

符合法测量放射源 ^{60}Co 和 ^{131}I 的绝对强度

许 国 茂

(应用物理系)

摘 要

本文应用 (γ, γ) 和 (β, γ) 符合法, 测量了放射源 ^{60}Co 和 ^{131}I 的绝对强度, 其测量误差分别为 $\pm 1.4\%$ 和 $\pm 1.3\%$, 精确度较高。

关键词 符合法, 放射源, 精确度

一、引 言

放射性强度的测量和核技术的发展有十分密切的关系。低能核物理中许多核衰变参数和某些核反应参数的确定, 都归结到放射性强度的测量。放射性核素的生产及其在工、农、医和科学研究诸领域中的应用, 以及环境监测等方面都涉及到放射性强度的测量。因此, 放射性强度的测量, 在实验核物理及核技术应用中占有很重要的地位。

微居里级(约 10^5Bq)放射性绝对强度的测量一般有: 小立体角法、 4π 计数法、符合法和液体闪烁法。其中符合法具有设备简单, 不依赖于探测器效率, 且修正影响因素少, 测量结果的精确度较高, 是目前测量放射性绝对强度的较好方法之一, 实际应用十分方便。

我们应用 (γ, γ) 和 (β, γ) 符合法测量了放射源 ^{60}Co 和 ^{131}I 的绝对强度, 计算其测量误差分别为 $\pm 1.4\%$ 和 $\pm 1.3\%$, 误差较小, 测量的精确度较高。

二、原 理

在很多放射性核素的衰变中, 往往伴有级联辐射。利用这个现象, 并借助于符合测量法, 则可测定放射源的绝对强度。

1. (γ, γ) 符合法

如图1所示的级联衰变, 可应用 (γ, γ) 符合法测量放射源的绝对强度。

设 A_0 为放射源的绝对强度, $N_{\gamma\gamma}$ 为 (γ, γ) 真符合计

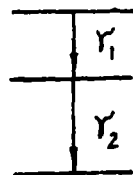


图1 级联 γ - γ 衰变

本文1988年12月24日收到。

数率; $N_{\gamma}^{(1)}$, $N_{\gamma}^{(2)}$ 为放射源引起的第 I γ 道和第 II γ 道的单道计数率; $\eta_{\gamma_1}^{(1)}$, $\eta_{\gamma_2}^{(1)}$ 为第 I γ 道对 γ_1 , γ_2 射线的探测效率; $\eta_{\gamma_1}^{(2)}$, $\eta_{\gamma_2}^{(2)}$ 为第 II γ 道对 γ_1 , γ_2 射线的探测效率. 则有

$$N_{\gamma}^{(1)} = A_0(\eta_{\gamma_1}^{(1)} + \eta_{\gamma_2}^{(1)}),$$

$$N_{\gamma}^{(2)} = A_0(\eta_{\gamma_1}^{(2)} + \eta_{\gamma_2}^{(2)}),$$

$$N_{\gamma\gamma} = A_0(\eta_{\gamma_1}^{(1)} \eta_{\gamma_2}^{(2)} + \eta_{\gamma_2}^{(1)} \eta_{\gamma_1}^{(2)}),$$

由此可推导出

$$A_0 = \frac{N_{\gamma}^{(1)} N_{\gamma}^{(2)}}{2N_{\gamma\gamma}} \left[1 - \frac{(\eta_{\gamma_1}^{(1)} - \eta_{\gamma_2}^{(1)})(\eta_{\gamma_1}^{(2)} - \eta_{\gamma_2}^{(2)})}{(\eta_{\gamma_1}^{(1)} + \eta_{\gamma_2}^{(1)})(\eta_{\gamma_1}^{(2)} + \eta_{\gamma_2}^{(2)})} \right]. \quad (1)$$

当 γ_1 和 γ_2 的能量相近时有 $\eta_{\gamma_1}^{(1)} \simeq \eta_{\gamma_2}^{(1)}$, $\eta_{\gamma_1}^{(2)} \simeq \eta_{\gamma_2}^{(2)}$. 则

$$A_0 = \frac{N_{\gamma}^{(1)} N_{\gamma}^{(2)}}{2N_{\gamma\gamma}}. \quad (2)$$

从式 (2) 可见, 只要测得 $N_{\gamma}^{(1)}$, $N_{\gamma}^{(2)}$ 和 $N_{\gamma\gamma}$ 便可计算出放射源的绝对强度 A_0 .

2. (β , γ) 符合法

如图 2 所示的级联衰变, 可应用 (β , γ) 符合法测量放射源的绝对强度.

设 A_0 为放射源的绝对强度; N_{β} 为 β 射线引起的 β 道计数率; N_{γ} 为 γ 射线引起的 γ 道计数率; $N_{\beta\gamma}$ 为 (β , γ) 真符合计数率; η_{β} 为 β 探测器对 β 射线的探测效率; η_{γ} 为 γ 探测器对 γ 射线的探测效率. 则有

$$N_{\beta} = A_0 \eta_{\beta}, \quad N_{\gamma} = A_0 \eta_{\gamma}, \quad N_{\beta\gamma} = A_0 \eta_{\beta} \eta_{\gamma}.$$

由此可推导出

$$A_0 = N_{\beta} \cdot N_{\gamma} / N_{\beta\gamma}. \quad (3)$$

从式 (3) 可见, 只要测得 N_{β} , N_{γ} 和 $N_{\beta\gamma}$, 便可计算出放射源的绝对强度 A_0 .

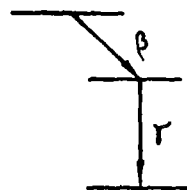


图 2 级联 β - γ 衰变

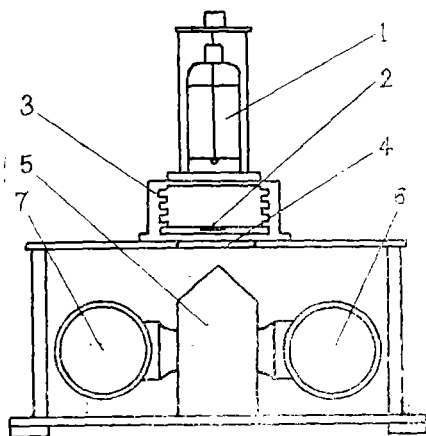


图 3 符合测量装置

- 1— β 计数管; 2—放射源; 3—有机玻璃架;
4—测量架顶板; 5—屏蔽铅砖; 6— γ 闪烁探头 I; 7— γ 闪烁探头 II

三、测量装置设计

根据符合法测量放射源绝对强度的要求, 现设计了如图 3 所示的测量装置.

测量架顶板 4 的中央开有一直径为 5 cm 的圆孔, 以让 γ 射线通过而进入闪烁探头. 进行符合测量时, 可把放射源置于有机玻璃架 4 的底层. 两个 γ 闪烁探头 6 和 7 之间用一块铅砖屏蔽, 以避免散射引起的符合. 在进行分辨时间测量时, 可消除真符合的产生.

利用本装置,把两个 γ 闪烁探头的输出信号接到符合电路的输入端,可进行 (γ, γ) 符合测量。而把 β 计数管和一个 γ 闪烁探头的输出信号接到符合电路的输入端,可进行 (β, γ) 符合测量。

四、符合电路制作

根据符合测量的要求,设计了符合电路的方框图如图4所示。同时制作的符合电路如图5所示。

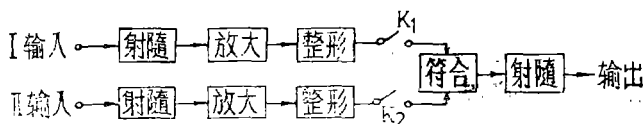


图4 符合电路方框图

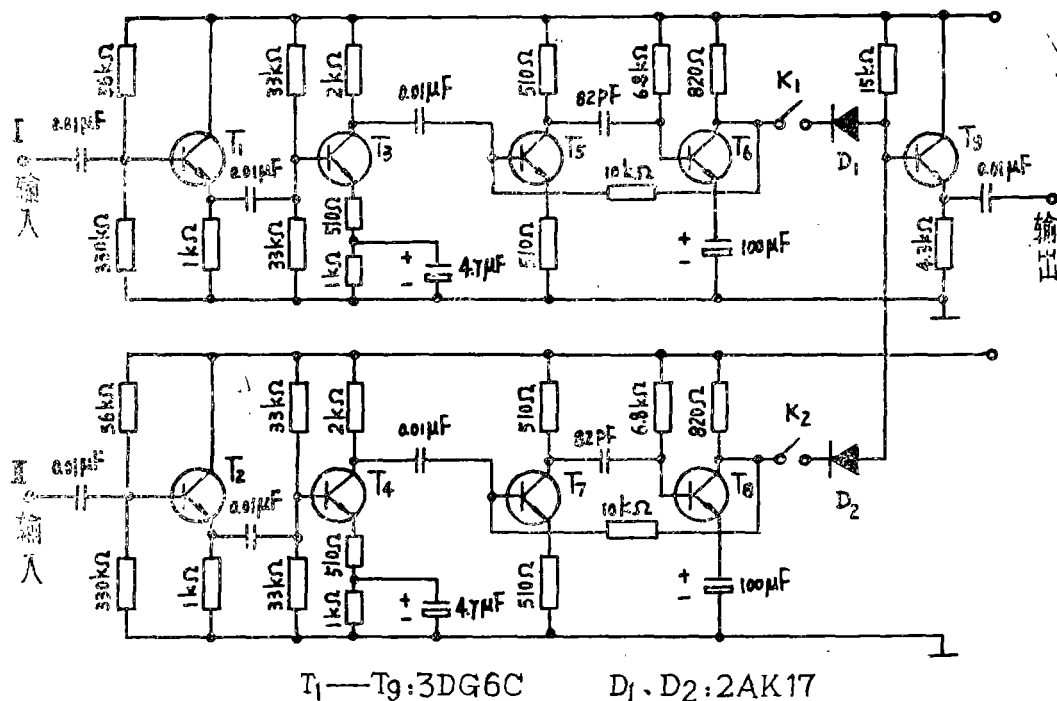


图5 符合电路

图5中, T_1 、 T_2 为两个射极跟随器; T_3 、 T_4 为两个放大器, 把输入信号幅度加以适当放大; T_5 、 T_6 和 T_7 、 T_8 构成两个单稳态电路, 把输入脉冲整形成幅度和宽度一定的矩形脉冲, 以满足后面符合电路对输入脉冲幅度和宽度变动小的要求; D_1 、 D_2 和 R 组成罗西二极管符合电路; T_9 为射极跟随器, 输出脉冲接到定标器记录。图中的 K_1 、 K_2 为两个开关, 当 K_1 闭

合、 K_2 断开时, 定标器记录第 I 道的单道计数; 当 K_1 断开、 K_2 闭合时, 定标器记录第 II 道的单道计数; 当 K_1 、 K_2 同时闭合时, 定标器记录符合计数。

五、实验结果和数据处理

1. 测量仪器

(1) β 探头选用(J117 β 型)钟罩形 β 计数管, 由测得的坪曲线选取 β 计数管的工作电压为 $U = 1120V$ 。

(2) γ 探头选用(FJ-367型)通用 γ 闪烁探头, 由测得的坪曲线选取 γ 闪烁探头的工作电压为 $U = 720V$ 。

(3)定标器选用(FH-408型)自动定标器。

2. 符合电路分辨时间的测定

无论是应用(γ , γ)或(β , γ)符合法, 测得的总符合计数率 N_c , 都包含了三个部分, 即真符合计数率 N_{c0} 、偶然符合计数率 N_{yc} 和本底符合计数率 N_{bc} 。即

$$N_c = N_{c0} + N_{yc} + N_{bc}. \quad (4)$$

偶然符合计数率和两个探头的单道计数率 N_1 , N_2 的关系如下:

$$N_{yc} = 2\tau N_1 N_2, \quad (5)$$

其中 τ 为符合电路分辨时间。

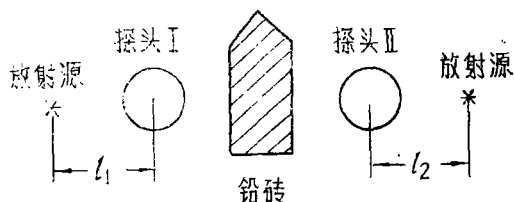


图6 分辨时间 τ 测量装置示意图

图6是分辨时间 τ 测量装置的示意图, 用两个 ^{137}Cs 放射源分别使两个 γ 探头计数, 由于两个探头之间用铅砖屏蔽, 所以记录下来的符合计数率 N_c' , 不包含真符合计数率 N_{c0} , 而只含偶然符合计数率 N_{yc} 和本底符合计数率 N_{bc} , 即

$$N_c' = N_{yc} + N_{bc} = 2\tau N_1 N_2 + N_{bc}, \quad (6)$$

移动放射源的距离 l_1 和 l_2 , 以改变单道计数率 N_1 、 N_2 , 测量相应的符合计数率 N_c' , 测量结果见表1。

表1 测定符合电路分辨时间的实验数据

符合 N_{c1}' (计数/10min)*	单道 N_1 (Cpm)**	单道 N_2 (Cpm)	符合 N_{c2}' (计数/10min)	$N_1 \cdot N_2 \times 10^8$ (Cpm) ²	N_c' (Cpm)
142	19485	21655	111	4.2	12.7
281	40851	31739	300	13.0	29.1
378	46222	42044	375	19.4	37.7
543	54257	52672	535	28.6	53.9
763	63867	65558	756	41.9	76.0
941	72468	72157	913	52.3	92.7
1098	80519	78880	1092	63.5	109.5
1351	89008	90028	1343	80.1	134.7
1641	101951	100543	1695	102.5	166.9

* N_{c1}' , N_{c2}' 为单道计数率测量前后的符合计数率, N_c' 为平均值。

**Cpm为每分钟计数, 即计数/min。

根据表1的数据作图, 见图7。 τ 和 N_{bc} 即可从图中直线的斜率和截距求得。

利用最小二乘法求出的结果如下：

$$\tau = 0.47(1 \pm 0.013) \mu s,$$

$$N_{bc} = 8.37(1 \pm 0.131) \text{ Cpm}.$$

3. (γ, γ)符合法测量⁶⁰Co源的绝对强度

⁶⁰Co 的衰变图如图 8 所示，放射源 ⁶⁰Co 放在有机玻璃架的底层，两个 γ 闪烁探头的 信

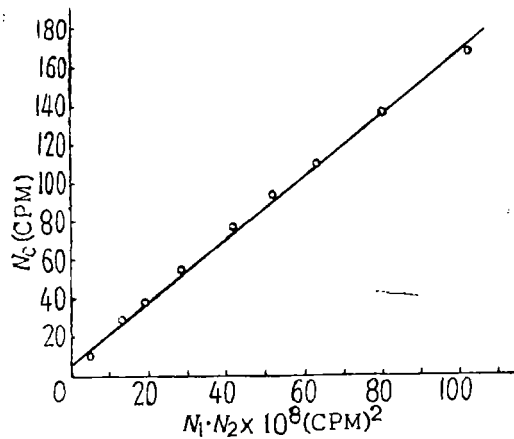


图 7 符合分辨时间的测定 ($N_c \sim N_1 \cdot N_2$ 关系曲线)

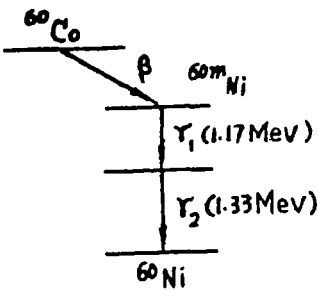


图 8 ⁶⁰Co衰变图

号，分别接到符合电路的输入端。测量单道计数率 $N_{\gamma 1}$ ， $N_{\gamma 2}$ 和符合计数率 $N_{\gamma \gamma}$ ，测量结果见表 2。

表 2 (γγ)符合测量的实验数据

测量条件	符合 $N_{\gamma \gamma}^{(1)*}$ (计数/10min)	单道 $N_{\gamma 1}$ (cpm)	单道 $N_{\gamma 2}$ (cpm)	符合 $N_{\gamma \gamma}^{(2)*}$ (计数/10min)
本底	41	9422	9937	38
⁶⁰ Co源	3181	58832	59441	3237

* $N_{\gamma \gamma}^{(1)} N_{\gamma \gamma}^{(2)}$ 为单道计数率测量前后的符合计数率。

γ_1 道总计数率扣去本底计数率，即

$$N_{\gamma}^{(1)} = 58832 - 9422 = 49410 \text{ cpm},$$

γ_2 道总计数率扣去本底计数率，即

$$N_{\gamma}^{(2)} = 59441 - 9937 = 49504 \text{ cpm},$$

偶然符合计数率为

$$N_{rc} = 2\tau N_1 N_2 = 2 \times 0.47 \times 10^{-6} \times (1/60) \times 58832 \times 59441 = 54.8 \text{ cpm},$$

本底符合计数率为

$$N_{vb} = \frac{41 + 38}{2 \times 10} = 4.0 \text{ cpm},$$

(γ, γ)符合总计数率扣去偶然符合计数率和本底符合计数率，得真符合计数率为

$$N_{\gamma\gamma} = \frac{3181 + 3237}{20} - 54.8 - 4.0 = 262.1 \text{ cpm}.$$

把 $N_{\gamma}^{(1)}$, $N_{\gamma}^{(2)}$ 和 $N_{\gamma\gamma}$ 值代入式(2), 求得 ^{60}Co 放射性绝对强度 A_0 为

$$A_0 = \frac{N_{\gamma}^{(1)} \cdot N_{\gamma}^{(2)}}{2N_{\gamma\gamma}} = \frac{49410 \times 49504}{2 \times 262.1} = 4.67 \times 10^6 \text{ cpm} = 7.77 \times 10^4 \text{ Bq}.$$

4. (β, γ) 符合法测量 ^{131}I 源的绝对强度

^{131}I 的衰变是先发射 β 射线跟着发射 γ 射线. 可应用 (β, γ) 符合法测量源的绝对强度.

由于 β 计数管对 γ 射线亦灵敏. 因此, β 计数管测得的总计数率 N_{β}' 包含三部分. 即

$$N_{\beta}' = N_{\beta} + \gamma' + N_{\beta b},$$

式中 N_{β} 为 β 射线引起的计数率; N_{γ}' 为 γ 射线引起的计数率; $N_{\beta b}$ 为本底计数率. 所以

$$N_{\beta} = N_{\beta}' - (N_{\gamma}' + N_{\beta b}), \quad (7)$$

$N_{\gamma}' + N_{\beta b}$ 可用足够厚的铝片把 β 射线全部吸收后测得.

放射源 ^{131}I 放在有机玻璃架的底层. β 计数管和1个 γ 闪烁探头的信号, 分别接到符合电路的输入端. 测量不加铝吸收片和加铝吸收片的单道计数率和符合计数率, 测量结果见表3.

表3 (β, γ) 符合测量的实验数据

测量条件	β 道 N_{β}' (cpm)	γ 道 N_{γ}' (cpm)	符合 $N_{\beta\gamma}'$ (计数/10min)
本底	124	9817	2
^{131}I 源	不加铝吸收片	57405	4497
	加铝吸收片	375	21

β 道总计数率扣去 γ 射线和本底计数率, 即

$$N_{\beta} = 57405 - 375 = 57030 \text{ cpm},$$

γ 道总计数率扣去本底计数率, 即

$$N_{\gamma} = 50136 - 9817 = 40319 \text{ cpm},$$

偶然符合计数率为

$$N_{\gamma c} = 2\tau N_{\beta}' N_{\gamma}' = 2 \times 0.47 \times 10^{-6} \times (1/60) \times 57405 \times 50136 = 45.1 \text{ cpm},$$

本底符合计数率为

$$N_{bc} = \frac{21}{10} = 2.1 \text{ cpm},$$

(β, γ) 符合总计数率扣去偶然符合计数率和本底符合计数率, 得真符合计数率为

$$N_{\beta\gamma} = \frac{4497}{10} - 45.1 - 2.1 = 402.5 \text{ cpm}.$$

根据 N_{β} , N_{γ} 和 $N_{\beta\gamma}$ 值由式(3)求得 ^{131}I 放射性绝对强度 A_0 为

$$A_0 = N_{\beta} \cdot N_{\gamma} / N_{\beta\gamma} = 57030 \times 40319 / 402.5 = 5.71 \times 10^6 \text{ cpm} = 9.51 \times 10^4 \text{ Bq}.$$

六、给果与讨论

根据误差传递公式计算了标准误差 σ 和相对标准误差 ε 分别为

对 ^{60}Co 源: $\sigma = \pm 0.11 \times 10^4 \text{ Bq}$, $\varepsilon = \sigma/A_0 = \pm 1.4\%$;

对 ^{131}I 源: $\sigma = \pm 0.12 \times 10^4 \text{ Bq}$, $\varepsilon = \sigma/A_0 = \pm 1.3\%$.

其测量结果分别为

$$^{60}\text{Co } A_0 = 7.77(1 \pm 0.014) \times 10^4 \text{ Bq}; \quad ^{131}\text{I } A_0 = 9.51(1 \pm 0.013) \times 10^4 \text{ Bq}.$$

由此可见, 其测量误差较小, 说明应用符合法测量放射源强度的校正因素较少, 测定的精确度较高.

所用的 ^{60}Co 标准放射源, 是中国科学院原子能所生产的, 出厂日期距实验时为2.4年, (2年又144天) 放射性强度出厂标称值为 $I_0 = 1.06 \times 10^5 \text{ Bq}$. 根据衰变公式 $I = I_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot t}$, 半衰期 $T_{1/2} = 5.3$ 年, 计算得到实验时放射性强度为 $I = 2.86 \times e^{(-0.693/5.3) \times 2.4} = 7.73 \times 10^4 \text{ Bq}$. 我们应用符合法测得的 ^{60}Co 放射性绝对强度为 $A_0 = 7.77 \times 10^4 \text{ Bq}$, 比较 I 和 A_0 值, 两者十分相近, 在误差范围内相吻合. 由此可见符合测量装置的设计是满足要求的, 测量结果是稳定可靠的.

^{131}I 在医学上对疫病的诊断和治疗应用十分广泛. 因此, 对 ^{131}I 放射性绝对强度的测量和标定是重要的. 本符合测量装置为 ^{131}I 绝对强度的测量, 提供了一个方便而可靠的方法.

参 考 文 献

- [1] 复旦大学、清华大学、北京大学合编, 原子核物理实验方法(上册), 原子能出版社, (1985).
- [2] 中国科学院原子能研究所编, 同位素应用实验方法讲义, 科学出版社, (1960).
- [3] 周志成编著, 核电子学基础(下册), 原子能出版社, (1980).
- [4] 徐钧山等编著, 核电子学实验, 原子能出版社, (1982).
- [5] Singru, R.M., *Introduction to Experimental Nuclear Physics*, Wiley Eastern Private Limited, New Delhi, (1972).

Determination of Absolute Intensity of the Radioactive Sources ^{60}Co and ^{131}I by Coincidence Method

Xu Guomao

Abstract

By applying γ , γ and β , γ coincidence method, the author measures the absolute intensity of the radioactive sources ^{60}Co and ^{131}I and estimates the error which is shown to be $\pm 1.4\%$ and $\pm 1.3\%$ respectively.

Key words Coincidence methods, radioactive sources, accuracy