

13.5—14.6MeV 中子能区锶同位素反应截面的测量

贺国珠 罗均华 刘中杰 孔祥忠¹⁾

(兰州大学现代物理系 兰州 730000)

摘要 在 13.5—14.6MeV 中子能区用活化法测量了 $^{84}\text{Sr}(n, 2n)^{83}\text{Sr}$, $^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85m}\text{Sr}$, $^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85}\text{Sr}$, $^{88}\text{Sr}(n, 2n)^{87m}\text{Sr}$, $^{84}\text{Sr}(n, p)^{84}\text{Rb}$, $^{86}\text{Sr}(n, p)^{86}\text{Rb}$, $^{88}\text{Sr}(n, p)^{88}\text{Rb}$ 和 $^{88}\text{Sr}(n, \alpha)^{85m}\text{Kr}$ 的反应截面值, 以 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 反应截面为中子注量标准, 并且将测量值和收集到的文献值做了比较.

关键词 截面 中子反应 活化法 锶

1 引言

锶属于碱金属元素, 在自然界中以化合物的形式存在, 锶同位素中子核反应截面的测量可以揭示中子和靶核相互作用机制, 加深对核力、核结构的认识, 同时在环境评估中也有需求. 14MeV 能区锶的中子反应截面, 已经有一些人进行过测量和评价, 但数据之间存在分歧, 某些反应道的数据还比较少, 因而我们对锶的中子活化反应截面进行了测量.

2 实验

样品辐照是在兰州大学 ZF-300-II 强流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 $E_d = 135\text{keV}$, 束流强度 $I_d \approx 400\mu\text{A}$, 氘-钛靶厚为 $1.35\text{mg}/\text{cm}^2$. 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 $(3-4) \times 10^{10}\text{n/s}$. 样品分别放在相对入射氘离子束的不同角度上. 中子能量是用 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 和 $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89m+g}\text{Zr}$ 截面比法测定的^[1]. 中子能量分别为 13.5, 14.1 和 14.6MeV. 锶样品由纯度 99.9% 的 SrCO_3 粉末压制而成, 直径 20mm. 样品采用三明治包裹法, 每组样品由两片铌夹一片锶组成. ^{92m}Nb , ^{89}Zr , ^{83}Sr , ^{85m}Sr , ^{85}Sr , ^{87m}Sr , ^{84}Rb , ^{86}Rb , ^{88}Rb 和 ^{85m}Kr 的 γ 放射性活度是用国产 CH8403 高纯锗 γ 谱仪测量, 其相对效率为 20%, 能量分辨率为 3keV(1.33MeV). 探测

器的 γ 探测效率已做绝对刻度, 效率误差小于 1.5%.

本工作中靶核的丰度、核反应剩余核的半衰期, γ 射线能量和强度等取自文献[2]且列于表 1 中.

表 1 靶核丰度和产物核衰变数据

核反应	靶核 丰度(%)	生成核 半衰期	γ 射线 能量/keV	γ 射线 强度(%)
$^{84}\text{Sr}(n, 2n)^{83}\text{Sr}$	0.56	32.41h	762.6	30
$^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85m}\text{Sr}$	9.86	67.63m	231.9	84.4
$^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85}\text{Sr}$	9.86	64.84d	514.0	96
$^{88}\text{Sr}(n, 2n)^{87m}\text{Sr}$	82.58	2.803h	388.5	82.1
$^{84}\text{Sr}(n, p)^{84}\text{Rb}$	0.56	32.77d	881.6	69
$^{86}\text{Sr}(n, p)^{86}\text{Rb}$	9.86	18.631d	1077.0	8.64
$^{88}\text{Sr}(n, p)^{88}\text{Rb}$	82.58	17.78m	898.0	14
$^{88}\text{Sr}(n, \alpha)^{85m}\text{Kr}$	82.58	4.48h	151.2	75.5

3 实验结果及讨论

反应截面的计算公式^[3]如下

$$\sigma_x = \frac{[\varepsilon I_\gamma N K M D]_m [\lambda A F C]_x}{[\varepsilon I_\gamma N K M D]_x [\lambda A F C]_m} \sigma_m,$$

其中下标“x”和“m”分别表示锶样品和铌监督片的相关值, ε 为相关的特征 γ 射线全能峰效率; I_γ 为特征 γ 射线的强度; N 为所测核素的同位素丰度; M 为样品质量; A 为样品元素的原子量; C 为实测的全能峰面积; λ 为衰变常量; $F = f_s \times f_o \times f_g$, 为总的 γ 活度校正因子, 其中 f_s , f_o 和 f_g 分别是样品自吸收校正因子, γ 射线级联加合效应校正因子和几何校正因子. $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$, 为测量收集因子, t_1 为从照射结束

2005 - 04 - 27 收稿

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

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. K 为中子注量波动校正因子, 其表达式为

$$K = \left[\sum_{i=1}^L \phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i} \right] / \phi S,$$

其中 T 是总的中子照射时间; 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. $S = 1 - e^{-\lambda T}$, 表示剩余核的生长因子. 反应截面测量结果如表 2 所示.

表 2 本实验反应截面测量值

核反应	各中子能量处(MeV)的核反应截面(mb)		
	$E_n=13.5 \pm 0.3$	$E_n=14.1 \pm 0.2$	$E_n=14.6 \pm 0.3$
$^{84}\text{Sr}(n, 2n)^{83}\text{Sr}$	311 ± 13	439 ± 17	609 ± 25
$^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85m}\text{Sr}$	156 ± 10	227 ± 8	253 ± 8
$^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85}\text{Sr}$		892 ± 53	955 ± 57
$^{88}\text{Sr}(n, 2n)^{87m}\text{Sr}$	198 ± 13	242 ± 13	265 ± 16
$^{84}\text{Sr}(n, p)^{84}\text{Rb}$			94.9 ± 9.5
$^{86}\text{Sr}(n, p)^{86}\text{Rb}$		44.6 ± 4.0	
$^{88}\text{Sr}(n, p)^{88}\text{Rb}$			19.4 ± 1.2
$^{88}\text{Sr}(n, \alpha)^{85m}\text{Kr}$		1.1 ± 0.1	1.3 ± 0.1

本实验测量结果与文献比较如图 1—图 8 所示.

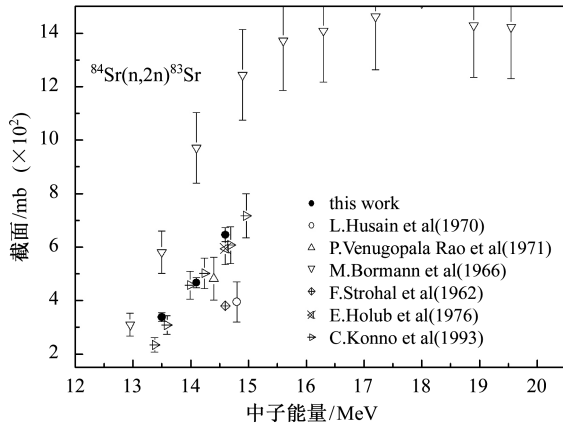


图 1 $^{84}\text{Sr}(n, 2n)^{83}\text{Sr}$ 核反应截面值

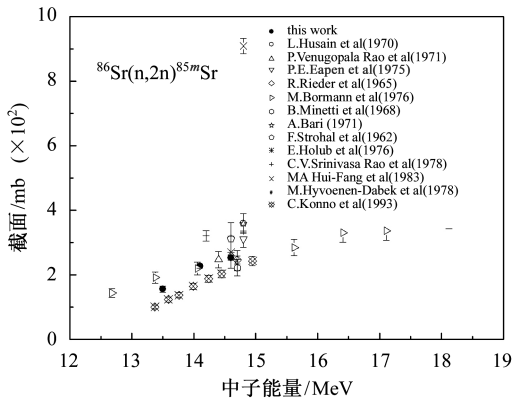


图 2 $^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85m}\text{Sr}$ 核反应截面值

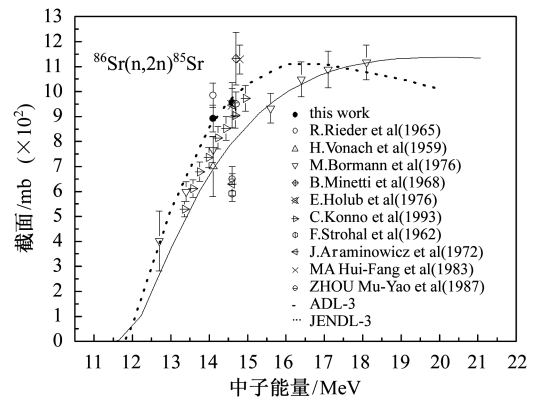


图 3 $^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85}\text{Sr}$ 核反应截面值

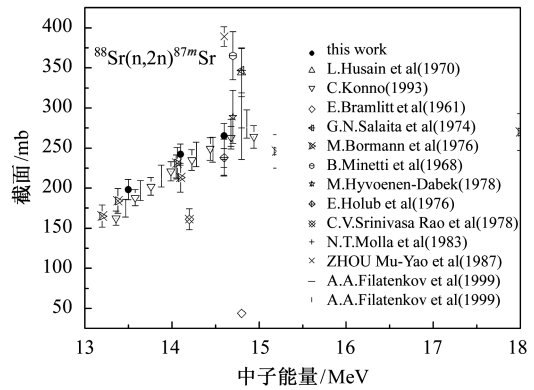


图 4 $^{88}\text{Sr}(n, 2n)^{87m}\text{Sr}$ 核反应截面值

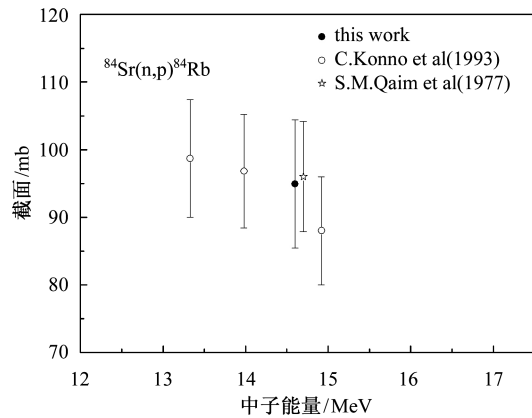


图 5 $^{84}\text{Sr}(n, p)^{84}\text{Rb}$ 核反应截面值

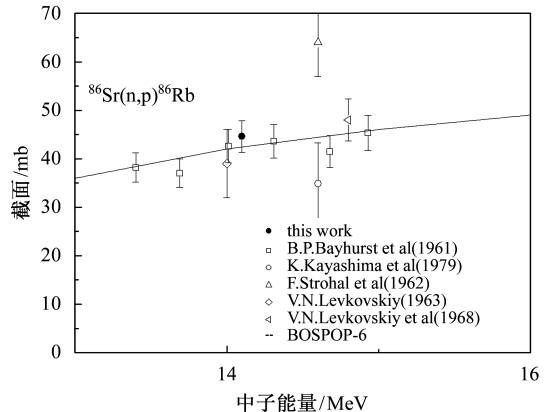


图 6 $^{86}\text{Sr}(n, p)^{86}\text{Rb}$ 核反应截面值

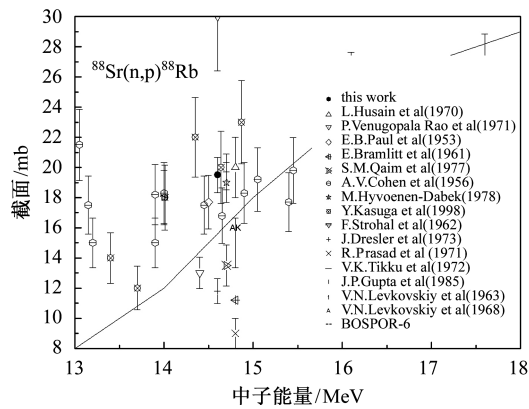
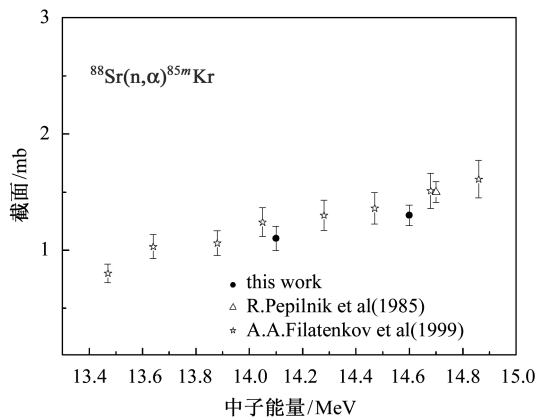
图 7 $^{88}\text{Sr}(n, p)^{88}\text{Rb}$ 核反应截面值图 8 $^{88}\text{Sr}(n, \alpha)^{85m}\text{Kr}$ 核反应截面值

图 1 中, 我们的数据在误差范围内和 Konno^[4], Holub^[5], Rao^[6] 的一致. Bormann^[7] 使用的是井型 NaI(Tl) 探测器, Strohal^[8] 使用了 NaI(Tl) 探测器和 β 计数管, 由于锶元素中有 ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr 4 种同位素存在, 不同同位素的反应产物不可能用上述探测器完全分开, 因此他们的数据可信度较低. Husain^[9] 使用的是 Ge(Li) 探测器, 将其采用的衰变参数按文献 [2] 修正后, 其截面结果提高约 12%, 和本实验值在误差范围内一致.

图 2 中, 我们的数据在 $E_n = 14.6 \pm 0.3\text{MeV}$ 处在误差范围内和文献 [4, 5], Bormann^[10], Rieder^[11] 一致, 在 $E_n = 14.1 \pm 0.2\text{MeV}$ 处和文献 [10] 一致.

图 3 中, 我们的数据和文献 [5, 11] 的实验数据及 ADL-3^[12] 推荐数据一致. JENDL-3^[13] 评价数据和文献 [4] 的数据比本工作偏低, 把文献 [4] 使用的 $T_{1/2} = 85\text{d}$, $P_\gamma = 0.9927$ 值用文献 [2] 的衰变参数修正后, 其数据与本工作一致.

图 4 显示绝大多数数据在误差范围内一致, 少数几个数据上下分散.

图 5 只有 3 组数据, 原因是 ^{84}Sr 的丰度很低, 截面测量难度大, 因而所有实验值误差均达 10%, 在误差范围内文献 [4], Qaim^[14] 和我们的数据一致.

图 6 共有 6 家测量数据和一组推荐值, 大多数结果在误差范围内一致, 并且与 BOSPOR-6^[15] 推荐值吻合, 仅文献 [8] 和 Kayashima^[16] 上下偏离.

图 7 中 $^{88}\text{Sr}(n, p)^{88}\text{Rb}$ 反应生成核 ^{88}Rb 的半衰期只有 17.78min, 辐照时间和测量时间恰当选择才能准确测量截面值, 我们的辐照时间和冷却时间是 20min. 图中显示了 Kasugai^[17] 和 Gupta^[18] 两家实验室 80 年代后对该截面的测量数据, 本工作和 1998 年使用 HPGe 探测器的测量值一致, 文献 [18] 在 1985 年使用的是端窗 β 计数器, 其结果和本实验差异较大. 70 年代有 7 家对该截面的测量数据, 其中只有 Dabek^[19] 与本工作一致, 文献 [9] 的数据按照文献 [2] 的衰变参数修正后和本工作一致. 由于探测器性能限制和当年衰变数据的不准确性, 致使其他的数据分歧较大.

在图 8 中, 仅列出了 1985 年以后的测量值, 本工作和 Filatenkov^[20], Pepelnik^[21] 的数据一致性较好. 另外, Paul^[22] 在 1953 年、文献 [8] 在 1963 年分别报道了用 NaI(Tl) 探测器和 β 计数管的测量值, 数据高出一个数量级, 没有将其显示在图中.

由于锶是多同位素的元素, 因此某些同位素的 (n, γ) 反应的产物与 $(n, 2n)$ 反应产物相同, 如: $^{84}\text{Sr}(n, \gamma)^{85}\text{Sr}$ 与 $^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85}\text{Sr}$ 相同, 而 $^{86}\text{Sr}(n, \gamma)^{87}\text{Sr}$ 与 $^{88}\text{Sr}(n, 2n)^{87}\text{Sr}$ 相同, 由于低能中子本底的存在会抬高某些 $(n, 2n)$ 反应截面值, 样品包在镉盒中照射可去掉热中子本底的影响. 因 $^{84}\text{Sr}(n, \gamma)^{85}\text{Sr}$ 和 $^{86}\text{Sr}(n, \gamma)^{87}\text{Sr}$ 截面很小, 对 $(n, 2n)$ 截面影响不大, 样品照射时没有包镉.

可以看出, 早期测量数据受使用探测器性能的限制, 采用的核衰变数据也不够准确, 结果比较分散, 可信度较低. 近期, 由于使用高分辨性能 Ge 探测器和衰变参数更加准确, 截面测量结果准确度得到提高.

本实验截面测量的主要误差来源有 γ 探测效率, 计数统计, 自吸收校正, 标准截面等, 衰变数据的误差未在结果中显示.

作者感谢兰州大学强流中子发生器小组成员的出色工作. 感谢卢涵林先生有益的指正.

参考文献(References)

- 1 Levis V E, Zieba K J. Nucl. Instrum. Methods, 1980, **174**: 141—144
- 2 Firestone R B, Shirley V S. Table of Isotopes. (8th Edition). New York: John Wiley & Sons, 1996. 2134—2322
- 3 PU Zhong-Sheng, YANG Jing-Kang, KONG Xiang-Zhong et al. HEP and NP, 2003, **27**: 581—584 (in Chinese) (蒲忠胜, 杨景康, 孔祥忠等. 高能物理与核物理, 2003, **27**: 581—584)
- 4 Konno C, Ikeda Y, Oishi K et al. JAERI-1329. Japan, 1993. 39—40
- 5 Holub E, Cindro N. J. Phys., 1976, **G2**: 405—419
- 6 Rao P V, Wood R E, Palms J M et al. Phys. Rev., 1971, **C3**: 629—635
- 7 Bormann M, Fretwurst E, Schehka P et al. Nucl. Phys., 1965, **63**: 438—448
- 8 Strohal F, Cindro N, Eman B. Nucl. Phys., 1962, **30**: 49—67
- 9 Husain L, Bari A, Kuroda P K. Phys. Rev., 1970, **C1**: 1233—1236
- 10 Bormann M, Feddersen H K, Holscher H H et al. Zeitschrift fuer Physik, 1976, **A277**: 203—210 (in German)
- 11 Rieder R, Muenzer H. EANDC(Or)-38. 1965. 1(in German)
- 12 Grudzevich et al. Catalog of the ADL-3 Library, 1993(in Russian)
- 13 Shibata et al. Japanese Evaluated Nuclear Data Library(Version-3): JAERI-1319. Japan, 1990
- 14 Molla N I, Qaim S M. Nucl. Phys., 1977, **A283**: 269—288
- 15 Manokhin V N, Pashchenko A B, Plyaskin V I. Technical Reports Series-273. Vienna: IAEA, 1987. 371—372
- 16 Kayashima K, Nagao A, Kumabe I. NEANDC(Japan)-61u, 1979. 94
- 17 Kasugai Y, Yamamoto H, Kawade K et al. Ann. Nucl. Energy, 1998, **25**: 23—45
- 18 Gupta J P, Bhardwai H D, Prasad R. Journal of Physics, India, 1985, **24**: 637
- 19 Hyvoenen Dabek M, Tarvainen M, Holmberg P. J. of Radioanalytical Chemistry, 1978, **46**: 357
- 20 Filatenkov A A, Chuvaev S V, Aksenov V N et al. INDC(CCP)-252. Vienna: IAEA, 1999
- 21 Pepelnik R, Anders B, Bahal B M et al. NEANDC(E)-262U, 1985, (5): 32
- 22 Paul E B, Clarke R L. J. Can. Phys., 1953, **31**: 267

Cross Section Measurements for (n, 2n), (n, p) and (n, α) Reactions on Strontium Isotopes at the Neutron Energy about 14MeV

HE Guo-Zhu LUO Jun-Hua LIU Zhong-Jie KONG Xiang-Zhong¹⁾

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

Abstract Cross-sections for $^{84}\text{Sr}(n, 2n)^{83}\text{Sr}$, $^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85m}\text{Sr}$, $^{86}\text{Sr}(n, 2n)^{85}\text{Sr}$, $^{88}\text{Sr}(n, 2n)^{87m}\text{Sr}$, $^{84}\text{Sr}(n, p)^{84}\text{Rb}$, $^{86}\text{Sr}(n, p)^{86}\text{Rb}$, $^{88}\text{Sr}(n, p)^{88}\text{Rb}$ and $^{88}\text{Sr}(n, \alpha)^{85m}\text{Kr}$ reactions were measured at neutron energies from 13.5 to 14.6MeV using activation technique and γ -ray spectrometry. The neutron flux was determined using the monitor reaction $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ and the neutron energies were measured by the method of cross section ratios for $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89m+g}\text{Zr}$ to $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ reactions. The results of present work were compared with data published previously.

Key words cross-section, neutron nuclear reaction, activation technique, strontium

Received 27 April 2005

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