

sPHENIX-INTT検出器を用いた 飛跡再構成アルゴリズムの開発と評価

高エネルギー物理学研究室

辻端 日菜子

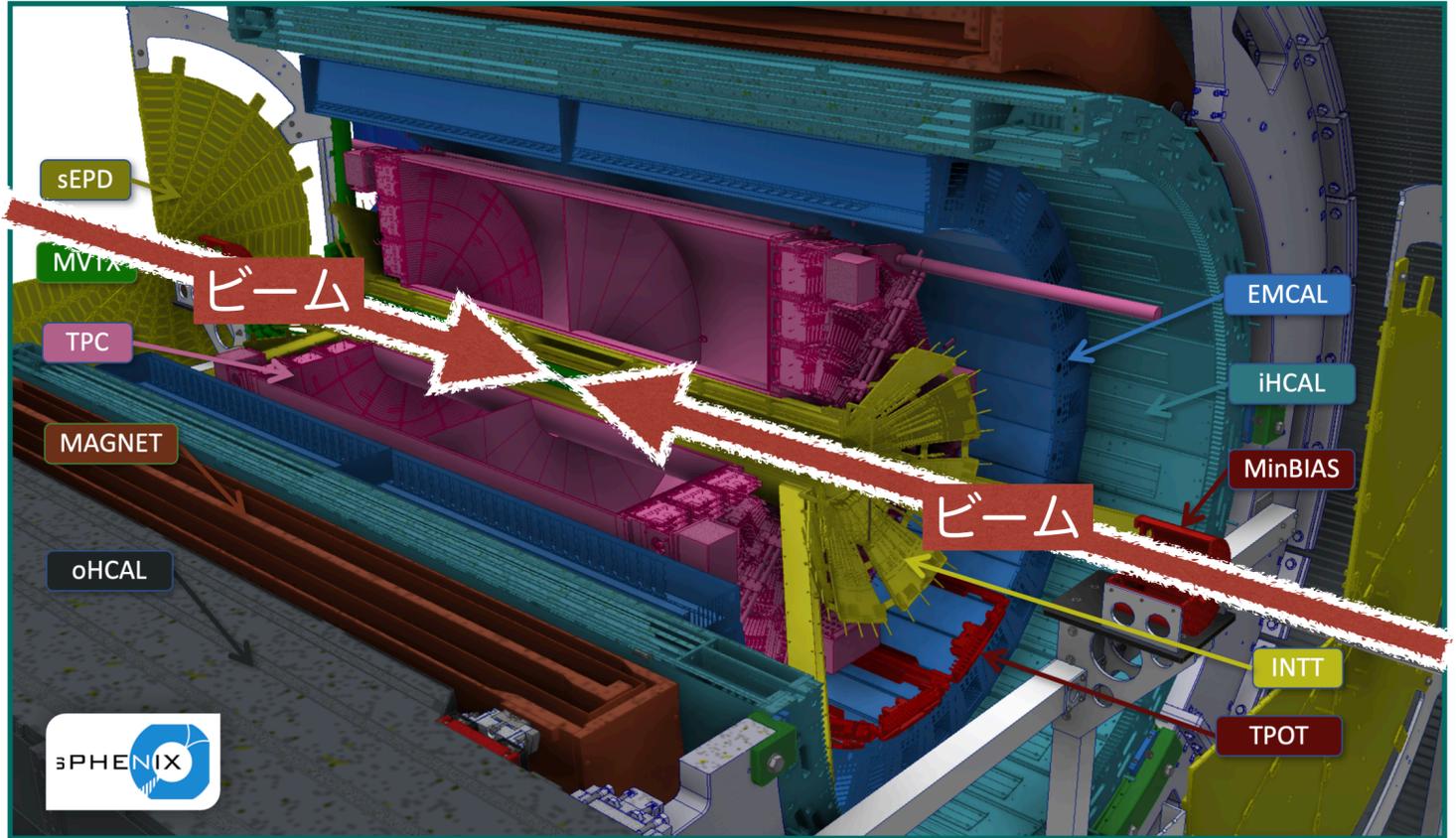
修士論文審査会 2024.02.17

クォーク・グルーオン・プラズマ

＜クォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）＞ クォークやグルーオンが高温、高密度下においてハドロン内部の閉じ込めから解放された状態。

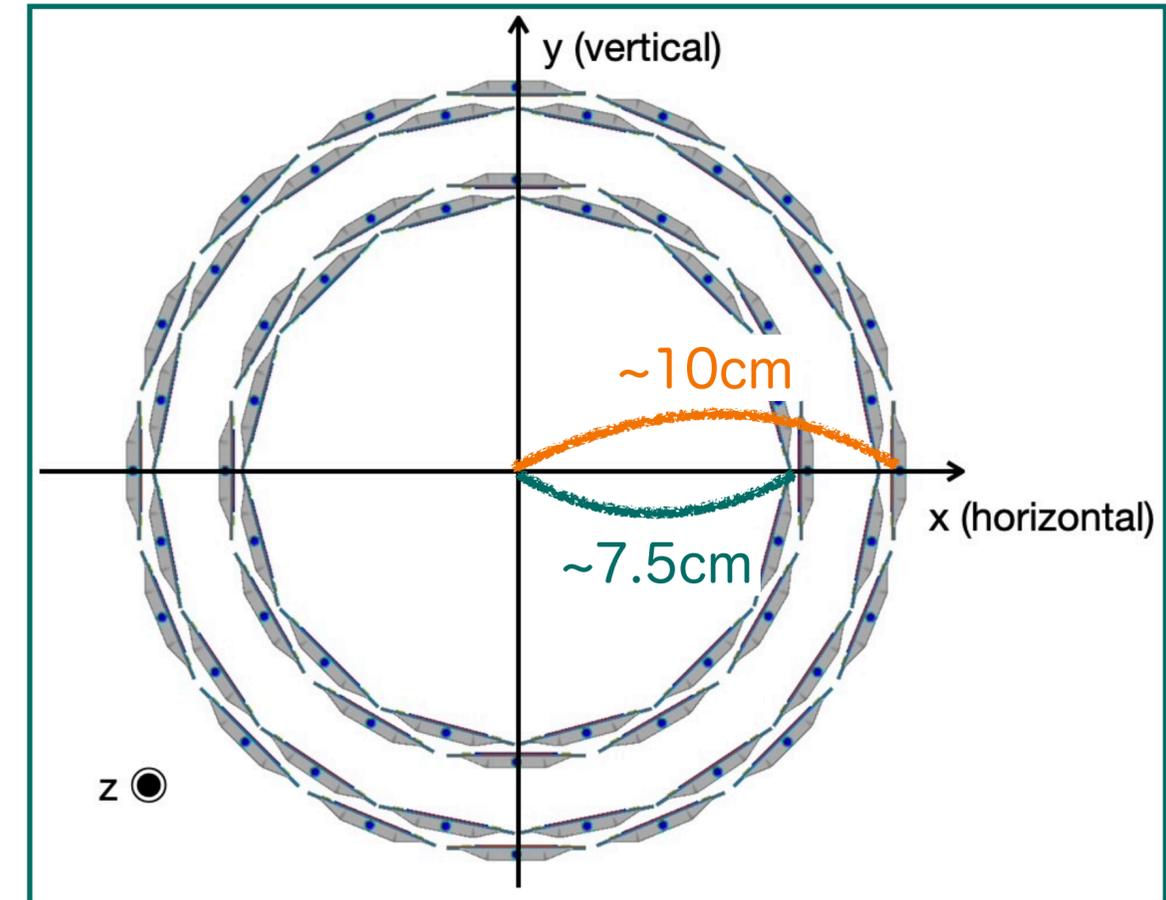
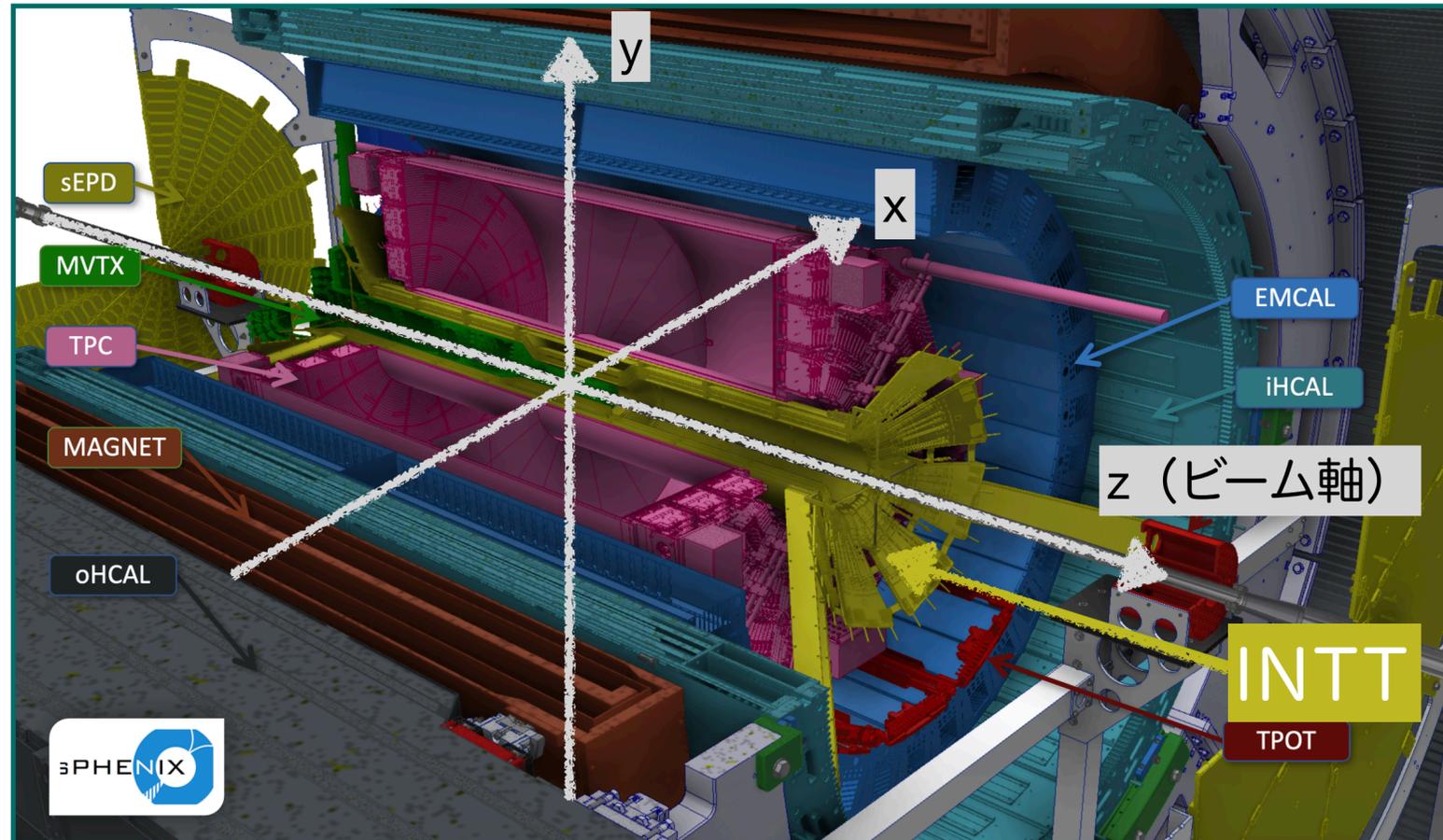


<クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) > クォークやグルーオンが高温、高密度下においてハドロン内部の閉じ込めから解放された状態。



<sPHENIX実験> (左図)

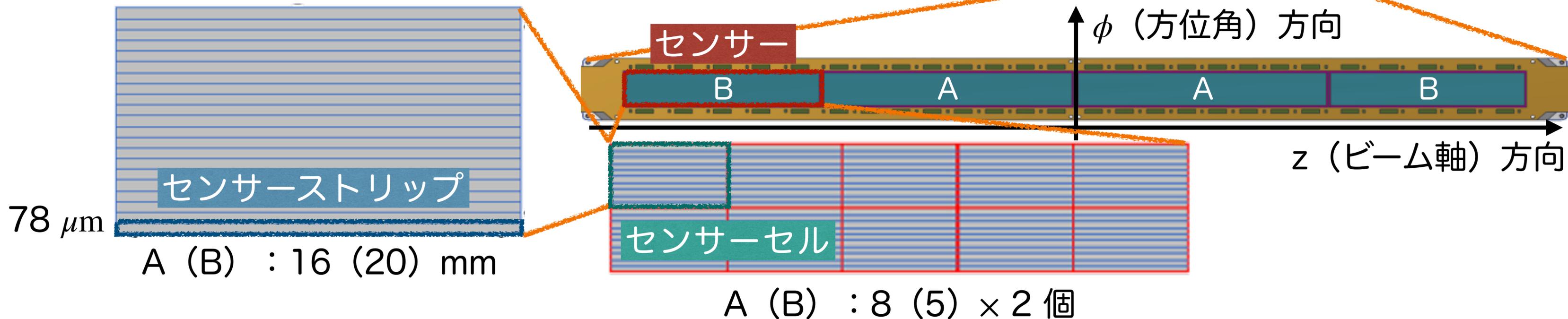
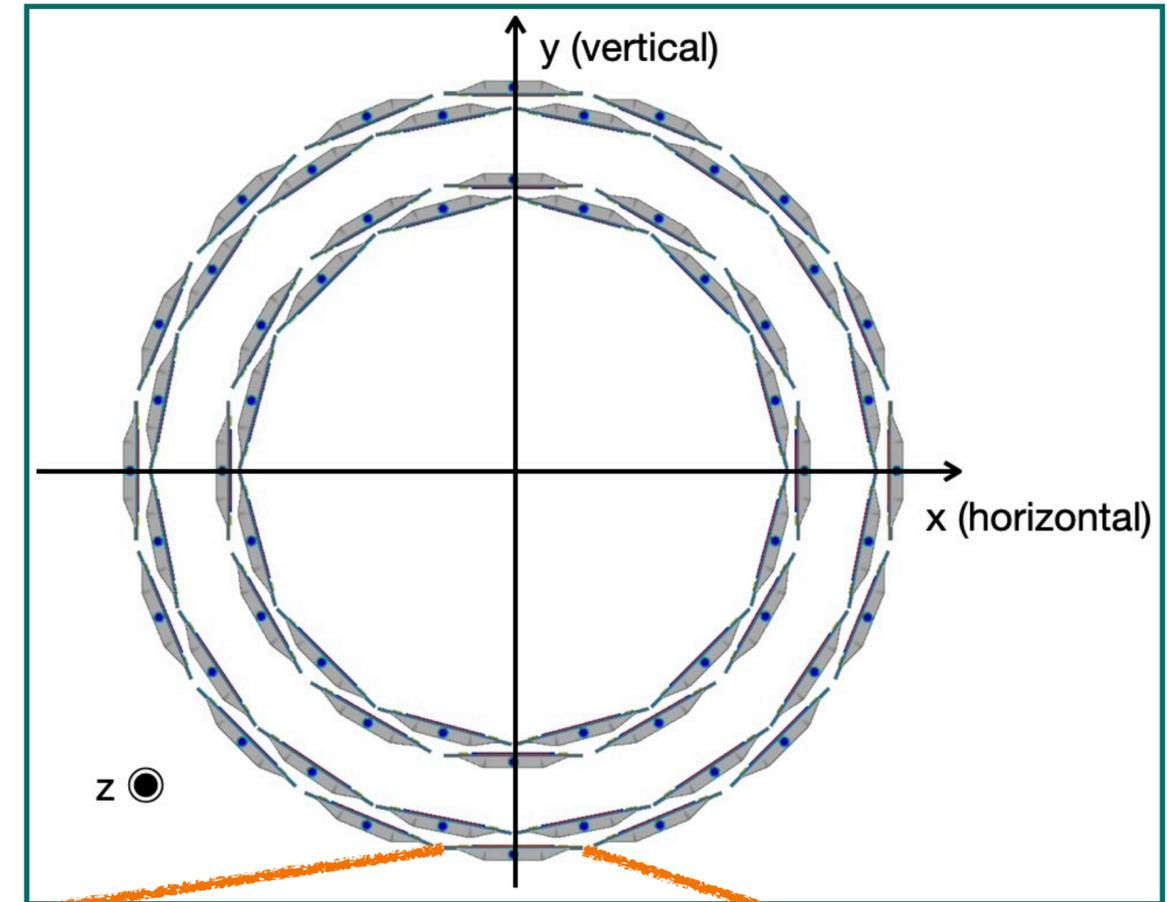
- 目的：重い原子核同士を高エネルギーで衝突させることによるQGPの生成、その性質の理解。
- 2024年に衝突エネルギー200 GeVの陽子陽子衝突データを収集。
- 磁場はビーム軸方向に一致。磁束密度1.4 T。



- 荷電粒子の通過位置を”ヒット”として測定する飛跡検出器。
- sPHENIX実験には3つの飛跡検出器が存在。その中間に位置する。
 - データ処理速度が速く、飛跡検出器群で唯一、衝突事象ごとの飛跡再構成が可能。
- (右図) 56本の”センサーラダー”で2層の円筒状をなしており、ビーム軸から半径7.5 cm, 10 cmに位置する。
- 全方位角、ビーム軸方向 ± 22.8 cmを覆う。

センサーラダー

- 1センサーラダーは長さの異なる2種類の**センサー**2つずつからなる。
- 1センサーは**センサーセル**16個または10個で構成されている。
- 1セルは**センサーストリップ**128個で構成されており、ストリップサイズは、 ϕ (方位角) 方向に $78 \mu\text{m}$ 、 z (ビーム軸) 方向に16または20 mm。

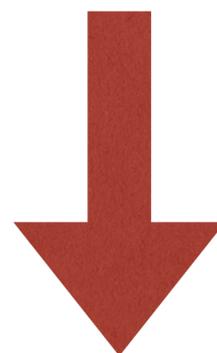


sPHENIX実験におけるINTTを用いた飛跡再構成アルゴリズムの開発と評価

<飛跡再構成方法>

時間分解能に優れたINTTで衝突事象ごとに飛跡再構成

本研究



既存のsPHENIX実験
の飛跡再構成

空間分解能に優れた検出器の飛跡に繋げる

<利点>

- INTTは2023年、2024年のデータ収集を通して正常に作動した。
 - 本研究ではINTT以外の検出器に左右されない安定した飛跡再構成が可能である。
- INTTの性能評価やノイズ除去などにも利用できる。

- 飛跡再構成アルゴリズムについて説明する。
 - 以下の実験データおよびシミュレーションデータを用いる。

【実験データ】

- 陽子陽子衝突 (200 GeV)
- 磁場：1.4 T
- 1万衝突事象

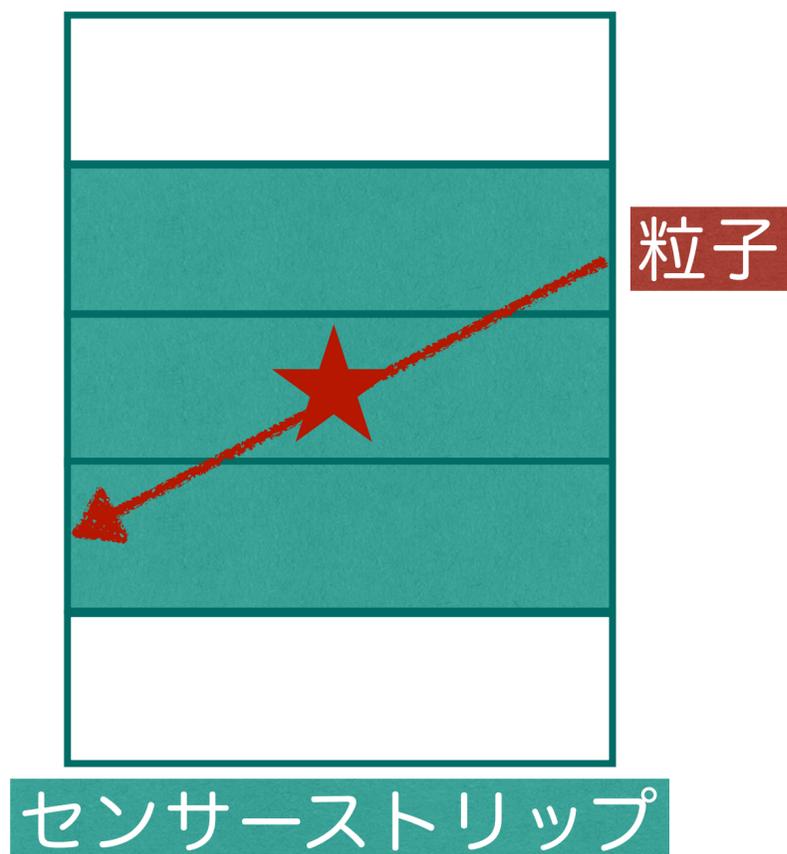
【シミュレーションデータ】

- シミュレータ：PYTHIA (衝突事象生成) + GEANT4 (粒子と検出器の相互作用)
- 陽子陽子衝突 (200 GeV)
- 磁場：1.4 T
- 10万衝突事象
- 衝突点：ガウス分布
 - 中心： $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ cm
 - 幅： $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = (10^{-4}, 10^{-4}, 10)$ cm

1：クラスターペアの選択

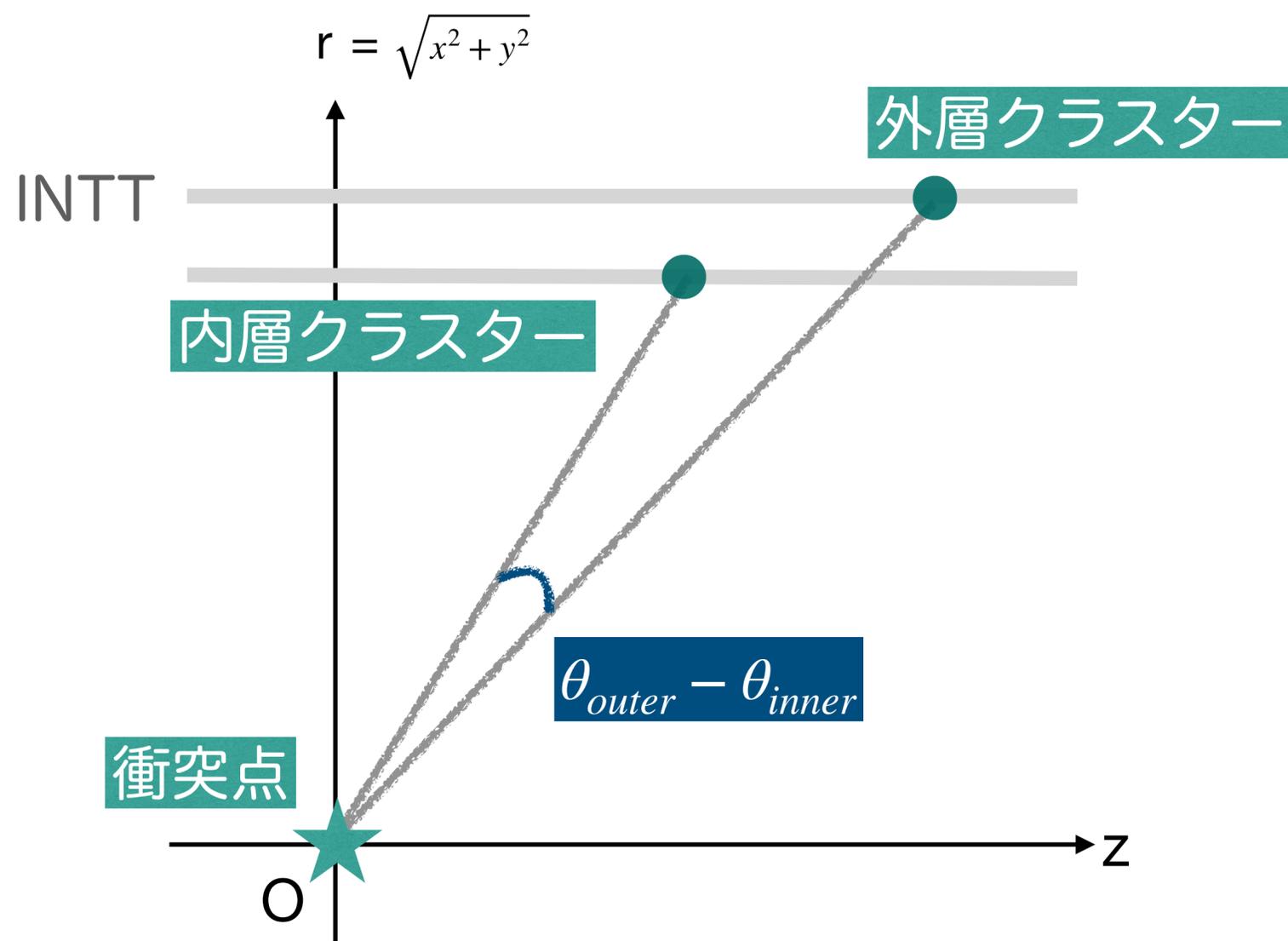
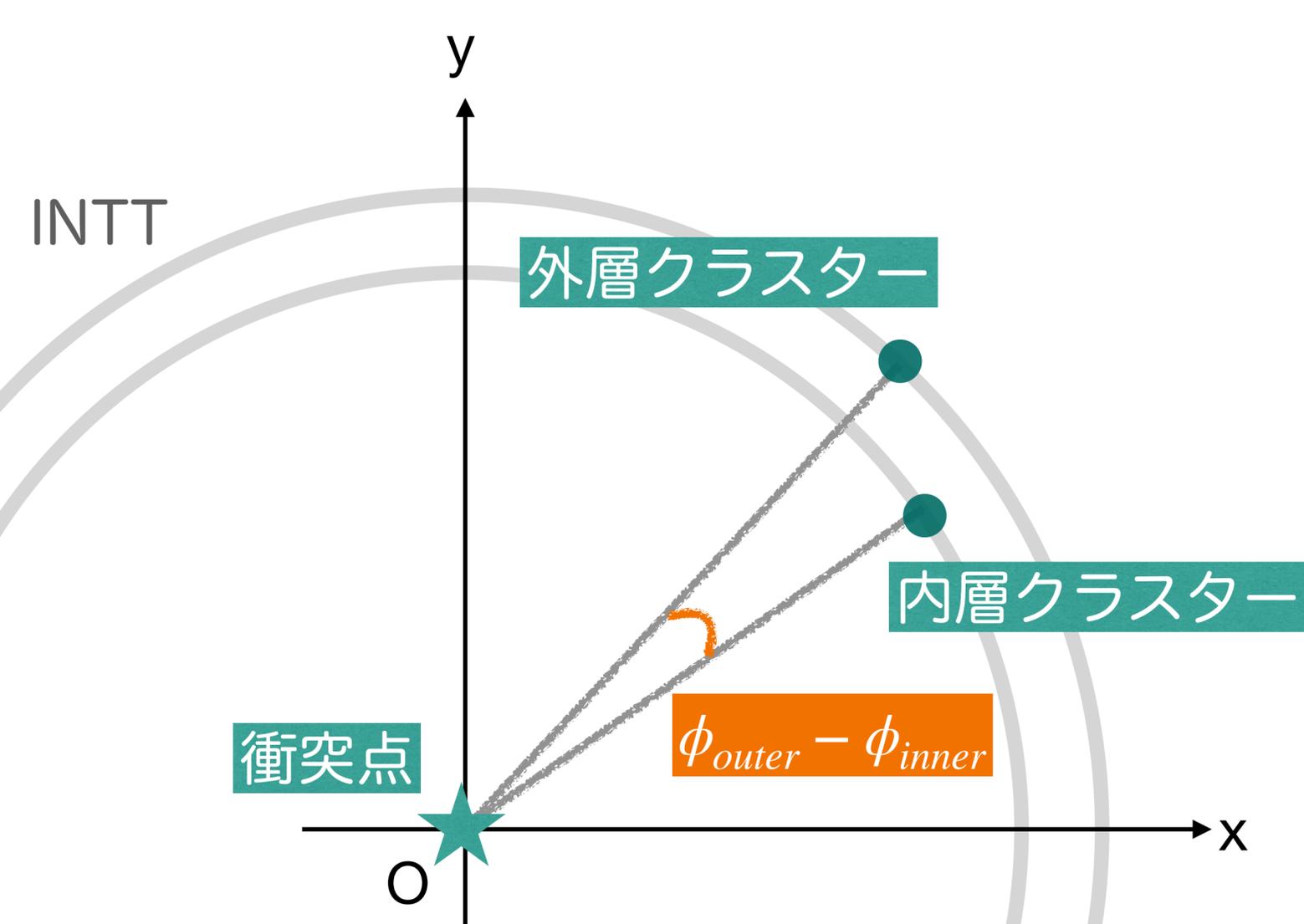
<クラスター>

- 粒子が複数のセンサーstriップを横断して通過するとき、1つの粒子の通過位置が複数のヒットとして記録される。それらの隣り合ったヒットをまとめたものを”クラスター”と呼ぶ。



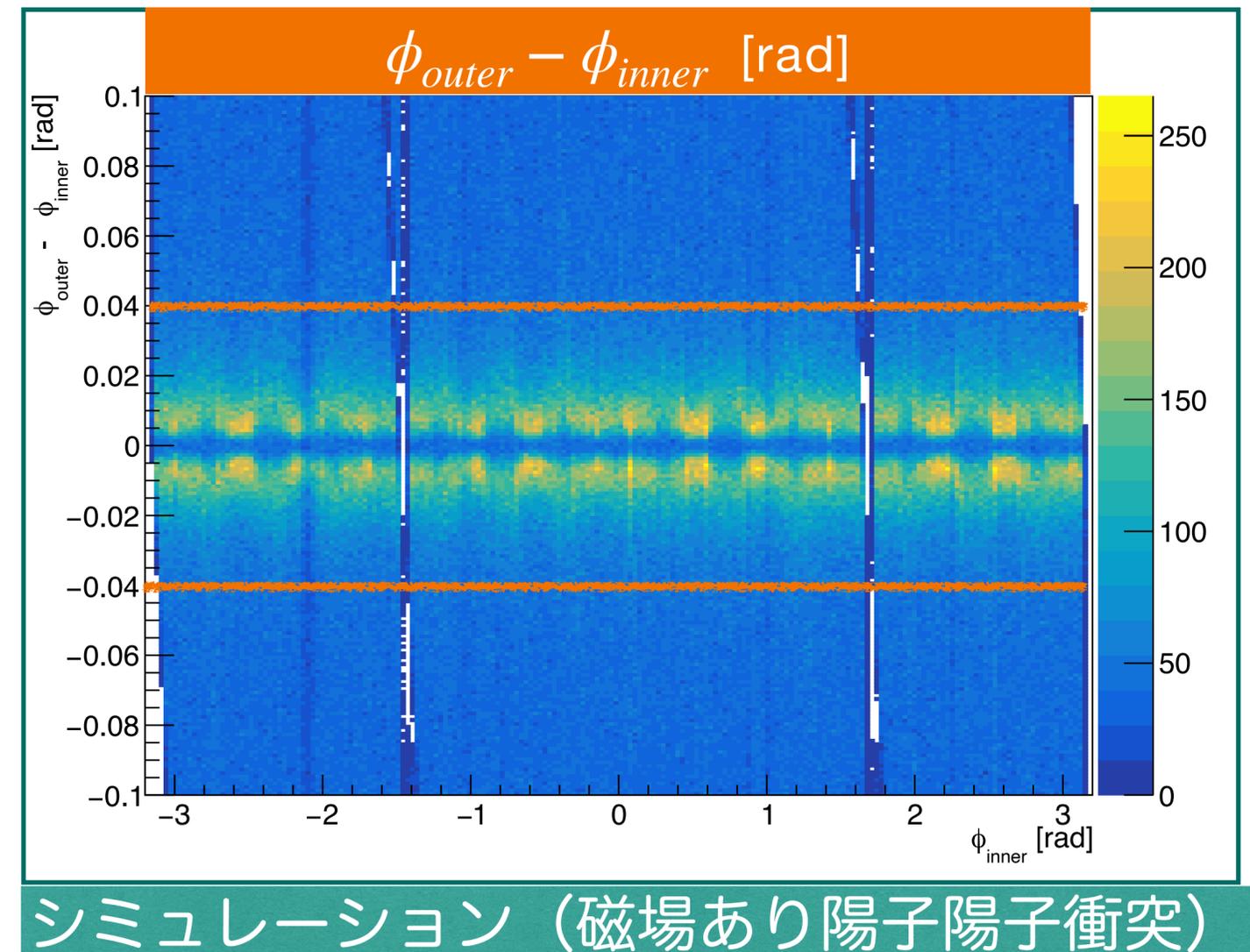
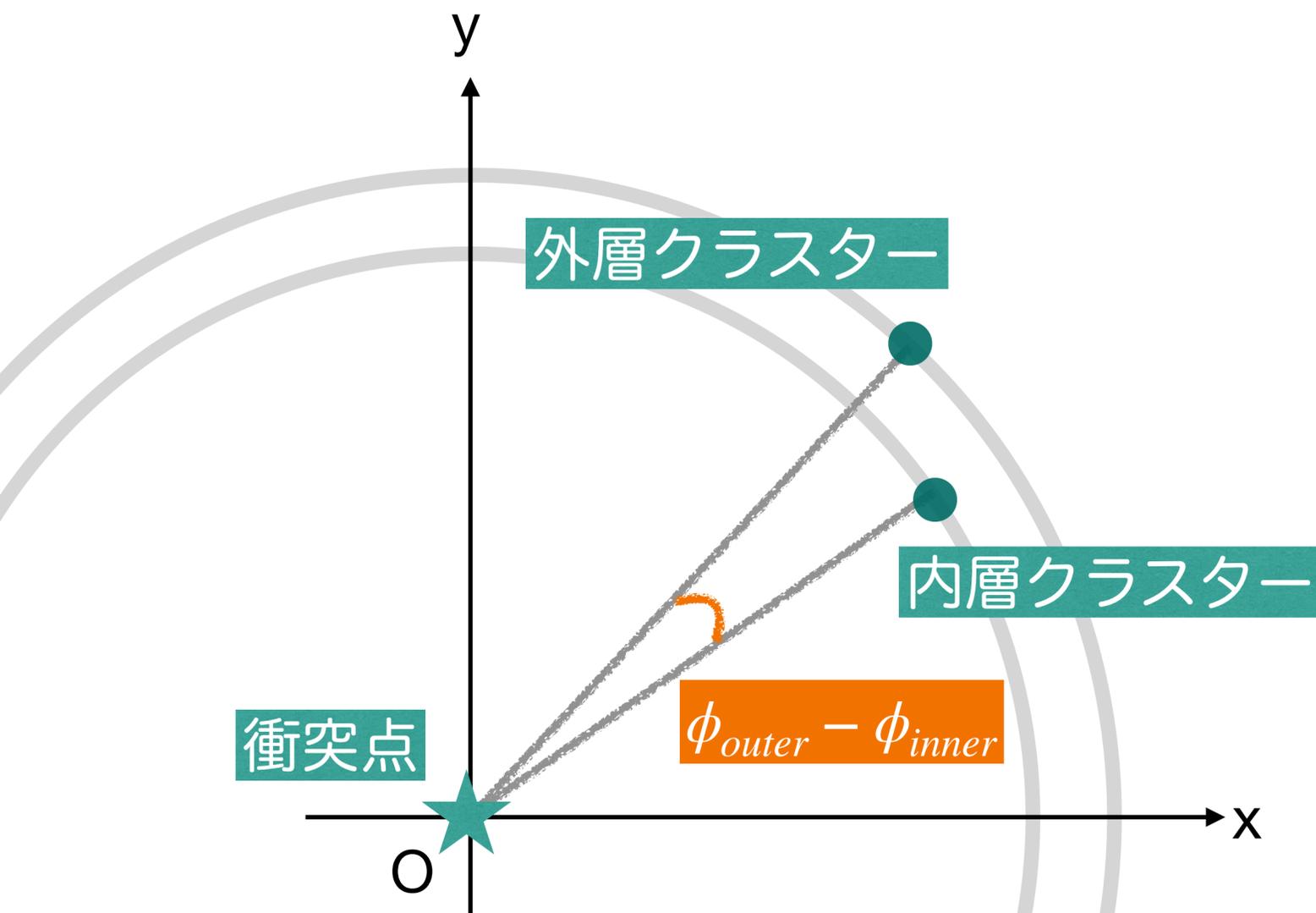
1: クラスターペアの選択

- 内層クラスター、外層クラスターを1点ずつ選ぶ。
 - 同じ粒子から作られた内層クラスター・外層クラスターは、衝突点を基準とした角度差 $\phi_{outer} - \phi_{inner}$, $\theta_{outer} - \theta_{inner}$ が平均的に0になることを利用する。



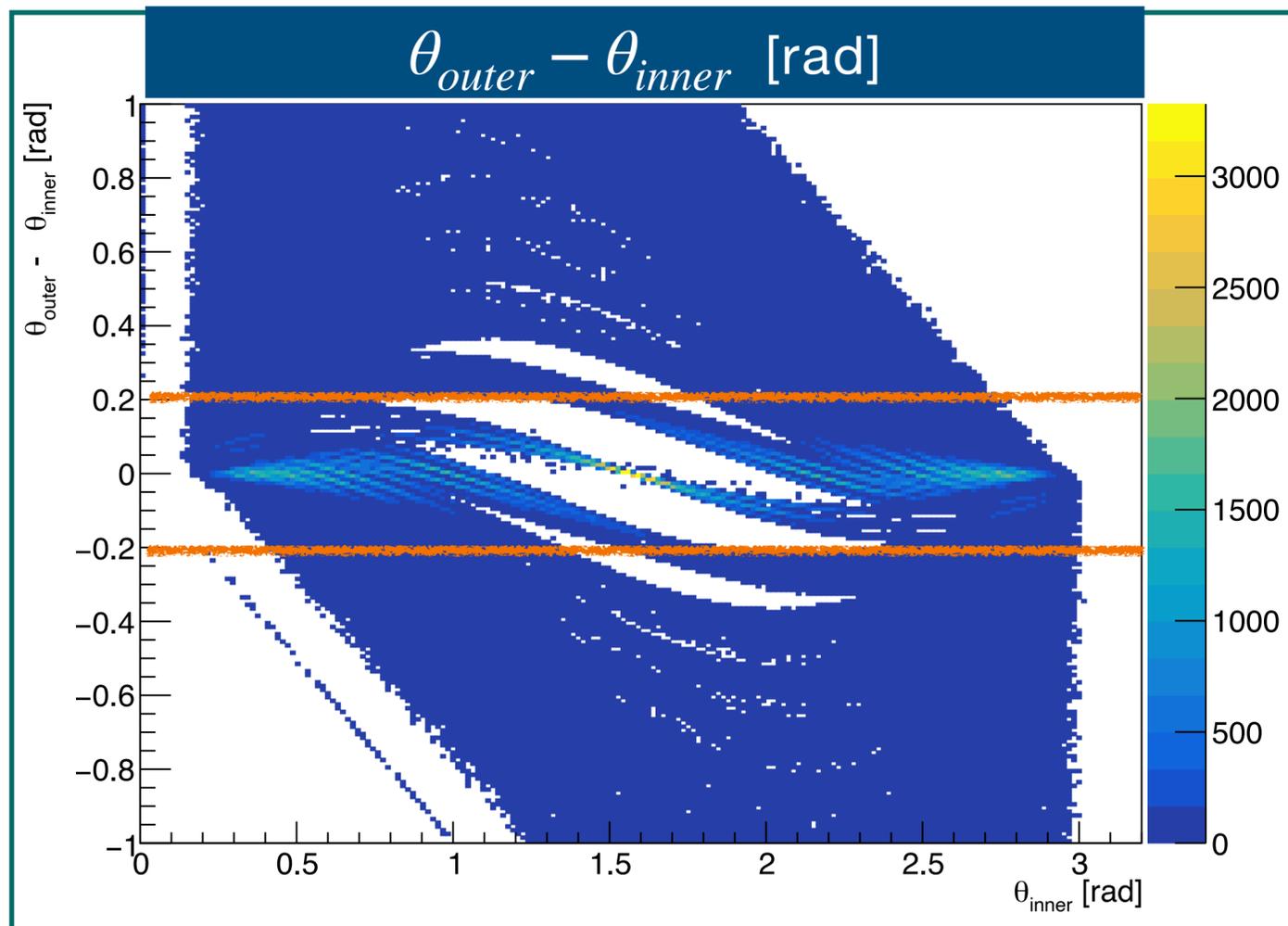
1: クラスタペアの選択 ($\Delta\phi$)

- 内層クラスター、外層クラスターを1点ずつ選ぶ。
 - クラスタペアの角度差が $|\phi_{outer} - \phi_{inner}| < 0.04$, $|\theta_{outer} - \theta_{inner}| < 0.2$ であるクラスタペアのみを選択する。

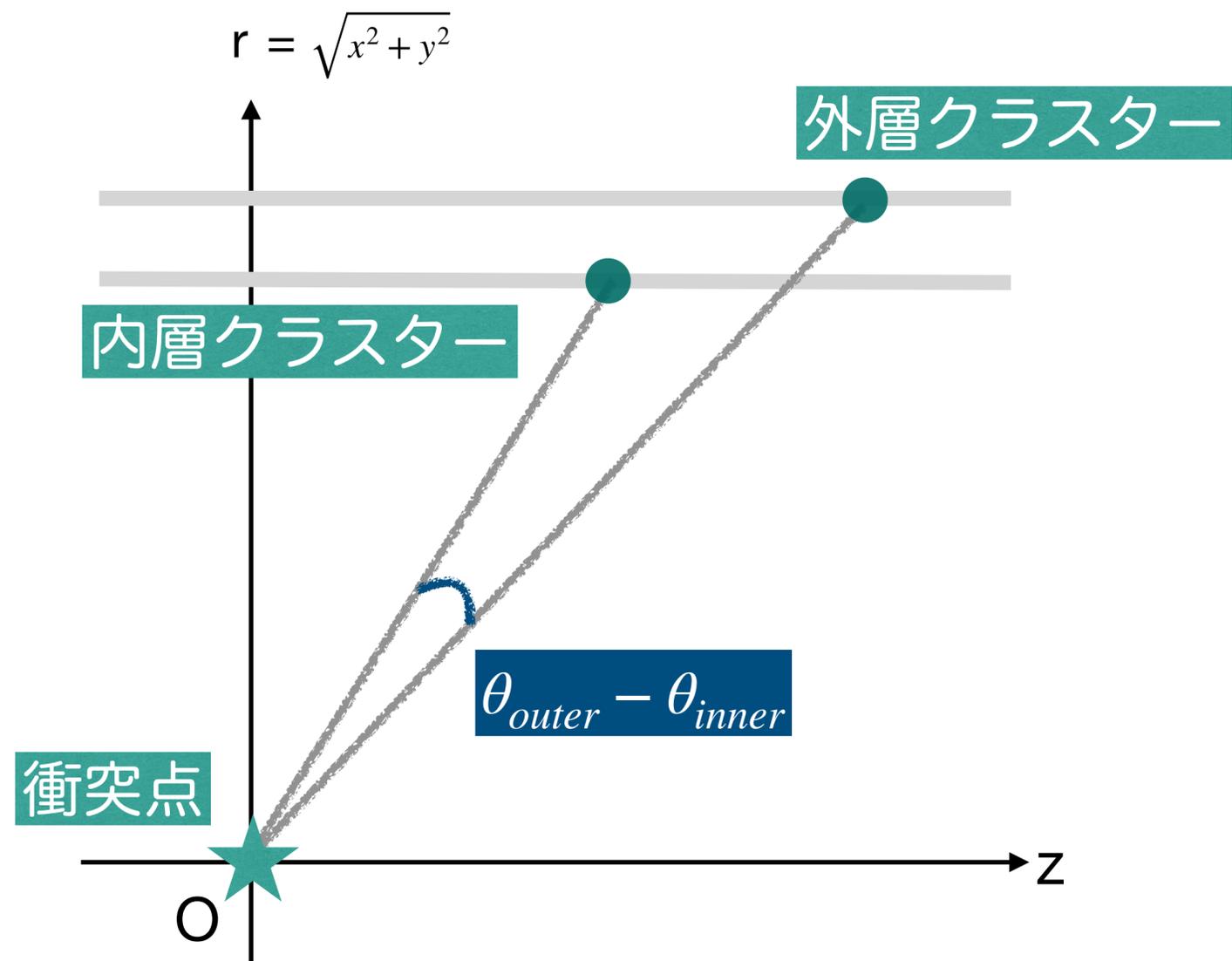


1: クラスタペアの選択 ($\Delta\theta$)

- 内層クラスター、外層クラスターを1点ずつ選ぶ。
 - クラスタペアの角度差が $|\phi_{outer} - \phi_{inner}| < 0.04$, $|\theta_{outer} - \theta_{inner}| < 0.2$ であるクラスタペアのみを選択する。



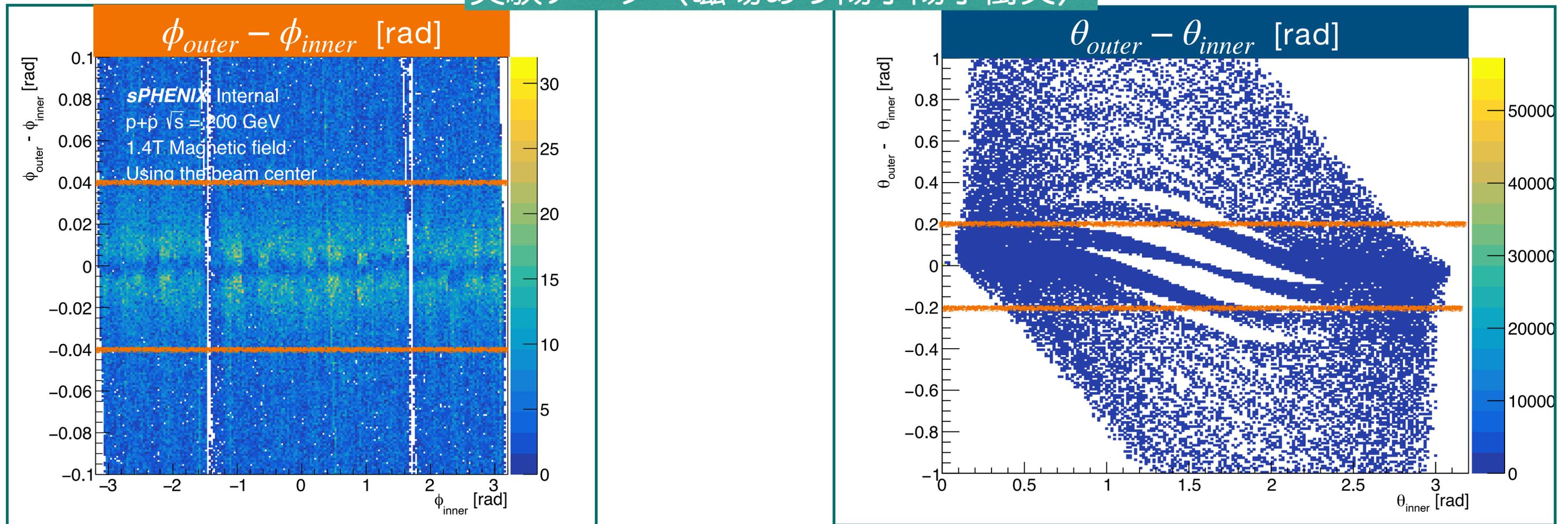
シミュレーション (磁場あり陽子陽子衝突)



1: クラスターペアの選択 (実験データ)

- 内層クラスター、外層クラスターを1点ずつ選ぶ。
 - クラスターペアの角度差が $|\phi_{outer} - \phi_{inner}| < 0.04$, $|\theta_{outer} - \theta_{inner}| < 0.2$ であるクラスターペアのみを選択する。

実験データ (磁場あり陽子陽子衝突)



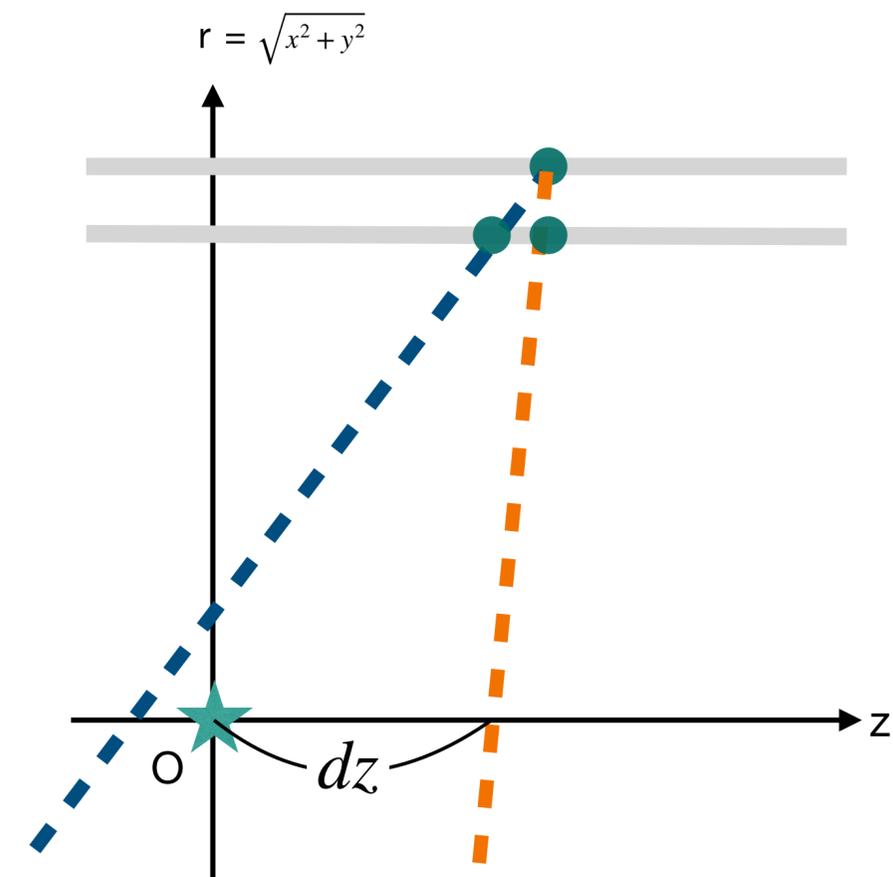
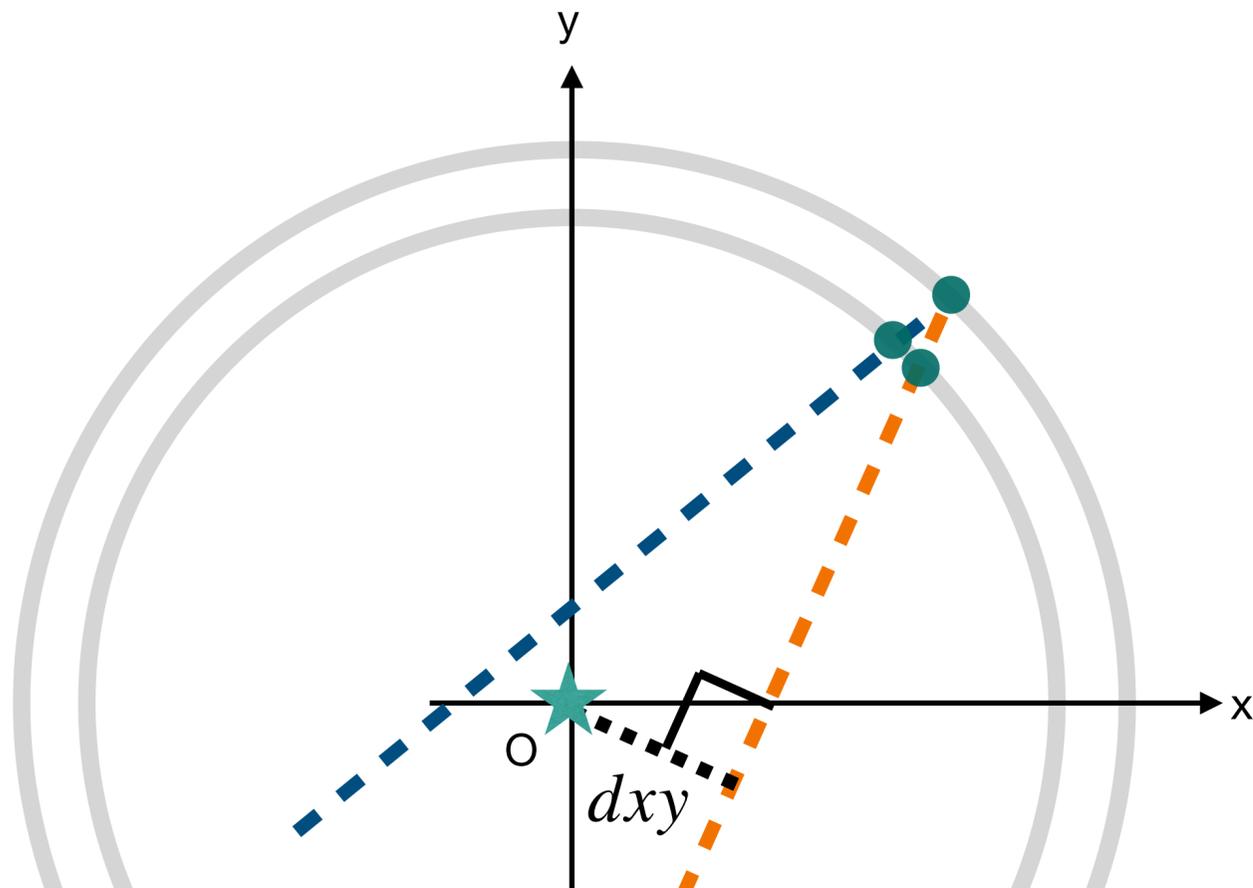
- 実験データでも $|\phi_{outer} - \phi_{inner}| < 0.04$, $|\theta_{outer} - \theta_{inner}| < 0.2$ にピークが見られる。
- ➡ 実験データでもアルゴリズムを適用可能である。

2：誤った組み合わせの除去

- 1つのクラスターが複数のクラスターペアの構成要素になってしまう場合：クラスターペアの外挿した直線と衝突点との距離が最も小さい（ χ^2 が最も小さい）クラスターペアのみを採用する。

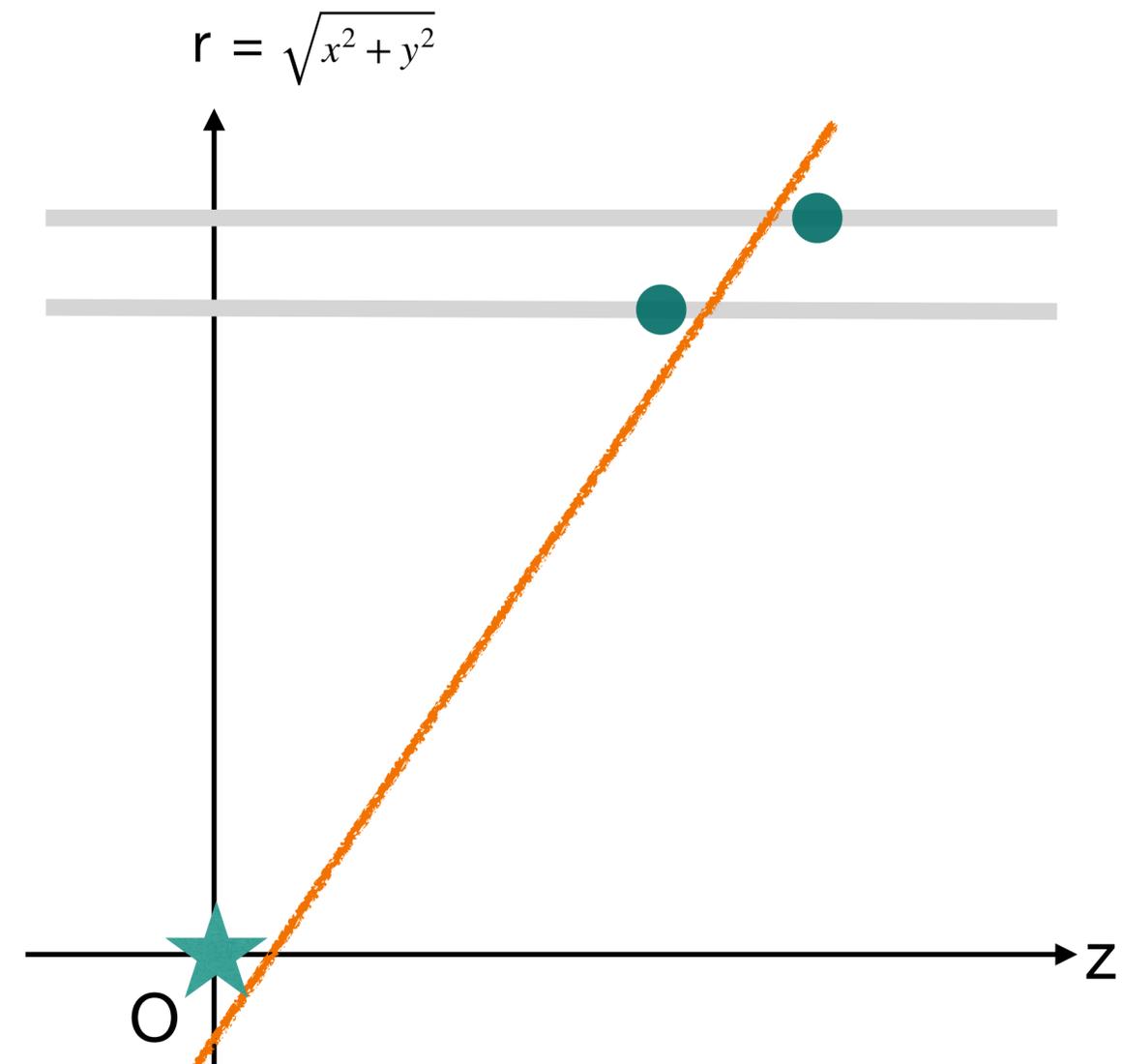
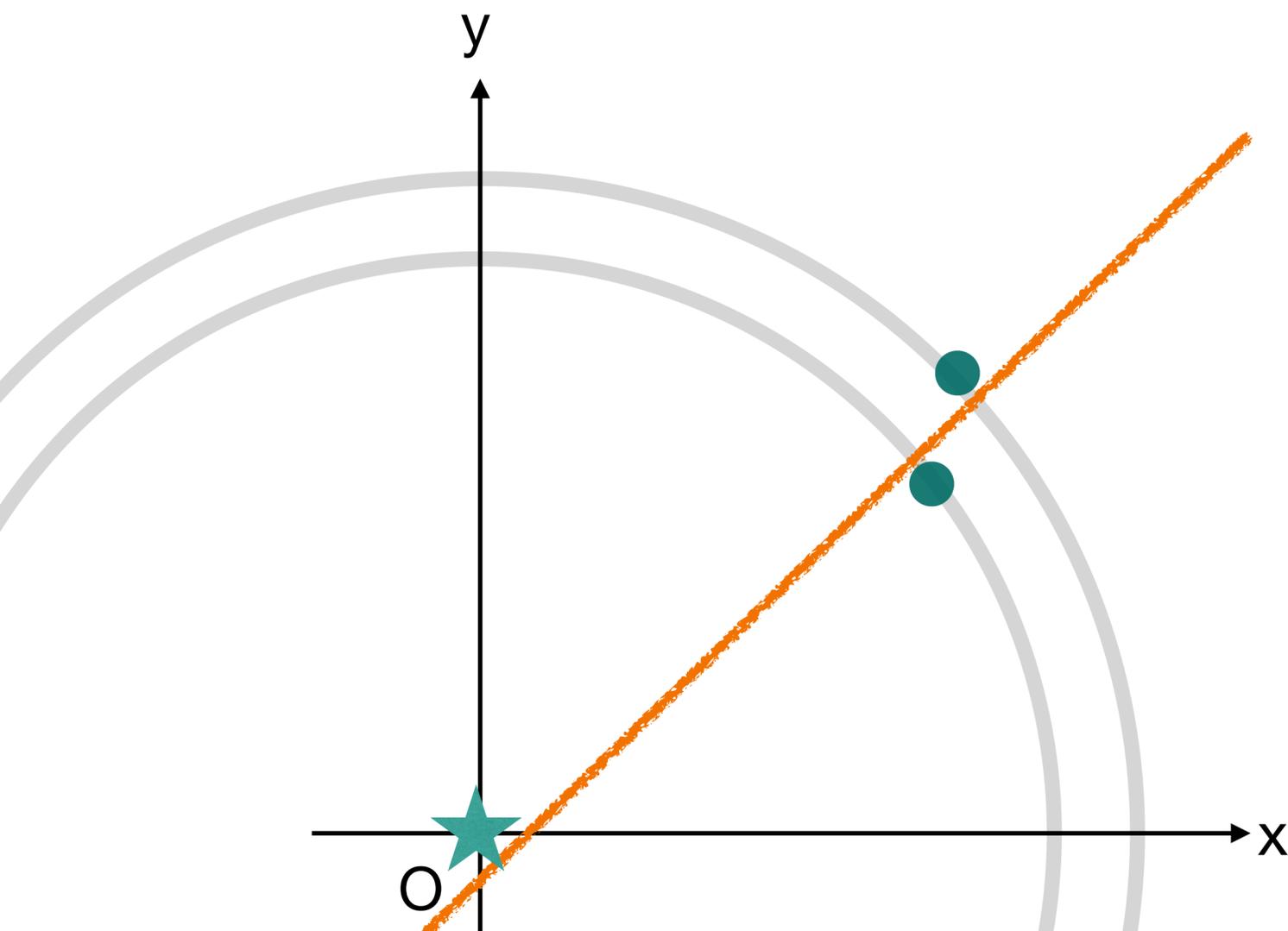
$$\chi^2 = \left(\frac{dxy}{\sigma_{xy}} \right)^2 + \left(\frac{dz}{\sigma_z} \right)^2$$

- dxy (dz) : x-y平面 (z軸) における衝突点とクラスターペアを外挿した直線間の距離。
- σ_{xy} (σ_z) : x-y平面 (z軸) におけるセンサーの分解能 $78 \mu\text{m}$ (20 mm)。



3 : クラスターペアの最適化

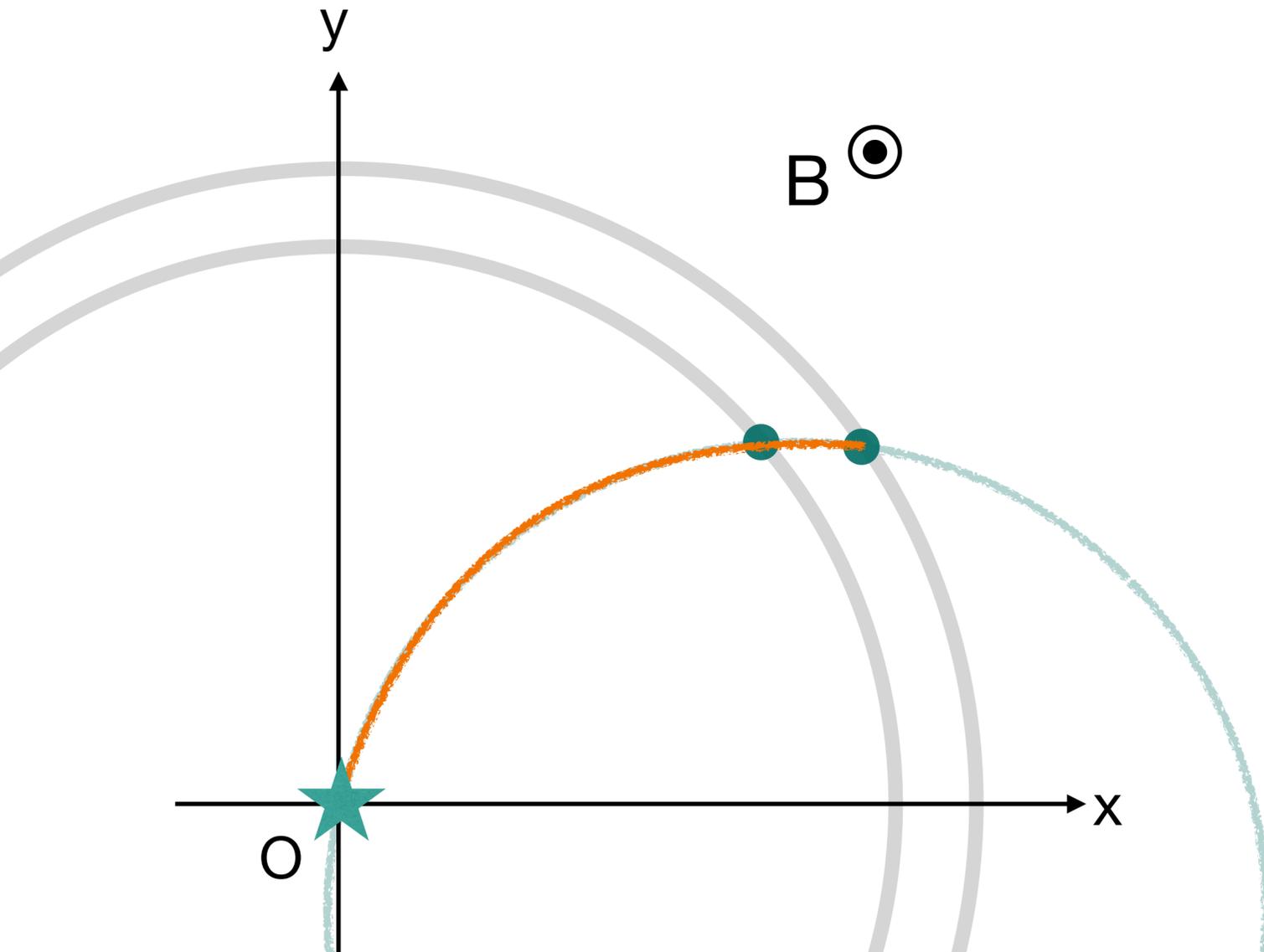
- 磁場なしデータの場合：衝突点、クラスターペアを最小二乗法によってフィッティングしたものを再構成された飛跡とする。



3 : クラスターペアの最適化 & 横運動量の算出

15

- 磁場ありデータの場合：
 - r-z平面：衝突点、クラスターペアを最小二乗法によってフィッティングしたものを再構成された飛跡とする。
 - x-y平面：衝突点、クラスターペアを円で結んだものを再構成された飛跡とする。



飛跡の円弧の半径 R および運動方程式より横運動量 p_T を求めることができる。

$$m \frac{v_T^2}{R} = e v_T B$$

$$p_T = 0.42R \quad [\text{GeV}/c]$$

使用したデータ（性能評価）

- アルゴリズムの評価のため、飛跡再構成効率および横運動量分解能を算出した。
 - 以下のシミュレーションデータを用いた。

【シミュレーションデータ】

- GEANT4
- 1粒子 (μ^-) 入射 × 10万事象
- 横運動量：0 ~ 5 GeVの一様分布
- 効率の計算：磁場なし / 横運動量分解能：磁場 1.4 T
- 入射源：ガウス分布
 - 中心： $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ cm
 - 幅： $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = (10^{-4}, 10^{-4}, 1)$ cm

飛跡再構成効率の定義

< 飛跡再構成効率 >

- 真の飛跡数に対する再構成された飛跡数の割合。

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}}$$

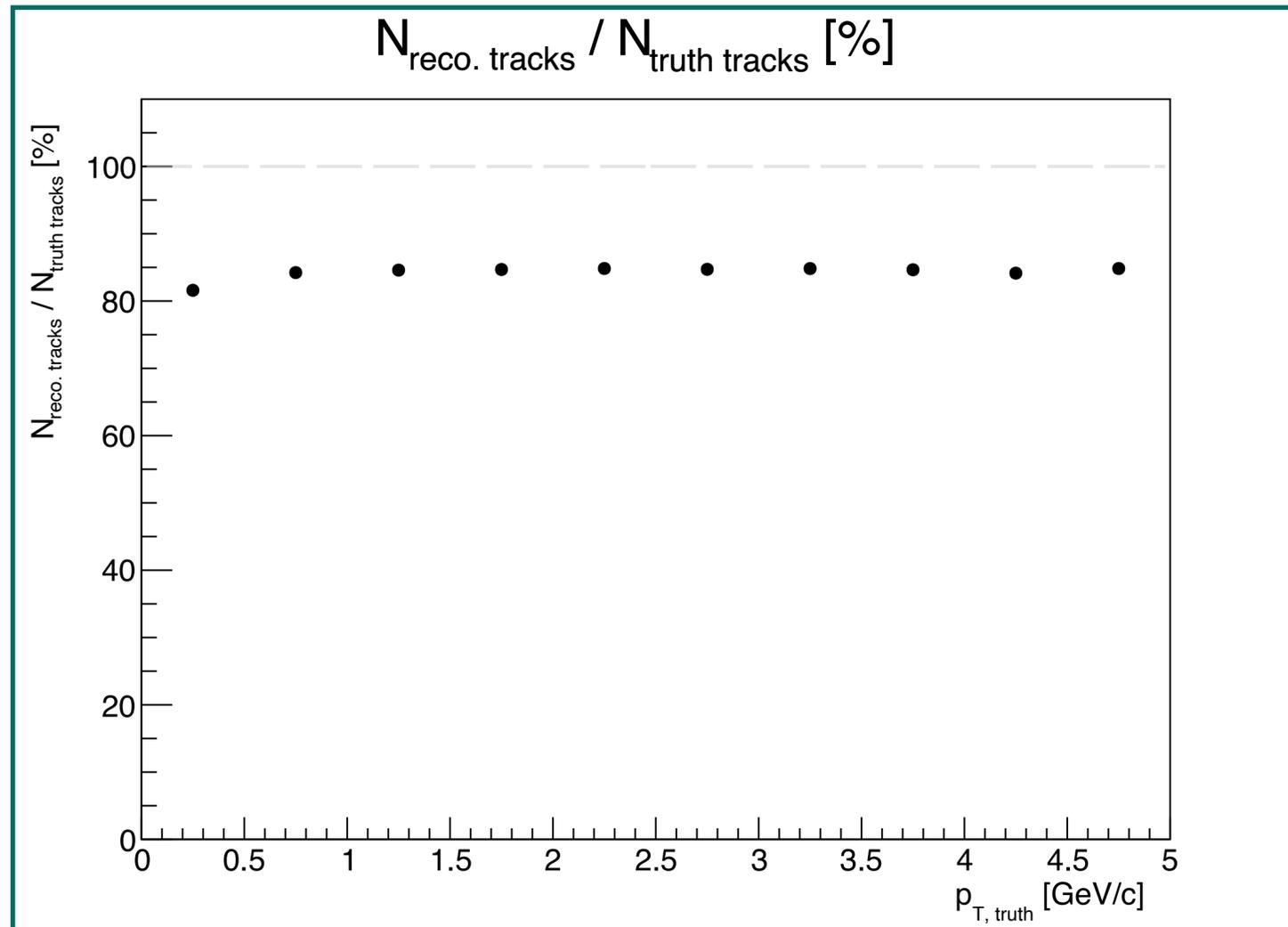
< 各変数の定義 >

$N_{\text{truth tracks}}$: INTTの検出可能領域を通過する真の飛跡数

- 条件 : 内層、外層 ($r = 7, 10 \text{ cm}$) を通るとききのz座標を算出、そのz座標が $|z| \leq 22.8 \text{ cm}$ となること。

$N_{\text{reco. tracks}}$: 正しく再構成された飛跡数

- シミュレーションにおいて、クラスターはそのクラスターを作った真の飛跡と同じIDを持つ。
- 条件 : その飛跡の再構成に用いられた内層、外層クラスターがどちらも同じIDを持つこと。



- 左図：飛跡再構成効率（真の飛跡数に対する再構成された飛跡数の割合）の横運動量依存性。

- <平均効率>

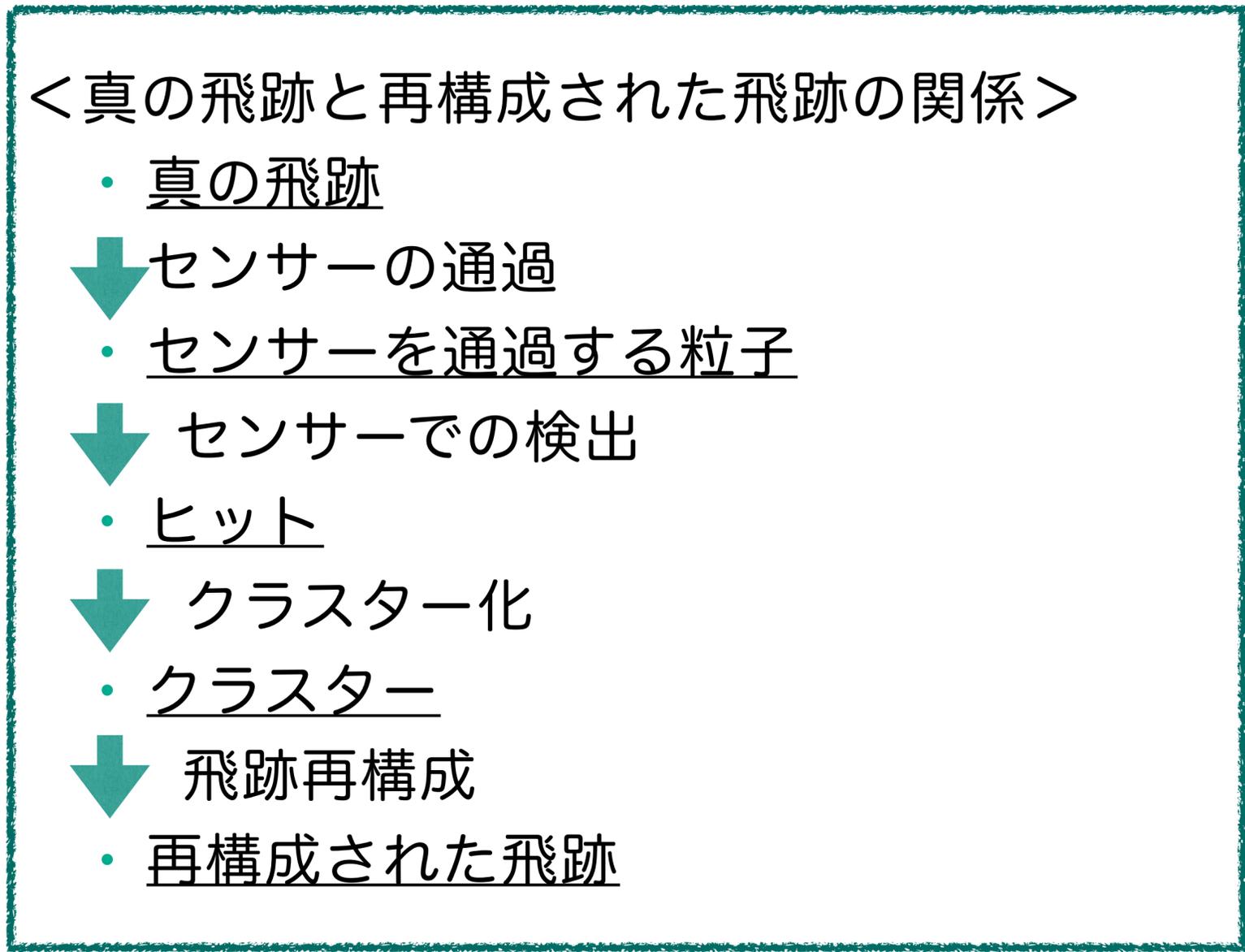
$$\frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}} = 84.40 \pm 0.12 \%$$

- 効率は横運動量0.5 GeV/c以下で少し低く、0.5 GeV/c以上では一定。

➡なぜ再構成効率は84.4%となるのか？

飛跡再構成効率の検証

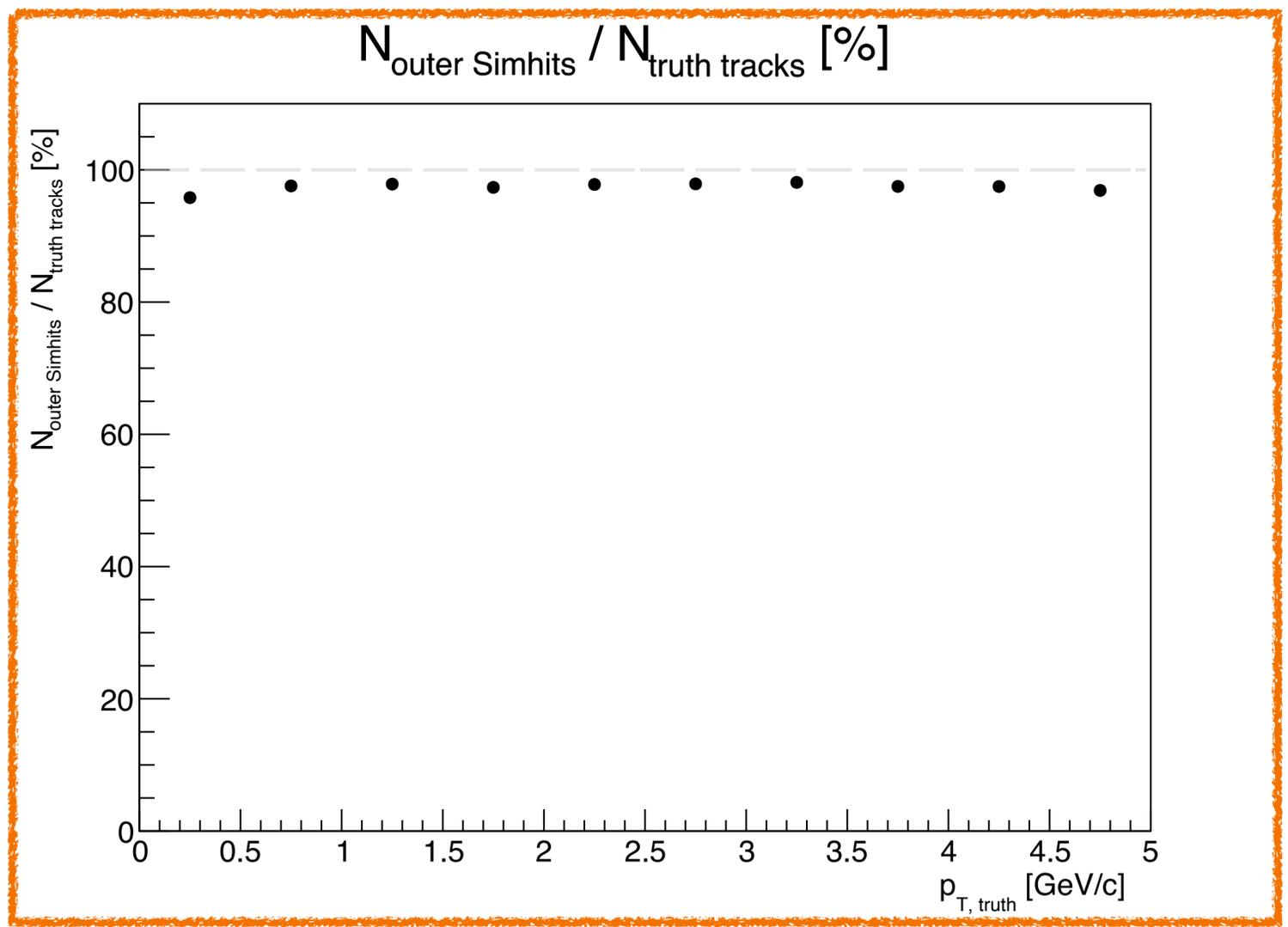
- 再構成効率における非効率の原因を調べるため、真の飛跡から再構成された飛跡になるまでの各過程における効率を算出した。



$$\frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}} = \frac{N_{\text{outer Simhits}}}{N_{\text{truth tracks}}} \times \frac{N_{\text{outer clusters}}}{N_{\text{outer Simhits}}} \times \frac{N_{\text{cluster pairs}}}{N_{\text{outer clusters}}} \times \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{cluster pairs}}}$$

効率：センサーの検出可能領域

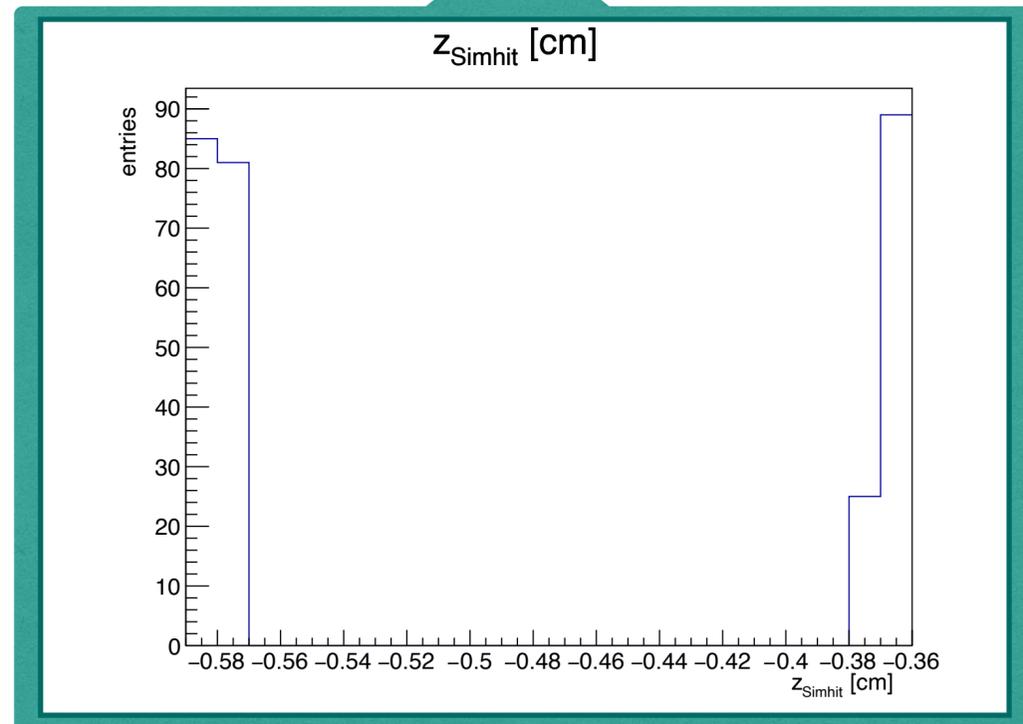
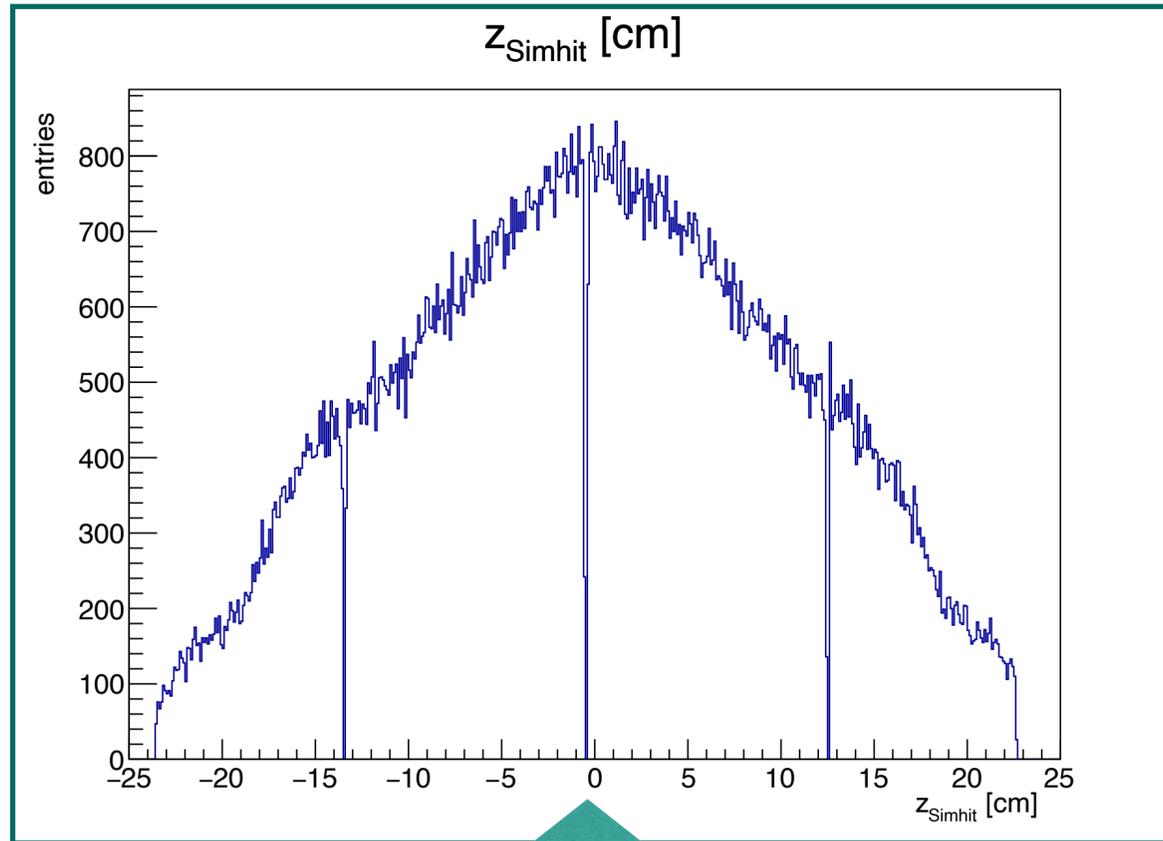
$$\frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}} = \frac{N_{\text{outer Simhits}}}{N_{\text{truth tracks}}} \times \frac{N_{\text{outer clusters}}}{N_{\text{outer Simhits}}} \times \frac{N_{\text{cluster pairs}}}{N_{\text{outer clusters}}} \times \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{cluster pairs}}}$$



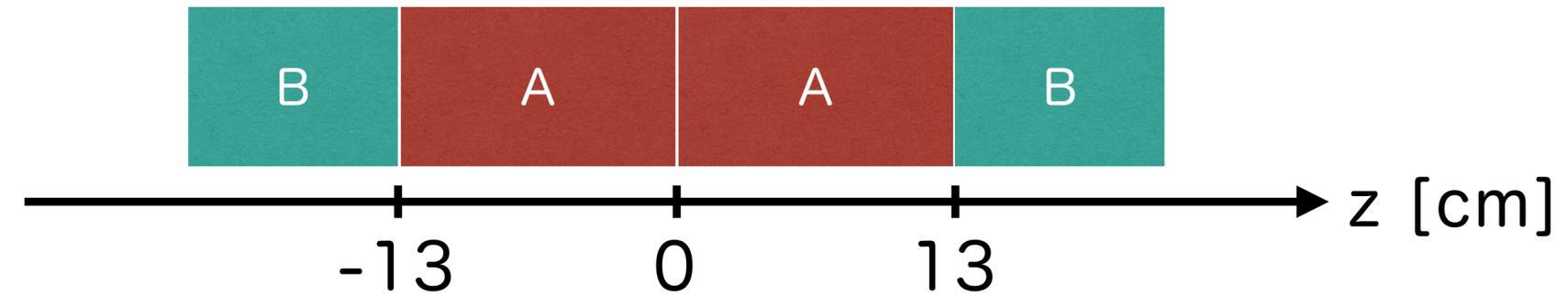
左図：真の飛跡数に対する外層センサーを通過した粒子数の割合の横運動量依存性。

- センサーの検出可能領域の割合を表す。
- 平均効率：97.34 ± 0.05 %
- 効率は横運動量0.5 GeV/c以下で少し低く、0.5 GeV/c以上では一定。

➡ 仮説：約3%の非効率の原因は、INTTセンサー上に存在する粒子を検出できない領域（非アクティブ領域）ではないか？



INTTラダー



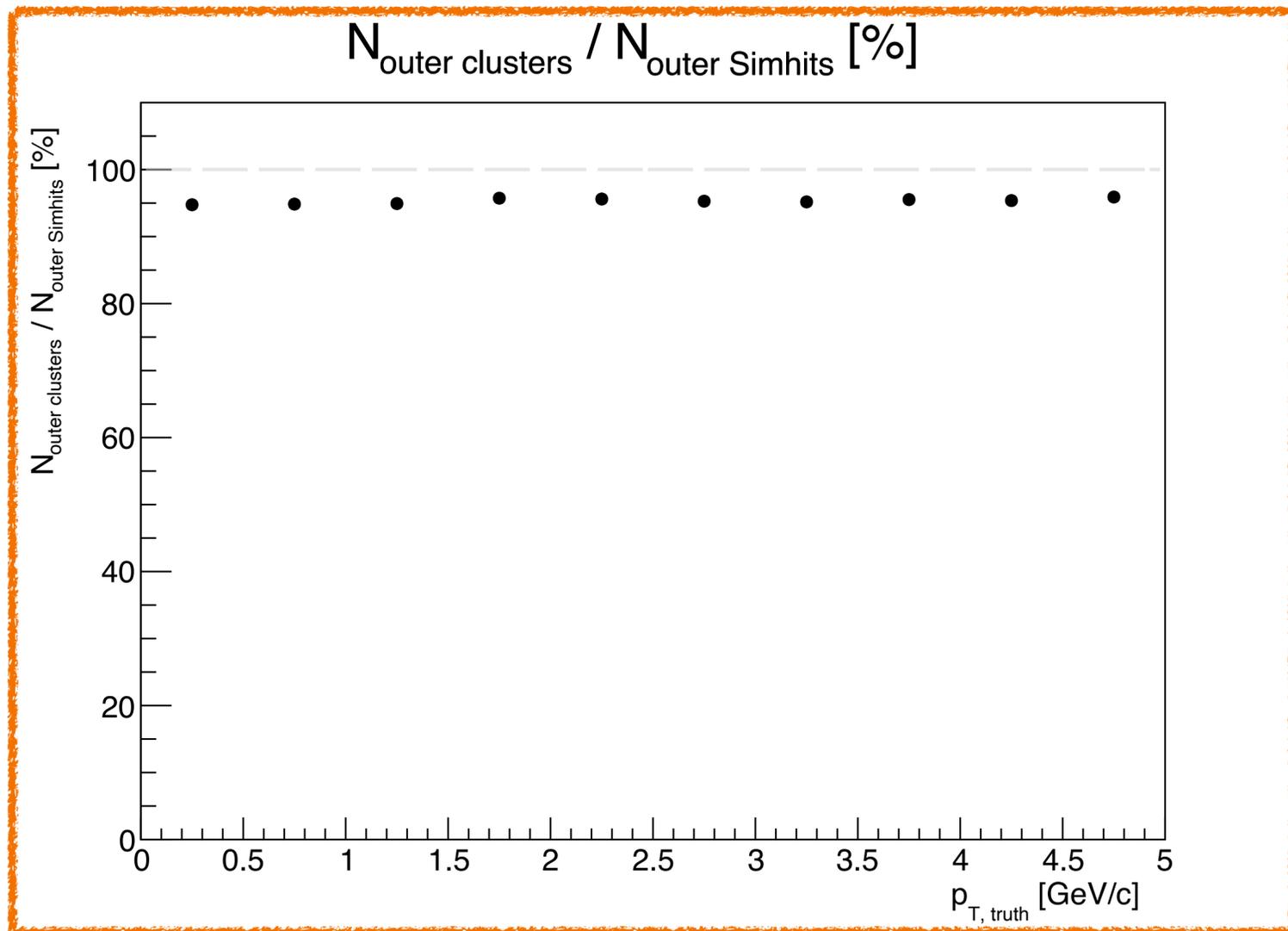
- INTTは $z \sim 0, \pm 13$ cmにそれぞれ0.2 cmの非アクティブ領域が存在する。

左図：外層センサーを通過した粒子のz座標。

- $z \sim 0, \pm 13$ cmに0.2 cmのヒットが存在しない領域が見られる。
- 分布全体において、ヒットのない領域を概算すると約3%であり、非効率に一致する。

効率：ヒットの検出・クラスター化

$$\frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}} = \frac{N_{\text{outer Simhits}}}{N_{\text{truth tracks}}} \times \frac{N_{\text{outer clusters}}}{N_{\text{outer Simhits}}} \times \frac{N_{\text{cluster pairs}}}{N_{\text{outer clusters}}} \times \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{cluster pairs}}}$$

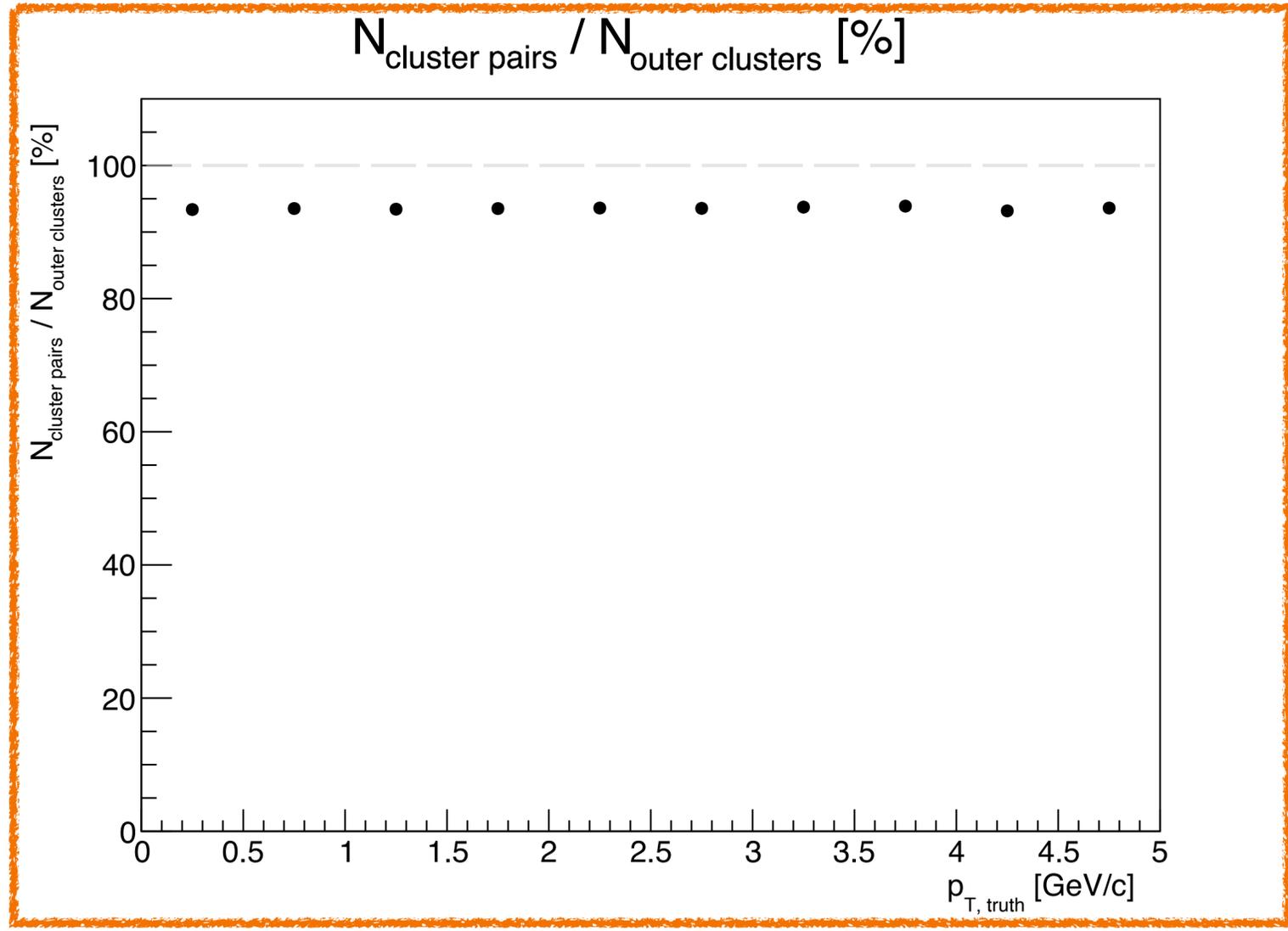


左図：外層センサーを通過した粒子数に対する外層クラスター数の割合の横運動量依存性。

- ヒットの検出およびクラスター化効率を表す。
- 平均効率： $95.47 \pm 0.07\%$
- 効率に横運動量依存性は見られない。
- 非効率の原因：センサーの故障によって粒子を検出できないセンサーストリップ（デッドチャンネル）による。シミュレーションでは5%のストリップをデッドチャンネルとしている。

効率：内層クラスター生成

$$\frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}} = \frac{N_{\text{outer Simhits}}}{N_{\text{truth tracks}}} \times \frac{N_{\text{outer clusters}}}{N_{\text{outer Simhits}}} \times \frac{N_{\text{cluster pairs}}}{N_{\text{outer clusters}}} \times \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{cluster pairs}}}$$

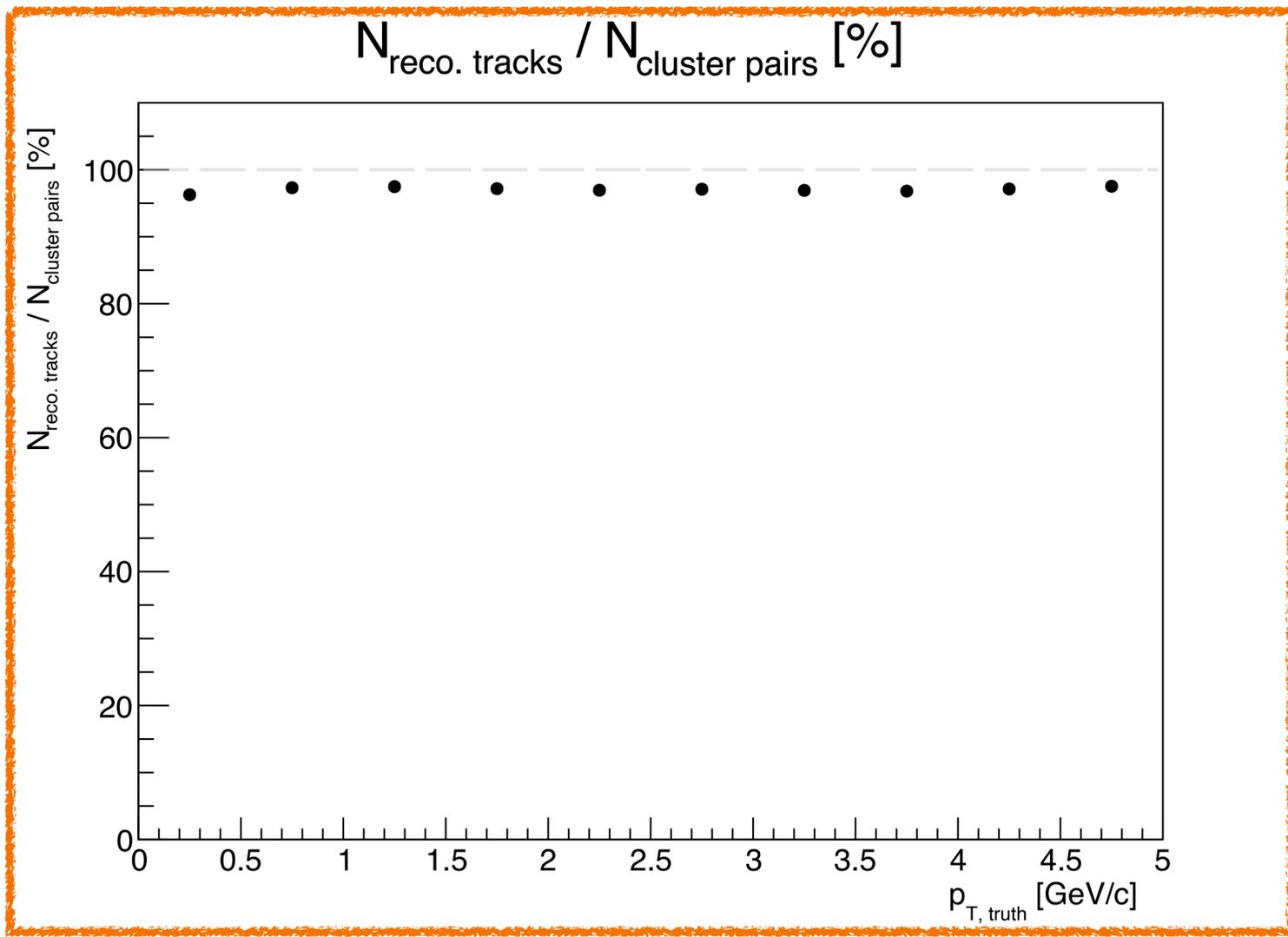


左図：外層クラスター数に対するクラスターペア数の割合の横運動量依存性。

- 内層クラスターの生成効率を表す。
- 平均効率： $93.70 \pm 0.08\%$
- 効率に横運動量依存性は見られない。
- 前述した外層クラスターの生成効率 (~93.0%) と同程度である。

効率：アルゴリズム

$$\frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}} = \frac{N_{\text{outer Simhits}}}{N_{\text{truth tracks}}} \times \frac{N_{\text{outer clusters}}}{N_{\text{outer Simhits}}} \times \frac{N_{\text{cluster pairs}}}{N_{\text{outer clusters}}} \times \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{cluster pairs}}}$$



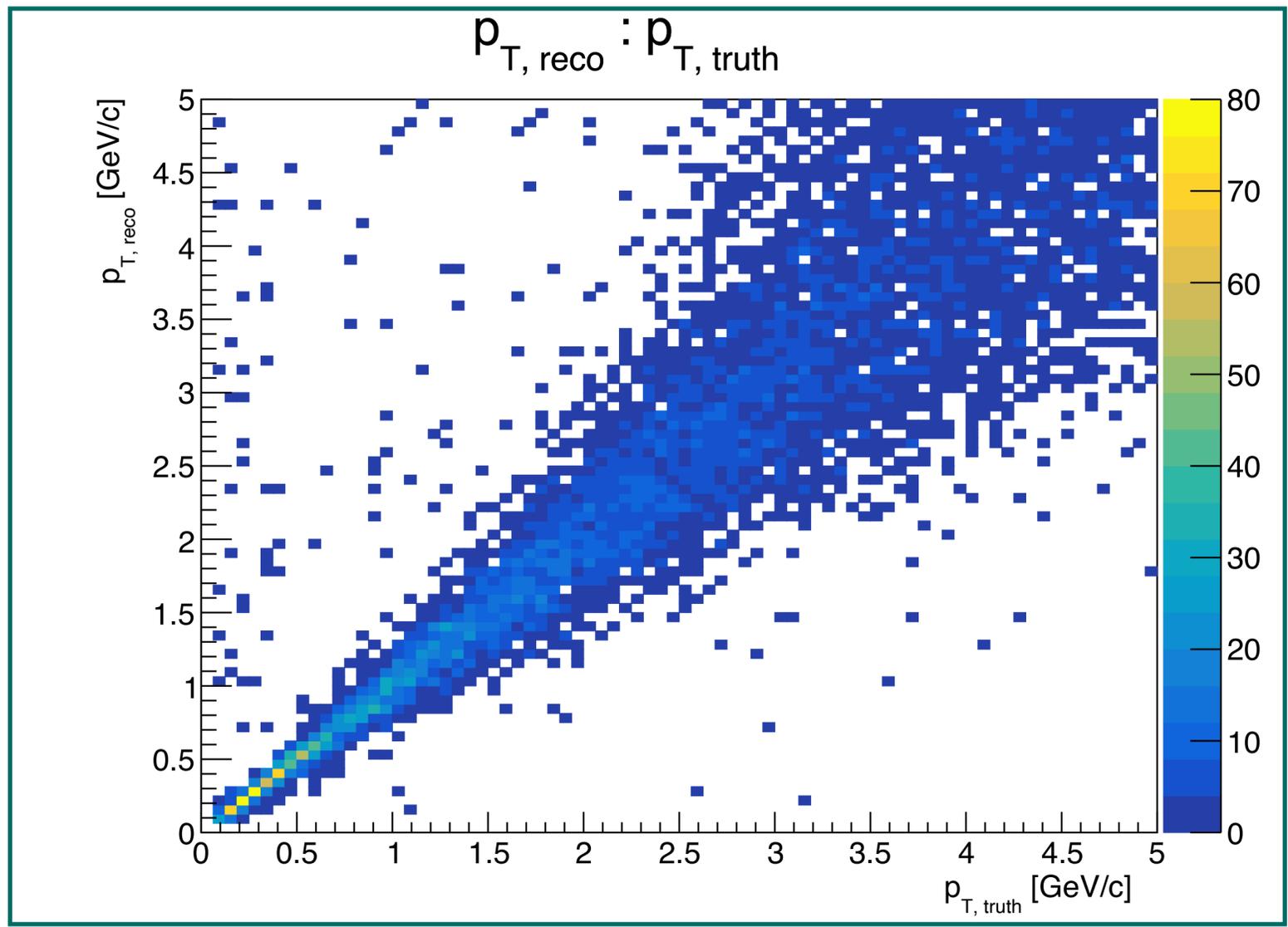
左図：クラスターペア数に対する再構成された飛跡数の割合の横運動量依存性。

- アルゴリズムの効率を表す。
- 平均効率： $97.03 \pm 0.06\%$
- 効率は横運動量 $0.5 \text{ GeV}/c$ 以下で少し低く、 $0.5 \text{ GeV}/c$ 以上では一定。
- アルゴリズムにおいてクラスターペアを選択する際の角度カットの影響を受けている。

飛跡再構成効率まとめ

	飛跡再構成 効率	= 外層センサーの 検出可能領域	外層ヒット検出 および クラスター化	内層ヒット生成	アルゴリズム
	$\frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}}$	= $\frac{N_{\text{outer Simhits}}}{N_{\text{truth tracks}}}$	$\times \frac{N_{\text{outer clusters}}}{N_{\text{outer Simhits}}}$	$\times \frac{N_{\text{cluster pairs}}}{N_{\text{outer clusters}}}$	$\times \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{cluster pairs}}}$
効率[%]	84.40	97.34	95.47	93.70	97.03
非効率 の原因		外層センサーの 非アクティブ領域	外層センサー の故障	内層センサーの 非アクティブ領域 および故障	アルゴリズム における 角度カット

再構成された横運動量



- アルゴリズムの評価のため、真の飛跡と再構成された飛跡間で横運動量の比較を行った。

左図：真の飛跡と再構成された飛跡の横運動量相関

- 再構成された横運動量は真の飛跡と相関がある。

➡横運動量分解能を評価する。

横運動量分解能の算出

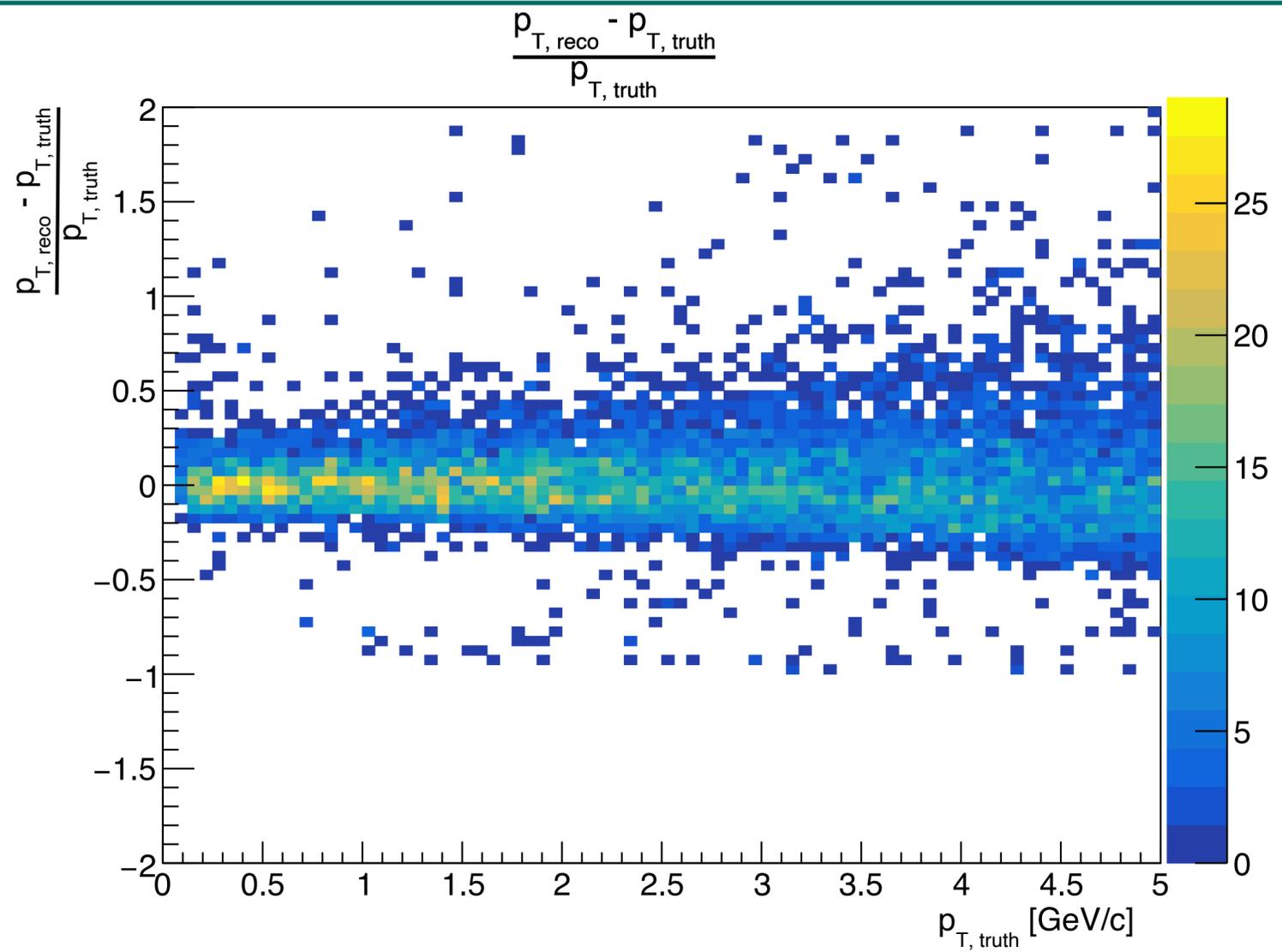
横運動量分解能の算出は以下の手順で行う。

左図：真の飛跡の横運動量に対する再構成された飛跡・真の飛跡間の横運動量の差分の割合

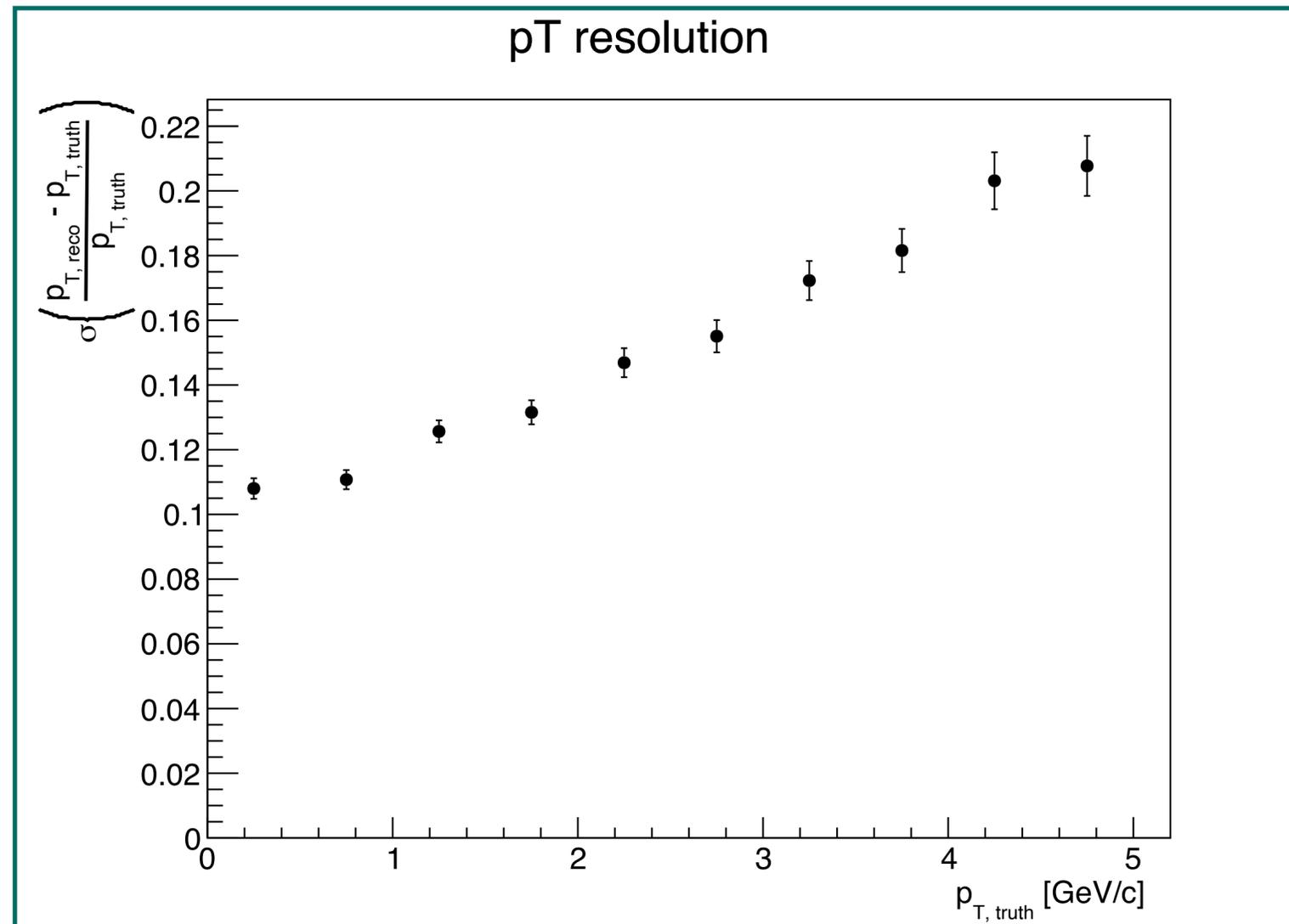
合 $\frac{\Delta p}{p}$ の横運動量依存性。

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{p_{T, \text{reco.}} - p_{T, \text{truth}}}{p_{T, \text{truth}}}$$

→ 分布を横運動量0.5 GeV/cごとに区切り、それぞれをガウス分布でフィッティングし、幅（＝横運動量分解能）を求める。



左図：横運動量分解能の横運動量依存性



- 横運動量分解能は真の飛跡の横運動量1 GeV/cにおいて10%であり、直線的に増加、5 GeV/cにおいて20%となる。

- sPHENIX実験のINTT検出器を用いて飛跡再構成アルゴリズムを開発した。
 - 高い時間分解能を持つINTTを用いることで衝突事象ごとの飛跡再構成が可能。
- シミュレーションを用いて飛跡再構成効率、横運動量分解能の算出を行った。
 - 飛跡再構成効率は 84.40%である。
 - 非効率の原因はセンサー上の非アクティブ領域（粒子を検出できない領域）、デッドチャンネル（故障したセンサーストリップ）、アルゴリズム中の角度カットによるものと同定した。
 - 横運動量分解能は横運動量1 GeV/cにおいて10%であり、直線的に増加、5 GeV/cにおいて20%となる。

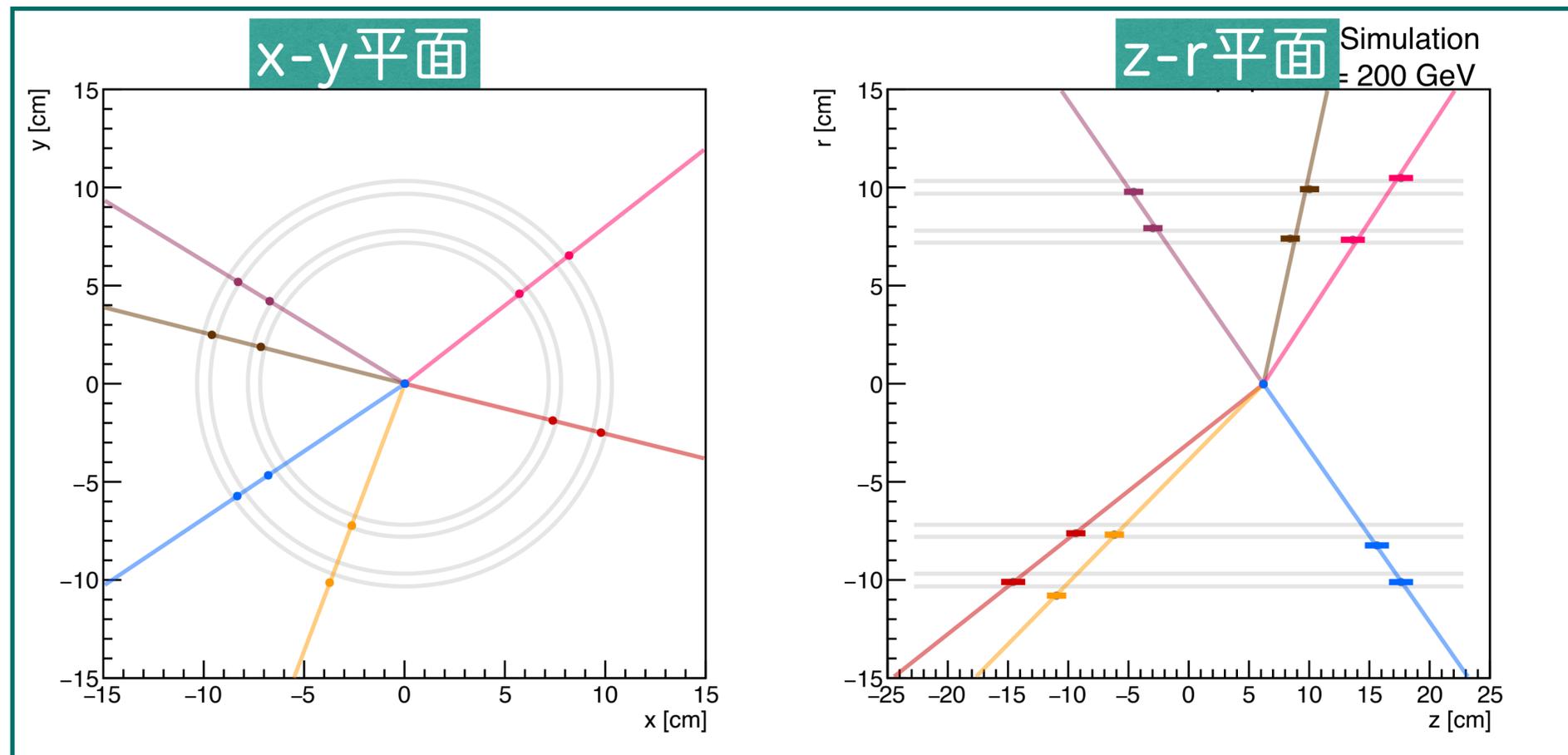
<今後の展望>

- 飛跡再構成効率：より現実的な環境（1粒子ではなく複数の粒子の入射）のシミュレーションを用いて算出。

BACK UP

再構成された飛跡 (磁場なしMC)

- 磁場なしシミュレーションデータを用いて、飛跡再構成を行なった。



色線：再構成された飛跡

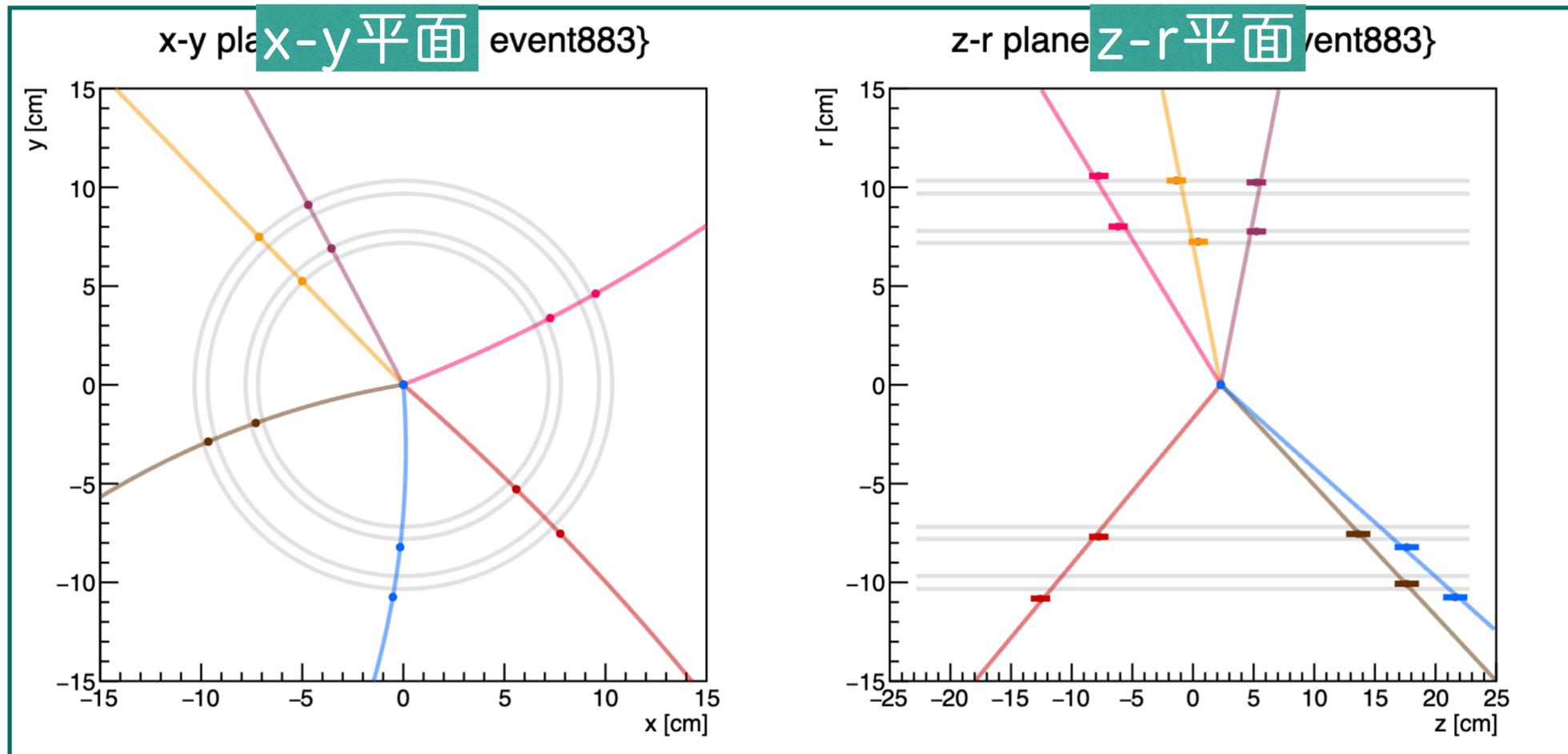
色点：再構成に使われたクラスター

(それぞれの色は両平面で共通)

黒点：それ以外のクラスター

再構成された飛跡 (磁場ありMC)

- 磁場ありシミュレーションデータを用いて、飛跡再構成を行なった。



色線：再構成された飛跡

色点：再構成に使われたクラスター
(それぞれの色は両平面で共通)

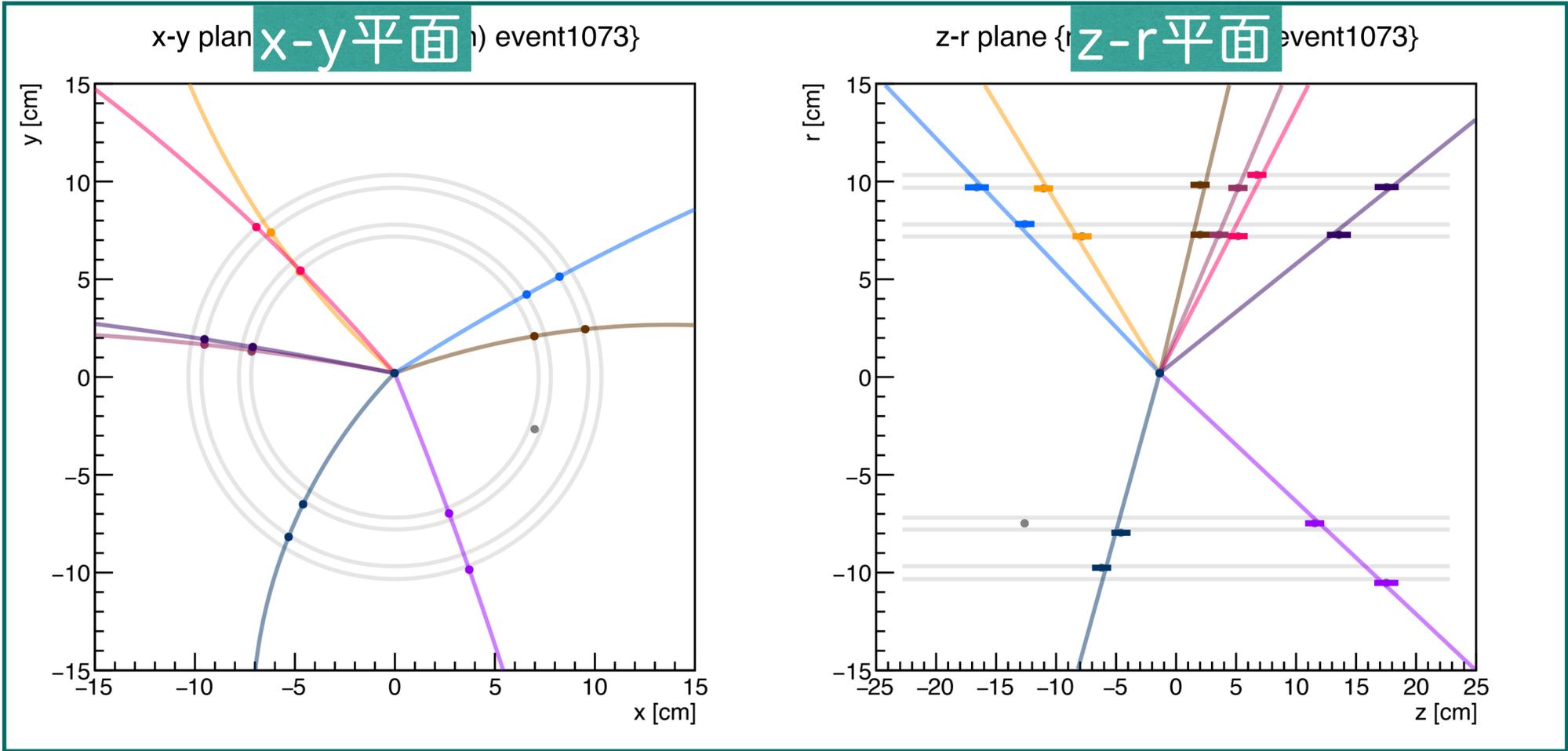
黒点：それ以外のクラスター

再構成された飛跡（磁場ありデータ）

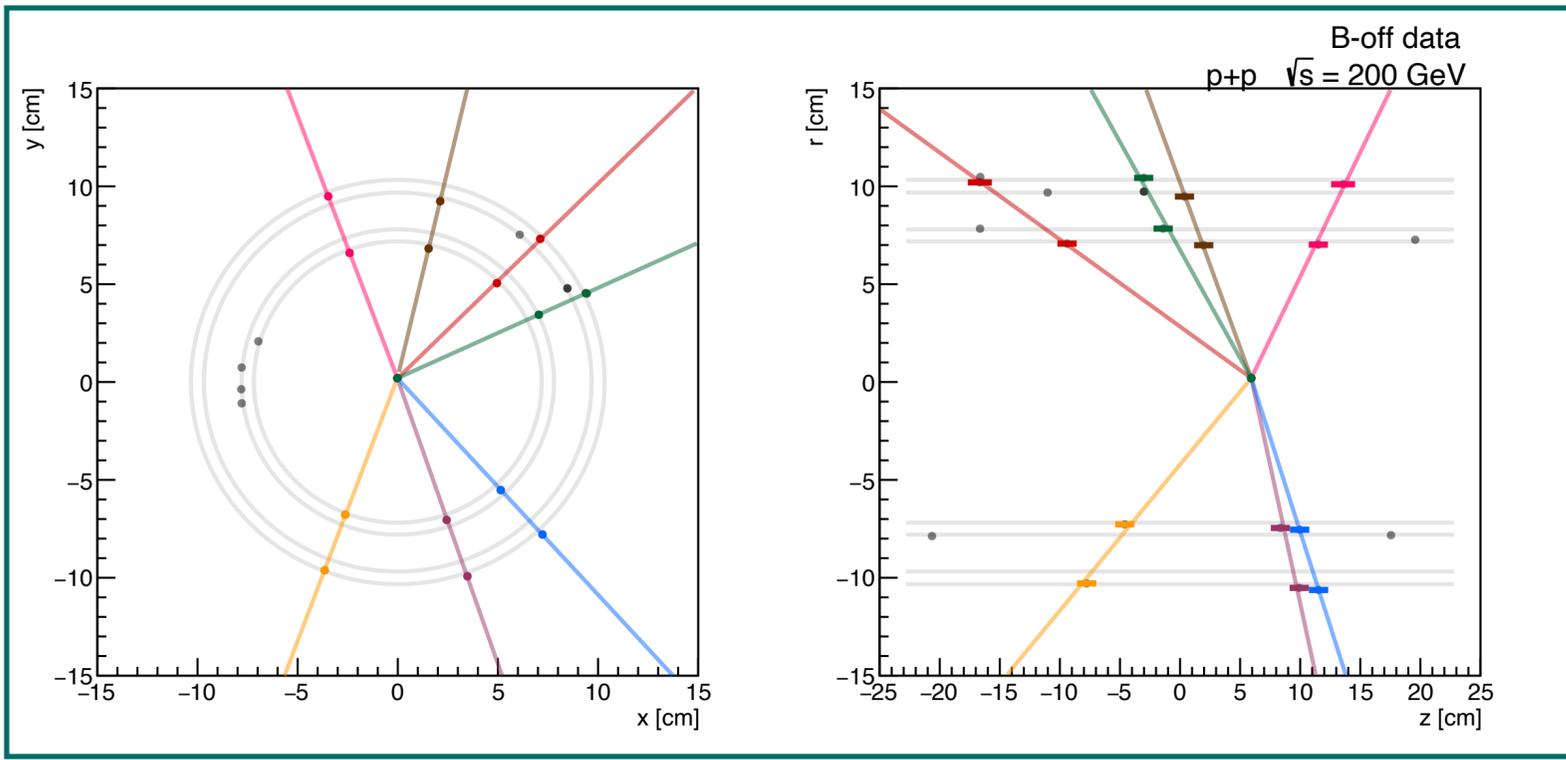
- 2024年に収集された磁場ありデータを用いて、飛跡再構成を行なった。

色線：再構成された飛跡
色点：再構成に使われたクラスター
（それぞれの色は両平面で共通）
黒点：それ以外のクラスター

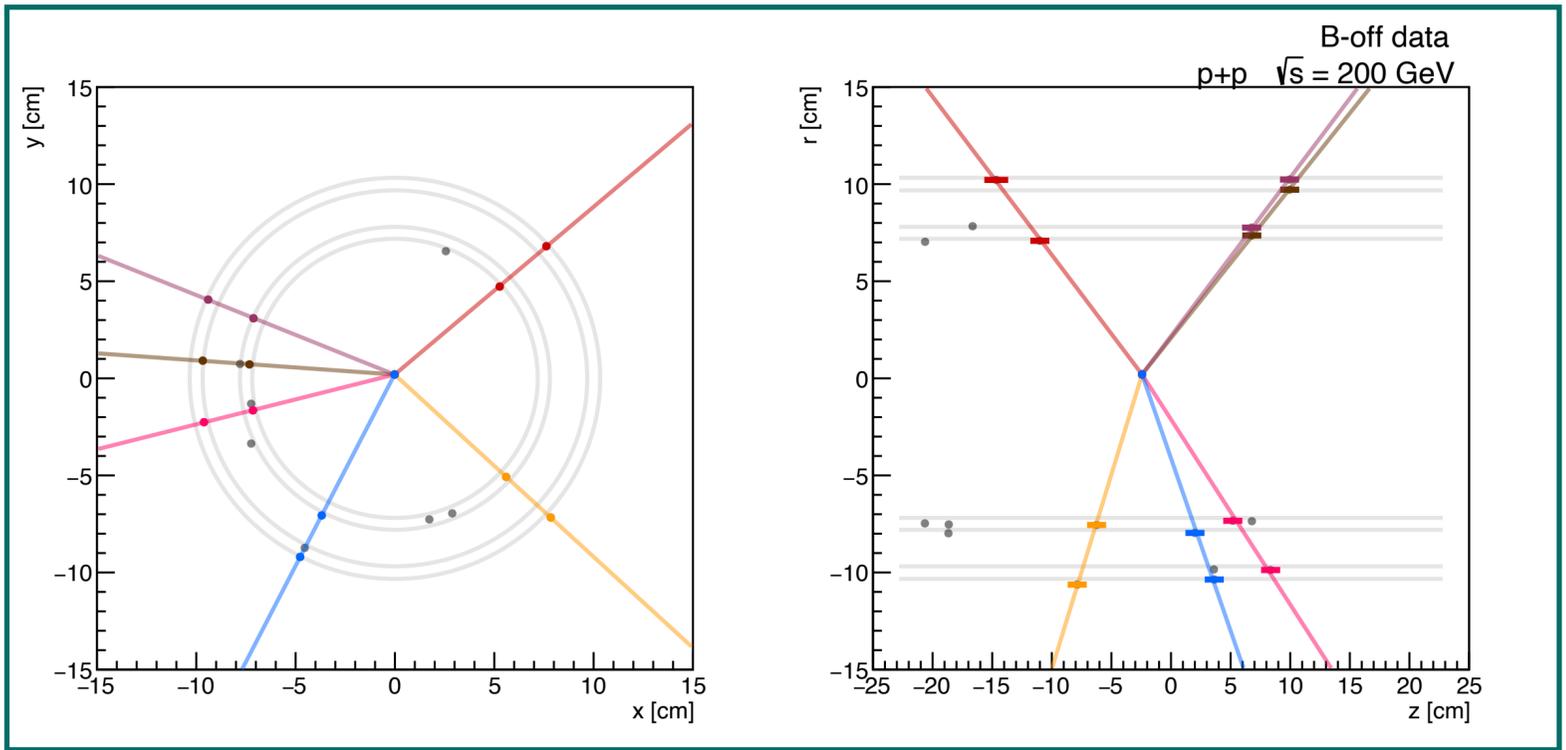
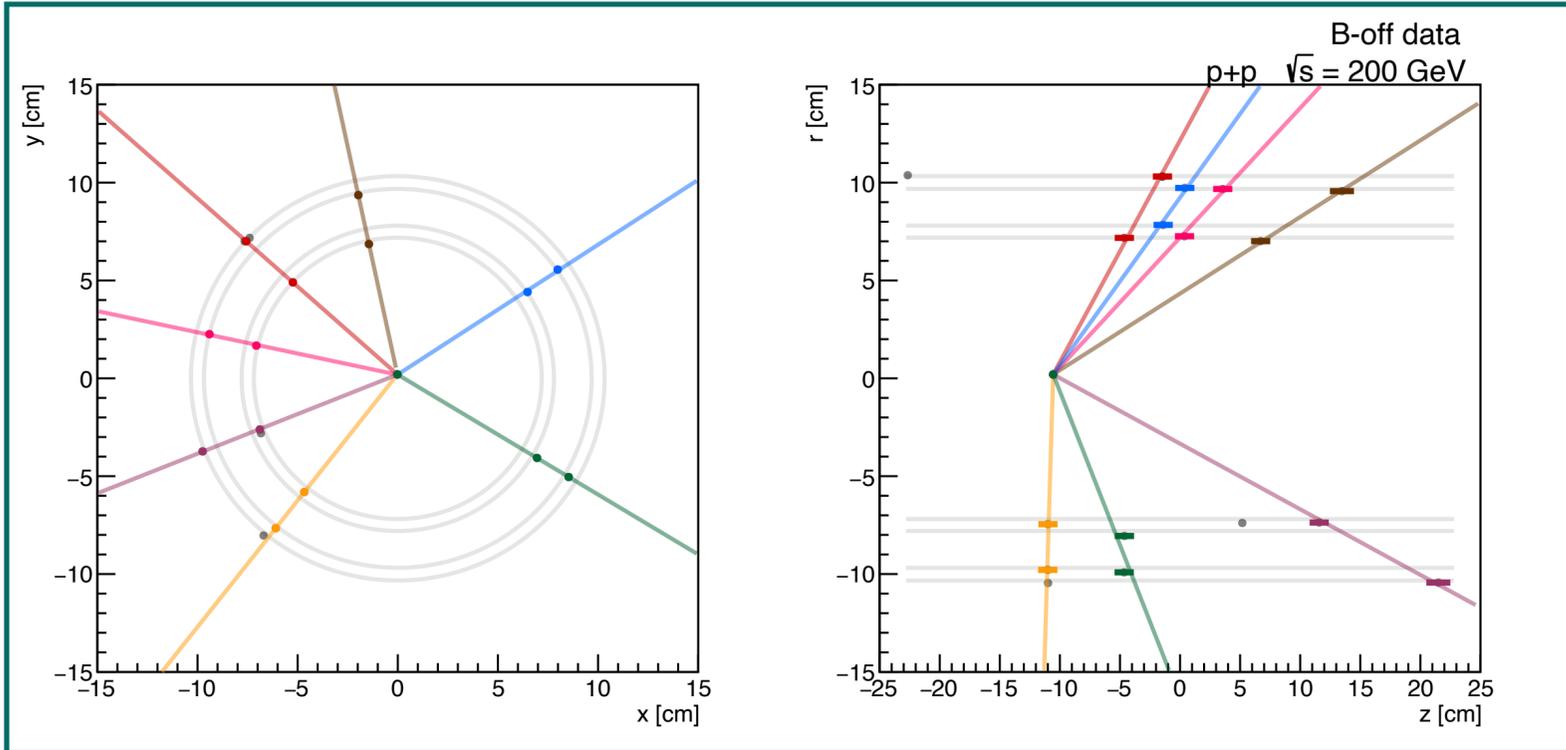
- 2024年に収集されたデータでも飛跡再構成をすることができる。
- 今後の課題として、定量的な評価をする予定。
 - 各パラメータ（飛跡の角度など）をシミュレーションと比較するなど



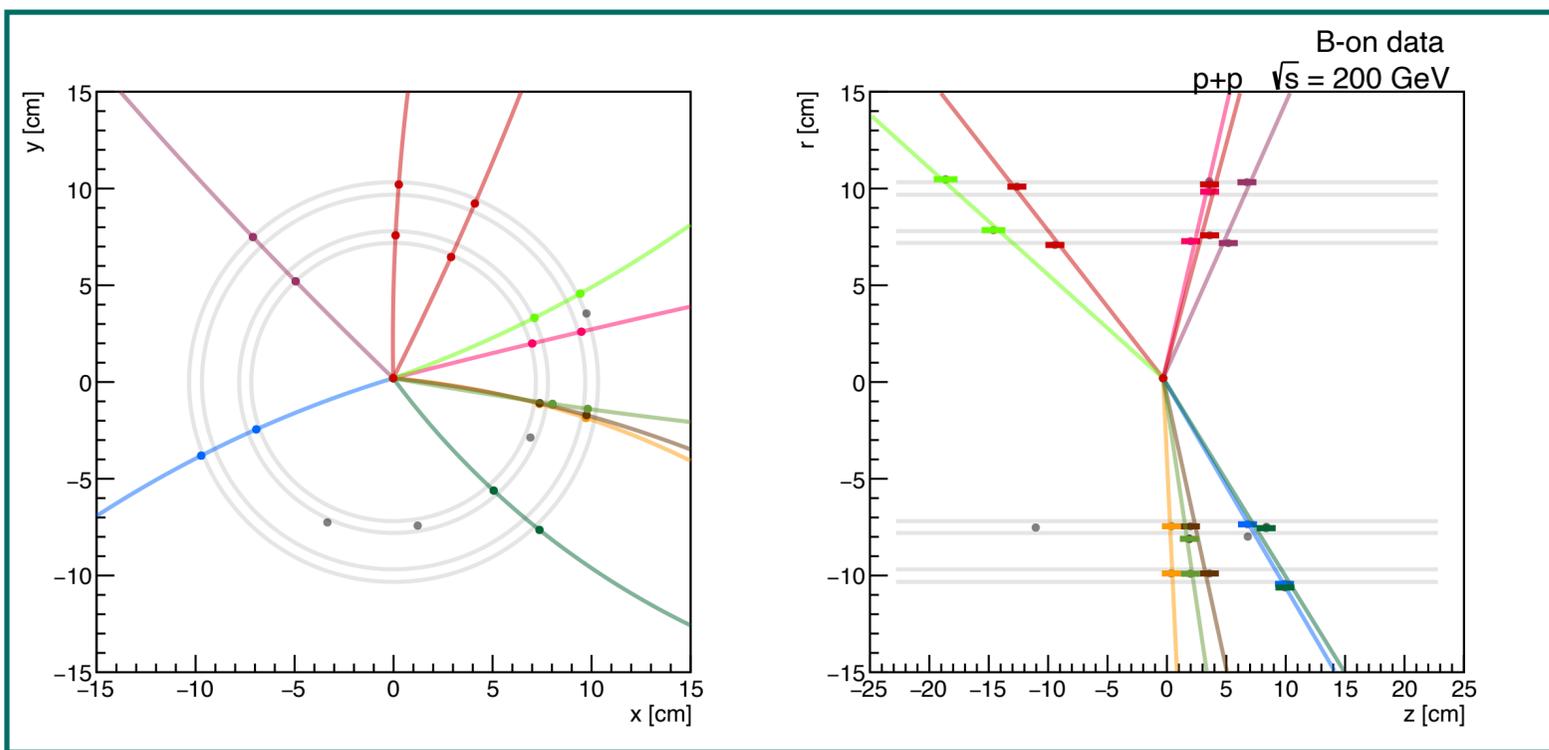
良さげなイベントディスプレイ (磁場なしデータ) 34



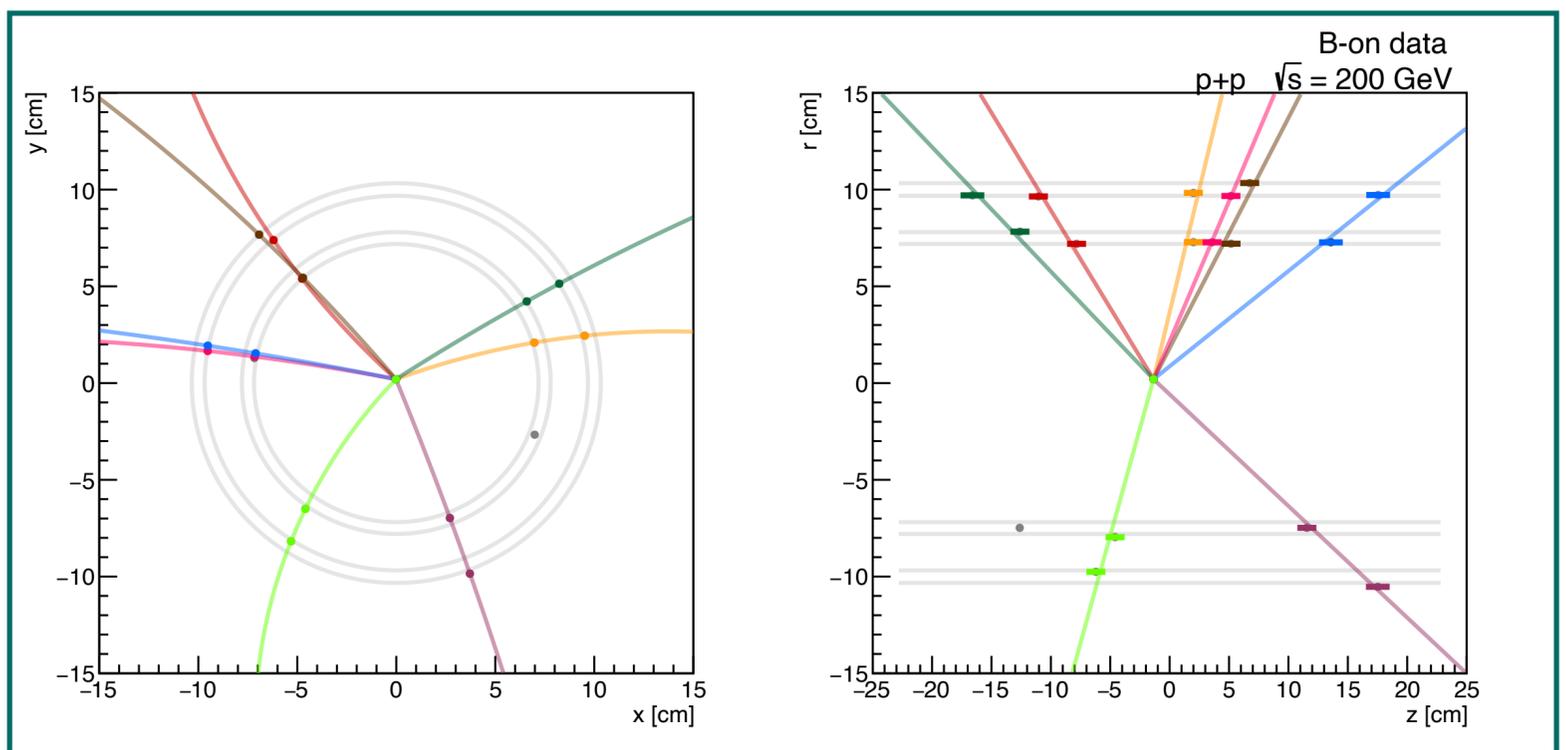
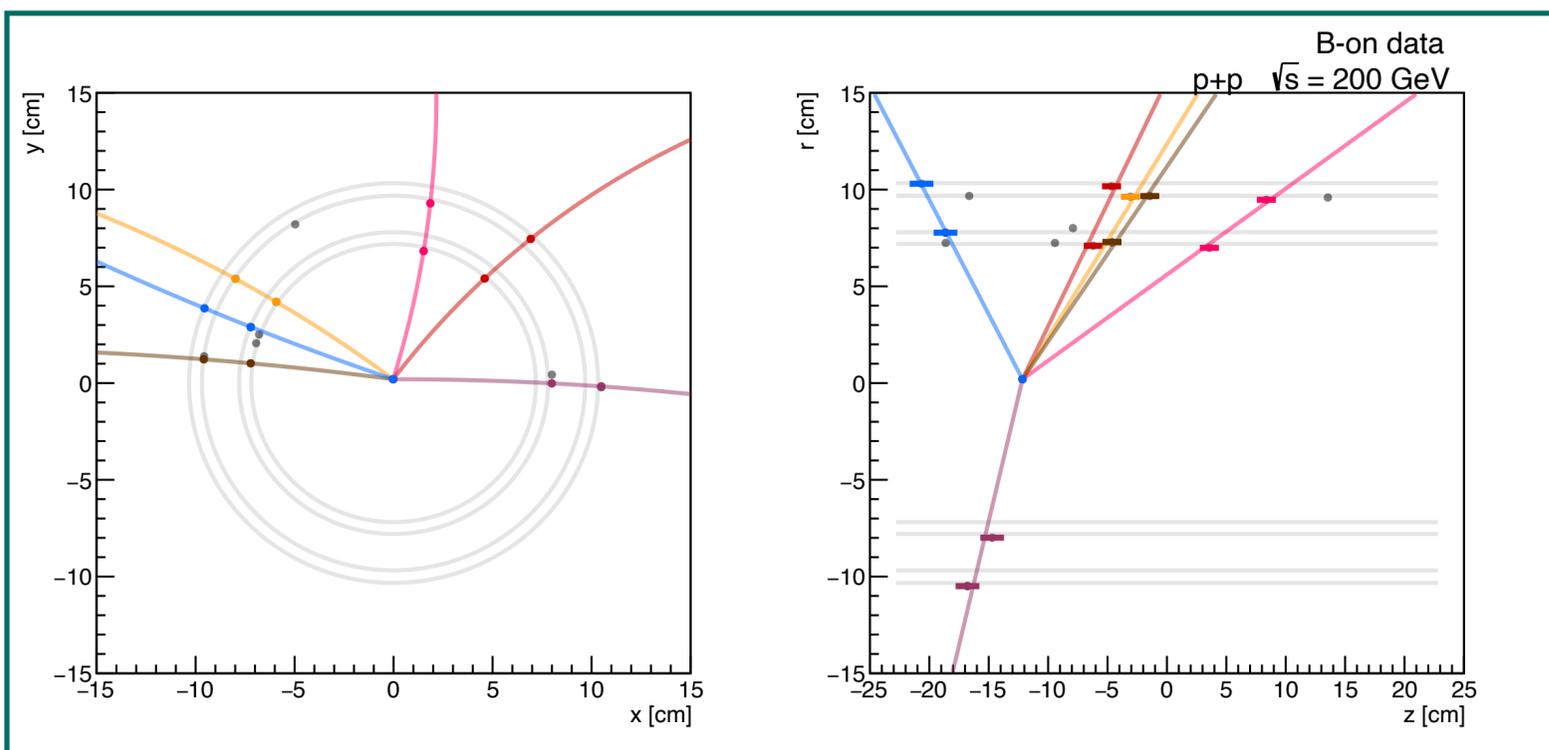
色線：再構成された飛跡
色点：再構成に使われたクラスター
(それぞれの色は両平面で共通)
黒点：それ以外のクラスター



良さげなイベントディスプレイ (磁場ありデータ) 35



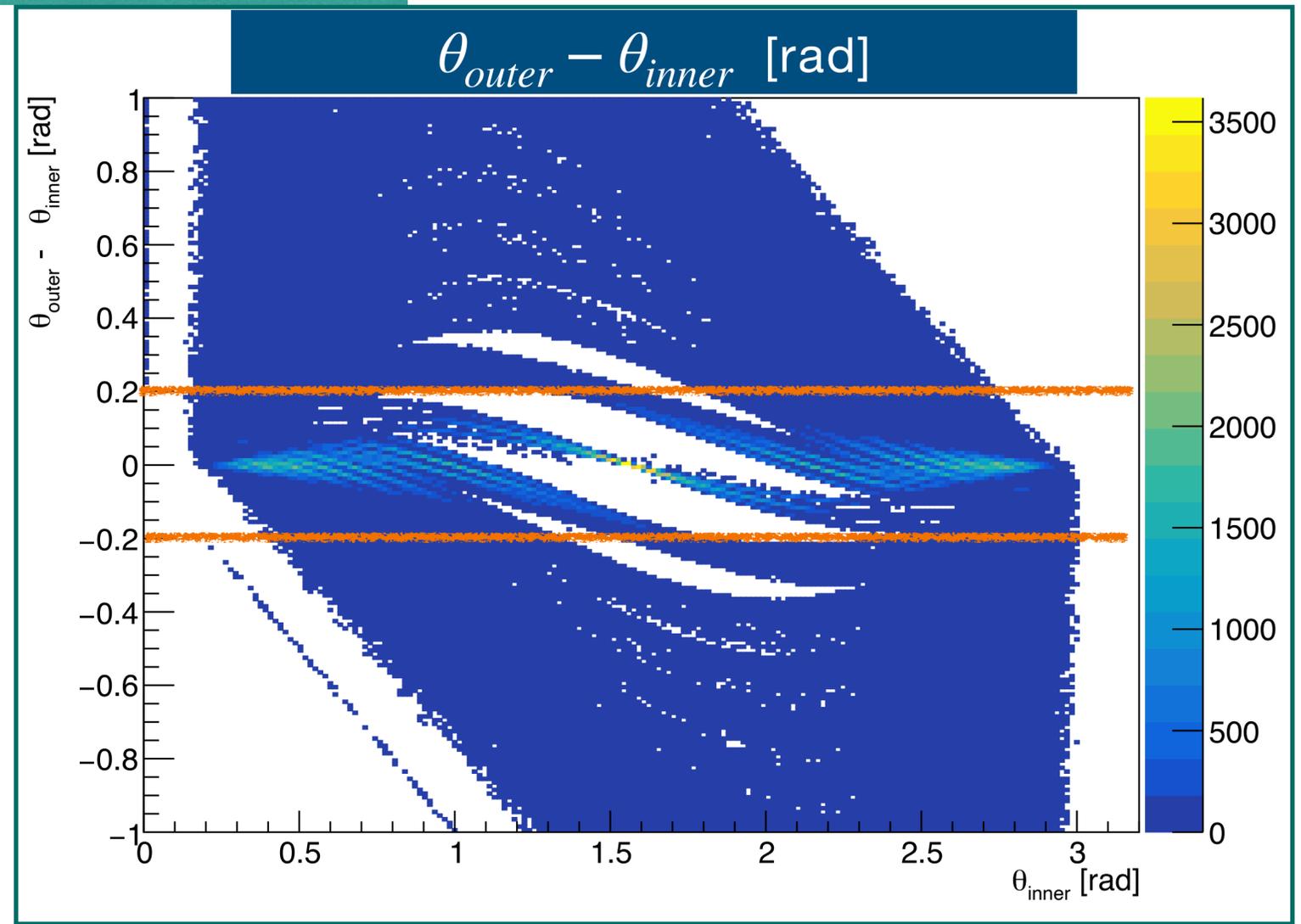
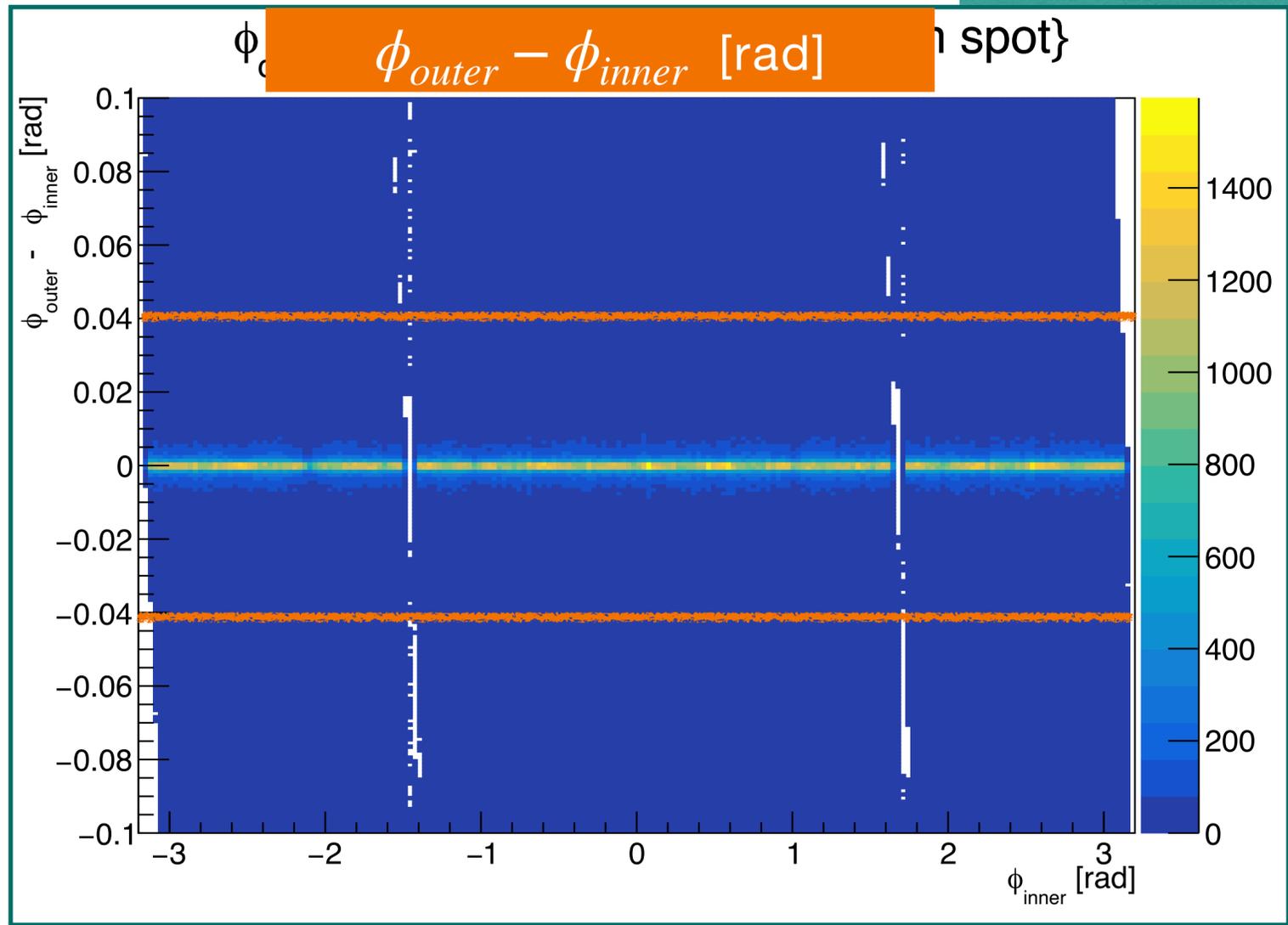
色線：再構成された飛跡
色点：再構成に使われたクラスター
(それぞれの色は両平面で共通)
黒点：それ以外のクラスター



1: クラスターペアの選択 (磁場なしMC)

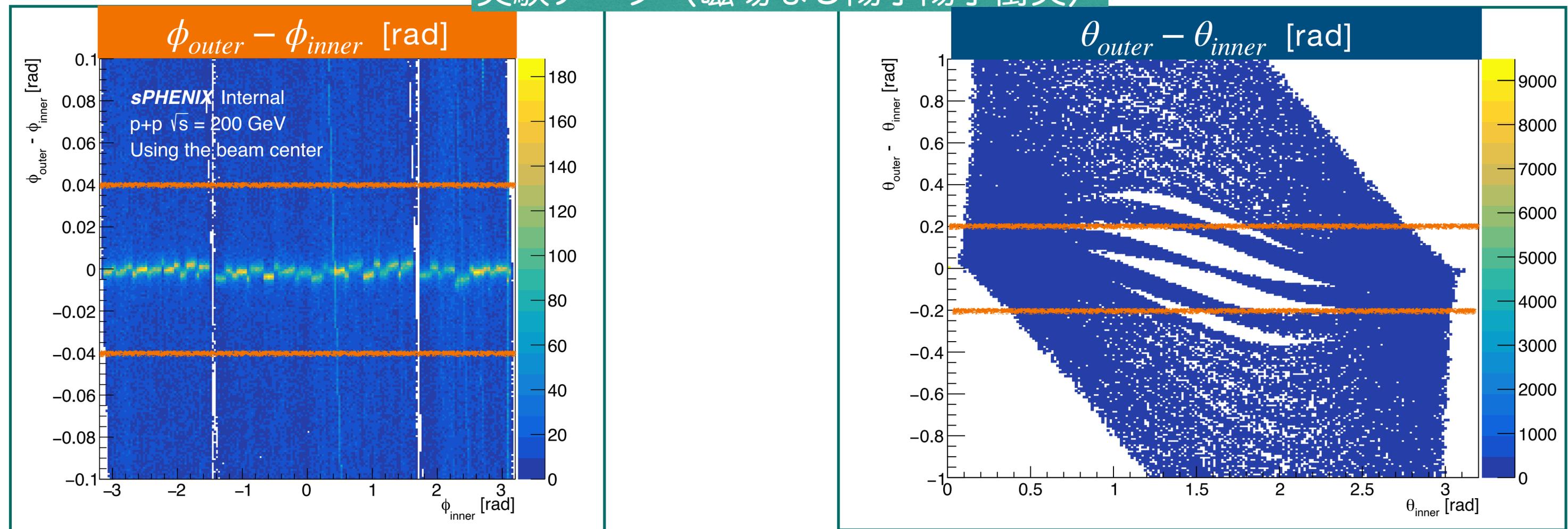
- 内層クラスター、外層クラスターをそれぞれ1点選ぶ。
 - クラスターペアの角度差が $|\phi_{outer} - \phi_{inner}| < 0.04$, $|\theta_{outer} - \theta_{inner}| < 0.2$ であるクラスターペアのみを選択する。

MC (磁場なし陽子陽子衝突)



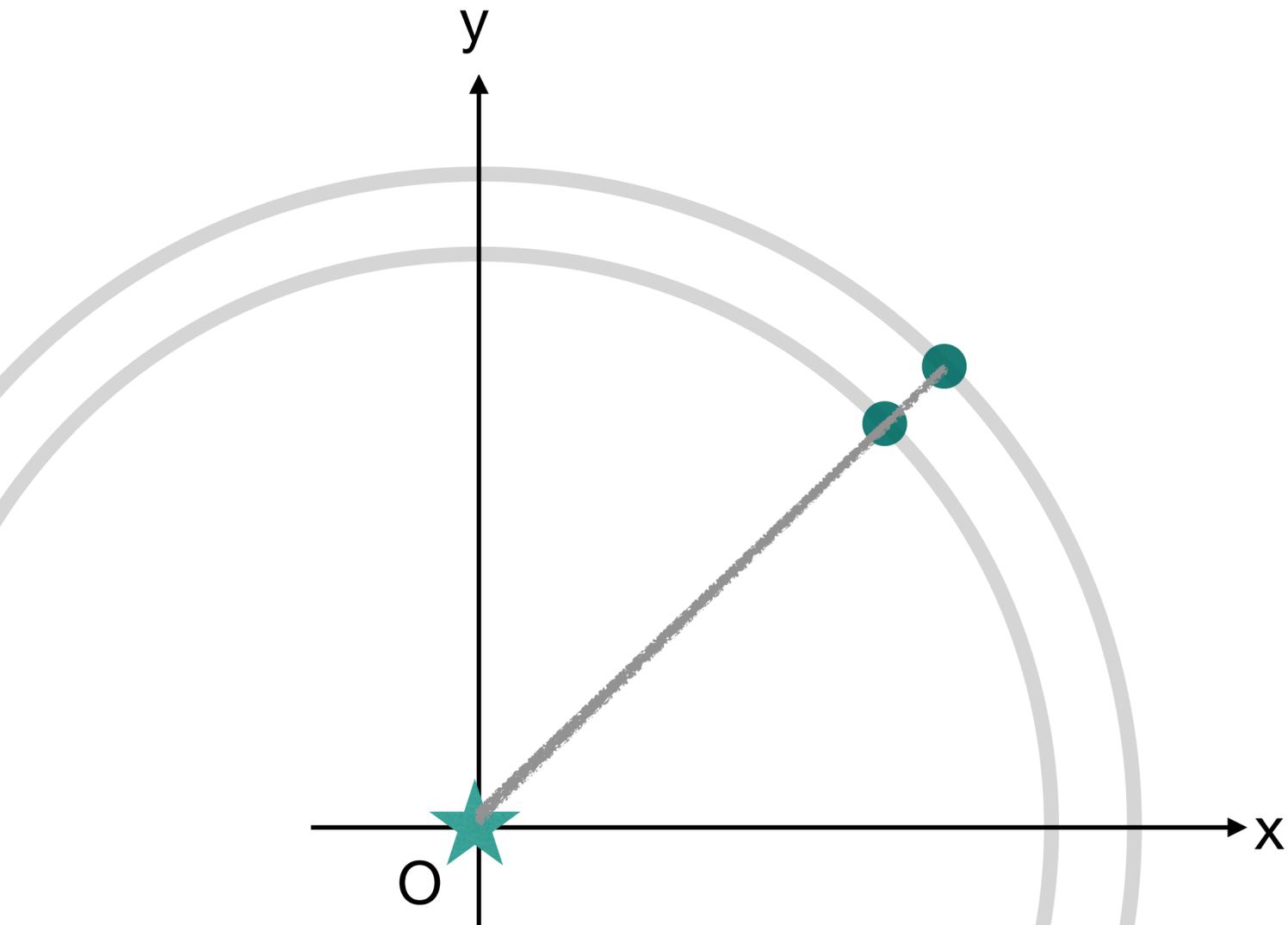
1: クラスターペアの選択 (磁場なしデータ)

- 内層クラスター、外層クラスターをそれぞれ1点選ぶ。
 - クラスターペアの角度差が $|\phi_{outer} - \phi_{inner}| < 0.04$, $|\theta_{outer} - \theta_{inner}| < 0.2$ であるクラスターペアのみを選択する。実験データ (磁場なし陽子陽子衝突)

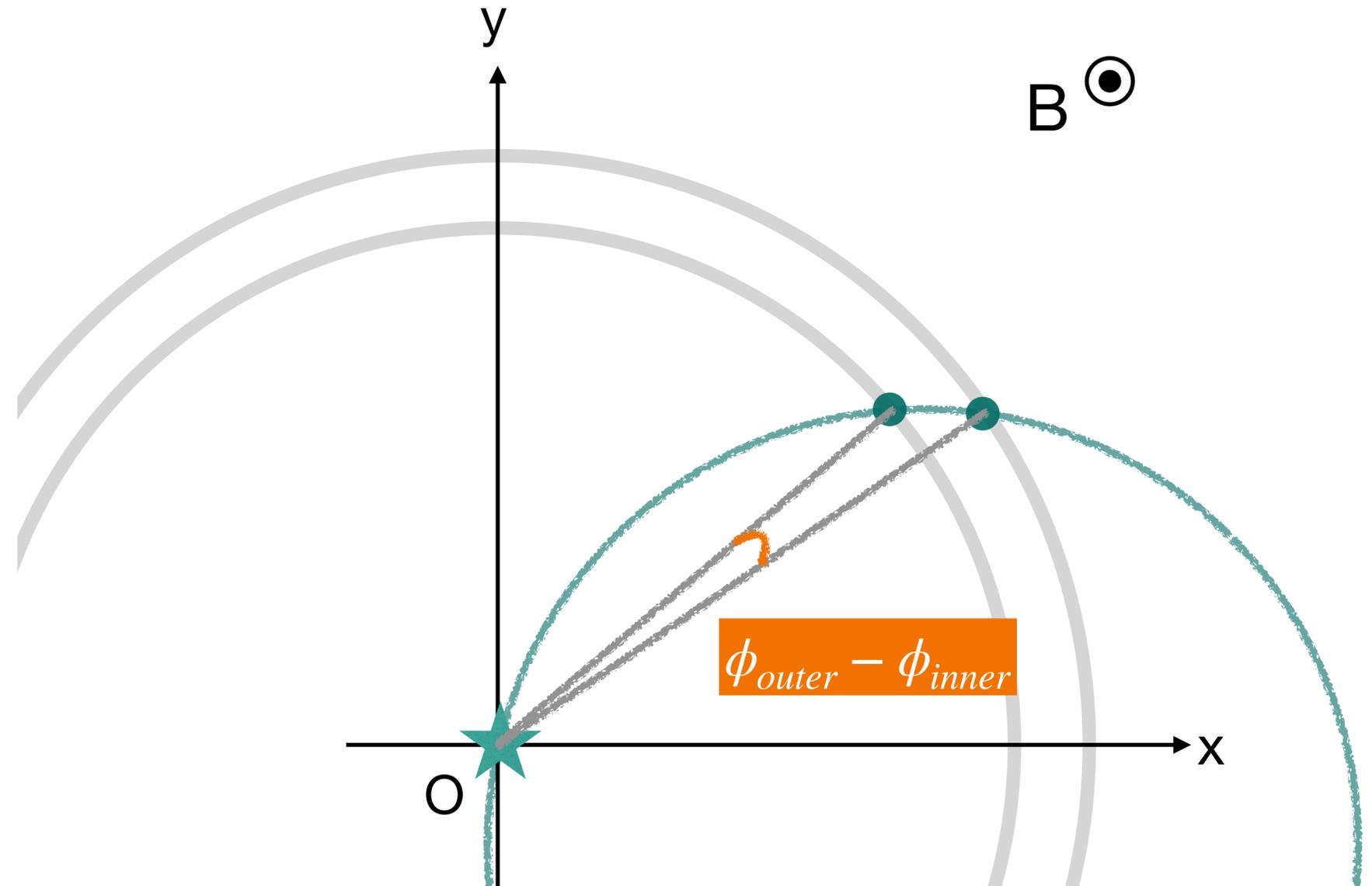


- 実験データの $\phi_{outer} - \phi_{inner}$, $\theta_{outer} - \theta_{inner}$ 分布においても0付近に同様のピーク構造が見られる。
→ 実験データでもアルゴリズムを適用可能である。

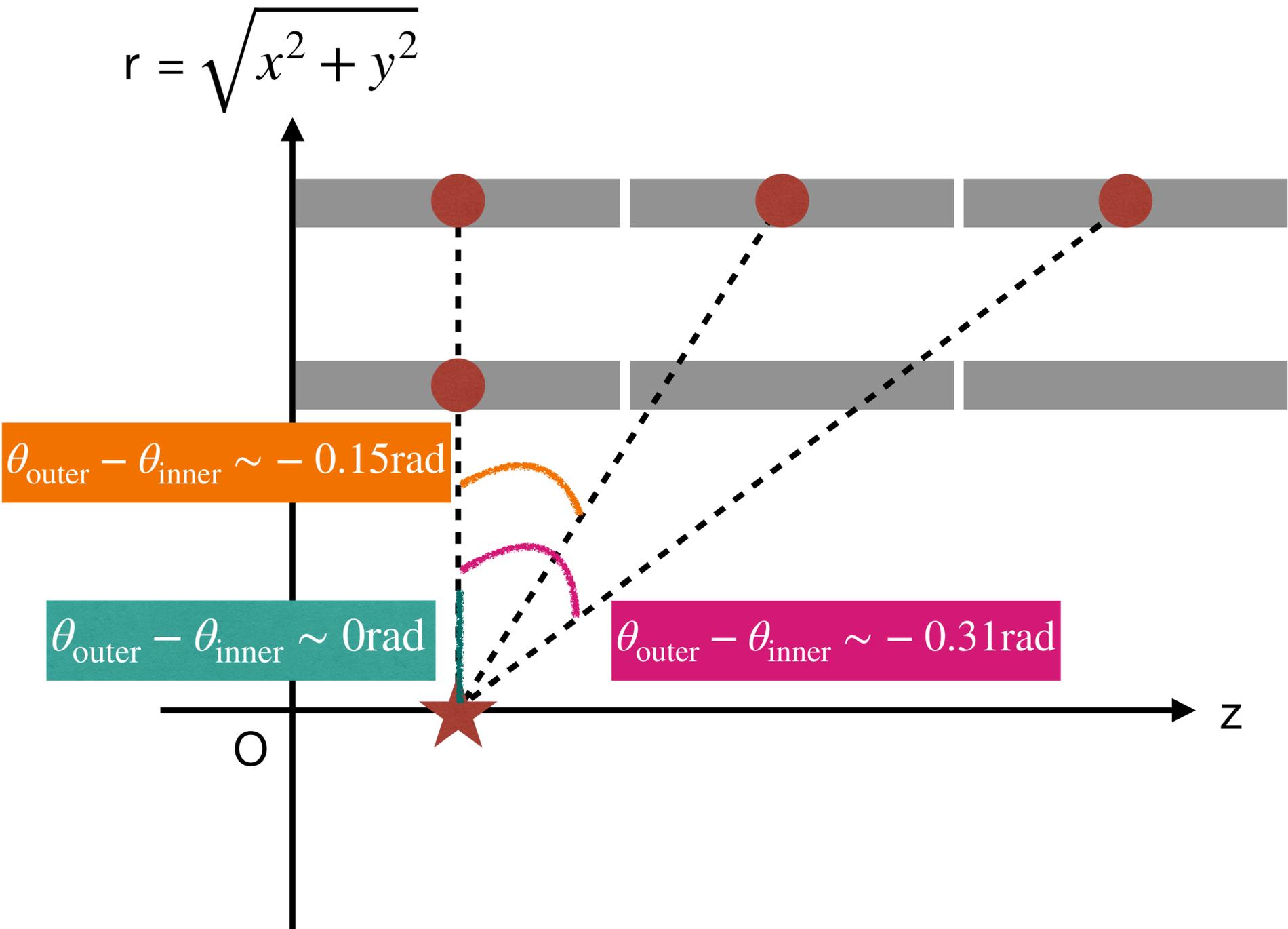
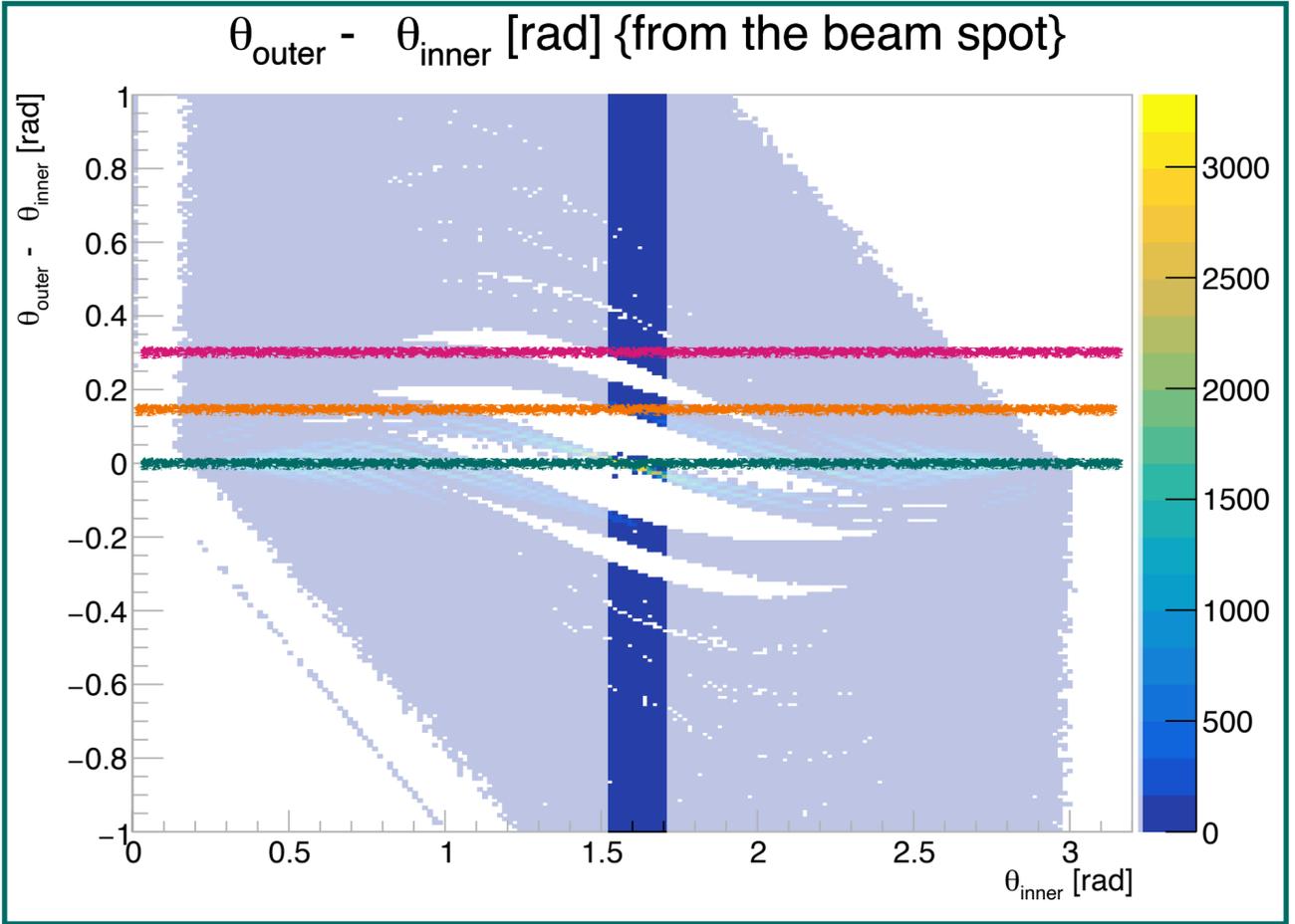
磁場なしデータの場合



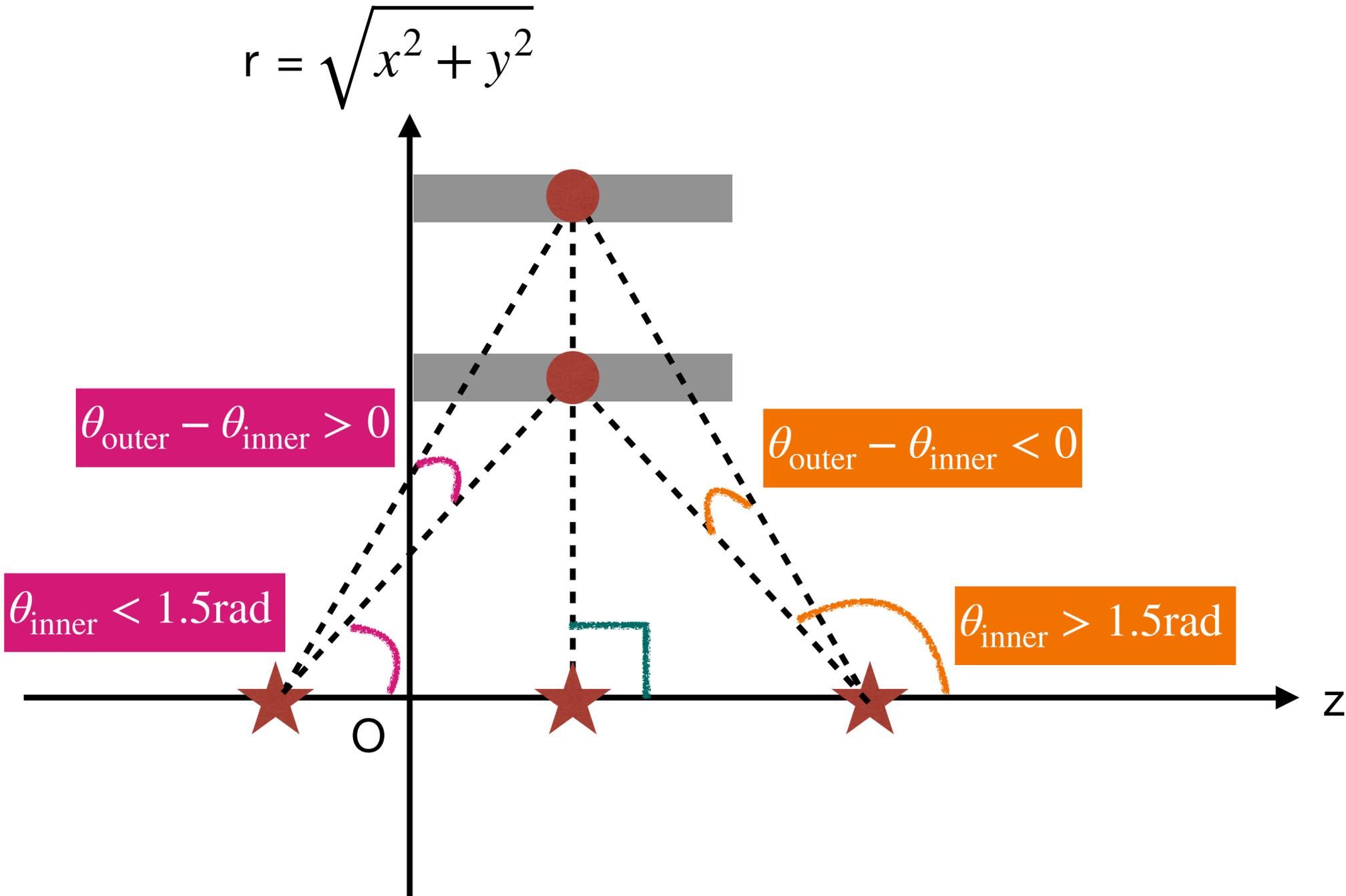
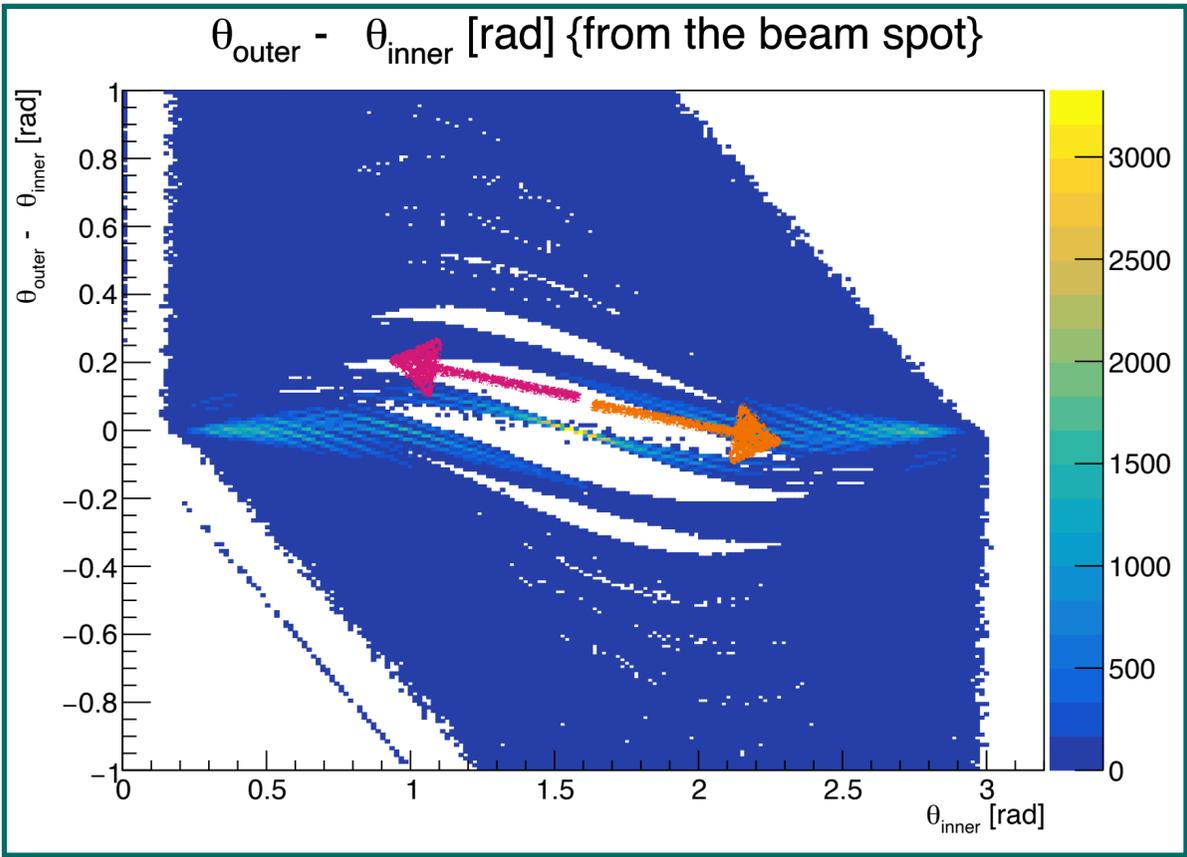
磁場ありデータの場合



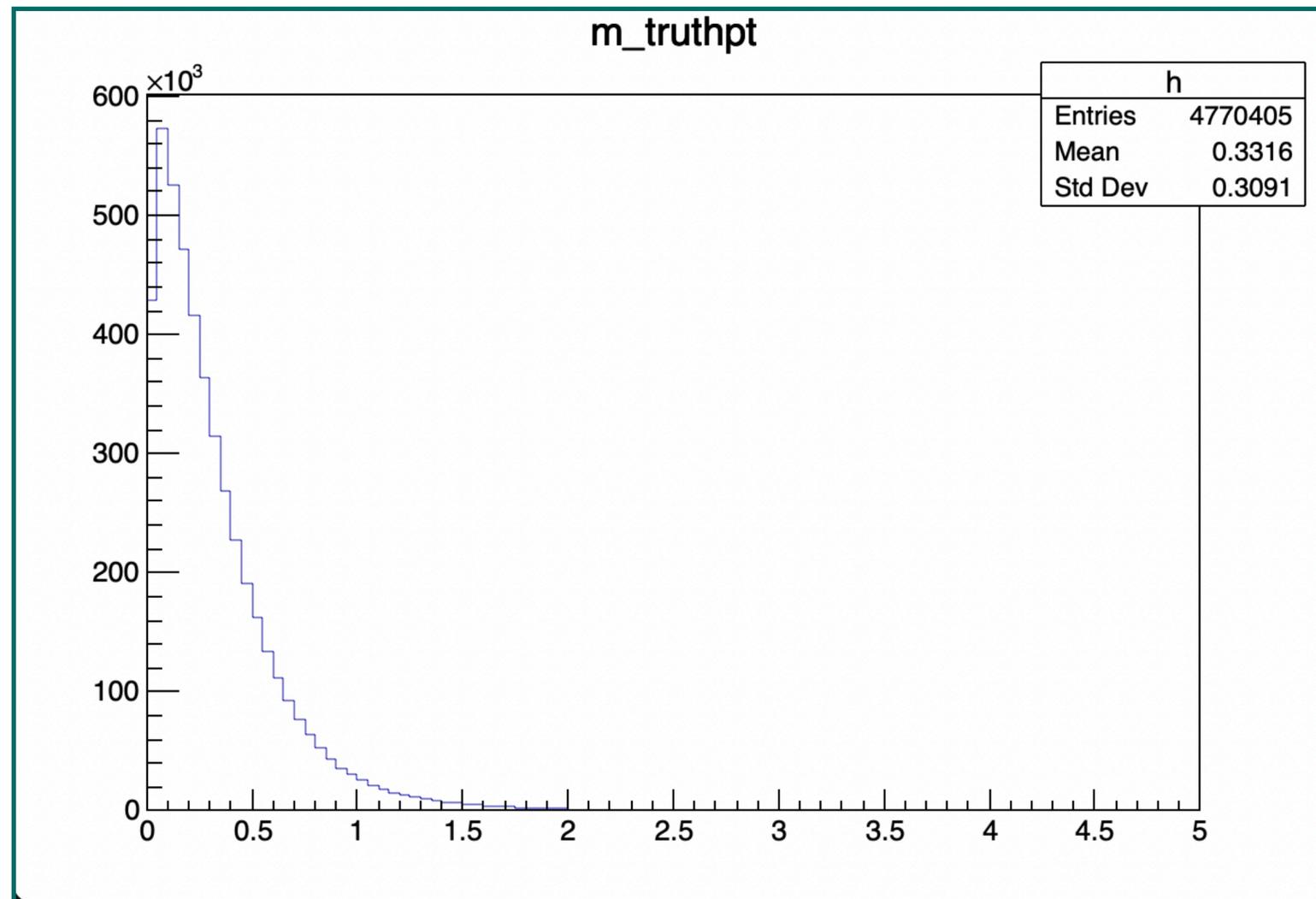
dtheta分布における空乏構造の原因



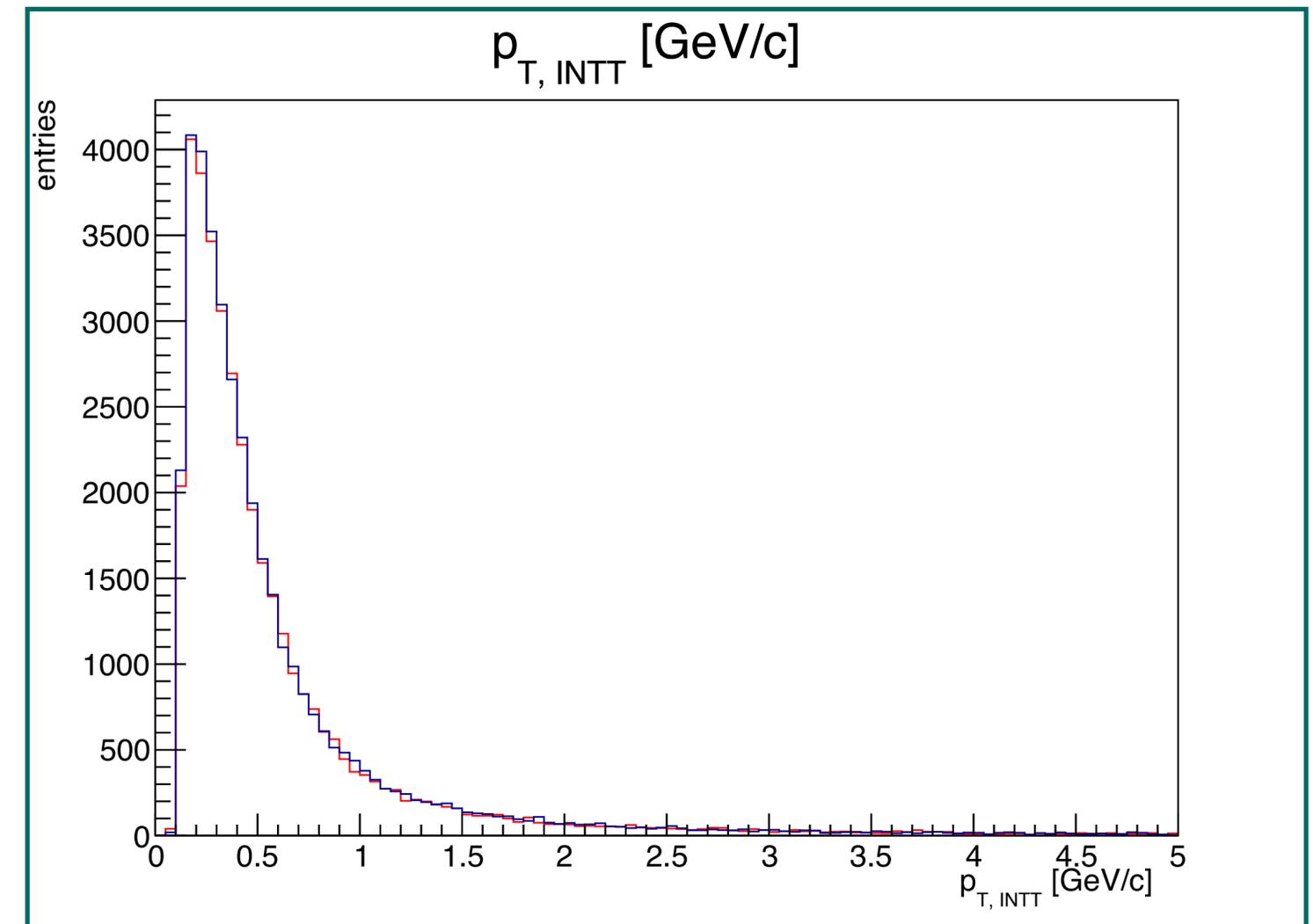
dtheta分布がサインカーブ状になる原因



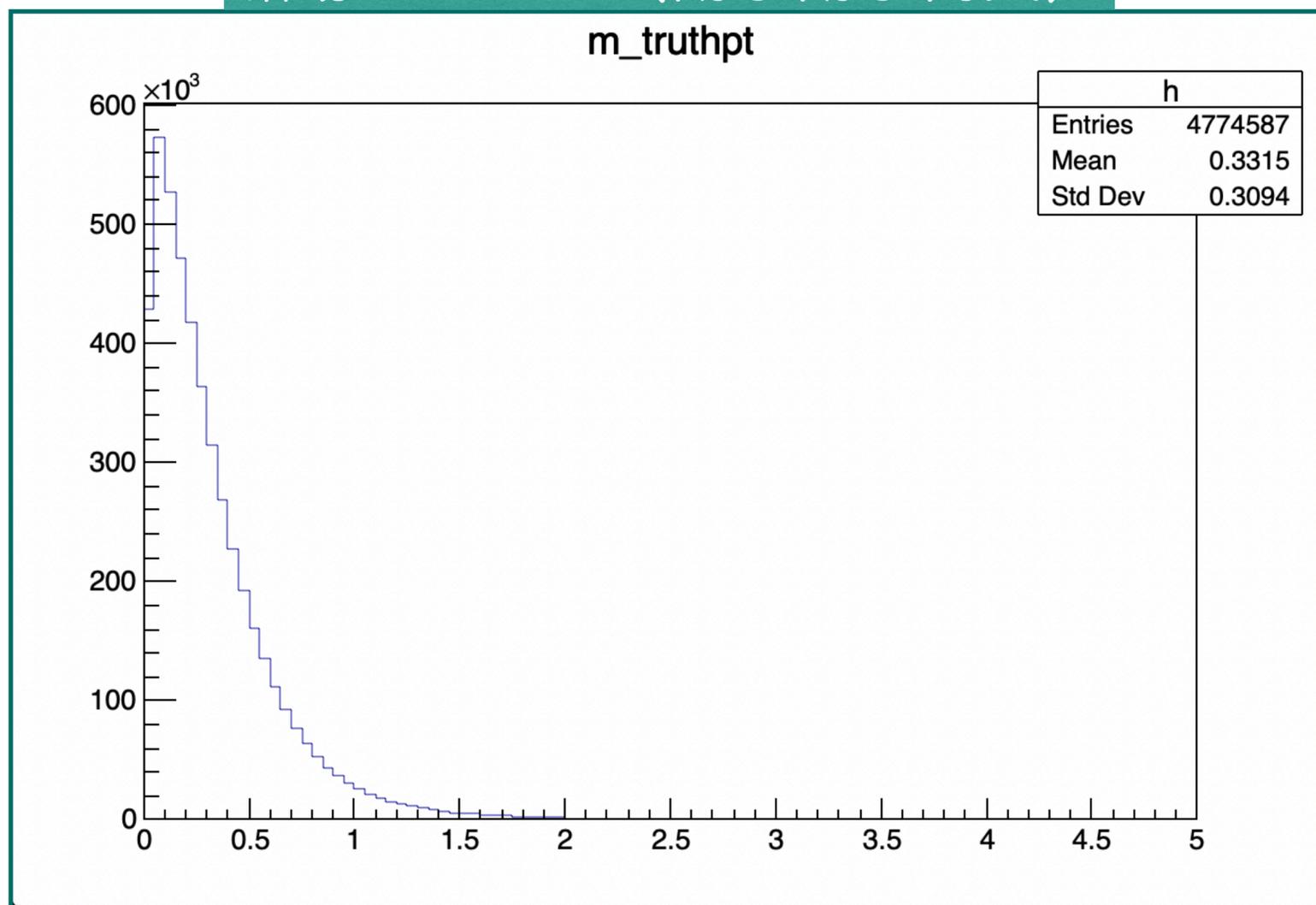
磁場ありMC (陽子陽子衝突)



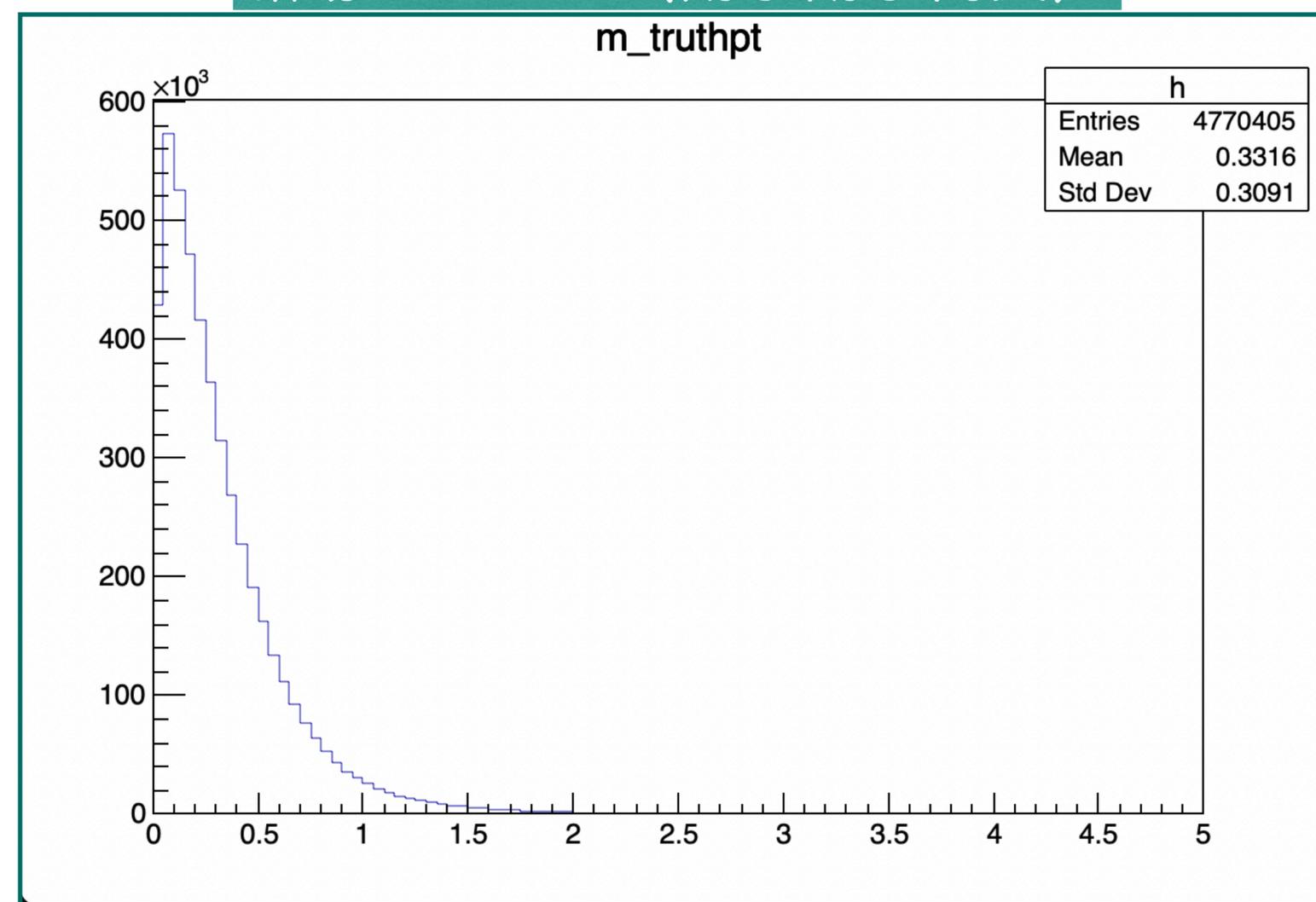
実験データ (磁場あり陽子陽子衝突)

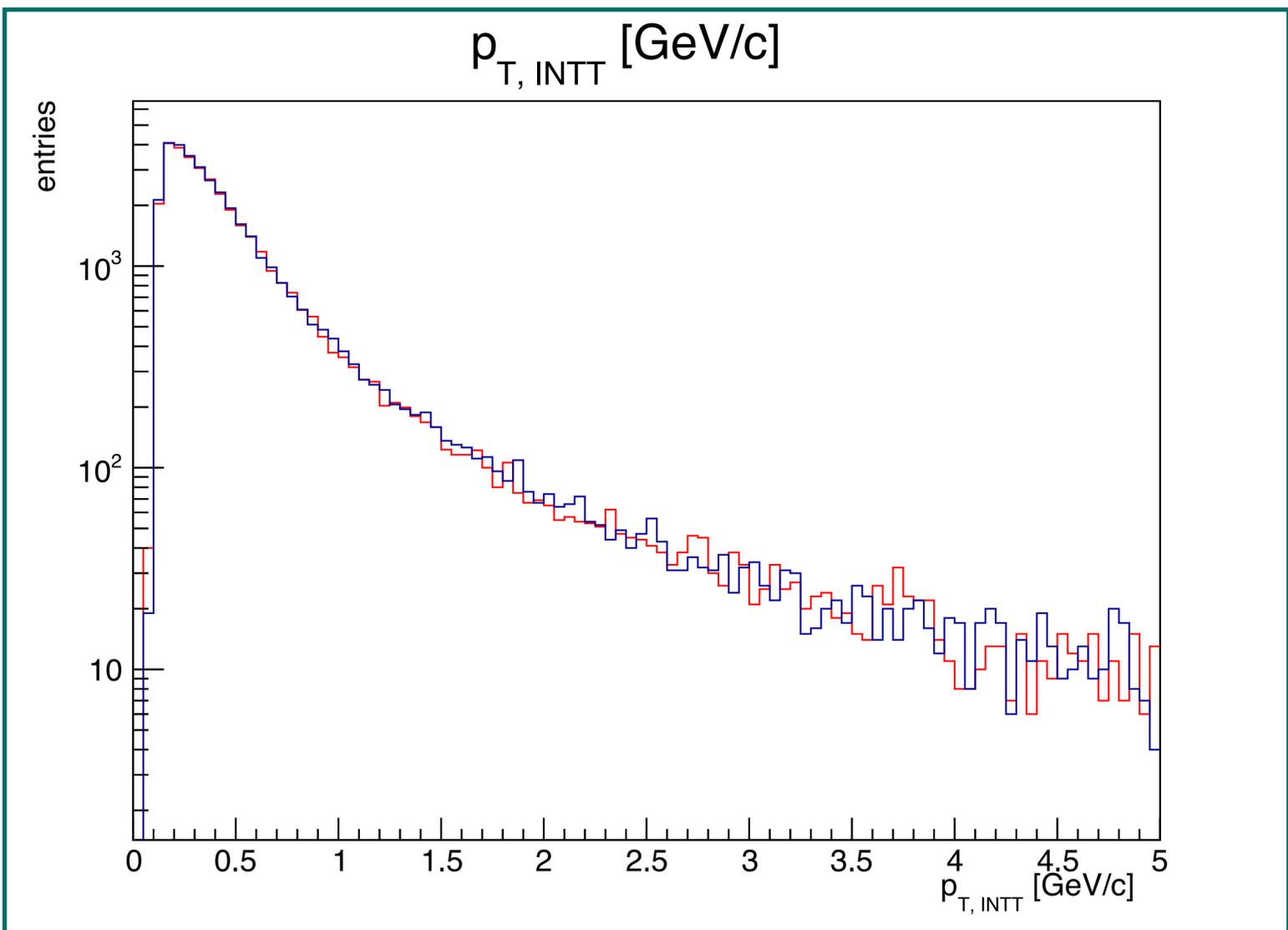
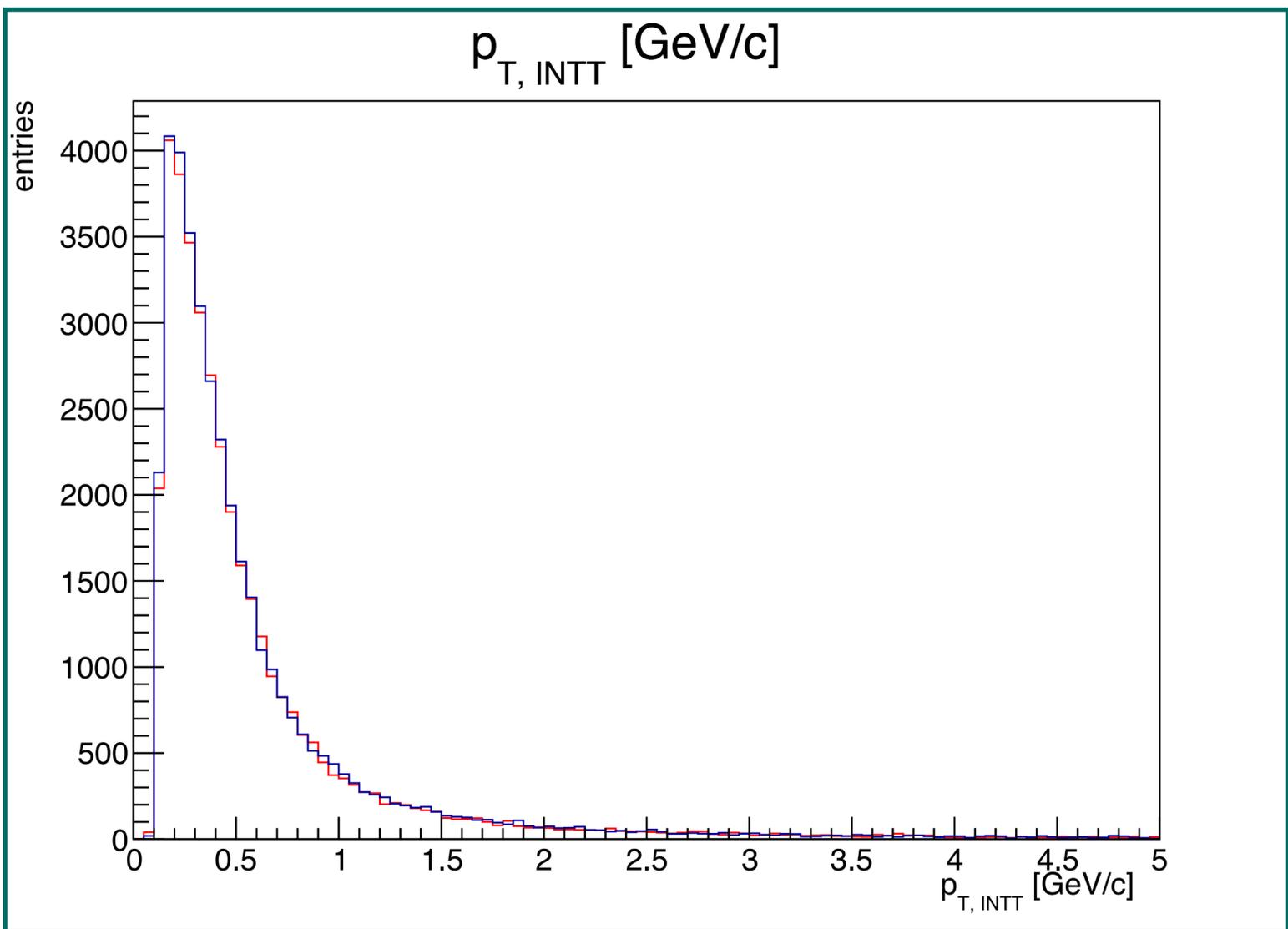


磁場なしMC (陽子陽子衝突)



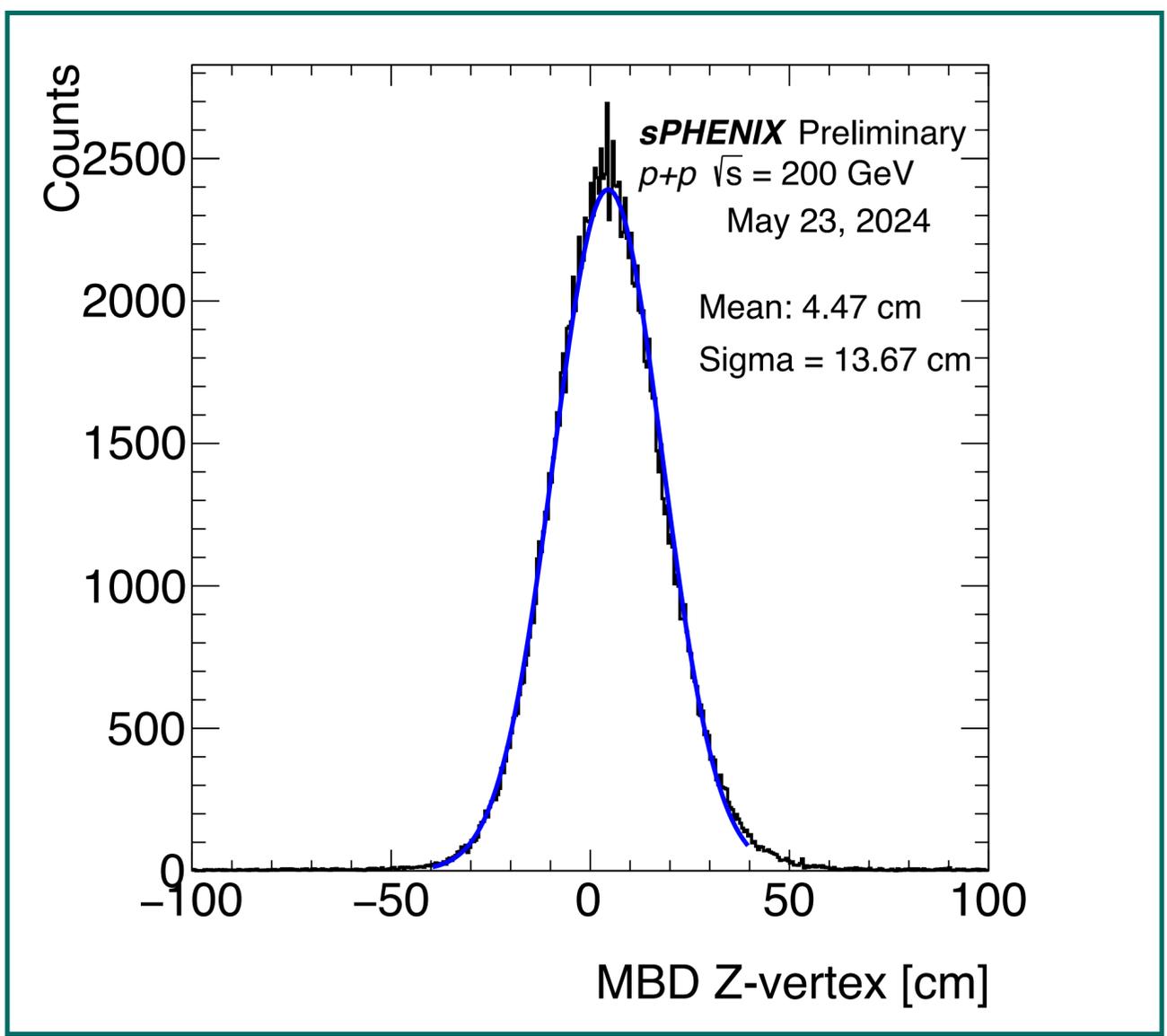
磁場ありMC (陽子陽子衝突)



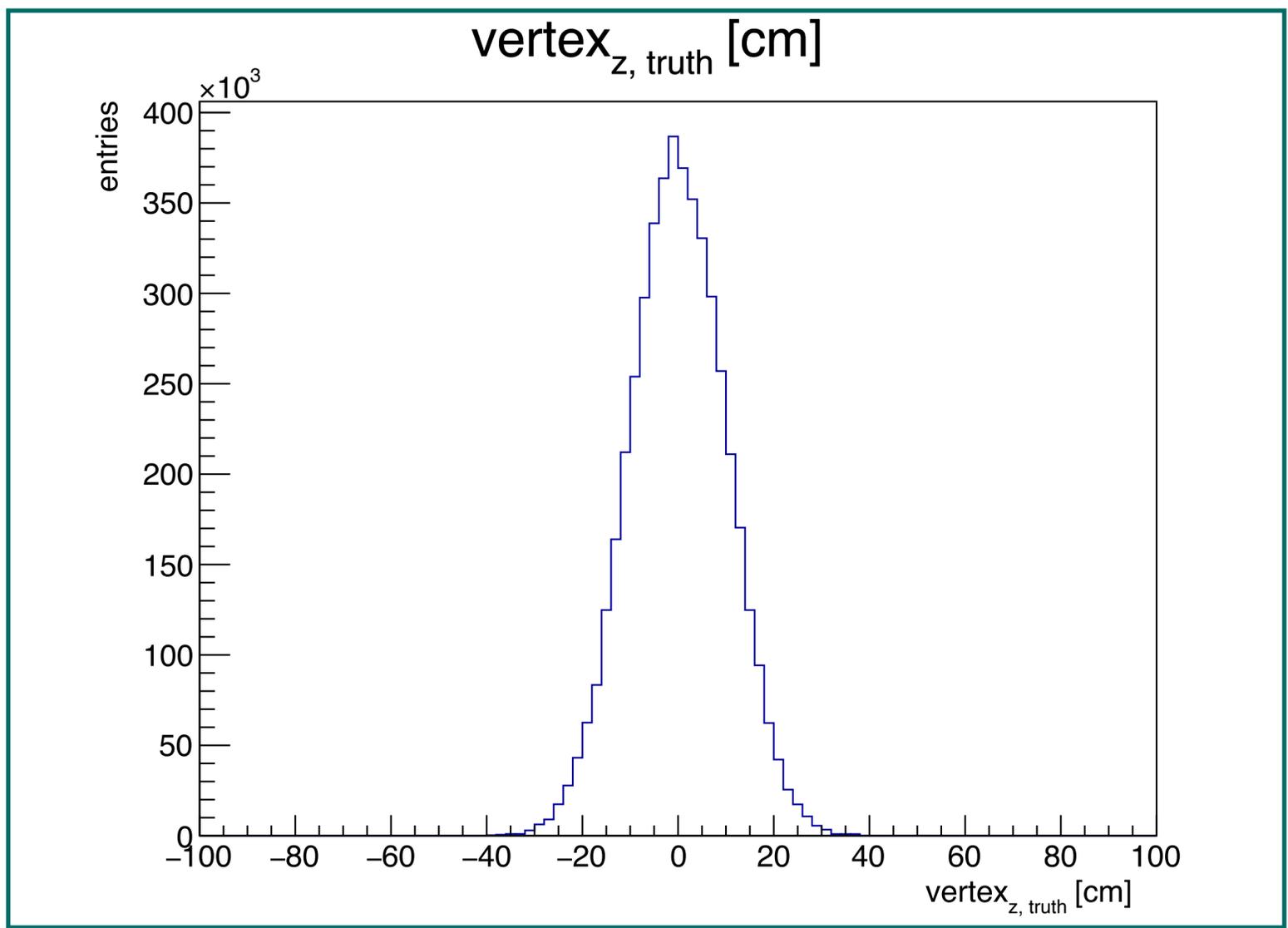


z衝突点分布

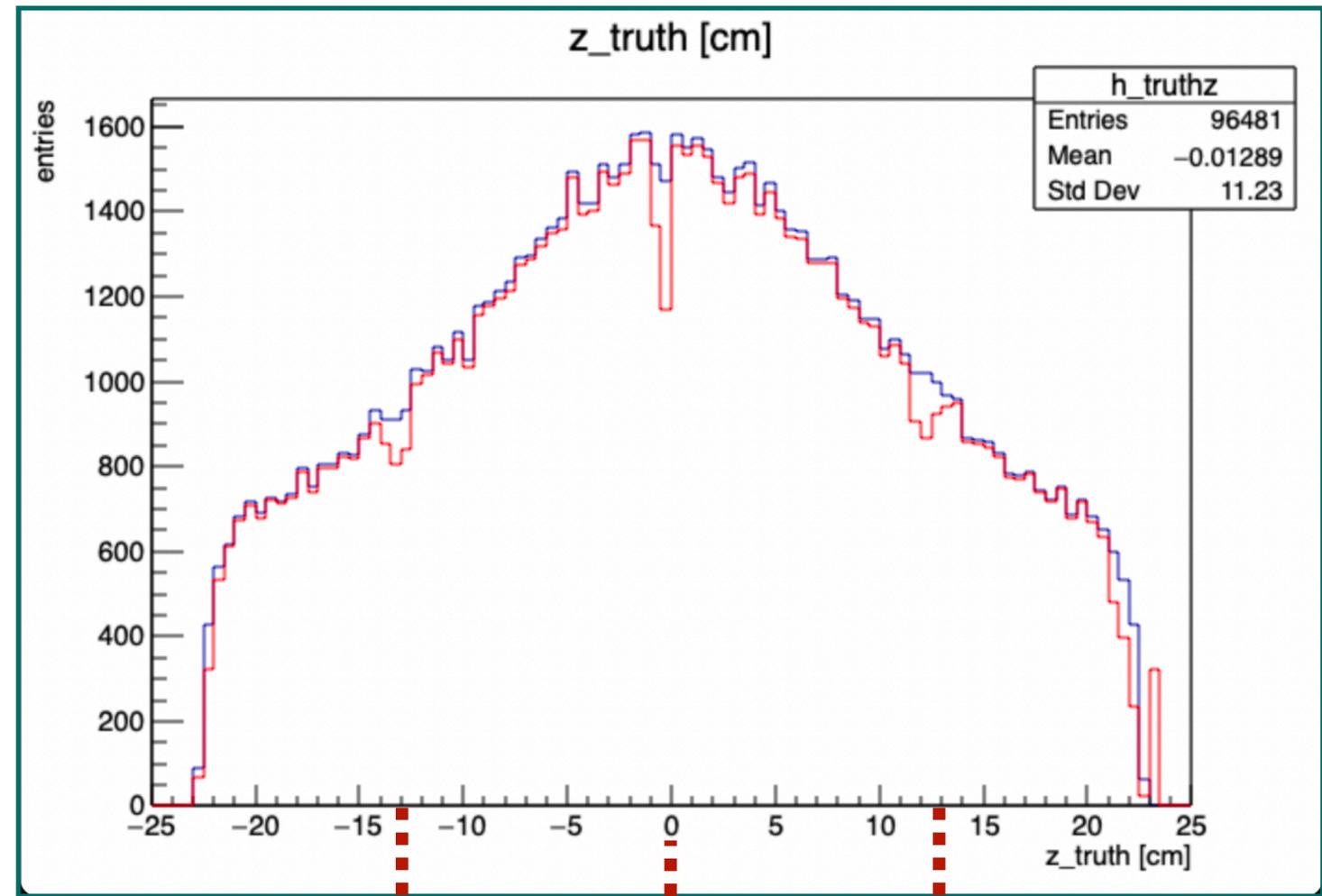
- 【実験データ】 (x,y : 使用している値)
- 中心 : (x, y, z) = (-0.019, 0.198, 4.47)cm
 - 分布幅 : (x, y, z) = (0, 0, 13.67)cm



- 【シミュレーションデータ】
- 衝突点 : ガウス分布
 - 中心 : (x, y, z) = (0, 0, 0)cm
 - 分布幅 : (x, y, z) = (10⁻⁴, 10⁻⁴, 10)cm



非アクティブ領域

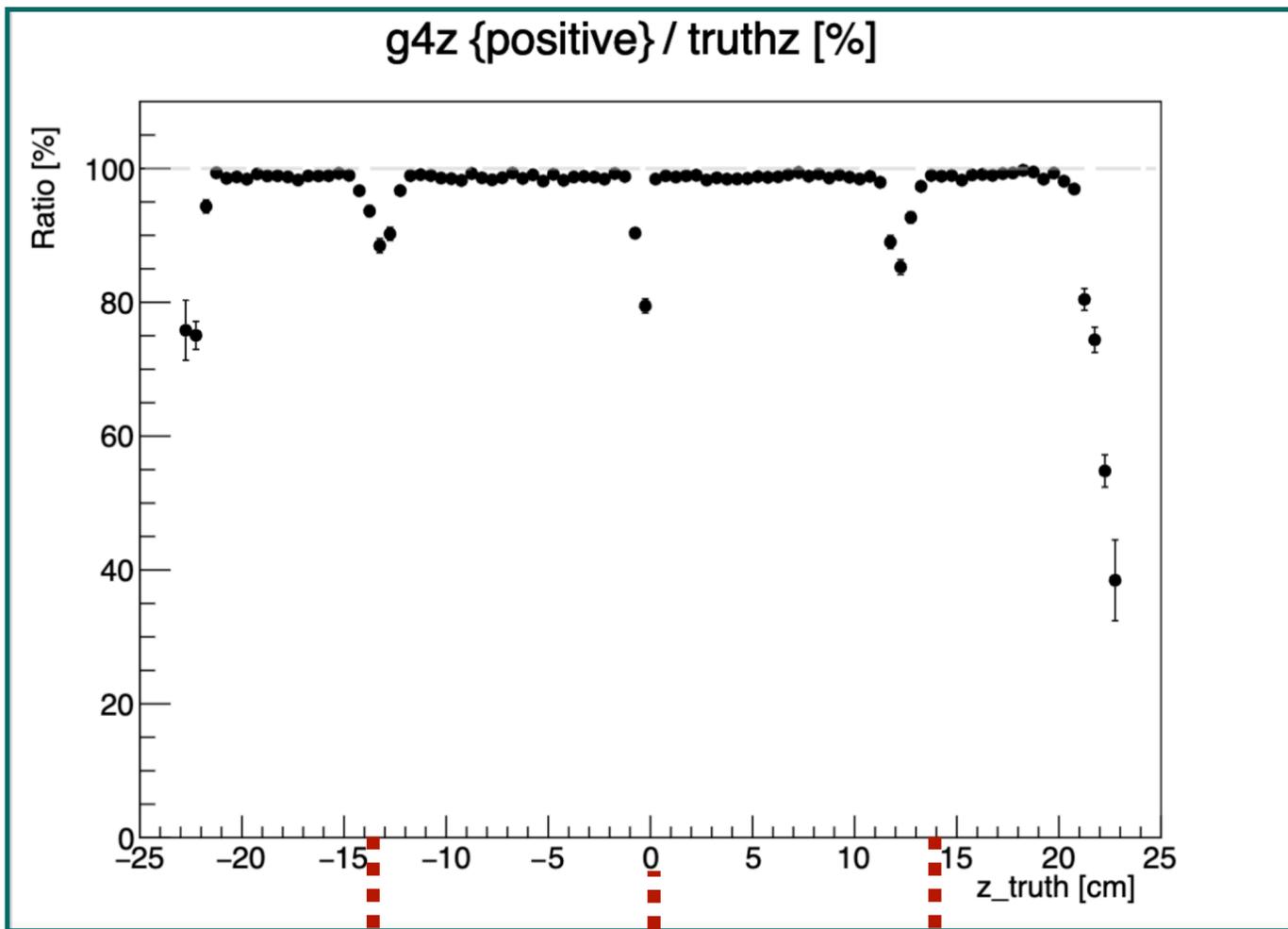


INTTラダー

$$\frac{N_{\text{outer Simhits}}}{N_{\text{truth tracks}}} = 97.34 \pm 0.05\%$$

- 左図：全ての真の飛跡（青）、INTTの外層センサーを通過した粒子（赤）が外層バレル（ $r = 10\text{cm}$ ）を通過したときのz座標 [cm]
- 分布において、全ての真の飛跡に対して、INTTの外層センサーを通過した粒子の数が大幅に減少している部分が3つある。
- その3箇所はセンサー間の非アクティブ領域に一致する。

非アクティブ領域

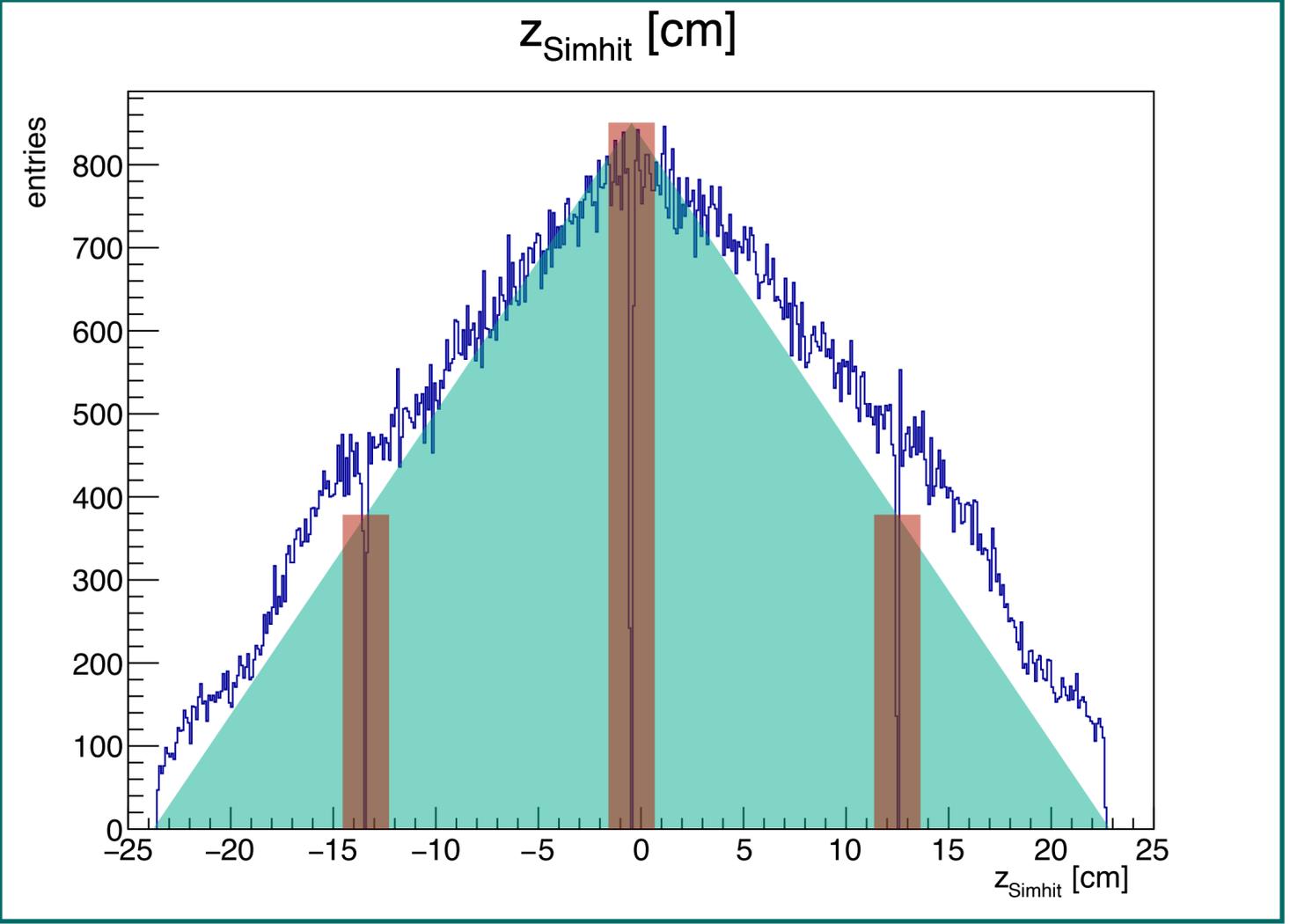


INTTラダー

$$\frac{N_{\text{outer g4hits}}}{N_{\text{truth tracks}}} = 97.34 \pm 0.05\%$$

- 左図：全ての真の飛跡（青）、INTTの外層センサーを通過した粒子（赤）が外層バレル（ $r = 10\text{cm}$ ）を通過したときのz座標 [cm]
- 分布において、全ての真の飛跡に対して、INTTの外層センサーを通過した粒子の数が大幅に減少している部分が3つある。
- その3箇所はセンサー間の非アクティブ領域に一致する。

非アクティブ領域の概算



- 左図：INTTを通過した粒子のz座標[cm]
- 左の分布を三角形、非アクティブ領域を四角形だと近似する。

- z座標分布面積は、底辺をL、高さをHとすると、

$$S_{full} = \frac{LH}{2}$$

- 非アクティブ領域の面積は、

- z ~ 0 cm : $S_{inactive\ 0cm} = \left(\frac{0.1cm}{46cm} \times 2 \times L \right) \times H$

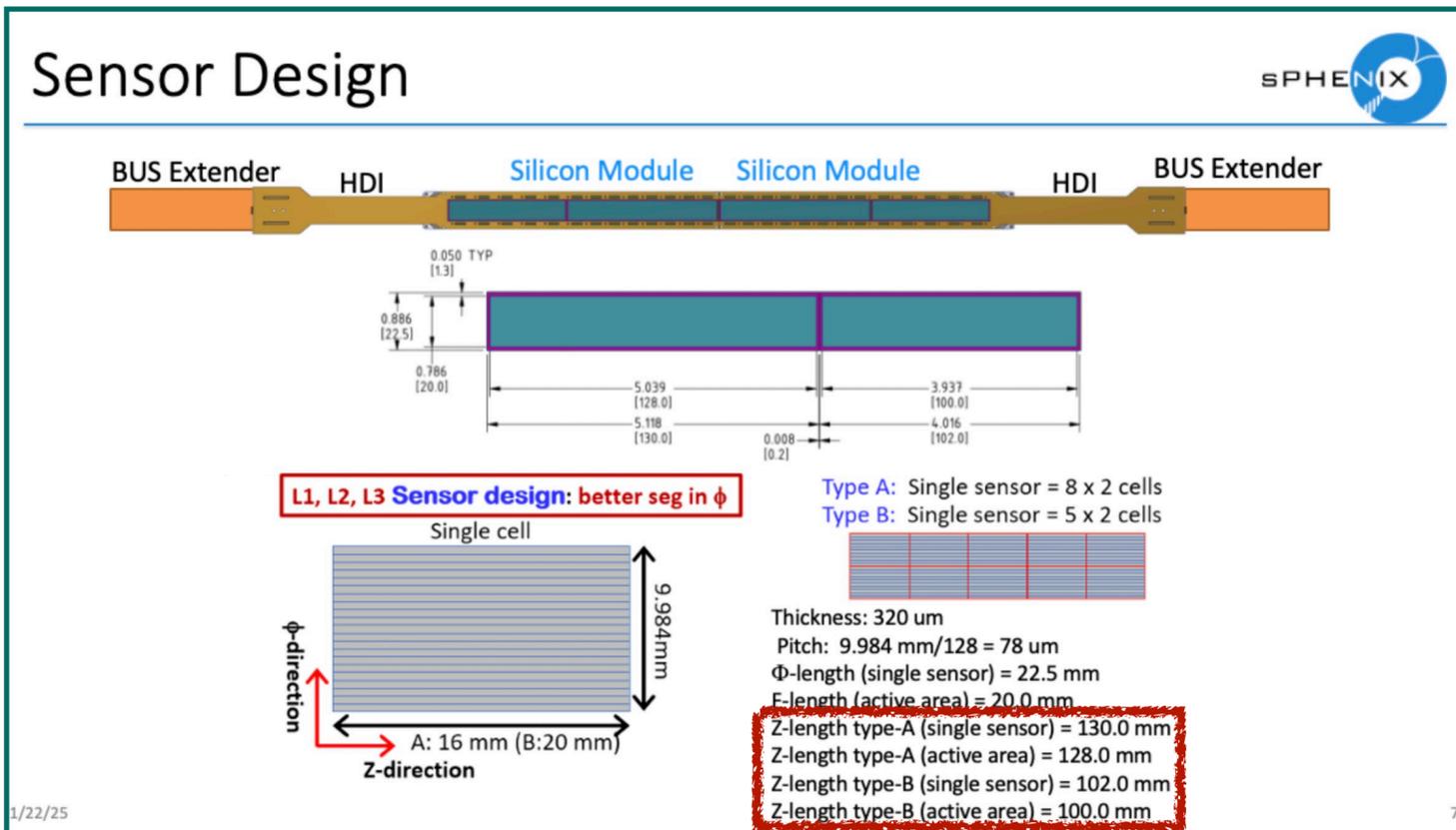
- z ~ ±13 cm : $S_{inactive\ 13cm} = \left(\frac{0.1cm}{46cm} \times 2 \times L \right) \times \frac{H}{2}$

- したがってz座標分布における非アクティブ領域の面積の割合は、

$$\frac{S_{inactive\ 0cm} + 2S_{inactive\ 13cm}}{S_{full}} \sim 3.1\%$$

非アクティブ領域

- 設計上、ビーム軸方向の非アクティブ領域はType-A, Type-Bセンサーどちらにおいても2mm（左端：1mm, 右端：1mm）。
- シミュレーションコードにおいても同様の設定であることを確認した。

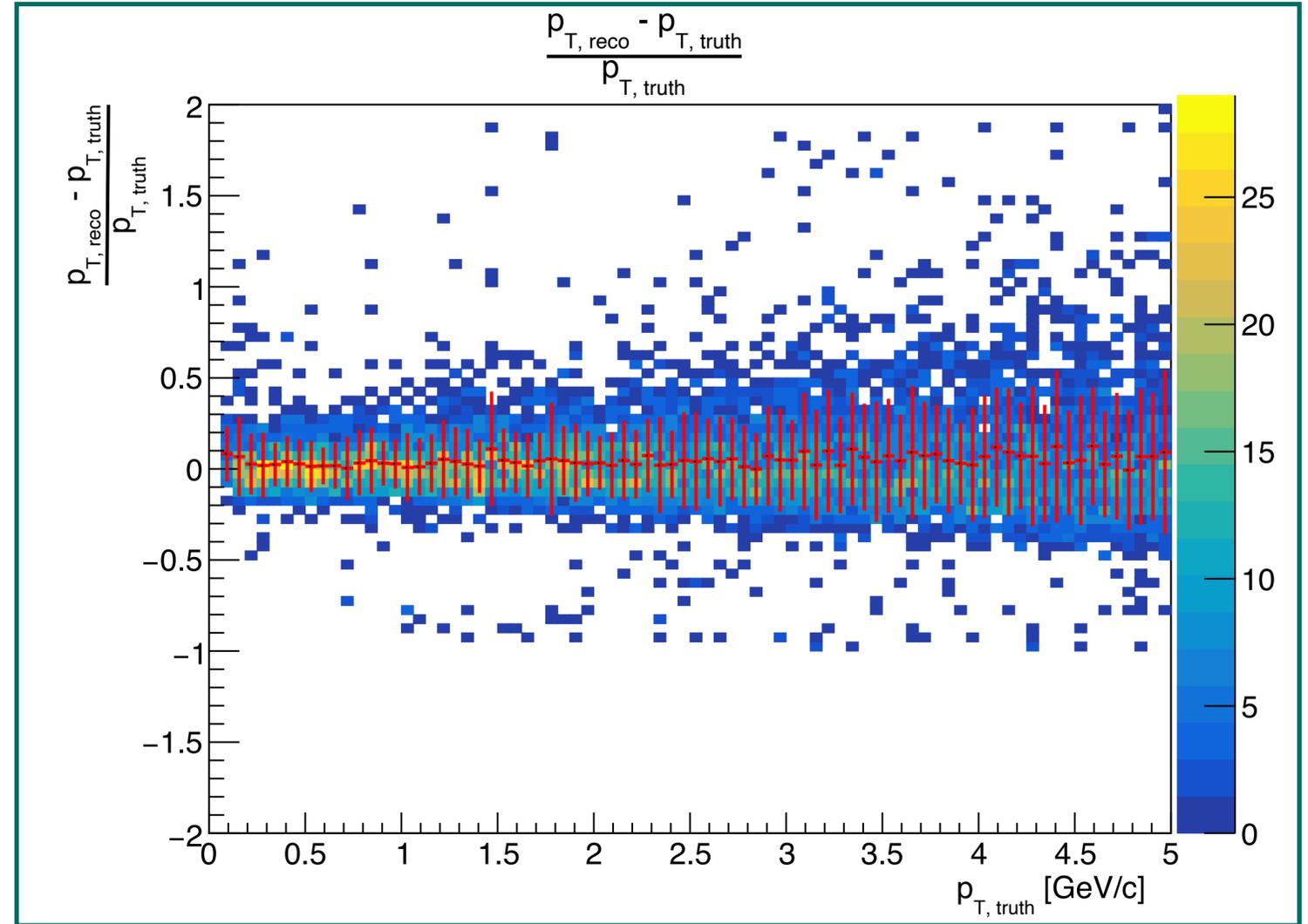


横運動量分解能の算出

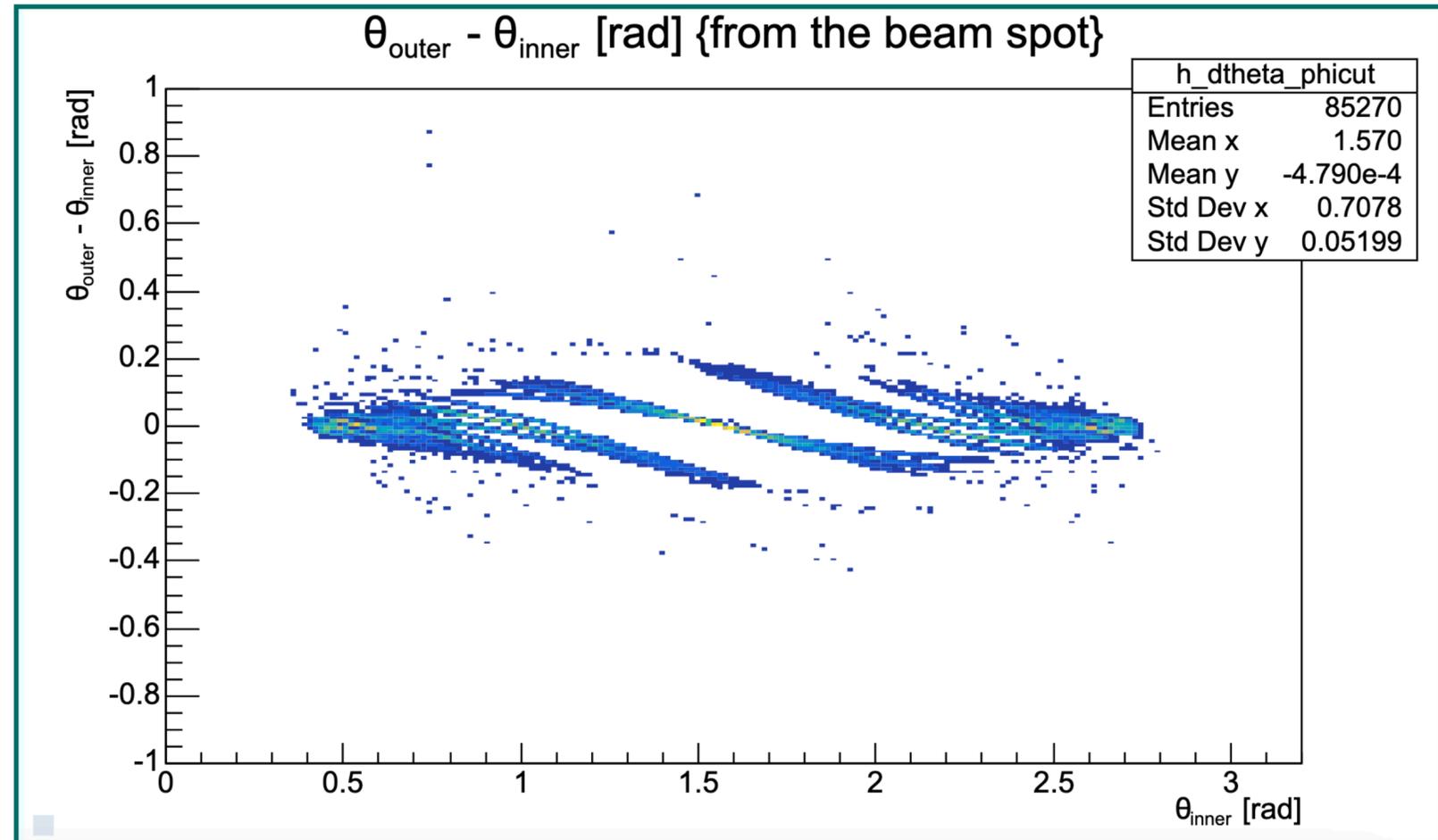
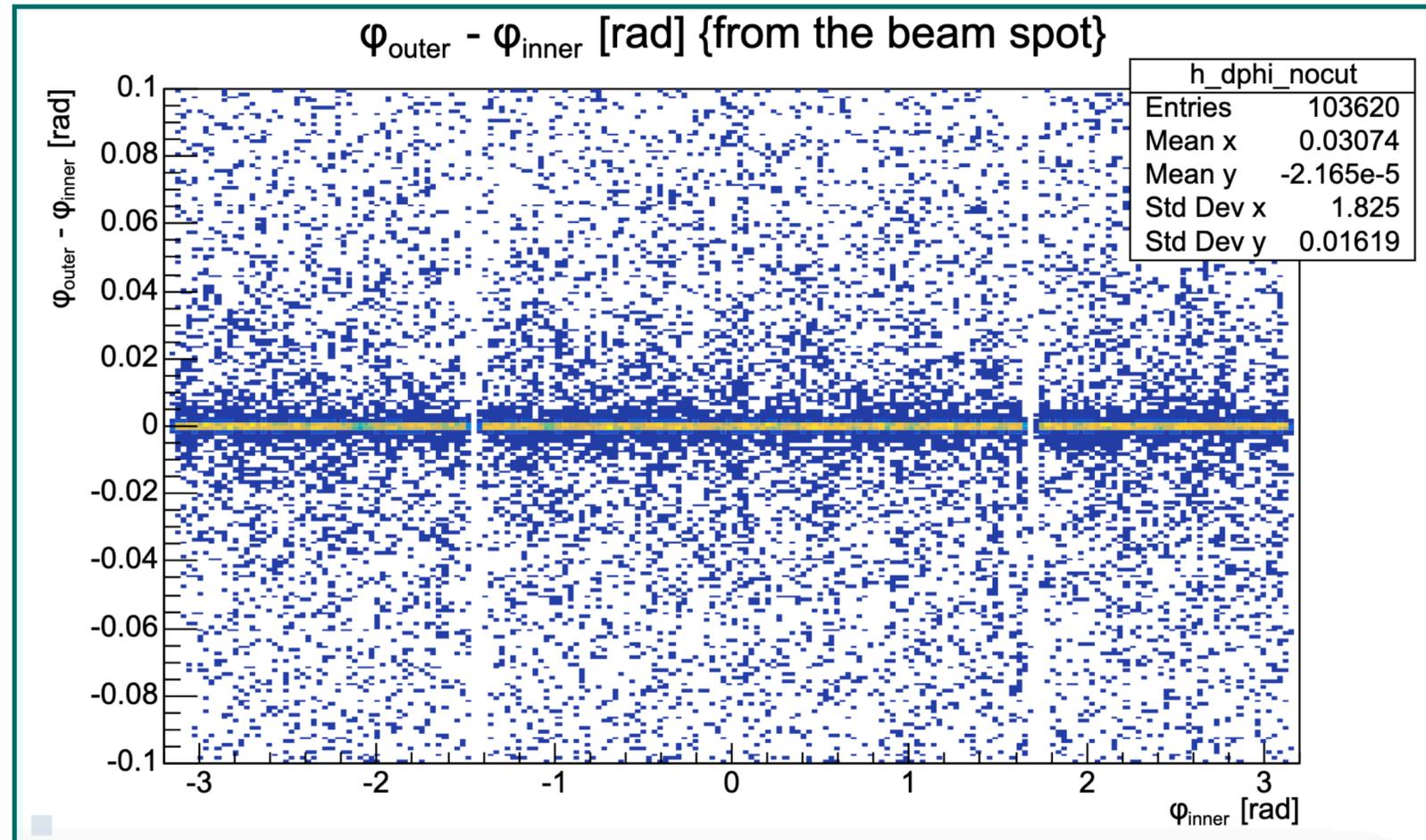
左図：横運動量に対する再構成された飛跡・真の飛跡間の横運動量の差分の割合の横運動量依存性。

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{p_{T, \text{reco.}} - p_{T, \text{truth}}}{p_{T, \text{truth}}}$$

➡分布を横運動量0.5 GeV/cごとに区切り、それぞれをガウス分布でフィット、幅（＝横運動量分解能）を求める。



single particle $\mathcal{O}dphi, dtheta$



研究方法：結果の検証方法

多重散乱において散乱角が小さい場合、その散乱角の角度分布は0を中心としたガウス分布で与えられる。
その標準偏差は次式。

$$\theta = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.088 \log_{10} \left(\frac{x z^2}{X_0 \beta^2} \right) \right]$$

βc : 入射粒子の速度[m/s] p : 入射粒子の運動量[MeV]

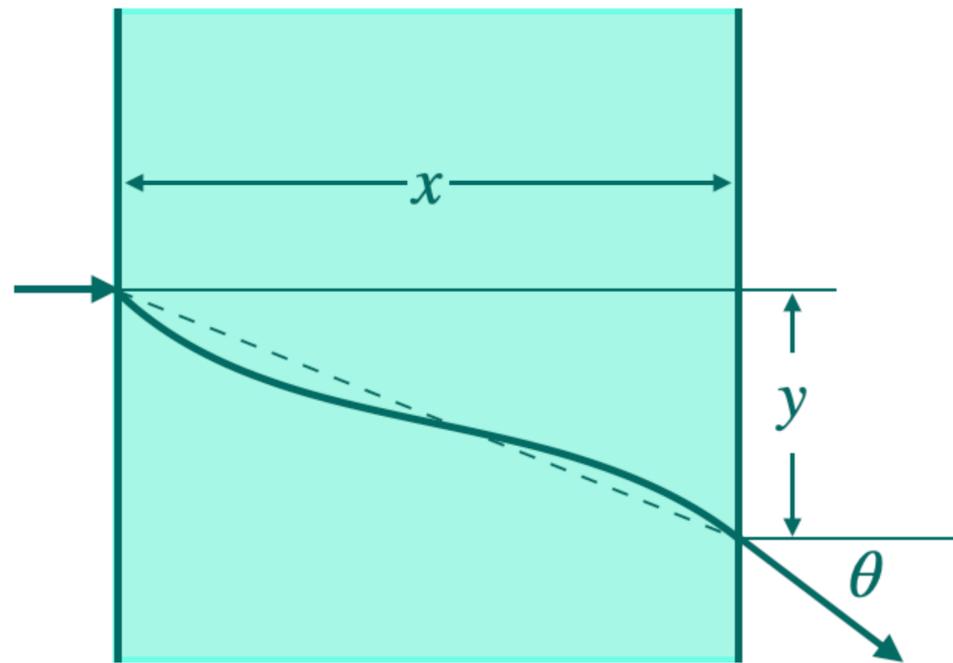
z : 入射粒子の電荷[C] x : 対象の厚み[m]

X_0 : 対象の放射長[m]

また入射ビーム軸からのずれ y は、

$$y = x \tan \theta \approx x \theta$$

と近似できる。



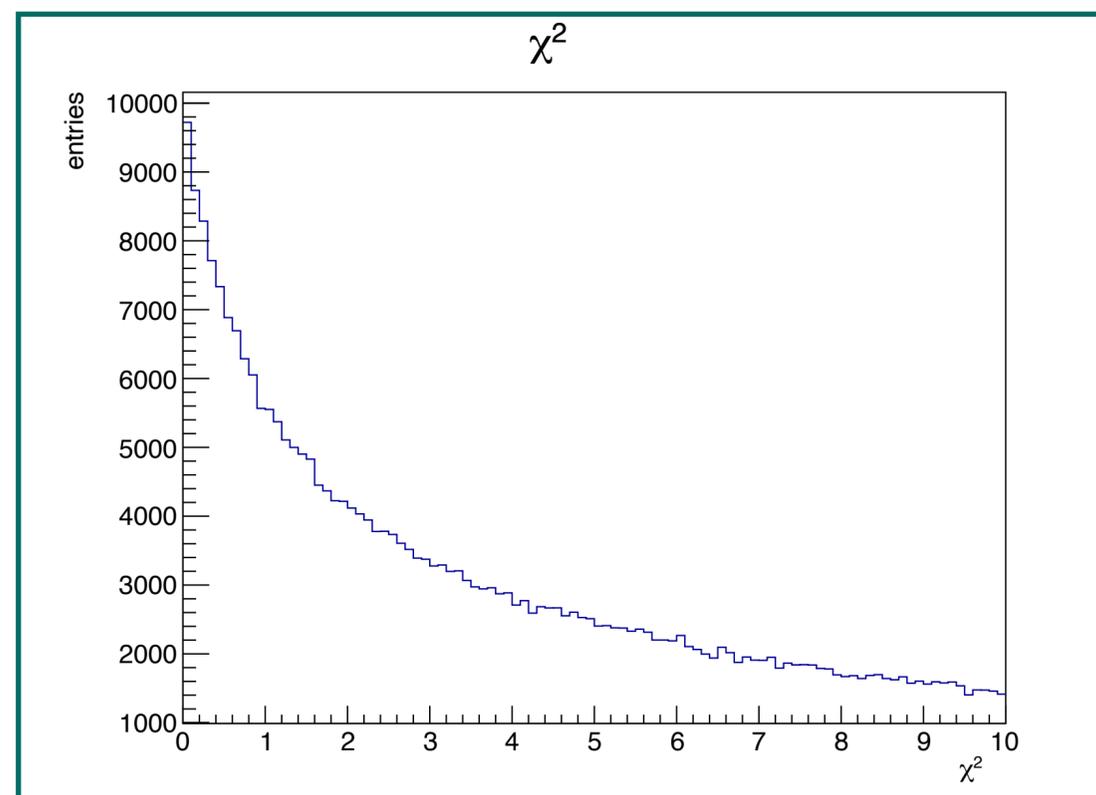
→入射ビーム軸からのずれ y はhit分布の広がり（標準偏差）に対応している

2：誤った組み合わせの除去

- 1つのクラスターが複数のクラスターペアの構成要素になってしまう場合
 - クラスターペアの外挿した直線と衝突点との距離が最も小さい（ χ^2 が最も小さい）クラスターペアのみを採用する。

$$\chi^2 = \left(\frac{d_{xy}}{\sigma_{xy}} \right)^2 + \left(\frac{dz}{\sigma_z} \right)^2$$

- d_{xy} (dz) : x-y平面 (z軸) における衝突点とクラスターペアを外挿した直線間の距離。
- $\sigma_{x,y}$ (σ_z) : x-y平面 (z軸) におけるセンサーの分解能 $78 \mu m$ (20 mm)。



3 : クラスターペアの最適化

- 磁場なしデータの場合：衝突点、クラスターペアを最小二乗法によってフィッティングする。フィッティングに用いた χ^2 は以下の通り（r-z平面のみ分解能を考慮）。

$$\chi^2 = \sum \frac{(z_i - (ar_i + b))^2}{\sigma_{z_i}^2}$$

- r_i (z_i) は衝突点、内層、外層クラスターの3点のr (z) 座標。
- aは再構成された飛跡のr-z平面上の傾き、bは切片（未知の変数）。
- σ_{z_i} は衝突点、内層、外層クラスターのz方向の位置分解能： $(\frac{0.8}{10}, \frac{20}{\sqrt{12}}, \frac{20}{\sqrt{12}})$ cm。
- χ^2 が最小になる、すなわち $(\frac{\delta\chi^2}{\delta a} = 0, \frac{\delta\chi^2}{\delta b} = 0)$ となるa, bを求めることによって再構成された飛跡を決定する。

効率の誤差

< 飛跡再構成効率 >

- 真の飛跡数に対する再構成された飛跡数の割合。

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{reco. tracks}}}{N_{\text{truth tracks}}}$$

- 誤差は二項分布における標準偏差を用いている。二項分布における分散 s^2 は以下の通り。

$$s^2 = np(1 - p)$$

- n は試行回数、効率の分母にあたる $N_{\text{truth tracks}}$ であり、 p は確率、効率に当たる ε_{eff} である。
- すなわち、

$$s^2 = N_{\text{truth tracks}} \times \varepsilon_{\text{eff}}(1 - \varepsilon_{\text{eff}})$$

となる。これを飛跡再構成効率に対する誤差に直すと、

$$\delta\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{N_{\text{truth tracks}} \times \varepsilon_{\text{eff}}(1 - \varepsilon_{\text{eff}})}}{N_{\text{truth tracks}}} \times 100[\%]$$

となる。

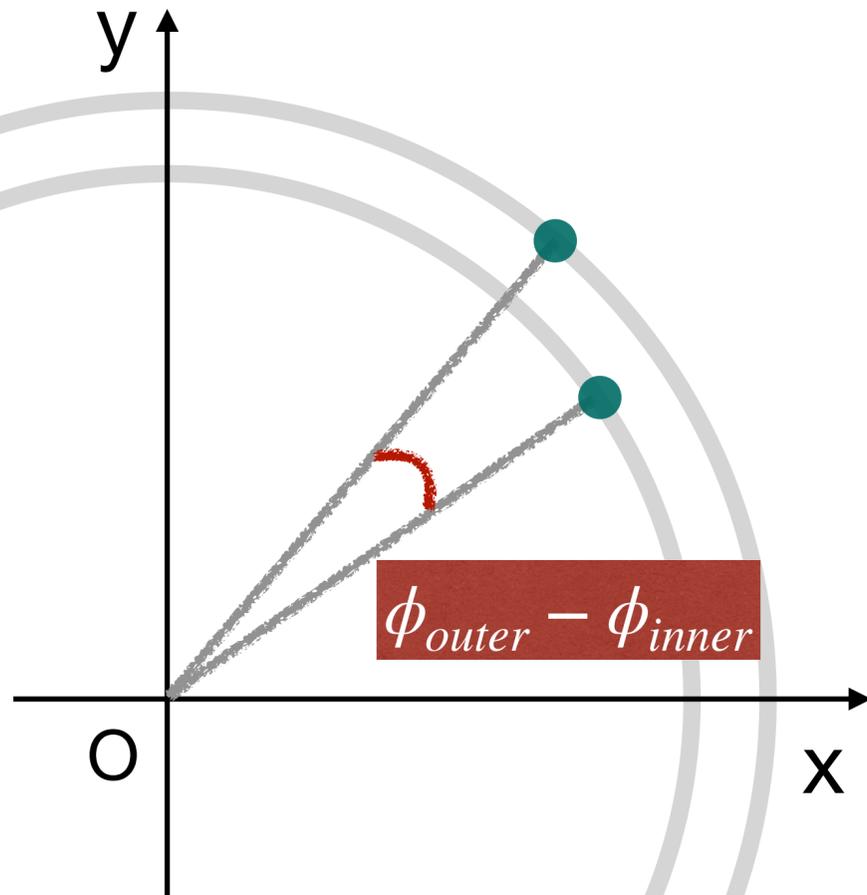
内部用

Plot1, 2 : $\phi_{\text{outer}} - \phi_{\text{inner}}$

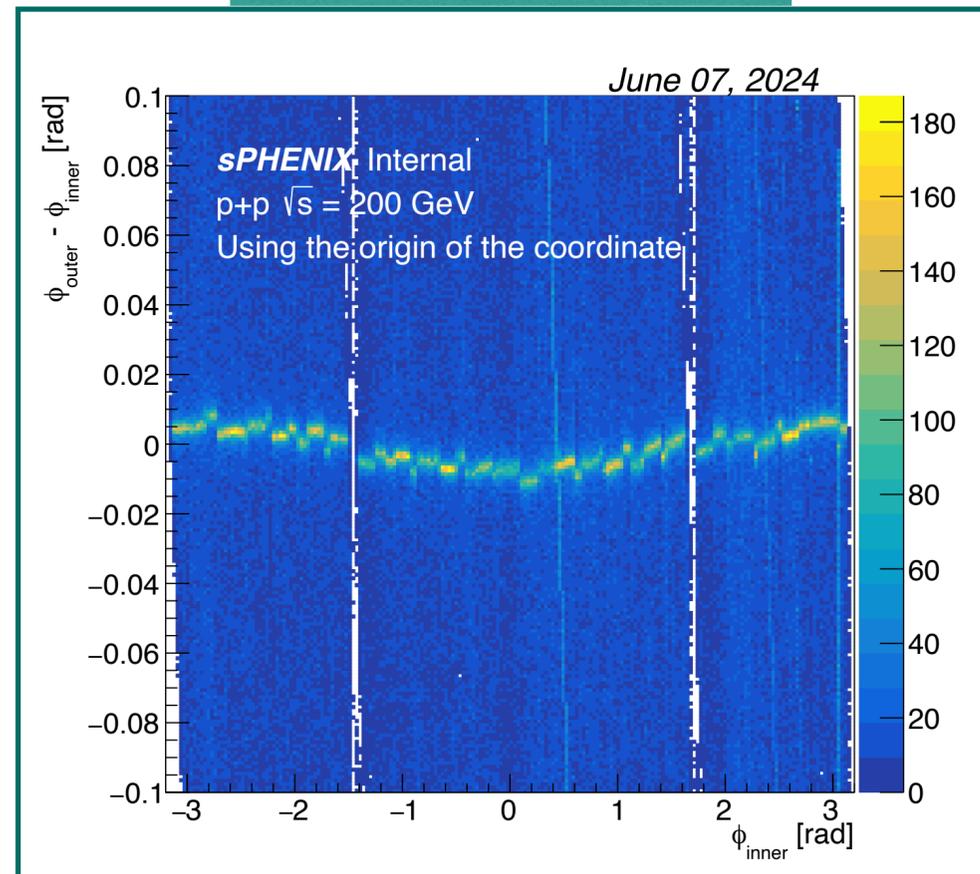
Used data : 40741 without B-field

56

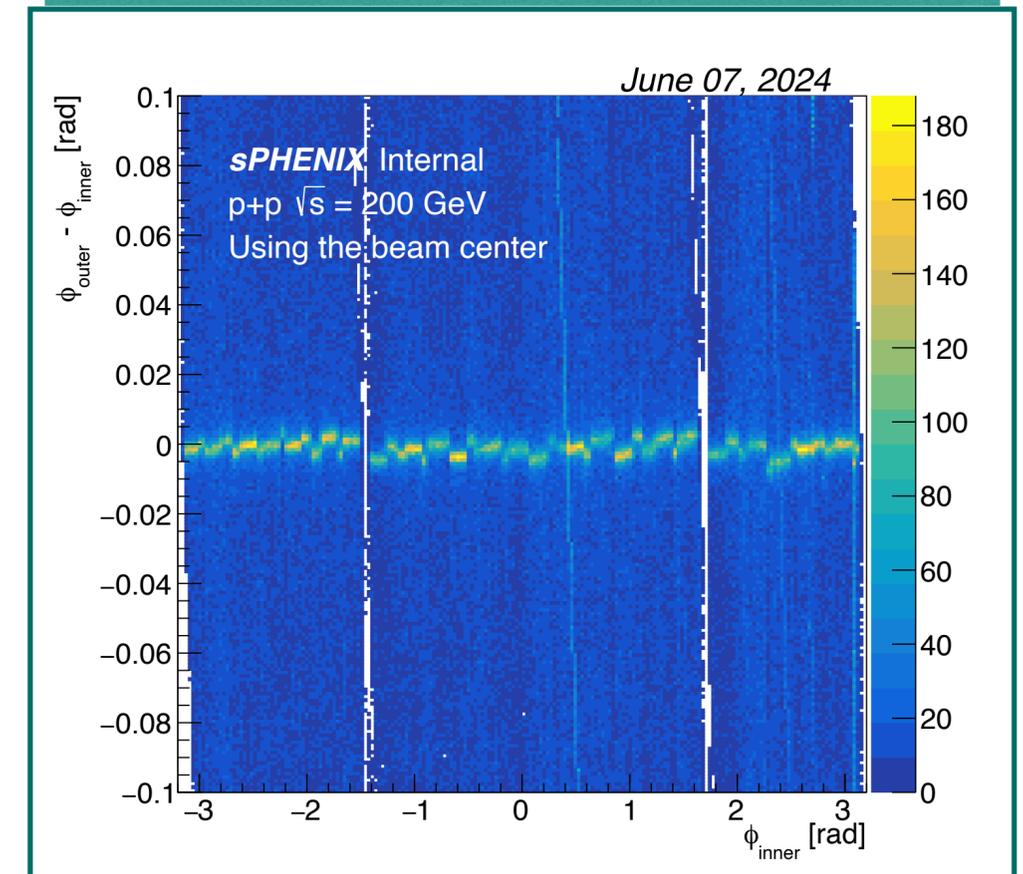
- Left(Right) plot shows angular differences btw the inner and the outer layer clusters from the origin of the coordinate (the beam center) in the x-y plane.



from (0, 0)cm



from (-0.019, 0.198)cm



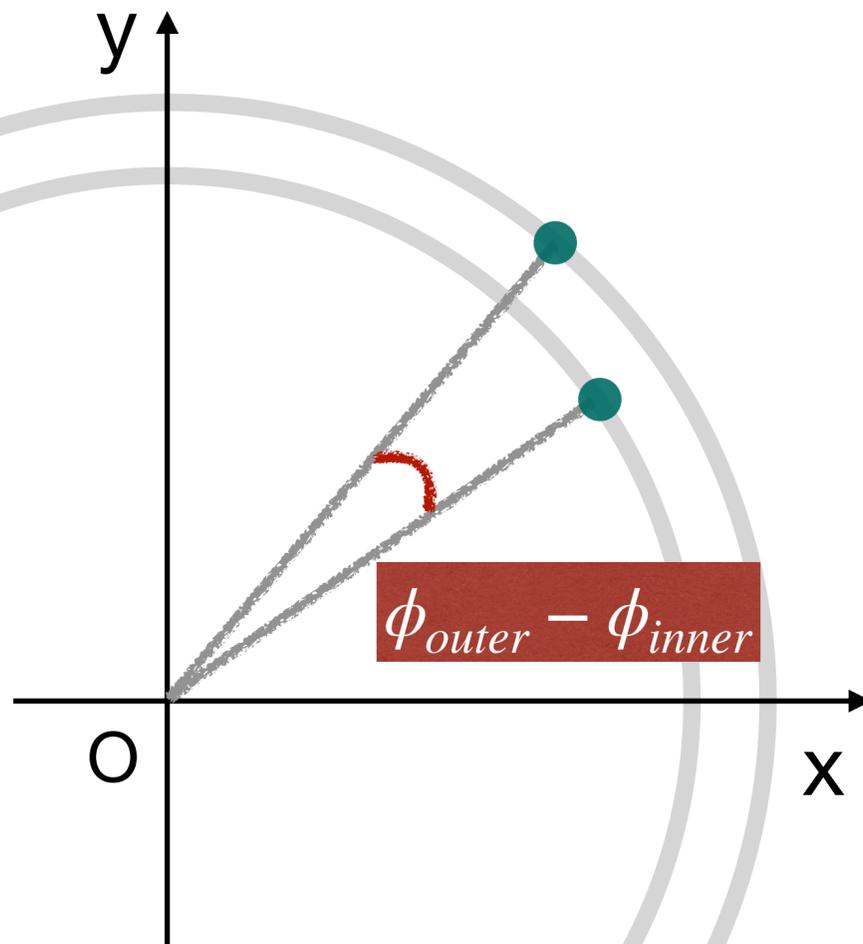
- These distribution have good correlations.
- Using the beam center, the shape becomes straight.

Plot3, 4 : $\phi_{\text{outer}} - \phi_{\text{inner}}$

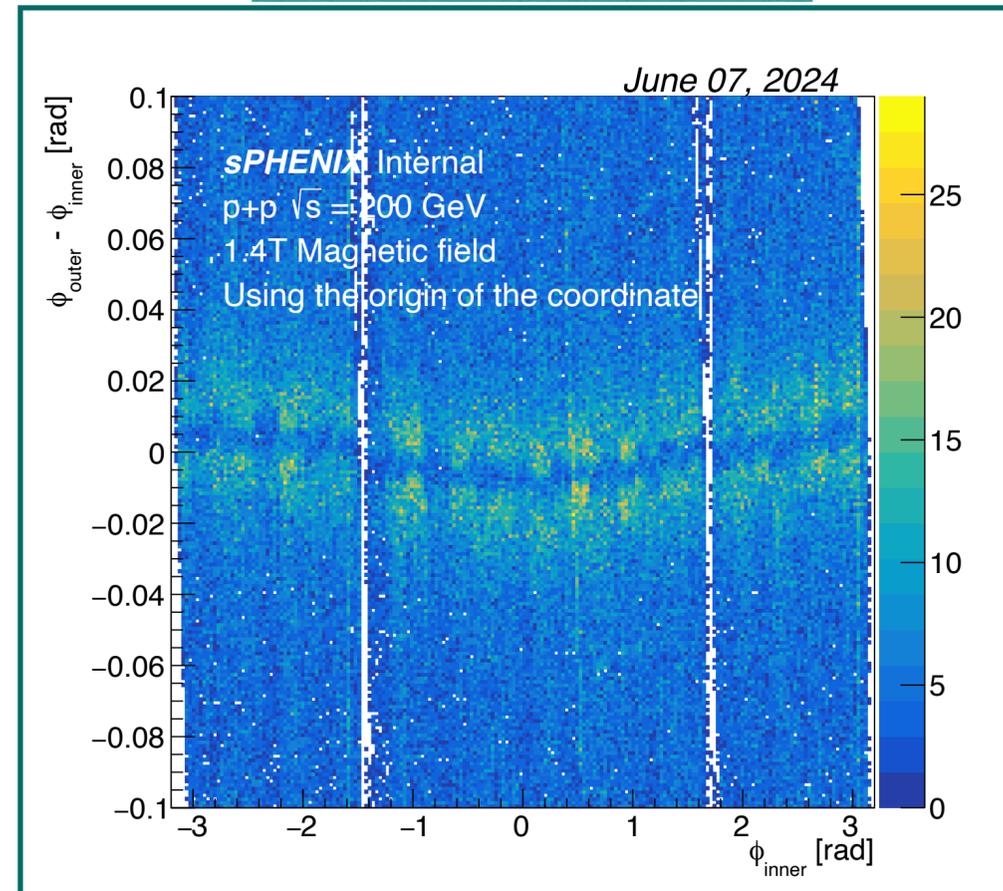
Used data : 41981 with B-field

57

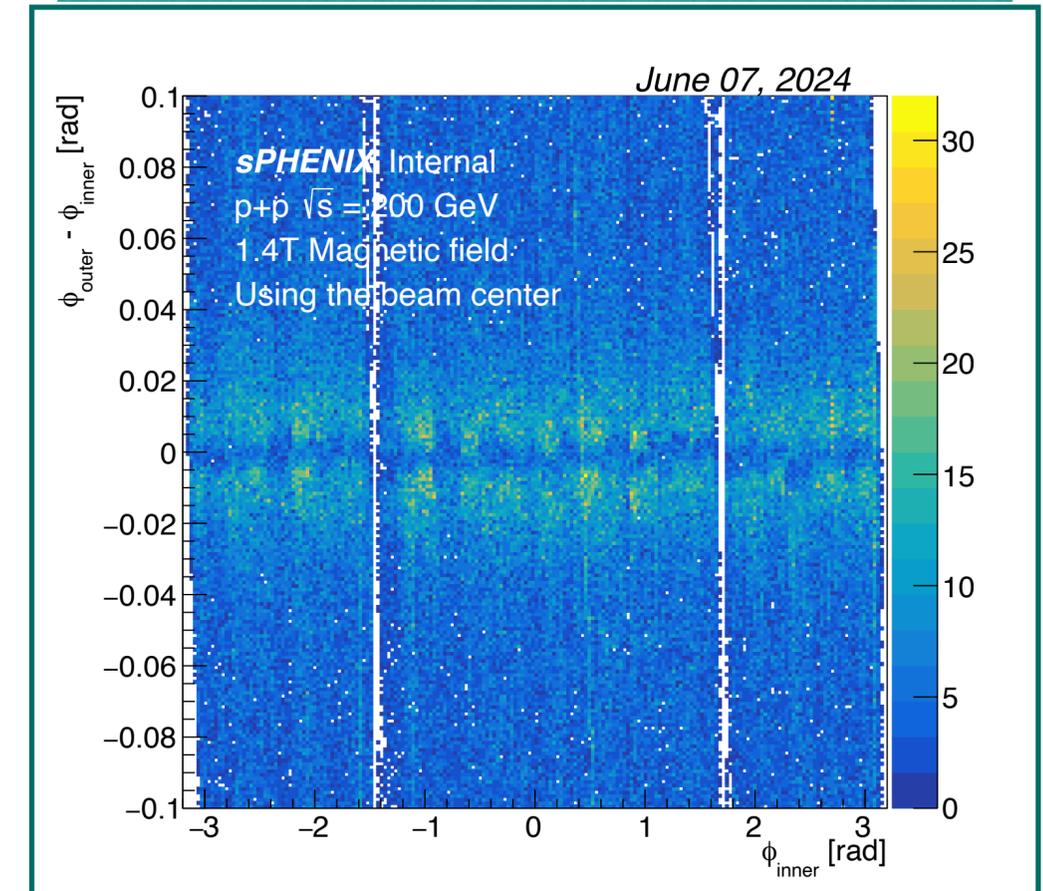
- Left(Right) plot shows angular differences btw the inner and the outer layer clusters from the origin of the coordinate (the beam center) in the x-y plane.



from (0, 0)cm



from (-0.019, 0.198)cm



- These distribution have good correlations.
- Using the beam center, the shape becomes straight.

- Some tracks pass through ladders multiple times.
- How many tracks pass through multiple times?
- <Ratio>

$$\frac{N_{\text{track ID (multi. times)}}}{N_{\text{all track ID}}}$$

$N_{\text{trackID (multi. times)}}$: The number of track ID of truth tracks pass through ladder multiple times.

$N_{\text{all trackID}}$: The number of track ID.

- Clusters have same ID are counted separately so far.

Single Particle

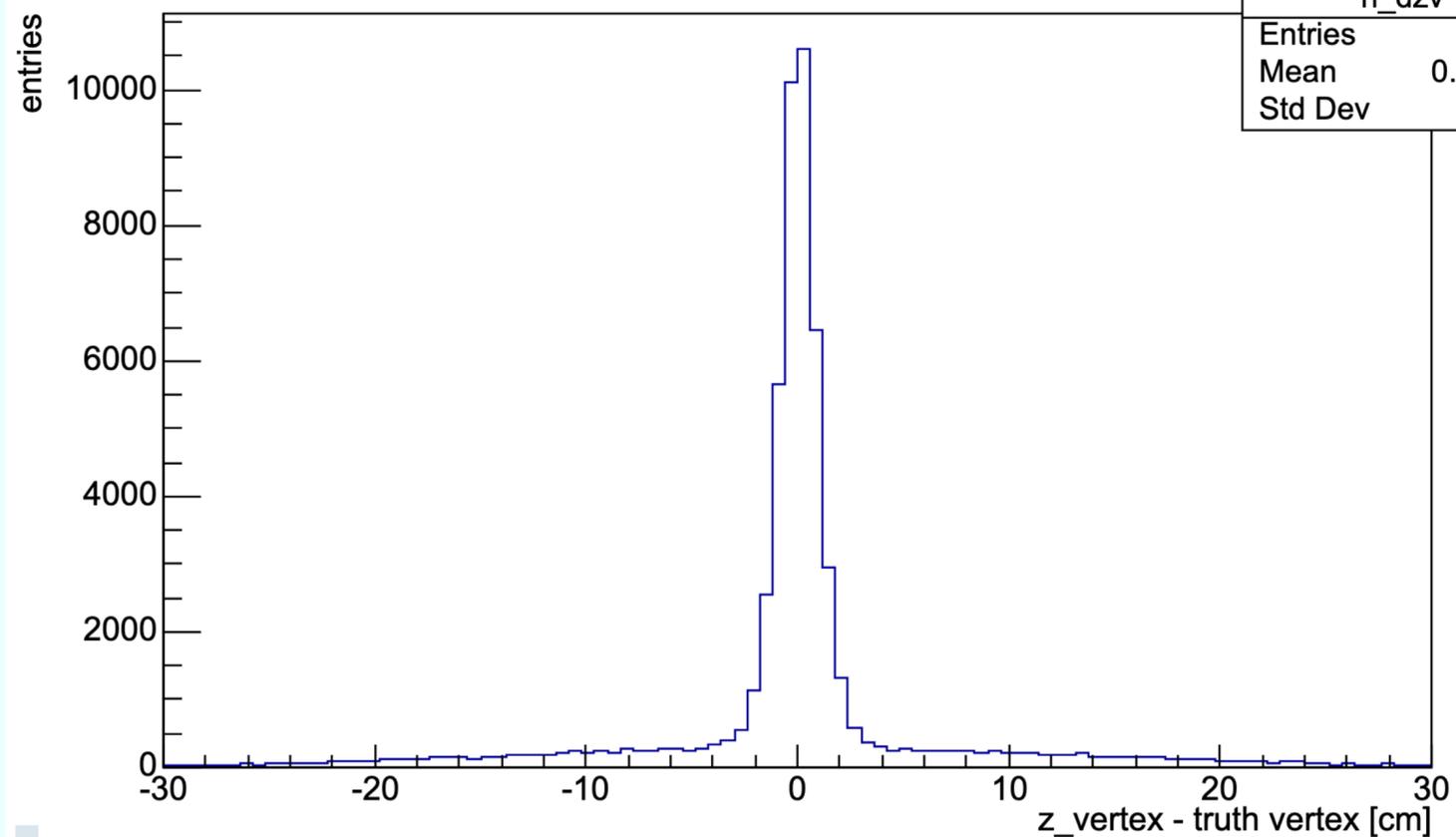
	B-off (inner cluster)	B-off (outer cluster)	B-on (inner cluster)	B-on (outer cluster)
Ratio[%]	0.14	0.13		

	B-off (inner cluster)	B-off (outer cluster)	B-on (inner cluster)	B-on (outer cluster)
Ratio[%]	0.32	0.21		

- (シミュレーションの飛跡再構成にはtruth vertexを使用。)
- InttZvertexFinderを使用。

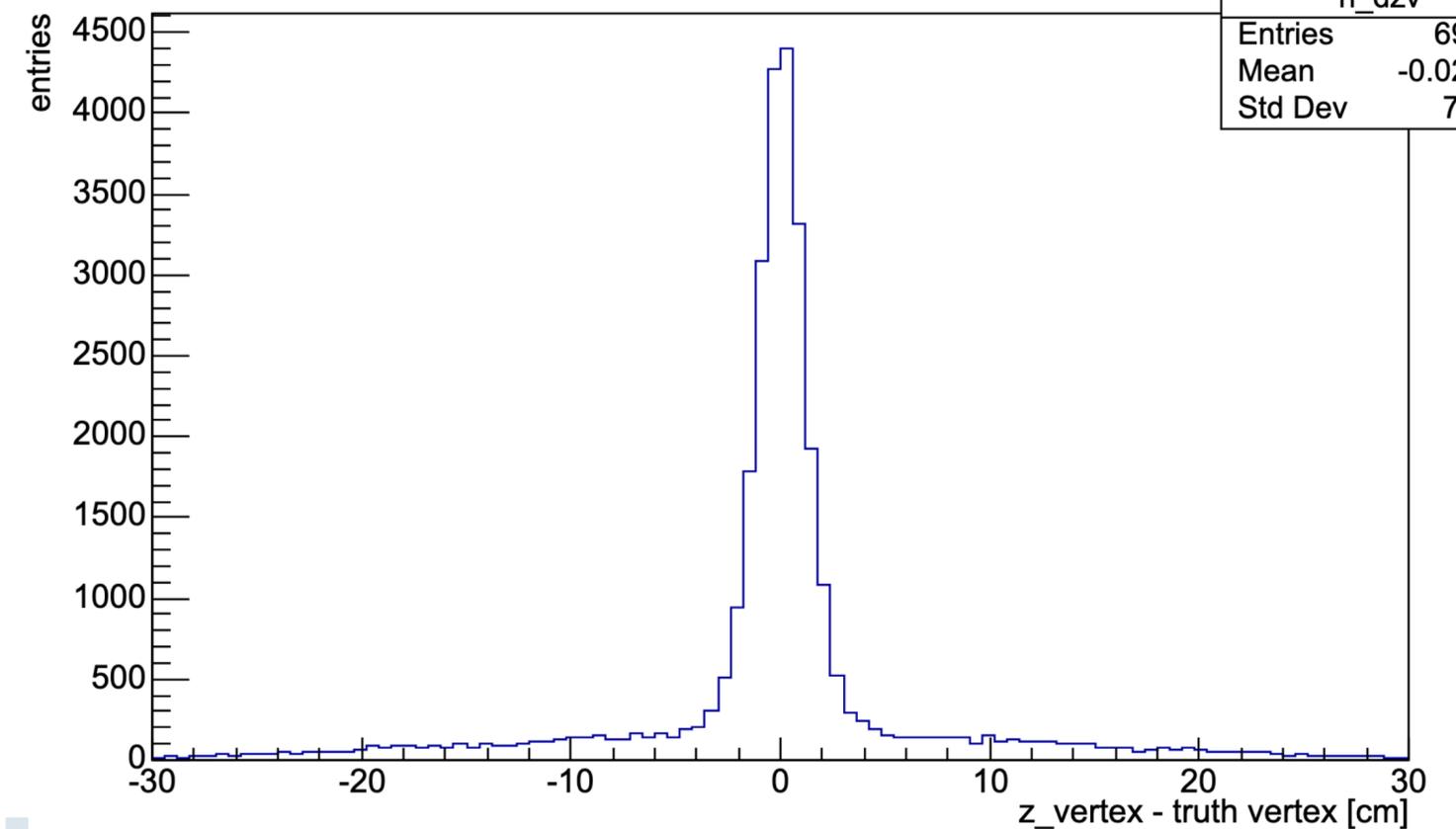
磁場なしMC (pp)

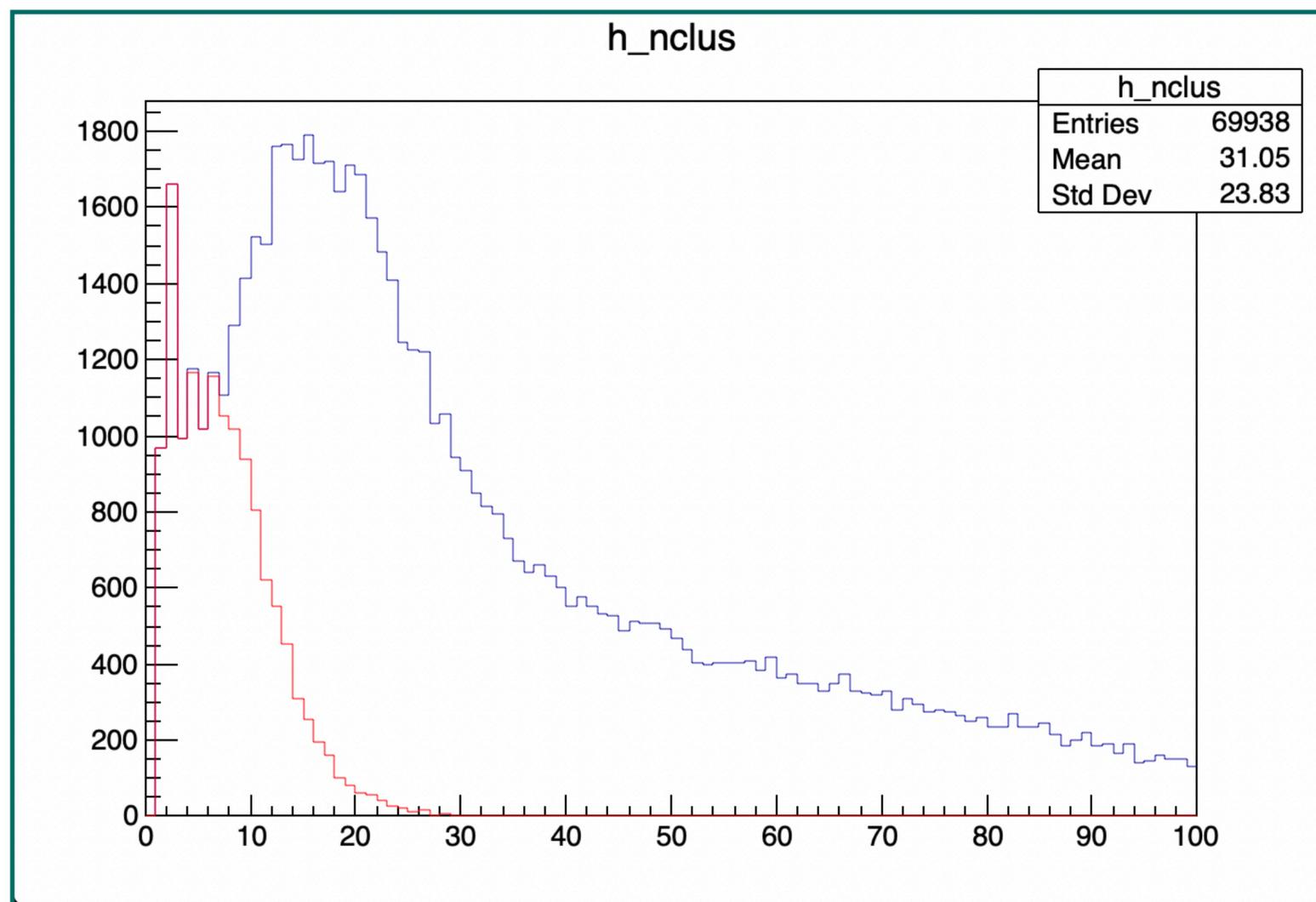
z_vertex - truth vertex [cm]



磁場ありMC (pp)

z_vertex - truth vertex [cm]





- InttZVertexFinderを用いたときに、z_vertexが再構成されないイベントがある。
- ➡ イベント内のクラスター数が少ない場合にz_vertexが再構成されないのではないか？
 - 青：全イベント（69938イベント）
 - 赤：z_vertexが再構成できなかったイベント（13780イベント）
- イベント内のクラスターが少ない場合にはz_vertexは再構成されない。

	Layer 0	Layer 1	Layer 2
Radial position (min.) (mm)	23.7	31.4	39.1
Radial position (max.) (mm)	28.0	35.9	43.4
Length (sensitive area) (mm)	271	271	271
Active area (cm ²)	421	562	702
Number of pixel chips	108	144	180
Number of staves	12	16	20

Table 3: Parameters of the sPHENIX MVTX design.

Run 40741 Trigger Configuration

LL1 input channel	Triggerdelay	switchyard
0	0	1
1	0	0
2	0	1
3	0	3
4	0	4
5	0	5
6	0	6
7	0	7
8	0	8
9	0	9
10	0	10
11	0	11
12	0	12
13	0	13

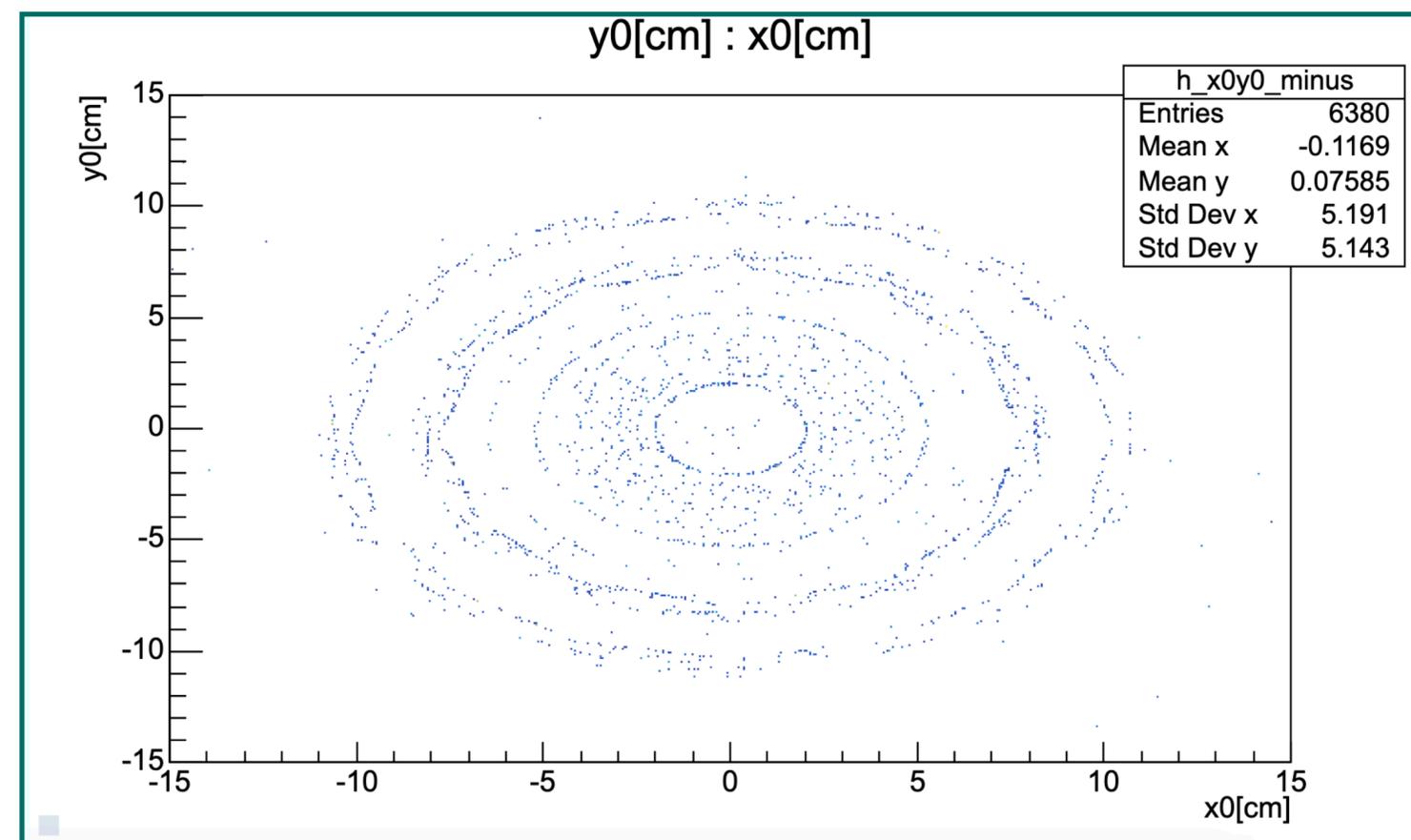
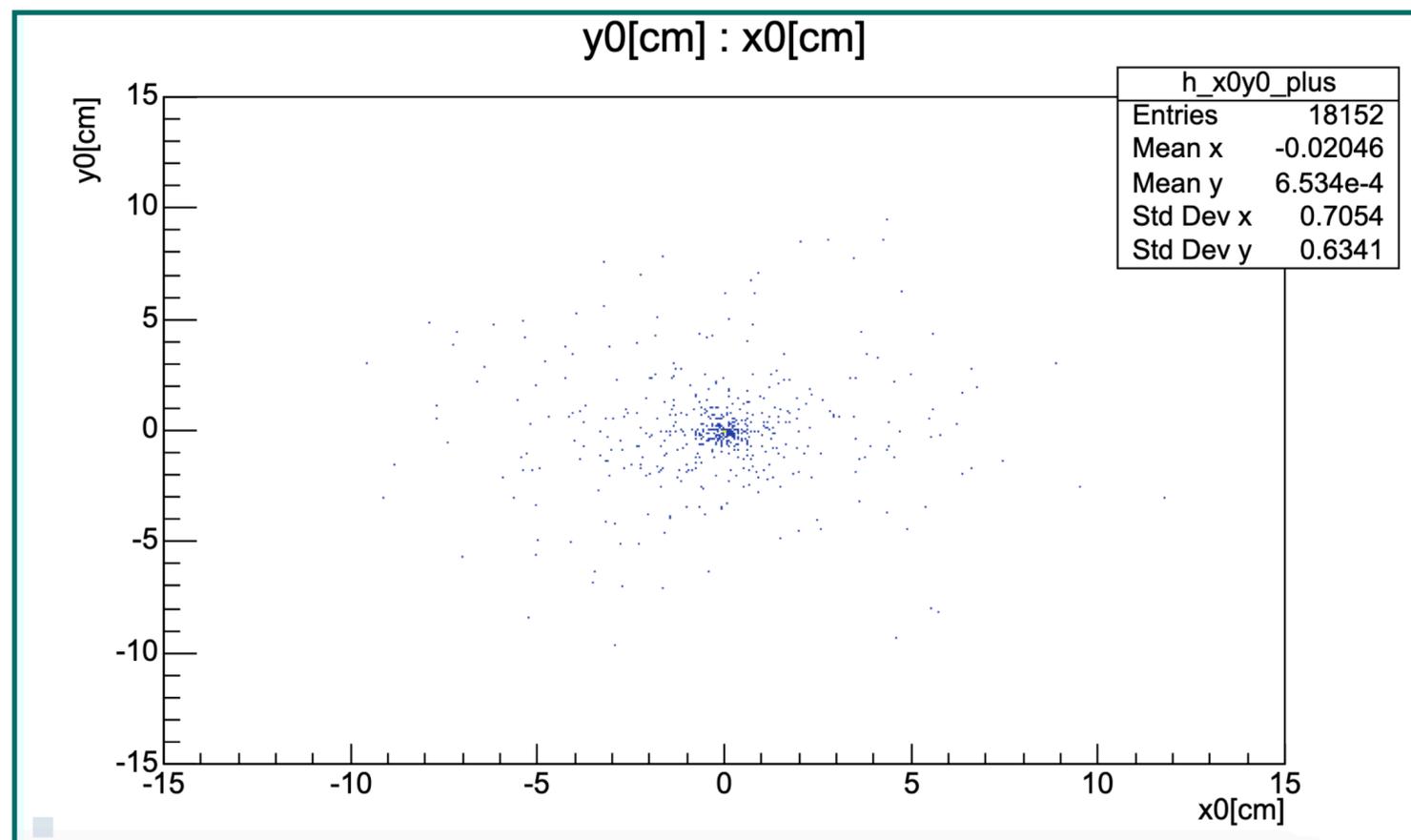
Trigger input channel	Name	enabled	Scaledown	Raw	Live	Scaled	Live (%)
0	Clock	yes	off	3529193895	1233164876	0	34.9
1	ZDC North	yes	off	5401526	1818012	0	33.7
2	ZDC South	yes	off	6012112	2035012	0	33.8
3	ZDC Coincidence	yes	off	386522	131664	0	34.1
4		yes	off	2434347	853521	0	35.1
5		yes	off	0	0	0	0
6		yes	off	0	0	0	0
7		yes	off	0	0	0	0
8	MBD S \geq 1	yes	off	43185665	15095717	0	35.0
9	MBD N \geq 1	yes	off	40551262	14206631	0	35.0
10	MBD N&S \geq 1	yes	off	16521538	5795674	1807560	35.1
11	MBD N&S \geq 2	yes	off	5617087	1971037	0	35.1
12	MBD N&S \geq 1, vtx < 10 cm	yes	off	1271587	446180	0	35.1
13	MBD N&S \geq 1, vtx < 30 cm	yes	off	3341149	1171582	0	35.1

Run 41981 Trigger Configuration

LL1 input channel	Triggerdelay	switchyard
0	0	0
1	1	0
2	0	1
3	5	2
4	5	3
5	0	5
6	0	6
7	0	7
8	3	8
9	3	9
10	3	10
11	3	11
12	3	12
13	3	13

Trigger input channel	Name	enabled	Scaledown	Raw	Live	Scaled	Live (%)
0	Clock	yes	off	5273012474	3328472954	0	63.1
1	ZDC South	yes	off	6836266	4312837	0	63.1
2	ZDC North	yes	off	7493587	4729244	0	63.1
3	ZDC Coincidence	yes	off	373457	235637	0	63.1
4	HCAL Singles	yes	off	80	40	0	50.0
5	HCAL Coincidence	yes	off	0	0	0	0
6		yes	off	0	0	0	0
7		yes	off	0	0	0	0
8	MBD S >= 1	yes	off	63312788	39962839	0	63.1
9	MBD N >= 1	yes	off	60990804	38498645	0	63.1
10	MBD N&S >= 1	yes	1400	26698955	16852188	12028	63.1
11	MBD N&S >= 2	yes	off	7386691	4662028	0	63.1
12	MBD N&S >= 1, vtx < T1	yes	off	157845	99662	0	63.1
13	MBD N&S >= 1, vtx < T2	yes	off	818403	516957	0	63.2

- トラックIDの正負ごとに、 x - y 平面上の生成点を調べた。



- 正のトラックIDを持つ粒子は原点（衝突点）付近で生成されている。
- 負のトラックIDを持つ粒子の分布は検出器の形状に一致しており検出器との相互作用において生成されている。

【実験データ】

- Run40741 (磁場なし)
- Run41981 (磁場あり)
- 陽子陽子衝突 ($\sqrt{s} = 200\text{GeV}$)
- 解析イベント数：10Kイベント
- トリガー：MBD N&S ≥ 1
- ホットチャンネルカット・タイミングカット
- DAC0：30

【シミュレーションデータ】

- PYTHIA8 + GEANT4
- 陽子 + 陽子衝突 ($\sqrt{s} = 200\text{GeV}$)
- イベント数：100Kイベント
- 磁場なし / 磁場あり
- 衝突点：ガウス分布
 - 中心： $(x, y, z) = (0, 0, 0)\text{cm}$
 - 分布幅： $(x, y, z) = (10^{-4}, 10^{-4}, 10)\text{cm}$