



復旦大學
FUDAN UNIVERSITY

上海光源SLEGS装置上 核天体关键反应实验研究

何建军

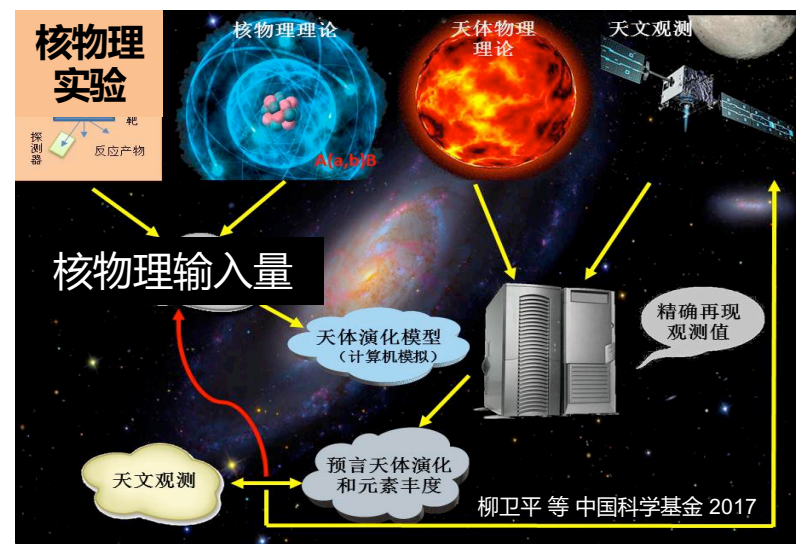
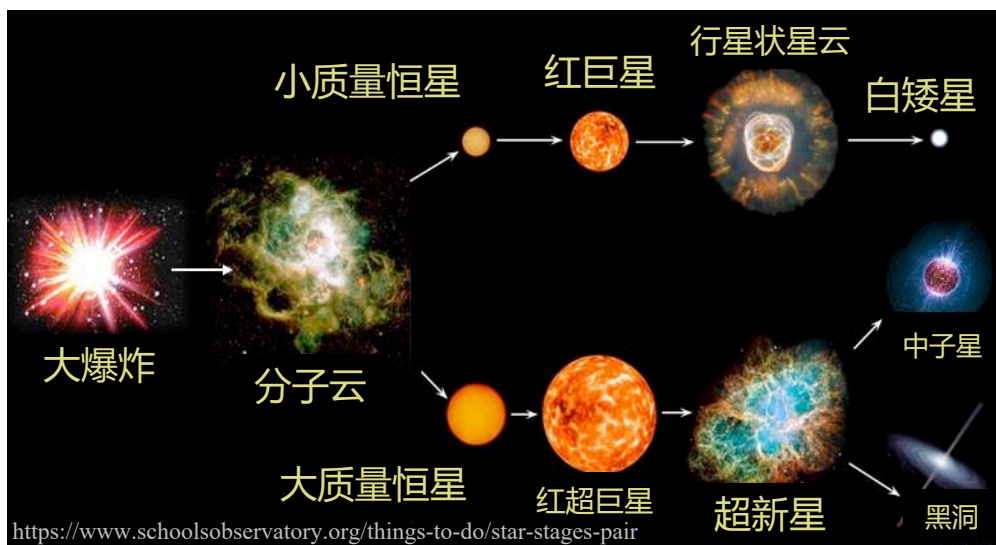
现代物理研究所

2026年5月17日 华东师范大学

研究背景

核天体物理：核物理与天体物理融合形成的交叉学科

研究目标：宇宙元素起源和星体演化



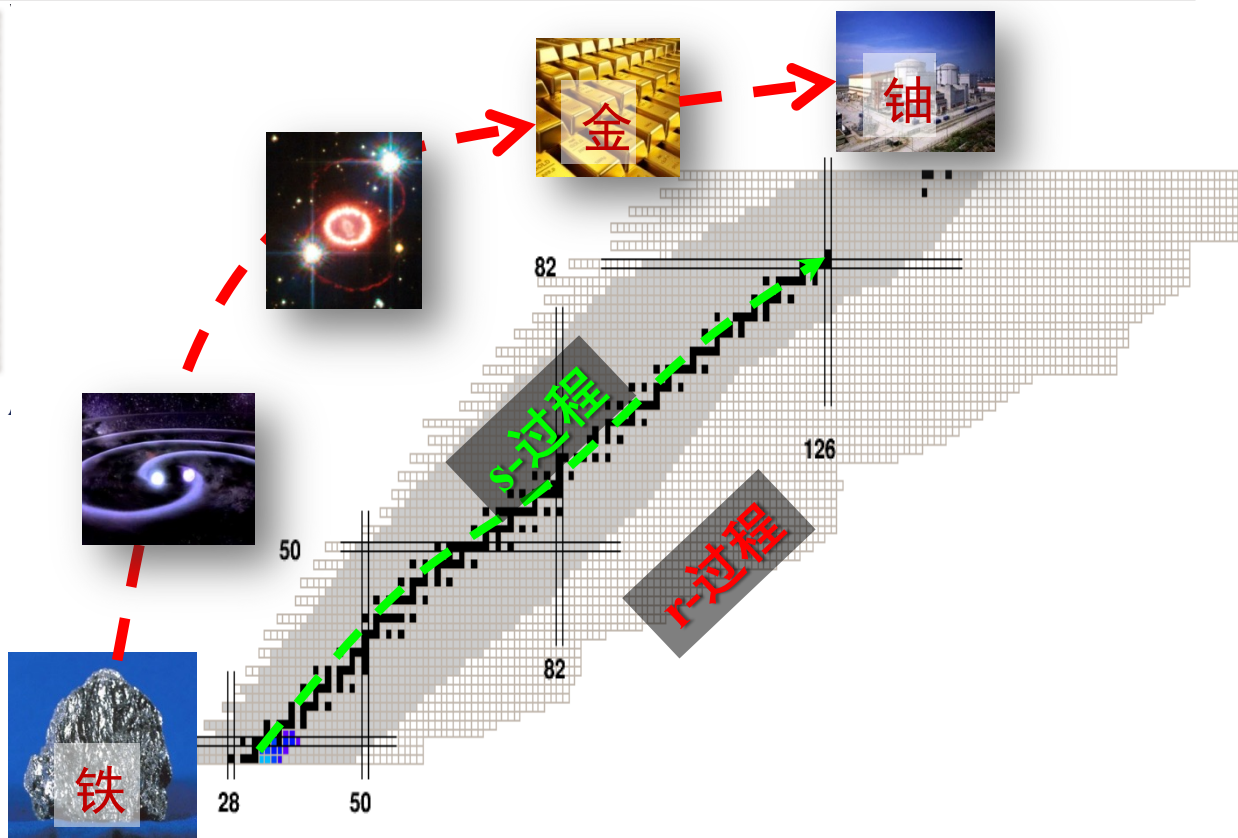
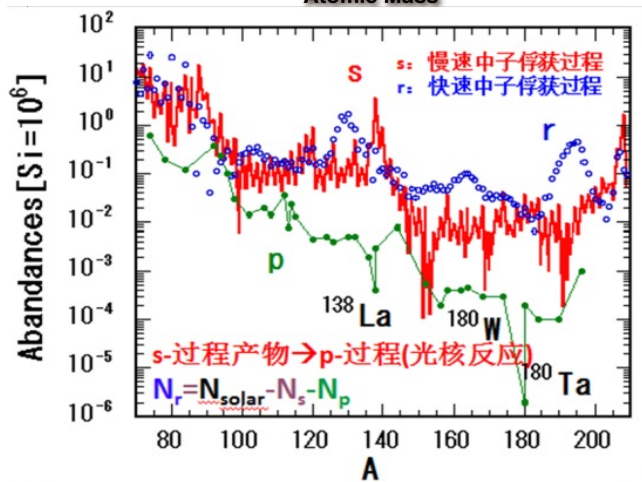
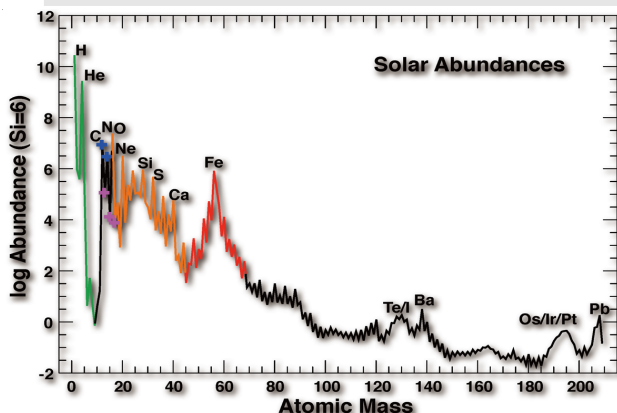
核过程：氢以外元素唯一合成机制，恒星抗衡引力收缩能量来源

核物理输入量：原子核质量，寿命，**反应截面（或反应率）**等

研究背景

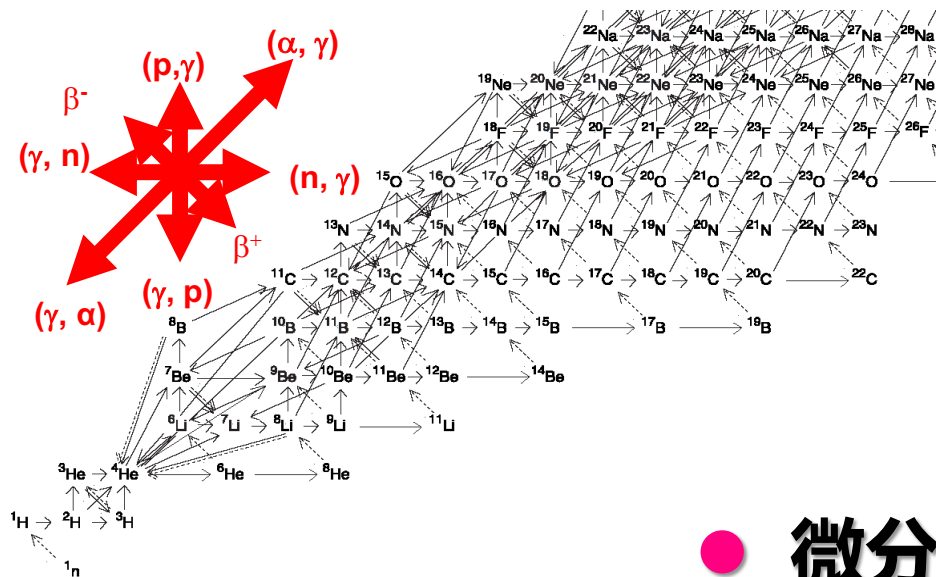
本世纪11个物理未解之谜 (2002年《发现》杂志)

Question 3: How were the elements from iron to uranium made? (铁到铀元素是如何造出来的?)



核天体物理

核合成网络



微分方程组

$$\frac{dY_i}{dt} = \sum_j N_j^i \lambda_j Y_j + \sum_{j,k} N_{j,k}^i \rho N_A \underbrace{\langle \sigma v \rangle}_{\text{反应率}} Y_j Y_k + \sum_{j,k,l} N_{j,k,l}^i \rho^2 N_A^2 \underbrace{\langle \sigma v \rangle}_{\text{反应率}} Y_j Y_k Y_l$$

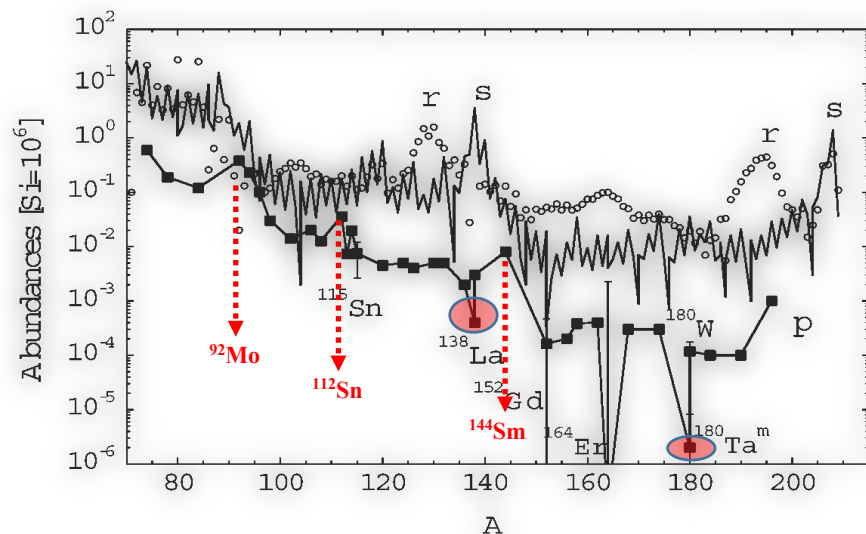
半衰期 $\tau = 1/\lambda$

反应截面 σ

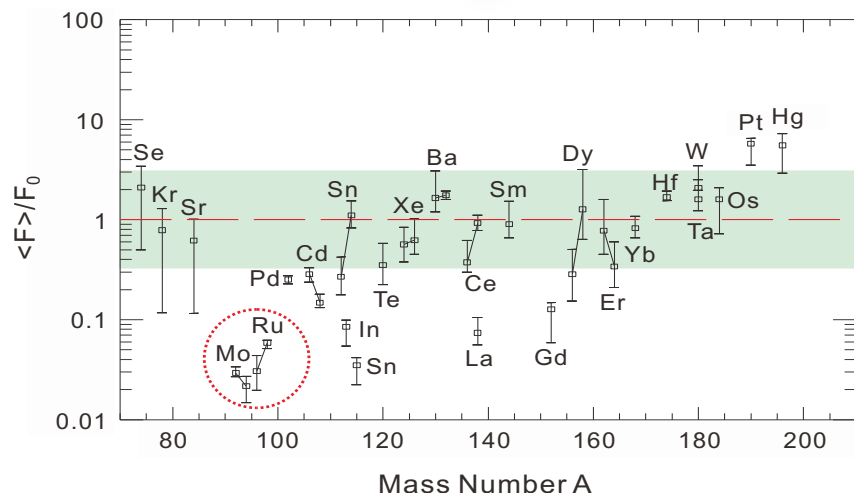
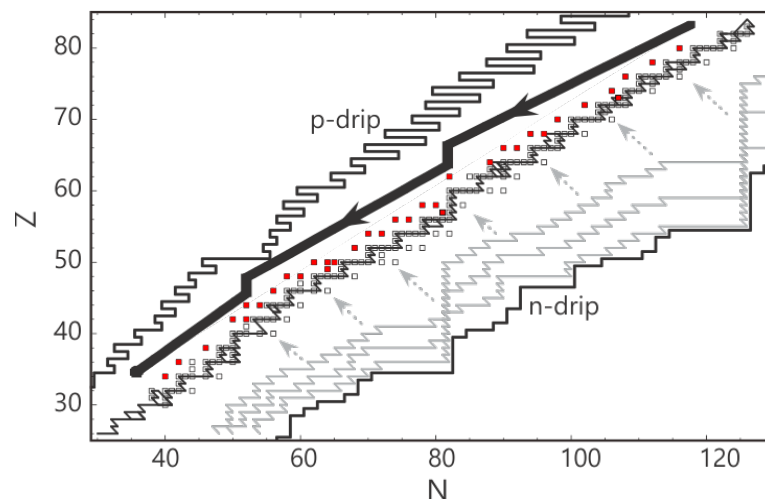
反应率 $\langle \sigma v \rangle$

宇宙中p-核的起源

太阳系中p-核丰度分布



$^{74}\text{Se} \sim ^{196}\text{Hg}$ 的 35 个 缺中子 稳定核



Mo, Ru, La等产量不足之谜
(under production!)

宇宙中p-核的起源

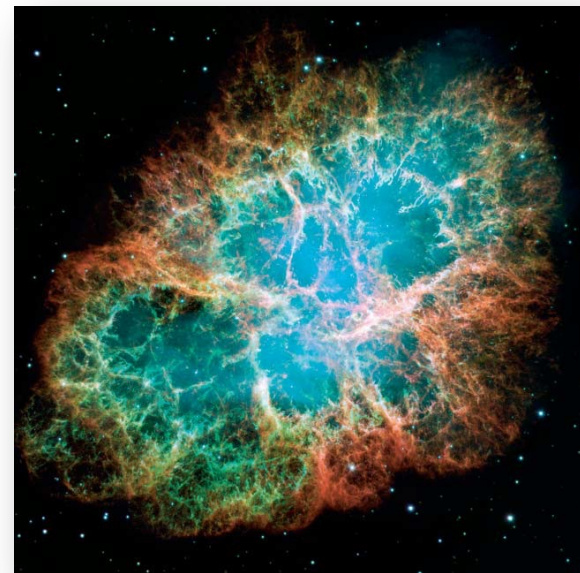
p-核产生的场所

大质量恒星II型超新星爆 (富O&Ne层)

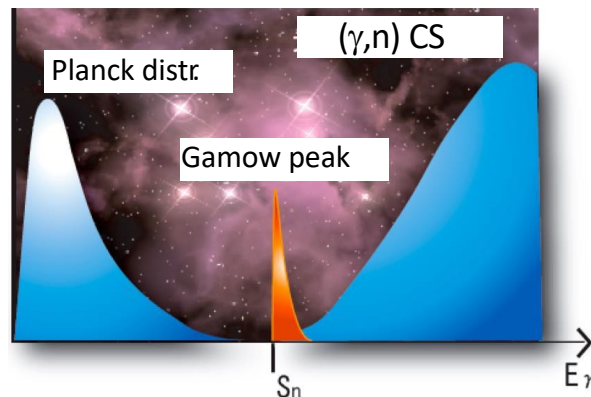
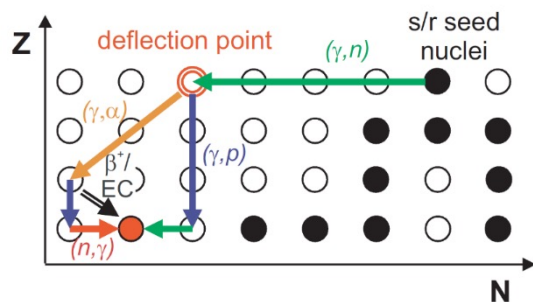
Woosley & Howard, APJS 36 (1978) 285

Rayet et al., A&A 22 (1990) 271

- 典型温度: $2 \sim 3$ GK; 伽莫夫能量: 几个MeV



p-过程



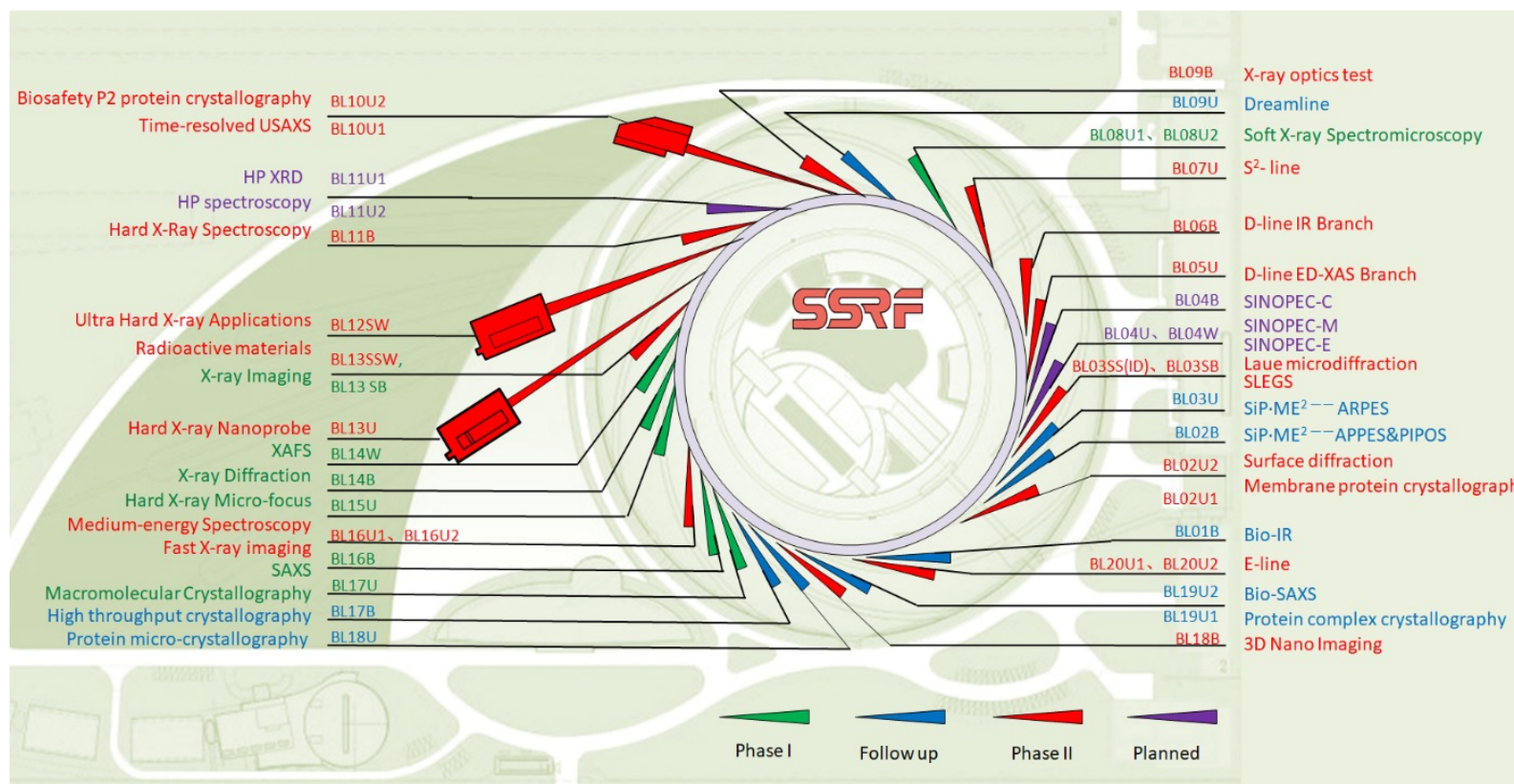
在天体模型中, 包含约2千个核素, 约2万个核反应: 主要依赖统计模型, 实验测量数据很少!

上海同步辐射光源(SSRF)

- 电子束能量 $E_e = 3.5 \text{ GeV}$
- 轨道稳定度 $< 1 \text{ mm}$
- 电子平均寿命 $t_e > 16 \text{ h}$
- 电子流强 $I_e > 240 \text{ mA}$

<http://ssrf.sari.ac.cn/nzzjs/njsq/>

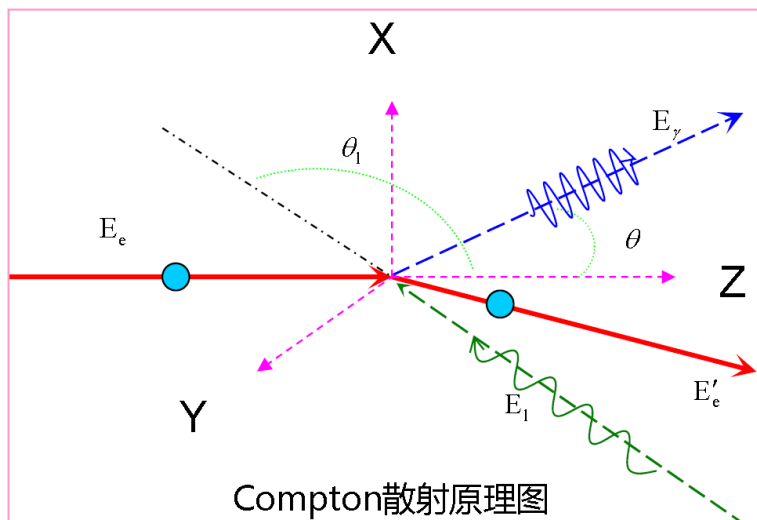
H. W. Wang et al., Nucl. Phys. News, 33 (2023) 17



能量: 0.4~21 MeV@20°~180°; 通量: 10^{5-8} phs/s; 分辨: 2~15%

上海光源SLEGS伽马光装置

激光康普顿LCS伽马源原理



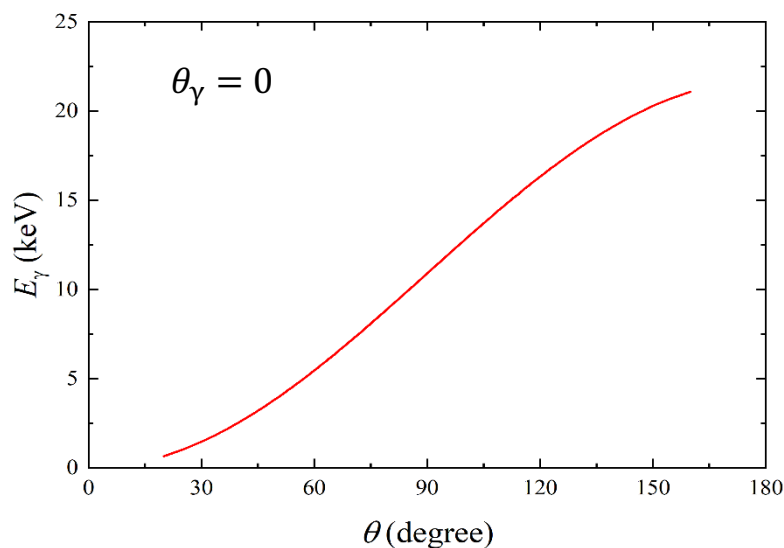
$$E_{\gamma} = \frac{E_l (1 - \beta \cos \theta_L)}{1 - \beta \cos \theta + \frac{E_l \{1 - \cos(\theta_L - \theta)\}}{E_e}}$$

$$\beta = v_e / c$$

$$\lambda = E_e / m_e c^2$$

$$\beta = \sqrt{1 - \lambda^2}$$

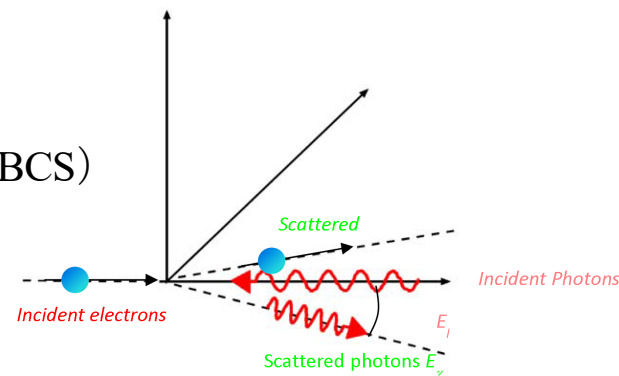
其中 E_e 和 E_l 分别为贮存环中高能电子和入射激光的能量, θ_l 为激光入射角度, θ 和 E_{γ} 为 γ 光出射角度和出射能量。由公式-1可知, 改变出射 γ 光能量 E_{γ} 的方法有三种: 改变入射激光能量, 改变电子束能量和改变激光和电子束夹角。上海激光电子伽玛源的低能端光源采用激光和电子束以一定的夹角发生 Compton 散射产生 γ 光, 并通过连续改变激光和电子束夹角的办法实现产生的 γ 光能量连续可调。高能端光源采用激光和电子束以 180° 的夹角发生 Compton



康普顿背散射

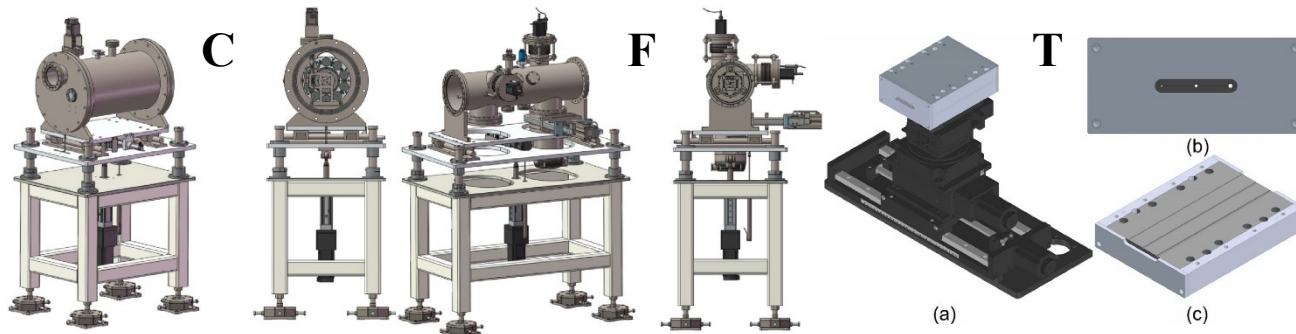
$$\theta = 0, \quad \theta_l = 180,$$

$$E_{\gamma}^{\max} = \frac{4E_e^2 E_l}{m_e^2 c^4 + 4E_e E_l} \quad (\text{BCS})$$

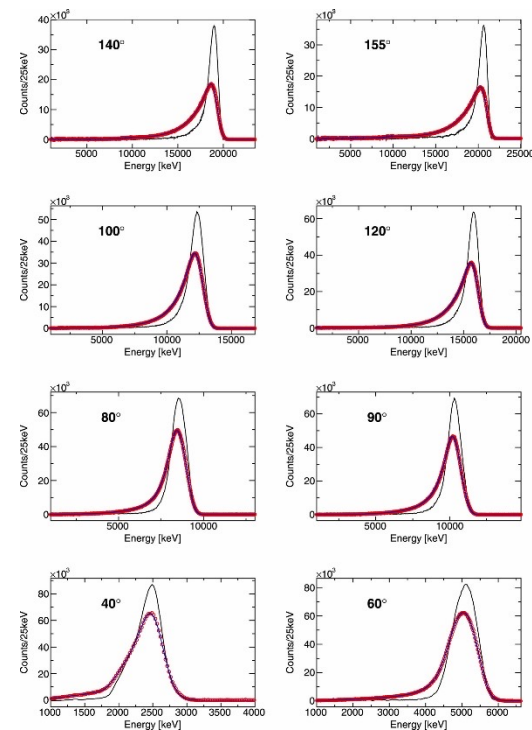


上海光源SLEGS伽马光装置

● 伽马束准直系统



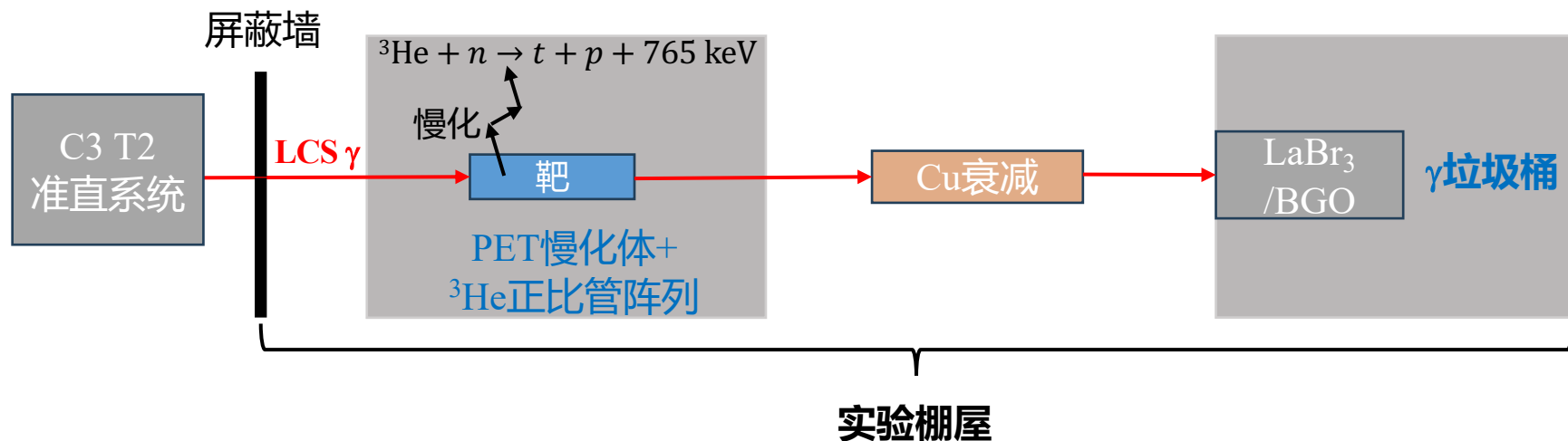
Angle degree	γ ray energy MeV	C3 (BGO) % (%)	C3T2 (BGO) % (%)
155	20.7	14.3 (24.7)	5.9 (13.4)
140	19.2	13.7 (25.2)	6.3 (13.0)
120	16.3	15.9 (24.8)	7.8 (13.6)
100	12.8	17.5 (25.0)	10.2 (14.9)
90	10.9	17.0 (22.8)	10.4 (14.4)
80	9.0	17.9 (22.7)	12.6 (15.7)
60	5.5	20.8 (24.0)	16.6 (19.3)
40	2.6	23.8 (28.6)	18.1 (23.1)



Z. Hao, G. Fan, H. Wang *et al.* NIMA 1013 (2021) 165638
 L. Liu, H. Utsunomiya, G. Fan *et al.*, NIMA 1063 (2024) 169314

上海光源SLEGS伽马光装置

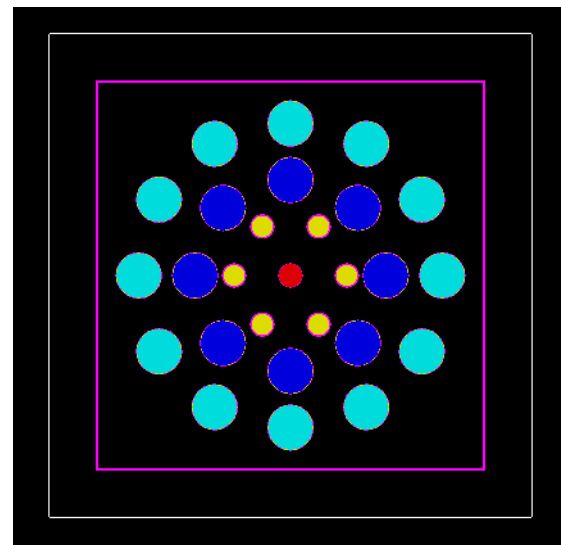
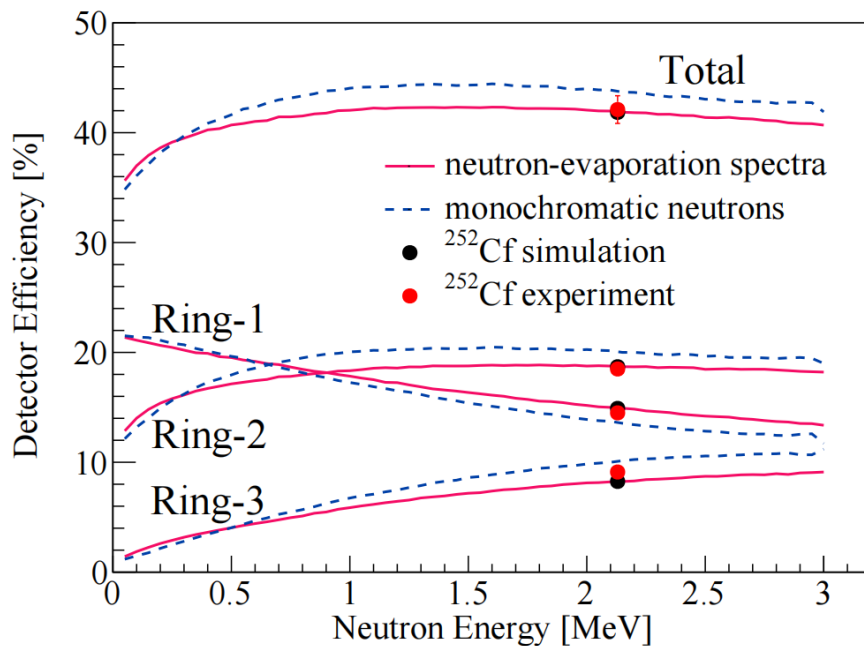
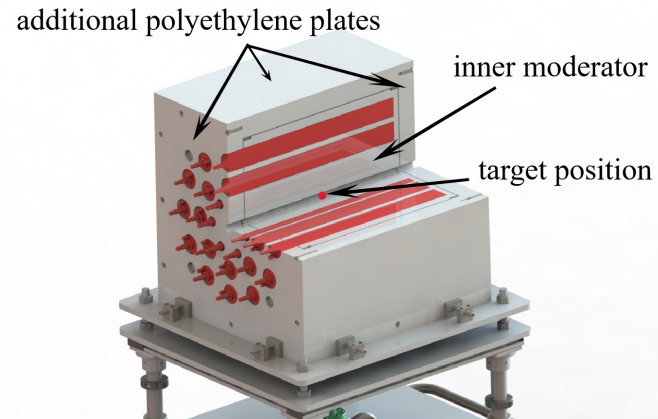
● 光中子测量系统



上海光源SLEGS伽马光装置

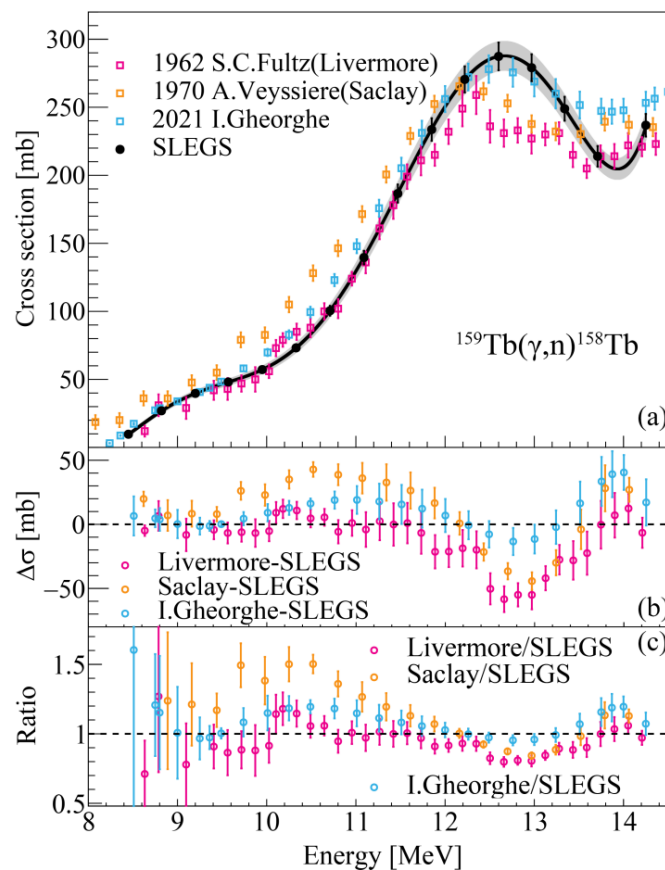
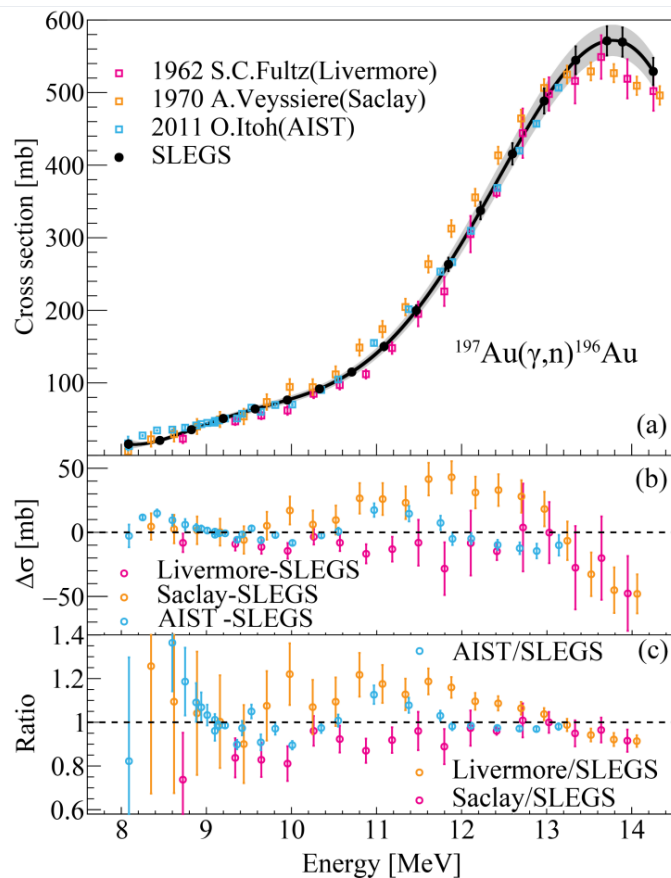
● 平坦效率中子探测器(FED)

- ◆ 26支 ^3He 正比计数管阵列 (2 atm)
- ◆ 4π 全立体角测量
- ◆ 0.05-3 MeV能量内效率平坦
- ◆ 探测器效率: 42% ~ 35% ($\pm 3\%$)



上海光源SLEGS伽马光装置

● 测量系统的刻度-- ^{197}Au , $^{159}\text{Tb}(\gamma, n)$



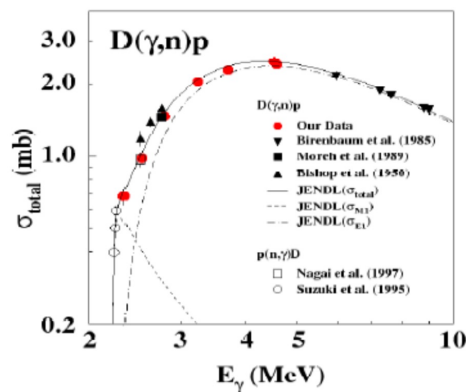
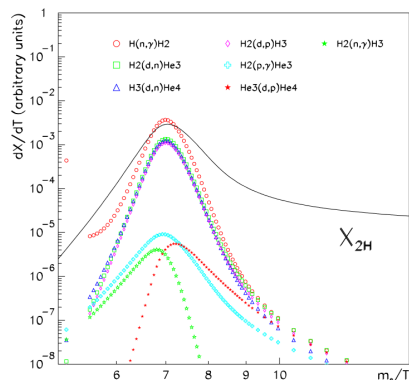
测量参考靶 ^{197}Au 和 ^{159}Tb 的光中子截面，二者与LCS伽马源上测量结果符合，证明实验方法的可行性。

SLEGS上核天体反应研究进展

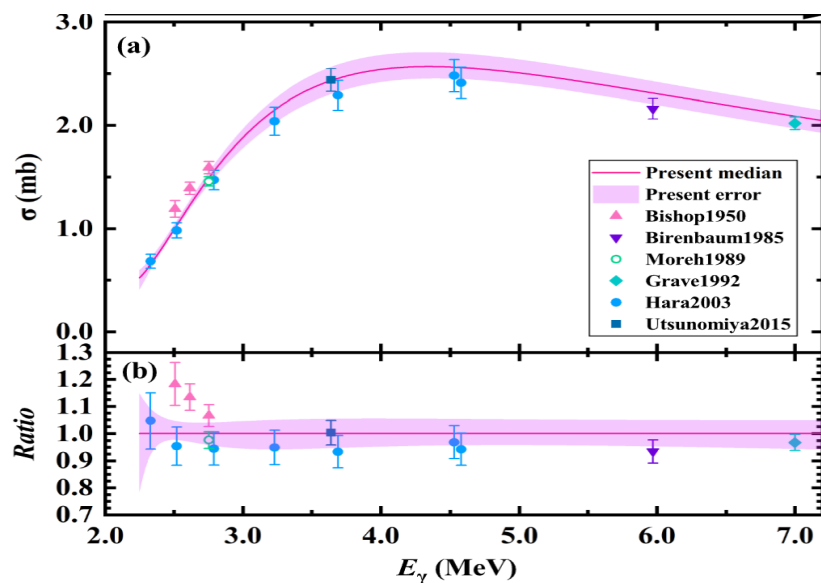
● 宇宙大爆炸原初关键核反应 $p(n,\gamma)D$ 研究

大爆炸原初氘核丰度的天文观测很精确 ($\sim 1.19\%$)，而BBN模型计算所需与氘相关核反应 $p(n,\gamma)D$ 的截面误差较大 ($7\%\sim 10\%$)，难以满足模型需求。

$p(n,\gamma)D$ 对D丰度影响较大!



➤ $D(\gamma,n)$ 单能反应截面



- 获得较宽能区截面 (一致性好)
- 在6 MeV以下能区数据更精确 (比日本人误差小1.2~2.2倍!)

P.D. Serpico *et al.*, JCAP 12 (2004) 010

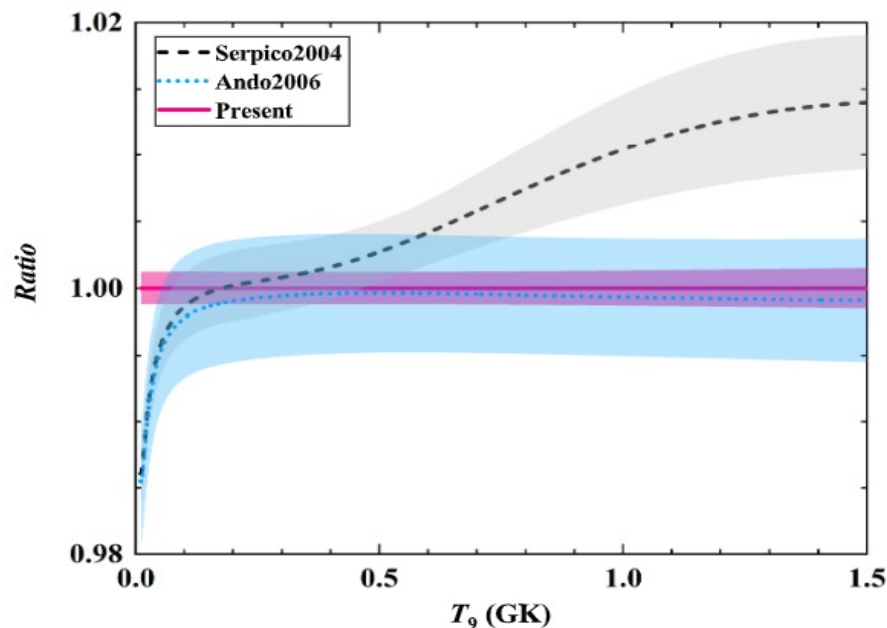
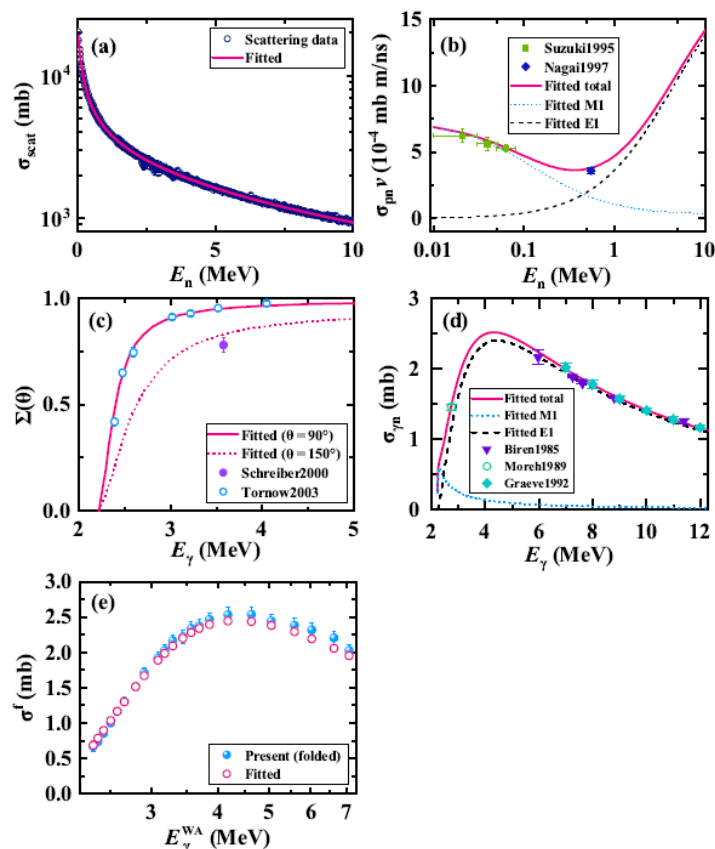
Z.L. Shen & J.J. He*, Nucl. Sci. Tech. 35 (2024) 63

SLEGS上核天体反应研究进展

● 宇宙大爆炸原初关键核反应 $p(n,\gamma)D$ 研究

➤ $p(n,\gamma)D$ 反应截面评估 (韩国Ando教授)

利用有效场dEFT理论, 对目前所有相关的实验数据进行拟合。

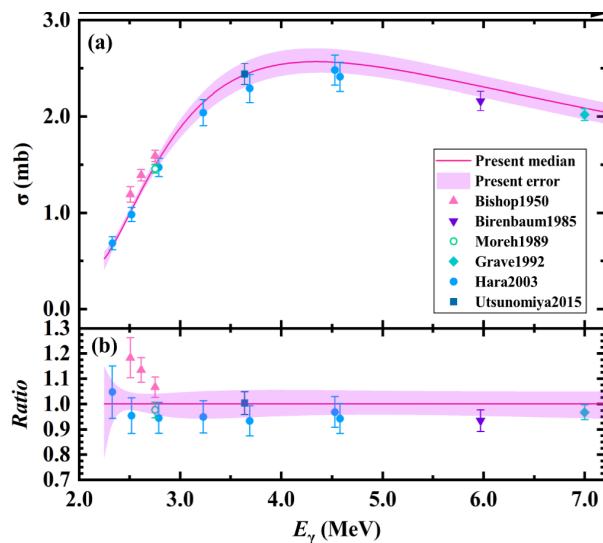


- 新评估的反应截面比之前的**更精确** (在1 MeV以下, **误差缩小3.3~4.3倍!**)
- 反应率**精度提高~4倍!**

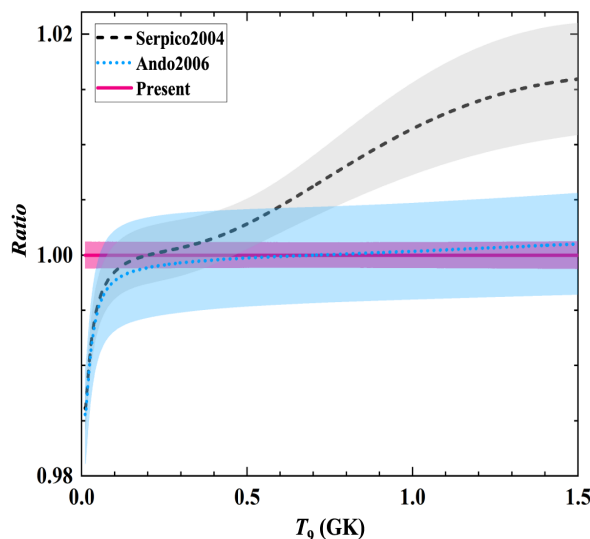
SLEGS上核天体反应研究进展

● 宇宙大爆炸原初关键核反应 $p(n,\gamma)D$ 研究

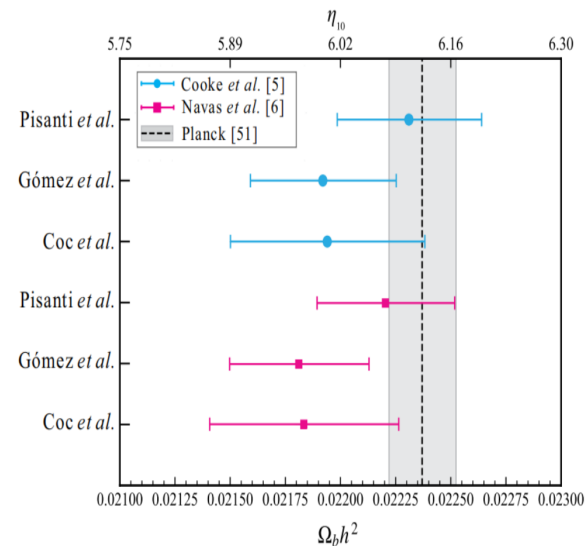
➤ $D(\gamma,n)$ 单能反应截面



➤ $p(n,\gamma)D$ 反应率



➤ 宇宙重子数密度

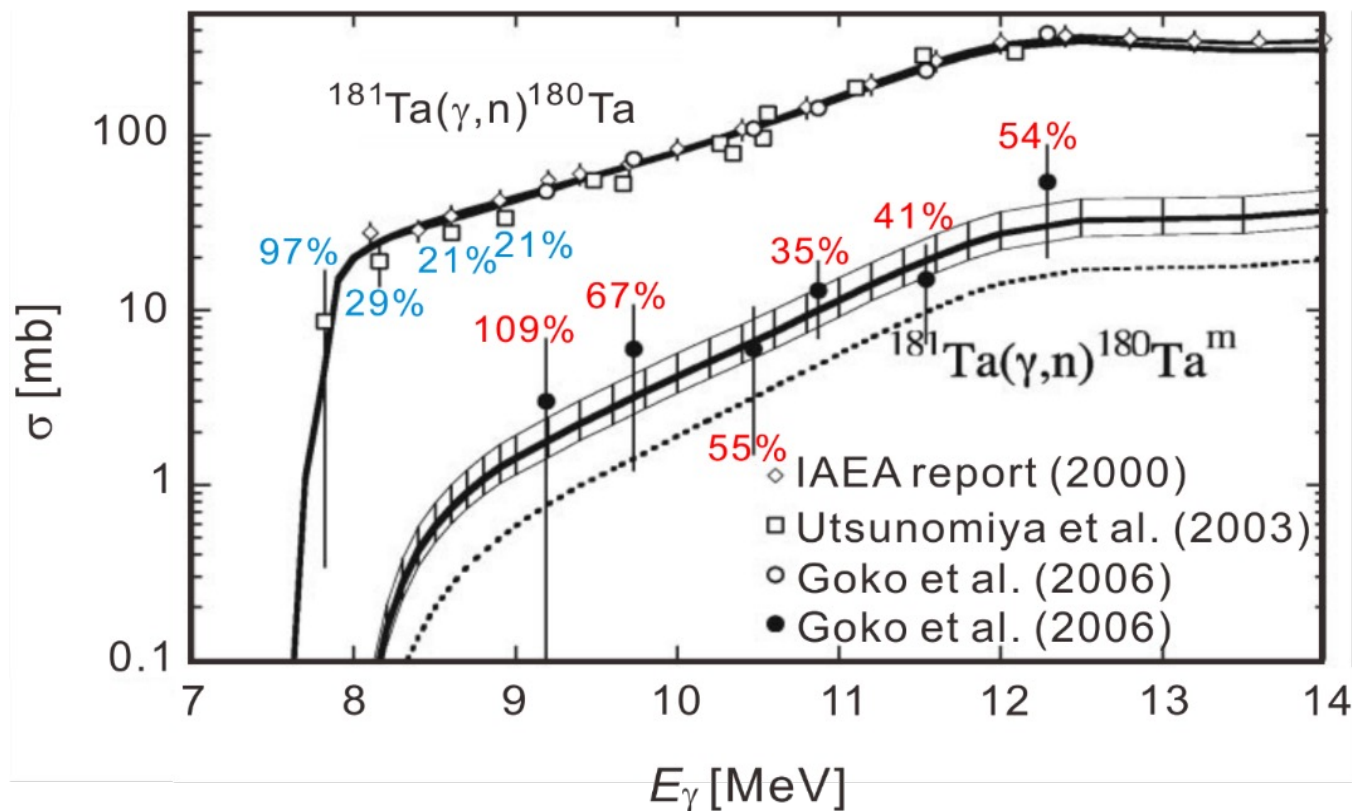


- 在阈值附近， $D(\gamma,n)p$ 数据精度最高提升了~2.2倍；
- 反应率精度提高~4倍；新反应率使得宇宙重子数密度 $\Omega_b h^2$ 的不确定度缩小了(10~16)%；
- 指出提高DD反应率精度的必要性和重要性，同时暗示了标准宇宙学模型之外存在新物理的线索。

SLEGS上核天体反应研究进展

● 宇宙p-核 $^{180}\text{Ta}^m$ 起源相关 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 研究

研究现状：在日本LCS光源上测量过，但误差大，数据少！

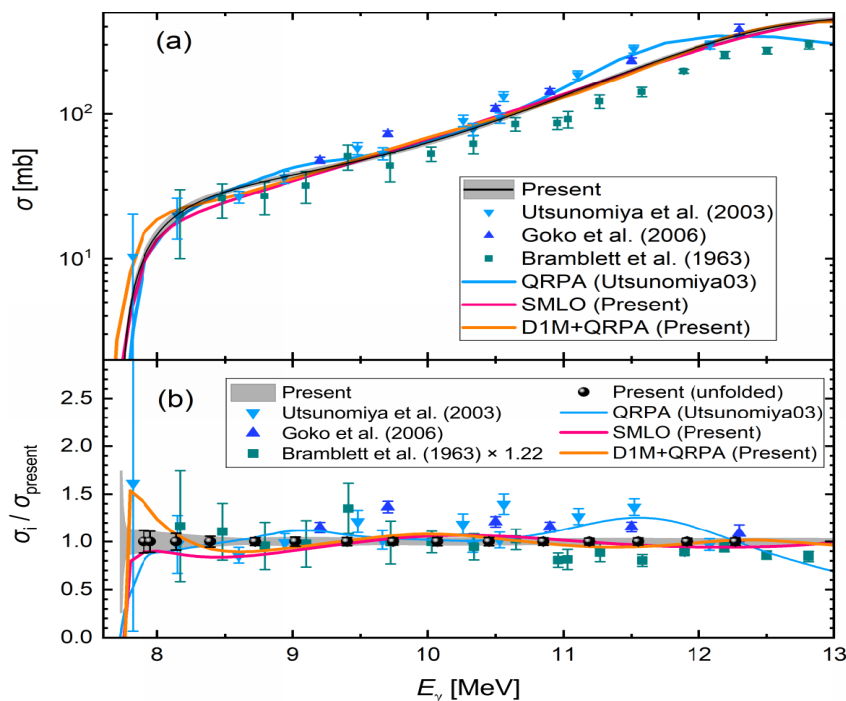


研究目标：在 ^{181}Ta 中子阈(7.6 MeV)附近进行精确测量

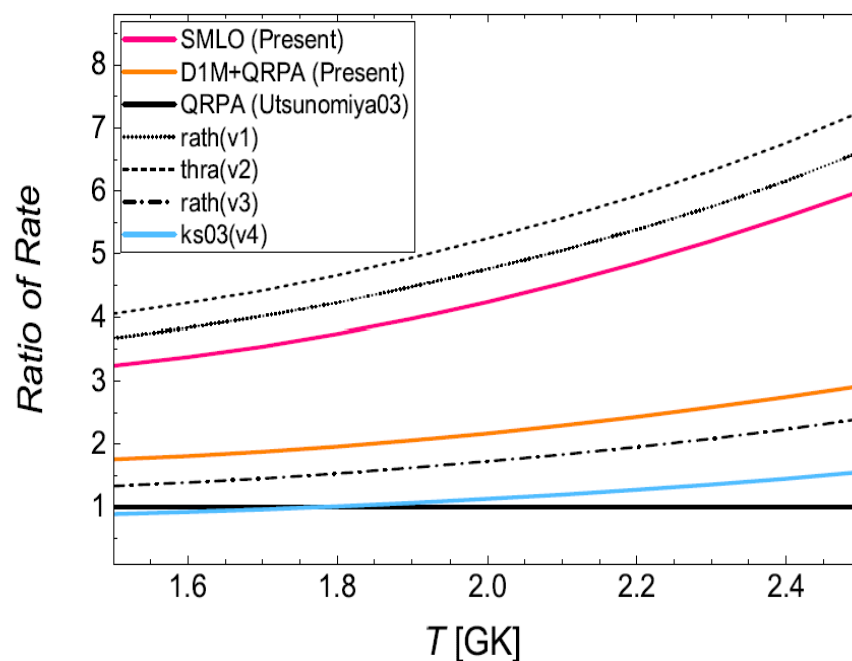
SLEGS上核天体反应研究进展

● 宇宙p-核 $^{180}\text{Ta}^m$ 起源相关 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 研究

➤ $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)$ 单能反应截面



➤ 反应率与之前的对比



- 更精确的光核反应截面（误差降低3~7倍）
- 更好的约束TALYS理论模型（SMLO）
- 反应率比Goko等人结果增大约3~6倍，比目前JINA推荐值增大~4倍！

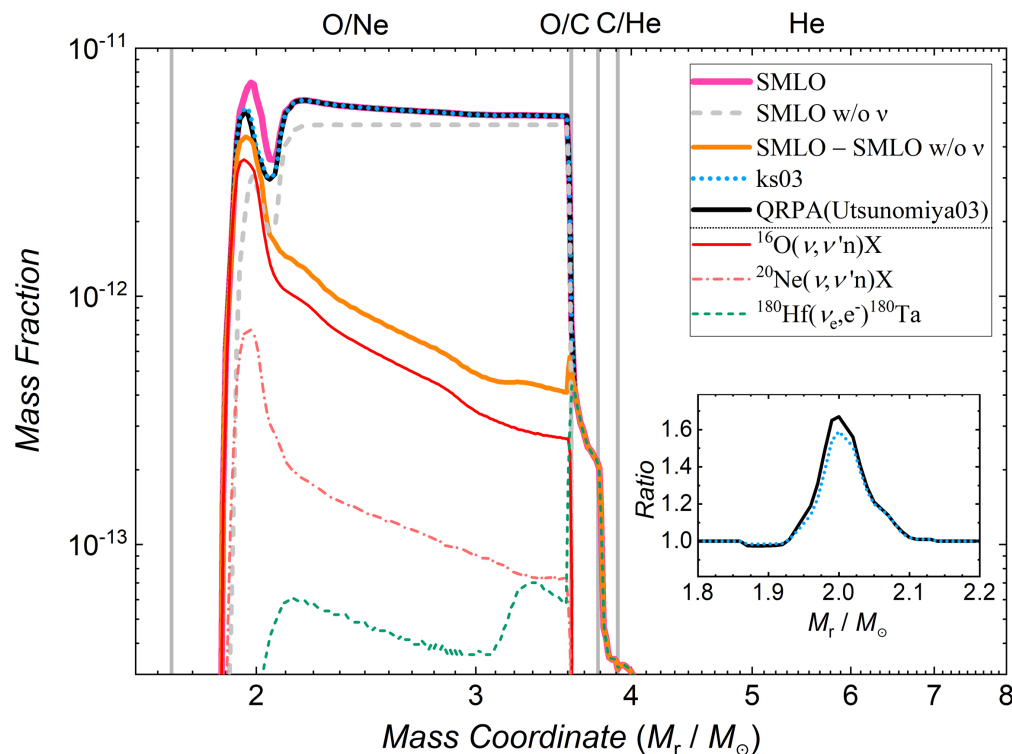
SLEGS上核天体反应研究进展

● 宇宙p-核 $^{180}\text{Ta}^m$ 起源相关 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 研究

超新星模型 (北航Kajino教授)

➤ ^{180}Ta 产额最大增加60%!

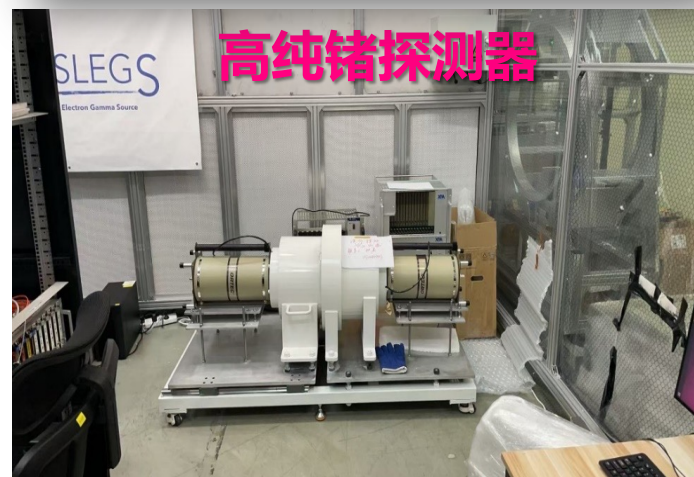
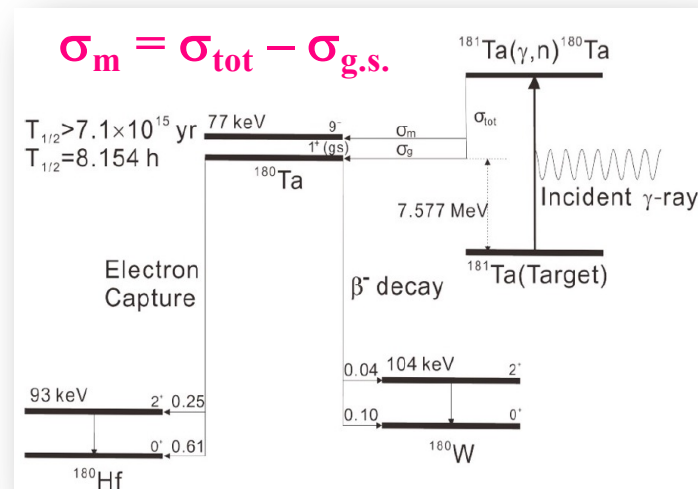
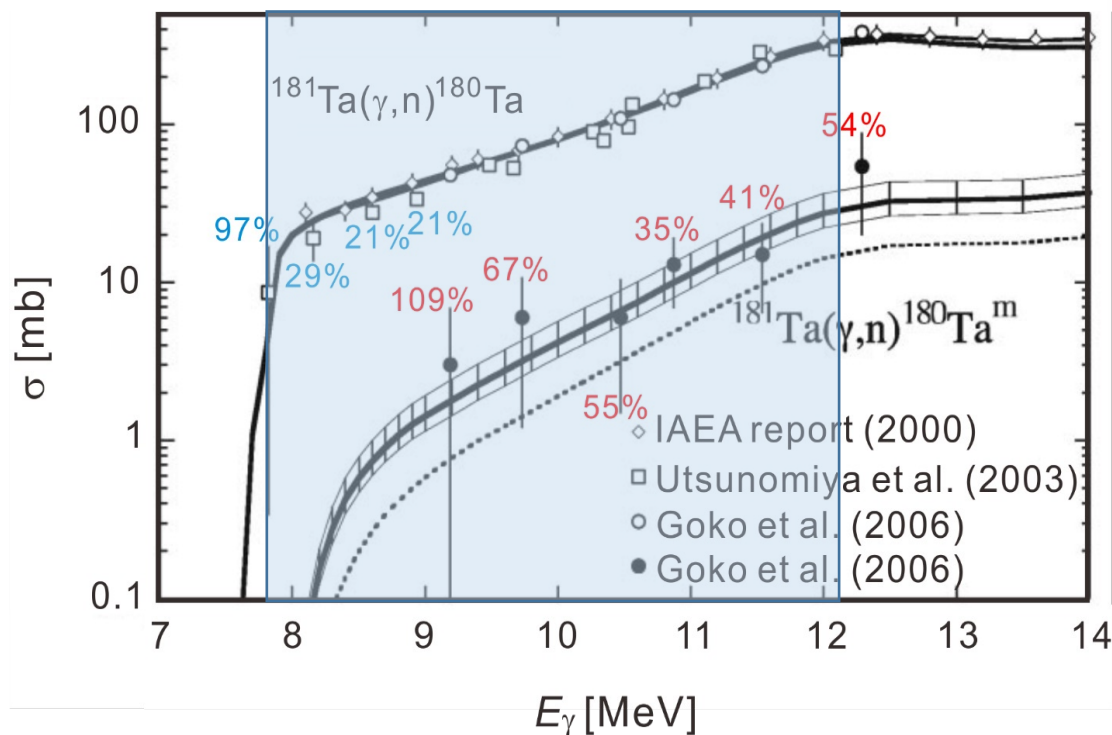
- 首次发现了 $\nu+^{16}\text{O}$ 在产生中子和 $^{180}\text{Ta}^m$ 方面的重要作用。澄清了超新星爆p-过程和 ν -过程产生 $^{180}\text{Ta}^m$ 的竞争机制, 对于揭示太阳系中最稀有同位素 $^{180}\text{Ta}^m$ 的起源之谜具有重要意义。



SLEGS上核天体反应研究进展

● 宇宙p-核 $^{180}\text{Ta}^m$ 起源相关 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 研究 (活化)

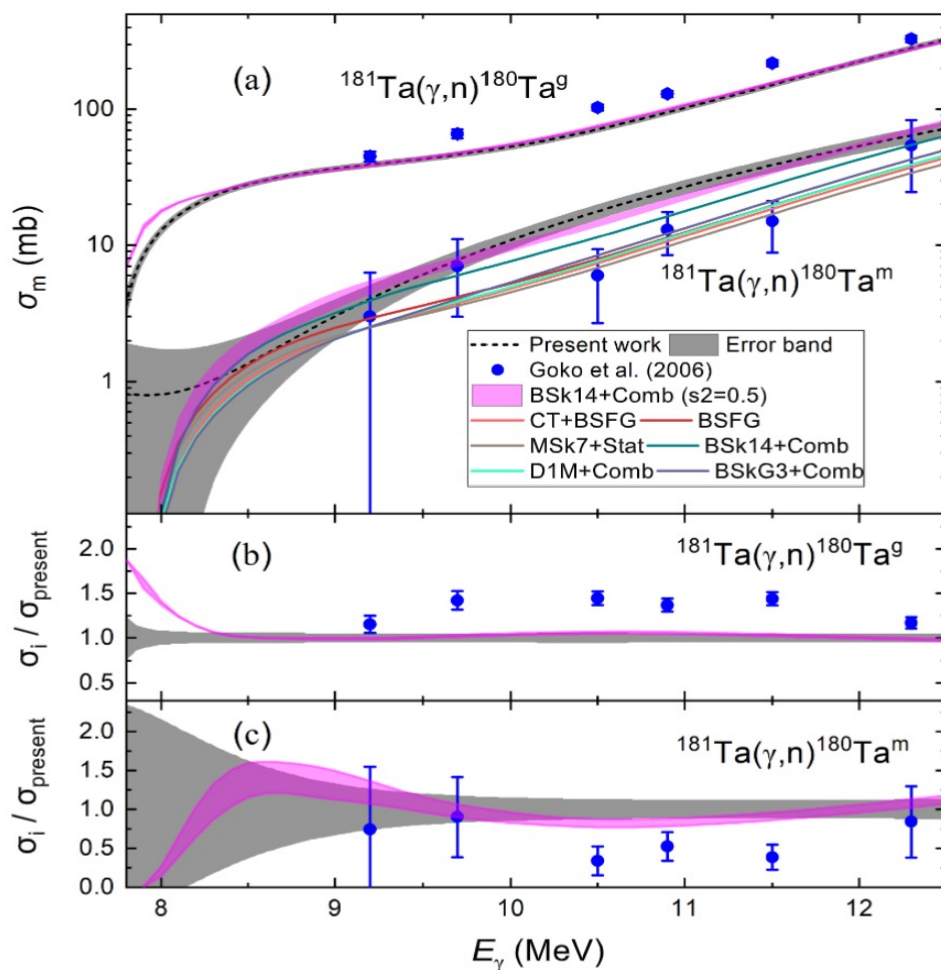
完成了 $E_\gamma = 7.9 \sim 12.8$ MeV的13个能量点的在束和离线活化测量。我们活化的统计比之前**好10倍左右**！



SLEGS上核天体反应研究进展

● 宇宙p-核 $^{180}\text{Ta}^m$ 起源相关 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 研究 (活化)

统计模型TALS理论计算 (比利时Goriely教授)



➤ 基态截面 $\sigma_{\text{g.s.}}$

- 比日本Goko等人小~25%;
- 数据更加精确, 能量更接近阈值, 能够更好约束理论模型。

➤ Isomer态截面 σ_m

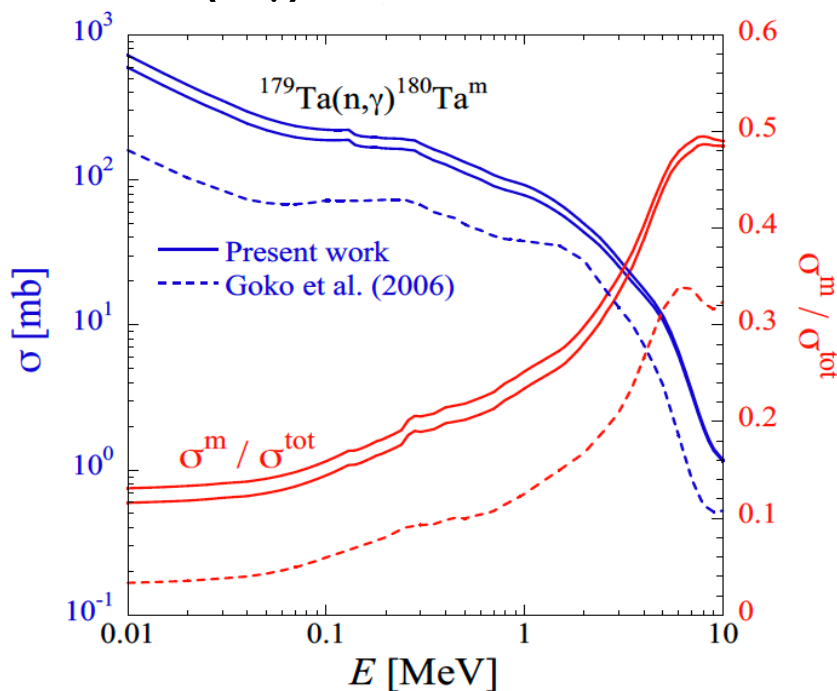
- 比日本人Goko等人大~2倍;
- 不确定度比之前小3~4倍, 并推进至~8 MeV能区, 之前所有的统计理论模型都无法很好描述, 可能存在新的机制...

SLEGS上核天体反应研究进展

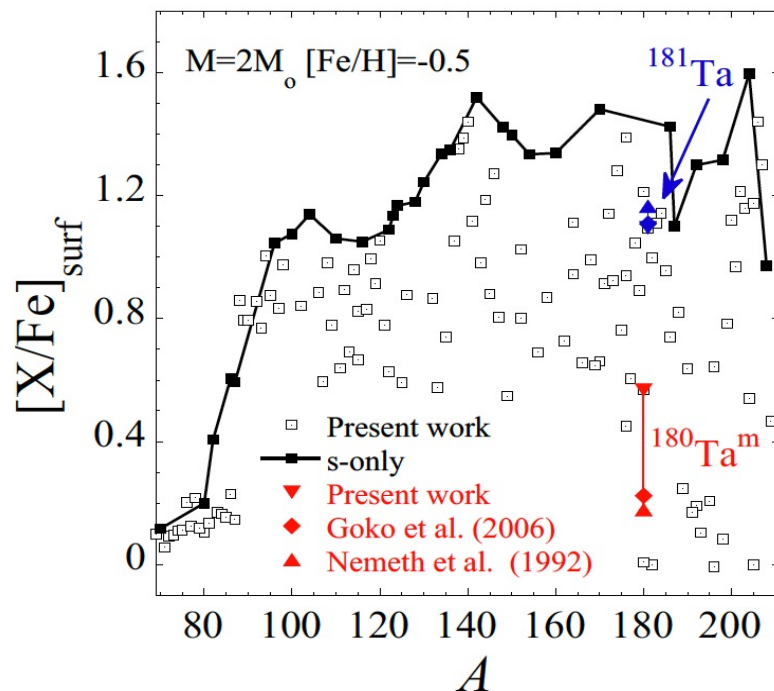
● 宇宙p-核 $^{180}\text{Ta}^m$ 起源相关 $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 研究 (活化)

AGB星s-过程核合成模拟 (比利时Goriely教授)

➤ $^{179}\text{Ta}(n, \gamma)^{180}\text{Ta}^m$ 反应截面



➤ s-过程恒星元素丰度



- $^{179}\text{Ta}(n, \gamma)^{180}\text{Ta}^m$ 截面比Goko等人的结果大~4倍!
- $^{180}\text{Ta}^m$ 产额提高了~3倍!

总结与展望

天体物理关键光核反应

Table 1 The photonuclear reactions of p-process importance

(γ, p)	(γ, α)	(γ, n)
$^{74}\text{Se}(\gamma, p)^{73}\text{As}$	$^{74}\text{Se}(\gamma, \alpha)^{70}\text{Ge}$	$^{96}\text{Mo}(\gamma, n)^{95}\text{Mo}$
$^{75}\text{As}(\gamma, p)^{74}\text{Ge}$	$^{96}\text{Ru}(\gamma, \alpha)^{92}\text{Mo}$	$^{102}\text{Pd}(\gamma, n)^{101}\text{Pd}$
$^{78}\text{K}(\gamma, p)^{77}\text{Br}$	$^{106}\text{Cd}(\gamma, \alpha)^{102}\text{Pd}$	$^{106}\text{Cd}(\gamma, n)^{105}\text{Cd}$
$^{84}\text{Sr}(\gamma, p)^{83}\text{Rb}$	$^{120}\text{Te}(\gamma, \alpha)^{116}\text{Sn}$	$^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$
$^{92}\text{Mo}(\gamma, p)^{91}\text{Nb}$	$^{128}\text{Ba}(\gamma, \alpha)^{124}\text{Xe}^{\text{a}}$	$^{114}\text{Sn}(\gamma, n)^{113}\text{Sn}$
$^{93}\text{Nb}(\gamma, p)^{92}\text{Zr}$	$^{146}\text{Gd}(\gamma, \alpha)^{144}\text{Sm}^{\text{a}}$	$^{124}\text{Xe}(\gamma, n)^{123}\text{Xe}$
$^{96}\text{Ru}(\gamma, p)^{95}\text{Tc}$	—	$^{130}\text{Ba}(\gamma, n)^{129}\text{Ba}$

- SLEGS为天体物理关键核反应研究提供独特的实验平台
- 实验能够约束核反应理论模型，提供可靠的天体反应率



谢谢大家的听讲!

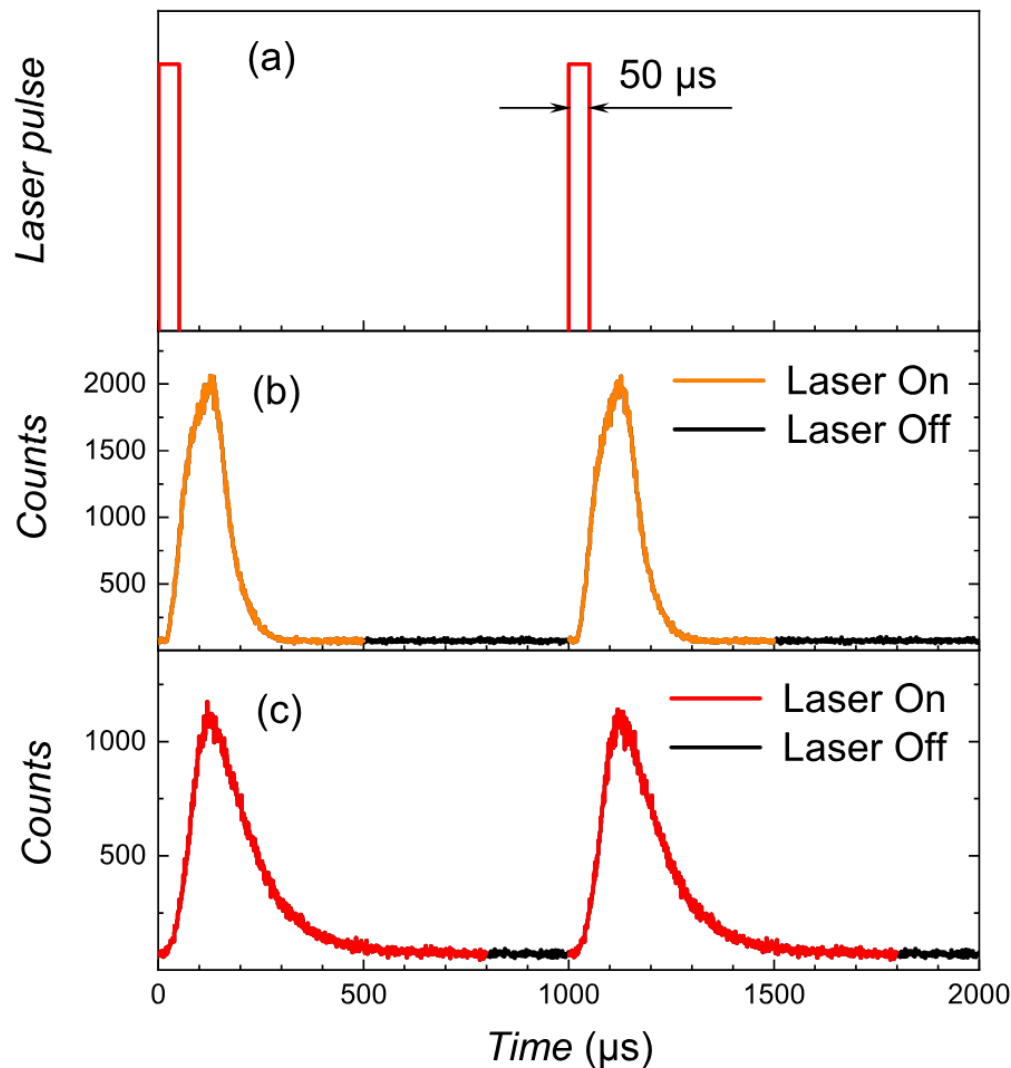
上海光源SLEGS伽马光装置

● 中子事件遴选

激光脉冲信号

伽马谱 (LaBr_3)

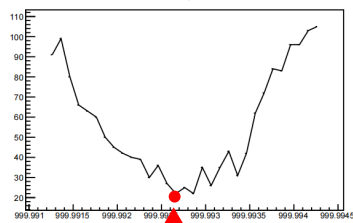
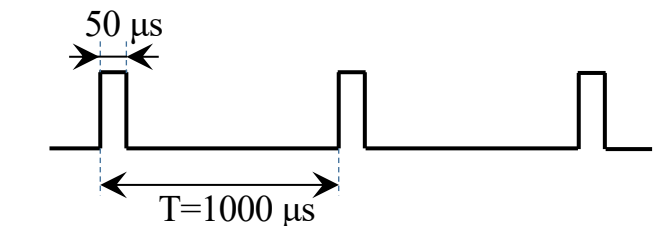
中子计数 (^3He)



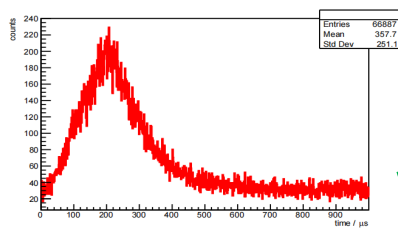
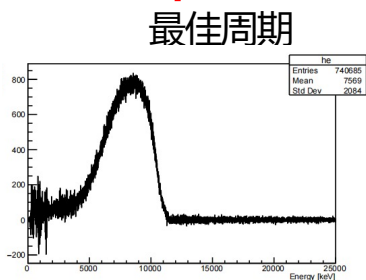
上海光源SLEGS伽马光装置

● 测量系统的刻度-- ^{197}Au , $^{159}\text{Tb}(\gamma, n)$

◆ 自触发提取中子/伽马信号

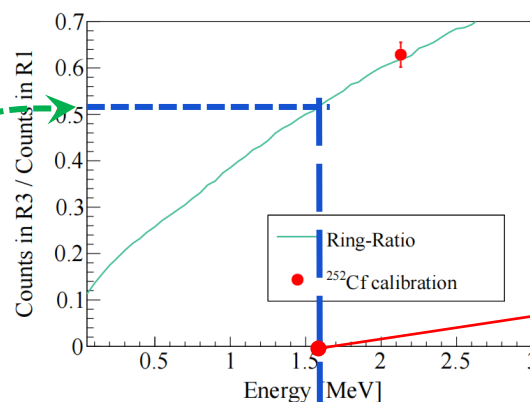


计算最佳周期，通过
这个周期统计信号的时
间分布，从而可以将信号
与本底区分

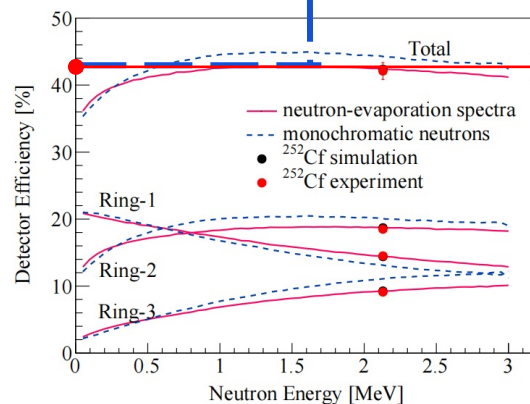


提取三个环
的计数 N_n

◆ 环比法



平均中子能量



平均效率 ϵ_n

平坦效率探
测器的“平坦”
用于减小推
算平均效率
的误差

上海光源SLEGS伽马光装置

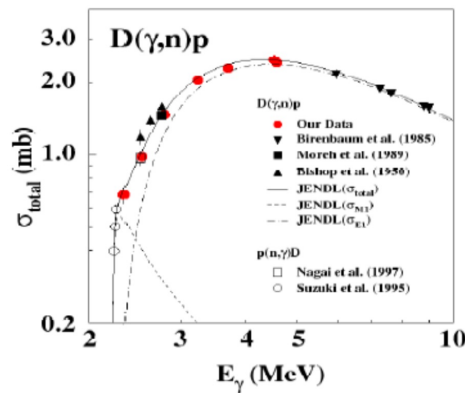
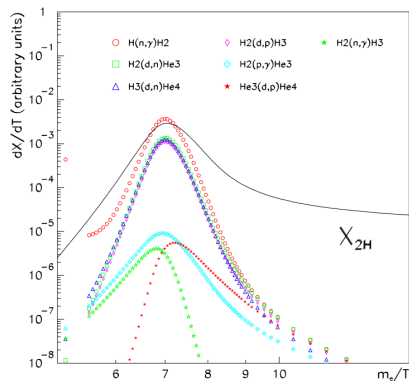
参数	HIGS		SLEGS		优势
伽马能量[MeV]	低能段	高能段	斜入射	背散射	
	1-20	21-60	0.4-21.1	21.7	SSRF限制
电子能量[GeV]	0.4-0.7	0.7-1	3.5	3.5	
入射激光波长[nm]	450-1064	190-450	10640	10640	
流强[ph/s]	10^{6-10}	10^8	10^{6-8}	10^8	SSRF限制
能量分辨[%]	0.8-10		~ 2-15		SSRF限制
能量扫描精度[keV]	40		14		
发射角[mrad]($\theta=1/\gamma$)	1.27-0.73		0.15		
样品处流强密度 [ph/s/mm ²]	0.7×10^4 - 0.4×10^6 (距离光源点60 m)		1.2×10^4 - 1.2×10^6 (距离光源点38 m)		
流强稳定性[%]	>20		<5		
能量调节方式/速度	储存环电子/min		激光入射角/s		

SLEGS上核天体反应研究进展

● 大爆炸原初核反应 $p(n,\gamma)D$ 研究

大爆炸原初氘核丰度的天文观测很精确 ($\sim 1.19\%$)，而BBN模型计算所需与氘相关核反应 $p(n,\gamma)D$ 的截面误差较大 ($7\%\sim 10\%$)，难以满足模型需求。

$p(n,\gamma)D$ 对D丰度影响较大!

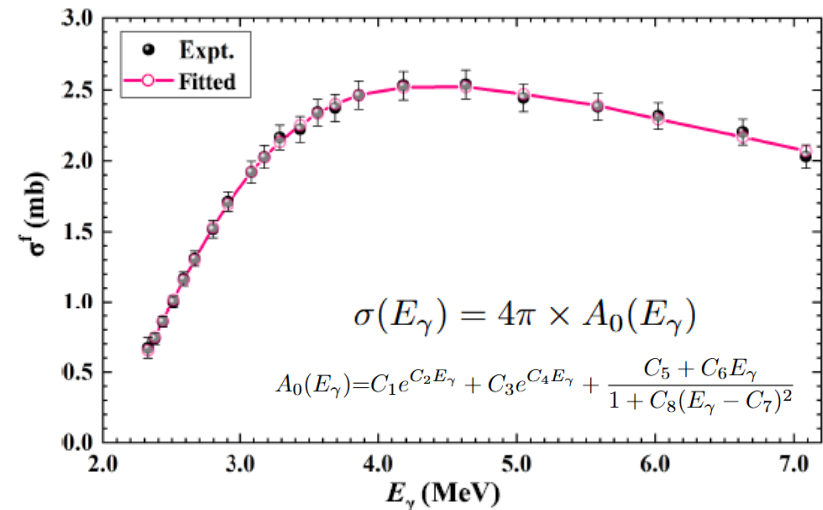


➤ $D(\gamma,n)$ 反应截面

卷积截面:

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

平均伽马能量: $E_{\gamma}^{\text{WA}} = \frac{\int_{S_n}^{E_{\text{max}}} E_{\gamma} D^{E_{\text{max}}}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}}{\int_{S_n}^{E_{\text{max}}} D^{E_{\text{max}}}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}}$



核天体物理

● 输入量：核反应率 (Reaction rate)

$$\langle \sigma v \rangle = \int \Phi(v) v \sigma(v) dv = \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{kT} \right)^{3/2} \int \sigma(E) E \times e^{(-\frac{E}{kT})} dE$$

● 伽莫夫峰

即核燃烧(或反应)的最有效
能区

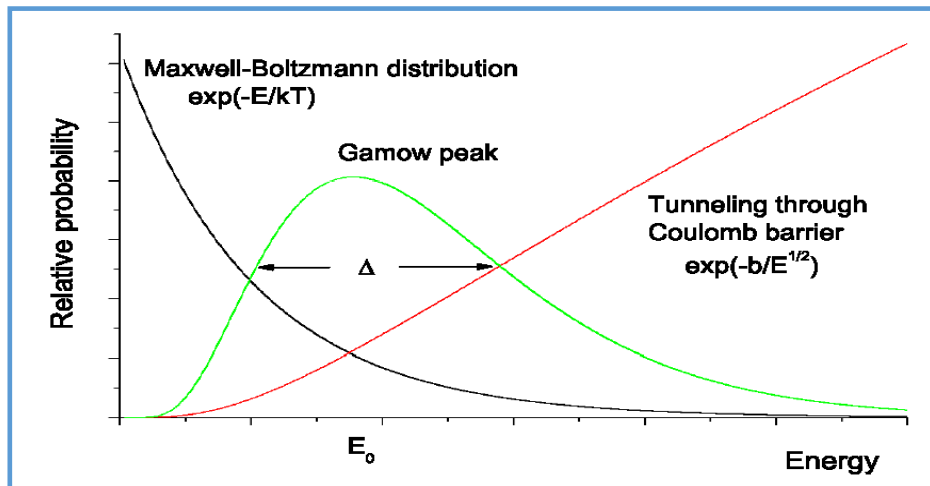
峰值:

$$E_0 = E_G^{1/3} (kT/2)^{2/3} \\ = 1.22 (Z_1^2 Z_2^2 \mu T_6^2)^{1/3} \text{ [keV]}$$

其中, $\mu = A_1 \times A_2 / (A_1 + A_2)$ [amu]

1/e 宽度:

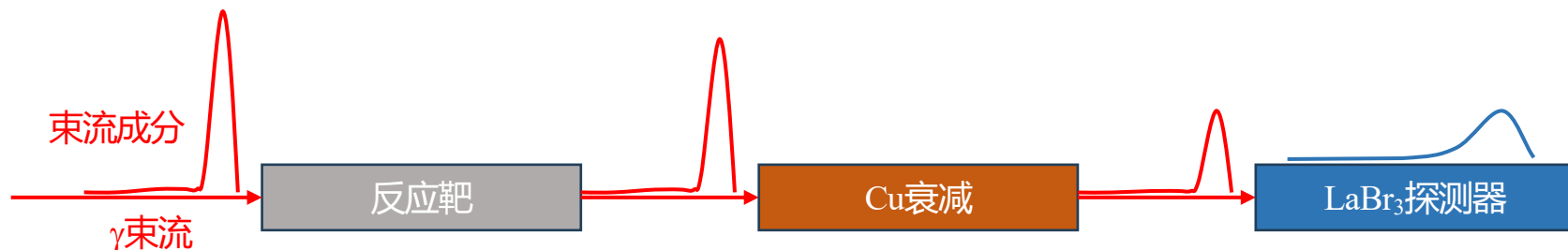
$$\Delta E_0 = 4/3^{1/2} (E_0 kT)^{1/2} \text{ [keV]}$$



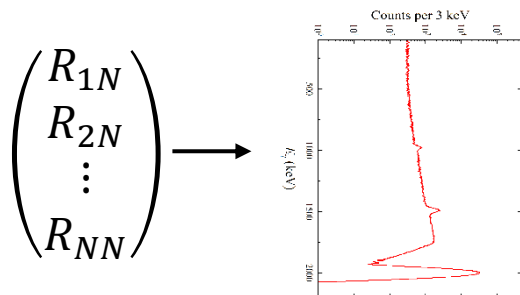
反应	场所	T_9 (GK)	E_0 (keV)	ΔE_0
p+p	Sun	0.015	5.9	6.4
p+ ¹⁴ N	CNO	0.03	42	24
p+ ¹⁷ F	Nova	0.3	232	179

上海光源SLEGS伽马光装置

● 重建靶前 γ 能谱



$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & R_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{pmatrix}$$



$$\sum_i R_{i,j} = 1$$

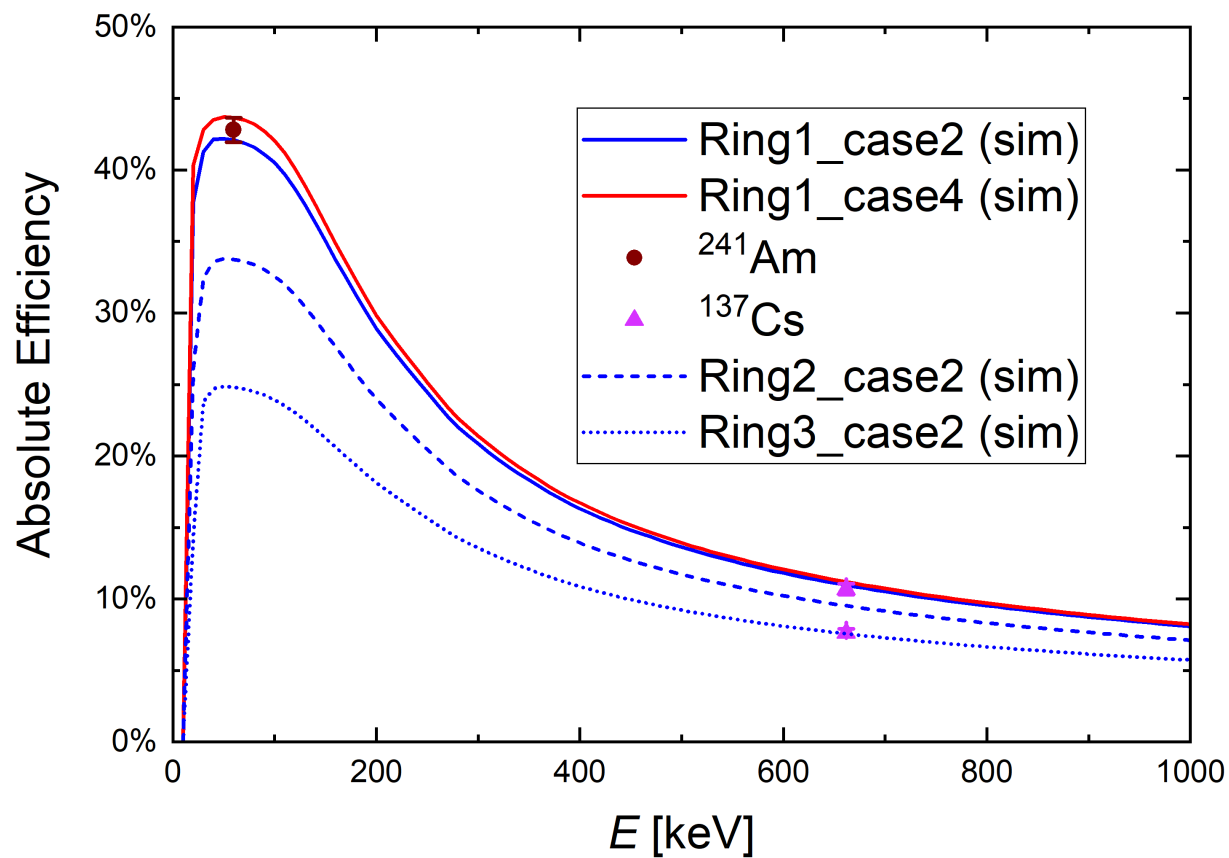
R_{ij} 是探测器第 i 道被能量被第 j 道的单能 γ 射线轰击时产生的响应

$$\begin{aligned} \text{Iteration} \begin{cases} \text{Step 1: } \mathbf{u}^0 = \mathbf{r} \\ \text{Step 2: } \mathbf{f}^0 = \mathbf{R}\mathbf{u}^0 \\ \text{Step 3: } \mathbf{u}^1 = \mathbf{u}^0 + (\mathbf{r} - \mathbf{f}^0) \end{cases} \\ \text{Iteration 1: } \mathbf{f}^1 = \mathbf{R}\mathbf{u}^1 \\ \text{Iteration } (i+1): \mathbf{u}^{i+1} = \mathbf{u}^i + \boxed{(\mathbf{r} - \mathbf{f}^i)} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

收敛条件

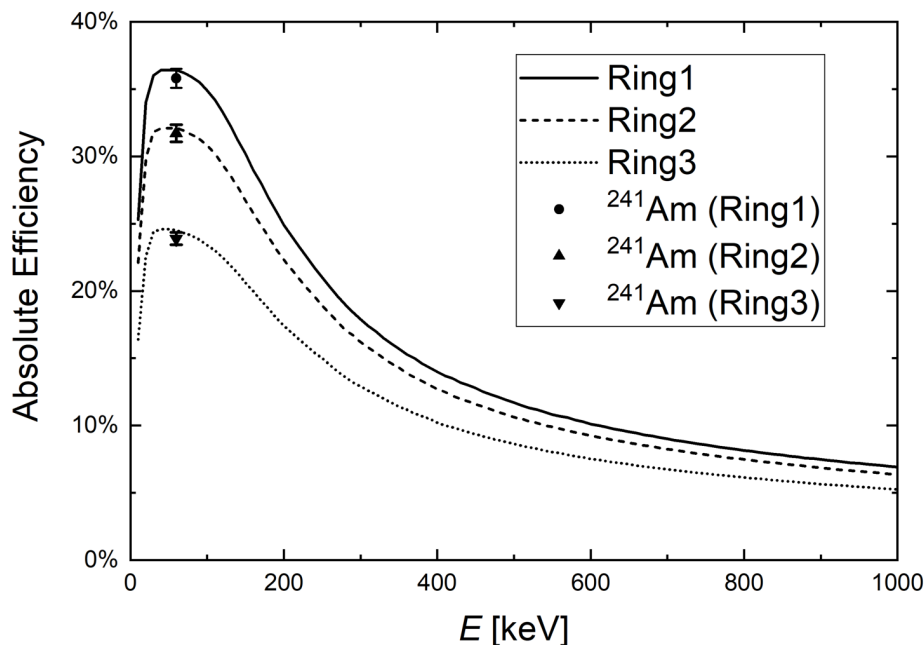


源刻度(合肥)





源刻度(SLEGS实验)



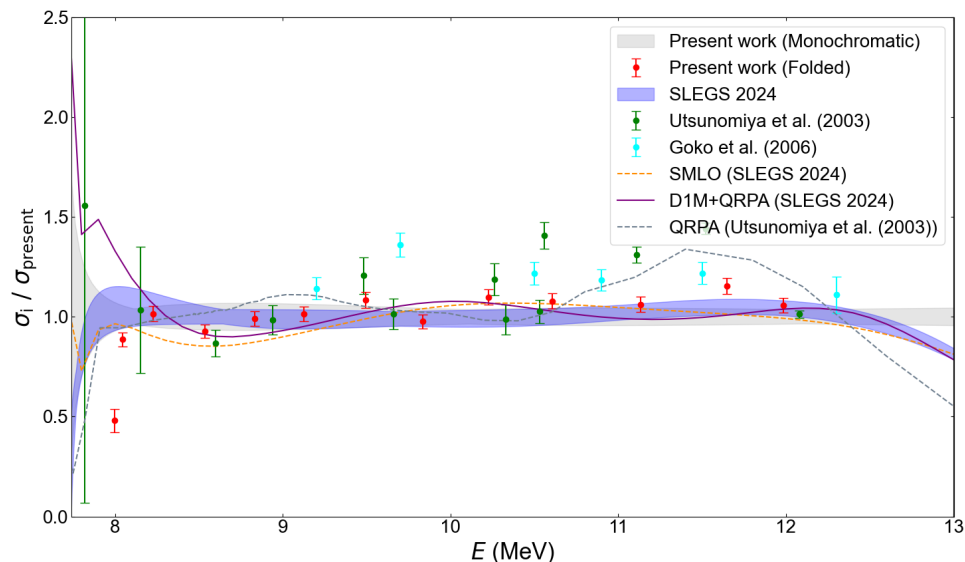
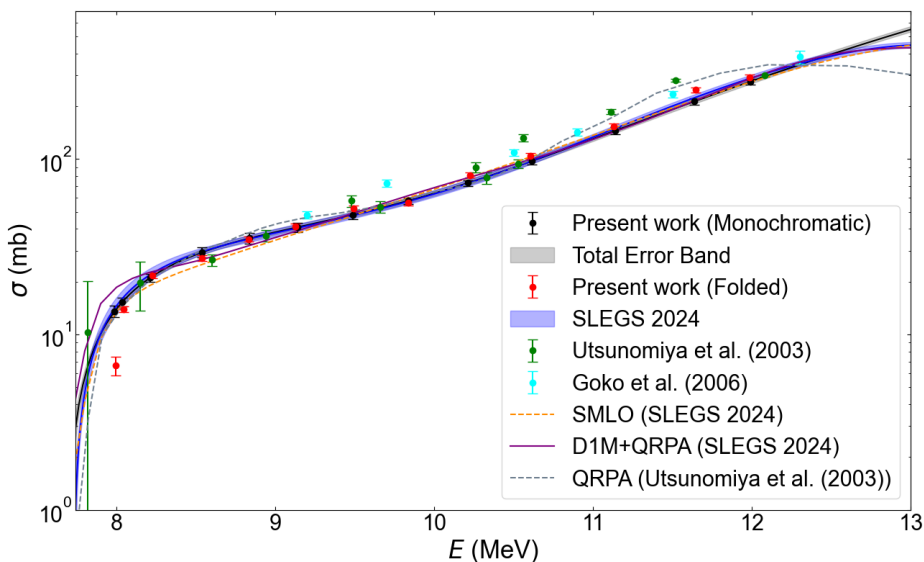
-> Total Absolute Efficiency: $K_{\alpha 1}$ (55.79 keV): 23.5%, $K_{\alpha 2}$ (54.61 keV): 23.4%

- 目前无法实现Geant4还原Ta靶自吸收过程 (Ta靶太薄) 使用NIST数据库计算
- 自吸收+绝对效率+分支比(K_{α}): 6.07% (ROI: 50-60 keV)



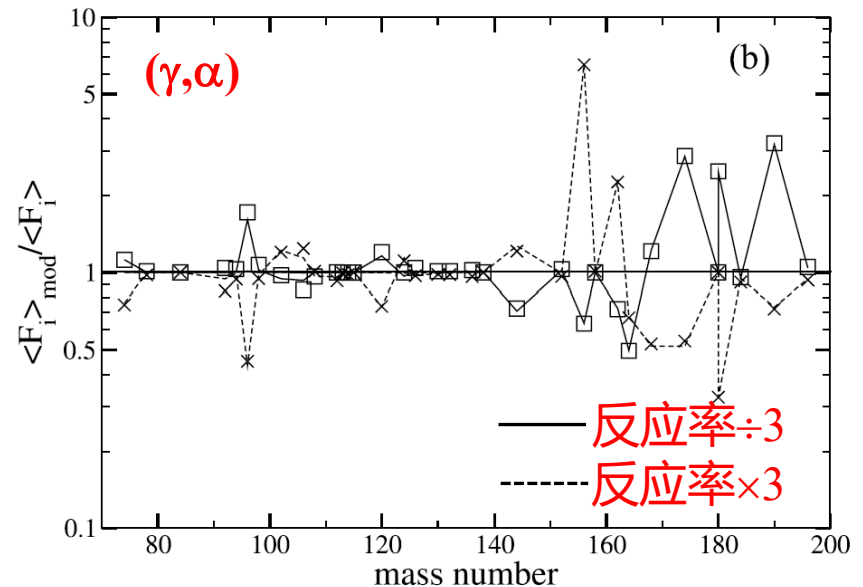
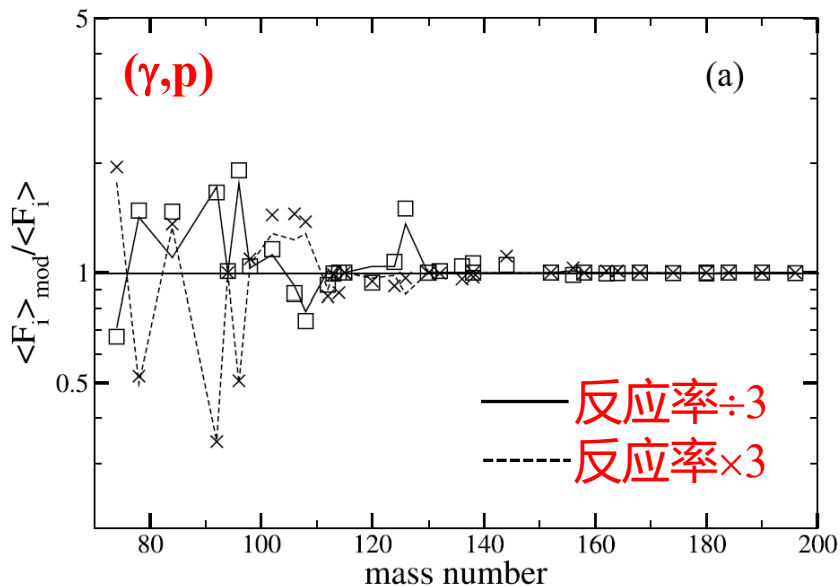
总截面

- 使用平均能量作为初始能量带入迭代。
- 加入不同初始能量引起的算法差别，作为算法误差来源之一。



SLEGS装置上核天体物理研究

较轻p-核 $^{92,94}\text{Mo}$ 和 $^{96,98}\text{Ru}$ 产量不足等问题



上海光源SLEGS伽马光装置

● 求解单能截面的方法

$$\sigma_{(\gamma,n)}^{\text{mono}}(E_{av}) = \frac{N_n}{N_\gamma N_t \xi \epsilon_n}$$

$$\sigma_f = \mathbf{D}\sigma.$$

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

(1) 令 $\sigma_0 = 1$, 计算folded cross section $\sigma_f = D \cdot \sigma_0$, 其中, D 为响应矩阵;

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

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

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

(3) 当 $\sigma_f^{i+1} \approx \sigma_{\text{exp}}$ 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 .

