

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

中国散裂中子源反角白光中子实验装置 实验厅二中低能区中子能谱*

孔誉谦¹⁾³⁾ 邱奕嘉¹⁾²⁾ 蒋伟^{1)2)†} 孙康¹⁾²⁾ 杨高乐²⁾⁴⁾ 易晗¹⁾²⁾
樊瑞睿¹⁾²⁾ 袁岑溪³⁾ 李强¹⁾²⁾ 任杰⁵⁾ 罗秋月¹⁾²⁾ 敬罕涛¹⁾²⁾
唐靖宇⁶⁾ 张广鑫^{3)‡} 陈永浩^{1)2)‡‡}

1) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

3) (中山大学中法核工程与技术学院, 珠海 519082)

4) (中山大学物理与天文学院, 珠海 519082)

5) (中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

6) (中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230027)

(2025年9月15日收到; 2025年10月22日收到修改稿)

中国散裂中子源 (CSNS) 反角白光中子实验装置 (Back-n) 提供的中子束流覆盖 0.3 eV—300 MeV 能量范围, 是我国开展中子核反应研究的重要研究平台. Back-n 实验厅二飞行距离达到 76 m, 具有良好的中子能量分辨率, 为涉及天体核合成、重要核数据的中子俘获反应截面测量等实验研究提供了优异的束流条件. 中子俘获反应截面测量主要利用中低能 (1 MeV 以内) 的中子开展研究, 实验结果精度十分依赖中低能区中子能谱. 受益于 CSNS 的稳定运行, Back-n 的中子能谱在较长时期内十分稳定, 但也会随着 CSNS 的靶体、束窗等部件的结构调整而演变. 本文利用 Back-n 实验厅二的 ⁶Li-Si 束流监测器开展了不同时期的 50-15-40 准直器设置下中低能区中子能谱测量. 得到了在 2024 年更换质子束窗和 2025 年 CSNS 调整靶体结构前后, Back-n 实验厅二 0.3 eV—1 MeV 中子能量区间的相对能谱 (100 bpd (bin per decade)), 并将解谱起点降低至 10 eV, 不确定度为 1%—6.8%. 结果表明, 2024 年调整质子束窗降低了 eV 至 keV 能区的中子通量并显著改变了能谱形状; 2025 年靶体调整略增加了 eV 至 keV 能区的中子通量并略改变能谱形状. 此外, 通过对两种常用准直器设置下的中子能谱进行分析, 比较了其能谱形状差异. 本文工作为在 Back-n 实验厅二开展的中子俘获反应截面测量等研究提供了关键数据支撑. 本文数据集可在 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00214> 中访问获取.

关键词: Back-n, 中子能谱, 中子俘获反应, 截面测量

DOI: 10.7498/aps.75.20251269

CSTR: 32037.14.aps.75.20251269

* 国家自然科学基金 (批准号: 12335011, 12005115, 12205326, 12405348, 12475129, 12405144)、国家重点研发计划 (批准号: 2023YFA1606602)、广东省基础与应用基础研究基金 (批准号: 2023A1515110711, 2025A1515012112) 和中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2023014) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiangwei@ihep.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhanggx37@mail.sysu.edu.cn

‡‡ 通信作者. E-mail: chenyonghao@ihep.ac.cn

1 引言

中国散裂中子源 (China spallation neutron source, CSNS) 是我国基于中子开展多学科研究的大科学装置, 该装置利用 1.6 GeV 能量和 25 Hz 频率的质子束轰击钨靶产生中子, 自 2018 年起正式运行^[1]. 依托 CSNS 建设的反角白光中子实验装置 (Back-n) 可提供 0.3 eV—300 MeV 能区的中子, 具有能区覆盖宽、能量高、分辨率优良等特点^[2-6], 设有两个实验厅, 分别位于 55 m (实验厅一) 和 76 m (实验厅二), 中子通量可达到 10^7 n/(cm²·s), 为宽能区、高精度中子核反应研究提供了理想的束流条件.

中子能谱是中子核反应截面测量的基础, 其精度直接影响中子核反应截面结果的可靠性^[7-9]. Back-n 实验厅的中子束斑形状、剖面分布、能谱及注量率取决于 CSNS 加速器和靶的结构, 及 Back-n 束线上的中子开关、准直器一和准直器二的孔径^[10]. 近些年, 使用裂变电离室探测器^[11], ⁶Li-Si 束流监测器^[12] 及反冲质子望远镜已得到部分条件下的 Back-n 能谱^[2-6], 且应用到了中子核反应截面测量研究中. 自运行以来, 国内外用户已在 Back-n 实验厅二 (EndStation#2, ES#2) 开展了 ¹⁶⁹Tm^[13], ⁹¹Zr^[14], ¹⁶⁸Yb^[15], ¹³⁹La 等核素的中子辐射俘获截面, 即 (n, γ) 反应截面测量研究^[16-18]. (n, γ) 反应截面测量最关注的是中低能区 (1 MeV 以内)、尤其是 keV 能区的截面值. 根据前期实验条件探索, 在 Back-n 实验厅二开展 (n, γ) 反应截面测量研究通常选用中子开关为 $\Phi 50$ mm, 准直器一为 $\Phi 15$ mm, 准直器二为 $\Phi 40$ mm (也称为 50-15-40 准直器设置) 的准直器方案, 因此 (n, γ) 截面测量研究依赖于 50-15-40 准直器组合下实验厅二的能谱.

CSNS 的稳定运行为 Back-n 提供了优异的束流条件及稳定的能谱. 然而, 随着 CSNS 的运行及功率的逐渐提升, Back-n 的中子能谱仍不可避免地受到 CSNS 部分部件调整维护的影响. 例如, 2024 年暑期更换新的质子束窗后, 束窗从单层膜结构变为双层膜结构, 均匀段区域变大, 中子飞行路径上新增了约 3 mm 的水层, 对中低能区能谱存在影响; 2025 年 2 月调整了靶体结构, 把其中一片钽包钨更换为锆包钨, 锆厚度是 0.5 mm, 也可能进一步改变能谱. (n, γ) 截面测量研究对 CSNS

部件调整后的实验厅二中低能区的能谱有迫切的需求.

此外, 由于 CSNS 通常运行于间隔 410 ns 的双质子束团打靶模式, Back-n 的能谱也受到双束团的影响, 在之前的能谱测量工作中使用了基于贝叶斯理论的双束团解谱方法对 10 keV 以上中子能区能谱进行了解谱^[19,20]. 但是, (n, γ) 反应中通常会在 10 keV 以下的中子能量范围存在共振结构, 为了得到更高精度的 (n, γ) 截面结果, 也需要对 10 eV—10 keV 能区开展双束团解谱.

为提升中子能谱精度, 本研究基于 Back-n 实验厅二 50-15-40 准直器设置, 系统分析了三个测量阶段的 0.3 eV—1 MeV 能区相对能谱: 2022 年基准数据、2024 年质子束窗更换后数据及 2025 年靶体调整后数据, 并将双束团解谱下限由 10 keV 拓展至 10 eV, 提升能谱精度. 本文结构如下: 第 2 节介绍中低能区中子能谱测量实验设置, 第 3 节阐述数据处理方法, 第 4 节给出结果并讨论, 第 5 节总结全文.

2 中子能谱测量实验设置

中子能谱在 0.3 eV—1 MeV 范围内的测量是利用实验厅二的 ⁶Li-Si 束流监测器完成的, 该束流监测器基于 ⁶Li(n, t) 反应: 反应产物 (α 粒子和氚核) 由硅探测器探测. 将 ⁶LiF 电镀到铝衬底上形成转换靶, ⁶LiF 直径为 80 mm, 平均厚度 354.3 μ g/cm²; 铝衬底直径 150 mm, 厚度 10.8 μ m. 8 个在 2π 范围内均匀分布、各向同性的 PIN 型硅探测器置于 ⁶LiF 转换靶的上游 (图 1), 每个硅探测器的有效探测区域为 20 mm \times 20 mm, 探测器中心距 ⁶LiF 转换靶中心 94.95 mm, 与束流方向成 45° 夹角. 探测器信号经 Mesytec MSI-8 的前置放大器及主放大器放大后进入 Back-n 共用电子学系统^[21], 使用

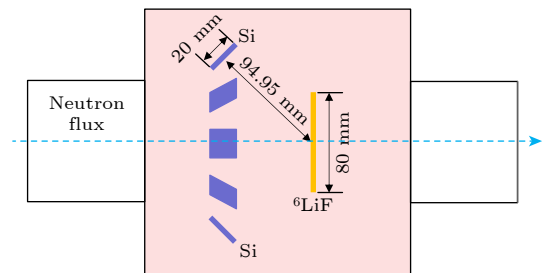


图 1 ⁶Li-Si 束流监测器结构 (侧视图)

Fig. 1. Structure of the ⁶Li-Si detector (side view).

表 1 实验条件
 Table 1. Experimental conditions.

Time	Experiment type	Collimator configuration	Effective detectors	Duration/h	Power/kW	Flight length/m
2022-03 2022-06	Beam spot measurement	50-15-40	6	74.05	124.99	73.98
2024-11	C6D6 experiment	50-15-40	4	95.28	170.16	73.94
2025-05	C6D6 experiment	50-15-40	4	154.70	170.51	73.98
2024-11	Beam spot measurement	50-50-58	7	43.44	170.26	73.94

12 bit, 1 GS/s 的 ADC 采集波形. 数据获取系统 (DAQ) 由质子脉冲信号触发, 记录触发后 10 ms 时间窗内的所有信号以便离线分析. 硅探测器输出信号后的堆积信号通过死时间修正还原, 具体研究将在 3.4 节展示.

本文研究了 ES#2 近三年内的四次实验, 其中两次与 C_6D_6 探测系统中子俘获反应截面实验同步进行, ${}^6\text{Li-Si}$ 束流监测器置于探测系统最上游; 另两次为专用的能谱束斑测量实验, 管道内仅含 ${}^6\text{Li-Si}$ 束流监测器与铀裂变电离室, ${}^6\text{Li-Si}$ 束流监测器位于电离室上游. 考虑硅探测器的稳定性, 每次实验均挑选了工作稳定的硅探测器的数据. 各实验对应的测量时长、有效硅探测器数目、准直器设置、CSNS 打靶质子束功率及飞行距离见表 1. 根据模拟和测试情况, ES#2 中 50-15-40 准直器设置的束斑大小为 $\Phi 42 \text{ mm} \times \Phi 26 \text{ mm}$ (半高宽), 50-50-58 准直器设置的束斑大小为 $\Phi 62 \text{ mm} \times \Phi 62 \text{ mm}$ (半高宽).

3 数据分析

中子通量 $\Phi(E_n)$ 通过以下关系式计算:

$$\Phi(E_n) = \frac{R(E_n)}{\sigma(E_n) \varepsilon(E_n) N_s}, \quad (1)$$

其中, E_n 表示入射中子能量, $R(E_n)$ 为测得的中子诱发反应率, $\sigma(E_n)$ 为反应截面, 数据来自 Carlson 等^[22] 的评价, N_s 为 ${}^6\text{LiF}$ 的靶核面密度 (单位: atoms/b), $\varepsilon(E_n)$ 为探测效率.

3.1 中子飞行时间方法 (TOF)

入射中子能量可通过飞行时间方法 (TOF) 确定, 其表达式为

$$E_n = (\gamma - 1)m_n c^2, \quad (2)$$

式中, c 为光速, m_n 为中子质量, γ 为洛伦兹因子, 由下式给出:

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}, \quad (3)$$

$$v = \frac{L}{\text{TOF}}, \quad (4)$$

其中, v 是中子速度, L 为飞行距离. 飞行时间 TOF 是反应产物定时时刻 T 与起始时刻 T_0 的差值:

$$\text{TOF} = T - T_0. \quad (5)$$

需要注意, 反应产物 (α 和 氦) 从靶到硅探测器的飞行时间可以忽略不计, 因为对于中低能区的中子能谱, 其能量上限为 1 MeV, 对应的中子飞行时间约为 5.35 μs , 而反应产物的飞行时间仅为 ns 量级, 对总飞行时间的贡献可以忽略. (5) 式中起始时刻 T_0 可通过以下公式计算:

$$T_0 = T_g - L/c, \quad (6)$$

其中, T_g 为探测到的 γ -flash 时刻, 该 γ -flash 来源于质子轰击钨靶时产生的瞬发 γ 射线, 对应于中子产生的时间. 由于 CSNS 通常运行于双束团模式, 每个质子脉冲内包含两个间隔为 410 ns 的质子束团, 这一结构可从图 2 中 PIN 型硅探测器的两个明显的 γ -flash 信号看出. 在数据分析中, 通常以第一个 γ -flash 的峰位作为 T_g , 这导致约半数中子事件的飞行时间包含 410 ns 的偏差, 进而影响中子能量的准确性. 以往研究认为该偏差在 10 keV 以

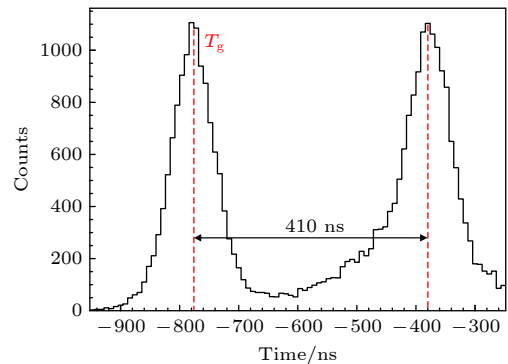


图 2 ${}^6\text{Li-Si}$ 束流监测器中硅探测器测到的 γ -flash 事件时刻的分布

Fig. 2. Time distribution of γ -flash events measured by the silicon detector in ${}^6\text{Li-Si}$ beam monitor.

下可忽略^[6], 因在该能区中子飞行时间足够长; 而在 10 keV 以上需进行修正. 本研究为了提高中子俘获反应截面分析的精度, 将修正下限扩展至 10 eV, 采用专为 Back-n 设计的双束团解谱程序^[20], 在 10 eV—1 MeV 能区实施解谱处理.

由于散裂钨靶的结构是钽包钨的结构, 所以 Back-n 的中子束流受 ^{181}Ta 的影响, 飞行距离 L 通过的 ^{181}Ta 在 23.90, 13.95 和 10.34 eV 处的 3 个特征吸收峰进行标定, 如图 3 所示. 这些峰形狭窄且无其他核素干扰, 适于精确标定. 采用多吸收峰拟合方法确定 L ^[23]:

$$T - T_g = \frac{L}{c} \left\{ \left[\sqrt{1 - \left(\frac{E_n}{m_n c^2} + 1 \right)^{-2}} \right]^{-1} - 1 \right\}, \quad (7)$$

其中 L 是唯一的自由度, 因此 $T - T_g$ 也仅为能量的函数, 通过拟合曲线即可确定 L . 然而, 由于中子在散裂靶内部产生后会经历慢化, 实测 TOF 包含靶内慢化时间与管道飞行时间两部分^[24,25], 因此实际飞行距离应表示为

$$L = L_{\text{geo}} + \lambda_m, \quad (8)$$

式中 L_{geo} 为与能量无关的几何长度, 即从靶表面至 ^6LiF 样品的物理距离; λ_m 为等效慢化长度 λ 的最可几值, λ 是靶面处中子出射速度与其对应的慢化用时的乘积, 通常通过模拟得到^[26]. 由于慢化过程较为复杂, λ 随中子能量分布有所展宽, 为简化分析, 本文使用 λ_m 作为代表值用于中子能量计算. Back-n 的等效慢化距离通过 Geant4 模拟得到^[6].

中子能量的不确定度如下:

$$\frac{\Delta E}{E} = \gamma(\gamma + 1) \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{\text{TOF}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2}, \quad (9)$$

其中, ΔT 和 ΔL 为中子飞行时间和飞行距离的不确定度. ΔT 主要来源于质子束团的时间展宽: 在 10 eV 以下取 205 ns, 对应于双束团结构的时间半宽; 在 10 eV 以上取 25 ns, 对应于单个质子束团的宽度, 因在此能区以上双束团效应已通过解谱予以修正. ΔL 取为慢化长度 λ 在各能量下分布的标准差 $\sigma_\lambda(E)$, 其值通过模拟计算获得^[6]. 如 (9) 式所示, 在低能区, 因 T 较大, ΔL 占主导; 高能区则 ΔT 贡献显著. 计算得 0.3—100 eV 内能量分辨为 0.1%—0.2%, 100 eV—1 MeV 内为 0.2%—0.94%. 为保证统计不确定度, 本研究将能谱的分 bin 数

目设置为 100 bpd (bin per decade), 对应能量分辨约为 2.3%^[6] (通过 bin 宽除以 bin 中心处能量得到).

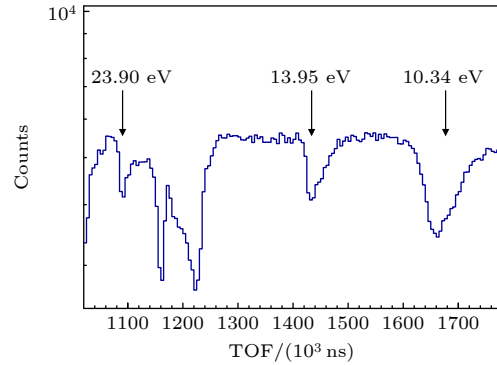


图 3 三吸收峰拟合的飞行距离刻度

Fig. 3. Flight path calibration using three absorption peaks.

3.2 双束团解谱

如前所述, CSNS 通常运行于双束团模式, 对于多数使用热中子的实验终端, 其对 TOF 的影响通常可忽略. 然而, 在涉及超热中子和快中子的 Back-n 实验装置中, 双束团结构会引入显著的飞行时间误差, 必须通过解谱方法予以修正. 为提供更高精度的中子能谱, 本研究将解谱的能量下限降低至 10 eV.

在解谱分析中, 将第一个束团产生的 γ -flash 时刻记为 T_g . 由于两束团完全相同且间隔严格保持 410 ns, 双束团模式下测得的能谱可被视为两个完全相同的单束团能谱在时间轴上相差 410 ns 的叠加. 采用一种基于贝叶斯理论 (Bayesian) 的解谱方法^[20], 可通过迭代算法将这两个能谱分离, 迭代公式如 (10) 式所示:

$$C_i^{(k+1)} = \frac{T_i C_i^{(k)}}{C_{i-\Delta}^{(k)} + C_i^{(k)}} + \frac{T_{i+\Delta} C_i^{(k)}}{C_i^{(k)} + C_{i+\Delta}^{(k)}}, \quad (10)$$

其中 C_i 是解谱后 TOF 谱中第 i 个 bin 的计数, T_i 是解谱前 TOF 谱中第 i 个 bin 的计数, Δ 是 410 ns 间隔对应的 bin 数量, k 代表第 k 次迭代. 解谱引入的最大不确定度为 4.5%, 典型值为 2.5%.

3.3 探测效率模拟

$^6\text{Li-Si}$ 束流监测器的探测效率受到核反应运动学以及 $^6\text{Li}(n, t)$ 反应角分布影响, 其探测效率随入射中子能量发生变化, 本文通过 Geant4 模拟其探测效率曲线. 模拟中分别使用了 ENDF/B-VIII.0^[27],

JEFF-3.3^[28] 和 BROND-3.1^[29] 等评价数据库中给出的反应出射产物的截面角分布信息; 最终以基于各评价数据库提供的反应出射产物的截面角分布信息开展模拟得到的效率结果的平均值作为探测效率曲线, 并根据文献 [30], 以探测效率均值的实验标准差作为其不确定度.

模拟结果如图 4 所示, 利用不同评价数据库提供的反应出射产物的截面角分布信息得到的效率曲线在整体趋势上一致. 在 100 eV 以下, 效率基本保持不变, 这是由于该能区 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反应的角分布近似各向同性; 在 100 eV—50 keV 区间内, 效率随能量上升而下降, 主要源于反应角分布逐渐向前集中^[31]; 在 50—250 keV 范围内效率出现回升, 这是由于反应产物的出射角分布变宽; 能量超过 250 keV 后, 效率再次下降, 直至 300 keV, 这归因于 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 反应截面减小以及高能中子引起的反应产物前冲效应增强. 该模拟结果与邱奕嘉等^[6] 的结果一致.

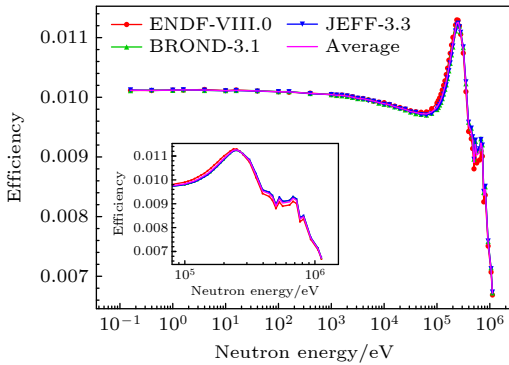


图 4 基于不同评价数据库的出射产物角分布的探测效率模拟结果
Fig. 4. Simulated detection efficiency with the angular distribution from different evaluation databases.

3.4 死时间修正

在实验过程中, 由于探测器输出信号后存在脉冲堆积效应, 即使采用有效的离线分析方法, 信号峰堆积往往难以甄别, 导致多个信号识别为一个, 使得探测计数率低于真实计数率. 在 200 keV 左右中子能区, ${}^6\text{Li-Si}$ 束流监测器的计数率较高, 堆积效应相对显著, 因此必须进行修正. 这种脉冲堆积效应导致的死时间可以认为是一种非扩展型死时间, 通过死时间修正系数 f_{dt} 进行修正:

$$f_{dt} = \frac{1}{1 - \tau N_i}, \quad (11)$$

其中 N_i 表示中子能量为 E_n 时的每质子脉冲计数率, 死时间 τ 取为 ${}^6\text{Li-Si}$ 信号的平均半高宽 (FWHM), 其数值为 1 μs . 死时间修正因子 $f_{dt} - 1$ 的百分比随能量的变化如图 5 所示. 结果表明, 在约 200 keV 处修正效应最为显著. 对于 50-15-40 准直器设置, 最大 $f_{dt} - 1$ 小于 1%; 而在 50-50-58 准直器设置下, 由于中子通量较大, 计数损失更为明显. 相比之下, 在 $E_n < 10$ keV 的能区, 2 种准直器设置的修正因子几乎为 100%, 计数损失可忽略不计.

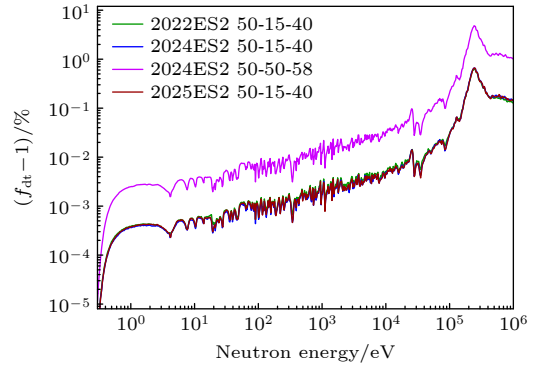


图 5 不同实验的死时间修正曲线
Fig. 5. Dead-time correction curves.

3.5 一致性验证

信号幅度与中子能量的二维分布示意图如图 6 所示, 其中可清晰区分 α 粒子和氚粒子的事例. 本分析仅使用 1 MeV 以下的的数据.

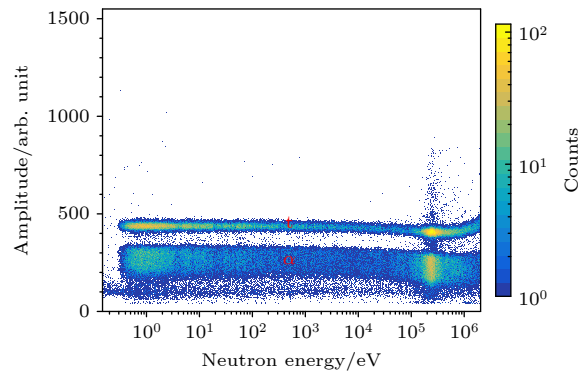


图 6 信号幅值-中子能量二维谱
Fig. 6. Spectrum of amplitude vs. neutron energy.

由于硅探测器对称布置于束流周围, 理论上各探测器计数应保持一致. 图 7 展示了各个探测器下的计数率, 图 8 反映了各次实验中不同通道的一致性, 通过每个探测器的反应率相对于平均值的偏差. 为便于比较反应率谱形状的一致性, 所有反应率均经 0.3 eV—10 keV 范围内的最大值归一化处

理. 本文取探测器计数均值的实验标准差作为探测器一致性的不确定度^[30]. 经过计算, 本文工作中四次实验的探测器一致性的不确定度均在 $\pm 2.2\%$ 以内 (详细结果参见 4.3 节), 该不确定度主要源于束流径向强度不均匀性与⁶LiF 厚度不均匀性的耦合.

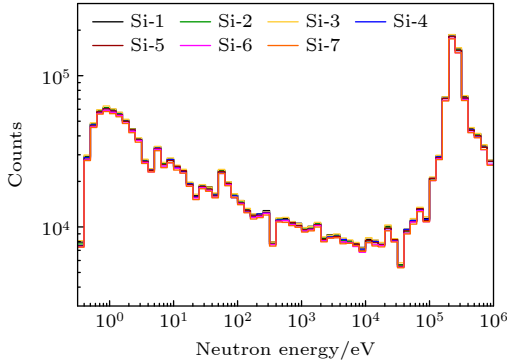


图 7 不同探测器的反应率比较

Fig. 7. Comparison of reaction rates in different detectors.

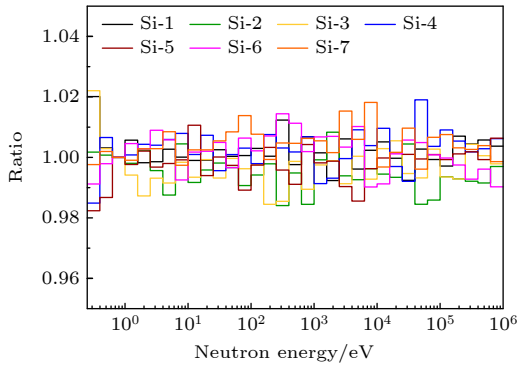


图 8 归一化反应速率与平均反应速率之比

Fig. 8. Ratio of normalized to average reaction rates.

4 结果和讨论

本文分析了质子束窗的更换和靶体的调整, 以及准直器设置对能谱相对通量和形状的影响. 通过比较近三年相同准直器设置下的能谱, 研究了质子束窗和靶体调整对能谱的影响; 通过对比同时期不同准直器设置下的能谱, 分析了准直器设置对能谱的影响. 所有能谱已按有效通道数、测量时长和质子打靶功率进行归一. 受限于本工作中使用的⁶LiF 转换靶面密度的不确定性, 本文的能谱通量均为相对通量.

4.1 质子束窗和靶体的影响

在 50-15-40 准直器设置下, 将三个时期的归一化能谱直接进行通量对比, 结果示于图 9; 进一

步计算各能谱之间的通量比值以进行定量分析, 如图 10(a)—(c) 所示. 为比较能谱形状, 将各能谱在 1—2 eV 区间内的面积对齐, 对齐后的相对通量比值示于图 10(d)—(f).

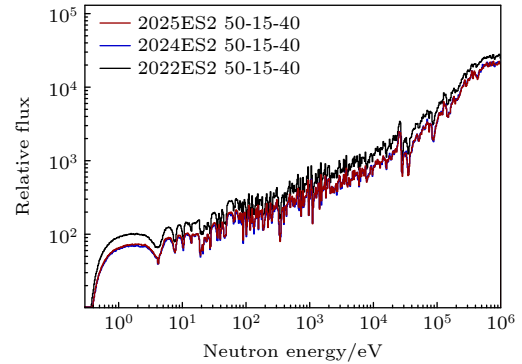


图 9 近三年 50-15-40 准直器设置的相对能谱

Fig. 9. Relative energy spectra with the 50-15-40 collimator configuration in recent three years.

4.1.1 能谱相对通量对比

图 9 中 2025 年与 2024 年能谱表明, 靶体调整前后通量基本处于同一水平. 从图 10(a) 可见, 调整靶体后通量在 0.3 eV—10 keV 区间内增大了大约 5%; 在 10 keV—1 MeV 能区内通量增幅下降至 0. 表明靶体调整小幅度增加了 eV 至 keV 能区的通量.

从图 9 可见, 2024 年与 2025 年能谱与 2022 年相比, 通量显著下降, 表明新质子束窗导致 eV—keV 能区通量降低. 定量对比说明 (图 10(b) 和图 10(c)), 在 0.3 eV—10 eV 能区通量降幅从 35% 逐渐收窄至 25%, 在 10 eV—100 keV 能区降幅重新逐渐扩大至 35%, 100 keV—1 MeV 后再次收窄至 20%. 下降最为明显的能点出现在 18 eV, 330 eV 和 35 keV, 最大降幅位于 18 eV, 达到 47%. 这三个能点的显著变化可能并非源自新束窗, 因为水在这些能区并无中子吸收峰, 而是来自 2022 至 2024 年间靶体的变动.

4.1.2 能谱形状对比

图 10(d) 显示, 2025 年调整靶体前后, 100 eV 以下最大差距约为 6%, 在 100 eV 以上差距逐渐增大至 9%. 可以认为 2025 年 2 月靶体结构调整改变了 eV—keV 能区的能谱形状.

从图 10(e) 与图 10(f) 可见, 2024 年更换质子束窗前后, 能谱形状在 18 eV, 330 eV 和 35 keV 处

变化最显著, 差异达 20%—25%; 在 0.3 eV—1 keV 区间内最大差异为 10%, 1 keV 后差距增大至 15%. 说明更换质子束窗改变了 eV—keV 的能谱形状.

4.2 不同准直器设置对能谱的影响

本文也分析对比了 ES#2 的 50-15-40 和 50-50-58 准直器设置下的能谱形状及通量. 50-15-40 和 50-50-58 准直器设置下归一化能谱直接用于通量对比, 如图 11(a) 所示, 并作通量比值用于定量分析, 如图 11(b) 所示. 形状对比通过将能谱在

1—2 eV 区间对齐后进行, 对齐后的相对通量比值示于图 11(c).

4.2.1 能谱相对通量对比

图 11(a) 显示, 50-50-58 准直器设置的通量显著高于 50-15-40 设置. 图 11(b) 中的比值结果表明, 50-15-40 的通量约为 50-50-58 的 14%—15%.

4.2.2 能谱形状对比

图 11(c) 中可见能谱形状差异小于 5.2%, 与不确定度水平相当, 所以 50-15-40 与 50-50-58 准直

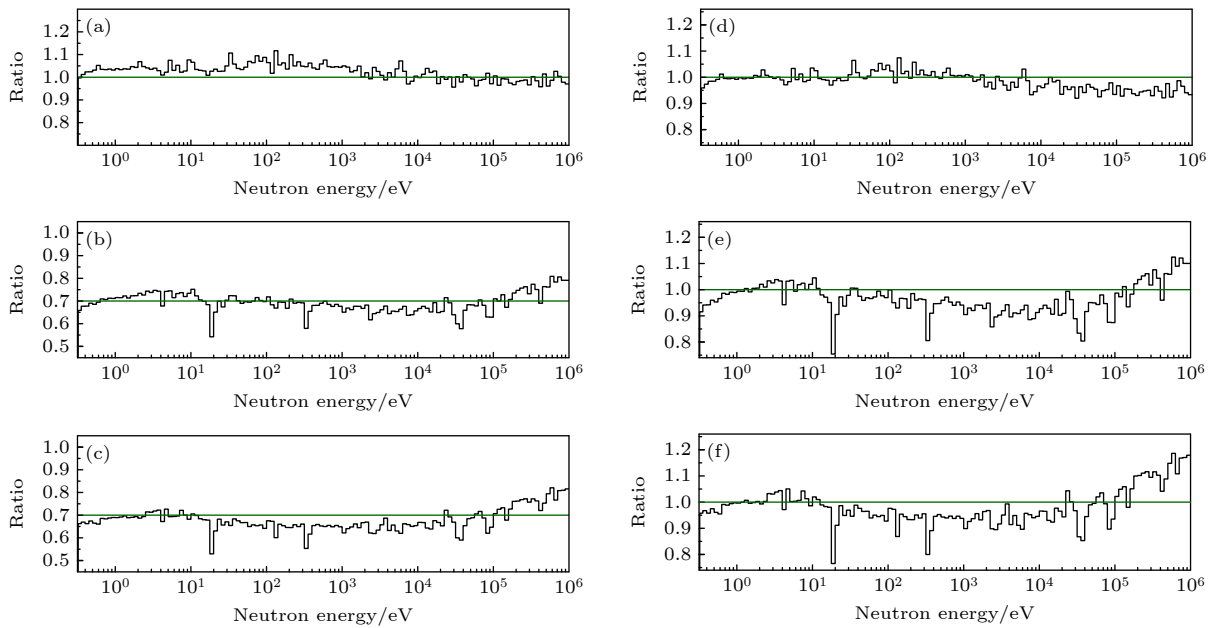


图 10 (a)—(c) 近三年 50-15-40 能谱的相对通量对比, (d)—(f) 使用 1—2 eV 归一后, 近三年 50-15-40 能谱的相对通量比值 (a) 2025/2024; (b) 2025/2022; (c) 2024/2022; (d) 2025/2024; (e) 2025/2022; (f) 2024/2022

Fig. 10. (a)–(c) Comparison of relative flux for the 50-15-40 collimator in recent three years, (d)–(f) shape comparison of 50-15-40 collimator after normalizing by 1–2 eV area: (a) 2025/2024; (b) 2025/2022; (c) 2024/2022; (d) 2025/2024; (e) 2025/2022; (f) 2024/2022.

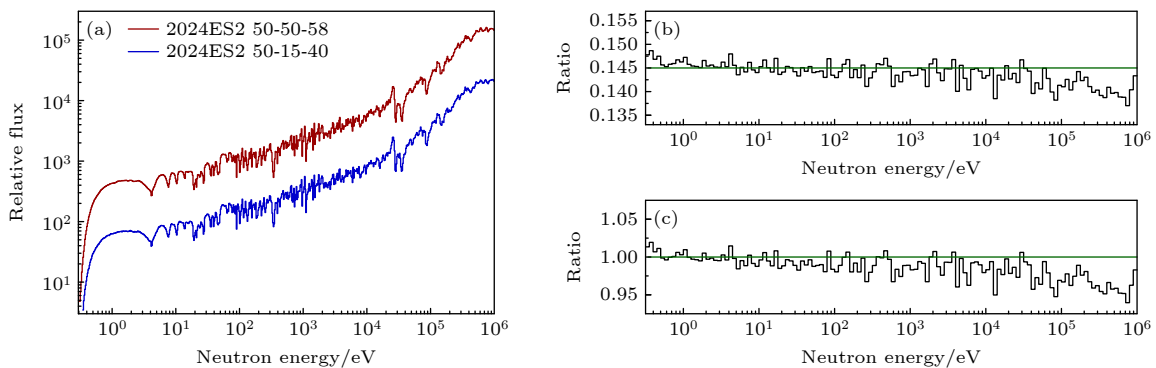


图 11 50-15-40 和 50-50-58 准直器设置的中子能谱的相对通量和通量的比值 (a) 相对通量对比; (b) 50-15-40 相对通量/50-50-58 相对通量; (c) 使用 1—2 eV 面积归一后, 50-15-40 相对通量/50-50-58 相对通量

Fig. 11. Relative energy spectra and ratio of flux between 50-15-40 and 50-50-58 collimator configurations: (a) Comparison of relative flux; (b) ratio of relative flux for 50-15-40 to 50-50-58; (c) ratio of relative flux for 50-15-40 to 50-50-58 after normalization to the integrated area in the 1–2 eV region.

器设置的能谱形状差异较小. 然而, 图 11(c) 存在明显走势, 即能量越高形状差距越大, 因此在用户需要使用能谱时, 为了提高分析结果精度, 使用与实验测量所用准直器设置相同的能谱是最佳的.

4.3 不确定度分析

能谱的不确定度主要来源于统计不确定度、解谱不确定度、 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 反应截面不确定度、探测器一致性不确定度和探测效率不确定度. 如图 12 及表 2 所示, 根据前文对双束团解谱、探测效率模拟、一致性验证等因素的不确定度评估, 最终计算得到了各能谱测量的不确定度.

以 2025 年 5 月的能谱测量为例, 统计不确定度为 0.6%—3.8%, 解谱不确定度为 0.6%—3.6%, 截面不确定度为 0.5%—1.7%, 探测器一致性不确定度为 0.3%—1.5%, 探测效率不确定度为 0.1%—0.8%, 总不确定度为 1.2%—5.5%.

5 结论

本文基于 ${}^6\text{Li-Si}$ 束流监测器得到了 Back-n 实验厅二在 CSNS 更换质子束窗、调整靶体结构前后 50-15-40 准直器设置下的中低能区 (0.3 eV—1 MeV) 的 100 bpd 的相对能谱, 能为中子俘获反应截面测量等研究提供精确的能谱, 主要结论如下.

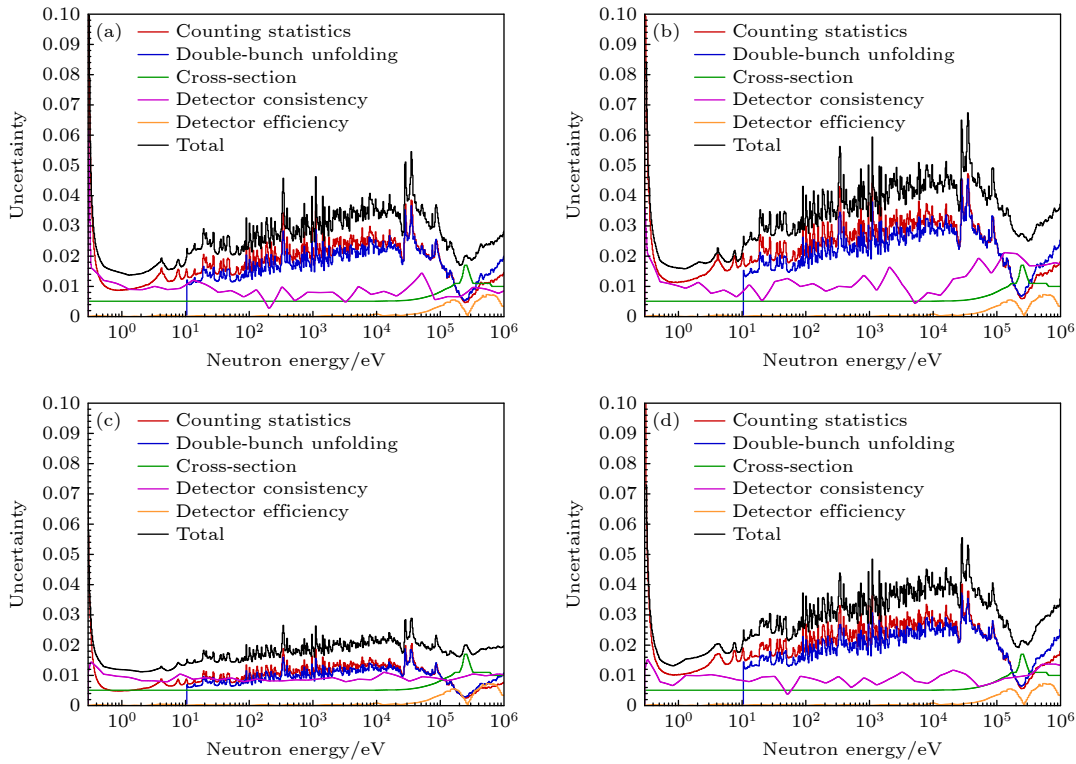


图 12 各能谱不确定度 (a) 2025 ES#2 50-15-40; (b) 2024 ES#2 50-15-40; (c) 2024 ES#2 50-50-58; (d) 2022 ES#2 50-15-40
 Fig. 12. Uncertainty of neutron energy spectra: (a) 2025 ES#2 50-15-40; (b) 2024 ES#2 50-15-40; (c) 2024 ES#2 50-50-58; (d) 2022 ES#2 50-15-40.

表 2 各能谱中子相对通量的不确定度 (单位: %)

Table 2. Uncertainty of relative neutron flux of each energy spectrum (Unit: %).

	2025 ES2 50-15-40	2024 ES2 50-15-40	2024 ES2 50-50-58	2022 ES2 50-15-40
Statistical counting	0.6—3.8	0.6—4.7	0.2—2.0	0.6—4.0
Double-bunch unfolding	0.6—3.6	0.7—4.5	0.2—1.9	0.6—3.8
${}^6\text{Li}(n, t)$ cross section	0.5—1.7	0.5—1.7	0.5—1.7	0.5—1.7
Detector consistency	0.3—1.5	0.4—2.2	0.8—1.2	0.2—1.4
Detector efficiency	0.1—0.8	0.1—0.8	0.1—0.8	0.1—0.8
Total	1.2—5.5	1.6—6.8	1.1—2.9	1.1—5.6

1) 靶体的调整略增加 eV—keV 通量并改变能谱形状. 对比 2025 年和 2024 年 50-15-40 准直器设置的能谱可以发现, 调整散裂靶体后, 通量在 0.3 eV—10 keV 增大 5%, 10 keV 后增幅逐渐降至 0; 能谱形状在 0.3 eV—100 eV 差距小于 6%, 在 100 eV—1 MeV 差距逐渐增大至 9%.

2) 新质子束窗降低 eV—keV 通量并改变能谱形状. 对比近三年 50-15-40 准直器设置的能谱可知, 更换质子束窗后, 通量在 10 eV 以下降幅从 35% 收窄至 25%, 10 eV—100 keV 重新扩大至 35%, 100 keV 以上再次收窄至 20%; 能谱形状在 0.3 eV—1 keV 内差距小于 10%, 1 keV 后增大至 15%.

3) 50-15-40 与 50-50-58 准直器设置相比仅通量降低, 能谱形状差异相对较小. 50-15-40 通量是 50-50-58 准直器设置通量的 14%–15%, 形状差别小于 5.2%, 与不确定度相当; 且中子能量越高差距越明显, 使用与物理测量实验相同准直器设置的能谱仍然是实验研究的最佳选项.

数据可用性声明

本篇论文的关联数据可以在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00214> 中获取.

感谢中国散裂中子源设施 (<https://cstr.cn/31113.02>. CSNS) 反角白光中子实验装置 (<https://cstr.cn/31113.02>. CSNS.Back-n) 的工作人员在数据收集和分析方面提供的技术支持和协助.

参考文献

- [1] Chen H, Wang X L 2016 *Nat. Mater.* **15** 689
- [2] Bao J, Chen Y H, Zhang X P, et al. 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 080101 (in Chinese) [鲍杰, 陈永浩, 张显鹏等 2019 物理学报 **68** 080101]
- [3] Chen Y H, Luan G Y, Bao J, Jing H T, Zhang L Y, An Q, Bai H Y, Cao P, Chen Q P, Cheng P J, Cui Z Q, Fan R R, Feng C Q, Gu M H, Guo F Q, Han C C, Han Z J, He G Z, He Y C, He Y F, Huang H X, Huang W L, Huang X R, Ji X L, Ji X Y, Jiang H Y, Jiang W, Kang L, Kang M T, Li B, Li L, Li Q, Li X, Li Y, Li Y, Liu R, Liu S B, Liu X Y, Ma Y L, Ning C J, Qi B B, Ren J, Ruan X C, Song Z H, Sun H, Sun X Y, Sun Z J, Tan Z X, Tang H Q, Tang J Y, Wang P C, Wang Q, Wang T F, Wang Y F, Wang Z H, Wang Z, Wen J, Wen Z W, Wu Q B, Wu X G, Wu X, Xie L K, Yang Y W, Yi H, Yu L, Yu T, Yu Y J, Zhang G H, Zhang J, Zhang L H, Zhang Q M, Zhang Q W, Zhang X P, Zhang Y L, Zhang Z Y, Zhao Y T, Zhou L, Zhou Z Y, Zhu D Y, Zhu K J, Zhu P 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 115
- [4] Chen Y H, Luan G Y, Bao J, Jing H T, An Q, Bai H Y, Cao P, Chen Q P, Cheng P J, Cui Z Q, Fan R R, Feng C Q, Gu M H, Guo F Q, Han C C, Han Z J, He G Z, He Y C, He Y F, Huang H X, Huang W L, Huang X R, Ji X L, Ji X Y, Jiang H Y, Jiang W, Kang L, Kang M T, Li B, Li L, Li Q, Li X, Li Y, Li Y, Liu R, Liu S B, Liu X Y, Ma Y L, Ning C J, Qi B B, Ren J, Ruan X C, Song Z H, Sun H, Sun X Y, Sun Z J, Tan Z X, Tang H Q, Tang J Y, Wang P C, Wang Q, Wang T F, Wang Y F, Wang Z H, Wang Z, Wen J, Wen Z W, Wu Q B, Wu X G, Wu X, Xie L K, Yang Y, Yi H, Yu L, Yu T, Yu Y J, Zhang G H, Zhang J, Zhang L H, Zhang L Y, Zhang Q M, Zhang Q W, Zhang X P, Zhang Y L, Zhang Z Y, Zhao Y T, Zhou L, Zhou Z Y, Zhu D Y, Zhu K J, Zhu P 2019 *ND 2019: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Beijing, China, May 19–24, 2019 p17018
- [5] Chen Y H, Qiu Y J, Li Q, Tang S D, Yang Y W, Ren Z Z, Jiang W, Fan R R, Yi H, Liu R, Tang J Y, Jing H T, Lan C L, Li Y, Tan Z X, An Q, Bai J B, Bao J, Bao Y, Cao P, Chen H L, Chen Q P, Chen Z, Cui Z Q, Feng C Q, Gao K Q, Gao X L, Gu M H, Han C C, Han Z J, He G Z, He Y C, Hong Y, Hu Y W, Huang H X, Huang X R, Jiang H Y, Jiang Z J, Kang L, Li B, Li C, Li J W, Li X, Liu J, Liu S B, Liu X Y, Long Z, Luan G Y, Ning C J, Niu M C, Qi B B, Ren J, Ruan X C, Song Z H, Sun K, Sun Z J, Tang X Y, Tian B B, Wang L J, Wang P C, Wang Z H, Wen Z W, Wu X G, Wu X, Xie L K, Yang X Y, Yu L, Yu T, Yu Y J, Zhang G H, Zhang L H, Zhang Q, Zhang X P, Zhang Y L, Zhang Z Y, Zhou L P, Zhou Z H, Zhu K J 2024 *Eur. Phys. J. A* **60** 63
- [6] Qiu Y J, Chen Y H, Li Q, Wang J C, Ren J, Tang S D, Fan R R, Yi H, Tang J Y, Ning C J, Jiang W, Li Y, Jing H T, Tan Z X 2025 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1075** 170383
- [7] Tang J 2019 *Proceedings of the ND 2019: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Beijing, China, May 19–24, 2019 p06002
- [8] Li X K, An Z D, Jiang W, Zhang J Y, Bai R R, Liu S K, Li X X, Zhu Z C, Yang G L, Qiu W W, Liao Z F, Zhuang Z Y, Zhang X P, Chen S L, Guo C C, Xiao E X, Fang X, Wang H W, Hu X R, Jiang B, Shen W Q, Wang J C, Ren J, Ruan X C, Luo W, Lan H Y, Cao Z W, Ma X, Liu Y D, Wang P S, Yang Y, Su P, Deng X A, He W B, Ma Y G, Ma C W, Wang Y T, Dai Z T, Li E T, He P Q, Tang R G, Zhou T, Wang J, Yi H, Zhang Y, Chen Y H, Fan R R, Gao K Q, Li Q, Sun K, Tan Z X, Gu M H, Jing H T, Tang J Y 2023 *Phys. Rev. C* **108** 035802
- [9] Yang G L, An Z D, Jiang W, Li X K, Qiu W W, Liao Z F, Zhuang Z Y, Zhang X P, Chen S L, Guo C C, Xiao E X, Fang X, Li X X, Wang H W, Hu X R, Jiang B, Shen W Q, Wang J C, Ren J, Ruan X C, Wang D X, Zhang S Y, Luo W, Zhu Z C, Lan H Y, Cao Z W, Ma X, Liu Y D, Wang P S, Yang Y, Su P, Deng X A, He W B, Ma Y G, Ma C W, Wang Y T, Dai Z T, Li E T, He P Q, Tang R G, Zhou T, Wang J, Yi H, Zhang Y, Chen Y H, Fan R R, Gao K Q, Li Q, Sun K, Tan Z X, Gu M H, Jing H T, Tang J Y 2024 *Phys. Rev. Res.* **6** 013225
- [10] Gao X L, Jing H T https://code.ihep.ac.cn/beag_csns/share/-/blob/main/doc/%E5%8F%8D%E8%A7%92%E7%99%BD%E5%85%89%E9%9A%A7%E9%81%93%E4%B8%8D%E5%90%8C%E5%87%86%E7%9B%B4%E5%99%A8%E5%AD%94%E5%BE%84%E7%BB%84%E5%90%88%E5%AF%B9%E6%9D%9F%E6%B5%81%E7%9A%84%E5%BD%B1%E5%93%8D20200522.pdf?ref_type=heads. [2025-09-12]

- [11] Yang Y W, Wen Z W, Han Z J, Wang M, Liu R, Wen J, Liu X Y, Chen Y H 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **940** 486
- [12] Li Q, Luan G Y, Bao J, Tang J Y, Jing H T, Fan R R, Bai H Y, Jiang W, Ning C J, Ren J, Ruan X C, Chen Y H, Zhang G H, Yi H, An Q, Cao P, Chen Q P, Cheng P J, Cui Z Q, Feng C Q, Gu M H, Guo F Q, Han C C, Han Z J, He G Z, He Y C, He Y F, Huang H X, Huang W L, Huang X R, Ji X L, Ji X Y, Jiang H Y, Kang L, Kang M T, Li B, Li L, Li X, Li Y, Li Y, Liu R, Liu S B, Liu X Y, Ma Y L, Qi B B, Song Z, Sun H, Sun X Y, Sun Z, Tan Z, Tang H Q, Wang P C, Wang Q, Wang T F, Wang Y F, Wang Z, Wang Z, Wen J, Wen Z W, Wu Q B, Wu X G, Wu X, Xie L K, Yang Y W, Yu L, Yu T, Yu Y J, Zhang J, Zhang L H, Zhang L Y, Zhang Q M, Zhang Q W, Zhang X P, Zhang Y L, Zhang Z Y, Zhao Y T, Zhou L, Zhou Z Y, Zhu D Y, Zhu K J, Zhu P 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **946** 162497
- [13] Ren J, Ruan X C, Jiang W, Bao J, Wang J C, Zhang Q W, Luan G Y, Huang H X, Nie Y B, Ge Z G, An Q, Bai H Y, Bao Y, Cao P, Chen H L, Chen Q P, Chen Y H, Chen Y K, Chen Z, Cui Z Q, Fan R R, Feng C Q, Gao K Q, Gu M H, Han C C, Han Z J, He G Z, He Y C, Hong Y, Huang W L, Huang X R, Ji X L, Ji X Y, Jiang H Y, Jiang Z J, Jing H T, Kang L, Kang M T, Li B, Li C, Li J W, Li L, Li Q, Li X, Li Y, Liu R, Liu S B, Liu X Y, Mu Q L, Ning C J, Qi B B, Ren Z Z, Song Y P, Song Z H, Sun H, Sun K, Sun X Y, Sun Z J, Tan Z, Tang H Q, Tang J Y, Tang X Y, Tian B B, Wang L J, Wang P C, Wang Q, Wang T F, Wang Z, Wen J, Wen Z W, Wu Q B, Wu X G, Wu X, Xie L K, Yang Y W, Yi H, Yu L, Yu T, Yu Y J, Zhang G H, Zhang L H, Zhang X P, Zhang Y L, Zhang Z Y, Zhao Y B, Zhou L P, Zhou Z Y, Zhu D Y, Zhu K J, Zhu P, The CSNS Back-n Collaboration 2022 *Chin. Phys. C* **46** 044002
- [14] Gan L, Sun H B, Jiang W, Li Z H, Zhong J, Rohilla A, Huang Z Y, Li X Y, Nan W, Nan W K, Hu S P, Li E T 2024 *Phys. Rev. C* **110** 025802
- [15] Chen Y J, Li X X, Jiang W, Ren J, Xie W, Wang H W, Fan G T, Liu L X, Zhang Y, Lin Z A, Jiang T, Li Z C, Luo K J, Shi X M, Li X K, Cao Z W, Yang G L, An Z D, Jiang B, Luo W 2025 *Phys. Rev. C* **111** 054607
- [16] Luo H T, Zhang Q W, Luan G Y, et al. 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 072801 (in Chinese) [罗昊天, 张奇玮, 栾广源等 2024 物理学报 **73** 072801]
- [17] Li X X, Liu L X, Jiang W, Ren J, Wang H W, Fan G T, He J J, Cao X G, Song L L, Zhang Y, Hu X R, Hao Z R, Kuang P, Jiang B, Wang X H, Hu J F, Wang J C, Wang D X, Zhang S Y, Liu Y D, Ma X, Ma C W, Wang Y T, An Z D, Su J, Zhang L Y, Yang Y X, Liu W B, Su W Q, Jin S, Chen K J 2022 *Chin. Phys. B* **31** 038204
- [18] Jiang B, Han J L, Ren J, Jiang W, Wang X H, Guo Z, Zhang J L, Hu J F, Chen J G, Cai X Z, Wang H W, Liu L X, Li X X, Hu X R, Zhang Y 2022 *Chin. Phys. B* **31** 060101
- [19] Gu M H, Xue J M, Li Y K, Cao P, Ren J, Chen Y H, Jiang W, Yi H, Hu P, Fan R R 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 203
- [20] Yi H, Wang T F, Li Y, Ruan X C, Ren J, Chen Y H, Li Q, Wen J, Tang J Y, An Q, Bai H Y, Bao J, Bao Y, Cao P, Chen H L, Chen Q P, Chen Y K, Chen Z, Cui Z Q, Fan R R, Feng C Q, Gao K Q, Gu M H, Han C C, Han Z J, He G Z, He Y C, Hong Y, Huang H X, Huang W L, Huang X R, Ji X L, Ji X Y, Jiang H Y, Jiang W, Jiang Z J, Jing H T, Kang L, Kang M T, Li B, Li C, Li J W, Li L, Li X, Liu R, Liu S B, Liu X Y, Luan G Y, Mu Q L, Ning C J, Qi B B, Ren Z Z, Song Y P, Song Z H, Sun H, Sun K, Sun X Y, Sun Z J, Tan Z X, Tang H Q, Tang X Y, Tian B B, Wang L J, Wang P C, Wang Q, Wang Z H, Wen Z W, Wu Q B, Wu X G, Wu X, Xie L K, Yang Y W, Yu L, Yu T, Yu Y J, Zhang G H, Zhang L H, Zhang Q W, Zhang X P, Zhang Y L, Zhang Z Y, Zhao Y B, Zhou L P, Zhou Z Y, Zhu D Y, Zhu K J, Zhu P 2020 *J. Instrum.* **15** P03026
- [21] Wang Q, Cao P, Qi X, Yu T, Ji X, Xie L, An Q 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 013511
- [22] Carlson A D, Pronyaev V G, Capote R, Hale G M, Chen Z P, Duran I, Hamsch F J, Kunieda S, Mannhart W, Marcinkevicius B, Nelson R O, Neudecker D, Noguere G, Paris M, Simakov S P, Schillebeeckx P, Smith D L, Tao X, Trkov A, Wallner A, Wang W 2018 *Nuclear Data Sheets* **148** 143
- [23] Xue J M, Feng S, Chen Y H, Yi H, Li X X, Xiao M, Cheng P J, Liu R, Yang Y W, Han Z J, Zhao D J, Wang H Q, Li B Q, Zhao J R, Liu Z J, Chen C M, Luo W, Zheng B 2023 *Chin. Phys. C* **47** 124001
- [24] Coceva C, Frisoni M, Magnani M, Mengoni A 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **489** 346
- [25] Lorusso G, Colonna N, Marrone S, Tagliente G, Heil M, Cano-Ott D, Mosconi M, Moreau C, Mengoni A, Abbondanno U, Aerts G, AlvarezPol H, Alvarez-Velarde F, Andriamonje S, Andrzejewski J, Angelopoulos A, Assimakopoulos P, Badurek G, Baumann P, Bečvář F, Benlliure J, Berthomieux E, Bisceglie E, Calviño P, Capote R, Cennini P, Chepel V, Chiaveri E, Coceva C, Cortes G, Cortina D, Couture A, Cox J, Dababneh S, Dahlfors M, David S, Dolfini R, Domingo-Pardo C, Duran I, Eleftheriadis C, Segura M E, Ferrant L, Ferrari A, Ferreira-Marques R, Fraiss-Koelbl H, Furman W I, Goncalves I F, Gonzalez-Romero E, Goverdovski A, Gramegna F, Griesmayer E, Gumsing F, Haas B, Haight R, HerreraMartinez A, Ioannides K G, Isaev S, Jericha E, Käppeler F, Kadi Y, Karamanis D, Ketlerov V, Kitis G, Koehler P E, Konovalov V, Kossionides E, Krťicka M, Leeb H, Lindote A, Lopes M I, Lozano M, Lukic S, Marganiec J, Mastinu P F, Milazzo P M, Molina-Coballes A, Neves F, Oberhammer H, O'Brien S, Pancin J, Paradela C, Pavlik A, Pavlopoulos P, Perrot L, Peskov V, Plag R, Plompen A, Plukis A, Poch A, Policarpo A, Pretel C, Quesada J M, Rapp W, Rauscher T, Reifarth R, Rosetti M, Rubbia C, Rudolf G, Rullhusen P, Salgado J, Savvidis E, Soares J C, Stephan C, Tain J L, TassanGot L, Tavora L M N, Terlizzi R, Tsangas N, Vannini G, Vaz P, Ventura A, Villamarin D, Vincente M C, Vlachoudis V, Vlastou R, Voss F, Wendler H, Wiescher M, Wisshak K 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **532** 622
- [26] Meo S L, Cortés-Giraldo M A, Massimi C, Lerendegui-Marco J, Barbagallo M, Colonna N, Guerrero C, Mancusi D, Mingrone F, Quesada J M, Sabate-Gilarte M, Vannini G, Vlachoudis V, n_TOF Collaboration T 2015 *Eur. Phys. J. A* **51** 160
- [27] Brown D A, Chadwick M B, Capote R, Kahler A C, Trkov A, Herman M W, Sonzogni A A, Danon Y, Carlson A D, Dunn M, Smith D L, Hale G M, Arbanas G, Arcilla R, Bates C R, Beck B, Becker B, Brown F, Casperson R J, Conlin J, Cullen D E, Descalle M A, Firestone R, Gaines T, Guber K H, Hawari A I, Holmes J, Johnson T D, Kawano T, Kiedrowski B C, Koning A J, Kopecky S, Leal L, Lestone J P, Lubitz C, Damián J I M, Mattoon C M, McCutchan E A, Mughabghab S, Navratil P, Neudecker D, Nobre G P A, Noguere G, Paris M, Pigni M T, Plompen A J, Pritychenko B, Pronyaev V G, Roubtsov D, Rochman D, Romano P, Schillebeeckx P, Simakov S, Sin M, Sirakov I, Sleaford B, Sobes V,

- Soukhovitskii E S, Stetcu I, Talou P, Thompson I, van der Marck S, WelschSherrill L, Wiarda D, White M, Wormald J L, Wright R Q, Zerke M, Žerovnik G, Zhu Y 2018 *Nucl. Data Sheets* **148** 1
- [28] Cabellos O, Alvarez-Velarde F, Angelone M, Diez C J, Dyrda J, Fiorito L, Fischer U, Fleming M, Haecck W, Hill I, Ichou R, Kim D H, Klix A, Kodeli I, Leconte P, Michel-Sendis F, Nunnenmann E, Pecchia M, Peneliau Y, Plompen A, Rochman D, Romojaro P, Stankovskiy A, Sublet J C, Tamagno P, van der Marck S 2017 *ND 2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Bruges, Belgium, September 11–16, 2016 p06004
- [29] Blokhin A I, Gai E V, Ignatyuk A V, Koba I I, Manokhin V N, Pronyaev V G 2016 *Yad. Fiz. Reak. Konst.* **2** 62
- [30] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) 2008 *Evaluation of Measurement data—Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with minor corrections)*. JCGM 100: 2008(E) (Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)) p10
- [31] Bai H Y, Fan R, Jiang H Y, Cui Z Q, Hu Y W, Zhang G H, Chen Z P, Jiang W, Yi H, Tang J Y, Zhou L, An Q, Bao J, Cao P, Chen Q P, Chen Y H, Cheng P J, Feng C Q, Gu M H, Guo F Q, Han C C, Han Z J, He G Z, He Y C, He Y F, Huang H X, Huang W L, Huang X R, Ji X L, Ji X Y, Jing H T, Kang L, Kang M T, Li B, Li L, Li Q, Li X, Li Y, Li Y, Liu R, Liu S B, Liu X Y, Luan G Y, Ma Y L, Ning C J, Qi B B, Ren J, Ruan X C, Song Z H, Sun H, Sun X Y, Sun Z J, Tan Z X, Tang H Q, Wang P C, Wang Q, Wang T F, Wang Y F, Wang Z H, Wang Z, Wen J, Wen Z W, Wu Q B, Wu X G, Wu X, Xie L K, Yang Y W, Yu L, Yu T, Yu Y J, Zhang J, Zhang L H, Zhang L Y, Zhang Q M, Zhang Q W, Zhang X P, Zhang Y L, Zhang Z Y, Zhao Y T, Zhou Z Y, Zhu D Y, Zhu K J, Zhu P 2020 *Chin. Phys. C* **44** 014003

SPECIAL TOPIC—Thematic data in nuclear physics: Experimental, theoretical and applied research

Neutron energy spectra below 1–MeV in ES#2 of the CSNS Back-n white neutron facility*

KONG Yuqian¹⁾³⁾ QIU Yijia¹⁾²⁾ JIANG Wei^{1)2)†} SUN Kang¹⁾²⁾
 YANG Gaole²⁾⁴⁾ YI Han¹⁾²⁾ FAN Ruirui¹⁾²⁾ YUAN Cenxi³⁾
 LI Qiang¹⁾²⁾ REN Jie⁵⁾ LUO Qiuyue¹⁾²⁾ JING Hantao¹⁾²⁾
 TANG Jingyu⁶⁾ ZHANG Guangxin^{3)‡} CHEN Yonghao^{1)2)††}

1) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China*)

3) (*Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China*)

4) (*School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China*)

5) (*Key Laboratory of Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

6) (*School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

(Received 15 September 2025; revised manuscript received 22 October 2025)

Abstract

The Back-n white neutron facility at the China Spallation Neutron Source (CSNS) provides neutrons in the 0.3 eV–300 MeV energy range, serving as a crucial platform for neutron-induced nuclear reaction studies in China. With a flight length of about 76 m, neutrons in Endstation 2 show excellent neutron energy resolution,

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12335011, 12005115, 12205326, 12405348, 12475129, 12405144), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2023YFA1606602), the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2023A1515110711, 2025A1515012112), and the Youth Innovation Promotion Association CAS (Grant No. 2023014).

† Corresponding author. E-mail: jiangwei@ihep.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhanggx37@mail.sysu.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: chenyonghao@ihep.ac.cn

providing ideal conditions for experiments such as neutron capture cross-section measurements relevant to astrophysical nucleosynthesis and key nuclear data. Neutron capture reactions are measured mainly using low- to intermediate-energy neutrons (below 1 MeV), and the precision of experimental results strongly depends on the neutron energy spectrum in this energy range. Due to the stable operation of the CSNS, the neutron energy spectrum of Back-n remains highly stable over extended periods, but it also evolves with structural adjustments of the CSNS's components such as the target and beam window. In this work, the ${}^6\text{Li-Si}$ beam monitor at Back-n Endstation 2 is used to measure the low- to intermediate-energy neutron spectrum under the 50-15-40 collimator configuration in different periods. Relative neutron energy spectra in the 0.3 eV–1 MeV range (100 bpd (bin per decade)) are obtained before and after the proton beam window replacement in 2024 and the target structure adjustment in 2025. The unfolding threshold is extended down to 10 eV, achieving a total uncertainty of 1%–6.8%. The results indicate that the new proton beam window reduces the neutron flux intensity in the eV to keV energy range and significantly changes the spectral shape, whereas adjustments to the target slightly increase the neutron flux intensity in the eV to keV range and marginally modify the spectral shape. Additionally, by analyzing the neutron energy spectra under two different commonly used collimator configurations, the comparisons are also made of the differences in their spectral shapes. The datasets presented in this paper are openly available at <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00214>.

Keywords: Back-n, neutron energy spectrum, neutron capture reaction, cross-section measurement

DOI: [10.7498/aps.75.20251269](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251269)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251269](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251269)