

# 符合法测量放射源活度的几点要求

(光信息科学与技术, 08300720390, 张煜)

**摘要:** 在用符合法测量放射源的活度时, 我们会自然地想到该放射源为什么可以用符合法测量其活度, 那有没有什么放射源的活度是符合法所不能测量的呢。本文主要分析讨论的就是用符合法测量放射源活度的几点要求。

**关键词:** 符合法; 符合测量; 放射源活度

符合法是研究核衰变和核反应过程中在时间上、方向上相互关联的事件的一种方法。符合法可以分析测量放射源的活度(强度)、激发态寿命和角关联等, 以此来研究原子核的结构及其规律。而自上世纪六十年以来, 由于快电子学、多道分析器和多参数分析系统的发展以及电子计算机在核实验中的应用, 符合法已成为实现多参数测量必不可少的实验手段。所以我们应对符合法有深入的了解和认识。

## 一、符合法的一些基本概念

### 1. 符合法、真符合和偶然符合

符合法是研究相关事件的一种方法, 相关事件是指两个或两个以上同时发生的事件, 也叫符合事件。符合法要利用符合技术即用电子学的方法在不同探测器的输出脉冲中把符合事件选择出来。符合电路的每个输入端都称为符合道。对于两个符合道的情形, 如一个原子核级联衰变时接连放射 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线, 这一对 $\beta$ ,  $\gamma$ 如果分别进入两个探测器, 将两个探测器输出的脉冲引到符合电路输入端时, 便可输出一个符合脉冲, 这种一个事件与另一个事件具有内在因果关系的符合称为真符合。另外也存在不相关的符合事件, 即两个在时间上没有规律性联系的粒子产生符合的情况。例如有两个原子核同时衰变, 其中的一个原子核放出的 $\beta$ 粒子与另一个原子核放出的 $\gamma$ 粒子分别被两个探测器所记录, 这样的事件就不是真符合事件。这种没有内在因果关系的事件的符合称为偶然符合。

### 2. 符合分辨时间

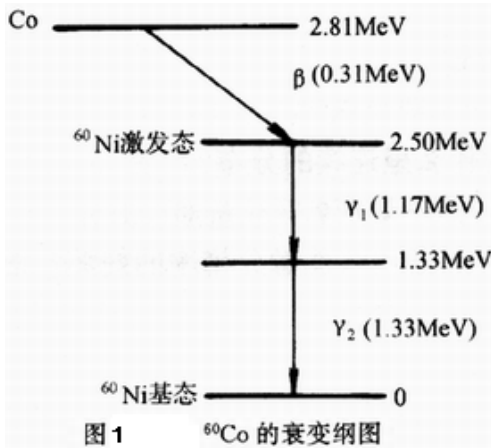
探测器的输出脉冲总有一定的宽度, 所以任何符合电路都有一定的符合分辨时间 $\tau$ 。在选择同时事件的脉冲符合时, 当两个脉冲的起始时间差别很小, 以致符合装置不能区分它们的时间差别时, 或者说, 只要两路脉冲在时间上有重叠部分时, 就会被当作同时事件记录下来, 所以产生符合脉冲的条件不一定要核事件绝对地“同时”, 即符合事件实际上是指相继发生于时间间隔小于符合分辨时间 $\tau$ 的事件。实验中可通过测量瞬时符合曲线得到分辨时间 $\tau$ 。

### 3. 偶然符合的计数率

对于大量的独立事件来说，两个探测器的输出信号同时发生在  $\tau$  时间内，这时符合电路也输出符合脉冲，但这个事件是不具有时间关联的偶然符合。假定两道输入的脉冲均为理想的宽度为  $\tau$  的矩形脉冲，设第I道的平均计数率为  $n_1$ ，第II道的平均计数为  $n_2$ ，则单位时间内偶然符合的计数率平均为  $2\tau n_1 n_2$ ，即  $n_{\text{偶然符合}} = 2n_1 n_2 \tau$ 。假如两个符合道的矩形脉冲宽度不等，分别为  $\tau_1$  和  $\tau_2$ ，则偶然符合计数率为  $n_{\text{偶然符合}} = n_1 n_2 (\tau_1 + \tau_2)$

### 二、 $\beta - \gamma$ 符合法测量放射源的绝对活度

当  $^{60}\text{Co}$  衰变时，同时放出  $\beta$  及  $\gamma$  射线，称为级联辐射，其衰变图纲如图 1 所示。假定



放射源  $^{60}\text{Co}$  的活度为  $A_0$ ， $\beta$  探头对源所张的立体角  $\Omega_\beta$ ， $\beta$  探头效率为  $\epsilon_\beta$ ，那么  $\beta$  道计数率应为：

$$n_\beta = A_0 (\Omega_\beta / 4\pi) \epsilon_\beta F_\beta D_\beta$$

其中  $F_\beta$  为所有吸收散射修正因子， $D_\beta$  为  $\beta$  道甄别器的甄别系数，它定义为甄别阈以上的  $\beta$  计数与整个  $\beta$  谱的面积之比。同理可得  $\gamma$  道的计数率为：

$$n_\gamma = A_0 (\Omega_\gamma / 4\pi) \epsilon_\gamma F_\gamma D_\gamma$$

对于  $^{60}\text{Co}$  源的具体情况，每放一只  $\beta$  粒子后相应的放两只  $\gamma$  光子，故计数率应为：

$$n_\gamma = 2A_0 (\Omega_\gamma / 4\pi) \epsilon_\gamma F_\gamma D_\gamma$$

因此，当  $\beta$  探头探测到一只  $\beta$  粒子后，由  $\gamma$  探头探测到的  $\gamma$  光子的几率为：

$$P = 2(\Omega_\gamma / 4\pi) \epsilon_\gamma F_\gamma D_\gamma$$

如果  $\beta$  探头有一次计数， $\gamma$  探头同时也有一次计数，那么符合电路必然给出一个符合计数。

于是  $\beta - \gamma$  符合计数率为： $n_{\beta\gamma} = n_\beta P = n_\beta (\Omega_\gamma / 4\pi) \epsilon_\gamma F_\gamma D_\gamma = n_\beta n_\gamma / A_0$

由此可得到放射源活度的表达式为： $A_0 = n_\beta n_\gamma / n_{\beta\gamma}$

由上式可以看出活度  $A_0$  只与两个输入道和符合道的计数率有关，与探测器的效率无关，这给测量带来很大的方便。但是在实验中测准活度  $A_0$ ，要进行一系列的修正，因为实际测

到的符合计数中还包含偶然符合计数，本底符合计数及  $\gamma$ - $\gamma$  符合计数，另外对  $\beta$  道和  $\gamma$  道计数要扣除本底。在  $\beta$  道的计数中还要扣除  $\gamma$  射线进入  $\beta$  探测器引起的计数。经修正可得活度  $A_0$  为：

$$A_0 = \frac{[n_\beta(\beta) - n_\beta(\text{本}) - n_\beta(\gamma)][n_\gamma(\gamma) - n_\gamma(\text{本})]}{[n_{\beta\gamma}(\beta, \gamma) - 2\tau n_\beta n_\gamma - n_{\beta\gamma}(\gamma, \gamma) - n_{\beta\gamma}(\text{本})]}$$

在实验中，当  $n_{\text{偶然符合}}/n_{\beta\gamma} \ll 1$  时， $n_\beta$  和  $n_\gamma$  的相对误差都很小，可简化得出  $A_0$  的相对误差

$$\text{为 } v_{A_0} = \sqrt{v_\beta^2 + v_\gamma^2 + v_{\beta\gamma}^2} \approx v_{\beta\gamma}(\beta, \gamma) = \frac{1}{\sqrt{n_{\beta\gamma}(\beta, \gamma)}}$$

### 三、用符合法测量活度的要求

1. 真符合计数率与偶然符合计数率的比值，简称真偶符合比，是符合实验的一个重要指标。为保证真符合计数率大于偶然符合计数率，要求真偶符合比  $n_{\beta\gamma}/n_{\text{偶然符合}} \geq 1$ ，因为  $n_{\beta\gamma}/n_{\text{偶然符合}} = n_{\beta\gamma}/2\tau n_\beta n_\gamma = 1/2\tau A_0$ ，所以  $A_0 \leq 1/2\tau$ 。这表明所测的源的活度不能太强，受符合电路分辨时间的限制。采用分辨时间小的符合电路，允许使用较强的放射源。

2. 要想用符合测量的方法测量放射源的绝对活度，首先对这个放射源有一定的要求，至少这个放射源在衰变时要产生出两种射线（如  $\beta$ ， $\gamma$  射线，或不同能量的同种射线）。如图 1 所示的  $^{60}\text{Co}$  放射源衰变纲图，除  $\beta$ - $\gamma$  符合法可用测量其的绝对活度外，还可以用  $\gamma$ - $\gamma$  符合法。

其绝对活度表达式为  $A_0 = \frac{n_{\gamma_1} n_{\gamma_2}}{2n_{\gamma_1\gamma_2}}$ ，当然也要对其进行修正。如

$$n_{\gamma_1} = n_{\gamma_1}(\gamma_1) - n_{\gamma_1}(\gamma_2) - n_{\gamma_1}(\beta) - n_{\gamma_1}(\text{本}) \quad ; \quad n_{\gamma_2} = n_{\gamma_2}(\gamma_2) - n_{\gamma_2}(\gamma_1) - n_{\gamma_2}(\beta) - n_{\gamma_2}(\text{本})$$

$$n_{\gamma_1\gamma_2} = n_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) - 2\tau n_{\gamma_1} n_{\gamma_2} - n_{\gamma_1\gamma_2}(\beta) - n_{\gamma_1\gamma_2}(\text{本})$$

其实， $n_{\gamma_1}(\beta)$ 、 $n_{\gamma_2}(\beta)$ 、 $n_{\gamma_1\gamma_2}(\beta)$  可通过在放射源与两探头间都放上适当厚度的铝片或塑料片来消除。而  $n_{\gamma_1}(\gamma_2)$ 、 $n_{\gamma_2}(\gamma_1)$  的获得还有待讨论和实验验证，因为  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  能量非常接近，穿透能力差不多，不能用阻挡法（或许有某种材料对两者的吸收系数有较大差别，则可用阻挡法），至于有没有对  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  探测效率差别较大的探测器，也不得而知。或许  $n_{\gamma_1}(\gamma_2)$ 、 $n_{\gamma_2}(\gamma_1)$  的数值较小，可忽略不计。至于  $n_{\gamma_1}(\text{本})$ 、 $n_{\gamma_2}(\text{本})$ 、 $n_{\gamma_1\gamma_2}(\text{本})$  则可通过将放射源拿走后测量获得。

3. 另外, 对放射元素的能级寿命也有一定的要求。要发生真符合事件, 则要求这两件事件同时发生。如图1,  $^{60}\text{Ni}$  的两个激发态的平均寿命均十分短分别约为  $10^{-20}\text{s}$  和  $7 \times 10^{-13}\text{s}$  , 如果  $\beta$  粒子和  $\gamma$  光子分别进入两个探测器, 再把两个探测器输出的脉冲引到符合电路时, 一般的符合电路不能区分这么短的时间差, 则可认为  $\beta$  和  $\gamma$  是一对真符合事件。而对  $^{137}\text{Cs}$  放射源, 其衰变纲图如图2所示。虽然  $\beta$  与  $\gamma$  是级联衰变, 但是由于  $^{137}\text{Ba}$  激发态平均寿命为 2.6min, 对于分辨时间为  $\mu\text{s}$  数量级的符合装置, 产生真符合的概率远小于产生偶然符合的概率, 可将其忽略, 即认为符合输出的只是偶然符合计数。故不能用  $\beta - \gamma$  符合法来测量的绝对活度。至于能不能用  $\beta - \beta$  符合法,

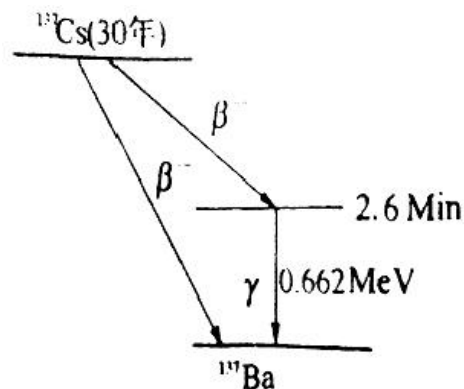


图2  $^{137}\text{Cs}$  的衰变纲图

则要看  $^{137}\text{Cs}$  是不是同时 (发射两个  $\beta$  粒子时间差远小于符合装置的分辨时间) 产生两  $\beta$  光子。所以可用  $^{137}\text{Cs}$  放射源做偶然符合源, 利用偶然符合方法来测量分辨时间。利用公式  $n_{\beta\gamma} = 2\tau n_{\beta} n_{\gamma}$  , 通过改变放射源到探测器的距离, 使  $n_{\beta\gamma}$ 、 $n_{\beta}$ 、 $n_{\gamma}$  改变, 用最小二乘法直线拟合, 就可以求出直线的斜率  $2\tau$  , 从而求出分辨时间  $\tau$  。当然也需要进行修正, 在分辨时间不变的情况下, 第一次测出  $n_{\beta}(\beta)$ 、 $n_{\gamma}(\gamma)$ 、 $n_{\beta\gamma}(\beta, \gamma)$  , 然后在  $\beta$  探头与放射源之间加铝片 (或塑料片), 第二次测出  $n_{\beta}(\gamma) + n_{\beta}(\text{本})$  和  $n_{\beta\gamma}(\gamma, \gamma) + n_{\beta\gamma}(\text{本})$  , 最后取走放射源, 第三次测出  $n_{\gamma}(\text{本})$  。则得

$$n_{\beta} = n_{\beta}(\beta) - [n_{\beta}(\gamma) + n_{\beta}(\text{本})] \quad , \quad n_{\gamma} = n_{\gamma}(\gamma) - n_{\gamma}(\text{本}) \quad ,$$

$$n_{\beta\gamma} = n_{\beta\gamma}(\beta, \gamma) - [n_{\beta\gamma}(\gamma, \gamma) + n_{\beta\gamma}(\text{本})]。$$

#### 四、总结

通过以上的分析讨论, 我们可以知道若要用符合法测量放射源的活度, 则放射源的强度不能太大, 这主要受符合装置的分辨时间的限制; 放射源得产生级联衰变, 产生两种粒子 (如  $\beta$  ,  $\gamma$  射线, 或不同能量的同种射线); 对放射性元素衰变过程中的能级寿命有一定的要求, 该寿命应远小于符合装置的分辨时间。

#### 参考文献

[1]程敏熙. 符合测量实验方法研究[J]. 大学物理, 2002, 21(6): 28—32.

[2]彭朝华, 吴小光, 李广生. 放射性活度的  $\gamma$ - $\gamma$  符合测量[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(3): 258—262.

[3]吴思成, 王祖铨. 近代物理实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995, 127—133.

## Several Conditions of Activity Measurement Using the Coincidence Method

ZHANG Yu

**Abstract:**When using the coincidence method to measure the activity of radioactive sources, we will naturally think that why we can do that and whether the activity of some sources can not be measured by using the coincidence method. In this respect, some conditions of activity measurement using the coincidence method will be discussed in this paper.

**Key words:**coincidence method;coincidence measurement;activity