

$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反应截面测量

王永昌 任忠良 袁俊谦 杨景康

(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 $E_n = 13.6-14.8\text{MeV}$ 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 $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ 的反应截面。在 E_n 为 13.64, 13.79, 14.03, 14.33, 14.60, 14.80MeV 处的截面分别为 184.4 ± 12.2 , 178.8 ± 10.5 , 171.4 ± 10.3 , 161.9 ± 9.6 , 157.0 ± 9.3 , $147.5 \pm 8.9\text{mb}$ 。在文章中还列举了所能收集到的一些作者的数据以作比较。中子能量是用铀锆截面比法测定的。

一、序 言

镍是用于建造聚变反应堆不可缺少的合金成分, 它的同位素 ^{60}Ni 在 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反应中所产生的 p, 进而形成的 H_2 , 对于 D-T 聚变反应堆的安全运转具有特殊意义, 在研究中子辐射损伤机制时必须考虑到。 $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ 反应是具有长寿命剩余核的重要阈反应, 它在反应堆剂量学上是一个长期的中子剂量监督器。所以研究 $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ 反应对现行反应堆和将来聚变反应堆的设计和建造都是有用的。在 14MeV 中子能区有许多人^[1-15]测量了 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 的反应截面, 除文献[4]以外, 其他人只测了个别能量点的数据, 但数据分散较大, 相差高达 35% 左右。这是因为 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反应中产生的 ^{60}Co 的半衰期长, 活度小, 在弱中子源的情况下, 为了产生可测的活性, 只有对所测样品进行长时间中子照射或者采用大质量样品, 或者长时间进行 γ 活性测量。再因在镍的天然样品中同位素多, 中子反应道也多, 多条 γ 射线的互相干扰, 使 ^{60}Co 的活度难以精确测定。本实验是在 3×10^{12} 中子/秒中子源上活化小质量样品, 测量了 $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ 反应截面, 力求提高测量的精度, 并和所能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 0.9mg/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. 在与入射氘束方向成 $0^\circ-130^\circ$ 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 $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ 的反应截面. 镍和铝均用天然样品, 其直径均为 20mm 的圆片, 厚度分别为 $0.4-1.5\text{mm}$ 和 0.1mm , Ni 和 Al 样品的纯度分别为 99.99% 和 99.999% , 每组样品的镍片分别加在两铝片之间. 把六组样品安置在距中子源中心为 $10\text{cm}-28\text{cm}$ 的六个中子能量处. 这六处的中子能量用铈钨截面比的方法^[16,17]测定, 它们分别为 13.64 , 13.79 , 14.03 , 14.33 , 14.60 和 14.80MeV .

2. γ 放射性测量

^{60}Co 和 ^{24}Na 的 γ 放射性用国产 CH8403 同轴高纯锗 γ 探测器测量, 其相对效率为 20% , 能量分辨率为 $3\text{keV}(1.33\text{MeV})$. 对探测器的 γ 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 γ 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, 计算得到 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 $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ 的两个反应道的靶核丰度分别是 100% 、 26.1% , 剩余核的半衰期分别是 14.659 小时和 5.271 年, γ 射线能量 1368.598keV 和 1332.501keV 的 γ 强度分别是 100% 和 99.98% . 这些数据取自文献[18]中. 在计算 γ 放射性活度时, 对中子注量波动, γ 射线在样品中的自吸收, 级联 γ 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:

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

其中 ε ——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 ——所测核素的丰度; $S = 1 - e^{-\lambda T}$ 表示剩余核的生长因子; λ 为衰变常数, T 是全部中子照射时间; m 为样品质量; $D = e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}$ 为测量收集因子, t_1 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 为样品元素的原子量; C 为实测的全能峰面积; F 为总 γ 活度校正因子, 铝的为 1.020 , 镍的为 $1.060-1.115$, 其中主要包括 γ 射线在样品中的自吸收校正, 级联 γ 符合效应校正和几何校正等; K 为中子注量波动校正因子, Al 的为 1.233 , Ni 的为 1.000 , 其表达式为:

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

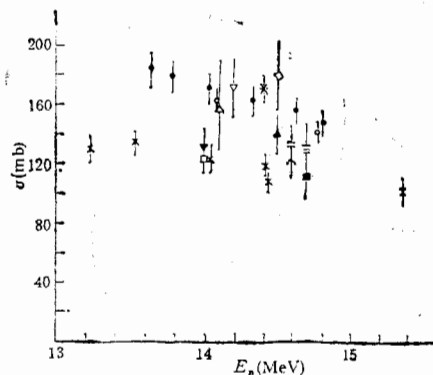
其中 l 为将照射时间分成的段数; Δt_i 为每段的时间间隔; T_i 为第 i 段时间结束到照射

结束的时间间隔; ϕ_i 为在 Δt_i 内入射到样品上的平均中子通量。表 1 是本文所测量的 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 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[19]。实验误差主要来自标准截面误差 1.5—3%, 统计误差 0.6—1.5%, γ 相对效率误差 0.7%, 称重

表 1 测量的 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 截面

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
参考截面 (mb)	125.6±4.0	122.7±1.7	122.2±1.7	119.1±1.7	114.6±1.6	112.3±1.3
截面 (mb)	184.4±12.2	178.8±10.5	171.4±10.3	161.9±9.6	157.0±9.3	147.5±8.9

误差 0.15%, 自吸收校正误差 1%, 级联符合校正误差 1%, 用铈铅截面比法确定中子能量的误差 0.4% 以及波动因子误差 5% 等。图 1 上绘出了本文和已收集到的其他人的数据。从图可知, 在 13.64—14.80 MeV 中子能区, 本文所测的 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 的反应截面数据随中子能量的增加而减小, 和文献[1, 8, 9, 15]的数据在误差范围内是一致的, 比文献[4, 10, 11, 12, 13, 14]的数据偏高, 比文献[4]中的数据系统高出 25% 左右。在 60 年代初期文献[4]的作者所测的 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面数据似乎比之 80 年代所公布的数据[19]约低 30%。文献[4]中的 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 反应截面数据是 1965 年发表的, 比本文所测的数据系统偏低, 估计是与所取的 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反应标准截面有关。在利用 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反应截面作标准截面时, 前人采用的 ^{24}Na 的半衰期在 14.96—15.02[20] 小时之间, 而本文根据文献[18]采用的 ^{24}Na 的半衰期为 14.659 小时, 比之采用半衰期为 14.96—15.02 小时所计算的 $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 的反应截面小 1—3%。

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

- 本文
- △ R.S. Stoyey, 1960
- D.L.Allan, 1961 and
A. Panlsen, 1967
- ◇ W.G. Cross, 1962
- × H.Liskien, 1965
- ▲ D.G.Gardner, 1967
- ▼ J.D.Hemigway, 1973
- ▽ G.N. Maslov, 1974
- * V.H.Weigel, 1975
- S.M.Gaim, 1977
- ≡ E.W.Lees, 1979, and
B.M.Bahal, 1985
- == Katsya Fukuga, 1982
- ^ N.I.Molla, 1986
- Lu Hanlin, 1989

我校强流中子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] R. S. Stoyey et al., *Proc. Phys. Soc.*, **A75** (1960), 526.
- [2] D. L. Allan, *Nucl. Phys.*, **24**(1961), 274.
- [3] W. G. Cross et al., *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **7**(1962), 335.
- [4] H. Liskien and A. Paulsen, *Nucl. Phys.*, **63**(1965), 393.
- [5] A. Paulsen, *Z. Physik*, **205**(1967), 226.
- [6] D. G. Gardner and S. Rosenblum, *Nucl. Phys.*, **A96** (1967), 121.
- [7] J. D. Hemigway, *J. Nucl. Energy*, **27** (1973), 241.
- [8] G. N. Maslov, INDC (ccp)-42/v(2), (1974).
- [9] V. H. Weigel et al., *Radichimica Acta*, **22** (1975), 11.
- [10] S. M. Gaim and N. I. Molla, *Nucl. Phys.*, **A283** (1977), 269.
- [11] E. W. Lees, AERE-R 9390, **6**, (1979).
- [12] B. M. Bahal, GKSS-85/E/11, (1985).
- [13] Katsya Fukuga et al., *Bull. Inst. Chem. Kyoto Univ.*, **60** (1982), 208.
- [14] N. I. Molla, INDC (BAN)-003/62, (1986).
- [15] Lu Hanlin, Private communication, (1989).
- [16] V. E. Lewis and K. J. Zieka, *Nucl. Instr. and Mechs.*, **174** (1980), 141.
- [17] V. E. Lewis, *Metrologia*, **20** (1984), 49.
- [18] E. Browne and R. B. Firstone, Table of Radioactive Isotopes, (1986).
- [19] S. Tagesen and H. Vonach, Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements Technical Reports Series No. 227, P-6 IAEA Vienna, (1983).
- [20] C. Michel Lederer and V. S. Shirley, Table of Isotopes, (1978).

THE CROSS SECTION MEASUREMENT FOR THE $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ REACTION

WANG YONGCHANG REN ZHONGLIANG

YUAN JUNQIAN YANG JINGKANG

(Department of Modern Physics, Lanzhou University)

XIANG SICANG

(Department of Physics, Xingjiang Normal University)

ABSTRACT

The cross sections for $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$ 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 184.4 ± 12.2 , 178.8 ± 10.5 , 171.4 ± 10.3 , 161.9 ± 9.6 , 157.0 ± 9.3 , 147.5 ± 8.9 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 and to be published data of several authors. The neutron energies were determined by the method of cross section ratios for the reactions $^{90}\text{Zr}(n,2n)^{89m+g}\text{Zr}$ by $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$.