

A6. 微小電気信号計測(第1週目)

-シンチレータ計測器を用いた宇宙線計測とコインシデンス計測-

電気電子情報工学専攻

兒玉研究室

担当: senmonA6@eie.eng.osaka-u.ac.jp

実験場所: E6-315

<実験に向けての注意事項>

- 実験は使用機器の関係で時間別に2つのグループに分かれて行います。
 <第1週目> 各班 名簿1-4人目まで 13:30-15:00, 名簿5-8人目まで 15:10-16:40
 <第2週目> 各班 名簿5-8人目まで 13:30-15:00, 名簿1-4人目まで 15:10-16:40
 7人の班は1-4人目、5-7人目で分かれてください。
- 第1週目と第2週目で実験場所が異なるのでご注意ください。
 <第1週目> 工学研究科電気 E6-315
 <第2週目> レーザー科学研究所L棟 (場所の詳細は第2週目資料参照)
- 本実験では高圧電源を使用するため機器の取り扱いには十分注意を払うこと。光電子増倍管に高電圧をかけている状態では、高圧用ケーブルはもちろんのこと通常の信号ケーブルであっても抜き差しは厳禁である。

<背景>

気象現象などの複雑な自然現象を計測する際、その信号は発生タイミングや発生場所がランダムな場合がほとんどである。人為的な信号については信号の特徴や周期性から発生原因を特定することにより、データを統計的に扱うことがある程度可能である。しかし、自然的な信号については人為的な信号ほど明確な周期性を持っていることはまれであり、検出したい信号の出力は極めて小さいことが多く、そのような信号を識別し特定することは非常に困難である。例えば気象現象における雷雨や放射性物質から放出される放射線、宇宙から降り注ぐ宇宙線(ガンマ線、電子線、ミューオン線)などは完全なランダム信号であり、通常このような信号を無作為に計測したとしてもそこから何か規則的な現象を観測することは難しい。

それらの計測から何らかの物理現象を解明していくためにはランダムに発生する信号を特定の条件で識別・抽出して計測を行うなどの信号処理が必要になる。特にX線や電子などの放射線信号に

対する信号処理として波高分布計測やコインシデンス計測など多数の手法があり、これらのパルス信号処理法をまとめて微小信号計測という。

〈実験目的〉

本実験の目的は、X線や電子などの計測において通常行われているランダム微小信号増幅から波高分布測定に至る一連のパルス信号処理法を学ぶことである。様々な波高を持つ微小パルス信号を光電子増倍管により増幅し、数10mV~数100mV程度の電圧パルス信号を計測し、信号の波高分布、時間幅の分布を測定する。また信号計測の応用として、ランダムパルス信号のコインシデンス計測での実験を行い、測定結果を考察する。

本実験ではランダムな信号として宇宙線を計測する。宇宙空間から大気中に降り注ぐ宇宙線は空間的、時間的にランダムな確率で起こるため、本実験の信号源として適している。放射線計測器として一般的なシンチレータを使用してランダムな宇宙線を計測し、適切な条件の信号のみを取り出して解析する信号処理法について学ぶ。

通常の微小信号計測は同時計数回路(コインシデンス回路)や波形弁別回路(ディスクリミネータ回路)などを用いて行うが、本実験ではオシロスコープのさまざまなトリガー機能を利用して特定の条件での信号識別・抽出を行う。信号識別・抽出法が中心となるため、詳細な物理に関してはあまり踏み込まないことにする。

〈実験準備品〉

実験テキスト(本紙)、筆記用具、レポート用データの持ち帰りのためUSBメモリを持参すること。
(グループで一つ以上あれば良い)

〈実験計測装置〉

(1) シンチレーション検出器

シンチレーション検出器は放射線検出器の一種である。シンチレータと光電子増倍管を組み合わせ、シンチレータの光を光電子増倍管で電気信号に変換することによって、放射線検出器として働く。

また光電子増倍管はこの光量に比例した電荷を出力するので、結果的には光電子増倍管の出力パルス波高は放射線のエネルギーに比例する。従ってシンチレータと光電子増倍管を組み合わせて、その出力パルスの波高値と計数率を測定することによって放射線のエネルギー分布とその線量を知ることができる。

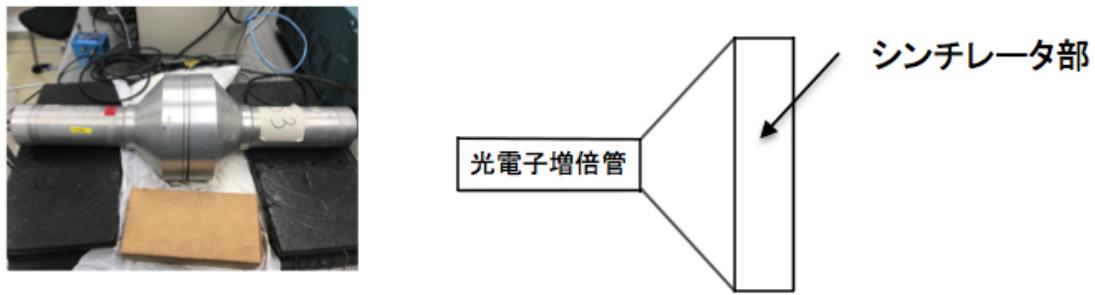


図1. 本実験で使用するシンチレーション検出器。

左図は二つのシンチレーション検出器が向かい合って設置されている。

a. プラスチックシンチレータ

シンチレータに放射線が入射するとシンチレータは短い減衰時間をもった蛍光を発生する。この光をシンチレーションという。 γ 線の場合次の3つの相互作用によりシンチレータ内に自由電子が発生し、この電子がシンチレータの束縛電子を励起することによって蛍光を発生する。3つの相互作用とは光電効果、コンプトン効果および、電子対生成である。これらの作用の起こる確率はシンチレータの種類と γ 線のエネルギーにより異なる。

代表的なシンチレータの一つであるあるプラスチックシンチレータは、ポリスチレンなどのプラスチックベースに有機シンチレータを溶解し、高分子化してプラスチックにすることにより精製される。プラスチックシンチレータは加工性に富んでおり、様々な発光波長を持つシンチレータがあるので、目的に合わせて使用することができる。

b. 光電子増倍管

光電子増倍管は一般的にガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面、集束電極、電子増倍部、陽極より構成されている。光電子増倍管は PMT(Photomultiplier Tube)やフォトマルともよばれ、高感度、高ゲイン、高時間分解能という性質のため、光検出器としてはよく用いられるデバイスである。光電子増倍管に入射した光は以下に示す過程を経て信号出力される。

- i. ガラス入射窓を透過する。
- ii. 光電面内の電子を励起し、真空中に光電子を放出(外部光電効果)する。
- iii. 光電子は集束(フォーカス)電極で第一ダイノード上に収束され、二次電子増倍された後、引き続各ダイノードで二次電子放出を繰り返す。
- iv. 最終ダイノードより放出された二次電子群は陽極(アノード)より取り出される。
- v. 信号の增幅率は図3のグラフから読み取れる。(次ページ)

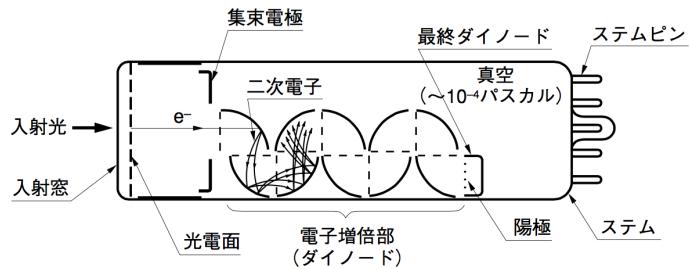


図 2. 光電子増倍管の構造図（浜松ホトニクスホームページより）

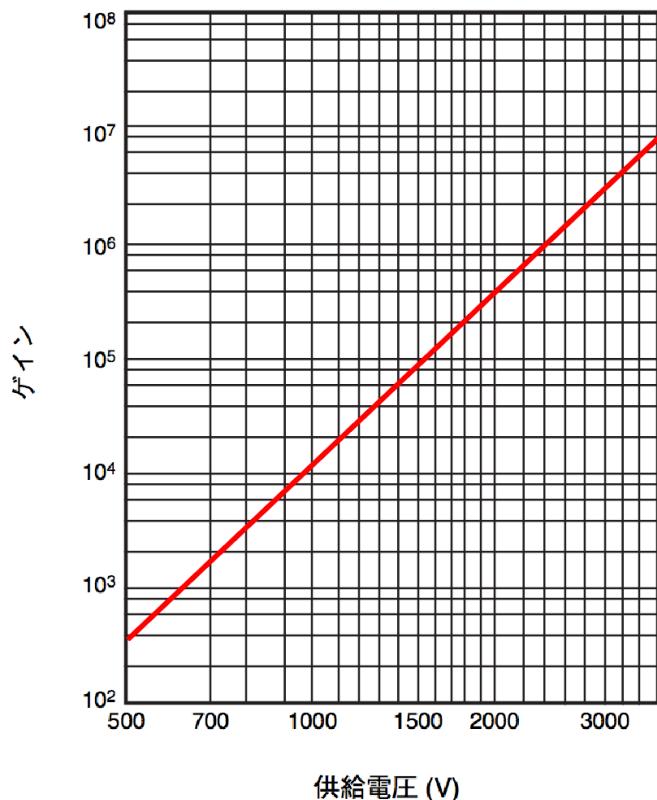


図 3. ゲインの電圧特性(光電子増倍管 R2083)
(浜松ホトニクスホームページより)

(2) デジタルオシロスコープによる信号処理

上部で説明したような信号分別処理は通常ディスクリミネーター回路やコインシデンス回路のような論理回路を用いて行なわれることが多い。ディスクリミネーターとは雑音と信号とを波高を用いて弁別する回路であり、コインシデンス回路とはある時間間隔に2つ以上の全入力端子にパルスが入った時にだけ出力パルスを出すような回路である。

最近のデジタルオシロスコープはウィンドウズ OS ベースのアプリケーションによって制御されているため、オシロスコープ上で様々な信号を解析できるようになっている。そのため、論理回路を使用しなくても、オシロスコープのトリガー機能を利用することで同様の原理の信号分別処理が可能となった。本実験では論理回路を使用せず、オシロスコープ上のトリガー機能を用いて信号分別処理を行う。

トリガーとは直訳すると「引き金」や「起爆装置」という意味で、このトリガー機能を適切に使用することで、オシロスコープはある決まった条件の信号が入力された場合のみ画面を更新することになる。宇宙線のような時間的・空間的にランダムな信号を計測する場合、そのトリガーの特性からその宇宙線信号の特性を判断することができるようになる。

＜実験概要＞

✧ 実験 1

- オシロスコープの基本的な使い方の復習
(オシロスコープによるパルス信号の波形観察)
- トリガー機能の理解(Edge mode trigger)

✧ 実験 2

波高分布計測による宇宙線のエネルギースペクトル計測、パルス幅分布計測
(Runt mode trigger, Width mode trigger)

✧ 実験 3

同時計数(コインシデンス)計測による宇宙線入射角度分布の計測
(Logic Pattern mode trigger)

＜実験配置図および計測準備＞

1. まず始めに図 4 のように配線を行う。ケーブルの抜き差しを行う場合はすべての装置の電源が落ちていることを確認する。
2. オシロスコープ、高圧電源をオンにする。
3. 高電圧をシンチレータ検出器に印加する。電圧値は実験時に口頭で伝える。

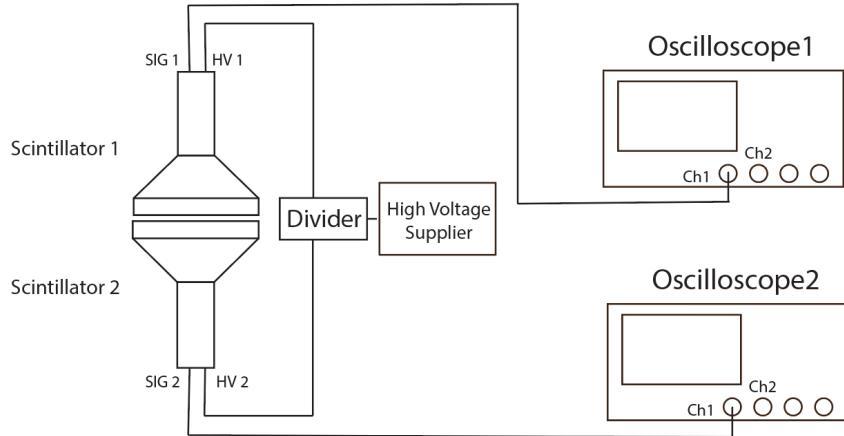


図 4. 実験 1, 実験 2 配置図

<実験 1> オシロスコープによるパルス信号の波形観察

シンチレータで発光した信号を光電子増倍管で増幅し、そのパルス信号をオシロスコープにより観測する。この実験でデジタルオシロスコープの使い方を習得し、正しい波形分析を行えるようにする。この計測を二つのシンチレータ検出器それぞれで行い、トリガーの意味を理解してもらう。また、この信号データを保存し、パソコンに取り込み、簡単な解析(課題 1)を行う。

オシロスコープの設定には主に以下の 3 つがある。

1. 縦軸(電圧軸、Vertical)の設定

オシロスコープの縦軸の電圧をダイヤルつまみにより調整して適切にパルス信号が表示されるようする。

2. 横軸(時間軸、Horizontal)の設定

オシロスコープの横軸の時間をダイヤルつまみにより調整して適切にパルス信号が表示されるようする。

3. トリガーの設定(Edge mode trigger)

トリガー(Trigger)とは直訳すると引き金、起爆装置などの意味があり、オシロスコープにおけるトリガーも同じように”きっかけ作り”の意味で使われる。特定の条件を設定し、その条件が満たされた信号をオシロスコープに入力すると、オシロスコープが信号を取り込み、画面に波形を表示する。

<計測>

上記の 3 つの設定を適切に調整してパルス波形を表示し、波高値(電圧値)、パルス幅(時間幅)を読み取る。その波形データを保存し、バイナリーファイルからテキストデータへの変換を行い、データ解析を行えるようにする。

本実験を通して、オシロスコープが信号を更新する条件をトリガー設定により決定するということを理解する。

<課題 1>

各々5つずつ得られた信号を保存し、パソコンにデータを取り込み、図 3 の増幅率を利用して、宇宙線によって発生したシンチレータ内での螢光量を計算により求めよ。5つの信号に対して求め、平均値、標準偏差を求めよ。

<実験 2> トリガー機能を用いた波高分布、パルス幅分布の計測

検出器から出力されるパルス信号は様々な波高値を持つ。複数のパルス信号をその波高値ごとに分類し、それぞれのパルスの数(計数)を計測することを波高分析という。波高分析は極微量分析手法である放射化分析や医療放射線イメージングなどにおいて一般に行われており、必要となる信号の選別、バックグラウンドの除去などに有効である。

この実験で用いるシンチレータ検出器の検出範囲においては、その出力 V が宇宙線のエネルギーに比例するとみなせるため、波高分布計測を行うことが宇宙線のエネルギー分布を計測することに相当する。

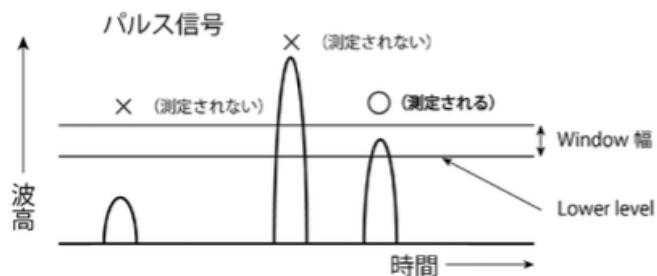


図 5. Runt モードトリガー機能による信号の弁別

通常の波高分布計測は波形弁別回路(ディスクリミネータ)を用いて行うが、この実験では Runt mode trigger を利用して、複雑な回路を使わずに波高分布計測を行う。

<波高分布計測>

Runt mode trigger

--- 2つのしきい値の一方を通過してから他方を通過する前に、最初の閾値を再度通過する
パルス振幅でトリガーするモード

1. Runt mode trigger での Upper Level, Lower Level をずらしながら、それぞれの条件(4つの範囲)でのトリガーの動作数が 50 カウントに達する時間を計測する。
(電圧範囲は装置の感度によって変更する必要があるのでその時に指示する。下の電圧値は一例)
 - ① $-50\text{mV} \sim -130\text{mV}$ (Upper Level – Lower level)
 - ② $-130\text{mV} \sim -210\text{mV}$
 - ③ $-210\text{mV} \sim -290\text{mV}$
 - ④ $-290\text{mV} \sim -370\text{mV}$
2. カウント数を計測時間で割ることでその信号の計数率を算出する
$$\text{計数率 } K = \text{計測数}/\text{計測時間}$$
3. 横軸の値を Upper Level と Lower Level の中間の値(V_0)の絶対値、縦軸を計数率とするグラフを描く。このグラフが宇宙線のエネルギースペクトルに相当する。(横軸の V_0 は宇宙線のエネルギーに変換することが可能だが計測器に依存したシミュレーションによる更正が必要になるのでここでは省略し、横軸は V_0 のままで良い)
4. 得られたグラフ曲線に対する累乗近似曲線を求め、下式の a と b を求めよ (K: 計数率)

$$K = aV^b$$

<パルス幅分布計測>

Width mode trigger

--- 波高分布計測度同様に信号の時間幅の Upper Limit と Lower Limit を設定して、2つの閾値の一方を通過してから他方を通過する前に、最初の閾値を再度通過するパルスの時間幅でトリガーするモード

計測に関しては波高分布計測とほぼ同じ手順なのでここでは省略。シンチレータ内での発光時間の違いにより宇宙線の種類を弁別することができる。

<課題 2>

波高分布グラフ、パルス幅分布グラフを作成せよ。また、そのグラフの累乗近似曲線を求めよ。

<実験 3> 同時計数(コインシデンス)計測による宇宙線入射角度分布計測

オシロスコープのトリガー機能 (Logic Pattern mode trigger) を利用して、コインシデンス計測を行う。コインシデンスとは同一事象から生じた 2 つの信号の相関を意味する。コインシデンス計測は信号源から発生した信号のみを選択的に取り込むことができ、信号源と関係なく発生した信号、いわゆるバックグラウンド信号を大幅に低減することができる。この実験では二つのシンチレータからの信号の検出時間差を利用してそれぞれの宇宙線の入射角度を算出し、宇宙線の入射角度分布を計測する。

通常のコインシデンス計測はその名のとおりコインシデンス回路を用いて行うが、本実験では Logic Pattern mode trigger を利用することで宇宙線の入射角度を求める。

<実験準備>

2 つのシンチレータの信号線をオシロスコープ DPO5104 の CH1, CH2 にそれぞれつなぐ。この際、高電圧を一度ゼロに落としてから、ケーブルの抜き差しを行うようにすること。

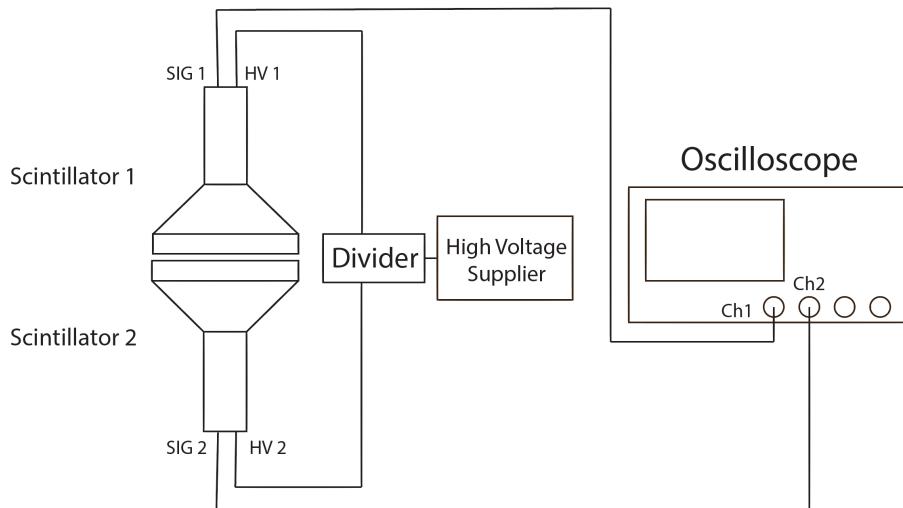


図 6. 実験 3 配置図

Logic Pattern mode trigger ---

複数の信号の相関からロジック入力信号によって選択した関数が True または False になる場合にトリガー(最大 4Ch)。論理積(AND)、否定論理積(NAND)、論理和(OR)、否定論理和(NOR)がある。

実験では論理積(AND)を使用して同時計測(Ch1, Ch2)を行う。

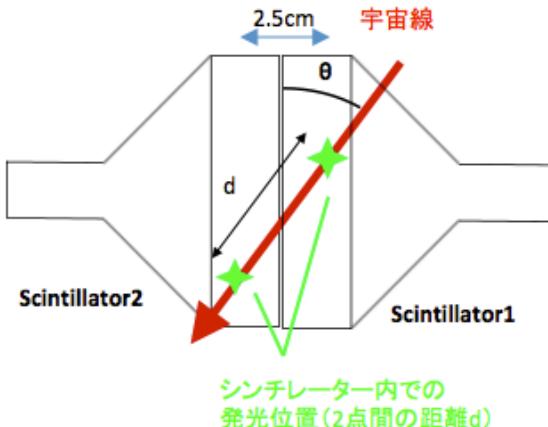


図 7. 宇宙線の入射角度(θ)分布の求め方の概念図

<宇宙線入射角度分布の計測>

1. 実験ではそれぞれのシンチレータでの信号の時間差 Δt を 100 個計測
2. 100 個のデータに対して以下の式よりそれぞれの入射角度を計算。宇宙線の伝搬速度は光速と近似

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{2.5}{d} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{2.5}{c\Delta t} \right), \quad c = 2.998 \times 10^{10} \text{ (cm/s)}$$

3. 100 個の入射角のヒストグラムを書く
 - ① 2. で求めた入射角度のデータを 0–90 度の範囲に変換する。例えば 110 度になった場合は 70 度など。
 - ② 100 個のデータを 10 度ごとにわけ、それぞれの範囲でのデータ数を数える。
 - ③ 0–90 度の範囲で 10 度刻みのヒストグラムを描く。

(注) 角度を求める際、 $2.5/(c\Delta t)$ が ± 1 を超えて角度が算出できないデータが生じることがある。これはシンチレータの厚みから生じるデータの誤差によるのでこのようなデータは省いてヒストグラムを描くこと。

<課題 3>

1. 宇宙線の入射角度の分布を図示せよ。
2. 同時計数(コインシデンス)計測の応用例を調査し、その例におけるコインシデンス計測の利点を簡単にまとめよ。

<レポートについて>

1. 実験目的、実験装置、手順に関しては記載しなくて良い。
2. 課題で指定された計算結果、グラフを載せること。その際、縦軸、横軸などの単位もきちんと記載すること。
3. 参考文献などはきちんと記載すること。
4. 1週目分、2週目分(別実験指導書)を合わせて提出とする。
5. レポート提出期限は第2週目実験日から1週間とする。
6. レポートは word か pdf ファイルとしてメールにて提出: senmonA6@eie.eng.osaka-u.ac.jp
7. レポートのファイル名を 班名_学籍番号_名前として pdf または Word ファイルで提出
(ファイル名例) 第 1 班_08D*****_中村浩隆.doc