

基于CSNS反角白光中子源的 ^{45}Sc 中子俘获截面的 实验研究

汇报人：林子昂

导 师：罗文 李鑫祥

南华大学 核科学技术学院



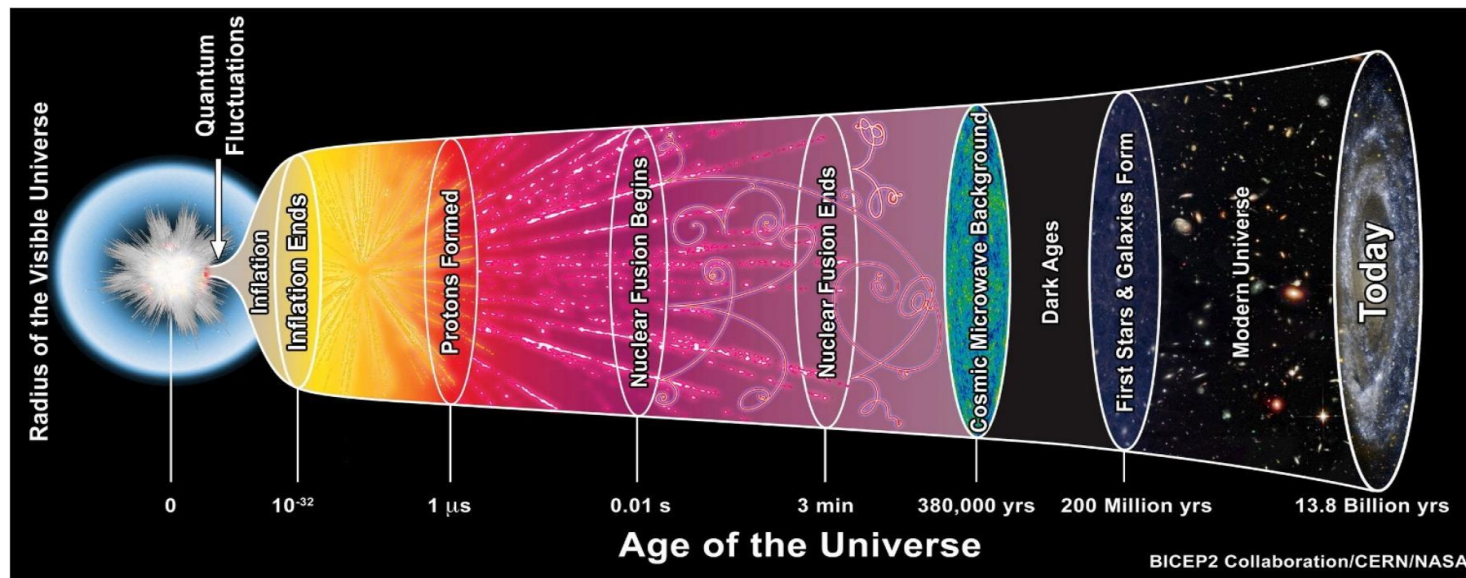
❖ 研究背景

❖ 实验与数据处理

❖ 数据与结果分析

探究宇宙中元素起源一直是天体物理学的一个重要方向。

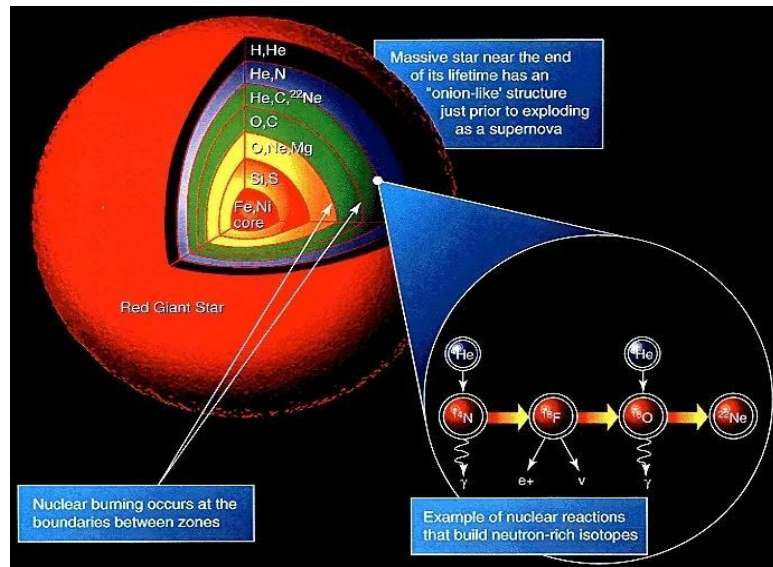
基于大爆炸理论的宇宙演化模型可以解释轻元素(如 H、He、Li 等)的形成。



目前公认的理论表明，宇宙起源于138亿年前的一次大爆炸。

● **恒星核合成:** 轻核 ($A < 56$) 的中子俘获截面数据可以作为研究恒星内部核合成过程的重要输入参数, 有助于解释宇宙中各种天体内核素丰度的分布规律, 对于理解恒星演化和宇宙化学演化具有重要意义。

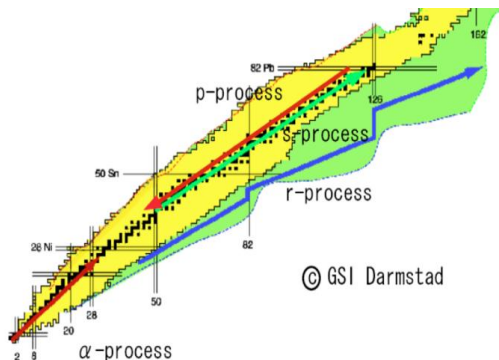
● **对慢中子俘获过程 (s-过程) 的影响:** 轻核的中子俘获截面对于s-过程至关重要, 因为它们可以充当中子毒物, 消耗原本可用于s-过程核合成的中子。特别是对于质量数小于56的核素, 虽然它们的中子俘获截面相对较小, 但它们在恒星中的高丰度可能会对s-过程产生显著影响。



[1] HEIL M, PLAG R, UBERSEDER E, et al. Stellar neutron capture cross sections of ^{41}K and ^{45}Sc [J]. Physical Review C, 2016, 93(5): 055807.

- ^{45}Sc 中子俘获截面可对 s-过程模型提供严格约束。
- ^{46}Sc 由于其经济性较好可用于替代 ^{60}Co 核素进行无损伽马检测，同时其也广泛运用于原油炼化裂解装置中的示踪剂以及生物和医学研究，精确测量 ^{45}Sc 中子俘获截面有助于准确预测和优化 ^{46}Sc 产量

天体核合成

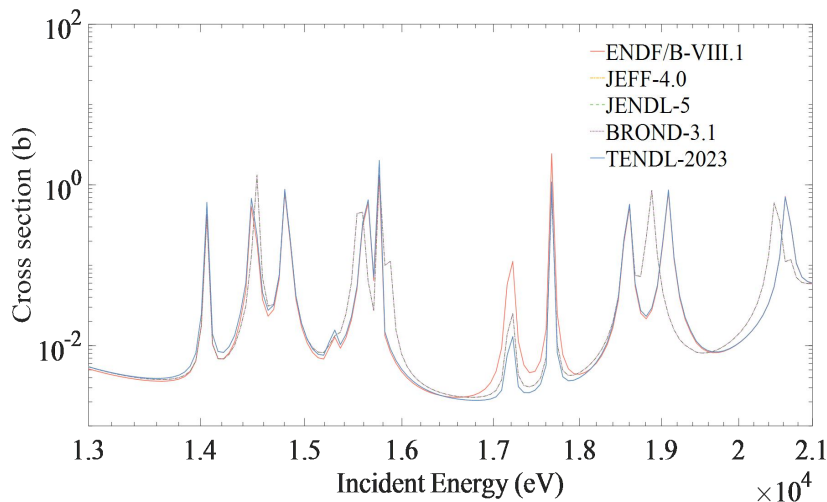


无损 γ 检测

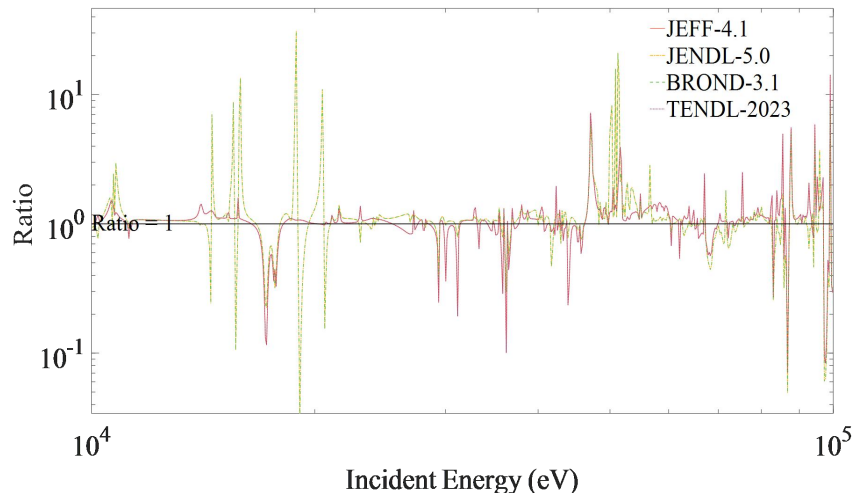


原油裂变示踪





主要评价核数据库和EXFOR数据库中的 ^{45}Sc 中子俘获截面数据



主要评价核数据库与ENDF数据库的比值

在10 keV至100 keV的能量范围内，不同评价核数据库之间也存在差异。

❖ 研究背景

❖ 实验与数据处理

❖ 数据与结果分析

Neutron Source Detection Apparatus and Experimental Target Material Selection

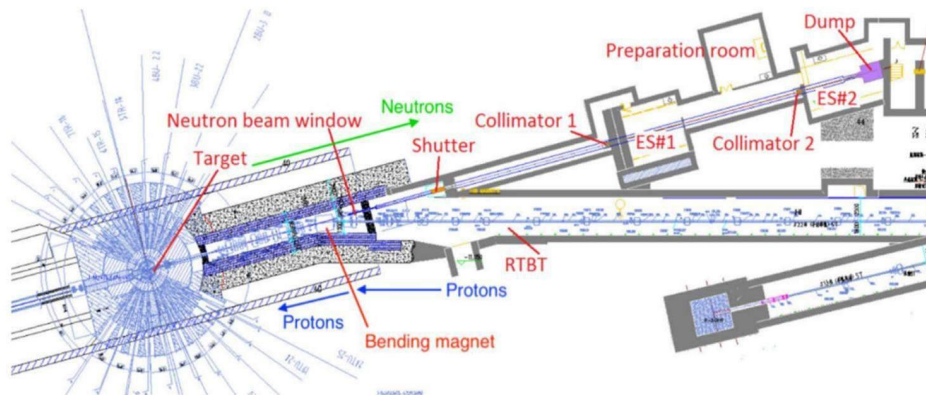
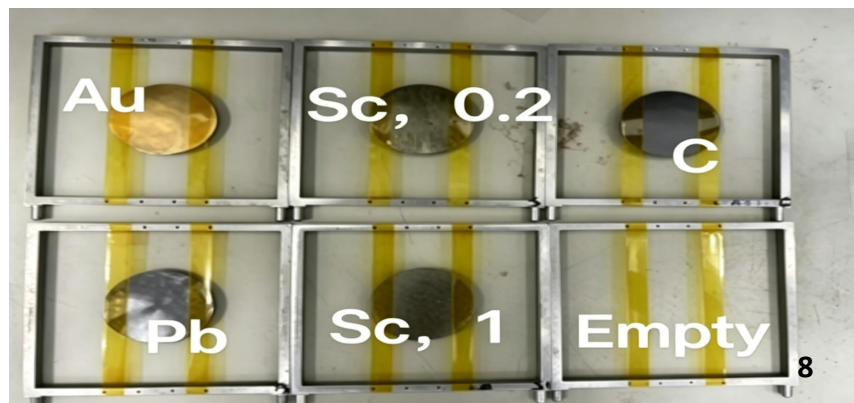
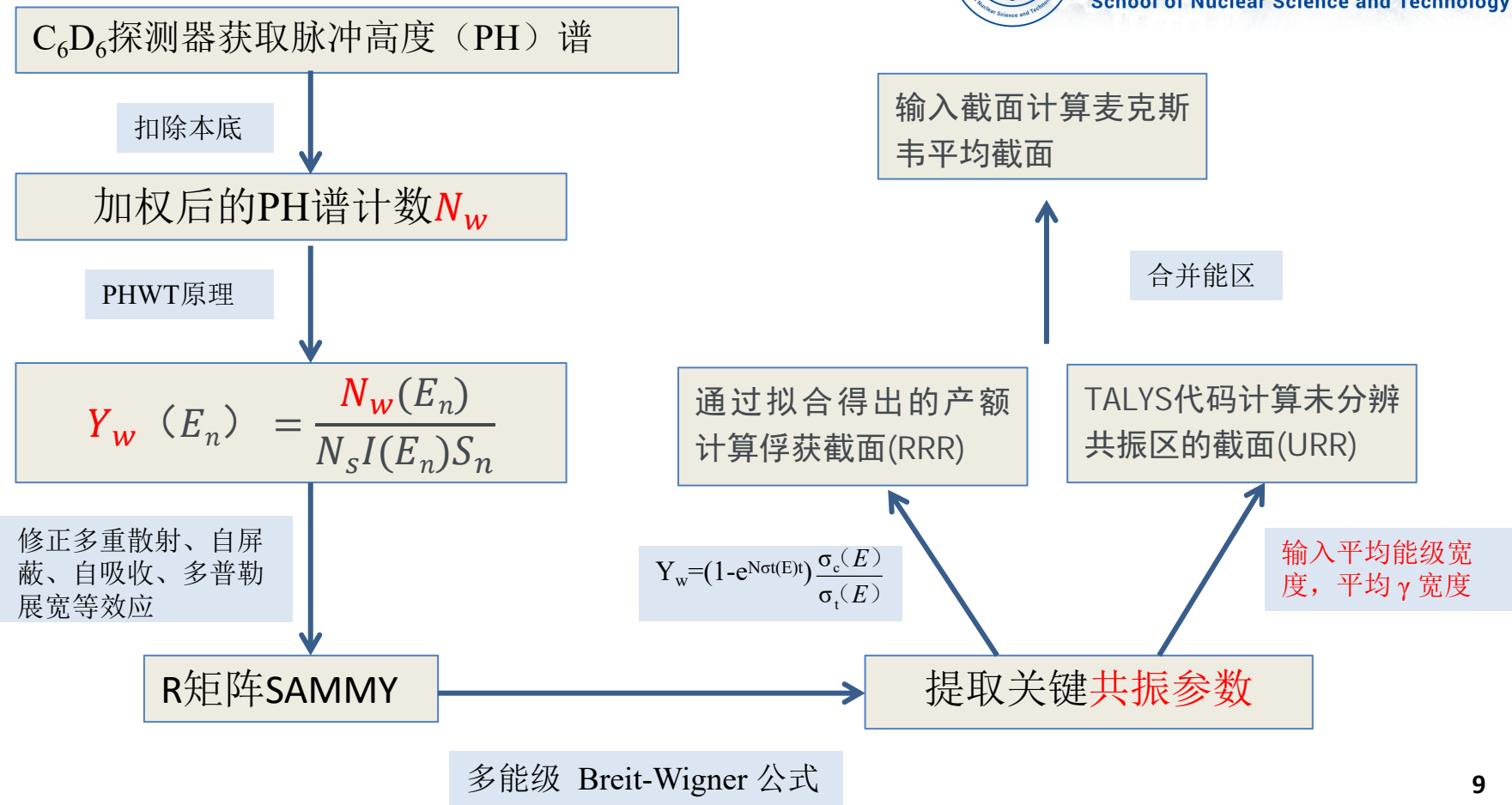


Figure from Wang J, Ren J, Jiang W, et al. In-beam gamma rays of CSNS Back-n characterized by black resonance filter [J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, 35 (10): 8-19.

在CSNS（中国散裂中子源）上，Back-n白中子源是一条专用于核数据测量的束线。为获取宽能谱中子，散裂靶前未安装慢化体；而得益于中子不带电、不受磁场影响的物理特性，Back-n合作组进一步研制了后向引出束线，以优化实验环境。该束线的具体布局由右上图给出。

Experimental target	Target parameters	Measurement time (h)
^{45}Sc	$\phi 50\text{mm} \times 1\text{mm}$	11
$^{45}\text{Sc} + \text{Filter}(\text{Ta} + \text{Co})$	$\phi 50\text{mm} \times 1\text{mm}$	8
C-nat	$\phi 50\text{mm} \times 0.2\text{mm}$	4
Pb-nat	$\phi 50\text{mm} \times 0.2\text{mm}$	6
Empty	/	6.5

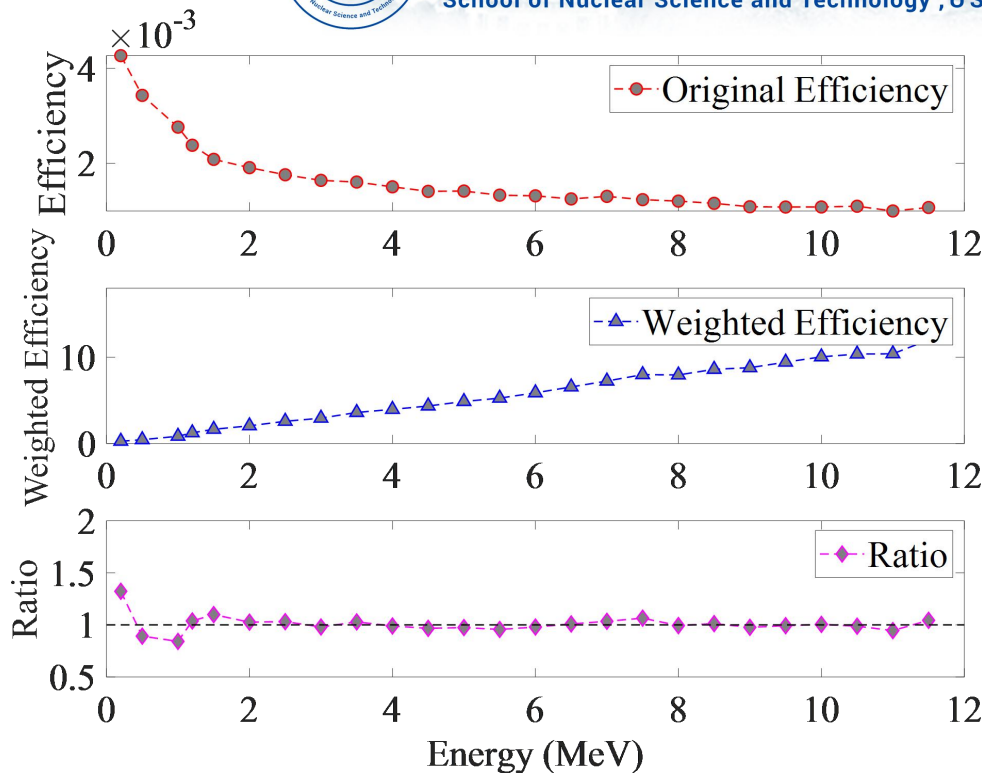




在未加权重参数时探测器探测效率与 γ 能量无关。

探测器在加上权重参数后与 γ 能量成正比。

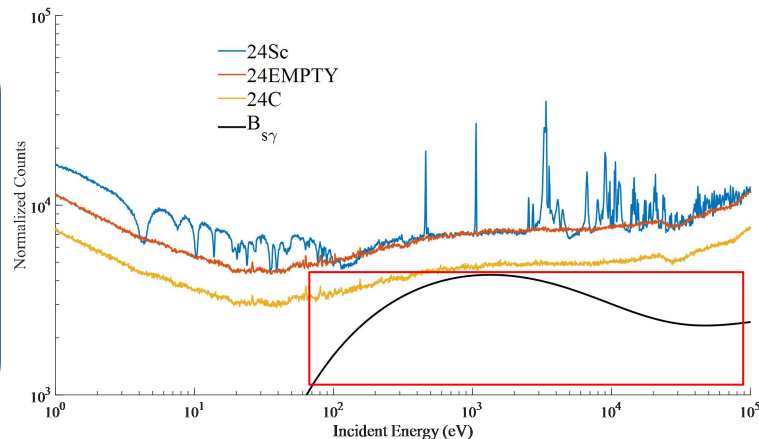
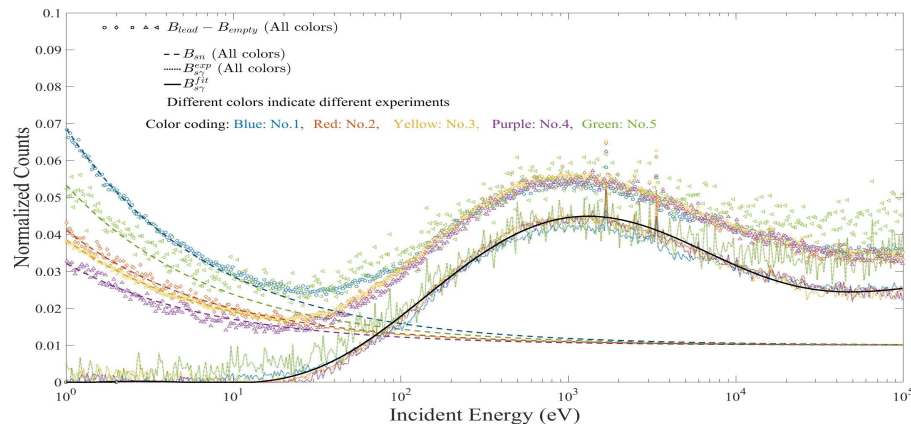
Ratio表示加权效率与对应 γ 能量的比值。



Background subtraction

空靶加束流状态：用于测量环境本底和束流引致的本底。

铅靶加实验靶并带有吸收体状态：用于确定和标定束内伽马本底。

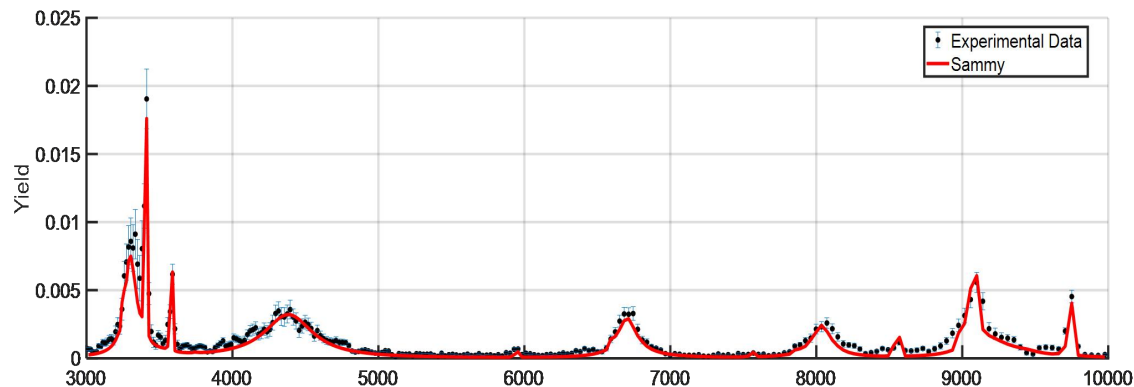
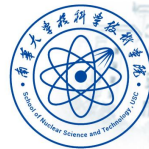


束内伽马本底形状的确认为及刻度

❖ 研究背景

❖ 实验与数据处理

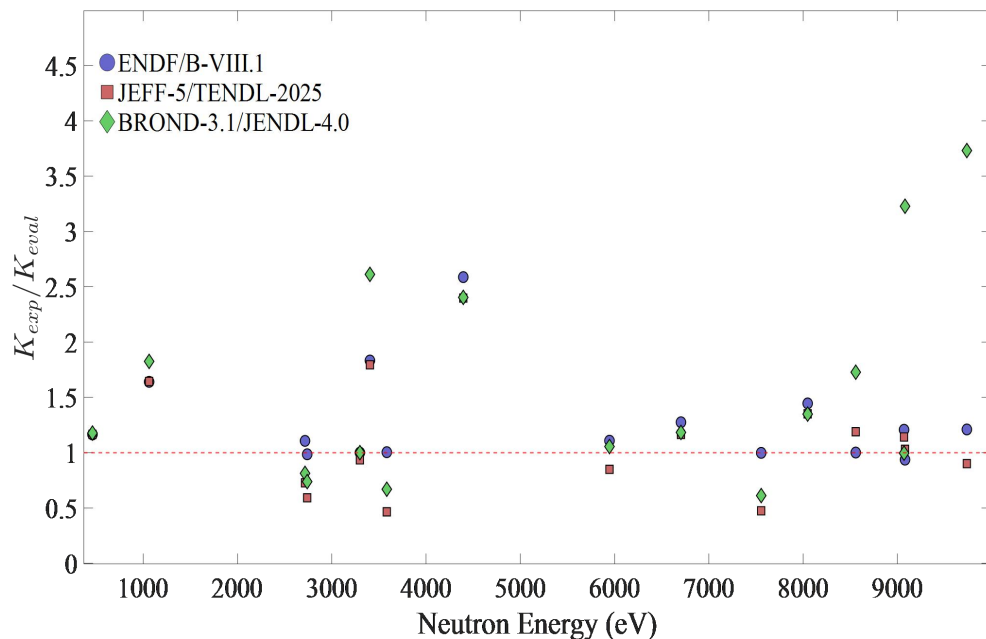
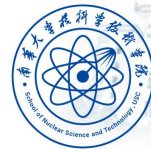
❖ 数据与结果分析



^{45}Sc 产额SAMMY拟合结果与实验结果对比

采用R-Matrix理论分析程序SAMMY8（美国橡树岭国家实验室开发）对实验数据进行拟合与共振参数提取。该程序具备多重散射、多普勒展宽、能量分辨率展宽等多种实验效应修正能力，可精确处理中子、质子、 α 粒子等多种入射粒子参与的裂变、库仑激发、弹性散射及辐射俘获等核反应过程。

^{45}Sc K值相较于主流评价库比值



实验K值相较于不同数据库K值的比值

$$k = g \frac{\Gamma_n \Gamma_\gamma}{\Gamma_n + \Gamma_\gamma}$$

该公式为共振因子计算公式，
g因子是由下述公式计算得到

$$g = \frac{2J + 1}{(2s + 1)(2I + 1)}$$

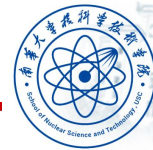
其中s是中子自旋量子数等于
1/2，J是总角动量，I是基态
自旋。

实验K值相较于ENDF/B-VIII.1的平均比值 : 1.28

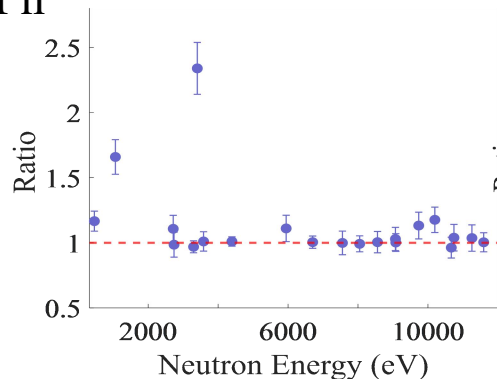
实验K值相较于JEFF-5/TENDL-2025的平均比值 : 1.11

实验K值相较于BROND-3.1/JENDL-4.0的平均比值: 1.57

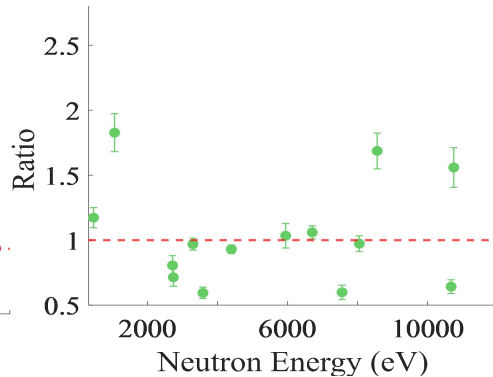
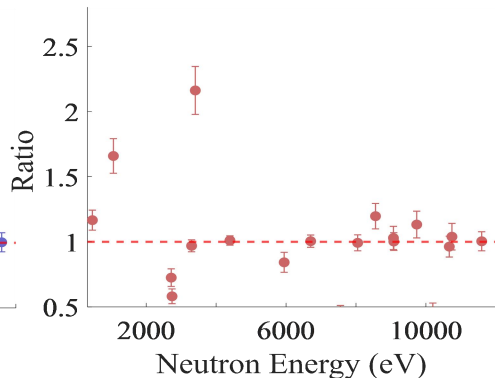
不同数据库中 ^{45}Sc 共振参数的整体偏差



Γ_n ENDF/B-VIII.0

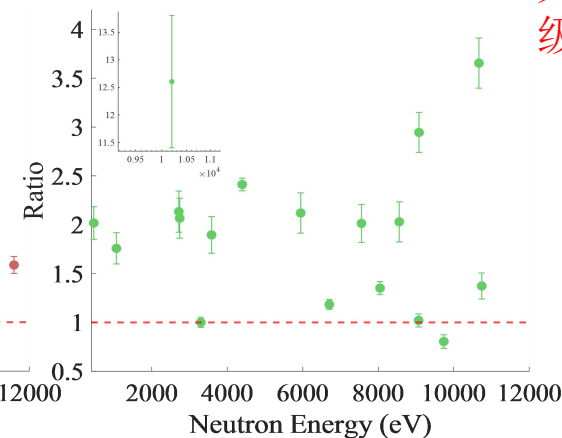
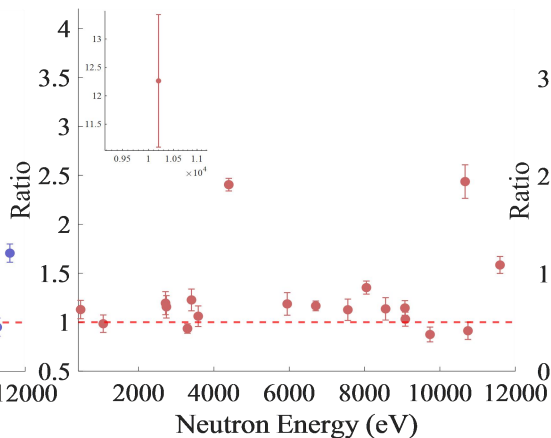
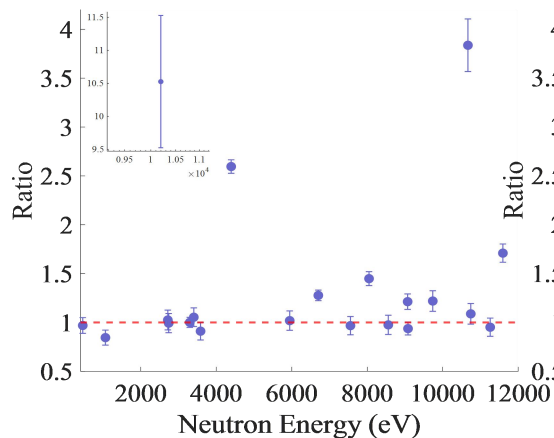


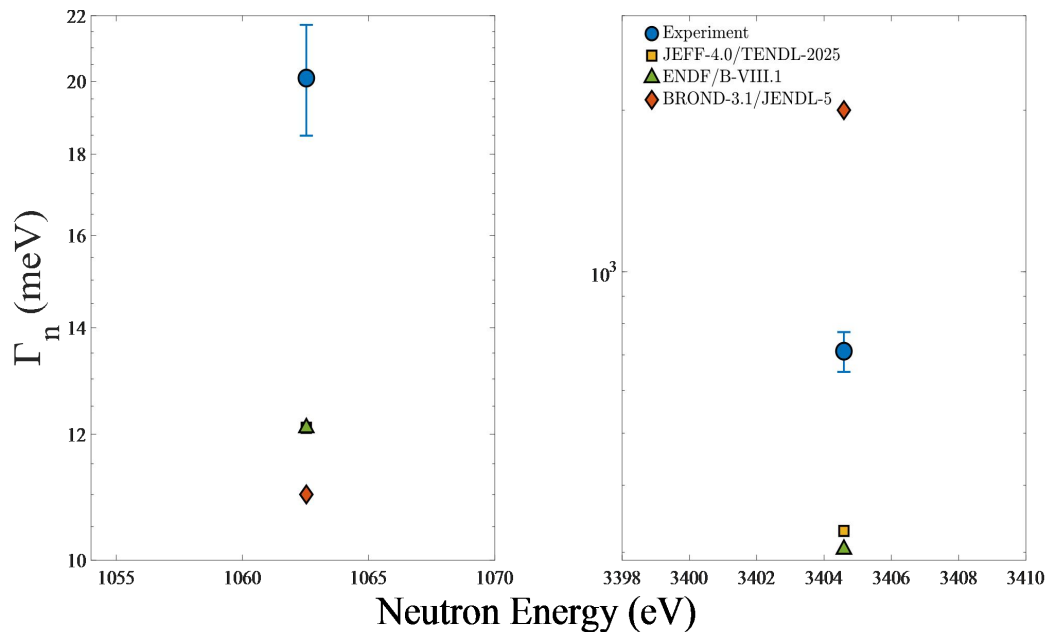
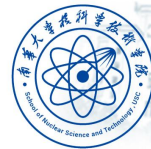
JEFF/TENDL



实验得到的 Γ_n 、 Γ_γ 值与ENDF评价数据的总体偏差最小，但在10189 eV处，实验给出的 Γ_γ 值比所有数据库中的值大约高出一个数量级。

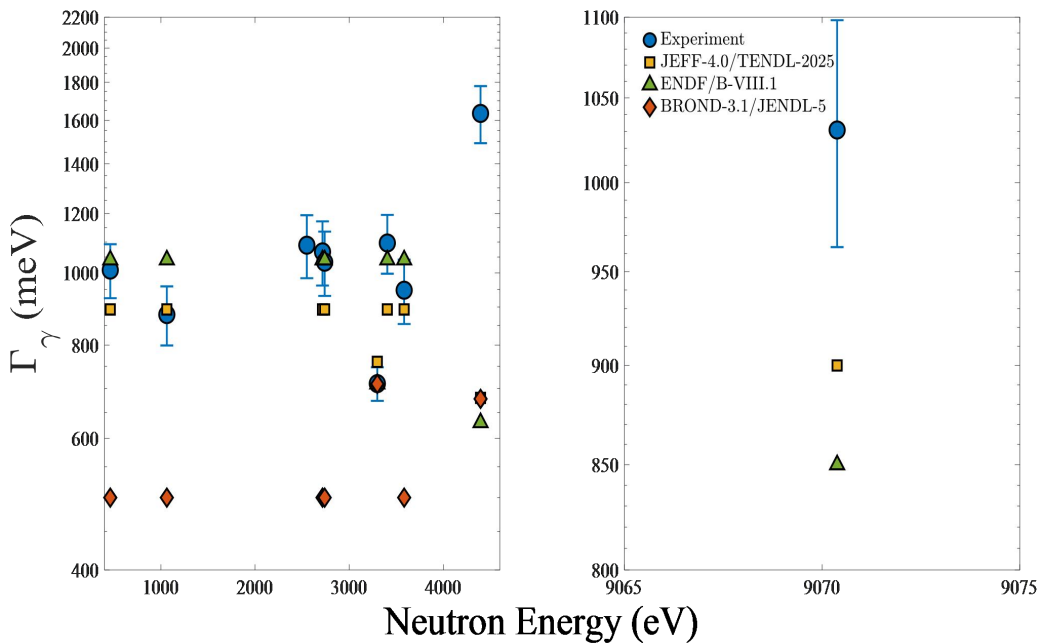
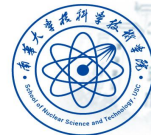
Γ_γ





Energy	This work	ENDF	BROND	JEFF
1062.25	19.82±2	10.00	10.00	10.00
3407.95	710.51±40	329.00	2000.00	304.00

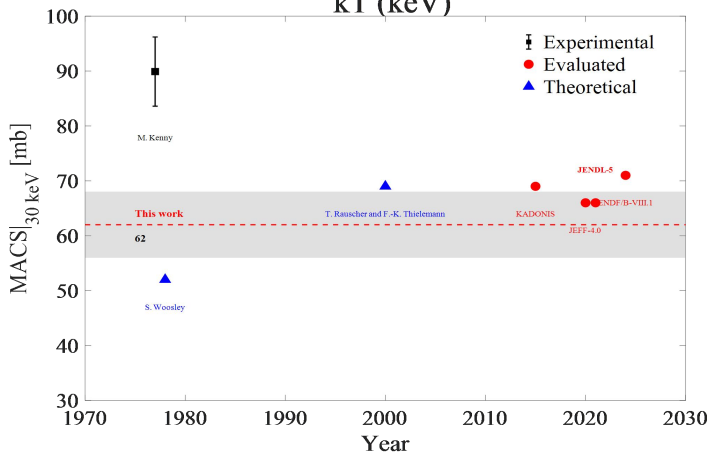
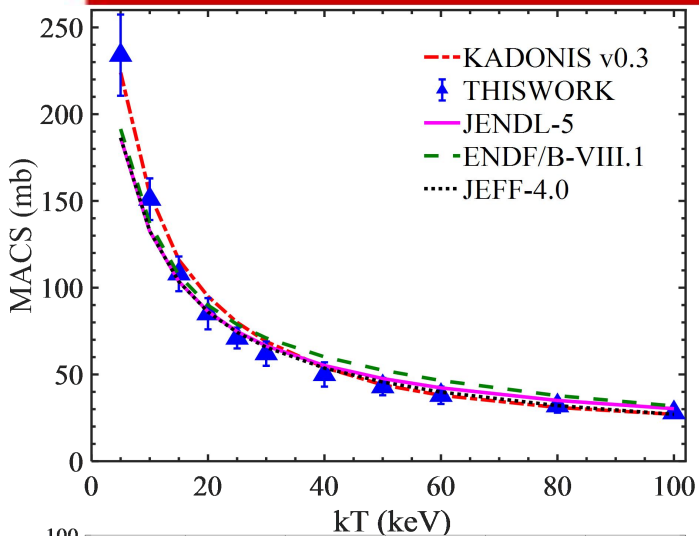
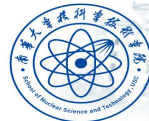
在1062.25 eV处 Γ_n 实验值高于5大主流数据库，在3404.59 eV处 Γ_n 实验值高于ENDF/JEFF/TENDL，低于BROND/JENDL数据库



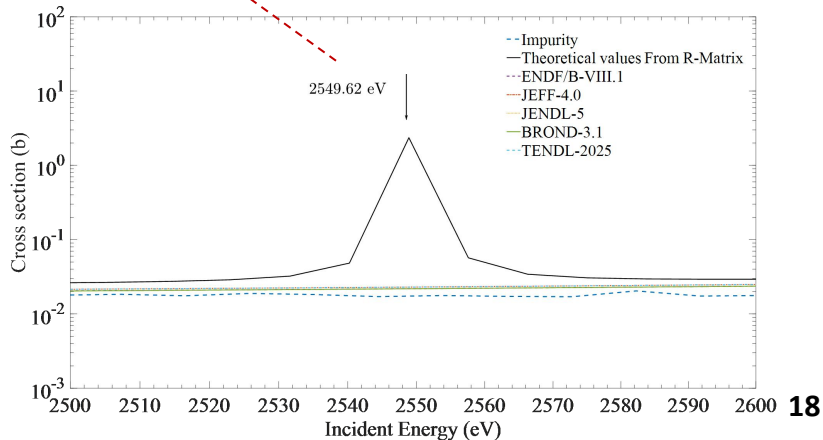
Energy	This work	ENDF	BROND	JEFF
461.50	1008.60±83.76	893.26	500.00	1040.80
2716.21	1066.90±105.3	893.26	500.00	1040.80
4394.17	1630.15±40	680	670	630
9070.50	1030.41±70	900	/	850

- 在461.50，2716.21，2739.24，3404.59 eV处实验值的 Γ_γ 更加接近于ENDF库，显著高于JEFF/TENDL/BROND数据库。
- 在4394 eV处的实验值高于所有评价数据库。
- 本次实验测得了9070.50 eV处BROND数据库缺失的数据，且实验数据接近ENDF/JEFF/TENDL数据库。

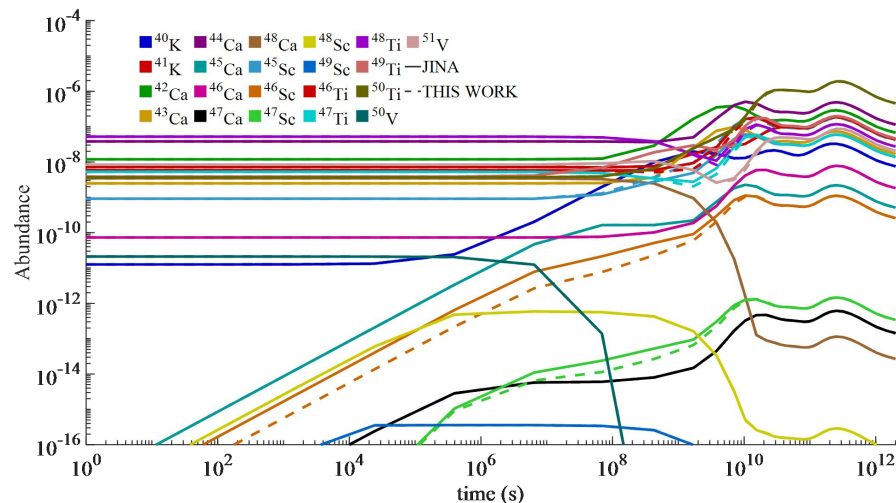
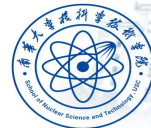
麦克斯韦截面及新共振结构



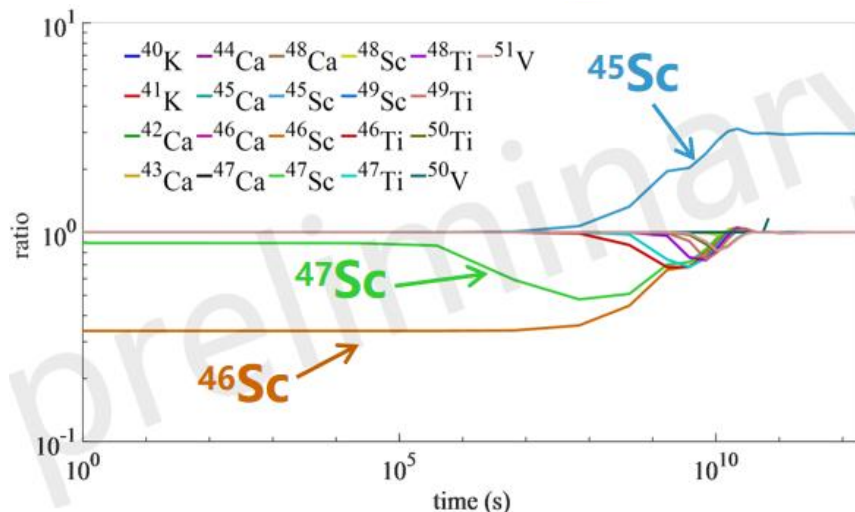
Gamma_n					Gamma_g			
Energy_eV	This work	JEFF	BROND	ENDF	This work	JEFF	BROND	ENDF
2549.62	0.13±0.013	/	/	/	1.089±0.0858	/	/	/



^{45}Sc 在S过程中对周围核素的影响



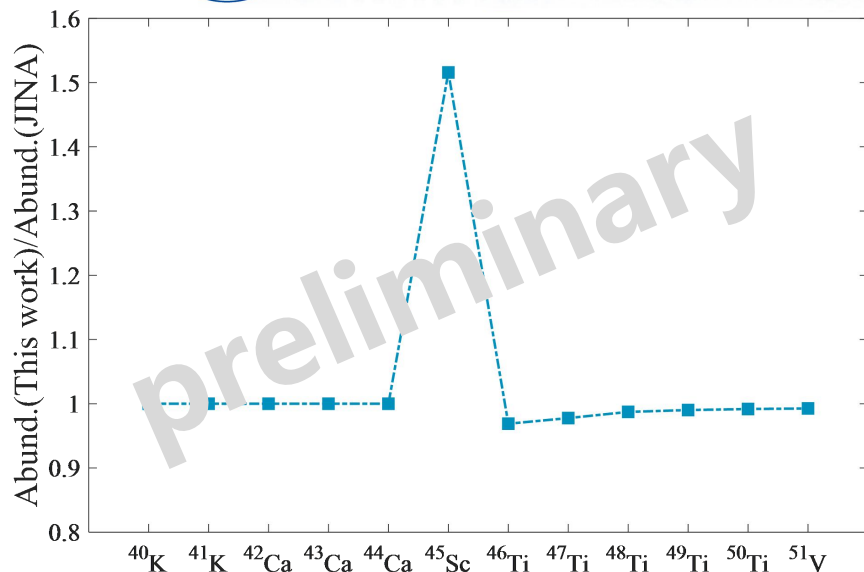
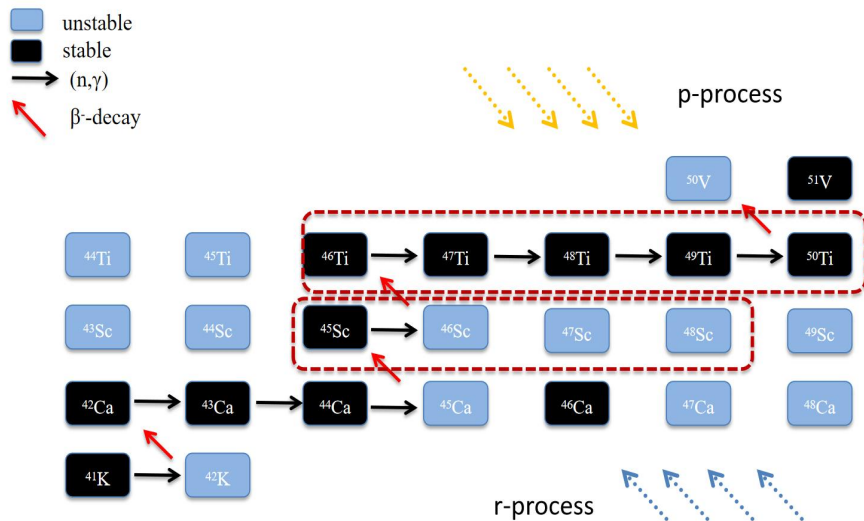
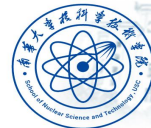
^{45}Sc 反应率变化对周围核素丰度变化的影响



实验反应率与JINA反应率与比值

我们将实验测得的 ^{45}Sc 反应率替换JINA数据库中的默认值，系统比较了该核素周边同位素丰度的响应变化，输入实验反应率后 ^{45}Sc 丰度相对提高了51%， ^{46}Sc 和 ^{47}Sc 丰度下降了48%和18%，对于 $^{46-49}\text{Ti}$ 而言其丰度仅下降了3.1%，2.2%，1.2%，0.99%。

^{45}Sc 在S过程中对周围核素的影响



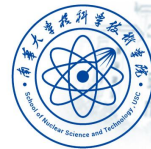
^{45}Sc 在采用新MACS后其丰度与旧MACS下的丰度比值约为 **1.5**（增强约 **50%**），而相邻稳定核素（ ^{41}K — ^{44}Ca 、 ^{46}Ti — ^{51}V ）**比值均趋近于 1.0**，前序（ ^{44}Ca ）与后续（ ^{46}Ti — ^{51}V ）核素的**丰度传递效应 < 5%**，扰动信号被严格禁锢于 ^{45}Sc 自身，其**展现了 ^{45}Sc 良好的局域独立性**。

总结

- 通过一系列数据处理方法及SAMMY拟合得到 ^{45}Sc 关键共振参数并与主流数据库对比，为后续评价数据库的选择给出了实验推荐
- 基于实验测得的中子俘获截面我们计算了MACS截面以及天体反应率，同时将反应率数据输入NucNet-tool中的S过程网络中计算得到了 ^{45}Sc 周围核素丰度变化，发现 ^{45}Sc 反应率变化会对 $^{46-49}\text{Ti}$ 产生一定影响。

展望

后续我们希望结合过去几年课题组在俘获截面实验数据上的积累，确定一个小的S过程网络模型，并给出最新实验值对这个网络的影响。



**感谢各位专家学者！
敬请批评指导**

