

用反符合方法测量¹³¹I和¹³³Ba的比活度

汪建清¹, 姚顺和¹, 杨丽艳², 杨巧玲¹, 贾雪文¹, 姚燕玲¹

(1. 中国原子能科学研究院 计量测试部, 北京 102413;

2. 四川大学, 四川 成都 610064)

摘要: ¹³¹I 是核医学应用中较为重要的核素之一; ¹³³Ba 是 1 种电子俘获核素, 对 HPGe γ 谱仪能量刻度和效率校准具有重要意义。利用 $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma(\text{HPGe})$ 反符合测量装置对上述两种核素的活度进行了反符合测量方法研究, 所得到的比活度测量结果分别为 $1\,794.8(1\pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$ 和 $502.8(1\pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$, 与归一到相同参考时刻 $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma(\text{NaI}(\text{Tl}))$ 符合效率外推法的测量结果 $1\,797.6(1\pm 0.5\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$ 和 $504.9(1\pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$ 均在不确定度范围内一致。

关键词: $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma$ 反符合; $4\pi\beta-\gamma$ 符合; 比活度

中图分类号: TL84

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)03-0211-07

Specific Activity Measurement of ¹³¹I and ¹³³Ba by Anti-coincidence Method

WANG Jian-qing¹, YAO Shun-he¹, YANG Li-yan², YANG Qiao-ling¹,
JIA Xue-wen¹, YAO Yan-ling¹

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing 102413, China;

2. Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: ¹³¹I is a very important nuclide applied in nuclear medicine. ¹³³Ba, an EC decay nuclide, plays a significant role in the efficiency calibration of HPGe detector. The activity measurement method for the above two kinds of nuclides was studied by the $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma(\text{HPGe})$ anti-coincidence counting. The specific activity measurement result for ¹³¹I sample is $1\,794.8(1\pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$ and for ¹³³Ba is $502.8(1\pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$. Compared with the results measured by $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma(\text{NaI}(\text{Tl}))$ coincidence efficiency extrapolation methods at the same reference time, $1\,797.6(1\pm 0.5\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$ and $504.9(1\pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1} (k=1)$, it is in good agreement within the uncertainties.

Key words: $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma$ anti-coincidence; $4\pi\beta-\gamma$ coincidence; specific activity

根据复杂衰变核素活度测量方法研究的需要, 在研制完成的 $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma(\text{HPGe})$ 反符合

测量装置上, 对¹³¹I、¹³³Ba的活度进行反符合测量方法研究。为验证反符合方法测量结果的可

靠性,同时采用 $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma(\text{NaI}(\text{Tl}))$ 符合标准装置对同一批 ^{131}I 、 ^{133}Ba VYNS 薄膜源进行效率外推测量,并将二者的测量结果进行比较。

1 测量装置

测量装置主要由 $4\pi\beta(\text{PPC})$ 正比计数器、1台HPGe探测器及相应的电子学线路,以及数据获取系统组成,其框图如图1所示。采用 ^{60}Co 薄膜源和 ^{133}Ba 薄膜源对 $4\pi\beta$ 高气压正比计数器和HPGe探测器的技术性能进行测试,结果表明: $4\pi\beta$ 高气压正比计数器的坪长大于300V,坪斜小于1%/100V;HPGe探测器的能量分辨率对 ^{60}Co 1332.5 keV γ 射线为2.2 keV。

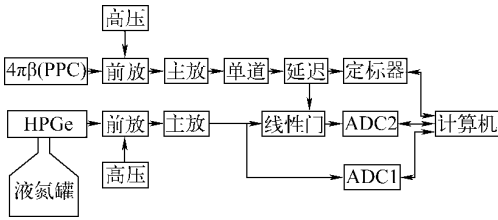


图1 $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma(\text{HPGe})$ 反符合装置框图

Fig.1 Diagram of $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma(\text{HPGe})$ anti-coincidence system

2 $4\pi\beta-\gamma$ 反符合测量原理

Y. Kawada 等^[1]于1970年详细介绍了 $4\pi\beta(\text{PPC})-\gamma(\text{Ge}(\text{Li}))$ 反符合测量装置、原理及利用反符合方法测量 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 和 $^{110}\text{Ag}^m-^{110}\text{Ag}$ 活度的结果,并与符合测量的结果进行了比较。

通常的 $\beta-\gamma$ 衰变纲图如图2所示。图中: β_k 代表 β 衰变到子体的第 k 激发态的 β 分支, p_k 为相应的分支比;从第 k 激发态退激到第 ν 激发态时发射的 γ 射线记为 $\gamma_{k\nu}$,发射几率为 $q_{k\nu}$ 。

对于如图2所示的复杂衰变核素,Y. Kawada 给出其活度测量的原理公式为:

$$n_0 = \frac{n_\beta}{\sum_{k=1}^n q_{k0} \varphi_{k0} + p_0 \varepsilon_0} \quad (1)$$

式中: n_β 为经死时间和本底修正后的 β 计数率; $\varphi_{k0} = 1 - (n_{\Lambda k0}^*/n_{\gamma k0}^*)$, $n_{\gamma k0}^*$ 和 $n_{\Lambda k0}^*$ 分别为从第 k 激发态跃迁到基态时发射的 γ 射线 γ_{k0} 对应于原始谱和反符合谱中峰面积的计数率; p_0 、 ε_0 分别为母核直接衰变到基态的 β 射线的分支比

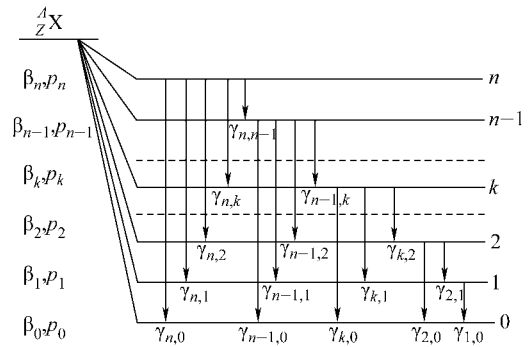


图2 β 核素衰变纲图一般形式

Fig.2 Decay scheme of general β nuclides

和 β 效率。

为满足采用反符合法测量 ^{131}I 、 ^{133}Ba 活度的需要,根据克希霍夫原理重新推导了反符合测量的原理公式。

当从第 k 激发态向第 ν 激发态跃迁时,其表观效率 $\varphi_{k\nu}$ 可表示为:

$$\varphi_{k\nu} = \left(p_k \varepsilon_k + \sum_{s=k+1}^n q_{sk} \varphi_{sk} \right) / \left(p_k + \sum_{s=k+1}^n q_{sk} \right) \quad (2)$$

根据克希霍夫定律:

$$\sum_{\nu=0}^{k-1} q_{k\nu} = p_k + \sum_{s=k+1}^n q_{sk} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),则有:

$$p_k \varepsilon_k = \sum_{\nu=0}^{k-1} q_{k\nu} \varphi_{k\nu} - \sum_{s=k+1}^n q_{sk} \varphi_{sk} \quad (4)$$

对 k 从 ρ 到 n 求和:

$$\sum_{k=\rho}^n p_k \varepsilon_k = \sum_{k=\rho}^n \sum_{\nu=0}^{\rho-1} q_{k\nu} \varphi_{k\nu} \quad (5)$$

将式(5)两边同时加上 $\sum_{k=0}^{\rho-1} p_k \varepsilon_k$,再乘以 n_0 ,可得到:

$$n_0 = \frac{n_\beta}{\sum_{k=\rho}^n \sum_{\nu=0}^{\rho-1} q_{k\nu} \varphi_{k\nu} + \sum_{k=0}^{\rho-1} p_k \varepsilon_k} \quad (6)$$

其中: $\varphi_{k\nu} = 1 - n_{\Lambda k\nu} / n_{\gamma k\nu}$ 。

式(6)即为不考虑任何修正的情况下反符合原理的普遍公式,Y. Kawada给出的式(1)仅为式(6)中 $\rho=1$ 的特例。

3 ^{131}I 活度测量

3.1 样品制备

采用 $4\pi\gamma$ 高气压电离室测量 ^{131}I 放射性溶

液的总活度,根据需要稀释成适合制备薄膜源的待测溶液,取适量的溶液于塑料小壶中,用HPGe γ 谱仪进行核纯分析,以检测溶液中是否含有其它 γ 放射性杂质。分析中未检测出其它 γ 放射性杂质。图3为分析测得的¹³¹I γ 能谱。

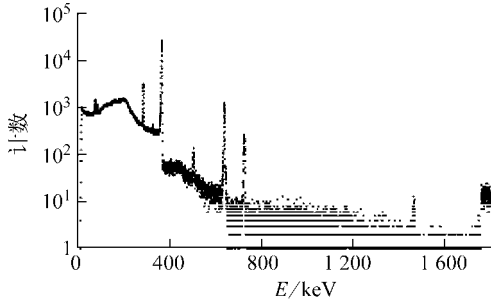


图3 核纯分析测得的¹³¹I γ 能谱

Fig. 3 γ spectrum of ¹³¹I solution measured by HPGe detector

将满足测量要求的¹³¹I溶液盛于塑料小壶中,利用十万分之一的微量天平采用差重法称取适量溶液于预先蒸金并喷硅胶的VYNS薄膜上制成VYNS薄膜源,待自然晾干后用于测量。

3.2 ¹³¹I衰变特点

¹³¹I的衰变纲图如图4所示^[2]。它主要有

6个 β 衰变分支,其中,分支比最大的分支是从母核到子体¹³¹Xe第4激发态的 β 衰变分支,分支比为89.9%。虽然其子体¹³¹Xe的第2激发态为具有平均寿命11.84 d的同质异能态,但从母核衰变到该激发态的 β 分支比仅为0.48%。根据反符合测量原理,在进行反符合测量时,应选择从子体核素各激发态退激到基态时发射的各条 γ 射线,即722.911 keV (1.773%)、636.989 keV (7.17%)、364.489 keV (81.7%)和80.185 keV (2.62%)等 γ 射线,对于能量为80.185 keV的 γ 射线,进行反符合测量时,选择能量为284.305 keV (6.14%)的 γ 射线来代替。

3.3 4 $\pi\beta$ - γ 反符合测量

利用4 $\pi\beta$ (PPC)- γ (HPGe)反符合测量装置,选定HPGe探测器的工作电压3 000 V,正比计数器的工作气压略大于0.1 MPa, β 道的工作电压为3 500 V,对所制备的薄膜源进行反符合测量。表1列出反符合法测得的¹³¹I溶液比活度的结果。图5为测得的¹³¹I原始 γ 谱和反符合 γ 谱。

3.4 4 $\pi\beta$ - γ 符合效率外推测量

为验证反符合测量方法给出量值的准确性,采用4 $\pi\beta$ (PC)- γ (NaI(Tl))符合测量标准装置对所制备的¹³¹I薄膜源样品进行效率外推测量。装置的工作条件为:4 $\pi\beta$ 正比计数器高

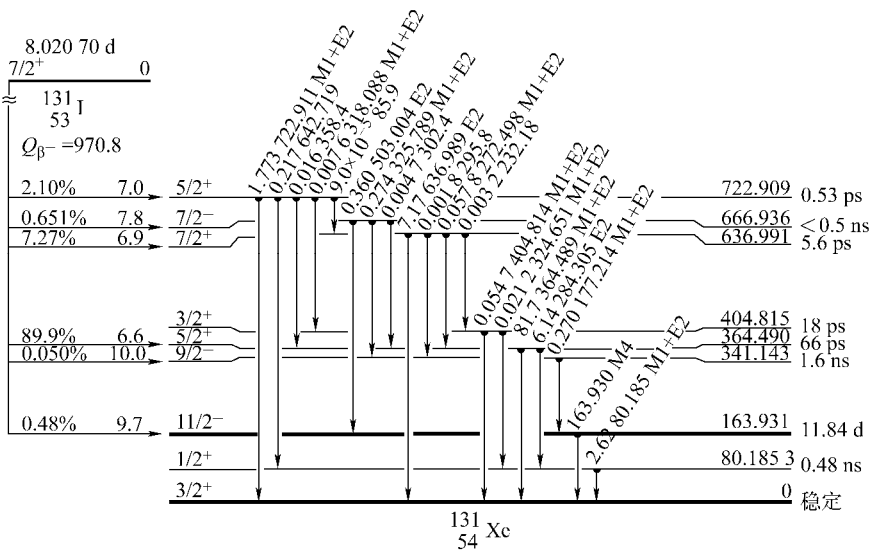


图4 ¹³¹I衰变纲图

Fig. 4 Decay scheme of ¹³¹I

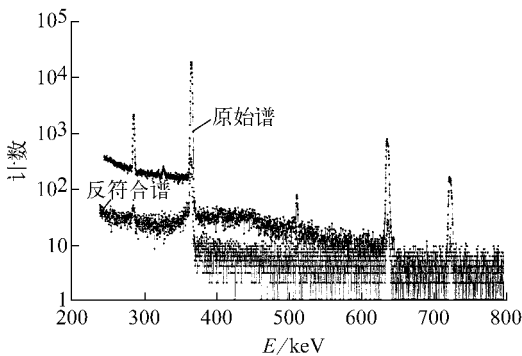
表 1 反符合法测量¹³¹I 溶液比活度的结果Table 1 Specific activity of ¹³¹I solution measured by 4πβ-γ anti-coincidence method

源号	质量/mg	测量时刻 ¹⁾	活度/Bq	合成标准 不确定度/Bq	比活度/ (kBq·g ⁻¹)	归一比活度 ²⁾ / (kBq·g ⁻¹)	与均值的 偏差/%
1	20.54	19:00:00	6 631.6	40.2	322.86	1 785.8	-0.50
2	37.96	17:00:00	12 396.9	75.2	326.58	1 793.4	-0.08
3	25.60	20:00:00	8 260.9	50.2	322.69	1 791.3	-0.20
4	36.82	15:00:00	12 132.2	73.8	329.50	1 796.5	0.09
7	35.26	11:00:00	11 784.5	72.0	334.22	1 796.1	0.07
8	34.28	14:00:00	11 323.6	68.9	330.33	1 794.5	-0.02
11	36.75	10:00:00	12 389.8	75.3	337.14	1 805.3	0.59
12	40.85	12:00:00	13 599.1	82.9	332.90	1 795.5	0.04
						1 794.8 ³⁾	

注:1) 测量日期 2007 年 1 月 15 日

2) 归一比活度参考时刻为北京时间 2006 年 12 月 27 日零时

3) 归一比活度平均值

图 5 实验测得的¹³¹I 原始 γ 谱和反符合 γ 谱Fig. 5 Original γ spectrum and β-γ anti-coincidence γ spectrum of ¹³¹I VYNS sample

压 2 600 V, NaI(Tl) 探测器高压 600 V, 系统的死时间 $\tau_d(\beta) = \tau_d(\gamma) = 4.21 \mu\text{s}$, 符合分辨时间 $\tau_R = 0.98 \mu\text{s}$, 采用改变 β 甄别阈的方法进行效率外推测量。表 2 列出 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合效率外推测量结果, 6 个平行样品的平均值为 $1 797.6 \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$, 相对标准不确定度为 0.5%。

4 ¹³³Ba 活度测量

4.1 样品制备

采用 HPGe γ 谱仪对¹³³Ba 原始放射性溶液进行核纯分析, 以检测溶液中是否含有其它 γ 放射性杂质。分析中未检测出其它 γ 放射性杂质。

表 2 符合效率外推测量结果

Table 2 Results measured by $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence method

源号	质量/mg	$\epsilon_{\beta_{\text{max}}}$ /%	比活度/ (kBq·g ⁻¹)	合成标准 不确定度/ (kBq·g ⁻¹)
6	33.57	96.04	1 794.3	2.2
7	35.26	95.89	1 794.0	2.3
8	34.28	90.14	1 799.5	5.3
10	30.03	95.76	1 801.4	4.2
11	36.75	95.59	1 796.7	2.5
12	40.85	95.46	1 799.8	2.7

注:参考时刻为北京时间 2006 年 12 月 27 日零时

将¹³³Ba 放射性溶液定量稀释成比活度适当的溶液后, 分装在 2 mL、5 mL 两种规格的安瓿瓶中, 溶液量分别取约 1 g 和约 3.6 g。前者可用于绝对测量时制备薄膜源, 后者主要作为 $4\pi\gamma$ 高压电离室校准用的标准溶液。

用塑料小壶取适量的¹³³Ba 溶液, 利用十万分之一的微量天平, 采用差重法称取几十 mg 的溶液于预先蒸金、喷硅胶的 VYNS 薄膜上制成 VYNS 薄膜源, 待自然晾干后用于反符合测量或符合测量。

4.2 ¹³³Ba 衰变特点

¹³³Ba 的衰变纲图如图 6^[2] 所示, 主要有到其子体¹³³Cs 的第 3 激发态和第 4 激发态的两个电子俘获分支, 其分支比分别为 14% 和

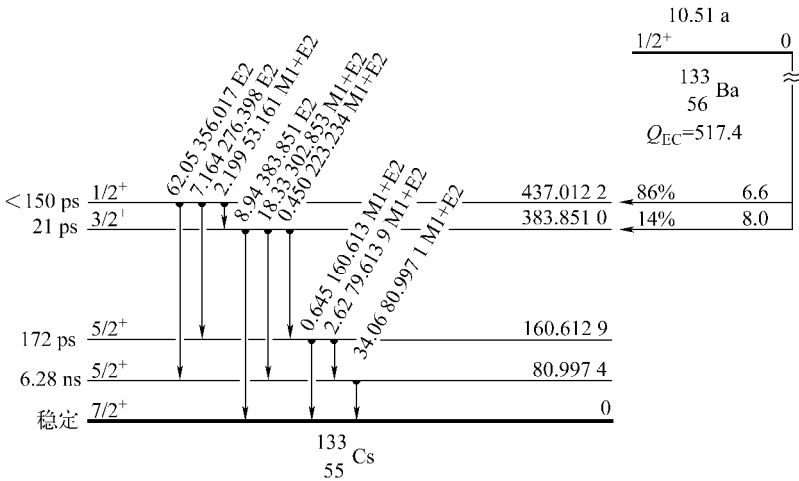


图6 ¹³³Ba 衰变纲图
Fig. 6 Decay scheme of ¹³³Ba

86%，从¹³³Cs 的各激发态退激到基态发射的 γ 射线有 80.997 1 keV (34.06%)、160.613 keV (0.645%)、383.851 keV (8.94%) 等 3 条，但由于 80.997 1 keV 的 γ 射线受从第 2 激发态跃迁到第 1 激发态、能量为 79.613 9 keV 的 γ 射线的干扰较大，且从第 1 激发态退激时除发射分支比 34.06% 的该能量的 γ 射线外，还有约占 48% 的内转换过程，因此，在进行数据处理时，选择从第 3 激发态退激所发射的能量分别为 223.234 keV (0.450%)、302.853 keV (18.33%)、383.851 keV (8.94%) 以及从第 4 激发态退激发射的能量为 276.398 keV (7.164%)、356.017 keV (62.05%) 等 5 条 γ 射线的反符合谱和原始谱数据计算表观效率，这样，还可有效利用这些 γ 射线与更低能级退激过程中发射的内转换电子的符合关系，从而测量待测样品的活度。

4.3 $4\pi\beta$ (PPC)- γ (HPGe)反符合测量

图 7 为实验测得的¹³³Ba 的原始谱和反符合谱示意图。从图 7 可清楚地看到感兴趣的 4 条 γ 射线，其中，能量为 223.234 keV 的 γ 射线的分支比较小，实验获得的能谱中不明显，因此，在实际处理时，人为设定该分支的 γ 射线与 X 射线或内转换电子符合的表观效率等于 276 keV 的 γ 射线的表观效率，这是因为两者均跃迁到¹³³Cs 的第 2 激发态。这样处理对总效率的不确定度的影响很小。

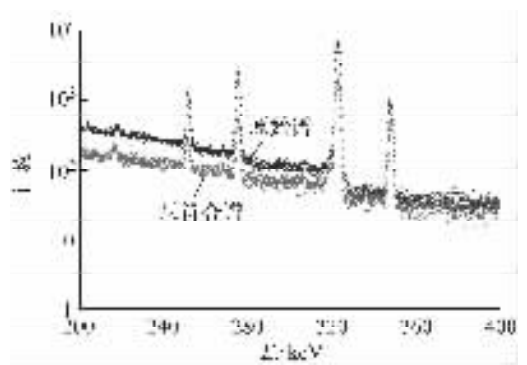


图7 HPGe 探测器测得的¹³³Ba 原始谱和反符合谱
Fig. 7 Original and anti-coincidence γ spectra of ¹³³Ba measured by HPGe detector

表 3 为采用反符合法测量¹³³Ba 样品的测量结果。该方法测得的比活度平均值为 502.8 kBq \cdot g⁻¹，算术平均值的标准偏差为 0.4 kBq \cdot g⁻¹。

4.4 $4\pi\beta$ - γ 符合效率外推测量

为验证反符合测量法给出量值的准确性，采用 $4\pi\beta$ (PC)- γ (NaI(Tl)) 数字符合系统对所制备的¹³³Ba 薄膜源样品进行效率外推测量。装置的工作条件为： $4\pi\beta$ 正比计数器高压 2 600 V，NaI(Tl)探测器高压 600 V。表 4 列出 $4\pi\beta$ - γ 数字符合效率外推的测量结果，其平均值为 504.9 kBq \cdot g⁻¹，相对标准不确定度为 0.6%。

表3 反符合测量¹³³Ba的结果Table 3 Results measured by the anti-coincidence method for ¹³³Ba

源号	质量/mg	活度/Bq	合成标准不确定度/Bq	比活度/(kBq·g ⁻¹)
12	22.62	11 359.7	35.3	502.2
14	25.96	13 118.9	44.5	505.3
15	24.32	12 254.6	73.7	503.9
16	20.09	10 085.5	35.9	502.0
23	22.80	11 455.7	52.1	502.4
34	25.66	12 860.1	44.6	501.2
52	17.11	8 599.7	51.9	502.6
55	23.44	11 811.9	69.6	503.9
57	24.53	12 295.8	44.9	501.3
58	22.64	11 390.9	41.5	503.1

表4 4πβ-γ 数字符合效率外推测量结果

Table 4 Results measured by 4πβ-γ coincidence method

源号	质量/mg	活度/Bq	比活度/(kBq·g ⁻¹)
1	23.95	12 100	505.2
2	22.22	11 248	506.2
3	15.02	7 583	504.9
4	20.99	10 602	505.1
5	26.96	13 553	502.7
24	40.89	20 685	505.9
29	36.82	18 514	502.8
27	31.76	16 013	504.2
26	29.76	15 039	505.3
30	19.93	10 106	507.1

5 反符合测量结果不确定度评定方法

由反符合测量原理公式(1)可知,待测样品的活度,即衰变率是通过测量β计数率和β效率而确定的,则采用反符合方法测量待测样品活度的不确定度主要来自以下两个分量:

1) β计数统计涨落、死时间修正和β本底计数率等因素造成的β计数率的不确定度;

2) 测量原始γ谱和反符合γ谱而确定β效率过程中因感兴趣的原始γ射线峰面积的统计涨落和对应的反符合γ射线峰面积的统计涨落,以及效率计算时采用的核参数的不确定度引起的β效率不确定度。

对于β衰变无直接衰变到基态或到基态的β分支可忽略的核素,式(1)可简化为:

$$n_0 = \frac{n_\beta}{\sum_{k=1}^n q_{k0} \varphi_{k0}} \quad (7)$$

式中: n_β 为经死时间和本底修正后的β计数率, $\varphi_{k0} = 1 - (n_{A_{k0}}^*/n_{\gamma_{k0}}^*)$, $n_{\gamma_{k0}}^*$ 和 $n_{A_{k0}}^*$ 为从第k激发态跃迁到基态时发射的γ射线 γ_{k0} 对应于原始谱和反符合谱中峰面积的计数率; q_{k0} 为相应γ射线的发射率。

5.1 β计数率合成标准不确定度

根据下式,β计数率为:

$$n_\beta = \frac{n_\beta^*}{1 - n_\beta^* \tau_d} - n_{\beta b} \quad (8)$$

式中: n_β^* 为直接测量得到的β计数率; $n_{\beta b}$ 为β本底计数率,由实验测量确定; τ_d 为电子学线路的死时间,通过选择实验条件确定并测量获得, $\tau_d = (4.00 \pm 0.05) \mu s$ 。

上述3个输入量独立不相关,则β计数率合成标准不确定度 $u_c(n_\beta)$ 为:

$$u_c(n_\beta) =$$

$$\sqrt{C^2(n_\beta^*) u_c^2(n_\beta^*) + C^2(\tau_d) u_c^2(\tau_d) + C^2(n_{\beta b}) u_c^2(n_{\beta b})} \quad (9)$$

式中: $C(n_\beta^*) = \frac{1}{(1 - n_\beta^* \tau_d)^2}$, $C(\tau_d) = \frac{(n_\beta^*)^2}{(1 - n_\beta^* \tau_d)^2}$, $C(n_{\beta b}) = -1$; $u_c(n_\beta^*)$ 、 $u_c(\tau_d)$ 和 $u_c(n_{\beta b})$ 分别为直接测量β计数率、死时间和β本底计数率的合成标准不确定度。

对于表1中所测定的8个样品,在上述给定的实验条件下,β计数率的相对合成标准不

确定度 $u_{cr}(n_\beta)$ 为 $0.06\% \sim 0.10\%$ 。

5.2 β 效率合成标准不确定度

对于 β 衰变直接到子体基态的分支可忽略的核素, β 效率由下式确定:

$$\epsilon_\beta = \sum q_{k0} \psi_{k0} \quad (10)$$

其中:

$$\psi_{k0} = 1 - \frac{n_{\Lambda k0}^*}{n_{\gamma k0}^*} \quad (11)$$

则:

$$u_c(\psi_{k0}) = \frac{1}{\sqrt{C^2(n_{\Lambda k0}^*)u_c^2(n_{\Lambda k0}^*) + C^2(n_{\gamma k0}^*)u_c^2(n_{\gamma k0}^*)}} \quad (12)$$

式中: $C(n_{\Lambda k0}^*) = -\frac{1}{n_{\gamma k0}^*}$, $C(n_{\gamma k0}^*) = \frac{n_{\Lambda k0}^*}{(n_{\gamma k0}^*)^2}$;

$u_c(n_{\Lambda k0}^*)$ 和 $u_c(n_{\gamma k0}^*)$ 分别为反符合谱和原始 γ 谱中对应于第 k 激发态到基态的 γ 射线峰面积计数率的标准不确定度。

由于是单次测量,在确定这两个量时,认为放射性衰变满足泊松分布。

在式(10)中, q_{k0} 和 ψ_{k0} 独立不相关,则:

$$u_c(\epsilon_\beta) = \sqrt{\sum \psi_{k0}^2 u_c^2(q_{k0}) + \sum q_{k0}^2 u_c^2(\psi_{k0})} \quad (13)$$

式中: $u_c(q_{k0})$ 为 q_{k0} 的标准不确定度,可通过《Table of Isotopes》给出的数据查得。

5.3 活度测量结果的合成标准不确定度

将式(1)转化为:

$$n_0 = \frac{n_\beta}{\epsilon_\beta} \quad (14)$$

则:

$$u_c(n_0) = \sqrt{C^2(n_\beta)u_c^2(n_\beta) + C^2(\epsilon_\beta)u_c^2(\epsilon_\beta)} \quad (15)$$

式中: $C(n_\beta) = 1/\epsilon_\beta$; $C(\epsilon_\beta) = -n_\beta/\epsilon_\beta^2$ 。

6 结论

¹³¹I是一衰变纲图较为复杂的 β 核素,主要有6个 β 衰变分支,其子体的第2激发态为具有平均寿命11.84 d的同质异能态,但从母核直接衰变到该能级的 β 分支比仅为0.48%,对测量结果的影响较小。

本工作采用的 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 反符合法和 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合效率外推法对¹³¹I溶液的测量结果分别为 $1794.8(1 \pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ ($k=1$)和 $1797.6(1 \pm 0.5\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ ($k=1$);对¹³³Ba溶液的测量结果分别为 $502.8(1 \pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ ($k=1$)和 $504.9(1 \pm 0.6\%) \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ ($k=1$)。两种方法的测量结果在不确定度范围内一致,因此,可相互验证各自复现的量值准确可靠。

采用符合和反符合两种方法给出的测量结果的不确定度基本相当,反符合法略高于符合效率外推法,主要是反符合法依赖于相关的核参数,但采用反符合法的优点是测量过程相对简单,不需符合效率外推较为繁琐的测量过程。

参考文献:

- [1] KAWADA Y, YURA O, KIMURA M. Radioactivity measurements by the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ anti-coincidence spectroscopy method using a Ge(Li) detector [J]. Nuclear Instruments and Methods, 1970, 78: 77-85.
- [2] FIRESTONE R B, CHU S Y F. Table of isotopes (Eighth edition) [M/OL]. California: Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1998. <http://www.wiley.com>.