

卒業論文(仮)  
— 於 大阪大学 H009 —

author      idetification  
大阪大学 青木研究室

2025 年 1 月 3 日

## 目次

1	本実験で行ったこと	1
1.1	概要	1
1.2	日程	2
1.3	リストアップ	2
2	理論・原理	4
3	実験機器・原理	4
3.1	光電子増倍管	4
3.2	電気回路・NIM モジュール	5
4	付録	5
4.1	オシロスコープ DAQ の作業	5
4.2	過去の卒研の記述	6
5	フィードバック	6
5.1	概要	6
5.2	理論	6
5.3	実験 1	6
5.4	実験 3.5	7
5.5	付録	7

## 1 本実験で行ったこと

### 1.1 概要

地球外からもたらされる放射線は宇宙線と呼ばれ、地表で観測される宇宙線の多くは二次宇宙線である。二次宇宙線、特に数量が多い荷電粒子であるミュオンの到来数は角度依存性があることが知られている。今回の実験ではその天頂角分布に着目し、その分布と絶対量がどれくらいであるか測定を行った。測定においては、プラスチックシンチレータと PMT などの配置を工夫することで到来方向の情報を得る方法をとった。結果としては、天頂角分布は天頂角の単調減少の傾向があり、 $\pm 15^\circ$  の角度分解能で 15 cm 角の検出面積に対し毎秒 0.023 – 0.137 回のカウントを得た。

測定結果に対し理論モデルに基づいて 3 つのフィッティングパラメータ  $p_0, p_1, p_2$  を用いて  $p_0 \cos^{p_1} \theta + p_2$  でフィッティングを行い、パラメータを決定した。

日程とリストアップはメンバーでの行程管理用。提出次には消します。

## 1.2 日程

- 6/26 天頂角分布の測定に時間的なレートの変動があった。これをコインシデンスの信号の波形が汚いことが原因であるかもしれないと予想し、その解決に取り組んだ。
- 6/27 低トリガーで暗電流の波高分布を見た。(56, 76, 96 mV) トリガーはオシロスコープで PMT の波高にかけたので、コインシデンスは取っていない。すべて暗電流の山の「すそ」しか見えなかった。
- 6/27 低トリガー測定中に、時間幅がとても長く汚い波形がいくつか見られたため、その判別などをするために最大波高と電荷量の散布図を書いて、正常な波形と異常な波形の分別をした。これはとても上手に行った
- 6/28 光漏れを疑った。
- 6/30 光漏れの改善を行った。確かにこれ以前は光漏れをしていた。
- 7/1 光漏れ対策後の波形を重ねて表示すると、トリガーの 500 ns あとくらいにアフターパルスの傾向が見られた。
- 7/1 暗電流ノイズレートを直接測る方法を思いついて、測定した。
- 7/2 スケアラの挙動が壊れた。次の日には勝手に治った。
- 7/2 ジッタによるディスクリ信号の幅の変動とか、1 パルスに 2 回ディスクリ信号が出ることが気になった。
- 7/8 ディスクリミネータのしきい値を下げて、2 つの PMT のコインシデンスを取ったときの波高分布を見た。これは暗電流と宇宙線との明確な波高の違いを与えてくれた。
- 7/16～ 発表資料作り
- 7/24 昼夜差があるかどうか、YouTube ライブを使ってモニタリングした。詳しい解析はできてないけど、昼夜差はなかった。
- 7/29(たぶん) 発表

## 1.3 リストアップ

- 宇宙線天頂各分布のための実験
  - 宇宙線 (荷電粒子) がシンチレーターに与えるエネルギーと実際の波形との比較による装置の健全性の見積もり
    - \* 宇宙線ミューオンがシンチレーター内で落とすエネルギーと、オシロスコープの波形からいくつかの仮定を置いて
      - ・ PMT 光電面の量子効率
      - ・ PMT の増幅率
      - ・ シンチレーターの発光効率
      - ・ MIP とは
      - ・ シンチレーターから PMT への集光率
    - \* オシロスコープのトリガー機能の使い方
      - ・ 「宇宙線」とはいえど、それがノイズなのかどうか安直に判断するのは良くない。1 イベント、たしか 600
  - どんなレートか知る実験
    - \* シンチレーターの離す距離を変えた

・ 6/19 まとめにカウントレート記載

\* どれくらいの精度で測定したいかによる

\* 統計を貯めれば貯めるほど誤差の少ない計数率になるが、それにいつも意味があるとは限らない。どんなものを説明したいか、それに必要な統計量とはどれくらいか事前に見極めることが重要である。

• 予備実験

## 2 理論・原理

本文

## 3 実験機器・原理

今回の実験で使用した実験機器について、新しく学んだことをまとめる。光電子増倍管と、その信号を処理する電気回路について述べる。

### 3.1 光電子増倍管

高電圧を印加した光電子増倍管にパルス光が入射すると、光子数に概ね比例した電荷量のパルス信号を出力させることができる。

#### 3.1.1 はたらき

光電子増倍管は主に光電窓とダイノードからなる。光電窓に光子が入射すると光電効果によって確率的に電子がPMT内部にはじき出される。その確率を量子効率という。量子効率は光電窓の材質や光子波長に依存し、その特性はPMTのスペックシートなどに記載されている。今回の実験で使用した浜松ホトニクス製PMT『R329-02』は可視光領域では380 nmの波長の光子に対して最大の約25 %の量子効率を持ち、波長によっては1 ~ 0.1 %の量子効率になる。

ダイノードは複数の電極の集まりで、ダイノードの間を電子が運動しダイノードに電子が衝突する際に電子数が増幅される。大まかには増幅率は、ある数をダイノードの数だけべき乗した値に比例し、今回の実験で使った浜松ホトニクス製PMT『R329-02』は典型的に $1.1 \times 10^6$ の増幅率 (gain) を持つ。[4],[5]

- 浜松ホトニクス『光電子増倍管 その基礎と応用』が詳しい。(https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\_SALES\_LIBRARY/etd/PMT\_handbook\_v4J.pdf)
- 浜松ホトニクス製PMT、『R329-02』のスペックシートに寸法や材質、増幅率特性が記載されている。(https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\_SALES\_LIBRARY/etd/R329-02\_TPMH1254E.pdf)

#### 3.1.2 特徴

光子の数を増幅して電気信号として取り出す増幅装置は光電子増倍管以外にもあるが、ここでは光電子増倍管の特徴を述べる。

- 光電子増倍管は印加電圧に対して指数的に増幅率が増加する。その特性はPMTのスペックシートなどに記載されている。
- 光電子増倍管はその内部で電子を適切に運動させる必要があるために、外部磁場の影響を受けて動作不良を起こす可能性がある。
- また、ある動作に温度依存性がある。光電窓からは熱的に揺らいだ電子が自発的に放出されて増幅さ

れた結果パルス信号を生む事象が起こる。これは暗電流と呼ばれ、温度によく依存するが典型的に  $10^5 \text{ s}^{-1}$  個の電子が光電窓から放出される。今回の実験で使用した浜松ホトニクス製 PMTR329-02』は典型的に  $10^1 \text{ nA}$  の暗電流を生む。

- 光電子増倍管にはアフターパルスと呼ばれる偽のパルス事象が起こる。例えば放射線がシンチレーターを発光させたパルスを観測したとすると、このパルスのだいたい  $100 \text{ ns} - 1 \mu\text{s}$  あとの間に決まってパルスが出力されることがある。光電子増倍管内の残留ガスと運動している電子との衝突によって生じたイオンが光電窓に戻ったときにまた電子が放出されることが原因であると言われている。

⇒ 今回の実験で用いた浜松ホトニクス製 PMT 『R329-02』のアフターパルスの傾向を図 3.1 に示した。 $-1800 \text{ V}$  の高電圧を印加し、シンチレーターが宇宙線を捉えたときの波形を重ね書きしたものである。

図 3.1: アフターパルスの傾向。トリガーがかかった (時刻  $0 \times 10^{-6} \text{ s}$ ) あとの  $0.5 - 0.6 \times 10^{-6} \text{ s}$  後に明らかに相関のあるパルスが見られている。

## 3.2 電気回路・NIM モジュール

今回の実験では宇宙線ミューオン由来の PMT からの信号を電気回路を用いて処理した。主に NIM モジュールを使用した。

### 3.2.1 ディスクリミネータ

ディスクリミネータ回路はアナログ入力の波高に応じて電圧 high/low の論理パルスを出力する。事前に設定した波高を超えるものが入力されたときだけ特定時間幅の論理パルスを出力する。NIM モジュールでは規格により  $-0.8 \text{ V}$  の論理パルスを出力する。

### 3.2.2 コインシデンス

コインシデンス回路は 2 つの論理入力の AND を取った論理パルスを出力する。

### 3.2.3 スケーラ

スケーラ回路は入力論理信号の回数を数える。pulseheight distance low-discr shading dist conclusion-future

## 4 付録

ローカルすぎる学習内容をこの章に記す。

### 4.1 オシロスコープ DAQ の作業

- LAN ケーブルが刺さっているか確認する
- PC 側で TCP/IP → IPv4 の設定 → DHCP 手動 → IP アドレス (自機) "192.168.10.~"、サブネットマスク "255.255.255.0"
- オシロスコープ側で "192.168.10.10"

- (PC から ping 飛ばしてみる)
- `run.sh` のあるディレクトリで `./run.sh %d` (詳細は DAQ コードのコマンドライン引数を確認してみるとか、シェルスクリプト側を書き換えてみるなど...)

## 4.2 過去の卒研の記述

『空気シャワーの観測』によると空気シャワーの広がりを調べたそう。それを参考にすると空気シャワーの広がりってめっちゃ小さい... consistent かどうかは追って調べる必要がありそう。

## 5 フィードバック

前期レポートで先生からもらったフィードバックを一応残してます。

この報告書について、先生からいただいたフィードバックをまとめる。次回以降のレポートを書くときに気をつける事項を箇条書きにする。

### 5.1 概要

- 数値を示す際、0.023 ~ 0.137 のように ~ ではなく - を使うのが一般的
- 「 $p_0 \cos^{p_1} \theta + p_2$  でフィッティングを行い」など、フィッティング関数のどの部分がフィッティングパラメータなのか明記すべき

### 5.2 理論

- 数値と単位の間スペース忘れないようにしよう
  - ⇒ 開ける大きさは半角スペースひとつ分であり、LaTeX の数式モード内の 「\,」 は半角スペースの半分だけしか開かないため注意。今まで 「\,」 が半角スペースと同じ大きさだと勘違いしていた。(参考: 図??)
  - 図は省略
- 他の文献からの引用をするときは [1] のように書いて、最後のセクションなどに引用元をまとめて記すのが良い
  - ⇒ thebibliography 環境で管理する試みをした。subfile システムとも互換性も確認した。
- 物理定数、例えば光速などを  $c$  などと表すときはそれを宣言すること
- (全体的に) 口語にならないように意識する
- 議論の流れから外れるサブ議論を `tcolorbox` などを使ってコラム的に書くことは報告書には相応しくない

### 5.3 実験 1

- 表のキャプションは表の上に配置するのがルール

## 5.4 実験 3.5

- itemize 環境を複数個使って、入れ子構造にして配置するのは思考の整理には便利であるが、報告書としてはふさわしくない。文章として書く。

## 5.5 付録

- 付録の前に全体のまとめ (結論) や今後の展望があると良い

## 参考文献

- [1] S. Navas et al. (Particle Data Group) Passage of Particles Through Matter , <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [2] 阿部倫史 小倉将紘 栗林宗一郎 島地哲平 春名純一 山本和樹. 宇宙線ミュオンの観測 , <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/A1/reports/alreport16b.pdf>
- [3] 宮島秀明, 塩見篤史. (大阪大学 青木研究室) 空気シャワーの観測, 2021
- [4] 浜松ホトニクス. Dataset PHOTOMULTIPLIER TUBE R329-02 , [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/R329-02\\_TPMH1254E.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R329-02_TPMH1254E.pdf)
- [5] 浜松ホトニクス. 光電子増倍管 その基礎と応用 第4版 , [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/PMT\\_handbook\\_v4J.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4J.pdf)