

LHC-ATLAS実験における CSC検出器を用いたミュオンハイレベル トリガーの性能改善

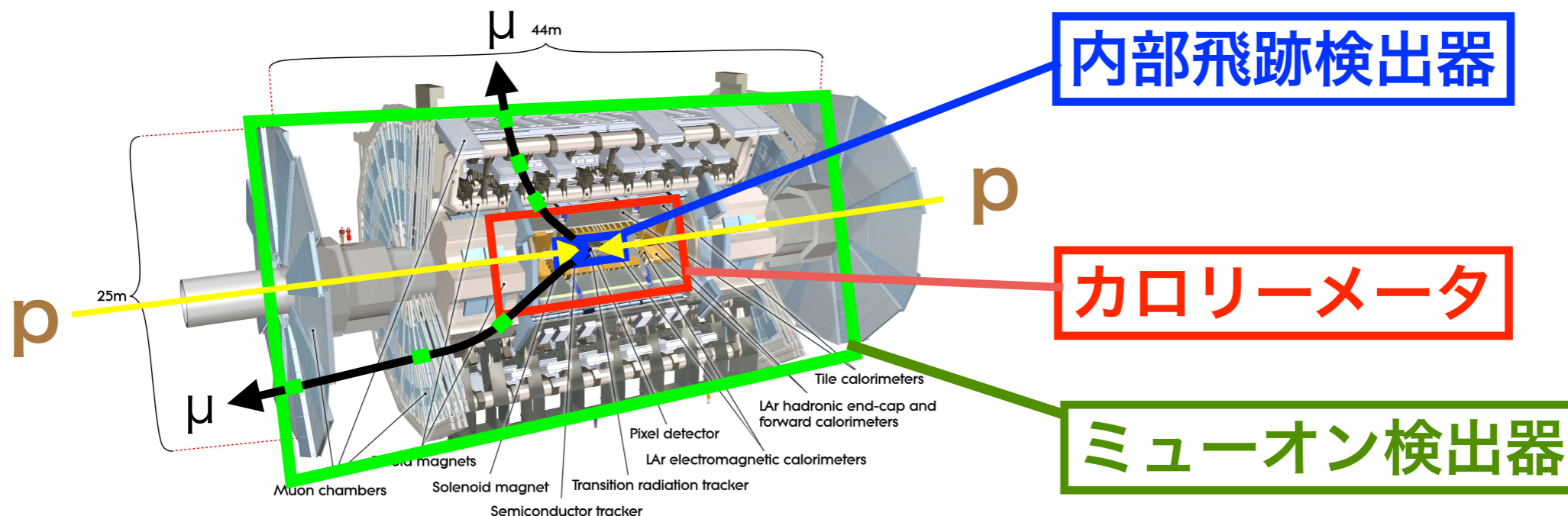
2017.2.20 ICEPPシンポジウム

京都大 野口陽平

- LHCによって陽子陽子を重心系エネルギー13 TeVで衝突させ、
- 衝突の終状態に現れる粒子の識別、エネルギー・運動量の測定により、事象の再構成を行う
- 標準理論の精密な検証と標準理論を超える物理の探索を行う

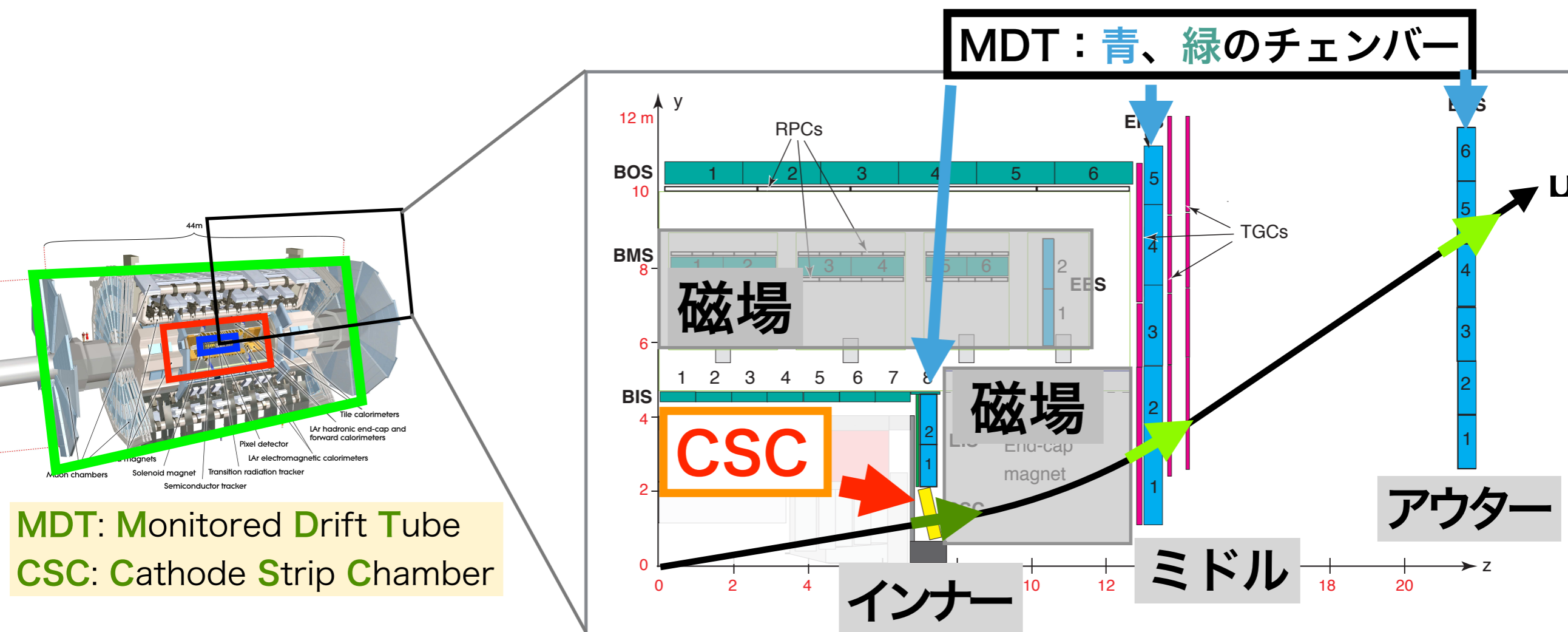
内側から

- ▶ 内部飛跡検出器
- ▶ カロリメータ
- ▶ ミューオン検出器

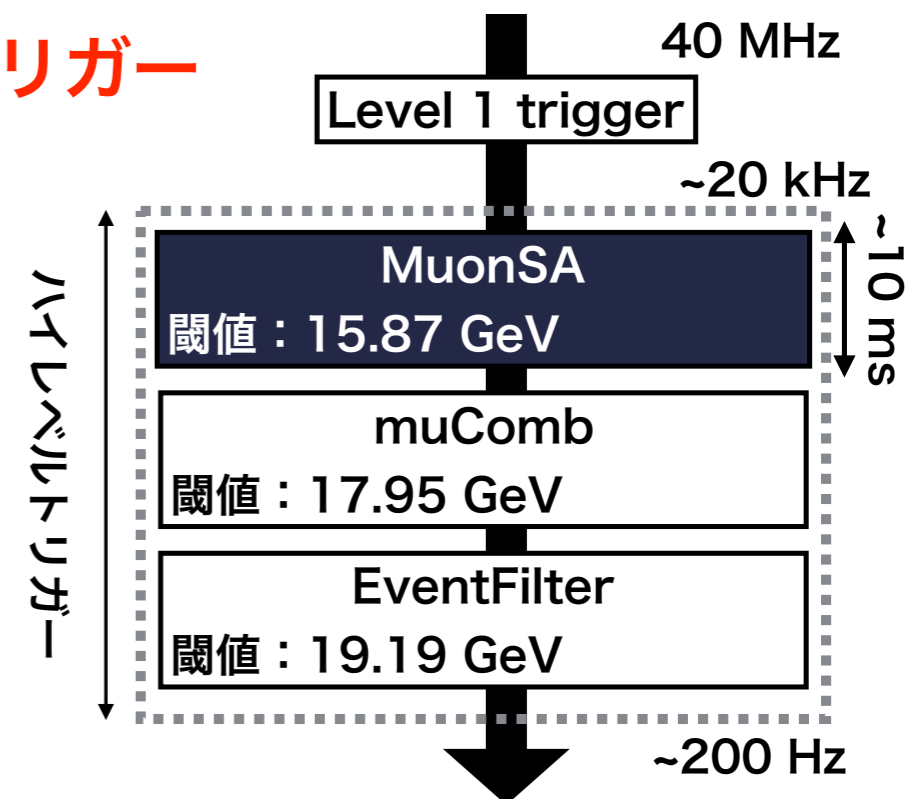


構成要素

- ▶ トロイド磁石
- ▶ トリガー用検出器
- ▶ 飛跡の角度と位置を測定する精密飛跡測定用検出器 (MDT, CSC; 位置分解能=数十 μm)
 - インナー・ミドル・アウター3層
 - 磁場で曲がる飛跡の曲率を測定することで運動量を測定
 - インナーの中心部は粒子到来頻度が高いため、レート耐性の高いCSCでMDTを代用

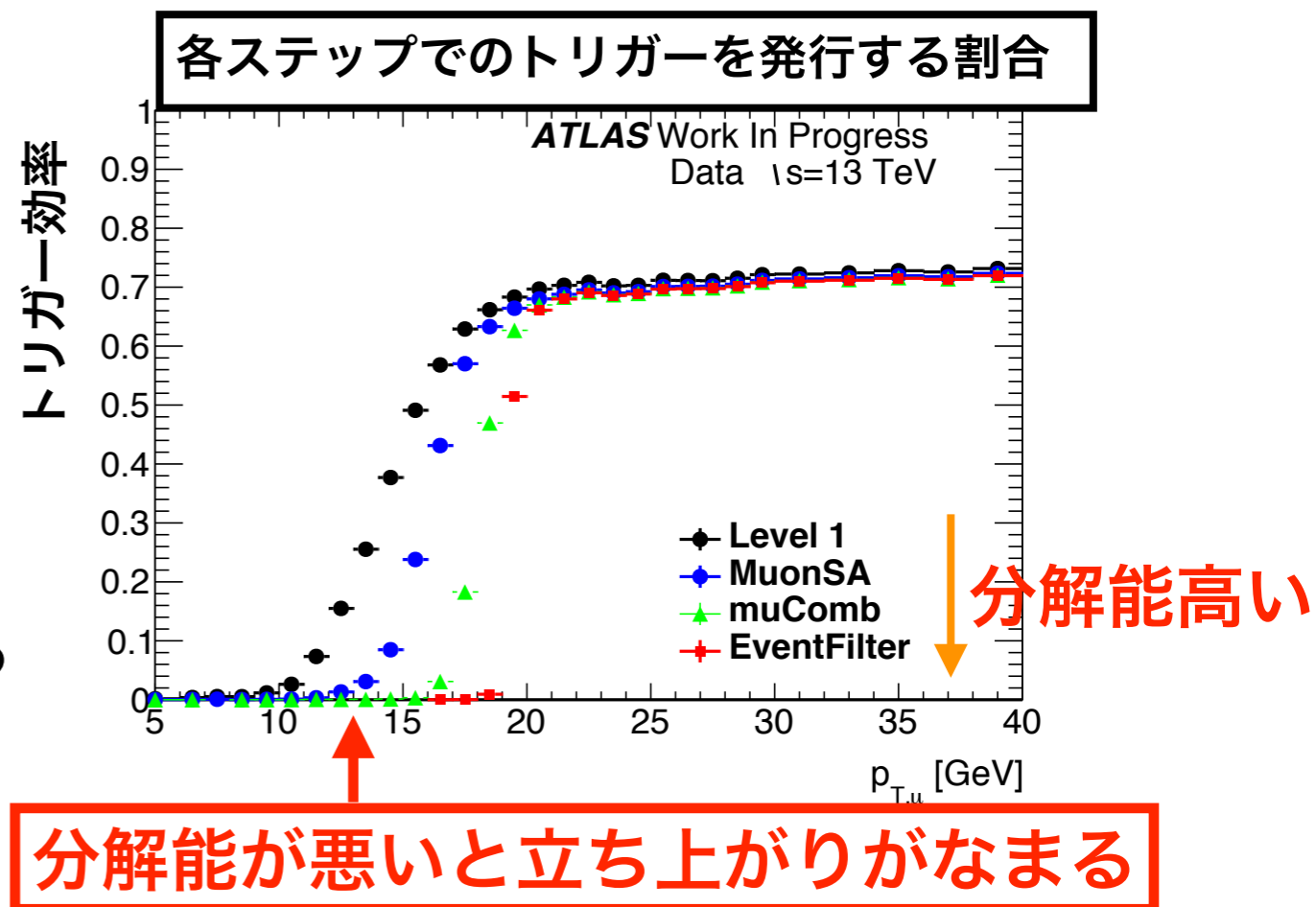


- 全事象を記録できないので、記録前に事象を選別 → トリガー
- 高い横運動量(p_T)のミュオンを含む事象を選ぶ
 - ▶ 新物理に感度がある $H \rightarrow \tau\tau$ 等のプロセスのミュオンに崩壊するモードの解析用の事象取得
- 多段階の選別を行う



- ▶ Level 1: 専用ハードウェア
- ▶ ハイレベルトリガー: CPU上で実行されるソフトウェア
 - ▶ さらに多段階に分割
 - ▶ 各段階で p_T を計算し、閾値を設定して判定
 - 前段ほど p_T 分解能が低い
 - 前段ほど閾値が低く設定される

20 GeV 以上のミュオン用のトリガー



・ ハイレベルトリガーの初段

▶ MuonSAアルゴリズム

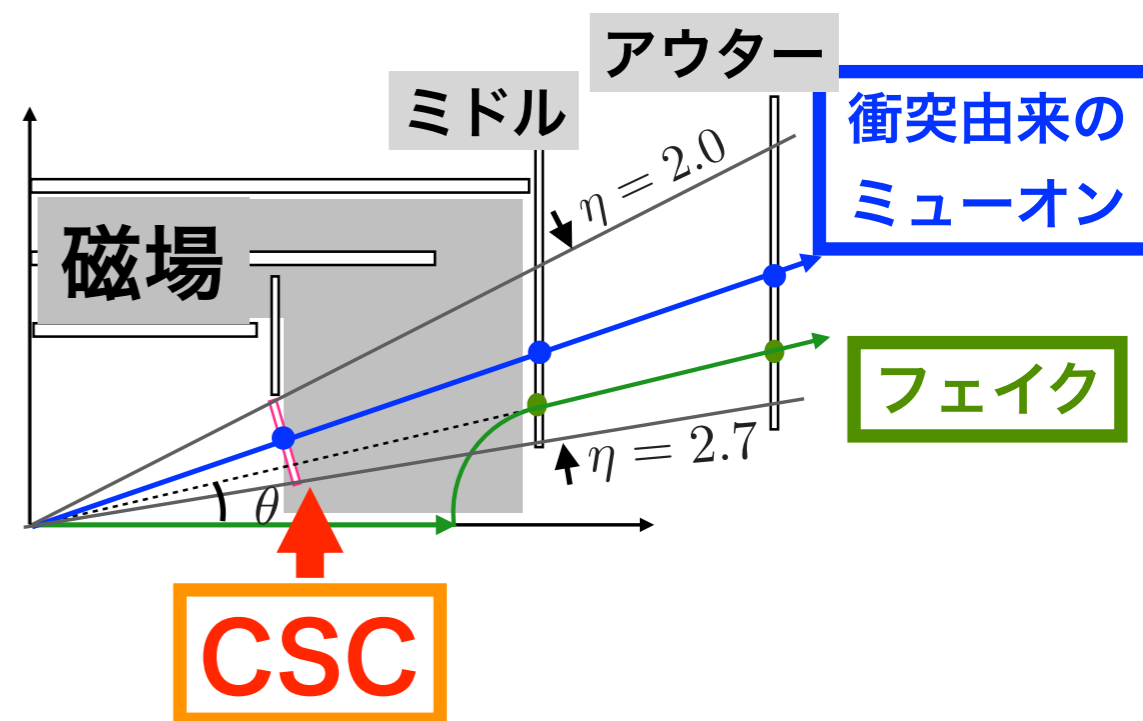
- ▶ ミューオン検出器の情報のみを使用
- ▶ シンプルなアルゴリズムで高速な p_T 計算・判定

・ フェイクトリガー

- ▶ CSCにヒットがないために、CSCとのコインシデンスを要求することで抑制できる。

・ 本研究の目的

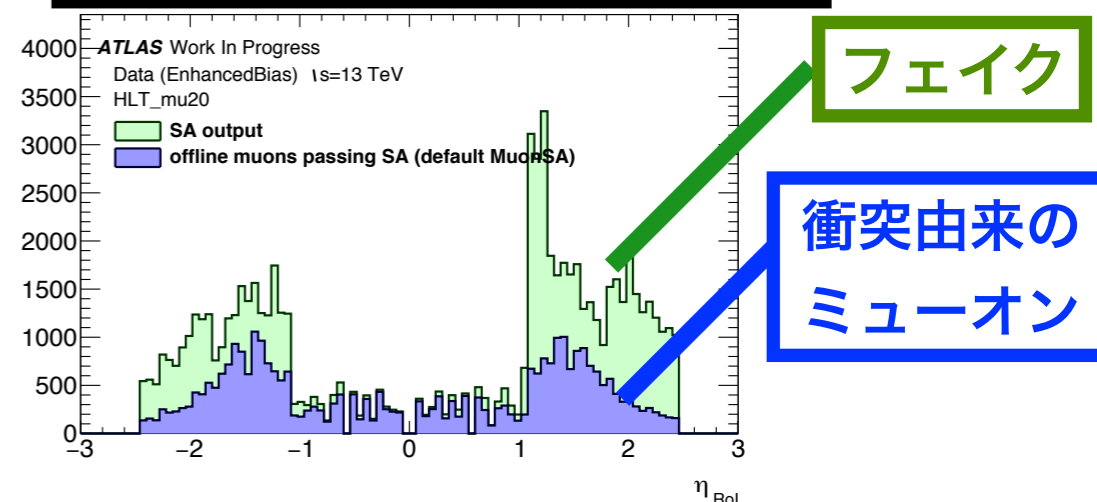
- ▶ トリガーレートを削減し、今後衝突頻度が上昇した時に、 p_T 閾値を現在の値に保持し、探索可能なフェイズスペースを広く保ちたい
- ▶ MuonSAにおいて、CSC検出器の情報を使用して、不要な事象の排除能力を向上させる。具体的には、
 - p_T の測定精度を向上
 - ・ 閾値以下のミューオンを排除
 - コインシデンスによりフェイクトリガーを削減



$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

擬ラピディティ

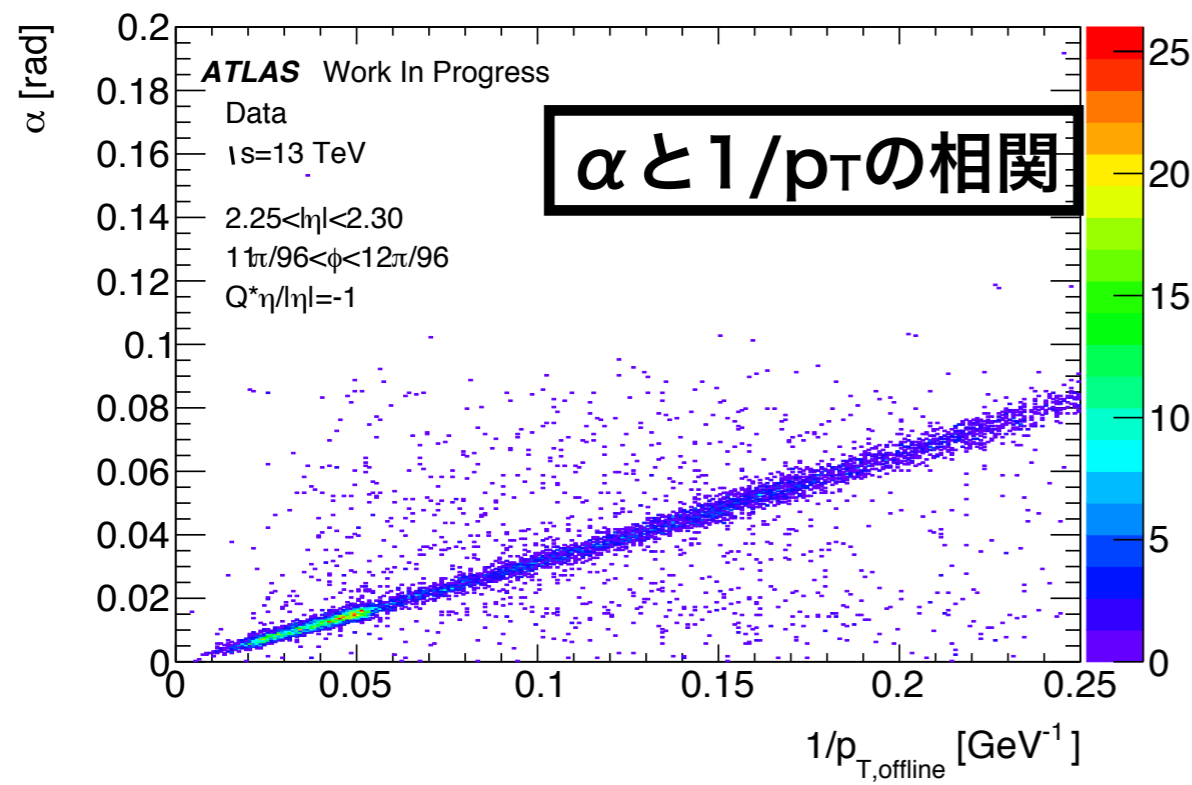
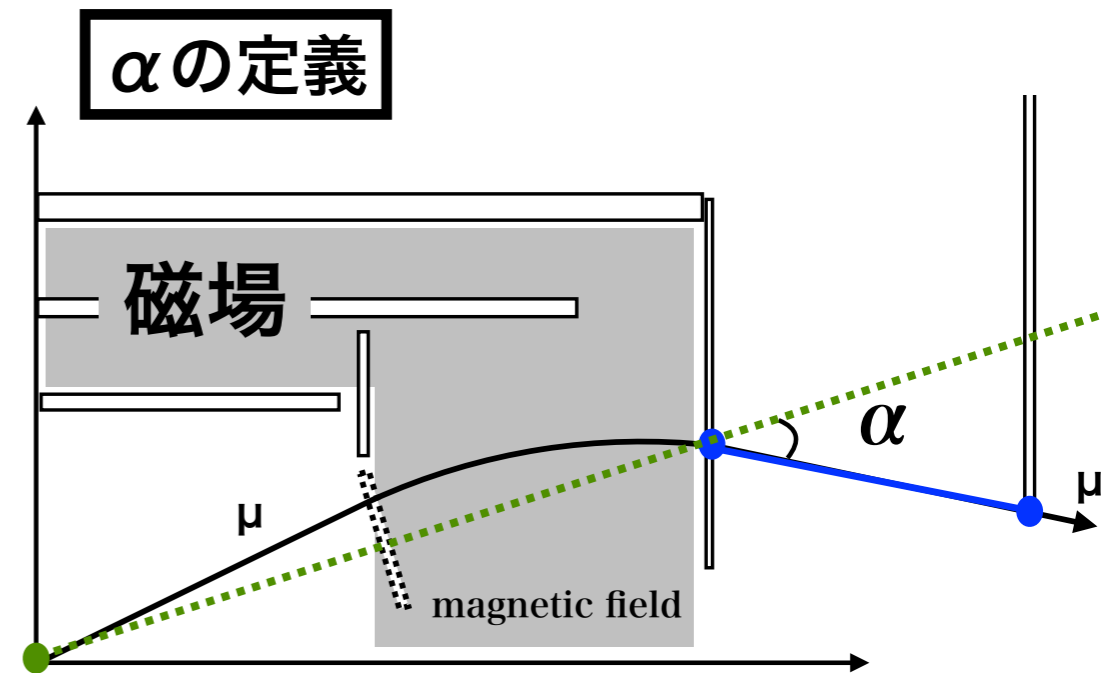
20 GeVのミューオン用トリガー
衝突由来/フェイクの割合



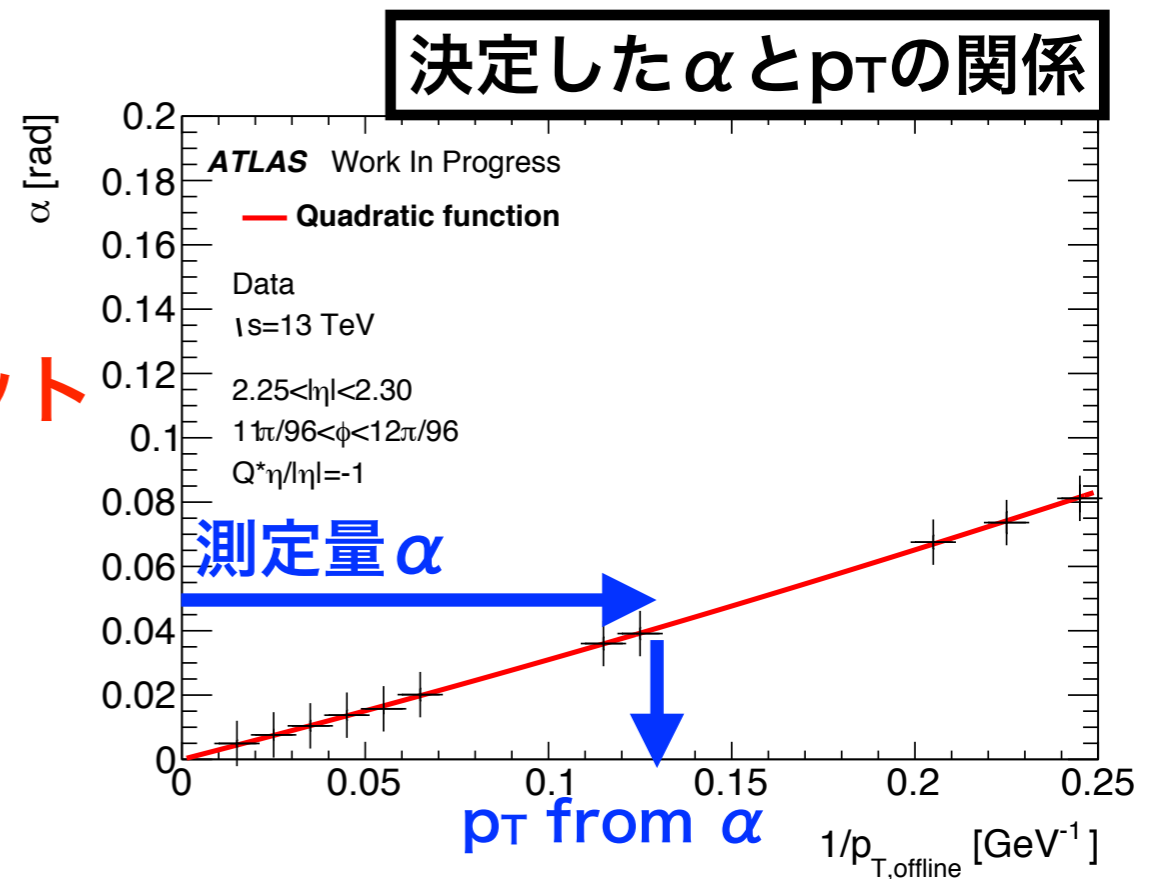
- 角度 α と $1/p_T$ の相関を利用。
- α と $1/p_T$ の関係を以下の二次関数で近似
- フィットにより係数A, Bを前以て決定
- α を測定後即座に以下の式で p_T を計算

$$\alpha = A \left(\frac{1}{p_T} \right) + B \left(\frac{1}{p_T} \right)^2$$

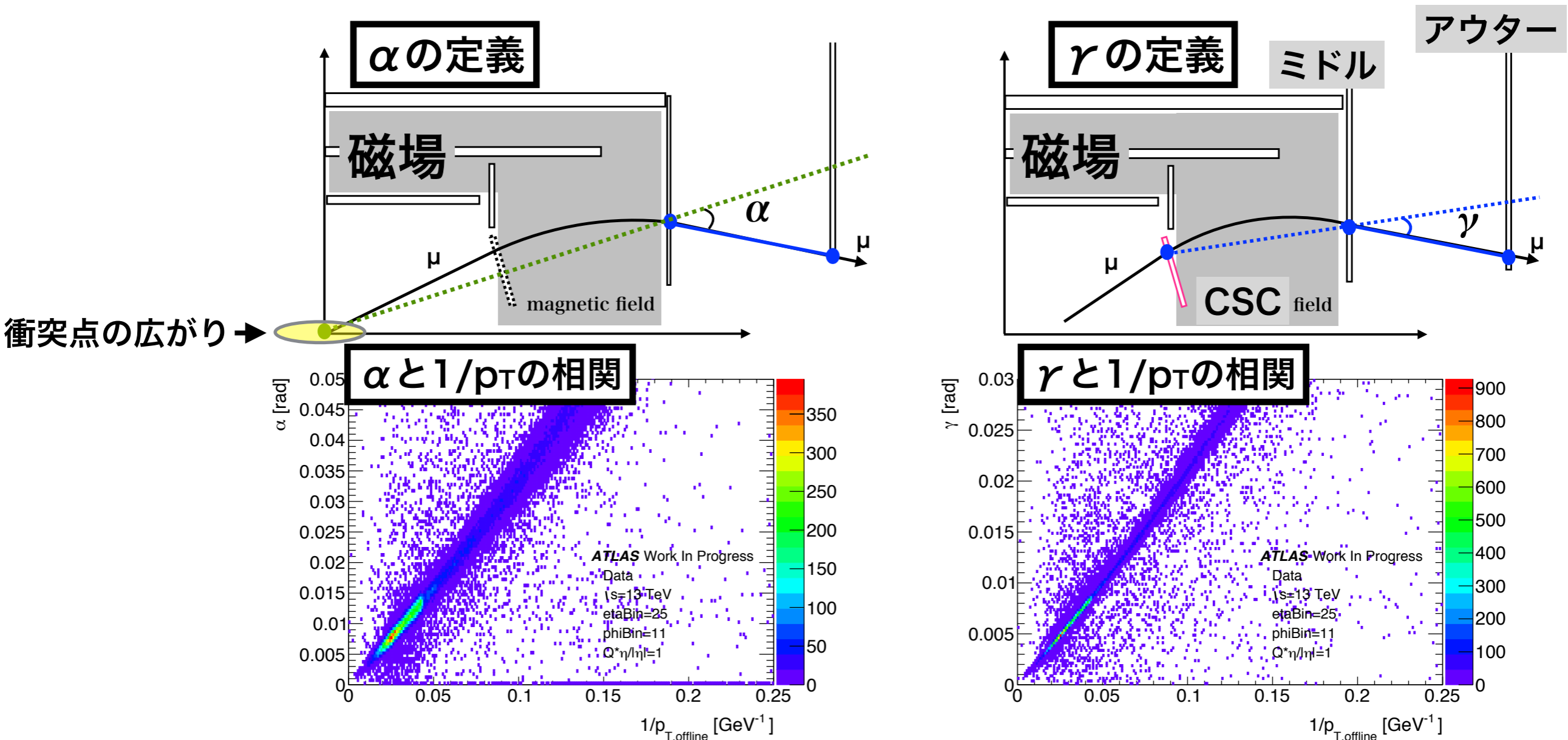
$$\frac{1}{p_T} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B\alpha}}{2B}$$



フィット
→



- 陽子陽子の衝突点はビーム軸方向に約5 cm広がって分布している。
 - 原点を仮定する α を使用して p_T を計算すると精度を悪化させる
- 原点を仮定せずにCSCによる測定で置き換え、新たな変数 γ を導入
 - CSCとミドルでの位置を結んだ直線、ミドルとアウターでの位置を結んだ直線の間の角度
 - α と同様に相関が確認できるので、同じ方法で γ を p_T へ変換する。



衝突点の広がり →

• p_Tの残差(Residual)を考える

$$\text{Residual} = \frac{1/p_{T,x} - 1/p_{T,\text{offline}}}{1/p_{T,\text{offline}}}$$

(x = α, γ)

(p_{T,offline} はデータ取得後に精密に再構成したp_T)

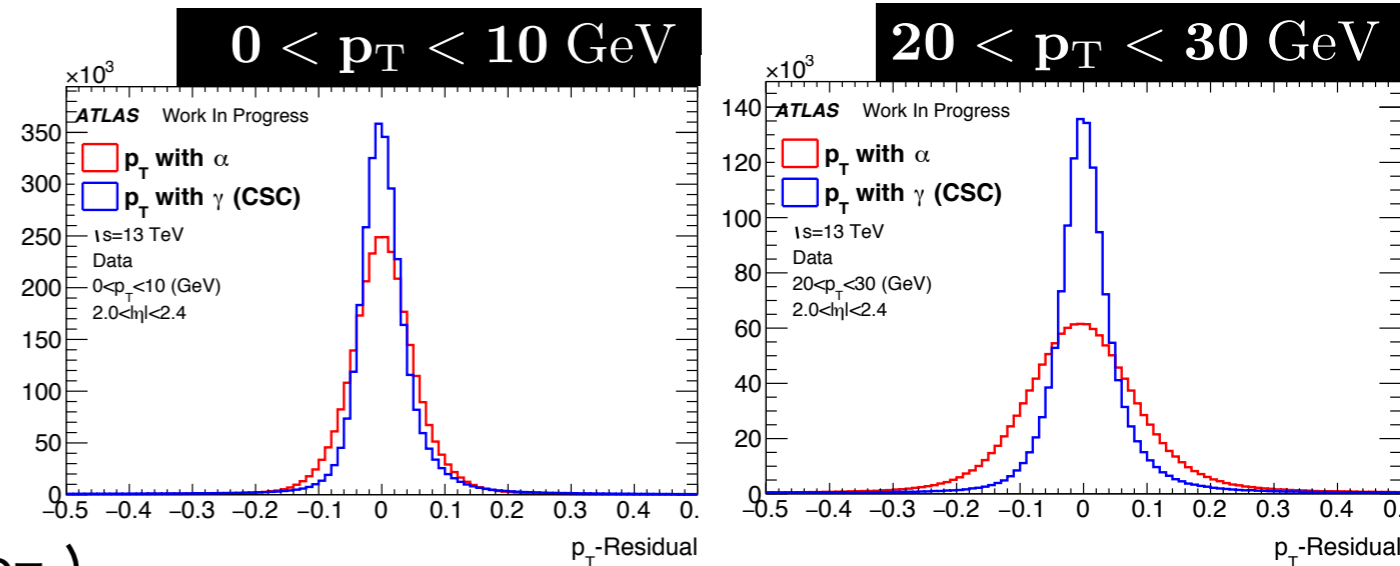
• 各p_Tの範囲におけるp_Tの残差の分布

- ▶ CSC (γ)を使用したほうが0周辺に鋭いピークを作る
- ▶ 分解能が改善している。

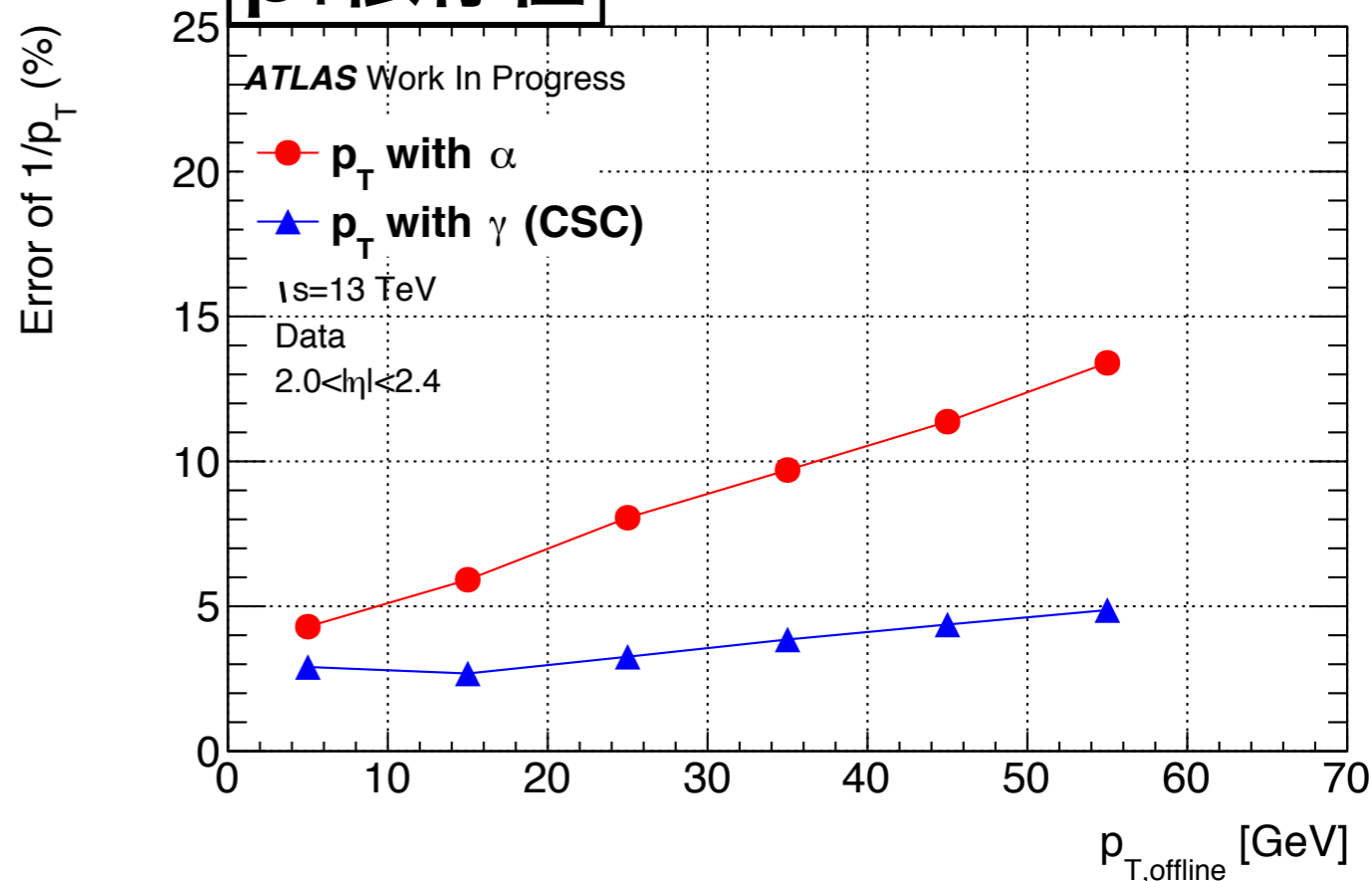
• ガウス分布のσのp_T依存性

- ▶ 分解能が改善している
- ▶ 8% ⇒ 3% @ 25 GeV

残差分布



p_T依存性



トリガー効率の変化

20 GeV以上のミュオン用のトリガーの CSC方向での効率の変化

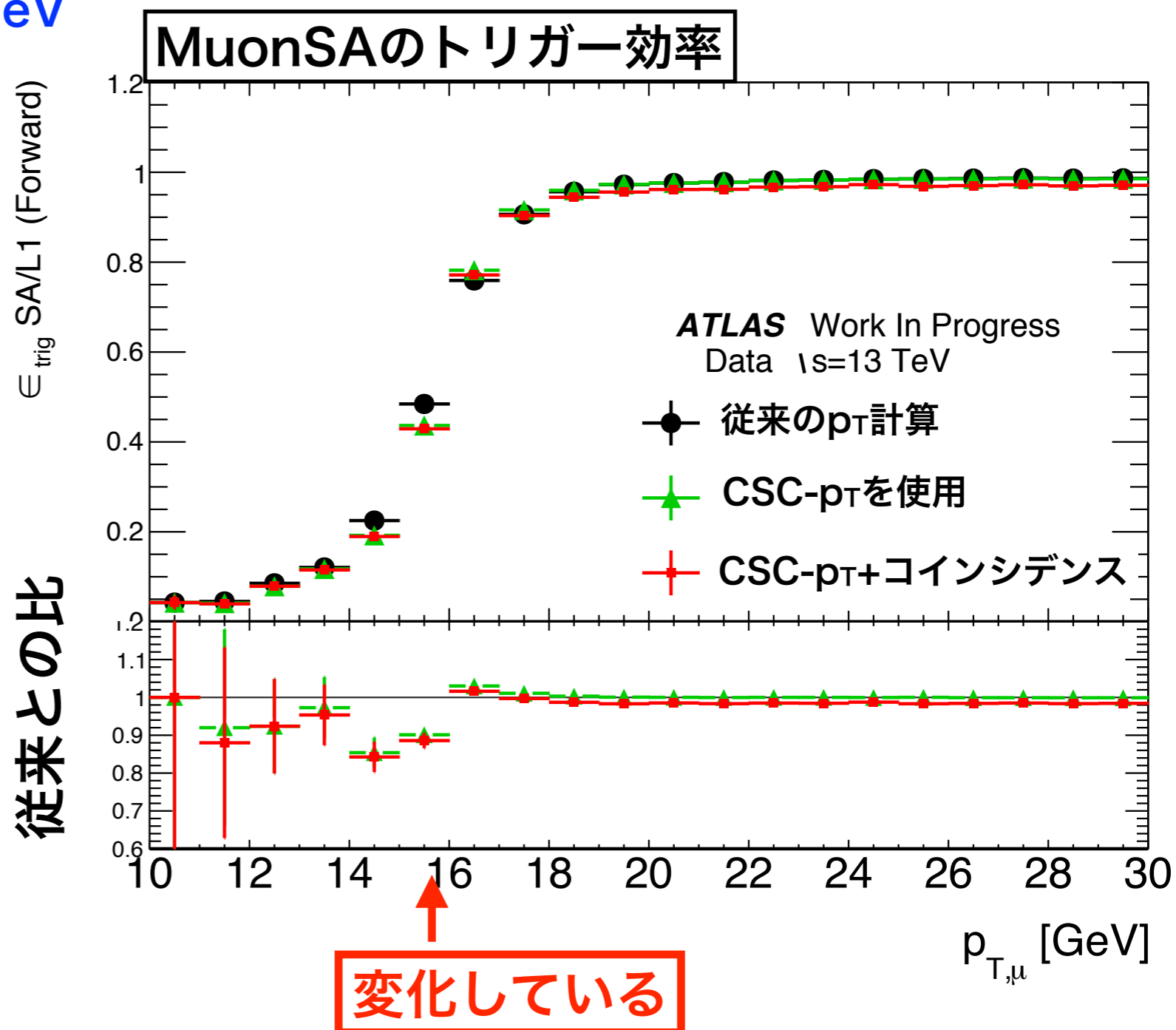
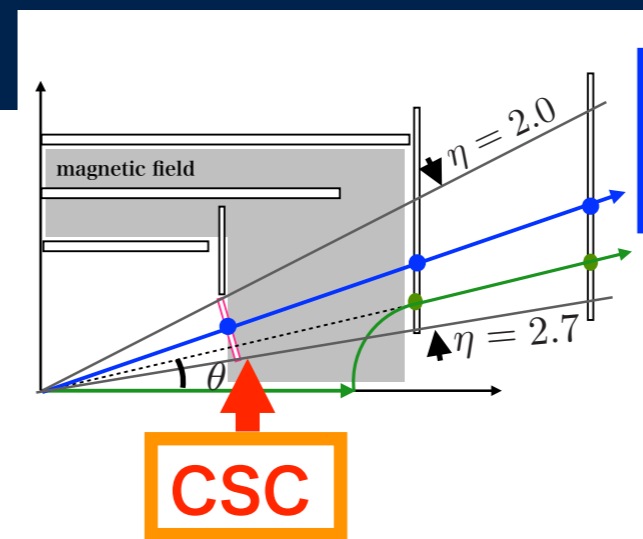
20 GeV以上をすべて取得したいので MuonSA段階での閾値は約16 GeV

CSCの p_T を使用(緑)

- ▶ 20 GeV以上での効率を維持
- ▶ 16 GeV での立ち上がりが鋭くなっている。
 - 分解能の改善の効果

CSCの p_T +コインシデンス(赤)

- ▶ フェイクトリガーを削減するため
- ▶ 20 GeV以上での効率の悪化は約3 %



• CSCの p_T を使用する(シアン)

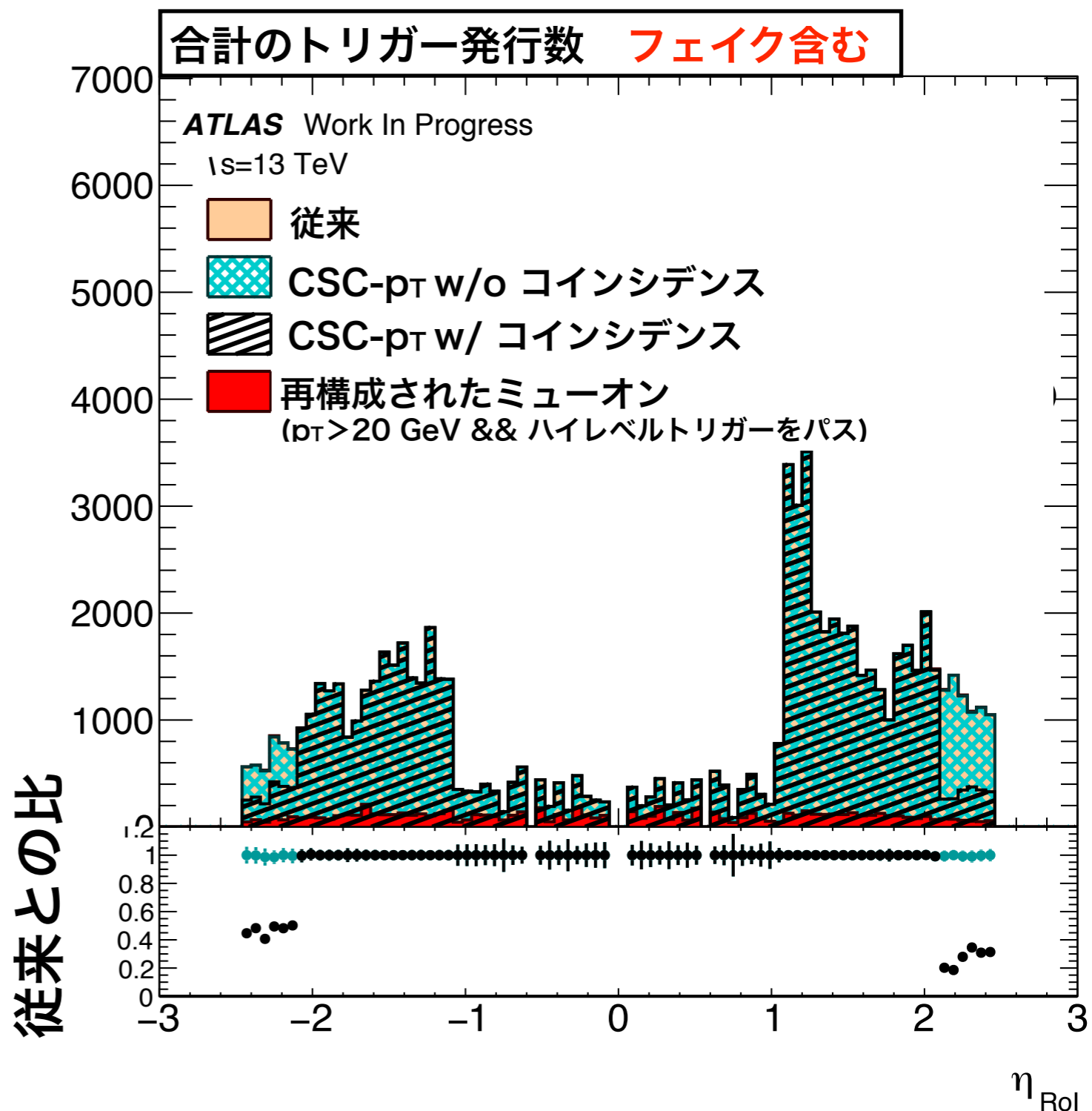
▶ 分解能の改善の効果だけでは、トリガーレートの削減は小さい

- フェイクトリガーが半数以上を占める
- レート削減が閾値付近に限る

• CSCの p_T +コインシデンス(黒)

▶ $|\eta| > 2.1$ で約65 %削減

- フェイクトリガーを約80 %削減
- 閾値以下のミュオンによるトリガーも抑制



- LHC-ATLASのミュオンハイレベルトリガーにおいて初段のアルゴリズムでの p_T 分解能を向上させるため、フォワード部に配置されているCSC検出器を使用した p_T 計算アルゴリズムを開発した。
- パラメータ r を導入することで p_T の分解能を改善
 - ▶ 8%⇒3% @ 25 GeV
- トリガー効率とトリガー発行レート
 - ▶ CSC(r)の使用による p_T 分解能の改善の効果
 - 閾値以下のミュオンによるトリガー発行を削減
 - 全体的なトリガー発行レート削減は小さいが、効率の低下はない
 - ▶ CSCの p_T +コインシデンス
 - 20 GeV以上の効率の悪化は3% ($|\eta| > 2.1$)
 - レートの削減は約65% ($|\eta| > 2.1$)

backup

衝突由来のミュオンに対する トリガーレートの削減

20 GeV以上のミュオン用のトリガーの、
CSCの方向のトリガーレートの変化

CSCの p_T を使用(シアン)

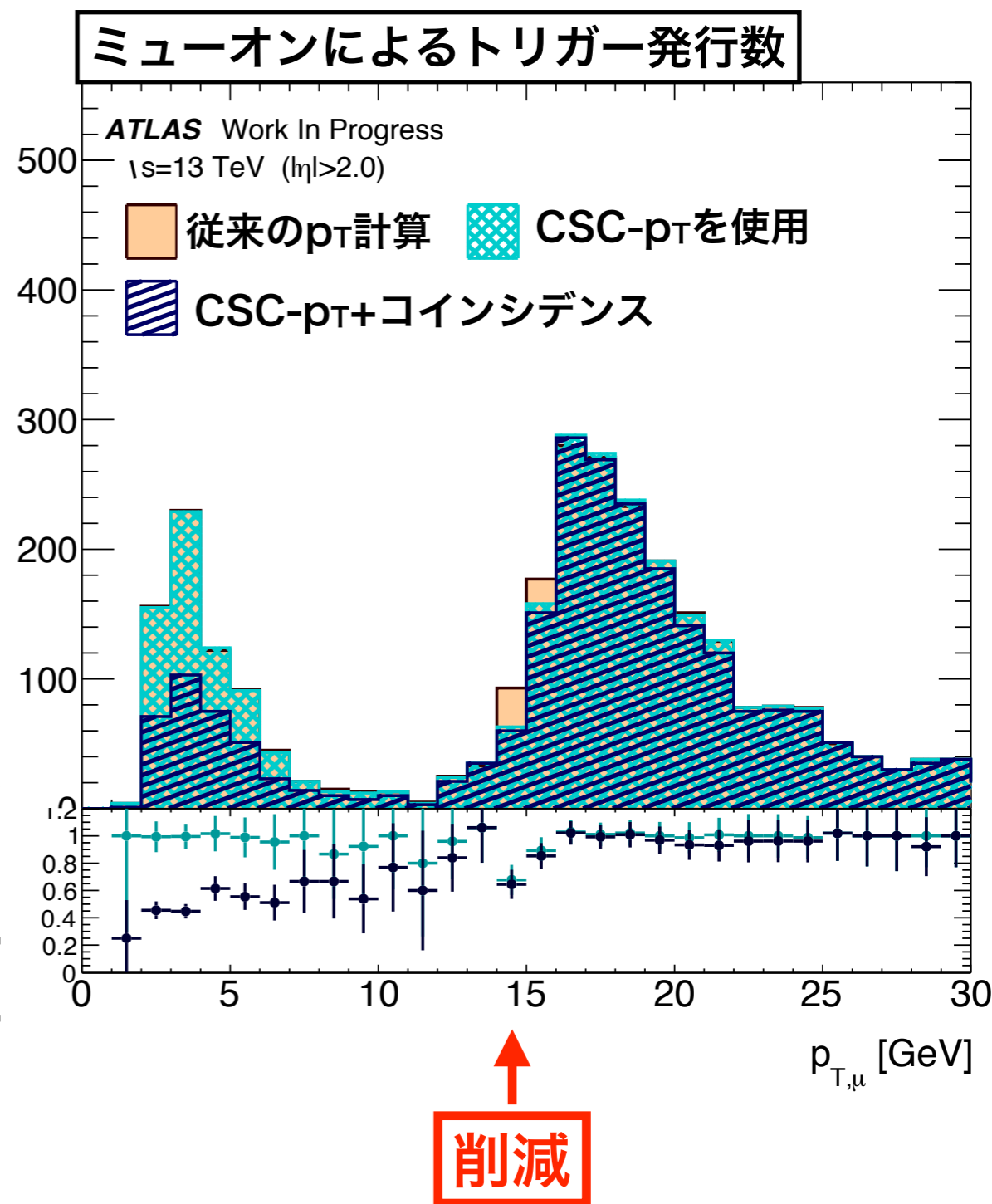
▶ 16 GeV (MuonSAの閾値) 付近で
トリガー発行レートを削減できている

- 分解能の改善の効果
- より低い p_T 領域では残った

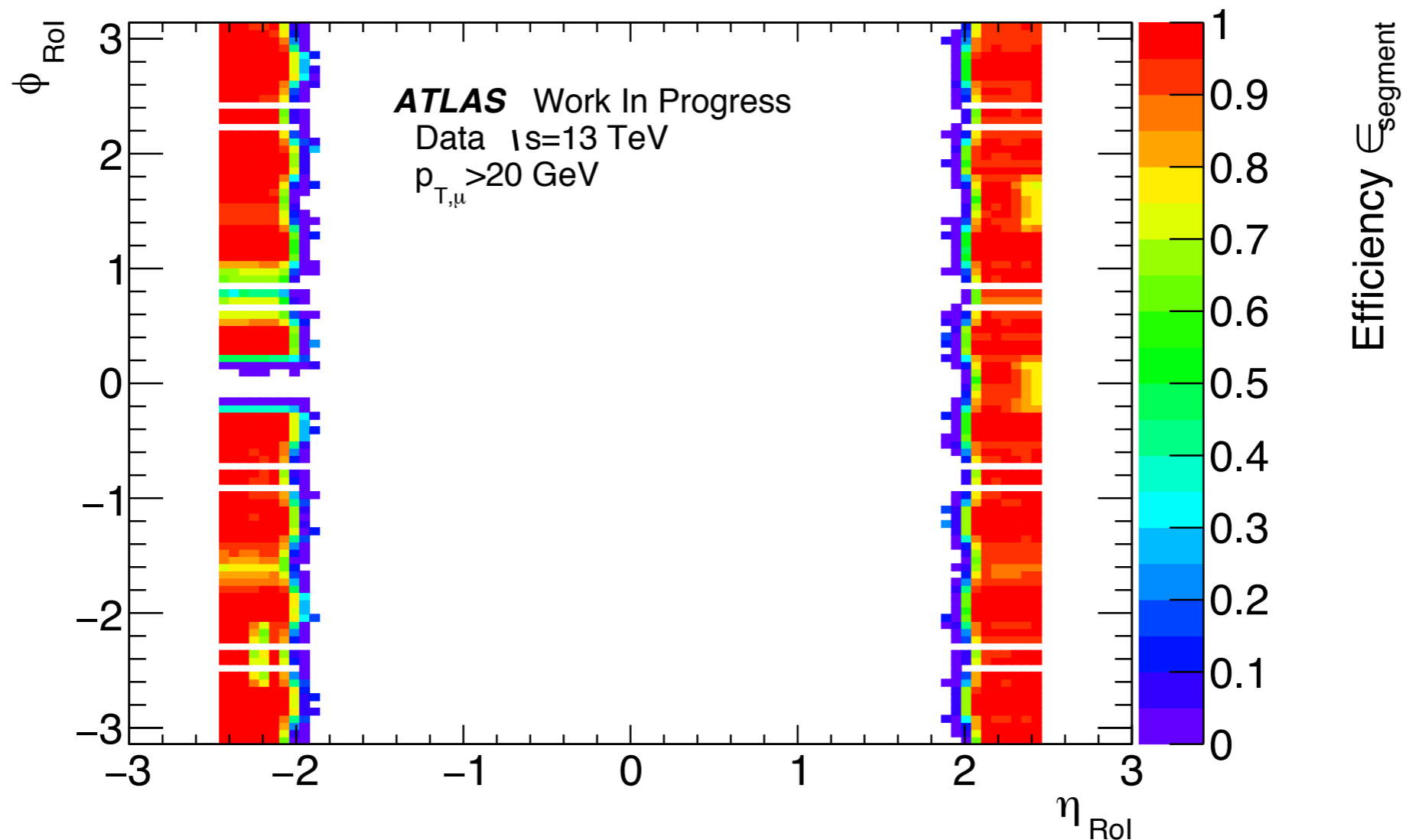
CSCの p_T +コインシデンス(黒)

- ▶ 16 GeV 付近で削減
- ▶ 0-16 GeVの範囲でもトリガーレートが削減

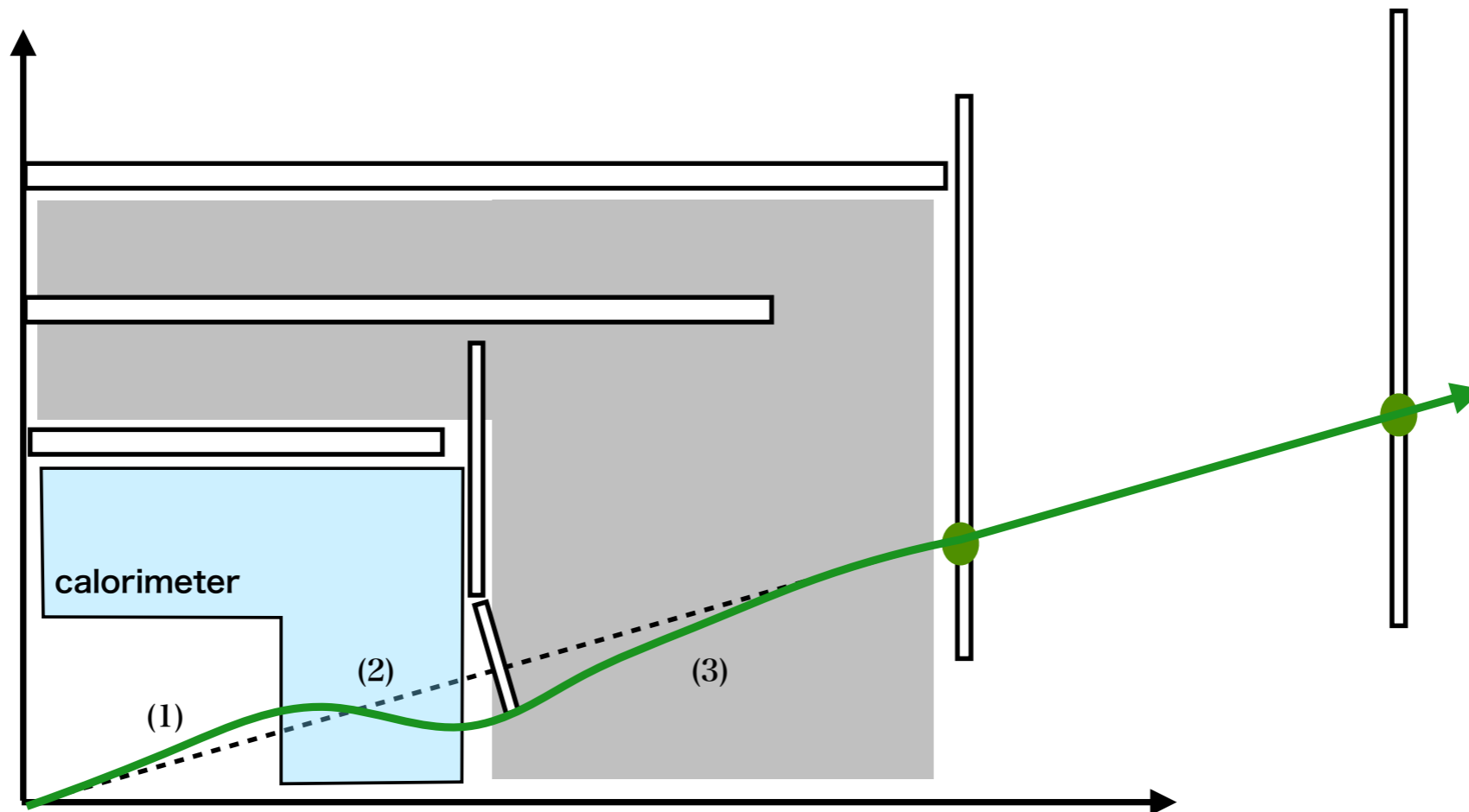
従来との比



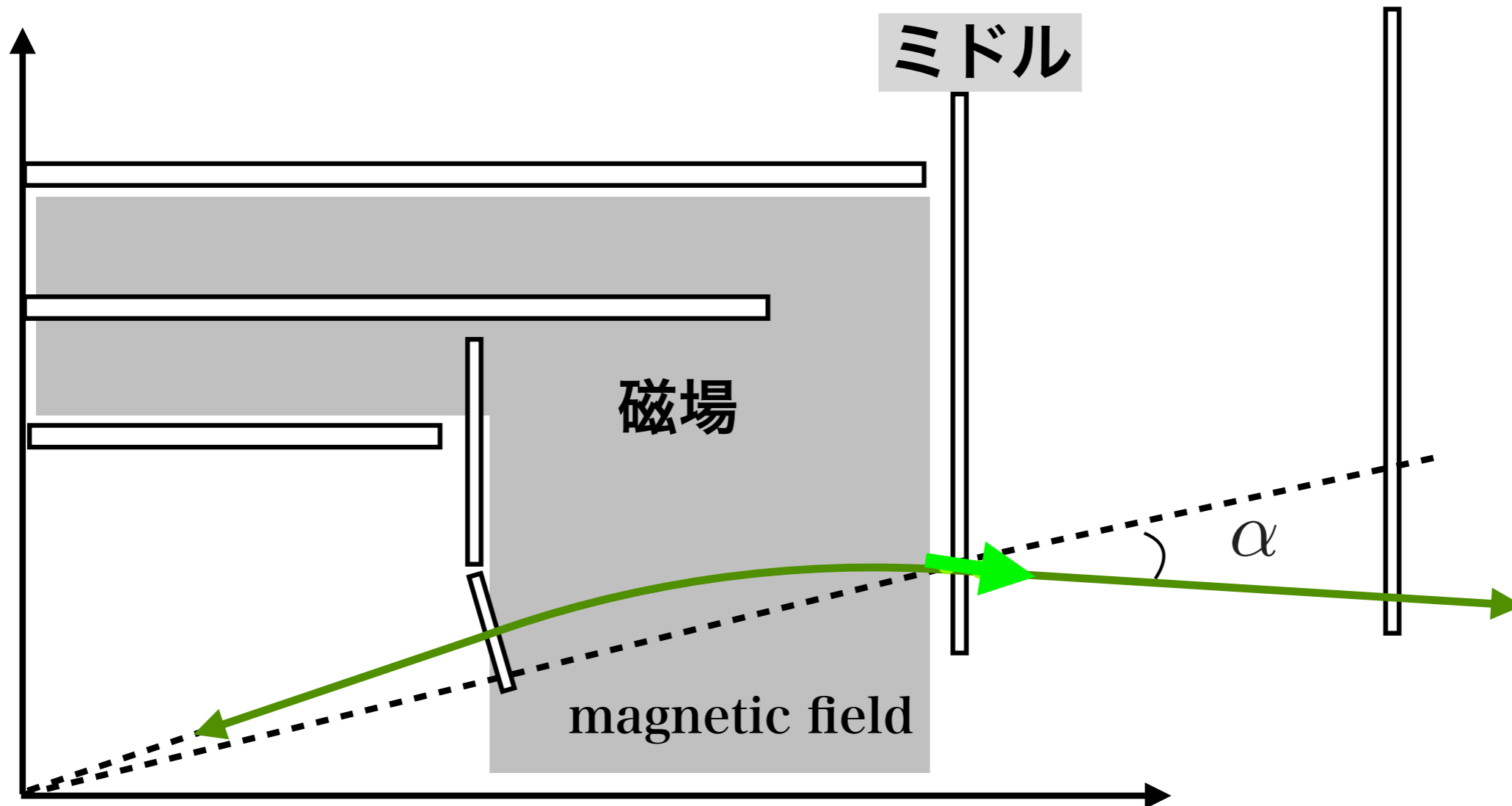
- CSCセグメントの再構成効率(飛跡検出効率)の η, ϕ 分布
 - ▶ $p_T > 20$ GeV(飛跡が直線的)
 - ▶ 内部飛跡検出器とミュオン検出器の飛跡を組み合わせることで再構成されるミュオンを使用



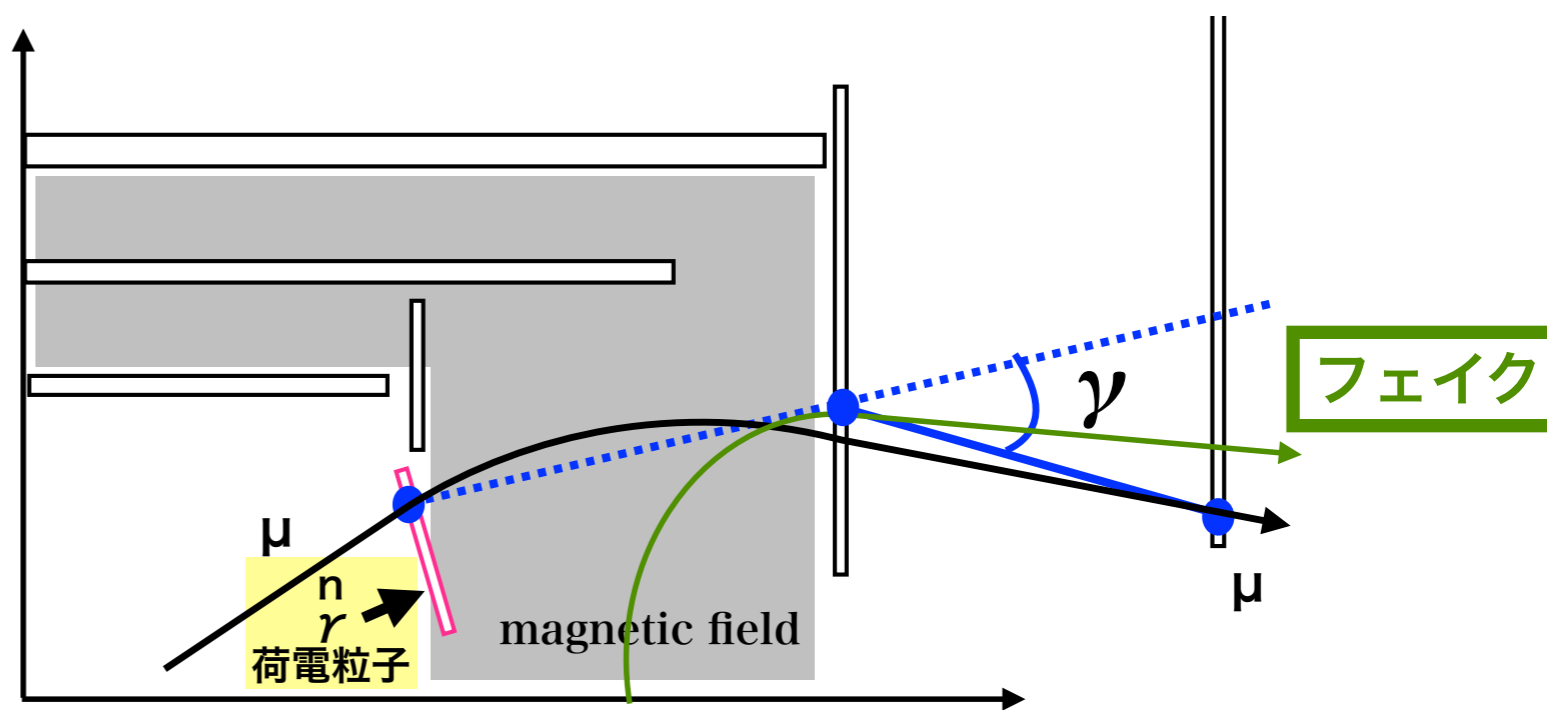
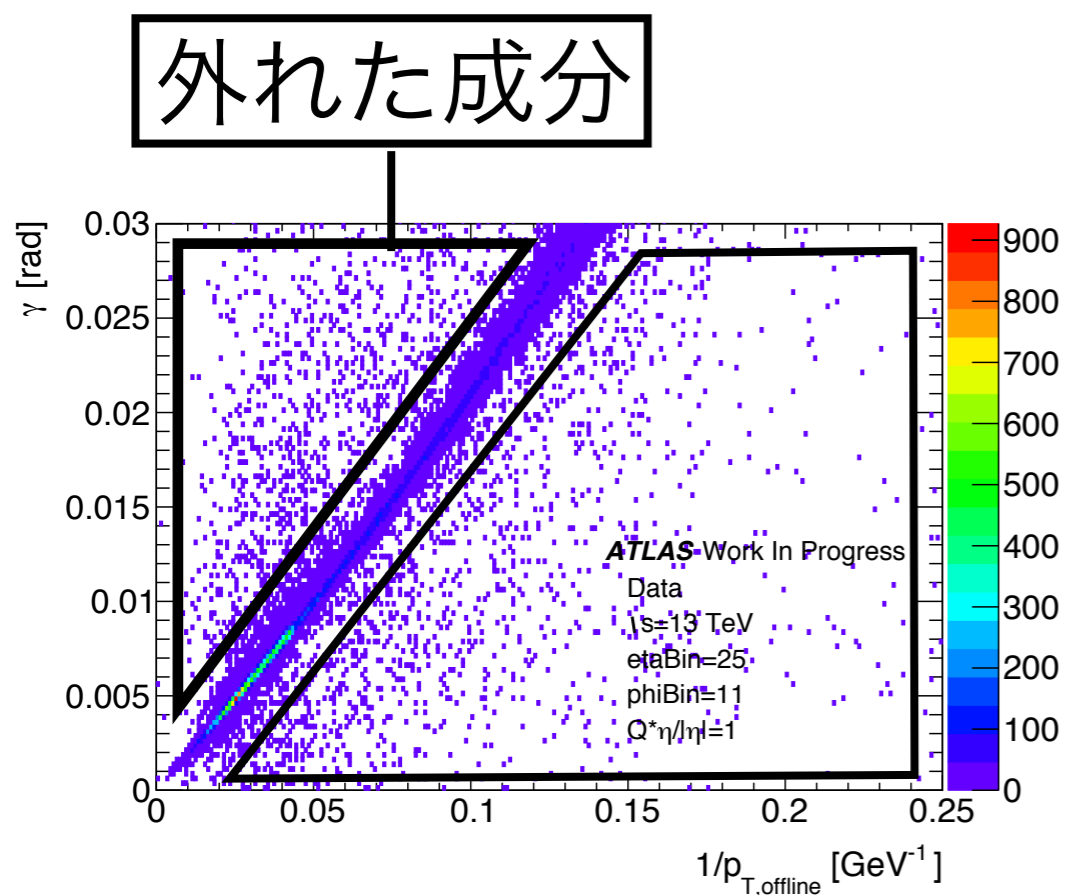
- 低い p_T でもトリガーを通過する例
 - ▶ ソレノイド磁場、multiple scattering、トロイド磁場で曲がる
 - ▶ 図のように最終的に原点からまっすぐ出てきたように見える場合がある
 - ミドル・アウターの情報だけでは高い p_T のミュオンと区別がつかない。



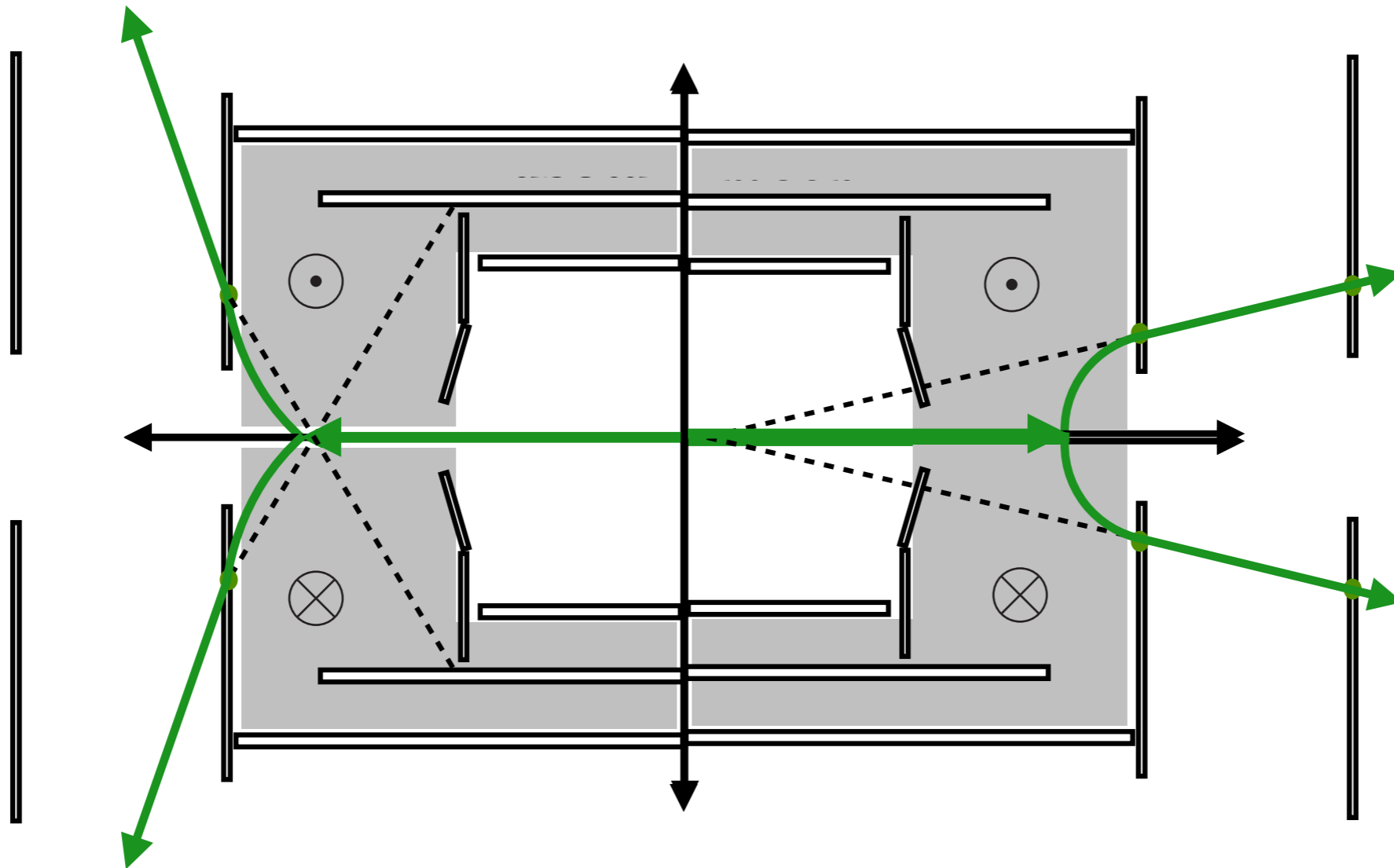
- ミドルでの飛跡をCSCまで外挿し、その周辺でCSC内の飛跡を探す
- 外挿では磁場と運動量を考慮するが、その際 α から求めた p_T を使用



- バックグラウンド由来のフェイクヒットをミュオンによるヒットと誤認してしまい、 γ の計算を間違ってしまう
- 一方横軸の $p_{T,offline}$ は内部飛跡検出器の情報も使用し、ヒットの選別を精密に行うのでそのような誤認が少ないと考えられる

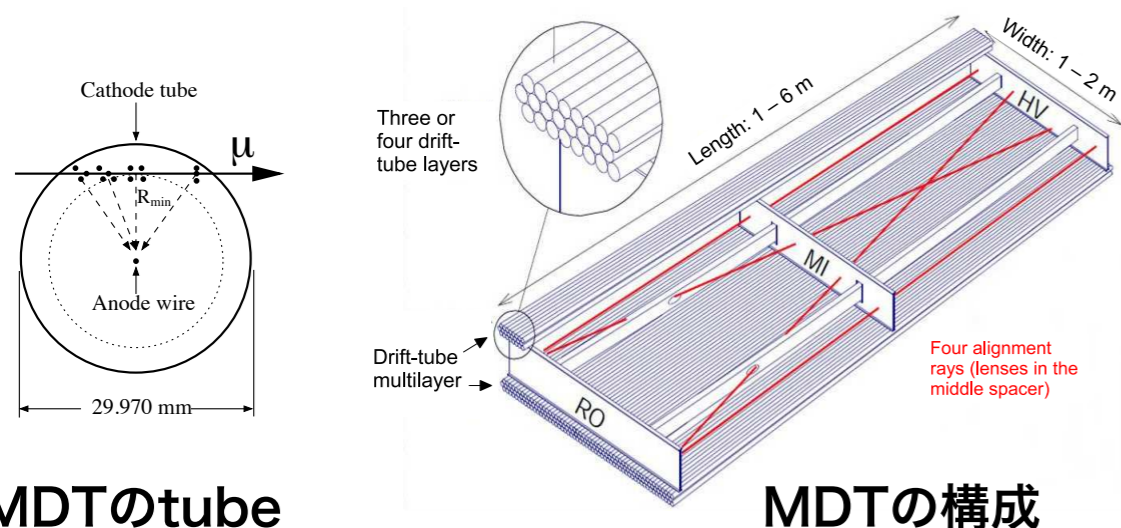


- フェイクトリガーを発行するのは大半が陽子と考えられている
- 左半分では飛跡が原点を向かない



- 飛跡の位置と方向の精密測定を行うMDTとCSCの特徴

Monitored Drift Tube

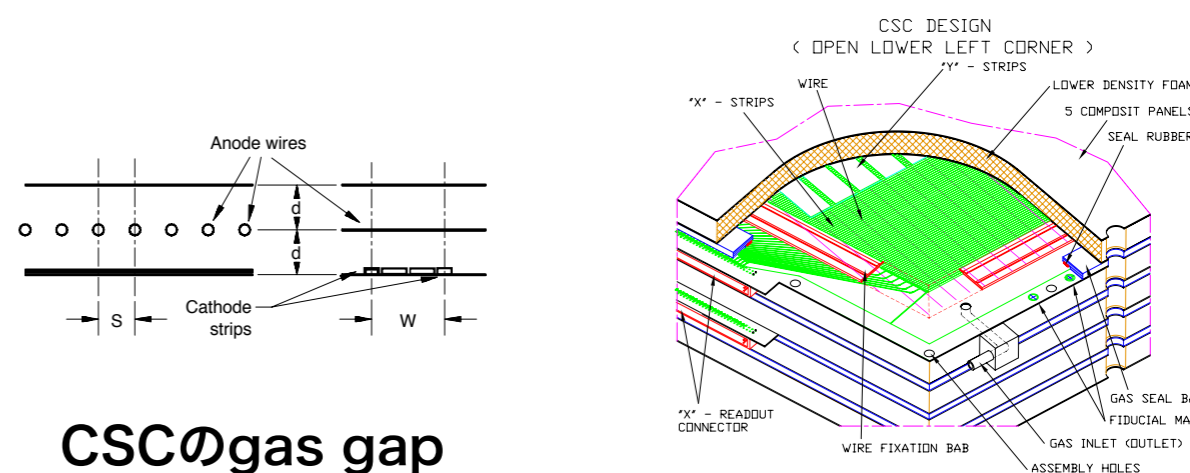


MDTのtube

MDTの構成

- 6層のdrift tubeで飛跡の位置と方向を測定 (Inner は8層)
- η 方向の分解能： $\sim 35\mu\text{m}$
- ϕ 方向の分解能は無い

Cathode Strip Chamber



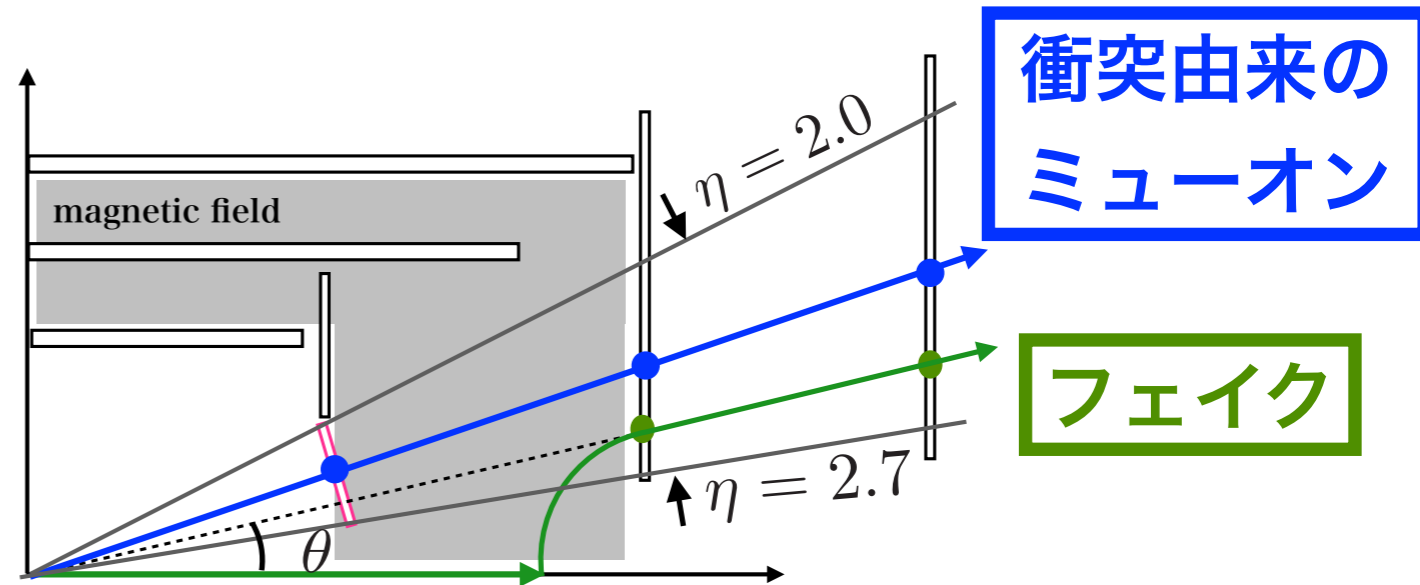
CSCのgas gap

CSCの構成

- 4層のMWPCで飛跡の位置と方向を測定
- stripに分割されたカソードから読み出す。
- 1 gas gapにつき η, ϕ 両方の分解能を持つ。
 - η 方向の分解能： $\sim 40\mu\text{m}$
 - ϕ 方向の分解能： $\sim 5\text{mm}$
- $|\eta| > 2$ のInner layerでは粒子の飛来頻度がMDTの許容頻度を上回るため導入された。

• MuonSAのトリガーを発行する粒子

- ▶ 衝突由来のミュオン
- ▶ フェイク
 - 低いQで散乱された陽子がビームパイプに衝突
 - 二次的な荷電粒子



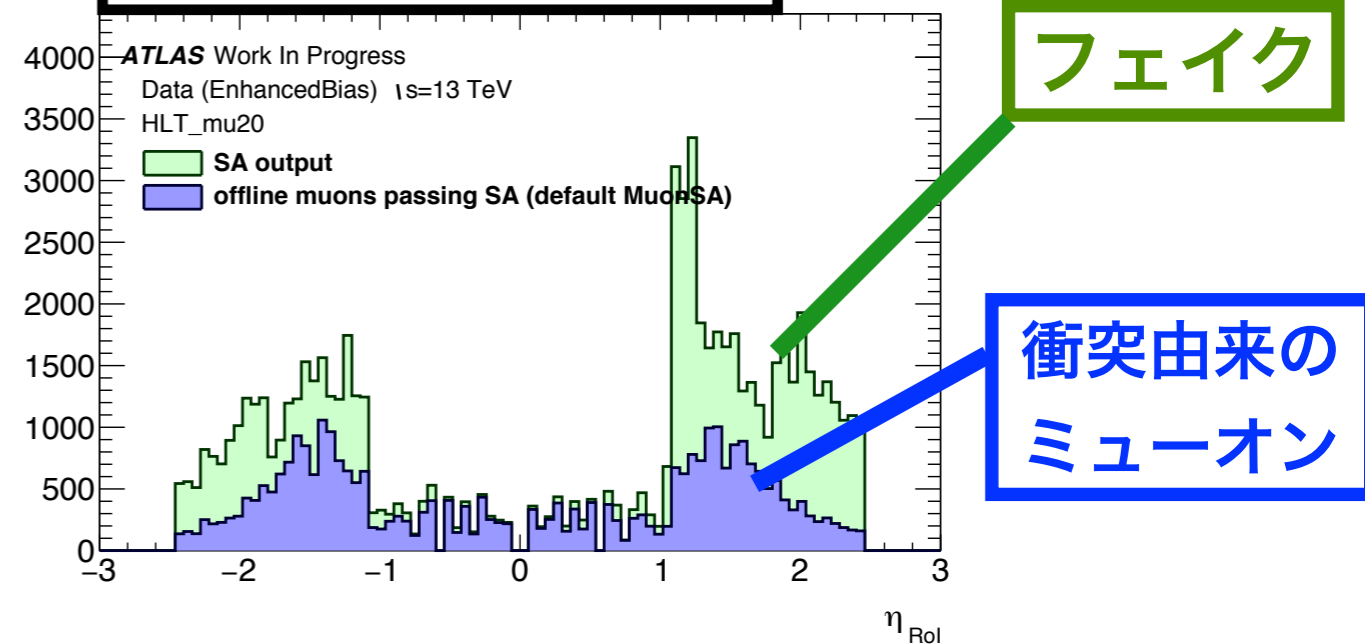
$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

擬ラピディティ

• 磁場より内側の検出器での飛跡検出の有無でフェイクかどうか判別可能

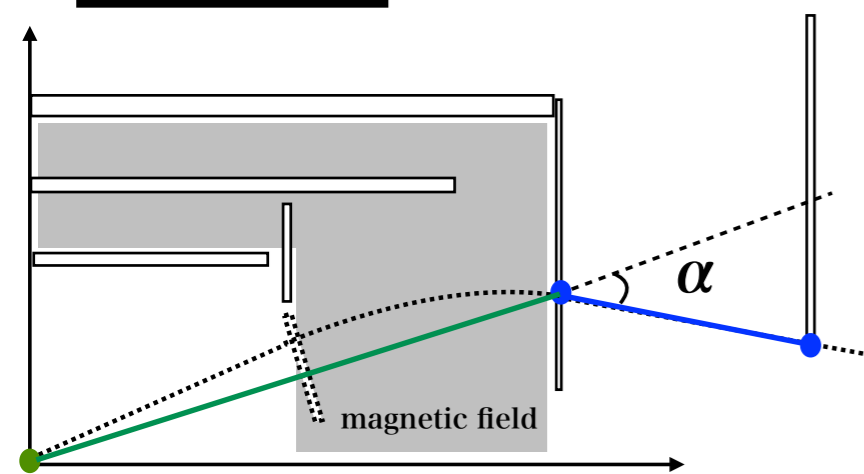
- ▶ CSCとのコインシデンスを要求することでフェイクを落とせる
- ▶ コインシデンスを要求する場合としない場合でレートを測定

閾値20 GeVのトリガー
衝突由来/フェイクの割合

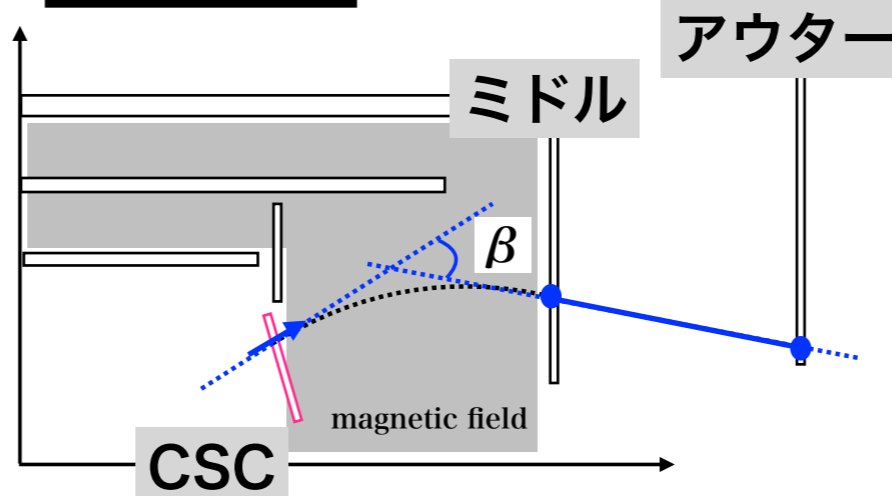


- 陽子陽子の衝突点はビーム軸方向に約5 cm広がって分布している。
 - 原点を仮定する α を使用して p_T を計算すると精度を悪化させる
- 原点を仮定せずにCSCによる測定で置き換え、新たな変数を導入
 - β : CSCによって測定した角度と磁場で曲がった後の飛跡の角度差
 - γ : CSCとミドルでの位置を結んだ直線、ミドルとアウターでの位置を結んだ直線の間角度

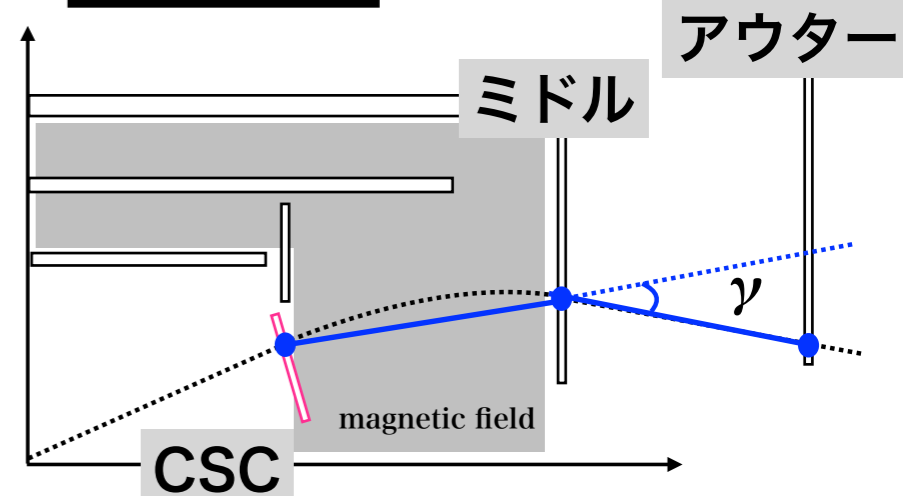
α の定義



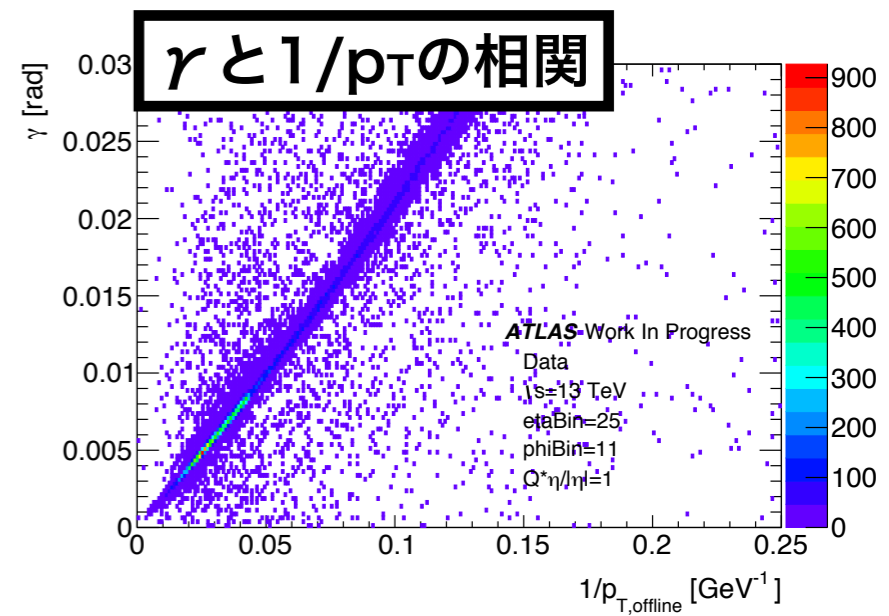
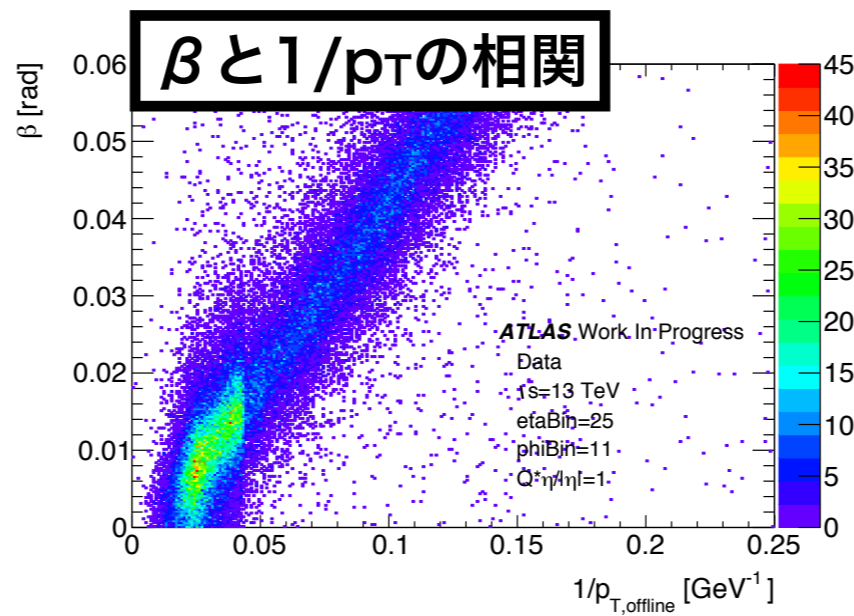
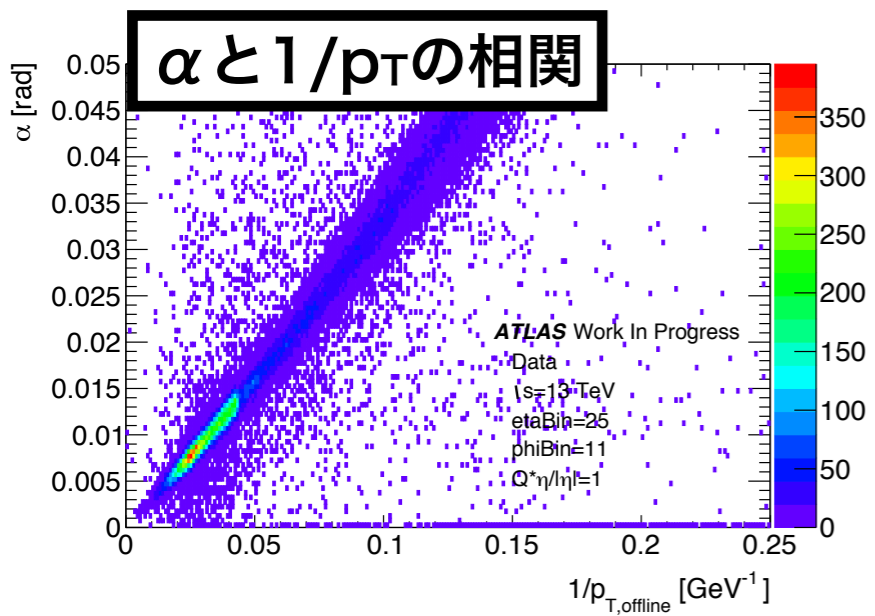
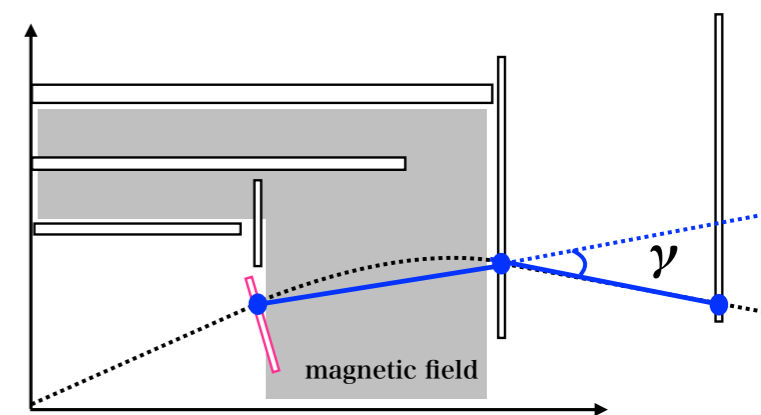
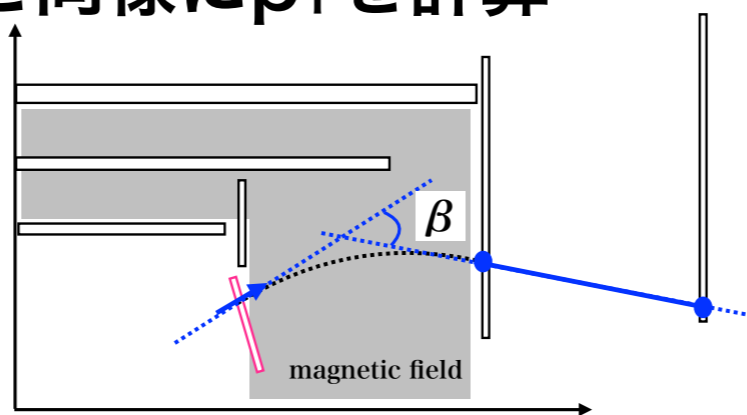
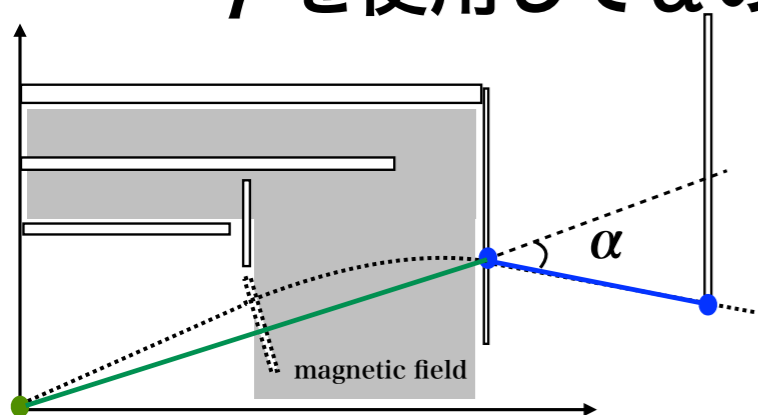
β の定義



γ の定義

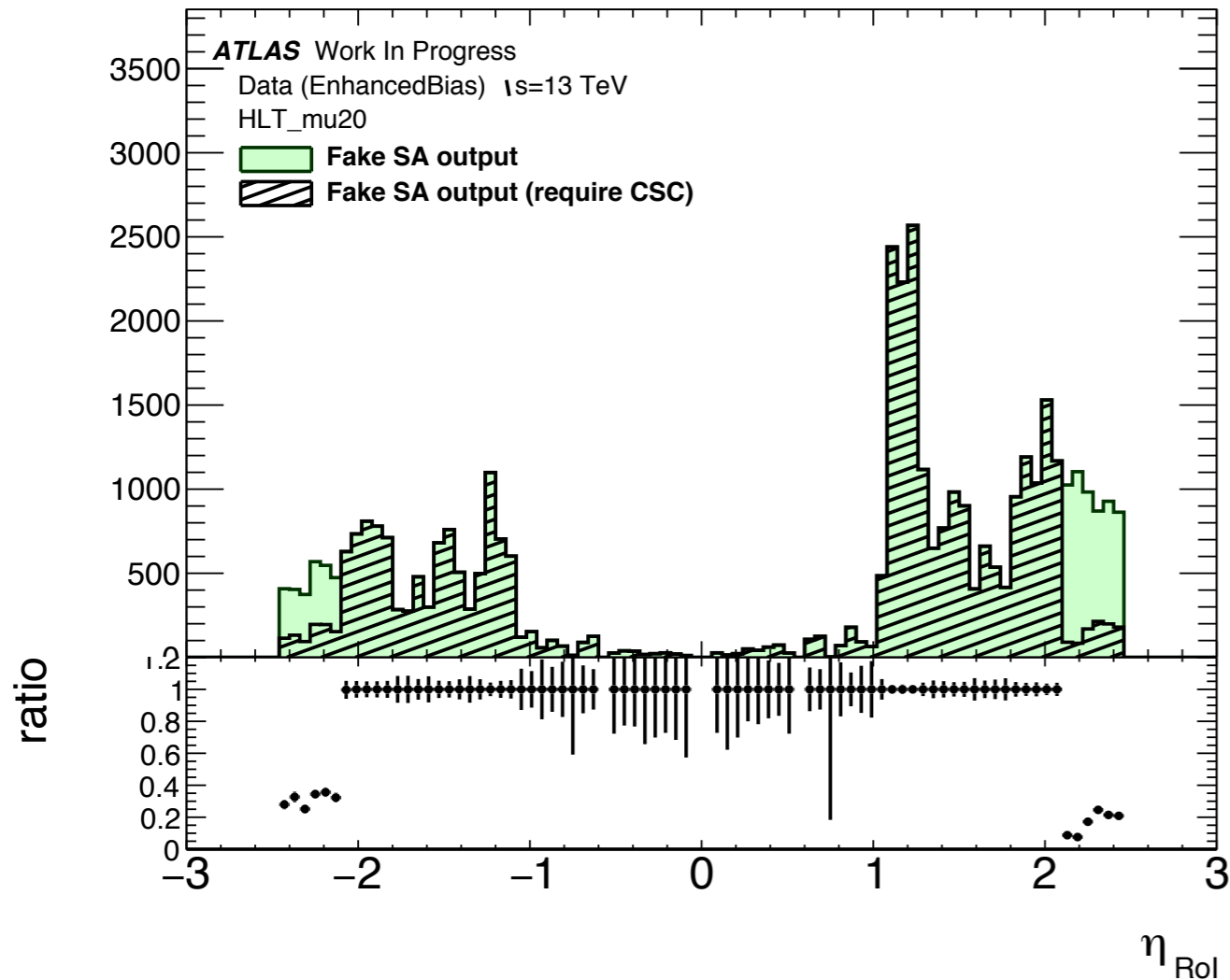


- ある角度を測定値での $1/p_T$ 方向の広がり、 p_T の誤差の目安
 - $\beta \Rightarrow$ 分布が α より太くなる $\Rightarrow p_T$ 分解能の改善が期待できない
 - CSCによる角度測定の精度が悪いと考えられる。
 - CSCの奥行き方向の短さが原因か
 - $\gamma \Rightarrow$ 分布が α より細くなる $\Rightarrow p_T$ 分解能の改善が期待出来る
 - γ を使用して α の時と同様に p_T を計算



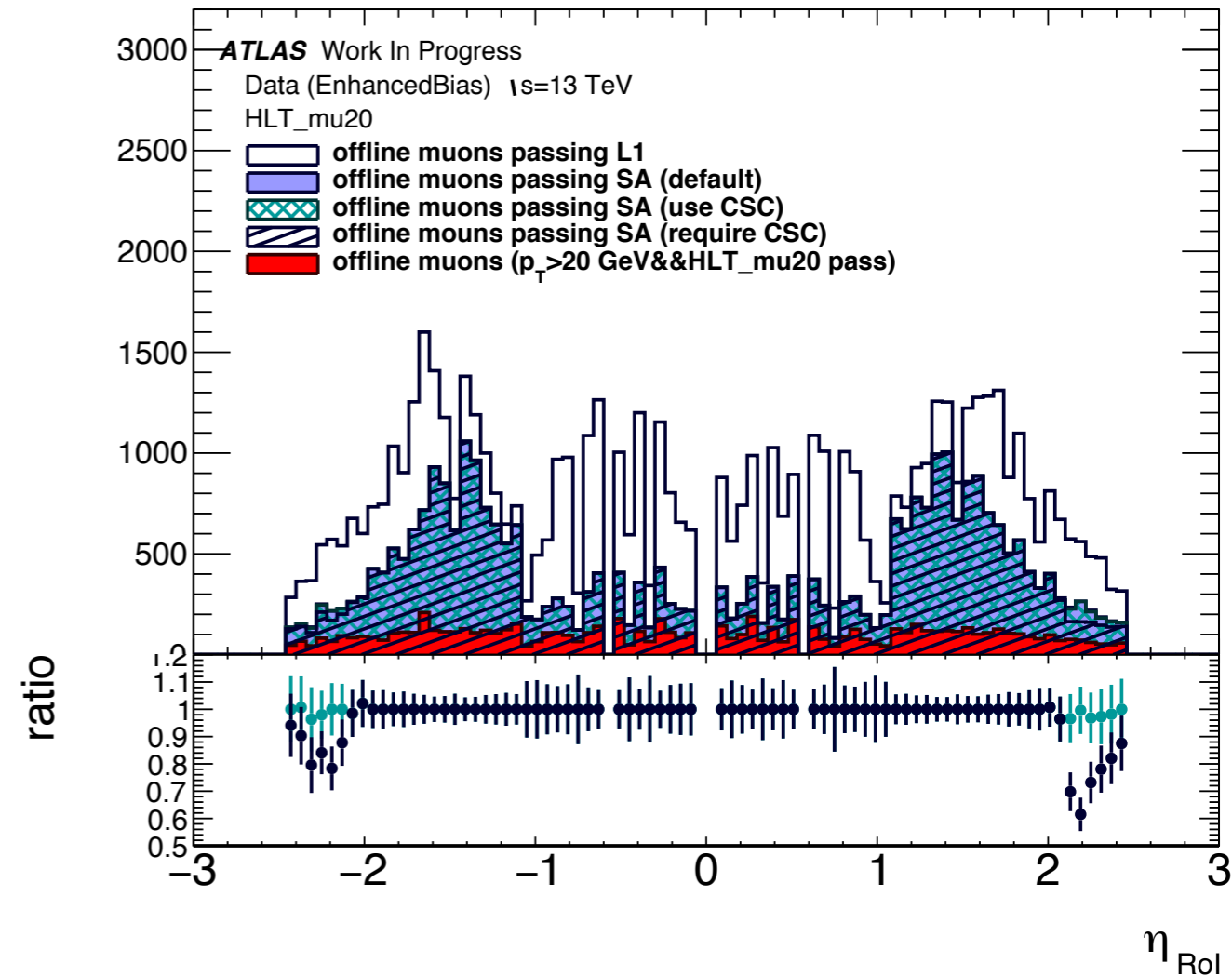
- フェイクトリガーの分布

- ▶ $|\eta| > 2.1$ でCSCとの
コインシデンスを要求
 - 80%削減が可能



- 衝突由来のミュオンによるトリガーの分布

- ▶ $|\eta| > 2.1$ でCSCとの
コインシデンスを要求



衝突由来のミュオンに対する トリガーレートの削減

• CSCの方向のトリガー効率とレートの変化

• CSCとのコインシデンスを 要求しない場合

- ▶ CSCによる p_T が使用可能な場合だけ使う
- ▶ 20 GeV以上での効率を維持
- ▶ 16 GeV (MuonSAの閾値) 付近で
トリガー発行レートを削減

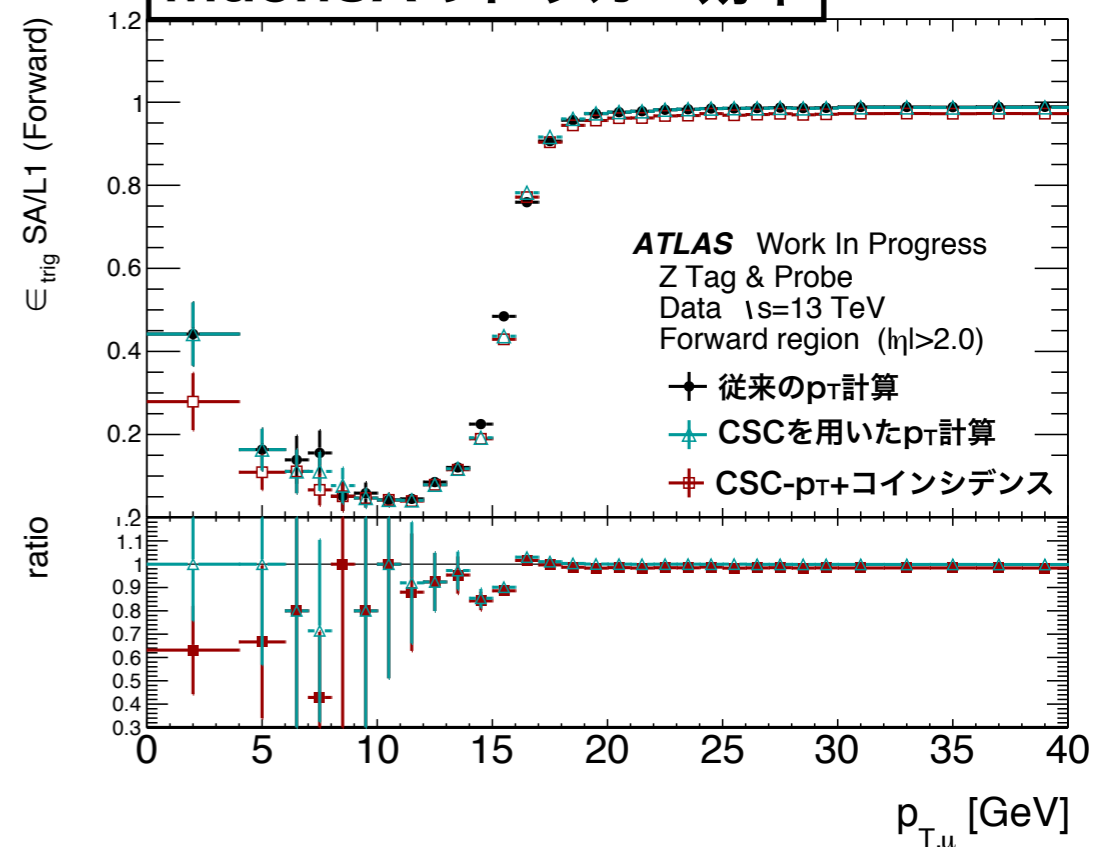
- 分解能の改善の効果
- 変化は閾値付近に限られる

- 5GeV以下では、
CSCによる飛跡検出効率が低い

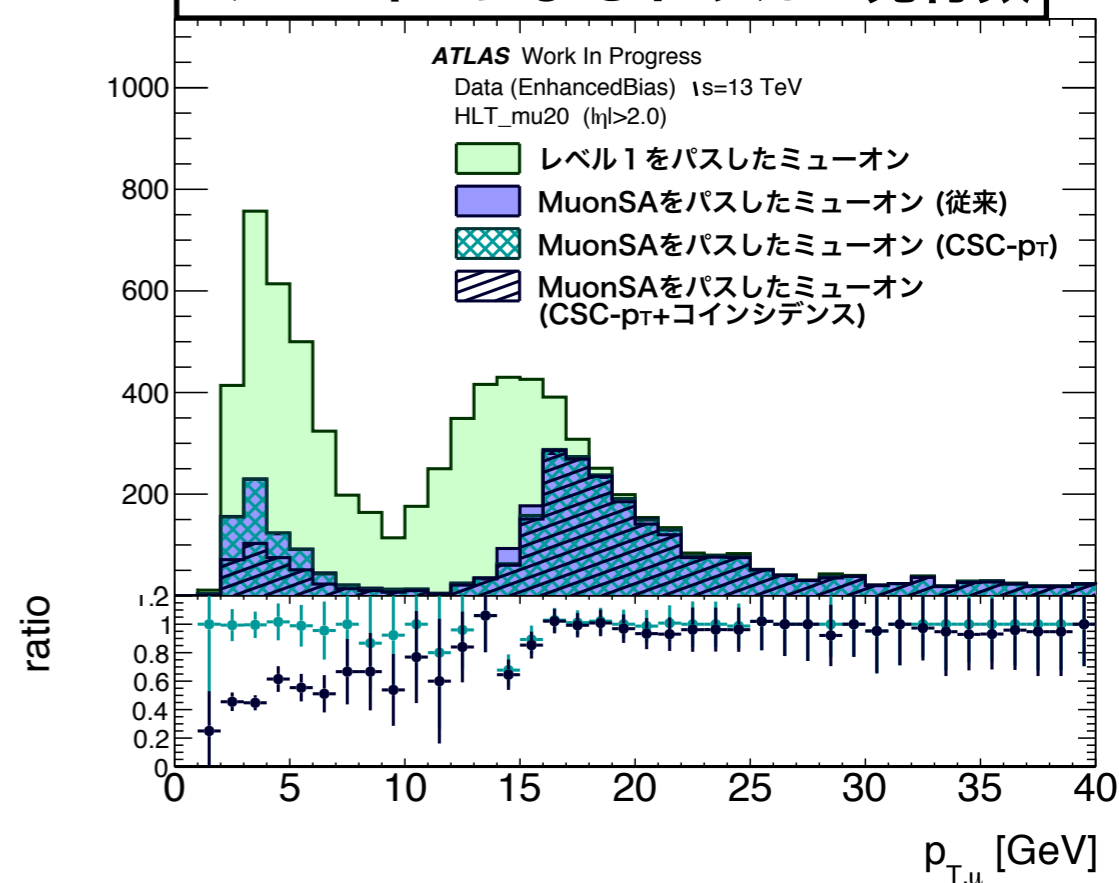
• コインシデンスを要求する場合

- ▶ 20 GeV以上での効率は約97 %
- ▶ 16 GeV以下で効率/トリガーレートが削減

MuonSAのトリガー効率



ミュオンによるトリガー発行数



- CSCとのコインシデンスを要求しない場合

- ▶ 分解能の改善の効果だけでは、トリガーレートの削減は小さい

- フェイクトリガーが半数以上を占める
 - レート削減が閾値付近に限る

- CSCとのコインシデンスを要求

- ▶ $|\eta| > 2.0$ で約65%削減

- フェイクトリガーを約80%削減
 - 閾値以下のミュオンによるトリガーも抑制

