

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

基于中国散裂中子源 Back-n 反角白光中子源的 10—100 eV 共振能区天然银中子全截面测量*

唐生达¹⁾²⁾³⁾ 陈永浩^{2)3)4)†} 杨振^{1)‡} 杨高乐²⁾³⁾⁵⁾ 彭俊勇²⁾³⁾⁴⁾ 邱奕嘉²⁾³⁾
任智洲⁶⁾ 朱通华⁶⁾ 樊瑞睿²⁾³⁾ 唐靖宇⁷⁾ 蒋伟²⁾³⁾ 易晗²⁾³⁾

1) (中山大学中法核工程与技术学院, 珠海 519082)

2) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

3) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

4) (中国科学院大学, 北京 100049)

5) (中山大学物理与天文学院, 珠海 519082)

6) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

7) (中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230026)

(2025 年 9 月 17 日收到; 2025 年 11 月 26 日收到修改稿)

银是考古领域十分常见的材料, 其中子全截面在基于中子共振透射分析 (neutron resonance transmission analysis, NRTA) 的科技考古场景中具有重要应用. 本工作基于中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 反角白光中子实验装置 (Back-n), 利用基于 ^{235}U 的快裂变电离室, 测量了天然银样品在 10—100 eV 范围内共振能区的中子全截面数据, 并结合 R 矩阵理论对天然银样品的中子透射率进行拟合, 得到了相应的共振参数. 本工作为 CSNS Back-n 上开展的 NRTA 方法学研究提供了新的数据支撑, 同时丰富了天然银的中子全截面实验测量数据. 本文数据集可在 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00208> 中访问获取.

关键词: 中子全截面, 天然银, 中国散裂中子源, Back-n**DOI:** 10.7498/aps.75.20251276**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251276

1 引言

中子共振透射分析 (neutron resonance transmission analysis, NRTA) 方法是一种通过测量和分析中子束流穿透样品后的透射率谱, 对样品开展元素成分分析的中子共振分析技术, 广泛应用于核安全、核燃料分析、考古等领域^[1-9], 具有无损、对样品要求较低、支持同位素分辨等优势. NRTA 技术的应用依赖于高质量的中子全截面数据, 同时

也需要高性能白光中子源支持. 中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 的反角白光中子实验装置 (Back-n) 是我国首台高性能白光中子源, 具有宽能谱、高通量和高能量分辨等特点^[10-12], 是开展 NRTA 方法学研究的优良平台.

天然银作为一种重要的贵金属材料, 常见于古代货币、器皿、装饰物中, 使用 NRTA 方法检测分析文物中的银元素含量, 对揭示冶炼工艺和货币流通体系具有重要价值. 天然银含有 ^{107}Ag 和 ^{109}Ag 两种同位素, 它们在中子能量 100 eV 以下区域具

* 国家自然科学基金 (批准号: 12405348)、中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2023014) 和国家重点研发计划课题 (批准号: 2023YFA1606602) 资助的课题.

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

‡ 通信作者. E-mail: yangzh97@mail.sysu.edu.cn

有清晰和独特的中子共振反应峰, 而且两者的共振峰之间重合较少, 是开展 NRTA 方法研究中的常用参考样品. 然而, 目前仅有 CENDL 和 JENDL 两个数据库提供天然银的全截面数据. 同时, 对于 ^{107}Ag 和 ^{109}Ag 同位素, 不同评价库之间存在较为明显的差异, 例如在 TENDL-2023 数据库中, ^{107}Ag 在 40.34 eV 共振处的最大全截面为 741.4 b, 但在 CENDL-3.2 评价库中对应的最大全截面为 988.84 b (共振能量为 40.1 eV), 两者截面相差约 25%. 在 ENDF/B-VIII.1 数据库中, ^{109}Ag 在 41.57 eV 共振处的最大全截面为 801.77 b, 而在 JEFF-3.3 数据库中对应的最大全截面为 522.799 b, 两者截面相差约 35%. 准确的实验测量数据不仅是核数据评价工作的重要基础, 同时也是开展 NRTA 高精度定量分析的先决条件. 本工作测量天然银样品的中子全截面, 对丰富核数据库以及 NRTA 方法学研究具有重要意义.

本文基于 CSNS Back-n, 使用基于 ^{235}U 的多层快裂变电离室 (fast ionization chamber for fission cross section measurement, FIXM)^[13], 采用飞行时间方法, 测量了有样和无样条件下的中子能谱, 得到了中子透射率随能量的变化关系, 最终结合银样品面密度得到了 10—100 eV 范围内天然银在共振能区的中子全截面, 同时结合 R 矩阵拟合软件 SAMMY 得到了对应的共振参数.

2 实验测量

2.1 实验装置及平台

CSNS 是我国首台脉冲型散裂中子源^[14], 其将

质子加速至 1.6 GeV, 并以 25 Hz 的频率轰击钨靶发生散裂反应, 产生高通量中子. 如图 1 所示, 质子束流经过 15° 的偏转磁铁后轰击散裂靶, 产生大量中子及带电粒子, 在与打靶质子束流呈 180° 的反角方向, 带电粒子被偏转磁铁扫除, 而中子则继续沿着反角方向, 经过中子开关和准直器后到达实验厅, 反角方向中子束流的能区覆盖范围非常广 (0.5 eV—300 MeV)^[15-19], 称为反角白光中子实验装置 (Back-n). Back-n 有实验厅 1 (End Station 1, ES#1) 和实验厅 2 (End Station 2, ES#2) 两个实验厅, 分别位于距散裂靶约 55 m 和 76 m 的位置. 基于 Back-n 的中子全截面测量由样品和探测器两部分构成, 通常将样品放置在 ES#1, 探测器放置在 ES#2, 这种配置能够有效降低散射中子本底的影响.

2.2 样品与探测器

实验测量所用的高纯度天然银 (Ag) 样品如图 2(a) 所示, 样品厚度为 0.3 mm, 边长为 90 mm, 质量为 25.7897 g, 面密度为 0.3184 g/cm². 此外, 实验过程中使用了 0.2 mm 厚、边长 90 mm 的金 (^{197}Au) 和 0.5 mm 厚、边长 90 mm 的钴 (^{59}Co) 作为吸收片. 实验配置如图 2(b) 所示, Ag 样品及吸收片被固定在各自支架上, 放置在 ES#1 的真空靶室中. 吸收片始终固定在中子束流中心位置, 用于评估中子本底水平.

FIXM 探测器如图 3 所示, 其内部含有两片平行放置的 ^{235}U 中子转换层. 中子诱发 ^{235}U 发生裂变反应, 产生的裂变碎片引起工作气体 (90% 氩气+10% 四氟化碳) 电离并产生信号, 探测器信号

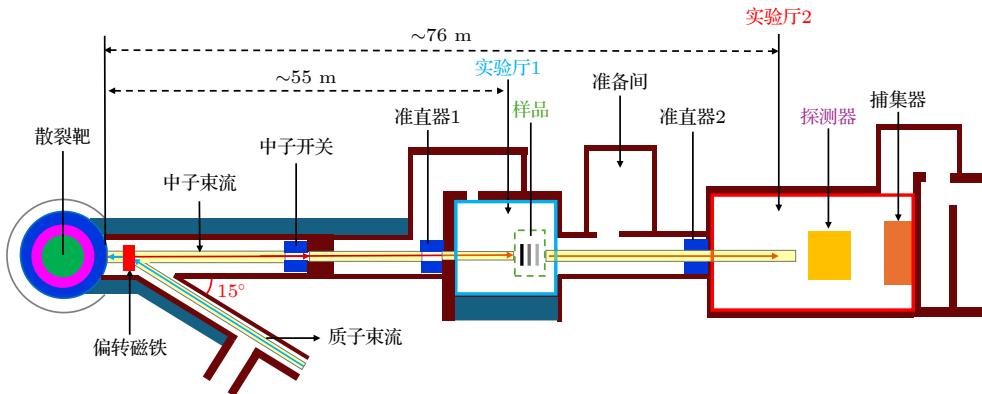


图 1 CSNS Back-n 中子源及中子全截面测量平台

Fig. 1. The layout of the Back-n white neutron source at CSNS and the neutron total cross section measurement setup.

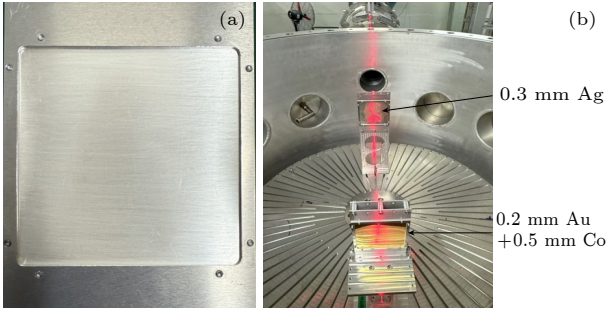


图 2 天然银样品 (a) 和实验配置 (b)

Fig. 2. Natural silver sample (a) and experimental setup (b).

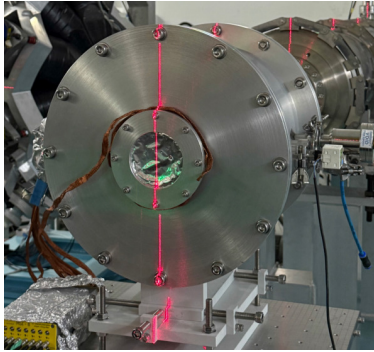


图 3 FIXM 探测器

Fig. 3. FIXM detector.

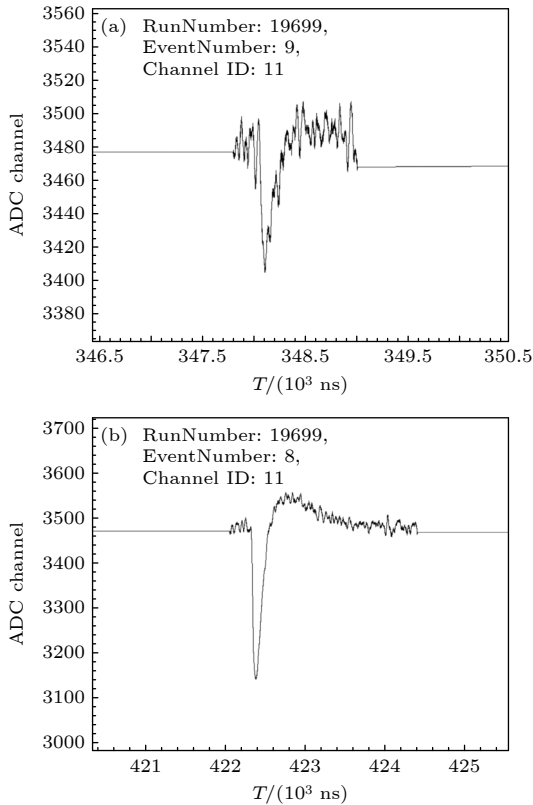


图 4 (a) α 粒子信号和 (b) 裂变碎片信号

Fig. 4. (a) α particle signal and (b) fission fragment signal.

首先输入到电荷灵敏前置放大器, 然后再将前放的时间输出信号 (timing output) 输入至数据采集卡 (digitizer) 中, 以 1 GHz 采样率完整采集每个时间信号, 以便后续开展详细的数据分析工作 [20,21]. 图 4 分别展示了 α 粒子和裂变碎片的特征信号.

本次实验, CSNS 质子打靶功率为 170 kW, 实验共计 85 h, 其中有样测量 45 h, 无样测量 40 h. 实验采用“靶包束”配置, 样品 (尺寸 90 mm \times 90 mm) 完全覆盖中子束斑, 保证所有束流中子均穿过样品. 图 5 展示了由 MicroMegas 探测器测量到的 ES#1 样品位置处的中子束斑分布 [22], 束斑内部接近均匀分布, 束斑边缘存在小部分束晕, 束流分布在 X 和 Y 方向投影的半高宽分别为 58 mm 和 54 mm. 束斑内部规则呈现的低计数阴影点是由探测器内部的支撑结构造成的.

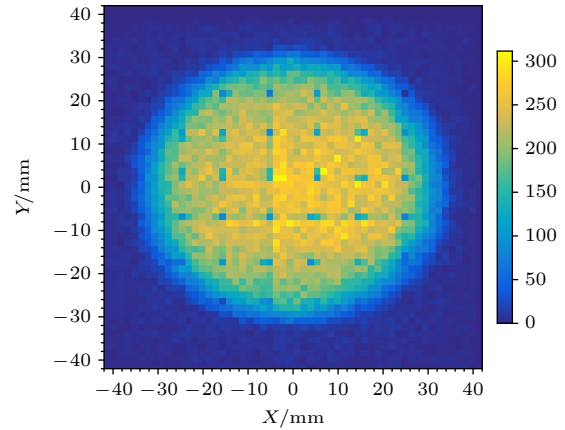


图 5 放置 Ag 样品处的中子束斑分布

Fig. 5. The neutron beam profile at the Ag sample position.

3 实验数据分析

基于中子透射法测量天然银中子全截面, 结合飞行时间方法确定中子能量, 得到有样、无样条件下 FIXM 测量到的裂变率随中子能量的变化关系 (以下称为裂变率谱), 并利用打靶质子数对中子通量归一得到中子透射率谱, 最终得到天然银的全截面.

3.1 全截面测量

中子全截面是指入射中子与靶核发生相互作用的所有核反应截面的总和. 根据反应类型可以将中子核反应分为吸收和散射两种方式, 其中吸收反应主要包括: (n, f), (n, γ), (n, p), (n, α) 等反应, 散射反应包括弹性散射和非弹性散射两种方式. 中子全截面通常基于透射法测量, 中子透射率及中

子全截面分别表示为 (1) 式、(2) 式:

$$T(E) = \frac{N_{\text{sample-in}}(E) - B_{\text{sample-in}}(E)}{N_{\text{sample-out}}(E) - B_{\text{sample-out}}(E)} A = e^{-\sigma_{\text{tot}}(E)N_s}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{total}}(E) = -(\ln T(E))/N_s, \quad (2)$$

(1) 式中 T 代表中子透射率, E 为中子能量, $N_{\text{sample-in}}$, $N_{\text{sample-out}}$ 分别代表有样品、无样品条件下测量到的中子事件数, $B_{\text{sample-in}}$, $B_{\text{sample-out}}$ 分别代表有样品、无样品下的中子本底事件数, A 为中子通量归一因子, (1) 式、(2) 式中 N_s 为样品的面密度. 通过“有样/无样”中子计数之比, 能够消除中子能谱、探测效率等因素的影响, 有效减小系统误差, 因此全截面测量相对其他核反应截面测量拥有更高精度.

3.2 中子飞行时间方法

中子能量由飞行时间 (time-of-flight, TOF) 方法确定, 如 (3) 式所示:

$$E_n = \left[1 / \sqrt{1 - \left(\frac{L}{c \cdot \text{TOF}} \right)^2} - 1 \right] m_n c^2, \quad (3)$$

其中 E_n 为中子能量, L 为中子飞行距离, TOF 为中子飞行时间, m_n 为中子静止质量, c 为光速. TOF 定义为中子起飞时刻与中子飞行长度 L 后到达终点时刻的时间差, 中子到达终点的时间由探测器给出, 中子的起飞时刻根据质子轰击钨靶时产生的瞬发伽马射线 (称为“ γ -flash”) 确定. γ -flash 以光速飞行距离 L 后到达探测器, 若将中子被探测的时间定义为 T_d , 将 γ -flash 被探测的时间定义为 T_γ , 那么 TOF 可表示为

$$\text{TOF} = T_d - (T_\gamma - L/c). \quad (4)$$

图 6 展示了 γ -flash 在探测器中的时间分布, 本次实验在双束团条件下开展, 即一个打靶质子脉冲中包含两个分布相同、时间相隔 410 ns 的质子束团 [11,23], 因此图中可以看到两个间隔 410 ns 的 γ -flash 分布. 第 2 个 γ -flash 分布处 (T_{γ_second}) 的计数明显高于第 1 个 γ -flash 分布 (T_{γ_first}) 计数, 是因为继第 1 束团后, 高能中子随即产生, 这些高能中子事件会叠加到第 2 束 γ -flash 对应的事件中, 导致计数率增大. CSNS Back-n 束流中包含 0.5 eV—300 MeV 范围内连续分布的白光中子 [18]. 根据中子飞行时间方法计算可知, 第 1 个质子束团打靶产生的能量为 78.3 MeV 附近的中子, 与第 2

束 γ -flash 同时达到探测器, 因此在如图 6 所示的飞行时间谱上呈现出了叠加的效果.

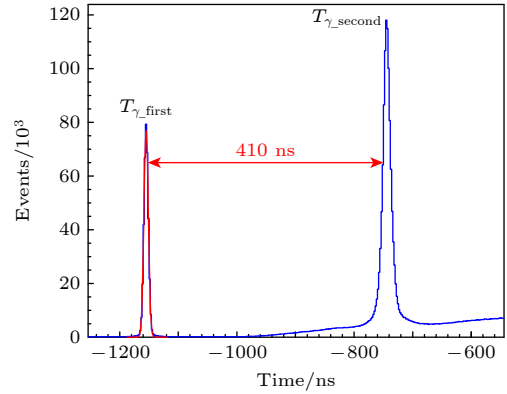


图 6 T_γ 分布

Fig. 6. The distribution of T_γ .

通过高斯函数拟合确定第 1 束对应的 γ -flash 时刻 T_{γ_first} 为 -1157.05 ns. 为减小双束团效应对定时带来的不确定度, 后续分析中以两个束团的中间位置作为 T_γ 进行刻度, 即 $T_\gamma = T_{\gamma_first} + 205$. 另外, 由于 100 eV 以下的中子飞行时间均大于 0.55 ms, 双束团的不确定度 (205 ns) 引入的中子飞行时间误差小于 0.04%, 因此本工作中可以忽略双束团影响.

图 7 为探测器信号幅度随中子飞行时间变化的二维谱, 红色虚线区域代表 α 本底事件, 其上方为中子诱发的裂变事件. α 事件通过设置合理的幅度阈值扣除. 此外, 图中 2400—2900 μs 时间范围内的裂变事件很少, 这是由于金吸收片吸收了束流中子所造成的. 通过观察透过吸收片后对应能量的中子计数, 可以有效评估实验中子本底.

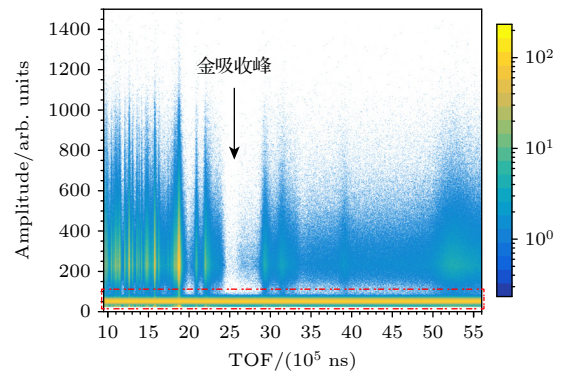


图 7 中子飞行时间-信号幅度二维谱 (对应中子能区 1—31 eV)

Fig. 7. 2D distribution of neutron TOF vs. signal amplitude (neutron energy region: 1 to 31 eV).

^{235}U 在低能区有特征明显的中子共振峰, 可基于此刻度飞行距离. 首先考虑能量分辨对共振峰位的影响, 将 Back-n 能量分辨率函数卷积到 $^{235}\text{U}(n, f)$ 截面数据中, 在此基础上, 选择如表 1 所示的多个能量点, 结合 (3) 式、(4) 式, 将飞行距离作为待拟合参数进行拟合. 图 8 所示为基于第 1 片 ^{235}U 刻度飞行距离的结果, 最终确定中子到达 FIXM 探测器第 1 片 ^{235}U 靶的飞行距离为 76.916 m.

表 1 刻度飞行距离所用的能量及对应的时间信息
Table 1. The energy and corresponding time for calibrating the flight distance.

E_n/eV	Time/ns
7.05	2.09459×10^6
8.75	1.88056×10^6
12.33	1.58306×10^6
19.21	1.26796×10^6
31.94	983171
35.05	938420
46.72	812590
51.06	777098
70.19	662404
83.825	606478

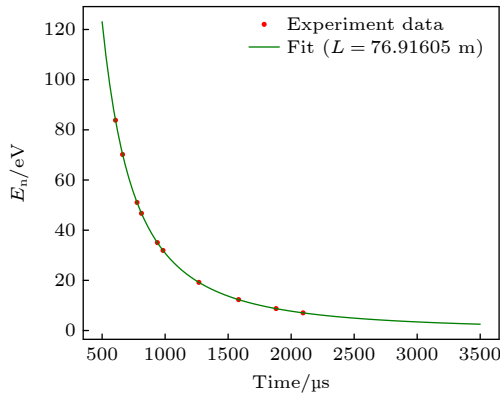


图 8 刻度中子飞行距离
Fig. 8. Neutron flight path calibration.

3.3 中子透射率分析

确定中子能量后, 即可得到有样、无样条件下的裂变率谱. 以下分析以无样条件为例, 验证两个 ^{235}U 单元的裂变率一致性. 如图 9(b) 所示, 在 50 bpd (bins per decade) 条件下的裂变率一致性基本保持在 3% 以内 (4—6 eV 对应 Au 的共振吸收谷, 故出现明显的振荡), 可以将两片 ^{235}U 的裂变率相加以提高统计. 实验中采用“黑共振吸收法”评

估中子本底, 该方法将吸收片始终固定在束流线上, 吸收特定能量处的所有源中子 (本工作中使用 ^{197}Au 和 ^{59}Co , 分别对应如图 9(a) 中的 5 eV 和 130 eV 附近的吸收谷), 则对应能量处测量到的中子事件即为本底贡献. 通过选取多个合适的吸收片得到多个能点的本底计数, 结合 (5) 式所示的函数表达式即可拟合出中子本底函数, 式中 a 代表时间无关本底, 指数项代表中子散射本底 [24].

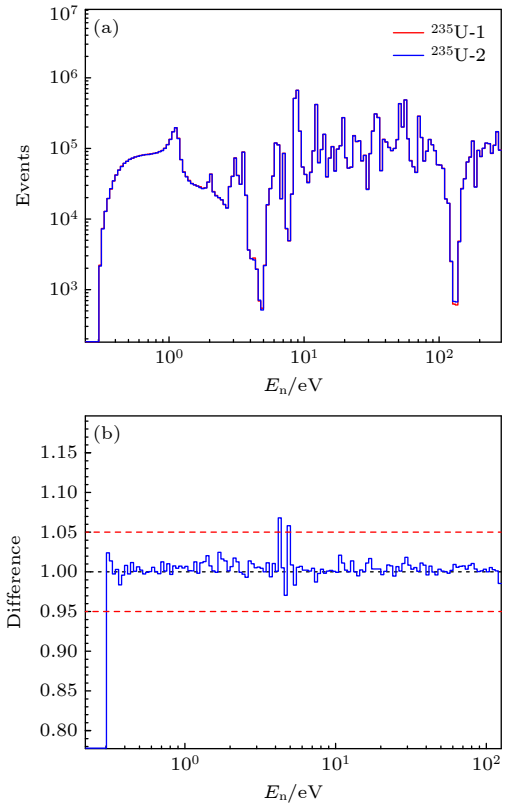


图 9 两片 ^{235}U 单元对应的无样裂变率谱 (a) 及一致性 (b)
Fig. 9. The fission rates of two ^{235}U cells (a) and their consistency (b).

图 10(a), (b) 中展示了无样/有样条件下的中子本底函数分布, 其中绿色曲线为拟合得到的中子本底函数, 蓝色和红色分别代表本底扣除前和扣除后的裂变率谱, 可以看到, 除了黑共振吸收谷附近扣除本底中子后计数率明显降低外, 其他区域影响很小, 说明本实验方案下 (图 1 所示配置) 的中子本底很小, 基本可以忽略. 图 10(c) 为本底扣除后的有样/无样裂变率谱对比, 图 10(d) 为两者的比值, 即银样品的中子透射率谱, 在 ^{59}Co 和 ^{197}Au 两种吸收片所覆盖的能量范围内可清晰观察到银的共振吸收.

$$B_{\text{total}}(t) = a + be^{-\lambda t}. \quad (5)$$

CSNS 的打靶质子数与 Back-n 实验终端的中子通量一一对应. 在实验过程中, 每次打靶质子脉冲内的质子数都会被记录下来, 通过时间戳匹配, 累计得到有样、无样条件下的质子数, 最终得到中子通量归一因子 $A = 0.98172$. 结合 (1) 式即可计算出 0.3 mm 天然银样品对应的中子透射率. 由于天然银特征明显的共振吸收峰基本在 100 eV 以内, 结合 NRTA 研究需求, 本工作主要关注 10—100 eV

范围内的中子共振能区透射率谱. 如图 11(b)所示, 由于样品较薄, 在统计涨落的影响下, 非共振区的中子透射率局部出现了大于 1 的现象, 因此我们对分 bin 进行动态调整, 增大非共振区的 bin 宽, 减小统计误差, 得到正确合理的中子透射率. 但即便如此, 非共振能区的中子透射率仍然很大 (接近 1), 测量到的全截面误差很大, 因此, 在后续分析中仅给出共振能区的天然银中子全截面.

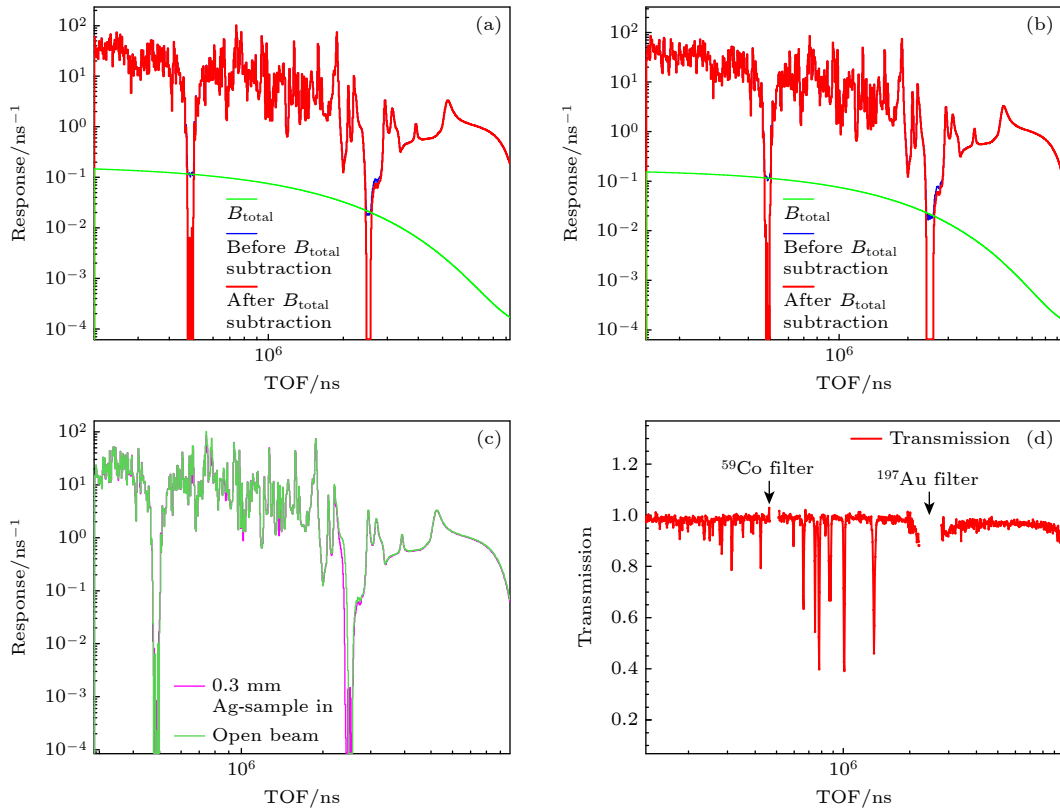


图 10 无样 (a) 和有样 (b) 中子本底函数拟合, 以及本底扣除后裂变率谱对比 (c) 和透射率谱 (d)

Fig. 10. The neutron background fitting of sample out (a) and sample in (b), and the fission rate spectrum comparison after neutron background subtraction (c) and the transmission rate (d).

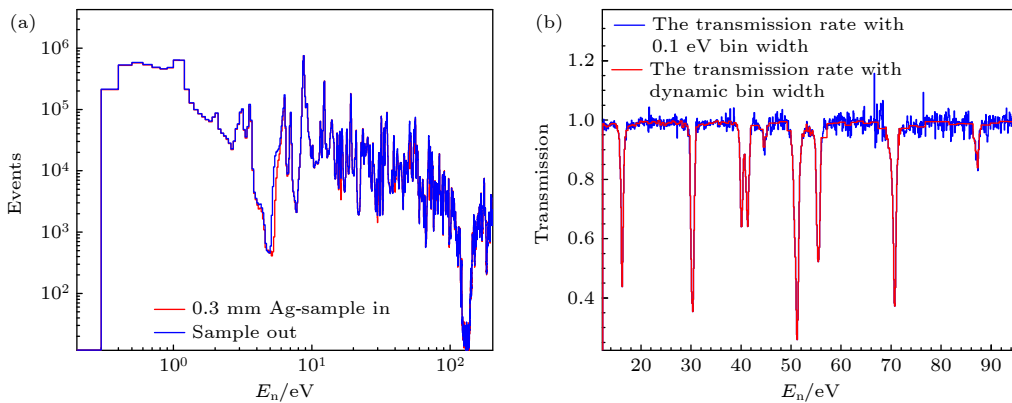


图 11 裂变率随中子能量变化 (a) 及 10—100 eV 范围内的中子透射率 (b)

Fig. 11. Fission rate as a function of neutron energy (a) and neutron transmission rate at 10—100 eV (b).

3.4 天然银中子全截面

结合中子透射率和样品面密度即可计算出天然银的中子全截面, 结果如图 12 所示. 根据 (2) 式, 可以推导出全截面的相对不确定度公式如下:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}(E) = -\frac{1}{\ln T(E)} \times \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}(E)\right)^2 + (\ln T(E))^2 \left(\frac{\Delta N_s}{N_s}\right)^2}. \quad (6)$$

不确定度的来源主要是透射率和面密度, 其中以透射率的贡献为主, 本工作测量到了 ^{107}Ag 在 16.25, 41.35, 44.6, 51.25 eV 以及 ^{109}Ag 在 30.35, 40.15, 55.45, 70.75, 87.3 eV 共振峰附近的全截面数据, 除了靠近谷区附近的截面误差较大外 (透射率接近 1), 其余测量截面的不确定度基本小于 10%.

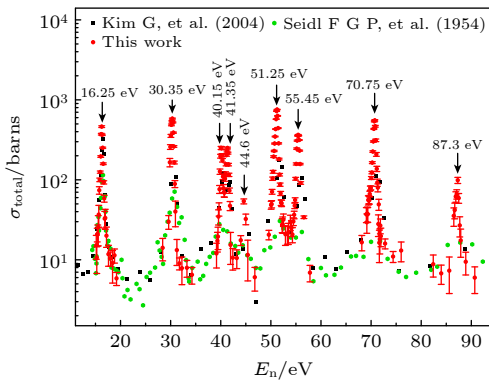


图 12 10—100 eV 范围的天然银中子全截面
Fig. 12. The neutron total cross sections of natural silver from 10 to 100 eV.

图 12 同时展示了 EXFOR 实验数据库中 10—100 eV 范围的天然银中子全截面实验测量数据. 在 16.25 eV 附近本次实验测量结果与 Kim 等 (2004)^[25] 结果相近, 但在其他共振峰附近, Kim 等^[25] 以及 Seidl 等 (1954)^[26] 的测量结果明显低于本工作测量结果, 这些差异的主要原因很可能是受能量分辨率函数的影响.

4 R 矩阵拟合

针对 10—100 eV 能区, 天然银中 ^{107}Ag , ^{109}Ag 的中子反应道主要包括 $^{107}\text{Ag}(n, \text{el})$, $^{107}\text{Ag}(n, \gamma)$, $^{109}\text{Ag}(n, \text{el})$, $^{109}\text{Ag}(n, \gamma)$. 本工作采用 **R** 矩阵理论软件 SAMMY, 拟合实验中子透射率, 得到 ^{107}Ag , ^{109}Ag 的共振参数. SAMMY 拟合时的重要输入选

项包括: 拟合模型、温度多普勒 (Doppler) 展宽以及能量分辨率函数. 本工作选择 Reich-Moore 模型描述中子共振截面, 多普勒展宽温度设置为室温 293 K, 采用标准的自由气体模型 (free gas model, FGM) 进行描述. 结合 RPI 函数^[27] 描述靶体慢化长度对应的能量分辨率. 此外, 对于 0.3 mm 厚度的天然银样品, 多重散射影响很小, 蒙特卡罗模拟表示多重散射的影响可忽略.

图 13 分能区展示了实验测量和 SAMMY 拟合得到的中子透射率. 需指出, 在 10—100 eV 能区, 透射率拟合对中子共振能量 E_{res} 及中子宽度 Γ_n 参数敏感, 但对俘获宽度 Γ_γ 敏感度较弱, 故准确地拟合共振参数一般需要同时结合中子透射和中子俘获实验数据. 由于本文只针对透射率开展数据分析, 因此在拟合时参考了 Li 等^[28] 的 Γ_γ 结果, 在 SAMMY 拟合时保持 Γ_γ 不变, 只对 E_{res} 与 Γ_n 进行拟合. 表 2 展示了本工作中子共振能量 E_{res} , 中子宽度 Γ_n 拟合结果以及与 Li 等^[28]、ENDF/B-VIII.0、CENDL 3.2 库结果对比.

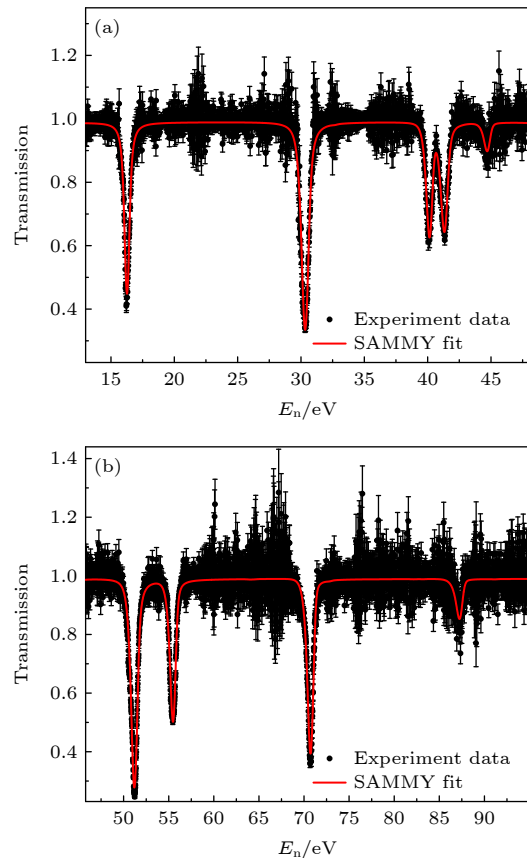


图 13 10—100 eV 实验测量透射率及 SAMMY 拟合结果
Fig. 13. The measured transmission rate and the SAMMY fitted results from 10 to 100 eV.

表 2 SAMMY 拟合共振参数
Table 2. The resonance parameters fitted by SAMMY.

	E_{res}/eV				Γ_n/meV			
	This work	Li et al. ^[28]	ENDF/B-VIII.0	CENDL3.2	This work	Li et al. ^[28]	ENDF/B-VIII.0	CENDL3.2
^{107}Ag	16.33	16.34	16.30	16.30	7.16	13.70	11.6	11.80
	41.52	41.57	41.57	41.50	4.60	4.40	5.37	5.40
	44.90	44.92	44.90	44.80	1.10	1.3	1.2	3.40
	51.44	51.57	51.56	51.40	21.97	21.8	23.9	21.60
^{109}Ag	30.51	30.57	30.60	30.40	7.66	10.58	7.33	7.30
	40.33	39.88	40.30	40.10	4.60	5.31	5.3	6.20
	55.72	55.92	55.80	55.70	38.32	31.96	37.20	36.80
	71.04	—	71.0	70.08	26.15	—	24.14	26.40
	87.57	—	87.70	87.70	5.13	—	6.40	6.20

拟合得到的中子共振能量 E_{res} 与 Li 等^[28] 结果及评价库差异非常小, 中子宽度 Γ_n 整体符合较好, 其中, 30.51 eV, 55.72 eV 对应中子宽度 Γ_n 与 ENDF/B-VIII.0, CENDL 3.2 评价库结果更为接近, 44.90 eV 处对应中子宽度 Γ_n 与 Li 等^[28] 及 ENDF/B-VIII.0 库相近, 仅 16.33 eV 的中子宽度 Γ_n 与 Li 等^[28] 及评价库数据存在一定差异. 能量分辨函数的精度是影响共振参数拟合的重要因素, 未来结合更准确的 Back-n 能量分辨率函数, 或将进一步提高中子共振参数的实验测量精度.

5 总结

本工作基于 CSNS Back-n 实验平台, 利用基于 ^{235}U 的 FIXM 探测器, 结合中子飞行时间方法, 测量了 10—100 eV 范围内共振峰附近的天然银中子全截面, 除靠近谷底的区域外, 测量截面不确定度均小于 10%, 对比 EXFOR 数据库中的天然银中子全截面数据, 在 16.3 eV 共振峰附近, 本次实验测量与 Kim 等^[25] 结果符合较好, 其余共振峰的测量结果普遍高于 Kim 等^[25] 和 Seidl 等^[26] 结果. 本工作提供了最新的天然银中子全截面测量结果, 对新一轮的核数据评价工作具有重要意义. 由于本次实验样品较薄, 非共振能区的中子透射率接近 1, 使得该能区的截面不确定度显著增大, 未来可以通过增加样品厚度, 专门开展针对非共振能区的测量.

本工作以 Back-n NRTA 方法学研究为背景和基础, 重点测量了天然银在共振能区的中子全截面, 为 NRTA 定量研究提供了新的截面数据. 在此基础上, 结合 R 矩阵理论程序 SAMMY 拟合中子

透射率, 得到了中子共振能量 E_{res} 及中子宽度 Γ_n . 总体来看, 本工作得到的中子共振能量 E_{res} 和中子宽度 Γ_n 与评价数据及其他实验数据均符合较好. 同时, 我们也观察到部分能点与实验数据及评价库数据存在一定差异, 这很可能与装置的能量分辨率函数有关, 随着未来能量分辨率函数精度的提升, 或将进一步提高共振参数质量. 另一方面, 后续可选择不同厚度的银样品, 结合开展俘获测量实验以得到更准确的俘获宽度 Γ_γ .

数据可用性说明

支持本研究成果的数据集可在补充材料 (online) 和科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00208> 中访问获取.

参考文献

- [1] Tuo X G, Liu F L, Wang Q B, Deng C, Shi R, Mu K L, Niu J 2020 *J. Nucl. Tech.* **43**, 100201 (in Chinese) [唐先国, 刘福乐, 王琦标, 邓超, 石睿, 穆克亮, 牛江 2020 *核技术* **43**, 100201]
- [2] Hecla J J, Danagoulian A 2018 *Nat. Commun.* **9** 1259
- [3] Engel E M, Danagoulian A 2019 *Nat. Commun.* **10** 4433
- [4] Behrens J W, Johnson R G, Schrack R A 1984 *Nucl. Tech.* **67** 162
- [5] Paradela C, Heyse J, Kopecky S, Schillebeeckx P, Harada H, Kitatani F, Koizumi M, Tsuchiya H 2017 *EPJ Web Conf.* **146** 09002
- [6] Nelson R O, Vogel S C, Hunter J F, et al. 2018 *J. Imaging* **4** 45
- [7] Cippo E P, Borella A, Gorini G, et al. 2011 *J. Anal. At. Spectrom.* **26** 992
- [8] Festa G, Cippo E P, Martino D D, Cattaneo R, Senesi R, Andreani C, Schooneveld E, Kockelmann W, Rhodes N, Scherillo A, Kudejova P, Biro K, Duzs K, Hajnal Z, Gorini G 2015 *J. Anal. At. Spectrom.* **30** 3
- [9] Tang S D, Chen Y H, Tang J Y, et al. 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 17

- [10] An Q, Bai H F, Bao J, et al. 2017 *JINST* **12** 07022
- [11] Zhang L Y, Jing H T, Tang J Y, Li Q, Ruan X C, Ren J, Ning C J, Yu Y J, Tan Z X, Wang P C, He Y C, Wang X Q 2018 *Appl. Radiat. Isot.* **132** 212
- [12] 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
- [13] Yang Y W, Wen Z W, Han Z J, et al. 2019 *Nucl. Instr. Meth. A* **940** 486
- [14] Wang S, Fang S X, Fu S N, Liu W B, Ouyang H F, Qin Q, Tang J Y, Wei J 2009 *Chin. Phys. C* **33** 001
- [15] 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]
- [16] Chen Y H, Luan G Y, Bao J, et al. 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 115
- [17] Chen Y H, Luan G Y, Bao J, et al. 2020 *EPJ Web Conf.* **239** 17018
- [18] Chen Y H, Qiu Y J, Li Q, et al. 2024 *Eur. Phys. J. A* **60** 63
- [19] 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. Instr. Meth. A* **1075** 170383
- [20] Yu T, Cao P, Ji X Y, et al. 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 7
- [21] Wang Q, Cao P, Qi X, Yu T, Ji X, Xie L, An Q 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 013511
- [22] Qi B B, Li Y, Zhu D Y, et al. 2020 *Nucl. Instr. Meth. A* **957** 163407
- [23] Yi H, Wang T F, Li Y, et al. 2020 *JINST* **15** 03026
- [24] Schillebeeckx P, Becker B, Danon Y, et al. 2012 *Nucl. Data Sheets* **113** 3054
- [25] Kim G, Meaze A. K. M. M. H, Ahmed H, Son D, Lee Y S, Kang H, Cho M, Ko I S, Namkung W, Ro T, Chung W, Kim Y A, Yoo K J, Chang J H 2005 *AIP Conf. Proc.* **769** 740
- [26] Seidl F G P, Hughes D J, Palevsky H, Levin J S, Kato W Y, Sjostrand N G 1954 *Phys. Rev.* **95** 476
- [27] Jiang B, Han J L, Jiang W, Hu J F, Wang X H, Chen J G, Cai X Z 2021 *Nucl. Instr. Meth. A* **1013** 165677
- [28] Li X X, Liu L X, Jiang W, et al. 2022 *Chin. Phys. B* **31** 038204

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

Measurement of neutron total cross section of natural silver in resonance region from 10 to 100 eV at CSNS Back-n**

TANG Shengda ¹⁾²⁾³⁾ CHEN Yonghao ^{2)3)4)†} YANG Zhen ^{1)‡} YANG Gaole ²⁾³⁾⁵⁾
 PENG Junyong ²⁾³⁾⁴⁾ QIU Yijia ²⁾³⁾ REN Zhizhou ⁶⁾ ZHU Tonghua ⁶⁾
 FAN Ruirui ²⁾³⁾ TANG Jingyu ⁷⁾ JIANG Wei ²⁾³⁾ YI Han ²⁾³⁾

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

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

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

4) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

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

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

7) (*School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 17 September 2025; revised manuscript received 26 November 2025)

Abstract

Silver is a very common material in archaeology, and its neutron total cross-section is crucial for neutron resonance transmission analysis (NRTA) in archaeometry. In this work, the neutron total cross sections of natural silver (^{nat}Ag) in the resonance region from 10 to 100 eV are measured at the China Spallation Neutron Source (CSNS) back-streaming neutron facility (Back-n). The neutron transmission rate of a 0.3 mm ^{nat}Ag

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12405348), the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2023014), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFA1606602).

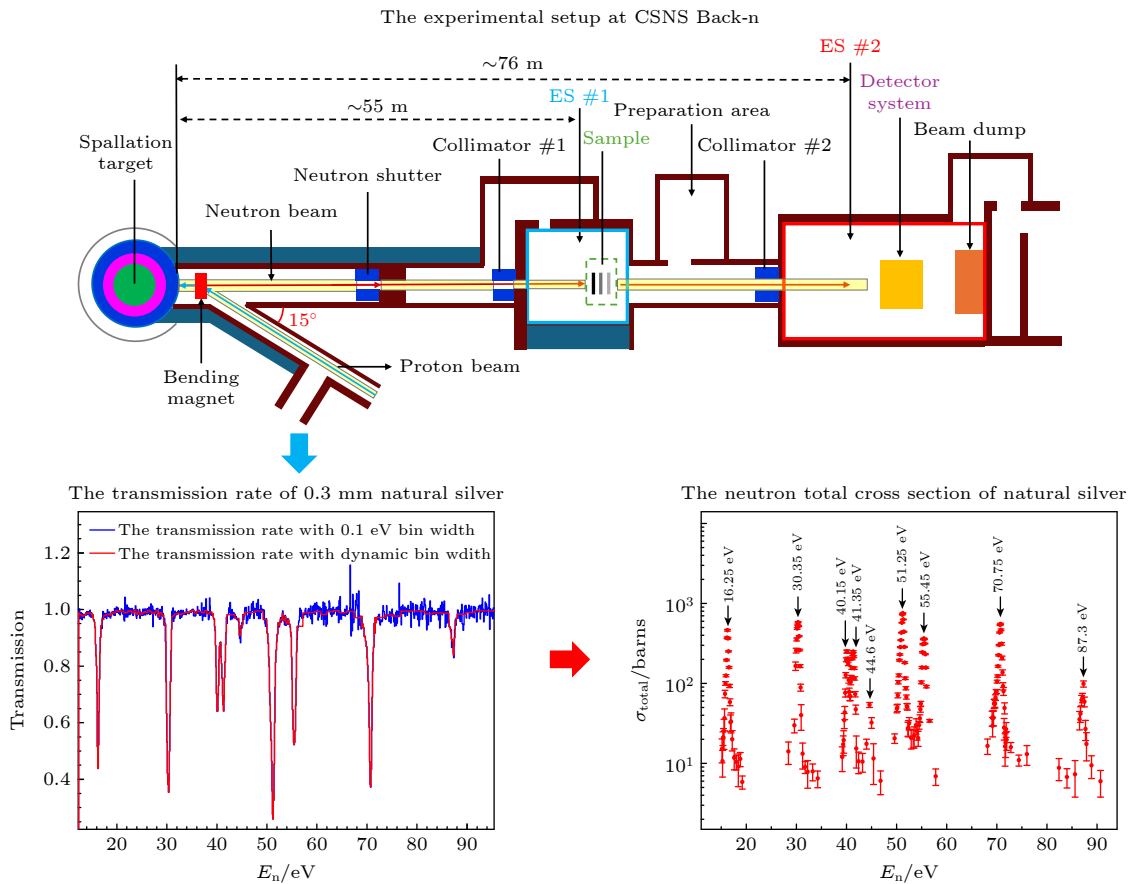
† Corresponding author. E-mail: chenyonghao@ihep.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yangzh97@mail.sysu.edu.cn

sample is measured with a fission chamber equipped with ^{235}U neutron converters. The neutron total cross-sections around resonance peaks at 16.25, 30.35, 40.15, 41.35, 44.6, 51.25, 55.45, 70.75, 87.3 eV are obtained. The cross-sections measured in this work are generally higher than previous measurements by G. Kim et al. and F. G. P. Seidl et al. These significant discrepancies are probably due to the resolution function of the facility, which is very sensitive to the resonance peaks.

The resonance parameters, i.e. the peak position of the resonances (E_{res}) and the neutron width (Γ_n)—of ^{107}Ag and ^{109}Ag , are extracted by fitting the transmission rate based on \mathbf{R} -matrix theory. The extracted parameters E_{res} and Γ_n are generally in good agreement with the evaluations of ENDF/B-VIII.0 and CENDL-3.2, but the neutron width at 16.33 eV is significantly lower than the evaluations. The resolution function of the facility is considered to be the main reason of the inaccuracy. More accurate resonance parameters will be extracted in the future when a better control of the resolution function is achieved.

This work provides new cross-section data for the research and development of the NRTA technique at the CSNS Back-n facility and enriches the experimental dataset for the neutron total cross-section of natural silver. The dataset of this paper is available at <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00208>.



Keywords: neutron total cross section, natural silver, China spallation neutron source, Back-n facility

DOI: [10.7498/aps.75.20251276](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251276)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251276](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251276)

基于中国散裂中子源Back-n反角白光中子源的10—100 eV共振能区天然银中子全截面测量

唐生达 陈永浩 杨振 杨高乐 彭俊勇 邱奕嘉 任智洲 朱通华 樊瑞睿 唐靖宇 蒋伟 易晗

Measurement of neutron total cross section of natural silver in resonance region from 10 to 100 eV at CSNS Back-n*

TANG Shengda CHEN Yonghao YANG Zhen YANG Gaole PENG Junyong QIU Yijia REN Zhizhou
ZHU Tonghua FAN Ruirui TANG Jingyu JIANG Wei YI Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 020110 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251276

CSTR: 32037.14.aps.75.20251276

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251276>

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

基于中国散裂中子源反角白光中子束线的天然锂中子全截面测量

Measurement of total neutron cross section of natural lithium at China Spallation Neutron Source Back-n facility

物理学报. 2022, 71(5): 052901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211646>