

用锰浴测定200毫居里Ra- α -Be 中子源的绝对产额* 1)

叶春堂 賈温海 陆 挺

提 要

采用 $MnSO_4$ 水浴测量镭铍中子源的绝对产额。在 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置上精确标定少量强放射性 $MnSO_4$ 溶液的比放射性,并洒入未活化的锰浴中,从而刻度出浸没式 γ -探测器的效率。对所测 200 毫居镭铍中子源,定出其产额为 $2.283(1 \pm 0.8\%) \times 10^6$ 中子/秒。

中子物理参数的绝对测量,常常涉及中子源的绝对产额。在有标准中子源的情况下,产额的绝对测量可以简化为待测中子源与标准中子源的相对比较,从而避免了复杂的绝对测量。本文介绍我们利用锰浴法^[1]对 200 毫居里镭铍源产额进行绝对测量的方法和结果。

一、测量原理

将待测中子源置于 $MnSO_4$ 浴中心,源所发出的快中子将在锰浴中慢化。在理想情况下,即对于点源所照射的无限大慢化介质,略去介质对快中子的吸收,则源所发出的全部中子将在慢化至热能后被介质吸收。若源在锰浴中放置的时间足够长,锰浴中的中子数目将处在平衡状态。这时,源在单位时间内发出的中子数目,恰好和介质在单位时间内所吸收的热中子数目相等。

介质中的 Mn^{55} 吸收热中子后变为 Mn^{56} 。当 Mn^{56} 处在放射性平衡状态时,其放射性 A' 与中子源强度 Q 的关系为:

$$Q = \frac{A'}{f} = \frac{A}{\epsilon f} \quad (1)$$

式中 A 为探测器所记录的 Mn^{56} 的衰变率, ϵ 为探测器记录 Mn^{56} γ -放射性的效率, f 为锰所吸收的热中子数目与介质所吸收的全部热中子数目之比,或:

$$f = \frac{N_{Mn}\sigma_{Mn}(1 + G\bar{r}s)}{N_{Mn}[\sigma_{Mn}(1 + G\bar{r}s) + \sigma_i + 4\sigma_0] + N_H\left(\sigma_H\frac{1}{2}\sigma_0\right)} \quad (2)$$

式中 N_{Mn} 及 N_H 分别为单位体积介质中 Mn 及 H 的核数目。 σ_i ($i = Mn, H, S, O$) 为

* 1972年7月24日收到。

1) 本工作于1967年完成。

介质中第 i 种核的热中子吸收截面。 $(1 + G\bar{\tau}_i)$ 项是对锰的共振吸收的校正。在室温下, $s = 0.666^{[2]}$ 。 $\bar{\tau}$ 为介质的平均热谱指数, G 为共振自屏蔽因子。 $\bar{\tau}$ 和 G 可由介质成分算出^[1], 分别为 2.286×10^{-2} 及 0.8326。

二、实验装置

1. 中子源

1957年3月封装, 由 462 毫克溴化镭及溴化钡(其中含镭 208 毫克)与 1.6 克金属钨粉(5~50 微米)混合, 封于 0.5 毫米厚的玻璃安瓶中, 外面加封总厚度共 2 毫米的两层黄铜套, 安瓶与铜套间空隙用玻璃棉填充。源的外观尺寸为 $\phi 26 \times 38$ 毫米圆柱体。

2. 锰浴

由 $\phi 1 \times 1.2$ 米圆柱状铝桶盛以 $MnSO_4$ 水溶液构成, 液面高 1.03 米, 浴顶有盖, 可粗封。由比重法^[3] 测出单位体积中氢、锰核数目比 $N_H/N_{Mn} = 72.9$, 化学分析表明, 杂质对中子源强度测量结果的影响可以忽略不计。

三、测量

1. Mn^{56} 活化衰变率测量

用尼龙线将中子源悬挂在锰浴中心, 源周围用 $\phi 45 \times 45$ 毫米铝空腔将 $MnSO_4$ 液隔开, 以降低源周围的热中子通量^[4](图 1)。照射约 30 小时, 取出中子源, 将溶液充分搅拌后, 用浸没式(即对 $MnSO_4$ 水溶液密封的) γ -探测器测量 Mn^{56} 的衰变率 A 。探测器由四只 MC-9 型盖革管并联, 密封于铝壳中, 死时间约 60 微秒。

我们共进行了五次测量, 按测量精度加权平均结果 $A = (4.898 \times 10^3 \pm 3)$ 次/分。在数据处理中, 利用了 Devolpi 等^[6] 的资料。

2. γ 管效率刻度

在重水反应堆垂直孔道照射高纯度(99.99%) 金属锰约 20 毫克。照射后, 制成放射性比度适当的 $MnSO_4$ 溶液。利用称量法^[7] 在 VYNS 薄膜底衬上滴制定量薄膜源, 并在其表面加盖镀金的 VYNS 膜^[8], 供 $4\pi\beta$ - γ 符合测量用。源厚 < 50 微米/厘米²。

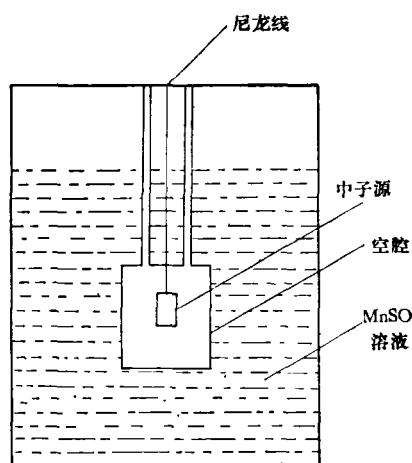


图 1 锰浴示意图(图中尺寸不成比例)

$4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置 β 道为流气式 $4\pi\beta$ 正比管, 4π 几何由两个内径 84 毫米 2π 圆柱几何构成, 膜源置于两个 2π 管之间的中央. 2π 管内壁抛光镀铬, 中心电极为 0.03 厘米钨丝. 工业甲烷流气. 高压接头绝缘材料采用聚四氟乙烯. 工作电压为 -2750 伏. 脉冲讯号放大约 6×10^4 倍, 记录 β 的效率 $\sim 99\%$, 本底约 0.2%.

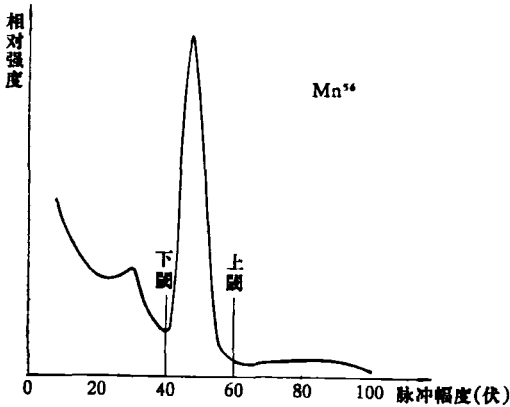


图2 Mn^{56} 的 γ 谱

γ 道由 $\phi 3.5'' \times 3.5''$ NaI 晶体与 $\Phi\Theta\Upsilon\text{-}24$ 光电倍增管耦合组成. 利用道宽 20 伏的微分单道, 选择适当的阈值, 记录 Mn^{56} 0.845 兆电子伏的光电峰(图2). 对图2所示 γ 谱的分析表明, γ 道的总记数中有 95% 来自 0.845 兆电子伏光电峰, 其余部分来自其它能级. 文章^[1]给出了在这种情况下应该对 Mn^{56} 复杂衰变方式进行的校正式. 在我们的情况下, 由于 β 道的平均效率高达 99% 左右,

因而即使有 5% 左右 0.845 兆电子伏能级以外的 γ 在 γ 道被记录, 校正值也很小, 可以忽略.

对 ϵ 进行了测量, 5 次加权平均结果为: $1.0553 \times 10^{-4}(1 \pm 1.9 \times 10^{-3})$.

四、校正项

在实际测量中并不严格满足点源、无限介质等理想条件, 且在慢化过程中还伴有介质对快中子的吸收. 这样, 必须引进一些校正项.

1. 中子逃逸

Geiger 等^[9]指出, 距源为 r 厘米处, 锰浴中的中子分布形式为 $1.9e^{-0.105r}$. 我们算出圆柱状锰浴从中心至边界的有效距离为 57.48 厘米, 由此给出逃逸因子 $L = (0.45 \pm 0.13)\%$.

2. 快中子俘获

Ryves 等^[10]指出, 在浓度比 $N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}} = 29.8$ 的 MnSO_4 溶液中, 由于引起各种带电粒反应, 总的丢失为 $(3.05 \pm 0.30)\%$, 其中 $\text{O}^{16}(n, \alpha)$ 反应占 $(2.15 \pm 0.25)\%$; $\text{S}^{32}(n, p)$ 反应及 $\text{S}^{32}(n, \alpha)$ 反应共占 $(0.90 \pm 0.20)\%$. 利用上述数据, 折算到我们所用的溶液浓度 ($N_{\text{H}}/N_{\text{Mn}} = 72.9$), 得到快中子的丢失因子 $P = (2.86 \pm 0.3)\%$.

3. 源和支承物的自吸收

Ryves^[5]的研究表明, 事先算出 MnSO_4 溶液的扩散长度, 就可以算出 MnSO_4 浴中置于空腔的单位强度中子源在空腔周围产生的热中子通量 $n\nu_0/Q$. 从而, 源和支承物的自吸收因子 $B = \Sigma n\nu_0/Q$, 其中 Σ 为源及支承物结构材料总的宏观吸收截面. 由此得

$$B = (0.73 \pm 0.22)\%$$

五、结果和简要的讨论

1. 结果及误差

综合(1),(2)式及上述各校正项,源强最终表达式为:

$$Q = \frac{A}{\varepsilon(1-P)(1-L)(1-B)} \left[\frac{N_{Mn}\sigma_{Mn}(1+G\bar{r}s)}{N_{Mn}[\sigma_{Mn}(1+G\bar{r}s)+\sigma_s+4\sigma_0]+N_H\left(\sigma_H+\frac{1}{2}\sigma_0\right)} \right]^{-1} \quad (3)$$

上式中 $A, \varepsilon, P, L, B, G, \bar{r}, s$ 诸值已在上面给出,再采纳以下参数:

$$\sigma_{Mn} = 13.25 \pm 0.1 \text{ 巴}^{[11]},$$

$$\sigma_H = 0.332 \pm 0.02 \text{ 巴}^{[12]},$$

$$\sigma_0 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ 巴}^{[12]},$$

$$\sigma_s = 0.52 \pm 0.02 \text{ 巴}^{[12]}.$$

把这些值代入(3)式得到:

$$Q = 2.283(1 \pm 0.8\%) \times 10^6 \text{ 中子/秒}.$$

这是 5 次测量的加权平均结果,并采用标准误差表示精密性. 误差来源如下:

A 值测量	0.6×10^{-3}
锰对热中子吸收份额	5.9×10^{-3}
效率刻度	1.9×10^{-3}
逃逸因子	0.6×10^{-3}
自吸收因子	2.2×10^{-3}
快中子俘获因子	3.1×10^{-3}
总误差	$\sim 8 \times 10^{-3}$

上列项目均未计及系统误差.

2. 讨论

存在着继续提高测量精度的可能性:若采用 $\sigma_H/\sigma_{Mn} = 0.024965 (1 \pm 0.18\%)^{[1]}$, 则锰对热中子吸收份额所贡献的误差将显著降低. 目前所用的源,结构复杂,自吸收大,作为标准源不够理想. 至于快中子俘获, Ryves^[10] 的研究是目前仅有的结果. 因此,选择一个比本文所述结构更好的中子源,并对快中子俘获项作进一步研究(或采用 Ra- γ -Be 源),将有助于建立更精确的初级标准.

除了引用资料上的数据在本工作中会带来一些系统误差外,就测量本身而论,结果的可靠性关键在于 $4\pi\beta-\gamma$ 符合装置对 γ 管效率的刻度. 我们的 $4\pi\beta-\gamma$ 符合装置建成之初曾与国家计量局放射性实验室的 $4\pi\beta-\gamma$ 测量装置用同一个 Co^{60} 源进行过相互校验(1967年4月),结果在 0.1% 误差范围内彼此相符.

本工作完成后,我们所用的这台 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合装置曾为其它工作提供过一些标准放射源,长期实践结果证明其工作基本可靠。我们所标定的中子源曾多次作为初级标准提供一些中子物理实验或标定其它中子源,迄今未发现明显的错误。

此外,在本工作开展的同时,采用另外完全独立的方法^[13]对同一源进行刻度,结果也在误差范围内与本结果相符。

这样,我们有理由认为,系统误差确实不很大,测量结果基本可靠。

作者对熊秉焘等同志在 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合测量中所给予的协助,杨宜棻同志在制备 Mn^{56} 薄膜源时给予的帮助表示真诚的谢意。

参 考 资 料

- [1] E. J. Axton et al., *J. Nucl. Energy*, **19** (1965), 409.
- [2] C. H. Westcott, AECL-1101.
- [3] A. De. Volpi et al., *J. Nucl. Energy*, **19** (1965), 595.
- [4] R. Richmond et al., AERE R/R-2097 (1957).
- [5] T. B. Ryves, *J. Nucl. Energy*, **18** (1964), 49.
- [6] A. De Volpi et al., ANL-6760.
- [7] P. J. Compion et al., *Nucl. Instr. & Method*, **31** (1964), 253.
- [8] B. D. Patt, L. Yaff, *Can. J. Chem.*, **31** (1955), 15.
- [9] K. W. Geiger, G. N. Whyte, *Can. J. Phys.*, **37** (1959), 256.
- [10] T. B. Ryves et al., *J. Nucl. Energy*, **19** (1965), 607.
- [11] J. W. Meadows et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **9** (1961), 132.
- [12] D. J. Hughes et al., BNL-325 (1957).
- [13] 卢涵林、曾显忠,物理,第一卷, **3** (1972), 146.