

sPHENIX実験における中間飛跡検出器INTTの 宇宙線を用いた検出効率の研究

奈良女子大学理学部数物科学科物理学コース B4

高エネルギー物理学研究室

西森 早紀子

卒業研究発表会 2021年3月1日

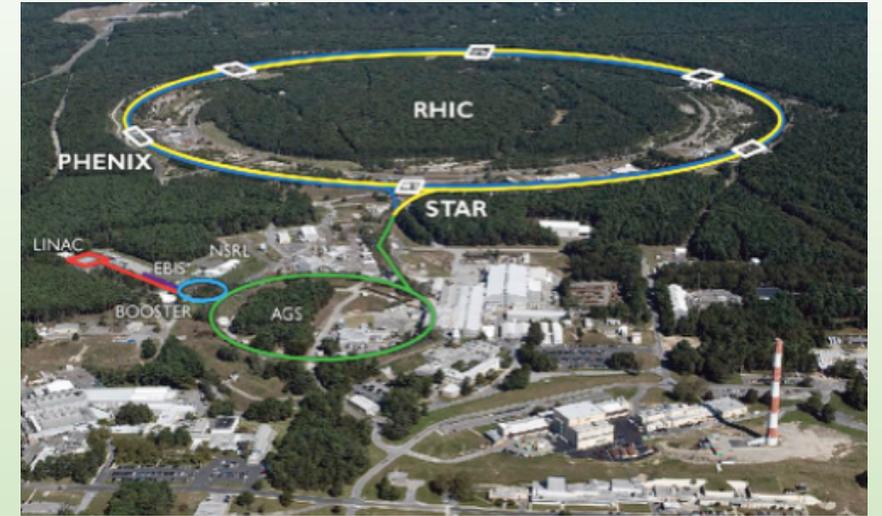
目次

- 研究背景
- **FPHXチップへの供給電圧の見積もり**
- **宇宙線を用いたINTTの検出効率測定**
- まとめ

研究背景

RHIC-sPHENIX実験

- アメリカブルックヘブン国立研究所 (BNL)
RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)加速器での実験
- 稼働予定期間：2023年～
- 2010年から2016年に稼働していたPHENIX実験を高度化
- 衝突で生じるジェット現象やウプシロン粒子を測定し、クォークグルーオンプラズマ (QGP) の性質を決定することを目的としている。
- 衝突エネルギー：200GeV
- 衝突核子：金原子核

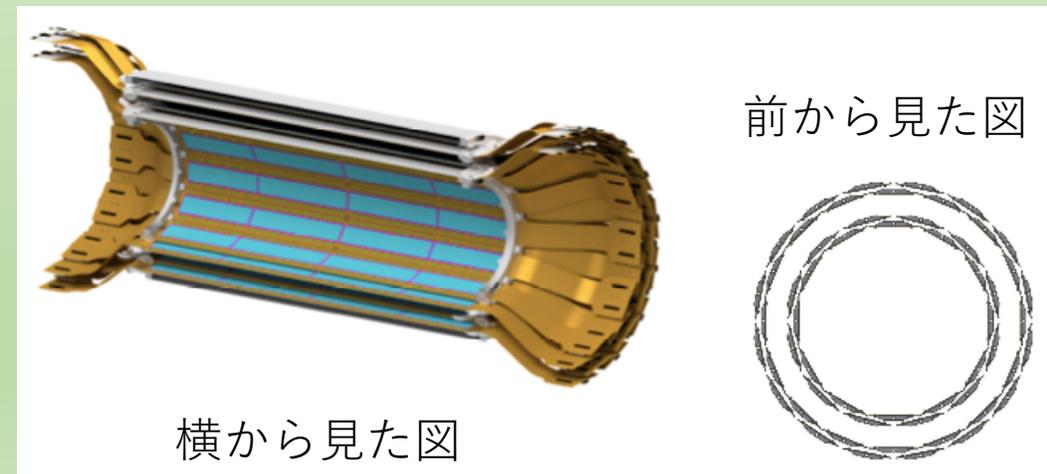
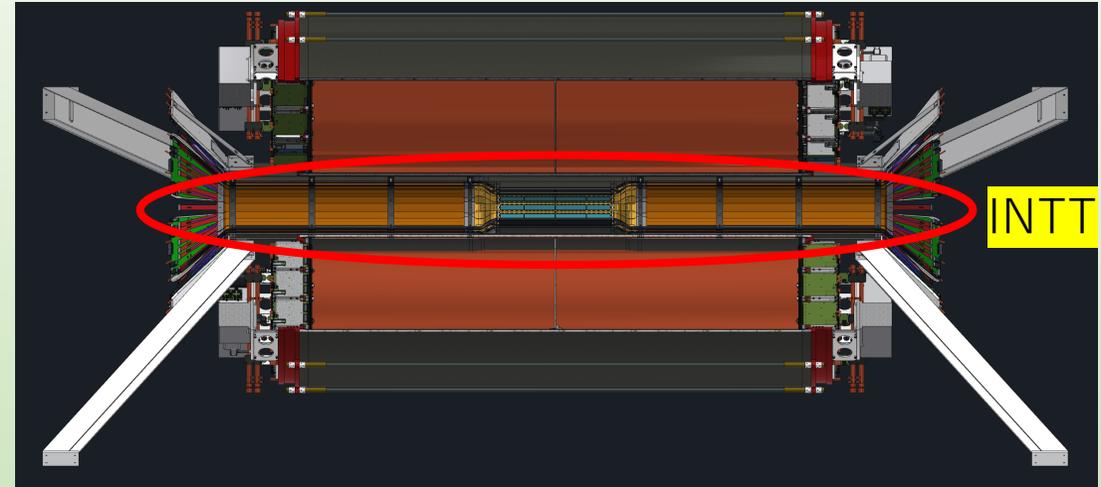


QGPとは

クォークとグルーオンからなるプラズマ状態のこと。
ビッグバンから 10^{-5} 秒後に宇宙に存在していたと考えられる。

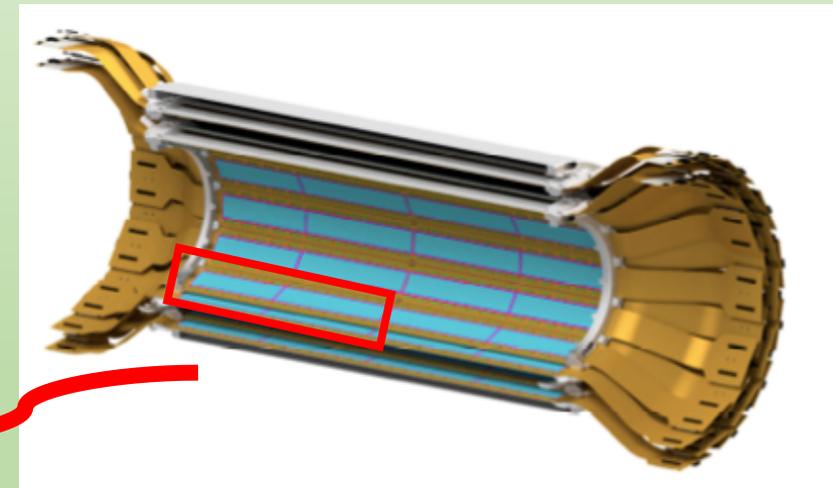
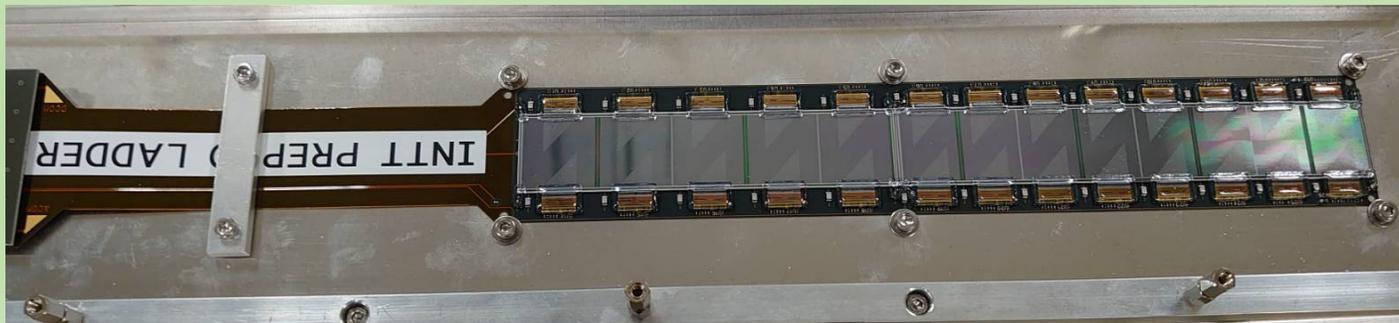
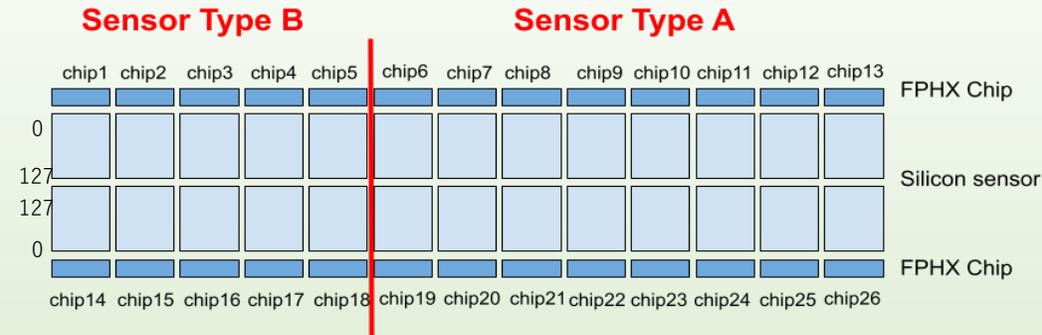
中間飛跡検出器INTT

- INTT : Intermediate Silicon Strip Track detector of the Tracking system
- sPHENIX実験で用いる飛跡検出器の1つ
- 樽状の2層のシリコン検出器(参考：図)
- ビームパイプから6~12cmに位置する
- 時間分解能が高く、飛跡再構成などにおいて重要な役割を担う



INTT用シリコンセンサー

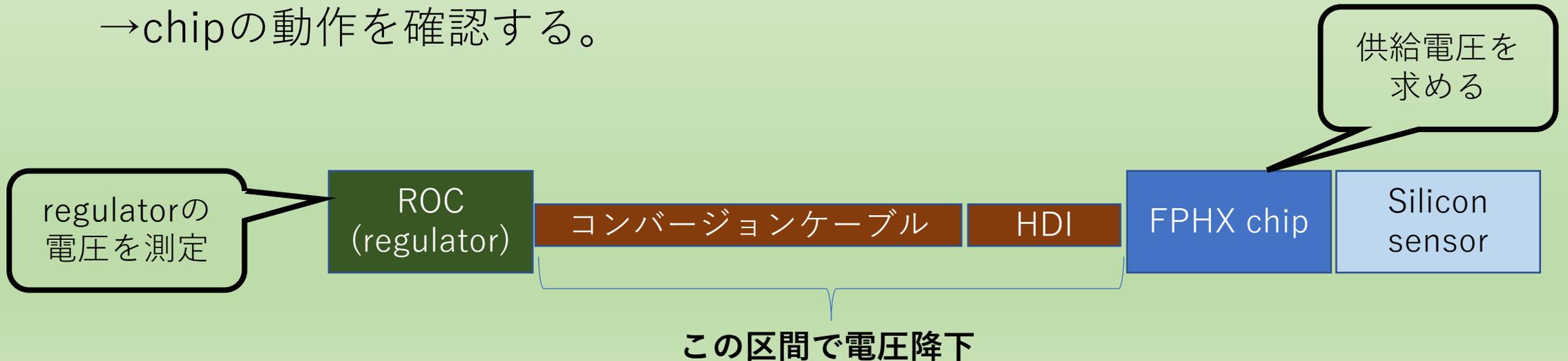
- シリコンストリップセンサー
 - 78 μm ピッチ、320 μm 厚のストリップ128個で構成されている
- シリコンセンサーモジュール
 - 26個のシリコンストリップセンサーと26個の読み出しチップ（FPHXチップ）で構成
 - TypeAには128 \times 16ch、TypeBには128 \times 10chある。全チャンネル数は3328chである。
- FPHXチップ
 - アナログ信号をデジタル信号に変換し、ROCに転送する
 - 1つのFPHXチップが128チャンネル分（1センサー分）を担う
 - 1チャンネルあたり3bitのADCを持つ



FPHXチップへの 供給電圧の見積もり

概要と目的

- FPHX chipに必要な電圧は2.5Vである。
→供給電圧の許容範囲を知りたい。
- ROCのregulator(2.5V出力)：FPHX chipに電力供給する。
- ROC~chip間の電圧降下によりFPHX chipに2.5Vを供給できない。
→chipの動作を確認する。



計算方法

chipへの供給電圧 $V_{chip} = V_{reg} - \Delta V$

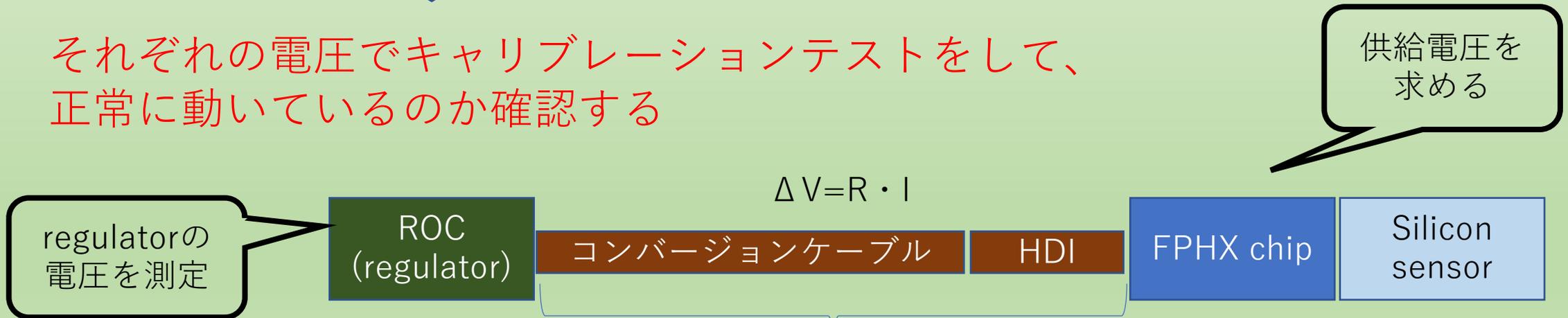
ROC~chip 間の電圧降下 $\Delta V = R_{ROC_to_INTT} \times I_{INTT}$

⇒ FPHX chipへの供給電圧が求まる。

R_ROC_to_INTT : ROCとFPHX chipの間の抵抗
I_INTT : INTTへの供給電流
V_reg : regulatorの電圧



それぞれの電圧でキャリブレーションテストをして、
正常に動いているのか確認する

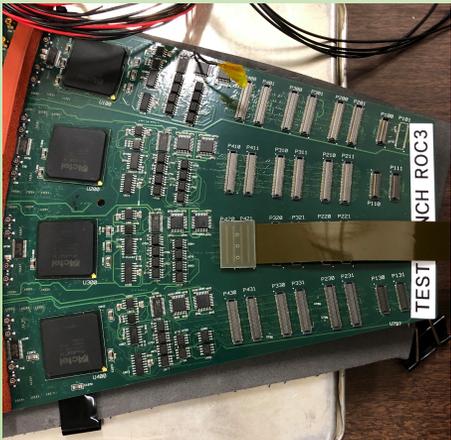


この区間での電圧降下を計算

Regulatorの位置

- RegulatorはROCの裏に付いている。

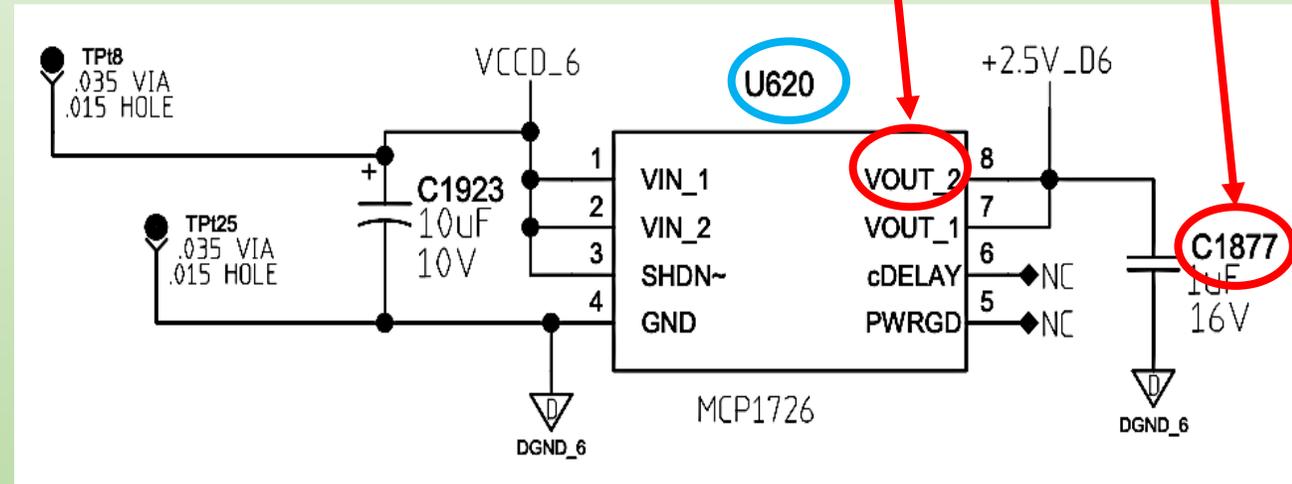
裏返して拡大



ROC



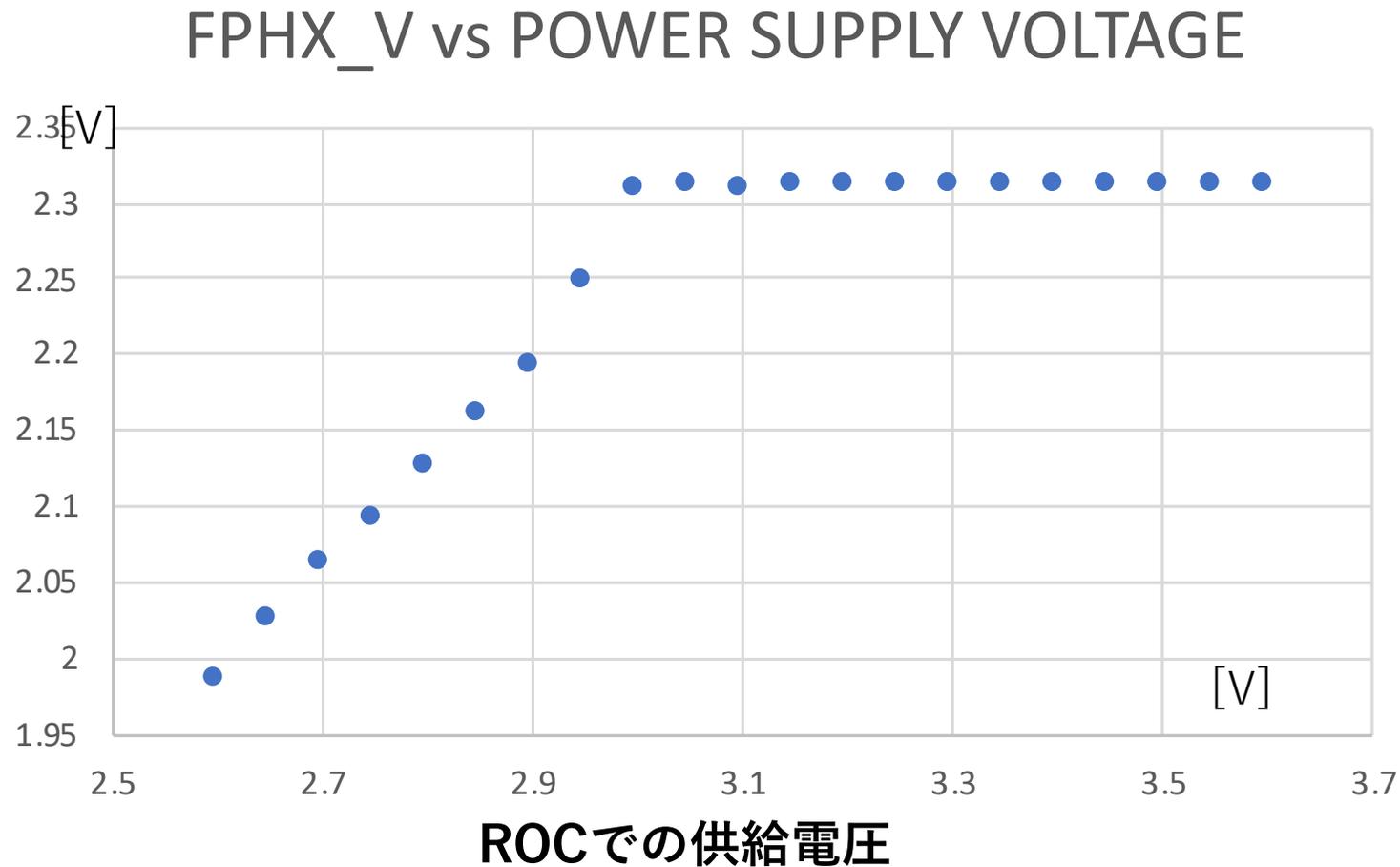
ROCの裏面



C1877が電圧を測定したregulator

供給電圧の計算結果

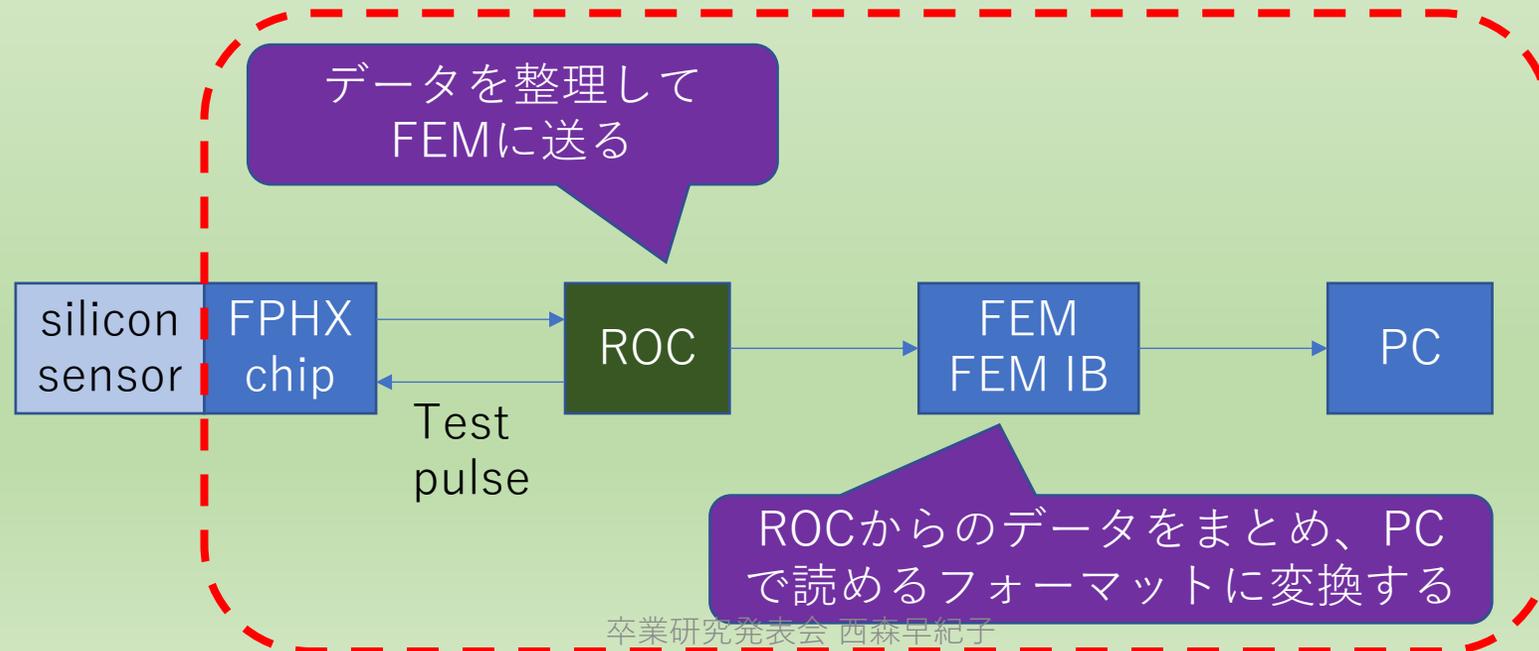
FPHX chipへの供給電圧の計算結果



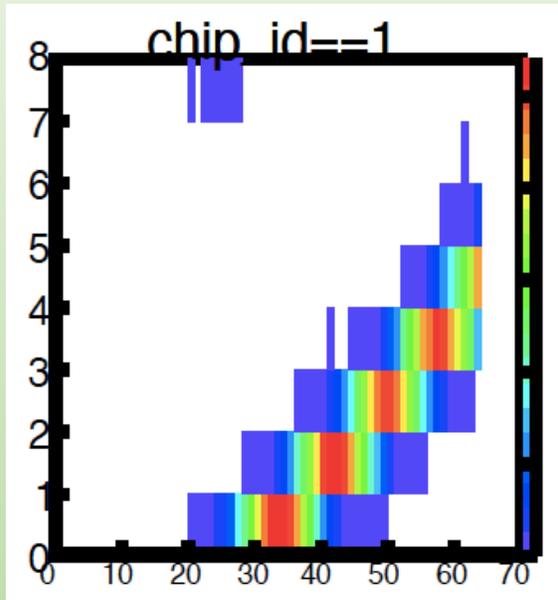
- Regulatorへの供給電圧が3V以上は、FPHX chipでの供給電圧の計算結果はほぼ一定。
- 3Vより下げると、減少していく。

キャリブレーションテスト

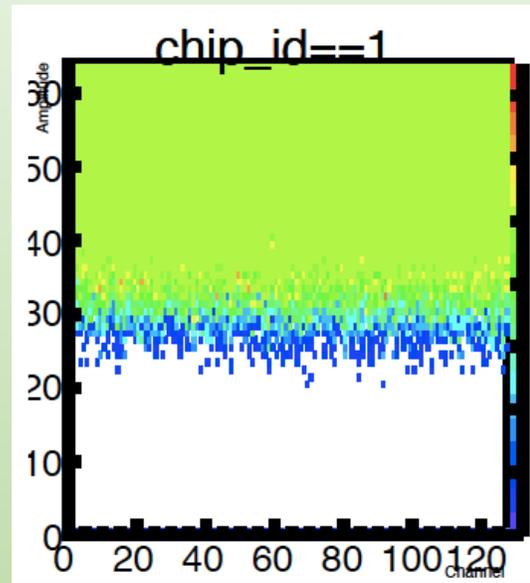
- キャリブレーションテストとは、ROC(読み出し基板)で発生させたテストパルスをINTTのFPHX chipに送り、その信号が正しくROCに戻り、読みこむことができるのかを調べるテストである。
- これを行うことで、テストベンチ全体の動作状況を確認できる。



正常な場合のキャリブレーションテスト結果



出力ADC vs Ampl



Ampl vs chan_id

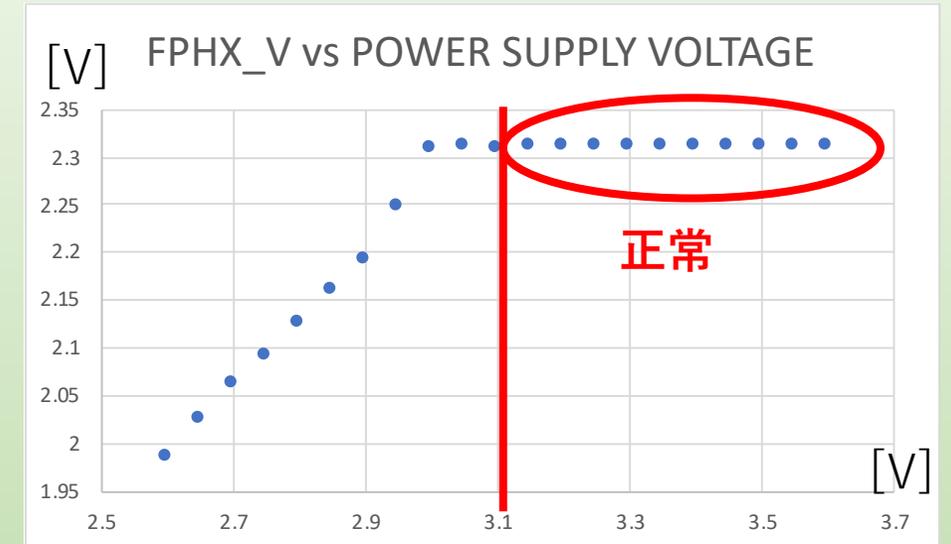
ADC	DAC value
0	20
1	25
2	30
3	35
4	40
5	45
6	50
7	55

DAC0=20で測定
閾値が作用している

右のグラフでAmpl=20でADC=7のノイズがあるが、どのChipにも見られるノイズであるので、今回は無視して考える。

供給電圧とキャリブレーションテスト

PWR_SUPPLY_V	動作状況
3.6	正常
3.5	正常
3.4	正常
3.3	正常
3.2	正常
3.1	正常
3.05	chip5:ノイズ多め
3.03	正常
3.02	chip5,9:データ少なめ
3	chip1,5,9:ノイズ多め、データ少なめ
2.95	chip1,9:データ少ない、chip5:データ少なめ
2.9	chip1,9:データかなり少ない、chip5:データ少ない、chip4,7:データ少なめ
2.85	chip1,9:データなし、chip3,4,5,7:データ少ない、chip13:データ少なめ
2.8	chip1,9:データなし、chip3,4,5,7,13:データほぼなし



供給電圧が3.1Vより下がると正常に動作しにくくなる。
 普段は供給電圧3.6Vで測定しているため、問題なし。

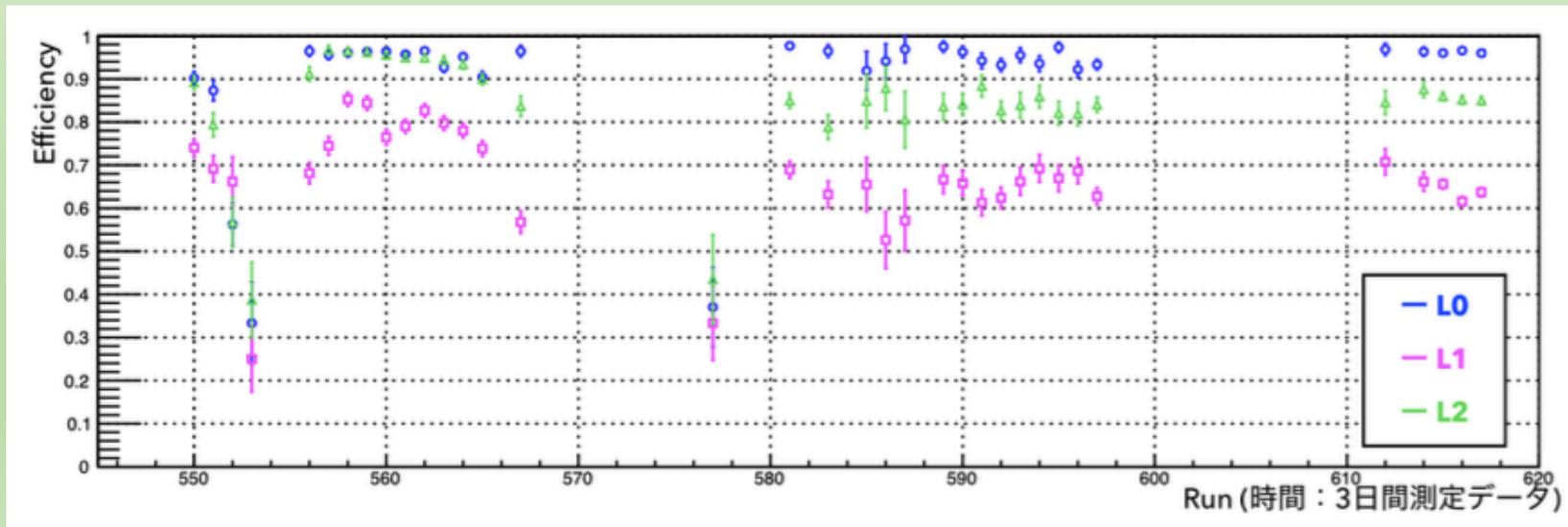
まとめと方針

- FPHX chipへの供給電圧を計算で見積もることができた。
 - 実際の実験では今回の実験より配線長が長くなるので、さらに電圧降下すると考えられる。
- regulatorをより出力電圧が高いものに変える必要がある。

宇宙線を用いた INTTの検出効率測定

概要と目的

- INTT用シリコンセンサーの検出効率はほぼ100%であると考えられている。しかし先行研究(鈴木 2019)では、約96%という結果になった。
- そこで、より細かく検出効率を求めるためのセットアップを考え、検出効率を測定した。

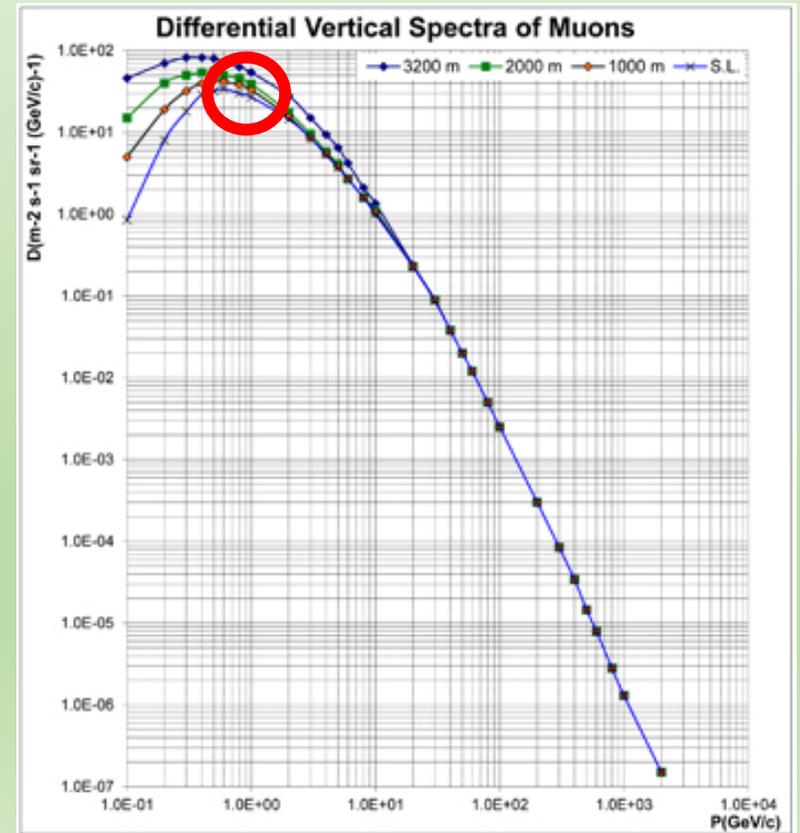
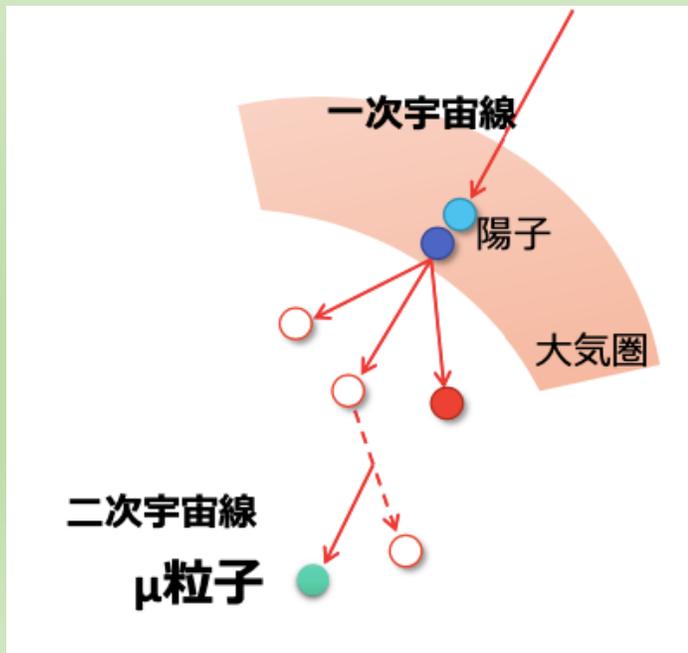


L0の結果が先行研究(鈴木 2019)での検出効率の結果。

検出効率が約96%である。

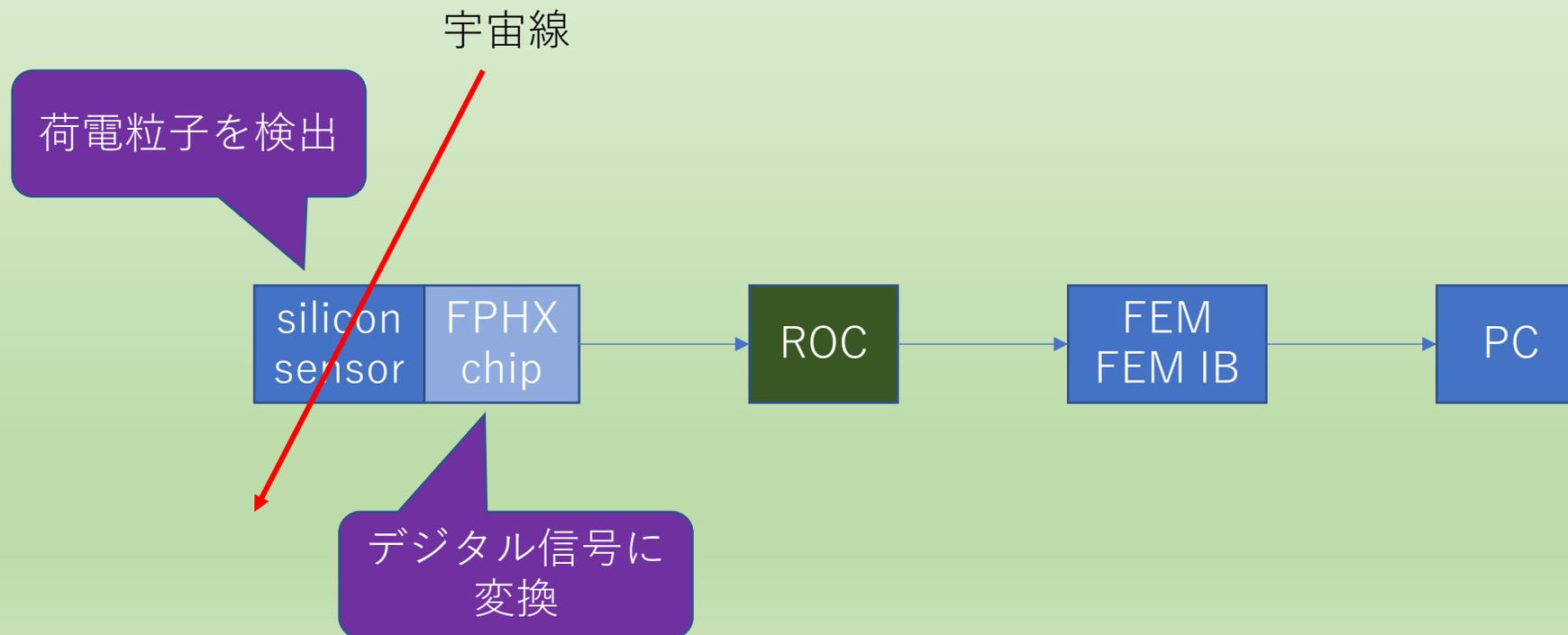
宇宙線

- 宇宙空間を高エネルギーで動き回る粒子の総称
- 宇宙空間では1次宇宙線（ほとんど陽子）、地表付近では2次宇宙線（ほとんどミュオン）
 - 1分毎に約1個/cm²
 - ミューオンの典型的なエネルギーは1GeV



宇宙線測定

- 宇宙線測定をする際は外部トリガーモードで測定を行う。

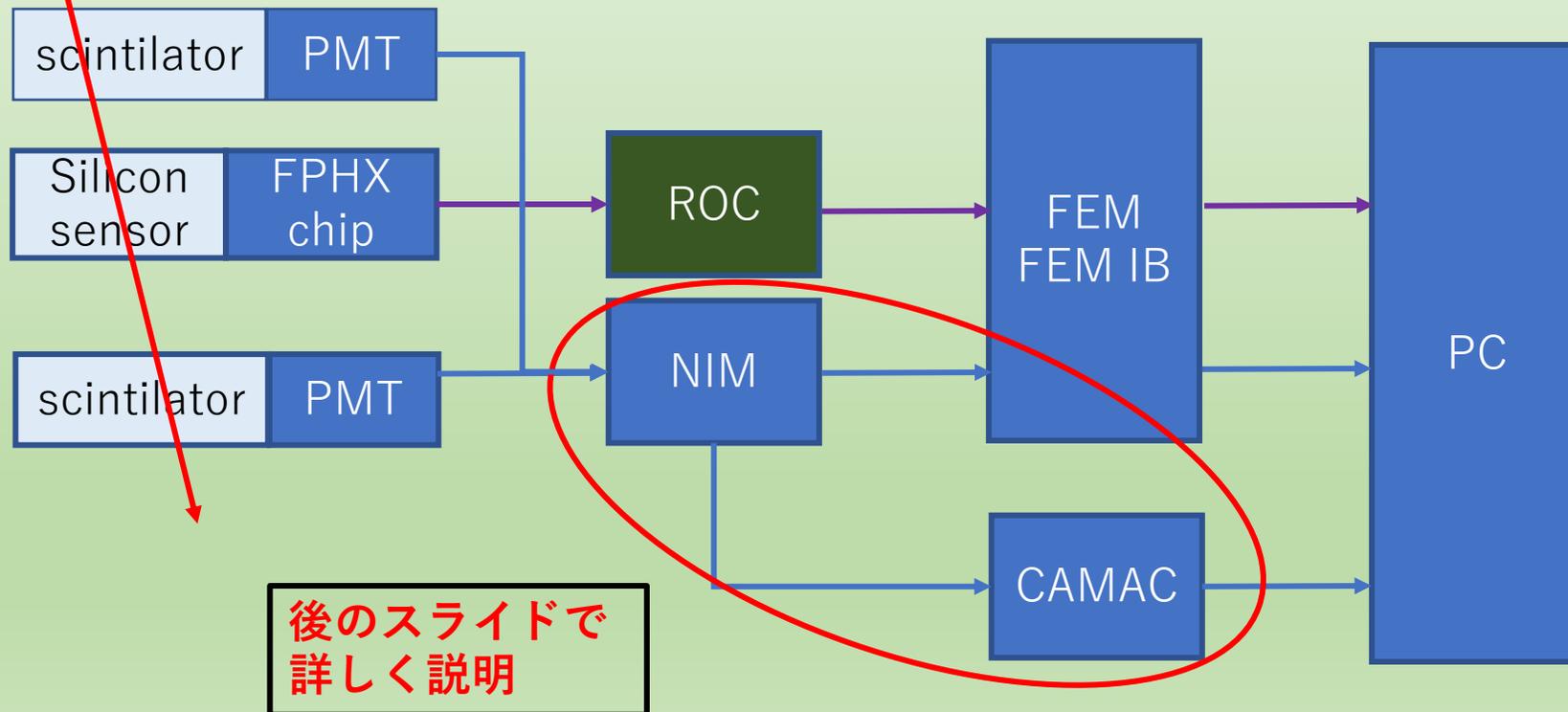


宇宙線測定の設定アップ

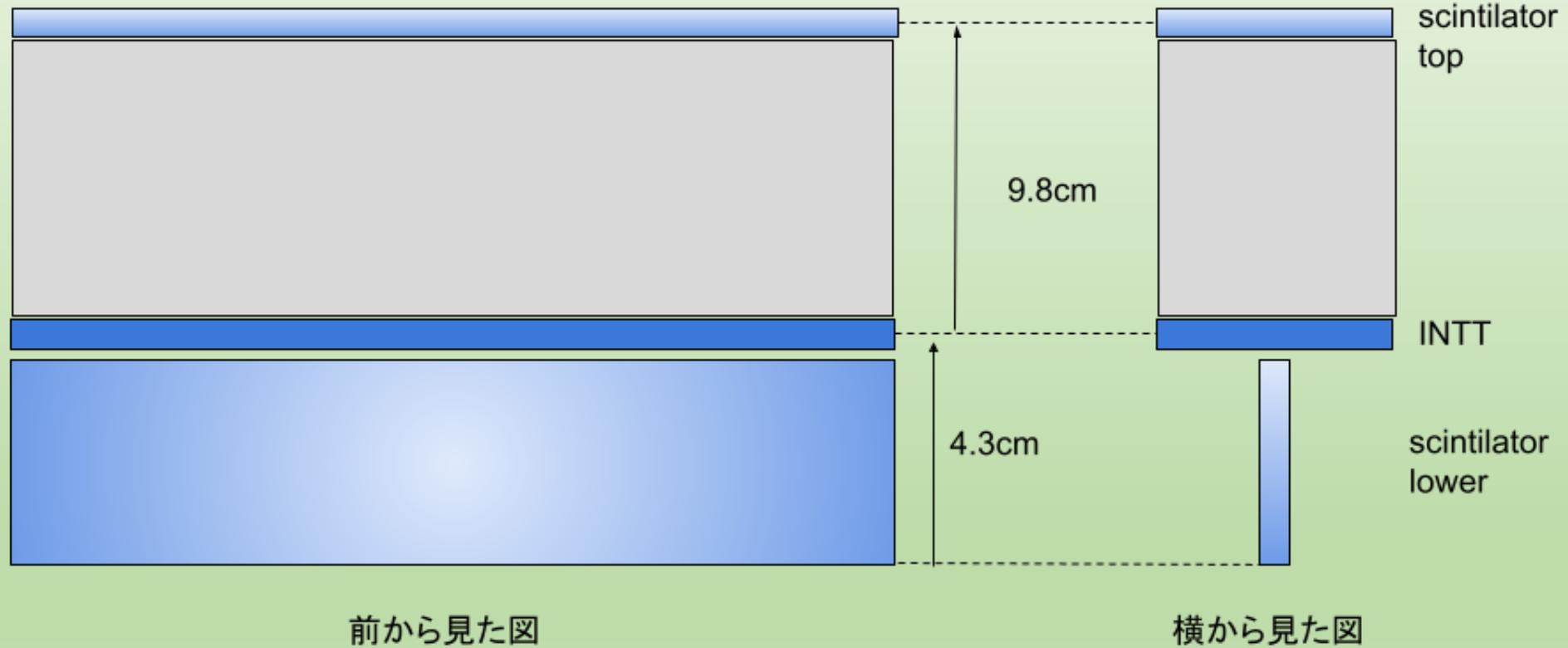
- 外部トリガーにはシンチレーターを2個使用。

NIMやCAMACの回路は今回初めて導入

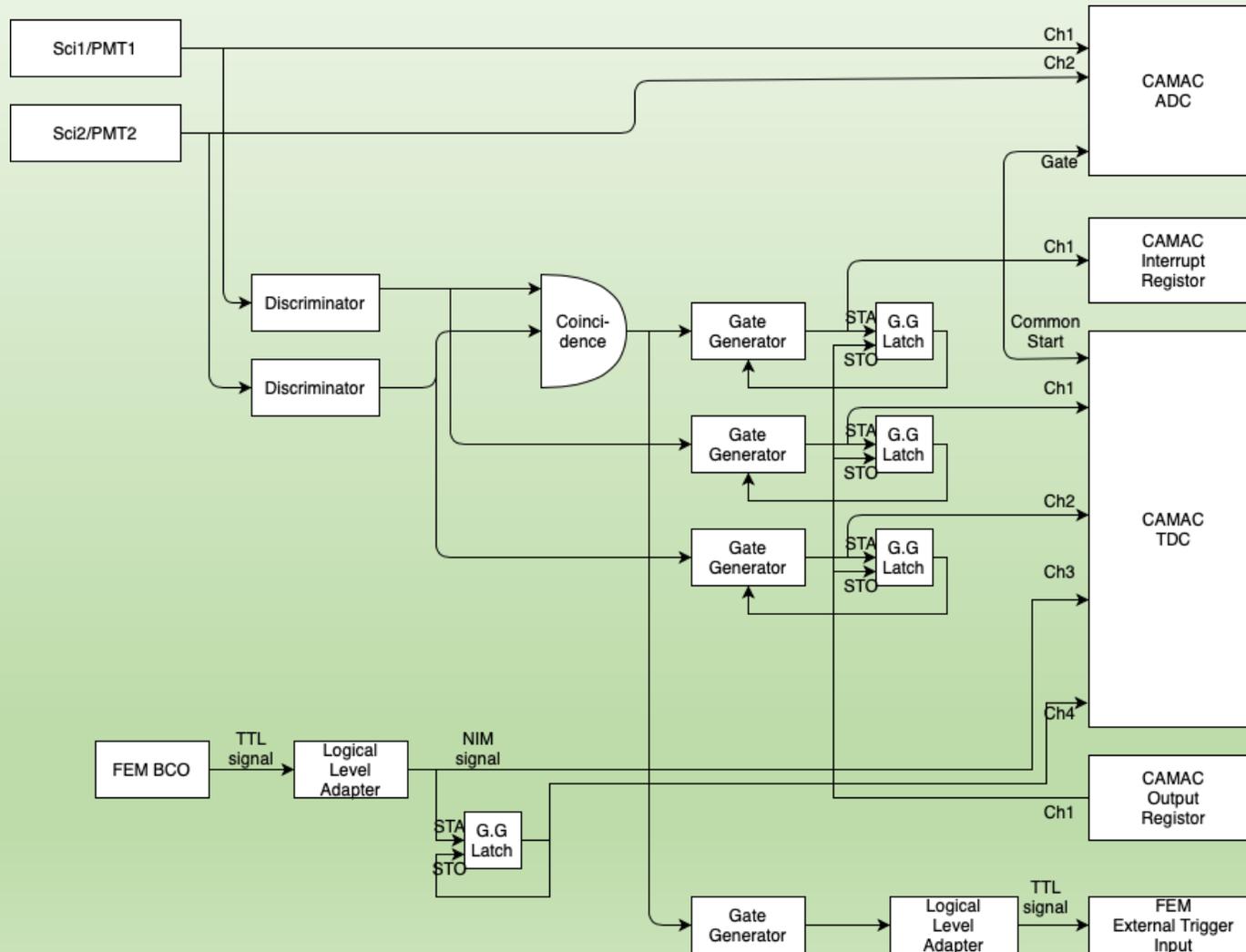
宇宙線



INTTとシンチレーターの設置状況



NIMのロジックダイアグラム



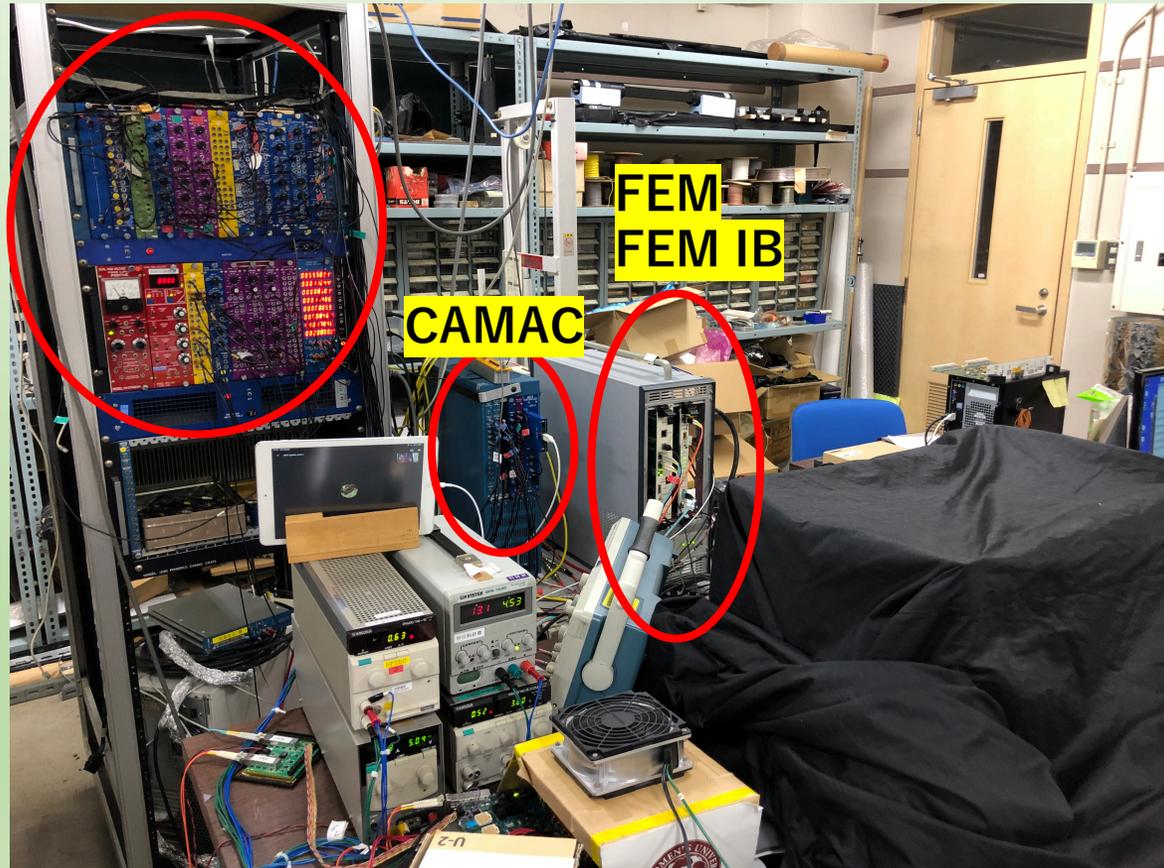
TDC (時間差を見る)
 Start : 2つのPMTからの信号の
 and信号
 Stop : 各PMTからの信号、FEM
 からのBCO信号

※Stop信号の方が遅くCAMACに
 来るよう、調整している。

セットアップ状況

**NIMやCAMACの接続状況
自分で配線を行った**

NIM



NIMの拡大図

宇宙線測定時のDAC値の設定

- 宇宙線測定の際のDAC値設定は以下のようにする。
- Thresholdの計算

$$\text{Threshold [mV]} = 210 \text{ [mV]} + 4 \text{ [mV]} \times \text{DACvalue}$$

ADC	DAC value	Threshold[mV]
0	20	290
1	23	302
2	60	450
3	98	602
4	135	750
5	173	902
6	210	1050
7	248	1202

宇宙線が1GeVのミュオンなら、
出力波高は
 580 ± 10 [mV]と求められる。
よってこのADC設定ではADC=2で検出される。

データ収集集中の状況

INTT event とは

外部トリガーにヒットがあったイベントからノイズを取り除いたもののうち、INTTへヒットが確認できたもの。

```
590 2021223_113944266      158      196      317      207      200      185      0      422      1077
data 0x215959, chip_id 43 chan 44, adc 1, ampl 0, bco 29473, time 11:39:06
data 0x215d59, chip_id 43 chan 46, adc 1, ampl 0, bco 29473, time 11:39:06
data 0x21dcf3, chip_id 30 chan 110, adc 3, ampl 0, bco 29473, time 11:39:06
data 0x215f5a, chip_id 43 chan 47, adc 2, ampl 0, bco 29473, time 11:39:06
data 0x216159, chip_id 43 chan 48, adc 1, ampl 0, bco 29473, time 11:39:06
data 0x215b58, chip_id 43 chan 45, adc 0, ampl 0, bco 29473, time 11:39:06
data 0x225b58, chip_id 43 chan 45, adc 0, ampl 0, bco 29474, time 11:39:06
INTT events: 1085 is taken.

591 2021223_114054489      188      195      298      206      205      194      182      216      870
data 0x1bfb4b, chip_id 41 chan 125, adc 3, ampl 0, bco 53787, time 11:39:44
data 0x1b0008, chip_id 1 chan 0, adc 0, ampl 0, bco 53787, time 11:39:44
data 0x1b0208, chip_id 1 chan 1, adc 0, ampl 0, bco 53787, time 11:39:44
data 0x1b8c08, chip_id 1 chan 70, adc 0, ampl 0, bco 53787, time 11:39:44
data 0x1cfb4b, chip_id 41 chan 125, adc 3, ampl 0, bco 53788, time 11:39:44
data 0x1c8c08, chip_id 1 chan 70, adc 0, ampl 0, bco 53788, time 11:39:44
INTT events: 1091 is taken.

592 2021223_114615150      158      188      303      206      202      189      0      0      578
data 0x6ef55a, chip_id 43 chan 122, adc 2, ampl 0, bco 45934, time 11:40:54
data 0x6e64f1, chip_id 30 chan 50, adc 1, ampl 0, bco 45934, time 11:40:54
data 0x6e68f1, chip_id 30 chan 51, adc 1, ampl 0, bco 45934, time 11:40:54
data 0x6ef759, chip_id 43 chan 123, adc 1, ampl 0, bco 45934, time 11:40:54
data 0x6e68f2, chip_id 30 chan 52, adc 2, ampl 0, bco 45934, time 11:40:54
INTT events: 1096 is taken.

593 2021223_114755437      181      198      341      207      199      189      74      107      761
INTT events: 1096 is taken.

594 2021223_114913580      180      181      313      204      206      194      0      373      1027
data 0x20f51d, chip_id 35 chan 122, adc 5, ampl 0, bco 33184, time 11:47:55
data 0x20f71f, chip_id 35 chan 123, adc 7, ampl 0, bco 33184, time 11:47:55
data 0x20f918, chip_id 35 chan 124, adc 0, ampl 0, bco 33184, time 11:47:55
INTT events: 1099 is taken.
```

1トリガーイベントにつき7つのINTTヒット
→INTT event

1トリガーイベントにつき6つのINTTヒット
→INTT event

1トリガーイベントにつき5つのINTTヒット
→INTT event

1トリガーイベントにつきINTTヒットなし
→INTT eventがない

1トリガーイベントにつき3つのINTTヒット
→INTT event

検出効率の求め方

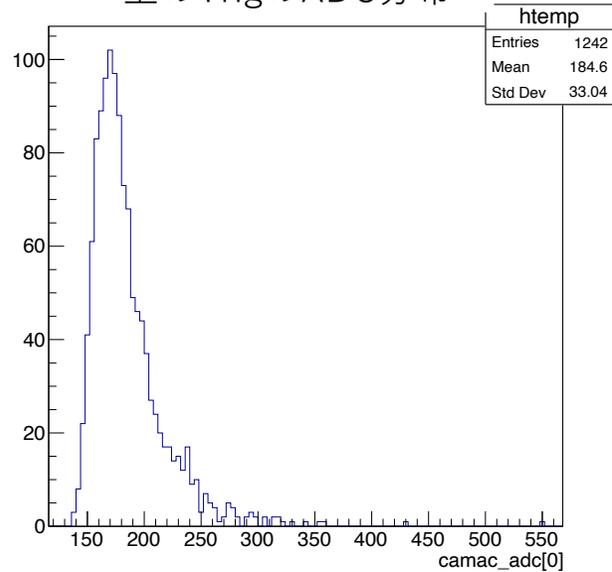
- 検出効率は「外部トリガーのイベントの数(trigger event)」と「INTTにヒットがあるイベントの数(INTT event)」の比である。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{trigger event \& INTT event}}{\text{trigger event}}$$

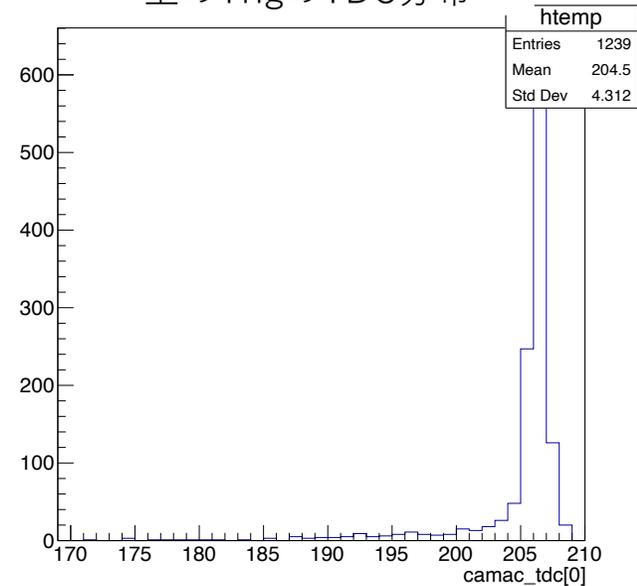
ADCとTDCの分布結果

INTTセンサーを通過した宇宙線を選びたい
→ピーク部分のみ選択

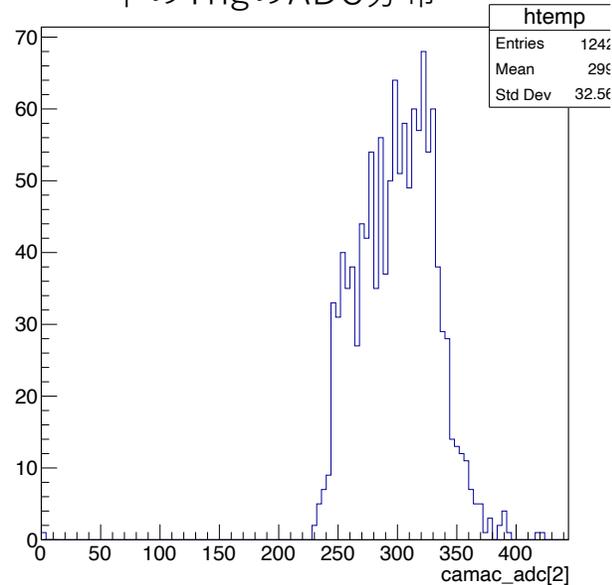
上のTrigのADC分布



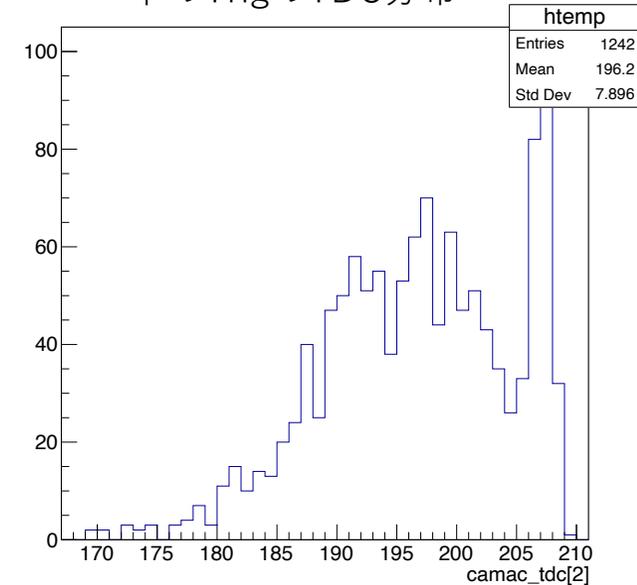
上のTrigのTDC分布



下のTrigのADC分布



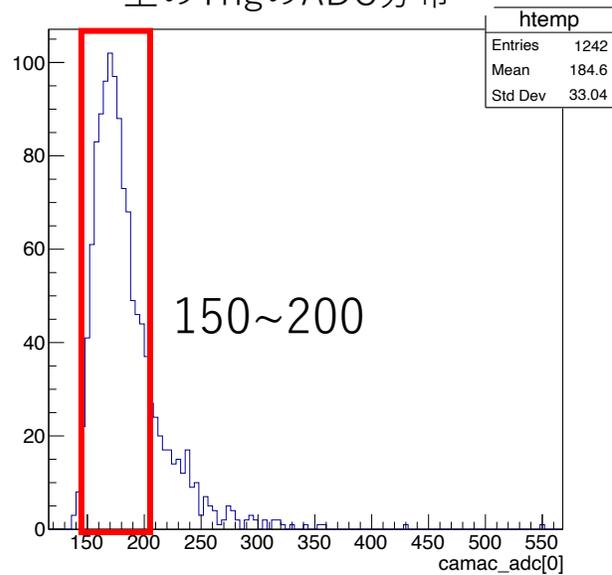
下のTrigのTDC分布



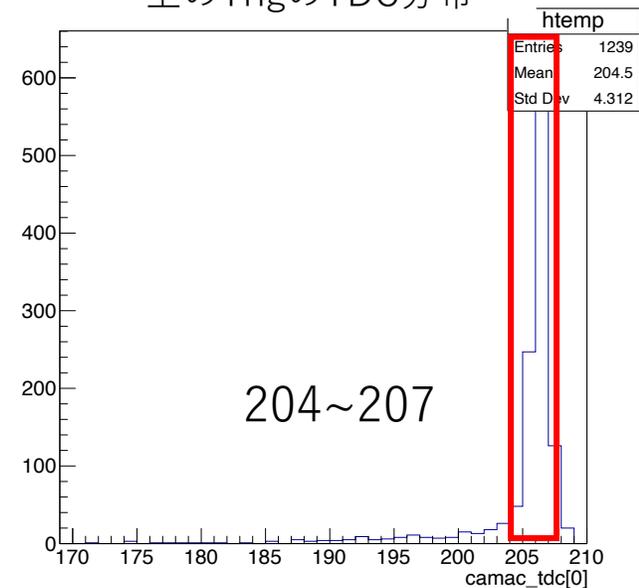
検出効率を求める際のカットを決める

ピークが1つのものは範囲を決定することができる

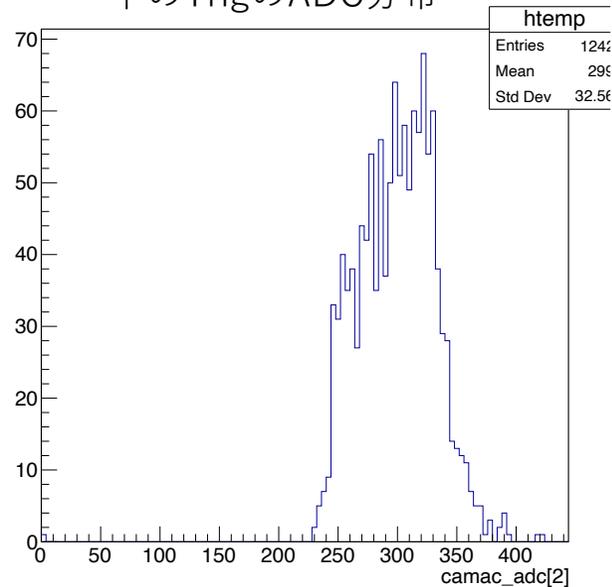
上のTrigのADC分布



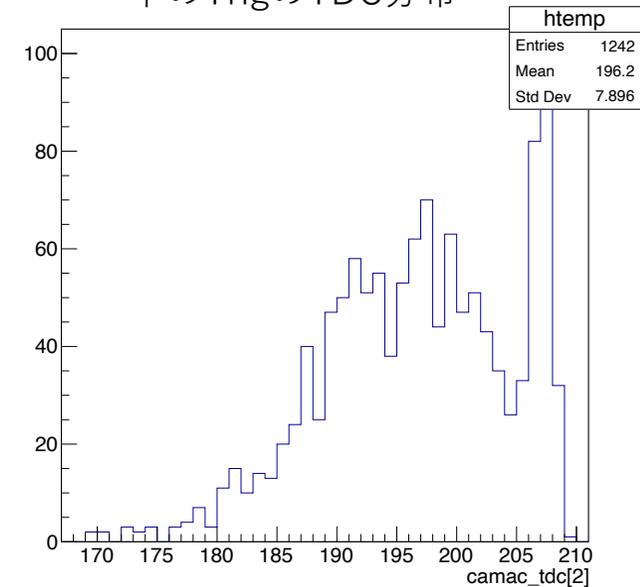
上のTrigのTDC分布



下のTrigのADC分布

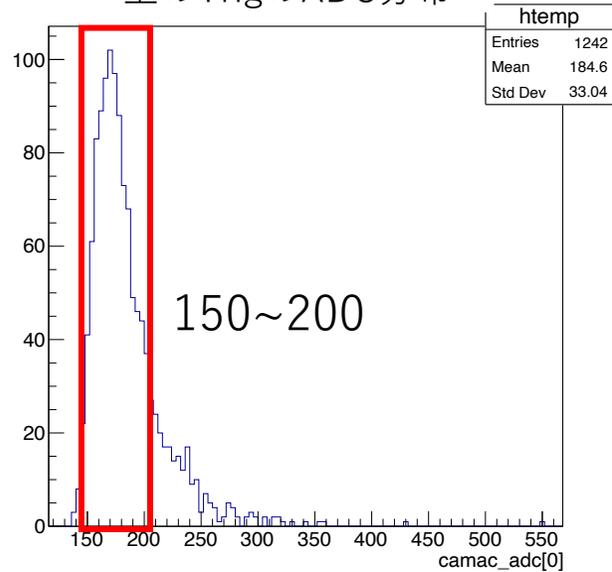


下のTrigのTDC分布



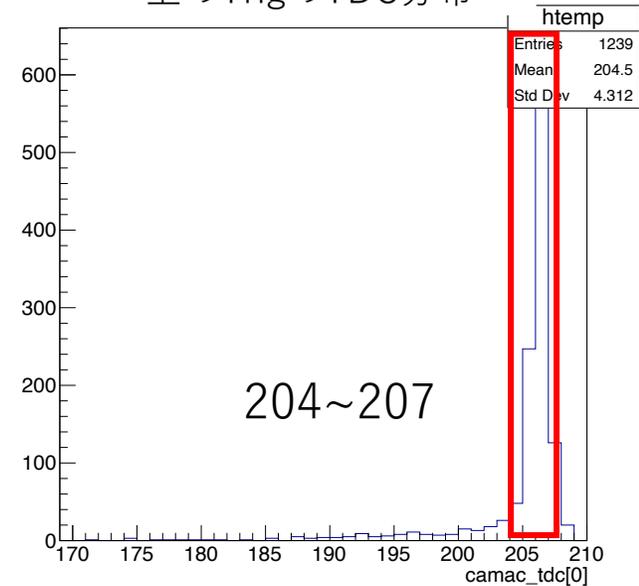
検出効率を求める際のカットを決める

上のTrigのADC分布



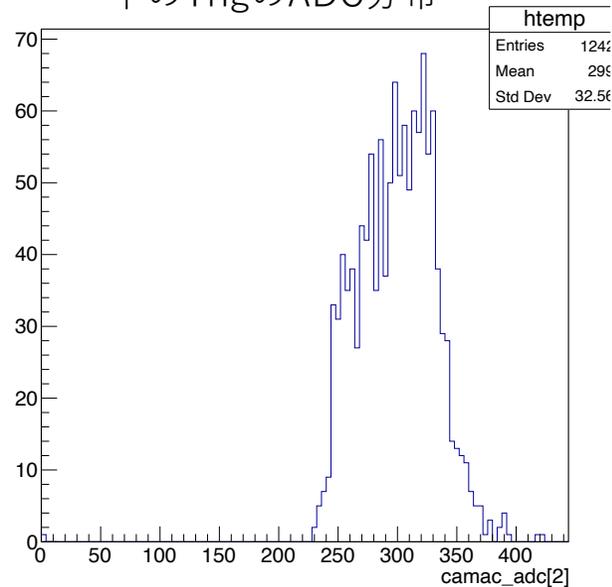
山のピーク位置が分かりにくい
→カットを後で考える

上のTrigのTDC分布



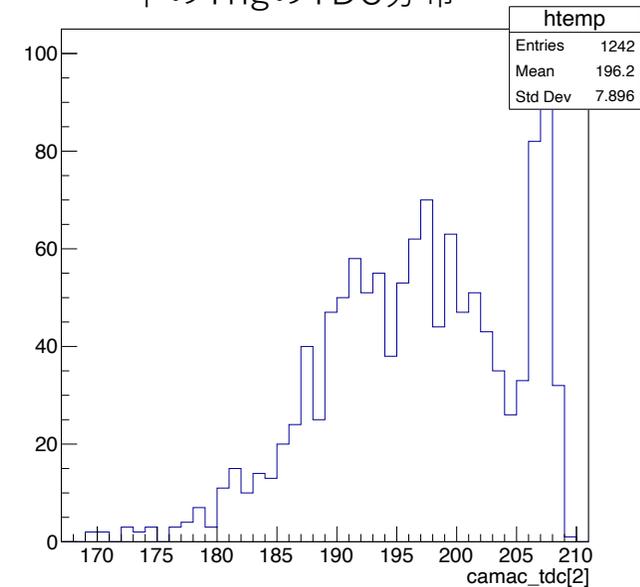
山のピークが2つある
→カットを後で考える

下のTrigのADC分布

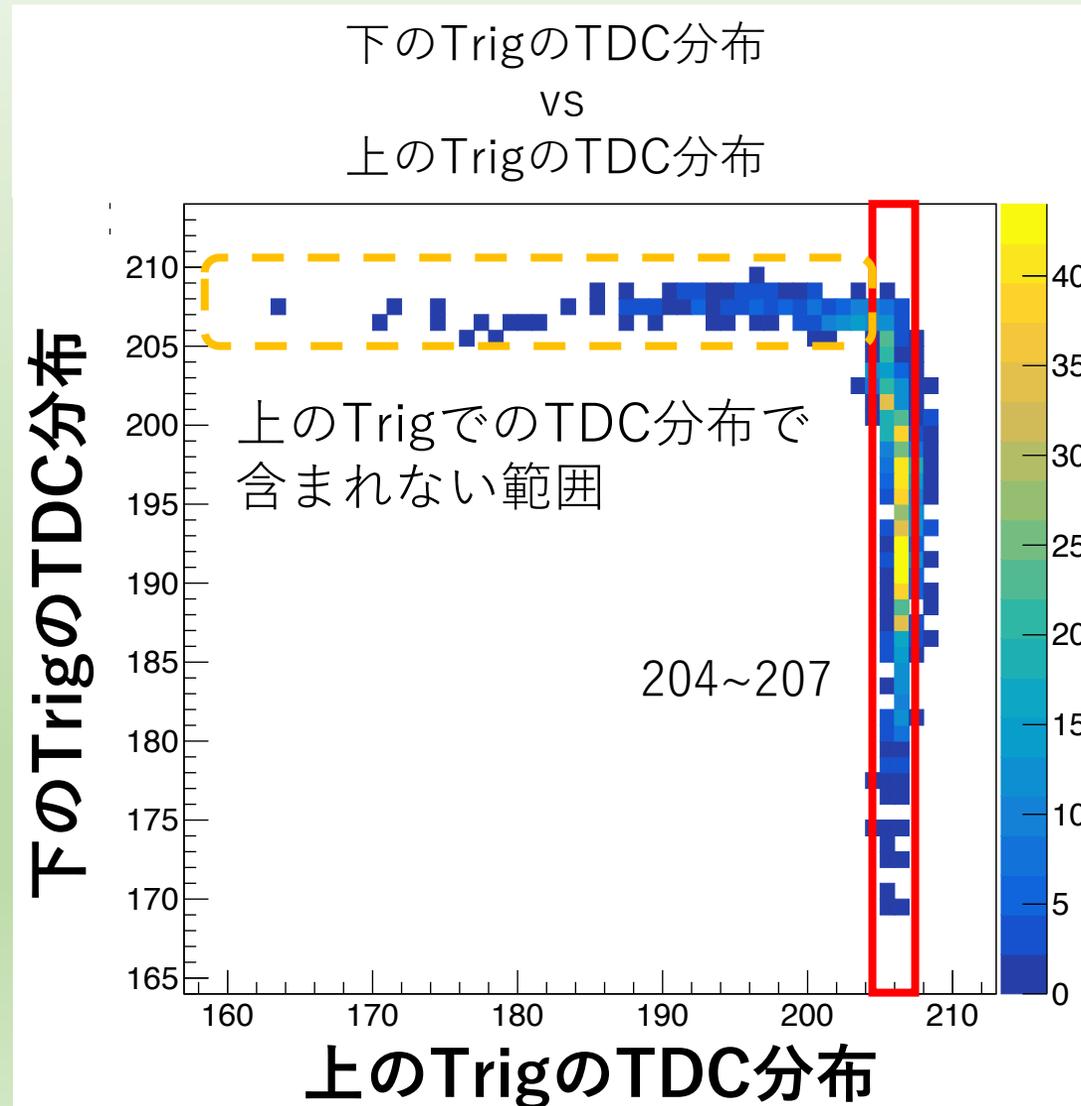


204~207

下のTrigのTDC分布



下のPMT：TDC分布カットの決定



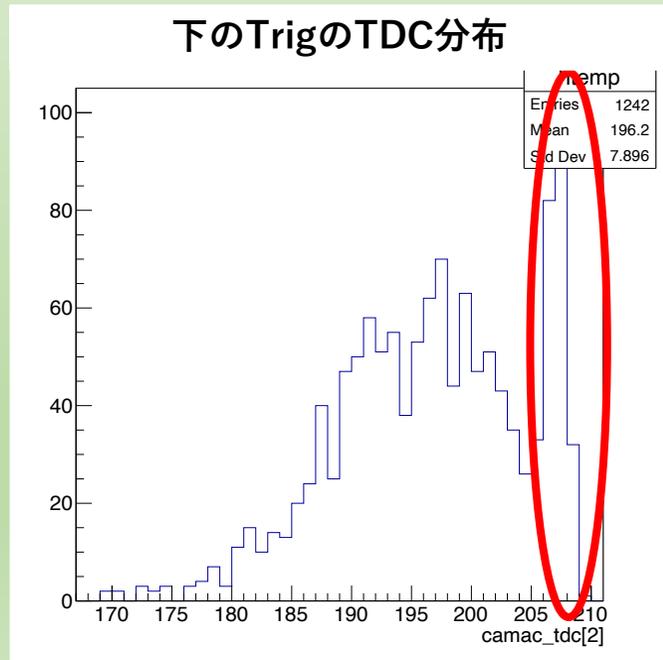
205~210にあったピークは上のTrigのTDC分布を見ると、カットに含まれないことがわかる。



黄色点線で囲った範囲は何なのか

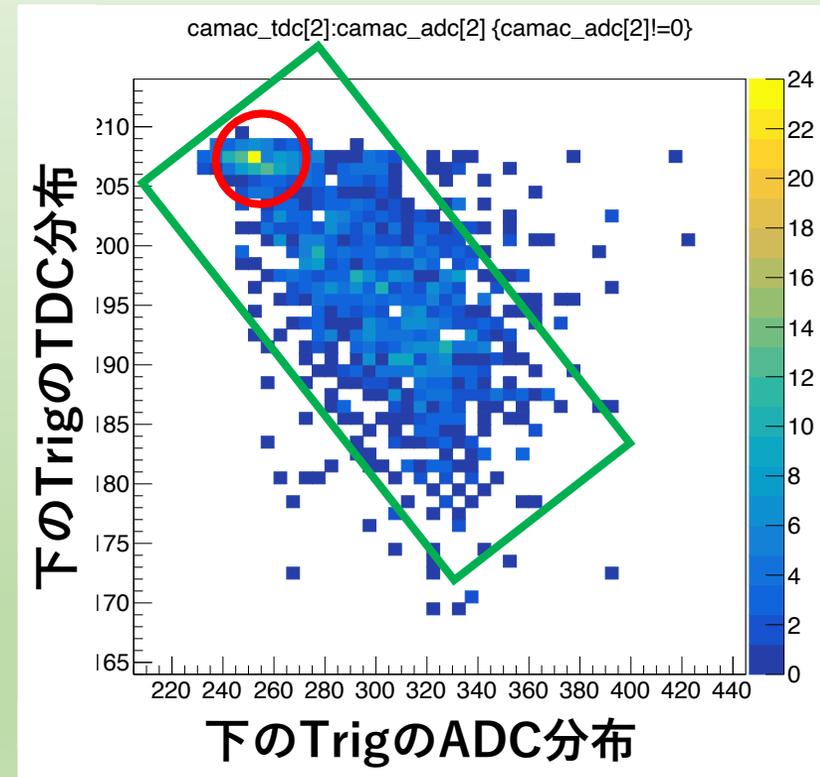
スルーイングについて

- 波高が低いパルス(ADC値が小さいパルス)のTDCの値が大きくなる現象。

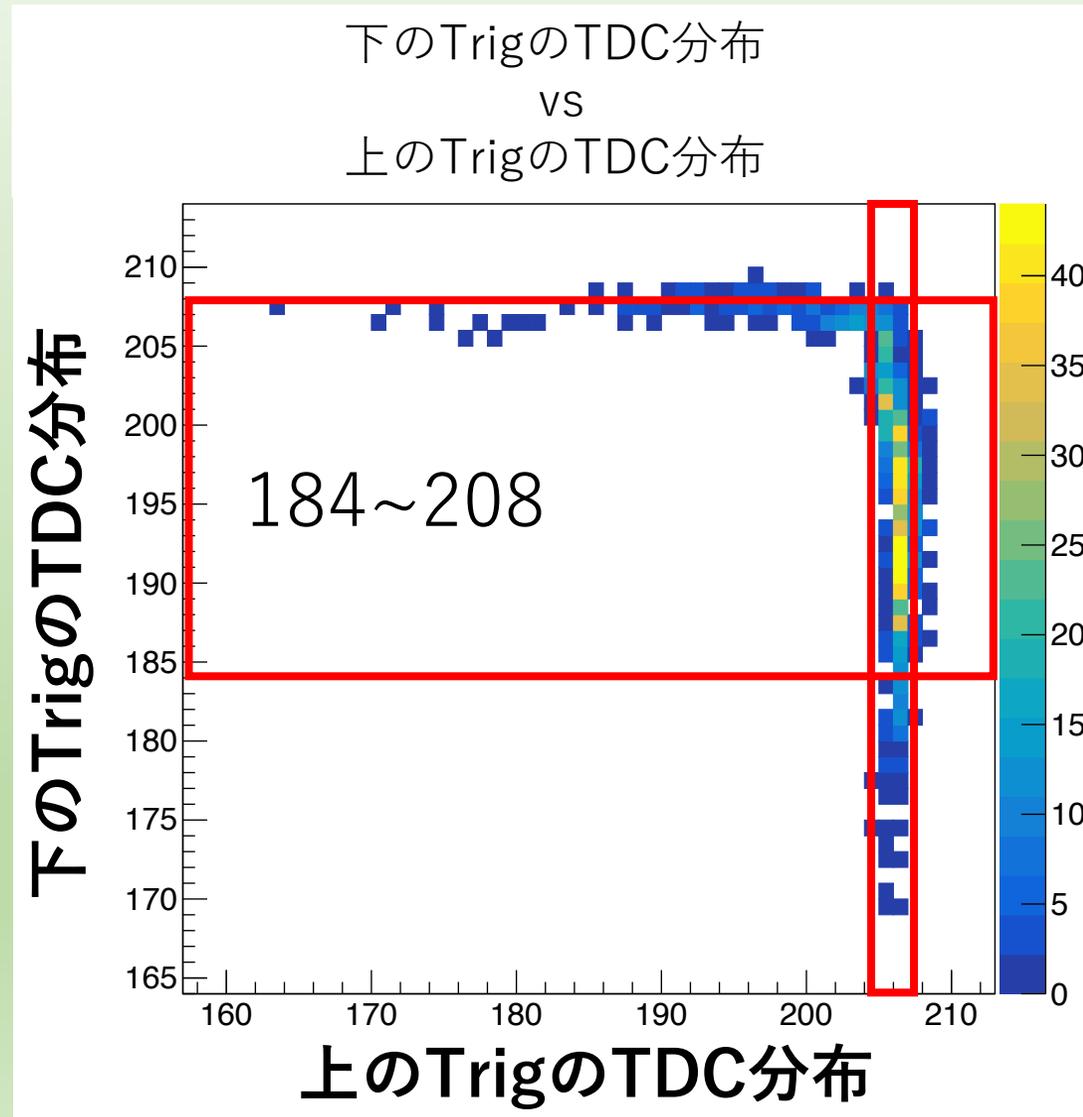


スルーイングの効果

波高が小さいパルスが大きいTDC値を出している



下のPMT：TDC分布カットの決定

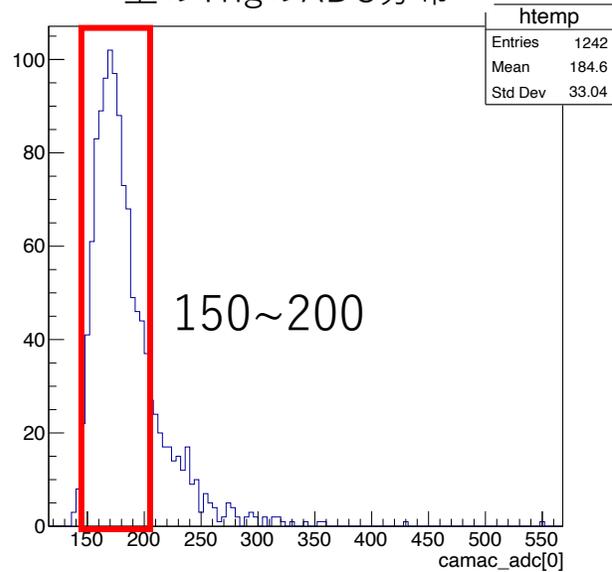


以上の内容を考慮して
カットを決定

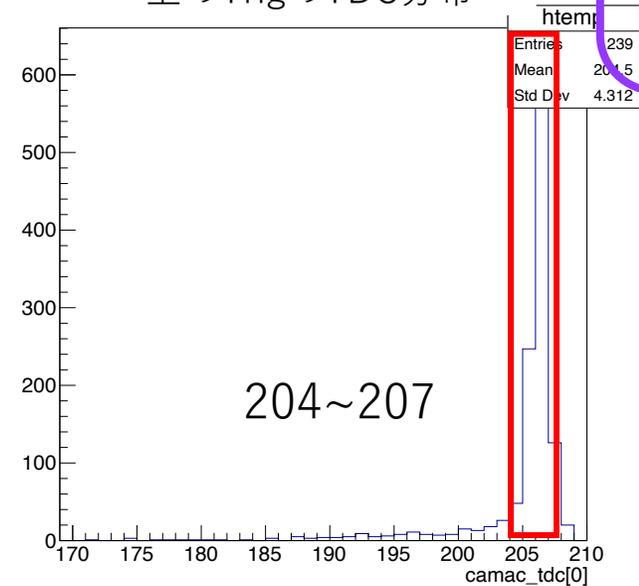
検出効率を求める際のカット条件①

センサーを通過したと考えられる、スルーイングの効果の影響がない宇宙線を選択

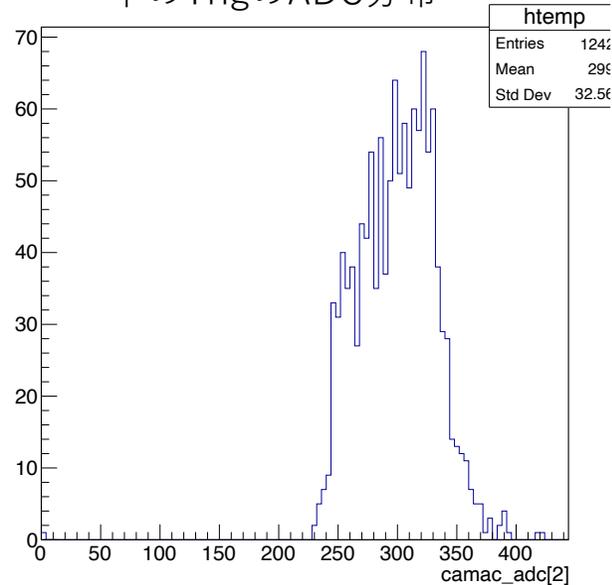
上のTrigのADC分布



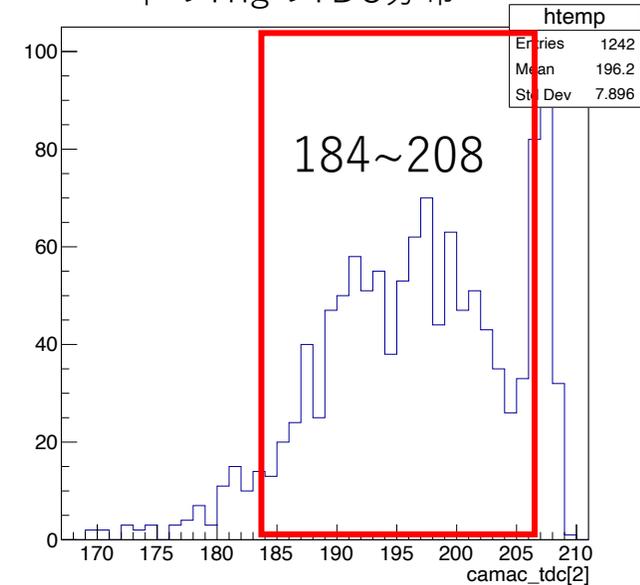
上のTrigのTDC分布



下のTrigのADC分布



下のTrigのTDC分布



検出効率の結果

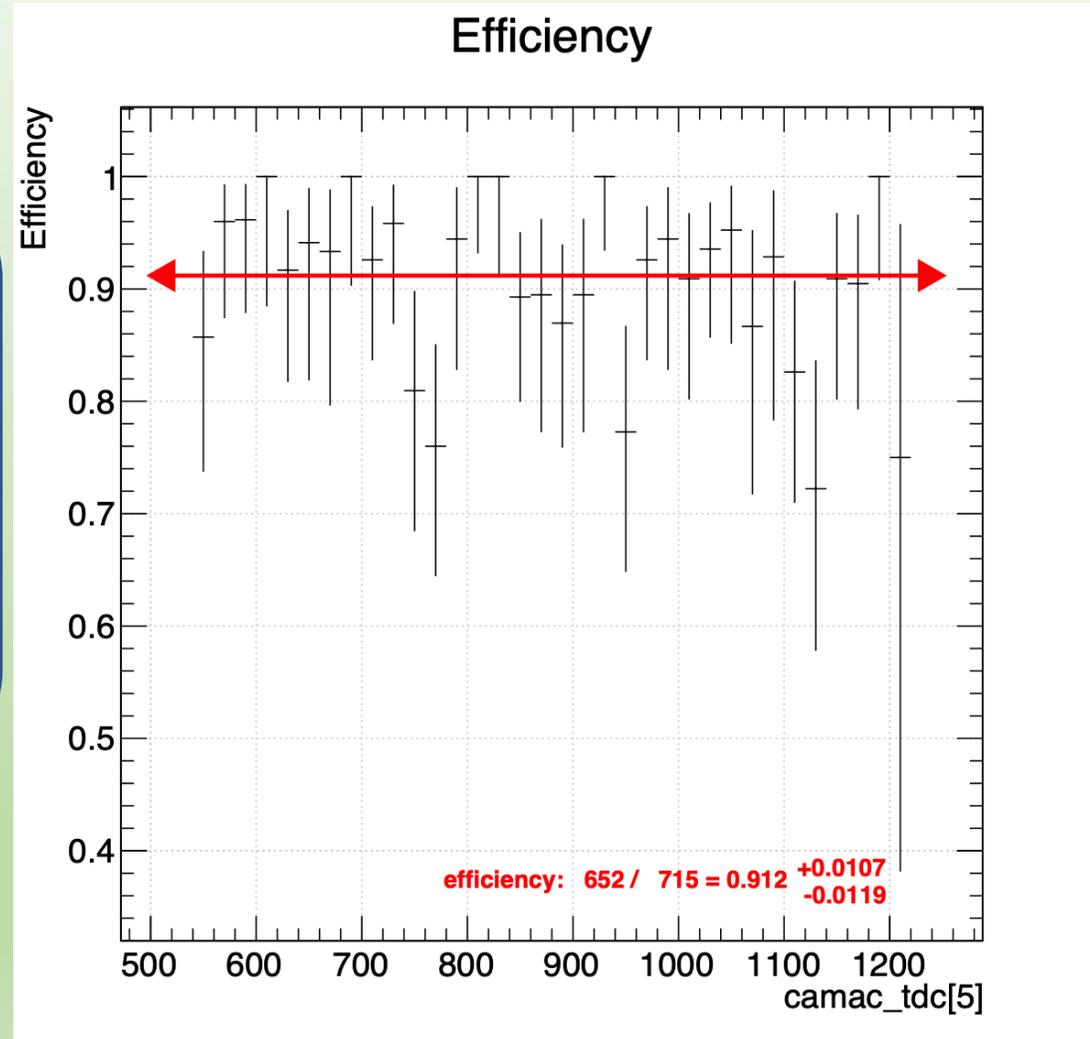
検出効率はBCOを見る。
カット条件①を反映した。
検出効率は、

$$\text{検出効率} = 662/715 \\ = 91.2(+1.1, -1.2)\%$$

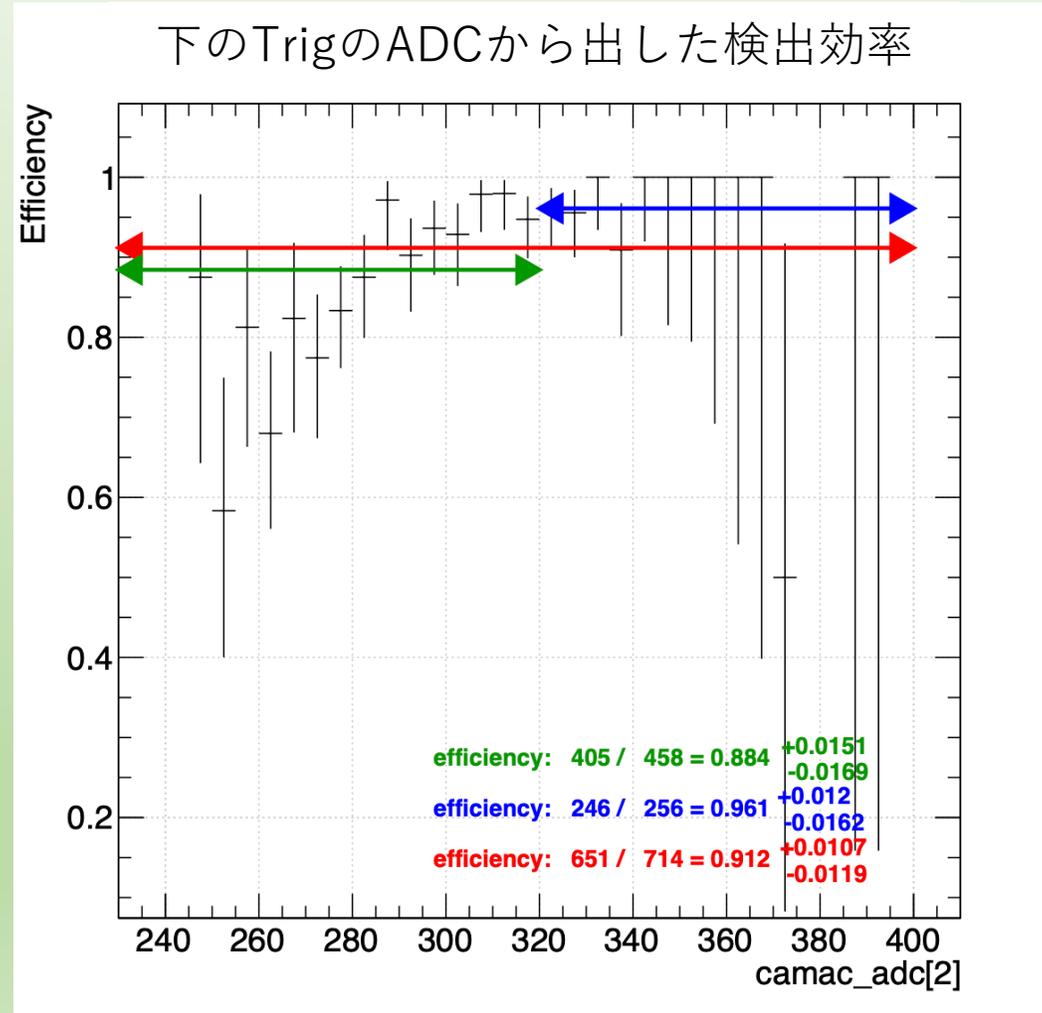
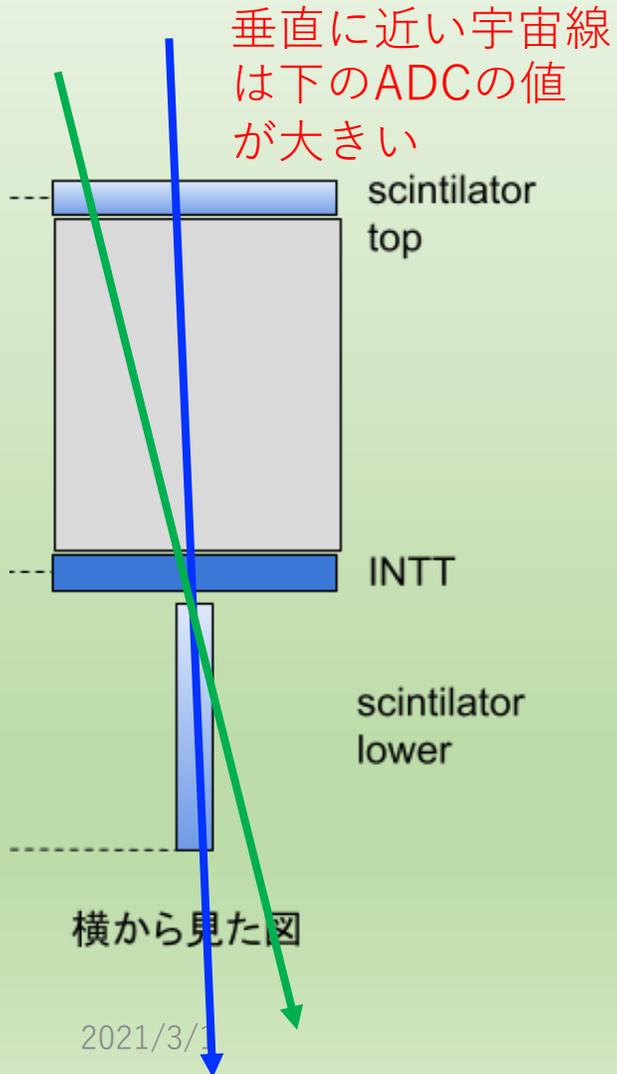
という結果になった。

→なぜ低いのか検討する

$$\text{検出効率} = \frac{\text{trigger event \& INTT event}}{\text{trigger event}}$$



下のTrigのADC分布について

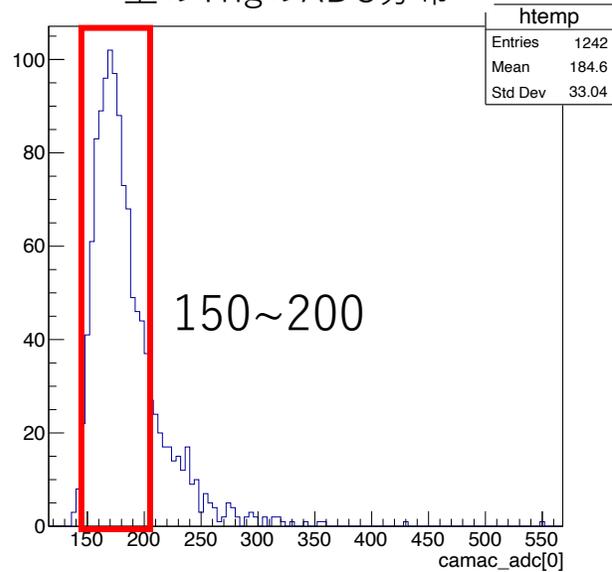


下のPMTのADCのカットを
青の範囲(320~)とする

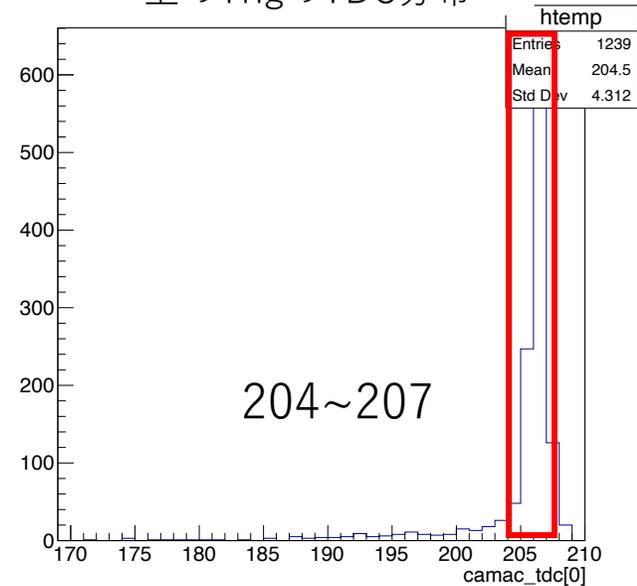
検出効率を求める際のカット条件②

全てのカットを決めた

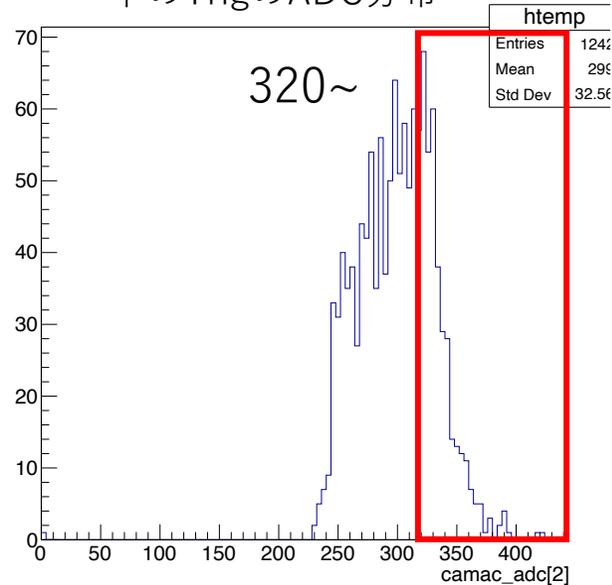
上のTrigのADC分布



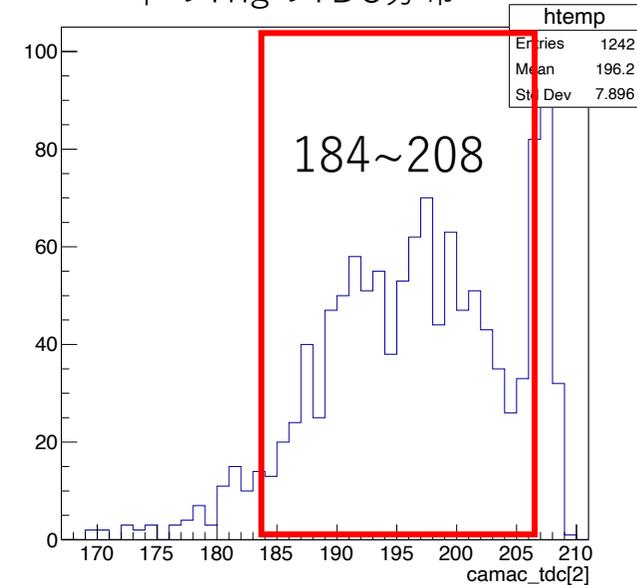
上のTrigのTDC分布



下のTrigのADC分布



下のTrigのTDC分布



カット条件②を適用した検出効率

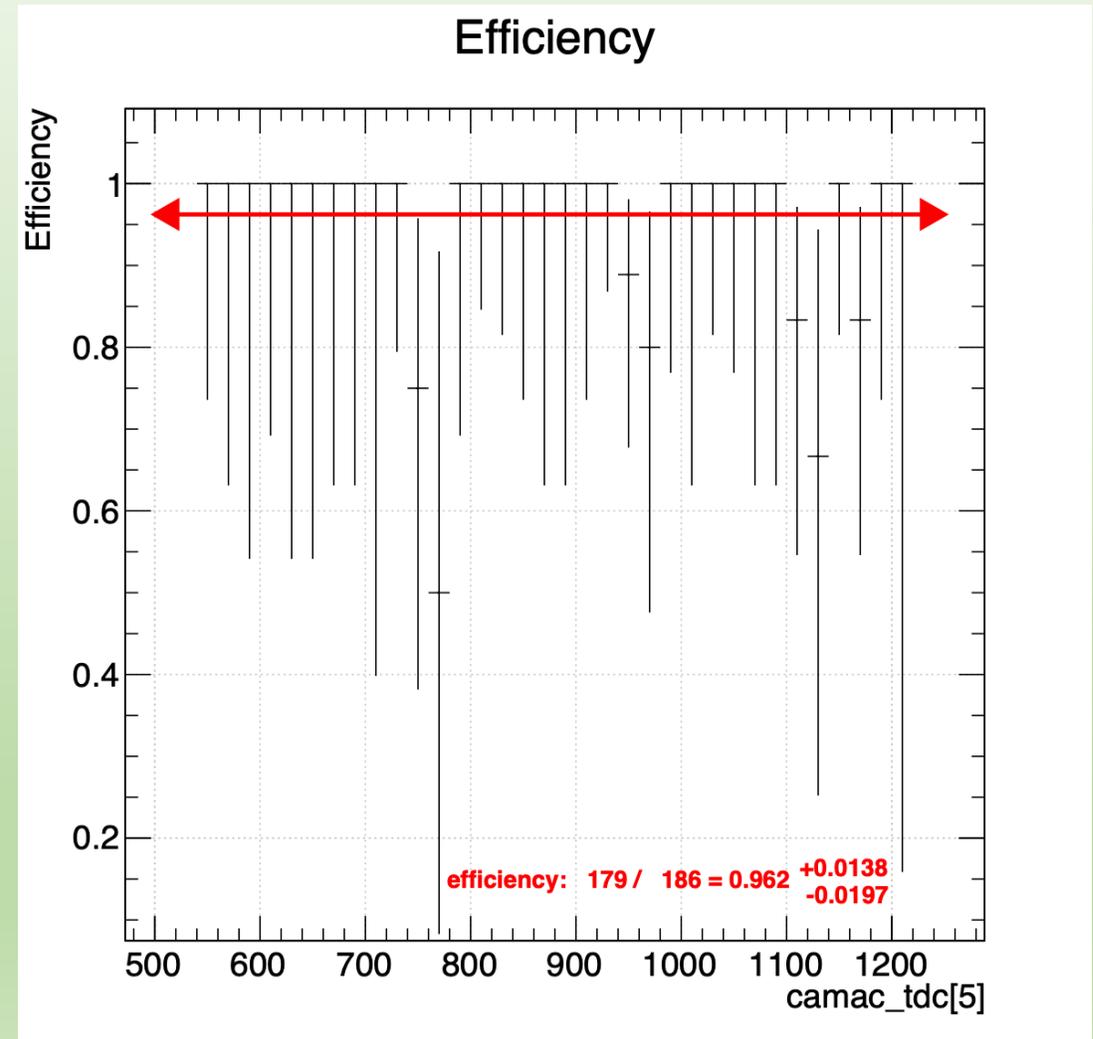
全てのカットを用いると検出効率は、

$$\text{検出効率} = 179/186 \\ = 96.2(+1.4, -2.0)\%$$

となる。

垂直に通り抜ける粒子を選ぶことで、検出効率が91%→96%になった。

この値はビームテスト時と同程度。



まとめと今後の方針

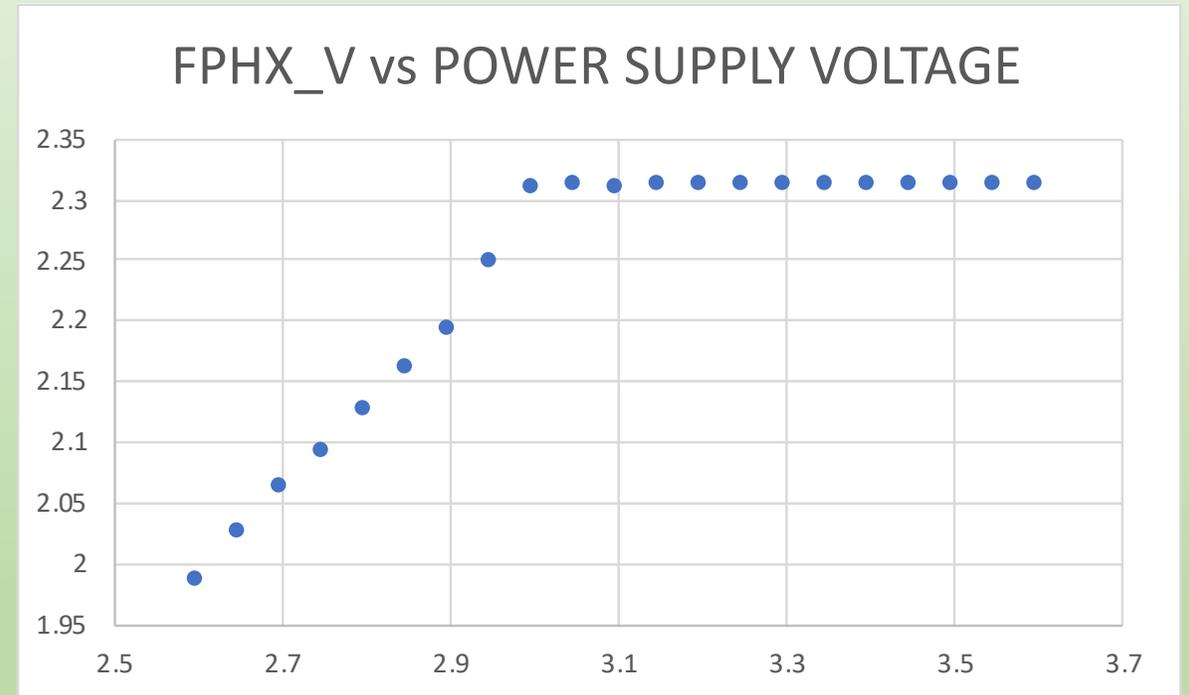
- DAQにトリガー情報を追加することができた。
- ビームテスト時と同程度の検出効率が得られた。

- データ数が少ないので測定を今後も続け、データ数を増やす。
- 垂直に通り抜ける粒子を選ぶことで検出効率が91%→96%となったことを踏まえ、シンチレーターの置き方を工夫することで、より高い検出効率が求められそうである。
 - シンチレーター3つを使って測定する
 - 2つのシンチレーターの距離を離す
 - INTT複数台で測定対象とトリガーをつくる

バックアップ

供給電圧測定結果(表付き)

NWU(12/8)				
PWR_SUPPLY_V	PWR_SUPPLY_Current	$\Delta V(= PWR_SUPPLY_Current * NTU_R_AVE)$	V_out(1877)	FPHX_V
3.6	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.55	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.5	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.45	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.4	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.35	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.3	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.25	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.2	0.53	0.16536	2.477	2.31164
3.15	0.53	0.16536	2.4765	2.31114
3.1	0.53	0.16536	2.476	2.31064
3.05	0.52	0.16224	2.4735	2.31126
3	0.52	0.16224	2.471	2.30876
2.95	0.52	0.16224	2.4105	2.24826
2.9	0.5	0.156	2.35	2.194
2.85	0.49	0.15288	2.3125	2.15962
2.8	0.48	0.14976	2.275	2.12524
2.75	0.47	0.14664	2.239	2.09236
2.7	0.45	0.1404	2.203	2.0626
2.65	0.44	0.13728	2.162	2.02472
2.6	0.43	0.13416	2.121	1.98684



宇宙線エネルギーの計算

- 1GeVの μ 粒子でのエネルギー損失：約1.15[MeV/g \cdot cm⁻²]
- シリコン密度：2.33[g/cm³]
- 単位体積あたりのシリコン中でMIPが失うエネルギー：E[MeV]

$$E[\text{MeV}] = 1.15 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}} \right] \times 0.032[\text{cm}] \times 2.33 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] = 0.0857[\text{MeV}]$$

- 1ストリップを通過するときに生成される電子正孔対の数：N

$$N = \frac{E[\text{MeV}]}{3.62[\text{eV}/\text{e対}]} = 23670[\text{個}] \quad (1\text{つの電子正孔対生成に必要なエネルギー：}3.62[\text{eV}])$$

- 電荷に変換

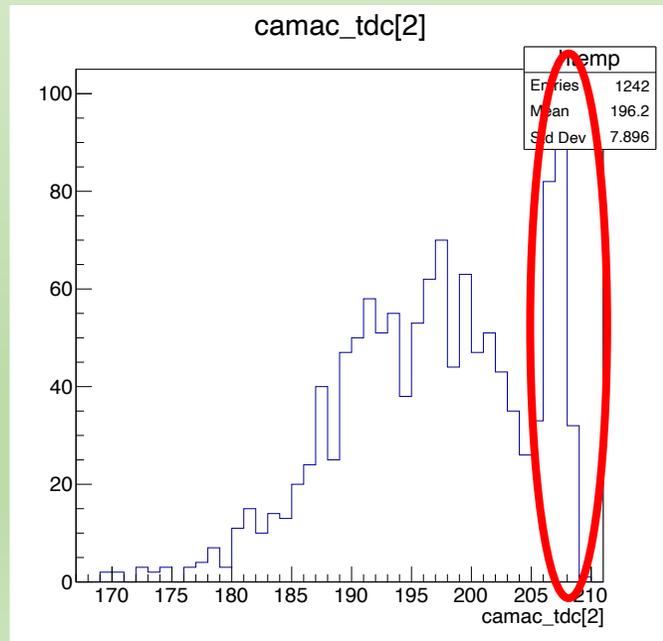
$$C[\text{fC}] = N \times 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}] = 3.79[\text{fC}]$$

- パルス波高を求める(増幅率100[mV/fC]、オフセット200 \pm 10[mV])

$$\text{Pulse height}[\text{mV}] = 100 \left[\frac{\text{mV}}{\text{fC}} \right] \times 3.79[\text{fC}] + 200 \pm 10[\text{mV}] = 580 \pm 10[\text{mV}]$$

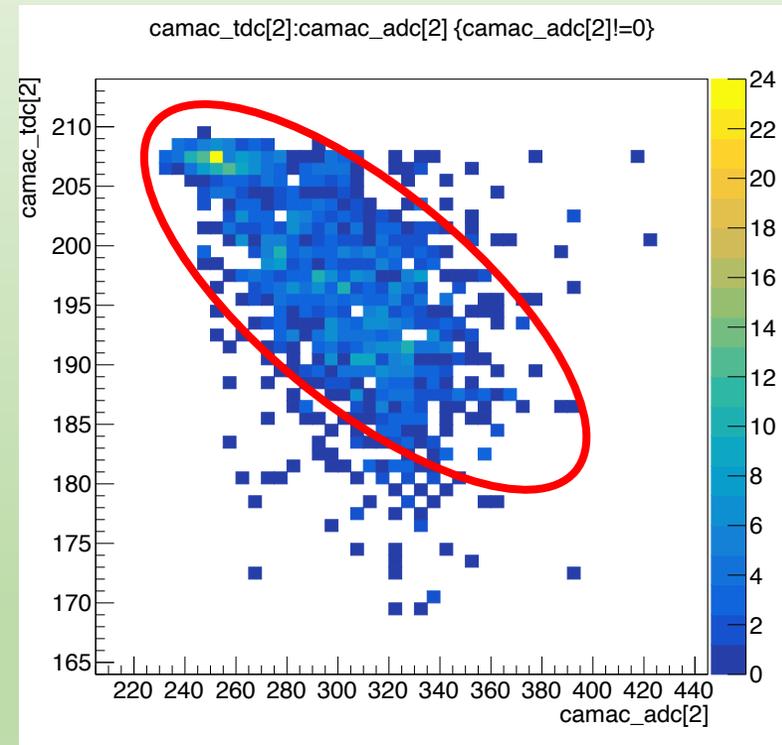
スローイングについて

- 波高が低いパルス(ADC値が小さいパルス)のTDCの値が大きくなる現象。



スローイングの効果

波高が小さいパルスが大きいTDC値を出している



ROOT TEfficiency

Calculation:

The lower boundary of the Clopper-Pearson interval is the "exact" inversion of the test:

$$\begin{aligned}P(x \geq \text{passed}; \text{total}) &= \frac{1 - \text{level}}{2} \\P(x \geq \text{passed}; \text{total}) &= 1 - P(x \leq \text{passed} - 1; \text{total}) \\&= 1 - \frac{1}{\text{norm}} * \int_0^{1-\epsilon} t^{\text{total}-\text{passed}} (1-t)^{\text{passed}-1} dt \\&= 1 - \frac{1}{\text{norm}} * \int_{\epsilon}^1 t^{\text{passed}-1} (1-t)^{\text{total}-\text{passed}} dt \\&= \frac{1}{\text{norm}} * \int_0^{\epsilon} t^{\text{passed}-1} (1-t)^{\text{total}-\text{passed}} dt \\&= I_{\epsilon}(\text{passed}, \text{total} - \text{passed} + 1)\end{aligned}$$

The lower boundary is therefore given by the $\frac{1-\text{level}}{2}$ quantile of the beta distribution.

The upper boundary of the Clopper-Pearson interval is the "exact" inversion of the test:

$$\begin{aligned}P(x \leq \text{passed}; \text{total}) &= \frac{1 - \text{level}}{2} \\P(x \leq \text{passed}; \text{total}) &= \frac{1}{\text{norm}} * \int_0^{1-\epsilon} t^{\text{total}-\text{passed}-1} (1-t)^{\text{passed}} dt \\&= \frac{1}{\text{norm}} * \int_{\epsilon}^1 t^{\text{passed}} (1-t)^{\text{total}-\text{passed}-1} dt \\&= 1 - \frac{1}{\text{norm}} * \int_0^{\epsilon} t^{\text{passed}} (1-t)^{\text{total}-\text{passed}-1} dt \\&\Rightarrow 1 - \frac{1 - \text{level}}{2} = \frac{1}{\text{norm}} * \int_0^{\epsilon} t^{\text{passed}} (1-t)^{\text{total}-\text{passed}-1} dt \\&\frac{1 + \text{level}}{2} = I_{\epsilon}(\text{passed} + 1, \text{total} - \text{passed})\end{aligned}$$

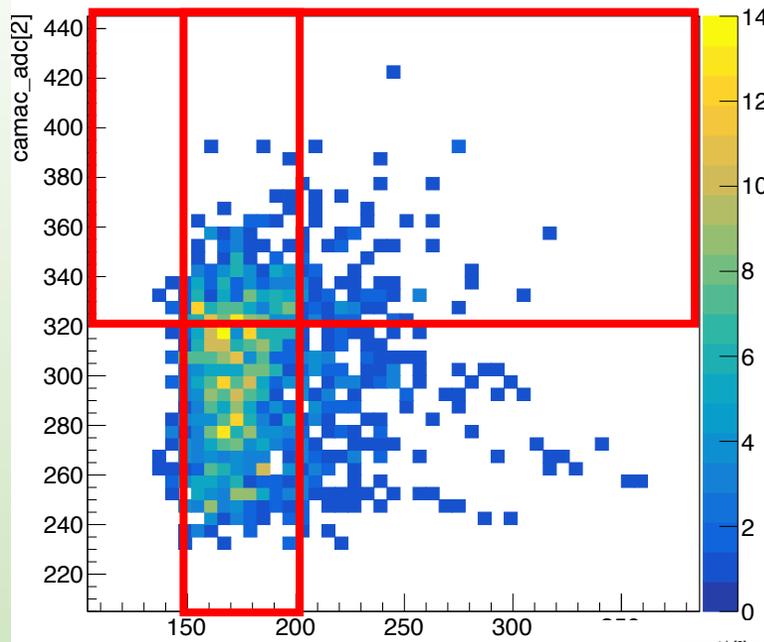
The upper boundary is therefore given by the $\frac{1+\text{level}}{2}$ quantile of the beta distribution.

Note: The connection between the binomial distribution and the regularized incomplete beta function $I_{\epsilon}(\alpha, \beta)$ has been used.

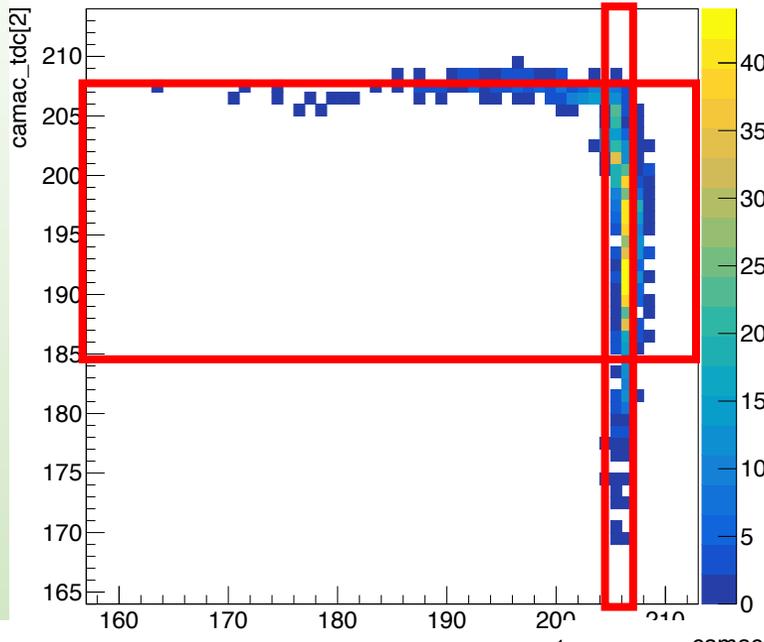
卒業研究発表会 西森早紀子

Definition at line 1814 of file TEfficiency.cxx.

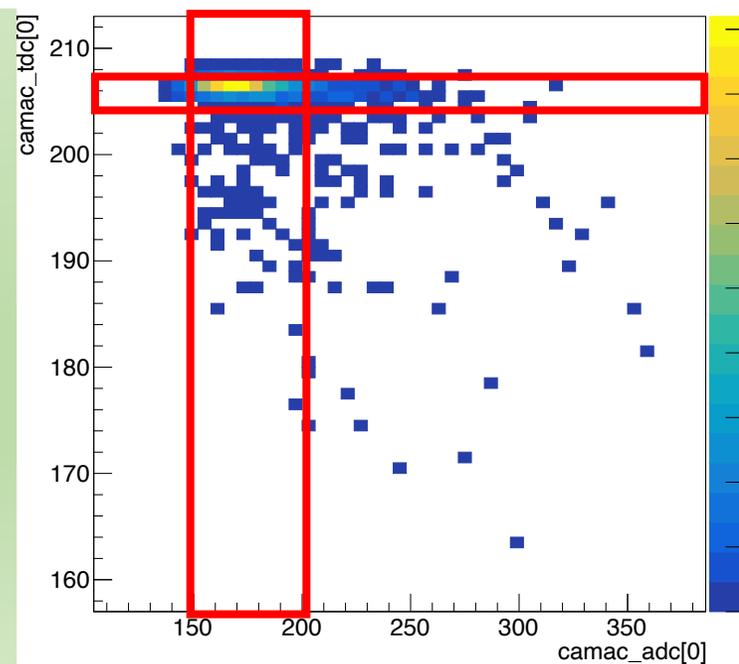
camac_adc[2]:camac_adc[0] {camac_adc[0]<400 && camac_adc[2]!=0}



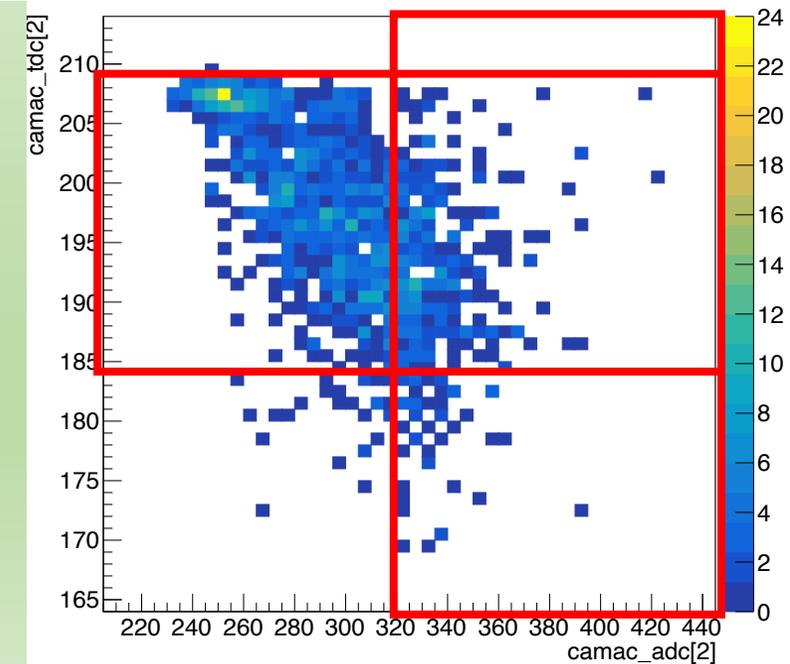
camac_tdc[2]:camac_tdc[0] {camac_tdc[0]>160}



camac_tdc[0]:camac_adc[0] {130<camac_adc[0] && camac_adc[0]<400 && camac_tdc[0]>160}



camac_tdc[2]:camac_adc[2] {camac_adc[2]!=0}



2021/3/1

西森早紀子