

放射線の計測

電気通信大学 I 類

2210632 宗村キヤ

2022 年 7 月 11 日作成

2022 年 7 月 24 日更新

1 目的

ガイガー・ミュラー計数管 (以下, GM 計数管と記す) は H. Geiger と W. Müller によって考案された放射線計数管である。アルゴンガスとアルコールガスで満たした金属円筒を陰極, 中心の金属線を陽極として電圧をかける事によって, 放射線粒子が入った時に粒子の数と同じ回数の電流パルスが生じる。この計数値に対し統計的な処理を施して, 放射性崩壊の原理と放射性物質に対する理解を深める。

2 原理

2.1 $^{137}_{55}\text{Cs}$ の崩壊系列

不安定な原子核は α 線 (He 原子核), β 線 (電子), γ 線 (高エネルギー電磁波), あるいは中性子線を出すことによってより安定な原子核へ崩壊する。今回の実験で用いる放射性同位元素セシウム 137 のベータ崩壊様式は式 (1) に示す通りとなっている。要するに, セシウム 137 は β 崩壊を起こして, 高エネルギー状態のバリウム 137 (バリウム 137m) を生じる。このバリウム 137 は γ 線を放出して, エネルギー的に安定した状態となる。



一般に放射性崩壊において, 放射性原子の数が元の半分になるまでに要する時間を半減期という。

3 方法

3.1 実験器具

今回の実験で用いる測定装置の外見を図 1 に示す。GM 管スタンドに計測する対象を収める。ゲート切替スイッチは計数する時間を設定するものであり, スタートボタンを押してから指定した時間計数し続ける。計数が終了すると計測ランプが消えるのでこの間に計数値をノートに控えて置き, リセットボタンを押すことで 0 から計数が可能な状態となる。ガイガー・ミュラー計数管は図 2 に示すような構造をしており, 金属円筒内にはアルゴンガスやアルコールガスなどが封入されている。中心の細い金属線を陽極, 金属円筒を陰極として, 500 ~ 1000 V の電圧をかけたとき, 放射線粒子が 1 個入ると放電して 1 個の電流パルスを生じる。この電流パルスの個数は, 計数管に入った放射線粒子の数に等しい。計数値は本質的には個数であるので, 無次元量である。

3.2 手順

なお, 以下の手順で放射線源や穴の開いた板の入れる位置, そして 1 mmAl 板, Al 箔, Ni 箔の厚さを予め記録した。

1. 測定装置の電源を入れて, 印加電圧調整つまみを電圧指示計がちょうど 500 V を指すように回した。
2. ゲート切替スイッチを 1 min に合わせた上で, GM 管スタンドに何も入っていない状態で 20 回計数した。

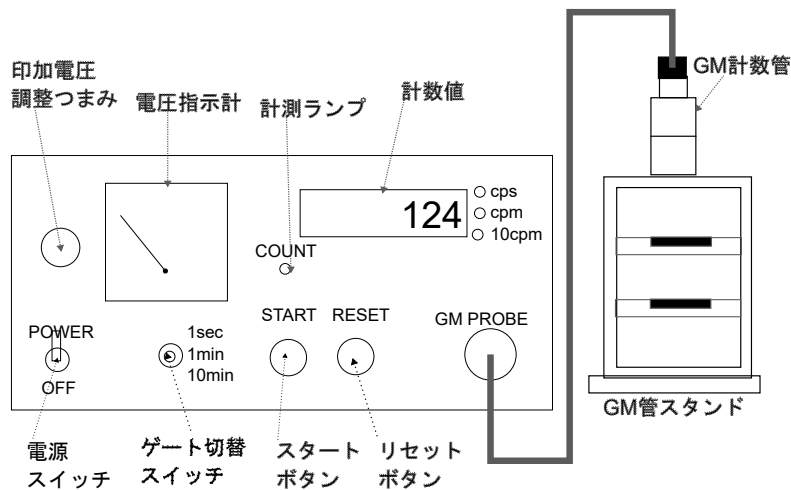


図 1: 今回の測定装置の大きな外見

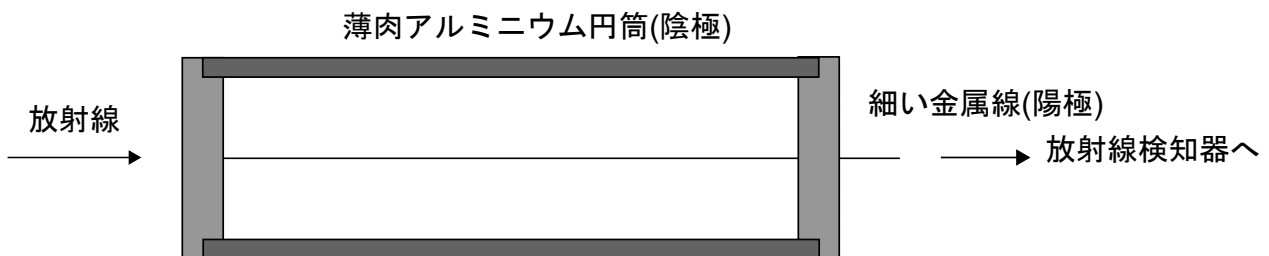


図 2: ガイガー・ミュラー計数管の構造

3. 80 mm の位置に放射線源を, 40 mm の位置に穴の開いた板をしまって, 5 回計数した.
4. Al 板, Al 箔, Ni 箔それぞれの厚さをマイクロメーターで 3 箇所測定し, ゼロ点補正を行った値の平均を求めた.
5. 穴の開いた板に 1 mm Al 板を乗せて, 5 回計数した.
6. 1 mm Al 板を取って, Al 箔を 1 枚, 3 枚, 6 枚乗せたときのそれぞれの場合において 5 回計数した.
7. 同様に, Ni 箔を 1 枚, 3 枚, 5 枚乗せたときのそれぞれの場合において 5 回計数した.
8. 金属箔と穴の開いた板を取り除き, ゲート切替スイッチを 1 sec に合わせた.
9. 最初に 100 回 (計測 [i]), 次に 298 回 (計測 [ii]) の測定を行った.
10. 放射線源を入れる位置を変えて, 300 回 (計測 [iii]) の測定を行った.

4 実験結果

以降, 実験データやそれを計算して得た値は小数点以下 3 桁まで示す.

表 1: 自然計数の測定結果

計数值 N	出現回数 n_N
7	1
8	1
9	0
10	3
11	0
12	1
13	4
14	4
15	2
16	1
17	0
18	0
19	1
20	1
21	0
22	0
23	0
24	1

4.1 自然計数の測定

表 1 にゲート時間を 60 s にした時の自然計数の 20 回分の測定結果を整理したうえで示す。全測定結果を平均して、自然計数の計数值 N_0 を求めると、

$$N_0 = \frac{\sum n_N N}{\sum n_N} = 13.7 \quad (2)$$

表 1 のデータを縦軸を出現回数、横軸を計数值として棒グラフで表示したものと N_0 の値を図 3 にまとめて示す。このグラフからは、特に分布のようなものは見られなかった。

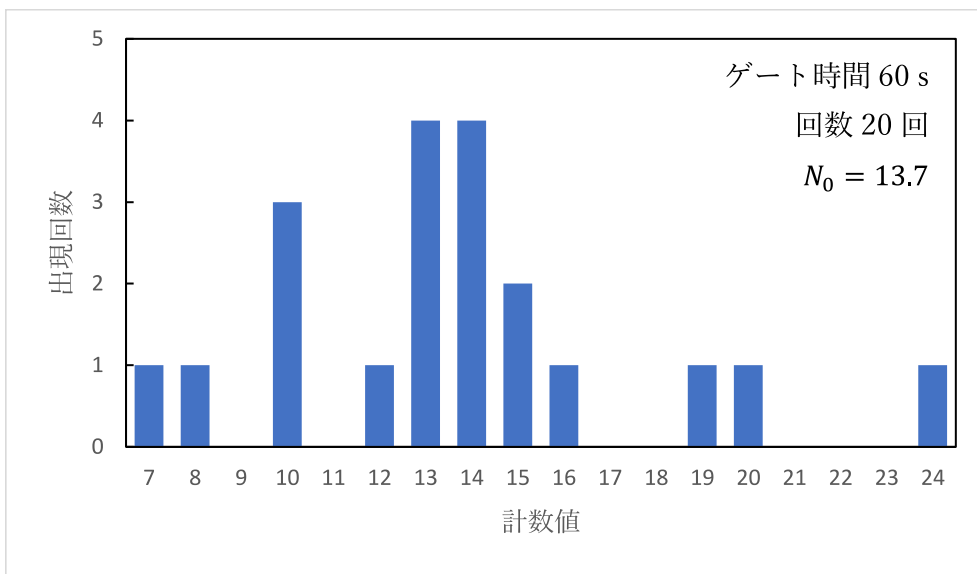


図 3: 自然計数の測定結果の分布

表 2: 計数値の分布の実験データ
測定回数 100 回, ゲート時間 1s, 線源の位置 80mm

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 $P(N)$
3	1	0.010	3	50	0.007
4	2	0.020	8	73	0.018
5	4	0.040	20	102	0.037
6	5	0.050	30	82	0.062
7	6	0.060	42	55	0.089
8	11	0.110	88	46	0.112
9	16	0.160	144	17	0.125
10	13	0.130	130	0	0.125
11	15	0.150	165	14	0.114
12	13	0.130	156	50	0.096
13	2	0.020	26	18	0.074
14	3	0.030	42	47	0.053
15	4	0.040	60	98	0.035
16	1	0.010	16	36	0.022
17	2	0.020	34	97	0.013
18	0	0.000	0	0	0.007
19	1	0.010	19	80	0.004
20	0	0.000	0	0	0.002
21	1	0.010	21	120	0.001
合計	100	1	1004	984	0.997

4.2 β 線の計数値の分布の観測

表 2 に 100 回の測定で得られた結果をテキストの通り整理したものを示す. なお, 平均値 \bar{N} , 平均値の平方根 $\sqrt{\bar{N}}$, 標準偏差 σ の値は次の計算で求めた.

$$\bar{N} = \frac{\sum n_N N}{\sum n_N} = 10.04 \quad (3)$$

$$\sqrt{\bar{N}} = 3.17 \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_N (N - \bar{N})^2}{(\sum n_N) - 1}} = 3.15 \quad (5)$$

表 2 のデータを縦軸を出現確率, 横軸を計数値として棒グラフで表示したものに, ポアソン分布の値をプロットしたものを図 4 に示す. 平均値 \bar{N} , 平均値の平方根 $\sqrt{\bar{N}}$, 標準偏差 σ の値は図中に書き入れた.

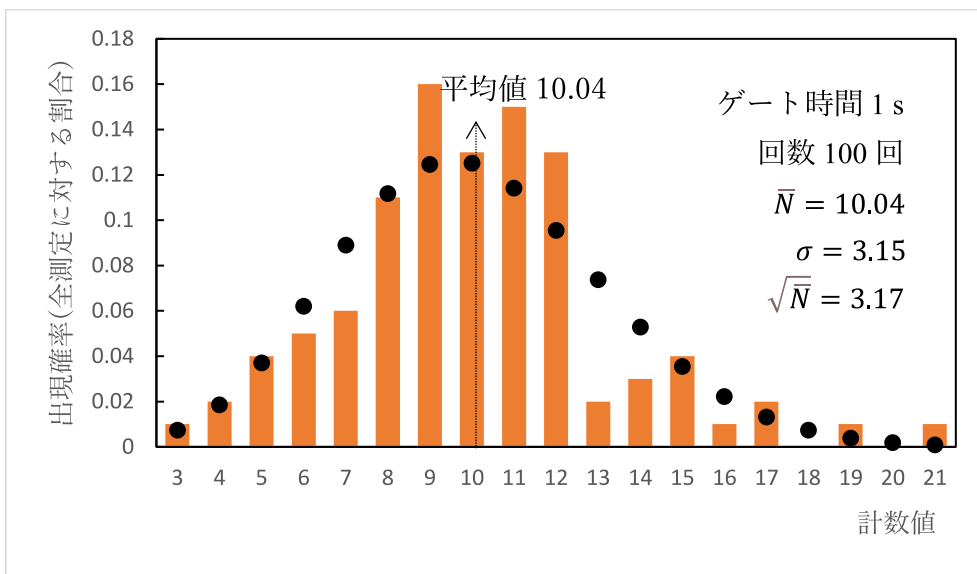


図 4: 100 回分の計数値の分布

表3に298回の測定で得られた結果をテキストの通り整理したものを示す。そして、このデータを縦軸を出現確率、横軸を計数値として棒グラフで表示したものに、ポアソン分布の値をプロットしたものを図5に示す。平均値 \bar{N} 、平均値の平方根 $\sqrt{\bar{N}}$ 、標準偏差 σ の値は図中にも書き入れた。

表3: 計数値の分布の実験データ
測定回数 298 回, ゲート時間 1 s, 線源の位置 80 mm

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 $P(N)$
2	1	0.003	2	53	0.004
3	2	0.007	6	79	0.012
4	6	0.020	24	167	0.029
5	19	0.064	95	348	0.054
6	27	0.091	162	290	0.083
7	40	0.134	280	208	0.110
8	34	0.114	272	56	0.127
9	38	0.128	342	3	0.131
10	36	0.121	360	19	0.122
11	33	0.111	363	98	0.103
12	12	0.040	144	89	0.079
13	21	0.070	273	291	0.057
14	10	0.034	140	223	0.038
15	9	0.030	135	295	0.023
16	5	0.017	80	226	0.013
17	3	0.010	51	179	0.007
18	2	0.007	36	152	0.004
合計	298	1	2765	2774	0.996

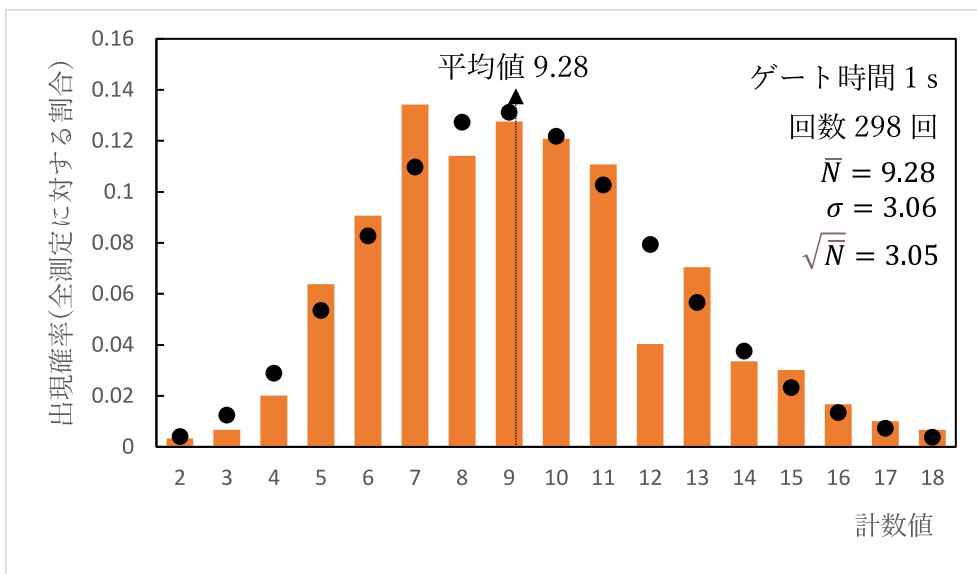


図 5: 298 回分の計数值の分布

表 4 に線源を 40 mm に置いた時の 300 回の測定で得られた結果をテキストの通り整理したものを示す。そして、このデータを縦軸を出現確率、横軸を計数値として棒グラフで表示したものに、ポアソン分布の値をプロットしたものを図 6 に示す。平均値 \bar{N} 、平均値の平方根 $\sqrt{\bar{N}}$ 、標準偏差 σ の値は図中に書き入れた。今回の測定は、測定 [i]、測定 [ii] と比べて計数値のばらつきが大きくなった。

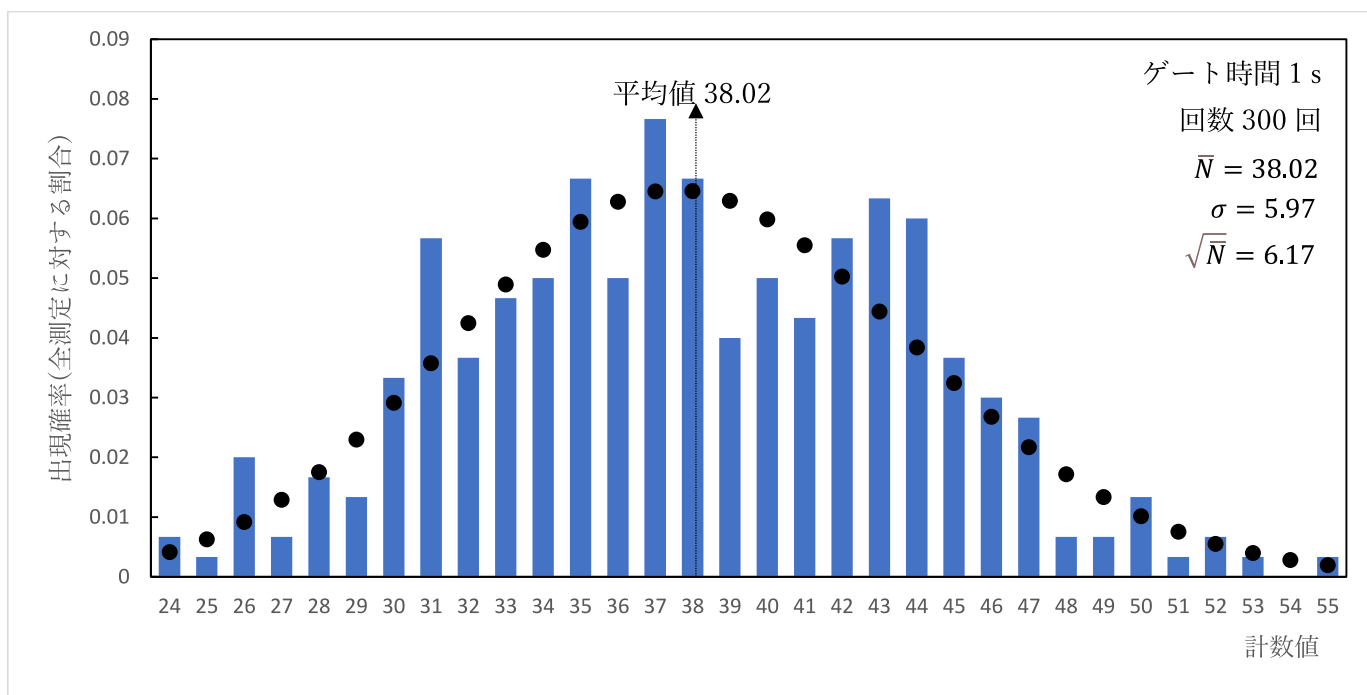


図 6: 300 回分の計数値の分布

表 4: 計数値の分布の実験データ
測定回数 300 回, ゲート時間 1 s, 線源の位置 40 mm

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 $P(N)$
24	2	0.007	48	393	0.004
25	1	0.003	25	170	0.006
26	6	0.020	156	867	0.009
27	2	0.007	54	243	0.013
28	5	0.017	140	502	0.018
29	4	0.013	116	326	0.023
30	10	0.033	300	644	0.029
31	17	0.057	527	839	0.036
32	11	0.037	352	399	0.042
33	14	0.047	462	353	0.049
34	15	0.050	510	243	0.055
35	20	0.067	700	183	0.059
36	15	0.050	540	61	0.063
37	23	0.077	851	24	0.065
38	20	0.067	760	0	0.065
39	12	0.040	468	11	0.063
40	15	0.050	600	59	0.060
41	13	0.043	533	115	0.056
42	17	0.057	714	269	0.050
43	19	0.063	817	471	0.044
44	18	0.060	792	643	0.038
45	11	0.037	495	535	0.032
46	9	0.030	414	573	0.027
47	8	0.027	376	645	0.022
48	2	0.007	96	199	0.017
49	2	0.007	98	241	0.013
50	4	0.013	200	574	0.010
51	1	0.003	51	168	0.008
52	2	0.007	104	391	0.006
53	1	0.003	53	224	0.004
54	0	0.000	0	0	0.003
55	1	0.003	55	288	0.002
合計	300	1	11407	10653	0.990

4.3 β 線の吸収の測定

Al板の厚さを測って計算したところ 0.996 mm であった。この時の、5 回分の計数値おそれぞれ 97, 93, 118, 114, 99 であり、平均すると 104.2 であった。以降、この値を線源の β 線以外の放射線の計数値 \overline{N}' とする。更に、以下登場する β 線計数値 \overline{N}_β 、標準偏差 σ_β は計測回数 n と計数値の平均 \overline{N} を用いて次のようにして求めた。

$$\overline{N}_\beta = \overline{N} - \overline{N}' \quad (6)$$

$$\sigma_\beta = \sqrt{\frac{\overline{N} + \overline{N}'}{n}} \quad (7)$$

続いて表 5 にアルミニウム箔を 1 枚, 3 枚, 6 枚乗せたときの計数値を, 表 6 にニッケル箔を 1 枚, 3 枚, 5 枚乗せたときの計数値を示す。続いて図 7, 8 に縦軸を $\ln \overline{N}_\beta$ を, 横軸に d をとってグラフを描いたものを示

表 5: β 線の吸収の実験データ

試料金属：アルミニウム, β 線源の位置 80 mm, 金属板の位置 40 mm

測定回数 5 回, β 線を遮断した時の計数値 104.2

枚数	厚さ d/mm	1 分間の計数値 N	平均値 \overline{N}	β 線計数値 \overline{N}_β	対数 $\ln \overline{N}_\beta$	標準偏差 σ_β
0	0	562,616,587,587,578	586	482	6.178	11.749
1	0.028	501,460,476,493,446	475.2	371	5.916	10.765
3	0.078	376,346,345,341,347	351	247	5.509	9.541
6	0.160	249,220,265,247,264	249	145	4.975	8.405

表 6: β 線の吸収の実験データ

試料金属：ニッケル, β 線源の位置 80 mm, 金属板の位置 40 mm

測定回数 5 回, β 線を遮断した時の計数値 104.2

枚数	厚さ d/mm	1 分間の計数値 N	平均値 \overline{N}	β 線計数値 \overline{N}_β	対数 $\ln \overline{N}_\beta$	標準偏差 σ_β
0	0	562,616,587,587,578	586	482	6.178	11.749
1	0.029	315,276,277,310,306	296.8	193	5.261	8.955
3	0.071	163,178,176,161,150	165.6	61	4.117	7.346
5	0.118	123,141,128,125,134	130.2	26	3.258	6.847

す。グラフの傾きと線吸収計数 μ , これを密度 ρ で割った質量吸収係数 $\mu_m = \mu/\rho$ を図に書き入れた。なお, アルミニウムの密度 ρ_{Al} , ニッケルの密度 ρ_{Ni} は文献値として次の値を採用した [1].

$$\rho_{Al} = 2.70 \text{ g cm}^{-3} \quad (8)$$

$$\rho_{Ni} = 8.908 \text{ g cm}^{-3} \quad (9)$$

また, グラフの直線の式は最小二乗法によって求めた。最小二乗法を用いた一次関数の近似は 2 つの量 x, y の関係として求める式を $y = ax + b$ としたとき, a, b は以下のようにして得られる。なお, x, y の n 個の測

定値を整数 i を用いて x_i, y_i のように表す. また, $\sum_{i=1}^n$ を単に \sum と表す.

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (10)$$

$$a = \frac{\sum x_i (y_i - b)}{\sum x_i^2} \quad (11)$$

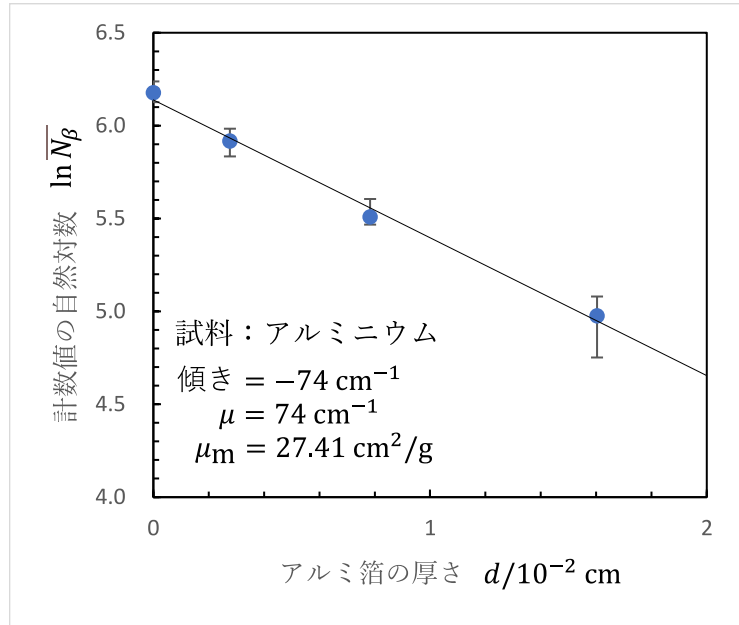


図 7: アルミニウム板の厚さと計数値の関係

図 7, 8 を見ると, 共に各点が大まかに直線の形に並んでいることが分かる. 最小二乗法で引いた直線は各点のエラーバー上を通過しているので, 大きく外れた点はない. 両グラフは縦軸に自然対数を用いたので, 勾配の絶対値が, 線吸収係数 μ に一致する.

5 考察

5.1 自然計数の測定

今回の実験から, 線源を持ち込まずとも周囲に放射線があることが分かる. だが, この放射線はセシウム 137 によるものと比べて明らかに微弱であることも分かる. セシウム 137 由来の γ 線による計数値 $N' - N_0$ と自然放射線による計数値 N_0 の比を取ると,

$$\frac{N_0}{N' - N_0} \times 100 = 15.1\% \quad (12)$$

となり, 実際に僅かな量しかないことがわかる.

5.2 β 線の計数値の分布の観測

今回のデータにおいて, 視覚的には確かに \sqrt{N} と σ の差が小さくなるほどグラフの形がポアソン分布に近くなることが分かる. \sqrt{N} と σ の差が最小である図 5 はほかの図と比べても明らかにポアソン分布に近い形

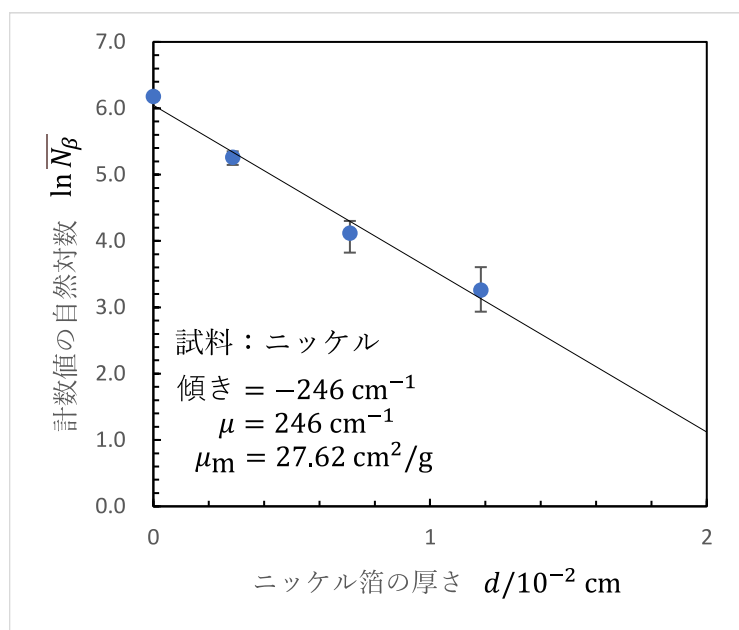


図 8: ニッケル板の厚さと計数値の関係

表 7: \sqrt{N} と σ の差とポアソン分布からのズレとの関係

計測	計測回数	差 $\sqrt{N} - \sigma$	ポアソン分布からの平均のズレ ΔP
計測 [i]	100	0.02	0.021
計測 [ii]	298	-0.01	0.013
計測 [iii]	300	0.20	0.010

をしているが、そこから差が 0.01 だけ開いた図 6 と差が 0.20 も開いている図 4 のどちらがポアソン分布から離れた形状をしているかは分からない。故に量的比較を行うために、表 7 に各計測に対してポアソン分布からの実際のズレ ΔP を式 (14) のようにして計算したものを示す。なお、計数値 N の出現確率 p_N を

$$p_N = \frac{n_N}{\sum n_N} \quad (13)$$

と定め、各計測における計数値の最大を N_{\max} 、最小を N_{\min} とおく。

$$\Delta P = \sqrt{\frac{\sum (P(N) - p_N)^2}{N_{\max} - N_{\min}}} \quad (14)$$

計算してみると意外なことに、図 6 では少なくとも計測 [ii] よりもポアソン分布からズレているように見えた計測 [iii] がポアソン分布に近いことが分かる。この指標が正しいものかは分からないが、これを認めれば今回の実験では \sqrt{N} と σ の差が小さくなるほどグラフの形がポアソン分布に近くなることは確かめられていないことが分かる。さらに、計測回数と ΔP の関係もこのデータでははっきりとしない。

今回、線源を計数管に近づけたところ図 6 のように、分布の幅が広がり線源が遠い場合と比べて分布の高さが低くなった。これは、計数値の平均が位置が 80 mm の時と比べて凡そ 4 倍になっていることに起因すると考えられる。

表 8: 材質ごとの線吸収係数と質量吸収係数

材質	密度 $\rho/\text{g cm}^{-3}$	線吸収係数 μ/cm^{-1}	質量吸収係数 $\mu_m/\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$
Al	2.70	74	27.41
Ni	8.908	246	27.62

5.3 β 線の吸収の測定

Al箔とNi箔それぞれの実験から得られた μ_m は $0.21 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の差なので、概ね実験の操作に不備はないと思われる。表8に各材質の質量吸収係数と線吸収係数を示す。

この図から、密度が高くなるほど放射線をより吸収するようになることが推測され、放射線の遮蔽材としては高密度の物質が向くことが分かる。

5.4 自然放射性原子

調べたところ自然界に存在する放射性原子には表9のようなものがあるとのことだ [1][2]。

表 9: 自然界に存在する放射性原子の一例とその放射線の種類及び半減期

放射性原子	放射線の種類	半減期
${}^{222}_{86}\text{Rn}$	α 線	3.8日
${}^{220}_{86}\text{Rn}$	α 線	55s
${}^3_1\text{H}$	β 線	12.32年
${}^{14}_6\text{C}$	β 線	5.70×10^3 年
${}^{40}_{19}\text{K}$	β 線	1.248×10^9 年

参考文献

- [1] 国立天文台, 理科年表プレミアム, 物理/化学部, 表: 単体の密度, 表: おもな放射性核種 (放射性同位体), <http://www.rikanenpyo.jp/member/>(参照 2022-07-16).
- [2] 環境省, 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 (平成 26 年度版), 第 1 章 放射線の基礎知識と健康影響, 自然からの被ばく線量の内訳 (日本人), <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo/attach/201510mat1s-01-6.pdf>(参照 2022-07-17).