

LHC-ALICE実験における前方ミュオン粒子検出器 と既存測定系との飛跡マッチング効率の定量評価

高エネルギー物理学研究室

釜野楓



ALICE



MFT

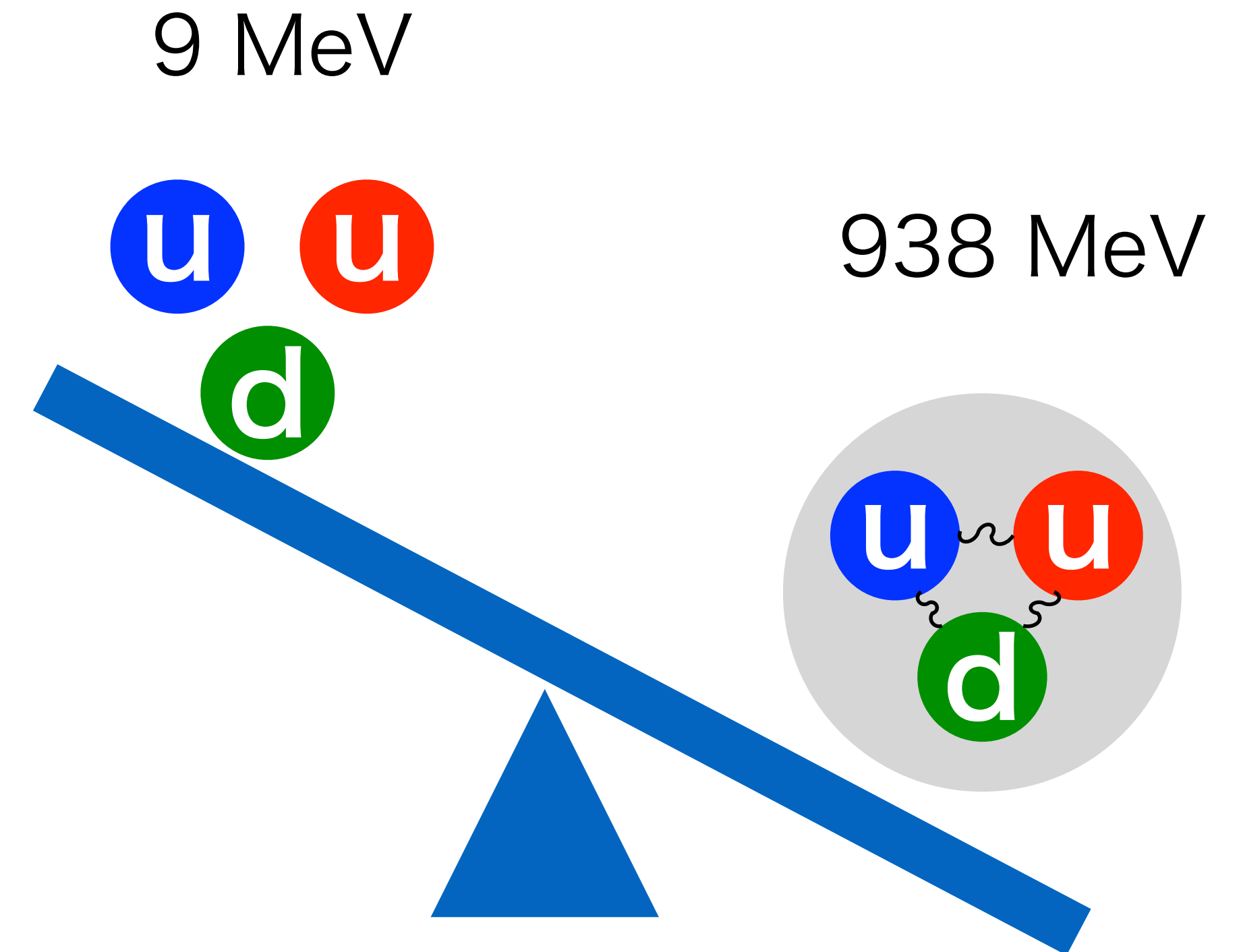
- ・ 研究背景
 - カイラル対称性の自発的破れによる質量獲得機構
- ・ LHC-ALICE実験
 - 既存ミュー粒子測定系 (Muon Spectrometer)
 - 前方ミュー粒子検出器 (Muon Forward Tracker)
- ・ MFT-MUON間の飛跡マッチング方法の開発と評価
 - single μ のみを考えた飛跡マッチング
 - バックグラウンドも考慮した飛跡マッチング
- ・ まとめ

クォークの裸の質量: $m_u \sim m_d \sim 3 \text{ MeV}$ (ヒッグス機構による質量獲得)

陽子の質量: $m_p \sim 938 \text{ MeV}$

裸のクォーク質量の合計に対して、
陽子の質量は約100倍

→ **カイラル対称性の自発的破れによる質量獲得**



- ・ ビッグバン後、宇宙の温度が下がる過程で真空から、クォーク対が凝縮した媒質で埋め尽くされている真空へ変化

→ **カイラル対称性の破れ**

- ・ クォークが運動するとき、クォーク凝縮による抵抗を受ける

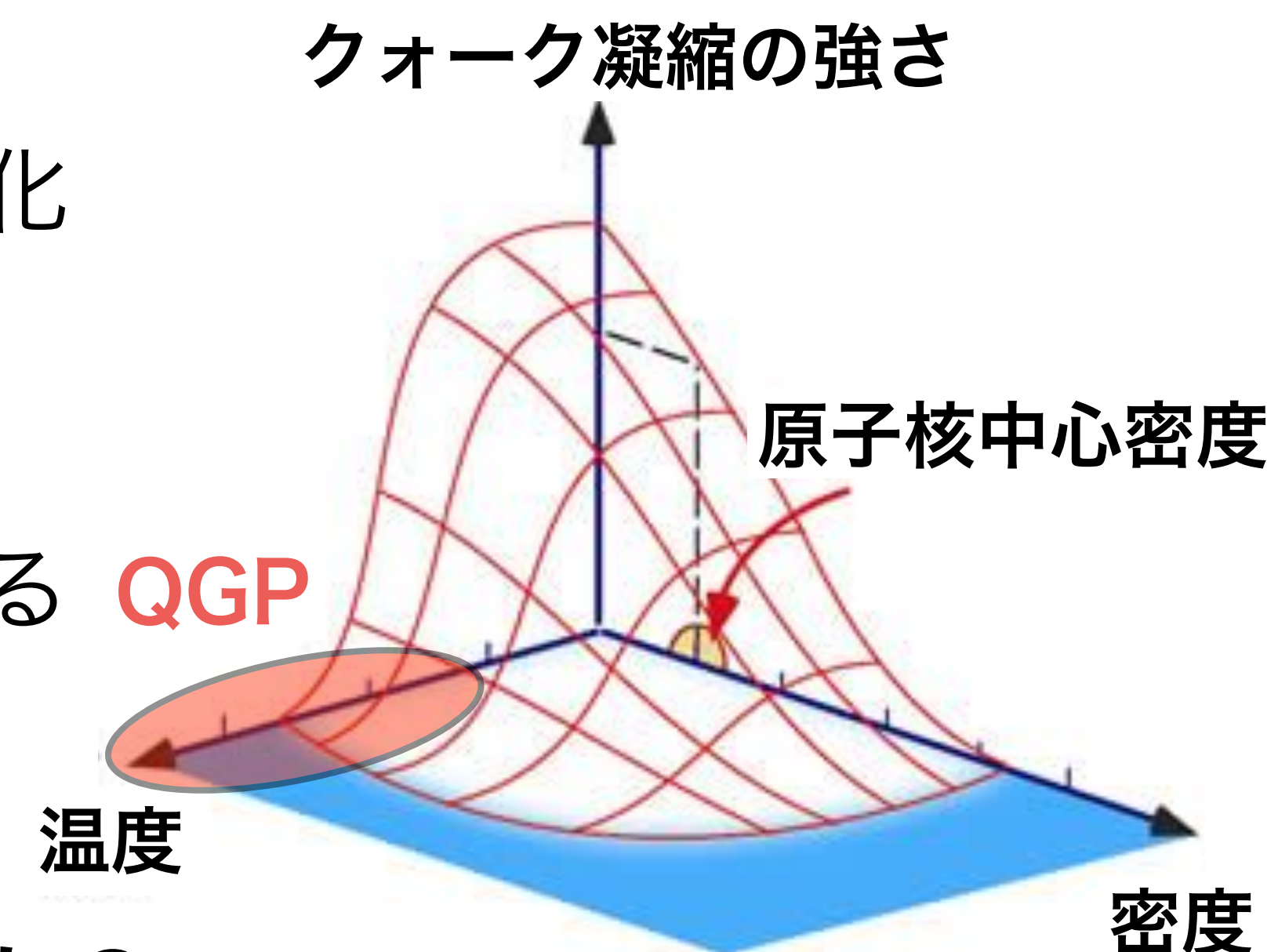
→ **カイラル機構による質量獲得**

- ・ **カイラル機構による質量獲得を調べるには何を測定すべきか？**

- クォーク凝縮の強さは真空の温度や密度に依存する

→ 高温高密度状態では質量が回復する

→ **実験的に高温高密度状態を作り出し、媒質中のクォークの質量変化を測定**



*高温高密度状態の例: クォークグルーオンプラズマ(QGP), 原子核など

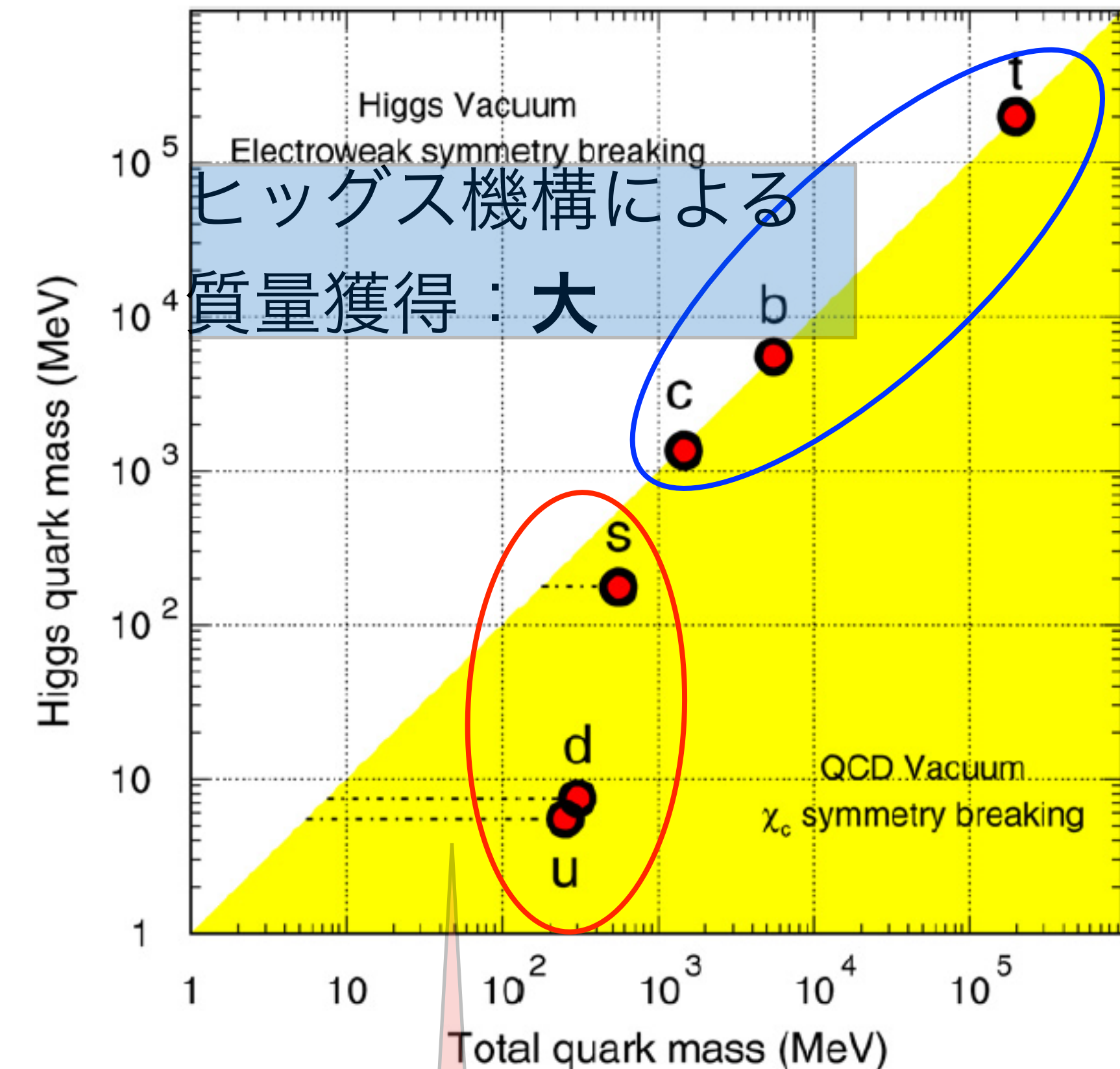
高温高密度媒質中でクォークの質量は軽くなると言われている

測定対象: ω 中間子, ϕ 中間子

- 短寿命粒子 \rightarrow 媒質中で崩壊
- u, d, s クォークで構成される
- μ 粒子対への崩壊モードを持つ ($\omega \rightarrow \mu\mu$, $\phi \rightarrow \mu\mu$)
 \rightarrow 媒質中で強い相互作用による散乱を受けない

媒質中での $m_{\mu\mu}$ の不変質量分布の変化を観測する

Phys. Lett. B 647 (2007) 366-370

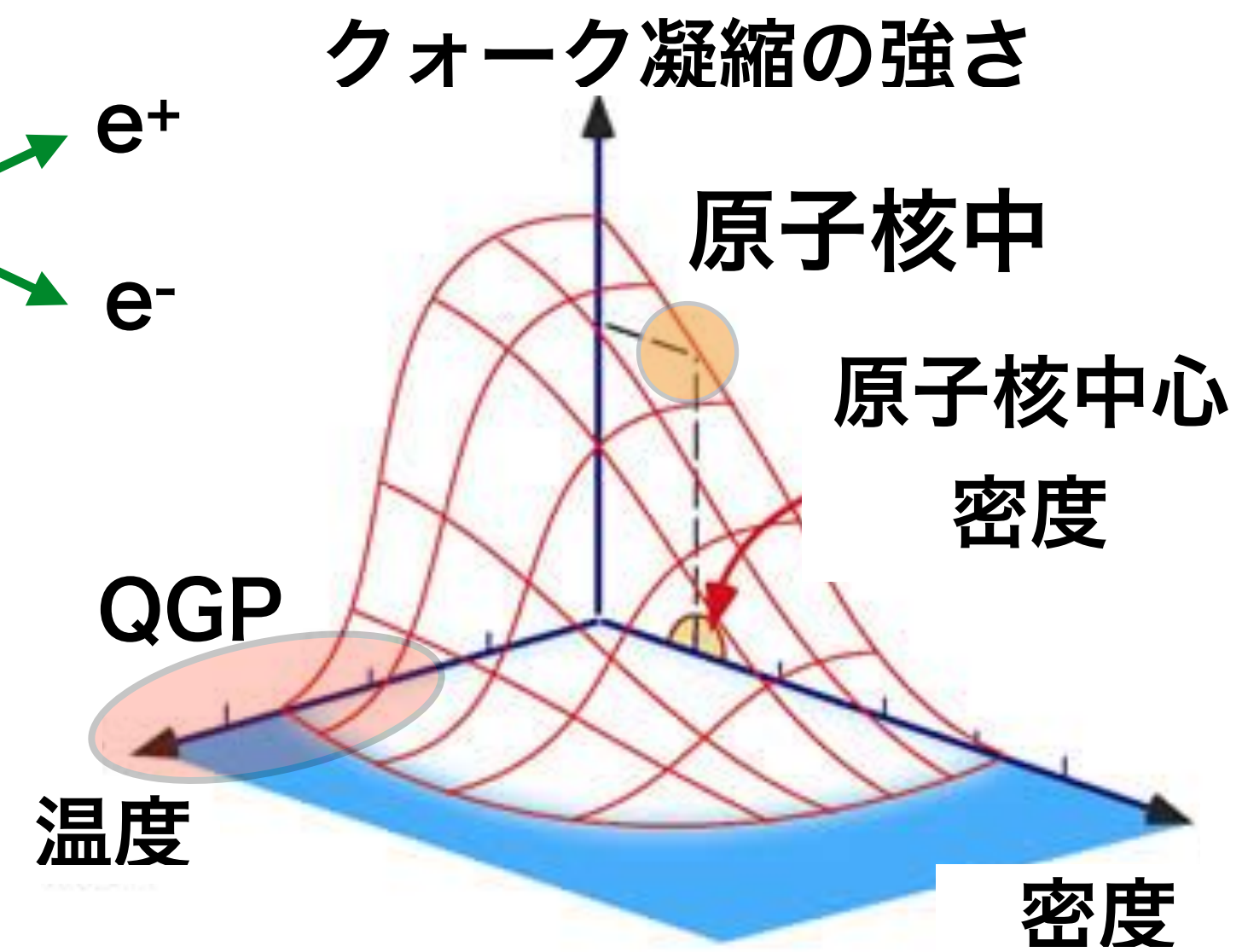
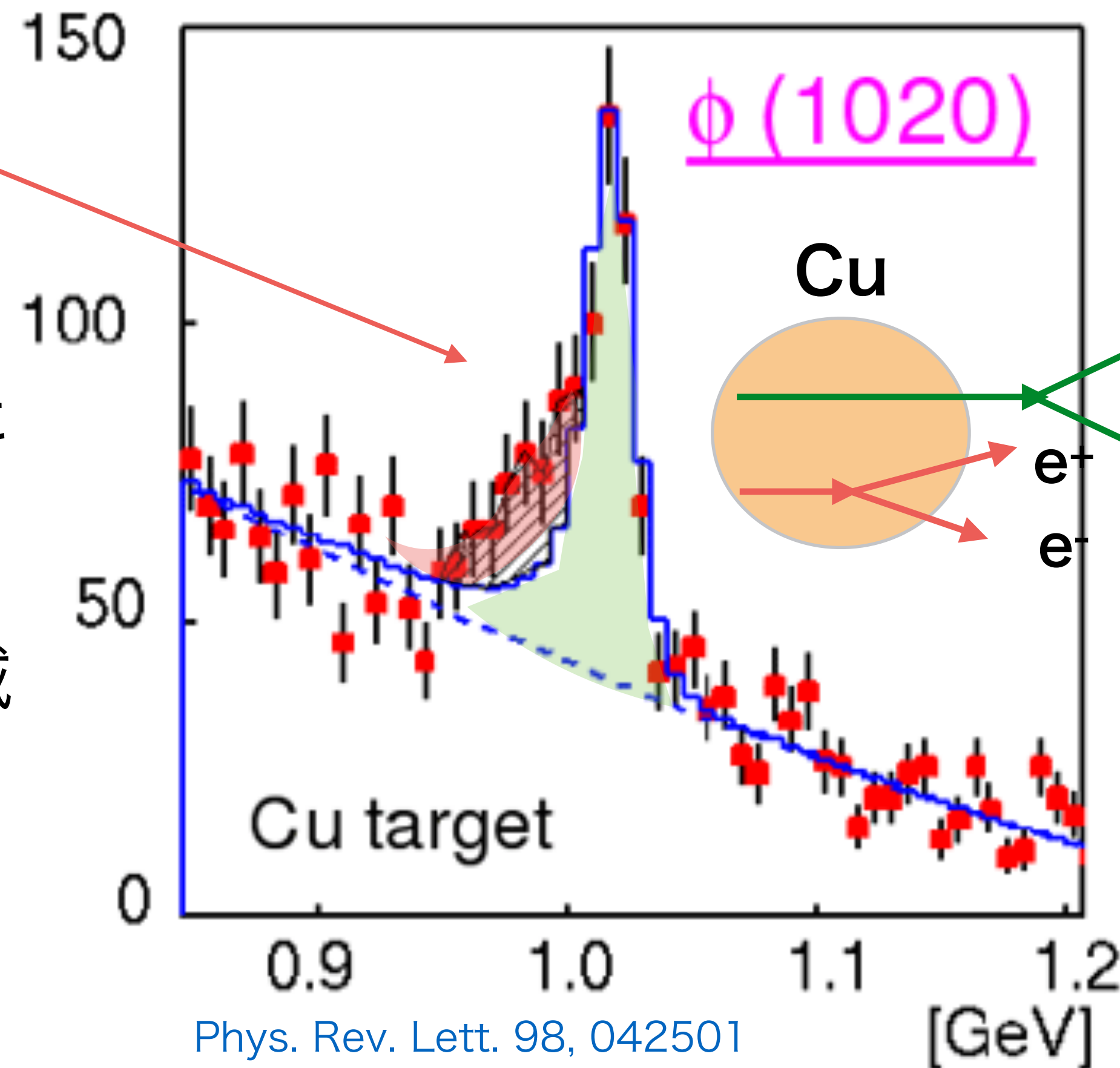


- ヒッグス機構による質量獲得: 小
- カイラル対称性の自発的破れ
に起因する質量獲得: 大

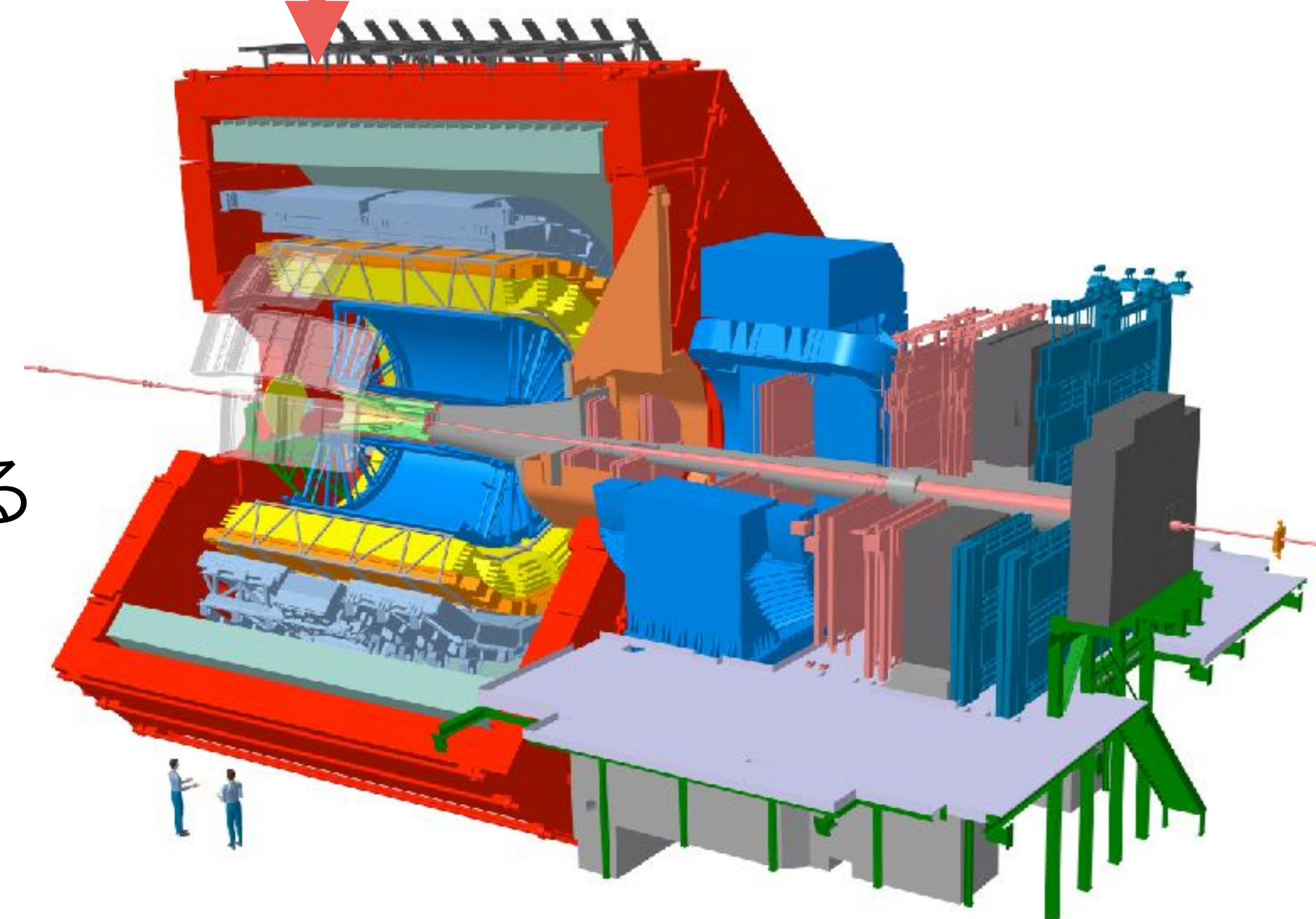
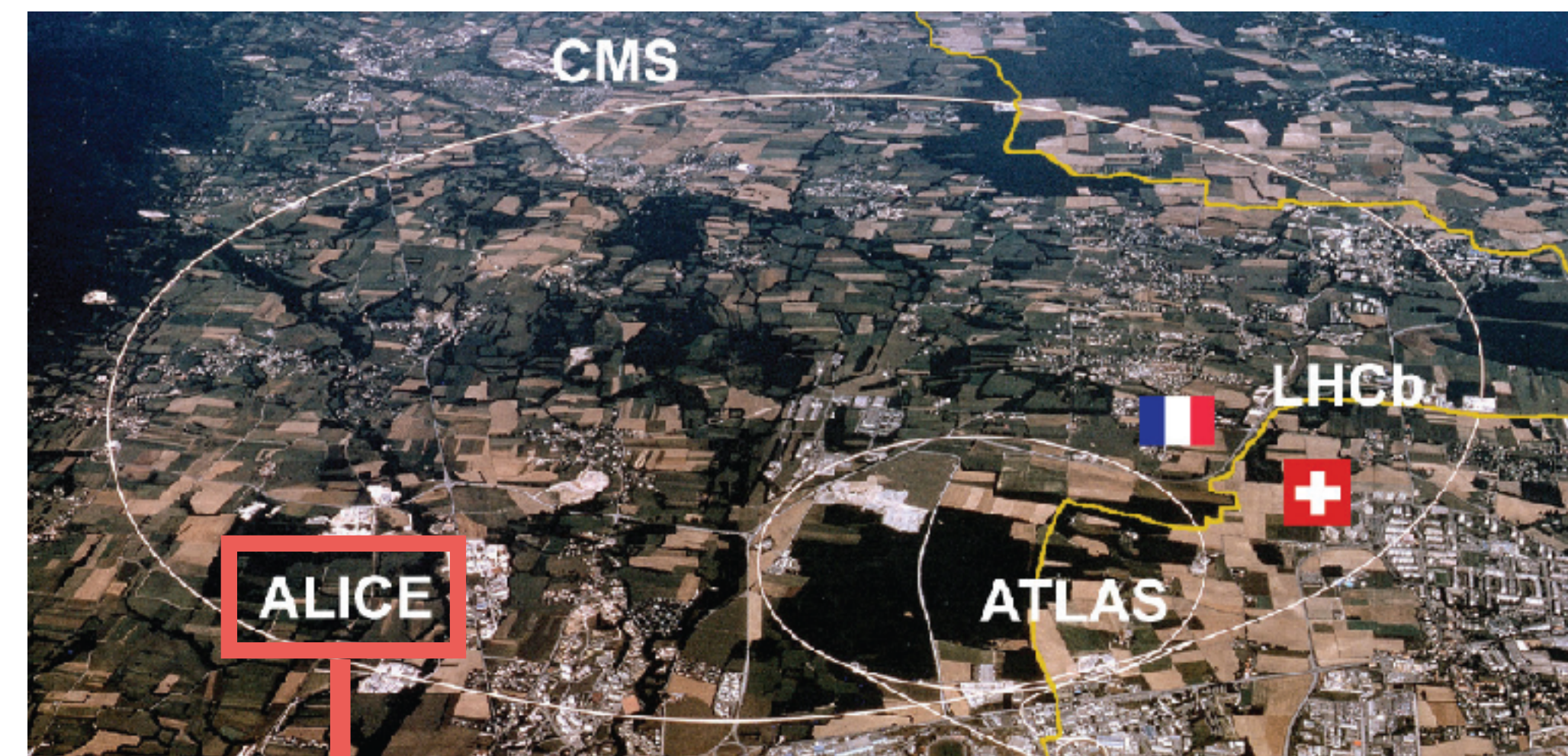
p+Cu固定標的実験 (Cu固定標的に12GeVのpビームを入射)
Cu原子核中で e^+e^- に崩壊した ϕ 中間子の質量変化測定

Breit Wigner分布では説明できないピークの広がりが見られた

- 質量変化の兆候が見えられた
- より高統計測定が必要
- クォーク凝縮がより弱い領域で質量変化を観測したい
- 高温状態での質量変化はまだ観測されていない



- ・ LHC加速器
 - 世界最大、最高エネルギーの粒子加速器
(Pb-Pb ~ 5.5 TeV, p-p ~ 13TeV)
- ・ ALICE実験
 - 重イオン衝突で生成される超高温媒質中での物理現象の研究
 - 現在、検出器のアップグレードを行なっている



Muon Spectrometer (MUON)

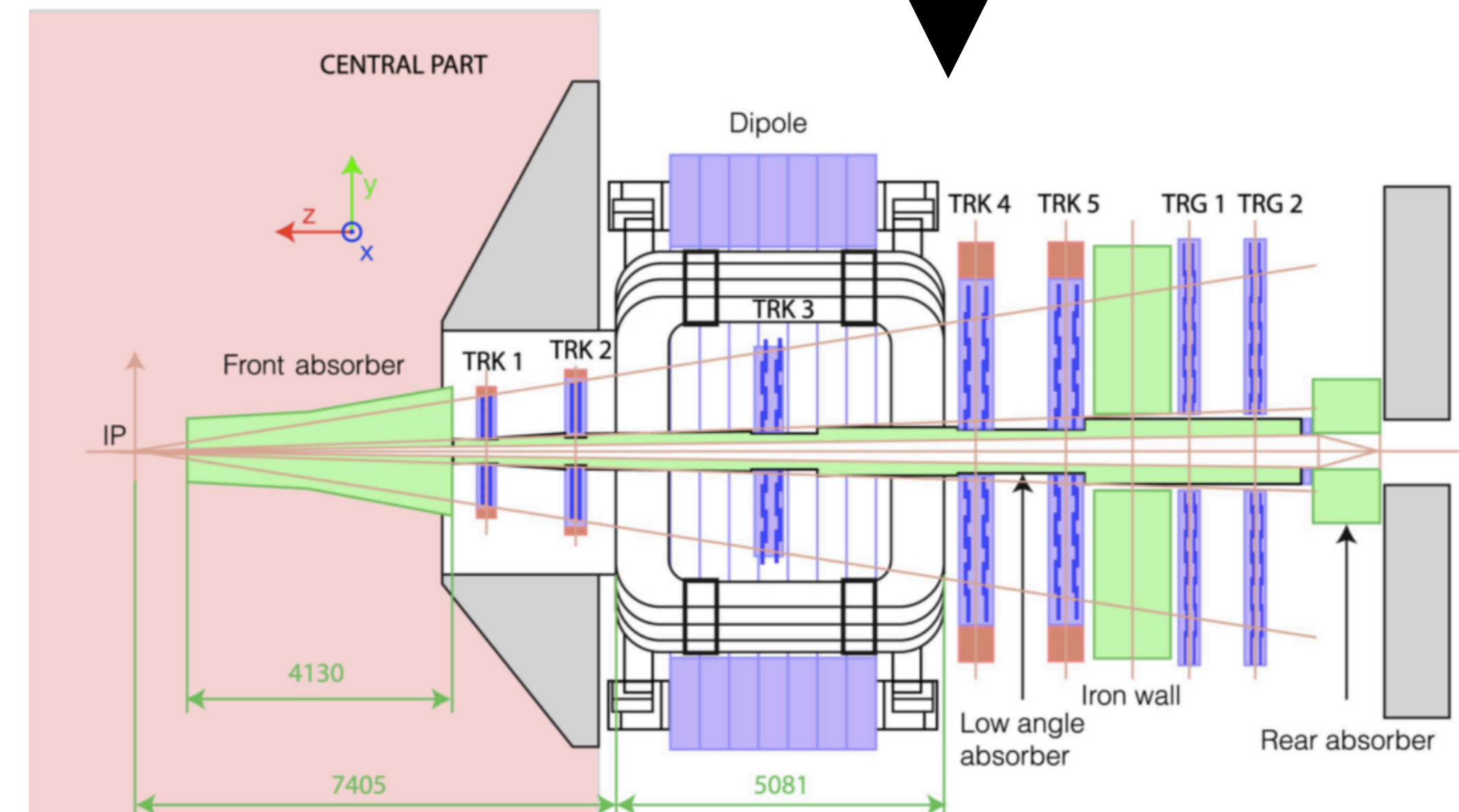
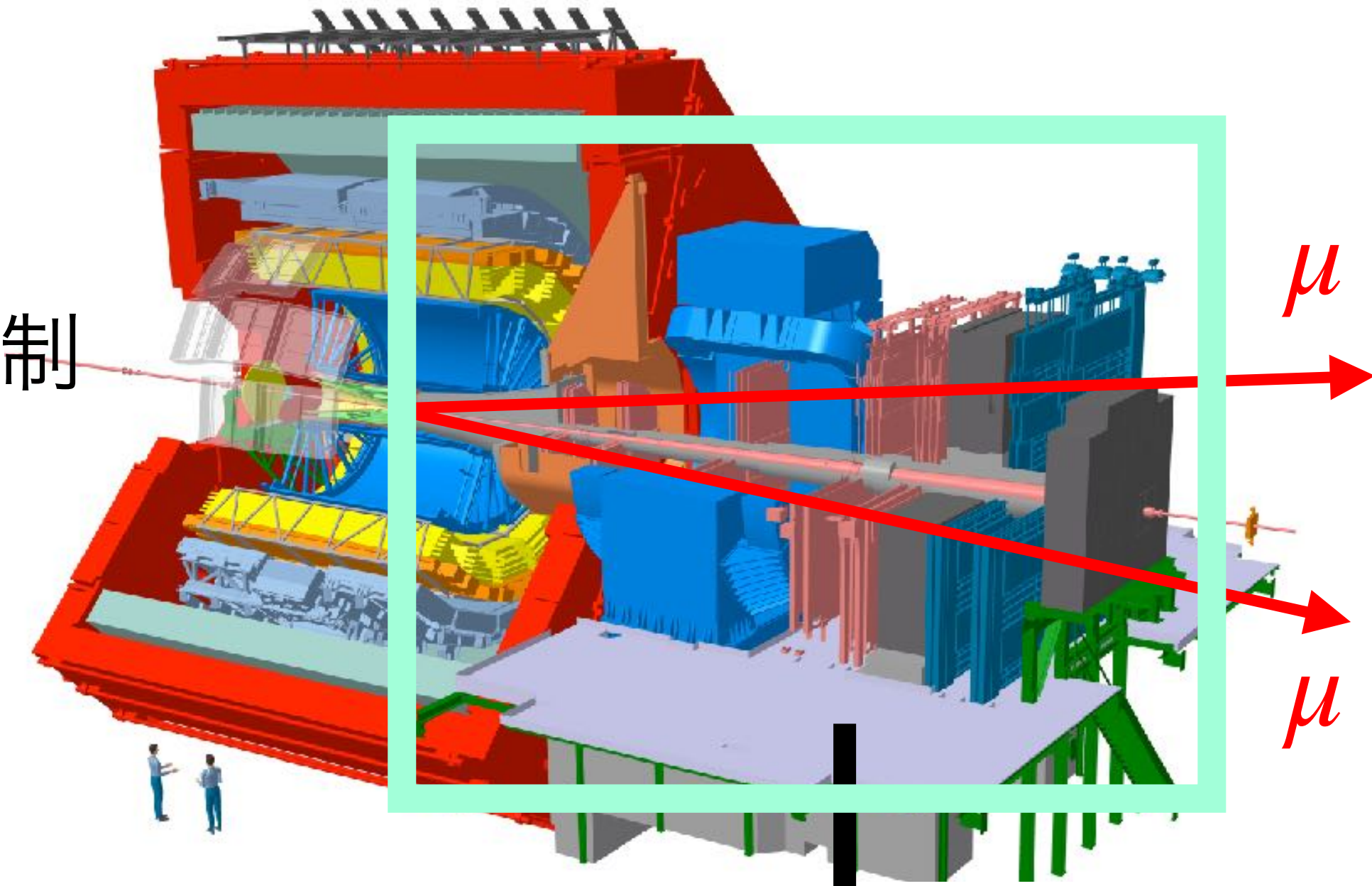
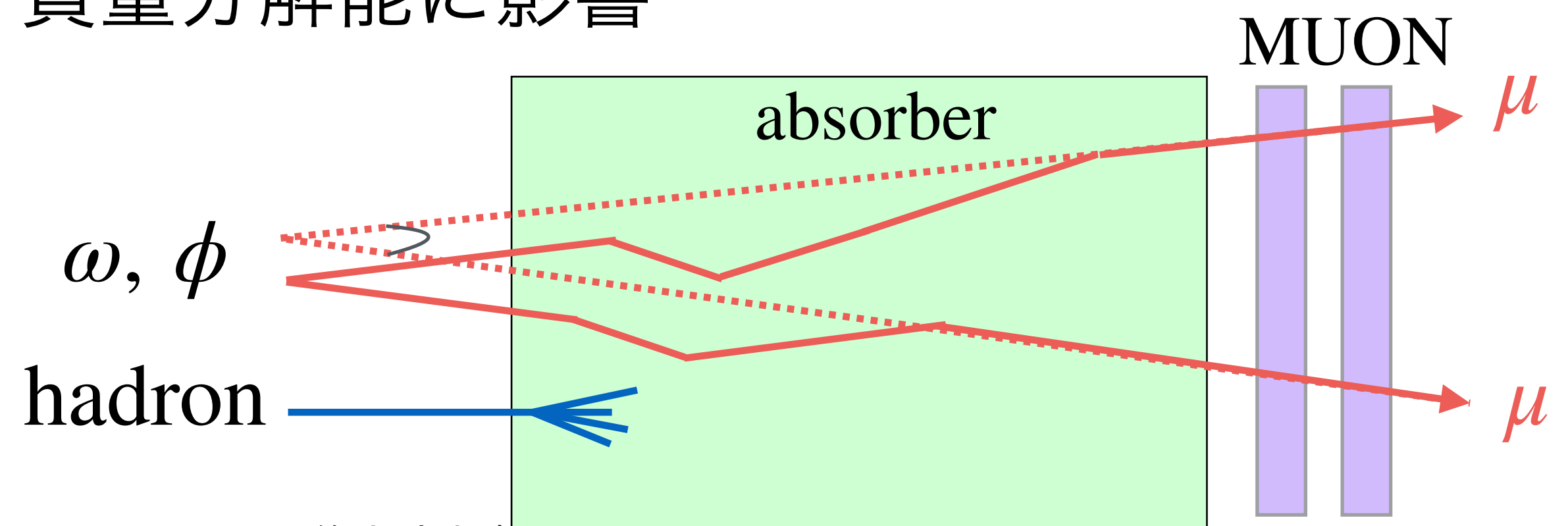
- 既存の μ 粒子検出器
- 4.13m ($60X_0$) のabsorberにより μ 以外の粒子を抑制

課題:

Absorber内での多重散乱の効果により、衝突点領域での飛跡情報が不鮮明になる

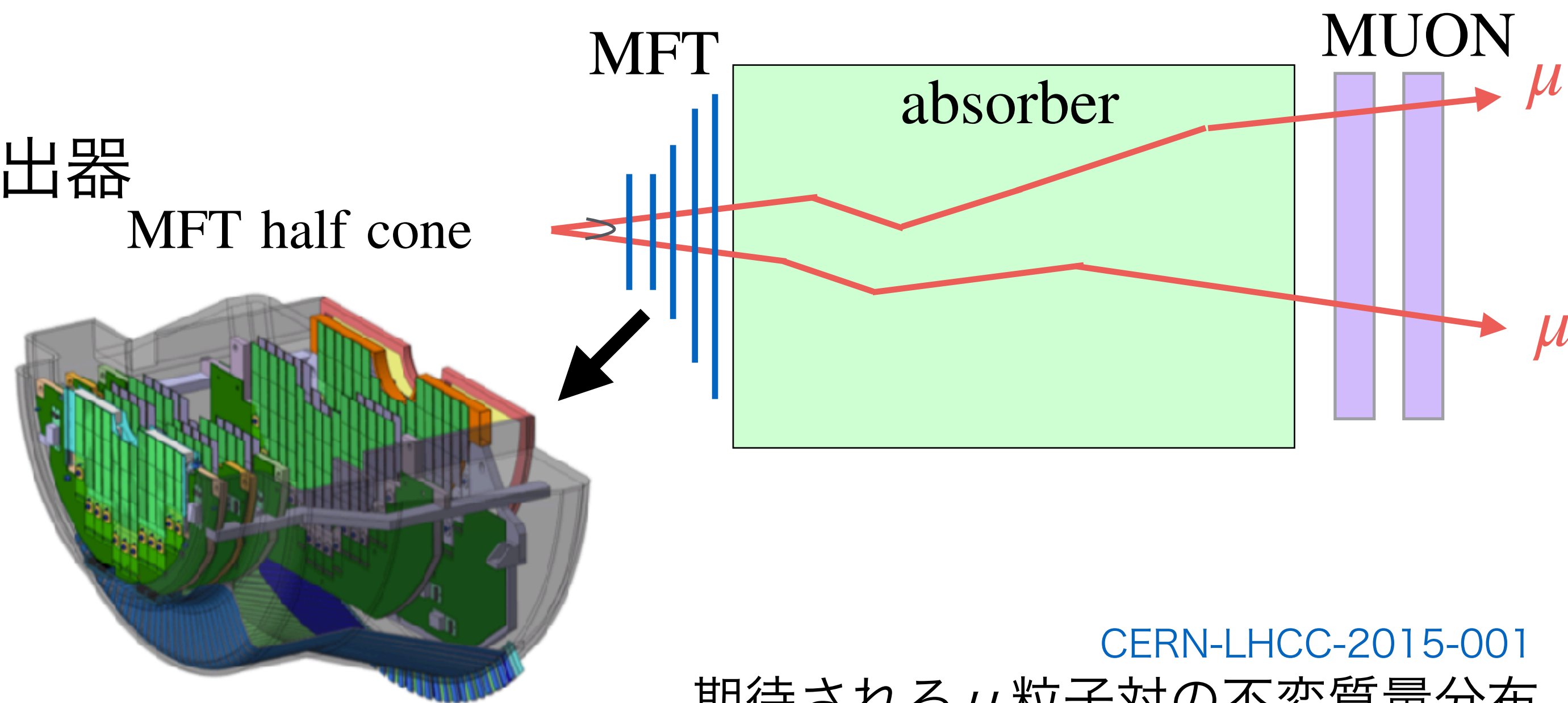


低質量 μ 粒子対の崩壊角の正確な測定ができない
質量分解能に影響



Muon Forward Tracker (MFT)

- 新たに導入されるシリコンピクセル検出器
pixel size: $29 \times 27 \mu\text{m}^2$
- 衝突点とabsorberの間に導入
感度領域: $-3.6 < \eta < -2.45$

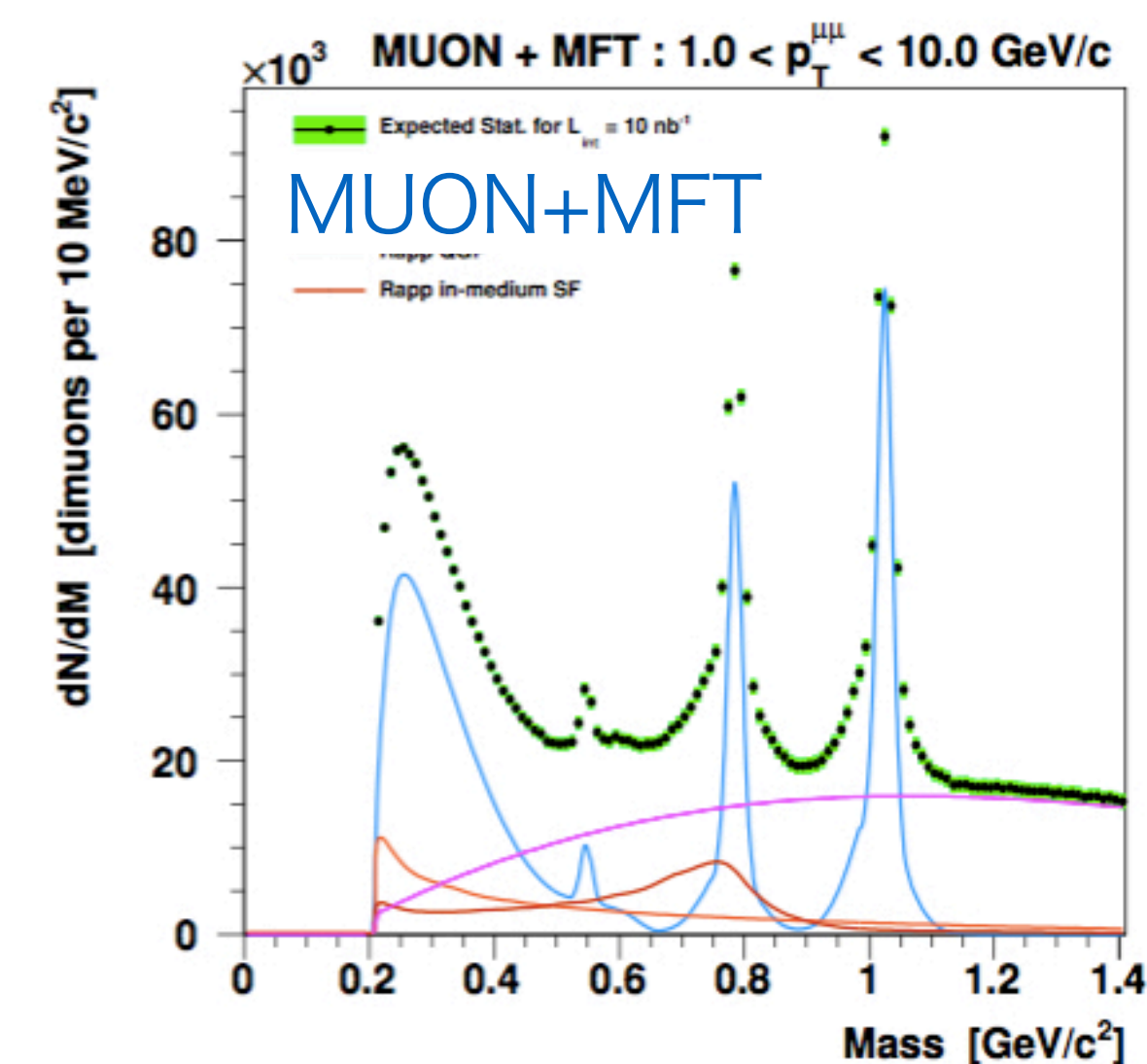
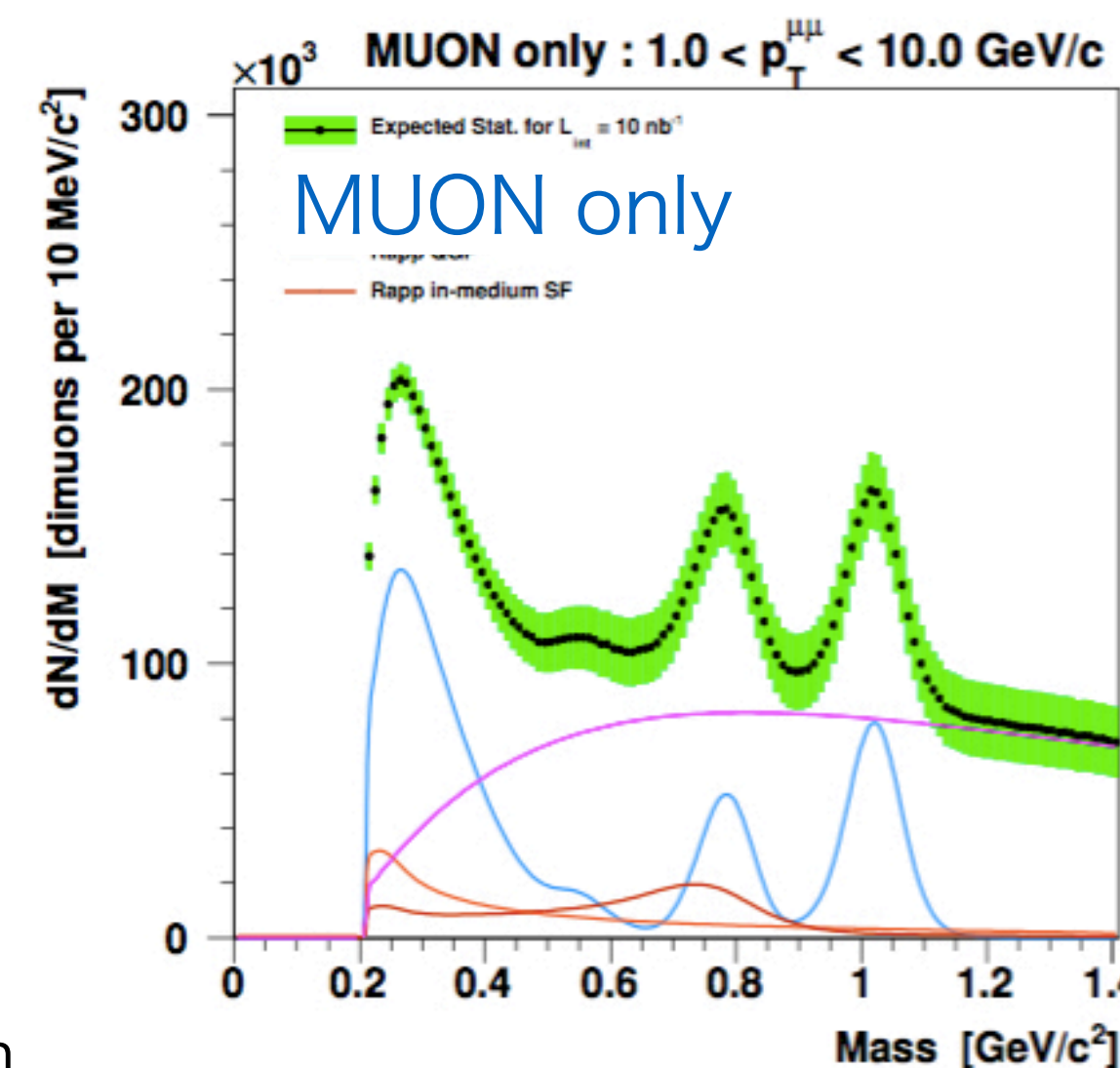


MFT導入による利点:

MFT-MUON間の飛跡マッチングにより、
衝突点領域での飛跡情報が得られる
→低質量 μ 粒子対の質量分解能向上

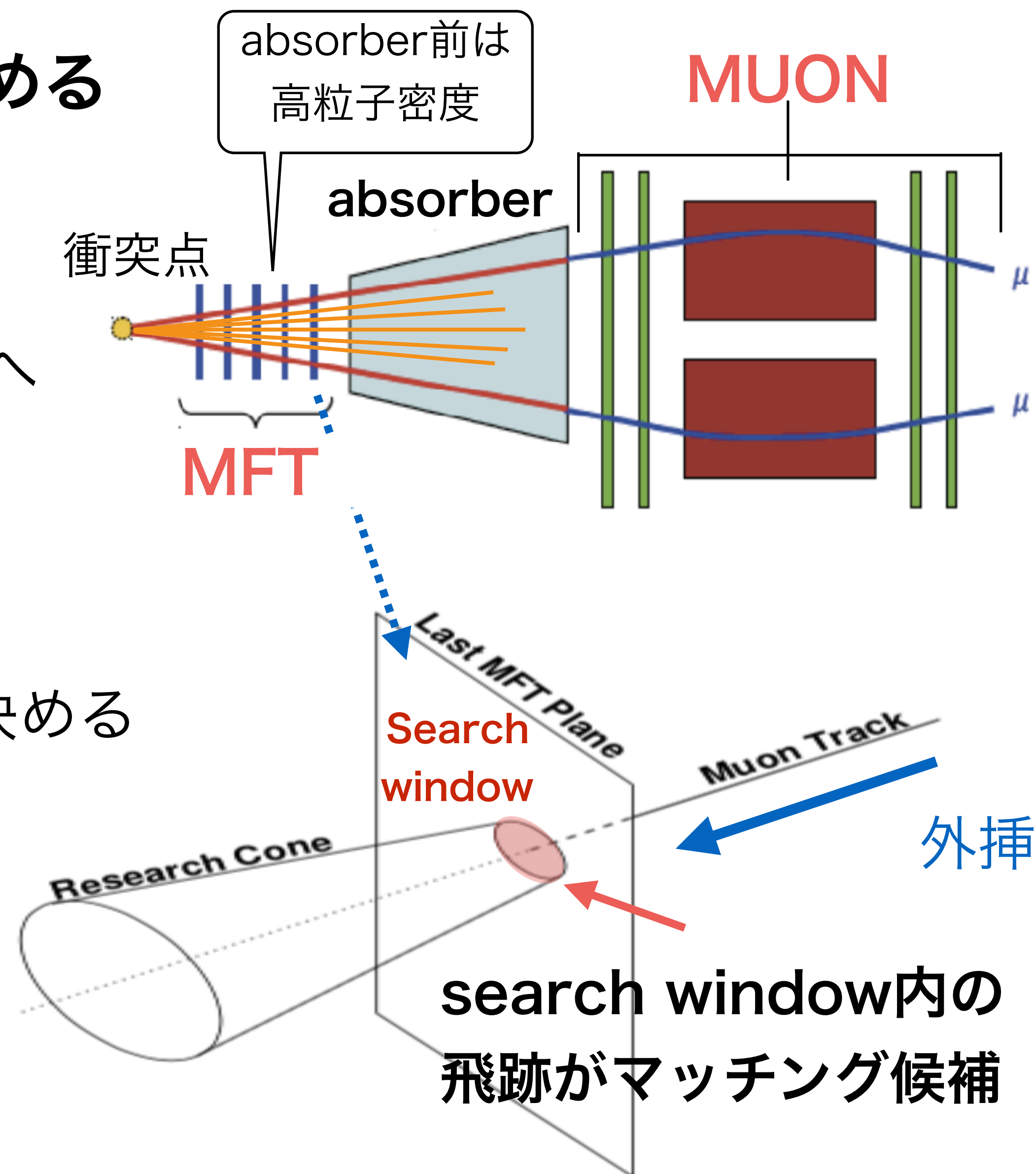
*トラッキングパフォーマンスは
MFT-MUON間の飛跡マッチングにより決定

CERN-LHCC-2015-001
期待される μ 粒子対の不変質量分布



MUON側の飛跡に対応するMFT側の飛跡を決める

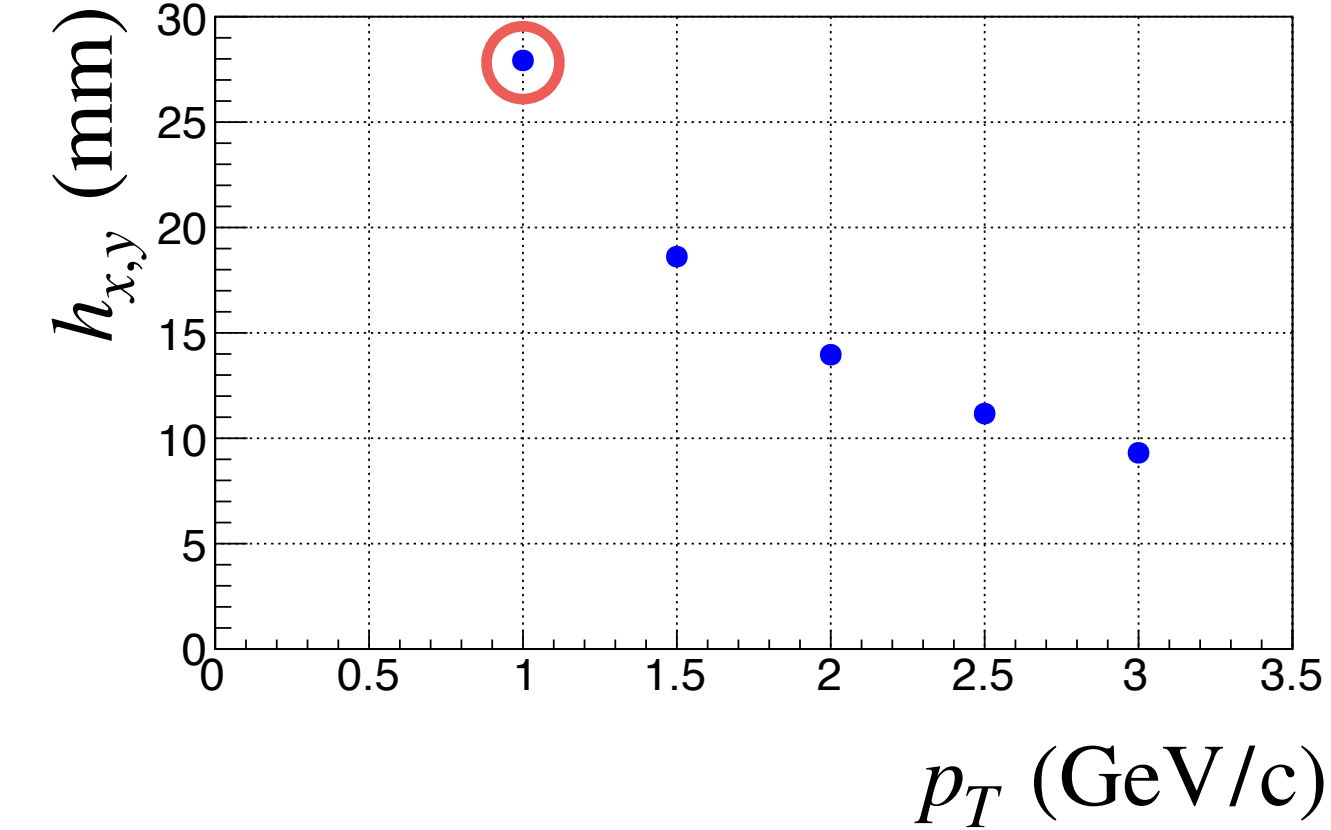
1. 飛跡はMFTとMUONそれぞれで再構成する
2. MUONの飛跡はabsorberを通して、衝突点の方へ外挿する
3. MFTの一番absorberに近い層で、absorberでの多重散乱を考慮し、search windowの大きさを決める
4. search windowの中でマッチングパラメータが一番良いMFTの飛跡を選び、結合



中心Pb-Pb衝突での一本のMUONの飛跡に対するMFTの飛跡の候補数<N>

$h_{x,y}$: x, y方向それぞれのsearch window

(多重散乱計算より)



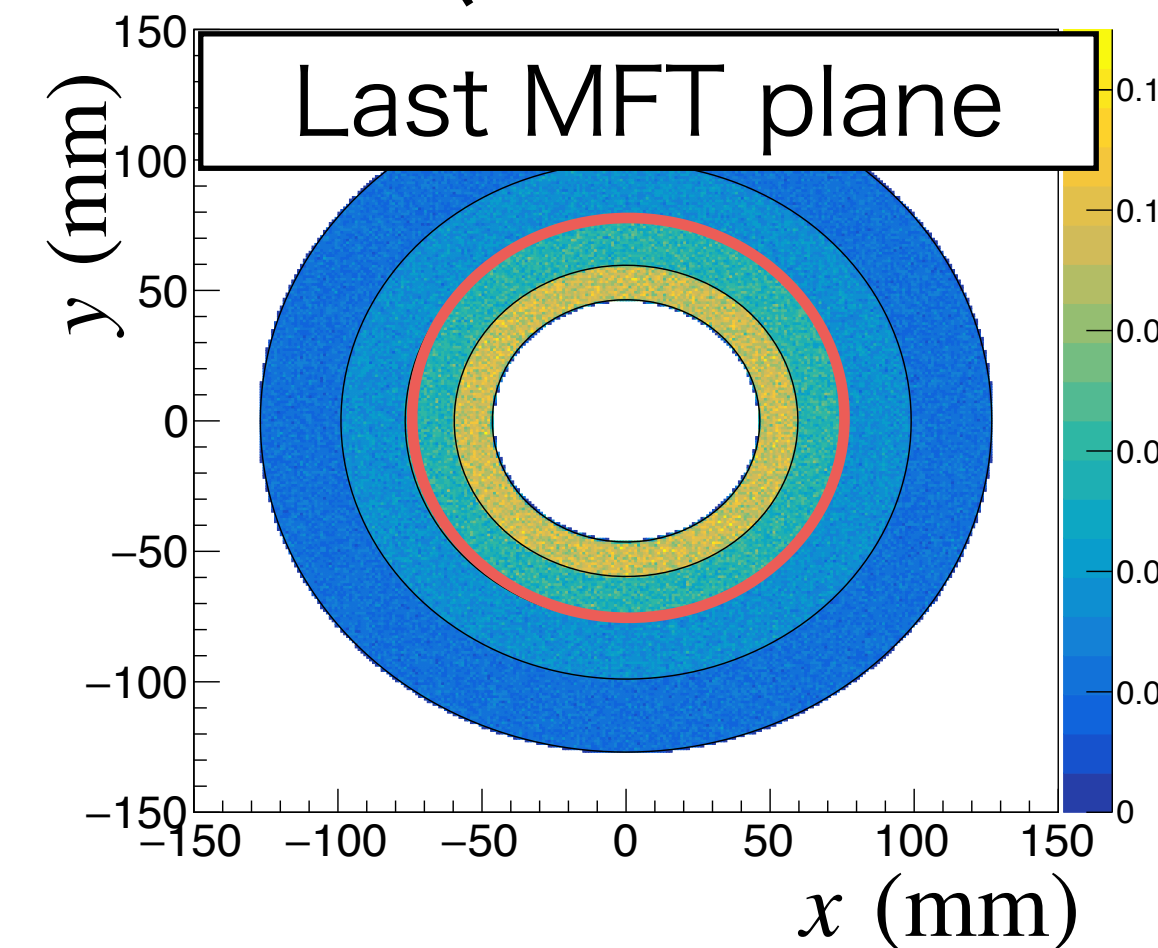
$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$

$$h_x = h_y = \frac{1}{\sqrt{3}} x \theta_0 \sim 29 \text{ (mm)}$$

$\sigma(r)$: 単位面積当たりの荷電粒子数

(実験データより)

Phys. Lett. B772 (2017)
567-577



$$-3.5 < \eta < -2.5$$

Multiplicity: $\sim 1.7 \cdot 10^3$

Occupancy: $\sim 3.0 \cdot 10^{-5}$

$$\sigma_{\eta=3} \sim 0.049 \text{ (mm}^{-2}\text{)}$$

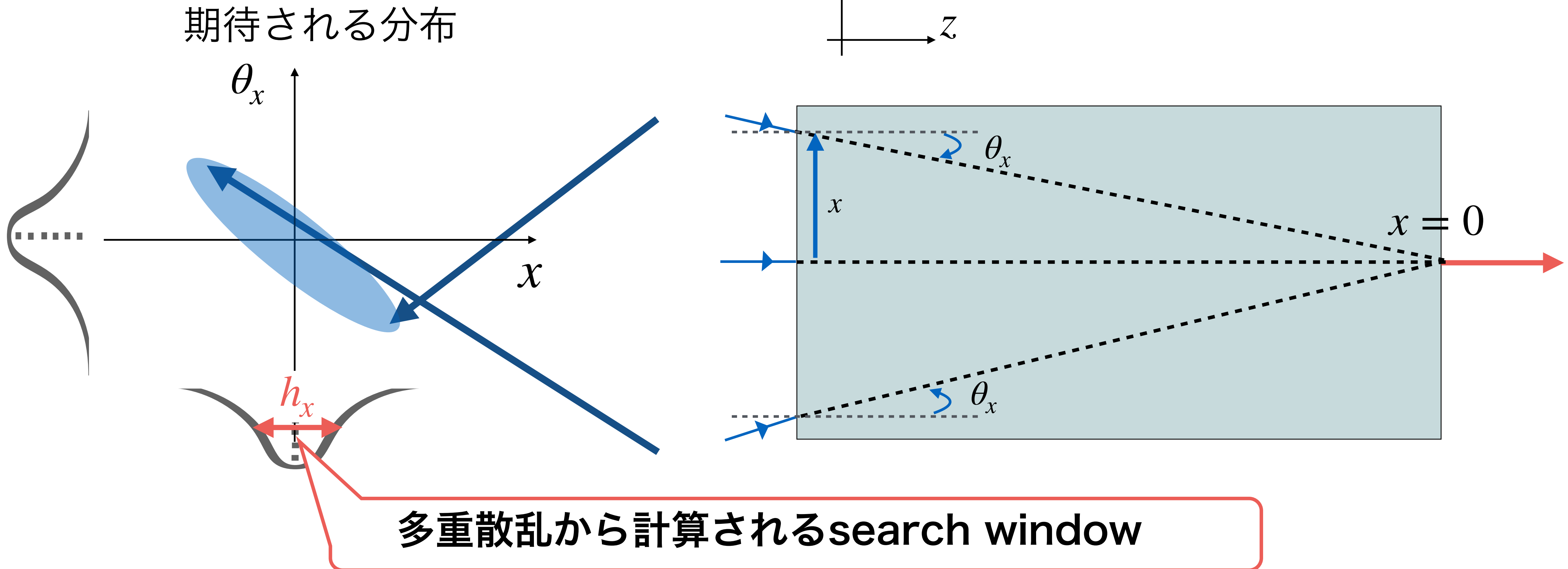
$$p_T = 1 \text{ GeV/c at } \eta = -3$$

$$\langle N \rangle = \sigma(r) * h_x * h_y = 0.049(\text{mm}^{-2}) * 29(\text{mm}) * 29(\text{mm}) \sim 41$$

← 候補数が多すぎる

- 候補数を減らす必要がある → 位置と角度の相関を用いる

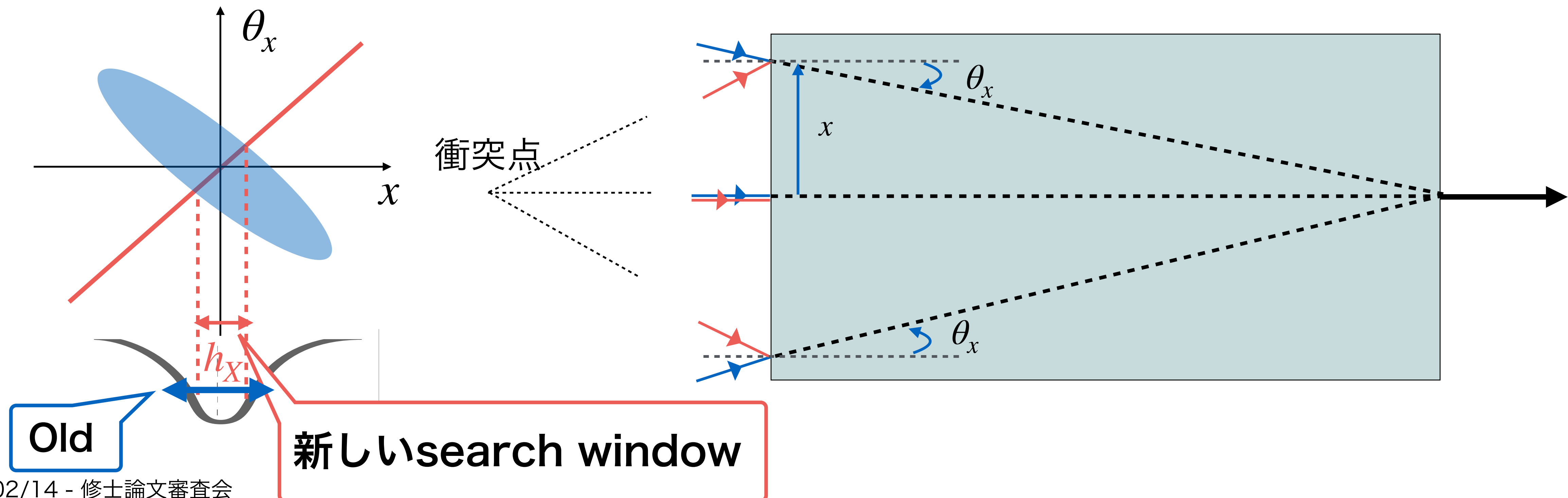
Absorberの出口で $x=0$ を通る μ 粒子はabsorber入口で以下のような位置と角度の相関分布を持つ

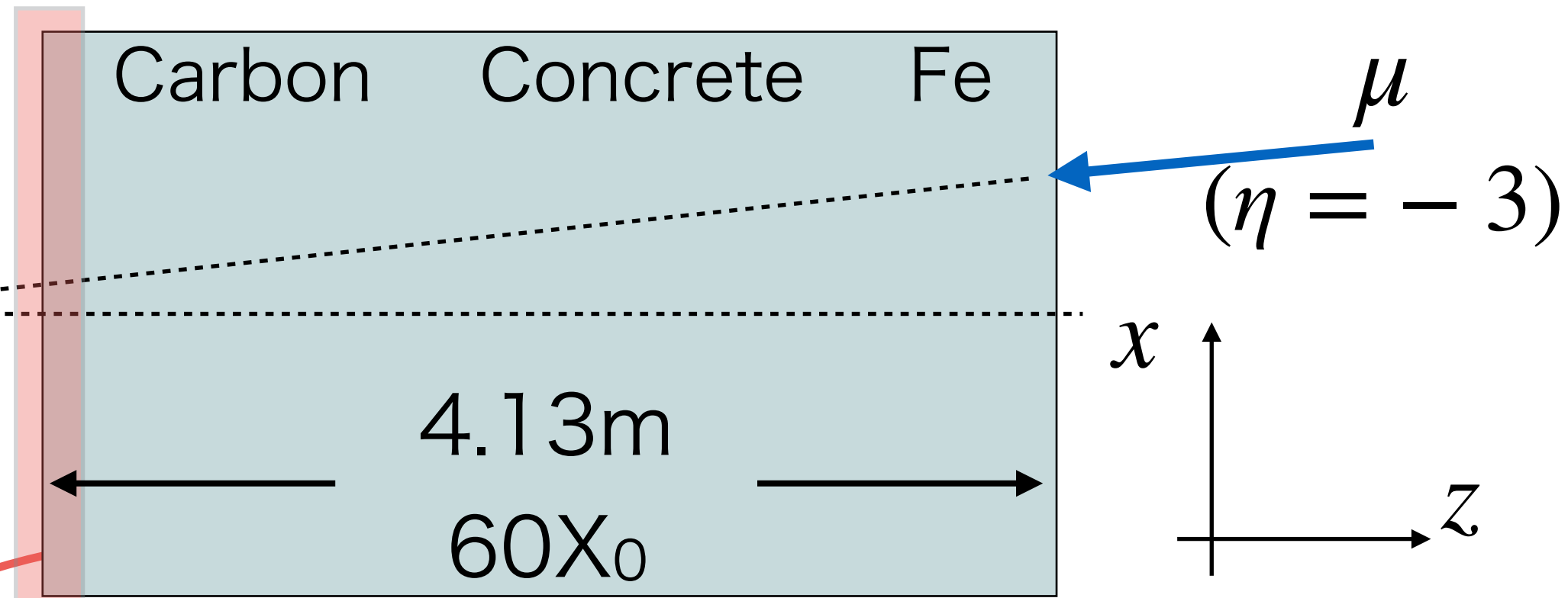


衝突点から来る μ 粒子(右図赤矢印)のみに興味がある

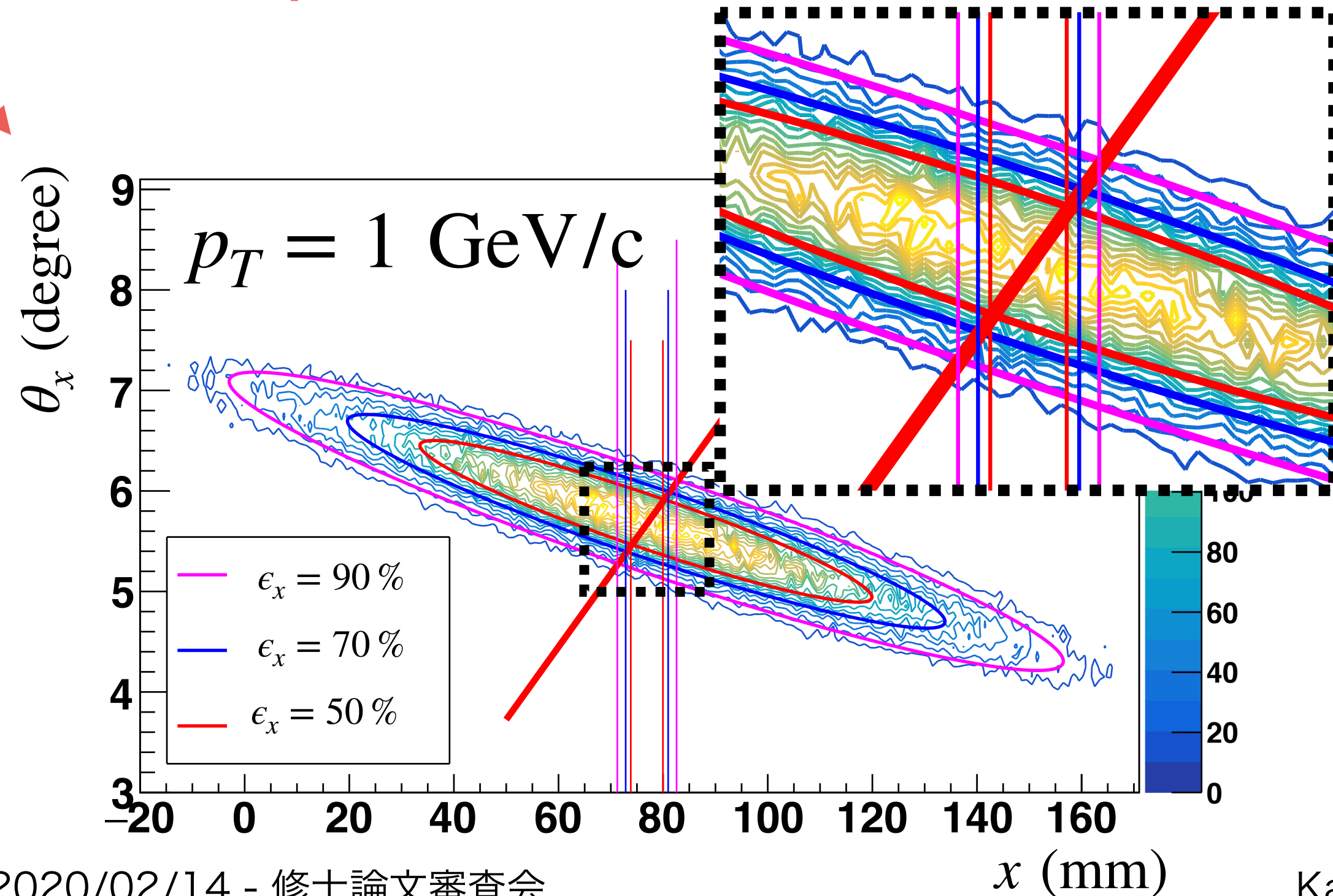
→ 左図赤線と分布との重なりのみが考慮しなければならない領域になる
(= 新しいsearch window)

位置と角度の相関分布を得るために、シミュレーションを行った





Output: Correlation distribution



absorberでの μ 粒子の多重散乱の効果を Geant4を用いて、シミュレーションした μ 粒子をabsorber右側 $\eta = -3$ ($\theta \sim 5.7^\circ$)の位置から衝突点に向けて入射

- 1次元のefficiencyに対応する位置角度の相関分布と赤線(衝突点から来る μ 粒子)との重なりをsearch windowとして定義

- 二次元のefficiencyを以下のように

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_x * \epsilon_y$$

ϵ_x, ϵ_y はそれぞれ1次元のefficiency

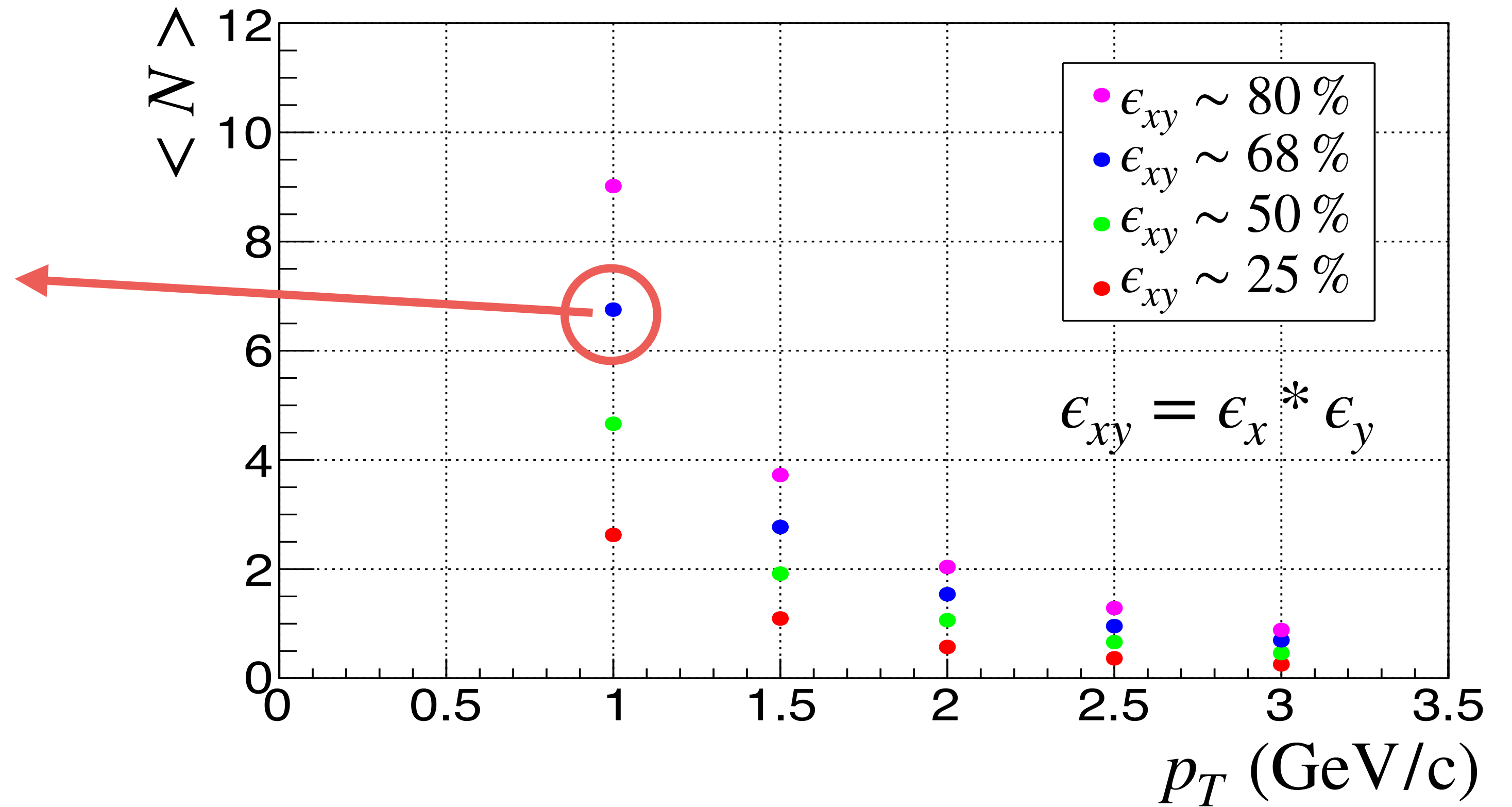
位置角度相関から求めたsearch window内の飛跡の候補数 $\langle N \rangle$ はいくつか？

$p_T = 1 \text{ GeV}/c$ at $\eta = -3$

- $\epsilon_{xy} \sim 68\%$ (1次元で82%に相当)
 $\langle N \rangle = 0.049 * 12 * 12 \sim 6.8$

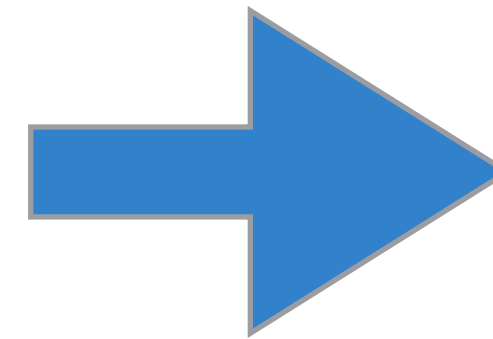
- 相関を使わない場合
 $\langle N \rangle = 0.049 * 29 * 29 \sim 41$

位置と角度の相関関係を使うと、
 search windowが小さくなり、
 その結果、飛跡候補数を約1/6に減らすことができる

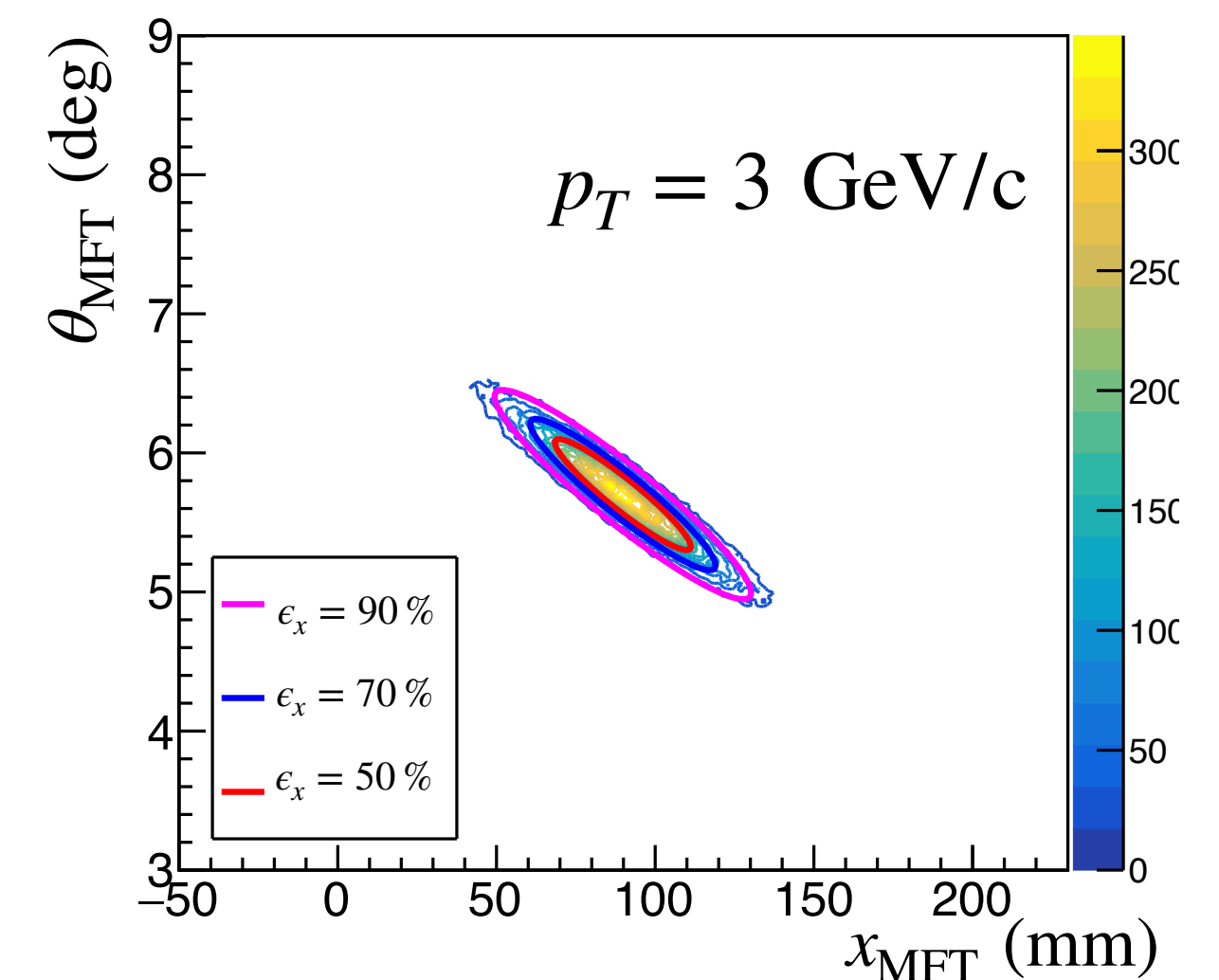
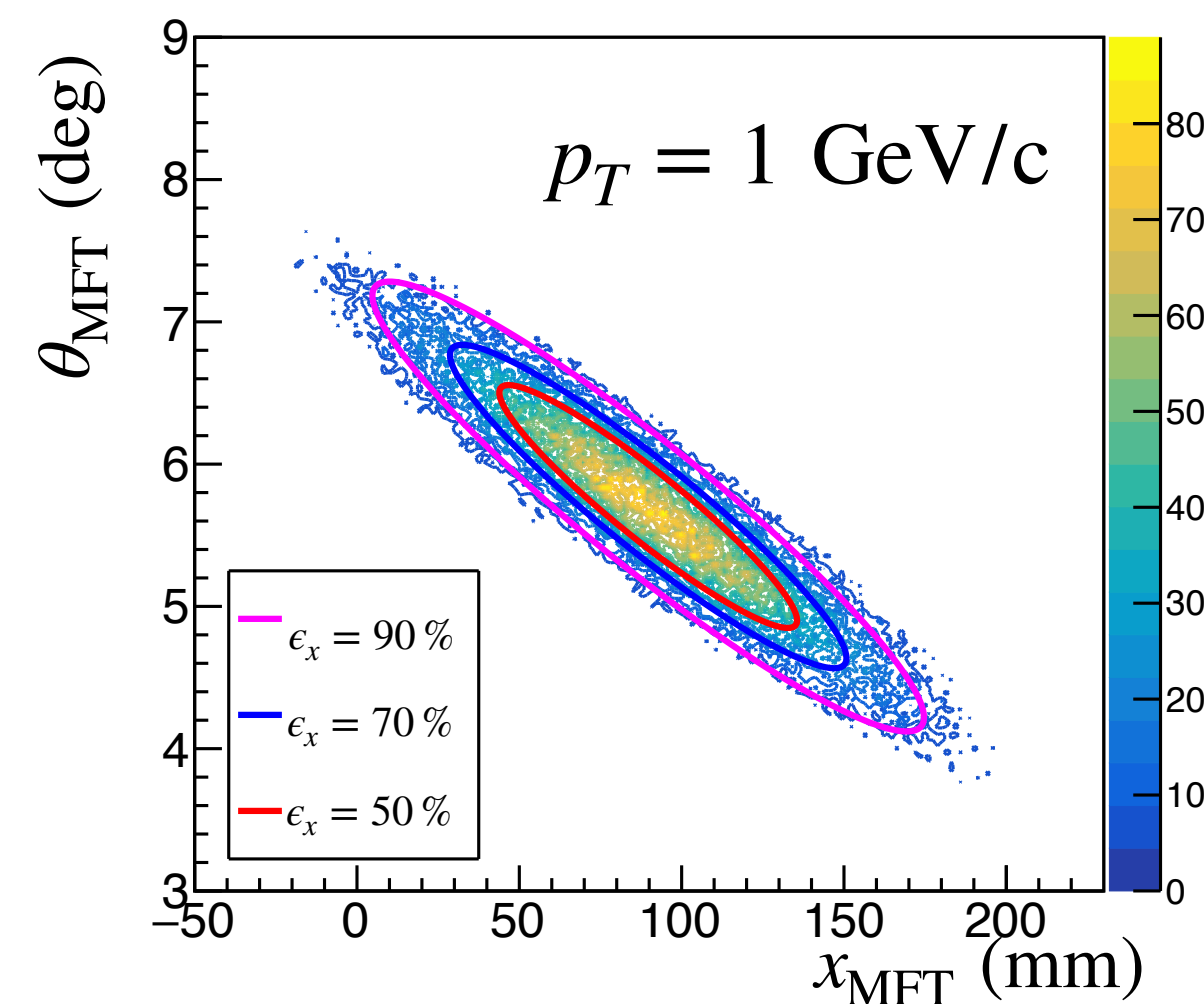
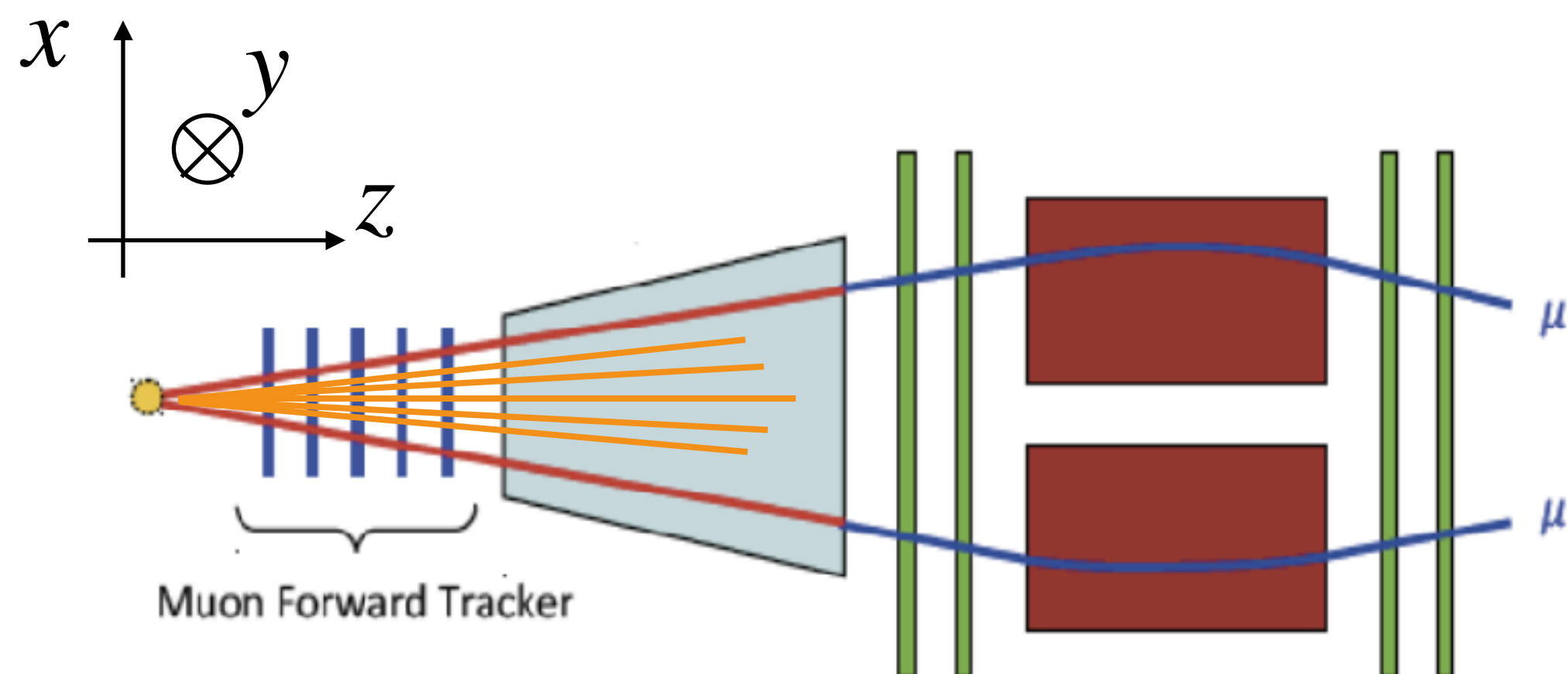


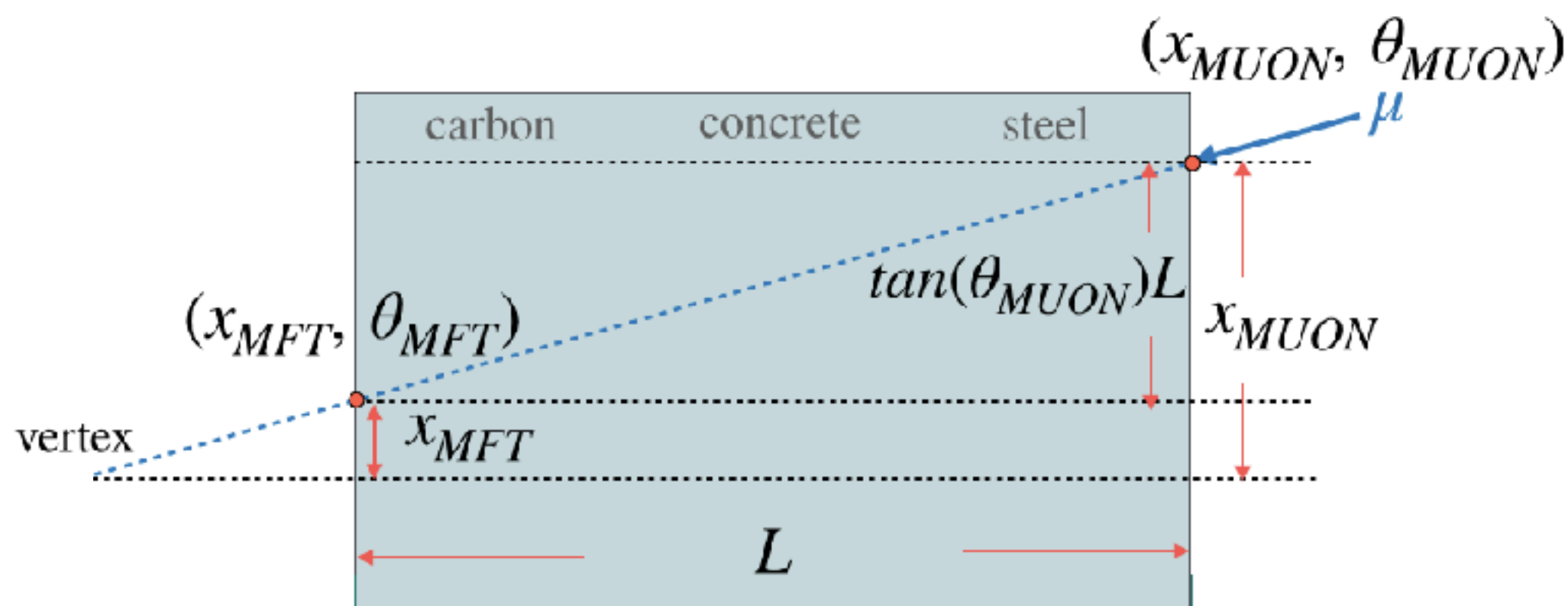
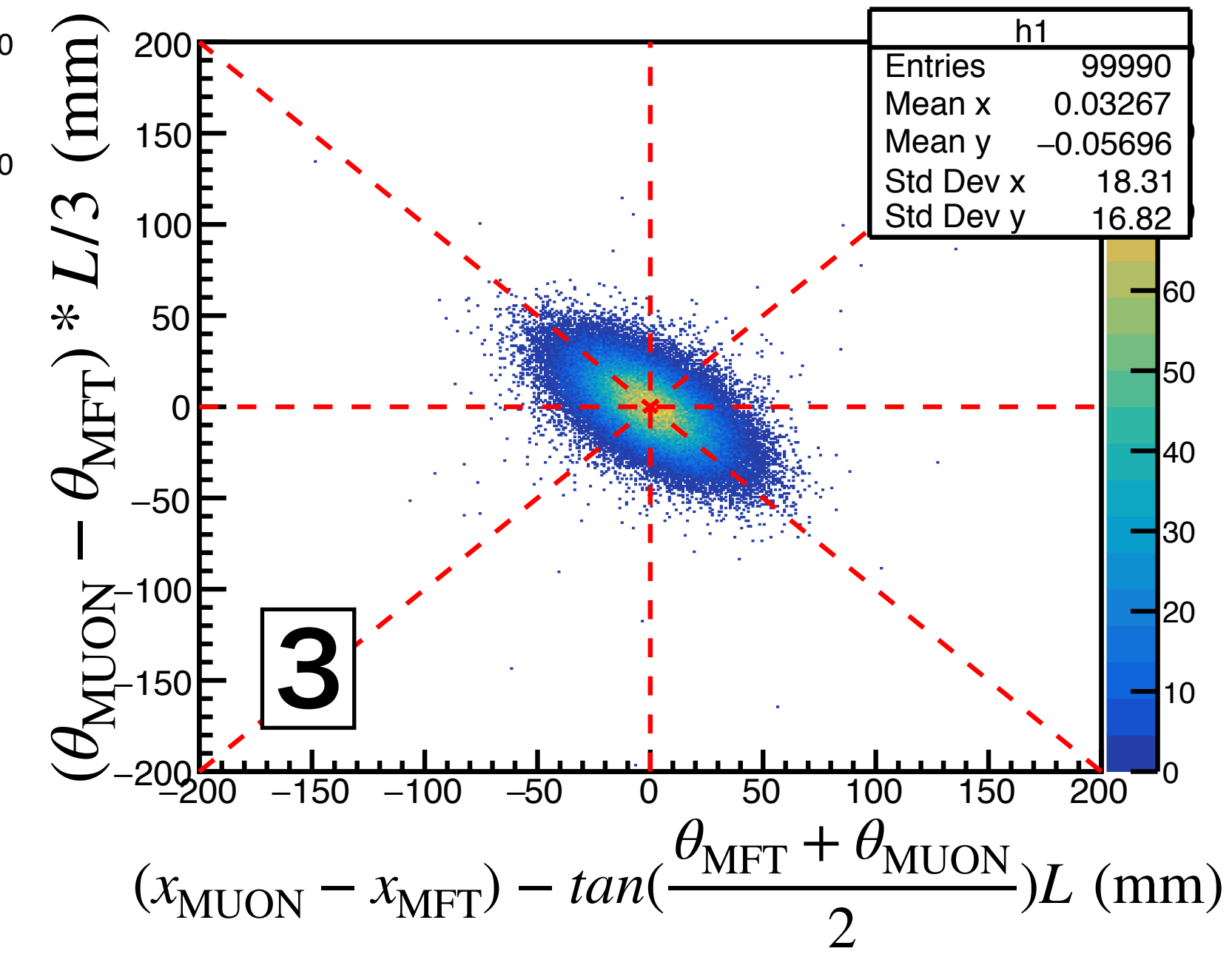
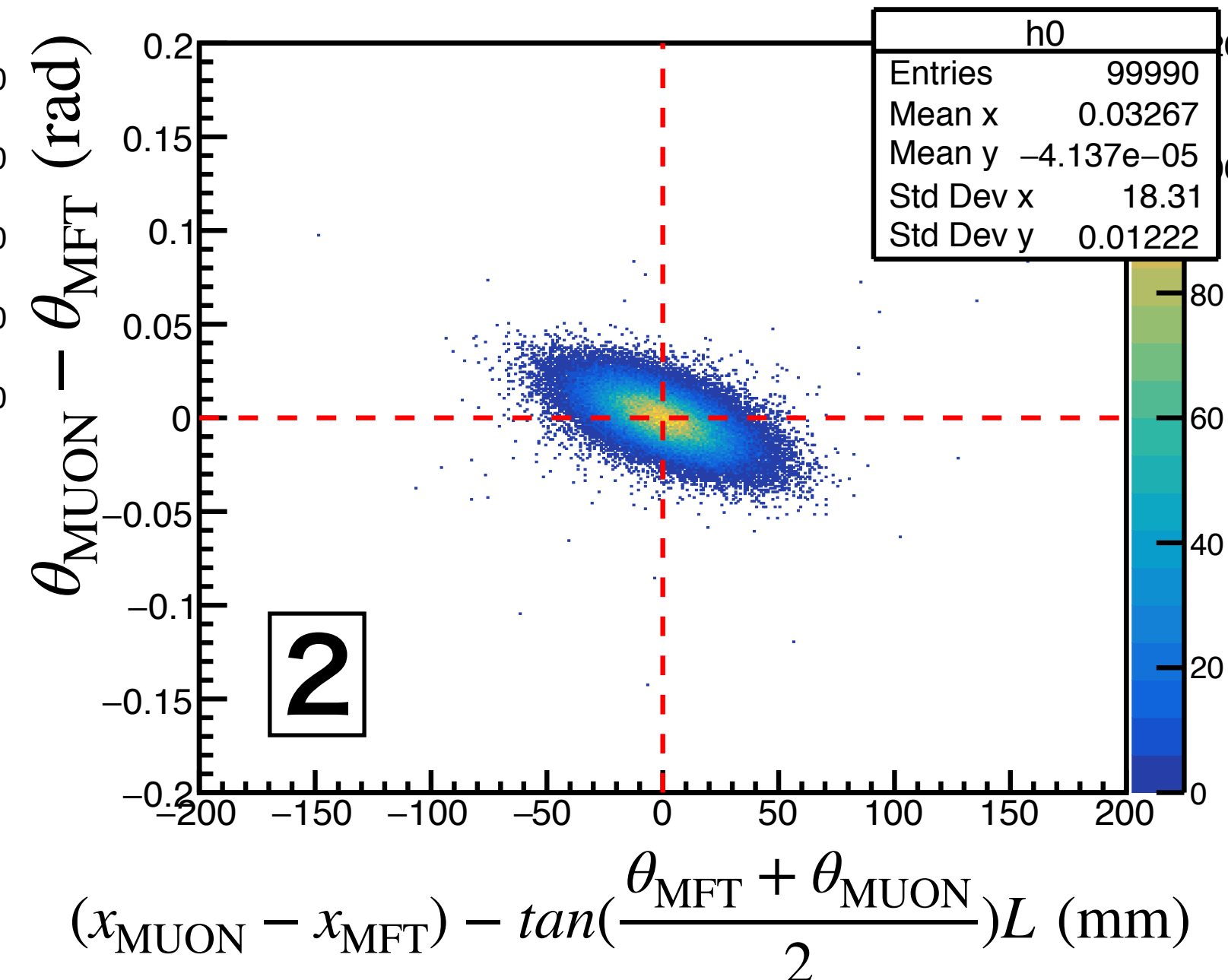
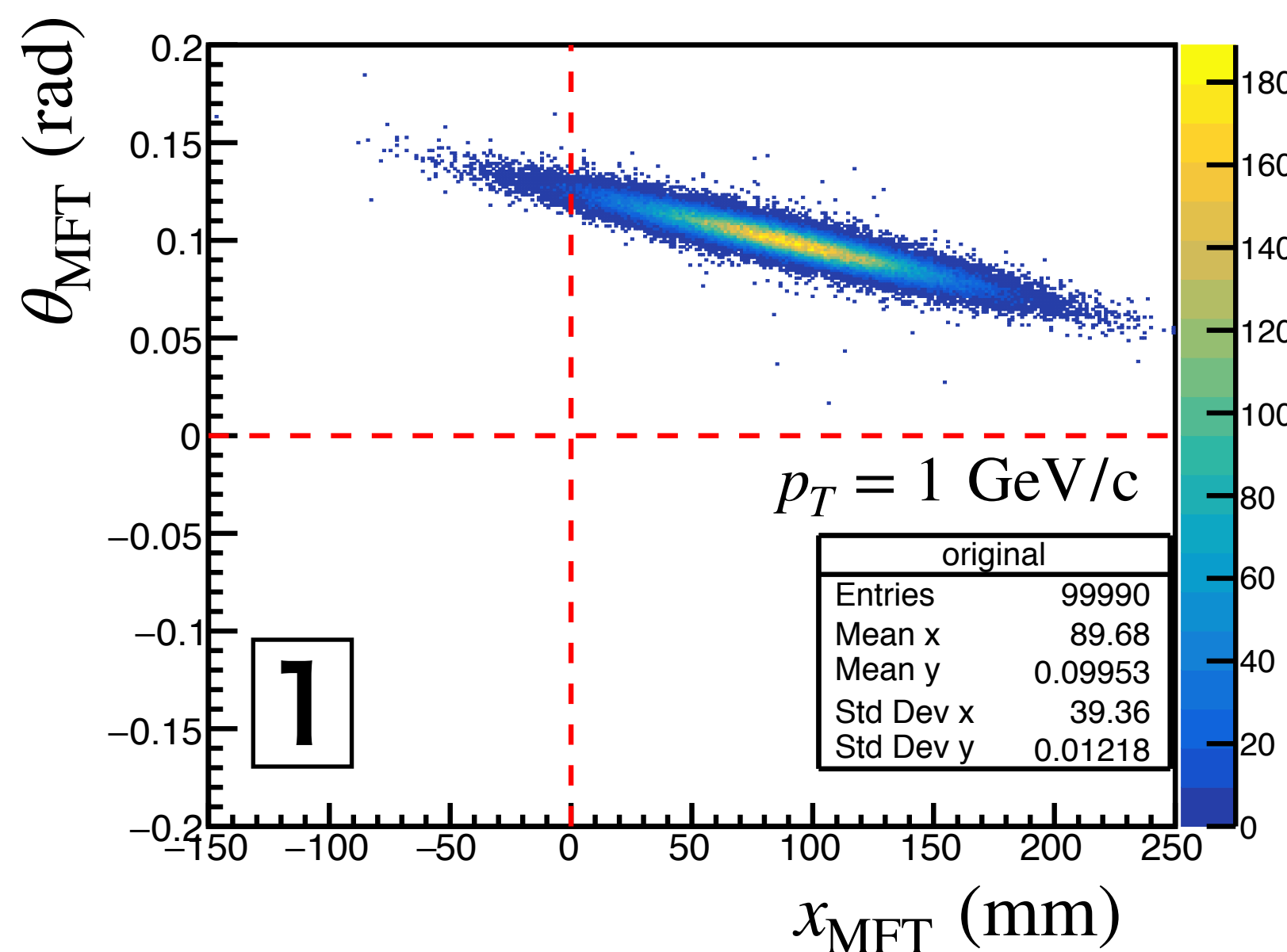
- ・ 研究背景
 - カイラル対称性の自発的破れによる質量獲得機構
- ・ LHC-ALICE実験
 - 既存ミュー粒子測定系 (Muon Spectrometer)
 - 前方ミュー粒子検出器 (Muon Forward Tracker)
- ・ MFT-MUON間の飛跡マッチング方法の開発と評価
 - single μ のみを考えた飛跡マッチング
 - バックグラウンドも考慮した飛跡マッチング
- ・ まとめ

- 相関から決めた飛跡候補の中から相関分布の中心に最もらしい飛跡を選びたい
- x, y方向どちらも考慮して飛跡を選ぶ必要がある
 - パラメータは合計4つ (x, θ_x, y, θ_y)
 - 位置角度分布のx, y軸を同等に扱いたい
 - 分布の大きさは運動量に変わる

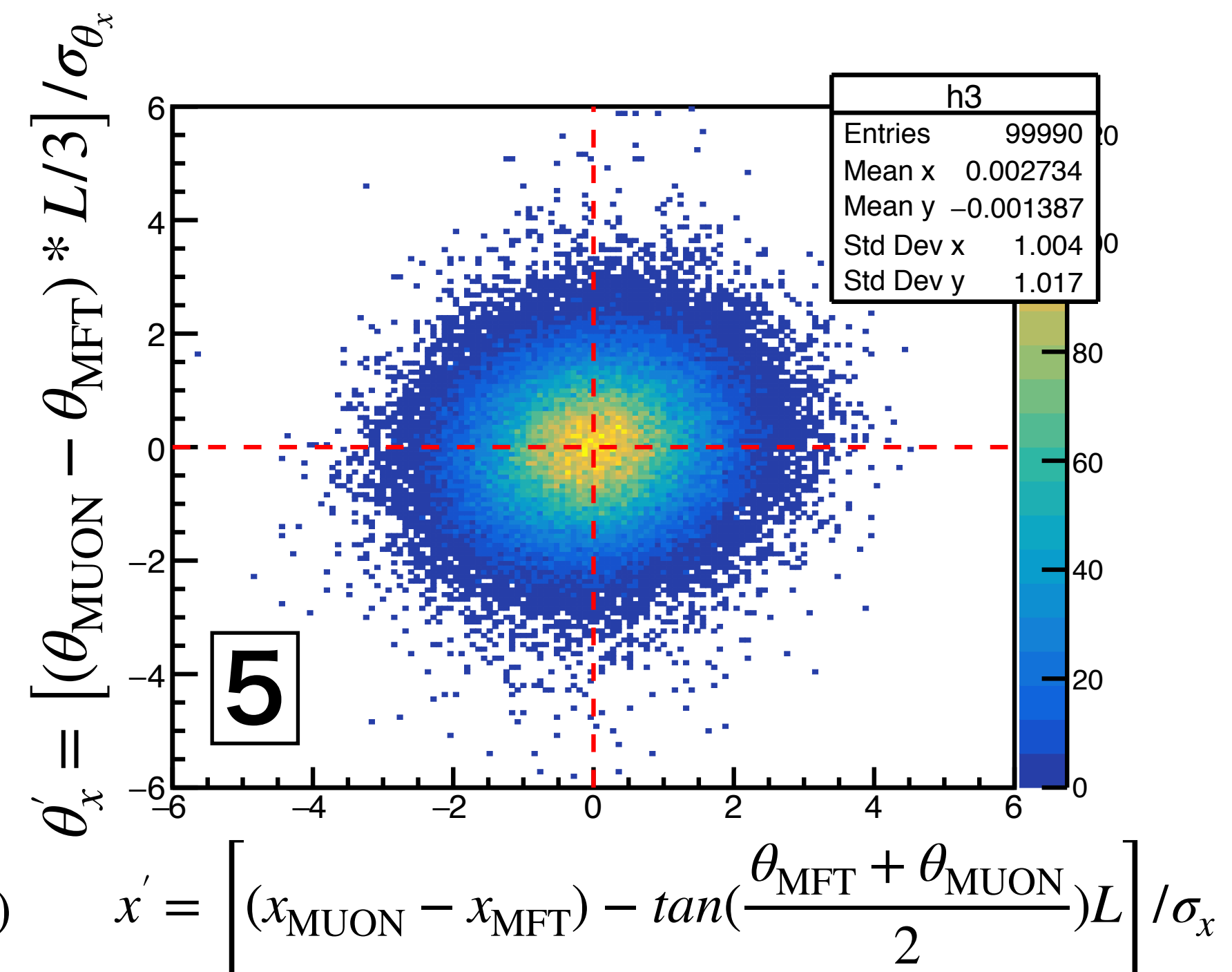
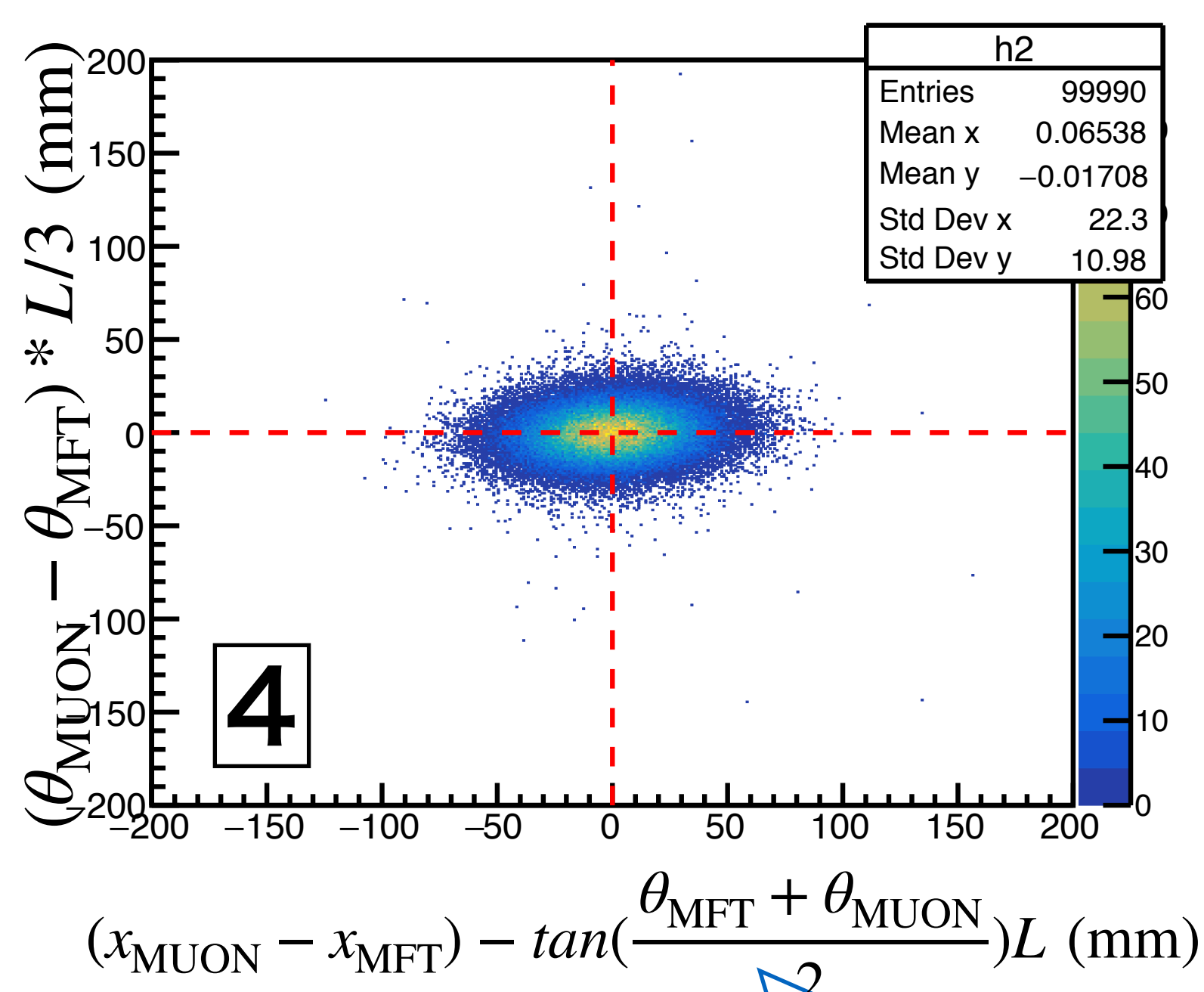
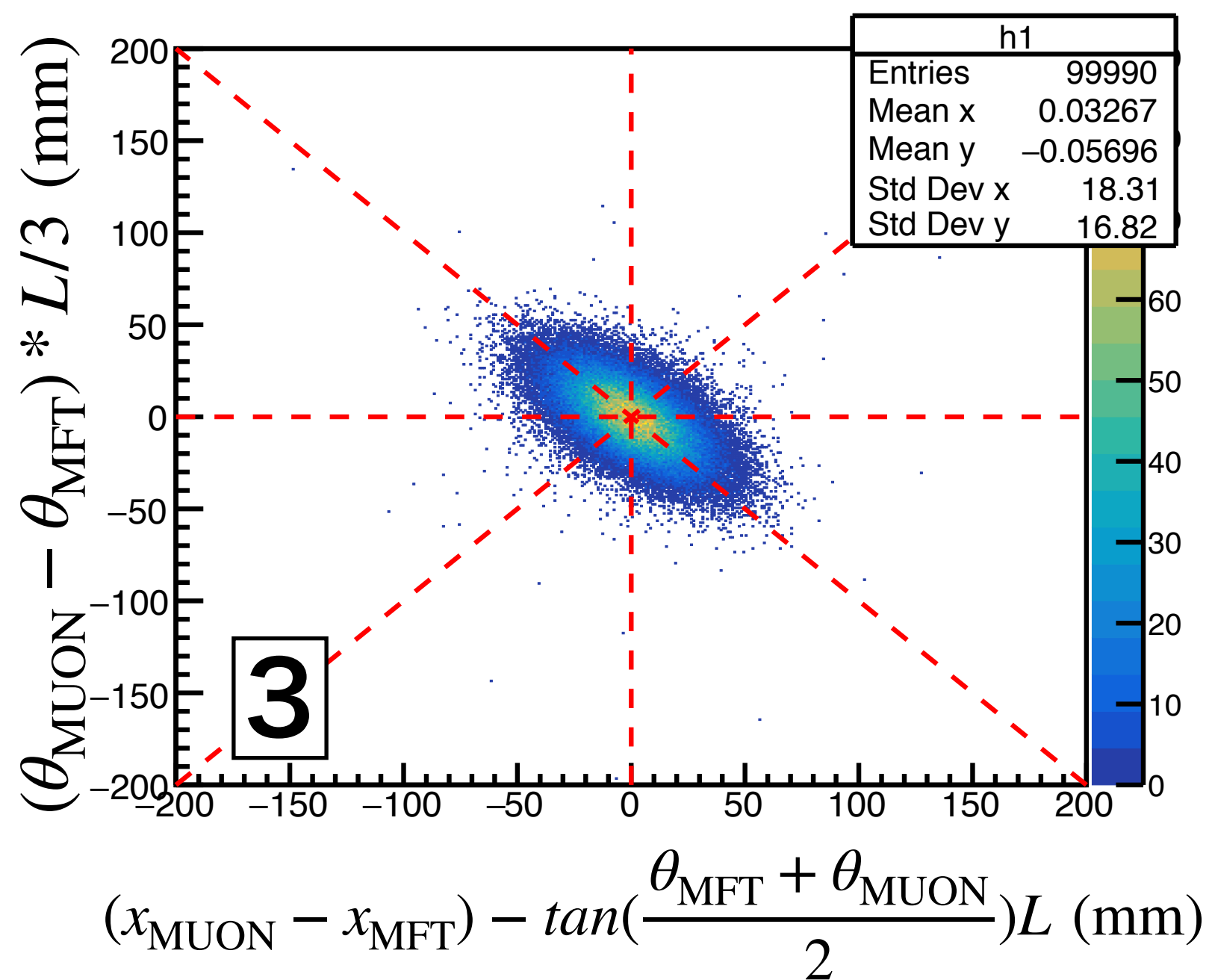


分布を規格化する





1. 元の分布
2. 図1 の中心を (0,0) に変換
3. y軸に L/3 を掛ける
 - y軸の次元をx軸と揃えるため
 - 楕円分布の角度を45度傾きにするため

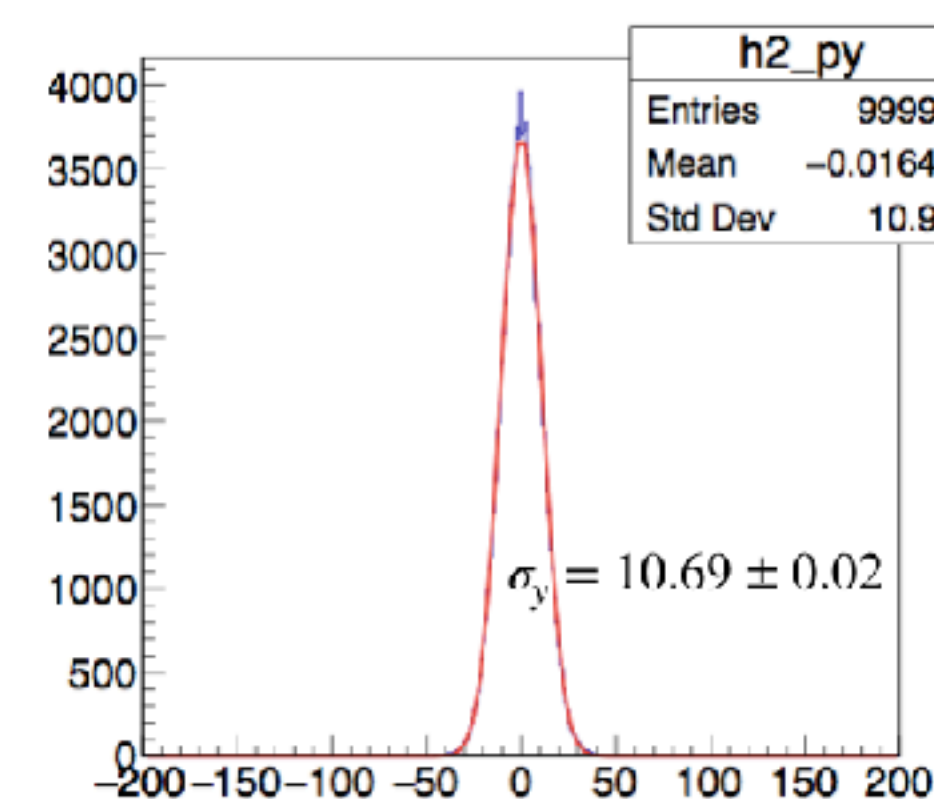
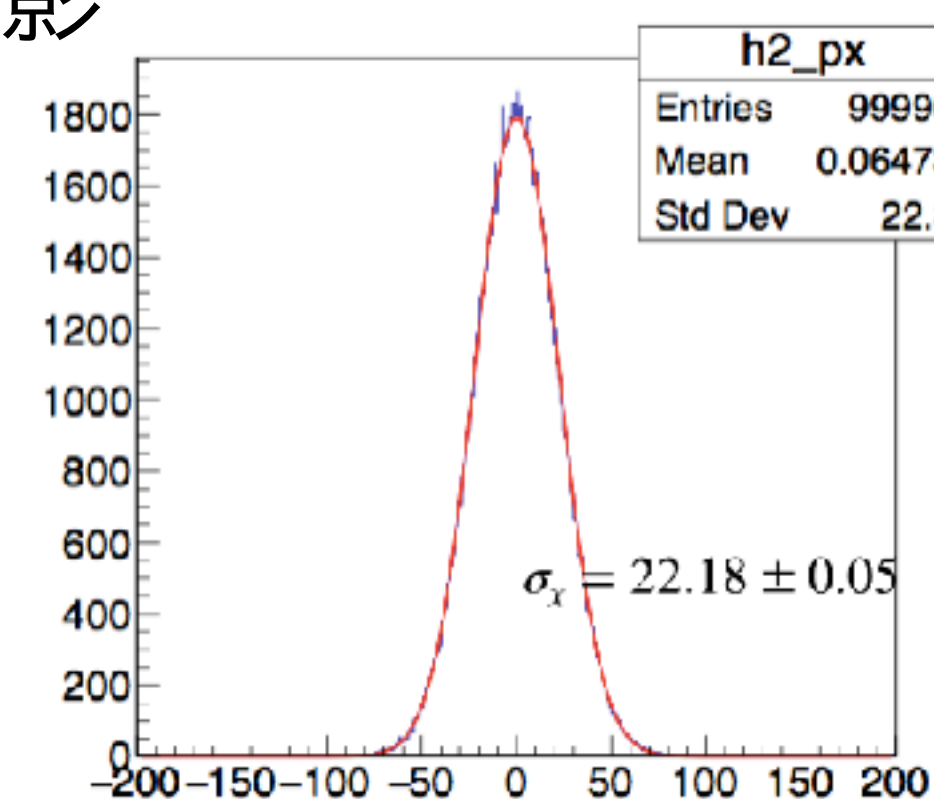


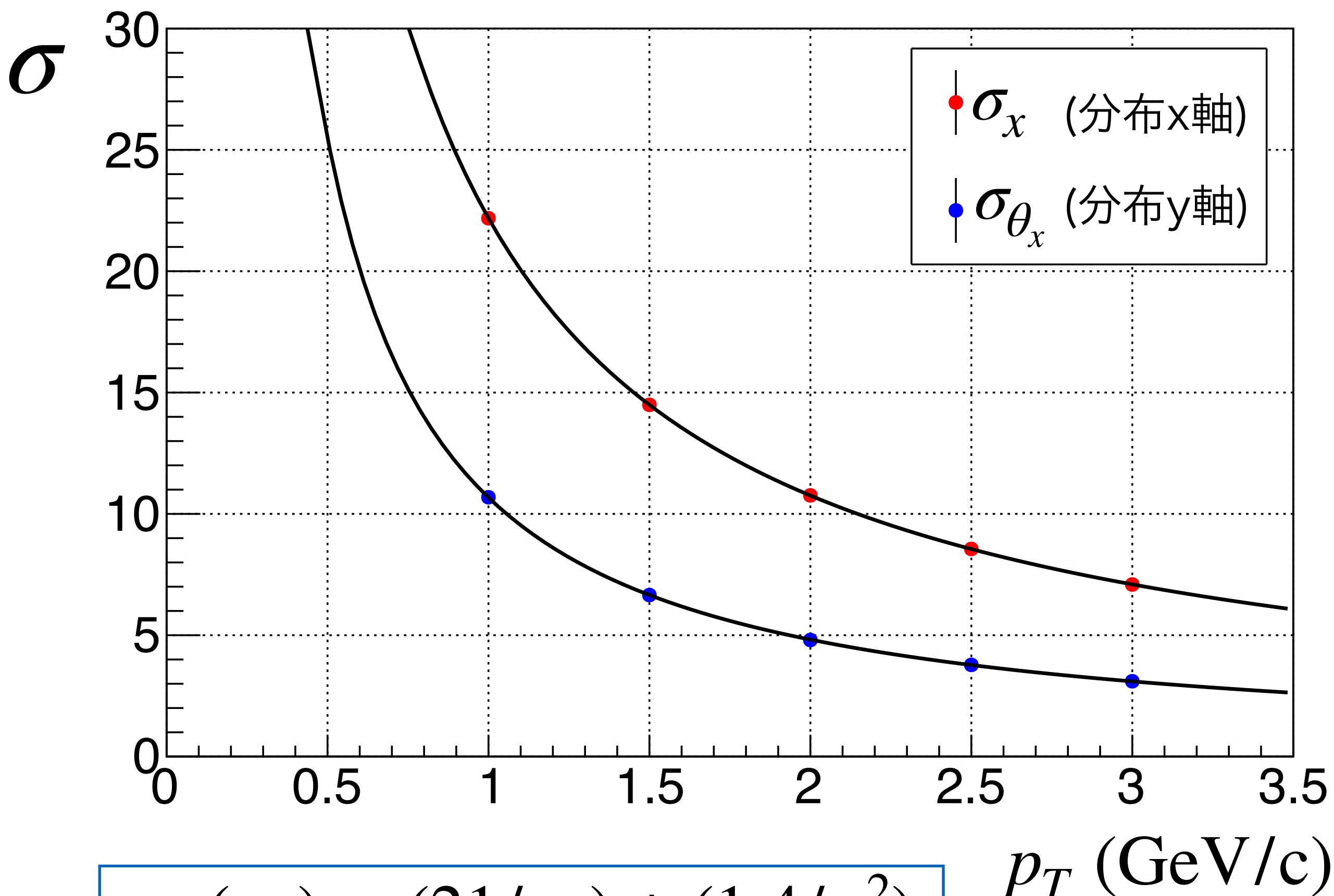
4. 図3 を 45度回転

5. x, y軸それぞれの標準偏差でそれぞれの軸を割ることにより、楕円を円形に変換

*標準偏差は横運動量により異なる

射影

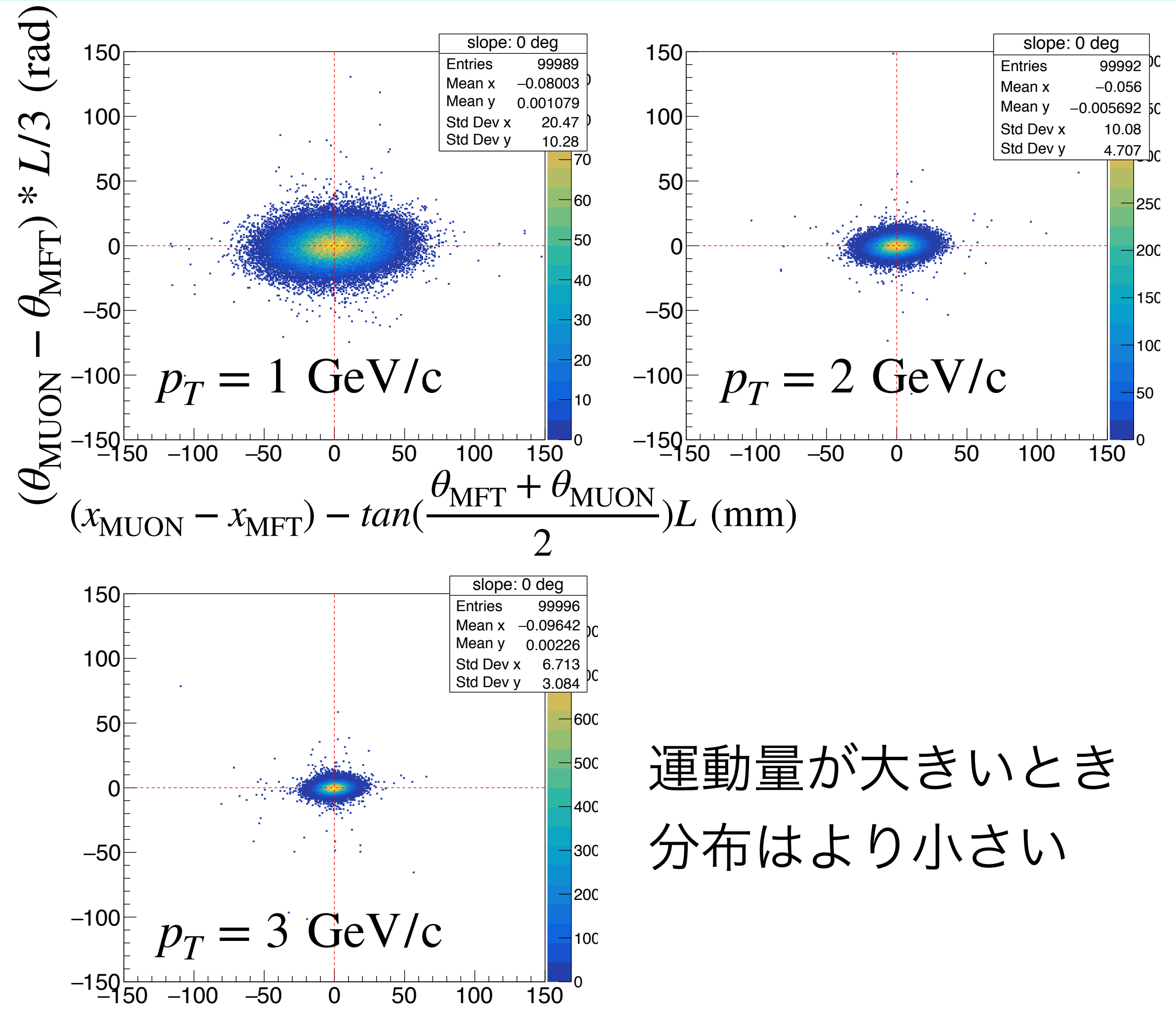




$$\sigma_x(p_T) \sim (21/p_T) + (1.4/p_T^2)$$

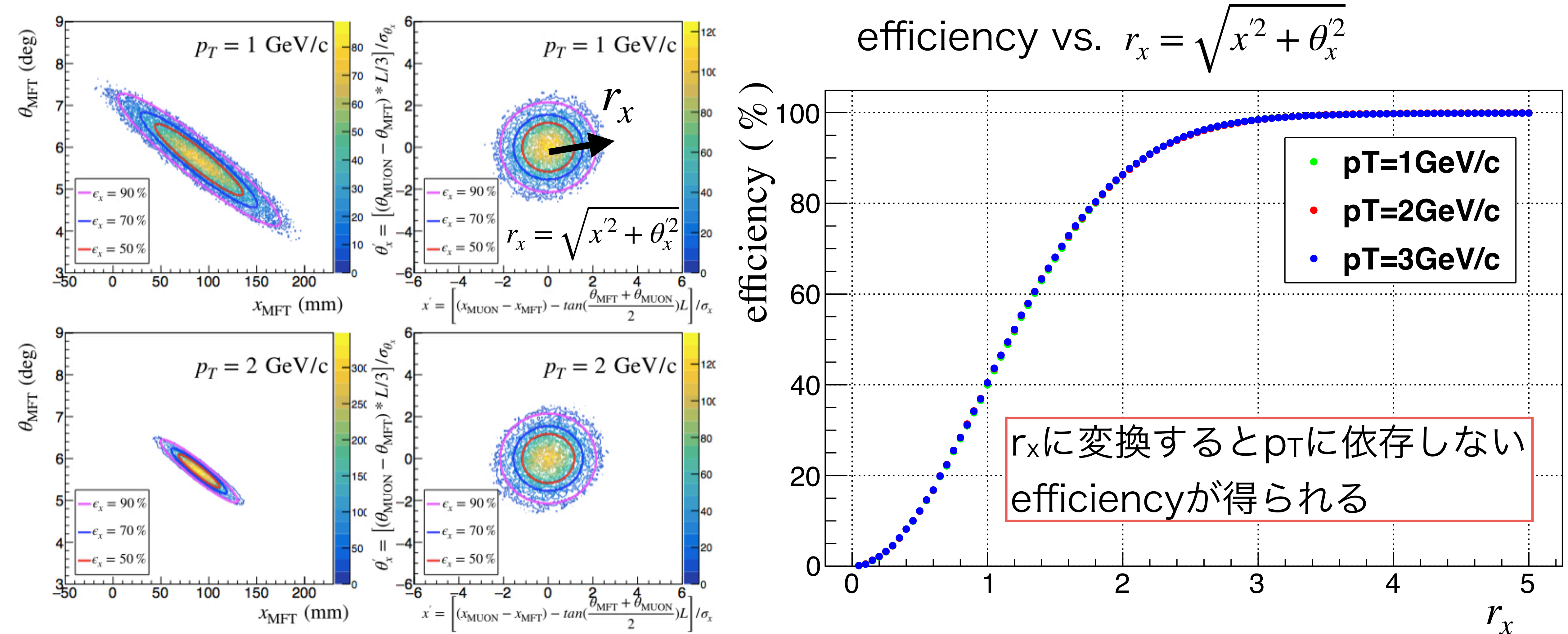
$$\sigma_y(p_T) \sim (8.6/p_T) + (2.1/p_T^2)$$

p_T (GeV/c)



運動量が大きいとき
分布はより小さい

x, y軸それぞれの標準偏差は横運動量の関数として書ける



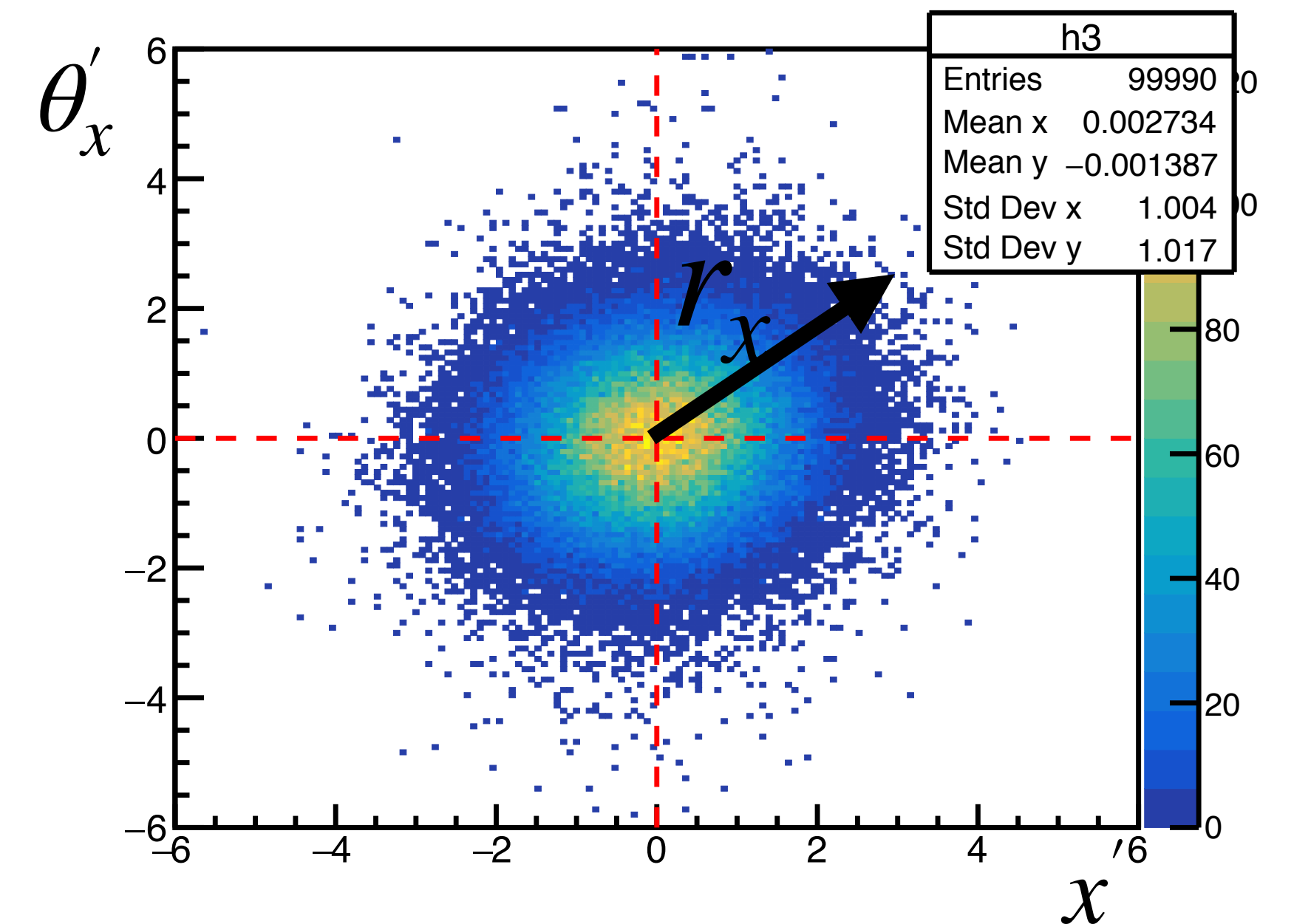
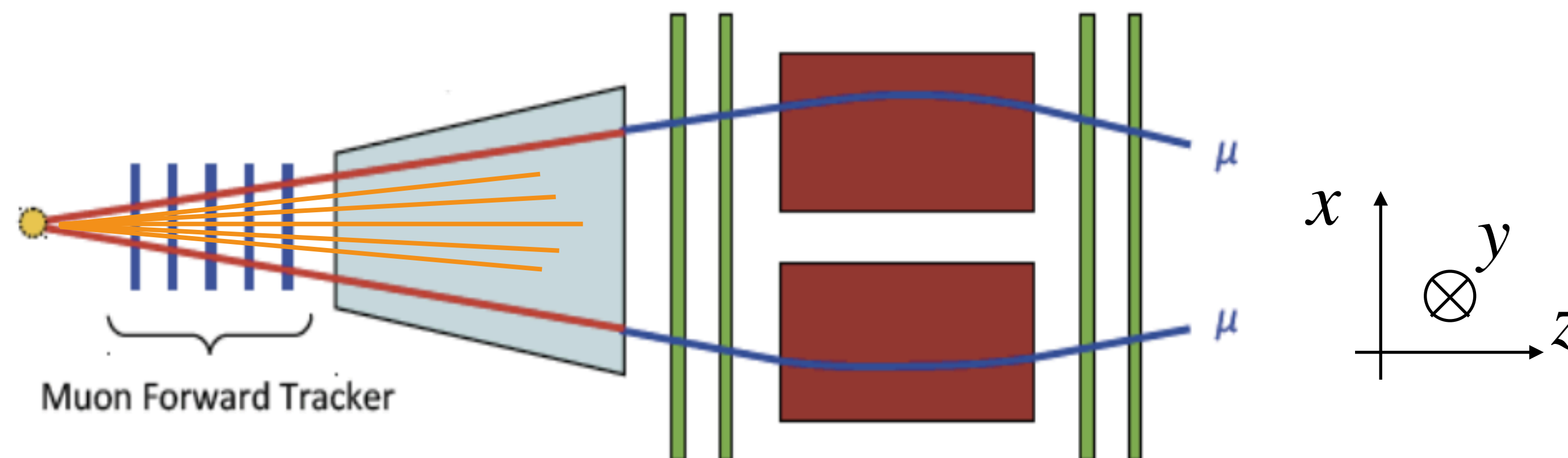
• p_T に依存しない位置角度の相関分布を得ることができた

重イオン衝突イベント生成機であるHIJINGを用いて飛跡マッチング法を評価

- single μ (signal) を Pb-Pb衝突 (BG) に 埋め込んだイベントを生成
- 飛跡候補のマッチングパラメータRを計算する (本物であればRの値は小さいはず)
- 埋め込んだ μ 粒子を候補1位として選び出せる精度を評価

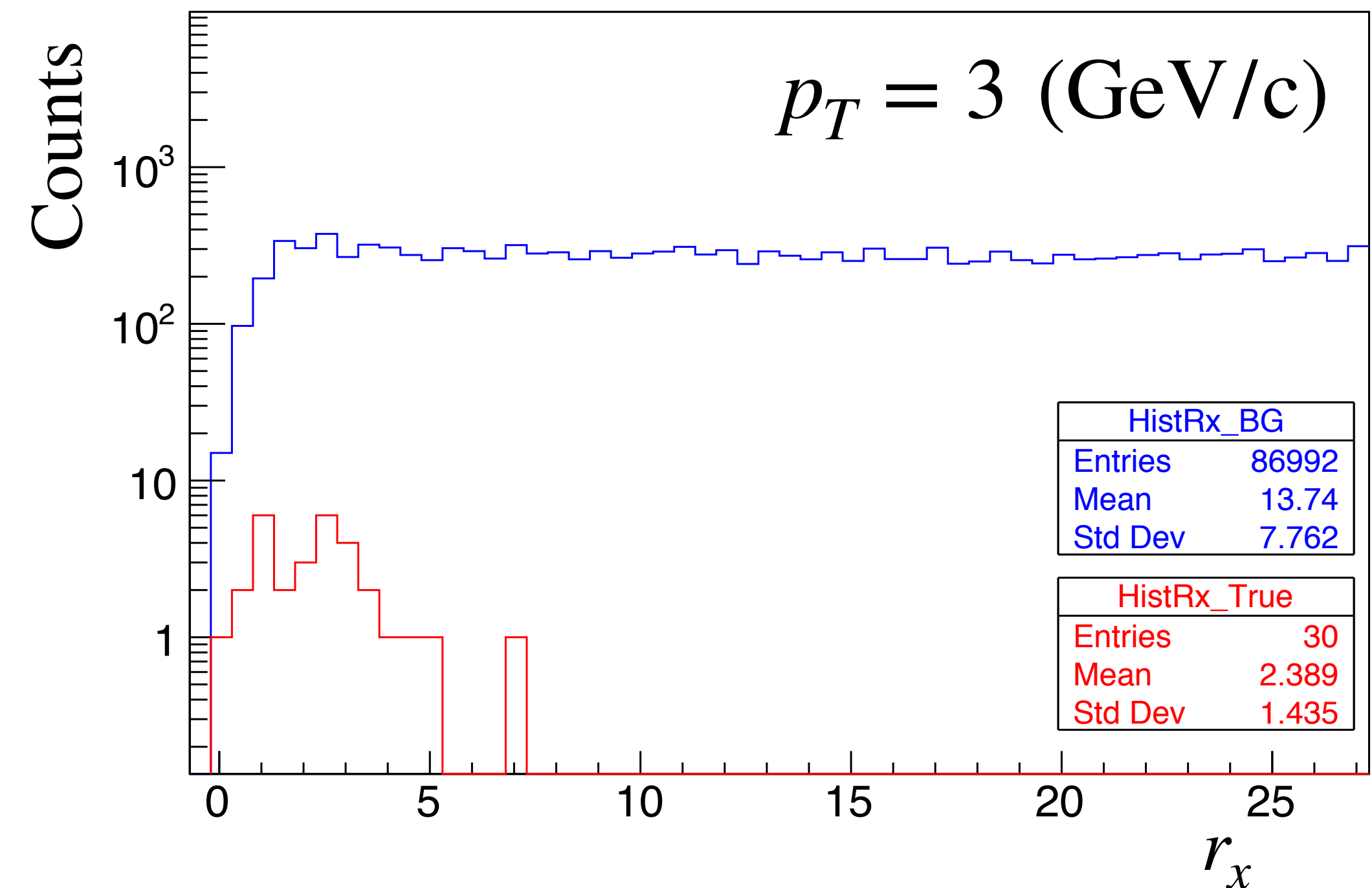
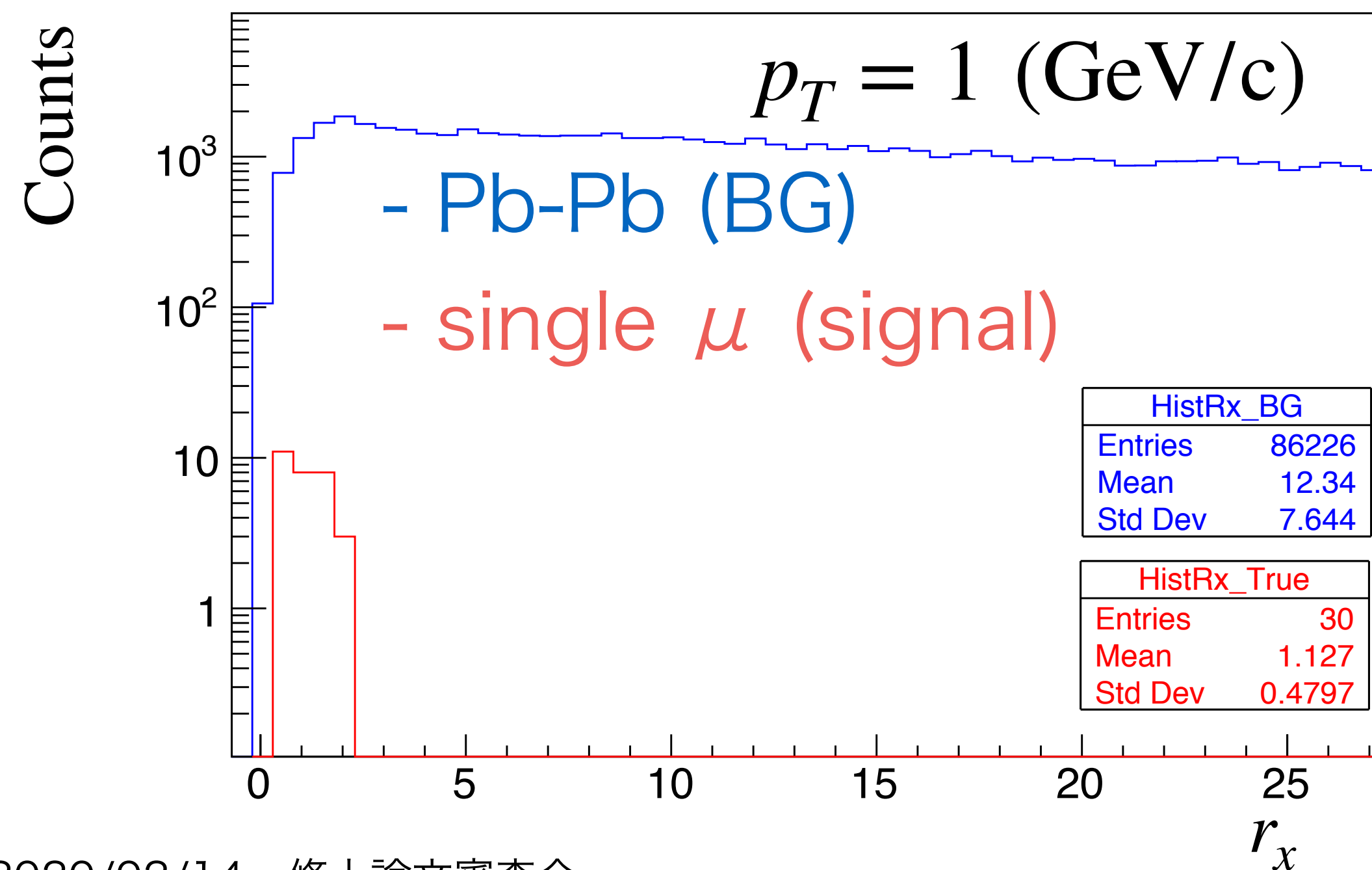
1D parameters: $r_x = \sqrt{x'^2 + \theta_x'^2}$ $r_y = \sqrt{y'^2 + \theta_y'^2}$

2D parameters: $R = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$



$$r_x = \sqrt{x'^2 + \theta_x'^2} \quad \text{の分布}$$

- 埋め込んだ μ 粒子の r_x は小さい領域に分布。BGはなだらかに分布。
 - signalに対するBG：約100倍
- r_x, r_y を組み合わせた二次元マッチングパラメータを用いる

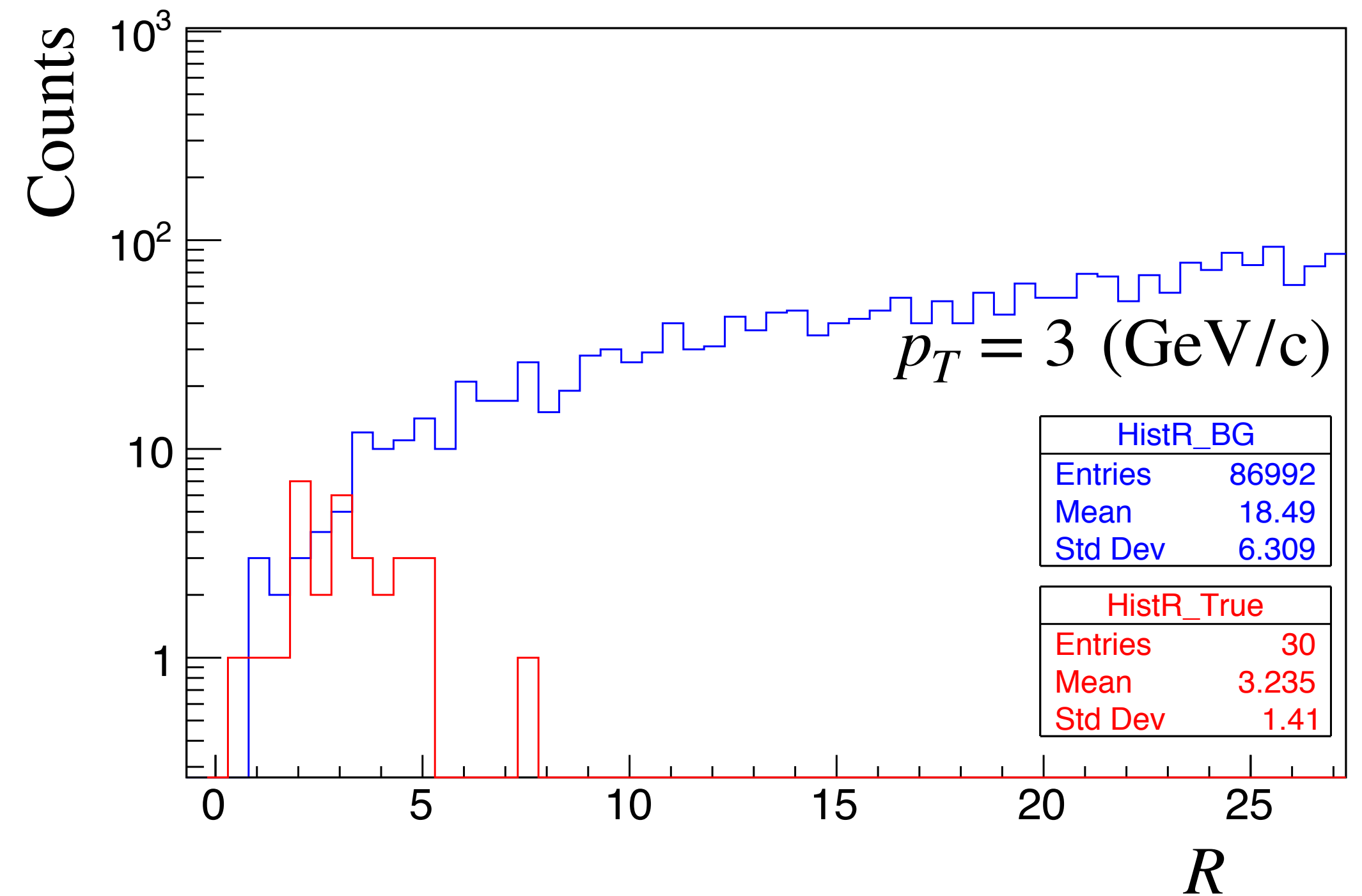
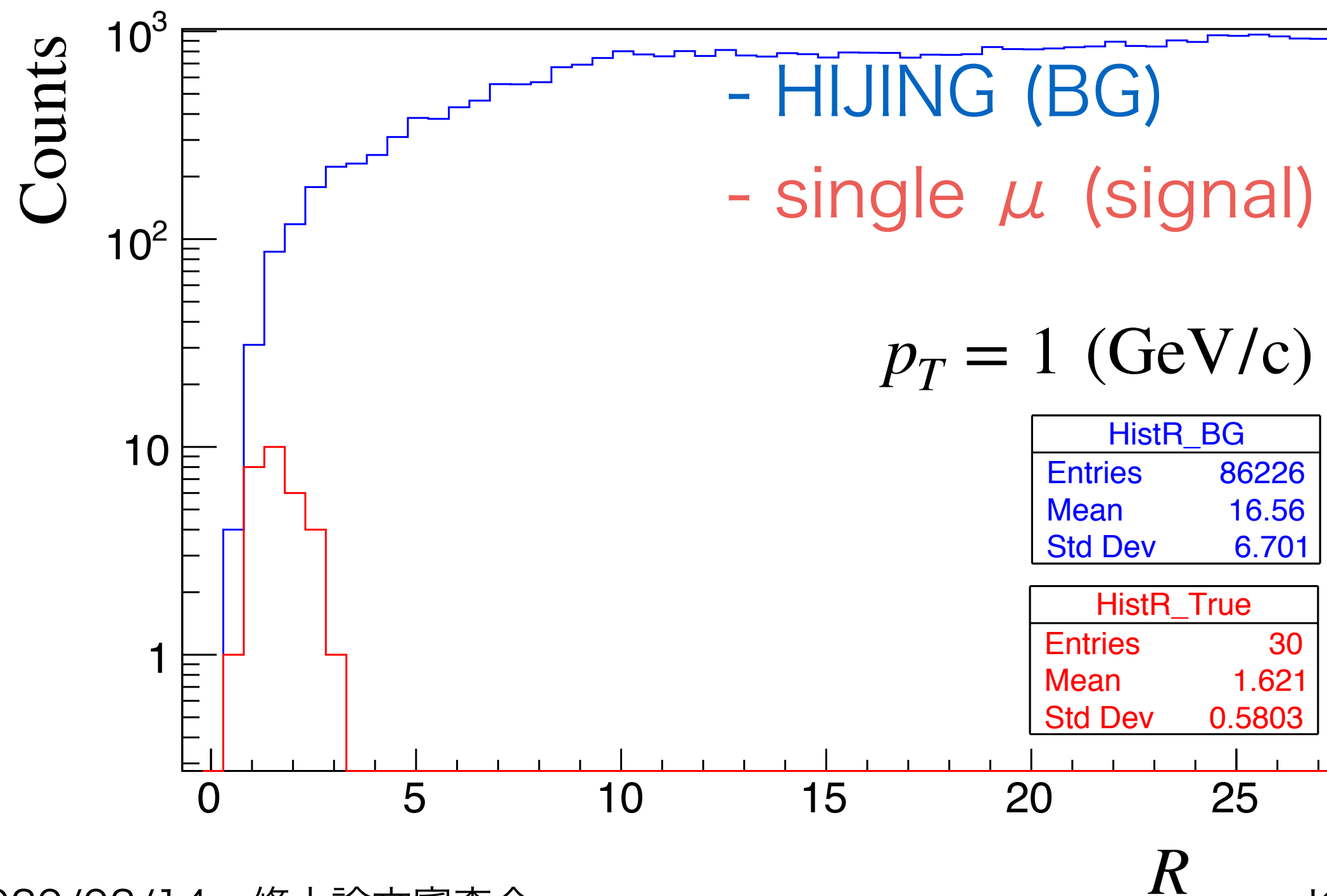


$$R = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} = \sqrt{x'^2 + \theta_x'^2 + y'^2 + \theta_y'^2} \quad \text{の分布}$$

signalに対するBG :

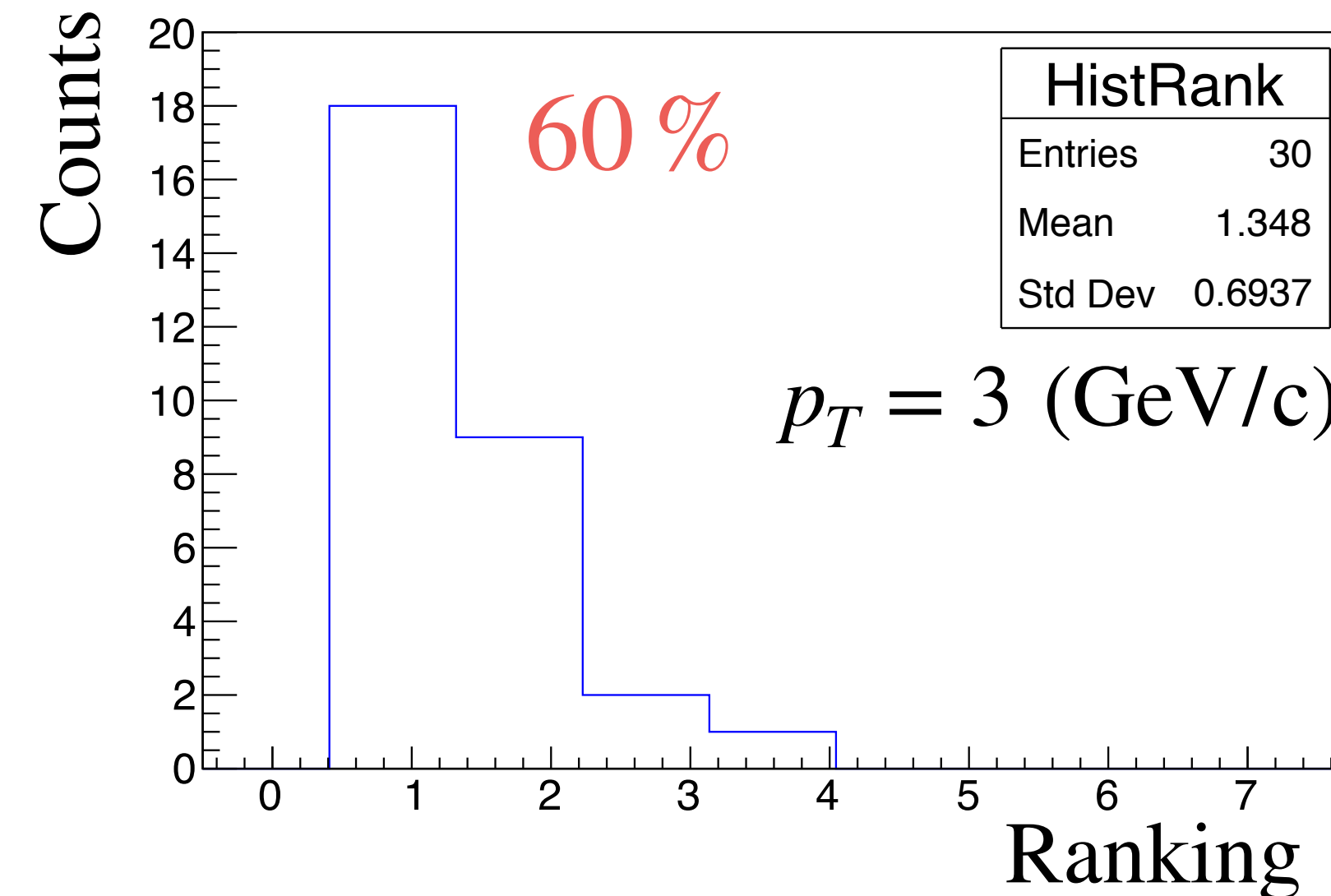
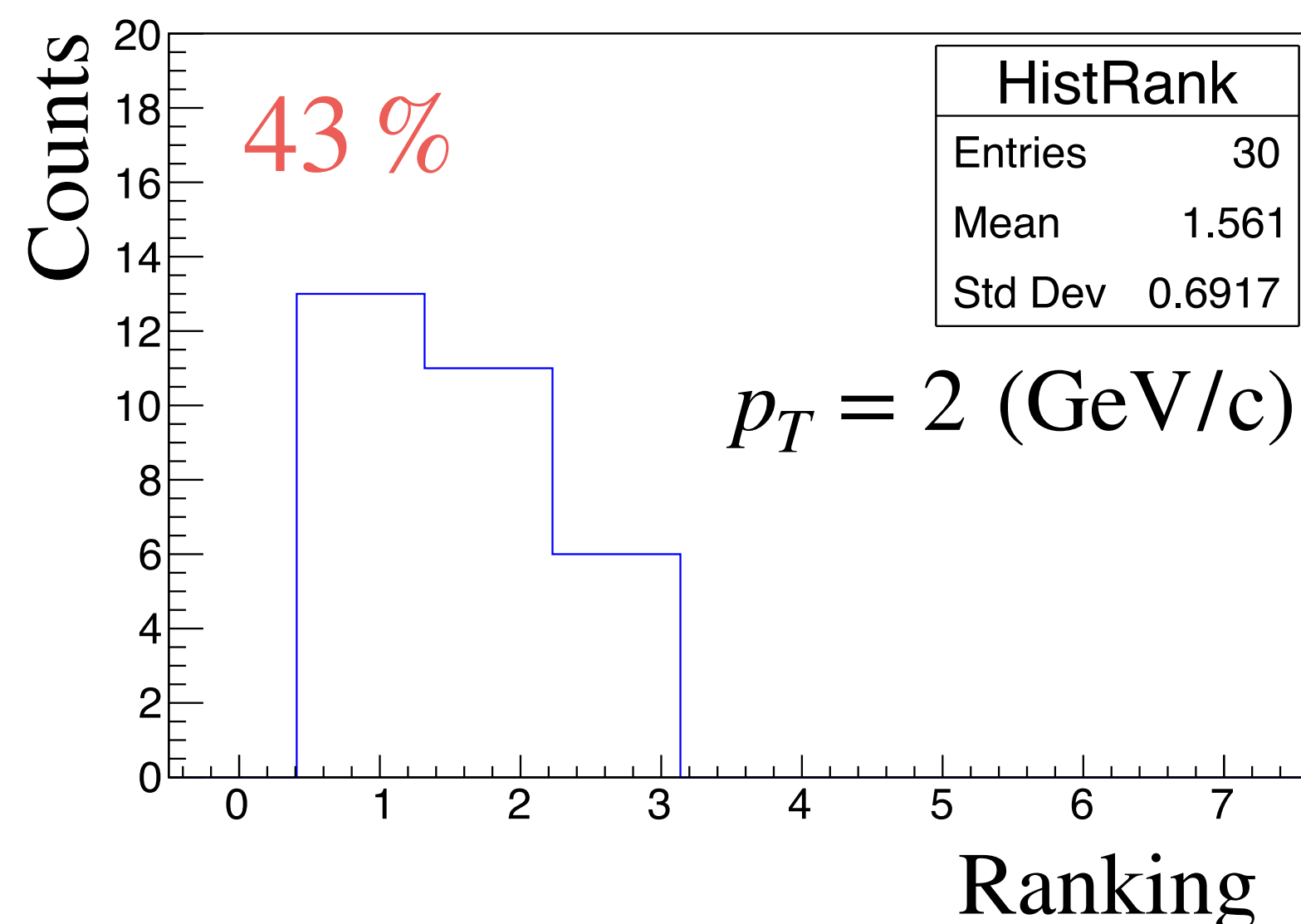
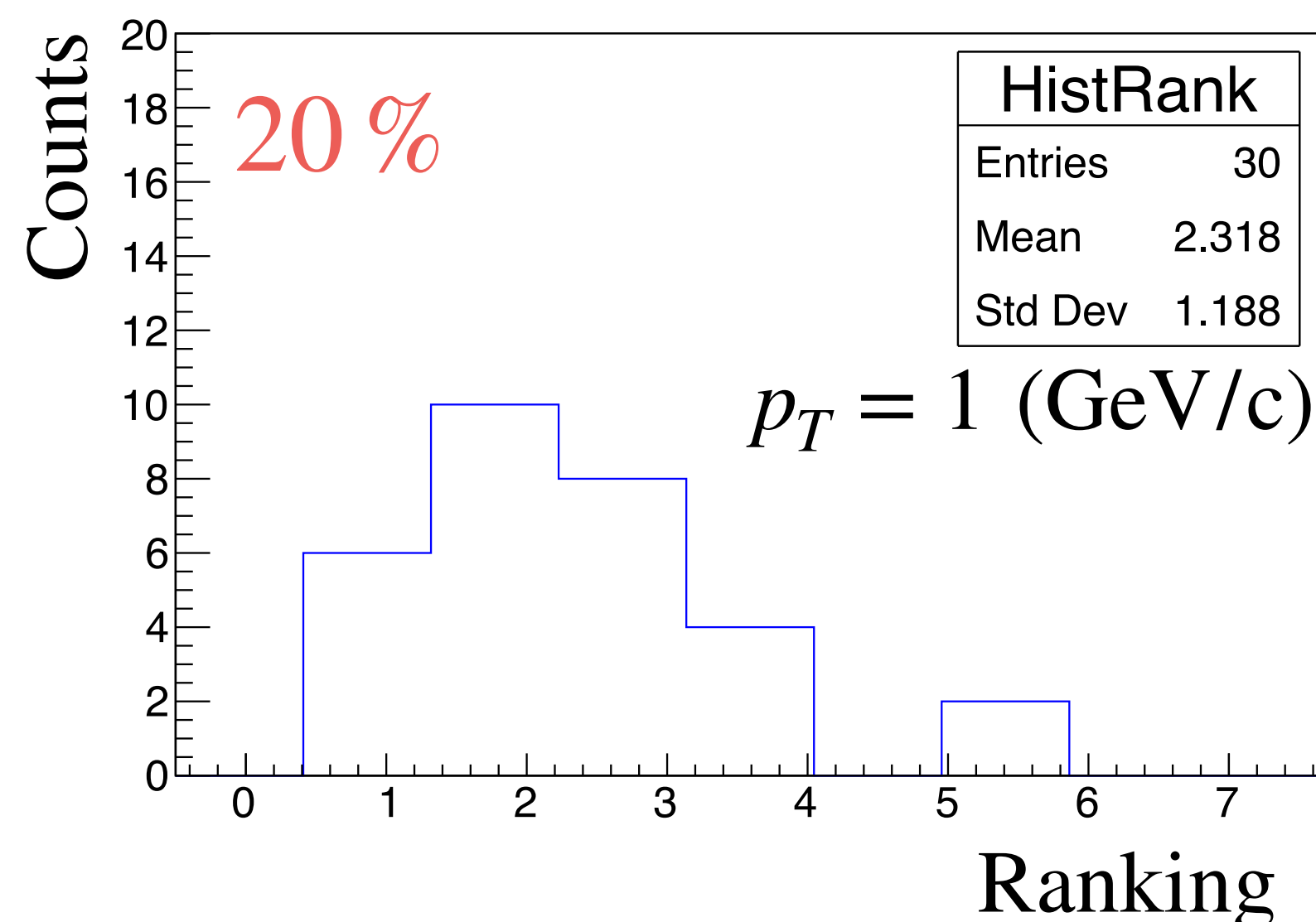
$p_T=1 \text{ GeV}/c$ で約10倍、 $p_T=3 \text{ GeV}/c$ で約1倍

(1次元マッチングパラメータでは
signalに対するBGは約100倍)



single μ (signal) が全MFTの飛跡の中で何番目に小さいRを持つか

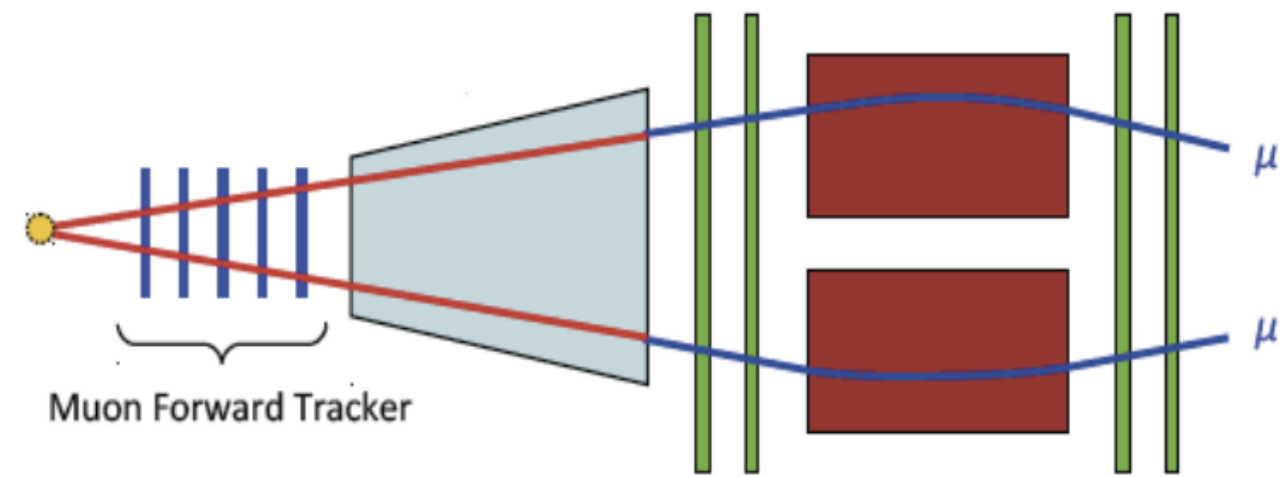
single μ (signal) が全飛跡中1位になる確率



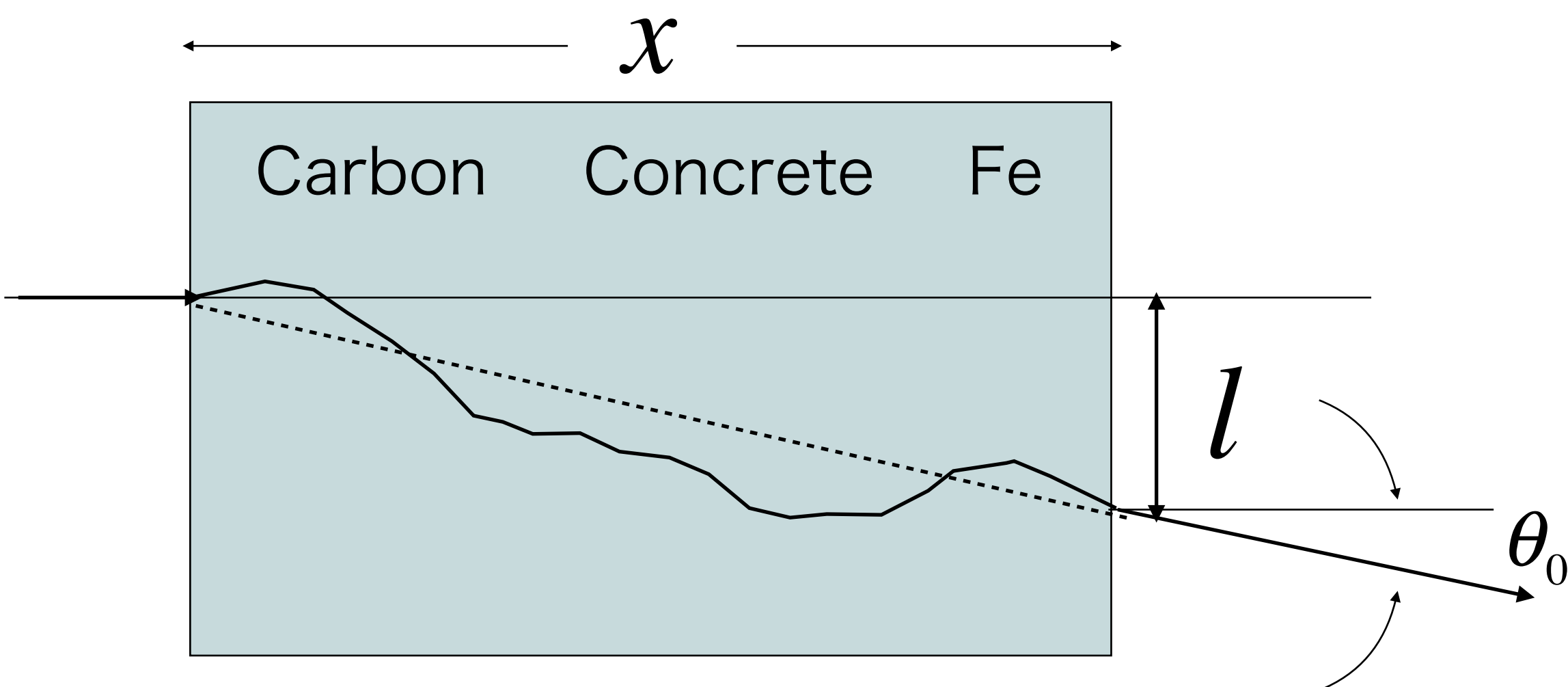
- $p_T=1$ GeV/cで20%、 $p_T=2$ GeV/cで43%、 $p_T=3$ GeV/cで60%の精度で埋め込んだ μ 粒子を選ぶことができる
- $p_T=1$ GeV/cでも90%のイベントが候補4位までに入る (シグナルが候補4位まで存在)

- ・ MFT-MUON間の飛跡結合は、衝突点でのミュー粒子の正確なトラッキング、S/Nや質量分解能向上のために重要である。
- ・ 飛跡の位置と角度の相関関係を用いたマッチング方法はS/Nを、高い効率（約6倍）で大きく向上させる。
- ・ p_T に依らずに使える飛跡マッチングパラメーターR（二次元X-Yの位置角度相関）を開発し、シミュレーションを用いて評価した。
- ・ 結果、Rにより90%の高い効率で真の μ 粒子を4位以内に選ぶことができる。
- ・ 今後、MFT, MUONで飛跡の電荷サインを測ることができるとすると、飛跡候補数を半分減らすことができる。
- ・ また運動量マッチングよりさらにバックグラウンドを減らせる可能性もある。

Backup



Muons are affected by multiple scattering in the absorber



The width parameter of angular distribution

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$

The width parameter of position distribution
= The width of search window $h_{x,y}$

$$l = \frac{1}{\sqrt{3}} x \theta_0$$

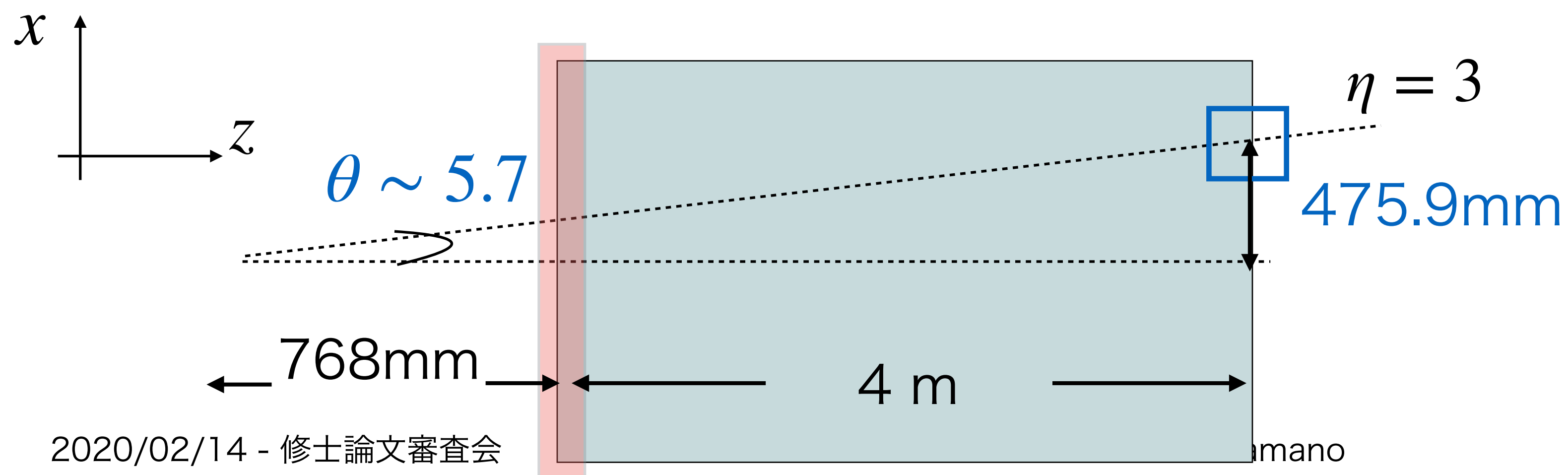
where p : momentum
 βc : velocity
 z : charge number of the incident particle
 x / X_0 : the thickness of the scattering medium

$$\beta = \frac{p}{E} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2}} \quad x = 60 X_0 = 4 [m]$$

Supplement: Confirmation of evaluation method 29 / 26

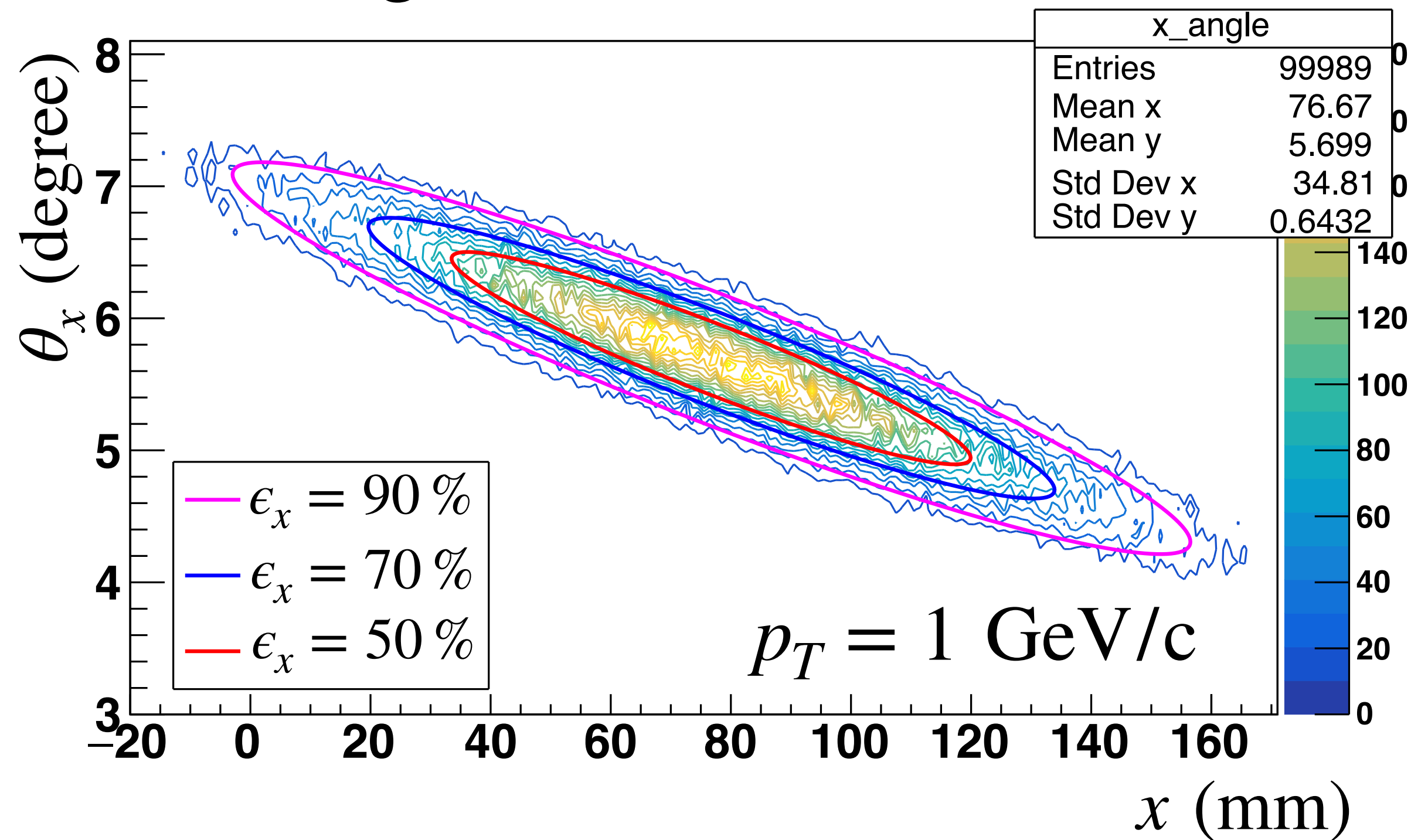
Make sure that the output is same when muon is injected from the right side and from the left side (vertex).

1. Muon was injected from left to right. ($z = 0$)
-20 < x < 160 mm, 1 mm step, 100 shots each
3 < θ < 8 deg, 0.1 deg step, 100 shots each
2. When muon got to **the range around $\eta = 3$** on the right side, position and angle on the left side was written out.

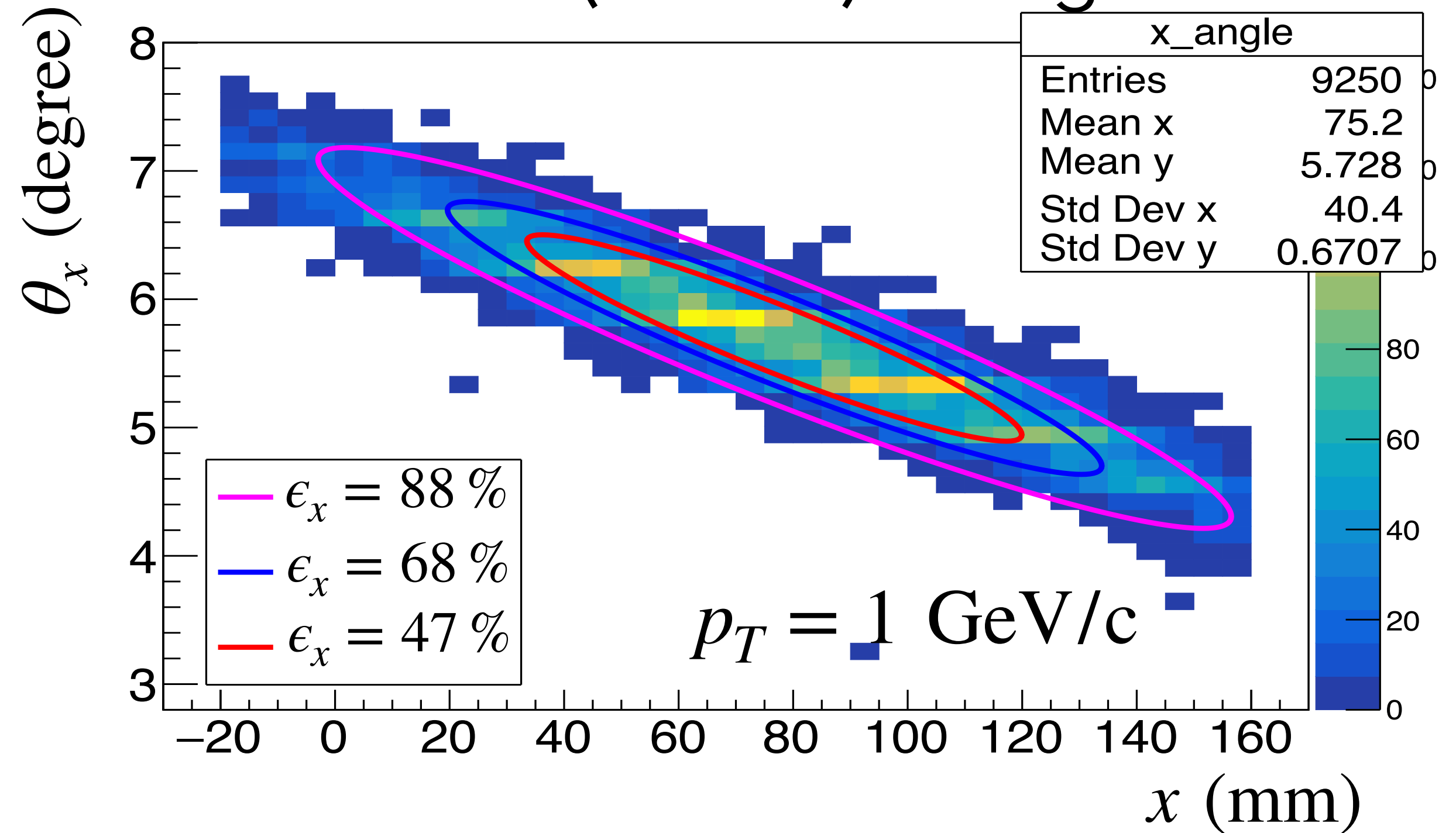


$$470.9 < x < 480.9 \text{ mm}$$
$$5.2 < \theta < 6.2 \text{ deg}$$

Right to left (vertex)



Left (vertex) to right



- Similar tendency can be seen
- Ellipses are exactly same in both figures
- Efficiency (90, 70, 50 %) defined in left figure give consistent results (88, 68, 47 %) in right figure

