

# RHIC-sPHENIX実験初年データに おける粒子多重度の測定

高エネルギー物理学研究室

波多美咲

2023年度修士論文発表会

Feb. 16. 2024

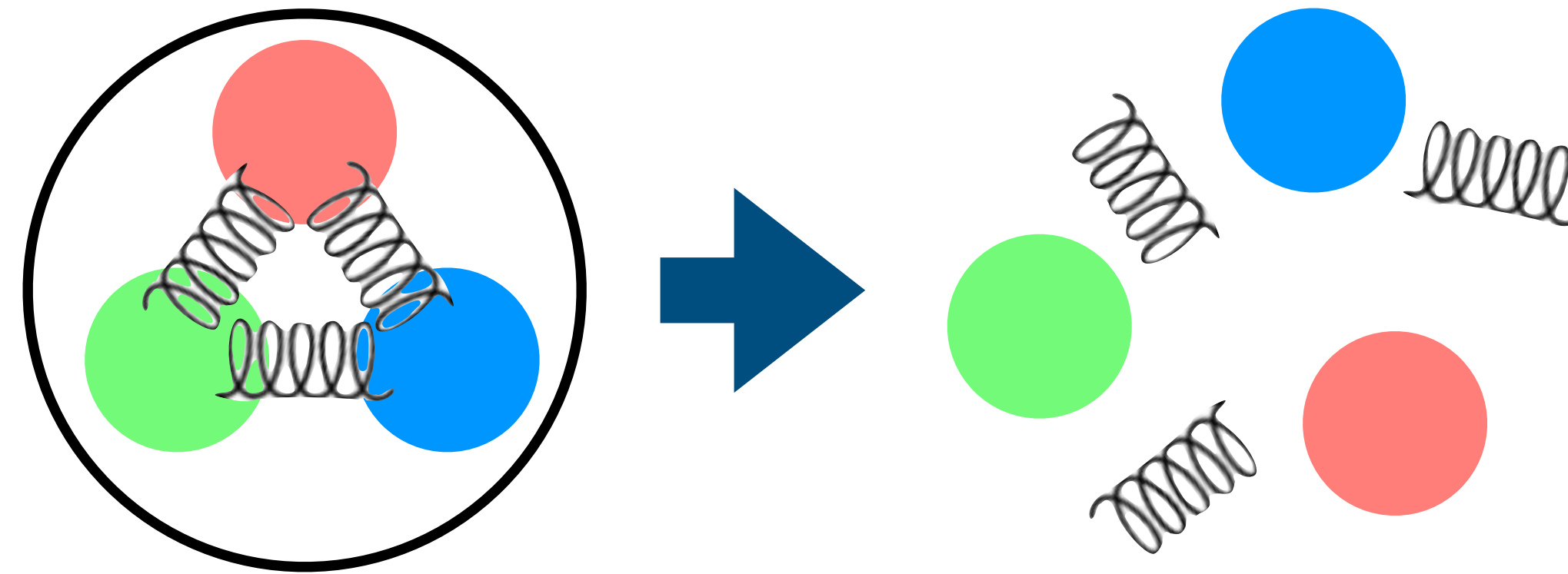
# 目次

1. 序論
2. 実験セットアップ
3. データ選定
4. 結果と考察
5. まとめと今後の課題

# 序論

## クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

- ・ 高温高密度状態でハドロン内のパートンが束縛から解放された状態。ビッグバンから数 $\mu$ ~数十 $\mu$ s後に存在していたとされる。



## 高エネルギー原子核衝突実験

- ・ 高エネルギーに加速した重い原子核同士を衝突させることで高温高密度状態を作り出すことで、QGPを実験室系で生成する。

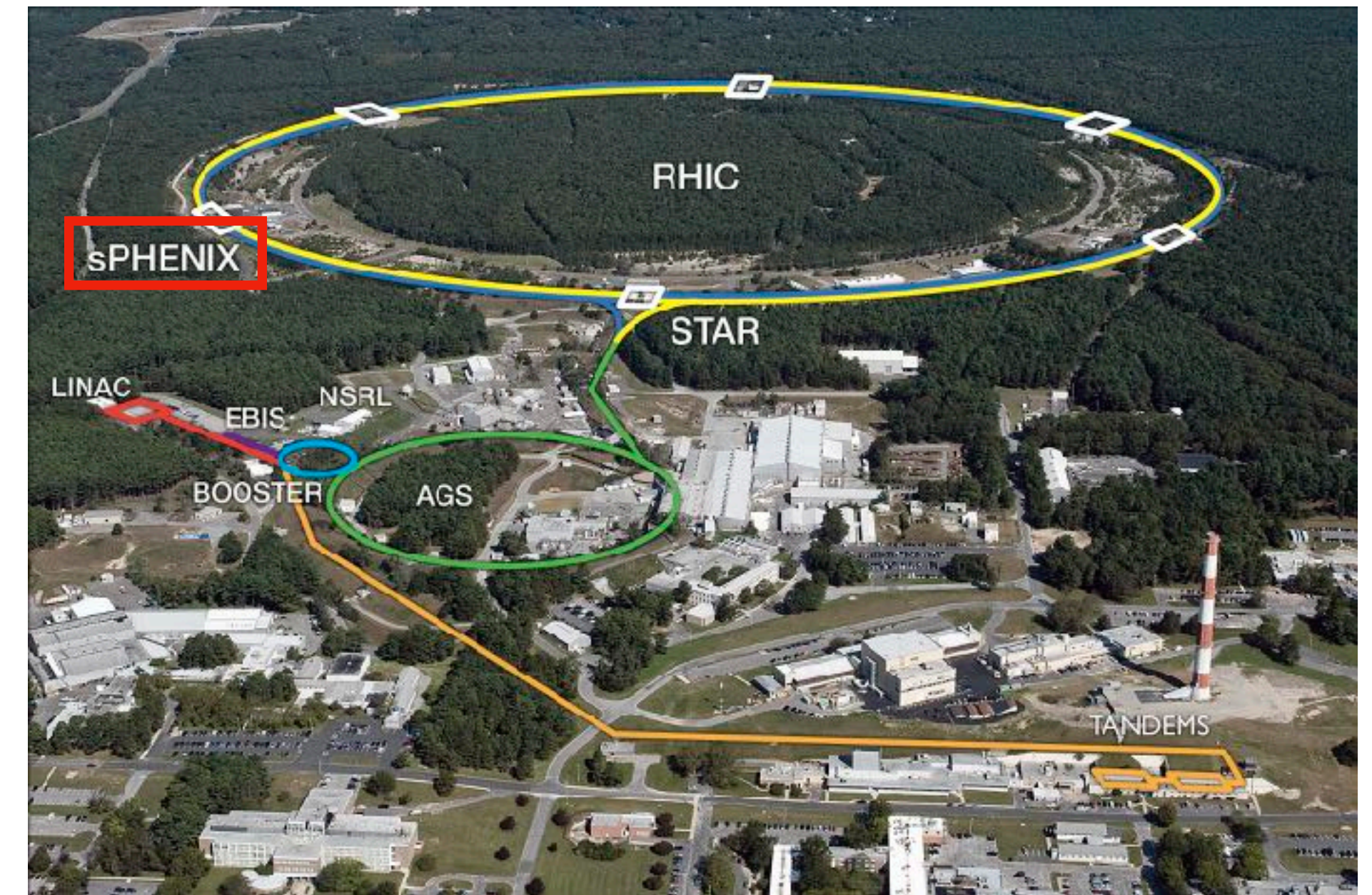
# 序論

## Relativistic heavy ion collider (RHIC)

- 米国ブルックヘブン国立研究所にある、高エネルギー原子核衝突実験が行われている加速器。2000年から稼働、世界で初めてQGPの生成に成功している。
- 最大重心系エネルギー
  - Au+Au : 200GeV, p+p : 500GeV

## sPHENIX実験

- 2023年5月からRHICで稼働した実験
- 目的：QGPの輸送係数とデバイ遮蔽長の温度依存性などのQGPの性質を決定する。



# 序論

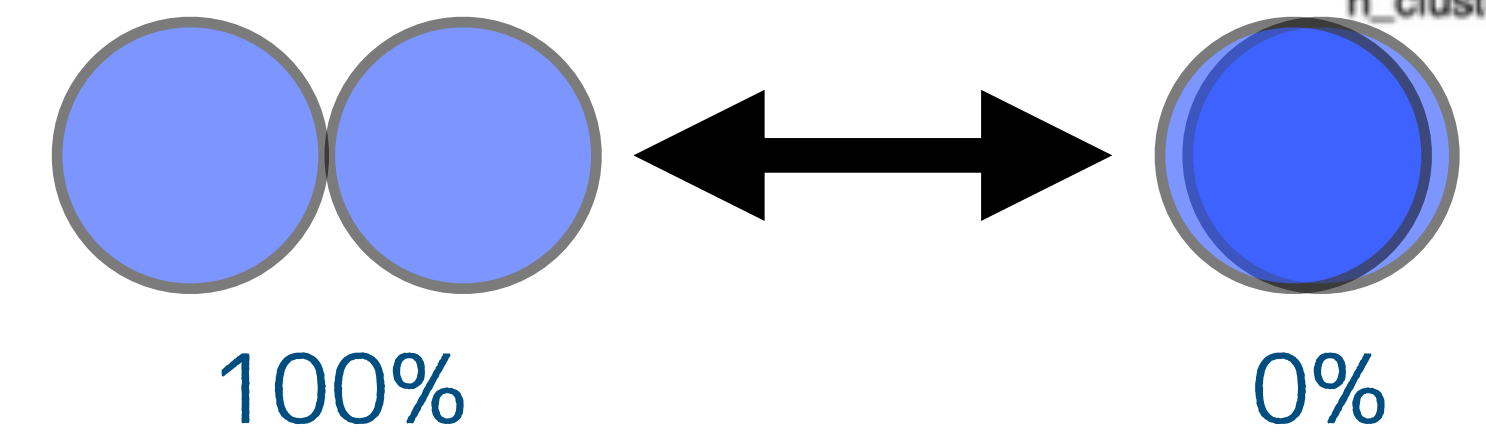
## 中心衝突度 (centrality)

- 衝突する原子核同士の衝突度合い。実験から予測される。

## ラピディティ・擬ラピディティ

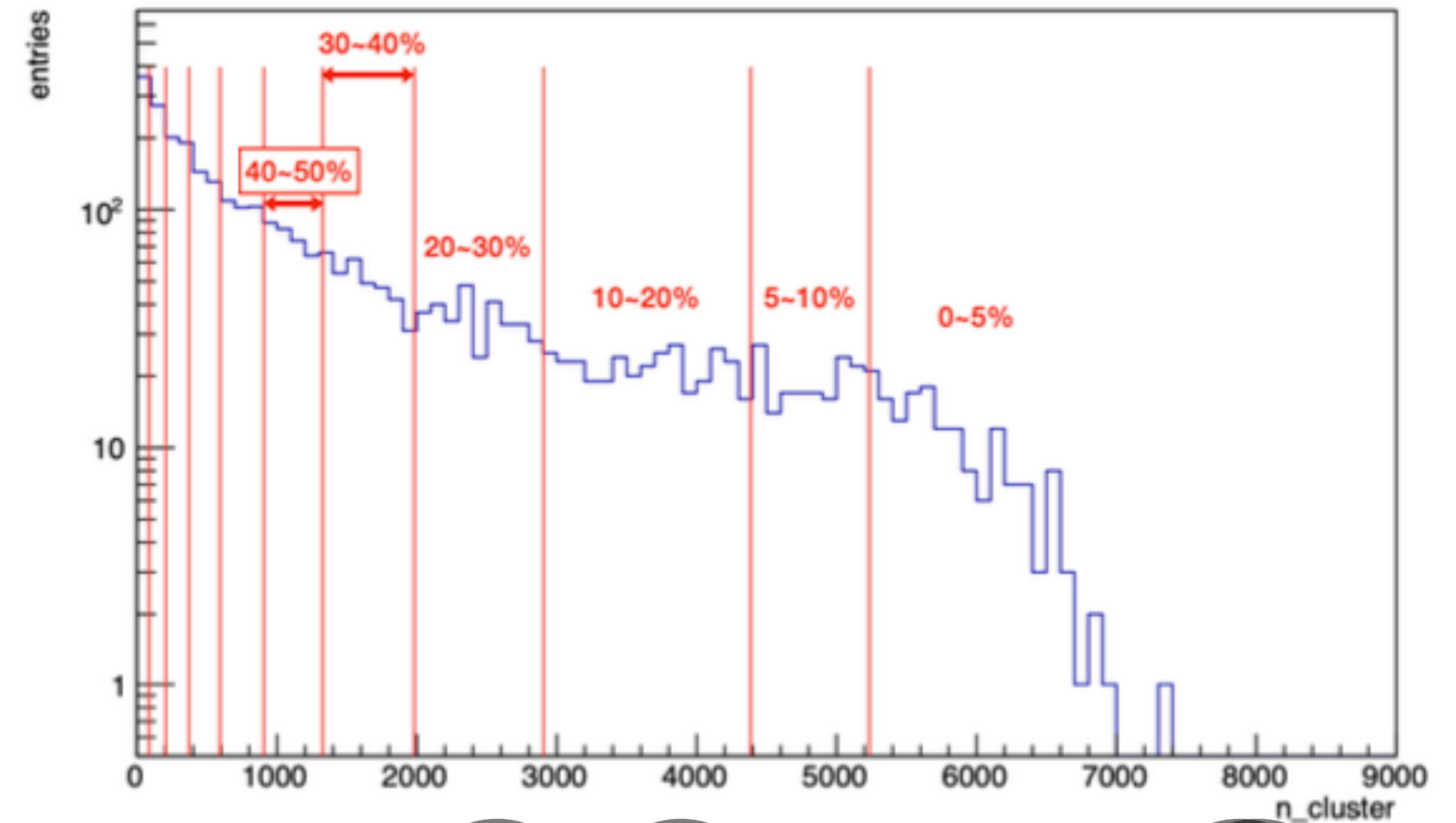
- ラピディティ：相対性理論での運動の大きさの尺度。

$$y = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{E + p_z}{E - p_z}\right) = \tanh^{-1}\left(\frac{p_z}{E}\right)$$



- 擬ラピディティ：ラピディティを近似した量。粒子が光速のとき、粒子の質量を無視できる。

$$y \simeq \eta = -\ln\left(\tan \frac{\theta}{2}\right)$$



# 序論

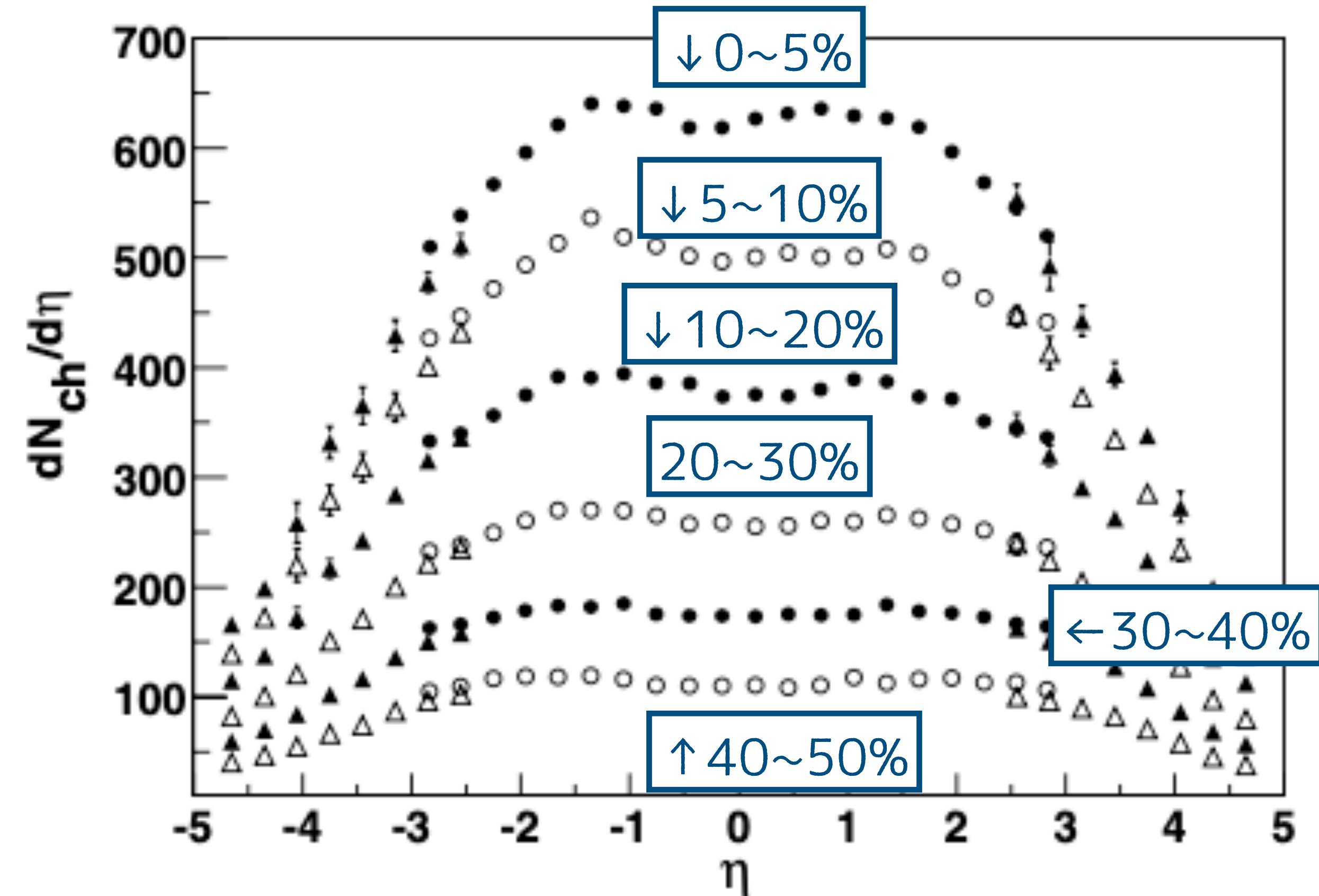
## 粒子多重度

- 高エネルギー原子核衝突実験で生成した粒子数。衝突の中心度を示す。
  - →特性評価に不可欠な変数。
- 粒子多重度の擬ラピディティ依存性は、エネルギー密度などのQGPに関する情報を持つ。
  - →過去の実験でも測定されている。

# 序論

## (例)BRAHMS実験

- 2000年にBRAHMS実験で測定された擬ラピディティ分布
- 重心系エネルギー200GeV、Au+Au衝突データを使用
  - →中心衝突度が大きいほど粒子多重度も大きい
  - →それぞれの中心衝突度での上下の変動は少ない



# 序論

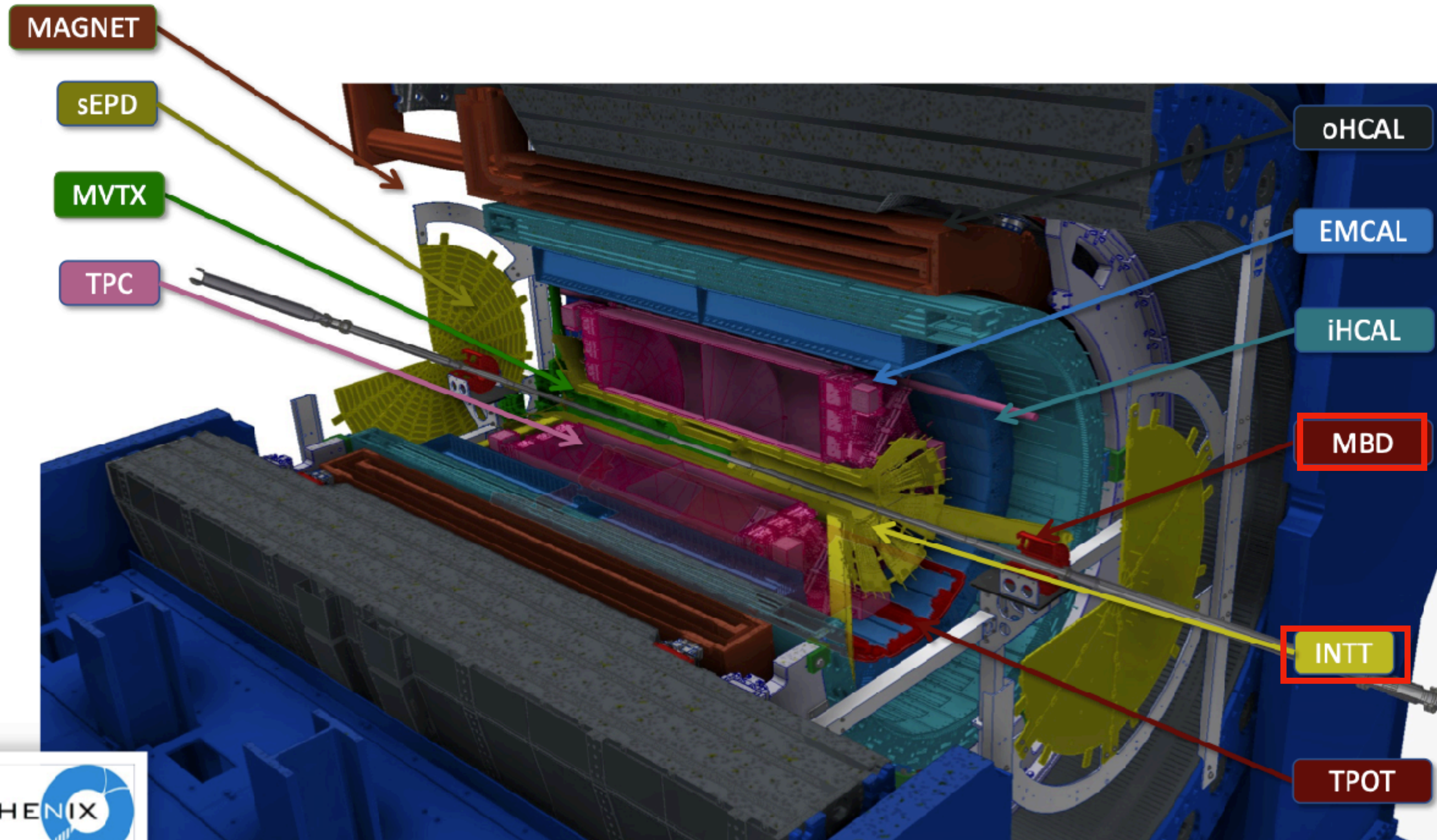
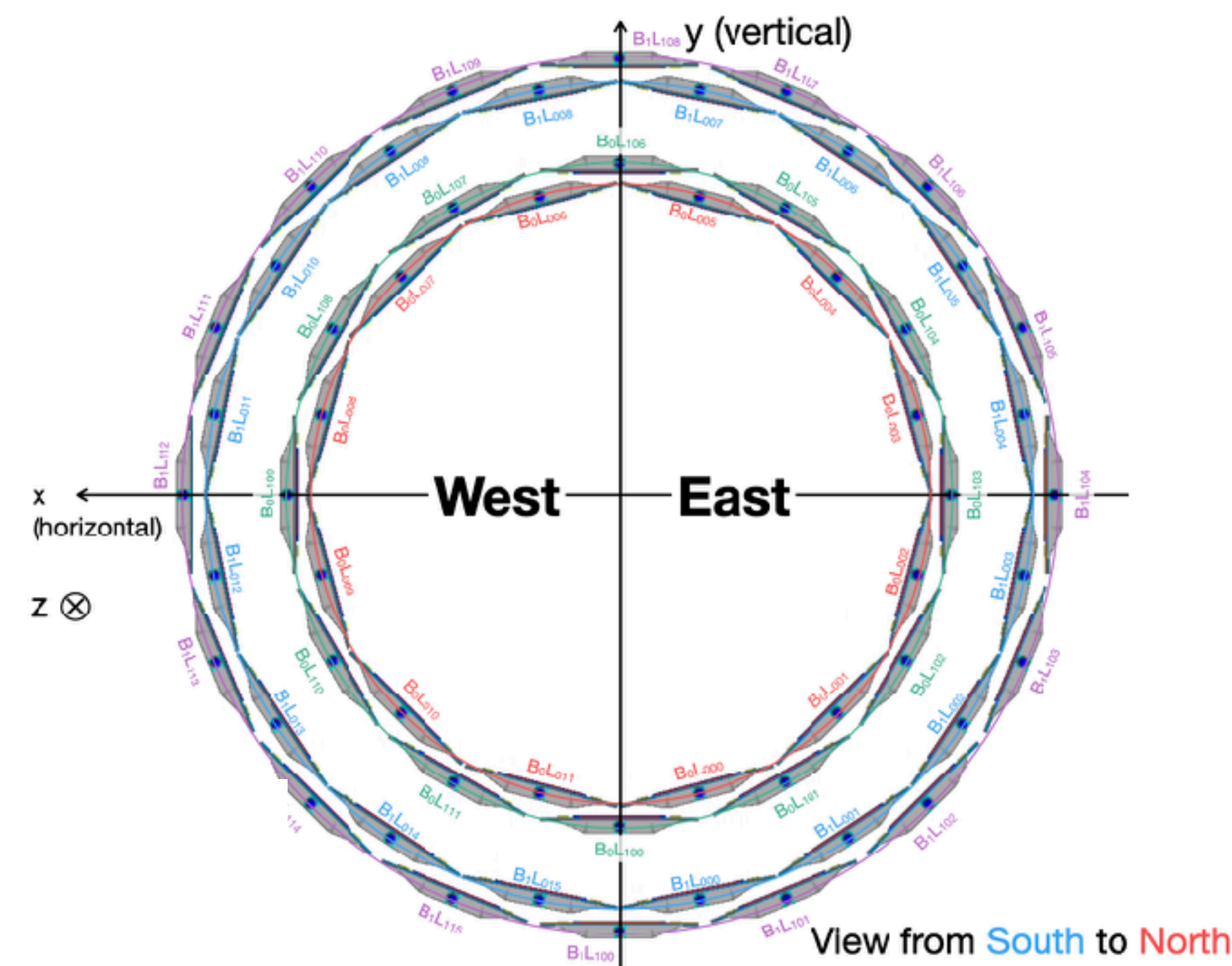
## 本研究の目的

- sPHENIX実験で得られた磁場なしの重心系エネルギー200GeV、Au+Au衝突のデータを10kイベント用いて、粒子多重度の擬ラピディティ依存性について測定。
  - sPHENIX実験での検出器の性能を確認する
  - 先行研究の結果と比較することでsPHENIX実験での稼働状態を確認する



# 実験セットアップ

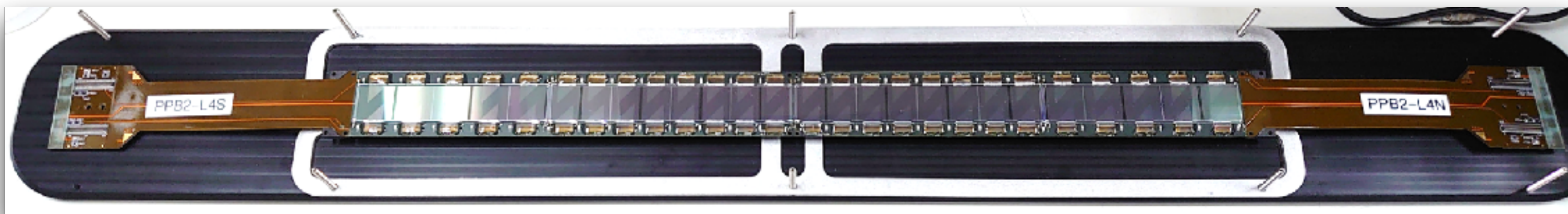
## 中間飛跡検出器 INTT



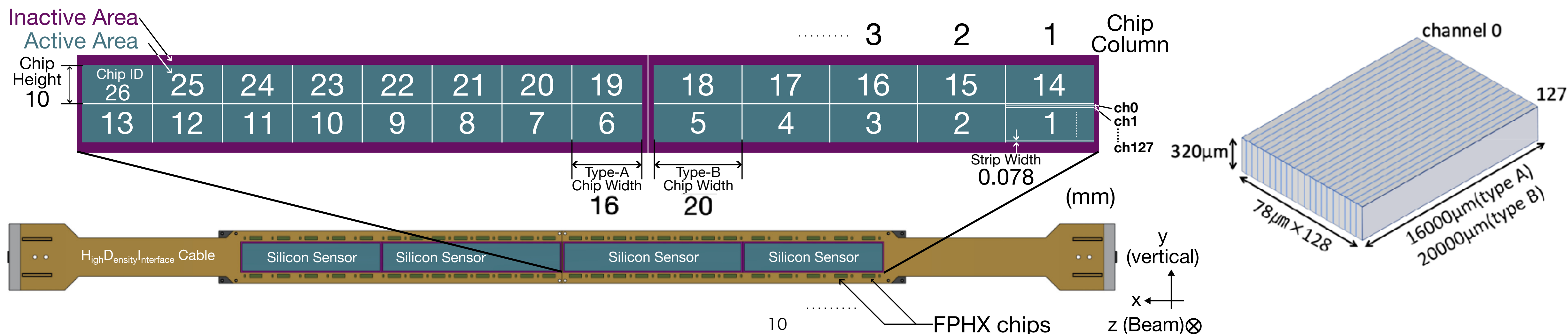
- sPHENIXの飛跡検出器の一つ。二層のバレル構造のストリップ型シリコン検出器。
- ビーム軸から7~10cmに位置し、ビーム軸方向 $\pm 23\text{cm}$ 、全方位角をカバーしている。

# 実験セットアップ

## 中間飛跡検出器 INTT



- ストリップ型シリコン検出器（ラダー） 56本で構成
- ラダー：シリコンセンサー、FPHX Chipなどから構成
- シリコンセンサー：横幅の異なる2種類が用いられる。それぞれ128channelに分かれており、ストリップの幅は $78\mu\text{m}$ 、厚さは $320\mu\text{m}$ である。



# 実験セットアップ

## 中間飛跡検出器 INTT

- FPHX Chip：センサーからの信号を読み出す。信号を積分・波形整形を行い、3bitのADC値を出力する。

- ADC値：8bitのDAC値で設定可能。対応電圧はDAC値を用いて以下の式で表される。

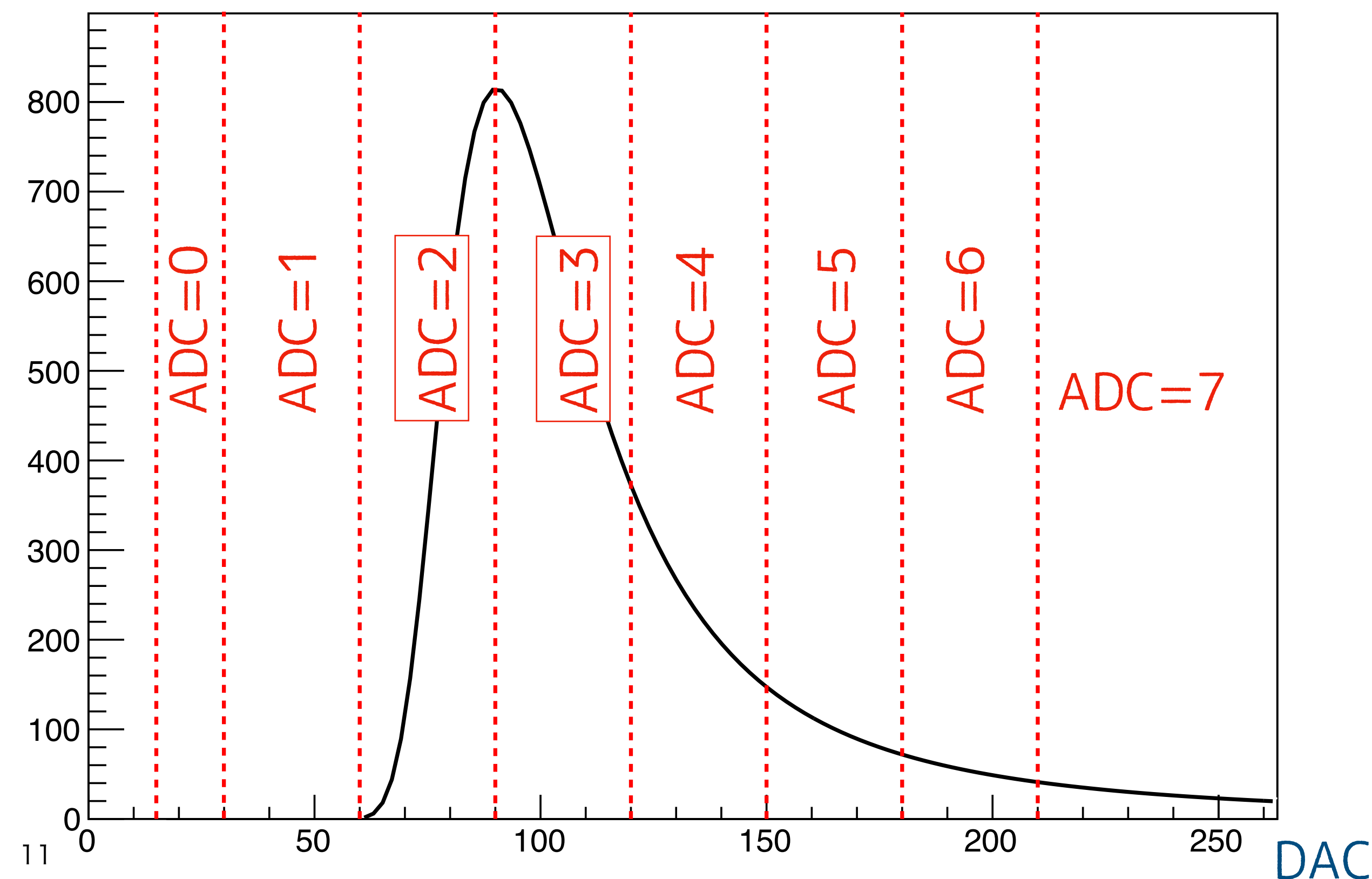
$$V = 4 \times DAC + 210$$

- 対応電圧はセンサーを通過したときに損失するエネルギーに対応している。

本研究でのDAC設定値

ADC	DAC
0	15~30
1	30~60
2	60~90
3	90~120
4	120~150
5	150~180
6	180~210
7	210~

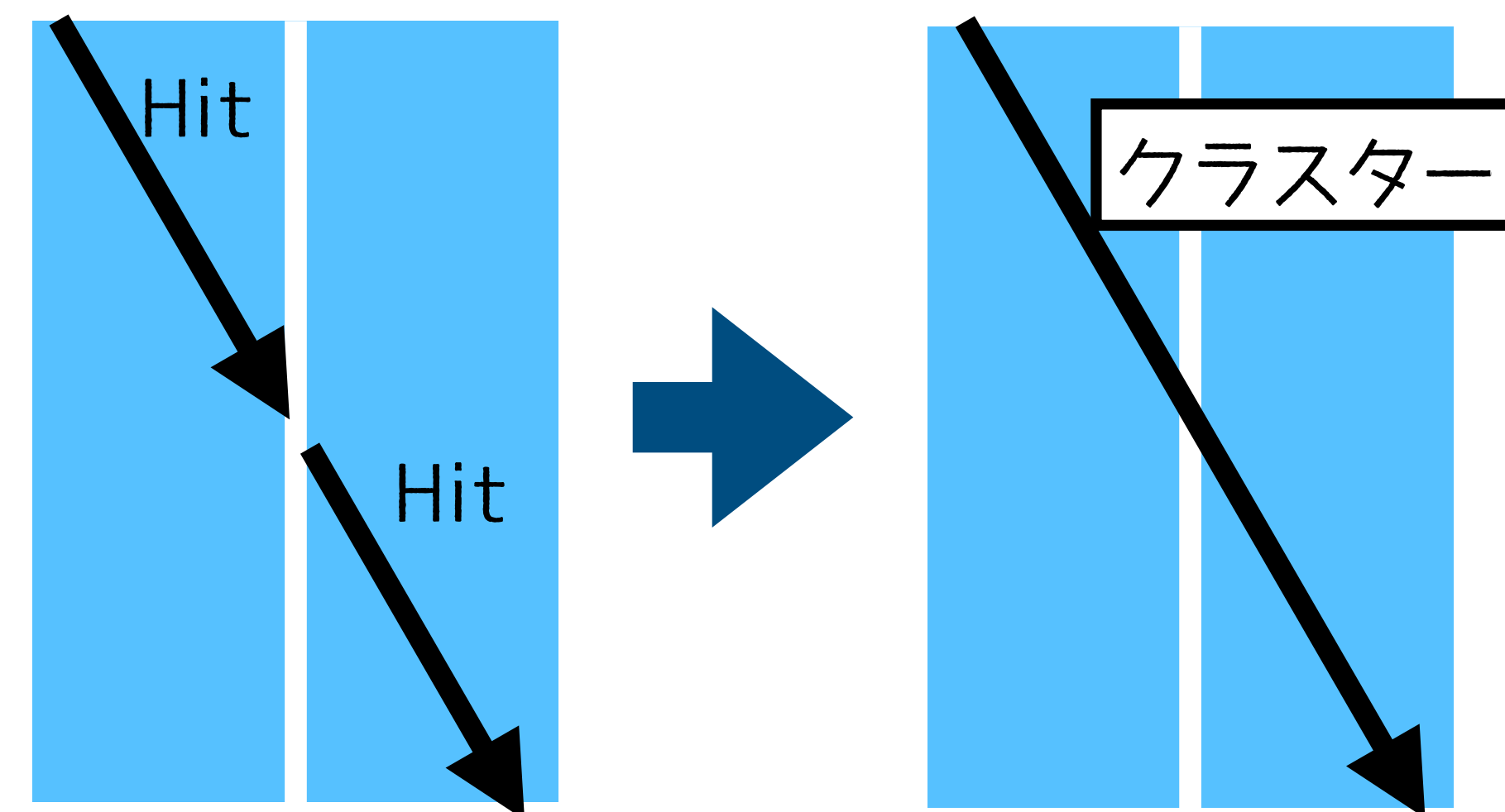
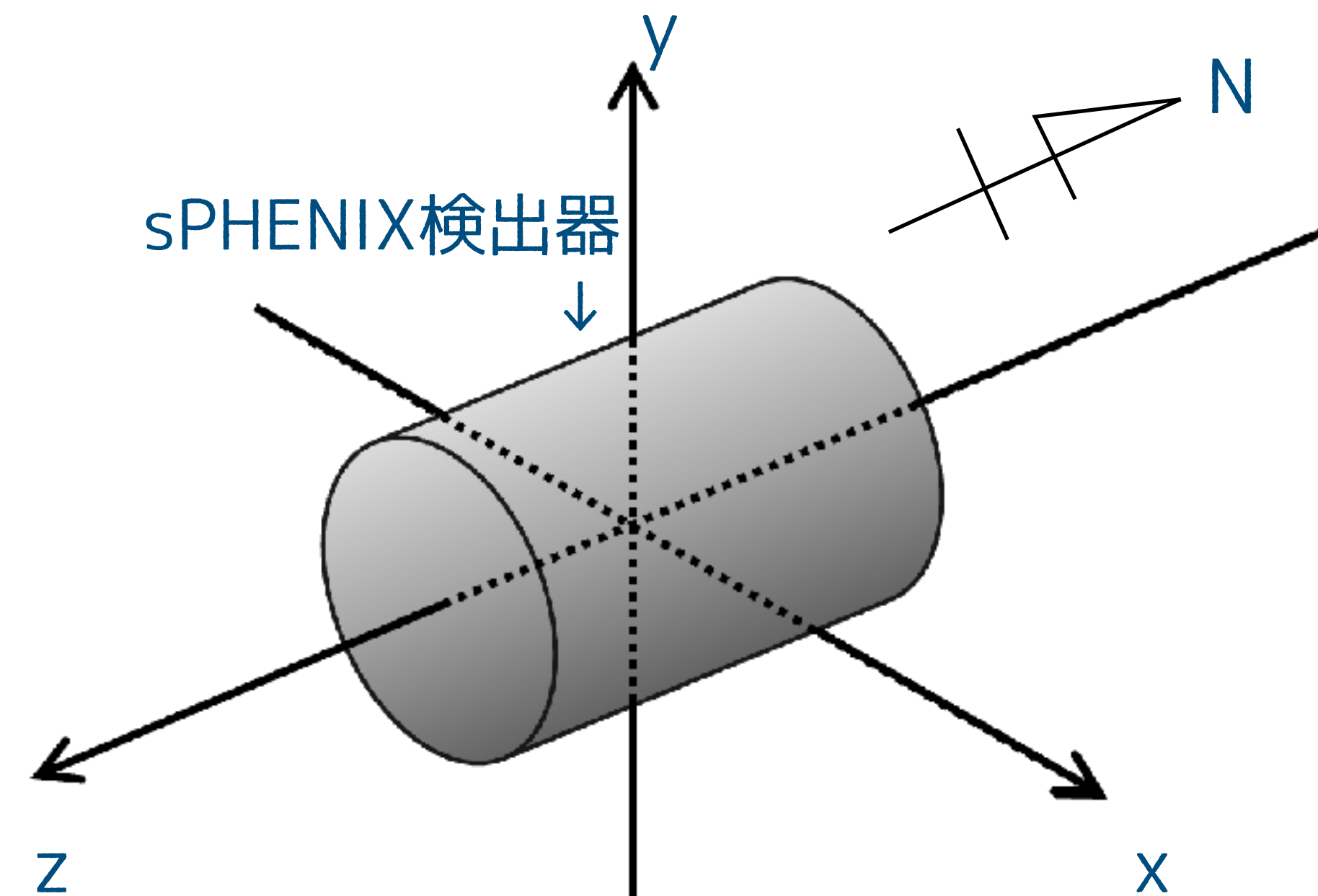
DAC設定値の閾値



# 実験セットアップ

## 中間飛跡検出器 INTT - クラスタリング

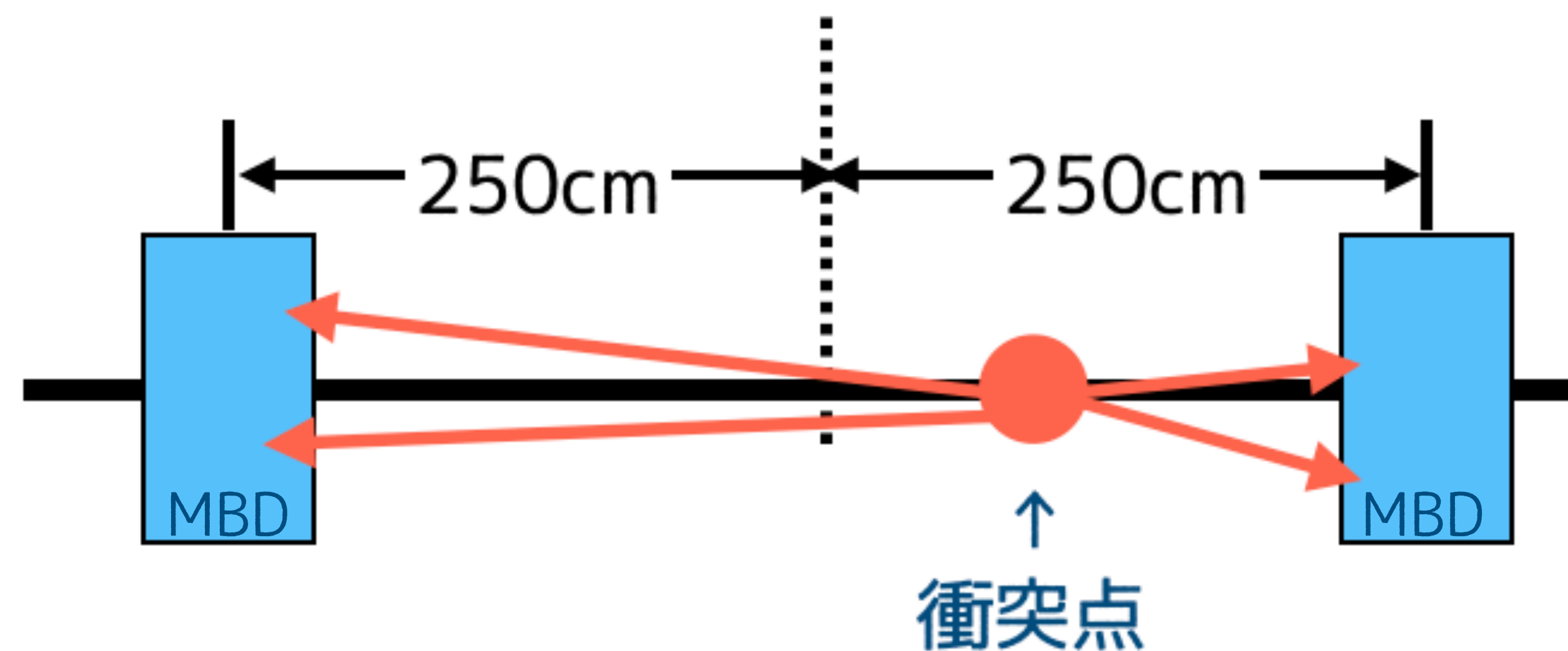
- sPHENIXでは上図のような右手系を採用。
- INTTのデータは channel-ID  $\rightarrow$  (x, y, z) に変換、channelの中央の位置座標をヒット位置とする。
- 隣り合うchannelにヒットがあった場合、クラスターとする（下図）。
  - クラスターのヒット位置  $\rightarrow$  ヒット位置の平均位置
  - クラスターのADC値  $\rightarrow$  ヒットのADC値の合計



# 実験セットアップ

## Minimum Bias Detector (MBD)

- sPHENIX実験のトリガーに用いられるチェレンコフ検出器。
- $z = -250\text{cm}$ ,  $250\text{cm}$ のビームパイプの周りに2つ配置されている。
- 単位時間50ps
- 衝突の位置を南北の時間差で測定している (下図)



# データ選定

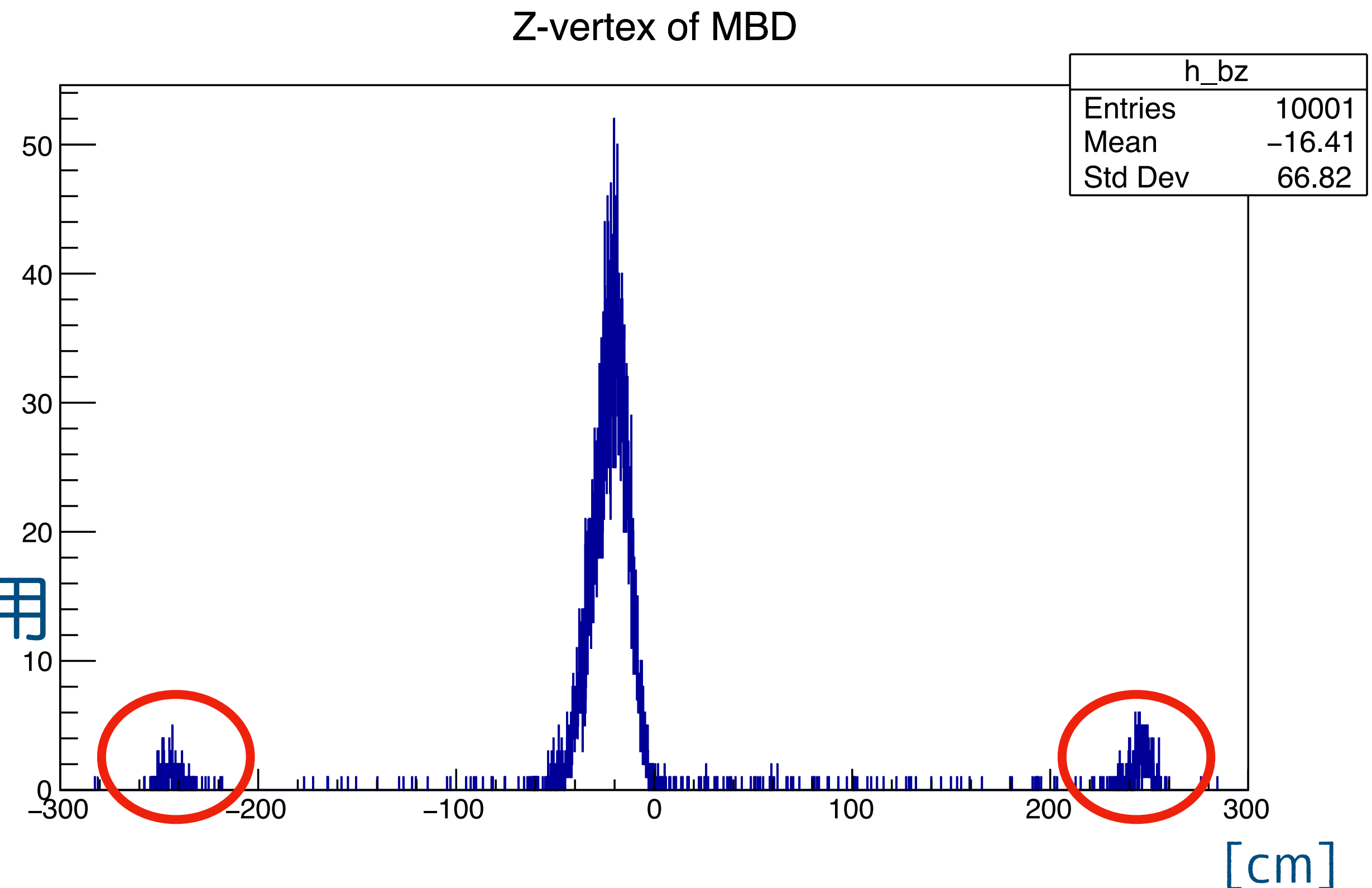
## ① Z-vertex Cut

- 図：MBDで測定した衝突点のz位置（Z-vertex）分布

- $\pm 250\text{cm}$ に小さなピークが見られる

- $\rightarrow$  MBDの設置位置と一致
- $\rightarrow$  シグナルではないと判断

- カット条件： $|Z\text{-vertex}| < 20\text{cm}$ のみ使用

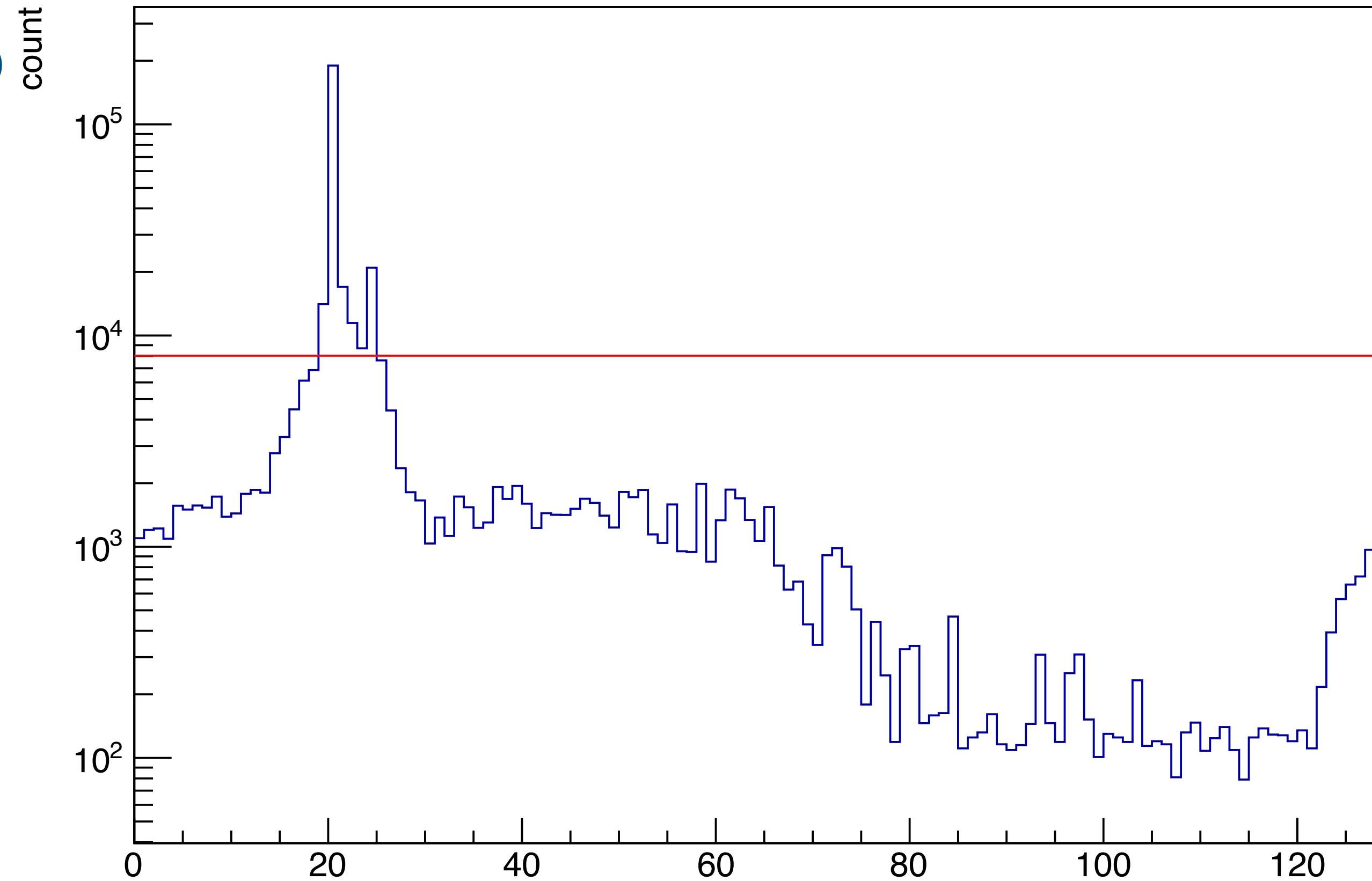


# データ選定

## ② Beam Clock Cut

- BCO-FULL : sPHENIX検出器全体の Beam Clock
- BCO : INTTのBeam Clock
- INTTと他の検出器が同期→2つの Beam Clockの差は一定になる
- 図 : Beam Clockの差の分布

BCO-FULLとBCOの差



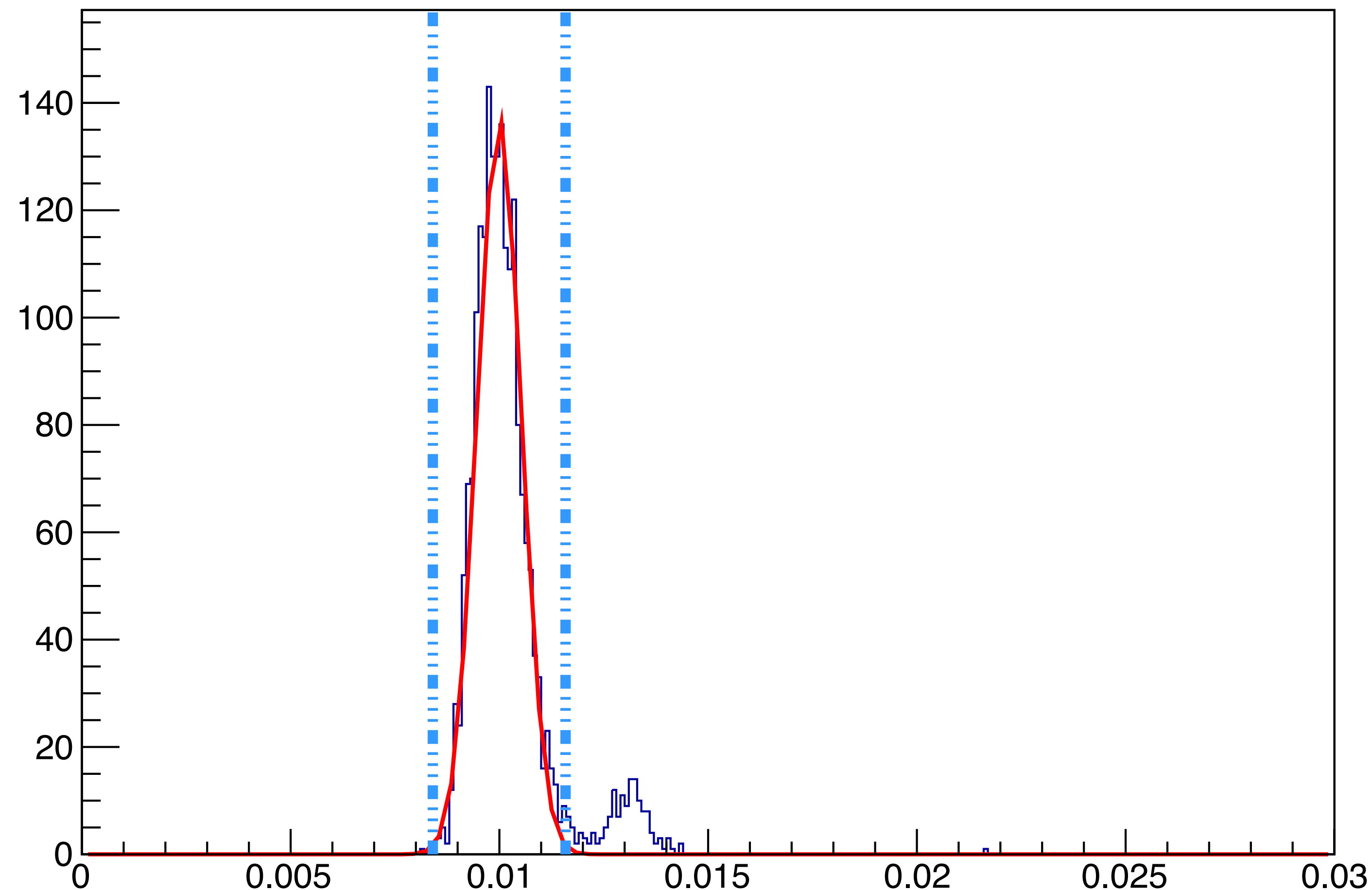
- カット条件 :  $\text{background} \times 5$ 以上となる範囲に含まれるヒットを使用

# データ選定

## ③ Channel Cut

- 図：Type-A Chipでのヒット数分布
  - 赤線：ガウス関数でフィットした結果
  - 点線： $\text{mean} \pm 3\sigma$
- カット条件：  
 $\text{mean} - 3\sigma \sim \text{mean} + 3\sigma$ に含まれるストリップのデータを使用

Type-A Chipの各ストリップのヒット割合



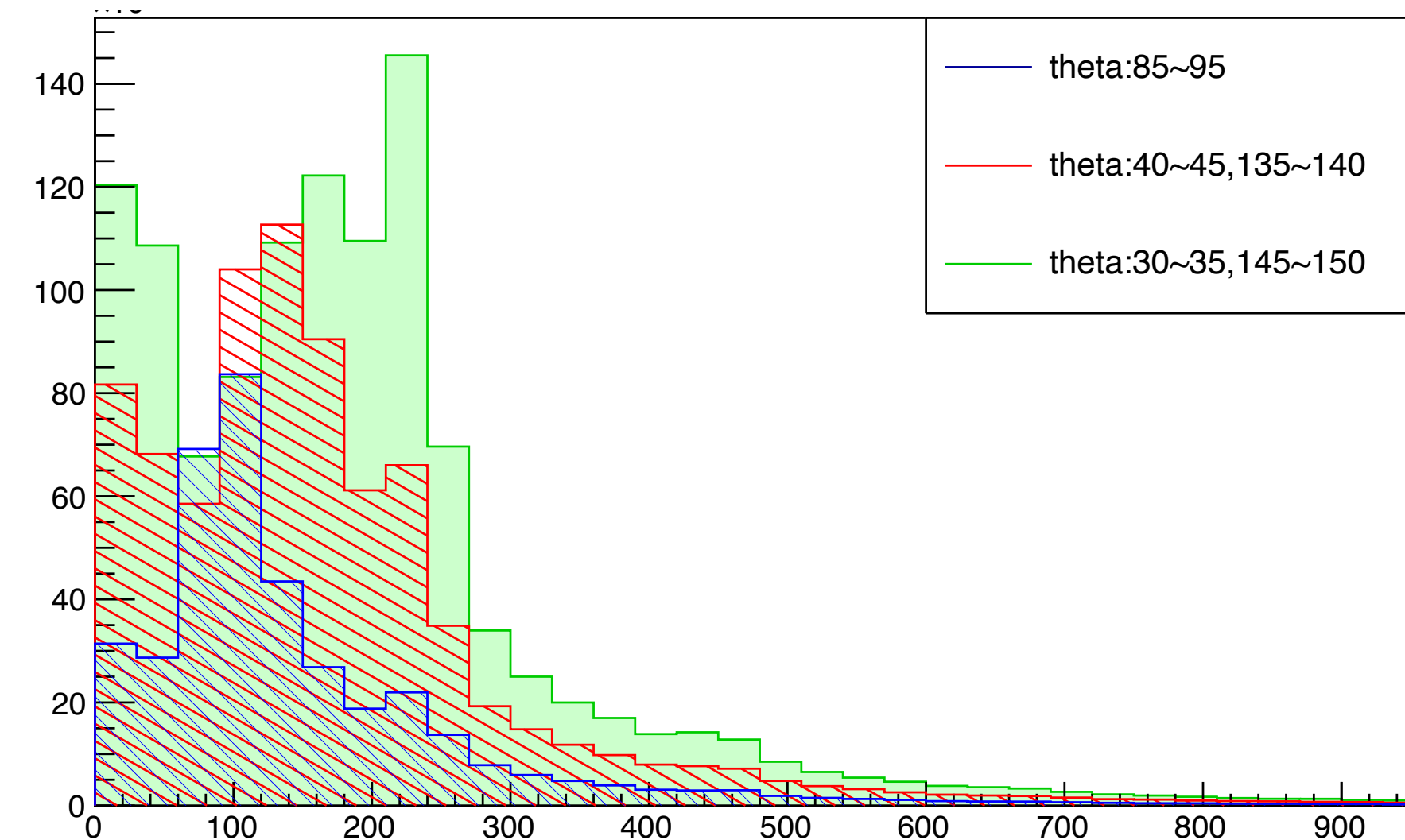
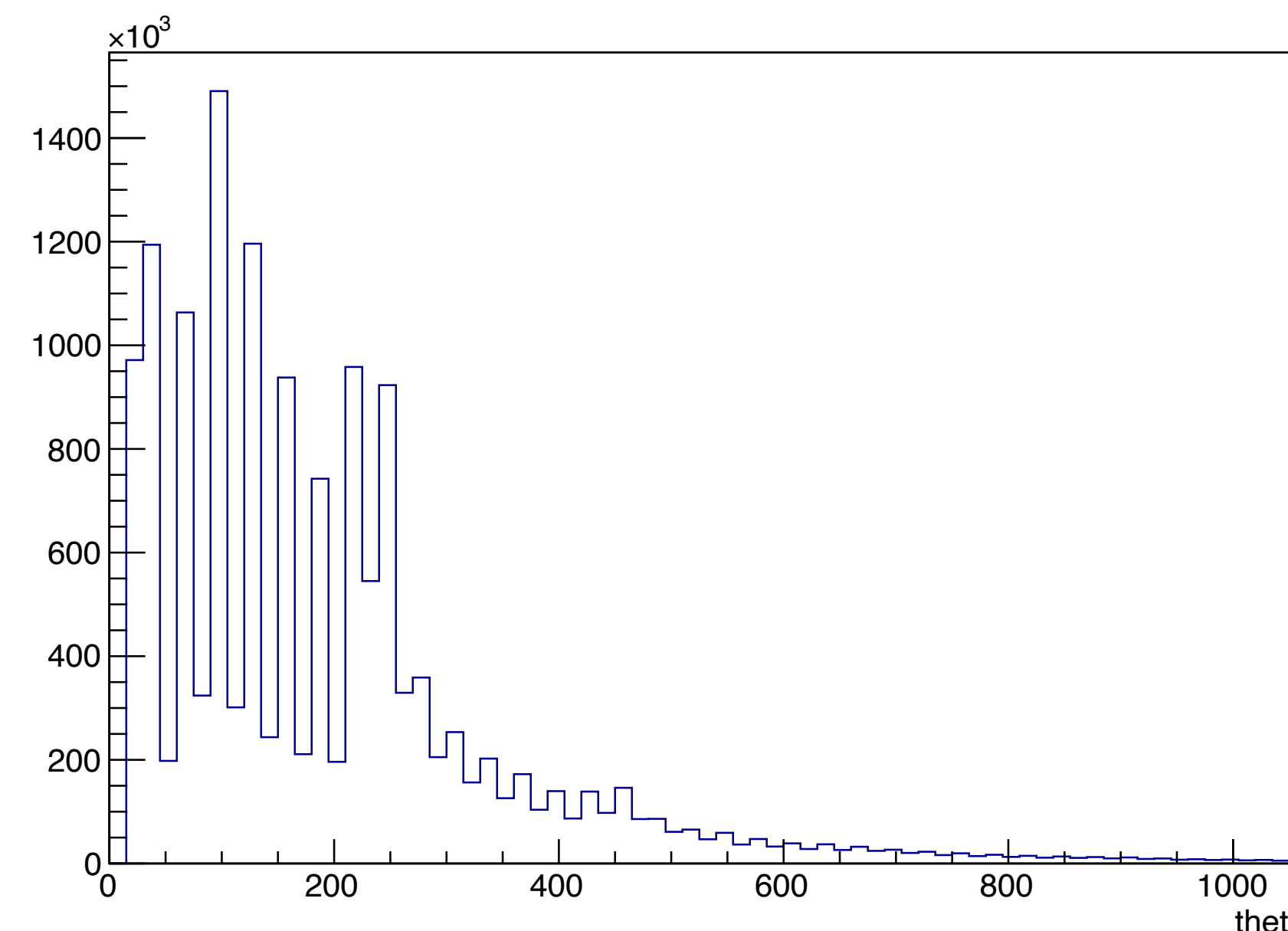
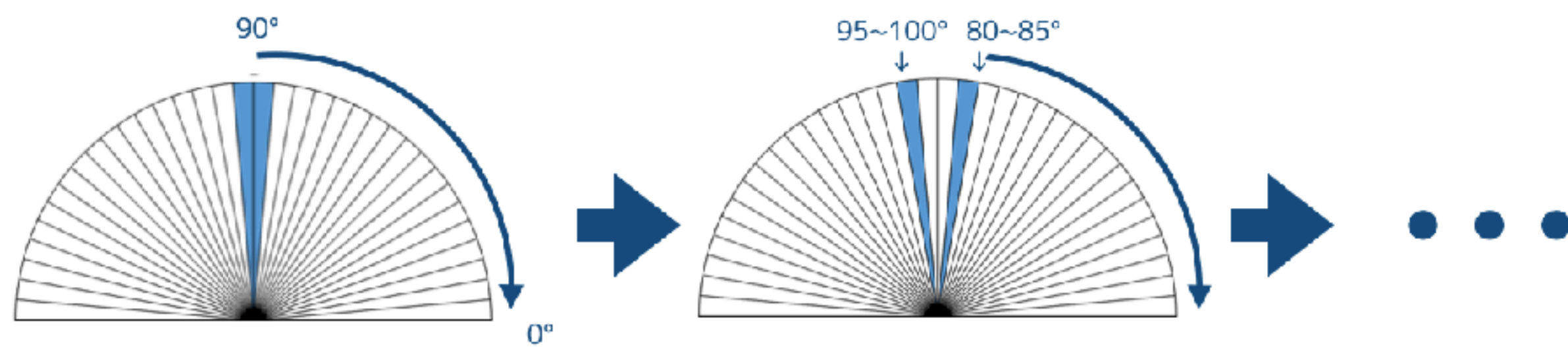
横軸： $\frac{\text{各ストリップが鳴った回数}}{\text{Runのイベント数}}$



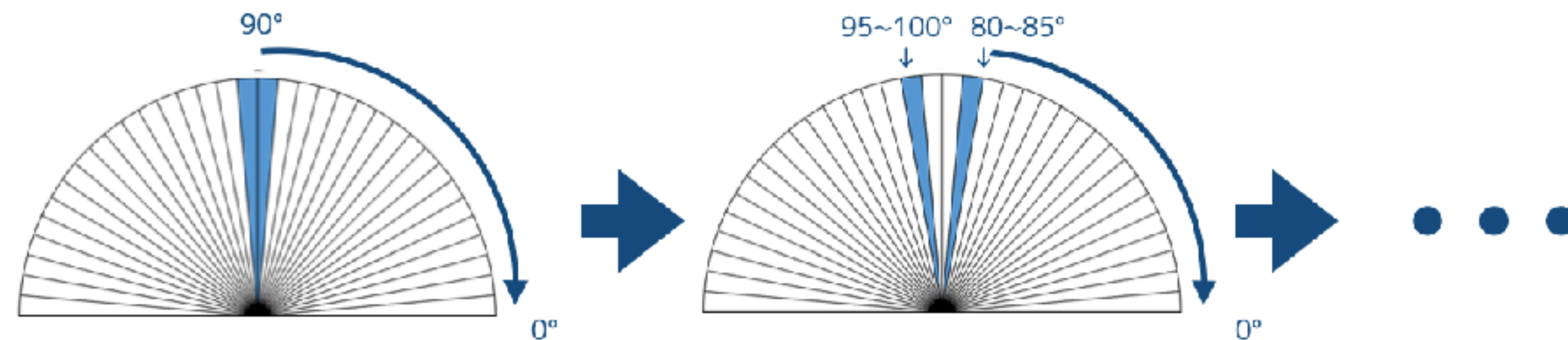
# データ選定

## ④ ADC Cut

- 上図：クラスターのADC分布
  - 0, 90, 210付近にピークがある
- 下図：角度 $\theta$ 毎に分けた場合のADC分布
  - 0, 210付近のピークはどの角度にもある。
  - 間にあったピークは角度が水平に近づくほど大きい方へ移動する。



# データ選定



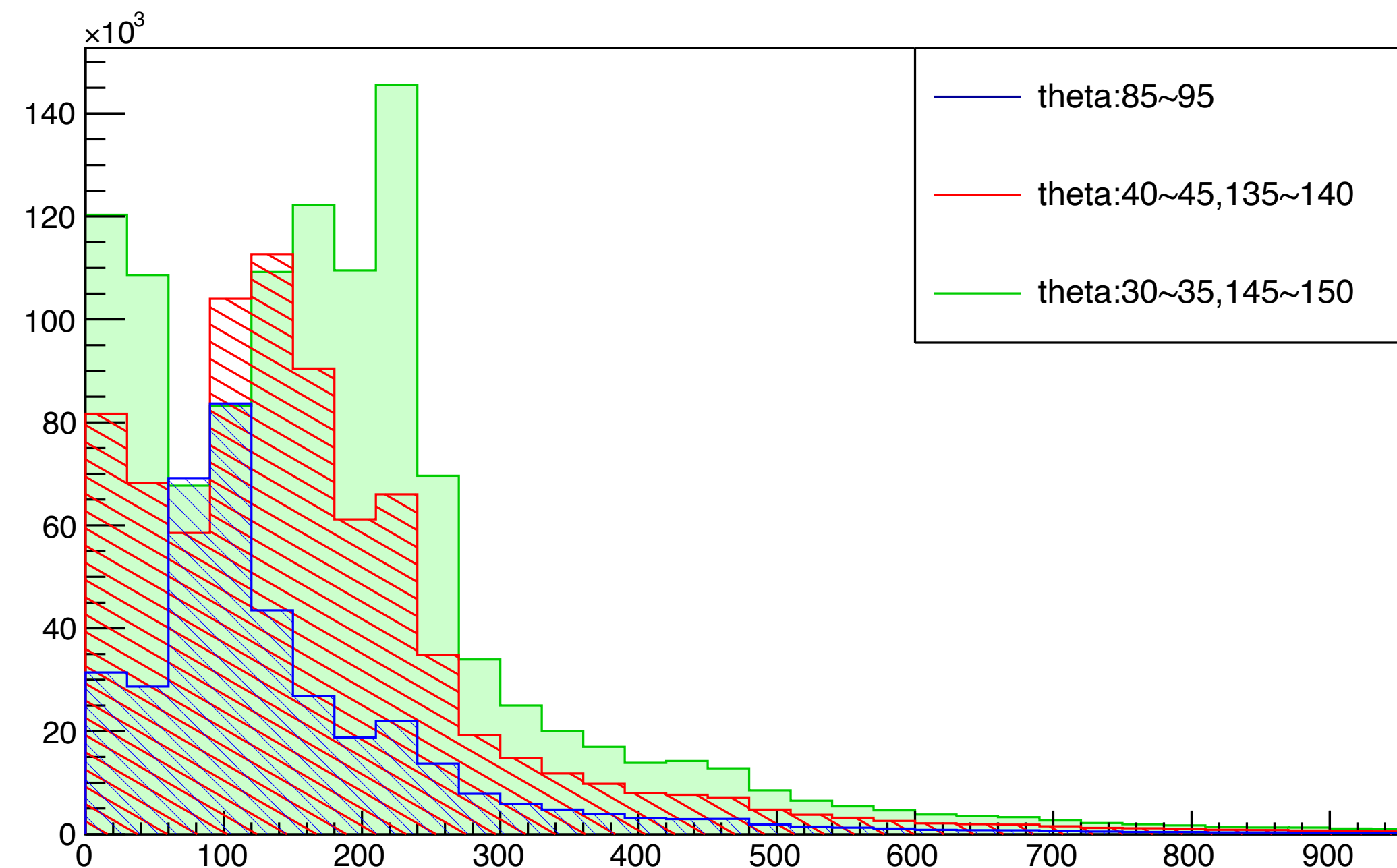
## ④ ADC Cut

- 0, 210付近のピークは常にある。
- 間にあったピークは角度が水平に近づくほど大きい方へ移動する。



## • 予想

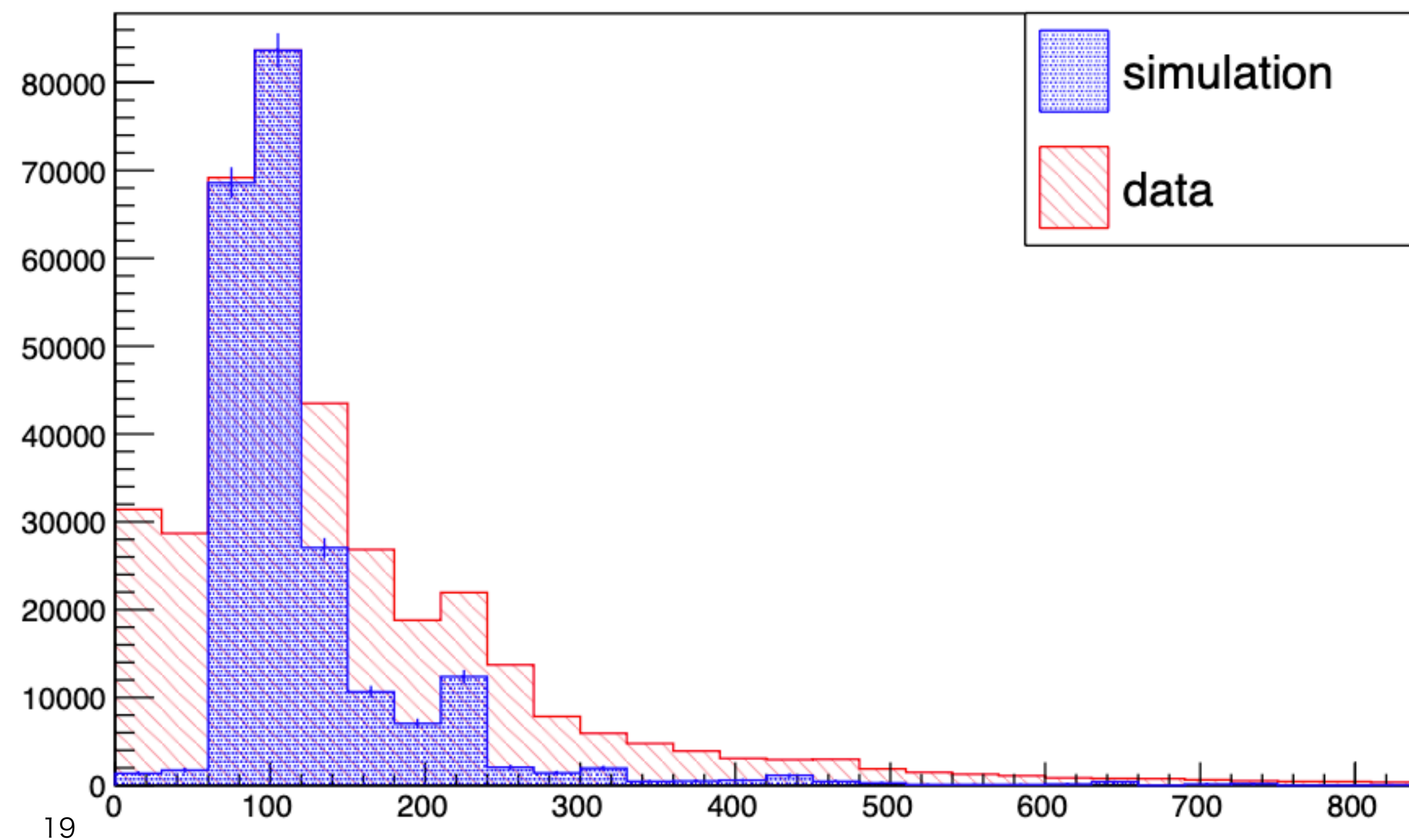
- 0付近のピーク：ノイズ
- 中間のピーク：シグナル
- 210付近のピーク：ノイズ or ADC設定値の影響によるもの



# データ選定

## ④ ADC Cut

- 図：  $85 < \theta < 95$  の場合の分布。データとシミュレーションの分布の形状を比較している
  - シミュレーションでは中間のピークと210付近のピークは見られるが、0付近のピークは見られない。
  - →データの0付近のピークはノイズ
  - →210付近のデータはノイズではない



# データ選定

## ④ ADC Cut

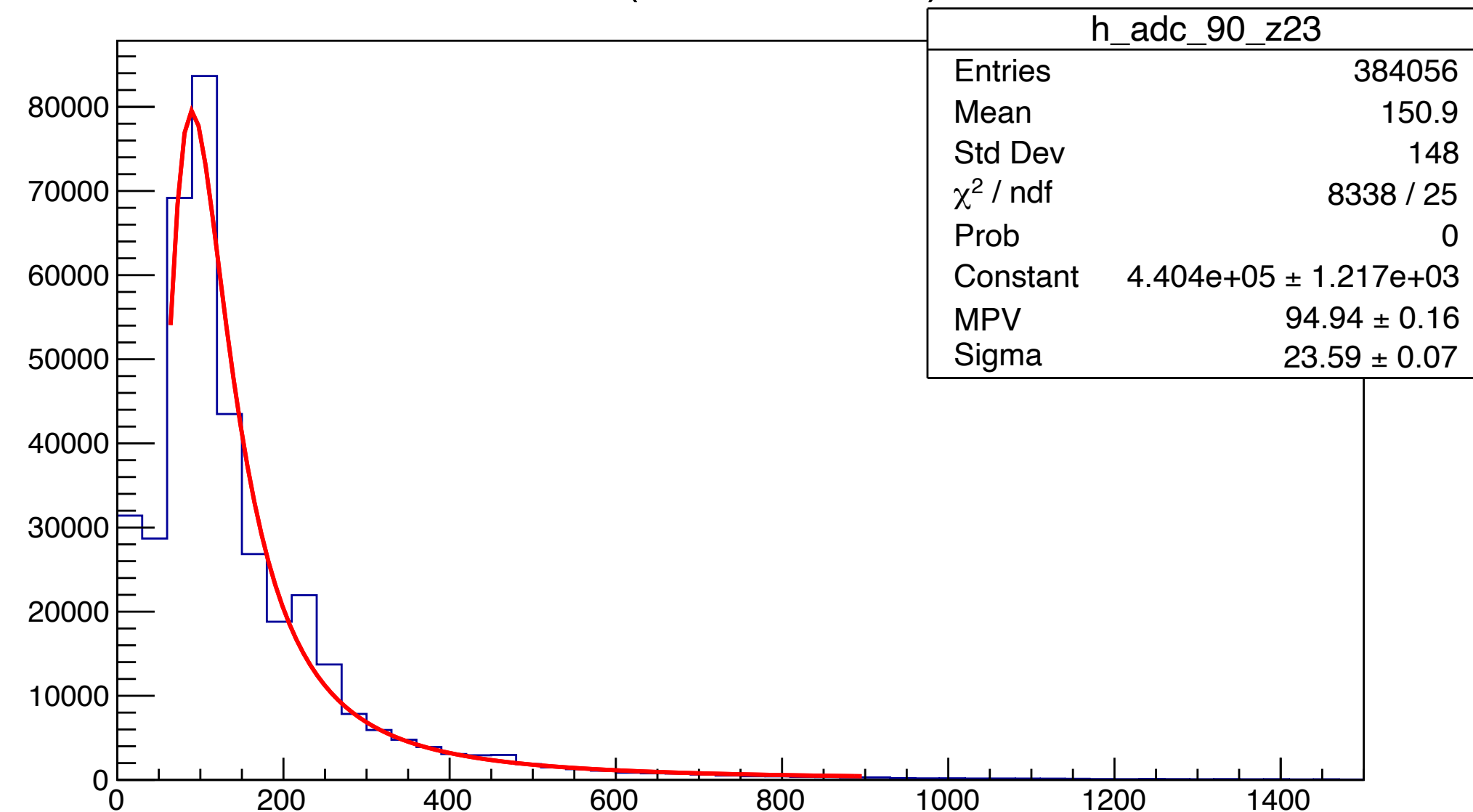
- 上図：85<θ<95の場合の分布をランダウ関数でフィットしたもの。
- 下図：フィットから得られた最確値と角度のグラフ。Bethe-Blochの式（下式）から得られたエネルギー損失の計算値と比較している。計算値はθ~90のときに一致するようにスケールしている。

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

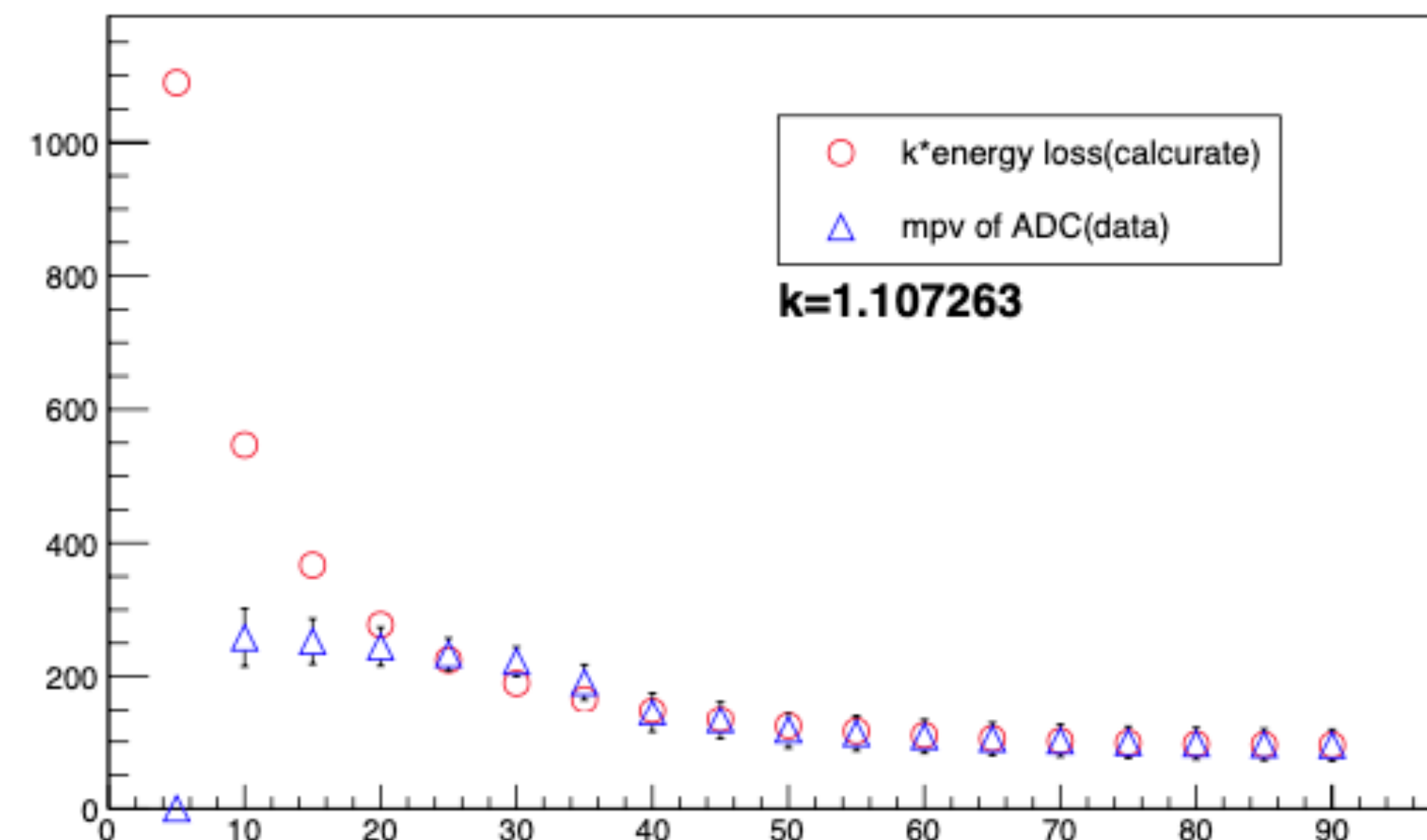
- 最確値が計算値とほぼ一致している

→ 中間のピークはシグナル

adc (MBD, z:-23~23)



ADC/energy loss vs theta



# データ選定

## ④ ADC Cut

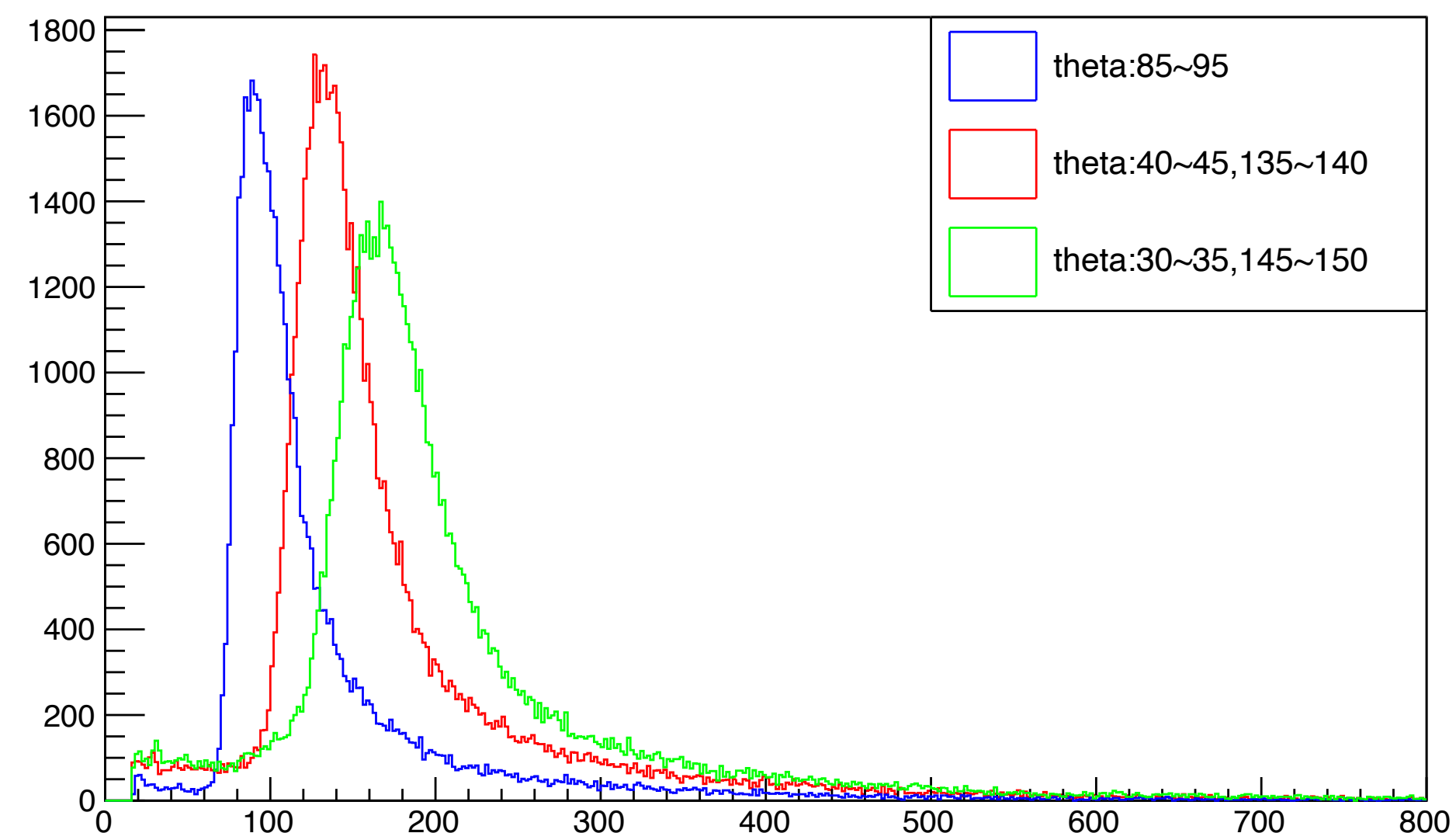
- 上図：閾値を設定せずにシミュレートした角度毎のADC分布

- 210付近のピークは見られない

- 下図：上図をフィットしたときの最確値と角度のグラフ。

- 210のピークの影響がないため水平に近い角度でも一致した。

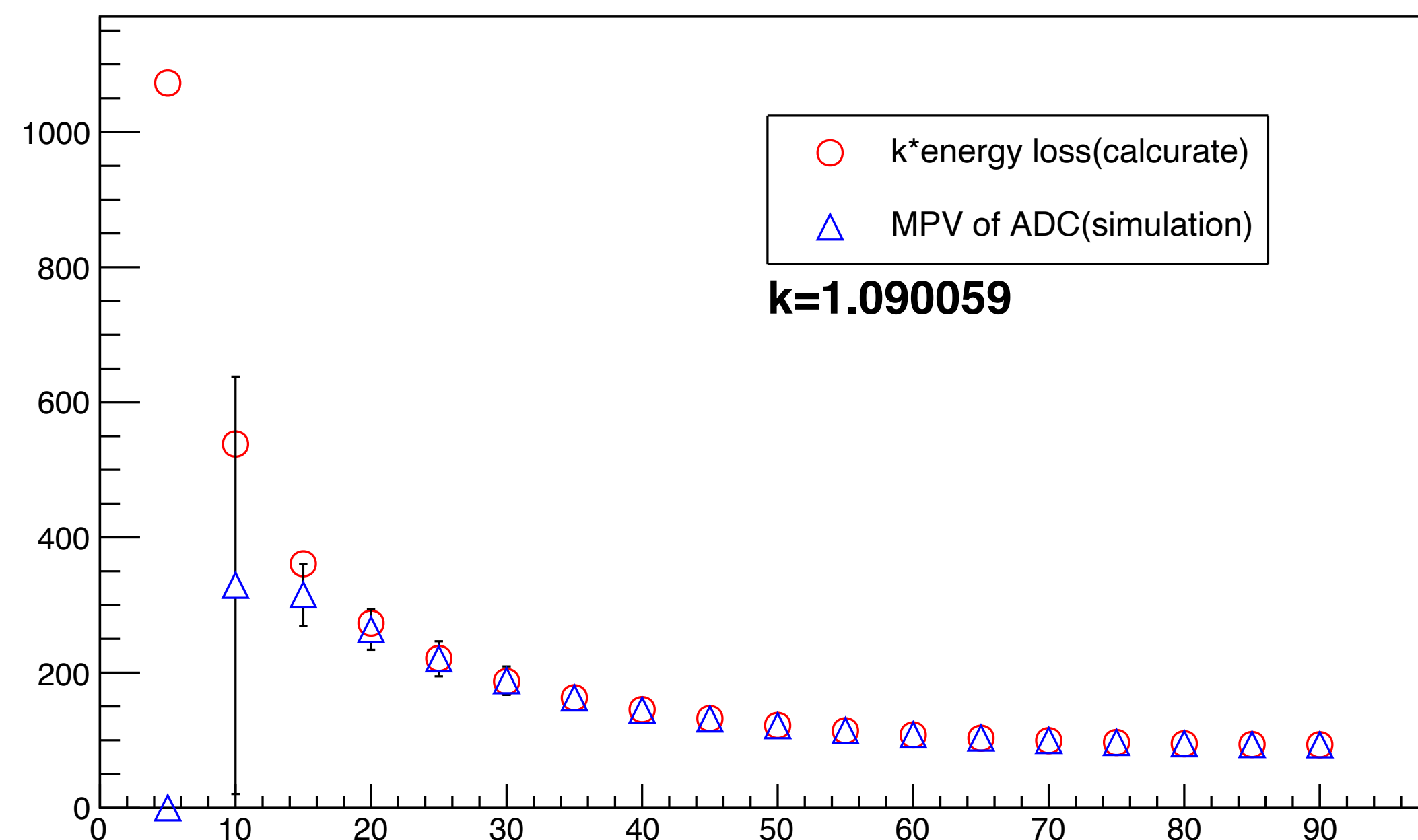
- 210付近のピークはDAC設定によるもの



## DAC設定値

ADC	DAC
0	15~30
1	30~60
2	60~90
3	90~120
4	120~150
5	150~180
6	180~210
7	210~

ADC/energy loss vs theta



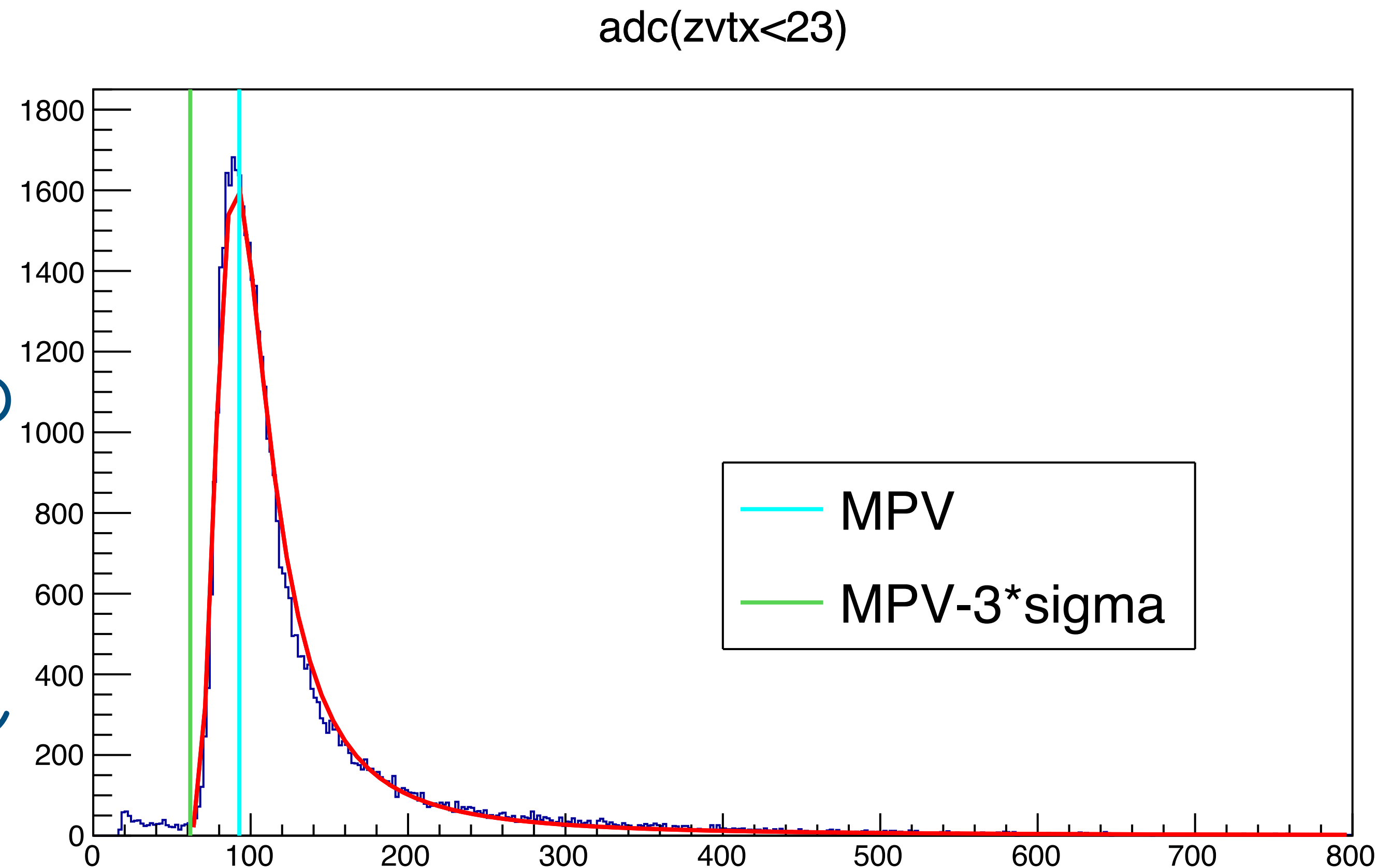
# データ選定

## ④ ADC Cut

- ADC分布の
  - 0付近のピークはノイズによるもの
    - →カット
  - 中間と210付近のピークはシグナル



- カット条件：角度毎に、最確値- $3\sigma$ 以上を使用。

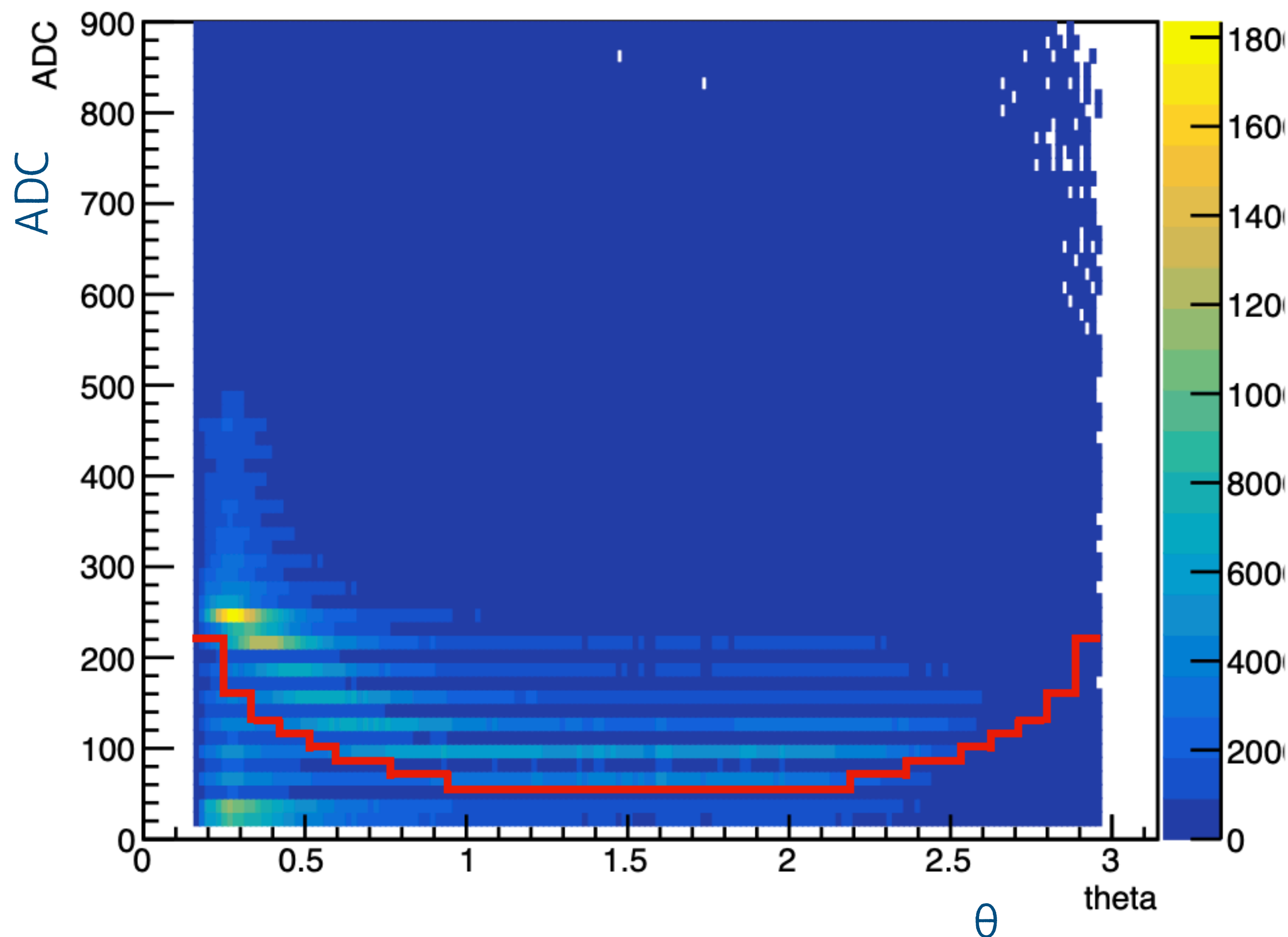


# データ選定

## ④ ADC Cut

角度毎のカット範囲

$\theta(^{\circ})$	カット範囲
55 ~ 125	60
45 ~ 55, 125 ~ 135	75
35 ~ 45, 135 ~ 145	90
30 ~ 35, 145 ~ 150	105
25 ~ 30, 150 ~ 155	120
20 ~ 25, 155 ~ 160	135
15 ~ 20, 160 ~ 165	165
0 ~ 15, 165 ~ 180	225

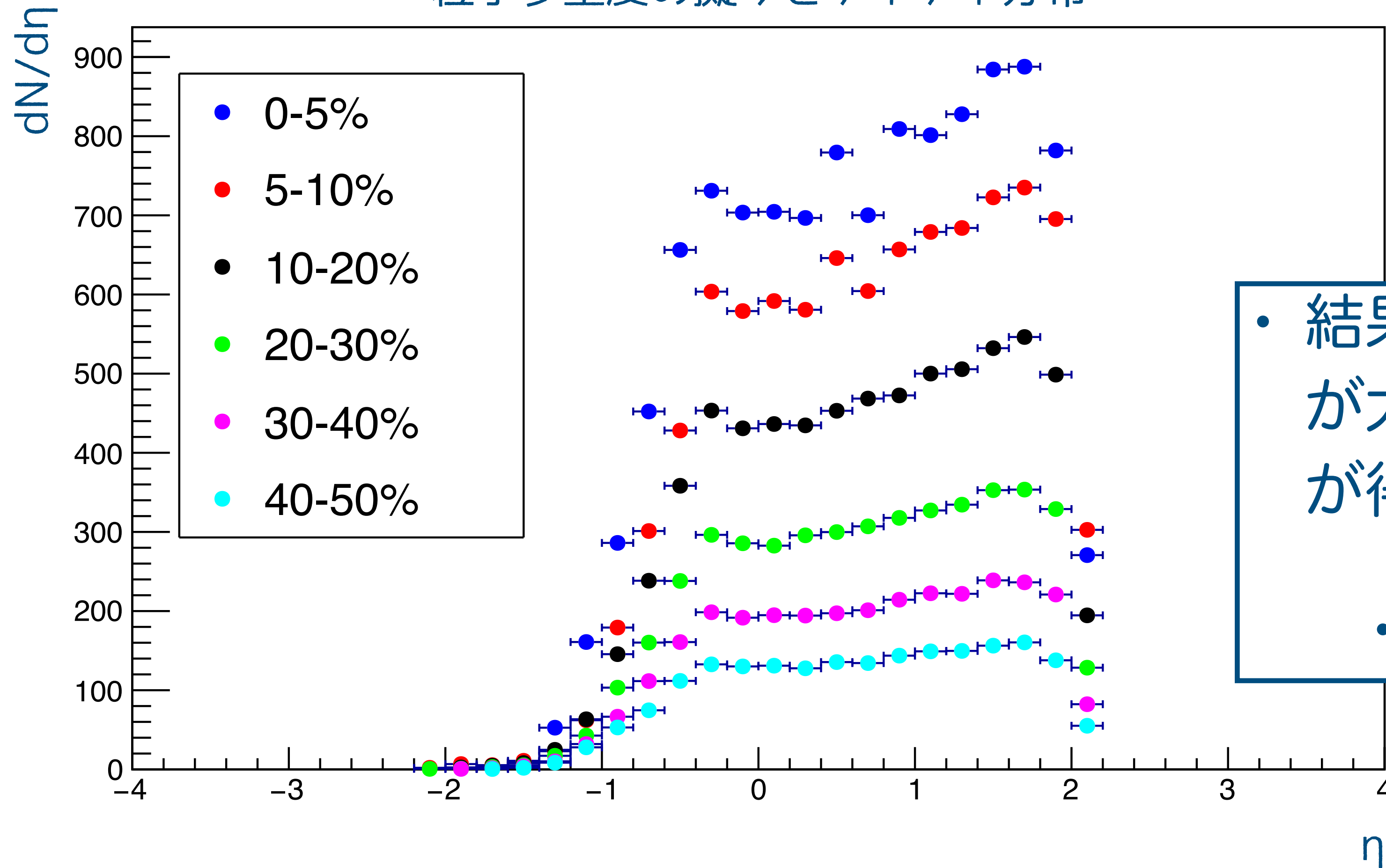


- 表：フィットを元に決定したADCのカット範囲
- 図：ADC vs  $\theta$  の2次元分布 赤線：カットの閾値

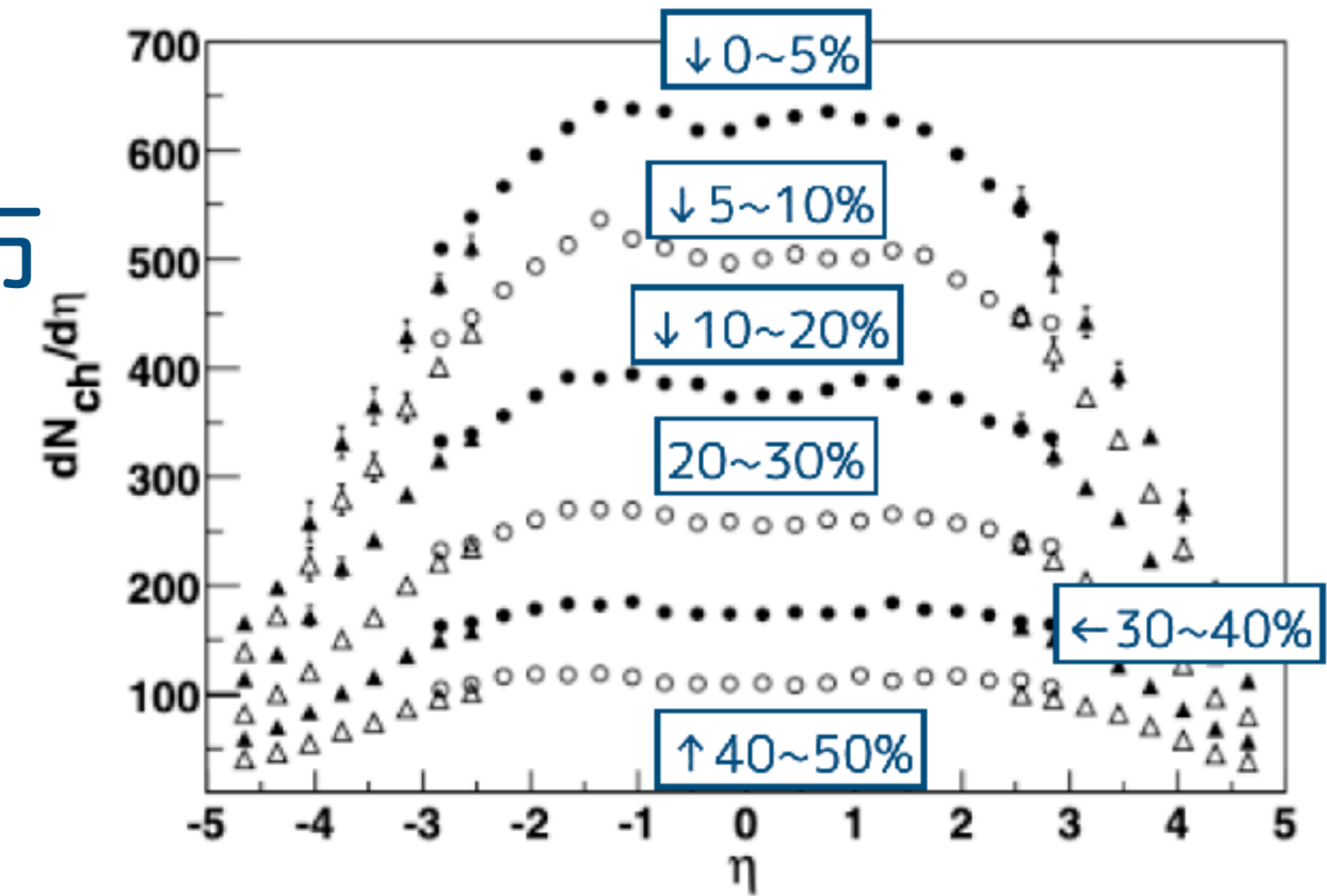
# 結果と考察

## 中心衝突度毎の粒子多重度の擬ラピディティ分布

粒子多重度の擬ラピディティ分布



BRAHMS実験の結果



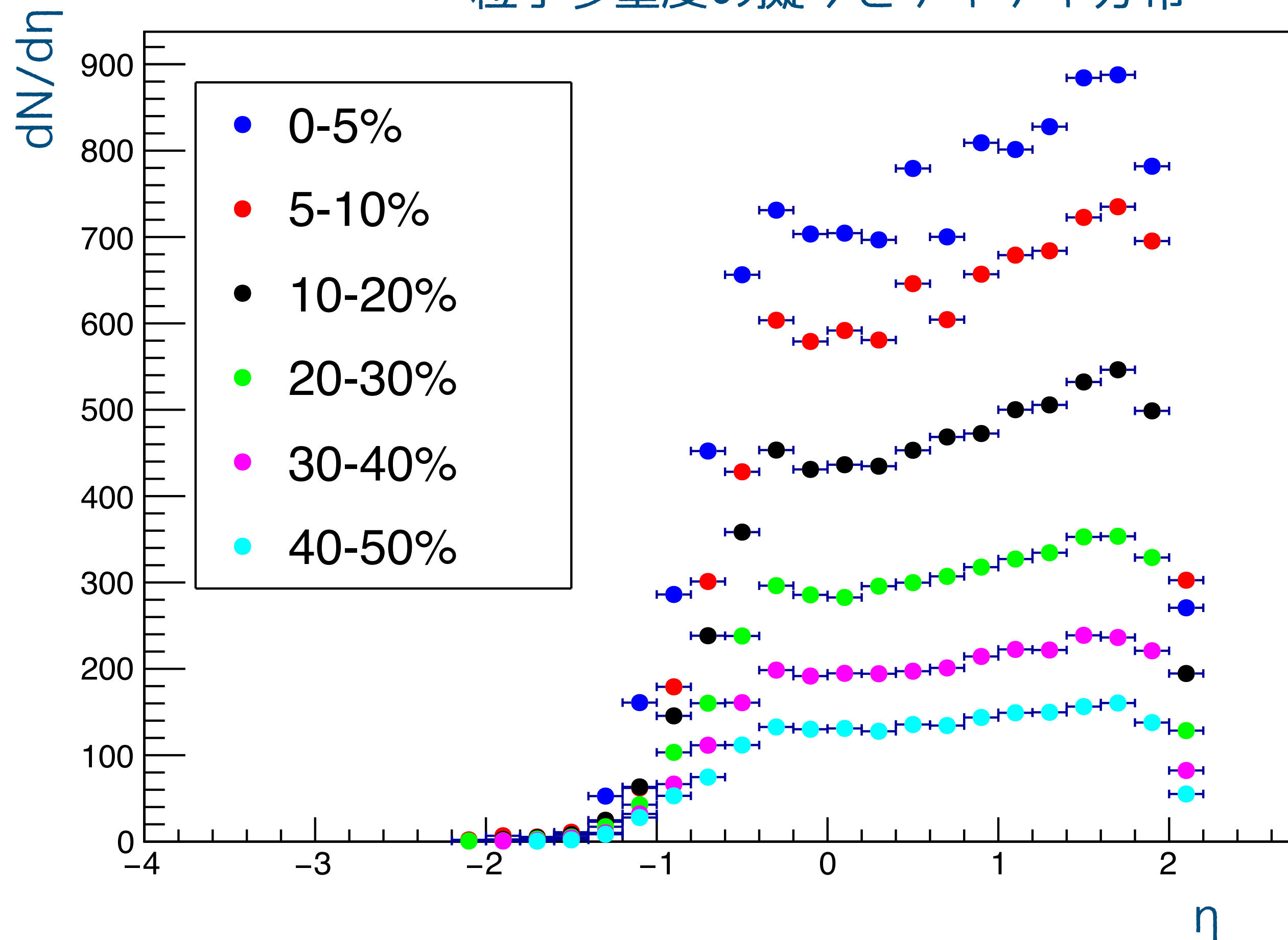
- 結果として、左右非対称・中心衝突度が大きいほど粒子多重度も大きい分布が得られた
- → 先行研究とは異なる形状



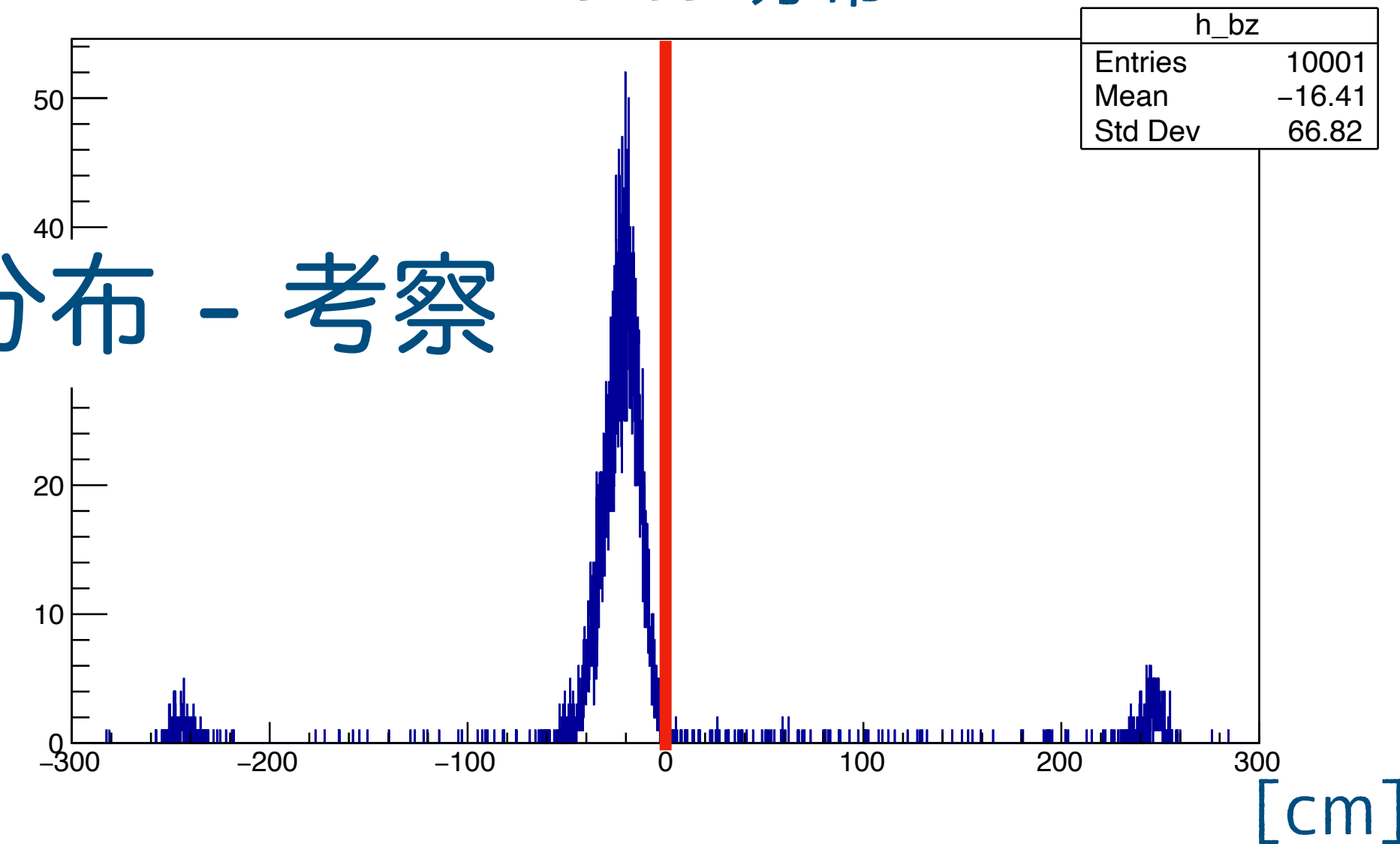
# 結果と考察

## 中心衝突度毎の粒子多重度の擬ラピディティ分布 - 考察

粒子多重度の擬ラピディティ分布



Z-vertex分布

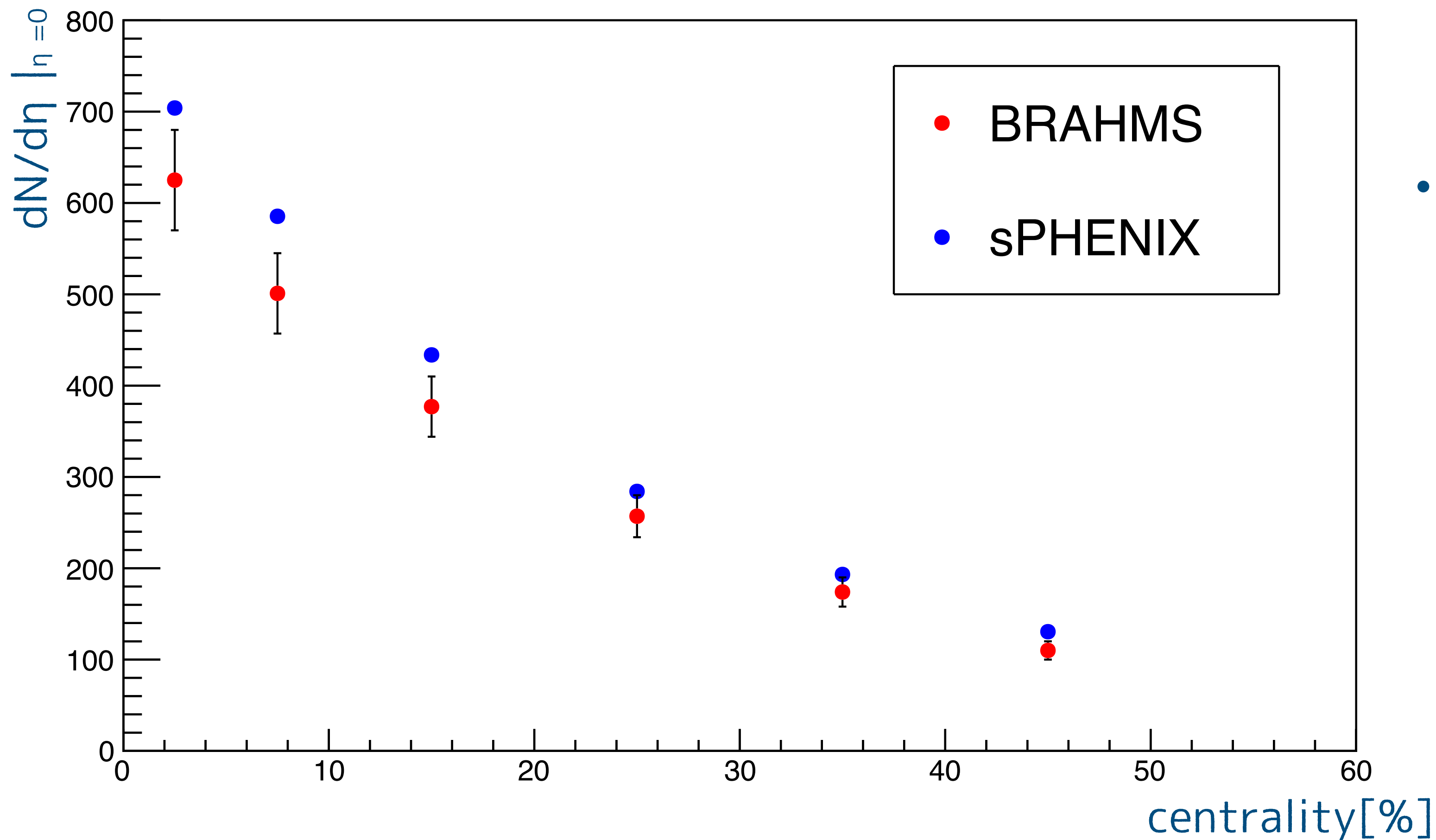


- 左右非対称になる原因
  - Z-vertexの影響によるもの
  - Z-vertex分布：約-20cmにピークがある
    - $\rightarrow \eta < 0$ でのエントリー数が減ったと考えられる。

# 結果と考察

## $\eta \sim 0$ の場合の粒子多重度と中心衝突度

$dN/d\eta|_{\eta=0}$  vs centrality

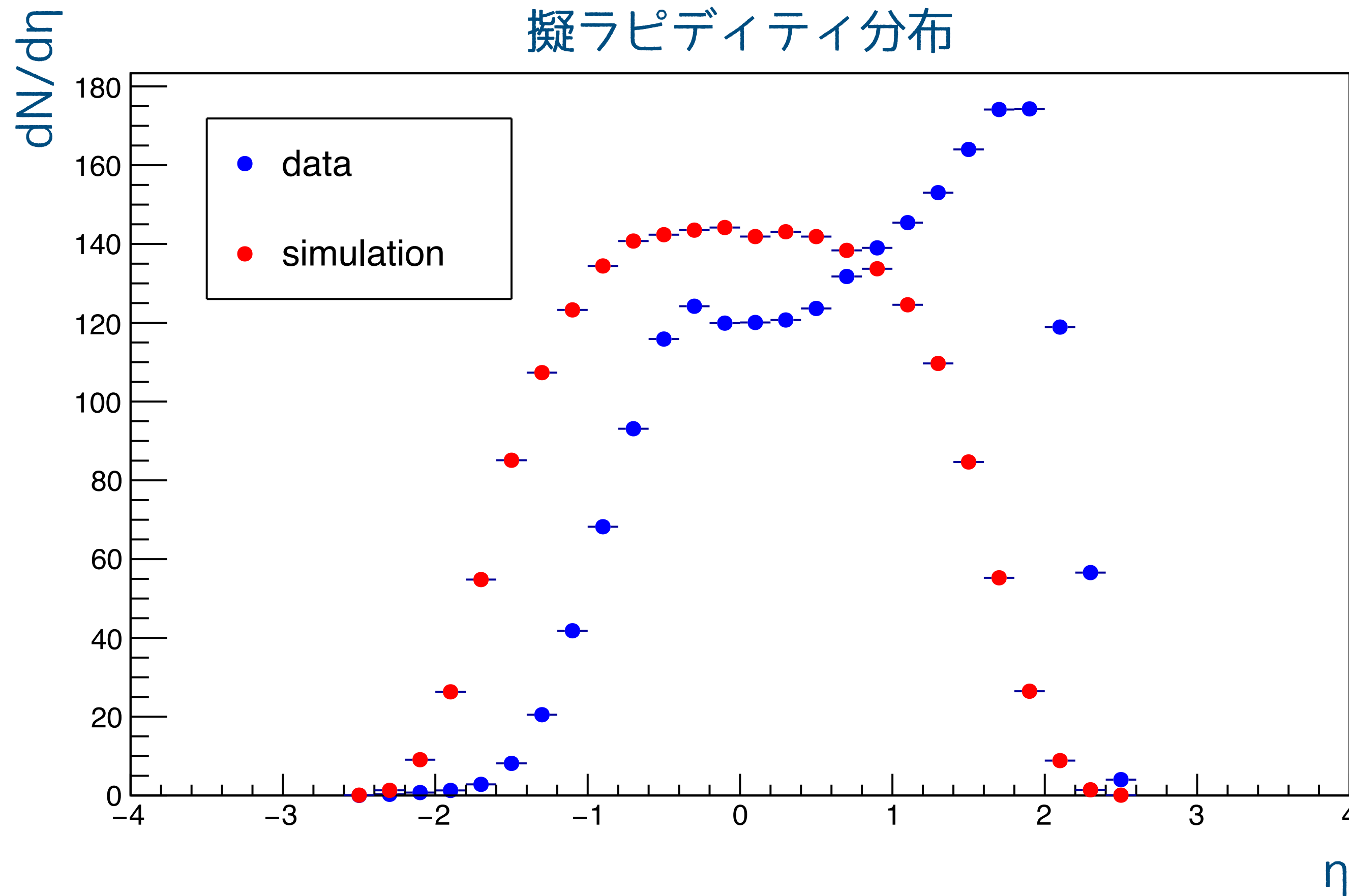


- アクセプタンスの補正は行っていないが、似た傾向が見られた。
- 本研究での誤差は統計誤差のみ。先行研究は統計誤差と系統誤差を使用しているが系統誤差が支配的。
- 今後アクセプタンスの補正、系統誤差の見積もりを行う

# 結果と考察

## データとシミュレーションの比較

データとシミュレーションでの  
擬ラピディティ分布



- シミュレーションは、ほぼ一定の左右対称な分布。データと異なる
- z-vertexの影響であると考えられる。run2024以降で測定し直す必要がある
- 現段階での課題：①シミュレーションの衝突点位置をデータと同じように調整し、比較する。②Z-vertex位置によってアクセプタンスの補正で調整し、比較する。

# まとめ・今後の課題

- sPHENIX実験で初年度に測定された磁場なしの $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  の Au+Au 衝突データを用いてADCに対するカット条件を決定し、粒子多重度について解析した。
- 放出角度  $\theta$  毎にADC分布について考察した
  - →どの角度でも0付近に見られたピークはノイズであると考えられ、それに対するカット条件を決定した。
- 結果として、粒子多重度の擬ラピディティ分布では、左右非改称な分布が得られた。
  - →Z-vertexが約-20cm偏っていることにより、 $\eta$ が0未満の範囲での測定が正しくできていないと考えられる。
  - →今後、系統誤差の検討、アクセプタンスの補正、シミュレーションのZ-vertexの調整を行う。