

ミューオンによる チェレンコフ光の観測

末野慶徳
三浦 栞

2019年2月22日

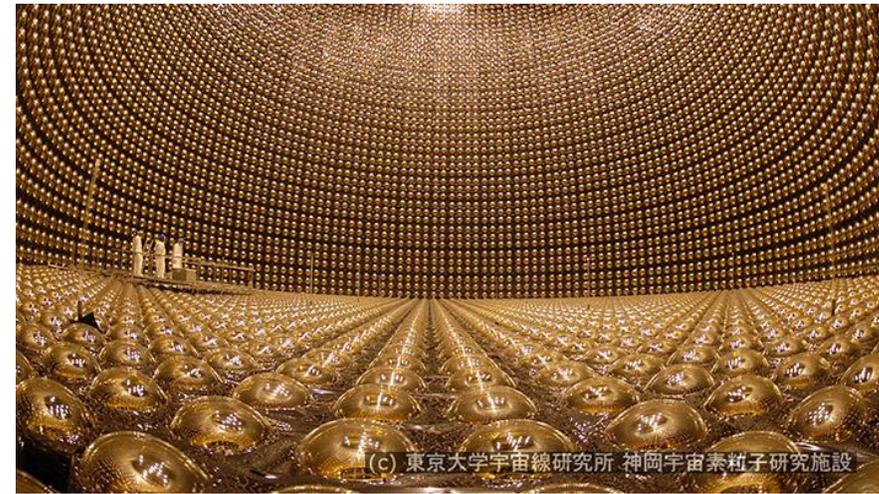
目次

- 1 : 動機と実験目標
- 2 : 実験の原理、メインセットアップ
- 3 : Calibration
- 4 : 1photoelectron
- 5 : トリガー回路
- 6 : μ 粒子によるCherenkov光の測定実験
- 7 : まとめ

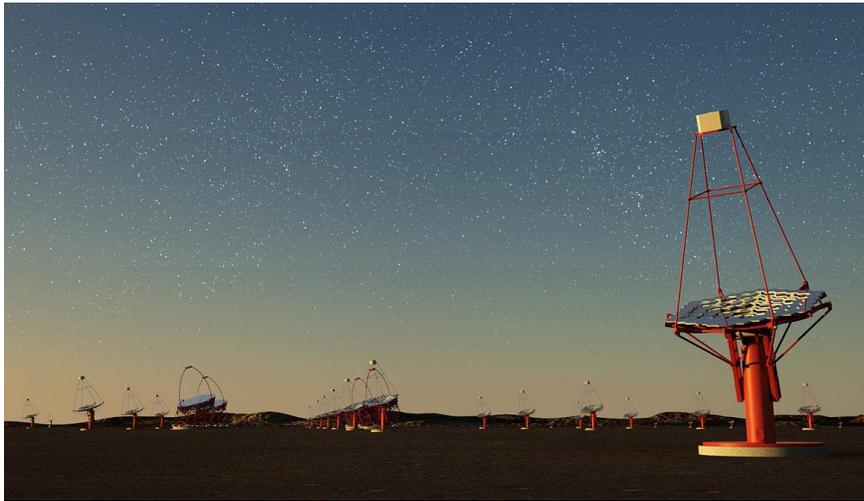
動機と実験目標

○動機

高エネルギーでの現象を観測する際に
有用な現象の一つである、
Cherenkov光という現象を知る。



(出典) <https://journal.jp.fujitsu.com/2015/12/01/01/>



(出典) https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_Telescope_Array



(出典) <https://veritas.sao.arizona.edu/>

○実験目標

宇宙線由来のミュオンによる、アクリル内でのCherenkov光を観測する。

実験の原理、メインセットアップ

○荷電粒子と媒質の選定

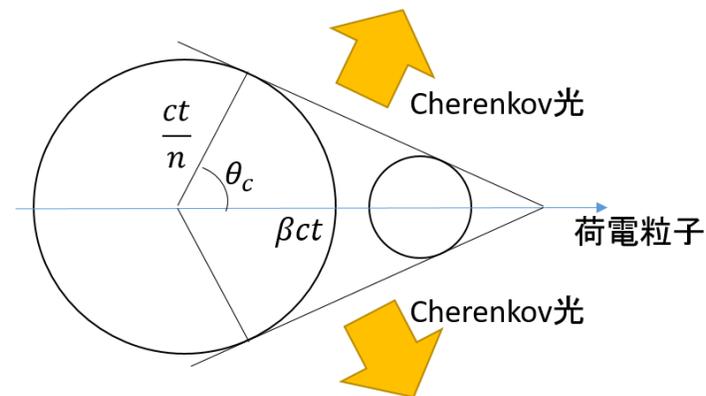
媒質	水	石英ガラス	鉛ガラス	アクリル
屈折率	1.33	1.46	1.46	1.49

(水、鉛ガラス、アクリル) <http://ww1.tiki.ne.jp/~uri-works/tmp/>
(石英) <http://www.ave.nikon.co.jp/glass/products/materials/sio2/index.htm>

1. より多くのCherenkov光のphotonを集めたい



屈折率が低く、Cherenkov光の波長帯において透明な媒質がいい。
しかし、現実的な問題からアクリルを選択。

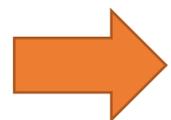


荷電粒子: 電子、陽子、ミューオン、パイオン...

2. より多くのイベントがとりたい

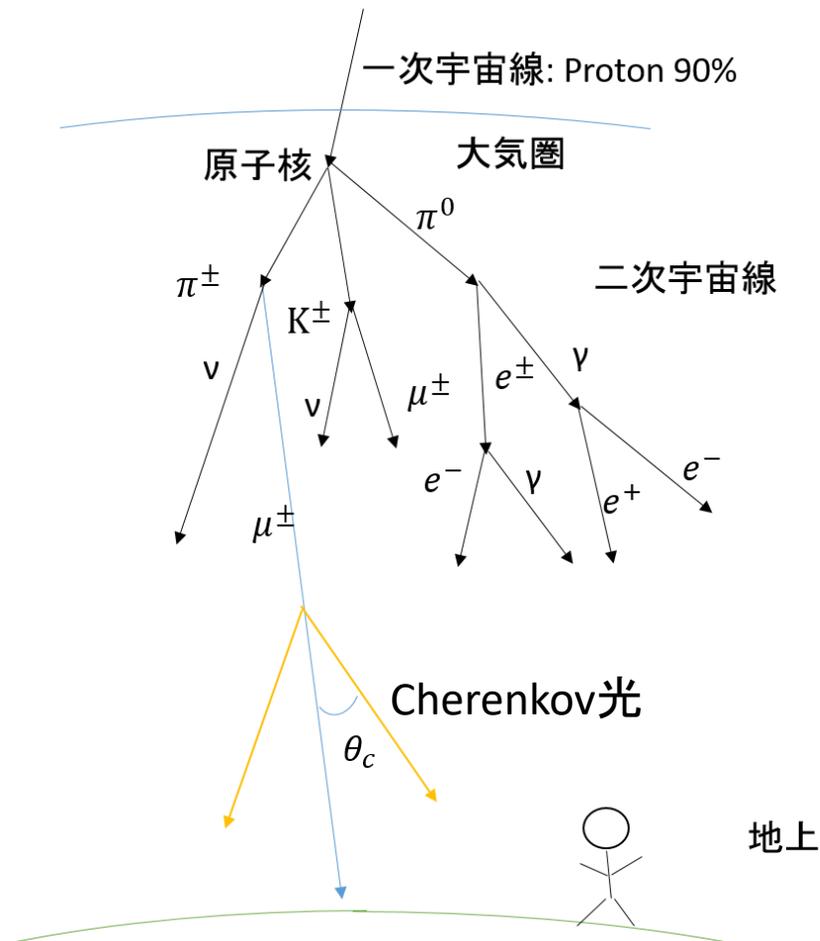


地上で一番多く観測できて、
ほぼ光速であるミューオン
が適している。



ミューオンによるアクリルでのCherenkov光を観測する

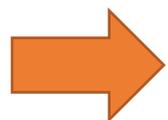
○宇宙線由来のミュオンによるCherenkov光



ミュオンは上から天頂角 θ に対して $\cos^2\theta$ に比例して降ってくる。

それをトリガーを用いて天頂角 θ を小さいものに限定するとCherenkov光には完全に下向きという異方性ができる。

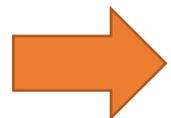
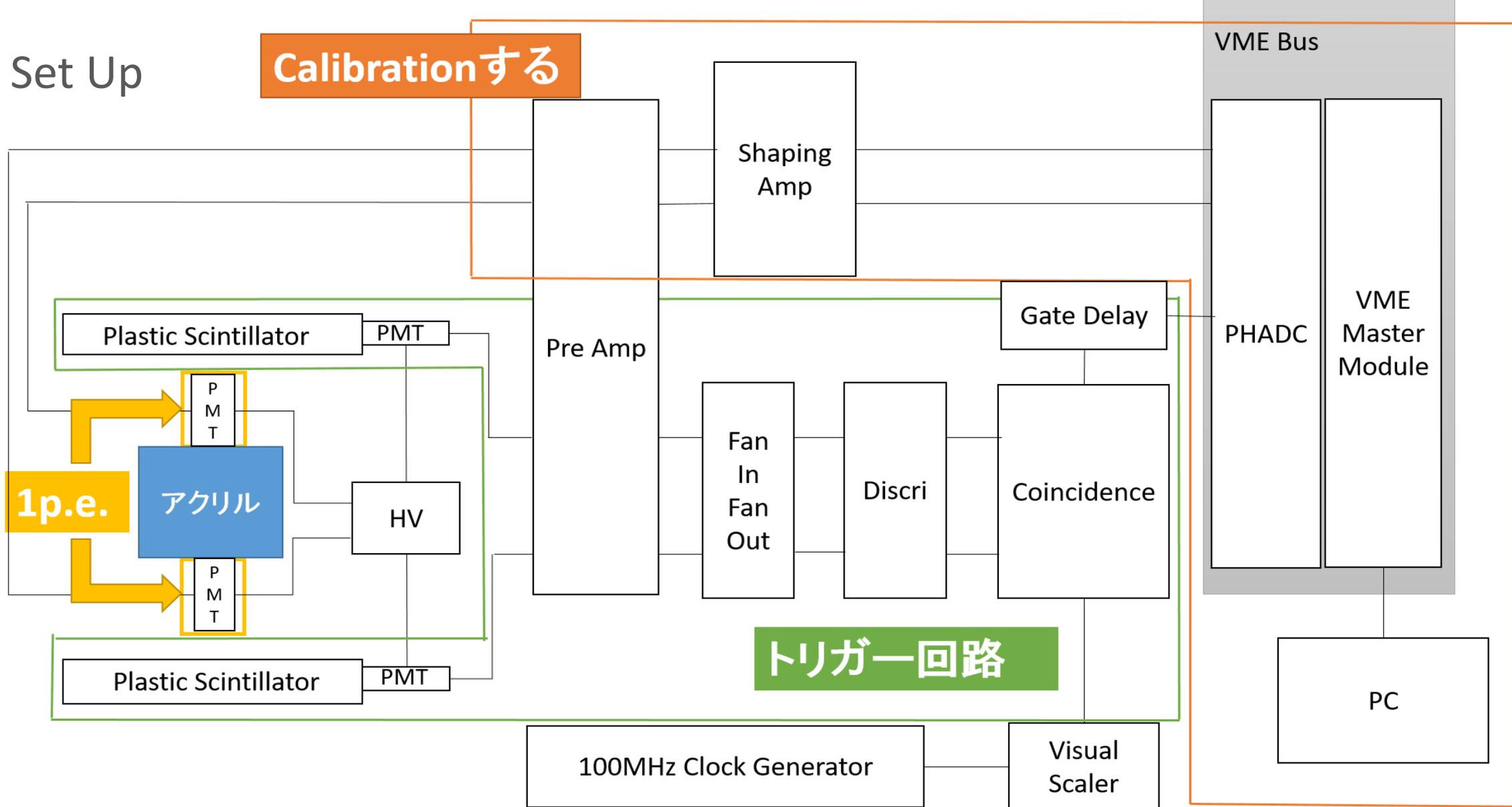
あとは、Cherenkov光自体の立ち上がりがシンチレーション光などと比べて比較的速いことも使えるか...?



下向きという異方性を利用して観測する

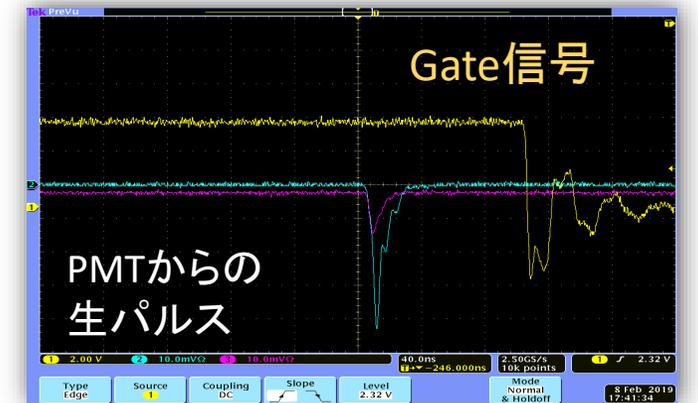
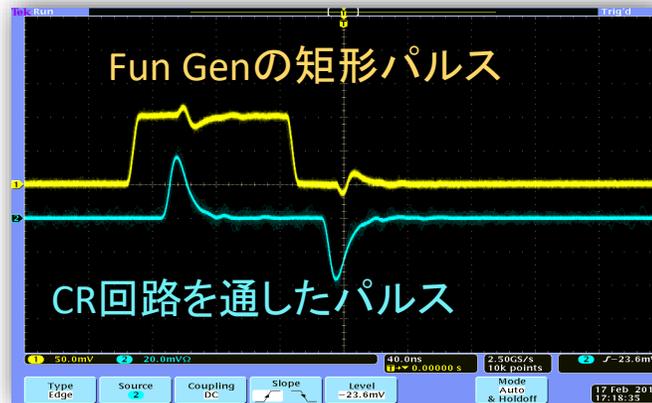
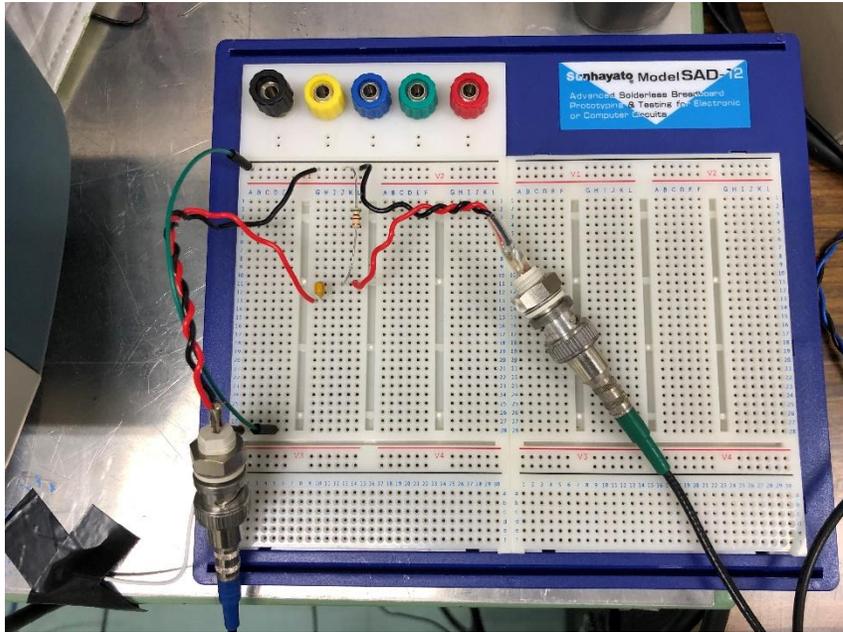
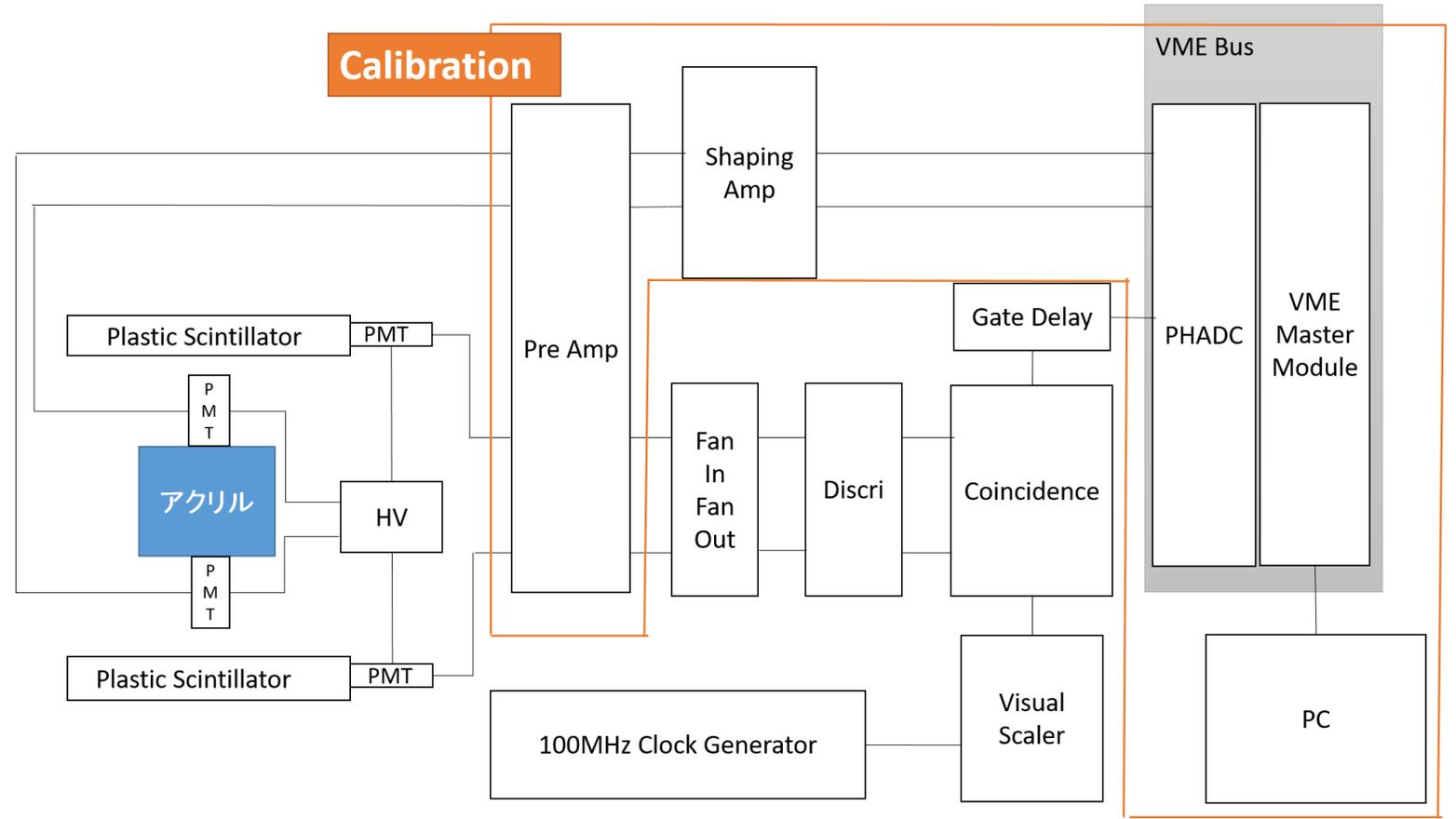
Main Set Up

Calibrationする

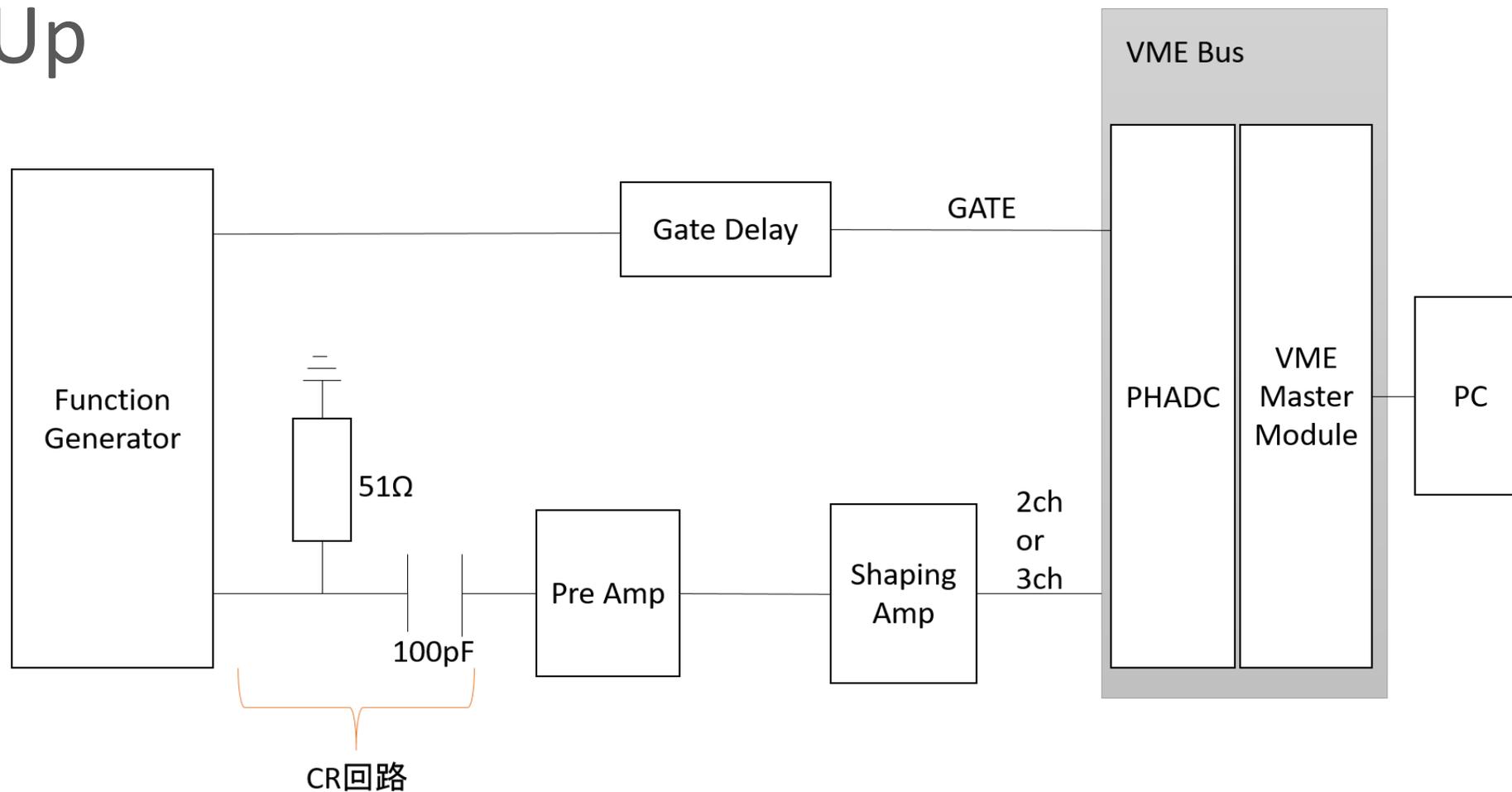


まず回路全体のCalibrationをする

Calibration



Set Up

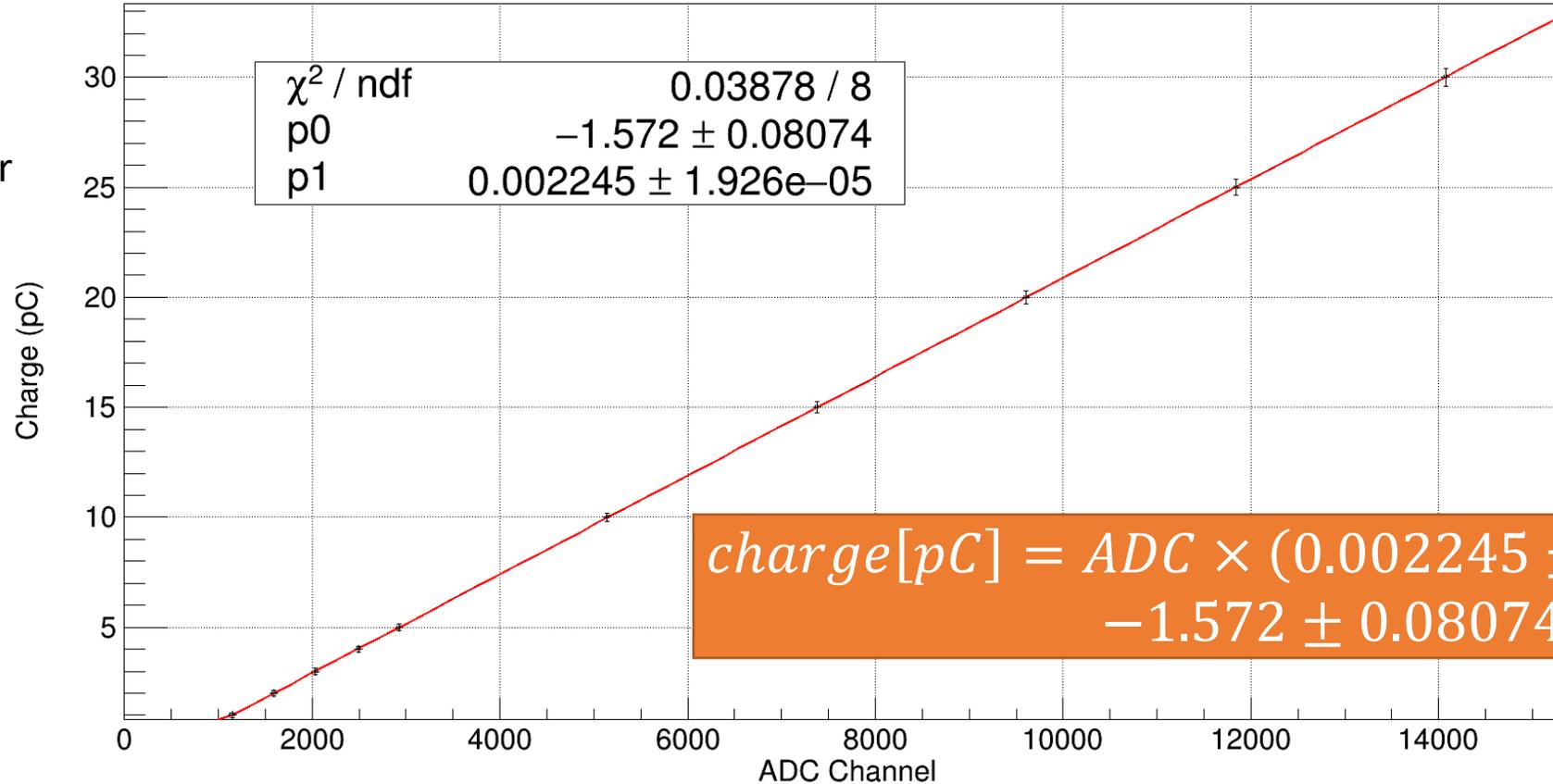


既知の電荷の、PMTの出力に
似たパルスを作る



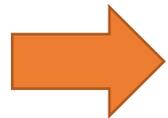
対応するADCのchannelを見る

Calibration for main (2CH)



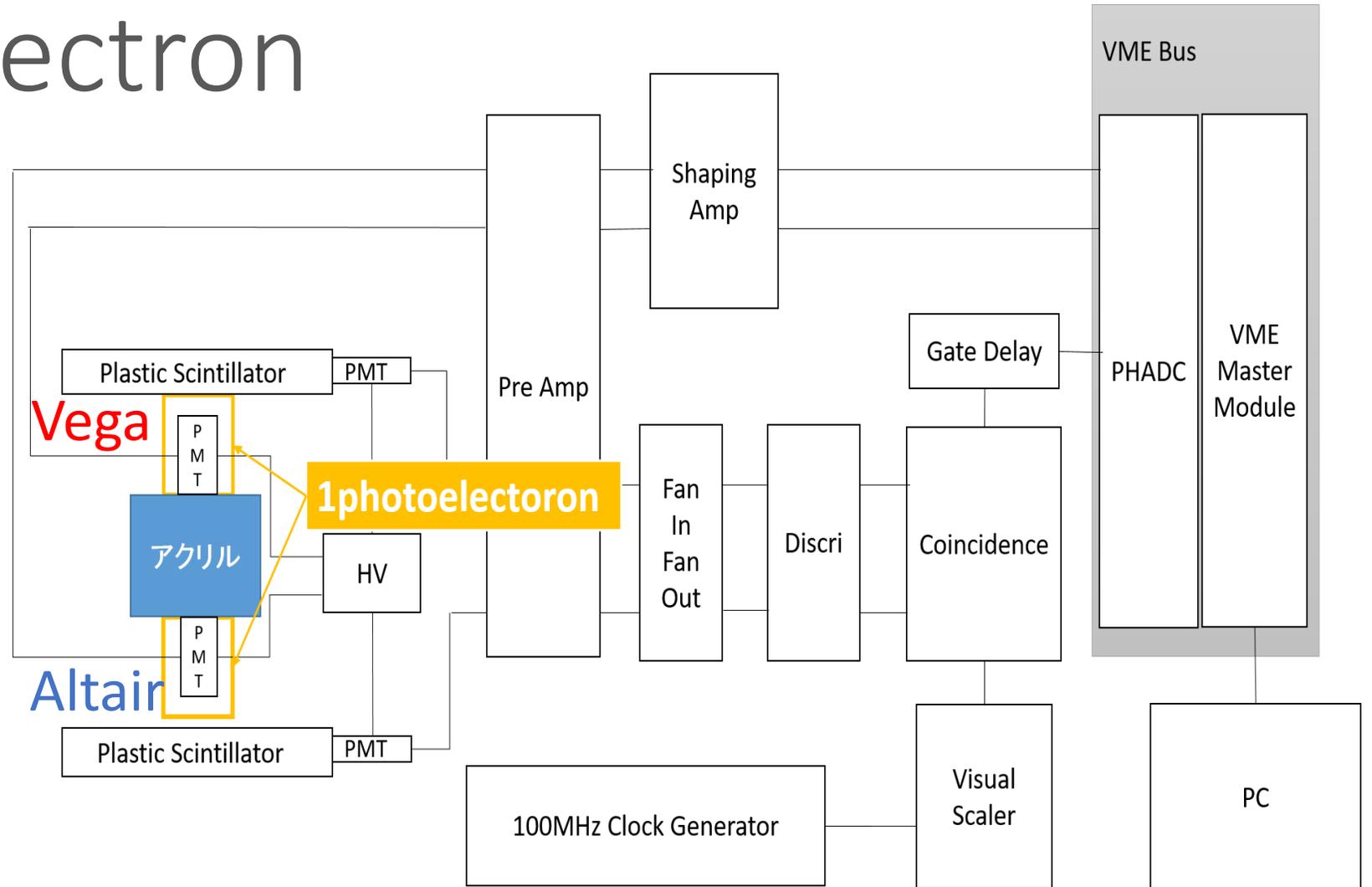
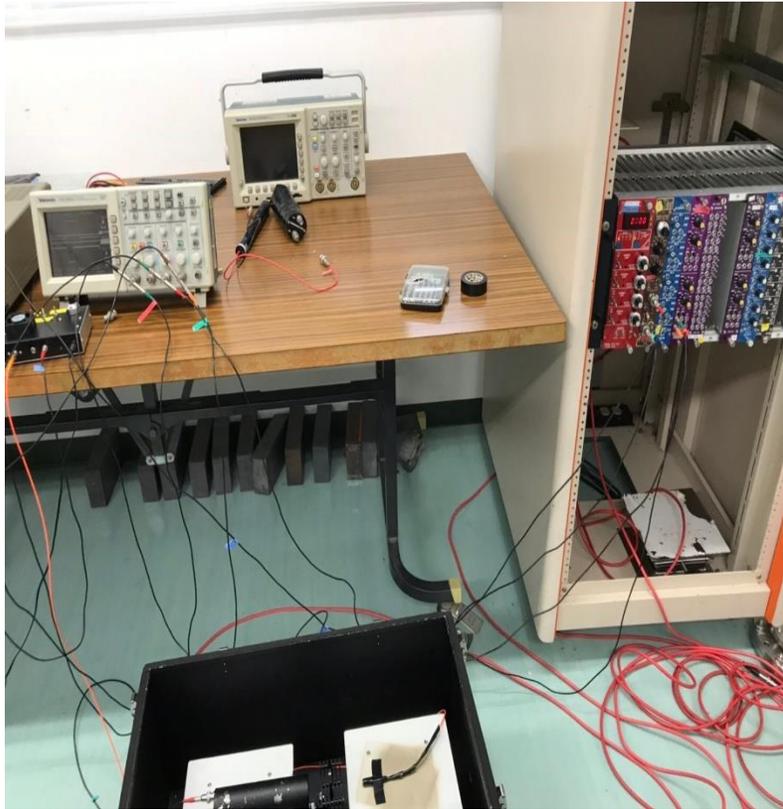
Function Generator
から求めた

結果の一例。ほかにも、必要に合わせていくつかcalibrationした。

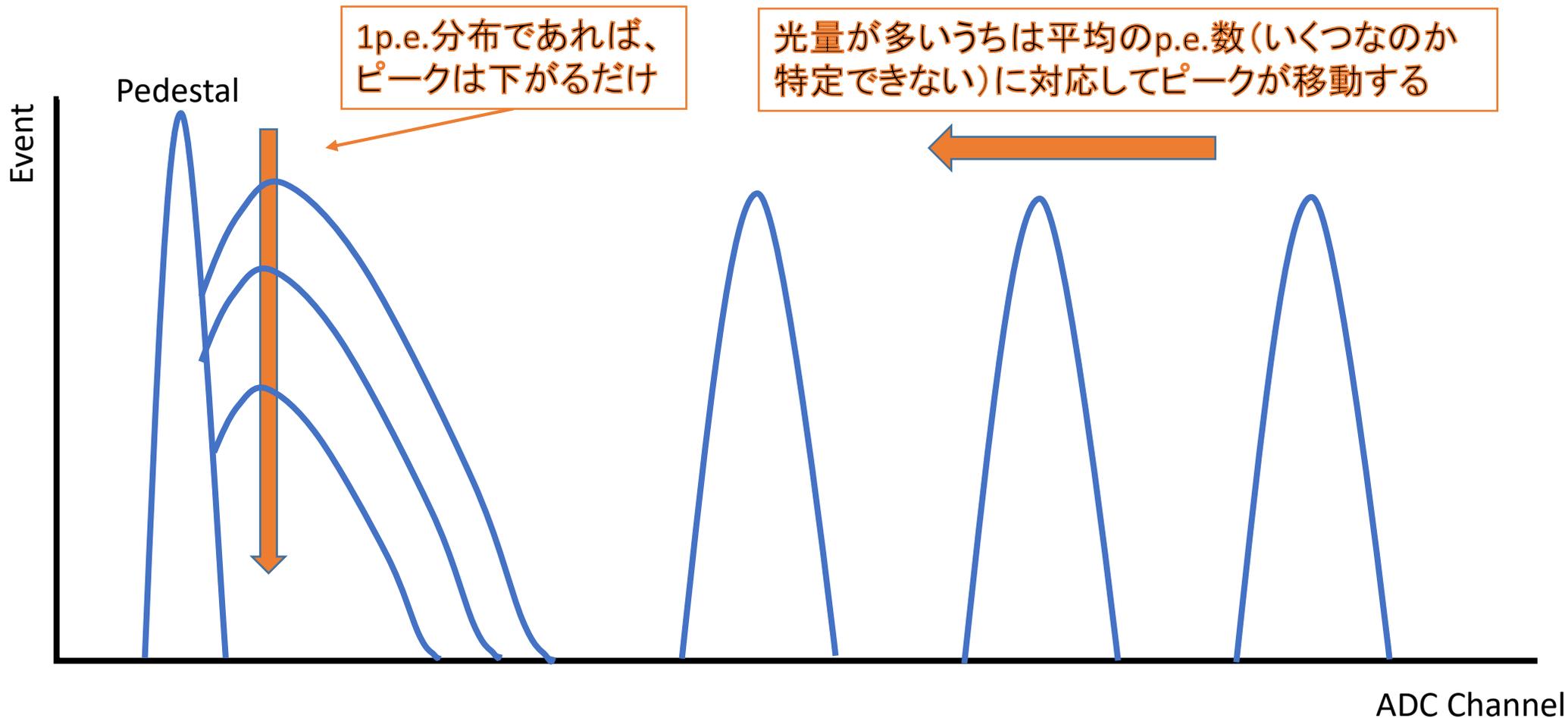


Calibrationはできた。次はPMT自体のGainを求める。

1 photo electron

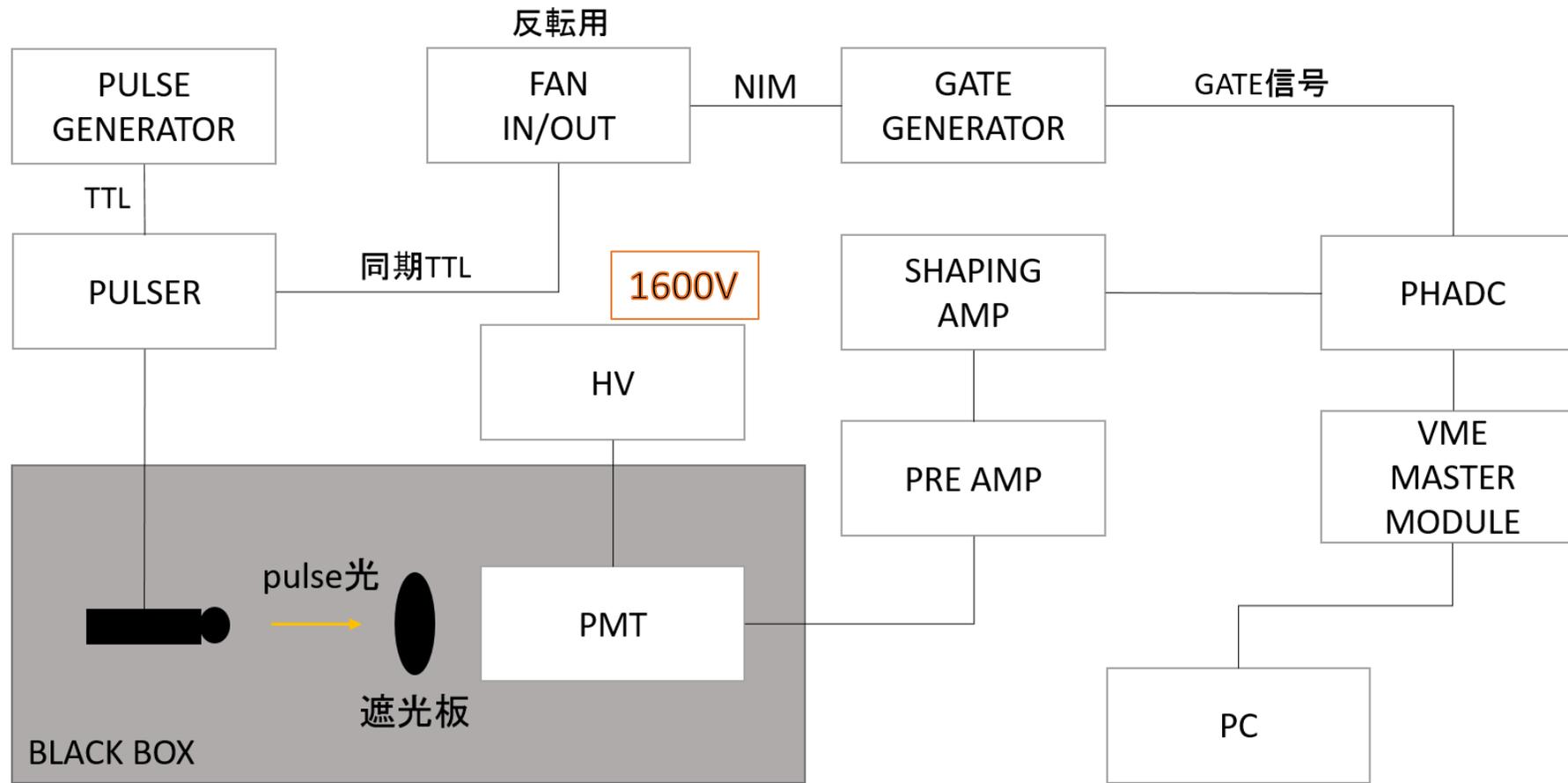


PMTへの入射光量を減らしていくと...

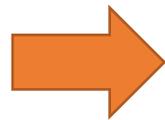


➡ PMTの検出できる最小単位の1p.e.の分布が見えれば、Gainを算出できる

Set up



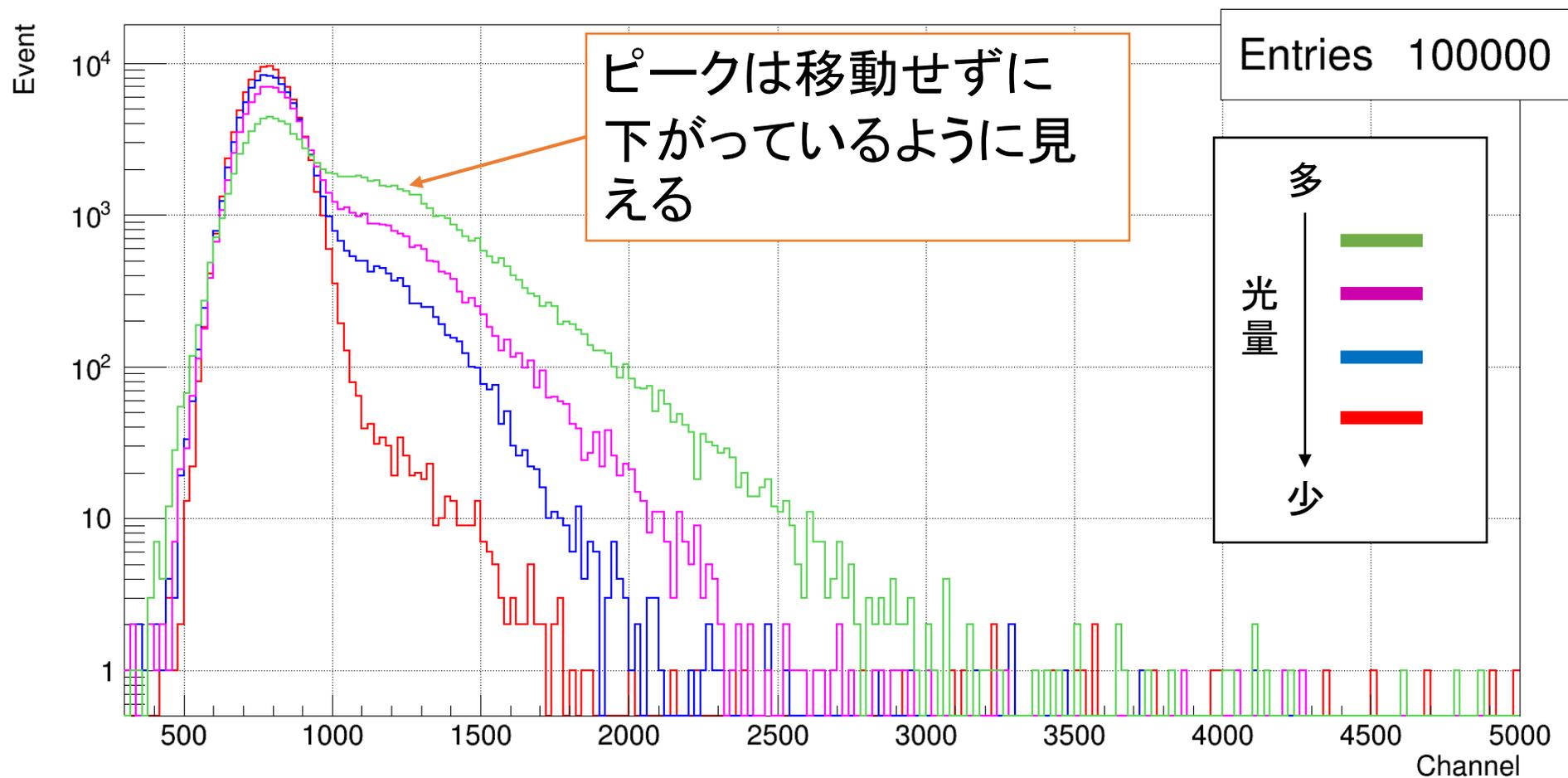
少しずつ減光する



1p.e.分布が見えてピークの移動が止まり、下がるだけになるはず

とても少ない光量での入射光量の違いに対するPMTの出力の変化

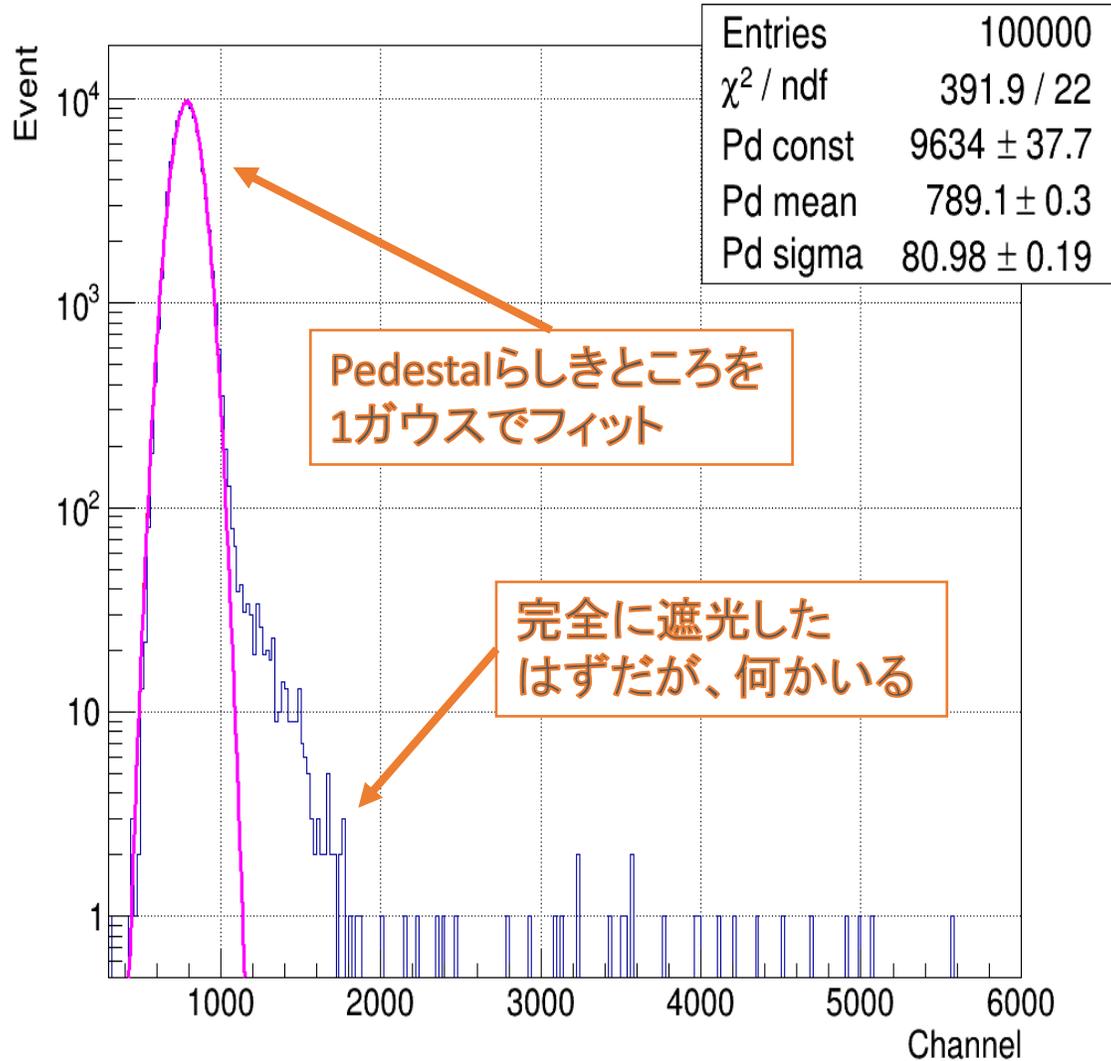
Comparison of differently lighted Altair outputs



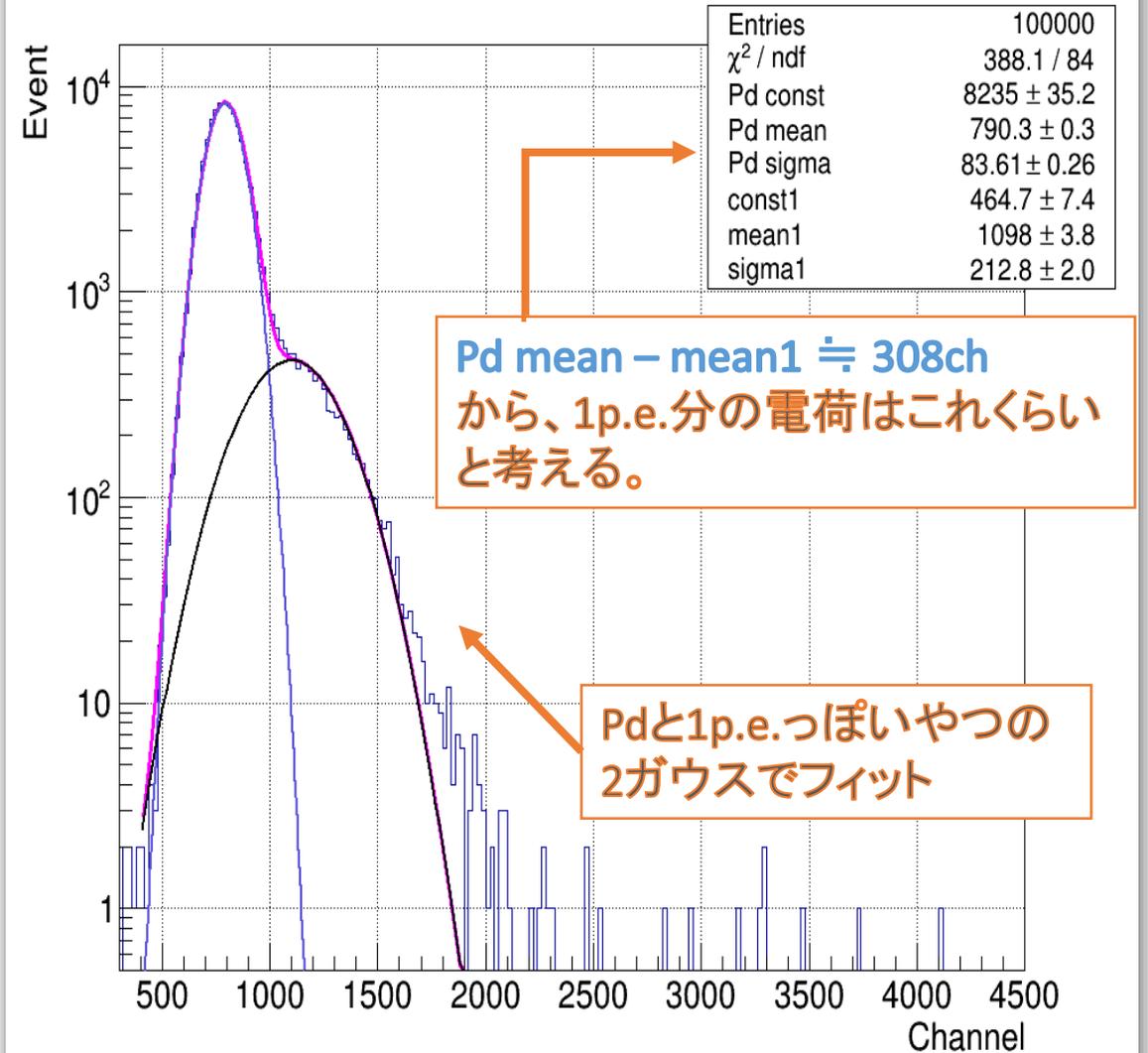
1p.e.の分布が見えたか？

ヒストグラムのフィッティング結果1

Output channel of covered Altair @1600V

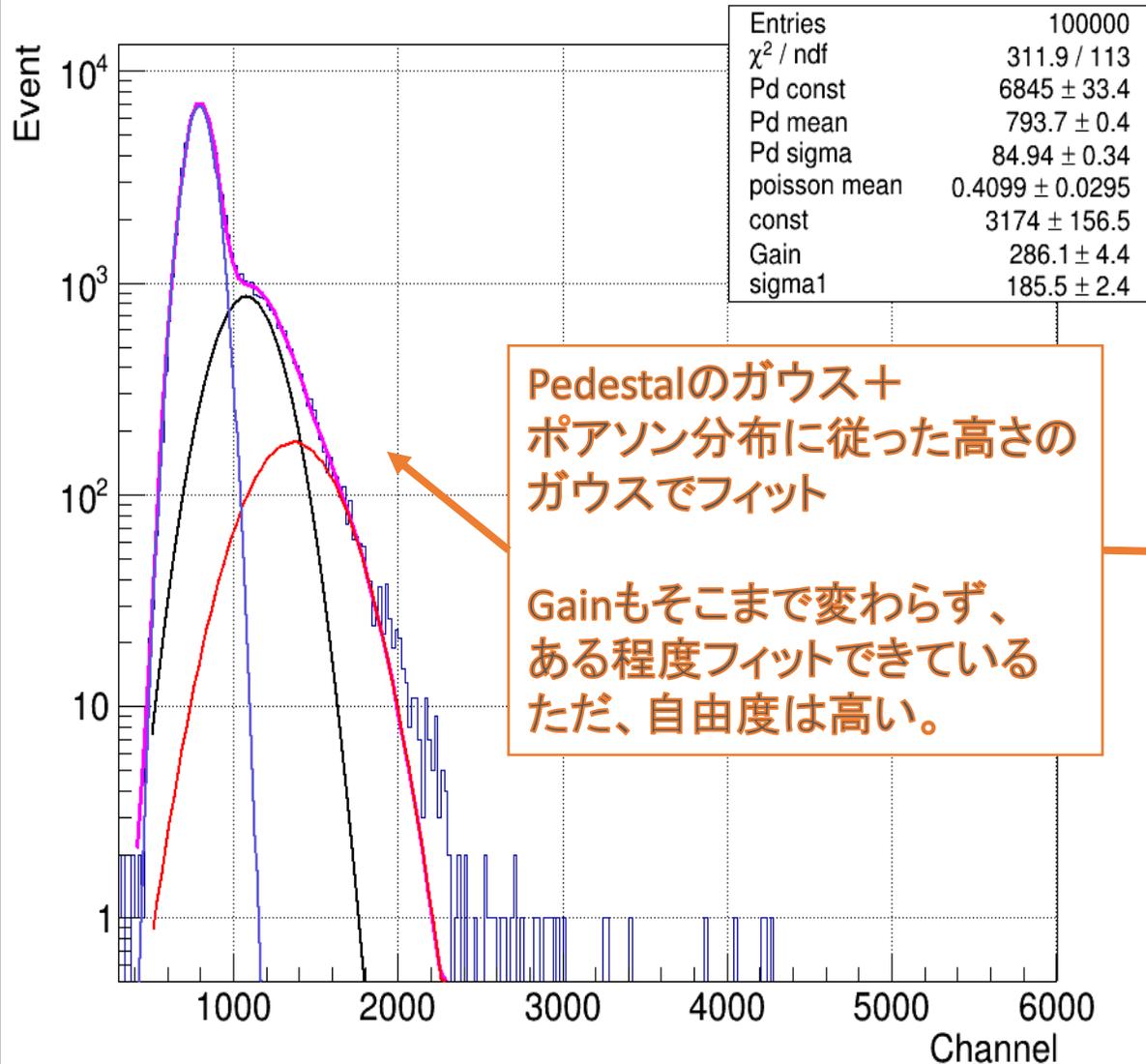


Output channel of lighted Altair @1600V

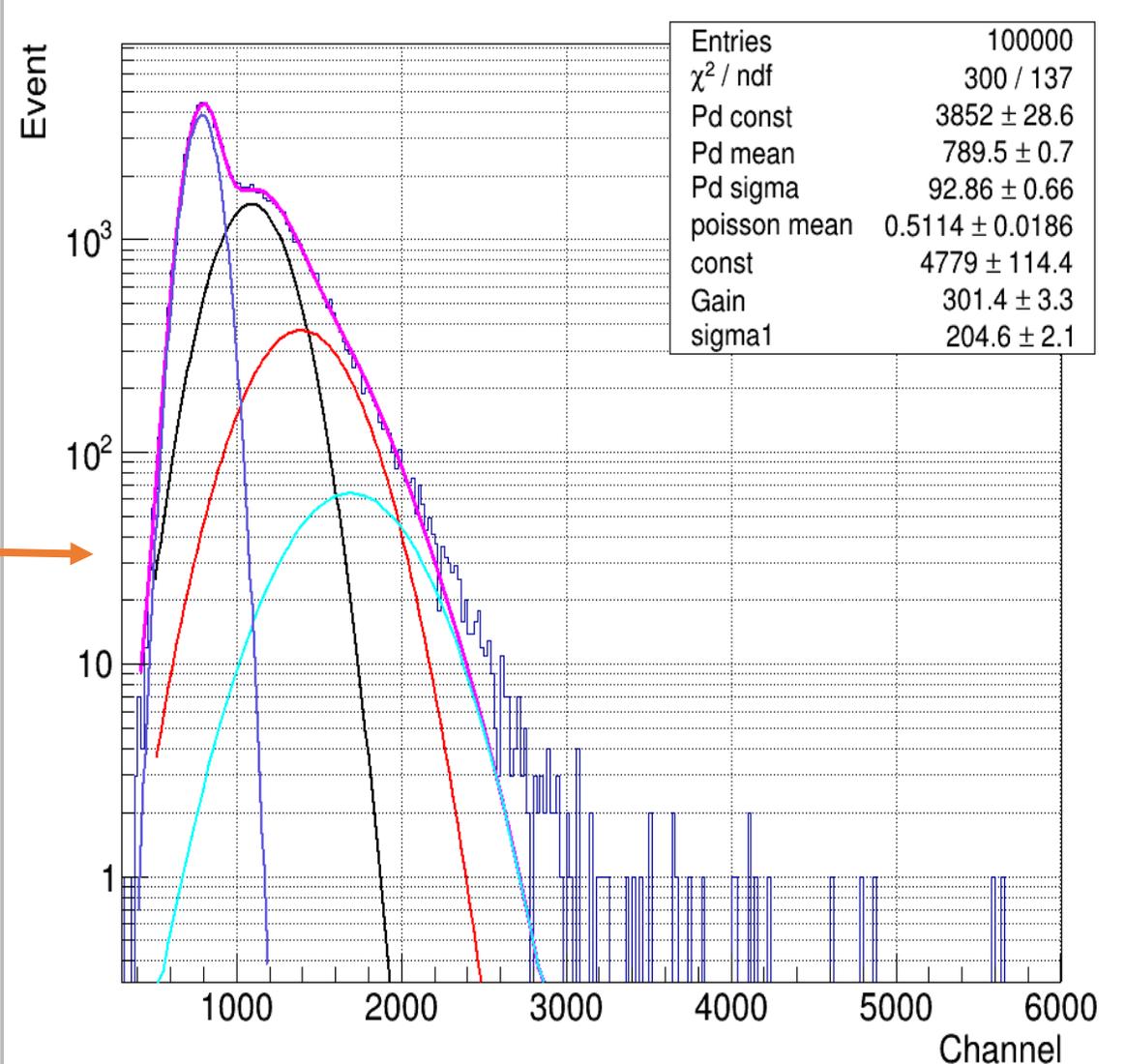


ヒストグラムのフィッティング結果2

Output channel of lighted Altair @1600V



Output channel of lighted Altair @1600V



PMTのGainの決定

一番信頼できそうな、ほぼ1p.e.のみと考えていいであろうデータを2ガウスでフィットした結果をGainの算出に利用。

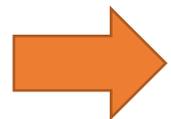


$$\text{Gain} = \frac{(\text{1p.e.分の電荷に対応するChannel}) \times (\text{較正直線の傾き})}{\text{素電荷}_e} \quad \text{で計算して}$$

$$\mathbf{Vega} \quad \mathbf{(1.07 \pm 0.030) \times 10^6}$$

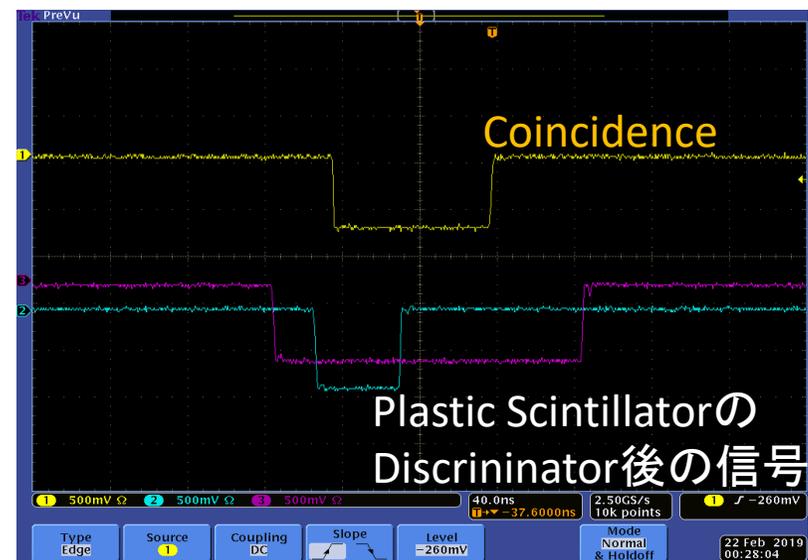
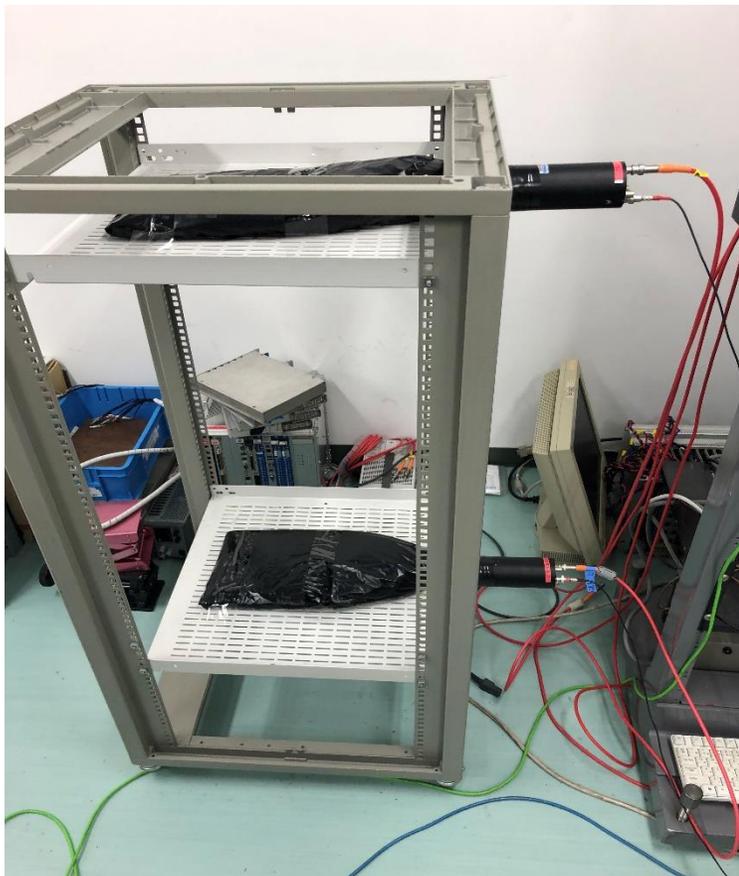
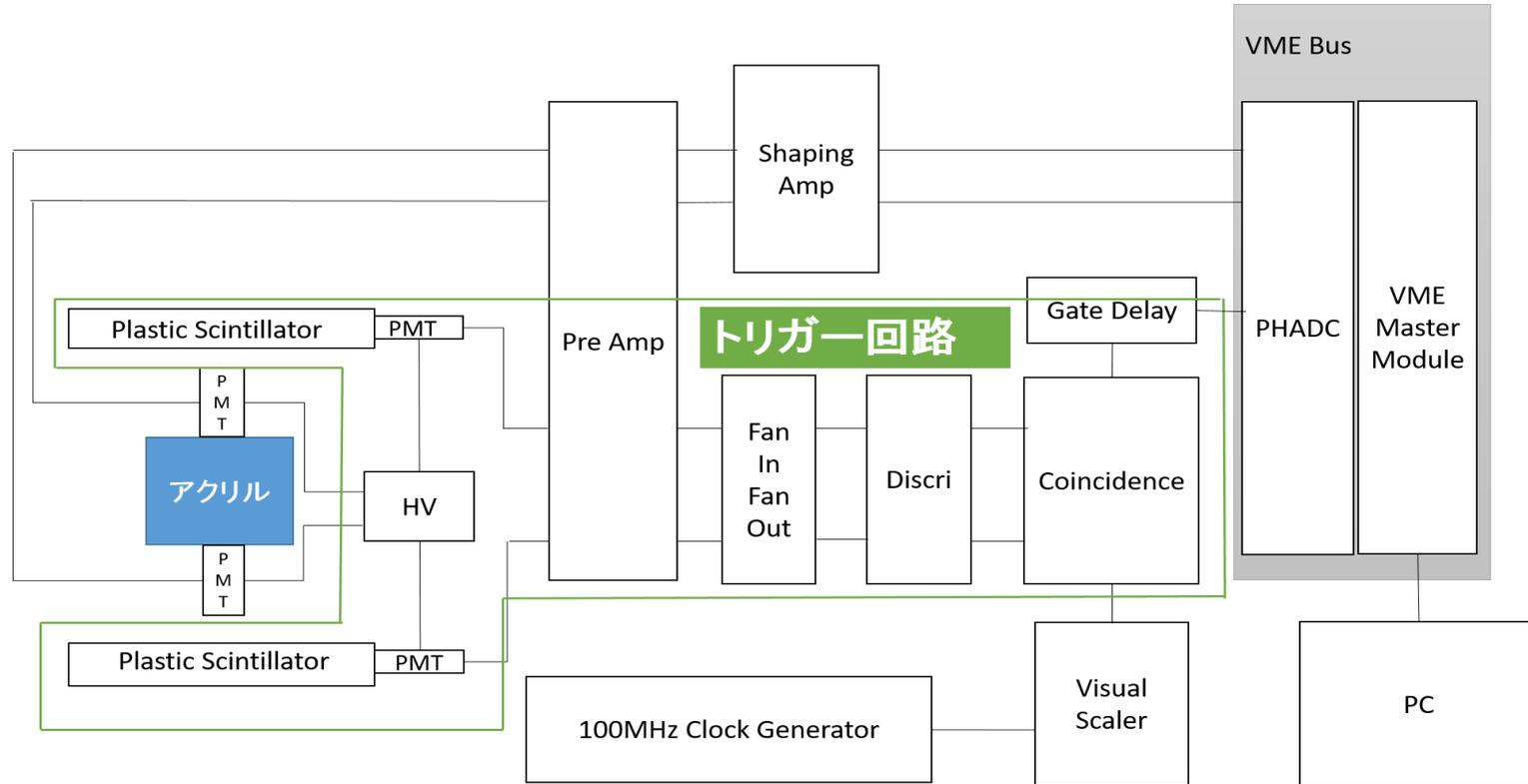
$$\mathbf{Altair} \quad \mathbf{(9.52 \pm 0.12) \times 10^5}$$

これは、製品カタログ(浜松ホトニクス、H3178-51)に載っているGainから求めた理論値 $\sim 1.3 \times 10^6$ と大差ない値である。

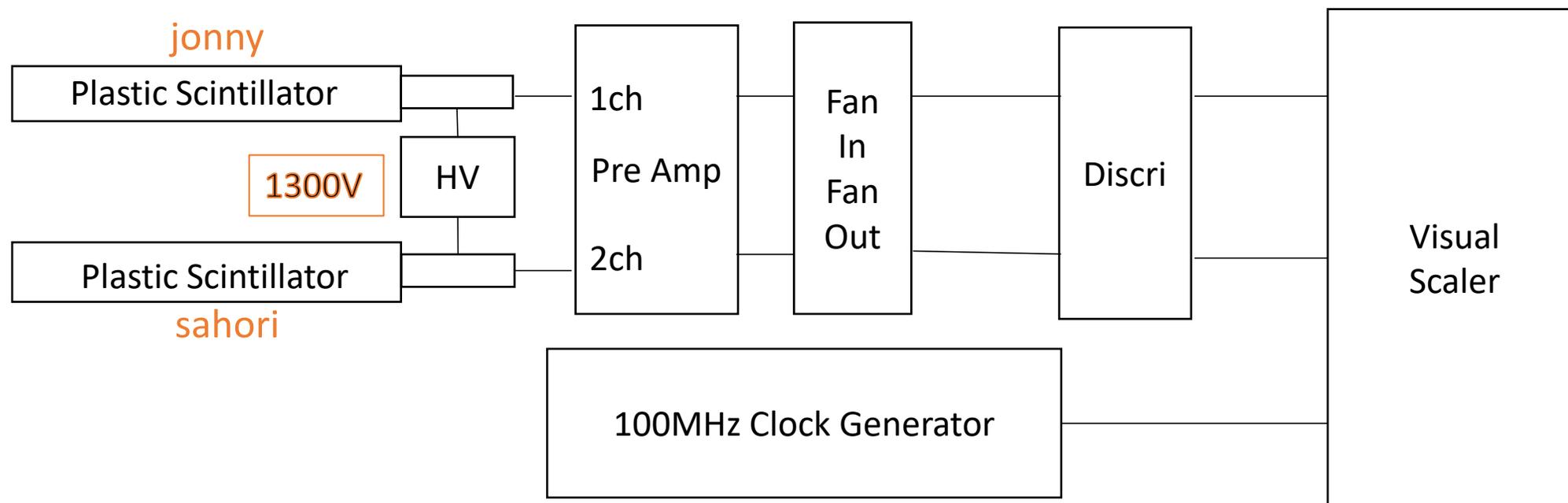


Gainは求まった。次はミュオンとのcoincidenceをとる。

トリガー回路



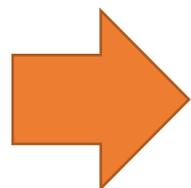
Set Up (Thresholdの決定)



PMTのノイズ成分
を取り除きたい！

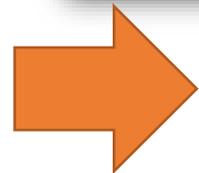
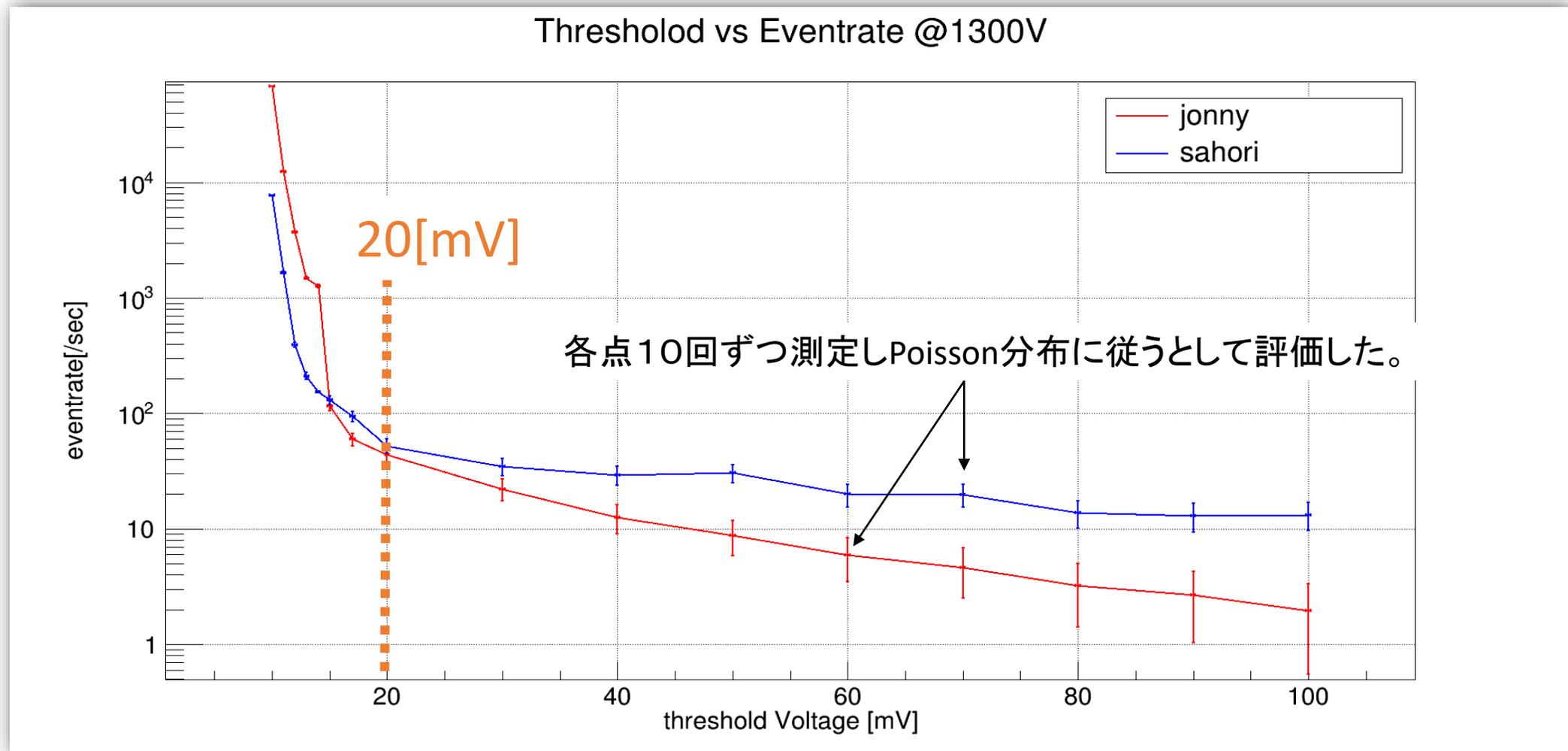


DiscriminatorのThreshold
を変えて取り除く



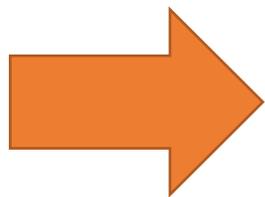
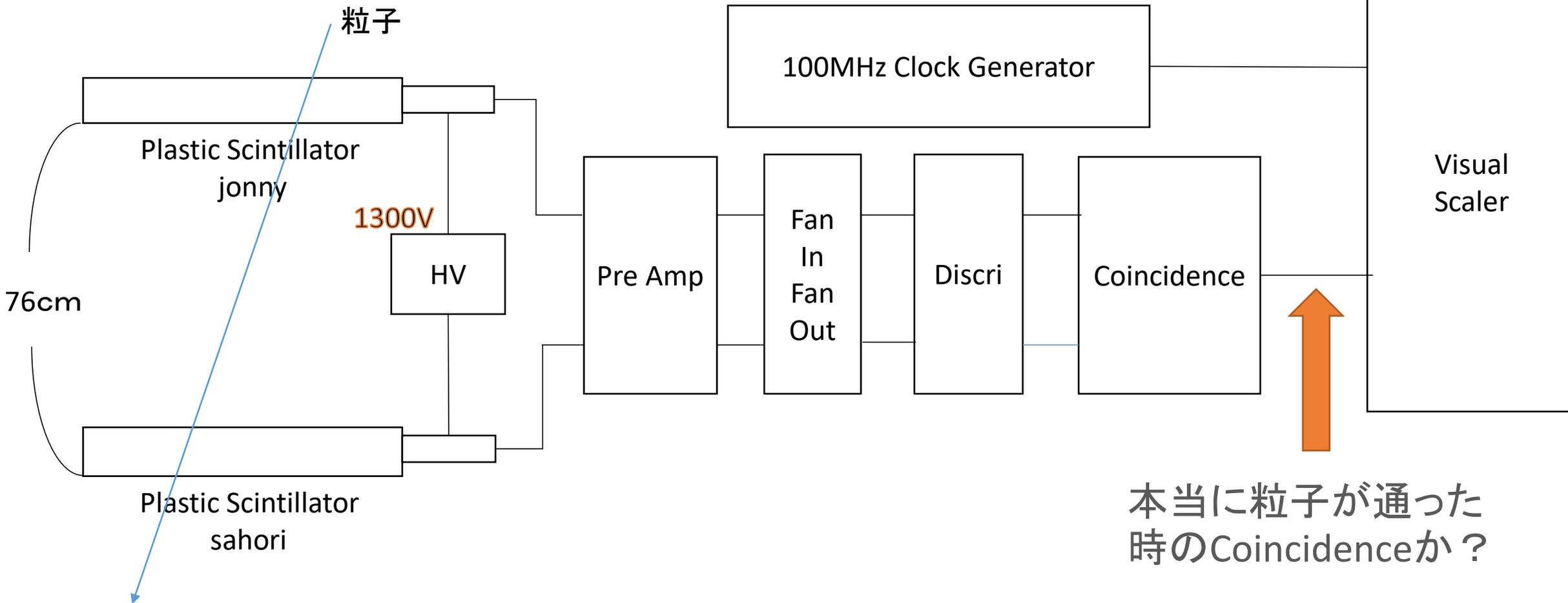
Thresholdを変えて各Plastic Scintillatorのeventrateを測定する

測定結果



プラシンのPMTのHV=1300[V], DiscrのThreshold=20[mV]でそれぞれのPMTでノイズ成分は除去できていると考えられる。

Set Up(Eventrateの評価)

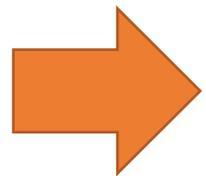


Coincidence rateとそれぞれのPlastic Scintillatorによるchance Coincidence rateと比較する

理論値とChance Coincidence rateとの比較

Coincidence rate 測定値[/sec]	Coincidence rate μ 粒子のみの理論値[/sec]	Coincidence rate 全宇宙線理論値[/sec]	Chance coincidence rate[/sec]
0.271 ± 0.0061	0.21 ± 0.013	0.31 ± 0.020	$(3.4 \pm 0.17) \times 10^{-4}$

*(出典)粒子線物理計測学入門



このSet Upでほぼ μ 粒子Coincidenceが取れているといえる

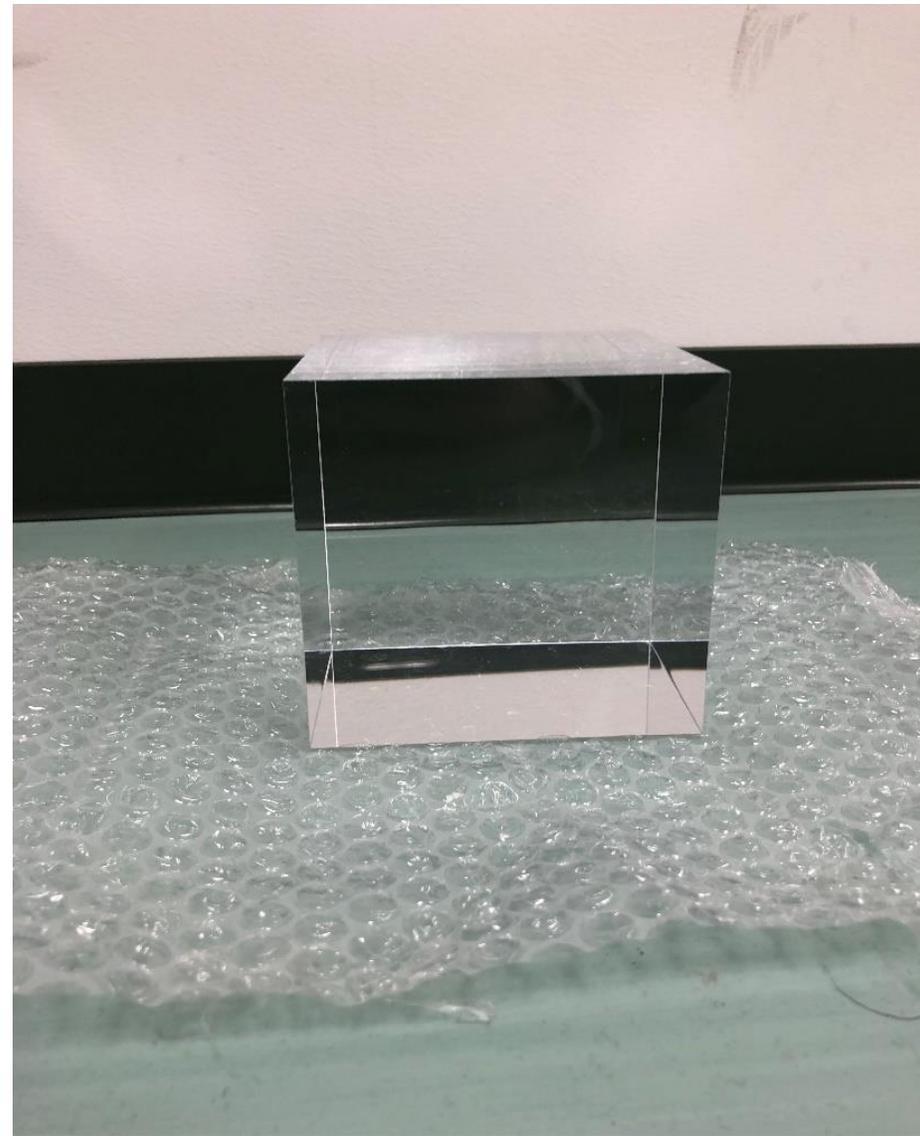
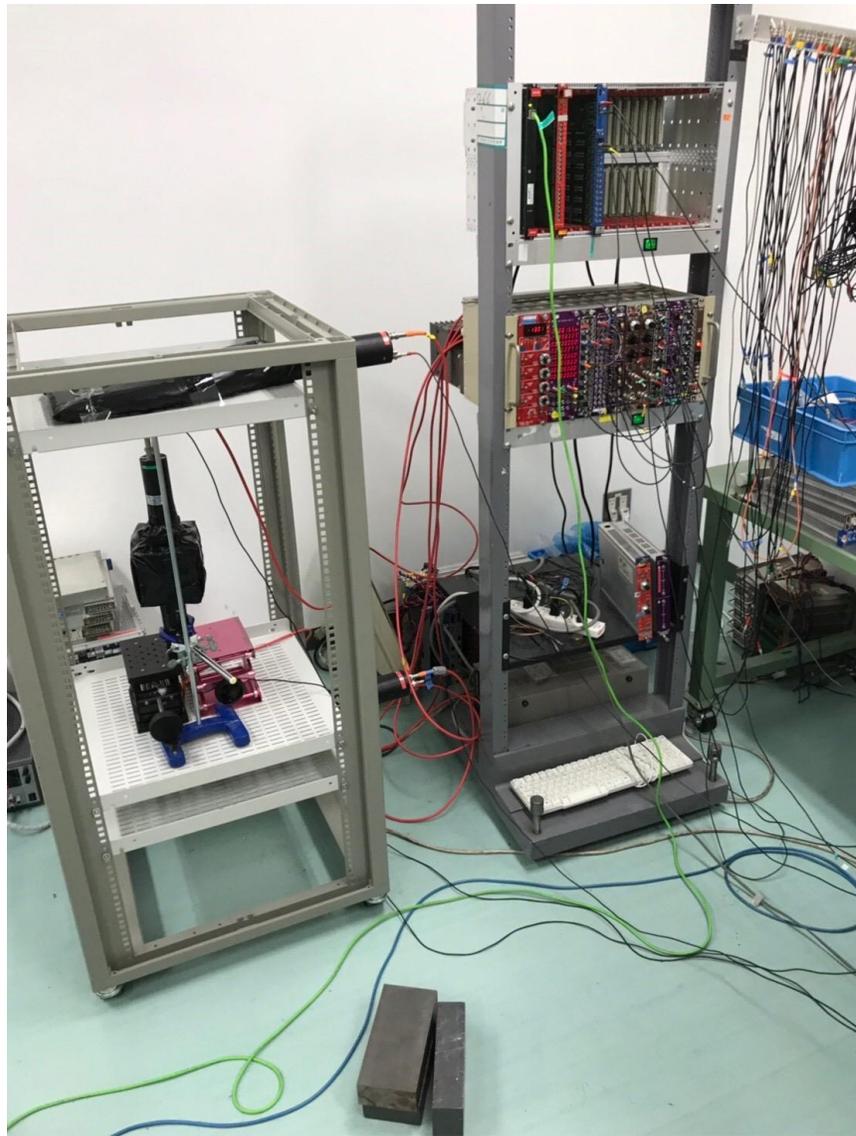
今後の実験では

HV=1300[V]
Threshold=20[mV]

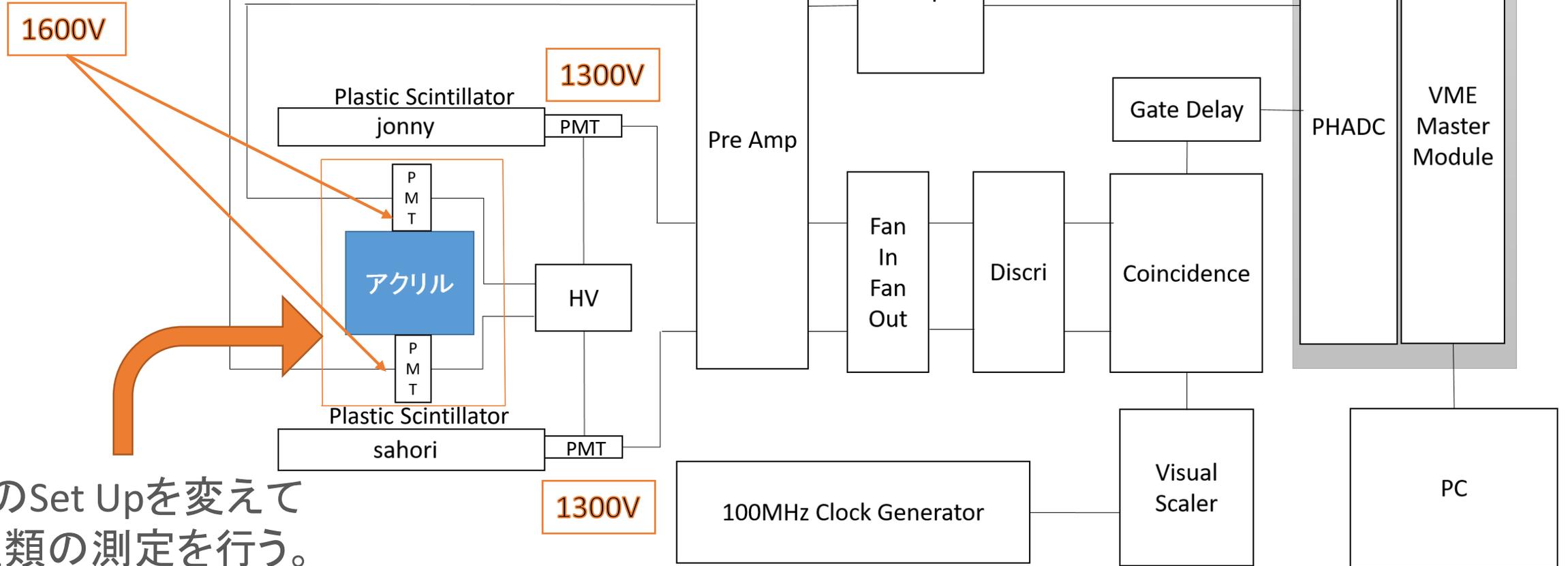
のSet Upで行う。

以上で予備実験を終了し、Cherenkov光の観測に移る。

μ 粒子によるCherenkov光の観測



Set Up



このSet Upを変えて
四種類の測定を行う。

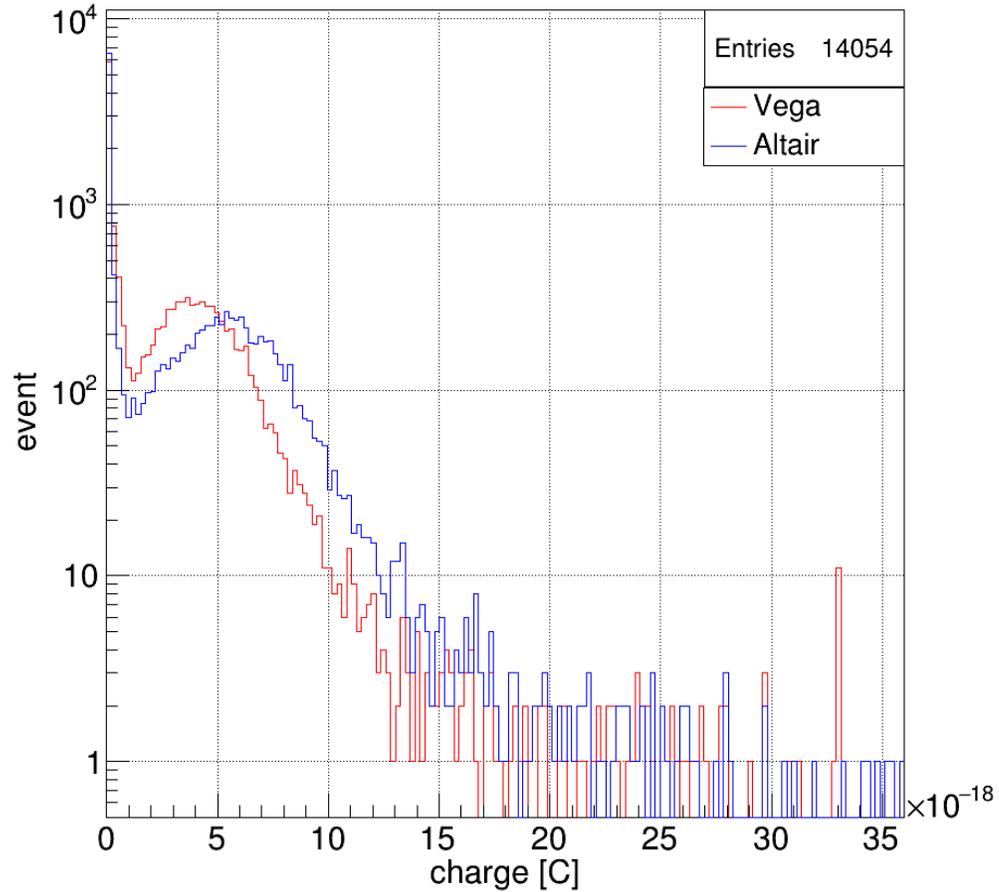
- 1: 左右での測定、2: 上下での測定、3: アクリルを除いて上下での測定
- 4: アルミをまいたアクリルでの上下での測定

1: 左右での測定結果

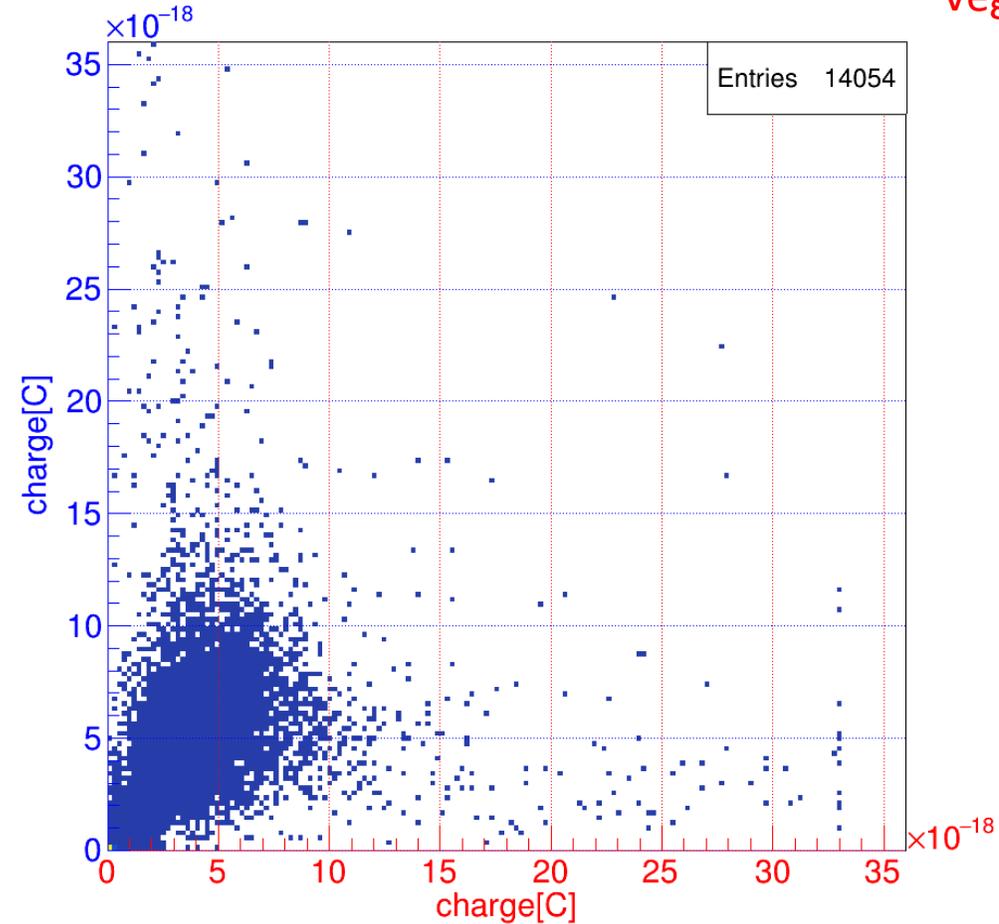
黒幕



cherenkov charge vs event

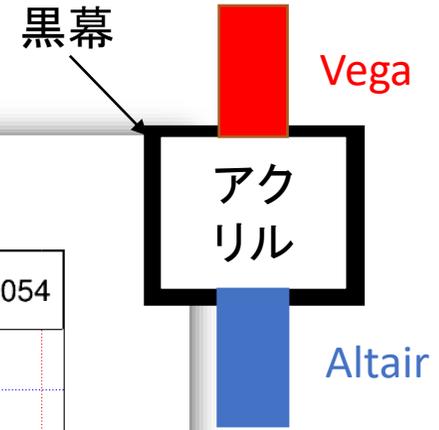


cherenkov vega vs altair

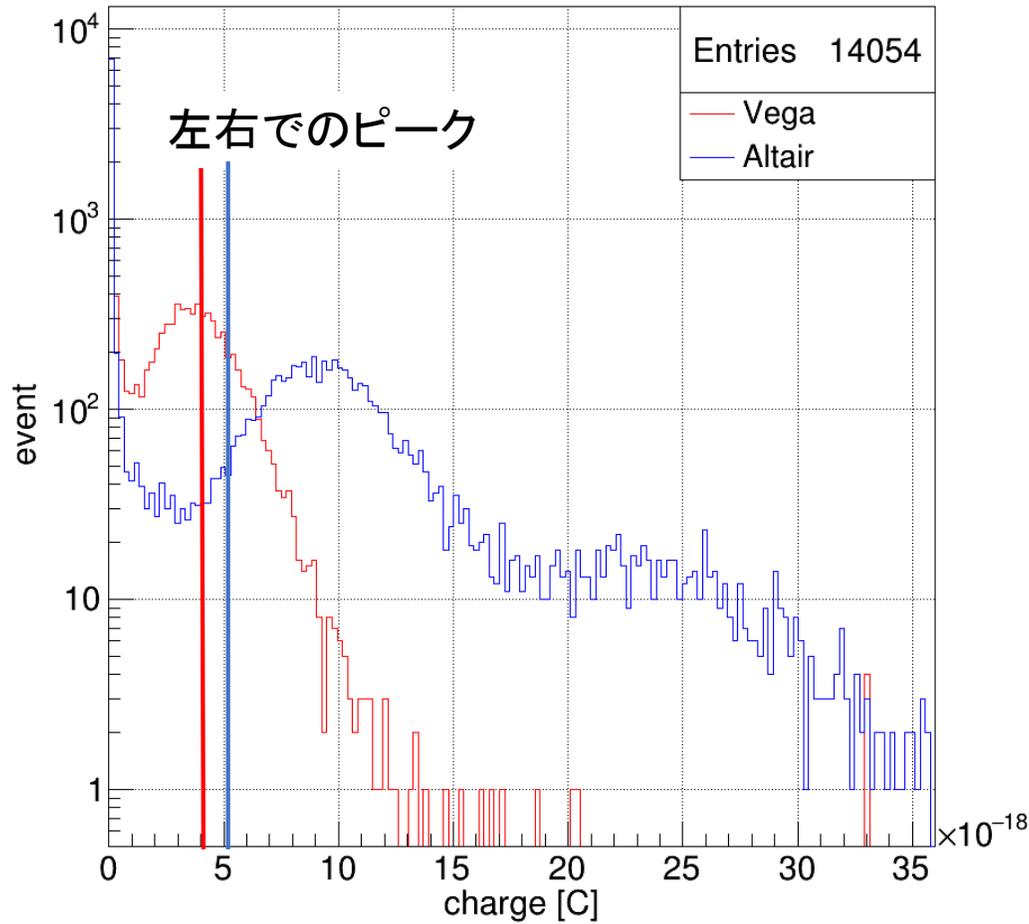


左右ではヒストグラムの違いはほぼ見られない

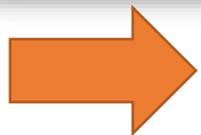
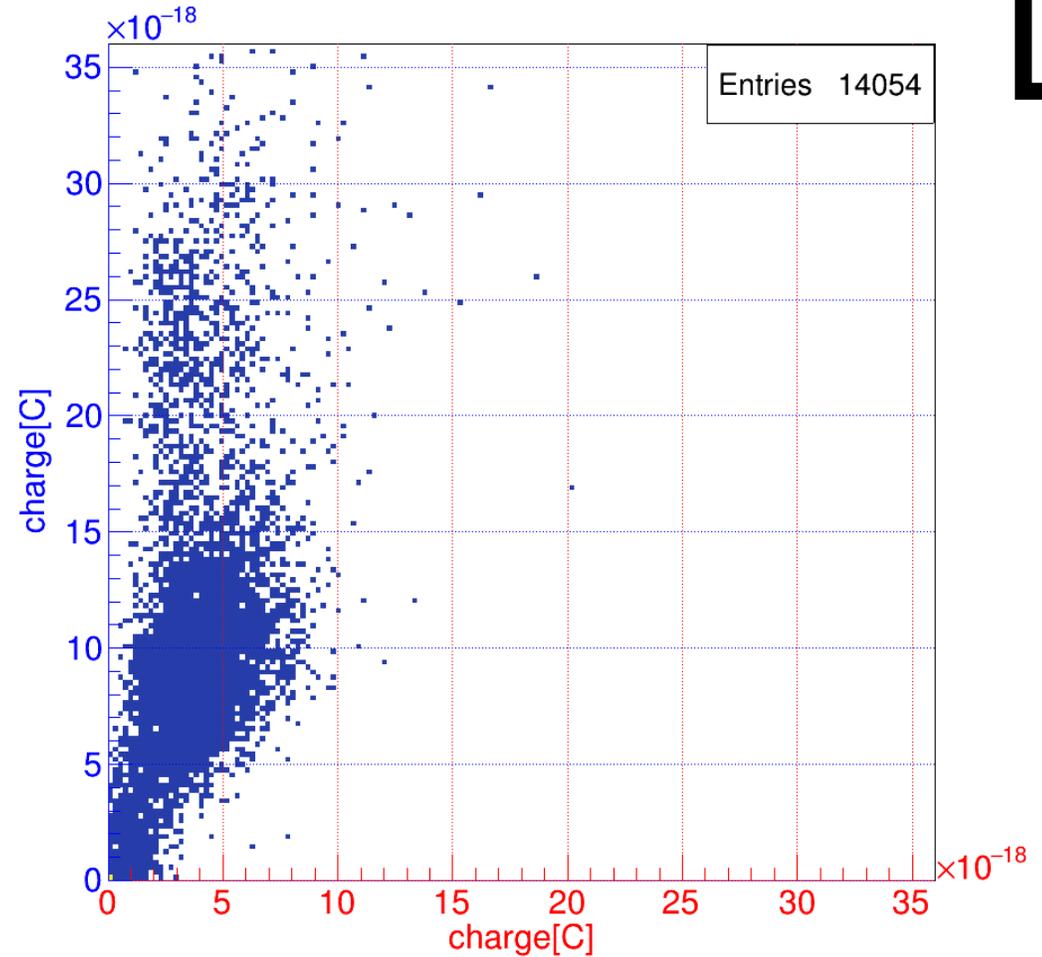
2: 上下での測定結果



cherenkov charge vs event

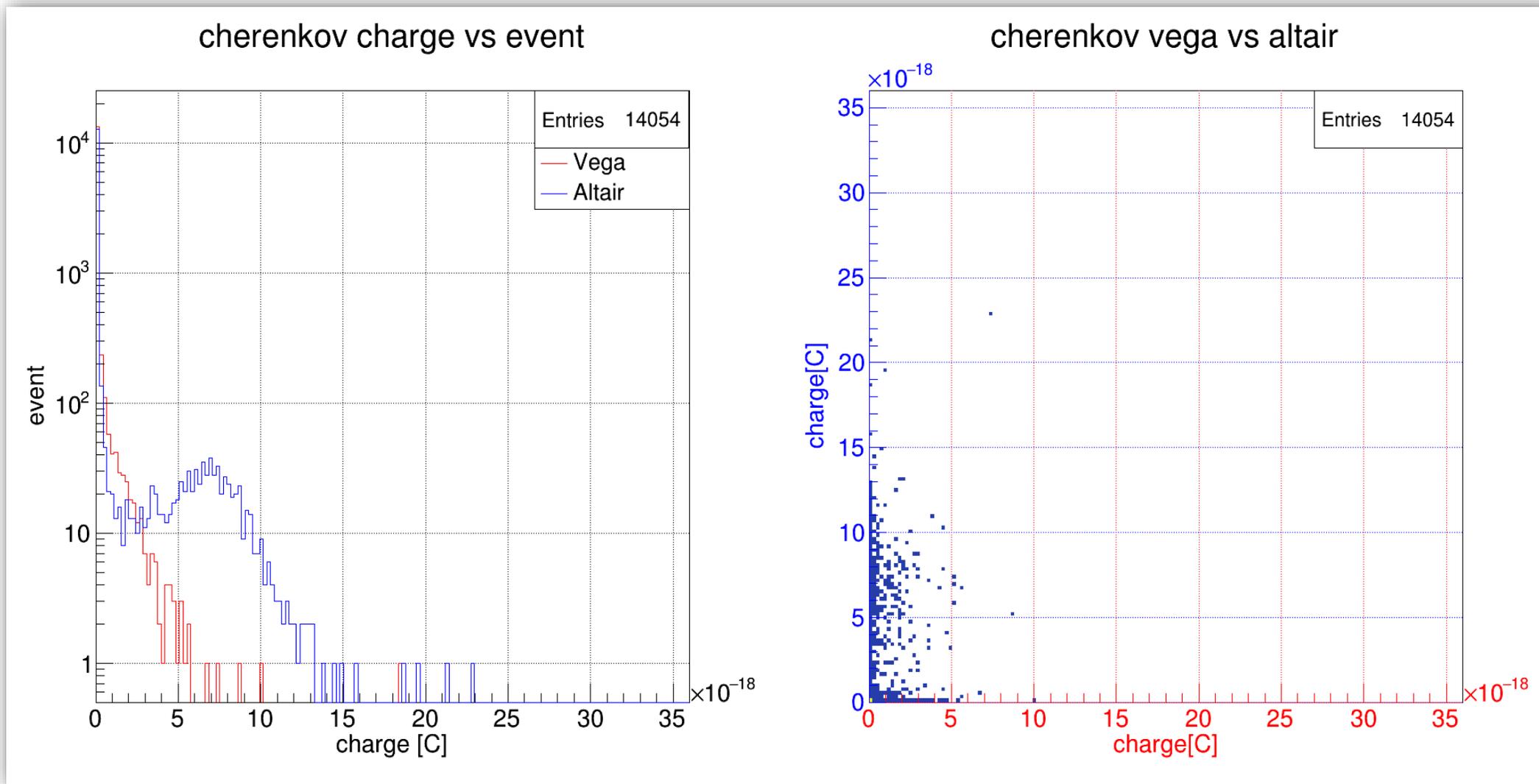
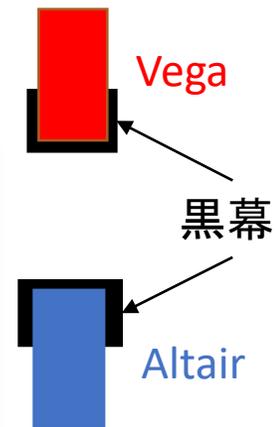


cherenkov vega vs altair



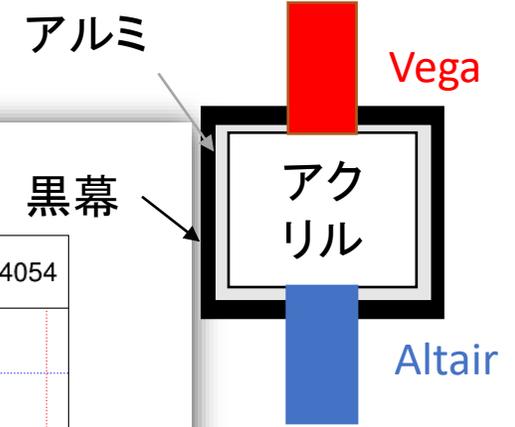
上下の入射光量に明確な差がみられた

3: アクリルを除いて上下での測定結果

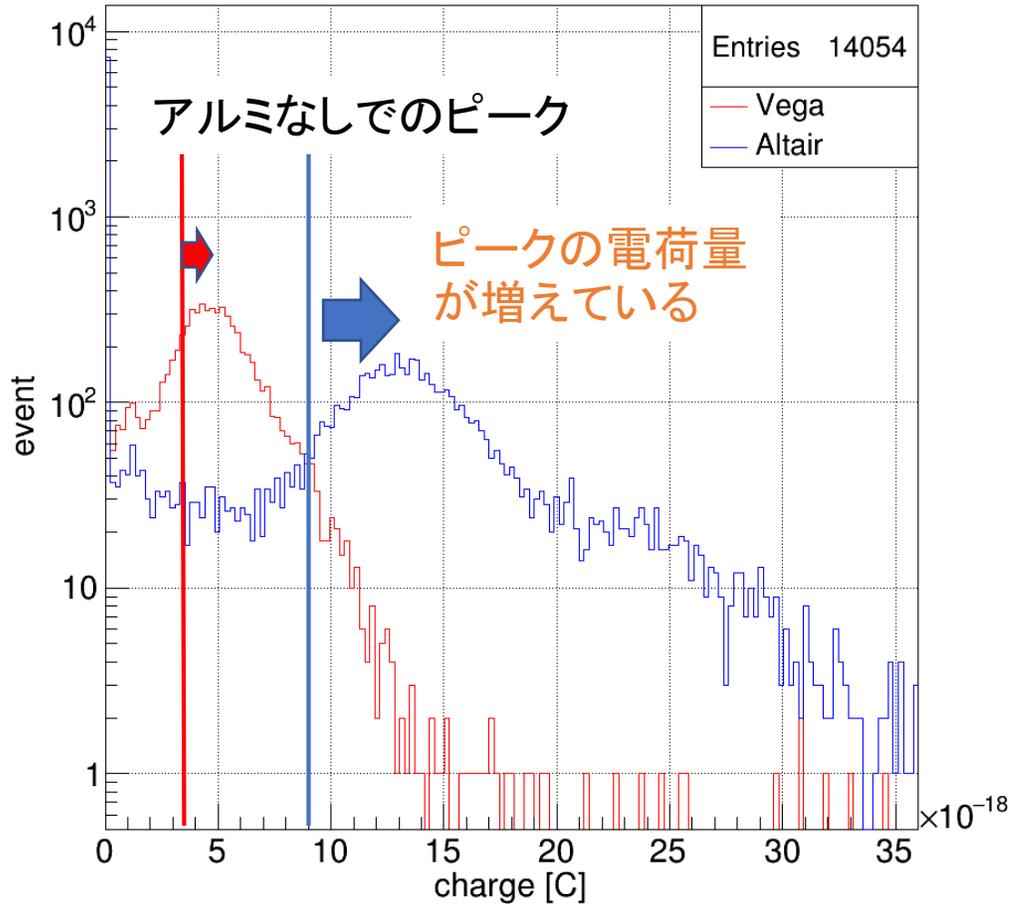


➡ Event数は少ないが上下での差が見られた

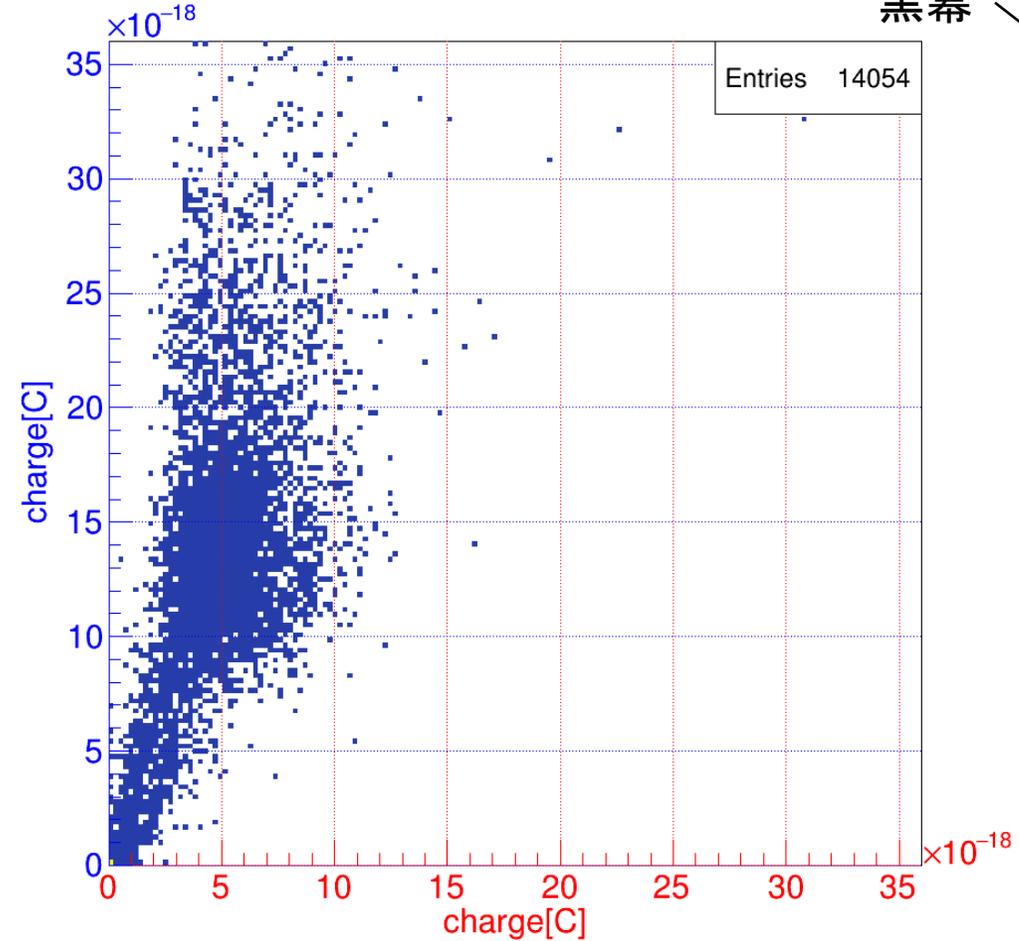
4: アルミをまいたアクリルでの上下での測定結果



cherenkov charge vs event



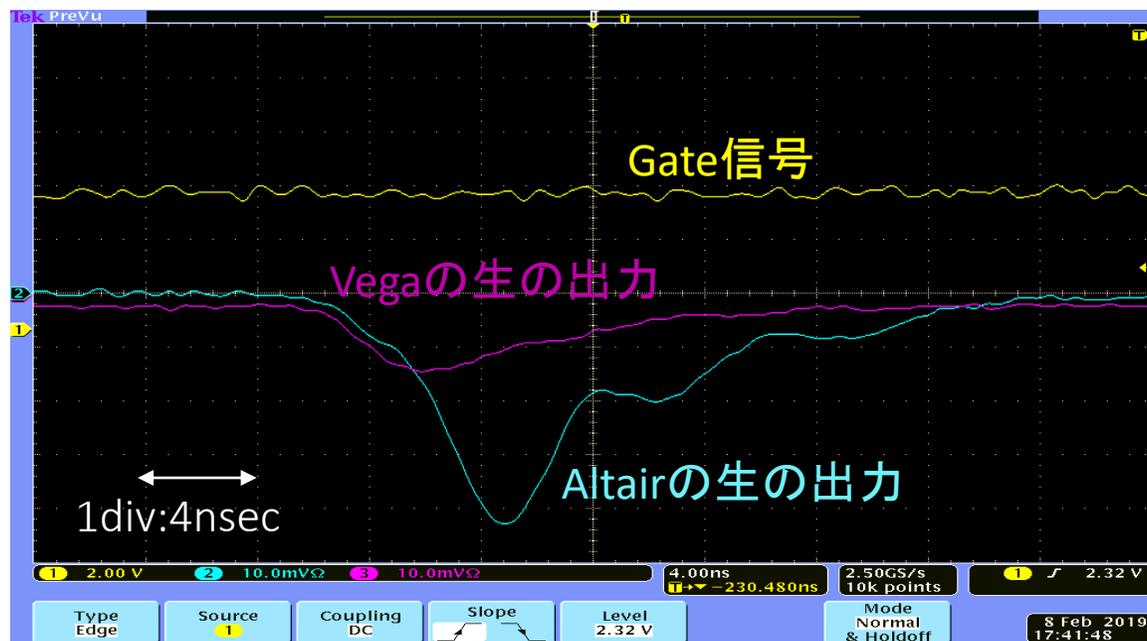
cherenkov vega vs altair



光の収集効率は上がった

分かったこと

- アクリル中で μ 粒子によるものであろう発光現象が起きている。
- その発光現象には上下で光量に差があり、下のほうが多い。
- 発光現象に明確な立ち上がり時間の差はなかった。



考察、今後の課題

調べた限りこのSetUpで生じる異方性のある発光現象はCherenkov光のみであると考えられるため、Cherenkov光が観測できたといえるかもしれない。

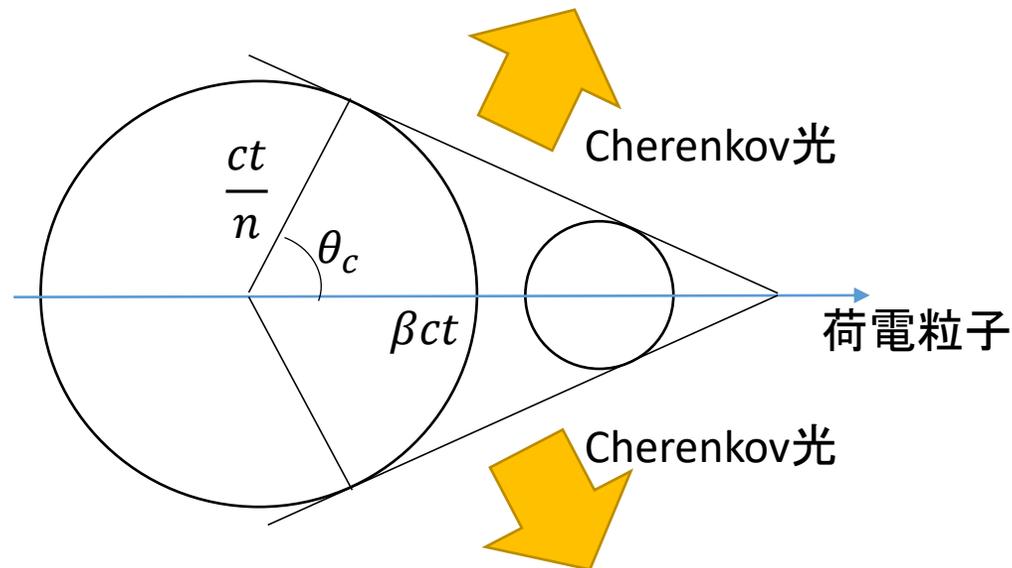
確実にCherenkov光だというためには、、、

- より性能の高いPMTを使つての実験
- より良い種類、形状の媒質での実験
- Cherenkov光の光子数のシミュレーション

ご清聴ありがとうございました。

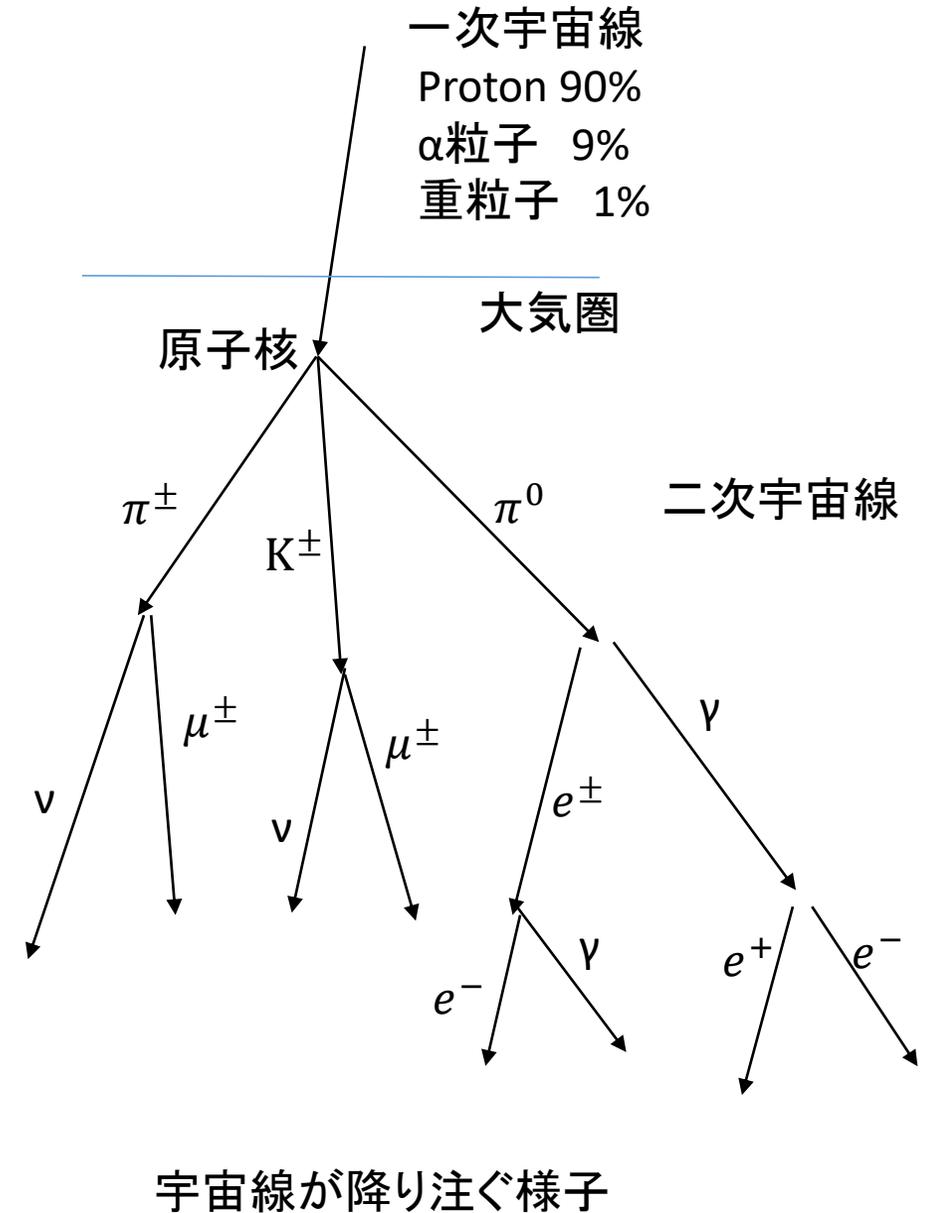
Cherenkov光の発生原理

- Cherenkov光とは、電荷をもった粒子が媒質中を媒質中での光速を超えて通った時に粒子の飛跡に沿って発生する光である。
- その性質から $\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n}$ の角度 θ_c で放射される。

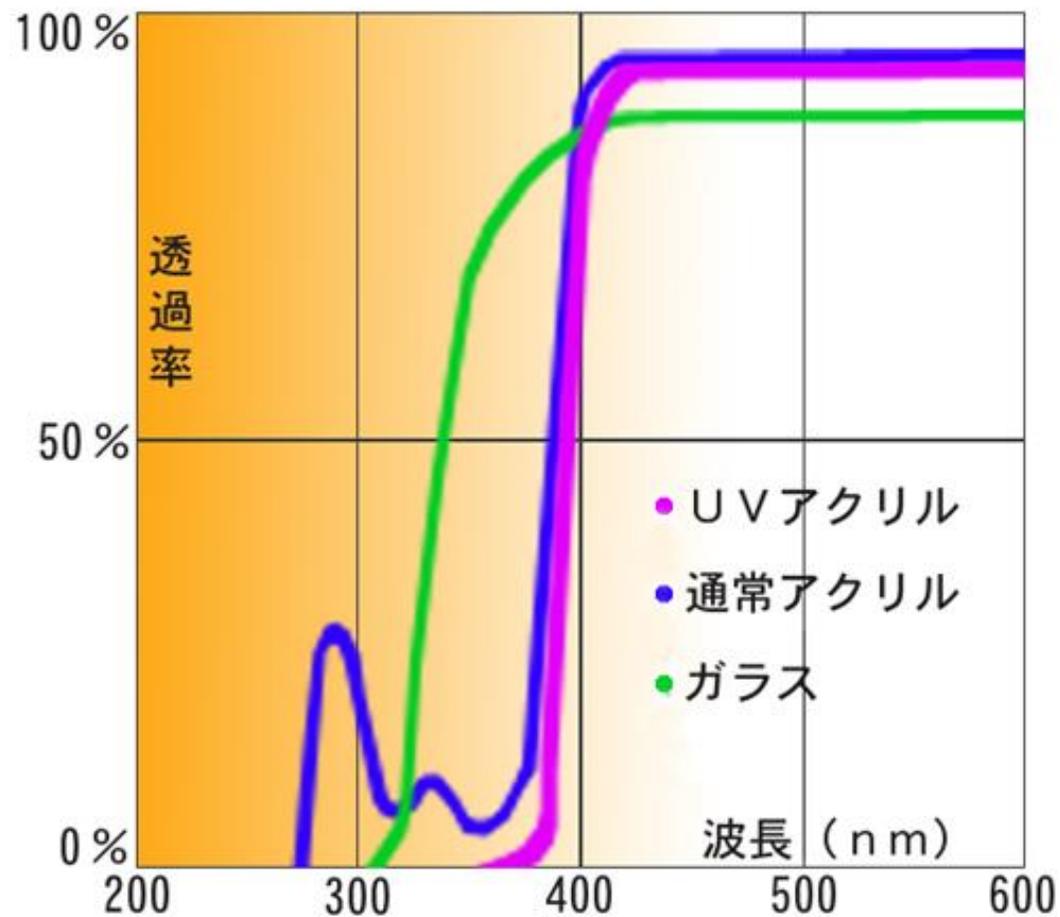


μ粒子について

- 宇宙線のほとんどはProtonであり、大気中の原子核と反応し K , π 中間子や μ 粒子が生成される。またそれらが崩壊することによっても生じる。
- 特に μ 粒子は寿命が 2.197×10^{-6} [sec]とほかの粒子に比べて長く、地上まで降り注ぐことができる。
- 寿命の引き延ばしを考えると1 GeVで 20.909×10^{-6} [sec]になり、 6.234×10^3 [m]走ることができる。(出典:粒子物理計測学入門)

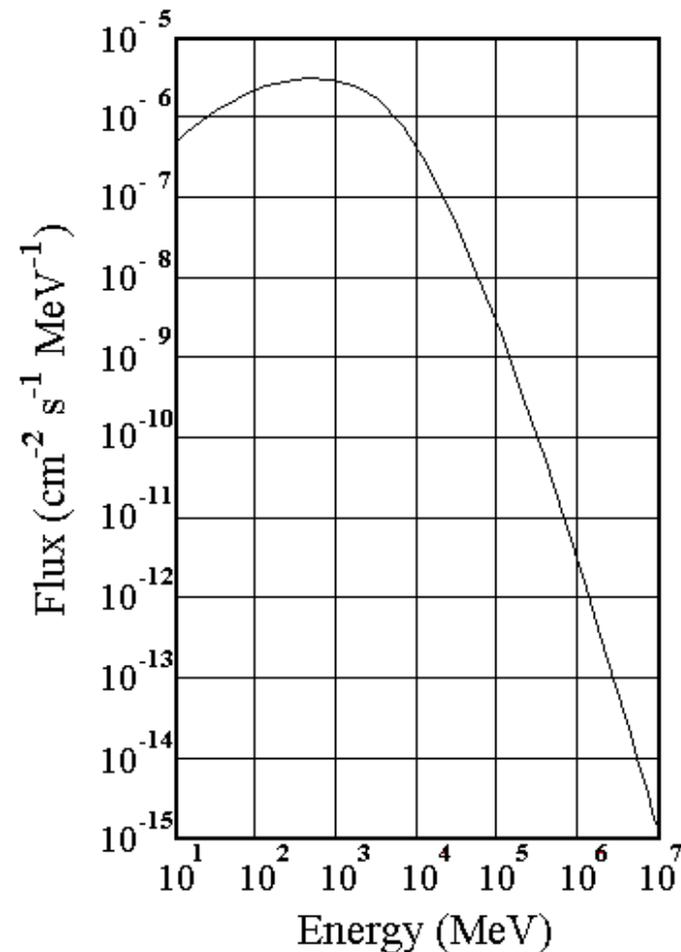


光透過特性グラフ



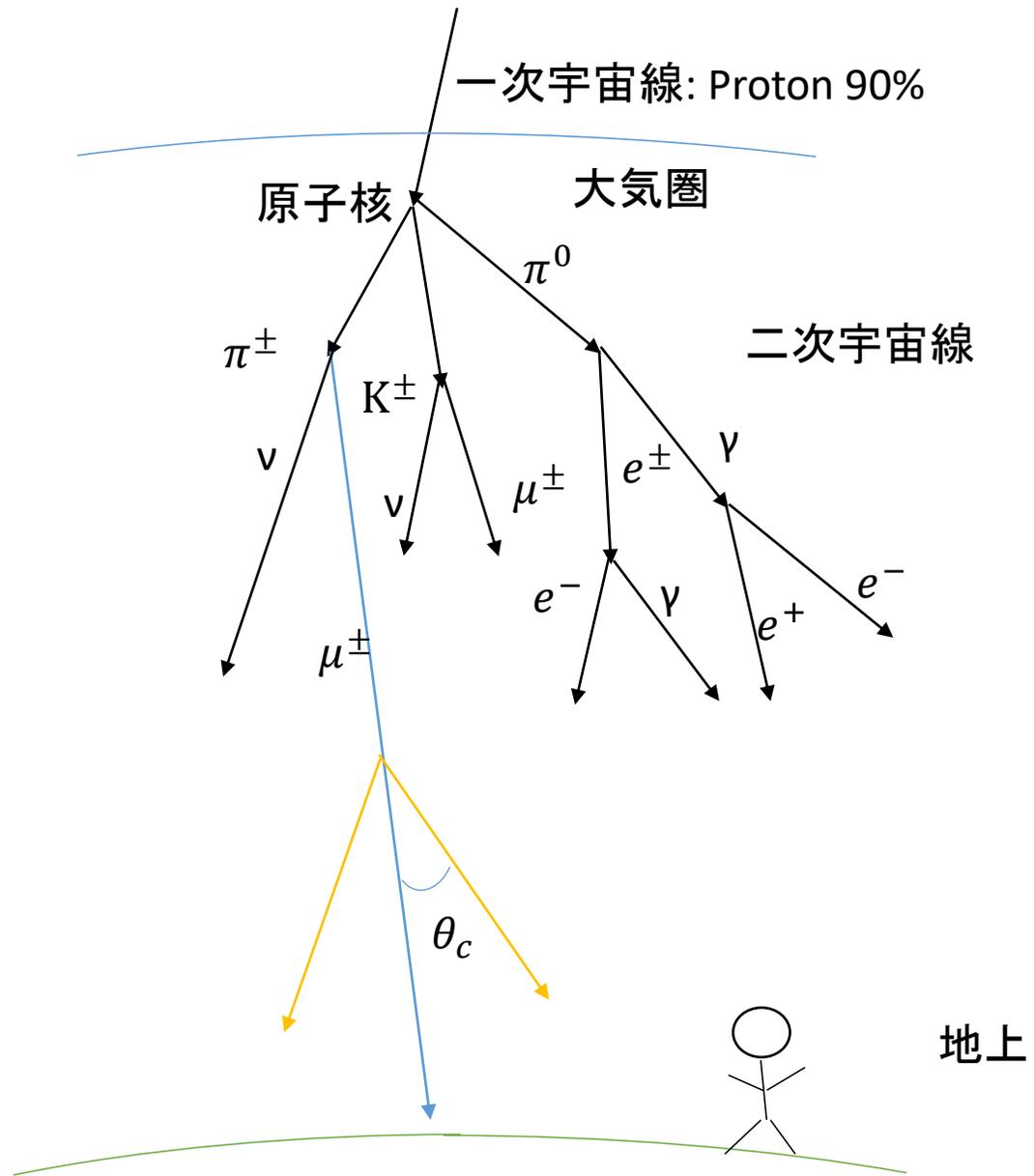
https://www.gakubuti.net/products/detail.php?product_id=126

Muon flux at sea-level, Nagoya

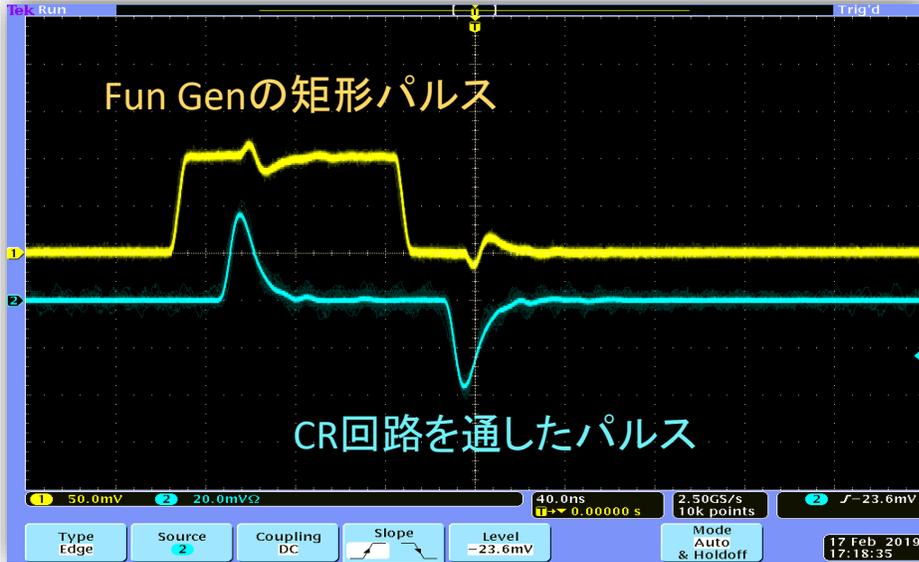


Minato, S. (1986) Bulk density estimates of buildings using cosmic rays, *Applied Radiation and Isotopes*, 37: 941-946.

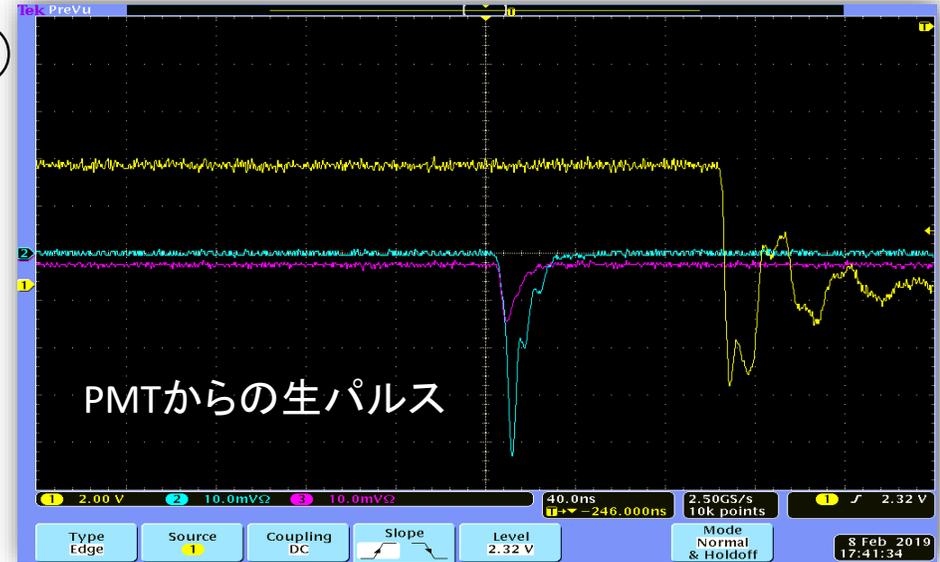
http://www1.s3.starcat.ne.jp/reslnote/A8_10.htm



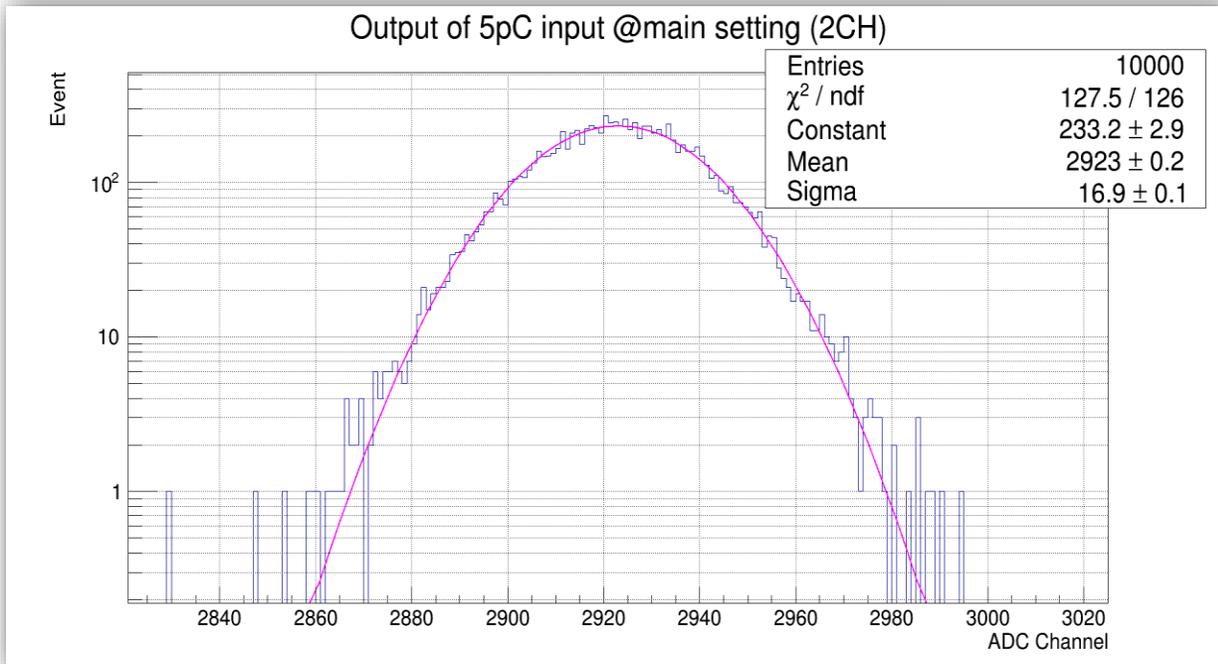
①



②

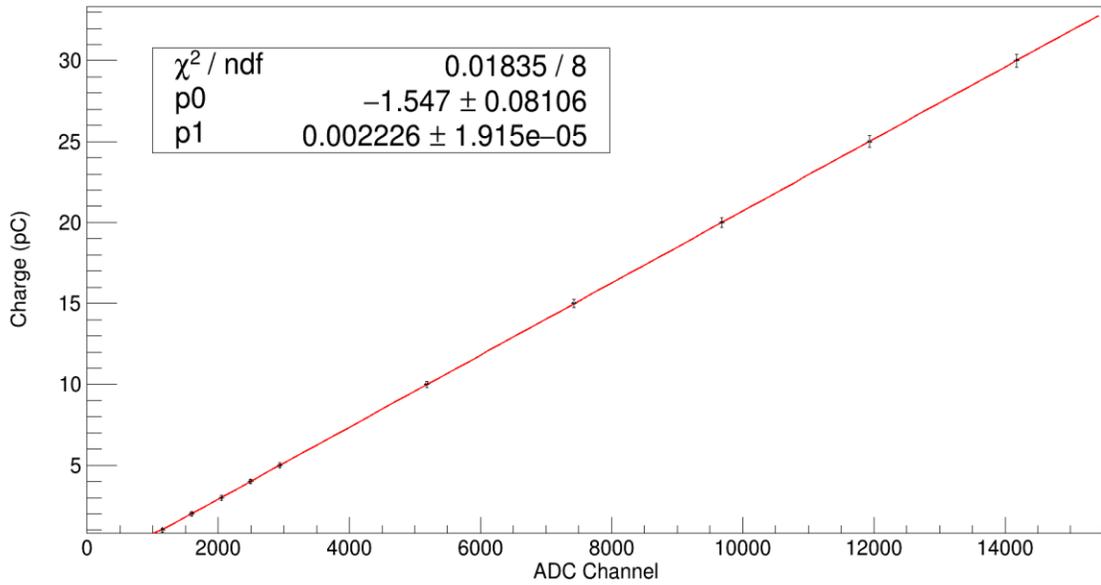


③

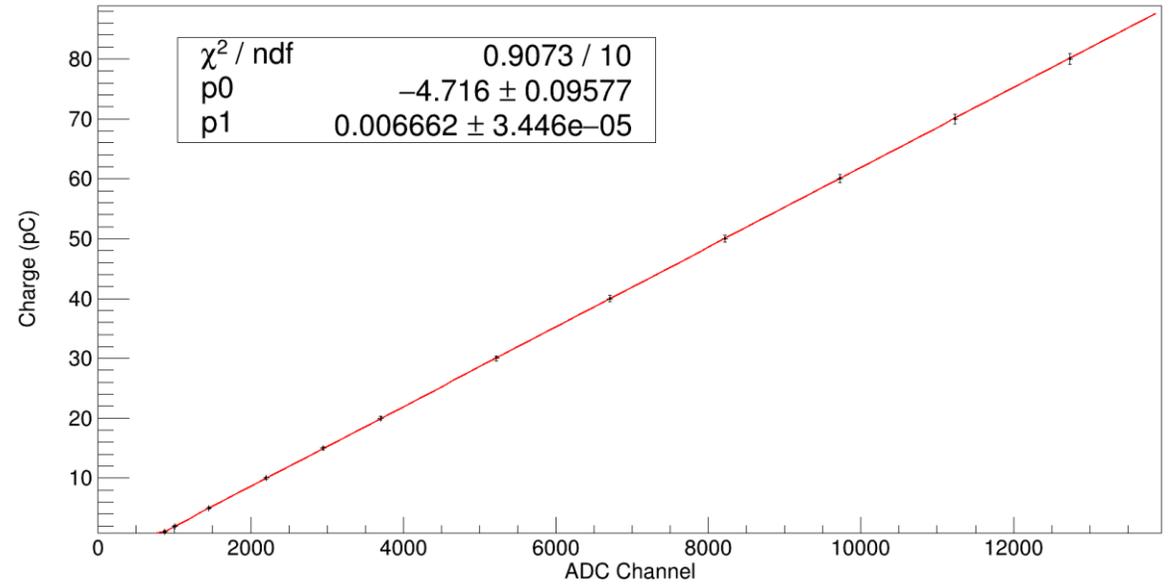


- ②よりPMTの出力パルスの時定数を10ns程度と読み取り、 $C=220\text{pC}$ $R=51\Omega$ を用いて $\tau = 11\text{ns}$ のCR回路を作り、①のパルスを作った。
- ③は実際のcalibrationの際の1測定点でのガウスフィットの様子。較正曲線ではinputの電荷に対してのchannel値を $\text{Mean} \pm 1\sigma$ として扱う。

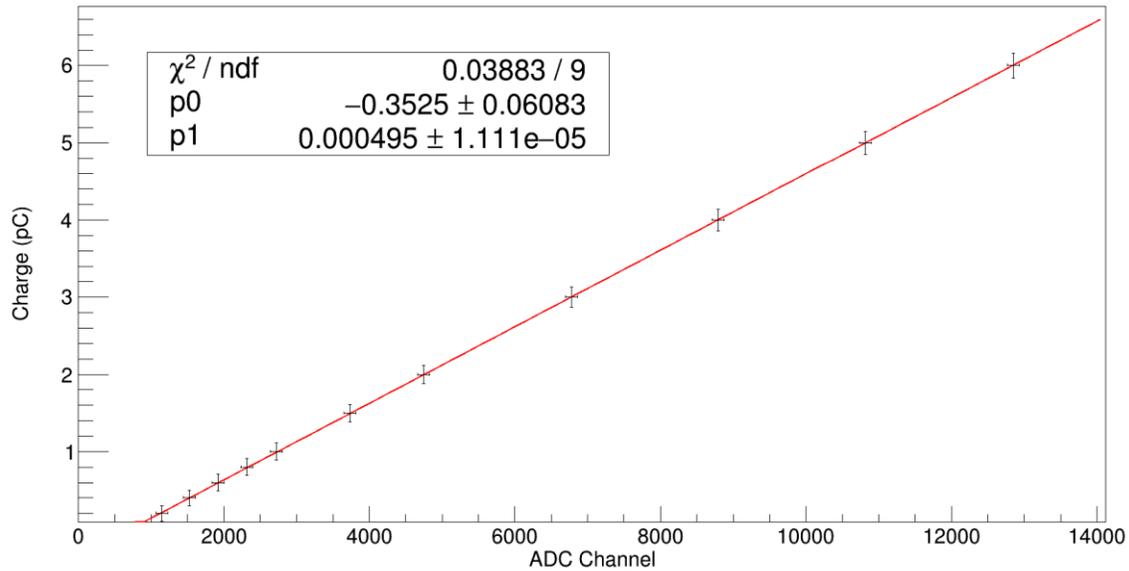
Calibration for main (CH3)



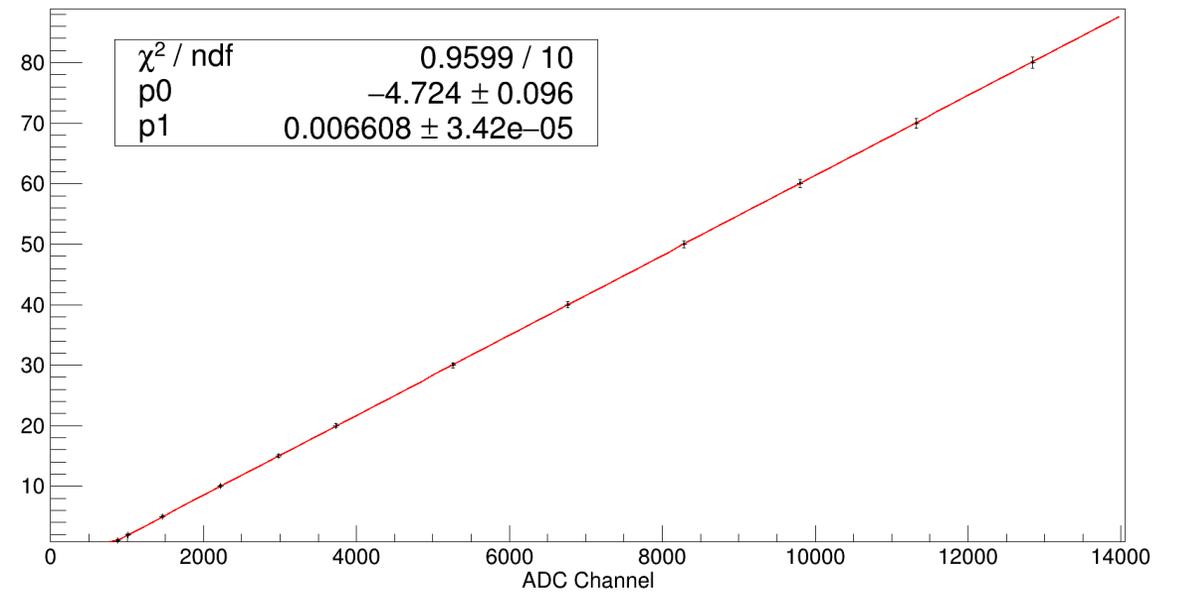
Calibration for main ver.ref (3CH)



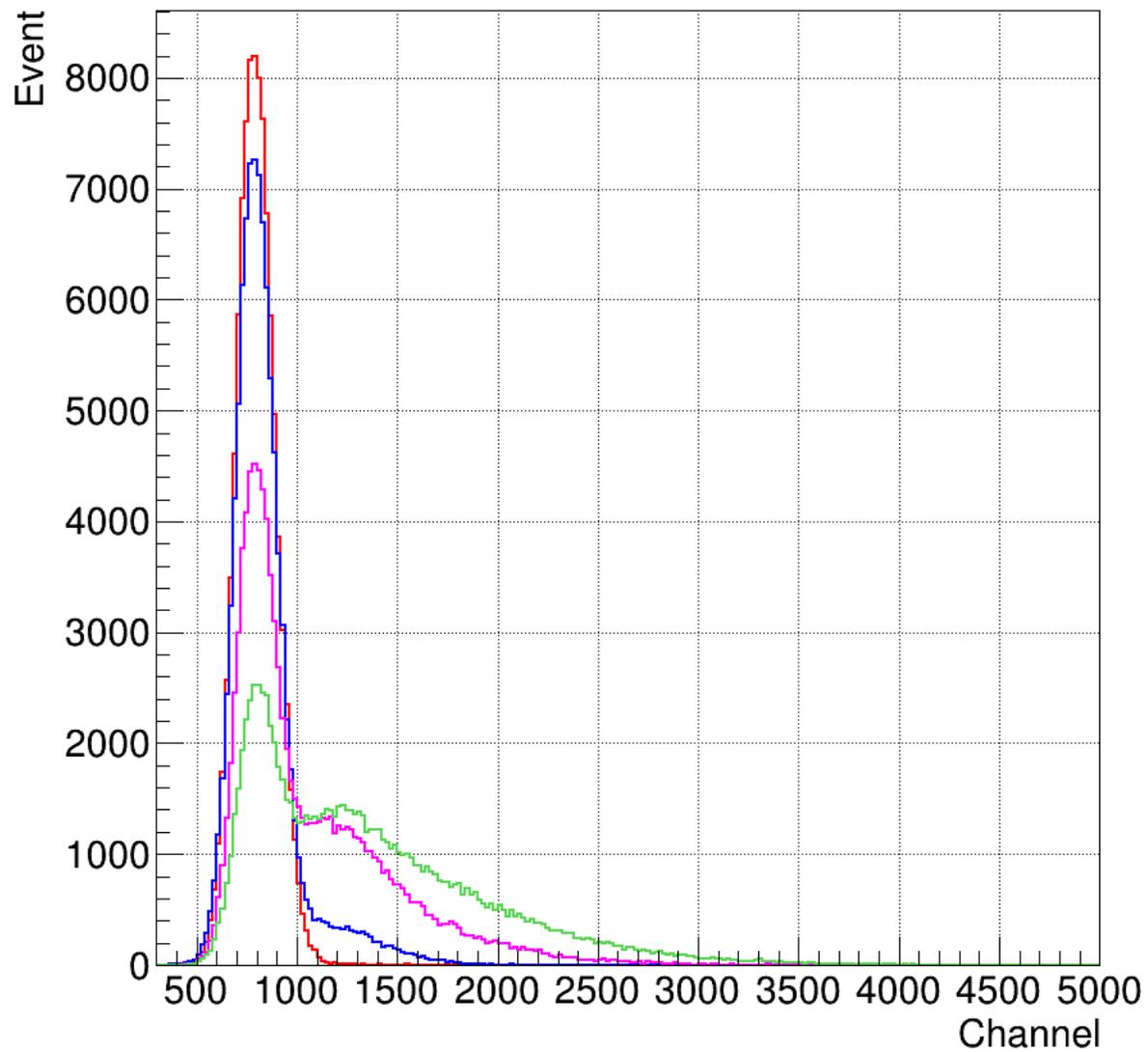
Calibration for 1p.e.



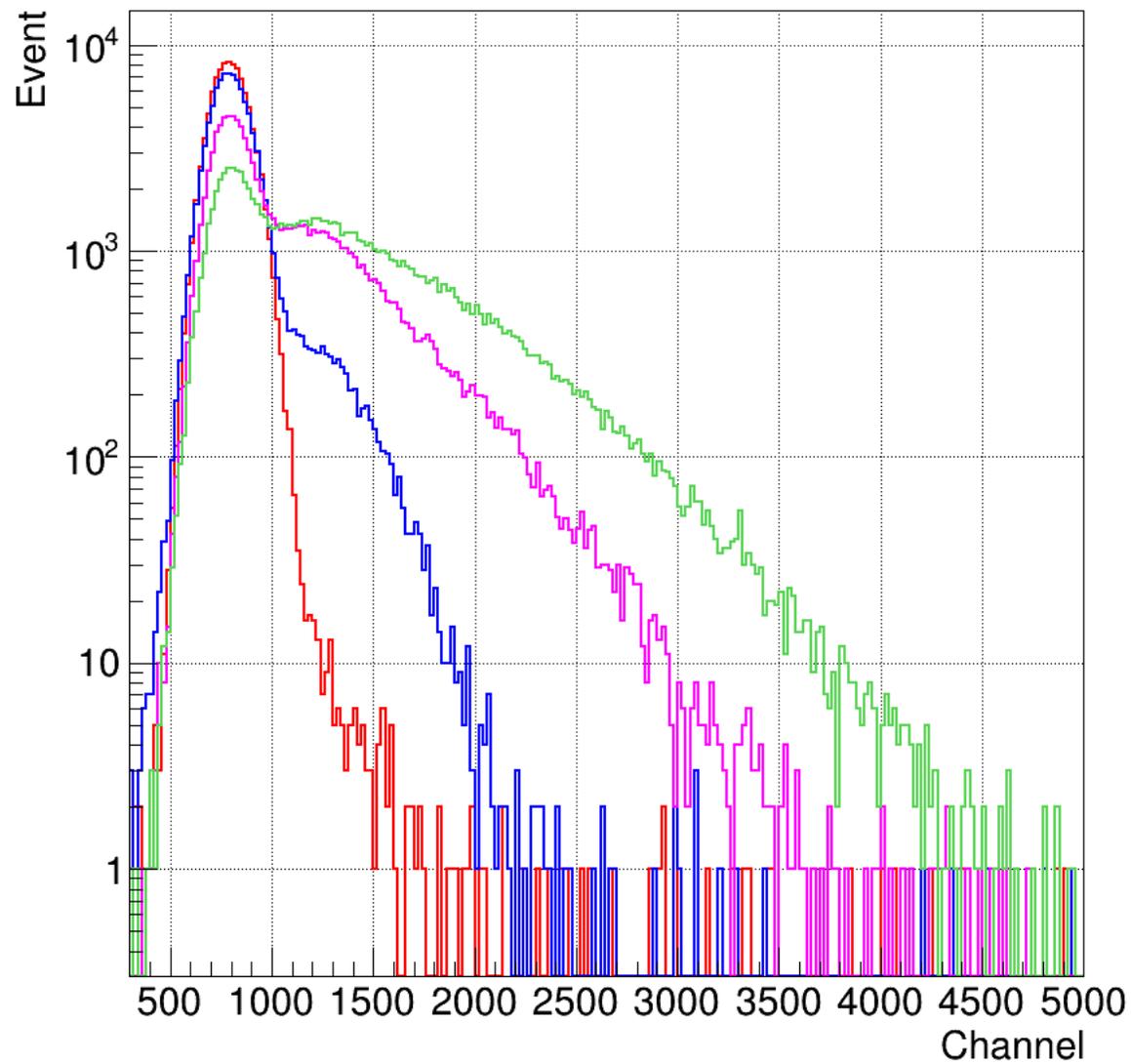
Calibration for main ver.ref (2CH)



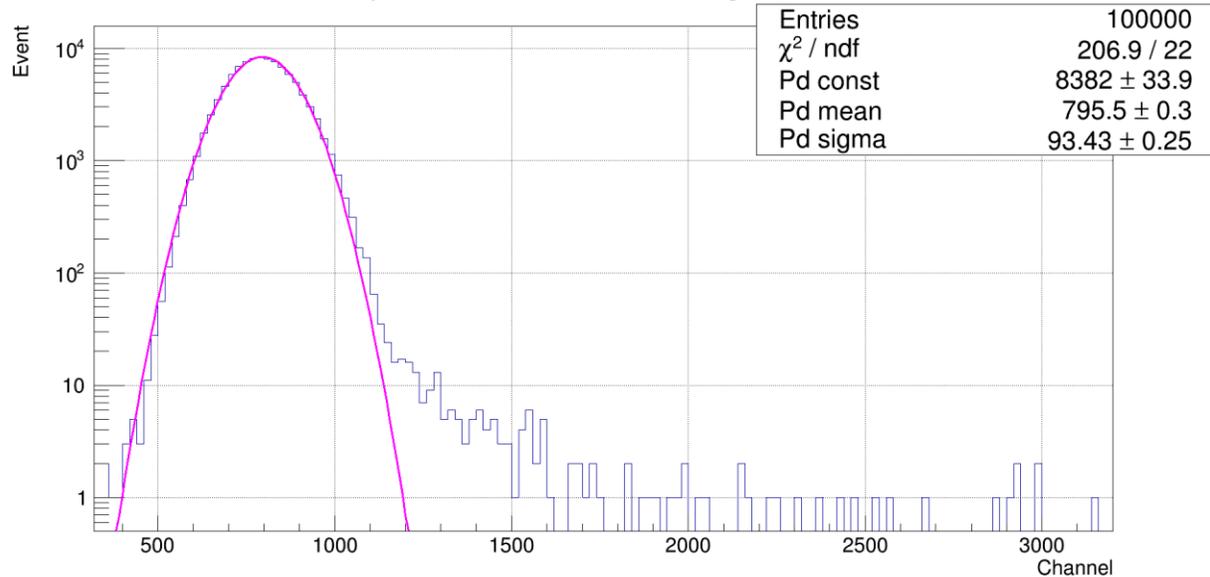
Comparison of differently lighted Vega outputs (linear)



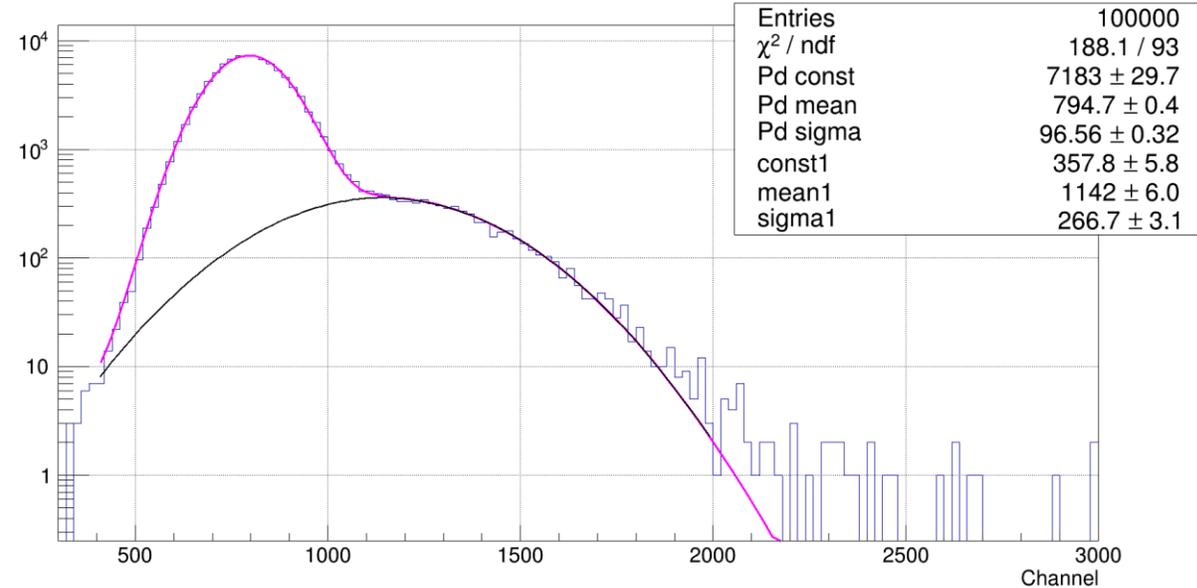
Comparison of differently lighted Vega outputs (log)



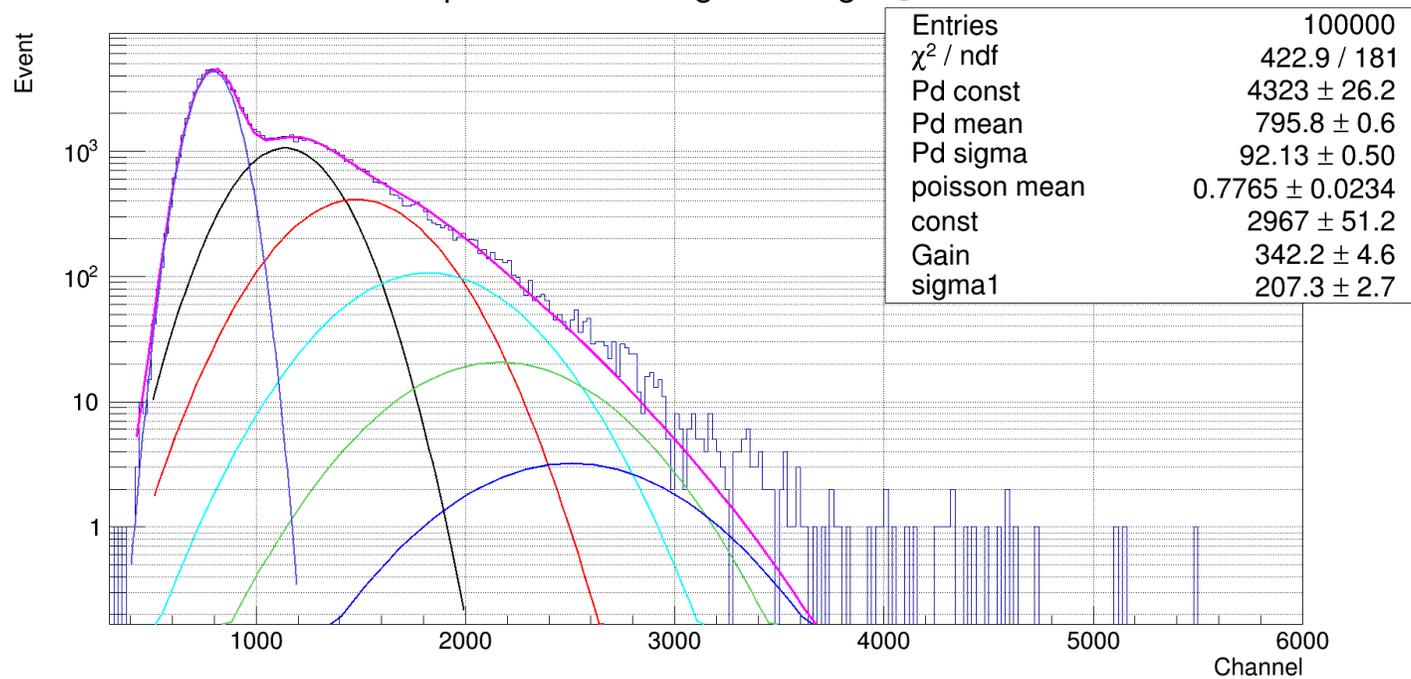
Output channel of covered Vega @1600V



Output channel of lighted Vega @1600V



Output channel of lighted Vega @1600V



Poisson Fitの式

$$y = [0] \times \exp\left(-\frac{(x - [1])^2}{2 \times [2]^2}\right) + \sum \left\{ [4] \times \frac{[3]^n \times \exp(-[3])}{n!} \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - ([1] + n \times [5])}{\sqrt{n} \times [6]}\right)^2\right) \right\}$$

[0]=Pedestal Const

[1]=Pedestal Mean

[2]=Pedestal Sigma

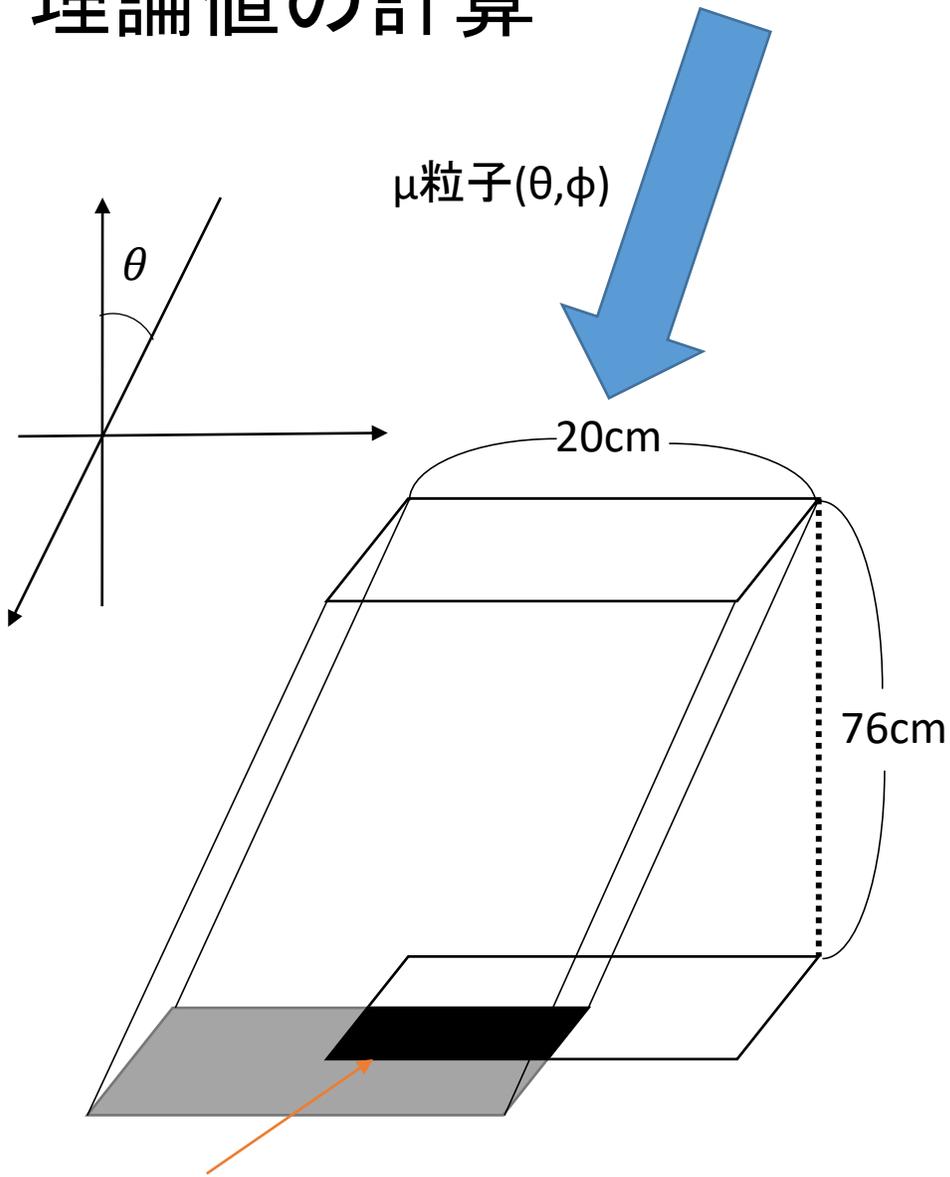
[3]=Poisson Mean

[4]=Poisson Const

[5]=Gain

[6]=1p.e. Gauss Sigma

理論値の計算



射影と重なる面積 $S[cm^2]$
 $S=(20 - 76\tan\theta\cos\varphi)(20 - 76\tan\theta\sin\varphi)$

μ^- の天頂角分布(地磁気緯度 $24^\circ N$)は

$$J(\theta) = J(0)\cos\theta^2[cm^{-2}sec^{-1}st^{-1}]$$

$$J(0) = (0.8 \pm 0.05) \times 10^{-2}[cm^{-2}sec^{-1}st^{-1}]$$

全ての宇宙線の天頂角分布

$$J(\theta) = J(0)\cos\theta^n[cm^{-2}sec^{-1}st^{-1}]$$

$$J(0) = (1.2 \pm 0.05) \times 10^{-2}[cm^{-2}sec^{-1}st^{-1}]$$

($n=2$:high energy, $n=3$:low energy)

(参考文献:粒子物理計測学入門)

ミューオンのEventrateを N とすると

$$N = 4 \iint d\theta d\varphi J(\theta)(20 - 76\tan\theta\cos\varphi)(20 - 76\tan\theta\sin\varphi)\sin\theta$$

$0 \leq \theta \leq \arctan \frac{5}{19}$ と $\arctan \frac{5}{19} \leq \theta \leq \arctan \frac{5\sqrt{2}}{19}$ で分けてそれぞれ積分して、足し合わせると

$$N \sim 0.21 \pm 0.013[/sec]$$

となる。

同様に全ての宇宙線でのEventrateを計算すると、

$$N \sim 0.31 \pm 0.020[/sec]$$

理論値との比較と偶然同時計数頻度との比較

Plastic ScintillatorのEventrateはそれぞれ

$$n_1(\text{Jonny}) = 26.9 \pm 0.061 \text{ [/sec]} \quad n_2(\text{Sahori}) = 58.9 \pm 0.090 \text{ [/sec]} \quad \text{であった。}$$

このことから偶然同時計数頻度 N' はそれぞれの信号を時間幅 w_1, w_2 [ns]で出力すると

$$w_1(\text{Jonny}) = 50 \pm 5 \text{ [nsec]} \quad w_2(\text{sahori}) = 170 \pm 10 \text{ [nsec]}$$

$$\begin{aligned} N' &= n_1 n_2 (w_1 + w_2) \\ &= (3.4 \pm 0.17) \times 10^{-4} \text{ [/sec]} \end{aligned} \quad \text{となる。}$$

Visual Scalerでの実際のcoincidence測定値 N は

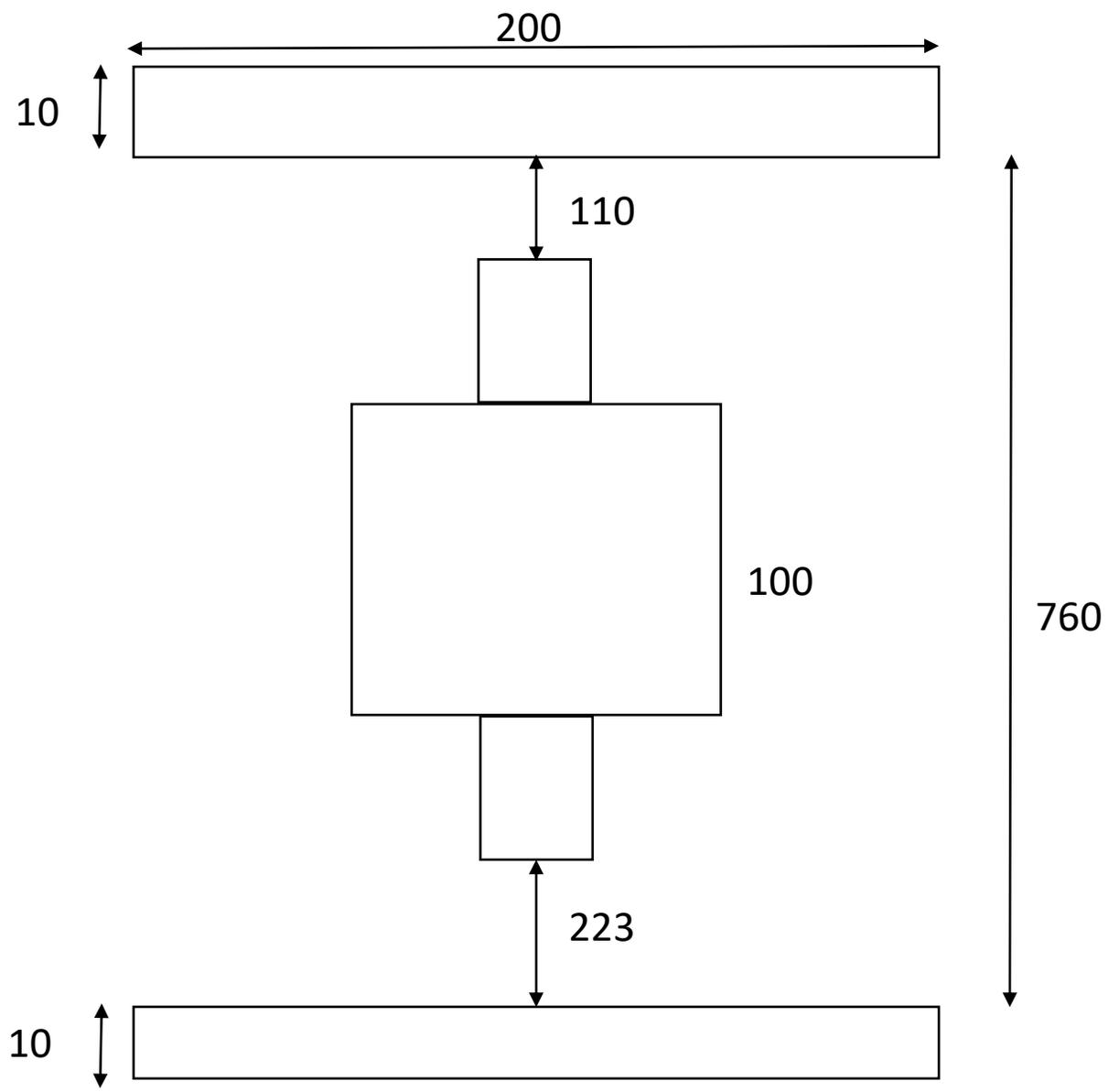
$$N = 0.271 \pm 0.0061 \text{ [/sec]}$$

であった。

これは偶然同時計数頻度 N' に比べて非常に大きいので、測定値への偶然同時計数頻度の寄与はほとんど無いと言える。

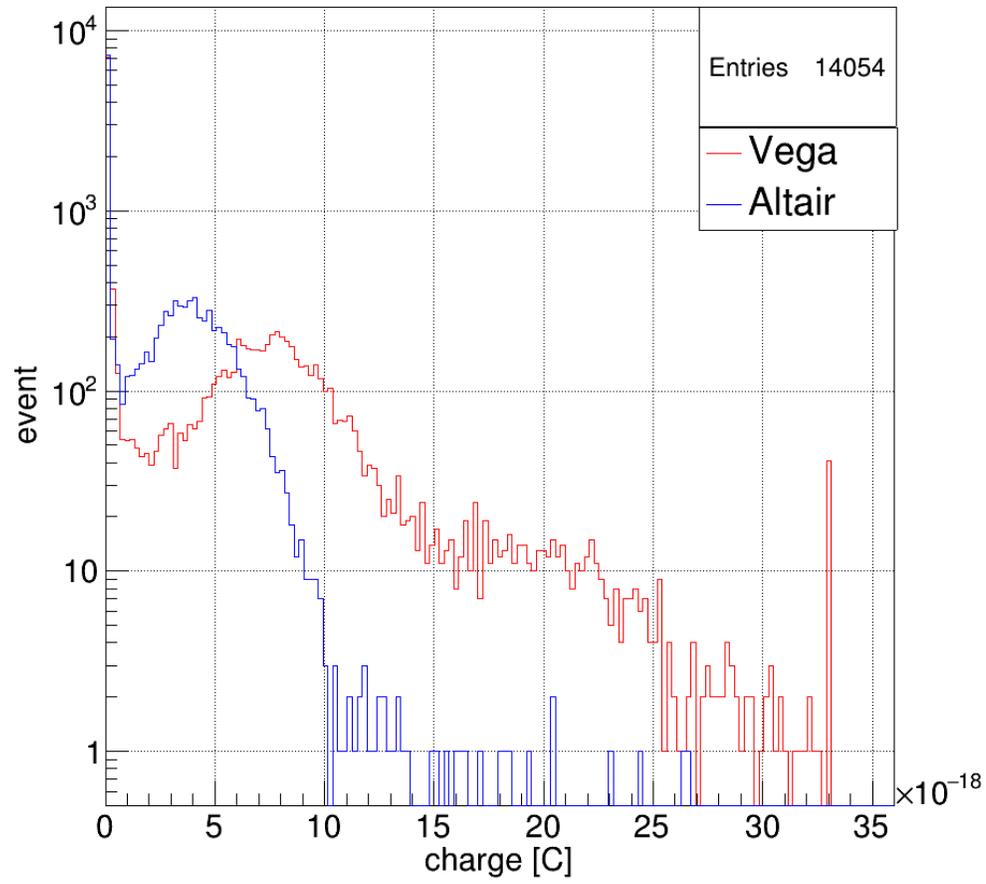
また先の理論値の計算から、 μ 粒子のみと全宇宙線のEventrateの間の値であるためおおよそ正しく測定できていると言える。

- ・以上の議論よりこのSet Up (HV=1300V, Threshold=20mV) でほぼミューオンのCoincidenceがとれているといえる。

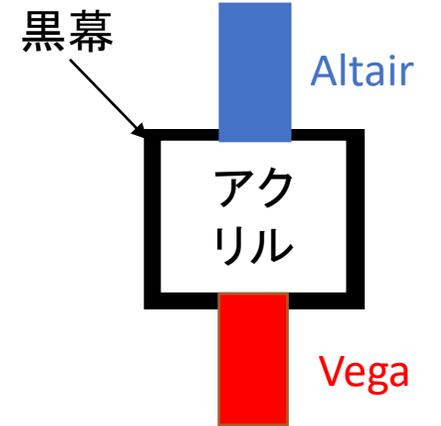
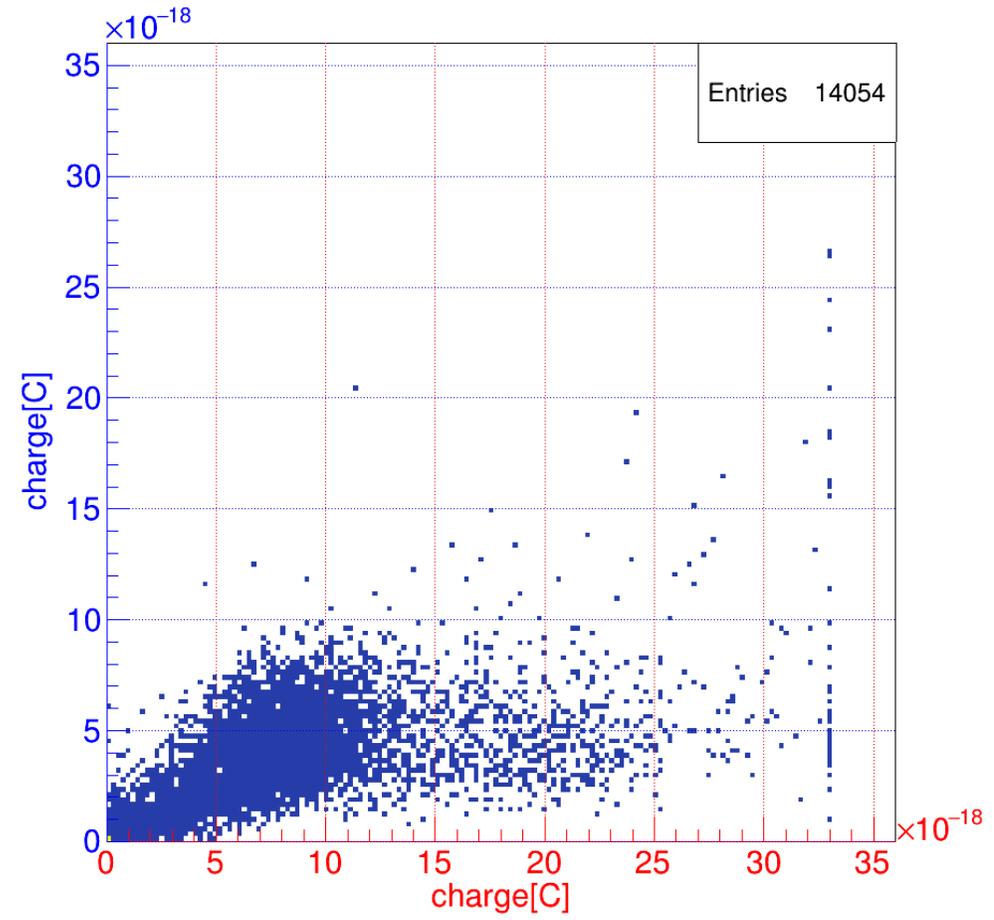


上下逆での計測

cherenkov charge vs event

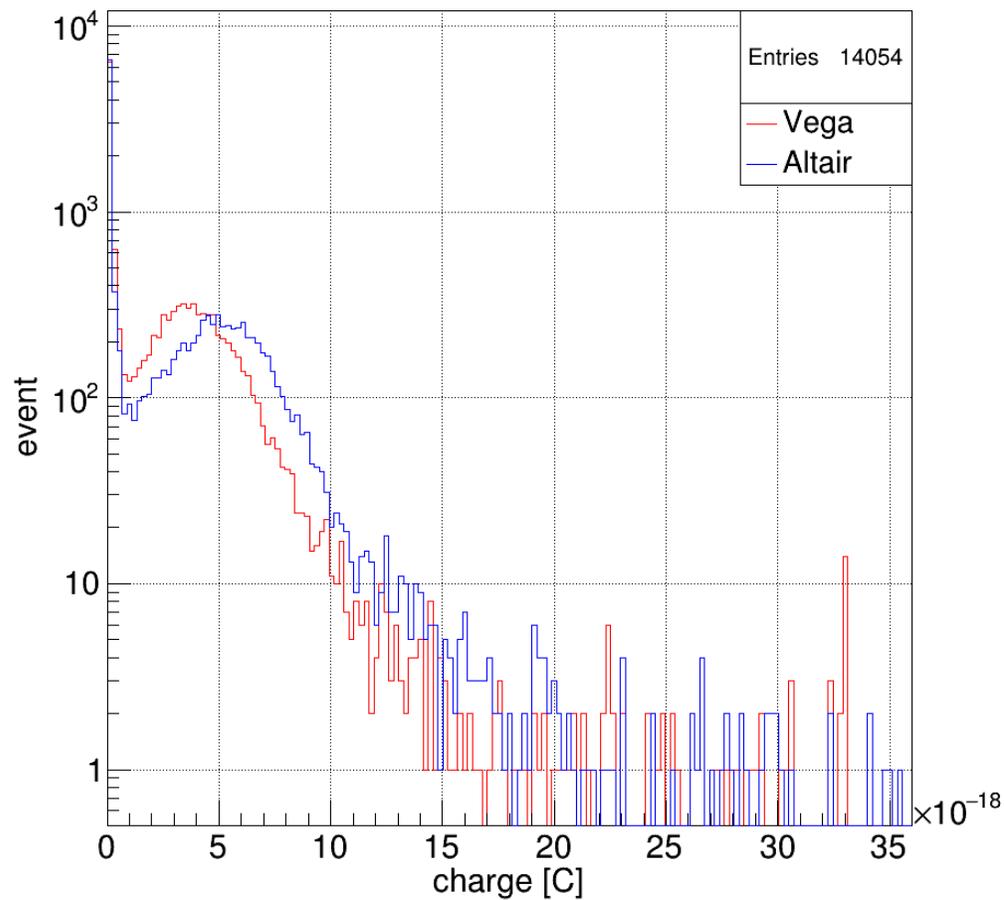


cherenkov vega vs altair

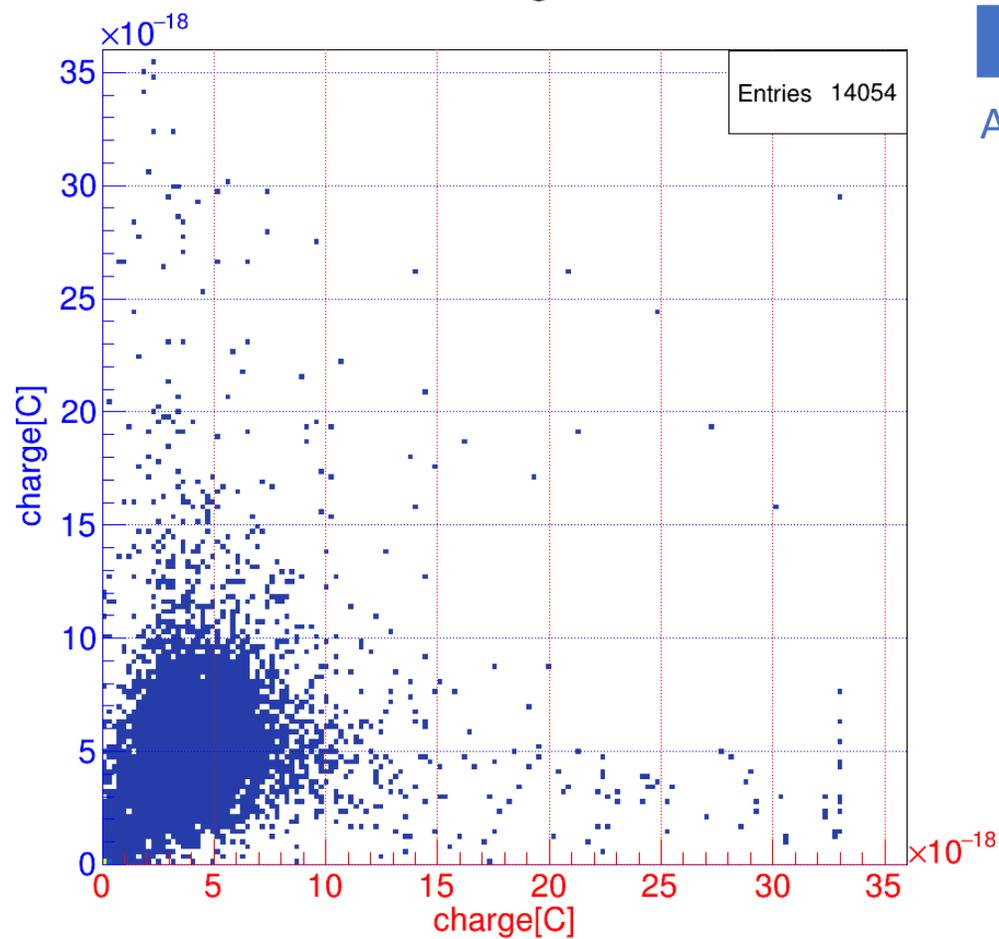


左右逆での計測

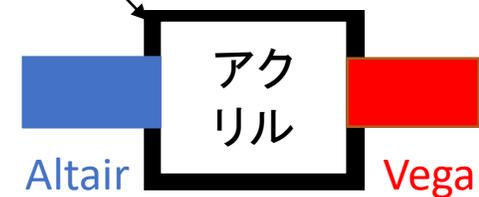
cherenkov charge vs event



cherenkov vega vs altair



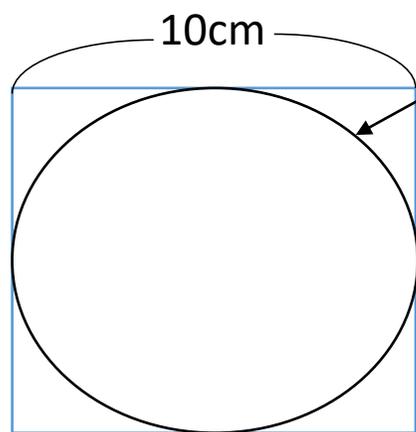
黒幕



Cherenkov光による光子数の計算

以下の2点の仮定の下、計算を行う。

- 1、アクリルに垂直に入射とする。
- 2、ミューオンのエネルギーをピークの1GeVとする。



この部分に入射する
μ粒子が一番event
数が多い

アクリル上面

μ粒子がアクリルを単位長さあたりを通過した際に出す光子数を N とすると

$$N = 2\pi\alpha \int_{650nm}^{400nm} \sin^2\theta_c / \lambda^2 d\lambda$$
$$= 239[/math>$$

この値から反射することなく光電面に届く光子数 N_1 を計算すると

$$N_1 = 63.5$$

となった。

アクリル側面で1回反射して光電面に入る光子数 N_2 を計算すると

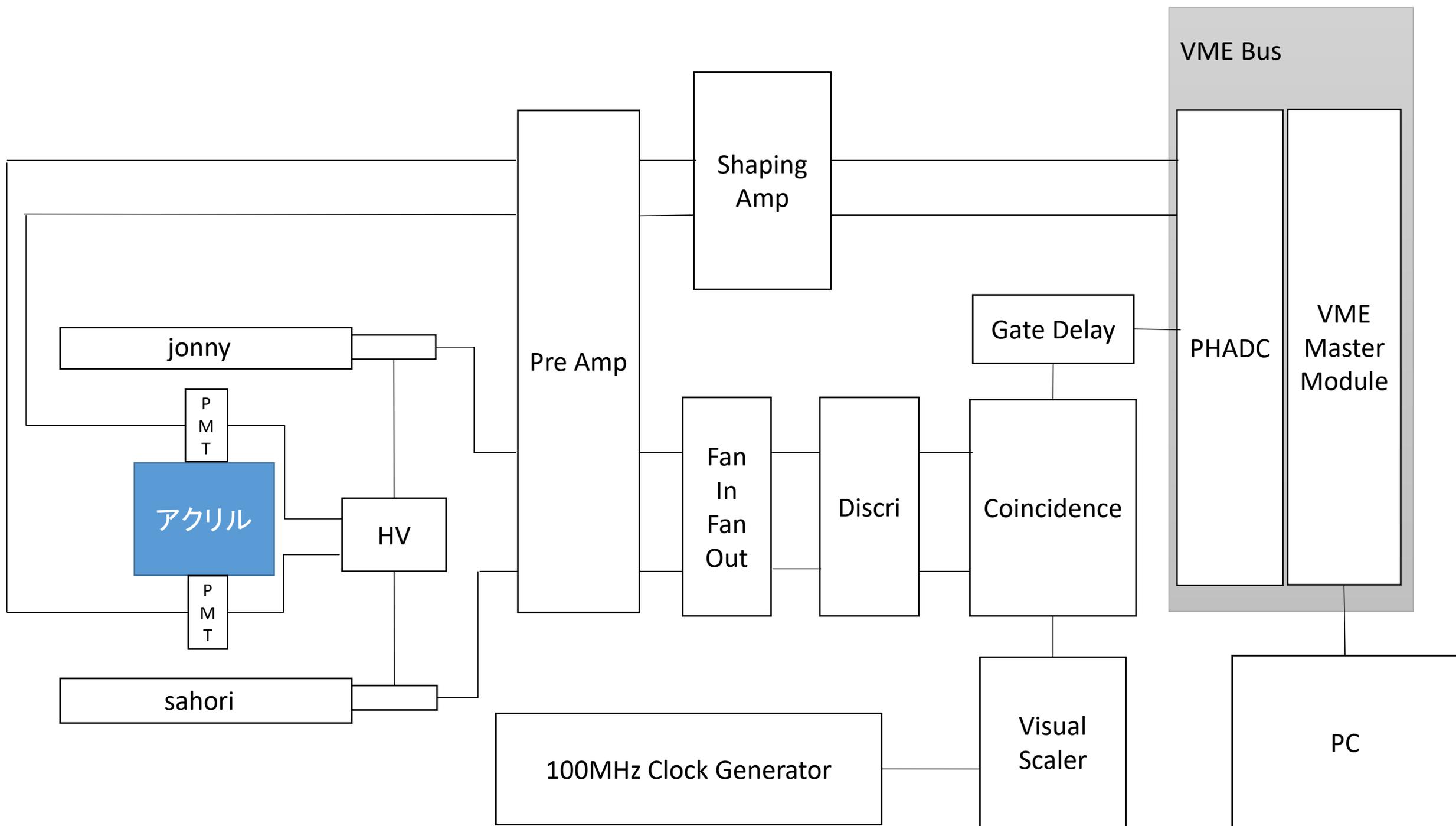
$$N_2 = 14.1$$

(反射率を10%で計算した。)

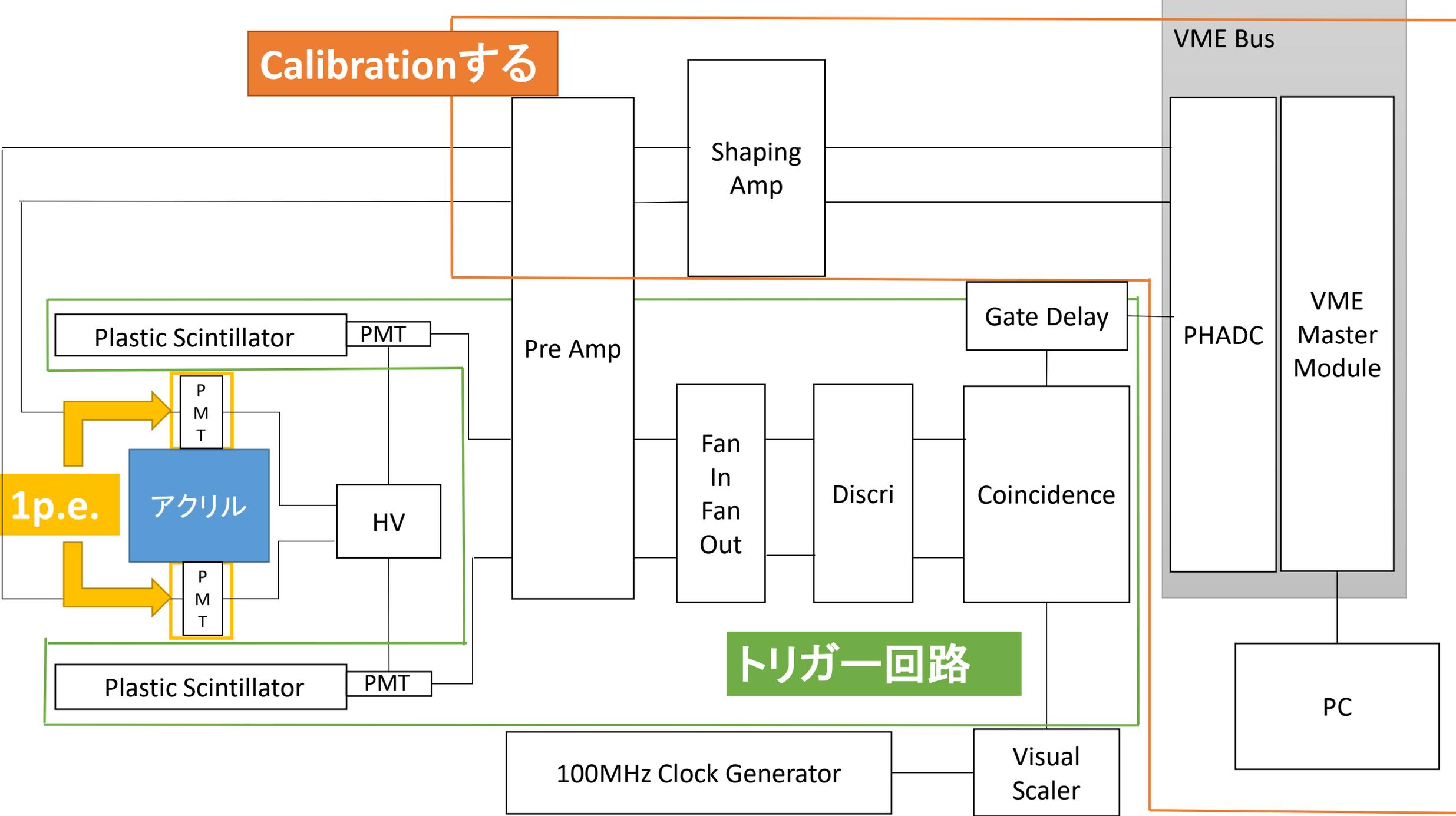
これらの値から、PMTの量子効率25%を考慮して生じる光電子数 N_e を計算すると

$$N_e = (N_1 + N_2) \times 0.25$$
$$= 19.4$$

となる。



Calibrationする



1p.e.

アクリル

P
M
T

P
M
T

Plastic Scintillator

PMT

HV

Plastic Scintillator

PMT

Pre Amp

Fan
In
Fan
Out

Discr

Coincidence

Gate Delay

Shaping
Amp

VME Bus

PHADC

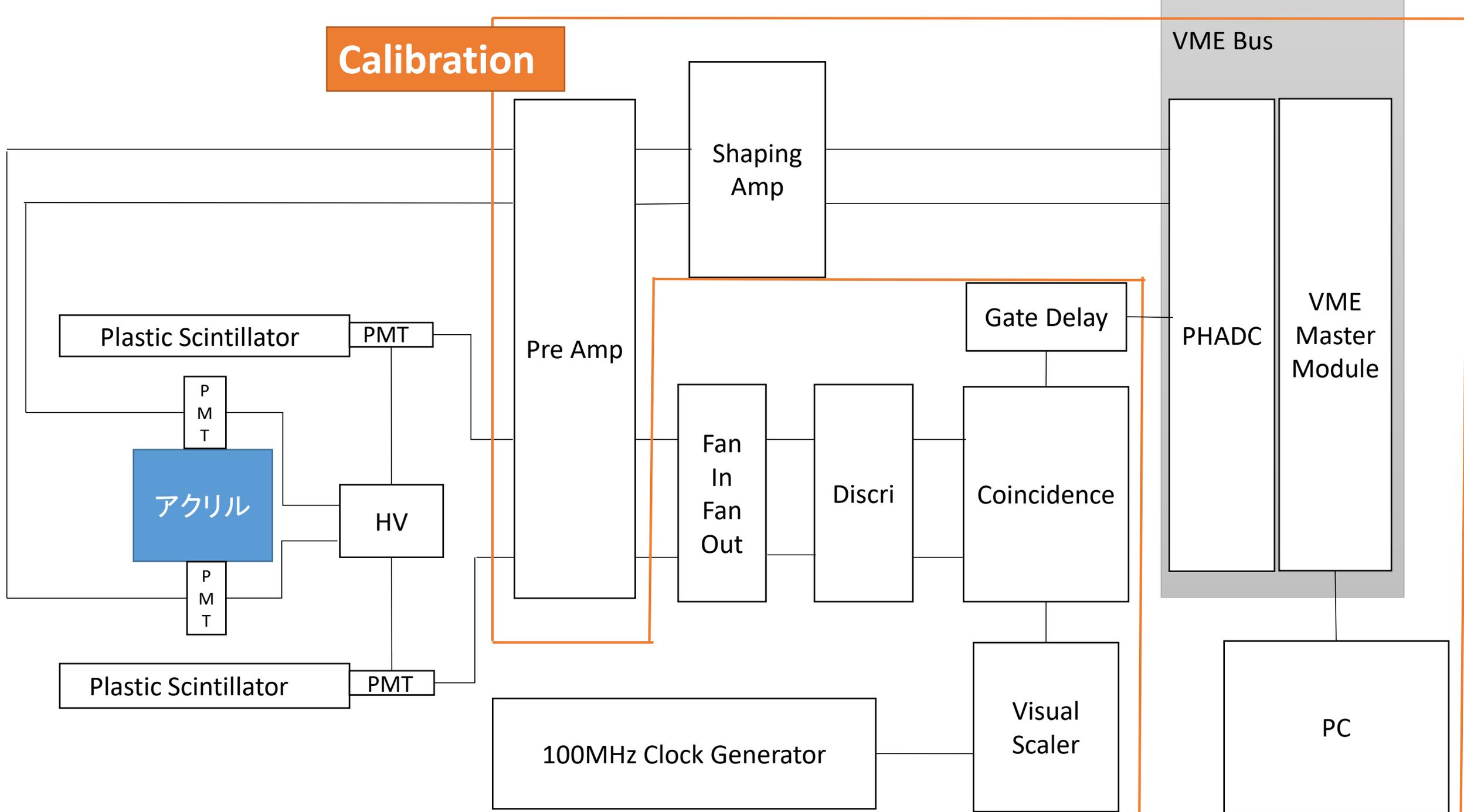
VME
Master
Module

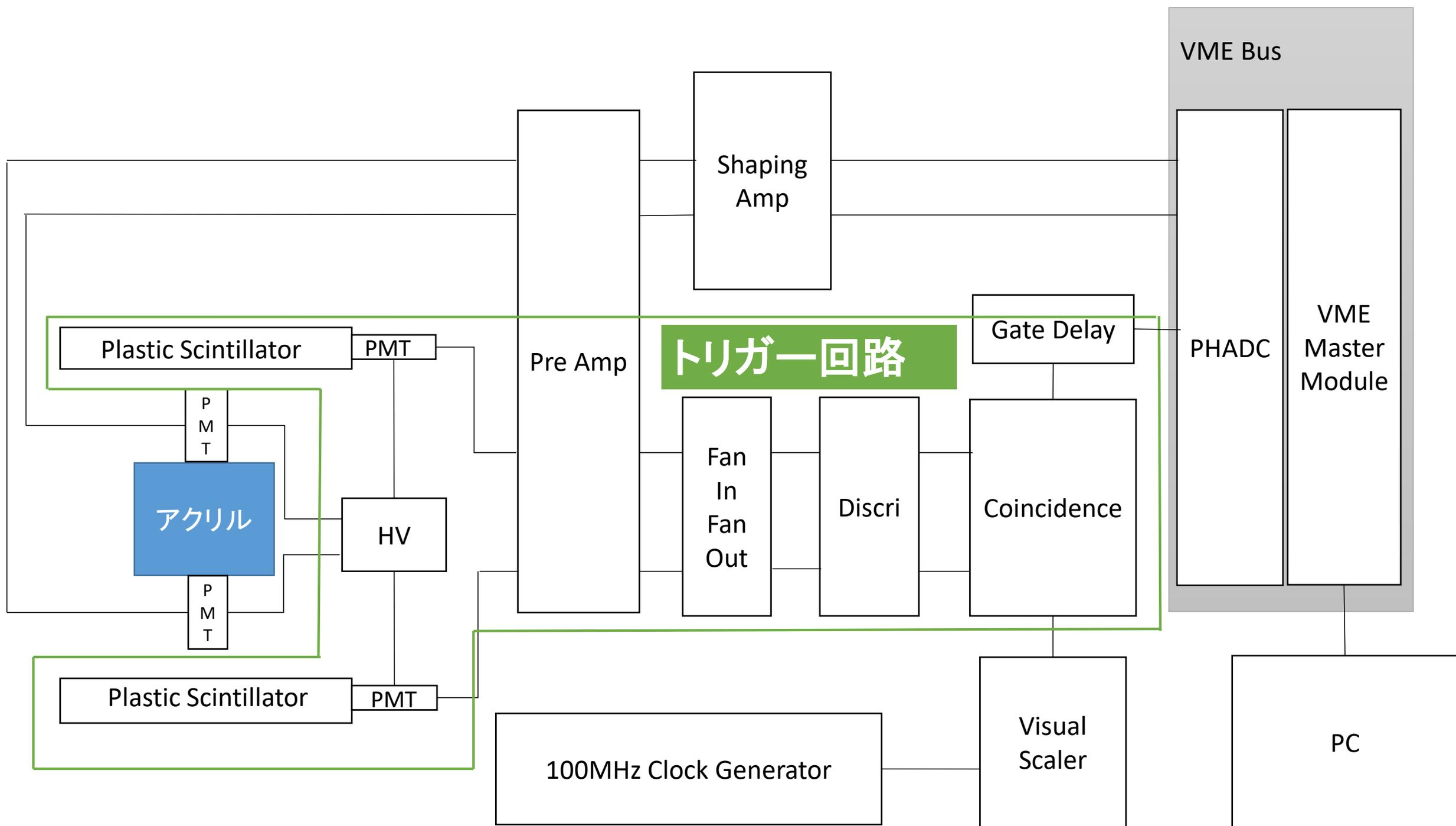
PC

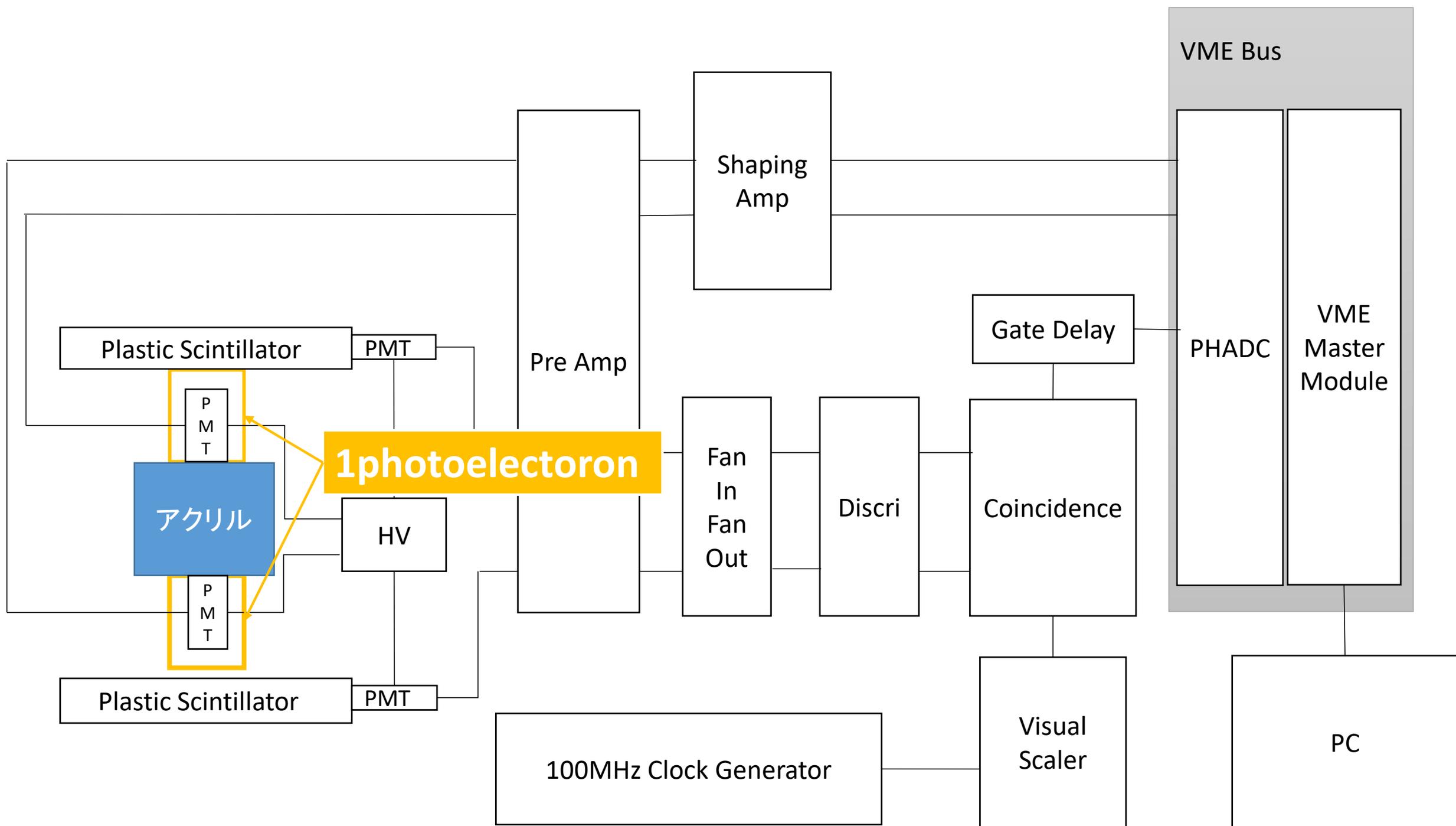
100MHz Clock Generator

Visual
Scaler

トリガー回路







今後の課題

- ・1photoelectronでのfitの時にぶれが大きかったので、よりエネルギー分解能が高いPMTを用いると精度よく実験できると思う。
- ・CoincidenceとアクリルにつけたPMTからの信号が同じミュオンが通過したときに生じたものかどうかの証明ができなかったので、それができるような実験方法を考え、実践できたらいいと思う。
- ・アクリルをPMTの光電面と同じ形の円筒状のものにし、側面に鏡のような乱反射しない反射材を巻き付けて観測すれば、ほぼ全てのCherenkov光を下のPMTに集めることができ、光子数の計算も楽にできると思う。またコインシデンスに用いるPlastic Scintillatorも円筒状のものにしたほうがより計算も考えやすくなると思うので、より正確にCherenkov光であると同定できると思う。
- ・光透過率が高くて、Cherenkov角 θ_c が小さくなるような媒質で実験すれば、より多くのCherenkov光を得られるため、違いがより顕著にみられるのではないかと思う。
- ・今回の実験から宇宙線の発生源についての情報は得られない事もあり、一般的にCherenkov光を測定する目的に沿う意味でもやはりイメージング法のほうが良いと思う。またそうするとCherenkov光であると同定するのも容易になる。