

# 伴随 $\beta^-$ 衰变的 $\gamma$ 射线强度归一化因子计算

周春梅<sup>1)</sup>

(中国原子能科学研究院核物理研究所中国核数据中心 北京 102413)

**摘要** 简要介绍了伴随  $\beta^-$  衰变的  $\gamma$  射线强度归一化因子的计算方法,并以实例说明,还给出了有关的强度平衡自洽检验方法及其简要讨论.

**关键词**  $\beta^-$  衰变  $\gamma$  射线 强度计算 强度平衡

## 1 引言

伴随  $\beta^-$  衰变的  $\gamma$  射线数据和衰变纲图是原子核物理基础研究,核科学技术应用,特别是放射性同位素应用的重要的基本核数据之一,具有广泛的应用价值.应用中,用户感兴趣的和实用的是其  $\gamma$  射线发射几率(即母核发生 100 次衰变时,发射  $\gamma$  射线绝对强度).通常情况下,实验测量的是  $\gamma$  射线的相对强度;因为  $\gamma$  射线绝对强度测量比相对强度测量的困难大很多,其技术要求高很多.因此,数据评价工作者要把  $\gamma$  射线相对强度转换为绝对强度( $\gamma$  射线发射几率);为了这种转换,需要一个相对应的转换系数,又称之为  $\gamma$  射线强度归一化因子.本文就伴随  $\beta^-$  衰变的  $\gamma$  射线强度归一化因子的计算方法进行介绍,并以实例说明,还给出了有关的强度平衡自洽检验方法及其简要讨论.

## 2 计算方法

### 2.1 从 $\gamma$ 射线绝对强度测量进行的计算

利用已经刻度好的探测器,把要测量的放射源的活度(放射源强度)和它的第  $i$  条特征  $\gamma$  射线绝对强度已分别测定后,可以得到已测放射性同位素的第  $i$  条特征  $\gamma$  射线发射几率  $P_{\gamma i}$ . 假定其第  $i$  条  $\gamma$  射线的相对强度为  $I_{\gamma i}$ ,  $\gamma$  射线强度归一化因子为  $N$ , 则有

$$P_{\gamma i} = NI_{\gamma i}, \quad (1)$$

或

$$N = P_{\gamma i}/I_{\gamma i}. \quad (2)$$

由(1)和(2)式可以计算出所有  $\gamma$  射线发射几率  $P_{\gamma i}$ , 其中,  $i = 1, 2, \dots$ . 如果同时或单独测量了  $n$  条  $\gamma$  射线发射几率  $P_{\gamma i}$ ,  $i \geq 2$ , 因此,可以得到的  $n$  个  $\gamma$  射线强度归一化因子分别是

$$N_1, N_2, \dots, N_n.$$

它们相对应的误差分别是

$$\Delta N_1, \Delta N_2, \dots, \Delta N_n.$$

对此情况,可采用加权或非加权方法求平均值计算得到评价推荐( $N \pm \Delta N$ )值.例如,  $^{155}\text{Eu}$   $\beta^-$  衰变<sup>[1]</sup>  $\gamma$  射线强度测量中,对  $E_\gamma = 86.545\text{keV}$  进行了绝对测量<sup>[2,3]</sup>(见表 1).

表 1  $^{155}\text{Eu}$   $\beta^-$  衰变  $E_\gamma = 86.545\text{keV}$   $\gamma$  射线绝对强度测量

$E_\gamma/\text{keV}$	$P_\gamma(\%)$	参考文献
86.545	31.1 <sup>a)</sup> 4	[2]
	30.5 3	[3]
	30.7 3	加权平均

a) 31.1 4 表示  $31.1 \pm 0.4$ (最后一位对齐).

在其  $\gamma$  射线相对强度测量中,  $I_\gamma(E_\gamma = 86.545\text{keV}) = 100$ , 由(2)式得到归一化因子  $N = 0.307 \pm 0.003$ . 由于其他  $\gamma$  射线强度测量是以  $I_\gamma(E_\gamma = 86.545\text{keV}) = 100$  的相对测量值,其发射几率(绝对强度)可由(1)式计算得到,如表 2 所示. 图 1 是  $^{155}\text{Eu}$   $\beta^-$  衰变纲图,分别标明了  $\beta^-$  射线最大能量和强

2003-09-10 收稿

1) E-mail: zcm@iris.ciae.ac.cn

表 2  $^{155}\text{Eu}$   $\beta^-$  衰变的  $\gamma$  射线能量和强度

$E_\gamma/\text{keV}$		$I_\gamma^a$		$P_\gamma(\%)^b$	
10.49	4	0.0159	16	0.0049	5
18.764	2	0.16	2	0.049	7
21.036	4	0.00153	13	0.00047	4
26.532	21	1.03	4	0.316	13
31.44	7	0.023	5	0.0071	16
45.2972	13	4.32	8	1.33	3
57.9805	20	0.217	11	0.067	4
60.0086	10	3.68	16	1.13	5
86.062	5	0.49	5	0.150	16
86.545	3	100		30.7	3
105.305	3	68.9	15	21.2	5
146.061	15	0.197	9	0.060	3

a) 相对强度; b) 绝对强度.

度,  $\gamma$  射线的能量、多极性、发射  $\gamma$  及其内转换电子的强度、与相对位置等.

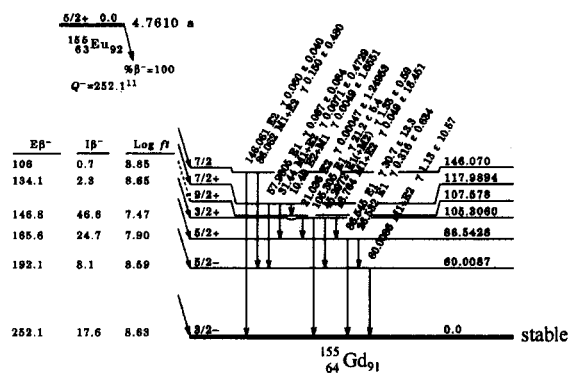


图 1  $^{155}\text{Eu}$   $\beta^-$  衰变纲图

### 2.2 从 $\beta^-$ 衰变至子核基态的强度 $I_{\beta^-}$ 测量进行的计算

假定实验测量了  $\beta^-$  衰变至子核基态的强度为  $P_{\beta^-0}$ , 如图 1 所示. 并假定从子核能级  $j$  跃迁至基态的  $\gamma$  射线相对强度为  $I_{\gamma j0}$ , 其  $\gamma$  射线的内转换系数为  $\alpha_{j0}$ , 其中  $j \geq 1$ , 由衰变强度平衡得 (3) 式, 并从 (3) 式导出归一化因子  $N$  的计算公式 (4),

$$(100 - P_{\beta^-0}) = N \sum_j I_{\gamma j0} (1 + \alpha_{j0}), \quad (3)$$

$$N = (100 - P_{\beta^-0}) / \sum_j I_{\gamma j0} (1 + \alpha_{j0}). \quad (4)$$

例如,  $^{166}\text{Ho}$   $\beta^-$  衰变<sup>[4]</sup>  $\gamma$  射线强度测量中, 已测定  $\beta^-$  衰变至子核基态的强度,  $P_{\beta^-0} = 50.0 \pm 2.1$ . 表 3 列出了  $^{166}\text{Ho}$   $\beta^-$  衰变  $\gamma$  射线相对强度及其内转换系数. 由 (4) 式计算得到归一化因子  $N = 0.0093 \pm 0.0003$ , 由 (4) 式计算得到  $\gamma$  射线绝对强度 (发射几

率), 见表 3.

表 3  $^{166}\text{Ho}$   $\beta^-$  衰变  $\gamma$  射线强度及其内转换系数

$E_\gamma/\text{keV}$		$I_\gamma^a$		$\alpha$	$P_\gamma(\%)^b$	
80.574	8	721.5	86	6.88	6.71	8
184.40	10	0.215	20	0.334	0.0020	2
520.8	4	0.036	10		0.00033	9
674.00	4	2.09	24		0.0194	22
705.30	4	1.41	5	0.00723	0.0131	5
785.89	4	1.28	5	0.00566	0.0119	5
1263.08	20	1.5	3		0.0014	2
1379.40	6	100.0	32	0.00179	0.93	3
1447.59	20	0.108	10		0.00098	10
1460.		0.032			0.0003	
1528.		0.022			0.0002	
1581.89	8	20.1	4		0.187	4
1662.48	8	12.9	2		0.120	2
1749.91	6	2.98	6		0.0277	5
1830.49	7	0.91	3		0.0085	3

a) 相对强度; b) 绝对强度.

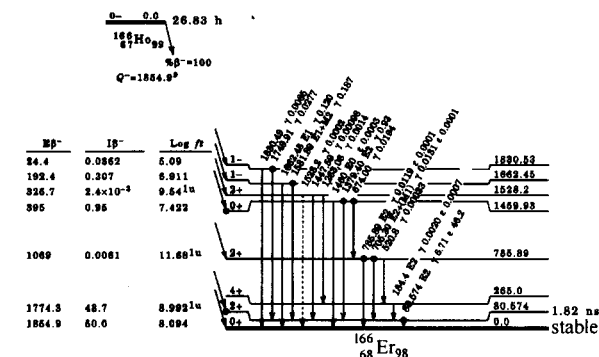


图 2  $^{166}\text{Ho}$   $\beta^-$  衰变纲图

图 2 是  $^{155}\text{Eu}$   $\beta^-$  衰变纲图, 并分别标明了  $\beta^-$  射线最大能量和强度,  $\gamma$  射线的能量、多极性、发射  $\gamma$  及其内转换电子的强度、与相对位置等.

### 2.3 从 $\beta^-$ 衰变至子核基态以上某一条能级 $j$ 的强度 $P_{\beta^-j}$ 测量进行的计算

假定  $\beta^-$  衰变至子核基态以上某一条能级  $j$  的强度为  $P_{\beta^-j}$ , 进入能级  $j$  的  $\gamma$  跃迁的总相对强度为

$$TI_j(\text{in}) = \sum_i I_{\gamma ij} (1 + \alpha_{ij}), \quad (5)$$

离开能级  $j$  的  $\gamma$  跃迁的总相对强度为

$$TI_j(\text{out}) = \sum_0 I_{\gamma j0} (1 + \alpha_{j0}). \quad (6)$$

根据能级之间  $\gamma$  跃迁总强度平衡条件可以写出

$$P_{\beta^-j} = N \left[ \sum_0 I_{\gamma j0} (1 + \alpha_{j0}) - \sum_i I_{\gamma ij} (1 + \alpha_{ij}) \right], \quad (7)$$

或

$$N = P_{\beta^-j} / \left[ \sum_o I_{\gamma jo} (1 + \alpha_{jo}) - \sum_i I_{\gamma ij} (1 + \alpha_{ij}) \right] \quad (8)$$

在(7)式中,  $N$  是  $\gamma$  射线强度归一化因子,  $I_{\gamma jo}$  和  $I_{\gamma ij}$  分别是离开和进入能级  $j$  的第  $o$  条和第  $i$  条  $\gamma$  射线相对强度,  $\alpha_{jo}$  和  $\alpha_{ij}$  分别是它们的内转换系数。

例如,  $^{24}\text{Na}$   $\beta^-$  衰变<sup>[5]</sup>  $\gamma$  射线强度测量中, 已测定  $\beta^-$  衰变至子核能级  $E_L = 4122.9\text{keV}$  的强度,  $P_{\beta^- (4122.9)} = 99.944 \pm 0.004$ . 表 4 列出了  $^{24}\text{Na}$   $\beta^-$  衰变  $\gamma$  射线强度, 其内转换系数非常小, 计算  $\gamma$  射线跃迁总强度时, 可以忽略. 从其衰变纲图(见图 4), 能直接计算得到  $2754.028\text{keV}$   $\gamma$  射线绝对强度(发射几率)及其归一化因子  $N$  值, 并得到其他  $\gamma$  射线绝对强度(发射几率), 见表 3.

表 4  $^{24}\text{Na}$   $\beta^-$  衰变  $\gamma$  射线强度

$E_\gamma/\text{keV}$		$I_\gamma$		$P_\gamma(\%)$	
996.82	6	0.0014	2	0.0014	2
1368.625	5	100.0		100.0	
2754.028	11	99.944	4	99.944	4
2869.19	6	0.0003	1	0.0003	1
3886.19	10	0.052	4	0.052	4
4237.96	6	0.0011	2	0.0011	2

图 3 是  $^{24}\text{Na}$   $\beta^-$  衰变纲图, 并分别标明了  $\beta^-$  射线最大能量和强度,  $\gamma$  射线的能量、多极性、发射  $\gamma$  射线的强度、与相对位置等。

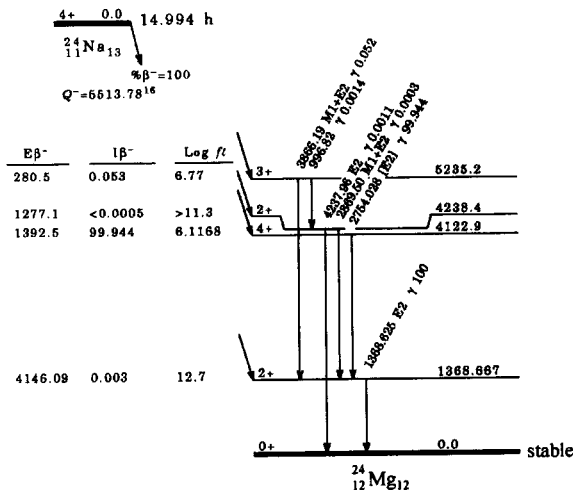


图 3  $^{24}\text{Na}$   $\beta^-$  衰变纲图

### 2.4 从 $\beta^-$ 衰变至子核基态是禁戒情况下进行的计算

$\beta^-$  衰变至子核基态是禁戒情况下, 母核  $\beta^-$  衰变

至子核基态的绝对强度(发射几率)  $P_{\beta^-0} = 0$ . 假设其子核有  $n$  条  $\gamma$  射线衰变至其基态, 其中第  $k$  条  $\gamma$  射线的相对强度为  $I_k$ , 它的内转换系数为  $\alpha_k$ , 因此(4)式变成

$$N \sum_{k=1}^n I_k (1 + \alpha_k) = 100, \quad (9)$$

$$N = 100 / \sum_{k=1}^n I_k (1 + \alpha_k). \quad (10)$$

对于轻核, 同理有

$$N = 100 / \sum_{k=1}^n I_k. \quad (11)$$

同样从(9)式, 或(10)式可求出归一化因子  $N$ , 显然可得到其各条  $\gamma$  射线的发射几率(或绝对强度). 例如,  $^{60}\text{Co}$   $\beta^-$  衰变<sup>[6]</sup>  $\gamma$  射线强度测量中, 已测定  $\beta^-$  衰变至子核基态能级  $E_0 = 0.0\text{keV}$  的强度为  $P_{\beta^-0} = 0.0$ , 如图 5 所示. 在表 5 列出了  $^{60}\text{Co}$   $\beta^-$  衰变  $\gamma$  射线相对强度及其内转换系数. 由(11)式计算得到归一化因子  $N = 1$ , 显然, 其各条  $\gamma$  射线的发射几率(或绝对强度)可直接得到, 如表 5 所示.

表 5  $^{60}\text{Co}$   $\beta^-$  衰变  $\gamma$  射线强度及其内转换系数

$E_\gamma/\text{keV}$		$I_\gamma^a$		$\alpha$		$P_\gamma(\%)^b$
346.93	7	0.0076	5		0.0076	5
826.28	9	0.0076	8		0.0076	8
1173.237	4	99.9736	7	0.000177	99.9736	7
1332.501	5	99.9856	4	0.000133	99.9856	4
2158.77	9	0.00111	18		0.00111	18
2505.74	1	0.0000020	4		0.0000020	4

a) 相对强度; b) 绝对强度.

图 4 是  $^{60}\text{Co}$   $\beta^-$  衰变纲图, 并分别标明了  $\beta^-$  射线最大能量和强度,  $\gamma$  射线的能量、多极性、发射  $\gamma$  射线及其内转换电子的强度、与相对位置等。

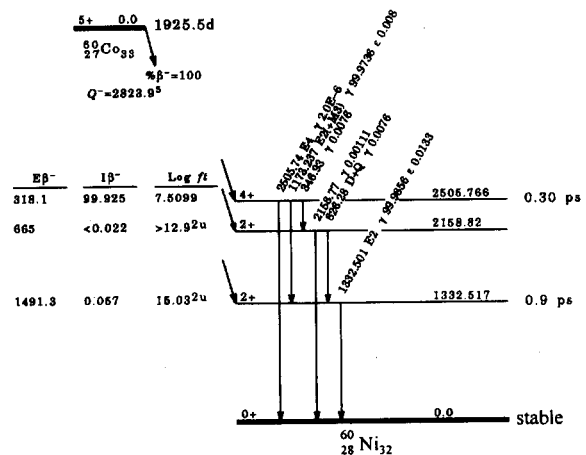


图 4  $^{60}\text{Co}$   $\beta^-$  衰变纲图

### 3 强度平衡检验

一般情况下,最重要的物理自洽检验是其各条激发能级的强度平衡检验. 原则上,对于核各条  $j$  能级的跃迁  $\gamma$  射线应满足(7)式,即离开和进入能级  $j$  的所有跃迁  $\gamma$  射线绝对强度之差应等于母核  $\beta^-$  衰变至能级  $j$  的  $\beta^-$  射线强度(发射几率)  $P_{\beta^-j}$ ; 对于核基态,至基态的所有跃迁  $\gamma$  射线绝对强度之和应满足(3)式,即至基态的所有跃迁  $\gamma$  射线绝对强度之和应等于母核  $\beta^-$  衰变至子核基态  $\beta^-$  射线强度(发射几率)与母核  $\beta^-$  衰变分支比之差(100% -  $P_{\beta^-0}$ ),其中  $p_{\beta^-0}$  是母核  $\beta^-$  衰变至子核基态  $\beta^-$  射线强度(发射几率);对于核最高激发能级  $L$ ,离开能级  $L$  的所有跃迁  $\gamma$  射线绝对强度之和应满足

$$P_{\beta^-L} = N \left[ \sum_o I_{\gamma L_o} (1 + \alpha_{L_o}) \right] \quad (12)$$

在(12)式中,  $N$  是  $\gamma$  射线强度归一化因子,  $I_{\gamma L_o}$  是离开子核最高激发能级  $L$  的第  $o$  条  $\gamma$  射线相对强度,

表 6  $^{59}\text{Fe}$   $\beta^-$  衰变至子核各能级  $\gamma$  强度平衡情况

LEVEL	$RI^a)$				$TI^b)$				NET FEEDING <sup>c)</sup>			
	输出	输入	(输出 - 输入)		输出	输入	(输出 - 输入)		计算值		$P_{\beta^-}$	
0.0	0.000	99.8	19 - 99.8	19	0.000	99.8	19 - 99.8	19	0.2	30	0.18	4
1099.262	5 56.5	15 3.37	10 53.1	15 56.5	15 3.40	11 53.1	15 53.1	19 53.1	19 53.1	19 53.1	15	
1291.611	6 46.3	11 1.02	4 45.3	11 46.3	11 1.04	4 45.3	11 45.3	14 45.3	14 45.3	11		
1434.263	6 1.29	5 0.00	4 0.00	1.29	4 0.00	1.31	5 1.31	5 1.31	5 1.31	5		
1481.58	20 0.077	7 0.000	0.077	7 0.077	7 0.000	0.077	7 0.077	7 0.077	7 0.077	7		

a) 相对强度; b) 包括内转换电子强度的相对  $\gamma$  强度; c) 绝对  $\gamma$  强度.

### 4 讨论

#### 4.1 内转换系数计算

如上所述,为计算  $\gamma$  射线强度,  $\gamma$  跃迁的内转换系数必须知道. 目前,不同元素的不同原子壳层的内转换系数也已系统评价. 他们是以不同元素(原子电荷数)及其  $\gamma$  射线跃迁能量  $E_\gamma$  为函数,给出了跃迁  $\gamma$  射线的多极性  $M1, M2, M3$  和  $M4$  以及  $E1, E2, E3, E4$  等的  $K, L, M, N \dots$  壳层及总的内转换系数的数表和曲线图. 现已有专门计算内转换系数的程序 HSICC, 由核结构和衰变数据评价国际协作网提供. 该程序是以样条拟合方式, 对应其相应  $\gamma$  射线多极性的不同  $\gamma$  射线的跃迁能量  $E_\gamma$  进行计算的, 并根

$\alpha_{L_o}$  是它的内转换系数,  $P_{\beta^-L}$  是母核  $\beta^-$  衰变至最高激发能级  $L$  的  $\beta^-$  射线强度(发射几率).

图 5 是  $^{60}\text{Co}$   $\beta^-$  衰变纲图, 并分别标明了  $\beta^-$  射线最大能量和强度,  $\gamma$  射线的能量、多极性、发射  $\gamma$  射线及其内转换电子的强度、与相对位置等. 表 6 给出了  $^{59}\text{Fe}$   $\beta^-$  衰变<sup>[7]</sup> 至子核各条能级的  $\gamma$  射线强度的计算检验结果. 从表 6 可以看出, 它们是满足  $\gamma$  射线强度平衡条件的.

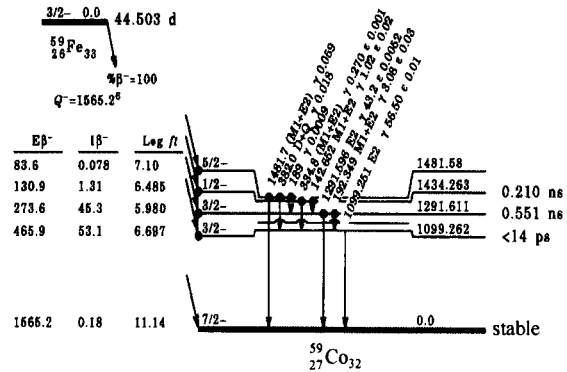


图 5  $^{59}\text{Fe}$   $\beta^-$  衰变纲图

据其  $\gamma$  射线跃迁多极性和跃迁能量  $E_\gamma$  给出不同壳层  $n$  的内转换系数  $\alpha_n$  和总的内转换系数  $\alpha$ ,

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \alpha_N = \sum_{n=K}^N \alpha_n, \quad (13)$$

其中  $n = K, L, M, N \dots$  原子电子壳层.

#### 4.2 核衰变纲图

一般情况下,对  $\gamma$  射线强度进行相对测量的核衰变,  $\gamma$  射线强度计算是以核衰变纲图为基础的. 核衰变纲图的准确和完整是非常重要的. 对核衰变能很高的衰变, 其子核激发能也很高, 除轻核以外, 核衰变能级纲图相当复杂. 在实验测量中, 由于探测器的探测下限的限制, 会有许多弱的  $\gamma$  射线不能被测量到, 此外, 还有测量误差(特别是解谱和扣除本底等)都会引起  $\gamma$  射线强度的不确定性. 实际上, (2), (4), (8) 和 (10) 式只能在其不确定度的范围内

成立. 正由于这些原因, 利用不同公式进行的归一化因子的计算结果会有差别. 在对  $\gamma$  射线绝对强度准确度高要求高的情况下, 建议进行  $\gamma$  射线绝对强度

测量, 并对  $\gamma$  射线绝对强度测量结果进行评价, 采用  $\gamma$  射线绝对强度测量的评价推荐结果是最好的.

### 参考文献 (References)

- 1 Reich C W. Nucl. Data Sheets, 1994, 71:709
- 2 Coursey B M, Calhoun J M, Cessna J et al. Nucl. Instr. Methods, Phys. Res., 1994, A339:26
- 3 Egorov A G, Chechev V P. Nucl. Instr. Methods, Phys. Res., 1994, A339:248
- 4 Shurshikov E N. Nucl. Data Sheets, 1992, 67:45
- 5 Endt P M. Nucl. Phys., 1998, A633:1
- 6 King M M. Nucl. Data Sheets, 1993, 69:1
- 7 Baglin C M. Nucl. Data Sheets, 1993, 69:733

## Calculation of Normalization Factor of Absolute Intensities of $\gamma$ Rays Arrising from $\beta^-$ Decay

ZHOU Chun-Mei<sup>1)</sup>

(China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** It is introduced briefly to calculate normalization factor for absolute intensities of gamma-rays arrising from  $\beta^-$  decay. The examples are given to illustrate their application. The intensity balance check and some discussion are also given in text.

**Key words**  $\beta^-$  decay, gamma-ray, intensity calculation, intensity balance