

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题·封面文章

# 1—100 eV 能区 $^{169}\text{Tm}$ 中子全截面测量 与共振参数分析\*

杨皓岚<sup>1)</sup> 薛洁明<sup>1)</sup> 任杰<sup>1)†</sup> 陈永浩<sup>2)3)</sup> 阮锡超<sup>1)‡</sup> 王金成<sup>1)</sup> 鲍杰<sup>1)</sup>  
樊瑞睿<sup>2)3)4)</sup> 蒋伟<sup>2)3)</sup> 孙琪<sup>1)</sup> 刘颖一<sup>1)</sup> 罗忠献<sup>1)</sup> 黄翰雄<sup>1)</sup>

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) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

4) (核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

(2025年9月15日收到; 2025年10月17日收到修改稿)

中子全截面不仅是核反应理论研究的重要参数, 也是共振参数提取和核数据库评价所必需的关键数据. 然而, 在低能共振区, 由于实验本底、样品自屏蔽效应和仪器展宽的影响, 不同实验的测量结果存在数据分歧. 本研究在中国散裂中子源反角白光中子束线 (CSNS Back-n) 上开展了  $^{169}\text{Tm}$  的中子全截面测量, 采用翼形锂玻璃探测器对 0.5 mm 和 4.5 mm 厚度样品进行透射实验, 并结合锂玻璃闪烁体与饱和共振吸收技术, 定量评估并扣除了束内伽马本底, 获得了 1—100 eV 能区的中子透射率和全截面数据, 结果与实验数据库符合较好. 结合在 Back-n 获得的中子俘获实验数据, 利用 SAMMY 程序对透射率进行了  $R$  矩阵拟合, 提取了该能区的共振参数, 初步验证了 Knapová 等观测到的 8.037 eV 处的新共振峰. 基于提取的参数, 采用 Reich-Moore 近似重构了  $^{169}\text{Tm}$  中子全截面, 结果与 ENDF/B-VIII.1 共振参数重构的截面符合较好, 为核数据库提供了新的参考. 本文数据集可在 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00192> 中访问获取.

**关键词:** 中子透射率, 中子全截面, 共振参数,  $R$  矩阵**DOI:** 10.7498/aps.75.20251263**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251263

## 1 引言

核数据是核物理基础研究及核工程与核技术应用的重要支撑. 中子全截面和中子共振参数在核物理和核工程中具有关键作用, 不仅可用于验证核能级结构和核反应理论模型, 还可作为核能系统设计与核医学应用的重要输入参数<sup>[1-3]</sup>. 铥 (Tm) 是一种重要的稀土元素, 也是反应堆可燃毒物, 其天

然同位素仅有  $^{169}\text{Tm}$ . 精确的  $^{169}\text{Tm}$  中子全截面数据, 不仅有利于提取可靠的中子共振参数, 例如共振能  $E_n$ 、中子宽度  $\Gamma_n$  以及伽马宽度  $\Gamma_\gamma$  等, 为核结构和核反应机理研究提供实验依据, 还有利于澄清核反应实验数据库 (EXFOR) 数据分歧, 从而为核反应堆设计与核技术应用提供坚实的支撑.

根据 EXFOR 记录,  $^{169}\text{Tm}$  中子全截面测量最早的相关实验是 Foote 等<sup>[4]</sup> 于 1953 年在布鲁克海文国家实验室 (BNL) 利用 Be 与 NaCl 晶体谱仪

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12475308)、国家重点研发计划 (批准号: 2023YFA1606603) 和稳定支持基础科研计划 (批准号: BJ010261223282) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [renjie@ciae.ac.cn](mailto:renjie@ciae.ac.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [ruanxc@ciae.ac.cn](mailto:ruanxc@ciae.ac.cn)

测量了 0.1—30 eV 能区的截面值, 首次观察到位于 3.92, 14.8 与 17.6 eV 的共振峰, 计算出复合核的能级间距约为 10 eV. 随后, Harvey 等<sup>[5]</sup>于 1955 年采用 BF<sub>3</sub> 计数器, 利用飞行时间方法在 3—200 eV 能区获得了 318 个能点, 并通过逐次逼近的方法分析透射曲线, 提取了  $E_n$  和  $\Gamma_n$ , 但受限于仪器能量分辨率和多普勒展宽效应, 所得参数精度不高. 20 世纪 70 年代, Tellier 等<sup>[6]</sup>在电子直线加速器上开展了 3.9 eV—1 MeV 的测量. 实验通过将液氮冷却至 77 K 以减小多普勒效应, 获得较多能点以及中子共振参数. 1998 年, Danon 等<sup>[7]</sup>在伦斯勒理工学院 (RPI) 电子直线加速器开展测量, 能区范围覆盖 0.001—20 eV, 并利用 SAMMY 程序获得了在 3.92, 14.8 与 17.6 eV 的共振参数, 为后续的核数据评价提供了重要依据. 王文明等<sup>[8]</sup>于 2010 年利用韩国的浦项中子源 (PNF) 对 <sup>169</sup>Tm 进行了 100 eV 以下能区全截面测量, 缺少俘获实验数据约束, 实验获得的共振参数与 Mughabghab<sup>[9]</sup>的推荐值存在较大分歧.

综上所述, <sup>169</sup>Tm 的中子全截面已有多项较薄样品的测量结果, 但研究者主要通过拟合 Breit-Wigner 共振公式<sup>[10]</sup>拟合 <sup>169</sup>Tm 的中子透射率, 从而确定了各共振态的  $E_n$ ,  $\Gamma_n$  和  $\Gamma_\gamma$  等参数, 其中  $\Gamma_\gamma$  主要基于透射率数据拟合公式间接推导获得, 而  $\Gamma_\gamma$  对中子俘获截面更加敏感, 通常需要结合中子辐射俘获产额确定. 任杰等<sup>[11]</sup>于 2022 年在 CSNS Back-n 上利用 C6D6 探测器对 0.2 mm 厚度 <sup>169</sup>Tm 开展了辐射俘获截面测量, 进行更加精确的实验本底扣除和共振参数分析, 利用 SAMMY 程序拟合中子辐射俘获产额, 确定了 1—100 eV 能量范围的  $\Gamma_\gamma$ . 部分参数与评价核反应数据库 (ENDF) 推荐值存在差异. Knapová 等<sup>[12]</sup>于 2025 年在 DANCE 设备上使用  $5.08 \times 10^{-3}$  cm 和  $2.07 \times 10^{-4}$  cm 两种厚度测量了 <sup>169</sup>Tm 的中子辐射俘获截面, 该研究报道了一些新的共振峰, 例如 8.037, 22.03, 71.85, 75.57 eV 等, 目前仍需更多实验数据验证.

自中国散裂中子源反角白光中子束线 (CSNS Back-n) 建成以来, 其宽能谱和高通量特性填补了我国在白光中子能区实验条件的空白, 为辐射俘获截面<sup>[13,14]</sup>、中子全截面<sup>[3,15,16]</sup>等核数据测量提供了关键平台<sup>[17,18]</sup>. 本研究依托该装置, 利用翼形锂玻璃探测器完成了 <sup>169</sup>Tm 的中子全截面测量, 并对 1—100 eV 能区的截面与共振参数进行分析. 本工

作不仅为 EXFOR 数据库补充了新数据, 也为 <sup>169</sup>Tm 共振参数的评价提供了更可靠的实验依据, 有助于澄清现有共振参数分歧、验证潜在的新共振峰, 并推动中子核反应理论模型的发展.

## 2 实验测量

### 2.1 测量原理

中子全截面的测量采用透射法结合飞行时间法进行. 透射法的基本原理是通过比较相同入射中子条件下有样和无样时的中子透射强度, 得到样品对中子的衰减效应, 从而反推出全截面<sup>[19]</sup>. 在开展各个样品的实验测量时, 尤其是在长时间测量模式下, 加速器的束流功率会存在一定的波动, 这会导致中子注量率发生变化, 另外, 各个靶的测量时长也并非严格相等. 为了消除束流波动以及不同测量时长对中子计数的影响, 一般采用质子数进行归一, 归一后的飞行时间谱才能用于计算透射率谱. 在中子能量为  $E_i$  时, 实验透射率 ( $T_{\text{exp}}$ ) 指扣除本底计数后, 有样条件与无样品条件下中子计数之比, 计算如 (1) 式所示:

$$T_{\text{exp}}(E_i) = \frac{C_{\text{in}}(E_i)/k_{\text{Cin}} - B_{\text{in}}(E_i)/k_{\text{Bin}}}{C_{\text{out}}(E_i)/k_{\text{Cout}} - B_{\text{out}}(E_i)/k_{\text{Bout}}}, \quad (1)$$

式中,  $C_{\text{in}}(E_i)$ ,  $C_{\text{out}}(E_i)$  分别表示有样与无样中子计数;  $B_{\text{in}}(E_i)$ ,  $B_{\text{out}}(E_i)$  分别表示有样与无样本底计数;  $k_{\text{Cin}}$ ,  $k_{\text{Bin}}$ ,  $k_{\text{Cout}}$ ,  $k_{\text{Bout}}$  表示质子归一系数. 通过对  $T$  的测量, 可计算中子全截面, 如 (2) 式所示:

$$\sigma_t(E_i) = -\frac{1}{n} \ln T_{\text{exp}}, \quad (2)$$

式中,  $n$  表示样品的面密度, 单位是 atoms/b ( $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$ ). 飞行时间法通过测量每一个中子被探测到的时间, 利用飞行时间谱刻度出中子飞行的起始时间和有效飞行距离, 从而得到中子能量, 其非相对论公式如 (3) 式所示:

$$E_i = \frac{m_n L^2}{2(t - t_0)^2}, \quad (3)$$

式中,  $m_n$  表示中子质量,  $t_0$  是中子产生时间,  $t$  表示中子到达探测器的时间.

### 2.2 实验装置

本实验在 CSNS Back-n 上开展 <sup>169</sup>Tm 中子全截面测量. 图 1 显示中子束流从左至右依次经过管道束窗、准直器 1、样品、准直器 2、探测器, 最后进

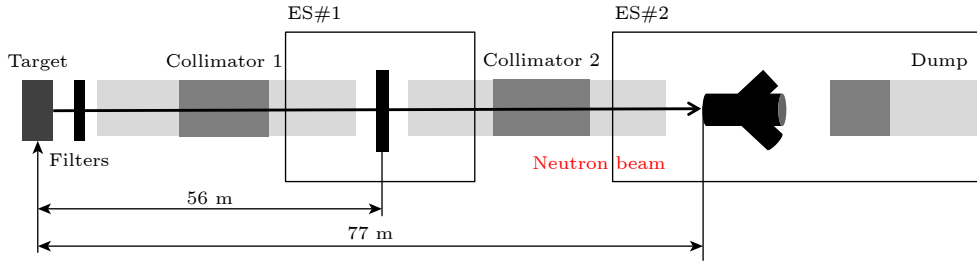


图 1 测量装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of measurement device.

表 1  $^{169}\text{Tm}$  样品的参数

Table 1. Parameters of the  $^{169}\text{Tm}$  sample.

样品	长度/mm	宽度/mm	质量/mg	样品面密度/(atom·b <sup>-1</sup> )
1#	60.34 ± 0.05	60.98 ± 0.08	17542.48 ± 0.30	1.694 × 10 <sup>-3</sup>
2#	60.37 ± 0.11	60.62 ± 0.02	151679.48 ± 0.46	1.472 × 10 <sup>-2</sup>

入中子捕集器. 在实验测量中, 确保中子源、样品、探测器在同一轴心线上. 其中, 探测器表面距样品中心约 21 m, 样品中心距散裂靶靶心约 56 m. 探测器布置在中子束流上, 两个光电倍增管 (PMT) 偏离束流中心, 位于探测器两侧, 可以大大减少散射中子和降低  $\gamma$ -flash 对 PMT 的影响. 实验采用 0.5 mm 和 4.5 mm 两种厚度的样品, 样品参数如表 1 所示.

### 3 数据分析

实验采用 CAEN DT5730B 装置获取信号波形信息, 为保证实验结果的准确性, 需对原始数据进行修正与本底扣除. 首先, 对所有实验条件下的飞行时间谱进行死时间修正, 并根据质子数进行归一化. 再分别使用  $^6\text{Li}$  和  $^7\text{Li}$  玻璃闪烁体 ( $^6\text{Li}$ -GS 和  $^7\text{Li}$ -GS) 结合饱和和共振吸收技术, 实现对有样和无样条件下本底的准确扣除. 经过上述处理后, 可计算得到透射率和全截面.

#### 3.1 数据修正

在数据获取系统处理脉冲信号的过程中, 其最大读出速率受到处理能力的限制, 这决定了在处理完当前脉冲之前, 系统能否及时响应下一个脉冲. 当脉冲的处理时间超出了相邻脉冲到达的时间间隔, 将无法获取这些连续脉冲的信号, 导致数据丢失. 本研究中使用的数据获取系统几乎记录了所有触发后的信号, 为了区分堆积信号, 在数据分析程序中设置时间间隔  $\tau$  ( $\tau = 380$  ns), 该时间间隔内

发生的所有信号都被视为一个信号脉冲. 本工作使用的死时间修正因子  $f_{\text{dt}}(E_i)$  的基本模型<sup>[20]</sup> 表示为

$$f_{\text{dt}}(E_i) = \frac{1}{1 - \tau N_i(E_i)}, \quad (4)$$

式中, 实验谱的计数率  $N_i(E_i)$  可以表示为每质子脉冲产生的中子计数. 在 1—100 eV 的能量范围内, 死时间引入的修正量均小于 0.2%.

#### 3.2 实验本底分析

中子全截面测量实验本底主要有两个来源, 一种是与时间无关的本底, 如环境活化本底、高能宇宙射线等. 这些本底不随时间变化发生改变, 构成坪本底  $B_0$ . 另一种是与时间相关的本底, 与时间相关的本底可以分为样品相关本底和样品无关本底. 这些本底来源主要是束内伽马 ( $\gamma$ ) 本底, 该本底中  $\gamma$  射线的能量分布在 keV 到十几 MeV<sup>[21]</sup>. 在数据分析中, 实验本底是由不随时间变化的坪本底和能量在 keV 能区以上占主导地位的  $\gamma$  射线成分组成, 如 (5) 式所示:

$$B(E_i) = B_0 + B_\gamma(E_i) \times k, \quad (5)$$

式中,  $B(E_i)$  表示有样或无样条件下的实验本底,  $B_0$  表示该实验条件下的坪本底,  $B_\gamma(E_i)$  表示束内  $\gamma$  本底.  $k$  表示束内  $\gamma$  本底的归一因子. 由于  $^6\text{Li}$ -GS 和  $^7\text{Li}$ -GS 探测器对  $\gamma$  射线的响应一致, 实验中使用  $^7\text{Li}$ -GS 结合饱和和共振技术测量束内  $\gamma$  和确定  $k$ . 图 2 展示了  $^6\text{Li}$ -GS 在测量 0.5 mm 样品的实验本底构成. TOF 谱上 0.3 eV (飞行时间在  $10^7$  ns 以上) 以下的计数几乎全部由坪本底构成. 束内  $\gamma$  本

底在整个测量能区范围都有分布, 在 keV 能区以上占主导影响. 利用飞行时间谱在 3.90 eV 的共振吸收谷可以确定  ${}^7\text{Li}$ -GS 探测器测量的束内  $\gamma$  本底贡献, 归一系数  $k = 0.43$ .

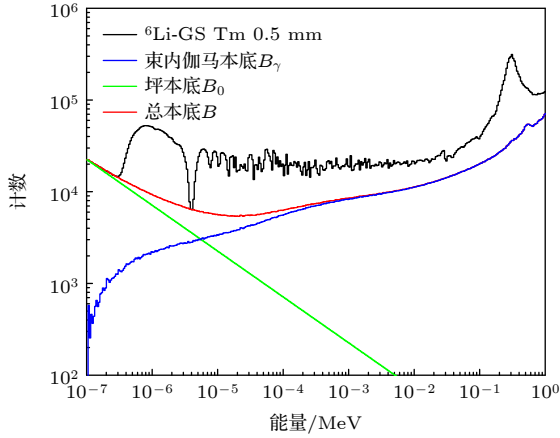


图 2 0.5 mm 样品本底  
Fig. 2. Background of a 0.5 mm sample.

针对无样相关的本底, 本工作利用具有强共振吸收峰的材料 (如 Co, Ta 和 Cd) 作为吸收片, 完全吸收特定能量的中子, 在飞行时间谱形成吸收谷 [22,23]. 在数据处理中, 选择  ${}^{181}\text{Ta}$ (4.28 eV) 的共振峰来计算  ${}^6\text{Li}$ -GS 探测器在有吸收片条件下的归一系数为 0.42. 在不同能区, 束内  $\gamma$  射线能量分布基本一致 [21], 利用 Geant4 程序 [24-26] 模拟在有吸收片时  $\gamma$  能谱, 计算得到吸收片对于束内  $\gamma$  射线平均衰减系数为 0.91. 有样和无样条件下的束内伽马贡献系数接近, 偏差在 3% 以内.

### 3.3 中子全截面计算

通过扣除本底, 可由 (1) 式计算得到中子透射率, 如图 3 所示. 黑色点和红色点分别对应厚度 0.5 mm 和 4.5 mm 的样品. 较厚样品的透射率展宽更明显, 主要由自屏蔽和多次散射效应引起. 为更精细地分析 1—100 eV 能区内的共振峰形状, 本实验采用较密的能量点, 但单点统计计数减少, 导致部分能区透射率的不确定度超过 10%. 中子全截面可由 (2) 式计算得到. 如图 4 所示, 本实验结果与 EXFOR 数据库中的多组实验数据整体一致, 共振吸收峰的展宽基本相符, 但峰高存在一定差异. 这主要源于样品厚度的不同: 较薄样品在强共振峰处不易出现饱和效应, 同时自吸收和多重散射效应也相对减弱.

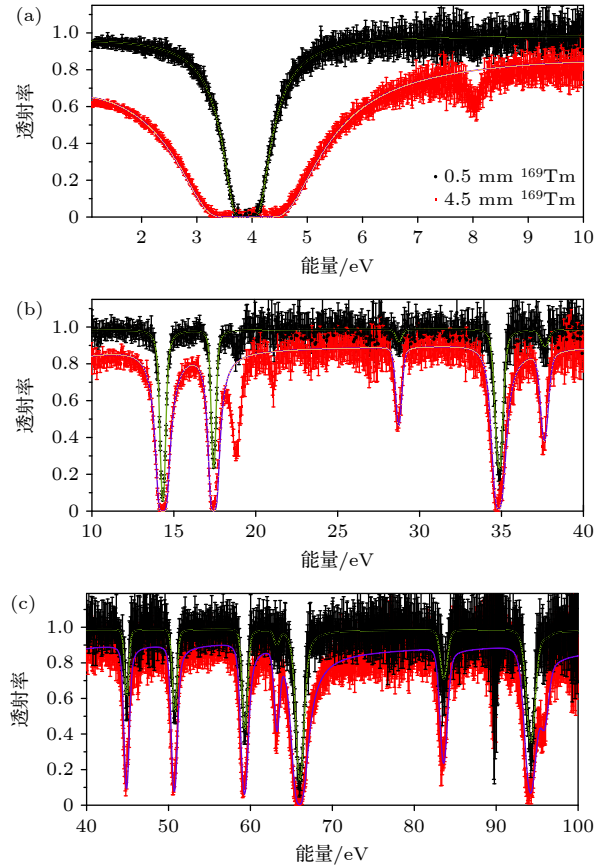


图 3 中子透射率与 SAMMY 拟合结果  
Fig. 3. Neutron transmission and SAMMY fitting results.

此前, Knapová 等 [12] 在俘获实验中报道了 8.037, 22.03, 71.85 和 75.57 eV 等新的共振峰, 而本实验在 8 eV 附近观测到明显共振, 该峰未被 ENDF 收录, 可能与以往透射实验所用样品较薄有关. 在 38—40 eV 区间, 本实验并未重现文献 [11] 报道的共振结构, 推测其可能由杂质引起. 本实验在 18.8 eV 和 21.1 eV 附近出现的共振结构主要源于散裂靶材料中的 W 共振吸收. W 的主要同位素包括  ${}^{182}\text{W}$  和  ${}^{186}\text{W}$ . 对其截面评价值进行归一化处理后可知,  ${}^{182}\text{W}$  的最大共振峰与 21.1 eV 对应 (图 4 中黄色曲线), 而  ${}^{186}\text{W}$  的最大共振峰与 18.8 eV 对应 (图 4 中蓝色曲线). W 共振吸收对 1—100 eV 能区共振峰的影响可以忽略.

## 4 中子共振参数分析

通常实验测得的中子全截面数据不能直接作为核能系统设计与分析的输入, 需要拟合中子透射率提取相应的共振参数. SAMMY 是美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 开发的用于中子共振参数分

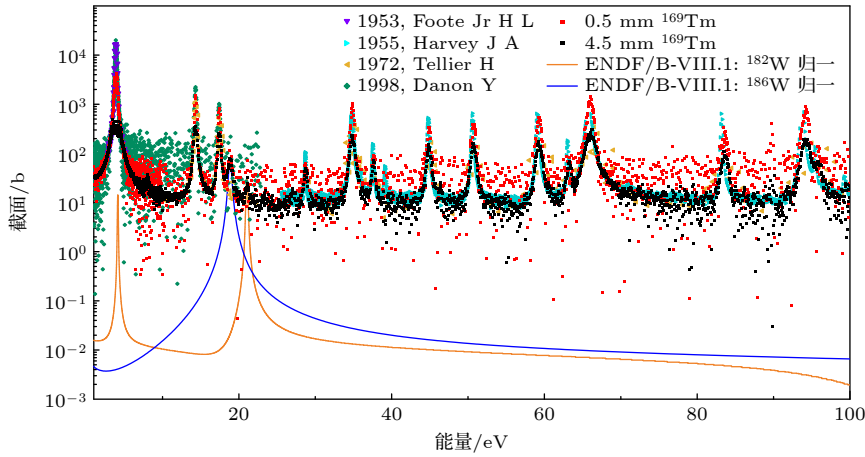


图 4  $^{169}\text{Tm}$  的中子全截面与实验库、评价库对比

Fig. 4. Comparison of the  $^{169}\text{Tm}$  neutron total cross section with EXFOR and ENDF libraries.

表 2  $^{169}\text{Tm}$  中子核反应共振参数与 ENDF/B-VIII.1 推荐值对比

Table 2. Comparison of  $^{169}\text{Tm}$  neutron reaction resonance parameters with ENDF/B-VIII.1 recommended values.

$E_n$ /eV		$\Gamma_n$ /meV		$\Gamma_\gamma$ /meV		$k$		$J$
本工作	ENDF/B-VIII.1	本工作	ENDF/B-VIII.1	本工作	ENDF/B-VIII.1	本工作	ENDF/B-VIII.1	
$3.908 \pm 0.002$	3.906	$7.38 \pm 0.24$	7.47	$105.70 \pm 7.40$	102.4	$5.17 \pm 0.21$	5.22	1
$14.33 \pm 0.01$	14.32	$9.13 \pm 0.16$	9.12	$98.80 \pm 6.92$	97.1	$2.09 \pm 0.14$	2.08	0
$17.43 \pm 0.01$	17.42	$5.46 \pm 0.04$	5.74	$81.40 \pm 5.70$	81.4	$1.28 \pm 0.04$	1.34	0
$28.73 \pm 0.26$	28.90	$0.21 \pm 0.01$	0.21	$93.70 \pm 6.56$	95.0	$0.16 \pm 0.01$	0.16	1
$34.85 \pm 0.01$	34.79	$6.86 \pm 0.06$	5.87	$86.00 \pm 6.02$	86.0	$4.76 \pm 0.06$	4.12	1
$37.64 \pm 0.06$	37.51	$0.45 \pm 0.02$	0.46	$123.96 \pm 8.68$	86.0	$0.34 \pm 0.02$	0.34	1
$44.88 \pm 0.01$	44.79	$2.91 \pm 0.18$	3.47	$99.00 \pm 6.93$	93.0	$2.12 \pm 0.17$	2.51	1
$50.74 \pm 0.07$	50.58	$5.06 \pm 0.37$	5.40	$89.01 \pm 6.23$	79.0	$3.59 \pm 0.33$	3.79	1
$59.29 \pm 0.02$	59.07	$10.13 \pm 0.21$	10.0	$86.00 \pm 6.02$	84.0	$6.80 \pm 0.18$	6.70	1
$63.17 \pm 0.01$	62.97	$0.96 \pm 0.06$	1.00	$78.02 \pm 5.46$	78.0	$0.71 \pm 0.06$	0.74	1
$65.98 \pm 0.01$	65.75	$139.18 \pm 0.49$	113	$83.00 \pm 5.81$	83.0	$13.00 \pm 2.28$	11.96	0
$83.55 \pm 0.13$	83.18	$7.50 \pm 0.09$	7.53	$85.00 \pm 5.95$	85.0	$5.17 \pm 0.09$	5.19	1
$94.16 \pm 0.06$	94.10	$35.08 \pm 1.92$	32.0	$119.12 \pm 8.14$	86.0	$18.56 \pm 1.19$	17.49	1
$95.95 \pm 0.02$	95.40	$4.25 \pm 0.32$	3.80	$71.00 \pm 4.97$	71.0	$1.00 \pm 0.29$	0.90	0

析的程序包, 该程序基于多能级多通道  $R$  矩阵理论, 并结合贝叶斯方法对实验数据进行拟合, 能够处理样品几何厚度引起的内散射效应、样品杂质、实验本底、温度导致的多普勒展宽以及仪器分辨率等因素<sup>[27]</sup>, 在拟合收敛时输出完整的参数协方差矩阵, 各参数的不确定度由协方差矩阵计算得到. 根据提取的共振参数可利用理论公式重构截面, 在可分辨共振能区 (resolved resonance region, RRR), SAMMY 提供了 Reich-Moore  $R$  矩阵近似、多能级 Breit-Wigner 近似和单能级 Breit-Wigner 近似等理论模型.

在输入文件中设置室温多普勒展宽、RPI 能量分辨函数和仪器展宽参数等<sup>[28]</sup>, 还结合了  $^{169}\text{Tm}$

中子俘获实验结果<sup>[11]</sup>, 并在参数文件中采用了该实验获取的  $\Gamma_\gamma$ . 如图 3 所示, 绿色与紫色曲线分别表示 SAMMY 对 0.5 mm 和 4.5 mm 厚度样品透射率的拟合结果, 均与实验数据符合较好, 验证了  $R$  矩阵模型的适用性. 表 2 总结了由透射率提取的共振参数及其不确定度. 结果表明, SAMMY 拟合得到的共振能量标准差在 0.07% 以内, 与推荐值的偏差为 0.05%—0.60%; 中子宽度的标准差为 0.35%—7.53%, 偏差范围为 0—20%. 相应的参数  $k$  ( $k = \frac{g\Gamma_n\Gamma_\gamma}{\Gamma_n + \Gamma_\gamma}$ ) 与评价库推荐值接近, 本工作验证了文献<sup>[11]</sup>中报道的一组  $\Gamma_\gamma$ , 并为核数据库评价提供了更可靠的实验输入.

如图 5 所示, 在 7.2—8.8 eV 能量区间存在共振结构, 利用 SAMMY 对该处的共振进行  $R$  矩阵拟合, 将该处共振峰伽马宽度设置为评价库的平均值 (86 meV), 最终拟合得到的共振参数如表 3 所示, 拟合得到的共振能量为 8.037 eV, 与文献 [12] 报道的新共振峰能量一致. 然而, 由于该共振峰截面较小, 受到仪器分辨、统计涨落等因素的影响, 本工作提取的中子宽度大于文献 [12] 中的结果, 但可以初步判断该共振峰属于  $^{169}\text{Tm}$ .

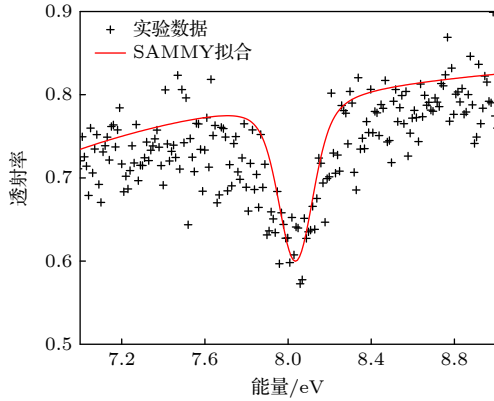


图 5 透射率拟合结果

Fig. 5. The results of fitting transmission.

表 3 两种总自旋态的中子核反应共振参数

Table 3. Resonance parameters of neutron nuclear reactions for two spin states.

$J$	$E_n$ /eV	$\Gamma_n$ /meV	$\Gamma_\gamma$ /meV
0	$8.037 \pm 0.009$	$0.036 \pm 0.002$	86
1	$8.037 \pm 0.009$	$0.015 \pm 0.001$	86

在获得共振参数后, 可利用  $R$  矩阵理论计算中子全截面. 本工作在 SAMMY 程序中输入表 2 和表 3 中的共振参数, 采用 Reich-Moore 近似重构了  $^{169}\text{Tm}$  在 1—100 eV 能区的中子全截面并以室温 (293 K) 进行多普勒展宽. 结果如图 6 所示, 除 8.037 eV 共振峰, 本工作与评价库共振参数重构的截面符合较好, 两者在共振峰峰值和宽度的差异与共振参数之间的偏差相关, 验证了俘获-透射实验提取共振参数方法的可靠性.

## 5 结 论

本工作采用透射法和飞行时间法, 利用翼形锂玻璃探测器测量了  $^{169}\text{Tm}$  的中子全截面. 采用  $^7\text{Li}$ -GS 结合饱和共振吸收技术有效扣除了实验本底, 在 1—100 eV 能区获得了透射率和截面数据, 结果

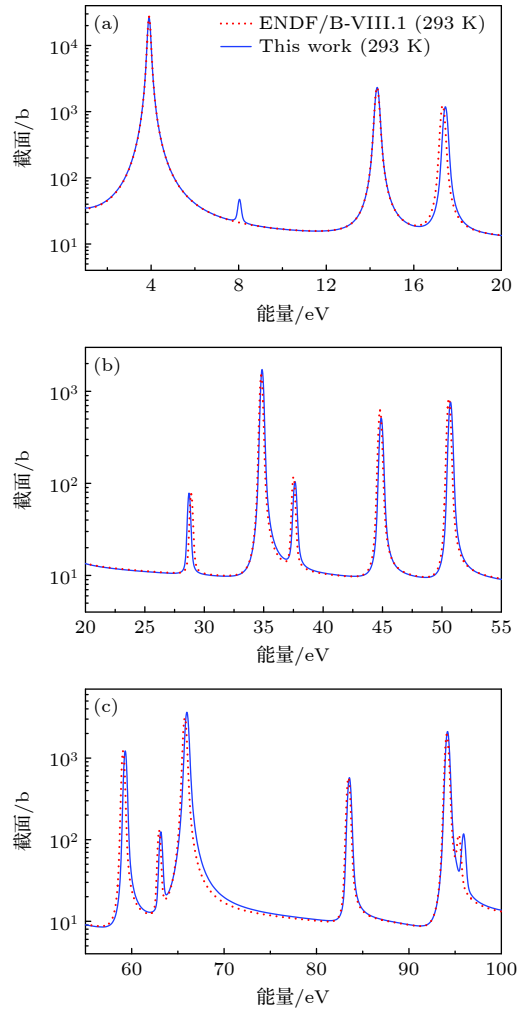


图 6 本工作与 ENDF/B-VIII.1 推荐的共振参数重构截面对比

Fig. 6. Comparison of the reconstructed cross section of the resonance parameters in this work with those recommended by ENDF/B-VIII.1 library.

与 EXFOR 数据库中的实验值符合良好. 在此基础上, 结合俘获实验数据, 采用 SAMMY 程序对透射率进行了  $R$  矩阵分析, 拟合结果与实验一致, 并在 1—100 eV 范围提取了一组中子共振参数, 同时验证了 Knapová 等 [12] 在 DANCE 实验中观测到的 8.037 eV 处的共振峰. 本工作与 ENDF/B-VIII.1 推荐参数重构截面的共振峰峰值和宽度符合较好. 本研究为数据评价提供了更加可靠的实验数据, 有利于进一步完善核数据库. 未来的工作需进一步: 1) 开展不同厚度样品的透射测量, 提高共振参数提取的精度和稳定性; 2) 对束内伽马本底进行更加细致的模拟, 提高数据归一系数的准确性; 3) 对探测器能量分辨率函数进行更准确地刻度; 4) 拓展更宽能区的共振参数分析.

## 数据可用性声明

支撑本研究的数据集可在科学数据银行 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00192> 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] Jiang B, Han J L, Ren J, Jiang W, Wang X H, Guo Z A, 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
- [2] Wang K B, Ma L T, Yang C, Bian Z Y, Zhang D D, Cui S, Wang M L, Chen Z, Li X F 2023 *Materials* **16** 4305
- [3] Zhang J L, Jiang B, Chen Y H, Guo Z A, Wang X H, Jiang W, Yi H, Han J L, Hu J F, Tang J Y, Chen J G, Cai X Z 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 052901 (in Chinese) [张江林, 姜炳, 陈永浩, 郭子安, 王小鹤, 蒋伟, 易晗, 韩建龙, 胡继峰, 唐靖宇, 陈金根, 蔡翔舟 2022 物理学报 **71** 052901]
- [4] Foote H L Jr, Landon H H, Sailor V L 1953 *Phys. Rev.* **92** 656
- [5] Harvey J A, Hughes D J, Carter R S, Pilcher V E 1955 *Phys. Rev.* **99** 10
- [6] Tellier H, Alix M 1972 *Saclay: Commissariat à l'Énergie Atomique* (CEA)
- [7] Danon Y, Werner C J, Youk G, Block R C, Slovacek R E, Francis N C 1998 *Nucl. Sci. Eng.* **128** 61
- [8] Wang W M, Li X, Zhao Z X, Zhou Z Y, Wu H C, Kim G N 2012 *At. Energy Sci. Technol.* **46** 897 (in Chinese) [王文明, 李霞, 赵志祥, 周祖英, 吴海成, Kim G N 2012 原子能科学技术 **46** 897]
- [9] Mughabghab S F 2006 *Atlas of Neutron Resonances* (Amsterdam: Elsevier) p67
- [10] Breit G, Wigner E 1936 *Phys. Rev.* **49** 519
- [11] 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, et al. 2022 *At. Energy Sci. Technol.* **56** 805 (in Chinese) [任杰, 阮锡超, 蒋伟, 鲍杰, 王金成, 张奇玮, 栾广源, 黄翰雄, 聂阳波, 葛智刚, 等 2022 原子能科学技术 **56** 805]
- [12] Knapová I, Horčíčková K, Couture A, Fry C, Günsing F, Kawano T, Kelly K J, Krčička M, Leal Cidoncha E, Prokop C J, Reifarh R, Rusev G, Ullmann J L, Valenta S 2025 *Phys. Rev. C* **112** 014612
- [13] Zhang S Y L T, Huang Y S, Jiang W, Ren J, Fan R R, Wang D X, Zhang C L, Li G, Niu D D, Huang M R 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 168
- [14] Luo H T, Zhang Q W, Luan G Y, Wang X Y, Zou C, Ren J, Ruan X C, He G Z, Bao J, Sun Q, et al. 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 072801 [罗昊天, 张奇玮, 栾广源, 王晓宇, 邹翀, 任杰, 阮锡超, 贺国珠, 鲍杰, 孙琪, 等 2024 物理学报 **73** 072801]
- [15] 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
- [16] Xue J M, Feng S, Chen Y H, Yi H, Xiao M, Cheng P J, Li X X, Liu R, Yang Y W, Han Z J, Zhao D J, Wang H Q, Li B Q, Zhao J R, Tang L X, Luo W, Zheng B 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 18
- [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] Li Q, Jing H T, Zhou B, et al. 2020 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* **980** 164506
- [19] Ji C S 2013 *Neutron Detection* (Beijing: China Atomic Energy Press) p216 (in Chinese) [汲长松 2013 中子探测 (北京: 中国原子能出版社) 第 216 页]
- [20] Knoll G F 2000 *Radiation Detection and Measurement 3rd ed.* (Hoboken, NJ, USA: Wiley) p122
- [21] Ren J, Ruan X C, Chen Y H, Jiang W, Bao J, Luan G Y, Zhang Q W, Huang H X, Wang Z H, An Q, et al. 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 172901 [任杰, 阮锡超, 陈永浩, 姜伟, 包建, 栾广宇, 张庆文, 黄浩轩, 王志宏, 安庆等 2020 物理学报 **69** 172901]
- [22] Syme D B 1982 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **198** 357
- [23] Wang J C, Ren J, Jiang W, et al. 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 164
- [24] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. 2016 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* **835** 186
- [25] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 270
- [26] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* **506** 250
- [27] Larson N M 2008 *Updated Users' Guide for SAMMY: Multilevel R-matrix Fits to Neutron Data Using Bayes' Equations* (Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory) p1
- [28] 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

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

## Measurement of neutron total cross sections and resonance parameters analysis of $^{169}\text{Tm}$ in the region from 1 eV to 100 eV\*

YANG Haolan<sup>1)</sup> XUE Jieming<sup>1)</sup> REN Jie<sup>1)†</sup> CHEN Yonghao<sup>2)3)</sup>  
 RUAN Xichao<sup>1)‡</sup> WANG Jincheng<sup>1)</sup> BAO Jie<sup>1)</sup> FAN Ruirui<sup>2)3)4)</sup>  
 JIANG Wei<sup>2)3)</sup> SUN Qi<sup>1)</sup> LIU Yingyi<sup>1)</sup>  
 LUO Zhongxian<sup>1)</sup> HUANG Hanxiong<sup>1)</sup>

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

4) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China*)

( Received 15 September 2025; revised manuscript received 17 October 2025 )

### Abstract

The neutron total cross section is one of the most fundamental nuclear data. In the low-energy resonance region, discrepancies among measurements arise from experimental backgrounds, sample self-shielding, and instrumental broadening, which complicate the precise determination of cross sections. In this work, the neutron total cross section of  $^{169}\text{Tm}$  is measured at the Back-n facility of the China Spallation Neutron Source (CSNS). Wing-shaped lithium glass detectors are used to record the transmitted neutron signals from samples with thicknesses of 0.5 mm and 4.5 mm. The raw data are processed, including time-of-flight correction and normalization to the incident proton number, to account for the fluctuations in the proton beam intensity. The in-beam  $\gamma$  background is quantified using the saturated resonance absorption technique with glass scintillators. After background subtraction, transmission and total cross-section data are obtained in an energy range of 1–100 eV. The measured spectra are analyzed using the SAMMY code within the framework of the  $\mathbf{R}$ -matrix. Neutron capture yield data are incorporated to improve the reliability of the extracted resonance parameters. For the resonance near 8 eV, the  $\Gamma_\gamma$  is set to the library average value of 86 meV. The resonance energy is determined to be 8.037 eV, consistent with the recently reported resonance by I. Knapová et al. and the neutron widths for both total spin states are evaluated. Based on the extracted parameters, the neutron total cross section of  $^{169}\text{Tm}$  is reconstructed using the Reich–Moore approximation. The reconstructed cross section shows good agreement with those recommended by ENDF/B-VIII.1 library, confirming the reliability of the resonance parameters extracted from the capture-transmission measurements. Overall, the present measurements and analysis provide a set of resonance parameters for  $^{169}\text{Tm}$ , enhancing the experimental foundation for both nuclear physics research and nuclear industry.

The datasets presented in this paper, including the neutron transmission, neutron total cross section, and resonance parameters are openly available at <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00192>.

**Keywords:** neutron transmission, neutron total cross section, resonance parameters,  $\mathbf{R}$ -matrix

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251263](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251263)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251263](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251263)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12475308), the National Key Research Program of China (Grant No. 2023YFA1606603), and the Continuous-Support Basic Scientific Research Project, China (Grant No. BJ010261223282).

† Corresponding author. E-mail: [renjie@ciae.ac.cn](mailto:renjie@ciae.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [ruanxc@ciae.ac.cn](mailto:ruanxc@ciae.ac.cn)



1—100 eV能区 $^{169}\text{Tm}$ 中子全截面测量与共振参数分析

杨皓岚 薛洁明 任杰 陈永浩 阮锡超 王金成 鲍杰 樊瑞睿 蒋伟 孙琪 刘颖一 罗忠献 黄翰雄

Measurement of neutron total cross sections and resonance parameters analysis of  $^{169}\text{Tm}$  in the region from 1 eV to 100 eV

YANG Haolan XUE Jieming REN Jie CHEN Yonghao RUAN Xichao WANG Jincheng BAO Jie  
FAN Ruirui JIANG Wei SUN Qi LIU Yingyi LUO Zhongxian HUANG Hanxiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 020103 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251263

CSTR: 32037.14.aps.75.20251263

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251263>

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>