

## $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ 反应截面测量

王永昌 袁俊谦 任忠良 王化民 杨景康 水永清

(兰州大学现代物理系)

项斯苍

(新疆师范大学物理系, 乌鲁木齐)

### 摘 要

本文报告了  $E_n = 13.6\text{—}14.8\text{MeV}$  中子能区用活化法以  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  截面为中子注量标准测得的  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  的反应截面。在中子能量为 13.64, 13.79, 14.03, 14.33, 14.60 和 14.80MeV 的截面值分别为  $58.3 \pm 3.1$ ,  $56.3 \pm 2.4$ ,  $53.4 \pm 2.0$ ,  $50.8 \pm 1.9$ ,  $48.4 \pm 1.7$  和  $47.4 \pm 1.7\text{mb}$ 。在文中还列举了一些作者的数据以作比较。中子能量是用铀铯截面比法测定的。

### 一、序 言

铜是 D-T 燃料聚变反应堆磁绕组的重要材料。因为从铜的这个主要反应  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  中产生的  $\alpha$  粒子对铜材料会有严重的损伤, 直接影响其机械强度。因此详细研究这个反应, 对于 D-T 聚变动力反应堆的安全运转具有特殊意义。另一方面, 这个反应的剩余核  $^{60}\text{Co}$  具有长的半衰期, 在反应堆的剂量学上常作为长期快中子注量监督器仍然是人们感兴趣的课题。在 14MeV 中子能区, 以前曾有许多人<sup>[1-14]</sup>测量过  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  的反应截面, 但大部分人只测了个别能量点的数据, 也有少数人测了几个点的数据, 这些现有的数据分散较大, 就拿用活化法所测的数据来看, 彼此之间约有 30% 之差。所以精确测量  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  的反应截面是十分有用的。为此, 我们用活化法测量了 13.6—14.8MeV 中子能区的  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  反应截面, 并和所收集到文献中的数据进行比较。

### 二、实验过程

#### 1. 样品照射

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  $\text{T}(d,n)^4\text{He}$  反应作中子源, 平均氘束能量  $\bar{E}_d = 125\text{keV}$ , 束流强度  $I_d \approx 20\text{mA}$ , 氘-钛靶厚度约为  $0.9\text{mg/cm}^2$ , 中子产额变化用铀裂变室监督, 中子产额为  $(1\text{—}3) \times 10^{12}$  中子/秒。在与入射氘束方向成  $0^\circ\text{—}130^\circ$  之间放置样品, 照射时间 6 小时。以  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  反应截面作为标准, 测量  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  的反应截面。铜和铝均用天然样品, 其直径均为 20mm 的圆片, 厚度分别为 0.45mm 和 0.1mm, Cu 和 Al 样品的纯度分别为 99.99% 和 99.999%,

每组样品的铜片分别夹在两铝片之间。把六组样品安置在距中子源中心为 10cm—28cm 的六个中子能量处。这六处的中子能量用铈钴截面比的方法<sup>[15,16]</sup>测定。这六处的中子能量分别为 13.64, 13.79, 14.03, 14.33, 14.60 和 14.80MeV。

## 2. $\gamma$ 放射性测量

$^{60}\text{Co}$  和  $^{24}\text{Na}$  的  $\gamma$  放射性用国产 CH8403 同轴高纯锗  $\gamma$  探测器测量, 其相对效率为 20%, 能量分辨率为 3keV(1.33MeV)。对探测器的  $\gamma$  探测效率进行了精确刻度。首先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, 进行该处的绝对探测效率刻度, 得出绝对刻度曲线。由于在实际测量时, 样品是放在距晶体 2cm 处, 所以用一组单能源分别先后放在 20cm 和 2cm 处测量出这两个位置处各条  $\gamma$  射线的效率比, 然后从这些不同能量的效率比和上述 20cm 的绝对效率刻度曲线, 计算得 2cm 处的绝对效率刻度曲线。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%。实验中所测的  $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$  和  $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$  的两个反应道的靶核丰度分别是 100%、69.17%, 剩余核的半衰期分别是 14.659 小时和 5.271 年,  $\gamma$  射线能量为 1368.598keV 和 1332.501keV 的  $\gamma$  强度分别是 100% 和 99.98%。这些数据取自文献[17]中。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  $\gamma$  符合效应及测量几何等进行了校正。

## 三、实验结果

截面的计算公式如下:

$$\sigma_{\text{Cu}} = \frac{[\varepsilon I_{\gamma} \eta K S M D]_{\text{Al}} \cdot [\lambda A F C]_{\text{Cu}}}{[\varepsilon I_{\gamma} \eta K S M D]_{\text{Cu}} \cdot [\lambda A F C]_{\text{Al}}} \cdot \sigma_{\text{Al}}$$

其中  $\varepsilon$  为所测的特征  $\gamma$  射线全能峰效率;  $I_{\gamma}$  ——特征  $\gamma$  射线的强度;  $\eta$  ——所测核素的丰度;  $S = 1 - e^{-\lambda T}$  表示剩余核的生长因子;  $\lambda$  为衰变常数,  $T$  是总的中子照射时间;  $M$  ——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;  $A$  ——样品元素的原子量;  $C$  ——实测的全能峰面积;  $F$  ——总  $\gamma$  活度校正因子, 铝的为 1.016, 铜的为 1.051, 其中主要包括  $\gamma$  射线在样品中的自吸收校正, 级联  $\gamma$  符合效应校正和几何校正等;  $K$  ——中子注量波动校正因子, 铝的为 1.233, 铜的为 1.000, 其表达式为:

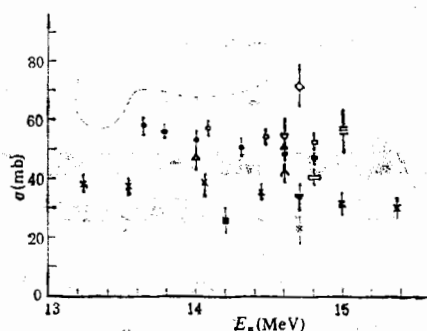
$$K = \left[ \sum_{i=1}^l \phi_i (1 - e^{-\lambda \Delta t_i}) e^{-\lambda T_i} \right] / \Phi S$$

其中  $l$  ——将照射时间分成的段数;  $\Delta t_i$  为每段的时间间隔;  $T_i$  第  $i$  段时间结束到照射结束的时间间隔;  $\phi_i$  为在  $\Delta t_i$  内入射到样品上的平均中子通量;  $\Phi$  为在  $T$  时间内入射到样品上的平均中子通量。表 1 是本文所测量的  $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$  的反应截面数据。 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$  反应截面数据是取自文献[18]。实验误差主要来自标准截面误差 1.5—3%, 统计误差 0.5—1.1%,  $\gamma$  相对效率误差 0.7%, 称重误差 0.15%, 自吸收校正误差 1%, 级联符合校正误差 1% 以及用铈钴截面比确定中子能量的误差 0.4% 等。图 1 上绘出了本

表 1 测量的  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  截面

中子能量 (MeV)	$13.64 \pm 0.05$	$13.79 \pm 0.06$	$14.03 \pm 0.07$	$14.33 \pm 0.09$	$14.60 \pm 0.11$	$14.80 \pm 0.11$	
参考截面 (mb)	$125.6 \pm 4.0$	$122.7 \pm 1.7$	$122.2 \pm 1.7$	$119.1 \pm 1.7$	$114.6 \pm 1.6$	$112.3 \pm 1.3$	
截面 (mb)	I	$58.3 \pm 3.1$	$56.3 \pm 2.4$	$53.4 \pm 2.0$	$50.8 \pm 1.9$	$48.4 \pm 1.7$	$47.4 \pm 1.7$
	II	$58.9 \pm 3.1$	$57.3 \pm 2.4$	$54.2 \pm 2.0$	$51.6 \pm 1.9$	$49.3 \pm 1.7$	$48.0 \pm 1.7$
	III	$59.1 \pm 3.1$	$57.3 \pm 2.4$	$54.3 \pm 2.0$	$51.9 \pm 1.9$	$49.6 \pm 1.7$	$48.4 \pm 1.7$

文和收集到的其他作者的数据. 从图 1 可知, 在 13.64—14.80 MeV 中子能区,  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  的反应截面随中子能量的增加而减小, 这和文献[14]的数据和走向是一致的, 比文献[4]高出 30% 左右.

图 1  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  反应截面测量值

- 文本
- △ Czapp and Vonach (60)
- \* Kantele and D.G. Gard (62)
- ◇ Irfan and Jach (63)
- × H. Liskien and A. Paulsen (67)
- ▼ A. Paulsen (67)
- ▲ C. Barrall (68) and Kayashima (79)
- ▽ G.N. Maslov (72)
- M. Bormann (72)
- ≡ M. Grimes (77)
- G. Winkler (78) and Artem'ev (80)
- △ Garuska (80)
- Lu Hanlin (89)

在利用铝的  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  反应截面作标准时, 前人采用的  $^{24}\text{Na}$  的半衰期在 14.96—15.02<sup>[19]</sup> 小时之间, 而本文根据文献 [17] 采用的  $^{24}\text{Na}$  的半衰期为 14.659 小时比之采用 14.96—15.02 小时所计算的  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  的反应截面小 1—3%, 表 1 中所标的 I、II 和 III 分别表示用 14.659、14.96 和 15.02 小时所计算的  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  的截面值.

我校强流中子发生器研究组的同志为本实验提供了可靠的中子流, 原子能研究院的卢涵林同志对本文提出了宝贵意见, 对他们表示衷心的感谢.

## 参 考 文 献

[1] Czapp and Vonach, Anz. Österr. Akad. Wiss., Math. Naturw. Kl., 97 (1960), 13.

- [ 2 ] Kantele and D. G. Gardner, *Nucl. Phys.*, **35**(1962), 353.  
 [ 3 ] Irfan and Jack, *Proc. Phys. Soc.*, **81**(1963), 808.  
 [ 4 ] H. Liskien and A. Paulsen, *Nucl. Phys.*, **63**(1965), 393, also, A. Paulsen, *Nukleonik*, **10**(1967), 91.  
 [ 5 ] A. Paulsen, *Z. Phys.*, **205** (1967), 226.  
 [ 6 ] C. Barrall et al., AFWL-TR-68-134 (AD-686453).  
 [ 7 ] G. N. Maslov et al., *Yad. Konstanty*, **9**(1972), 50.  
 [ 8 ] M. Bormann et al., *Nucl. Phys.*, **A186** (1972), 65.  
 [ 9 ] M. Grimes et al., *Bull. Am. Phys. Soc.*, **22**(1977), 631.  
 [10] G. Winkler, *Nucl. Sci. and Eng.*, **67**(1978), 260.  
 [11] Kayashima et al., *NEANDC (J) -61U*, **94** (1979).  
 [12] Garuska et al., *INR-1871/1/PL/A*, **15** (1980).  
 [13] Artem'ev, *J. Sov. Atom. Energy*, **49** (1980), 195.  
 [14] Lu Hanlin, Private communication, (1989).  
 [15] V. E. Lewis and K. J. Zieba, *Nucl. Instr. and Meths.*, **174** (1980), 141.  
 [16] V. E. Lewis, *Metrologia*, **20** (1984), 49.  
 [17] E. Browne and R. B. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes*, (1986).  
 [18] S. Tagesen and H. Vonach, *Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements Technical Reports Scies No. 227 P-6 IAEA Vienna*, (1983).  
 [19] C. M. Lederer and V. S. Shirley, *Table of Isotopes*(1978).

## THE CROSS SECTION MEASUREMENT FOR THE $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ REACTION

WANG YONGCHANG    YUAN JUNQIAN    REN ZHONGLIANG

WANG HUAMIN    YANG JINGKANG    SHUI YONGQING

(Department of Modern Physics, Lanzhou University)

XIANG SICANG

(Department of Physics, Xingjiang Normal University)

### ABSTRACT

The cross sections for  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  have been measured by using the activation method relative to the cross sections of  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  in the neutron energy range of 13.6—14.8 MeV. The values of  $58.3 \pm 3.1$ ,  $56.3 \pm 2.4$ ,  $53.4 \pm 2.0$ ,  $50.8 \pm 1.9$ ,  $48.4 \pm 1.7$ ,  $47.4 \pm 1.7$  mb, were obtained at the 13.64, 13.79, 14.03, 14.33, 14.60, and 14.80 MeV neutron energies, respectively. The results are compared with the published data. The neutron energies were determined by activity ratios of Nb and Zr foils.