

# 产生长寿命核的几个 (n, 2n) 反应 截面的测量

王永昌 袁俊谦 杨景康 孔祥忠 任忠良 王化民

(兰州大学现代物理系, 730001)

## 摘 要

本文报道了  $E_n = 13.5-14.8\text{MeV}$  中子能区几个长寿命生成核的 (n, 2n) 反应截面的测量。测量方法是以  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  反应截面为中子注量标准的相对活化法。测量的几个反应为:  $^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150\text{m}}\text{Eu}$ 、 $^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$ 、 $^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$  和  $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108\text{m}}\text{Ag}$ 。中子能量是用铯锶截面比法测定的。本文的结果和已收集到的测量结果进行了比较。

## 一、前 言

$^{151}\text{Eu}$ 、 $^{153}\text{Eu}$ 、 $^{159}\text{Tb}$  和  $^{109}\text{Ag}$  都有较大的天然同位素丰度, 它们的 (n, 2n) 反应产物都是长寿命的核。所以, 1988年 E. T. Cheng 在日本 (Mito) 举行的国际核数据会上把  $^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150\text{m}}\text{Eu}$ 、 $^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$ 、 $^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$  和  $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108\text{m}}\text{Ag}$  列为低活性聚变研究需要的活化截面<sup>[1]</sup>。后来, 国际核数据中心组织了国际合作研究项目 (CRP), 这四个反应是这个项目中的部分内容。北京原子能研究院卢涵林和我们是 CRP 参加者之一。另外这些截面值对检验统计模型在描述远离  $\beta$  稳定线的核 (n, 2n) 反应的适用性方面也是很有用的。由于以上四个反应的产物核半衰期都很长 ( $^{150\text{m}}\text{Eu}$  是 35.8 年,  $^{152}\text{Eu}$  是 13.3 年,  $^{158}\text{Tb}$  是 180 年,  $^{108\text{m}}\text{Ag}$  是 127 年), 所以一般中子源照射产生的剩余核的活性很低, 也很难测量。关于 Eu 的两个反应公开发表的数据只有两篇文章<sup>[2,3]</sup>; 关于  $^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$  反应也只有两篇文献给出了在 14.8MeV 中子能量点的测量值<sup>[3,4]</sup>; 对  $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108\text{m}}\text{Ag}$  反应直到 1989 年才有了测量数据<sup>[5-7]</sup>。为了进一步确定这四个反应的截面值, 我们在兰州大学强流中子发生器上用活化法测量了在 13.5—14.8MeV 中子能区  $^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150\text{m}}\text{Eu}$ 、 $^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$ 、 $^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$  和  $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108\text{m}}\text{Ag}$  四个反应的截面。

## 二、实验过程

### 1. 样品照射

本文 1991 年 6 月 26 日收到。

实验工作是在兰州大学 ZF-300-II 强流中子发生器上进行的。以  $T(d, n)^4\text{He}$  作中子源, 平均氘束能量  $\bar{E}_d = 125\text{keV}$ , 束流强度  $I_d$  约 20mA, 氘靶厚约  $0.9\text{mg}/\text{cm}^2$ , 中子产额变化用铀裂变室监督, 中子产额为  $(1-3) \times 10^{12}$  中子/秒。在与入射氘束成  $0^\circ-140^\circ$  角之间放置样品, 样品距中子源 5—28cm。照射时间, Ag 为 7.36 小时, Eu 和 Tb 为 6.6 小时。以  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$  反应截面作为中子注量标准测量样品靶核的反应截面, 标准截面值取自文献[8]。铌和银是天然同位素丰度的金属圆片, 直径为 20mm。铌的厚度为 0.1—1mm, 纯度为 99.99%。银的厚度为 0.45mm, 纯度为 99.9%。Eu 和 Tb 样品均为氧化物粉末 ( $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tb}_2\text{O}_3$ ) 压成的直径为 20mm, 厚度为 0.3—1.2mm 的圆片。氧化铌的纯度为 99.9%, 氧化铈的纯度为 99.95%。每个样品夹在两个监督铌片之间, Eu 和 Ag 样品还包有 1mm 厚的锡皮以减少  $(n, \gamma)$  的影响。样品处的中子能量是用铌箔截面比的方法测定的。

## 2. $\gamma$ 放射性测量

反应产物的  $\gamma$  放射性用国产 CH8403 同轴高纯锗  $\gamma$  探测器测量。探测器相对效率为 20%, 能量分辨为 3 keV (对 1.33MeV  $\gamma$  射线)。对探测器的绝对  $\gamma$  探测效率进行了精确刻度。刻度源为美国国家标准局生产的 SRM4275 (Standard Reference Material 4275) 型标准点源。刻度方法见文献[9]。标准源的误差小于 1%, 估计我们在 2cm 处所定的效率误差小于 1.5%。在计算反应截面时用到的核数据来自文献[10], 其值如下表所示:

表 1 用到的核数据

反 应 道	靶核丰度	剩余核半衰期	被测 $\gamma$ 能量 (keV)	$\gamma$ 发射率
$^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$	100%	10.15 天	934.5	99%
$^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150m}\text{Eu}$	47.8%	35.8 年	333.93	94%
$^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$	52.2%	13.33 年	1408.0	20.8%
$^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$	100%	180 年	944	43.3%
$^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108m}\text{Ag}$	48.16%	127 年	433.9	90.5%

在计算  $\gamma$  放射性活度时, 对中子注量波动、 $\gamma$  射线在样品中的自吸收、级联  $\gamma$  的符合加合效应及测量几何等进行了校正。

## 三、实验结果和讨论

所测反应截面的计算公式如下:

$$\sigma_s = \frac{[\varepsilon I_\gamma \eta K g M D]_s \cdot [\lambda A F C]_s}{[\varepsilon I_\gamma \eta K g M D]_m \cdot [\lambda A F C]_m} \cdot \sigma_m \quad (1)$$

下标  $s$  表示被测样品的有关参数,  $m$  表示监督标准的有关参数, 各参数符号的意义为:  $\varepsilon$  是探测器对所测特征  $\gamma$  射线全能峰效率;  $I_\gamma$  是特征  $\gamma$  射线强度;  $\eta$  是所测核素的丰度;  $g = 1 - e^{-\lambda T}$  表示剩余核的生长因子,  $\lambda$  为衰变常数;  $T$  是全部中子照射时间;  $M$  是样品质量;  $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$  为测量收集因子,  $t_1$  和  $t_2$  分别表示从停止照射到开始测

量和到测量结束的时间间隔； $A$  是样品元素的原子量； $C$  是实测的全能峰面积； $F$  是总的  $\gamma$  活度校正因子， $F = f_s \cdot f_c \cdot f_g$ ， $f_s, f_c, f_g$  分别是  $\gamma$  射线在样品中自吸收校正因子、级联  $\gamma$  符合加合校正因子和测量校正因子； $K$  是中子注量波动校正因子，其表达式为：

$$K = \left[ \sum_{i=1}^l \phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i} \right] / \Phi g, \quad (2)$$

其中  $l$  是将照射时间分成的段数； $\Delta t_i$  为每段的时间间隔； $T_i$  为第  $i$  段时间结束到照射结束的时间间隔； $\phi_i$  和  $\Phi$  分别为在  $\Delta t_i$  和  $T$  内入射到样品上的平均中子通量。我们的测量结果见表 2。

表 2 测量结果

中子能量 (MeV)	13.54±0.05	13.72±0.06	14.35±0.09	14.60±0.11	14.80±0.11
反应截面 (mb)					
$^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150m}\text{Eu}$	1227±47	1238±48	1165±44	1168±44	1170±44
$^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$	1469±117	1467±113	1502±118	1496±118	1596±118
$^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$		2077±277	2144±112	1909±85	1922±89

中子能量 (MeV)	13.64±0.05	13.79±0.06	14.03±0.07	14.33±0.09	14.60±0.11	14.80±0.11
反应截面 (mb)						
$^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108m}\text{Ag}$	223±7	223±18	227±20	224±8	232±8	236±7

测量结果中给出的误差主要包括标准截面的误差 1.0—2.0%，计数统计误差 0.5—11.7%，探测效率误差 1.5%，样品称重误差 0.5%，自吸收校正误差 1%，级联  $\gamma$  符合加合修正误

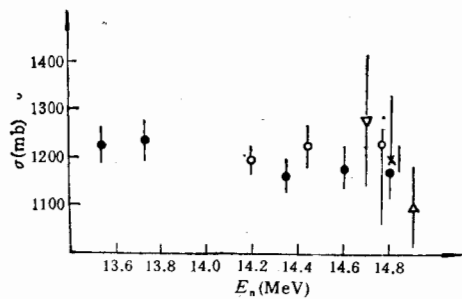


图 1  $^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150m}\text{Eu}$  反应截面与中子能量关系

● 本文 ▽ 文献[3] △ 文献[7] × 文献[2] ○ 文献[5]

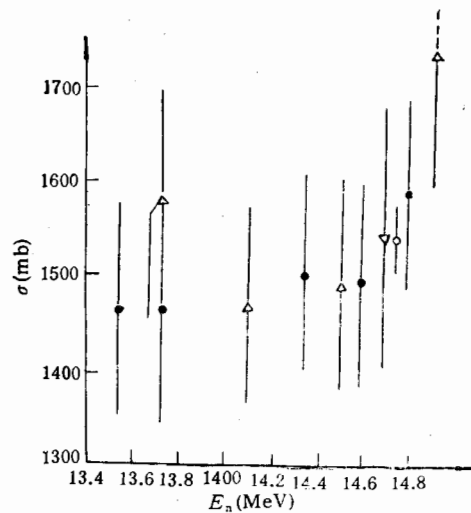


图 2  $^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$  反应截面与中子能量的关系

● 本文 ○ 文献[5] ▽ 文献[3] △ 文献[7]

差2%,测量几何修正误差1%,中子注量波动修正误差1—2%和用铈镨截面比确定中子能量的误差0.4%。关于 $^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150m}\text{Eu}$ 反应,数据都列在图1中。从图可看出我们的数据与文献[2,5]符合很好。文献[3]稍偏高,文献[7]稍偏低,但在统计误差范围内是一致的。关于 $^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$ 反应,我们和其他作者的数据结果比较如图2所示。我们的结果与文献[3,5]符合比较好,与文献[7]在误差范围内也是一致的,文献[7]是用 $^{153}\text{Eu}$ 分

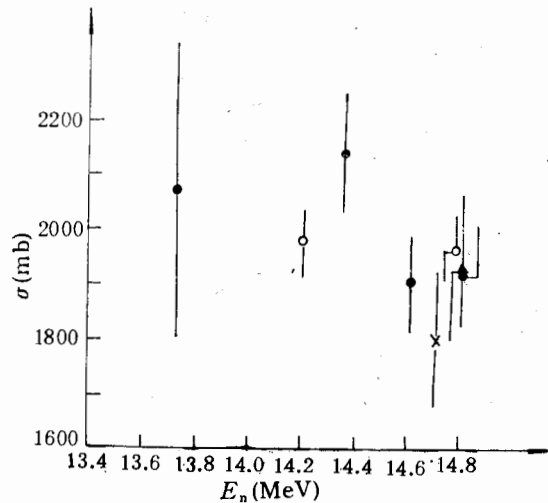


图3  $^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$  反应截面与中子能量的关系

●本文 ×文献[3] ▲文献[4] ○文献[5]

$^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108m}\text{Ag}$  反应截面测量时,我们考虑到 $^{107}\text{Ag}(n, \gamma)$  反应可能对这个测量产生影响。为了证明这一影响,我们进行了下述的实验:把一个100mci的Ra-Be中子源放在直径约100cm的石蜡慢化剂中使中子热化,并将Ag放在热中子场中长时间照射,然

分离同位素完成的。考虑到 $^{151}\text{Eu}(n, \gamma)^{152}\text{Eu}$ 对这个反应的影响,在照射时,样品包了镭。除此以外,对低能散射中子作了修正。关于 $^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$ 反应,我们的结果与其他人的结果如图3所示。我们的结果与文献[3—5]是符合的。文献[3]在14.7 MeV中子能量时给出 $1801 \pm 117\text{mb}$ 的测量值。这个值看来似乎小了些,因为它用的产物核的半衰期为150年,经过用180年半衰期校正后,它的截面值应该是 $2161 \pm 140\text{mb}$ ,比我们稍大一点。关于 $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108m}\text{Ag}$ 反应,从图4看出,我们的测量值与文献[5—7]的测量值是符合的。在进行

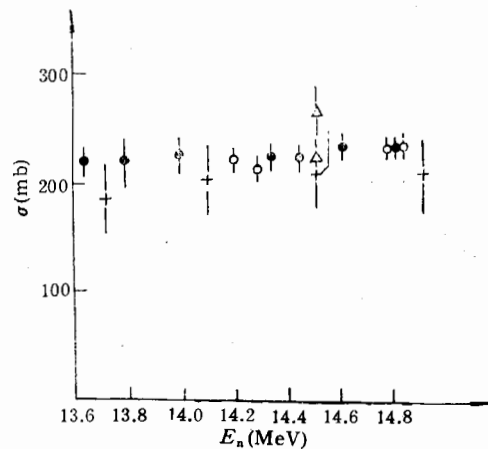


图4  $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108m}\text{Ag}$  反应截面与中子能量关系

●本文 ○文献[5] ▲文献[6] +文献[7]

后测量 Ag 片的活性, 结果发现 $^{109}\text{Ag}(n, \gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$  ( $T/2 = 250$  天) 的活性很强, 而没有发现 $^{107}\text{Ag}$  的 (n,  $\gamma$ ) 反应产物 $^{108\text{m}}\text{Ag}$  的活性。所以我们认为在进行 $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108\text{m}}\text{Ag}$  反应截面测量时,  $^{107}\text{Ag}(n, \gamma)^{108\text{m}}\text{Ag}$  的影响可以忽略。

作者对我校强流中子发生器研究组的同志为实验提供了可靠的中子流, 及北京原子能研究院卢涵林同志给予的许多帮助表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] E. T. Cheng, Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Mito, Japan, 30 May-3 June, 1988.
- [ 2 ] D. R. Nethaway, *Nuclear Physics*, **A190**(1972), 635—644.
- [ 3 ] S. M. Qaim, *Nuclear Physics*, **A229**(1974), 319—330.
- [ 4 ] R. J. Prestwood et al., *Physics Review*, **C30**(1984), 823—825.
- [ 5 ] Lu Hanlin et al., INDC(NDS)-232/L, p. 33.
- [ 6 ] J. Csikai et al., INDC(NDS)-232/L, p. 61.
- [ 7 ] M. V. Blinov et al., INDC(NDS)-232/L, p. 87.
- [ 8 ] Zhao Wenrong, Lu Hanlin, Yu Weixiang, Yuan Xianlin, INDC(CPR)-16, 1989.
- [ 9 ] 王永昌等, 高能物理与核物理, **14**(1990), 919.
- [10] E. Browne and R. B. Firestone, Table of Radioactive Isotopes, 1986.

## Measurement of Some (n, 2n) Reaction Cross Sections for Producing Long Half-Life Residues

WANG YONGCHANG YUAN JUNQIAN YANG JINGKANG KONG XIANGZHONG

REN ZHONGLIANG WANG HUAMIN

(Department of Modern Physics, Lanzhou University, 730001)

### ABSTRACT

Measurement of (n, 2n) reaction cross sections for some nuclides, whose residues have long half-lives, is described. The activation method relative to the  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  reaction cross section was used. The cross sections of the  $^{151}\text{Eu}(n, 2n)^{150\text{m}}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}(n, 2n)^{152}\text{Eu}$ ,  $^{159}\text{Tb}(n, 2n)^{158}\text{Tb}$  and  $^{109}\text{Ag}(n, 2n)^{108\text{m}}\text{Ag}$  reactions in the neutron energy range of 13.50—14.80 MeV were measured. The neutron energies in this experiment were determined by means of the method of cross section ratios for  $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89\text{m}+g}\text{Zr}$  and  $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  reactions. The results obtained were compared with other existing data.