

放射線計測

1 レポートを書く前に

実験のレポートを書く際に大切なことは、「実験のテーマがなんであるか」を明確にすることにあります。目的があって（物理理論で説明）、その目的を果たすためには何をするのかを考えて（測定理論で説明）、実際に行った結果（実験結果で説明）知りたいことへの答えが導かれ（解析結果で説明）、考察で「目的に対する答えは何であったか」を考える述べるのが実験です。ただし、考察については、いわゆる意見論文ではありませんので「～だと思う」という主観的な結論ではいけません。「～であることがわかった。」といった具合に、断定をする必要があります。ましてや、「難しかった」とか「うまくいった」など、目的にそぐわないことは書いてはいけません。

2 物理理論

この実験の目的は「 β 線の吸収曲線を測定することにより、 β 線のエネルギーを測定する」ことなのですが、教育的な目的は、放射線を計測する技術と遮蔽について理解することにあります。

放射線は正式には「電離放射線」と呼ばれます。「電離」とは、物質を形作っている原子の最外殻電子を何らかの方法（例えばクーロン力）によって電子軌道からはじき飛ばすことまたはその現象を意味しており、電離を引き起こすものを電離放射線と呼んでいます。図1は電子が原子の近傍を通過する際に、軌道電子に力積を与えて電離をさせる様子を模式的に表したものです。このとき、通過する電子は軌道電子に力積を与えることによって仕事をしていますので、電離作用によってエネルギーを一定量失うこととなります。ちなみに、この通過する電子は β 線と呼ばれる電離放射線です。

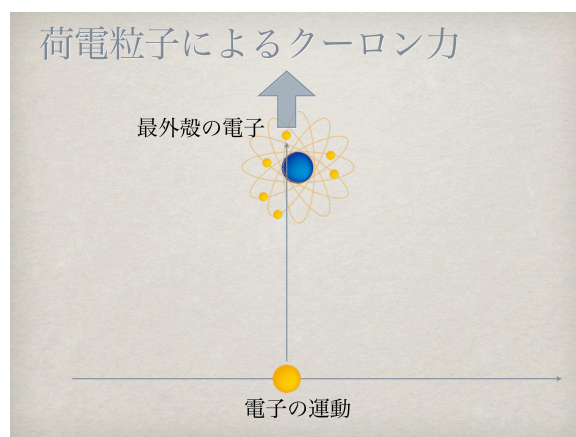


図 1: 電離の原理

この電離という現象を利用することにより、放射線のエネルギーを減少させていくことができます。つまり、大きな物質（すなわち、たくさんの原子）を用意することにより、放射線にその物質内で電離を何度も何度も繰り返し起こさせることによって、いつしか放射線のエネルギーを奪い取ってしまうというわけです。これが「遮蔽」です。基本的に、放射線を避けたければ放射線源と自分との間にたくさんの原子を置けばいいということになります。

3 測定理論

放射線の計測にあたっては、電離によって自由になった軌道電子を捕らえて数えることによって行われますが、電子一つあたりの電荷が $e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ と非常に小さいため、電子の数を増やさないことには（電子増幅）、電気信号として数えることはできません。

電子増幅にあたっては、今回の測定ではGM計数管を使用します。GM計数管の構造については、テキストを参照してください。簡単に言うと、金属筒の中心に細いワイヤーを貼ったような構造をしています。筒とワイヤー

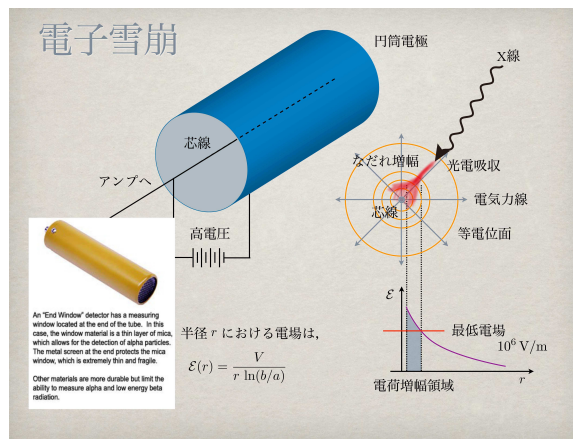


図 2: 電子雪崩の様子

をそれぞれ電極として電圧をかけると、図 2 のような等電位面ができ、ワイヤーに近ければ近いほど大きな電場が生まれます。この電場によって、電子が加速され次々と新しい電子が生まれていきます（電子雪崩）。これが一般的なガス増幅方法でおおよそ 10^4 程度にまで電子の数を増やすことができるのですが、GM 計数管ではこの電子雪崩の連鎖反応を無作為に起こすことによって、おおよそ 10^{10} 程度にまで増幅されます。

4 実験データの解析

4.1 プラトー領域の安定性

放射線計測にあたって、まず、使用する検出器である GM 計数管の安定性、信頼性を検証します。具体的に言えば、GM 計数管の振る舞い（計数の様子）についての、

- 時間依存性
- 電極管電圧依存性

を確認します。

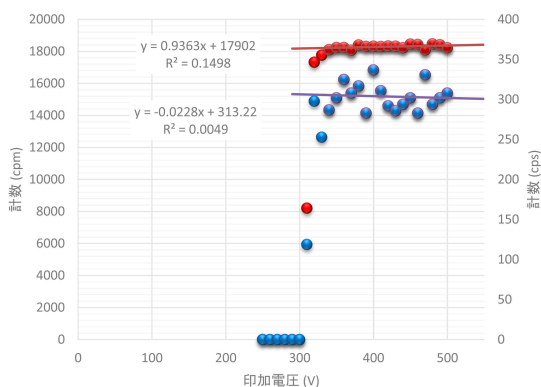


図 3: プラトー領域の安定性検証

がかなり大きいことが判ります。このバラツキの大きな要因として考えられるのが放射性同位元素壊変の統計的なバラツキです。つまり、測定に使用した放射線源の方の問題であって、GM 計数管の安定性に依存するもので

はないということです。放射線の数自身が統計的なバラツキ（ふらつき）がある場合、次に行う β 線吸収曲線の測定に大きな影響を与えますので注意が必要です。

4.2 β 線吸収曲線の測定

β 線の実体は電子とその反粒子である陽電子です。電子は負電荷、陽電子は陽電荷を持っているため、物質中ではクーロン力による電離作用を起こします。すなわち、物質を構成する原子から軌道電子をはぎ取る作用を起こすということです。これは、原子核の質量が電子の質量の数1,000倍以上であるため、相互作用によって空間的な影響を受けないのに対し、軌道電子とは質量がほぼ同じたため軌道電子を弾き飛ばすことができるためです。そのため、 β 線の実体である電子（陽電子）自身も相互作用によって大きくエネルギーを失い、進行方向が変わることになります。この飛跡は図4のように曲がりくねっていますが、全体としては β 線の入射方向へ進んでいき、いずれは物質内で全エネルギーを失います。なお、 β 線の散乱では入射粒子と標的粒子が同じため（電子・電子散乱）、入射 β 線と散乱線の区別はつきません。

β 線と物質の相互作用には、以下のような特徴があります。

- β 線の飛跡が曲がりくねっている。
- β 線のエネルギー分布が連続である。



図4: β 線の飛跡

そのため、吸収物質の厚さと透過率の関係（吸収特性）

は曲線となります。 β 線の透過率が1/10程度までは、吸収曲線は物質の厚さに対してほぼ指数関数的振舞をします。つまり、縦軸に計数率（対数メモリ）、横軸に吸収体の厚さ（単位は $[\text{mg}/\text{cm}^2]$ が使われます）をとると、単調減少のグラフに近い形になります。これが今回計測したアルミニウムによる吸収係数の測定結果というわけです。注意をしてもらいたいのですが、テキスト172ページにある「表10-2」にある「Background」とは、最初に測定した放射線源を置かない段階での計測数のことで、この値を測定値から引いたものが補正值となります。

例題として、ある実験グループが測定したデータを図5に示します。測定頻度が高い場合は不感時間の影響により測定値が低めに出ます。そのため、最初の4点を無視して、吸収係数の傾きを決めています。最後の4点でフラットな部分を決めている（平均を出している）のですが、こうやってみるとやや強引ですね。

なお、この曲線については、以下のように補足しておきます。

- この振舞については、 γ 線の指数関数的減弱（一次 γ 線）のような明確な物理的意味はありません。
- 吸収体の厚さが小さい場合、計測数が10,000 cpmを越える場合があります。このような場合、GM計数管の不感時間（1つ目の信号が入ってから、次の信号を受け付けることができるようになるまでの時間。GM計数管の場合、200 μs 程度）の関係で数え落しが生じます。計測数が10,000 cpmで3%程度ですので、今回の測定においては直線が少し鈍った形になります。

吸収体の厚さ R と計数率 I の関係は、

$$I = I_0 \exp(-\mu R) \quad (1)$$

と近似的に表されます。このとき、 μ は吸収係数（単位は $[\text{cm}^2/\text{mg}]$ ）と呼ばれ、 β 線の最大エネルギーを E_{max} 、原子番号を Z とすると、

- $\mu = 0.017 E_{\text{max}}^{-1.43}$ （Alで換算した場合）
- $\mu = 0.080 Z^{0.28} E_{\text{max}}^{-1.57+Z/160}$

となります。

また、 β 線の最大エネルギーと最大飛程の関係は、テキストにある通りです。測定によって最大飛程が測定できませんので、この値を使って β 線の最大エネルギーを算出してください。なお、今回用いた β 線源は、 ^{90}Sr (strontium

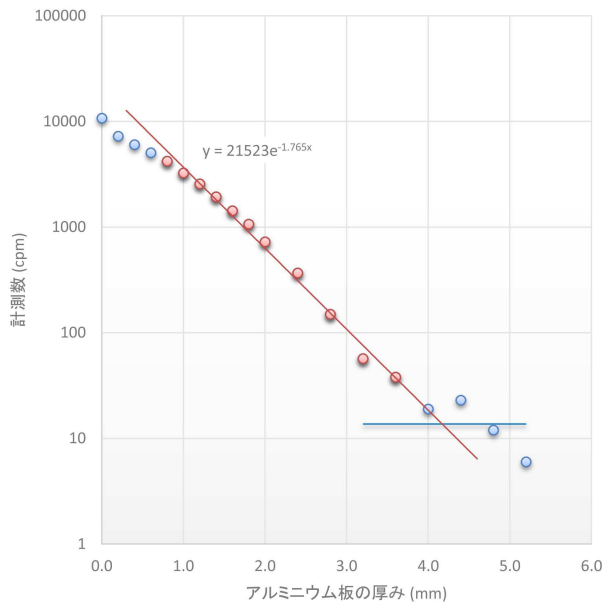
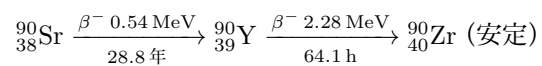


図 5: β 線の吸収曲線

90) です。 ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ は、半減期 28.8 年で β^- 壊変して ${}^{90}_{39}\text{Y}$ となります。この ${}^{90}_{39}\text{Y}$ は、 ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ よりも不安定な原子で、半減期 64.1 時間で β^- 壊変をし、安定核である ${}^{90}_{40}\text{Zr}$ となります。



実は、今回の測定においては ${}^{90}_{39}\text{Y}$ の放出する 2.28 MeV の β 線を検出しており、 ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ の放出する β 線ではありません。そのため、この放射線源を示す場合、一般には「 ${}^{90}\text{Sr}$ 」と書くのですが、「 ${}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ 」と表記される場合もあります。