

基于白光中子源的 ^{197}Au 中子辐射俘获截面 测量及共振参数分析*

罗湔天¹⁾ 张奇玮^{1)†} 栾广源¹⁾²⁾³⁾ 王晓宇¹⁾ 邹翀¹⁾ 任杰¹⁾ 阮锡超^{1)‡}
贺国珠¹⁾ 鲍杰¹⁾ 孙琪¹⁾ 黄翰雄¹⁾ 王朝辉¹⁾ 吴鸿毅¹⁾ 顾旻皓²⁾⁴⁾
余滔⁴⁾⁵⁾ 解立坤⁴⁾⁵⁾ 陈永浩²⁾³⁾ 安琪⁴⁾⁵⁾ 白怀勇⁶⁾ 鲍煜²⁾³⁾ 曹平⁴⁾⁵⁾
陈昊磊⁴⁾⁵⁾ 陈琪萍⁷⁾ 陈裕凯²⁾³⁾ 陈朕⁴⁾⁵⁾ 崔增琪⁶⁾ 樊瑞睿²⁾³⁾⁴⁾
封常青⁴⁾⁵⁾ 高可庆²⁾³⁾ 韩长材⁸⁾ 韩子杰⁷⁾ 何泳成²⁾³⁾ 洪杨²⁾³⁾⁹⁾
黄蔚玲²⁾³⁾ 黄锡汝⁴⁾⁵⁾ 季筱璐²⁾⁴⁾ 吉旭阳⁴⁾¹⁰⁾ 蒋伟²⁾³⁾ 江浩雨⁶⁾
姜智杰⁴⁾⁵⁾ 敬罕涛²⁾³⁾ 康玲²⁾³⁾ 康明涛²⁾³⁾ 李波²⁾³⁾ 李超⁴⁾⁵⁾
李嘉雯⁴⁾⁵⁾ 李论²⁾³⁾ 李强²⁾³⁾ 李晓²⁾³⁾ 李样²⁾³⁾ 刘荣⁷⁾ 刘树彬⁴⁾⁵⁾
刘星言⁷⁾ 穆奇丽²⁾³⁾ 宁常军²⁾³⁾ 齐斌斌⁴⁾⁵⁾ 任智洲⁷⁾ 宋英鹏²⁾³⁾
宋朝晖⁸⁾ 孙虹²⁾³⁾ 孙康²⁾³⁾⁹⁾ 孙晓阳²⁾³⁾⁹⁾ 孙志嘉²⁾³⁾⁴⁾ 谭志新²⁾³⁾
唐洪庆¹⁾ 唐靖宇²⁾³⁾ 唐新懿⁴⁾⁵⁾ 田斌斌²⁾³⁾ 王丽娇²⁾³⁾⁹⁾ 王鹏程²⁾³⁾
王琦¹⁾ 王涛峰¹¹⁾ 文杰⁷⁾ 温中伟⁷⁾ 吴青彪²⁾³⁾ 吴晓光¹⁾ 吴煊²⁾³⁾
羊奕伟⁷⁾ 易晗²⁾³⁾ 于莉²⁾³⁾ 于永积²⁾³⁾ 张国辉⁶⁾ 张林浩²⁾³⁾⁹⁾
张显鹏⁸⁾ 张玉亮²⁾³⁾ 张志永⁴⁾⁵⁾ 赵豫斌²⁾³⁾ 周路平²⁾³⁾⁹⁾
周祖英¹⁾ 朱丹阳⁴⁾⁵⁾ 朱科军²⁾⁴⁾⁹⁾ 朱鹏²⁾³⁾ 朱兴华¹²⁾

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)

5) (中国科学技术大学近代物理系, 核探测与核电子学国家重点实验室, 合肥 230026)

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

7) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

8) (西北核技术研究院, 西安 710024)

9) (中国科学院大学, 北京 100049)

10) (中国科学技术大学工程与应用物理系, 合肥 230026)

11) (北京航空航天大学物理学院, 北京 100083)

12) (华能山东石岛湾核电有限公司, 荣成 264312)

(2023年12月12日收到; 2024年1月11日收到修改稿)

* 国家自然科学基金(批准号: 11975317, 11975318, 12275363)、核数据重点实验室基金(批准号: JCKY2022201C158)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: zqwvictor@126.com

‡ 通信作者. E-mail: xichao_ruan@126.com

中子辐射俘获反应在反应堆运行、核装置设计及核天体物理研究中起重要的作用。4 π BaF₂ 探测装置有着高时间分辨能力、低中子灵敏度、高探测效率等优点, 适合开展中子辐射俘获反应截面数据的测量。中国原子能科学研究院核数据重点实验室建立了伽马全吸收装置 (Gamma total absorption facility, GTAF), 该装置用 28 块六棱 BaF₂ 晶体和 12 块五棱 BaF₂ 晶体构成了外径 25 cm, 内径 10 cm 的球壳, 覆盖了 95.2% 的立体角。利用 GTAF 在中国散裂中子源 Back-n 束线上, 测量了 ¹⁹⁷Au(n, γ) 的反应截面数据。测量数据通过能量筛选、PSD 方法、晶体多重性筛选进行了初步本底扣除, 随后结合对 ¹³C 及空样品的测量数据对本底进行了分析及扣除, 获得了 ¹⁹⁷Au 俘获反应的产额, 利用 SAMMY 程序拟合得到了 ¹⁹⁷Au 在 1—100 eV 的共振能量、中子共振宽度和伽马共振宽度参数。实验测量结果与 ENDF/B-VIII.0 数据库符合良好, 其共振参数存在一定差异, 分析原因可能与 GTAF 能量分辨率、Back-n 的中子能谱测量精度、以及实验本底扣除方法相关, 这也是下一步工作的重点。

关键词: 中子辐射俘获截面, 共振参数, 白光中子源, 伽马全吸收装置

PACS: 28.20.Np, 29.25.Dz, 28.20.Pr, 01.52.+r

DOI: 10.7498/aps.73.20231957

1 引言

中子辐射俘获反应, 也称 (n, γ) 反应, 是重要的中子反应之一, 该反应在核能源利用、核装置设计、核天体物理中均有应用。在核能源利用中, 反应堆的控制棒是控制堆中核反应过程的重要组件, 其对中子辐射俘获反应截面数据精度要求较高。在核装置设计中, 加速器的驱动次临界系统设计同样需要准确的反应截面数据^[1]。在核天体物理中, 所有比铁重的核素 ($A > 56$) 均由天体间的 S 过程和 R 过程生成, 中子辐射俘获截面作为研究该过程的重要输入参数, 对星系演化、元素丰度等目前具有分歧的研究问题起着关键作用^[2]。因此, 实现高精度的中子辐射俘获反应截面数据测量对核物理研究及核能应用具有重要意义。

20 世纪 60 年代, 国际上开始采用连续中子飞行时间法 (TOF), 对俘获过程中产生的瞬发 γ 射线进行测量, 发展了一些探测装置^[3-6], 这些探测装置存在较高的中子灵敏度, 严重影响实验测量结果。为了解决这些问题, CERN^[7] 和 ORNL^[8] 等实验室先后建立了 C₆D₆ 等低中子灵敏度的探测装置, 用于稳定核素的中子辐射俘获反应截面测量。20 世纪 80 年代初, 发现 BaF₂ 晶体具有较低中子灵敏度、良好的时间分辨能力和能量分辨能力。在小截面核素和低样品量核素的截面测量中, C₆D₆ 探测装置覆盖立体角小, 探测效率低, 不适合开展测量; 而基于 BaF₂ 晶体的 4 π 全吸收装置可以覆盖更大的立体角, 拥有更高的探测效率, 具有优势。在裂变核素和具有放射性核素的截面测量中, 区分反应

道是重要的一环。基于 BaF₂ 晶体的 4 π 全吸收装置能够至少拥有 40 个探测单元, 可以通过晶体多重性扣除其他反应道的本底。目前, 国际上几个重要的实验室都相继建立了基于 BaF₂ 晶体的 4 π 全吸收装置^[9-11], 取得了一些重要的成果。

为了加强国内核数据的发展, 中国原子能科学研究院的核数据重点实验室建立了一套 4 π 型 BaF₂ 伽马全吸收探测装置 (Gamma total absorption facility, GTAF)^[12]。2018 年, 中国散裂中子源 (CSNS) 反角白光束线 (Back-n) 建成。该束线具有宽中子能谱, 能量覆盖范围广、中子流强高的优点, 填补了国内在 keV 能区的中子源空白, 非常适合开展核数据的测量工作^[13]。本文使用 GTAF 在 CSNS Back-n 上测量 ¹⁹⁷Au 的中子辐射俘获反应截面, 并使用 SAMMY 程序给出共振参数, 完善数据分析的流程, 验证装置及数据分析流程的可靠性。

2 中子辐射俘获反应截面的测量原理

中子辐射俘获反应可以用复合核反应模型描述。中子入射靶核后, 与靶核形成复合核, 并可由多种路径退激, 如图 1 所示。中子辐射俘获反应的截面可以通过下列公式进行计算:

$$\sigma_{n,\gamma}(E_n) = \frac{C_{(E_n)}}{A \cdot \phi_{n(E_n)}}, \quad (1)$$

其中 $\sigma_{n,\gamma}(E_n)$ 代表中子辐射俘获反应的截面; $C_{(E_n)}$ 代表样品上发生中子辐射俘获反应的总计数率; $\phi_{n(E_n)}$ 代表通过样品的中子注量率; A 代表样品的原子厚度 (单位为 atoms/barn)。

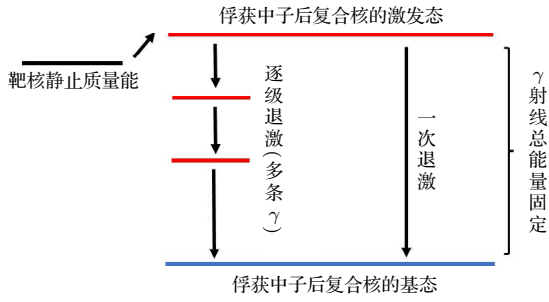


图 1 中子辐射俘获反应退激示意图

Fig. 1. Schematic diagram of deexcitation of neutron capture reaction.

根据飞行时间法,可以得到入射中子的能量:

$$E_n = \left[\frac{72.2977 \cdot L}{(T_{\gamma n} - T_{\gamma f}) + L_0/c} \right]^2, \quad (2)$$

式中, $T_{\gamma n}$ 为中子辐射俘获反应的级联射线到达探测器的时间; $T_{\gamma f}$ 为 γ -flash 到达探测器的时间; L 为中子的飞行距离; L_0 为 γ -flash 从散裂靶飞行到探测器晶体上的距离; c 为光速. 因此, 通过测量中子飞行时间、反应事件计数以及加速器中子束流强度即可计算中子辐射俘获反应截面^[14,15].

3 实验装置

3.1 中国散裂中子源反角白光束线

本工作在中国散裂中子源的反角白光束线上展开. 中国散裂中子源的粒子加速系统由一个直线加速器、一个快循环同步加速器构成, 质子束流的能量 1.6 GeV, 频率 25 Hz, 设计功率为 100 kW.

Back-n 束线位于质子打靶的反角方向 (图 2)^[16-21]. 中子能量为几 eV 到几百 MeV, GTAF 装置位于实验厅 2, 样品处的中子飞行距离为 75.9 m.

3.2 GTAF 谱仪

为了实现中子辐射俘获截面的高精度在线测量, 探测器需要满足以下几点要求: 1) 较好的时间分辨能力; 2) 对中子灵敏度低; 3) 对俘获事件的探测效率与伽马级联无关. GTAF 由 40 块 BaF₂ 闪烁体探测器组成, 排布为内半径 10 cm, 外半径 25 cm 的球形探测器阵列 (图 3). 闪烁体选用 12 块五棱锥台形的 BaF₂ 晶体和 28 块六棱锥台形的 BaF₂ 晶体, 每块晶体对于球心处拥有相同的立体角, 所有晶体可以覆盖的立体角为 95.2%, 具有较高的探测效率, 同时方便对俘获事件的多重性进行判断. 通过模拟计算与实验测试结果, 探测器对 6 MeV 以下的 γ 射线探测效率达到 95% 以上^[22].

单块晶体的底面直径为 14 cm, 高度为 15 cm, 具有较低的中子灵敏度, 同时拥有两种发光成分, 其中快成分发光时间可以达到 0.6 ns, 慢成分发光时间为 630 ns^[23]. 因此, GTAF 装置拥有良好的时间响应能力, 非常适合用于 TOF 方法和测量中子辐射俘获反应截面数据. 为增强晶体的光收集效率, 每块晶体表面 (除底面) 分别使用两层厚度为 2 μ m 的特氟龙、两层厚度为 1 μ m 的铝箔和黑胶带进行封装. 晶体底面与光电倍增管之间用硅油进行耦合, 并通过铝壳固定在铝制支架上.

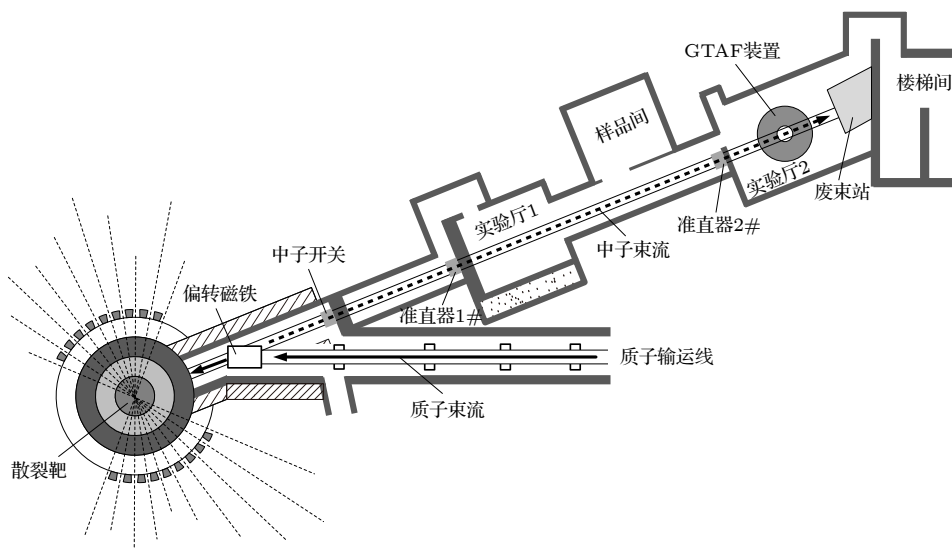


图 2 反角白光束线示意图

Fig. 2. Schematic diagram of Back-n.

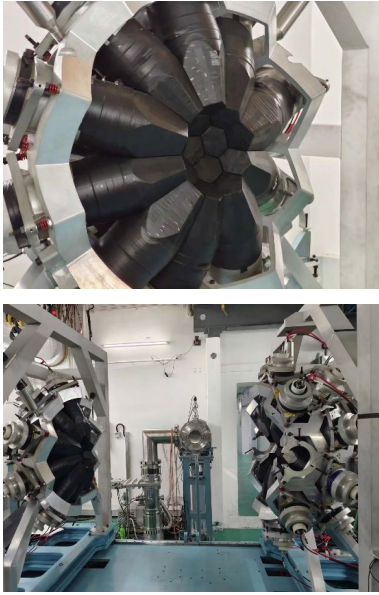


图3 GTAF照片
Fig. 3. Photos of GTAF.

3.3 电子学与数据获取系统

实验测量使用的电子学及获取系统如图4所示. 该获取系统通过千兆网线与电子学系统相互连接, 可以完成触发判断、波形数字化采集、在线处理、文件分发存储等功能^[24-26].



图4 数据获取系统照片
Fig. 4. Photo of data acquisition system.

4 实验样品及实验条件

^{197}Au 为天然丰度 100% 的样品, 其截面数据是国际上广泛认可的标准截面. 为了验证测量方法和数据处理流程, 本实验选用 ^{197}Au 作为测试样品, 还测量了 $^{\text{nat}}\text{C}$ 样品和空样品, 用于评估实验中的本底. 样品具体参数如表1所列.

本次实验的束流功率为 100 kW, 束斑大小为 30 mm. 实验样品通过衬底固定在真空管道内, 真

空管道放置一个含硼聚乙烯球壳 (B_4C 含量 30%, 厚度 5 cm), 在 Back-n 的中子束窗内放置了厚度为 1 mm 的镉吸收片, 用于过滤 0.3 eV 及以下的中子.

表1 实验样品参数
Table 1. Characteristics of experimental samples.

样品	直径/mm	厚度/mm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
^{197}Au	40	0.2	19.32
$^{\text{nat}}\text{C}$	40	1.0	2.25

5 实验数据处理

5.1 波形处理及沉积能量判选

实验中采集的数据为 BaF_2 探测器单元的阳极信号, 脉冲幅度阈值为 20 mV, 宽度阈值为 8 ns, 信号波形采集时间为 2000 ns. 每个波形前 40 ns 幅值取均值作为基线, 对波形幅度进行积分得到能量. 图5展示了 Au, C, 空三种样品的加和沉积能谱, ^{197}Au 的中子结合能为 6.5 MeV, 筛选沉积能量在 2.5—7.0 MeV 范围内的事件, 去除低能和高能部分的本底.

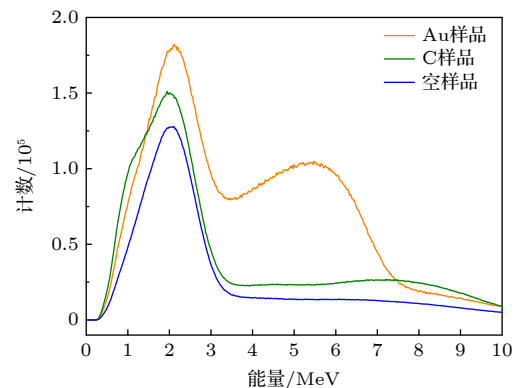


图5 实验得到的能谱
Fig. 5. Energy spectrum obtained from experiment.

5.2 晶体多重性判选

晶体多重性是指在同一中子辐射俘获反应事件的时间窗口内, 被触发探测器的个数. 在测量过程中, 发生中子辐射俘获反应的核素通过出射多条级联 γ 射线退激, 会同时触发多个探测器, 而大部分由散射中子引起的本底只会出射一条 γ 射线, 通过设置晶体多重性 ≥ 2 , 遏止这部分本底. 在线实验中, 时间窗口设置为 64 ns, 测量得到的晶体多重性如图6所示.

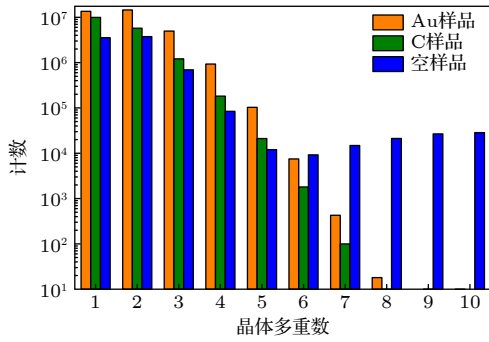


图 6 实验记录的晶体多重数

Fig. 6. Experimentally recorded crystal multiplicity.

5.3 PSD 判选

在 BaF₂ 晶体中 Ba 的同族元素 Ra 会自发进行 α 衰变, 放出的 α 粒子可能和本底中的 γ 射线产生偶然符合, 此时无法通过能量和多重性对该本底进行判选 [27]. 由于 α 粒子引起的闪烁体发光时间较长, 因而可以用粒子甄别方法 (PSD) 对 α 引起的本底进行扣除. 本文选用的 PSD 的计算方法如下:

$$PSD = (E_{T_{long}} - E_{T_{short}}) / E_{T_{long}}, \quad (3)$$

其中, 选取长门 $T_{long} = 2000$ ns, 短门 $T_{short} = 40$ ns. 将计算得到的 PSD 和其长门能量绘制成二维直方图, 可以得到图 7, 红框选中的区域均为 α 粒子. 通过能量和 PSD 关系可以将 α 粒子所产生的能量从数据中剔除.

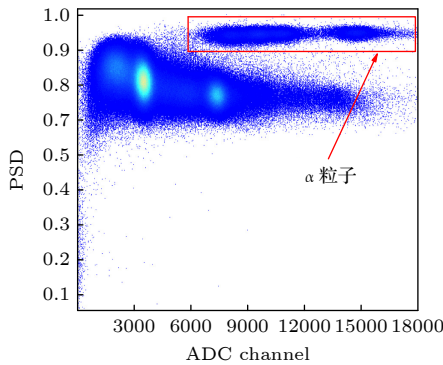


图 7 PSD-ADC channel 二维谱

Fig. 7. Two-dimensional spectrum of PSD-ADC channel.

5.4 本底扣除

通过上述的筛选, 结合公式, 得到初步处理的 Au, C, 空样品的 TOF 谱. 此时 Au 样品的 TOF 谱上还有以下本底没有扣除: 来自样品散射导致的本底、环境活化引起的本底和环境长寿命衰变

核素带来的本底. 下面将分别对上述三种本底进行扣除.

图 8 展示了为使用镉吸收片的 Au 样品的 TOF 谱, 镉吸收片过滤了 0.3 eV 及以下的中子, 因此在低能部分 (低于 0.3 eV) 所产生的计数均由与束流无关的环境中的长寿命衰变核素导致. 这部分本底计数不随时间变化, 在 TOF 谱上呈线性坪本底.

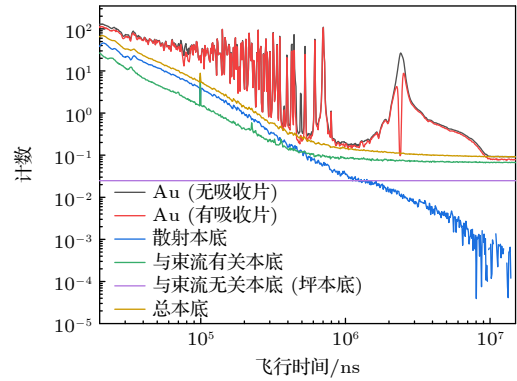


图 8 不同吸收片的条件下 ¹⁹⁷Au 样品和各本底的 TOF 谱
Fig. 8. TOF spectra of ¹⁹⁷Au samples under different absorber conditions and various backgrounds.

空样品的数据包含了在束流开启时, 实验环境中的物质与中子发生反应产生的本底, 通过扣除坪本底得到与束流相关的本底. 样品处散射中子产生的本底是本底的主要来源. C 样品的中子辐射俘获反应截面很小, 而中子散射反应截面较大, 因此可以选用 C 样品模拟 Au 样品的中子散射本底. 通过添加镉银钴吸收片, 可以阻止 4.9 V 附近的中子入射, 此时 Au 样品在此能量范围内的计数均由本底构成. 将 C 样品的计数在扣除与束流相关的本底和坪本底后, 归一到此位置可以得到 Au 样品的中子散射本底.

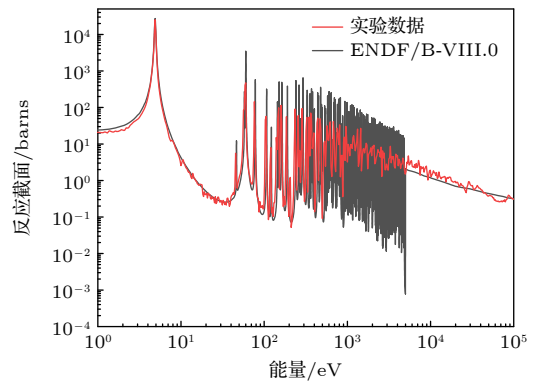


图 9 ¹⁹⁷Au 共振曲线的实验值和理论值对比

Fig. 9. Comparison between experimental values and theoretical values of ¹⁹⁷Au resonance curves.

经过上述分析,可以得到 Au 样品测量中所有本底,将这些本底相加可以得到实验的总本底,如图 8 所示.对本底进行扣除之后,可以得到测量的共振曲线如图 9 所示,实验结果与 ENDF/B-VIII.0 数据符合较好.

6 SAMMY 程序拟合

6.1 SAMMY 程序及 R 矩阵方法简介

20 世纪中叶起,散射理论经由 Lane 和 Tomas 等进行了系统性的发展,1980 年由 Frohner^[28] 整理,成为了中子共振研究和分析的重要理论. R 矩阵方法是散射理论中重要的一部分,也是分析中子共振的经典方法.它是一种对于实验的数学描述,而非一种描述核反应的模型,通过入射道和出射道中粒子的自旋、质量、角动量四种参数描述反应过程,结合理论公式逼近实验结果,得到共振参数^[29].

SAMMY 程序是美国橡树岭国家实验室开发的^[29],基于 R 矩阵方法的实验数据分析软件.该程序包含了一系列与实际实验条件相关的修正,十分适用于中子辐射俘获反应的数据分析.

6.2 共振参数的拟合

共振参数为一组描述共振曲线的量.对于中子辐射俘获反应,伽马共振参数为最重要的参数,SAMMY 程序通过 R 矩阵计算,结合 SLBW,MLBW,Reich-Moore 等公式计算反应的共振参数.在散射理论中,反应截面可以通过如下公式描述^[30]:

$$\sigma_{cc'} = \frac{\pi}{k_\alpha^2} g_{J\alpha} |e^{2iw_c} \delta_{cc'} - U_{cc'}|^2 \delta_{JJ'}, \quad (4)$$

其中, k_α 为入射粒子反应道 α 的相关波数; $g_{J\alpha}$ 为自旋统计因子; $U_{cc'}$ 为散射矩阵.在上述参数中, $g_{J\alpha}$ 可以通过输入的自旋角动量、轨道角动量、总角动量计算得到.

$g_{J\alpha}$ 的公式如下:

$$g_{J\alpha} = \frac{2J+1}{(2i+1)(2l+1)} \quad (5)$$

散射矩阵 $U_{cc'}$ 的公式如下:

$$U_{cc'} = \Omega_c W_{cc'} \Omega_{c'}, \quad (6)$$

其中, $\Omega_c = e^{i(w_c - \phi_c)}$, w_c 为库仑相移差,对于非 Coulomb 通道该值为 0. ϕ_c 为散射相移差,在文献中有对其的具体描述. $W_{cc'}$ 为与 R 矩阵相关的项,其公式为

$$W = P^{\frac{1}{2}}(I - RL)^{-1}(I - RL^*)P^{-1/2}. \quad (7)$$

式中, I, L, P 均可以由输入参数进行计算, $R_{cc'}$ 为 R 矩阵项,表示为

$$R_{cc'} = \sum_{\lambda} \frac{\gamma_{\lambda c} \gamma_{\lambda c'}}{E_{\lambda} - E} \delta_{JJ'}, \quad (8)$$

其中,角标 λ 代表某一个共振(或能级), γ 的值可以通过共振参数得到.因而,当输入实验获得的共振曲线和实验入射核和靶核的角动量参数后,便可以通过上述过程推算反应的共振参数.

对于 Au 样品的中子辐射俘获反应,出射粒子为 γ , 只用考虑入射道的角动量参数.入射粒子为中子,其自旋为 $\pm 1/2$,靶核为 ^{197}Au ,其基态自旋为 $+1.5$,则中子和 Au 样品组成的入射通道总自旋为 $+1$ 或者 $+2$.又由于该反应的轨道角动量 l 为 0,根据总角动量等于总自旋角动量和轨道角动量的矢量和,即 $J = s + l$,该反应的总角动量可以为 $+1$ 或 $+2$. ^{197}Au 的自旋组信息如表 2 所列.

多普勒展宽、多重散射展宽及自屏蔽效应同样会影响 SAMMY 程序的评价结果,需要在程序中输入温度、靶的几何参数、束斑大小等信息,程序会根据输入参数自动进行修正.实验温度为 300 K,使用 FGM(自由气体模型)进行多普勒展宽.中子源的靶为圆柱体,其打靶位置存在一定的不确定度,这会对中子的飞行时间的测定产生影响,该不确定选取为 0.02 m.程序启用自吸收修正,反应半径 a 参考实验库数据,定为 8.45,样品的厚度为 0.001179 atoms/barn.

在 SAMMY 程序的拟合中,需要给出共振参数作为初值输入.由于金的共振参数测量数据较多且差距较小,选用 ENDF/B-VIII.0 的共振参数作为初值,并将拟合范围定为 1—100 eV.在拟合

表 2 ^{197}Au 自旋组信息

Table 2. Information of spin groups of ^{197}Au .

自旋组	基态自旋	中子自旋	总自旋角动量	轨道角动量	总角动量
1	+1.5	-0.5	+1	0	+1
2	+1.5	+0.5	+2	0	+2

开始前,不使用贝叶斯公式进行拟合并绘制拟合结果与实验数据的对比通过目视调整,可以将评价库中共振能量进行微调,使得共振参数与实验数据之间更加接近.调整完成后,将伽马共振宽度固定,将共振能量和中子共振宽度设定为可变值,对实验进行第一次拟合.程序会根据实验结果调整参数,给出第一次拟合的结果.然后固定共振能量和中子共振宽度,将伽马共振宽度作为可变值,用第一次实验给出的参数作为初值,进行第二次拟合.此时得到的参数为最终得到的拟合值.

6.3 拟合结果与分析

将处理后的 Au 的产额曲线和上文确定的实验参数输入到 SAMMY 程序中,可以得到 SAMMY 程序的拟合结果见图 10 和表 3 所列.

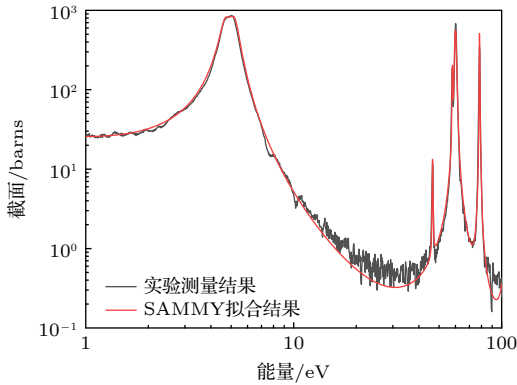


图 10 SAMMY 拟合结果与实验数据对比图

Fig. 10. Comparison of SAMMY fitting results and experimental data.

从图 10 可以看出,实验数据与拟合结果在共振峰处吻合程度高.将评价结果与 ENDF/B-VIII.0 数据进行对比,可以发现该次评价结果中的 γ 共振宽度整体与数据库中的差距较小.对于 4.9, 59, 78 eV 等较大的共振峰,评价得到的伽马共振宽度与数据库的共振宽度差距不超过 3%;对于 46, 58 eV 两个较小的共振峰,伽马共振宽度与数

据库的共振宽度差距较大,其可能原因有:本文暂未考虑实验中中子源的分辨展宽,这使中子共振宽度有限的共振峰出现误差;实验中扣除本底的方法存在一定不确定度,这会导致中子产额实验数据存在一定误差,对计数较少的共振峰存在影响;目前 GTAF 装置能量分辨率较差,实验数据存在较大的能量展宽,这会影响实验计数及本底扣除,带来不确定度.综合上述分析,后续的实验测量中可以提升如下方面:1)对 GTAF 装置进行维护和升级,达到更好的能量分辨率,减少能量展宽;2)改进实验本底的扣除方法,减少实验数据处理带来的不确定度;3)研究在白光中子源上的 GTAF 装置的分辨率函数,将其作为 SAMMY 程序的输入数据,提升拟合的精确度.

7 结论

GTAf 的数据分析流程如下:1)通过多重性判选,筛出偶然符合事件;2)根据波形积分得到能谱与 PSD,筛选低能本底、高能本底、 α 粒子本底;3)结合 C 样品和空样品的数据扣除散射本底和环境活化本底;4)通过 0.3 eV 以下的线性区域计算坪本底(长寿命核素衰变本底);5)结合公式,计算共振曲线;6)使用 SAMMY 程序给出共振参数.通过比较拟合结果和实验结果,可以看出拟合结果与实验数据吻合.将拟合给出的共振参数与数据库进行比较,可以发现对于较高的共振峰, SAMMY 程序给出的伽马共振宽度能够与数据库中吻合,在较大的共振峰,实验数据的拟合结果与数据库差距低于 3%,这证明了数据处理方法的可靠.但是对于较小共振峰,拟合数据与数据库存在较大的差距,其可能原因有如下三条:1)本文暂时没有考虑中子源的分辨展宽,这会导致原本中子共振宽度有限的共振峰误差进一步扩大;2)实验扣除本底的方法存在一定不确定度,这会导致产额计算存在误

表 3 SAMMY 拟合的共振参数与 ENDF/B-VIII.0 对比

Table 3. Comparison of resonance parameters fitted by SAMMY and ENDF/B-VIII.0.

能量/eV		中子共振宽度/meV		伽马共振宽度/meV	
拟合值	ENDF/B-VIII.0	拟合值	ENDF/B-VIII.0	拟合值	ENDF/B-VIII.0
4.93709	4.8997	17.6345	1.496	121.9605	121.4
46.5717	46.669	0.20511	0.22	190.5456	127
57.9329	58.078	4.99505	0.431	175.7	113
59.9007	60.2914	137.619	7.066	115.4935	118
78.2631	78.5	34.3565	17	125.296	124

差, 将这种实验数据作为评价程序的输入会影响共振参数的稳定性; 3) GTAF 装置目前能量分辨率较差, 实验数据存在较大的能量展宽, 这会影响到实验计数及本底扣除. 针对上述问题, 可以提出改进方法如下: 1) 对 GTAF 装置进行维护升级, 提升装置的分辨率能力, 减少实验数据展宽; 2) 继续改进实验本底扣除方式, 减少数据处理引入的不确定度; 3) 研究白光中子源上分辨率函数, 将其作为 SAMMY 程序的输入参数, 提升拟合精确度. 总体来说, 本文结合 SAMMY 程序, 总结完善了 GTAF 的本底分析流程, 给出了 ^{197}Au 的中子辐射俘获反应数据处理方法和共振参数. ^{197}Au (n, γ) 作为标准截面, 在未来可以开展相对测量以减少中子辐射俘获反应截面测量数据的不确定度, 可以为裂变核素和小截面核素等难以测量的核素的截面测量提供基础.

参考文献

- [1] Palmiotti G, Salvatores M, Assawaroongruengchot M 2009 *International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles* Kyoto, Japan, December 7–11, 2009 pINL/CON-09-17363
- [2] Arnould M, Katsuma M 2008 *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology* Nice, France, April 22–27, 2008 p5
- [3] Kompe D 1969 *Nucl. Phys.* **133** 513
- [4] Wisshak K, Kappeler F, Reffo G 1984 *Nucl. Sci. Eng.* **88** 594
- [5] Terada K, Katabuchi T, Mizumoto M, Arai T, Saito T, Igashira M, Hirose K, Nakamura S, Kimura A, Harada H, Hori J, Kino K, Kiyonagi Y 2015 *Prog. Nucl. Energy* **82** 118
- [6] Kobayashi K, Lee S, Yamamoto S 2004 *Nucl. Sci. Eng.* **146** 209
- [7] Mingrone F, Massimi C, Altstadt S 2014 *International Conference on Nuclear Data for Science and Technology* New York, USA, March 4–8, 2013 18
- [8] Guber K H, Derrien H, Leal L C, Arbanas G, Wiarda D, Koehler P E, Harvey A 2010 *Phys. Rev. C* **82** 057601
- [9] Wisshak K, Voss F, Kaeppler F, Krticka M, Gallino R 2006 *Phys. Rev. C* **73** 015802
- [10] Mendoza E, Cano-Ott D, Altstadt S, et al. 2018 *Phys. Rev. C* **97** 054616
- [11] Mosby S, Bredeweg T A, Couture A, Jandel M, Kawano T, Ullmann J L, Henderson R A, Wu C Y 2018 *Phys. Rev. C* **97** 041601
- [12] Shi B, Peng M, Zhang Q W, He G Z, Zhou Z Y, Tang H Q 2018 *At. Energy Sci. Technol.* **52** 1537 (in Chinese) [石斌, 彭猛, 张奇玮, 贺国珠, 周祖英, 唐洪庆 2018 *原子能科学技术* **52** 1537]
- [13] Tang J Y, An Q, Bai H Y, et al. 2019 *At. Energy Sci. Technol.* **53** 2012 (in Chinese) [唐靖宇, 安琪, 白怀勇等 2019 *原子能科学技术* **53** 2012]
- [14] Ding D Z, Ye C T, Zhao Z X 1996 *Neutron Physics-Principles, Methods, and Applications* (Beijing: Atomic Energy Press) pp387–389 (in Chinese) [丁大钊, 叶春堂, 赵志祥 1996 *中子物理学——原理、方法与应用* (北京: 原子能出版社) 第 387–389 页]
- [15] Lu X T 2000 *Nuclear Physics* (Beijing: Atomic Energy Press) pp263–267 (in Chinese) [卢希庭等 2000 *原子核物理* (北京: 原子能出版社) 第 263–267 页]
- [16] An Q, Bai H Y, Bao J, et al. 2017 *J. Instrum.* **12** 7022
- [17] Tang J Y, Fu S N, Jing H T, Tang H Q, Wei J, Xia H H 2010 *Chin. Phys. C* **34** 121
- [18] 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. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **621** 91
- [19] 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 *At. Energy Sci. Technol.* **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** 1089]
- [20] Ren J, Ruan X C, Tang H Q, Ge Z G, Huang H X, Jing H T, Tang J Y, Huang W L 2014 *Nucl. Tech.* **37** 100521 (in Chinese) [任杰, 阮锡超, 唐洪庆, 葛智刚, 黄翰雄, 敬罕涛, 唐靖宇, 黄蔚玲 2014 *核技术* **37** 100521]
- [21] Chen Y H, Luan G Y, Bao J, et al. 2019 *Eur. Phys. J. A* **55** 115
- [22] Zhang Q W, Luan G Y, Ren J, et al. 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 222801 (in Chinese) [张奇玮, 栾广源, 任杰等 2021 *物理学报* **70** 222801]
- [23] Heil M, Reifarth R, Fowler M M, et al. 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 1095
- [24] Wang Q, Cao P, Qi X, Yu T, Ji X, Xie L, An Q S 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 013511
- [25] Zhang Q W, He G Z, Huang X, Cheng P J, Ruan X C, Zhu X H 2016 *At. Energy Sci. Technol.* **50** 536 (in Chinese) [张奇玮, 贺国珠, 黄兴, 程晶晶, 阮锡超, 朱兴华 2016 *原子能科学技术* **50** 536]
- [26] Zhang Q W, He G Z, Huang X, Ruan X C, Li Z H, Zhu X H 2014 *At. Energy Sci. Technol.* **48** 612 (in Chinese) [张奇玮, 贺国珠, 黄兴, 阮锡超, 李志宏, 朱兴华 2014 *原子能科学技术* **48** 612]
- [27] Fröhner F H 1980 *Applied Neutron Resonance Theory* (Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH)
- [28] Lane A M, Thomas R G 1958 *Rev. Mod. Phys.* **30** 257
- [29] Larson N M 2008 *Updated User's Guide for Sammy: Multilevel R-Matrix Fits to Neutron Data Using Bayes' Equations* ORNL/TM-9179/R8 ENDF-364/R2

Neutron capture reaction cross-section data processing and resonance parameter analysis of ^{197}Au based on white light neutron source*

Luo Hao-Tian¹⁾ Zhang Qi-Wei^{1)†} Luan Guang-Yuan¹⁾²⁾³⁾ Wang Xiao-Yu¹⁾
 Zou Chong¹⁾ Ren Jie¹⁾ Ruan Xi-Chao^{1)‡} He Guo-Zhu¹⁾ Bao Jie¹⁾
 Sun Qi¹⁾ Huang Han-Xiong¹⁾ Wang Zhao-Hui¹⁾ Wu Hong-Yi¹⁾
 Gu Min-Hao²⁾⁴⁾ Yu Tao⁴⁾⁵⁾ Xie Li-Kun⁴⁾⁵⁾ Chen Yong-Hao²⁾³⁾ An Qi⁴⁾⁵⁾
 Bai Huai-Yong⁶⁾ Bao Yu²⁾³⁾ Cao Ping⁴⁾⁵⁾ Chen Hao-Lei⁴⁾⁵⁾ Chen Qi-Ping⁷⁾
 Chen Yu-Kai²⁾³⁾ Chen Zhen⁴⁾⁵⁾ Cui Zeng-Qi⁶⁾ Fan Rui-Rui²⁾³⁾⁴⁾
 Feng Chang-Qing⁴⁾⁵⁾ Gao Ke-Qing²⁾³⁾ Han Chang-Cai⁸⁾ Han Zi-Jie⁷⁾
 He Yong-Cheng²⁾³⁾ Hong Yang²⁾³⁾⁹⁾ Huang Wei-Ling²⁾³⁾ Huang Xi-Ru⁴⁾⁵⁾
 Ji Xiao-Lu²⁾⁴⁾ Ji Xu-Yang⁴⁾¹⁰⁾ Jiang Wei²⁾³⁾ Jiang Hao-Yu⁶⁾
 Jiang Zhi-Jie⁴⁾⁵⁾ Jing Han-Tao²⁾³⁾ Kang Ling²⁾³⁾ Kang Ming-Tao²⁾³⁾
 Li Bo²⁾³⁾ Li Chao⁴⁾⁵⁾ Li Jia-Wen⁴⁾⁵⁾ Li Lun²⁾³⁾ Li Qiang²⁾³⁾ Li Xiao²⁾³⁾
 Li Yang²⁾³⁾ Liu Rong⁷⁾ Liu Shu-Bin⁴⁾⁵⁾ Liu Xing-Yan⁷⁾ Mu Qi-Li²⁾³⁾
 Ning Chang-Jun²⁾³⁾ Qi Bin-Bin⁴⁾⁵⁾ Ren Zhi-Zhou⁷⁾ Song Ying-Peng²⁾³⁾
 Song Zhao-Hui⁸⁾ Sun Hong²⁾³⁾ Sun Kang²⁾³⁾⁹⁾ Sun Xiao-Yang²⁾³⁾⁹⁾
 Sun Zhi-Jia²⁾³⁾⁴⁾ Tan Zhi-Xin²⁾³⁾ Tang Hong-Qing¹⁾ Tang Jing-Yu²⁾³⁾
 Tang Xin-Yi⁴⁾⁵⁾ Tian Bin-Bin²⁾³⁾ Wang Li-Jiao²⁾³⁾⁹⁾ Wang Peng-Cheng²⁾³⁾
 Wang Qi¹⁾ Wang Tao-Feng¹¹⁾ Wen Jie⁷⁾ Wen Zhong-Wei⁷⁾
 Wu Qing-Biao²⁾³⁾ Wu Xiao-Guang¹⁾ Wu Xuan²⁾³⁾ Yang Yi-Wei⁷⁾
 Yi Han²⁾³⁾ Yu Li²⁾³⁾ Yu Yong-Ji²⁾³⁾ Zhang Guo-Hui⁶⁾ Zhang Lin-Hao²⁾³⁾⁹⁾
 Zhang Xian-Peng⁸⁾ Zhang Yu-Liang²⁾³⁾ Zhang Zhi-Yong⁴⁾⁵⁾
 Zhao Yu-Bin²⁾³⁾ Zhou Lu-Ping²⁾³⁾⁹⁾ Zhou Zu-Ying¹⁾ Zhu Dan-Yang⁴⁾⁵⁾
 Zhu Ke-Jun²⁾⁴⁾⁹⁾ Zhu Peng²⁾³⁾ Zhu Xing-Hua¹²⁾

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)

5) (State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Department of Modern Physics,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

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

- 7) (*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)
 8) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)
 9) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
 10) (*Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)
 11) (*School of Physics, Beihang University, Beijing 100083, China*)
 12) (*Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co.Ltd, Rongcheng 264312, China*)

(Received 12 December 2023; revised manuscript received 11 January 2024)

Abstract

Neutron capture reaction is one of the neutron reactions and plays an important role in using reactor control rods and shell materials, designing nuclear device structures, and studying nuclear astrophysics S processes and element origins. The 4π BaF₂ detection device has advantages such as high time resolution, low neutron sensitivity, and high detection efficiency, thus making it suitable for measuring neutron radiation capture reaction cross-section data. In order to fill the gap in our neutron capture reaction data in the keV energy range and improve their accuracy, the Key Laboratory of Nuclear Data at the Chinese Institute of Atomic Energy (CIAE) has established a Gamma Total Absorption Facility (GTAF), which consists of 28 hexagonal BaF₂ crystals and 12 pentagonal BaF₂ crystals to form a spherical shell with an external diameter of 25 cm and an internal diameter of 10 cm, covering 95.2% of the solid angles. The Back-n beam line of the Chinese Spallation Neutron Source (CSNS) is a back-streaming white beam line that covers neutron energy ranging from a few eV to several hundred MeV, making it suitable for measuring neutron capture cross-sections. The reaction cross-section data of ¹⁹⁷Au is measured by using GTAF on the Back-n beam line. The measurement data are preliminarily background deducted through energy screening, PSD method, and crystal multiplicity screening. Subsequently, the background is analyzed and deducted based on the measurement data of ^{nat}C and empty samples, and the yield of ¹⁹⁷Au capture reaction is obtained. Resonance parameters are a set of parameters extracted from experimental data to describe the resonance curve, which can eliminate the influence of experimental conditions on resonance data and are more important than the cross-section obtained from experiments. The resonance energy, neutron resonance width, and gamma resonance width parameters of ¹⁹⁷Au at 1–100 eV are fitted by using the SAMMY program. From the comparison between the resonance curves obtained from experimental measurements and the resonance parameters obtained from fitting with the ENDF/B-VIII.0 database, it can follow that the experimental measurement results are in good agreement with the database, nevertheless, there exist some differences in the resonance parameter, which may be due to the GTAF energy resolution, Back-n neutron spectrum measurement accuracy, and the experimental background deduction method. Our next work is to identify the sources of difference.

Keywords: neutron capture cross section, resonance parameters, white neutron source, gamma-ray total absorption facility

PACS: 28.20.Np, 29.25.Dz, 28.20.Pr, 01.52.+r

DOI: [10.7498/aps.73.20231957](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231957)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11975317, 11975318, 12275363), the Key Laboratory of Nuclear Data Foundation, China (Grant No. JCKY2022201C158), and the Continuous-Support Basic Scientific Research Project, China (Grant No. BJ010261223282).

† Corresponding author. E-mail: zqvvictor@126.com

‡ Corresponding author. E-mail: xichao_ruan@126.com

基于白光中子源的 ^{197}Au 中子辐射俘获截面测量及共振参数分析

罗湫天 张奇玮 栾广源 王晓宇 邹翀 任杰 阮锡超 贺国珠 鲍杰 孙琪 黄翰雄 王朝辉 吴鸿毅 顾旻皓 余滔 解立坤 陈永浩 安琪 白怀勇 鲍煜 曹平 陈昊磊 陈琪萍 陈裕凯 陈朕 崔增琪 樊瑞睿 封常青 高可庆 韩长材 韩子杰 何泳成 洪杨 黄蔚玲 黄锡汝 季筱璐 吉旭阳 蒋伟 江浩雨 姜智杰 敬罕涛 康玲 康明涛 李波 李超 李嘉雯 李论 李强 李晓 李祥 刘荣 刘树彬 刘星言 穆奇丽 宁常军 齐斌斌 任智洲 宋英鹏 宋朝晖 孙虹 孙康 孙晓阳 孙志嘉 谭志新 唐洪庆 唐靖宇 唐新懿 田斌斌 王丽娇 王鹏程 王琦 王涛峰 文杰 温中伟 吴青彪 吴晓光 吴焯 羊奕伟 易晗 于莉 于永积 张国辉 张林浩 张显鹏 张玉亮 张志永 赵豫斌 周路平 周祖英 朱丹阳 朱科军 朱鹏 朱兴华

Neutron capture reaction cross-section data processing and resonance parameter analysis of ^{197}Au based on white light neutron source

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 072801 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231957

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231957>

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