

# Study on Accuracy of $^{60}\text{Co}$ Radioactive Source Activity Measured by Coincidence Method

Zhicheng Yin, Xiuliang Zhao\*, Sanjun He, Hang Chen, Liyan Liu, Chao Zhou

College of Nuclear Science and Technology, Nanhua University, Hengyang Hunan  
Email: \*zhaoxiul@163.com

Received: Sep. 8<sup>th</sup>, 2017; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2017; published: Sep. 30<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

This paper introduces the basic principle of  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence method for measuring the activity of radioactive source, and the setting method of each plug-in parameter is described in order to achieve the highest precision. The influence of the measurement time on the measurement results is discussed in detail, and the accuracy of the measurement method can be achieved under the condition of the method. The experimental results show that the best measurement time is 100 s. The activity of the  $^{60}\text{Co}$  radioactive source is  $142,620 \pm 924$  Bq, the measurement accuracy is 308 Bq, and the relative deviation of the measurement result is 0.217%. The experiment turns out that the activity and experimental time the relative deviation of the reference activity of the source is 1.09%, which is consistent within the error range.

## Keywords

$\gamma$ - $\gamma$  Coincidence, Measurement Accuracy, Relative Deviation,  
The Best Measurement Time

---

# 符合法测量 $^{60}\text{Co}$ 放射源活度的精度研究

殷志成, 赵修良\*, 贺三军, 陈航, 刘丽艳, 周超

南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳  
Email: \*zhaoxiul@163.com

收稿日期: 2017年9月8日; 录用日期: 2017年9月22日; 发布日期: 2017年9月30日

\*通讯作者。

## 摘要

本文介绍了 $\gamma$ - $\gamma$ 符合法测量放射源活度的基本原理, 阐述实验过程中为达到最高精度, 各个插件参数的设置方法; 详细讨论了测量时间对测量结果的影响, 并讨论在该条件下符合法测量源活度能够达到的精度。实验结果表明: 最佳测量时间为100 s; 符合法实验测得 $^{60}\text{Co}$ 放射源的活度为 $142,620 \pm 924 \text{ Bq}$ , 测量精度为308 Bq, 测量结果的相对偏差为0.217%; 实验所得的源活度与实验时源的参考活度相对偏差为1.09%, 在误差范围内一致。

## 关键词

$\gamma$ - $\gamma$ 符合, 测量精度, 相对偏差, 最佳测量时间

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

$\gamma$  标准放射源活度的准确测量是  $\gamma$  放射性活度绝对测量计量传递的关键技术。 $^{60}\text{Co}$  放射源被广泛应用于放射性临床诊断、治疗[1]、生物化学、动植物学及核科学等的基础研究, 放射源活度测量的准确性直接影响到患者的治疗效果及科研结果的科学性。在不同领域的使用, 对  $^{60}\text{Co}$  放射源的测量精度有不同的要求; 因此在进行相应的基础研究或诊断、治疗之前需要确定实验条件并选择合适的实验装置对放射源的活度进行测量[2]。符合法作为一种放射源活度的绝对测量方法在各个领域中得到广泛应用; 开设核学科的高校都设有符合法测量源活度的实验, 在进行符合法测源活度时, 本科生并不能准确、快速的将源的活度测量出来; 本文意在给出符合法测量源活度数据上的参考, 并讨论出高校一般符合测量系统能够达到的最高测量精度。

## 2. 符合法原理

$\gamma$ - $\gamma$  符合法测量  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度, 实际上就是利用  $\beta$  衰变产生, 退激放出 2 个  $\gamma$  粒子  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  之间的符合; 如图 1(a),  $^{60}\text{Co}$  的衰变为级联辐射,  $^{60}\text{Co}$  经过  $\beta$  衰变到  $^{60}\text{Ni}$  的激发态, 通过放出一组级联  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  射线退激到  $^{60}\text{Ni}$  的基态[3]; 如图 1(b), 用两个探测器分别探测源放出的  $\gamma$  射线, 输出的信号送入符合电路。

实验所用实验装置如图 2(a)、图 2(b), 两个探头都为 NaI(Tl) 闪烁探测器。

### 2.1. 放射源活度的计算公式推导

令  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度为 A, 实验装置第 1 道, 第 2 道和符合道所接定标器测量折合的计数率分别为  $n_{\gamma_1}$ 、 $n_{\gamma_2}$ 、 $n_{\gamma\gamma}$ , 设  $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{21}$  分别为第 1 道对  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  射线的探测效率,  $\varepsilon_{12}$ 、 $\varepsilon_{22}$  分别为第 2 道对  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  射线的探测效率,  $\Omega_{\gamma_1}$ 、 $\Omega_{\gamma_2}$  分别为探测器 1、探测器 2 对放射源所张的立体角; 则有如下关系式:

第 1 道计数率:

$$n_{\gamma_1} = A\Omega_{\gamma_1}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{21}) \quad (1)$$

第 2 道计数率:

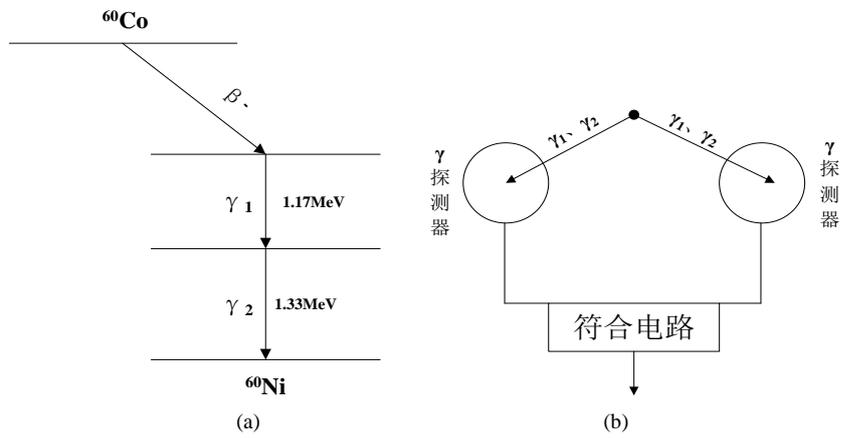


Figure 1. (a) The decay plan of  $^{60}\text{Co}$ ; (b) the illustration of coincidence method  
 图 1. (a)  $^{60}\text{Co}$  衰变纲图; (b) 符合法示意图

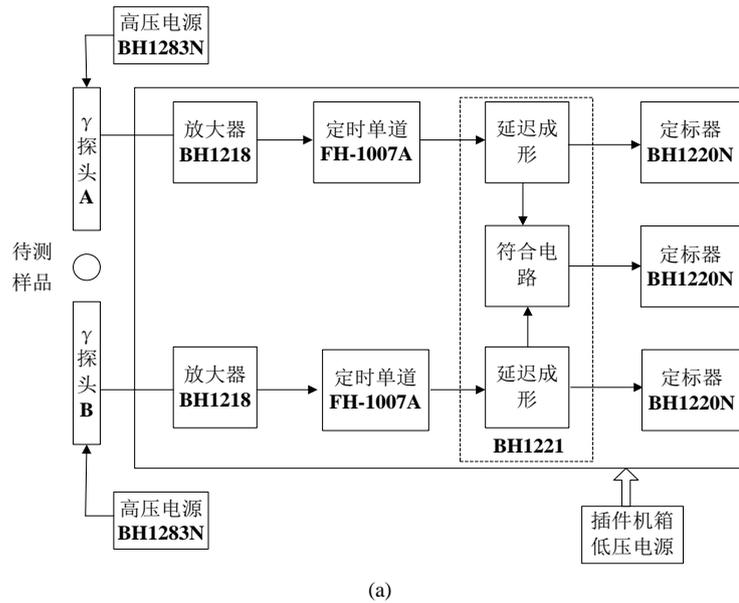


Figure 2. (a) The block diagram of  $\gamma$ - $\gamma$  coincides measurement system [4]; (b) the physical map of  $\gamma$ - $\gamma$  coincides measurement system  
 图 2. (a)  $\gamma$ - $\gamma$  符合测量实验系统框图[4]; (b)  $\gamma$ - $\gamma$  符合测量实验系统实物图

$$n_{\gamma 2} = A\Omega_{\gamma 2}(\varepsilon_{12} + \varepsilon_{22}) \quad (2)$$

符合道计数率:

$$n_{\gamma\gamma} = A\Omega_{\gamma 1}\Omega_{\gamma 2}(\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + \varepsilon_{21}\varepsilon_{12}) \quad (3)$$

式(1)、(2)代入式(3), 可得:

$$A = \frac{n_{\gamma 1}n_{\gamma 2}}{2n_{\gamma\gamma}} \left[ 1 - \frac{(\varepsilon_{\gamma 11} - \varepsilon_{\gamma 21})(\varepsilon_{\gamma 12} - \varepsilon_{\gamma 22})}{(\varepsilon_{\gamma 11} + \varepsilon_{\gamma 21})(\varepsilon_{\gamma 12} + \varepsilon_{\gamma 22})} \right] \quad (4)$$

如果  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  的能量相近时有  $\varepsilon_{\gamma 11} \approx \varepsilon_{\gamma 21}$ ,  $\varepsilon_{\gamma 12} \approx \varepsilon_{\gamma 22}$ , 则

$$A = \frac{(n_{\gamma 1} - n_{b1})(n_{\gamma 2} - n_{b2})}{2(n_{\gamma\gamma} - n_{rc} - n_b)} \quad (5)$$

为了计算结果更加准确, 在此基础上对  $n_{\gamma 1}$ 、 $n_{\gamma 2}$ 、 $n_{\gamma\gamma}$  进行本底修正、偶然符合计数修正后[5], 则

$$A = \frac{n_{\gamma 1}n_{\gamma 2}}{2n_{\gamma\gamma}} \quad (6)$$

### 3. 最佳测量时间的测量

测量时间是符合测量过程中一个重要参数; 设置的时间太长使得测量效率太低, 太短则测量数据的统计涨落影响测量结果的准确度, 因此需要设置一个恰当测量时间。

将测量时间依次设置为 10 s、20 s、30 s、40 s、50 s、100 s、200 s, 重复进行下述实验。

#### 3.1. 探测器与仪器预热

按照图 1 连接实验装置图; 将 2 个插件机箱的电源打开, 仪器预热 30 分钟。测量探头的工作坪曲线, 确定最佳工作电压, 最佳工作电压取坪区 1/3 或 1/2 [6], 这里最佳工作电压取坪区 1/3; 计算得探头 A 的最佳工作电压为 550 V, 探头 B 的最佳工作电压为 540 V, 分别将高压插件[7]调至对应探头的最佳工作电压。

对各个道对应的定标器进行自检, 定标器选择为“自检”, 定时时间设为 1 s (定器:  $k = 1$ ,  $n = 0$ ), 若仪器显示“19,456”, 则证明定标器计数正常[8];

分别将  $^{137}\text{Cs}$  源分别置于 NaI (TI) 探头 1 与 NaI (TI) 探头 2 之前, 见图 3(a); 2 探头之间放置铅砖, 减小源与源之间的干扰; 将 2 个 NaI (TI) 探头输出[9]、信号放大器的输出信号[10]、2 个单道的输出信号[11]和符合插件[12]的输出信号分别接入示波器观察是否有信号输出、输出的信号是否失真。



**Figure 3.** (a) The position of  $^{137}\text{Cs}$  with probe; (b) the position of  $^{60}\text{Co}$  with probe  
**图 3.** (a)  $^{137}\text{Cs}$  与探头位置; (b)  $^{60}\text{Co}$  与探头位置

### 3.2. $^{60}\text{Co}$ 放射源活度测量

#### 3.2.1. 脉冲宽度的设置

- 1) 单道的工作方式选择为“积分”；
- 2) 调节放大器增益的粗调和微调使放大器的输出脉冲的幅度为 3 V；

$^{137}\text{Cs}$  输出的脉冲幅度为 3 V 时，在测量  $^{60}\text{Co}$  源活度时，保持放大器的放大倍数不变， $^{60}\text{Co}$  源能量为 1.137 MeV 全能峰对应脉冲幅度大约 6 V；由于单道的甄别阈为 0~10 V，如若  $^{137}\text{Cs}$  脉冲幅度太小，可能造成全能峰的重叠[13]；若  $^{137}\text{Cs}$  脉冲幅度太大， $^{60}\text{Co}$  的脉冲幅度更大，使得单道的阈值对于  $^{60}\text{Co}$  来说毫无意义；因此本实验将  $^{137}\text{Cs}$  的脉冲幅度调为 3 V。

3) 调节单道的甄别阈值为放大器输出脉冲幅度的 75%（保证全能峰的计数都能够被记录下来；又去掉了 X 射线峰、反散射峰的计数贡献）(图 4)；

理想情况下阈值选择 V3 位置最好，但是由于探测器探测的全能峰会偏移[14]，全能峰可能产生的漏计数；如若阈值选择 V1 位置峰的偏移，可能会记录到反散射峰贡献的计数；彭朝华等[15]证实康普顿坪计数对活度测量影响为 3%~5%；因此选择 V2，V2 靠近 V3，既不会产生全能峰漏计数，也能减小康普顿坪计数对活度测量的影响；在上述工作电压、放大倍数的条件下，通过多道脉冲幅度分析器，得到  $^{137}\text{Cs}$  该条件下的能谱；通过能谱测量得到  $V4 \approx 2.8\text{ V}$ ， $V3 \approx 2.45\text{ V}$ ， $V2 \approx 2.1\text{ V}$ ， $V2/V4 \approx 75\%$ ，峰偏移时，各个位置对应与脉冲幅度之间的比例不会改变，则 V2 的位置可近似看做脉冲幅度的 75%。

4) 调节符合插件上符合成形时间，经过 2017 年殷志成等(待发表)大量实验证明，该符合测量系统的最佳脉冲宽度为 0.39  $\mu\text{s}$ ；因此将符合电路插件 I 和 II 路的“监测”输出脉冲宽度调到 0.39  $\mu\text{s}$ 。

#### 3.2.2. 偶然符合计数及符合道符合计数测量

1) 将两个  $^{137}\text{Cs}$  源拿掉，并使  $^{60}\text{Co}$  放射源夹于两个 NaI (TI) 闪烁探头之间，见图 3(b)；

2) 放大器增益的粗调和微调的倍数保持不变；单道工作方式仍为积分，通过示波器观察此时放大器输出脉冲幅度，调节对应单道的阈值为脉冲幅度的 75%；

3) 固定将符合电路插件上 I 路延时固定某一位置，改变另一道的延时，延时从 0.4  $\mu\text{s}$  慢慢调节到最大处，若符合道的计数先是保持不变，在慢慢增大，增大后又慢慢减下，最后又保持不变，则最开始保持不变的计数即为偶然符合计数，该过程如图 5 所示；图中的 1 和 4 不产生符合计数，此时符合道的计数即为偶然符合计数。用定标器对符合道进行计数，计数时间为 10 秒，计数 3 次；

4) 再调节桥延迟使符合道脉冲计数为最大后，仪器预热 30 s，用定标器对符合道进行计数，计数时间为 10 秒，计数 3 次

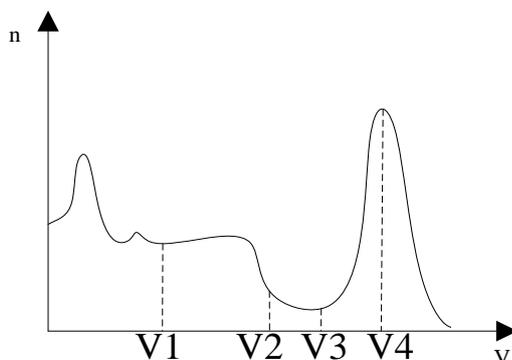


Figure 4. The  $^{137}\text{Cs}$ 's  $\gamma$  spectrum and threshold selection

图 4.  $^{137}\text{Cs}$  的  $\gamma$  能谱及阈值选择示意图

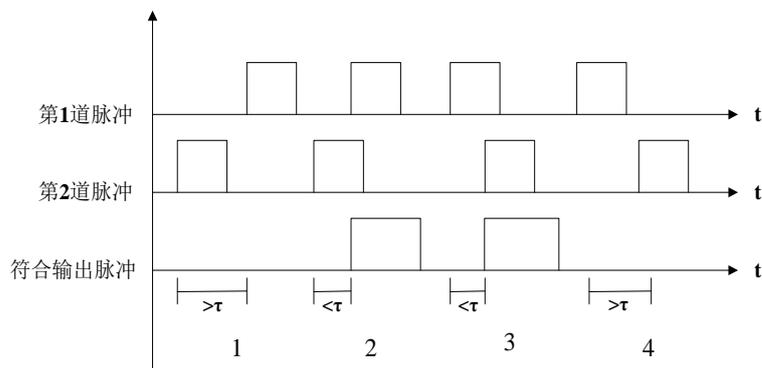


Figure 5. Composite pulse diagram  
图 5. 符合脉冲示意图

5) 将源拿掉并置于远离探头的位置, 对第 1 道、第二道和符合道的本底计数进行测量, 用定标器对符合道进行计数, 计数时间为 10 秒, 计数 3 次。

6) 定标器的测量时间后, 预热 30 秒, 重复 3.3 的测量过程; 得到的测量数据处理以后见表 1。

$\gamma$ - $\gamma$  符合法测得的放射性活度  $A$  的物理量并不是直接得到的, 它要通过诸如式(8)中各参量按着一定的函数关系计算得到。因此, 实验中各个直接测量的物理量存在的误差会传递到间接测量的结果中去。所以对符合法测量误差进行分析可以考虑采用间接测量的误差传递公式。本符合测量中, 物理量  $n_{\gamma 1}$ 、 $n_{\gamma 2}$  中包含  $n_{\gamma\gamma}$ , 所以这 3 个量是相关。为了选择独立的变量, 可把  $n_{\gamma 1}$  分成两部分: 一部分是符合计数  $n_{\gamma\gamma}$ , 另一部分是未符合的计数用  $n_x$  表示。对  $n_{\gamma 2}$  也是这样分成两部分即  $n_{\gamma\gamma}$  和  $n_y$ 。于是  $n_{\gamma 1}$ 、 $n_{\gamma 2}$  可以写成。

$$n_{\gamma 1} = n_{\gamma\gamma} + n_x, \quad n_{\gamma 2} = n_{\gamma\gamma} + n_y$$

$$A = \frac{(n_{\gamma\gamma} + n_x - n_{b1})(n_{\gamma\gamma} + n_y - n_{b2})}{2(n_{\gamma\gamma} - n_{rc} - n_b)} \quad (7)$$

式中,  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_c$ 、 $n_{b1}$ 、 $n_{b2}$ 、 $n_b$ 、 $n_{rc}$  均为互相独立的变量, 根据误差传递公式可得  $A$  的方差[5]:

$$\sigma_A^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial n_{\gamma\gamma}}\right)^2 \sigma_{n_c}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial n_x}\right)^2 \sigma_{n_x}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial n_y}\right)^2 \sigma_{n_y}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial n_b}\right)^2 \sigma_{n_b}^2$$

$$+ \left(\frac{\partial A}{\partial n_{b1}}\right)^2 \sigma_{n_{b1}}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial n_{b2}}\right)^2 \sigma_{n_{b2}}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial n_{rc}}\right)^2 \sigma_{n_{rc}}^2 \quad (8)$$

其相对误差:

$$\delta_A = \frac{\sigma_A}{A} \quad (9)$$

由表 2 可知: 测量时间越长测量得到  $^{60}\text{Co}$  放射源的相对误差越小, 计数统计误差越小; 测量时间 100 s、200 s 的相对误差分别为 0.35%、0.24%, 2 者之间相对误差接近, 但是 200 s 的测量时间要比 100 s 的测量时间多 100 s, 极大的减慢了测量的速度; 为确保测量的效率, 又使统计误差的影响降低; 测量时间取 100 s。

#### 4. $^{60}\text{Co}$ 放射源活度测量

实验室构建两套符合测量实验系统。又偶然符合计数为式  $n_{rc} = 2\tau n_{\gamma 1} n_{\gamma 2}$ , 将式(6)计算放射源的公式变形如下所示:

**Table 1.** The Calculated of  $n_{b1}$ ,  $n_{b2}$ ,  $n_{\gamma1}$ ,  $n_{\gamma2}$ ,  $n_{\gamma\gamma}$ ,  $n_{rc}$  and  $A$   
**表 1.**  $n_{b1}$ ,  $n_{b2}$ ,  $n_{\gamma1}$ ,  $n_{\gamma2}$ ,  $n_{\gamma\gamma}$ ,  $n_{rc}$  及  $A$  计算值

测量时间/s	$n_{b1}/s^{-1}$	$n_{b2}/s^{-1}$	$n_b/s^{-1}$	$n_{\gamma1}/s^{-1}$	$n_{\gamma2}/s^{-1}$	$n_{\gamma\gamma}/s^{-1}$	$n_{rc}/s^{-1}$	$A/Bq$
10	7.6	8.3	0	9955.5	8942.9	377.8	63	141,139
20	8.4	8.25	0	9948.4	9001.8	377.3	63.6	142,479
30	8.3	8.5	0	9646.9	9284.4	377.1	63.7	142,630
40	8.0	8.7	0	9978.5	9043.2	380.2	63.7	142,290
50	8.2	8.3	0	9640.4	9399.5	380.2	65.2	143,557
100	8.4	8.6	0	9565.2	9272.1	375.4	63.7	141,985
200	8.1	8.8	0	9958.9	9396.9	394.2	66.1	142,372

**Table 2.** Measured  $A$ ,  $\sigma_A$  and  $\delta_A$  by different measurement times  
**表 2.** 不同测量时间测量得到的  $A$ ,  $\sigma_A$  及  $\delta_A$

测量时间/s	$A/Bq$	$\sigma_A/Bq$	$\delta_A$
10	141,139	1530	1.08%
20	142,479	1095	0.77%
30	142,630	896	0.63%
40	142,290	769	0.54%
50	143,557	698	0.49%
100	141,985	490	0.35%
200	142,372	338	0.24%

$$A = \frac{(n_{\gamma1} - n_{b1})(n_{\gamma2} - n_{b2})}{2(n_{\gamma\gamma} - 2\tau n_{\gamma1}n_{\gamma2} - n_b)} \quad (10)$$

重复上述 3.3.1 的步骤，经测量计算得到 2 套符合测量系统探头最佳工作电压如表 3 所示。

#### 4.1. 符合分辨时间 $\tau$ 的测量

1) 单道的工作方式选择为“积分”；调节放大器增益的粗调和微调使放大器的输出脉冲的幅度为 3 V；调节单道的甄别阈值为放大器输出脉冲幅度的 75%；

2) 将符合电路插件 I 和 II 路的监测输出接到示波器上，调节符合电路插件上的符合成形时间，使得 I 和 II 的监测输出脉冲的宽度为 0.39  $\mu$ s；

3) 分别调节三个定标器的定时时间设为 100 秒，并同时第 1 道、第 2 道、符合道进行计数，计数 3 次，对源距探头 5 个不同距离重复测量；每次改变条件后，仪器预热 100 s，再重新测量。

计数的相对误差要求小于 1%，即计数率要大于 100  $s^{-1}$ ；改变源距探头距离的时候，要求符合道的计数有显著的改变，若改变的不显著，可能造成多点重合，增大拟合结果的误差(表 4)。

根据公式(7)，使用最小二乘法拟合得到结果见表 5。

#### 4.2. 符合计数及各道本底计数测量

1) 将两个  $^{137}\text{Cs}$  源拿掉，并使  $^{60}\text{Co}$  放射源夹于两个 NaI (TI) 闪烁探头之间，见图 3(b)。

**Table 3.** The best working voltage of each probe**表 3.** 各探头最佳工作电压

探头	第一套系统最佳工作电压/V	第二套系统最佳工作电压/V
探头 A	510 V	550 V
探头 B	540 V	540 V

**Table 4.** The calculate data of  $2n_{\gamma 1}$ ,  $n_{\gamma 2}$  and  $n_{rc}$ **表 4.**  $2n_{\gamma 1}$ ,  $n_{\gamma 2}$ ,  $n_{rc}$  计算数据

次数	探头 A 与源的距离, 探头 B 与源的距离/cm	第一套系统		第二套系统	
		$2n_{\gamma 1}n_{\gamma 2}/s^{-2}$	$n_{rc}/s^{-1}$	$2n_{\gamma 1}n_{\gamma 2}/s^{-2}$	$n_{rc}/s^{-1}$
第 1 次	2, 2	9,469,769	3.63	9,648,520	3.50
	1, 1	23,920,861	8.73	23,875,457	8.63
	0.5, 1	30,736,639	11.66	31,863,920	11.67
	0.5, 0.5	39,426,156	14.68	40,930,006	14.85
	0, 0.5	51,933,348	19.44	51,052,040	19.04
第 2 次	2, 2	8,186,750	2.93	9,698,688	3.63
	1, 1	19,966,954	7.47	23,242,000	8.36
	0.5, 1	26,702,631	9.88	32,121,816	11.34
	0.5, 0.5	32,663,447	11.95	42,329,116	15.35
	0, 0.5	39,842,104	14.52	52,152,502	19.00
第 3 次	2, 2	8,414,033	3.09	10,747,351	3.97
	1, 1	21,260,775	7.91	24,812,721	8.76
	0.5, 1	27,594,961	10.45	33,682,452.5	12.47
	0.5, 0.5	36,772,327	13.17	42,234,850.3	15.36
	0, 0.5	49,004,730	18.67	53,586,585.37	19.81

**Table 5.** Obtained  $\tau$  by fitting 5 points**表 5.** 5 点拟合得到的  $\tau$ 

次数	第一套系统 $\tau/\mu s$	第二套系统 $\tau/\mu s$
第 1 次	0.374	0.373
第 2 次	0.365	0.362
第 3 次	0.378	0.371

2) 放大器增益的粗调和微调的倍数保持不变; 单道工作方式仍为积分, 通过示波器观察此时放大器输出脉冲幅度, 调节对应单道的阈值为脉冲幅度的 75%。

3) 固定将符合电路插件上 I 路延时固定某一位置, 改变另一道的延时, 延时从 0.4  $\mu s$  慢慢调节到最大处, 同时记录各个延迟时刻的符合计数, 找到符合计数最大处。

4) 用定标器同时对符合道、第 1 道、第 2 道进行计数, 计数时间为 100 秒, 计数 3 次, 改变条件后, 仪器预热 100 s, 测量数据经计算后, 结果见表 6。

**Table 6.** The calculated of  $n_{b1}$ ,  $n_{b2}$ ,  $n_{\gamma1}$ ,  $n_{\gamma2}$  and  $n_{\gamma\gamma}$   
**表 6.**  $n_{b1}$ ,  $n_{b2}$ ,  $n_{\gamma1}$ ,  $n_{\gamma2}$ ,  $n_{\gamma\gamma}$  计算值

次数	第一套系统					第二套系统				
	$n_{b1}/s^{-1}$	$n_{b2}/s^{-1}$	$n_{\gamma1}/s^{-1}$	$n_{\gamma2}/s^{-1}$	$n_{\gamma\gamma}/s^{-1}$	$n_{b1}/s^{-1}$	$n_{b2}/s^{-1}$	$n_{\gamma1}/s^{-1}$	$n_{\gamma2}/s^{-1}$	$n_{\gamma\gamma}/s^{-1}$
第 1 次	7.1	9.2	6882	8779	233.0	7.88	8.14	10,084	8738	374.9
第 2 次	6.6	7.8	6776	9264	240.4	7.87	8.48	9514	9385	376.6
第 3 次	6.7	8.2	7055	8674	235.0	7.76	9.13	9351	9420	373.3

5) 计算  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度  $A$

将处理以后的数据带入式(7), 可得  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度  $A_1, A_2, A_3$ , 相关计算数据计算值如表 7 所示。

本次实验室 2 套符合测量系统均对同一个  $^{60}\text{Co}$  的放射源活度进行测量, 且各次测量时间间隔较短, 可认为在短时间  $^{60}\text{Co}$  源的活度是不变的; 测量误差都是由于仪器与统计误差造成。则引入塞贝尔公式[16]:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (A_i - \bar{A})^2}{k-1}} \tag{11}$$

其相对偏差为:

$$\delta_A = \frac{\sigma_s}{A} \tag{12}$$

### 5. 结果分析

从表 5 可知,  $\gamma$ - $\gamma$  符合测量实验系统在脉冲宽度设为  $0.39 \mu\text{s}$ , 理论上符合测量系统的符合分辨时间应该为  $0.39 \mu\text{s}$ , 但是 2 套符合测量装置测量数据拟合得出的符合分辨时间都小于  $0.39 \mu\text{s}$ , 在  $0.37 \mu\text{s}$  上下波动, 因此每次测量源活度之前都必须重新测量该符合测量的符合分辨时间。

该  $^{60}\text{Co}$  放射源出厂时间为 2015 年 1 月, 出厂活度为  $1.96 \times 10^5 \text{ Bq}$ ; 2017 年 6 月进行了本次实验, 计算得到实验时源的参考活度为  $141,086 \text{ Bq}$ 。由表 8 可知: 第一套、第二套符合测量系统测量数据计算出的  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度分别为  $161,099 \text{ Bq}$ 、 $142,620 \text{ Bq}$ , 2 套符合测量系统使用的插件型号均相同, 实验过程中设置的参数均相同; 理论上 2 套符合测量系统测出来的  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度应在误差范围内一致, 但第一套符合测量系统测量的活度值要远远大于第二套符合测量系统; 且第二套符合测量系统测量结果与参考源的活度相对偏差为  $1.09\%$  在误差范围内一直, 如若 2 套符合测量系统的第一道与第二道计数相同则第一套的符合测量系统真符合计数必定小于第二套符合测量系统。

符合插件其本身具有时间分辨本领, 符合插件的符合分辨时间不能随意减小, 本次实验 2 套符合测量系统设置的符合分辨时间都为  $0.39 \mu\text{s}$ , 测量时间相同, 第二套符合测量系统的真符合计数大于第一套符合测量系统, 则说明第一套符合测量系统真符合计数产生了“漏计数”, 即第二套符合测量系统的符合插件的性能好于第一套符合测量系统。

比较两个符合插件的性能好坏, 可同时构建 2 套符合测量系统测量; 先测量第一套符合测量系统的最佳脉冲宽度; 再同时用 2 套符合测量系统测量同一个  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度, 2 套符合测量系统的符合分辨时间都设为第一套符合测量系统测出的最佳脉冲宽度且其他参数设置相同; 通过比较两套符合测量系统测量出的放射源的活度; 若第二套符合测量系统测量活度小于第一套系统, 则第二套符合测量系统的符合插件性能好于第一套系统; 反之第一套符合测量系统的符合插件的性能好于第二套。

**Table 7.** The calculated of  $A_1$ ,  $A_2$  and  $A_3$   
**表 7.**  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  计算值

$A_i$	第一套系统/Bq	第二套系统/Bq
$A_1$	160,486	142,274
$A_2$	161,052	142,866
$A_3$	161,758	142,720

**Table 8.** The calculated of  $\bar{A}$ ,  $\sigma_s$  and  $\delta_{\bar{A}}$

**表 8.**  $\bar{A}$ ,  $\sigma_s$  及  $\delta_{\bar{A}}$  计算值

参数	$\bar{A}$ /Bq	$\sigma_s$ /Bq	$\delta_{\bar{A}}$ /Bq
第一套系统	161099	637	0.395%
第二套系统	142620	308	0.217%

文献报道中 1990 年许茂国[17]利用  $\gamma$ - $\gamma$  符合法测量放射源  $^{60}\text{Co}$  的活度, 测量结果的相对偏差为 1.4%; 2002 年程敏熙[18]使用  $\gamma$ - $\gamma$  符合法对  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度进行测量, 测量结果的相对偏差为 3.93%; 2003 年马文彦等[19]通过  $\beta$ - $\gamma$  符合法测量  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度, 测量结果的相对偏差 4.18%; 2013 年颜拥军等[20]利用数字符合法测量  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度, 测量结果的相对偏差为 2.51%。

该实验测量出的  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度为 142620Bq, 相对偏差为 0.217%, 与其精度要比上述学者测量出的  $^{60}\text{Co}$  放射源的精度都要高; 与实验时放射源的参考活度的相对偏差为 1.09%, 在误差范围内一致; 通过此实验步骤及插件的相关参数的设置, 能够快速、准确的测量出  $^{60}\text{Co}$  放射源的活度。

## 6. 结论

本文详细介绍了  $\gamma$ - $\gamma$  符合法测量  $^{60}\text{Co}$  放射源活度的原理, 以及测量活度的实验步骤; 阐述了为保证测量精度符合测量系统各插件相关参数设置方法; 通过实验可知每套符合套测量系统都有其固有的符合分辨本领, 实验之前必须找到其最佳脉冲宽度, 且每次进行实验时都需对符合测量系统的符合分辨时间重新进行测量; 本次实验测量出的  $^{60}\text{Co}$  放射源活度为  $142,620 \pm 924$  Bq, 测量精度为 308 Bq, 测量结果的相对偏差为 0.217%; 实验所得的源活度与实验时源的参考活度相对偏差为 1.09%, 在误差范围内一致, 测量结果稳定可靠, 实验精度要好于其他学者测量结果的精度。

## 基金项目

湖南省科技计划项目(2015SK20063)。

## 参考文献 (References)

- [1] 王彬生. 放射性活度计测量的误差来源和控制[J]. 中国医疗设备, 2010, 25(8): 85-86.
- [2] 马文彦, 闫桂英, 奇格其.  $\beta$ - $\gamma$  符合法测量  $^{60}\text{Co}$   $\beta$  放射源活度误差分析[J]. 计量技术, 2005(7): 32-34.
- [3] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000.
- [4] 谢菊英, 董国福, 顾龙, 等. 符合系统的调试及应用[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(5): 694-697.
- [5] 复旦大学. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1981.
- [6] 凌球, 等. 核辐射探测[M]. 修订版. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [7] 北京核仪器厂. BH1283N 高压电源使用说明书[Z].

- [8] 张玉琴, 刘伟. 如何正确使用定标器[J]. 核电子学与探测技术, 1981(2): 65-66.
- [9] FJ-374NaI(Tl) $\gamma$  闪烁探头使用说明书[Z].
- [10] 北京核仪器厂. BH1218 放大器使用说明[Z].
- [11] 北京核仪器厂. FH0001B 插件机箱使用说明[Z].
- [12] 北京核仪器厂. BH1221 型符(反)符合[Z].
- [13] 王经瑾. 核电子学[M]. 北京: 原子能出版社, 1985.
- [14] 杨焕章. 航空 $\gamma$ 能谱探头温度效应及校正技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [15] 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.
- [16] 李志宏, 余忠民. 怎样正确理解和运用标准偏差 $\sigma$  [J]. 机电工程技术, 2000(2): 11-13.
- [17] 许国茂. 符合法测量放射源 $^{60}\text{Co}$ 和 $^{131}\text{I}$ 的绝对强度[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1990(1): 25-31.
- [18] 程敏熙. 符合测量实验方法研究[J]. 大学物理, 2002, 21(6): 28-32.
- [19] 马文彦, 邱晓林, 齐格奇, 等. 用符合法测量 $\beta$ 放射源的活度[J]. 计量技术, 2002(7): 32-34.
- [20] 颜拥军, 杨朝桐, 赖伟, 等. 数字符合法 $^{60}\text{Co}$ 源活度测量实验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(5): 629-632.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)