

RHIC-sPHENIX実験での
 $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$ のp+p衝突における
J/ ψ 中間子の測定

高エネルギー物理学研究室

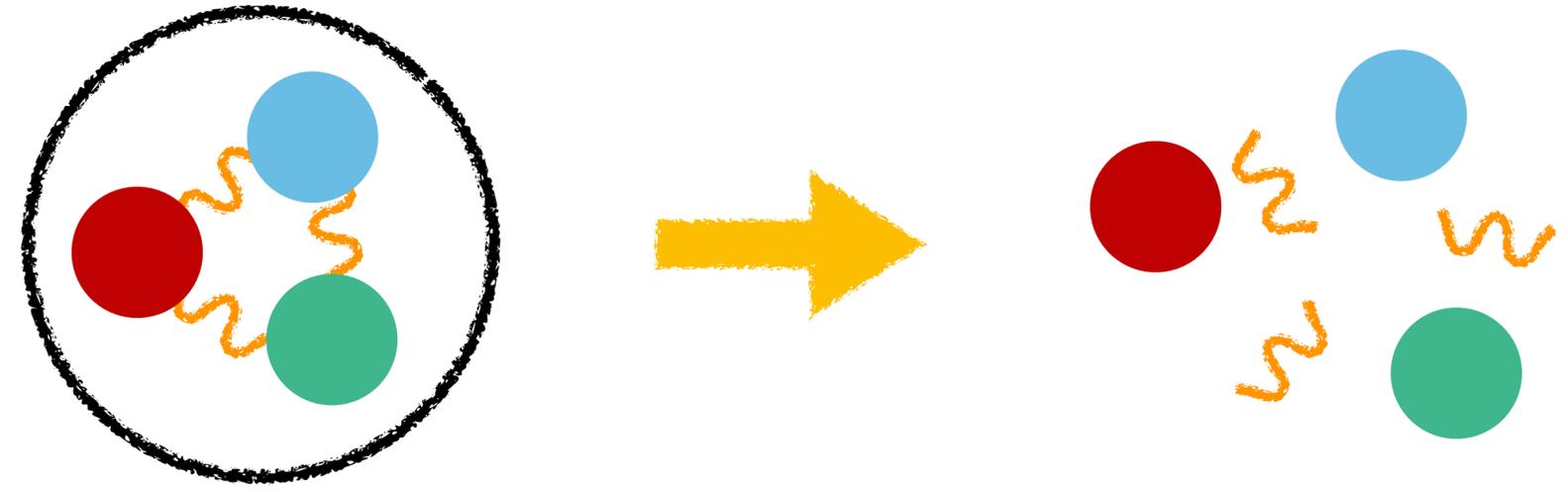
池本 真尋

修士論文審査会 2026.02.17

クォーク・グルーオン・プラズマ

<QGP>

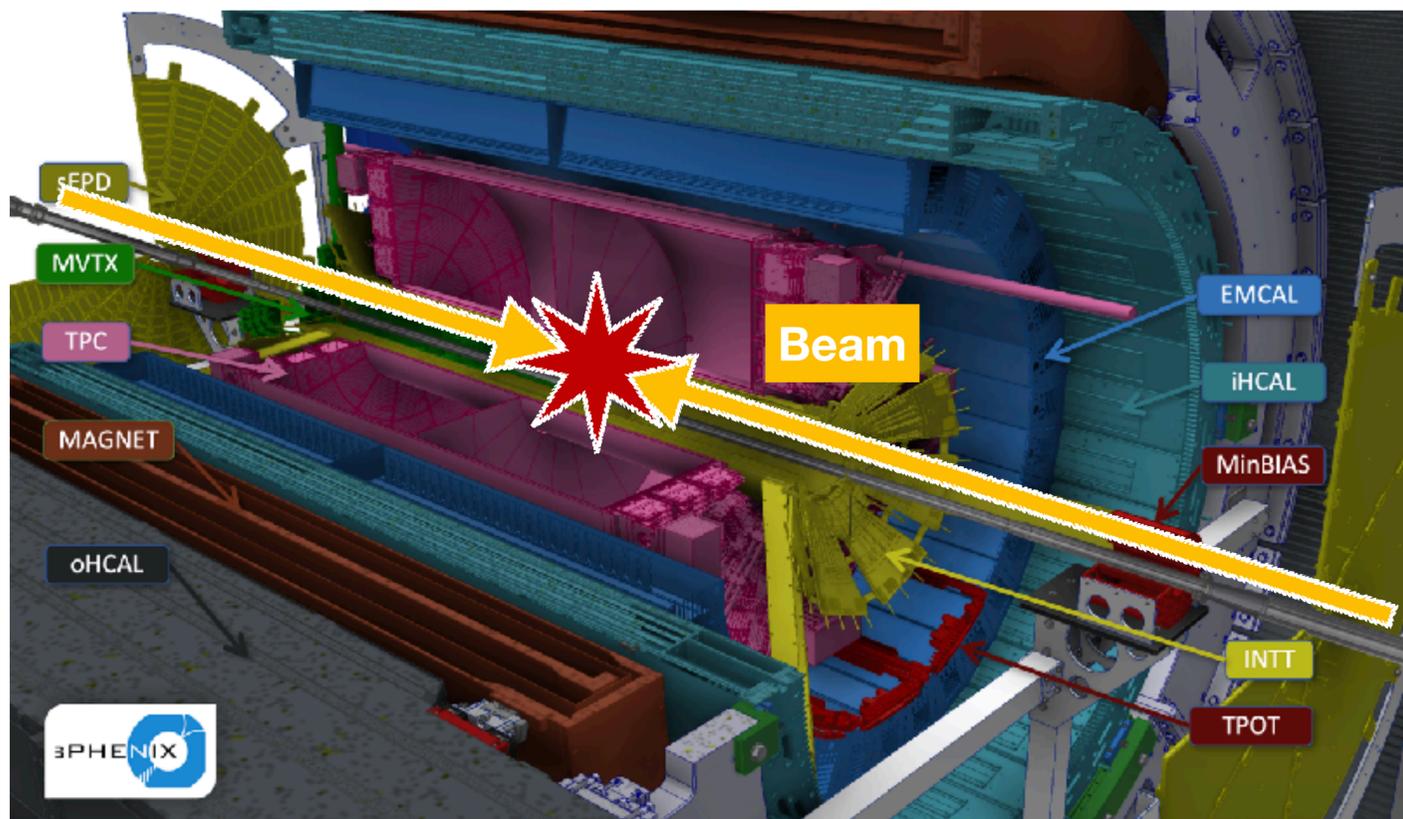
高温・高密度下において、クォークやグルーオンがハドロン内の閉じ込めから解放されたプラズマ状態



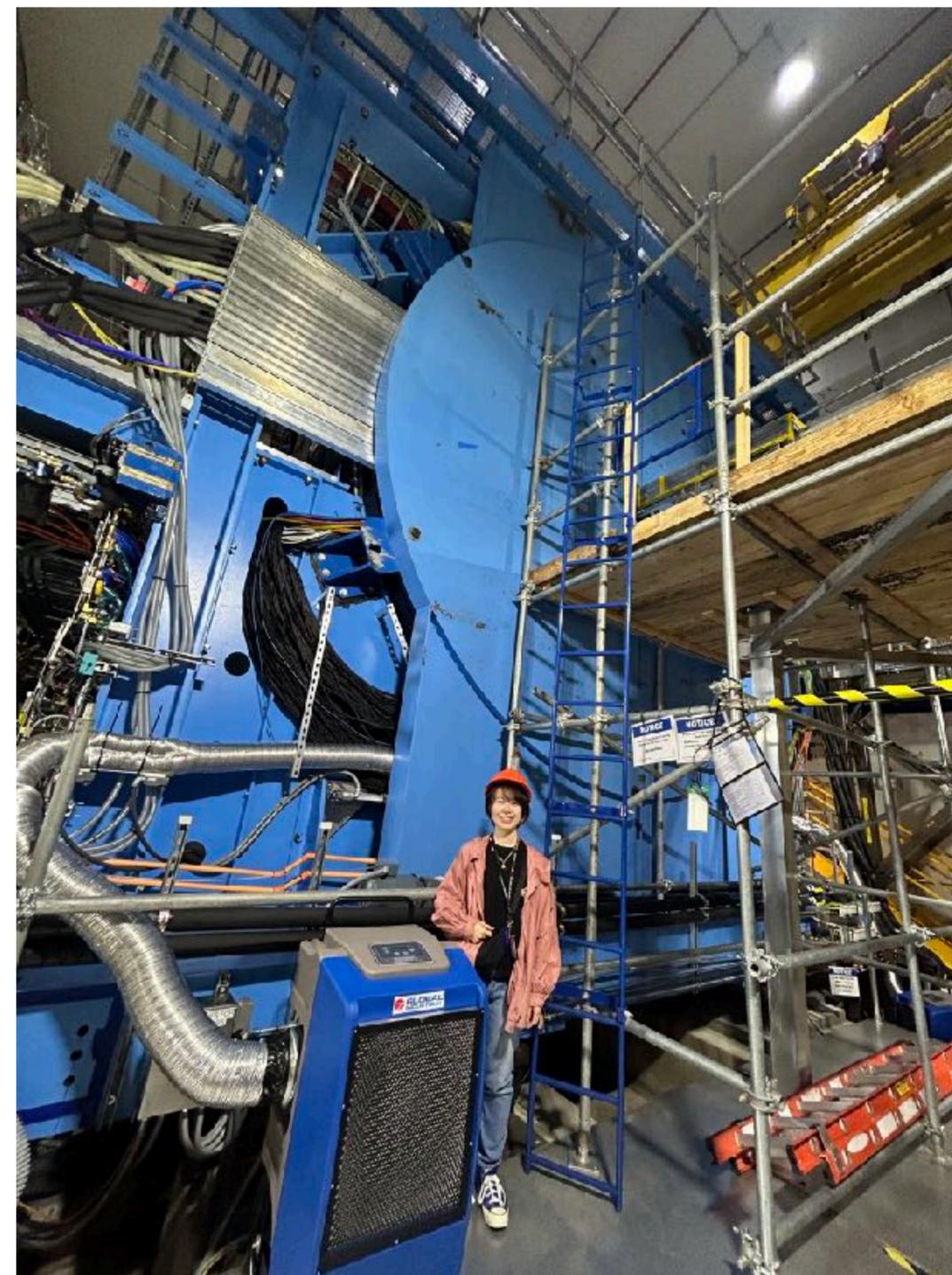
sPHENIX実験

<sPHENIX実験>

- RHIC加速器 @米国ブルックヘブン国立研究所
- 重い原子核対の衝突でQGPを生成、性質を解明
- Au+Au(200GeV) や p+p (200GeV)
- 磁場はビーム軸(z軸)方向にかかる。磁束密度1.4T

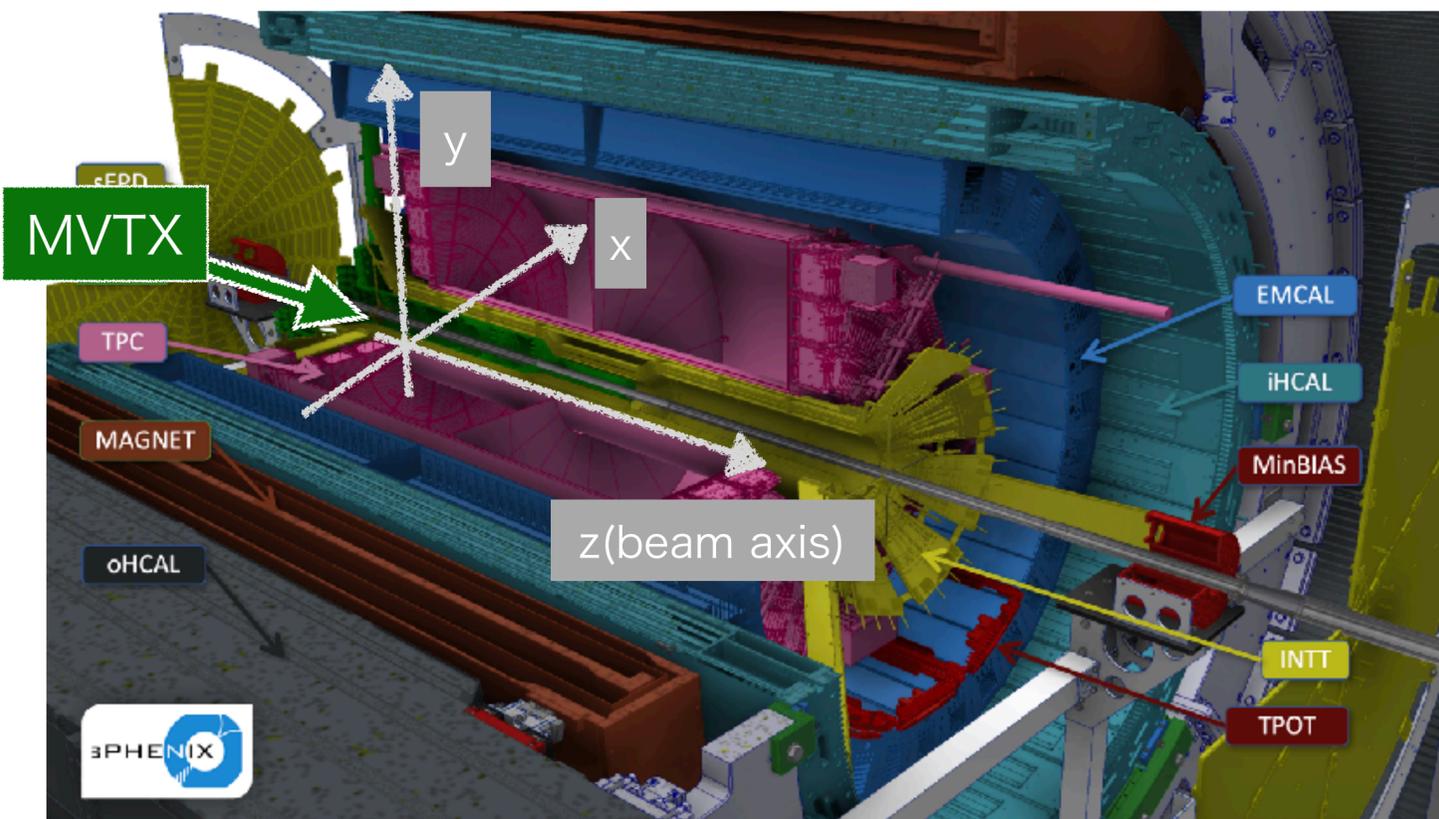
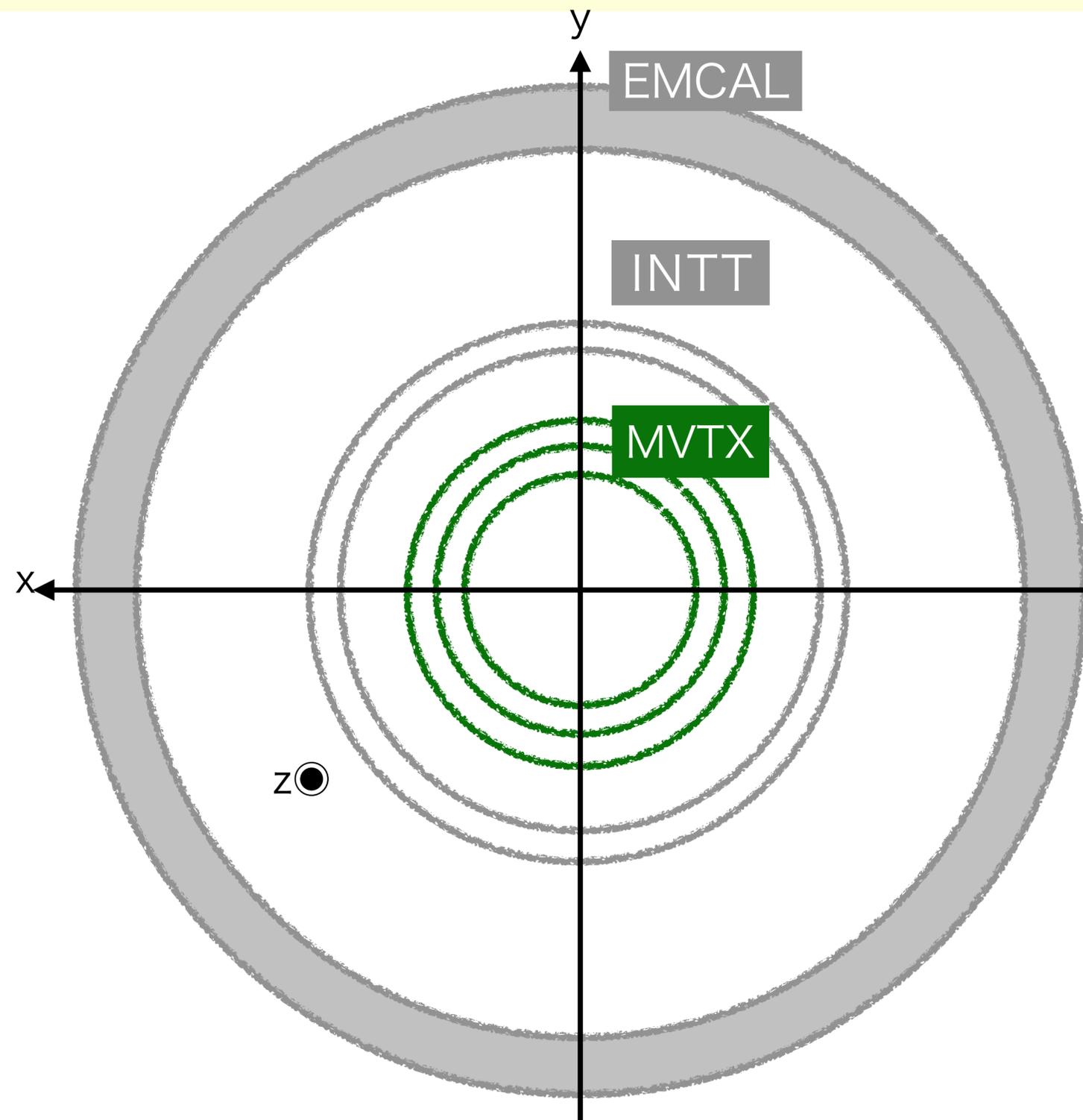


sPHENIX実験現地にて撮影



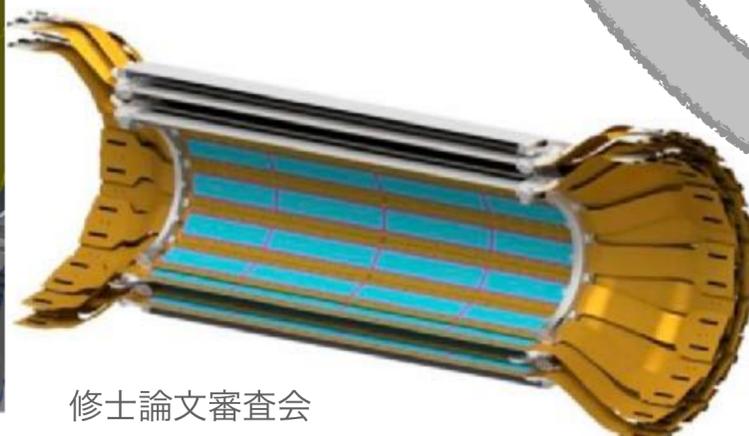
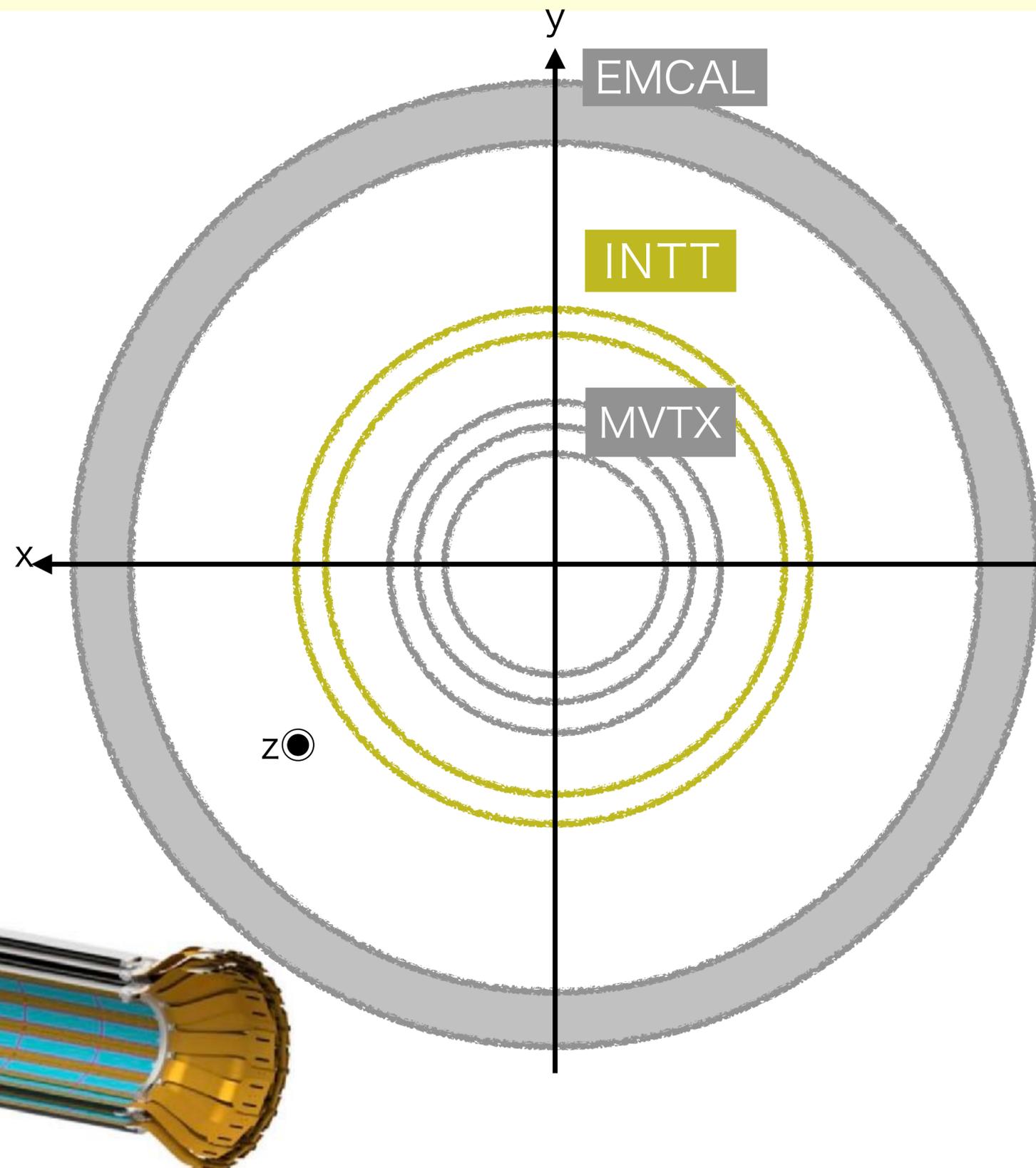
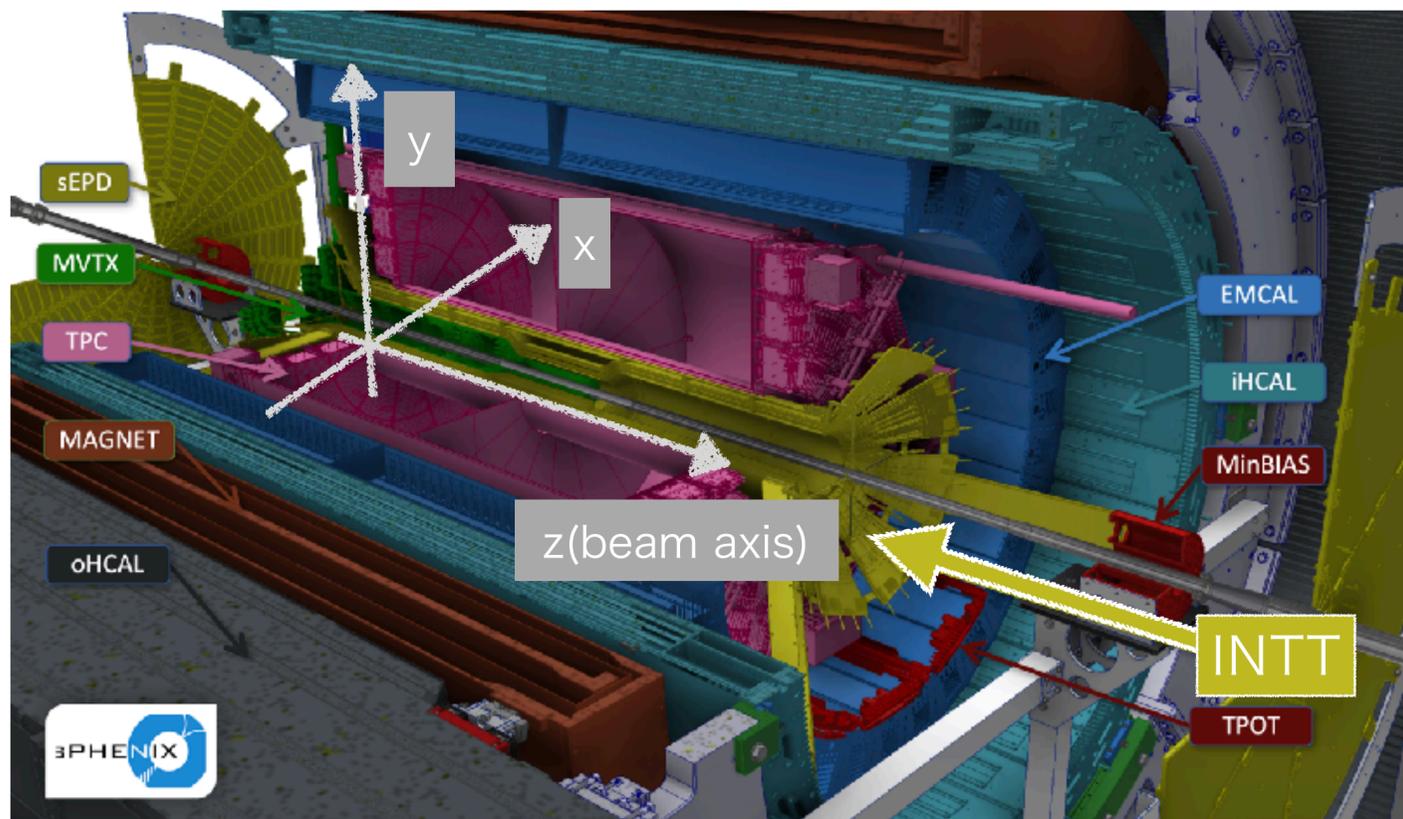
ピクセル型シリコン飛跡検出器 - MVTX

- 3層のバレル型シリコンピクセル検出器 (pixel size : $27\mu\text{m} \times 29\mu\text{m}$)
- ビーム軸から2.4cm, 3.1cm, 3.9cm
- 最も内側(ビーム軸に近い)にある検出器
- 衝突点と粒子の最近接距離を測定、衝突点や飛跡を再構成



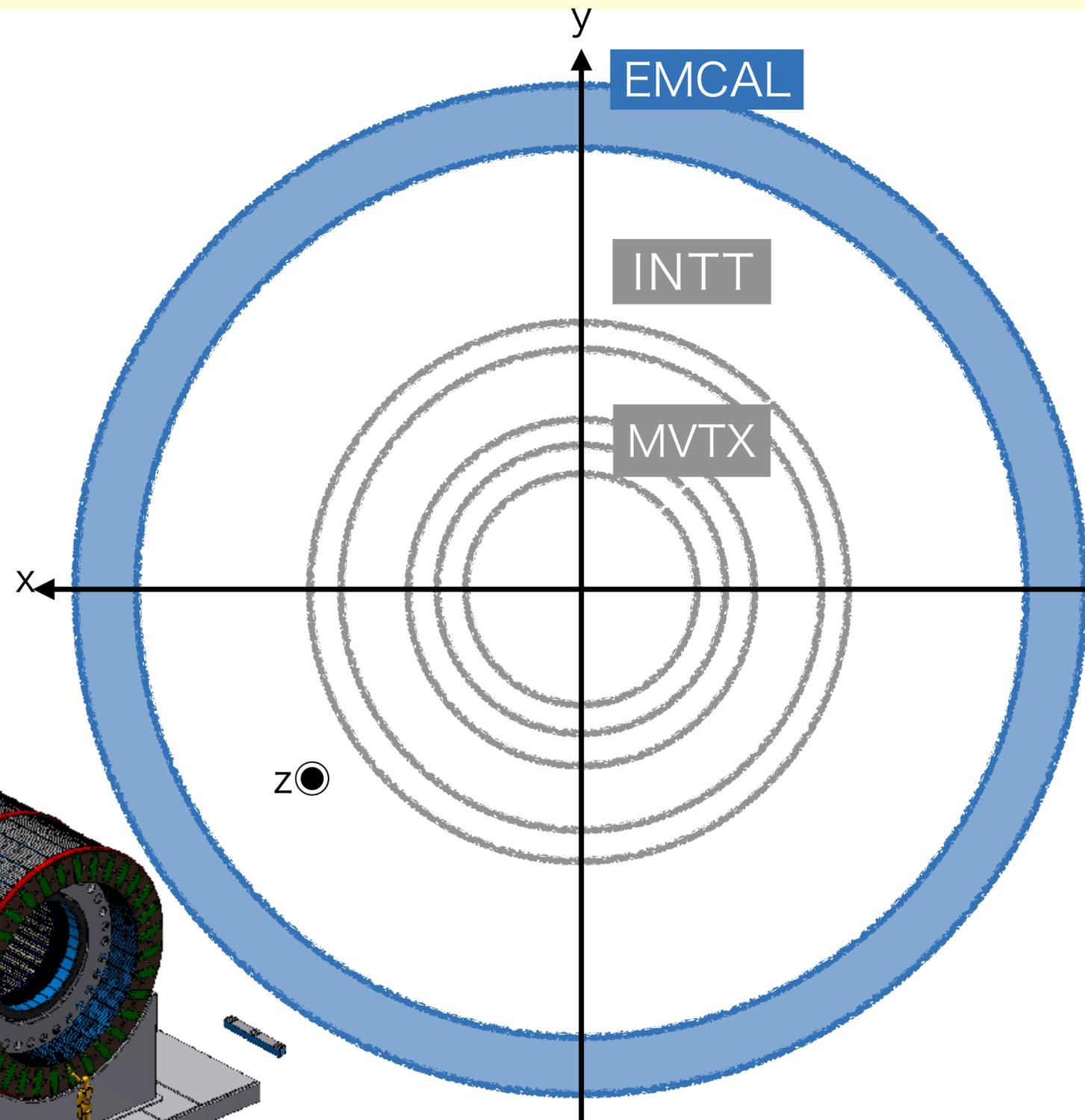
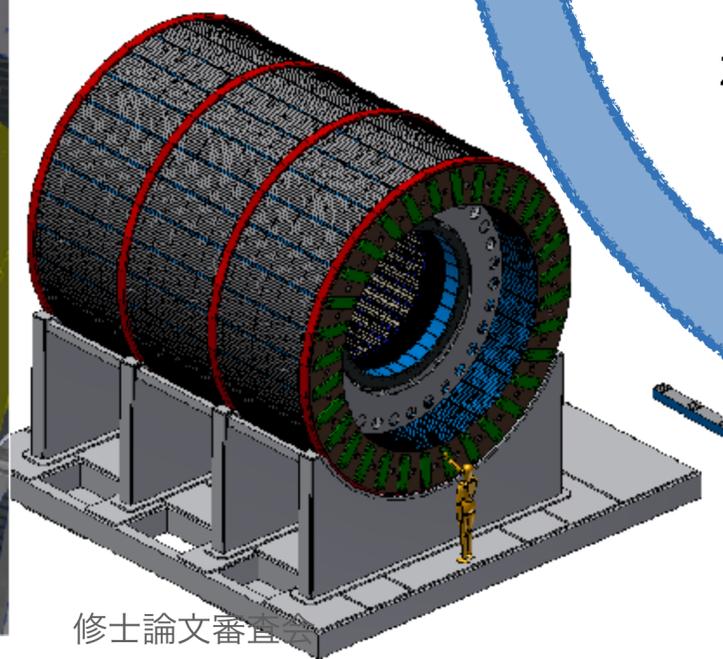
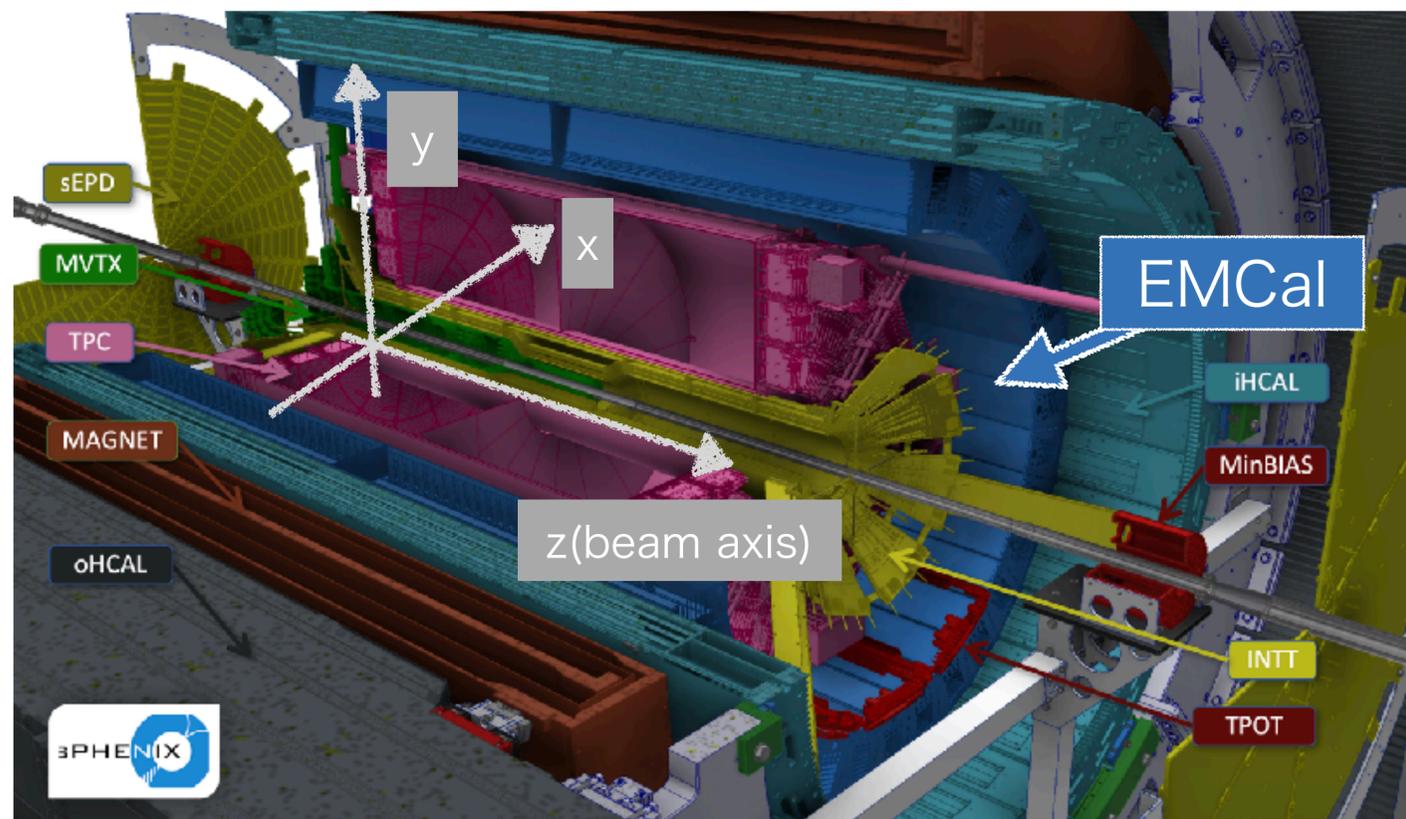
ストリップ型シリコン飛跡検出器 - INTT

- ・ 2層のバレル型シリコンストリップ検出器
(strip size : $320\mu\text{m} \times 16$ or 20 mm)
- ・ ビーム軸から7.5cm, 10cm に位置
- ・ 内側から二番目の検出器
- ・ データ処理速度が速く、衝突事象ごとの飛跡再構成が可能



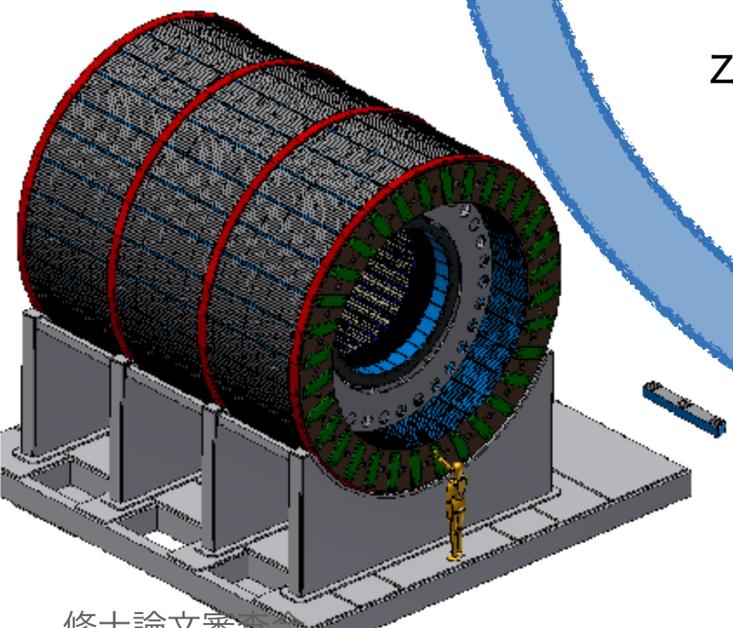
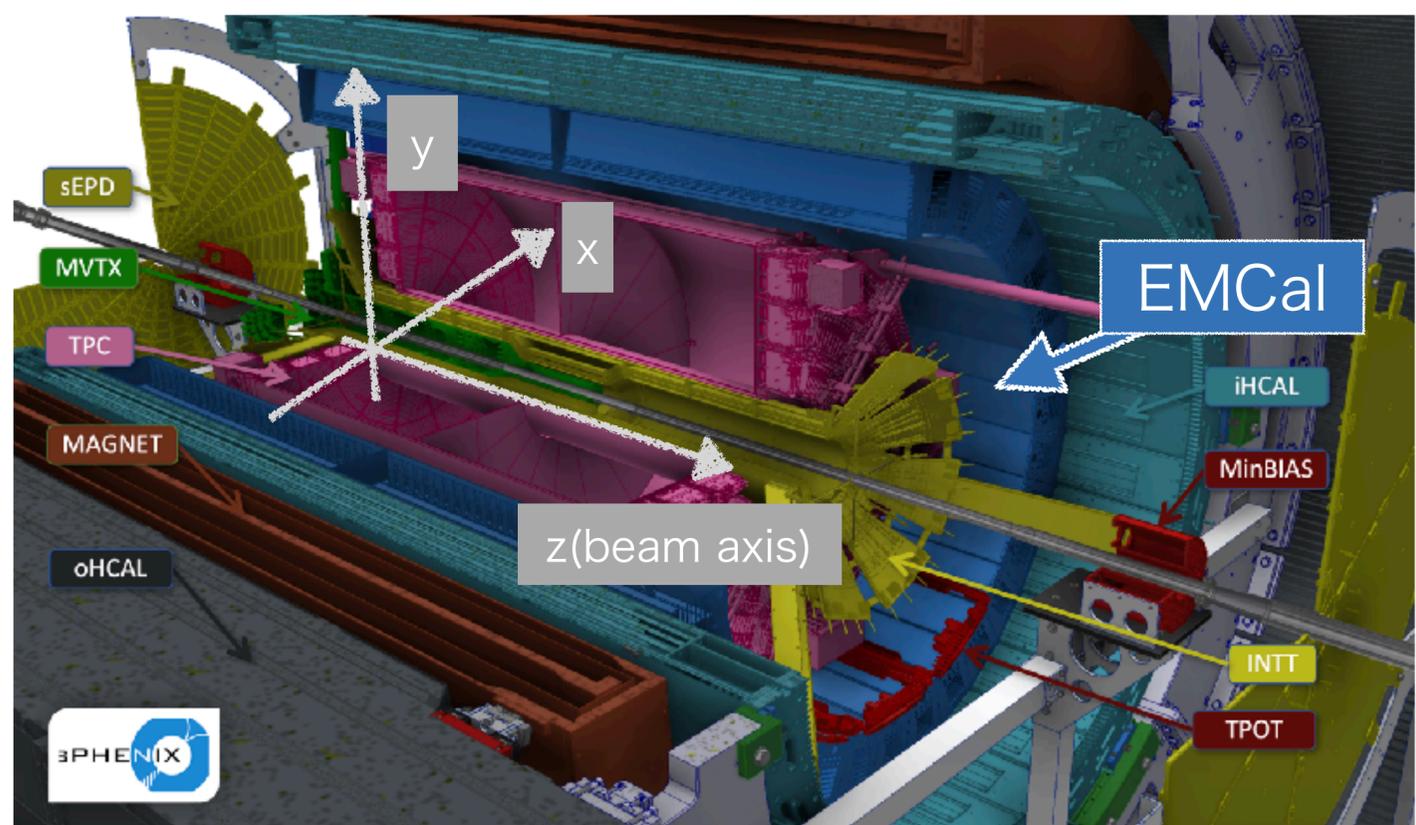
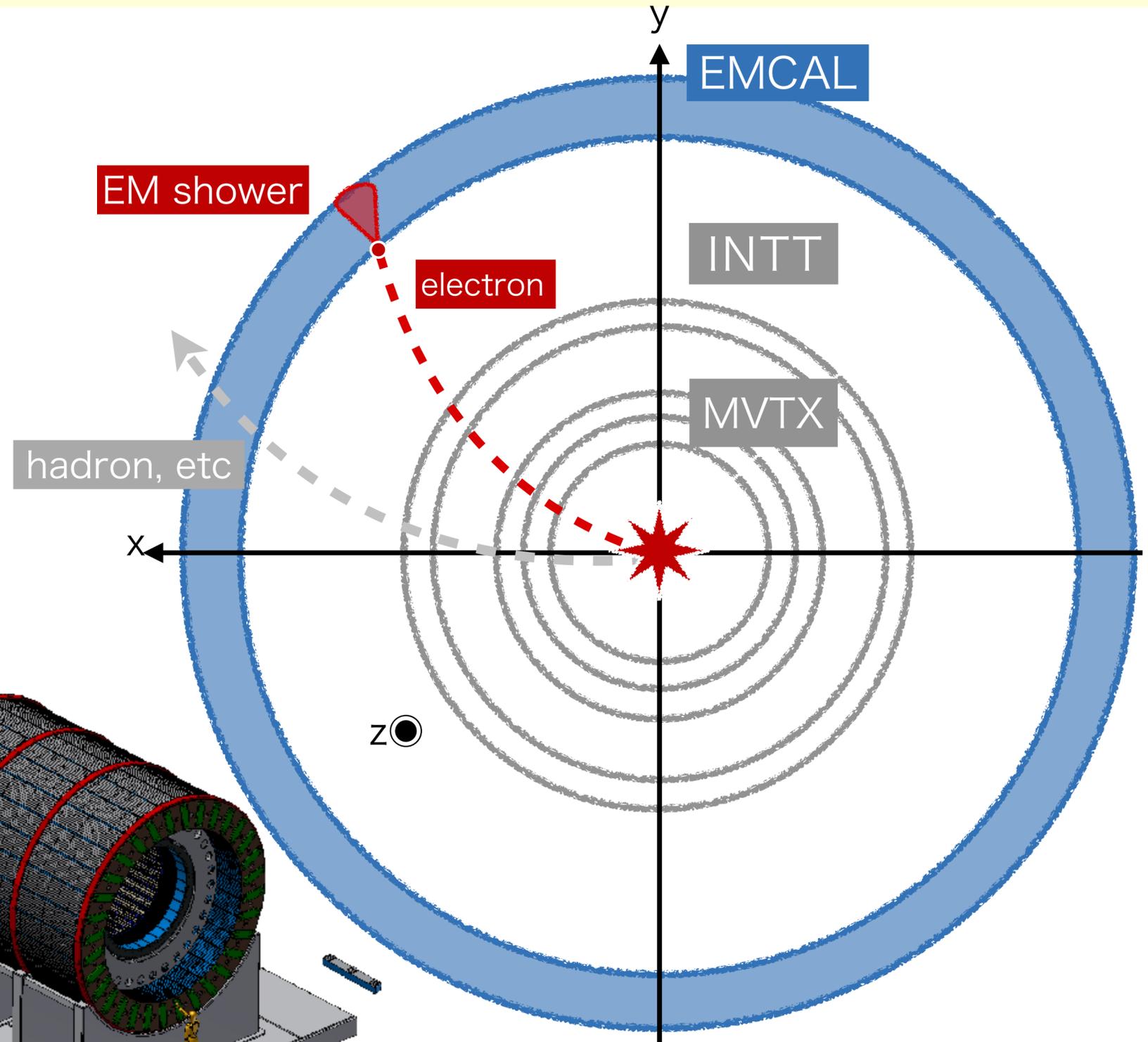
電磁カロリメータ - EMCal

- ・ 電磁カロリメータ
- ・ ビーム軸から90-116cm、飛跡検出器の外側に位置
- ・ 光子や電子・陽電子が物質中で起こす電磁シャワーを用いてエネルギーを測定



電磁カロリメータ - EMCAL

- ・ 電磁カロリメータ
- ・ ビーム軸から90-116cm、飛跡検出器の外側に位置
- ・ 光子や電子・陽電子が物質中で起こす電磁シャワーを用いてエネルギーを測定

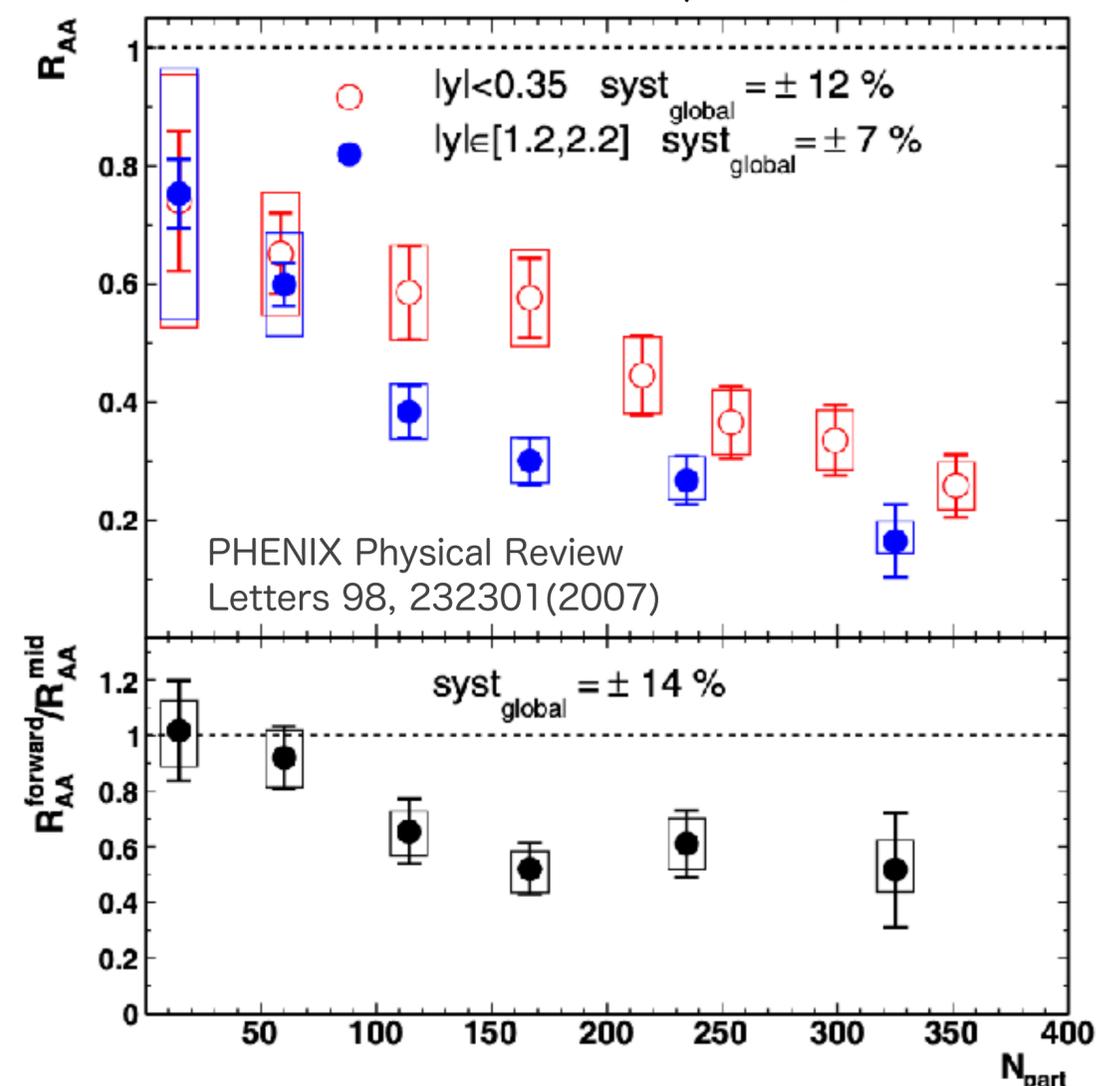


研究目的

- sPHENIX実験p+p衝突で、MVTX+INTT+EMCalを用いた e^+e^- 対から J/ψ の不変質量再構成手法を開発
- 2024年度のp+pデータ収集で3検出器が安定に動作
- 重イオン衝突では、QGP中の媒質の遮蔽効果により J/ψ 生成量が減少

→定量的な議論のため、基準となる「QGP生成のないp+p衝突での生成量」の整備が必要

先行研究：PHENIX実験による J/ψ 抑制度の測定結果



研究目的

- sPHENIX実験p+p衝突で、MVTX+INTT+EMCalを用いた e^+e^- 対からJ/ ψ の不変質量再構成手法を開発
- 2024年度のp+pデータ収集で3検出器が安定に動作
- 重イオン衝突では、QGP中の媒質の遮蔽効果によりJ/ ψ 生成量が減少

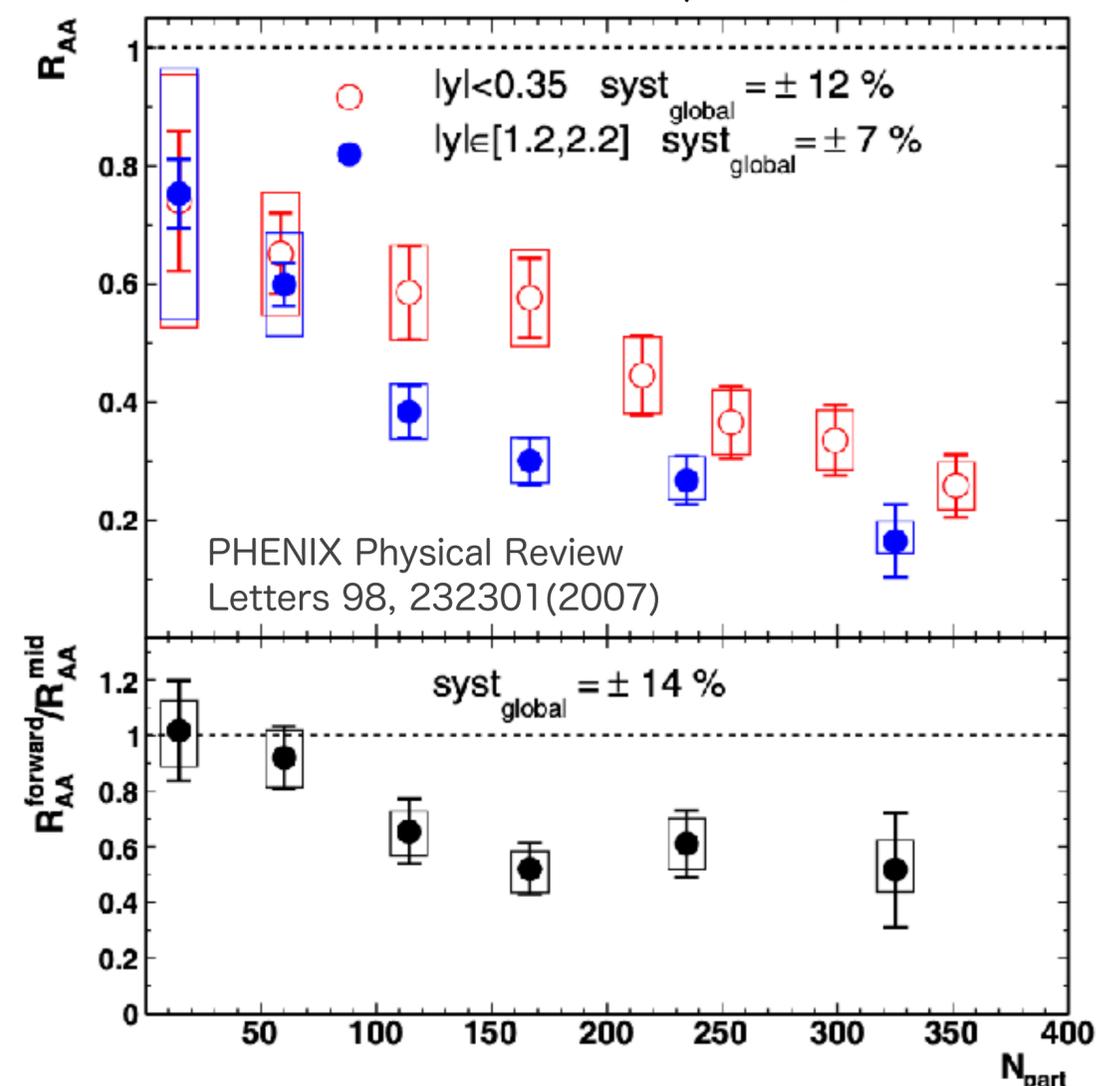
→定量的な議論のため、基準となる「QGP生成のないp+p衝突での生成量」の整備が必要

- <J/ ψ 中間子>
- 質量：3.096 GeV/c²
- 一度のp+p衝突で生成される確率：約0.0073%
- 崩壊分岐比

hadrons : 88% (例： $\rho\pi$), e^+e^- : 6%, $\mu^+\mu^-$: 6%

⇒ p+p衝突でのJ/ ψ → e^+e^- 発生確率が低く、
背景(J/ ψ 由来ではない信号)からの信号発見は困難

先行研究：PHENIX実験によるJ/ ψ 抑制度の測定結果



本解析で用いるデータセット

- ・ 二種のシミュレーションデータを用いて、 J/ψ 不変質量再構成手法を開発
- ・ 開発した手法を実験データに適用し、 J/ψ シグナルの抽出を試みる

<シミュレーションデータ>

【単一粒子】

- ・ シミュレータ：PYTHIA
(事象生成)
- ・ J/ψ 中間子1つを発生・
入射
- ・ 全ての崩壊モード含む
- ・ 磁場：1.4 T
- ・ 20万事象

【p+p衝突】

- ・ シミュレータ：PYTHIA +
GEANT4(粒子と検出器の相
互作用)
- ・ p+p (200 GeV)
- ・ 磁場：1.4 T
- ・ 1億衝突事象

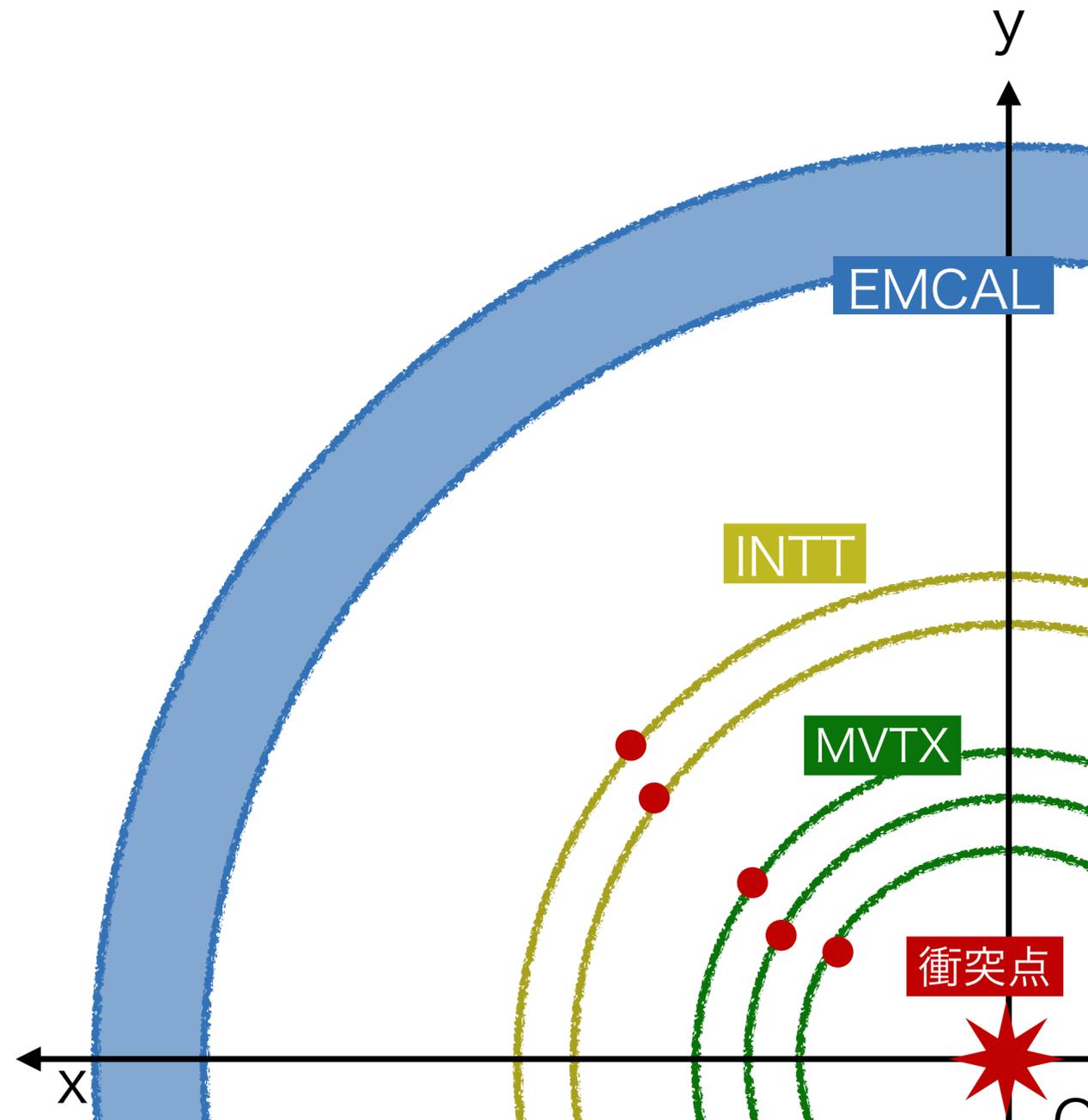
<実験データ>

【実験データ】

- ・ p+p衝突 (200GeV)
- ・ 磁場：1.4 T
- ・ 約1.5億衝突事象

本解析の全体像

- $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 崩壊を用いた不変質量再構成手法の開発

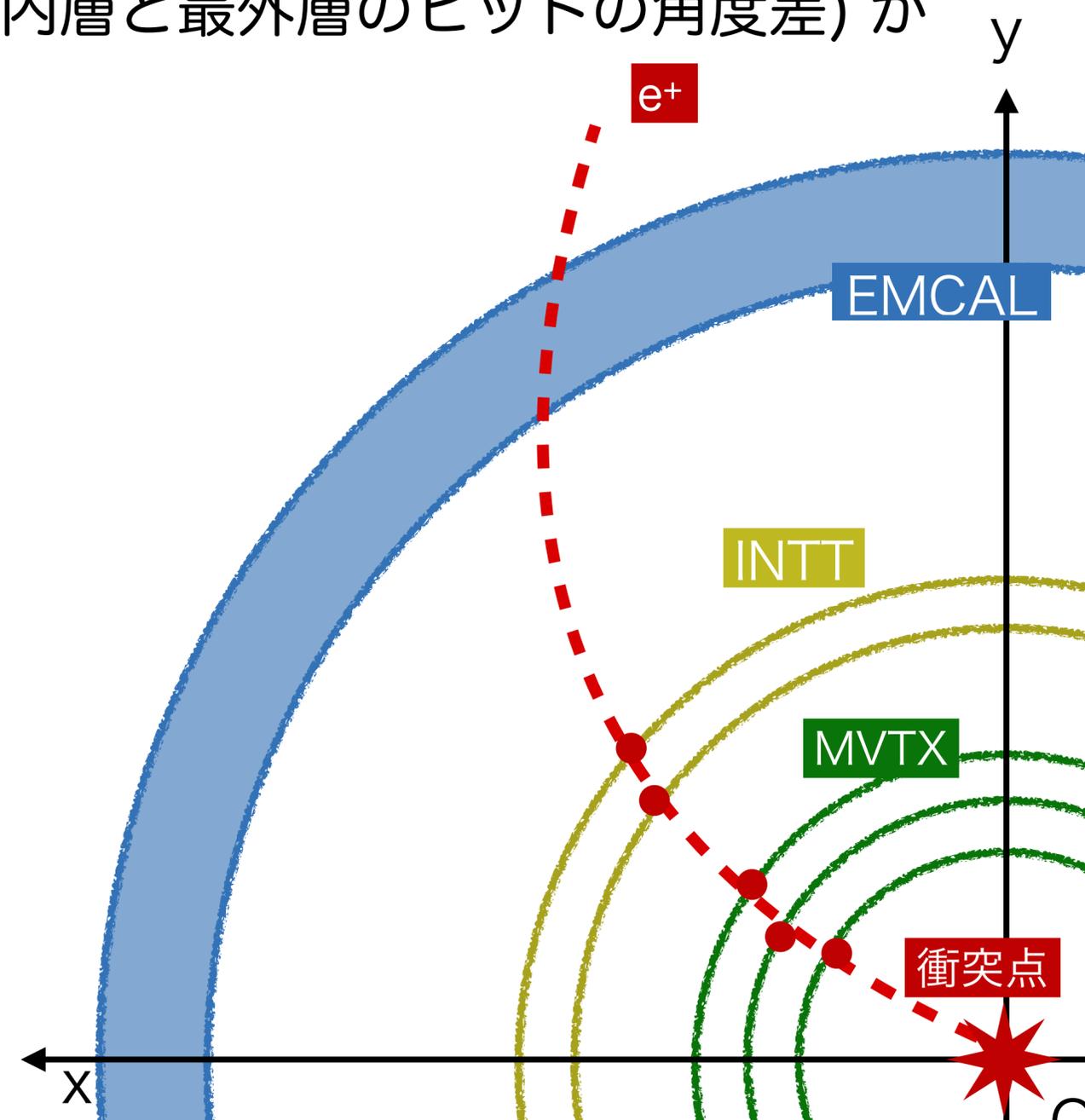


本解析の全体像

- $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 崩壊を用いた不変質量再構成手法の開発

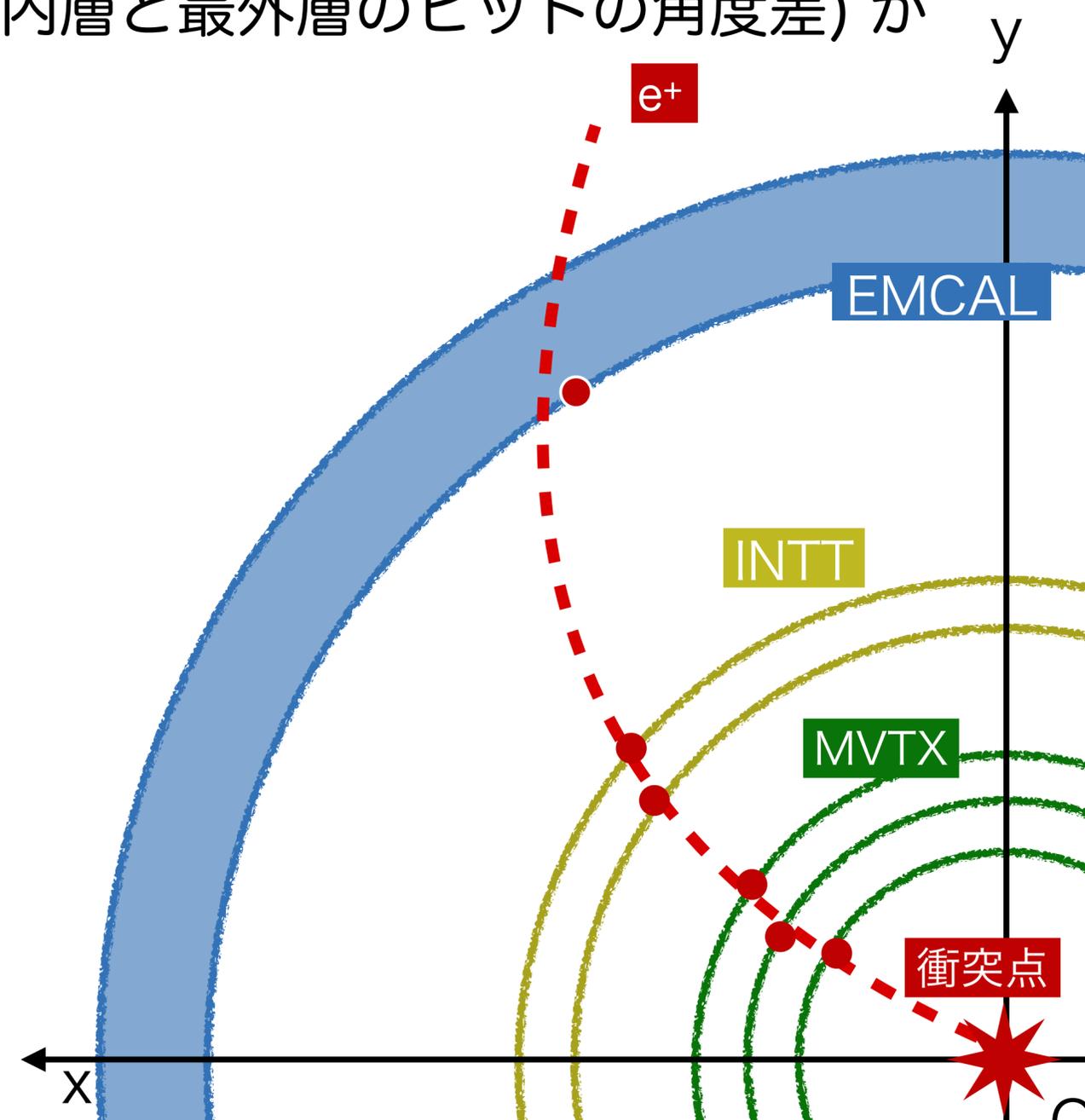
1. MVTX、INTTのヒット群に円方程式をフィッティングし、粒子の飛跡再構成

→ 飛跡の曲がり具合・半径から運動量 \vec{p}_{e^\pm} 、曲がる方向 (最内層と最外層のヒットの角度差) から電荷符号を得る



本解析の全体像

- $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 崩壊を用いた不変質量再構成手法の開発
 1. MVTX、INTTのヒット群に円方程式をフィッティングし、粒子の飛跡再構成
→ 飛跡の曲がり具合・半径から運動量 \vec{p}_{e^\pm} 、曲がる方向 (最内層と最外層のヒットの角度差) から電荷符号を得る
 2. 飛跡とEMCalヒットを対応づけ、電子(陽電子)を識別



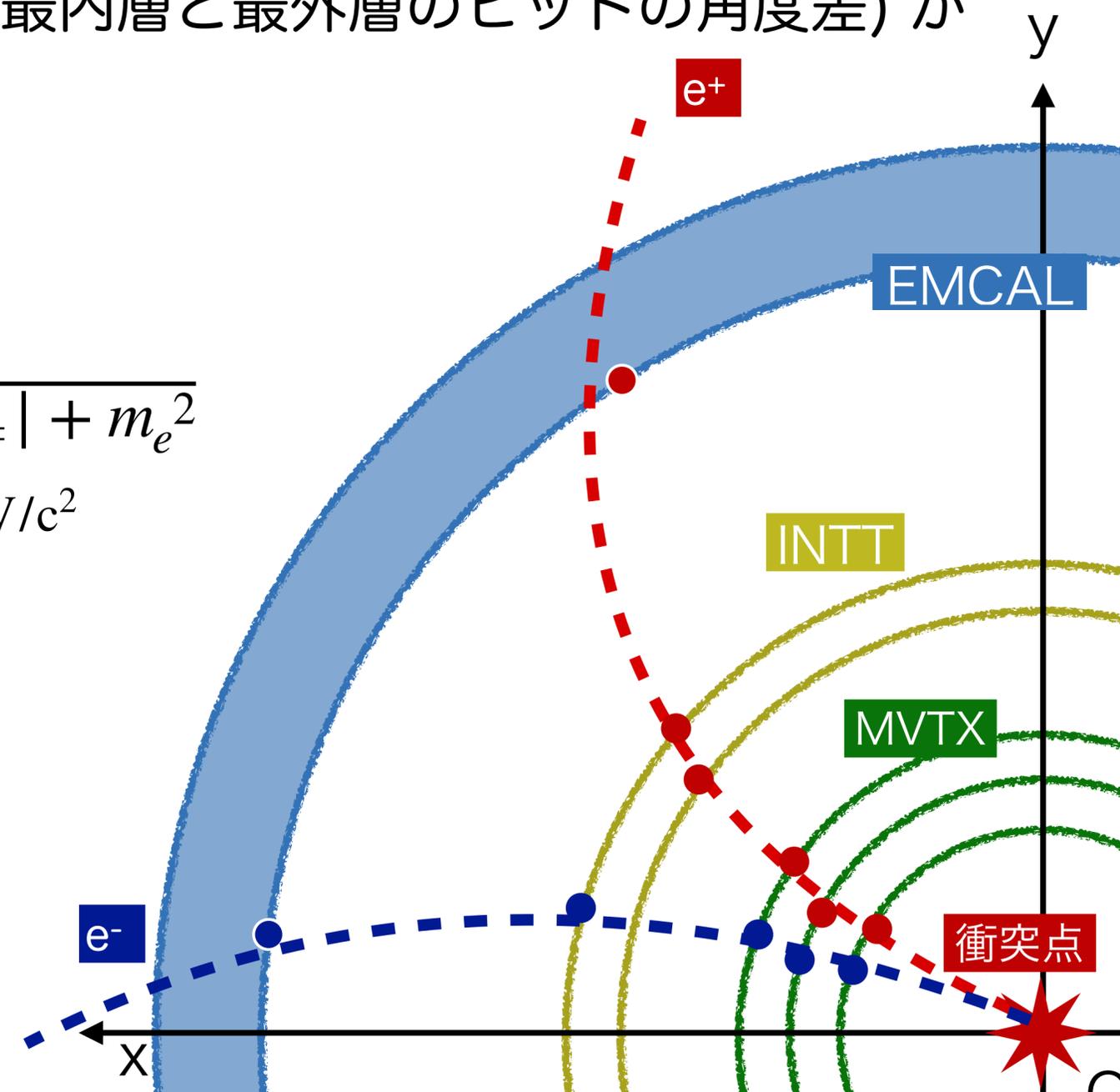
本解析の全体像

- $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 崩壊を用いた不変質量再構成手法の開発
 1. MVTX、INTTのヒット群に円方程式をフィッティングし、粒子の飛跡再構成
→ 飛跡の曲がり具合・半径から運動量 \vec{p}_{e^\pm} 、曲がる方向 (最内層と最外層のヒットの角度差) から電荷符号を得る
 2. 飛跡とEMCalヒットを対応づけ、電子(陽電子)を識別
 3. 飛跡のペアから、運動量を用いて不変質量再構成

$$M_{J/\psi} = \sqrt{(E_{e^+} + E_{e^-})^2 - |\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-}|^2}$$

$$E_{e^\pm} = \sqrt{|\vec{p}_{e^\pm}|^2 + m_e^2}$$

$$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$



本解析の全体像

- $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 崩壊を用いた不変質量再構成手法の開発
 1. MVTX、INTTのヒット群に円方程式をフィッティングし、粒子の飛跡再構成
→ 飛跡の曲がり具合・半径から運動量 \vec{p}_{e^\pm} 、曲がる方向 (最内層と最外層のヒットの角度差) から電荷符号を得る
 2. 飛跡とEMCalヒットを対応づけ、電子(陽電子)を識別
 3. 飛跡のペアから、運動量を用いて不変質量再構成

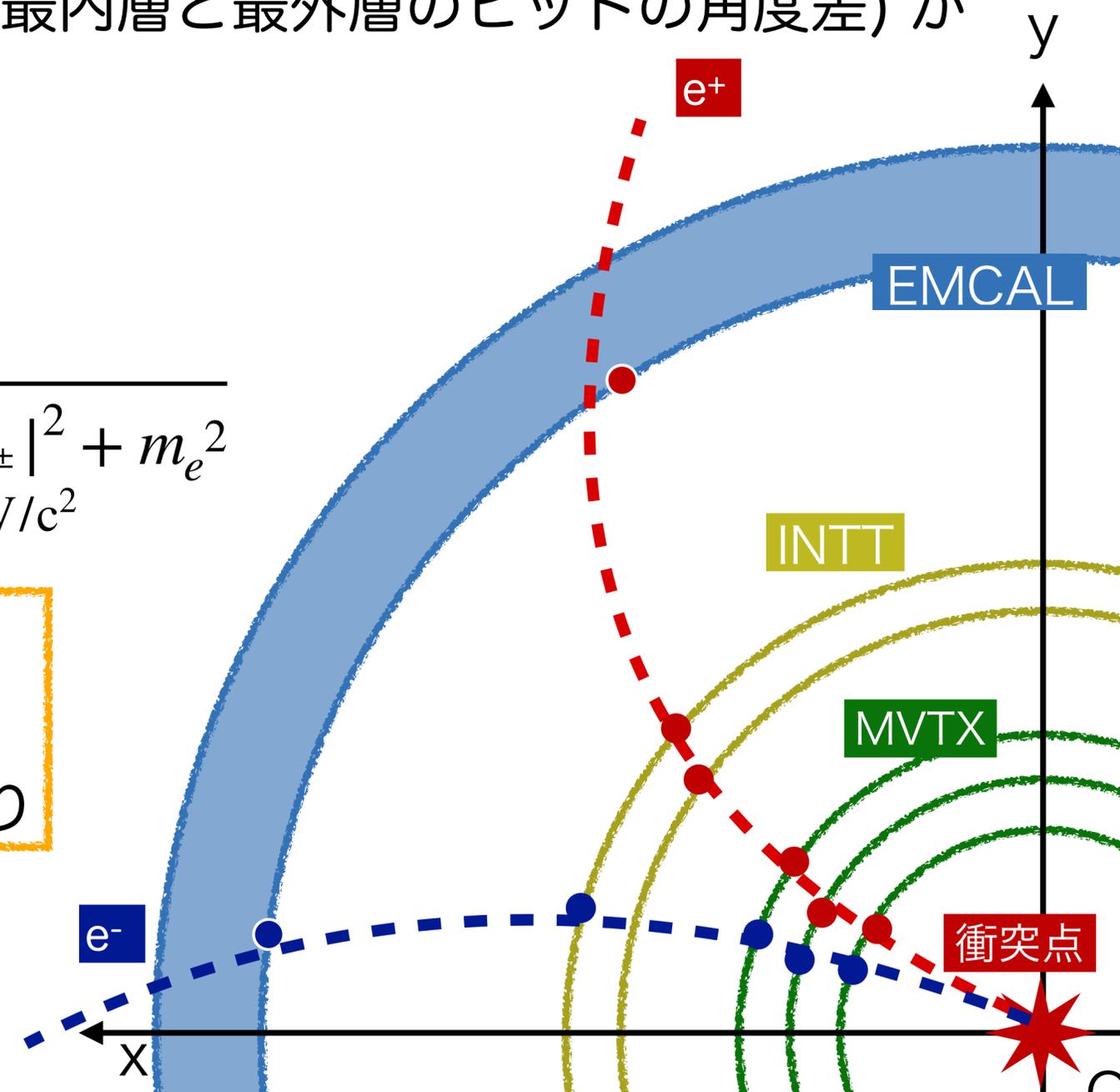
$$M_{J/\psi} = \sqrt{(E_{e^+} + E_{e^-})^2 - |\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-}|^2}$$

$$E_{e^\pm} = \sqrt{|p_{e^\pm}|^2 + m_e^2}$$

$$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

- シミュレーション解析
 - 単一粒子： J/ψ 粒子の信号確認
 - p+p衝突：背景成分評価、期待される J/ψ 信号数見積もり

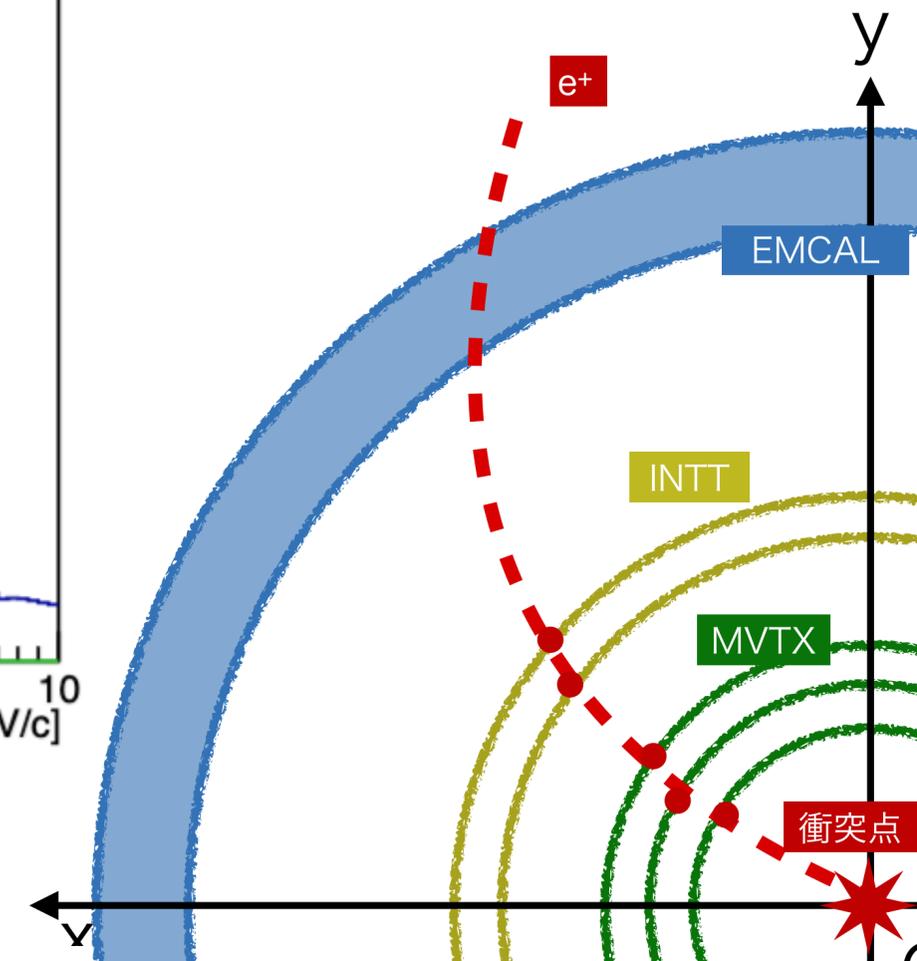
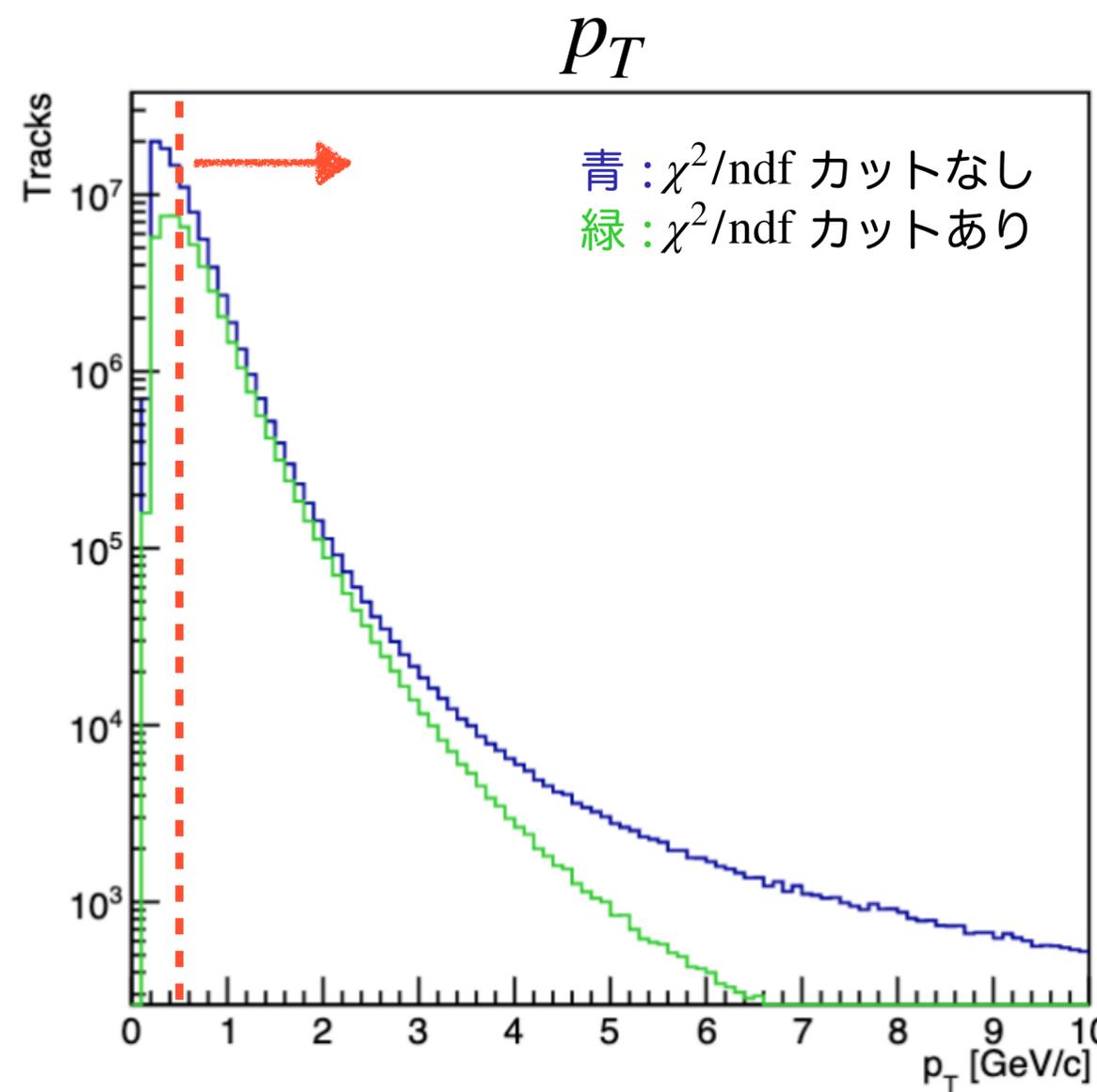
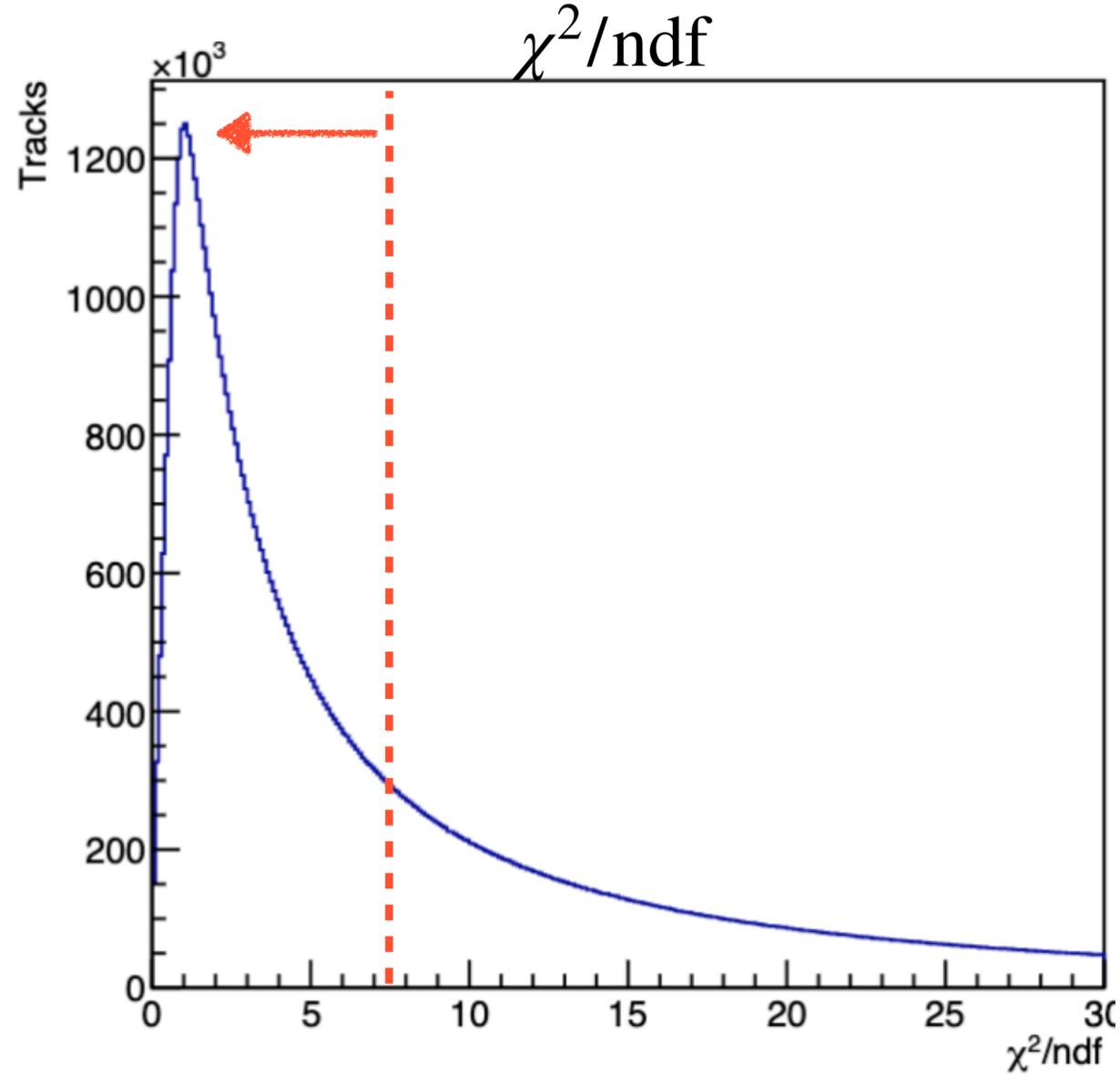
- 実験データ解析
 - 不変質量の再構成、シミュレーションと比較



p+pシミュレーションの飛跡再構成

p+pシミュレーション (200GeV)
磁場1.4T 1億衝突事象

- 飛跡再構成のための要求
 - ヒット数：MVTX=3 & INTT ≥ 1 、 $\chi^2/\text{ndf} < 7.415$ (フィット品質 $\sim 1\sigma$ 相当)、 $p_T > 0.5 \text{ GeV}/c$



- χ^2/ndf カットにより、高 p_T の飛跡が減少 \rightarrow 背景成分の減少

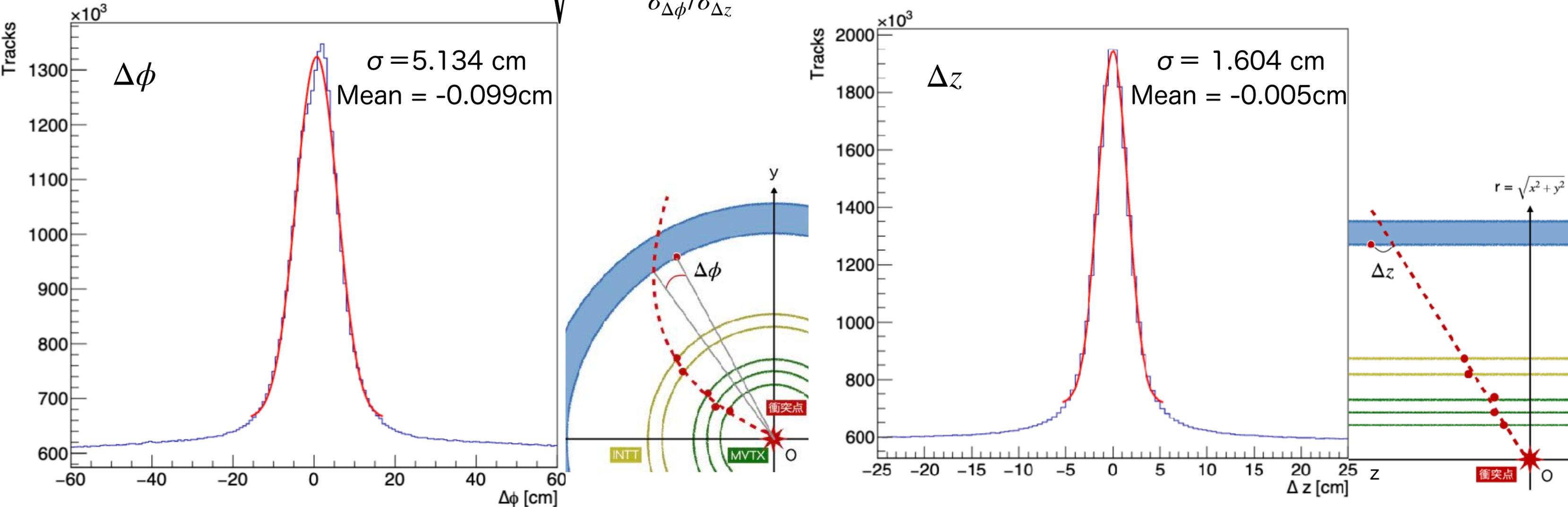
飛跡とEMCalとの結びつけ

p+pシミュレーション (200GeV)

磁場1.4T 1億衝突事象

17

- 左図 $\Delta\phi$: 飛跡投影位置とEMCalヒット位置の方位角度差 右図 Δz : ビーム軸(z軸)上の位置の差
- それぞれ3 σ 以内から $r_{\text{matching}} = \sqrt{\Delta z^2 + \frac{\Delta\phi^2}{\sigma_{\Delta\phi}/\sigma_{\Delta z}}}$ が最小 \rightarrow 対応するEMCalヒット



- ピークが0cm \rightarrow 飛跡投影位置とEMCalヒット位置は平均的に一致
- $\Delta\phi$ 分布幅が Δz の約3.2倍 \rightarrow 運動量分解能の影響

電子識別方法

- $E/p = (\text{EMCalから得られるエネルギー} E) / (\text{飛跡から得られる運動量 } p (\approx \text{数GeV}))$

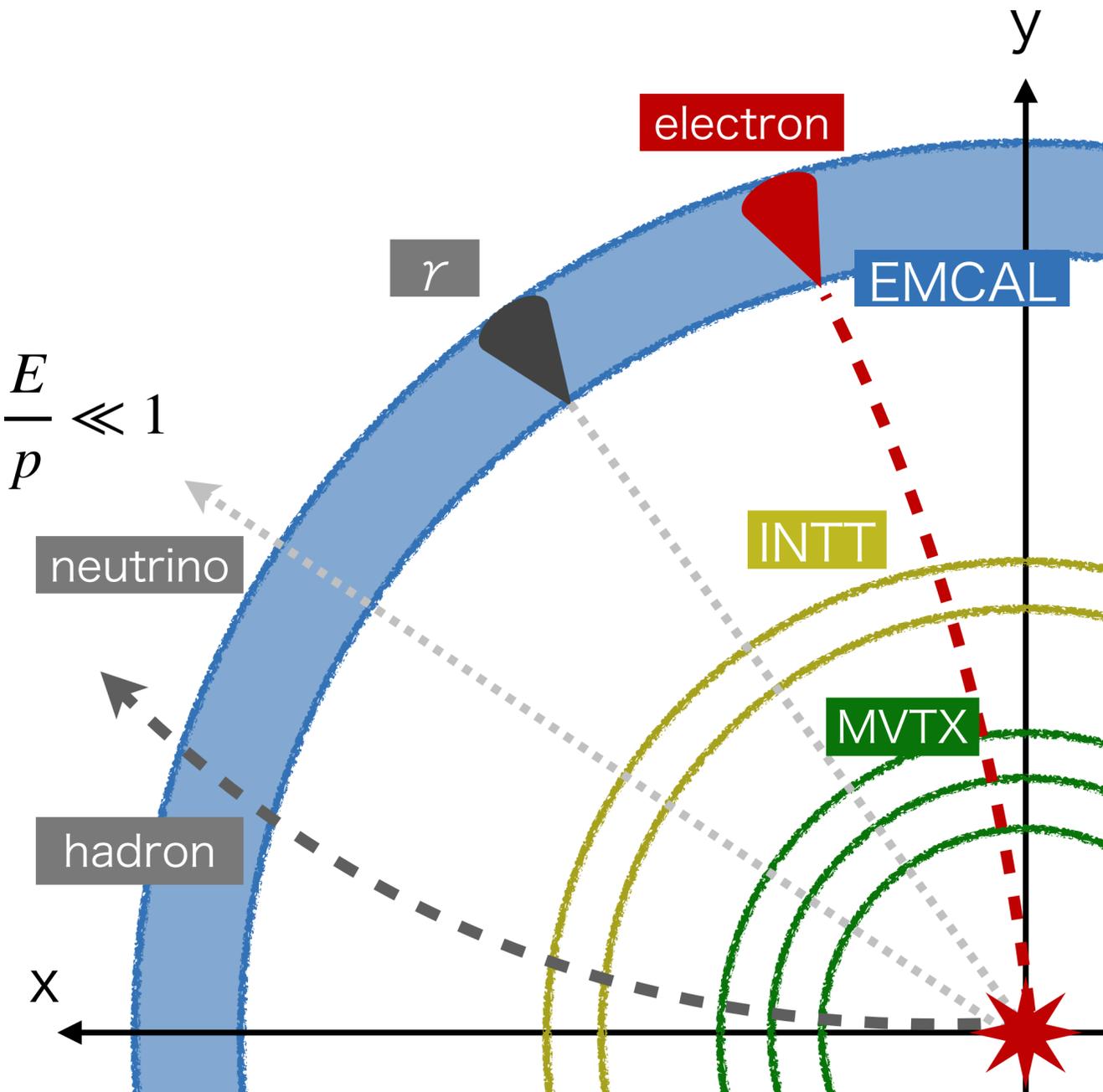
- 光速 $c = 1$ のとき、 $E^2 = p^2 + m^2 \Rightarrow \frac{E}{p} = \sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2}$

- e^\pm のとき、 $m \ll p \Rightarrow \frac{E}{p} \approx 1$ (e^\pm の質量は $0.511 \text{ MeV}/c^2$)

- 他の荷電粒子はEMCalで最大約 250 MeV のエネルギー $\Rightarrow \frac{E}{p} \ll 1$

- 非荷電粒子はシリコン検出器で検出されない

飛跡再構成ができる & $\frac{E}{p} \approx 1$ の粒子 $\Rightarrow e^\pm$



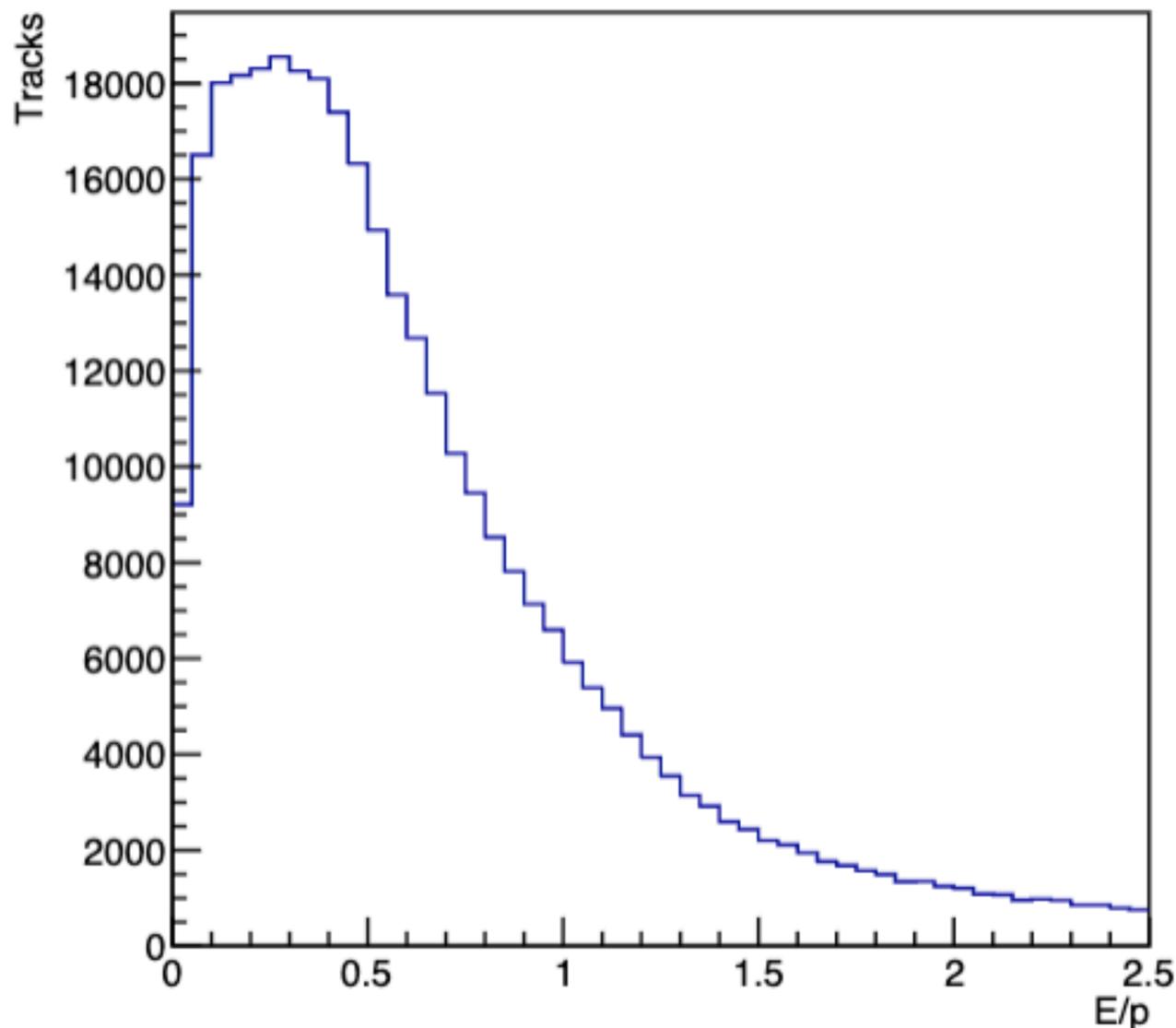
単一粒子シミュレーションの不変質量再構成

単一シミュレーション
磁場1.4T 20万事象

19

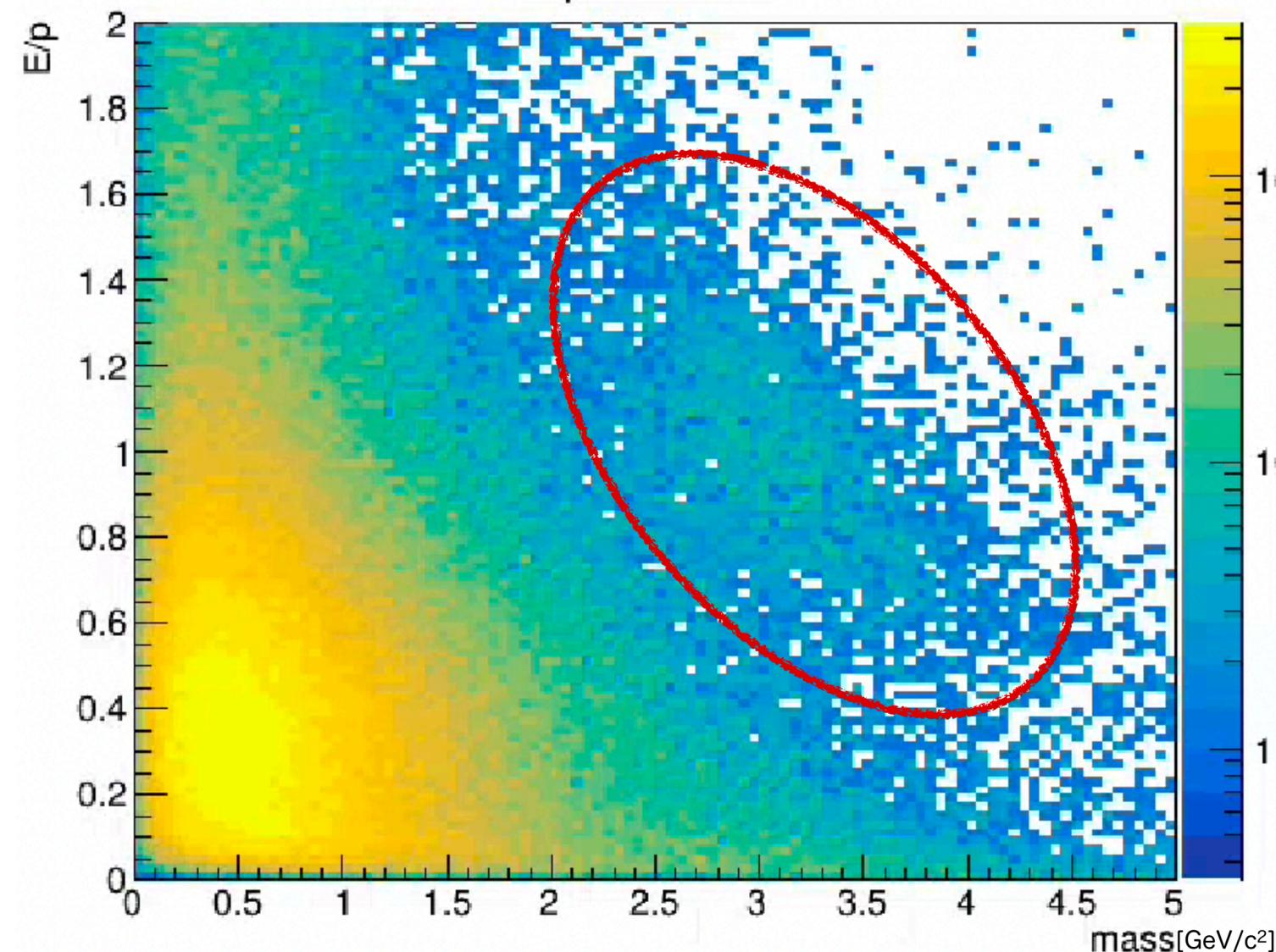
- 左図：E/p分布 右図：E/pと不変質量の相関図

E/p分布



$$M_{J/\psi} = \sqrt{(E_{e^+} + E_{e^-})^2 - |\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-}|^2}$$

E/p vs mass

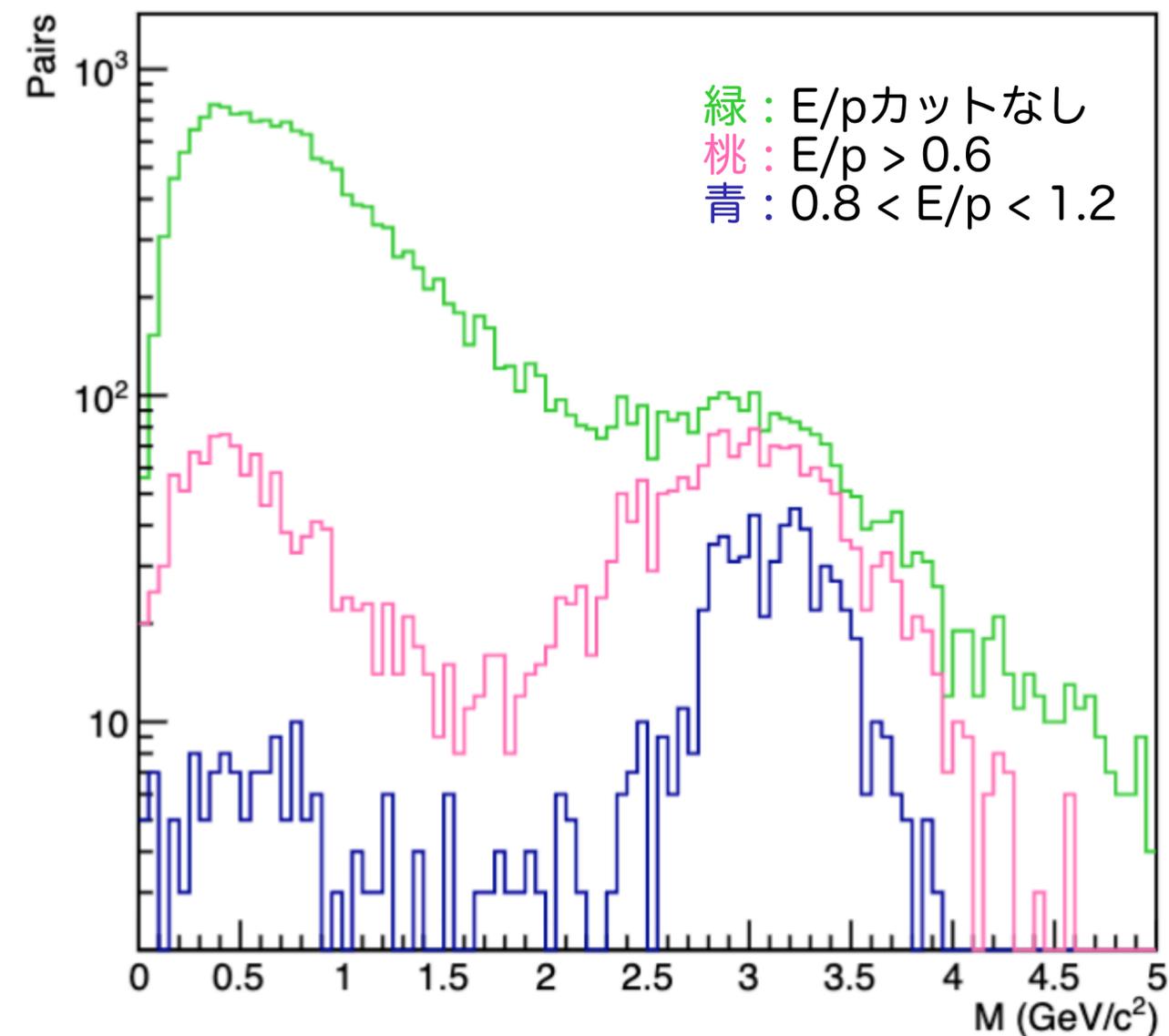
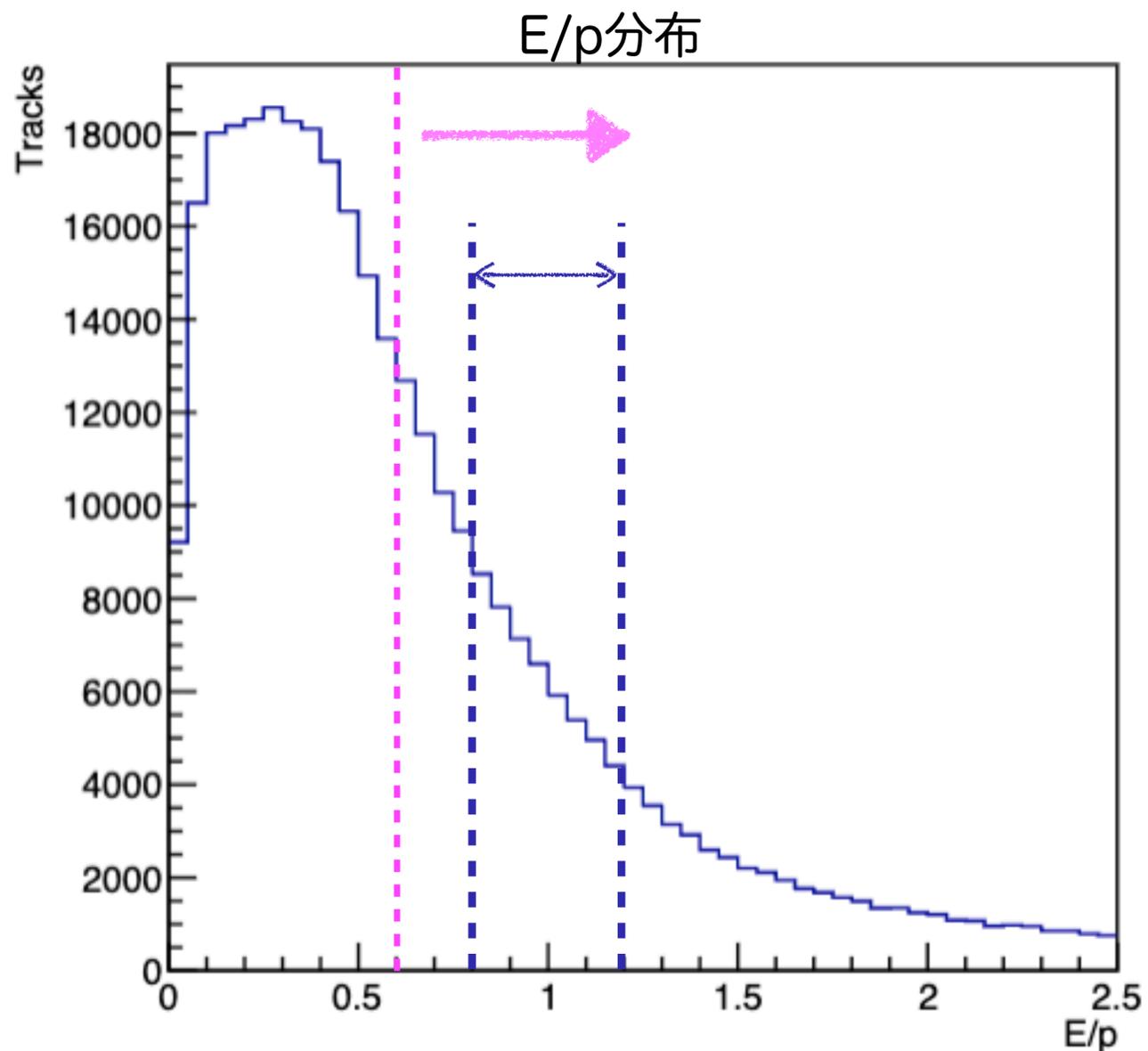


- E/p ≈ 1にピークはなく、E/p < 1側に大きなエントリー → ハドロンが作る背景成分が大きい
- J/ψ質量3.1 GeV/c²かつE/p ≈ 1付近に局在した成分 → J/ψ → e⁺ e⁻由来の信号成分

単一シミュレーションのE/pによる質量分布

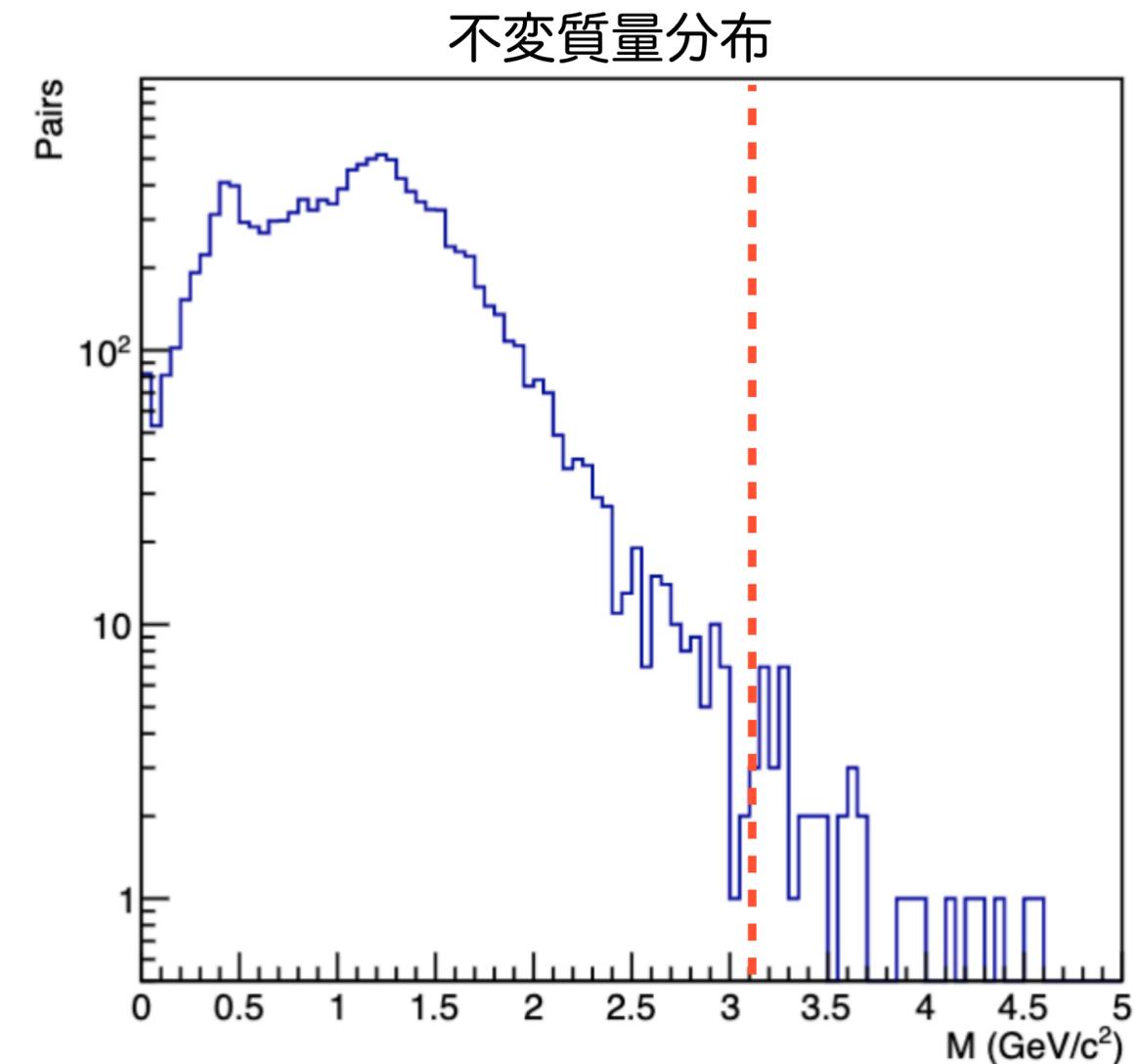
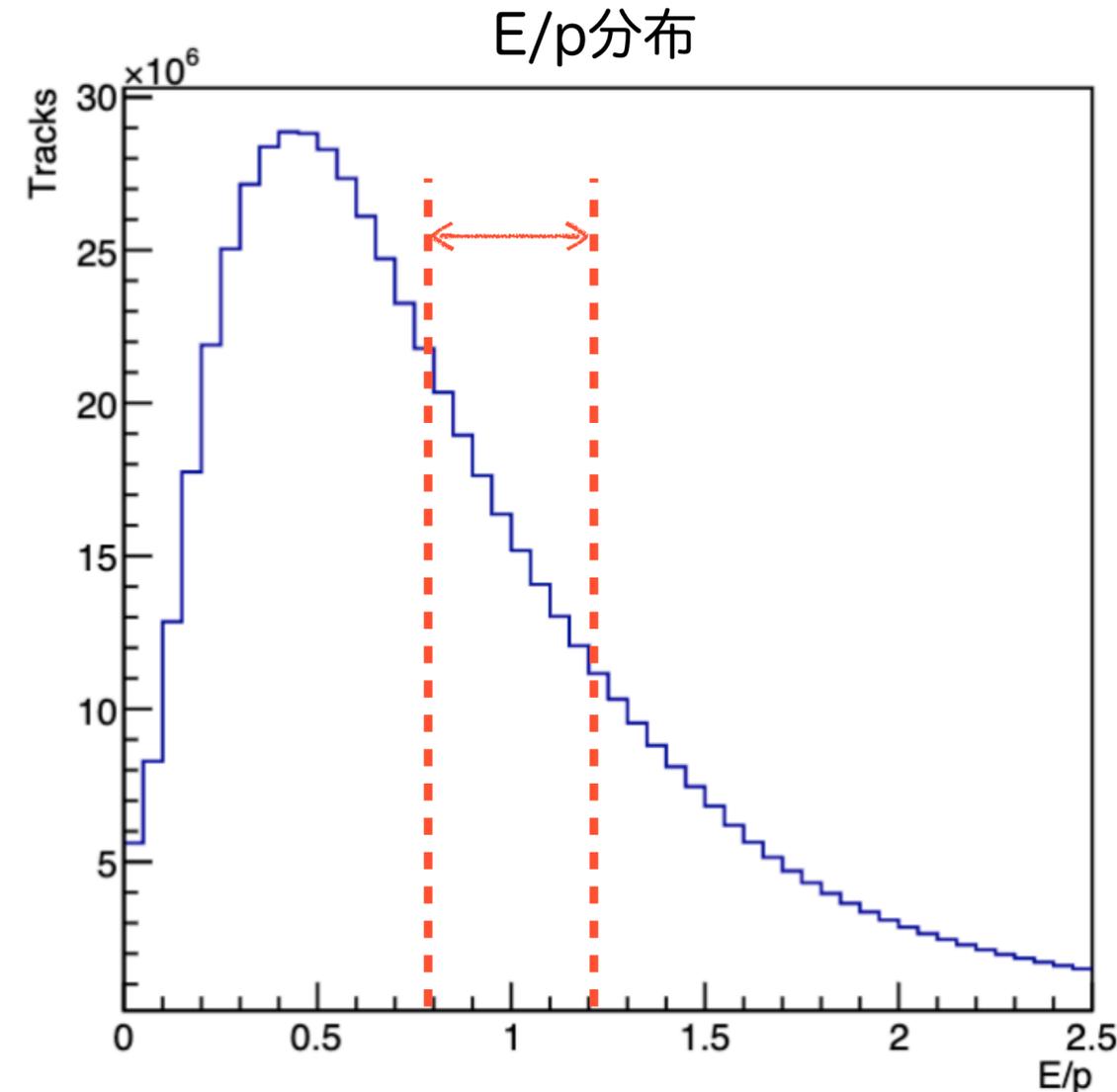
単一シミュレーション
磁場1.4T 20万事象

- 右図：E/pカット値を変えた時の不変質量分布
- 緑：E/pカットなし 桃：E/p > 0.6 青：0.8 < E/p < 1.2



- カット値を厳しくするほど、質量3.1 GeV/c² 付近のJ/ψシグナルが明瞭に

- 左図：E/p分布 右図：不変質量分布
- 単一粒子シミュレーションで明瞭にJ/ψ信号が確認できた $0.8 < E/p < 1.2$ のカット値



- E/pは単一シミュレーションと同様に背景が多い。質量3.1 GeV/c² 付近に明確なピークはない
- p+p衝突では全体としてJ/ψ → e⁺ e⁻に由来しない背景成分が多い

p+pにおけるJ/ψシグナルの評価

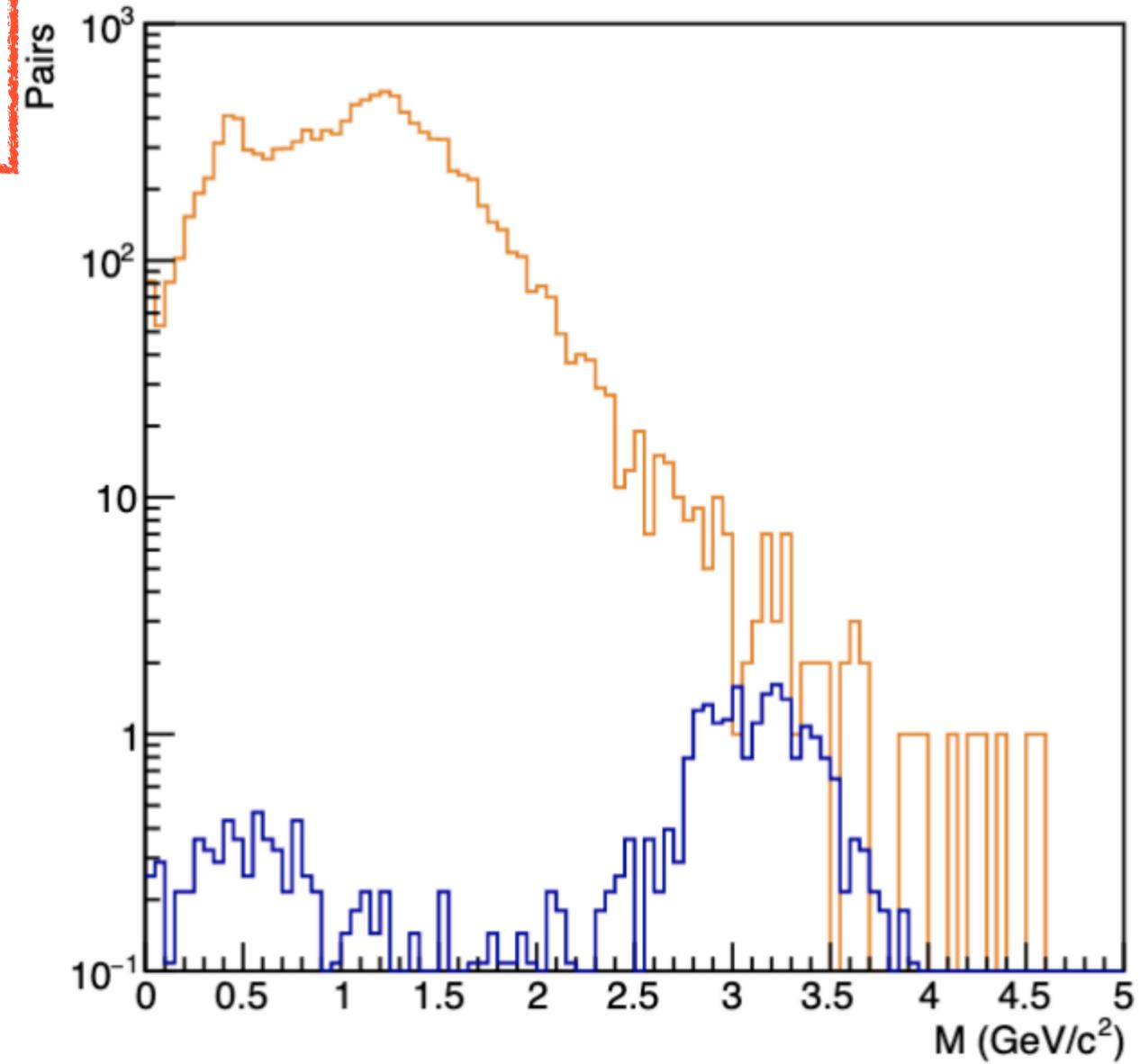
- Orange - p+p シミュレーション(1億事象) - 非規格化
- Blue - J/ψ単一粒子シミュレーション(20万事象) - p+p 1億事象に相当するよう規格化

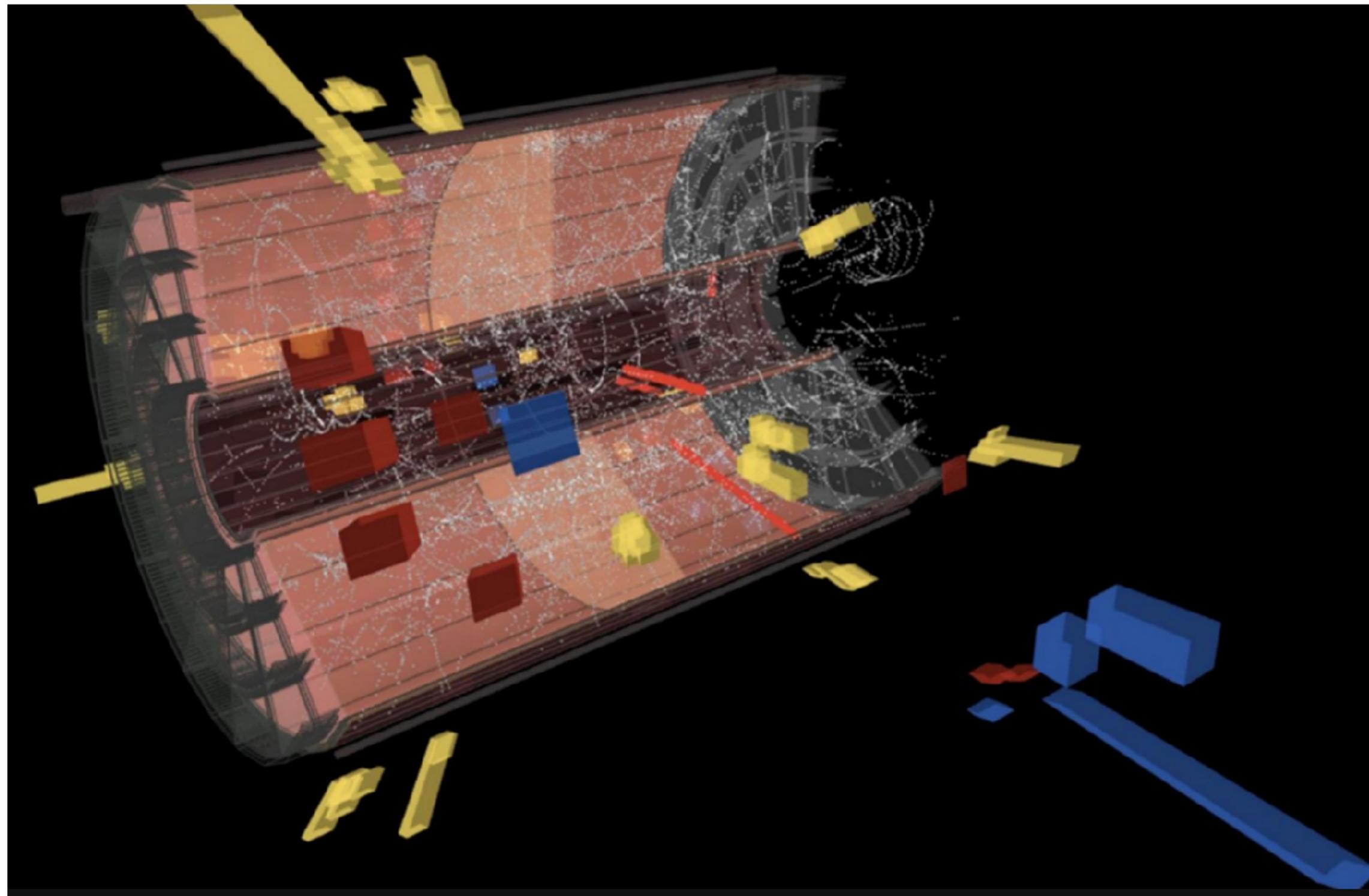
$$f_{scale} = \frac{J/\psi \text{ cross section}}{\% \text{ of } J/\psi \rightarrow e^{\pm}} \times \frac{1}{pp \text{ cross section}} \times \frac{1.0 \times 10^8}{2.0 \times 10^5}$$

J/ψ cross section : **180 nb**
 % of J/ψ → e± : **6%**
 Reaction cross section (pp) : **42 mb**

Cross section : 粒子衝突時、特定の相互作用の発生しやすさを表す物理量

- 3.1 GeV/e² 付近、背景成分にJ/ψ由来の信号も重なっている可能性
 →適切な選別条件を適用することで、背景の中から信号成分を抽出できると期待





<実験データ>

【実験データ】

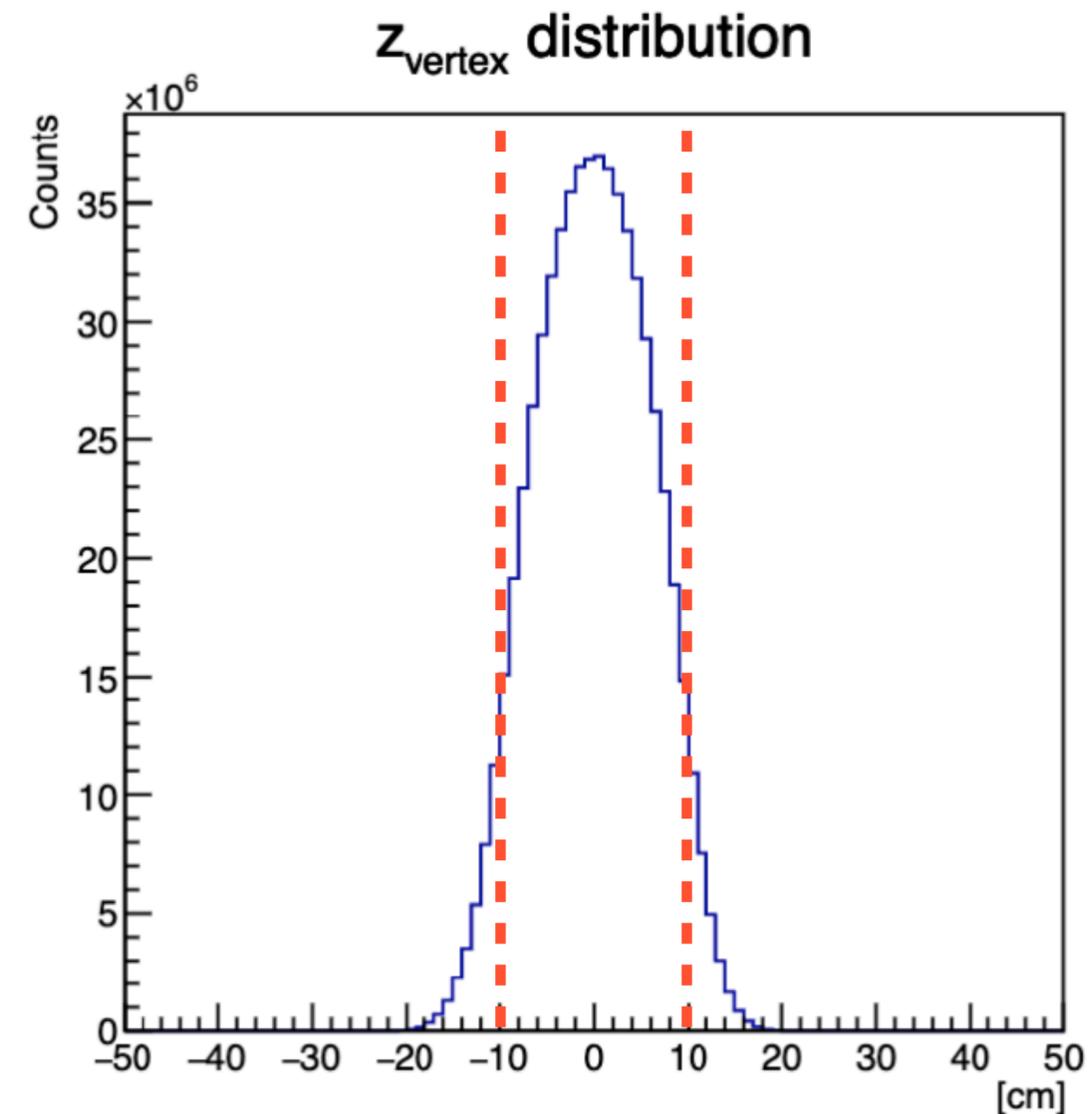
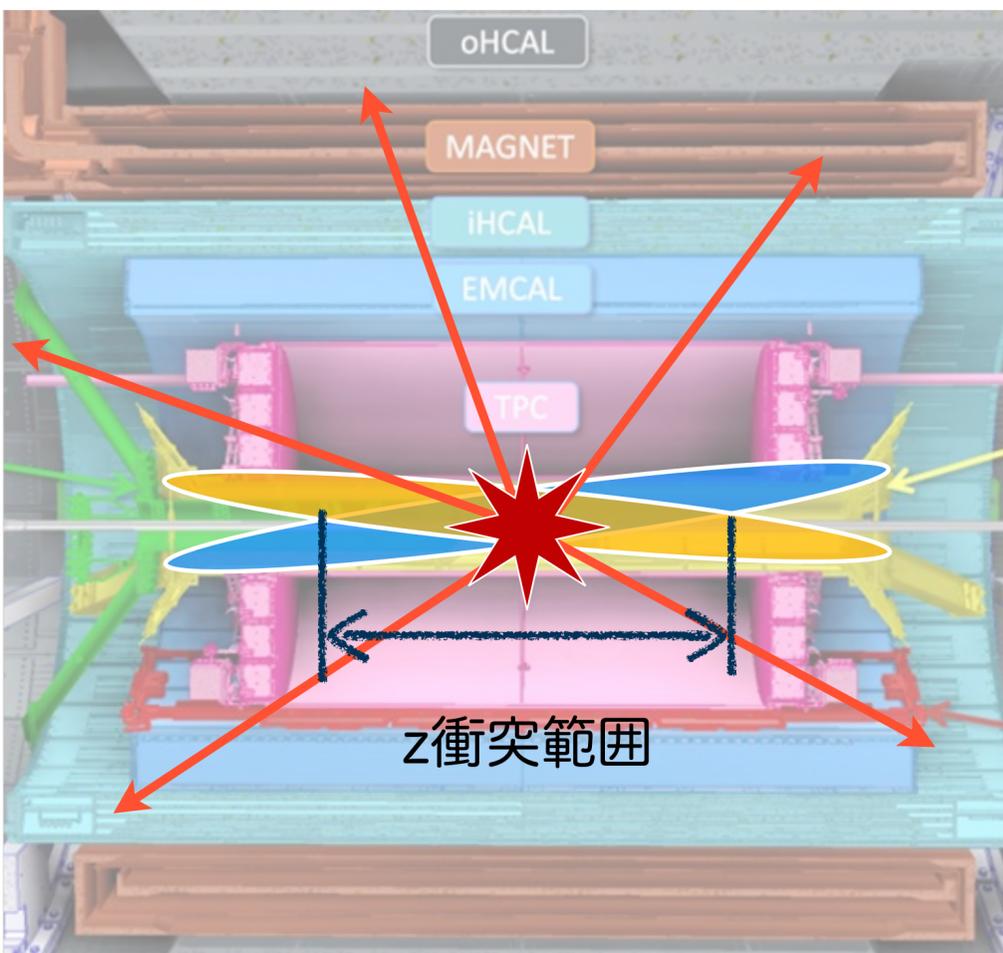
- p+p衝突 (200GeV)
- 磁場：1.4 T
- 約1.5億衝突事象

2024年度に収集された全
p+pデータの約0.01%

p+p衝突実験の衝突位置

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

- ビームは塊構造で衝突 右図：ビーム軸上衝突点位置分布



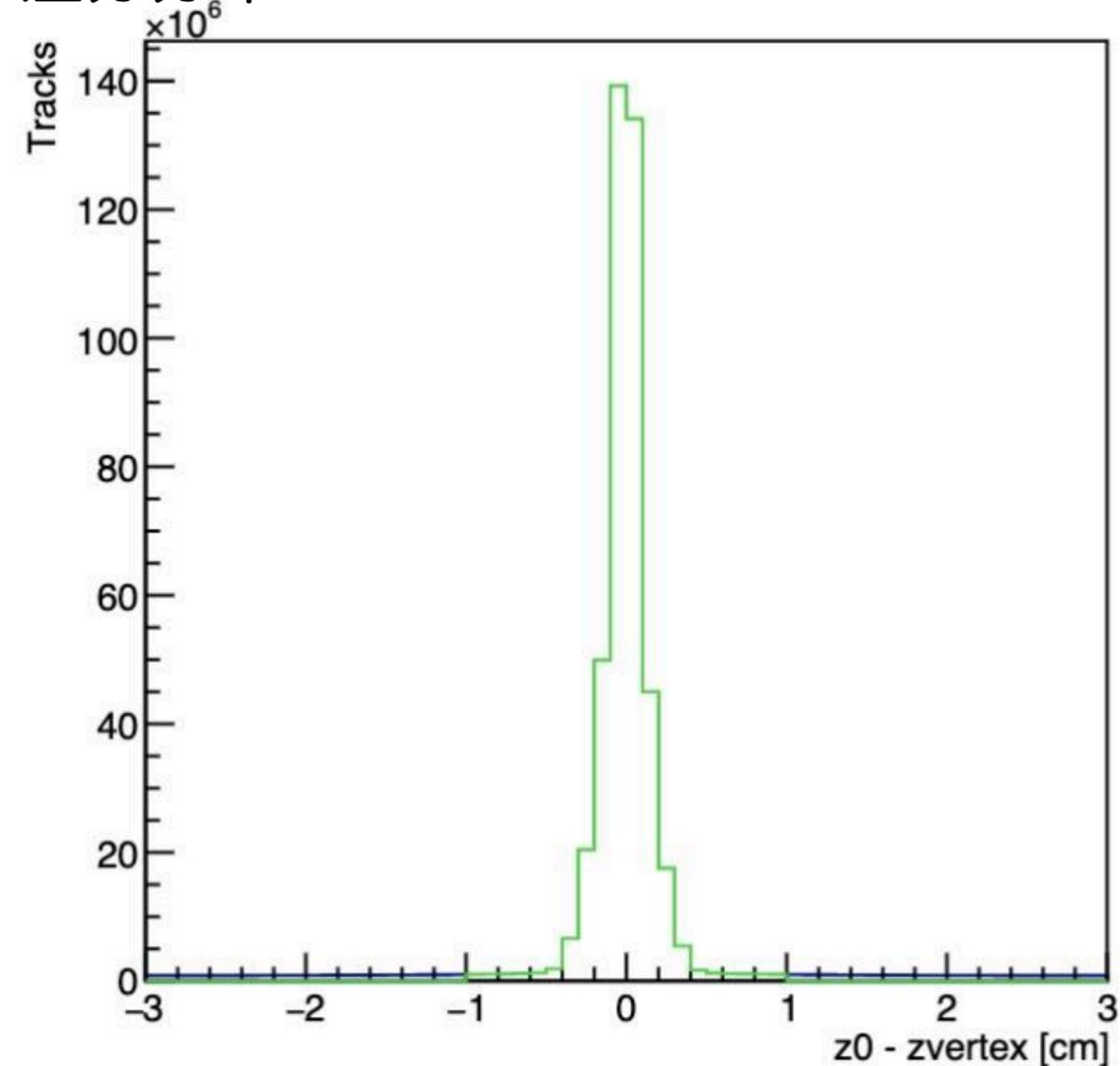
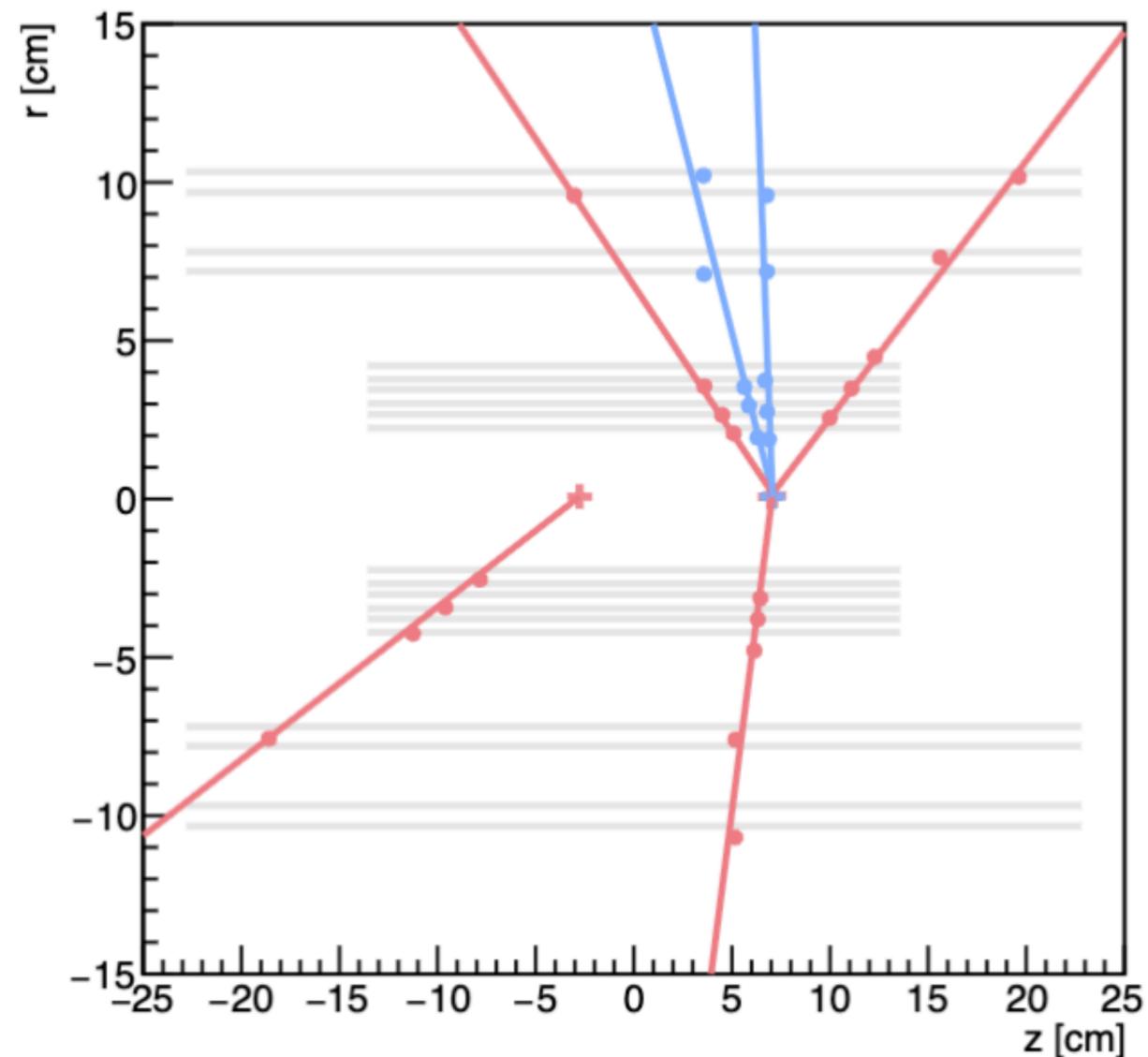
- ビーム幅により、ビーム軸上衝突位置は広がる (~20 cm)
- 衝突点が-10cm~10cmにある事象を要求
 - 検出器中央の衝突のみ解析

衝突点から外れた飛跡の削除

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

25

- 左図：z-r ($r = \frac{y}{|y|} \sqrt{x^2 + y^2}$) 平面のイベントディスプレイ
- 右図：ビーム軸上の飛跡の出発点と衝突点位置の差分分布



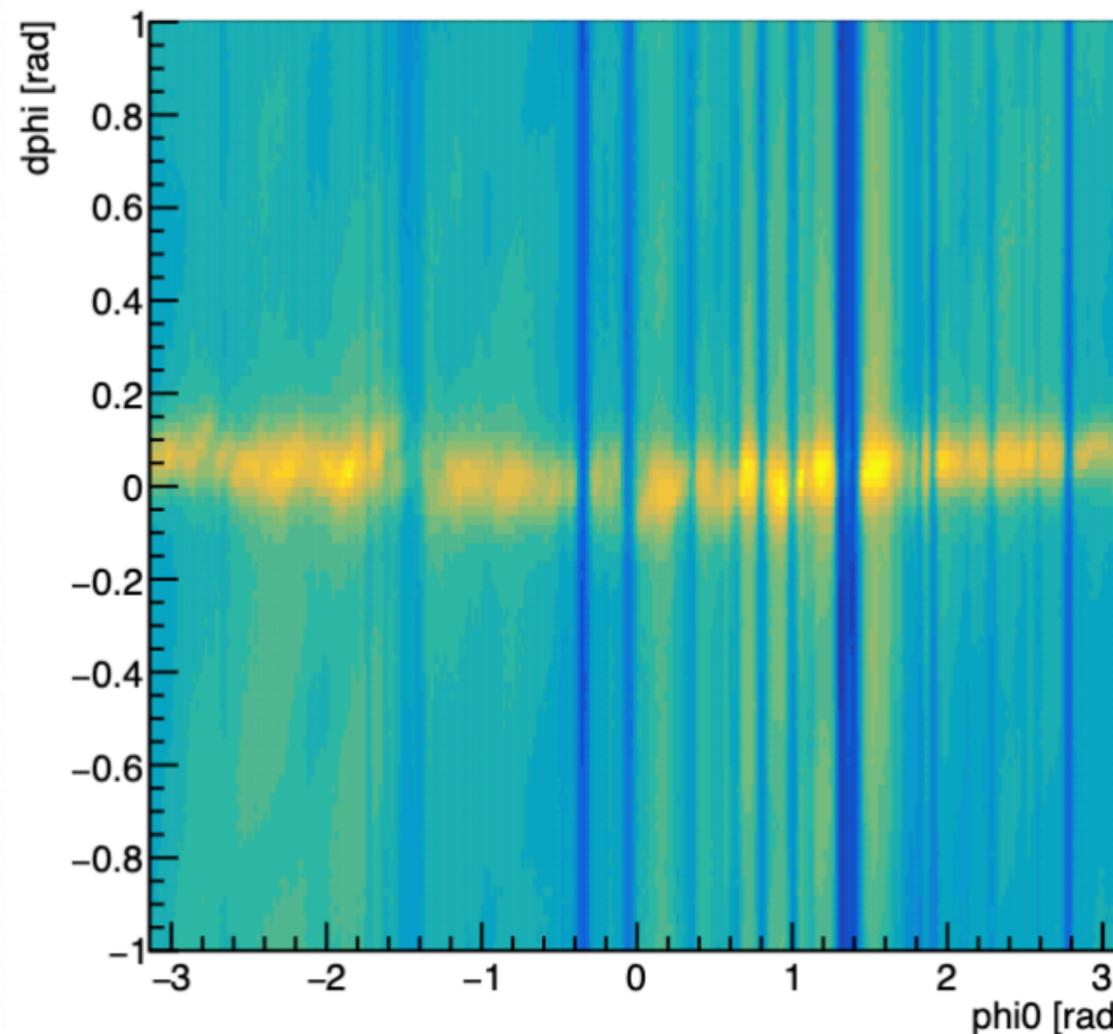
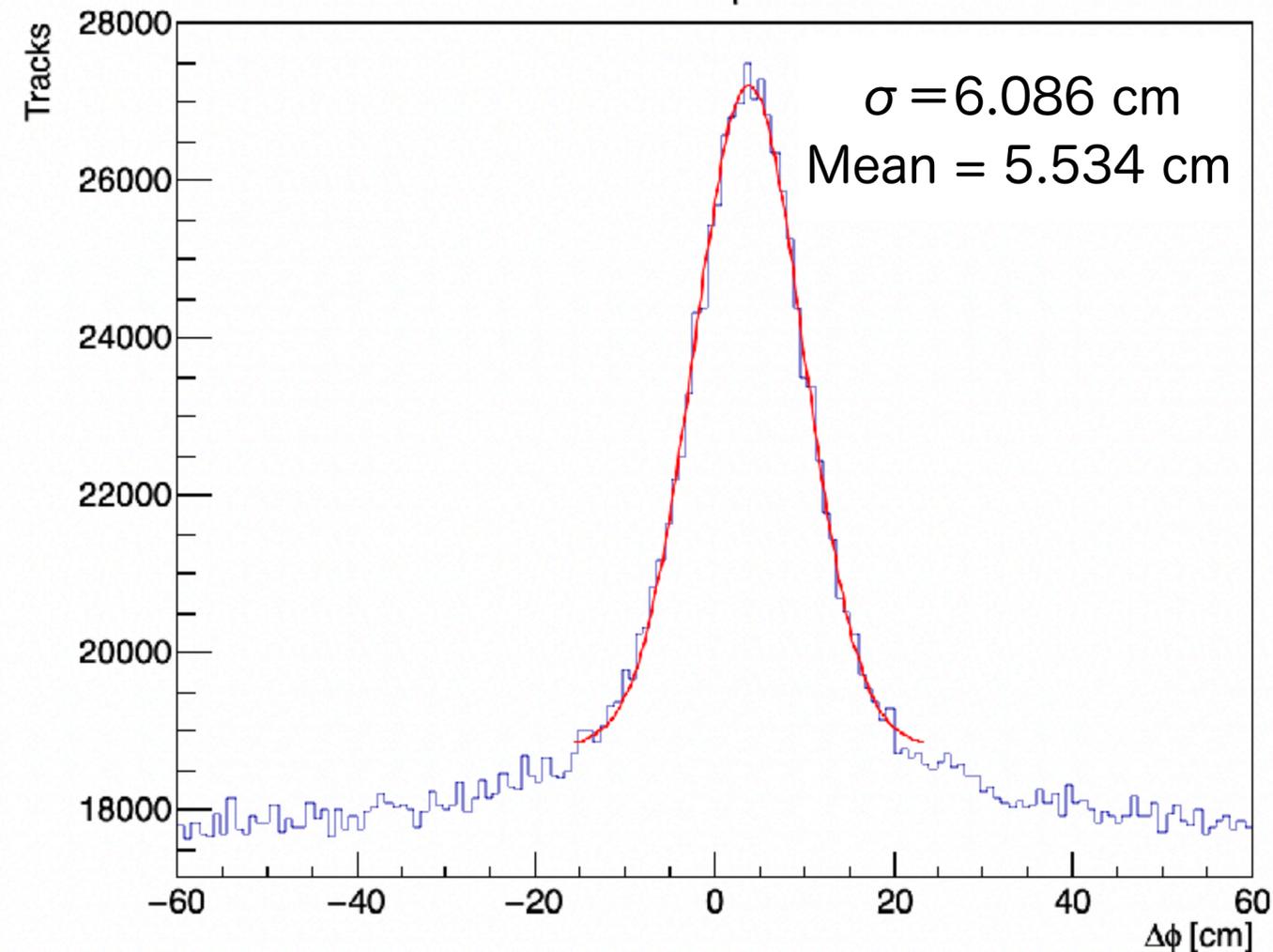
- ほとんどの飛跡は衝突点から生成されている一方、一部飛跡は衝突点から来ていない
- 右図の差分が1cm 未満の飛跡を要求

実験データにおける $\Delta\phi$ 分布のずれ

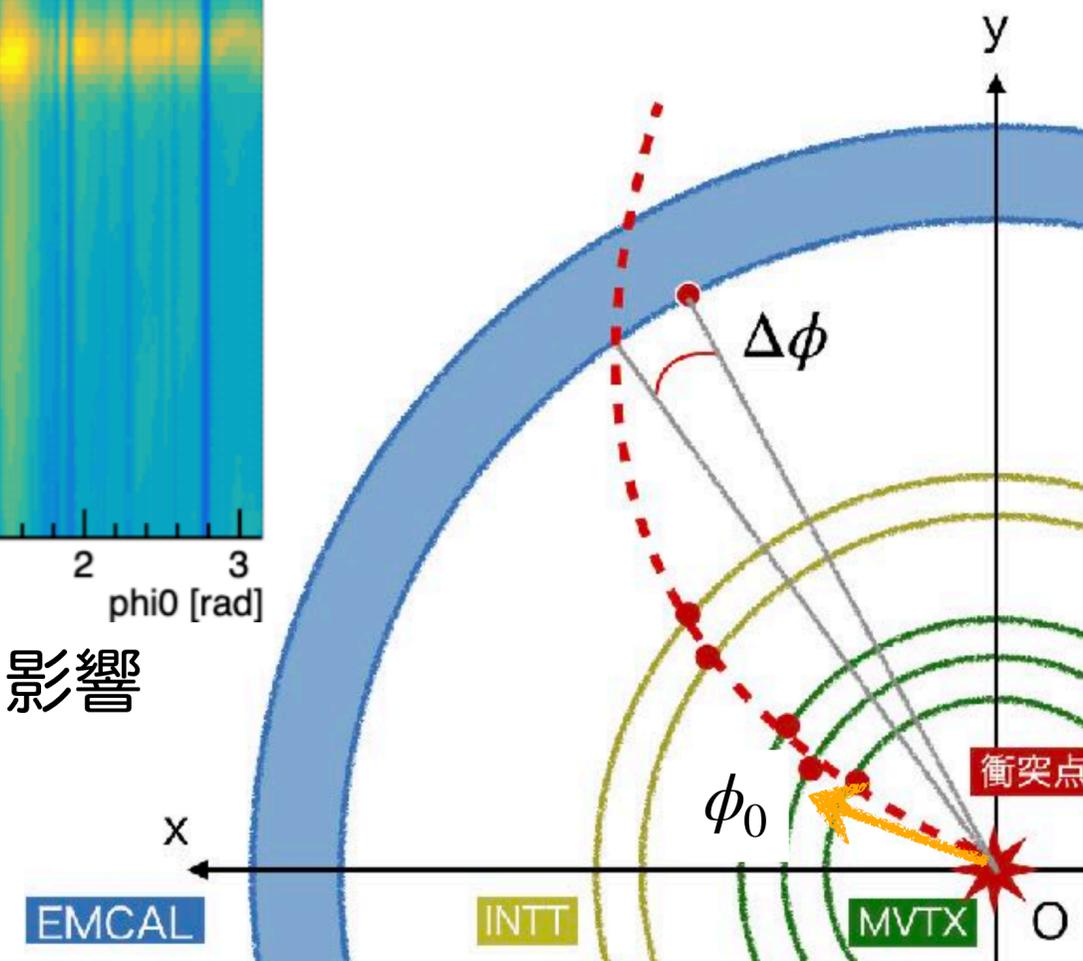
p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

- 左図： $\Delta\phi$ 分布 右図：飛跡の出発点の方位角 ϕ_0 と $\Delta\phi$ の相関分布

$\Delta\phi$



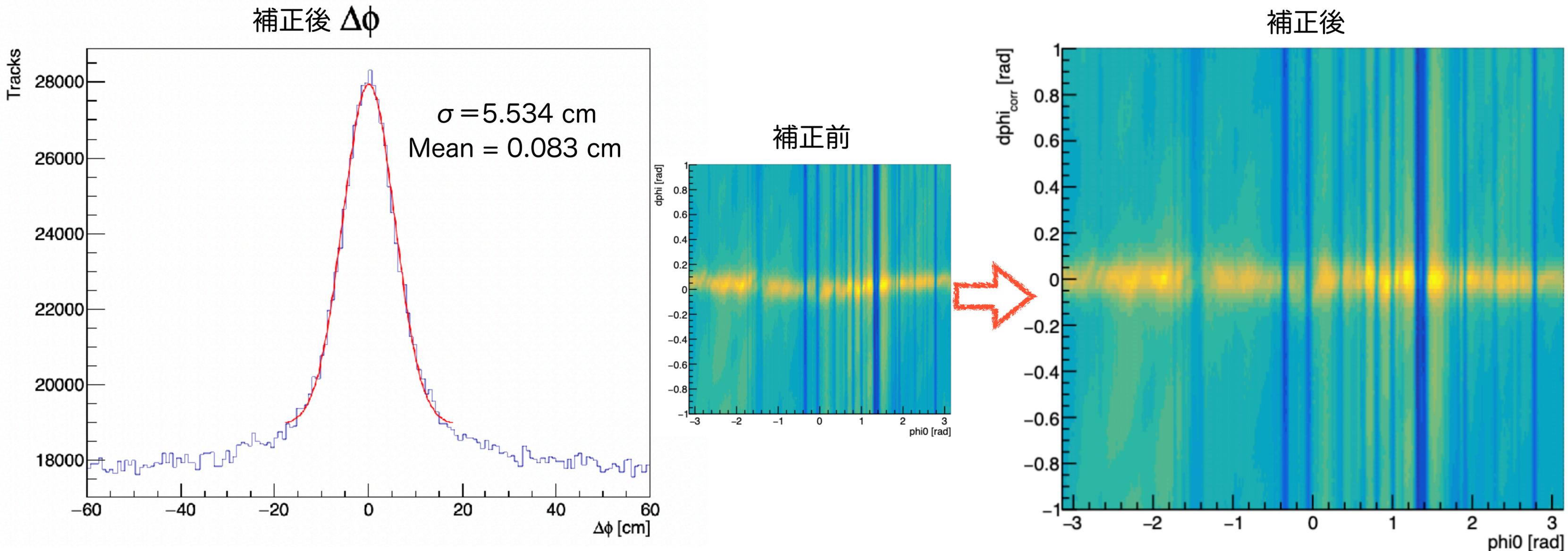
- ピーク中央のずれ、 ϕ_0 に依存した湾曲→検出器配置の微小なずれの影響
- ϕ_0 0.2 rad ごとにそれぞれガウス分布でフィッティングし、ピーク位置が中央に来るようにずらす



実験データのずれ補正後の $\Delta\phi$ 分布

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

- 左図： $\Delta\phi$ 分布 右図：飛跡の出発点の方位角 ϕ_0 と $\Delta\phi$ の相関分布



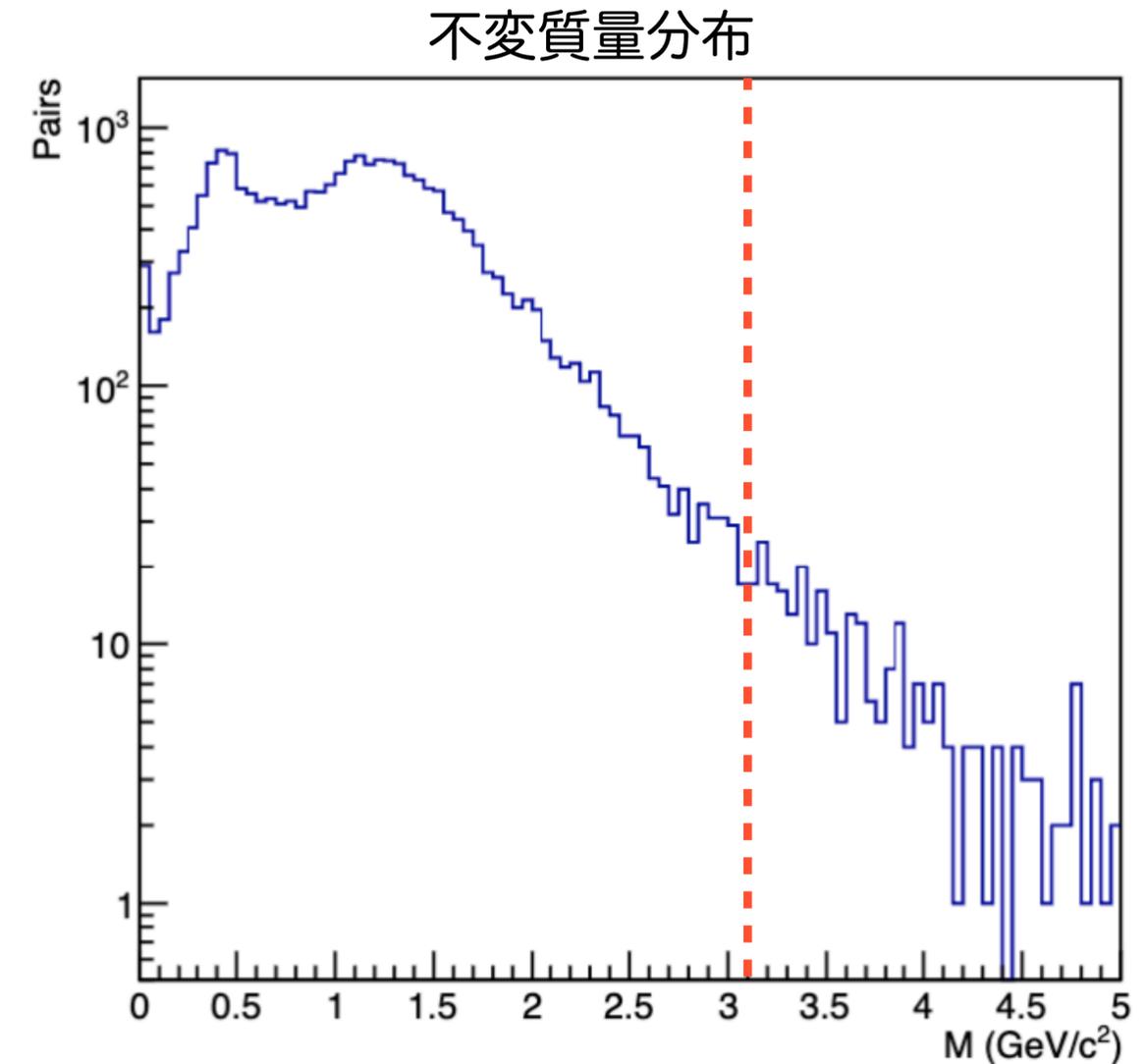
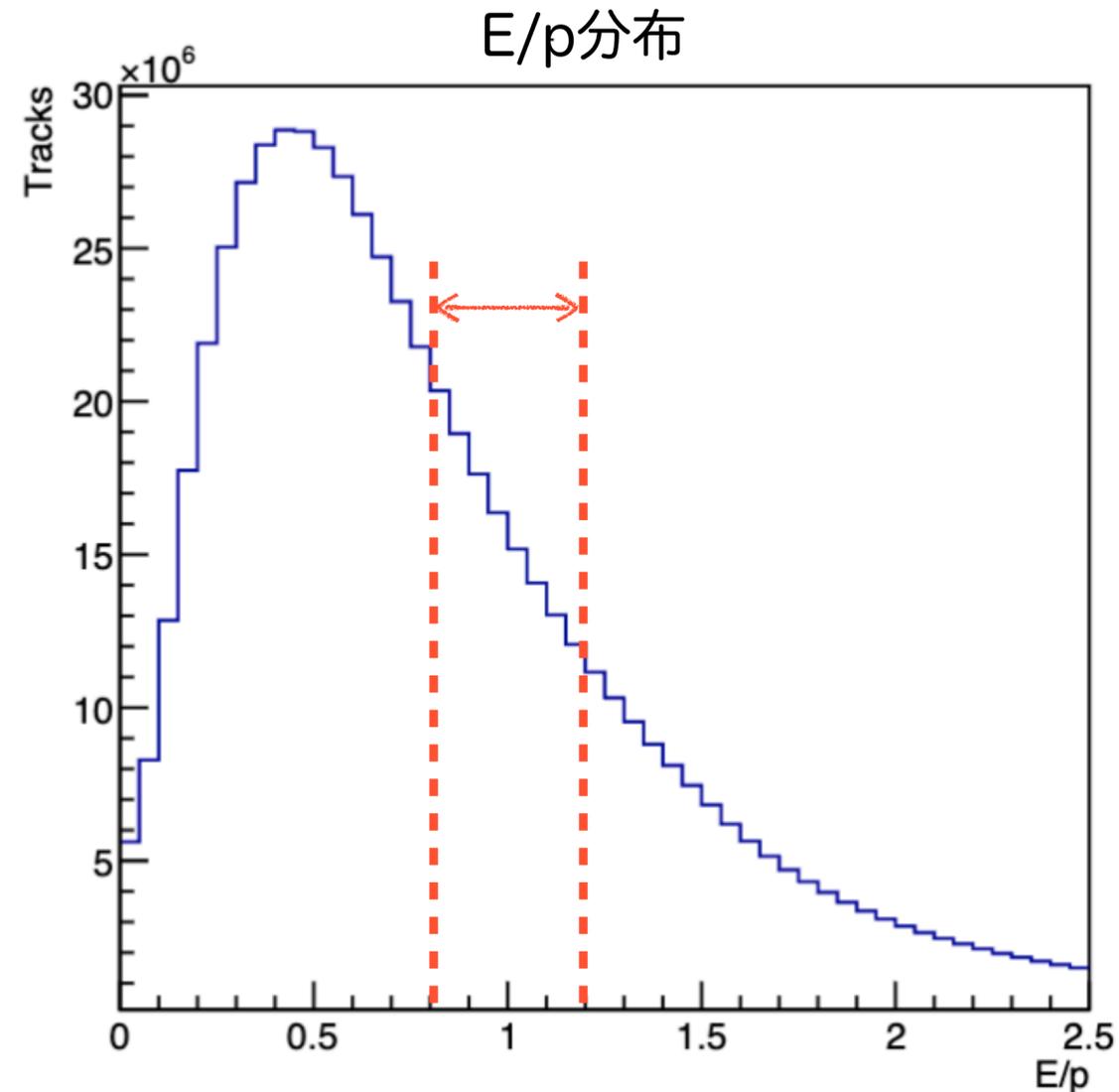
- 補正後 $\Delta\phi$ 分布のピーク位置が中央に、分布幅も補正前から0.5cm小さい→補正は有効
- $\Delta\phi$ 分布の幅はp+pシミュレーションと同程度

実験データにおける不変質量再構成

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

28

- 左図：E/p分布 右図：不変質量分布 ($0.8 < E/p < 1.2$ を要求)



- シミュレーションと同様に背景成分が多く、 $3.1 \text{ GeV}/c^2$ に明確なピークはないがエントリーは存在
- 運動量測定・電子識別の精度改善、背景成分の低減、統計量の増加などで、 J/ψ 質量付近の構造をより明確にできる

まとめ

- RHIC-sPHENIX p+p衝突実験における $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 測定に向け、MVTX、INTT、EMCalを組み合わせた電子・陽電子対を用いた不変質量の再構成手法の開発
- シミュレーションデータで手法を開発し、実験データに用いた
 - 単一粒子シミュレーション：背景成分を抑える選別を強め、質量 $3.1 \text{ GeV}/c^2$ 付近に J/ψ 由来のピーク構造を確認
 - p+pシミュレーション：背景成分が大きいが、背景成分の中にも信号が重なり得る
 - 実験データ：背景成分が大きいい中、 $3.1 \text{ GeV}/c^2$ 近傍にも成分が存在

<今後の展望>

- 運動量測定の精度向上、粒子識別の精度向上による背景成分の低減、統計量増加による、 J/ψ 信号の明瞭化

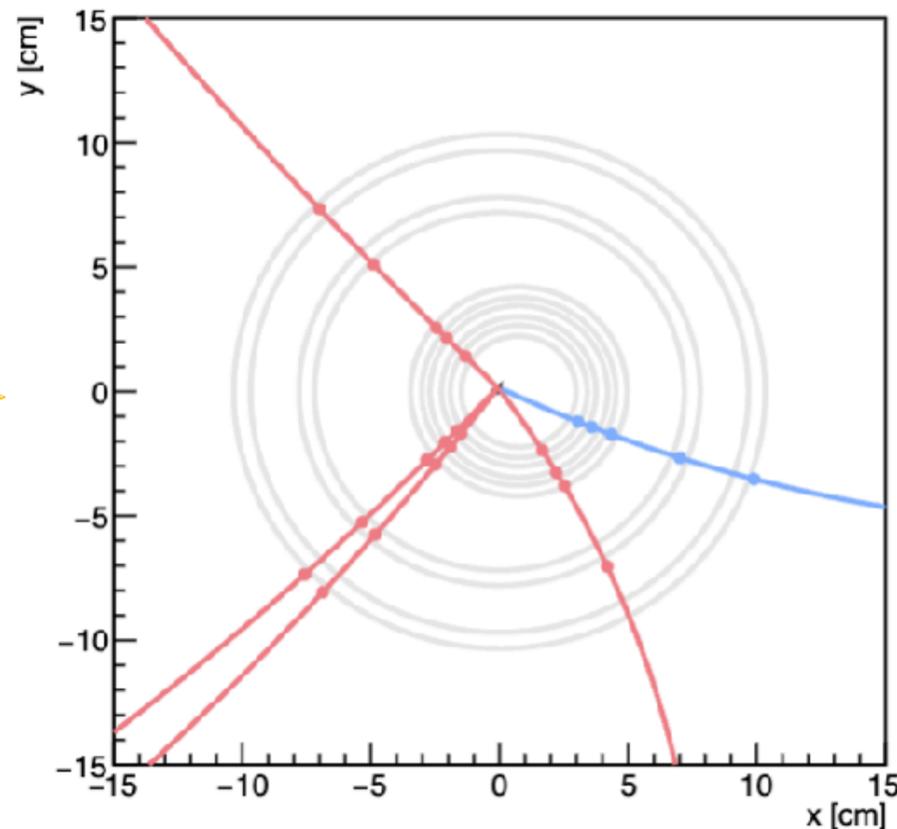
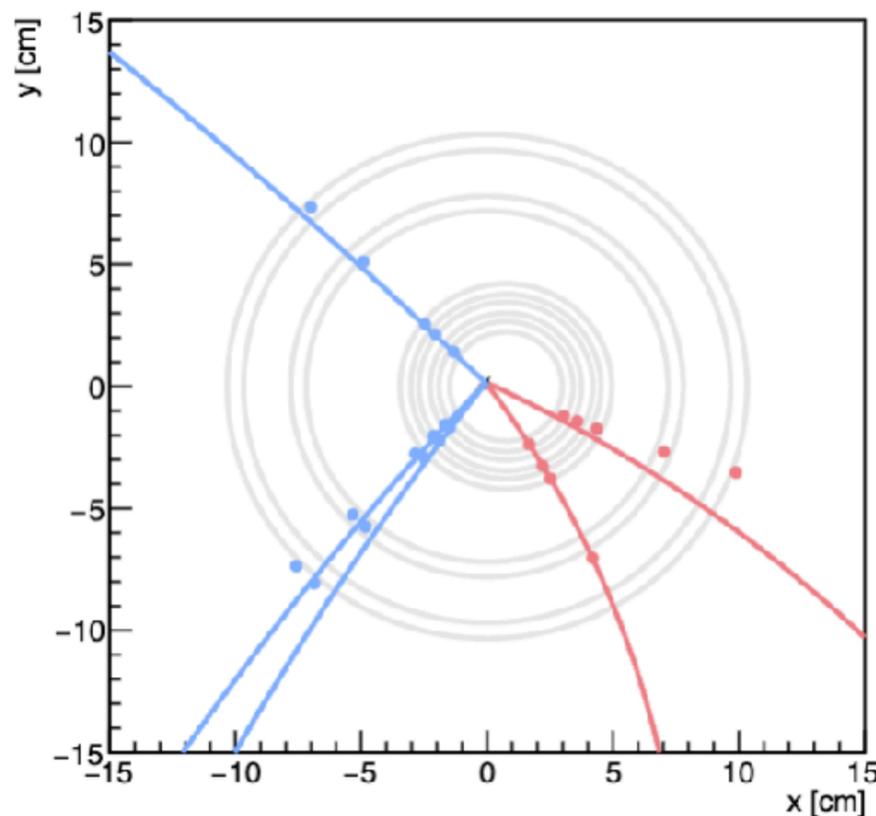
Back Up

飛跡の電荷符号の再計算

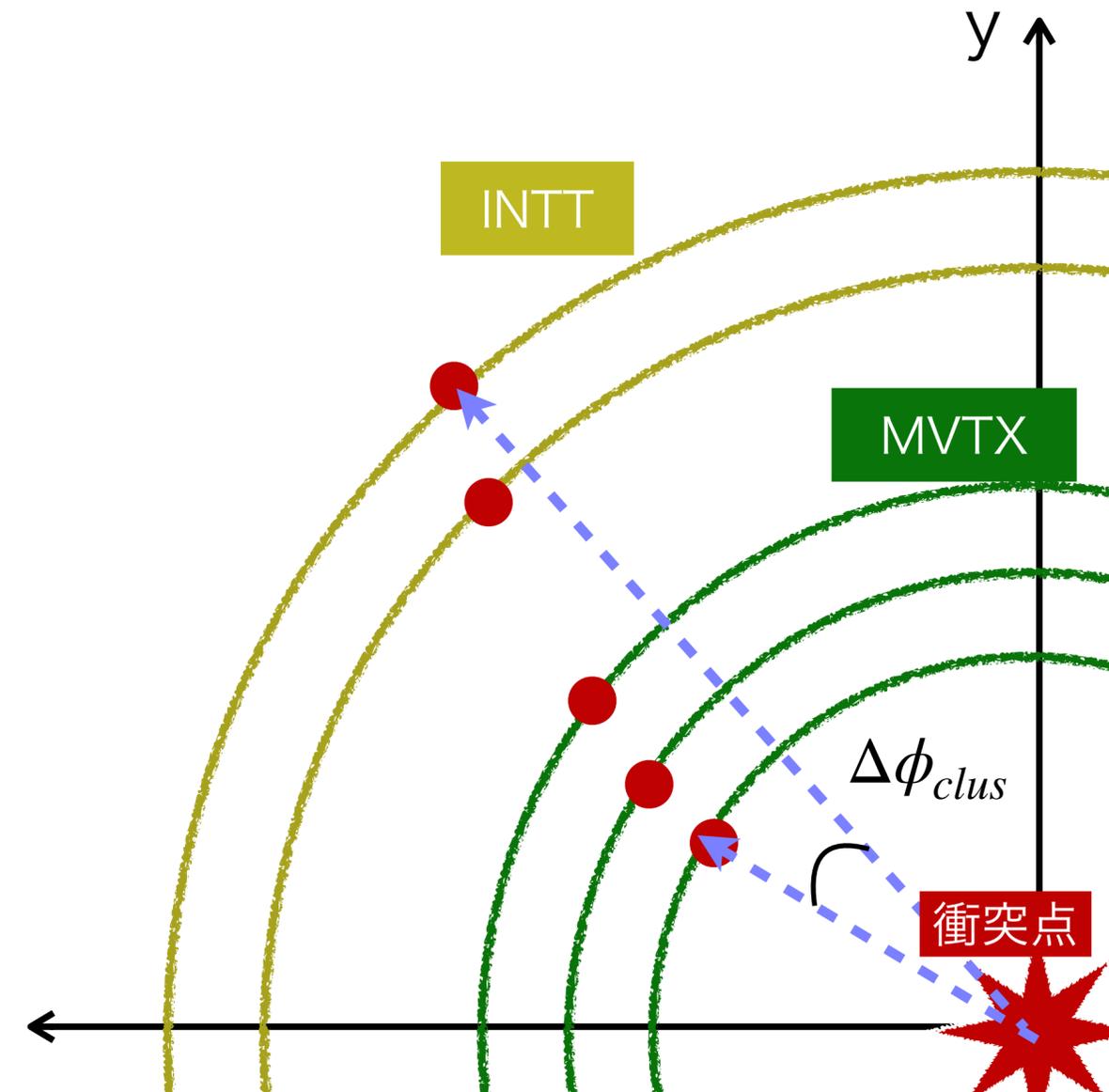
p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

31

- 一部の飛跡において、電荷符号が誤っているものが確認
 - 飛跡を構成するヒットのうち、最外層のヒットから最内層のヒット方位角度差を計算(衝突点を基準とする)
 - ヒット方位角度差の符号により電荷符号を再決定
- 左図：再計算前のx-y平面イベントディスプレイ
- 右図：再計算後 飛跡とヒット位置が一致するようになった



修士論文審査会



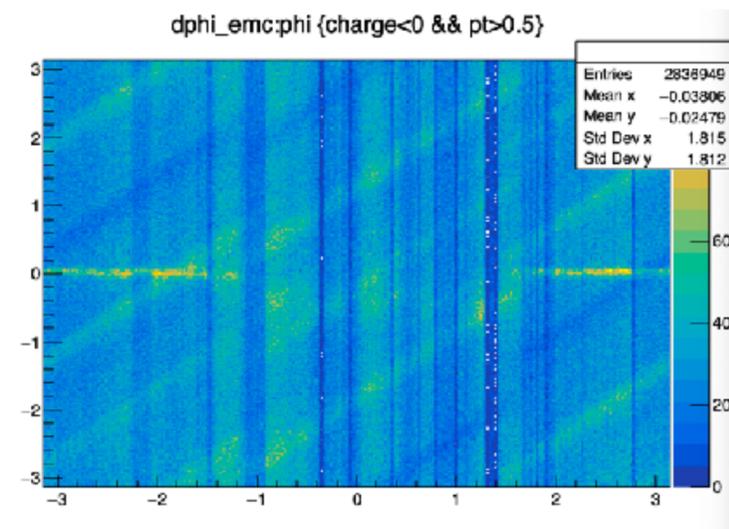
Chargeを再計算した結果 - dphi VS phi0

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

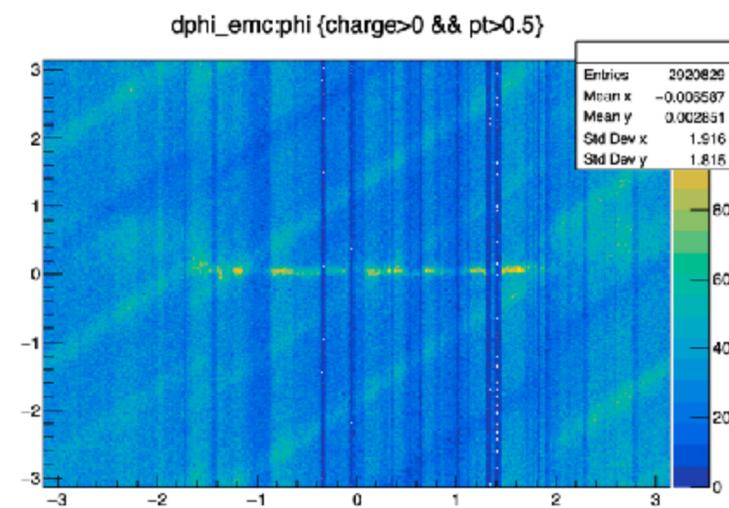
32

- Dphi VS phi0
(dphi \rightarrow EMCalのクラスタの角度phi - トラックをEMCalに投影した点の角度phi
phi0 \rightarrow トラックの出発点の角度phi)
- 再計算前は、chargeが変わるとphi0の値によってdphiピークの分布位置が変わっていたが、chargeによらずdphi ピークが
一様分布するようになった

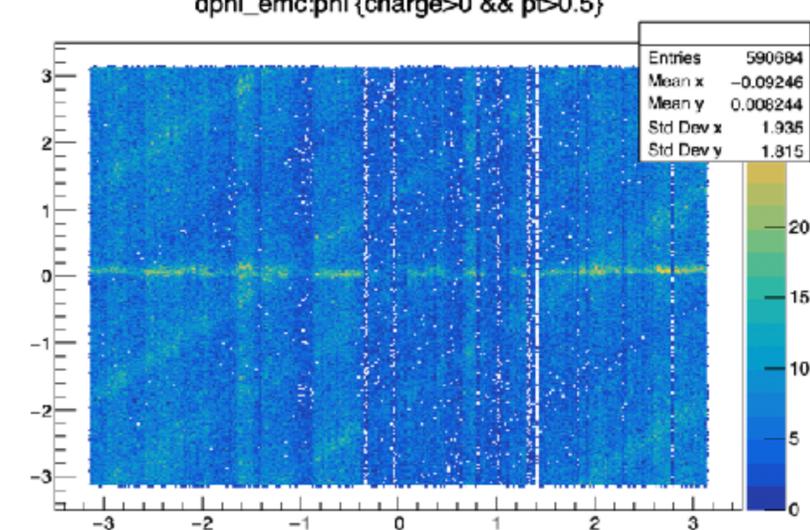
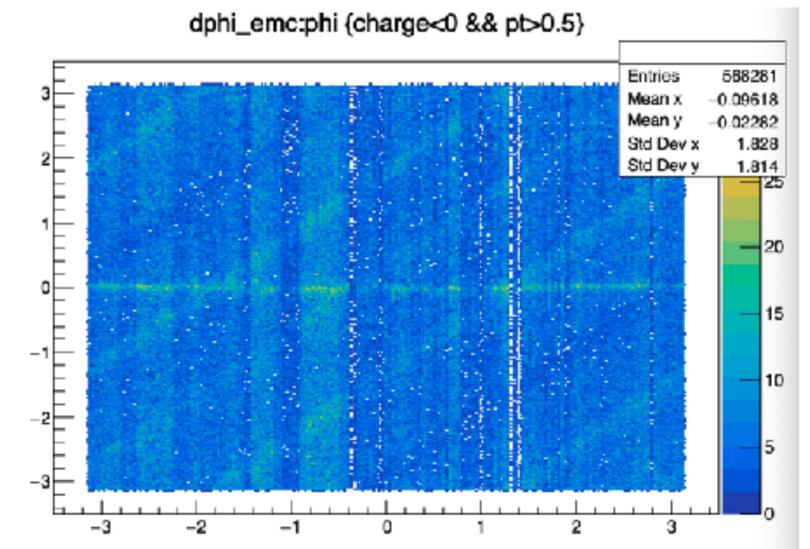
Before



+



After



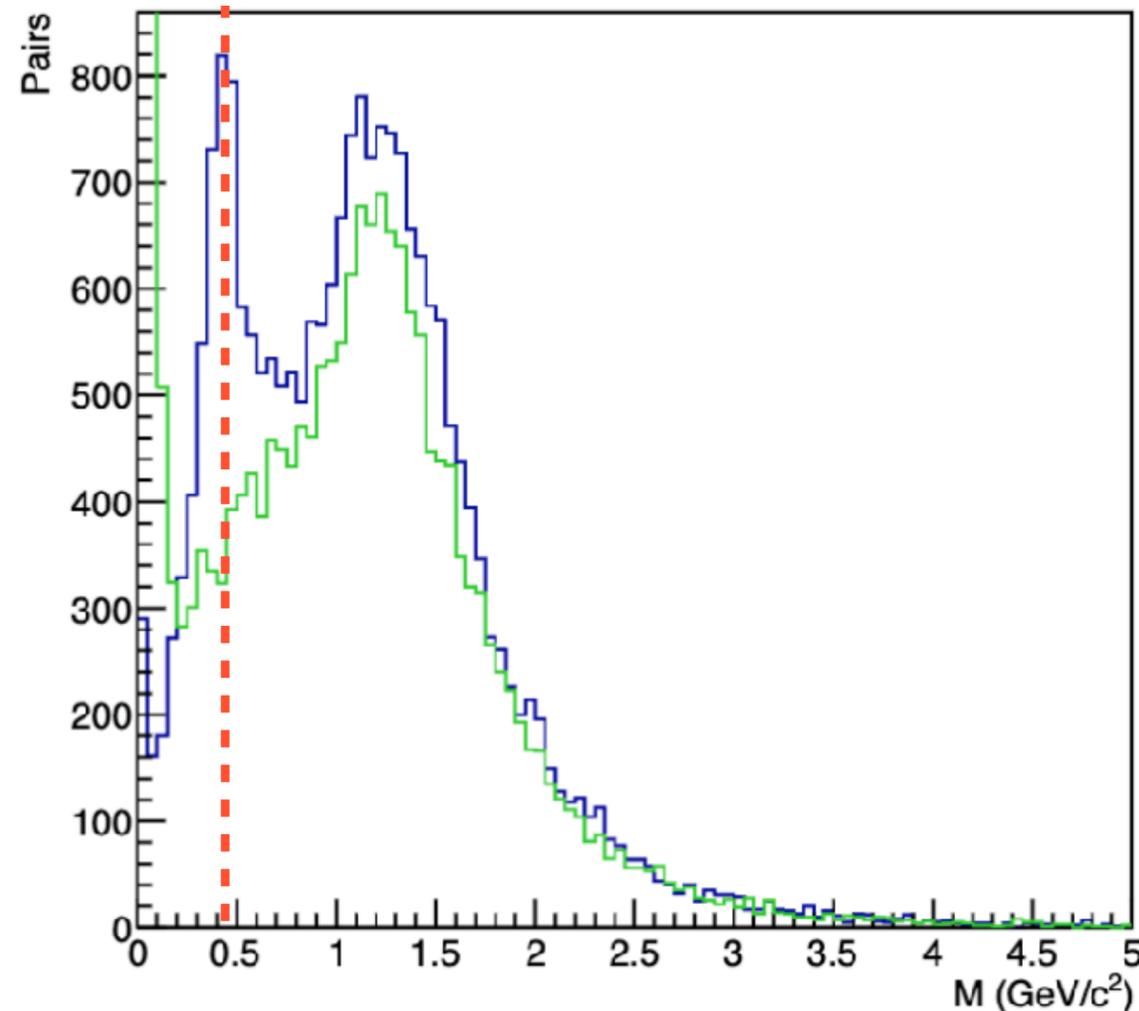
実験データにおける不変質量再構成

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

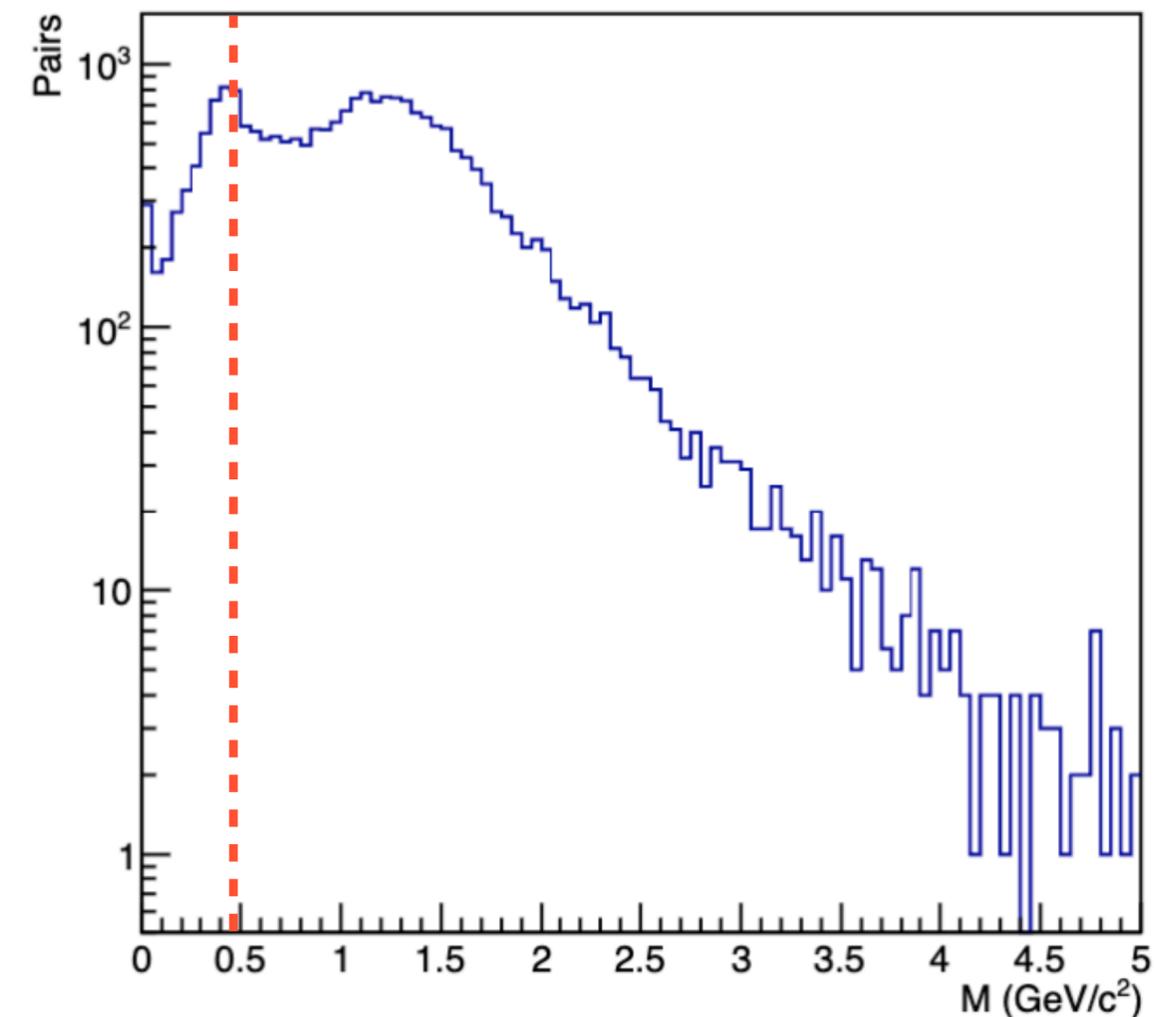
33

- 0.4~0.5GeV/c² 付近の鋭いピーク
- 左図 青：異符号ペア(e⁺e⁻ signal候補) 緑：同符号ペア(誤組み合わせ=背景)

不変質量分布



不変質量分布(log)

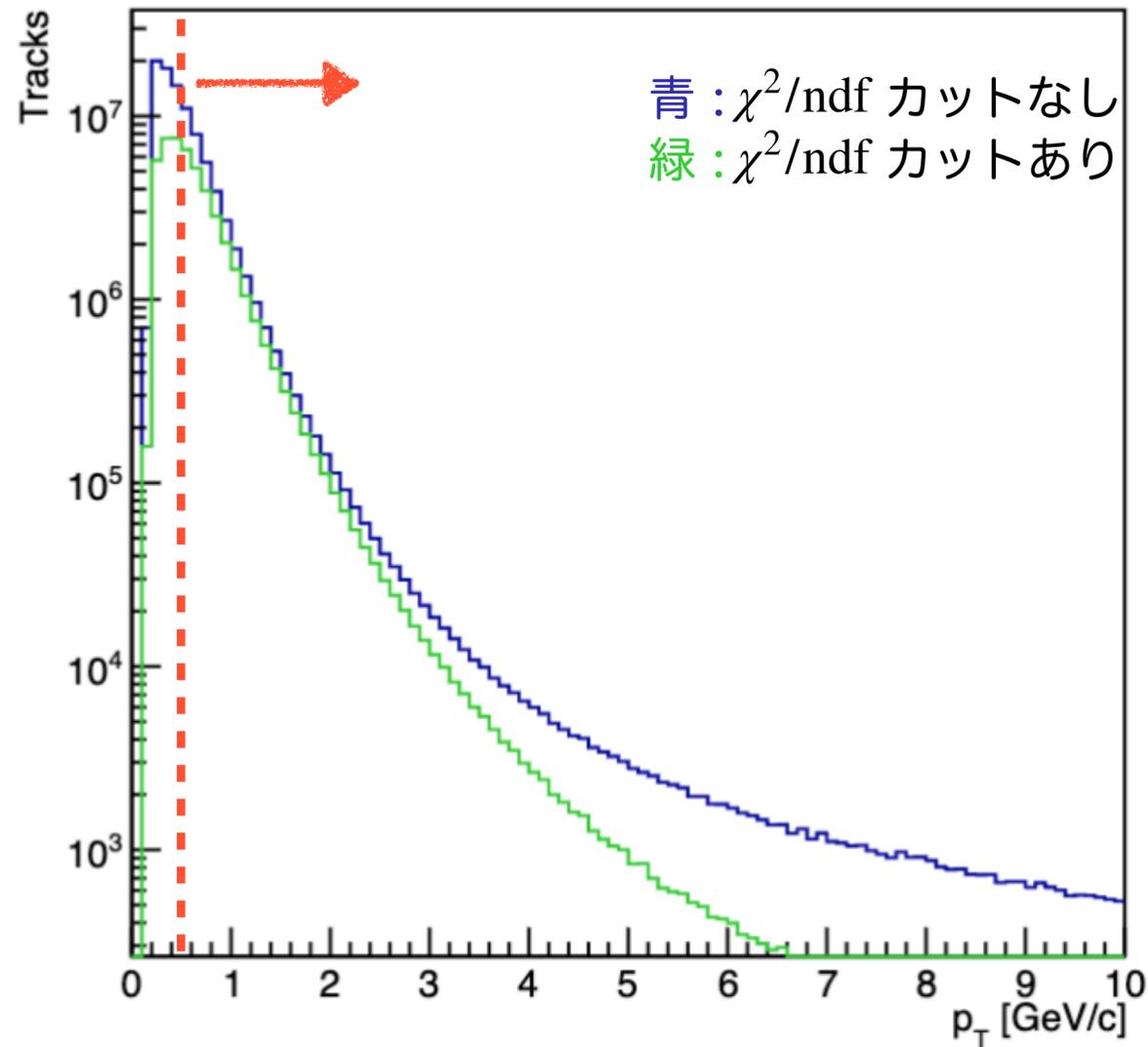


- E/pの不確かさによる、ハドロンペアに崩壊する他の粒子起源の可能性。K₀などの可能性がある

Ptカットの理由

- $p_T > 0.5 \text{ GeV}/c$ の理由

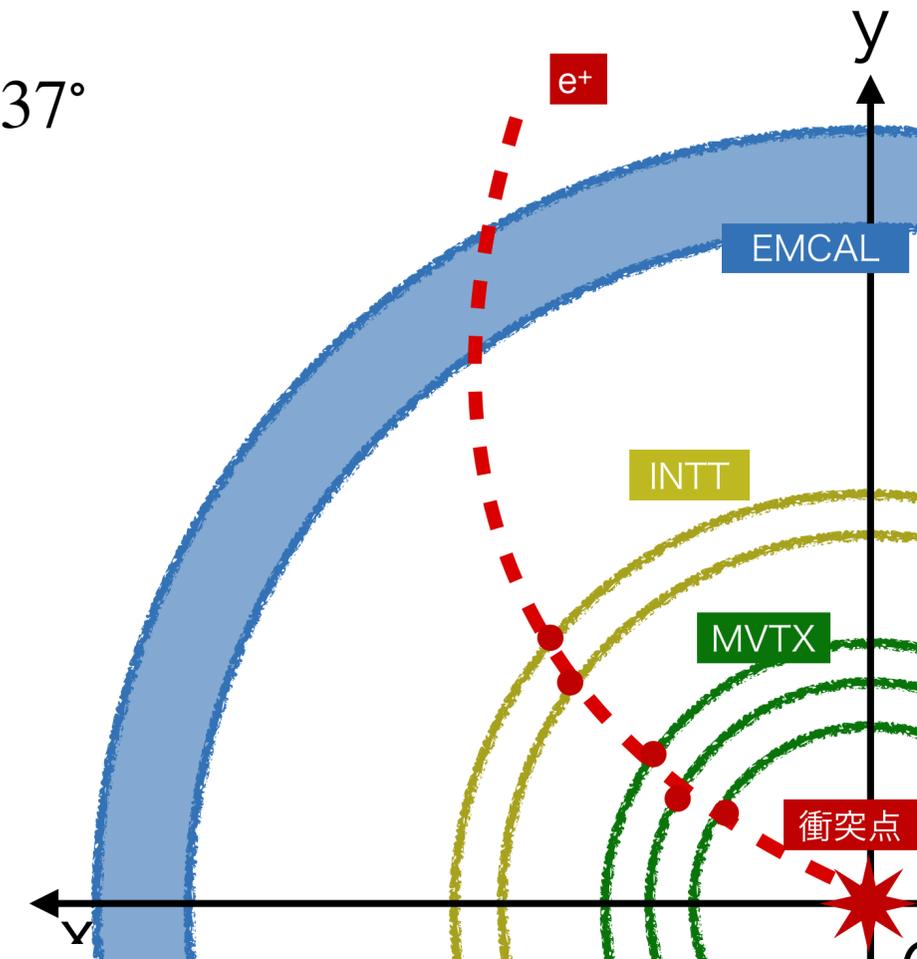
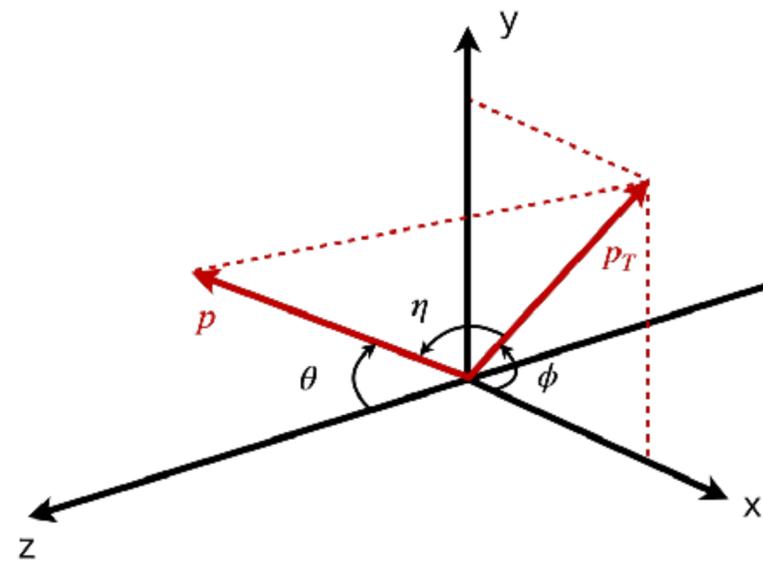
p_T



p^* : J/ ψ 静止系における娘電子の運動量の大きさ
J/ $\psi \rightarrow e+e^-$ 崩壊の時、運動量保存則とエネルギー保存則から

$$p^* = \sqrt{\left(\frac{M_{J/\psi}}{2}\right)^2 - M_e^2} \approx \frac{M_{J/\psi}}{2} \approx 1.55 \text{ GeV}/c$$

$$p_T = p^* \sin\theta \approx 0.9 \text{ GeV}/c \quad \theta \approx 37^\circ$$



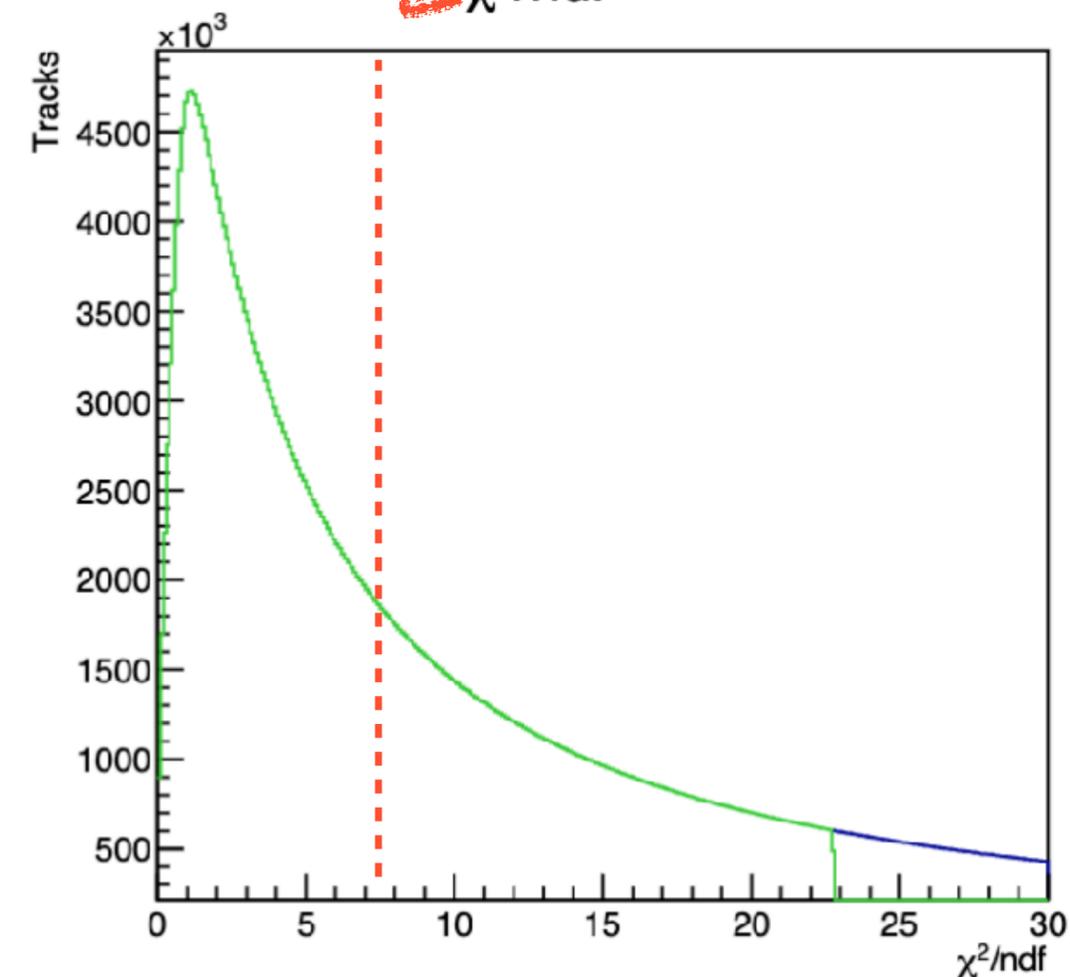
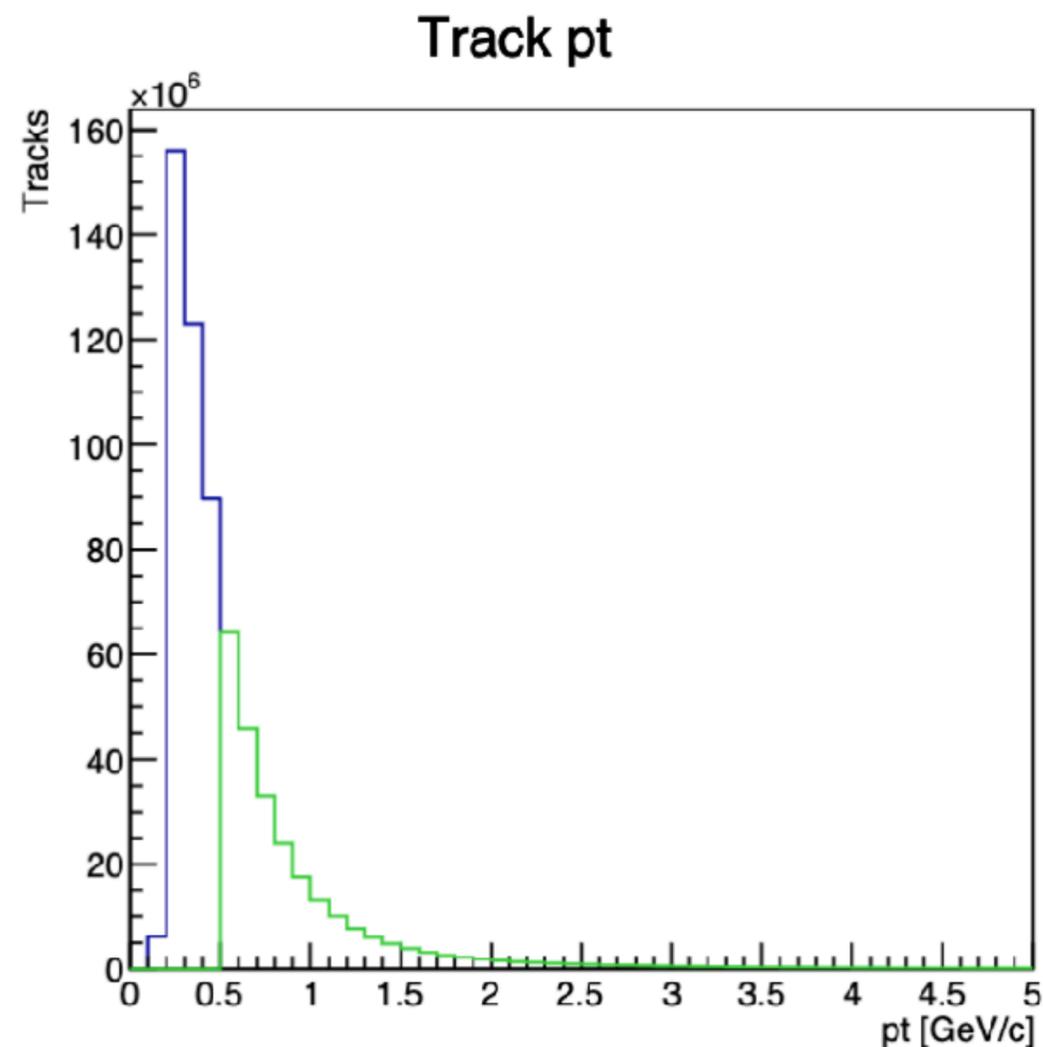
改善の余地

実験データにおける飛跡再構成

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

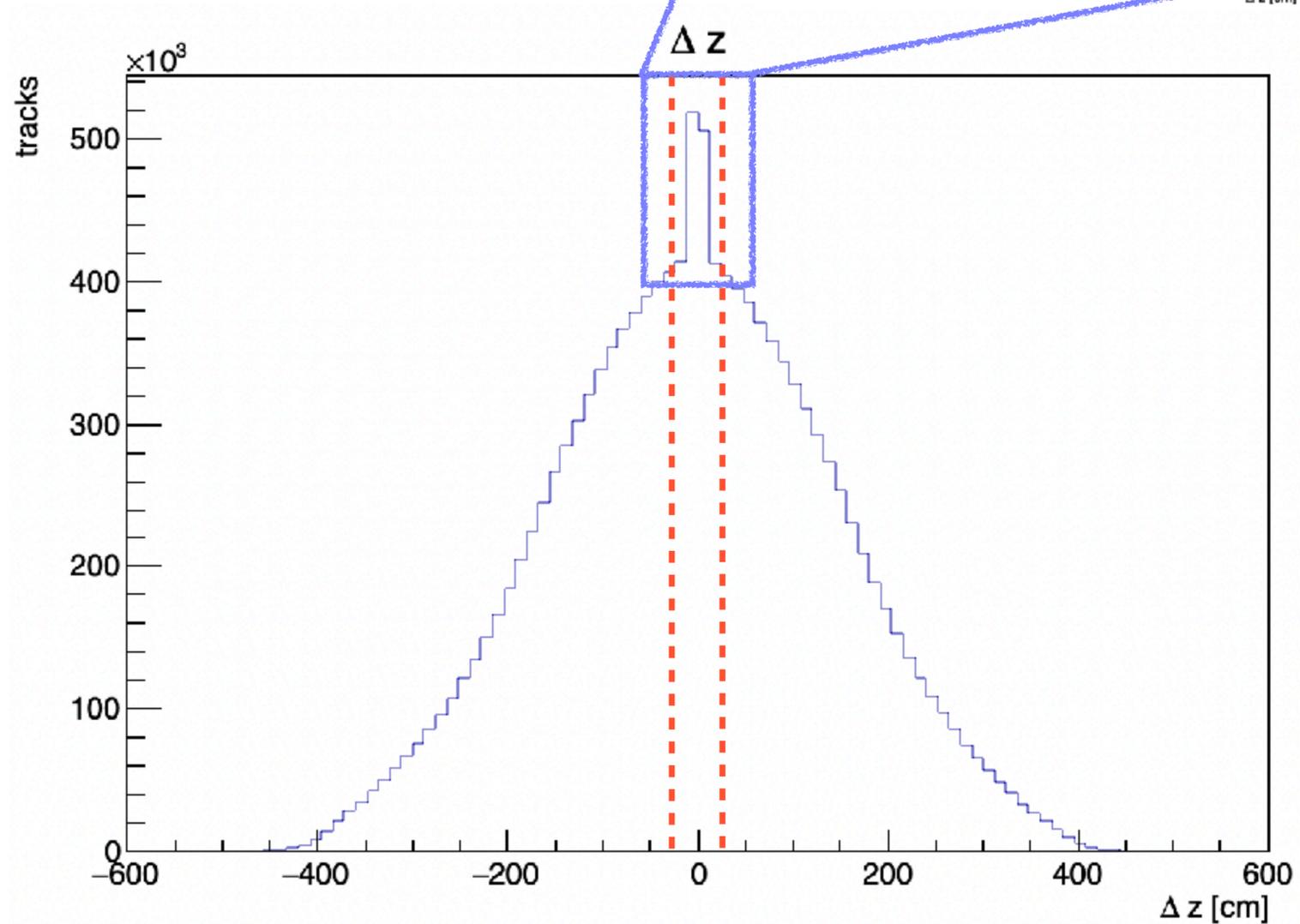
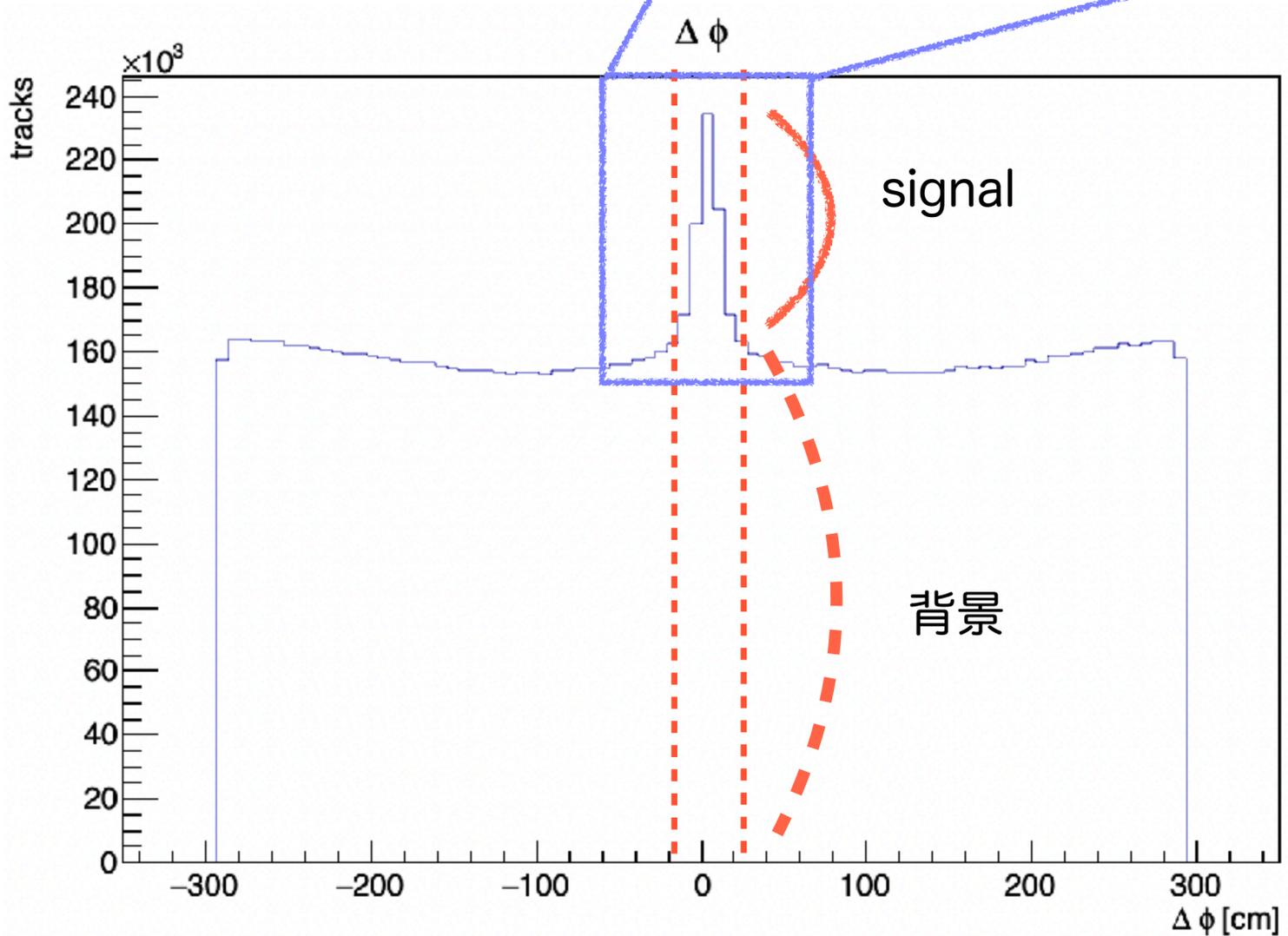
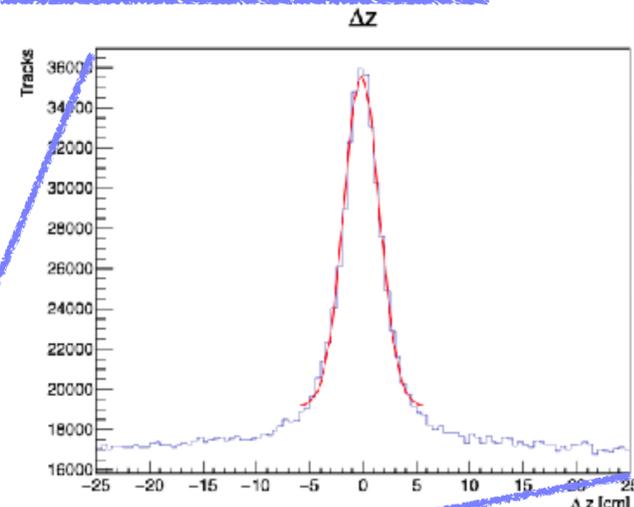
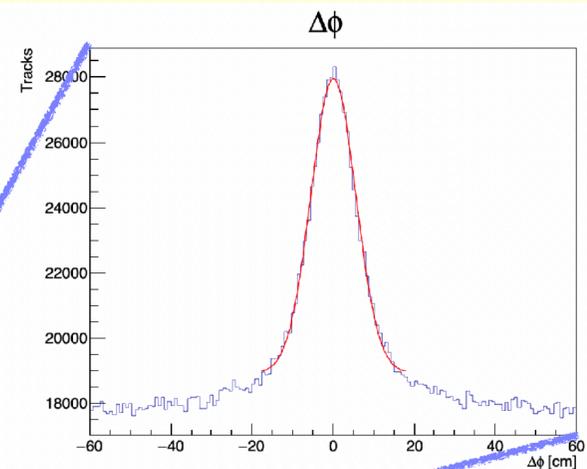
36

- 左図：横運動量分布 $p_T > 0.5 \text{ GeV}/c$ を要求
- 右図： χ^2/ndf 分布 $\chi^2/\text{ndf} < 22.781$ を要求
- p+pシミュレーション時より大きい値→検出器配置のずれやノイズなどの影響で、ヒット位置と飛跡の対応が相対的に悪化しやすいと考えられる



実験データの $\Delta\phi$ 、 Δz 分布全範囲

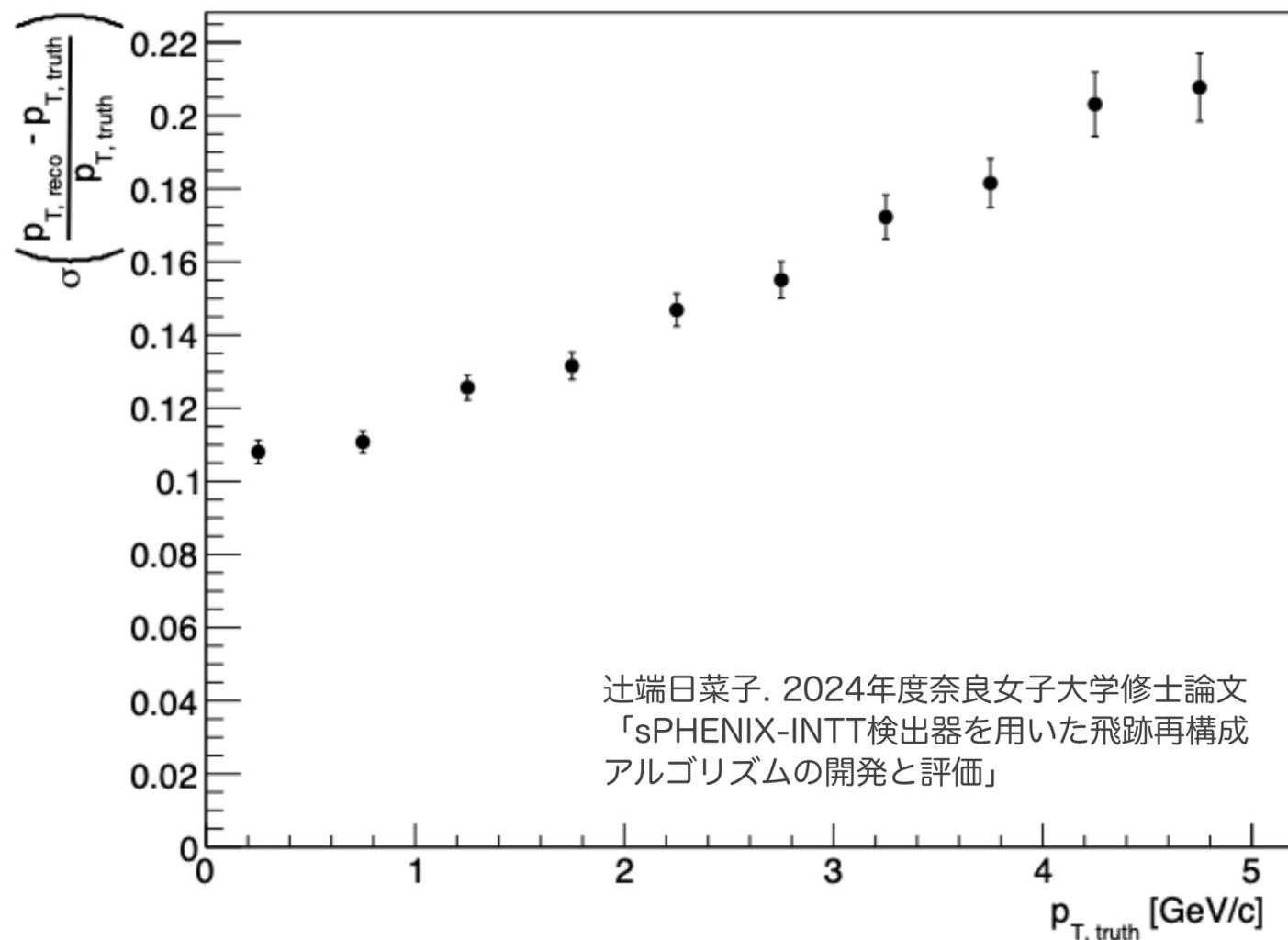
p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象



運動量分解能の改善

- INTTシリコン検出器の運動量分解能はpt 1 GeV/cにおいて10%
- EMCal情報を飛跡再構成時に使用すると1%に向上することがわかっている(図なし)
→ 分解能を10倍に上げることが可能

pT resolution



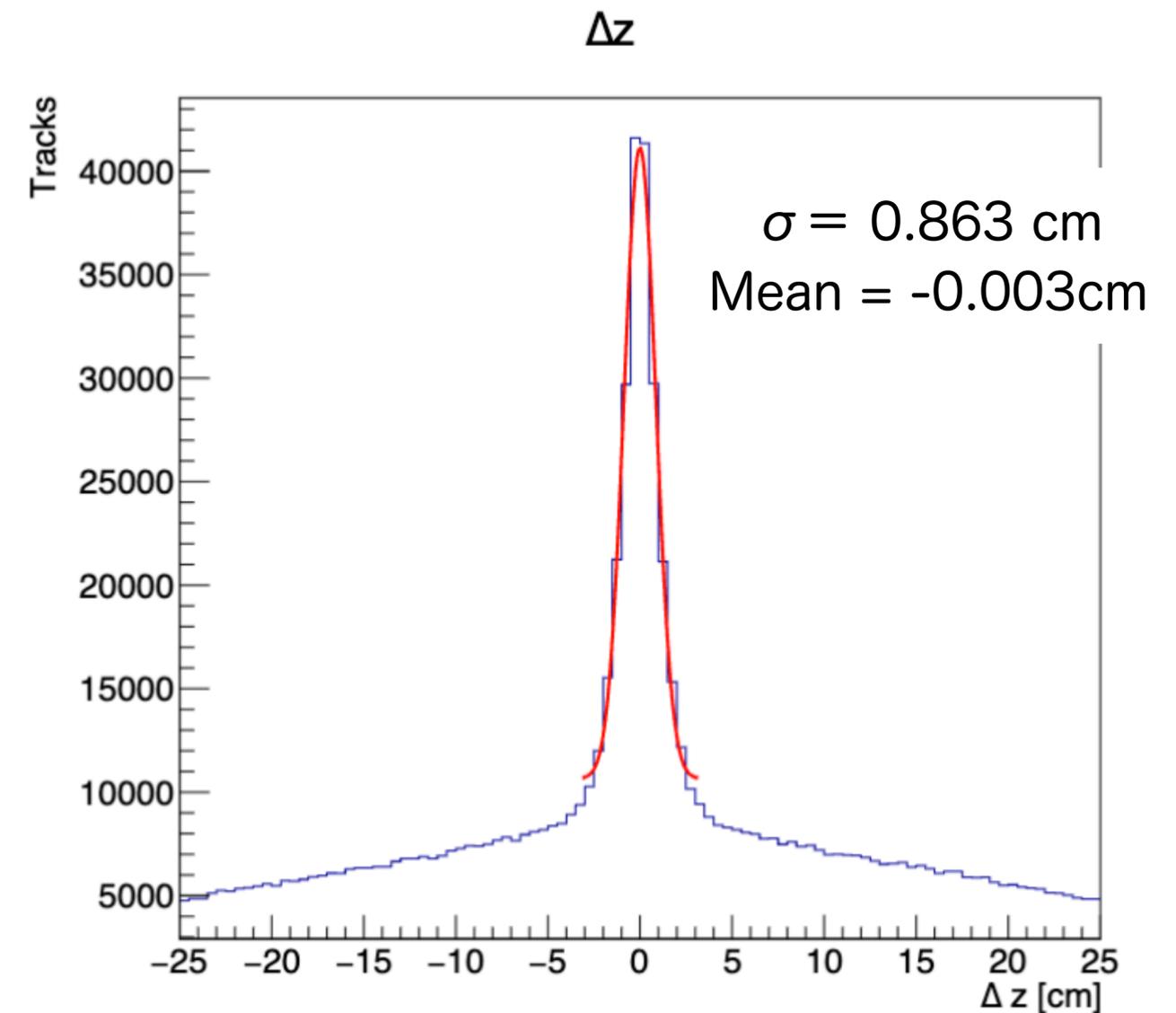
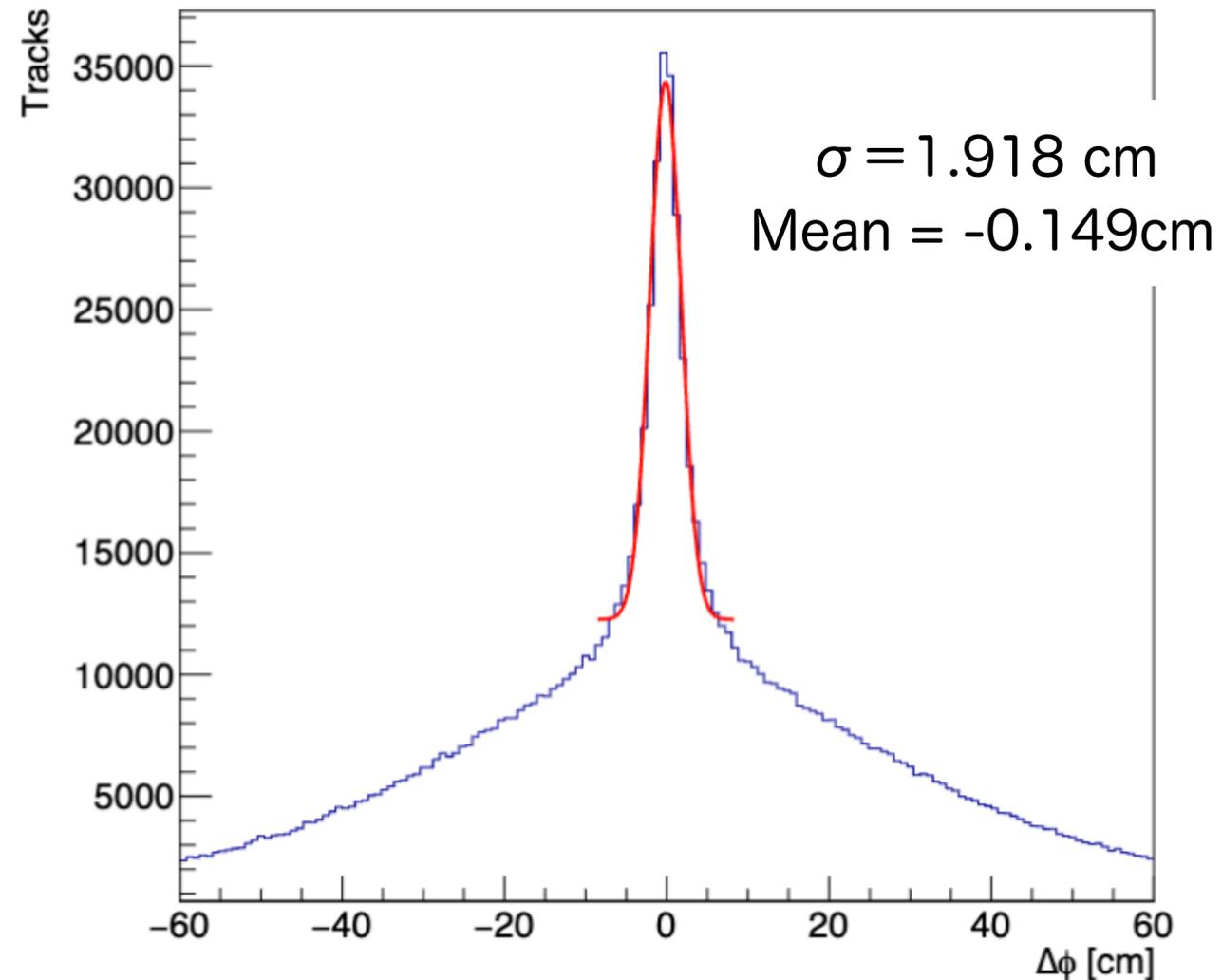
載せていない分布

単一シミュレーションにおける $\Delta\phi$ 、 Δz 分布

単一シミュレーション
磁場1.4T 20万事象

40

- 左図： $\Delta\phi$ 分布 右図： Δz 分布



- どちらもピークが0cm 付近にある → 飛跡投影位置とEMCalヒット位置は平均的に一致している

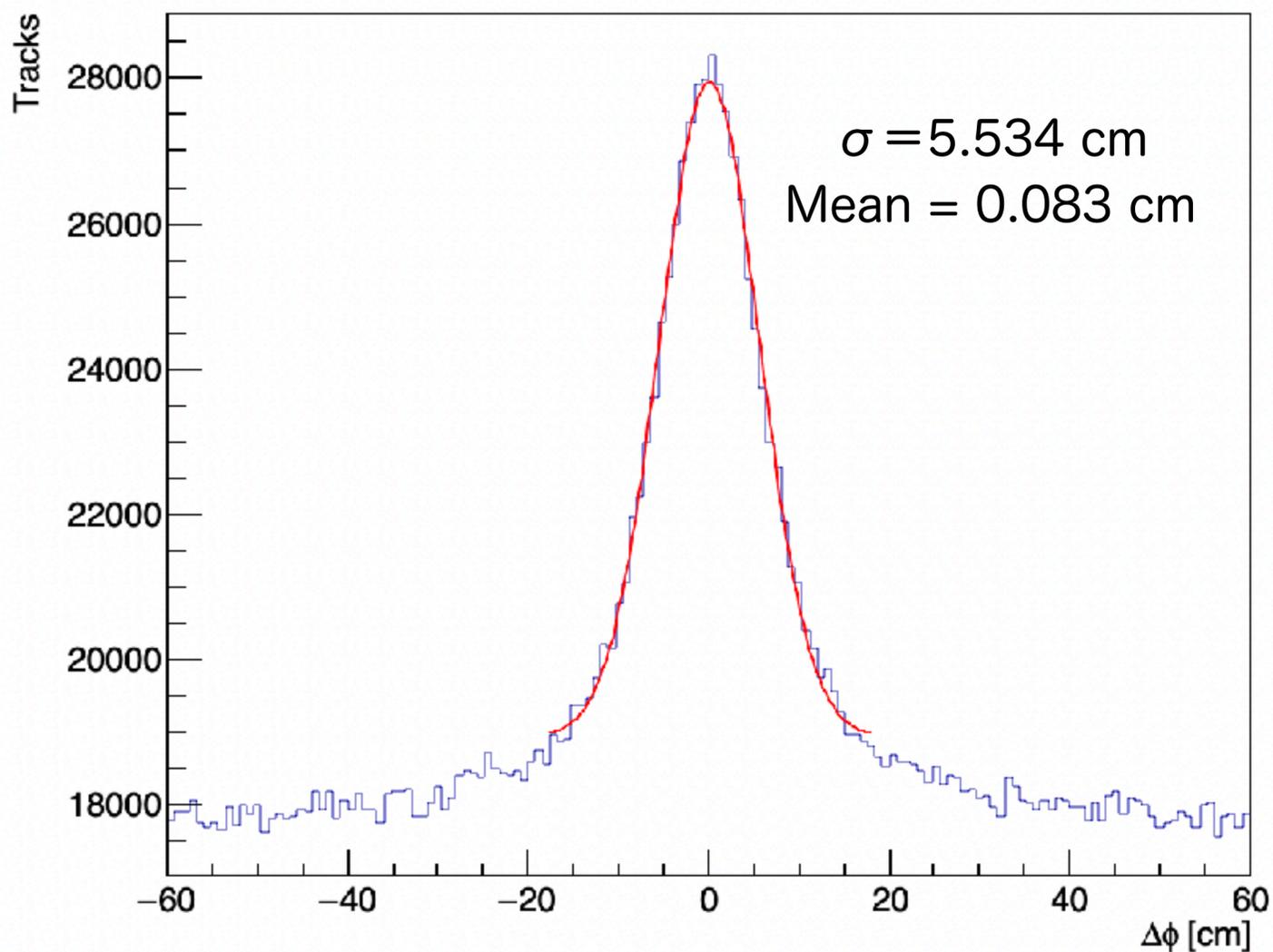
実験データのずれ補正後の $\Delta\phi$ 、 Δz 分布

p+p実験データ (200GeV)
磁場1.4T 1.5億衝突事象

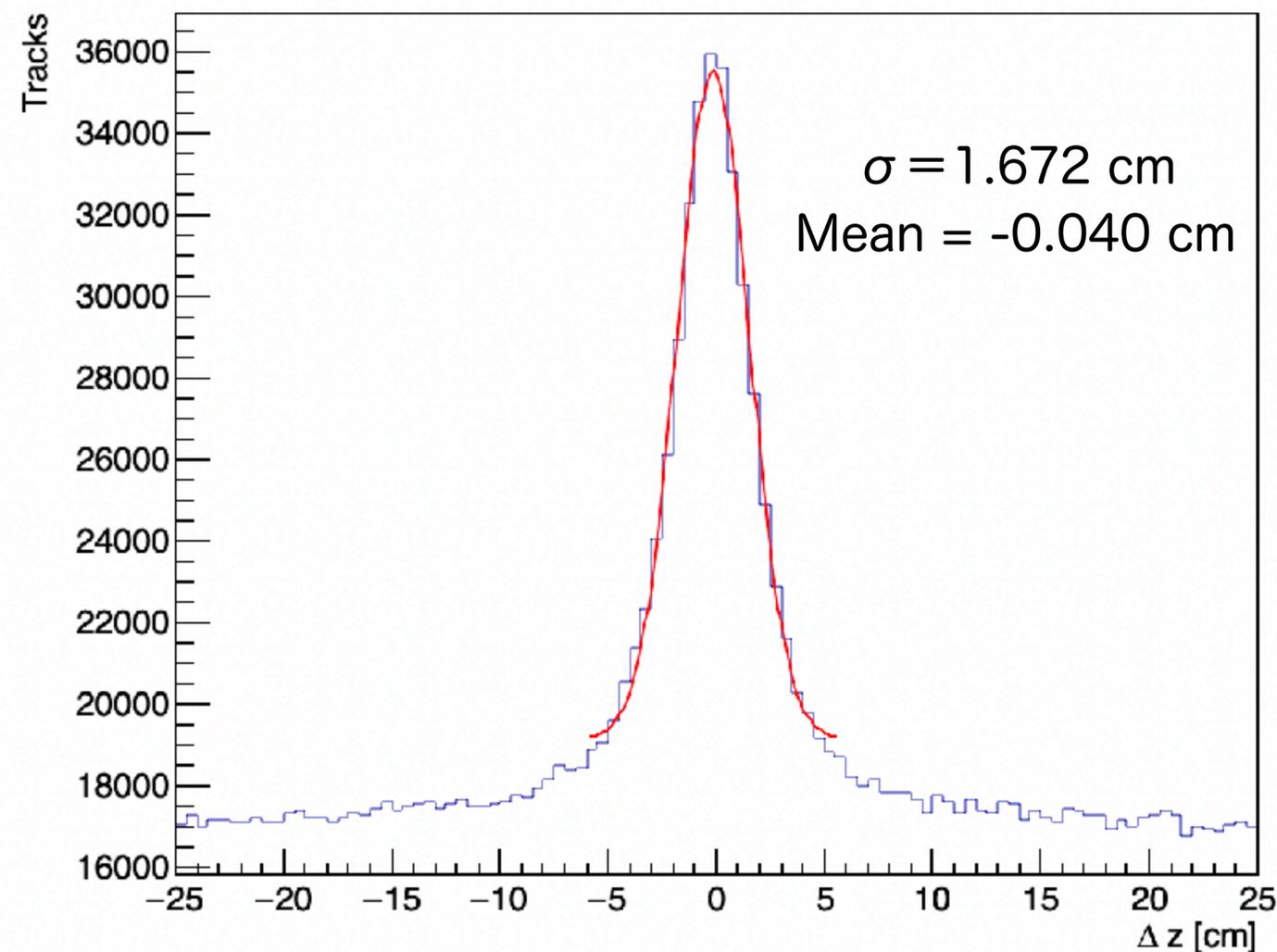
41

- 左図： $\Delta\phi$ 分布 右図：飛跡の出発点の方位角 ϕ_0 と $\Delta\phi$ の相関分布

補正後 $\Delta\phi$



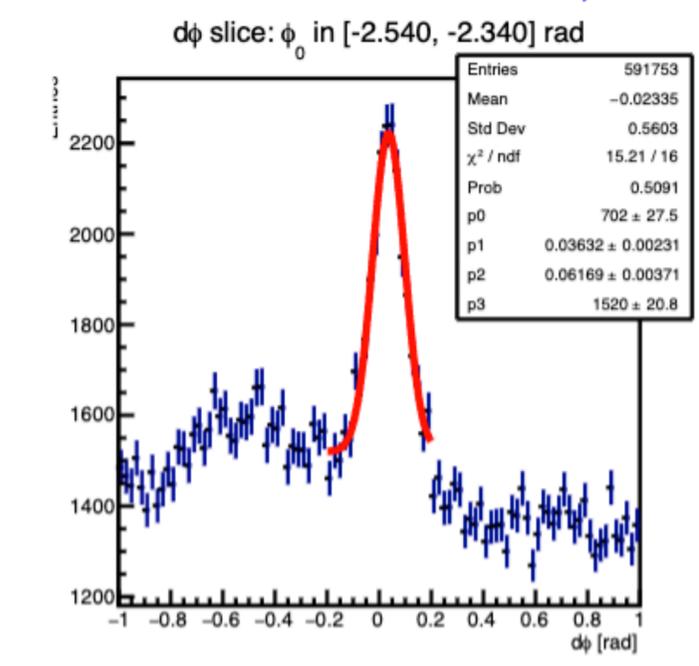
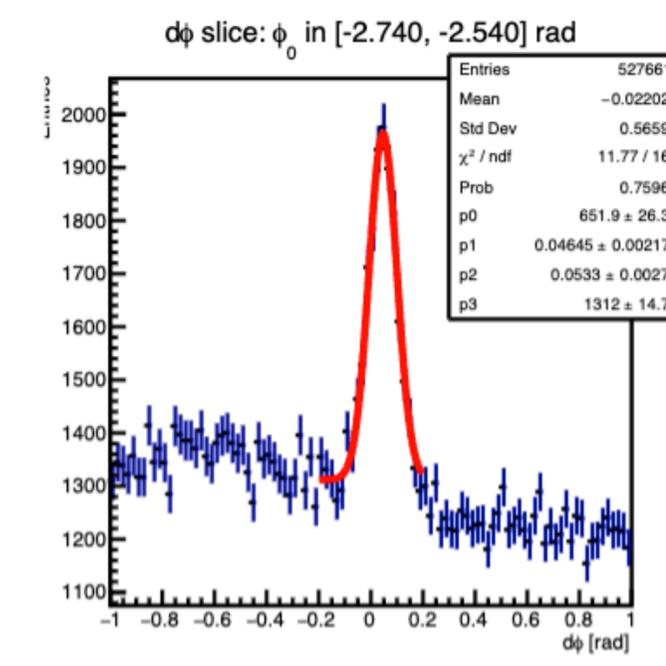
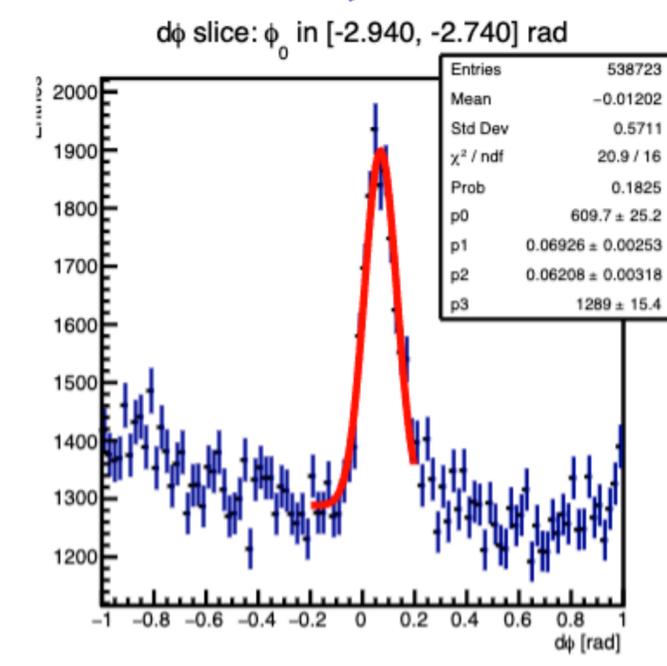
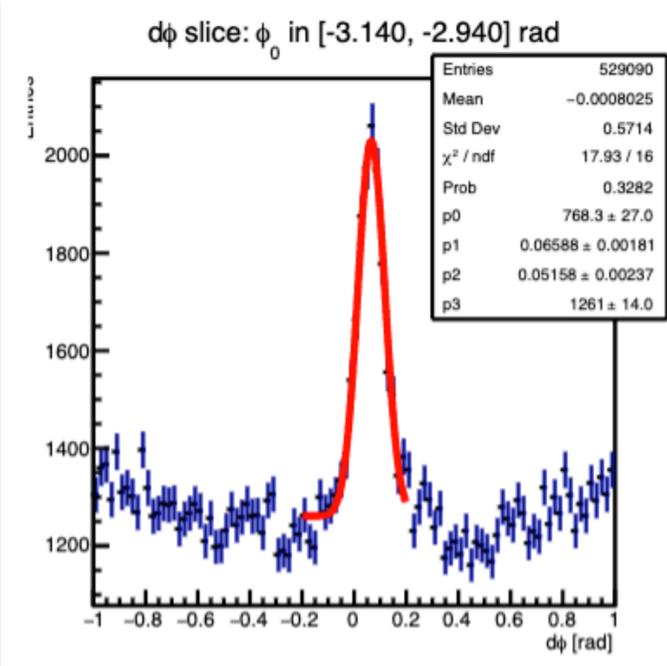
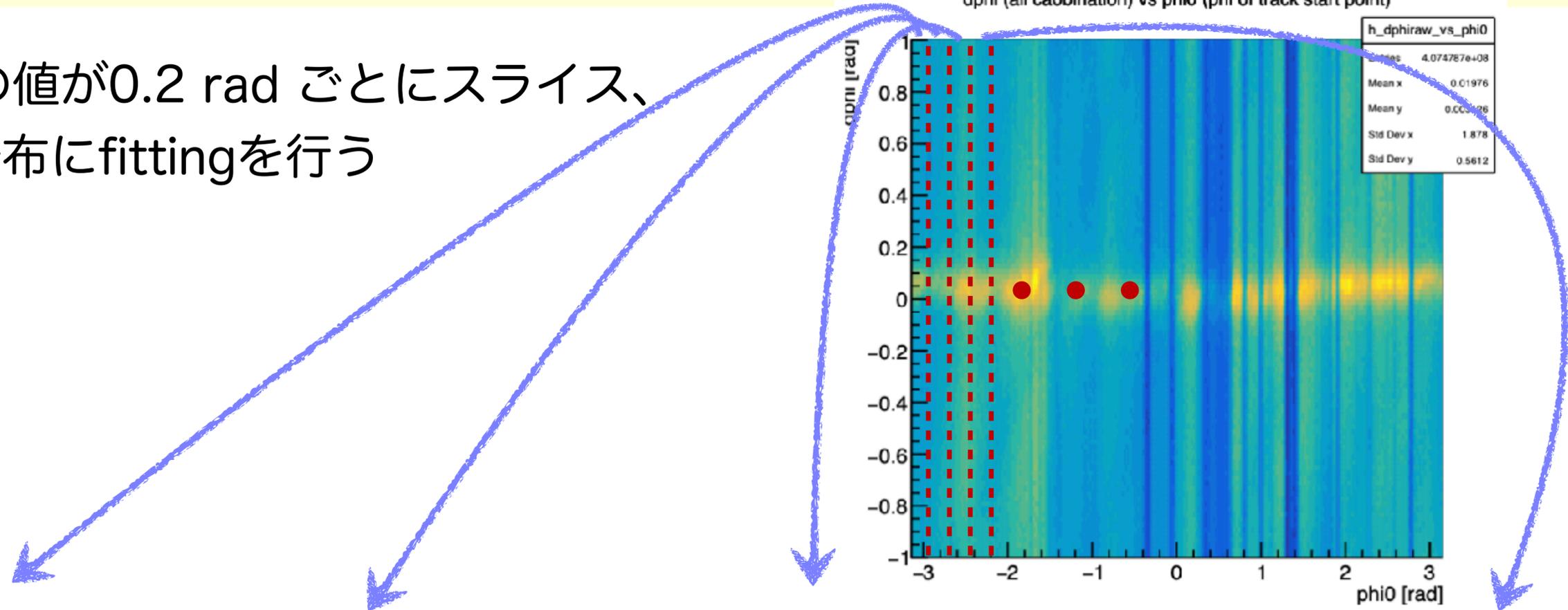
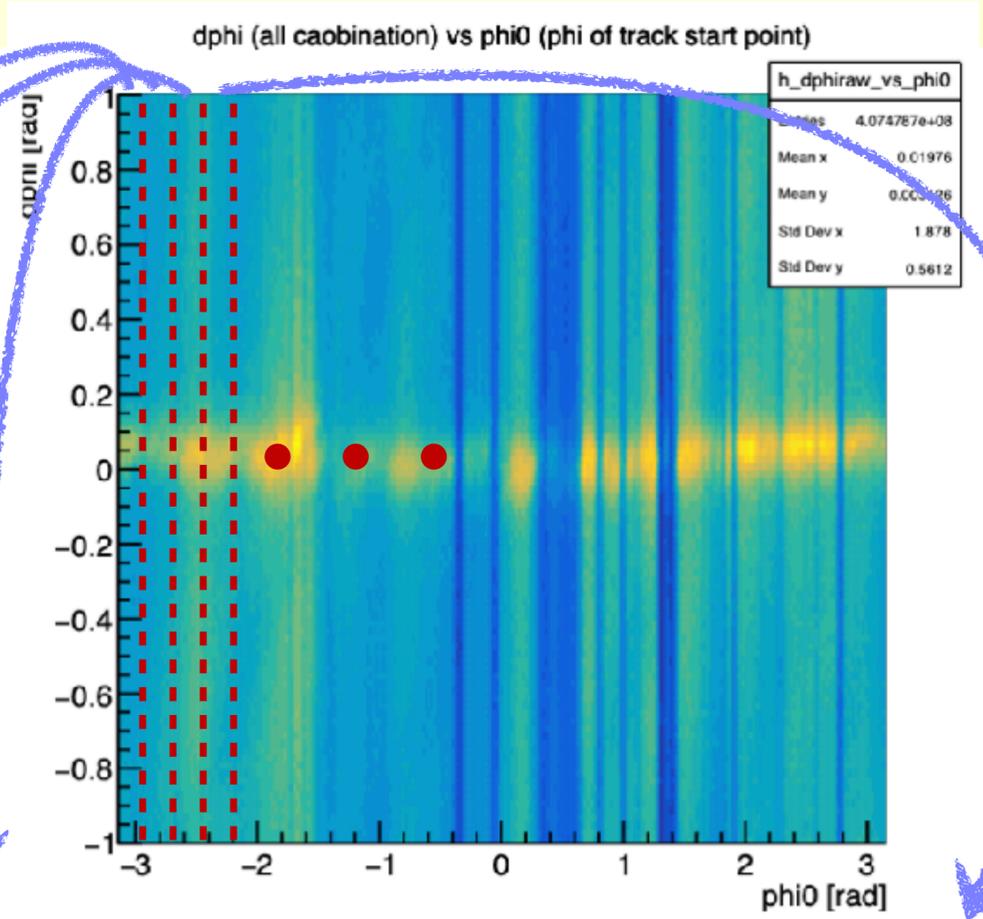
Δz



- $\Delta\phi$ 分布幅は Δz 分布のおよそ3.3倍

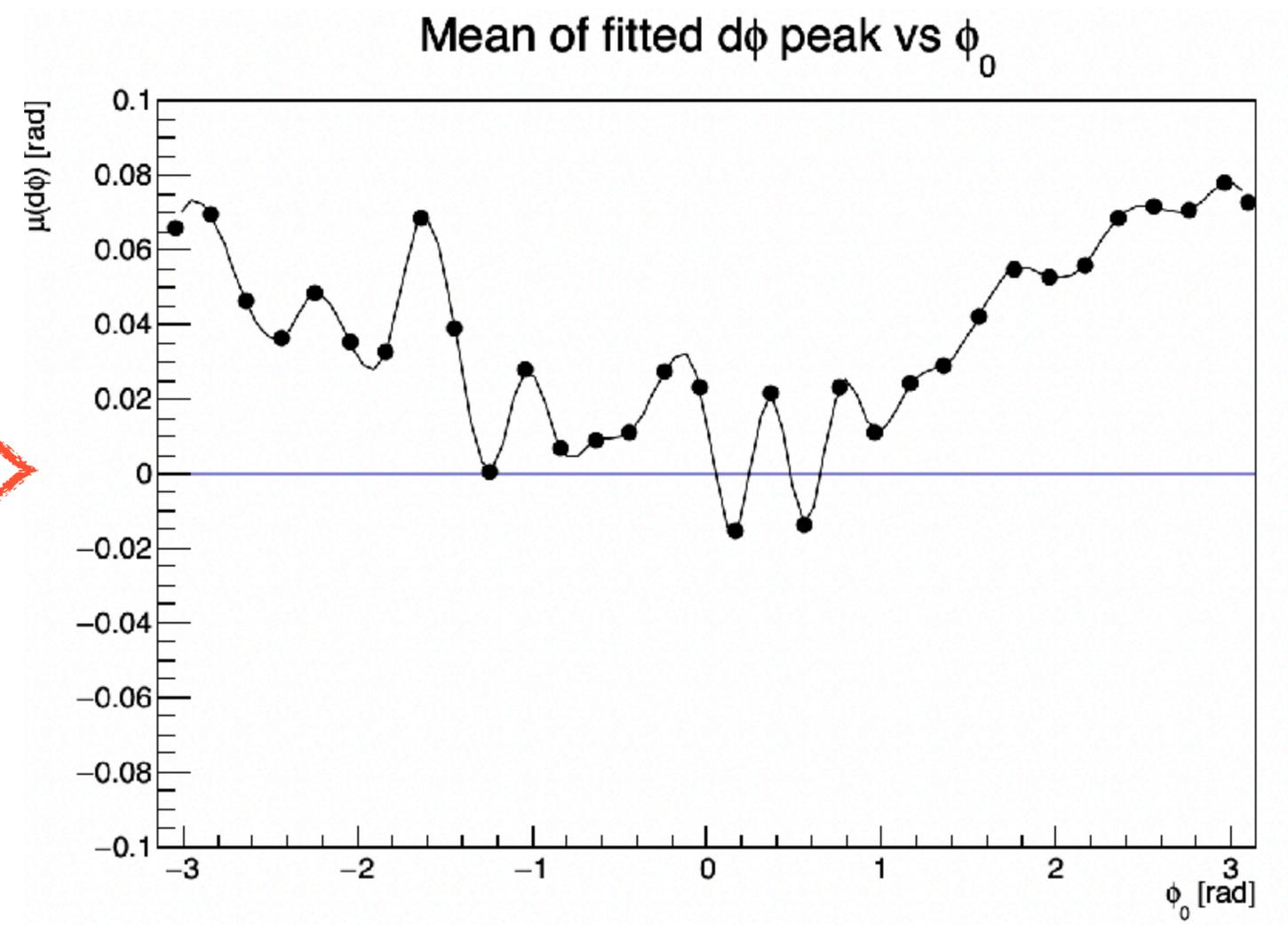
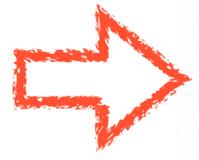
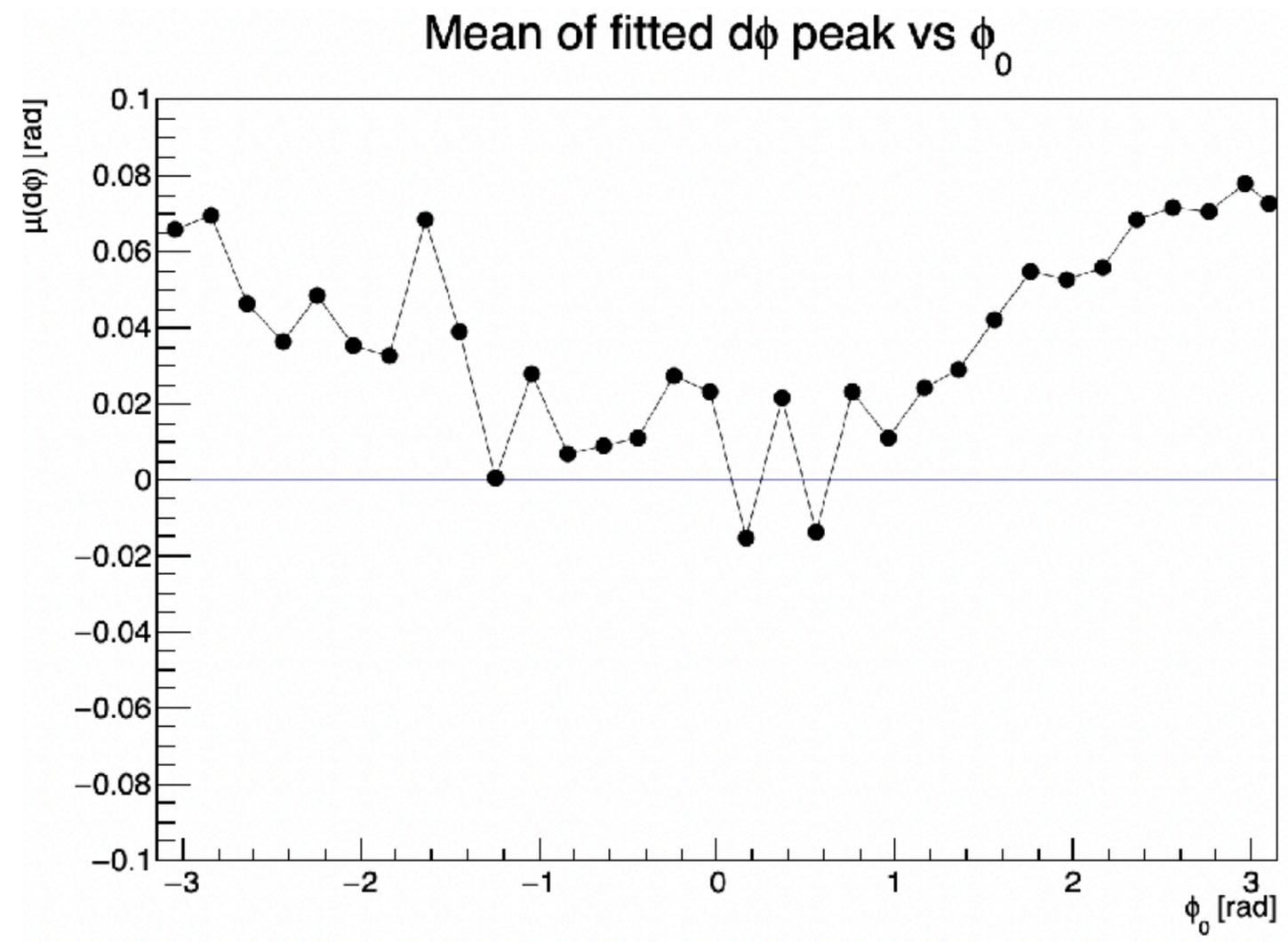
Dphi fitting

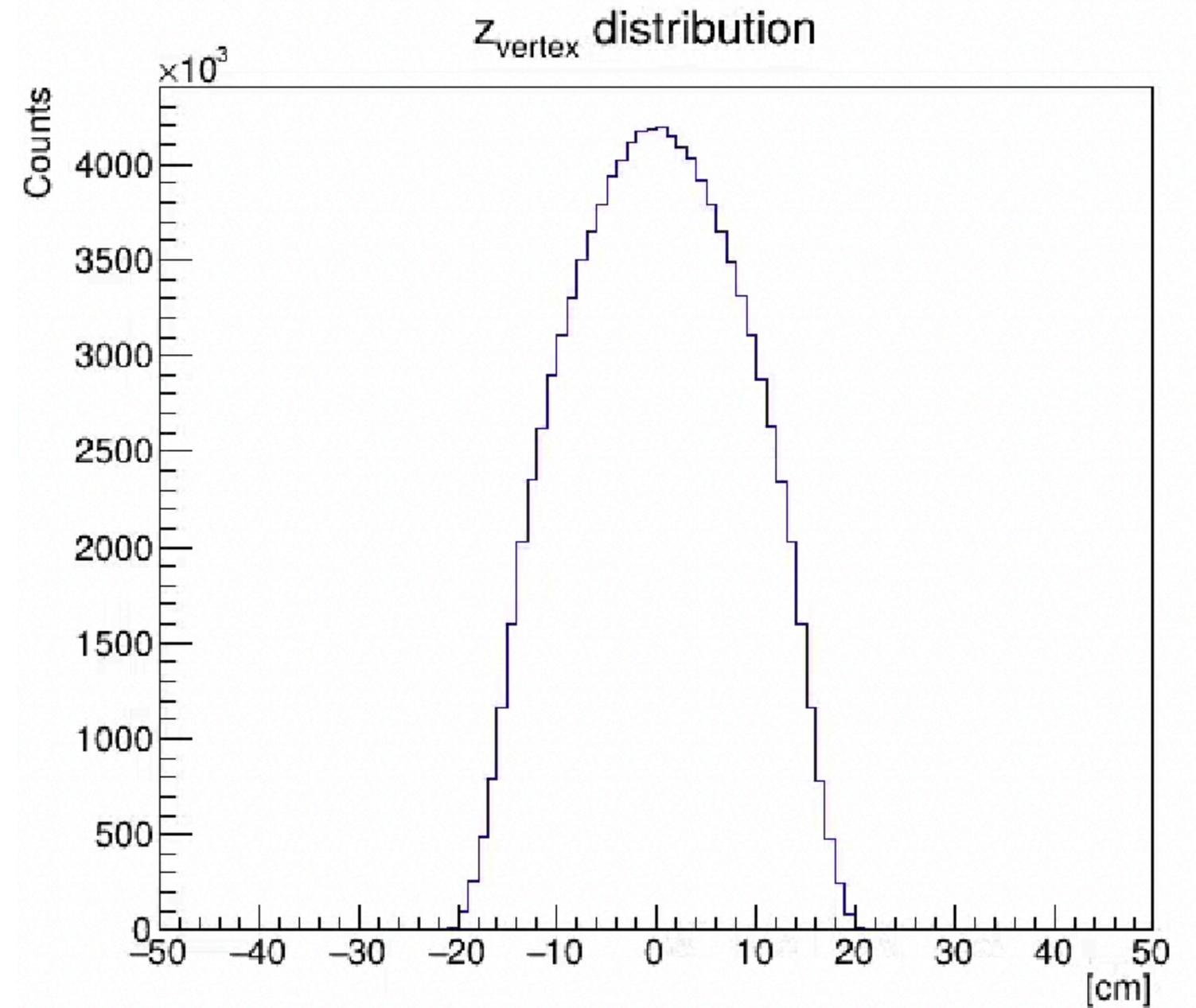
- dphi分布をphi0の値が0.2 rad ごとにスライス、スライスした各分布にfittingを行う



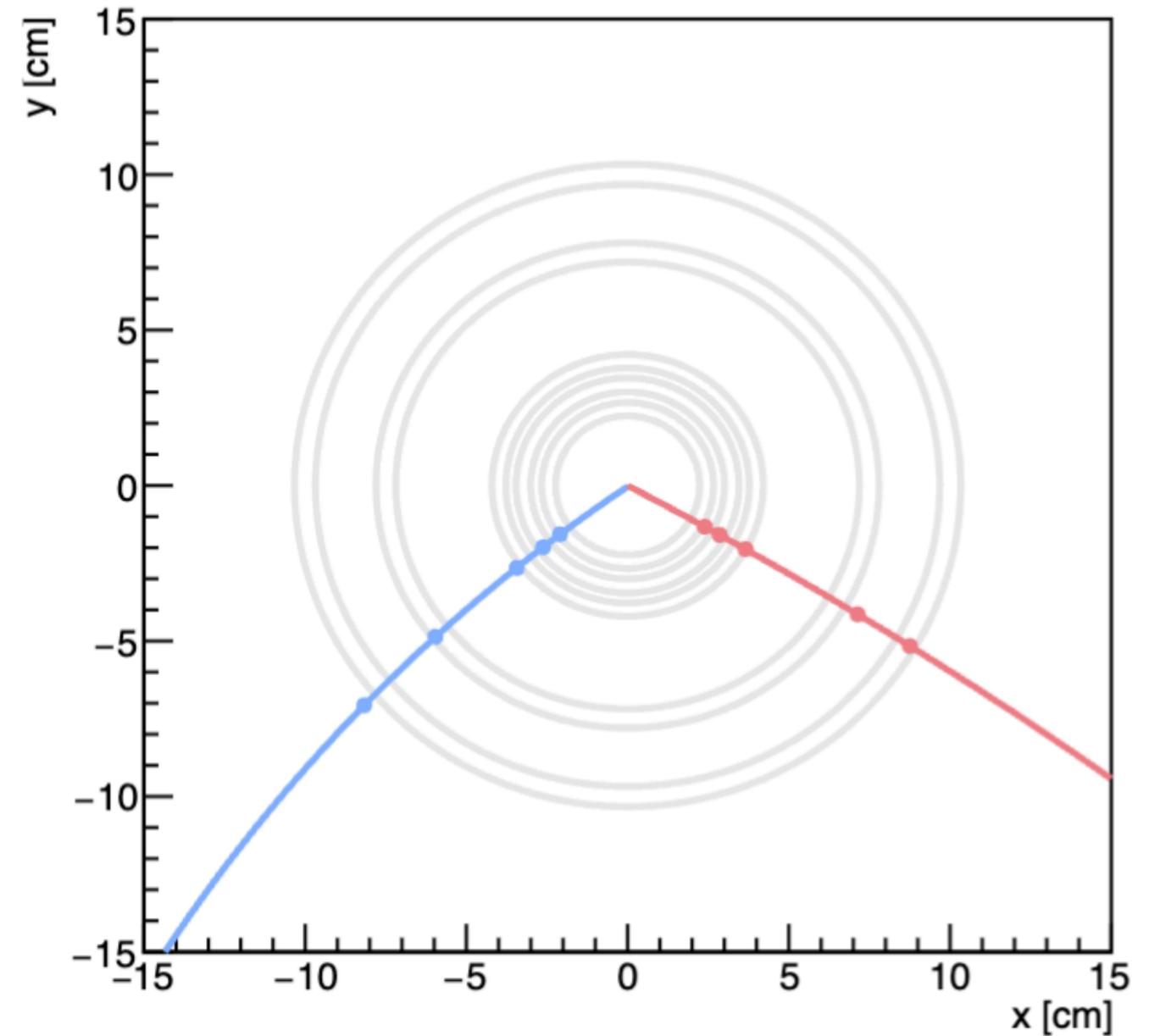
Dphi補正関数の作成

- Phi0 の値ごとの、各dphi 分布のピーク位置をプロット
- →phi0による関数として使えるように保存、これをdphi分布のズレ補正に使用



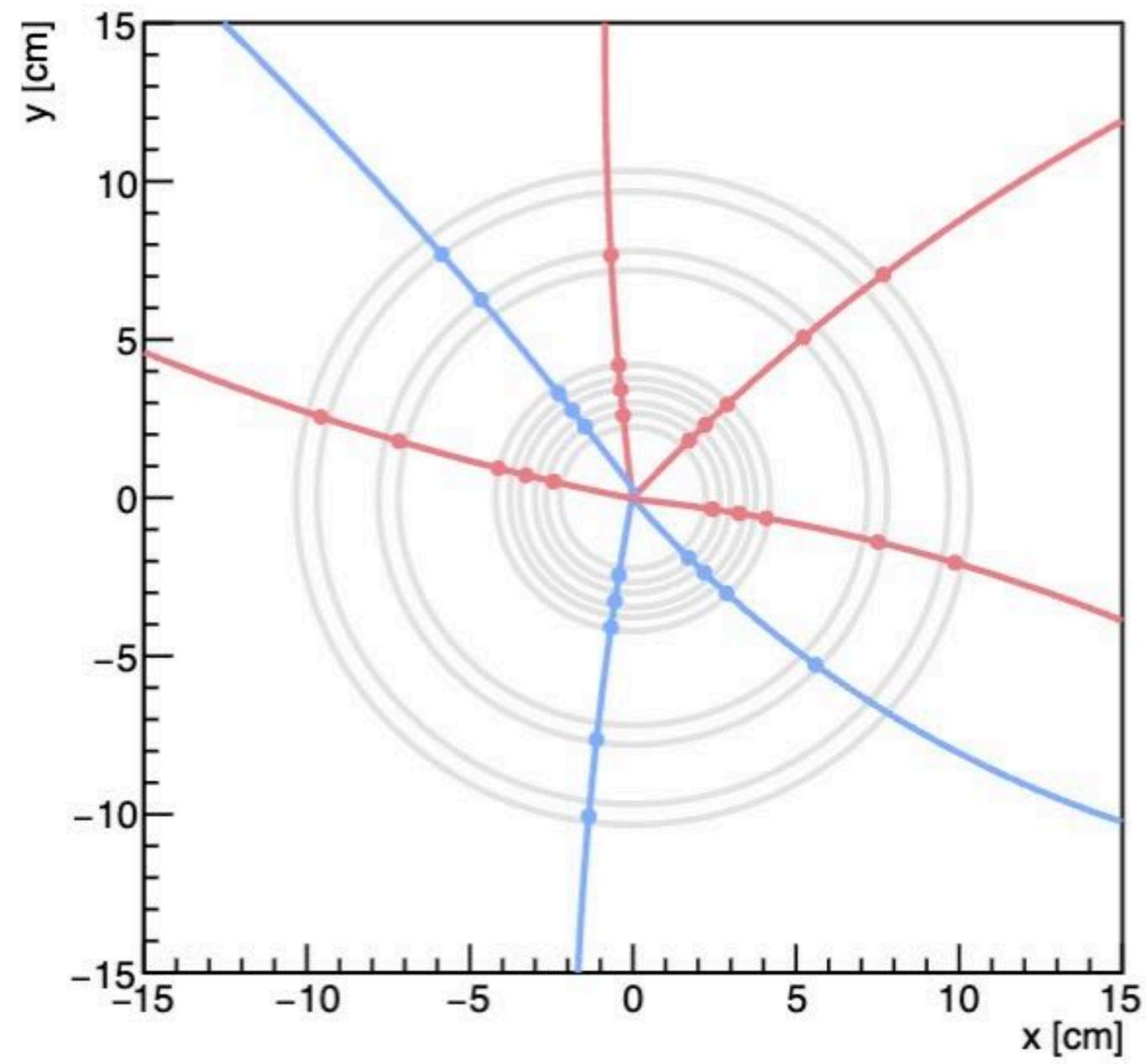


- ・ 電子・陽電子ペア
- ・ 赤：正電荷 青：負電荷
- ・



再構成された飛跡イベントディスプレイ- p+p sim

- ・ 2以上の粒子が生成
- ・ 赤：正電荷 青：負電荷



再構成された飛跡イベントディスプレイ- p+p data

- p+p simと同様に2以上の粒子
- 赤：正電荷 青：負電荷

