

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

第三届“粤港澳”核物理论坛

CSNS Back-n低能区能谱测量研究

邱奕嘉，陈永浩，唐生达，李强

中国科学院高能物理研究所
散裂中子源科学中心



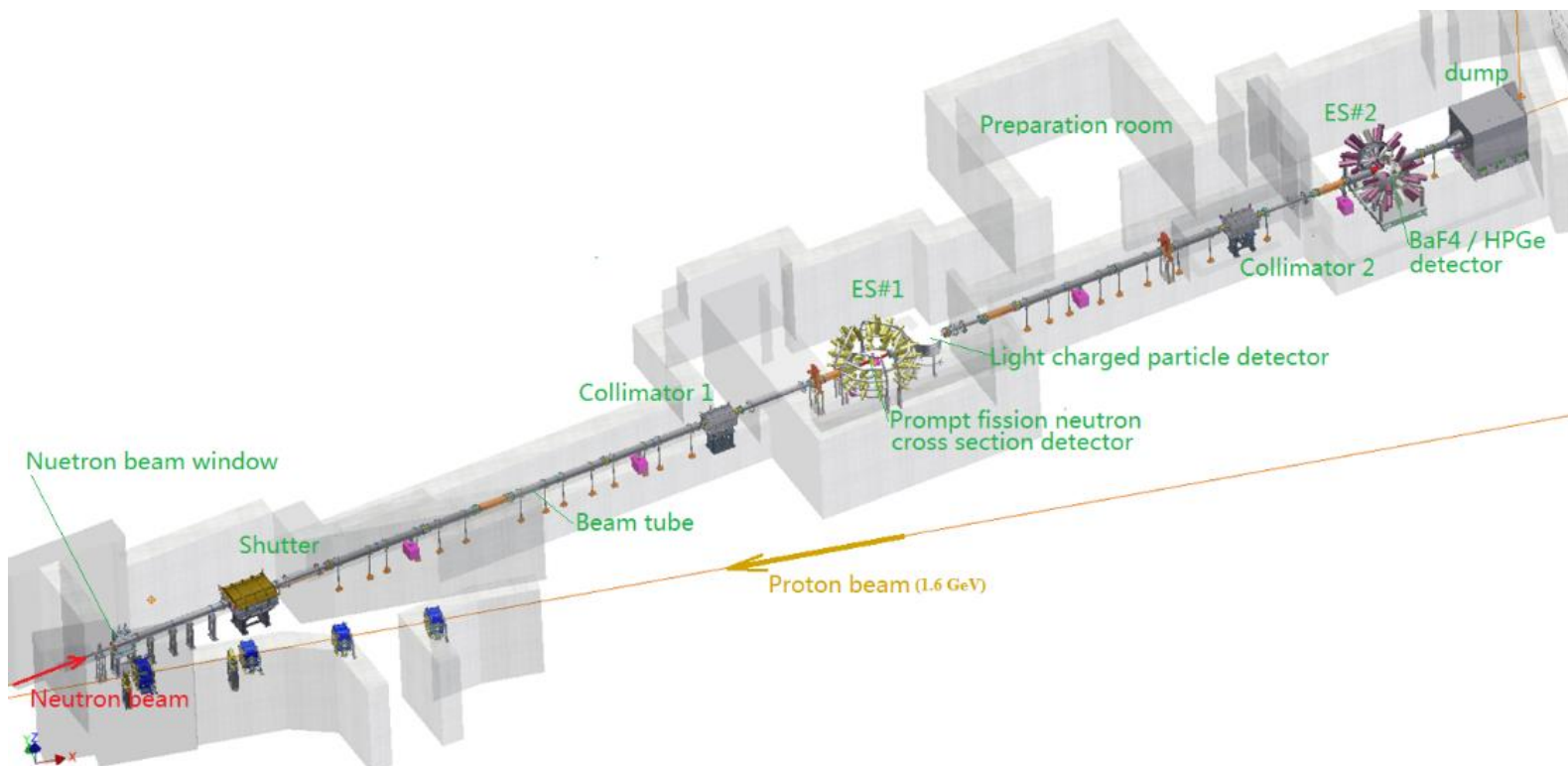
目 录

- 研究动机
- 研究内容
- 研究结论

目 录

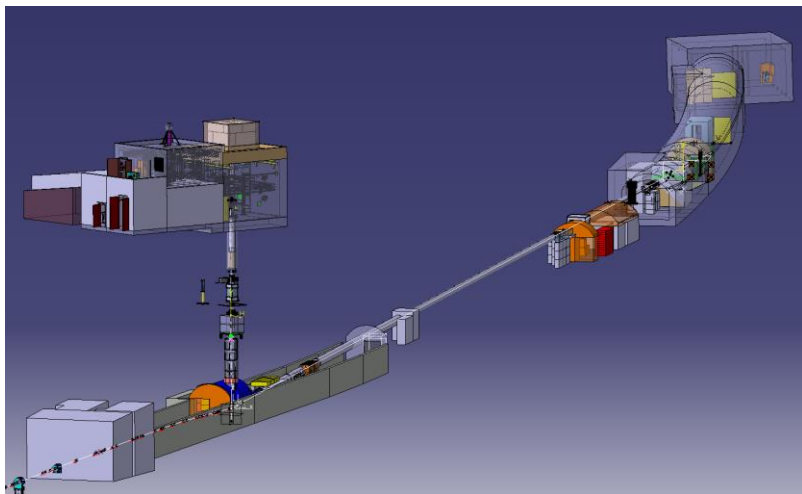
- 研究动机
- 研究内容
- 研究结论

中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, 简称CSNS) 反角白光中子实验装置 (Back-n) 具有能量范围宽(0.3 eV到300 MeV)、中子通量高($1.75 \times 10^7 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ @ES1)、能量分辨率好(0.32%- 4.9% @ES2)等特点。基于该平台两个实验终端已经开展了大量基础科学及应用技术研究。



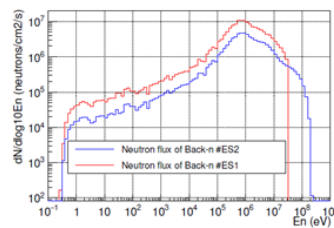
- 中子能谱是白光中子装置最重要的束流特征参数和基础数据
- 中子能谱是基于装置的可行性研究与方案设计的重要指引
- 中子能谱是开展高精度核数据测量的先决条件

CERN n_TOF装置自2000年开始运行至今，一直在定期测量能谱

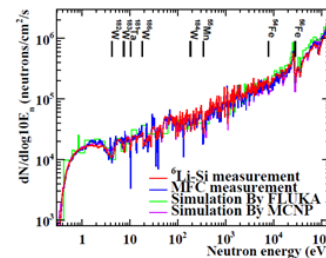


从2018年至今长期开展能谱测量研究，不断用新方法、新手段提高测量可靠性与精度

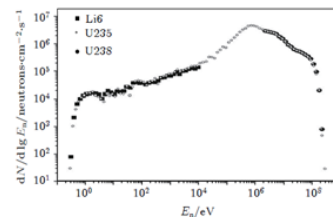
Yonghao Chen et al., EPJA
(2019) 55: 115
Yonghao Chen et al., EPJ WC
(2030) 239: 17018



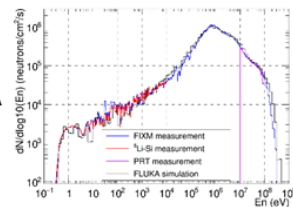
Yijia Qiu et al., NIMA
(Revision)



鲍杰等, 物理学报 (2019)
68: 080101



Yonghao Chen et al., EPJA
(2024) 60: 63



- 能谱测量的基本技术路线和研究方法已掌握
- Back-n能区非常宽泛（跨越10个量级）
- Back-n拥有2个终端及多种束线配置(36种组合)，需要开展系统性、整体性研究
- 随着研究的不断深入，要从细节上提高精度

Jing-Yu Tang, et al. NST (2021) 32: 11

Table 1 Four sets of standard beam spots and neutron fluxes with relevant collimator apertures at Back-n (100 kW)

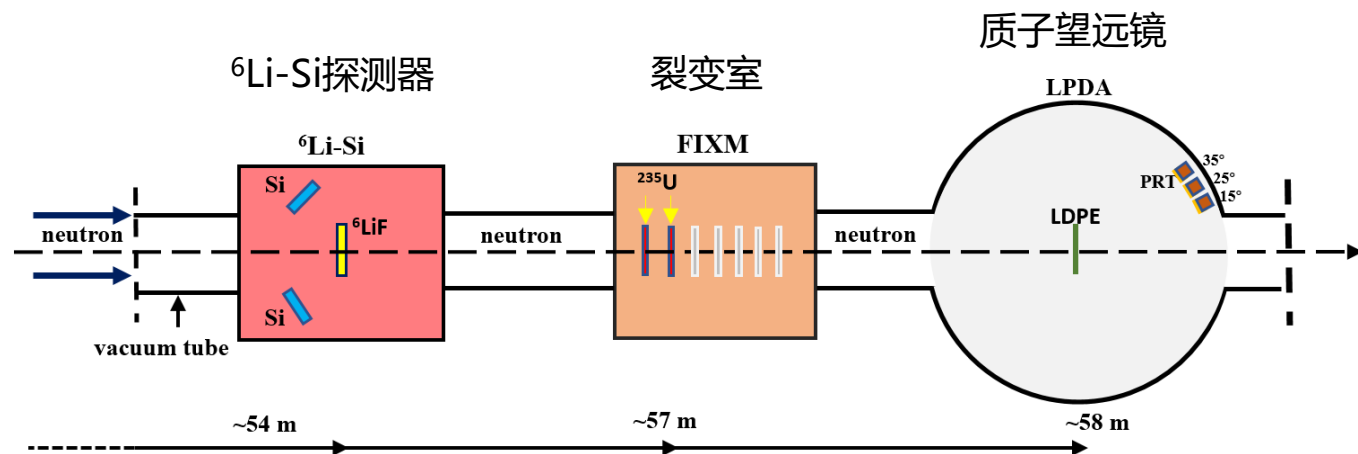
Mode	Shutter (mm)	Coll#1 (mm)	ES#1 spot (mm)	ES#1 flux (n/cm ² /s)	Coll#2 (mm)	ES#2 spot (mm)	ES#2 flux (n/cm ² /s)
Low intensity	Φ3	Φ15	Φ15	1.3×10^5	Φ40	Φ20	4.6×10^4
Small spot	Φ12	Φ15	Φ20	1.6×10^6	Φ40	Φ30	6.1×10^5
Large spot	Φ50	Φ50	Φ50	1.8×10^7	Φ58	Φ60	6.9×10^6
Imaging	78 × 62	76 × 76	75 × 50	2.0×10^7	90 × 90	90 × 90	8.6×10^6

所有可能的终端和准直器配置：36种组合。

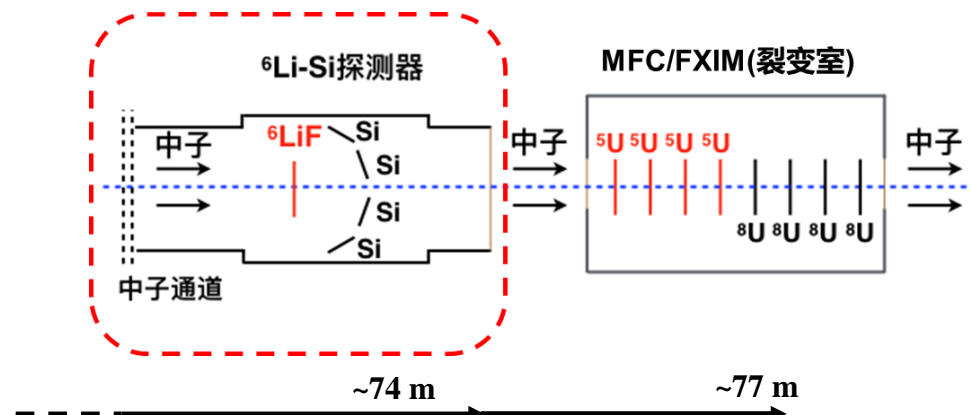
目 录

- 研究动机
- **研究内容**
- 研究结论

能谱测量探测器@ES#1

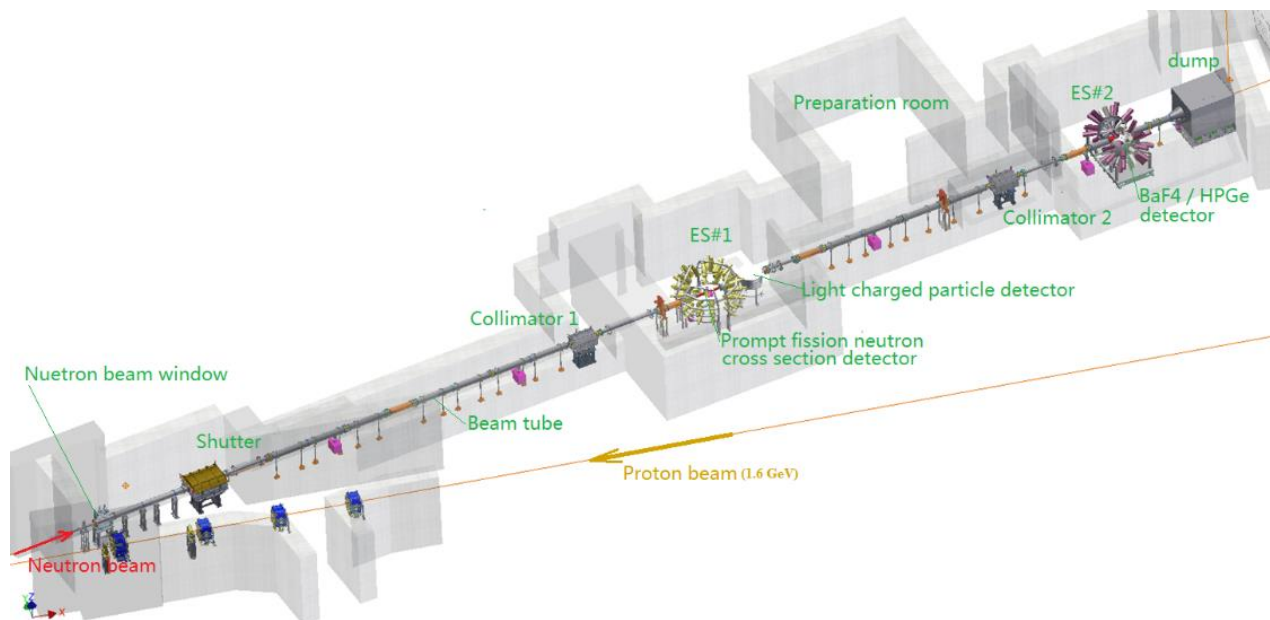


能谱测量探测器@ES#2



Detectors and induced reactions

Detectors	Samples and reactions	Energy range
$^6\text{Li-Si}$	$^6\text{LiF}/^6\text{Li} \cdot (\text{n}, \text{t})$	0.5 eV-150 keV
FIXM	$^{235}\text{U}/^{235}\text{U} \cdot (\text{n}, \text{f})$	150 keV-300 MeV
PRT	$\text{LDPE}/\text{H} \cdot (\text{n}, \text{n})$	10 MeV-70 MeV



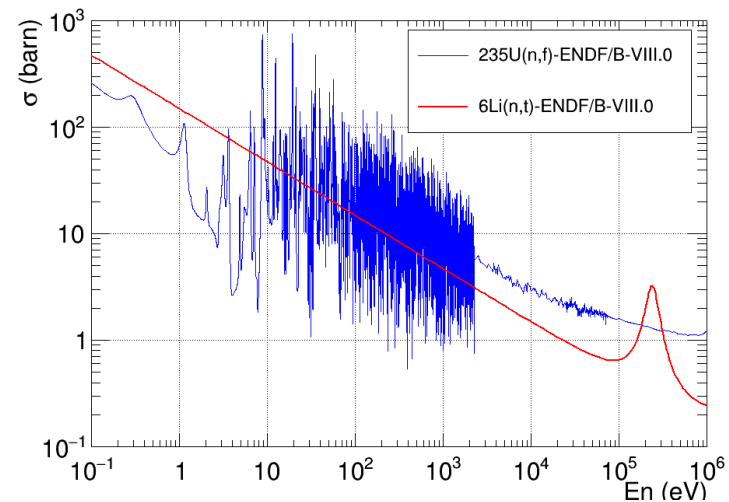
Back-n ES#2低能区 (150 keV以下) 3种束斑下的能谱测量研究:

中子开关直径 (mm)	准直器1 (mm)	准直器2 (mm)	束斑
50	50	58	大束斑
50	15	40	组合束斑
12	15	40	小束斑

基于 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 中子转换反应的测量, 弥补 ${}^{235}\text{U}(n, f)$ 反应在低能区的不足(非标准截面、共振密集)



${}^6\text{LiF}+8$ 片各向同性分布的Si探测器

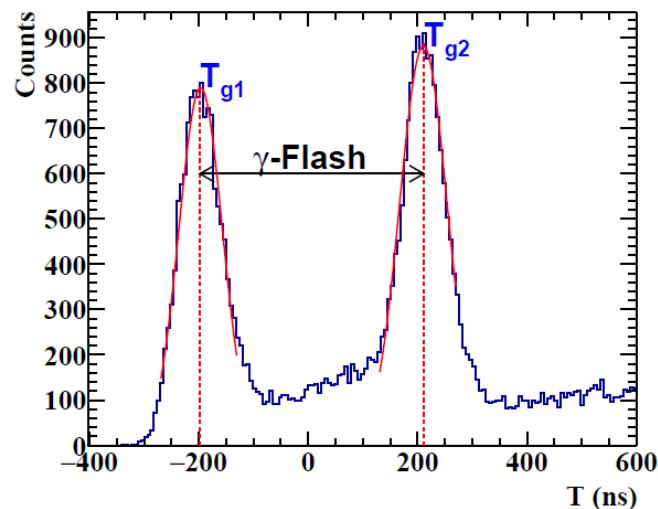


- 测量原理

$$\Phi(E_n) = \frac{R(E_n)}{\sigma(E_n)\varepsilon(E_n)N_s}$$

- 中子飞行时间方法 (TOF) 确定中子能量

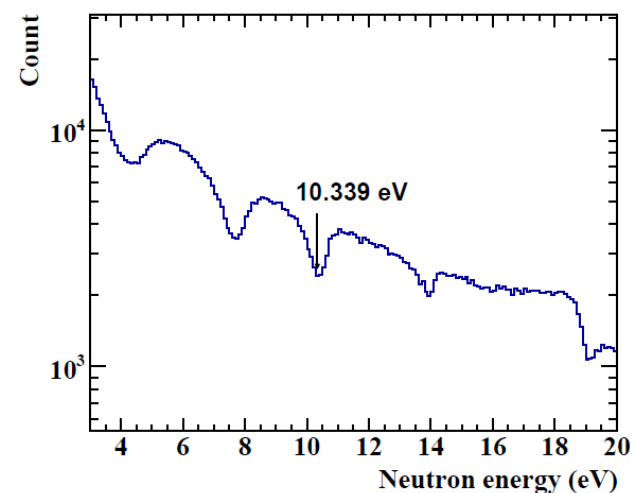
γ-flash事件刻度 T_0



$$v = \frac{L}{TOF} = \frac{L}{T - T_0}$$

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

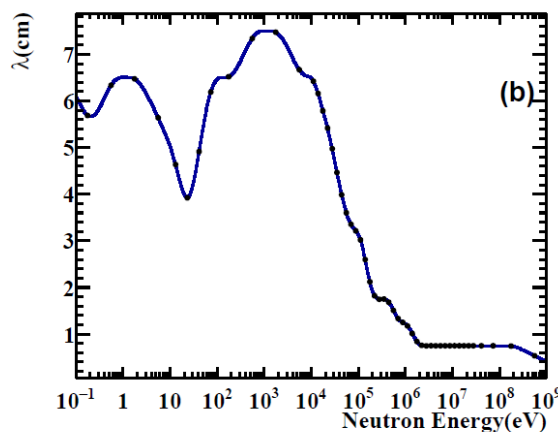
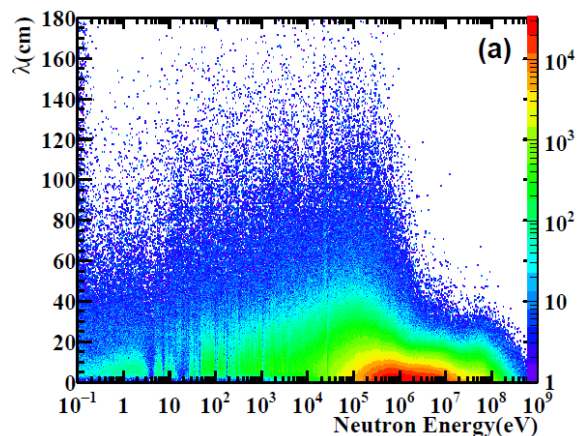
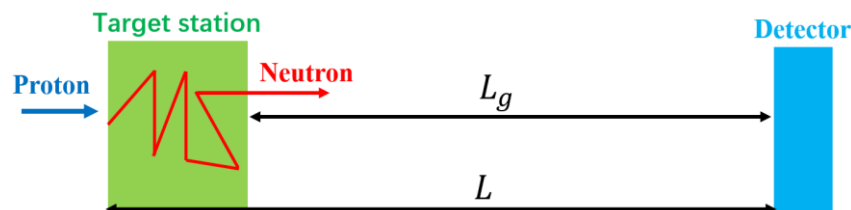
^{181}Ta 吸收谷刻度飞行距离



● 慢化长度修正飞行距离

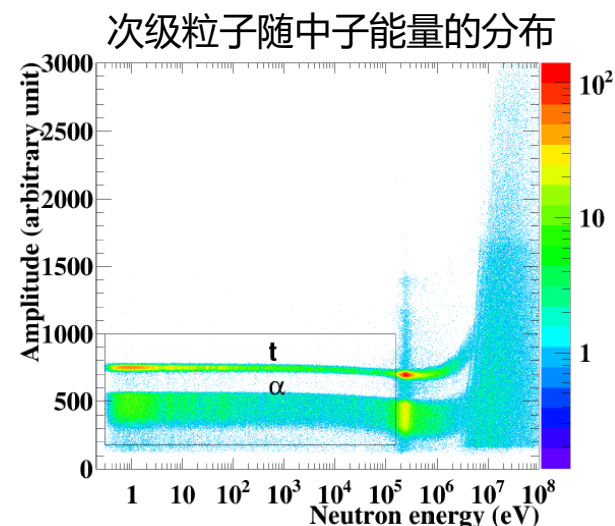
基于散裂反应的白光中子**并非严格意义上的匀速飞行**，中子最初产生时在厚靶内发生多重散射（随机过程），离开靶体后才开始匀速飞行！
将多重散射慢化过程等效为长度，从而运用飞行时间方法

$$L = L_0 + \lambda$$



技术细节见于唐生达报告

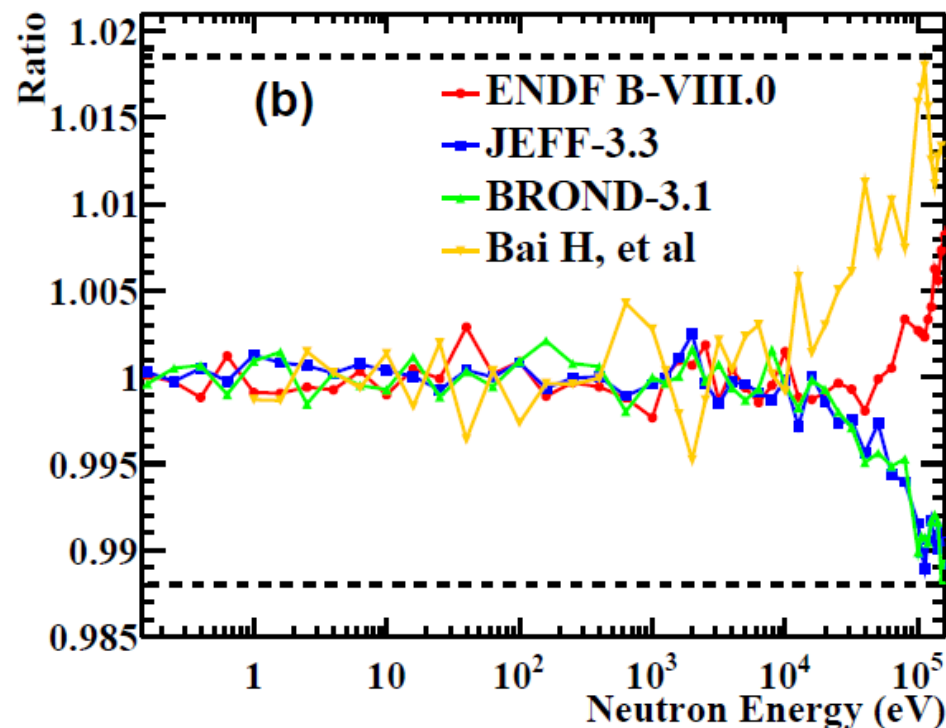
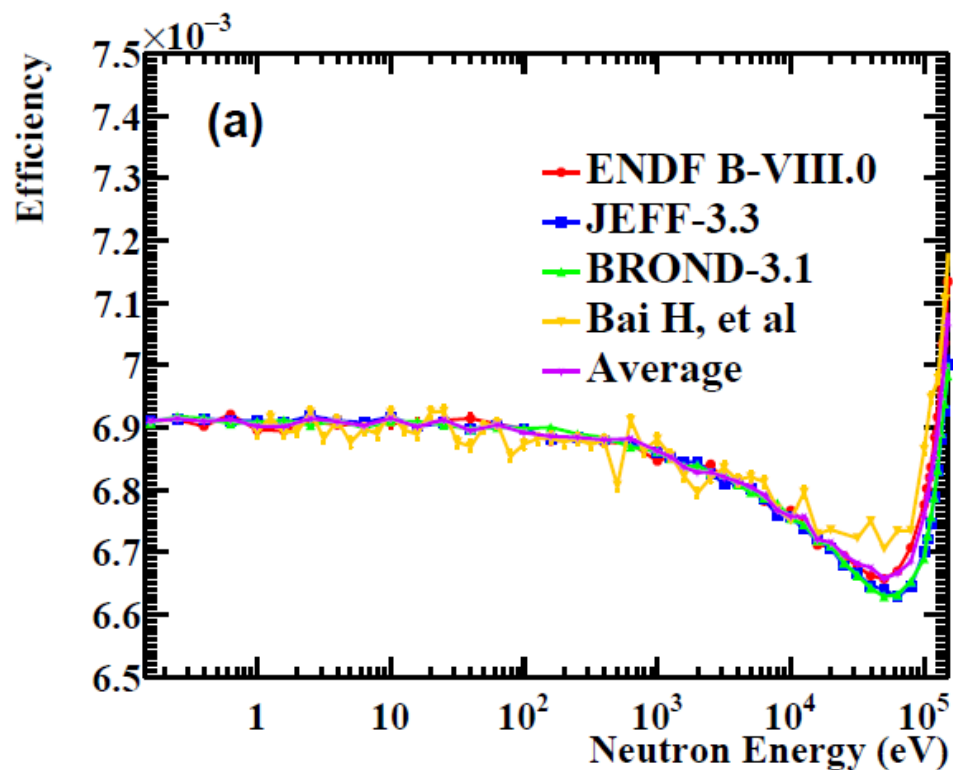
慢化长度的G4模拟(能量分辨率函数)



● 探测效率模拟

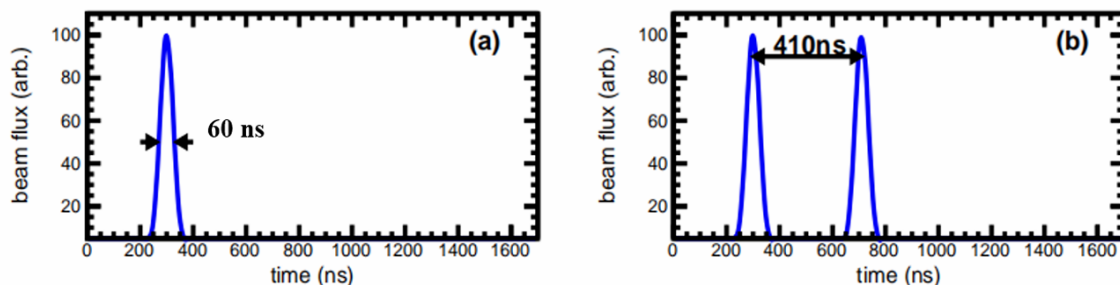
基于Geant4的探测效率模拟：

- ✓ 基于不同评价数据库模拟
- ✓ 使用实验测量角分布数据
(*H. Bai et al. CPC (2020) 44: 014003*)
- ✓ 1 keV以上探测效率明显受角分布各向异性影响
- ✓ 根据不同数据结果评价效率系统误差(3%)



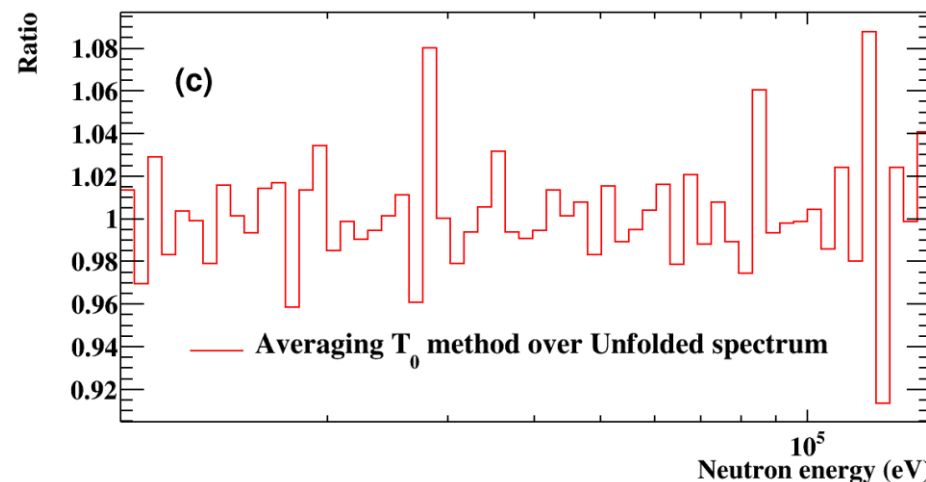
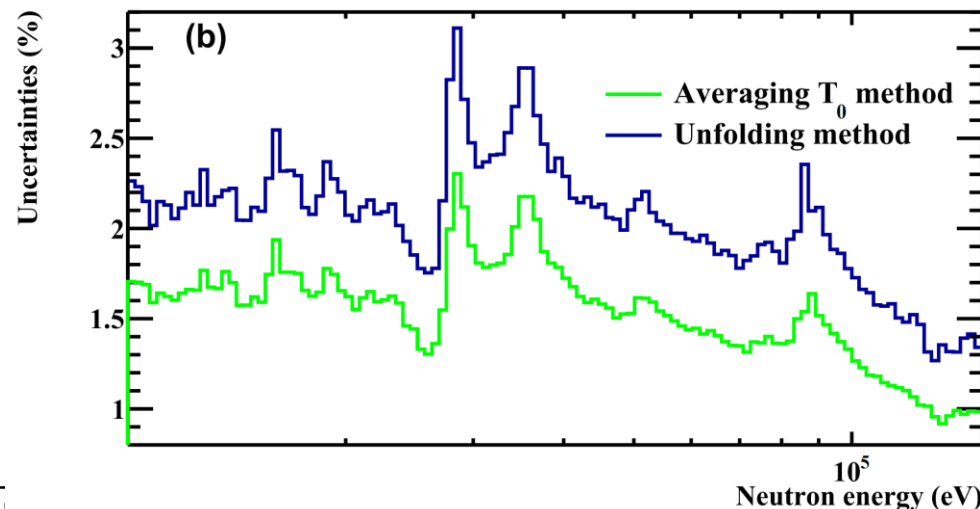
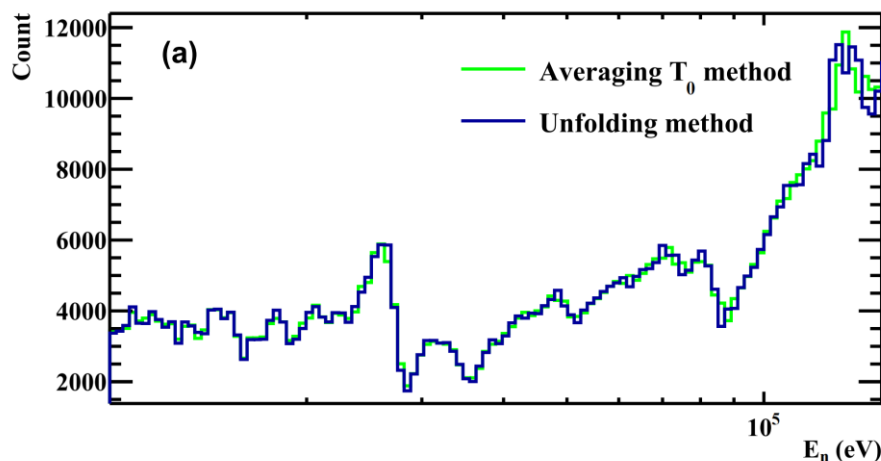
● 双束团影响评估

- ✓ 评估双束团对低能区测量的影响。对比使用不同 T_0 刻度方法与双束团解谱的效果，最终选择平均 T_0 时间法，省去双束团解谱带来的系统误差。

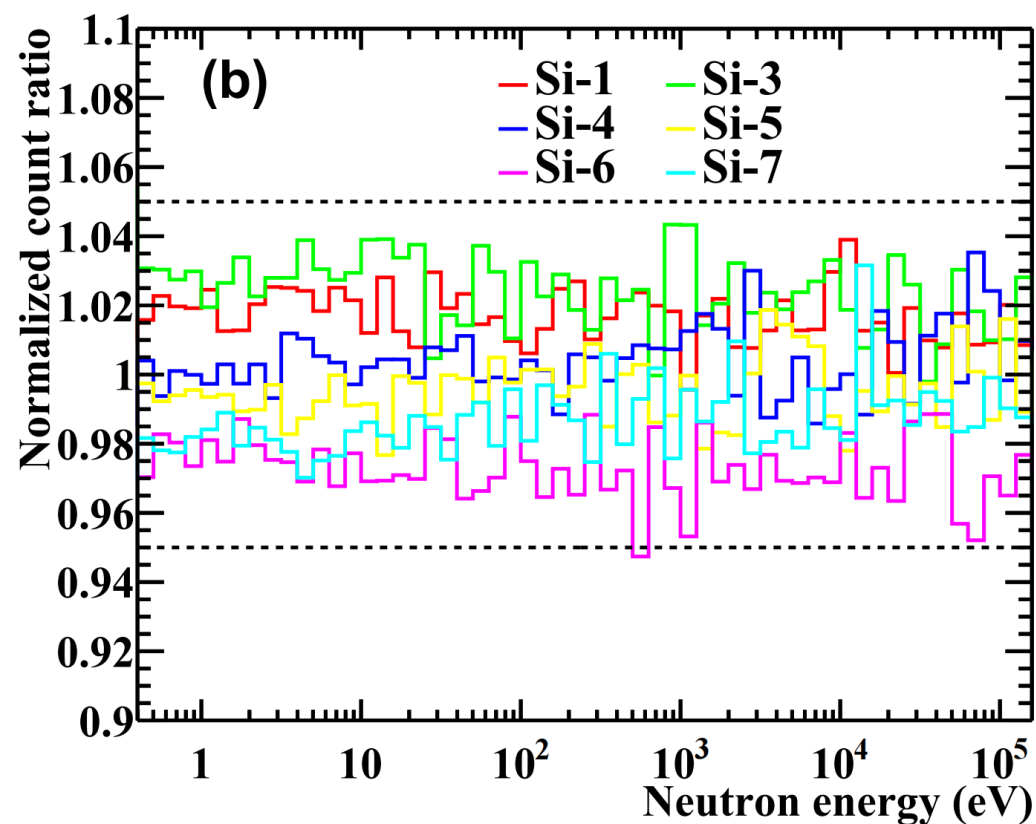
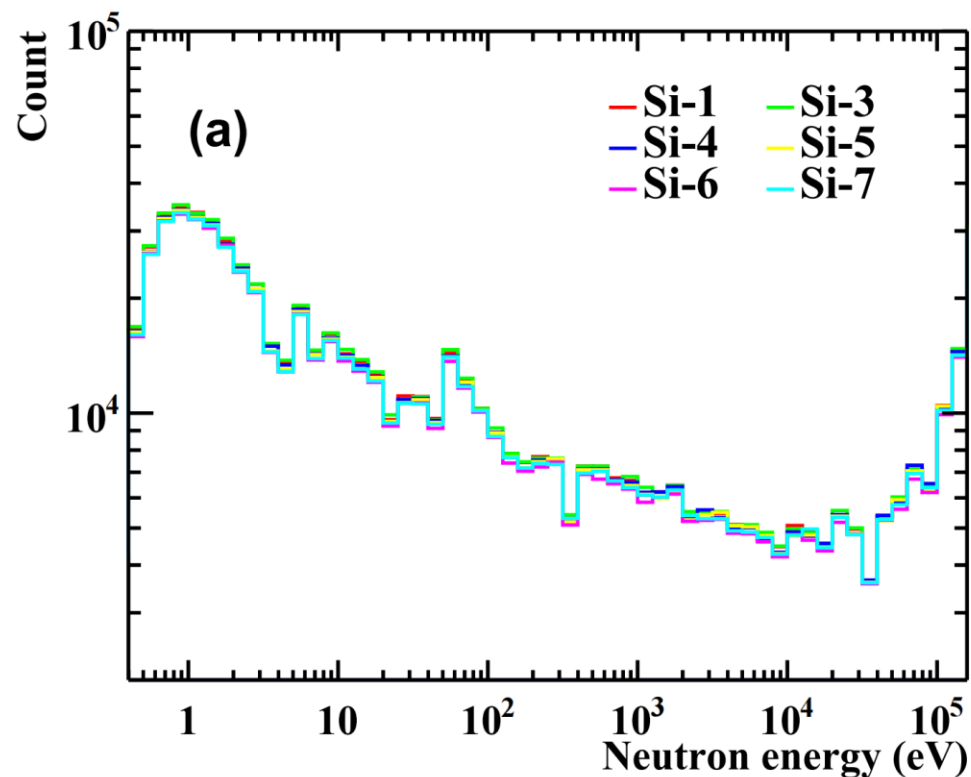


双束团模式示意图

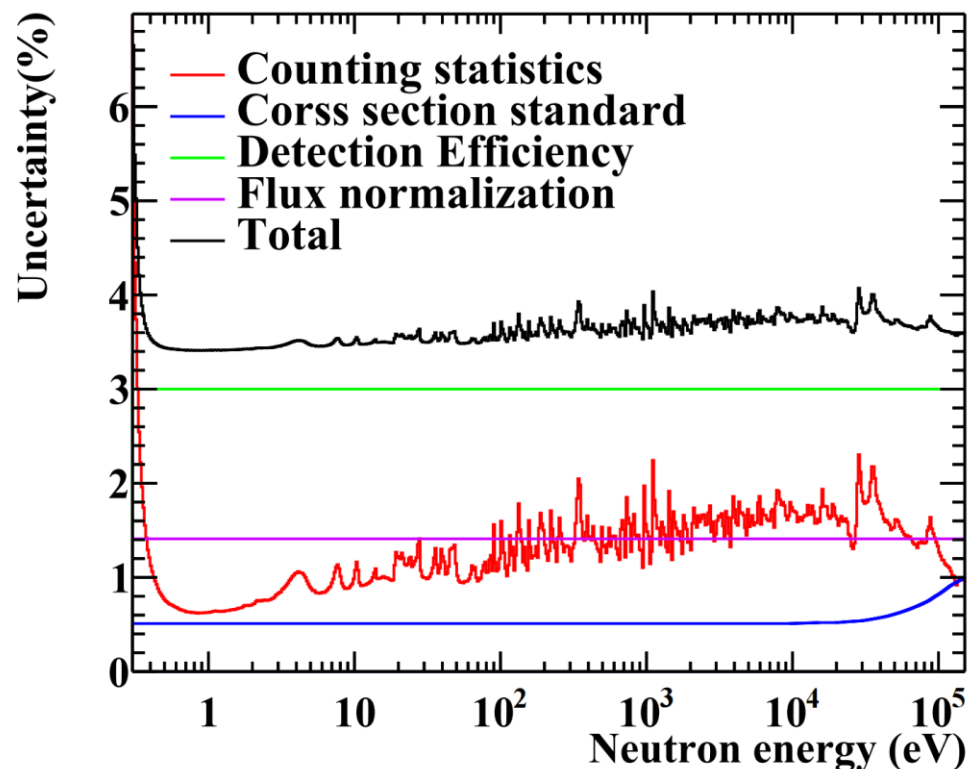
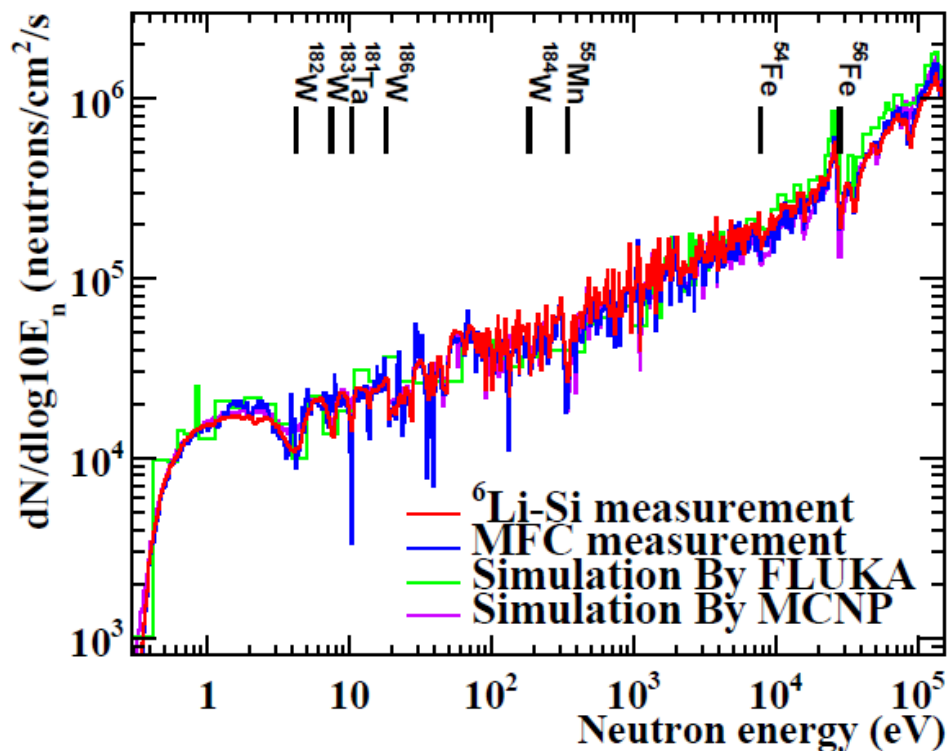
基于贝叶斯方法的双束团解谱程序
(H. Yi et al., JINST 14 (2019): 02011)

$$C_i^{(k+1)} = E_i \frac{C_i^{(k)}}{C_{i-\Delta}^{(k)} + C_i^{(k)}} + E_{i+\Delta} \frac{C_i^{(k)}}{C_i^{(k)} + C_{i+\Delta}^{(k)}}$$


● 测量一致性校验



- ✓ 6路Si探测器（各向同性分布）测量的反应率比较
- ✓ 6路结果表现出高一致性 $\pm 5\%$ ，表明测量与分析的可靠性
- ✓ 加合所有反应率，提升统计量

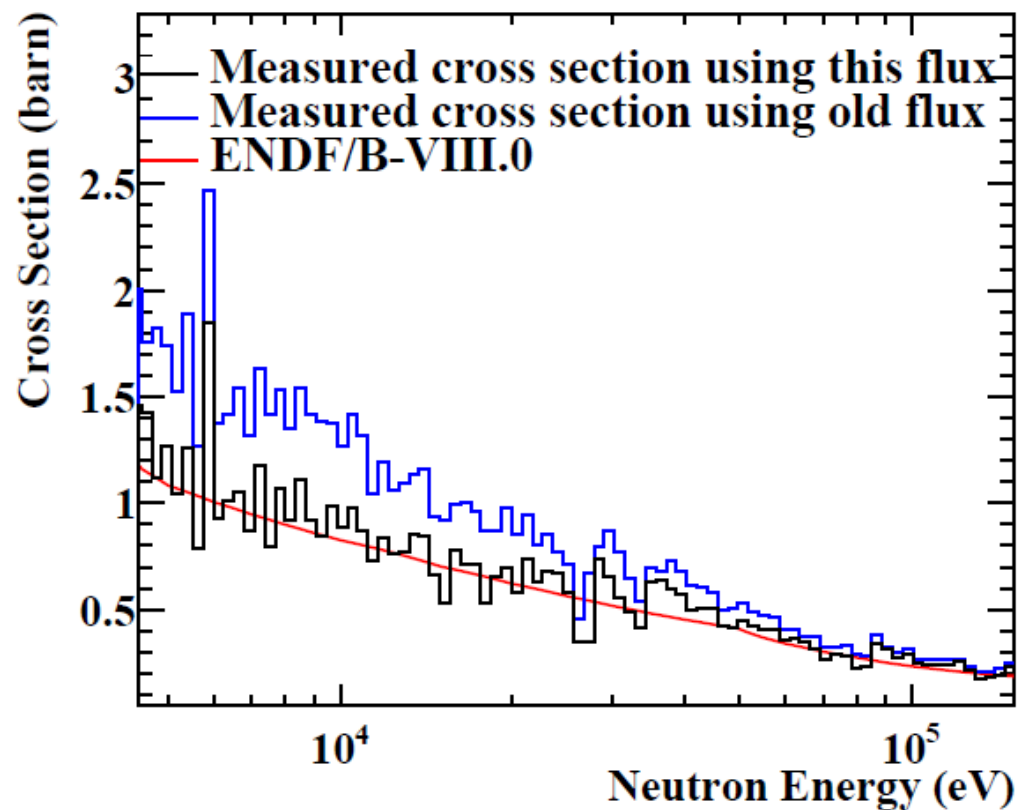


- ✓ 中子低能区⁶Li-Si测量结果明显优于裂变室：更少的振荡、更光滑的谱形
- ✓ ⁶Li-Si测量结果反应了能谱存在的真实结构：与MCNP模拟结果相符，来自靶体系统和束线材料的吸收（W、Ta、Mn、Fe）
- ✓ 测量误差（含统计误差与系统误差）：3.4-6.7%

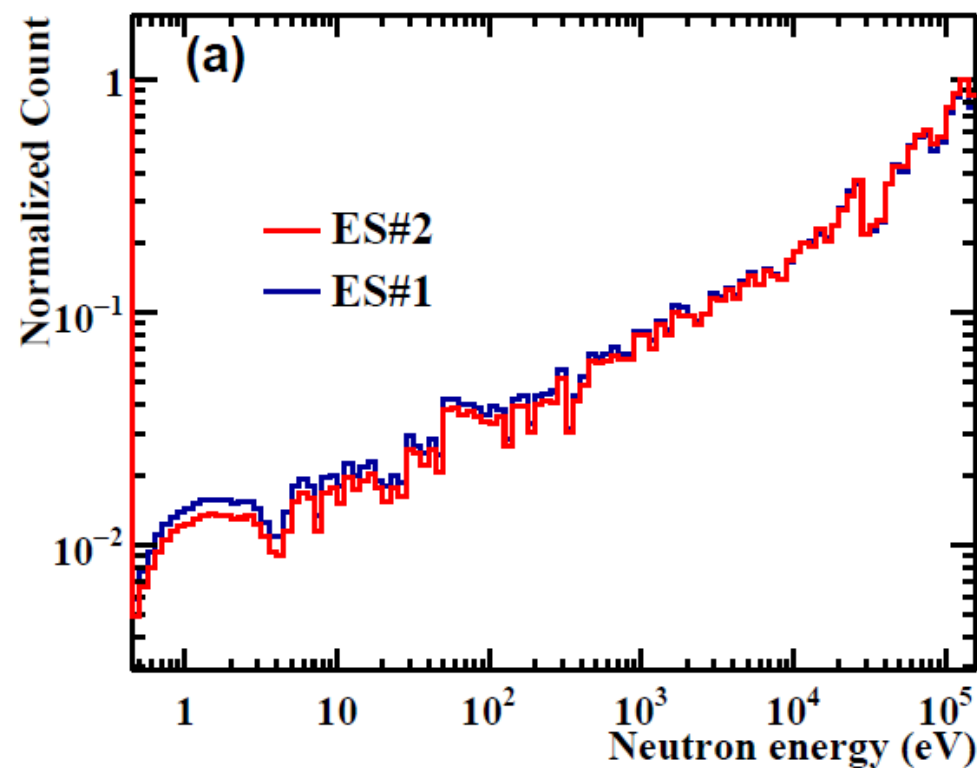
- 最新能谱在中子俘获截面测量中的验证 (任杰、王金成)

^{232}Th 俘获截面测量

最新结果 (黑色曲线) 与评价数据符合较好



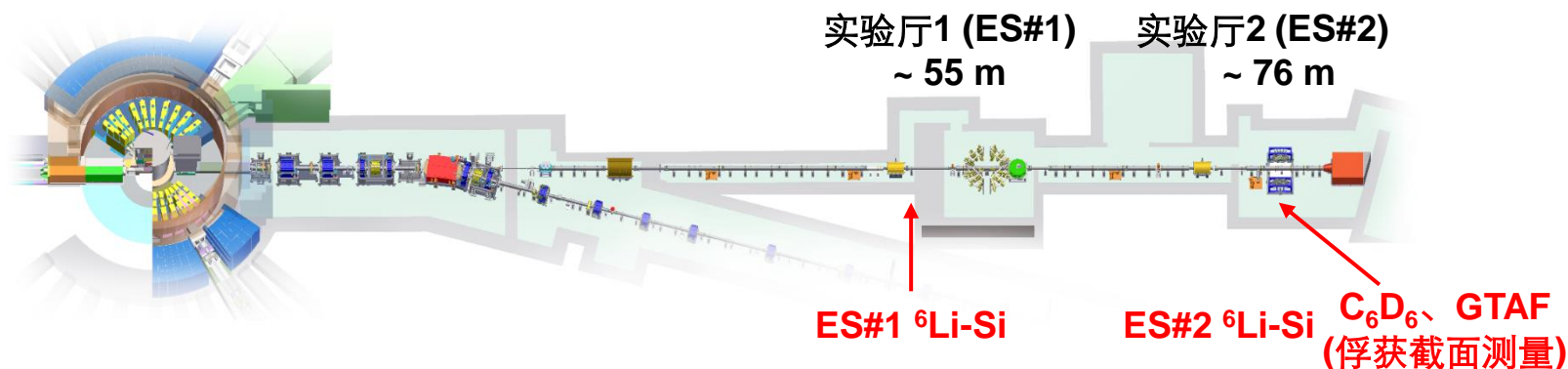
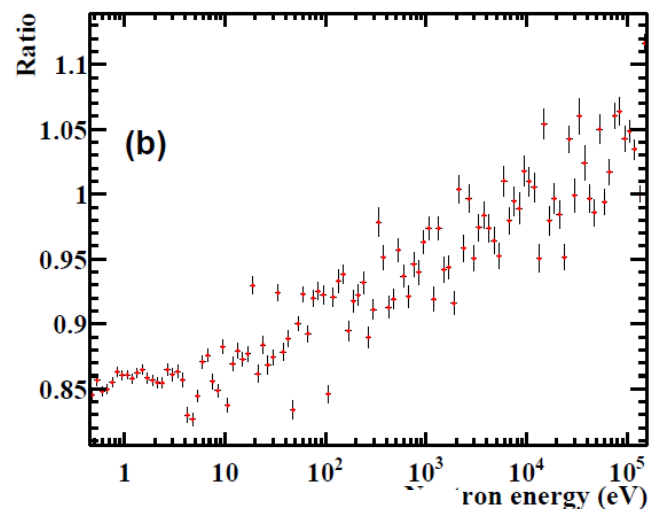
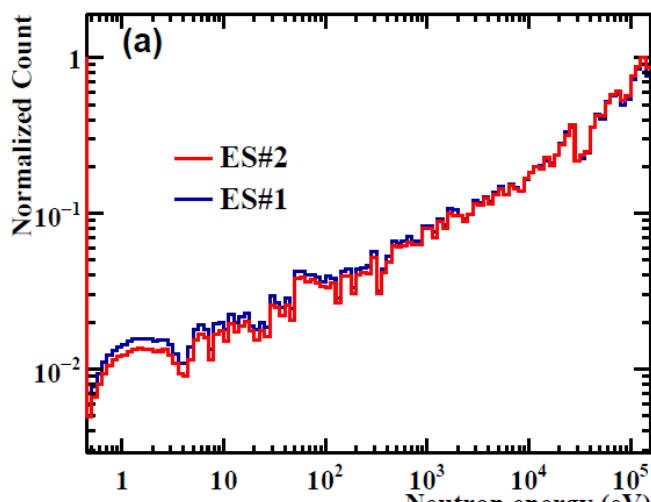
实验厅1(ES#1)与实验厅2(ES#2)能谱比较



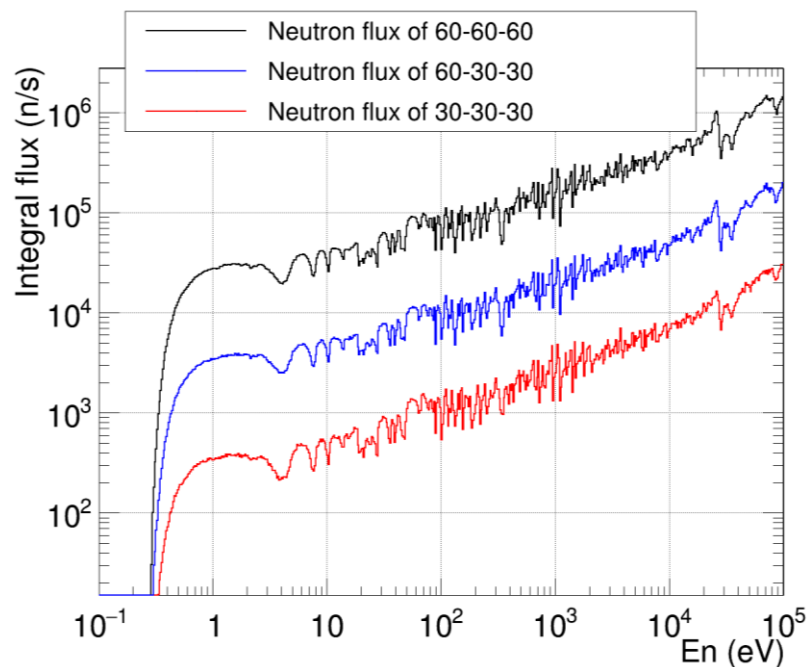
能谱比较 ES#1 vs ES#2

ES#1和ES#2在低能区的能谱差异最大可达20%，即使二者属于同一条束流线并配置了相同的准直器，即ES#1相较于ES#2的能谱更“软”。

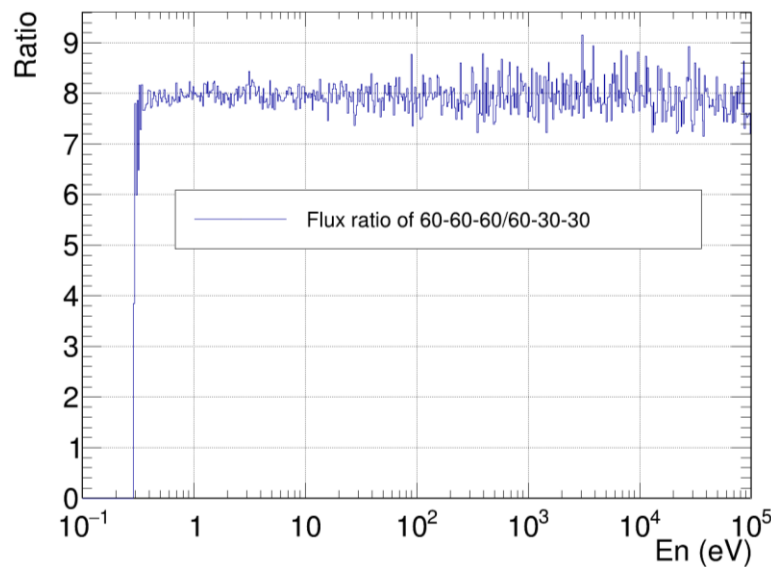
澄清了俘获截面测量中长期存在的分歧。



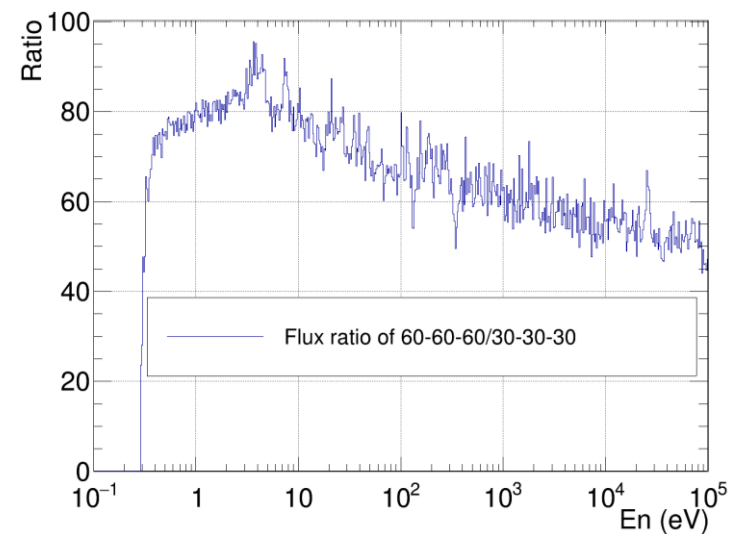
ES#2 3种束斑条件下的能谱比较



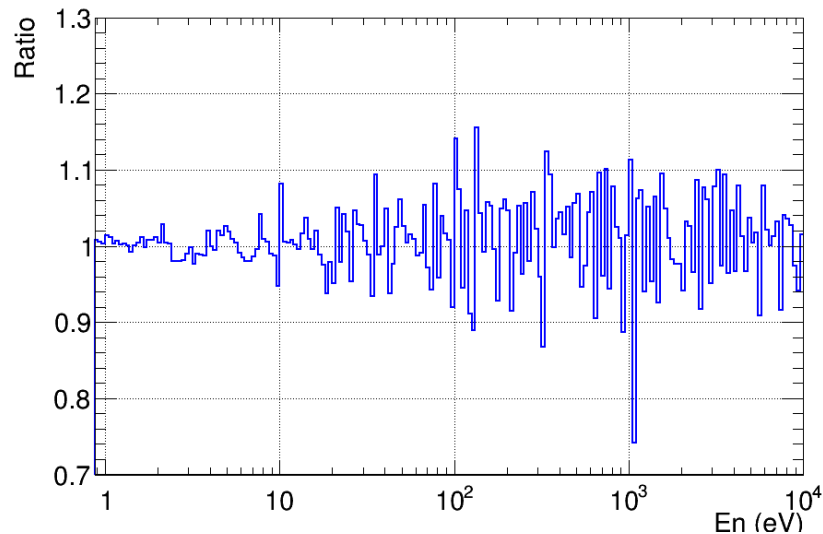
大束斑(60-60-60)与组合束斑(60-30-30)
束斑能谱形状一致



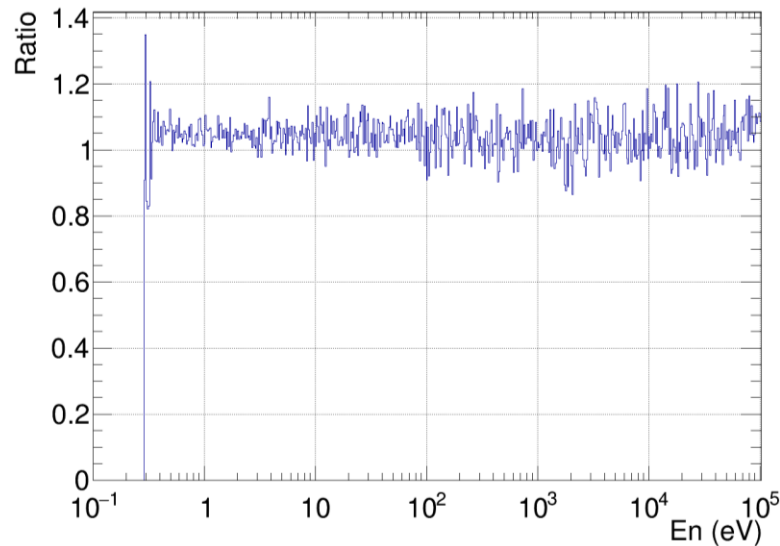
大束斑(60-60-60)与小束斑(30-30-30)束斑
能谱形状差异较大



20 kW与100 kW下的比较



100 kW与125 kW下的比较



- ✓ 20 kW (2018年2月)
- ✓ 100 kW (2020年2月、2021年12月)
- ✓ 125 kW (2022年3月)

CSNS加速器提升功率过程中Back-n能谱形状没有变化

目 录

- 研究动机
- 研究内容
- **研究结论**

1. 基于 $^6\text{Li-Si}$ 测量了Back-n实验厅2低能区（0.3 eV – 150 keV）能谱，得到了较为详细精确的能谱数据，误差范围：3.4-6.7%
2. 实验观测到在同一束线配置下ES#1和ES#2能谱存在较大差异，最大可达20%，这澄清了中子俘获截面测量中长期存在的分歧
3. 2018年2月至2022年3月期间，能谱形状不随CSNS加速器功率提升（20 kW→125 kW）而变化
4. ES#2的能谱与束线配置存在一定关联，部分束线配置能谱一致(如大束斑与组合束斑)，而部分能谱存在较大差异(如大束斑与小束斑)

https://code.ihep.ac.cn/beag_csns/share/-/wikis/Back-n

束流特征参数


内容	简介
不同准直器孔径组合的束流特征模拟结果	基于FLUKA模拟，给出27种不同准直器孔径组合的通量以及中子束斑尺寸。
实验测量能谱	能谱的实验测量数据，目前包括：ES#1小束斑(3030)能谱，ES#1大束斑(6060)能谱，ES#2大束斑(606060)能谱。能谱数据均以加速器功率为100 kW时归一，在使用中需要依据实际功率进行计算。不同束斑的通量比值，可参考 文献 中表1的结果。
数值模拟能谱	能谱的实验测量数据，目前包括：ES#1小束斑(3030)能谱，ES#2大束斑(6060)能谱，ES#2小束斑(303030)能谱，ES#2大束斑(606060)能谱。能谱数据均以加速器功率为100 kW时归一，在使用中需要依据实际功率进行计算。需要注意的是该能谱为lethargy处理后的结果。

Last edited by [fanrr@ihep.ac.cn](#) 2 days ago

白光中子源是一个开放的研究平台，面向国内外实验用户征集实验建议。如有实验需求，可与实验支持人取得联系并讨论实验相关事宜。白光中子源各类型实验支持人分工如下：

- 陈永浩 (chenyonghao@ihep.ac.cn)：裂变截面与全截面测量、FIXM谱仪相关实验
- 蒋伟 (jiangwei@ihep.ac.cn)：中子俘获反应测量、中子非弹反应测量、 γ 探测器相关实验
- 栾广源 (1178812483@qq.com)：GTAF实验
- 李强 (qiangli@ihep.ac.cn)：中子测量相关实验、成像探测器测试
- 谭志新 (tanzhixin@ihep.ac.cn)：单粒子效应实验、中子辐照相关实验
- 易晗 (yih@ihep.ac.cn)：带电粒子出射核反应测量、MTPC实验、中子共振成像、探测器测试与标定

束流申请具体流程请登陆[用户束流申请系统](#)。

 申请束流的用户需认真撰写束流申请书，对申请书的科学性和合理性负责。申请书的内容和格式可参考[束流申请书模板](#)。

[查看2024年度下半年实验机时计划可以点击这里](#)

已申请获批实验机时的用户，在进入园区之前请阅读以下入园流程 

请各位老师批评指正！