

V. 放射線の性質とその計測

1. 目的

ガイガーミュラー (GM) 計数管を用いて β 線の計測を行い、放射線に関する知識および安全面についての認識を深める。

2. 放射線の性質

1. 放射線

原子核の崩壊により、 α 、 β 、 γ 線と呼ばれる放射線が放出されることはよく知られている。これらの放射線は、素粒子間に働くそれぞれ異なる相互作用に起因している。例えば α 線は、「強い相互作用」による α 崩壊の際に放出されるヘリウムの原子核 ${}^4_2\text{He}$ (α 粒子) であり、 β 線は「弱い相互作用」による β 崩壊の過程で放出される電子あるいは陽電子である。また γ 線は「電磁相互作用」による γ 崩壊の過程で放出される光子 (電磁波) である。さらに、核分裂反応などにより発生する中性子からなる中性子線も存在する。本実験では ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ (ストロンチウム 90) を線源とする β 線の計測を行う。

(1) ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ が最大エネルギー 0.545MeV (メガ電子ボルト) の β^- 線 (主に電子) を放出しながら、 ${}^{90}_{39}\text{Y}$ (イットリウム 90) に半減期 28 年で崩壊する $\cdots 0.545\text{MeV}$

(2) ${}^{90}_{39}\text{Y}$ は、さらに最大エネルギー 2.26MeV の β^- 線を放出しながら半減期 64.2 時間で安定な原子核 ${}^{90}_{40}\text{Zr}$ (ジルコニウム 90) に崩壊する $\cdots 2.26\text{MeV}$

従って、本実験で扱う β 線のほとんどは Y から Zr への崩壊におけるものであり、エネルギーの最大値 E_{\max} は 2.26MeV である。

2. 物質による β 線の吸収

β^- 線 (高エネルギーの電子線) が物質を通過するとき、厚さが増すと共に透過量は減少する。その原因は、物質を構成する原子・分子を励起あるいは電離したり、原子・分子の電場に軌道を曲げられて γ 線を放出したりして、電子の運動エネルギーが低下するためである。この現象を「物質による β 線の吸収」と呼ぶ。

物質の厚みが $d(\text{cm})$ で密度が $\rho (\text{mg}/\text{cm}^3)$ のとき、放射線に対する「物質の厚さ」は $x = \rho d (\text{mg}/\text{cm}^2)$ で定義されるのが通例である。いま単位時間（1分）当りに物質に入射する β 線の個数を $N_0 (\text{cpm})$ 、物質を透過してくる β 線の個数を $N (\text{cpm})$ とすると、

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad \dots (1)$$

の関係が成り立つことが知られている。ここで、 $\mu (\text{cm}^2/\text{mg})$ は質量吸収係数とよばれる定数である。 $\log N$ を x に対して描いたグラフを吸収曲線と呼ぶ。

β 線の透過量は x の増加と共に(1)式に従って減少していくが、ある厚さ $x_{\text{max}} (\text{mg}/\text{cm}^2)$ 以上ではほとんど一定となる。この x_{max} は最大飛程とよばれ、先に示した β 線のエネルギーの最大値 $E_{\text{max}} (\text{MeV})$ との間には次のような関係が成り立つ。

$$0.15\text{MeV} < E_{\text{max}} < 0.8\text{MeV} \text{ の範囲で、 } x_{\text{max}} = 407 (E_{\text{max}})^{1.38}$$

$$0.8\text{MeV} < E_{\text{max}} < 3\text{MeV} \text{ の範囲で、 } x_{\text{max}} = 542 E_{\text{max}}^{-1.33}$$

さらに $\mu (\text{cm}^2/\text{mg})$ と $E_{\text{max}} (\text{MeV})$ の間にも、

$$0.1\text{MeV} < E_{\text{max}} < 3\text{MeV} \text{ の範囲で、 } \mu = 22 \times 10^{-3} / (E_{\text{max}})^{1.33}$$

が成り立つことから、吸収曲線を測定し $x_{\text{max}} (\text{mg}/\text{cm}^2)$ および $\mu (\text{cm}^2/\text{mg})$ を求めれば、と $E_{\text{max}} (\text{MeV})$ を決定することができる。

3. 安全基準および安全上の注意点

1. 安全基準

放射線に関する単位を以下の表に示す。

名称	意味	新単位	旧単位	単位の換算
放射能	放射線の強度	Bq(ベクレル)	Ci(キュリー)	1Bq=2.7×10 ⁻¹¹ Ci
照射線量	人体へ照射された量	C(クーロン)/kg	R(レントゲン)	1C/kg=3.91×10 ⁸ R
吸収線量	人体が吸収した量	Gy(グレイ)	rad(ラド)	1Gy=100rad
線量当量	人体への影響の大きさ	Sv(シーベルト)	rem(レム)	1Sv=100rem

確率的影響（がん、遺伝子）による障害の程度を考慮した実効線量当量については、国際放射線防護委員会（ICRP）がその限度を、一般住民については年間 1mSv と定めている。また、原子力発電所の作業員や X 線技師などの放射線従事者については、5 年間で 100mSv が限度であり、どの一年も 50mSv を越えてはならないと定めている。

また、確定的影響（皮膚の火傷、不妊、脱毛など）の障害の程度を考慮した組織線量当量の限度は①眼：年間 150mSv ②その他：年間 500mSv ③妊娠可能な年齢の女子腹部（生殖腺）；3ヶ月間に 13mSv ④妊娠している女子の腹部（胎児）：妊娠と判断されたときから出産までの期間に 10mSv、となっている。

さらに医療 X 線検査時の皮膚面積量（1 検査あたりのおよその値：mGy=mSv）は、①頭部（正面）：1.96、②胸部（正面）：成人；0.18；子供（3才）；0.08 ③胃（透視、撮影）：直接；158.00；間接；23.30 ④腹部 2.38 ⑤歯科：5.84、といわれている。

2. 安全上の注意

① 実験で用いる $^{90}_{38}\text{Sr}$ の β 線源は Al（アルミニウム）の容器に密封されており、その放射能は 0.74MBq（メガベクレル）と法律で定められた規制値以下となっているが、直接触れたりほしないよう注意すること。線源カプセルは、落としたり破損したりしないよう慎重に取り扱う。

② 実験に用いる測定器は破損しやすかったり、調整が狂ったりしやすいので、教官の指示があるまで勝手に手を触れたりしないこと。特に GM 計数管の先端は薄いマイカ（雲母）膜でできており、破損しやすいので先端には触れないこと。

③ 電気回路には高電圧部分があるので、実験中に異常が起こっても自分で修理しようとしなくて教官の指示を仰ぐこと。

④ 自分が身に付けているポケット線量計が $1\mu\text{Sv}$ 以上の値を示したときは、直ちに教官に報告し、指示に従うこと。

4. 実験装置

- ・ GM 計数管
- ・ スケラータイマー
- ・ Al 吸収板(0.5mm、1mm、2mm 厚、各 2 枚)
- ・ β 線源 ($^{90}_{38}\text{Sr}$) 入り Al カプセル
- ・ 測定台

- ・鉛製の防護筒
- ・ポケット線量計

5. 放射線計測法（GM 管の原理）

1. GM 管の原理

GM 計数管は二つの電極からなる一種の電離箱で、放射線によってはこの中のガス分子はイオン化され、陽イオンと伝のイオン対を作る(一次イオン)。両極間に強い電界をかけておくと、短時間で電子が電子なだれを起こしながら陽極に集まり、電子パルスを生じる（陽イオンは電子に比べ、ゆっくり陰極へ移動する）。電圧と電圧パルスがいちる、イオンの数に無関係となり範囲を GM 領域といい、GM 管はこの範囲で使用する。

計数管の構造は、測定の方法によって異なるが、窓は暑さ $2 \sim 3 \text{ mg/cm}^2$ の雲母が用いられ、陽極となる中心線は直径約 1 mm のタングステン線、陰極としては Cu と Fe の合金が用いられている。

2. GM 管の特性曲線の測定

- ① スケーラータイマーが以下の状態になっていることを確認する。
 - a) 電源スイッチおよび HV（高電圧）スイッチが OFF（下向き）になっている。
 - b) HV（高電圧）ダイヤルが左回りに止まるまでいっぱい回っている。
 - c) PRESET TIME が 1 分に設定されている。
- ② スケーラータイマーの電源プラグを 100V コンセントに接続する。
- ③ GM 管のケーブルを HV/SIG に接続し、GM 管のキャップを外す。その際、先端部のマイカ膜に触れないように注意すること。
- ④ 電源スイッチを ON（上向き）にし、次に HV スwitch を ON にする。ウォームアップのためそのまま 5 分ほど待つ。
- ⑤ 測定台を 20cm の位置に固定し、 β 線源 ($^{90}_{38}\text{Sr}$) 入り Al カプセルを教官から受け取り慎重に測定台にセットする。同時にポケット線量計を教官から受け取り、身に付ける。実験中時々表示をチェックし、もし $1 \mu\text{Sv}$ 以上の値を示す場合は即刻教官に伝え指示を仰ぐこと。
- ⑥ 以下で計数率(cpm)の測定を行うが、測定のたびに STOP→RESET→START の順にスイッチを押し、1 分間経過して自動的に計測が終了した後、計数值(cpm)を記録する。

- ⑦ 最小電圧 200V で測定し COUNT 表示を記録する。次に HV ダイアルをゆっくり右に回し、電圧を 100V ずつ上げて測定し、その都度 COUNT 表示を記録する。COUNT 数が増え始めたら 50V ずつ上げて測定する。1200V まで測定を続け、終了する。
- ⑧ HV ダイアルをゆっくり左に、止まるまで回して最小電圧 200V にする。
- ⑨ 線源を台から外し、机上の離れた場所に赤印面を下に置き、鉛の防護筒をかぶせておく。
- ⑩ 得られた結果を横軸を電圧値(V)、縦軸を計数率(cpm)にとって方眼グラフ用紙にプロットする。
- ⑪ 教科書の表記に従い、始動電圧 S(V)、開始電圧 T(V)をグラフから求める。曲線の平坦部分はプラトーと呼ばれるが、最適作動電圧 V_0 (V)はプラトーの左端から、観測終了までの長さの 1/4~1/3 程度の電圧とする。

3. Al による β 線の吸収曲線の測定

- ① HV ダイアルをゆっくり右に回し、最適作動電圧 V_0 (V)で測定し COUNT 数を記録する。これをバックグラウンド計数率と呼び、 N_b (cpm)で表す。
- ② 次に線源を慎重に測定台に取り付け、Al 吸収板(0.5mm、1mm、2mm 厚、各 2 枚)を組み合わせて測定台にセットする。d を 0.5mm から 6.0mm まで 0.5mm 間隔で増やしながらか計数率 N_e (cpm)を測定し、記録する。
- ③ 次に線源を台から外し、机上の離れた場所に防護筒をかぶせて置き、バックグラウンド計数率 N_b (cpm)を再度測定し、記録する。
- ④ 以上で測定終了なので、HV ダイアルをゆっくり左に、止まるまで回して最小電圧 200V にする。HV スイッチを OFF (下向き)にしてから電源スイッチを OFF にする。電源プラグを 100V コンセントから抜く。そして先端部 (マイカ膜)に触れないように注意して、GM 管にキャップをかぶせる。最後にケーブルを HV/SIG から外す。

4. β 線の最大エネルギーと質量吸収係数の決定—計算

- ① 2 回測定したバックグラウンド係数率の平均値 $\langle N_b \rangle$ を求める。

- ② Al 吸収板を通過した正味の係数率 $N(= N_e - \langle N_b \rangle)$ を求める。
- ③ Al 吸収板の厚み $d(\text{cm})$ と、Al の密度 $\rho = 2.69(\text{g}/\text{cm}^3)$ を用いて、「放射線に対する Al の厚さ」
 $x = \rho d (\text{mg}/\text{cm}^2)$ を計算する。
- ④ 横軸に「放射線に対する Al の厚さ」 $x (\text{mg}/\text{cm}^2)$ を、縦軸に $\log N$ (自然対数) をとり、グラフ用紙にプロットする。
- ⑤ 最大飛程 $x_{\text{max}} (\text{mg}/\text{cm}^2)$ を決定する。また、同様に参照して質量吸収係数 $\mu(\text{cm}^2/\text{mg})$ を求める。
- ⑥ ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ の β 線のエネルギーの最大値 $E_{\text{max}} (\text{MeV})$ を、このレポートの 2 枚目を参照して求める。

6. 実験結果

実験の結果として、データ表 2 枚・グラフ 2 枚を次項から載せる。

6. 考察

(i) 実験結果について

結果として出た E_{\max} の値は、 x_{\max} からの値が 2.29MeV (2.310、2.312、2.238) であり、 μ からの値が 2.15MeV (2.136、2.226、2.0748) であった。考察に使うのこの値は後にグラフを書き直したもので、自分たちの実験に対してより正確であろうと思われる値である。結果記入用紙には実験時に出した値が書いてある。また、この値は共同実験者 3 人の平均値を取ったものである。() 内が 3 人のそれぞれの値。

では、 x_{\max} からの値がそれなりに実際の値 (2.26MeV) に近いのに対し、 μ からの値が極端に実際の値より小さいことをまず考察していく。計測された β 線のエネルギーの最大値が小さくなったことの原因のひとつとして、距離が離れるにつれ四方へ広がっていくこと (拡散) による減衰が考えられる。もうひとつは途中にある空気などによって吸収されることが考えられる。ここで、放射線の強度という視点から考えてみると、距離を r とすると、これによる減衰は $1/r^2$ で表される。そして、吸収による減衰は吸収される物質の厚みが増すにつれ指数関数的に増えていくため、 e^{kr} と表される (k は空気中での減衰係数で、放射線の種類によって異なる)。従って、線源から距離 r の地点での放射線の強度 (A_r) は、

$$A_r = A_0 \times e^{kr} / r^2 \quad (A_0 \text{ は距離 } 0 \text{ での放射線強度})$$

のように表される。以上のように、拡散と吸収による減衰は起こりえるものであり、そのために値が小さくなったのではないかと考えている。また、Al 吸収板による放射線の散乱もあるのではないだろうか？ 実際、放射線をあててその散乱の度合いから厚さを測る方法がある。これは厚ければ厚いほど散乱することを利用した方法である。以上の 3 つの理由により、実際の値に比べ、今実験において観測された μ より求められたエネルギーの最大値が小さかったのである。

しかし、 x_{\max} からの値も正確な値とまったく同じとはいえない。そこで、まずは最大飛程とは何かを考えてみる。最大飛程とは β 線が、散乱されずに直進した場合の飛程のことをいう (実際には高速の電子である β 線は、電気的な相互作用により散乱され、進行方向を変化させられることが多い)。つまり、最大飛程からは散乱されないときの値が出るということで、だから、 μ からの値に比べ正確な値に近い値が出たのであろう。正確な値と結果の値を比べてみると、少しだけ結果の値が大きい。この理由は、半減期の割合から 2.26MeV の β 線を出す崩壊がほとんどであるが、小さな割合で 0.545MeV の β 線を出す崩壊も起こっているはずであるからだ。割合としては小さいが、Sr \rightarrow Y の崩壊による β 線も加わって大きく測定されるはずである。

(ii) 放射線について

放射線は電離放射線と非電離放射線に大きく分けられる。

電離とは 原子が電子を失う事だ。電離放射線とは直接または間接的に電離作用を有するものの事である。電離放射線は更に粒子線（ α 線・ β 線・陽子線・重陽子線・中性子線）と電磁放射線（ γ 線・X線）に大別される。 α 線はヘリウムの原子核で β 線は陰電子または陽電子のことである。これらの放射線のうち放射性核種から出てくるものは α 線・ β 線・ γ 線の三種類である。これらの放射線は人間の五感では感じない。

放射線は 1895 年 10 月、最初のノーベル物理学賞の対象となったレントゲンによる X 線として発見される。レントゲンは陰極線の研究中偶然 X 線を発見した。この当時は X 線が電磁波の一種であるとは分かっていなかった。レントゲンの X 線の発見から一年後の 1896 年フランスのベクレルはウラニウム化合物が写真乾板を感光させる性質を持つ、X 線に似た光を出している事を発見した。この放射線はその後 α 線・ β 線・ γ 線の三種類であることが分かった。 β 線はベクレルによって電子であることが示され、 α 線はラザフォードによってヘリウムの原子核であることが示された。放射性核種からは後 α 線・ β 線・ γ 線の三種類の放射線が出てくる。原子は α 線・ β 線・ γ 線を放出すると別の核種に変わる。この現象を放射線崩壊と呼ぶ。 α 崩壊とは、 α 線を出して、原子番号が 2、質量数（陽子数+中性子数）が 4 減った原子になることだ。これは、 α 線がヘリウムの原子核である事を意味する。また、 α 線のエネルギーとは α 粒子の運動エネルギーを意味する。 β 線の放出は核内の 1 個の中性子が陽子になることに基づくので、原子番号は 1 増加する。 γ 線の放出は α 崩壊または、 β 崩壊の際付随して放出される。 γ 線のエネルギーとは光子エネルギーを意味する。原子力発電は、ウランまたはプルトニウムが放射性崩壊をする際に放出されるエネルギー（熱エネルギー）を用いて蒸気を発生させてタービンを回すことにより発電している。

放射線には物質を透過する性質がある。その際に放射線自身の持つエネルギーを徐々に失いながら進んで行き全てのエネルギーを失いきると放射線は止まる、つまりはなくなってしまふ。エネルギーを失って行くと言う事は人体（細胞）にエネルギーを与える事を意味する。エネルギーの失い方は放射線の種類によってかなり異なる。 α 線は大きな粒子（ヘリウムの原子核）なのですぐに他の物質と衝突してエネルギーを失い、遠くまでは届かない。 β 線の場合は α 線よりは長い距離を飛ぶが、それでもせいぜい 2 cm から 8 cm ほどだ。 γ 線は α 線や β 線とは違い、ある距離を進む毎にある一定の割合で弱まっていく。 α 線を出す物質が体内に入った場合、体内の細胞表面にくっついて周囲 50 μm の範囲ほどに影響を及ぼす。逆にいえば、ほんの 50 μm の範囲内に持っている全エネルギーを与えてしまう事となる。 β 線の場合は少し広い範囲にかなりのエネルギーを与える事となり、 γ 線の場合はかなり広い範囲に少しずつエネルギーを与えることとなる。このエネルギーが電離作用により細胞を傷つける。このため、不安定になった原子が生体構成物質に化学的変化を及ぼす。そして結果的に、細胞は死にいたるかまたは、変異を起こす。

放射線から防護するために、放射線の照射時間をできる限り短くする、適当な物質で遮蔽する、線源からできる限り距離をとる、ことが重要である。したがって、自分が扱っている放射性物質はどういう種類の放射線をどれほど出しているかを知ること重要なことなのだ。