



第九届CSNS反角白光中子源用户研讨会

$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应截面和微分截面实验测量

任文凯¹, 易晗², 白浩帆¹, 孙康², 蒋伟², 刘杰¹, 邬泽鹏¹, 夏聪¹,
张国辉¹, 樊瑞睿², 陈永浩²

¹ 北京大学物理学院

² 中国科学院高能物理研究所, 散裂中子源科学中心

2025年7月24日



目录

Content

01

研究背景

02

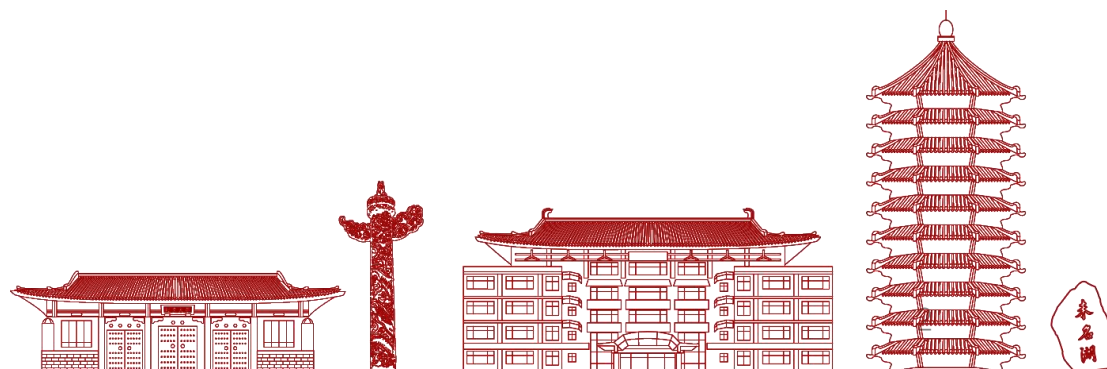
实验设置

03

数据处理

04

实验结果



$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$: ^{10}B : 在天然硼中丰度 19.9%

1、基础研究

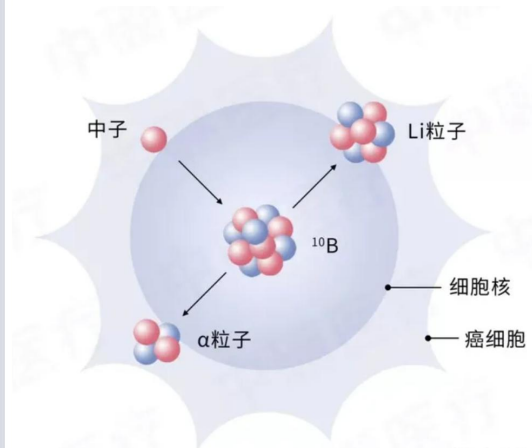
a) 标准截面^[1]

Neutron cross section standards	
Reaction	Standards incident neutron energy range
$\text{H}(n,n)$	1 keV to 20 MeV
$^3\text{He}(n,p)$	0.0253 eV to 50 keV
$^6\text{Li}(n,t)$	0.0253 eV to 1 MeV
$^{10}\text{B}(n,\alpha)$	0.0253 eV to 1 MeV
$^{10}\text{B}(n,\alpha_1\gamma)$	0.0253 eV to 1 MeV
$\text{C}(n,n)$	10 eV to 1.8 MeV
$\text{Au}(n,\gamma)$	0.0253 eV, 0.2 to 2.5 MeV, 30 keV MACS
$^{235}\text{U}(n,f)$	0.0253 eV, 7.8-11 eV, 0.15 MeV to 200 MeV
$^{238}\text{U}(n,f)$	2 MeV to 200 MeV

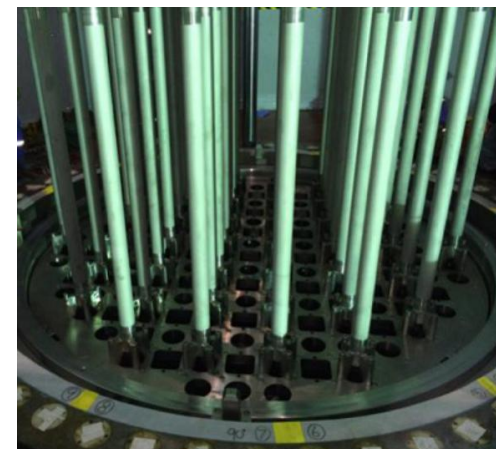
b) 1p壳轻核核反应理论

2、应用

中子探测(BF_3)、反应堆控制(B_4C)、中子屏蔽与防护、医疗(BNCT)等



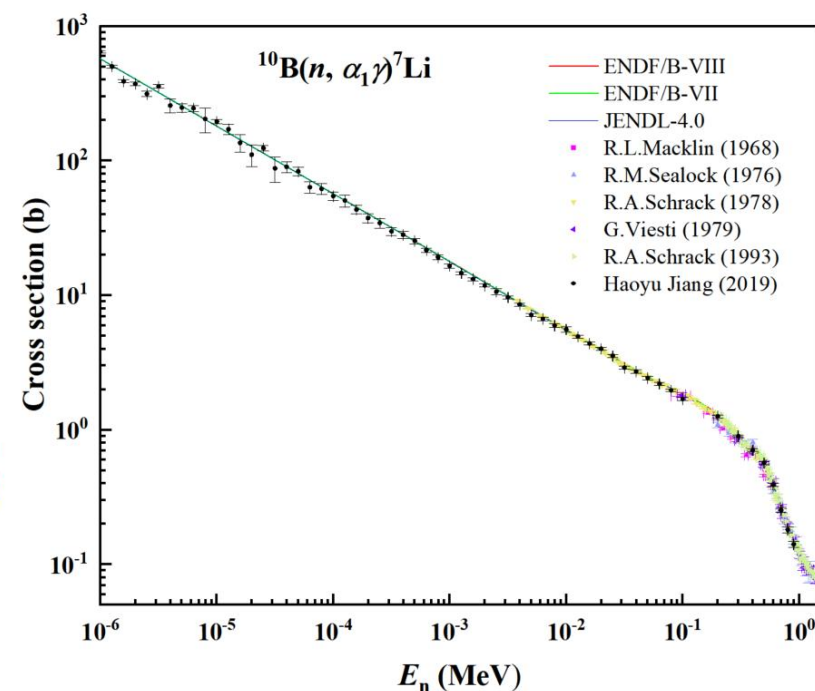
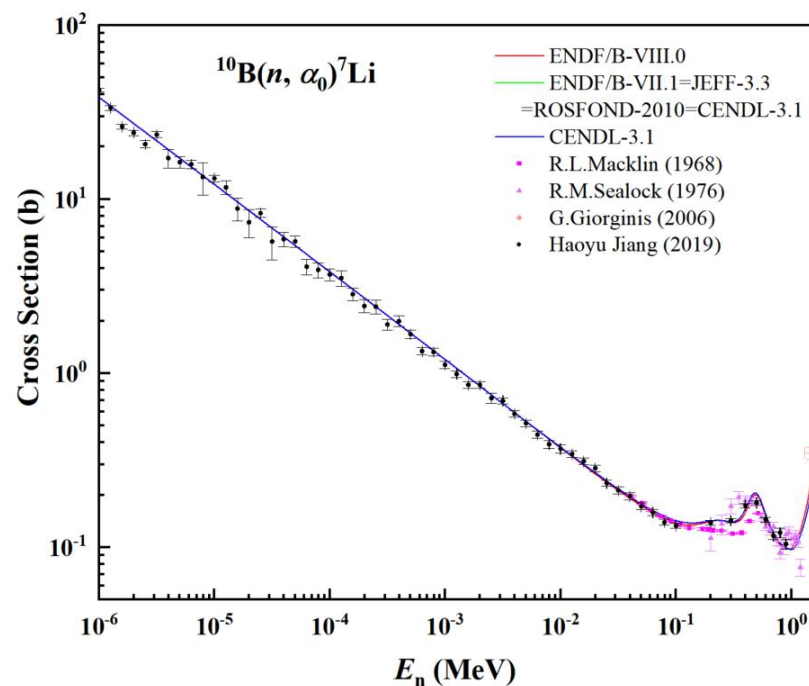
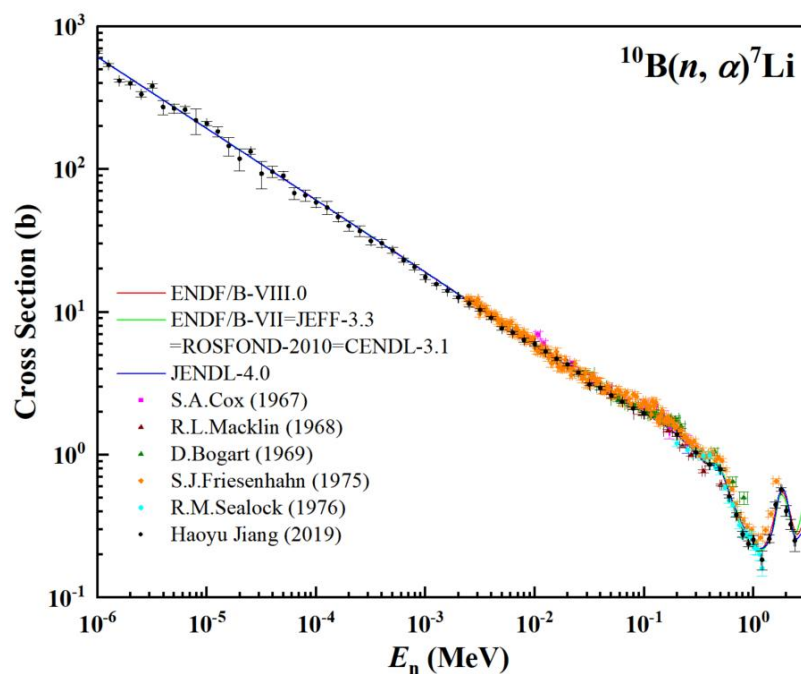
BNCT



B_4C 控制棒

截面测量:

3 MeV以下: 能区较全的仅有2019年 本课题组 在CSNS back-n的测量结果



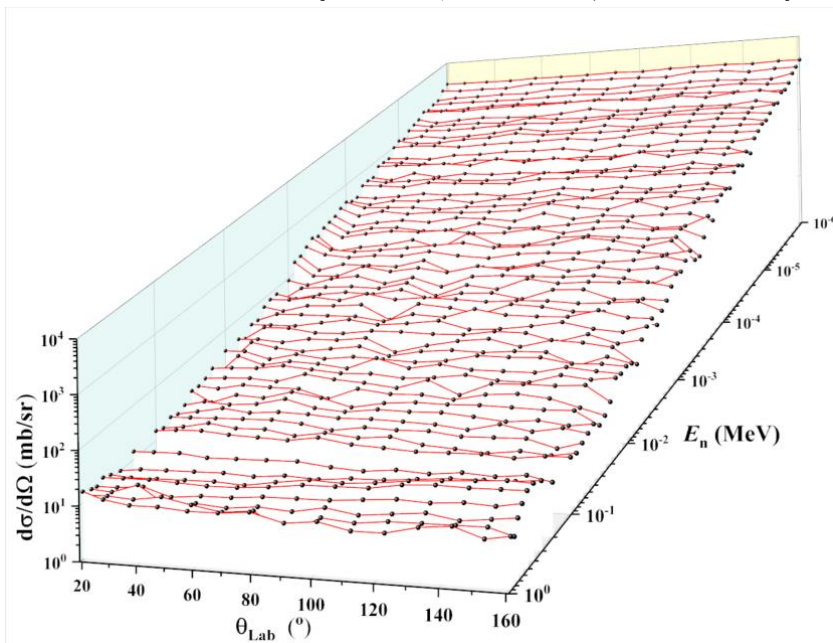
$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 、 $^{10}\text{B}(n, \alpha_0)^7\text{Li}$ 和 $^{10}\text{B}(n, \alpha_1\gamma)^7\text{Li}$ 截面测量与评价结果 (1 eV ~ 3 MeV)

微分截面测量 (3 MeV以下):

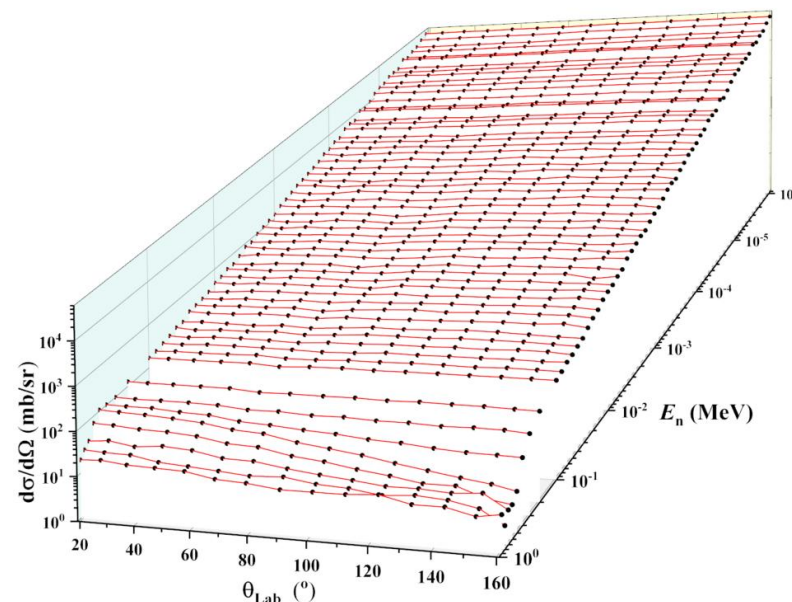
400 eV以下: 仅有2019年本课题组在CSNS back-n的测量结果

400 eV~1 MeV: 仅有R.M.Sealock (1976)、 F.-J.Hambsch (2009)和2019年本课题组的测量结果

1 MeV~ 3 MeV: 仅有2019年本课题组的测量结果和T.N.Massey (2022) 两家测量结果



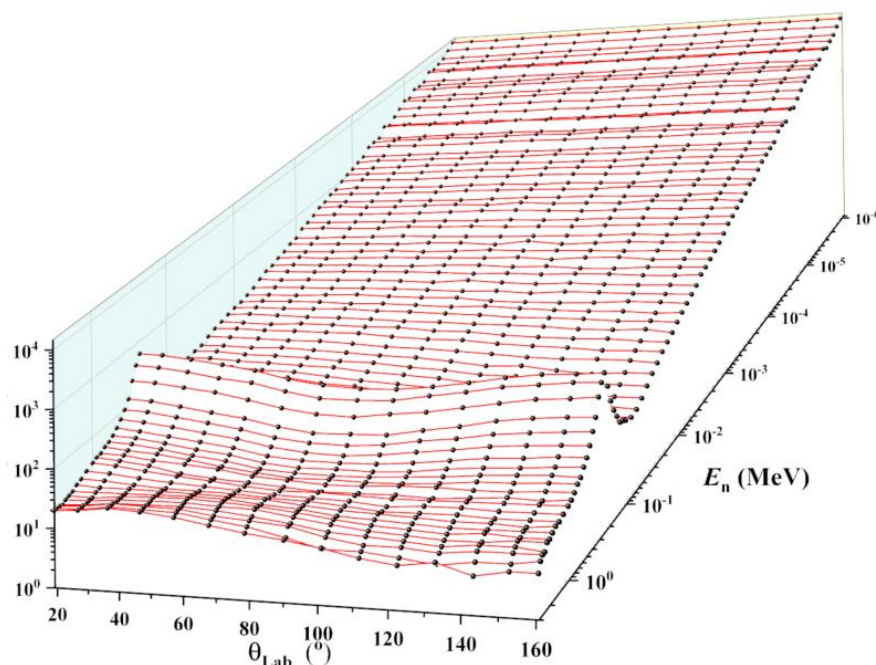
$^{10}\text{B}(n, \alpha_0)^7\text{Li}$ 微分截面[1]



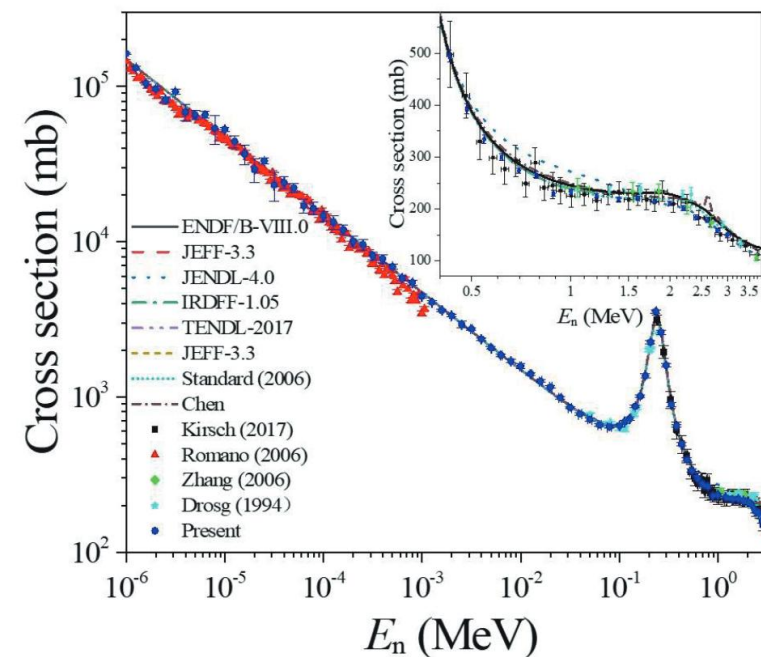
$^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}$ 微分截面[1]

${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$:

${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 微分截面和积分截面实验测量数据，目前已成为IEAE标准截面数据评价的关键实验数据



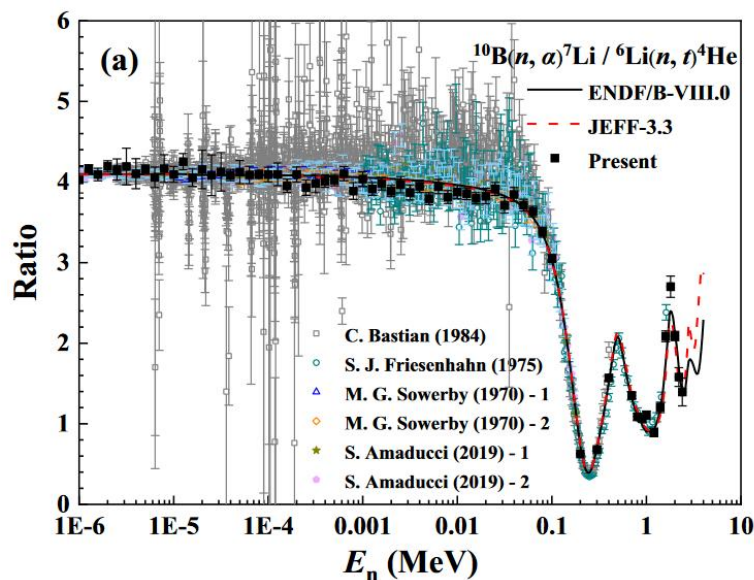
${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 微分截面[1]



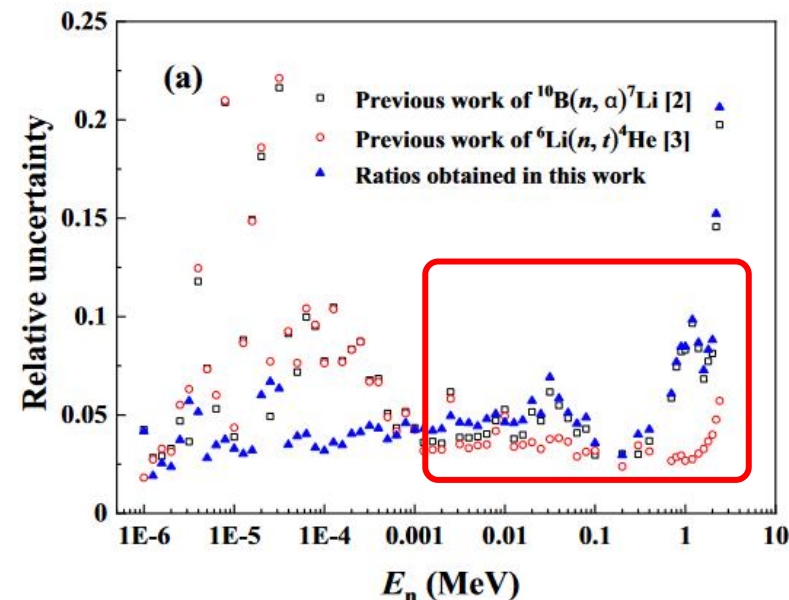
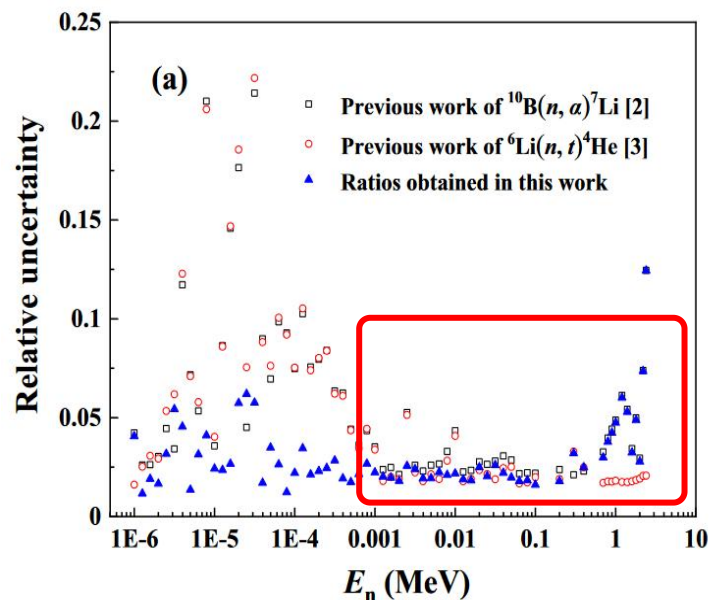
${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 截面[1]

19年实验存在的不足:

$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应测量数据的误差明显大于 $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 反应的误差



$^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 和 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应的截面比和相对误差[1]



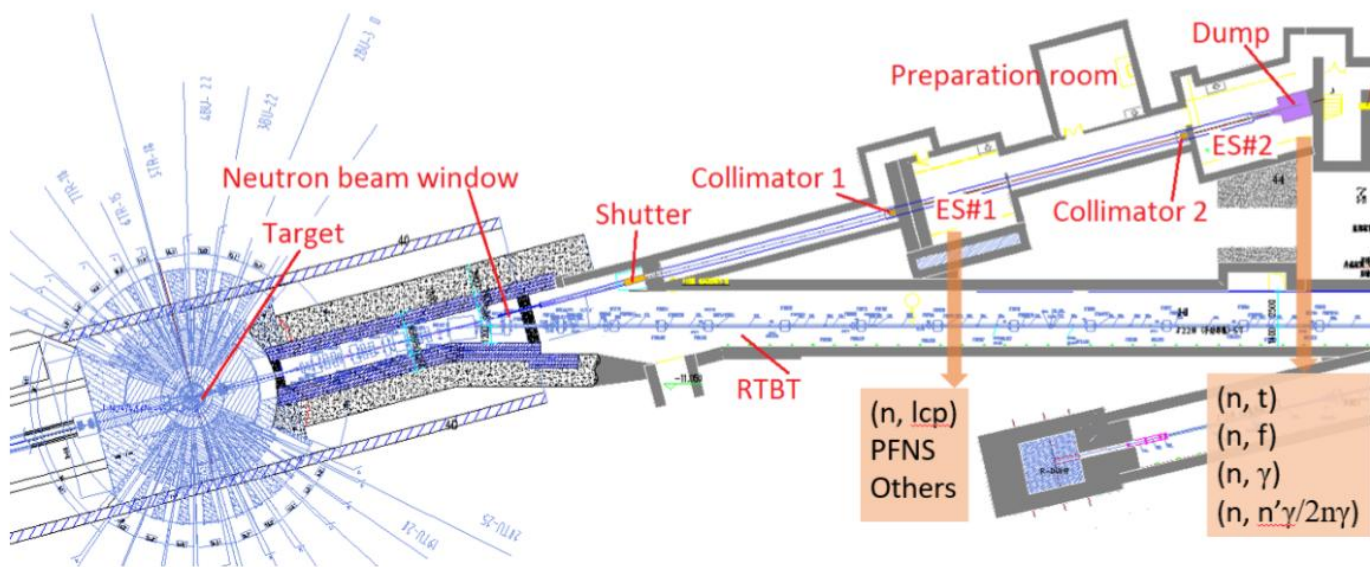
$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 和 $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 微分截面的平均相对误差[1]

实验设置

实验设置:

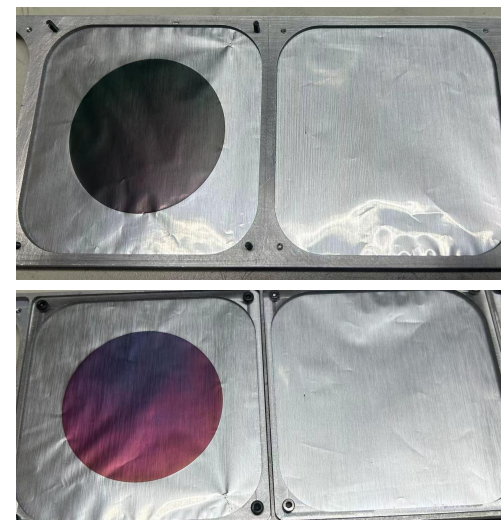
- 增加计数
- 采用更薄的样品
- 中子通量检测

中子源: CSNS back-n 厅1 准直器组合 $\Phi 50\text{ mm} - \Phi 15\text{ mm}$



CSNS Back-n 白光中子源束线示意图

样品: 双面背对背的 ^{10}B 样品



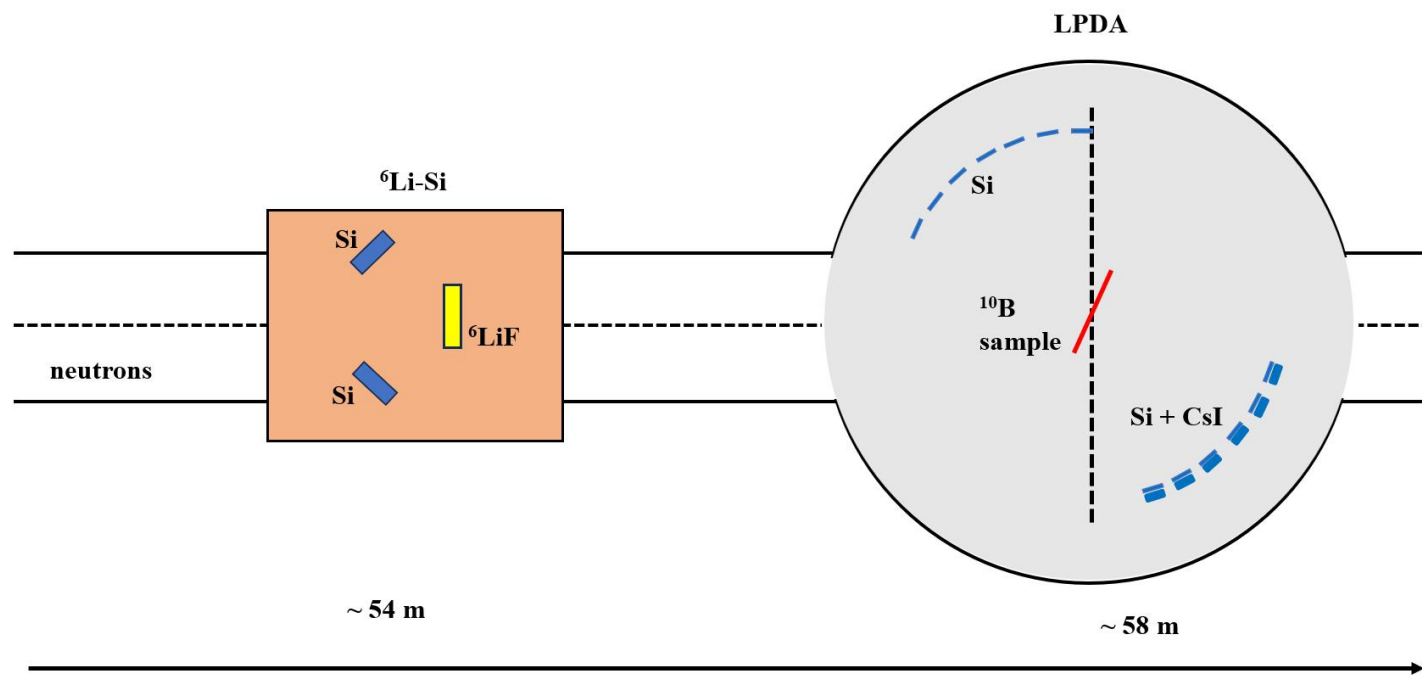
样品示意图

实验设置

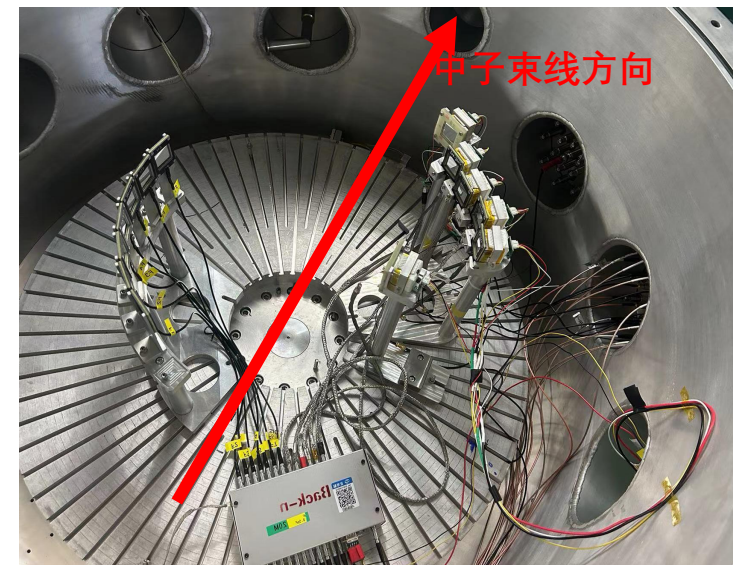
实验设置:

- 增加计数
- 采用更薄的样品
- 中子通量检测

探测器设置(LPDA和LiSi)



实验装置示意图



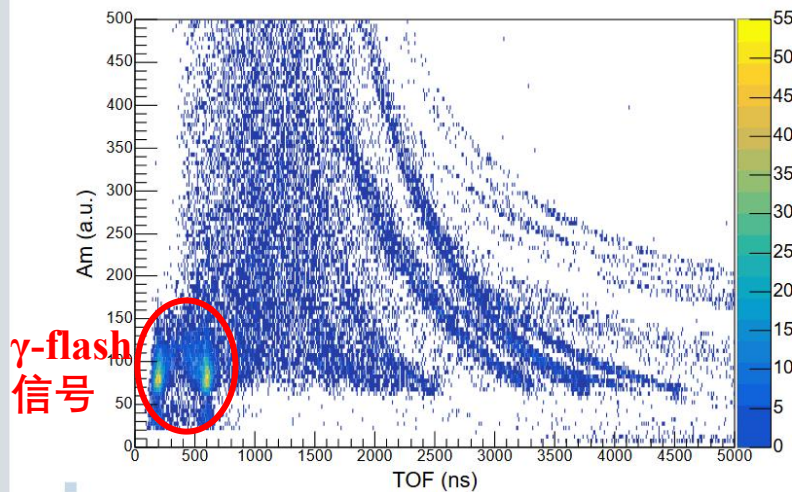
LPDA实物图

微分截面:
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_n, \theta_{lab}) = \varepsilon_{nor} \frac{N_\alpha}{I \cdot N_c \cdot \Omega \cdot \varepsilon_d}$$

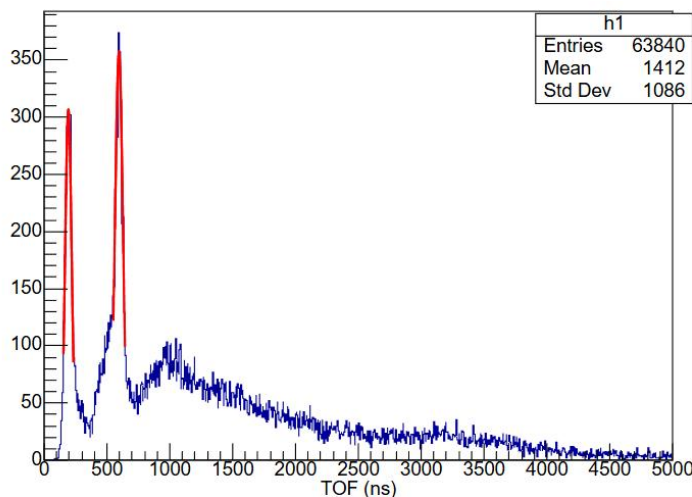
中子能量(E_n): 基于TOF方法得到

$$E_n = (\gamma - 1) \cdot m_n c^2, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, v = \frac{L}{TOF},$$

T0修正

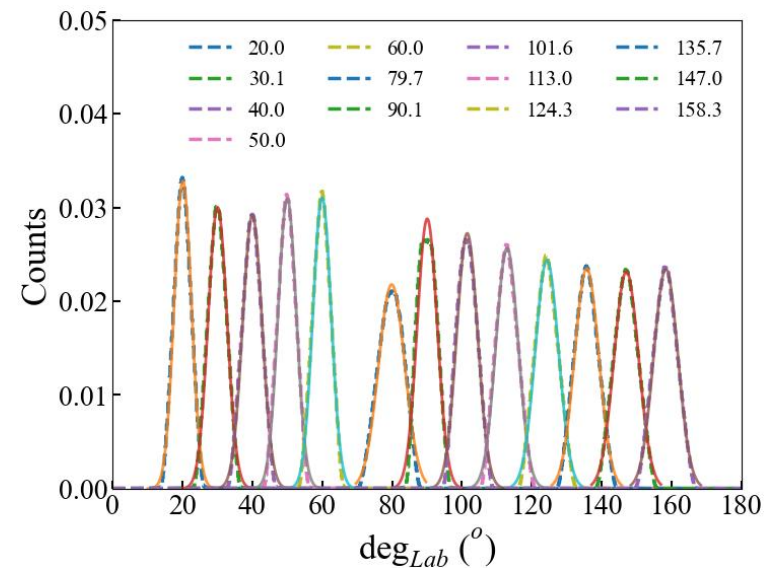


TOF-Am 二维图



TOF 统计图

角度分布(deg_{lab}): 基于模拟得到

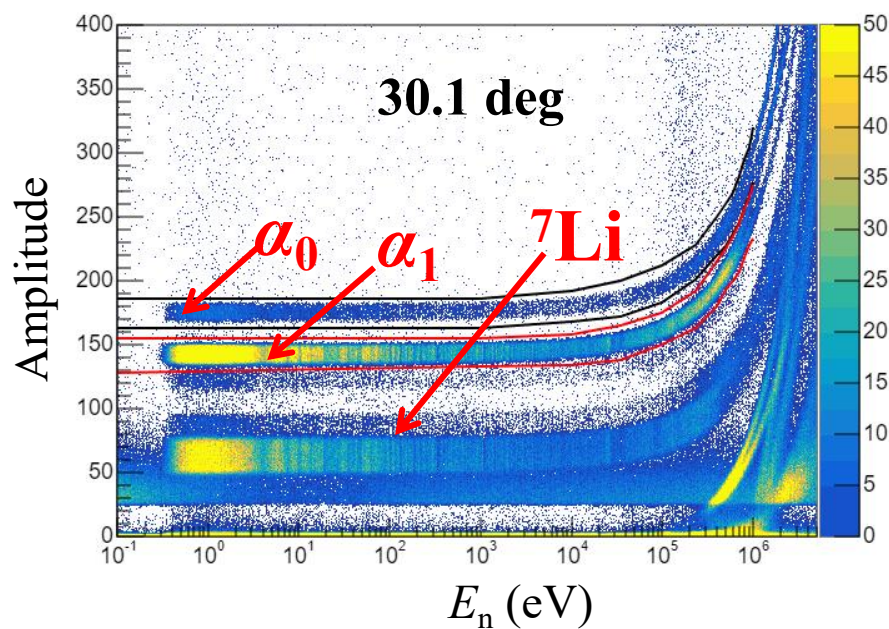


模拟探测器角度分布

数据处理

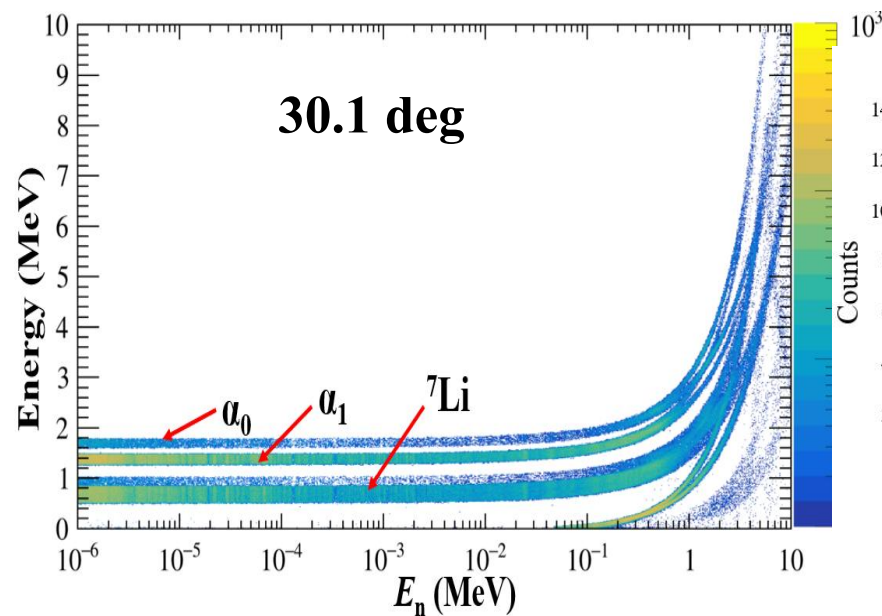
微分截面:
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_n, \theta_{lab}) = \varepsilon_{nor} \frac{N_{\alpha}}{I \cdot N_c \cdot \Omega \cdot \varepsilon_d}$$

α 粒子计数(N_{α}): 基于幅度-中子能量二维图得到

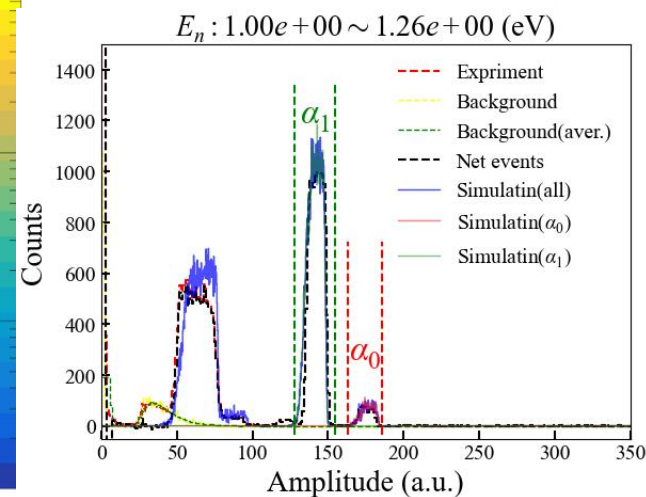


实验幅度-中子能量二维图

探测效率(ε_d): 基于模拟和实验对比得到



模拟幅度-中子能量二维图

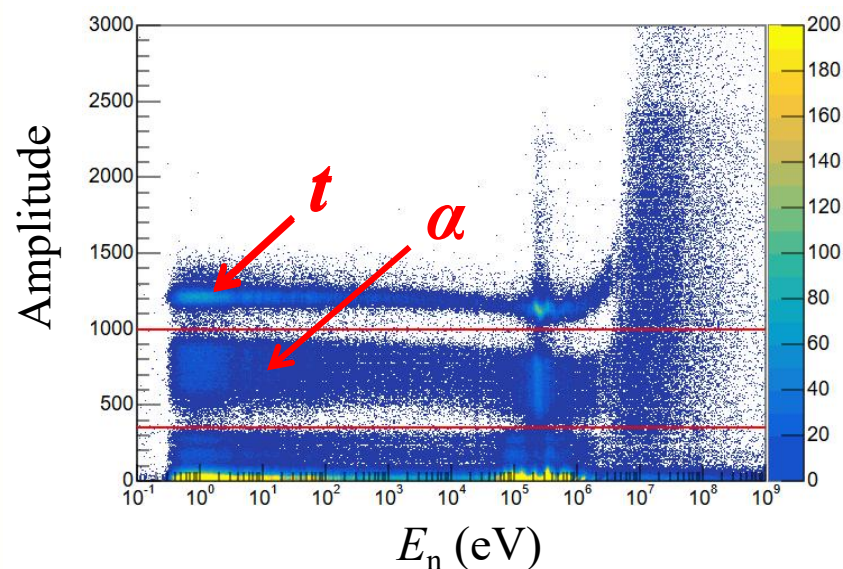


30.1deg 幅度谱

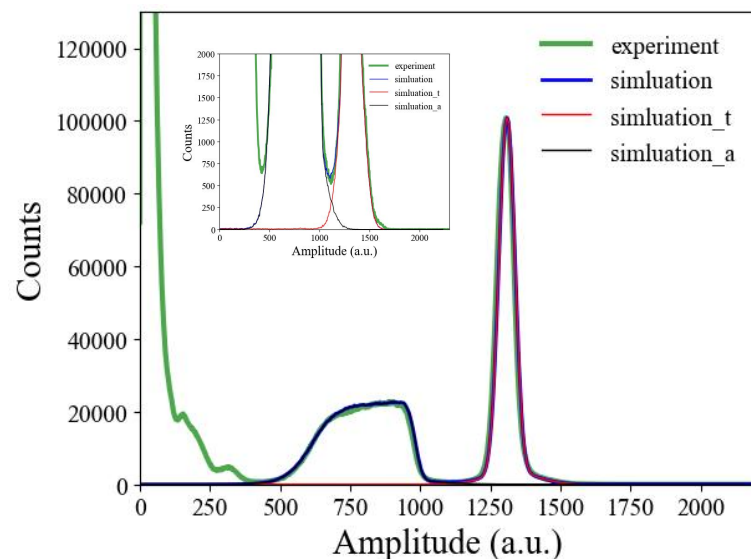
数据处理

微分截面:
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_n, \theta_{lab}) = \varepsilon_{nor} \frac{N_\alpha}{I \cdot N_c \cdot \Omega \cdot \varepsilon_d}$$

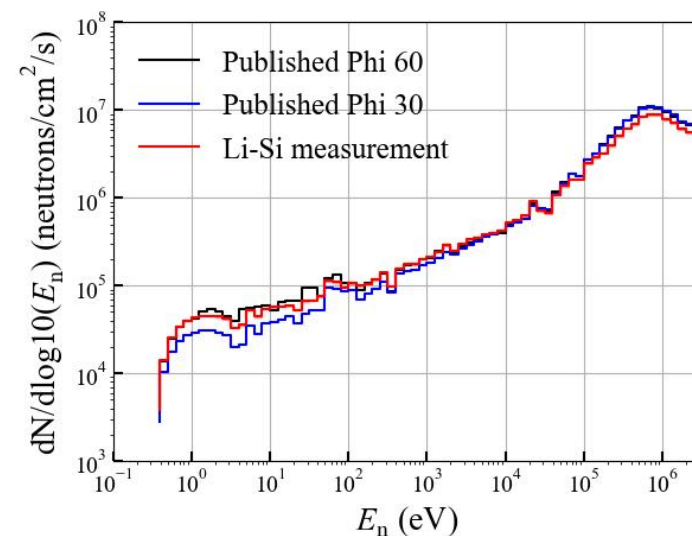
中子通量(I): 基于LiSi探测器检测和已知能谱得到



实验幅度-中子能量二维图



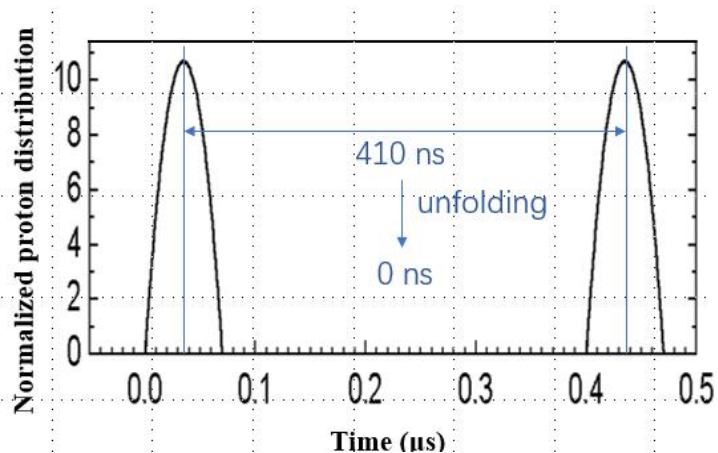
幅度谱



基于LiSi探测器得到的能谱

微分截面:
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_n, \theta_{lab}) = \epsilon_{nor} \frac{N_\alpha}{I \cdot N_c \cdot \Omega \cdot \epsilon_d}$$

α 粒子计数(N_α): 双束团反解



质子束团的双束团结构

在每一个探测角上，每一个事件都会根据劈裂成两份并分别赋予权重：

$$\begin{cases} w_{E_{n1}} = \frac{I_{E_{n1}} \sigma_{E_{n1}, \theta}^{\text{last_itera}}}{I_{E_{n1}} \sigma_{E_{n1}, \theta}^{\text{re}} + I_{E_{n2}} \sigma_{E_{n2}, \theta}^{\text{last_itera}}} \\ w_{E_{n2}} = \frac{I_{E_{n2}} \sigma_{E_{n2}, \theta}^{\text{last_itera}}}{I_{E_{n1}} \sigma_{E_{n1}, \theta}^{\text{last_itera}} + I_{E_{n2}} \sigma_{E_{n2}, \theta}^{\text{last_itera}}} \end{cases}$$

通过迭代进行反解

核数(N_c): 通过制靶已知

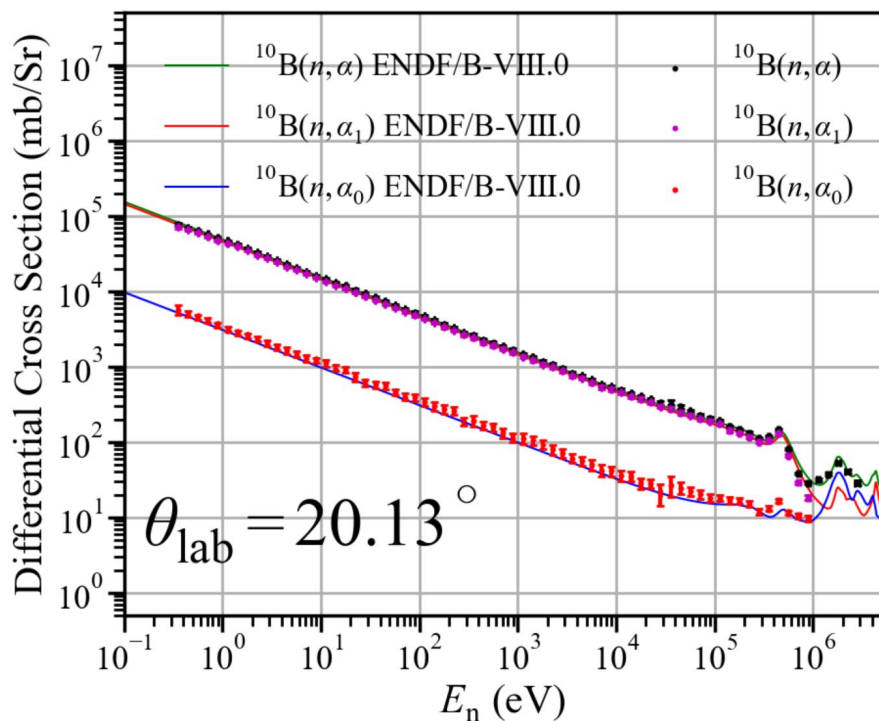
立体角(Ω): 通过计算得到

归一化系数(ϵ_{nor}): 在0.5 eV ~ 1.5 eV 利用标准截面归一得到

实验结果

微分截面结果:

本实验得到了 0.3 eV ~ 3.0 MeV 70个能点下 13个角度的 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应微分截面



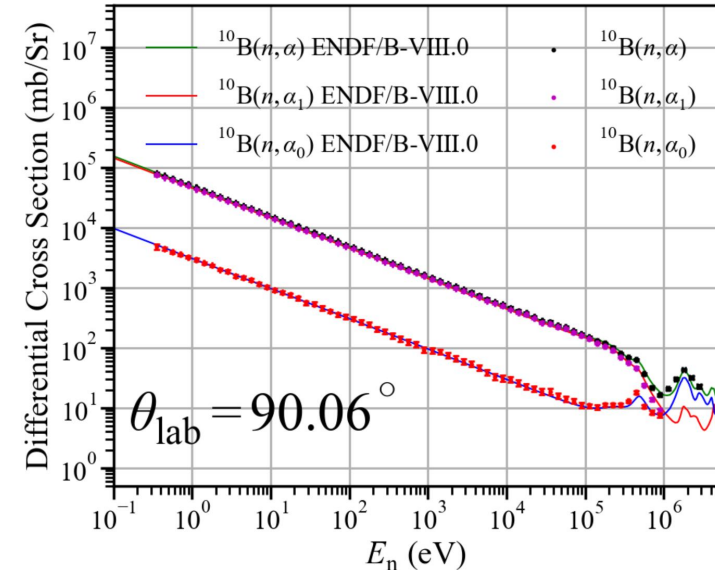
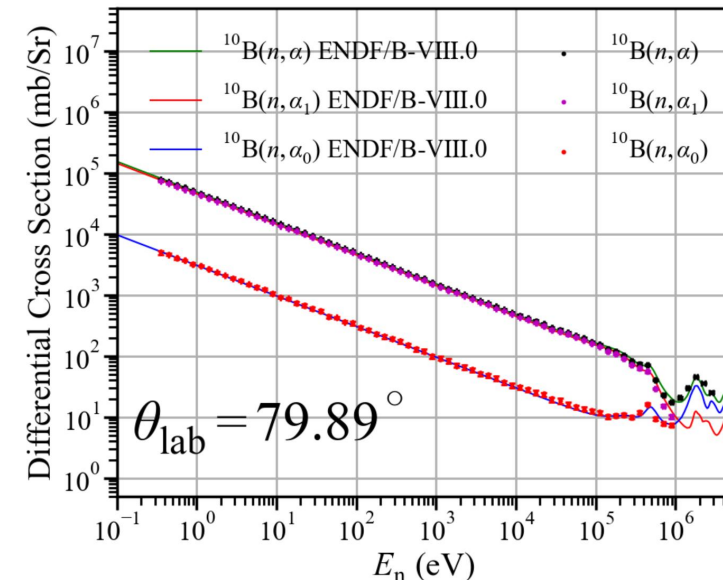
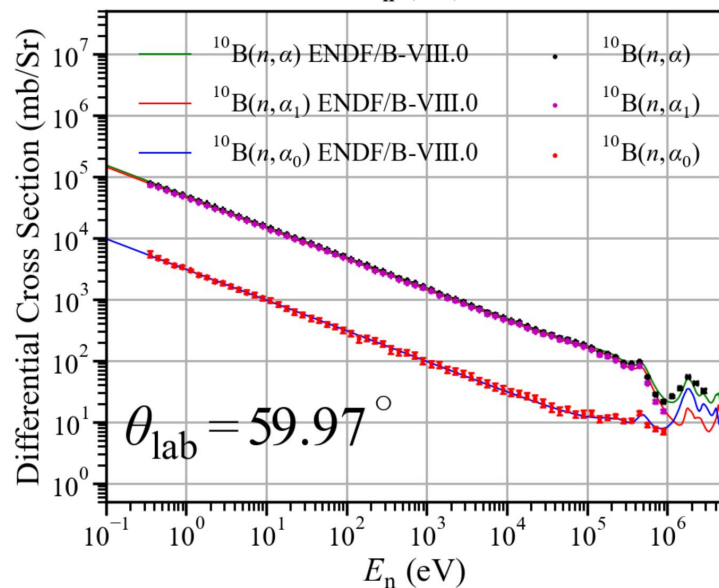
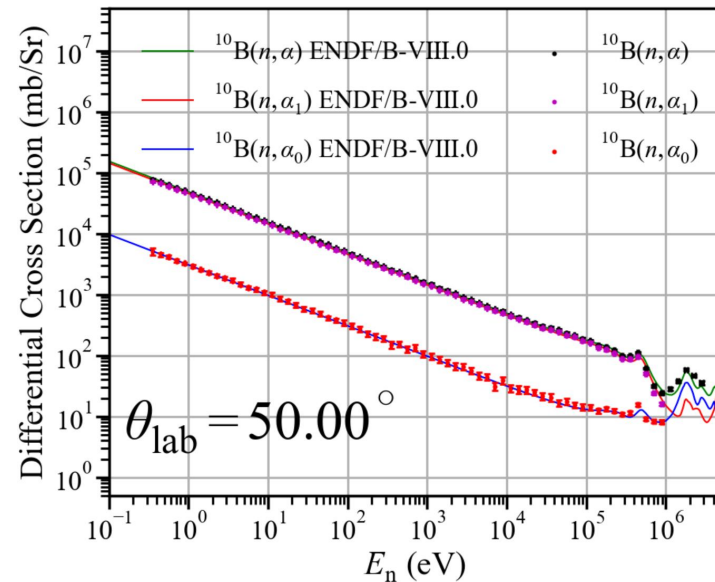
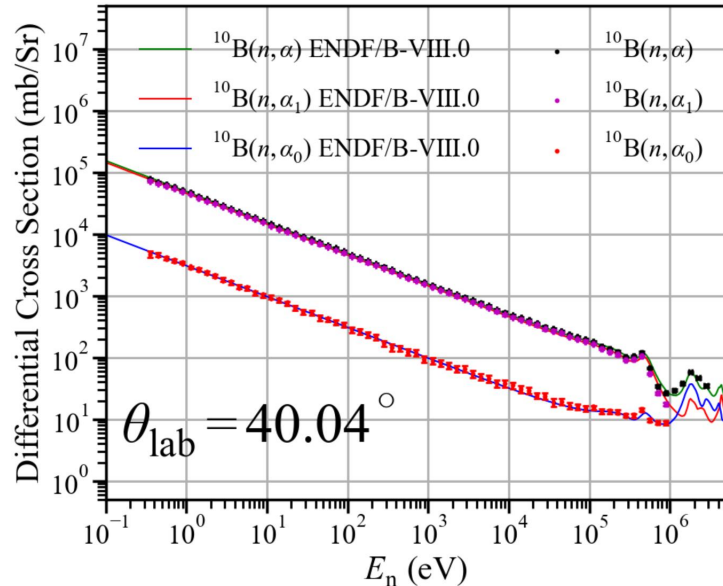
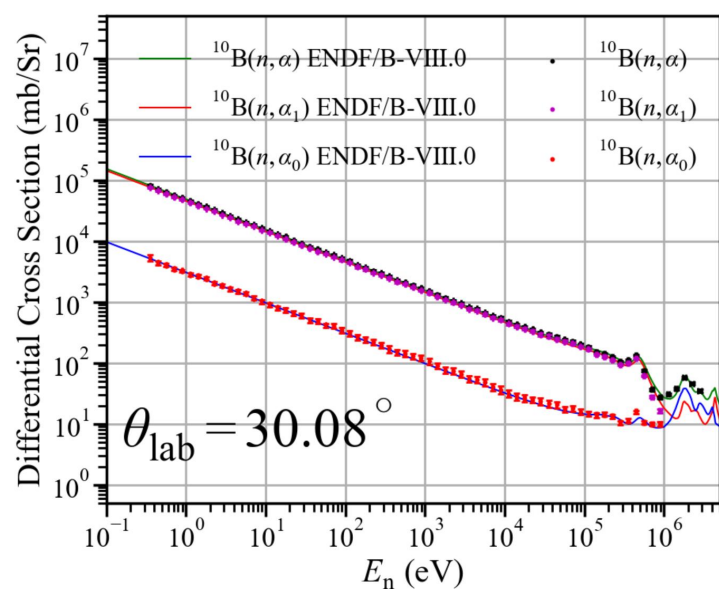
$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 微分截面和标准截面对比

误差分析:

误差来源	数值(%)
中子注量	1.5 ~ 3.0
统计误差	0.2 ~ 9.8 ^a (17.8 ^b)
解谱误差	0.2 ~ 10.0 ^a (18.3 ^b)
事件区选取误差	< 0.3
本底误差	0.2 ~ 2.5 ^a (20.1 ^b)
探测效率误差	< 0.1
核数误差	1.0
立体角误差	< 0.4
归一误差	1.3
总误差	2.0 ~ 15.0 ^a (30.1 ^b)

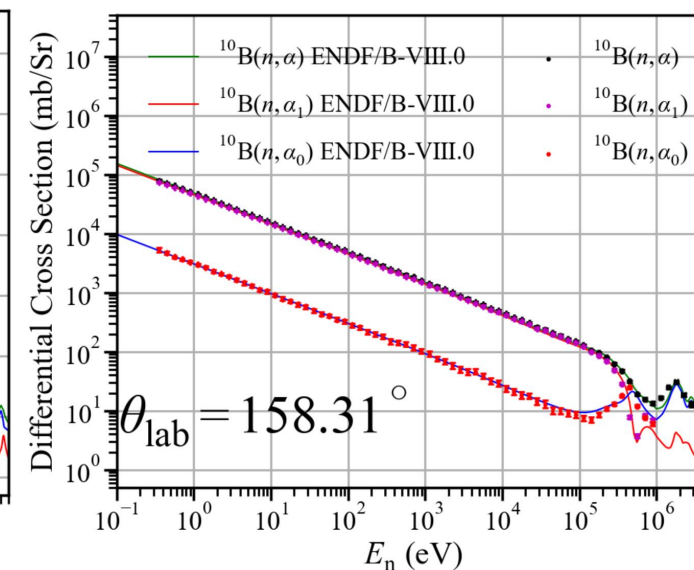
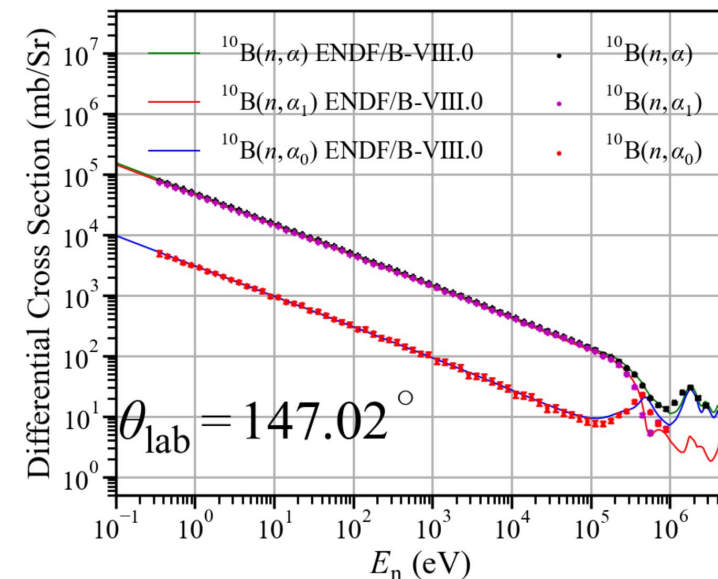
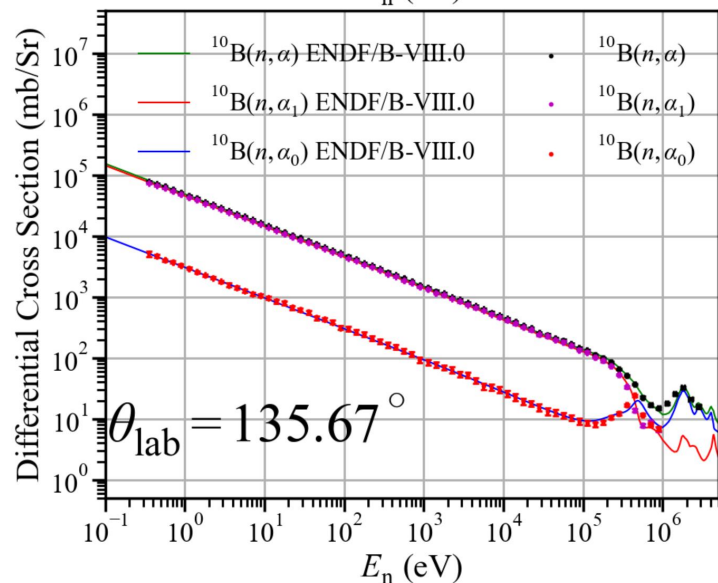
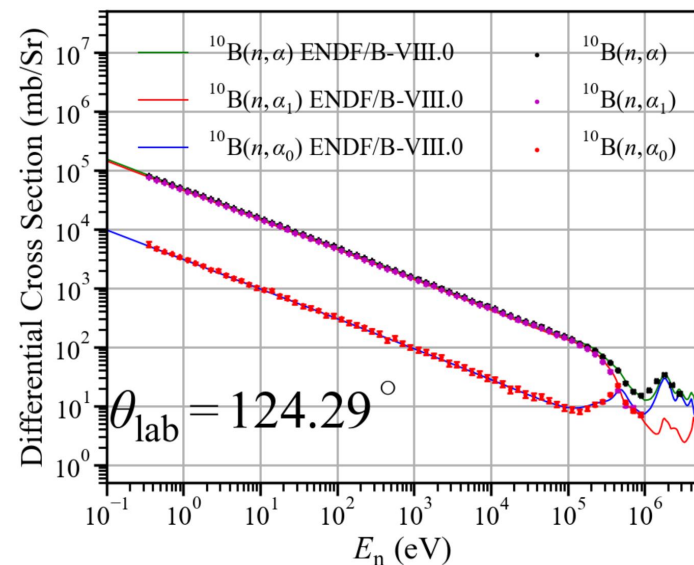
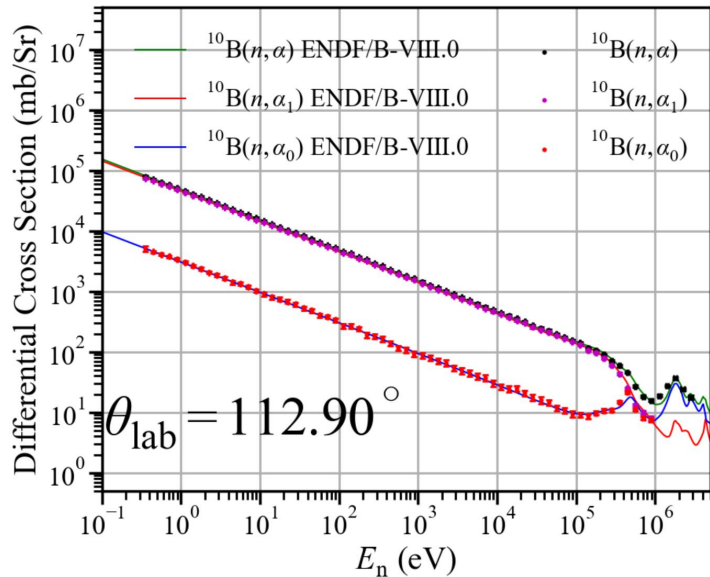
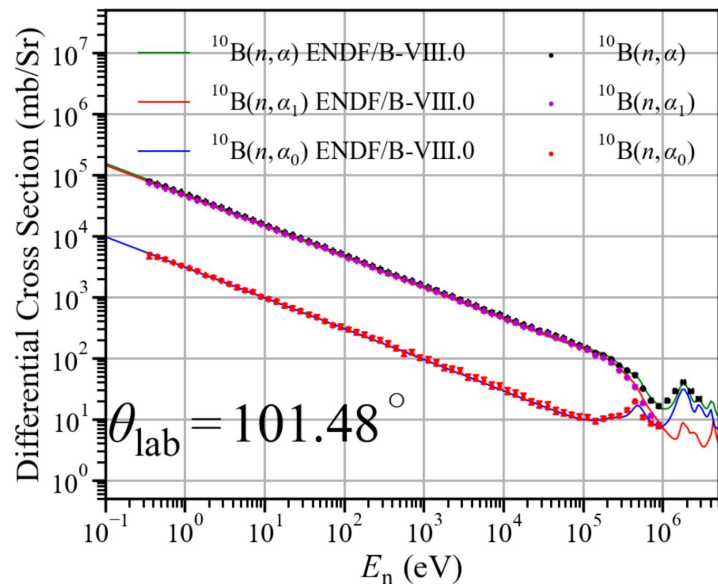
a: >95%的数据. b: <5%的数据.

实验结果



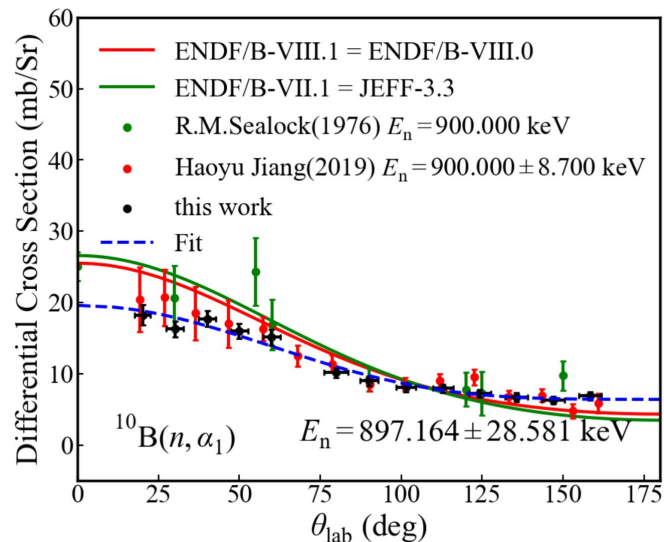
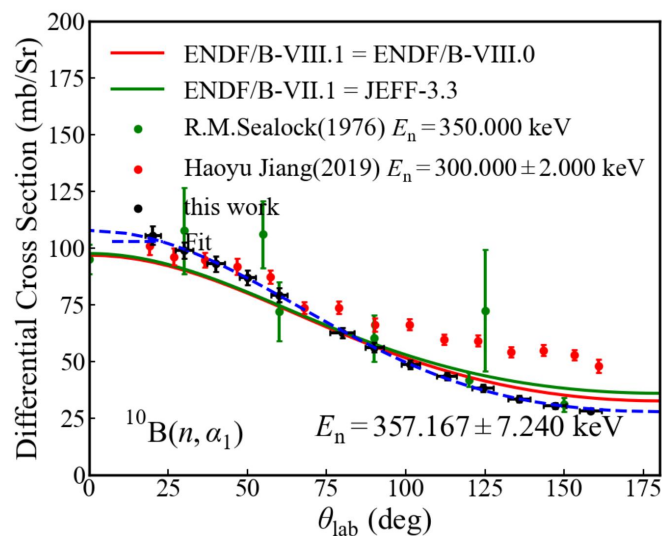
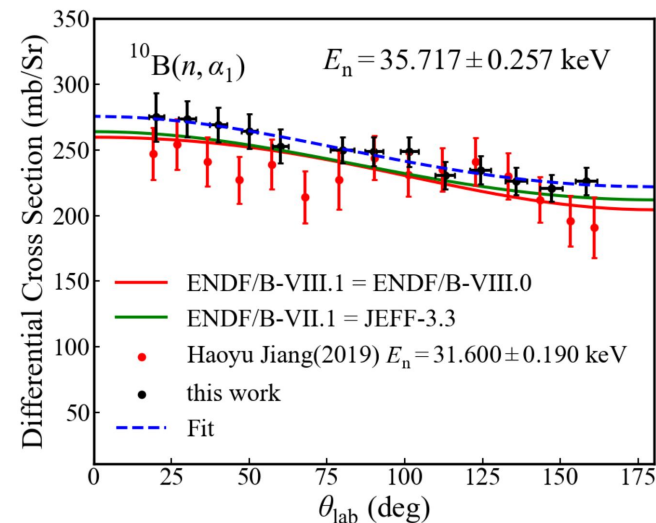
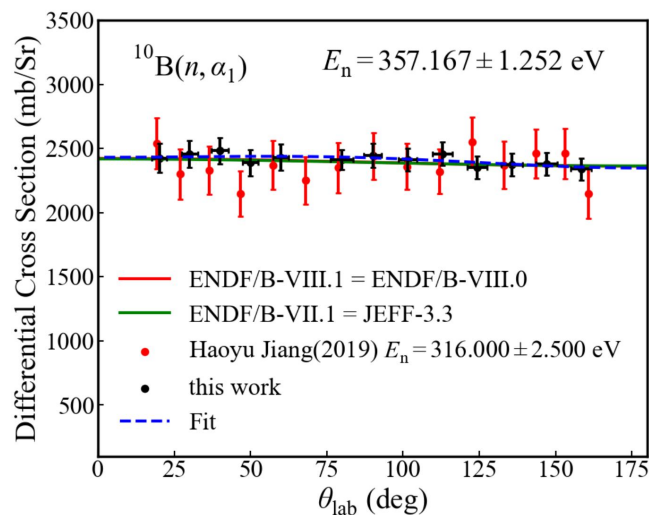
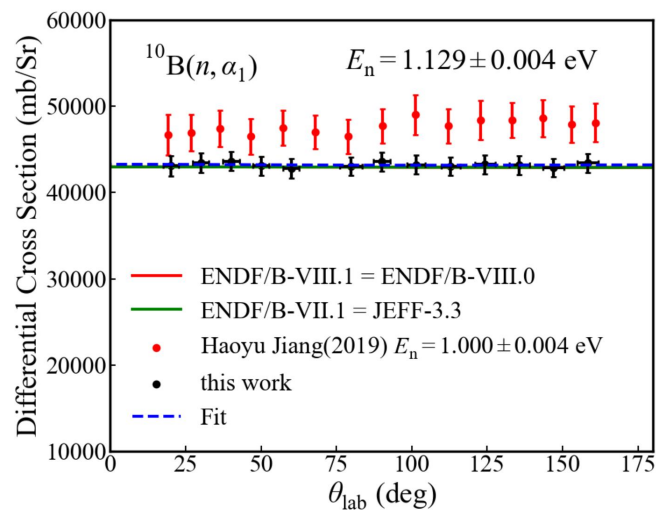
$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 微分截面和标准截面对比

实验结果



$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 微分截面和标准截面对比

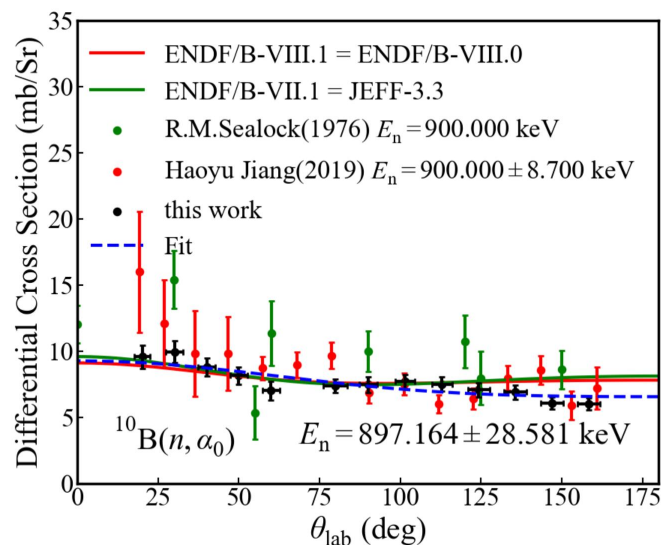
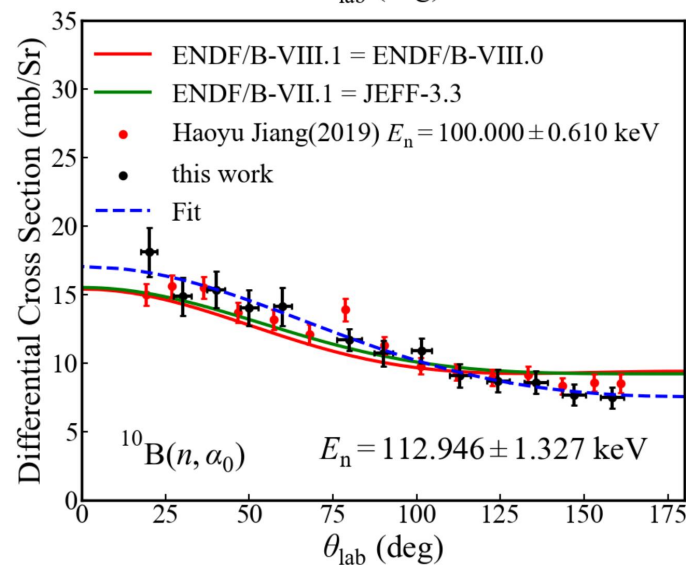
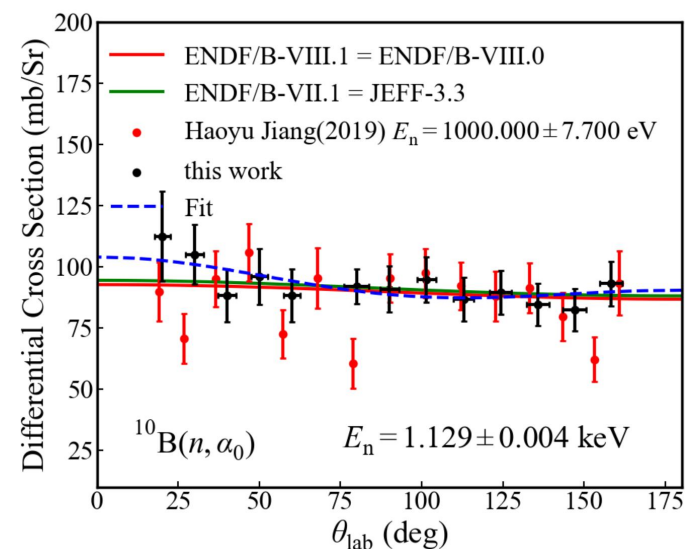
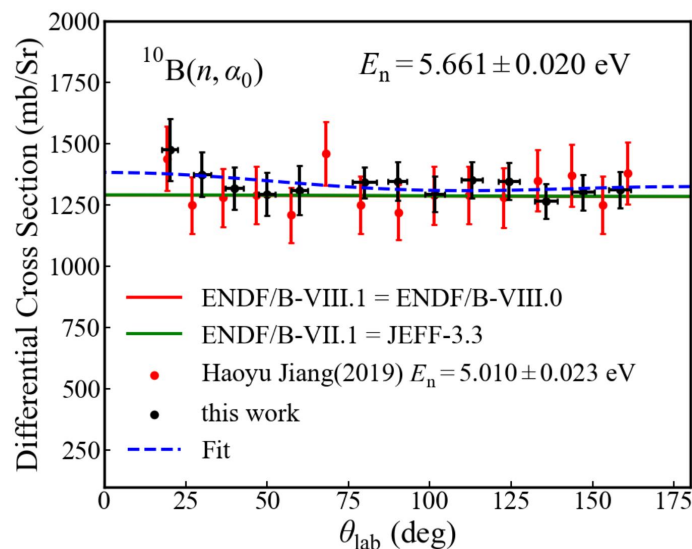
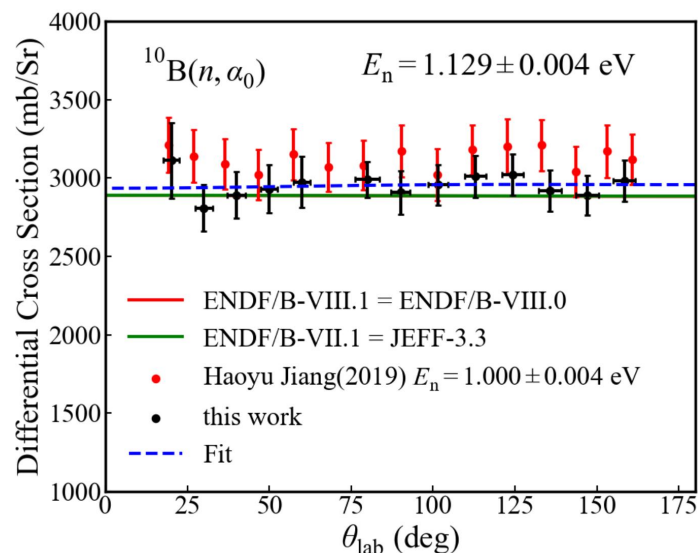
实验结果



➤ 验证了2019年的实验结果

➤ 提高了测量精度

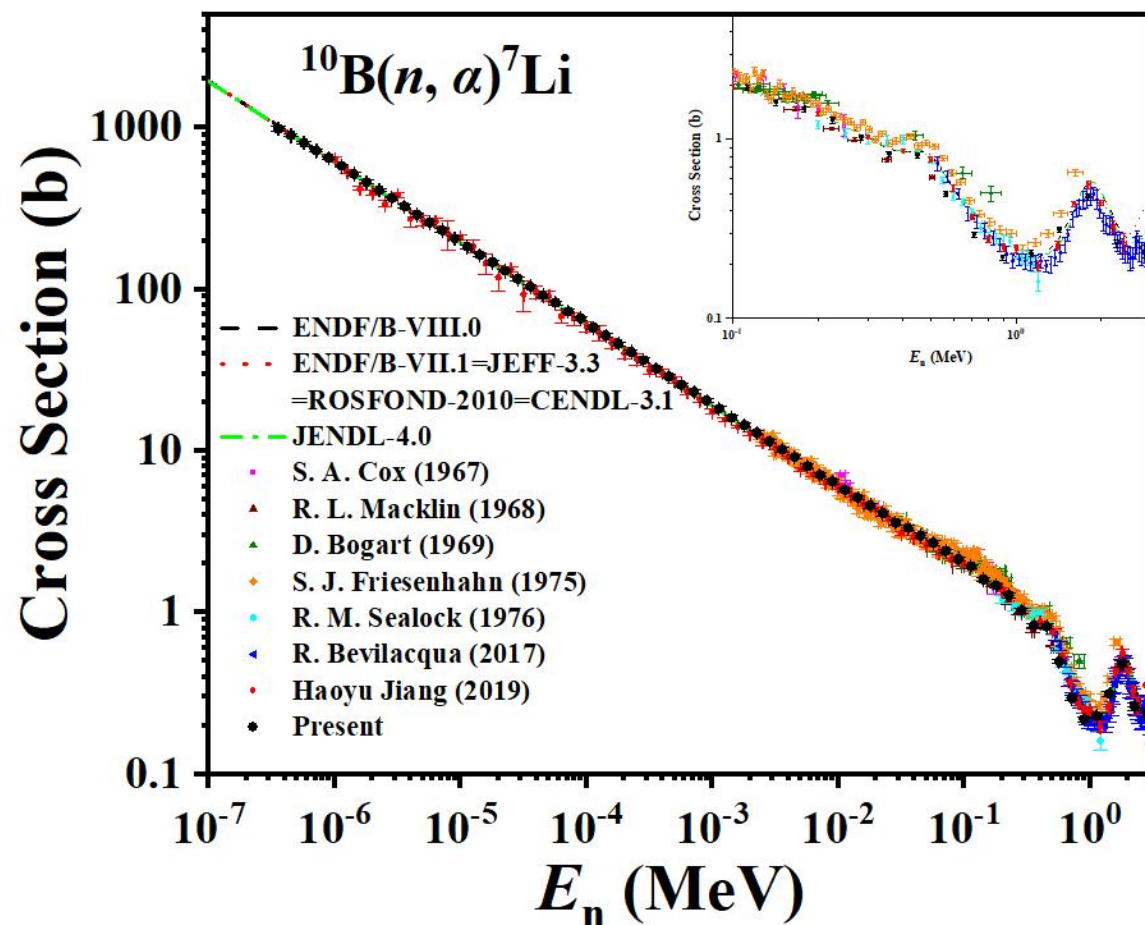
实验结果



➤ 验证了2019年的实验结果

➤ 提高了测量精度

积分截面:



$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 截面结果

误差分析:

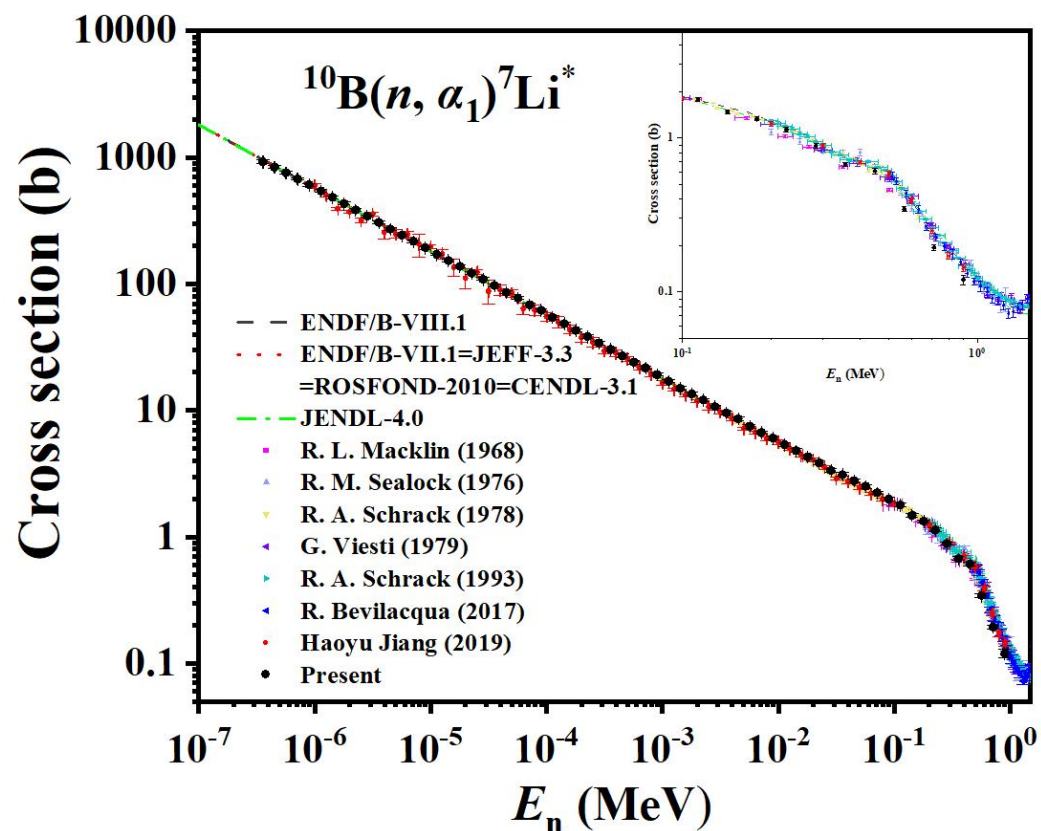
误差来源	数值(%)
中子注量	1.5 ~ 3.0
统计误差	0.2 ~ 2.6
解谱误差	0.2 ~ 3.0
事件区选取误差	< 0.3
本底误差	0.2 ~ 1.4
探测效率误差	< 0.1
核数误差	1.0
立体角误差	< 0.4
拟合误差	0.2 ~ 2.0 ^a (7.2 ^b)
归一误差	1.3
总误差	2.0 ~ 4.0 ^a (7.8 ^b)

a: $E_n < 500$ keV, $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 和 $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}$

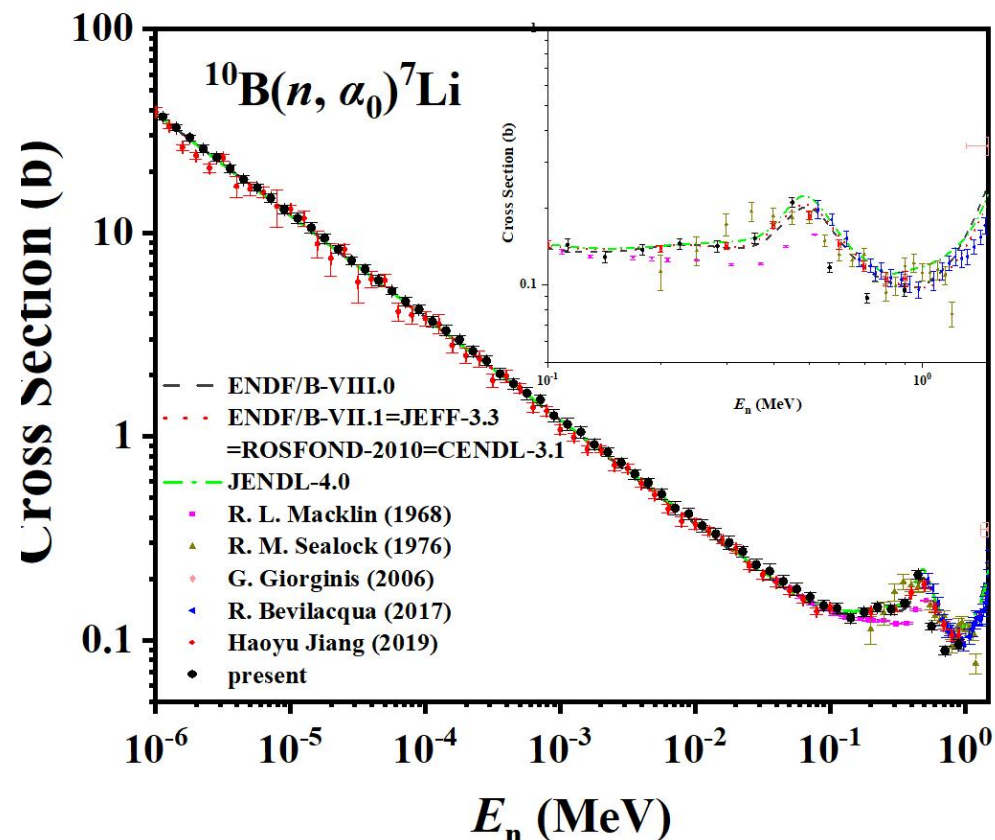
b: 其它

积分截面:

本实验得到了 0.3 eV ~ 1.0 MeV 65个能点的 $^{10}\text{B}(n, \alpha_0)^7\text{Li}$ 和 $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}$ 反应截面



$^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}$ 截面结果



$^{10}\text{B}(n, \alpha_0)^7\text{Li}$ 截面结果



请各位老师批评指正！

