

14 MeV 附近 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 反应截面实验研究*

朱传新† 秦建国 郑普 蒋励 朱通华 鹿心鑫

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621999)

(2022 年 4 月 22 日收到; 2022 年 5 月 24 日收到修改稿)

铱元素是测量中子能谱的优质活化探测器. 本文围绕 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 反应截面开展了实验研究, 在 PD-300 中子发生器 DT 中子源上采用活化法以 $^{93}\text{Nb}(\text{n},2\text{n})^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应截面为标准进行了 14 MeV 附近 9 个能点的 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 反应截面测量, 活化产物采用高纯锗探测器进行了测量, 获得了 13.40—14.86 MeV 范围内 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 第 2 激发态截面 $\sigma_{\text{m}2}$, $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 基态与第 1 激发态之和的反应截面 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$ 、总反应截面 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2}$ 和截面比 $\sigma_{\text{m}2}/\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$ 等实验数据, 实验不确定度在 3.4%—3.5%, 其中, 14 MeV 对应 $\sigma_{\text{m}2} = (136.05 \pm 4.93)$ mb, $\sigma_{\text{g}+\text{m}1} = (1972.35 \pm 67.06)$ mb, $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2} = (2108.40 \pm 71.99)$ mb, 截面比 $\sigma_{\text{m}2}/\sigma_{\text{g}+\text{m}1} = 0.0690 \pm 0.0024$. 实验结果与文献数据及 ENDF/B-VIII.0 和 JEFF3.0/A 数据库评价数据进行了比较, 结果表明: 第 1 激发态与基态截面之和 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$ 实验结果与文献数据取得了较好的一致性, ENDF/B-VIII.0 数据库评价数据与本工作所得 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 总反应截面 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2}$ 实验数据较好地符合, 对文献数据分歧情况进行了分析和澄清; 本实验结果与文献数据相较有更高的测量精度, 本研究结果可为核数据评价相关工作提供重要参考.

关键词: 反应截面, Ir, 活化法, DT 中子源

PACS: 25.40.-h, 27.70.+q, 24.10.-i, 29.25.Dz

DOI: 10.7498/aps.71.20220776

1 引言

铱元素在医药、工业以及聚变堆材料等领域有广泛的应用^[1]; 同时, 铱元素是测量中子能谱的优质活化探测器^[2,3]. 诊断中子能谱需使用不同核反应以确定中子能谱中的不同能段信息, 在这方面, 天然铱元素的两个核素 ^{191}Ir 和 ^{193}Ir 构成了一整套的放射化学探测器, 对于几 MeV 能区的中子能谱可采用 (n,n') 反应进行诊断, 而对于更高能区范围的中子能谱可采用 (n,xn) 反应进行诊断. 铱元素的 $(\text{n},2\text{n})$ 反应, 对于 $(\text{n},2\text{n})$ 阈能以上的高能中子诊断尤其灵敏, 例如 14 MeV 中子. 对于 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 反应截面已开展了实验研究^[4–12], 在 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 总反应截面测量方面: Qaim^[4] 与 Konno 等^[5] 测得 14 MeV 处的 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 总反应截面存在

较大的差异 (7%), 并且测量结果的不确定度也较大: 7%—12%; Patronis 等^[6] 测量了 10—11.3 MeV 范围内的 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 总反应截面; Kalamara 等^[7] 测量了 15—21 MeV 范围内的 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 总反应截面; Bayhurst 等^[8] 测量了 15.3—20.9 MeV 范围内的 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 反应截面 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+0.086\text{ m}2}$; Herman 等^[9] 测量了 15.3—20.9 MeV 范围内的 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 反应截面, 测量结果的不确定度也较大: 6%—8%. 对于 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 总反应截面测量的实验数据稀少, 文献数据之间分歧较大; 而国内已有的实验结果^[10] 是对 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 反应截面 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+0.086\text{ m}2}$ 的测量, 未进行激发态截面 $\sigma_{\text{m}2}$ 的测量, 尚无 $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ 总反应截面的实验数据; Filatenkov 等^[11] 以及 Bormann 等^[12] 进行了分反应截面测量. 此外, ^{190}Ir 的衰变纲图^[13] 如图 1 所示, ^{190}Ir 的第 2 激发态 $\text{m}2$ 对应自旋态 11 相对于基态 g 对应自旋态 4 的高自

* 国家自然科学基金 (批准号: 11775200) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zcx_602@sina.com

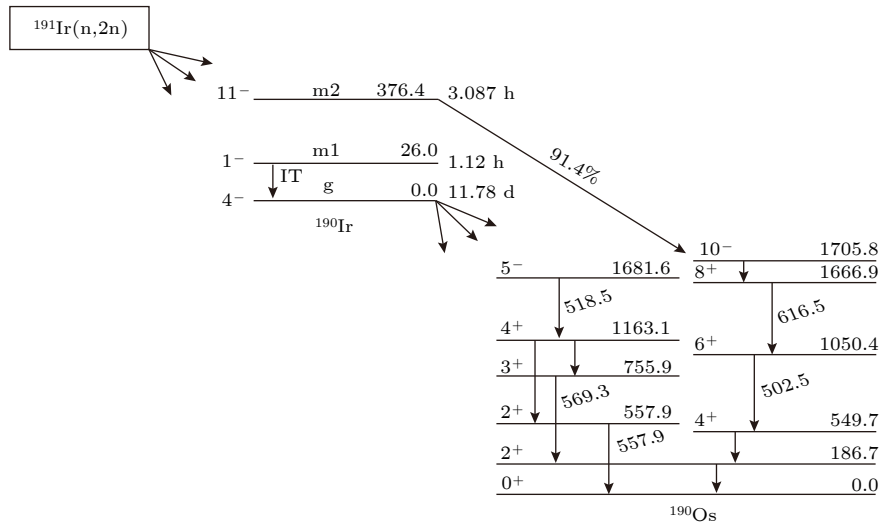

 图 1 ^{190}Ir 衰变纲图

 Fig. 1. Simplified representation of formation and decay of ^{190}Ir .

旋差异, 对于核素自旋分布研究是非常灵敏的, 截面比参数 $\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1}$ 的测量对于该研究具有重要意义, 国外开展的实验研究也比较少^[6,9], 国内尚无相关实验报道. 因此, 进一步深入开展 14 MeV 附近 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应截面实验研究对于提高实验数据精度、澄清文献数据的分歧、填补国内实验数据空白等方面具有重要意义.

本文利用 PD-300 中子发生器 DT 中子源开展 14 MeV 附近的 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应截面实验测量工作, 研制了 (n,2n) 激发函数实验装置, 进行了样品的中子辐照, 利用高纯锗进行了活化测量, 分别获得了 13.40—14.86 MeV 能区范围内 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应第 2 激发态截面 σ_{m2} 及基态、第 1 激发态之和的反应截面 σ_{g+m1} , 并最终得到 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 总反应截面和截面比参数 $\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1}$ 的实验结果, 对实验结果与文献数据及国际上的评价数据库进行了比较、分析, 本工作所取得的实验数据可为相关核数据评价提供重要参考.

2 基本原理

将标准截面活化片与待测片贴在一起, 经过 DT 中子辐照一定时间后, 利用 HPGe 探测器测量活化片的 γ 射线. 以 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 作为标准反应截面^[14], 由所测实验数据处理得到待测核素反应截面. 样品的基本参数列于表 1.

根据活化法和相对测量的基本原理, 使用下标 X 和 Nb 分别代表待测量核素和 Nb 核素, 样品

X 的反应截面 σ_X 的计算公式可表示为

$$\sigma_X = \frac{\lambda_X \cdot N_X \cdot A_X}{\lambda_{\text{Nb}} \cdot N_{\text{Nb}} \cdot A_{\text{Nb}}} \cdot \frac{W_{\text{Nb}} \cdot P_{\text{Nb}}}{W_X \cdot P_X} \times \frac{\eta_{\text{Nb}} \cdot f_{s\text{Nb}} \cdot f_{\text{Nb}} \cdot \varepsilon_{\text{Nb}}}{\eta_X \cdot f_{sX} \cdot f_X \cdot \varepsilon_X} \cdot F_\phi \times \frac{1 - e^{-\lambda_{\text{Nb}} \cdot t_{m\text{Nb}}}}{1 - e^{-\lambda_X \cdot t_{mX}}} \cdot \sigma_{\text{Nb}}, \quad (1)$$

$$F_\phi = \frac{\sum_{i=1}^l N_{\phi i} \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{Nb}} T_i}) \cdot e^{-\lambda_{\text{Nb}} t_i}}{\sum_{i=1}^l N_{\phi i} \cdot (1 - e^{-\lambda_X T_i}) \cdot e^{-\lambda_X t_i}}. \quad (2)$$

公式中所使用的核素半衰期、分支比数据取自美国 National Nuclear Data Center 的同位素数据^[15], 见表 2. $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面作为标准截面使用, 对于评价标准截面通过插值的方法, 得到对应中子能量的 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面.

表 1 样品参数
Table 1. Sample characteristics.

样品	纯度/%	同位素成分/%	厚度/mm	直径/mm
Nb	99.999	^{93}Nb 100	0.5	20
Ir	99.95	^{191}Ir 37.3	0.5	20
		^{193}Ir 62.7		

表 2 在实验数据分析中使用的同位素参数
Table 2. Details of radioactivity constants used in analysis of experimental data.

核素	半衰期	E_γ/keV	I_γ
^{92m}Nb	10.15 d	934.44	0.9915
^{190g}Ir	11.78 d	371.24	0.216
$^{190m2}\text{Ir}$	3.087 h	616.50	0.9015

3 实 验

本次实验所使用的 (n,2n) 激发函数实验装置是在实验装置 [16,17] 基础上研制的, 如图 2 所示. 样品的固定如图 3 所示, 样品距离氚靶中心 20 cm. 样品位置处的中子能量由铌锆截面比方法测定 [18]. 实验中, 将样品分别固定在与靶管中心线及靶心夹角为: 0° — 166° 的 9 个位置上, 对应中子能量在 13.4—14.86 MeV 范围内. 其中, 1 片待测样品夹于两片 Nb 样品中. 该实验装置具有样品定位精确、结构材料少的优点, 确保了样品的准确定位, 降低了装置自身结构材料散射中子本底的干扰, 散射中子干扰份额在 0.5% 以下 [19]. 样品及实验装置的照片示于图 4.

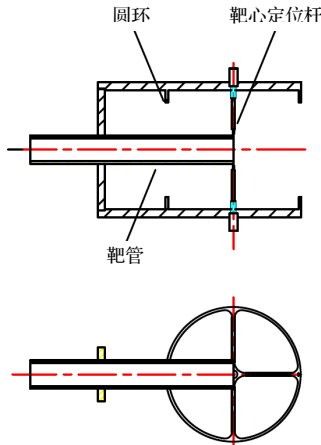


图 2 (n,2n) 激发函数实验装置

Fig. 2. Experiment assembly of (n,2n) excitation function.

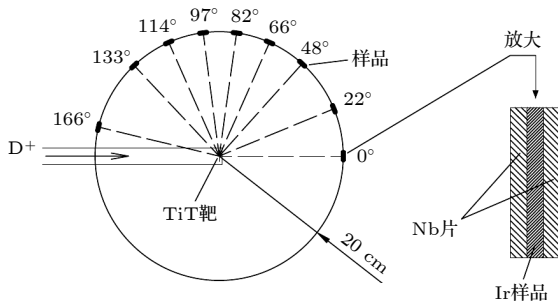


图 3 样品放置

Fig. 3. Sample setting.

基于 PD-300 中子发生器 $d + T$ 反应产生中子, DT 中子源强采用伴随粒子法进行分时监测, 时间间隔为 5 s. 金硅面垒型 α 探测器与 D 束及氚靶中心成 178° 夹角. 伴随 α 粒子信号经过前放和主放,

放大成形, 然后送入 927 多道, 得到 α 谱, 由主放的另外一路送入单道, 通过调节单道的窗, 卡掉幅度较小的噪声本底, 然后送入 6612 计数器, 利用计算机控制 6612 计数器进行分时监测.

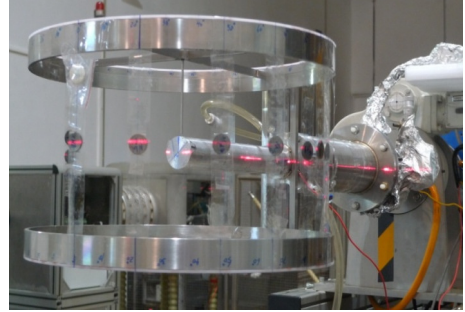


图 4 样品及实验装置照片

Fig. 4. The picture of experiment assembly and sample.

中子辐照结束后, 样品 γ 射线采用美国 ORTEC 公司生产的 GEM-C7080 型高纯锗探测器测量. 高纯锗探测器系统, 由高纯锗探测器、铅屏蔽室、数字化 γ 谱仪、计算机多道共同组成. HPGe 探测器效率刻度的准确性对于活化测量结果的准确性有重要影响, 为此分别使用了 ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{166}mHo 等 γ 射线面源, 由以上 γ 射线标准源得到探测效率曲线示于图 5, 探测距离为 12.65 cm. 探测效率曲线的拟合, 采用多项式分能区拟合, 拟合结果与实验值的偏差控制在 0.5% 以内. 拟合公式如下:

第 1 能区, 当 $0.059 \text{ MeV} \leq E < 0.300 \text{ MeV}$ 时, 拟合公式为

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1.74416 - 8.21314E + 79.73397E^2 \\ & - 524.83049E^3 + 1507.43815E^4 \\ & - 1533.03319E^5. \end{aligned} \quad (3)$$

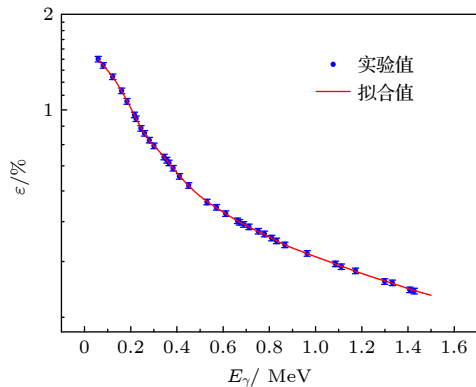


图 5 高纯锗探测效率曲线

Fig. 5. Efficiency-energy curve for Ge detector.

第2能区, 当 $0.300 \text{ MeV} \leq E < 0.611 \text{ MeV}$ 时, 拟合公式为

$$\begin{aligned} \varepsilon = & -1.47902 + 28.12036E \\ & -125.73106E^2 + 256.6175E^3 \\ & -250.59894E^4 + 95.10291E^5. \end{aligned} \quad (4)$$

第3能区, 当 $0.610 \text{ MeV} \leq E < 0.810 \text{ MeV}$ 时, 拟合公式为

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 3.4465 - 15.77372E + 34.39745E^2 \\ & -38.40765E^3 + 21.42204E^4 - 4.74103E^5. \end{aligned} \quad (5)$$

第4能区, 当 $0.810 \text{ MeV} \leq E \leq 1.408 \text{ MeV}$ 时, 拟合公式为

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 7.57209 - 31.70461E + 56.41114E^2 \\ & -50.36205E^3 + 22.38458E^4 - 3.95612E^5. \end{aligned} \quad (6)$$

对于第2激发态 $^{190\text{m}2}\text{Ir}$ 的测量在中子辐照结束后立即进行, 对于基态 $^{190\text{g}}\text{Ir}$ 的测量在样品冷却 2 d 以后进行, 以将激发态 $^{190\text{m}2}\text{Ir}$ 全部衰减至基态

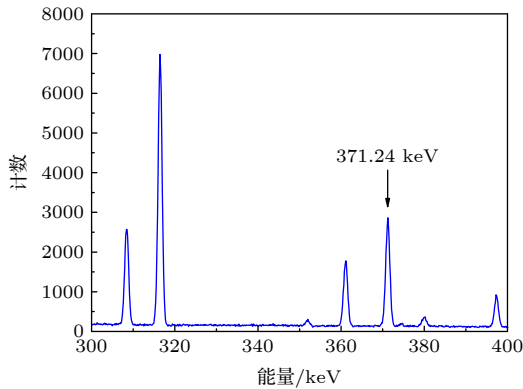


图6 冷却 2 d 后的铱样品 γ 谱

Fig. 6. The γ -ray spectra of iridium sample with 2 d cooling time.

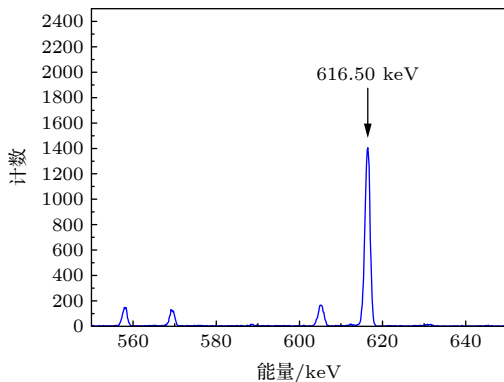


图7 $^{190\text{m}2}\text{Ir}$ 激发态 γ 谱

Fig. 7. The γ -ray spectra of $^{190\text{m}2}\text{Ir}$.

$^{190\text{g}}\text{Ir}$. 铱样品的基态和激发态 γ 谱如图6—图7所示, 在图6中除可观察到基态 $^{190\text{g}}\text{Ir}$ 的 371.24 keV 和 361.09 keV 特征峰外, 还可以观察到来自 $^{193}\text{Ir}(n, 2n)^{192}\text{Ir}$ 反应产物 ^{192}Ir 的 308.455 和 316.506 keV 特征峰. $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 的 γ 谱如图8所示.

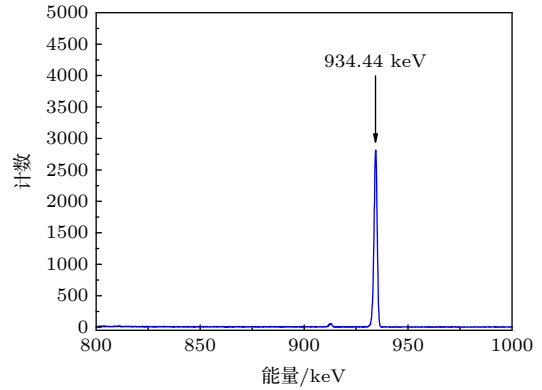


图8 $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 的 γ 谱

Fig. 8. The γ -ray spectra of $^{92\text{m}}\text{Nb}$.

4 结果与讨论

4.1 数据处理

基于 ^{190}Ir 衰变纲图, 根据基本原理及 (1) 式分别得到截面 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+0.086\text{m}2}$ 和 $\sigma_{\text{m}2}$ 实验结果, 由于总截面 σ 即为 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2}$, 因此, 可由 $\sigma_{\text{m}2}$ 对 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+0.086\text{m}2}$ 中的 $\sigma_{0.086\text{m}2}$ 贡献进行扣除, 得到 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$, 最后由两者相加, 得到 $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 总反应截面, 即 (7) 式—(8) 式.

$$\sigma_{\text{g}+\text{m}1} = \sigma_{\text{g}+\text{m}1+0.086\text{m}2} - 0.086\sigma_{\text{m}2}. \quad (7)$$

由此, $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 总反应截面:

$$\sigma = \sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2} = \sigma_{\text{g}+\text{m}1} + \sigma_{\text{m}2}. \quad (8)$$

4.2 实验不确定度分析

(n, 2n) 反应截面实验结果列于表3. 表3中分别给出了第1激发态与基态截面之和 $\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$ 、第2激发态截面 $\sigma_{\text{m}2}$ 、总反应截面 σ 和截面比参数 $\sigma_{\text{m}2}/\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$.

反应截面实验测量不确定度分析: 实验结果的不确定度, 主要来源于 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应截面数据、HPGe 探测器效率刻度以及特征 γ 射线峰计数等因素. 各不确定度因素及总不确定度列于表4.

表 3 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应截面及截面比实验结果
Table 3. The $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ cross sections and cross section ratio from this work.

E_n/MeV	σ_{g+m1}/mb	σ_{m2}/mb	σ/mb	$\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1}$
13.40	1939.42 ± 65.94	122.09 ± 4.29	2061.51 ± 70.23	0.0630 ± 0.0022
13.60	1957.66 ± 66.56	128.30 ± 4.58	2085.96 ± 71.14	0.0655 ± 0.0023
13.80	1963.28 ± 66.75	132.92 ± 4.85	2096.20 ± 71.60	0.0677 ± 0.0024
14.00	1972.35 ± 67.06	136.05 ± 4.93	2108.40 ± 71.99	0.0690 ± 0.0024
14.20	1977.33 ± 67.23	140.08 ± 5.03	2117.41 ± 72.26	0.0708 ± 0.0025
14.40	1981.92 ± 67.39	150.98 ± 5.34	2132.90 ± 72.73	0.0762 ± 0.0026
14.60	1980.04 ± 67.32	161.50 ± 5.82	2141.54 ± 73.14	0.0816 ± 0.0029
14.80	1981.45 ± 67.37	164.25 ± 5.87	2145.70 ± 73.24	0.0829 ± 0.0029
14.86	1964.28 ± 66.79	158.56 ± 5.72	2122.84 ± 72.51	0.0807 ± 0.0028

表 4 反应截面测量结果的不确定度
Table 4. Uncertainties in the cross section.

不确定度来源	不确定度/%
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面数据	2.0
伴随 α 粒子相对监测	1.0
HPGe探测器效率刻度	2.0
特征 γ 射线峰计数	0.7—0.9
衰变数据	1.0
时间因子	0.5
修正因子	1.0
总不确定度	3.4—3.5

4.3 与文献值及评价数据的比较

$^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190(g+m1)}\text{Ir}$ 反应截面 σ_{g+m1} 实验结果与文献值及评价数据的比较示于图 9, 其中, 对于张锋^[10]的实验结果中依据本实验结果对激发态 $m2$ 的贡献进行了扣除. 由图 9 可以看出, 本实验结果与 Bayhurst 等^[8], Herman 等^[9]和张锋等^[10]的实验结果在不确定度范围内较好地吻合; 而 Filatenkov 等^[11]的实验结果整体偏低约 8%, 其使用特征峰 371.24 keV 分支比 0.228. 而现在该参数为 0.216, 应用该分支比后, 其测量结果将整体提高约 6%, 将与其他各组实验结果在不确定度范围内一致. ENDF/B-VIII.0^[20]和 JEFF3.0/A^[21]提供了 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190(g+m1)}\text{Ir}$ 反应截面 σ_{g+m1} 的评价数据, JEFF3.0/A 与本结果较接近, 但截面随中子能量的变化趋势与本实验结果相反; 从截面数据变化趋势上, ENDF/B-VIII.0 与本结果是一致的, 即: 在 14 MeV 附近 σ_{g+m1} 处于上升趋势, 但 ENDF/B-VIII.0 评价值整体高于本实验结果约 5%.

$^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190m2}\text{Ir}$ 反应截面 σ_{m2} 实验结果与文献值及评价数据的比较示于图 10. 由图 10 可以看

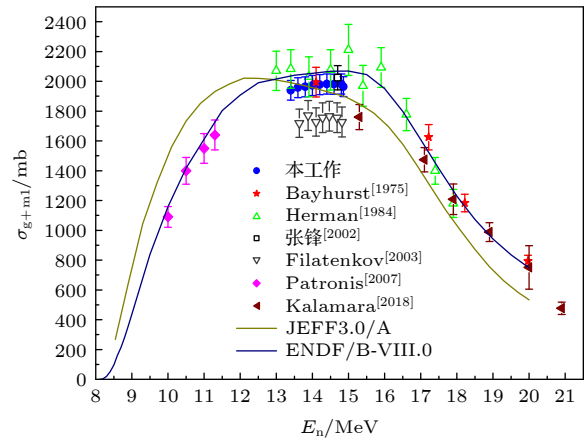


图 9 σ_{g+m1} 实验结果与文献及评价数据的比较

Fig. 9. Comparison with reference and the available evaluated data of σ_{g+m1} .

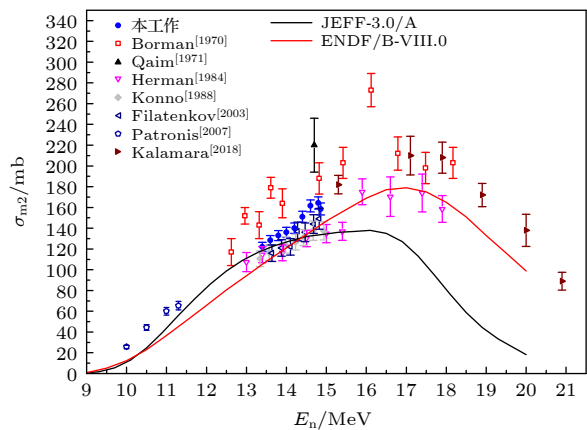


图 10 σ_{m2} 与文献及评价数据的比较

Fig. 10. Comparison with reference and the available evaluated data of σ_{m2} .

出, Qaim^[4]的实验结果高出本实验值约 30%, 该实验中测量了 186.7 keV 的产物核特征峰, 而该特征峰中有 ^{190}Ir 基态 186.68 keV 峰的严重干扰, 这应当是导致其测量结果显著偏高的主要原因; 从截面

数据随能量变化趋势看, 本实验结果与 Kalamara 等^[7]变化趋势比较吻合; Herman 等^[9]的实验结果低于本实验值约 10% 以上, 这估计是由于其使用的半衰期为 3.2 h, 造成结果的偏低; Filatenkov^[11] 等的实验结果与本实验结果较为一致; Bormann 等^[12] 的实验结果高出本实验值约 15%—40%, 该实验中使用了 $H(n,p)$ 反应截面作为监测反应, 所使用的半衰期和分支比数据也不准确, 分析认为其所使用的监测反应和半衰期数据的不准确是导致其结果偏高的主要原因; JEFF3.0/A 数据库评价数据低于本实验结果约 5%—20%, 且随着能量增加而偏差变大; ENDF/B-VIII.0 数据库评价数据整体低于本实验结果约 10%, 评价数据随能量的变化趋势与本实验结果一致; 这也表明, 对于激发态 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190m2}\text{Ir}$ 反应截面 σ_{m2} 的评价数据有待改进.

$^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 总反应截面 $\sigma_{g+m1+m2}$ 的实验结果与文献值及评价数据的比较示于图 11. 由图 11 可以看出, Qaim^[4] 的实验结果偏低约 8%; Konno 等^[5] 的实验结果在 13—15 MeV 能区范围内, 比本实验结果偏低约 15%, 其所使用的 11.78 d, 371.24 keV, 分支比为 0.227, 当使用新的分支比数据 0.216 后, 其截面数据将上调 5%, 这种差异将变小至 10% 左右; 而 Kalamara 等^[7] 的实验结果与本实验结果由于没有交叉能点, 从趋势上分析, 在 15 MeV 附近会存在较大分歧; Herman 等^[9] 的实验结果与本实验结果在不确定度范围内吻合. ENDF/B-VIII.0 数据库的评价值在 13.4—14.86 MeV 范围内与本实验结果符合较好, 在变化趋势上也较好地一致. JEFF3.0/A 数据库在 14.4—14.8 MeV 范围内比本实验结果偏低约 4%, 在随能量变化趋势上与本实验结果有较大差异. 从 $^{191}\text{Ir}(n,3n)^{189}\text{Ir}$ 的反应阈能 14.396 MeV 来分析, 在 13—15 MeV 能量范围内, 由于 $(n,3n)$ 反应尚处于极低水平, 其对于 $(n,2n)$ 反应的竞争效应尚未显现, 因此, 从本实验结果对于 14 MeV 附近多个能点的测量结果来看, 在 13—15 MeV 能量范围内 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应仍然处于上升的状态, 无论是总的 $(n,2n)$ 反应截面还是各个分反应截面测量结果, 都给出了同样的变化趋势, 从实验角度印证了这一核反应变化过程的物理规律, 加深了对于核反应物理机制的认识. JEFF3.0/A 数据库的评价值在 13—15 MeV 能量范围内呈现的下降趋势则与实验有比较大的分歧, 而 ENDF/B-VIII.0 数据库的评价值在变化趋势上是符合这一特点的.

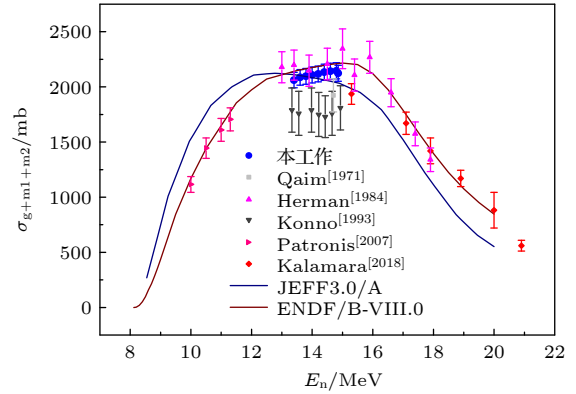


图 11 $\sigma_{g+m1+m2}$ 与文献及评价数据的比较

Fig. 11. Comparison with reference and the available evaluated data of $\sigma_{g+m1+m2}$.

在截面比参数 $\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1}$ 方面, 本实验给出该参数在 0.0630—0.0829 之间变化, 呈现出随中子能量变大的趋势, 与 Patronis 等^[6], Herman 等^[9] 截面比实验结果的变化趋势一致, 其中, Herman 等的测量结果比本实验值偏低约 13%—21%, 主要是由于其对激发态 $m2$ 反应截面 σ_{m2} 测量结果偏低引起的; 本实验结果可为相关核素自旋理论研究提供重要参考.

5 结 论

本工作围绕 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应截面开展了实验研究, 进行了 $(n,2n)$ 激发函数实验装置研制, 基于 PD-300 中子发生器 DT 中子以 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面作为标准截面, 通过活化法测量得到了 13.4—14.86 MeV 范围内 9 个能点的 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 反应截面实验数据, 分别给出了第 1 激发态与基态截面之和 σ_{g+m1} 、第 2 激发态截面 σ_{m2} 、总反应截面 $\sigma_{g+m1+m2}$ 和截面比参数 $\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1}$ 等实验数据. 在国内首次获得了 13.4—14.86 MeV 范围内 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 第 2 激发态截面 σ_{m2} , $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190}\text{Ir}$ 基态与第 1 激发态之和的反应截面 σ_{g+m1} 、总反应截面 $\sigma_{g+m1+m2}$ 和截面比参数 $\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1}$ 等实验数据, 实验数据不确定度: 3.4%—3.5%; 其中, 14 MeV 对应 $\sigma_{m2} = (136.05 \pm 4.93)$ mb, $\sigma_{g+m1} = (1972.35 \pm 67.06)$ mb, $\sigma_{g+m1+m2} = (2108.40 \pm 71.99)$ mb, 截面比参数 $\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1} = 0.0690 \pm 0.0024$. 实验结果与文献数据及评价数据库进行了比较, 得到以下几个方面的结论:

1) 对 σ_{g+m1} 测量结果分析表明: σ_{g+m1} 实验结

果与文献数据取得了较好的一致性; JEFF3.0/A 评价数据给出的截面随中子能量的变化趋势与本实验结果相反; 从截面数据变化趋势上, ENDF/B-VIII.0 与本结果是一致的, 即: 在 14 MeV 附近 σ_{g+m1} 处于上升趋势, 但 ENDF/B-VIII.0 评价值整体高于本实验结果;

2) 对 σ_{m2} 测量结果分析表明: 本实验结果与 Kalamara 变化趋势比较吻合, Filatenkov 的实验结果与本实验结果较为一致, 对于其他各组文献数据分析给出了分歧产生的主要原因; JEFF3.0/A 数据库评价数据低于本实验结果约 5%—20%, 且随着能量增加而偏差变大; ENDF/B-VIII.0 数据库评价数据整体低于本实验结果约 10%, 评价数据随能量的变化趋势与本实验结果一致; 对于激发态 $^{191}\text{Ir}(n,2n)^{190m2}\text{Ir}$ 反应截面 σ_{m2} 的评价数据有待改进;

3) 对 $\sigma_{g+m1+m2}$ 测量结果分析表明: Herman 等的实验结果与本实验结果在不确定度范围内吻合; ENDF/B-VIII.0 数据库的评价值在 13.4—14.86 MeV 范围内与本实验结果符合较好, 在变化趋势上也较好地一致; JEFF3.0/A 数据库在 14.4—14.86 MeV 范围内比本实验结果偏低, 在随能量变化趋势上与本实验结果有较大差异;

4) 对截面比参数 $\sigma_{m2}/\sigma_{g+m1}$ 测量结果分析表明: 本实验给出该参数在 0.0630—0.0829 之间变化, 呈现出随中子能量变大的趋势, 与 Patronis 等、Herman 等截面比实验结果的变化趋势一致。

本实验结果与文献数据相较有更高的测量精度, 对于文献数据中存在的分歧进行了分析和澄清. 15 MeV 以上能区仍然需要更多的实验数据, 以校验理论评价数据的可靠性. 本研究结果可为核数据评价相关工作提供重要参考。

参考文献

- [1] Chadwick M B, Ignatyuk A V, Pashchenko A B, Vonach H, Young P G 1997 *Fusion Eng. Des* **37** 79

- [2] Chadwick M B, Frankle S, Trellue H, Talou P, Kawano T, Young P G, MacFarlane R E, Wilkerson C W 2007 *Nucl. Data Sheets* **108** 2716
- [3] Chadwick M B 2014 *Nucl. Data Sheets* **120** 297
- [4] Qaim S M 1972 *Nucl. Phys. A* **185** 614
- [5] Konno C, Ikeda Y, Oishi K, Kawade K, Yamamoto H, Maekawa H 1993 *JAERI* **1329** 199310
- [6] Patronis N, Papadopoulos C T, Galanopoulos S, Kokkoris M, Perdikakis G, Vlastou R, Lagoyanis A, Harissopoulos S 2007 *Phys. Rev. C* **75** 034607
- [7] Kalamara A, Vlastou R, Kokkoris M, Chasapoglou S, Stamatopoulos A, Patronis N, Serris M, Lagoyanis A and Harissopoulos S 2018 *Phys. Rev. C* **98** 034607
- [8] Bayhurst B P, Gilmore J S, Prestwood R J, Wilhelmy J B, Jarmie N, Erkkila B H, Hardekopf R A 1975 *Phys. Rev. C* **12** 451
- [9] Herman M, Marcinkowski A, Stankiewicz K 1984 *Nucl. Phys. A* **430** 69
- [10] Zhang F, Kong X Z, Pu Z S, Zhu X B 2002 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **22** 678 (in Chinese) [张锋, 孔祥忠, 蒲忠胜, 朱学彬 2002 高能物理与核物理 **22** 678]
- [11] Filatenkov A A, Chuvaev S V 2003 *Khlopin Radiev. Inst., Leningrad Reports.* **259**
- [12] Bormann M, Bissem H H, Magiera E, Warnemunde R 1970 *Nucl. Phys. A* **157** 481
- [13] Singh B 2003 *Nucl. Data Sheets* **99** 275
- [14] nudat2 Benjamin S, <http://www.nndc.bnl.gov/> [2021-8-20]
- [15] Zolotarev K I 2010 INDC International Nuclear Data Committee. INDC(NDS)-0584
- [16] Zhu C X, Chen Y, Mou Y F, Zheng P, He T, Wang X H, An L, Guo H P 2011 *Nucl. Sci. Eng* **169** 188
- [17] Zhu C X, Wang J, Jiang L, Zheng P 2020 *Chin. Phys. C* **44** 034001
- [18] Lewis V E, Zieba K J 1980 *Nucl. Instrum. Method* **174** 141
- [19] Zhu C X 2006 CNIC-01866 CAEP-0178 1 (in Chinese) [朱传新 2006 中国核科技报告 第2集 CNIC-01866 CAEP-0178 1]
- [20] 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, Smith D L, Hale G M, Arbanas G, Arcilla R, Bates C R, Beck B, Becker B, Brown F, Casperson R J, Conlin J, Cullen D E, Descalle M A, Firestone R, Gaines T, Guber K H, Hawari A I, Holmes J, Johnson T D, Kawano T, Kiedrowski B C, Koning A J, Kopecky S, Leal L, Lestone J P, Lubitz C, Márquez Damián J I, Mattoon C M, McCutchan E A, Mughabghab S, Pronyaev V G, Roubtsov D, Rochman D, Romano P, Schillebeeckx P, Simakov S, Sin M, Sirakov I, Sleaford B, Sobes V, Soukhovitskii E S, Stetcu I, Talou P, Thompson I, Marck S V D, Welser-Sherrill L, Wiarda D, White M, Wormald J L, Wright R Q, Zerkle M, Žerovnik G, Zhu Y 2018 *Nucl. Data Sheets* **148** 1
- [21] Kellett M A, Bersillon O, Mills R W 2009 JEFF Report **20**

Measurement of $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ cross section near 14 MeV*Zhu Chuan-Xin[†] Qin Jian-Guo Zheng Pu

Jiang Li Zhu Tong-Hua Lu Xin-Xin

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

(Received 22 April 2022; revised manuscript received 24 May 2022)

Abstract

Natural iridium acts as a high-quality activated detector for probing the energy components of a neutron fluence. Measurements of $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ cross sections are carried out near 14 MeV by the activation method based on $^{93}\text{Nb}(\text{n},2\text{n})^{92\text{m}}\text{Nb}$ reaction cross section standard by PD-300 neutron generator DT neutron source. The (n,2n) products are measured by using a calibrated high pure Ge detector. The cross sections of $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$, $\sigma_{\text{m}2}$ and $\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$, are measured carefully. The $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ cross sections: $\sigma_{\text{m}2}$, $\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$, $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2}$ and cross section ratio of $\sigma_{\text{m}2}/\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$ are obtained in an energy range of 13.40–14.86 MeV. Experimental uncertainties are in a range of 3.4%–3.5%. The measured cross sections for the reaction of $^{191}\text{Ir}(\text{n},2\text{n})^{190}\text{Ir}$ at 14 MeV are $\sigma_{\text{m}2} = (136.05 \pm 4.93)$ mb, $\sigma_{\text{g}+\text{m}1} = (1972.35 \pm 67.06)$ mb, $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2} = (2108.40 \pm 71.99)$ mb, and $\sigma_{\text{m}2}/\sigma_{\text{g}+\text{m}1} = 0.0690 \pm 0.0024$. The present data are compared with the previous experimental data and the ENDF/B-VIII.0 and JEFF3.0/A evaluated data, showing that the experimental data from the literature are in good agreement with the present data for $\sigma_{\text{g}+\text{m}1}$, the evaluated data from JEFF3.0/A are underestimated by 5%–20% in comparison with the present data for $\sigma_{\text{m}2}$, the evaluated data from ENDF/B-VIII.0 are underestimated by 10% in comparison with the present data for $\sigma_{\text{m}2}$, and the ENDF/B-VIII.0 data are consistent with the present data for $\sigma_{\text{g}+\text{m}1+\text{m}2}$. The discrepancies between the data from the literature and the present data are analyzed and clarified. The present data show significant improvement in accuracy in comparison with data from the literature, these results provide more reliable nuclear data for improving the future evaluation.

Keywords: cross section, Ir, activation method, DT neutron source**PACS:** 25.40.-h, 27.70.+q, 24.10.-i, 29.25.Dz**DOI:** 10.7498/aps.71.20220776

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11775200).

[†] Corresponding author. E-mail: zcx_602@sina.com

14 MeV附近 $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ 反应截面实验研究

朱传新 秦建国 郑普 蒋励 朱通华 鹿心鑫

Measurement of $^{191}\text{Ir}(n, 2n)^{190}\text{Ir}$ cross section near 14MeV

Zhu Chuan-Xin Qin Jian-Guo Zheng Pu Jiang Li Zhu Tong-Hua Lu Xin-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 192501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220776

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220776>

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