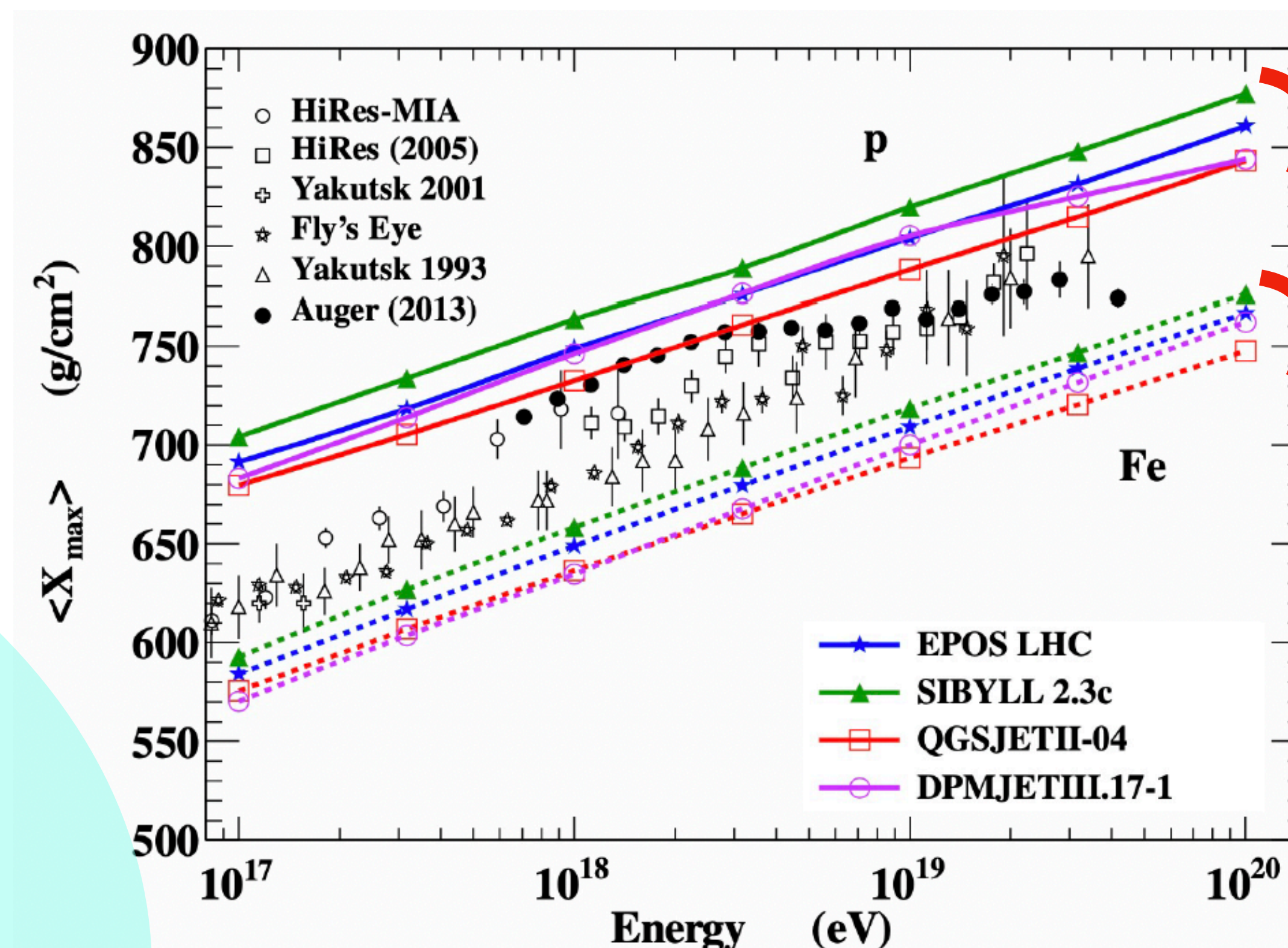
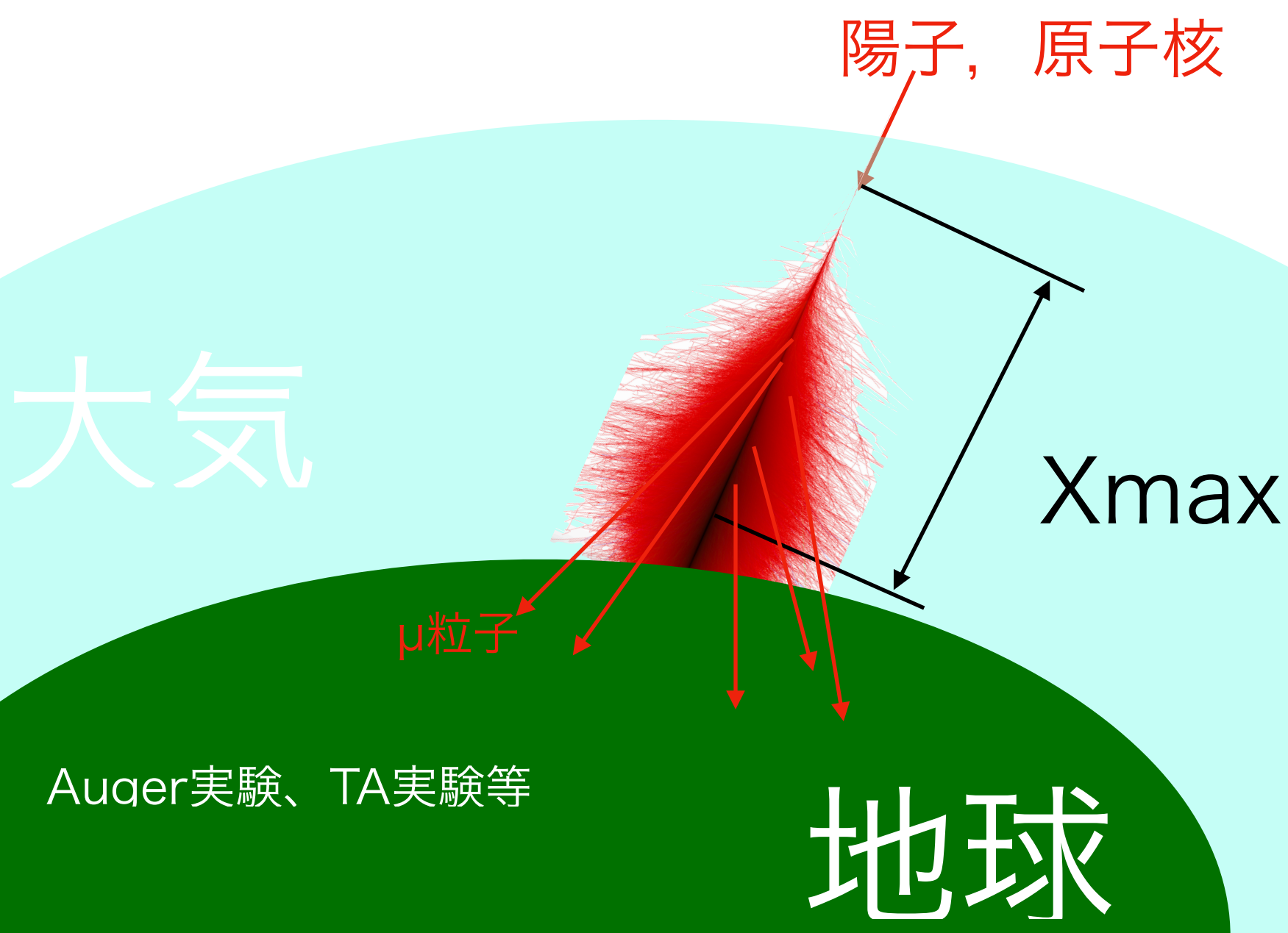


LHCfとATLAS-ZDC共同の 陽子ビームを用いた性能評価

小林春佳^A 毛受弘彰^A 伊藤好孝^{AB} P.Steinberg^C
他LHCfコラボレーション ATLAS-ZDCグループ
名大ISEE^A、名大KMIB^B、BNL^C、他

空気シャワーシミュレーションの問題点

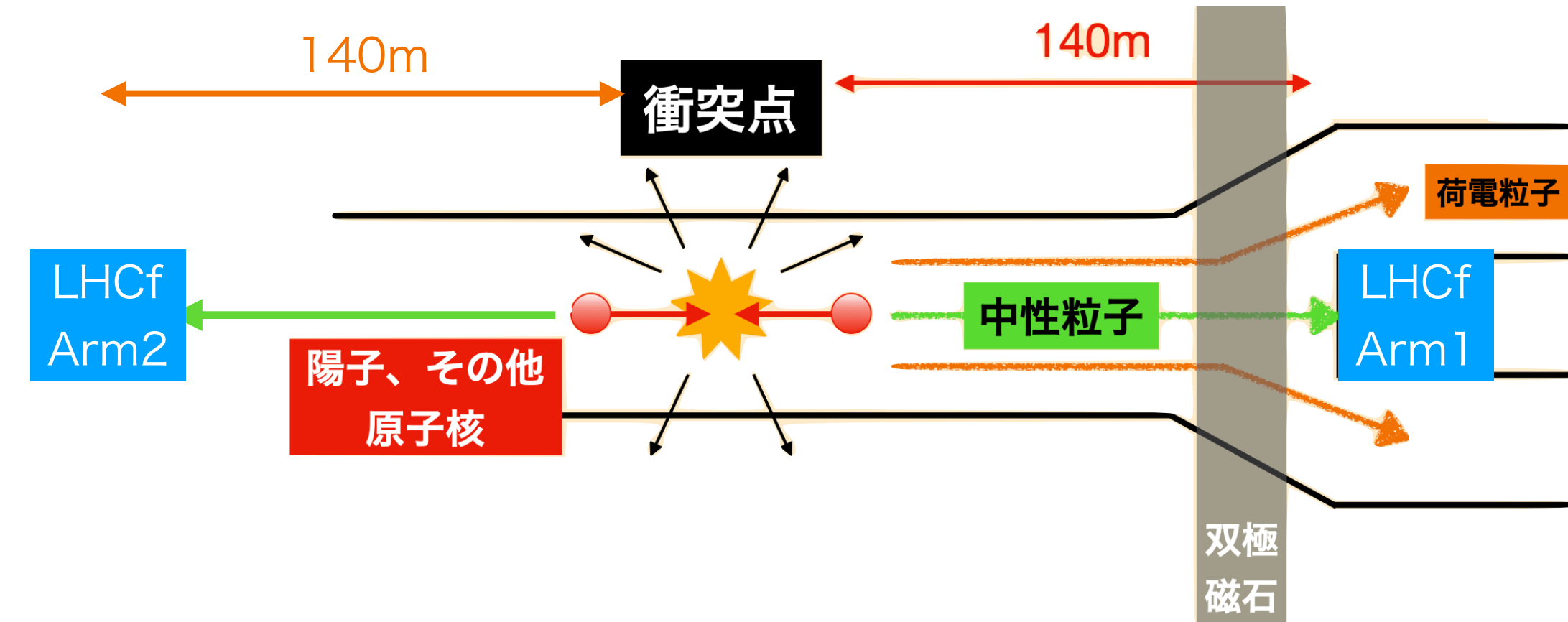
- 空気シャワーシミュレーションでは、高エネルギーのハドロン相互作用について、モデル間の差がある→1次宇宙線の化学組成の決定に不定性
- 加速器を用いたハドロン相互作用の理解が必要
→LHCf実験：世界最高の衝突エネルギーを持つLHCで前方に生成される粒子を測定する



モデル間の差

LHCf実験について

- LHCfでは、陽子-陽子衝突で生成される超前方に飛んできた中性粒子を測定する。

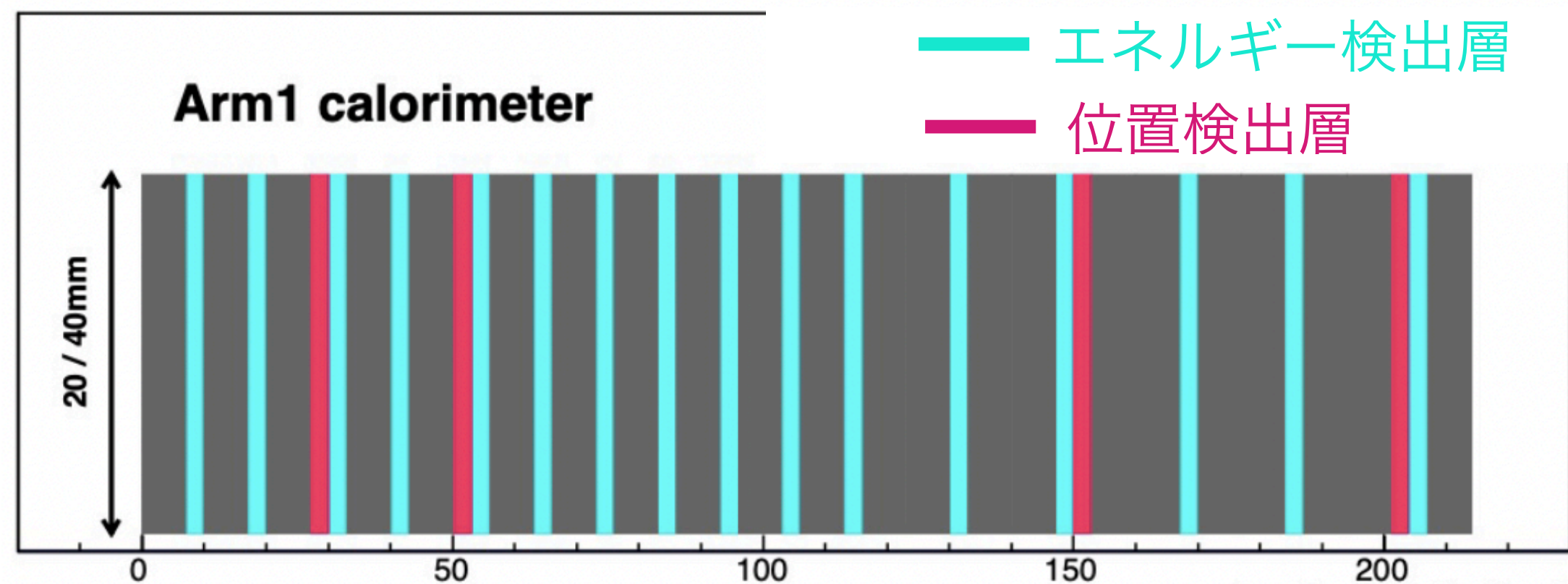


• LHCf検出器の設置場所

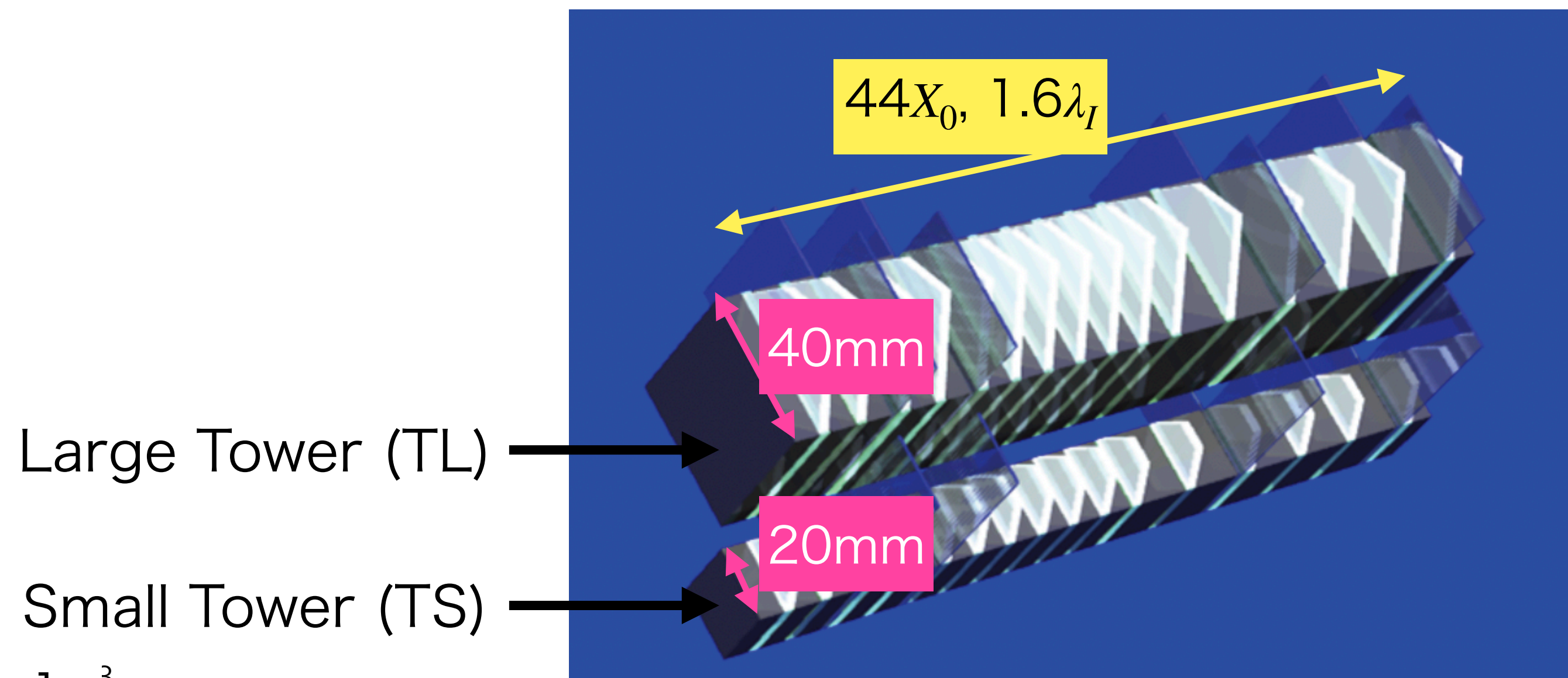
- LHCの衝突点1の両側に、衝突点から140m離れた位置に設置

• LHCfカロリメーター (Arm1)：サンプリングカロリメーター

- タングステン層 (16層) とGSO(Gd_2SiO_5)シンチレータ (16層) のサンドイッチ構造。
- GSO bar hodoscope : 4層
- 奥行き方向長さ : 光子 $44X_0$, 中性子 $1.6\lambda_I$



奥行き方向長さ [mm] ³

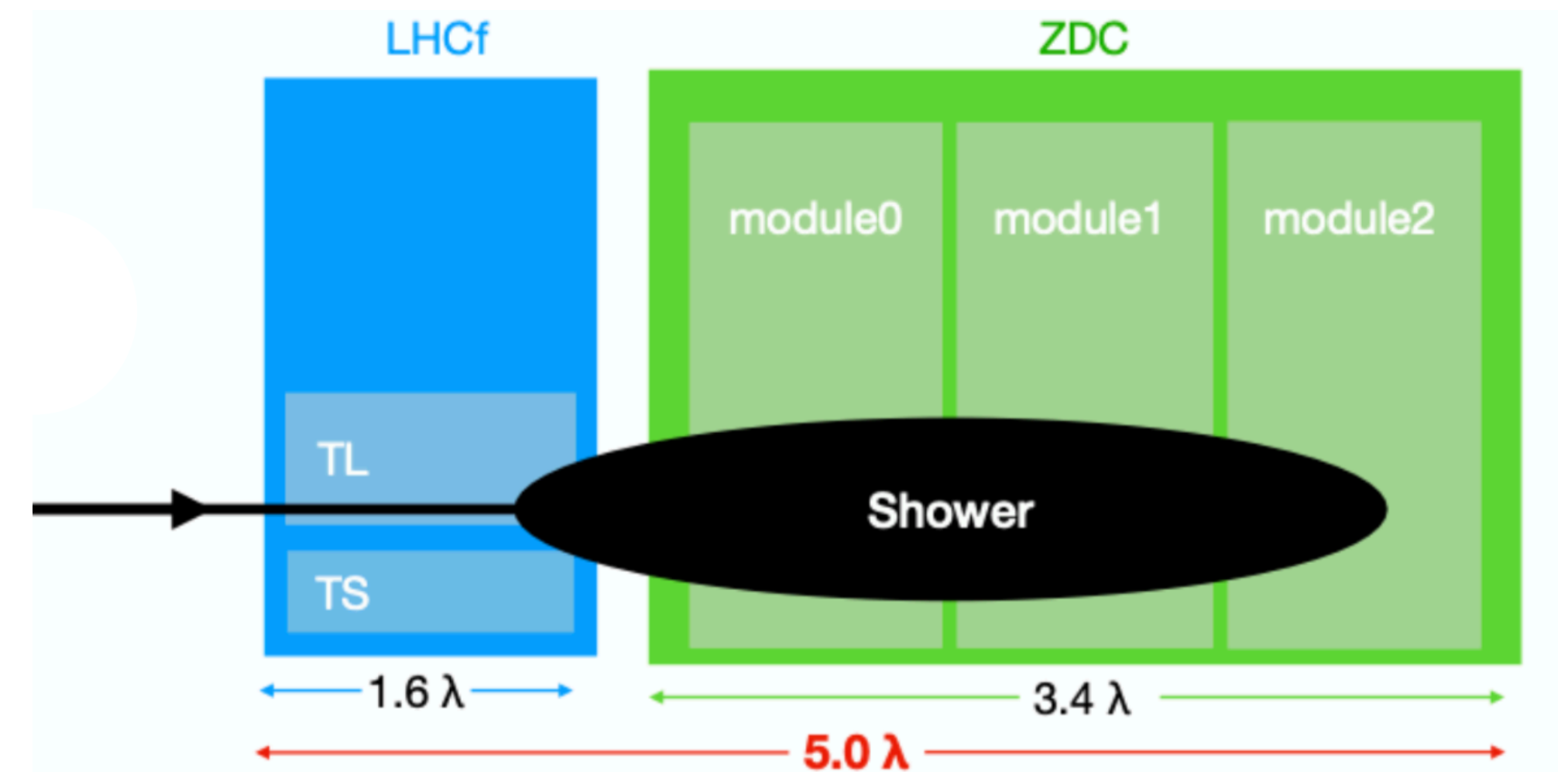


LHCfの中性子検出

- 中性子は、LHCf検出器の後方で発達するため、シャワーの漏れが大きく、エネルギー分解能が約40%→中性子スペクトルの系統誤差が大きい

→ 後方に設置したZDC検出器と共同解析

→ 2022年の陽子-陽子衝突($\sqrt{s} = 13.6$ TeV)
実際にZDCと共同で行なった



- **ビームテストでの性能検証**

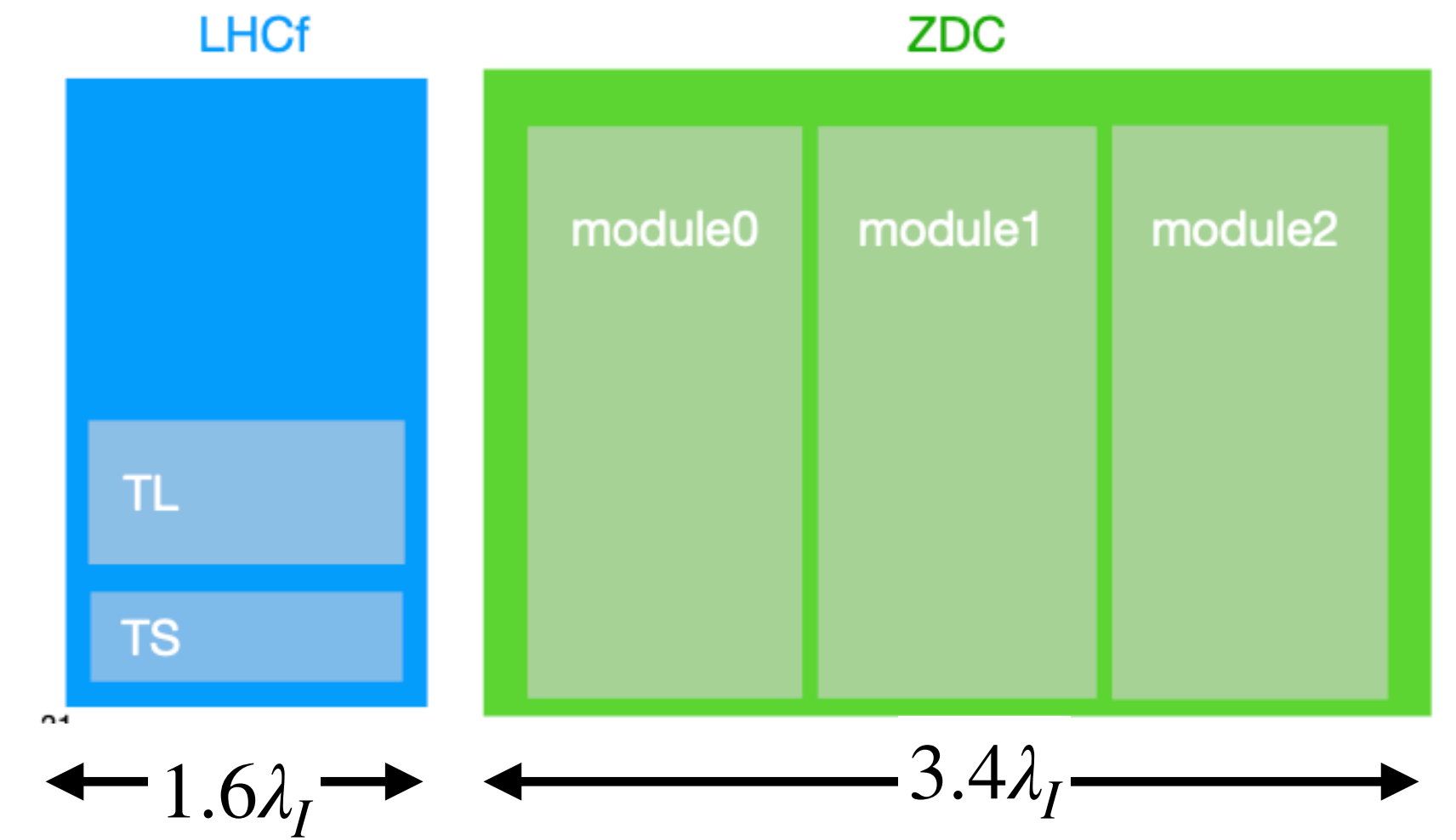
- 検出器中心に入射したビームの分解能の改善

後方に設置したZDC検出器と共同解析することで分解能が40%から**20%**に改善
(2022春 物理学会にて発表 近藤)

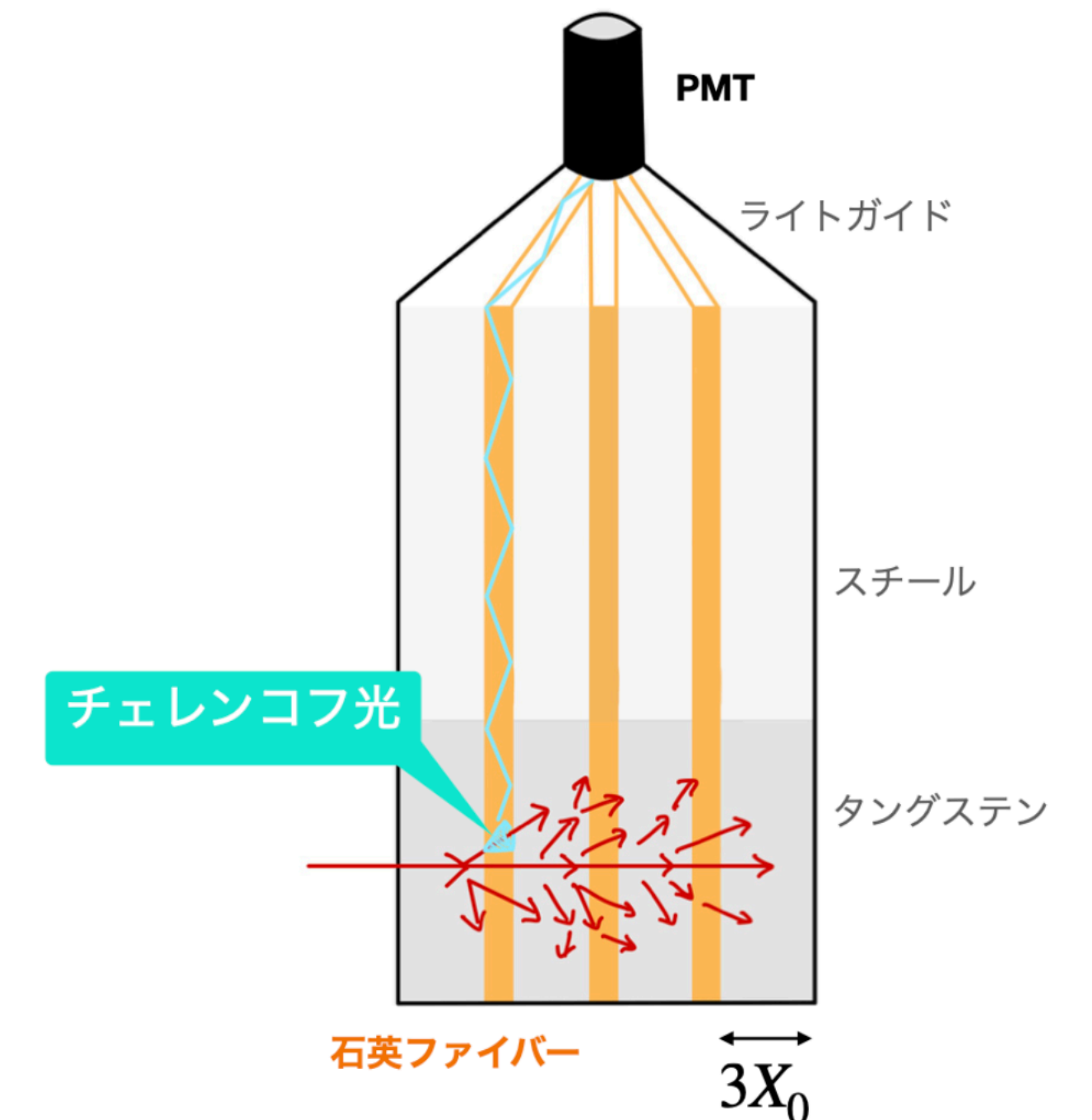
- 今回は、ビーム入射位置によるエネルギー分布の解析を行った。

ATLAS-ZDC検出器について

- **ATLAS-ZDC(Zero Degree Calorimeters)**
 - LHCf検出器の後方に設置
 - 3つのmoduleからなる(3module合わせて $3.4\lambda_I$)
- **ATLAS-ZDCカロリメーター**
 - タングステン層：11層
 - 石英ファイバー層：12層
→Moduleごとに、上部PMTでチェレンコフ光を測定
 - 位置分解能はない。
- **ATLAS-ZDC 入射位置依存性の可能性がある原因**
 - 石英ファイバーの位置が固定されていない
 - 石英ファイバーの光の伝達効率

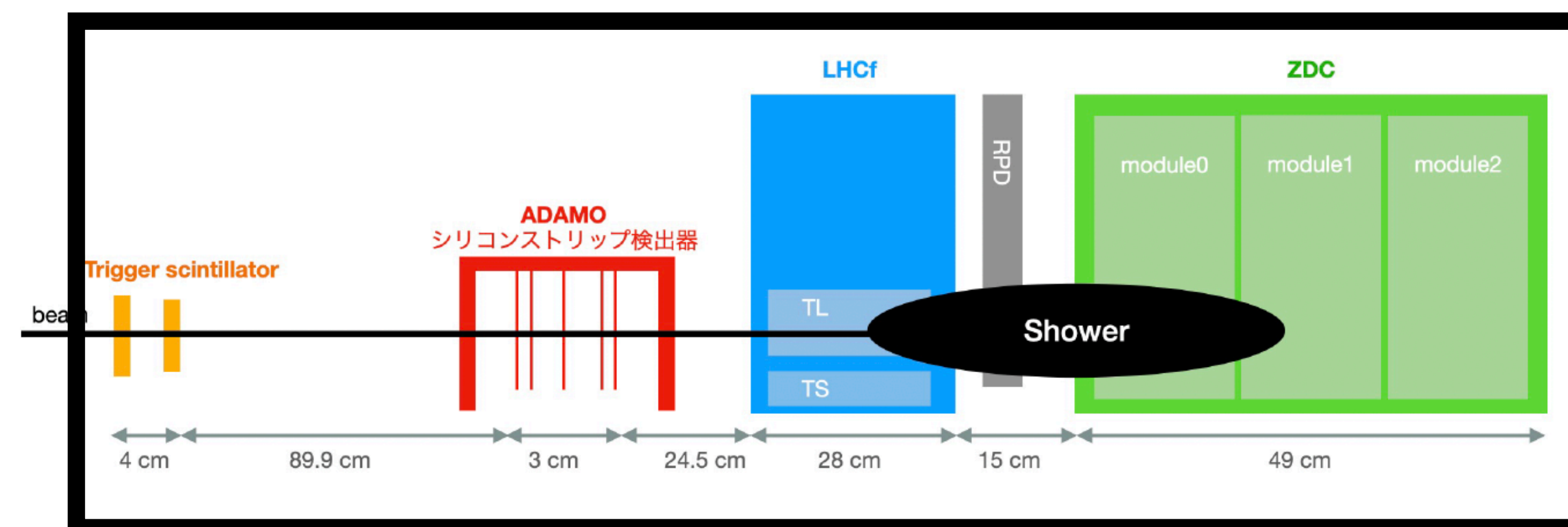
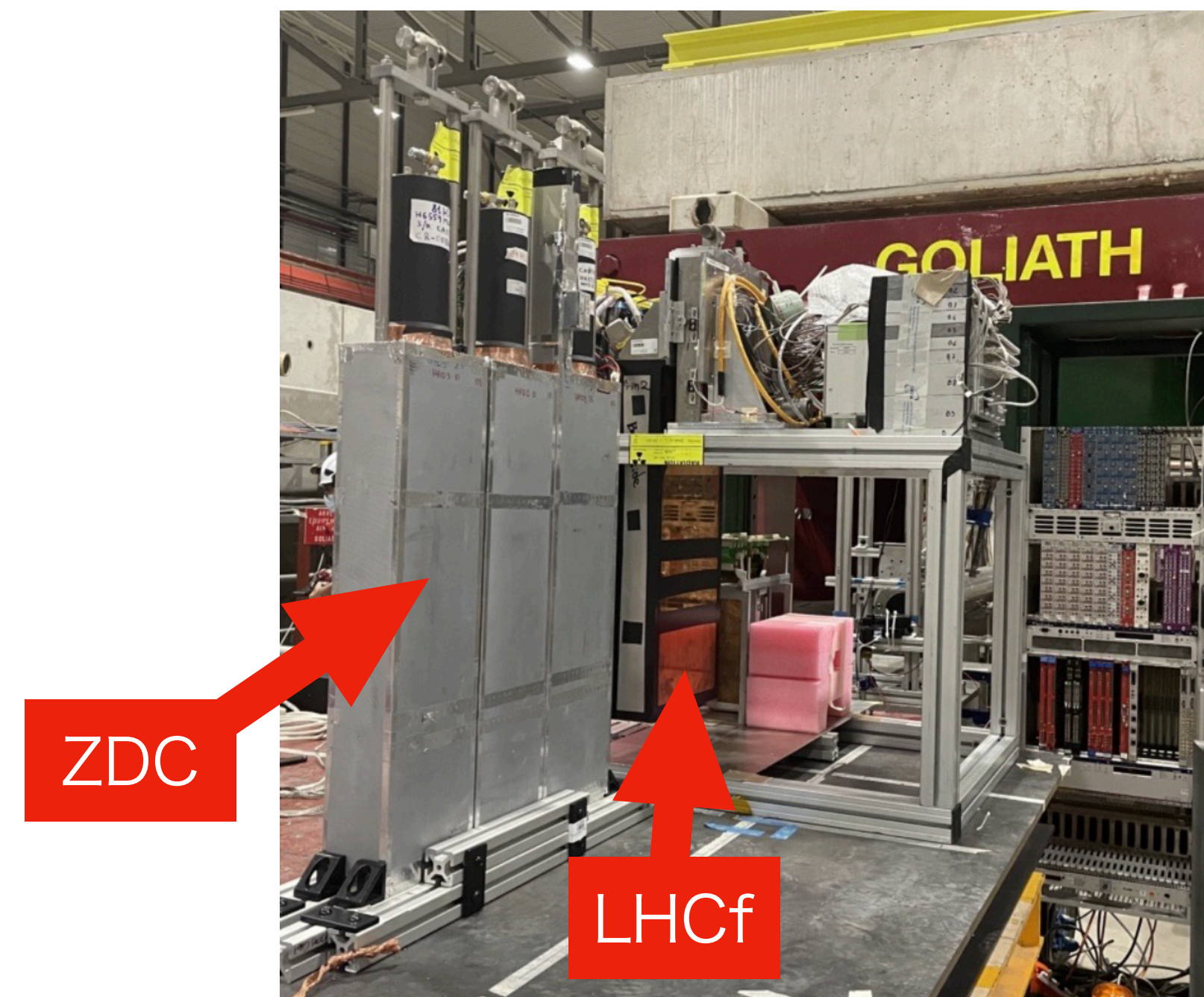


検出器の構造



SPSビームテスト

- 測定するエネルギーに位置依存性がないか確認するため、入射エネルギーを決められるSPSビームテストの結果を用いる。
- 2021 SPSビームテスト**
 - 2021年9月24～28日
 - 350 GeVの陽子を検出器全面に入射
- イベント数**
 - Small Tower : 170k events
 - Large Tower : 501k events



可動テーブル
検出器を動かすことで、ビームの入射位置を変える

エネルギー再構成手法

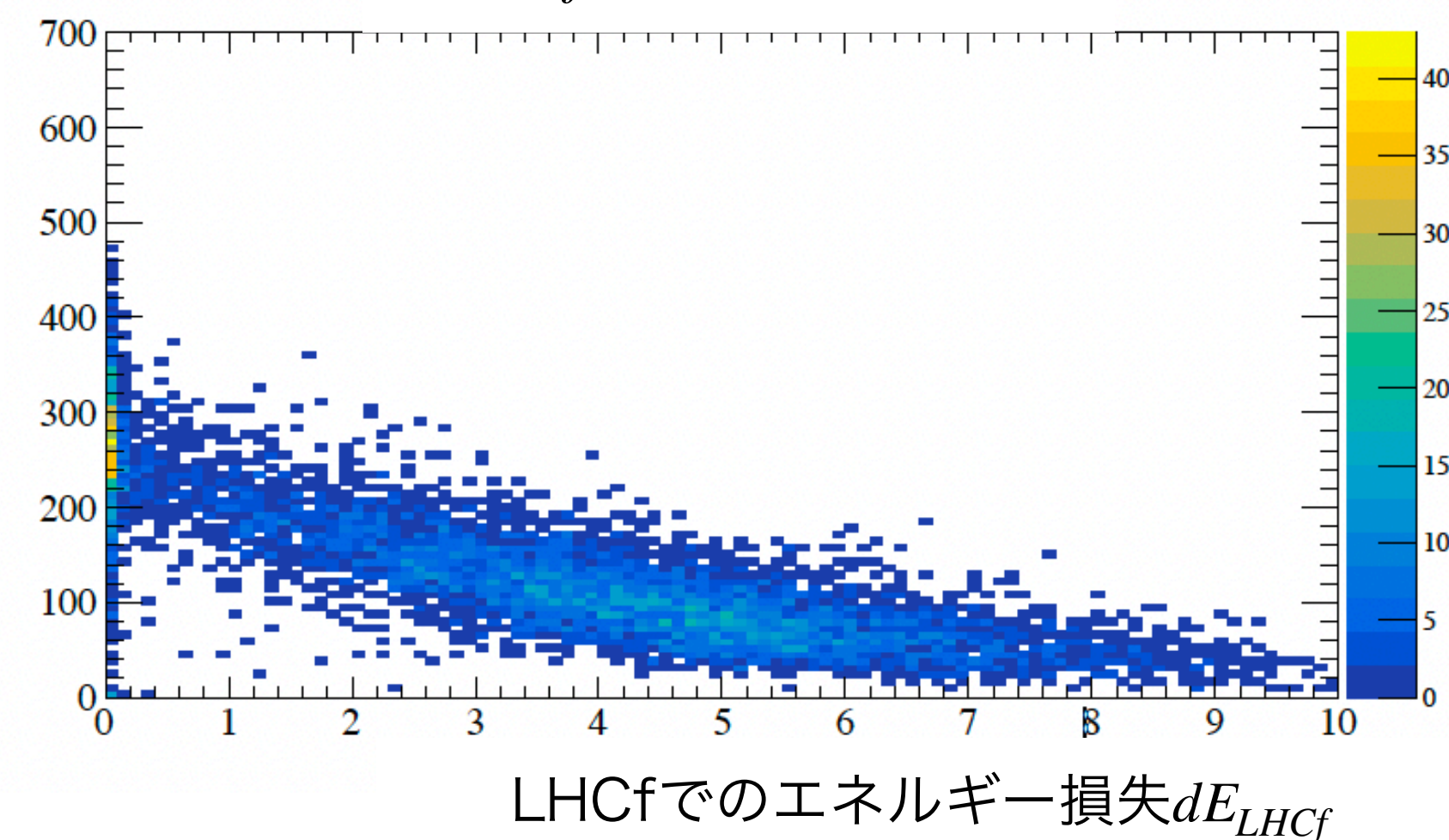
- 再構成エネルギー計算方法

$$E_{est} = E_{LHCf} + \alpha E_{ZDC}$$

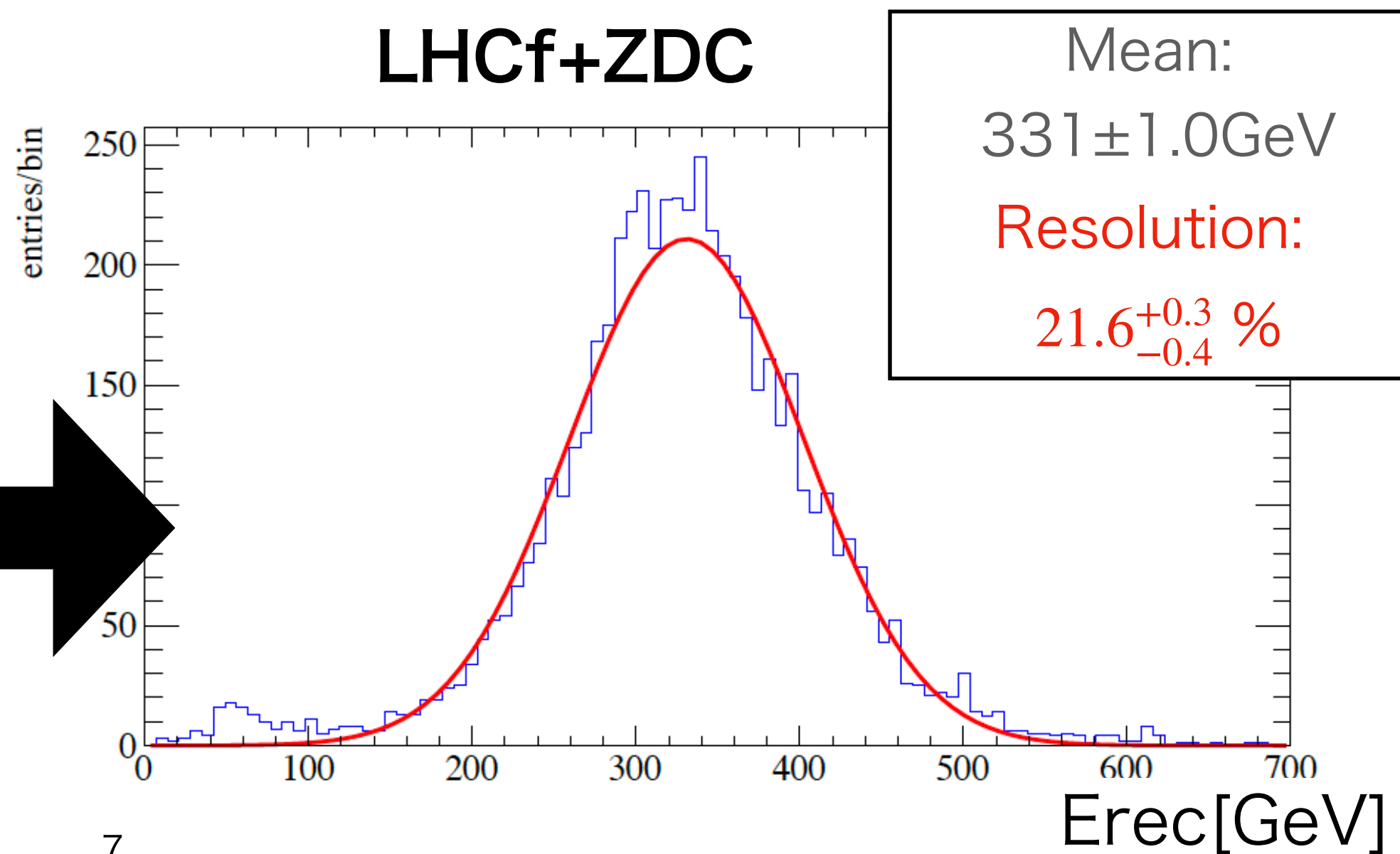
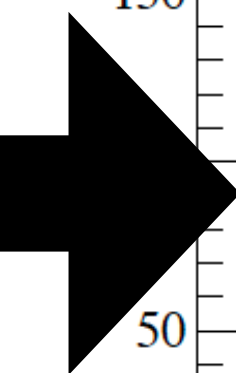
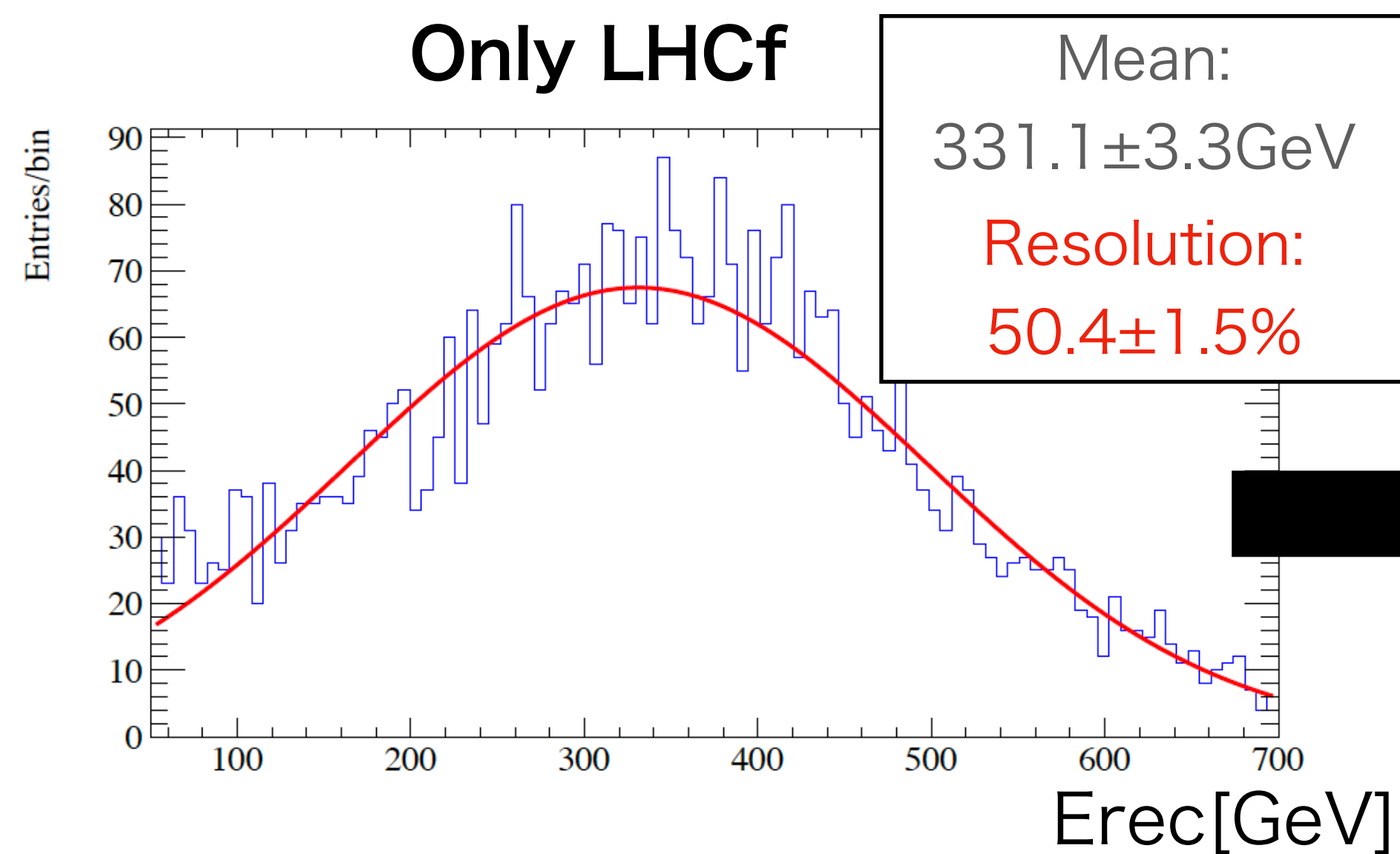
$$E_{rec} = F(E_{est})$$

dE_{LHCf} と dE_{ZDC} の相関

ZDCでのエネルギー損失 dE_{ZDC}



- TSの中心領域に入射したビームのエネルギー分布



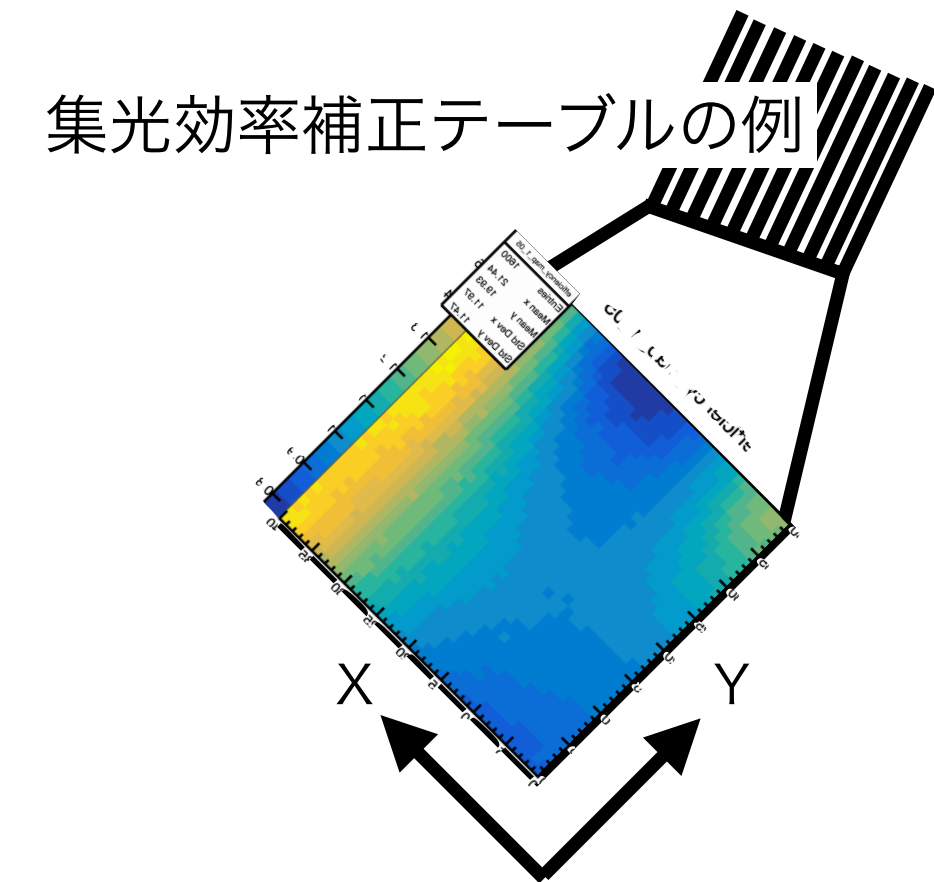
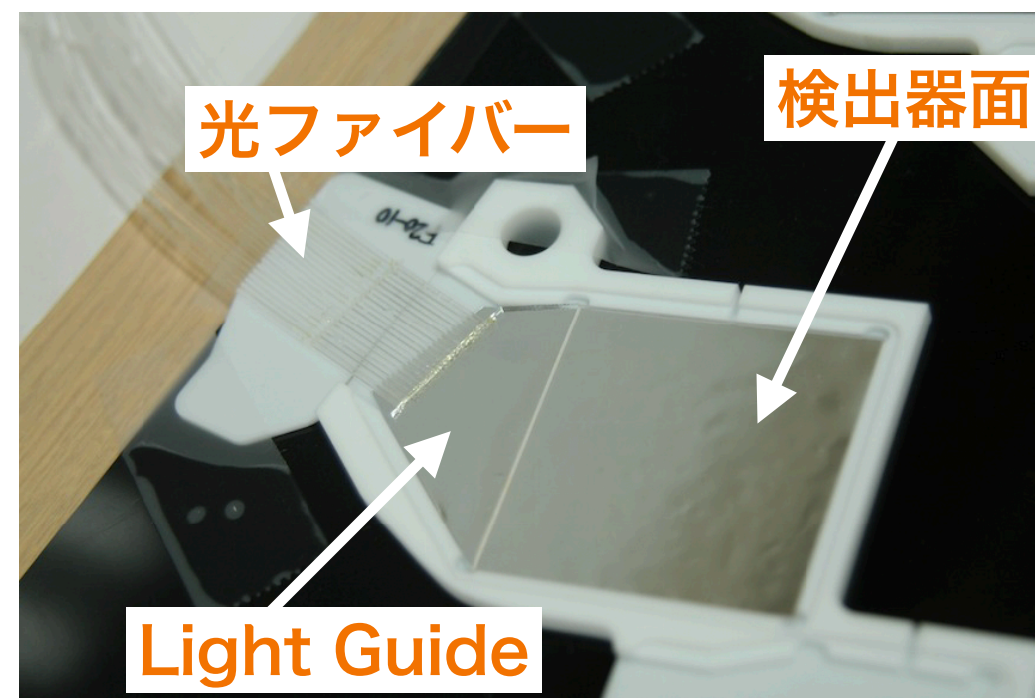
再構成エネルギーの位置依存性の検証

- 位置依存性が生じてしまう要因

- LHCf検出器の集光効率
- ZDC検出器による位置依存性
- シャワーの横漏れの効果

＊LHCf検出器の集光効率

LHCfのGSO層では、PMTに光を伝達するファイバーが斜めに取り付けられているため、位置によって集光効率に差が出る



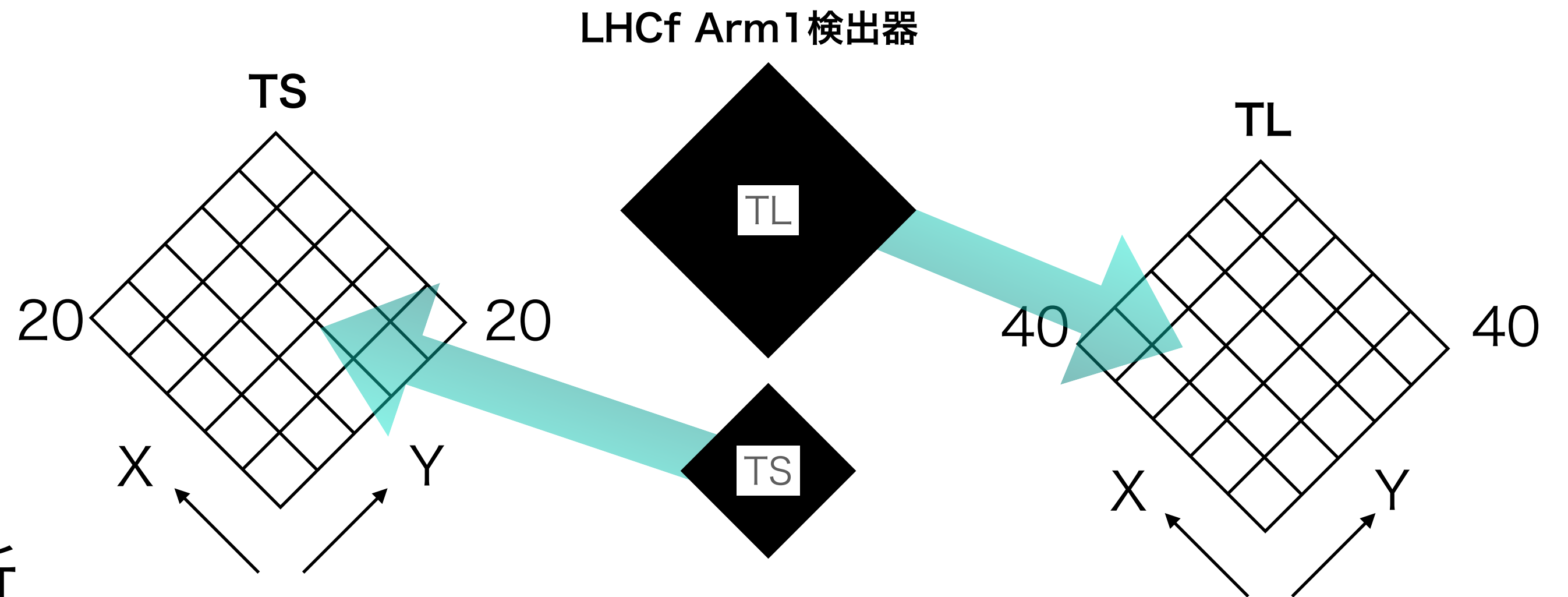
- 位置依存性の検証方法

① 検出器面を分割

TS : 4mm×4mm

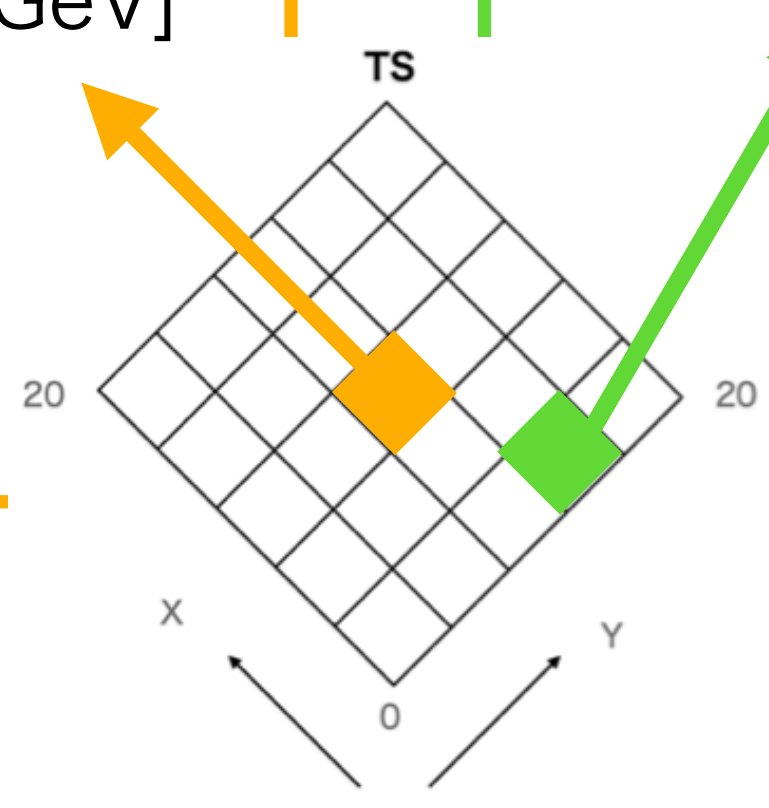
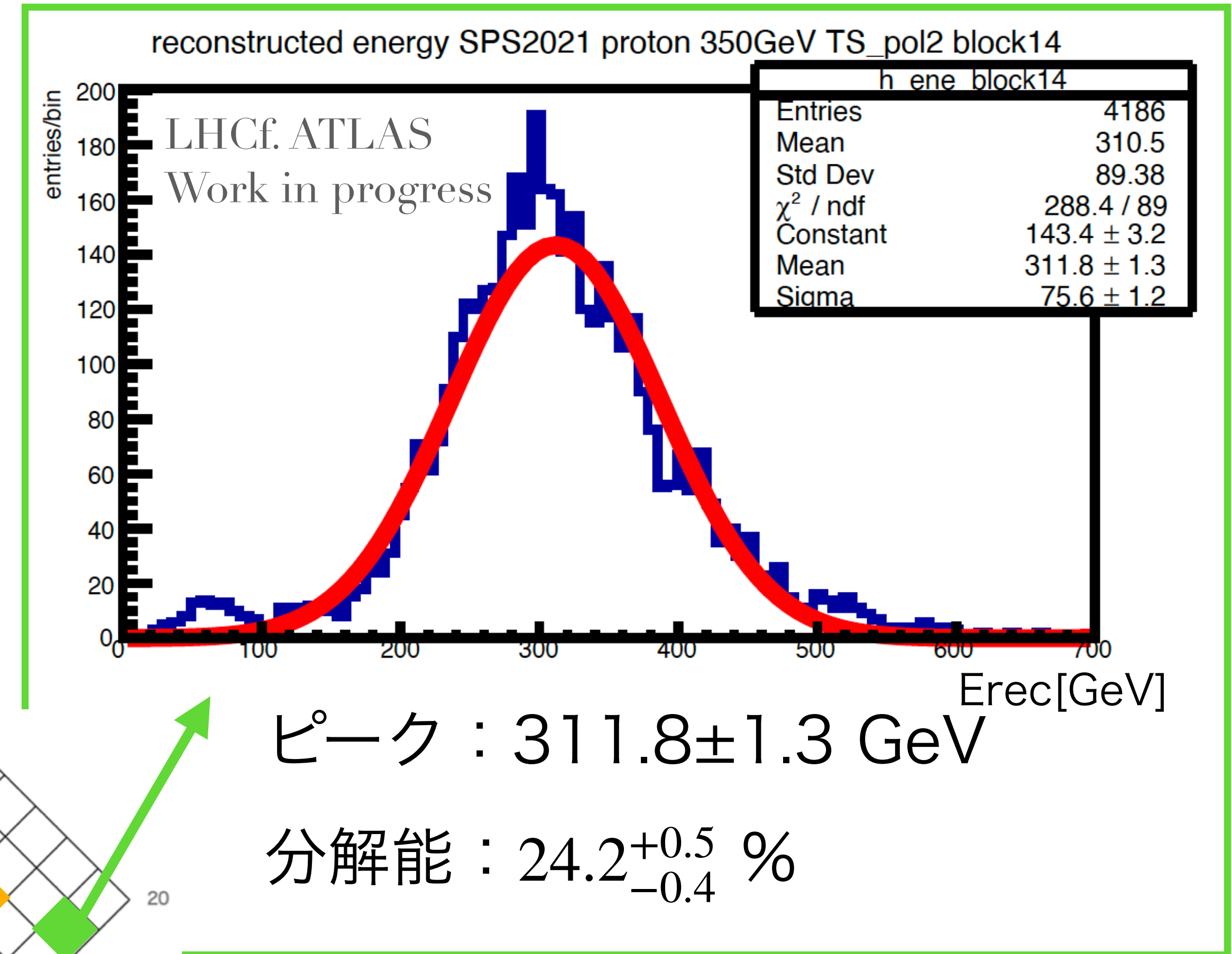
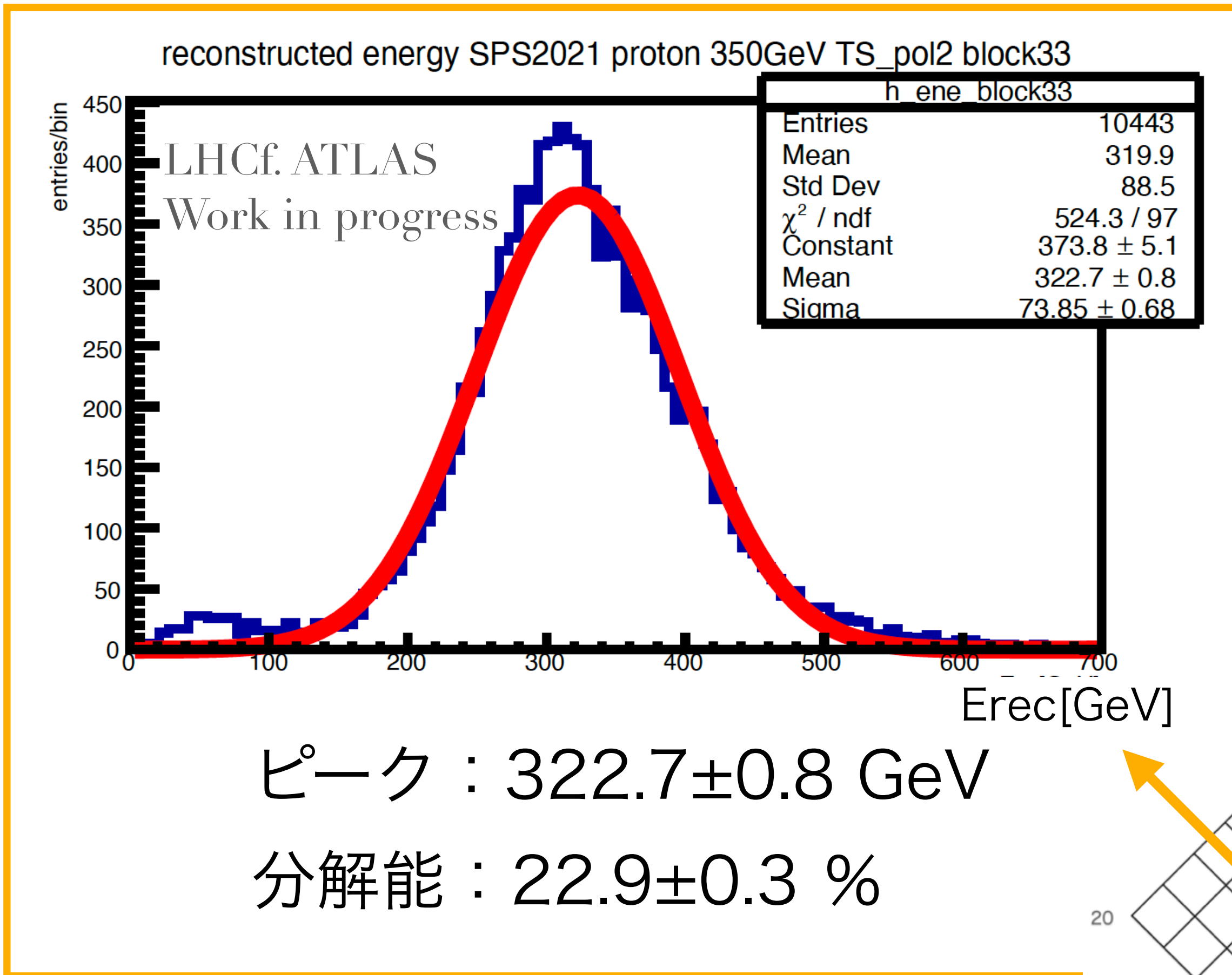
TL : 8mm×8mm

② 領域ごとにエネルギー分布を解析



各位置ブロックでのエネルギー分布(LHCf+ZDC)

Small tower



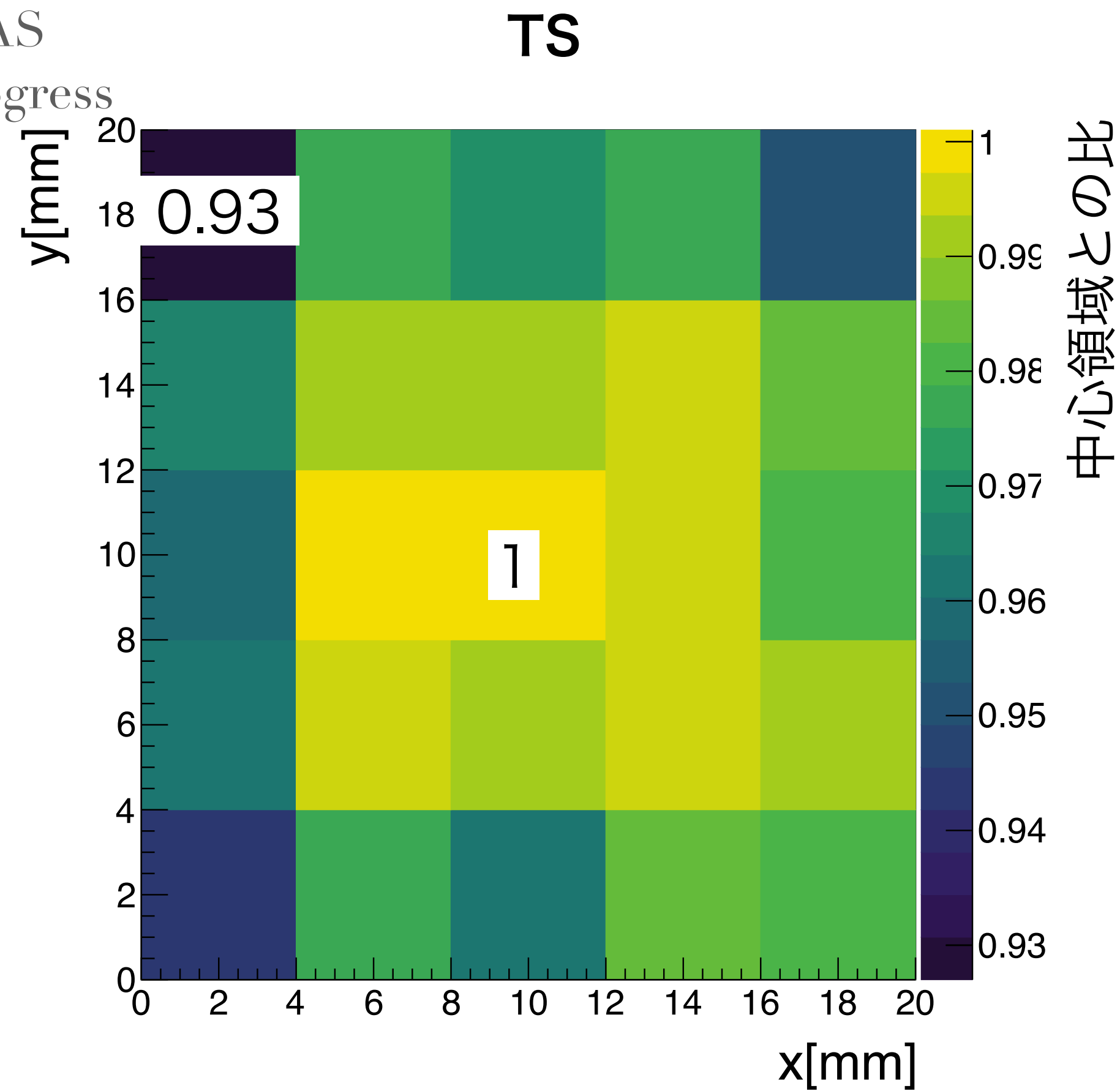
分解能 : σ/E (ガウスフィッティングより)

位置によってピークの数と分解能に差がある

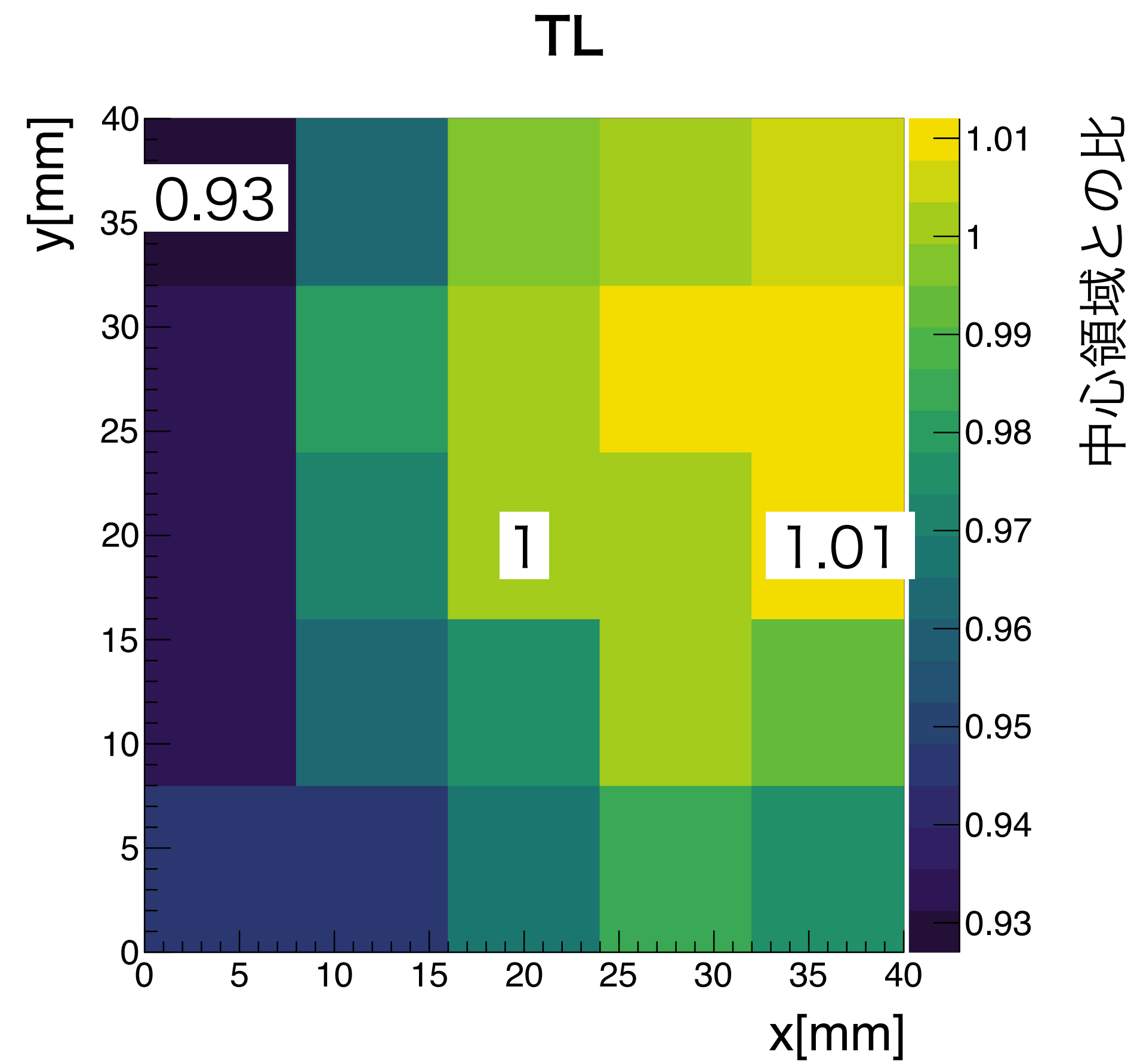
位置依存性解析 結果(平均値)

Z軸： $\frac{\text{それぞれの領域のガウスフィッティングの平均値}}{\text{中心領域のガウスフィッティングの平均値}}$

LHCf. ATLAS
Work in progress



TS中心領域のガウスフィッティングの平均値：
 322.7 ± 0.8 GeV

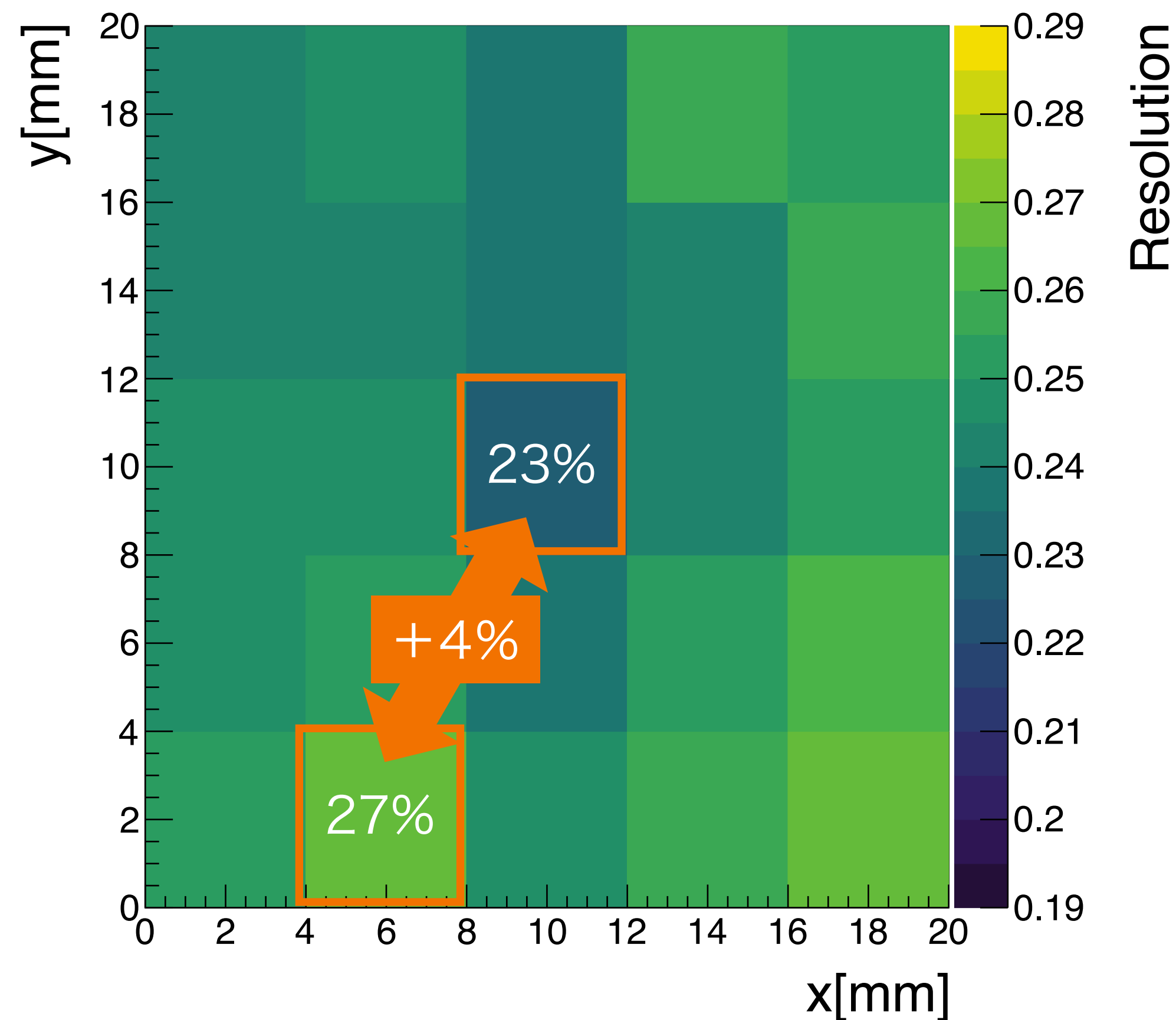


TL中心領域のガウスフィッティングの平均値：
 335.9 ± 0.5 GeV

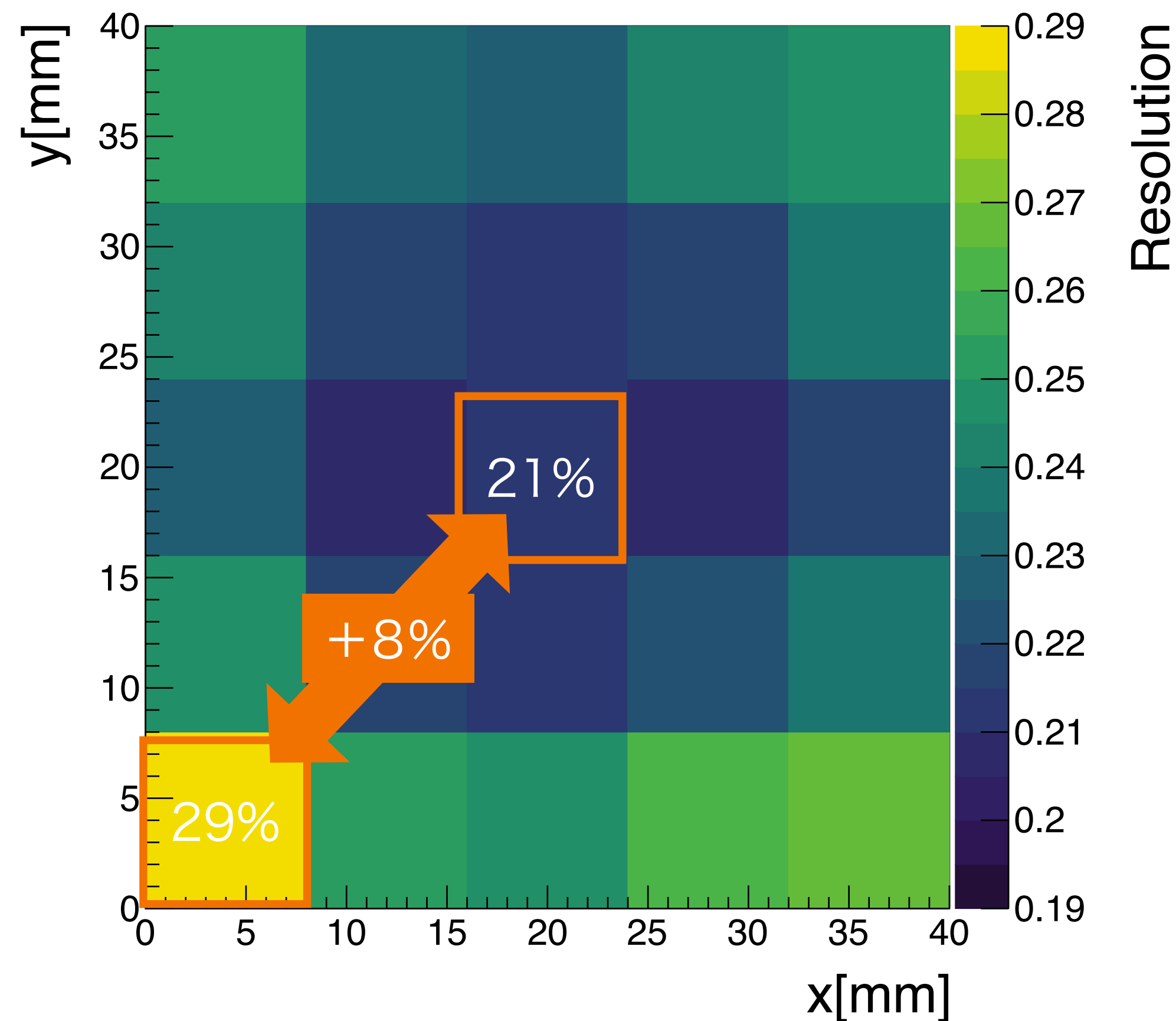
TSで最大7%、TLで最大9%ほどのエネルギーの位置依存性がある

位置依存性解析 結果(分解能)

TS



TL

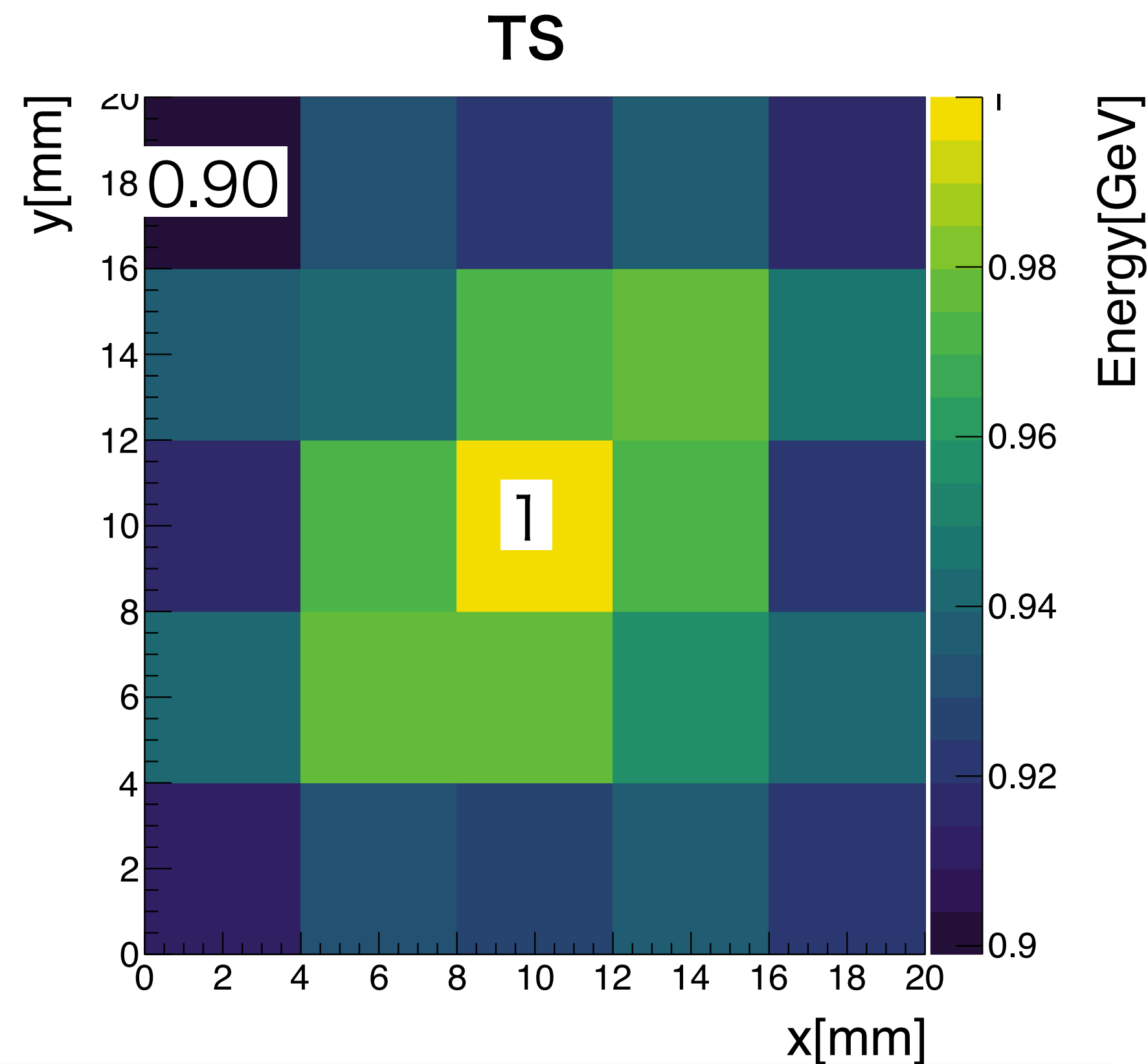


LHCf. ATLAS
Work in progress

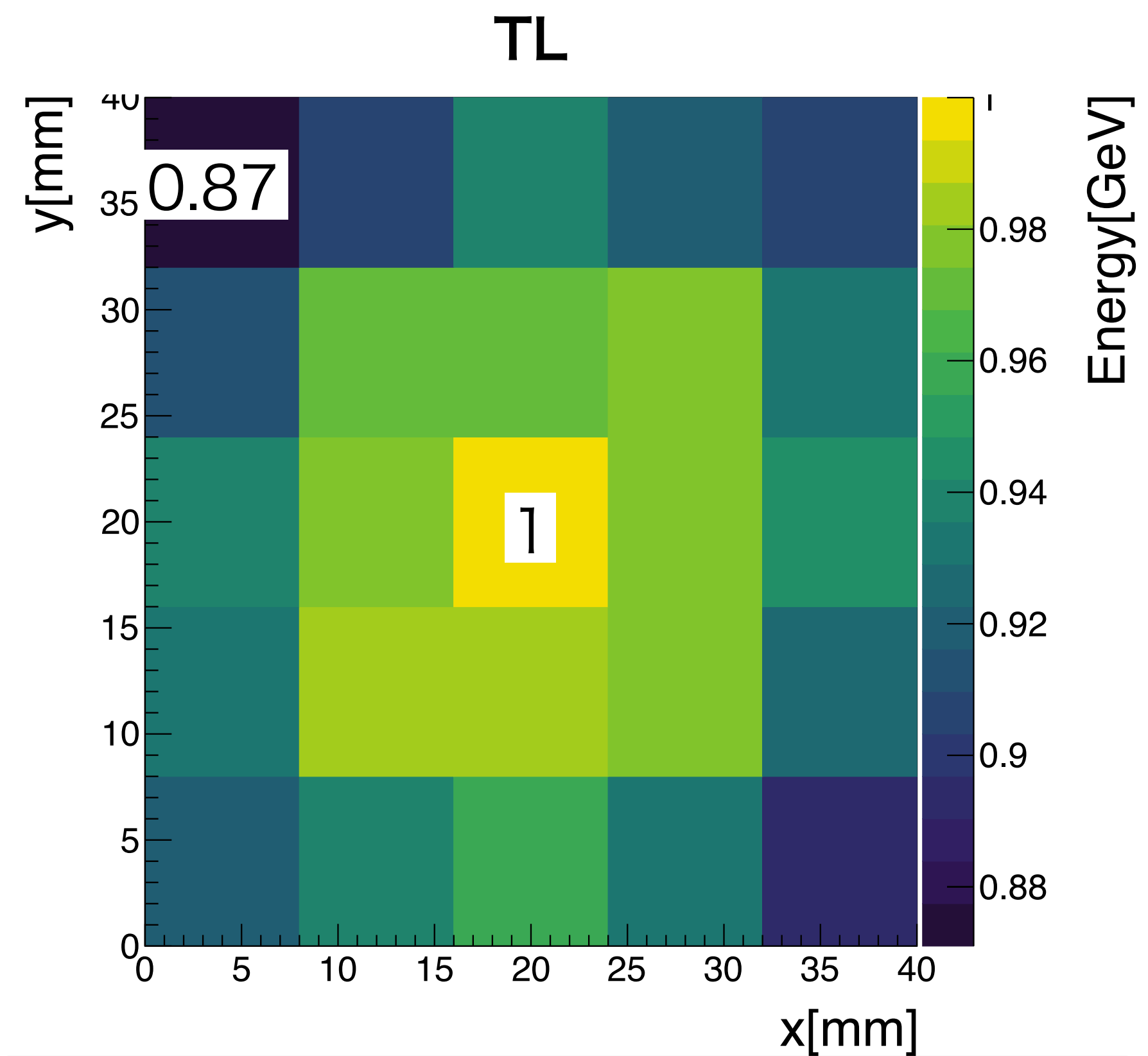
端を除いた領域では、TSで約24%、TLで約22%で一様になっている

MCデータの位置依存性 (平均値)

350 GeVの陽子をTS, TLの検出器全面に入射するMCイベントをそれぞれ40万イベント作成。



TS中心領域のガウスフィッティングの平均値：
 338.9 ± 0.7 GeV



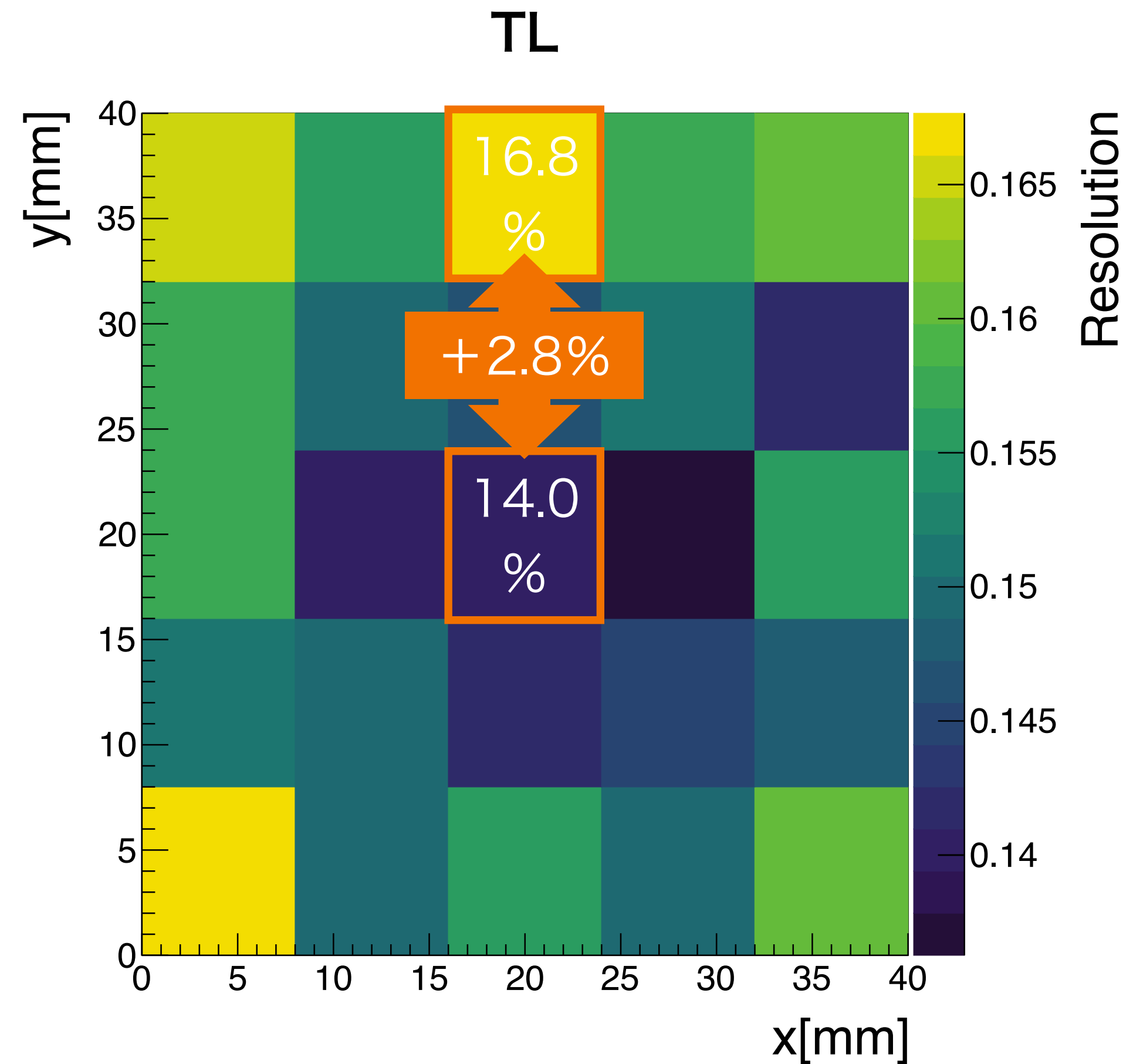
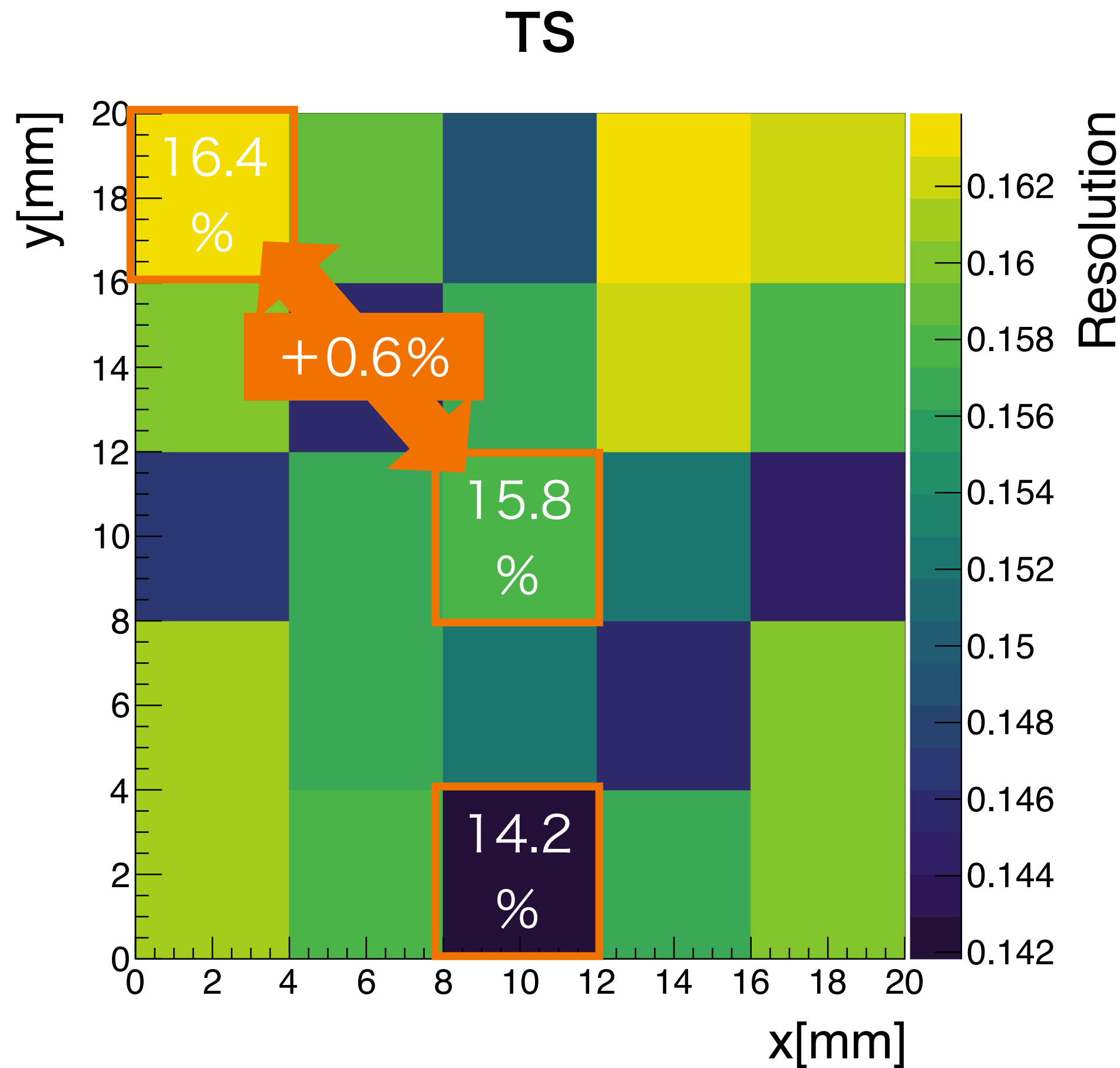
TL中心領域のガウスフィッティングの平均値：
 340.8 ± 0.7 GeV

TSで最大10%、TLで最大13%ほどのエネルギーの位置依存性がある
データの位置依存性よりも大きい

実際のシャワー漏れはシミュレーションより小さい可能性

MCデータの位置依存性 (分解能)

350 GeVの陽子をTS, TLの検出器全面に入射するMCイベントをそれぞれ40万イベント作成。



LHCf. ATLAS
Work in progress

中心領域で、データよりも約7%ほど分解能が良く、位置依存性も小さい

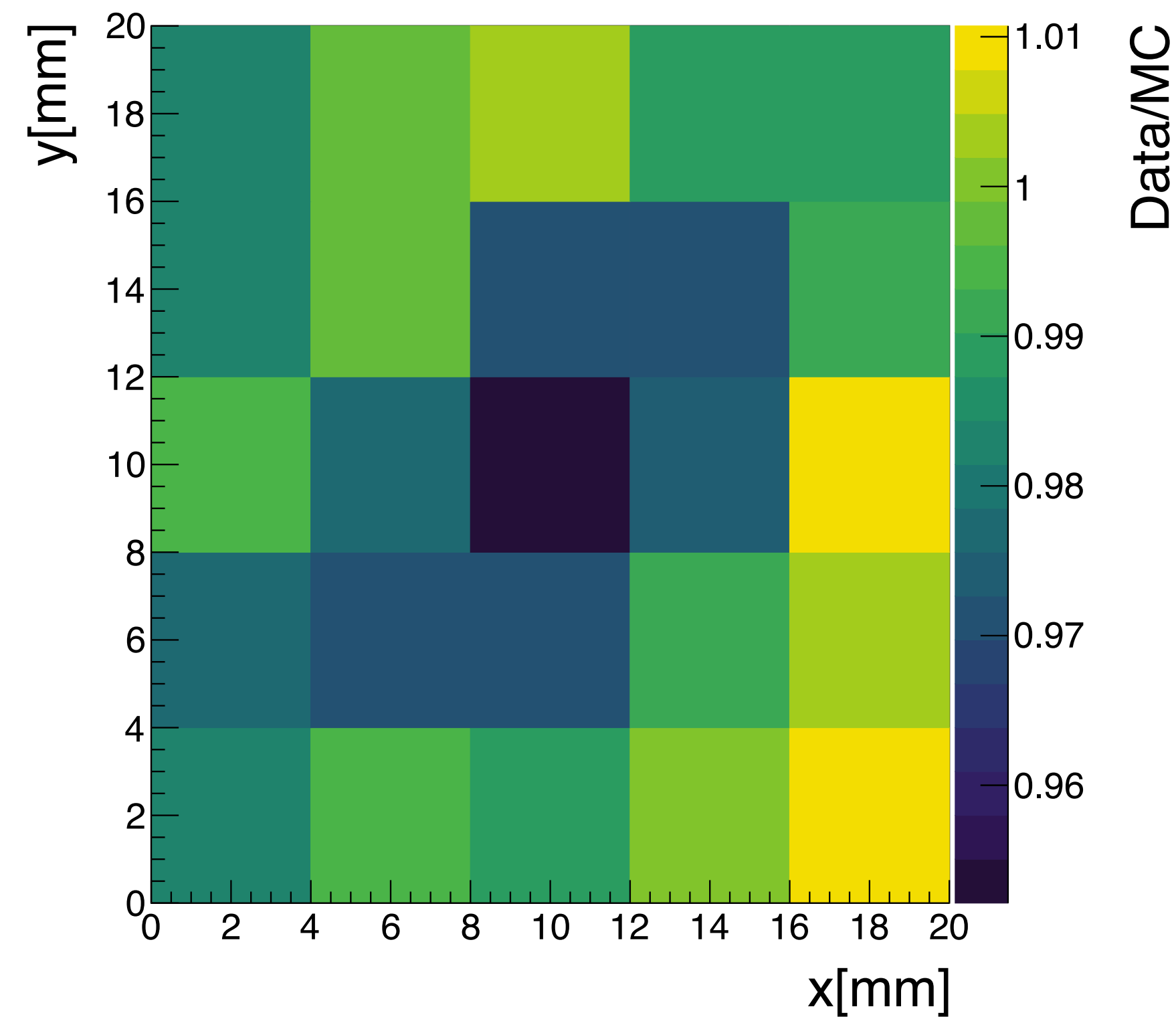
データとMCの比較

データのガウスフィッティングの平均値

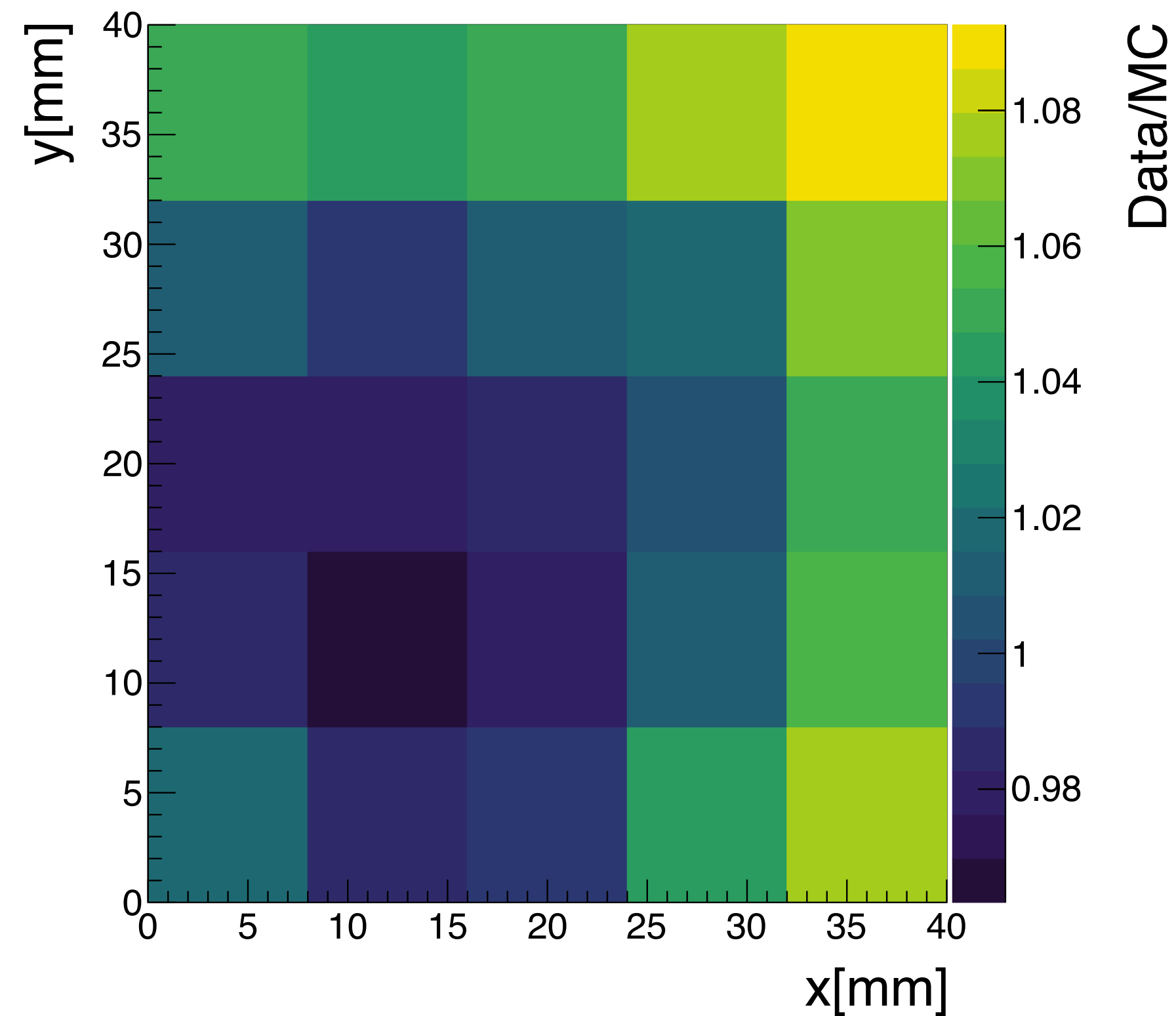
Z軸:

MCのガウスフィッティングの平均値

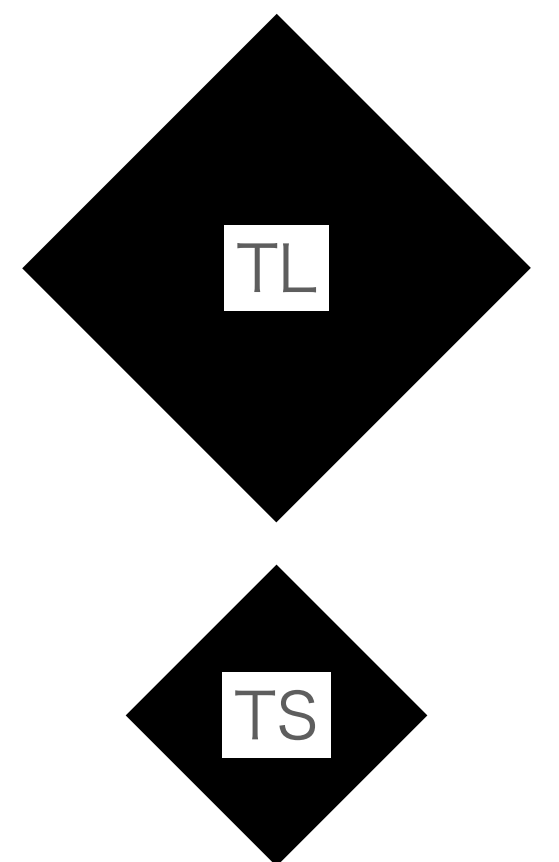
TS



TL



LHCf Arm1 検出器



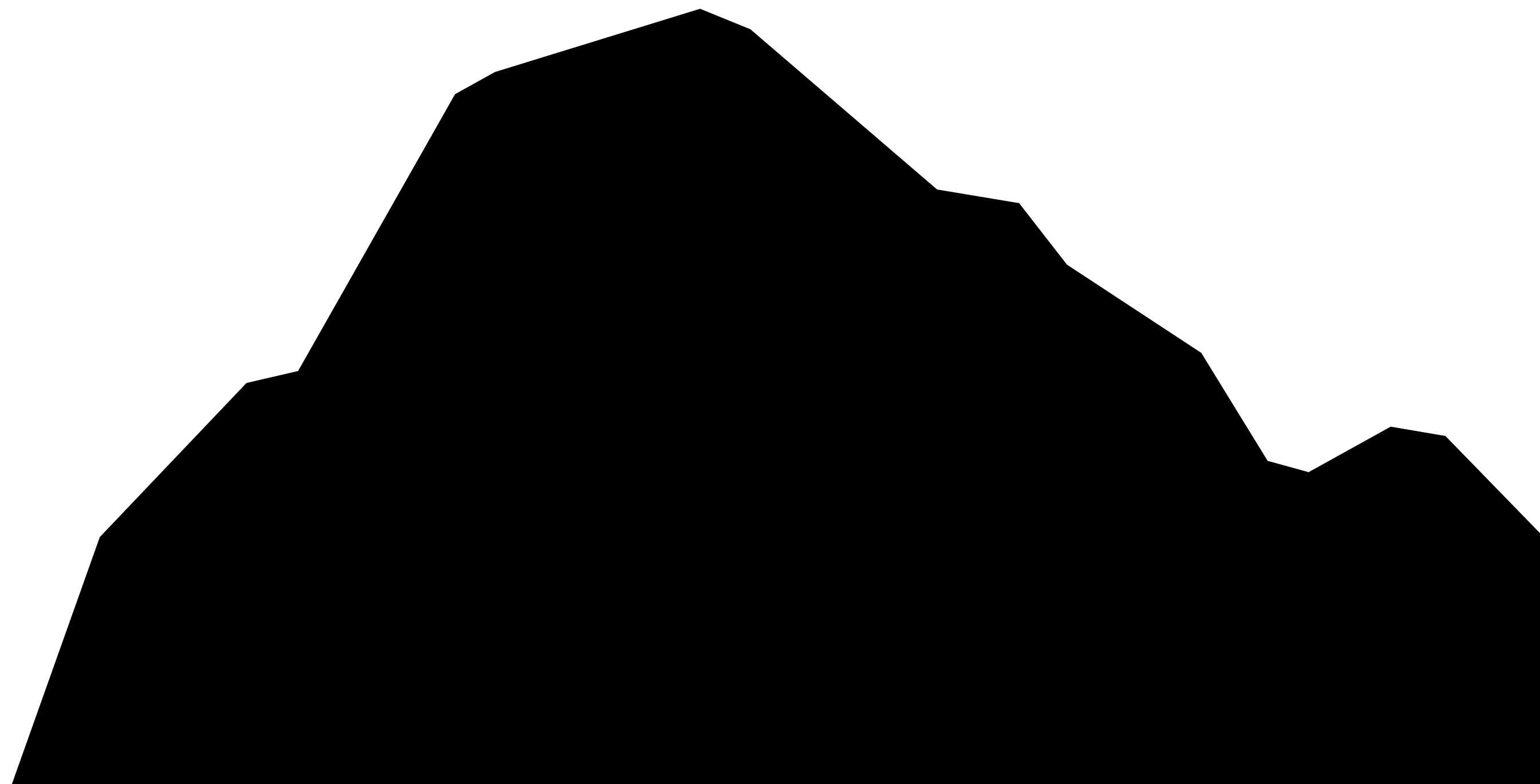
LHCf. ATLAS
Work in progress

TL検出器の上端でデータの方がエネルギーが大きくなっている

まとめ

- LHCf+ZDCのハドロンシャワー測定性能を、350GeV陽子のビームテストを用いて評価した。
 - エネルギー位置依存性はTS、TLで9%以下に抑えられていた。
 - 分解能は検出器の端以外の領域ではTSで約24%、TLで約22%で一様になっていることがわかった。
- MCデータを用いて解析した。
 - エネルギー位置依存性はデータよりも大きく、TSで10%、TLで13%であった。
 - 分解能は検出器中心領域でデータよりも約7%小さく、位置依存性も小さかった。
 - データと比較すると、TLで検出器上端でデータの方がエネルギーが大きくなっていることがわかった。
- 今後
 - TLのMCとデータの違いの原因を調査する。
 - 位置依存性の補正係数を再構成手法に組み込む方法を考える。

Back up

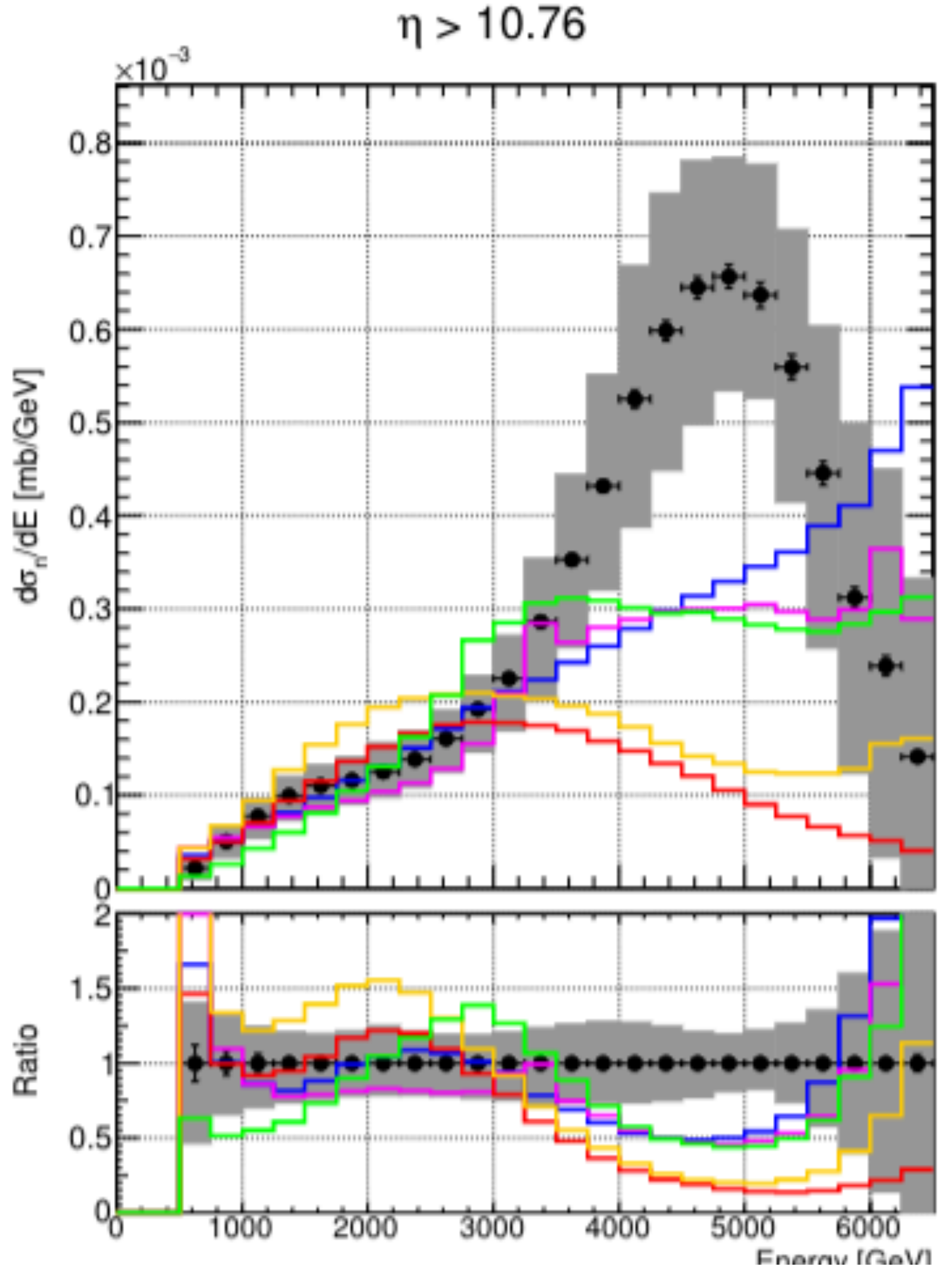
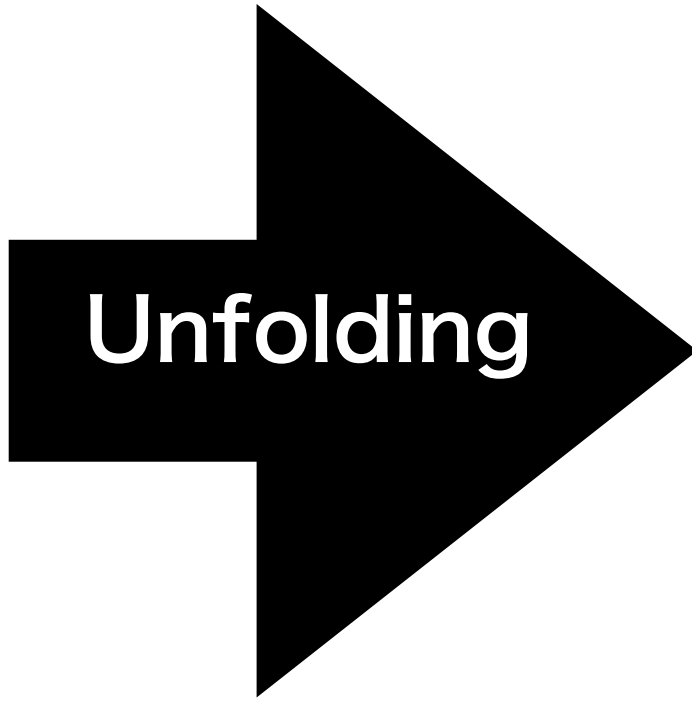
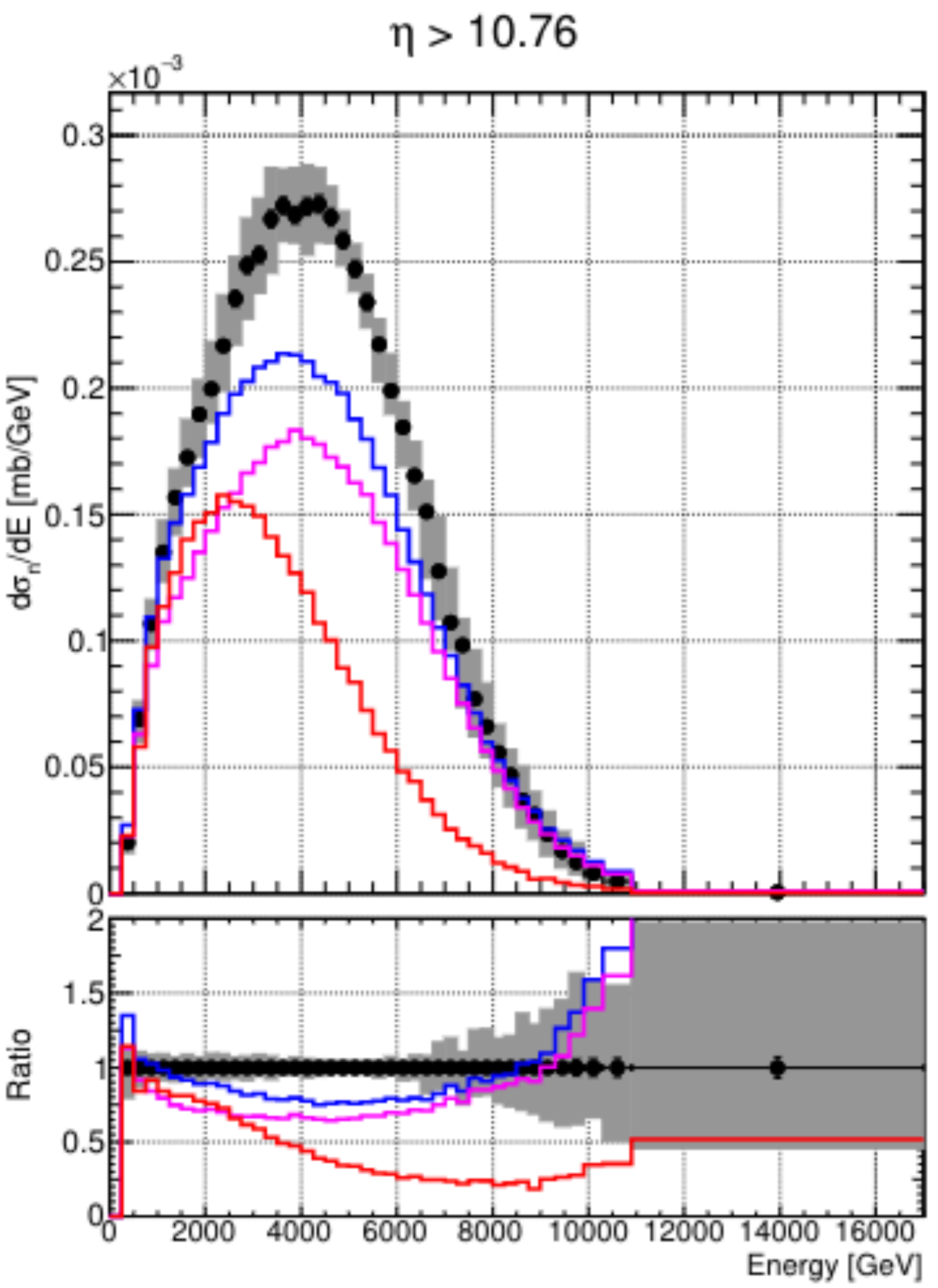


LHCfの中性子検出

$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ のpp衝突実験で、

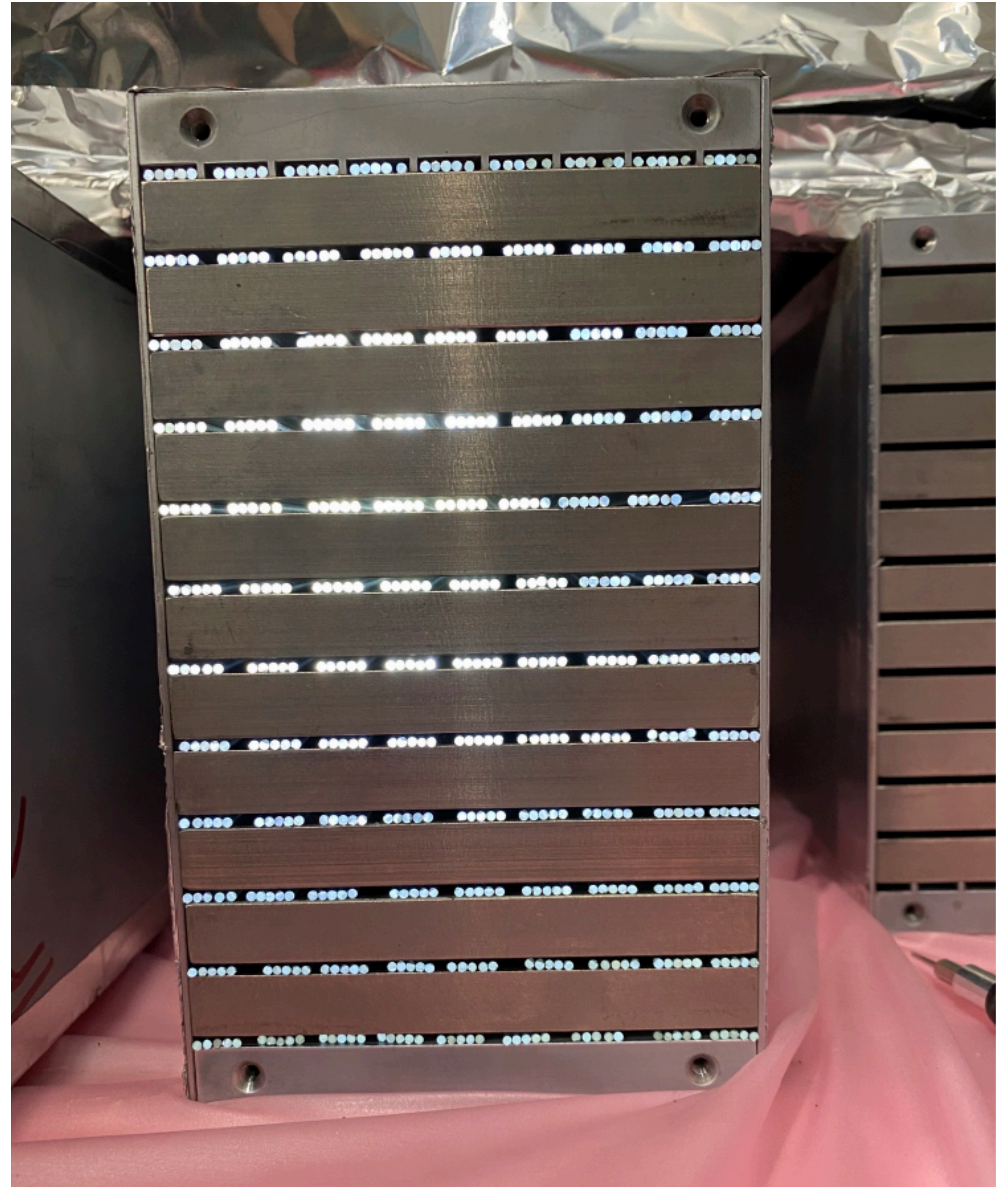
LHCf検出器で測定された中性子エネルギースペクトル

黒点：データ点
 黒エラーバー：統計誤差
 グレーの領域：統計誤差+系統誤差



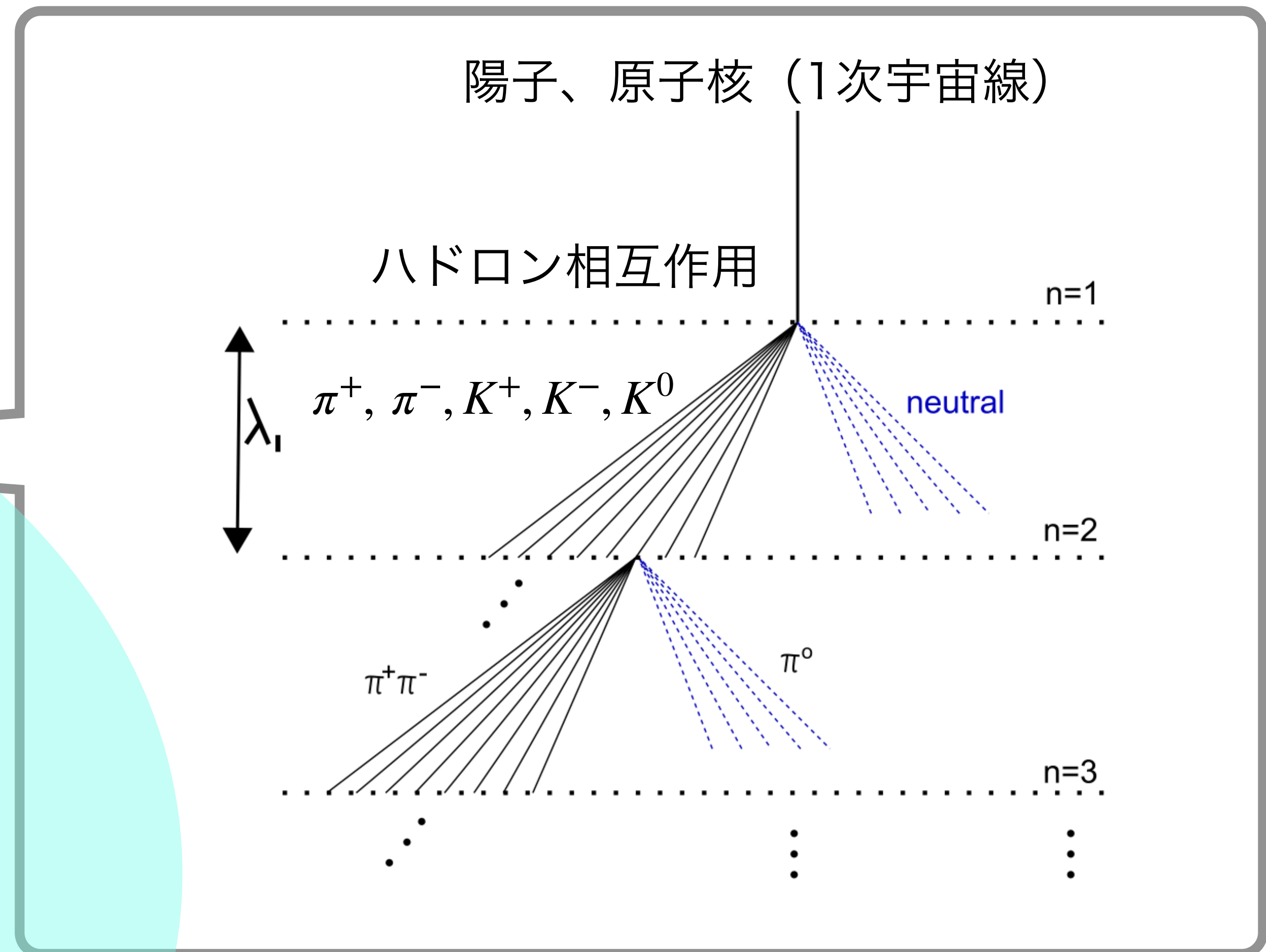
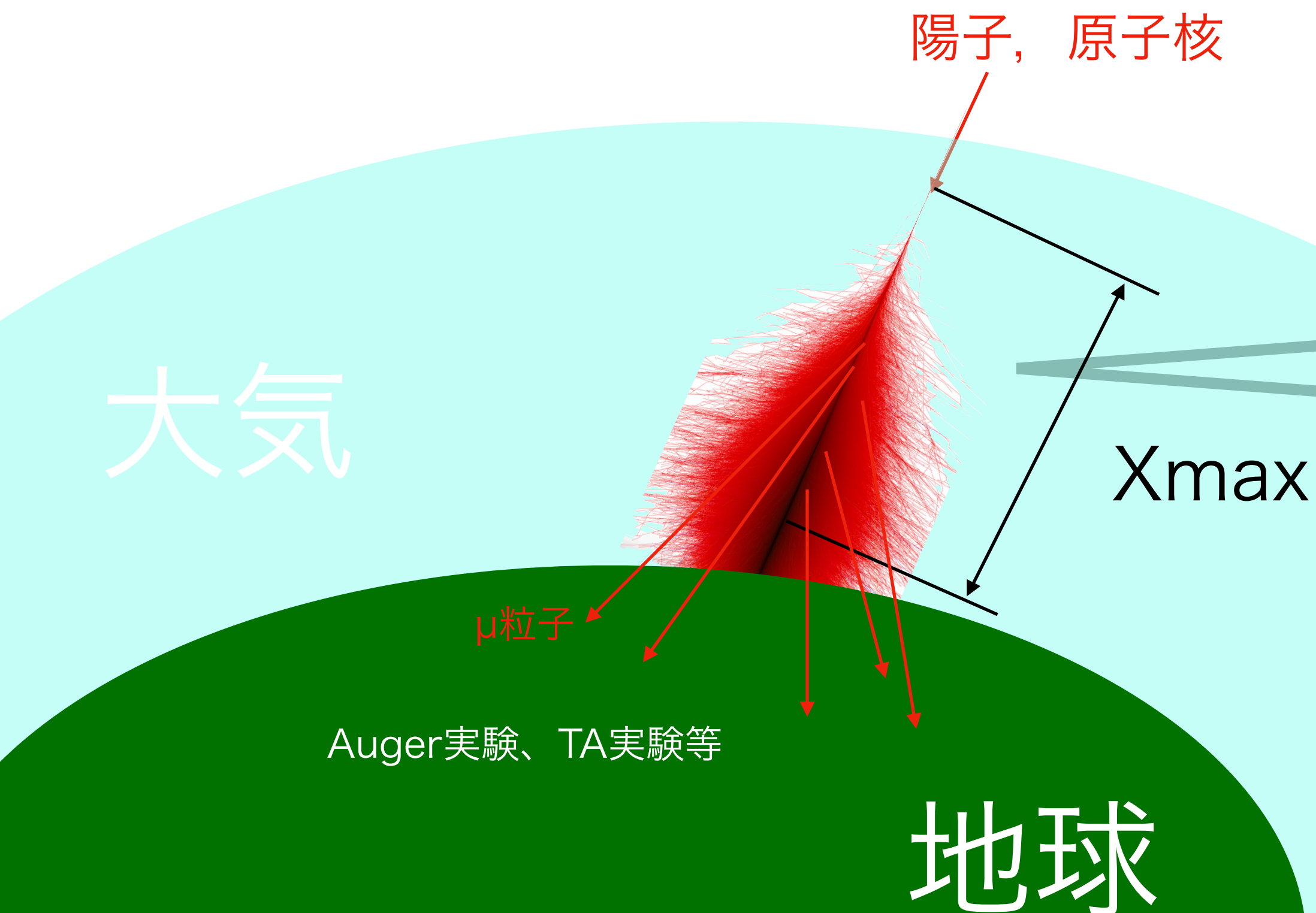
ZDCの位置依存性

- 石英ファイバーは固定されていないのでエネルギーの位置依存性が生じる可能性がある。



空気シャワーについて

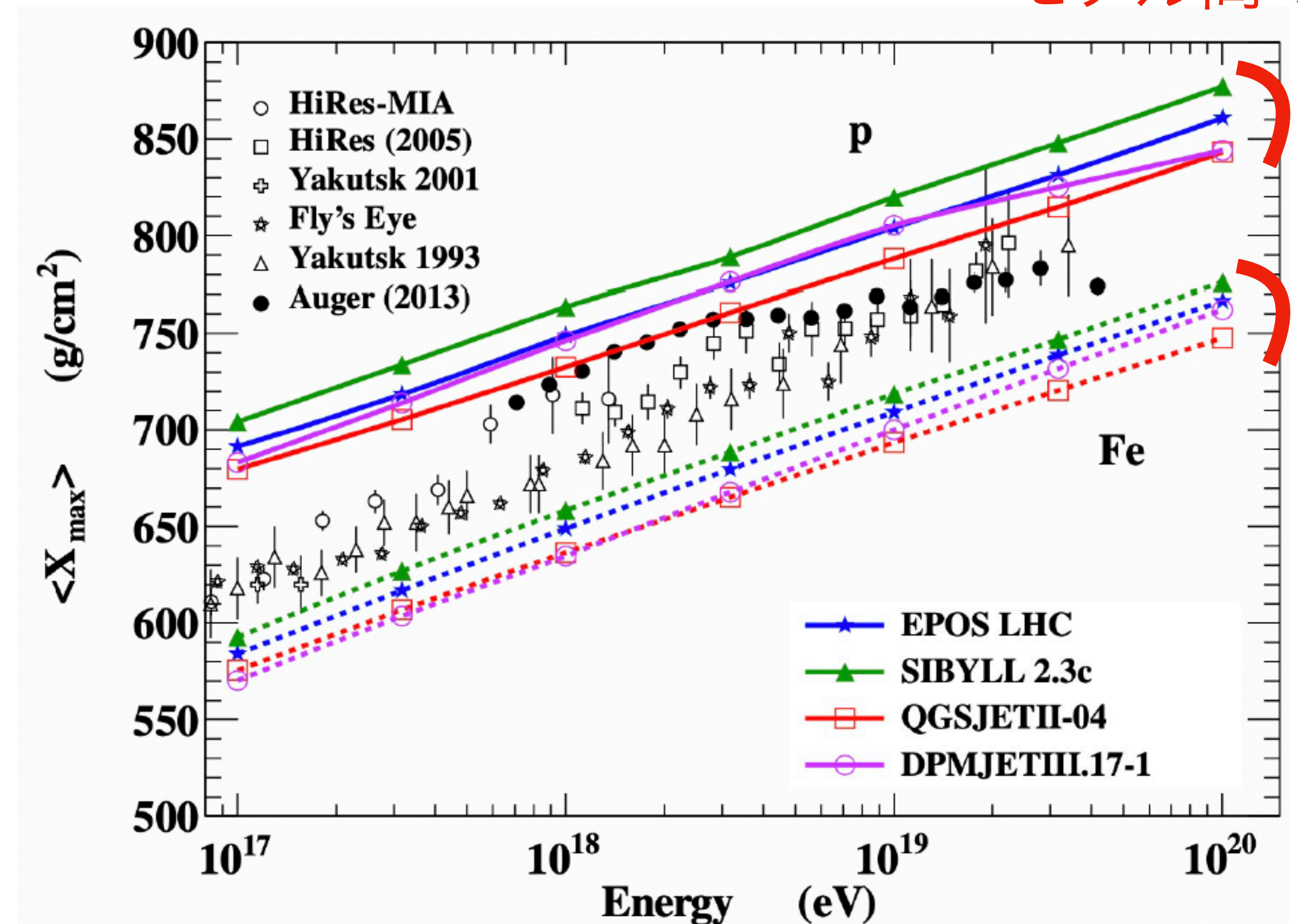
- 陽子, 原子核が地球に飛んでくると, 地球大気と相互作用して空気シャワーを作る。
- 空気シャワーの最大発達深度 (X_{max}) や生成される μ 粒子の数 (N_{μ}) を観測し、1次粒子の化学組成などの特徴を決めている。



空気シャワー観測の課題

- 空気シャワーシミュレーションでは、高エネルギーのハドロン相互作用について、相互作用モデル間の差がある。
- そのため、1次宇宙線の化学組成の決定に不定性が生じる。(右図)
- 高エネルギーのハドロン相互作用を正確に測定したい→**世界最高の衝突エネルギーを持つLHCで前方に生成される粒子を測定する、LHCf実験**

モデル間の差



T.Pierog DOI: 10.1051/epjconf/201920802002

