



中国散裂中子源反角白光中子束流参数的初步测量

鲍杰 陈永浩 张显鹏 栾广源 任杰 王琦 阮锡超 张凯 安琪 白怀勇 曹平 陈琪萍 程晶晶 崔增琪 樊瑞睿 封常青 顾旻皓 郭凤琴 韩长材 韩子杰 贺国珠 何泳成 何越峰 黄翰雄 黄蔚玲 黄锡汝 季筱路 吉旭阳 江浩雨 蒋伟 敬罕涛 康玲 康明涛 兰长林 李波 李论 李强 李晓 李阳 李祥 刘荣 刘树彬 刘星言 马应林 宁常军 聂阳波 齐斌斌 宋朝晖 孙虹 孙晓阳 孙志嘉 谭志新 唐洪庆 唐靖宇 王鹏程 王涛峰 王艳凤 王朝辉 王征 文杰 温中伟 吴青彪 吴晓光 吴焯 解立坤 羊奕伟 杨毅 易晗 于莉 余滔 于永积 张国辉 张旌 张林浩 张利英 张清民 张奇伟 张玉亮 张志永 赵映潭 周良 周祖英 朱丹阳 朱科军 朱鹏

Experimental result of back-streaming white neutron beam characterization at Chinese spallation neutron source

Bao Jie Chen Yong-Hao Zhang Xian-Peng Luan Guang-Yuan Ren Jie Wang Qi Ruan Xi-Chao Zhang Kai An Qi Bai Huai-Yong Cao Ping Chen Qi-Ping Cheng Pin-Jing Cui Zeng-Qi Fan Rui-Rui Feng Chang-Qing Gu Min-Hao Guo Feng-Qin Han Chang-Cai Han Zi-Jie He Guo-Zhu He Yong-Cheng He Yue-Feng Huang Han-Xiong Huang Wei-Ling Huang Xi-Ru Ji Xiao-Lu Ji Xu-Yang Jiang Hao-Yu Jiang Wei Jing Han-Tao Kang Ling Kang Ming-Tao Lan Chang-Lin Li Bo Li Lun Li Qiang Li Xiao Li Yang Li Yang Liu Rong Liu Shu-Bin Liu Xing-Yan Ma Ying-Lin Ning Chang-Jun Nie Yang-Bo Qi Bin-Bin Song Zhao-Hui Sun Hong Sun Xiao-Yang Sun Zhi-Jia Tan Zhi-Xin Tang Hong-Qing Tang Jing-Yu Wang Peng-Cheng Wang Tao-Feng Wang Yan-Feng Wang Zhao-Hui Wang Zheng Wen Jie Wen Zhong-Wei Wu Qing-Biao Wu Xiao-Guang Wu Xuan Xie Li-Kun Yang Yi-Wei Yang Yi Yi Han Yu Li Yu Tao Yu Yong-Ji Zhang Guo-Hui Zhang Jing Zhang Lin-Hao Zhang Li-Ying Zhang Qing-Min Zhang Qi-Wei Zhang Yu-Liang Zhang Zhi-Yong Zhao Ying-Tan Zhou Liang Zhou Zu-Ying Zhu Dan-Yang Zhu Ke-Jun Zhu Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 080101 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182191

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182191>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国散裂中子源在大气中子单粒子效应研究中的应用评估

Application and evaluation of Chinese spallation neutron source in single-event effects testing

物理学报. 2019, 68(5): 052901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181843>

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

物理学报. 2018, 67(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

基于裂变 γ 标识技术的瞬发裂变中子谱测量新方法

A novel method to measure prompt fission neutron spectrum based on fission γ tagging technique

物理学报. 2018, 67(21): 212501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180563>

利用气泡探测器测量激光快中子

Laser fast neutron measured by bubble detector

物理学报. 2018, 67(22): 222101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181035>

基于3.5 MeV射频四极质子加速器硼中子俘获治疗装置的束流整形体设计

Design of beam shaping assembly based on 3.5 MeV radio-frequency quadrupole proton accelerator for boron neutron capture therapy

物理学报. 2018, 67(14): 142801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180380>

快中子照相模拟分析与实验验证

Simulation analysis and experimental verification of fast neutron radiography

物理学报. 2015, 64(19): 198702 <https://doi.org/10.7498/aps.64.198702>

中国散裂中子源反角白光中子束流参数的初步测量*

鲍杰¹⁾ 陈永浩^{2)3)†} 张显鹏⁴⁾ 栾广源¹⁾ 任杰¹⁾ 王琦¹⁾ 阮锡超¹⁾
张凯¹⁾ 安琪⁵⁾⁶⁾ 白怀勇⁷⁾ 曹平⁵⁾⁶⁾ 陈琪萍⁸⁾ 程晶晶⁹⁾ 崔增琪⁷⁾
樊瑞睿²⁾³⁾⁵⁾ 封常青⁵⁾⁶⁾ 顾旻皓²⁾⁵⁾ 郭凤琴²⁾³⁾ 韩长材⁴⁾ 韩子杰⁸⁾
贺国珠¹⁾ 何泳成²⁾³⁾ 何越峰⁹⁾ 黄翰雄¹⁾ 黄蔚玲²⁾³⁾ 黄锡汝⁵⁾⁶⁾
季筱路²⁾⁵⁾ 吉旭阳⁵⁾¹⁰⁾ 江浩雨⁷⁾ 蒋伟²⁾³⁾ 敬罕涛²⁾³⁾ 康玲²⁾³⁾
康明涛²⁾³⁾ 兰长林¹³⁾ 李波²⁾³⁾ 李论²⁾³⁾ 李强²⁾³⁾ 李晓²⁾³⁾ 李阳²⁾⁵⁾
李祥²⁾³⁾ 刘荣⁸⁾ 刘树彬⁵⁾⁶⁾ 刘星言⁸⁾ 马应林²⁾³⁾ 宁常军²⁾³⁾
聂阳波¹⁾ 齐斌斌⁶⁾ 宋朝晖⁴⁾ 孙虹²⁾³⁾ 孙晓阳²⁾³⁾ 孙志嘉²⁾³⁾⁵⁾
谭志新²⁾³⁾ 唐洪庆¹⁾ 唐靖宇²⁾³⁾ 王鹏程²⁾³⁾ 王涛峰¹²⁾ 王艳凤²⁾³⁾
王朝辉¹⁾ 王征²⁾³⁾ 文杰⁸⁾ 温中伟⁸⁾ 吴青彪²⁾³⁾ 吴晓光¹⁾ 吴焯²⁾³⁾
解立坤⁵⁾¹⁰⁾ 羊奕伟⁸⁾ 杨毅¹⁾ 易晗²⁾³⁾ 于莉⁵⁾⁶⁾ 余滔⁵⁾⁶⁾ 于永积²⁾³⁾
张国辉⁷⁾ 张旌²⁾³⁾ 张林浩²⁾³⁾ 张利英²⁾³⁾⁵⁾ 张清民¹¹⁾ 张奇伟¹⁾
张玉亮²⁾³⁾ 张志永⁵⁾⁶⁾ 赵映潭¹¹⁾ 周良²⁾³⁾ 周祖英¹⁾ 朱丹阳⁶⁾
朱科军²⁾⁵⁾ 朱鹏²⁾³⁾

1) (中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413)

2) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

3) (东莞中子科学中心, 东莞 523803)

4) (西北核技术研究所, 西安 710024)

5) (核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049, 合肥 230026)

6) (中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

7) (核物理与核技术国家重点实验室, 北京大学物理学院, 北京 100871)

8) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

9) (南华大学, 衡阳 421001)

10) (中国科学技术大学工程与应用物理系, 合肥 230026)

11) (西安交通大学, 西安 710049)

12) (北京航空航天大学, 北京 100083)

13) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2018年12月12日收到; 2019年2月17日收到修改稿)

* 国家重点研究发展计划 (批准号: 2016YFA0401601)、国家自然科学基金 (批准号: 11790321, 11805282) 和强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室开放基础研究 (批准号: SKLIPR1515, SKLIPR1516) 资助的课题。

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

中国散裂中子源 (CSNS) 已于 2018 年 5 月建设完工, 随后进行了试运行. 其中的反角白光中子束线 (Back-n) 可用于中子核数据测量、中子物理研究和核技术应用等多方面的实验. 本文报道对该中子束的品质参数测量实验过程以及最终实验结果. 实验主要采用中子飞行时间法, 利用 ^{235}U , ^{238}U 裂变室和 $^6\text{Li-Si}$ 探测器测量了中子能谱和中子注量率, 又利用闪烁体-互补金属氧化物半导体探测系统测量了中子束斑的剖面, 得到了该束线的初步实验测量结果. 其中白光中子的全能谱测量范围 eV—100 MeV, 给出了不确定度分析; 给出了中子注量率两个实验厅位置的满功率值; 给出了白光中子在直径 60 mm 情况下的全能区束斑. 通过与模拟结果的比较探讨了以上结果的合理性, 并提出了改进计划. 这些实验结果为以后该束线的核数据测量和探测器标定实验奠定了基础.

关键词: 中国散裂中子源, 反角白光中子, 中子飞行时间法, 中子束线特征参数

PACS: 01.52.+r, 29.25.Dz, 28.20.-v, 28.20.Pr

DOI: 10.7498/aps.68.20182191

1 引言

中国散裂中子源 (China spallation neutron source, CSNS) 是我国一个大型中子科学实验平台, 于 2018 年 5 月建设完工和达到预定束流功率, 并于 2018 年 8 月正式通过国家验收交付使用. CSNS 主要技术指标为: 满功率为 100 kW, 重复频率为 25 Hz, 质子束流能量为 1.6 GeV, 中子产额约 $2 \times 10^{16}/\text{s}$, 验收指标为 10 kW. 为了充分发挥 CSNS 的作用, 建设了一条专用的中子束线 [1-5]. 从反角引出的中子是直接从散裂靶出来的连续能量中子, 即白光中子. 其能区涵盖热能到几百 MeV 的范围, 且强度较大, 可用于中子核数据测量、中子物理实验研究和核技术应用. 本文主要针对反角白光中子束的参数及其相关性能进行测量研究.

反角白光中子束线及其实验厅如图 1 所示. 从散裂反应反角出射的中子, 经偏转磁铁后去掉了中子束中的带电粒子. 再经过中子束开关和一级准直

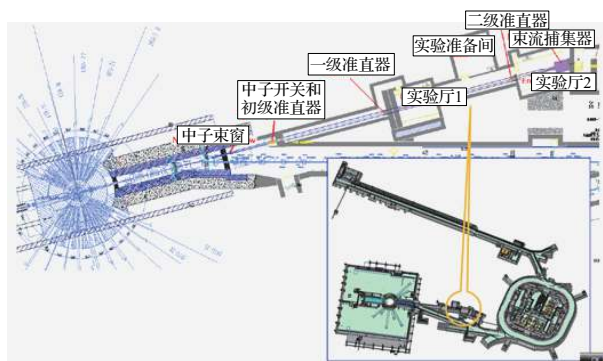


图 1 CSNS 装置布局及其反角白光中子源

Fig. 1. Arrangement of back-streaming neutron beam at CSNS.

器准直后进入实验厅-1、经过二级准直器进入实验厅-2. 实验厅-1 和实验厅-2 中心距离中子靶站几何长度分别约为 55 m 和 75.8 m. 通过准直器后的中子束斑有 3 种尺寸, 分别是直径为 30 mm 和 60 mm 的圆形束斑以及 90 mm 的正方形束斑, 可供不同实验选用. 本文主要针对用于未来核数据测量及中子物理实验的 60 mm 直径中子束斑进行测量.

2 反角白光中子束的特点

1) 由加速器的设计可知 [6-8], 在正常运行的情况下, 其质子脉冲束频率为 25 Hz, 每个束脉冲又具有双束团结构, 还可以运行在单束团工作状态下, 如图 2 所示.

对于双束团模式, 单个束团的半高宽约 50 ns, 两束团之间的距离约 410 ns. 在要求高时间 (即能量) 分辨的物理实验中, 最好采用单束团进行实验, 如果采用双束团进行实验, 则需要对测量结果进行解谱分析.

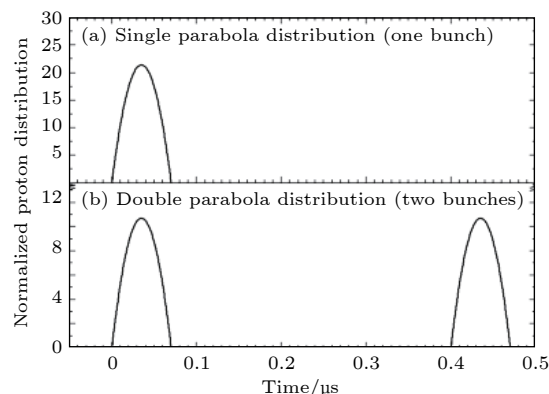


图 2 一个脉冲内的两种供束模式

Fig. 2. Two kinds of operation modes.

2) 中子能量区间宽. 入射能量为 1.6 GeV 的质子束打在钨靶上产生的散裂中子能谱可通过蒙特卡罗模拟计算得到. 图 3 给出了束流功率为 100 kW 时, 反角方向 75.8 m 远处的能谱. 可以看出, 中子的能量区间很宽, 低至热能, 高至几百 MeV; 而且高能中子成分还相当丰富. 考虑到在物理实验中需采用飞行时间法 (TOF), 而脉冲束周期只有 40 ms (对应于脉冲束频率 25 Hz) 的实际情况, 在测量中必须将热中子以及更低能量的中子去掉 (其飞行 75.8 m 所需的时间已接近或超过 40 ms). 由于镉 (Cd) 对热中子有很高的截面, 形成切割效应, 这里是采用在中子束线上游前端放置镉片的方法实现的.

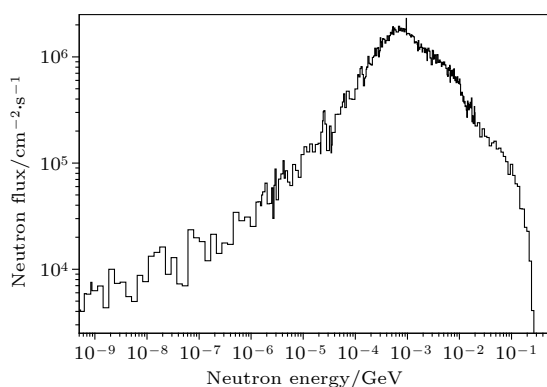


图 3 蒙特卡罗模拟得到的反角出射的散裂中子能谱
Fig. 3. Stimulated neutron energy spectrum of back-streaming beam.

3) 每个质子脉冲产生的 γ 射线强度高时间短. 模拟计算表明每个脉冲内伴随散裂反应产生的 γ 射线与散裂中子产额比约 1:2.3. 由于产生的中子能量分布很宽, 因而飞行一段距离后分布在很宽的时间段内, 对探测器来讲有足够的响应时间利于测量; 而对伴生的瞬发 γ 射线, 无论其能量高低都以光速行进, 因此集中在与质子束团相当的时间范围内 (每个约 50 ns). 若用探测器在实验厅进行测

量, 则在约 50 ns 的时间间隔内就有大于 10^6 的 γ 射线入射到探测器上, 称之为“ γ 闪光” (γ -flash), 它使探测器饱和甚至阻塞, 影响后续事件的记录, 在测量中必须想法消除“ γ 闪光”造成的影响. 上述束流特点有别于以往经验, 对实验测量提出新要求, 下文具体实验描述中都会有体现.

3 反角白光中子束流参数测量

中子源的特性主要包括三点: 中子能谱、中子强度和角分布, 具体针对反角白光中子束线就是中子能谱、实验位置的中子注量率和准直约束下的中子束斑. 对于中子能谱和注量率的测量, 参考了已有宽能区脉冲白光中子源的测量技术^[9-16], 并考虑到 CSNS 反角白光中子束能量范围宽的特点, 采用飞行时间法实现的, 利用 ^{235}U 裂变室 (0.15 MeV 以上能区中子能谱和注量率测量)、 ^{238}U 裂变室 (1 MeV 以上中子能谱和注量率测量)、 $^6\text{Li-Si}$ 探测器系统 (0.2 MeV 以下中子能谱和注量率测量) 作为主探测器, 在低能和高能中子区间互相校验结果, 保证实验测量的准确性. 中子束斑测量则是采用基于 $\text{ZnS}(\text{Ag})/^6\text{Li}$ 转换屏和 EJ230 塑闪屏的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 照相系统进行的, 其中 $\text{ZnS}(\text{Ag})/^6\text{Li}$ 转换屏作为低能区探测器, EJ230 塑闪屏作为高能区探测器, 同样利用飞行时间法测量不同能段.

3.1 中子能谱和注量率测量

3.1.1 高能能区的中子能谱和注量率测量

1) 实验装置

中子能谱和注量率测量系统的探测器为多层 (5 层) 快裂变室^[17-20], 如图 4 所示. 多层快裂变室

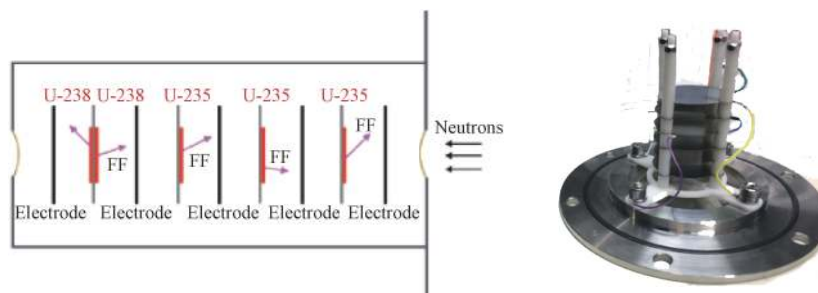


图 4 多层快裂变室

Fig. 4. The multi layer fission chamber.

内部是高纯度的 ^{235}U 和 ^{238}U 靶片, 镀层平均厚度约 $280\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 镀层活性区直径 $40\ \text{mm}$, 极板间距 $10\ \text{mm}$. 裂变室主要由靶片、收集极、外壳、绝缘部件、导线、进气孔和出气孔等部分组成. 裂变室模型采用铜质的外壳和收集极. 收集极与靶片基板间、靶片基板与外壳间均用绝缘材料隔开, 通过改变绝缘垫片的厚度来控制靶片与收集极之间的距离, 即极板间距. 靶片接地, 收集极与MESYTEC-MSI-8前置放大器相连, 输出时间信号接 $300\ \text{V}$ 正高压. 裂变室工作气体为氙甲烷P10(甲烷10%, 氙气90%), 1个标准大气压.

探测器时间分辨和粒子分辨是对重要并需要兼容的指标, 初步选定极间距 $10\ \text{mm}$, 实验上可以有效分辨 α 粒子和裂变信号, 系统时间分辨好于 $35\ \text{ns}$.

探测器信号通过同轴电缆接入前置放大器和成形放大器, 然后进入读出电子学系统. 前置放大器使用Mesytec公司的MSI-8集成放大器, 它是一款紧凑型8通道成形放大器, 且具有集成的定时滤波放大功能. 由于模块化的设置, 每个通道可以单独选择前置放大和成形模块的类型, MSI-8可同时输入8路信号, 每路输入信号对应T(时间)和E(能量)两个输出信号, 如图5所示, 其中负信号为T信号, 正信号为E信号. T信号的上升时间约 $70\ \text{ns}$, 通过恒比定时可以得到好于 $20\ \text{ns}$ 的定时精度, 满足测量反角白光中子源的 $10\ \text{MeV}$ 以下中子的飞行时间的需求.

图6是多层快裂变室的实验测量时间信号, 左侧两个相隔较近的小信号就是两个束团的 γ -flash, 右侧较大的信号是裂变碎片的信号. 通过分析不同的信号发现, 裂变碎片的能量信号和时间信号幅度都很大, α 粒子的能量信号和时间信号幅度都较



图5 MSI-8的输出信号

Fig. 5. The output signal of MSI-8 module.

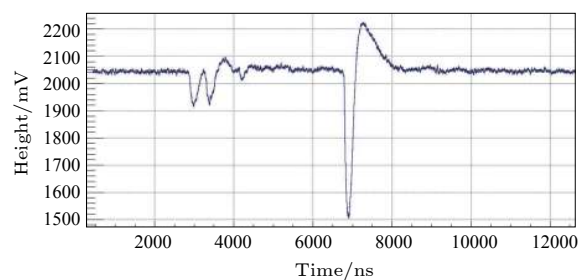


图6 裂变室的时间信号

Fig. 6. The time signal of the fission chamber.

小, 而 γ -flash的能量信号很大, 时间信号远小于裂变信号. 根据这一特征, 可以比较容易区分信号的类型.

2) 实验测量

能谱测量主要在实验厅-2进行, 采用单束团模式, 束流功率 $15\ \text{kW}$ 左右. 中子注量率测量采用相同的裂变电离室, 只是将其中的靶片换成了精确定量的两片 ^{235}U 和两片 ^{238}U , 其定量精度为 1.5% , 注量率测量实验时的加速器运行参数与能谱测量基本相同.

裂变室的五个靶片对应五路输出信号, 这五路信号进入成形放大器MSI-8, MSI-8分别处理每一路信号, 并输出能量信号E和时间信号T. 通过调节MSI-8的增益, 可使E信号幅度为 $0\text{--}400\ \text{mV}$, 而T信号的信号幅度在 $-1500\text{--}0\ \text{mV}$ 之间. 把E信号和T信号通过数据获取系统的调理电路板(SCM板)后再接入波形数字化采集卡(FDM板), 通过DAQ软件就可以获取波形数据. 整个数据获取系统采用外部触发方式, 触发源是质子束流的脉冲拾取信号, 这样探测器测得的信号就和质子打靶有了严格的一一对应关系, 保证了中子飞行时间的精度.

3) 数据处理和实验结果

数据处理的思路是: 根据所获取的裂变碎片的波形数据, 确定有效信号及其过零时刻; 确定该有效信号的中子飞行距离和飞行时间; 得到中子飞行时间谱(即裂变率谱); 进行探测效率修正得到中子能谱等四个步骤.

a) 有效信号过零时刻的确定. 根据原始数据的存储结构, 把每个周期内(FCT给出)的有效信号通过过阈触发, 按时间顺序排列; 之后通过滑动滤波(多点平均)得到光滑的有效裂变信号; 再通过微分方法, 并作光滑处理和拟合处理, 得到过零点. 图7是得到有效信号过零点的一个具体实例.

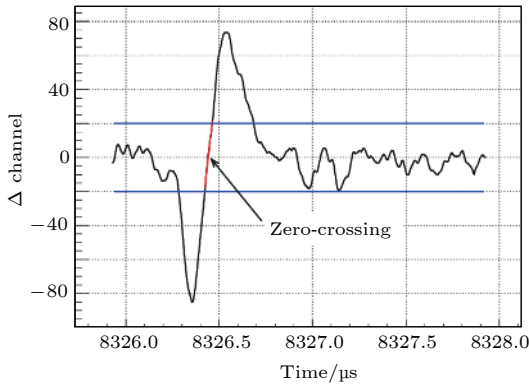


图 7 过零定时效果示意

Fig. 7. Zero-crossing time determination of signal.

b) 中子的飞行距离和飞行时间的确定. 根据实验测量到的探测器介质的特征共振峰位及其与标准截面库给出的该特征共振峰位的比较, 确定中子飞行距离. 再通过散裂反应 γ 脉冲和裂变碎片脉冲 (即中子到达时刻) 的相对位置确定中子的飞行时间 (图 8). 中子飞行时间等于 γ 脉冲和中子到达时刻之间的时间差与 L/c 之和 (其中 c 是光速, L 是探测器到散裂靶的距离).

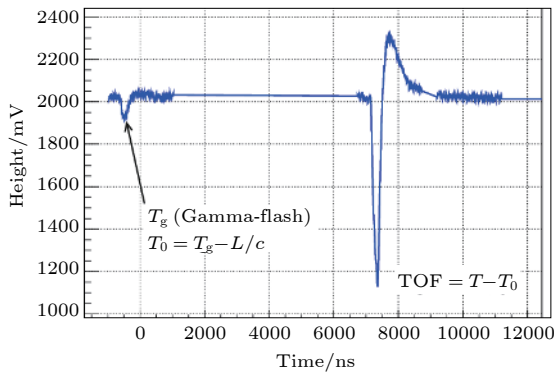


图 8 有效裂变信号的飞行时间确定示意图

Fig. 8. Time determination from fission signal.

c) 中子飞行时间谱 (即裂变率谱) 的获得. 每一个周期内的有效信号 (即裂变碎片信号) 与中子起飞时刻之差即为中子的飞行时间. 记录中子数目随中子飞行时间的变化即得到中子飞行时间谱, 即裂变事件率的时间谱, 如图 9 所示.

d) 中子能谱和注量的数据处理过程. 中子能谱根据下面公式得到:

$$\Phi(E_n) = \frac{N(E_n)}{\sigma(E_n) N_V \varepsilon N_P} \cdot K, \quad (1)$$

式中 E_n 是入射中子的能量, 由中子的飞行时间和距离确定; $N(E_n)$ 是能量为 E_n 的中子与裂变室靶

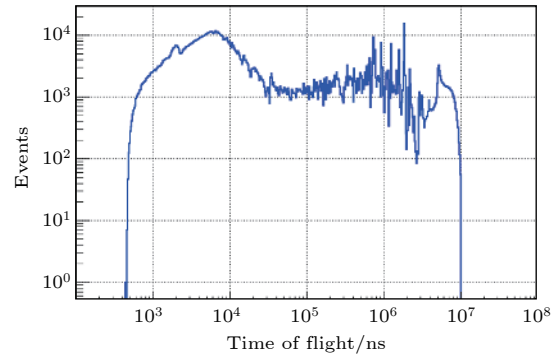


图 9 中子飞行时间谱

Fig. 9. Neutron time-of-flight spectrum.

片作用产生的裂变事件, 由实验测量得到; $\sigma(E_n)$ 是能量为 E_n 的中子与裂变室靶片作用的裂变截面, 可由评价数据库得到; N_V 是裂变室靶片中所含裂变物质的原子数, 制靶期间由靶片重量算得可控制到 1.5% 以内; ε 是裂变碎片的探测效率, 根据模拟计算和预备实验得到; N_P 是实验测量的、引起散裂中子反应的总质子数; K 是束流功率 100 kW 时对应的单位时间的质子数, 其值为 $3.9 \times 10^{14}/s$. 对各能量区间的中子完成计算后, 就可以得到中子能谱和各能量间隔内的中子注量率.

3.1.2 低能区间的中子能谱和注量率测量

低能能区的中子能谱和注量率是用 ${}^6\text{LiF}$ 探测器和 ${}^{235}\text{U}$ 裂变室测量的. 由于在低能区间 ${}^{235}\text{U}$ 的裂变截面存在共振, 按照国际原子能机构 (IAEA) 推荐的标准截面数据在低能量区间, ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反应产生的两个带电粒子的能量较大 (4.8 MeV), 很容易测量, 截面值平滑, 在低能区间将以含 ${}^6\text{Li}$ 探测器的测量为主. ${}^6\text{LiF}$ 探测器的结构如图 10 所示, 将 ${}^6\text{LiF}$ 电镀到铝膜上制成转换靶, ${}^6\text{LiF}$ 厚度约 $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 电镀区直径 60 mm, 底衬铝膜厚

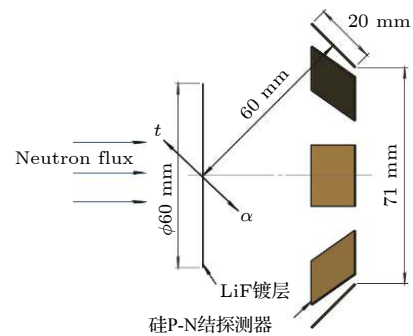


图 10 ${}^6\text{Li-Si}$ 探测器结构

Fig. 10. ${}^6\text{Li-Si}$ Detector structure.

约 $10\ \mu\text{m}$ (模拟表明对全能区中子注量率的影响不到万分之一). 离 ${}^6\text{LiF}$ 镀层轴心线上外部约 $30\ \text{mm}$ 处平面上, 对称放置 8 个金硅面垒型探测器, 用于测量反应带电粒子, 同时保证探测器不在中子束线内. 每个探测器灵敏面积 $20\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$, 每个探测器的过中心法线通过 ${}^6\text{LiF}$ 靶的中心. 中子同 ${}^6\text{Li}$ 反应产生的带电粒子将被探测器记录, 由此得到低能区中子的能谱和注量率.

${}^6\text{Li-Si}$ 探测器测量中子能谱和注量率的过程与上节裂变室的测量类似, 这里不再赘述.

用 ${}^6\text{Li-Si}$ 探测器测量中子能谱和注量率如图 11 中的黑方块所示, 其能区覆盖范围从 eV 至 $200\ \text{keV}$. 圆圈代表用 ${}^{235}\text{U}$ 裂变室测得的结果, 覆盖 $0.15\ \text{MeV}$ 以上能区, 但在低能区, 特别是 $2\ \text{keV}$ 以下, 存在共振. 黑圆点代表用 ${}^{238}\text{U}$ 裂变室测得的结果, 覆盖 $1.1\ \text{MeV}$ 以上能区. 整个中子能谱与实验前的模拟计算结果基本一致.

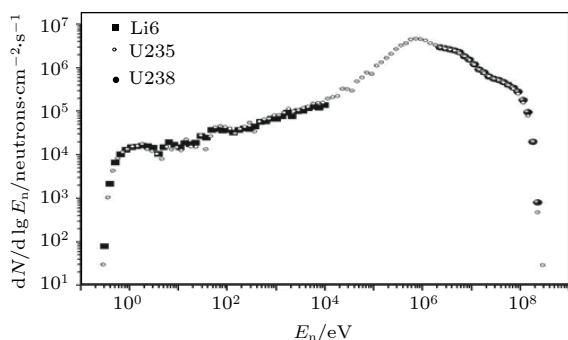


图 11 实验测得的 CSNS 反角白光中子能谱

Fig. 11. Experimental result of back-streaming white neutron energy spectrum.

根据中子能谱, 结合质子束流值和功率, 得到实验厅-1 (距离散裂中子靶站 $55\ \text{m}$) 在 $100\ \text{kW}$ 满功率运行时的中子注量率为 $1.75 \times 10^7\ \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 实验厅-2 (距离散裂中子靶站 $75.8\ \text{m}$) 在 $100\ \text{kW}$ 满功率运行时的中子注量率为 $7.03 \times 10^6\ \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 不确定度约为 3% , 两个测量厅的不确定度会有少许变化, 主要因为中子束斑和能谱上的微小变化.

3.2 束流剖面测量

3.2.1 中子束流剖面测量装置及工作原理

束流剖面测量采用闪烁体 + 反射镜 + 相机的方式, 测量装置示意图如图 12 所示.

辐射图像转换屏采用了两种类型的闪烁体: 一

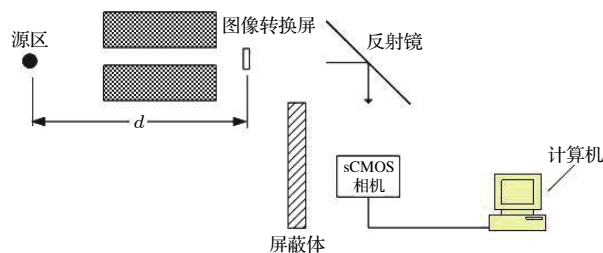


图 12 中子束剖面测量装置

Fig. 12. Neutron profile measurement equipment.

种是 $\phi 150\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 的 EJ-230 塑料闪烁体, 主要对快中子响应; 另一种为 ${}^6\text{LiF/ZnS}$ 的闪烁屏 (EJ-426HD2, ${}^6\text{LiF}:\text{ZnS}$ 为 $1:2$, 厚度为 $0.32\ \text{mm}$), 主要对低能中子响应.

探测器的光电转换器件和数据采集部分采用的是 ANDOR-ISTAR-sCMOS 相机, 其基本参数为: 像素阵列 2560×2160 , 像素大小 $6.5\ \mu\text{m}$, 全幅最大帧频率 50 , 门控时间 $< 5\ \text{ns}$, 制冷温度 $0\ ^\circ\text{C}$. 镜头为 Nikon $50\ \text{mm}\ 1/1.8$. 反射镜厚度 $2\ \text{mm}$. 测量中, 采用 Integrate On Chip 模式, 经多个脉冲采集后在芯片上累加一次读出, 可大大降低读出噪声.

实验时需如图 13 所示. 触发信号由每个周期的触发信号提供, 相机延迟采用内部延迟, 结合相机的延迟时间以及门宽来进行中子飞行时间的选通, 从而选择不同的中子能量段作剖面测量.

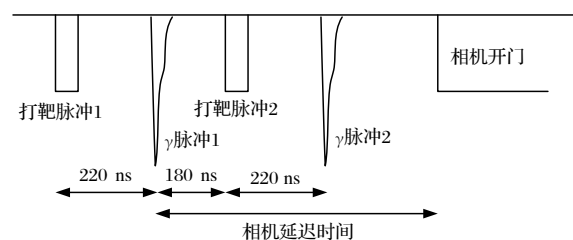
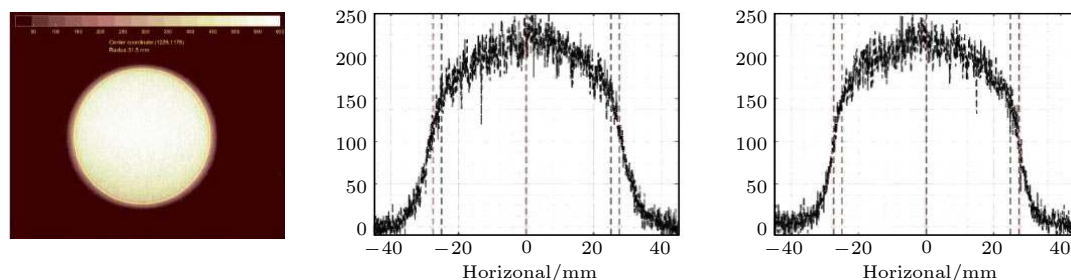


图 13 探测器触发时间关系

Fig. 13. Timing-serial of neutron profile detection.

3.2.2 中子束流剖面测量的数据处理和结果

图像处理内容包括图像预处理、系统性能标定和束流剖面判定尺寸判读等环节. 图像预处理包括: 尺寸标定、 γ 斑点 (亮白点) 去除和本底扣减等内容. 在此基础上分别完成了中子束剖面轮廓判定及尺寸判读、系统调制传递函数测量和中子能谱测量的初步分析. 系统性能标定主要指系统的空间分辨能力, 本实验中通过厚刀口法测量得到探测系统的调制传递函数, 从而得到系统空间分辨能力, 并

图 14 中子束斑剖面分布及其在 x 轴和 y 轴上的灰度值分布Fig. 14. Neutron profile distribution and grey scale information on x and y axis.

利用狭缝法验证. 束流剖面判定尺寸判读基于 Hough 变换的圆检测算法, 得到不同能量对束流轮廓、尺寸的影响, 不同能量不同计数圈内非均匀性变化规律, 束剖面轮廓中心与“重心”偏差分析等结果.

对中子束轮廓判断、尺寸大小和均匀性进行了评估和定量分析, 并对中子重点能区的能谱 (0.1—20.0 MeV) 进行了初步实验研究. 在束斑直径理论值为 $\Phi 50$ mm 的实验厅-1 (距中子靶 55 m), 实验测得的半高值 (FWHM) 对应的中子束斑直径为 $\Phi 55$ mm, 峰值强度约 75% 时对应的束斑直径为 $\Phi 50$ mm, 与理论值一致. 在束斑直径理论值为 $\Phi 60$ mm 的实验厅-2 (距中子靶 75.8 m), 实验测得的半高值 (FWHM) 对应的中子束斑直径为 $\Phi 63$ mm, 峰值强度 75% 时对应的束斑直径为 $\Phi 60$ mm, 也与理论值一致. 进一步分析表明, 束斑的轮廓尺寸与中子能量无关, 这说明各种能量的中子在束斑内是均匀分布的, 中子束强度在已判定轮廓的 80% 范围内不均匀性小于 10%, 且束剖面不均匀性与能量无关. 剖面上的全能区中子束强度分布图及其在 x 轴方向和 y 方向的投影如图 14 所示.

4 实验结果讨论

CSNS 反角白光中子平台的建设完成, 对国内的中子核数据工作非常有利, 而该中子束线特征参数测量对加速器及束线前期设计起着检验作用, 为未来的核数据测量及核物理实验提供基础的参数, 对实验的设计以及数据处理意义重大, 必须得到准确测量结果. 目前通过测量给出了初步实验结果, 分别给出了中子能谱、中子注量和中子束流剖面等结果. 由图 11 的反角白光中子能谱可以看到, 目前按照 IAEA 推荐的 3 个核素探测介质得到的结果互相符合得很好, 而 3 个核素的截面不确定

度很好, 说明测量结果是可信的. 实验结果有 4 项修正量, 分别是裂变产物碎片自吸收系数修正 2.5%, 低能区碎片修正 1%, 高能区中子修正 1%, 同位素修正 8.5%. 不确定度分析包含统计不确定度 2%, 标准靶定量不确定度 1.5%, 推荐截面不确定度 (20 MeV 以下小于 1%, 以上小于 5%), 合成不确定度 2.7%—5.6%.

束斑剖面的测量结果符合事先模拟计算^[7]的结果 (图 15), 在束斑直径和灰度值分布上模拟和实验一致.

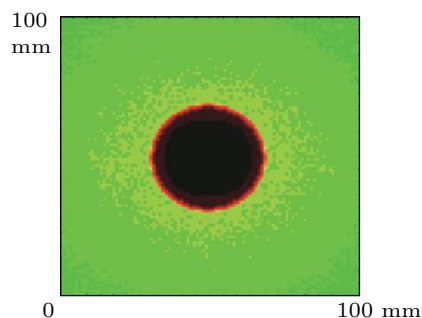


图 15 60 mm 直径束斑模拟

Fig. 15. Simulation of neutron profile in 60 mm diameter.

5 结论

目前得到的 CSNS 反角白光中子束流特征实验结果是初步的. 对于中子能谱和注量率的测量尚存在两个问题: 低能区中子能谱是重点关注对象, 特别是对其可能存在的固有的结构需要精确掌握, 用 ${}^6\text{Li-Si}$ 探测器是合适的, 但是其设计存在缺陷, 后面测量改进的方法是尽量减少束斑内物质的厚度包括闪烁体合结构材料, 同时使光电倍增管偏出束线, 利用光的全反射收集, 减少探测器的死时间; 利用 ${}^{235}\text{U}$ 裂变室测量中子能谱和注量率是可以的, 但在低能区存在密密麻麻的共振峰, 后面还要用其他实验结果来验证, 但是用来做中子注量监测是合

适的. 此外在低能区还需要用含 ^3He , ^6Li 或 ^{10}B 等标准截面的探测介质来进行进一步的实验验证. 对于中子束流剖面测量, 需要做出各能量区间标定后的剖面分布, 而不仅是转化为可见光后的近似剖面结果.

实验准备和测量过程中, 感谢中国原子能科学研究院的唐洪庆和周祖英两位老师的悉心指导, 感谢探测器标定过程中加速器组提供的优质束流, 感谢散裂中子源值班人员放弃春节假期坚守岗位.

参考文献

- [1] Tang J Y, Fu S N, Jing H T, Tang H Q, Wei J, Xia H H 2010 *Chin. Phys. C* **34** 121
- [2] Jing H T, Tang J Y, Tang H Q, Xia H H, Liang T J, Zhou Z Y, Zhong Q P, Ruan X C 2010 *Nucl. Instr. Meth. A* **621** 91
- [3] Tang J Y, Jing H T, Xia H H, Tang H Q, Zhang C, Zhou Z Y, Ruan X C, Zhang Q W, Yang Z 2013 *J. Atom. Ener.* **47** 47–1089 (in Chinese) [唐靖宇, 敬罕涛, 夏海鸿, 唐洪庆, 张闯, 周祖英, 阮锡超, 张奇玮, 杨征 2013 原子能科学技术 **47** 47—1089]
- [4] Wei J, Chen H, Chen Y, et al. 2009 *Nucl. Instr. Meth. A* **600** 10
- [5] An Q, Bai H Y, Bao J, et al. 2017 *J. Instr.* **12** 1748
- [6] Zhang L Y, Jing H T, Tang J Y, Wang X Q 2016 *Radi. Phys. Chem.* **127** 133
- [7] Zhang L Y 2018 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [张利英 2018 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [8] Zhang L Y, Jing H T, Tang J Y, et al. 2018 *Appl. Radi. Iso.* **132** 212
- [9] Liu S K 1986 *Neutron Physics* (Beijing: Atomic Energy Press) pp21–25 (in Chinese) [刘圣康 1986 中子物理 (北京: 原子能出版社) 第21—25页]
- [10] Marrone S, Mastinu P F, Abbondanno U, et al. 2004 *Nucl. Instr. Meth. A* **517** 389
- [11] Colonna N, Andriamonje S, Andrzejewski J, et al. 2011 *Nucl. Instr. Meth. B* **269** 3251
- [12] Guerrero C, Becares V, Cano-Ott D, et al. 2010 *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Korea Jeju Island, Korea, April 26–30, 2010*
- [13] Beyer R, Birgersson E, Elekes Z, Ferrari A, Grosse E, Hammaske R, Junghans A R, Kögler T, Massarczyk R, Matic A, Nolte R, Schwengner R, Wagner A 2013 *Nucl. Instr. Meth. A* **723** 151
- [14] Kino K, Furusaka M, Hiraga F, et al. 2011 *Nucl. Instr. Meth. A* **626** – **627** 58
- [15] Calviani M, Cennini P, Karadimos D, et al. 2008 *Nucl. Instr. Meth. A* **594** 220
- [16] Savvidis I, Lampondis C, Papaevangelou T, et al. 2007 *Radi. Meas.* **42** 1492
- [17] Weiss C 2010 *Ph. D. Dissertation* (Wien: Atominstitut der österreichischen Universitäten)
- [18] Gayther D B 1990 *J. Metrologia* **27** 221
- [19] Wang Q, Bao J, Hou L, Ruan X C, Su X B, Jing H T, Li Q 2015 *J. Nucl. Tech.* **38** 100403 (in Chinese) [王琦, 鲍杰, 侯龙, 阮锡超, 苏晓斌, 敬罕涛, 李强 2015 核技术 **38** 100403]
- [20] Luan G Y, Wang Q, Bao J, Ruan X C, Ren J, Jing H T, Zhang K, Huang H X 2017 *J. Nucl. Tech* **40** 110501 (in Chinese) [栾广源, 王琦, 鲍杰, 阮锡超, 任杰, 敬罕涛, 张凯, 黄翰雄 2017 核技术 **40** 110501]

Experimental result of back-streaming white neutron beam characterization at Chinese spallation neutron source*

Bao Jie¹⁾ Chen Yong-Hao^{2)3)†} Zhang Xian-Peng⁴⁾ Luan Guang-Yuan¹⁾
 Ren Jie¹⁾ Wang Qi¹⁾ Ruan Xi-Chao¹⁾ Zhang Kai¹⁾ An Qi⁵⁾⁶⁾
 Bai Huai-Yong⁷⁾ Cao Ping⁵⁾⁶⁾ Chen Qi-Ping⁸⁾ Cheng Pin-Jing⁹⁾
 Cui Zeng-Qi⁷⁾ Fan Rui-Rui²⁾³⁾⁵⁾ Feng Chang-Qing⁵⁾⁶⁾ Gu Min-Hao²⁾⁵⁾
 Guo Feng-Qin²⁾³⁾ Han Chang-Cai⁴⁾ Han Zi-Jie⁸⁾ He Guo-Zhu¹⁾
 He Yong-Cheng²⁾³⁾ He Yue-Feng⁹⁾ Huang Han-Xiong¹⁾ Huang Wei-Ling²⁾³⁾
 Huang Xi-Ru⁵⁾⁶⁾ Ji Xiao-Lu²⁾⁵⁾ Ji Xu-Yang⁵⁾¹⁰⁾ Jiang Hao-Yu⁷⁾
 Jiang Wei²⁾³⁾ Jing Han-Tao²⁾³⁾ Kang Ling²⁾³⁾ Kang Ming-Tao²⁾³⁾
 Lan Chang-Lin¹³⁾ Li Bo²⁾³⁾ Li Lun²⁾³⁾ Li Qiang²⁾³⁾ Li Xiao²⁾³⁾
 Li Yang²⁾⁵⁾ Li Yang²⁾³⁾ Liu Rong⁸⁾ Liu Shu-Bin⁵⁾⁶⁾ Liu Xing-Yan⁸⁾
 Ma Ying-Lin²⁾³⁾ Ning Chang-Jun²⁾³⁾ Nie Yang-Bo¹⁾ Qi Bin-Bin⁶⁾
 Song Zhao-Hui⁴⁾ Sun Hong²⁾³⁾ Sun Xiao-Yang²⁾³⁾ Sun Zhi-Jia²⁾³⁾⁵⁾
 Tan Zhi-Xin²⁾³⁾ Tang Hong-Qing¹⁾ Tang Jing-Yu²⁾³⁾ Wang Peng-Cheng²⁾³⁾
 Wang Tao-Feng¹²⁾ Wang Yan-Feng²⁾³⁾ Wang Zhao-Hui¹⁾ Wang Zheng²⁾³⁾
 Wen Jie⁸⁾ Wen Zhong-Wei⁸⁾ Wu Qing-Biao²⁾³⁾ Wu Xiao-Guang¹⁾
 Wu Xuan²⁾³⁾ Xie Li-Kun⁵⁾¹⁰⁾ Yang Yi-Wei⁸⁾ Yang Yi¹⁾ Yi Han²⁾³⁾
 Yu Li⁵⁾⁶⁾ Yu Tao⁵⁾⁶⁾ Yu Yong-Ji²⁾³⁾ Zhang Guo-Hui⁷⁾ Zhang Jing²⁾³⁾
 Zhang Lin-Hao²⁾³⁾ Zhang Li-Ying²⁾³⁾⁵⁾ Zhang Qing-Min¹¹⁾ Zhang Qi-Wei¹⁾
 Zhang Yu-Liang²⁾³⁾ Zhang Zhi-Yong⁵⁾⁶⁾ Zhao Ying-Tan¹¹⁾ Zhou Liang²⁾³⁾
 Zhou Zu-Ying¹⁾ Zhu Dan-Yang⁶⁾ Zhu Ke-Jun²⁾⁵⁾ Zhu Peng²⁾³⁾

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

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

3) (*Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523803, China*)

4) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

5) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronic, Beijing 100049, Hefei 230026, China*)

6) (*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

7) (*State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

8) (*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

9) (*University of South China, Hengyang 421001, China*)

10) (*Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

11) (*Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

12) (*Beihang University, Beijing 100083, China*)

13) (*School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

(Received 12 December 2018; revised manuscript received 17 February 2019)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0401601), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11790321, 11805282), and the Open Basic Research of State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, China (Grant Nos. SKLIPR1515, SKLIPR1516).

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

Abstract

The Chinese spallation neutron source was completed in May 2018 and then subsequently commissioned. The Back-streaming white neutron beam line can be used in neutron nuclear data measurement, neutron physics research, and nuclear technology. In these experiments, it is necessary to know the neutron energy spectrum, the neutron flux, and the neutron beam profile of the neutron beam. In this paper, we present the preliminary measurements of these parameters. The neutron energy spectrum and neutron flux are measured by the time-of-flight method with a fission chamber equipped with ^{235}U and ^{238}U samples and a $^6\text{Li-Si}$ detector. The neutron beam profile is measured by a scintillator-CMOS detection system. The preliminary experimental measurements of the beam line are obtained. Among them, the energy spectrum measurement range of white neutrons is from eV to more than 100 MeV, which also gives an uncertainty analysis; the neutron fluence rate gives the full power value of the two experimental halls; the collimated white neutron beam spot is given under a diameter of 60 mm. The future plan is also given. The results of these experimental parameters can serve as the foundation for the future nuclear data measurement and detector calibration experiments of the beam line.

Keywords: China spallation neutron source, back-streaming white neutron, neutron time-of-flight method, neutron beam characterization

PACS: 01.52.+r, 29.25.Dz, 28.20.-v, 28.20.Pr

DOI: [10.7498/aps.68.20182191](https://doi.org/10.7498/aps.68.20182191)