

天然 Mo 的快中子辐射俘获截面

牟运山 徐海珊 向正瑜
李业祥 王世明

(四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

刘建峰

(郑州大学物理系, 郑州 450052)

摘 要

在 0.7—1.4 MeV 中子能区, 用大液体闪烁探测器和飞行时间法, 相对于 ^{197}Au 测量了天然 Mo 的辐射俘获截面。在 0.01—2.0 MeV 中子能区, 用理论方法对天然 Mo 的俘获截面进行了计算。理论计算结果与实验数据进行了比较。

引 言

中子的俘获反应在许多核应用方面, 从天体物理学关于元素的核合成, 到反应堆的设计, 都起着重要的作用。天然 Mo 及其同位素作为反应堆结构材料及裂变产物核, 它的核数据更是反应堆设计者极为关注的。

在 0.7—1.4 MeV 的中子能区, 曾有五家 Mo 的辐射俘获截面测量数据。B. C. Diven 等^[1]用直径 1 米的大液体闪烁探测器, 通过探测瞬发俘获 γ 射线的方法, 测量了 0.175—1.0 MeV 能区 7 个能点的数据。Yu. Ya. Stavisskii 等^[2]用 CaF_2 晶体闪烁计数器记录瞬发 γ 射线的方法, 测量了 0.05—0.96 MeV 11 个能点的数据。M. P. Fricke 等^[3]用大液体闪烁探测器和飞行时间法, 测量了 0.01—1.108 MeV 95 个能点的数据。T. C. Belanova^[4]用球壳透射法测量了 0.024, 0.220 和 0.830 MeV 三个能点的数据。W. P. Poenitz^[5]用 1300 升的大液体闪烁探测器和飞行时间技术, 测量了 0.5—4.0 MeV 能区 14 个能点的数据。这几家的测量结果, 有的相互间差异明显。

Mo 的辐射俘获反应截面的理论计算: 国外有人对 Mo 的各同位素进行过计算, 但仅发表过图示结果, 未见到发表具体数据; 国内还未曾见到有人发表过这方面的结果。天然 Mo 含有七种同位素, 计算起来, 工作量很大。为对 Mo 的辐射俘获截面做进一步地系统了解, 在 0.01—2.0 MeV 能区, 本工作对其进行了计算。

一、实验测量

本工作的基本测量原理、实验装置及测量系统的详细情况可参看文献[6,7]。这里仅做简要介绍。

由四川大学原子核科学技术研究所的脉冲化的 2.5 MeV 质子静电加速器,提供宽 10 ns, 重复频率 2MHz, 平均束流强度 2—4 μ A 的脉冲质子束,经 $T(P, n)^3\text{He}$ 反应产生单能的脉冲中子束。用直径为 1 米的大液体闪烁探测器探测 (n, γ) 反应的瞬发 γ 射线以记录俘获事件。用长计数器监测中子注量率。中子能量由质子能量按反应动力学公式计算得到,并用飞行时间法进行校验。以 ^{197}Au 作为标准样品,在 0.7—1.4 MeV 能区,相对测量了天然 Mo 的四个能点的俘获截面。

Mo 的样品为纯度 99.9% 的金属,厚度为 8.5×10^{21} 原子/厘米²; ^{197}Au 为纯度好于 99.9% 的金片,厚度为 5.7×10^{21} 原子/厘米²。样品的形状为直径 9 厘米的圆片。

测量结果及讨论

^{197}Au 的标准俘获截面取自美国核数据库的推荐值^[8],列于表 1。

表 1 0.7—1.4 MeV ^{197}Au 中子俘获截面值

E_n, MeV	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4
$\sigma, 10^{-31}\text{m}^2$	101.0	90.8	85.5	83.0	76.0	71.5

相对于 ^{197}Au , 本工作所测得的天然 Mo 的俘获截面列于表 2。

表 2 天然 Mo 的俘获截面测量值

E_n, MeV	0.73 \pm 0.06	0.97 \pm 0.09	1.12 \pm 0.08	1.37 \pm 0.08
$\sigma, 10^{-31}\text{m}^2$	37.7 \pm 4.1	26.7 \pm 2.7	21.5 \pm 2.4	20.6 \pm 2.3

用蒙特卡罗方法对样品的散射效应进行了计算。

截面误差主要包括以下几项:能谱外推误差 5—8%, 散射效应修正的误差 2%, 探测器对不同样品的俘获 γ 射线的探测效率不一致引入的误差 2%, 本底扣除误差 1—2%, 标准截面误差 5—7%, 统计误差 2—3%。加上其它误差, 得到截面总误差为 10—12%。

本工作的测量结果与其他测量数据的比较见附图。从图中可以看出, 本工作的测量结果与文献[5]的符合较好, 在低于 1.0 MeV 能区, 比文献[3]的结果要高, 比文献[1, 2, 4]的结果要低。

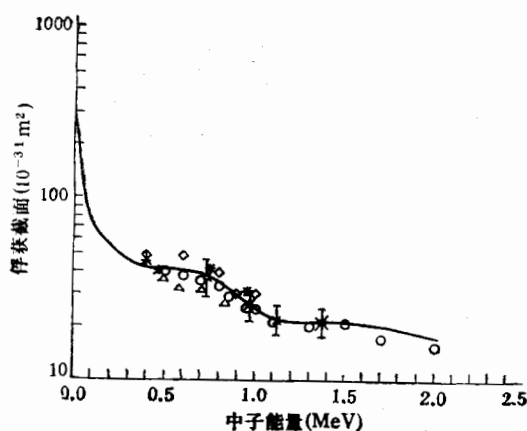


图1 Mo 的中子俘获截面

—本文工作: 理论 ○ Poenitz (1982) △ Fricke (1971) ◇ Diven (1960)
* Stavisskii (1961) + Belanova (1960) ㄣ 本文工作: 实验

二、理论计算

在中子能量为 0.01—2.0 MeV 的范围,对 Mo 的辐射俘获截面进行了理论计算。计算中所考虑的反应机制计有如下几项:

1. 复合核统计过程^[9], (n, γ) 截面计算公式为

$$\langle \sigma_{\gamma}^c \rangle = \frac{\pi}{K^2} \sum_{lij\pi} \frac{(2J+1)}{2(2I+1)} \cdot \frac{T_{ali} \cdot T_{\gamma}^{j\pi}}{T^{j\pi}} \cdot W_{ali}^{j\pi}$$

其中 K 为入射中子波数; T_{ali} 是角动量为 l, j 的入射中子穿透系数,由光学模型计算; $T_{\gamma}^{j\pi}$ 为光子穿透系数; $T^{j\pi}$ 为总穿透系数; $W_{ali}^{j\pi}$ 为宽度涨落修正因子。光子穿透系数 $T_{\gamma}^{j\pi}$ 由下式计算

$$T_{\gamma}^{j\pi} = \frac{1}{3\pi \hbar^2 c^2} \left[\sum_{i=1}^M (E_n + B_n - E'_i)^2 \sigma_o(E_n + B_n - E'_i) \cdot H(J, J'_i, 1) \right. \\ \left. + \sum_{\substack{J'=1 \\ \pi, \pi'=-1}}^{J+1} \int_{E_c}^{E_n+B_n} (E_n + B_n - E')^2 \sigma_o(E_n + B_n - E') \cdot \rho_{A+1}(J', \pi', E') dE' \right],$$

其中,

$$H(J, J'_i, 1) = \begin{cases} 1, & \text{若 } |J-1| \leq J'_i \leq J+1 \text{ 且 } \pi \cdot \pi'_i = -1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

M 为复合核分离能级条数; E_n 为质心系中子入射能, B_n 为中子分离能; E_c 为复合核能级连续区下限; $\rho_{A+1}(J', \pi', E')$ 为能级密度; $\sigma_o(E_{\gamma})$ 为光子吸收截面,由下式计算:

$$\sigma_o(E_{\gamma}) = \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_{gi} E_{\gamma}^2 \Gamma_{gi}^2}{(E_{gi}^2 - E_{\gamma}^2)^2 + E_{\gamma}^2 \Gamma_{gi}^2}$$

式中 σ_{gi} , Γ_{gi} , E_{gi} 分别为光核反应巨偶极共振峰的截面、宽度和能量。

2. 中子辐射俘获中的非统计效应: 包括位阱俘获^[10], 复合核弹性道中的俘获^[11], 和复合核外弹性道中的俘获^[12]. 对 Mo 来说, 非统计效应俘获截面仅占其总的 (n, γ) 反应截面的 2% 左右, 故可忽略不计. 因此在调整参数拟合实验数据时, 未对其有关参数作调整. 其计算公式可参看文献[10—12].

计算中所采用的参数如下:

1. 计算中子穿透系数时, 用了 Becchetti-Greenless^[13] 的参数, 未作任何调整.
2. 能级密度的计算, 采用 Gilbert-Cameron^[14] 公式, 并根据低激发能级实验值的累加数对参数作了调整. 调整后的复合核能级密度参数见表 3. 低激发能级分布取自《Nuclear Data Sheets》.
3. 计算光子吸收截面 $\sigma_a(E_\gamma)$ 时的光核反应巨偶极共振参数见表 3.

表 3 复合核能级密度参数和光核反应巨偶极共振参数

	E_x (MeV)	T (MeV)	E_0 (MeV)	P (MeV)	AL (MeV ⁻¹)	σ_g (10 ⁻²⁸ m ²)	Γ_g (MeV)	E_g (MeV)
⁹³ Mo	5.390	0.840	0.170	1.28	9.95	0.3143	4.5	15.30
⁹⁵ Mo	6.700	0.870	-0.870	1.28	11.36	0.3211	4.5	15.23
⁹⁶ Mo	6.500	0.720	0.550	2.40	12.67	0.3345	4.5	15.20
⁹⁷ Mo	5.100	0.700	-0.450	1.28	12.93	0.3026	4.5	15.17
⁹⁸ Mo	6.600	0.700	0.020	2.57	13.16	0.2548	4.5	15.14
⁹⁹ Mo	6.100	0.660	-1.060	1.28	14.17	0.3861	4.5	15.11
¹⁰¹ Mo	5.700	0.660	-1.510	1.28	15.48	0.3545	4.5	15.053

理论计算结果和讨论

Mo 的辐射俘获截面理论计算结果列于表 4.

表 4 Mo 的辐射俘获截面计算结果

E_n, MeV	0.01	0.05	0.10	0.30	0.50	0.80	1.00	1.30	1.50	2.0
$\sigma, 10^{-31}\text{m}^2$	316.7	106.3	71.0	44.6	41.5	35.0	24.3	21.2	21.0	16.8

Mo 的俘获截面, 理论计算结果与实验数据的比较见附图. 总的走向, 两者是一致的. 在高于 0.5MeV 能区, 计算结果与本工作的测量结果以及文献[5]的测量结果是一致的, 较文献[3]的测量结果高. 在低于 0.5MeV 能区 (图中未画出各家实验数据), 与 D. Kompe^[15] 及其它一些实验数据较一致, 比文献[3]及另外有的实验数据要高.

本工作的实验测量, 得到了四川大学原子核科学技术研究所质子静电加速器室同志的大力协作, 在此致谢.

参 考 文 献

- [1] B. C. Diven, et al., *Phys. Rev.*, 120(1960), 556.
- [2] Yu. Ya. Stavisskii, *Soviet Progress in Neutron Phys.* 227, Consult. Bureau, New York, 1961.

- [3] M. P. Fricke et al., 3rd Conf. on Neutron Cross-Sections and Technology, Vol. 1, p252, Univ. of Tennessee, Knoxville, 1971.
- [4] T. C. Belanova, *Sov. J. Atom. En.*, 8(1960), 549.
- [5] W. P. Poenitz, ANL-83-4 (1982), 239.
- [6] 徐海珊等,核技术,9(1986),5.
- [7] 徐海珊等,原子核物理,9(1987),127.
- [8] ENDF/B-V.
- [9] E. Vogt, *Advances in Nucl. Phys.*, Vol. 1, p161, Plenum, New York, 1978.
- [10] A. M. Lane et al., *Nucl. Phys.*, 17(1960), 563, 586.
- [11] Y. K. Ho et al., *Nucl. Phys.*, A406(1983), 1.
- [12] 刘建峰等,高能物理与核物理,3(1983),355.
- [13] F. D. Becchetti et al., *Phys. Rev.*, 182(1969), 1190.
- [14] A. Gilbert et al., *Can. J. Phys.*, 43(1965), 1446.
- [15] D. Kompe, *Nucl. Phys.*, A133(1969), 513.

Fast Neutron Capture Cross Section of Natural Molybdenum

MU YUNSHAN XU HAISHAN XIANG ZHENGYU LI YEXIANG WANG SHIMING

(*Institute of Nuclear Science and Technology of Sichuan University, Chengdu 610064*)

LIU JIANFENG

(*Physics Department, Zhengzhou University 450052*)

ABSTRACT

The radiative capture cross sections of natural Mo relative to the ^{197}Au (n, γ) were measured in the 0.7—1.4 MeV neutron energy range, using a large liquid scintillator detector and the time-of-flight method. In the 0.01—2.0 MeV neutron energy range, the theoretical calculation of (n, γ) reaction cross section for Mo was performed. The result of calculation is compared with the experimental data.