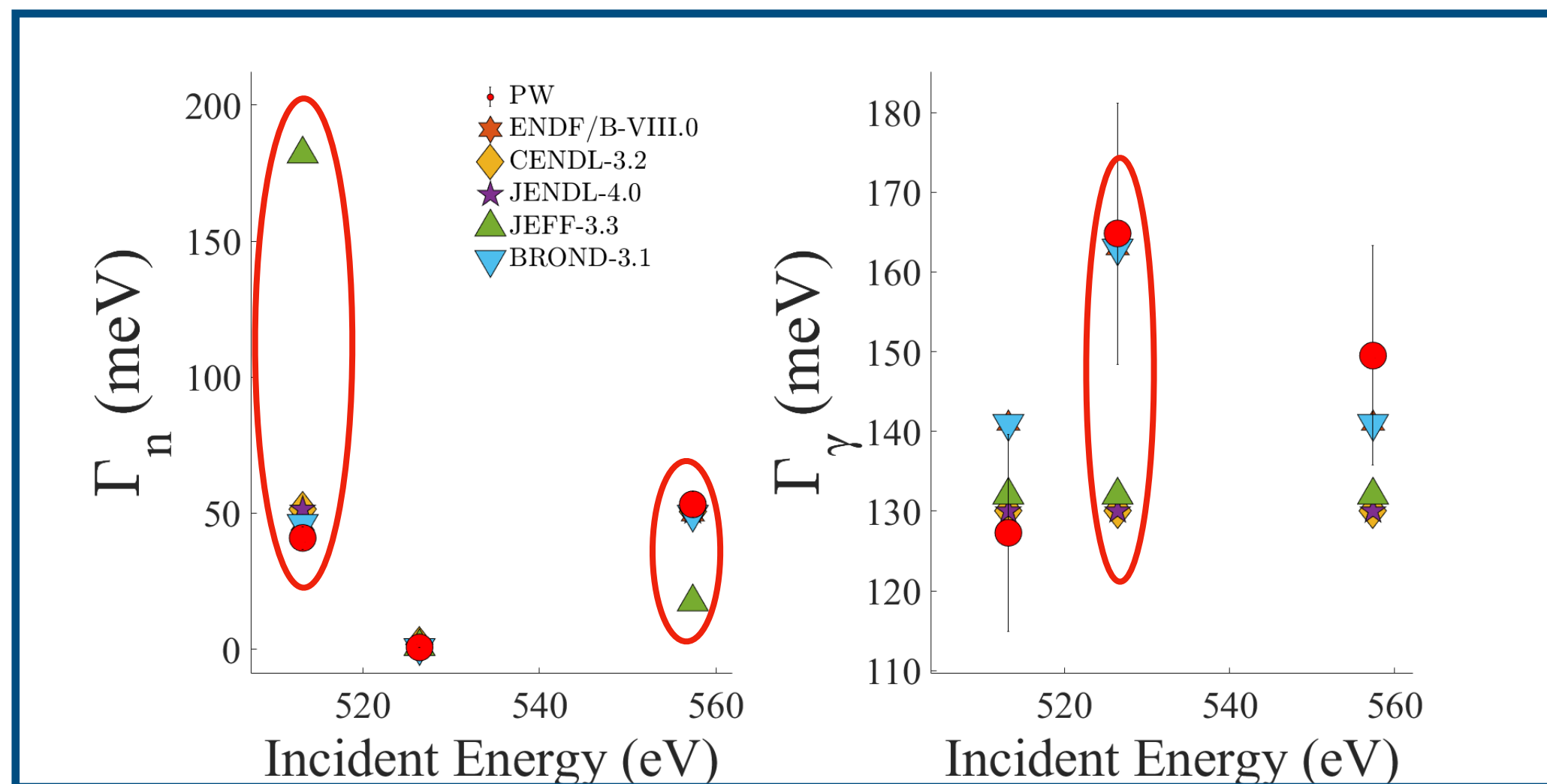
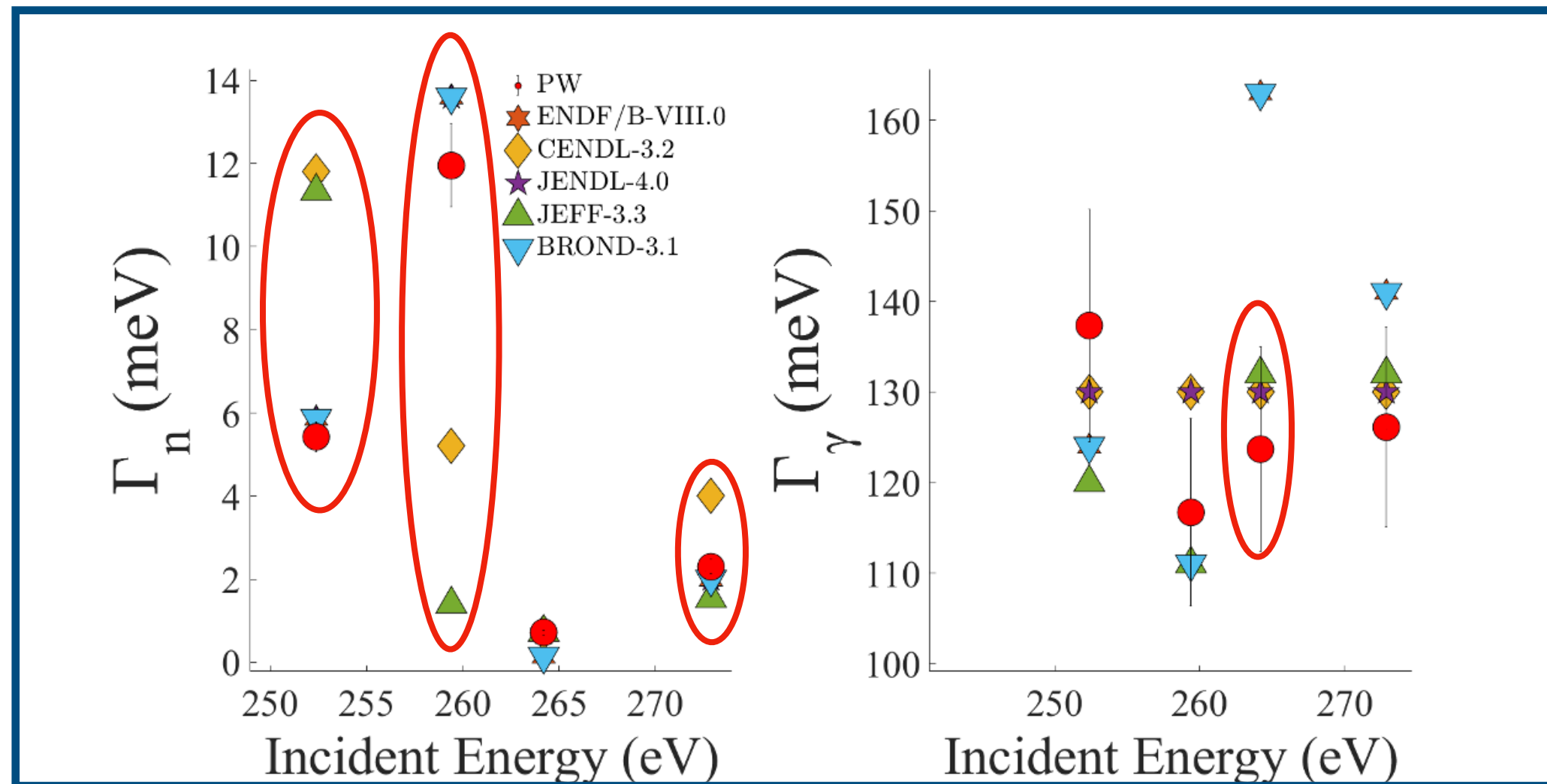


对于 $^{168}\text{Yb}$ , ENDF/B-VIII.0库、JENDL-4.0库以及BROND-3.1库都只收录了5个共振峰，而JEFF-3.3库收录了41个共振峰，TENDL-2019库中收录了201个，不同评价库差异巨大。  
在本次实验中，发现了 $^{168}\text{Yb}$ 的5个共振峰，并使用SAMMY程序提取了其共振参数，实验结果与ENDF/B-VIII.0库一致。



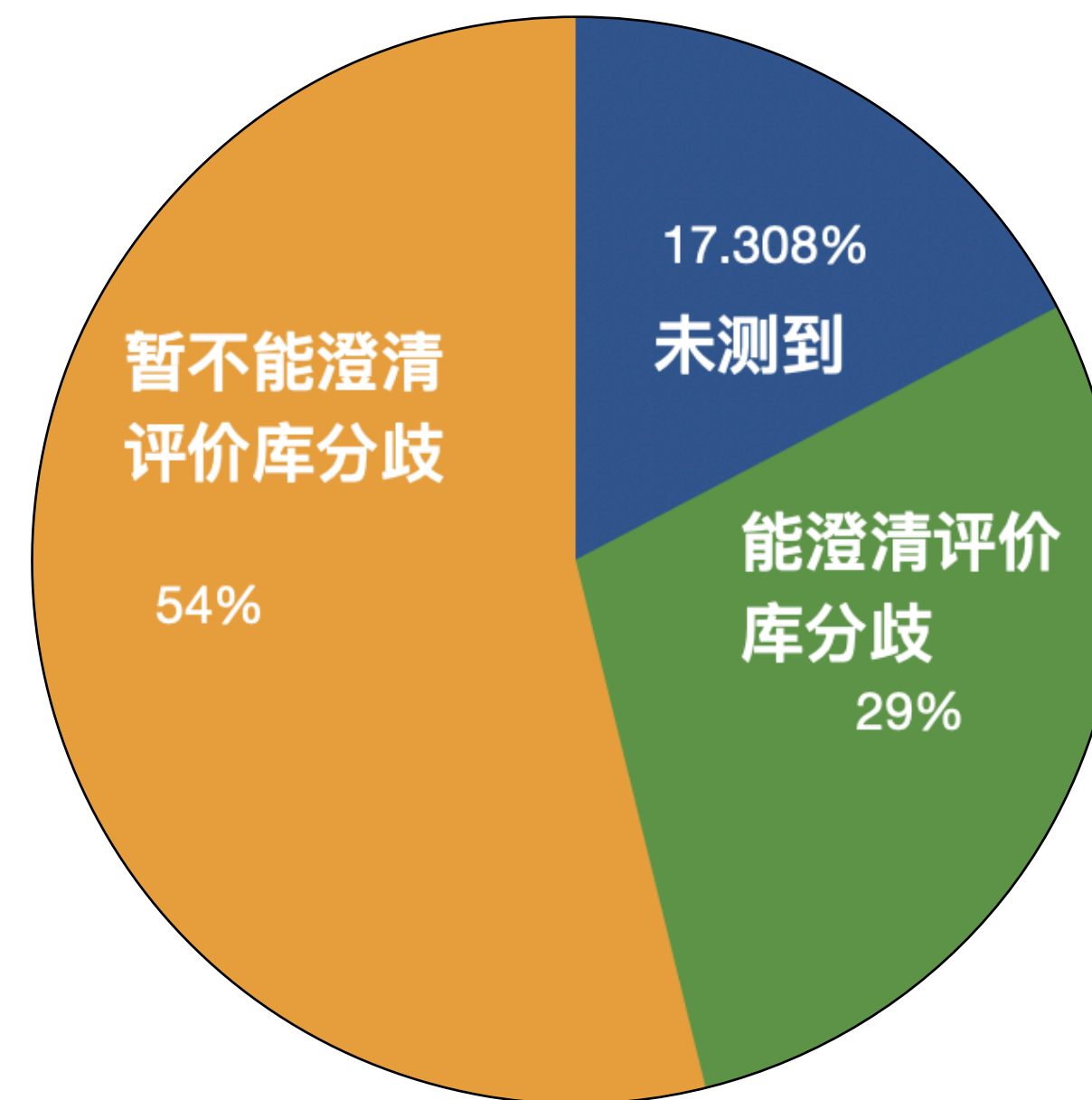


# natAg 中子俘获截面数据分析



使用**SAMMY**程序提取了1-600 eV能区<sup>109</sup>Ag的中子俘获共振参数；  
在较高能区存在与**Yb**一样的问题，仍需进一步分析。

## 初步提取的共振参数结果



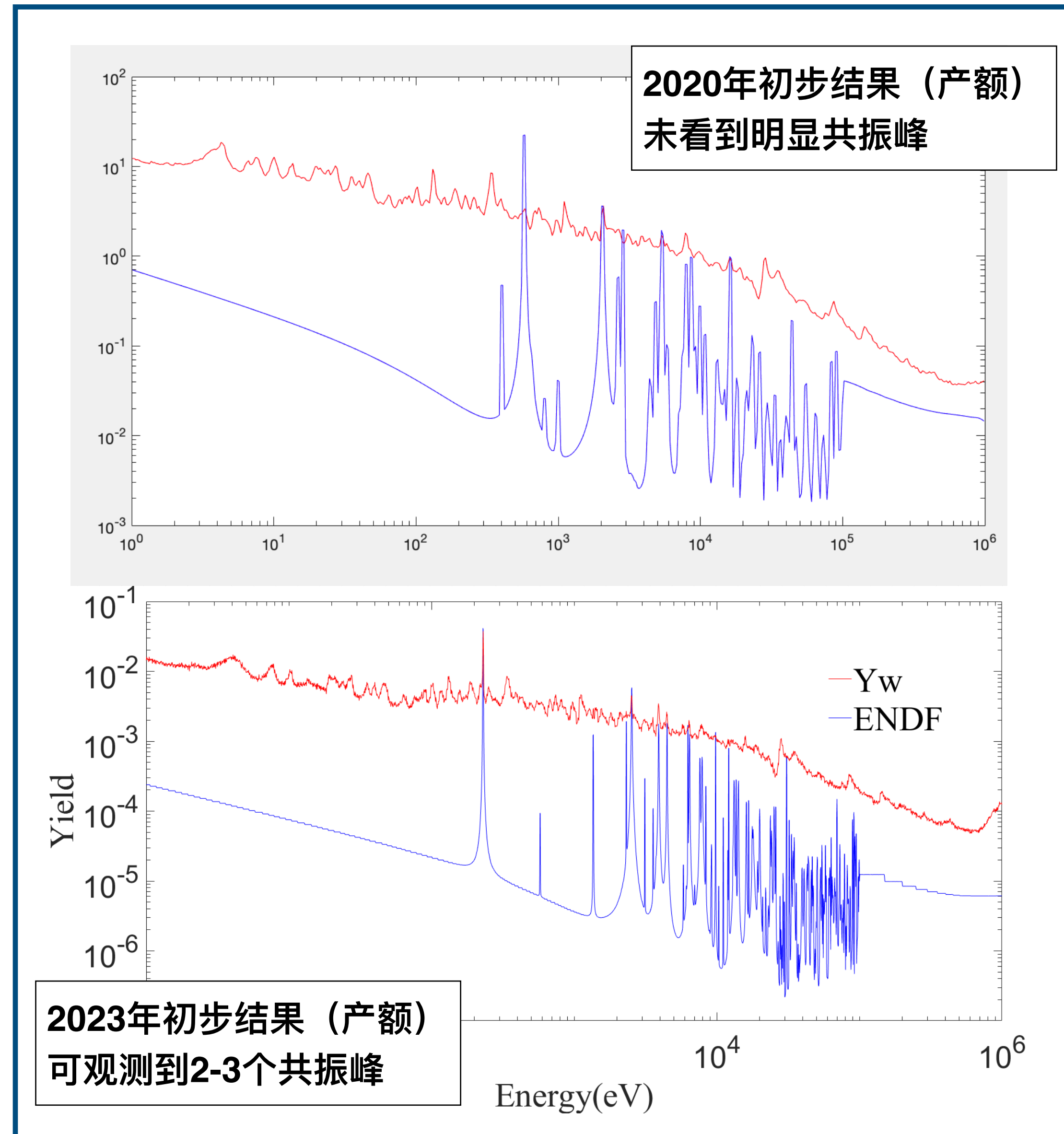
未测到的最大截面为1.2 b@82.5 eV，结论与2022年的<sup>107</sup>Ag实验一致。

正在尝试通过进一步扣除本底、非标准化能量箱划分等方式，企图找到截面更低的共振峰。





# $^{65}\text{Cu}$ 中子俘获截面数据分析



- 相对于2020年的实验条件，2024年的中子能谱更加精确，加速器功率更大；
- 相对于2020年的结果，2024年的实验初步产额中能明显发现2-3个共振峰，有明显提升；





# 上海高研院&南华大学在中子俘获截面实验研究方向发表文章汇总

(截至2024年8月)

序号	标题	期刊	发表年	第一作者	通讯作者	第一作者单位
1	脉冲高度权重技术测量 <sup>197</sup> Au中子俘获截面	核技术	2020	李鑫祥	王宏伟	中科院上海应物所
2	New experimental measurement of <sup>nat</sup> Er( <i>n</i> , $\gamma$ ) cross sections between 1 and 100 eV	Phys. Rev. C	2021	李鑫祥	王宏伟、范功涛	中科院上海应物所
3	Measurements of the <sup>197</sup> Au( <i>n</i> , <i>g</i> ) cross section up to 100 keV at the CSNS Back-n facility	Chin. Phys. B		胡新荣	刘龙祥、王宏伟、范功涛	中科院上海应物所
4	Measurements of the <sup>107</sup> Ag neutron capture cross sections with pulse height weighting technique at the CSNS Back-n facility	Chin. Phys. B	2022	李鑫祥	刘龙祥、王宏伟、范功涛	中科院上海应物所
5	New experimental measurement of <sup>nat</sup> Se( <i>n</i> , $\gamma$ ) cross section between 1 eV to 1 keV at the CSNS Back-n facility	Phys. Rev. C		胡新荣	刘龙祥、王宏伟、范功涛	中科院上海应物所
6	Experimental determination of the neutron resonance peak of <sup>162</sup> Er at 67.8 eV	Phys. Rev. C		李鑫祥	刘龙祥、王宏伟、范功涛	中科院上海高研院
7	Measurement of the <sup>nat</sup> Eu( <i>n</i> , $\gamma$ ) cross section up to 500 keV at the CSNS Back-n facility, and the stellar <sup>151,153</sup> Eu( <i>n</i> , $\gamma$ ) cross section at s-process temperatures	Eur. Phys. J. A		黎先锴	安振东	南华大学
8	Measurement of the <sup>141</sup> Pr( <i>n</i> , $\gamma$ ) cross section up to stellar s-process temperatures at the China Spallation Neutron Source Back-n facility	Phys. Rev. C	2023	黎先锴	安振东、李鑫祥、朱志超	南华大学
9	<sup>233</sup> Pa( <i>n</i> , $\gamma$ ) cross section extraction using the surrogate reaction <sup>232</sup> Th( <sup>3</sup> He, <i>p</i> ) <sup>234</sup> Pa*involving spin-parity distribution	Phys. Rev. C	2024	谭畅翔	李鑫祥、罗文	南华大学

截至目前，SLEGS组在中子俘获截面实验研究领域发表了学术论文9篇，占Back-n发表论文总数的10% (9/86)



# 目 录

- 1、研究背景与意义
- 2、研究现状与进展
- 3、总结与展望**







# Why neutron capture?

PHYSICAL REVIEW LETTERS 132, 122701 (2024)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

## Measurement of the $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)$ Cross Section at n\_TOF and Its Astrophysical Implications for the Chemical Evolution of the Universe

S. Amaducci<sup>1</sup>, N. Colonna,<sup>2</sup> L. Cosentino,<sup>1</sup> S. Cristallo,<sup>3,4</sup> P. Finocchiaro,<sup>1</sup> M. Krtička,<sup>5</sup> C. Massimi,<sup>6,7</sup> M. Mastromarco,<sup>8</sup> A. Mazzone,<sup>2,9</sup> E. A. Mauger, <sup>10</sup> A. Mengoni,<sup>6,11</sup> I. U. Roederer,<sup>12,13,14</sup> O. Straniero,<sup>3,15</sup> S. Valenta,<sup>5</sup> D. Vescovi,<sup>3,4</sup> O. Aberle,<sup>8</sup> V. Alcayne,<sup>16</sup> J. Andrzejewski,<sup>17</sup> L. Audouin,<sup>18</sup> V. Babiano-Suarez,<sup>19</sup> M. Bacak,<sup>8,20,21</sup> M. Barbagallo,<sup>8,2</sup> S. Bennett,<sup>22</sup> E. Berthoumieux,<sup>21</sup> J. Billowes,<sup>22</sup> D. Bosnar,<sup>23</sup> A. Brown,<sup>24</sup> M. Busso,<sup>4,25</sup> M. Caamaño,<sup>26</sup> L. Caballero-Ontanaya,<sup>19</sup> F. Calviño,<sup>27</sup> M. Calviani,<sup>8</sup> D. Cano-Ott,<sup>16</sup> A. Casanovas,<sup>27</sup> F. Cerutti,<sup>8</sup> E. Chiaveri,<sup>8,22</sup> G. Cortés,<sup>27</sup> M. A. Cortés-Giraldo,<sup>28</sup> L. A. Damone,<sup>2,29</sup> P. J. Davies,<sup>22</sup> M. Diakaki,<sup>30,8</sup> M. Dietz,<sup>31</sup> C. Domingo-Pardo,<sup>19</sup> R. Dressler,<sup>10</sup> Q. Ducasse,<sup>32</sup> E. Dupont,<sup>21</sup> I. Durán,<sup>26</sup> Z. Eleme,<sup>33</sup> B. Fernández-Domínguez,<sup>26</sup> A. Ferrari,<sup>8</sup> V. Furman,<sup>34</sup> K. Göbel,<sup>35</sup> R. Garg,<sup>31</sup> A. Gawlik-Ramięga,<sup>17</sup> S. Gilardoni,<sup>8</sup> I. F. Gonçalves,<sup>36</sup> E. González-Romero,<sup>16</sup> C. Guerrero,<sup>28</sup> F. Gunsing,<sup>21</sup> H. Harada,<sup>37</sup> S. Heinitz,<sup>10</sup> J. Heyse,<sup>38</sup> D. G. Jenkins,<sup>24</sup> A. Junghans,<sup>39</sup> F. Käppeler,<sup>40,\*</sup> Y. Kadi,<sup>8</sup> A. Kimura,<sup>37</sup> I. Knapová,<sup>5</sup> M. Kokkoris,<sup>30</sup> Y. Kopatch,<sup>34</sup> D. Kurtulgil,<sup>35</sup> I. Ladarescu,<sup>19</sup> C. Lederer-Woods,<sup>31</sup> H. Leeb,<sup>20</sup> J. Lerendegui-Marco,<sup>28</sup> S. J. Lonsdale,<sup>31</sup> D. Macina,<sup>8</sup> A. Manna,<sup>6,7</sup> T. Martínez,<sup>16</sup> A. Masi,<sup>8</sup> P. Mastinu,<sup>41</sup> E. Mendoza,<sup>16</sup> V. Michalopoulou,<sup>30,8</sup> P. M. Milazzo,<sup>42</sup> F. Mingrone,<sup>8</sup> J. Moreno-Soto,<sup>21</sup> A. Musumarra,<sup>43,44</sup> A. Negret,<sup>45</sup> R. Nolte,<sup>32</sup> F. Ogállar,<sup>46</sup> A. Oprea,<sup>45</sup> N. Patronis,<sup>33</sup> A. Pavlik,<sup>47</sup> J. Perkowski,<sup>17</sup> C. Petrone,<sup>45</sup> L. Piersanti,<sup>3,4</sup> E. Pirovano,<sup>32</sup> I. Porras,<sup>46</sup> J. Praena,<sup>46</sup> J. M. Quesada,<sup>28</sup> D. Ramos-Doval,<sup>18</sup> T. Rauscher,<sup>48,49</sup> R. Reifarth,<sup>35</sup> D. Rochman,<sup>10</sup> C. Rubbia,<sup>8</sup> M. Sabaté-Gilarte,<sup>28,8</sup> A. Saxena,<sup>50</sup> P. Schillebeeckx,<sup>38</sup> D. Schumann,<sup>10</sup> A. Sekhar,<sup>22</sup> A. G. Smith,<sup>22</sup> N. V. Sosnin,<sup>22</sup> P. Sprung,<sup>10</sup> A. Stamatopoulos,<sup>30</sup> G. Tagliente,<sup>2</sup> J. L. Tain,<sup>19</sup> A. Tarifeño-Saldivia,<sup>19</sup> L. Tassan-Got,<sup>8,30,18</sup> Th. Thomas,<sup>35</sup> P. Torres-Sánchez,<sup>46</sup> A. Tsinganis,<sup>8</sup> J. Ulrich,<sup>10</sup> S. Urlass,<sup>39,8</sup> G. Vannini,<sup>6,7</sup> V. Variale,<sup>2</sup> P. Vaz,<sup>36</sup> A. Ventura,<sup>6</sup> V. Vlachoudis,<sup>8</sup> R. Vlastou,<sup>30</sup> A. Wallner,<sup>51</sup> P. J. Woods,<sup>31</sup> T. Wright,<sup>22</sup> and P. Žugec<sup>23</sup>

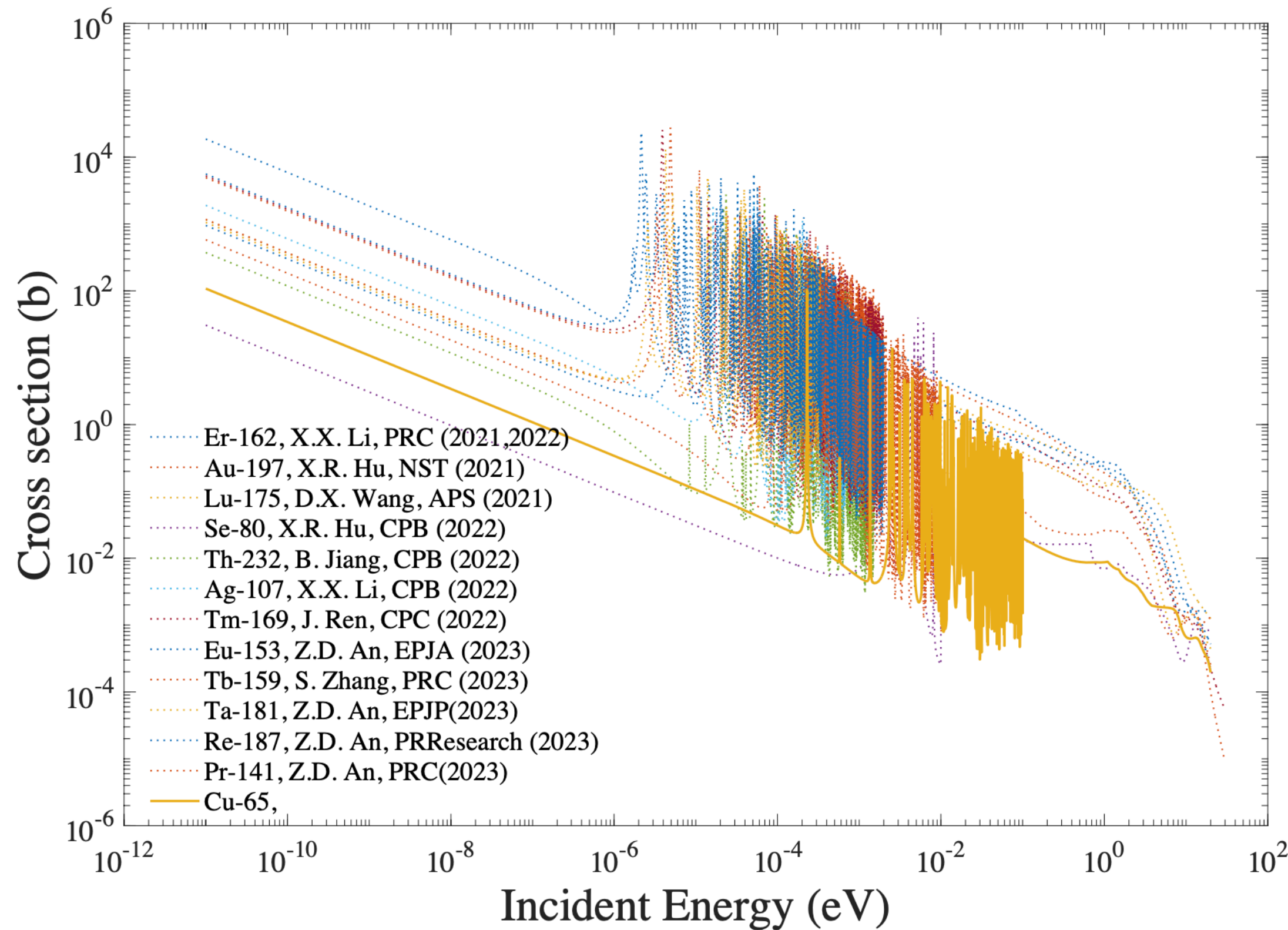
制约Back-n装置获得更好物理结果的关键问题：  
低截面与低丰度靶的高精度测量技术与分析方法有待发展发展和完善

How far is the result of Back-n from PRL?





# Why $^{65}\text{Cu}$ target?

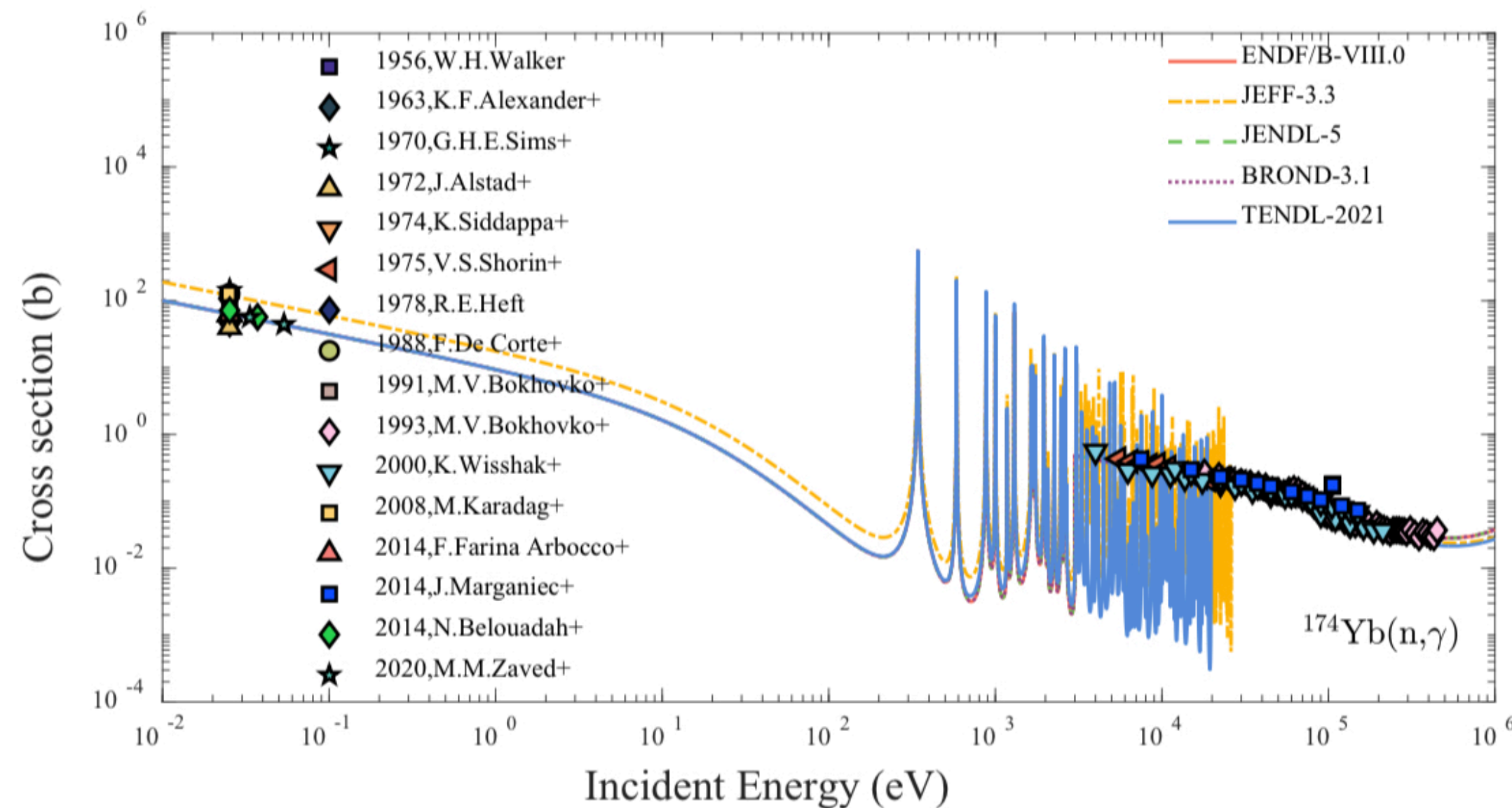


- The resonance peak cross-section of  $^{65}\text{Cu}$  is generally lower than the data published by Back-n collaboration.
- The neutron capture resonance peak cross-section of  $^{65}\text{Cu}$  is still within the current capacity of Back-n facility with deuterated benzene detector.
- **In 2023, we conducted the experiment of copper 65 target (n,g) cross section measurement and the data is currently being analyzed.**





# Why $^{174}\text{Yb}$ target?



- We plan to explore the method of extracting neutron capture cross-sections for extremely low abundance isotopes through a series of isotopic target measurements;

- $^{174}\text{Yb}$  丰度 32%，制靶可行性高；
- 2022年已经完成Yb天然靶测量，我们有足够的实验数据可供低丰度靶分析的改进方法探索与发展；





南  
華  
大  
學

# 合作研究



罗文、朱志超、冯松、袁赞、李鑫祥  
陈雅菊、谢文、江婷、李志才、罗凯军、林姿、彭宁馨 等

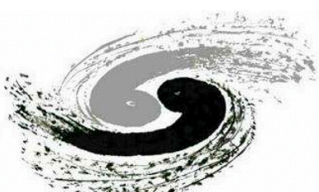


Shanghai Laser Electron Gamma Source

王宏伟、范功涛、刘龙祥、张岳



安振东、杨高乐



中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics  
Chinese Academy of Sciences



Back-n团队



张苏雅拉吐、王德鑫



任杰



何建军、苏俊、张立勇



刘应都



马春旺、  
王玉廷



陈金根、胡继峰、  
王小鹤、黄勃松



胡新荣



李欣雨



感谢您的聆听！  
请大家批评指正！