

# Cherenkov 検出器 (P2-RICH-Detector) の作製と観測

2022 年度課題研究 P2

大谷尚輝 片岡敬涼 坂本璃月 清水慧人 星野大輝 前田潤 吉岡龍

2023 年 6 月 28 日

## 目次

1	Introduction	4
1.1	Cherenkov 光	4
1.2	Cherenkov 検出器	5
2	実験原理	6
2.1	球面鏡を用いた間接型 Cherenkov 検出器の原理	6
2.2	P2-RICH-Detector の原理	6
2.3	P2-RICH-Detector の特徴	8
3	予備実験	9
3.1	目的	9
3.2	実験原理	9
3.3	PMT の gain 測定	10
3.4	実験方法	12
3.5	結果	13
3.6	考察	13
4	実験装置	19
4.1	MPPC	19
4.2	EASIROC	23
4.3	MPPC の Calibration	32
4.4	P2-RICH-Detector の設計	36
5	実験方法	36
5.1	セットアップ	36
5.2	回路図	38
5.3	Calibration とデータ取得	39
6	実験結果	40
6.1	トリガーに用いたプラスチックシンチレータの信号	40
6.2	MPPC アレイの配置とヒストグラムの対応	40
6.3	Cherenkov ring の観測結果	41
6.4	平均光量の見積もり	44
7	解析	45
7.1	円 fitting による推定	46
7.2	Poisson 分布による推定	49
7.3	機械学習による推定	51



# 1 Introduction

## 1.1 Cherenkov 光

Cherenkov 光とは、荷電粒子が物質中の光速よりも速く運動した際に出す光の衝撃波のことである。荷電粒子の速さを  $v$ 、物質の屈折率を  $n$  とすると、

$$v > \frac{c}{n} \quad (1.1.1)$$

の条件が満たされるときに Cherenkov 光が発生する。この速度についての条件 (1.1.1) をエネルギーについての条件で表すと、

$$E_{\text{th}} = mc^2 \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{1}{n^2 - 1}} \right) \quad (1.1.2)$$

以上のエネルギーを持つときに Cherenkov 光が発生するということになる。

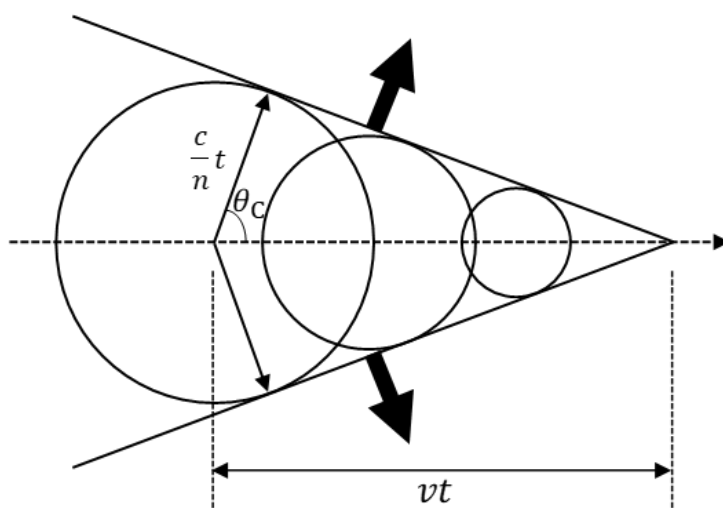


図 1: Cherenkov 光

Cherenkov 光は粒子の進行方向に対して頂角  $\theta_C$  を持つ円錐状に出る。ただし、 $\theta_C$  は

$$\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n} \quad (1.1.3)$$

を満たす  $\theta_C$  である ( $\beta = \frac{v}{c}$ )。また、単位長さ・単位波長あたりの放出光子数は

$$\frac{d^2 N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi z^2 \alpha}{\lambda^2} \sin^2 \theta_C \quad (1.1.4)$$

で与えられる。ただし、 $z$  は荷電粒子の電荷を素電荷で割ったもの、 $\alpha = \frac{1}{137}$  は微細構造定数である。

以上の特徴から、Cherenkov 光を使った検出器を用いることにより、エネルギー閾値 (1.1.2) を用いて粒子識別に使い、(1.1.3) から粒子の速度 (速さと方向) が分かる。

## 1.2 Cherenkov 検出器

代表的な Cherenkov 検出器は、主として直接型検出器と間接型検出器の二種類に分別できる。ここでは、これらの検出器の長所と短所を紹介する。なお、間接型検出器については球面鏡を用いたものを紹介する。

### 1.2.1 直接型検出器

直接型検出器は、平面の検出器で直接 Cherenkov 光を観測する検出器である。装置の概観を図 2 に示す。この検出器では、誘電体中を荷電粒子が走る間に出す Cherenkov 光をそのまま検出するため、図 3 に示すように中身が塗りつぶされたような円状に光子が観測される。この出来上がったリングイメージの最大半径  $r$  と誘電体の厚さ  $d$  を用いることで、

$$\tan \theta_C = \frac{r}{d} \quad (1.2.1)$$

$$\therefore \beta = \frac{1}{n} \sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2} \quad (1.2.2)$$

と粒子の速度を算出できる。ここで、式 (1.1.3) を用いた。この検出器の長所としては、後述する間接型検出器よりもコンパクトなサイズで実現可能であり、発生するリングを直接的に観測できるためにわかりやすいという点がある。一方で、短所としては発生する光子が最大半径  $r$  の円の内部に飛んでいくため、光子数が少ない場合には  $r$  を計測することが困難になるという点である。また、正確に検出するためには高い位置分解能を有する光検出器が必要になる。

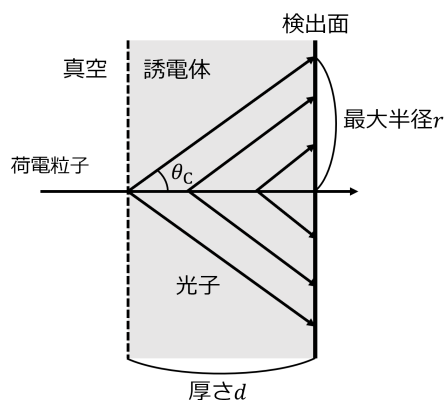


図 2: 直接型検出器

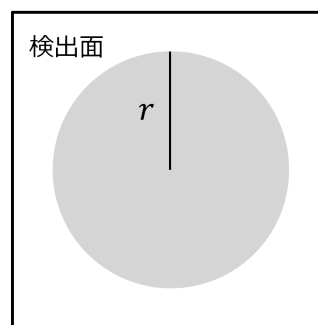


図 3: 直接型検出器の観測予想図

### 1.2.2 球面鏡を用いた間接型検出器

この検出器は、発生した Cherenkov 光を球面鏡を用いて集光し、円環状に集めて観測する検出器である。装置の概観を図 4 に示す。半径  $R$  の球面鏡に対して、半径  $R/2$  の検出面を設置し、その間を誘電体で埋めた構造になっている。図 4 は、荷電粒子の飛跡に沿ったある面で切った図の一部をかいており、同じ Cherenkov 角  $\theta_C$  で放射された光子が検出面のある点に集まる様子がかかっている。ただし、このように球面鏡である点に集めるためには  $\theta_C \ll 1$  の仮定が必要であることに注意が必要である。この装置および Cherenkov 光の放射は、荷電粒子の飛跡を軸とする回転に対して対称であるから、検出面で観測できる信号は図 5 に示すように

半径  $r$  の円環になる．このリング半径  $r$  を用いると， $\theta_C \ll 1$  の仮定の下では

$$r = \frac{R}{2} \tan \theta_C \quad (1.2.3)$$

として  $\theta_C$  がわかる．長所としては，直接型検出器とは異なり，発生した光子が円環状に集まるため，その分光量が大きくなる点がある．また，直接型と比べると Cherenkov 角の角度分解能も良くなる．一方で，短所としては装置のサイズが大きくなる傾向にあり， $\theta_C \ll 1$  を満たさない場合にはうまく円環に光子が集まらず，光量が著しく減少してしまうという点がある．式 (1.1.4) にあるように，Cherenkov 光の生成光子数は  $n$  が大きくなるほど多くなるが，式 (1.1.3) から  $n$  が大きくなるほど  $\theta_C$  も大きくなり， $\theta_C \ll 1$  という仮定が破綻するため，誘電体を変えて光量を稼ぐといったことは難しくなる．

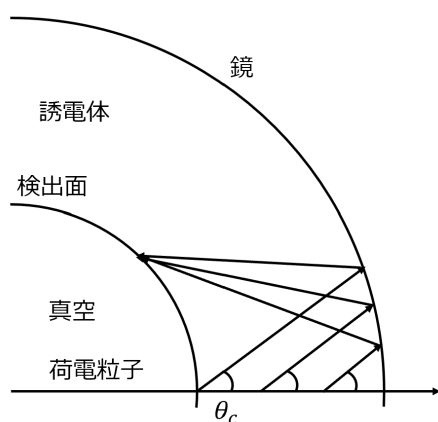


図 4: 球面鏡を用いた間接型検出器

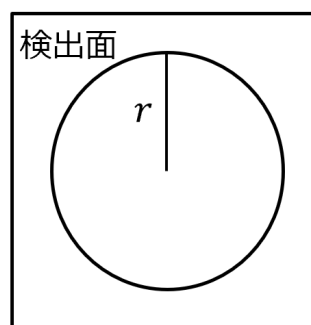


図 5: 間接型検出器の観測予想図

## 2 実験原理

### 2.1 球面鏡を用いた間接型 Cherenkov 検出器の原理

まず，従来の球面鏡を用いた間接型 Cherenkov 検出器の原理とその問題点について述べる．(1.1.3) より，荷電粒子の速度が一定のとき Cherenkov 光の放射角は一定となる．したがって図 6 のようにビーム軸から見てある方向に出る Cherenkov 光は平行光線となる．また，球面鏡は図 7 のように平行光線を近似的に焦点に集める．半径  $R$  の球面鏡の焦点は半径  $R/2$  の球面上に存在する．

これらの二つの性質を組み合わせると，検出器に入った荷電粒子からある一定の方向に出る Cherenkov 光は一点に集まる．Cherenkov 光はビーム軸対称に出るので，検出面で検出される像はリング状になる (図 8)．

球面鏡を用いた間接型 Cherenkov 検出器は，Cherenkov 角が  $\theta_C \ll 1$  を満たさない場合には光子がうまく焦点に集まらないというのが問題点である．

### 2.2 P2-RICH-Detector の原理

球面鏡を用いたときに問題になったのは焦点が近似的なものだけということである．そこで，平行光線を厳密に一点に集める放物線鏡を用いるとききれいな Cherenkov ring が観測できるのではないかと考えた．つまり，

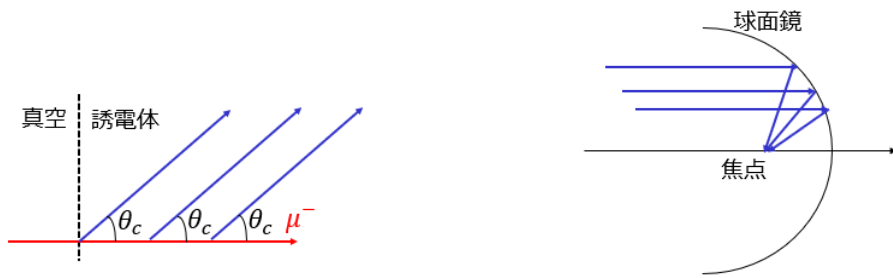


図 6: 荷電粒子からある方向に出る Cherenkov 光      図 7: 球面鏡が平行光線を焦点に集める図

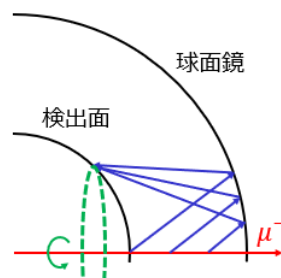


図 8: 球面鏡を用いた間接型 Cherenkov 検出器の原理

図 9 のように鏡を放物線にすると、厳密にどの放射体を用いても Cherenkov 光は一点に集まる。これをビーム軸まわりに一回転させると Cherenkov ring ができる。

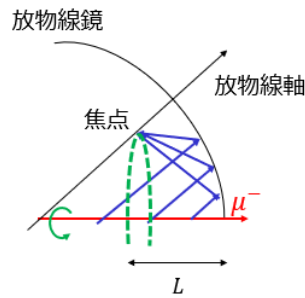


図 9: P2-RICH-Detector

ビーム方向を  $z$  軸として Cherenkov 光の放射角を  $\theta_C$  とすると、放物線の軸は Cherenkov 光に平行である必要があるので、 $z$  軸から  $\theta_C$  だけ傾く。放物線のスケールはビーム軸上で鏡面が滑らかにつながるように定めると、鏡面を表す方程式は式 (2.2.1) で表される。

$$\sqrt{x^2 + y^2} = 2n\sqrt{-Lz} + \sqrt{n^2 - 1}z \quad (2.2.1)$$

ただし、 $n$  は誘電体の屈折率、 $L$  は放射体の厚さである。

### 2.3 P2-RICH-Detector の特徴

P2-RICH-Detector の特徴の一つは設計の動機でもある，荷電粒子が中心を通ったときにきれいなリングが観測できることである．実際に，GEANT4 でシミュレーションしたときに検出面で見える像は図 10 のようになる．

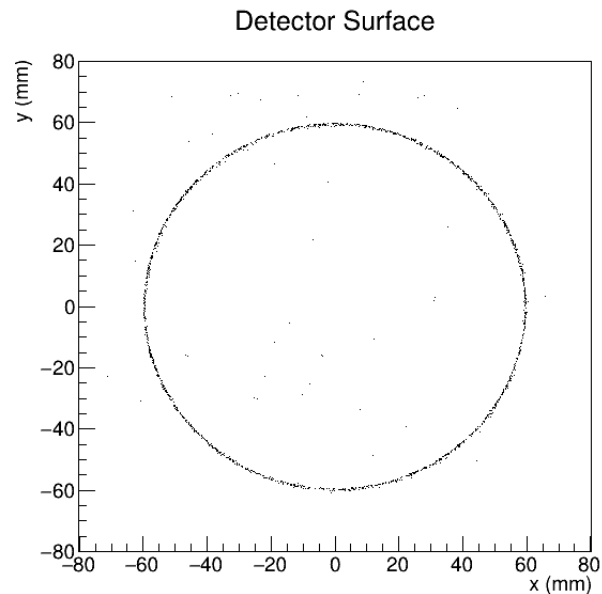


図 10: 検出面の様子 (中心を通ったとき)

もう一つの特徴はこの検出器は荷電粒子が中心を通るとき用に作られているため，中心を通らないときはきれいなリングイメージにならないことである．GEANT4 で様々な角度，様々な位置でミューオンが入射したときの検出面の様子は図 11 のようになる．

このようにミューオンの入射の仕方によってリングイメージが変化するので，多数のシミュレーションを行いミューオンの入射情報とリングイメージの関係を調べることで，観測データからミューオンの入射情報を求めることができる．



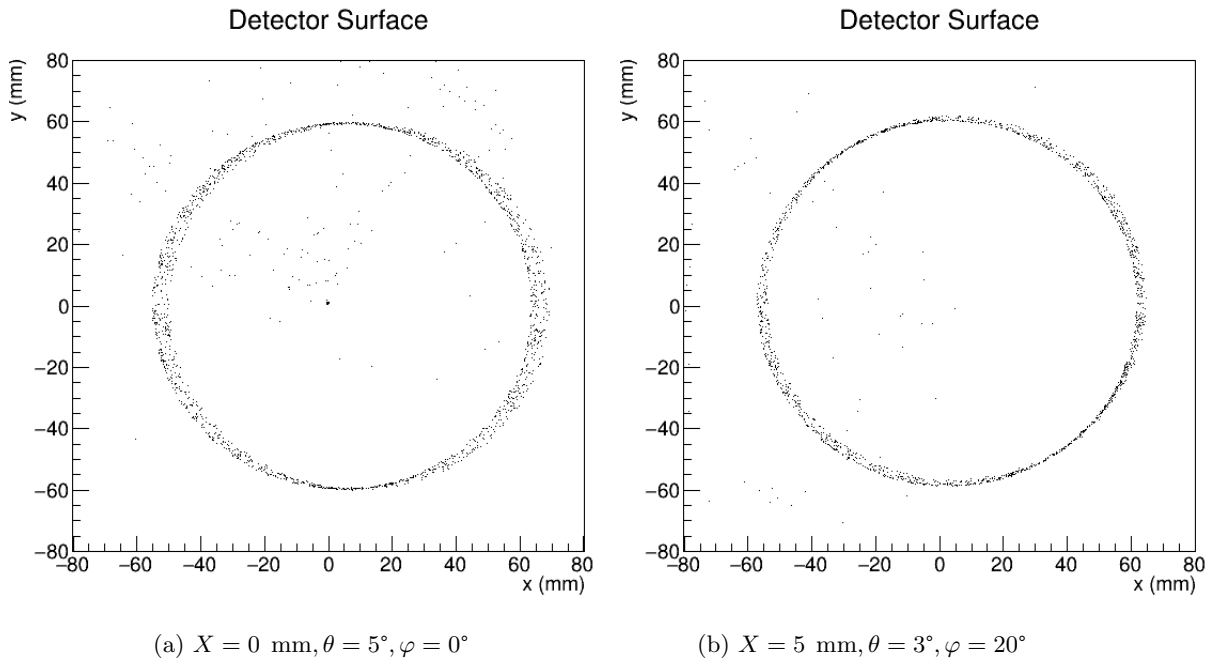


図 11: 検出面の様子

### 3 予備実験

#### 3.1 目的

Cherenkov 光は粒子の進行方向に対して、角  $\theta$  ( $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$ ) をなして円錐状に放出されるので、Cherenkov 光を検出することによりその粒子の進行方向が分かる。本予備実験はこの事実を確かめるために行った。具体的には、宇宙線ミュオンがアクリルを通った際に放出される Cherenkov 光を PMT (光電子増倍管) で観測をすることで、Cherenkov 光の観測により粒子の進行方向を決定できることを確認した。また、放出される Cherenkov 光の光子数の理論値・シミュレーション値も求め、観測値と比較した。

#### 3.2 実験原理

宇宙線ミュオンは鉛直上から下に向かっては降ってくるが、下から上に向かっては降ってこない。したがって、図 12 のように、上にアクリル、下に PMT という配置の時は、宇宙線ミュオンがアクリルを通った際に放出される Cherenkov 光が PMT により検出されるのに対して、上に PMT、下にアクリルという配置の時は、Cherenkov 光は PMT により検出されない。<sup>\*1</sup>ゆえに、アクリルと PMT の上下の配置を逆にしたときに PMT で観測される光量の差を見ることによって宇宙線ミュオンの方向性、つまり宇宙線ミュオン

<sup>\*1</sup> 考察のところで述べるように、実は上から下にまっすぐ飛んできた宇宙線ミュオンがアクリルを通った時に放出される Cherenkov 光はアクリルの側面、底面ともに全反射するので、上に PMT、下にアクリルという配置の時も全反射した Cherenkov 光が検出される。ただし、アクリルでの散乱等の影響があり、また、宇宙線ミュオンが斜めに入射した時は必ずしも全反射条件が満たされるとは限らないので、上にアクリル、下に PMT という配置の時よりも上に PMT、下にアクリルという配置の時の方が Cherenkov 光の光量は小さくなるはずである。

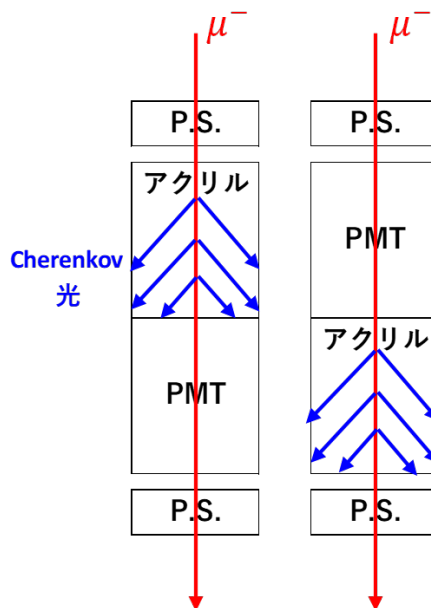


図 12: 予備実験の実験原理

は下から上ではなく上から下に向かって降り注ぐことを確かめることができる。

なお、上下にプラスチックシンチレータ (P.S.) を置き、その coincidence をとることにより、横から飛んでくる宇宙線ミュオンによる影響を取り除いた。

### 3.3 PMT の gain 測定

PMT で観測された信号から実際の光子数に直すためには PMT の gain を測定することが必要なので、以下のようにして PMT の gain を測定した。

#### 3.3.1 方法

PMT の gain は次のように定義される量である：

$$\text{gain} = \frac{\text{PMT で増倍された後の電子数}}{\text{光電面から出る光電子数}} \quad (3.3.1)$$

LED を用いて 1 光電子に相当する信号を測定し、(3.3.1) を用いて gain を求めた。

実験装置および回路は図 13 の通りである。LED を含む回路に Clock Generator による周波数 1 kHz, width 12 ns の TTL 信号を入力して LED を光らせた。また、LED と PMT の間には 10 % および 1 % の 2 枚の遮光フィルターを挟み、PMT には電圧 -3000 V をかけた。PMT の信号は 10 倍の Amp に 1 回通した後、オシロスコープを用いて波形を記録した。<sup>\*2</sup>

<sup>\*2</sup> FADC の Sampling rate がオシロスコープより低く、1 p.e. の信号の時間幅が小さいために FADC で 1 p.e. の波形データをとる際には抵抗とコンデンサの直列回路を通して信号を時間方向に伸ばす必要があったが (信号を伸ばさずに波形データをとると、1 点か 2 点しか見えなくなってしまう)、そうすると信号の高さが小さくなり、ノイズに埋もれて信号が見えなくなってしまうという問題が発生したため、やむを得ずオシロスコープで波形データを取得した。ちなみに、オシロスコープのデータ取得は自動ではできない (自動でデータ取得できるオシロスコープもあったが、データ取得の速度がかなり遅く手動の方が早かった) ので、手動で約 10000 データ取得した。

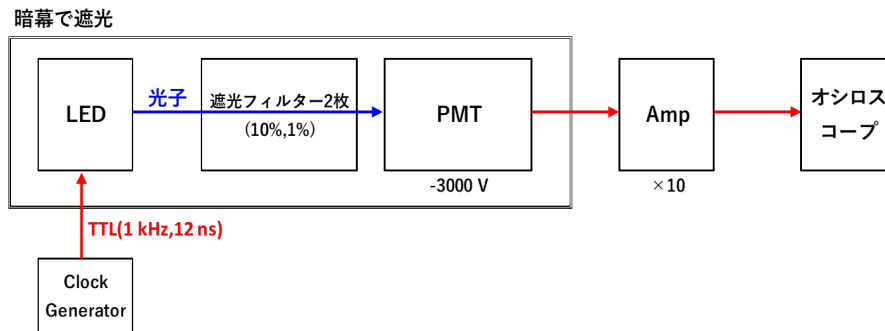


図 13: PMT の gain の測定方法

### 3.3.2 結果

オシロスコープで取得した波形の縦軸 (電圧) を Amp をかける前の電流に変換し (電圧を抵抗  $50 \Omega$ , Amp の倍率 10 で割る), 電流を時間積分 (波形のデータは離散的なので実際には離散的なデータを足し上げる) することで PMT で増倍された後の電荷を求めた. その電荷に関するヒストグラムは図 14 のようになった.

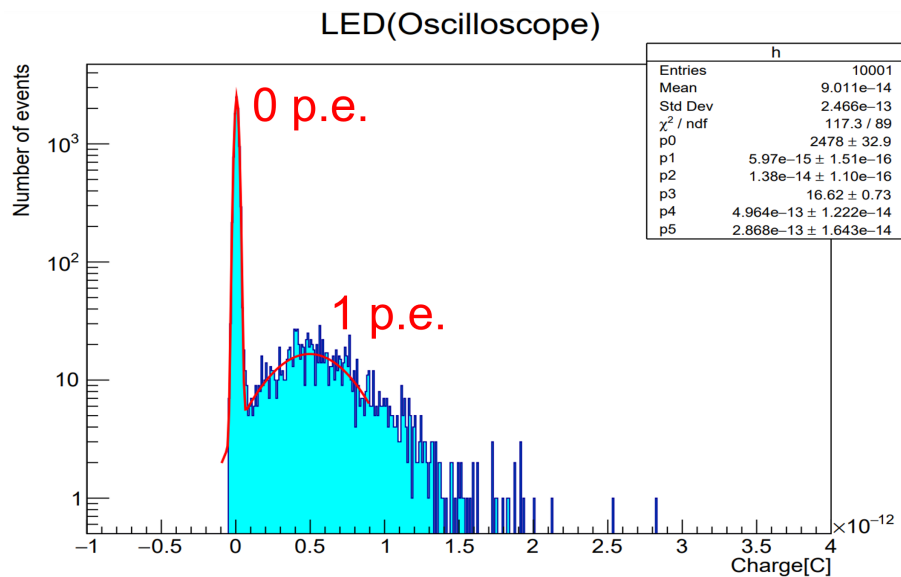


図 14: PMT で増倍された後の電荷に関するヒストグラム (gain 測定)

図 14 において,  $0 \text{ C}$  付近の鋭い山は  $0 \text{ p.e.}$ ,  $0.6 \times 10^{-12} \text{ C}$  付近の緩やかな山は  $1 \text{ p.e.}$  に相当すると考えられる. 図 14 のように,  $0 \text{ p.e.}$ ,  $1 \text{ p.e.}$  それぞれの山を Double Gaussian で fitting した.  $1 \text{ p.e.}$  についての Gaussian fitting の Mean を  $Q_1$  とし,  $Q_1$  を素電荷  $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$  で割ることにより, PMT の gain を求めた:

$$\text{gain} = \frac{Q_1}{1.60 \times 10^{-19} \text{ C}} \quad (3.3.2)$$

その結果, PMT の gain は  $(3.1 \pm 0.076) \times 10^6$  と求まった. この値は PMT の仕様書に書かれてある Typical gain  $2.5 \times 10^6$  から大きくずれてはおらず, 妥当な値だと考えられる.

### 3.4 実験方法

#### 3.4.1 セットアップ

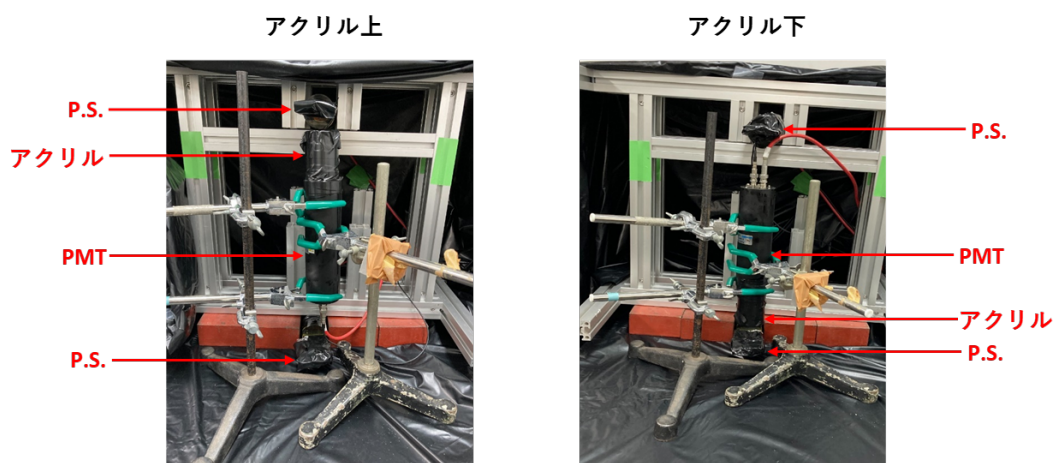


図 15: 予備実験のセットアップ

予備実験のセットアップは図 12 のようにした. 実際の写真を図 15 に示す. 集光しやすくするためにプラスチックシンチレータの周りにアルミホイルを巻き, さらにシンチレーション光が漏れないように黒テープを巻いた. 同様に, アクリルの周りにも黒テープを巻き, 実験装置全体を暗幕で遮光した. なお, プラスチックシンチレータは (アクリルとつながっている PMT とは別の)PMT とつながっている.

#### 3.4.2 回路図

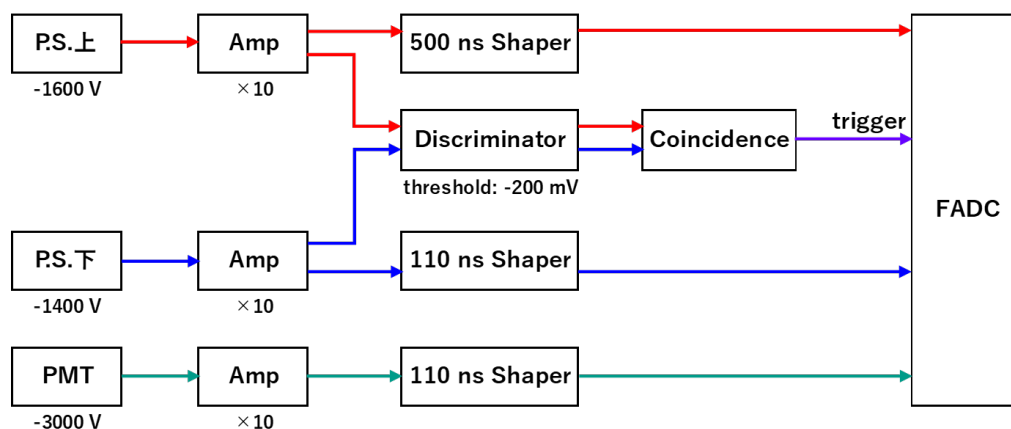


図 16: 予備実験の回路図

予備実験の回路図は図 16 のようにした. プラスチックシンチレータ (P.S.) の下に書いてある電圧はプラスチックシンチレータに接続された PMT にかけた電圧を示してある. 上下のプラスチックシンチレータからの信号をそれぞれ 10 倍の Amp にかけて Discriminator に通した後, Coincidence をとったものをトリガーと

して上下のプラスチックシンチレータ、PMT の信号の波形を FADC で取得した。なお、FADC のサンプリングレートが今回の実験で波形を記録するには低かったので、500 ns や 110 ns の Shaper 回路を通して信号を時間方向に伸ばしたものの波形を記録した。ここで、110 ns の Shaper とは、時定数が 110 ns になるように設計した抵抗 (50  $\Omega$ )、コンデンサ (2.2 nF) の直列回路、500 ns の Shaper とは、時定数が 500 ns になるように設計した抵抗 (50  $\Omega$ )、コンデンサ (10 nF) の直列回路のことである。

### 3.5 結果

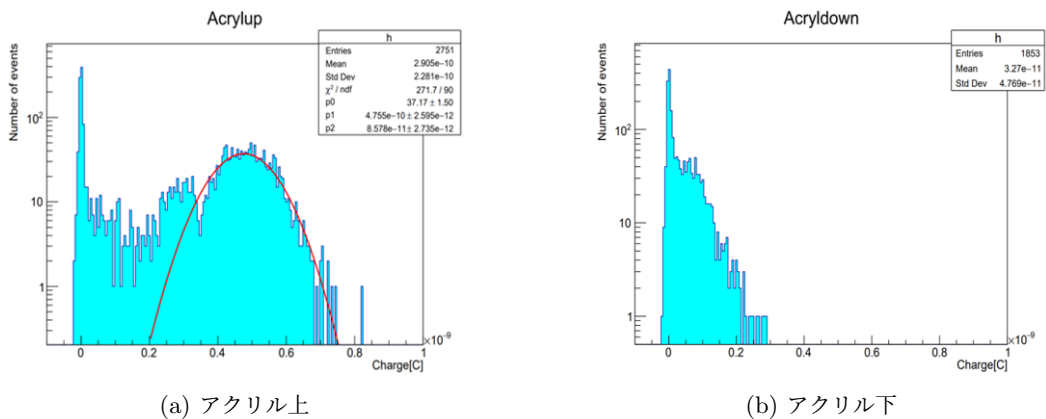


図 17: PMT で増倍された後の電荷に関するヒストグラム (予備実験)

3.3.2 節と同様に、FADC で取得した波形の縦軸 (電圧) を Amp をかける前の電流に変換してそれを時間積分することで PMT で増倍された後の電荷を求めた。その電荷に関するヒストグラムはそれぞれ図 17 のようになった (「アクリル上」の場合のヒストグラム中の fitting の曲線については考察のところで述べる)。

### 3.6 考察

#### 3.6.1 アクリル上

##### 観測値

上から下にまっすぐ飛んできた宇宙線ミュオンがアクリルを通った時に放出される Cherenkov 光はアクリルの側面、底面ともに全反射条件を満たす。ただし、宇宙線ミュオンが斜めに入射した時は必ずしも全反射条件が満たされるとは限らない。このことを踏まえると、図 17(a) において、 $0.4 \times 10^{-9}$  C から  $0.6 \times 10^{-9}$  C のデータはほぼまっすぐに宇宙線ミュオンが飛んできた時の Cherenkov 光であり、 $0.1 \times 10^{-9}$  C から  $0.3 \times 10^{-9}$  C のデータは斜めに宇宙線ミュオンが入射したりアクリルをかすったりしたときの Cherenkov 光を表していると考えられる (図 18 参照)。また、0 C 付近の鋭い山は宇宙線ミュオンがアクリルを通らずに上下のプラスチックシンチレータを通った時のデータだと考えられる (今回のセットアップではこのことが起こり得る)。

ほぼまっすぐに宇宙線ミュオンが飛んできた時の Cherenkov 光に対応する  $0.5 \times 10^{-9}$  C 付近の山を Gaussian で fitting すると、図 17(a) のようになった。その Gaussian の Mean を  $Q_C$  とし、それを PMT の gain 測定の時に測定した 1 p.e. の増倍後の電荷  $Q_1$  (3.3.2 節参照) で割ったものが Cherenkov 光の光電子数で

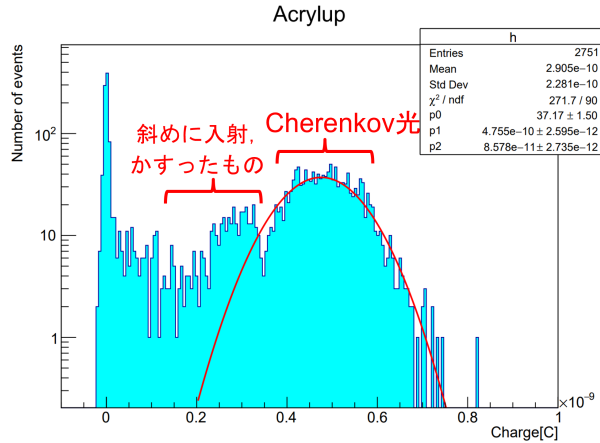


図 18: PMT に対してアクリルが上の時のヒストグラムの説明

ある<sup>\*3</sup> :

$$\text{Cherenkov 光の光電子数} = \frac{Q_C}{Q_1} \quad (3.6.1)$$

それを求めると、光電子数は  $957 \pm 24$  p.e. と求めた。

#### 理論値

観測される Cherenkov 光の光量の概算をするため、式 (1.1.4) を波長、アクリルの厚さについて積分する。この際、PMT には量子効率 (QE) があるので、これを考慮したうえで積分をしなければならない。

まず、アクリルの厚さ  $L$  は定規を用いて測定し、 $L = 7$  [cm] とした。

次に、QE の値は浜松ホトニクスから頂いた値を用いた。その値を表 1 に示す。なお、表にない波長帯の QE は 0 として扱った。表 1 中にある、QE がわかっている波長  $\lambda$  [nm] に対して、 $\lambda \pm 5$  [nm] の区間がその QE であるとして積分を行った。例えば、 $\lambda = 270$  [nm] では QE = 0.042 であるから、 $\lambda = 270 \pm 5$  [nm] の波長区間を QE = 0.042 として積分を行った。

表 1 中の波長を小さい方から  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{39}$  とし、それぞれの波長に対応する QE を  $QE(\lambda_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, 39$ ) と表すと、観測される Cherenkov 光の光電子数  $N_C$  は

$$\begin{aligned} N_C &= \int_{\lambda_1-5 [\text{nm}]}^{\lambda_{39}+5 [\text{nm}]} d\lambda \frac{d^2 N}{d\lambda dx} \times L \\ &= \sum_{k=1}^{39} 2\pi\alpha L \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) QE(\lambda_k) \int_{\lambda_k-5 [\text{nm}]}^{\lambda_k+5 [\text{nm}]} d\lambda \frac{1}{\lambda^2} \quad (\because \text{式 (1.1.4)}) \\ &\simeq 678 \text{ [p.e.]} \end{aligned} \quad (3.6.2)$$

となった。これを理論値として扱うことにする。

<sup>\*3</sup> PMT の gain 測定の際に PMT にかけた電圧と予備実験の際に PMT にかけた電圧は同じである (-3000 V)。

表 1: PMT の量子効率 [%]

Wavelength [nm]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100										
200								4.2	8.5	13.5
300	17.8	20.9	23.0	24.2	24.9	25.1	25.2	25.6	25.9	25.8
400	25.6	25.4	24.6	23.9	23.1	22.2	21.0	19.5	18.2	17.2
500	16.5	15.6	13.6	10.7	8.7	7.4	6.5	5.7	4.5	3.6
600	2.8	2.2	1.6	1.1	0.7	0.4				

### シミュレーション値

この予備実験を GEANT4 のシミュレーションでも確認した。半径 25 mm、高さ 70 mm のアクリルの円柱の下端に半径 25 mm の光子の検出器を設置した。ここで、円柱の上端の円の中心から垂直に円柱の上方向へ 25 mm 離れた点から、円中心を目指して 1 GeV のミュオンを打ち込む状況を考えた。この時の下端の検出器で検出される光子の数とエネルギーを求め、それぞれのエネルギーに対応した量子効率をそのエネルギー帯で検出された光子数をかけて、光電子数を求めた。

また、ここでアクリルの円柱は理想的に磨かれた (polished な) ものとし、ランパート反射はしないものとした。境界での光学過程は glisur model を使用した。

一発のミュオンを打ち込むのを 1 イベントとし、同じ状況で 10 万イベントの演算をおこなった。それぞれのイベントでの光電子数を求め、イベント数と光電子数のヒストグラム作成した。ヒストグラム中のピークを gaussian で fitting し、その mean をシミュレーション値とした。

シミュレーション値 (平均値) は 560 p.e. であった。

図 19 は光電子数のヒストグラムを gaussian fitting した図であり、図 20 は GEANT4 で 1 イベント演算させたときのジオメトリーの様子である。

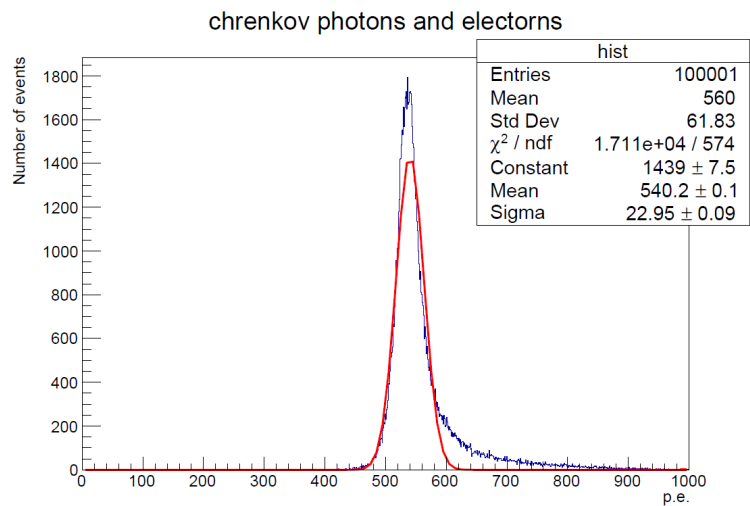


図 19: 光電子数に関するヒストグラムの gaussian fitting(上から)

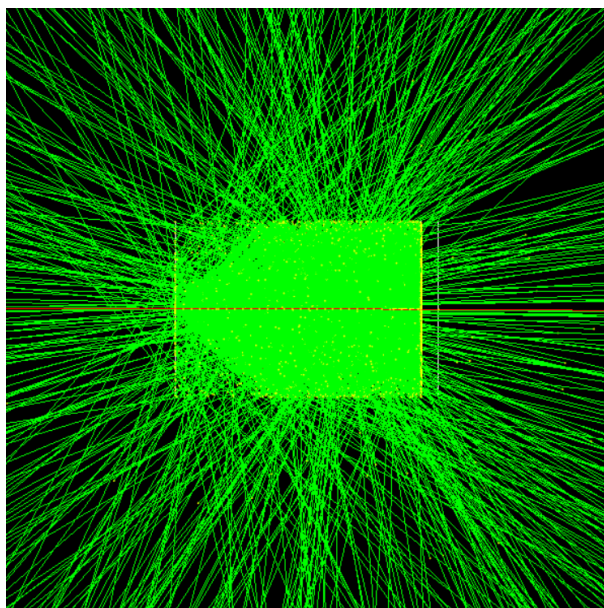


図 20: GEANT4 でのシミュレーション (上から)

ここで、図 19 からわかるように光電子数が 600 から 800 のあたりの値をとるとき、fitting した gaussian に比べてヒストグラムが右に偏っている。これはミュオンがアクリル内を通過中に電子を散乱させ、それが制動放射による光または Cherenkov 光を出していることが原因であると考えられる。

実際に光電子数とアクリル内で散乱された電子の相関を調べてみると図 21 のようになる。図 21 から光電子数が大きな値をとるとき（600 から 800 あたり）確かに散乱された電子数が大きくなっており、やはり光電子数が gaussian に比べて右側で大きくなるのは、散乱された電子数が寄与していると言える。

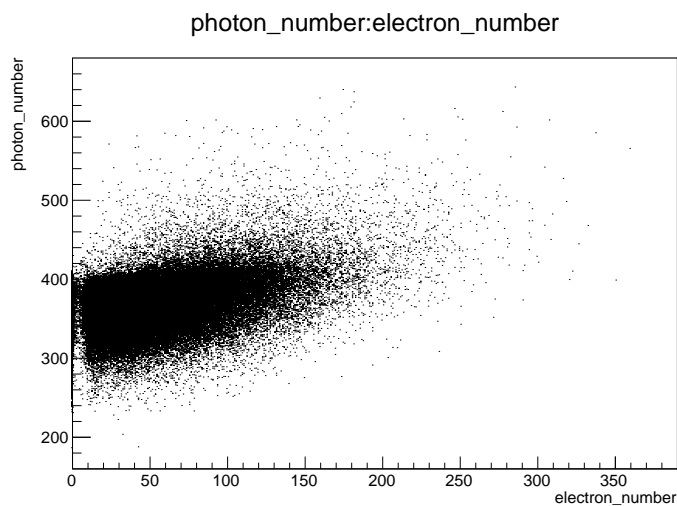


図 21: 散乱された電子数と光電子数の相関 (上から)



## 観測値が実験値・シミュレーション値とずれた原因

表 2: PMT に対してアクリルが上の時の Cherenkov 光の光電子数

観測値	理論値	シミュレーション値
957 ± 24 p.e.	678 p.e.	560 p.e.

以上の Cherenkov 光の光電子数についての結果をまとめると表 2 のようになる。シミュレーション値よりも理論値の方が光電子数が多いのは、理論値を求める際にはアクリルでの散乱や透過の影響を考えていないので実際よりも多めに見積もっているためだと考えられる。

また、観測値が理論値・シミュレーション値とずれた原因としては以下のようなことが系統誤差として効いてきたためだと考えられる：

- QE の実際の値とデータシートの値のずれ
- 光電子数と gain の間の線形性が高い光電子数で成り立つかどうか不明であること
- FADC(予備実験)、オシロスコープ (gain 測定) で取得した波形 (離散的) を足し上げたものと実際の波形 (連続的) の積分値との差

### 3.6.2 アクリル下

#### 実験で得られたデータ

図 17(b) を見ると、0 C より大きい電荷のものが観測されていることが分かる。それは上から降ってきた宇宙線ミュオンによる Cherenkov 光がアクリルの底面・側面で反射したものが観測されたものだと考えられる。アクリルに垂直に入ってきた宇宙線ミュオンからの Cherenkov 光はアクリルの底面・側面ともに全反射するが、少しでも斜めに入射したものはアクリルの底面で全反射しなくなる。その影響により PMT の上にアクリルを配置した時よりも PMT の下にアクリルを配置したの時の方が光量が少なくなったと考えられる。また、仮に上からまっすぐに飛んできたミュオンによる Cherenkov 光が観測されたとしてもその Cherenkov 光が発生してから PMT の光電面に入るまでにアクリル内を通る経路は PMT の上にアクリルを配置したときよりも長いので、アクリル内での散乱や側面での透過の影響を考えると光量は PMT の上にアクリルを配置した時よりも少なくなるはずである。

以上のことから、PMT に対してアクリルが上・下の場合に観測される光量の比較により宇宙線ミュオンの方向が特定可能であることが分かる。

#### シミュレーション

ミュオンを上から射出したときと同じように下から射出した場合についてもシミュレーションを行った。今回の場合では、上から入射したときと同じアクリルと検出面を配置し、アクリル下端の検出器からさらに下に 2.5 cm の場所から 1 GeV のミュオンを円柱の中心へ垂直に打ち込んだ。光学過程の設定は上からの時と同じである。ここでも一発のミュオンがアクリルへ入射することを 1 イベントとして 10 万イベント演算し、検出面で検出される光電子数を求め、ヒストグラムを作成した。

図 22 は 1 イベント実行したときの陽子である。図 23 は下から入射したときの gaussian fitting の様子である。

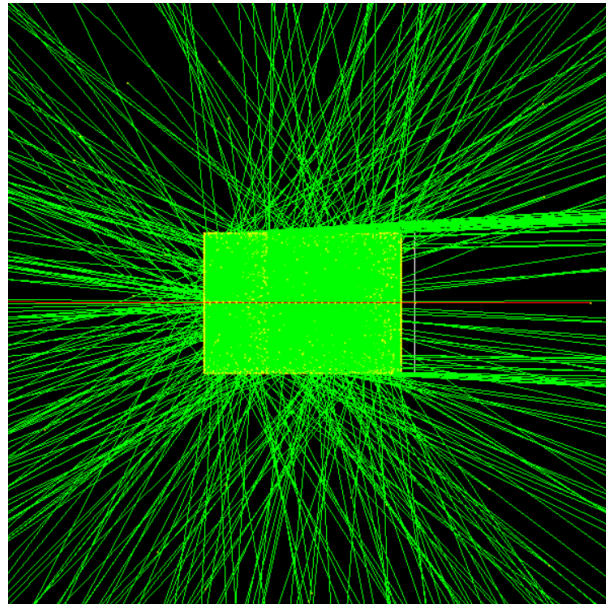


図 22: GEANT4 でのシミュレーション (下から)

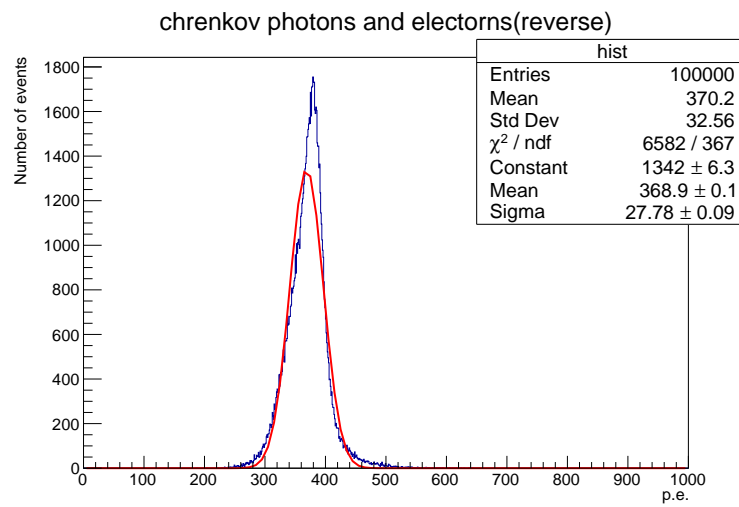


図 23: 光電子数に関するヒストグラムの gaussian fitting (下から)

やはりわずかにであるが、ヒストグラムが gaussian に比べ右に突出している。上から入射したときと同様に、散乱された電子数と光電子数の関係を調べた。

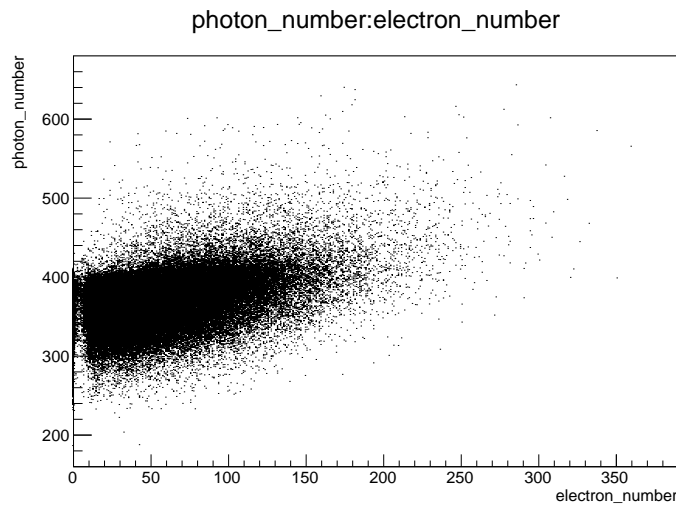


図 24: 散乱された電子数と光電子数の相関 (下から)

図 24 は下から入射したときの散乱された電子数と光電子数の相関図である。正の相関が確認できることから、散乱された電子数が光電子数に寄与していることが分かる。

## 4 実験装置

### 4.1 MPPC

Multi-Pixel Countre (MPPC) とは、ピクセル化された Avalanche Photo Diode(APD) が受光面に多数並んだ構造を持つ、半導体光検出器の一種である。優れたフォトンカウンティング能力を持ち、数 p.e. レベルの微弱な光を検出するために使用できる。以下のような特徴を持っている。

- 100V 以下の低電圧で動作
- 高い増倍率
- 高い検出効率
- 優れた時間分解能
- 磁場の影響を受けない

#### 4.1.1 APD

Avalanche Photo Diode(APD) とは、アバランシェ増倍現象を利用したフォトダイオードである。APD では、逆電圧をかけることによって生じた高電場領域で電子雪崩を起こし、シグナルの強さを指数関数的に増大させる (アバランシェ増倍現象) ことで高い検出効率を実現している。

APD の動作モードにはノーマルモードとガイガーモードの 2 種類がある。

##### 1. ノーマルモード

- ブレイクダウン電圧以下のバイアス電圧で動作
- 増幅率  $\leq 100$



図 25: 1ch MPPC



図 26: 64ch MPPC

- 入射光子数に比例した電荷出力
2. ガイガーモード
- ブレイクダウン電圧以上のバイアス電圧で動作
  - 増幅率  $\approx 10^6$
  - 入射光子数によらず、電圧値に依存した電荷出力

MPPC ではガイガーモードで動作させて使用する。

#### 4.1.2 MPPC の動作原理

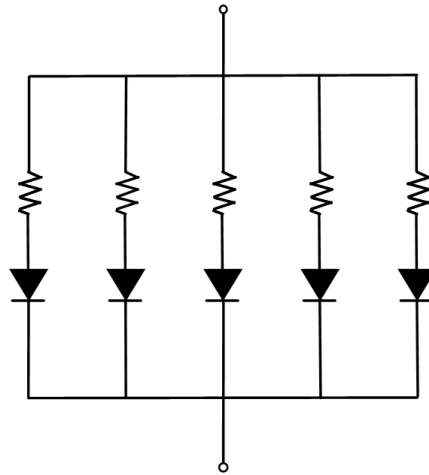


図 27: MPPC の回路

MPPC は、ガイガーモード APD とクエンチング抵抗を組み合わせたものを 1 ピクセルとして、多数のピクセルを 2 次元に電氣的接続した構造をもっている。

MPPC では全てのピクセルに同じ電圧値が付加され、全てのピクセルからのシグナルの総和が出力される。

受光した1つのピクセルから出力されるシグナル  $Q$  は以下の式で表される。

$$Q = C(V_R - V_{BD}) \quad (4.1.1)$$

$C$  は APD の容量,  $V_R$  は逆バイアス電圧,  $V_{BD}$  はブレイクダウン電圧である。APD ピクセルは非常に小さく, 検出する光が微弱であれば, 同じピクセルに同時に2つ以上の光子が入射する確率は非常に小さい。よって出力される電荷の総和は受光したピクセル数に比例する。よってシグナルの総和  $Q_{total}$  は,

$$Q_{total} = C(V_R - V_{BD}) \times N \quad (4.1.2)$$

と表される。ここで,  $N$  は受光したピクセル数である。

図 28 は LED の光を検出した MPPC からの信号を, 後述する EASIROC モジュールで読み出したもののヒストグラムである。光子数ごとにピークが分かれていることが確認できる。

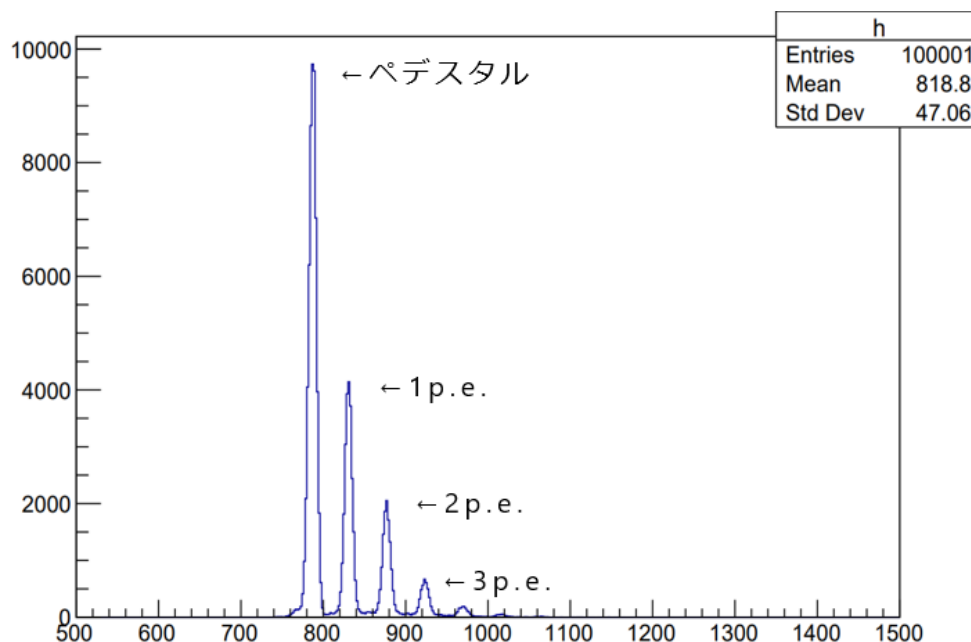


図 28: LED 光を検出した MPPC の信号を EASIROC で読み出したもののヒストグラム

#### 4.1.3 MPPC の特性

##### 1. ダークカウント

MPPC では, 光によって生成されたキャリアだけでなく, 熱的に発生したキャリアによってもパルスが発生する。このパルスをダークパルスと呼び, 観測されたダークパルスの数をダークカウントという。ダークカウントレートは温度が低いほど小さくなる。

##### 2. クロストーク

MPPC のピクセルでアバランシェ増倍が起こる過程で2次フォトンが発生し, 他のピクセルがこれを検出し, 2 p.e. 以上の信号が観測されることがある。この現象をクロストークという。

### 3. アフターパルス

MPPC のピクセルでアバランシェ増倍が起こる過程で、結晶欠陥にキャリアが捕獲されることがある。このキャリアが放出されると、入射光子によるキャリアとともにアバランシェ増倍され、アフターパルスとして観測される。

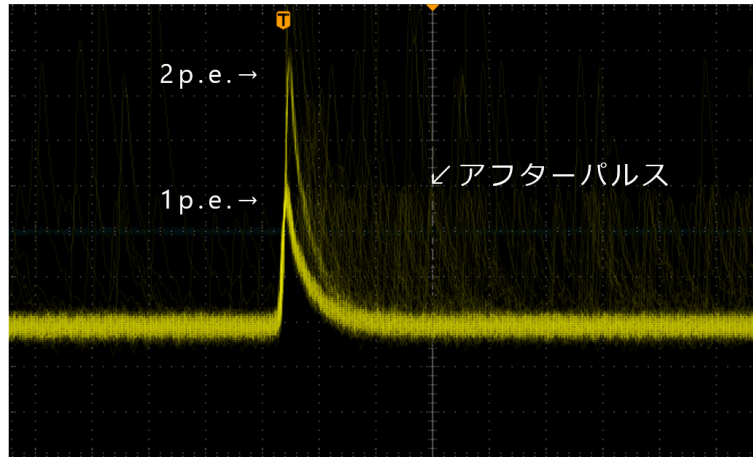


図 29: アフターパルス

#### 4.1.4 1chMPPC の読み出し回路

後述するように本実験ではトリガー用として 1ch MPPC を 4 つ使用した。その際 2 つの MPPC を読み出す回路を作成し、同じ回路を 2 つ作ることで計 4 つの MPPC を読み出すことにした。アイデアとしては五味さんの修士論文 [4] を参考に作成した。ローパスフィルターを 2 段作って高周波ノイズをカットするように意図した。回路に使用したコンデンサの容量や抵抗値は修士論文の値をそのまま採用した。波長変換ファイバーと 1ch MPPC のセラミックパッケージとの接続には、GOMI Connector (General Optical MPPC Injection Connector) を用いてプラスチックシンチレーターからの光を漏れなく MPPC へ伝えるようにした。GOMI Connector を図 30 に示す。GOMI Connector が MPPC と接続されている様子を図 31 に示す。

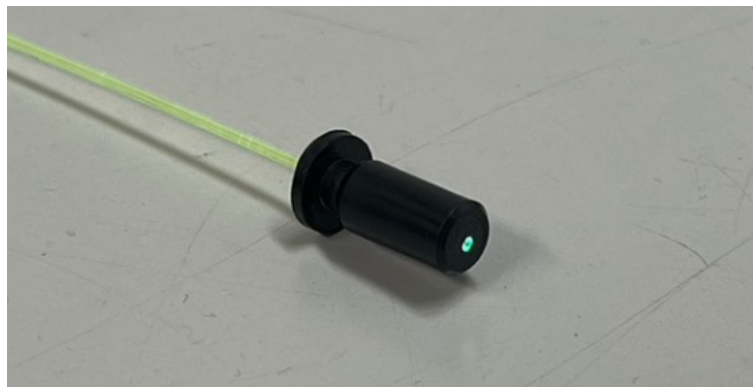


図 30: GOMI Connector

1chMPPC のブレイクダウン電圧はおよそ 70 V であり、回路には 70 V 近い電圧をかける必要があった。そのためコンデンサの耐電圧は 70 V よりも十分大きいものを使用しなければいけない。読み出した信号を discriminator に入れる際、信号が立ち下がりの方が好ましいので回路に負電圧を供給するようにした。回路図と実際の回路の様子を図 31 に示す。

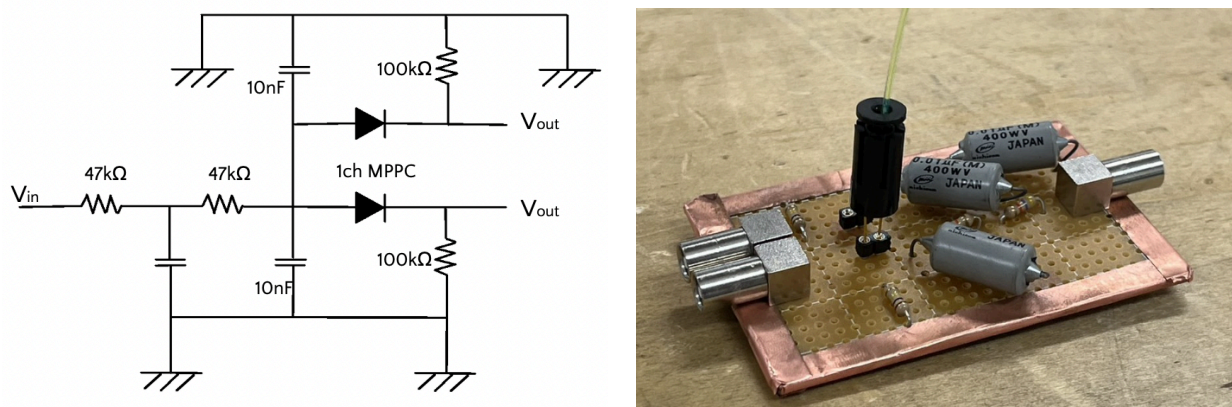


図 31: 1ch MPPC 読み出し回路

## 4.2 EASIROC

今回の実験で MPPC アレイを二つ使い、合計で  $(8 \times 8) \times 2 = 128\text{ch}$  を読み出さなければいけない。多チャンネルの読み出し回路を作るのは大変であるため 1 台で 64ch を読み出すことができる EASIROC モジュールを用いて実験を行うことにした。

### 4.2.1 EASIROC とは？

EASIROC は Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip の略称であり、MPPC 読み出し用の ASIC である。32ch を同時に読み出すことができ、増倍率調整可能なアンプ、波形整形増幅器、discriminator を各チャンネルが持っている。また、InputDAC と呼ばれる内蔵 DAC により 0 ~ 4.5 V の範囲で 32ch の MPPC に印加するバイアス電圧をそれぞれ別に調整することができる。EASIROC モジュールはこの EASIROC チップを二個搭載しており、64ch の MPPC の同時駆動が可能になっている。EASIROC モジュールには MPPC への印加電圧 (0 ~ 90 V) も内蔵されている、内部回路の概要を図 32 に示す。今回の実験では電荷を測定したため、電荷測定用の波形整形器である slow shaper と slow shaper で整形された信号のピークの電圧を保持する hold が特に重要な機能となっている。

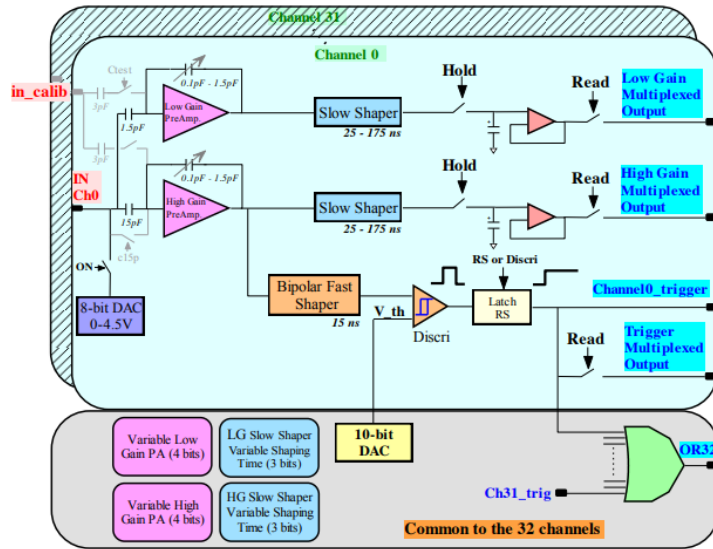


図 32: EASIROC の内部回路

次に EASIROC モジュールの内部基板を図 33 に示す。EASIROC チップが二つモジュール内に組み込まれていることが見てわかる。

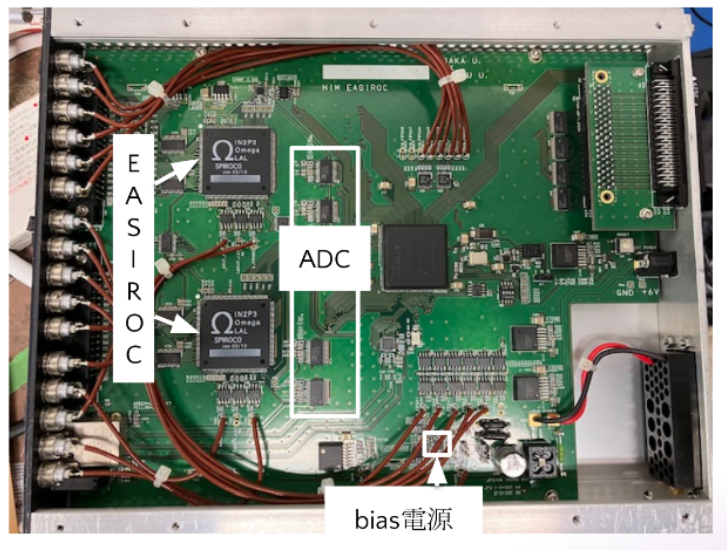


図 33: EASIROC モジュールの内部基板

#### 4.2.2 MPPC-EASIROC 間の変換基板

MPPC アレイの信号を EASIROC で読み出すためにはそれらをつなぐ変換基板が必要となるため、その基板を作成した。MPPC アレイの 64ch を一台の EASIROC モジュールで読み出すため、MPPC アレイ一つにつき基板が一枚という対応になり同じ基板を二枚作成した。基板を作るにあたって注意すべき点を述べる。



- EASIROC への入力信号の極性は正電圧にしなければいけない。そのため MPPC のカソードに正電圧を印加し、アノード側を EASIROC への入力とすることが必要
- EASIROC のピンアサインは決まっており、アノードとカソードを間違えないように配線をしなければいけない
- 二つの MPPC アレイを隣接させて使用する可能性を考慮して、MPPC アレイを基板の側面に沿うように配置した
- 基板を実験装置に固定するために四隅に半径 3.2 mm のねじ穴を空けた
- モジュール側のコネクタは HIF6-68D-1.27R で 68 pin
- MPPC 側のコネクタは SS4-40-3.00-L-D-K-TR

実際の基板を図 34 に示す。

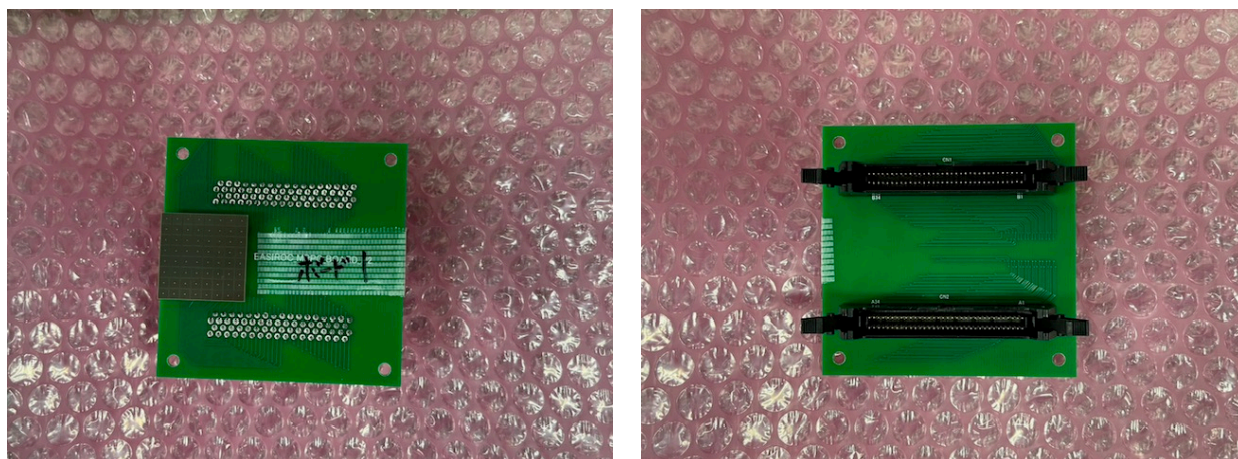


図 34: 実際の基板

この基板にフラットケーブルをつなぎ上下 32 ch ずつ EASIROC モジュールと接続した。基板の配線図を図 35 に示す。また、MPPC アレイの各チャンネルと EASIROC の各チャンネルの対応関係を図 36 に示す。

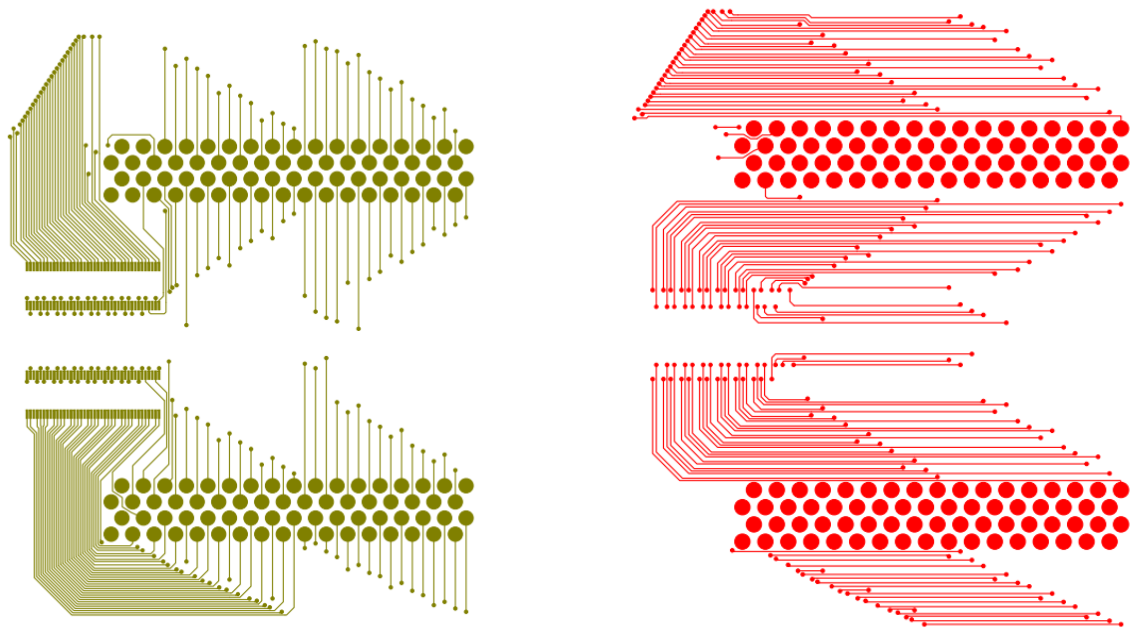
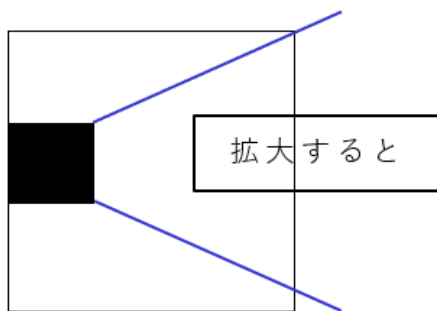


図 35: 基板の配線図



H1(ch7)	H2(ch6)	H3(ch5)	H4(ch4)	H5(ch3)	H6(ch2)	H7(ch1)	H8(ch0)
G1(ch15)	G2(ch14)	G3(ch13)	G4(ch12)	G5(ch11)	G6(ch10)	G7(ch9)	G8(ch8)
F1(ch23)	F2(ch22)	F3(ch21)	F4(ch20)	F5(ch19)	F6(ch18)	F7(ch17)	F8(ch16)
E1(ch31)	E2(ch30)	E3(ch29)	E4(ch28)	E5(ch27)	E6(ch26)	E7(ch25)	E8(ch24)
D1(ch39)	D2(ch38)	D3(ch37)	D4(ch36)	D5(ch35)	D6(ch34)	D7(ch33)	D8(ch32)
C1(ch47)	C2(ch46)	C3(ch45)	C4(ch44)	C5(ch43)	C6(ch42)	C7(ch41)	C8(ch40)
B1(ch55)	B2(ch54)	B3(ch53)	B4(ch52)	B5(ch51)	B6(ch50)	B7(ch49)	B8(ch48)
A1(ch63)	A2(ch62)	A3(ch61)	A4(ch60)	A5(ch59)	A6(ch58)	A7(ch57)	A8(ch56)

図 36: MPPC と EASIROC のチャンネル対応

#### 4.2.3 基本的な使い方

EASIROC を使用したデータの取り方を簡単にまとめる．EASIROC の操作は OGAWA EASIROC の Controller をお借りしてそれを用いた．今回はその中の三つのファイルを主に用いた．

- InputDAC (MPPC にかけるバイアス電圧を調整)
- RegisterValue (トリガーモードの選択や内部トリガーの threshold を設定)
- Controller (バイアス電圧の印加やデータ取得を開始する命令を行う)

InputDAC では前述したようにバイアス電圧を 0 ~ 4.5 V の範囲で微調整する。電圧調整の概要を図 37 に示す。基本的に MPPC にかけるバイアス電圧は全チャンネル共通であり、チャンネル毎に電圧を変えたいときに便利な機能である。



図 37: InputDAC での電圧調整

まずは内部トリガーでのデータ取得をする手順を簡単に述べる。

1. RegisterValue で TriggerMode を 3 に設定する (ピークの hold は EASIROC がやってくれる)
2. トリガーとするチャンネルを決める (このとき 1ch だけを指定することもできるし、上側 32ch や 64ch 全体として指定することもできる)
3. threshold の値を決める (RegisterValue 内の DAC code という値を変えて設定する)
4. DAC code の値は 0 ~ 1023 までとり、値が小さいほど threshold としては大きくなるような仕様である (DAC code 値と実際の信号の大きさとの対応関係については分からなかったので、色々値を変えながら適切な数値を探るしかない)

次に外部トリガーでのデータ取得をする手順を簡単に述べる。

1. RegisterValue で TriggerMode を 2 に設定する
2. トリガー信号を EASIROC モジュールの hold 端子につなぐ
3. slow shaper 後の信号とトリガー信号のタイミングを delay させるなどして合わせる

MPPC アレイから EASIROC へ送られる信号のピークの高さと検出光子数とは線形の関係があり、EASIROC の電荷測定法は積分型ではなく波高測定型である。そのため正しくピークの高さを読み取ることが重要である。ピークの高さを正しく保持する機能として hold 機能がある。hold 機能の概要図を図 38 に示す。

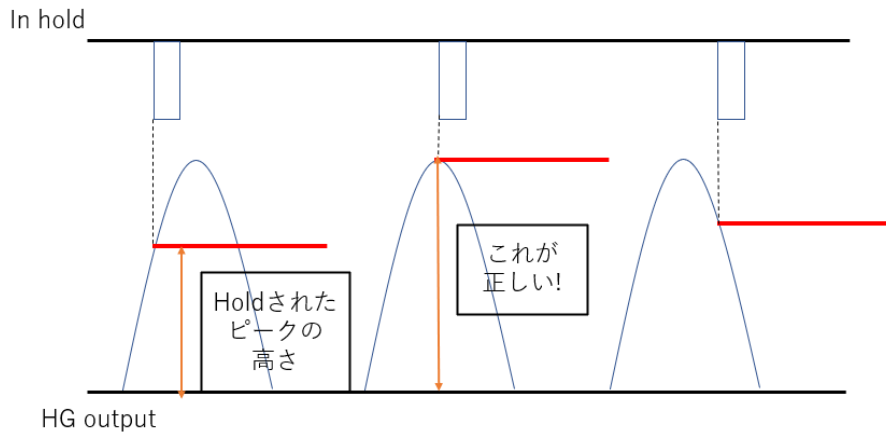


図 38: hold 機能の概要

トリガー信号のタイミングを波形のピークに合わせないと本来の信号の高さより小さく hold されてしまって本来の光子数よりも少ない光子数としてカウントしてしまう。そのため delay をどれだけかけるかタイミングの調整には注意しなければいけない。実際に hold されている信号をオシロスコープで見た様子を図 39 に示す。

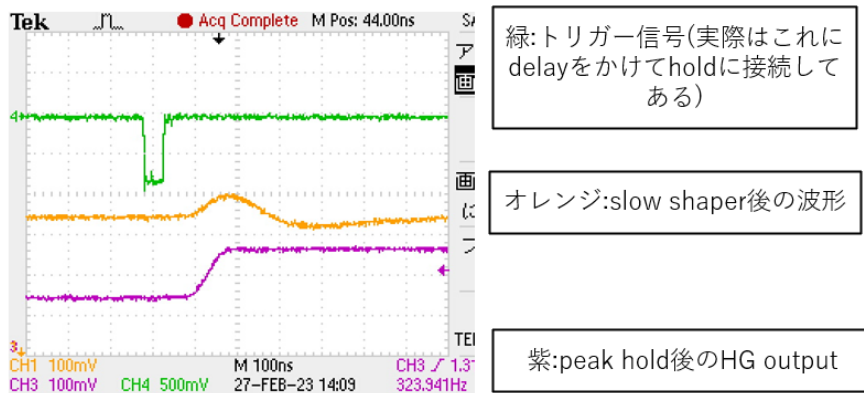


図 39: オシロスコープで見た hold

今回 EASIROC を初めて使い、使い方に慣れるという意味を込めて動作確認を行った。まずは 1ch の MPPC を使い、ADC のヒストグラムで 1 p.e., 2 p.e., ... のピークが見て取れるか確認した。また、当初は原因不明のエラーにより外部トリガーでデータが取得できなかった (結局原因はよく分からなかったがある日突然取れるようになった) ため、内部トリガーでデータを取得した。1ch MPPC を二つ用意し、一つに LED の光を十分に当て (TTL 信号は 1 kHz で、width は 30 ns)、トリガーとして用いた。もう一方には弱い LED の光を当て (TTL 信号は 1 kHz、width は 30 ns で、attenuator を通して 1/1.26 にした。さらに受光面を紙で覆い光を絞った)、LED の光で 1 p.e., 2 p.e., ... が見えるか検証した。回路の概略を図 40 に示す。またこれらの装置全体を暗幕で覆い、遮光した。トリガー用の MPPC で DAC code 値を 230 とし、threshold を大

きめに設定した.

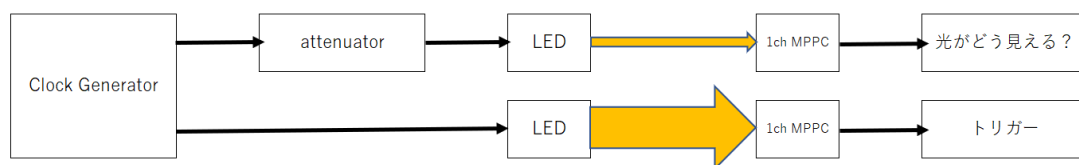


図 40: 回路の概略図

この時, 光を見たい方のチャンネルで測定した ADC Value のヒストグラムを図 41 に示す. 以下, ヒストグラムの横軸は ADC Value, 縦軸はイベント数である.

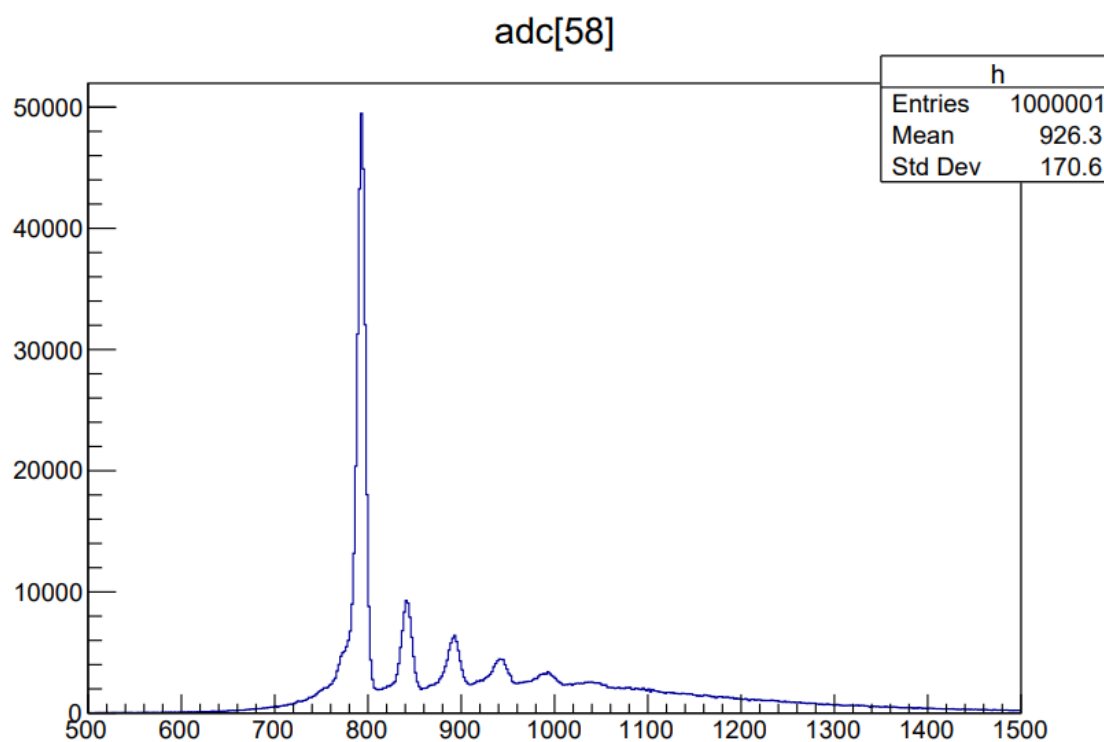


図 41: LED の光を当てた時のヒストグラム

ヒストグラムを見てみるとペDESTAL, 1 p.e., 2 p.e., 3 p.e. までのピークが確認はできるがピークの山がくっきりとは見えない. またペDESTALと思われるイベントが多すぎる. 次にトリガーとした方のチャンネルでのヒストグラムを図 42 に示す.

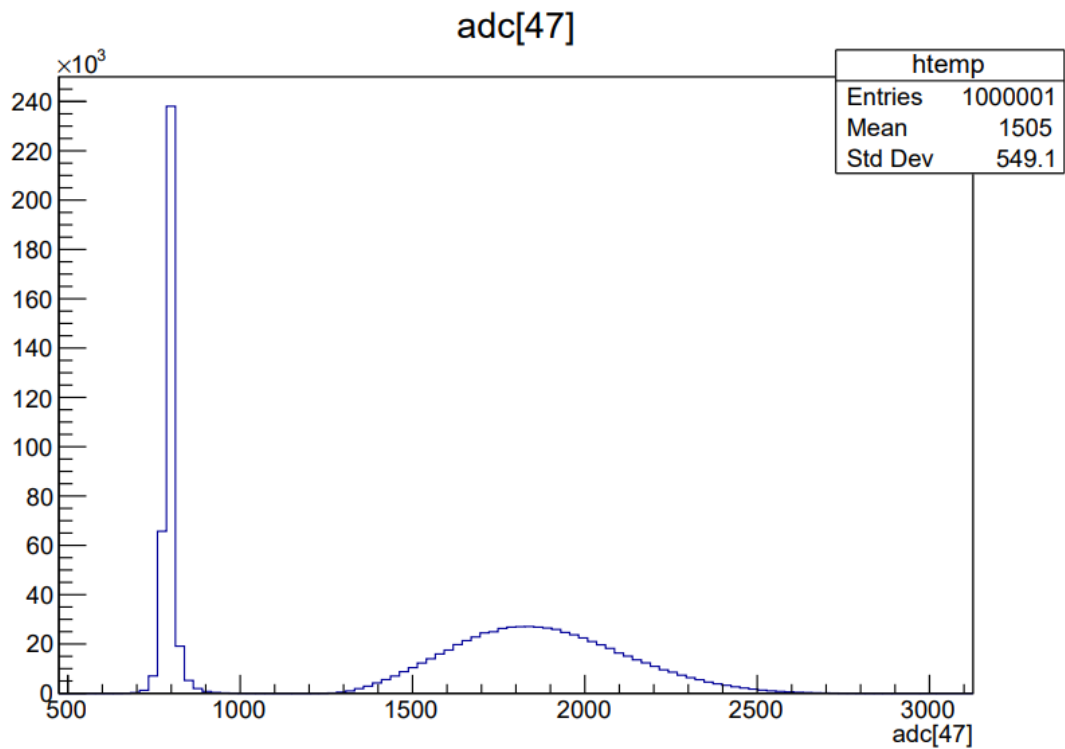


図 42: トリガーとした方のヒストグラム

ヒストグラムの ADC Value が 1200 以上のイベントは十分な光が MPPC で検出されたものと考えられるが、1000 以下のものはペDESTAL であり、このイベントはトリガーとして機能しない。そのためこのチャンネルで ADC Value が 1200 以上であったイベントのみを抽出して先ほどのヒストグラムを見てみることにする。その様子を図 43 に示す。

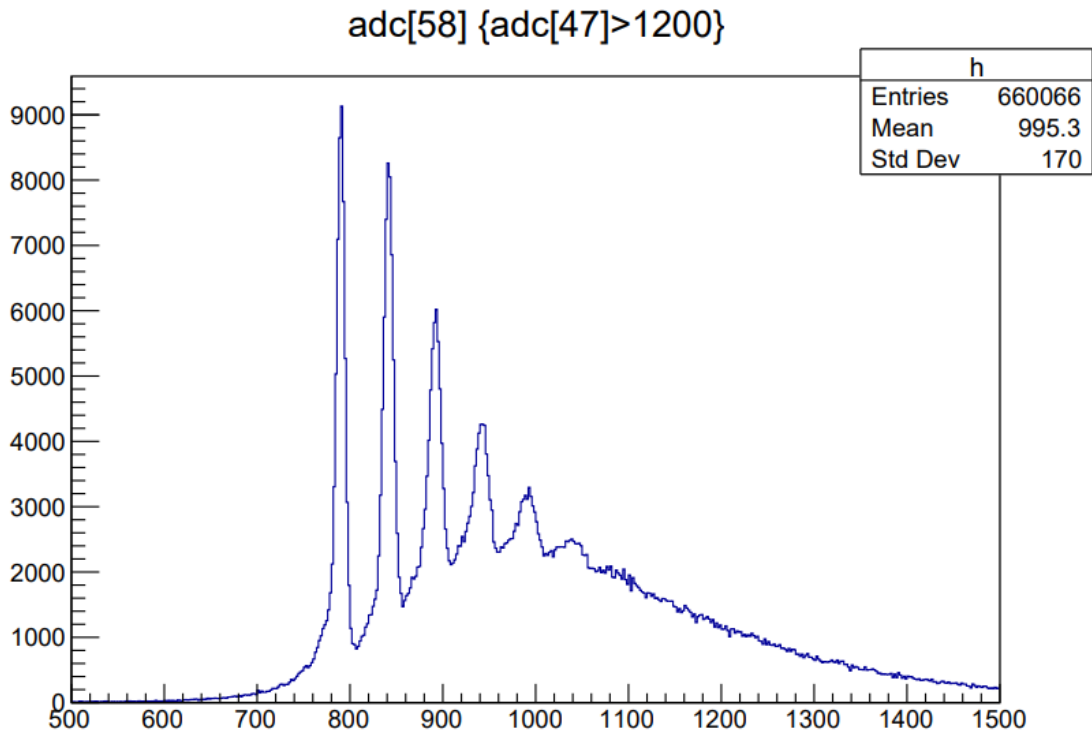


図 43: LED の光を当てた時のヒストグラム (トリガーがかかったものを抽出)

これを見ると先程よりもピークの山がくっきり見える (4 p.e. の山まで見える)。また山同士の間隔も同じくらいで光子数に応じて ADC Value が線形に増えていくことを反映した結果であるといえる。以上より 1ch の MPPC を用いて 1 p.e., 2 p.e., ... のピークを見て取ることができたといえる。

#### 4.2.4 EASIROC ユーザーガイド

EASIROC モジュールは様々な機能を有している優れたものであるが、その分複雑な点も多く、使っている中で上手くいかないことが多々あった。これより EASIROC を使用する際の注意点や出会ったエラーなどについて簡単にまとめる。

- EASIROC モジュールによっては Controller が開かない (Time out や RBCP といったエラーが出る)  
→ EASIROC モジュールのファームウェアを更新するなどしなければいけない
- 外部トリガーでデータが取れない (原因, 解決策ともに不明)
- データ取得中に frame error が出てデータ取得が強制的に中断される  
→ MPPC に入射する光の量を減らすことでそのようなエラーは起きなくなった (これが本質的な解決なのかは不明)
- MPPC に電圧を印加する際は一気に上げたりせず、徐々に上げる (Controller に stepsetHV という少しずつ電圧を上げるコマンドがある)
- デフォルトではイベントごとにそのイベントが起きた時間を出力する Time stamp 機能はない  
→ Time stamp を出力するコードを Controller に書き足す
- EASIROC でデータ取得を開始すると HG や probe の信号が来なくなるので波形を確認したい時は

データ取得前に行う

- 外部トリガーでトリガー信号のタイミングを合わせてもピークを上手く hold してくれないことがある  
→ 新しいファームウェアでは EASIROC が hold してくれる割合がおよそ 7 割程になるという仕様になっているらしい (EASIROC を 3 台同時に使うとなると全て hold される割合は  $0.7^3 = 0.343$  となり, 約 35 パーセントしか hold が上手くいかないことになる. 古いファームウェアのものを使えば, かなりの確率で hold されるが, TSTOP 端子や ACCEPT 端子にも信号をつなぐ必要があり, 回路が少々複雑になる

### 4.3 MPPC の Calibration

MPPC アレイを使用する前に, ADC Value と実際の光電子数の対応付けを行う必要がある. 本項では, この Calibration に用いた手法について説明する.

#### 4.3.1 方法

64chMPPC アレイの Calibration の手順を以下に示す:

1. MPPC アレイで数 p.e. の信号を取得し, EASIROC を用いて ADC を行う.
2. 各光電子数に対応する ADC Value を求め, 線形 fitting を行うことで gain(ここでは, ADC Value を観測光子数で割ったもの) や pedestal(0p.e. に対応する ADC Value) を求める.
3. gain や pedestal にはバイアス電圧の依存性があるので, 10 パターンのバイアス電圧に対してここまできと同じ作業を行う.
4. 得られた各バイアス電圧に対する gain や pedestal を, 電圧を fitting parameter として線形 fitting する.

次に, 図 44 に, 今回の Calibration で用いた回路図を示す.

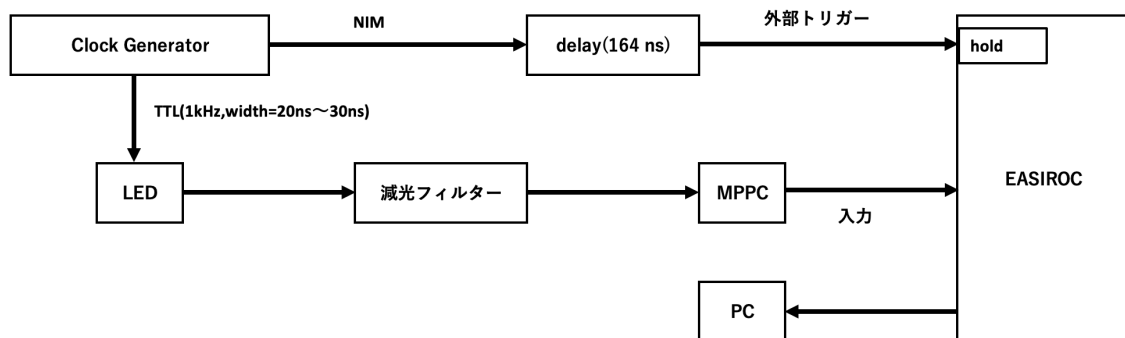


図 44: 回路図

LED に Clock Generator の信号を入れ, 生じた LED の光を減光フィルターに通すことで平均光子数が数 p.e. の光を作り, これを Clock Generator からの信号をトリガーとして MPPC アレイで観測することで Calibration を行った. Calibration を行ったセットアップを図 45 に示す.



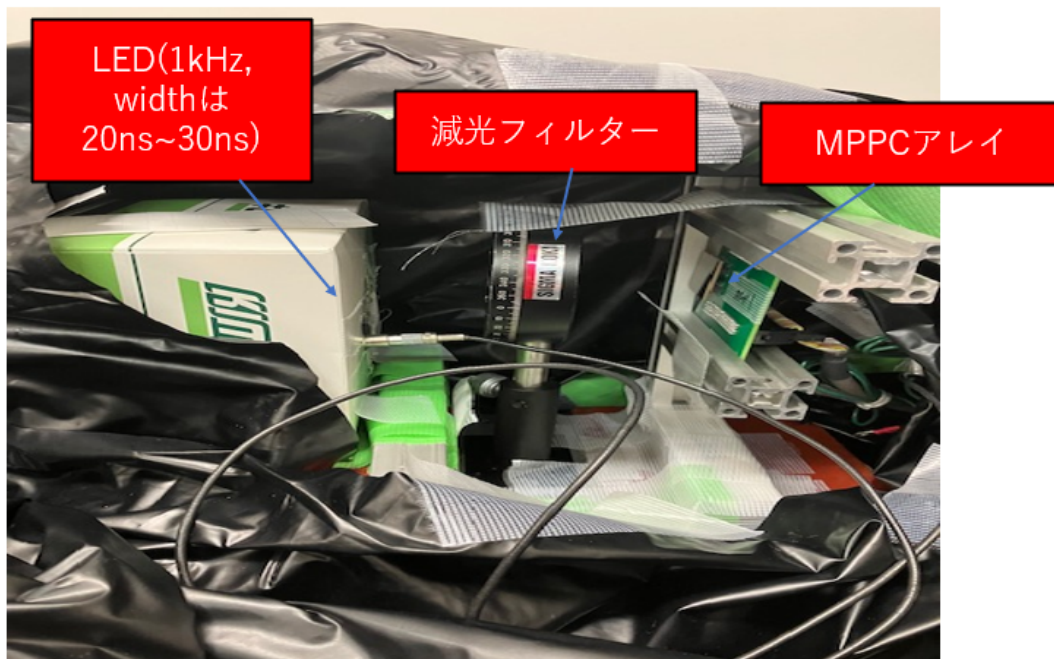


図 45: Calibration のセットアップ

#### 4.3.2 結果

本来、MPPC アレイには第 0ch から第 63ch の合計 64ch の MPPC がついており、これが 2 枚分あるので 128 個の MPPC の Calibration をする必要がある。これ以降では、代表として第 0ch の MPPC に対して詳細を述べることにする。

バイアス電圧  $V = 56.568 \text{ V}$  の場合に取得した ADC Value をヒストグラムにしたものを図 46 に示す。図中のピークになっている部分のうち、左側から 0 p.e., 1 p.e., ... の信号である。各ピークの ADC Value を算出するために、独立な Gaussian を用いて各ピークに対して fitting を行った。その様子を図 47 に示す。fitting して得られた Gaussian から、各 Mean を各光電子数に対応する ADC Value だとして表にまとめると表 3 のようになる。

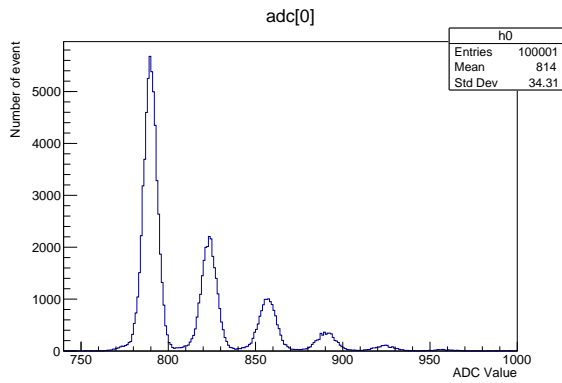


図 46: 数 p.e. のヒストグラム

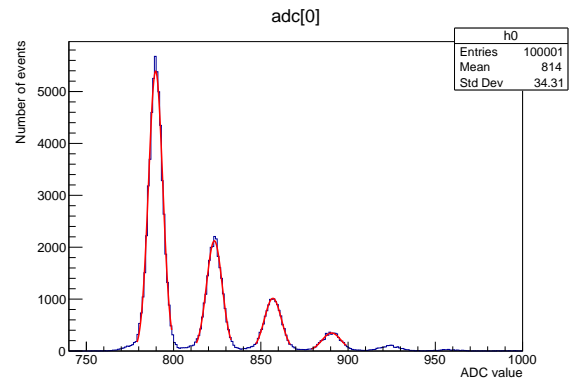


図 47: Gaussian fitting の様子

表 3: 各 Gaussian の Mean とその Error

光電子数 ( $n_{p.e.}$ )	Mean(ADC Value)	Error
0	789.71	0.02
1	823.34	0.03
2	856.90	0.05
3	890.53	0.10

各光電子数 ( $n_{p.e.}$ ) と ADC Value には,

$$\text{ADC Value} = a(V, n_{ch}) \cdot n_{p.e.} + b(V, n_{ch}) \quad (4.3.1)$$

という関係がある。ここで、 $n_{ch}$  は MPPC の ch 番号であり、 $a(V, n_{ch})$  が gain,  $b(V, n_{ch})$  が pedestal に対応する。 $a(V, n_{ch})$ ,  $b(V, n_{ch})$  を fitting paramter として表 3 の関係を式 (4.3.1) で fitting を行った。fitting の様子を図 48 に示す。fitting 結果は

$$a(V = 56.568 \text{ V}, 0ch) = p_1 = 33.61 \pm 0.02$$

$$b(V = 56.568 \text{ V}, 0ch) = p_0 = 789.7 \pm 0.02$$

となった。

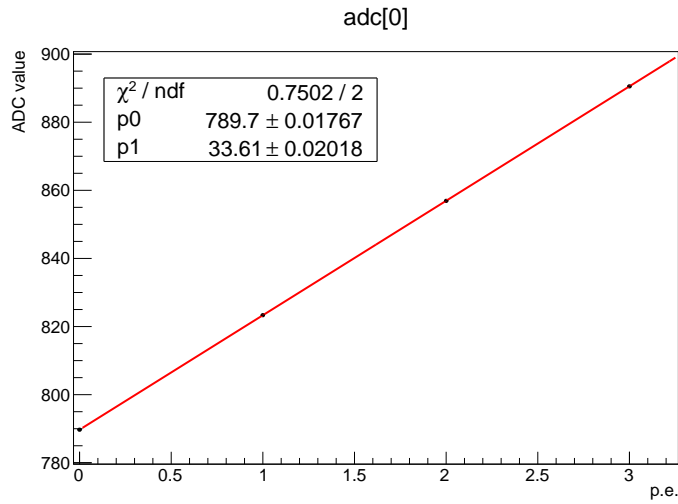


図 48: ADC Value vs 光電子数の fitting

ここまでの作業を 10 パターンのバイアス電圧  $V$  に対して行った. こうして得られる 10 組の  $(V, a)$ ,  $(V, b)$  のデータセットをそれぞれ

$$a(V, n_{\text{ch}}) = c \cdot V + d \quad (4.3.2)$$

$$b(V, n_{\text{ch}}) = e \cdot V + f \quad (4.3.3)$$

という関数で,  $c, d, e, f$  を fitting parameter として fitting を行う. 図 49,50 に fitting の様子を示す.

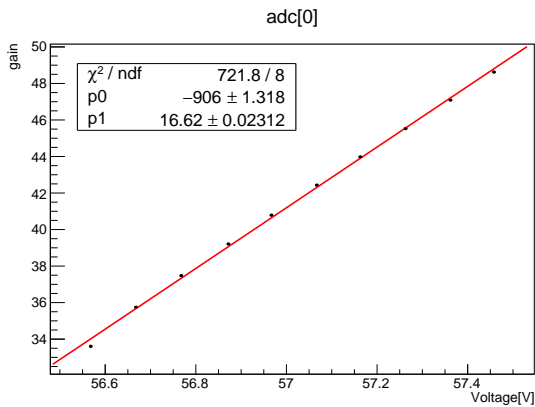


図 49: gain の電圧依存性

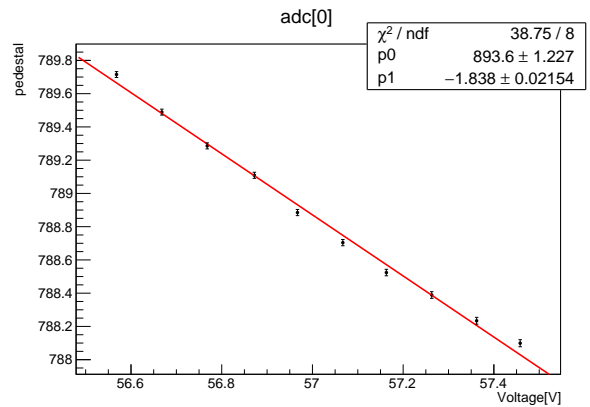


図 50: pedestal の電圧依存性

best fit parameter は

$$c = 16.62 \pm 0.02 \quad (4.3.4)$$

$$d = -906.0 \pm 1.32 \quad (4.3.5)$$

$$e = -1.838 \pm 0.02 \quad (4.3.6)$$

$$f = 893.6 \pm 1.23 \quad (4.3.7)$$

となった．以上で，0ch に対する Calibration が完了した．これを全ての ch に対して行い，合計 128ch の MPPC に対して Calibration を行った．

#### 4.4 P2-RICH-Detector の設計

今回作成した検出器の厚さ  $L$  は，誘電体をアクリルと固定した上でどれだけ光量を稼ぐことができるかどうかで決定した．光量を稼ぐためには誘電体の厚さをなるべく厚くした方が良いが，式 (2.2.1) を見るとわかるように，観測されるリングの半径は  $L$  が大きくなるほど大きくなってしまふ．観測に用いる MPPC アレイはサイズが決まっており，一枚につきリングの円周のおよそ 25 mm 分の光を観測できる．つまり，厚さ  $L$  が大きくなるほどリングの円周は大きくなるが，観測できる範囲は変わらないので，観測可能な光量は減ってしまう．この二つの効果を天秤にかけて，ちょうどよい厚さ  $L = 54$  [mm] を採用した．実際の寸法を図 51 に示す．なお，アクリルの屈折率は  $n \simeq 1.49$ ，宇宙線ミュオン速度は  $\beta \simeq 1$  より，(1.1.3) から，Cherenkov 光放射角は  $\theta_C \simeq 48^\circ$  である．

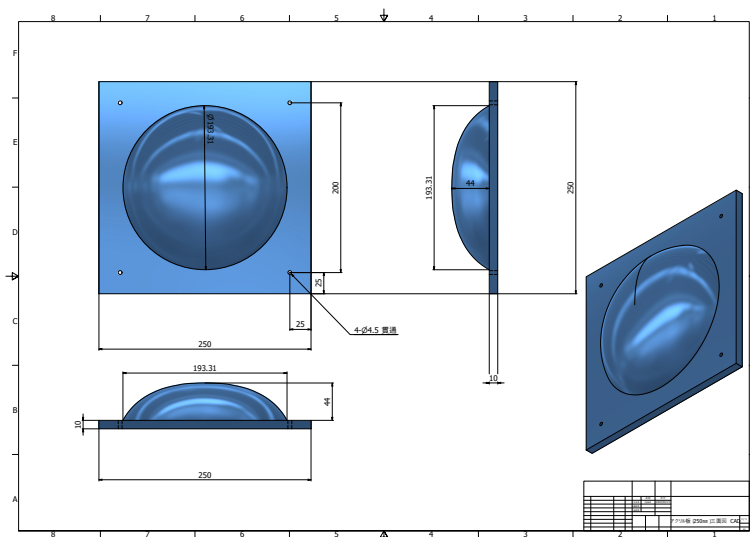


図 51: P2-RICH-Detector の寸法

## 5 実験方法

### 5.1 セットアップ

本実験のセットアップは図 52, 53 のようにした．プラスチックシンチレータ (P.S.) は宇宙線ミュオンの信号を観測するために用いた．プラスチックシンチレータで発生したシンチレーション光は，波長変換ファイバーを通して 1ch MPPC に伝播され，1ch MPPC により信号が増幅される．波長変換ファイバーと 1ch MPPC とは GOMI Connector により接続した．プラスチックシンチレータの周りには集光しやすくするためにアルミホイルを巻き，さらにシンチレーション光が漏れるのを防ぐために黒テープを巻いた．図 52 には上下それぞれ 1 個ずつしかプラスチックシンチレータが描かれていないが，実際は，図 53 のように，上下そ

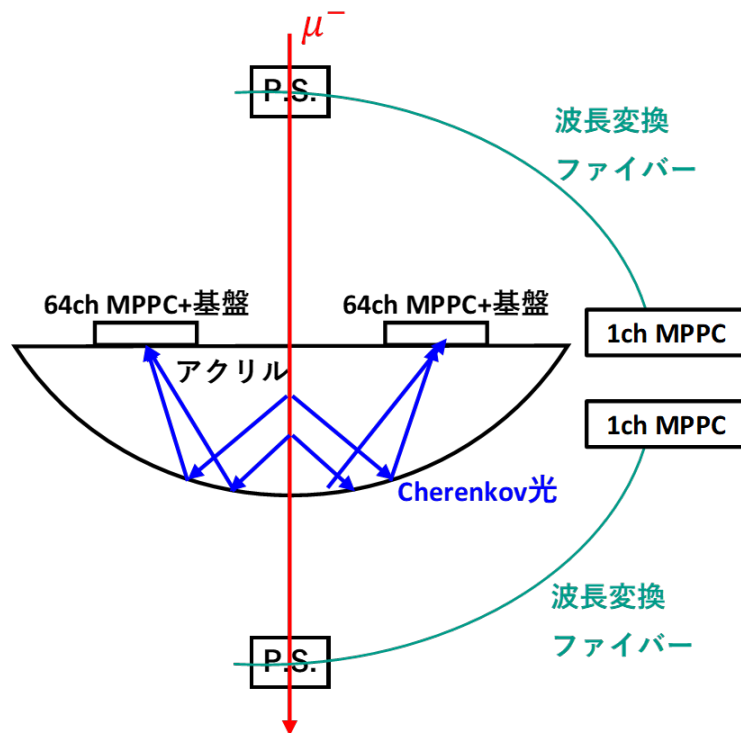


図 52: セットアップ (模式図)

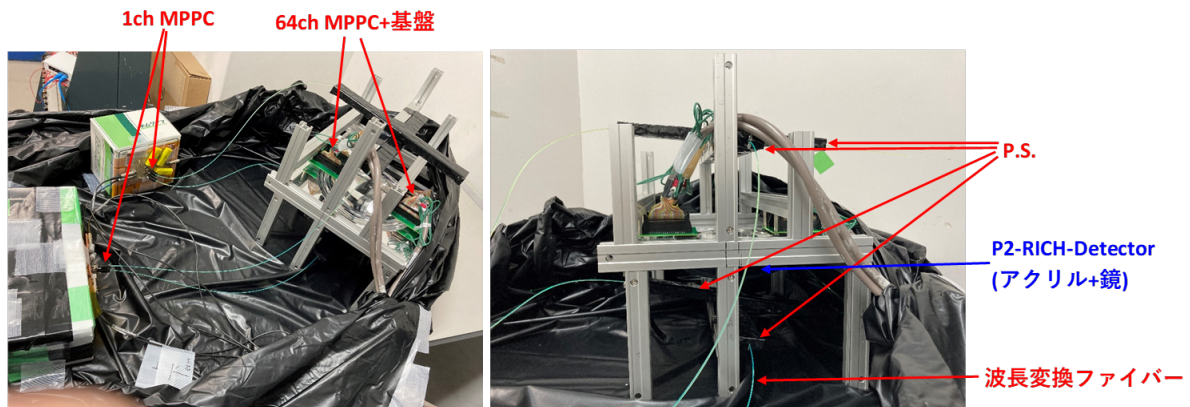


図 53: セットアップ (写真)

れぞれ、2 個の長いプラスチックシンチレータを交差させている。<sup>\*4</sup>上下 2 個ずつ、計 4 個のプラスチックシンチレータからの信号の Coincidence をとったものをトリガーとしてデータを取得した。なお、プラスチックシンチレータの長さや配置は、実験に用いる宇宙線ミュオンの角度が P2-RICH-Detector により Cherenkov リングを十分観測できる範囲になるように調整した。

<sup>\*4</sup> 本当は、小さいプラスチックシンチレータを上下 1 個ずつ配置する予定だったが、小さいプラスチックシンチレータだと宇宙線ミュオンが通った時に予想される光量 (20 ~ 30 p.e.) を観測できず、長いプラスチックシンチレータだと観測できるという謎状況が発生したため、このように長いプラスチックシンチレータ 2 個を交差させてそれらの Coincidence をとることで小さいプラスチックシンチレータ 1 個分の役割をさせている。未だにこの原因は分かっていない。

64ch MPPC は宇宙線ミューオンが P2-RICH-Detector のアクリルを通った際に発生する Cherenkov 光を検出するために用いた。なお、64ch MPPC とアクリルの間に optical grease を塗った。また、装置全体はレコフレームを用いて固定し、実験装置全体を暗幕で遮光した。

図 54 に実験装置を上から見た図を示す。図中の赤線は予想される Cherenkov ring を表しており、64ch MPPC ではほぼ横線として観測されるはずである (7.2 節の図 68 を参照)。また、図中の一番外側の黒線で描かれた正方形は装置の水平面の端の部分を表し、黒線で描かれた円は水平面と、光を反射させ集める回転放物面の境界部分を表している。

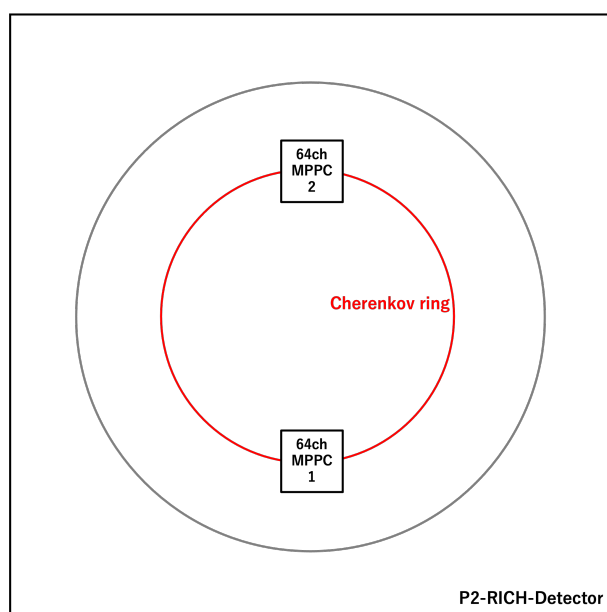


図 54: 実験装置を上から見た図

## 5.2 回路図

図 55 に本実験で用いた回路図を示す。

4 つの 1ch MPPC が出す信号はまず、Amp により増幅したのちに Discriminator に通し、Coincidence を取る。これをさらに Logic FIFO に通してから CAEN 製の Digitizer である DT5725S の trigger として入れる。また、Logic FIFO に通した後さらに Delay をかけ、DUAL FAN OUT を通してから 3 台の EASIROC の trigger として入れる。<sup>\*5</sup>なお、LED 光を遮光用の暗幕の内部で光らせて実際の回路 (図 55) を用いて測定することにより (1ch MPPC へは波長変換ファイバーを通して LED 光が入り、64ch MPPC へは P2-RICH-Detector の鏡に反射した LED 光が入る)、EASIROC で適切に信号が hold されるような Delay の長さを求めた。また、1ch MPPC の信号は Amp を通ったあと DT5725S により ADC を行い、PC で DAQ を行う形で生信号も取得している。

64ch MPPC アレイで拾った信号は EASIROC にて ADC を行い、PC で DAQ を行っている。この部分で

<sup>\*5</sup> EASIROC を 3 台用いているのは、64ch すべてうまく読み出せる EASIROC が 1 台しかなかったためである。EASIROC 1 台で 64ch 分、もう 2 台でそれぞれ 32ch ずつ読み出している。なお、EASIROC 3 台の IP アドレスを異なるものにより、PC で 3 台を識別している。

Cherenkov 光を信号として取得する。

DT5725S により取るイベントと、EASIROC により取るイベントの同期がなされていない可能性があるため、それぞれデータ取得時にタイムスタンプを残すようにしてある。DT5725S はその時間分解能が 8 ns であるが、17 s 程度でオーバーフローしてしまうため、この点は改善が必要である。EASIROC での時間分解能は約数 ms であり、日付と時刻を出力する。同期の一番初めのタイミングを決めるために、本実験の測定を開始する前に 10 Hz の Clock Generator からの信号を Logic FIFO を通してから trigger にしてダミーデータを測定する。タイムスタンプにより 10 Hz のダミーデータを識別し、その最後のダミーデータを基準にその後のイベントの対応を付ける。途中で Gate Generator を入れているのは、もう一方の Gate Generator の LATCH 機能 (start を押すと NIM 信号を出し、stop を押すと NIM 信号を止める) を用いて出した NIM 信号を VETO に入れ、制御を行うためである。これにより start を押すと測定が止まり、stop を押すと測定が始まる。start と stop の意味が入れ替わっていることには注意が必要である。

この同期を行ったのち、10 Hz の Clock Generator からの信号を Logic FIFO から外し、Coincidence からの信号を入れる。

また、EASIROC を動かすコントローラーは、信号が来ない状態で約 48 分経つとタイムアウトが起きてしまう。これを対策するために、1 Hz の Clock Generator を Pre Scaler に入れることで 999 秒に 1 回 NIM 信号を出力、これをトリガーに入れてダミーデータを取ることで対策している。本来はコントローラーのソースコードを書き換えるなどして対策するのが望ましい。

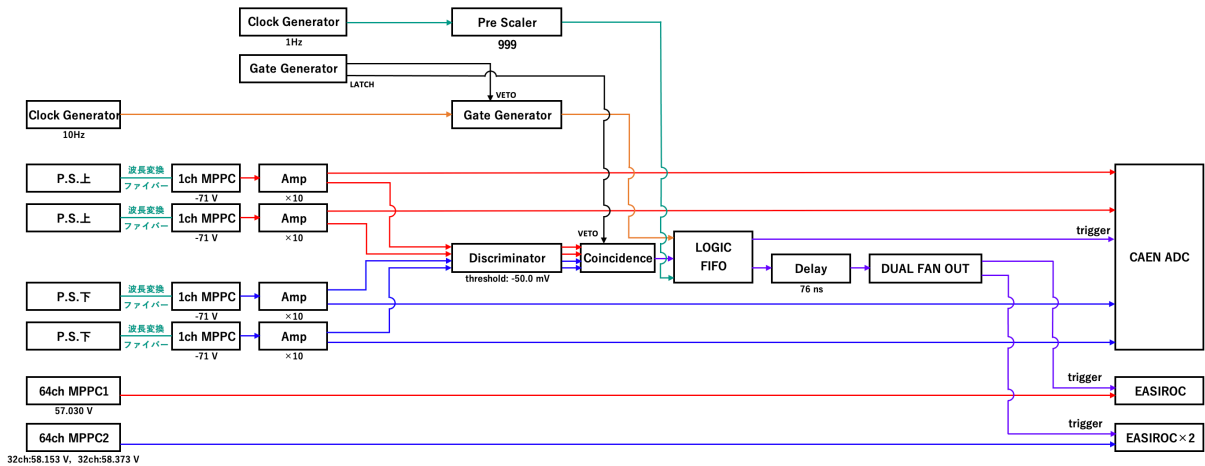


図 55: 本実験に用いた回路図

### 5.3 Calibration とデータ取得

2 枚の 64ch MPPC アレイのうち 1 枚全面 (回路図 55 中の 64ch MPPC1) ともう 1 枚半面 (回路図 55 中の 64ch MPPC2 の半面) については 4.3 節で述べた方法で Calibration を行った。残りの 64ch MPPC アレイ半面 (回路図 55 中の 64ch MPPC2 の半面) については、数 p.e. の信号を取得するのに、暗幕内の P2-RICH-Detector の真上に設置した LED からの光が鏡で反射したものをを用い、解析は 4.3 節で述べた

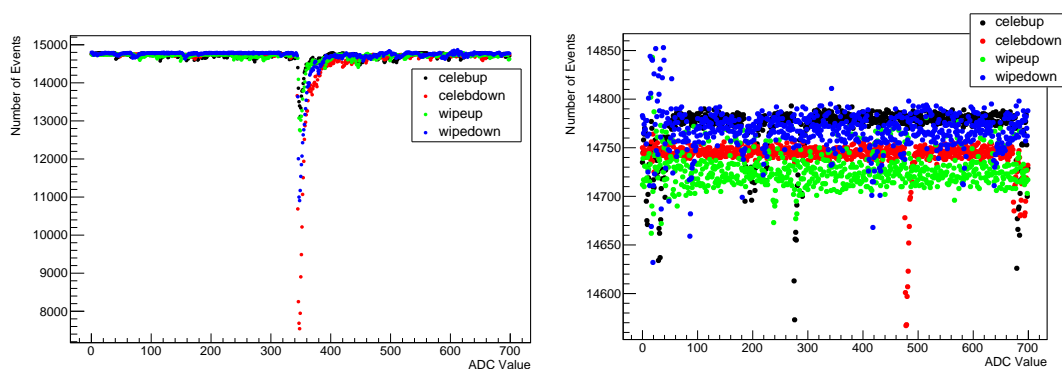
方法で行った。<sup>\*6</sup>なお、4.3 節では電圧依存性も考慮した Calibration 手法が書かれているが、本実験での Calibration では本実験で実際にかける電圧で Calibration を行いその電圧での Calibration 結果を用いた。また、MPPC の gain は温度依存性等により時間変化するので本実験の前後に Calibration を行うことが望ましいが、今回は本実験の少し前に Calibration を行った (2023/5/29, 5/30, 6/15)。

本実験は、2023/6/20 19:36～6/21 16:58, 2023/6/21 19:00～6/22 13:53 の期間に行った。

## 6 実験結果

### 6.1 トリガーに用いたプラスチックシンチレータの信号

CAEN の Digitizer で波形取得した、プラスチックシンチレータの信号のうち、ミュオンが通ったときの波形とノイズの波形の区別は目視で行った。それらの波形の例を図 56 に示す。図 56 のように、ミュオンかノイズかどうかの区別は目視で容易かつ確実にできる。6/20 に取得したデータ 181 イベントのうちミュオンが通ったイベントは 96 イベント、6/21 に取得したデータ 155 イベントのうちミュオンが通ったイベントは 82 イベントであった。



(a) ミュオンが通ったときの波形

(b) ノイズの波形

図 56: トリガーに用いたプラスチックシンチレータの信号の波形

### 6.2 MPPC アレイの配置とヒストグラムの対応

実験結果を述べる前に、結果として得られる 2D ヒストグラムと実際の MPPC アレイの対応関係を図 57 に示す。図 57 中の、上下に 2 つ並んだ 2D ヒストグラムはノイズのデータをプロットしたものであり、その位置関係は実際の MPPC アレイの配置と一致している。また、今回は EASIROC を 3 台用いて ADC を行っており、この 3 台の EASIROC を EASIROC-A,B,C と名付けた。MPPC1 は EASIROC-A 1 台で、MPPC2 は EASIROC-B, EASIROC-C の 2 台でそれぞれ ADC を行った。特に、MPPC2 については、ちょうど半分になるように縦に切り、左側は EASIROC-C、右側は EASIROC-B で ADC を行った。

<sup>\*6</sup> 4.3 節で述べた方法で数 p.e. の信号を取得するには Calibration 時に 64ch MPPC を P2-RICH-Detector から取り外さないといけないので面倒である。暗幕内の P2-RICH-Detector の真上に設置した LED を用いる方法では 64ch MPPC を取り外す必要がないので効率的である。



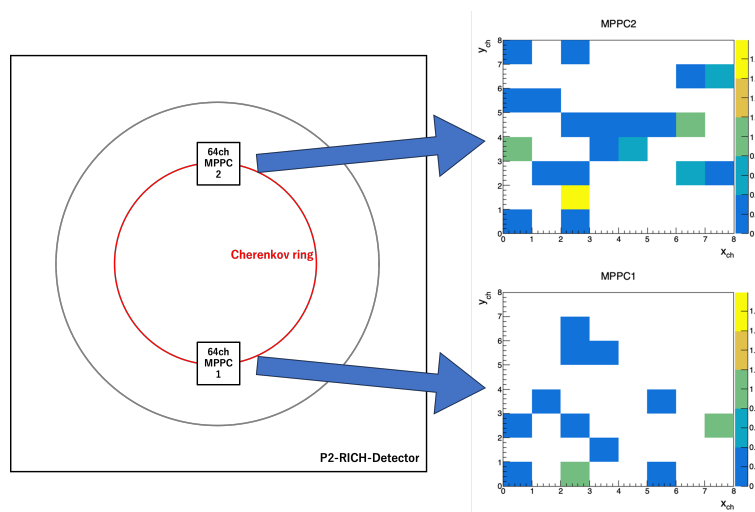
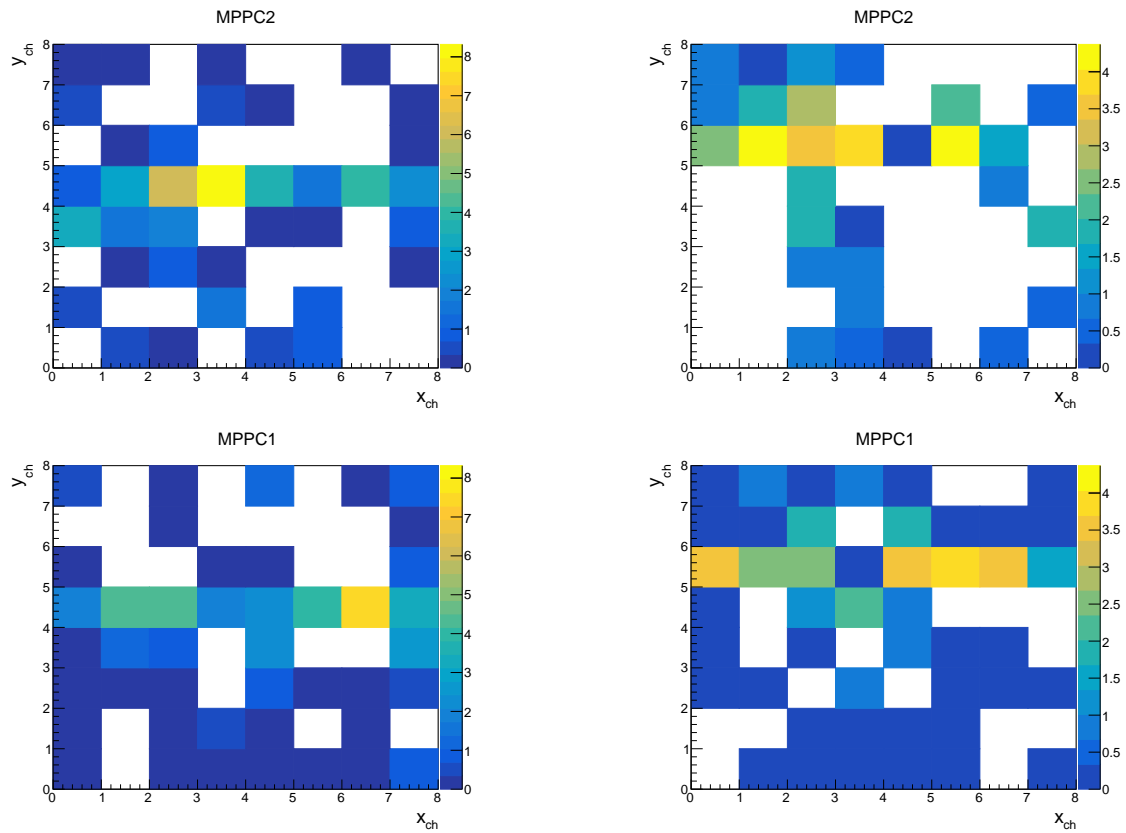


図 57: MPPC アレイの配置と 2D ヒストグラムの対応関係

### 6.3 Cherenkov ring の観測結果

実験結果のうち、MPPC1, MPPC2 の両方に Cherenkov 光由来の信号が確認できるヒストグラムを図 58 に示す。なお、白色の部分は統計的揺らぎにより光電子数がマイナスになっている部分であり、便宜上 0 として扱っている。横一直線に 4~8 p.e. の信号が並んでおり、およそシミュレーション結果と一致していることがわかる (シミュレーション結果は 7.2 節の図 68 を参照)。また、図 58(b) のイベントは (a) のイベントに比べて信号が広がっており、ミュオンが斜めに通過してきたイベントと推測される。

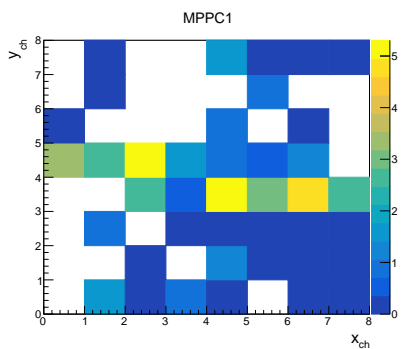
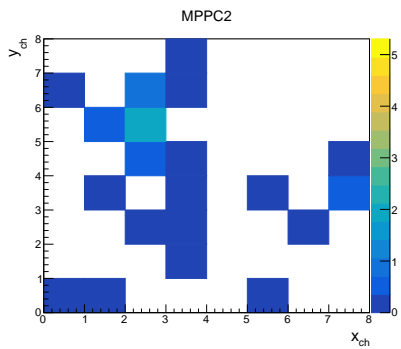


(a) 上から4列目のチャンネルに、一直線に信号が来ている

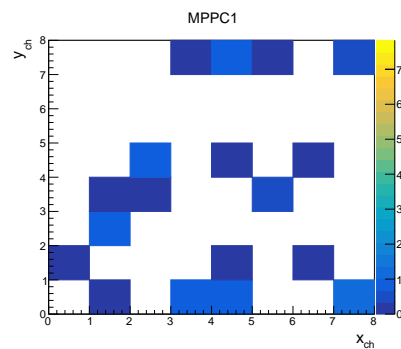
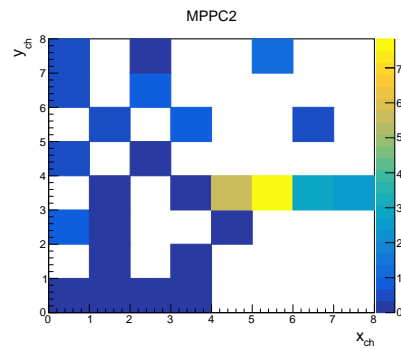
(b) 上から3列目のチャンネルを中心に、少し広がった形で信号が来ている

図 58: MPPC1, MPPC2 の両方に Cherenkov 光由来の信号が確認できるヒストグラム

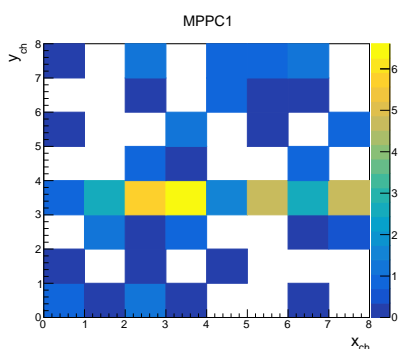
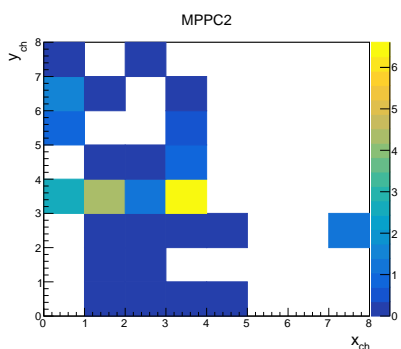
今回、MPPC アレイの ADC には EASIROC を用いたが、たとえタイミングが完璧にあっても hold が 70 % 程でしか成功しないという問題があった。MPPC1 は EASIROC が 1 台、MPPC2 は EASIROC が 2 台用いられているので、全ての MPPC で信号がうまく取れる確率は約 35 % となる。このため、2 枚の MPPC アレイに Cherenkov 光由来の信号を確認できたイベントは非常に少なく、トリガーイベントが全 178 イベントあったのに対し、2 枚の MPPC アレイで ring を観測できたのは 5 イベントのみであった。hold がうまくできなかったために、Cherenkov 光の一部しか見えなかった場合のヒストグラムを、図 59 に示す。なお、Cherenkov 光の見えているイベントの選別は、個別にとったミューオンの信号を確認し、その Coincidence が取れているイベントに対して目視で行った。



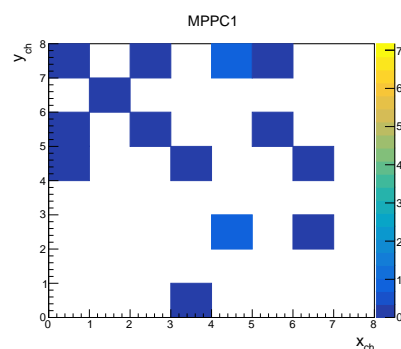
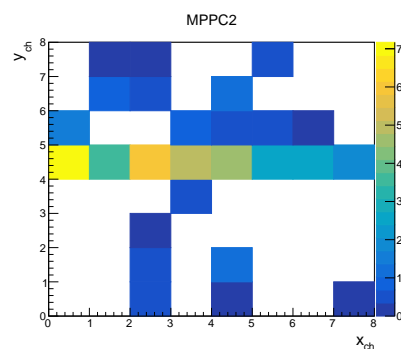
(a) EASIROC-A のみ hold に成功した場合



(b) EASIROC-C のみ hold に成功した場合



(c) EASIROC-A,B で hold に成功した場合



(d) EASIROC-B,C で hold に成功した場合

図 59: hold に成否による ring の見え方の違い

## 6.4 平均光量の見積もり

観測できた Cherenkov ring の平均光量を見積もりを行う。MPPC1 に関しては、1 台の EASIROC がうまく hold してくれれば Cherenkov 光の横線が見えるはずなので、そのようなイベントを集めて平均光量の算出を行う。目視で MPPC1 に Cherenkov 光が確認されるイベントを選別し、それらのイベントの光電子数を各チャンネルごとに足すことで得られた各チャンネルごとの光電子数の和を、イベント数で割ることで平均光子数を算出した。この平均光子数をカラープロットで示した 2D ヒストグラムを図 60 に示す。この図を見ると、主として下から 5 列目のチャンネルに光電子が集まっていることがわかるが、この列の光電子数の平均は各チャンネルおよそ 1.4 p.e. であり、シミュレーション結果と比べてもかなり少なく、また、Cherenkov 光の信号が広がっている。これは下から 5 行目以外に Cherenkov リングの線が確認できるイベントや Cherenkov 光の信号が広がっているイベントも含めて平均をとっているためだと考えられる。

そこで、下から 5 行目に Cherenkov リングの線が確認できるイベント（つまり、宇宙線ミュオンが検出器の中心を垂直に通ったイベント）のみについて平均をとって光量を評価するために、2 行ずつ、すなわち、下から 1 行目と 2 行目、2 行目と 3 行目、 $\dots$  と和をとり、4 行目と 5 行目、もしくは、5 行目と 6 行目の光電子数の和が 25 p.e. 以上のイベントのみを集め、これらについて平均をとった。その結果を図 61 に示す。これを見ると、確かに下から 4 行目と 5 行目のチャンネルで光電子数が大きくなっており、図 60 よりも信号が広がっていないことがわかる。それぞれの行についてチャンネルごとの平均光電子数をとると、下から 4 行目の平均光電子数はおよそ 1.8 p.e.、5 行目の平均光電子数はおよそ 1.7 p.e. であった。図 60 のように単純に平均をとった場合に比べると、平均光電子数は確かに大きくなっている。また、光子は必ずしも 1 つの行に集まるわけではなく、2 行分ほどに分かれてくることもある。そのような場合も図 61 に含まれていると考えると、下から 4 行目と 5 行目の平均光電子数の和をとる、すなわち、列方向に積分を行うことでチャンネルごとの平均光電子数は約 2.5 p.e. と結論づけられる。MPPC アレイの情報から、各チャンネルは  $3 \times 3$  [mm<sup>2</sup>] の面積を持つことがわかっているので、この平均光電子数を 1 cm あたりに直すと、およそ 8.3 p.e./cm と算出できる。

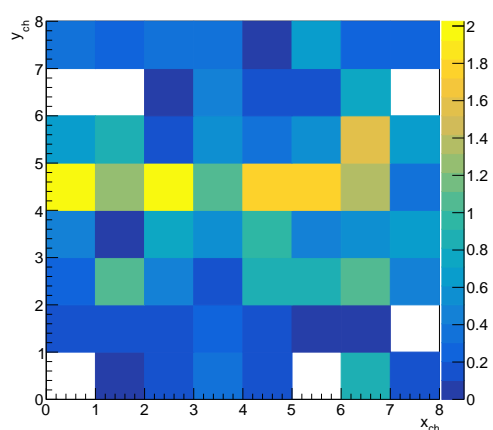


図 60: Cherenkov 光が見えていた場合のみを集めたときの、MPPC1 の平均光電子数のカラープロット

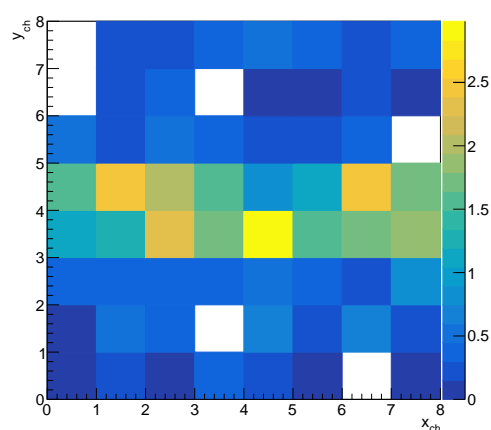


図 61: 下から 4,5,6 行目の光電子数を用いて選別した場合の、MPPC1 の平均光電子数のカラープロット

## 7 解析

この章では以上で得た実験結果から実際にミュオンがどのように入射してきたか、すなわちどのようなエネルギーでどの方向から入射してきたかを調べる。<sup>\*7</sup>実験結果の解析方法には以下の3つが考えられる:

- 実験データを円 fitting し、その円の情報から入射方向を推定する
- 各 ch の光子数を Poisson 分布で fitting し、その結果を用いて入射方向を推定する
- 機械学習

それぞれについて入射方向を求め、それらを比較検討していく<sup>\*8</sup>。また解析においては初期条件と観測データの組が必要になるが、それらは GEANT4 を用いたモンテカルロシミュレーションを用いて取得した。我々の装置に対する典型的なシミュレーションは図 62 に示しておく。

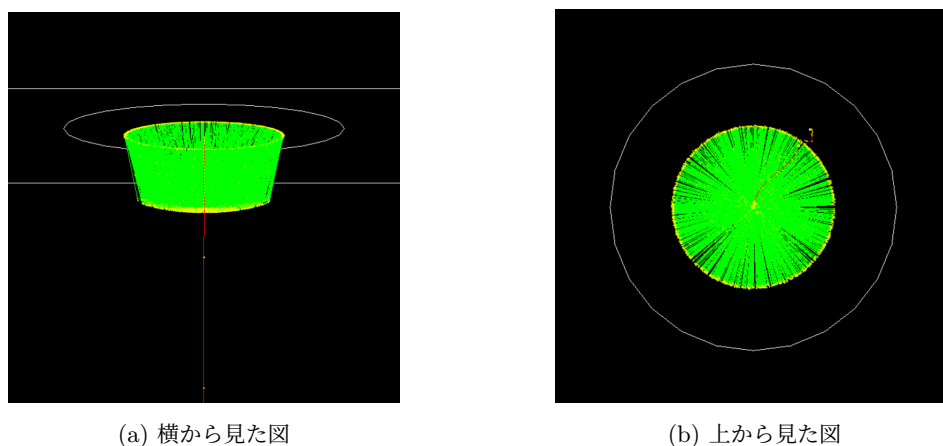


図 62: 初期条件  $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$  に対する GEANT4 のシミュレーション結果。赤色の線がミュオンや電子等の荷電粒子の軌跡、緑線が光子の軌跡、黄色が反応点を表す。理論通り検出面で光子により円が形作られている。

初期条件とはミュオンの入射情報のことであるが、ミュオンの入射情報は入射エネルギー  $E$  (速度と 1 対 1 にに対応するので以下では  $\beta (= \frac{v}{c})$ ) と入射方向  $(X, Y, \theta, \varphi)$  で尽くされる。ここで  $(X, Y)$  は検出面上の座標であり、 $(\theta, \varphi)$  は飛来した方向である (図 63 参照)。解析ではこの 5 変数  $(\beta, X, Y, \theta, \varphi)$  と観測データ  $(\{N_{\text{ch}}\})$  を結び付ける必要がある。具体的にはこの  $5 + 64 \times 2$  変数から成る確率分布  $p(\{N_{\text{ch}}\} | \beta, X, Y, \theta, \varphi)$  を求めなければならない。しかし、これに対して何らかの確率モデルを定義し実際に求めることは非常に難しい。したがって、いくつかの変数に対して簡約化を行う必要が生じる。幸い、P2-RICH-Detector は  $(\beta, X, Y)$  についての分解能が小さいことがシミュレーションの結果から分かった<sup>\*9</sup>。従って以下ではミュオンの入射

<sup>\*7</sup> 以上の実験結果を解析する時間がなく、解析していないので、ここでは解析手法のみ述べる。

<sup>\*8</sup> 解析等で用いたプログラムのソースコードは <https://github.com/p22022/GEANT4> にあるが、一般公開はしていないので見たい方は高エネ研まで。

<sup>\*9</sup> 厳密にいうと、 $\beta$  に関しては  $\beta \sim 1$  に対して、 $(X, Y)$  に関しては  $(X, Y) \sim (0, 0)$  に対しての分解能が小さい、ということである。

情報を  $(\theta, \varphi)$  に限定して議論をする, すなわち  $(X, Y) = (0, 0)$  とする<sup>\*10</sup>. なおシミュレーションは  $\theta$  を  $1^\circ$  ずつ動かして  $0^\circ$  から  $10^\circ$  まで,  $\varphi$  は  $5^\circ$  ずつ動かして  $0^\circ$  から  $355^\circ$  まで, 各初期条件  $(\theta, \varphi)$  に対して 1000 回ずつ行った. また, 装置の  $z$  軸回転対称性から,  $(X, Y) = (0, 0)$  の時にはどの  $\varphi$  に対しても単にデータを回転させた時と (統計的なバラつきを除き) 同じ結果を与えるはずであるので, 以下の解析では単にデータ点を回転させて解析を行っている. すなわち  $(\theta, \varphi (\neq 0))$  についてのシミュレーションは行わず,  $(\theta, 0)$  のデータを  $\varphi$  だけ回転させたものを  $(\theta, \varphi)$  のシミュレーション結果として用いた.

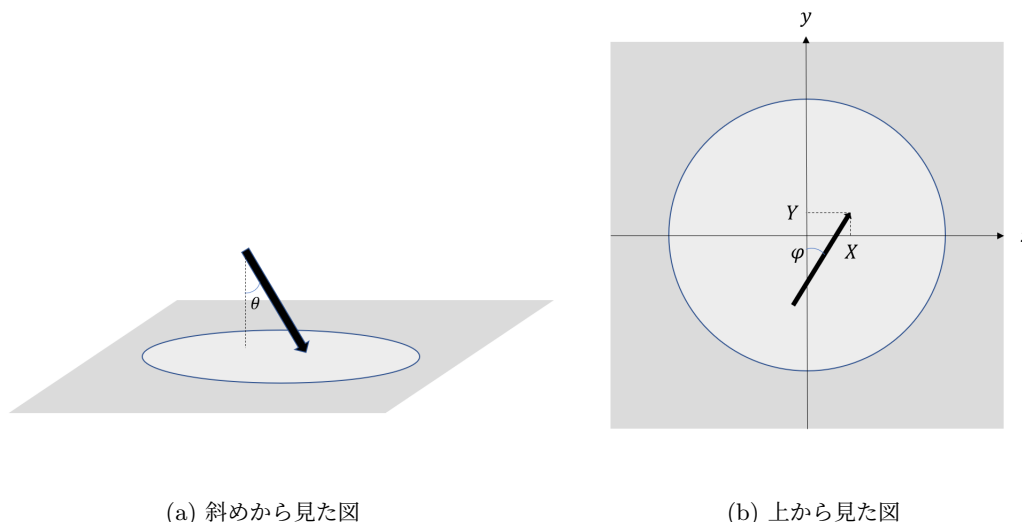


図 63: 入射条件を指定する変数の定義. 黒い矢印はミューオンの入射ベクトルで, 矢印の先にミューオンが存在するとしている. 灰色の面が検出面を表している. なお, 本実験では  $y$  軸上に MPPC の中心が乗るようにセットアップしている.

## 7.1 円 fitting による推定

まず, 円 fitting による推定について検討していく. この推定方法では, 検出面での光子分布はおおよそ円になることを用いて, 円 fitting を行い, パラメータと  $(\theta, \varphi)$  の関係を求める. 以下の図 64 はシミュレーションデータを円 fitting し, 光子分布を重ねたものである.

円 fitting をしたときの中心を  $(x_c, y_c)$ , 半径を  $r_c$  とする. また, 中心座標の極座標表示を  $(\delta_c, \varphi_c)$  とする. つまり,

$$\delta_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \quad (7.1.1)$$

$$\varphi_c = \tan^{-1} \frac{y_c}{x_c} \quad (7.1.2)$$

である. 多数のシミュレーションの結果,  $\delta_c \propto \theta, \varphi_c = \varphi$  となることが分かった. 実際, 初期条件  $(X, \theta, \varphi)$  をランダムに変えてシミュレーションを行い, 円 fitting したときのパラメータと  $(\theta, \varphi)$  の関係は次の図 65 のようになる.

<sup>\*10</sup> シミュレーション自体は  $X = 5, 10$  の場合に対しても行い, そのデータも同じレポジトリに乗せてある.

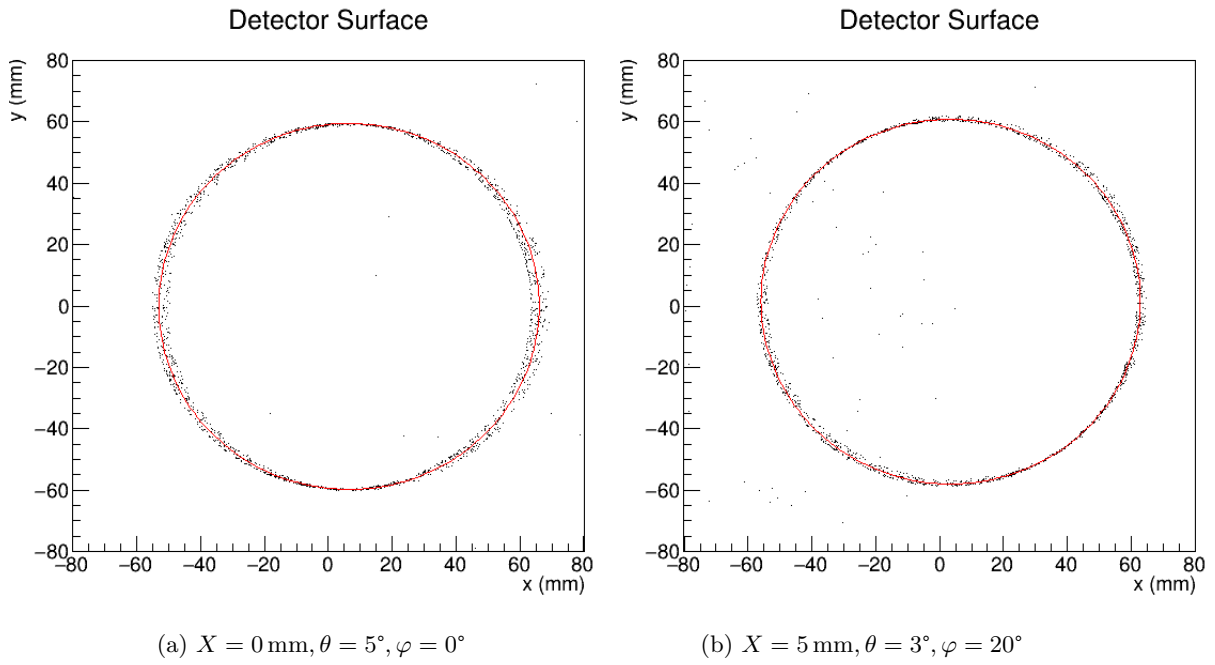


図 64: 光子分布に円 fitting した結果を重ねた図

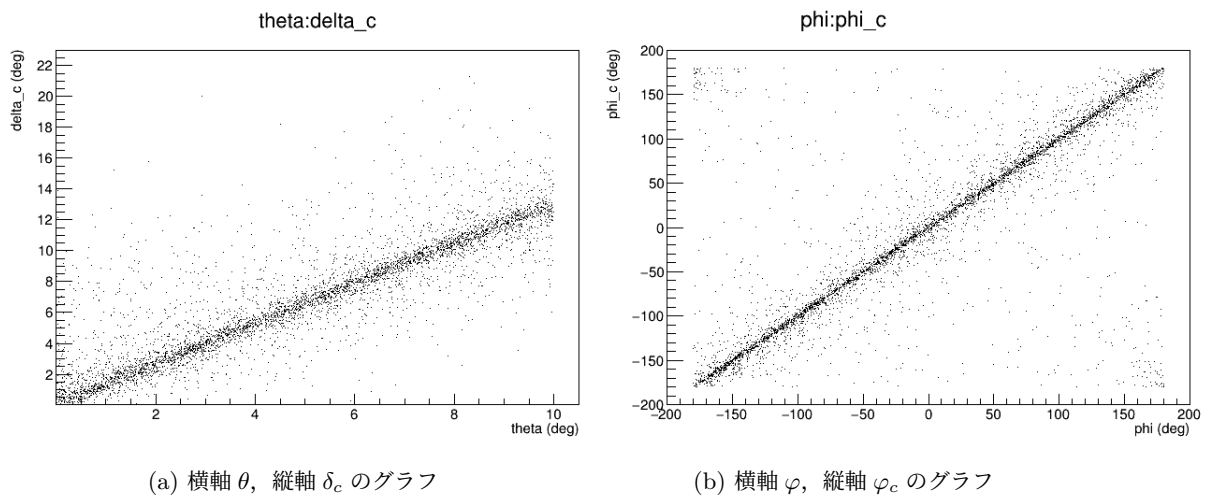


図 65: 初期条件をランダムに変えてシミュレーションを 5000 回行い、円 fitting したときのパラメータと  $(\theta, \varphi)$  の関係

Cherenkov 放射は確率過程なので、各初期条件に対する  $\delta_c, \varphi_c$  の値は、1000 回の同一初期条件のシミュレーションデータから得られる円 fitting のパラメータのヒストグラムをガウシアンで fitting して求める。円 fitting には損失関数

$$L = \sum_i \left( \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - r_c \right)^2 \quad (7.1.3)$$

を用い、 $L$  を最小化するパラメータ  $x_c, y_c, r_c$  を求めた。図 66 は初期条件  $X = 5 \text{ mm}, \theta = 3^\circ, \varphi = 20^\circ$  のときの 1000 回のシミュレーションデータから得られる  $x_c, y_c$  のヒストグラムをガウシアンで fitting したものである。

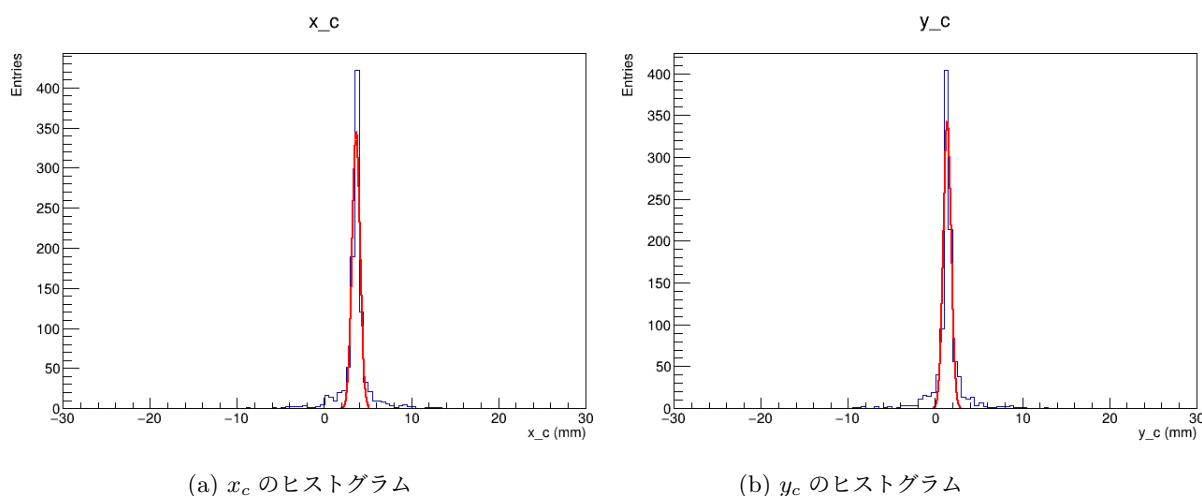


図 66:  $X = 5 \text{ mm}, \theta = 3^\circ, \varphi = 20^\circ$  のときの  $x_c, y_c$  のヒストグラム

各初期条件に対してガウシアンで fitting して得られた  $\delta_c, \varphi_c$  をグラフにすると次の図 67 のようになる。

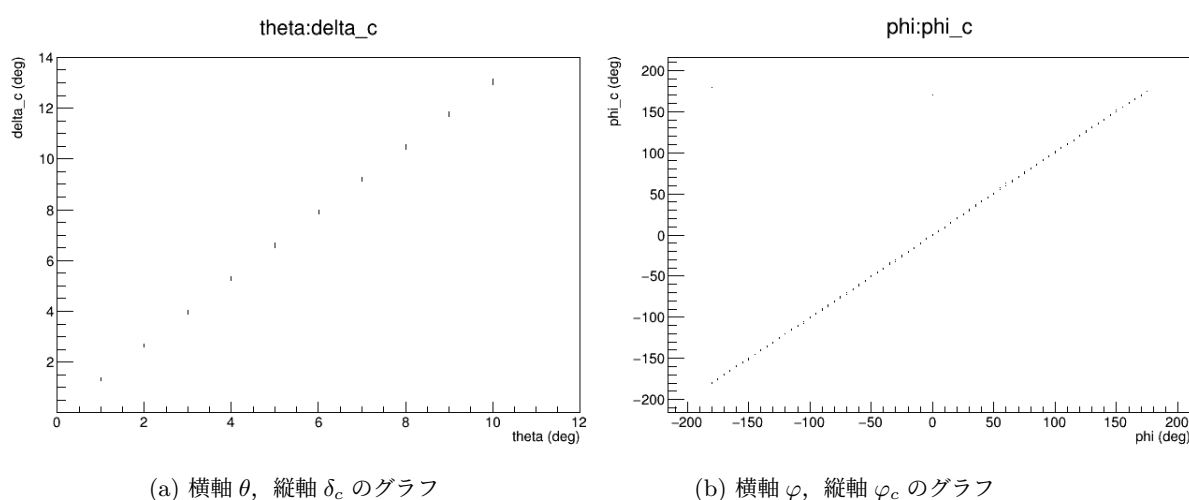


図 67: 円 fitting のパラメータ ( $\delta_c, \varphi_c$ ) と ( $\theta, \varphi$ ) の関係



図 67 から分かるように誤差付きで  $\varphi = \varphi_c$  となる．シミュレーションデータは初期条件  $(X, Y, \theta, \varphi)$  のうち  $Y$  については動かしていないが回転対称性から  $Y \neq 0$  の場合でも， $\varphi = \varphi_c$  としてよい<sup>\*11</sup>． $\theta$  については  $\delta_c$  から求めることができる．

## 7.2 Poisson 分布による推定

初期条件  $(\theta, \varphi) = (1^\circ, 10^\circ)$  のシミュレーションの結果をしてみると図 68 のようになっている．

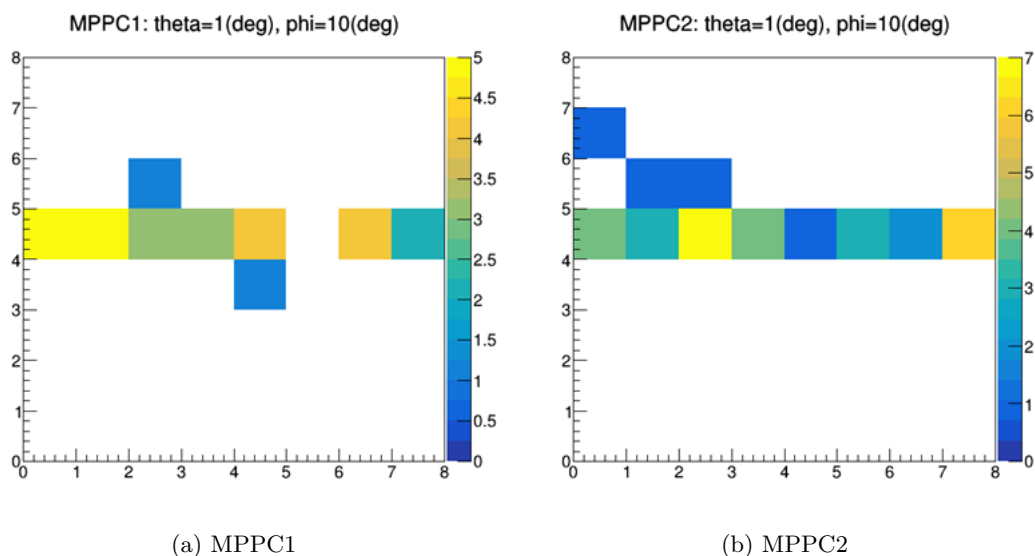


図 68: 初期条件が  $(\theta, \varphi) = (1^\circ, 10^\circ)$  に対するシミュレーションデータを MPPC の観測データに焼き直したものの

円 fitting の時に初期条件ごとにその中心位置や半径が変動したように，初期条件ごとに光子が入りやすい ch というものが存在する．そして Cherenkov 光放出は確率過程なので，それだけが起こるとすれば<sup>\*12</sup>MPPC の各 ch に入る光子数は初期条件を固定すれば Poisson 分布に従うと考えられる．実際，初期条件  $(\theta, \varphi) = (1^\circ, 10^\circ)$  に対し 1000 回のシミュレーションを回した結果の一つの ch に対する光子数の分布は図 69 のようになり，Poisson 分布になっている．

従って，シミュレーションにより

$$\lambda_{\text{ch}} = \lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi) \quad (7.2.1)$$

を求めれば，各観測データ  $\{N_{\text{ch}}\}$  に対し

$$P(\{N_{\text{ch}}\}|\theta, \varphi) = \prod_{\text{ch}} p_{\lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi)}(N_{\text{ch}}) \quad (7.2.2)$$

<sup>\*11</sup> ただし， $\varphi_c$  は  $\theta, R = \sqrt{X^2 + Y^2}$  によらないという仮定をおいている．この仮定はシミュレーションを行った範囲内では妥当と思われる．

<sup>\*12</sup> 実際はデルタ線放出等が起こるが，その扱いに関しては 7.3 参照

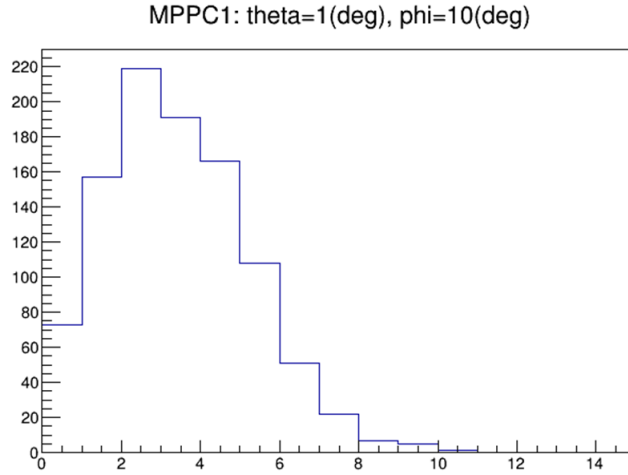


図 69: 初期条件  $(\theta, \varphi) = (1^\circ, 10^\circ)$  に対する光子数の分布

により入射情報  $(\theta, \varphi)$  に対して観測データ  $\{N_{\text{ch}}\}$  が観測される確率が計算できる。ただし

$$p_\lambda(X = N) = \frac{\lambda^N e^{-\lambda}}{N!} \quad (7.2.3)$$

はパラメータが  $\lambda$  の Poisson 分布である。シミュレーションでは  $\theta$  は  $1^\circ$  ずつ  $\varphi$  は  $5^\circ$  ずつ動かして  $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ ,  $0^\circ \leq \varphi \leq 355^\circ$  の有限グリッド上でしか  $\lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi)$  は定義されていないので、何らかの方法で補間をするべきである。しかし今回行った補間方法ではうまく出来なかった (図 70 参照) ので、以降では有限個数のグリッド上で推定を行う。

### 7.2.1 最尤推定

観測データから入射情報を推定する方法の一つとして最尤推定がある。最尤推定法においては、上で求めた各パラメータに対する  $p_{\lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi)}(N_{\text{ch}})$  から尤度

$$L(\theta, \varphi) = \prod_{\text{ch}} p_{\lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi)}(N_{\text{ch}}) \quad (7.2.4)$$

を計算し、これを最大化させる  $(\theta, \varphi)$  の組が入射情報であったと推定する。いくつかの初期条件のシミュレーションデータに関する最尤推定の結果を図 71 に示す。これを見てわかるように、確かにシミュレーションデータの中では初期条件 (つまり推定されるべき真の値) となる確率は他の結果になるよりも高いが、推定の精度としてはかなり低いことが分かる。

### 7.2.2 ベイズ推定

最尤推定以外にも観測データから初期条件を推定する方法はあり、その一つがベイズ推定である。ベイズの定理によれば  $\{N_{\text{ch}}\}$  に対する  $(\theta, \varphi)$  の確率分布は次で与えられる:

$$P(\theta, \varphi | \{N_{\text{ch}}\}) = \frac{f(\theta, \varphi) \prod_{\text{ch}} p_{\lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi)}(N_{\text{ch}})}{\int_0^{\frac{\pi}{18}} d\theta' \int_0^{2\pi} d\varphi' \sin \theta' f(\theta', \varphi') \prod_{\text{ch}} p_{\lambda_{\text{ch}}(\theta', \varphi')}(N_{\text{ch}})} \quad (7.2.5)$$

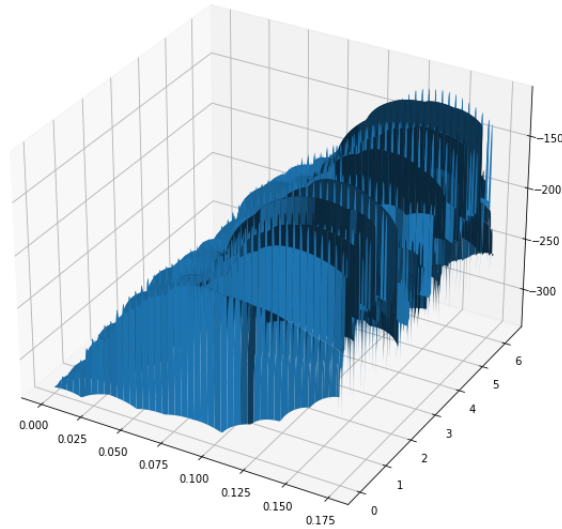


図 70: Poisson 分布のパラメータ  $\lambda_{\text{ch}}$  に 2 次元補間 (scipy の `interpolate.interp2d` を用いた双線形補間) をして初期条件  $(\theta, \varphi) = (6^\circ, 140^\circ)$  のシミュレーションデータの 1 つに対する, 7.2.1 で定義する尤度の  $\log$  を取ったもの. 手前 (左) の軸が  $\theta(\text{rad})$ , 右の軸が  $\varphi(\text{rad})$  である. 補間の結果として極めて特異的な点が多く生じていることがグラフから見て取れる.

ここで  $f(\theta, \varphi)$  は初期条件として  $(\theta, \varphi)$  が選ばれる確率 (つまりミュオンが  $(\theta, \varphi)$  の方向から入射してくる確率) である. 実際は補間が行えていないので分母は適当にグリッド上の和に書き換える:

$$P(\theta_i, \varphi_j | \{N_{\text{ch}}\}) = \frac{f(\theta_i, \varphi_j) \prod_{\text{ch}} p_{\lambda_{\text{ch}}}(\theta_i, \varphi_j)(N_{\text{ch}})}{\sum_{i=0}^{10} \sum_{j=0}^{72} \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\pi}{36} \sin\left(\frac{i\pi}{180}\right) f\left(\frac{i\pi}{180}, \frac{j\pi}{36}\right) \prod_{\text{ch}} p_{\lambda_{\text{ch}}}\left(\frac{i\pi}{180}, \frac{j\pi}{36}\right)(N_{\text{ch}})} \quad (7.2.6)$$

### 7.3 機械学習による推定

装置の中をミュオンが通過する過程において, 実際には Cherenkov 光放射以外にもデルタ線の放出やそれに伴うミュオンの散乱などが起こりうる. このような現象を考えると, MPPC の各 ch で測定される光子数は厳密には Poisson 分布にはならない<sup>\*13</sup>. こうした過程の影響を含めた統計モデルを手で作ることは難しいが, 測定データを機械に学習させれば自動的にそのような影響も含んで推定できるのではないかと考えた<sup>\*14</sup>. 全結合層の数や中間層の数, ハイパーパラメーターなどを変えながら何度も学習させてみたが, 精度自体はあまり上がらなかった (training に用いたデータですら 5% 程度).

<sup>\*13</sup> もっとも, このような放出・散乱過程が起こる確率は小さいのでシミュレーションを多数回行えば統計的には Poisson 分布として上のような扱いが行える. ただ, こうした過程が起こった場合の 1 つのデータから初期条件を推定したときの精度については疑問が残る.

<sup>\*14</sup> 機械学習等で用いた具体的なコードなども <https://github.com/p22022/GEANT4> に置いてある. なお機械学習を行うに当たっては [7] や [8] を主に参考にした.

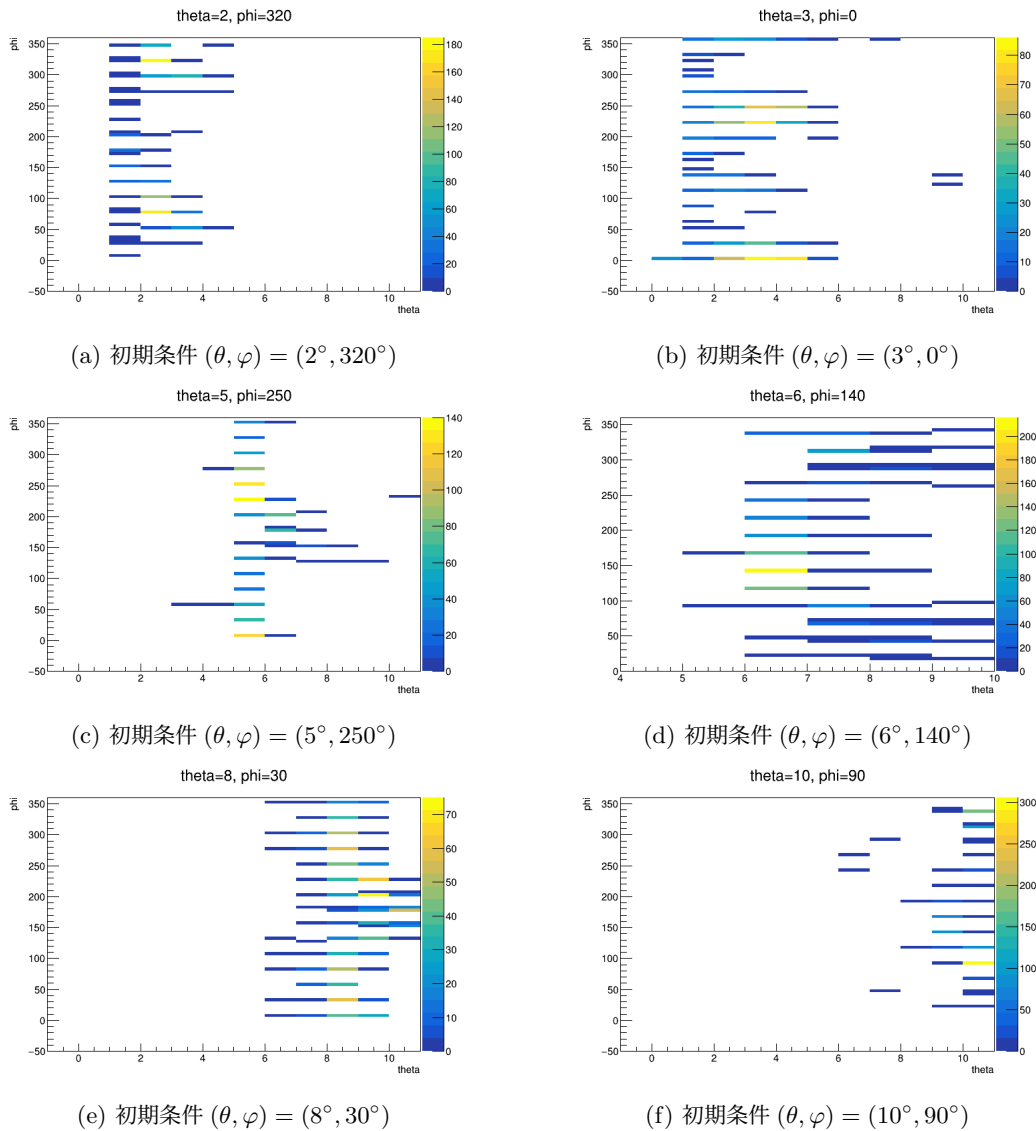


図 71: 様々な初期条件に対する 1000 回のシミュレーションデータをそれぞれ最尤推定して得られた初期条件の推定結果をヒストグラムにしたもの。

## 8 まとめと今後の展望

本研究では、球面鏡を用いると高屈折率の誘電体に対して Cherenkov リングの集光がうまくいかないという問題を解決するために、放物回転体を用いた Cherenkov 検出器を提案し、作製した。また、作成した Cherenkov 検出器を用いて宇宙線ミュオン由来の Cherenkov リングを観測することができた。

標的とする荷電粒子が完全に検出器の中心を通り検出器に垂直に入射したものでないとリングが歪むことが想定されているが、逆にこれを用いて粒子の入射方向を推定できる可能性がある。そこで、GEANT4 を用いたシミュレーションを行い、こちらで設定した入射情報に対して出来上がる Cherenkov リングのデータを集

めた。このデータを元に実際の実験結果から粒子の入射情報の推定を目指したが、その手法の確立には至らなかった。

今後の展望を述べる。まず、Cherenkov リングの情報から入射粒子の情報を推定する完全な手法の確立には至っていないため、こちらの確立を行いたい。具体的なものとしては

- 7.2 節で出来なかった Poisson パラメーターの正しい 2 次元補間方法の確立
- 7.3 節で精度が上がらなかった原因の特定及びより良い学習モデル/パラメーターの吟味

等が考えられる。また、シミュレーションデータに対し以上の解析手法を当てはめることで、それぞれの手法がどの程度精度よく入射情報を推定できているかを評価をすることも必要である。そして、以上の解析手法を用いて今回得られた結果を解析したい。

## 謝辞

課題研究 P2 では以上の結果を出すまでに多くの方々のお世話になりました。理論ゼミでは橋本幸士さん、杉本茂樹さんに面倒を見ていただきました。橋本さんの的確な質問でゼミが盛り上がったことはとても良い経験になったと思います。杉本さんの丁寧な解説でゼミの内容をより深く理解することができました。また実験ゼミ及び後半の P2-RICH-Detector 作成では木河達也さん、隅田土詞さん、中家剛さん、さらに TA の川上将輝さん、對馬拓実さんに実験器具の取り扱いから解析プログラムの作成まで大変助けていただきました。大学院になってからは高エネ研の恩田直人さんに EASIROC モジュールの取り扱いについて多くのことを教えていただきました。高エネ研の皆様には 313 号室の実験スペースを一部貸していただき、また、「P2 は進捗どうや？」という感じで気にかけていただき本当に助けていただきました。高エネ研以外に進学した P2 メンバーとは廊下などですれ違った時に進捗の報告をし、その際にエールをもらい励みになりました(手伝ってくれても良かったんやで)。皆様の助けなくしてはこの研究は成り立たなかったと思います。少し延長してしまいましたがなんとか結果を出せたことは非常に嬉しく思っています。実験を続けて諦めないことの大切さを学ぶことができました。1 年間(と 3 ヶ月)本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] William R.Leo(1994). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*. Springer,Berlin,Heidelberg.
- [2] 岡村 和弥, 高橋 将太 (2008) 「球面鏡チェレンコフ光検出器の開発と評価」京都大学理学部卒業論文. [https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-08/graduateThesis\\_final.pdf](https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-08/graduateThesis_final.pdf)
- [3] 太田 寛明, 中脇 稔貴 (2017) 「チェレンコフ検出器の作成とこれを用いた粒子線の測定」京都大学理学部卒業論文. <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P1/P1-16/FY16cherenkovReport.pdf>
- [4] 五味慎一 (2008) 「半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築」京都大学大学院理学研究科修士論文.
- [5] 永井直樹 (2009) 「T2K 実験において用いられる半導体光検出器 MPPC の大量測定」京都大学大学院理学研究科修士論文.
- [6] 木河達也 (2011) 「T2K 実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作とこれを用いたニュートリノ反応の研究

究」京都大学大学院理学研究科修士論文.

- [7] 新納 浩幸, 『PyTorch による物体検出』, オーム社 (2020)
- [8] PyTorch で CNN を徹底解説 <https://qiita.com/mathlive/items/8e1f9a8467fff8dfd03c>
- [9] 石島直樹, 仲居勇樹 (2014) 「EASIROC MODULE User Guide」
- [10] 本多良太郎 (2013) 「EASIROC テストボード仕様書」東北大学
- [11] 浜松ホトニクス 技術資料/MPPC [https://www.hamamatsu.com/documents/ssd/mppc\\_kapd9008j](https://www.hamamatsu.com/documents/ssd/mppc_kapd9008j)
- [12] 浜松ホトニクス MPPC データシート [https://www.hamamatsu.com/optical-sensors/mppc/mppc\\_array/s13361-3050\\_series\\_kapd1054e](https://www.hamamatsu.com/optical-sensors/mppc/mppc_array/s13361-3050_series_kapd1054e)