

02/05/05

物理学実験

シンチレーション検出器

実験日 6月5、6日、12、13日、19、20日

実験の目的

目的

放射線観察において、一般的な霧箱について、その原理を理解し、放射線飛跡を観察した。また、物理実験分野で一般的な放射線計測器であるシンチレーション検出器についてその動作原理を理解し、自然放射線の測定を通して宇宙線ミュオン成分の到達強度の評価を行なう。さらに、二台のシンチレーション検出器を同時に動かすことにより、コインシデンス法を用いて、宇宙線成分以外の雑音成分の除去法について理解する。また、パソコンによるデータ収集を含めた、全体の測定ハードウェアについて、パルサーを用いてキャリブレーションを行い、それらの関連装置のパルス特性を調べ、その特徴を理解する。

● 霧箱

19世紀の終わりごろに霧箱は考えられた。水蒸気などが、飽和状態になっていると霧が発生するが、このときは空気中の塵などが、核となりそこへその周りの水蒸気が水になっていき水滴が成長していく。しかし、核となる物質がないときは飽和状態になっても水滴にならない。つまり、気体を急激に膨張させたり、冷却をすると過飽和という状態になる。

気体を急激に膨張させたときのことを考える。何度も容器を膨張させて水滴が発生させていると、容器の中にあった塵が、水滴と一緒に下に落ちて、容器の中がきれいになってしまうので、やがて膨張させても水滴が発生しなくなってしまう。膨張後の体積と膨張前の体積の比を膨張率というが、膨張率を1.25以下にすると塵がなくても、少し水滴が発生するようになる。そして膨張率が1.37を越すと、容器全体に今までよりも細かい水滴が発生する。つまり膨張率が1.37以上では何も核がなくても水滴になれる（そのかわり水滴は小さいが）。膨張率1.25～1.37では、イオンが核になっている。

だから、霧箱を1.25～1.37の膨張率にすると、荷電粒子が通ったとき、周りの空気がイオン化されて霧が発生して、粒子が通ったことがわかる。

拡散霧箱は、容器の上に気化しやすい液体（一般にエタノール）を入れておきヒーターで暖め、下をドライアイスで冷やす。すると水を温めたときと、ちょうど逆の対流が起こり、容器の中心部分では下降気流になる。上のヒーターで暖められ、十分アルコールが蒸発して飽和状態になった空気が降りてきて冷やされると、容器のその部分で過飽和になる。（上の気体になったアルコールが下に拡散していくので拡散霧箱と呼ぶ。）そのとき、そこを荷電粒子が通ると、白い飛跡が見られる。これは、上部の液体溜りの液体がなくなるか、ドライアイスがなくなり、適度な温度勾配がなくなるまで続く。こうして霧箱を用いた観測ができる。

● 実験 1 霧箱による放射線観測

準備するもの

- 光源装置（平行光源の出せるものがよい）
- ドライヤー
- エタノール
- ドライアイス
- ハンマー
- 軍手

実験方法

霧箱の上ぶたをとり、スポンジにアルコールをたっぷり染み込ませる。ハンマーでドライアイスで冷却容器に入る大きさに割る。冷却容器にドライアイスで冷却板に当てて入れ、スポンジを1～2枚入れて密着させ底ぶたをしっかりとる。そして、線源を横に向けて固定させる。上ぶたをかぶせ、観察槽の側面より光を当て、霧箱の電源を入れる。

放射線の飛跡の様子をビデオカメラで5分間、3通り録画する。録画のパターンは

線源をそのまま観察する。線源の前方半分を紙で遮断する。線源の近くに磁石をおく、の3種類である。録画した映像をパソコンに取り入れ、画像処理ソフトで画像を見やすく編集した。

実験結果と考察

右に画像処理した飛跡の様子を示す。線源の飛跡は白い霧状で観測される。線源をそのまま観察と、線源を前方半分を紙で遮断を見比べると、放射線は紙を通過することができず、紙で遮断されることがわかる。次に と 線源の近くに磁石を置く、を見比べると、 のほうが よりも飛跡が密である。以上の比較から、観測した放射線は物質の透過力の少なく、磁石によって飛跡は変化することがわかった。よって観測された放射線は物質に対する透過力が少なく、陽子 2 個と中性子 2 個よりなる 線と推測できる。

● シンチレーション検出器について

シンチレーション検出器は右図の示すように、電子、陽子、 α 線、ミューオンといった荷電粒子が通過したときに光を出す、シンチレーターと呼ばれるプラスチック製の板とその微弱な光を受けて電氣的なパルスとして出力する光電子増倍管からなっている。両者は買い部から光が漏れない箱の中に設置されており、光電子増倍出力パルスは光電子増倍管と直結しているパルス増幅器にて増幅され、出力として以降の電子回路に導かれる。

シンチレーター

シンチレーターは有機の単結晶、有機の液体、または固体に有機物を溶かしたものの、無機の単結晶、無機の粉末などで、放射線エネルギーに変わる際の交換効率が低いこと、生じた傾向の減衰時間が短いこと、使用可能な光電子増倍管の光電面の波長感度分布に整合したスペクトル分布の蛍光を発することを満たすものが使われる。これらの物質中で吸収されたエネルギーが可視光、もしくは紫外線領域に近い近可視光として再び放出される現象はルミネッセンスと呼ばれている。発光体が励起された状態からもとの状態に戻る転移が許されている場合には元の状態に戻る際に光の放出によってエネルギーを外に出す。光を出している時間は 10^{-8} 秒程度の時間である。これは許された転移に対する原子状態の寿命時間にほぼ等しい時間である。シンチレーター内で放射線によって作られた励起や電離は急激に熱エネルギーに変わり、可視、または紫外光に変換される割合はかなり小さい。光に変わる変換効率は通常用いられているシンチレーターで、 $1 \sim 40\%$ である。

光電子増倍管

光電子増倍管は光電面から放出した光電子を二次電子増倍作用で増幅する機構をもつ光電管である。その光電子増幅率は 10^6 以上のもなるのでシンチレーターからの非常に弱い光を検出することができ、それを電気パルスとして出力し、以降のパルス制御回路に受け渡すことができる。光電子増倍管は光電子を放出する光電陰極(光電面：カソード)、二次電子増倍を行なうダイノード、電流パルスを取り出す陽極からなっている。ダイノードには陽極に近いほど高い電圧がかけられていて、光電陰極からの電子はこのダイノード群により

次々に増幅され陽極に集められる。この電子増倍作用はダイノードによる二次電子放射現象によって行なわれる。入射電流に対する二次電子の比を二次電子放射率といい、ダイノード1段あたりの増倍率を表す。

● 実験2 シンチレーション検出器(A)出力パルス波高分布の測定

実験方法

シンチレーション(A)(シンチレーター面積50cm×50cm、厚さ10cm)を用いて宇宙線を検出する。右図のように各関係装置をケーブルで繋ぐ。パルス増幅器に±12V直流電圧を付加する。高圧電圧+700V、の電圧に設定し、測定時間900秒で、パルス波形分布を測定し、波高分布をデータ保存し、印刷した。(資料) 続けて750V(資料)、800V(資料)にてそれぞれ同様な測定を行った。

それぞれ、得られた波高分布について、分布のピークを与えるチャンネル値(ch-p)を読み取り、高圧電圧値とch-pの関係を図紙にプロットした。

単位秒あたりのパルス数を求め、高圧電圧値との関係を図紙に図示した。

結果と考察

得られた波高分布とグラフを次ページに添付する。波高分布、
、
は0ch付近で高い山があり、さらにその左側に山がもう一つある。0ch付近の山は回路の電氣的ノイズと考え、左の山の分布を宇宙線による波高分布と考える。だから、得られた波高分布は2つの分布の重ねあわせと考えることができる。

まず、高圧電圧値と分布のピークを与えるチャンネル値のグラフを検討すると、電圧値が高くなるにつれ、ピーク値も高くなっていることがわかる。両者の間には $y=ax+b$ の関係があると推測されるので最小二乗法を適用することにより

$$a = \frac{3\sum xy - \sum y \sum x}{3\sum x^2 - (\sum x)^2} = 12.97$$

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{3\sum x^2 - (\sum x)^2} = -8454.5$$

$$S = \sum (y - ax - b)^2 = 17821.5$$

$$r_y = 0.816 \sqrt{\frac{S}{n(n-1)}} = 44.47$$

$$\omega_a = \frac{n}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} = 0.0002$$

$$\omega_b = \frac{\sum x^2}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} = 112.833$$

$$r_a = r_y \sqrt{\omega_a} = 0.6289$$

$$r_b = r_y \sqrt{\omega_b} = 472.39$$

r_a 、 r_b は a 、 b の誤差である。

よって求める式は

$$y = (12.9 \pm 0.6)x - (8454 \pm 472)$$

となる。この式の結果は、光電子増倍管に高い電圧をかけると増幅率が増すので、より高いエネルギーをもつパルスの割合が増えるためと考えられる。

次に高圧電圧と単位秒あたりのパルス数との関係のグラフを検討する。すると、電圧が高くなるにつれ、単位秒あたりのパルス数が減っていることがわかる。

$$a = \frac{3\sum xy - \sum y \sum x}{3\sum x^2 - (\sum x)^2} = -0.06276$$

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{3\sum x^2 - (\sum x)^2} = 87.54842$$

$$S = \sum (y - ax - b)^2 = 0.071177$$

$$r_y = 0.816 \sqrt{\frac{S}{n(n-1)}} = 0.08876$$

$$\omega_a = \frac{n}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = 0.0002$$

$$\omega_b = \frac{\sum x^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = 112.833$$

$$r_a = r_y \sqrt{\omega_a} = 0.001257$$

$$r_b = r_y \sqrt{\omega_b} = 0.9440$$

r_a 、 r_b はa、bの誤差である。

よって求める式は

$$y = (-0.062 \pm 0.001)x + (87.5 \pm 0.9)$$

となる。

誤差が小さいので、この直線の傾きは有意に下がっていると言っていい。本来ならば高圧電圧と単位秒あたりのパルス数は無関係で、電圧がいくらであろうと、空から降ってくる宇宙線の数は変わらない。だから、傾きが下がっている原因は、パルス数の測定方法にあると考える。そもそも、この実験では、波高分布のピークのチャンネルから右の部分を積分し、2倍したものをパルス数とし、パルス数を時間で割ったものを単位秒あたりのパルス数としている。しかし、波高分布、 ω_a 、 ω_b のチャンネルの上限は4096chと一定であるため、 ω_a 、 ω_b の積分範囲は一定でなく、ピークのチャンネルが大きいほど積分範囲を狭く取ってしまう。電圧が高いとピークのチャンネルは大きいので、単位秒あたりのパルス数の値は小さくなると考えられる。



写真

● 実験3 シンチレーション検出器(B)出力パルス波高分布の測定

実験方法

シンチレーション(B)(シンチレーター面積 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 、厚さ 1 cm)を用いて宇宙線を検出する。実験1と同様に、各関係装置をケーブルで接続した。そして、高圧電圧 -800 V の電圧に設定し、測定時間 1800 秒でパルス波形分布を測定した。(資料) 続けて -850 V (資料)、 -900 V (資料)にてそれぞれ同様な測定を行い、波高分布をデータ保存し、印刷した。

結果と考察

得られた波高分布を次ページに添付する。波高分布、、は 0 ch 付近でシンチレーション(A)と同じく、電氣的ノイズが観測された。また、ノイズの左側には宇宙線による波高分布が観測されるが、負荷する電圧が高いにもかかわらず、実験1と比べピーク値のチャンネル数は低かった。

この理由はシンチレーター(A)に比べ、シンチレーター(B)は面積も厚さも小さいことが原因と推測できる。シンチレーター(A)が面積 $5.0\text{ cm} \times 5.0\text{ cm}$ 、厚さ 10 cm なのに対し、シンチレーター(B)は面積 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 、厚さ 1 cm である。冒頭で説明したとおり、シンチレーターは内部を通過する宇宙線の量に比例して光を発する。当然、シンチレーターが大きいほど、光を出す量も多いので、光電子増倍管より出される電気パルスの波高も大きい。よって、実験1と比べピーク値のチャンネル数は低いことが説明される。

● 実験4 関連装置のキャリブレーション

本実験で用いられている、パルス増幅器、ADC について、パルス発生器からのパルスを用いて、calibrate (メモリを調整) する。

実験方法

上図に基づき、パルス発生器とシンチレーション検出器(A)、パルス増幅器、ADC、PC、オシロスコープを接続する。

パルス発生器出力パルスの波高値をオシロスコープで用いて4 mV ~ 2.8 mV まで4 mV 刻みで設定し(測定点 A)、それぞれの場合の測定点 B,C に置けるパルス波高値をオシロスコープで測定した。

また、上記、それぞれの場合の ADC 出力(PC 上でのチャンネル値)を PC 画面より読み取る。

パルス増幅器 の増幅率を調べるため、測定点 A と測定点 B におけるパルス波高値の関係をグラフにプロットした(グラフ)。同様にパルス増幅器 の増幅率を調べるため、測定点 B と測定点 C におけるパルス波高値の関係をグラフ用紙にプロットした(グラフ)。

ADC 入力パルス波高値と PC 上でのチャンネル値との間の関係を求めるため、測定点 C とそれぞれの場合の PC 上でのチャンネル値との間の関係をグラフ用紙にプロットした。(グラフ)

一回目の実験は測定者を途中で交代して観測したので、同様の実験を、測定者を変えずにもう一度行い、グラフをプロットした。(グラフ 、 、)また、シンチレーション(B)のパルス増幅器 の増加率を調べるために同様の実験を行なった。(グラフ)

結果と考察

得られたグラフを次ページに添付する。一回目の実験のグラフより、シンチレーション(A)内のパルス増幅器の増幅率を最小二乗法によって求める。

$$a = \frac{7 \sum xy - \sum y \sum x}{7 \sum x^2 - (\sum x)^2} = 0.0445$$

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{7 \sum x^2 - (\sum x)^2} = -0.048$$

今、x 軸は mV、
 ス増幅器の増幅率は 1000 倍となるから、
 44.5 倍である。

y 軸は V より、パル

$$a = \frac{7 \sum xy - \sum y \sum x}{7 \sum x^2 - (\sum x)^2} = 44.5$$

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{7 \sum x^2 - (\sum x)^2} = -0.048$$

$$S = \sum (y - ax - b)^2 = 0.00139$$

$$r_y = 0.816 \sqrt{\frac{S}{n(n-1)}} = 0.00139$$

$$\omega_a = \frac{n}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = 2232$$

$$\omega_b = \frac{\sum x^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = 0.7142$$

$$r_a = r_y \sqrt{\omega_a} = 10.88415$$

$$r_b = r_y \sqrt{\omega_b} = 0.0034$$

求める式は

$$y = (44 \pm 10)x - (0.048 \pm 0.003)$$

となる。

同様に最小二乗法を適用して、グラフ からパルス増幅器 の増幅率は 8 . 2 倍である。
求める式は

$$y = (8.20 \pm 0.04)x - (0.006 \pm 0.02)$$

となる。

同様に最小二乗法を適用して、またグラフ から、パルス増幅器 と ch の関係は

$$y = (217.00 \pm 0.06)x - (18 \pm 2)$$

2 回目の実験も同様に、グラフ より、シンチレーション(A)内のパルス増幅器 の増幅率を最小二乗法によって求める。増幅率は 4 2 . 1 倍である。求める式は

$$y = (42 \pm 4)x - (0.007 \pm 0.001)$$

同様に最小二乗法を適用して、グラフ からパルス増幅器 の増幅率は 8 . 49 倍である。
求める式は

$$y = (8.49 \pm 0.02)x - (0.14 \pm 0.01)$$

同様に最小二乗法を適用して、またグラフ から、パルス増幅器 と ch の関係は

$$y = (221.00 \pm 0.09)x - (4 \pm 3)$$

グラフ より、シンチレーション(B)のパルス増幅器 ' の増幅率を最小二乗法によって求める。増幅率は 7 . 2 8 倍である。求める式は

$$y = (7.2800 \pm 0.0009)x - (2.8 \pm 0.3)$$


● 実験5 コインシデンス法を用いた宇宙線強度の測定


実験2で得られたパルス波高分布には宇宙線ミュオン粒子による分布とともに、使用する電子回路から発生する雑音ノイズ、周辺の金属、コンクリート等から出る低エネルギーのガンマ線成分による比較的小さなパルス高を持つ成分が現れている。宇宙線強度測定を目的とすると寄稿者の成分は背景雑音として排除できることが望ましく、その目的に添った測定を、コインシデンス法を用いて行なう。

測定方法

上図に基づいて、シンチレーション検出器(A)(B)を実験2、実験3に記した手続きに従って動作させる。また、シンチレーション検出器(B)からの出力パルスを増幅し反転させるためのパルス増幅器3を用い、その出力をADC回路のGATE IN入力に接続する。その上で、シンチレーション検出器(A)からのパルスを実験2で行なったように接続し、ADC回路上のトグルスイッチをCOIN側に変更する。

シンチレーション検出器(B)に負荷する高圧電圧を -850V に設定し、パルス増幅器3の増幅率を64倍とする。シンチレーション検出器(A)に負荷する高圧電圧を 700V に設定し、測定時間1800秒でパルス波高分布を測定した。終了後、パルス波高分布を印刷し実験2でやったように波高分布のピーク値を読み取り、加えてch-pから4095chまでパルス数の積分値を求めた。

シンチレーション検出器(B)の設定はそのまま、シンチレーション検出器(A)に負荷する高圧電圧を 700V 、 750V 、 800V に変更してそれぞれ1800秒の測定を行い、ch-p、積分値を求めた。(波高分布、)

測定されたch-pと積分値を2倍したものとシンチレーション(A)に負荷した電圧との関係をグラフに示した。(グラフ、) ch-pと電圧のグラフに関しては、ch-pの値がはっきりわからなかったため、目検討で誤差をつけた。

結果と考察

得られた波高分布とグラフを次ページに添付する。

波高分布 (、 、) を見ると、実験 2 で得られた波高分布と比べると、だいぶノイズが除去されていることがわかる。これはうまくコインシデンス法が適用されていることを示す。コインシデンス法とは、シンチレーション検出器 (A) (B) から得たパルスの検出タイミングが一致するもののみ有効とする検出方法である。この方法によってノイズを抑えることができる。

グラフ にエラーバーをつけたが、 $ch - p$ は有意に増加しているといえる。これは実験 2 と同じ理由で、光電子増倍管に高い電圧をかけると増幅率が増すので、より高いエネルギーをもつパルスの割合が増えるためと考えられる。

グラフ と実験 2 のグラフ を比べると、今回の実験のほうが $ch - p$ の値が小さく、幅があることがわかる。これはコインシデンス法による検出が原因である。コインシデンス法によって検出されるには右図のように宇宙線が 2 つのシンチレーターを垂直に通らなくてはならない。そのため、シンチレーター内を通る宇宙線の距離 (r) は小さくなる。一方、単独でシンチレーション (A) 計測したときは、右図のように宇宙線はあらゆる

角度から進入でき、 r は大きい。シンチレーター内を通った宇宙線の距離 r が長ければ、シンチレーターが出す光は強まり、シンチレーターが出す光が強まれば、 $ch - p$ の値は大きくなる。従って、今回の実験のほうが $ch - p$ の値が小さいことが説明される。また、ピークの値に幅があるのも、シンチレーターに入射する角度が原因である。 r の値の大きいものの頻度と、 r の値の小さいものの頻度を比べたとき、圧倒的に r の値の小さいものの頻度のほうが大きい。従って、実験 2 でシンチレーター (A) 単独で測定したときの波高分布の $ch - p$ はシャープであり、今回の実験の $ch - p$ は幅があることが説明される。

グラフ と実験 2 のグラフ を比べると、今回の実験のほうが単位秒あたりの宇宙線数はすくない。これはコインシデンス法による検出が原因である。コインシデンス法によって検出されるパルスはシンチレーション (A) (B) を同時に出力したものしか検出されない。パルスが同時に出力されるためには宇宙線が同時にシンチレーター (A) (B) を貫かなくてはならない。従って、実験 2 でシンチレーター (A) 単独で測定したときよりも、単位秒あたりの宇宙線数は少なくなる。