

物理学に関する実験例

GM 計数管を用いた β -線の測定

[目的]

GM 計数管には使用目的により各種各様のものがあるが、放射性同位元素の実験に主として用いられる GM 計数管は、低エネルギーの β 線の測定に便利な様に作られた端窓型カウンタである。本 GM 計数管を用いて β 線の測定の原理、方法等を修得する。

[GM 計数管の構造]

GM 計数管は図 1 に示す通り、中心部に陽極としての芯線、陰極は GM 計数管の壁が使われている。GM 計数管の一端にはマイカ（雲母）が張られている。マイカは約 $1.5 \sim 3.0 \text{ mg/cm}^2$ と薄いため、突起物に当たったり、強度の振動により容易に破壊されたりするので取扱いには十分注意を要する。GM 計数管内部にはアルゴンと消滅ガスとしてエチルアルコールが陰圧で充填されている。消滅ガスにはアルコール等の有機ガスの他ハロゲンガスが充填されたものもある。

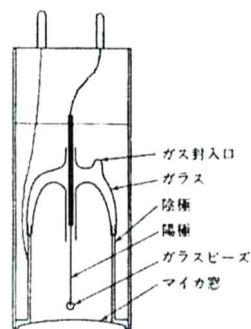


図 1 GM 管の構造

GM 計数管に β 線が入射すると内部ガスが電離し一次イオンが作られる。GM 計数管の陽極には $1100 \sim 1300 \text{ V}$ の電圧がかけられているため、電子は陽極に達するまでガス増幅作用が続き、電子雪崩となり多数のイオン対が生成される。陽イオンは電子に比べ、移動速度が遅いため、中心線周囲には陽イオンの鞘ができる。この結果、中心電極周囲の電場が弱められ、アルコール分子の消滅作用とあいまって増幅は停止する。このように、GM 計数管の特徴は最初に生じた一次イオンの数に関係なくガス増幅が行われ、取り出される電気パルスの大きさは入射放射線の種類、エネルギーに関係なく一定の値となる。

つぎに、取り出されたパルスを増幅し、さらに必要な波高とノイズが波高選別器 (Pulse height analyzer, PHA) により選別された後、計数回路へ信号が送られ、最終的に数値 (カウント) として取り出される (図 2)。

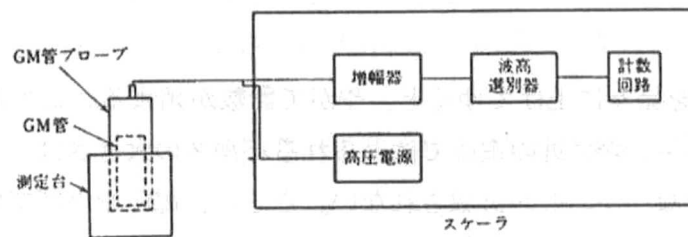


図2 GM測定装置の回路構成

[GM計数管の取扱法]

- (1) 端窓型 GM 計数管は通常、雲母の薄い膜を保護するため端窓部にアルミ製のキャップが被せてある。したがって、測定に際しては、これを丁寧に外す必要がある。雲母窓は極めて薄く、しかも外圧がかかっているため、指や他の器物で压することのないように十分注意すること。
- (2) GM 計数管および計数装置の電源コードならびに計数管へのケーブルが確実に接続されていることを確認すること。接続不良がしばしば、誤った計数の原因となることがある。
- (3) 主電源スイッチを入れる前に、高電圧調節用ダイヤルが「0」であることを確認すること。高電圧位置に設定されていて、主電源スイッチを入れたために、GM 計数管を破損することがある。
- (4) 以上の事項を確認した後、主電源スイッチを入れ、少なくとも 10 分間、“Warming up” する。
- (5) 高電圧調節用ダイヤルは、電圧を上げるときは「ゆっくり」高電圧側に回し、指定の電圧に合わせる。
- (6) 測定中に異常（過電圧、雑音、その他）に気づいたら、直ちに電圧を下げること。
- (7) 測定終了後は、高電圧調節用ダイヤルを「0」まで戻し、主電源スイッチを切る。

1) プラトー特性の測定

[目的]

GM 計数管にかける印加電圧と計数率との関係を知り、使用電圧 (V_0) を決める。また、GM 計数管の良否を判断する。

[理論]

GM 計数管に印加電圧を徐々に上げてゆくと、やがて計数が始まる。この電圧を**始動電圧** (V_s) という。ただし、この付近の電圧では得られるパルスの大きさは一次電離の大きさより異なるため、大きなパルスしか計数されない。さらに、電圧を上げてゆくと、**開始電圧** (V_T) を超えるあたりからパルスの大きさがそろいだし、印加電圧に関係なく計数率が一定となる平坦な領域が現れる。この領域を**プラトー**という。更に、電圧を上げてゆくと、計数率が急増し、連続放電状態 (**プラトー末端電圧**、 V_D) となる。この印加電圧と計数率との関係を**プラトー特性**という。また、実際に GM 計数管を使用する時の印加電圧を**使用電圧** (V_0) といい、通常プラトーの約 $1/4 \sim 1/3$ の電圧を用いる (図 3)。

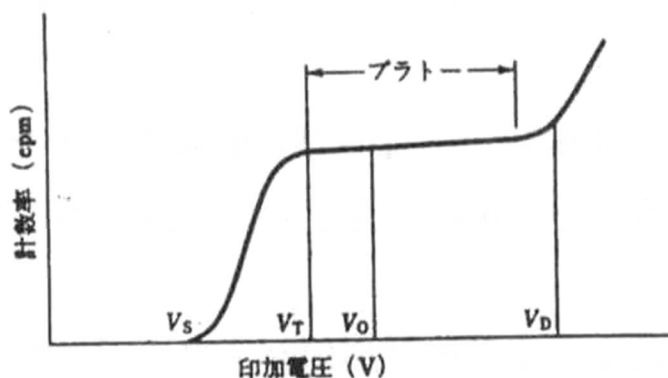


図 3 GM 計数管のプラトー特性

[準備]

使用機器：GM 測定装置一式

線源： ^{32}P 線源 (約 2,000 Bq の $^{32}\text{P}\text{-H}_3\text{PO}_4$ 水溶液をステンレス製プランチェットに滴下、乾燥後ラッカーでコーティングして作製)

[操作]

- (1) 印加電圧調節用ダイヤルをゆっくり回し **1150 V** にし、³²P 線源を乗せる棚段を上下させて、**10,000 cpm** 前後になるよう棚段の位置を決める。
- (2) 印加電圧を一旦「0」まで下げ、再び徐々に上げ、計数が始まる電圧（始動電圧 V_s ）をよみとる。
- (3) 区切りのよい始動電圧付近から **25 V** ずつ印加電圧を上げ、各電圧での計数率をよみとり、記録する。この際、測定と同時にグラフを作成してゆくこと。
- (4) 計数の増加が著しくなったら、直ちに印加電圧を下げる。

[データ処理]

- (1) 印加電圧と計数率との関係を方眼紙に作図する。各測定点には標準誤差を示すエラーバーをつけること。計数率の統計的変動に基づき測定値 m 、測定時間 t の時、標準誤差は $\pm\sqrt{m/t}$ となる。
- (2) 図上から、プラトーの長さの **1/4** に相当する電圧を**使用電圧**とし、グラフ上に表示する。
- (3) プラトーの長さの中央付近でプラトー勾配（電圧 100 V 当たりの計数増加率）を算出する。

[考察への手引き]

- (1) α 、 β 、および γ 線に対する GM 計数管の感度を考察する。
- (2) GM 計数管を用いた測定上の注意点を考察する。

2) 測定値の統計的変動

[目的]

放射性原子の壊変はランダムに起こることを理解する。同時に標準偏差 σ の意味を理解する。

[理論]

ある放射性原子の壊変は、他のすべての原子の壊変に無関係で、ある放射性原子がいつ壊変するかを正確に予知することはできないが、多数の壊変に対しては平均的な壊変速度を決めることはできる。今、計数率 5000 cpm を得たとしても、多数回のこの試料の測定値がいつも正確に 5000 cpm を示すわけではない。平均値を 5000 cpm とすると、全測定回数約の 68.3% が $5000 \pm \sqrt{5000}$ 、すなわち、4930～5070 cpm の中に入るが、他の 31.7% の測定値は平均値からかなり離れた値となる可能性があることを意味している (図 4)。

測定値の精度を上げるためには、

- 1) 測定時間を長くする。
- 2) 測定回数を増やす。

の二つの方法がある。標準偏差を知ることは、全測定値の一部が入っている境界の予想値として有用である。

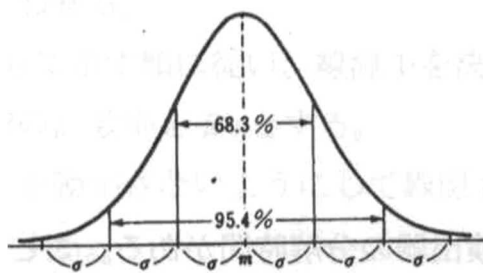


図 4 測定値 (m) の度数と標準偏差 σ の関係 (ガウス分布)

[準備]

使用機器 : GM 測定装置一式

線源 : ^{32}P 線源 (約 2,000 Bq の $^{32}\text{P}\cdot\text{H}_3\text{PO}_4$ 水溶液をステンレス製プランシェットに滴下、乾燥後ラッカーでコーティングして作製)

[操作]

- (1) 主電源スイッチを入れた後、印加電圧調節用ダイヤルを回し、GM 計数管の使用電圧に合わせる。
- (2) 線源を 1 分間計測して、3000 カウント前後となるように試料棚を決める。
- (3) 同一試料を測定時間 1 分として、50 回繰り返し測定、各値を記録する。

[データ処理]

- (1) 全測定値の平均値を次式により求める。

$$\text{平均係数值 } (m) = \text{全測定係数}(\Sigma N) / \text{測定回数 } (n)$$

- (2) 平均計数值 (m) の標準偏差 (σ) を求める。

$$\sigma = \sqrt{m}$$

- (3) 各回数の計数值と平均計数值 (m) との差を標準偏差 (σ) で割ることにより、平均計数值からの「偏りの割合」を算出する。
- (4) $-3.0\sigma \sim +3.0\sigma$ の範囲で、 0.5σ ごとの測定値の度数分布を求める。
- (5) 横軸に標準偏差 (0.5σ 単位)、縦軸に度数としたヒストグラムを作成する。
- (6) 測定回数の何%が $\pm\sigma$ に入るか。また、 $\pm 2\sigma$ に入るかを調べる。

[考察への手引き]

- (1) 放射線計測値に関する標準偏差と標準誤差の違いを考察する。
- (2) 相対誤差の意味を考察する。

3) β 線の吸収曲線と未知核種の同定

[目的]

β 線の最大エネルギーを推定したり、あるいは GM 計数管の入射窓、試料と入射窓間の空気層による β 線の吸収を補正して吸収ゼロの真の計数値を求めたりする時には吸収曲線を作成する必要がある。また、これより得られた吸収曲線を用いて Feather 法などにより未知核種のエネルギーを求め、核種を推定することができる。

そこで、本実習では ^{32}P 線源を用いて吸収曲線を作成し、これより最大飛程を読みとり、最大エネルギーを計算により求める。さらに、Feather 法により未知核種の同定を行う。

[理論]

β 線源と GM 計数管との測定装置試料棚に線源を置き吸収体の厚さと計数率との関係を示したものを**吸収曲線**という。 β 線は物質と相互作用し、徐々にエネルギーを失う。 β 線のエネルギーは連続スペクトルを示し、吸収体の厚さを増すと、吸収される β 粒子の数は減少し、やがてある厚さに達すると、ついにはゼロとなり計数されなくなる。この時の厚さを、その物質中での**最大飛程**という。

[準備]

使用機器：GM 測定装置一式

使用器具：アルミ吸収板セット、ピンセット

線源： ^{32}P 線源 (約 2,000 Bq の $^{32}\text{P}\cdot\text{H}_3\text{PO}_4$ 水溶液をステンレス製プランチェットに滴下、乾燥後ラッカーでコーティングして作製)

なお、未知線源 (^{32}P 、 ^{35}S 、 ^{45}Ca 、 ^{137}Cs 、いずれも約 2,000 Bq をプランチェットに滴下、乾燥後ラッカーでコーティングして作製)

[操作]

[A] β 線の吸収曲線と最大エネルギーの推定

- (1) 主電源スイッチを入れた後、印加電圧調節用ダイヤルを回し、GM 計数管の使用電圧に合わせる。
- (2) ^{32}P 線源を適当な棚に置き、計数率が約 1×10^4 cpm であることを確認する。
- (3) ^{32}P 線源を棚から取り除き、自然計数を 10 分以上測定する。
- (4) 操作 (2) で得られた棚に ^{32}P 線源を納め、吸収板が無い時の計数率を、再度測定

する。

- (5) 800mg/cm² の前後の吸収板を最大値として、この約 1/10 程の厚さのものから順次、2/10、3/10、・・・と厚みを増して、各々の計数率を測定する。

* 各計数率からは当然自然計数率を差し引く必要がある。

- (6) (5) の測定値から片対数方眼用紙に、横軸には吸収層の厚さ (mg/cm²) を、縦軸 (対数目盛) には計数率をプロットし、吸収曲線を作成する。

* 吸収板ゼロの点は決して吸収層ゼロではない。空気層の厚さ (1cm 当たり 1.3 mg/cm²) と GM 計数管の窓厚 (各々記載されている) を加えたもの (1.3 x 棚段数 + GM 計数管の窓厚) が、アルミ吸収板ゼロ点にはすでに厚さとして存在している。

- (7) 吸収曲線より ³²P の最大飛程を読みとる (図 5a)。

- (8) 読み取った最大飛程を次式に挿入して最大エネルギーを求め、理論値と比較する。

$$R = 0.542 \times E - 0.133 \quad (E > 0.8 \text{ MeV})$$

* R は g/cm²、 E は MeV であるので、計算の際に単位をあわせること。

[B] Feather 法による β 線放出未知核種の同定

吸収曲線から β 線の最大エネルギーを求める最も一般的な方法であり、標準線源として RaDEF あるいは ³²P などが用いられる。ここでは、実験[A]で作成した ³²P による吸収曲線を用いる。

- (1) ³²P の最大飛程が 780 mg/cm² であることから、実験[A]で作成した ³²P の吸収曲線の横軸 (厚さ) を 78、156、234、・・・702 と分割し、各々の点を 0'、1'、2'、・・・、9' とする。この場合、原点 (0') が真の吸収層ゼロの点である。
- (2) 0'、1'、2'、・・・、9' から縦軸に平行線を引き、吸収曲線と交わった点を求め、各々の点から横軸に平行に仮想線を引く。さらに、これらを縦軸に投影した点 0、1、2、・・・9 を有する物指し (**Feather analyzer**) を作成する (図 5b)。
- (3) ³²P 標準線源と同様に、未知線源について吸収曲線を作成する。この場合、横軸のスケールは同一でなくともよいが、縦軸のスケールはほぼ同一にする。
- (4) Feather analyzer のゼロ (0) 点を未知線源吸収曲線の吸収層 0 の計数率に合わせる。
- (5) Feather analyzer の 1、2、・・・、9 に相当する横軸上の吸収層の厚さ r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、・・・、 r_9 を読みとる (図 5c)。

- (6) n に相当する吸収層の厚さを r_n として、見かけの飛程 $R_n = r_n \times (10/n)$ を、 $n = 1, 2, 3, \dots, 9$ について計算する。
- (7) n と R_n との関係を図示し、 $n=10$ に相当する R_{10} を読みとる (図 5c)。
この r_{10} が最大飛程である。アルミニウム中での β 線の最大飛程とエネルギーとの関係より、次の式のいずれかを用い最大エネルギーを求める。

$$R = 0.542 \times E - 0.133 \quad (E > 0.8 \text{ MeV})$$

$$R = 0.407 \times E^{1.38} \quad (0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV})$$

但し、ここで R は g/cm^2 、 E は MeV 単位。

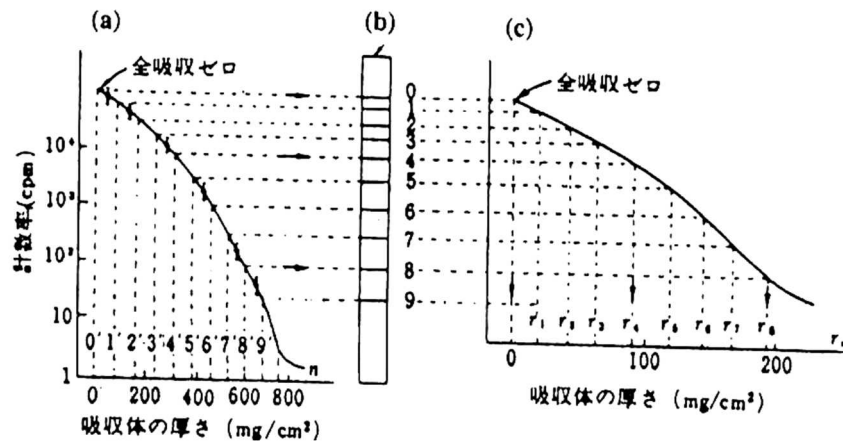


図 5 ^{32}P の吸収曲線と Feather analyzer
(a) ^{32}P からの β -線の吸収曲線
(b) Feather analyzer
(c) Feather analyzer による未知核種からの β -線の吸収曲線の解析

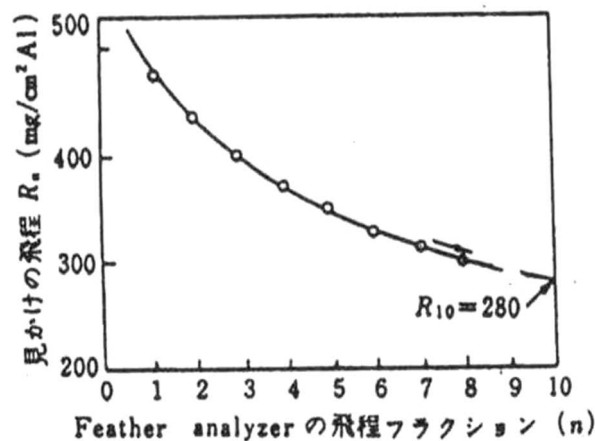


図 6 補外法による未知核種からの β -線の最大飛程の推定

[データ処理]

上記(7)で求めた最大エネルギーから未知核種を推定する。

[考察への手引き]

- (1) Feather法により全ての β 線のエネルギーが推定できるのはどのような原則が成り立つからか、その理由を考えること。
- (2) β 線と同時に γ 線放核種の場合には吸収曲線はどのようなようになるか、考察すること。
- (3) β 線のエネルギー決定法には、他にどのような方法があるか。
- (4) 次の核種について放出 β 線のエネルギーを確認しておくこと。

^{32}P : 1.710 (MeV)

^{35}S : 0.167 (MeV)

^{45}Ca : 0.250 (MeV)

^{137}Cs : 0.514 (MeV) (β 以外に γ 線も放出する)

4) β 線の後方散乱の測定

[目的]

β 線の測定をする場合には、線源の背後にある物質（散乱体）により散乱されたものも計数されること、またその割合が散乱体の種類、厚さにより異なることを学ぶ。

[理論]

β 線測定に際しては、GM 計数管とは反対方向に放射されたものが線源の背後にある物質（線源を置く板など）に散乱されて、逆に GM 計数管方向に戻されることがある。これを後方散乱という。散乱の起こる割合は β 線のエネルギー、物質の種類、厚さによってこととなる。後方散乱の割合は物質の厚さが増すにつれて増加し、最大飛程の 1/5 程度で飽和する。この割合はエネルギーが低いほど、また原子番号が大きいほど急激に増加し、飽和する。

[準備]

使用機器：GM 測定装置一式

使用器具：アルミ吸収板セット、ピンセット、セロテープ

線源： ^{32}P 線源（下図 1 にあるように、ビニールシート上に約 2,000 Bq の $^{32}\text{P}\cdot\text{H}_3\text{PO}_4$ 水溶液を滴下、充分乾燥させ作製）

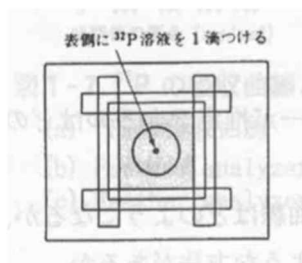


図 7 後方散乱用 ^{32}P 線源の作製

[操作]

- (1) 主電源スイッチを入れた後、印加電圧調節用ダイヤルを回し、GM 計数管の使用電圧に合わせる。
- (2) 線源の測定値が 3000 cpm 前後となるように試料棚を決める。
- (3) アルミ吸収板を ^{32}P 線源とは反対側（裏）にセロテープで止め、同様に測定する。アルミ板の厚さは 10 mg/cm² から始め、400 mg/cm² あたりの厚さまで測定する。

[データ処理]

アルミ吸収板の厚さを横軸に取り、後方散乱増加率を縦軸に取る。後方散乱増加率は、後方散乱体のない場合の計数率を 1.00 として、後方散乱体のある場合の計数率比で表示する。ただし、各計数率は自然計数率を差し引いたものである。この後方散乱増加率とアルミ吸収板の厚さの関係を方眼紙に図示する (図 8)。

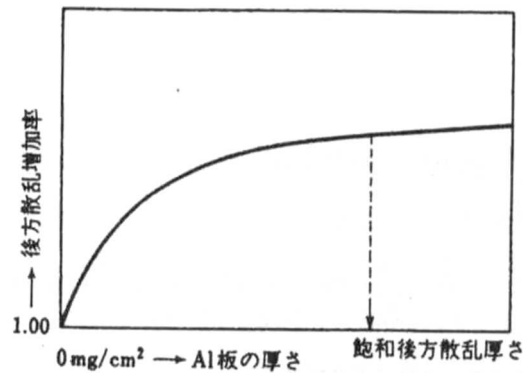


図 8 Al 板による後方散乱率の増加

[考察への手引き]

- (1) 飽和厚さ以上の Al ($Z = 13$)、Cu ($Z = 29$)、Sn ($Z = 50$)、および Pb ($Z = 82$)板による後方散乱増加率と原子番号 (Z) との関係はどの様になるかを考察せよ。
- (2) 多くの試料を比較測定する際の留意点を述べなさい。