

## 1 目的

ガイガー・ミュラー計数管を用いて、放射性原子が放射性崩壊する際に出る放射線を観測し、放射性原子の放射性崩壊の法則と物質による放射性吸収について調べる。

## 2 原理

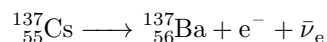
### 2.1 ガイガー・ミュラー計数管

ガイガー・ミュラー計数管 (以下 GM 計数管) とは高い電圧をかけた金属円筒の中に放射性粒子が 1 つ入ると放電が起こり 1 個の電流パルスが生じることを利用してある時間内において放射性粒子がいくつ計数管を通過したかを生じたパルス数を数えることで計測する装置である。

### 2.2 放射性原子の崩壊

原子核の中には不安定なものが存在する。不安定な原子核は崩壊してより安定な原子核になる。この際に  $\alpha$  線 (He の原子核) や  $\beta$  線 (電子) や  $\gamma$  線 (電磁波) を放出する。この現象が放射性原子の崩壊である。

今回の実験の放射線源である  $^{137}_{55}\text{Cs}$  (セシウム 137) は次のように電子  $e^-$  ( $\beta$  線) と中性子線 (ニュートリノ)  $\bar{\nu}_e$  を放出して  $^{137}_{56}\text{Ba}$  (バリウム 137) に崩壊する。



## 3 実験方法

### 3.1 自然計数の測定

近くに放射性源がなくても GM 計数管の計数値は 0 にならない。これは宇宙線や身の回りに極微量存在する天然の放射性原子からの放射線によるものである。これを自然計数という。

以下のような手順でこの自然計数の値を測定した。

- GM 計数管のスタンドに何も入れないで GM 計数管の電源を入れた。
- 電圧調整つまみを回して電圧指示計が 500 V を指すように調整した。
- カウンターの計数時間を 60s に設定した。
- 計数を 20 回繰り返した。

### 3.2 $\beta$ 線の計数値の分布の観測

$\beta$  線源 (セシウム 137) を一定時間の計数値の分布を以下のような手順で測定した。

- $\beta$  線源 (セシウム 137) を取り出し、GM 計数管スタンドの上から 60 mm の段に入れた。

- カウンターの計数時間を 1 s に切り替え、100 回計数値を測定した。
- 線源は同じ位置のまま 300 回計数値を測定した。
- 線源を GM 計数管スタンドの同じ段のまま 300 回計数値を測定した。
- 線源を GM 計数管スタンドの 120mm、80mm の段に入れ、300 回係数値を測定した。

### 3.3 $\beta$ 線の吸収の測定

GM 計数管スタンドに放射線源を入れその上に金属板を載せることで計数値が金属板の厚みとともにどのように変化するかを以下のような手順で調べた。

- GM 計数管スタンドの上から 80 mm の位置に放射線源を入れ、上から 30 mm の段に穴の空いた板を入れた。
- カウンターの計数時間を 60s に設定した。
- 上の段に入れた板の穴を厚さ 1 mm の Al 板でふさぎ 1 min 間の計数値  $N'$  を求めた。
- この測定を 5 回繰り返し、平均値  $\overline{N'}$  を求めた。
- 1 mm の Ti 板を取り出し、Ti の薄板を 0 枚から 1 枚ずつ入れて、各枚数に対して計数値  $N$  を 3 回測定し、 $\overline{N'}$  を求めた。
- Ti の薄板の厚みをマイクロメーターで測定した。
- 同じ測定を Cu の薄板に対しても行った。

## 4 結果

### 4.1 自然計数の測定

自然計数の計数値と出現回数は次の表に示す通りとなった。

表 1 自然計数の計数値と出現回数

計数値	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	22
出現回数	1	1	2	3	1	1	1	2	3	3	1	1

表 1 にまとめた計数値の平均値を  $N_0$  とすると  $N_0 = 14.9$  となった。また横軸に計数値  $N$ 、縦軸に同じ計数値の出現回数  $n$  をとった棒グラフを作成し、レポート末尾に添付した。

## 4.2 $\beta$ 線の計数値の分布の観測

総回数 100 回、ゲート時間 1 秒、線源の位置 60 mm としたときの測定結果は次の表のようになった。

表2 セシウム 137 の計数値の分布の実験データ

計数値 $N$	出現回数 $n_N$	出現確率 $n_N / \sum n_N$	計数値と $n_N$ の積 $n_N N$	2乗偏差と $n_N$ の積 $n_N (N - \bar{N})^2$	ポアソン分布 $P(N)$
10	2	0.017	20	203.19	0.005588
11	1	0.008	11	82.43	0.010201
12	1	0.008	12	65.28	0.017070
13	1	0.008	13	50.12	0.026367
14	4	0.035	56	147.84	0.037817
15	3	0.026	45	77.40	0.050624
16	10	0.088	160	166.43	0.063532
17	6	0.053	102	56.90	0.075042
18	14	0.123	252	60.54	0.083712
19	13	0.115	247	15.15	0.088468
20	11	0.097	220	0.06	0.084928
21	8	0.070	168	6.88	0.084298
22	10	0.088	220	36.87	0.077515
23	9	0.079	207	76.75	0.067672
24	5	0.044	120	76.84	0.056618
25	3	0.026	75	72.62	0.045475
26	3	0.026	78	105.15	0.035120
27	3	0.026	81	143.67	0.026118
28	2	0.017	56	125.46	0.018730
29	0	0.000	0	0	0.012969
30	2	0.017	60	196.82	0.008680
31	0	0.000	0	0	0.005622
32	0	0.000	0	0	0.003528
33	2	0.017	66	333.87	0.002146
合計	113	1	2269	2100.28	0.99237

計数値の平均値  $\bar{N}$  は  $\bar{N} = 20.79$ 、標準偏差  $\sigma$  は  $\sigma = 4.33$  となった。

横軸に計数値  $N$ 、縦軸に計数値  $N$  の出現確率  $n_N / \sum n_N$  をとって棒グラフに合わせたものをレポート末尾に添付した。またポアソン分布から各係数値  $N$  に対する確率  $P(N)$  を計算し、その値を棒グラフに大きめのバツ印で書き込んだ。

総回数 300 回、 ゲート時間 1 秒、 線源の位置 60 mm としたときの測定結果は次の表のようになった。

表 3 セシウム 137 の計数値の分布の実験データ 2

計数値 $N$	出現回数 $n_N$	出現確率 $n_N / \sum n_N$	計数値と $n_N$ の積 $n_N N$	2 乗偏差と $n_N$ の積 $n_N (N - \bar{N})^2$	ポアッソン分布 $P(N)$
8	1	0.003	8	147.62	0.001195
9	1	0.003	9	124.32	0.002677
10	1	0.003	10	103.02	0.005394
11	0	0.000	0	0	0.009881
12	1	0.003	12	66.42	0.016593
13	9	0.030	117	460.10	0.025719
14	16	0.053	224	605.10	0.037017
15	11	0.036	165	291.74	0.049727
16	13	0.043	208	223.89	0.062624
17	20	0.066	340	198.45	0.074228
18	41	0.136	738	189.52	0.083095
19	28	0.093	532	37.03	0.088124
20	30	0.100	600	0.67	0.088785
21	22	0.073	462	15.89	0.085191
22	29	0.096	638	99.25	0.078028
23	14	0.046	322	113.71	0.068359
24	18	0.060	432	266.80	0.057393
25	13	0.043	325	305.79	0.046259
26	5	0.016	130	171.11	0.035850
27	7	0.023	189	328.45	0.026755
28	9	0.030	252	554.60	0.019254
29	3	0.010	87	234.96	0.013378
30	3	0.010	90	291.06	0.008985
31	5	0.016	155	588.61	0.005840
32	0	0.000	0	0	0.003677
33	0	0.000	0	0	0.002245
合計	300	1	6045	5418.25	0.99628

計数値の平均値  $\bar{N}$  は  $\bar{N} = 20.15$ 、標準偏差  $\sigma$  は  $\sigma = 4.25$  となった。

横軸に計数値  $N$ 、縦軸に計数値  $N$  の出現確率  $n_N / \sum n_N$  をとって棒グラフに合わせたものをレポート末尾に添付した。またポアッソン分布から各係数値  $N$  に対する確率  $P(N)$  を計算し、その値を棒グラフに大きめのバツ印で書き込んだ。

総回数 300 回、 ゲート時間 1 秒、 線源の位置 120 mm としたときの測定結果は次の表のようになった。

表 4 セシウム 137 の計数値の分布の実験データ 3

計数値 $N$	出現回数 $n_N$	出現確率 $n_N / \sum n_N$	計数値と $n_N$ の積 $n_N N$	2 乗偏差と $n_N$ の積 $n_N (N - \bar{N})^2$	ポアソン分布 $P(N)$
0	2	0.006	0	46.92	0.007876
1	16	0.051	16	236.40	0.038153
2	28	0.093	56	226.45	0.092404
3	42	0.139	126	142.79	0.149197
4	52	0.172	208	37.02	0.180673
5	51	0.169	255	1.24	0.175030
6	46	0.152	276	61.48	0.141304
7	22	0.073	154	102.27	0.097779
8	21	0.069	168	209.18	0.059203
9	14	0.046	126	241.82	0.031863
10	5	0.016	50	132.92	0.015434
11	1	0.003	11	37.89	0.006796
12	1	0.003	12	51.21	0.002743
13	0	0.000	0	0	0.001022
合計	301	1	1458	1527.66	0.9994

計数値の平均値  $\bar{N}$  は  $\bar{N} = 4.84$ 、 標準偏差  $\sigma$  は  $\sigma = 2.25$  となった。

横軸に計数値  $N$ 、 縦軸に計数値  $N$  の出現確率  $n_N / \sum n_N$  をとって棒グラフに合わせたものをレポート末尾に添付した。またポアソン分布から各係数値  $N$  に対する確率  $P(N)$  を計算し、 その値を棒グラフに大きめのバツ印で書き込んだ。

総回数 300 回、 ゲート時間 1 秒、 線源の位置 80 mm としたときの測定結果は次の表のようになった。

表 5 セシウム 137 の計数値の分布の実験データ 4

計数値 $N$	出現回数 $n_N$	出現確率 $n_N / \sum n_N$	計数値と $n_N$ の積 $n_N N$	2 乗偏差と $n_N$ の積 $n_N (N - \bar{N})^2$	ポアッソン分布 $P(N)$
3	4	0.012	12	295.39	0.002395
4	4	0.012	16	230.64	0.006944
5	6	0.019	30	260.84	0.01610
6	12	0.038	72	375.45	0.031113
7	16	0.051	112	337.61	0.051531
8	18	0.058	144	232.44	0.0746786
9	34	0.109	306	228.70	0.096198
10	36	0.116	360	91.41	0.111528
11	36	0.116	396	12.68	0.117546
12	24	0.077	288	3.96	0.113565
13	32	0.103	416	63.29	0.101278
14	25	0.080	350	144.77	0.083870
15	20	0.064	300	232.07	0.064823
16	13	0.041	208	252.41	0.046970
17	7	0.022	119	204.60	0.032032
18	6	0.019	108	246.25	0.020631
19	3	0.009	57	164.56	0.012589
20	3	0.009	60	212.00	0.007297
21	2	0.006	42	176.96	0.004028
22	9	0.029	198	974.64	0.002123
合計	310	1	3594	4740.78	0.9978

計数値の平均値  $\bar{N}$  は  $\bar{N} = 11.59$ 、標準偏差  $\sigma$  は  $\sigma = 3.19$  となった。

横軸に計数値  $N$ 、縦軸に計数値  $N$  の出現確率  $n_N / \sum n_N$  をとって棒グラフに合わせたものをレポート末尾に添付した。またポアッソン分布から各係数値  $N$  に対する確率  $P(N)$  を計算し、その値を棒グラフに大きめのバツ印で書き込んだ。

### 4.3 $\beta$ 線の吸収の測定

1 mm の Al 板により  $\beta$  線を遮断したときの計数値  $N'$  の平均値  $\bar{N}'$  は

$$\bar{N}' = (129 + 136 + 120 + 155 + 144) / 5 = 136.8$$

となった。 $N'$  は自然計数  $N_0$  と計数値  $N_\gamma$  の和である。

#### 4.3.1 Ti による $\beta$ 線の吸収

Ti の薄板 1 枚の厚さの平均値  $\overline{d_a}$  は、0.20 mm であった。

$\beta$  線の計数値の平均値  $\overline{N}_\beta$  は  $\overline{N}_\beta = \overline{N} - \overline{N'}$  として求めた。

また  $\overline{N}_\beta$  の標準偏差  $\sigma_\beta$  は次式から求めた。  $n$  は各測定の一連の繰り返し回数である。

$$\sigma_\beta = \sqrt{\frac{\overline{N} + \overline{N'}}{n}}$$

Ti の薄板を 1 枚ずつ入れて各枚数に対して計数値  $N$  を測定した結果を次の表にまとめた。

試料金属：Ti、 $\beta$  線源の位置：80 mm、金属板の位置：30 mm

測定回数：3 回、 $\beta$  線を遮断したときの計数値：136.8

表 6 Ti による  $\beta$  線の吸収の実験データ

枚数	厚さ /mm	1 分間の計数値 $N$	平均値 $\overline{N}$	$\beta$ 線計数値 $\overline{N}_\beta$	$\beta$ 線計数値の対数 $\log_{10} \overline{N}_\beta$	標準偏差 $\sigma_\beta$
1	0.20	449、482、481	470.6	333.86	2.5235	14.229
2	0.40	388、499、392	426.3	289.53	2.4616	13.700
3	0.60	343、356、317	338.6	201.86	2.3050	12.589
4	0.80	288、296、289	291	154.2	2.1880	2.188
5	1.00	261、242、249	250.6	113.86	2.0563	11.364
6	1.20	213、227、267	235.6	98.86	1.9950	11.142

グラフの横軸にチタン板の厚さ  $x$  を、縦軸に計数値の対数  $\overline{N}_\beta$  をとりグラフを作成しレポート末尾に添付した。グラフの傾きからチタンの線吸収係数  $\mu$  を求めるとその値は

$$\mu = -\frac{2.4616 - 2.4150}{1.00} = 0.5285 \text{ mm}^{-1} \cong 52.9 \text{ cm}^{-1}$$

またグラフから決定される定数  $\delta X = 0.0881 \times \text{mm}$ 、 $\delta Y = 0.00466$  を用いてチタンの線吸収係数  $\mu$  の不確かさ  $\Delta\mu$  は以下のように求められる

$$\Delta\mu = 0.5285 \times \sqrt{\left(\frac{0.0881}{1}\right)^2 + \left(\frac{0.00466}{0.5285}\right)^2} = 0.04679.. \cong 0.047 \text{ mm}^{-1} = 4.7 \text{ cm}^{-1}$$

質量吸収係数は線吸収係数  $\mu$  を密度  $\rho$  で割ること得られる。チタンの密度は  $4.506 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  であるから [1]、チタンの質量吸収係数を  $\mu_m$  とするとその値は

$$\mu_m = \frac{52.9 \pm 4.7}{4.506} = 11.7 \pm 1.0 \text{ cm}^2/\text{g}$$

と計算できた。

#### 4.3.2 Cu による $\beta$ 線の吸収

Cu の薄板 1 枚の厚さの平均値  $\overline{d_c}$  は、0.31 mm であった。

Cu の薄板を 1 枚ずつ入れて各枚数に対して計数値  $N$  を測定した結果を次の表にまとめた。

試料金属：Cu、 $\beta$  線源の位置：80 mm、金属板の位置：30 mm

測定回数：3 回、 $\beta$  線を遮断したときの計数値：136.8

表 7 Cu による  $\beta$  線の吸収の実験データ

枚数	厚さ /mm	1 分間の計数値 $N$	平均値 $\bar{N}$	$\beta$ 線計数値 $\bar{N}_\beta$	$\beta$ 線計数値の対数 $\log_{10} \bar{N}_\beta$	標準偏差 $\sigma_\beta$
1	0.31	309, 315, 326	316.6	179.86	2.2549	12.294
2	0.62	230, 230, 198	219.3	82.53	1.9166	10.895
3	0.93	177, 157, 175	169.67	32.86	1.5167	10.107
4	1.24	160, 175, 160	165	28.2	1.45024	10.029

グラフの横軸に銅板の厚さ  $x$  を、縦軸に計数値  $\bar{N}_\beta$  をとりグラフを作成しレポート末尾に添付した。グラフの傾きから銅の線吸収係数  $\mu$  を求めるとその値は

$$\mu = -\frac{2.2549 - 1.4502}{0.93} = 0.8652... \text{ mm}^{-1} \cong 86.5 \text{ cm}^{-1}$$

またグラフから決定される定数  $\delta X = 0.0617 \times \text{mm}$ 、 $\delta Y = 0.0534$  を用いて銅の線吸収係数  $\mu$  の不確かさ  $\Delta\mu$  は以下のように求められる

$$\Delta\mu = 0.8652 \times \sqrt{\left(\frac{0.0617}{0.93}\right)^2 + \left(\frac{0.0534}{0.8047}\right)^2} = 0.08118.. \cong 0.0812 \text{ mm}^{-1} = 8.12 \text{ cm}^{-1}$$

銅の質量吸収係数を  $\mu_m$  とするとその値は、銅の密度は  $8.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  であるから [1]、

$$\mu_m = \frac{86.5 \pm 8.12}{8.96} = 9.65 \pm 0.90 \text{ cm}^2/\text{g}$$

と計算できた。

## 5 考察

### 5.1 自然計数の測定

実験結果から放射線源が近くになくても天然には微量の放射線が存在することが分かった。ただ、線源の保管場所が壁を隔てた案外近い場所にあったので、それも少なからず影響していると思う。

### 5.2 $\beta$ 線の計数値の分布の観測

総回数 100 回 と 300 回の 3 つの測定データにおける計数値の平均の平方根と標準偏差の差は 300 回のものの方が小さい値であった。このことより、回数を重ねることで測定の精度が改善されているといえる。得られた測定データにおける各計数値の出現確率はポアソン分布に近いものとなっていた。しかし、それでもなお外れ値や飛んだ値が存在していた。



### 5.3 $\beta$ 線の吸収の測定

測定によって得られた質量吸収係数  $\mu_m$  の値は、チタンでは  $\mu_m = 11.7 \pm 1.0 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、銅では  $\mu_m$  の値は、 $\mu_m = 9.65 \pm 0.90 \text{ cm}^2/\text{g}$  であり、チタンのほうが大きな値であった。

### 参考文献

[1] 理科年表 平成 31 年度版 p.388