

基于 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 实验开展的Back-n装置的能量分辨率函数研究

报告人：杨高乐^{1,2}

导师：蒋 伟²

1. 中山大学物理与天文学院

2. 散裂中子源科学中心

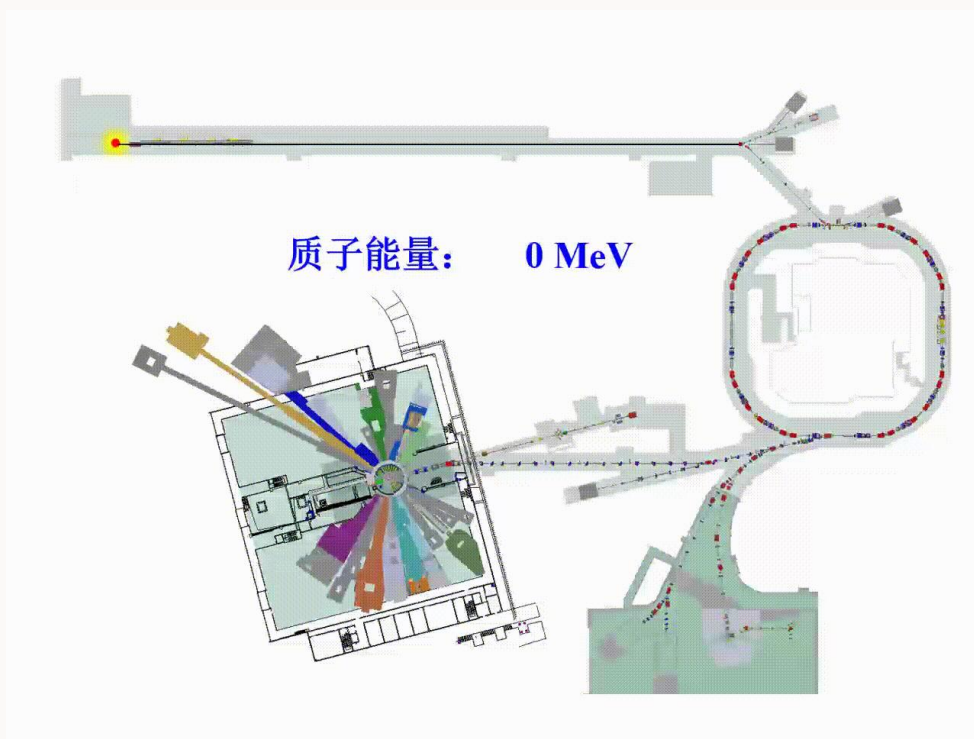
2025.07.24

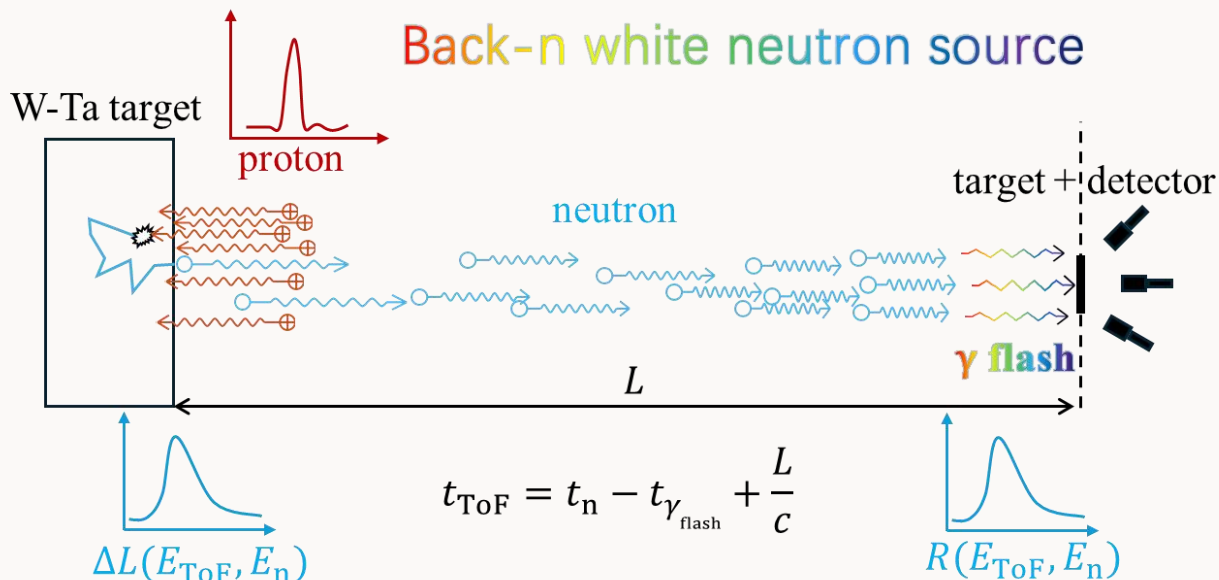


中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

1. 研究背景
2. 基于 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 实验数据的RPI参数研究
3. RPI参数的验证与应用
4. 总结与展望

- 基于中国散裂中子源搭建的反角白光源(Back-n)是我国的首台高性能白光中子源，具有中子能量范围宽、通量高、能量分辨好等特点，主要开展中子核数据精确测量、核物理及核天体物理等领域的研究。
- 每个中子ToF装置都具有两个比较重要的两个内禀性质：**中子注量率和中子能量分辨率函数(ERF)**，研究清楚这两个量是利用该装置开展实验研究的前提和基础；





$$E_{\text{ToF}} = \frac{1}{2} m_n V^2 = \frac{(72.2977 \times L)^2}{t_{\text{ToF}}^2}$$

由于中子在散裂靶中产生的位置不同以及在散裂靶体中的散射，中子的实际飞行距离通常大于散裂靶表面到用户实验靶的物理距离：

$$E_n = \frac{[(72.2977 \times (L + \Delta L(E_{\text{ToF}}, E_n)))]^2}{t^2}$$

我们可以用某个特定的分布函数($R(E_{\text{ToF}}, E_n)$)来近似描述装置的 E_{ToF} 与 E_n 的总体分布，这个分布函数即为该装置对应的中子能量分辨率函数(Energy Resolution Function(ERF)), ERF通常会与我们想要测量的物理量卷积耦合在一起

$$\sigma_{\text{exp}}(E_{\text{ToF}}) = \int R(E_{\text{ToF}}, E_n) \sigma_{\text{true}}(E_n) dE_n$$

实验值(装置相关) ERF(装置相关) 真实值(装置无关)

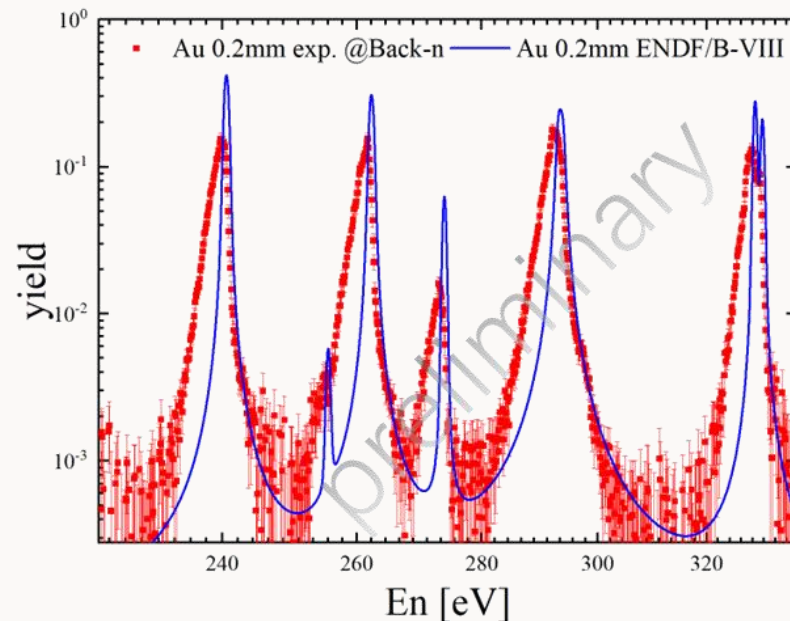


Fig. 在Back-n装置测量的 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 实验数据与评价库的对比.

- 存在多种形式的ERF，最早采用的Gaussian & exponential形式(N. M. Larson research on ORELA facility)，后来提出了更符合真实情况也更复杂的ORR形式(for ORELA data)，和RPI形式(for n_tof, LINAC facility).
- 与n_tof类似，一般认为Back-n装置的ERF也应该采用RPI形式[1]；

- Gaussian & exponential函数：

$$R_{GE}(E, E') = \frac{1}{2\Delta_E} \exp\left\{\frac{\Delta_G^2}{4\Delta_E^2}\right\} \exp\left\{-\frac{E' - E + \Delta E_S}{\Delta_E}\right\} \times \operatorname{erfc}\left(\frac{\Delta_G}{2\Delta_E} - \frac{E' - E + \Delta E_S}{\Delta_G}\right)$$

其中 Δ_E, Δ_G 为待定参数， ΔE_S 是为了使分布的最大值位于 $E' = E$ 处；

- RPI函数：

$$I(t) = A_0 \left\{ \frac{(t + \tau)^2}{2! \Lambda^3} e^{-(t+\tau)/\Lambda} + A_1 [A_2 e^{-A_3(t+t_0)} + A_4 e^{-A_5(t+t_0)}] X(t) \right\}$$

其中 $\Lambda, \tau, A_1, A_3, A_5$ 都是中子能量的函数：

$$\Lambda(E) = \Lambda_0 + \Lambda_1 \ln(E) + \Lambda_2 [\ln(E)]^2 + \Lambda_3 E^{\Lambda_4}$$

$$\tau(E) = \tau_1 e^{-\tau_2 E} + \tau_3 e^{-\tau_4 E} + \tau_5 + \tau_6 E^{\tau_7}$$

$$A_i(E) = \left\{ a_{i1} e^{-a_{i2} E} + a_{i2} e^{-a_{i4} E} + a_{i5} + a_{i6} E^{a_{i7}} \right\} \alpha_i$$

- 一般来说ERF难以通过实验直接测量 (能量分辨率高于ToF装置一个量级), 需要通过Monte Carlo方法对中子产生装置进行模拟获得;
- CSNS的大部分束线主要需求热中子及以下能区的中子, 需要大量中子慢化体和反射层, 所以CSNS相对其他中子源的散裂靶结构复杂;

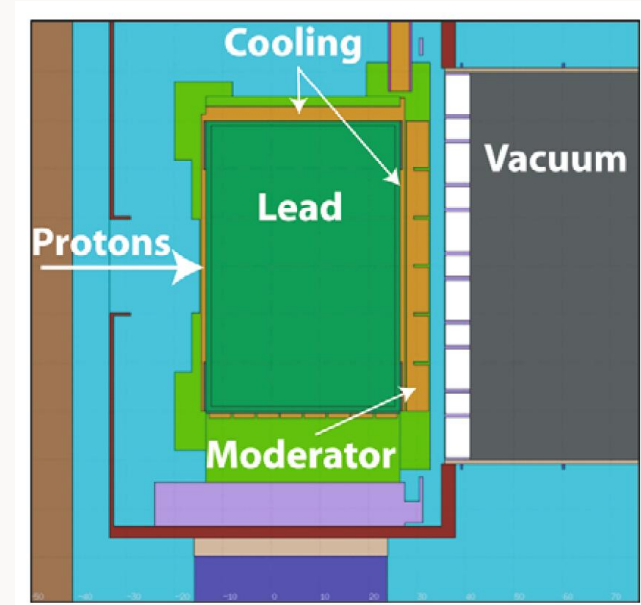
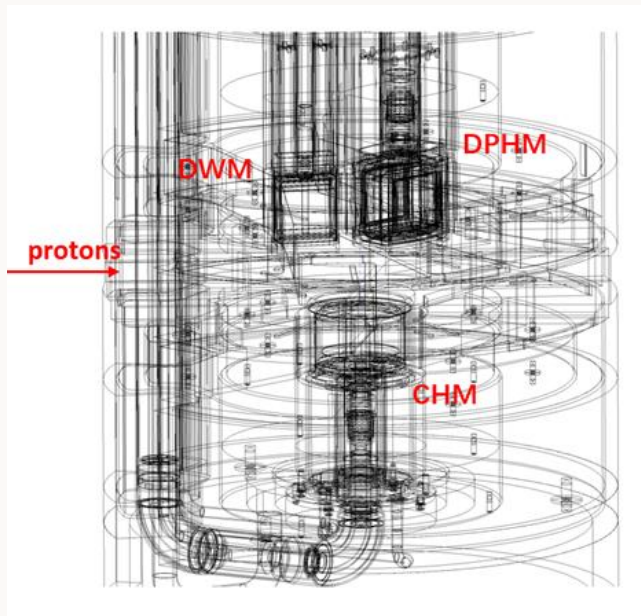
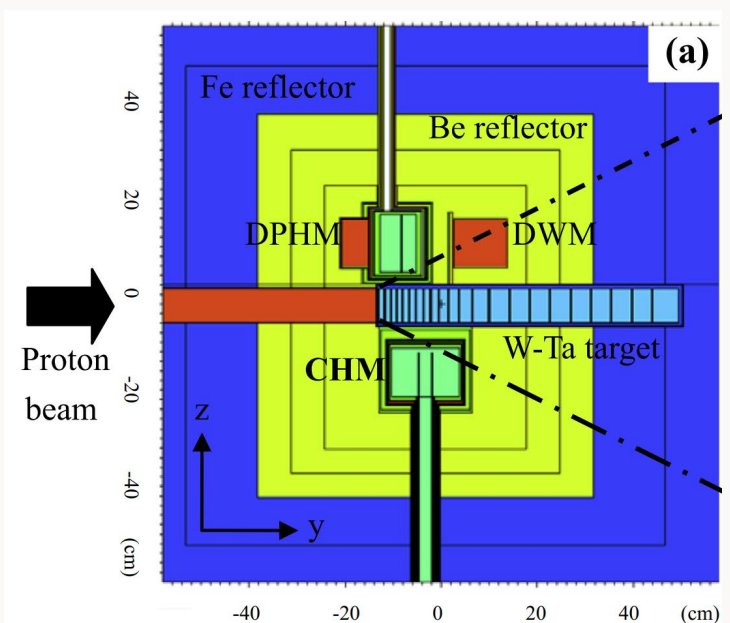


Fig. Schematic drawing of the target-moderator-reflector assembly of CSNS facility.

Fig. Geometry of the target assembly for n_{tof}.

[1]. B., Jiang *et al.* NIMA, 1013,165677 (2021).

- 以往利用Geant4开展了对CSNS散裂靶体精细的建模和模拟，并根据模拟结果提取RPI函数的参数[1];

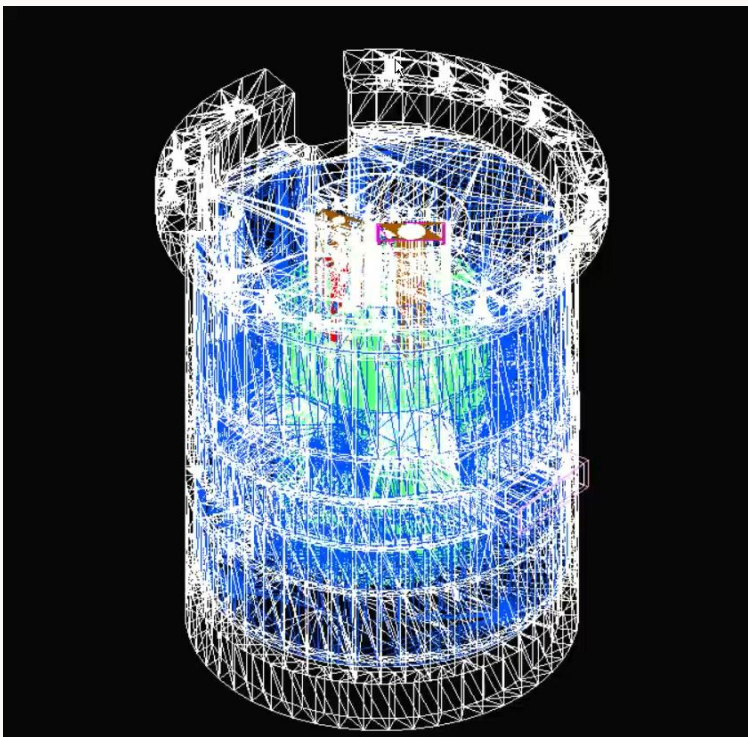


Fig. target-moderator-reflector assembly at CSNS as implemented in GEANT4 simulations.

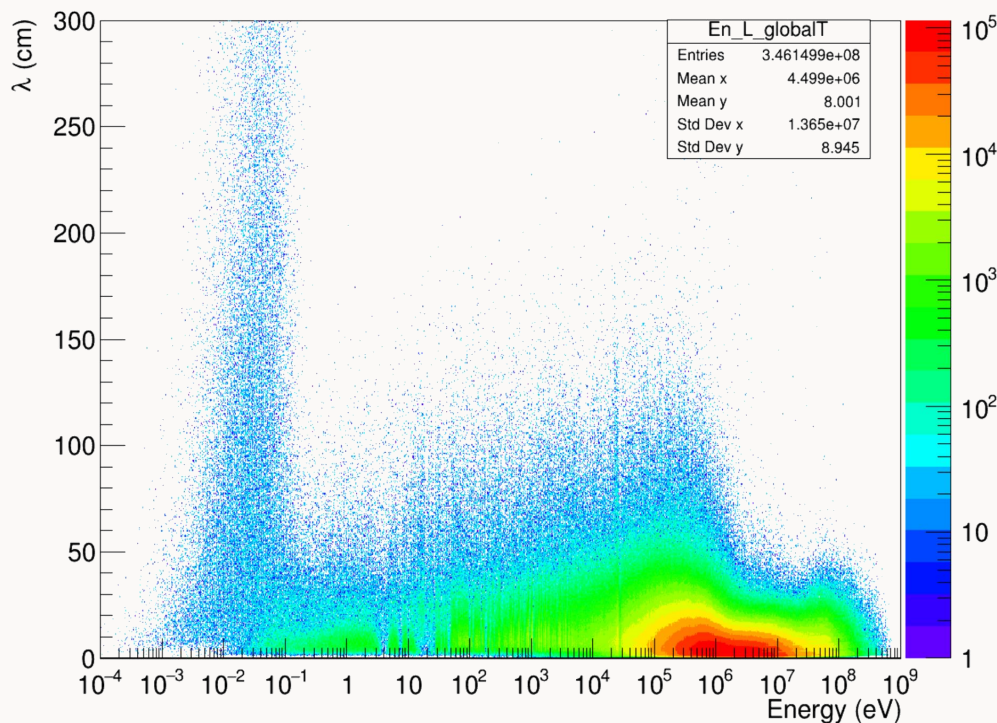


Fig. Probability distribution of the equivalent moderation distance, as a function of neutron energy

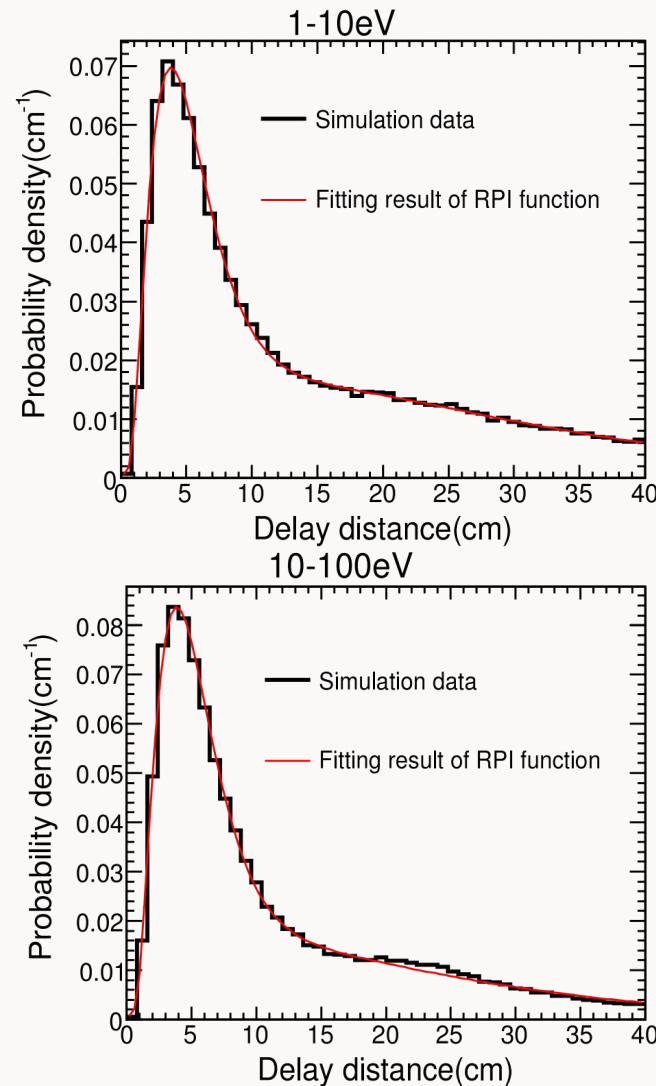


Fig. 根据模拟结果得到RPI参数

[1]. B., Jiang *et al.* NIMA, 1013,165677 (2021).

- 将以往通过模拟得到的RPI参数应用于Back-n实验数据的R-matrix分析获得的拟合结果不够好。
- 在数据分析过程中发现采用 Gaussian & exponential 形式的ERF(Gaussian & exponential 函数的参数作为自由参数), 可以很好地拟合实验数据;

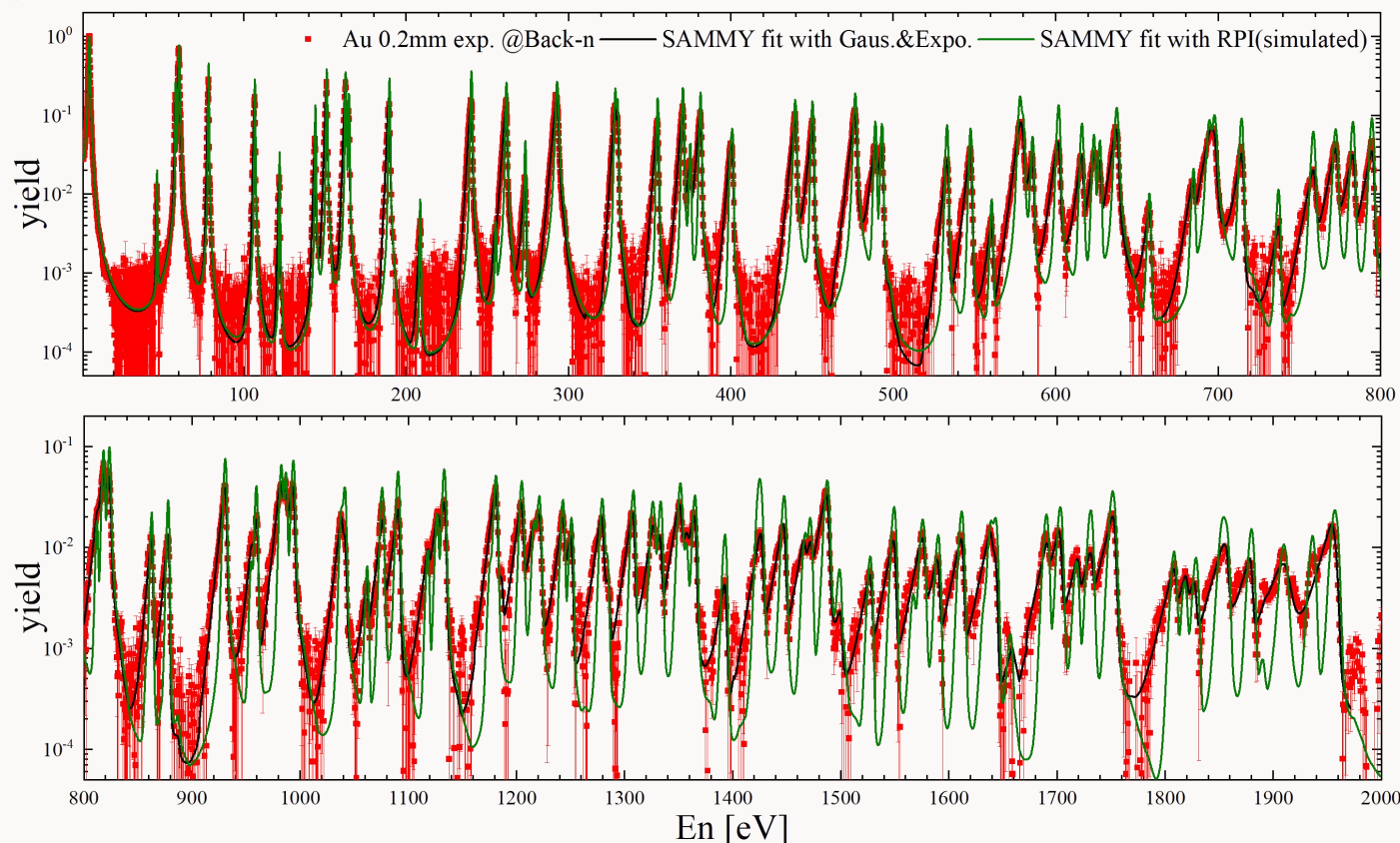
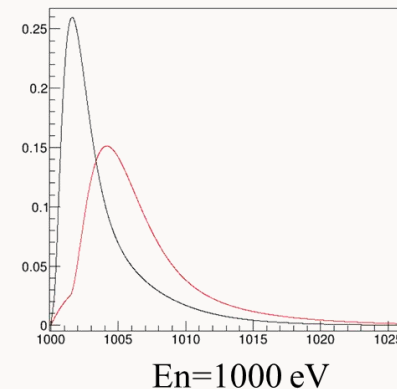
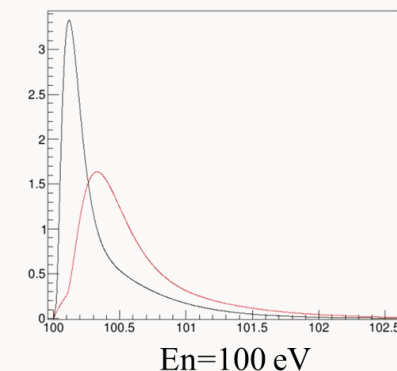
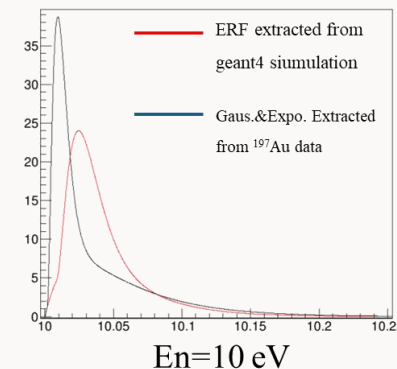


Fig. R-matrix analysis for $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ experimental data with SAMMY code (with RPI(simulated) and Gaussian & exponential function).

➤ 通过SAMMY程序分析 $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$ 实验数据，可以得到1~2000 eV 能区的Gaus.&Expo. 函数的参数，进而得到各个能区的ERF形状。

Energy range(eV)	Δ_L	Δ_G	Δ_E
1-20	0.060 ± 0.012	0.812 ± 0.162	1.65 ± 0.328
20-100	0.084 ± 0.008	0.401 ± 0.04	1.59 ± 0.03
100-310	0.126 ± 0.007	0.206 ± 0.021	0.926 ± 0.008
310-520	0.056 ± 0.005	0.112 ± 0.010	0.616 ± 0.005
520-850	0.075 ± 0.004	0.034 ± 0.003	0.502 ± 0.004
850-1160	0.045 ± 0.004	0.059 ± 0.006	0.395 ± 0.004
1160-1400	0.051 ± 0.005	0.078 ± 0.007	0.331 ± 0.004
1400-1670	0.049 ± 0.004	0.068 ± 0.006	0.34 ± 0.007
1670-1970	0.046 ± 0.008	0.066 ± 0.009	0.336 ± 0.007

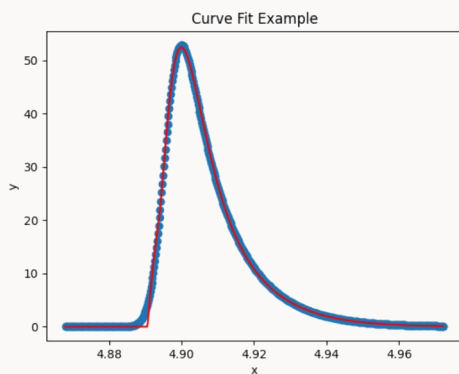
Tab. Gaus.&Expo. Parameters for each energy range;



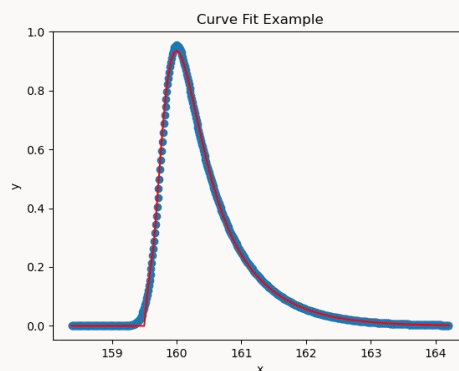
- 通过Gaussian & exponential(fitted) 可以给出各个能区的 E_{ToF} 与 E_n 的分布，基于这些分布，可以拟合给出RPI函数的各项参数：

● ERF with G&E

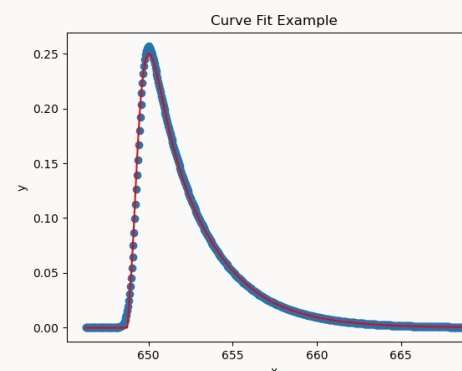
— ERF with RPI



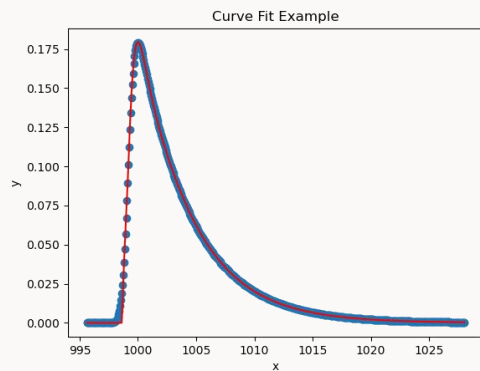
1~20eV



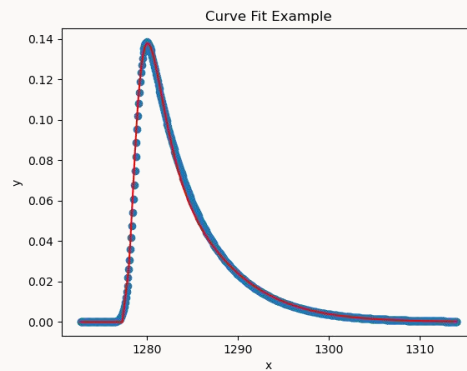
100~310eV



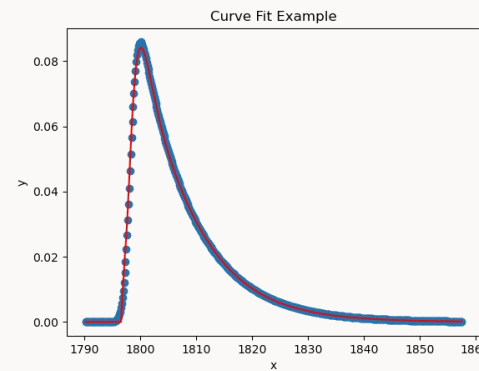
520~850eV



850~1160eV

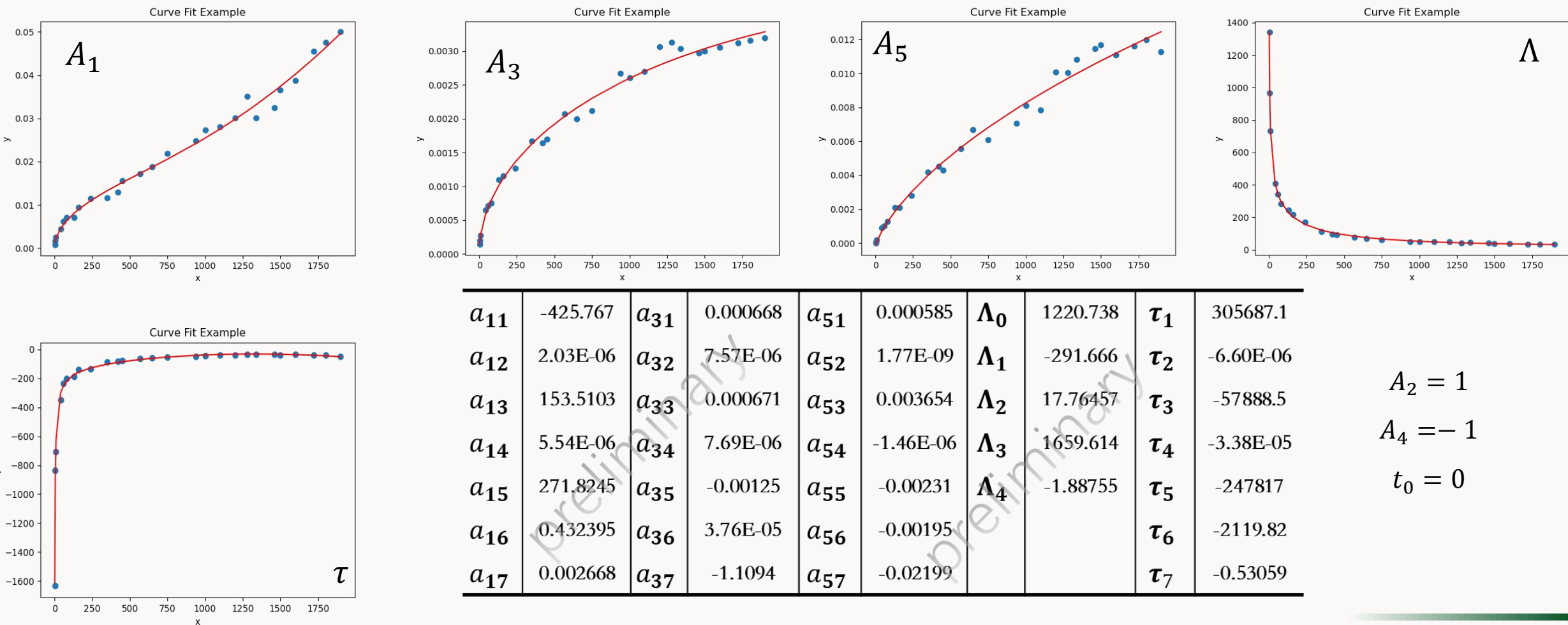


1160~1400eV



1670~2000eV

➤ 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_{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

$$A_2 = 1$$

$$A_4 = -1$$

$$t_0 = 0$$

- 在Geant4模拟中加入RPI函数展宽模拟 ^{197}Au 的产额(Geant4可以考虑多重散射、多普勒展宽等其他实验效应), 与实验数据对比即可初步验证RPI参数的准确性:

$$\int R(E_{\text{ToF}}, E_n) \sigma_{\text{true}}(E_n) dE_n \Rightarrow \sigma_{\text{exp}}(E_{\text{ToF}})$$

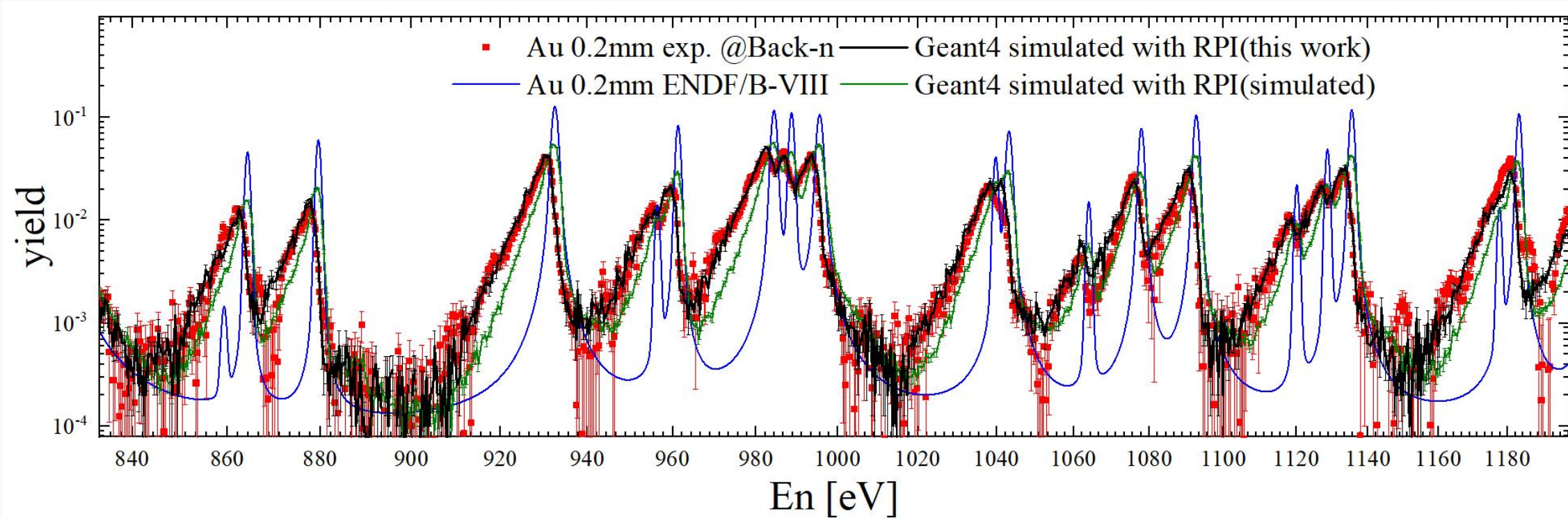


Fig. $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ experimental yield (at Back-n) compared with Geant4 simulated yield (with RPI from simulation and this work).

- 在 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 数据的 R-matrix 分析中，代入之前得到的RPI参数，可以很好的拟合实验数据；
- 在R-matrix 分析中，用两种形式的ERF分别提取得到共振参数，与 ENDF/B-VIII.0 评价库的评价参数对比，使用RPI函数的情况下的提取的共振能量与评价数据的差异 $\leq 1.5\%$ 。

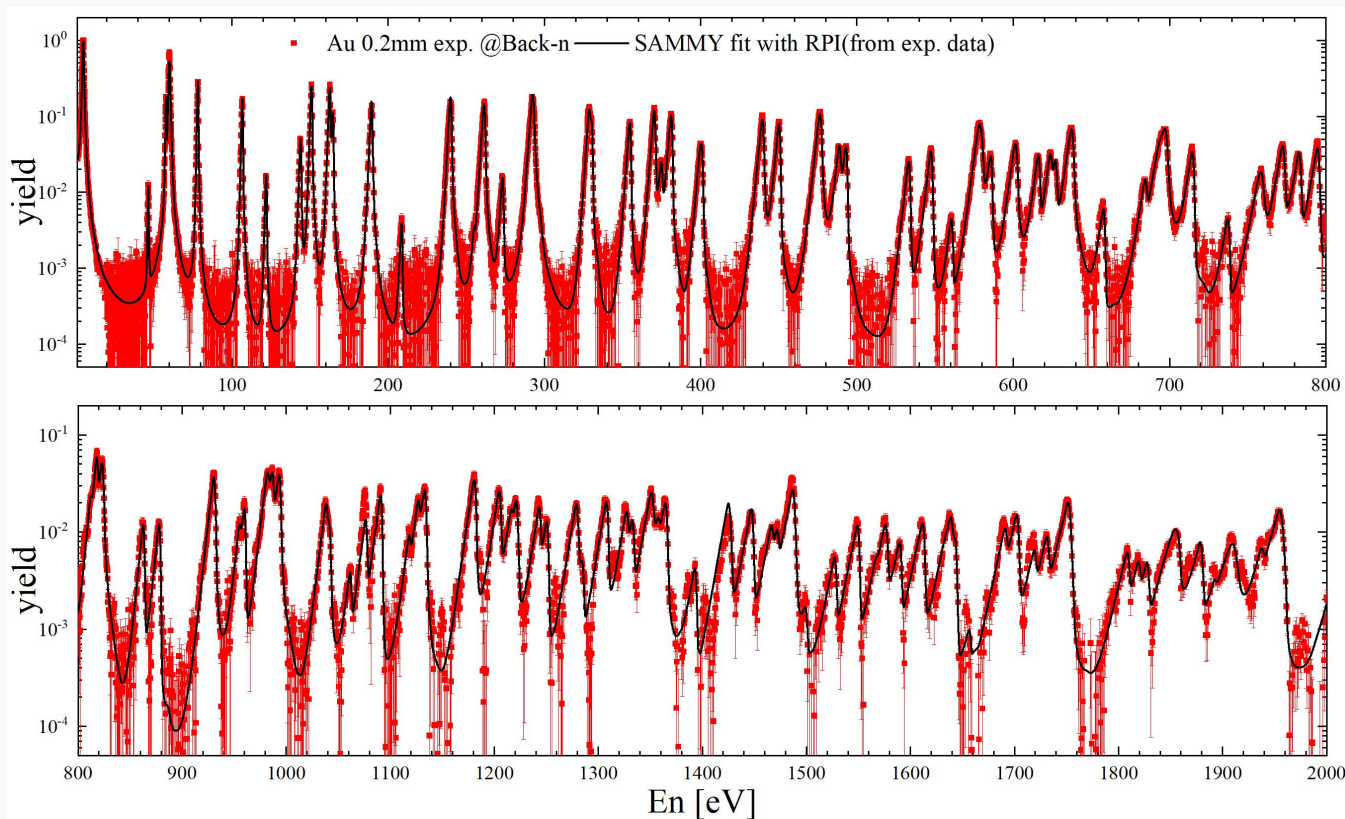


Fig. R-matrix analysis for $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ experimental data with SAMMY code and ERF(RPI) function.

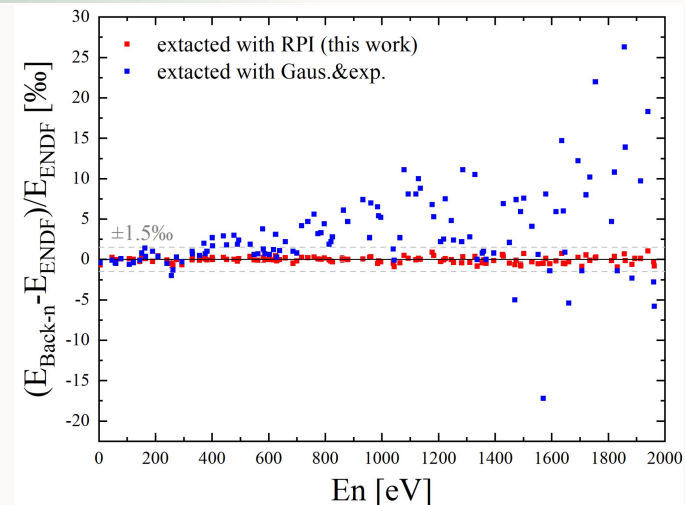


Fig. Differentials of resonance energy for ^{197}Au experimental data and ENDF/B-VIII.0 database.

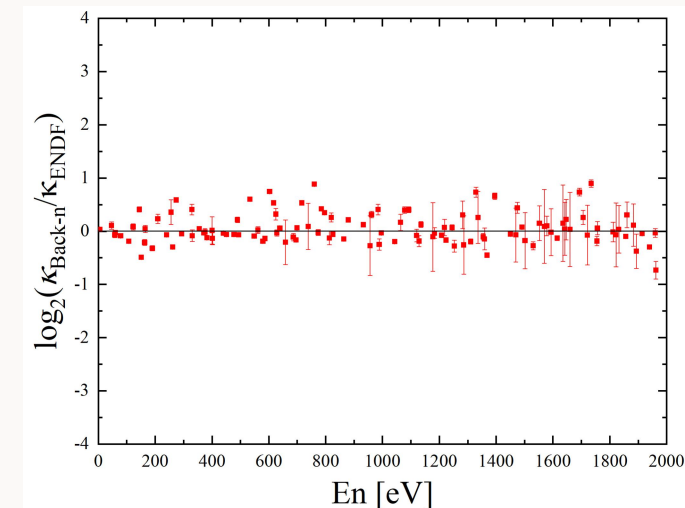


Fig. Logarithmic capture kernel ratios for $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ experimental data and ENDF/B-VIII.0 database.

在中子透射及中子俘获实验中验证RPI参数；

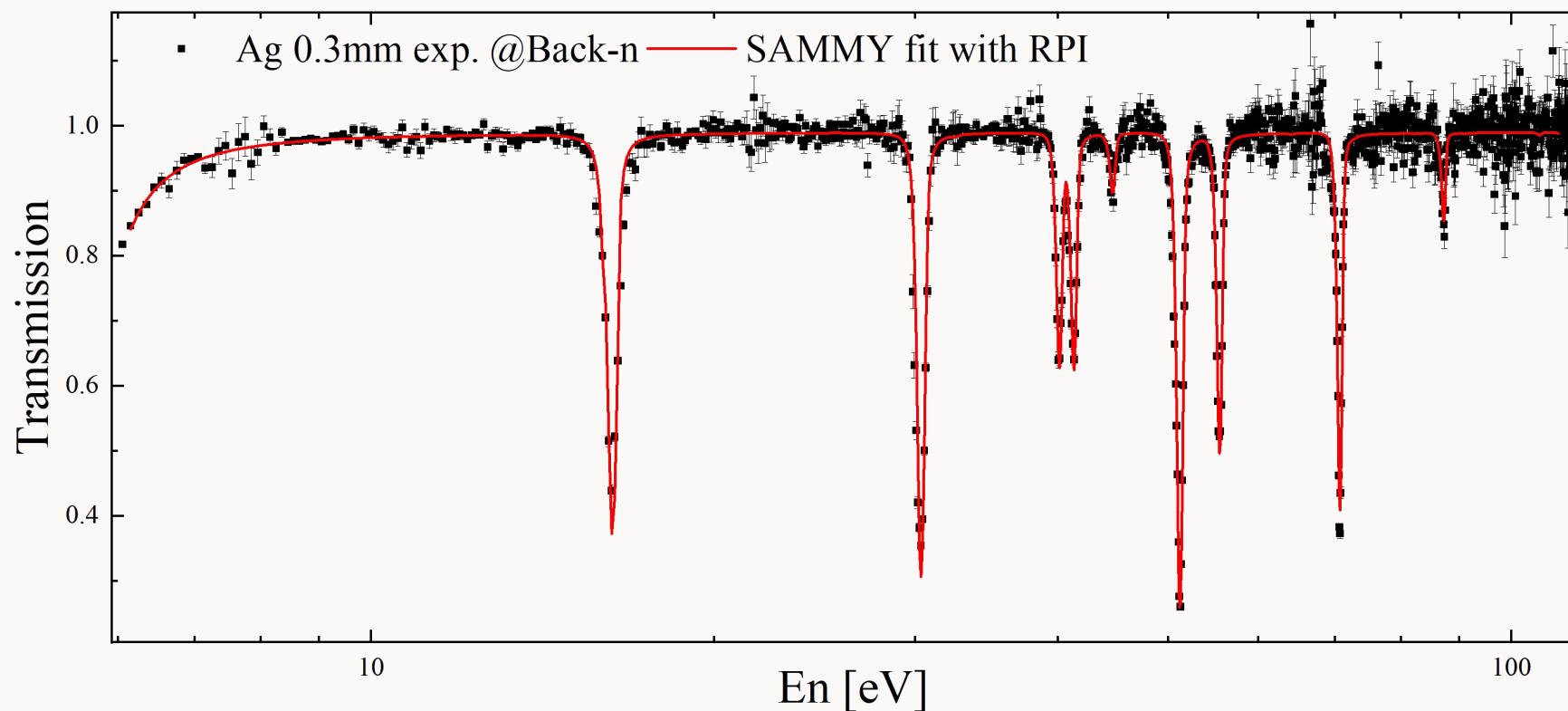


Fig. R-matrix analysis for neutron transmission experimental data with SAMMY code and RPI function. (data from 唐生达)

- 对于该核素，ENDF/B.VIII.0与ENDF/B.VIII.1评价库给的共振峰位存在约3%的系统偏差，这样的偏差难以通过实验数据直接验证。
- 将本工作提取的RPI参数代入 R-matrix 数据分析中，提取得到了的峰位，发现基于Back-n 的实验数据更支持 ENDF/B.VIII.0 库的共振峰位指定；

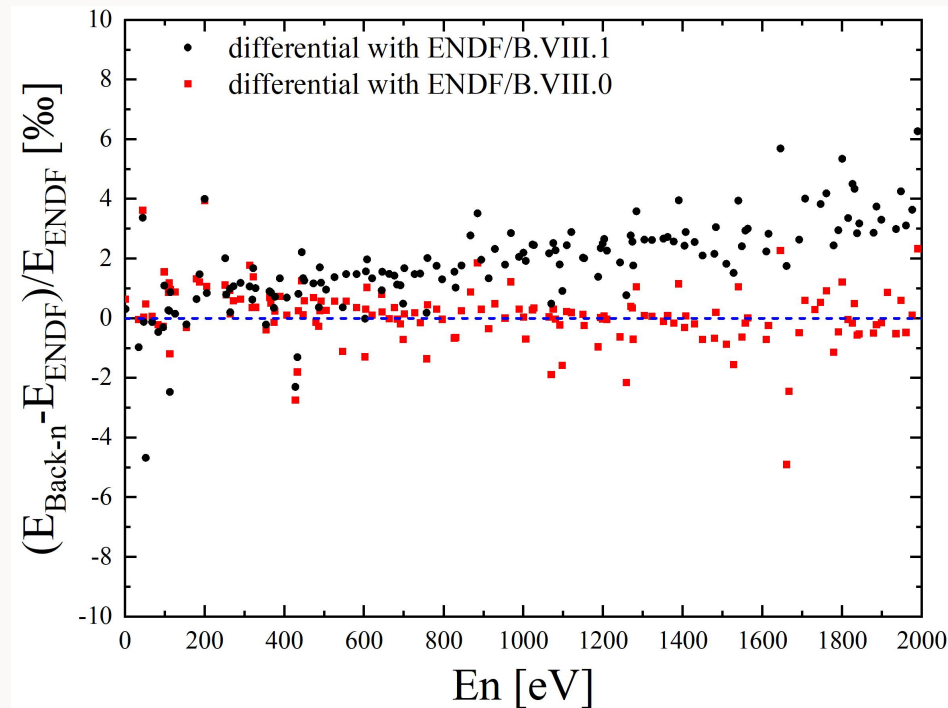
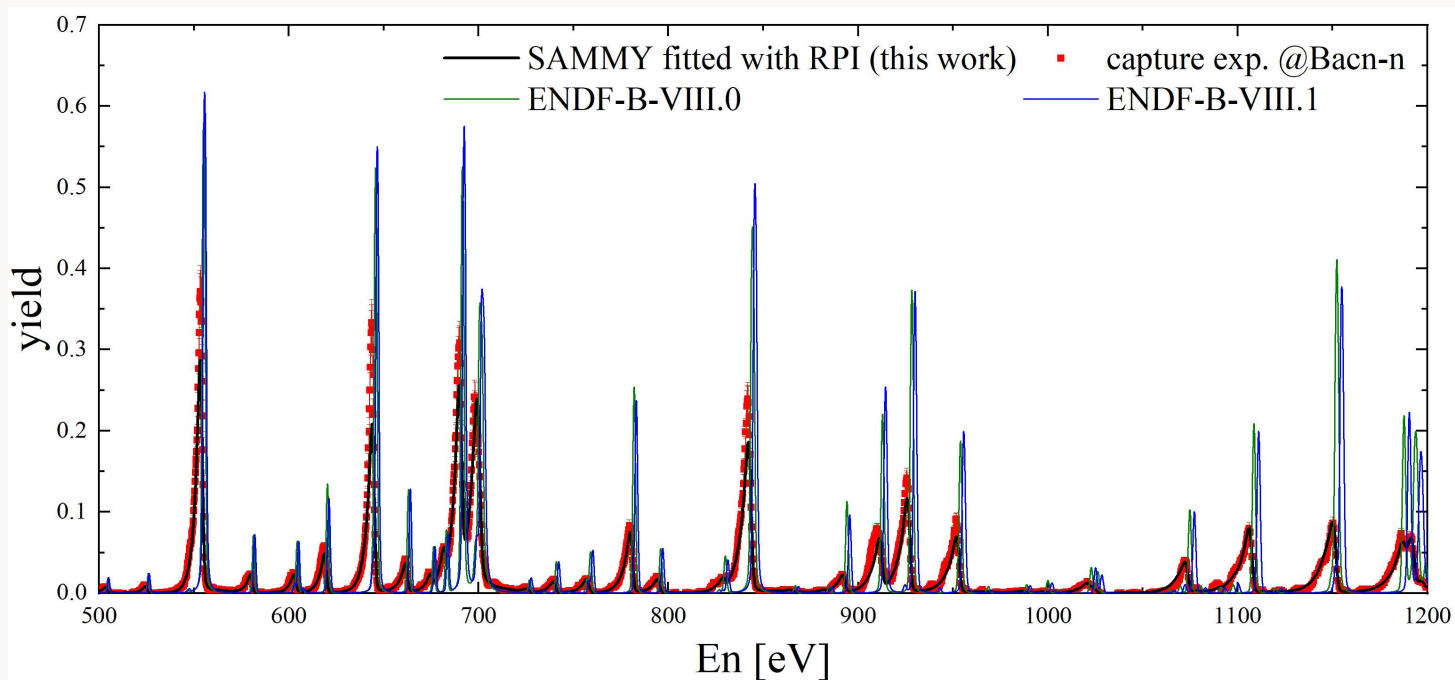


Fig. Resonance energy differentials for capture experimental data with ENDF/B-VIII.0 and ENDF/B-VIII.1 database.

Fig. R-matrix analysis for neutron capture experimental data with SAMMY code and RPI function.

➤ 总结:

1. 我们提出了一种新的方法，从标准靶 ^{197}Au 的中子俘获实验数据出发，间接从实验数据获得了RPI形式的Back-n装置#ES2的1~2000 eV的ERF;
2. 通过Geant4模拟，以及对中子透射及中子俘获实验数据的拟合，验证了我们获得的RPI形式的ERF的准确性;
3. 利用得到的RPI参数，结合R-matrix分析，有助于我们基于Back-n束线开展更精确的核数据测量;

➤ 展望:

1. 结合金靶以及其他合适的靶，开展更高能区及#ES1的ERF的研究;
2. 在ERF提取过程中的误差传递还有待进一步考虑和完善;

期待各位老师和同学基于大家手中的Back-n实验数据对我们的RPI参数开展验证，如果有问题，欢迎大家随时反馈！

请大家批评指正