

放射性绝对测量和半衰期 (I)

放射性绝对测量中测量时刻选择的实验证明

冯锡璋 赵珍兰 罗世华 张景烈 郭应焕
徐元彪 杨瑞英 黄忠祥 张元纪 苏峙鑫

(中国科学院高能物理研究所)

李作前 马国华

(中国计量科学研究院)

摘 要

本文用 ^{99m}Tc 源的衰变实验证明了: 在测量一个样品中在 t_0 时的一种放射性同位素的原子数时只需精心选择一次或多次测量其放射性的时刻在 t_0 后约该同位素的一个寿期 $(1/\lambda)$, 并进行计算, 则由它的衰变常数 (λ) 或其半衰期 $(T_{1/2})$ 的不准确性而引进的误差可以被降低到较小值。

1. 当通过放射性的绝对测量来测定某一起始时刻 t_0 下该放射性同位素的原子数目 N_0 时, 其 N_0 的误差来源, 除来自统计性等外, 还来自它的衰变常数 λ 的不准确性。

我们在文献[1]中已阐明了通过对放射性绝对测量中测量时刻的精心选择, 即选择在 t_0 后约一个寿期 $\tau(1/\lambda)$ 的时刻进行一次或多次放射性的绝对测量, 并由此推算到 t_0 , 则可大大降低由 λ 的不准确性而引进的对 N_0 的准确度的影响。从文献[1]中的计算数据可清楚地看到, 即使衰变常数 λ 的实验误差达到 $\pm 4\%$ 这么高时, 但由 λ 的不准确性带给 N_0 的相对误差可小到 $\pm 0.1\%$ 以下。

2. 若我们在一系列测量时刻 $t_c (c = 1, 2, \dots)$ 下, 对某一放射性同位素样品进行放射性衰变测量, 分析数据, 可以得到衰变常数的最可几值 λ , 或其一次近似值 $\lambda_i(1)$ 。把各个 t_c 值以及与之对应的放射性计数率 A_c 值代入公式(1)中,

$$kN_{0i}^* = \frac{A_c}{\lambda_i} \exp[\lambda_i(t_c - t_0)]. \quad (1)$$

这里, λ_i 为在 λ 附近任选的衰变常数值, k 为探测效率, N_{0i}^* 为以 A_c , λ_i 和 t_c 计算得出的在 t_0 (设 $t_0 = 0$) 时的原子数目。在某一给定的衰变常数 λ_i 下, 便可求出一组对应的 kN_{0i}^* 值来。如果我们在 λ , 或 $\lambda_i(1)$ 上下 $\pm 4\%$ 的范围内, 选择若干个不同的 λ_i 值 ($i = 1, 2, \dots, s, \dots, n$), 根据公式(1)计算 kN_{0i}^* 值, 则对每一个 λ_i 值, 都有一组 kN_{0i}^* 值与之对

应,我们把测量时刻 t_c 作为横坐标, kN_{0i} 值作为纵坐标作图,则对应每个 λ_i 值,都可得到一条 $kN_{0i}-t_c$ 曲线,根据文献[1]的结论,不管选择其中的哪个 λ_i 值,在 (t_c-t_0) 为寿期 $\tau_i(1/\lambda_i)$ 时,所得到的 kN_{0i} 值相差较小. 这里 N_{0i} 为以 A_{τ_i} (在 $\tau_i = 1/\lambda_i$ 时的放射性计数率), λ_i 与 τ_i 计算得出的在 t_0 时的原子数目. 因此,各条 $kN_{0i}-t_c$ 曲线必然在横坐标为寿期 τ_i 附近处与 $kN_{0i}-t_c$ 曲线相交.

3. 做为一个验证的例子,采用 $4\pi\gamma$ 型电离室并,对放化纯 ^{99m}Tc 进行放射性衰变测量,

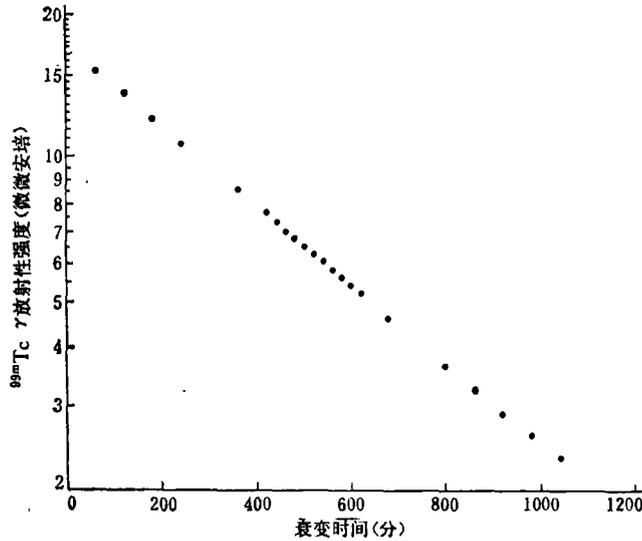


图 1 ^{99m}Tc 样品 γ 放射性衰变曲线

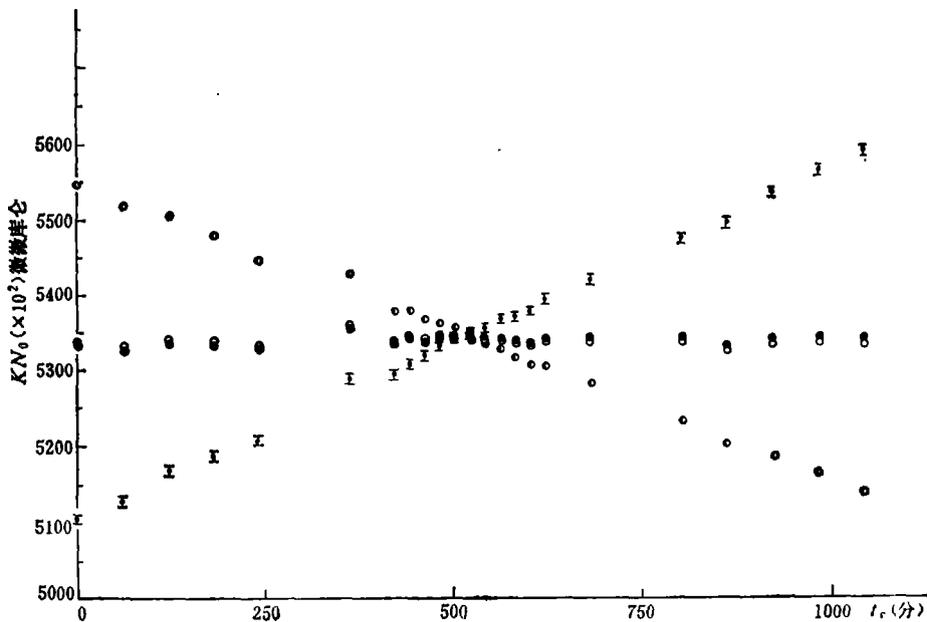


图 2 在 t_0 时 kN_{0i} 与 λ_i 和 t_c 的关系曲线

● $T_{1/2}6.250\text{hr}$ ○ $T_{1/2}6.010\text{hr}$ ● $T_{1/2}6.005\text{hr}$ ◼ $T_{1/2}5.750\text{hr}$

数据列于表1,并作图1. 放化纯的 ^{99m}Tc 从 ^{99m}Tc “发生器”(母体 ^{99}Mo 衰变产生)中得到,源强约3毫居里,通过测量 γ 射线产生的电离电流,得到 A_c (单位为微微安培,即 10^{-12} 安培)¹⁾,用最小二乘法分析数据得出最可几 λ_i (经典)为0.0019224/分. ($\tau_i = 1/\lambda_i = 520.2$ 分)在 λ_i 上下约 $\pm 4\%$ 的范围内,选择了若干个不同的 λ_i 值,其相应的半衰期值为 $T_{1/2(i)} = \ln 2/\lambda_i$,来计算对应的 kN_{0i} 值²⁾,结果给在表2和图2中.

当所取的衰变常数为 λ_i 或很接近于 λ_i 时, $kN_{0i} - t_i (i \rightarrow \infty)$ 曲线在统计误差范围内为一平行于 t_i 轴的直线,即用在任何一点 t_i 所测的数据计算在 t_0 时的原子数目与 k 的乘积将得出很接近的结果,并接近其最可几值.但若 λ_i 偏离 λ_i 时(正或负)则 $kN_{0i} - t_i$ 曲线明显显示由低到高或由高到低的趋势,而在 t_i 为 ^{99m}Tc 的 $\tau_i = 1/\lambda_i$ 附近与上面的平行直线相交.这说明若 λ_i 偏离 λ_i 值,用某一 t_i 所测的数据计算在 t_0 时的原子数目与 k 的乘积随着 t_i 的不同而不同,偏离最可几值有大有小,只有在 t_i 为 $\tau_i = 1/\lambda_i$ 附近时,才与最可几值很为接近.换言之,只有当用 t_i 接近为 τ_i 时所测数据进行计算,则即使 λ_i 值偏离 λ_i 较大(如 $\pm 4\%$),所得在 t_0 时的原子数目与 k 的乘积仍然与最可几值很为接近(误差在0.1%左右).

从表2中可以看到,若用($t_i - t_0$)分别为501.2分,520.6分(最可几寿期的一次近似)和540.7分时所测的数据和半衰期分别为5.750小时(比6.006小时约小4.2%),6.006小时和6.250小时(比6.006小时约大4.1%)进行计算,则所得的在 t_0 时的原子数目与 k 的乘积分别为534162、534099(最可几值为533846见表2)和533555微微库仑.前、中和后项分别比最可几值大0.06%、大0.05%和小0.05%,此值包括由衰变常数的不准确性引入的误差以及由统计涨落、测量条件的细微差别和仪器的不稳定性等引入的误差.这与文献[1]中所预计的完全一致.

表1 ^{99m}Tc 的 γ 衰变测量数据

T_c (分)	I (微微安培)	T_c (分)	I (微微安培)	T_c (分)	I (微微安培)
0.0	17.094	460.5	7.0579	620.5	5.1908
60.3	15.206	481.0	6.7895	680.7	4.6228
121.9	13.539	501.2	6.5344	800.8	3.6675
180.2	12.091	520.6	6.2903	860.8	3.2630
240.2	10.760	540.7	6.0503	920.9	2.9116
360.6	8.5829	561.6	5.8137	981.0	2.5955
420.5	7.6167	580.6	5.5993	1041.1	2.3111
440.9	7.3353	600.7	5.3851		

1) 单位用微微库仑表示, 1微微库仑相当于 $6.2415 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ 个放射性原子. 1微微安培则相当于 $6.2415 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ 衰变/秒.

表 2 非经典法的数据处理结果

kN_{0i} (微微库仑) $T_{1/2}$ (小时) t_c (分)	6.250	6.150	6.050	6.030	6.020	6.015
0.0	554882.	546004.	537126.	535350.	534463.	534019.
60.3	551795.	543951.	536109.	534541.	533757.	533365.
121.9	550552.	543732.	536919.	535557.	534877.	534536.
180.2	547614.	541778.	535959.	534797.	534217.	533926.
240.2	544489.	539659.	534858.	533902.	533424.	533185.
360.6	542577.	539714.	536916.	536364.	536090.	535953.
420.5	537872.	535997.	534211.	533865.	533694.	533608.
440.9	537905.	536360.	534911.	534634.	534496.	534428.
460.5	536658.	535431.	534310.	534099.	533995.	533944.
481.0	536187.	535291.	534510.	534368.	534299.	534265.
501.2	535673.	535102.	534657.	534584.	534549.	534532.
520.6	534488.	534231.	534108.	534100.	534099.	534099.
540.7	533555.	533620.	533830.	533891.	533923.	533940.
561.6	532883.	533283.	533839.	533971.	534039.	534073.
580.6	531576.	532279.	533149.	533344.	533444.	533495.
600.7	530592.	531614.	532816.	533078.	533213.	533281.
620.5	530513.	531851.	533381.	533711.	533879.	533964.
680.7	528071.	530362.	532882.	533415.	533685.	533821.
800.8	523078.	527248.	531732.	532669.	533143.	533381.
860.8	519970.	525061.	530514.	531651.	532225.	532514.
920.9	518487.	524510.	530948.	532288.	532965.	533305.
981.0	516503.	523447.	530861.	532404.	533183.	533574.
1041.1	513943.	521795.	530174.	531917.	532797.	533240.
$\overline{kN_{0i}}$	534342.	534014.	533857.	533848.	533846.	533846.
$\overline{\Delta I}$	8567.	5128.	1581.	858.	494.	312.
$\overline{\Delta I'}$	-8567.	-5128.	-1581.	-858.	-494.	-312.
σ_{n-1}/\sqrt{n}	2340.	1392.	426.	243.	167.	140.

续表 2 (a)

kN_{0i} (微米) $T_{1/2}$ (小时) t_c (分)	6.010	6.007	6.006	6.005	6.000	5.995
0.0	533575.	533308.	533220.	533131.	532687.	532243.
60.3	532973.	532738.	532659.	532581.	532189.	531797.
121.9	534196.	533992.	533924.	533856.	533515.	533175.
180.2	533636.	533462.	533404.	533346.	533056.	532766.
240.2	532946.	532803.	532755.	532708.	532469.	532231.
360.6	535816.	535734.	535707.	535679.	535543.	535406.
420.5	533523.	533472.	533455.	533438.	533353.	533269.
440.9	534360.	534320.	534306.	534293.	534225.	534158.
460.5	533893.	533862.	533852.	533842.	533791.	533741.
481.0	534232.	534212.	534205.	534198.	534165.	534133.
501.2	534516.	534506.	534503.	534500.	534484.	534469.
520.6	534098.	534099.	534099.	534099.	534100.	534101.
540.7	533957.	533968.	533971.	533975.	533993.	534011.
561.6	534109.	534130.	534137.	534144.	534180.	534217.
580.6	533546.	533577.	533587.	533598.	533650.	533703.
600.7	533349.	533390.	533404.	533418.	533487.	533557.
620.5	534049.	534101.	534118.	534135.	534222.	534308.
680.7	533958.	534040.	534068.	534095.	534233.	534372.
800.8	533620.	533764.	533812.	533860.	534101.	534342.
860.8	532804.	532978.	533036.	533094.	533386.	533679.
920.9	533646.	533852.	533920.	533989.	534332.	534677.
981.0	533967.	534203.	534282.	534361.	534756.	535153.
1041.1	533684.	533951.	534039.	534129.	534575.	535024.
$\overline{kN_{0i}}$	533846.	533846.	533846.	533846.	533848.	533849.
$\overline{\Delta f}$	129.	20.	-17.	-53.	-236.	-420.
$\overline{\Delta f}$	-130.	-20.	17.	53.	236.	420.
σ_{n-1}/\sqrt{n}	129.	131.	133.	136.	160.	195.

续表 2 (b)

kN_{0i} (微库仑)	$T_{1/2}$ (小时)	t_c (分)	5.990	5.985	5.980	5.950	5.850	5.750
			0.0	531799.	531355.	530911.	528248.	519370.
60.3	531405.	531013.	530621.	528269.	520431.	512595.		
121.9	532835.	532495.	532155.	530114.	523318.	516530.		
180.2	532476.	532186.	531896.	530157.	524374.	518610.		
240.2	531992.	531754.	531516.	530088.	525351.	520648.		
360.6	535270.	535134.	534998.	534188.	531533.	528958.		
420.5	533184.	533100.	533017.	532519.	530928.	529443.		
440.9	534091.	534025.	533958.	533566.	532332.	531215.		
460.5	533691.	533641.	533592.	533302.	532414.	531655.		
481.0	534100.	534068.	534036.	533853.	533327.	532942.		
501.2	534454.	534439.	534424.	534346.	534177.	534162.		
520.6	534103.	534105.	534107.	534129.	534305.	534646.		
540.7	534030.	534050.	534069.	534196.	534728.	535439.		
561.6	534253.	534291.	534328.	534564.	535468.	536565.		
580.6	533756.	533809.	533864.	534198.	535439.	536885.		
600.7	533628.	533698.	533770.	534209.	535807.	537626.		
620.5	534396.	534484.	534572.	535115.	537069.	539258.		
680.7	534511.	534651.	534792.	535648.	538680.	541995.		
800.8	534585.	534828.	535072.	536557.	541748.	547336.		
860.8	533972.	534267.	534563.	536359.	542628.	549356.		
920.9	535023.	535370.	535719.	537834.	545207.	553106.		
981.0	535551.	535951.	536352.	538785.	547261.	556337.		
1041.1	535473.	535925.	536377.	539126.	548701.	558954.		
$\overline{kN_{0i}}$	533851.	533854.	533857.	533886.	534113.	534554.		
$\overline{\Delta f}$	-604.	-788.	-972.	-2084.	-5878.	-9809.		
$\overline{\Delta f_i}$	604.	788.	972.	2084.	5877.	9809.		
σ_{n-1}/\sqrt{n}	235.	279.	325.	620.	1659.	2743.		

参 考 文 献

- [1] 冯锡璋、赵珍兰、汤乃勋, 高能物理与核物理, 4(1980), 771.

MEASUREMENTS OF NUMBER OF RADIOACTIVE ATOMS AND HALF-LIFE (I)

FENG XI-ZHANG ZHAO ZHEN-LAN LO SHI-HUA ZHANG JING-LIE GUO YING-HUAN

XU YUAN-BIAO YANG RUI-YING HUANG ZHONG-XIANG

ZHANG YUAN-JI SU ZHI-XIN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

LI ZUO-QIAN MA GUO-HUA

(National Institute of Metrology)

ABSTRACT

The decay of ^{99m}Tc source was used to verify experimentally that in the measurement of the number of atoms of a radioactive isotope in a sample at time t_0 , the error introduced through the inaccuracy of its decay constant (λ) can be reduced to a much smaller value by the careful selection of the time of measurement or measurements of its radioactivity at around one life time ($1/\lambda$) after t_0 and doing the calculation.