

效率融洽法 Yb-169 活度测定

苏 琼 王 兰 程建平
(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 本文详细介绍了在一次 ^{169}Yb 点源的活度测量比对中针对短寿命核素样品测量的特点而采取的数据处理方法。提出了效率融洽法概念, 介绍对待测源的效率与活度的乘积值 $\varepsilon(E_\gamma) \times A$ 采用效率融洽法改善测量系统在关心能区的效率刻度准确性的尝试, 并取得了比较满意的比对结果。

关键词 比对, Yb-169, 效率融洽法, 数据处理方法

中图分类号 TL7

清华大学工程物理系的(核技术研究所)面向教学与科研的低本底 HPGe γ 谱仪实验室正处于建设完善中。由于测试分析任务的繁忙、紧迫, 以及客观条件的原因, 新谱仪仅以低本底 HPGe 单晶 γ 谱仪方式运行, 仅完成了系统对圆柱形体源的天然放射性核素的测量效率刻度。

众所周知, 开展实验室间的样品分析技术的比对是检验和提高测试分析能力、促进量值统一准确可靠的重要措施之一。为使该新设备早日完善, 为考查我们在特定环境背景状况下设想的新的谱仪刻度方法的可行性, 从而检验和加强我们测试结果的质量保证。本实验室参加了由中国原子能科学技术研究院组织的多个实验室、多台测量仪器以及多种测量方法参与的 ^{169}Yb 点源活度测量比对。本文介绍我们参加这次比对中的一些主要工作, 并与同行探讨。

1 短寿命核素样品测量和多次测量的平均值

1.1 短寿命核素样品测量的特点

与通常的长寿命放射性核素不同, ^{169}Yb 是衰变方式较为复杂(伴有符合相加效应)、半衰期也较短的 γ 放射性核素。在 ^{169}Yb 样品谱获取中, 为减小其 γ - γ 符合相加效应的影响(小到可以忽略), 我们采用了大源距(>38.5 cm)的测量几何条件; 另一方面, 为获取具有足够小的相对统计误差的特征峰计数, 又得采用足够长的谱数据获取时间。因此, 必须考虑短寿命核素在样品谱获取过程中的活度衰减, 否则, 势必在测量结果中引入系统误差。同样, 假若

未考虑样品谱获取过程中的衰减, 那样的多次测量结果的平均值, 它也必然含有系统误差。

下文给出了计入样品谱获取过程中 ^{169}Yb 衰变的活度计算表达式的导出与结果。

对于任意一个具有 γ 放射性核素的样品, 其 γ 放射性核素 i 的 γ 谱中的任一不受其它因素干扰(如符合相加效应、来自其它核素的重峰干扰等)的孤立单个特征峰的净峰面积 $S(i, E_\gamma, t_1, t_2)$ 为:

$$S(i, E_\gamma, t_1, t_2) = \varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot \int_{t_1}^{t_2} A(i, t) \cdot dt \quad (1)$$

式中, $\varepsilon(E_\gamma)$ 是探测系统对能量为 E_γ 的 γ 射线的探测效率; $\delta(i, E_\gamma)$ 是核素 i 发射能量为 E_γ 的 γ 射线的分支比; t_1 与 t_2 分别是样品谱获取的起始时刻和终止时刻。通常, 把 $t_r = t_2 - t_1$ 称作谱获取的真实时间; $A(i, t)$ 是样品中核素 i 在 t 时刻的活度。

$$A(i, t) = A_0(i) \cdot e^{-\lambda_i t} \quad (2)$$

式中, $A_0(i)$ 是样品中核素 i 在认定的基准参考时刻(通常规定校准时刻为 $t=0$ 的时刻)的活度; λ_i 是样品中核素 i 的衰变常数, $\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2}$, $T_{1/2}$ 是核素 i 的半衰期。

对于式(1), 我们分别两种情况进行讨论:

1) 依据测试分析的精确度要求, 若样品谱获取期间 $t_r = t_2 - t_1$ 内, 样品中核素 i 的活度衰减变化对测定结果的不确定度的贡献份额可忽略不计, 即可认为 $A(i, t) = A_0(i) \cdot e^{-\lambda_i t} \approx \text{常数}$ 时, 则式(1)化为式(3):

$$S(i, E_\gamma, t_1, t_2) = \varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot A_0(i) \cdot e^{-\lambda_i t_1} \cdot (t_2 - t_1) \quad (3)$$

2) 依据测试分析的精确度要求,若样品谱获取期间 $t_r = t_2 - t_1$ 内,样品中核素 i 的活度衰减变化对测定结果的不确定度的贡献份额不可忽略不计,这正是短寿命核素测量的一个显著特点,则式(1)化为式(4):

$$S_{sh}(i, E_\gamma, t_1, t_2) = \varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot A_0(i) \cdot \frac{e^{-\lambda_i t_1} - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i} \quad (4)$$

事实上,至少当 $t_r/T_{1/2} \leq 0.001$ 时,即在“长寿命放射性核素”的 γ 谱分析中,人们普遍运用的是表达式式(3)。其实,它是表达式(4)的幂级数展开的一次项。

1.2 短寿命核素多次测量的平均值

为获得高准确度的测试结果,须对于同一物理量进行多次测量,然后取其等权或加权平均值。然而,用式(4)处理的短寿命核素的多次测量,其多次测量的平均值显然应考虑测量时间及衰变常数。改写式(4),可得到短寿命核素测量活度的式(5)

$$A_0(i) = S_{sh}(i, E_\gamma, t_1, t_2) / (\varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot \frac{e^{-\lambda_i t_1} - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i}) \quad (5)$$

对样品做等精度 $n(=1, 2, \dots, j, \dots)$ 次测量,则式(5)可改写为式(6),式中角标 j 表示第 n 的测量。

$$A_{0,j}(i) = S_{sh,j}(i, E_\gamma, t_{1,j}, t_{2,j}) / (\varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot \frac{e^{-\lambda_i t_{1,j}} - e^{-\lambda_i t_{2,j}}}{\lambda_i}) \quad (6)$$

因而,等精度多次测量的平均值为式(7)所示:

$$\overline{A_{0,j}(i)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_i \cdot S_{sh,j}(i, E_\gamma, t_{1,j}, t_{2,j})}{\varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot (e^{-\lambda_i t_{1,j}} - e^{-\lambda_i t_{2,j}})} \quad (7)$$

1.3 系统死时间的影响

测量活度太强的样品时,得系统的计数死时间不为 0,则真实测量时间为 $t_r = t_2 - t_1$,而有效测量时间 $t_l < t_2 - t_1$ 。若样品测量的死时间为 t_d ,则

$$t_r = t_l + t_d \quad (8)$$

若有效测量时间内的谱峰净计数为 S' ,而真实测量时间内谱峰面积净计数记为 S ,则

$$\frac{S'}{t_l} = \frac{S}{t_r} \quad \text{或} \quad S = t_r \cdot \frac{S'}{t_l} \quad (9)$$

实际上,由于死时间的存在,测量得到的是 S' 、 t_l 和 t_r ,而真实测量时间内谱峰面积净计数 S 则是导出量。用直接测得的量代替导出量后,式(4)~(7)等则均应改写为式(4')~(7')的形式,这些是在考虑了系统计数死时间的影响后,人们要经常采用的表达式。

$$S'_{sh}(i, E_\gamma, t_1, t_2) = \varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot A_0(i) \cdot \frac{e^{-\lambda_i t_1} - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i} \cdot \frac{t_l}{t_r} \quad (4')$$

$$A_0(i) = \frac{t_r}{t_l} \cdot S'_{sh}(i, E_\gamma, t_1, t_2) / (\varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot \frac{e^{-\lambda_i t_1} - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i}) \quad (5')$$

$$A_{0,j}(i) = \frac{t_{r,j}}{t_{l,j}} \cdot S'_{sh,j}(i, E_\gamma, t_{1,j}, t_{2,j}) / (\varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot \frac{e^{-\lambda_i t_{1,j}} - e^{-\lambda_i t_{2,j}}}{\lambda_i}) \quad (6')$$

$$\overline{A_{0,j}(i)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_i \cdot t_{r,j} \cdot S'_{sh,j}(i, E_\gamma, t_{1,j}, t_{2,j})}{\varepsilon(E_\gamma) \cdot \delta(i, E_\gamma) \cdot t_{l,j} \cdot (e^{-\lambda_i t_{1,j}} - e^{-\lambda_i t_{2,j}})} \quad (7')$$

2 用效率融合法修正的效率刻度

2.1 用点 ^{152}Eu 标准源刻度效率

用 ^{152}Eu 点标准源对谱仪系统作效率刻度,并利用 ^{152}Eu 的“能量—效率”和感兴趣能区的 ^{169}Yb 的“能量—(效率·活度)积”数据,可拟合出精确的谱仪效率刻度曲线,确定效率刻度曲线的阶数和具体的刻度结果。

覆盖能区较宽的多能 ^{152}Eu 点标准源置于样品架上,在源—探测器距恒定(>38.5 cm)的相同测量几何下,对标准源进行数次测量。取其 γ 全能峰探测效率的平均值,取自然对数作最小二乘法的 n 阶多项式拟合。多项式的阶数取决于观测能量点的多少。我们对 121.8 keV 到 1408.1 keV 的 14 个 γ 能量的效率点,分别取 $n=3, 4, 5$ 与 6,选择其方差和最小的多项式为最佳拟合表达式。表 1 列出了五次测量的各 γ 峰的平均探测效率及其标准差,表 1 末还列出了 5 阶多项式 6 次迭代的拟合函数的计算效率。

表 1 ¹⁵²Eu 标准点源五次测量的各 γ 辐射能量的全能峰平均探测效率及其标准差

Table 1 Average detection efficiency and its standard deviation of full energy peaks of γ -rays from five measurements of ¹⁵²Eu standard point source

E_{γ} / keV Energy of γ rays	平均计数率 $\pm 1 \sigma\%$ Average count rate	分支比 $y, \%$ Emission rate	测定平均效率 Determined average efficiency	拟合计算效率 * Efficiency fitted
121.8	14.7435 $\pm$ 1.7	28.0	1.455E-3	1.4474E-3
244.7	2.7798 $\pm$ 0.31	7.4	1.038E-3	1.0380E-3
344.3	7.5770 $\pm$ 0.15	26.2	7.992E-4	8.0562E-4
411.1	0.5568 $\pm$ 0.53	2.20	6.994E-4	7.0162E-4
444.0	0.72696 $\pm$ 0.43	3.04	6.609E-4	6.6077E-4
564.0	0.096748 $\pm$ 4.4	0.49	5.457E-4	5.5010E-4
586.3	0.089703 $\pm$ 1.6	0.452	5.485E-4	5.340E-4
778.9	1.96564 $\pm$ 0.12	12.7	4.277E-4	4.3411E-4
964.1	1.88810 $\pm$ 0.63	14.23	3.667E-4	3.7209E-4
1085.9	1.20824 $\pm$ 0.24	9.56	3.493E-4	3.4046E-4
1089.7	0.20754 $\pm$ 1.2	1.68	3.414E-4	3.396E-4
1112.1	1.60418 $\pm$ 0.21	13.35	3.321E-4	3.340E-4
1299.1	0.16904 $\pm$ 0.68	1.60	2.920E-4	2.9472E-4
1408.0	2.04692 $\pm$ 0.19	20.57	2.750E-4	2.7440E-4

源距=38 cm, 标准源当前活度: 36185 Bq, 参考时间: 2003.8.1

Distance of source = 38 cm, activity of standard source = 36185 Bq, reference time: 2003.8.1

*: 本处为 5 阶 6 次迭代的拟合函数的计算效率

*: The Efficiency fitted was computing results from the polynomial fitted with 5 powers by iterating of 6 times.

2.2 用效率融洽法修正 ¹⁶⁹Yb 的探测效率

从表 1 的效率数据可见, 要确定 ¹⁶⁹Yb 的低能区特征峰, ¹⁵²Eu 的效率刻度点显得较少, 为使刻度更为准确, 我们采用了效率融洽法。其出发点是对于无符合相加效应或符合相加效应可以忽略的 γ 辐射来说, 其探测效率刻度曲线应连续光滑, 理想情况下, 即测量精确度高的情况下, 应是彼此互容的。本工作中:

1) 除使用标准源 ¹⁵²Eu 进行刻度外, 还利用 ¹⁶⁹Yb 的效率与活度的乘积值, 即 $\varepsilon(E_{\gamma i}) \times A$, 使 ¹⁶⁹Yb 探测效率刻度更为准确。

2) 用 ¹⁵²Eu 标准源, 无符合相加效应的探测效率已实验测得 (表 1)。测量 ¹⁶⁹Yb 并计算 $\varepsilon(E_{\gamma i}) \times A$ 。通过多项式拟合、重复迭代求得精确效率曲线的函数 $\varepsilon(E_{\gamma i})$, 可得 ¹⁶⁹Yb 的活度 A 。

2.2.1 拟合方法 利用 ¹⁵²Eu 测量得到的 14 个能量点的数据, 对自然对数值进行最小二乘法多项式拟合, 得到 $\ln(\varepsilon) = p_0 \cdot \ln(E_{\gamma})$; 将 ¹⁶⁹Yb 的 5 个能量值 ($E_{\gamma 1} \sim E_{\gamma 5}$) 代入, 得出其对应的效率 $\varepsilon(E_{\gamma 1}) \sim \varepsilon(E_{\gamma 5})$; 从 $\varepsilon(E_{\gamma i}) \times A$ 的值, 计算出对应活度 $A(E_{\gamma 1}) \sim A(E_{\gamma 5})$;

对活度求平均, 得出 $\bar{A}$ 。

2.2.2 迭代过程 为更准确地求出 ¹⁶⁹Yb 的活度, 须对初始由 ¹⁵²Eu 确定的效率拟合结果进行迭代修订, 其方法是:

将由 ¹⁵²Eu 测量得到的 14 个能量点的平均效率数据连同来自上述的 ¹⁶⁹Yb 的 5 个探测效率值的共计 19 个数据进行拟合, 得到新的拟合多项式 $\ln(\varepsilon) = p_0 \cdot \ln(E_{\gamma})$;

由拟合结果计算出新的 ¹⁶⁹Yb 的 5 个效率值;
由 ¹⁶⁹Yb 的 5 个新效率值, 再依据测定的 $\varepsilon(E_{\gamma i}) \times A$ 计算出新的对应活度 $A(E_{\gamma 1}) \sim A(E_{\gamma 5})$, 并计算新的平均值 $\bar{A}$, ...。

反复以上过程, 直至相邻两次迭代求得平均活度 $\bar{A}$ 之差小于给定的相对偏差时, 迭代结束。

2.2.3 计算流程 图 1 给出所使用的程序框逻辑框图。计算过程中, 拟合阶数 power 和迭代次数 n 主要由两个参数 ratio 和 r 来决定。

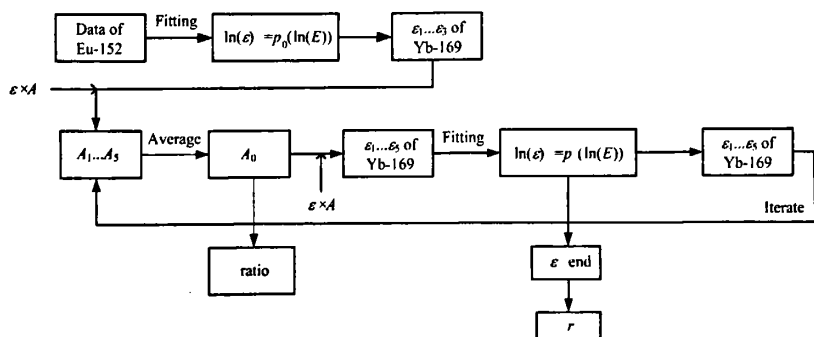


图 1 数据处理拟合、迭代计算程序流程图

Fig.1 Flow chart of processing data used for fitting and iterating program

ratio 为相邻两次迭代计算得出的 ^{169}Yb 的活度的变化率：

$$\text{ratio} = \frac{|A_{i+1} - A_i|}{A_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

r 为拟合数据和实验数据的标准差，表示用拟合曲线描述实际测量数据的可靠性。由于 ^{169}Y 的 5 个点的效率在拟合前未知，不宜将这 5 点的数据加入 r 的计算中， r 的计算仅使用 ^{152}Eu 的 14 个测量点。

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{14} (\epsilon_i - \epsilon_{\text{end}_i})^2}{14}} \quad (11)$$

ϵ_{end} 是由当次迭代拟合后的多项式，将 ^{152}Eu 的 14 个能量点代入计算得出的效率结果。迭代次数 n 主要由 ratio 决定，对同样的阶数， n 越大所得的 ratio 越小，当 ratio 小于一定数值时，迭代停止。拟合阶数 power 主要由 r 决定， r 越小，拟合结果与实际数据越相似，随着 power 的增大，使 r 值最小的 power 就是所需值。

2.2.4 计算结果及其初步分析 用 matlab 编程分别进行了 power = 3, 4, 5 与 6 和 $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 与 20 排列组合得出的几种情况的计算，表 2 列出了这些情况下的拟合、迭代结果。

由以上数据可以得出以下结果：

- 1) power = 5 时的 r 最小，拟合与实际最为符合，而在 power = 5 时， $n = 6$ 的情况下 ratio 已降为万分之一以下，因此选择这样的计算情况是合适的。
- 2) power = 5， $n = 6$ 的活度计算结果稳定，因为 6 次和 20 次迭代得到的活度差仅为 7 Bq，与总活度值相比可忽略。

表 2 拟合阶数 power = 3~6 和迭代次数 $n = 1 \sim 6$ 与 20 得出的 ratio(%), $r(\text{e-6})$ 和 $A_i(\text{Bq})$ 计算结果

Table 2 Calculated ratio, r , and activity $A_i(\text{Bq})$ in different conditions of fitting power $p=3 \sim 6$, and iterating time $n=1 \sim 6$ and 20

Power	n	ratio/ 10^{-3}	$r/10^{-6}$	A_i/Bq
3	1	/	8.6427	86000
	2	0.9249	8.5556	85920
	3	0.59699	8.5034	85869
	4	0.38594	8.4714	85836
	5	0.24951	8.4515	85815
	6	0.16131	8.4389	85801
4	20	0.0035967	8.4166	85775
	1	/	6.0293	84188
	2	0.26894	6.0391	84211
	3	0.19297	6.0466	84227
	4	0.13846	6.0523	84239
	5	0.099343	6.0564	84247
5	6	0.07128	6.0595	84253
	20	0.00068328	6.0674	84268
	1	/	5.9049	84434
	2	0.10357	5.9027	84425
	3	0.075653	5.9012	84418
	4	0.055261	5.9001	84414
6	5	0.04365	5.8993	84410
	6	0.029484	5.8987	84408
	20	0.0036287	5.8972	84401
	1	/	8.8453	81657
	2	8.5353	7.6066	82360
	3	6.3107	6.8554	82883
6	4	4.6682	6.421	83272
	5	3.4544	6.18	83560
	6	2.5568	6.0509	83775
	20	3.8196	5.9328	84379

3)在上述不同拟合阶次的数十次迭代计算中,A 值在 81657~86000 间变化。在 5 阶拟合的情况下, $n=1$, 活度是 84434, $n=6$ 即迭代计算所得活度基本稳定的情况下, 活度为 84408, 而 $(84434-84408)/84434=3.08\times 10^{-4}$ 。说明对 ^{152}Eu 的 14 个点的测量结果的函数拟合与 ^{169}Yb 测量结果的实际情况十分吻合。

4) 图 2 是“效率融洽法求得的点源总活度”随多项式拟合阶数 p 及迭代次数 n 变化, 如图所示, 对于阶数分别为 4、5、6 的情况, 它们的多次迭代结果是趋向于几乎共同的收敛值。而拟合阶数为 6 的情况, 显示“效率融洽法求得的点源总活度”由原始的 81657 Bq 到迭代 19 次后的 84379 Bq, 产生了 3.2% 的修正, 这说明当选择的函数形式不尽合理时, “效率融洽法”会给最终结果带来不容忽视的改善。

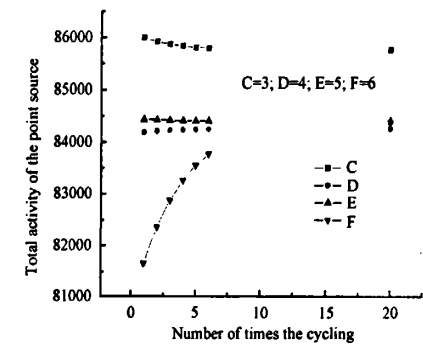


图 2 “效率融洽法求得的点源总活度”随多项式拟合阶数 p 及迭代次数 n 变化直观图

Fig.2 Visual picture of total activity calculated as function of fitting power p and iterating time n by harmonizing efficiency method

5) 若选择的函数过于不合理, 如图 2 中拟合阶数等于 3 的情况所示, 迭代效果不明显。

表 3 列出了 $\text{power}=5, n=6$ 情况下的拟合结果, 其中包括 ^{169}Yb 的迭代结果, 图 3 绘出了相应的效率曲线。表 4 列出了在未使用 ^{169}Yb 数据的情况下, 按 $\text{power}=5$ 拟合得出相应 ^{169}Yb 各特征 γ 辐射的探测效率值。

$$\ln(\varepsilon) = -0.017171(\ln(E))^5 + 0.4627(\ln(E))^4 - 4.8246(\ln(E))^3 + 23.994(\ln(E))^2 - 56.166\ln(E) + 41.92$$

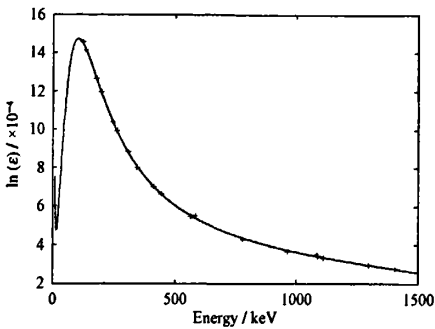


图 3 ^{152}Eu 和 ^{169}Yb 点源位于探测器轴向距端面=38.5 cm 情况下的探测效率刻度曲线

Fig.3 Detection efficiency of point sources of ^{152}Eu and ^{169}Yb placed at 38.5 cm to the detector

表 3 ^{152}Eu 和 ^{169}Yb 点源的 5 阶多项式的 6 次迭代情况下的拟合结果

Table 3 Result of efficiencies fitted in condition of power=5 and $n=6$ for point sources of ^{152}Eu and ^{169}Yb			
核素 Nuclides	能量 Energy / keV	测量效率 ε Determining efficiency	计算效率 ε_{end} Computing efficiency
Eu-152	121.8	0.001455	0.0014474
	244.7	0.001038	0.001038
	344.3	0.0007992	0.0008056
	411.1	0.0006994	0.0007016
	444.0	0.0006609	0.0006608
	564.0	0.0005457	0.0005501
	586.3	0.000549	0.000534
	778.9	0.0004277	0.0004341
	964.1	0.0003667	0.0003721
	1085.9	0.0003493	0.0003405
	1089.7	0.0003414	0.0003396
	1112.1	0.000332	0.000334
Yb-169	1299.1	0.000292	0.0002947
	1408.0	0.000275	0.0002744
	130.52	0.0014251	0.0014253
	177.21	0.0012641	0.0012645
	197.96	0.001189	0.00119
	261.08	0.0009915	0.0009917
	307.74	0.000878	0.0008781

表 4 在未使用 ^{169}Yb 数据的情况下的 ^{169}Yb 各特征 γ 辐射的探测效率拟合结果

Table 4 Characteristic peaks of γ -rays from detection efficiency fitted by just ^{152}Eu

能量 Energy /keV	计算效率 ε_{end} Computing efficiency
130.52	0.001432
177.21	0.001265
197.96	0.0011884
261.08	0.00098892
307.74	0.00087574

3 比对结果与结论

表 5 为本次 ^{169}Yb 测量比对工作当前汇聚到的实验结果,该表中的实验室代码项只用于区分同一方法的不同实验室,而不同方法的相同代码不一定是同一实验室的。根据误差理论对各实验室所报告的数据进行检验,未有应予剔除的异常值^[1]。因此,

按等权方式对它们计算了方法平均值和总平均值。表 5 表明:两种物理测试法的方法平均值符合很好;本实验室的数据结果在 2% 的偏差范围内与方法平均值及总平均值符合。本实验室测定结果的总不确定度为 3% (3σ ,下同),它包括 ^{152}Eu 标准源的不确定度 2%、计数统计误差(<1%)、样品称量误差(<0.2%),核参数的不确定度(<2%)^[2]等。这表明在我们的包括数据处理方法在内的测量方法是可靠的,不确定度的估算也是合理的。

正如在§3.2.4 中所述,本工作提出的“效率融洽法”的效果受初始函数的选取影响。但是,无论哪种情况,迭代都给最终结果带来改善,选取合理的函数至关重要。如前所述,虽然 5 阶多项式能同时对 ^{152}Eu 和 ^{169}Yb 点源的共 19 个测量值给出满意的拟合结果,但 4 和 6 阶多项式多次迭代结果又趋于相近收敛值,它们彼此验证着我们的比对结果的合理性。正因为如此,本文选取了三种函数的 $n=20$ 时的平均值,而不仅仅是 5 阶拟合函数的结果。

表 5 各实验室的比对报告结果 (参考时间: 2003 年 7 月 13 日 00:00:00)
Table 5 Intercomparison of sources ^{169}Yb from participant labs (Reference time: 13 July 2003, 00:00:00)

实验室代码 Lab. code	γ 谱仪方法报告结果 Results by γ spectrometer /Bq·mg ⁻¹		实验室代码 Lab. code	$4\pi\beta$ - γ 符合方法报告结果 Results by $4\pi\beta$ - γ coincidence method /Bq·mg ⁻¹	
A	3390.6	±71(3 σ)	A	3390	±41(3 σ)
B(本实验室 Our lab.)	3250	±98(3 σ)	B	3190	±51(3 σ)
C	3340	±194(--)	C	3410	--
D	3380	--			
E	3190	±109(3 σ)			
方法平均值 Average of method	3310	±233 (3 σ)	方法平均值 Average of method	3330	±298 (3 σ)
总平均值 Average	3317.6±261.2 (3 σ)				

最后,再次指出,除效率融洽法外,本文的短寿命核素样品测量和多次测量的平均值问题也是本比对工作中需要格外注意的事项,否则,它们会带来百分之二甚或更大的偏低的系统误差。

参考文献

1 冯师颜. 误差理论与实验数据处理. 北京: 科学出版社, 1964. 65 - 67

FENG Shiyao. Error Theory and Processing of Experiment Data. Beijing: Science Press, 1964. 65 - 67
2 刘运祚主编. 常用放射性核素衰变纲图. 北京: 原子能出版社, 1982. 228 - 230
LIU Yunzuo. Decay Schemes for Common Radioactive Nuclides. Beijing: Atomic Energy Press, 1982. 228 - 230

An application of harmonizing efficiency method in an intercomparison on measuring activity of Yb-169

SU Qiong WANG Lan CHENG Jianping

(Institute of Nuclear Technology, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper, the methods used for processing activity data of radionuclides of short life are presented. A concept of harmonizing efficiency method was employed to improve veracity of efficiency scale in energy range of interest, using the products between efficiencies and activity, i. e. $\varepsilon(E_{\gamma i}) \times A$, of the source being measured, and more satisfying intercomparison result was obtained.

Key words Intercomparison, Yb-169, Harmonizing efficiency method, Methods of processing data

CLC TL7