

13.5—14.6MeV 中子能区镓的同位素反应截面的测量

蒲忠胜 杨景康 孔祥忠¹⁾

(兰州大学现代物理系 兰州 730000)

摘要 报道了在 13.5—14.6MeV 中子能区用活化法以 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 反应截面为中子注量标准测得的 $^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$, $^{69}\text{Ga}(n,p)^{69\text{m}}\text{Zn}$, $^{71}\text{Ga}(n,p)^{71\text{m}}\text{Zn}$ 和 $^{71}\text{Ga}(n,n'\alpha)^{67}\text{Cu}$ 的反应截面值. 由 (13.5 ± 0.2), (14.1 ± 0.1) 和 (14.6 ± 0.2)MeV 中子引起的 $^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$ 反应截面值分别为 (794 ± 31), (869 ± 35) 和 (986 ± 39)mb, $^{71}\text{Ga}(n,n'\alpha)^{67}\text{Cu}$ 反应截面值分别为 (1.3 ± 0.1), (1.7 ± 0.1) 和 (2.5 ± 0.1)mb. 在中子能量为 (14.1 ± 0.1)MeV 能量点, $^{69}\text{Ga}(n,p)^{69\text{m}}\text{Zn}$ 反应截面值为 (21.5 ± 1.0)mb, $^{71}\text{Ga}(n,p)^{71\text{m}}\text{Zn}$ 反应截面值为 (12.4 ± 0.7)mb. 单能中子由 $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 反应获得. 文中还列举了尽可能收集到的数据以作比较.

关键词 镓 反应截面 活化法 放射性活度

核反应截面是核物理的重要研究课题之一,它能揭示入射粒子和靶核相互作用机制,加深对核力、核结构的认识,也是核技术和核能利用的基础数据,特别是在核反应理论模型的建立和完善,聚变反应堆的设计、军用核测试数据库的建设以及天体物理方面有重要意义. 在 14MeV 能区,对镓的同位素的反应截面,曾有许多人进行过测量^[1-19]和评价^[20],绝大部分测量是在 1980 年之前完成的,各家数据之间有分歧,所以进一步精确测量镓的同位素的反应截面是十分重要的.

1 实验过程

样品照射是在中国科学院近代物理研究所 T-600 型中子发生器上进行的. 以 $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 反应作中子源,平均氘束能量 $\bar{E}_d = 150\text{keV}$,束流强度 $I_d \approx 1\text{mA}$,氘-钛靶厚为 $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$. 中子产额的变化用 α 伴随粒子法监督,以便对中子注量波动进行修正,中子产额为 $4 \times 10^{10} - 8 \times 10^{10} \text{n/s}$. 3 组样品分别放在与入射氘束方向成 $45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 的角度上. 中子能量是用 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ 和 $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89\text{m}} + ^{90}\text{Zr}$

截面比法测定的^[21]. 这三处的中子能量分别为 13.5, 14.1 和 14.6MeV. 镓样品均为直径 20mm 的天然金属圆片,纯度均为 99.99%. 每组样品均由两片铌样品夹一片镓样品组成.

$^{68}\text{Ga}, ^{69\text{m}}\text{Zn}, ^{71\text{m}}\text{Zn}, ^{67}\text{Cu}$ 和 $^{92\text{m}}\text{Nb}$ 的 γ 放射性活度是用国产 CH8403 同轴高纯锗 γ 谱仪测量,相对效率为 20%,对 1.33keV γ 的能量分辨率为 3keV. 对探测器的 γ 探测效率进行了精确刻度,把美国国家标准局生产的 SRM4275 (Standard Reference Material 4275) 型标准点源放在距高纯锗晶体 20cm 处进行该处的绝对效率刻度,得出绝对刻度曲线. 标准源的误差小于 1%. 剩余核的半衰期, γ 射线能量和强度以及靶核丰度列于表 1 中,这些数据取自文献[22]. 很多剩余核的退激有级联辐射产生,造成和峰效应,

表 1 靶核丰度和产物核衰变数据

靶核丰度	反应	半衰期	E_γ/keV	I_γ
60.108 %	$^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$	67.629m	1077.4	3.0 %
60.108 %	$^{69}\text{Ga}(n,p)^{69\text{m}}\text{Zn}$	13.76h	438.634	94.7687 %
39.892 %	$^{71}\text{Ga}(n,p)^{71\text{m}}\text{Zn}$	3.96h	386.28	93 %
39.892 %	$^{71}\text{Ga}(n,n'\alpha)^{67}\text{Cu}$	61.83h	184.577	48.7 %
100 %	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	10.15d	934.43	99.07 %

2002-11-18 收稿

1) E-mail: kongxz@lzu.edu.cn

当样品与探测器表面的距离约为 2cm 时,对截面测量的影响有时可达 10%—30% 之多,因此这项修正很重要.若样品与探测器的距离较远 (~20cm),级联效应很小,可以忽略.在本次测量中,由于样品和探测器之间的距离在 20cm 处,所以级联效应可以忽略.在计算 γ 放射性活度时,对中子注量的波动、 γ 射线在样品中的自吸收及测量几何进行了校正.

2 实验结果及讨论

反应截面的计算公式如下^[23]:

$$\sigma_x = \frac{[\epsilon \cdot I_\gamma \cdot \eta \cdot K \cdot S \cdot M \cdot D]_0}{[\epsilon \cdot I_\gamma \cdot \eta \cdot K \cdot S \cdot M \cdot D]_x} \cdot \frac{[\lambda \cdot A \cdot F \cdot C]_x}{[\lambda \cdot A \cdot F \cdot C]_0} \cdot \sigma_0,$$

其中下标“X”和“0”分别表示镓样品和铟监督片的值, ϵ 为所测的特征 γ 射线全能峰效率; I_γ 为特征 γ 射线的强度; η 为所测核素的同位素丰度; $S = 1 - e^{-\lambda T}$ 表示剩余核的生长因子; λ 为衰变常数; T 是总的中子照射时间; M 为样品质量; $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$ 为测量收集因子, t_1 为从照射结束到测量开始的时间间隔, t_2 为从照射结束到测量结束的时间间隔; A 为样品元素的原子量; C 为实测的全能峰面积; F 为总的 γ 活度校正因子,其中主要包括 γ 射线在样品中的自吸收校正和几何校正. K 为中子注量波动校正因子,其表达式为

$$K = \left[\sum_{i=1}^l \Phi_i \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) \cdot e^{-\lambda T} \right] / \Phi S,$$

其中 l 为将照射时间分成的段数; Δt_i 为每段的时间间隔; Φ_i 为在 Δt_i 内入射到样品上的平均中子通量; Φ 为在 T 时间内入射到样品上的平均中子通量.

测量结果如表 2 所示, $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面值取自文献[24].截面测量的主要误差来源有 γ 探测效率 1.5%,计数统计 0.2%—4.2%,自吸收校正 1%,测量几何校正 1%,标准截面 1.5%,样品称重 0.15%,确定平均中子能量的误差 2.0%.

$^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$, $^{69}\text{Ga}(n,p)^{69m}\text{Zn}$, $^{71}\text{Ga}(n,p)^{71m}\text{Zn}$ 和 $^{71}\text{Ga}(n,n'\alpha)^{67}\text{Cu}$ 的反应截面值随能量的变化列在图 1—4 中,在每个图中把已收集到的其他作者的反应截面数据也列在其中.从图 1 可以看出,在 13.5—14.7MeV 中子能区 $^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$ 反应截面随中子能量增加而增大,其走向与 Bormann^[2] 的截面走向一致,而 Casanova^[5] 的截面数据明显比我们的和其他作者的数据偏大.在误差范围内本工作与 Bormann^[2], Sigg^[16] 和姚立山^[20] 的数据符合得很好.在 14.8MeV 能量点, Bormann^[2] 和 Molla^[12] 两家数据差别达 254mb.从图 2 可以看出,本工作测得的 $^{69}\text{Ga}(n,p)^{69m}\text{Zn}$ 反应截面值,在中子能量为 14.1MeV 时,比 Casanova^[5] 的数据低,而与其他几家数据的趋势较为一致.从图 3 中可以看出,本工作测得的 $^{71}\text{Ga}(n,p)^{71m}\text{Zn}$ 反应截面值,在 14.1MeV 能量点与 Casanova^[5] 的数据符合得很好.从图 4 中可以看出, $^{71}\text{Ga}(n,n'\alpha)^{67}\text{Cu}$ 的反应截面随中子能量增加而增大.

表 2 本次反应截面测量值

核反应	$E_n = 13.5 \pm 0.2\text{MeV}$	$E_n = 14.1 \pm 0.1\text{MeV}$	$E_n = 14.6 \pm 0.2\text{MeV}$
	反应截面值/mb		
$^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$	794 ± 31	869 ± 35	986 ± 39
$^{69}\text{Ga}(n,p)^{69m}\text{Zn}$	—	21.5 ± 1.0	—
$^{71}\text{Ga}(n,p)^{71m}\text{Zn}$	—	12.4 ± 0.7	—
$^{71}\text{Ga}(n,n'\alpha)^{67}\text{Cu}$	1.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1	2.5 ± 0.1

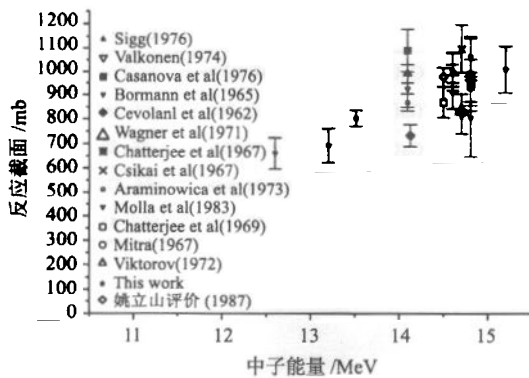


图 1 $^{69}\text{Ga}(n,2n)^{68}\text{Ga}$ 反应截面

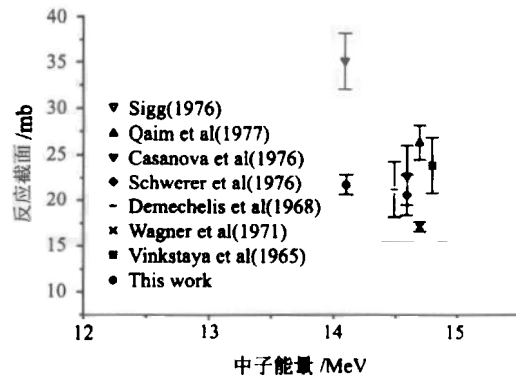


图 2 $^{69}\text{Ga}(n,p)^{69m}\text{Zn}$ 的反应截面

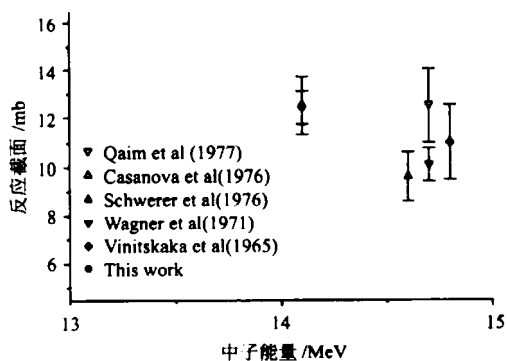


图 3 $^{71}\text{Ga}(n,p)^{71m}\text{Zn}$ 的反应截面

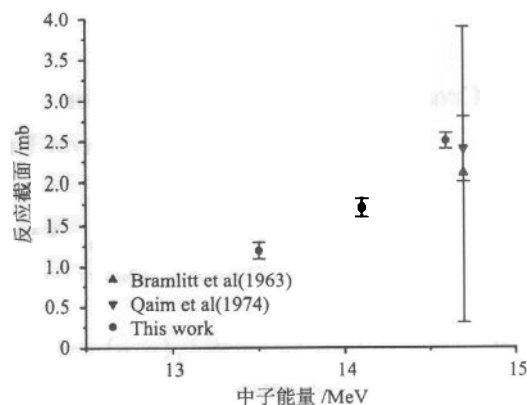


图 4 $^{71}\text{Ga}(n,n'\alpha)^{67}\text{Cu}$ 的反应截面

参考文献 (References)

- 1 Araminowicz J, Dresler J. INR-1464, 1973, 14
- 2 Bormann M, Fretwurst E, Schehka P et al. Nuclear Physics, 1965, **63**: 438
- 3 Browne E, Firestone R B. Table of Isotopes. Wiley, New York, 1996
- 4 Bramlitt E T, Fink R W. Physical Review, 1963, **131**: 2649
- 5 Casanova J L, Sanchez M L. Anales de Fisica y Quimica, 1976, **72**(3): 186
- 6 Cevolani M, Petralia S. Nuovo Cimento, 1962, **26**: 1328
- 7 Chatterjee A, Nath A, Ghose A M. Nucl. and Solid State Physics Symp., Kanpur, 1967
- 8 Chatterjee A, Nath A, Ghose A M. Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Studsvik, 1969, **2**: 117
- 9 Csikai J, Peto G. Acta Physica Hungarica, 1967, **23**: 87
- 10 Demechelis F, Guidetti M, Miraldi E et al. Nuovo Cimento B, 1968, **58** (1): 177
- 11 Mitra B. Indian Journal of Physics, 1967, **41**: 752
- 12 Molla N T, Mizanul Islam M, Mizanur Rahman, INDC (BAN)-002, 1983, 1
- 13 Qaim S M, Stoecklin G. EUR-5182E, 1974, 939
- 14 Qaim S M, Molla NI. Nuclear Physics, Section., 1977, **A283**: 269
- 15 Schwerer O, Winkler-rohatsch M, Winkler C. Oesterr. Akad. Wiss., Math-Naturw. Kl, Anzeiger, 1976, **113**: 153
- 16 Sigg R A. Nuclear Data Sheets (Nuclear Data Sect. B), 1976, **37**: 2237
- 17 Valkonen M. Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry, 1974, **36**: 715
- 18 Viktorov D V, Sjablin V L. Yadernaya Fizika, 1972, **15**(6): 1099
- 19 Wagner P, Uhl M. Oesterr. Akad. Wiss., Math-Naturw. Kl, Anzeiger, 1971, **108**: 185
- 20 YAO Li-Shan, ZHOU En-Chen, CAI Dun-Jiu. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1987, **11**(4): 533 (in Chinese)
(姚立山, 周恩臣, 蔡敦九. 高能物理与核物理, 1987, **11**(4): 533)
- 21 Levis V E, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, **174**: 141
- 22 Brone E, Firestone R B. Table of Radioactive Isotopes, USA, 1996
- 23 WANG Yong-Chang, YUAN Jun-Qian, REN Zhong-Liang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1991, **15**: 73 (in Chinese)
(王永昌, 袁俊谦, 任忠良等. 高能物理与核物理, 1991, **15**: 73)
- 24 Filatenkov A A, Chuvaev A V, Aksenov V N et al. RI-252, 1999

Cross Section Measurements for $(n, 2n)$, (n, p) and $(n, n'\alpha)$ Reactions on Gallium Isotopes at the Neutron Energies of 13.5, 14.1 and 14.6 MeV

PU Zhong-Sheng YANG Jing-Kang KONG Xiang-Zhong¹⁾

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

Abstract Cross sections for $(n, 2n)$, (n, p) and $(n, n'\alpha)$ reactions have been measured on Gallium isotopes at the neutron energies of 13.5–14.6 MeV using activation technique. The data of the cross sections are reported for the reactions of $^{69}\text{Ga}(n, 2n)^{68}\text{Ga}$, $^{69}\text{Ga}(n, p)^{69m}\text{Zn}$, $^{71}\text{Ga}(n, p)^{71m}\text{Zn}$, and $^{71}\text{Ga}(n, n'\alpha)^{67}\text{Cu}$. The cross sections of $^{69}\text{Ga}(n, 2n)^{68}\text{Ga}$ reaction are 794 ± 31 , 869 ± 35 and 986 ± 39 mb at 13.5 ± 0.2 , 14.1 ± 0.1 and 14.6 ± 0.2 MeV incident neutron energies, respectively. The cross sections of $^{71}\text{Ga}(n, n'\alpha)^{67}\text{Cu}$ reaction are given: 1.3 ± 0.1 , 1.7 ± 0.1 and 2.5 ± 0.1 mb at 13.5 ± 0.2 , 14.1 ± 0.1 and 14.6 ± 0.2 MeV, respectively. The cross section of $^{69}\text{Ga}(n, p)^{69m}\text{Zn}$ reaction is 21.5 ± 1.0 mb at 14.1 ± 0.1 MeV. The cross section of $^{71}\text{Ga}(n, p)^{71m}\text{Zn}$ reaction is 12.4 ± 0.7 mb at 14.1 ± 0.1 MeV. The neutron fluences are determined by the cross sections of $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ reaction.

Key words Gallium, cross section, activation, gamma ray activity

Received 18 November 2002

1) E-mail: kongxz@lzu.edu.cn