

用基态特征 γ 射线计算同质异能态反应截面的公式及其应用*

周丰群^{1;1)} 翟子楠¹ 拓飞² 罗均华² 孔祥忠²

1 (平顶山学院物理系 平顶山 467000)

2 (兰州大学现代物理系 兰州 730000)

摘要 根据人工放射性的生长与衰变规律, 推导出一个在特殊情况下用基态特征 γ 射线计算同质异能态反应截面的公式, 并据此公式用活化法以 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应截面为中子注量标准对 $^{128}\text{Te}(n, 2n)^{127\text{m}}\text{Te}$ 反应截面进行了测量. 由能量为 (14.1 ± 0.2) 和 (14.6 ± 0.3) MeV 的中子引发的 $^{128}\text{Te}(n, 2n)^{127\text{m}}\text{Te}$ 反应截面值分别为 (737 ± 69) 和 (853 ± 82) mb. 单能中子用 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应获得, 其能量用铈镨截面比法测定. 为减小热中子的 (n, γ) 反应的影响, 在辐照过程中对样品进行了包锡处理.

关键词 公式 反应截面 铈 活化法 中子

1 引言

铈是一种类金属元素, 较广泛地应用于染料、合金、陶瓷、玻璃、半导体以及某些探测器的生产与制造中. 与铈有关的聚变能设备和加速器驱动系统等材料暴露在强的高能中子场中, 会发生各种反应. 因此, 测量 14 MeV 能区中子引起的铈同位素反应截面意义重大. 正因如此, 已有不少人对此进行了测量^[1-12], 但关于 $^{128}\text{Te}(n, 2n)^{127\text{m}}\text{Te}$ 反应截面的测量结果仅有文献 [1, 2] 进行了报道 (文献 [1] 采用正比计数器通过测 β 射线的方法进行测量, 文献 [2] 采用 Ge(Li) 探测器通过测 γ 射线的方法进行测量). 由文献 [13] 可知, $^{127\text{m}}\text{Te}$ 的特征 γ 射线中强度最大的是 $E_\gamma = 57.63$ keV, $I_\gamma = 0.4982\%$. 按通常测 γ 射线的方法 (即测 $^{127\text{m}}\text{Te}$ 的特征 γ 射线) 很难测出该反应道. 我们注意到: 惟一用测 γ 射线的方法测量该反应道的文献 [2] 中, 所用特征 γ 射线 ($E_\gamma = 417$ keV) 不是 $^{127\text{m}}\text{Te}$ 的特征 γ 射线, 而是 $^{127\text{g}}\text{Te}$ 的特征 γ 射线. 考虑到此反应截面数据少, 而且其截面值较大, $^{127\text{m}}\text{Te}$ 的半衰期又较长, 因此精确测量其截面值有重要意义. 本文根据人工放射性的生长与衰变规律^[14-16], 给出一个在特殊情况下用基

态特征 γ 射线计算同质异能态反应截面的公式, 并用活化法和此公式测量计算了 14 MeV 能区中子引发的 $^{128}\text{Te}(n, 2n)^{127\text{m}}\text{Te}$ 反应截面.

2 用基态特征 γ 射线计算同质异能态反应截面的公式

在利用生成核的特征 γ 射线来测量反应截面的方法中, 常会遇到这种情况: 某种核反应同时生成某种放射性核素的基态 ^mY 和激发态 ^nY , 而激发态在衰变同时向基态跃迁, 或者只向基态跃迁, 如图 1 所示. 通常情况下, 利用激发态 ^nY 的任何一条特征 γ 射线来测量 $\text{X}(n, b)^m\text{Y}$ 的反应截面. 但是, 在由于各种原因无法测到激发态 ^nY 的任何一条特征 γ 射线的特殊情况下, 如果激发态的半衰期 $T_{m1/2}$ 远大于基态的半衰期 $T_{g1/2}$,

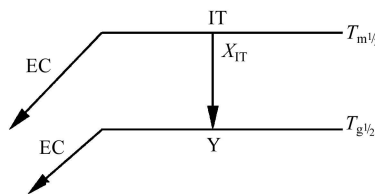


图 1 激发态在衰变同时向基态跃迁示意图

2006 - 10 - 08 收稿, 2006 - 10 - 31 收修改稿

* 平顶山学院高层次人才科研启动经费资助

1) E-mail: zfq@pdsu.edu.cn

且在足够长的冷却时间后基态的特征 γ 射线可测到满足计数统计要求, 可根据人工放射性的生长与衰变规律, 推导出利用基态特征 γ 射线计算 $X(n,b)^mY$ 反应截面的公式.

假定样品质量为 M , 母核原子量为 A , 丰度为 a , 样品被照射的时间为 t_1 , 中子平均注量为 ϕ , $X(n,b)^mY$ 反应的截面为 σ_m . 测量生成的放射性基态核 sY 的特征 γ 射线时, 样品的冷却时间为 t_2 , 测量时间为 t_3 . 根据人工放射性的生长与衰变规律^[14-16]可推导出在测量时间 t_3 内, 基态核 sY 的特征 γ 射线的全能峰计数

$$K_g = \frac{\lambda_g^2 D_m \sum_{i=1}^n \phi_i (1 - e^{-\lambda_m t_i}) e^{-\lambda_m \Delta t_i} - \lambda_m^2 D_g \sum_{i=1}^n \phi_i (1 - e^{-\lambda_g t_i}) e^{-\lambda_g \Delta t_i}}{\phi (\lambda_g^2 S_m D_m - \lambda_m^2 S_g D_g)},$$

N_A 为阿佛伽德罗常数, X_{IT} 为IT的分支比, λ_m 为 mY 的衰变常量, λ_g 为 sY 的衰变常量, $I_{\gamma g}$ 为 sY 的特征 γ 射线的强度, F_{gs} , F_{gg} 和 F_{gc} 分别为 sY 的特征 γ 射线在样品中的自吸收校正因子、样品几何校正因子、级联加合修正因子, ε_g^p 为 sY 的特征 γ 射线在探测器中的全能峰效率; n 是将照射时间 t_1 分成的段数, t_i 为第 i 段照射时间, Δt_i 为第 i 段照射结束到总照射结束之间的时间, ϕ_i 为第 i 段平均中子注量.

采用类似的推导过程, 可以推导出监督反应生成物的特征 γ 射线的全能峰计数为

$$C_0 = \frac{M_0 N_A a_0 \phi \sigma_0 I_{\gamma 0} \varepsilon_0^p K_0 S_0 D_0}{A_0 \lambda_0 F_{0s} F_{0g} F_{0c}}, \quad (2)$$

式中 M_0 为监督片的质量, N_A 为阿佛伽德罗常数, a_0 为监督反应的母核丰度, ϕ 为照射时间 t_1 内中子的

(参考文献[17]中式(10)的推导并考虑到级联加合修正因子 F_{gc})为

$$C = \frac{MN_A a \phi \sigma_m X_{IT} I_{\gamma g} \varepsilon_g^p K_g}{AF_{gs} F_{gg} F_{gc}} \times \left[\frac{\lambda_g}{\lambda_m (\lambda_g - \lambda_m)} S_m D_m - \frac{\lambda_m}{\lambda_g (\lambda_g - \lambda_m)} S_g D_g \right], \quad (1)$$

式中

$$S_m = 1 - e^{-\lambda_m t_1}, \quad S_g = 1 - e^{-\lambda_g t_1},$$

$$D_m = e^{-\lambda_m t_2} (1 - e^{-\lambda_m t_3}), \quad D_g = e^{-\lambda_g t_2} (1 - e^{-\lambda_g t_3}),$$

平均注量, σ_0 为监督反应的截面, I_{γ} 为监督反应生成物的特征 γ 射线的强度, ε_0^p 为监督反应生成物的特征 γ 射线的全能峰效率, A_0 为监督反应的母核原子量, λ_0 为监督反应生成物的衰变常量; F_{0s} , F_{0g} 和 F_{0c} 分别为监督反应生成物的特征 γ 射线在样品中的自吸收校正因子、样品几何校正因子和级联加合修正因子; $S_0 = 1 - e^{-\lambda_0 t_1}$, $D_0 = e^{-\lambda_0 t_02} - e^{-\lambda_0 (t_02 + t_03)}$, (t_02 为监督片的冷却时间, t_03 为监督片的测量时间), $K_0 = \left[\sum_{i=1}^n \phi_i (1 - e^{-\lambda_0 t_i}) e^{-\lambda_0 \Delta t_i} \right] / \phi S_0$ (n 是将照射时间 t_1 分成的段数, t_i 为第 i 段照射时间, Δt_i 为第 i 段照射结束到总照射结束之间的时间, ϕ_i 为第 i 段平均中子注量).

由式(1)和式(2)比较可得

$$\sigma_m = \frac{A (\lambda_g - \lambda_m) \lambda_m \lambda_g F_{gs} F_{gg} F_{gc} C \cdot M_0 a_0 I_{\gamma 0} \varepsilon_0^p S_0 D_0 K_0}{A_0 \lambda_0 F_{0s} F_{0g} F_{0c} C_0 \cdot M a I_{\gamma g} \varepsilon_g^p K_g X_{IT} (\lambda_g^2 S_m D_m - \lambda_m^2 S_g D_g)} \sigma_0, \quad (3)$$

式中各量意义同上. 该式就是通过测量基态特征 γ 射线计算激发态反应截面的公式.

值得注意的是, (1)在图1情况下, 只有在激发态的半衰期 $T_{m1/2}$ 远大于基态的半衰期 $T_{g1/2}$ 时才可以用式(3)通过测量基态特征 γ 射线计算激发态的反应截面; (2)用式(3)计算激发态的反应截面时, 样品的冷却时间 t_2 至少应大于7倍的 $T_{g1/2}$, 如果计数统计允许, 冷却时间越长越好.

3 实验过程

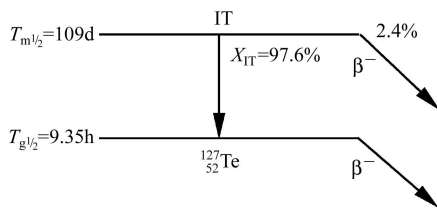
样品辐照是在兰州大学的ZF-300-II型强流中子发生器上进行的, 以 $T(d,n)^4He$ 反应为中子源, 平均

氘束能量 $\bar{E}_d = 135 \text{keV}$, 束流强度 $I_d \approx 500 \mu\text{A}$, 氚-钽靶厚度为 1.35mg/cm^2 , 中子产额为 $3 \times 10^{10} - 4 \times 10^{10} \text{n/s}$, 中子产额的变化用铀裂变室来监测, 以便对中子注量率的波动进行校正. 以 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面为中子注量标准. 碲样品采用纯度为99.999%的高纯碲粉压制成直径为20mm、厚度为2.16—2.62mm的圆片; 铌样品采用纯度为99.99%、直径为20mm、厚度为0.28—0.36mm的天然金属圆片. 每组样品的碲片夹在两个铌片中间, 并用厚度约为1mm的锡皮包住, 以吸收热中子. 样品分别放在与入射氘束方向成 0° , 90° 和 135° 的方向上, 距氚-钽靶心约1—10cm的固定位置上. 这些位置的中子能量用 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 和 $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89m+g}\text{Zr}$ 反应截面比法测定^[18].

^{92m}Nb 和 ^{127g}Te 的 γ 放射性用国产 CH8403 同轴高纯锗 γ 谱仪测量, 其相对效率为 20%, 对 1.33MeV γ 射线的能量分辨率为 3keV. 测量时样品距探测器的晶体表面为 2cm (测量碲样品时, 冷却时间 $T_2 \approx 106\text{d} > 270T_{g1/2}$). 对探测器的 γ 探测效率进行了精确刻度 (详见文献 [19]), 在 2cm 处所定的效率误差小于 1.5%. 实验中, 反应产物核的半衰期、 γ 射线的能量和强度, 以及靶核的丰度列于表 1 中, ^{127}Te 的衰变纲图如图 2, 这些数据和纲图取自文献 [13].

表 1 核反应及相关核数据

反应道	靶核丰度 (%)	$T_{1/2}$	E_γ/keV	$I_\gamma(\%)$
$^{128}\text{Te}(n,2n)^{127m}\text{Te}$	31.69	109d		
$^{128}\text{Te}(n,2n)^{127g}\text{Te}$	31.69	9.35h	360.3	0.13464
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	100	10.15d	934.44	99.07

图 2 ^{127}Te 的衰变纲图

4 实验结果及讨论

用所测数据及相关数据代入式 (3) 计算得到的 $^{128}\text{Te}(n,2n)^{127m}\text{Te}$ 反应截面、监督片的标准截面 (用文献 [20] 的评价拟合而得到) 及文献值列于表 2 中. 在计算 γ 放射性活度时, 对 neutron 注量率的波动、 γ 射线在样品中的自吸收、 γ 级连符合效应以及测量几何等进行了校正. 本工作误差的主要来源有: 计数统计误差, 标准截面误差. 探测效率, 样品称重, γ 射线在样品中的自吸收、测量几何、 γ 级连符合效应以及散射中子的影响等.

从表 2 可以看出, 我们的测量值比文献 [1, 2] 的值小, 但在误差范围内一致. 前已提及文献 [1] 的结果是用正比计数器通过测 β 射线的方法而得到的, 文献 [2] 是用 Ge(Li) 探测器通过测 γ 射线得到的. 本实验中, 在辐照过程中样品外包有 1mm 的锡皮, 减小了热中子 (n, γ) 反应的影响; 选用了 HPGe 探测器, 提高了分辨率; 而且所采用的核数据^[13, 20] 也是最近的、较精确的, 从而得到更加可靠准确的反应截面.

本文所推导出的公式 (3) 可用于类似情况的核反应截面的计算.

表 2 测量结果及文献值

反应道	本工作		文献值		Reference
	E_n/MeV	σ/mb	E_n/MeV	σ/mb	
$^{128}\text{Te}(n,2n)^{127m}\text{Te}$	14.1 ± 0.2	737 ± 69	13.53 ± 0.08	885 ± 105	[1]
	14.6 ± 0.3	853 ± 82	14.30 ± 0.09	936 ± 107	[1]
			15.31 ± 0.09	937 ± 110	[1]
			14.4 ± 0.3	949 ± 150	[2]
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$			14.1	459.3 ± 9.2	[20]
			14.6	459.7 ± 13.8	[20]

参考文献 (References)

- Bormann M, Bissen H H, Magiera E et al. Nucl. Phys., 1970, **A157**: 481
- LU W D, Ranakumar N, Fink R W. Phys. Rev., 1970, **C1**: 350
- Husain L, Kuroda P K. Nucl. Phys., 1968, **A114**: 663
- Filatenkov A A, Chuvaev S V, Aksenov V N et al. Khlopin Radium Institute Report RI-252, St Petersburg, 1999
- Brzosko J, Ecowski P, Siwek-diamant K et al. Nucl. Phys., 1965, **74**: 438
- Majumdar N K, Chatterjee A. Nucl. Phys., 1963, **41**: 192
- Bonazzola G C, Brovetto P, Chiavassa E et al. Nucl. Phys., 1964, **51**: 337
- Hasan S S, Prasad R, Seghal M L. Nucl. Phys., 1972, **A181**: 101
- Levkovskiy V N, Artem'ev O I. YF, 1971, **13**(5): 923
- Struwe W, Winkler G. Nucl. Phys., 1974, **A222**: 605
- Brzosko J, Decowski P, Siwek-diamant K et al. Nucl. Phys., 1963, **45**: 579
- Gopych P M, Demchenko M N, Zalyubovskiy I I et al. I.Int.Conf.on Neutron Physics, 1987, **3**: 295
- Firestone R B, Shirley V S. Table of Isotopes. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996
- Мухин К Н (SHEN Zhi-Tong, YIN Xiong, ZHANG Fa-Tong et al. Translation). Experimental Nuclear Physics (Vol.1). Beijing: Atomic Energy Press, 1996. 94—97 (in Chinese)
- LU Xi-Ting. Nuclear Physics (Revised Edition). Beijing: Atomic Energy Press, 2000. 22—39 (in Chinese)

- (卢希庭. 原子核物理(修订版). 北京: 原子能出版社, 2000. 22—39)
- 16 YANG Fu-Jia, WANG Yan-Sen, LU Fu-Quan. Nuclear Physics(The Second Edition). Shanghei: Fudan University Press, 2002. 102—107 (in Chinese)
(杨福家, 王炎森, 陆福全. 原子核物理(第2版). 上海: 复旦大学出版社, 2002. 102—107)
- 17 ZHOU Feng-Qun, LUO Jun-Hua, YI Yan-Ling et al. HEP & NP, 2005, **29**(8): 741 (in Chinese)
(周丰群, 罗均华, 易艳玲等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(8): 741)
- 18 Levis V E, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, **174**: 141
- 19 WANG Yong-Chang, YUAN Jun-Qian, REN Zhong-Liang et al. HEP.& NP, 1990, **14**(10): 919 (in Chinese)
(王永昌, 袁俊谦, 任忠良等. 高能物理与核物理, 1990, **14**(10): 919)
- 20 Wagner M, Vonach H, Pavlik A et al. Physik Daten Physics Data., 1990, **13**(5): 183

A Formula Used to Calculate Cross Section of Isomeric State with Characteristic Gamma-Ray of Ground State in a Special Case and Its Application *

ZHOU Feng-Qun^{1,1)} ZHAI Zi-Nan¹ TUO Fei² LUO Jun-Hua² KONG Xiang-Zhong²

1 (Department of Physics, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China)

2 (Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract According to the regulation of growing and decay of artificial radioactive nuclide, a formula used to calculate the cross section of isomeric state with characteristic gamma-ray of ground state in a special case was deduced. And the cross sections of $^{128}\text{Te}(n,2n)^{127\text{m}}\text{Te}$ reaction induced by neutrons around 14MeV were measured and calculated by using the activation technique and the formula deduced above. The experimental results were (737 ± 69) and $(853\pm 82)\text{mb}$ at the neutron energies of (14.1 ± 0.2) and $(14.6\pm 0.3)\text{MeV}$, respectively. The samples wrapped in cadmium foil were irradiated in order to avoid the effect of (n, γ) reaction induced by thermal neutron. The neutron energies in these measurements were determined by the method of cross-section ratios between $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89\text{m}+\text{g}}\text{Zr}$ and $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ reactions, and the neutron fluencies were determined by using the monitor reaction $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$.

Key words formula, reaction cross-section, tellurium, activation technique, neutron

Received 8 October 2006, Revised 31 October 2006

* Supported by Scientific Research Start up Outlay of High-Position Talent in Pingdingshan University

1) E-mail: zfq@pdsu.edu.cn