

用 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 和 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 反应的截面比定平均中子能量

袁俊谦 王永昌 仇九子
王化民 任忠良 杨景康
(兰州大学物理系)

摘 要

本文叙述了用两个硅半导体探测器和 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 与 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 反应截面比定 D-T 中子的平均能量的方法, 得到了该截面比与中子能量的关系曲线并与所引文献中的结果进行了比较。

一、前 言

在研究 D-T 中子引起的核反应时, 确切知道打在样品上的中子的平均能量是非常重要的。中子能量可用核反应运动学关系计算, 但 D-T 反应出射的中子能量不仅决定于反应的运动学参数, 而且与氘-钛靶的状态有关。靶中氘的分布和氘的平均作用能还随靶的历史变化, 何况在平面中子源的条件下要利用反应运动学公式以中子发射角计算中子能量是难以准确的。通常每进行一次核反应实验都需同时实验测定样品上的平均中子能量。实验测定中子能量一般采用飞行时间法、伴随粒子法以及利用硅探测器的硅的 (n, α) 反应法等。这些方法似乎对强流、旋转靶和中子源距样品较近的条件下均不能得到满足, 因此近几年有人提出利用两个核反应截面比的方法确定平均中子能量。现在国际上公认利用 $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{87m+g}\text{Zr}$ 和 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92m}\text{Nb}$ 的反应截面比^[1,2] 确定平均中子能量是较好的。因为在 13.3—15.0MeV 中子能区, ^{90}Zr 的 (n, 2n) 反应的激发函数变化陡峭而 ^{93}Nb 的 (n, 2n) 反应的激发函数是平坦的, 所以它们的比在这一能区对中子能量的变化是灵敏的。也有人曾用 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58m+g}\text{Co}$ 和 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 反应截面比确定平均中子能量^[3,5], 因为在 13.3—15.0MeV 中子能区 ^{58}Ni 的 (n, p) 反应的激发函数随能量增大而减小, 而 ^{58}Ni 的 (n, 2n) 反应的激发函数随能量的增大而增大, 它们的截面比随中子能量的增加近似于指数减小如图 1 所示^[5]。因 Zr 和 Nb 的价格昂贵且每一个测量点至少需两个样品。如果用 Ni 的两个反应截面比定中子能量, Ni 要比 Nb 和 Zr 便宜得多, 每一测量点仅有一个样品。 $^{58m+g}\text{Co}$ 和 ^{57}Ni 的半衰期适中、发射 γ 射线的能

量便于测量、截面比随能量变化更灵敏。为了长期在 10^{12} n/秒强流中子源上开展工作我们尝试了用 ^{58}Ni 的两个反应截面比定平均中子能量的技术。本实验是在兰州大学 150 kV 中子发生器上,用两个硅半导体探测器测量了 Ni 样品处的中子平均能量,同时 Ni 片给出两个反应截面比,由此可以给出截面比与中子能量的关系曲线。

二、 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m,g}\text{Co}$ 和 $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ 反应截面比 的测量

中子源为 150kV 中子发生器的 $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 反应的中子,中子产额为 10^9 n/秒,入射氦束平均能量为 70keV,氦-钛靶厚度 $0.47\text{mg}/\text{cm}^2$ 。把六个纯镍样品分别放在与入射氦束成 0° 、 40° 、 60° 、 96° 、 110° 和 130° 的方向上照射。样品和中子源的距离为 10cm,样品的直径为 2cm。在每一个测量角上尽量使硅半导体探测器、样品和中子源保持在一条直线上。反应产物 ^{58}Co 的半衰期为 70.916₅ 天, E_γ 为 810.8keV, I_γ 为 99.53%; ^{57}Ni 的半衰期为 1.503₄ 天, E_γ 为 1377.6keV, I_γ 为 77.9₁₆%^[6]。用高纯锗 γ 谱仪测量 ^{58}Co 和 ^{57}Ni 的 810.8keV 和 1377.6keV 的 γ 射线活度。由于 ^{58m}Co 的半衰期为 9.2 小时,所以 ^{58}Co 样品的冷却时间为 50 小时。在计算 ^{58}Co 和 ^{57}Ni 的活度时对 $+\beta$ 的湮灭辐射、级联 γ 射线和所测 γ 射线的符合加合效应及样品的自吸收进行了修正。

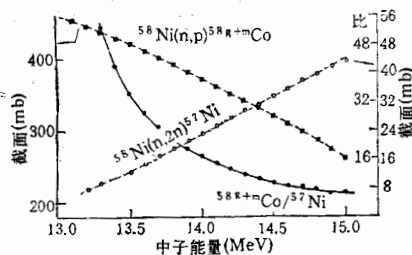


图1 在 13.3—15.0MeV 中子能区
 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m,g}\text{Co}$ 和 $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$
的激发函数和它们的比

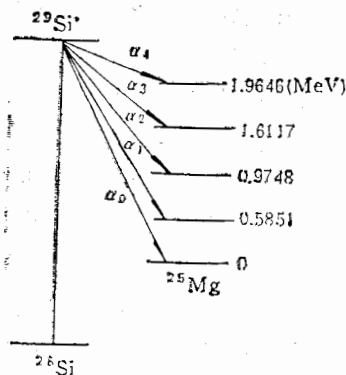


图2 $^{28}\text{Si}(n,\alpha)^{25}\text{Mg}$ 反应纲图

三、平均中子能量的测量

平均中子能量是通过 GM-8 型金硅面垒半导体探测器进行的。快中子作用于硅探测器的硅上产生 $^{28}\text{Si}(n,\alpha)^{25}\text{Mg}$ 反应,其反应纲图如图 2 所示。该反应产生的轻、重带电粒子 (α 和 ^{25}Mg) 同时被探测器探测,反应的 Q 值已被精确测定,根据能量守恒定律,此带电粒子的能量即反映了入射中子的能量。所以用刻度过的谱仪通过对 $^{28}\text{Si}(n,\alpha)^{25}\text{Mg}$ 反应产生的 α 谱的分析就可得到入射中子的能量。从反应运动学推得入射氦束在 10keV 到 160keV 范围内在实验室系统在与氦束为 96° 角方向的中子能量几乎为一个常数,其值为 14.011MeV ^[7],又因为 α_0 与 α_4 的 Q 值之差 ΔQ 为 1.9646MeV ,所以谱仪每道的刻度能量为 $\Delta Q/(C_0 - C_4)$, C_0 和 C_4 分别为多道上所测的 α_0 和 α_4 的峰位道数。这样, θ 角的中子能量可以用下式求出

$$E_n(\theta) = E_n(96^\circ) + \Delta Q(C'_0 - C_0)/(C_0 - C_4),$$

其中 C'_0 是在 θ 角度处所测的 α_0 峰位的道数, C_0 , C_4 为 96° 方向测得的 α_0 和 α_4 峰

位的道数。

为了方便,我们用了两个同型号的硅半导体探测器同时测量中子所产生的 α 谱,其中一个固定在与入射氘束成 96° 角的方向,另一个放在 θ° 。考虑到两个探测器能量响应的差别以及其他因素引起的零道位置和能量刻度的不同,用下式将一个探测器测得的 α_0 峰位道数换到另一个探测器上相应峰位的道数

$$C_{10} = \frac{K_2}{K_1} C_{20},$$

其中 K_1 、 K_2 分别为 1 号和 2 号探测器的刻度能量(每道能量值), C_{10} 和 C_{20} 分别为 1 号和 2 号探测器所测的同一个 α_0 经过零道位校正后的峰位道数。

四、结果和讨论

下表是在 0° 、 40° 、 60° 、 96° 、 110° 和 130° 方向测得的平均中子能量 $\bar{E}_n(\theta)$ 、 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58\text{m}}\text{Co}$ 和 $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$ 反应截面比 R 以及由截面比确定的平均中子能量 $\bar{E}_n(R)$ 。

数据表

角度 θ	$\bar{E}_n(\theta)$ (MeV)	截面比 R	$\bar{E}_n(R)$ (MeV)	$\bar{E}_n(R)'$ (MeV)
0°	14.67 ± 0.02	8.00 ± 0.45	14.67 ± 0.05	14.71 ± 0.06
40°	14.53 ± 0.02	9.47 ± 0.41	14.52 ± 0.04	14.53 ± 0.05
60°	14.37 ± 0.02	11.32 ± 0.68	14.37 ± 0.06	14.34 ± 0.06
96°	14.01 ± 0.02	16.88 ± 0.94	14.03 ± 0.05	13.98 ± 0.05
110°	13.85 ± 0.02	21.41 ± 1.25	13.83 ± 0.05	13.80 ± 0.04
130°	13.67 ± 0.02	25.62 ± 1.62	13.68 ± 0.06	13.68 ± 0.04

用探测器测得的平均中子能量 $\bar{E}_n(\theta)$ 的不确定性包括 α_0 峰位的不确定性为 $\pm 19\text{keV}$, 96° 角的不确定性为 $\pm 10\text{keV}$, ^{25}Mg 反冲核能量亏损引起的不确定性为 $\pm 5\text{keV}$, $^{28}\text{Si}(n, \alpha_0)^{25}\text{Mg}$ 反应截面引起的不确定性为 $\pm 2\text{keV}$, Q 值的误差 $\pm 0.6\text{keV}$ 。所以所测的平均中子能量 $\bar{E}_n(\theta)$ 的不确定性为 $\pm 22\text{keV}$ 。截面比的误差中包括了 γ 射线计数的统计误差、探测器效率误差、自吸收校正及级联 γ 符合校正的误差等。用截面比定的平均中子能量的误差包括了用硅探测器测量中子能量的不确定性和截面比误差的不确定性。我们还在同样中子能量点同时照射 Ni、Zr 和 Nb 样品,实验证明用 Ni 的两截面比定出的平均中子能量与用 Zr 和 Nb 截面比确定的平均中子能量相差仅小于 1%。

在文献 [5] 中,收集了前人在各个中子能量点的 ^{58}Ni 的 (n, p) 、 $(n, 2n)$ 反应截面的数据,编评出他们所测的截面、截面比和中子能量的关系表。从他们的表上计算出本文测得的截面比对应的平均中子能量 $\bar{E}_n(R)'$ 也列在本文数据表的最后一栏,以便比较。由此看出我们的结果与文献 [5] 的结果在误差范围内是完全一致的。

在图 3 中把我们的结果和文献 [3, 8] 的结果也作了比较,在误差范围内基本上是一致的。所以我们认为用 ^{58}Ni 的 (n, p) 、 $(n, 2n)$ 两个反应的截面比确定中子能量的方法

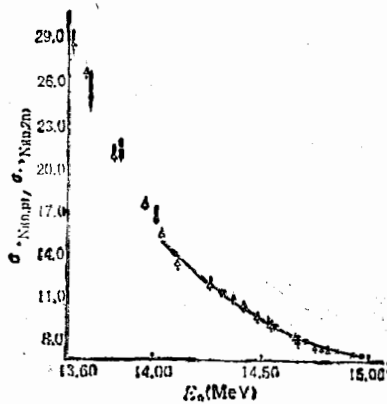


图3 $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 和 $^{58}\text{Ni}(n,2n)$ 反应截面比与中子能量的关系

✦ 本文 ✕ 文献 [3] ✧ 文献 [8]

是可以采用的。 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 反应为放热反应，质子与 ^{58}Co 的库仑位垒约为 5.3 MeV，但 $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ 反应的阈能为 12 MeV，所以在散射中子较强的 14 MeV 中子场中用 ^{58}Ni 的两个截面比确定平均中子能量会引起较大的误差。由于条件限制，在测量中子能量时我们用了 GM-8 型金硅面垒探测器，它的边缘效应对能量分辨有一定的影响，如果采用 2 mm 厚高阻硅半导体探测器效果会更好一些。今后我们将改善条件做进一步的测量。

作者们对负责 150 kV 中子发生器运行的龚承德同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] V. E. Lewis and K. J. Zieba, *NIM.*, 174(1980), 141.
- [2] R. A. Jarjis, *NIM.*, 184(1981), 439.
- [3] Rene J. Prestwood and Kimberly W. Thomas. David R. Nethaway and Norman L. Smith, *Phys. Rev., C* 29(1984), 805—810.
- [4] Raymond C. Barrall et al., AFWL-TR-68-134.
- [5] B. M. Bahal. S. I. Kafala and S. Y. Hurani, *Appl. Radiat. Isot.*, 39(1988), 487—493.
- [6] E. Browne and R. B. Firestone, Table of Radioactive Isotopes, (1986).
- [7] T. B. Ryves and K. J. Zieba, *NIM.*, 167(1979), 449—453.
- [8] A. Pavlik. G. Winkler, M. Uhi and A. Paulsen, H. Lisken, *Nuclear Science and Engineering*, 90(1985), 186—202.

DETERMINATION OF THE AVERAGE NEUTRON ENERGY USING CROSS SECTION RATIO OF $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$ and $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ REACTIONS

YUAN JUNQIAN WANG YONGCHANG QIU JIUZI WANG HUAMIN

REN ZHONGLIANG YANG JINGKANG

(Department of Physics, Lanzhou University)

ABSTRACT

The method of determination for average neutron energy from D-T reaction by using two silicon semiconductor detectors and the cross section ratios of $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58m+g}\text{Co}$ and $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$ reactions is described. The plot of the cross section ratio against the neutron energy has been obtained. The results have been compared with existing data.