



共振分辨区 ^{197}Au 中子俘获截面测量

蒋伟，崔展樵，杨高乐，樊瑞睿，任杰

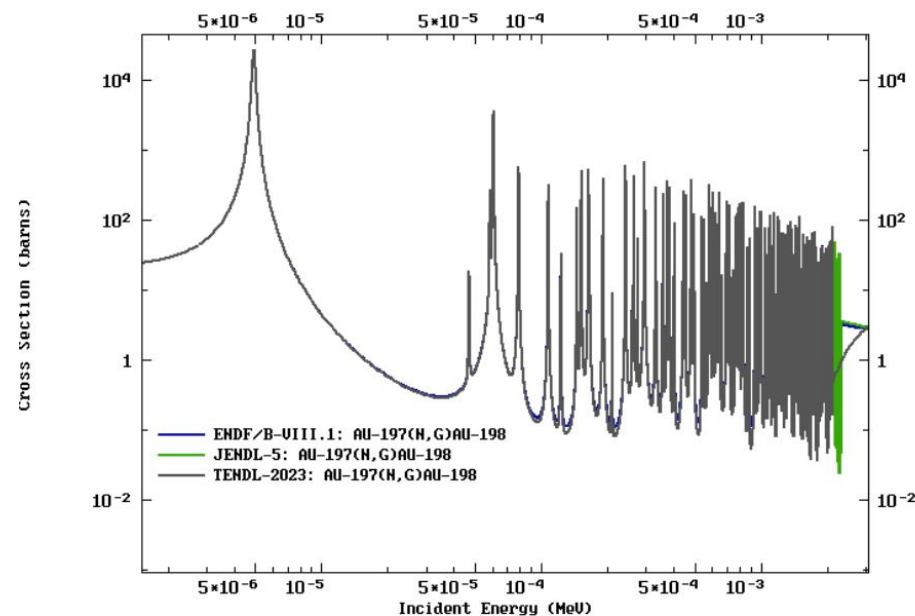
2025年CSNS反角白光中子实验装置用户研讨会 安徽六安 2025年7月23-25日

- 研究背景
- 实验开展主要数据分析
 1. 反角白光中子束流
 2. 脉冲高度权重技术
 3. 双束团解谱
 4. 本底扣除
- 实验结果
 1. 俘获产额, 共振参数
 2. 计算俘获截面, 麦克斯韦平均截面

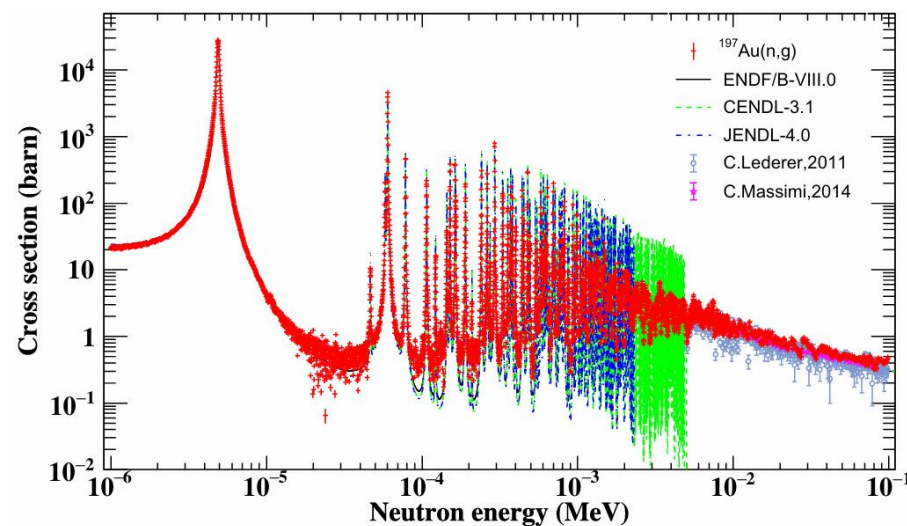
■ 得益于 ^{197}Au 稳定的物化性质, $^{197}\text{Au}(\text{n},\gamma)$ 反应截面因而成为为数不多的**标准截面**之一,这使得该截面值成为测量其它中子俘获反应截面不可或缺的相对参考截面。对于每一个开展中子俘获测量的中子束流线来说,针对 ^{197}Au 俘获截面的准确测量都是必须开展的工作之一。

■ 在低能可分辨共振能区 (2 keV内), 其截面值虽然在各大最新的评价数据库 (ENDF/B-VIII.1, JENDL-5 和 TENDL-2023) 中表现出较小的差异,但尚不被认可为**标准截面能区**。对于各种中子俘获核反应来说,如何在共振能区实现**较为精确的相对测量**更为重要,以提取到更加精确的共振峰结构,这要求进一步精确测量 ^{197}Au 在共振能区的截面。

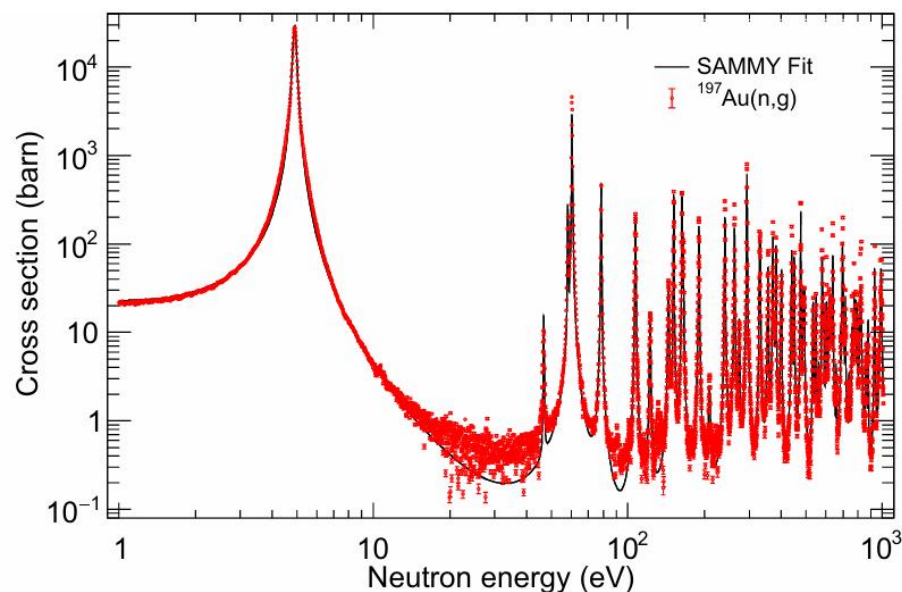
■ n_TOF在2010年曾开展此方面测量工作,针对共振能区进行了俘获产额测量,并结合R矩阵分析提取了共振参数,号召将**截面标准扩展至共振能区**。这同样是本次实验的目标之一。



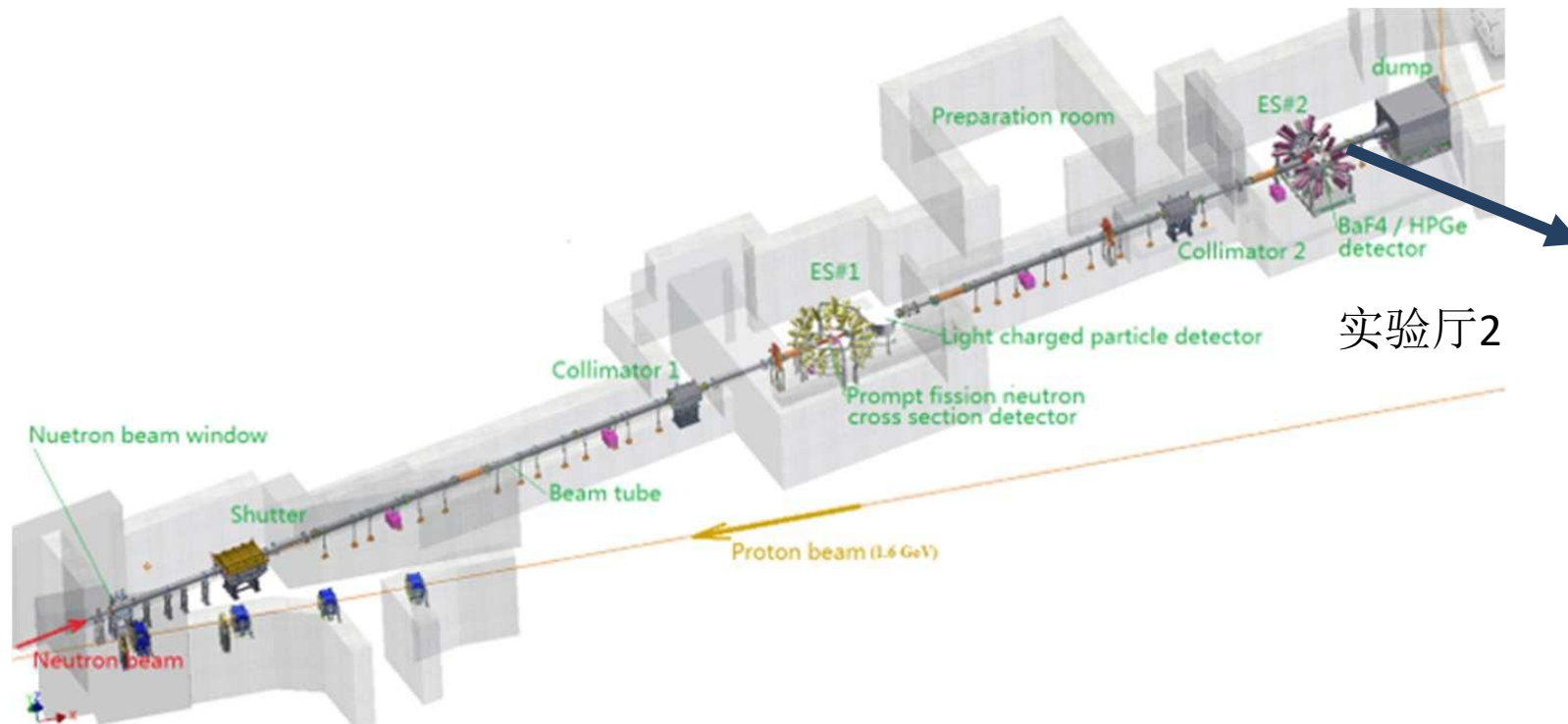
基于C₆D₆探测系统@Back-n 探测器已发表结果



X. Hu, et al(2021)



- 比较早期在Back-n开展的 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 反应截面测量研究得到了反应产额和截面;
- 近几年在不断完善基于C₆D₆探测系统开展中子俘获截面测量的实验方法及数据分析:
 - 1、**黑共振法**: 利用^{nat}Co等吸收片吸收共振峰处中子后用于刻度本底曲线;
 - 2、**双束团解谱**;
 - 3、**厅二Li-Si束流监测器**的安装, 促进厅二eV-keV能区能谱的测量研究;
- 基于这些发展, 2024年重新开展了 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 反应截面测量研究。



由四个氙代苯闪烁体及PMT组成的 C_6D_6 探测系统



- ✓ 2024年4月份开展实验;
- ✓ 金靶: $\phi 40\text{mm } 0.2\text{mm}$;
- ✓ 束斑组合: 50-15-40 @160kW;
- ✓ 使用中子束窗处的Co+Ag吸收片进行黑共振法刻度。

脉冲高度权重技术: PHWT



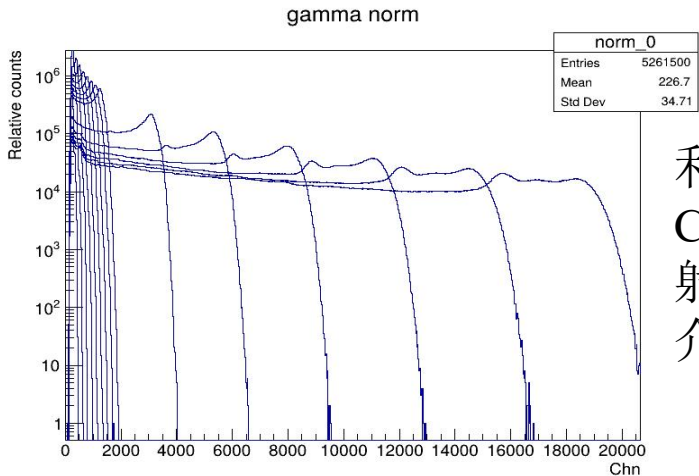
C₆D₆探测器对伽马射线的响应谱需要进行下式所示的加权才能正确建立探测器的效率与可观测量——伽马能量之间的刻度关系:

$$\epsilon_{\gamma} = \int R(E_d) WF(E_d) dE_d = E_{\gamma},$$

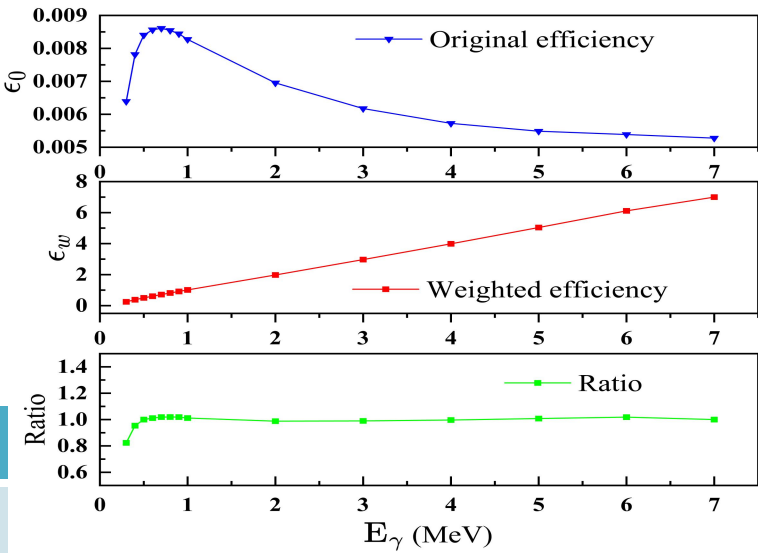
式中 ϵ_{γ} , $R(E_d)$, $WF(E_d)$ 分别代表对能量为 E_{γ} 的伽马射线的探测效率, 经模拟次数归一的响应谱以及一个4次多项式加权函数; E_d 代表沉积在探测器中的能量, 加权函数参数如下:

$$WF(E_d) = \sum_{i=0}^4 a_i E_d^i$$

a0	a1	a2	a3	a4
1.3060	0.132478	9.6442e-06	-6.8508e-10	e-14



利用Geant4模拟出的C₆D₆对15条单能伽马射线的响应谱, 能量介于0.2 - 7 MeV

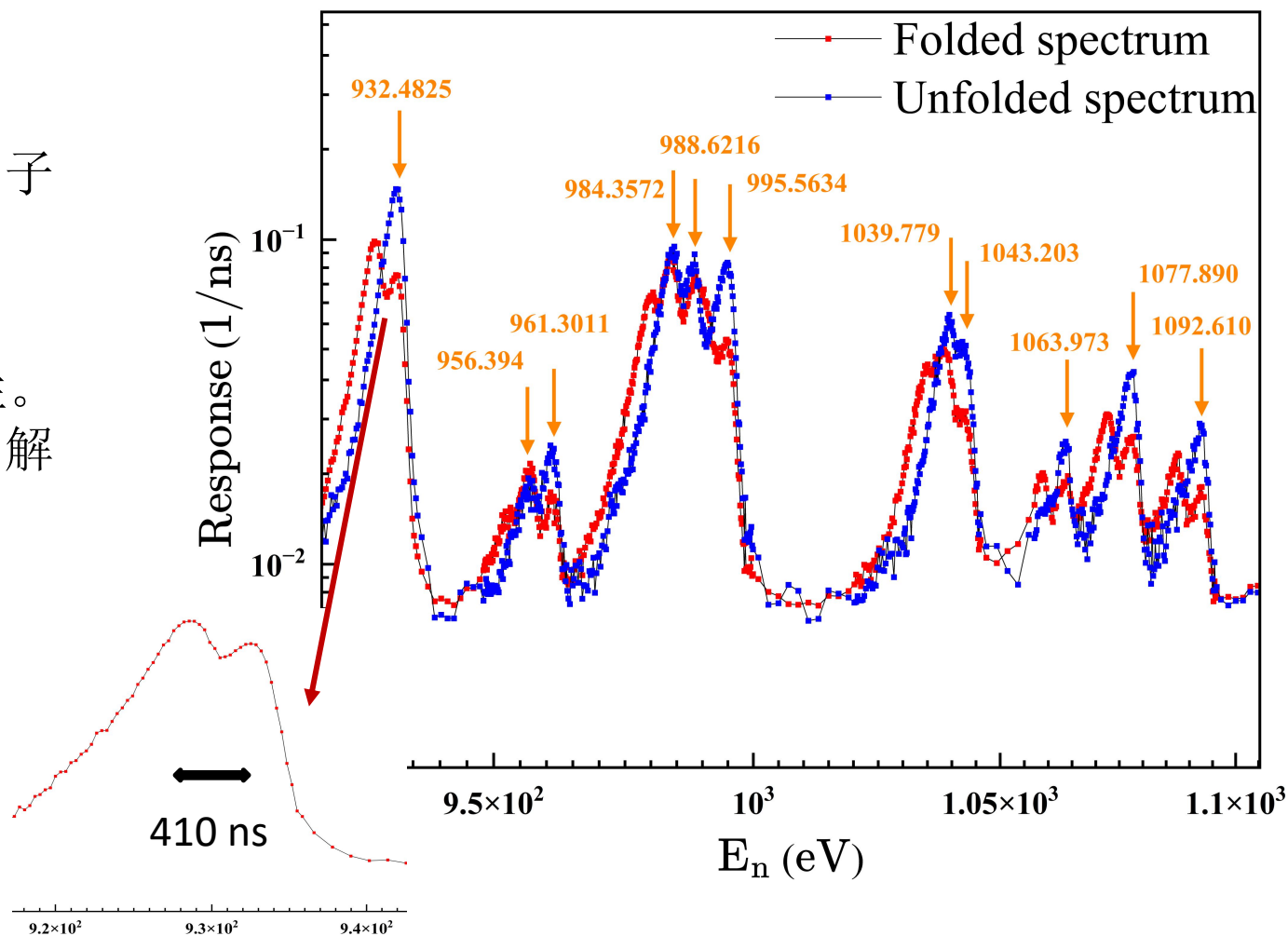


加权前后的效率对比

比率为 ϵ_w/E_{γ}

- 双束团工作模式下，两团间隔410ns的中子束团会先后与样品靶发生反应。
- 结果上会造成原始事件谱具有双束团特性。解谱程序的应用效果如右图所示，经过解谱的计数谱呈现出正确的共振结构。

例子：双束团效应



■ $N_w = N_o * WF = [N_{Au} - N_{emp} - N_{el} - N_{\gamma}] \otimes WF$ (其中 $\otimes$ 表示卷积)

空本底
散射中子本底
在束 γ 本底

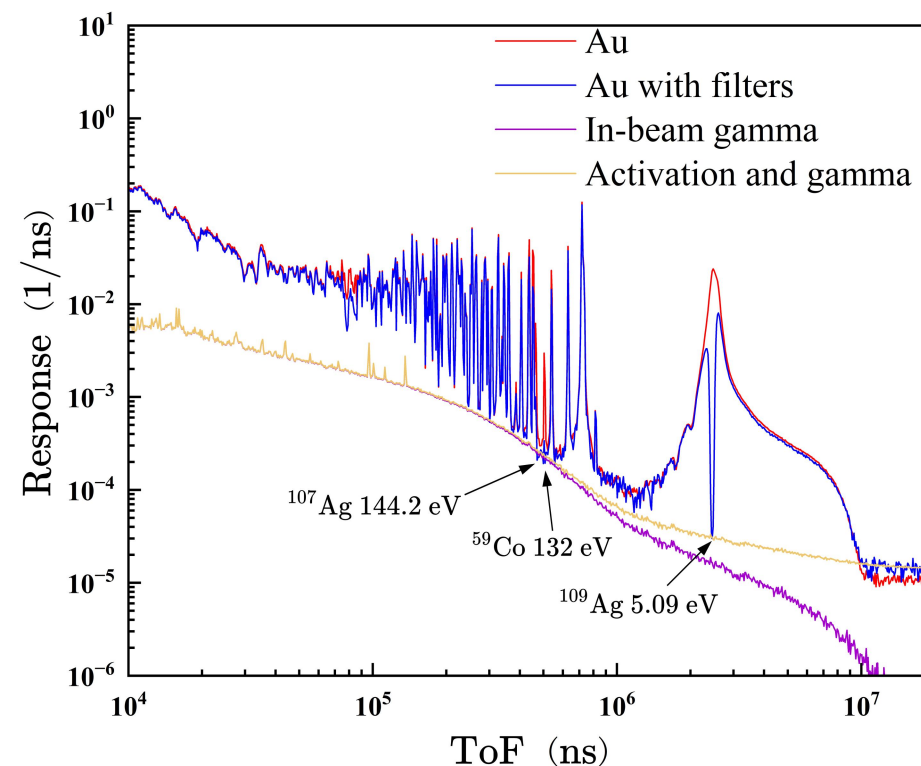
测量所得计
算所得归一
所得

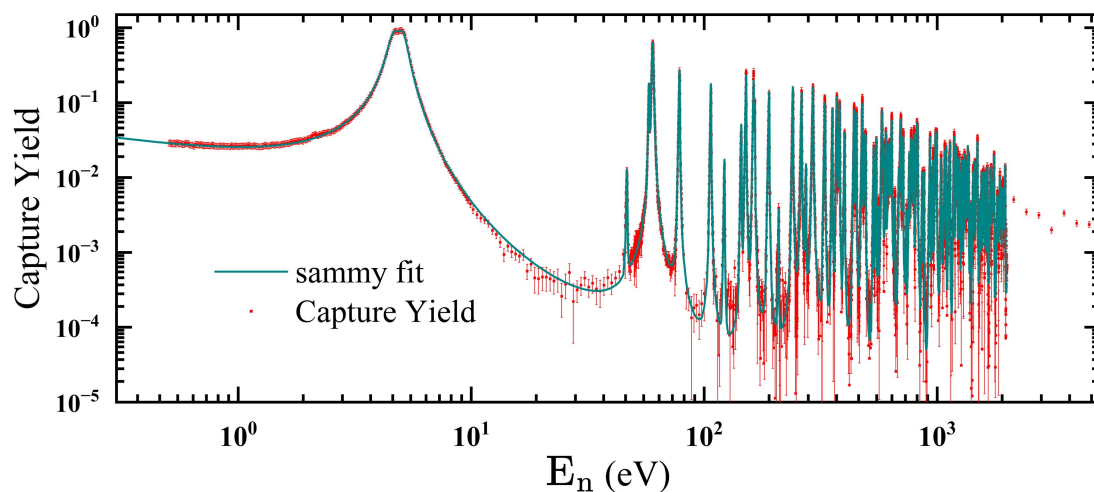
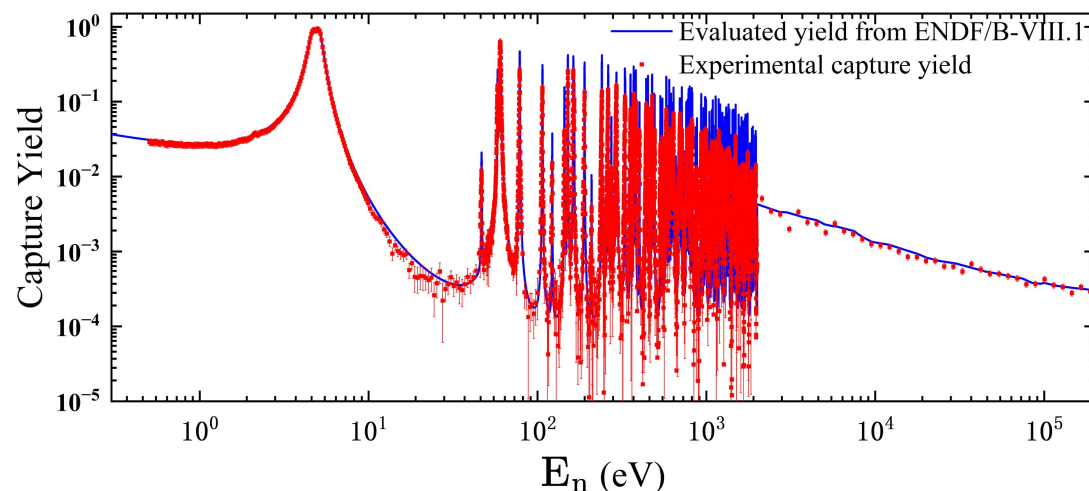
$$N_{el} = \eta_1 (N_C - N_{emp}),$$

$$N_{\gamma} = \eta_2 [N_{Pb} - N_{emp} - \eta_3 (N_C - N_{emp})],$$

$$\eta_1 \equiv \frac{\sigma_{Au}}{\sigma_C}, \quad \eta_3 \equiv \frac{\sigma_{Pb}}{\sigma_C} \quad \text{截面值均来自ENDF}$$

η_2 是将Pb靶刻画出的在束伽马形状归一到有Ag+Co吸收片实验结果的吸收谷所得系数





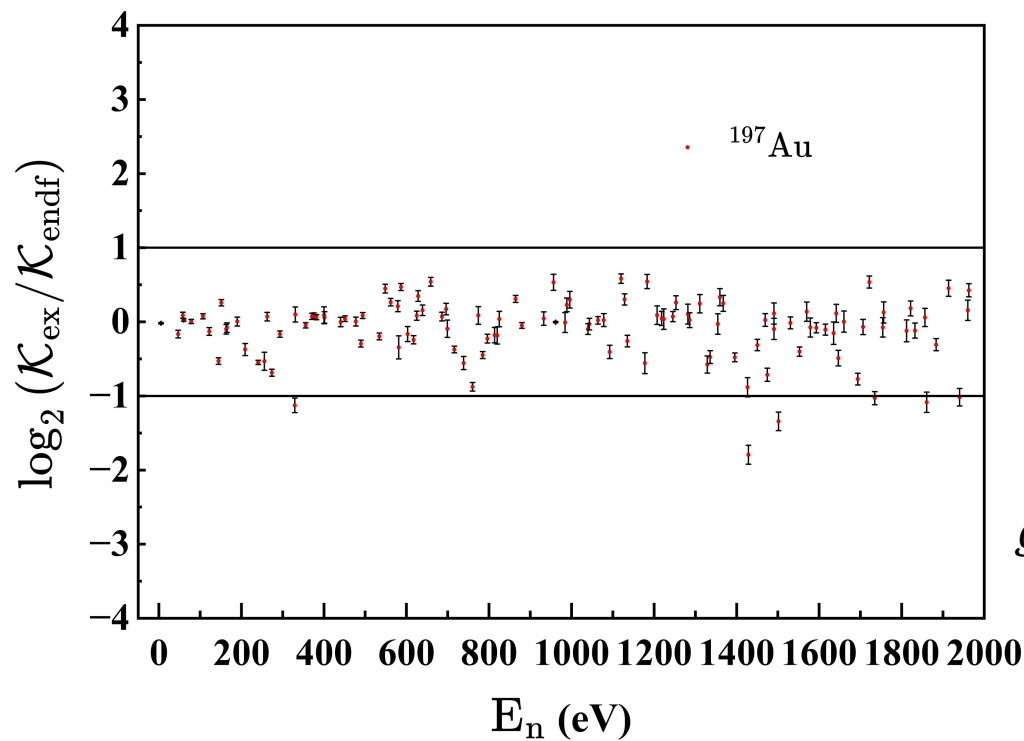
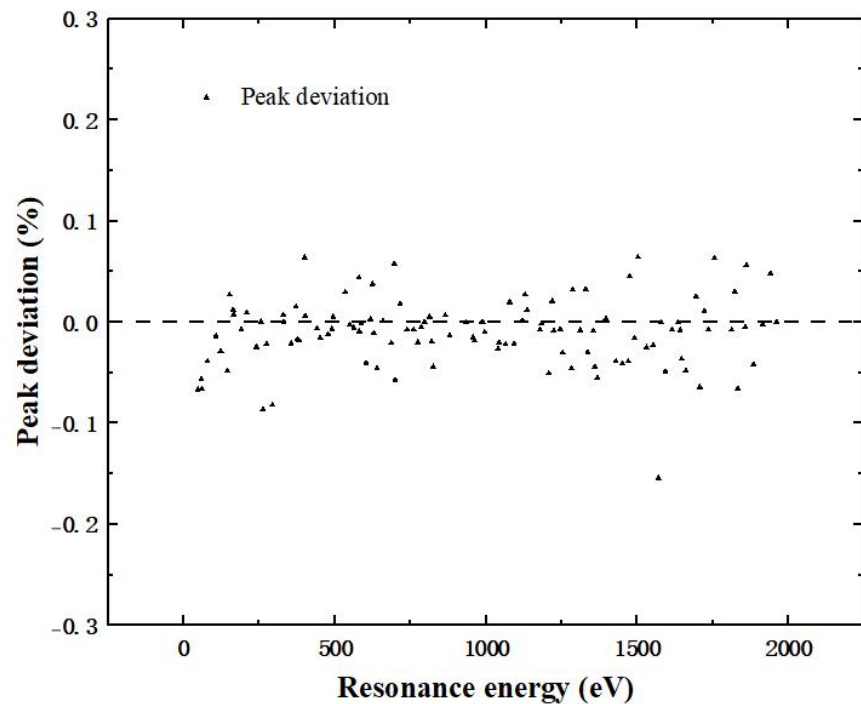
中子俘获反应产额:

$$Y = C \frac{N_w}{I\epsilon} = C \frac{N_w}{I(S + E_n)}$$

I 为中子能谱, S 是 ^{197}Au 的结合能。在考虑了多重散射的修正后, 结果被归一至位于4.9 eV的饱和吸收峰。

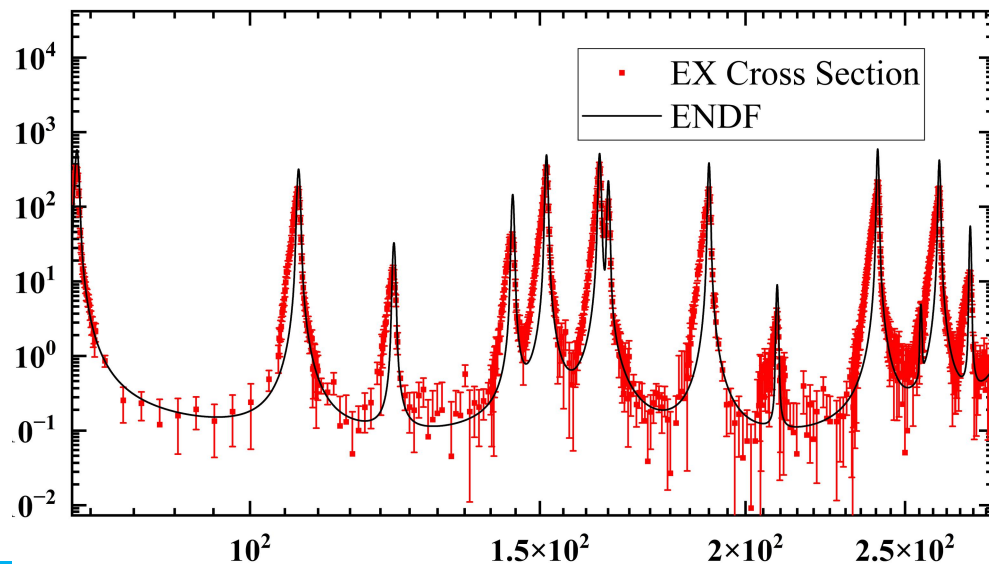
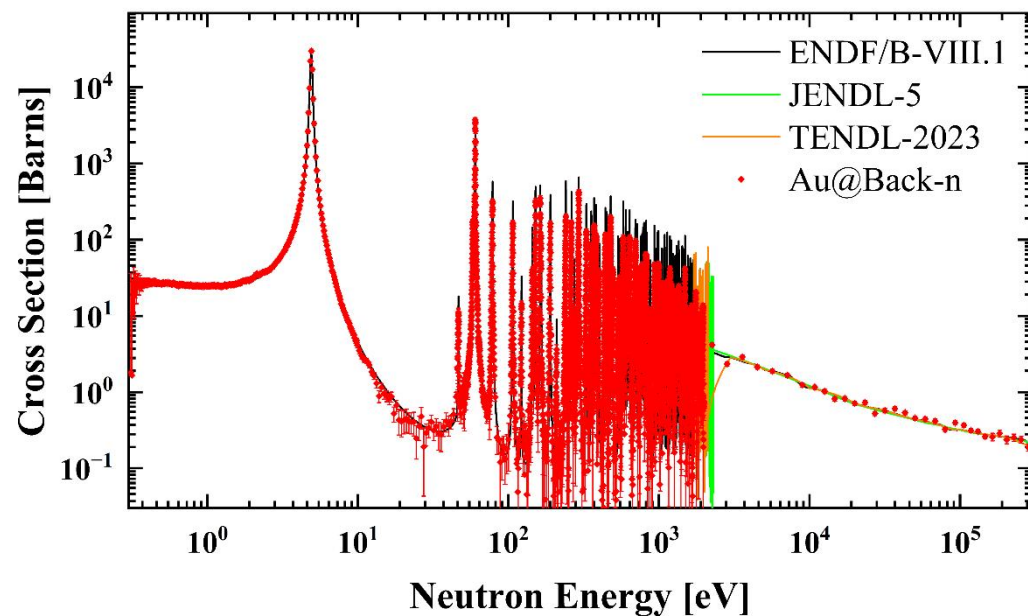
使用ENDF/B-VIII.1 中的共振参数作为sammy的输入值, 在2 keV内, 拟合了实验所得产额, 并得到了一套所有可辨识到的共振峰的新的共振参数

R矩阵分析提取的共振参数



$$K = g \frac{\Gamma_\gamma \Gamma_n}{\Gamma_\gamma + \Gamma_n}$$
$$g = \frac{2J + 1}{(2s + 1)(2I + 1)}$$

- 由于质子束团宽度的原因，离得较近的双共振峰(数量较少)在此次测量和数据分析中不容易被区分开。
- 实验数据提取的共振峰位及Capture Kernel K (描述一个共振峰大小的常用参数评价)与ENDF-B/VIII.1评价库给的参考值之比整体上表现出较小的偏差。



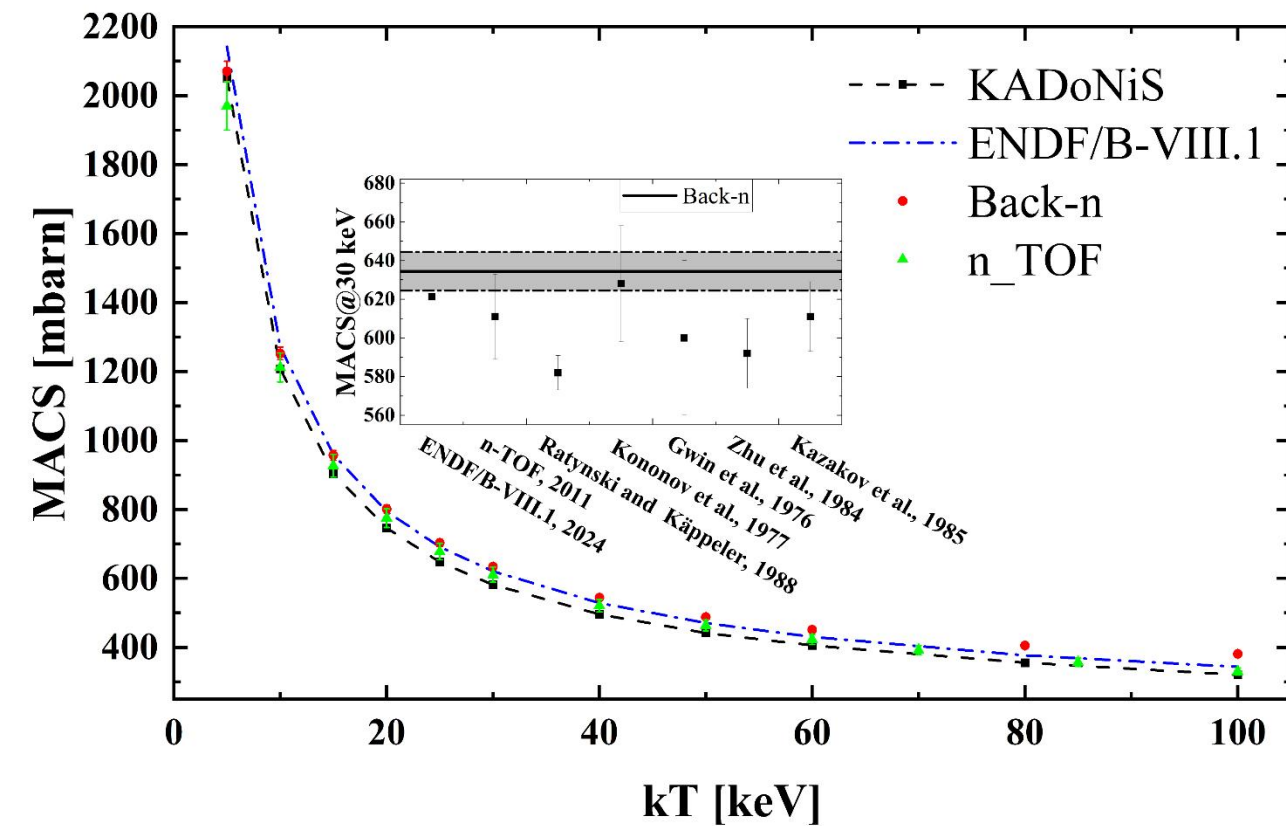
结合ENDF/B-VIII.1给出的 $^{197}\text{Au}(n, \text{tot})$ 截面值，初步计算了从 0.3 eV 到 300 keV能区的截面值：

$$Y = [1 - \exp(-N_V \sigma_{nt} d)] \frac{\sigma_{n\gamma}}{\sigma_{nt}}$$



$$\sigma_{n\gamma} = Y \frac{\sigma_{nt}}{1 - \exp(-N_V \sigma_{nt} d)}$$

可见在共振峰谷有较好的截面结果



■ 麦克斯韦平均截面：

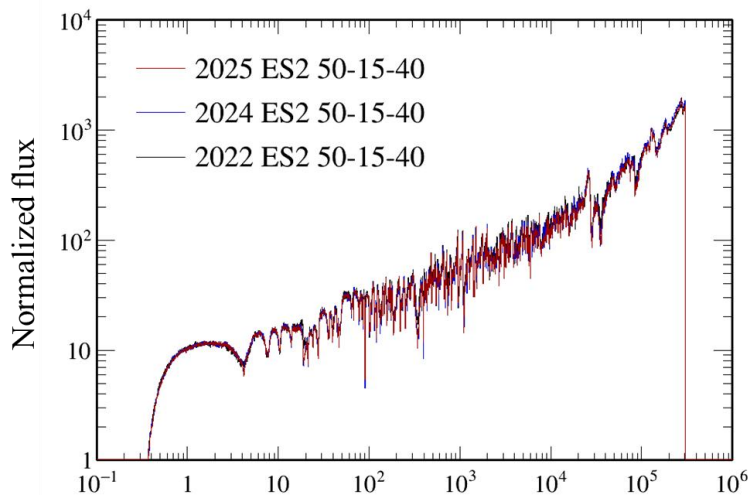
$$\langle \sigma \rangle_{kT} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\int_0^\infty \sigma(E_n) E_n e^{-E_n/kT} dE_n}{\int_0^\infty E_n e^{-E_n/kT} dE_n}$$

■ 整体与ENDF/B-VIII.1给出参考值符合较好。

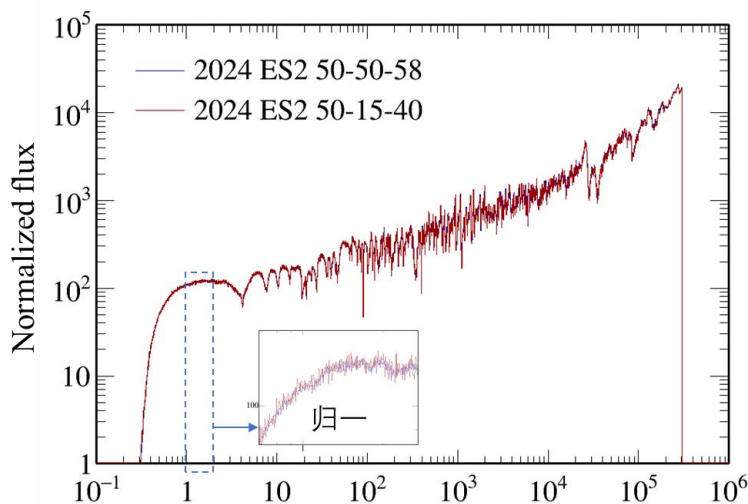
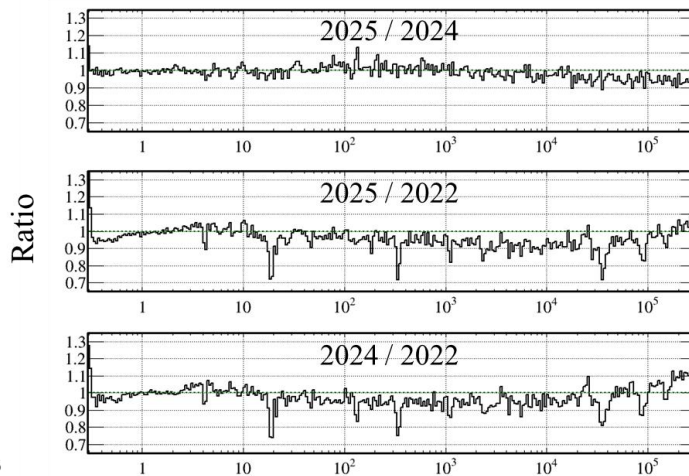
- 本次实验使用C₆D₆探测系统测量了 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 反应截面，测量中使用了黑共振法进行本底刻度，数据分析中开展了双束团解谱，使用了更加合适的能谱。
- 得到了0.3 eV 至 300 keV 能区的 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 的产额及截面，在共振峰的谷处本底得到了较好的控制。
- 通过俘获产额拟合得到了一套新的共振参数，计算得到了麦克斯韦平均截面，与ENDF-B/VIII.1已有的评价数据符合较好。
- 实验方法及束流特征的测量的发展对共振区中子俘获截面有重要的意义。

- 如何利用 C_6D_6 探测系统得到尽可能精确的共振区中子俘获反应截面：
 - 1、高丰度同位素样品及足够的测量统计；
 - 2、降低本底水平： 探测器距离真空的距离， 真空管道材料；
 - 3、能谱： 高精度(尽可能达到500bpd)； 能谱结构改变(2024年更换质子束窗及2025年更换靶) 需要结合Li-Si束流监测器尽快给出实验期间的能谱；
 - 4、能量分辨率函数： 结合模拟和实验给出能量分辨率函数。

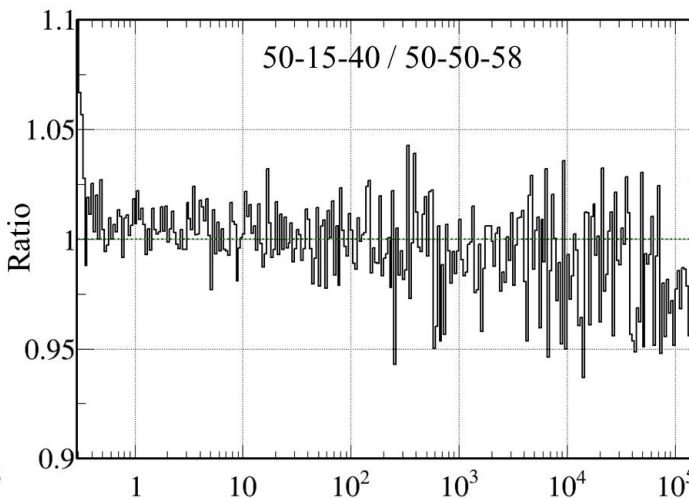
厅二150keV以内能区能谱变化



Energy (eV)



Energy (eV)

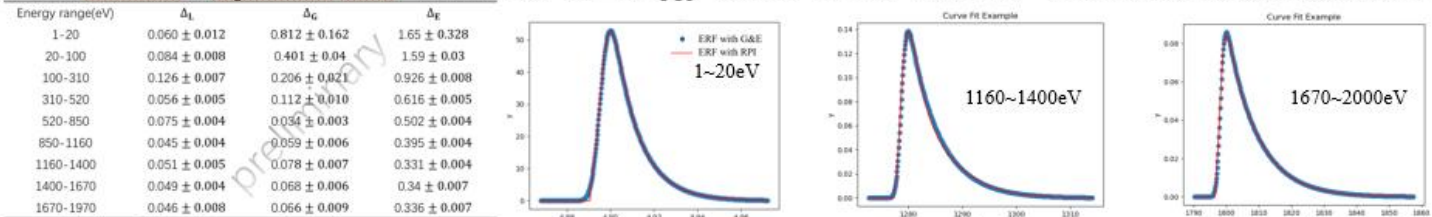


- CSNS加速器及散裂靶的调整对能谱的影响: 2024暑期更换了1.6GeV质子束流入射到散裂靶前质子束窗改变(没有水→有**3mm**厚的水); 2025年1月更换了散裂靶体; **对Back-n能谱均可能有影响。**
- 分析了2022、2024、2025特定时间的50-15-40准直器组合下厅二能谱。
- 2024更换质子束窗对能谱影响比较大, 2025年换靶影响相对较小。

详情请见:
24日上午孔誉谦报告及海报

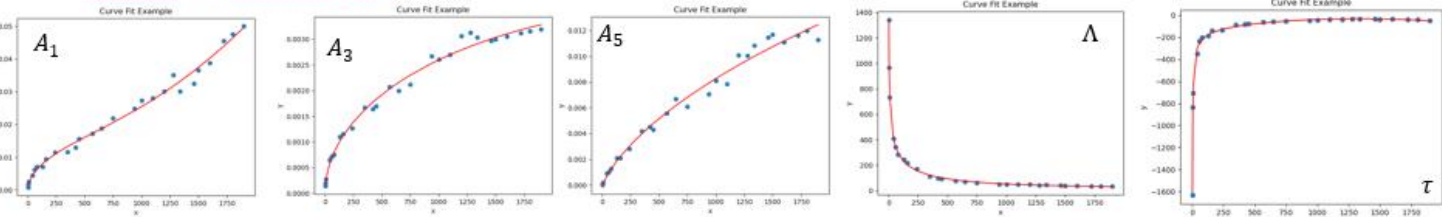
基于 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 实验数据提取RPI参数

通过 Gaussian & exponential(fitted) 可以给出各个能区的 E_{ToF} 与 E_n 的分布，基于这些分布，可以拟合给出RPI函数的各项参数：



Tab. Gaus.&Expo. Parameters for each energy range;

利用 Gaussian & exponential(fitted) 的限制，给出了在 1 eV~2 keV 能区 RPI 参数 $A_1, A_3, A_5, \tau, \Lambda$ 对 E_{ToF} 的依赖关系：



$$A_2 = 1 \quad A_4 = -1 \quad t_0 = 0$$

a_{11}	-425.767	a_{31}	0.000668	a_{51}	0.000585	Λ_0	1220.738	τ_1	305687.1
a_{12}	2.03E-06	a_{32}	7.57E-06	a_{52}	1.77E-09	Λ_1	-291.666	τ_2	-6.60E-06
a_{13}	153.5103	a_{33}	-0.000671	a_{53}	0.003654	Λ_2	17.76457	τ_3	-57888.5
a_{14}	5.54E-06	a_{34}	7.69E-06	a_{54}	-1.46E-06	Λ_3	1659.614	τ_4	-3.38E-05
a_{15}	271.8245	a_{35}	-0.00125	a_{55}	-0.00231	Λ_4	-1.88755	τ_5	-247817
a_{16}	-0.432395	a_{36}	3.76E-05	a_{56}	-0.00195			τ_6	-2119.82
a_{17}	0.002668	a_{37}	-1.1094	a_{57}	-0.02199			τ_7	-0.53059

Tab. RPI parameters extracted from $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ data(1~2000 eV).

右表即是我们基于Back-n的 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 实验数据，通过 Gaussian & exponential 函数和R-matrix分析间接得到的Back-n装置在1 eV~2 keV能区的RPI形式的中子能量分辨率函数的参数

- 基于在 C_6D_6 探测系统开展的 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 反应的数据，使用R矩阵分析提取了高斯+指数形式的能量分辨率，进而拟合得到了RPI形式的能量分辨率函数。
- 对于得到的RPI形式的能量分辨率函数，在中子透射及中子俘获反应数据分析中得到了验证。

详情请见：
24日上午杨高乐报告及海报



Thanks !