

白光中子源上的 ^{93}Nb 的 出射中子核反应截面测量研究

报 告 人：王晓宇

指导老师：聂阳波 贺国珠

日 期：2026.7.16

目录

01

项目背景及意义

02

实验方法

03

数据处理

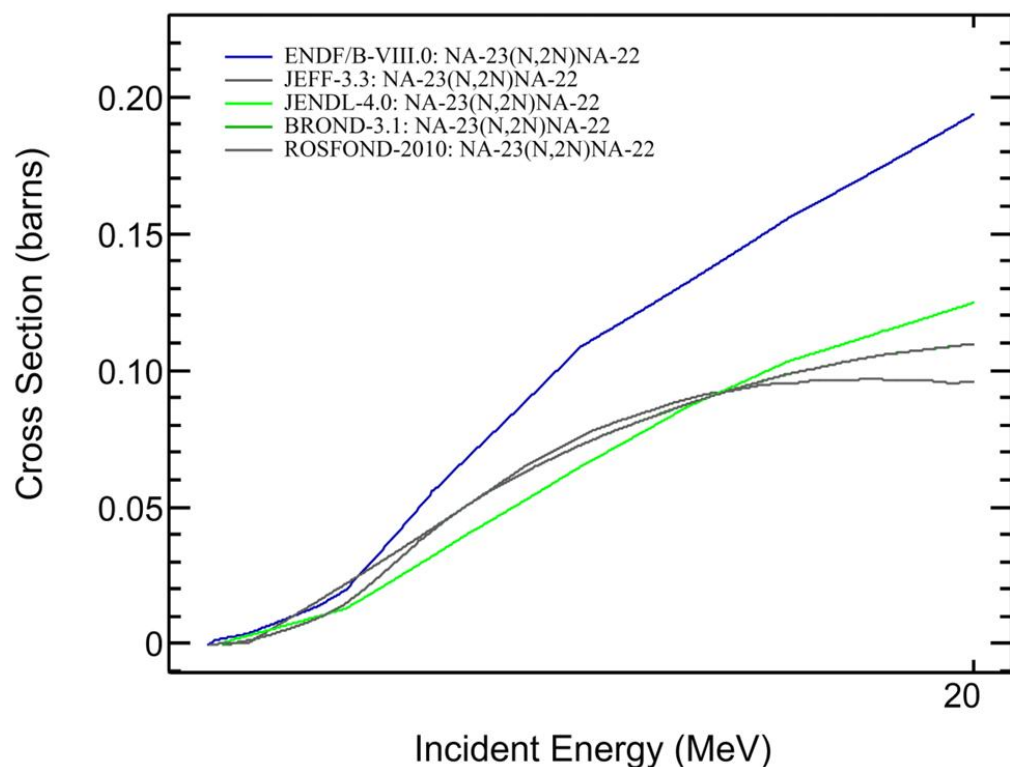
04

总结与展望

01

项目背景及意义

(n,2n)反应激发函数的实验研究在理论及应用研究中都具有重要意义。但在(n,2n)反应道开放的全能区逐点测量激发函数并不容易，尤其对于 ^{23}Na 等核，反应阈值很高，受中子源等因素条件的限制，激发函数的测量是一个难点。



基于CSNS反角白光中子源，利用束内MeV能区中子，对 $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ 等反应激发函数的能量积分进行实验测量，实验结果可用于澄清数据库中 $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ 等反应激发函数评价曲线之间的分歧，对评价曲线在高能区段的完善给予指导。

02

实验方法

测量方法

离线测量（活化法）：

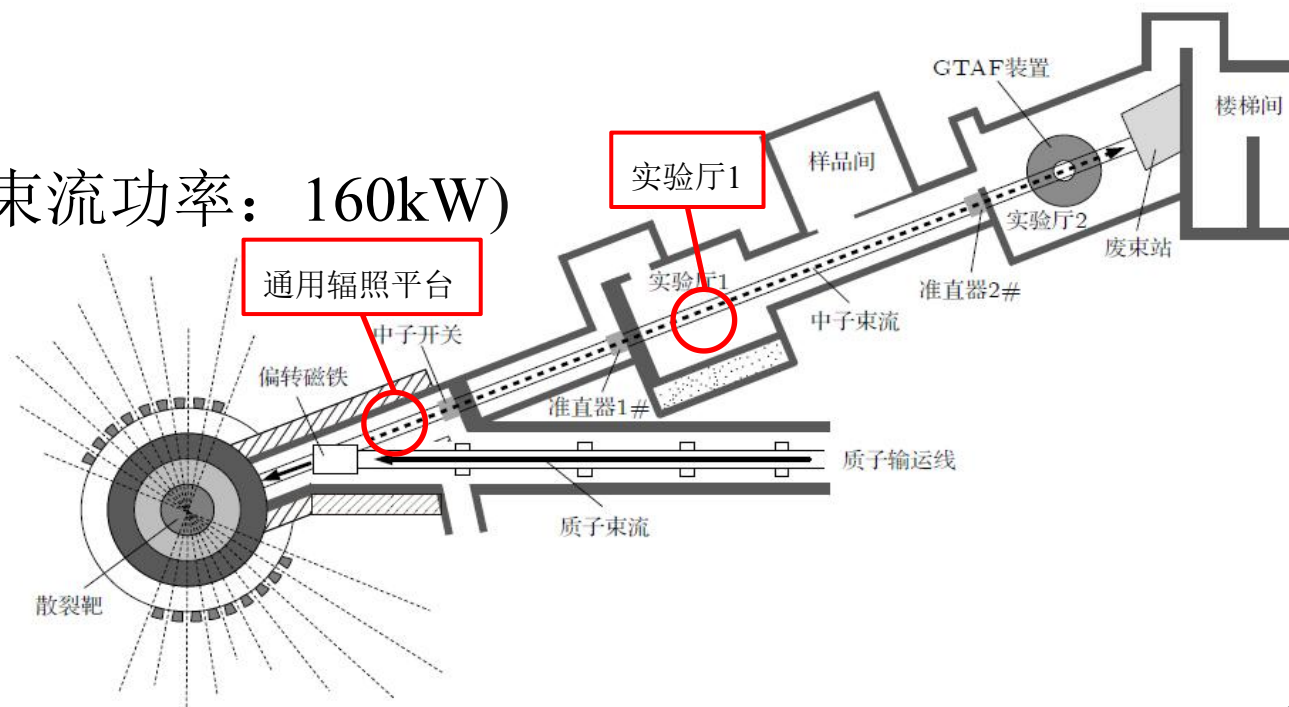
将样品置于中子场中辐照，稳定靶核吸收中子发生核反应，生成人工放射性核素。通过测量产物核特征 γ 射线活度，结合半衰期、 γ 分支比和中子注量反推出反应截面。

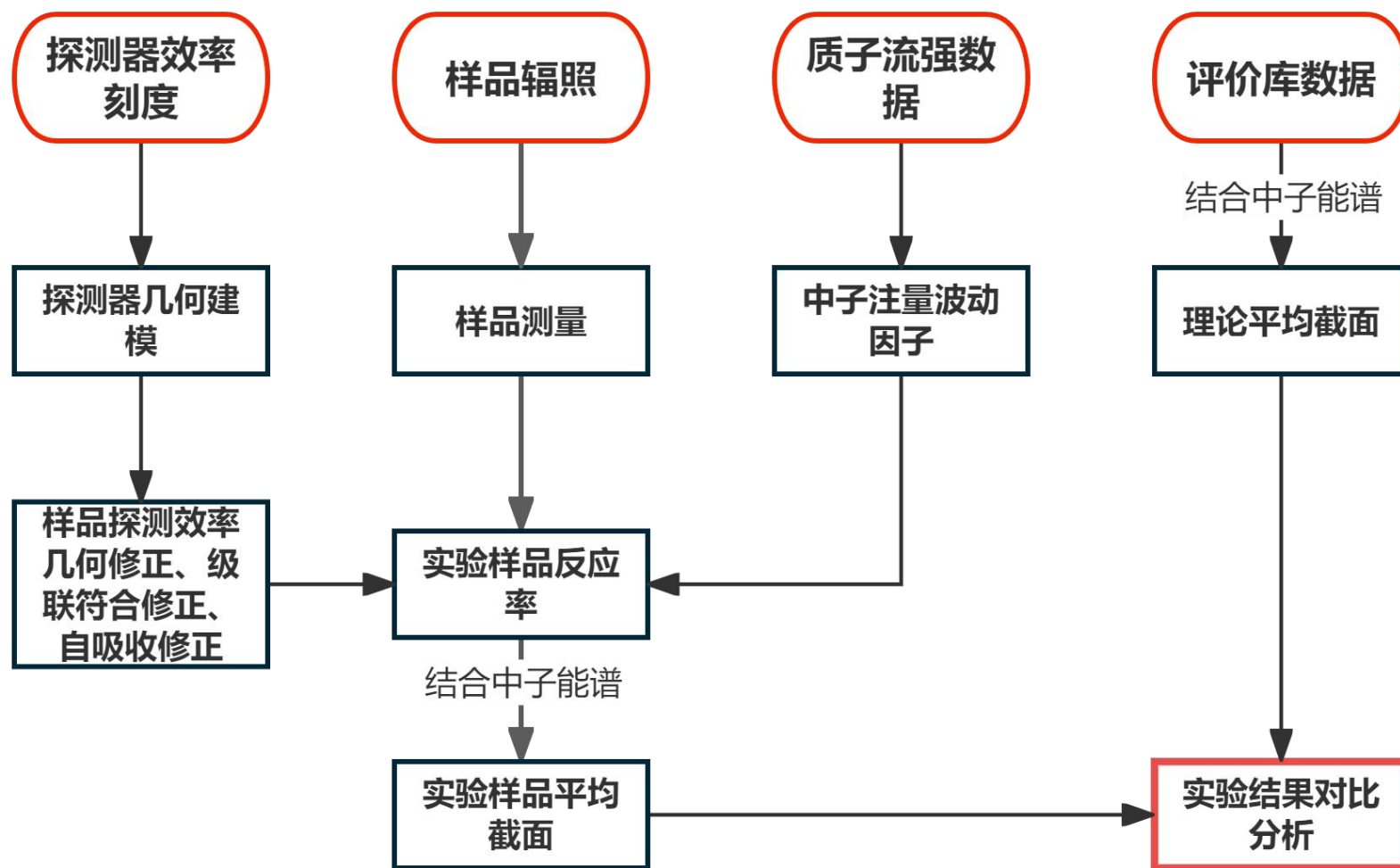
实验条件

CSNS Back-n，双束团，（频率：25Hz，束流功率：160kW）

辐照位置：通用辐照平台、实验厅1

实验样品（ $\Phi 20$ ）： ^{23}Na 、 ^{93}Nb 等





平均截面计算公式

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \sigma(E) \phi(E) dE}{\int \phi(E) dE}$$

$\sigma(E)$: 截面激发函数;
 $\phi(E)$: 中子能谱;

03

实验数据处理

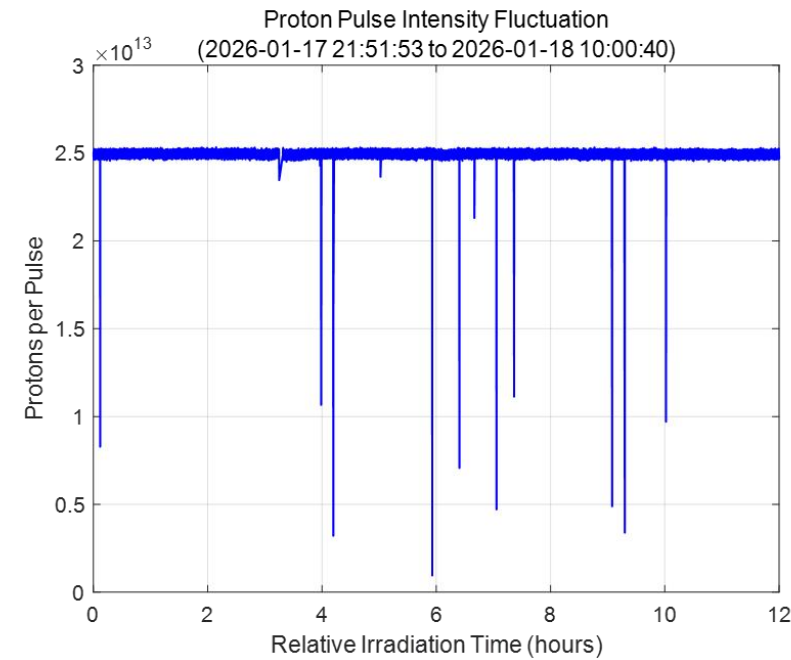
中子注量波动修正因子

中子注量波动修正因子的计算公式为：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n I_i(1 - e^{-\lambda \Delta t_i})e^{-\lambda T_i}}{I(1 - e^{-\lambda T})}$$

I_i ：第*i*段辐照时间内平均中子通量； I ：总辐照时间内入射到样品上的平均中子通量； λ ：衰变常数；
 Δt_i ：第*i*段辐照时间长度； T_i ：第*i*段辐照结束时刻到总辐照结束时刻的时间间隔； T ：总辐照时间；

核素	半衰期	中子注量波动修正因子
Nb92m	10.15d	1.0000211968
Nb90	14.6h	1.0009060289



反应率计算

- 通过实验数据得到辐照期间样品的反应率
- 将白光的中子能谱与评价库截面结合起来得到理论的反应率

实验数据计算辐照期间样品反应率公式

$$A = \frac{C \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda T_c}}{\varepsilon \cdot I_\gamma \cdot (1 - e^{-\lambda T_m})}$$

A : 辐照结束时活度; C : 测量计数; λ : 衰变常数; T_c 冷却时间; T_m : 测量时间;
 I_γ : 特征 γ 射线分支比

$$R = \frac{A}{1 - e^{-\lambda T_r}}$$

R : 辐照期间平均反应率; A : 辐照结束时活度; λ : 衰变常数; T_r : 辐照时间

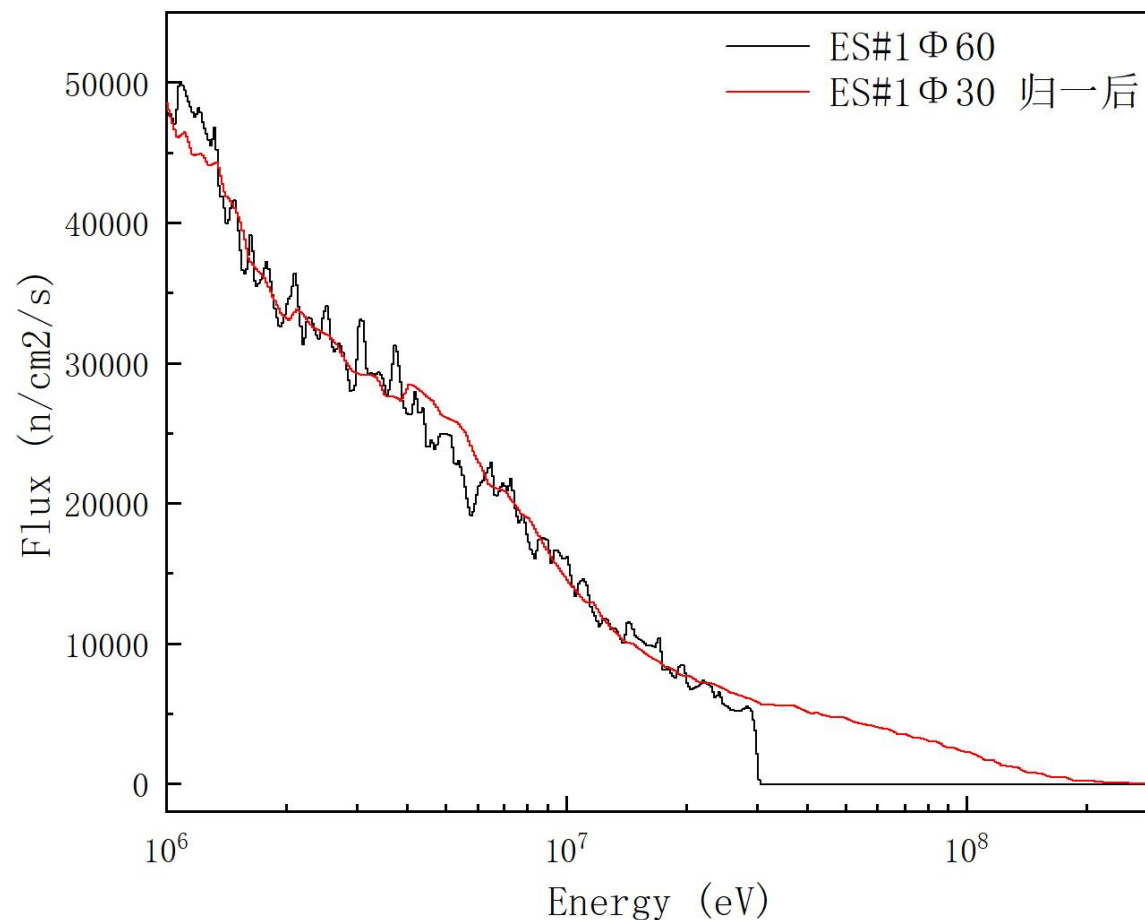
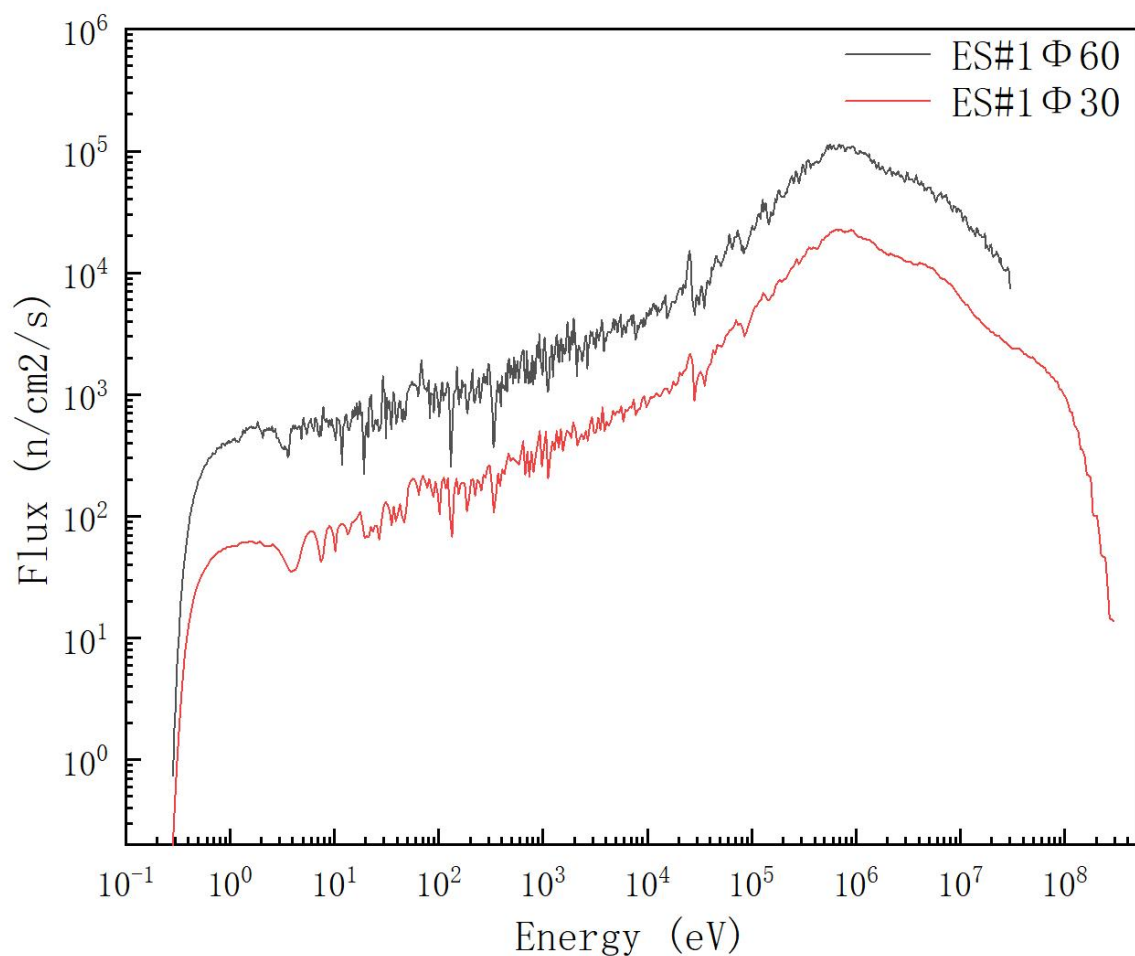
辐照期间平均反应率
 $^{93}\text{Nb} (n,2n) ^{92}\text{Nb}$ 辐照时平均反应率

样品	辐照结束时活度	原子数	辐照时平均反应率
Nb93-1234	9.305E+01	6.979E+21	3.952E-19
Nb93-3456	9.211E+01	6.967E+21	3.919E-19
Nb93-5678	9.287E+01	6.951E+21	3.961E-19
Nb93-78910	9.216E+01	6.940E+21	3.937E-19

$^{93}\text{Nb} (n,4n) ^{90}\text{Nb}$ 辐照期间平均反应率

样品	辐照结束时活度	原子数	辐照时平均反应率
Nb93-1234	2.957E+02	6.979E+21	9.845E-20
Nb93-3456	2.939E+02	6.967E+21	9.801E-20
Nb93-5678	2.928E+02	6.951E+21	9.787E-20
Nb93-78910	2.972E+02	6.940E+21	9.950E-20

由于实验时使用大束斑，中子能谱采用 $\Phi 60$ 中子能谱为标准。但是 $\Phi 60$ 中子能谱只有30MeV以下能区数据，高于30MeV的中子能谱数据使用的是将 $\Phi 30$ 中子能谱与 $\Phi 60$ 中子能谱在1eV-30MeV进行积分值归一后的值。



平均反应截面计算

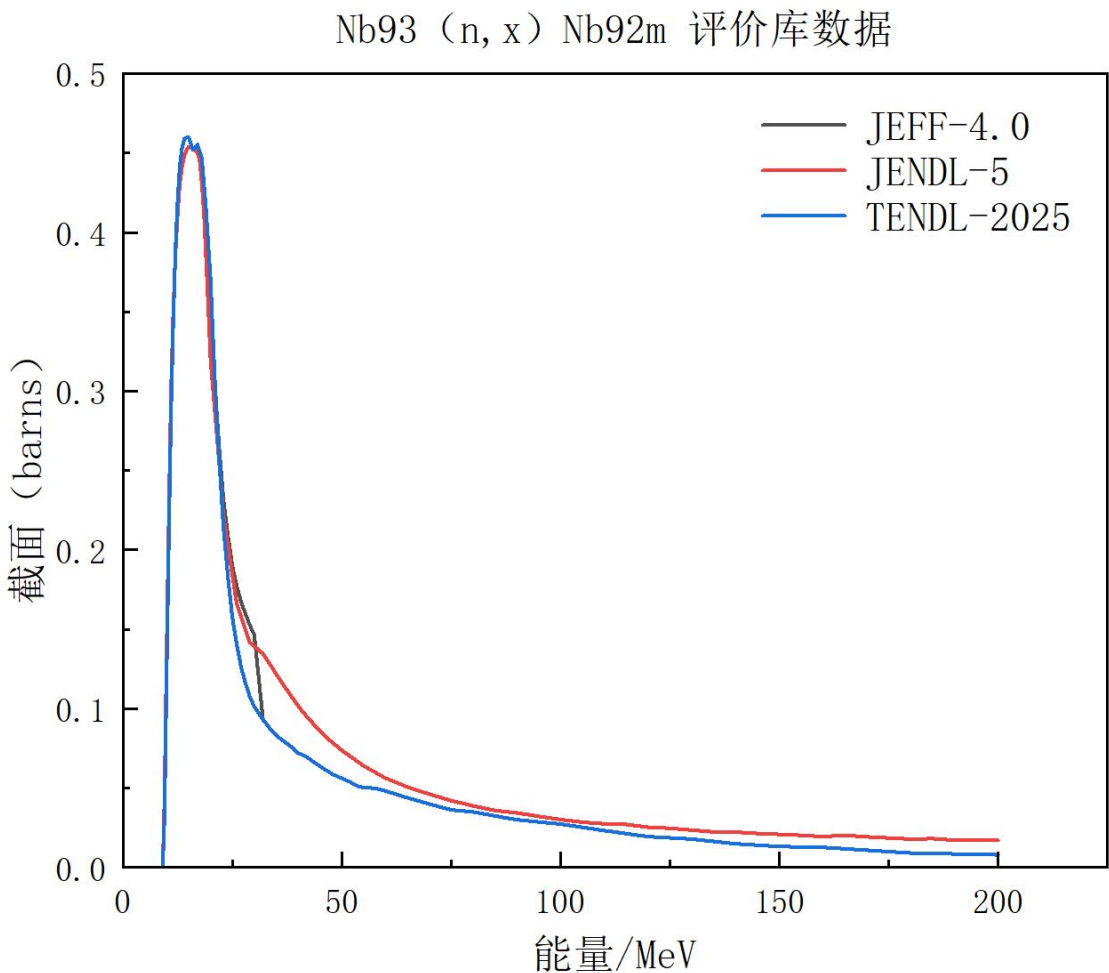
评价：将评价库截面结合中子能谱进行积分，再除以中子能谱在对应能区的积分得到平均截面。

实验：将辐照期间平均反应率除以中子能谱在对应能区的积分得到平均截面。

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \sigma(E)\phi(E)dE}{\int \phi(E)dE}$$

$\bar{\sigma}$ ：平均截面； $\sigma(E)$ ：截面激发函数； $\phi(E)$ ：中子能谱；

平均截面计算



^{93}Nb (n,2n) ^{92}Nbm 评价库数据

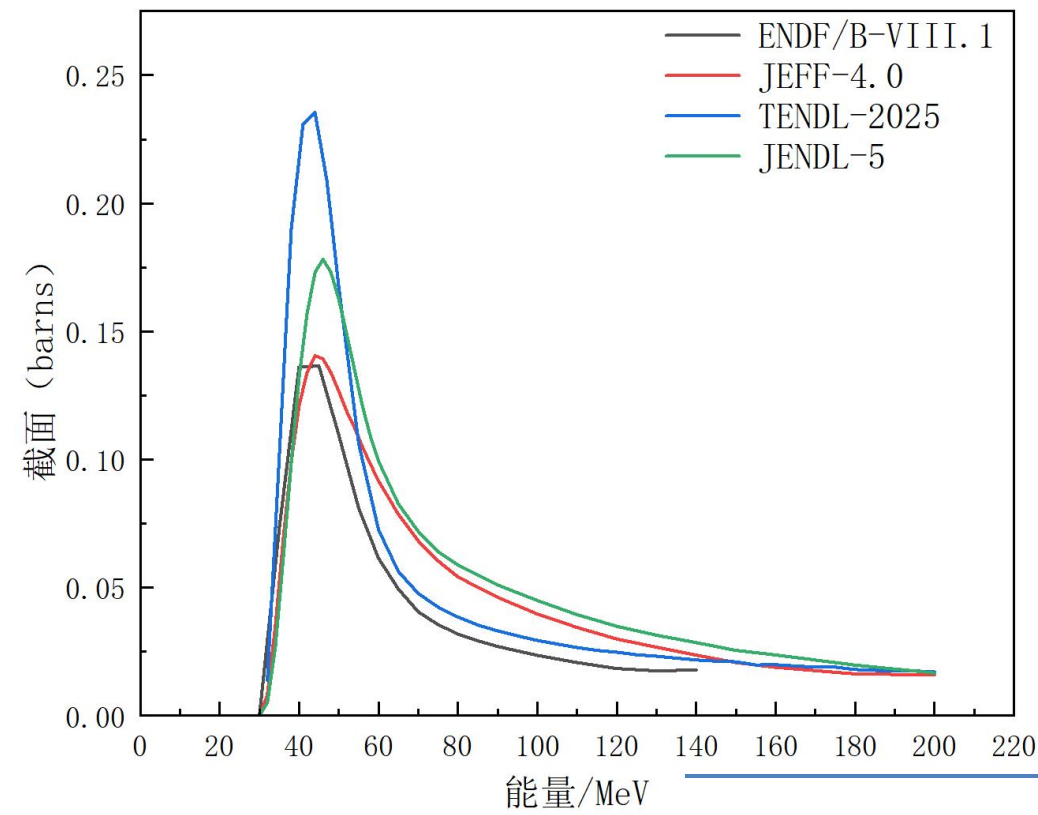
评价库	评价库曲线范围	理论平均截面 (mbarns)
JEFF-4.0	阈值-200MeV	218.4
TENDL-2025	阈值-200MeV	215.1
JENDL-5	阈值-200MeV	222.4

^{93}Nb (n,2n) ^{92}Nbm 实验平均截面

样品	实验平均截面 阈值-200MeV(mbarns)
Nb93-1234	259.7

平均截面计算

Nb93 (n, x) Nb90 评价库数据



⁹³Nb (n,4n) ⁹⁰Nb 评价库数据

评价库	评价库曲线范围	理论平均截面 (mbarns)
ENDF/B-VIII.1	阈值-140MeV	66.6
JEFF-4.0	阈值-200MeV	72.4
TENDL-2025	阈值-200MeV	81.7
JENDL-5	阈值-200MeV	94.5

⁹³Nb (n,4n) ⁹⁰Nb实验平均截面

样品	实验平均截面 阈值-140MeV(mbarns)	实验平均截面 阈值-200MeV(mbarns)
Nb93-1234	193.7	187.5

04

总结与展望

总结

本实验成功得到了 ^{93}Nb 在CSNS反角白光中子源上的 $(n,2n)$ 及 $(n,4n)$ 的平均反应截面， $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92}\text{Nbm}$ 与理论值接近，但 $^{93}\text{Nb}(n,4n)^{90}\text{Nb}$ 显著高于理论值，说明评价库可能低估了 $^{93}\text{Nb}(n,4n)^{90}\text{Nb}$ 的反应截面。

实验平均反应截面普遍高于通过评价库计算的平均反应截面，可能原因如下：

- $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92}\text{Nbm}$ 的高能中子实验数据欠缺，且由于生成核为激发态，现有理论模型不能很好的进行预测，因此实验值与理论值存在偏差。
- 实验使用的是大束斑，而高能区缺少大束斑下的数据，使用 $\Phi 30$ 中子能谱数据可能存在偏差。
- 中子能谱数据认为在束斑内中子通量是均匀的，而实验样品尺寸为 $\Phi 20$ ，实验时为束靶，因此可能打到样品上的实际中子通量偏高，导致计算得到的实验平均截面偏高。

展望

- 后续期望在厅1使用 $\Phi 30$ 束斑对样品进行辐照，利用 $\Phi 30$ 中子能谱数据得到更加准确结果。
- 下一次实验时分别使用 $\Phi 20$ 样品及 $\Phi 50$ 样品进行实验，通过束包靶及靶包束的样品活度对比来更准确地得到样品上的实际中子通量。
- 使用准确度更高的样品作为标准样品，例如： ^{197}Au ，提高实验结果的可信度。
- 希望能在今年10月份再得到一次束流时间。

谢谢！