

# RHIC-sPHENIX実験に おけるジェット検出手法 の開発と評価

高エネルギー物理学研究室

渡部舞

2023年度修士論文審査会

2024年2月15日

# 目次

## 研究背景

- ・ QGP
- ・ RHIC加速器
- ・ ジェット
- ・ 研究目的

## 解析方法

- ・ ジェット再構成アルゴリズム
- ・ バックグラウンドのカット
- ・ 解析のセットアップ
- ・ ジェット再構成の精度
- ・ マッチジェットの決定
- ・ ジェットの $p_T$ の下限値と efficiency、purityの関係

## 結果

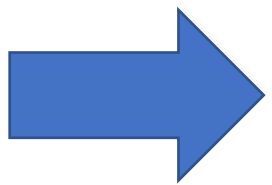
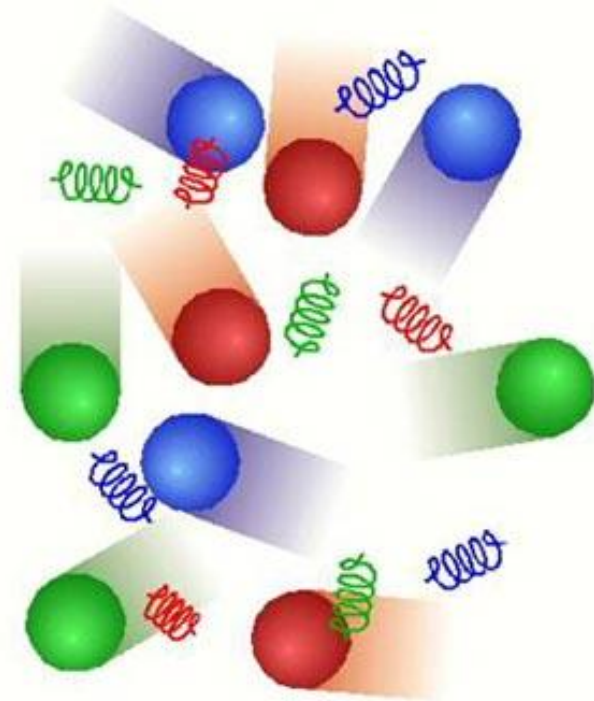
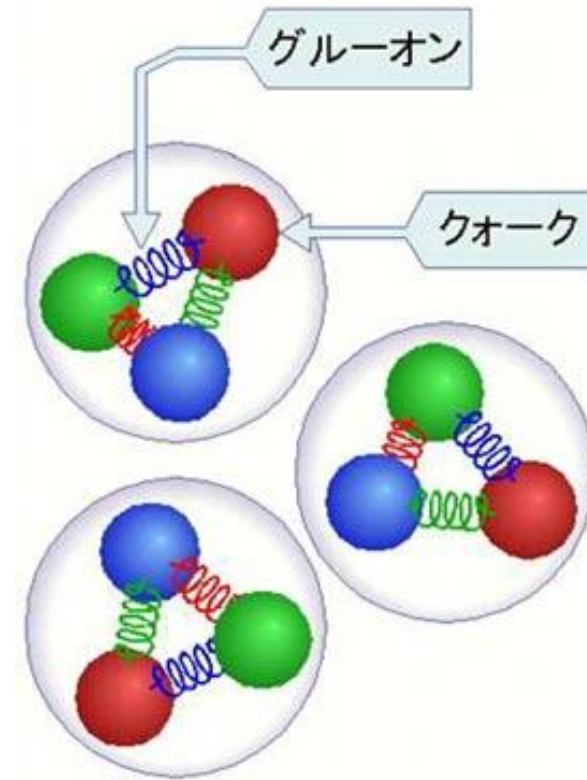
## 考察と今後の課題

## まとめ

# QGP(クォーク・グルーオン・プラズマ)

クォークとグルーオンが核子の閉じ込めを破った超高温物質

宇宙初期に存在したと考えられている



QGPの性質を調べることで、宇宙初期の頃を知ることができる

# RHIC

米国ブルックヘブン国立研究所に建設された加速器

陽子や金原子核など様々な粒子をほぼ光速まで加速させることができる  
(金原子核は重心系エネルギー200GeVまで加速可能)

世界初の衝突型重イオン加速器



QGPを実験で再現する

## sPHENIX実験

RHIC加速器を用いた高エネルギー重イオン衝突実験の1つ

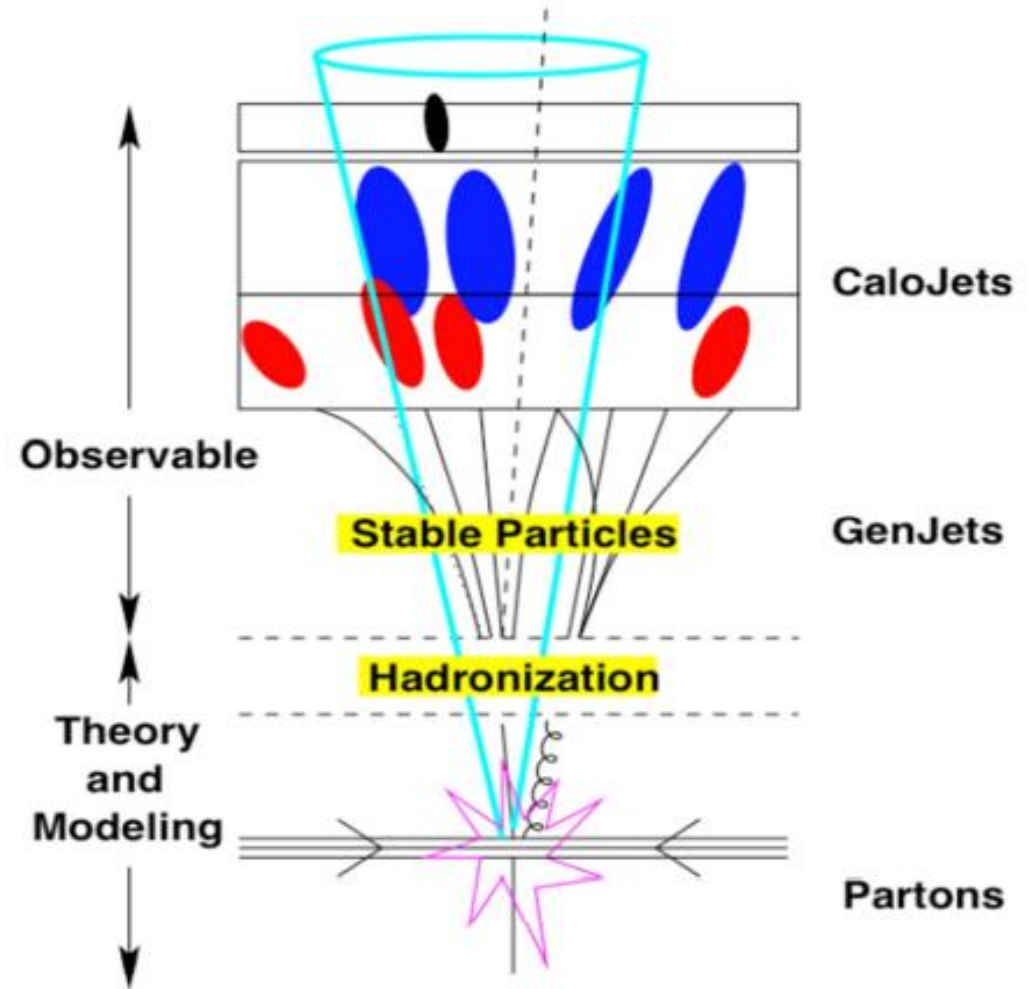
目的：QGPの性質の解明

ジェット、ジェット相関、ウプシロン粒子の測定をする

# ジェット

高エネルギー重イオン衝突では、ジェットと呼ばれる物理現象が起きることがある

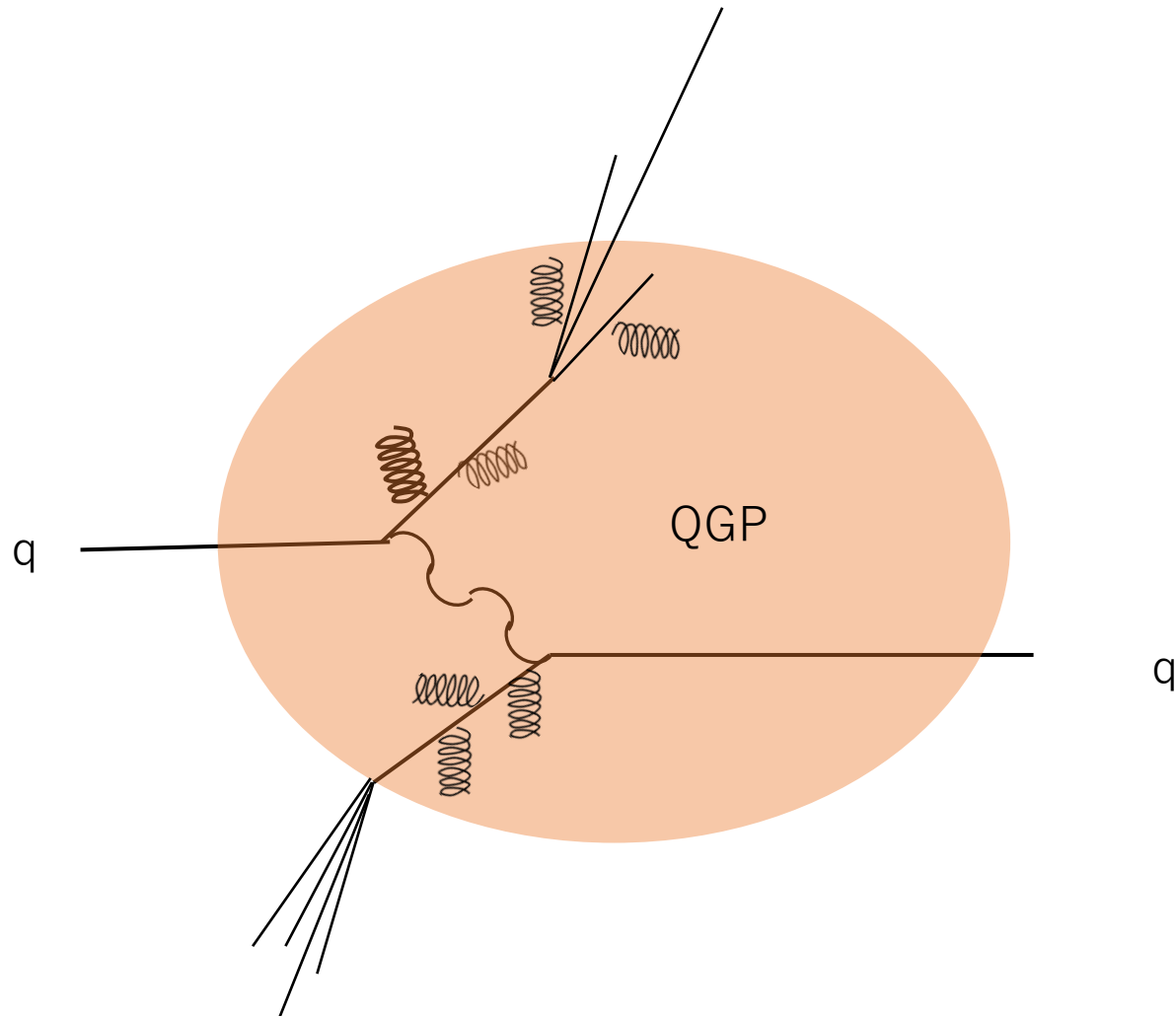
ジェット・・・衝突初期に作られた高い運動量を持つパートンが破砕してできる、同じ方向にかたまって放出される粒子群のこと



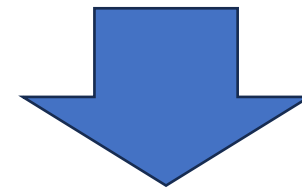
# ジェット抑制

ジェットはQGPの性質を理解するのに重要なプローブである

ジェット抑制： QGPと強く相互作用し、ジェットのエネルギー損失が起こること



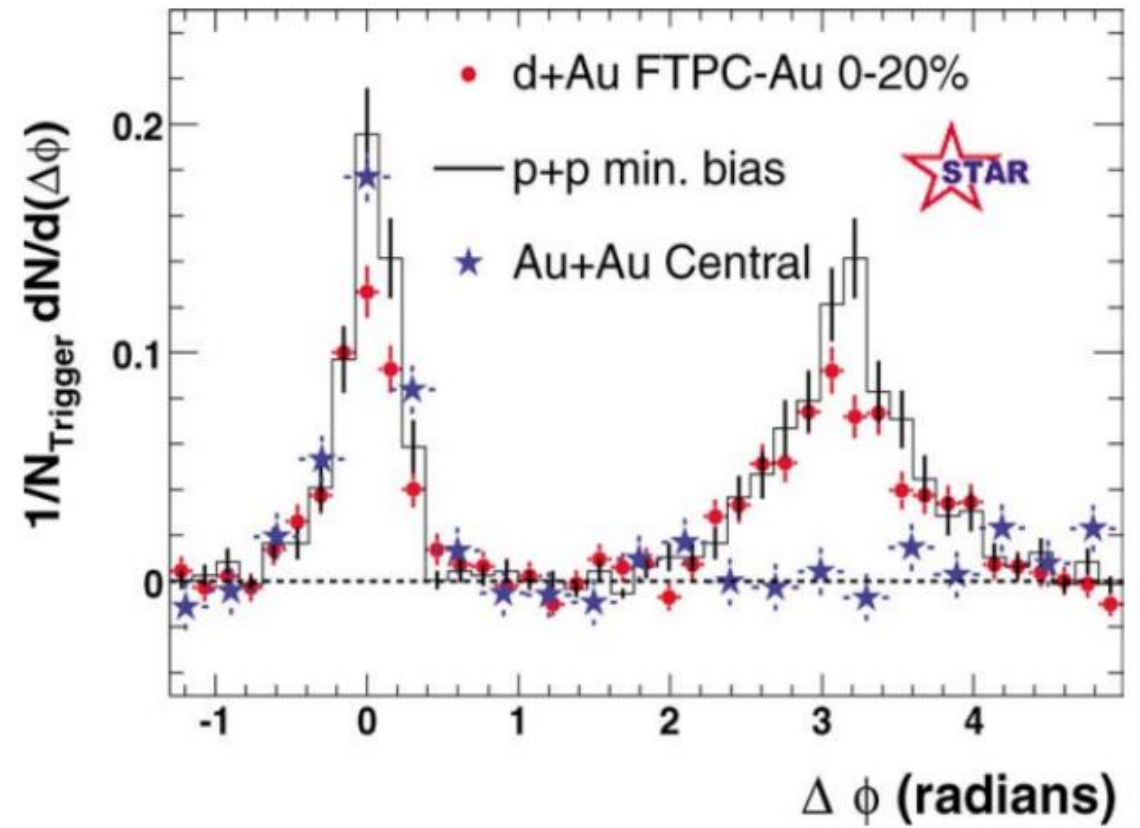
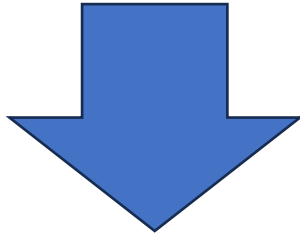
ジェット抑制が起きる



QGPの証拠

# 研究目的

同じRHICを用いたSTAR実験で  
ジェット抑制が観測されている



STAR実験で測定された2粒子相関関

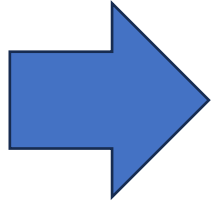
sPHENIXではジェットのエネルギー損失機構を調べる為に、粒子ではなくジェットを測定し、QGPの性質の解明に貢献したい

→衝突後の多数の粒子からジェットのみを取り出すジェットの再構成方法を開発する

# ジェット再構成アルゴリズム

ジェットを解析するためには…

衝突を起こした後の様々な粒子からジェットのみを取り出す必要がある



ジェット再構成アルゴリズム

ジェット再構成アルゴリズム

- $k_T$
- *Anti- $k_T$*  ← best
- Cambridge/Aachen
- Iterative cones(IC-PR,IC-SM)
- SIScone



# Anti- $k_T$ アルゴリズム

2 粒子間の距離 $d_{ij}$ 、 ビーム軸と検出された粒子間の運動量空間距離 $d_{iB}$

$$d_{ij} = \min\left(\frac{1}{p_{Ti}^2}, \frac{1}{p_{Tj}^2}\right) \times \frac{R_{ij}^2}{R}$$

$$d_{iB} = \frac{1}{p_{Ti}^2}$$

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

$\eta$  : 擬ラピディティ

$\phi$  : 角度

$R_{ij}^2 = (\eta_i - \eta_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$  は 2 粒子間の $(\eta-\phi)$ 空間距離、 $R$ はジェットの最終の大きさを決めるパラメーター

最小の $\{d_{ij}, d_{iB}\}$ の組み合わせを見つける

・ もし $d_{ij}$ が最小なら粒子 $i$ と $j$ を粒子のリストから取り除き、四次元ベクトルを合計することで1つの粒子にする( $p_T$ が一番大きい粒子)

・ もし $d_{iB}$ が最小なら $i$ をジェットとし、粒子のリストから取り除く

・ 全ての粒子がジェット軸間の距離 $R_{ij}$ が $R$ より大きいjetの一部になる

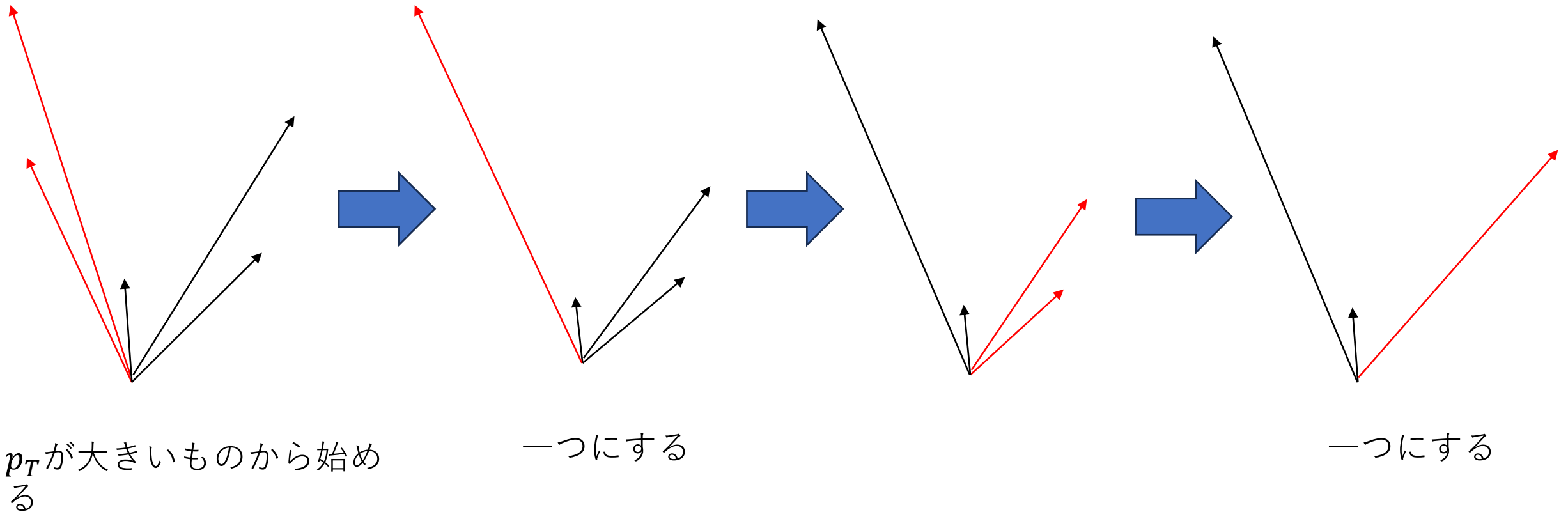
or

・ 欲しい量のジェットが見つかる

繰り返す

## Anti- $K_T$ アルゴリズム

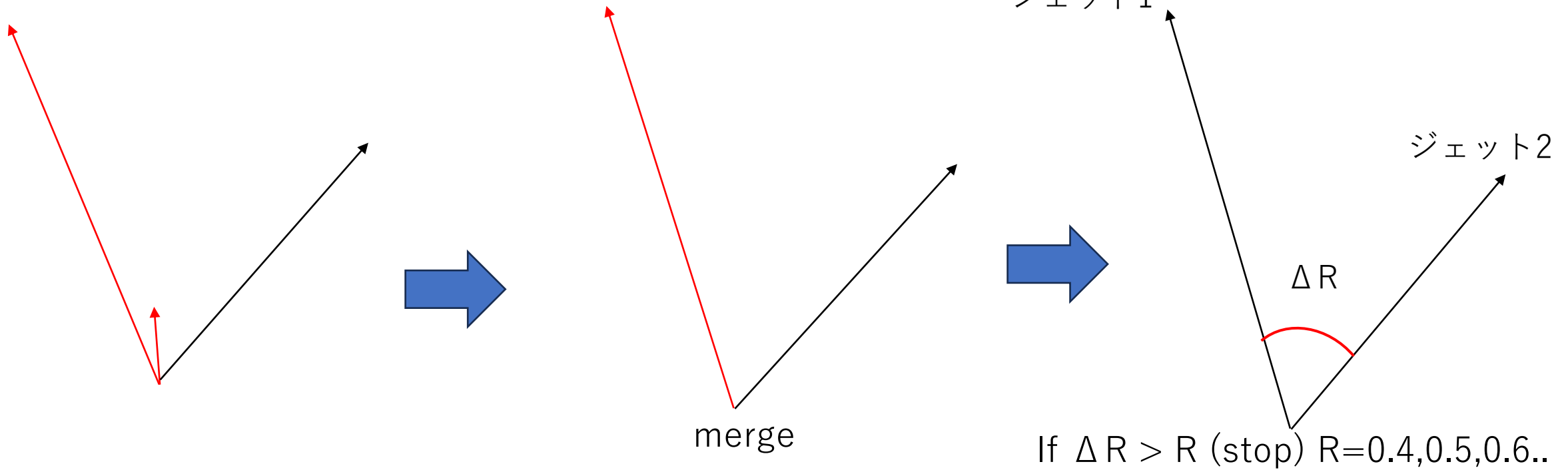
- ①
- もし  $d_{ij}$  が最小なら粒子  $i$  と  $j$  を粒子のリストから取り除き、四次元ベクトルを合計することで1つの粒子にする ( $p_T$  が大きい粒子から)
  - もし  $d_{iB}$  が最小なら  $i$  をジェットとし、粒子のリストから取り除く



# Anti- $K_T$ アルゴリズム

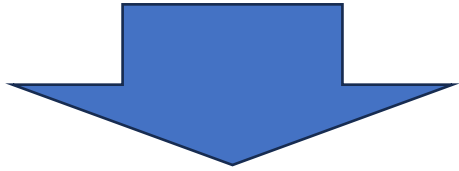
②まで①を繰り返す

- ②
- 全ての粒子がjet軸間の距離 $R_{ij}$ が $R$ より大きいjetの一部にな  
or
  - 欲しい量のジェットが見つかる

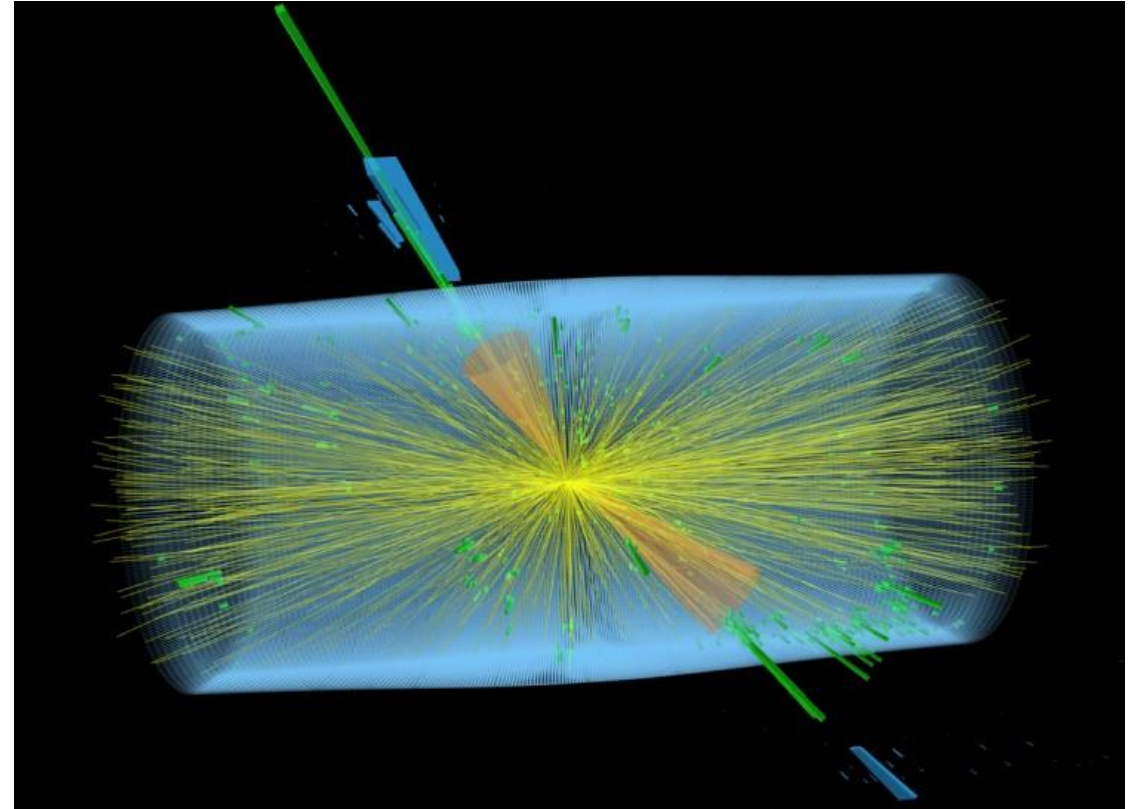


# バックグラウンドの差し引き

ジェット部分にもジェット以外の部分と同様にソフトな粒子が混じっている

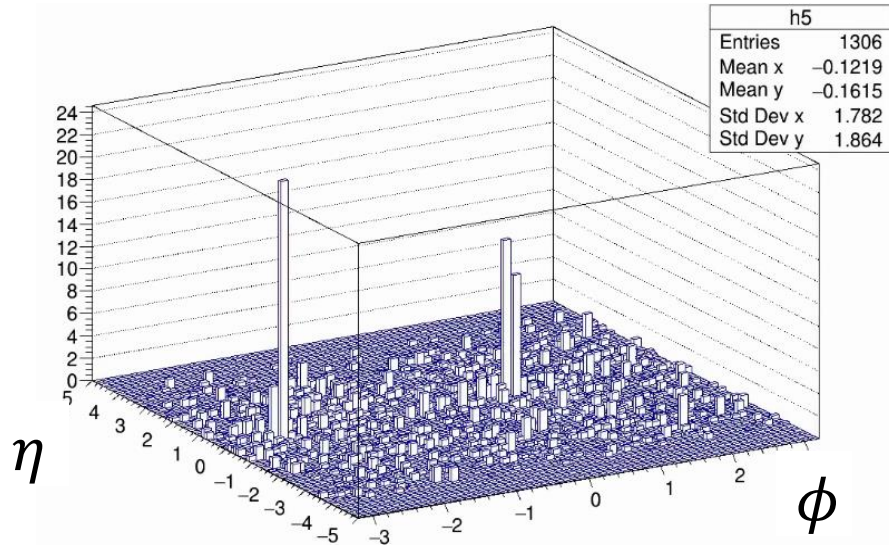


ジェット部分にも含まれるバックグラウンドを見積もり、差し引く必要がある

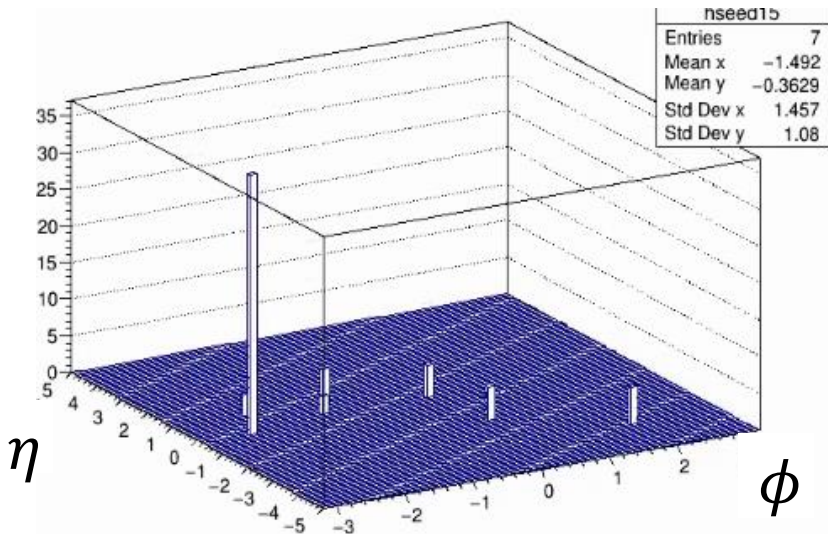


重イオン衝突で生成されたジェット

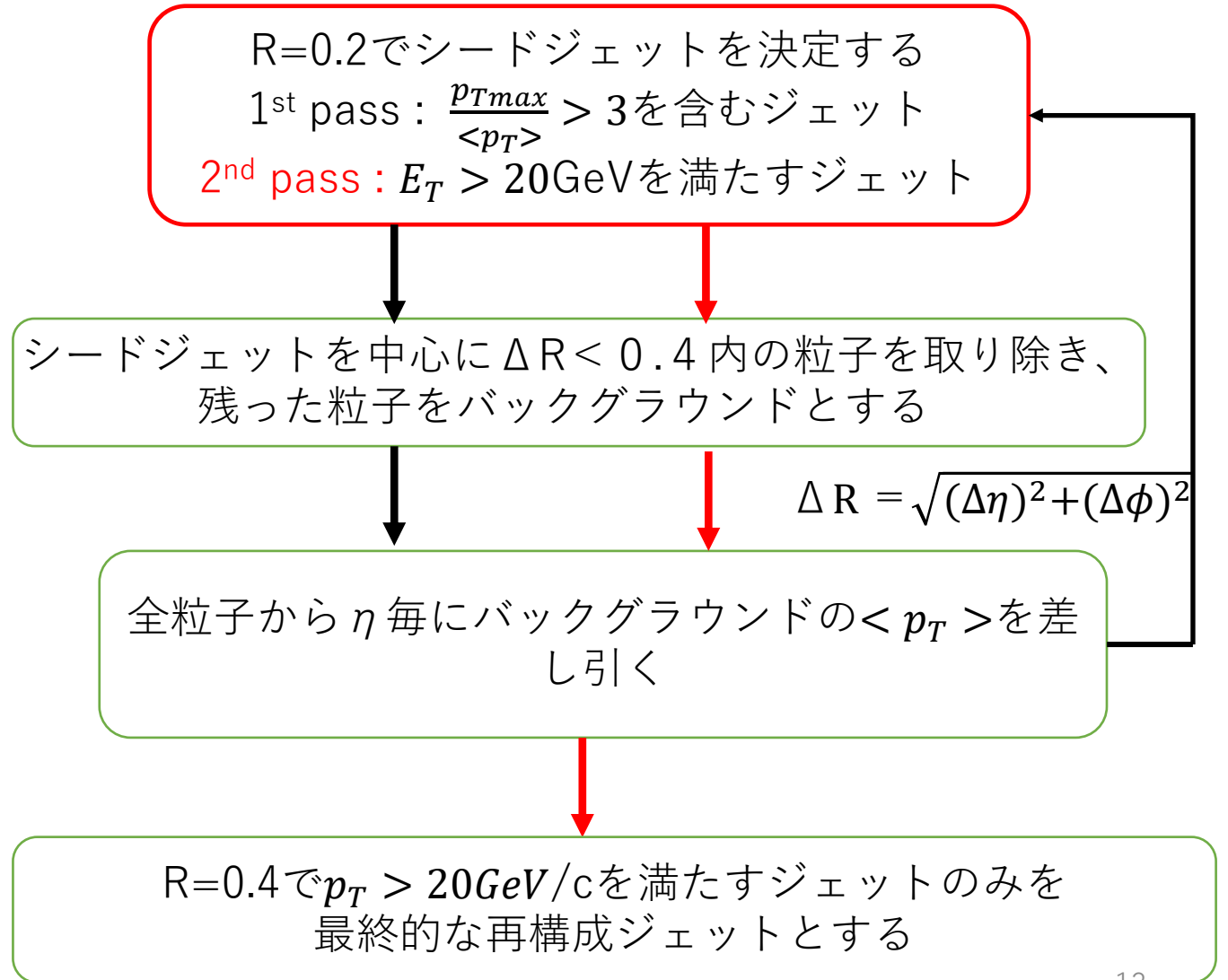
# バックグラウンドの差し引き



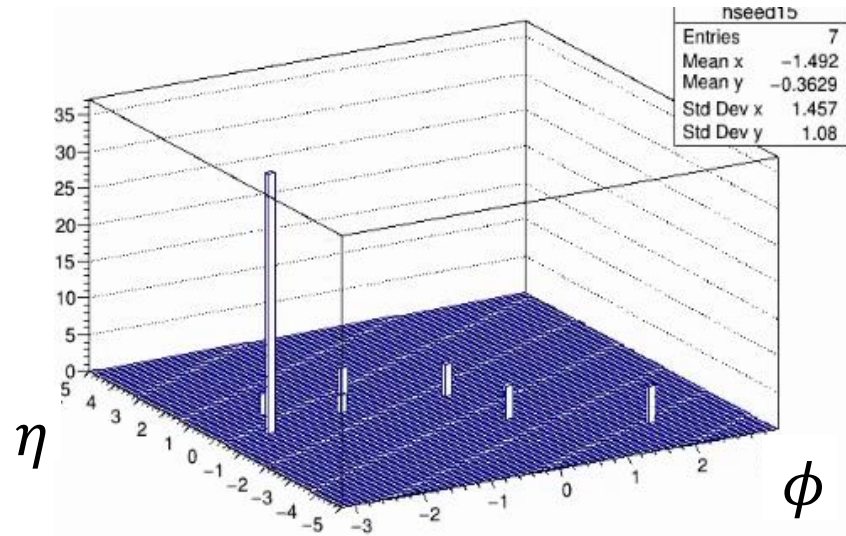
原子核衝突1回の全粒子の $\eta - \phi - p_T$ 分布



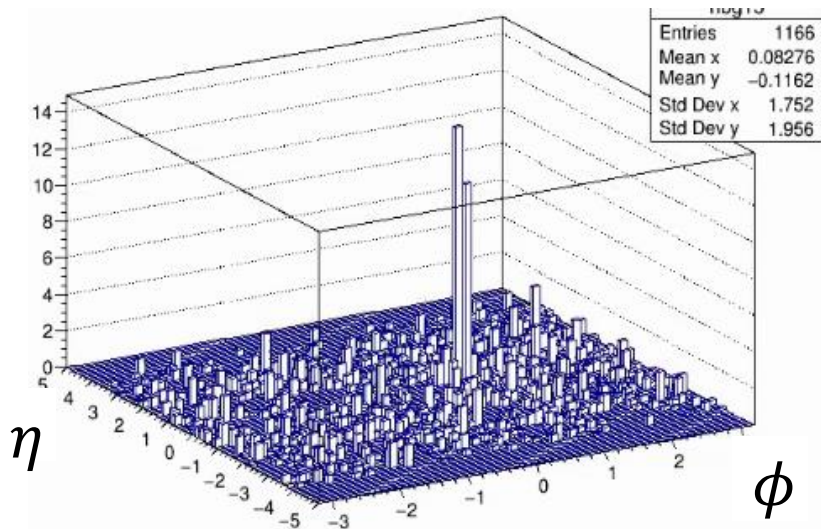
1回目のシードジェット



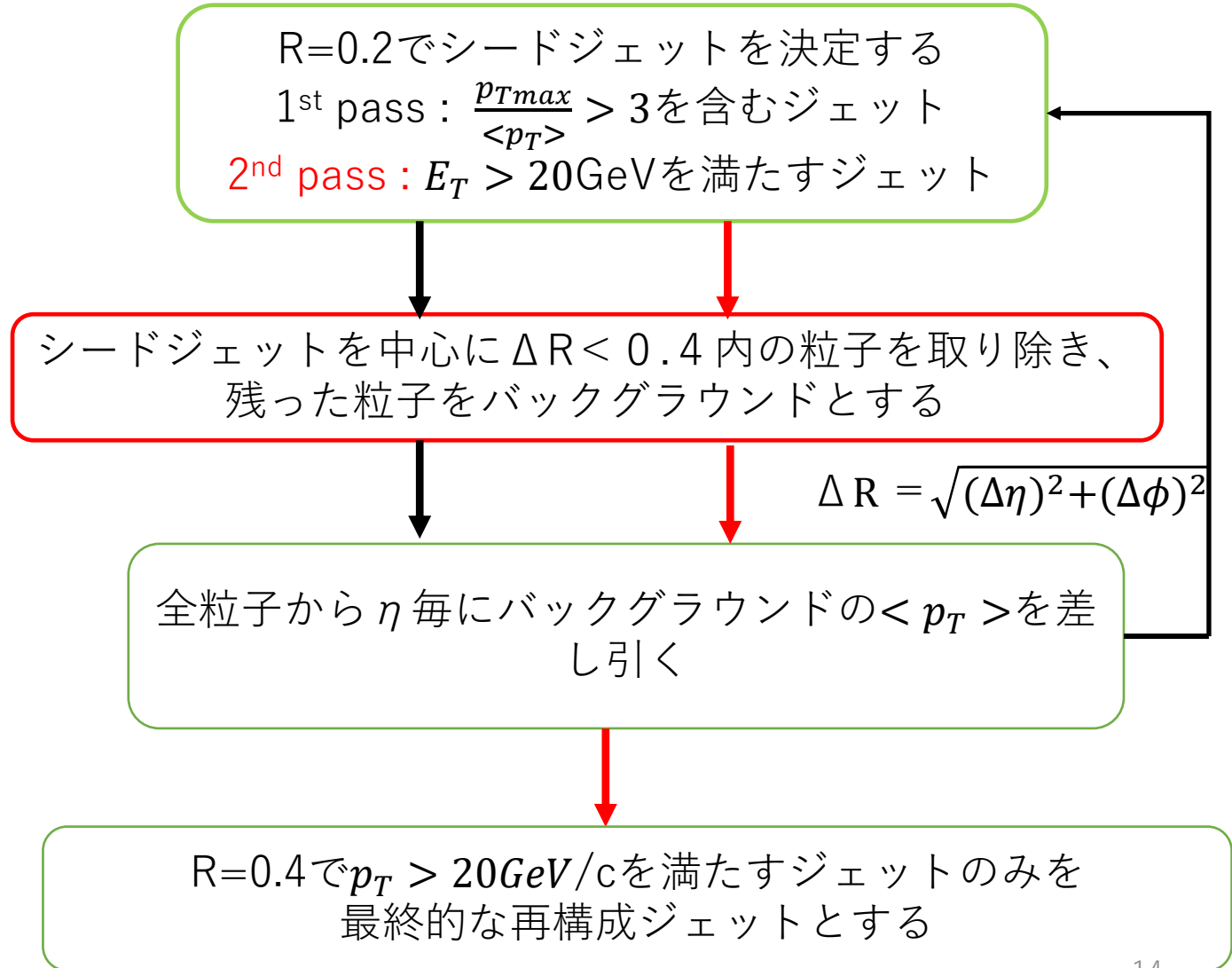
# バックグラウンドの差し引き



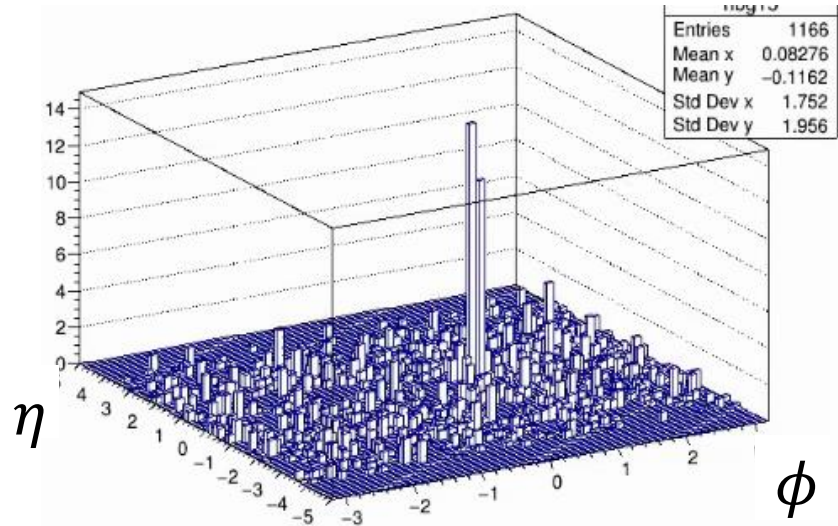
1回目のシードジェット



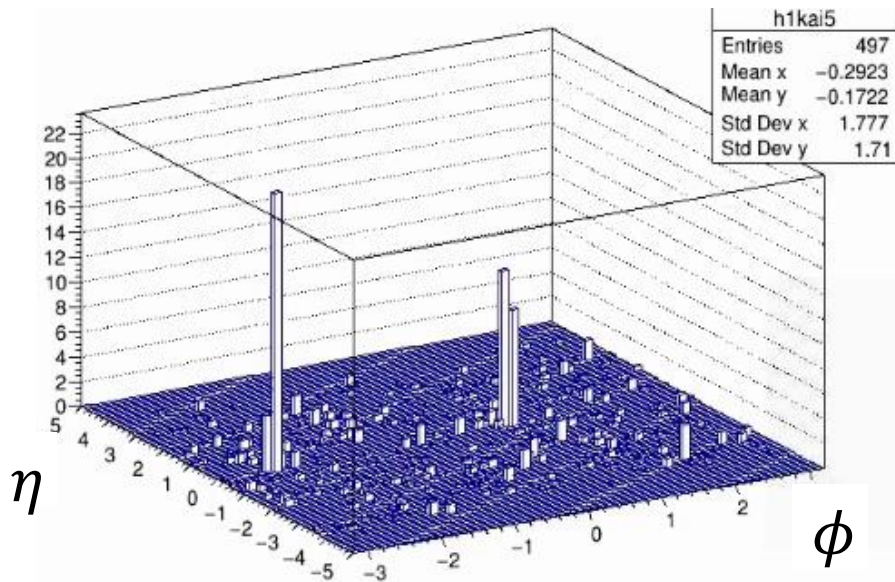
1回目のバックグラウンド



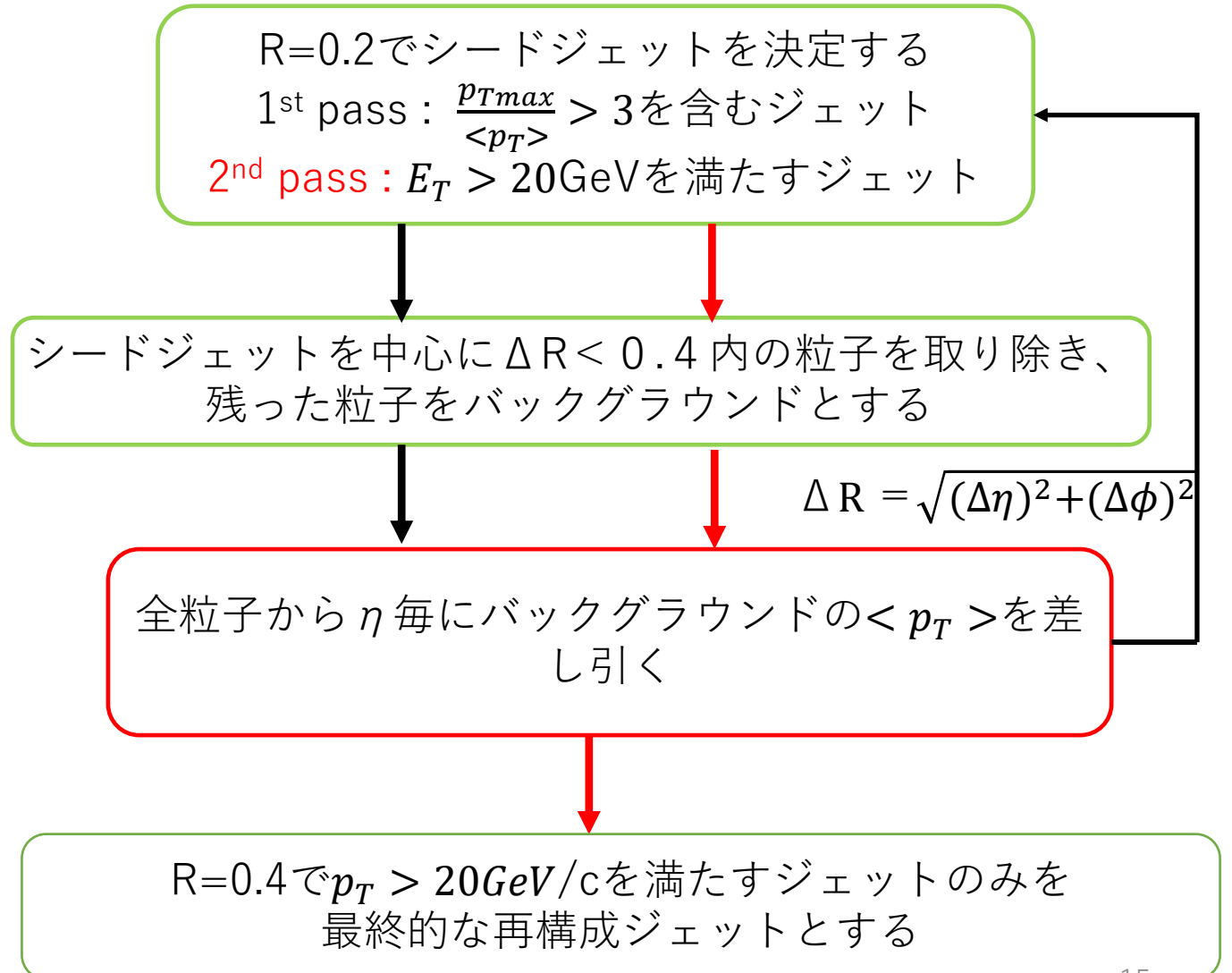
# バックグラウンドの差し引き



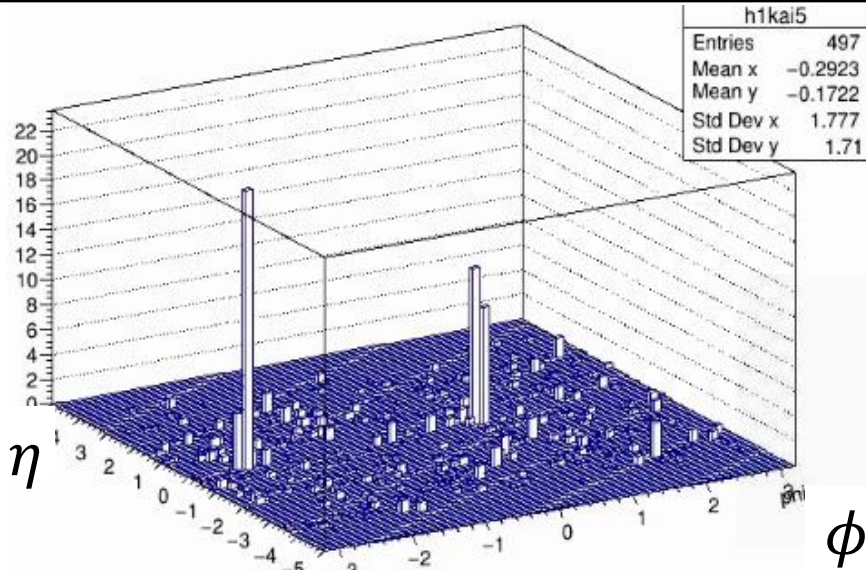
1回目のバックグラウンド



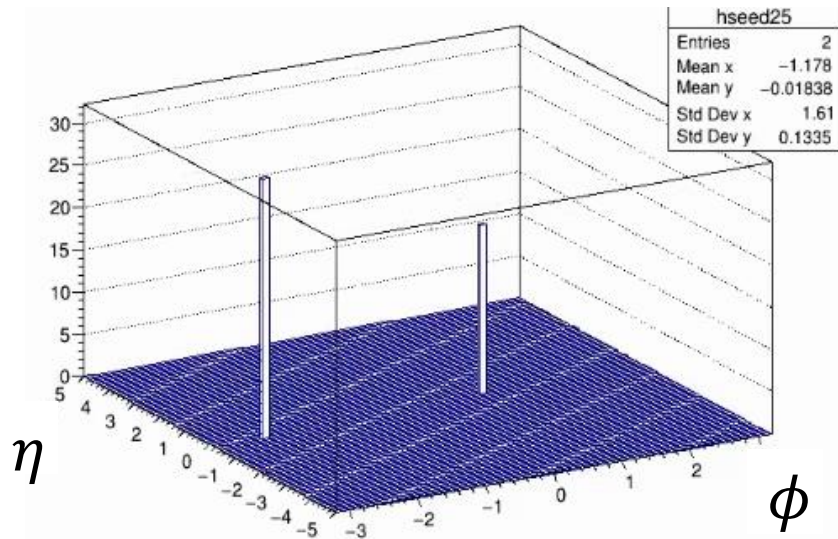
1回目のバックグラウンドを差し引いた後



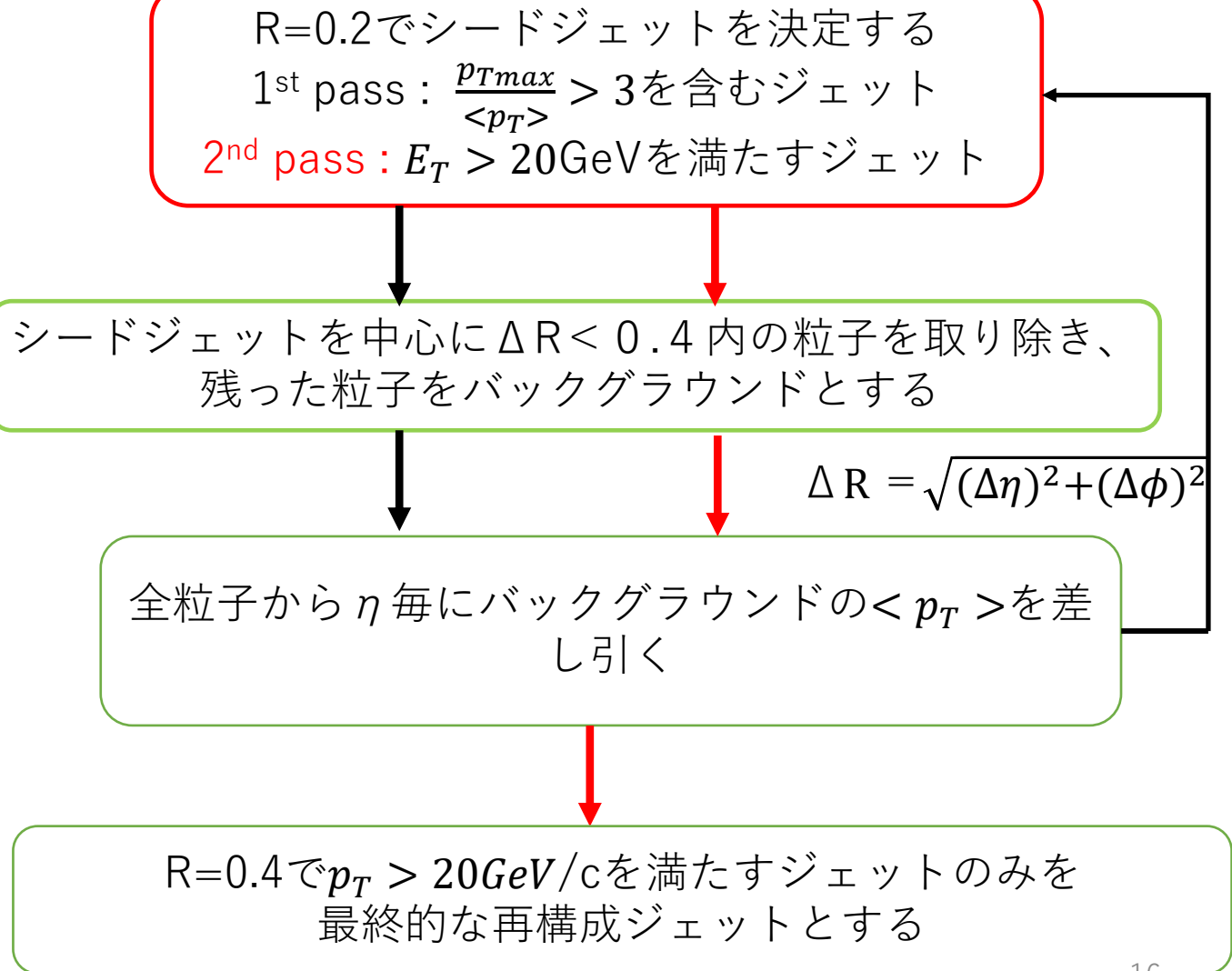
# バックグラウンドの差し引き



1回目のバックグラウンドを差し引いた後

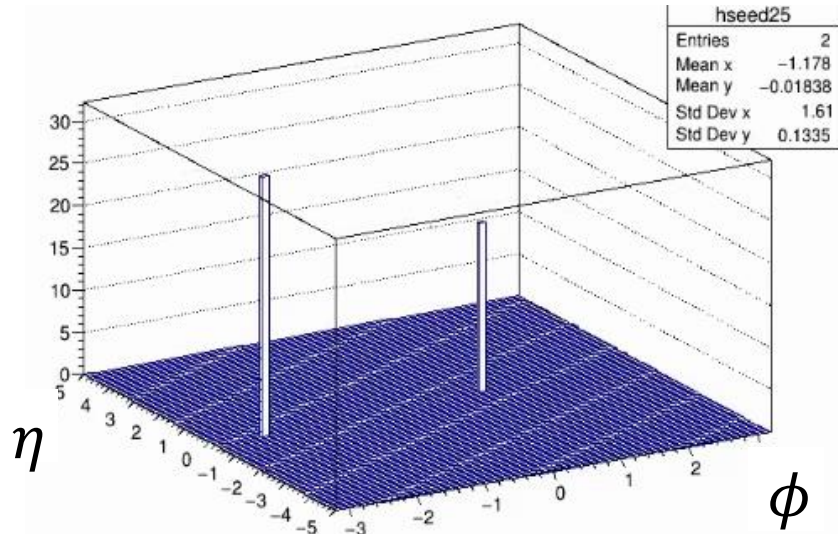


2回目のシードジェット

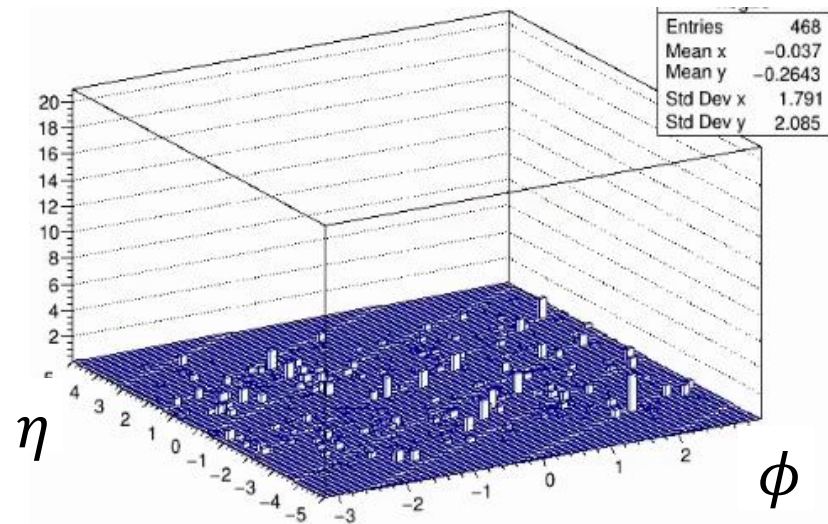




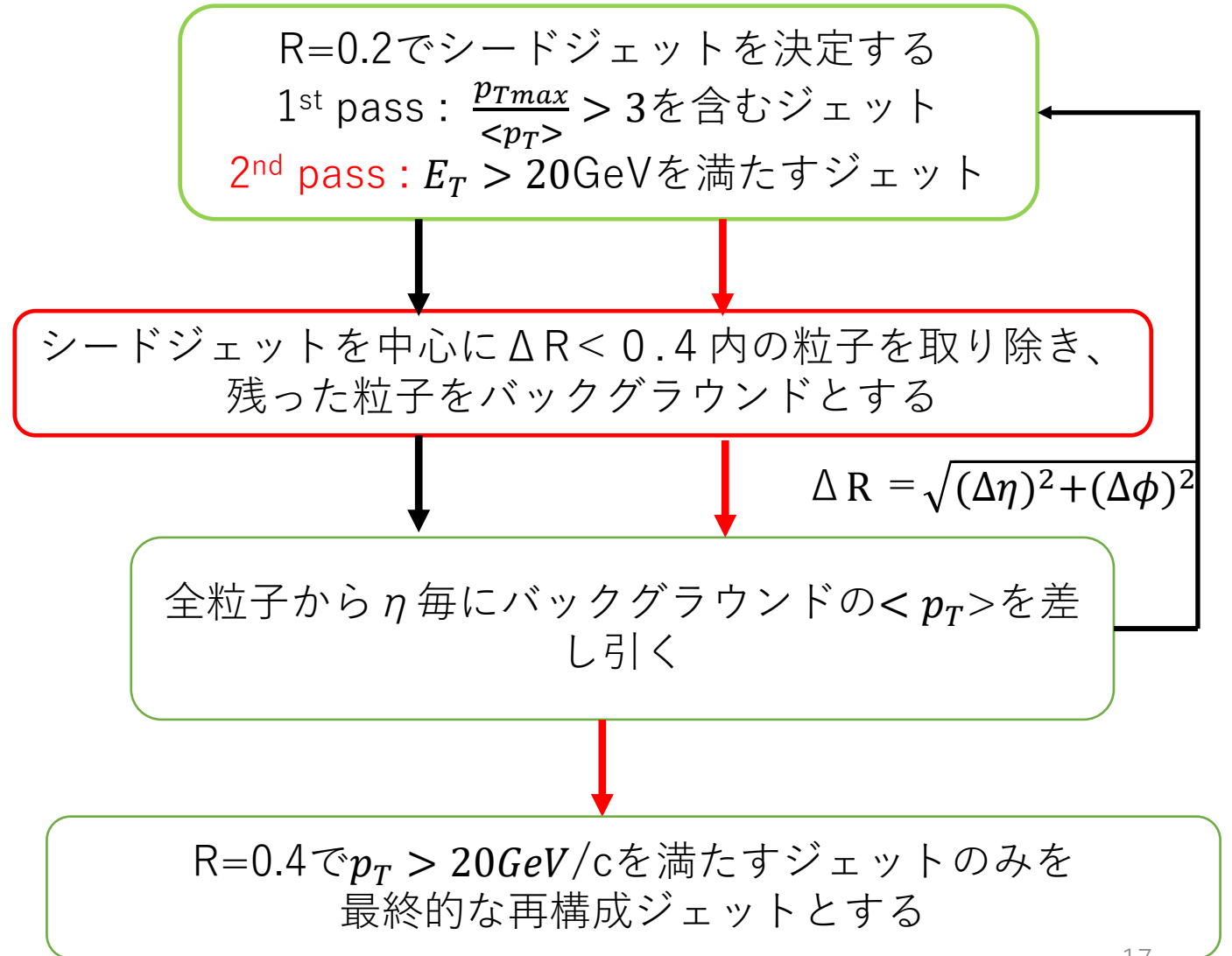
# バックグラウンドの差し引き



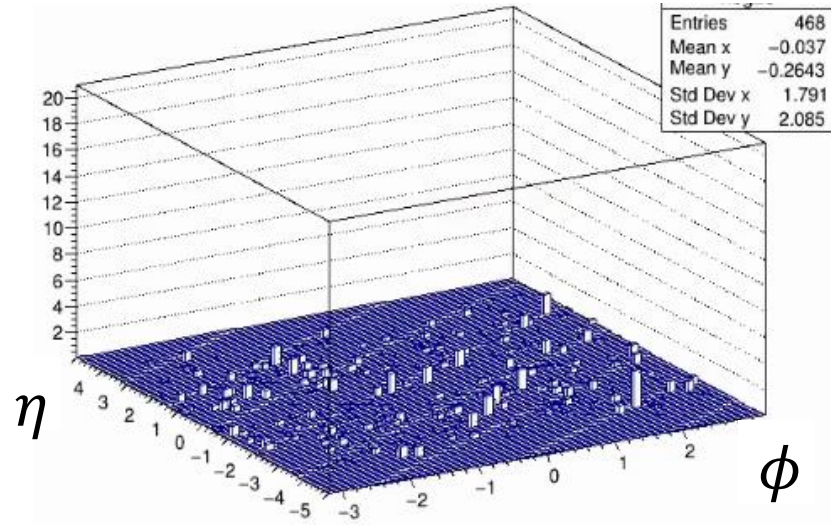
2回目のシードジェット



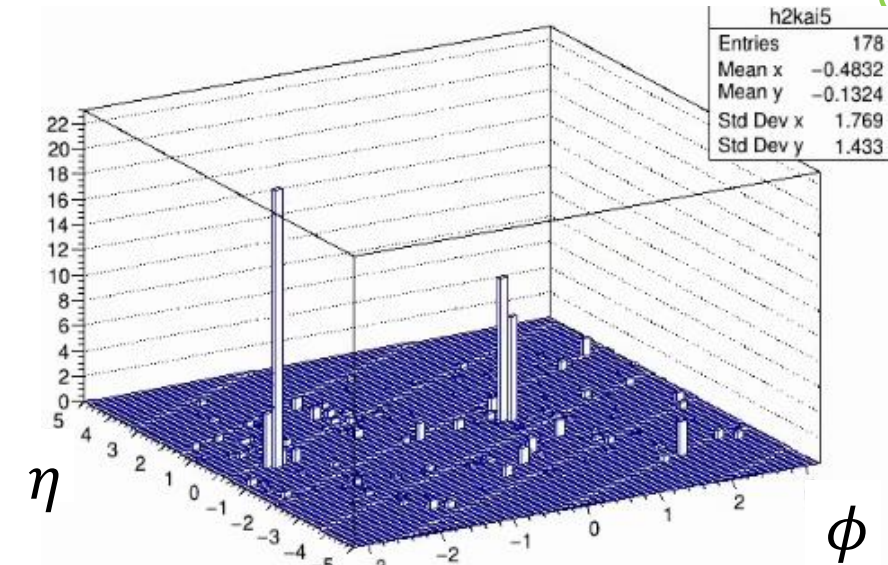
2回目のバックグラウンド



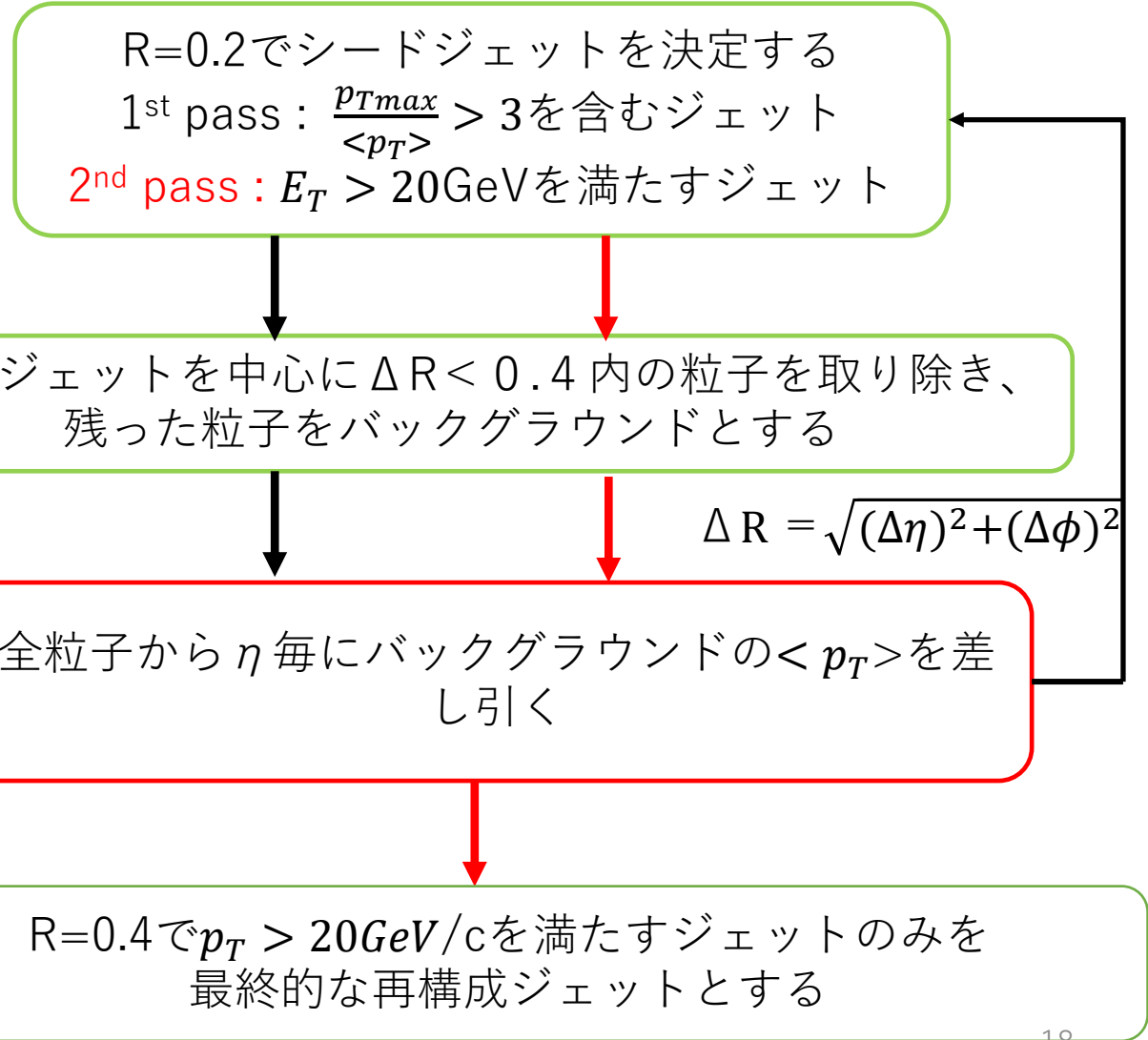
# バックグラウンドの差し引き



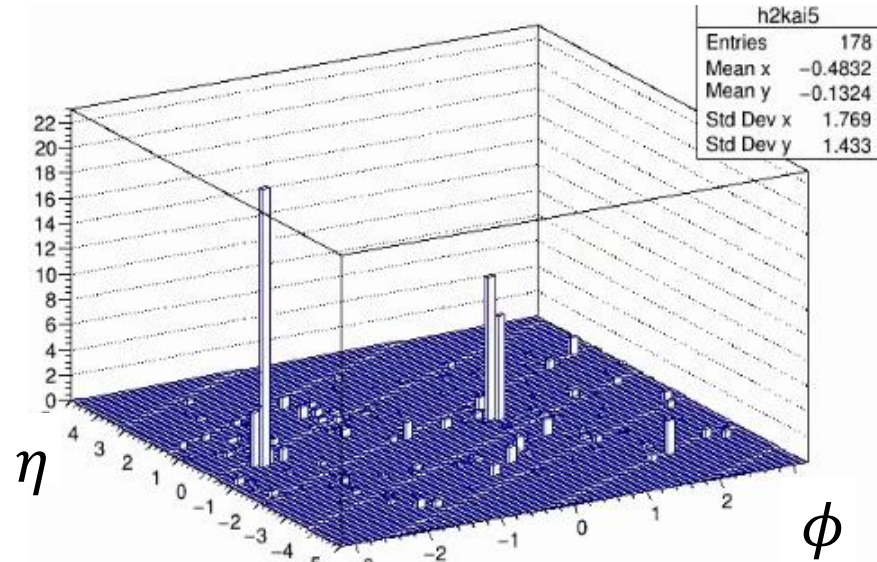
2回目のバックグラウンド



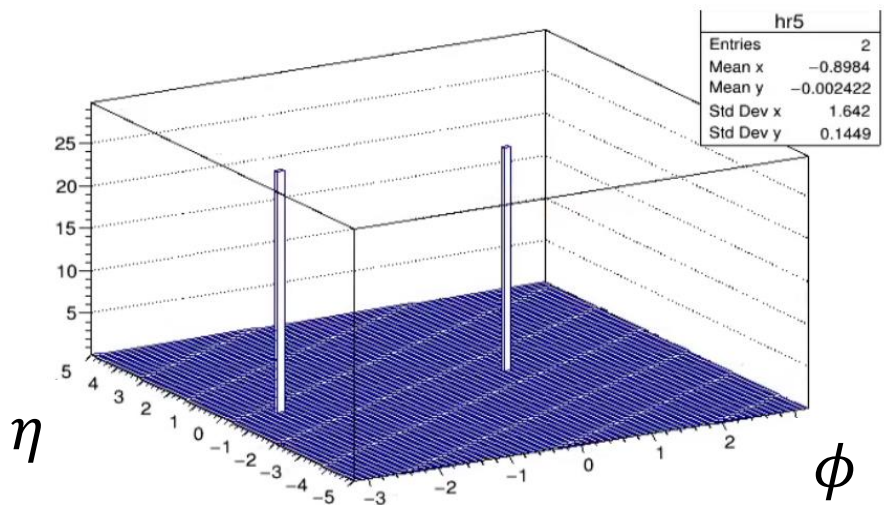
2回バックグラウンドを差し引いた後



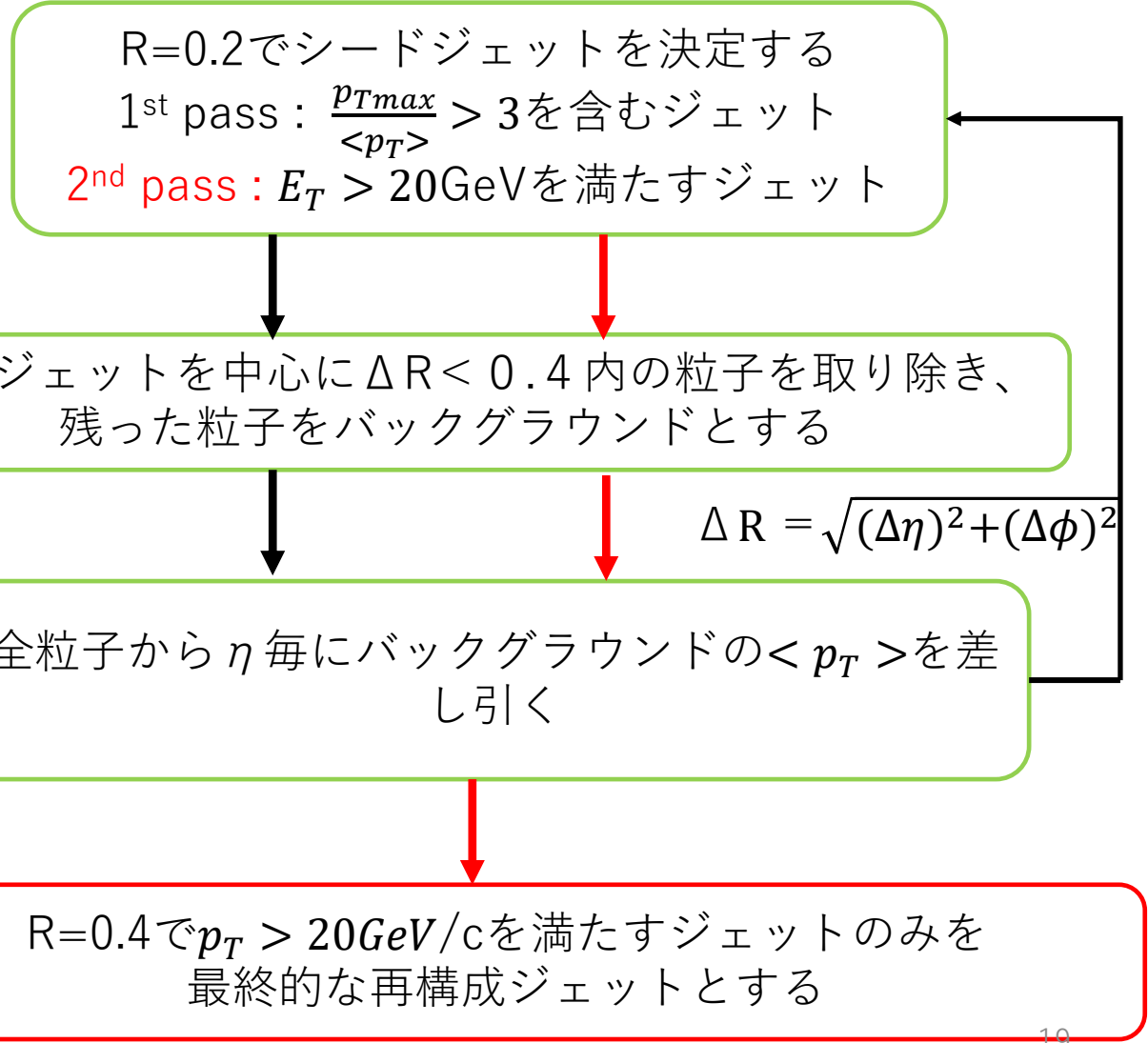
# バックグラウンドの差し引き



2回バックグラウンドを差し引いた後



再構成ジェットの分布



# 解析のセットアップ

重イオン衝突のイベントジェネレータで生成されたミニマムバイアスのイベントに30GeVのp+p衝突のイベントジェネレータで作られたジェットを埋め込んだシミュレーションデータを用いてジェットの再構成を行う。ここに検出器の効果は含まれていない。

重イオンイベントジェネレータ：HIJING  
p+p衝突イベントジェネレータ：PYTHIA

# ジェットの再構成の性能

再構成ジェット：バックグラウンドを二回差し引いた後にAnti- $k_T$ を用いて再構成されたジェット

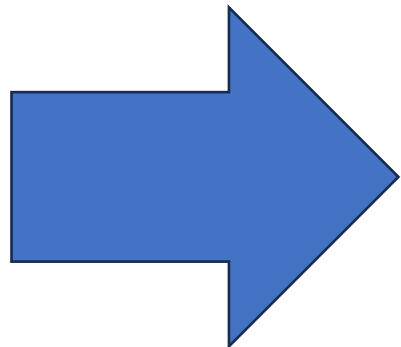
マッチジェット：真ジェットと一致した再構成ジェット

真ジェット：重イオンイベントに埋め込む前のジェットのみAnti- $k_T$ を用いて再構成されたジェット

$$\text{efficiency} : \frac{\text{マッチジェットの数}}{\text{真ジェットの数}}$$

$$\text{purity} : \frac{\text{マッチジェットの数}}{\text{再構成ジェットの数}}$$

この二つの値が高ければ高いほど良い再構成方法



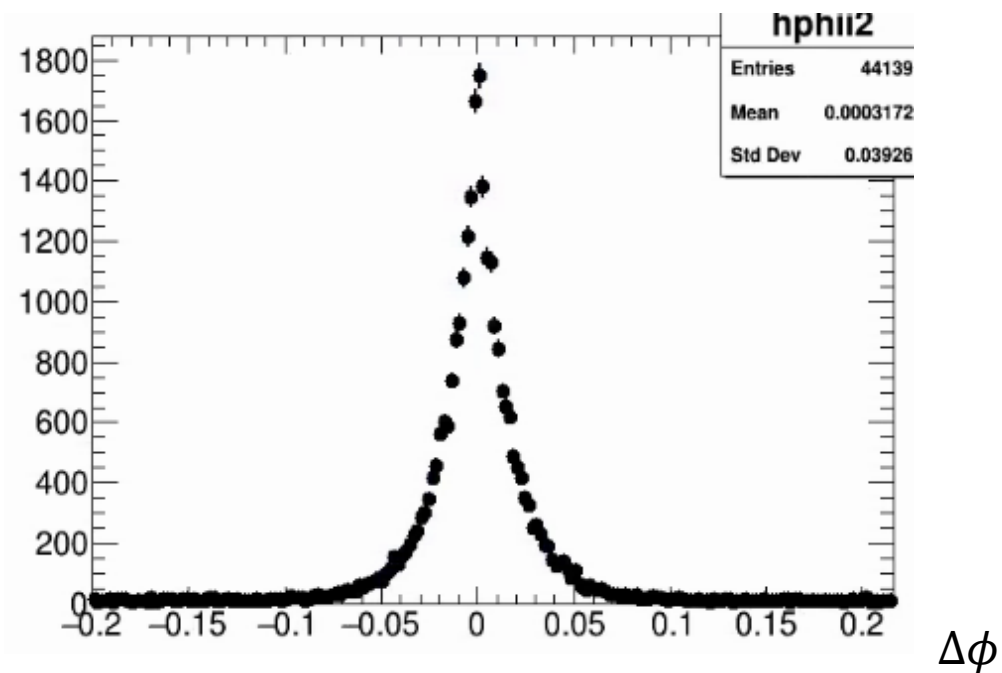
マッチジェットの定義を決める必要がある。

# マッチジェットの決定

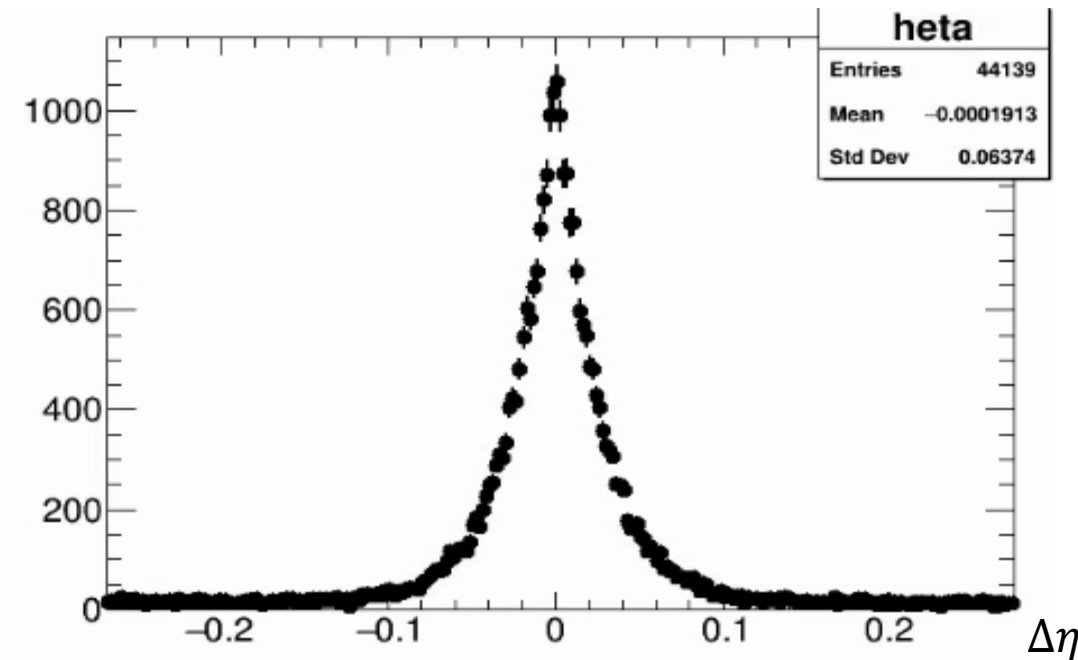
$\Delta\phi$  : 再構成ジェットの $\phi$  - 真ジェットの $\phi$

$\Delta\eta$  : 再構成ジェットの $\eta$  - 真ジェットの $\eta$

真ジェットと再構成ジェットの $\phi, \eta$  の差の分布

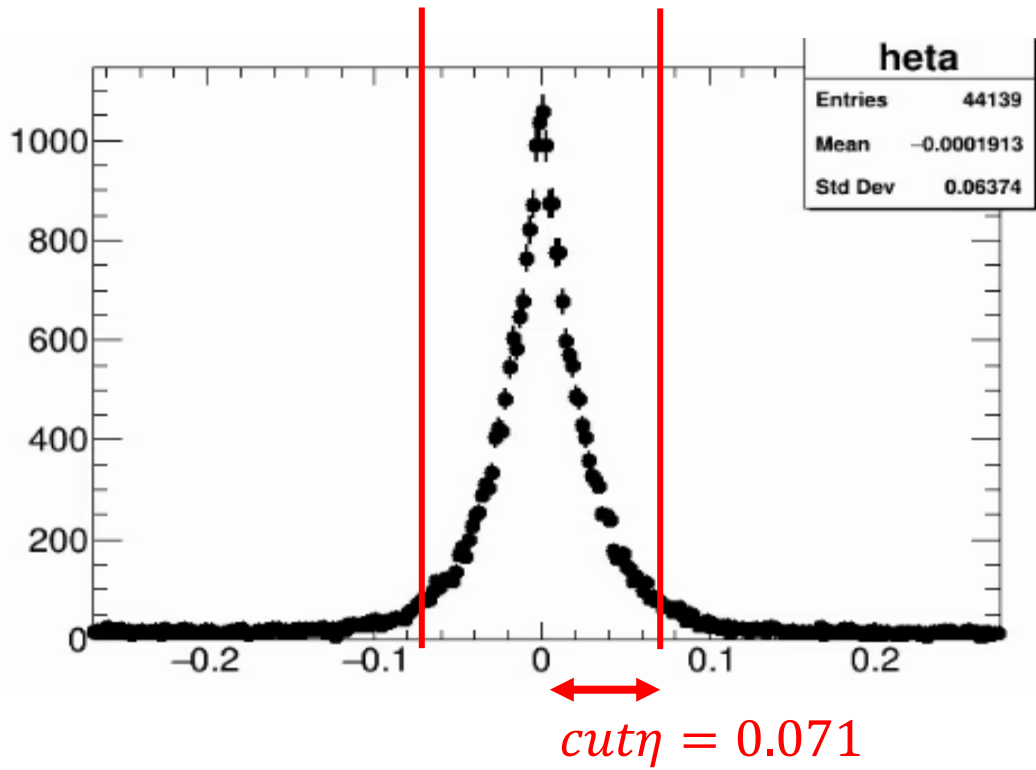


$\phi$ の差の分布



$\eta$ の差の分布

①再構成ジェットと真ジェットの $\phi, \eta$  の差の分布を求める



②差の分布を適切な関数でfitし、積分する

③その積分値の97%を満たす閾値を  $cut\phi, cut\eta$  とする

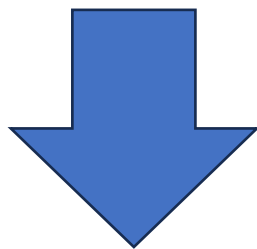
$\Delta\eta$

④真ジェットと再構成ジェットの $\eta, \phi$ の差が  $\left(\frac{\Delta\eta}{cut\eta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\phi}{cut\phi}\right)^2 < 1.0$  を満たしたものをマッチジェットとする

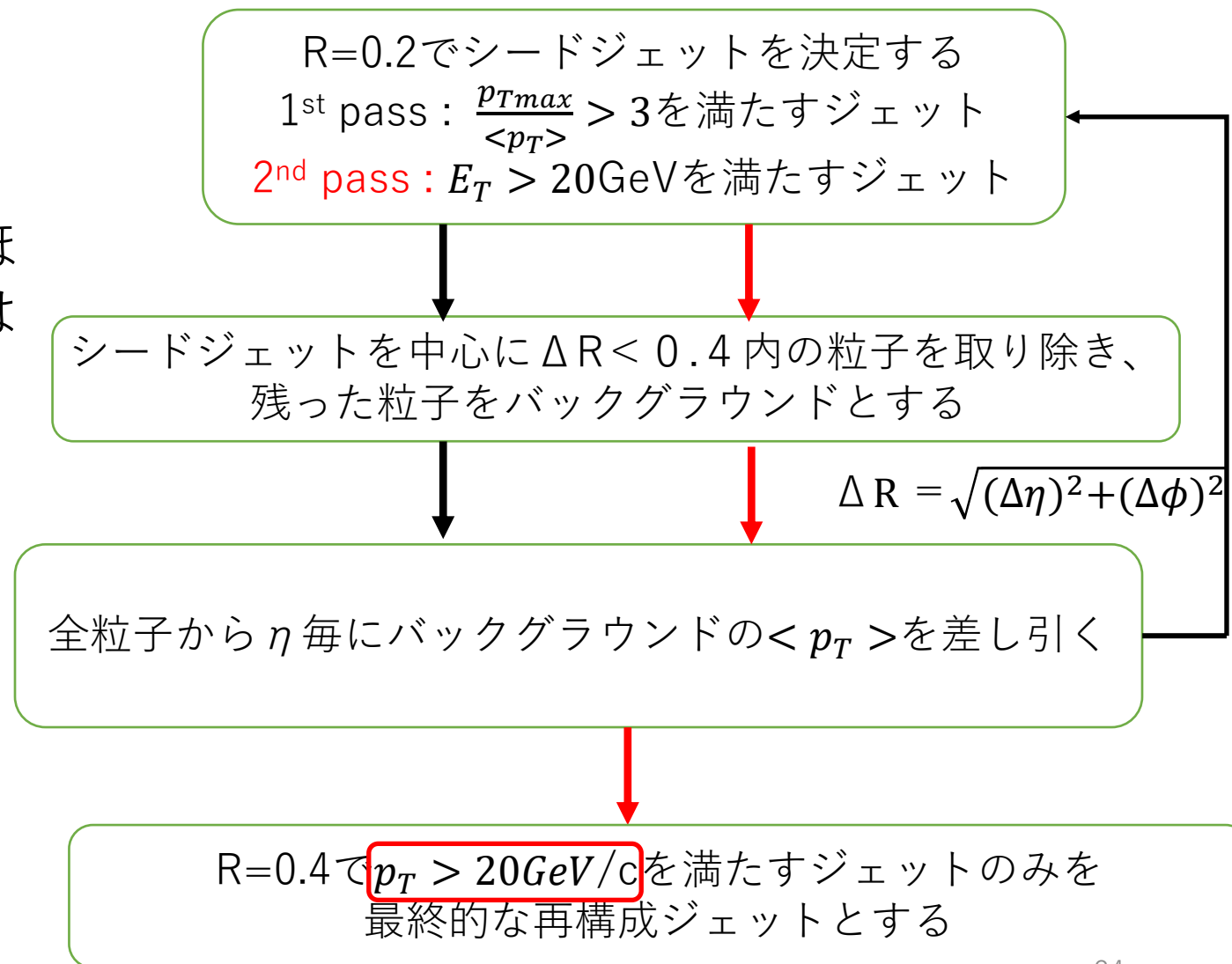
# ジェットの $p_T$ の下限値によるefficiencyとpurityの変化

Efficiency(マッチジェット/真ジェット)  
Purity (マッチジェット/再構成ジェット)

ジェットの $p_T$ の下限値を下げるほどefficiencyは上がるが、purityは下がるはず



efficiency、purityが共に高くなる $p_T$ の下限値を探る



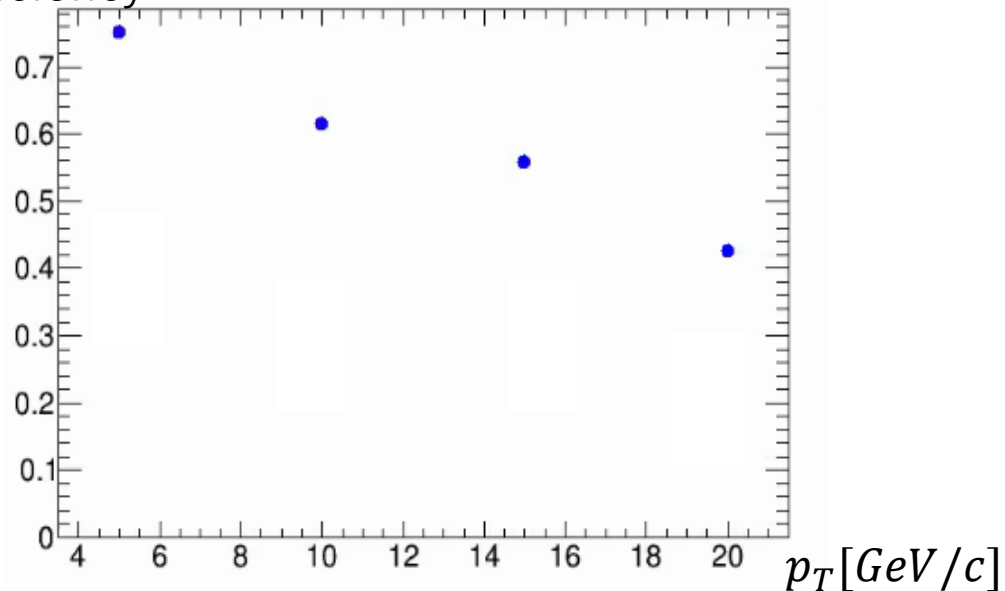


# 結果

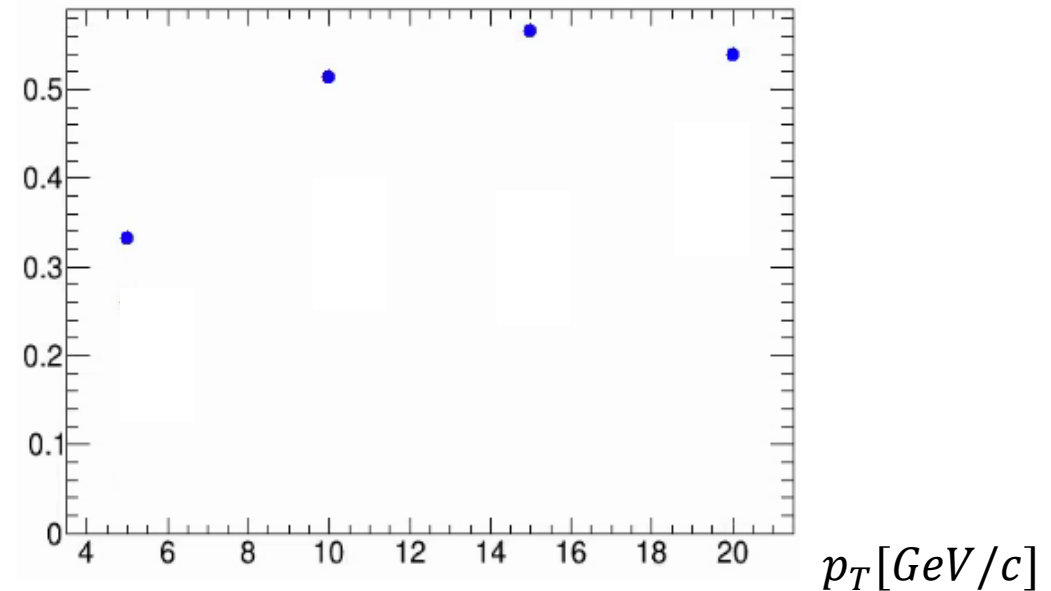
| ジェットの $p_T$ の下限値 | 5GeV/c            | 10GeV/c           | 15GeV/c           | 20GeV/c            |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 真ジェット            | 84557             | 69352             | 63075             | 57535              |
| 再構成ジェット          | 190890            | 86583             | 62208             | 44292              |
| マッチジェット          | 63636             | 44501             | 35228             | 23919              |
| Efficiency       | $0.753 \pm 0.002$ | $0.642 \pm 0.003$ | $0.559 \pm 0.003$ | $0.426 \pm 0.003$  |
| purity           | $0.333 \pm 0.003$ | $0.514 \pm 0.003$ | $0.566 \pm 0.003$ | $0.5400 \pm 0.003$ |

33905イベント分のジェットの $p_T$ の下限値によるefficiencyとpurity

efficiency



purity

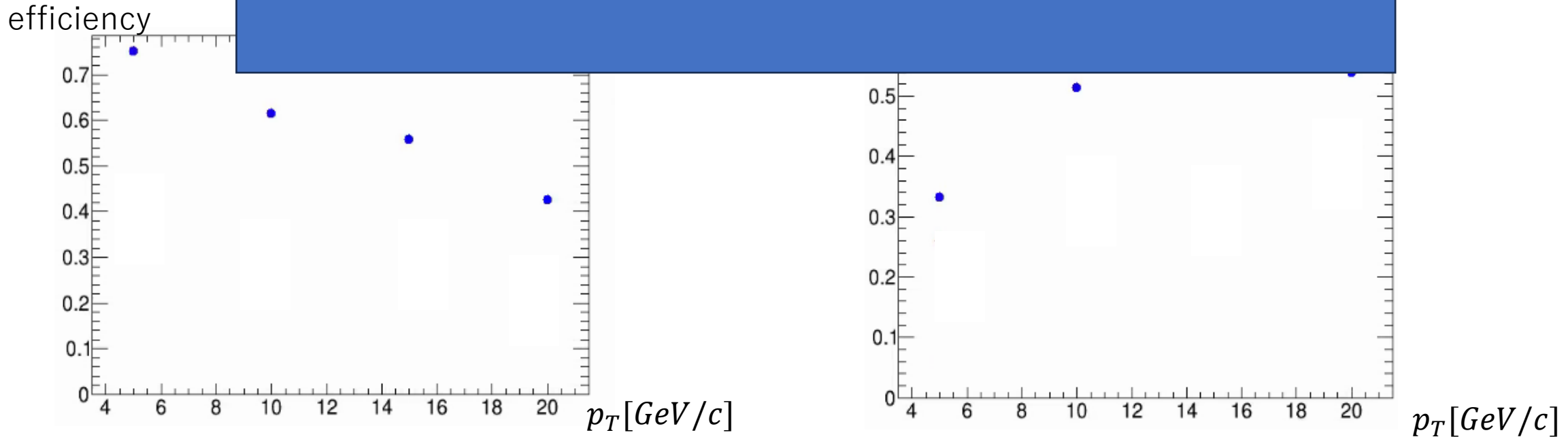


ジェットの $p_T$ の下限値を15GeV/c以上ではpurityの上昇傾向が止まった

# 結果

| ジェットの $p_T$ の下限値 | 5GeV/c | 10GeV/c | 15GeV/c | 20GeV/c            |
|------------------|--------|---------|---------|--------------------|
| 真ジェット            | 84557  | 69352   | 63075   | 57535              |
| 再構成ジェット          | 190890 | 86583   | 62208   | 44292              |
| マッチジェット          |        |         |         | 23919              |
| Efficiency       |        |         |         | $0.426 \pm 0.003$  |
| purity           |        |         |         | $0.5400 \pm 0.003$ |

ジェットの $p_T$ の下限値は15 GeV/cが最適である



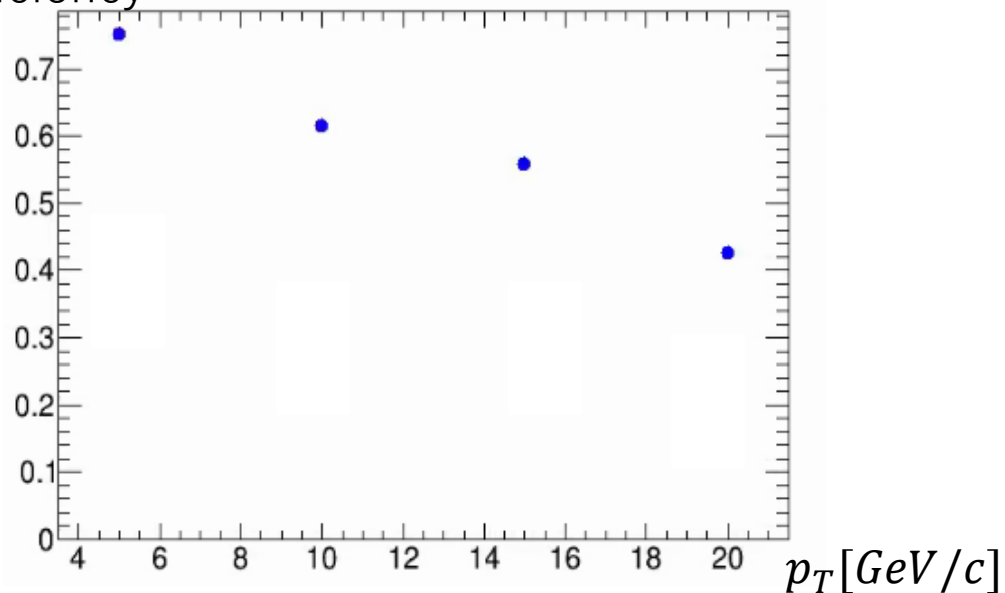
ジェットの $p_T$ の下限値を15GeV/c以上ではpurityの上昇傾向が止まった

# 結果

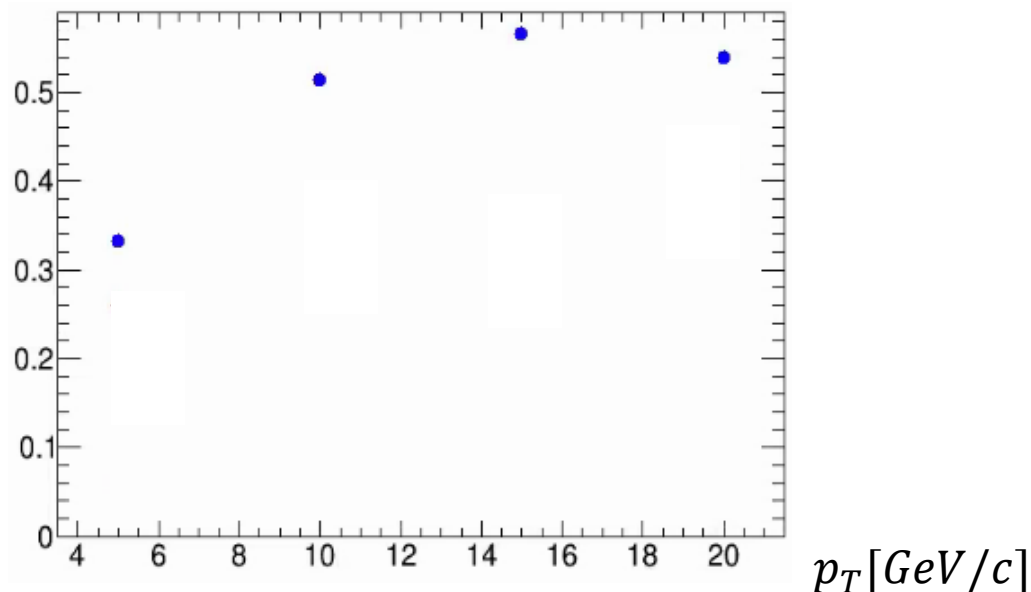
| ジェットの $p_T$ の下限値 | 5GeV/c            | 10GeV/c           | 15GeV/c           | 20GeV/c            |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 真ジェット            | 84557             | 69352             | 63075             | 57535              |
| 再構成ジェット          | 190890            | 86583             | 62208             | 44292              |
| マッチジェット          | 63636             | 44501             | 35228             | 23919              |
| Efficiency       | $0.753 \pm 0.002$ | $0.642 \pm 0.003$ | $0.559 \pm 0.003$ | $0.426 \pm 0.003$  |
| purity           | $0.333 \pm 0.003$ | $0.514 \pm 0.003$ | $0.566 \pm 0.003$ | $0.5400 \pm 0.003$ |

33905イベント分のジェットの $p_T$ の下限値によるefficiencyとpurity

efficiency



purity



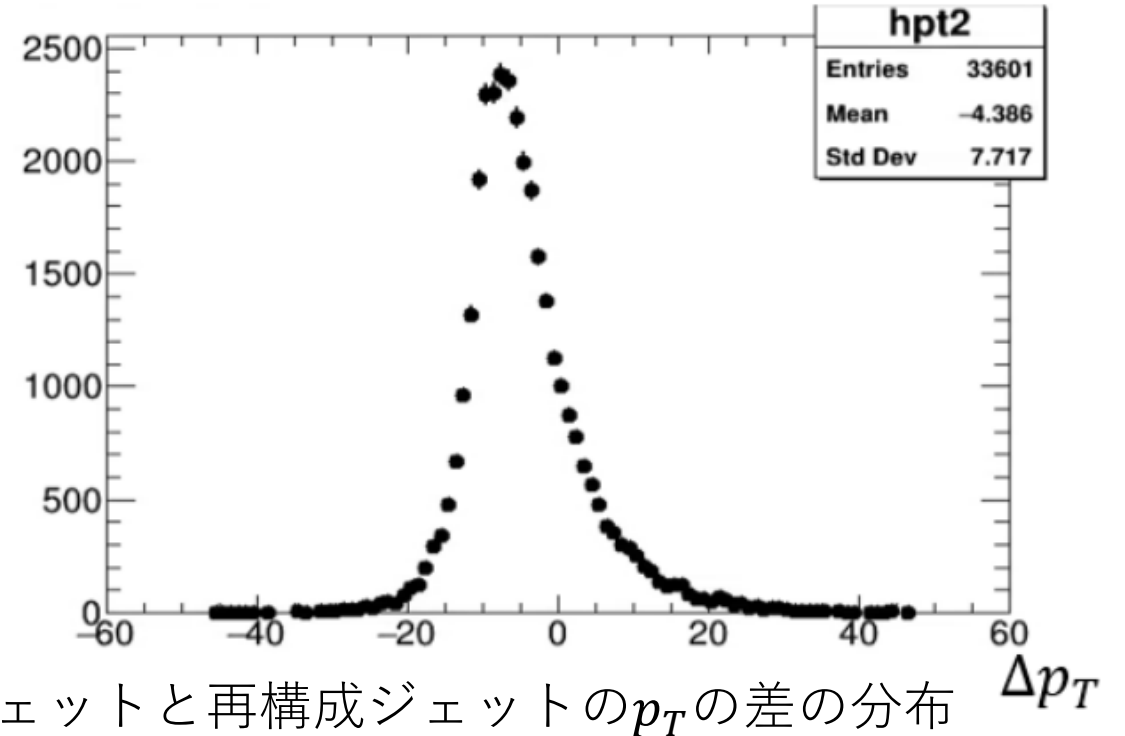
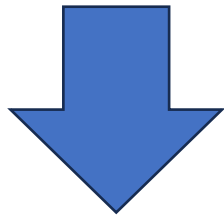
ジェットの $p_T$ の下限値を15GeV/c以上ではpurityの上昇傾向が止まった

# 考察と今後の課題

## 再構成ジェットと真ジェットの $p_T$ のズレ

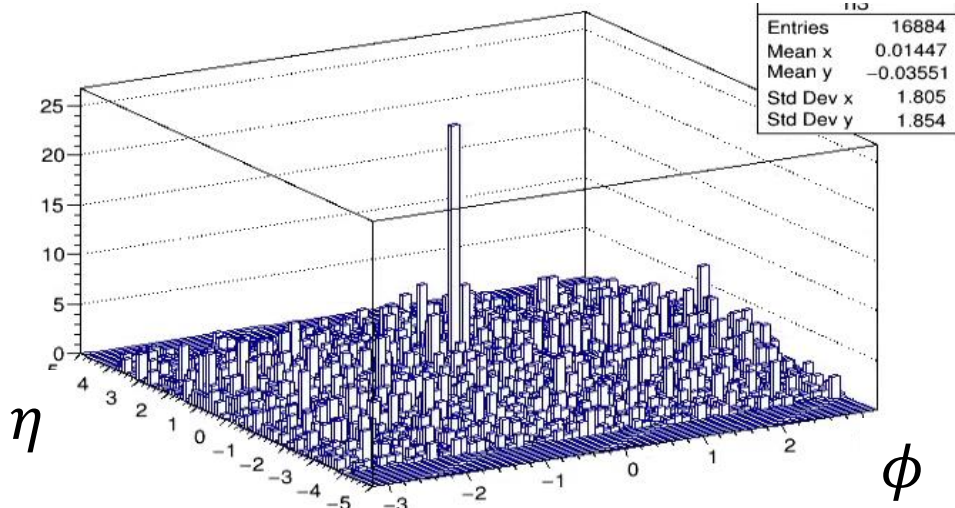
$p_T$ の差分分布はピークが負に傾いている

→真ジェットに比べて再構成ジェットの $p_T$ は低い

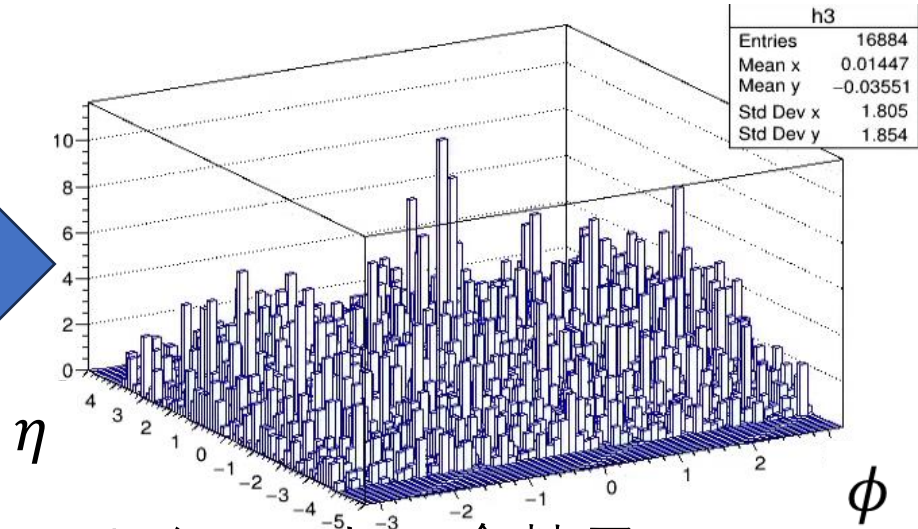
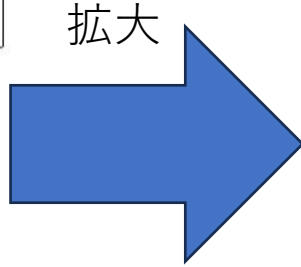


現状の解析方法では再構成ジェットの $p_T$ の補正をする必要がある

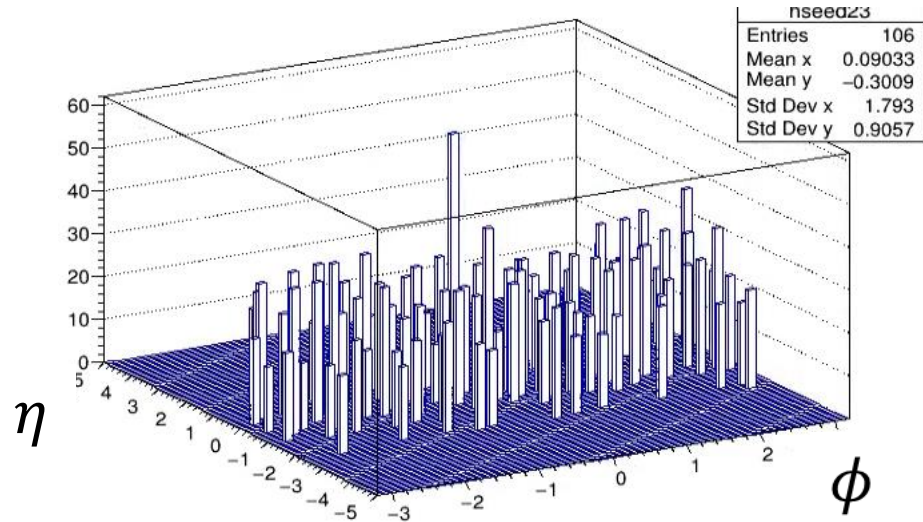
# purityが限界を迎える要因



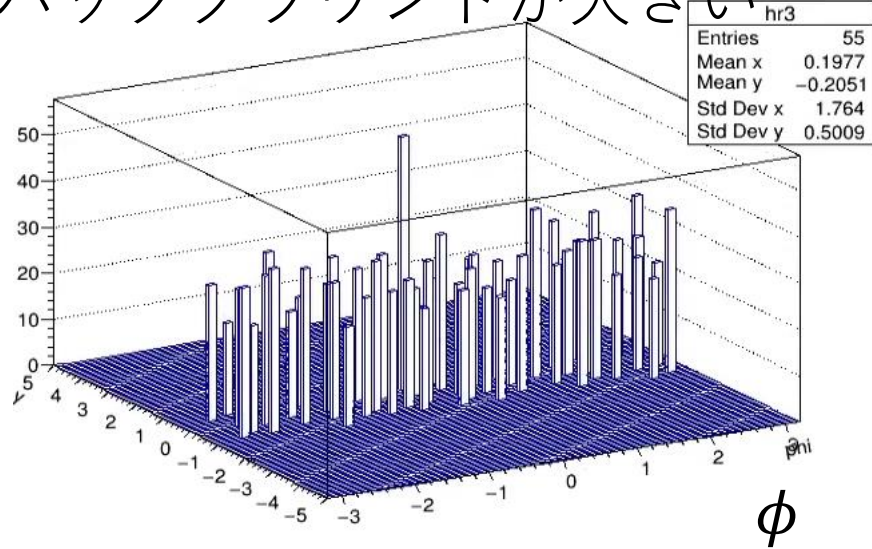
1イベントの全粒子



1イベントの全粒子  
バックグラウンドが大きい



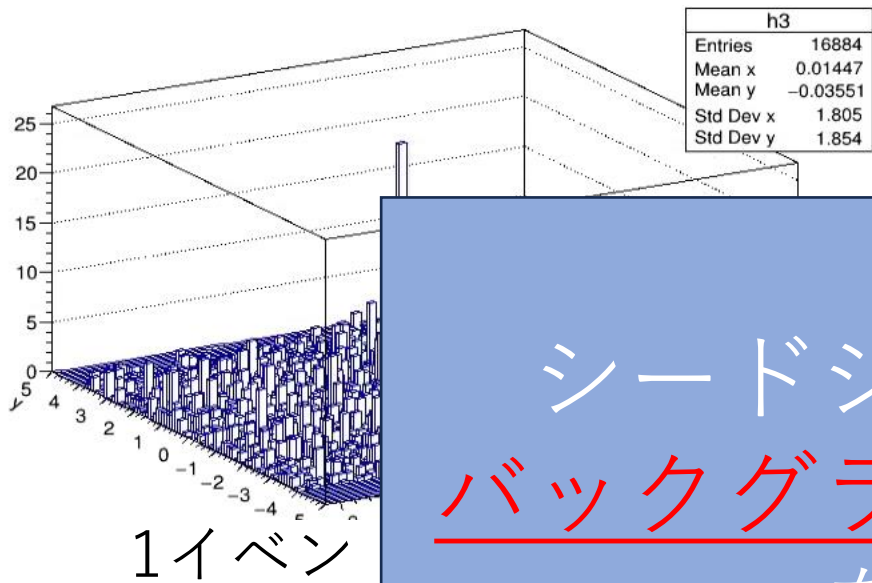
2回目のシードジェット



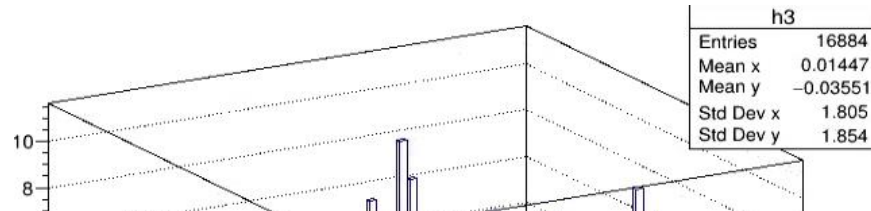
再構成ジェット

バックグラウンドがおおきいと沢山のシードジェット生じる

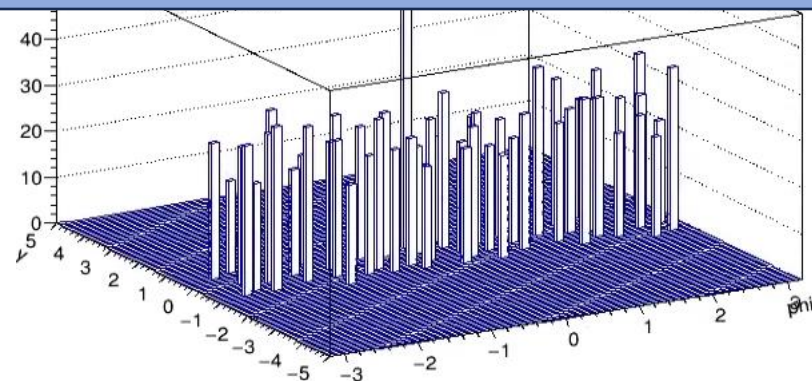
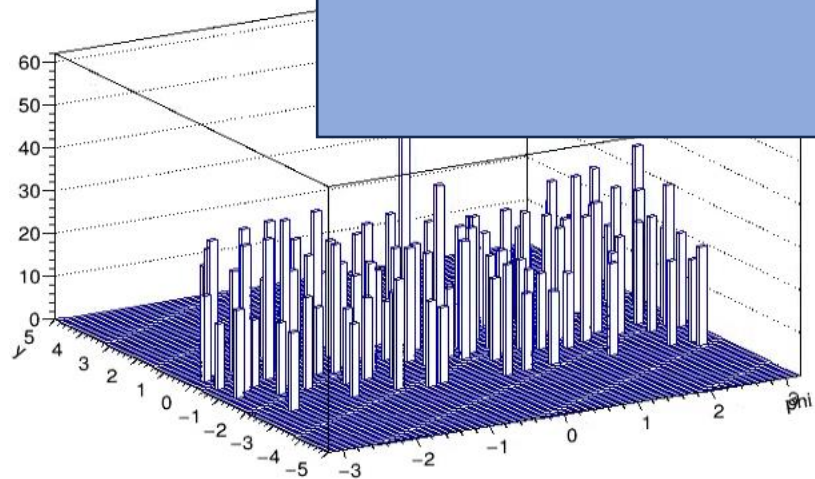
# purityが限界を迎える要因



拡大



シードジェットが多数あるときは  
バックグラウンドの新しい差し引き方  
を考える必要がある



バックグラウンドがおおきいと沢山のシードジェット生じる

# まとめ

RHIC-sPHENIX実験でジェットを再構成する手法の開発と検証を行った

## 結果

- $p_T$ の下限値が15GeV/cの時のefficiencyは $0.559 \pm 0.003$ ,purityは $0.566 \pm 0.003$ になった
- 現状の解析方法だとジェットの $p_T$ の下限値は15GeV/cが最適である

## 今後すること

- 再構成ジェットの $p_T$ の補正をする
- シードジェットが多数存在する際の新しいバックグラウンドの差し引く方法を考える
- sPHENIXの検出器の効果を含めたシミュレーションで同様のことをする