

基于CSNS Back-n装置的中子能量分辨率函数模拟研究

报告人：唐生达^{1, 2, 3}

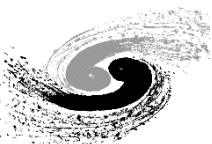
导师：陈永浩^{2, 3}，杨振¹

1. 中山大学中法核工程与技术学院，珠海，519082
2. 中国科学院高能物理研究所，北京，100049
3. 散裂中子源科学中心，东莞，523803

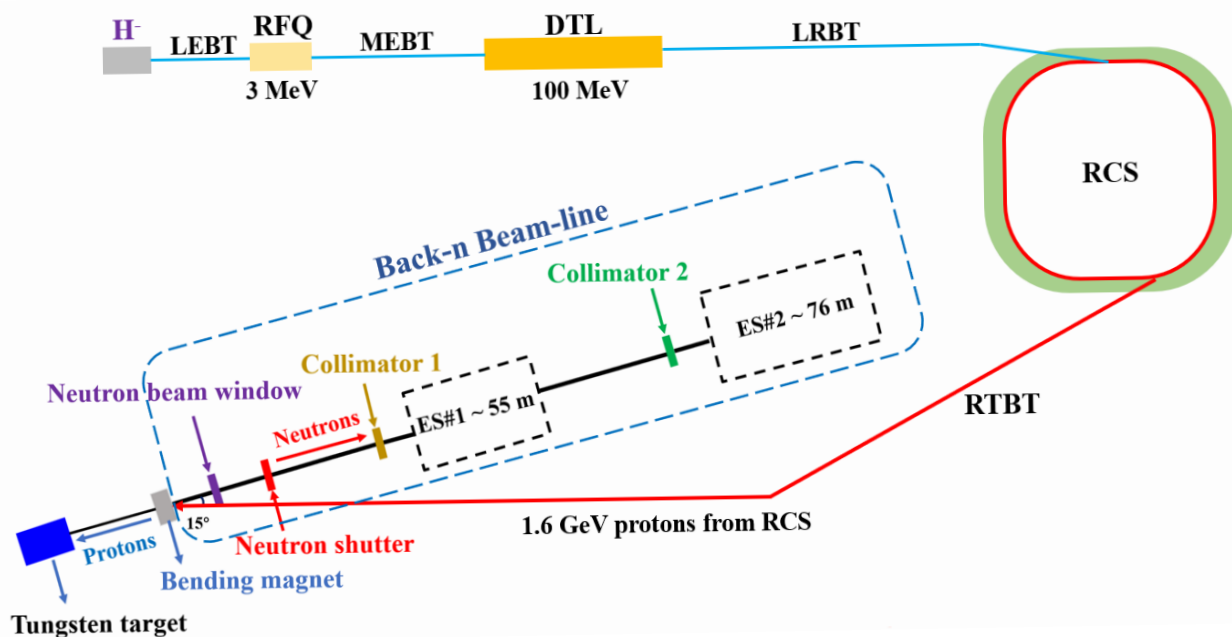
第三届“粤港澳”核物理论坛，广东·深圳，2024.11.15-18

目录

- **CSNS Back-n装置**
- **能量分辨率函数**
- **Geant4模拟研究**
- **分辨率函数拟合**
- **小结与展望**



CSNS 与 Back-n装置

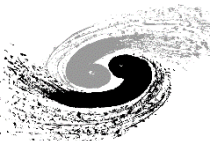


CSNS与Back-n布局示意图

Back-n不同准直器组合及中子通量参考

中子开关 (mm)	准直器1 (mm)	准直器2 (mm)	ES#1 束斑 (mm)	ES#2 束斑 (mm)	ES#1 中子通量 (n/cm ² /s)	ES#2 中子通量 (n/cm ² /s)
Ø12	Ø15	Ø40	Ø(15×15)	Ø(40×40)	1.30E5	4.60E4
Ø12	Ø15	Ø40	Ø(18×18)	Ø(30×28)	1.67E6	6.41E5
Ø50	Ø50	Ø58	Ø(54×54)	Ø(62×62)	1.60E7	6.72E6
78×62	76×76	90×90	84×82	96×94	1.80E7	8.57E6
Ø50	Ø15	Ø40	Ø(14×14)	Ø(42×26)	1.04E7	2.42E6

基于中国散裂中子源（China spallation neutron source-CSNS）的Back-n装置是我国的第一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。 Back-n搭配包括中子开关在内的三个准直器，可满足多种实验需求，是开展中子核数据测量、中子多学科应用研究的良好平台。



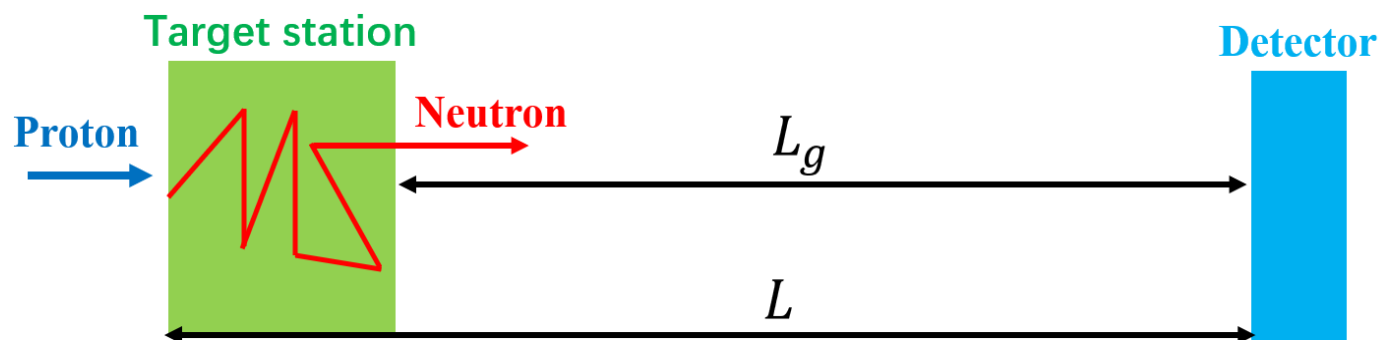
能量分辨率函数

- 能量分辨率函数 Energy Resolution Function (ERF) 描述了谱仪装置的本征中子能量分辨率与中子能量的函数关系，ERF是共振截面测量、中子共振透射分析等研究方向的重要参数。
- 对脉冲中子源而言，ERF与脉冲束流的时间结构、散裂靶的材料与结构、中子在散裂靶中产生的位置、慢化、散射效应密切相关。由于中子在散裂靶系统中的产生、输运等过程较为复杂，通常需要结合蒙特卡模拟的方式研究。

$$\frac{\Delta E}{E} = \gamma(\gamma+1) \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

慢化长度: $v T_{mod} \approx \Delta L$



中子产生、输运及探测示意图

RPI函数

RPI函数是用于描述谱仪能量分辨函数的常见函数形式，在n_TOF、GELINA为代表的白光中子源装置得到了良好的应用效果。它由卡方函数和指数函数，以及对应的待拟合参数组成。

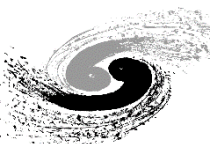
$$I(t) = A_0 \left\{ \frac{t+\tau}{2!} \frac{1}{\Lambda^3} e^{-\frac{t_2+\tau}{\Lambda}} + A_1 [A_2 e^{-A_3(t_2+t_0)} + A_4 e^{-A_5(t_2+t_0)}] X(t_2) \right\} \quad (1)$$

$$\tau(E) = \tau_1 e^{-\tau_2 E} + \tau_3 e^{-\tau_4 E} + \tau_5 + \tau_6 E^{-\tau_7} \quad (2)$$

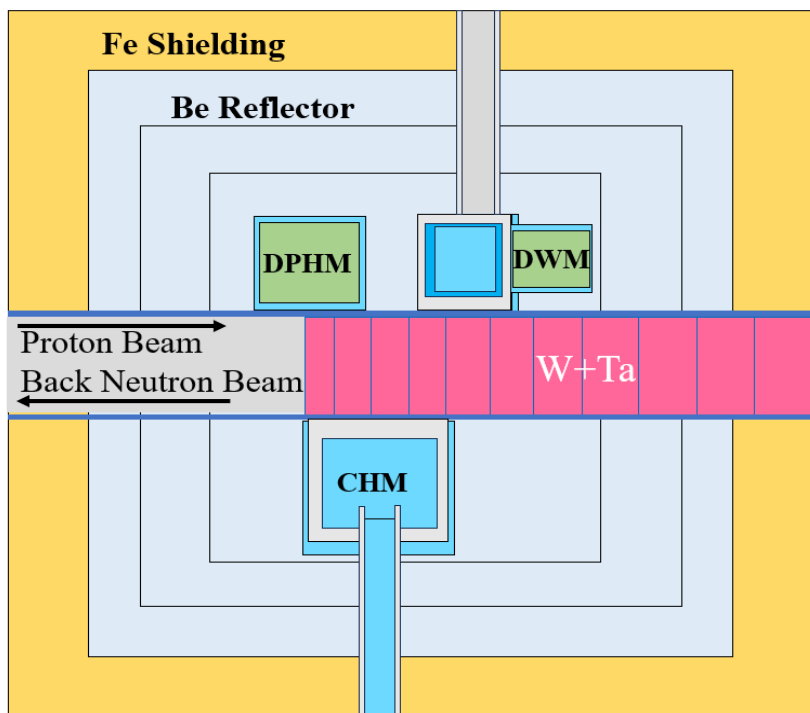
$$\Lambda(E) = \Lambda_0 + \Lambda_1 \ln(E) + \Lambda_2 [\ln(E)]^2 + \Lambda_3 E^{\Lambda_4} \quad (3)$$

$$A_i(E) = \{a_{i1} e^{-a_{i2} E} + a_{i3} e^{-a_{i4} E} + a_{i5} + a_{i6} e^{-a_{i7} E}\} a_i \quad (4)$$

结合模拟得到的慢化长度形状分布，基于RPI函数的形式对慢化长度分布进行拟合，最终得到能量分辨率函数。



- 能量分辨率函数与散裂靶、慢化体、反射体系统 (Target-moderate-reflector (TMR) system) 紧密相关。
- Geant4提供了慢化时间、角度、位置等重要参数接口，方便获取慢化长度、得到能量分辨率函数。

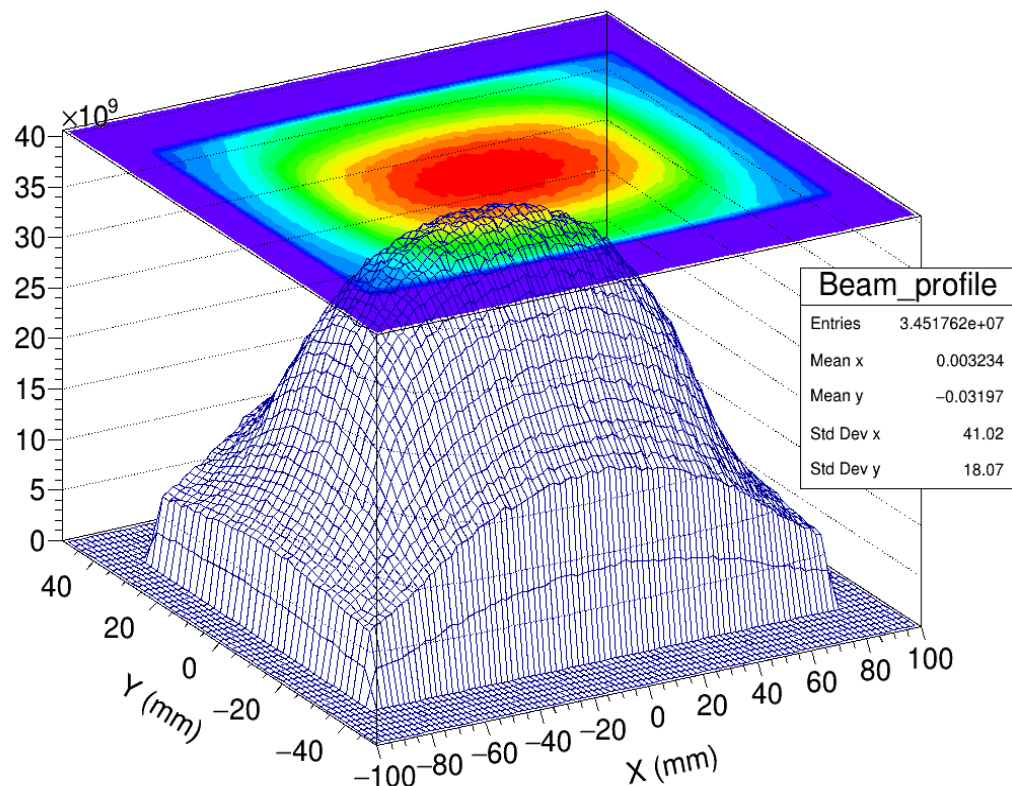


Geant4 TMR模型示意图

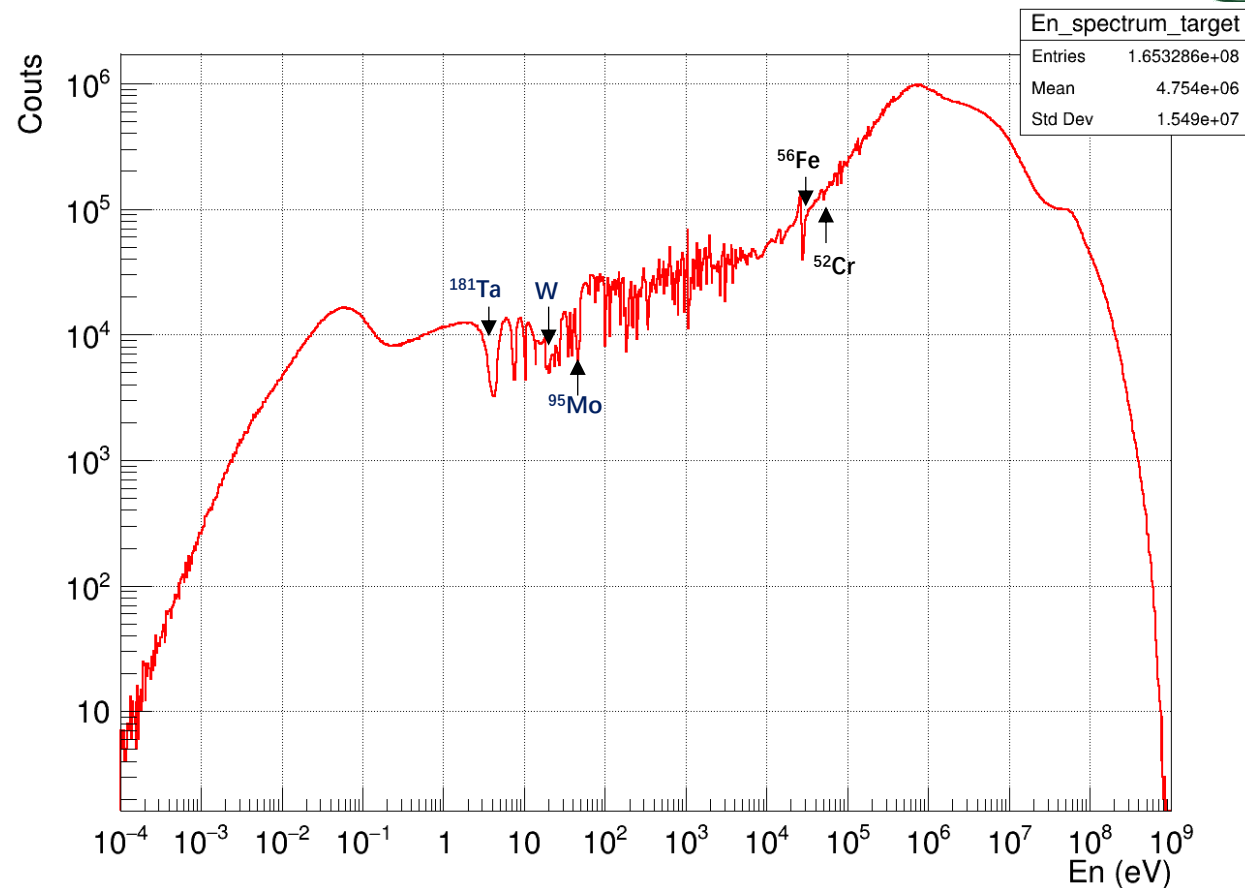
模型相关参数

系统组成	材料与尺寸
靶体	钨靶(11 片, 全长:650 mm) 截面积 170 mm(H) × 70 mm(V)
钽	厚度: 0.3 mm
靶冷却	冷却水层:1.2 mm other size: 20 mm
反射层	Be: $\Phi 700 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$
屏蔽体	Fe:1000 mm × 1000 × 1000 mm
靶容器	SS316 前向: 2.5 mm 后向: 12 mm 上下: 7.5 mm 左右: 12 mm
慢化器	CHM: $\Phi 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ DPHM: 120 mm × 120 mm × 50 mm DWM: 110 mm × 110 mm × 50 mm



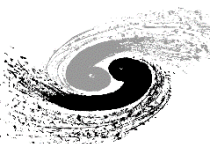


靶面出射中子分布

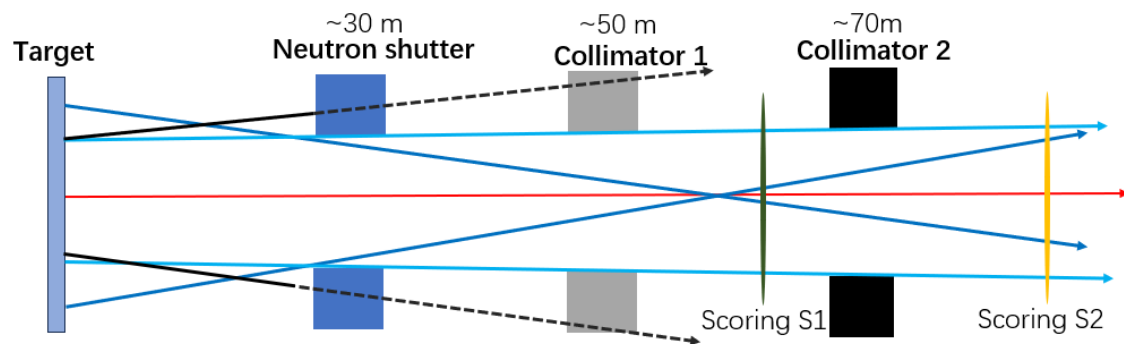


靶表面中子能谱特征

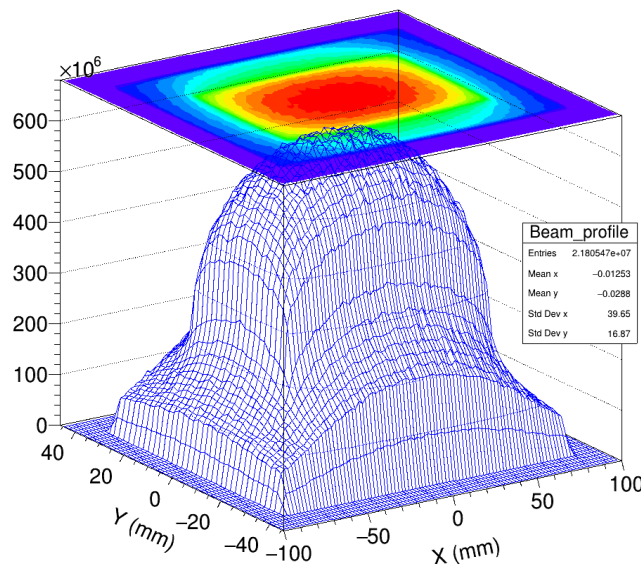
- 利用120*40 mm, 均匀分布的束斑模拟质子打靶, 统计出靶表面物理信息。
- 在出靶表面处的能谱中, 可以清晰的观察到Ta、W、Fe等主要元素的共振吸收结构。



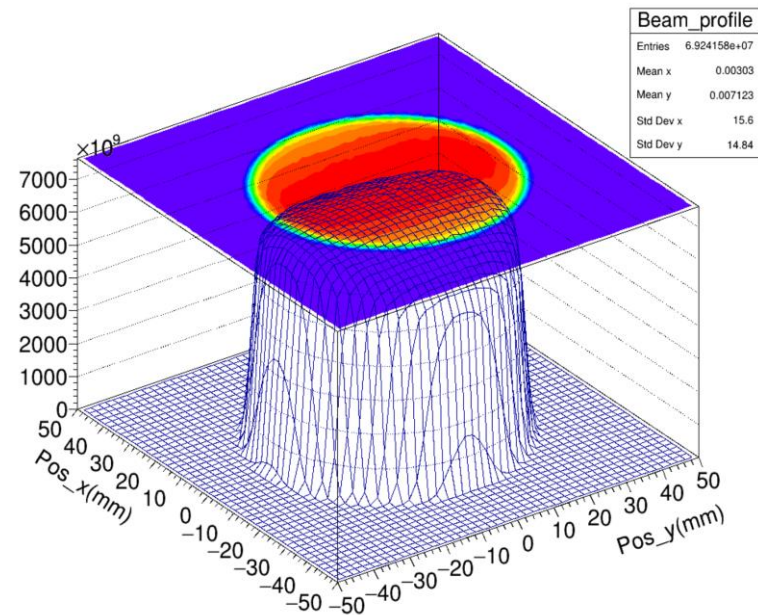
中子光学与“二次抽样”



中子简易光学

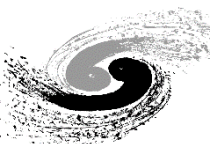


靶面中子分布 (4°锥角筛选)

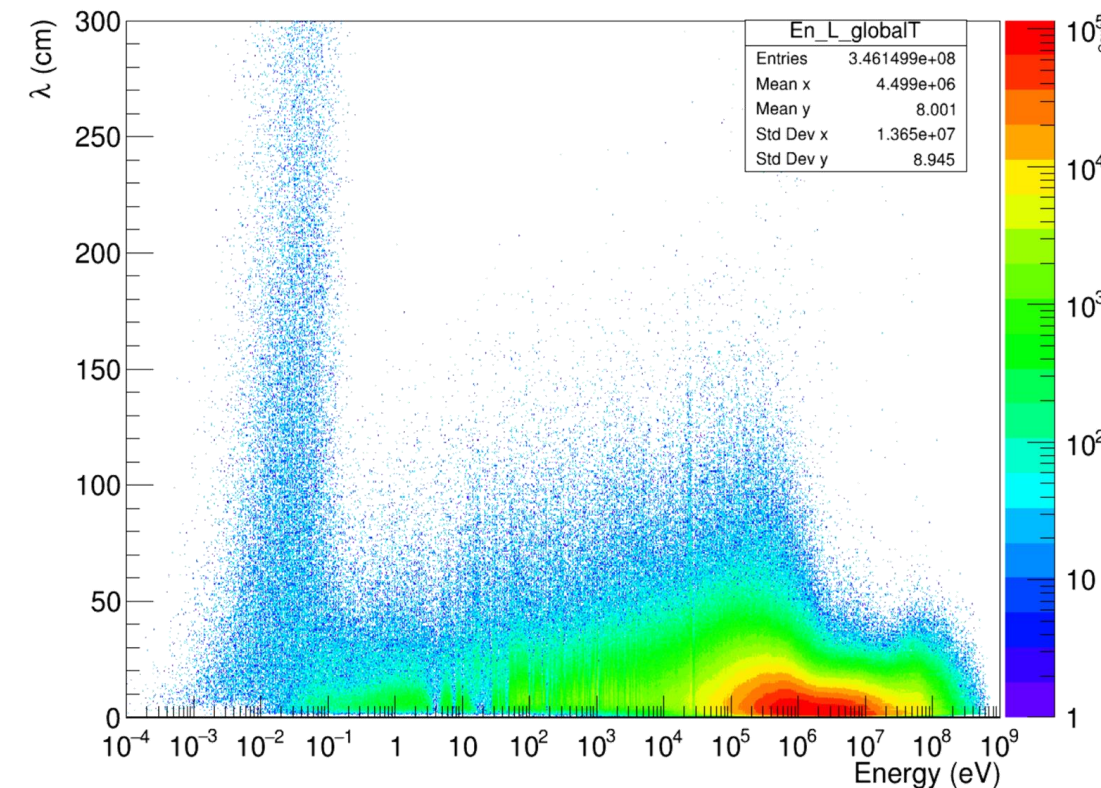


准直器筛选ES2位置中子束斑

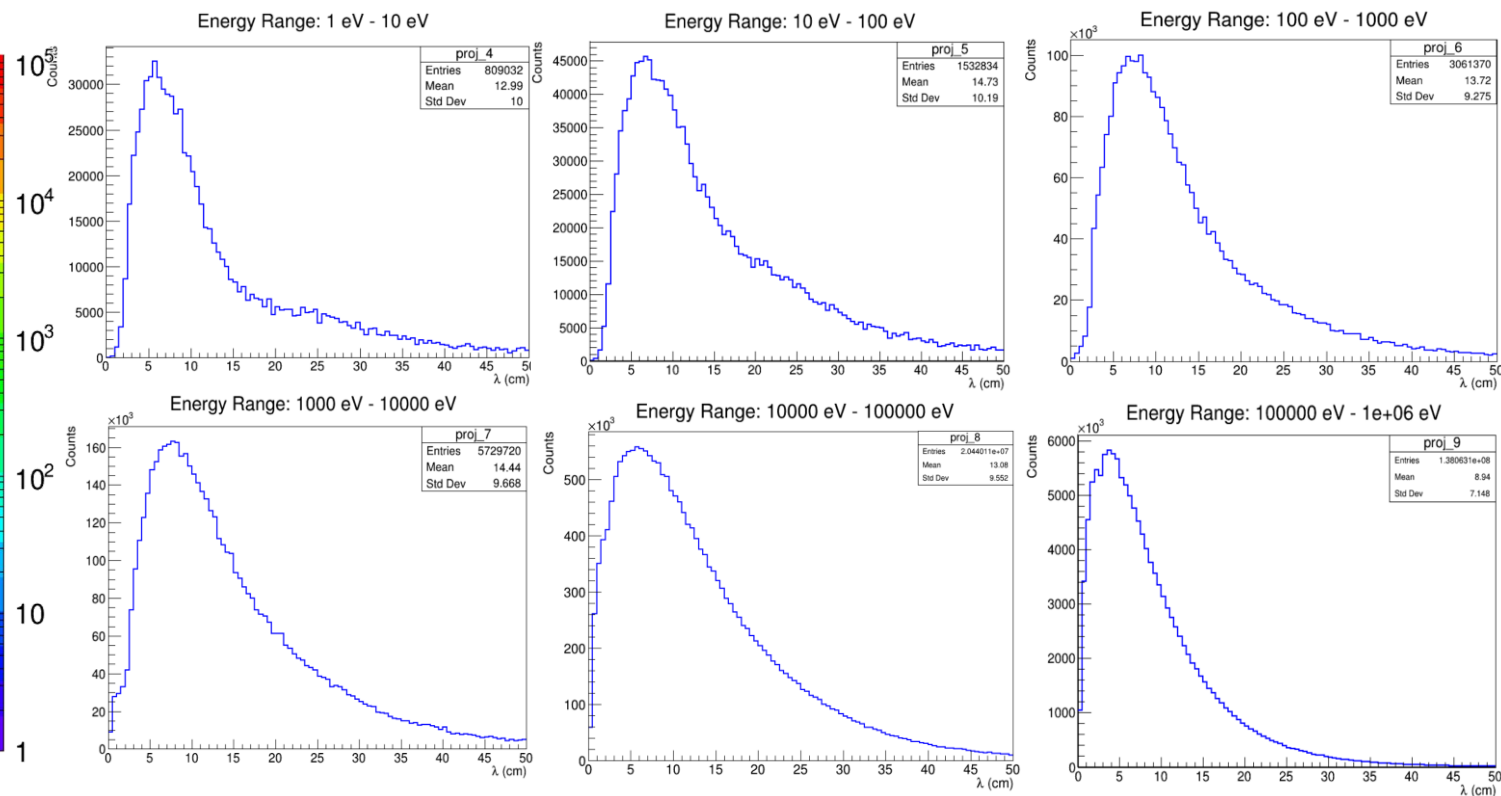
- 出靶表面的中子需经过准直器筛选以到达实验位置。可根据每个中子的位置和角动量信息，重建其出射方向，判断是否能够通过准直器。
- 在靶面计数的基础上，筛选出小角度范围出射的中子，进一步添加一个很小的锥角范围进行“二次抽样”，采用这种方式增加到达实验厅位置的计数，再此基础上提取慢化长度，拟合中子能量分辨函数。



慢化长度分布

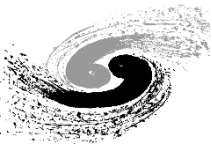


慢化长度随中子能量变化 (74 m处筛选)



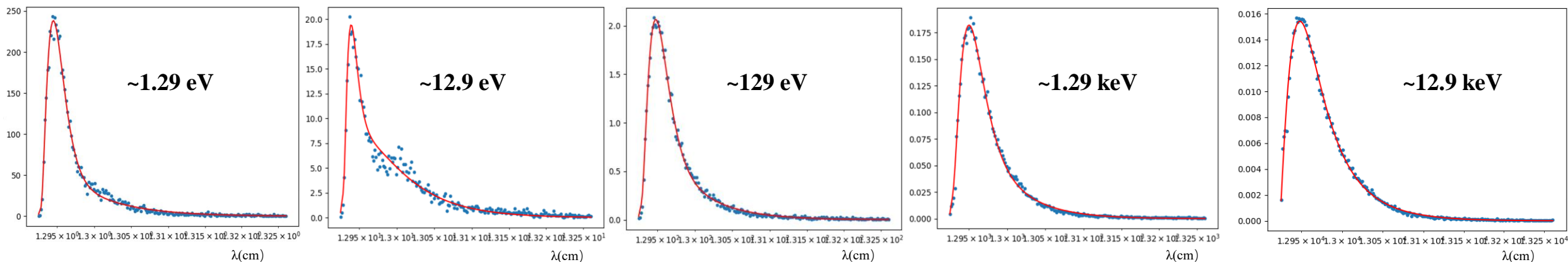
不同能区对应慢化长度分布

对不同能区对应的慢化长度进行投影得到慢化长度分布，中子能量对应的慢化长度分布有所不同，需结合函数进行拟合，得到相应的参数，以描述能量分辨函数随中子能量的变化关系。

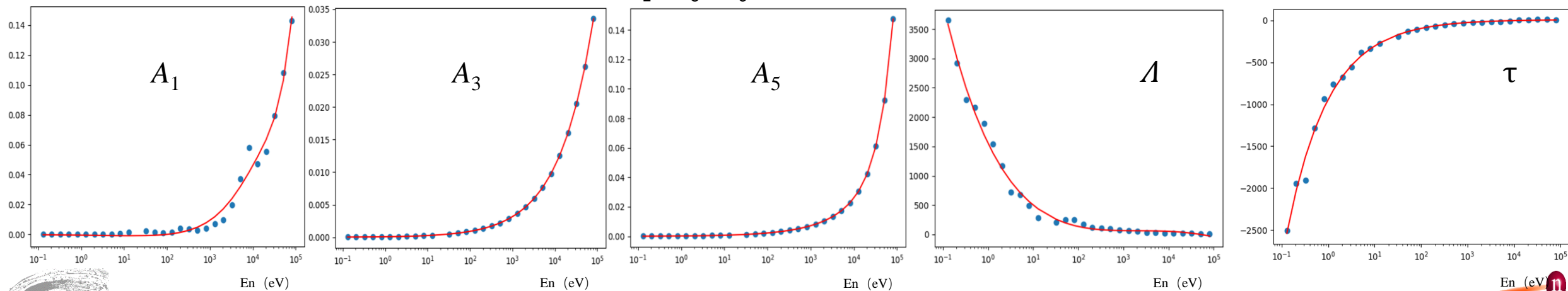


确定RPI函数形式，依次对每个能量间隔投影下的慢化长度分布进行拟合，在此基础上进一步拟合 A_1 、 A_3 、 A_5 、 Λ 、 τ 。

部分中子能量对应慢化长度的拟合效果



A_1 、 A_3 、 A_5 、 Λ 、 τ 拟合效果

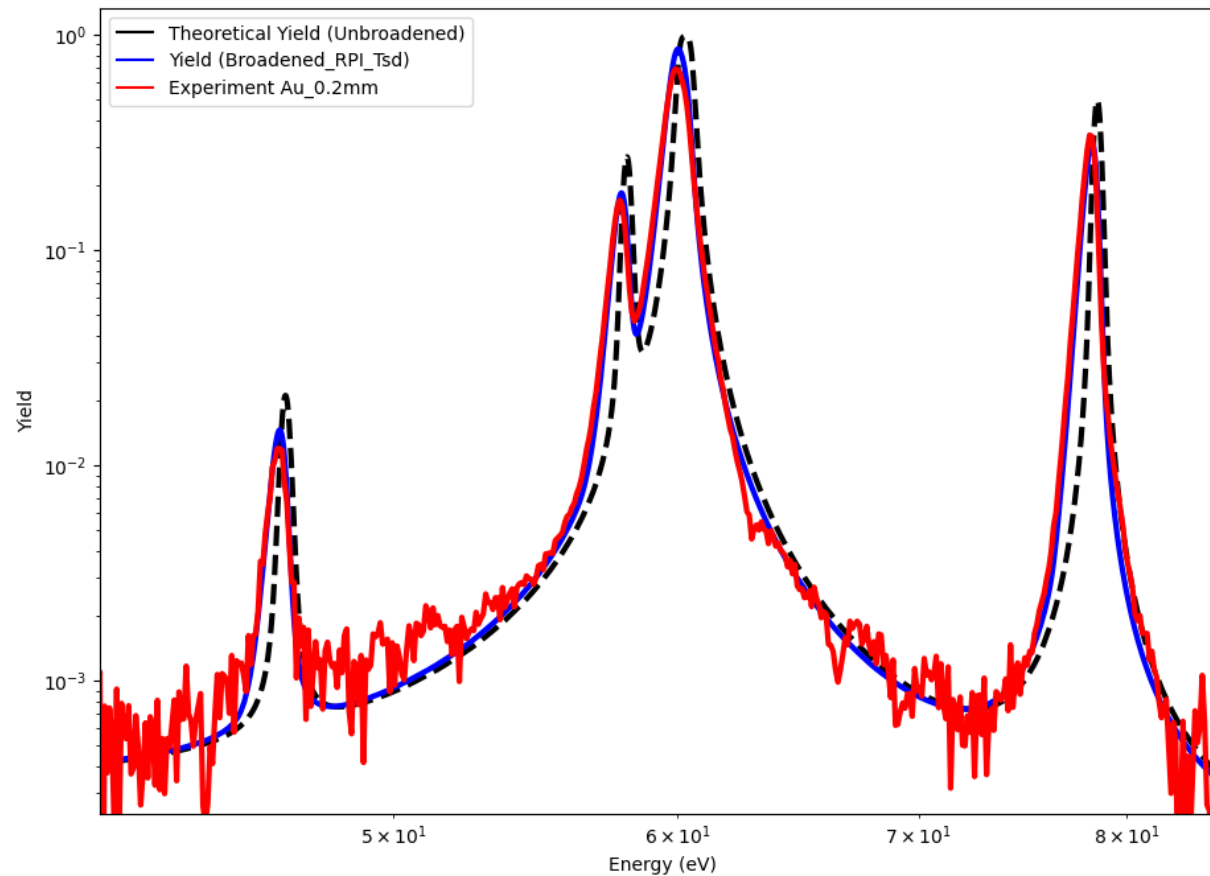


能量分辨率函数应用

待定参数 Λ 、 τ 、 A_i 结果

A_0 : -9.58647109e+06	A_{14} : -6.55705130e-03
A_1 : 1.58815024e+05	A_{15} : -1.05917698e+03
A_2 : -1.20520197e+03	A_{16} : 1.18404653e-02
A_3 : 9.5880484e+06	A_{17} : 9.96205577e-01
A_4 : -1.66386582e-02	A_{35} : 1.13085799e-04
τ_5 : 1.51482644e+01	A_{36} : 3.12018773e-06
τ_6 : -9.22537775e+02	A_{37} : 3.01325136e-01
τ_7 : -4.77991758e-01	A_{53} : 4.27711906e-02
A_{11} : 1.05919149e+03	A_{34} : -1.86183811e-07
A_{12} : 1.09397701e-05	A_{35} : -4.26419945e-02
A_{13} : -9.36831526e-08	

在100 eV以内，将能量分辨率函数与理论数据进行卷积后，与实验结果符合较好。



^{197}Au 卷积理论产额与实验数据对比 (< 100 eV)

小结

- 基于Geant4对CSNS TMR系统能量分辨率进行了模拟研究，采用RPI函数形式对能量分辨率进行参数化。
- 基于三个准直器构成的简易光学，采用二次抽样的方式提高统计，对经过准直器筛选后的中子进行慢化长度投影并结合RPI函数进行拟合。
- 现有RPI函数对100 eV以下结果符合较好，但在100 eV以上能区展宽效果有待进一步提高。

展望

- 物理模型的结构和材料是影响能量分辨函数的重要因素。下一步将对现有TMR模型中的材料和结构等问题进行优化和深入研究，以得到更准确的能量分辨函数。

谢谢大家！

