

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

1—500 eV ^{109}Ag 中子俘获截面 实验测量与共振参数提取*

谢文¹⁾ 车国梁¹⁾ 蒋伟³⁾⁴⁾ 董高阳¹⁾ 翁楚轩¹⁾ 蒋欣¹⁾ 李鑫祥^{1)2)†}
冯松^{1)2)‡} 姜炳¹⁾²⁾ 任杰⁵⁾ 林子昂¹⁾ 尹铭杨¹⁾ 江婷¹⁾ 何睿¹⁾
王宏伟⁶⁾⁷⁾ 范功涛⁶⁾⁷⁾ 刘龙祥⁶⁾⁷⁾ 张岳⁶⁾ 郝子锐⁶⁾
张苏雅拉吐⁸⁾ 王德鑫⁸⁾ 罗文^{1)2)††}

1) (南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001)

2) (南华大学, 先进核能技术设计与安全教育部重点实验室, 衡阳 421001)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

4) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

5) (中国原子能科学研究院, 北京 102413)

6) (中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

7) (中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

8) (内蒙古民族大学核物理研究所, 通辽 028000)

(2025年9月15日收到; 2025年11月14日收到修改稿)

^{109}Ag 位于慢速中子俘获过程路径上, 且 79% 由快速中子俘获过程产生. 同时, 银铟镉 (Ag-In-Cd) 控制棒中 ^{109}Ag 的质量比为 38.56%, ^{109}Ag 的中子俘获反应截面数据在核能和核天体物理学应用中非常重要. 本工作利用中国散裂中子源的白光中子源开展了 ^{109}Ag 同位素靶的中子俘获截面实验, 结合中子飞行时间法和脉冲高度权重技术等方法获得了 1—500 eV 能区的 ^{109}Ag 中子俘获截面. 使用基于 R 矩阵理论的 SAMMY 程序提取了 ^{109}Ag 的共振能量、中子共振宽度和辐射共振宽度参数, 实验所提取的中子共振参数值在 139.4 eV 处符合 JENDL-4.0 库收录的结果, 在 169.9 eV 处和 328.1 eV 处符合 JEFF-4.0 库收录的结果, 在 259.3 eV 处符合 CENDL-3.2 库收录的结果. 本文数据集可在 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00197> 中访问获取.

关键词: 中子俘获反应截面, 白光中子源, 共振参数

DOI: 10.7498/aps.75.20251270

CSTR: 32037.14.aps.75.20251270

1 引言

探究宇宙中元素的起源一直是天体物理学的一个重要方向, 基于大爆炸理论的宇宙演化模型可

以解释轻元素 (如 H, He, Li 等) 的形成^[1], 从碳到铁的元素起源可以很好地由恒星中的核燃烧过程解释, 由于比结合能和库仑位垒的原因, 恒星中的核燃烧过程无法产生比铁更重的元素. 因为中子不带电, 并且中子与核的反应截面存在随着系统能量

* 湖南省自然科学基金 (批准号: 2025JJ60020) 和国家自然科学基金联合基金 (批准号: U2441221) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lixinxiang@usc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: songfeng@usc.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: wen.luo@usc.edu.cn

降低而增大的趋势,中子俘获反应是宇宙中超铁元素合成的主要方式,分为慢速中子俘获过程(s-process)^[2]和快速中子俘获过程(r-process)^[3].慢速中子俘获过程主要发生在渐近巨星分支恒星的氦壳层中,是宇宙中大多数稳定的超铁元素(如铷、钡、铟和铊)合成的主要来源;快速中子俘获过程的发生需满足极高中子密度、高温与高熵的条件,通常出现在具有高中子与中子核比的环境中,此环境下中子俘获速率远高于衰变速率.中子俘获截面作为研究中子俘获反应的重要参数,在星系演化、元素丰度等目前具有分歧的研究中起着关键作用^[4].如图1所示,¹⁰⁹Ag同位素属于较轻的超铁元素($38 < Z < 50$),位于慢速中子俘获过程的主要路径上,但是79%的¹⁰⁹Ag由快速中子俘获过程产生^[5],它的中子俘获截面数据是计算天体反应速率、模拟天体核合成的关键输入量,在天体核合成网络计算中具有关键作用,对于解释Cd以及更重的超铁元素的丰度具有重要的参考价值.

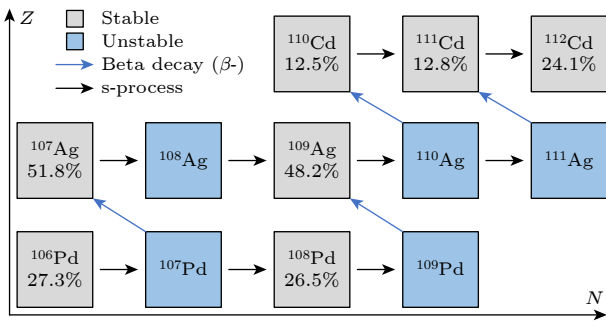


图1 ¹⁰⁹Ag区域的s-过程反应路径示意图
Fig. 1. The s-process reaction path in the region of ¹⁰⁹Ag.

银铟镉(Ag-In-Cd)控制棒在压水反应堆中被广泛应用,¹⁰⁹Ag的质量占比为38.56%,主要用于补偿初始装料剩余的反应性,调整并维持反应堆在特定功率下的运行,并确保在正常或紧急情况下堆芯能够安全停堆^[6].控制棒在高通量环境中持续消耗,这导致控制棒的量会随着堆芯燃料消耗而变化.在早期的反应堆设计中,安全裕度相对较大,燃料消耗相对较小,控制棒在反应堆运行策略中的作用并不明显.随着能源短缺问题日益突出,为了提高燃料利用率并降低燃料循环成本,反应堆设计继续朝着深度燃耗的方向发展.因此,控制棒在运行策略中的作用变得越来越重要^[7],准确计算控制棒的量需要可靠的控制棒中子反应截面数据.

目前国际上有5大主流评价数据库,分别是中

国CENDL^[8]、美国ENDF/B^[9]、日本JENDL^[10]、欧洲JEFF^[11]和俄罗斯BROND^[12],其收录的¹⁰⁹Ag中子俘获截面数据仍存在分歧,在1—500 eV能区内部分数据偏差接近2个数量级;根据国际核反应实验数据库EXFOR^[13]收录情况,以往针对¹⁰⁹Ag的中子俘获截面实验测量主要集中在热中子能区和不可分辨共振区,可分辨共振区的中子俘获截面精确数据仍存在不足.2019年Šalamon等^[14]在GELINA装置上开展了Ag天然靶中子俘获截面实验测量,并提取了¹⁰⁷Ag和¹⁰⁹Ag在1 keV以下的中子共振参数.2021年Li等^[15]提取了¹⁰⁷Ag同位素靶在1—60 eV内的共振参数,与Šalamon等^[14]相比,Li等^[15]提取的辐射共振宽度值与美国ENDF/B-VIII.0评价库的平均偏差为1.4%,小于Šalamon等^[14]的4.3%,由于靶材料具有更少的杂质干扰,在相同的条件下,使用纯同位素靶实验预期能取得更精确的结果.

本研究基于中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)^[16]的反角白光中子源(back-n white neutron experiment facility, Back-n)^[17]装置,使用高富集度¹⁰⁹Ag同位素靶进行了中子俘获截面实验测量:通过C₆D₆探测器系统和飞行时间(TOF)法获得了¹⁰⁹Ag的中子俘获产额并计算了其中子俘获截面,使用基于R矩阵理论的SAMMY^[18]程序提取了¹⁰⁹Ag在1—500 eV能量范围内的中子共振参数,实验获取相关数据的流程如图2所示.

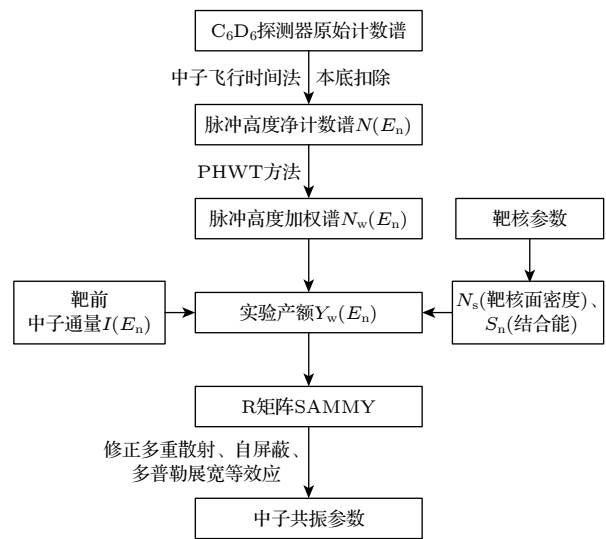


图2 获取中子共振参数的步骤
Fig. 2. Procedure for obtaining neutron resonance parameters^[16].

2 实验与数据处理

2.1 实验装置

CSNS 是中国首个散裂中子源设施, 是我国大功率质子加速器驱动的大型多学科研究平台. Back-n 是 CSNS 的重要实验平台之一, 主要用于中子核数据实验、高能中子单粒子效应等研究. Back-n 位于 CSNS 质子束流反角 (180°) 方向, 束线全长 80 m, 在 Back-n 束线处建有两个实验站, 即实验厅 1(ES#1) 和实验厅 2(ES#2), 其中 ES#2 离散裂靶约 76 m, 该处中子通量可达 $10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$. 本次实验在 ES#2 中进行, 实验期间 CSNS 提供的平均束流功率为 100 kW, 重复频率为 25 Hz^[19]. 实验中通过 4 个无氢氘化苯 (C_6D_6) 液体闪烁体探测器 (如图 3 所示) 对源自 ^{109}Ag 同位素靶的中子俘获反应产生的退激 γ 射线进行探测^[20], 利用脉冲高度权重技术 (PHWT) 对 γ 射线的探测效率进行加权处理, 靶前中子通量测量采用基于 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反应的 ^6Li -Si 探测器. 本研究中使用飞行时间 (time of flight, TOF) 法确定中子能量, 其表达式如下^[21]:

$$E_n = \frac{1}{2} m_n \left(\frac{L}{t_n} \right)^2, \quad (1)$$

其中, m_n 表示中子质量, L 为飞行距离, t_n 是飞行时间. 在 Back-n 设施中, t_n 的计算公式为 $t_n = (t_{\text{det}} - t_\gamma) + L/c$, 其中 t_{det} 代表探测器响应中子或 γ 射线的时间, t_γ 表示 γ 射线抵达探测器的时间, c 为光速^[22]. 本研究中 L 值设定为 76.5 m, L 值的不确定性主要源于中子在散裂靶内部发生的多次散射现象^[23]. 在 CSNS 的常规运行模式下 (双束团脉冲模式), 每个脉冲包含两个质子束团, 时间间隔为 410 ns. 由于两个束团对应的事件分布存在叠加效应, 若直接使用未经解谱处理的数据, 其时间分辨率会因双束团特性而降低, 尤其在高能区段表现明显^[24]. 本研究采用 Back-n 合作组开发的解谱方法, 最终得到单束团下对应的数据^[25].

本次实验时长约 70 h, 由于 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 是国际认定的中子俘获反应的标准截面^[26], 本次实验对 ^{197}Au 靶进行 5 h 的测量, 用于验证本次实验设置与数据处理的可靠性. 对碳天然靶 ($^{\text{nat}}\text{C}$) 和空靶分别进行 9.5 h 和 6 h 的测量, 用于评价在束条件下的中子散射本底及环境本底^[27], 对 ^{109}Ag 同位素靶

进行 35.5 h 的测量. 为校准束流中的 γ 本底, 本研究使用 Al 吸收片加 ^{109}Ag 的组合进行了 4.5 h 的测量, 随后对铅天然靶 ($^{\text{nat}}\text{Pb}$) 进行 10 h 的测量. 有关靶材参数的详细信息如表 1 所示.

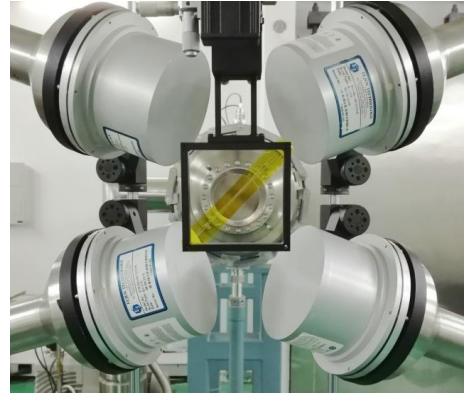


图 3 Back-n 设施中的 C_6D_6 探测器

Fig. 3. Photograph of the C_6D_6 detector in the Back-n facility of CSNS.

表 1 实验所用靶材信息

Table 1. Information of experimental targets.

实验靶	纯度/%	直径/mm	靶厚/mm	质量/g
^{109}Ag	>99%	30.00 ± 0.02	0.100 ± 0.005	0.745 ± 0.005
^{197}Au	>99%	30.00 ± 0.02	0.100 ± 0.005	1.423 ± 0.005
$^{\text{nat}}\text{C}$	—	30.00 ± 0.02	0.100 ± 0.005	0.160 ± 0.005
$^{\text{nat}}\text{Pb}$	—	30.00 ± 0.02	0.100 ± 0.005	0.787 ± 0.005

2.2 本底扣除

使用 C_6D_6 探测器在 Back-n 进行中子俘获截面测量的本底组成如下^[28]:

$$B(t) = B_0 + B_{\text{empty}}(t) + B_{\text{sample}}(t), \quad (2)$$

其中 B_0 是与靶和时间无关的本底, $B_{\text{empty}}(t)$ 是和时间相关但与靶无关的本底, $B_{\text{sample}}(t)$ 是与靶相关的本底, 与靶对中子和 γ 射线的散射有关. 中子能量 E_n 由飞行时间 t 得出:

$$B(E_n) = B_0 + B_{\text{empty}}(E_n) + B_{\text{sn}}(E_n) + B_{\text{s}\gamma}(E_n), \quad (3)$$

其中 $B(E_n)$ 表示总本底, $B_{\text{sn}}(E_n)$ 和 $B_{\text{s}\gamma}(E_n)$ 分别代表中子和 γ 射线与靶发生散射引起的本底.

实验中由环境活化和缓发 γ 射线产生的本底与靶和时间无关, 通过测量无束流条件下的空靶来确定这种本底 B_0 ; 束流与环境产生的本底与靶无关, 但会随时间变化, 实验中通过测量在束条件下的空靶评估这种本底 $B_{\text{empty}}(E_n)$; 测量散射中子产

生的本底 $B_{sn}(E_n)$ 需要靶在相关能量范围内具有较大的散射截面, 同时需要靶的中子俘获截面相对平坦, 实验中通过测量碳靶来完成; 因为铅与 ^{109}Ag 相比具有较低的中子俘获截面, 且在相关能量范围内不存在共振结构, 实验中将铅作为评估束流中 γ 射线本底 $B_{s\gamma}(E_n)$ 的理想材料^[29]. 图 4 所示为上述各测量条件下, 经中子注量归一化后得到的计数分布.

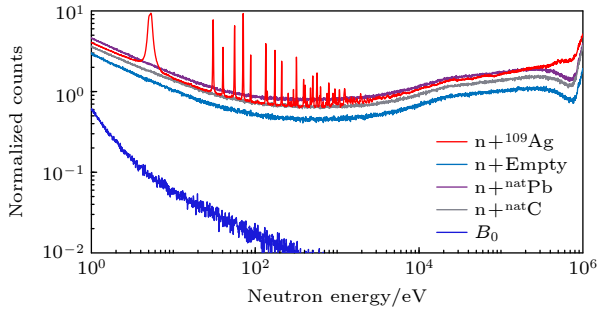


图 4 归一化的实验能谱

Fig. 4. Normalized experimental energy spectrum.

由于 $B_{s\gamma}(E_n)$ 值与中子通量无直接关联, 无法通过 $^6\text{Li-Si}$ 探测器计数进行数据分析, 实验中使用黑共振法^[30]对 $B_{sn}(E_n)$ 和 $B_{s\gamma}(E_n)$ 进行归一化处理: 在中子束窗使用 40 mm 厚的 ^{27}Al 的吸收片, ^{27}Al 的中子吸收截面在 34.8 keV 和 86 keV 处呈现双峰特征, 可以很好地吸收掉相应飞行时间下的中子束流, 从而使该中子飞行时间下的实验计数仅由束内伽马射线引起^[31]. 图 5 展示了 ^{109}Ag 同位素靶在加吸收片与未加吸收片时的归一化计数谱对比, 最后, 可将铅天然靶的本底参数化为

$$B_{\text{lead}}(E_n) = B_{\text{empty}}(E_n) + C_n B_{sn}(E_n) + C_\gamma B_{s\gamma}(E_n). \quad (4)$$

分别计算出 $B_{s\gamma}(E_n)$ 归一化因子 C_γ 和 $B_{sn}(E_n)$ 归一化因子 C_n 的值.

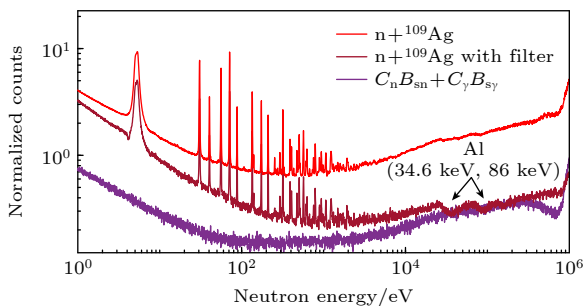


图 5 ^{109}Ag 实验靶加吸收片和不加吸收片的对比以及本底能谱

Fig. 5. The ^{109}Ag target with and without filters and background energy spectrum.

2.3 脉冲高度权重技术

C_6D_6 探测器探测中子俘获反应产生的瞬发 γ 射线时, 其探测效率受复合核复杂的去激发路径的影响^[32]. 需要对探测器的响应函数运用脉冲高度权重技术 (PHWT) 处理, 使探测效率不受级联 γ 射线能量的影响. 实验中 C_6D_6 探测器对俘获反应探测效率大致等于对级联 γ 射线探测效率的总和^[21]:

$$\varepsilon_c = 1 - \prod(1 - \varepsilon_{\gamma i}) \approx \sum \varepsilon_{\gamma i}, \quad (5)$$

其中 ε_c 表示 C_6D_6 探测器对俘获反应的探测效率, $\varepsilon_{\gamma i}$ 是探测器对第 i 级级联 γ 射线的探测效率. 由于 $\varepsilon_{\gamma i}$ 足够小, (5) 式中的等号成立. (5) 式建立了 ε_c 与 $\varepsilon_{\gamma i}$ 之间的关系, 但无法直接反映在 C_6D_6 探测器的输出能谱中. 我们希望建立 ε_c 与探测器输出能谱之间的直接关联, 这有助于通过探测器的输出信号直接分析 ε_c , 进而计算中子俘获截面. 即满足:

$$\varepsilon_c = \alpha \sum E_{\gamma i}, \quad (6)$$

要使方程 (6) 成立, 必须对探测系统的响应函数进行数学控制以实现:

$$\varepsilon_{\gamma i} = \alpha E_{\gamma i}, \quad (7)$$

这就是脉冲高度权重技术 (PHWT), 其中 α 是比例系数, $E_{\gamma i}$ 是级联 γ 能量, 可直接从 C_6D_6 输出的脉冲高度谱 (PH 谱) 获得. PHWT 最初由 Macklin 和 Gibbons^[33] 提出, 并应用于 C_6F_6 探测器中测量中子俘获截面, 加权后每组级联 γ 射线的能量将与加权探测效率成正比, 归一化的探测效率能直观地体现在脉冲高度谱的计数中. 因此, 通过分析脉冲高度谱即可描述探测器对 γ 射线的探测效率. 通过引入加权函数 (WF) 确保满足以下方程:

$$\int_{\text{EL}}^{\infty} R_d(E_d, E_{\gamma j}) W(E_d) dE_d = \alpha E_{\gamma j}, \quad (8)$$

其中 EL 为 PH 谱的阈值, E_d 是 PH 谱的能量区间, $R_d(E_d, E_{\gamma j})$ 表示具有 E_d 能量响应函数的 PH 谱计数, $W(E_d)$ 是与 E_d 对应的权重因子; $E_{\gamma j}$ 为第 j 组 γ 射线的能量, 此处将 α 设为 1. 加权函数可表示为与 γ 射线能量相关的多项式函数:

$$\text{WF}(E_d) = \sum_{i=0}^4 a_i E_d^i, \quad (9)$$

其中 a_i 是 WF 的参数, 可通过最小二乘拟合法确定:

$$\chi^2 = \sum \left(k E_{\gamma j} - \int_{\text{EL}}^{\infty} R_d(E_d, E_{\gamma j}) \text{WF}(E_d) dE_d \right)^2. \quad (10)$$

每个事件都通过适当的权重因子进行加权处理, 以确保探测器的加权探测效率与 γ 射线的能量成正比. 本研究使用 GEANT4 蒙特卡罗程序 [34] 模拟了 C_6D_6 探测系统对 ^{109}Ag 中子俘获反应产生的级联伽马射线的响应: 原始效率曲线如图 6(a) 所示, 通过对原始效率应用加权函数后, 图 6(b) 清晰展示了加权后的探测效率与能量之间的线性关系, 图 6(c) 中展示的加权后的探测效率与能量的比值趋近于 1. 当能量低于 1.5 MeV 时, 加权效率不再与能量成正比, 因此在处理 γ 能谱时需要设置阈值, 以消除权重函数失效带来的影响.

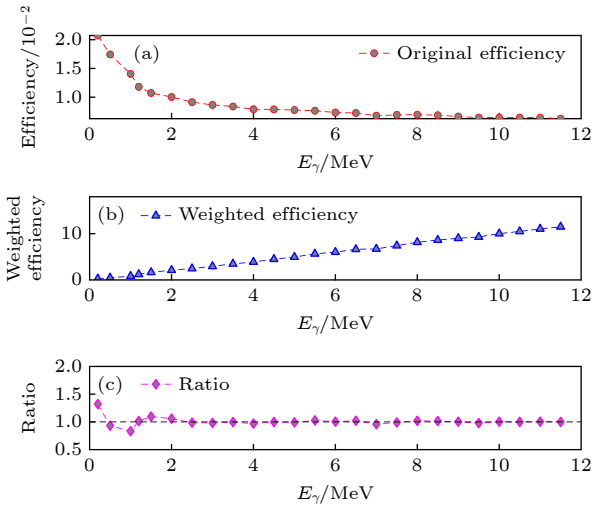


图 6 C_6D_6 效率 (a) 原始效率; (b) 加权后的探测效率; (c) 加权效率和 γ 射线能量的比值
Fig. 6. The C_6D_6 efficiency: (a) Original efficiency; (b) weighted efficiency; (c) the ratio between the weighted efficiency and the γ -ray energy.

2.4 不确定度分析

实验的不确定度来源于实验条件、数据分析以及数理统计. 实验条件的不确定度包含加速器功率、中子能谱以及靶参数的不确定度. 根据实验记录, 本次实验中加速器功率带来的不确定度小于 1.5%; 根据 Back-n 合作组的研究, 对于本次实验, 数据覆盖的能区范围为 1—500 eV, 能谱引入的不确定度小于 8.0% [35]; 靶参数的不确定度来源于靶的面密度以及靶中子结合能的计算, 并被靶的尺寸、厚度和质量的测量以及中子结合能的数据来源影响, 其带来的不确定度小于 1.5%. 数据分析的不确定度包括归一化、PHWT 方法、双束团解谱以及本底扣除的不确定度. 归一化过程主要采用两种方法: 第 1 种是对实验测得的 30.5—31 eV 共振峰进

行高斯拟合, 通过将拟合曲线与理论数据进行对比, 计算归一化系数; 第 2 种是根据实验能量区间选取 30.5—31 eV 的能量区间, 并与理论数据进行对比, 计算归一化系数. 根据 (11) 式计算中子俘获截面后, 采用第 2 个共振峰 (30.6 eV) 对低能区结果进行归一化处理. 经计算发现, 归一化系数的计算误差小于 2.0%. 在数据分析过程中, PHWT 方法可能引入 2.0%—3.0% 的系统误差 [36], 双束团解谱带来的误差小于 2.0% [25]. 本底扣除的不确定度来源于黑共振法中归一因子的计算, 引入的不确定度小于 2.0%. 实验过程中统计误差的不确定度小于 0.7%, 因此实验结果的总不确定度小于 9.4%, 各不确定度来源如表 2 所示.

表 2 实验测量中不确定度来源
Table 2. The sources of uncertainty in experimental measurement.

不确定度来源	组成	不确定度/%
实验条件	加速器功率	<1.5
	中子能谱 (<0.15 MeV)	<8.0
	靶参数	<1.5
数据分析	归一化	<2.0
	PHWT 方法	<3.0
	双束团解谱	<2.0
	本底扣除	<2.0
数理统计	统计误差	<0.7

3 结果与讨论

中子俘获产额由加权函数确定, 将 ^{109}Ag 的加权函数 (WF) 应用于净计数谱 (由原始数据扣除本底后获得) 可计算出加权谱 $N_w(E_n)$. 中子俘获产额 $Y_w(E_n)$ 与 $N_w(E_n)$ 相关, 其表达式为 [37]

$$Y_w(E_n) = \frac{N_w(E_n)}{N_s I(E_n) S_n}, \quad (11)$$

其中 N_s 是靶的面密度, S_n 是靶的中子结合能, 其计算数据来源于 AME2020 [38]; $I(E_n)$ 是不同中子能量下的靶前中子通量, 由 Back-n 合作组提供 [35]. 中子俘获截面与产额的关系如下:

$$Y_w(E_n) = \left(1 - e^{-N\sigma_t(E_n)t f_c}\right) \frac{\sigma_c(E_n)}{\sigma_t(E_n)}, \quad (12)$$

其中 σ_c 是中子俘获截面, σ_t 是中子总截面, N 是原子密度, t 是靶厚. 考虑到靶内中子多次散射等效效应可能导致粒子在靶中运动的实际路径将大于靶的厚度, 引入了厚度修正因子 $f_c = f_L/t$, 其中

f_L 为模拟的中子在靶内运动的总长度. f_c 反映了在一定厚度的 ^{109}Ag 中, 不同能量中子的平均长度随中子能量的变化^[36]. 本研究使用 GEANT4 模拟确定了 f_c 的值, 如图 7 所示.

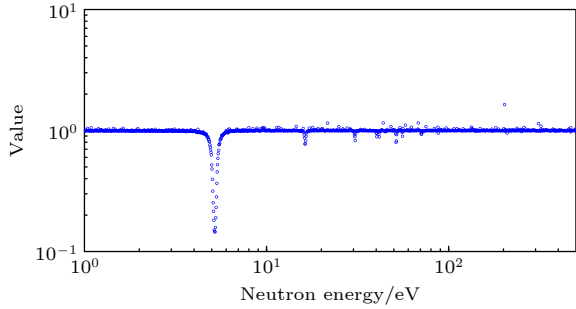


图 7 f_c 随中子能量的变化
Fig. 7. Variation of the f_c with neutron energy.

中子俘获截面可用以下公式表示:

$$\sigma_c = \frac{N_w}{N_s I S_n} \times \frac{\sigma_t}{(1 - e^{-N \sigma_t f_c})}. \quad (13)$$

图 8 展示了根据 (13) 式计算的中子俘获截面值与不同评价库收录数据的对比结果. 在 1—500 eV 能区, 实验中能明确发现存在 25 个中子共振峰, 其中截面最低为 3.6 b ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$), 位于 293.2 eV 处. 实验未发现 ^{109}Ag 在 106.3 eV 存在中子共振的迹象, 根据评价库的结果, ^{109}Ag 在该能量处存在共振峰且其俘获截面约为 7.5 b, 对于该能量下 ^{109}Ag 中子共振现象是否存在, 有待进一步的实验检验.

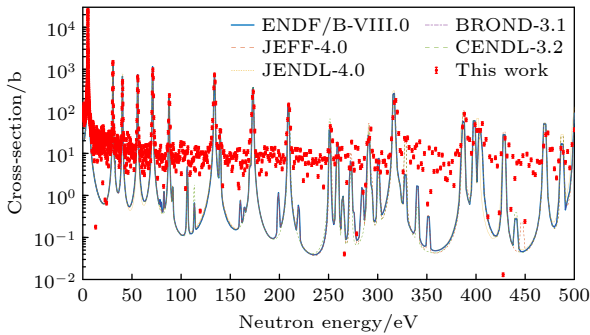


图 8 实验数据的截面计算结果
Fig. 8. Calculated cross-section of the experimental data.

对于截面高于 3.6 b 的中子共振峰, 使用基于 R 矩阵理论的 SAMMY 程序提取了中子共振参数. SAMMY 程序中考虑了多重中子散射、自屏蔽、多普勒展宽效应等物理效应和中子能量分辨率导致的共振展宽效应^[23]. 俘获核 K 定义为

$$K = g \frac{\Gamma_\gamma \Gamma_n}{\Gamma_\gamma + \Gamma_n}, \quad (14)$$

其中 Γ_γ 为辐射共振宽度, Γ_n 为中子共振宽度, 统计因子 g 定义为

$$g = \frac{2J + 1}{(2s + 1)(2I + 1)}, \quad (15)$$

其中 J 为总角动量, $s = 1/2$ 为中子自旋, I 为同位素自旋, 本研究将提取的俘获核 K 与各主流评价库进行对比.

图 9 所示为本研究结果与基于各主流评价库推荐的共振参数值计算的俘获核的比值, 由于 ENDF/B-VIII.0 和 BROND-3.1 评价库数据完全一致, 在图中用橙色六角形合并表示, CENDL-3.2, JENDL-4.0, JEFF-4.0 评价库数据分别用黄色菱形、紫色五角星和绿色三角形表示. 本研究提取结果与基于 ENDF/B-VIII.0 和 BROND-3.1 评价库数据计算的俘获核 K 的平均比值为 1.24, 与基于 CENDL-3.2, JENDL-4.0, JEFF-4.0 评价库数据计算的俘获核 K 的平均比值为 0.92, 1.23, 1.02.

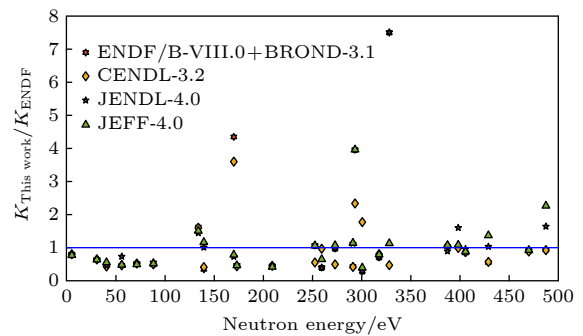


图 9 实验提取的俘获核 K 与各主流评价库的对比
Fig. 9. Comparison between the capture Kernels K from the major evaluations and the ones from this work.

实验提取的中子共振参数与主流评价库收录数据的详细对比如表 3 所示, 为方便后文讨论, 用 DB#1-5 分别表示 ENDF/B-VIII.0, CENDL-3.2, JENDL-4.0, JEFF-4.0 以及 BROND-3.1 评价库, 由于 DB#1 和 DB#5 在这些能量点的数据一致, 在表中将其合并. 如表 3 所示, 不同评价库所提供的 ^{109}Ag 中子共振参数在 139.4, 169.9, 259.3 和 328.1 eV 存在分歧. 在 139.4 eV 处, Γ_γ 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 4%, 4%, 6%, 6%, 4%, Γ_n 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 66%, 60%, 1%, 17%, 66%, 实验结果与 JENDL-4.0 库的偏离相对较小; 在 169.9 eV 处, Γ_γ 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 18%, 3%, 3%, 3%, 18%, Γ_n 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 338%,

表 3 实验提取的 ^{109}Ag 的共振参数与各主流评价库对比

Table 3. Comparison of the ^{109}Ag resonance parameters obtained from experiment and the major evaluated libraries.

E_n/eV	Γ_γ/meV					Γ_n/meV				
	This Work	DB#1/#5	DB#2	DB#3	DB#4	This Work	DB#1/#5	DB#2	DB#3	DB#4
5.1	131.11±8.35	130.00	136.00	136.00	135.30	10.02±0.77	12.73	12.70	12.67	13.24
30.6	135.53±3.89	130.00	128.00	130.00	125.50	4.62±0.12	7.33	7.30	7.20	7.38
40.4	151.81±5.30	131.00	131.00	130.00	139.70	2.57±0.07	5.33	6.20	5.87	4.76
55.9	146.22±5.78	139.00	139.00	130.00	130.60	14.94±0.50	37.20	36.80	21.60	36.09
71.2	111.70±5.45	120.00	117.00	130.00	130.00	12.37±0.49	26.67	26.40	25.20	27.49
88.1	149.92±8.18	130.00	131.00	130.00	127.90	2.84±0.11	6.40	6.20	5.47	5.91
133.8	108.54±2.15	120.00	120.00	130.00	130.00	274.05±4.84	80.00	82.00	92.13	85.86
139.4	137.93±12.29	133.00	133.00	130.00	130.00	2.02±0.09	6.00	5.00	2.00	1.73
169.9	133.81±11.21	163.00	130.00	130.00	130.00	1.05±0.04	0.24	0.29	1.44	1.34
173.0	134.96±8.34	140.00	130.00	130.00	130.00	17.42±0.55	44.93	50.00	44.93	46.48
209.0	112.91±9.51	133.00	123.00	130.00	130.00	10.02±1.28	24.00	24.40	24.80	26.36
252.4	123.58±11.90	124.00	130.00	130.00	130.00	6.28±0.54	5.87	11.80	5.87	5.87
259.3	131.94±13.07	111.00	130.00	130.00	130.00	5.03±0.50	13.60	5.20	13.60	7.92
272.9	137.47±13.60	141.00	130.00	130.00	130.00	1.95±0.19	2.00	4.00	2.00	1.82
291.1	132.99±13.10	140.00	140.00	130.00	130.00	12.60±1.11	33.20	34.20	11.07	10.92
293.2	129.80±12.98	163.00	130.00	130.00	130.00	1.67±0.15	0.40	0.68	0.40	0.40
300.6	130.38±12.94	141.00	130.00	130.00	130.00	1.66±0.16	6.00	0.93	6.00	4.27
317.7	102.90±8.91	141.00	124.00	130.00	130.00	121.70±11.33	178.67	158.00	200.00	153.70
328.1	134.04±12.99	163.00	130.00	130.00	130.00	6.82±0.63	0.87	15.40	0.87	6.00
387.3	153.07±13.65	147.00	147.00	130.00	130.00	44.91±4.19	43.33	43.10	55.33	43.02
398.2	140.83±13.94	140.00	140.00	130.00	130.00	22.48±1.96	22.00	22.70	13.33	20.77
405.6	115.84±13.20	146.00	143.00	130.00	130.00	182.11±18.87	200.00	190.00	168.00	210.60
428.9	126.15±12.41	141.00	130.00	130.00	130.00	19.06±1.83	38.00	37.40	18.27	13.32
470.0	120.00±10.92	141.00	134.00	130.00	130.00	129.26±11.96	138.00	148.00	138.00	139.30
487.4	134.34±13.15	141.00	130.00	130.00	130.00	41.76±4.15	45.40	46.80	22.80	15.77

262%, 27%, 22%, 338%, 实验结果与 JEFF-4.0 库的偏离相对较小; 在 259.3 eV 处, Γ_γ 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 19%, 1%, 1%, 1%, 19%, Γ_n 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 63%, 3%, 63%, 36%, 63%, 实验结果与 CENDL-3.2 库的偏离相对较小; 在 328.1 eV 处, Γ_γ 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 18%, 3%, 3%, 3%, 18%, Γ_n 实验值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 684%, 56%, 684%, 14%, 684%, 实验结果与 JEFF-4.0 库的偏离相对较小. 另外, 在 133.8 eV 处, 实验提取的 Γ_γ 值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 10%, 10%, 17%, 17%, 10%, 实验提取的 Γ_n 值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 243%, 234%, 194%, 222%, 243%; 在 317.7 eV 处, 实验提取的 Γ_γ 值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 27%, 17%, 21%, 21%, 27%, 实验提取的 Γ_n 值与 DB#1—5 的相对偏差分别为 32%, 23%, 40%, 21%, 32%.

综上所述, 实验结果与主流评价库的偏差, 以及不同主流评价库之间的偏差在 Γ_n 值处相对显著, 这意味着不同评价库采用的方法和标准在计算中子共振宽度时存在较大的差异, 在 139.4, 169.9, 259.3 和 328.1 eV 处, 当前的实验结果能够较好地符合一个或者某几个评价库的结果, 而在 133.8 eV 和 317.7 eV 处当前的实验结果并不能很好地澄清这些差异. 考虑到目前实验数据的缺乏, 当前并不合适做评价数据库或实验数据准确性的判断. 我们建议在 133.8 eV 和 317.7 eV 处开展独立的实验检验.

4 总结

本研究基于中国散裂中子源的反角白光中子源装置完成了 ^{109}Ag 同位素靶的中子俘获截面测量, 使用 C_6D_6 探测器系统和飞行时间法得到了脉冲高度净计数谱, 其中本底通过碳靶和铅靶进行扣

除, 使用 PHWT 方法得到了加权计数谱并计算出 ^{109}Ag 在 1—500 eV 能量范围内的中子俘获截面, 实验提取的中子共振峰截面下限为 3.6 b, 位于 328.1 eV 处. 对于高于 3.6 b 的中子共振峰, 使用基于 R 矩阵理论的 SAMMY 程序提取了 ^{109}Ag 同位素的中子共振参数. 在 139.4 eV 处, 实验所提取的中子共振参数值符合 JENDL-4.0 库收录的结果; 在 169.9 eV 和在 328.1 eV 处, 实验所提取的中子共振参数值符合 JEFF-4.0 库收录的结果; 在能量为 259.3 eV 处, 实验所提取的中子共振参数值符合 CENDL-3.2 库收录的结果, 而在 133.8 eV 和 317.7 eV 处当前的实验结果并不能很好地澄清这些差异, 有待于进一步的实验检验.

本工作提供了共振能区 ^{109}Ag 中子俘获截面实验数据, 在评价库存在分歧的能量点也给出了基于实验的推荐; 本工作所提取的数据可进一步用于核天体物理与核反应堆设计等应用中.

数据可用性声明

支撑本研究成果的数据集可在科学数据银行 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00197> 中访问获取.

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] Battino U, Pignatari M, Tattersall A, Denissenkov P, Herwig F 2022 *Universe* **8** 170
- [2] Käppeler F, Gallino R, Bisterzo S, Aoki W 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 157
- [3] Thielemann F K, Arcones A, Käppeler R, et al. 2011 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **66** 346
- [4] Arnould M, Katsuma M 2007 *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology* Nice, France, April 22–27, 2007 p5
- [5] Arlandini C, Käppeler F, Wisshak K, Gallino R, Lugaro M, Busso M, Straniero O 1999 *Astron. J.* **525** 886
- [6] Lin M, Cheng M S, Dai Z M 2020 *Nucl. Sci. Tech.* **31** 33
- [7] Qayyum F, Ali M R, Zahur A, Khan R 2019 *Nucl. Sci. Tech.* **30** 63
- [8] Ge Z G, Xu R R, Wu H C, et al. 2020 *EPJ Web Conf.* **239** 09001
- [9] 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, et al. 2018 *Nucl. Data Sheets.* **148** 1
- [10] Shibata K, Iwamoto O, Nakagawa T, et al. 2011 *Nucl. Sci. Technol.* **48** 1
- [11] Hursin M, Xia F, Rochman D 2025 *Nucl. Sci. Eng.* **199** 1987
- [12] Blokhin A I, Gai E V, Ignatyuk A V, Koba I I, Manokhin V N, Pronyaev V G 2016 *Yad. Reak. Kon.* **2** 62
- [13] Otuka N, Dupont E, Semkova V, et al. 2014 *Nucl. Data Sheets.* **120** 272
- [14] Salamon L, Geslot B, Heyse J, et al. 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **446** 19
- [15] Li X X, Liu L X, Jiang W, et al. 2022 *Chin. Phys. B* **31** 038204
- [16] Chen H, Wang X L 2016 *Nat. Mater.* **15** 689
- [17] Tang J Y, An Q, Bai J B, Bao J, Bao Y, Cao P, Chen H L, Chen Q P, Chen Y H, Chen Z, et al. 2021 *Nucl. Sci. Tech.* **32** 11
- [18] Larson N M 2008 *Oak Ridge National Laboratory Technical Report No.* ORNL/TM-9179/R8
- [19] Zhang L Y, Jing H T, Tang J Y, Wang X Q 2016 *Rad. Phys. Chem.* **127** 133
- [20] Wang D X, Zhang S Y L T, Jiang W, Ren J, Wang J C, Tang J Y, Ruan X C, Wang H W, Chen Z Q, Huang M R, Tang X, Hu X R, Li X X, Liu L X, Liu B Y, Sun H, Zhang Y, Hao Z R, Song N, Li X, Niu D D, Li G, Meng G F 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 072901 (in Chinese) [王德鑫, 张苏雅拉吐, 蒋伟, 任杰, 王金成, 唐靖宇, 阮锡超, 王宏伟, 陈志强, 黄美容, 唐鑫, 胡新荣, 李鑫祥, 刘龙祥, 刘丙岩, 孙慧, 张岳, 郝子锐, 宋娜, 李雪, 牛丹丹, 利国, 蒙古夫 2022 物理学报 **71** 072901]
- [21] Li X X, Liu L X, Jiang W, et al. 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 178
- [22] Wang J C, Ren J, Jiang W, et al. 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 164
- [23] Jiang B, Han J L, Jiang W, Hu J F, Wang X H, Chen J G, Cai X Z 2021 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1013** 165677
- [24] Liu X Y, Yang Y W, Liu R, et al. 2019 *Nucl. Sci. Tech.* **30** 139
- [25] Yi H, Wang T F, Li Y, et al. 2020 *Jour. Instrum.* **15** P03026
- [26] Carlson A D, Pronyaev V G, Smith D L, et al. 2009 *Nucl. Data Sheets.* **110** 3215
- [27] Li X X, Liu L X, Jiang W, et al. 2021 *Phy. Rev. C* **104** 054302
- [28] Ren J, Ruan X, Jiang W, Bao J, Luan G, Zhang Q W, Huang H X, Nie Y B, Ge Z G, An Q, et al. 2021 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **985** 164703
- [29] Ren J, Ruan X C, Chen Y H, Jiang W, Bao J, Luan G Y, Zhang Q S, Huang H X, Wang Z H, An Q, et al. 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 172901 (in Chinese) [任杰, 阮锡超, 陈永浩, 蒋伟, 鲍杰, 栾广源, 张奇诗, 黄翰雄, 王朝辉, 安琪, 等 2020 物理学报 **69** 172901]
- [30] Li X X, Liu L X, Jiang W, et al. 2022 *Phy. Rev. C* **106** 065804
- [31] Li X K, An Z D, Jiang W, et al. 2023 *Phy. Rev. C* **108** 035802
- [32] Ren J, Ruan X C, Bao J, et al. 2019 *Radiat. Detect. Tech. Meth.* **3** 52
- [33] Macklin R L, Gibbons J H 1967 *Phys. Rev.* **159** 1007
- [34] Apostolakis J, Arce P, Burkhardt H, et al. 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **506** 250
- [35] Chen Y H, Luan G Y, Bao J, et al. 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 115
- [36] Li X X, Liu L X, Jiang W, et al. 2020 *Nucl. Tech.* **43** 080501 (in Chinese) [李鑫祥, 刘龙祥, 蒋伟, 等 2020 核技术 **43** 080501]
- [37] Chen Y J, Li X X, Jiang W, et al. 2025 *Phy. Rev. C* **111** 054607
- [38] Huang W J, Wang M, Kondev F G, Audi G, Naimi S 2021 *Chin. Phys. C* **45** 030002

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

Measurement of neutron capture cross-sections and extraction of neutron resonance parameters at 1—500 eV for $^{109}\text{Ag}^*$

XIE Wen¹⁾ CHE Guoliang¹⁾ JIANG Wei³⁾⁴⁾ DONG Gaoyang¹⁾
 WENG Chuxuan¹⁾ JIANG Xin¹⁾ LI Xinxiang^{1)2)†} FENG Song^{1)2)‡}
 JIANG Bing¹⁾²⁾ REN Jie⁵⁾ LIN Ziang¹⁾ YIN Mingyang¹⁾
 JIANG Ting¹⁾ HE Rui¹⁾ WANG Hongwei⁶⁾⁷⁾ FAN Gongtao⁶⁾⁷⁾
 LIU Longxiang⁶⁾⁷⁾ ZHANG Yue⁶⁾ HAO Zirui⁶⁾
 ZHANG Suyalatu⁸⁾ WANG Dexin⁸⁾ LUO Wen^{1)2)††}

1) (*School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China*)

2) (*Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy Design and Safety, Ministry of Education, Hengyang 421001, China*)

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

4) (*China Spallation Neutron Source, Dongguan 523803, China*)

5) (*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

6) (*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

7) (*Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China*)

8) (*Institute of Nuclear Physics, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, China*)

(Received 15 September 2025; revised manuscript received 14 November 2025)

Abstract

^{109}Ag is located on the pathway of the slow neutron capture process, and 79% of ^{109}Ag is generated through a rapid neutron capture process. Meanwhile, the mass fraction of ^{109}Ag in Ag-In-Cd control rods is 38.56%. Therefore, the neutron capture cross-section of ^{109}Ag is crucial for both nuclear energy and nuclear astrophysics applications. In this work, a neutron capture cross-section is measured using a ^{109}Ag isotope target at the Back-n white neutron facility of the China Spallation Neutron Source (CSNS). Neutron capture cross-sections in the 1–500 eV energy region are obtained by combining the time-of-flight method and the pulse-height weighting technique. The ^{109}Ag resonance energy, neutron resonance width, and gamma resonance width parameters are extracted using the SAMMY code, which is based on R-matrix theory. The neutron resonance parameters extracted from this study at 139.4 eV are in agreement with the values evaluated in the JENDL-4.0, while the parameters at 169.9 eV and 328.1 eV are in agreement with the values evaluated in the JEFF-4.0. Additionally, the result at 259.3 eV is consistent with the value evaluated in the CENDL-3.2. The datasets presented in this paper are openly available at <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00197>.

Keywords: neutron capture cross-section, white neutron source, resonance parameter

DOI: [10.7498/aps.75.20251270](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251270)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251270](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251270)

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 2025JJ60020) and the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2441221).

† Corresponding author. E-mail: lixinxiang@usc.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: songfeng@usc.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: wen.luo@usc.edu.cn



1—500 eV ^{109}Ag 中子俘获截面实验测量与共振参数提取

谢文 车国梁 蒋伟 董高阳 翁楚轩 蒋欣 李鑫祥 冯松 姜炳 任杰 林子昂 尹铭杨 江婷 何睿 王宏伟 范功涛 刘龙祥 张岳 郝子锐 张苏雅拉吐 王德鑫 罗文

Measurement of neutron capture cross-sections and extraction of neutron resonance parameters at 1—500 eV for ^{109}Ag

XIE Wen CHE Guoliang JIANG Wei DONG Gaoyang WENG Chuxuan JIANG Xin LI Xinxiang
FENG Song JIANG Bing REN Jie LIN Ziang YIN Mingyang JIANG Ting HE Rui WANG
Hongwei FAN Gongtao LIU Longxiang ZHANG Yue HAO Zirui ZHANG Suyalatu WANG Dexin
LUO Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 020114 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251270

CSTR: 32037.14.aps.75.20251270

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251270>

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