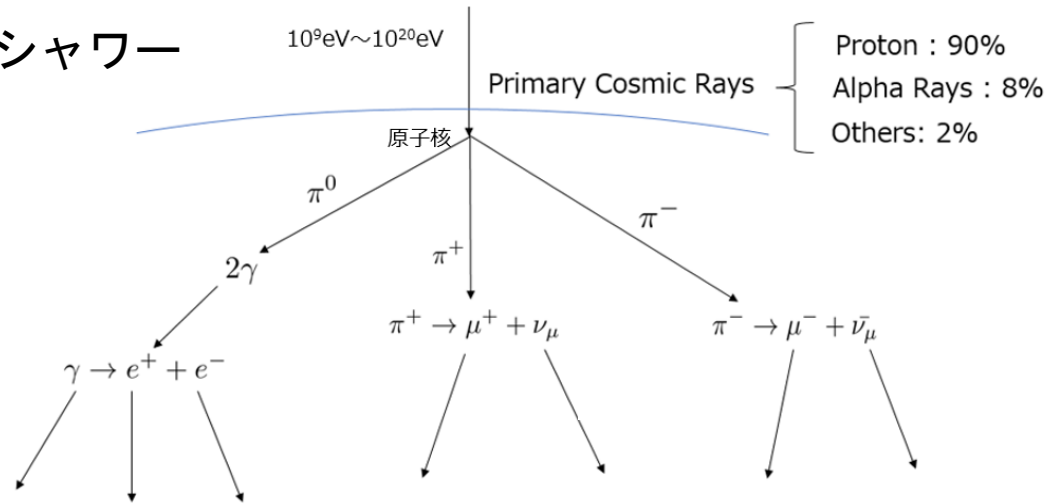


水チエレンコフ検出器による 空気シャワーの到来方向の決定

佐藤颯 難波宏樹

Cosmic Rays

空気シャワー



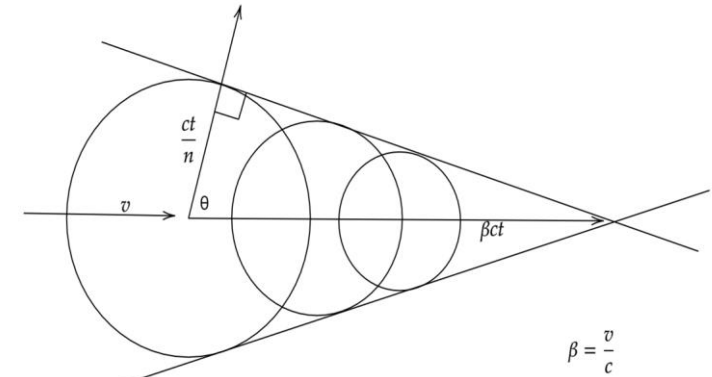
(宇宙線)

- 宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子
- 一般には陽子、ヘリウムやその他の原子核成分

(空気シャワー)

- 地表付近で二次宇宙線の中ではミュオンの数が多い
→本実験ではミュオンの水チェレンコフ放射を観測。

cherenkov光



- 荷電粒子の速度が媒質中の光速度より速くなると放射される青白い光

水チェレンコフ 検出器

今回の実験では水チェレンコフ 検出器として黒色の水タンク (800mmx640mmx580mm) に水を半分ほど入れ使用。

タンクの内側には集光率を上げるために白色のタイベックシートを貼った。

タンクの蓋に穴を開け、PMTを差し込んだ。



目標

①宇宙線などの観測にしばしば用いられるPMTへの理解を深める。

②水チェレンコフ検出器を3つ用いて、その信号の到達時間差から空気シャワーの到来方向を決定。

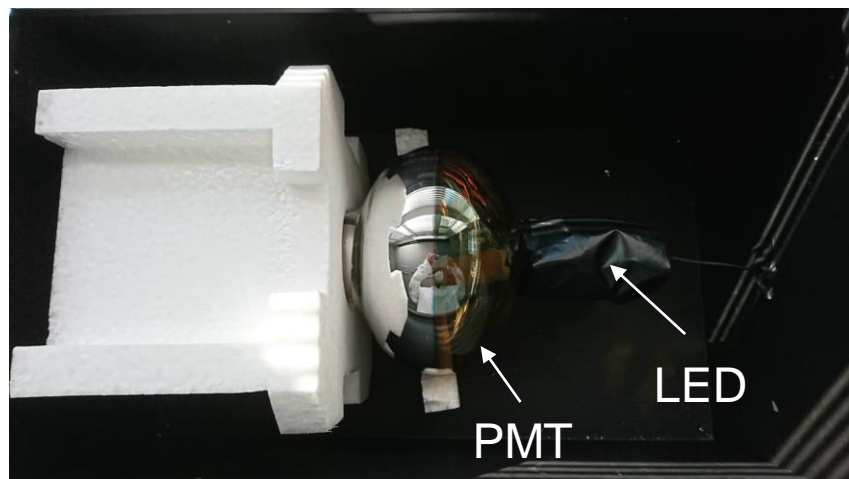
- 1、 GainCurve測定(前実験)
- 2、 1p.e.測定(前実験)
- 3、 空気シャワー到来方向決定(本実験)



前実験 ～PMTの性能評価～

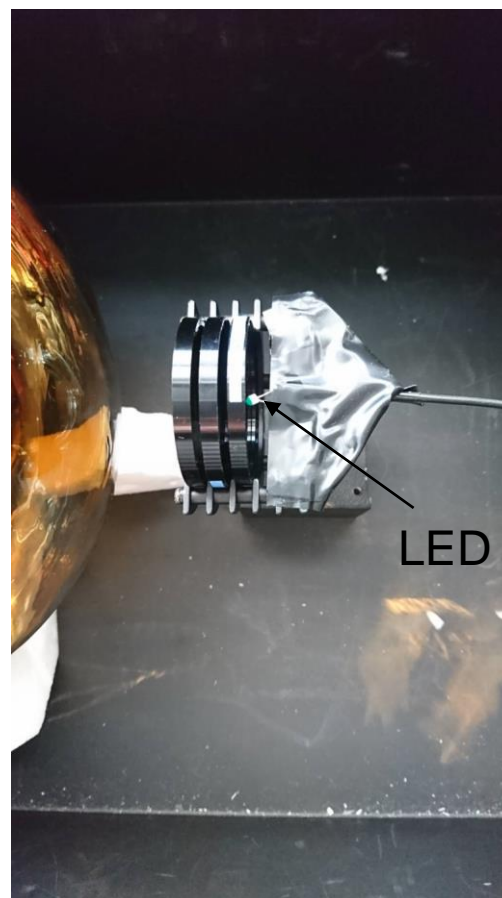
Setup

(暗箱)



暗箱の上からブラックシートを被せることで十分に遮光。

(LED)

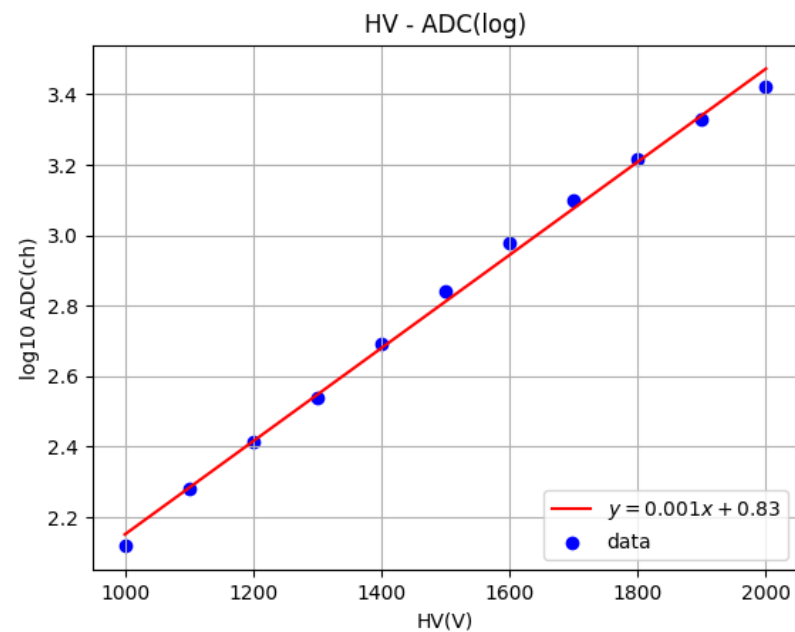
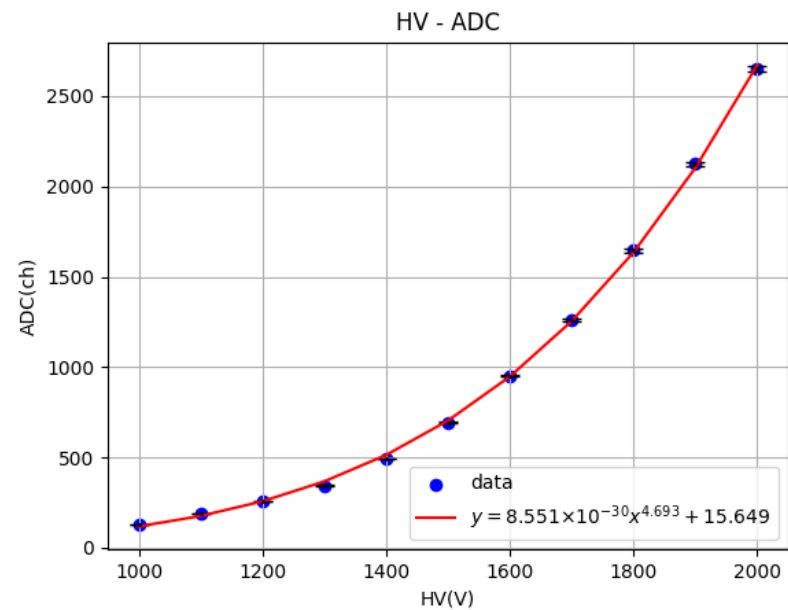
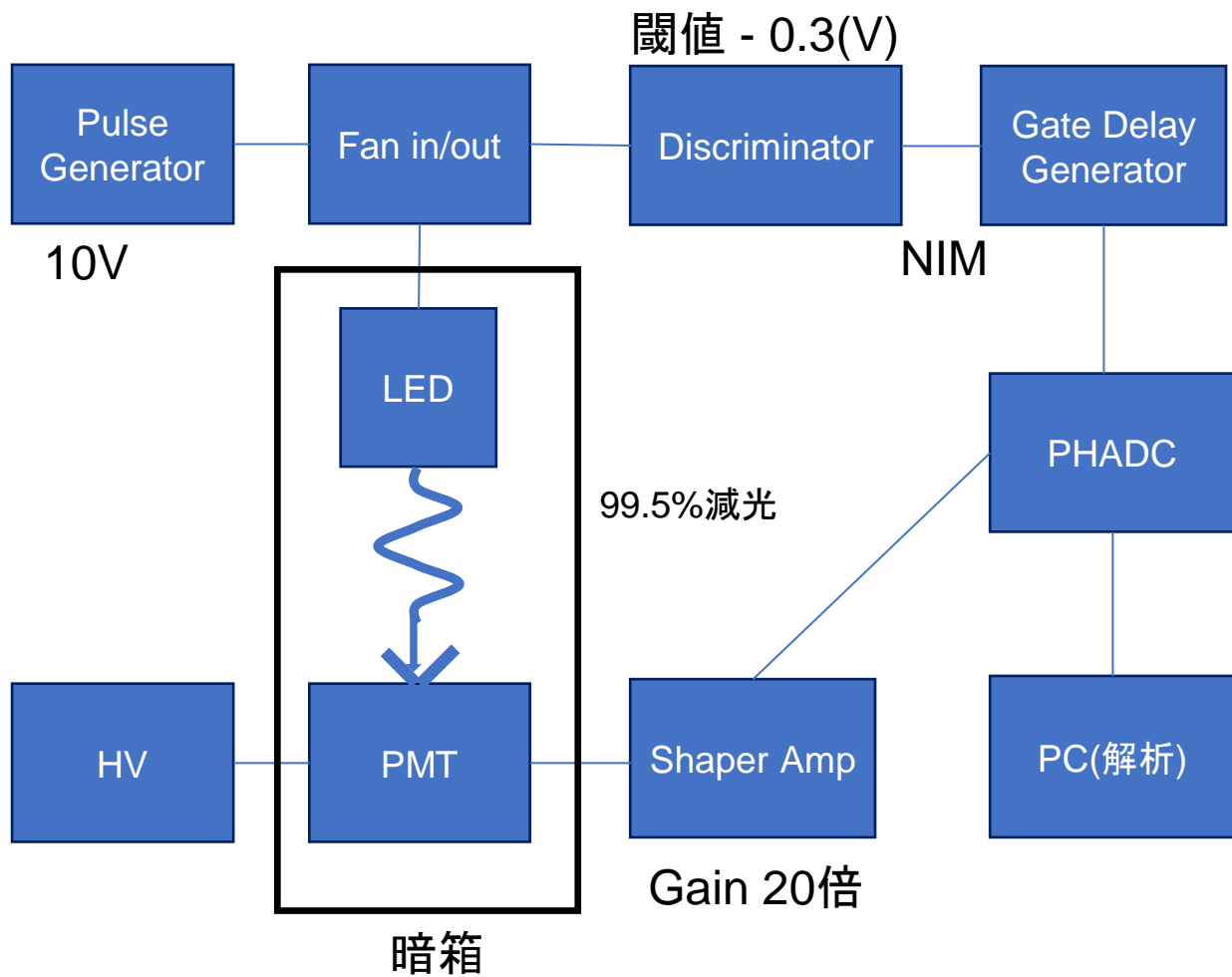


減光フィルターを設置する台に、LEDをつけた同軸ケーブルをテープで固定。

LEDの光が減光フィルターの範囲外から漏れないようブラックシートで台を覆った。

※画像は減光フィルター1-5-10の3枚を入れたもの。

GainCurve



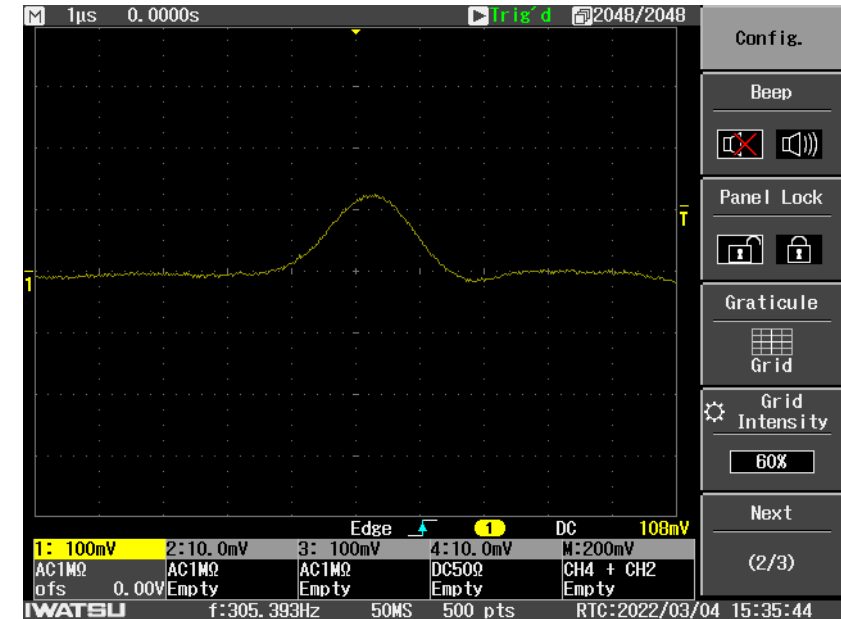
Oscilloscope



IWATSU DIGITAL OSCILLOSCOPE DS-5624A VIEWGO II

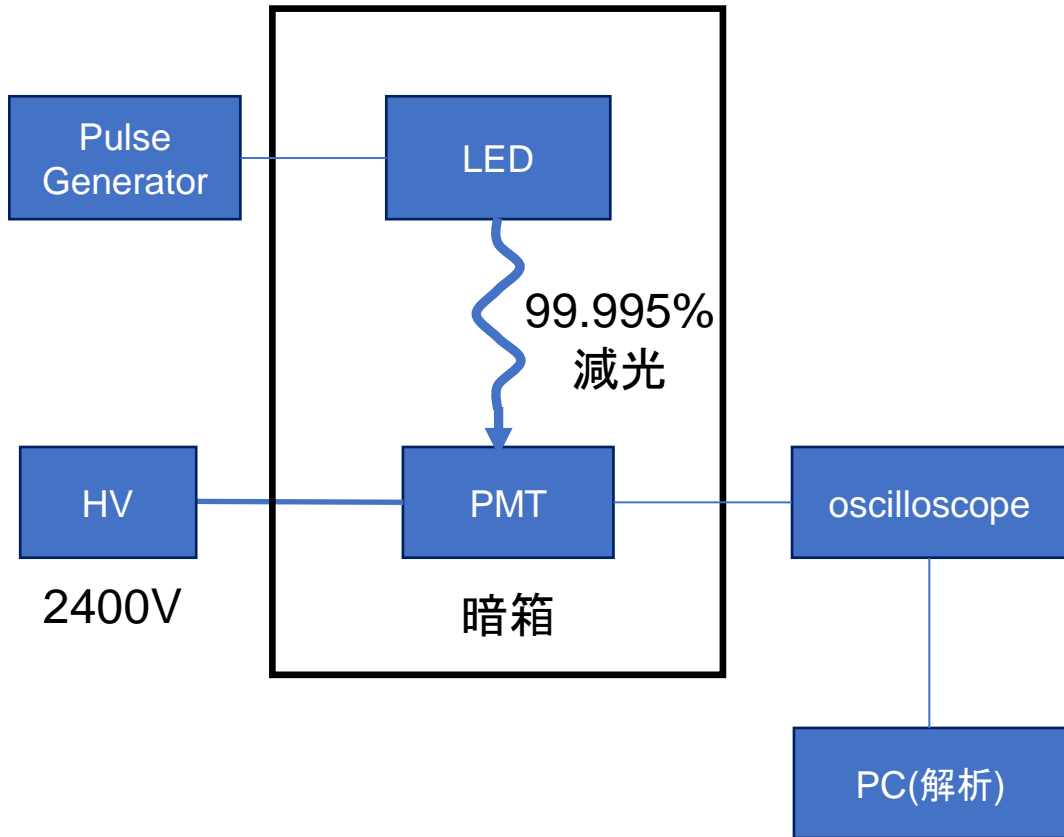
- 周波数帯域：200MHz
- 立ち上がり時間：1.75ns（代表値）
- 入力インピーダンス：1M Ω
- 各トリガーごとに画面内のV-tの情報をCSVファイルで取得できる
- 画面の画像を格納することも可能

解析

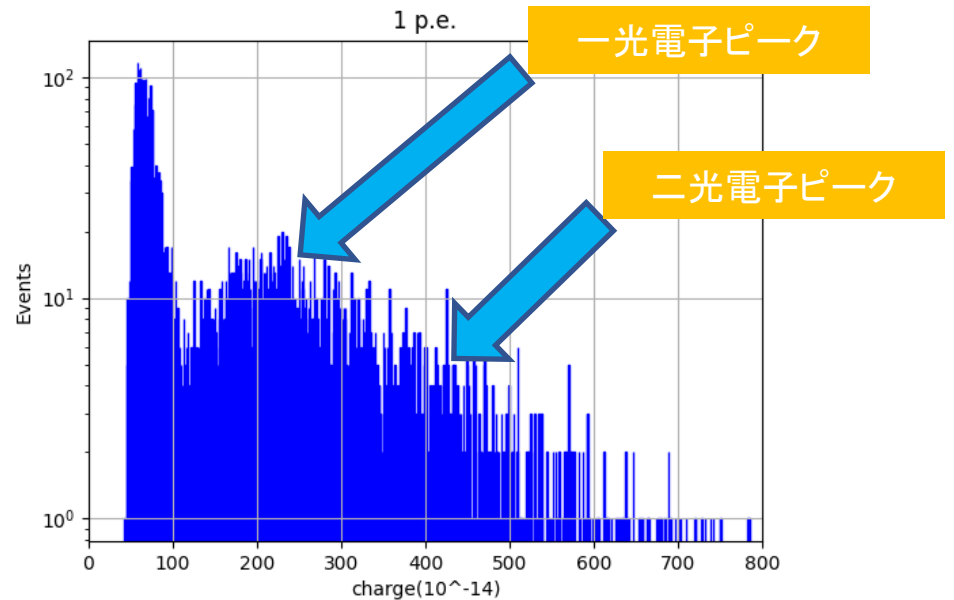
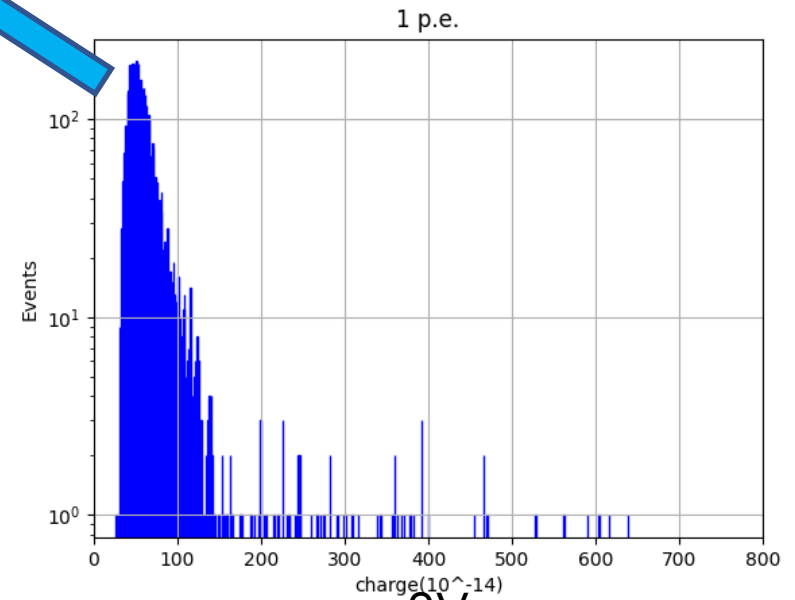


- 得られたCSVファイルのデータを元にV-t波形を積分することでチャージを計算。（抵抗は50 Ω ）
- それをチャージごとにカウント
（縦軸：カウント数、横軸：チャージ）

1 p.e.



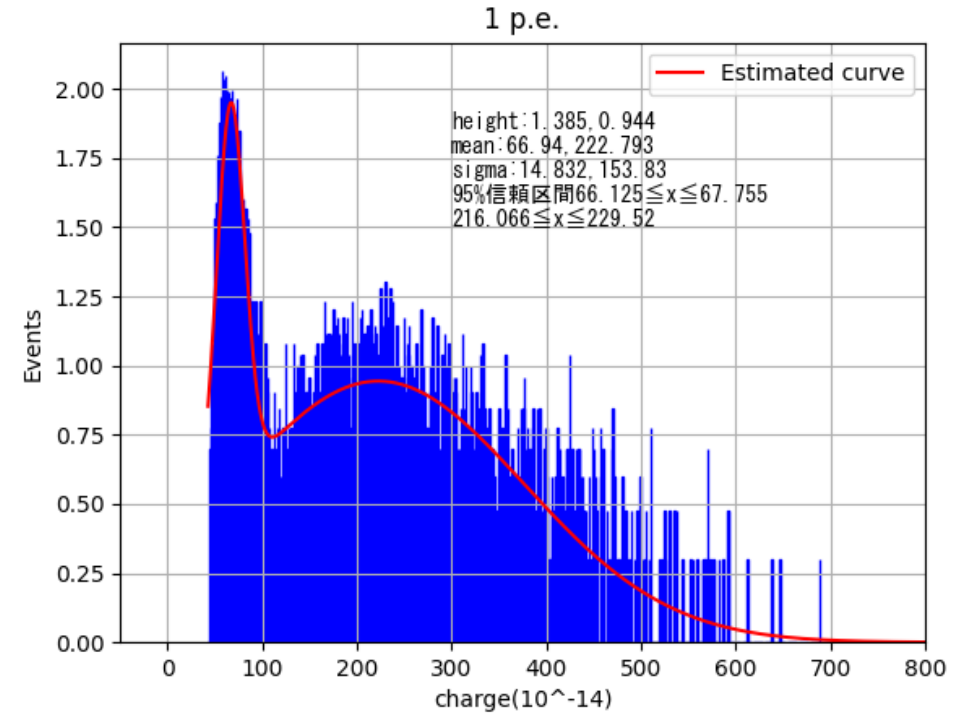
pedestal



1 p.e.

今回の実験で一光電子測定では、PMTのGainは表のようになり、Gain平均は 0.90×10^7 となった。
本実験で用いたPMTのGainの典型値(浜松ホトニクスR5912)は 1.0×10^7 である。

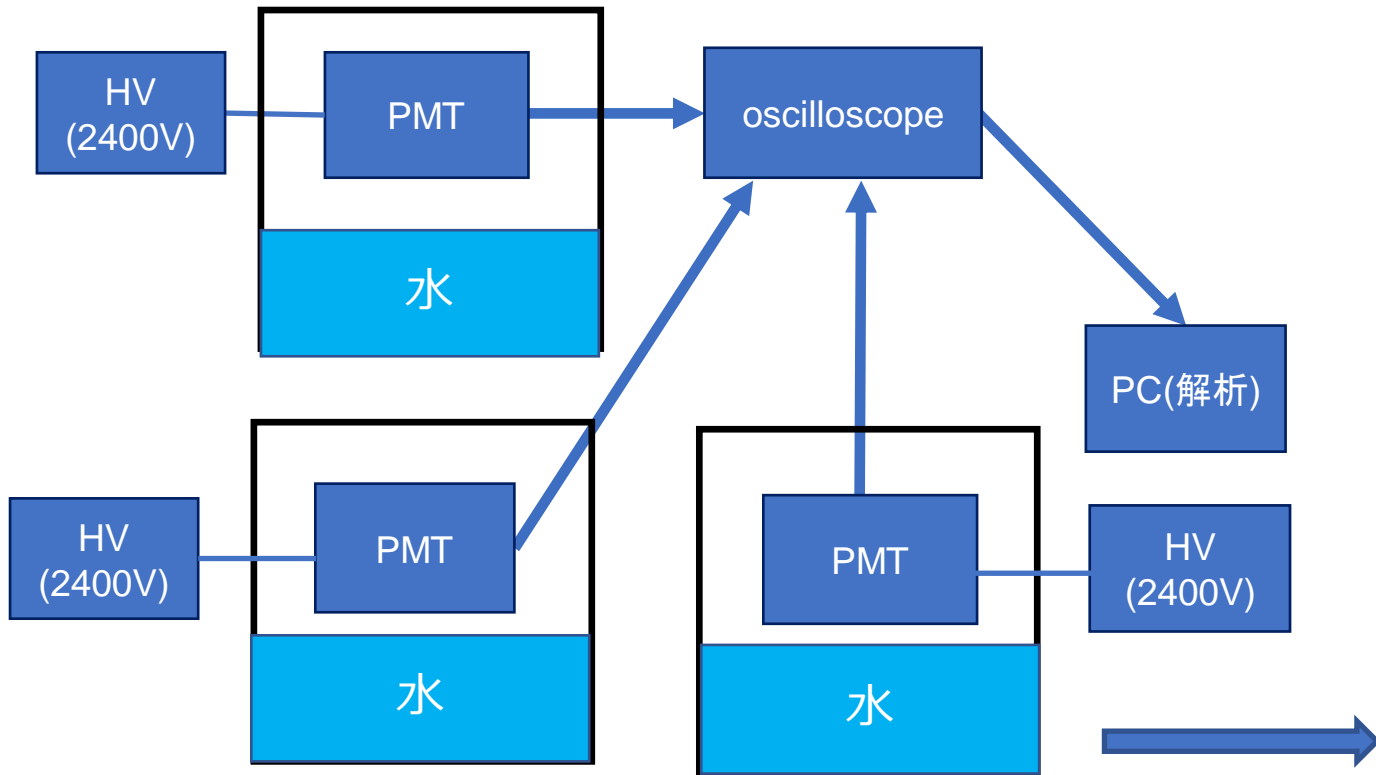
$$e \times \text{Gain(PMT)} \times 1(\text{photoelectron}) = \frac{1}{R} \int V dt$$



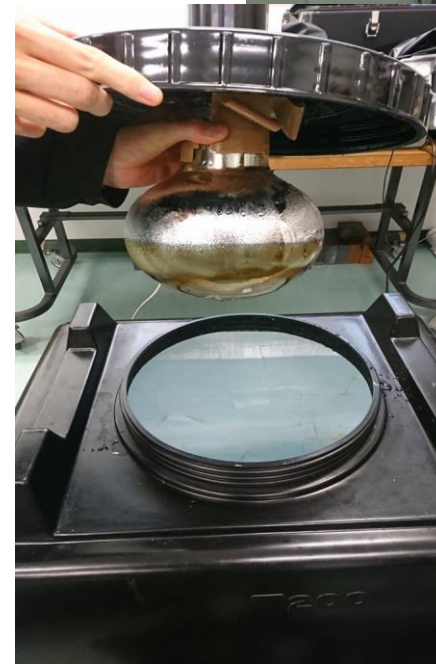
	0V	4.5V	5V	5.5V	6V
① Background charge mean($\times 10^{-14}$)	60.24	66.94	71.86	67.65	71.25
② 1p.e. charge mean($\times 10^{-14}$)		222.79	226.18	193.06	211.85
②—①		155.85	154.32	125.41	140.60
PMT Gain		9.74×10^6	9.65×10^6	7.84×10^6	8.79×10^6

本実験 ～到来方向決定～

setup

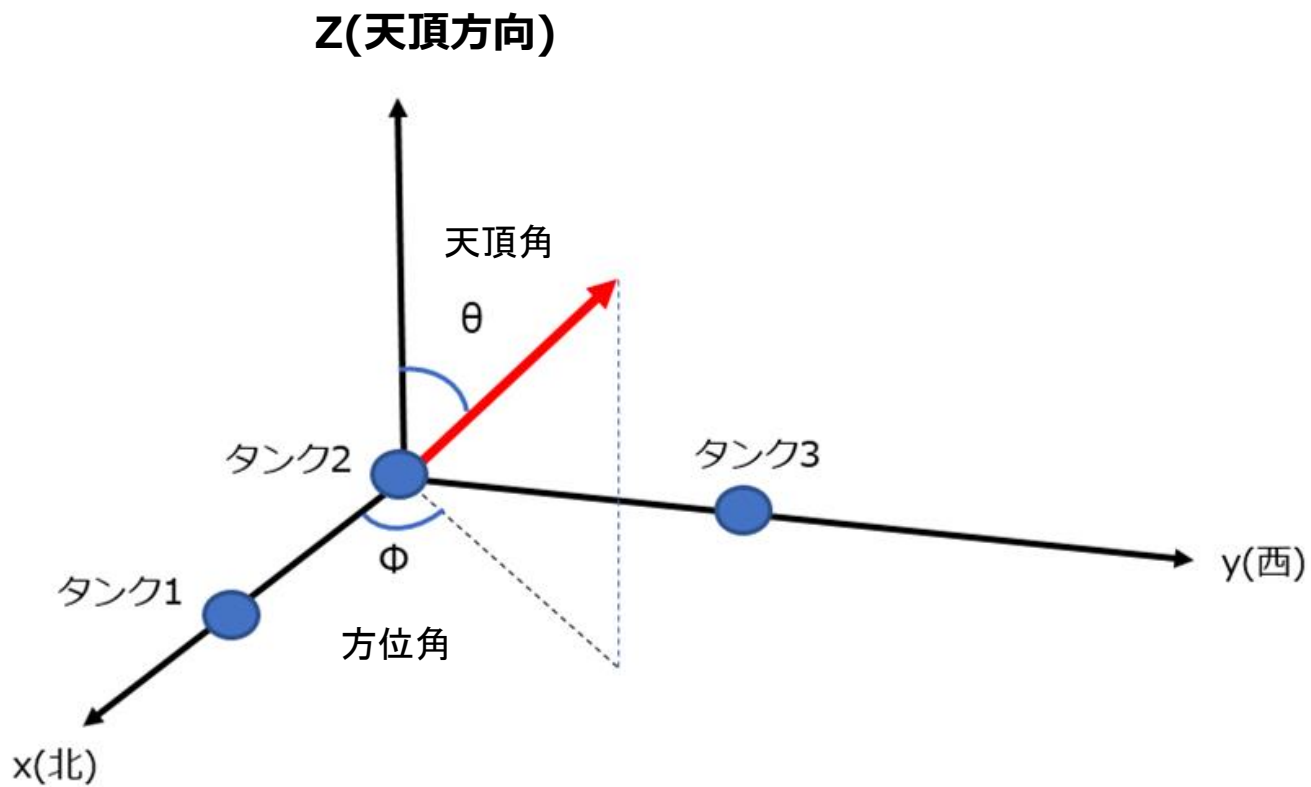


※実験に使用するケーブルの長さは同一



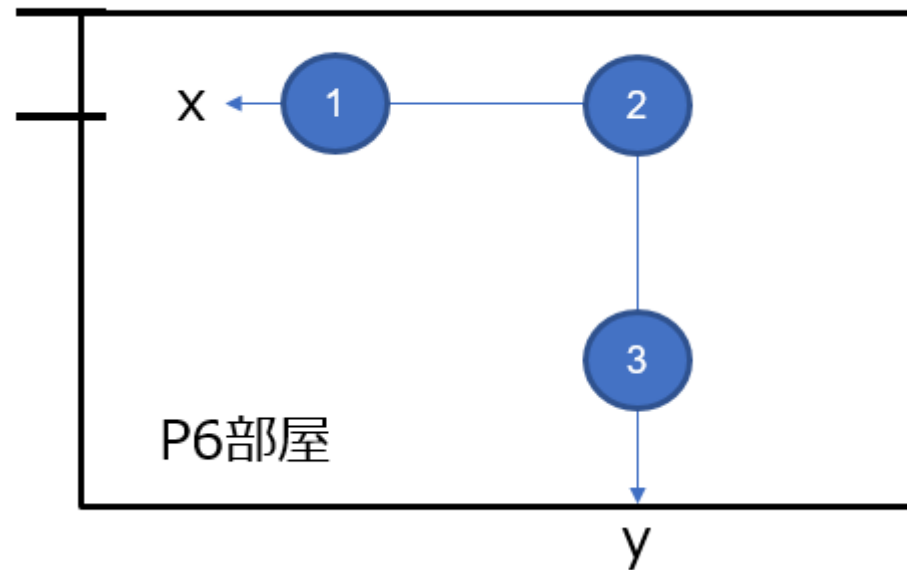
3つのタンクに来るミューオンの時間差から到来方向決定

座標設定



$$0^\circ \leq \phi < 360^\circ$$

$$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

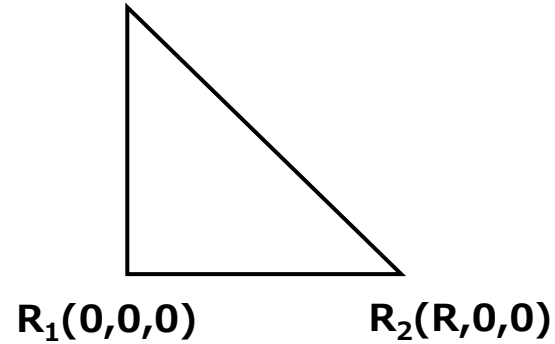


理論

水タンク配置図

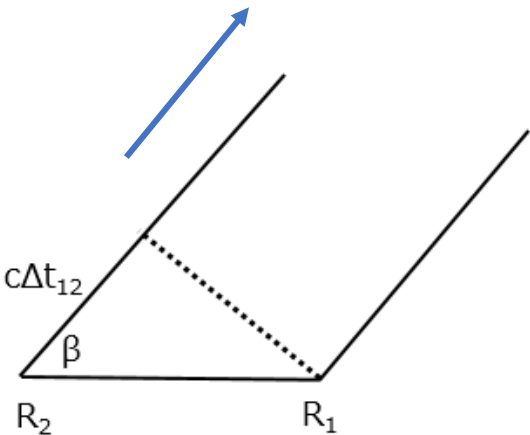
本実験では $R=2.5(\text{m})$

$R_3(0,R,0)$ 上から見た図



到来方向

$$\mathbf{a} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$$



$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{R}_{12} = |\mathbf{R}_{12}| \cos \beta = c\Delta t_{12}$$

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{R}_{13} = c\Delta t_{13}$$

$$\phi = \arctan \frac{\Delta t_{13}}{\Delta t_{12}}$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{c\sqrt{\Delta t_{12}^2 + \Delta t_{13}^2}}{R} \right)$$

オーダー

$$\sin^2 \theta = \frac{c^2(\Delta t_{12}^2 + \Delta t_{13}^2)}{R^2}$$

$$\Delta t_{12}^2 + \Delta t_{13}^2 \leq \frac{R^2}{c^2} \simeq 69.4 \times 10^{-18}$$

t は数nsで観測する必要がある。
0.1nsオーダーまで読む必要がある。

誤差

$$\phi \text{の誤差} = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi}{\partial t_{12}}\right)^2 \Delta t^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial t_{13}}\right)^2 \Delta t^2} = \frac{\Delta t}{\sqrt{t_{12}^2 + t_{13}^2}}$$

$$\theta \text{の誤差} = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial t_{12}}\right)^2 \Delta t^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t_{13}}\right)^2 \Delta t^2} = \frac{c\Delta t}{\sqrt{R^2 - c^2(t_{12}^2 + t_{13}^2)}}$$

偶然同時係数

$$N = 2n_1n_2\tau = 8.46 \times 10^{-7}$$

N (/s) :一秒あたりの偶然同時カウント頻度

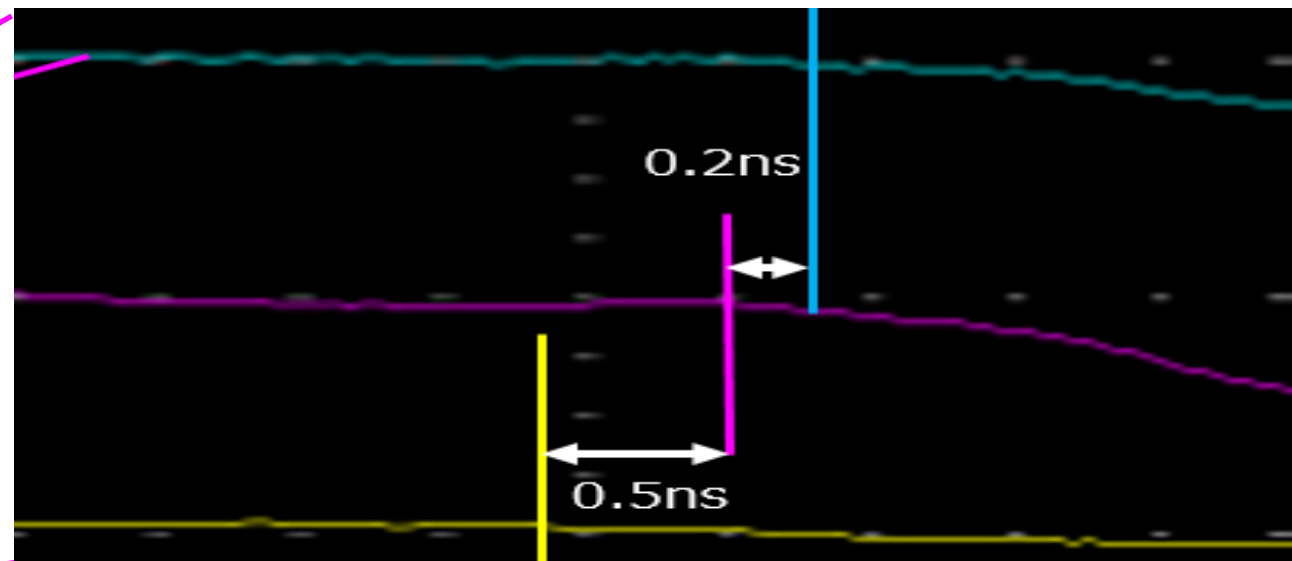
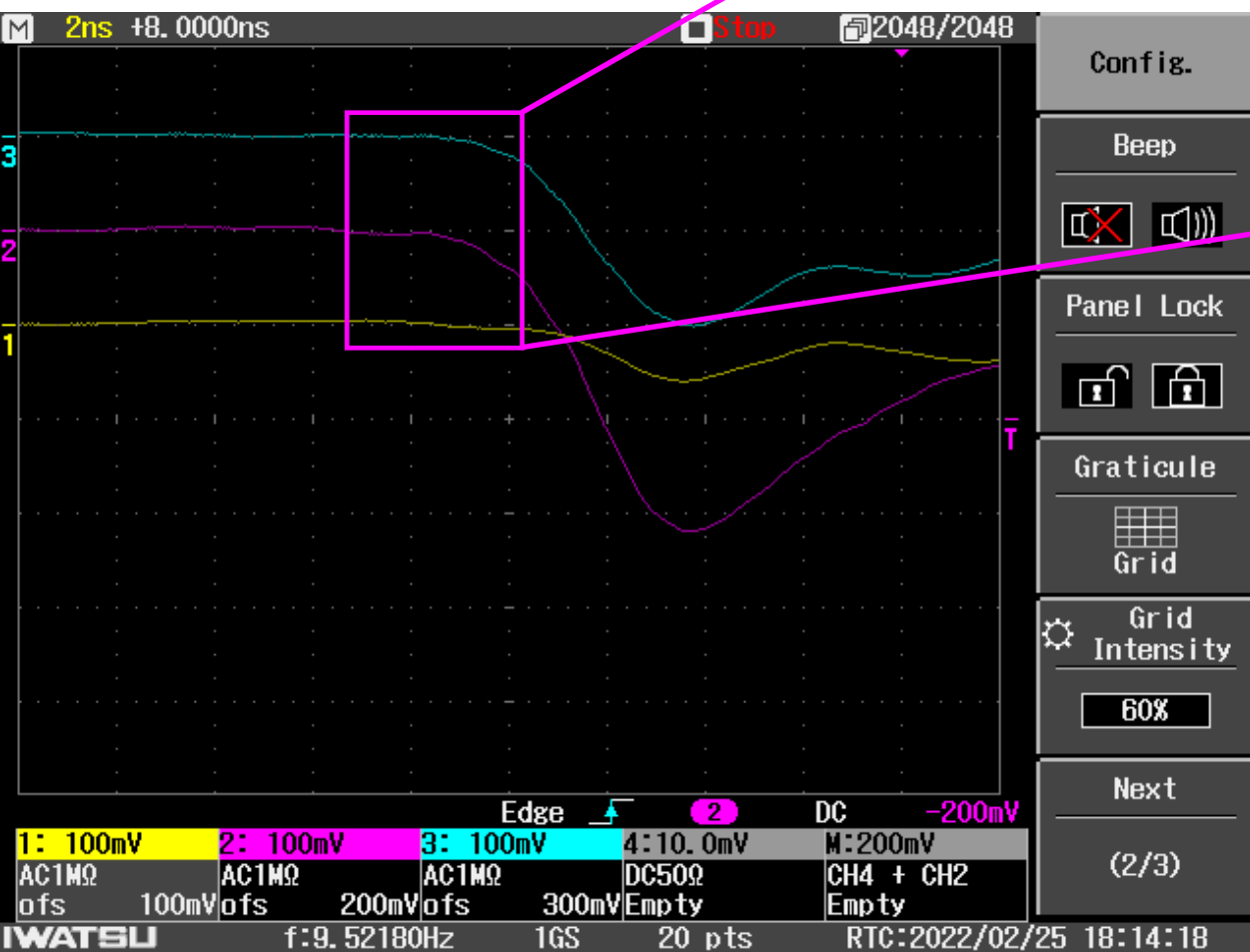
n_1, n_2 :一秒あたりのカウント数 (4.6)

τ :コインシデンス分解時間(20ns)

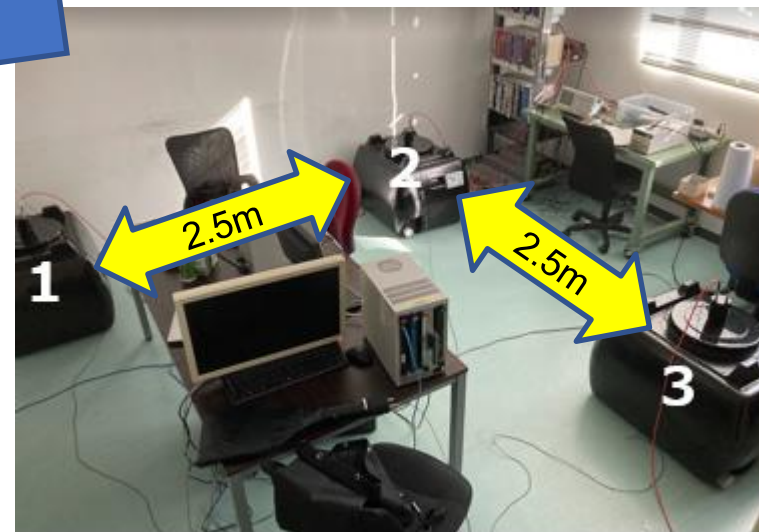
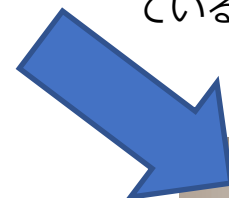
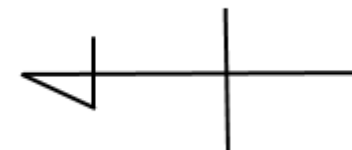
(参考:粒子物理計測学入門)

計測時間あたりでは、 9.1×10^{-4} 個なので、問題なしと判断した。

時間差観測

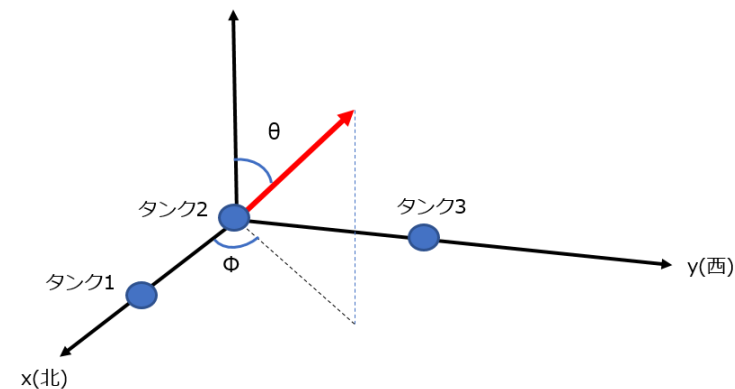


およそこの方向から来ていると推測される

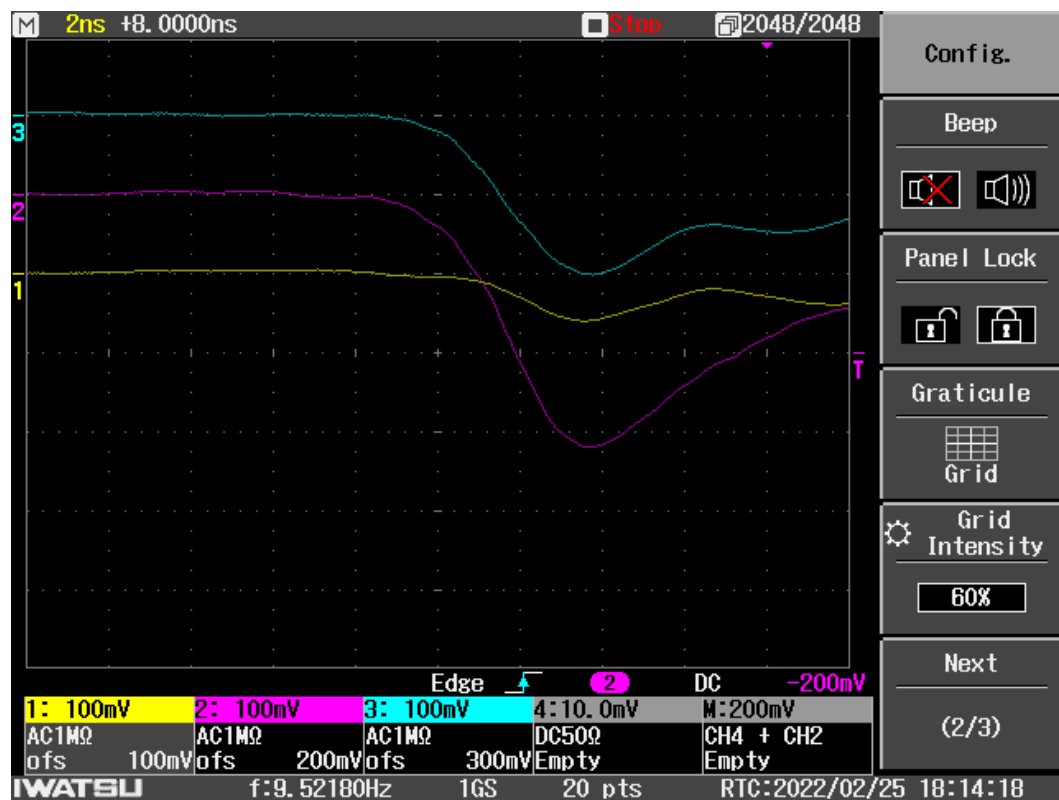


Event1(分解能0.4nsで波形観測)

到来方向決定

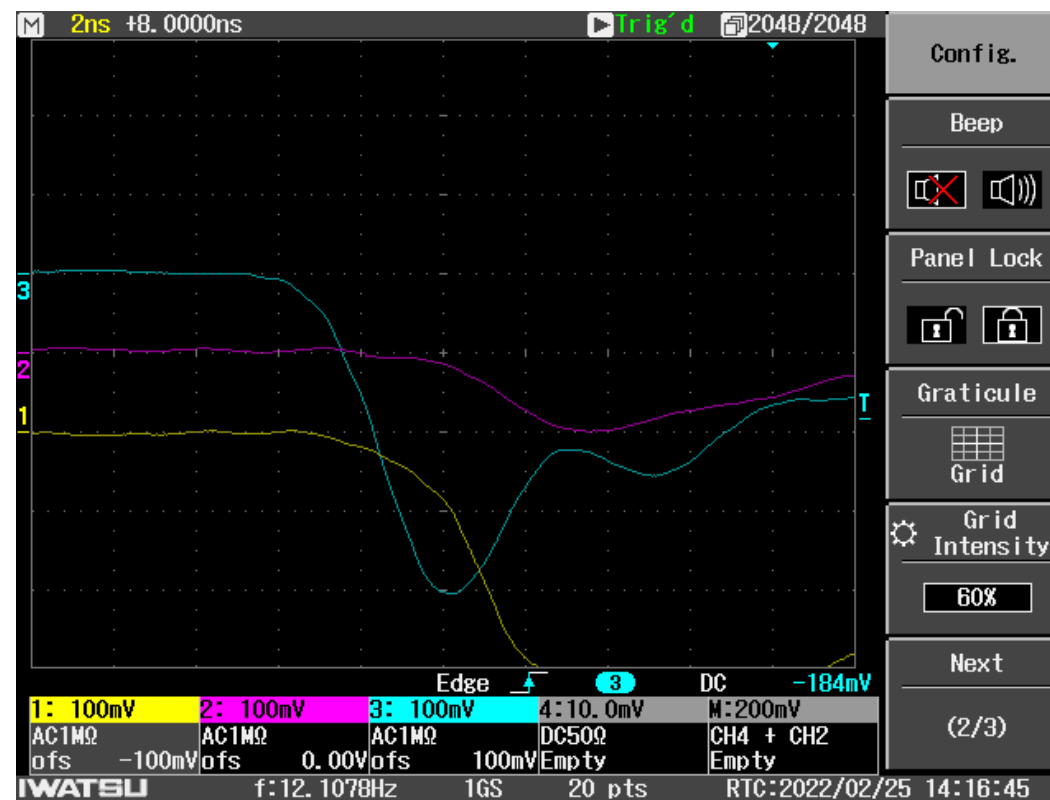


Event 1



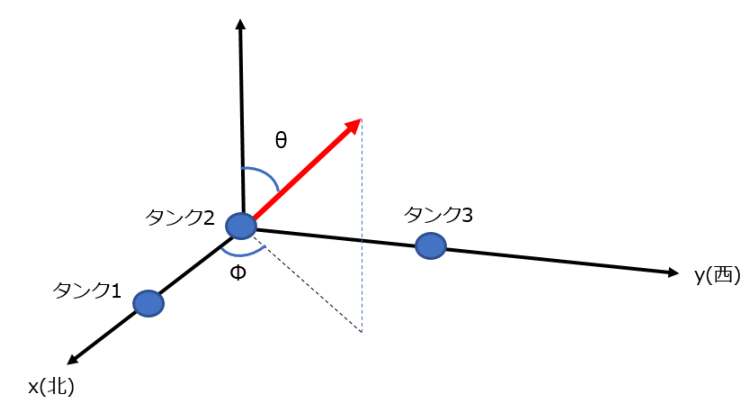
$\phi = 292^\circ \pm 21^\circ$ (東北東)
 $\theta = 9^\circ \pm 1^\circ$

Event 2

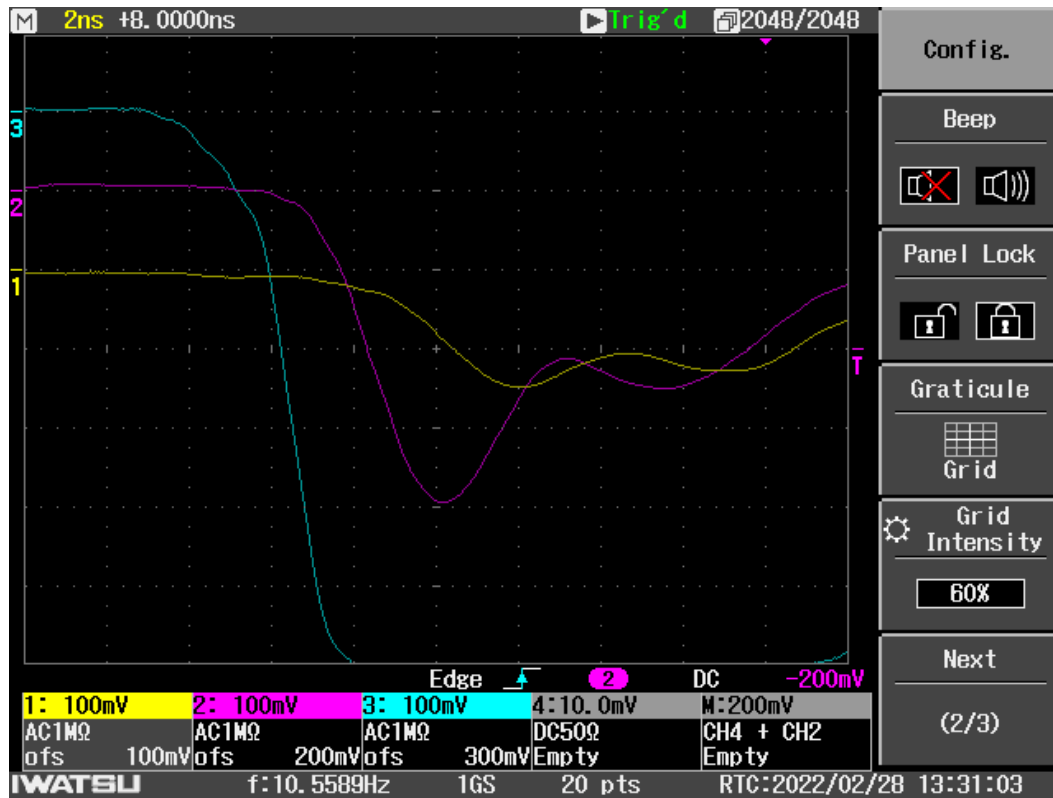


$\phi = 68^\circ \pm 5^\circ$ (西北西)
 $\theta = 40^\circ \pm 1^\circ$

到来方向決定

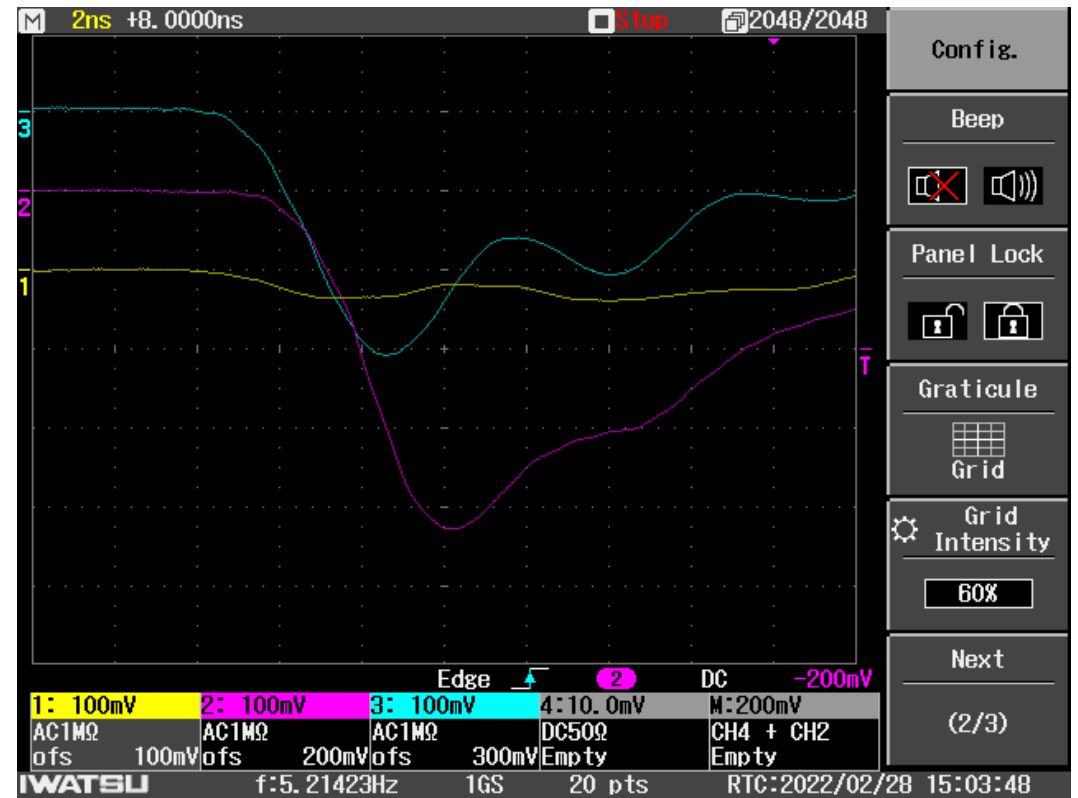


Event 3



$\Phi = 82^\circ \pm 4^\circ$ (西)
 $\theta = 65^\circ \pm 1^\circ$

Event 4



$\Phi = 43^\circ \pm 7^\circ$ (北西)
 $\theta = 29^\circ \pm 1^\circ$

到来方向

地平座標⇒赤道座標(赤緯,赤経)と変換したものと合わせて表にした。

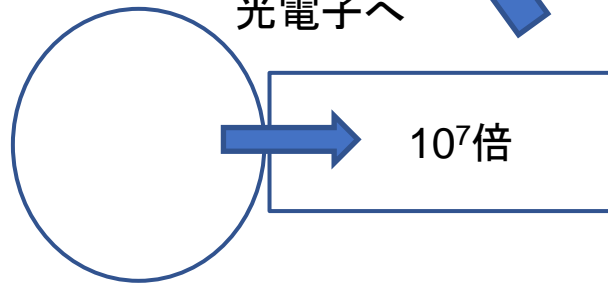
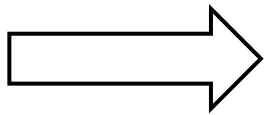
	Event1	Event2	Event3	Event4
Φ (地平座標)	292°	68°	82°	43°
Θ (地平座標)	9°	40°	65°	29°
赤緯(α)	44°	75°	80°	64°
赤経(δ)	18h36m	22h40m	0h12m	21h32m

光電子数



Event 1

水チェレンコフ放射後の光子



PMT

水チェレンコフ放射によるPMTへの入射粒子数実験値

Event1の画像ではタンク1,2,3それぞれに光子が20個、140個、95個がPMTに入射したという結果となった。

水チェレンコフ放射によるPMTへの入射粒子数理論値

$$N = \text{量子効率} \times 2\pi z^2 \alpha x \sin \theta \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{d\lambda}{\lambda^2} \simeq 10^3$$

量子効率:20%

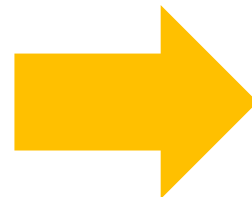
x:30cm

α :1/137

λ_1 :350(nm)

Θ :42°

λ_2 :550(nm)



入射数が理論値より少ない???

原因

- タイベックシートを上面に貼っていなかった。(面積比的に6%程度)
⇒一回の反射でPMTへ入射したものしか反映されず、集光率が悪い。

課題、改善点

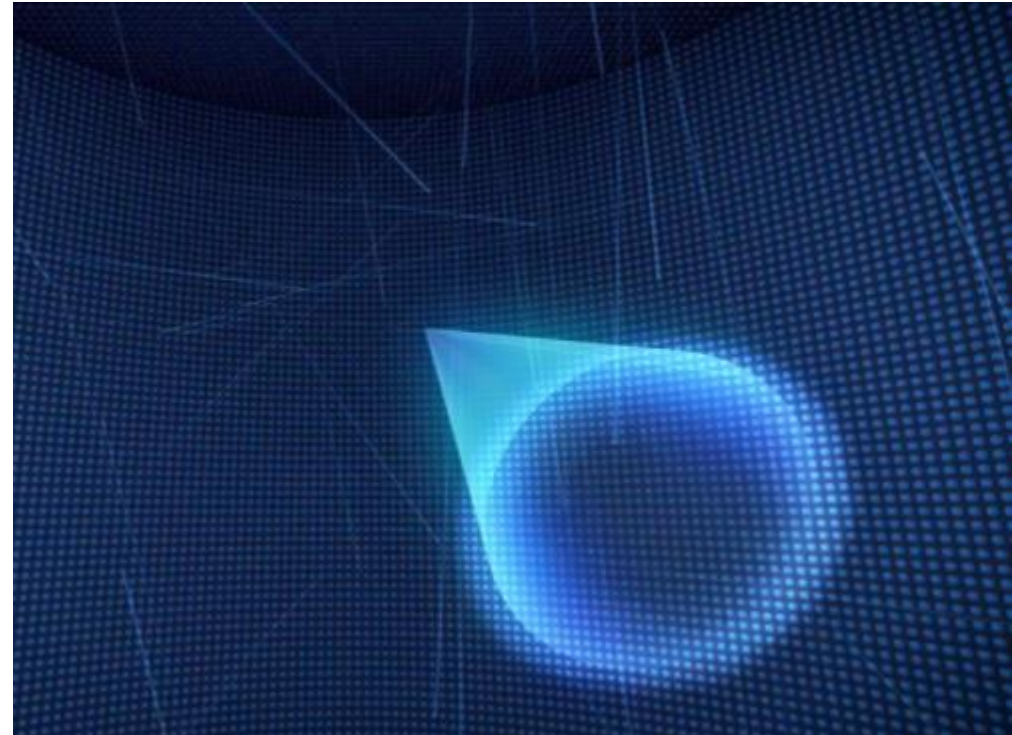
- ・ 時間差測定 of 統計的な解析
 - ⇒オシロスコープの解像度の限界となっていた部分を上手く理論的に処理する方法。
 - ⇒ 距離を広げて測定すれば時間差が大きくなるので統計的な解析が可能になる。(今回の距離で精度良い実験を行うのには限界がある)
- ・ データ数をたくさん取る
 - ⇒ θ と ϕ の分布をプロットすればおもしろそう
 - ϕ は一様分布、 θ は真上からが多いと予想

ご清聴ありがとうございました

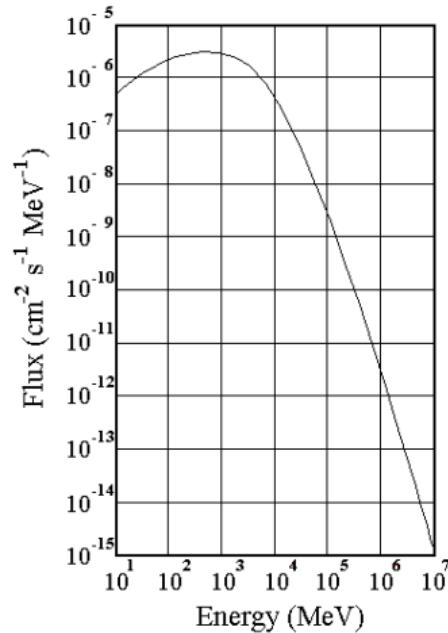
② 水チェレンコフ検出器

- ・ 水中でのチェレンコフ光を
光電子増倍管で観測
- ・ 42度の円錐状にチェレンコフ光が観測される。
(大気中では1度程度)

$$\theta = \cos^{-1} \frac{1}{1.34} = 42^\circ$$



地表でのミューオンのエネルギー分布



ピークは 1 GeV程度

X は高度、 λ は平均自由行程

$$J(X, \theta)d\Omega = J(X, \theta = 0)(\cos \theta)^{\frac{X}{\lambda}} d\Omega \sim \cos^2 \theta$$

ここからマッピングすると真上からが多いと予想

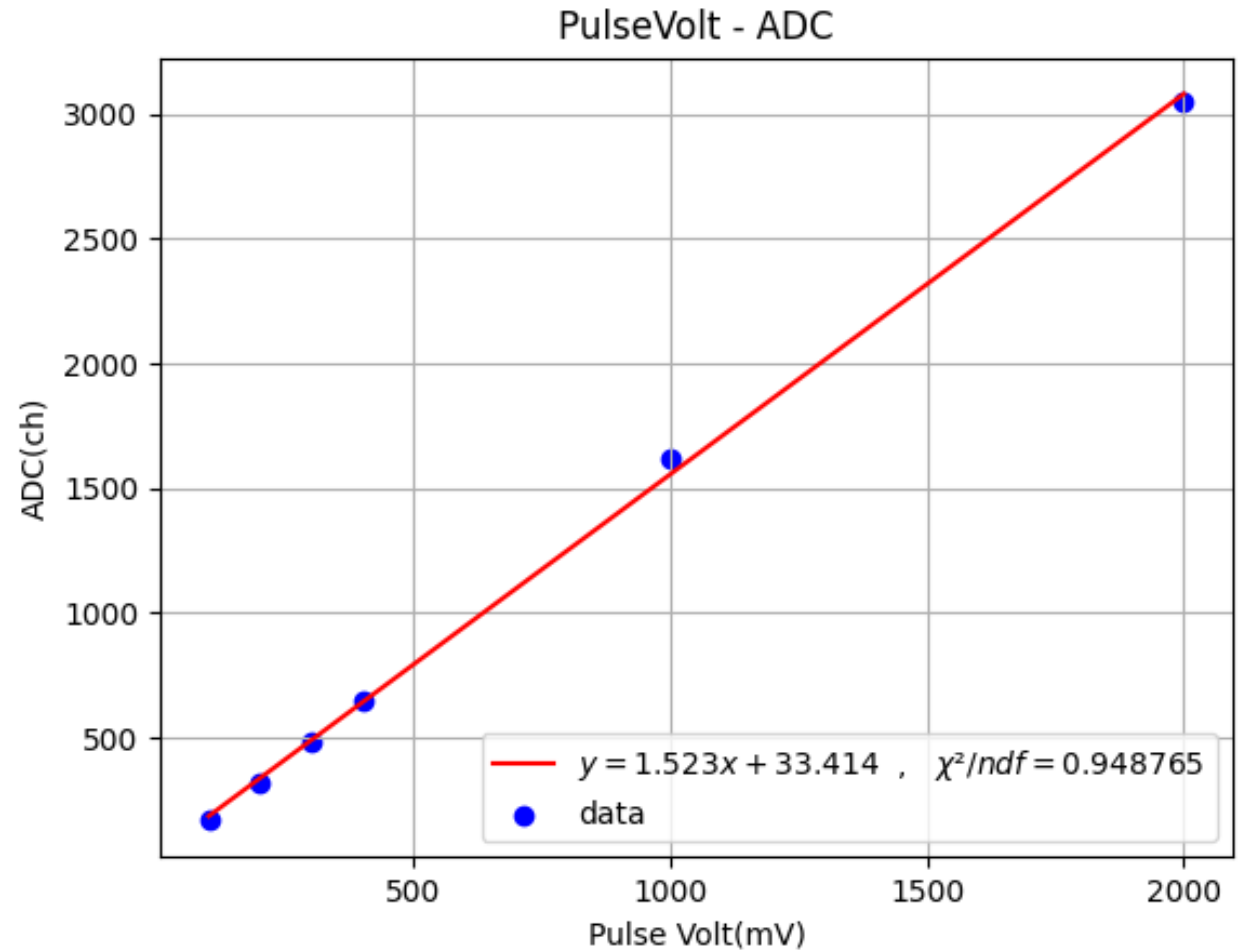
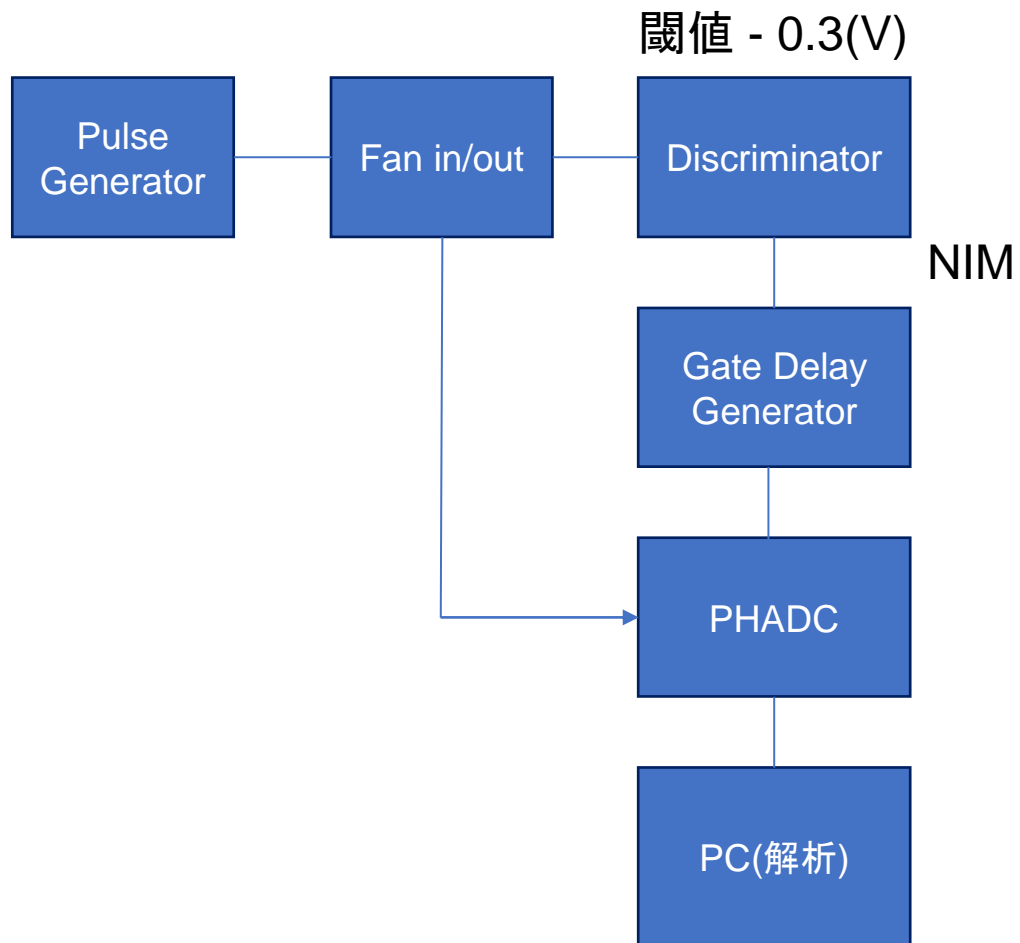
図10 地表における宇宙線ミュー粒子のエネルギー分布

ミューオン

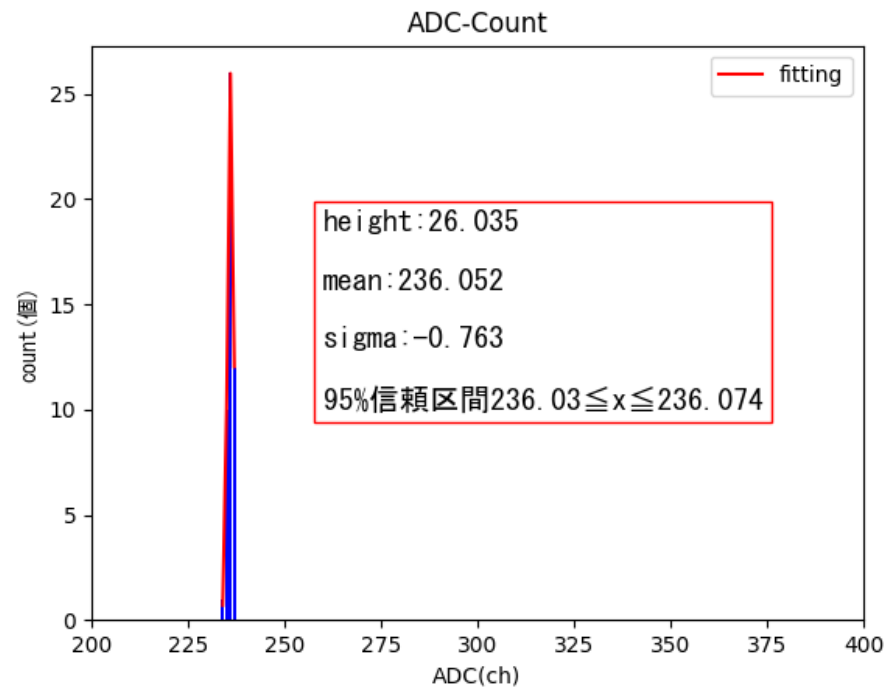
- 10GeV/cのミューオンは、相対論的効果により寿命が 207.95×10^{-6} (s)となっていて、62.34km進むことができる。
⇒一次宇宙線の最初の反応場所は高度40kmあたりなので地表まで届く。
- 二次宇宙線の天頂角分布は、エネルギーが高い方は $\sim \cos^2\theta$ 、エネルギーが低い方は $\sim \cos^3\theta$ に比例する。
- ミューオンの場合は $\sim \cos^2\theta$ に比例することが知られている。(透過しやすいため)

(参考:粒子物理計測学入門)

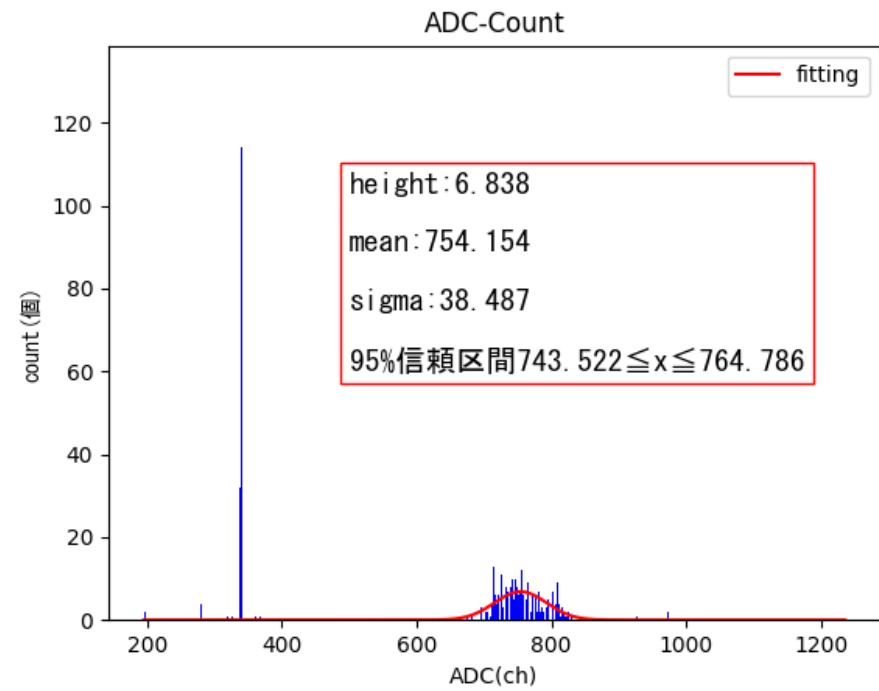
Calibration



GainCurve

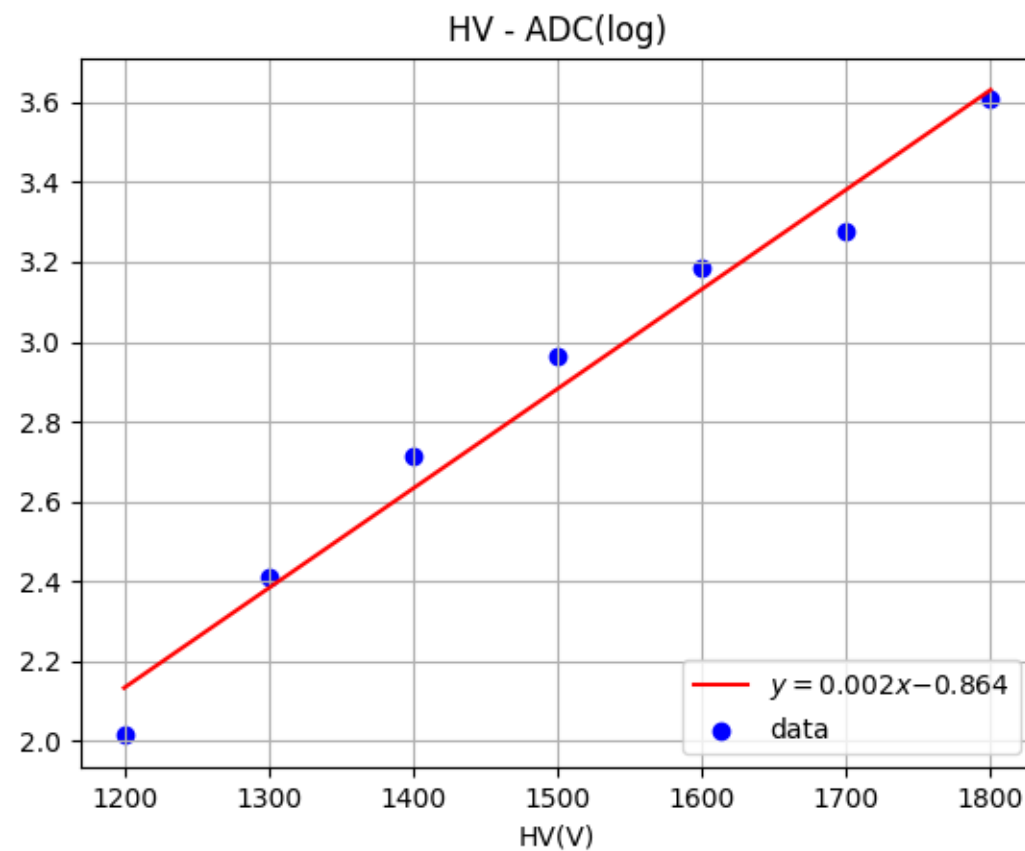
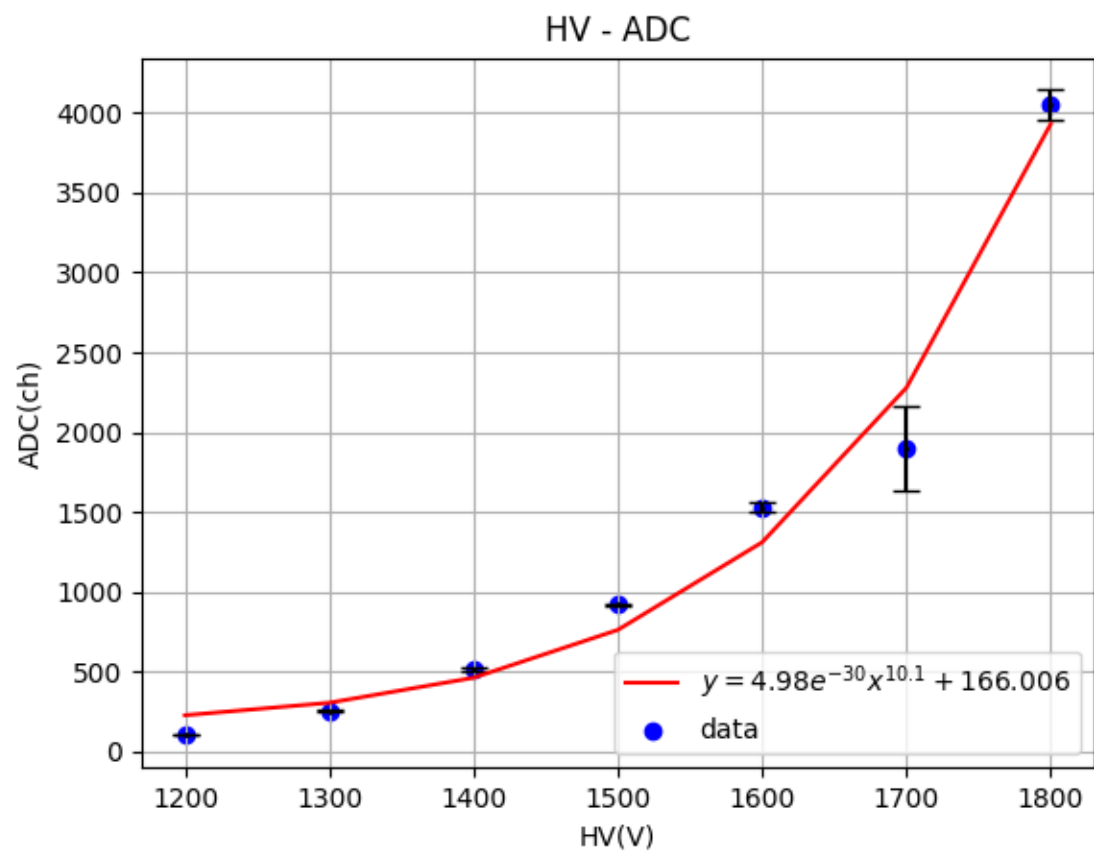


ADC-Count fitting (0V)



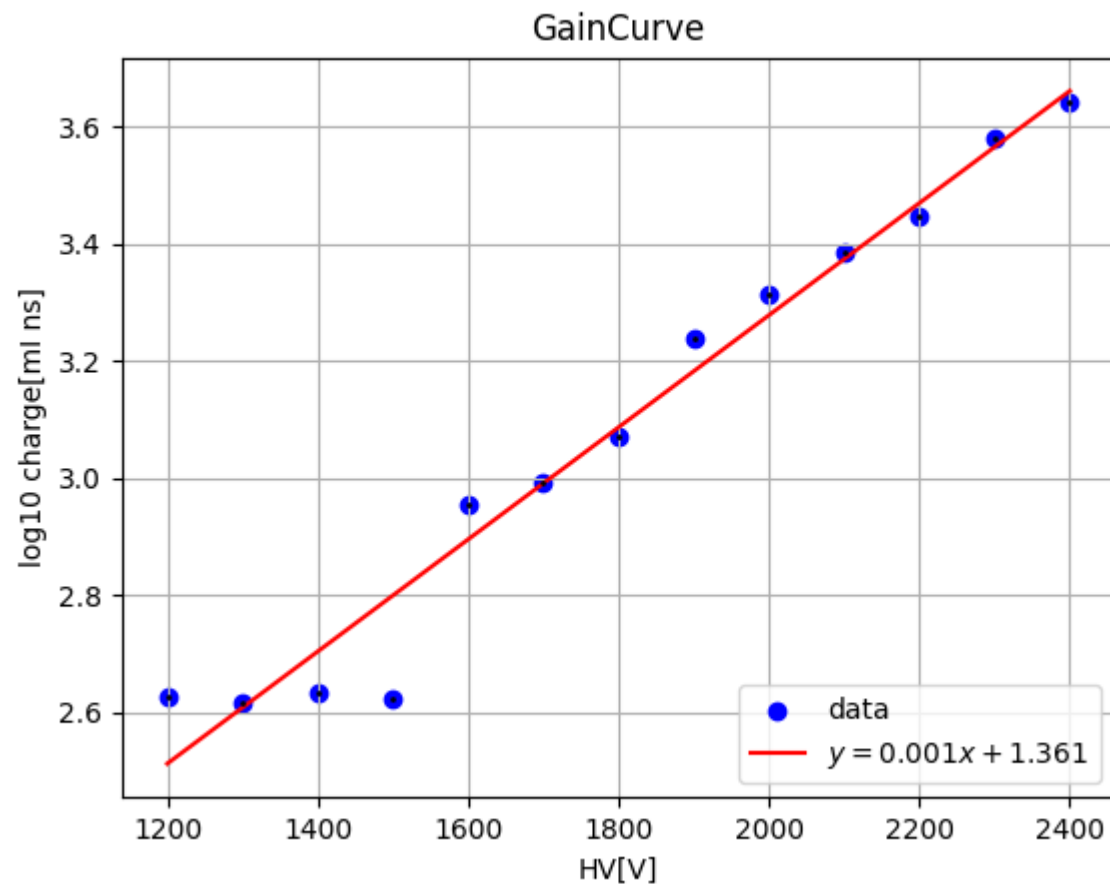
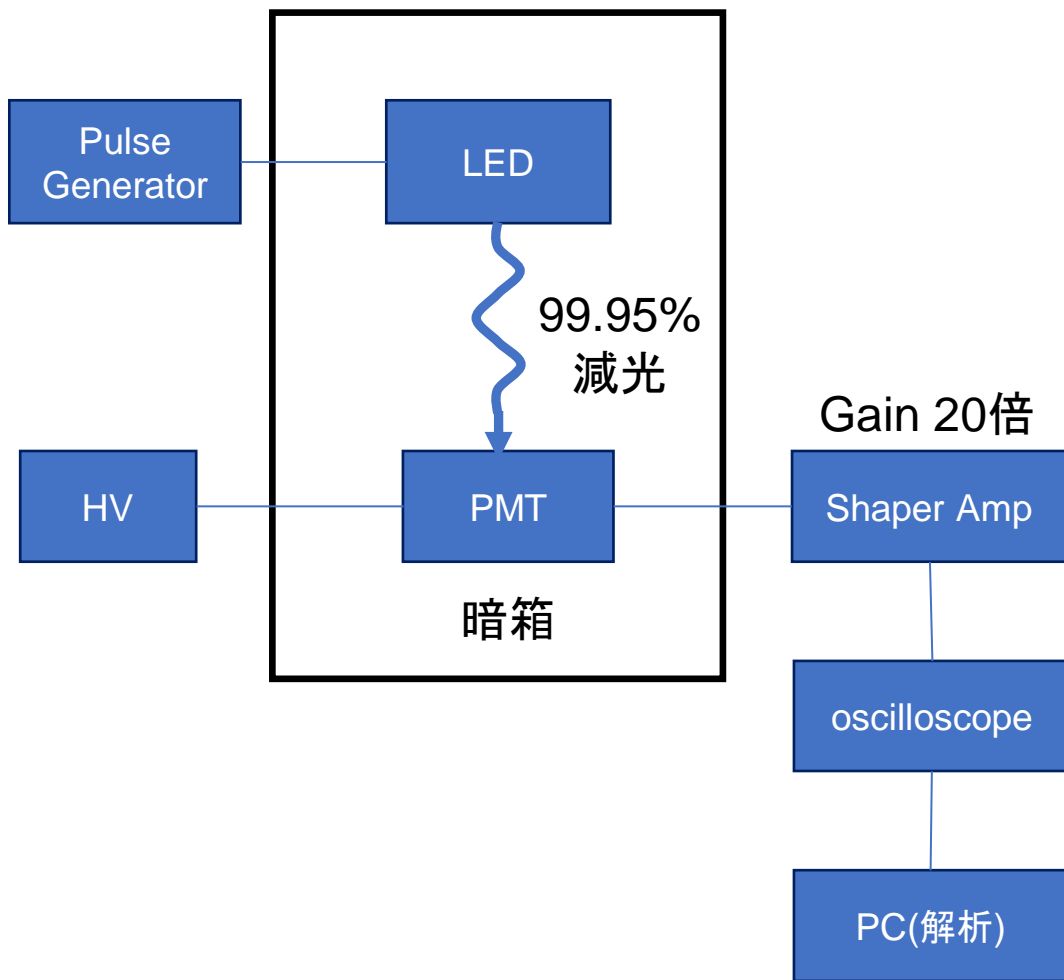
ADC-Count fitting (1400V)

GainCurve(一回目)



1回目のPMTのGaincurve測定。

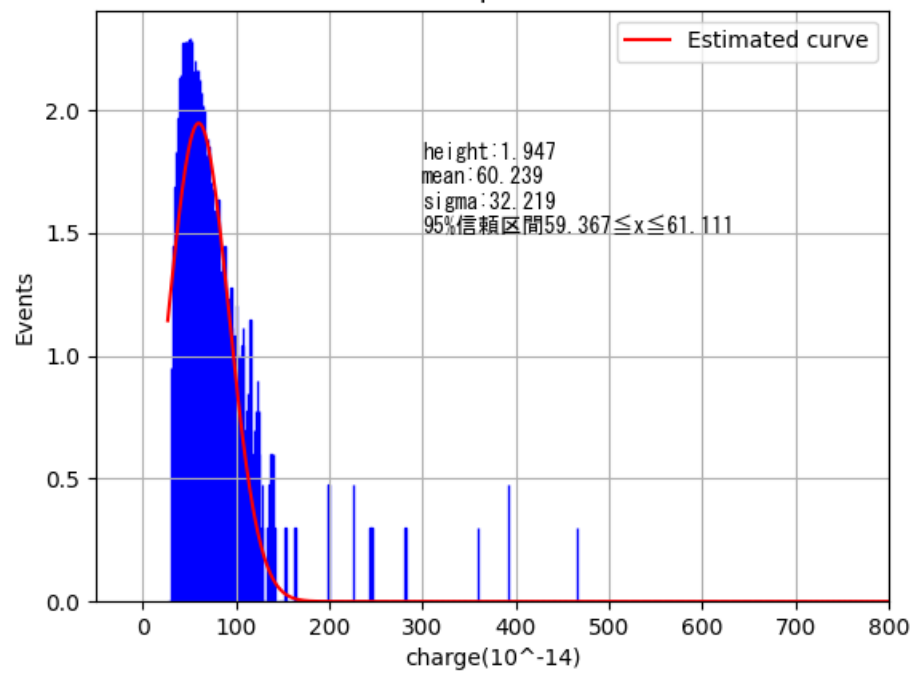
GainCurve(new PMT)



1 p.e.

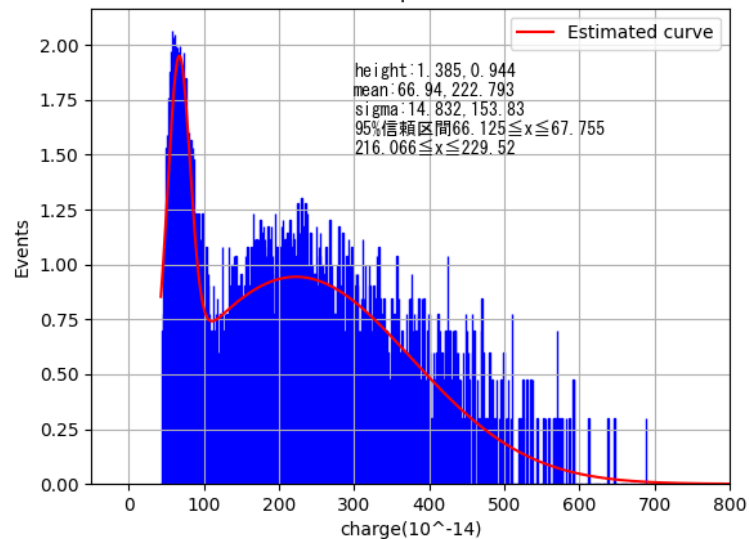
0V

1 p.e.



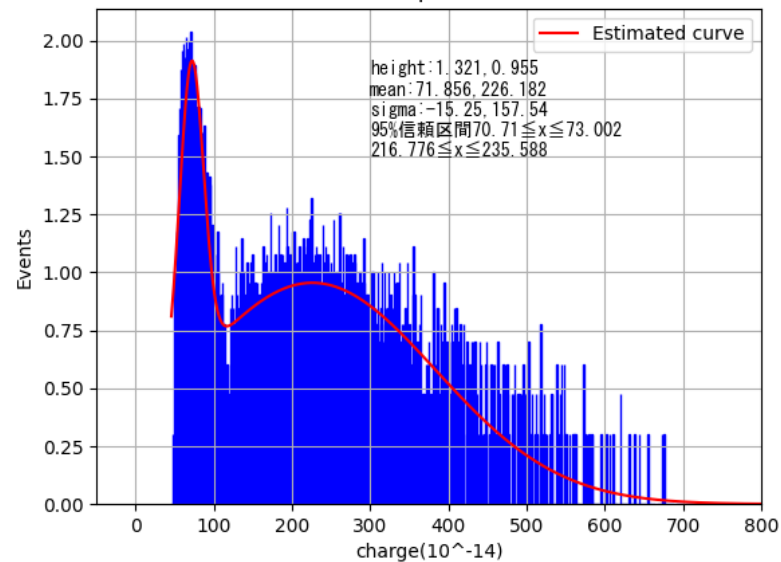
4.5V

1 p.e.



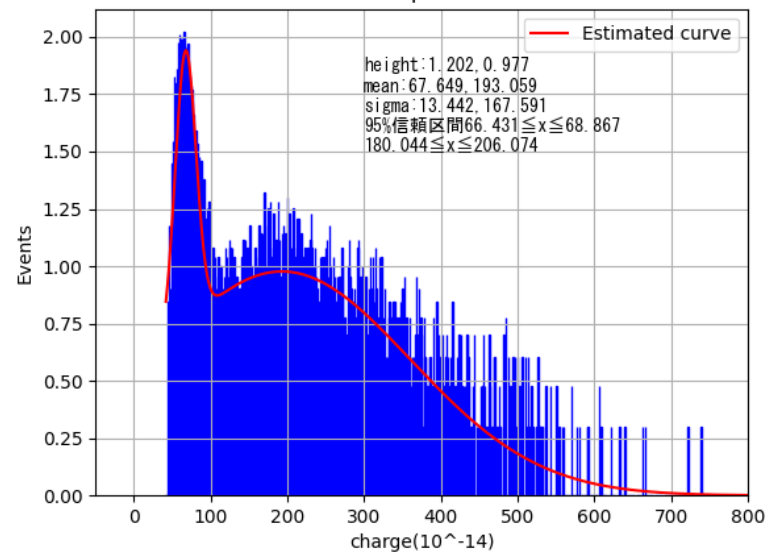
5V

1 p.e.



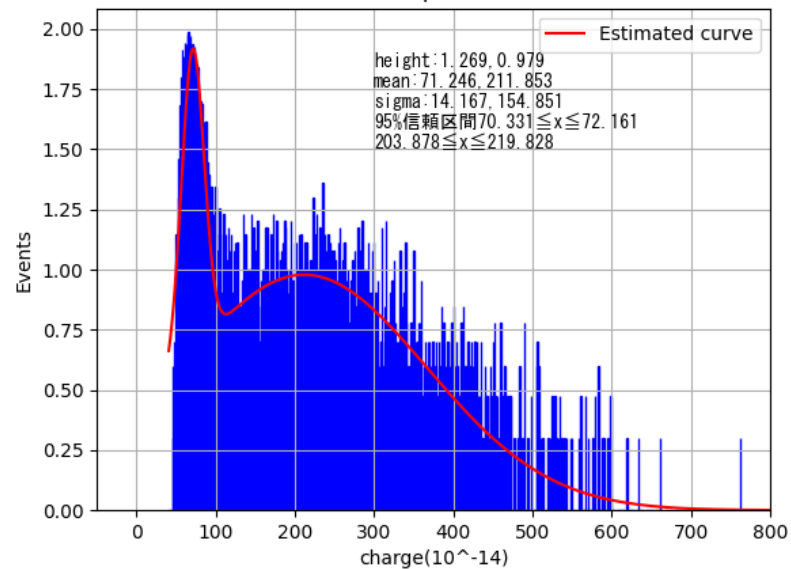
5.5V

1 p.e.



6V

1 p.e.



解析

立ち上がり時間にならってピークの1/10になる時間を到来時間とする方法

- ・ 問題点

⇒ イベント数が少ない

⇒ ピークがoscilloの外に出ることも多い。

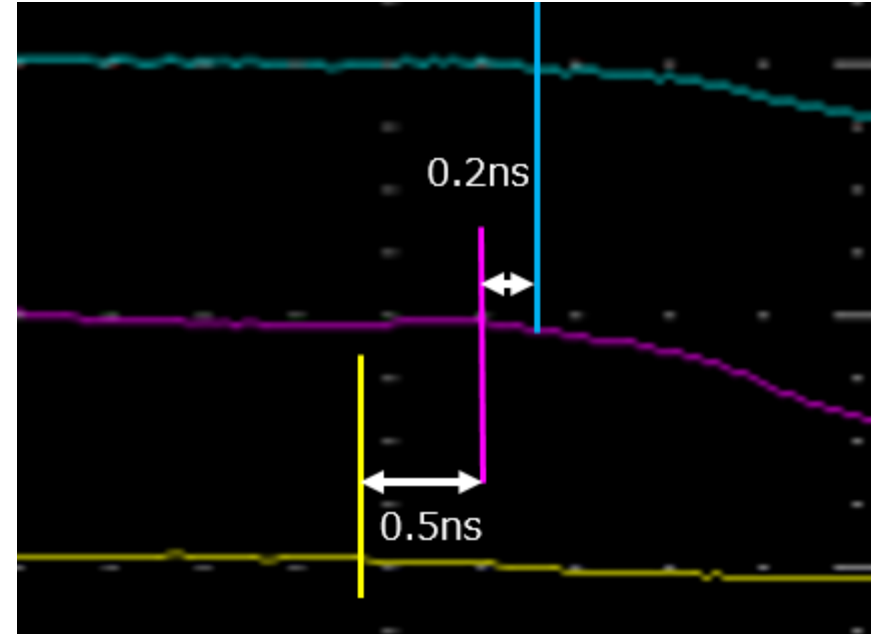
⇒ csvデータの解像度が1nsで不十分



画像出力ができるので、0.4ns(0.1ns)の解像度で判別可能

到来時間差

二回目	0.8ns、	2.0ns
一回目	0.5ns、	-0.2ns
三回目	0.4ns、	3.0ns
四回目	1.2ns、	1.1ns



赤緯、赤経変換

参考: https://www.ir.isas.jaxa.jp/~maruma/kougi/sec2_190411.pdf

赤緯 $\delta = \arcsin(\cos B \cos \theta \cos \phi + \sin B \sin \theta)$

赤経 $\alpha = \Theta - \arctan\left(\frac{\cos \theta \sin \phi}{\sin B \cos \theta \cos \phi - \cos B \sin \theta}\right)$

Bは緯度(京都で35°)



赤経は時間に変換する

赤緯、赤経変換

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \\ \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin B & \cos B \\ 0 & \cos B & \sin B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \sin(\Theta - \alpha) \\ \cos \delta \cos(\Theta - \alpha) \\ \sin \delta \end{pmatrix}$$

ここから逆行列をとって赤緯、赤経を求めた。