



基于Back-n LPDA谱仪的 n - p 散射反应微分截面测量

孙康、蒋伟、任文凯、易晗、陈永浩、樊瑞睿

2025年7月24日

反角白光中子实验装置（第九届）用户研讨会 安徽·六安

➤ 研究背景

➤ n - p 散射反应实验2024

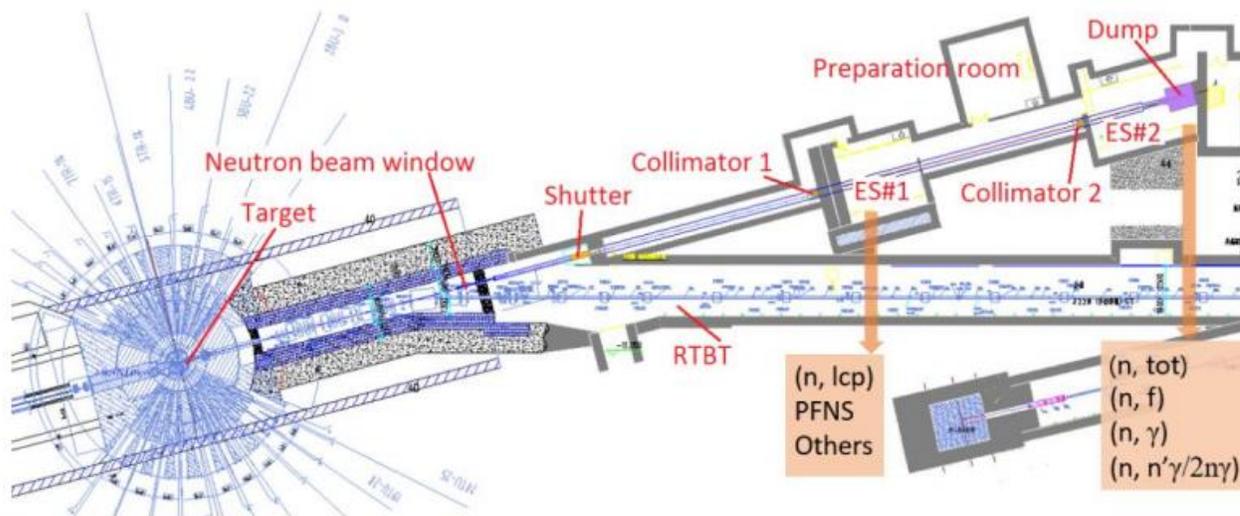
✓ 实验设置

✓ 数据分析

✓ 初步结果

✓ 能谱优化

➤ 总结和展望

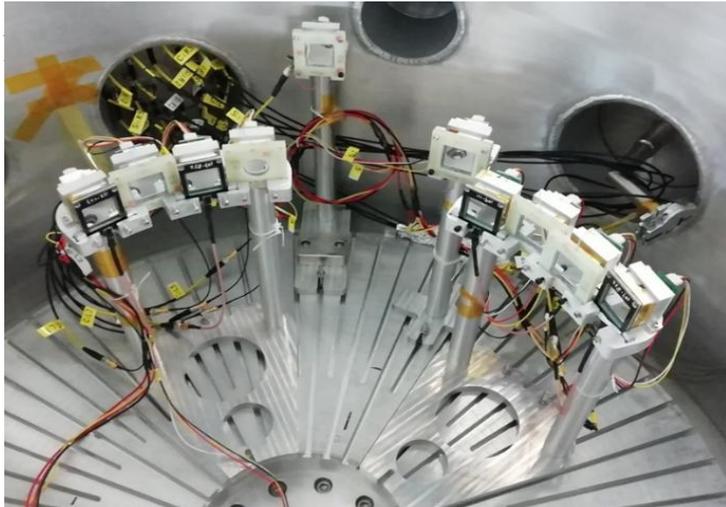


n - p 散射反应微分截面研究:

- 对核力、核结构的理解,
- 探测器标定、中子束流监测、核能工程中的设计,
- 辐射防护等应用.....

现有数据缺乏系统性:

- 1.5-10 MeV 能区 n - p 散射实验2019: 只有6家数据,



Detector layout for n - p scattering experiments in 2019

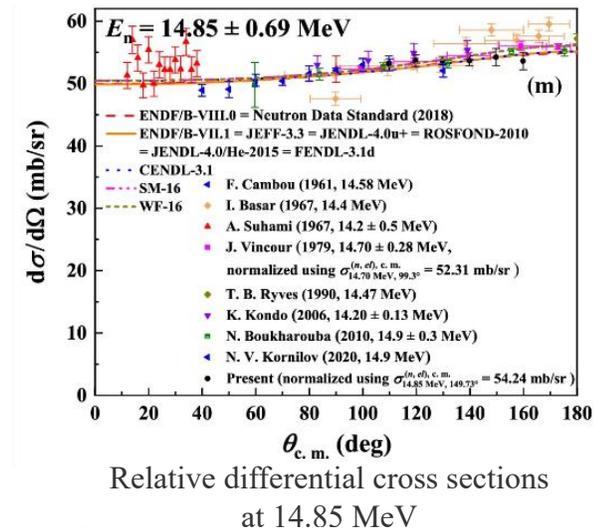
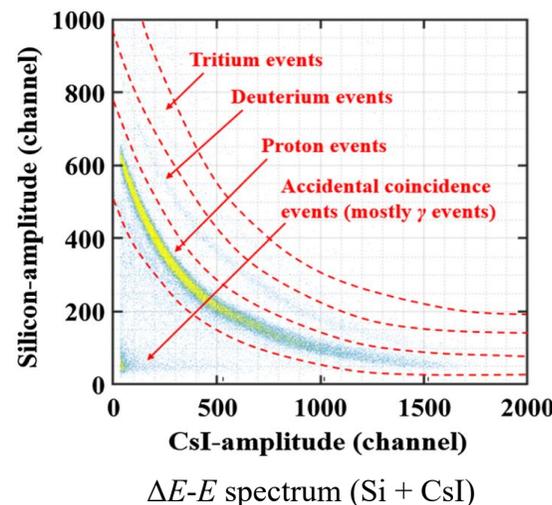
n - p 散射实验2020-21:



Detector layout for n - p scattering experiments in 2020

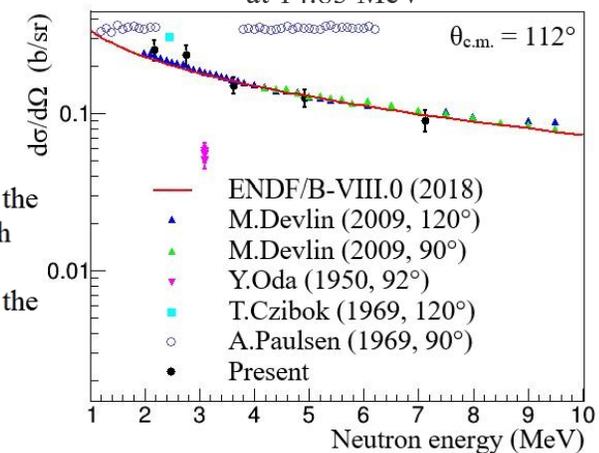
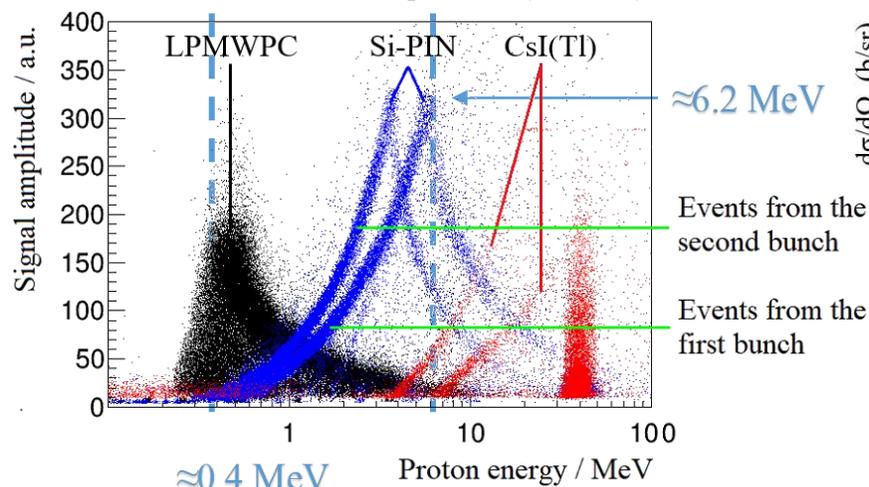
n-p 散射实验2019*:

- 使用了10套 $\Delta E-E$ 望远镜(Si-PIN + CsI(Tl))。
- 样品靶为100 μm 厚聚乙烯膜。
- 在6.14 MeV-52.48 MeV能区 23个能点得到了相对微分截面。



n-p 散射实验2020-21:

- 使用了16单元 $\Delta E-\Delta E-E$ 望远镜阵列(LPDA + Si-PIN + CsI(Tl))。
- 样品靶为4 μm 厚聚丙烯膜。
- 在2 - 7 MeV能区得到了*n-p*散射反应相对微分截面的初步结果。



Amplitude – TOF spectrum in LPMWPC, Si-PIN and CsI(Tl)

Preliminary results of the relative differential cross sections

*Jiang H, et al. EPJA, 2021, 57(1): 6.

➤ 研究背景

➤ n - p 散射反应实验2024

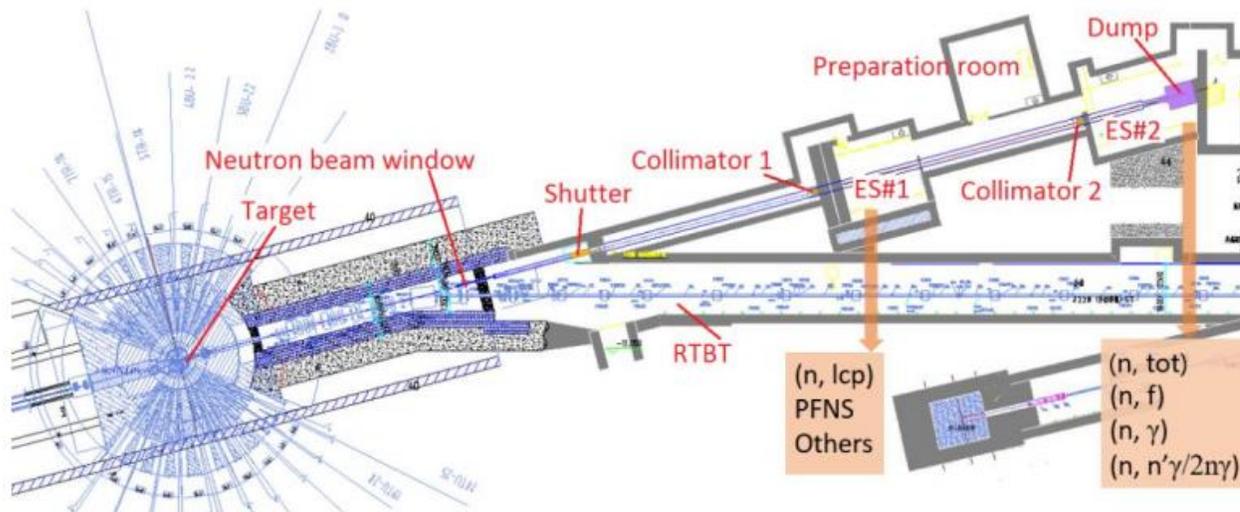
✓ 实验设置

✓ 数据分析

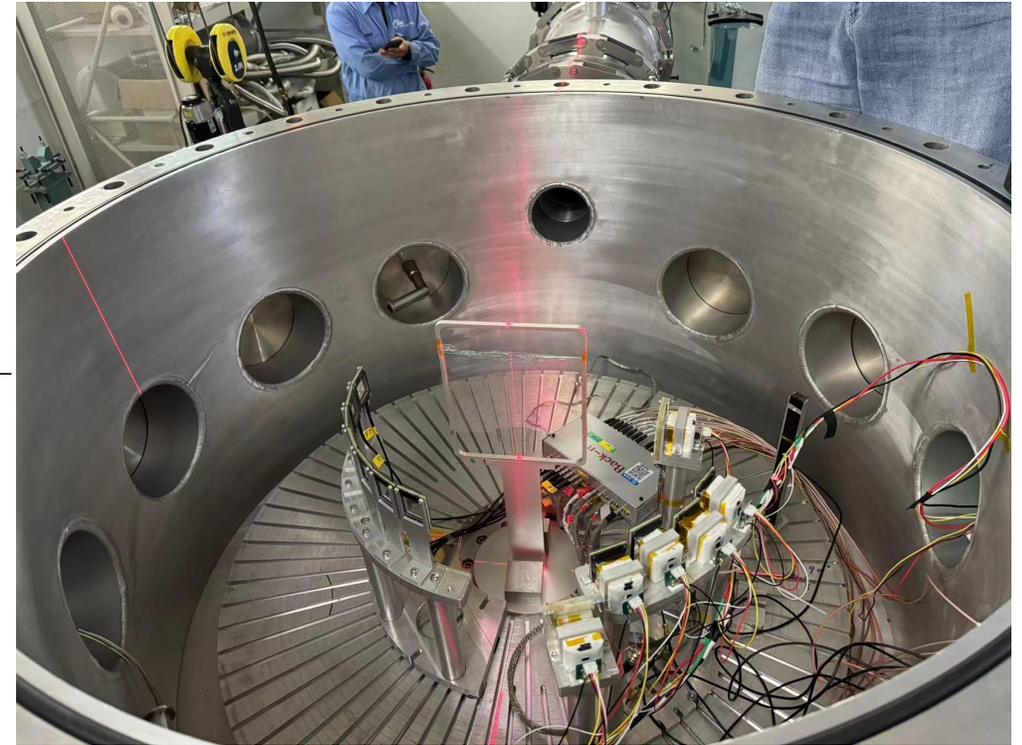
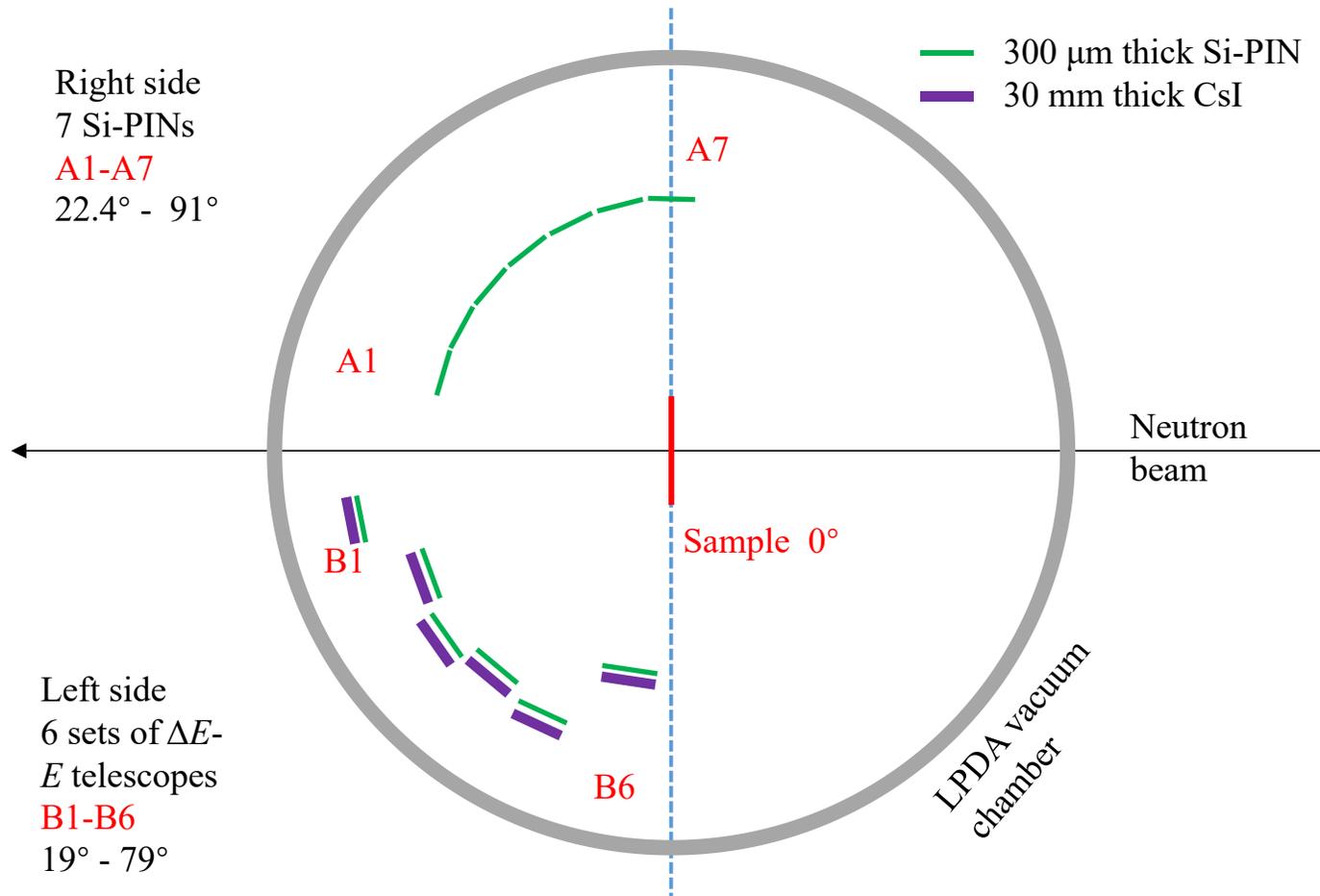
✓ 初步结果

✓ 能谱优化

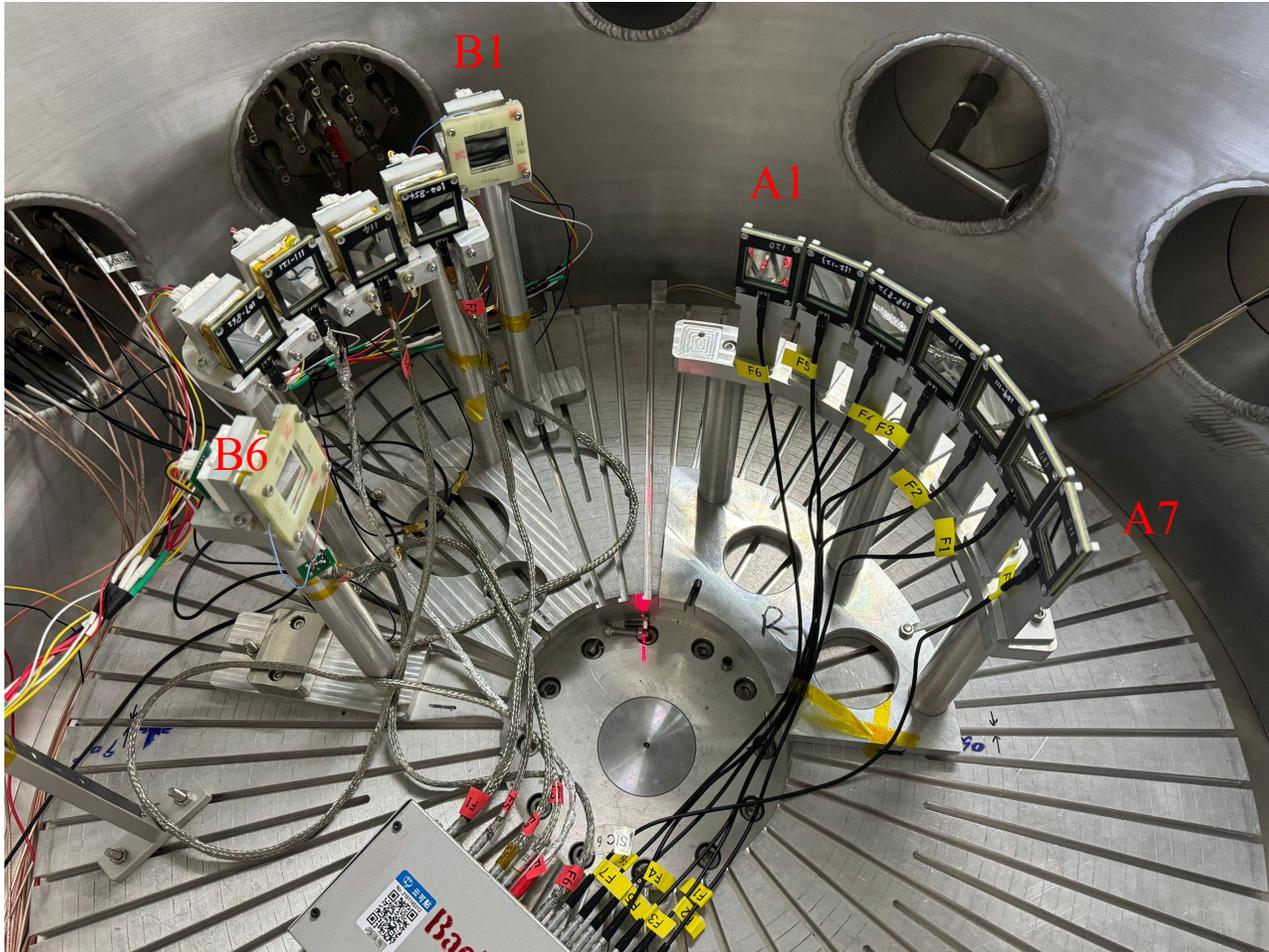
➤ 总结和展望



探测器系统布局



Detector layout for n - p scattering experiments



Detector layout for n - p scattering experiments

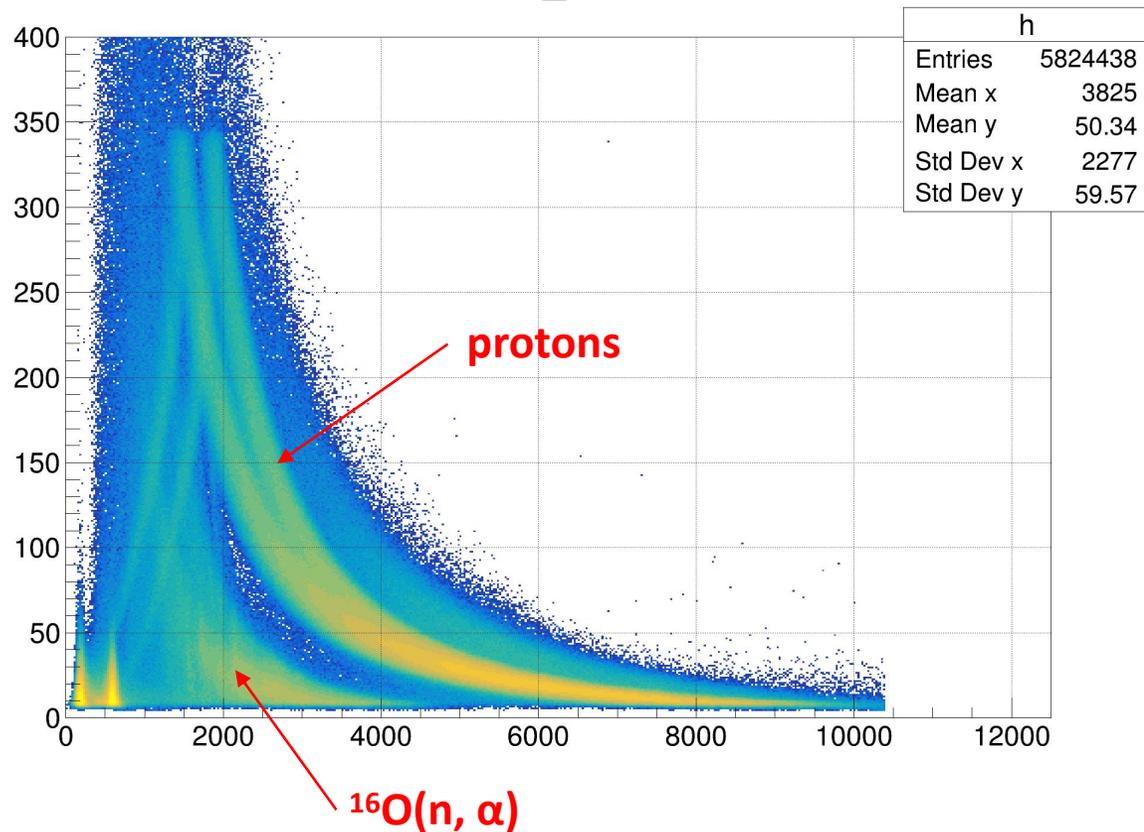
探测器系统设置

- A1-A7: Si
 - ✓ 角度: $22.4^\circ, 33.9^\circ, 45.3^\circ, 56.7^\circ, 68.1^\circ, 79.6^\circ, 91^\circ$
 - ✓ 距离: 189.5 mm
- B1-B6: Si + CsI
 - ✓ 角度: $19^\circ, 29^\circ, 39^\circ, 49^\circ, 59^\circ, 79^\circ$
 - ✓ 距离: B1=295 mm, B2=B4=249 mm, B3=B5=240 mm, B6=170 mm
- 样品: 500 nm thick Mylar film
- 中子束斑:
 - ✓ $\Phi 50 + \Phi 50$ (大束斑, 118 h)
 - ✓ $\Phi 50 + \Phi 15$ (小束斑, 47 h)

不同角度下信号幅值-TOF二维谱（大束斑结果）

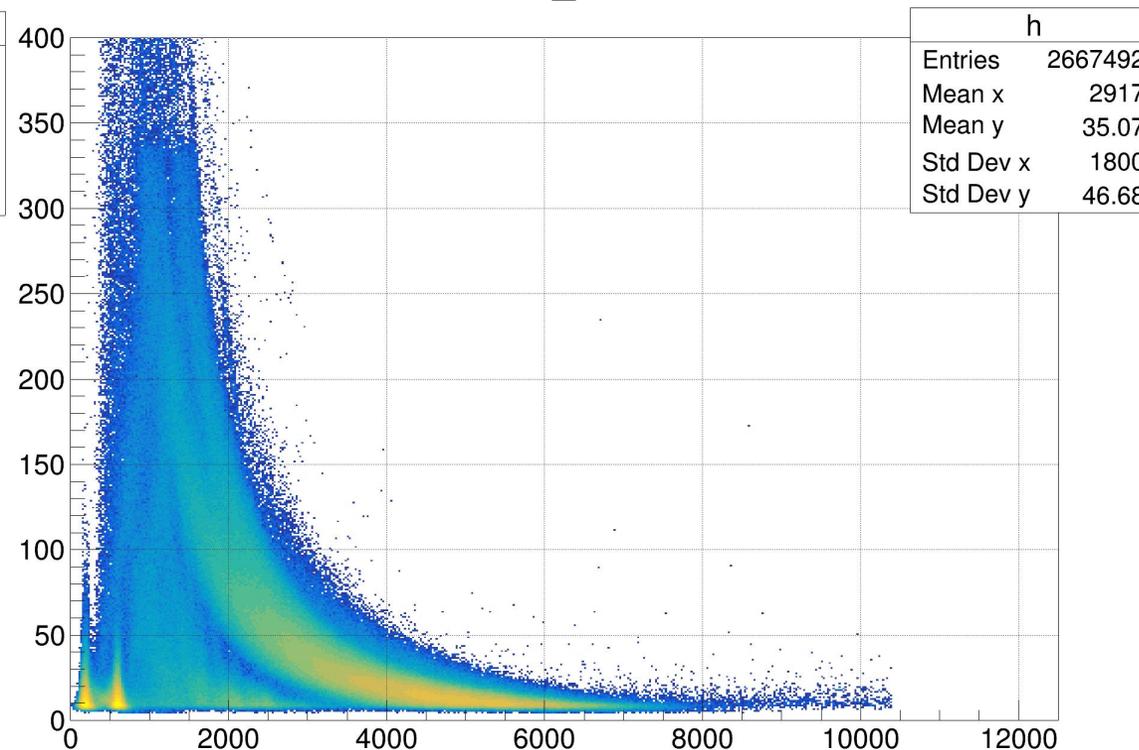
A2 33.8° 18.95 cm

Si_09



A4 56.7° 18.95 cm

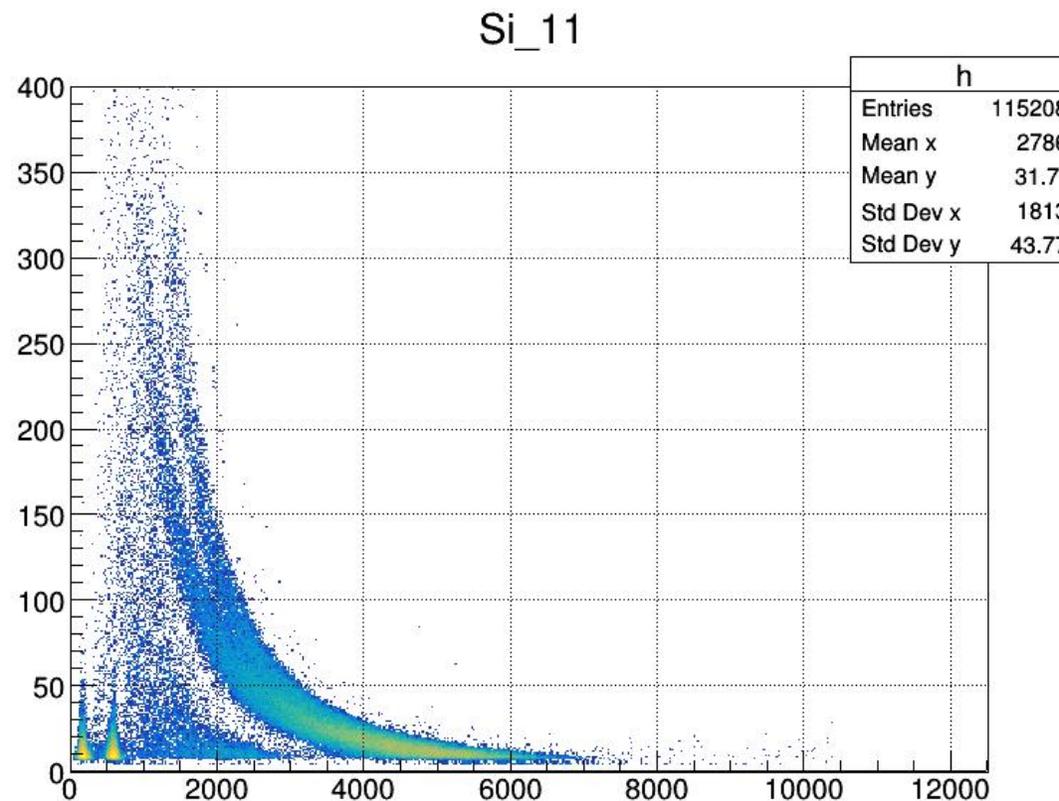
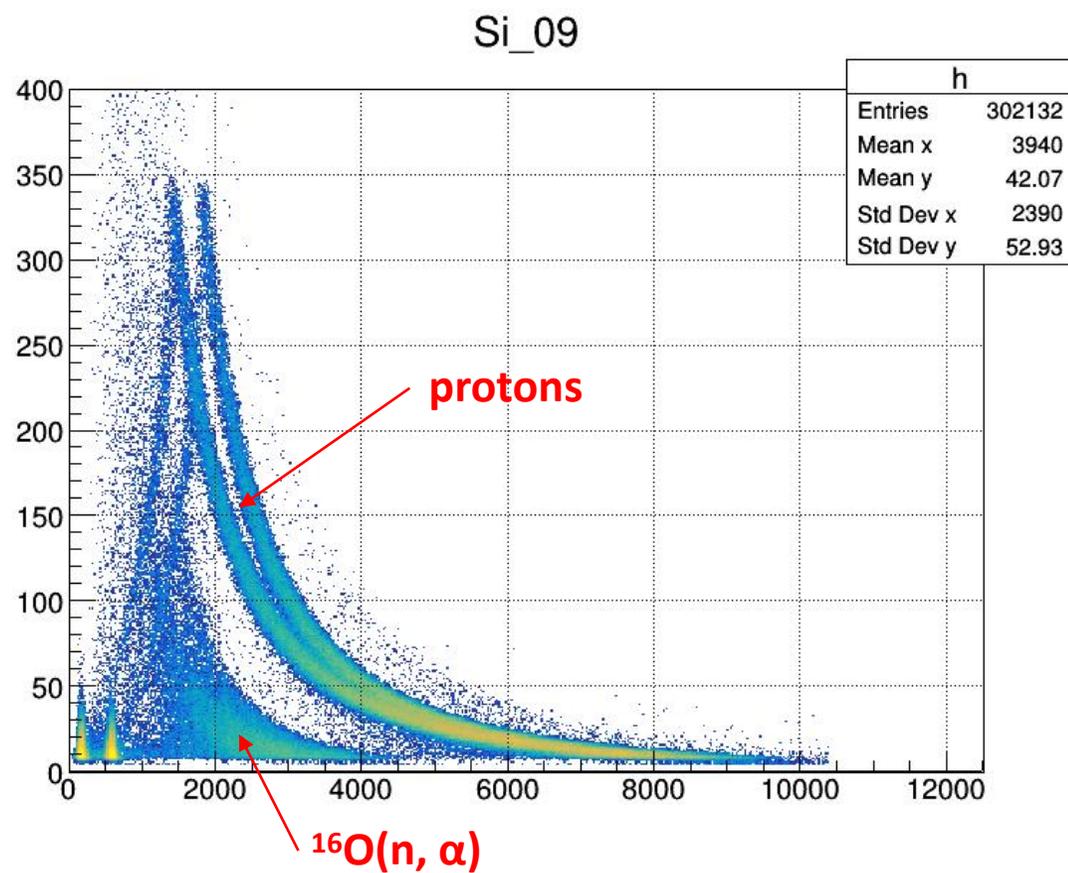
Si_11



不同角度下信号幅值-TOF二维谱（小束斑结果）

A2 33.8° 18.95 cm

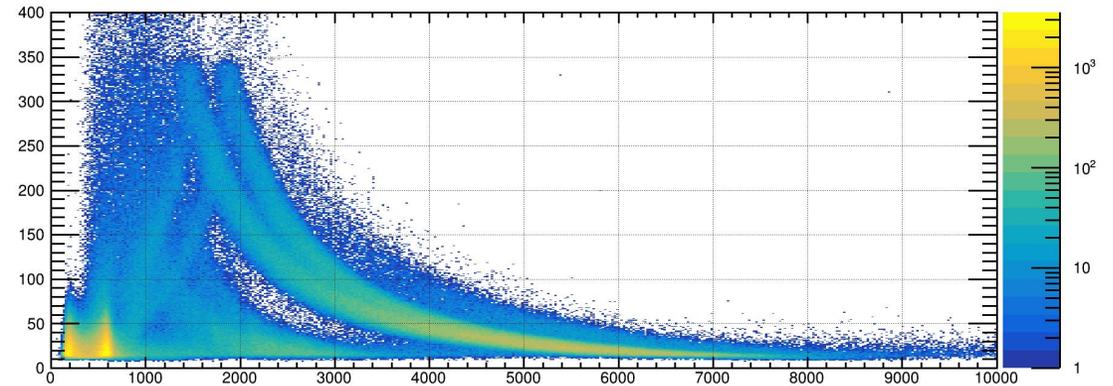
A4 56.7° 18.95 cm



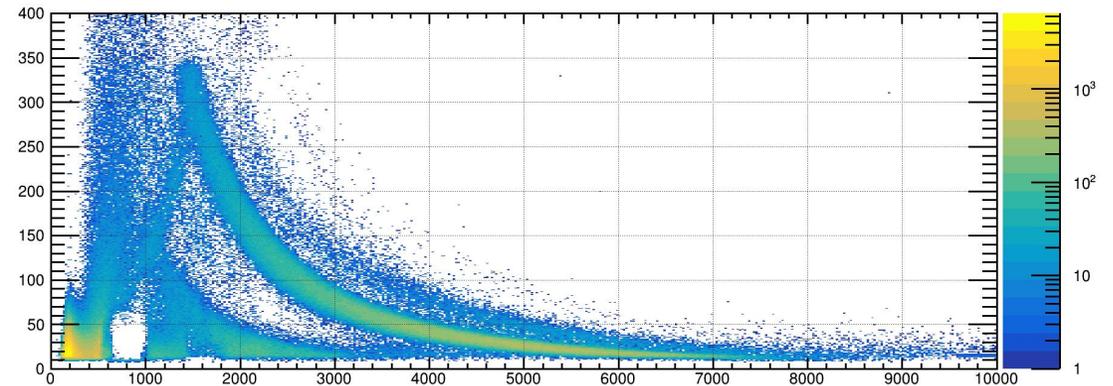
双束团解谱方法

- CSNS加速器通常以双束团模式运行,两个质子束团间隔410 ns, 重复频率为25 Hz。
- 通过基于贝叶斯方法的双束团解谱程序,可以把双束团结构的TOF谱解为接近单束团结构的TOF谱。

Folded Amplitude – TOF spectrum (A2 33.8°)

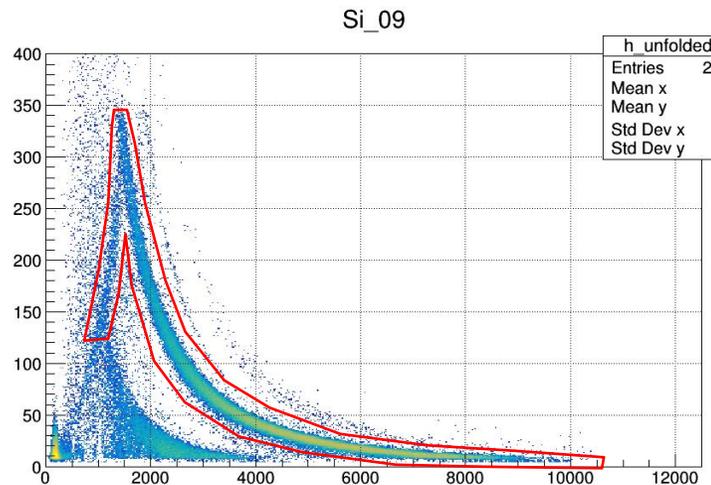


Unfolded Amplitude – TOF spectrum (A2 33.8°)



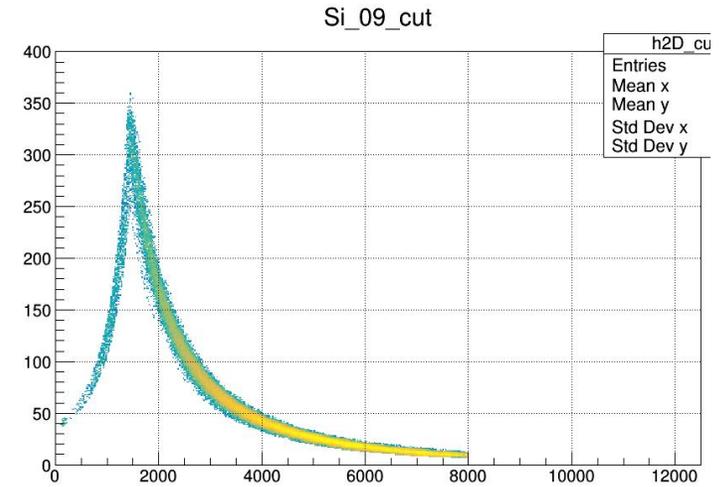
通过两种方法从解谱后的信号幅值-TOF二维谱中提取质子事件带：

- 使用ROOT中**Graphical Cut**工具，手动选取符合的质子事件。
- 推导质子事件带的近似函数表达式，设置选取范围并选取事件带。

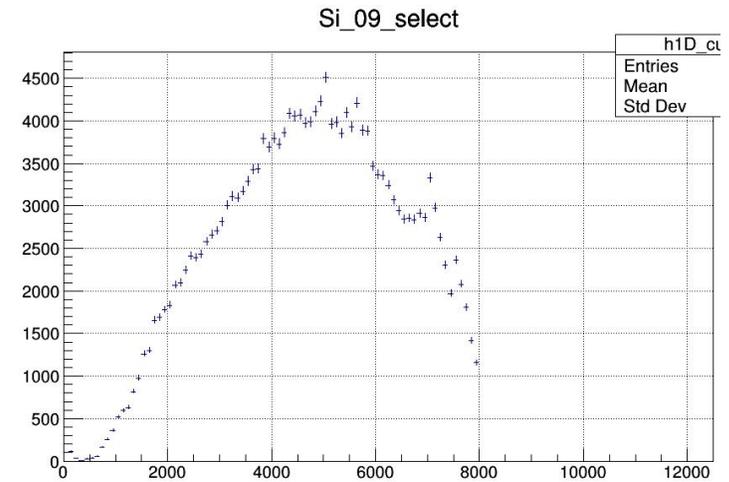


Using the Graphical Cut tool

选取的事件带投影到x轴，并给出每个bin的误差，包括统计误差和解谱带来的误差。

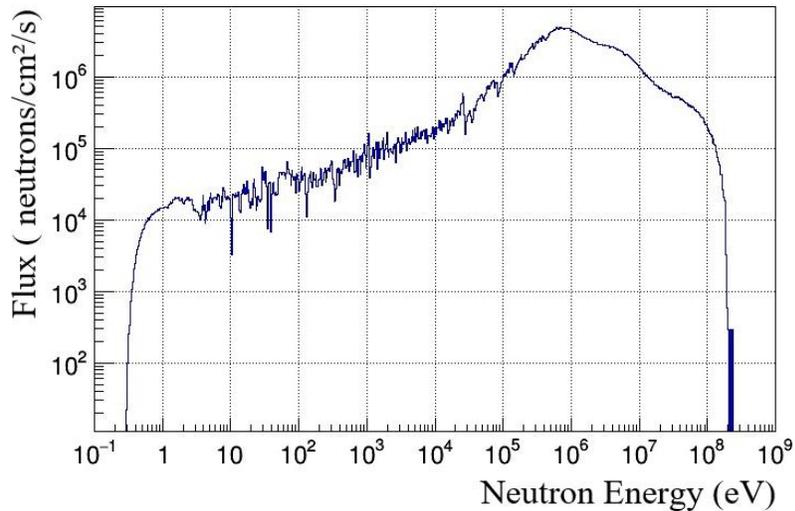


Using the approximate function method

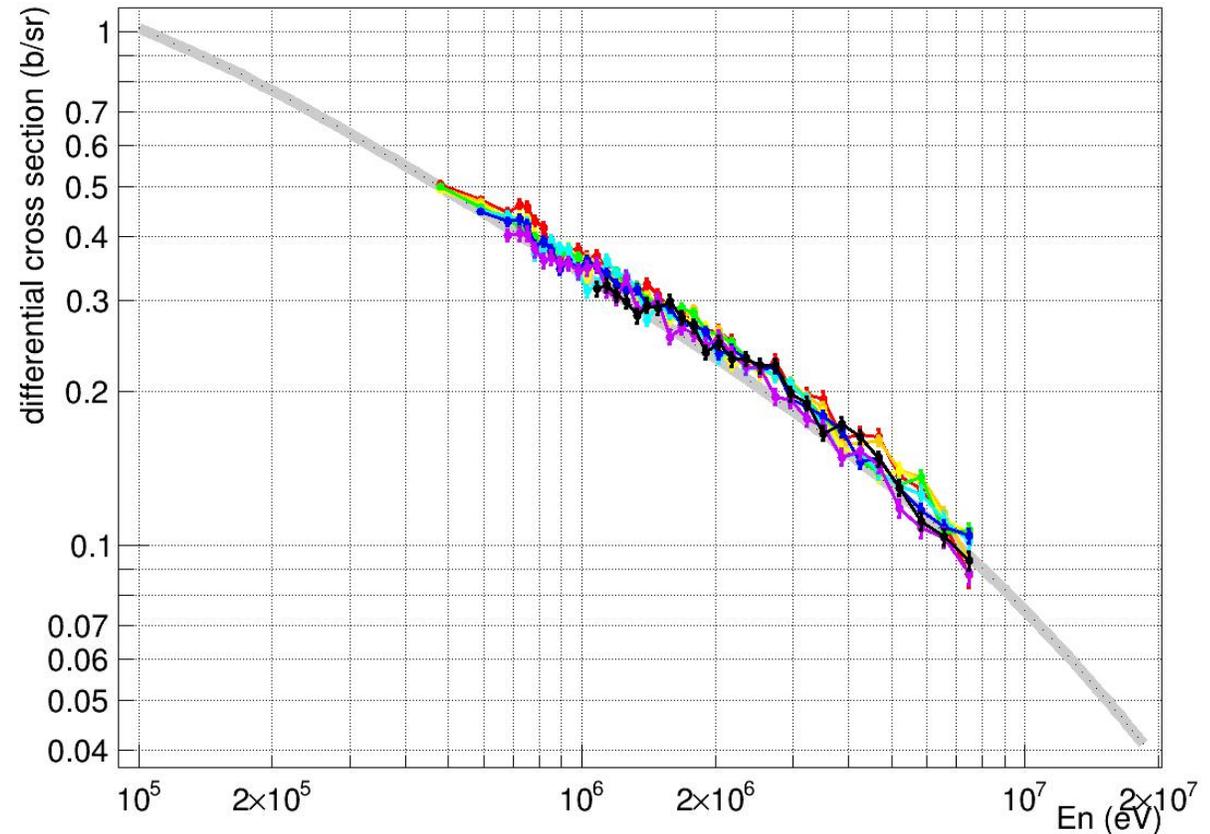


The projection of the proton event band onto the x-axis 11

- 对于质子事件带的投影，通过TOF方法计算每个bin的中子能量。
- 根据Back-n的中子能谱对数据进行归一化。
- L-C系转换。
- 归一到ENDF/B-VIII.0库，给出相对微分截面。



The neutron energy spectrum of Back-n ES#2 at 100 kW



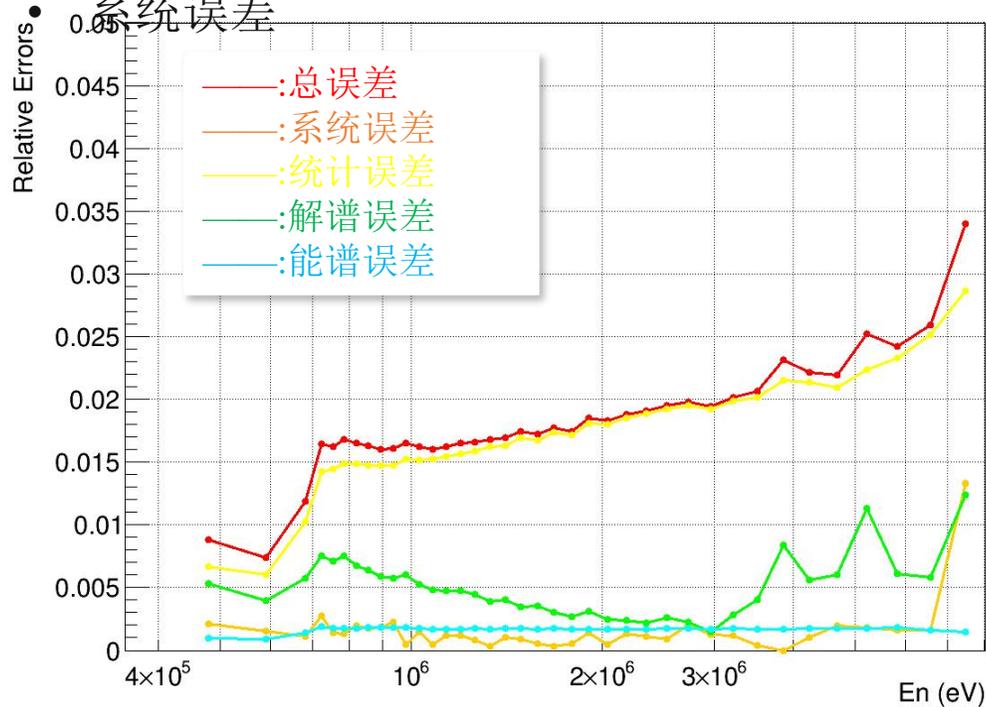
- Angles in lab system:
- Red: 19°
 - Orange: 22.4°
 - Yellow: 29°
 - Green: 33.9°
 - Cyan: 39°
 - Blue: 45.3°
 - Violet: 49°
 - Black: 56.7°

The preliminary results of the relative differential cross sections of n - p scattering (8 angles, obtained by small spots data)

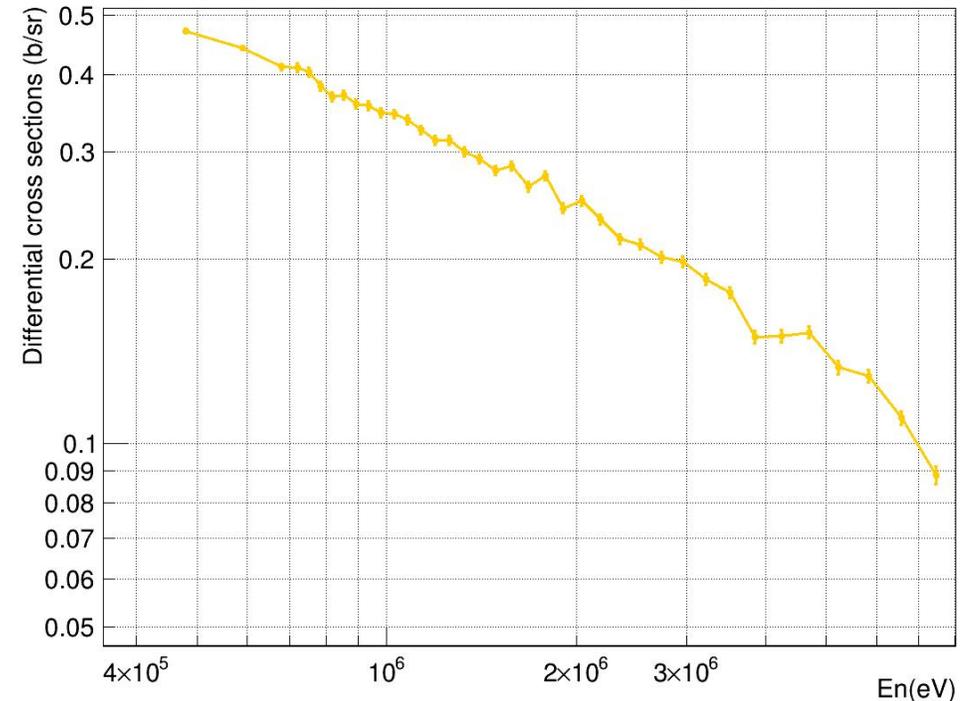
影响n-p散射相对微分截面结果的误差主要有：

- 统计误差
- 解谱误差
- 能谱误差
- 系统误差

- 以小束斑结果中A1探测器（实验室系角度 22.4° ）为例，展示其误差分布。
- 其纵向误差在0.7%~3.4%之间。



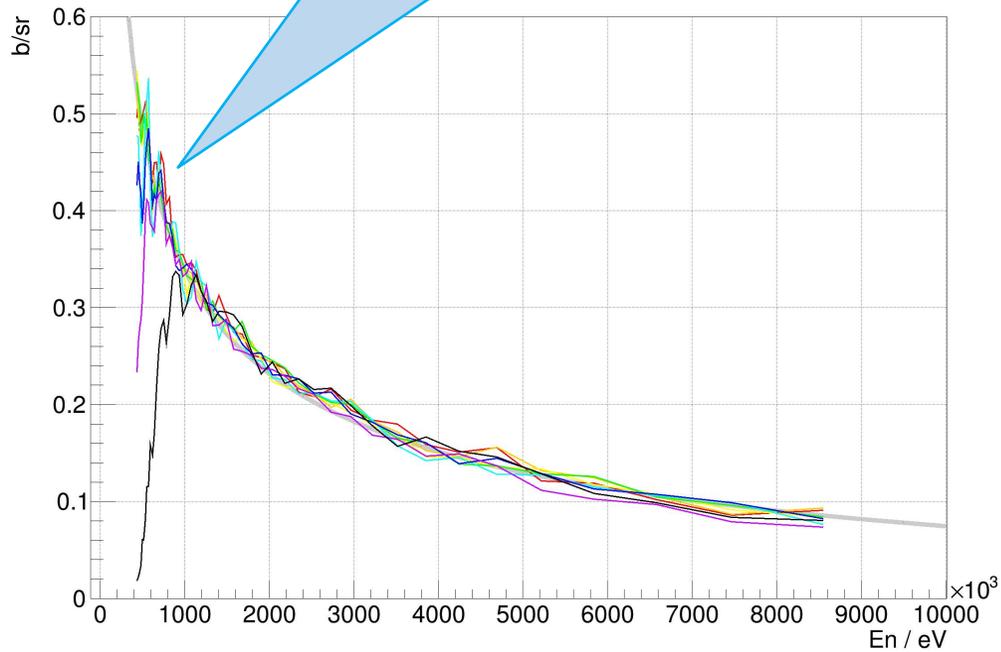
The relative errors of the relative differential cross sections of n - p scattering at the angle of 22.4°



The preliminary results of the relative differential cross sections of n - p scattering at the angle of 22.4°

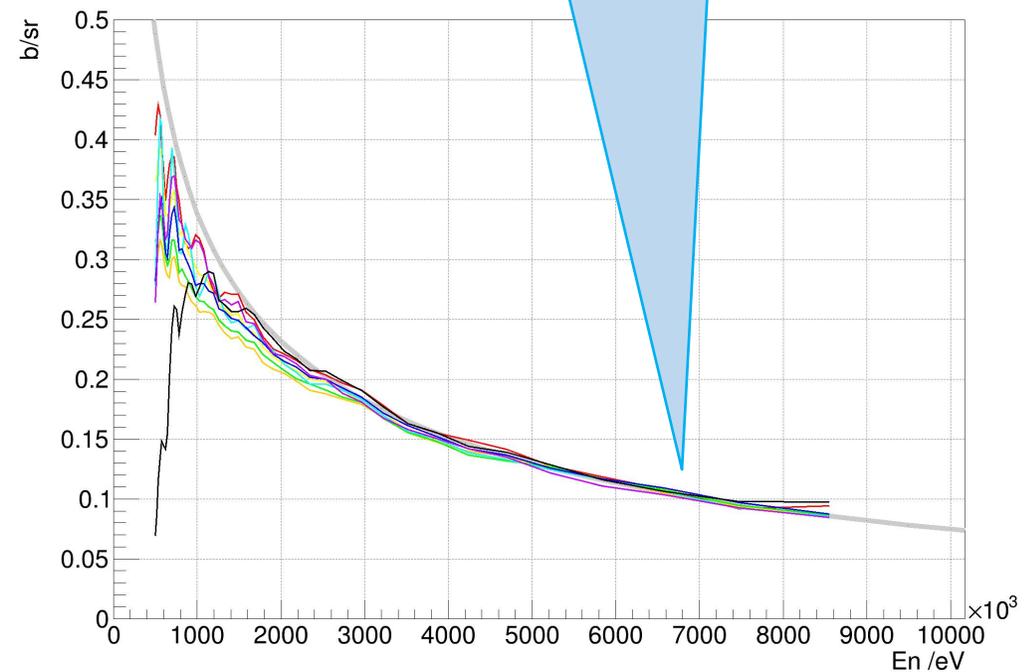
- 不同束斑孔径下的相对微分截面的初步结果。

小束斑结果在低能区(0.5 – 2.5 MeV)的符合更好



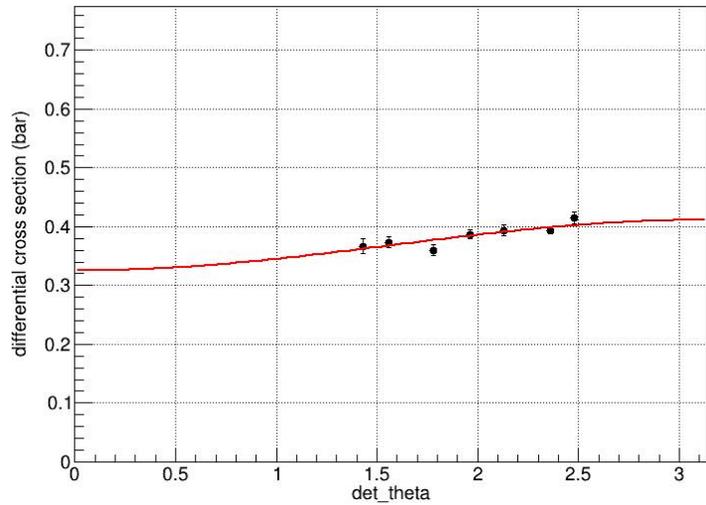
The preliminary results obtained by small spots data

大束斑结果在 高能区(3 – 8 MeV)的统计误差更小

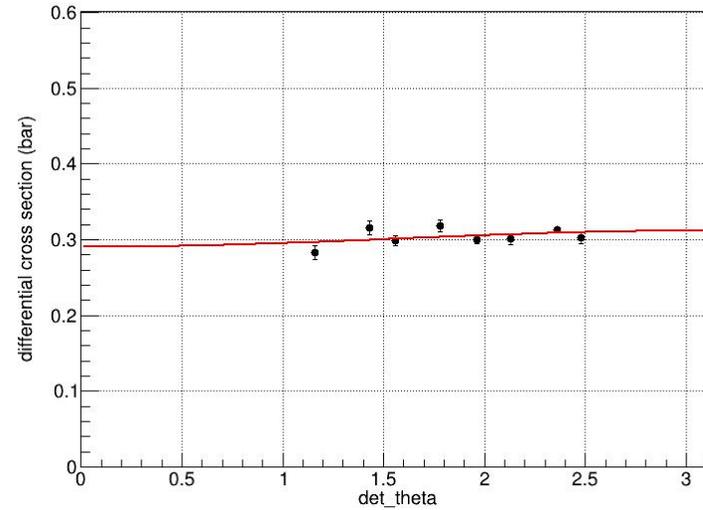


The preliminary results obtained by big spots data

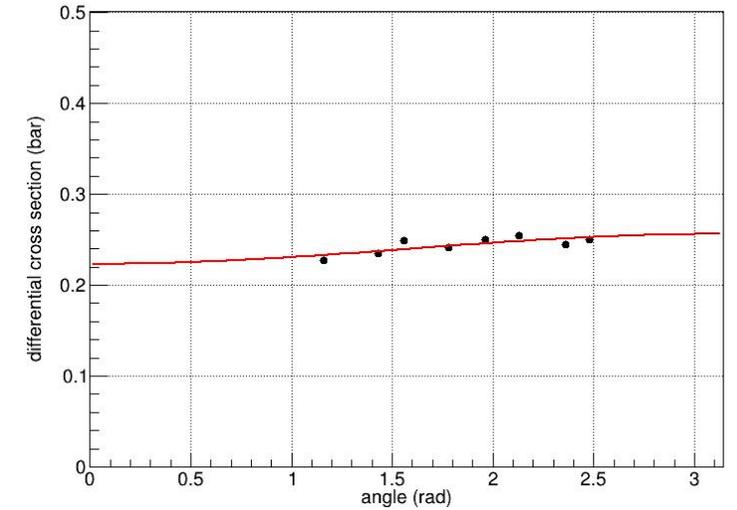
Legendre Fit of Angular Distribution ($E_n=0.7846$ MeV)



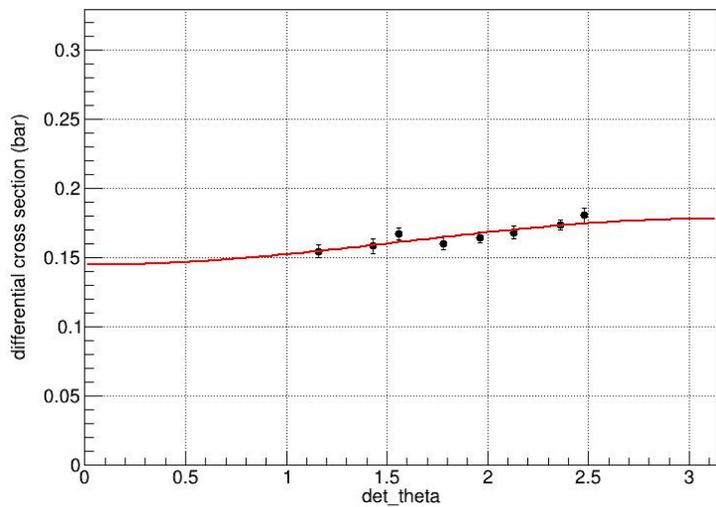
Legendre Fit of Angular Distribution ($E_n=1.2601$ MeV)



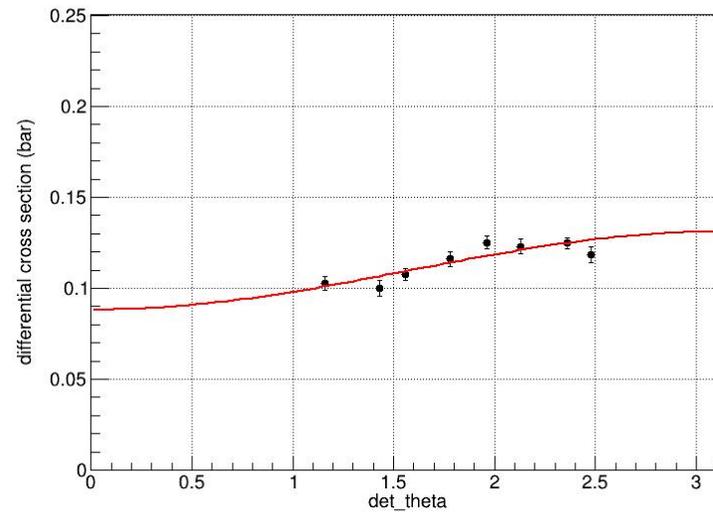
Legendre Fit of Angle Distribution ($E_n=1.9073$ MeV)



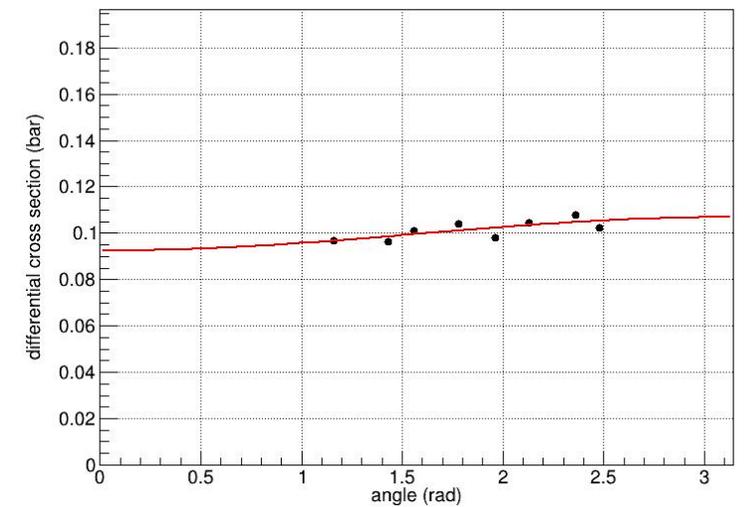
Legendre Fit of Angular Distribution ($E_n=3.5162$ MeV)



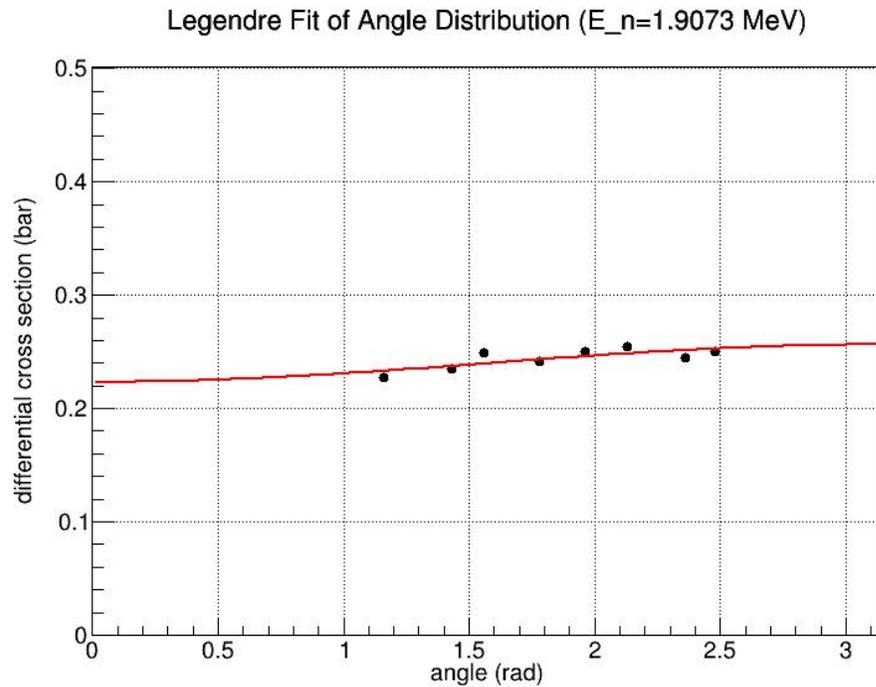
Legendre Fit of Angular Distribution ($E_n=5.8397$ MeV)



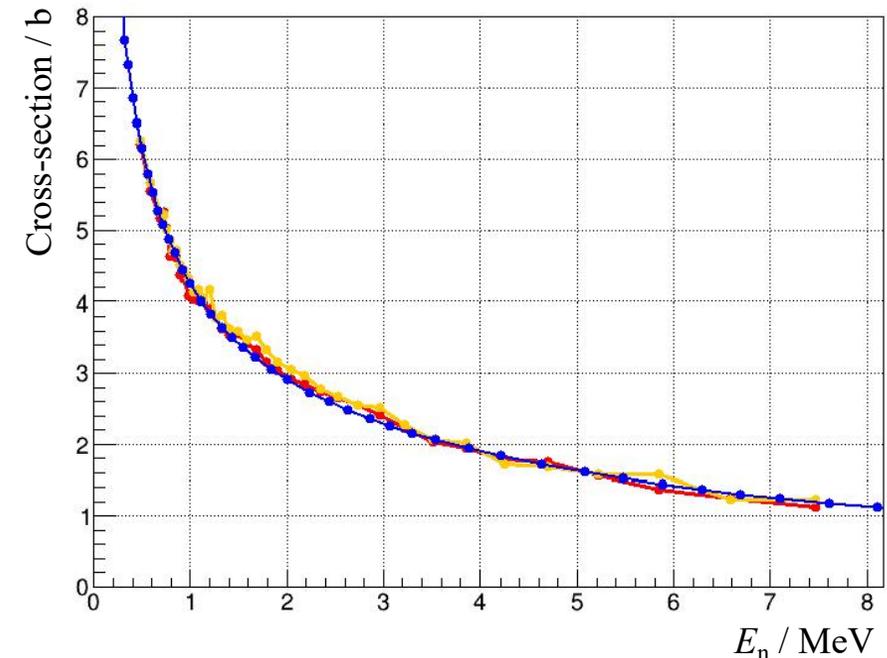
Legendre Fit of Angle Distribution ($E_n=6.5788$ MeV)



- 对于不同角度下 n - p 散射的相对微分截面，使用一阶勒让德多项式对每个能量点的实验数据进行拟合。
- 对其积分可以获得 n - p 散射的角积分截面。

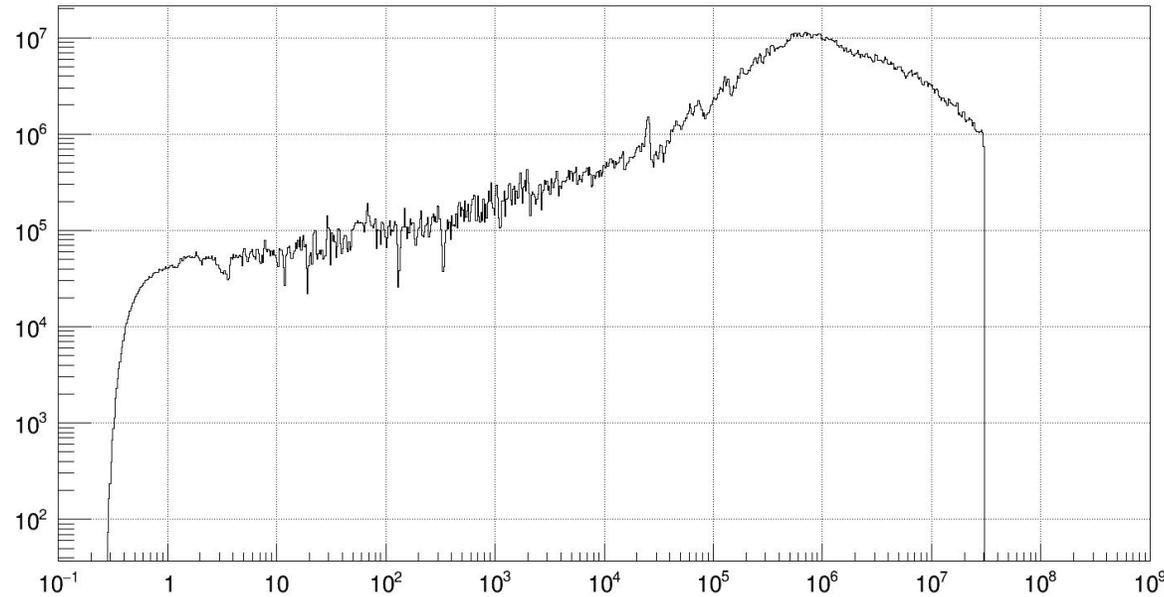


The angular distribution and fitting results of the n - p scattering differential cross sections at 1.9 MeV.

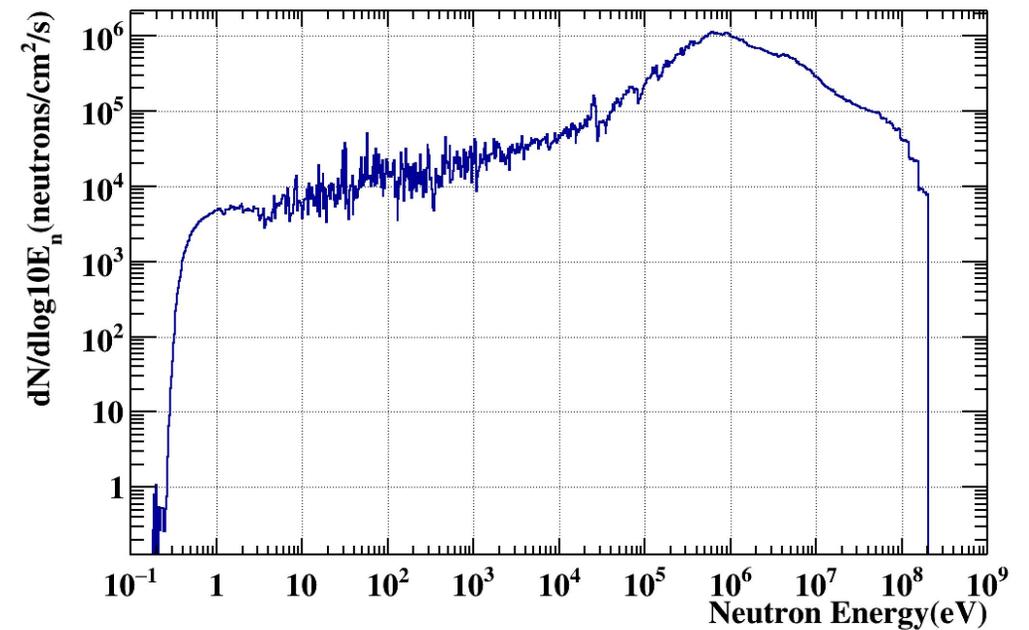


The angular integrated cross sections vs cross sections data from ENDF

- 目前束流扩展应用组网站上可以下载到的厅1能谱只有 $\Phi 60 + \Phi 60$ 和 $\Phi 30 + \Phi 30$ 两种，且都是早期的测量结果，能谱精度不足。
- 通过对已有能谱实验的数据进行分析，得到了厅1新的初步能谱，包括2020年测量得到的 $\Phi 60 + \Phi 30$ 的能谱和2022年在测量得到的 $\Phi 60 + \Phi 60$ 的单束团模式的能谱。

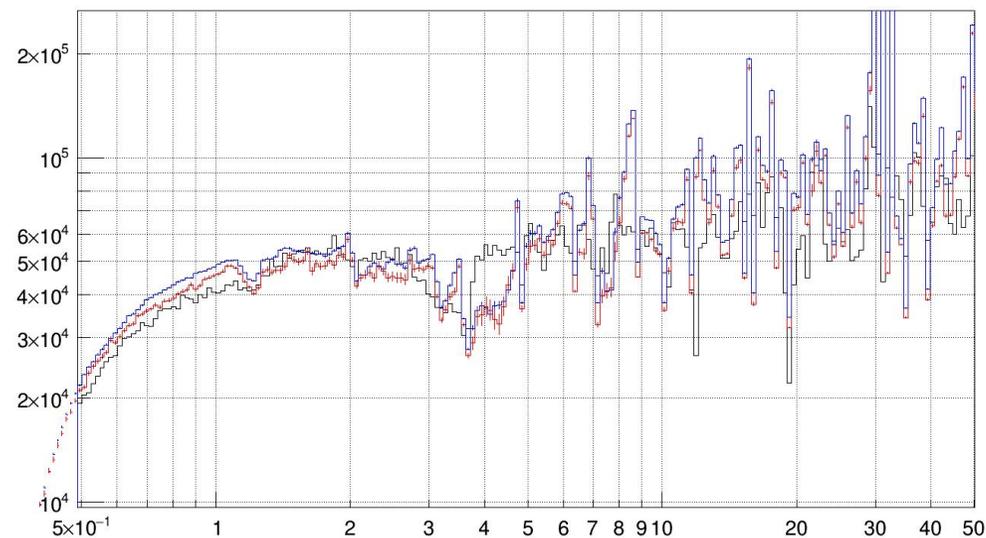
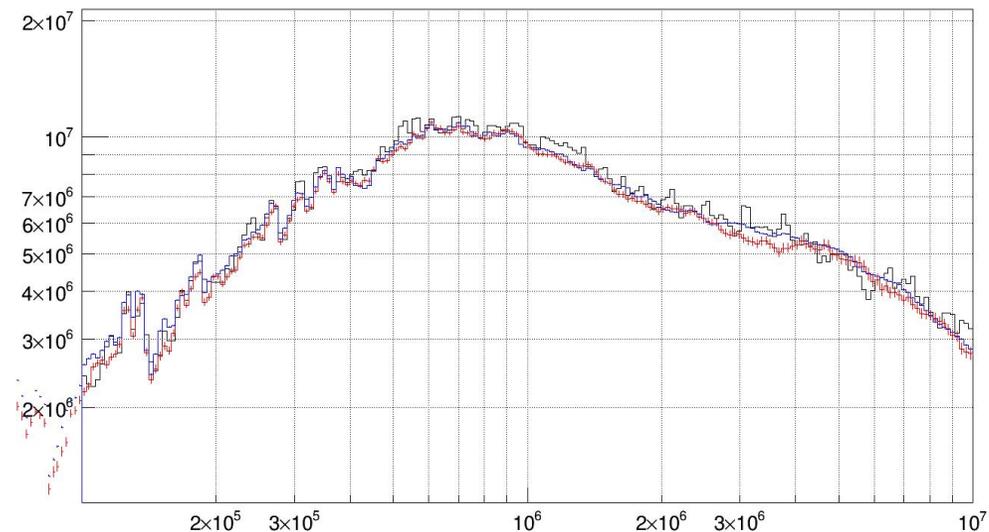
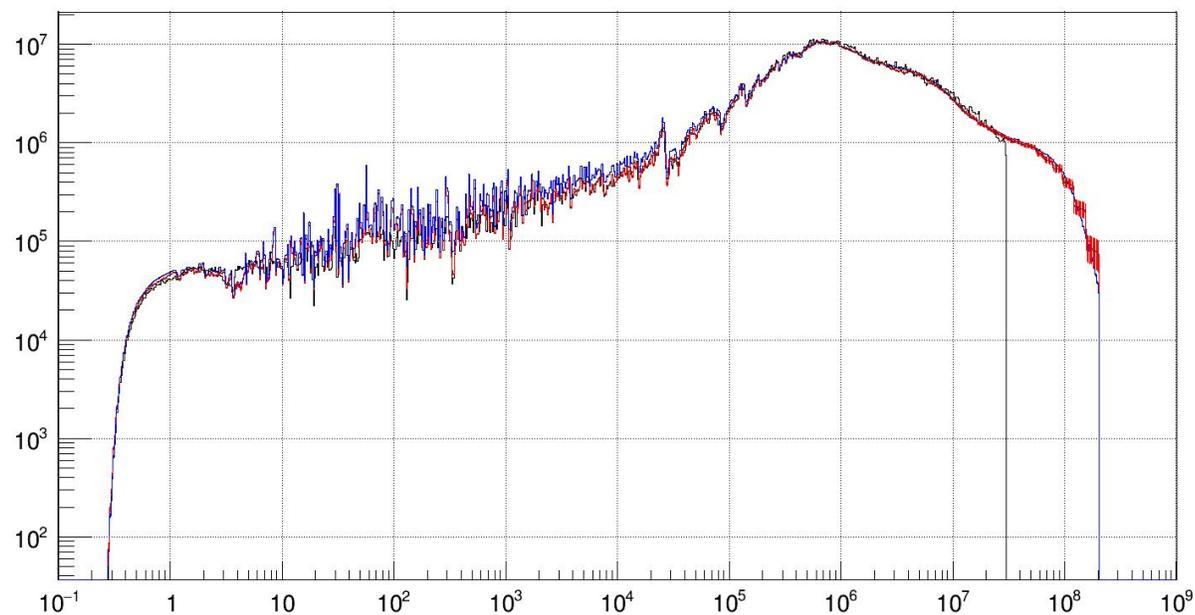


The neutron flux spectrum measured in ES1, 2018



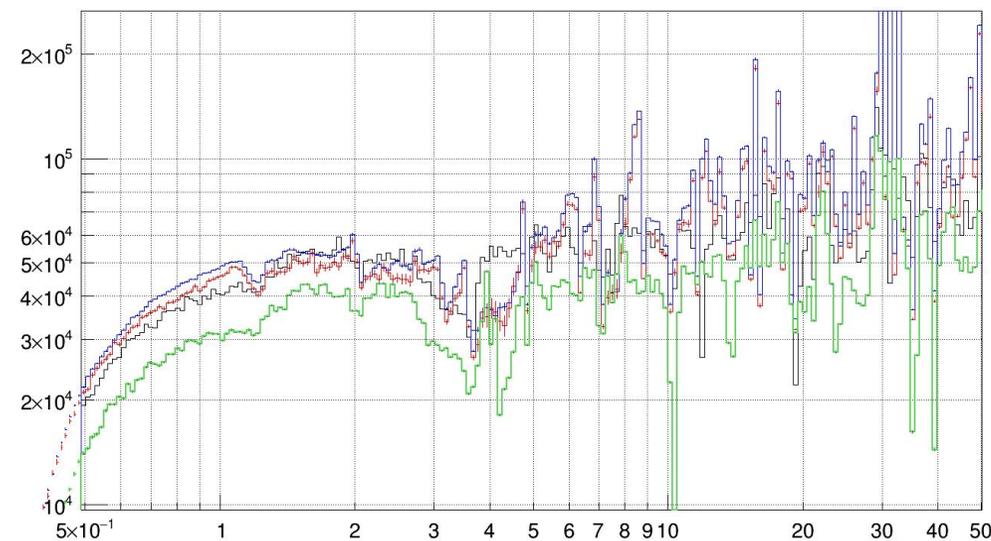
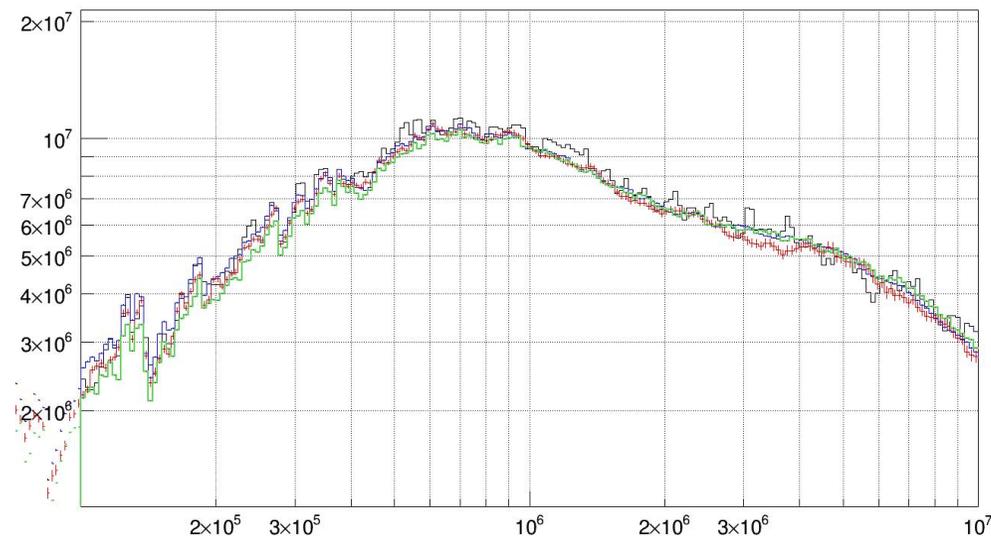
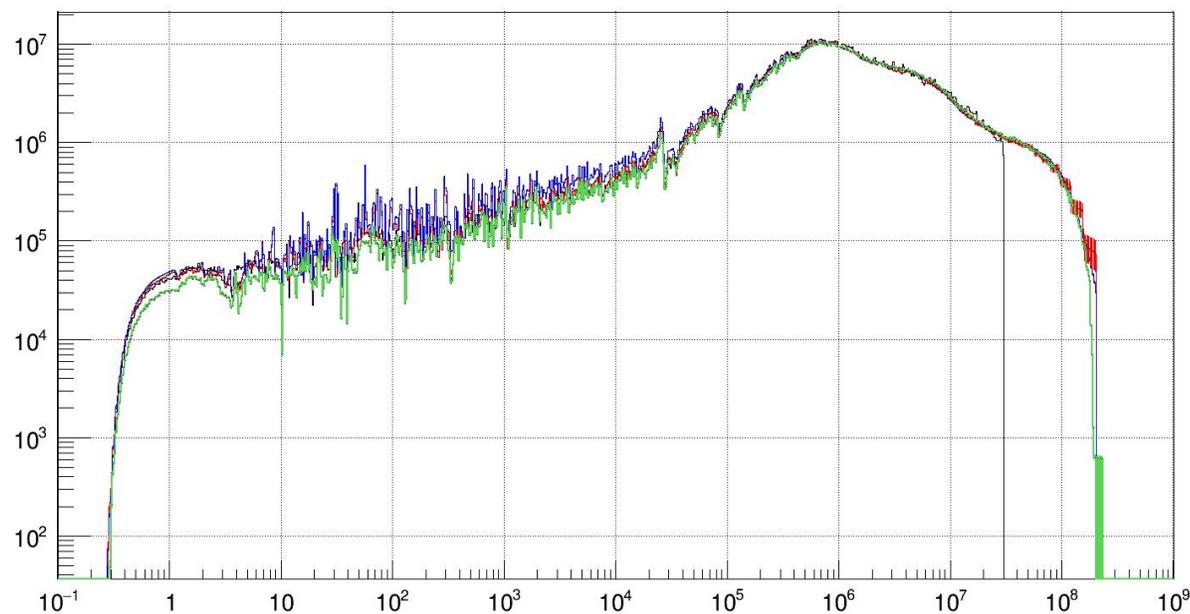
- 新旧能谱归一对比

——:18年厅1 $\Phi 60+$ $\Phi 60$ 能谱
 ——:20年厅1 $\Phi 60+$ $\Phi 30$ 能谱
 ——:22年厅1 $\Phi 60+$ $\Phi 60$ 单束团能谱

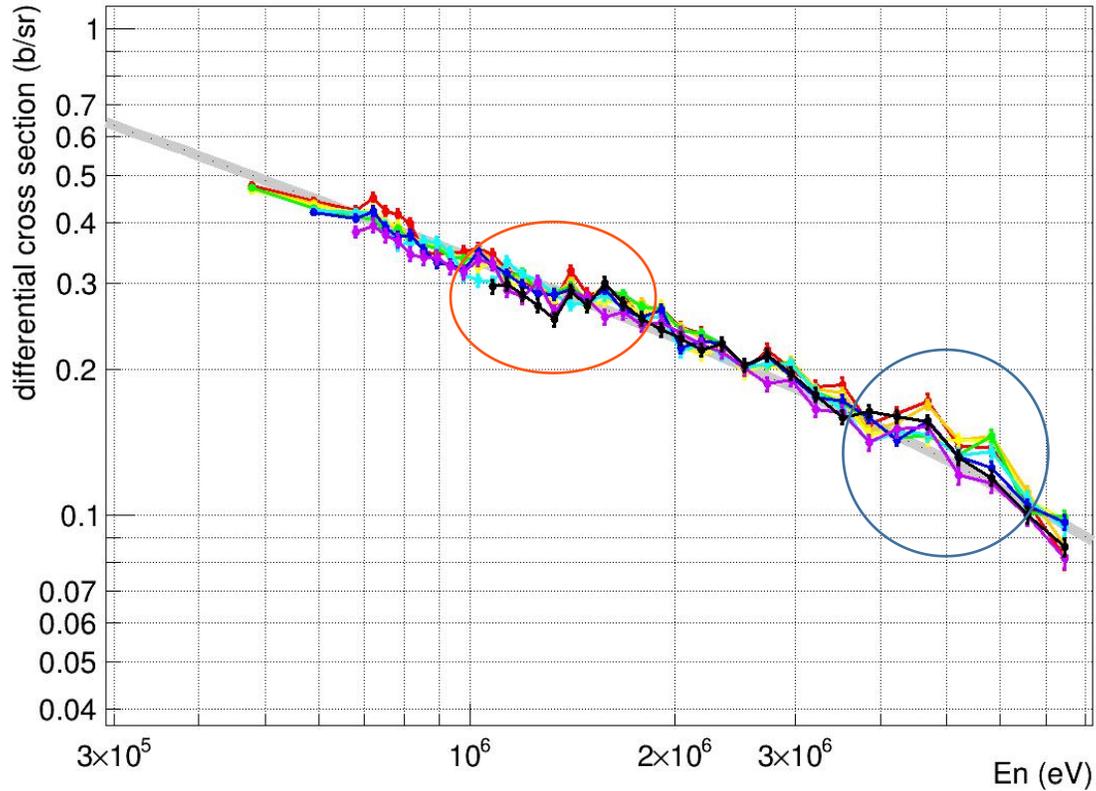


- 新旧能谱归一对比

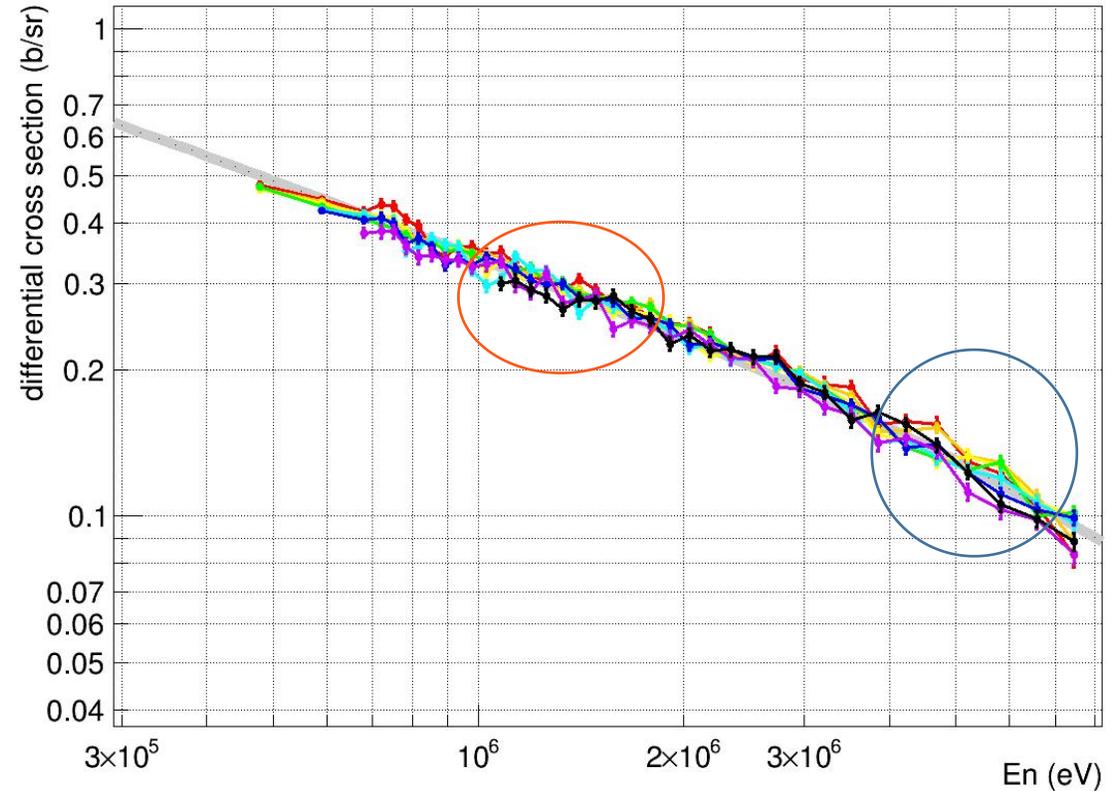
——:18年厅1 $\Phi 60+$ $\Phi 60$ 能谱
 ——:20年厅1 $\Phi 60+$ $\Phi 30$ 能谱
 ——:22年厅1 $\Phi 60+$ $\Phi 60$ 单束团能谱
 ——:厅2 $\Phi 60+$ $\Phi 30+$ $\Phi 60$ 能谱



- 使用不同能谱的相对微分截面的初步结果。



The preliminary results of the relative differential cross sections of n - p scattering using the neutron flux spectrum measured in 2018



The preliminary results of the relative differential cross sections of n - p scattering using the neutron flux spectrum measured in 2022

已有结果

- 在2024年的 n - p 散射实验中，对硅探测器的数据分析得到了质心系角度 66° 到 142° 、中子能量在0.48 MeV - 7.5 MeV的 n - p 散射反应的相对微分截面的初步结果。

未来计划

- 完善误差分析、本底扣除等细节。
- 分析大束斑下的实验结果，结合两种束斑结果各自的优点，给出更好的相对微分截面。
- 撰写数据分析文章并投稿。



Thanks for listening!