

2022年度課題研究P2 中間発表

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

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

目次

1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間がないのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

目次

1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間が無いのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

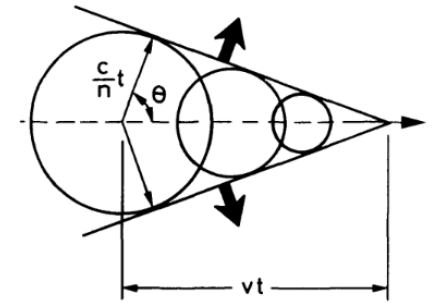
1. Introduction

1.1 Cherenkov光

1.2 Cherenkov検出器

1.1 Cherenkov光

- Cherenkov光：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



- Cherenkov光が出る条件： $v_{\text{particle}} > \frac{c}{n}$
- あるエネルギー以上でCherenkov光が出る
- 粒子の進行方向に対して頂角 θ_C ($\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n}$)を持つ円錐状に光が放出

- 単位長さ・波長あたりの放出光子数： $\frac{d^2 N}{d\lambda dx} = \frac{2\pi z^2 \alpha}{\lambda^2} \sin^2 \theta_C$

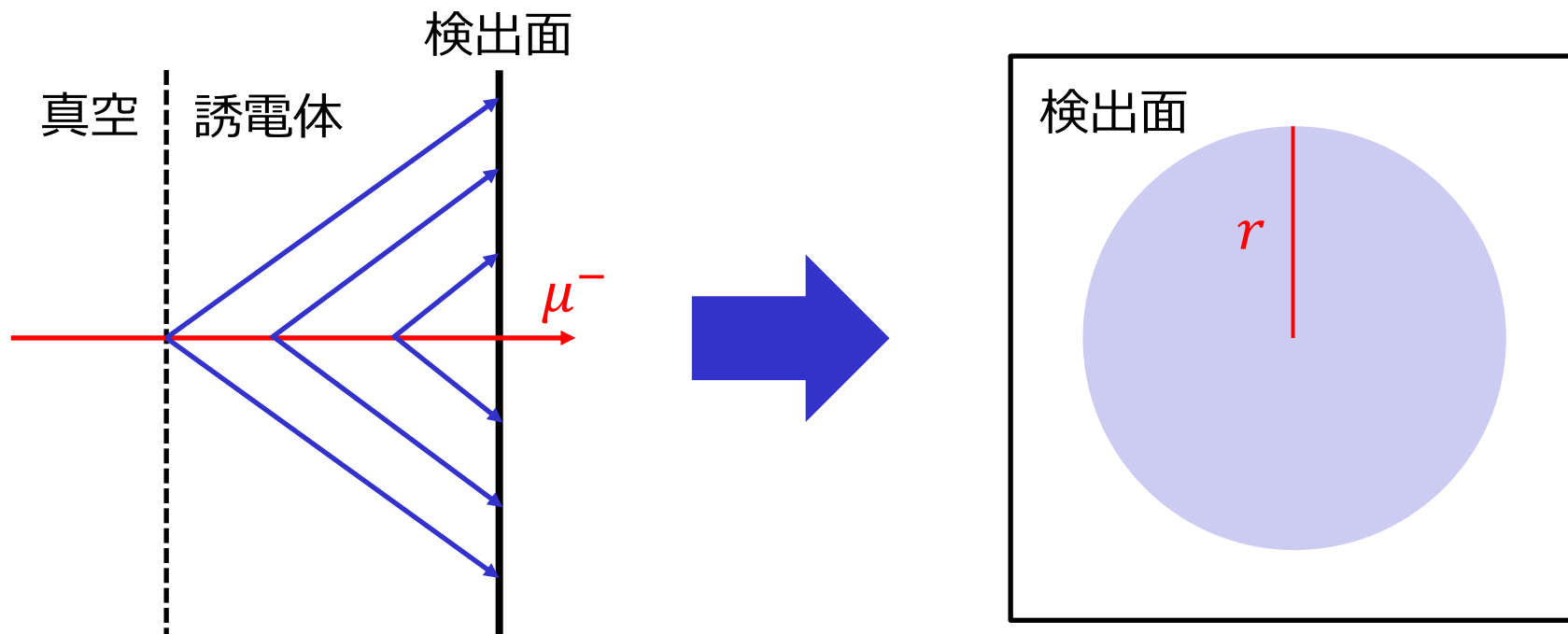


- 粒子のエネルギー閾値を用いて粒子判別に使える
- 粒子の速度(大きさ+方向)が分かる

1.2 Cherenkov検出器(1)

直接検出型

検出面にできる円形の像の半径 r から荷電粒子の速度 β がわかる



問題点：光量が少ないと円が見えず、半径の推定が困難

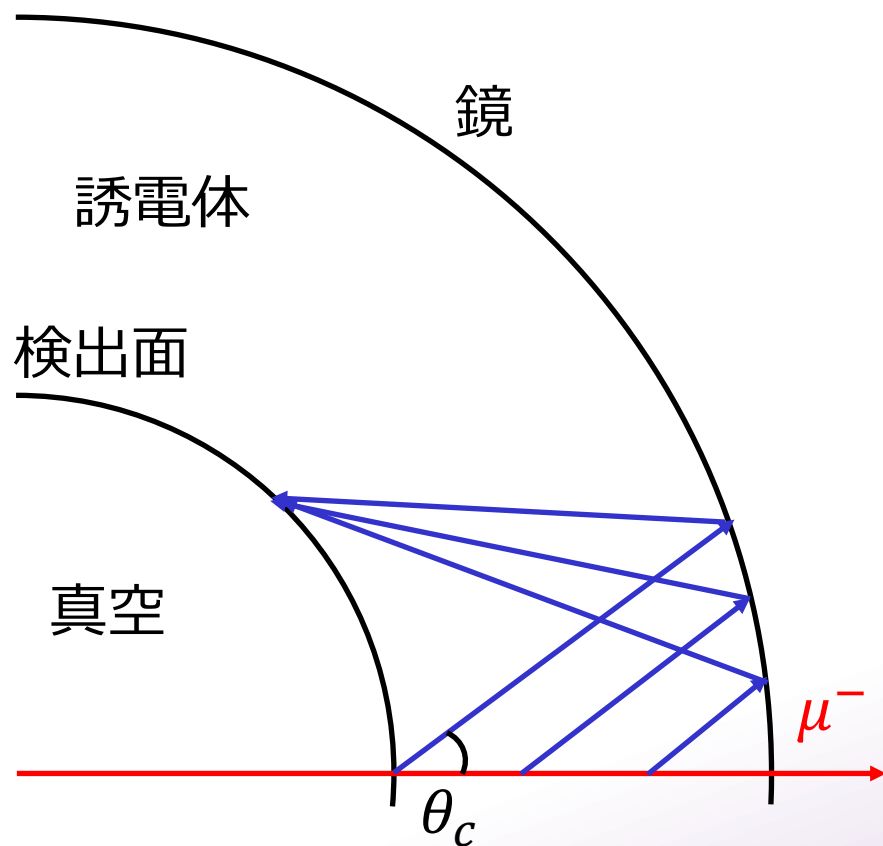
1.2 Cherenkov検出器(2)

間接検出型 (球面鏡を用いたもの)

荷電粒子の飛跡上から出てきた Cherenkov光を、半径 R の球面鏡で反射させ、半径 $R/2$ の球状検出面に集める

(ただし、 $\theta_c \ll 1$ のときのみ)

右図のように平面で切って見ると、ある点に集まって見える

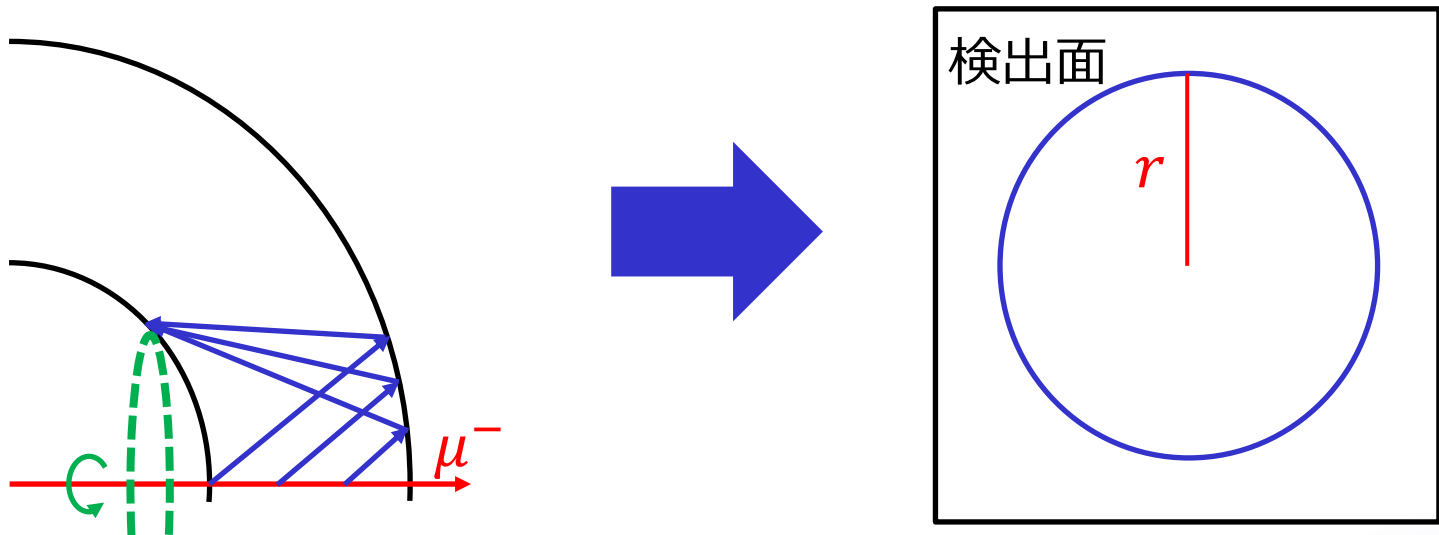


1.2 Cherenkov検出器(3)

間接検出型 (球面鏡を用いたもの)

- ・ 検出器、Cherenkov光はビーム方向まわりの回転について対称なので出来上がる像は円環になる

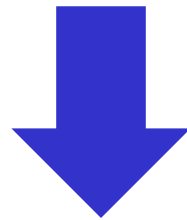
光子が円環に集まるので、少ない光子でも半径がわかる



問題点： $\theta_c \ll 1$ でないともそもそも光が集まらない

1.2 Cherenkov検出器(4)

$\theta_c \ll 1$ でなくとも光が集まる
Cherenkov検出器を作製



P2-RICH-Detector

目次

1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間が無いのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

2 実験原理

2.1 従来型(球面鏡)の原理

2.2 P2-RICH-Detector の原理

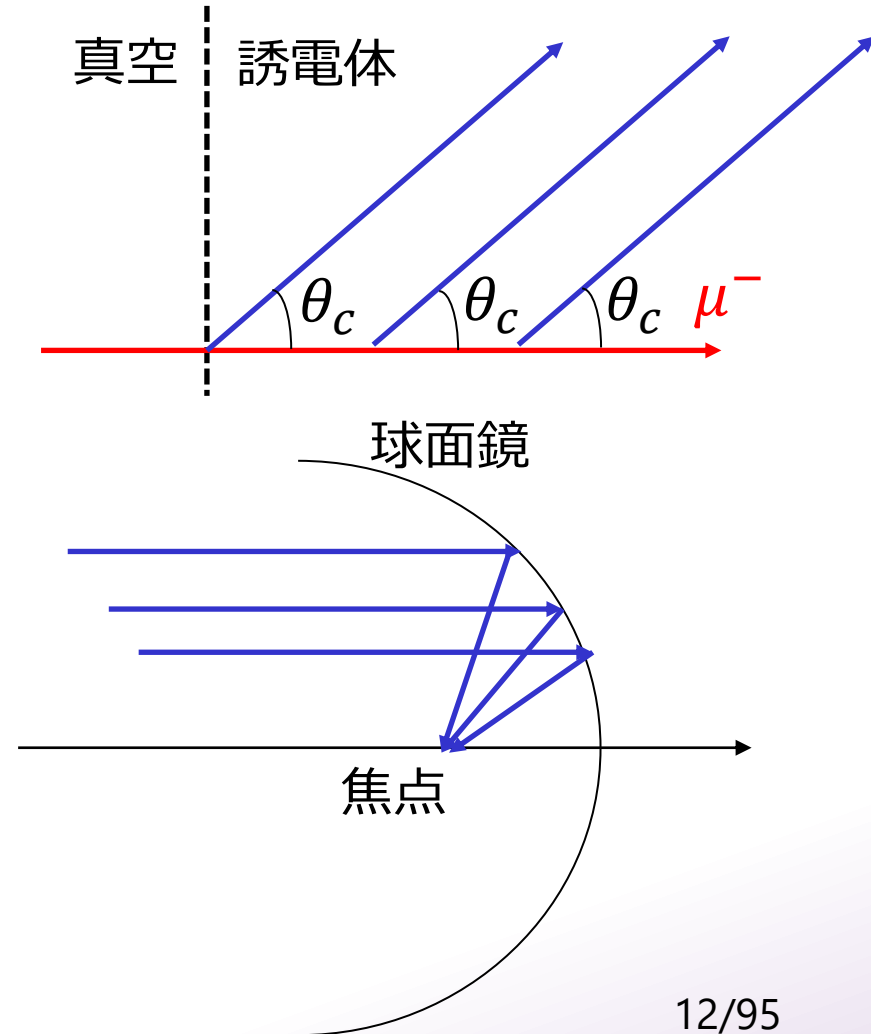
2.3 P2-RICH-Detector の特徴

2.1 従来型(球面鏡)の原理(1)

- ・ 性質 1

Cherenkov光は放射角が一定

➡ 平行光線が出る

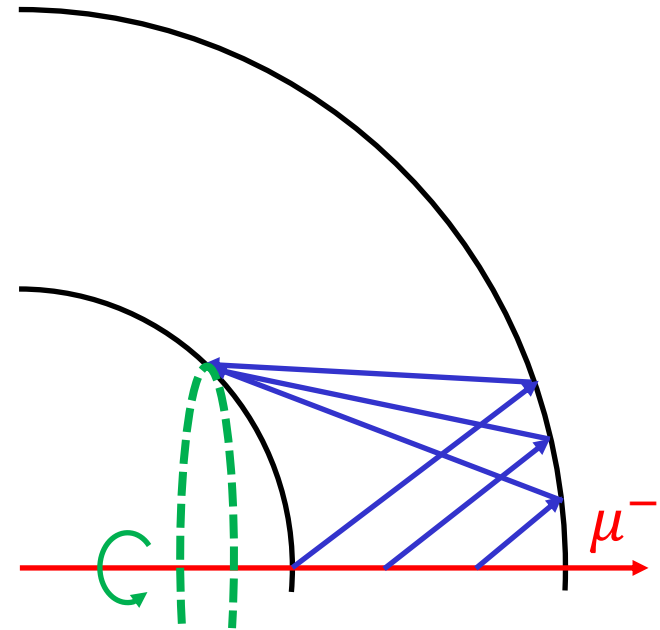


- ・ 性質 2

球面鏡は平行光線を反射して焦点 ($R/2$) に集める

2.1 従来型(球面鏡)の原理(2)

二つの性質をまとめると、
Cherenkov光が**焦点**に集まり
リングを形成する



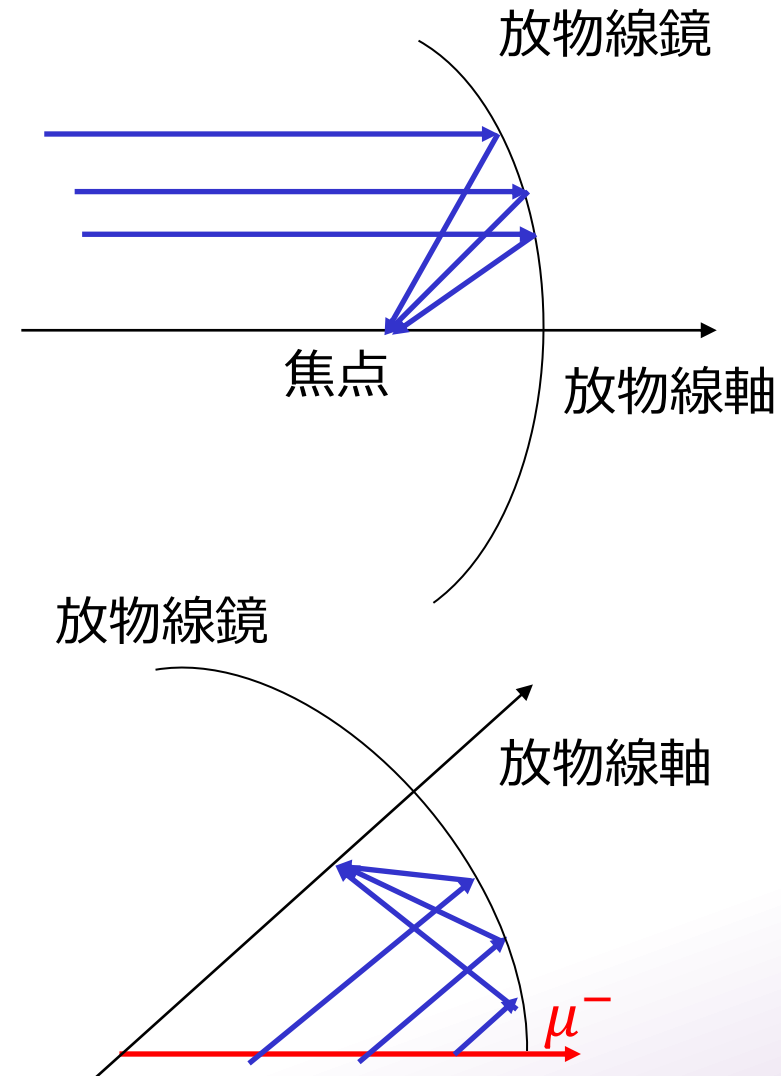
しかし、球面鏡の焦点は近似的なものであり、
近軸近似でしか成り立たない。 ($\theta_c \ll 1$)

2.2 P2-RICH-Detector の原理(1)

放物線鏡であれば平行光線は厳密に焦点に集まる

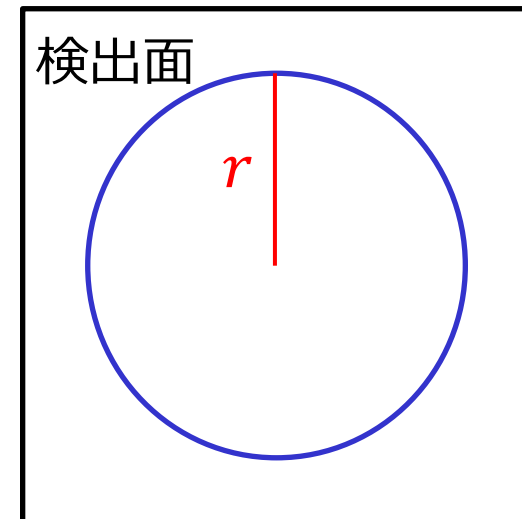
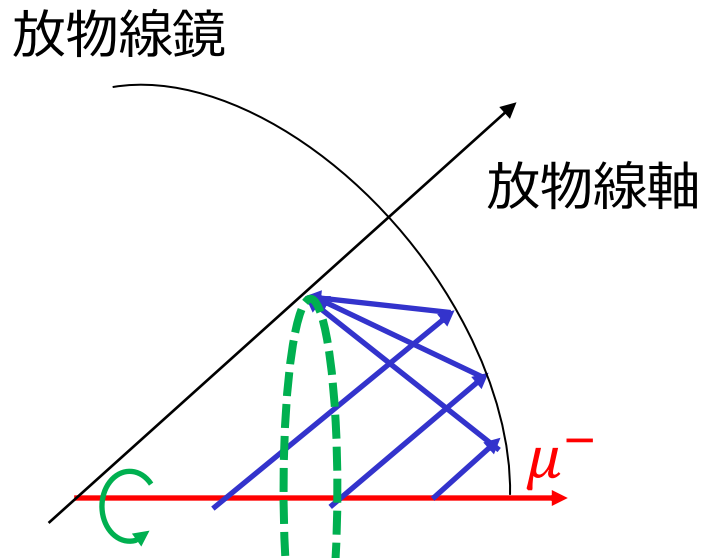


放物線鏡をCherenkov光の出す方向に沿って傾けると



2.2 P2-RICH-Detector の原理(2)

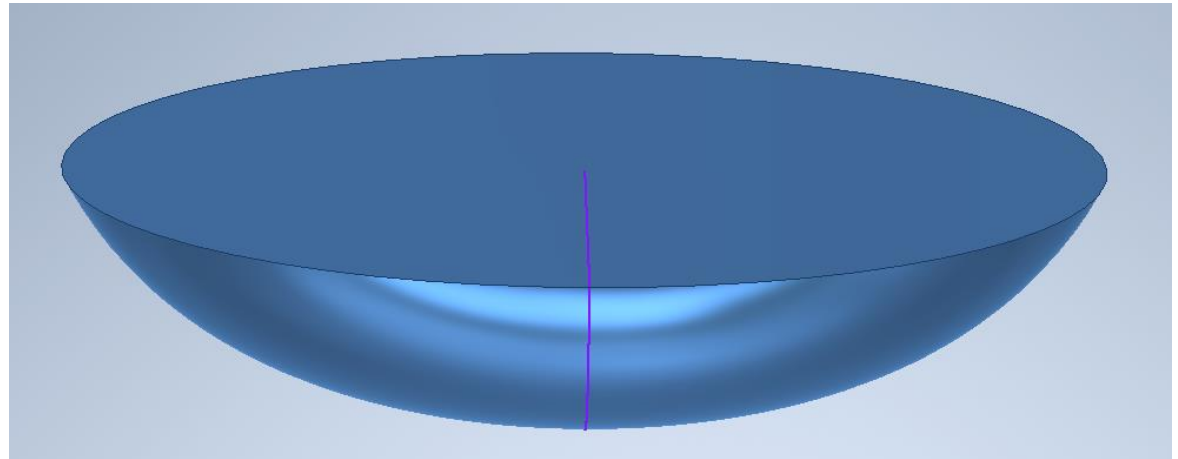
Cherenkov光は円錐状にでるのでビーム軸まわりに回転させるとリングができる



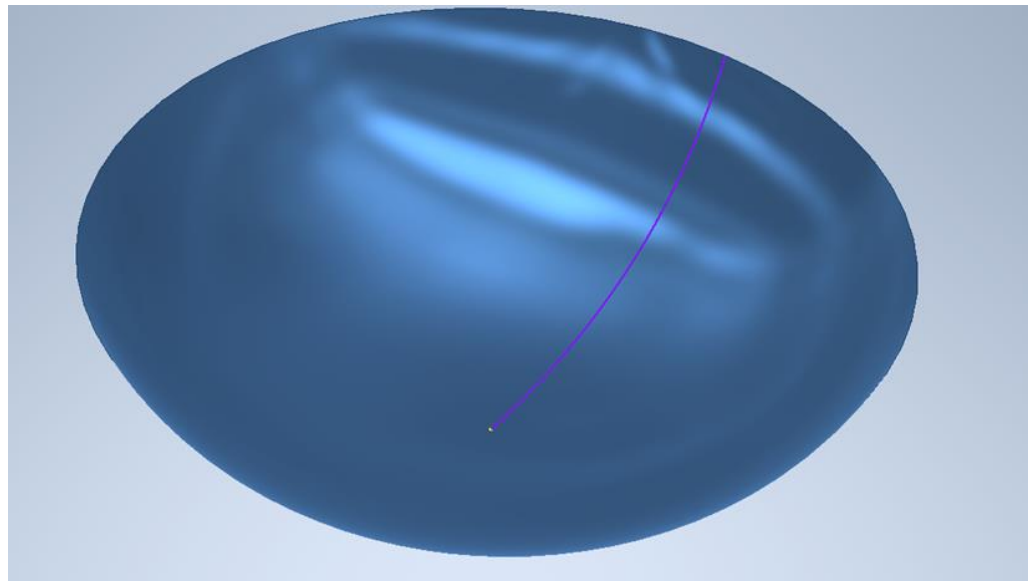
2.3 P2-RICH-Detectorの特徴(1)

放物回転体の完成図

斜め上からの図



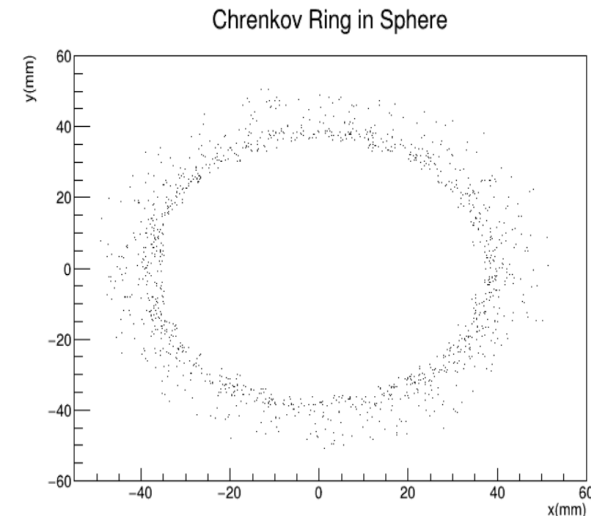
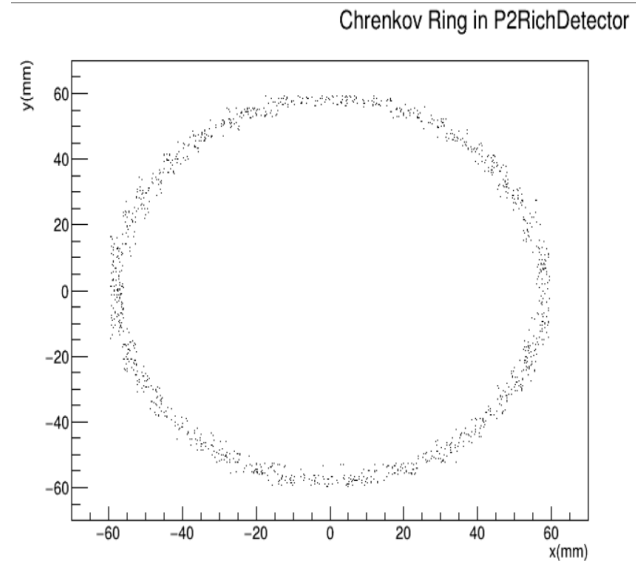
斜め下からの図



2.3 P2-RICH-Detectorの特徴(2)

特徴その1

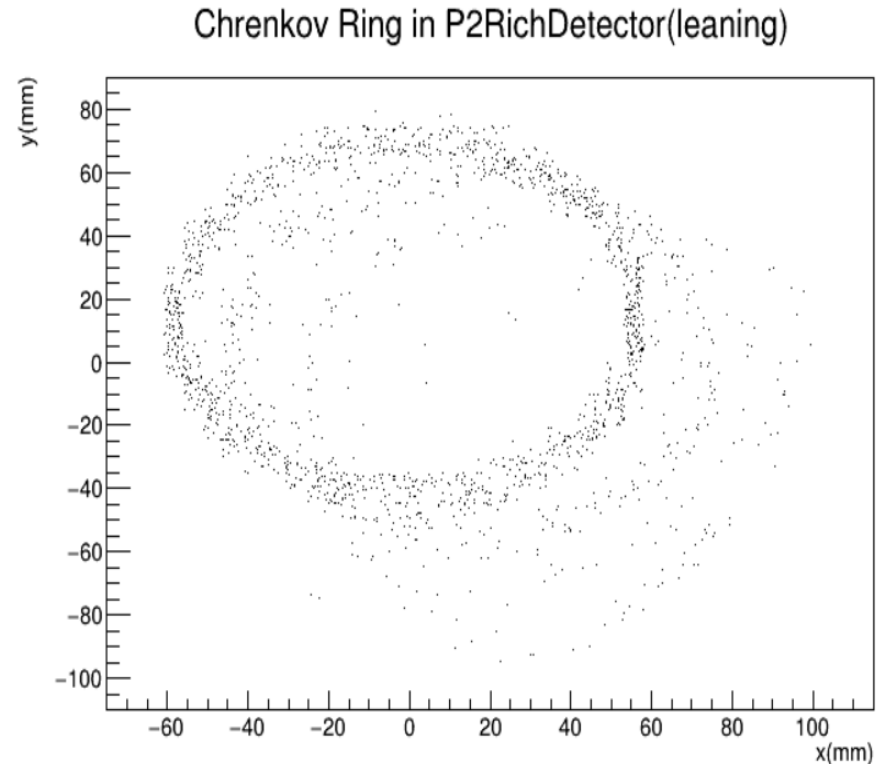
- 球面に比べてCherenkov ringが見えやすい
- 上はP2-Rich-Detectorが検出面に作るCherenkov ring
- 下は球面のもの



2.3 P2-RICH-Detectorの特徴(3)

特徴その2

- 入射角と入射位置をずらすとCherenkov ringがずれてくる。
- 右は中心から5mmずれた位置に入射角10度で入射したもの



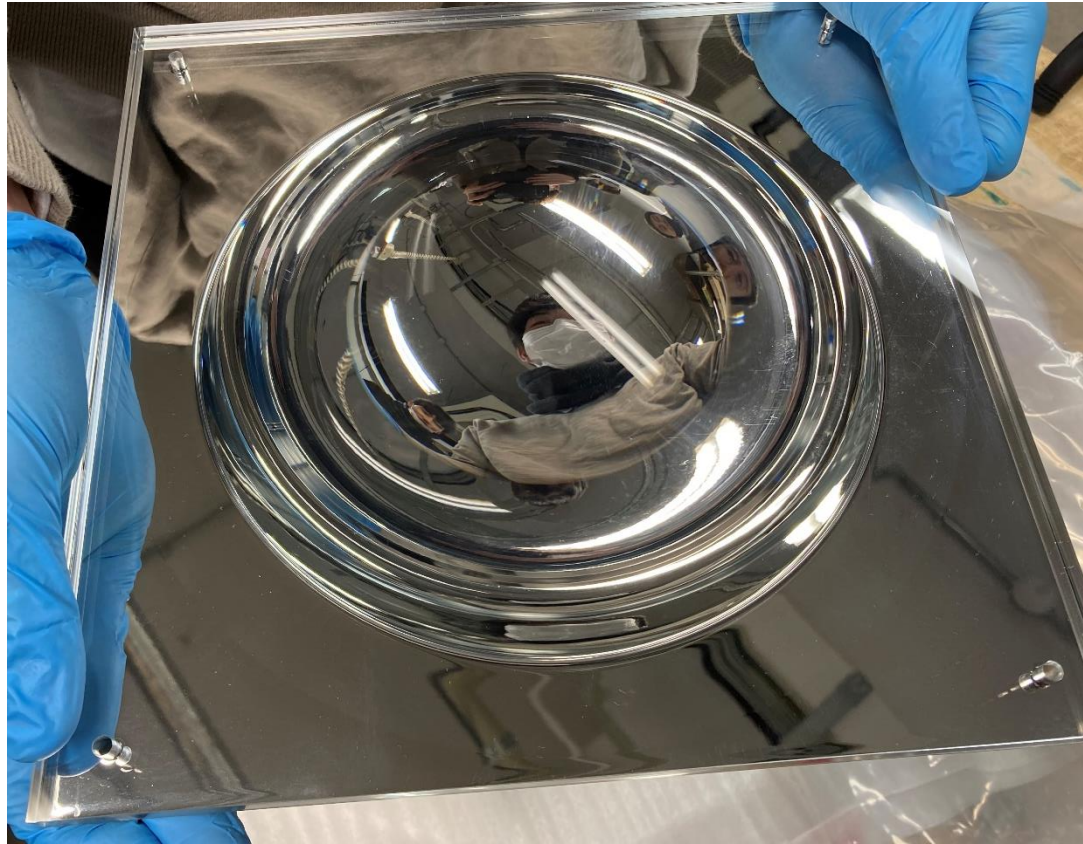
2.3 P2-RICH-Detectorの特徴(4)

特徴まとめ

- 放物回転体にすることで焦点の位置をより収束させることができる。
- Cherenkov ringは入射位置と入射角により異なるのでCherenkov ringを検出することで入射位置と入射角度を読みみたい。

(詳細は後述)

2.3 P2-RICH-Detectorの特徴(5)



目次

1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間が無いのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

4. 実験装置

4.1 MPPC

4.2 EASIROC

4.3 MPPCのCalibration

4.1 MPPC(1)

Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)とは

Pixeled Photon Detector(PPD)と呼ばれる半導体光検出器の一種。ピクセル化されたAvalanche Photo Diode(APD)が受光面に多数並んだ構造になっている。以下の特徴を持つ。

- 低電圧(約70V)で動作
- 高い増倍率($10^5 \sim 10^6$ 程度)
- 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 MPPC(2)

MPPC(1ch)



MPPC(64ch)



4.1 MPPC(3)

Avalanche Photo Diode(APD)とは

ダイオードに逆電圧を掛けることで、半導体内に大きな電場が生じる。



電子雪崩が起き、シグナルの強さが指数関数的に増大（アバランシェ増倍）



アバランシェ増倍を用いたフォトダイオード

4.1 MPPC(4)

APDの動作モードは2種類



- ノーマルモード
- ガイガーモード

MPPCでは**ガイガーモード**でAPDを動作させる

ガイガーモードの特徴

- ブレークダウン電圧以上のバイアス電圧で動作
- 増幅率 $\sim 10^6$
- 入射光子数によらず、電圧値に依存した電荷出力

4.2 EASIROC(1)

- MPPCアレイは $8 \times 8 = 64$ chあり、二つ使用すると合計128chになる
- 128chの読み出しをどうするか？(多チャンネルの読み出し回路を一から作るのは結構大変)



一台で64chを読み出すことができる
EASIROCモジュールを使おう!

4.2 EASIROC(2)

EASIROCとは？

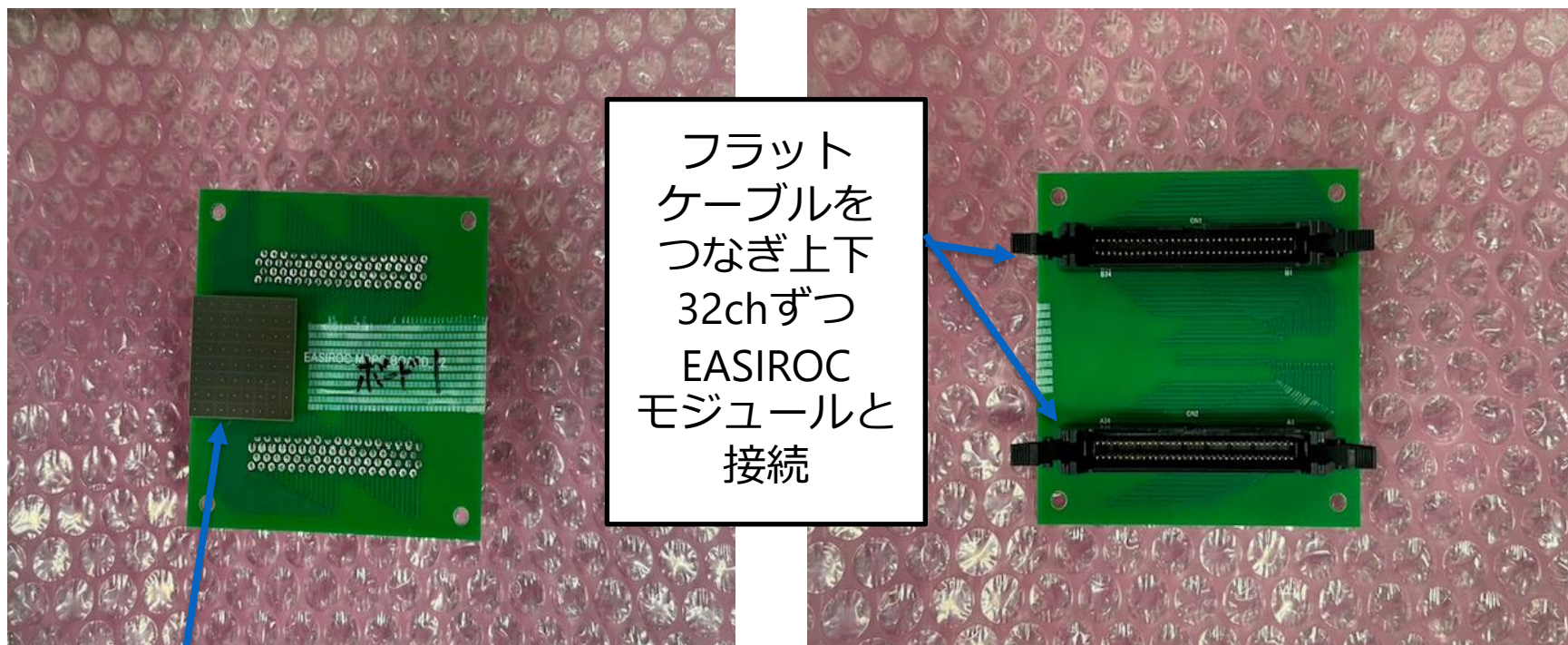
- **EASIROC**(Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip)はMPPC読み出し用のchipであり、**一枚で32ch**を読み出すことができる
- 各チャンネルが増幅率可変なアンプ、波形整形増幅器、discriminatorを有している
- 0~4.5Vの範囲で各MPPCにかけるbias電圧を個別に調整できるInput DAC機能を所持

4.2 EASIROC(3)

EASIROC-MPPCアレイ変換基板

表面

裏面



フラット
ケーブルを
つなぎ上下
32chずつ
EASIROC
モジュールと
接続

MPPCアレイ

4.2 EASIROC(4)

基本的な使い方

外部トリガーでのデータ取得

- 今回の本実験では外部トリガーで用いる
- トリガー信号をモジュールのhold端子につなぐ
- EASIROCの電荷測定法は波高測定型である(信号波形のピークの高さと検出光子数は線形の関係にある)



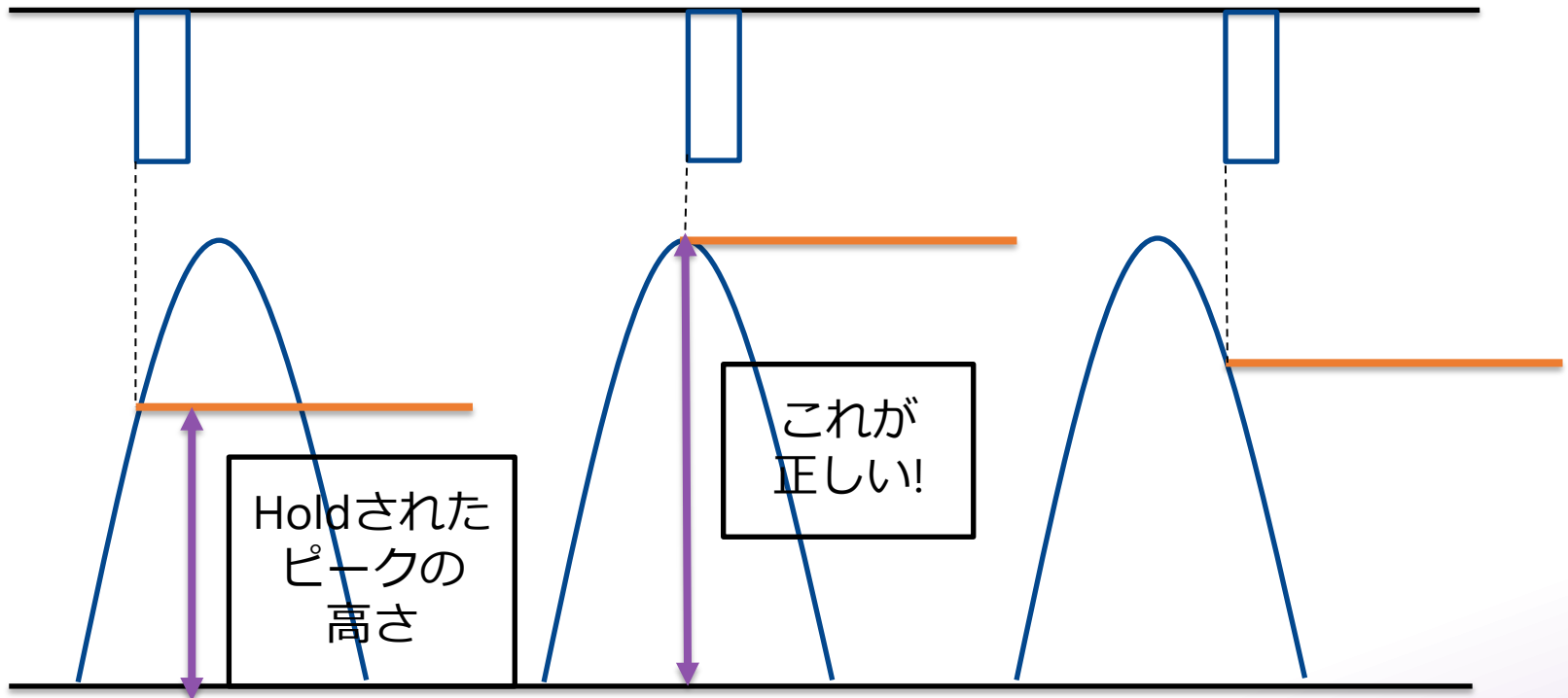
ピークの高さを保持するhold機能が重要!

4.2 EASIROC(5)

Peak hold

入力するトリガー信号のタイミングをdelayさせる
などして調整し、ピークの高さを保持させる

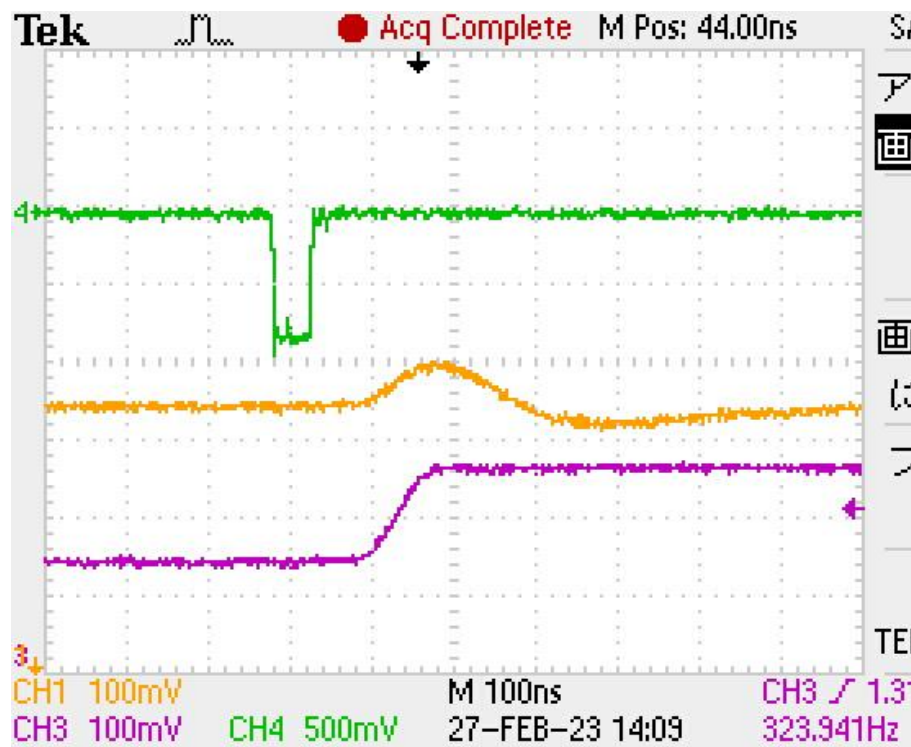
In hold



HG output

4.2 EASIROC(6)

実際にピークがholdされている様子



緑:トリガー信号(実際はこれにdelayをかけてholdに接続してある)

オレンジ:slow shaper後の波形

紫:peak hold後のHG output

4.3 MPPCのCalibration

MPPCのADC Valueと光電子数の対応付けを行う

fitting関数:

$$\underline{y} = a(V) \cdot \underline{x} + b(V)$$

ADC Value 光電子数

$$a(V) = c \cdot V + d$$

$$b(V) = e \cdot V + f$$

LEDを用いた数p.e.の信号を用意
様々なバイアス電圧Vで測定、fitting

本番では

ADC Valueから入ってきた光電子数を算出

目次

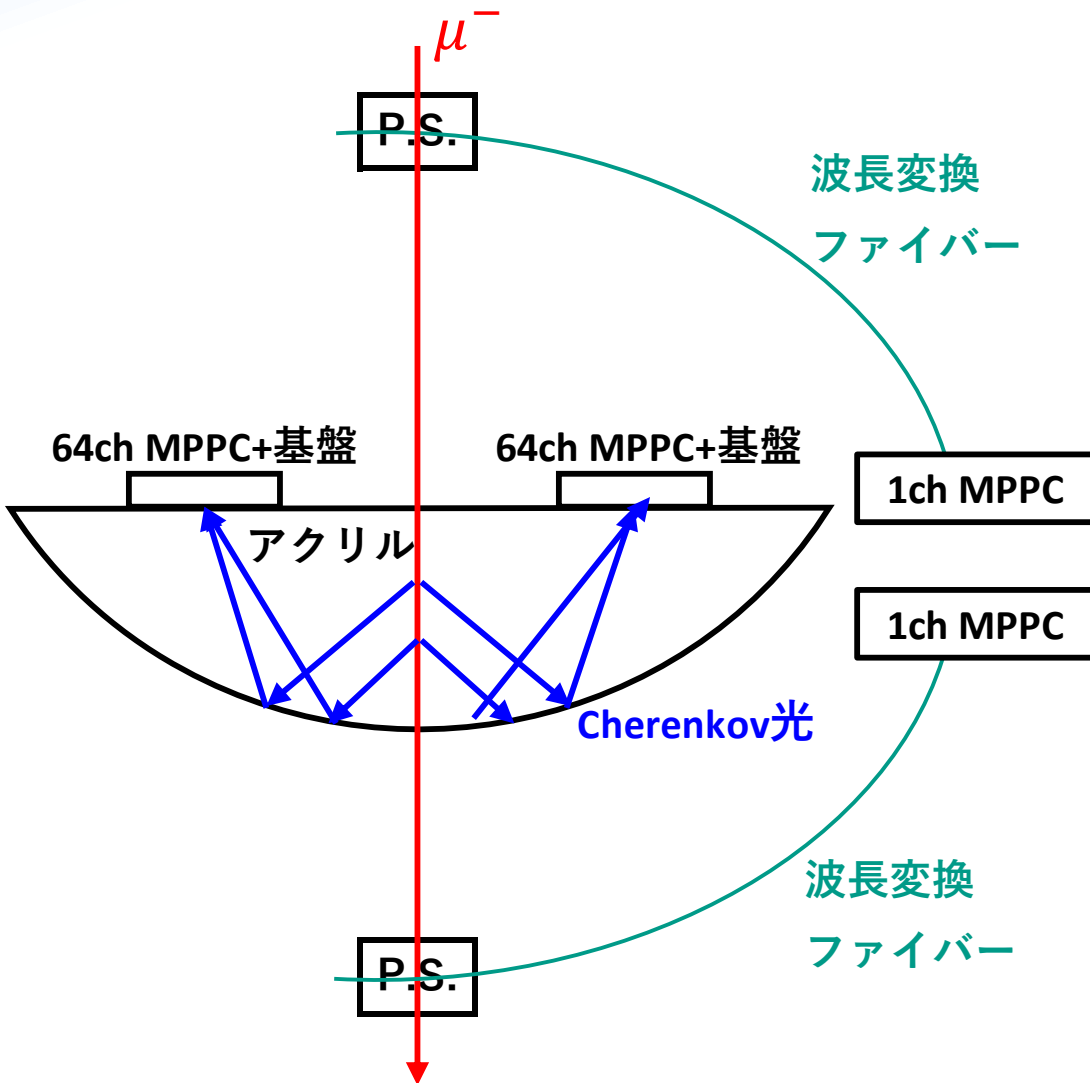
1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間が無いのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

5. 実験方法

5.1 セットアップ

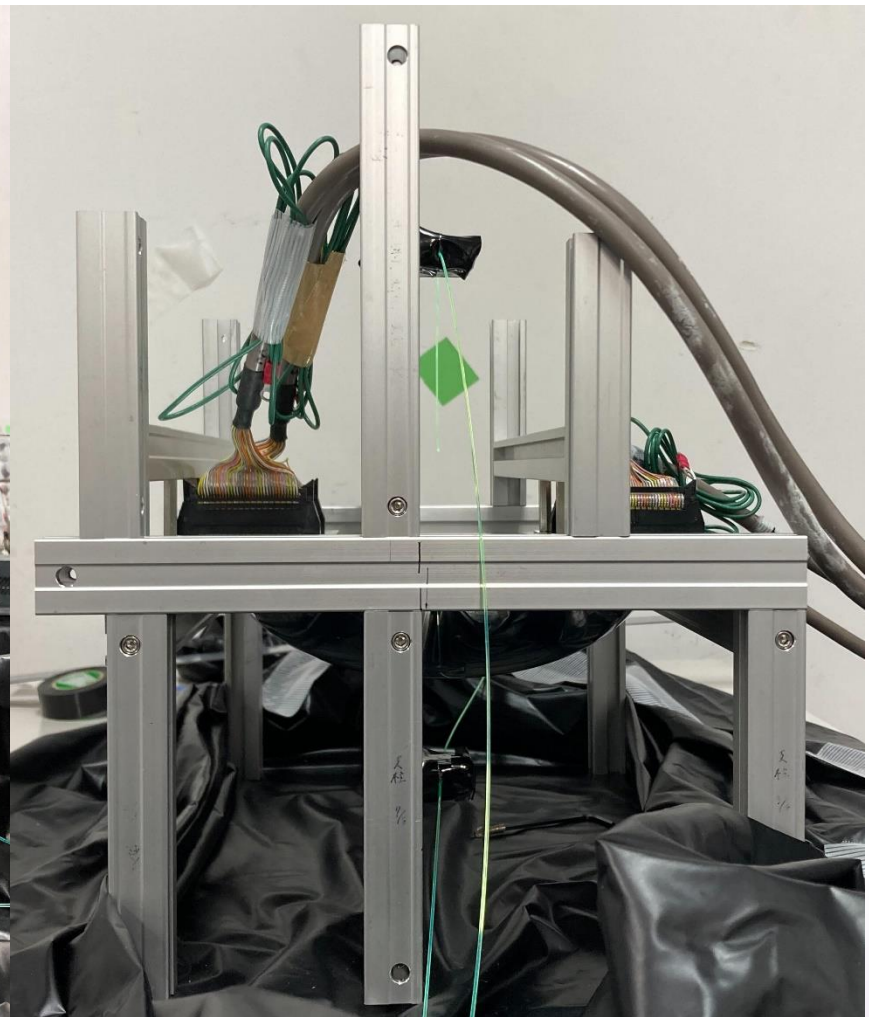
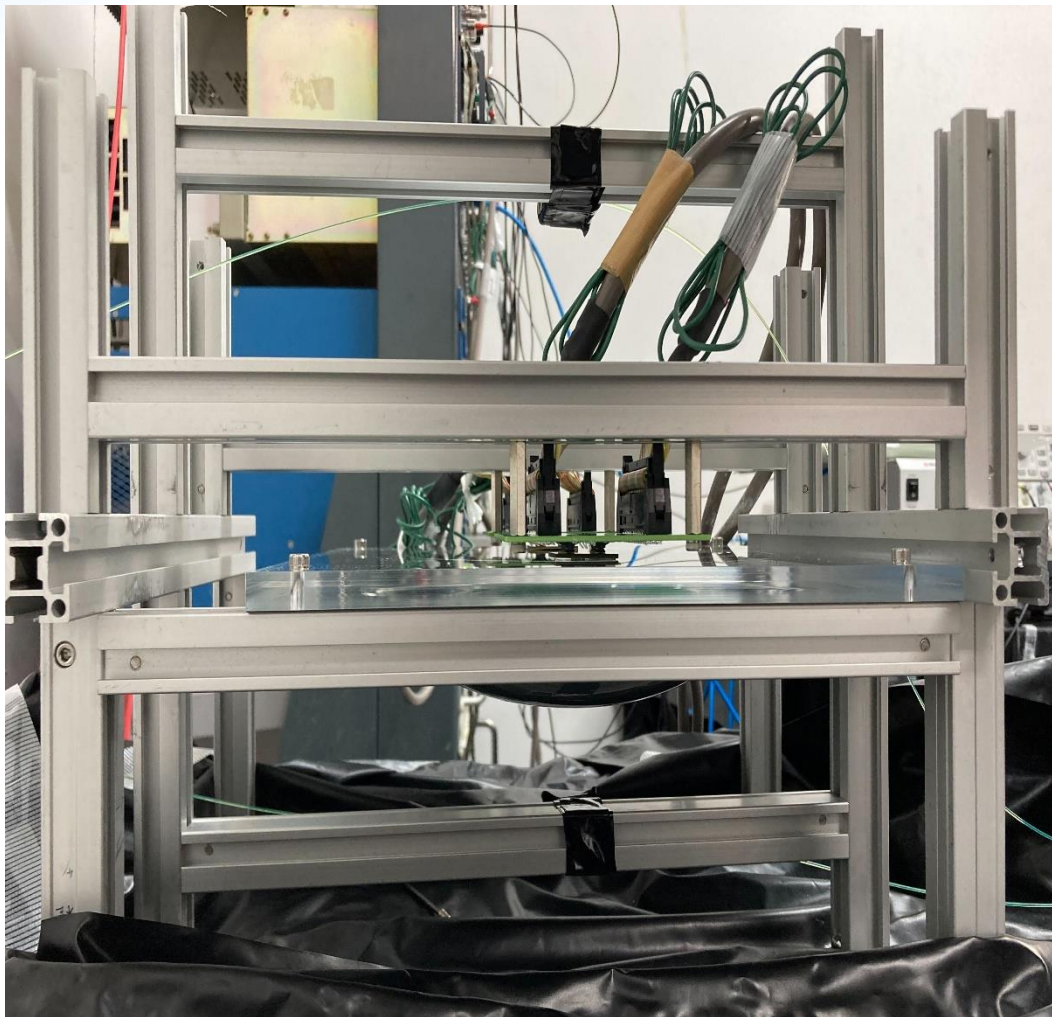
5.2 回路図

5.1 セットアップ(1)

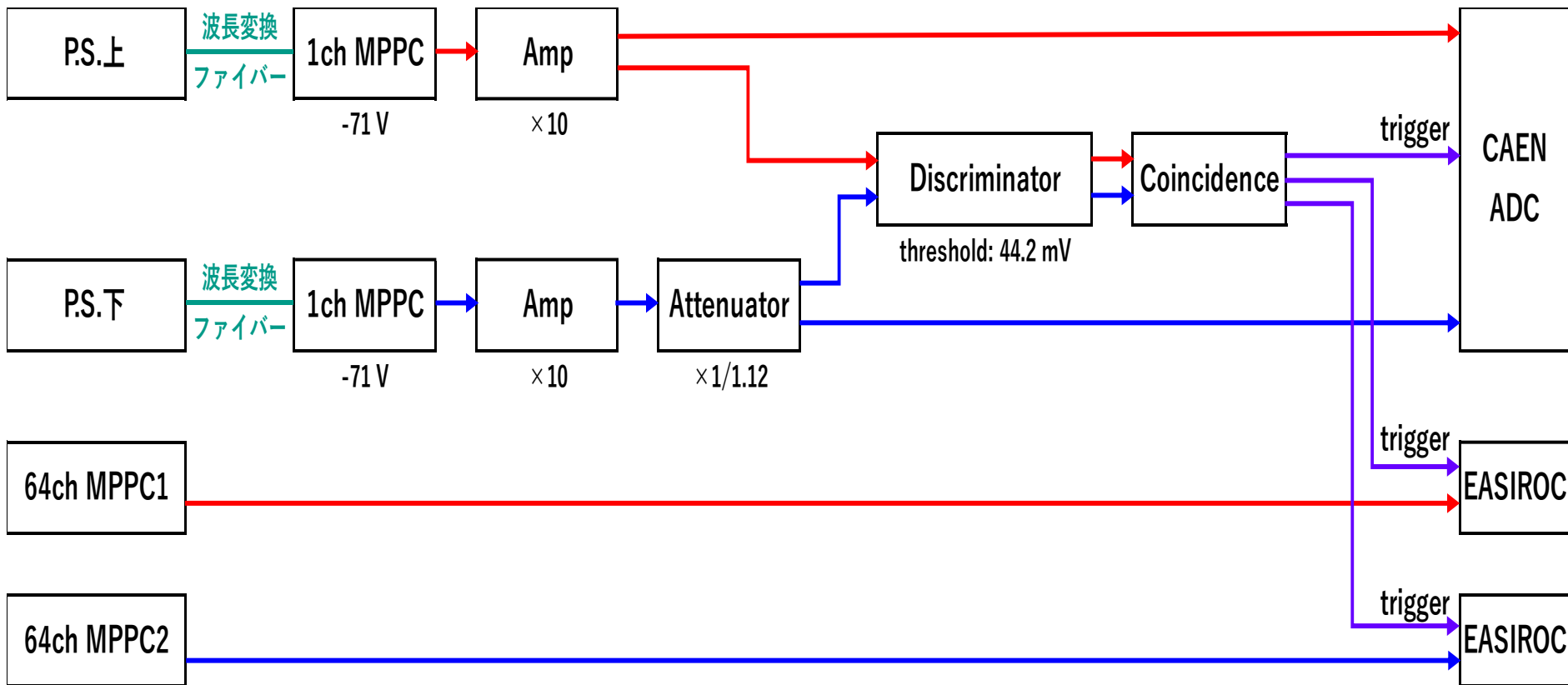


- 装置はレコフレームで固定
- ファイバーと1ch MPPCの間はGOMI Connector
- P.S.の周りにアルミ+黒テープ
- 実験装置全体を暗幕で遮光

5.1 セットアップ(2)



5.2 回路図



目次

1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間がないのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

6. 解析

6.1 解析イントロ

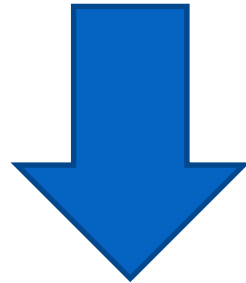
6.2 解析① 円fittingによる最尤推定

6.3 解析② Poisson分布による最尤推定

6.1 解析イントロ(1)

解析でやりたいこと

観測データ(各MPPC chに入った光子数)



ミューオンの入射情報(入射位置、方向、エネルギー)

6.1 解析イントロ(2)

解析方法(簡易版)

1. 光子分布の円っぽさ→ミューオンの入射方向... ?
2. 各chに入る光子数の分布→ミューオンの入射方向... ?
3. 機械学習による特徴量の抽出・確率分布の推定(未定)

6.1 解析イントロ(3)

観測データからミュオンの入射情報を推測するためには

([入力 $\beta, X, Y, \theta, \varphi$], [観測データ $\{N_{ch}\}$])

の組に関する多くのデータが必要

➡ GEANT4を用いたシミュレーション

シミュレーションでは
観測量にまで粗視化可能

シミュレーションでの再現

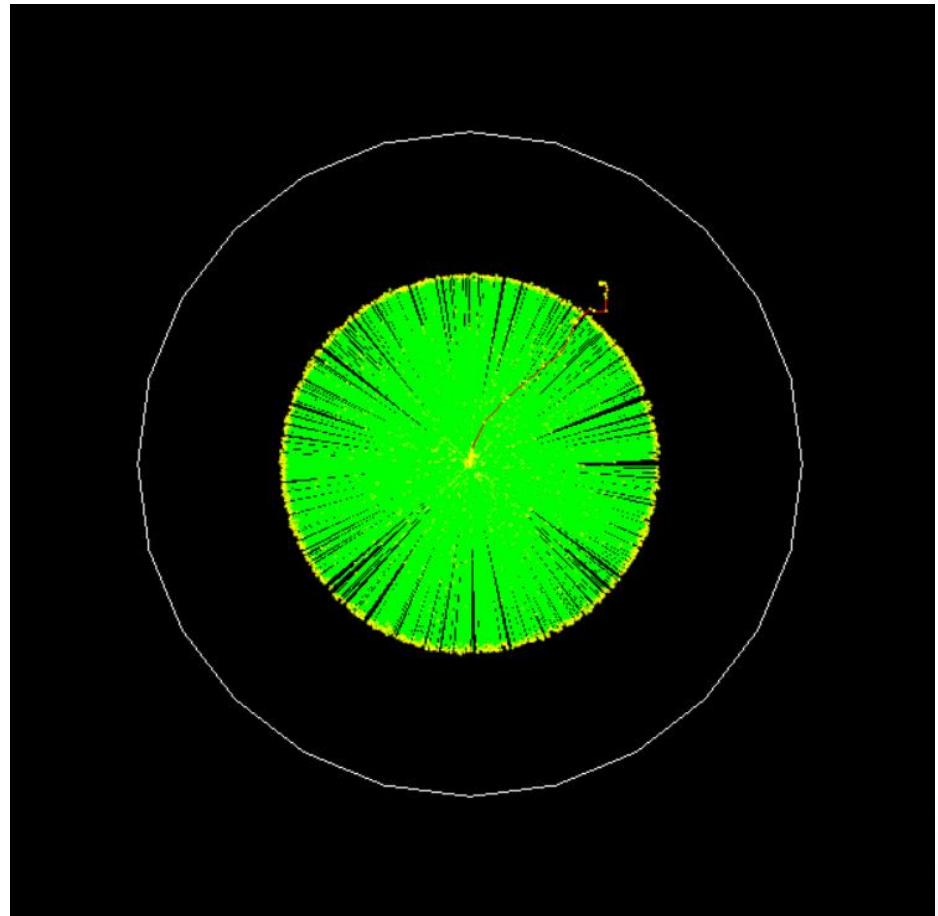
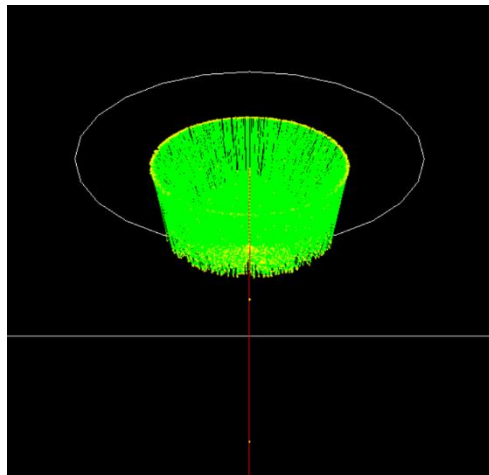
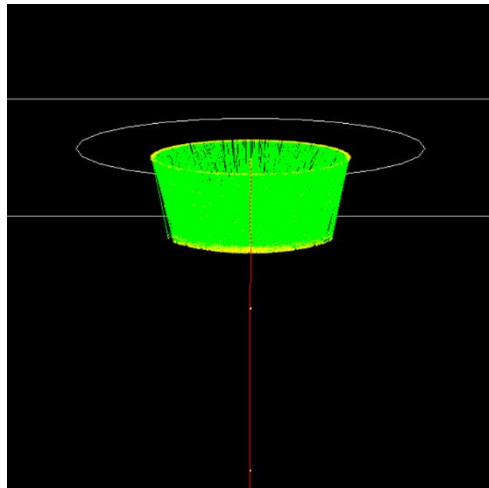
入力 [$\beta, X, Y, \theta, \varphi$]



出力 [$\{\lambda_i\}, \{(x_i, y_i)\}$]

6.1 解析イントロ(4)

GEANT4でのシミュレーション結果の例:



6.1 解析イントロ(5)

解析方法

考えられる解析方法を以下に挙げる:

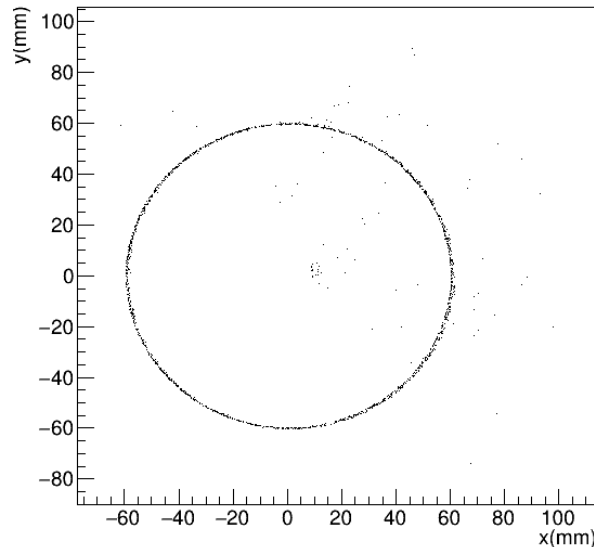
1. fittingによる特徴量の抽出・確率分布の推定、およびそれを用いた入力の最尤推定
2. 各chに入る光子数のPoisson分布パラメータの入力依存性の推定、およびそれを用いた入力の最尤推定
3. 機械学習による特徴量の抽出・確率分布の推定(未定)

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(1)

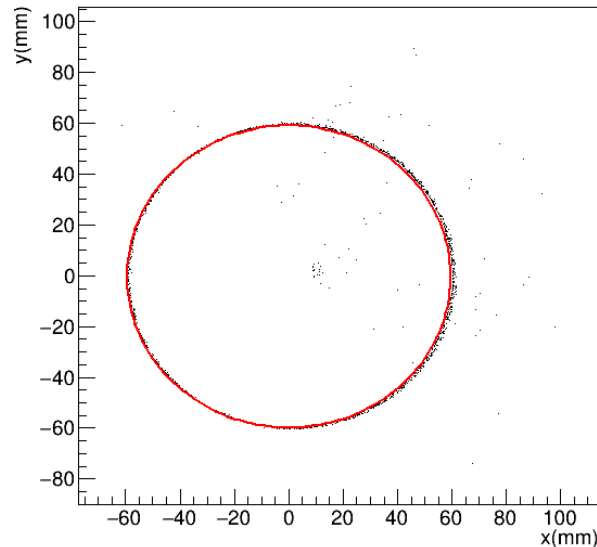
下のシミュレーションの結果に対して円でfittingを行う、つまり次の量を最小化する (x_c, y_c, r_c) の組を求める:

$$\sum_i [\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - r_c]$$

Photon



Photon



6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(2)

一般に

入力 [$\{a_i\}$] \longrightarrow 出力 [$\{b_i\}$]

という関係に対して、

$p(\{b_i\}|\{a_i\})$: 入力が $\{a_i\}$ の時に出力が $\{b_i\}$ の確率

$f(\{a_i\})$: 入力が $\{a_i\}$ の確率

とすると、出力が $\{b_i\}$ の時に入力が $\{a_i\}$ の確率 $P(\{a_i\}|\{b_i\})$ は

$$P(\{a_i\}|\{b_i\}) = \frac{f(a_i)p(\{b_i\}|\{a_i\})}{\int d\{a'_i\} f(a'_i)p(\{b_i\}|\{a'_i\})}$$

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(3)

出力から入力を求めるために p をシミュレーションで求める必要があるが、5自由度の確率密度関数を与えるのは難しい

しかしシミュレーションを見ていくと β や X, Y に対する分解能が小さいと考えられる

また出力として (x_c, y_c, r_c) の代わりに $(\delta_c, \varphi_c, r_c)$ を用いる

$$(\delta_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}, \varphi_c = \tan^{-1} \frac{y_c}{x_c})$$

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(4)

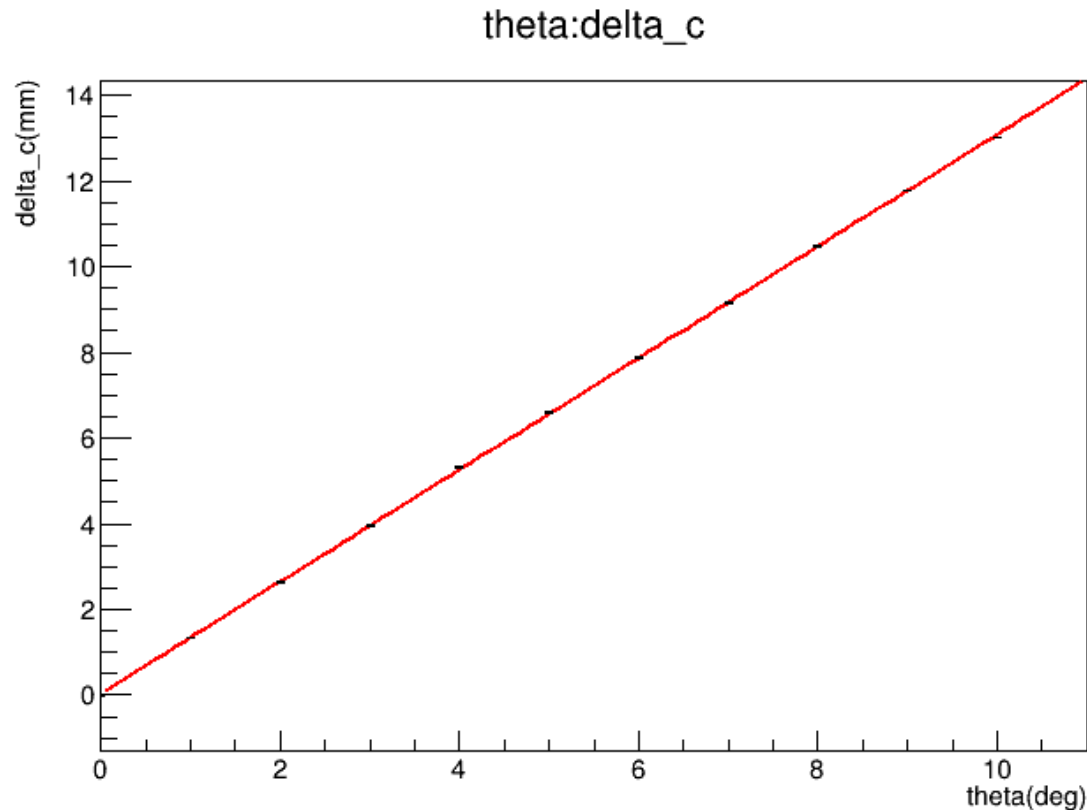
以下のような仮定を置いて p を求める:

1. 出力は β に依らない(シミュレーションで β を固定)
2. 出力は (X, Y) に依らない($X=Y=0$ としてシミュレーションを行う)
3. 上の仮定1, 2から入力変数は2つなので出力変数として (δ_c, φ_c) だけを考え、確率分布は独立である:

$$p(\delta_c, \varphi_c | \theta, \varphi) = p(\delta_c | \theta, \varphi) p(\varphi_c | \theta, \varphi)$$

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(5)

θ だけを変化させたときの θ と δ_c の関係($\varphi = 0$):



6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(6)

シミュレーションの結果から

$$p(\delta_c | \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(\theta, \varphi)}} \exp \left[-\frac{(\delta_c - m(\theta, \varphi))^2}{2\sigma^2(\theta, \varphi)} \right]$$

ただし

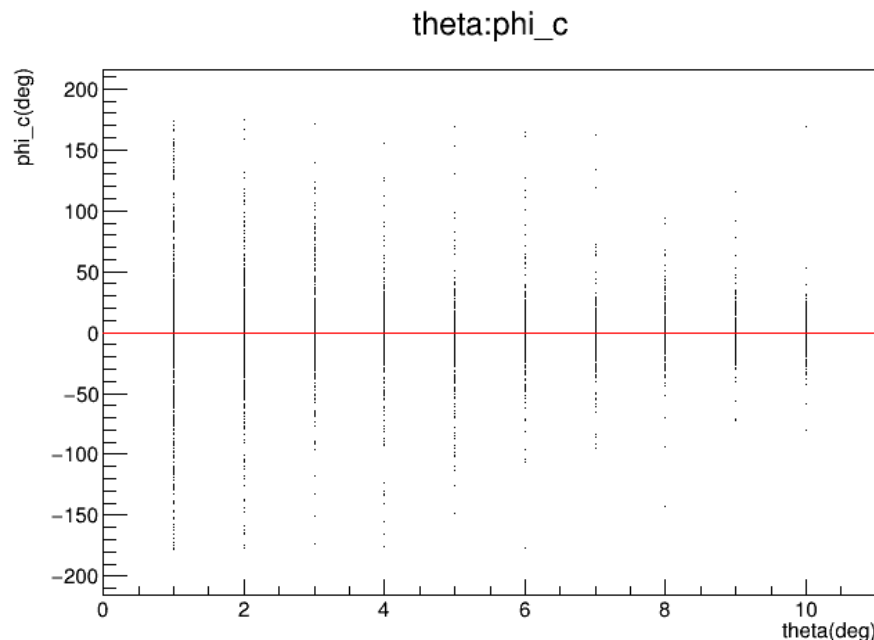
$$\begin{aligned} m(\theta, \varphi) &= a(\varphi)\theta = a\theta \\ \sigma^2(\theta, \varphi) &= \text{const.} \end{aligned}$$

と考えられる

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(7)

装置の回転対称性を考慮して φ 方向のシミュレーションはせずにデータを回転させているため φ と φ_c は線形相関する

θ と φ_c の関係だけを見ると以下のようなになる($\varphi = 0$):



6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(8)

シミュレーションの結果から

$$p(\varphi_c | \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(\theta, \varphi)}} \exp \left[-\frac{(\varphi_c - m(\theta, \varphi))^2}{2\sigma^2(\theta, \varphi)} \right]$$

ただし

$$\begin{aligned} m(\theta, \varphi) &= \varphi \\ \sigma^2(\theta, \varphi) &= \text{const.} \end{aligned}$$

と考えられる

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(9)

以上で $p(\delta_c|\theta, \varphi)$, $p(\varphi_c|\theta, \varphi)$ が求まったので先の議論から

$$P(\theta, \varphi|\delta_c, \varphi_c) = \frac{f(\theta, \varphi)p(\delta_c|\theta, \varphi)p(\varphi_c|\theta, \varphi)}{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} d\theta' \int_0^{2\pi} d\varphi' f(\theta', \varphi')p(\delta_c|\theta', \varphi')p(\varphi_c|\theta', \varphi')}$$

の計算を行うことで出力に対する入力の確率分布を得る
この確率を最大化する入力を求めればよい

ただし右辺の計算において $f(\theta, \varphi)$ の関数形の決定に関しては後述するが、今のところは一様分布を仮定する

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(10)

実際の観測データは各chに入った光子数であるから、それを座標の情報に焼き直さなければ円fittingはできない

ここでは各chをその中心座標(X_{ch}, Y_{ch})に代表させ、その座標に光子が N_{ch} 個到着したと見なす

つまりfittingで最小化させる関数は

$$\sum_{ch} N_{ch} [\sqrt{(X_{ch} - x_c)^2 + (Y_{ch} - y_c)^2} - r_c]$$

6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(11)

観測結果から得られたfittingデータを用いて得た入射方向の分布は次のようになる:

と言いたいところだったが、まだ実験中でデータが得られていない...

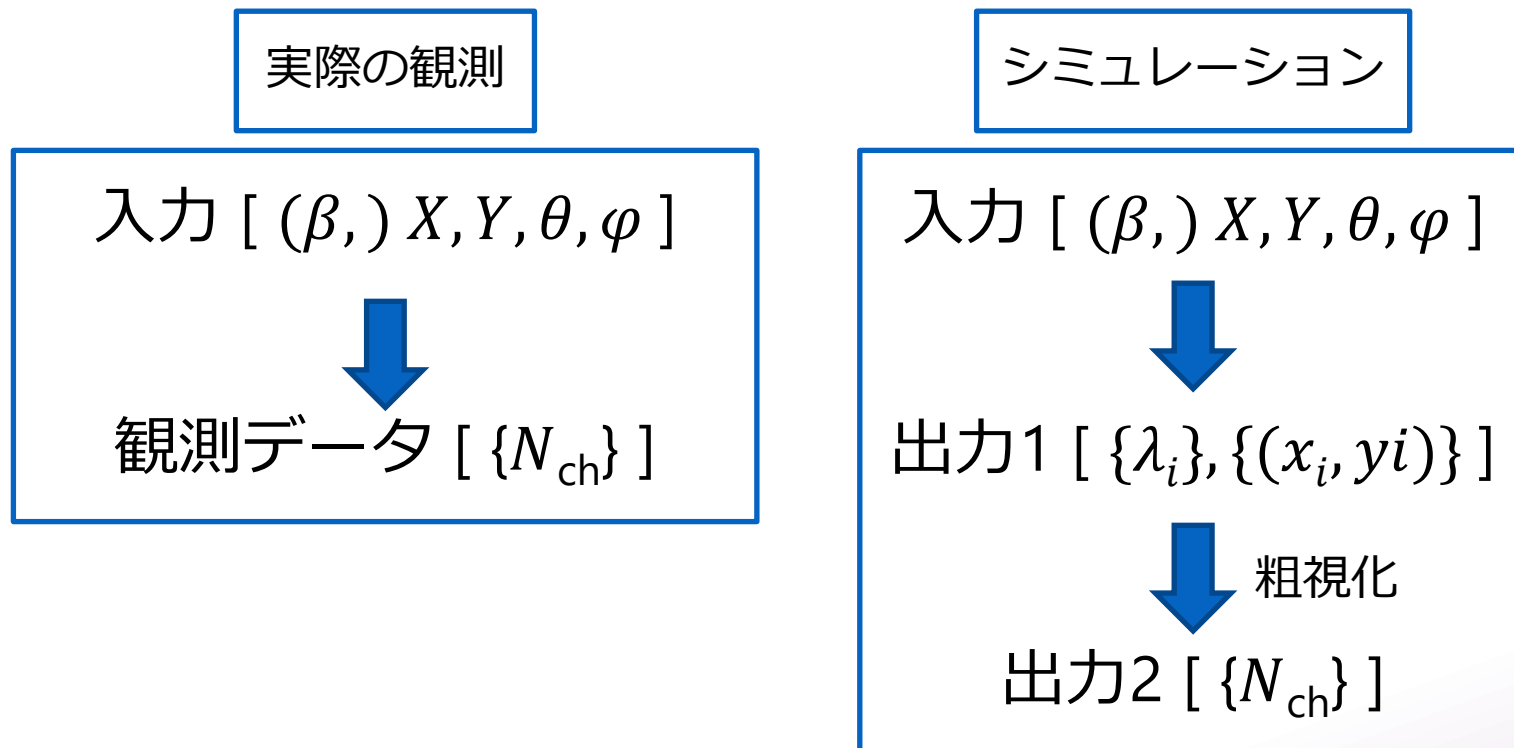
6.2 解析① 円fittingによる最尤推定(12)

上では入射方向に対し、一様分布を仮定したがこれが実際に妥当な仮定であったかを検定することもできる

が、時間とデータが足りていないので割愛

6.3 解析② Poisson分布による最尤推定(1)

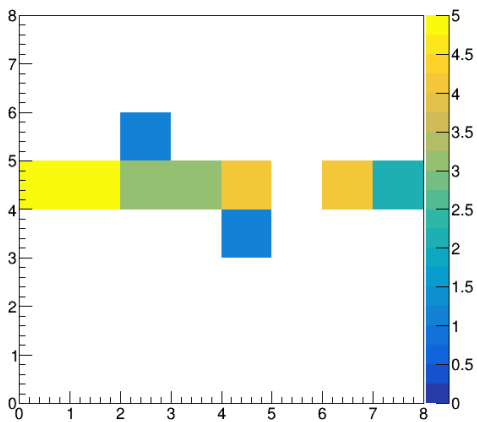
シミュレーションデータに粗視化を施すことで観測データ
それ自体のシミュレーション結果を得ることもできる:



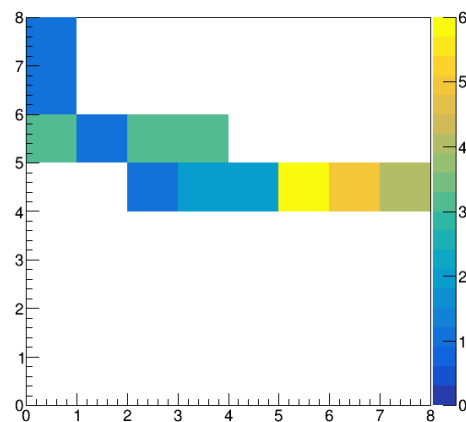
6.3 解析② Poisson分布による最尤推定(2)

GEANT4でのシミュレーション結果をMPPCデータにまで粗視化してみると次のような図が得られる:

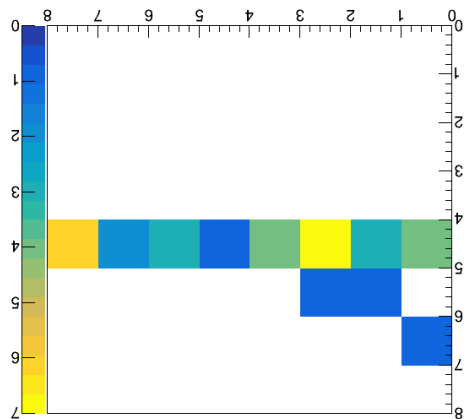
MPPC1: theta=1(deg), phi=10(deg)



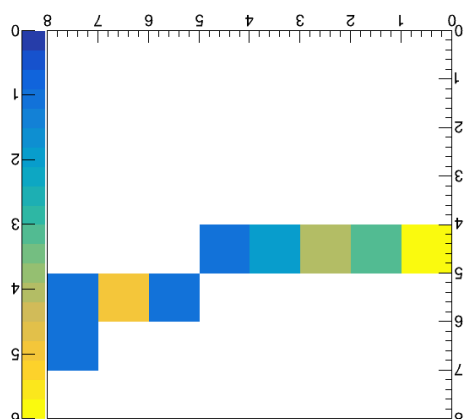
MPPC1: theta=10(deg), phi=50(deg)



MPPC2: theta=1(deg), phi=10(deg)



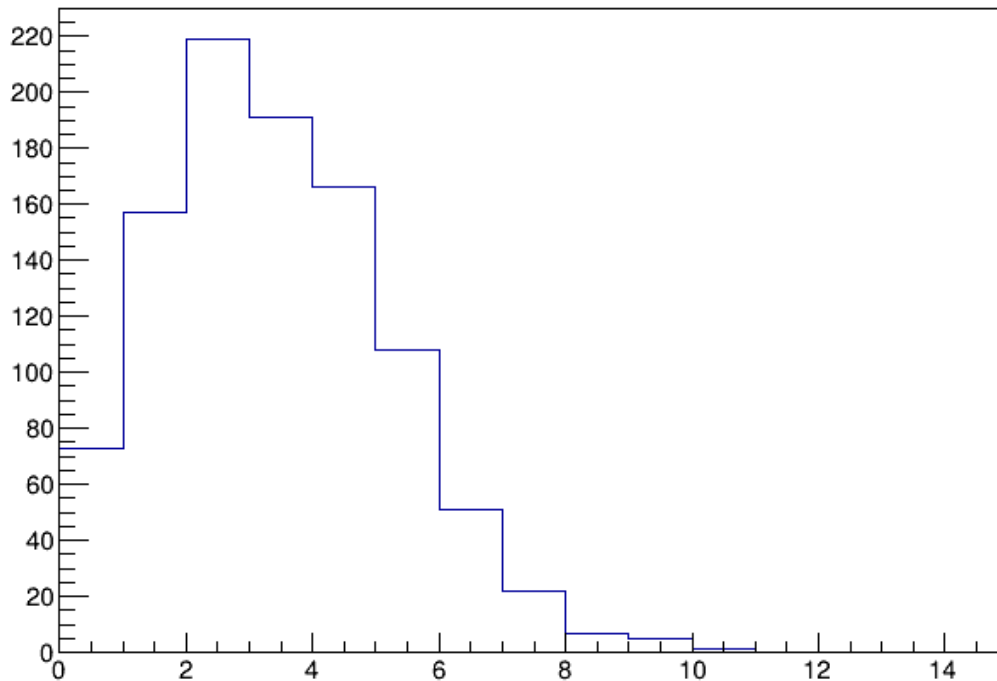
MPPC2: theta=10(deg), phi=50(deg)



6.3 解析② Poisson分布による最尤推定(3)

適当な入力に対する一つのchの光子数は以下のようにPoisson分布になる:

MPPC1: theta=1(deg), phi=10(deg)



Poisson分布

$$p_{\lambda}(N_{\text{ch}}) = \frac{\lambda^{N_{\text{ch}}} e^{-\lambda}}{N_{\text{ch}}!}$$

6.3 解析② Poisson分布による最尤推定(4)

従って64×2chのPoisson分布のパラメータ λ を入力に対する関数

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

として求め、

$$P(\theta, \phi) = \prod_{\text{ch}} p_{\lambda_{\text{ch}}(\theta, \phi)}(N_{\text{ch}})$$

を最大化させる (θ, φ) を求め、それが実際の入力であったと推定することが出来る

6.3 解析② Poisson分布による最尤推定(5)

実際にはシミュレーションは離散的な入力に対してのみ行っている

連続変数 (θ, φ) に対する $\lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi)$ は次のような双線形補間により定める:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{ch}}(\theta, \varphi) := & (1-s)(1-t)\lambda_{\text{ch}}(\theta_i, \varphi_j) + (1-s)t\lambda_{\text{ch}}(\theta_{i+1}, \varphi_j) \\ & + s(1-t)\lambda_{\text{ch}}(\theta_i, \varphi_{j+1}) + st\lambda_{\text{ch}}(\theta_{i+1}, \varphi_{j+1})\end{aligned}$$

ただし

$$s = \frac{\theta - \theta_i}{\theta_{i+1} - \theta_i}, \quad t = \frac{\varphi - \varphi_j}{\varphi_{j+1} - \varphi_j}$$

(for $(\theta, \varphi) \in [\theta_i, \theta_{i+1}] \times [\varphi_j, \varphi_{j+1}]$)

目次

1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間が無いのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

7. 今後の展望

- 宇宙線ミュオンの実験データ解析
- 入力の確率分布 f を求める
- 最尤推定がどれくらい推定されているかをシミュレーションで確かめる
- X, Y を変えたときのシミュレーションデータも含める
- Poisson分布パラメータの補間の仕方を変えてみる
- 機械学習？

まとめ

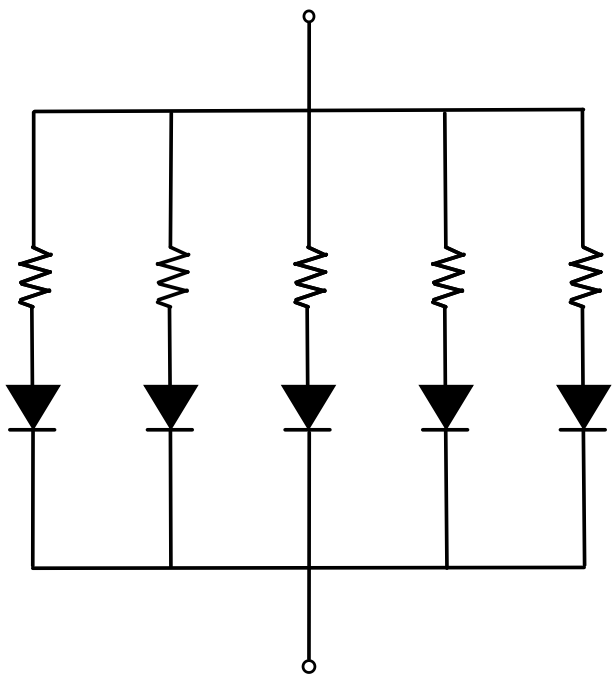
- 球面ではない**放物線の一部を回転させた鏡面**を持つ RICH-detectorを作成した
- 光子数の測定には理論上で作られるリングに合わせて置いた**MPPC(array)**を用いた
- 解析には
 - ① **円fitting**
 - ② **Poisson分布**による最尤推定で入射方向を推定する予定である

目次

1. Introduction
2. 実験原理
3. 予備実験(時間がないのでカット)
4. 実験装置
5. 実験方法
6. 解析
7. 今後の展望

Back up (1) MPPC

MPPCの動作原理(1ピクセル)



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

Q :出力される電荷

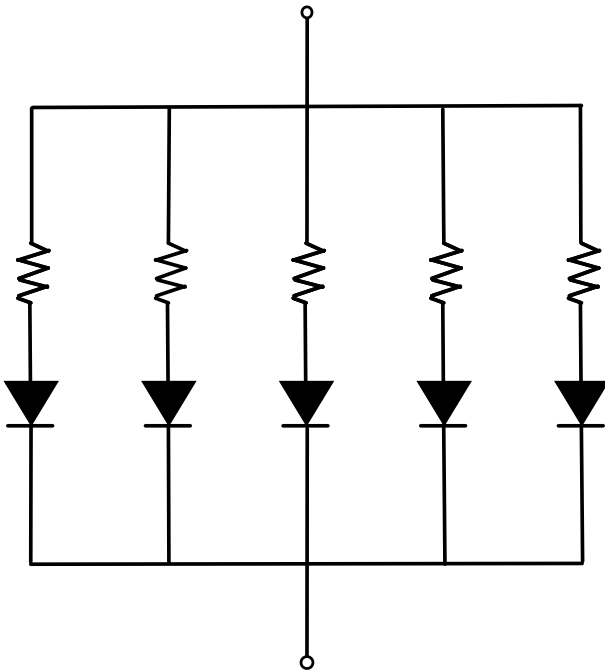
C :APDの容量

V_R :逆バイアス電圧

V_{BD} :ブレイクダウン電圧

Back up(2) MPPC

MPPCの動作原理(1ch)

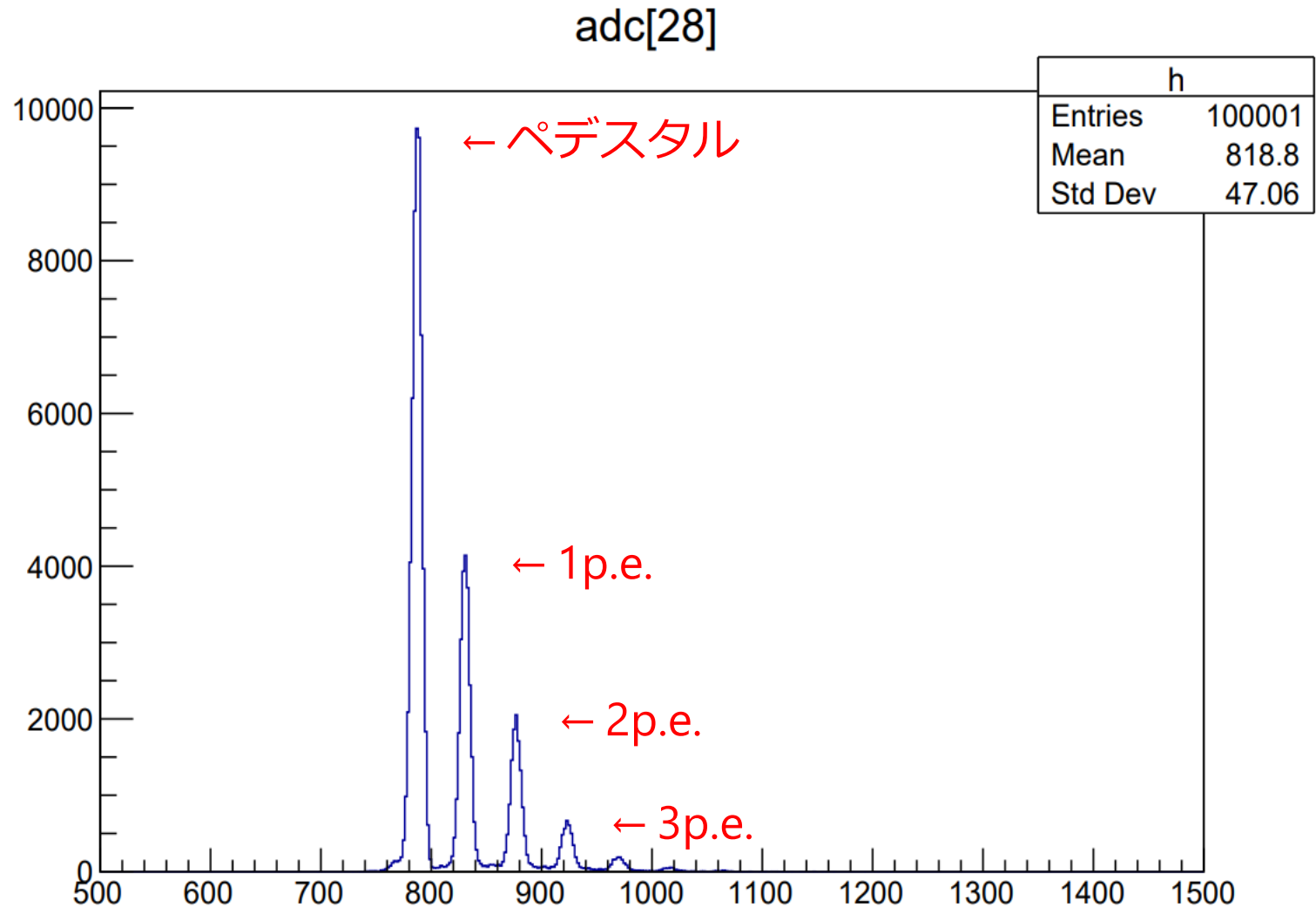


$$Q_{\text{total}} = C(V_R - V_{\text{BD}}) \times N$$

Q_{total} :出力される電荷の総和

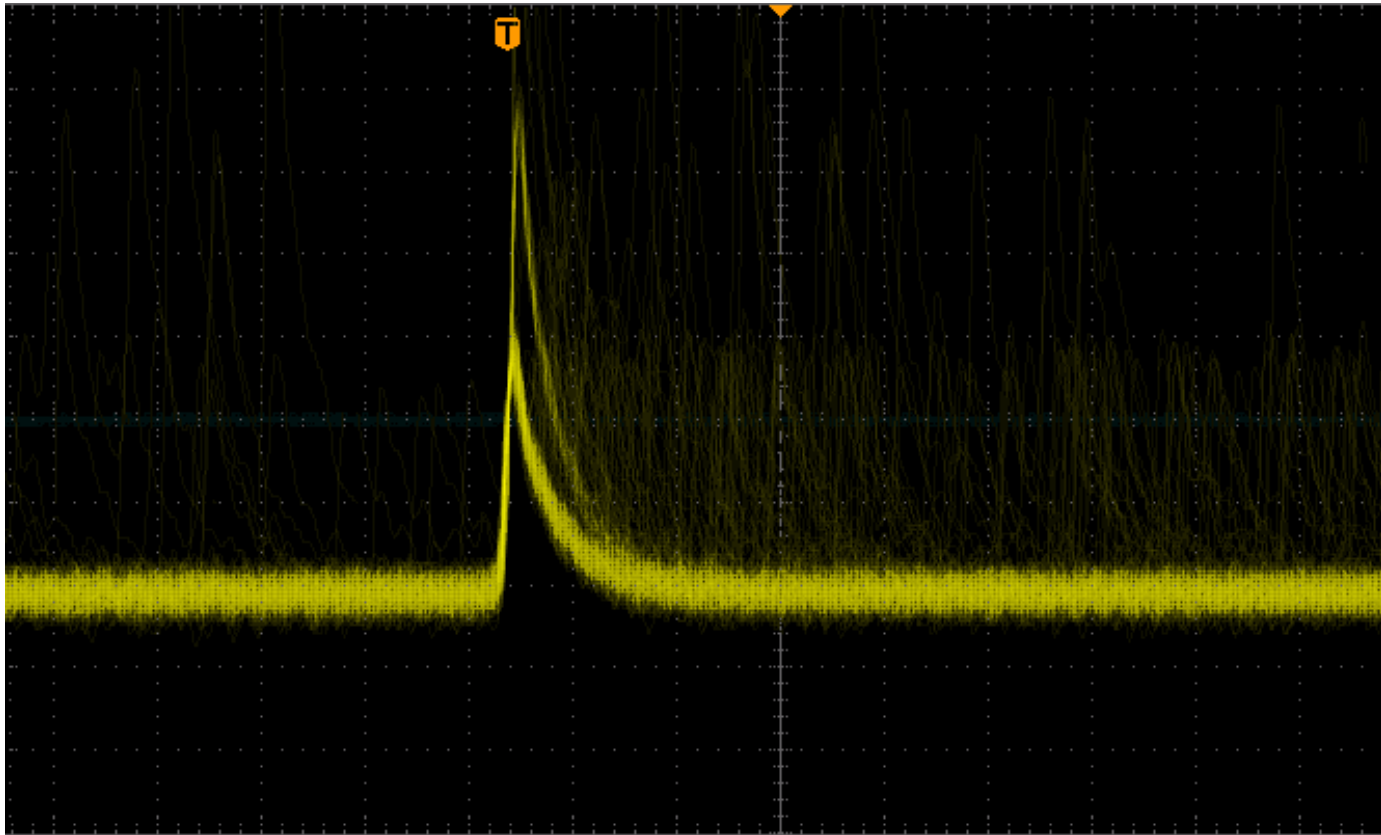
N :受光したピクセル数

Back up(3) MPPC



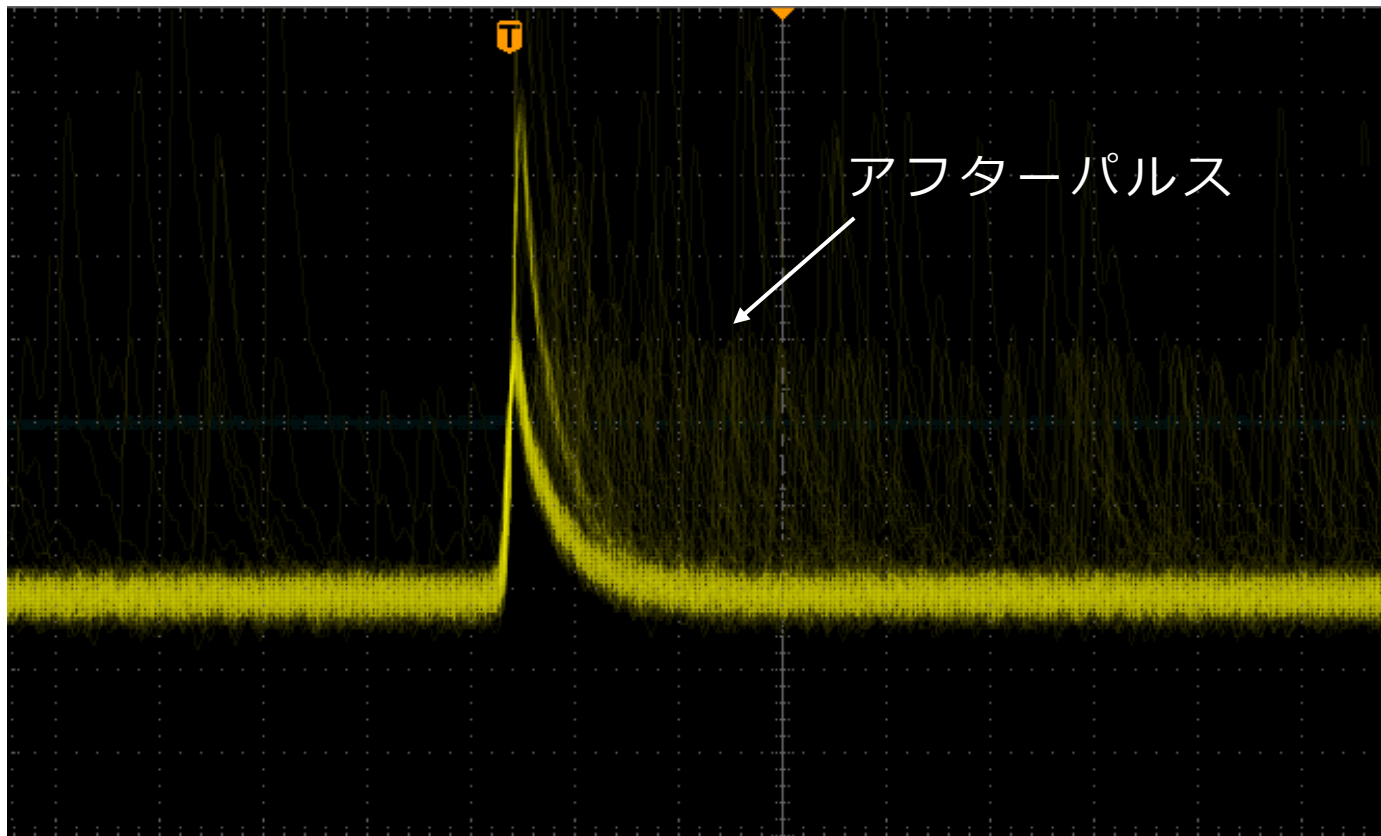
Back up(4) MPPPC

ダークカウント



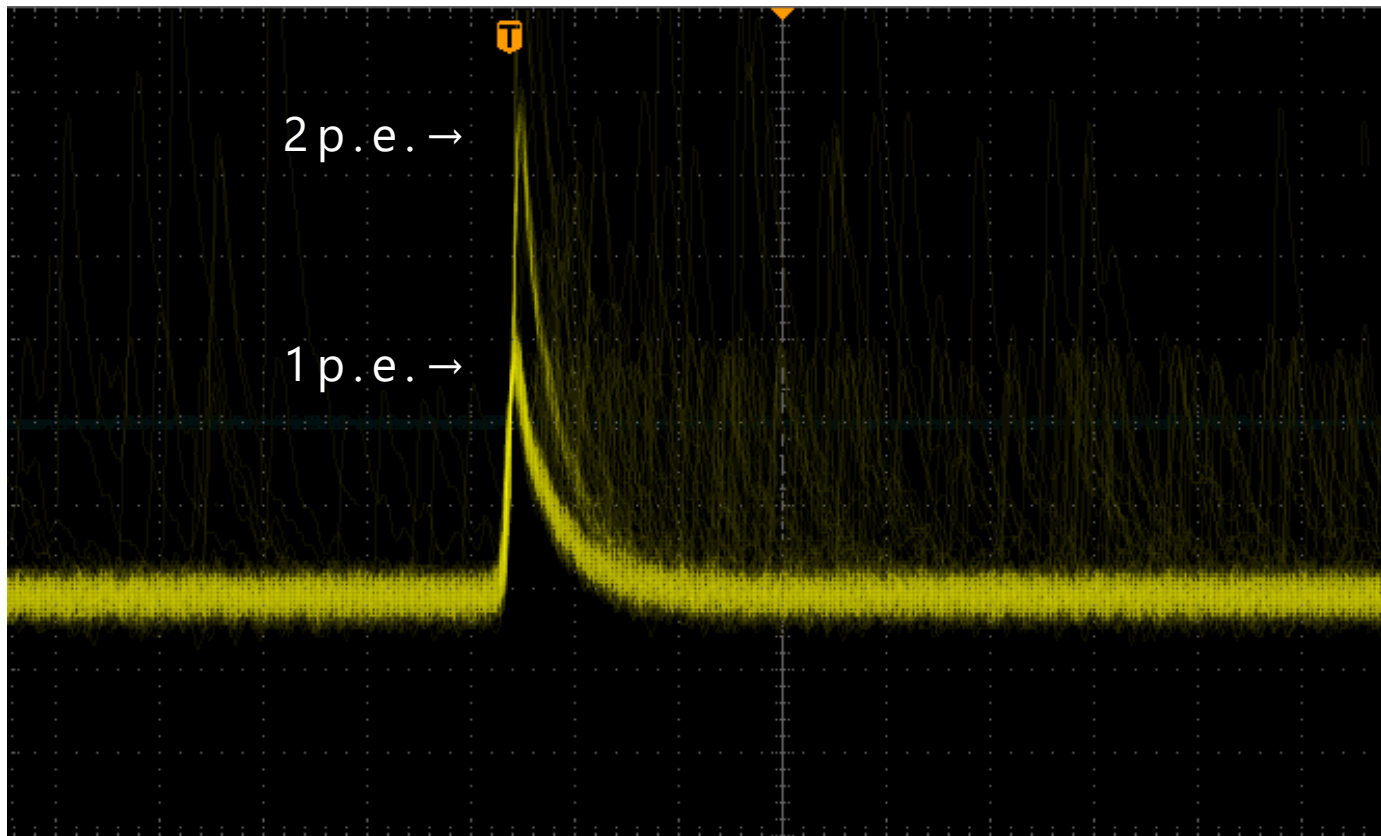
Back up(5) MPPPC

アフターパルス



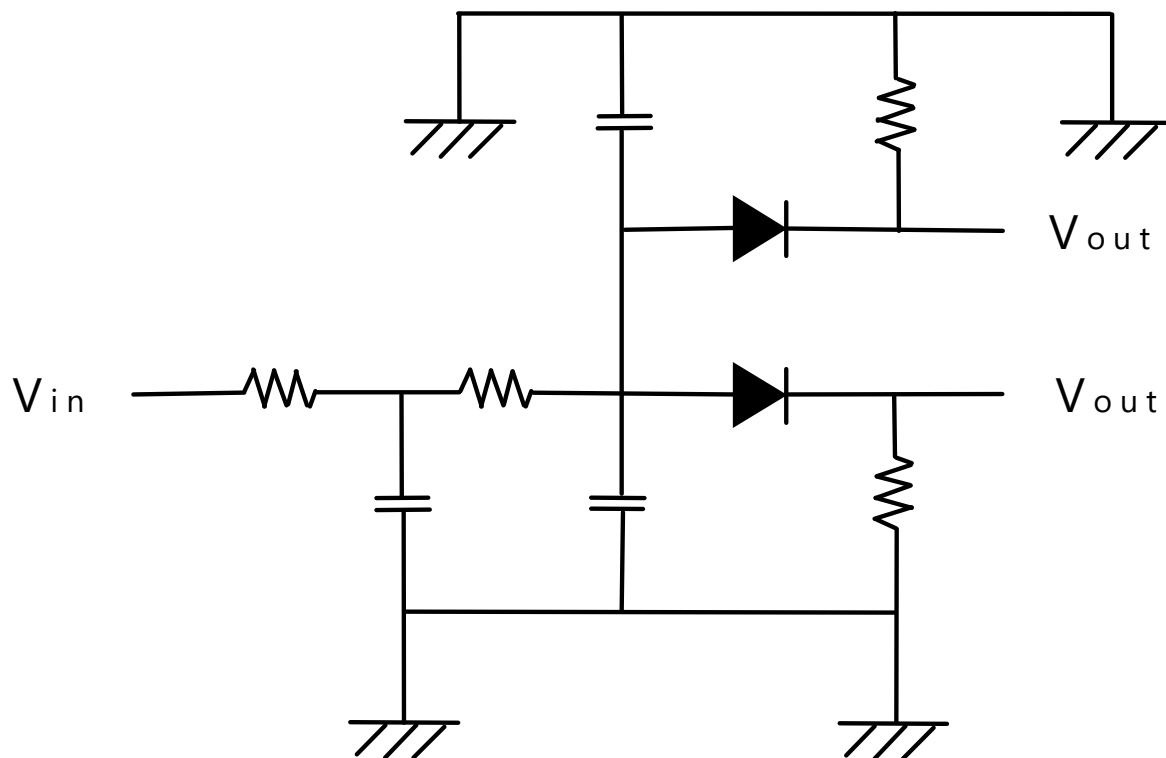
Back up(6) MPPC

クロストーク



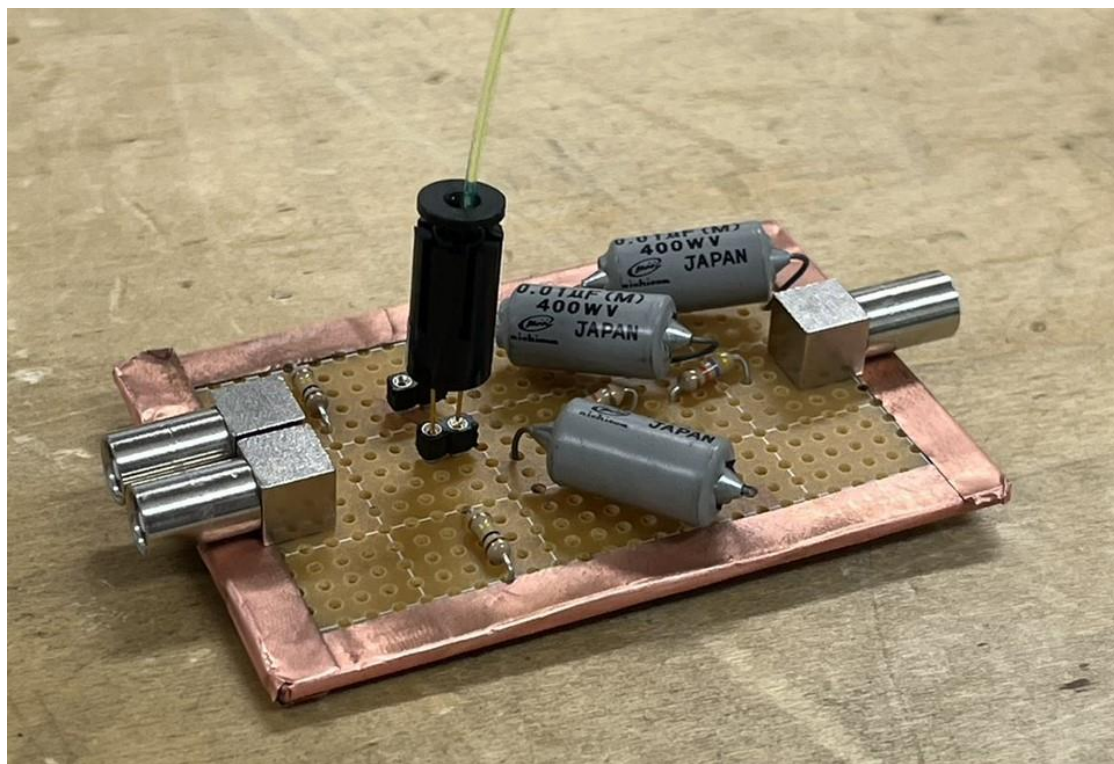
Back up(7) MPPC

MPPCとプラスチックシンチレーターの接続回路



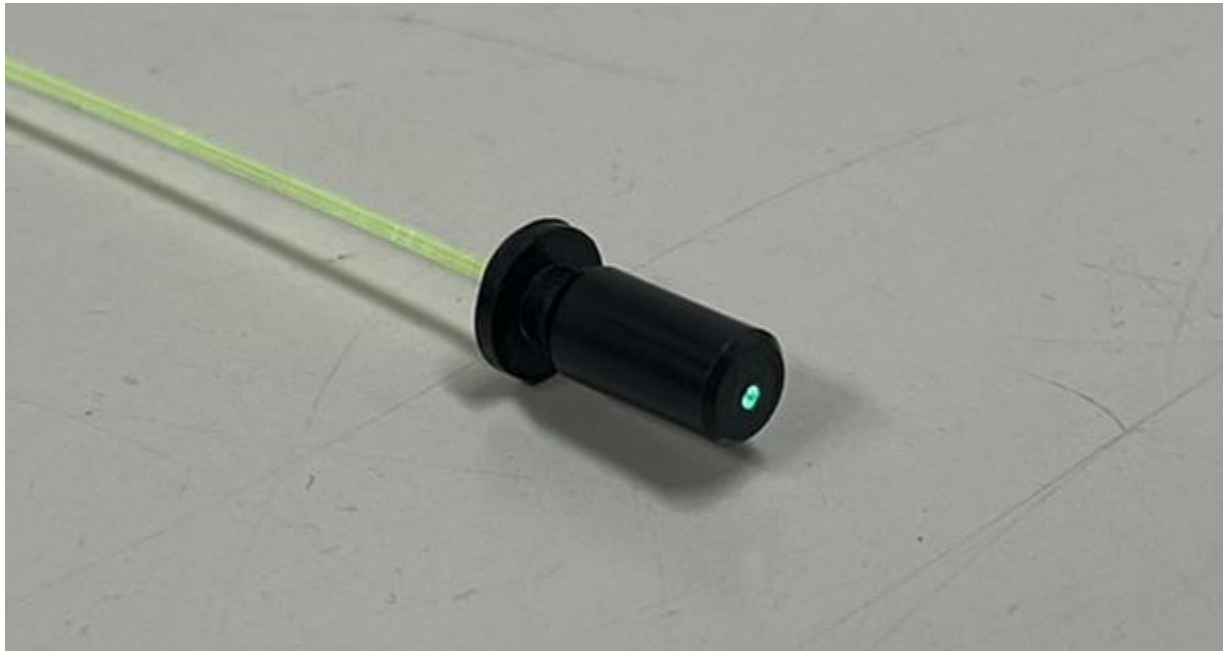
Back up(8) MPPC

MPPCとプラスチックシンチレーターの接続回路



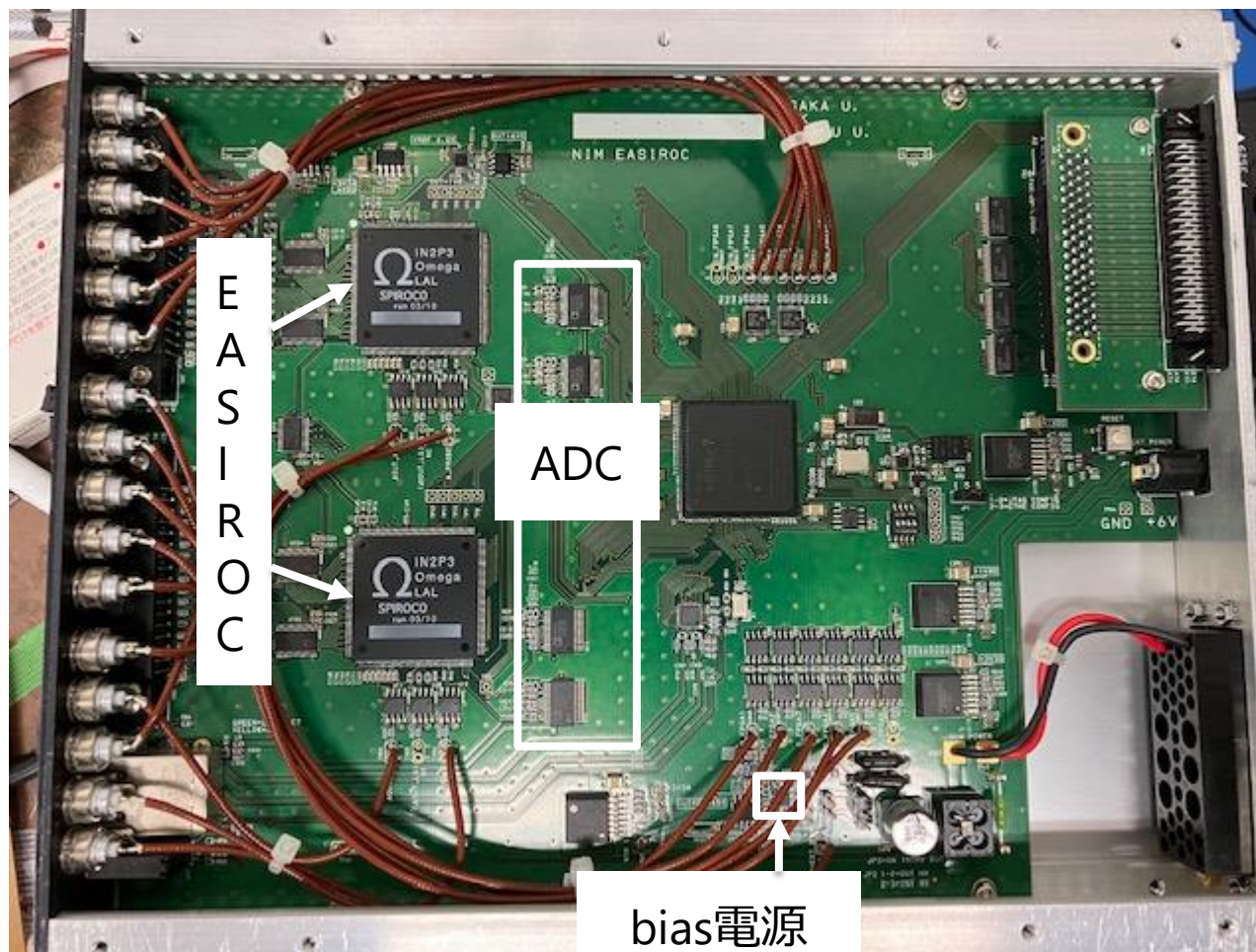
Back up(9) MPPC

GOMI Connector



Back up(10) EASIROC

EASIROCモジュールの内部基板

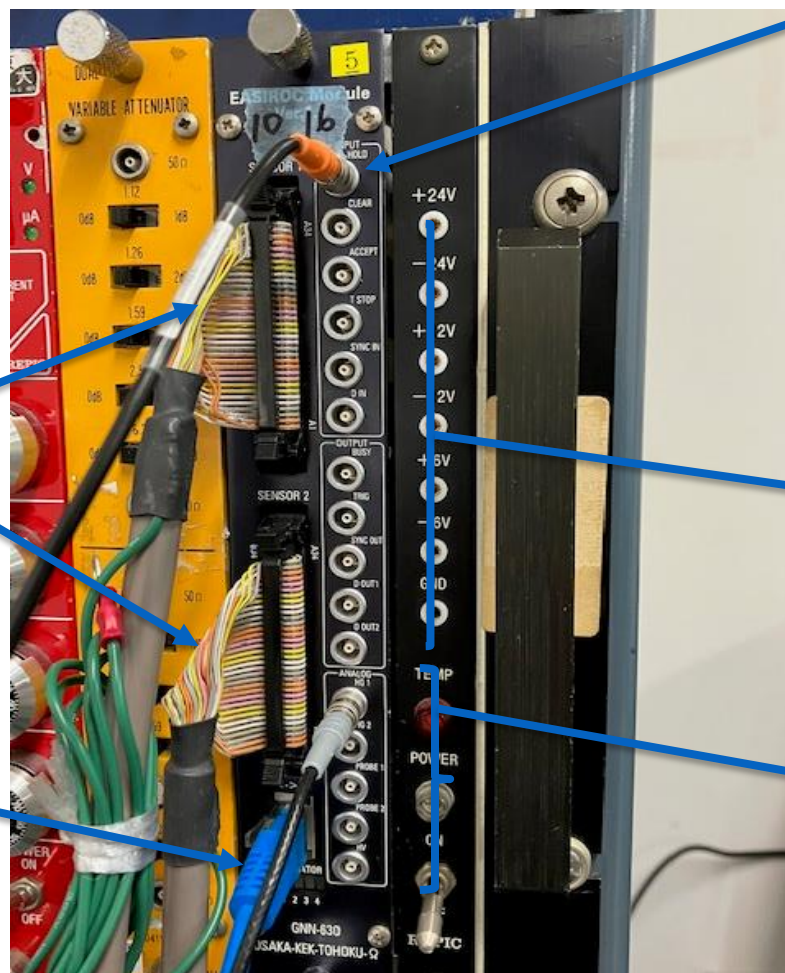


Back up(11) EASIROC

EASIROCモジュールの前面

上下32chずつ
変換基板から
の信号を送る
フラットケー
ブル

Ethernet
ケーブルでPC
と接続



外部トリガーで
データを取る時
にトリガー信号
を入れるhold

今回の実験
では特に使用
しない

アナログ信号の
outputでオシロ
スコープにつない
で見る

Back up(12) EASIROC

基板を作るに当たって

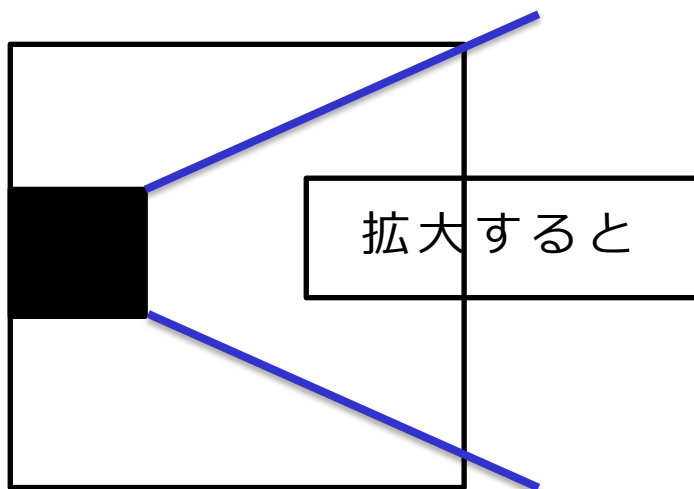
- EASIROCへの入力信号の極性は**正電圧**にしなければいけない



- MPPCの**カソード**を正電圧に、**アノード**をEASIROCへの出力につなぐ必要がある
- MPPCとEASIROCのpinを正しく対応させることに注意しなければいけない

Back up(13) EASIROC

MPPCアレイの各チャンネルとEASIROCのチャンネルとの対応



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)

Back up(14) EASIROC

基本的な使い方

Input DAC

基本的にMPPCにかけられるbias電圧は全チャンネル**共通**なので、Input DACでチャンネル毎にbias電圧を微調整できる



Back up(15) EASIROC

内部トリガーでのデータ取得

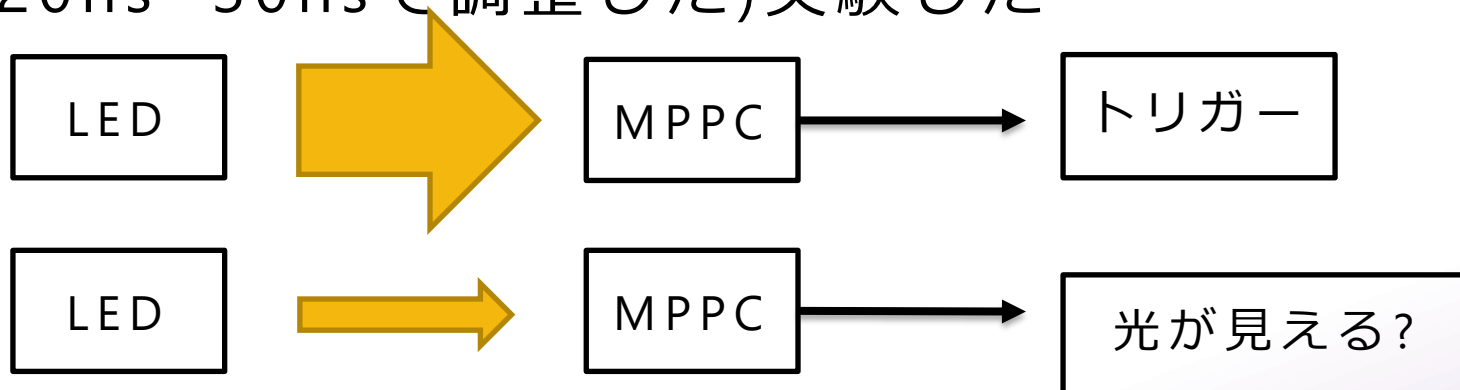
- トリガーの設定は基本RegisterValueで行う
- トリガーとするchを設定する(個別に設定できるし、上側32ch全体を設定することもできる)
- thresholdの値を設定する(RegisterValue内のDAC code値を決める)
- DAC code値は0~1023までの値を取り、値が小さいほどthresholdが大きくなる

Back up(16) EASIROC

EASIROCとMPPCの動作確認

1chMPPC

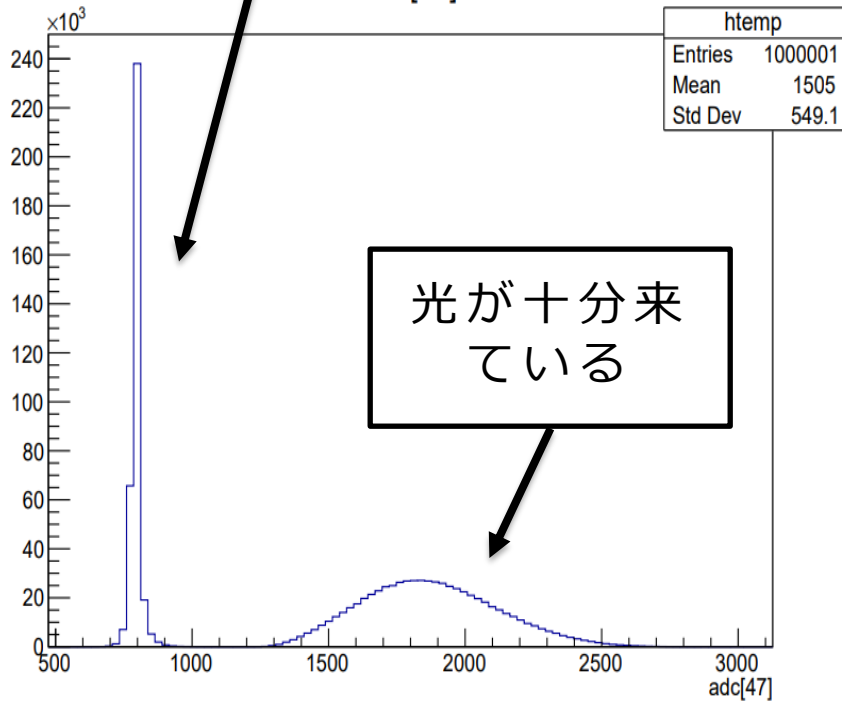
- 1chMPPCを2つ用いて内部トリガーで確認した
- 片方のMPPCにLEDの光を十分当ててそれをトリガーとし、もう一方のMPPCにLEDの光を当て(TTL信号は1kHz、widthは20ns~30nsで調整した)実験した



Back up(17) EASIROC

ペDESTラル

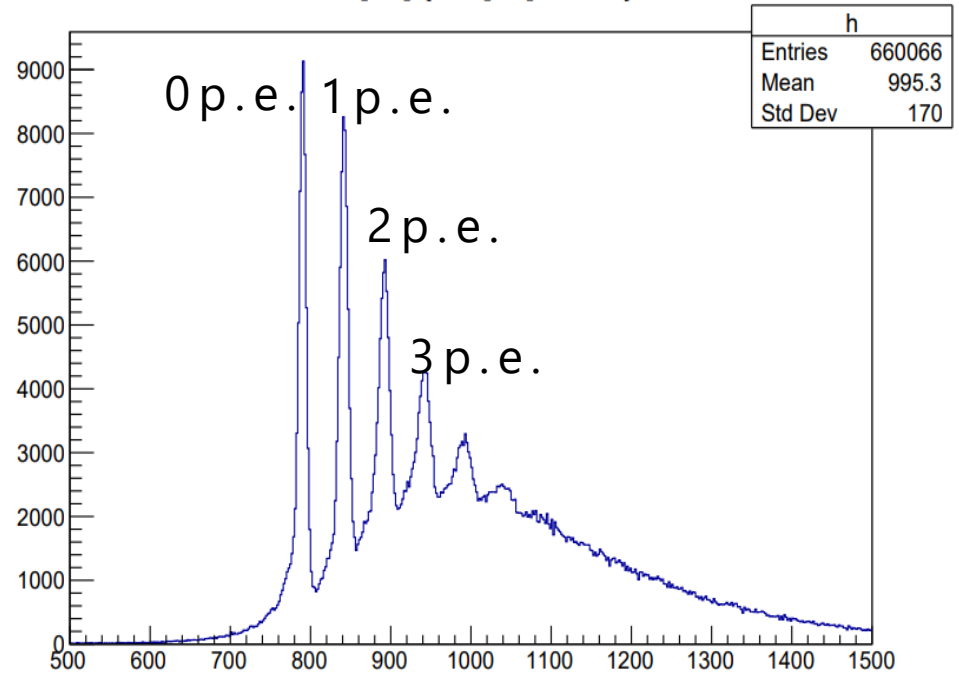
adc[47]



トリガー

トリガーがかかったイベントのみに絞る

adc[58] {adc[47]>1200}



1光子あたりのADC値が一定なので山の間隔は一定

Back up(18) MPPCのCalibration

- ADC Valueと検出光子数には線形の関係がある
- 1光電子当たりのADC Value(Gainに相当するもの)とbias電圧にも線形の関係がある

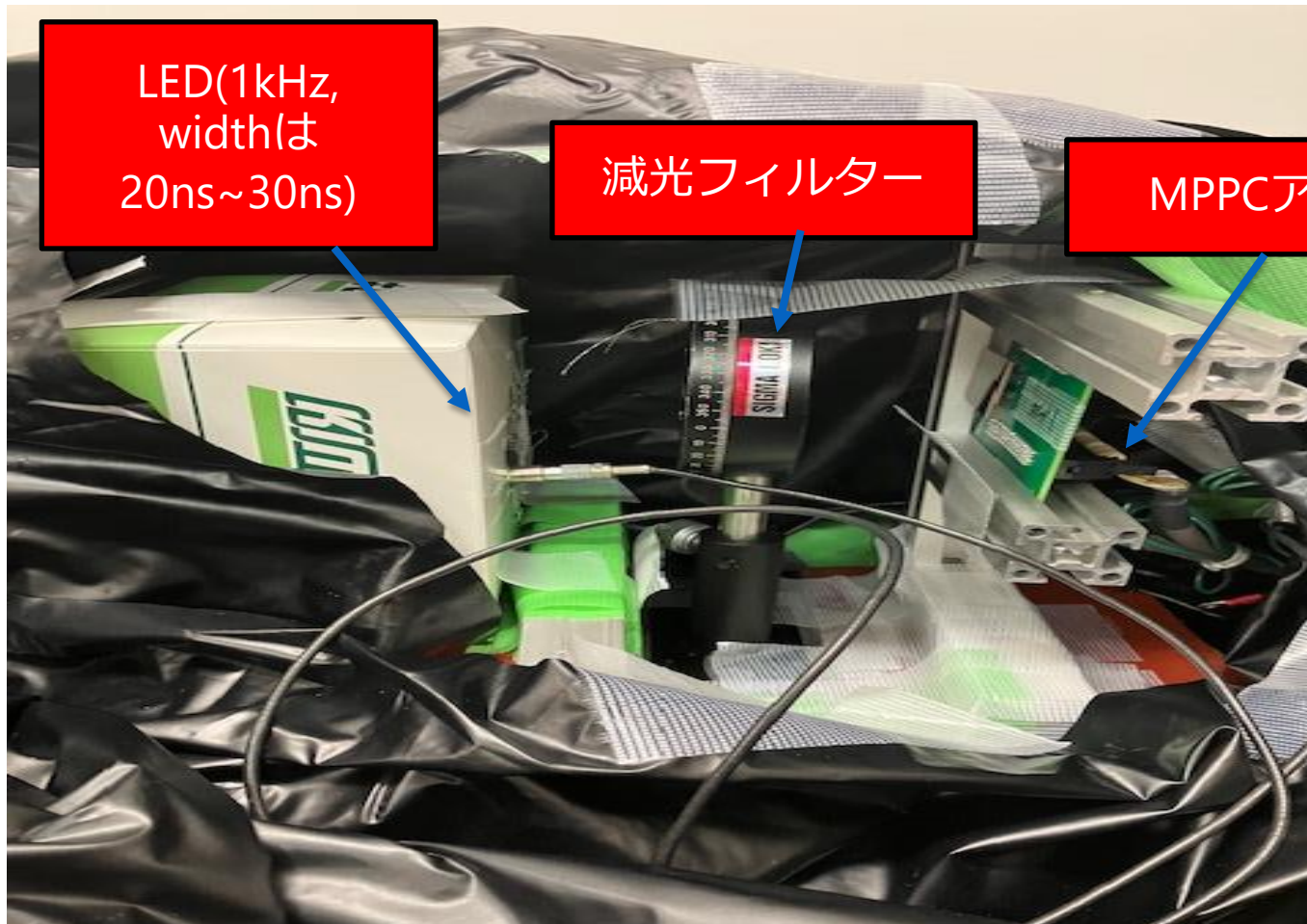


これらの関係を求めたい(Calibration)

- これが分かればADC Valueから検出された光電子数が算出できる

Back up(19) MPPCのCalibration

セットアップ



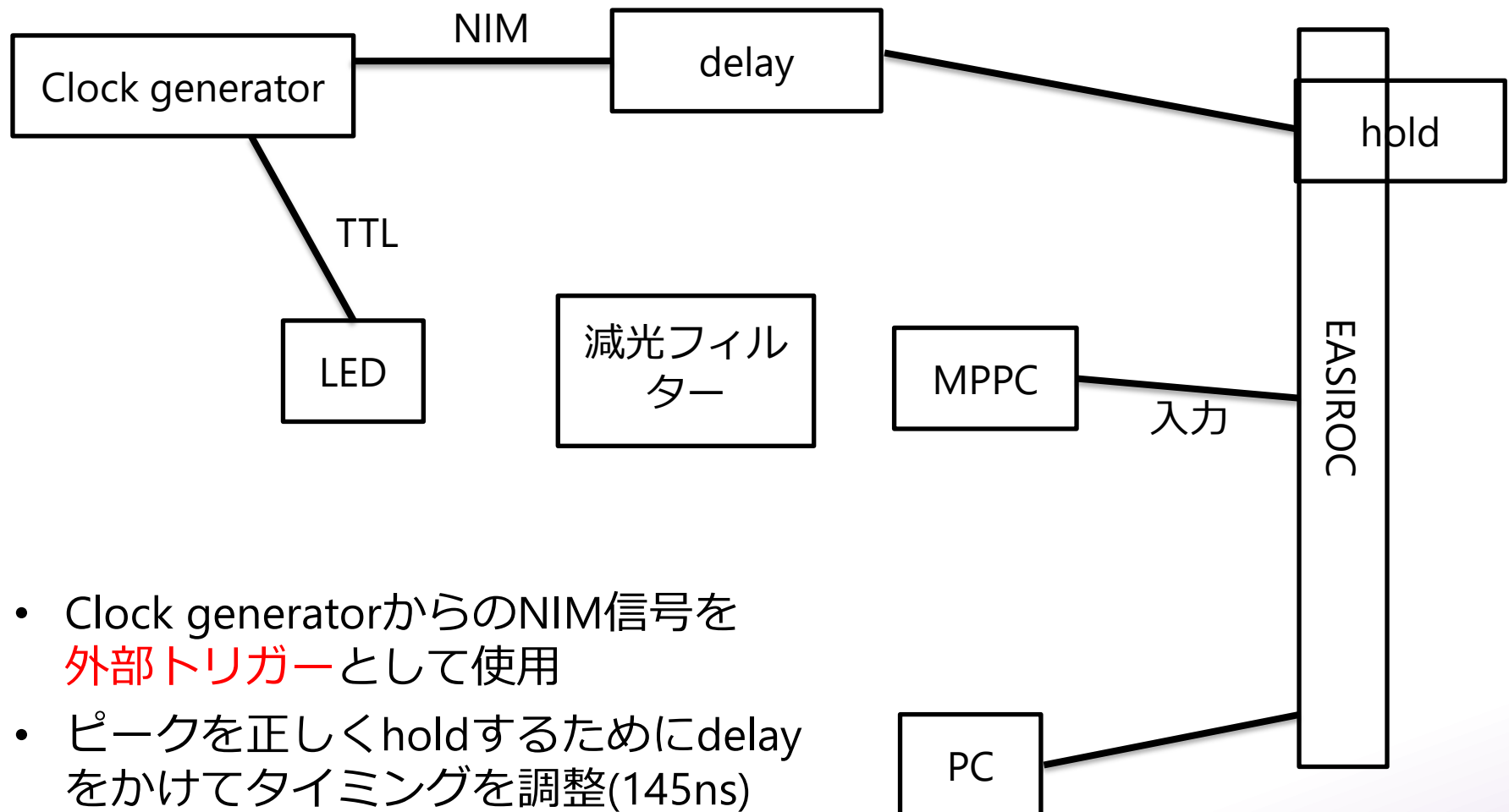
LED(1kHz,
widthは
20ns~30ns)

減光フィルター

MPPCアレイ

Back up(20) MPPCのCalibration

配線図



- Clock generatorからのNIM信号を外部トリガーとして使用
- ピークを正しくholdするためにdelayをかけてタイミングを調整(145ns)

Back up(21) MPPCのCalibration

- MPPCの各チャンネルに数光子が入射する程度に光量を調節(微調整はTTL信号のwidthを変える)
- MPPCアレイのブレイクダウン電圧は 53 ± 5 Vで、推奨電圧は 56 ± 5 V



電圧を57.0 Vから57.9 Vまで0.1 V刻みで10個の電圧値に対してデータを取得(Input DACの補正で実際にかかっている電圧は少し小さくなる)

Back up(22) MPPCのCalibration

目標

MPPCのADC Valueと光電子数の対応付けを行う

$$y = a(V) \cdot x + b$$

ADC Value 光電子数

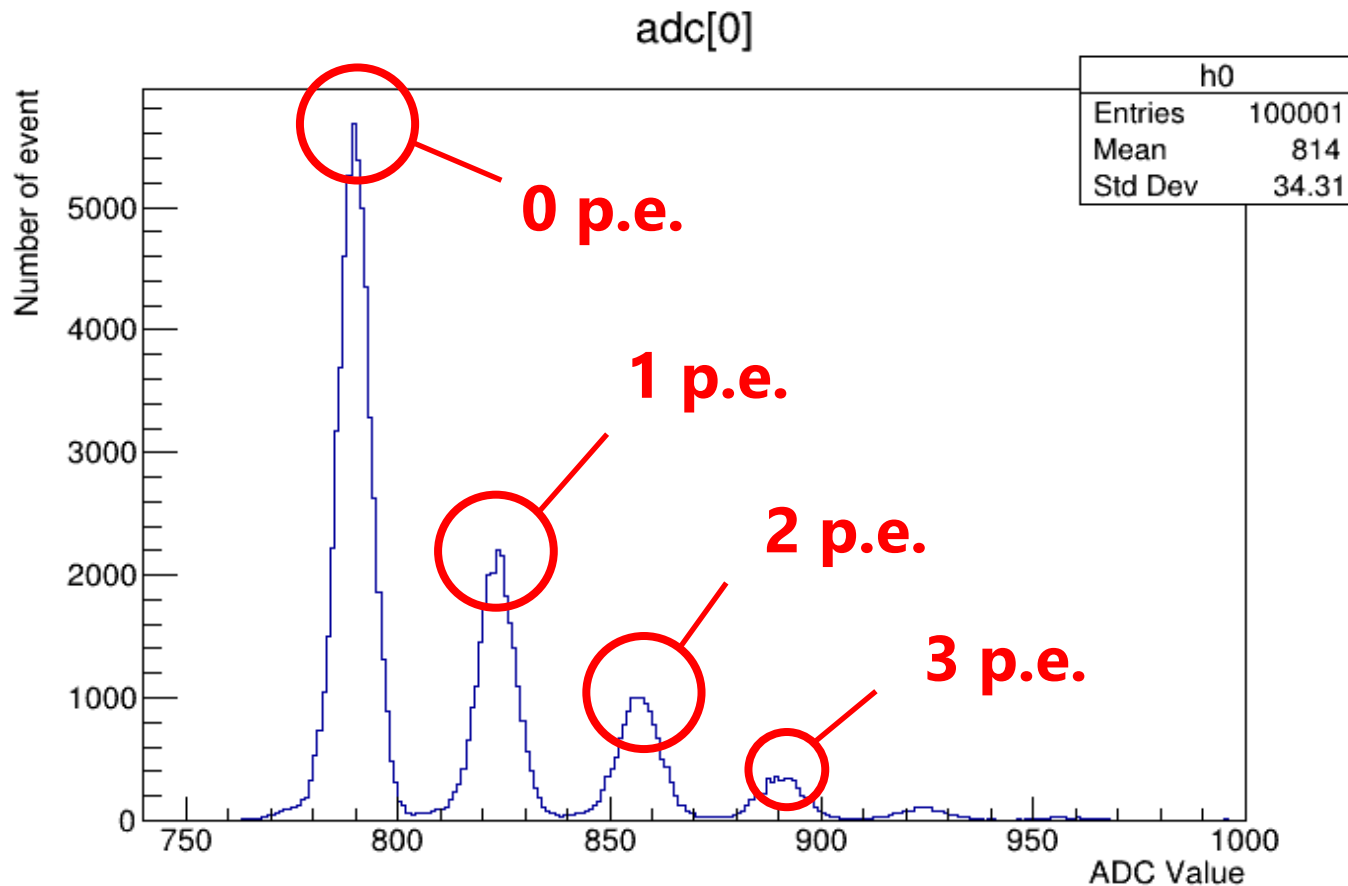
$a(V)$ にはバイアス電圧 V の依存性がある

$$a(V) = c \cdot V + d$$

 まずは V を固定して $a(V)$, b を求める

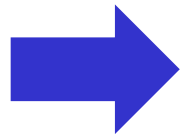
Back up(23) MPPCのCalibration

結果の例 (バイアス電圧56.568 V , ch0)
ADC Valueのヒストグラム

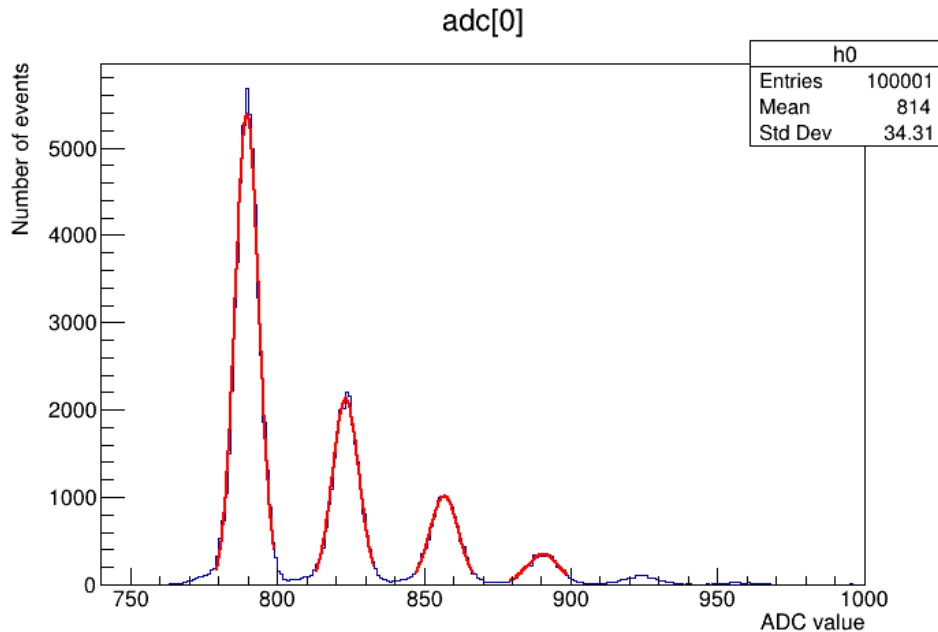


Back up(24) MPPCのCalibration

(光電子数, ADC Value) の組を得るために、各ピークを
独立なGaussianを用いてfitting



MeanをADC Valueの値として用いる

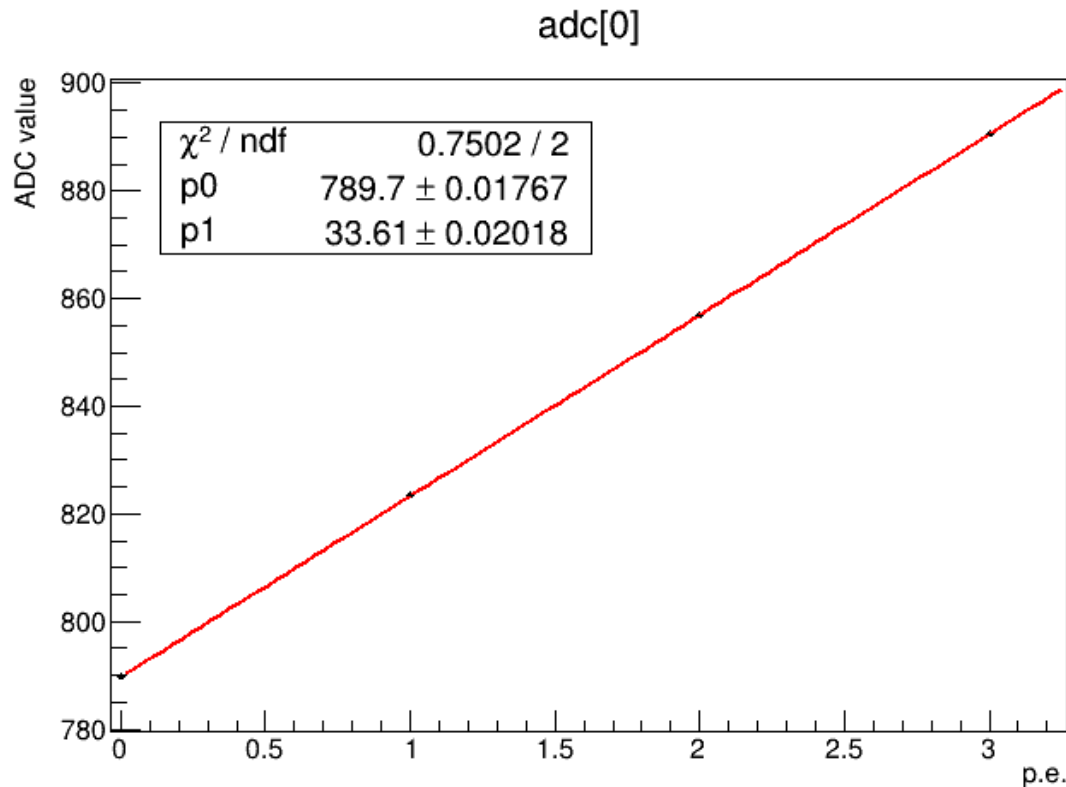


光電子数	Mean	Error
0	789.71	0.02
1	823.34	0.03
2	856.90	0.05
3	890.53	0.10

Back up(25) MPPCのCalibration

$a(V = 56.568 \text{ V})$ の算出

光電子数 vs. ADC Valueのグラフをかき、**線形fitting**



$V = 56.568 \text{ V}$ のとき、

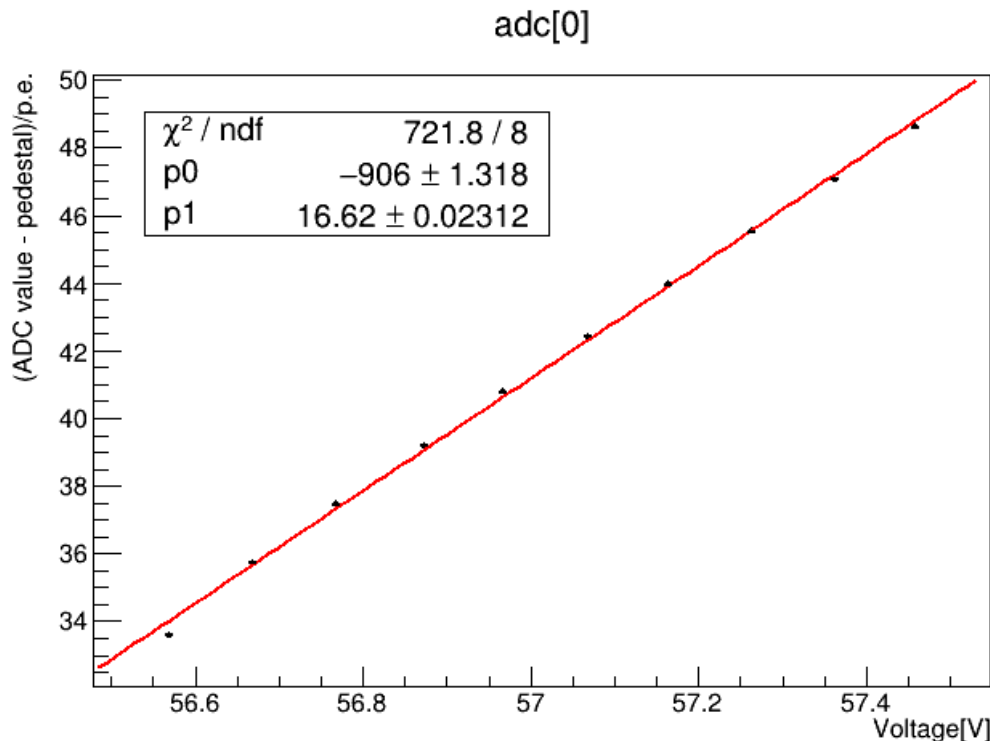
$$a = 33.61 \pm 0.02018$$

$$b = 789.7 \pm 0.01767$$

Back up(26) MPPCのCalibration

V依存性

ここまでのことを**複数のバイアス電圧V**について行い、**電圧V vs. $a(V)$ のグラフを線形でfitting**する



$$a(V) = c \cdot V + d$$

として

$$c = 16.62 \pm 0.02312$$

$$d = -906 \pm 1.318$$

Back up(27) MPPCのCalibration

まとめ

ADC Valueと光電子数の対応は (ch0の場合は)

$$\overbrace{y}^{\text{ADC Value}} = a(V) \cdot \overbrace{x}^{\text{光電子数}} + b$$

$$a(V) = c \cdot V + d$$

$$b = 789.7 \pm 0.01767$$

$$c = 16.62 \pm 0.02312$$

$$d = -906 \pm 1.318$$

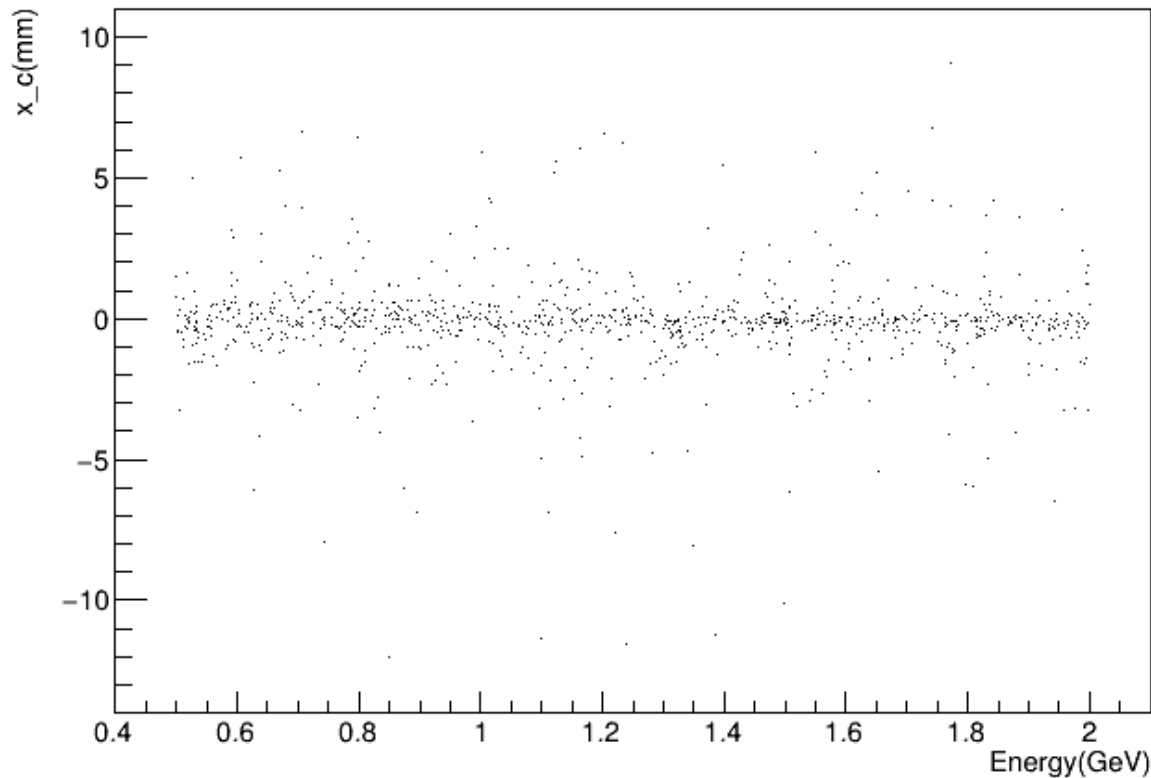
これを64ch×2枚分行うことで

MPPCの各chに入ってきた光電子数がわかる

Back up(28) 解析① 円fittingによる最尤推定

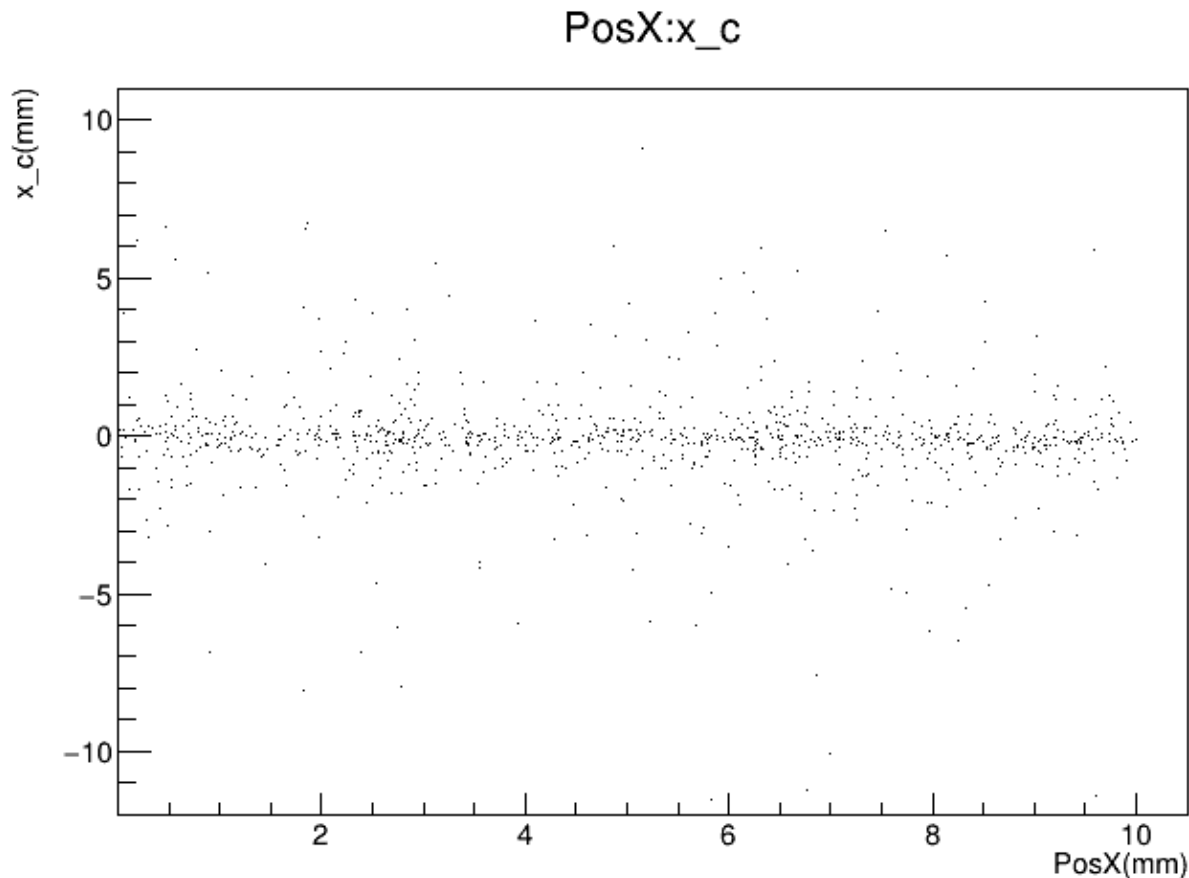
β を変えながらfittingしてみた図が以下:

Energy:x_c



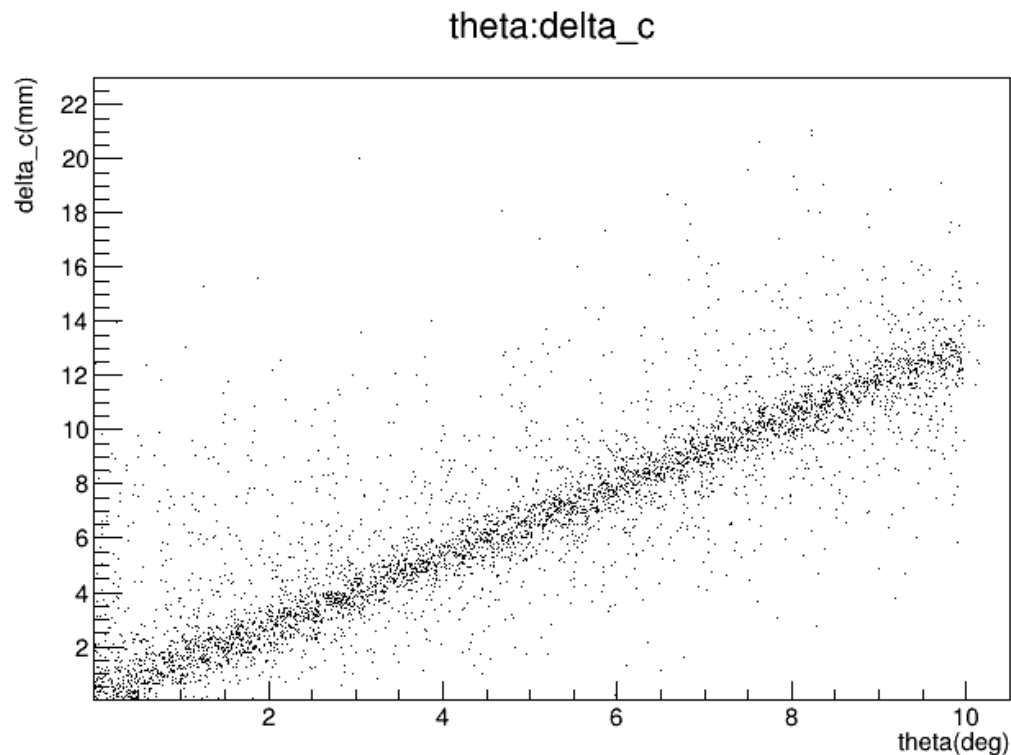
Back up(29) 解析① 円fittingによる最尤推定

入射位置(X, Y)を変えながらfittingをした図が以下:



Back up(30) 解析① 円fittingによる最尤推定

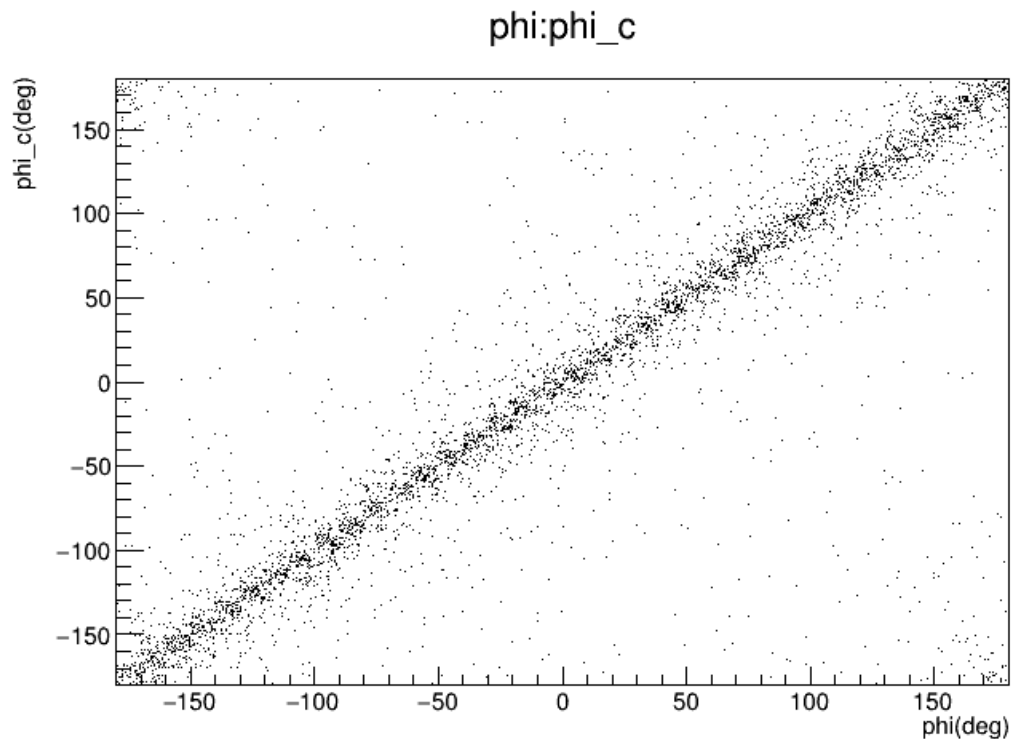
ランダムな初期方向からミュオンを5000回入射させた時の θ と δ_c の関係:



左図から θ と δ_c には
線形相関がありそうだと分かる

Back up(31) 解析① 円fittingによる最尤推定

ランダムな初期方向からミュオンを5000回入射させた時の φ と φ_c の関係:



左図から φ と φ_c には
線形相関がありそうだと分かる