陽子ビームを用いたLHCf-ATLAS ZDC共同測定性能評価

- ATLAS ZDC検出器との共同中性子測定
- SPSでの測定性能検証

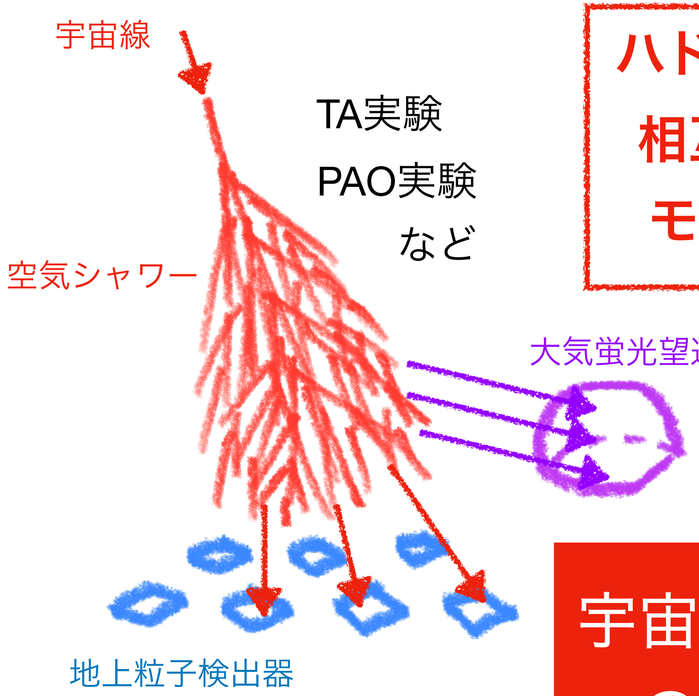
近藤萌

名大 ISEE

@空気シャワー勉強会（オンライン）　2022年3月22日

超高エネルギー宇宙線

- 10^{18} eV 以上の宇宙線 。
- 加速源や加速機構が未解明。解明のため、宇宙線のエネルギー、到来方向、化学組成などが重要。
- 宇宙線と大気中の粒子が相互作用してできる空気シャワーを観測する。



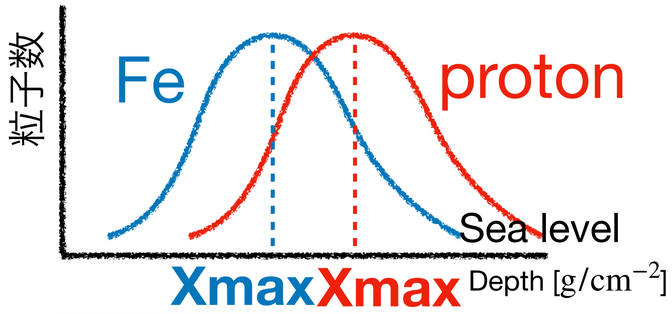
TA実験
PAO実験
など

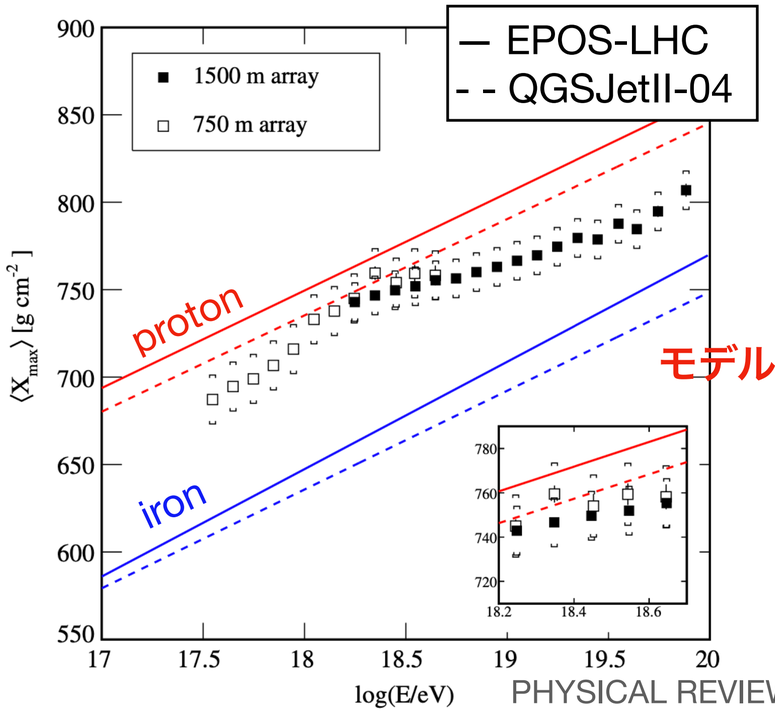
ハドロン相互作用モデル

1次宇宙線の情報を推定

- エネルギー
- 到来方向
- 化学組成

宇宙線と大気の相互作用の詳細な理解が必要





モデル間の差が大きい

PHYSICAL REVIEW D 96, 122003 (2017)

超高エネルギー宇宙線測定と中性子

弾性度

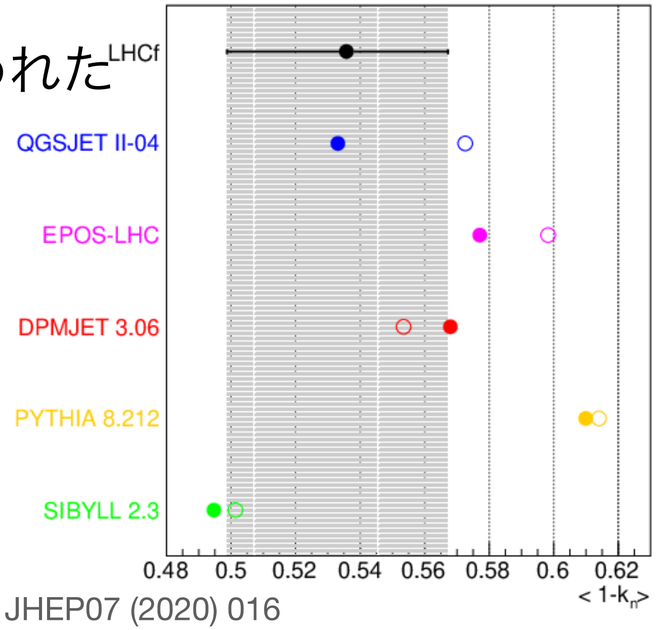
加速器実験で得られた中性子のデータを用いて弾性度を求める解析が行われた[LHCf]

非弾性度の不定性は<Xmax>に影響→データの不定性も大きくなる

非弾性度K_{inel}が0.6から0.7になると、<Xmax>は5.4 g/cm^{2}変化する

（From 大橋さんスライド）

●中性子での非弾性度
○非弾性度



π-proton 反応

空気シャワーでは高エネルギーなπと陽子の衝突が多く起こっている

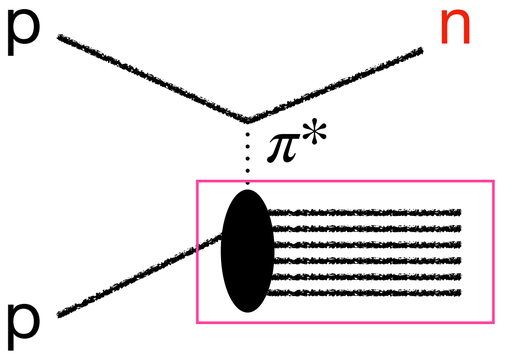
→ π-p 反応を調べる必要あり

低エネルギー：πビーム衝突実験

高エネルギー：one pion exchangeを調べる

衝突により放出される中性子を調べることで、one pion exchangeをタグ付けすることができる。

one pion exchenge



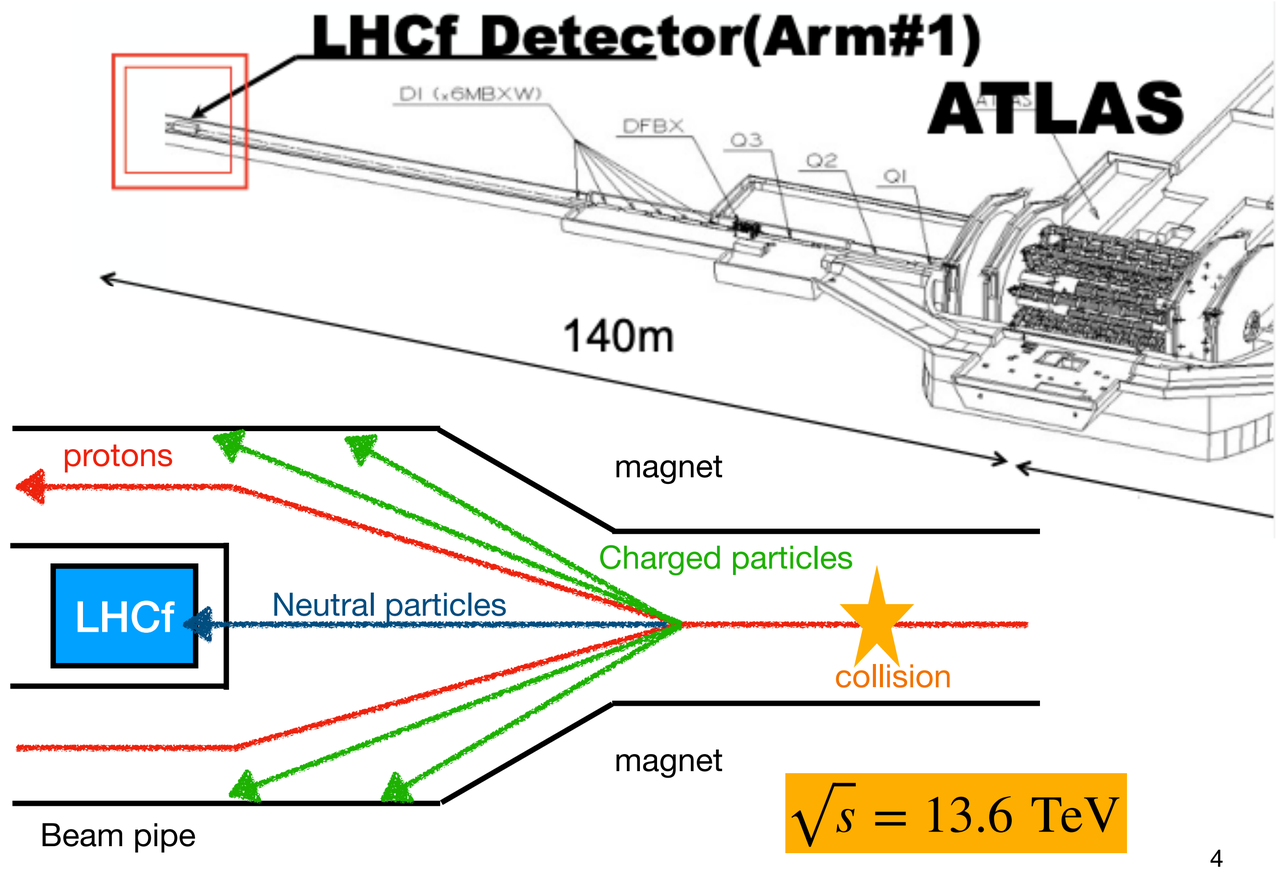
中性子を測定することで、宇宙線測定に重要なパラメータ・反応を調べることができる

LHCf 実験

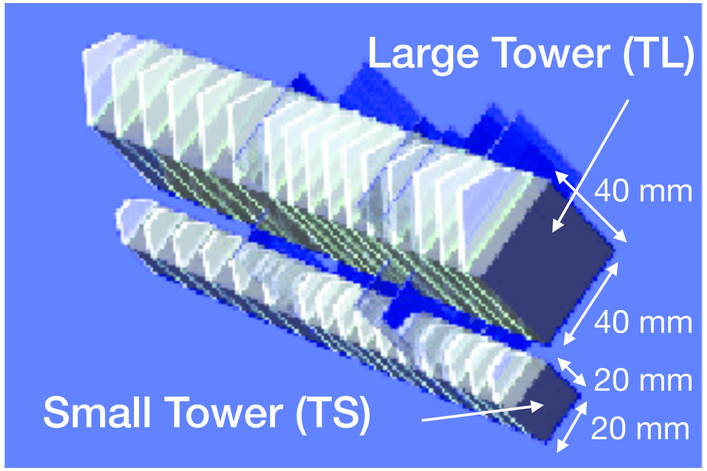
ATLAS衝突点の140 m前方に検出器を設置。衝突によって超前方に放出される中性粒子 (γ, n, π^0) を検出。

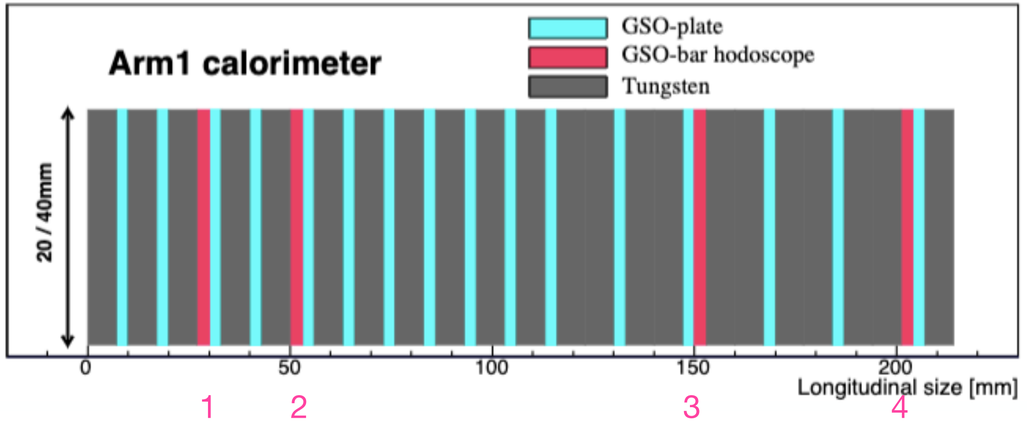
・最近の実験　**2015**：p-p $\sqrt{s}$=13 TeV、**2016**：p-Pb $\sqrt{s_{NN}}$=8 TeV

・次回　**2022** 9月 p-p $\sqrt{s}$=13.6 TeVを予定。 10^9 collisionデータ取得予定。



Arm1 detector





LHCf 実験における中性子測定

中性子の微分生成断面積

$\sqrt{s} = 13$ TeV (2015)、10^7collision、陽子陽子衝突実験

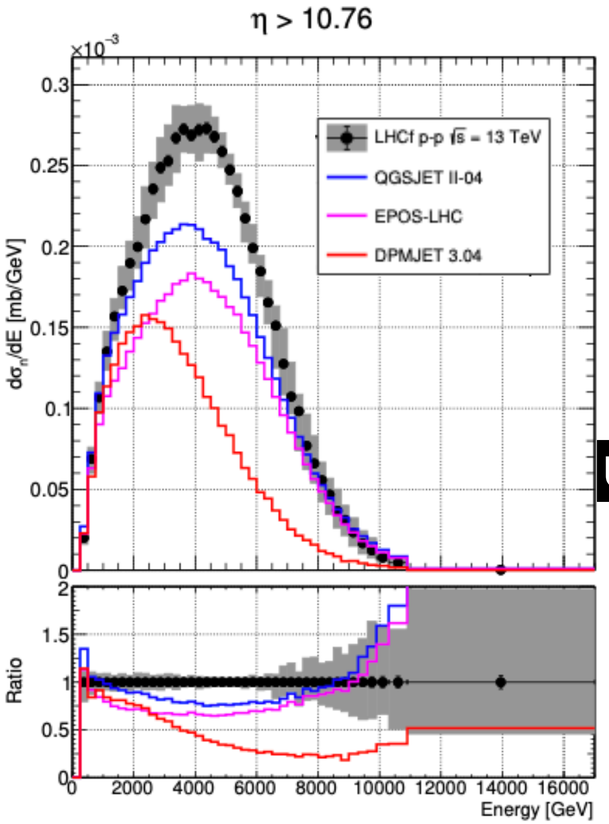
Unfolding の不定性が大きい
　↑エネルギー分解能に依存

<u>現在のLHCf 測定性能</u>

- エネルギー分解能　40 %
- 位置分解能　0.3 mm
- 検出器の大きさ　1.7 λ

中性子測定の系統誤差低減のためには、
エネルギー分解能向上が不可欠！

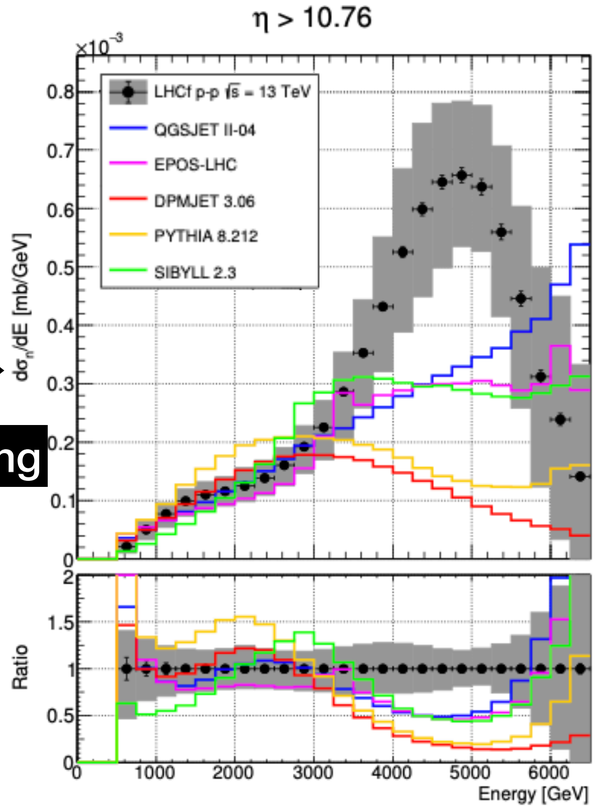
再構成された微分生成断面積



Unfolding

Unfolding後の微分生成断面積

uncertainty ~ 25 %

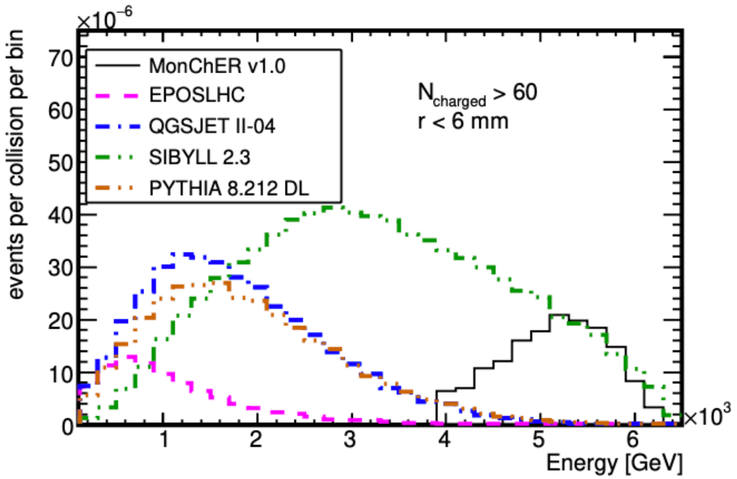


JHEP11(2018)073
黒：統計誤差、グレー：統計&系統誤差

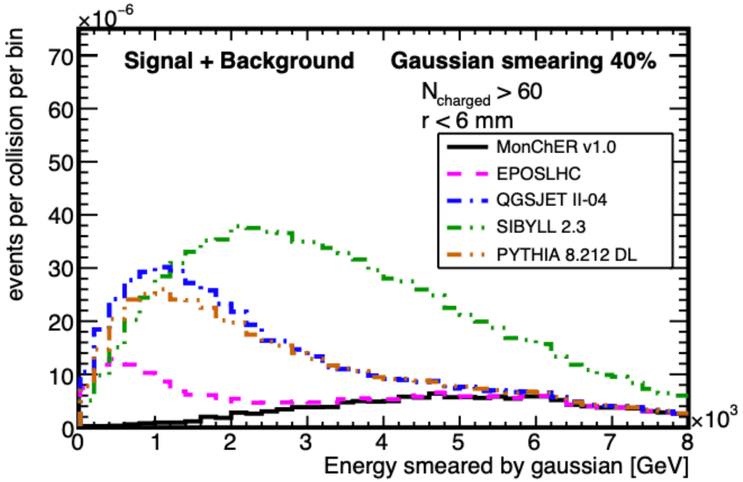
中性子測定性能向上の重要性

黒線：one pion exchange

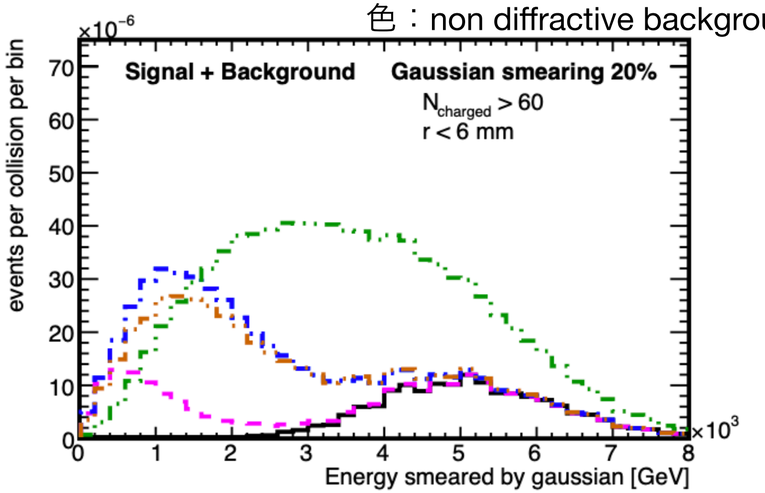
色：non diffractive background



trueの中性子エネルギースペクトル



エネルギー分解能が40 %のとき



20 %のとき

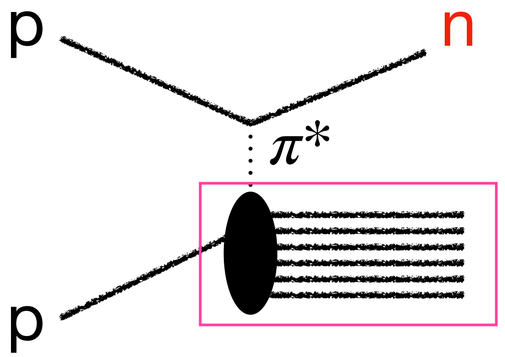
PoS(ICRC2021)190

中性子のエネルギー分解能が良くなれば、

one pion exchangeとそうでない反応を

区別することができる！

one pion exchenge



LHCf + ZDC による共同測定

ATLAS ZDCとの共同解析で、LHCf の後ろに漏れ出すシャワーも捕らえる

ATLAS ZDC

・ATLASのZero Degree Calorimeter

・今までは原子核衝突時に使用。

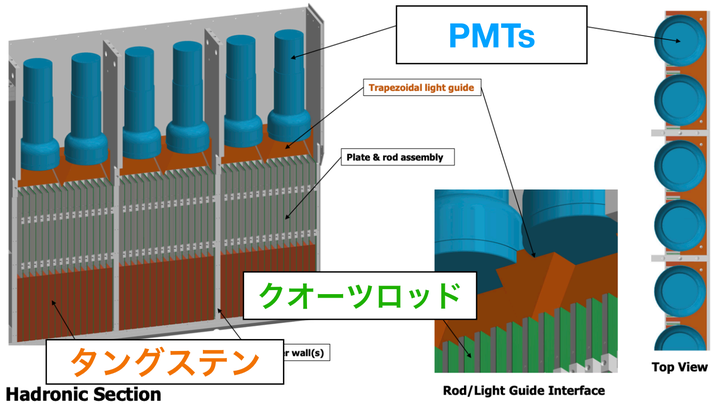
<u>測定性能</u>

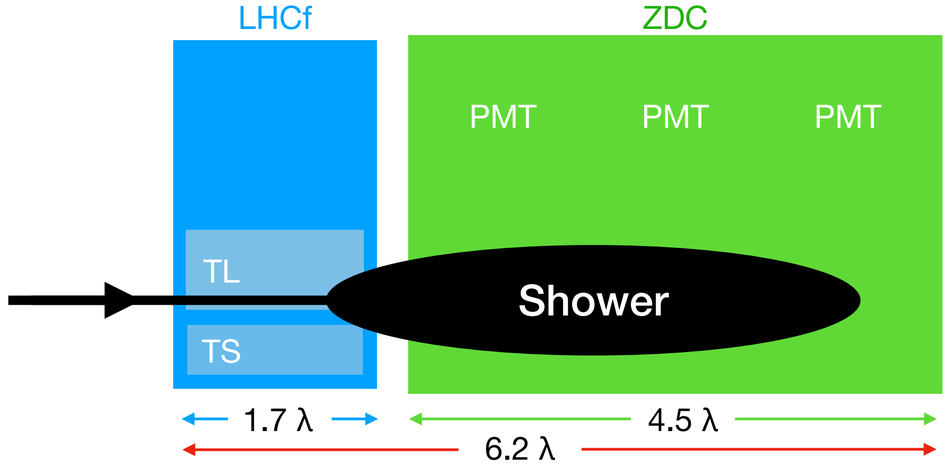
・3つのモジュール

・検出器の大きさ　4.5 λ

・エネルギー分解能 24 %

https://indico.cern.ch/event/974868/attachments/2157061/3638446/ZDC_v04_Latest.pdf





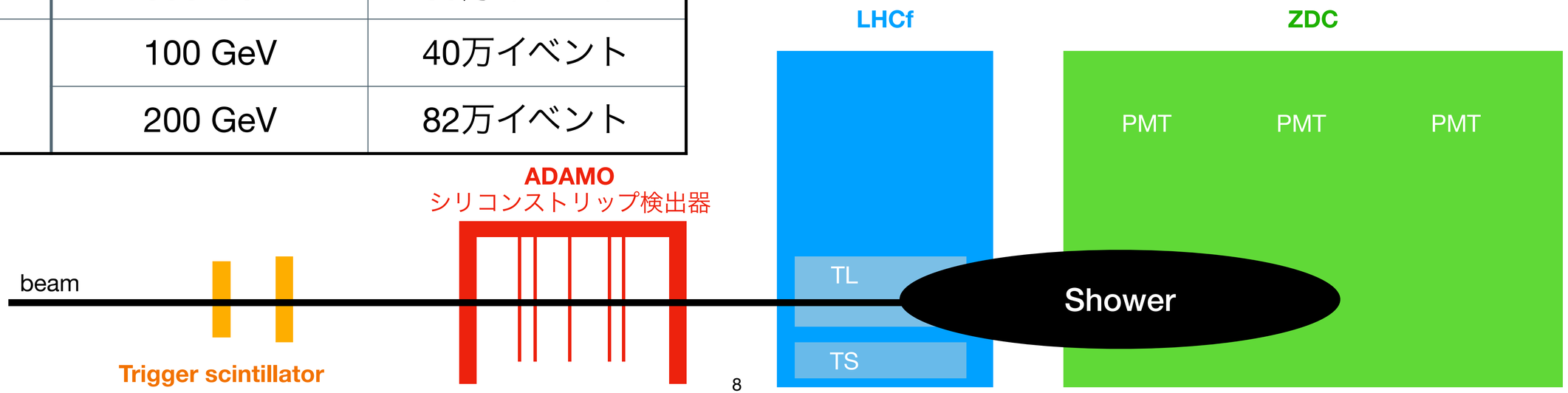
LHCf + ZDCで
エネルギー分解能
の向上

LHCf の
高い位置分解能

SPSビームテスト実験

- 共同測定時の性能検証として、SPSでビームテスト実験を行った。
- 2021年9月24日 - 28日 @CERN SPS H4ビームライン
- ビーム入射位置を変えながら測定

ビーム	エネルギー	統計
陽子	350 GeV	86万イベント
電子	100 GeV	40万イベント
	200 GeV	82万イベント



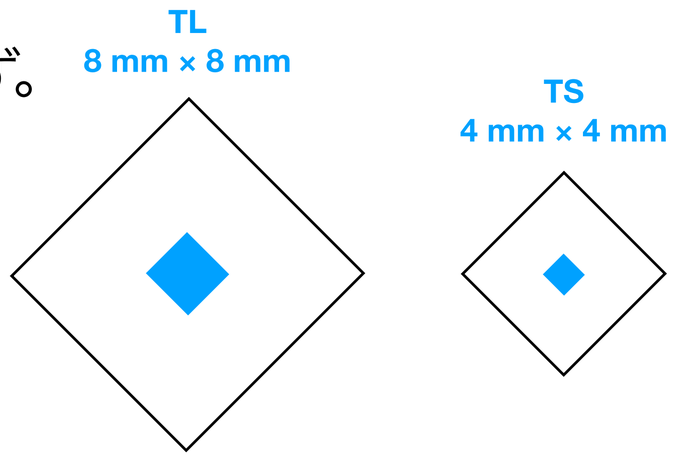
SPSビームテスト実験

目的

LHCf 検出器のエネルギー較正　＆　ZDCとの共同測定の性能評価

解析手法

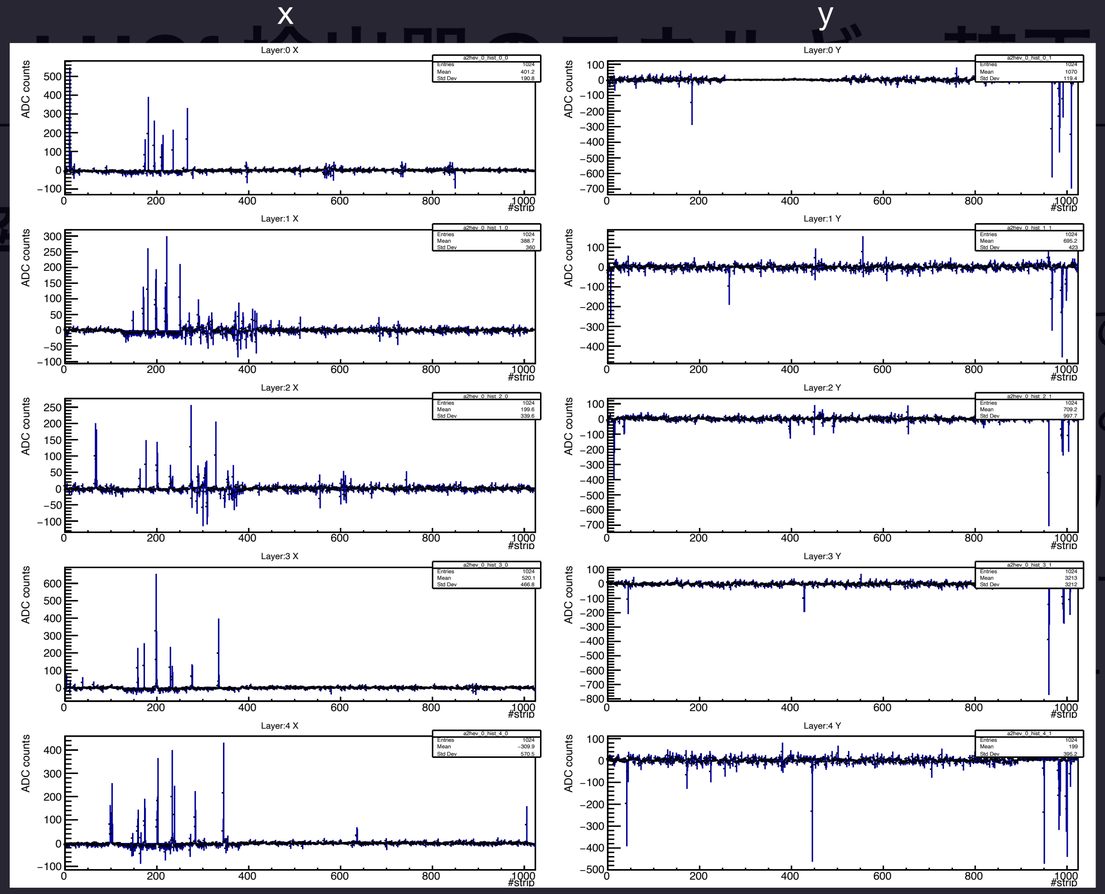
1. ADAMOというシリコントラッカーを用いて入射粒子の位置決定、イベントセレクション。
2. カロリメータの中心に入射した陽子ビームと電子ビームのデータを、SPSで2015に同様に行ったビームテスト実験のデータと比較し、エネルギー較正を行う。
3. LHCf とZDC の相関関係を調べ、エネルギー分解能を評価する。
   ZDCのエネルギー分解能を考慮すると、24 %までは改善するはず。

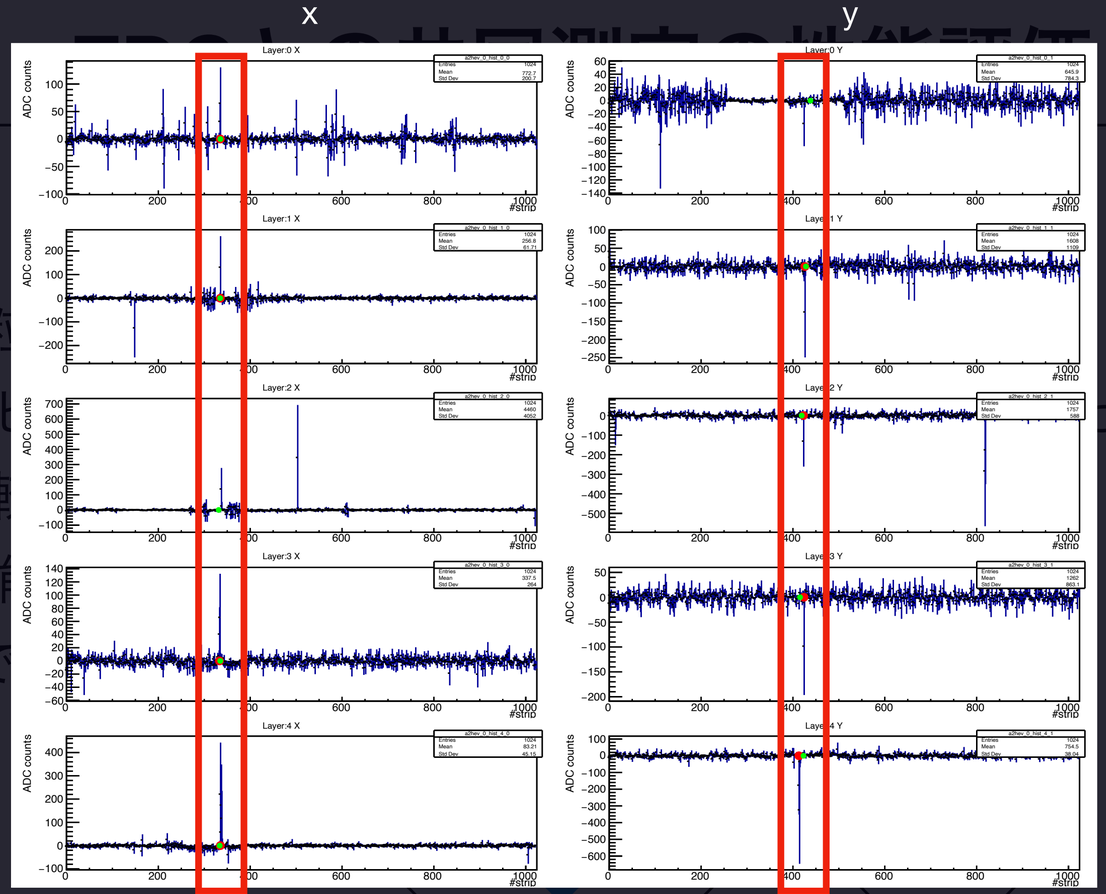


ADAMOによるイベントセレクション（ある１イベントの例）

カットされたイベント

通過したイベント





1層目

2層目

3層目

4層目

5層目

↑

LHCf より前にシャワーが発達してしまっている

350 GeV の陽子が入射していると断定できない

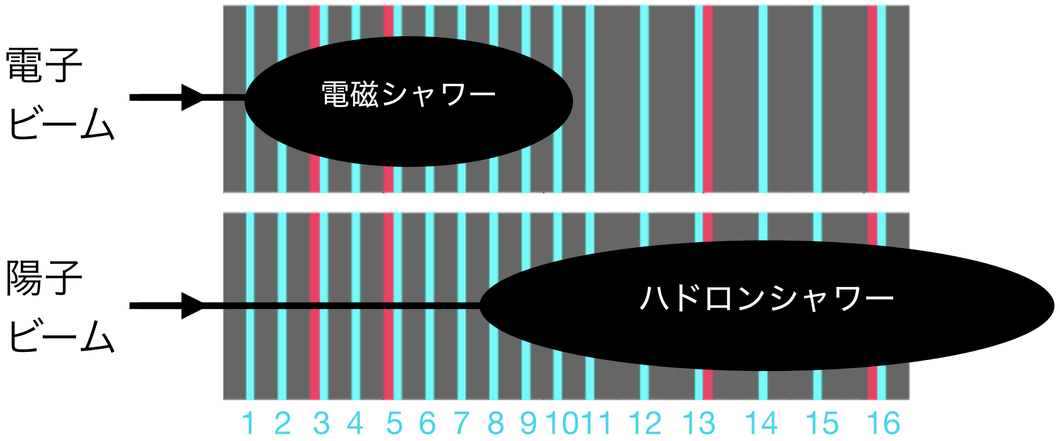
●→Hit Strip　●→Reconstructed Hit Track

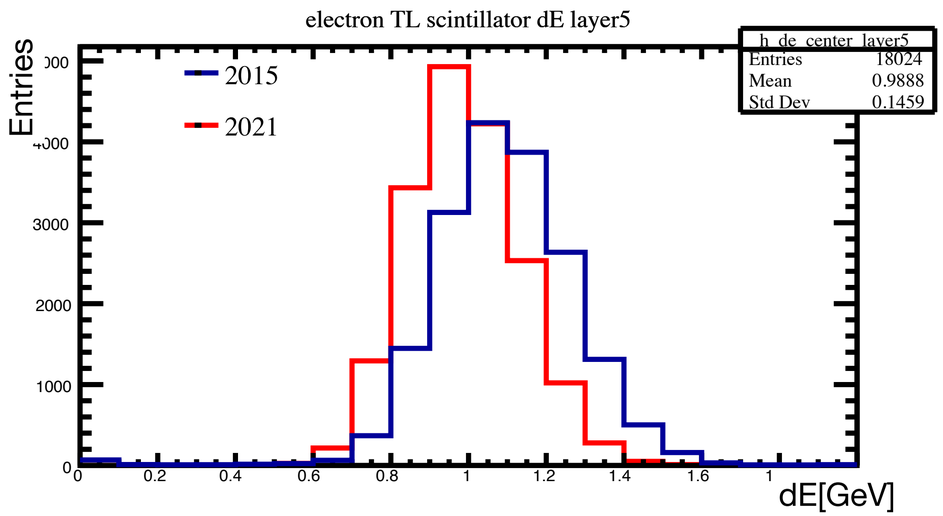
LHCf 検出器のエネルギー較正

6年ぶりの実験であったため、ADC値をエネルギーデポジット（dE）に変換する補正係数の確認が必要であった。2015年に同様のビームテスト実験を行った結果と比較し、各サンプリング層での dE が一致するよう補正係数を修正。

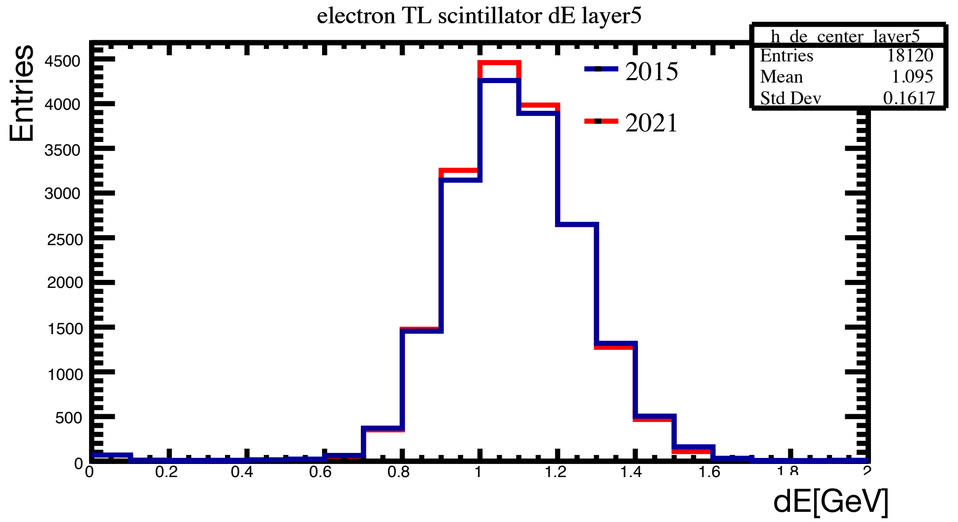
使用したデータ

- 1 - 9 層目　→ 電子
- 10 - 16 層目 → 陽子
- カロリメータ中心のデータを使用





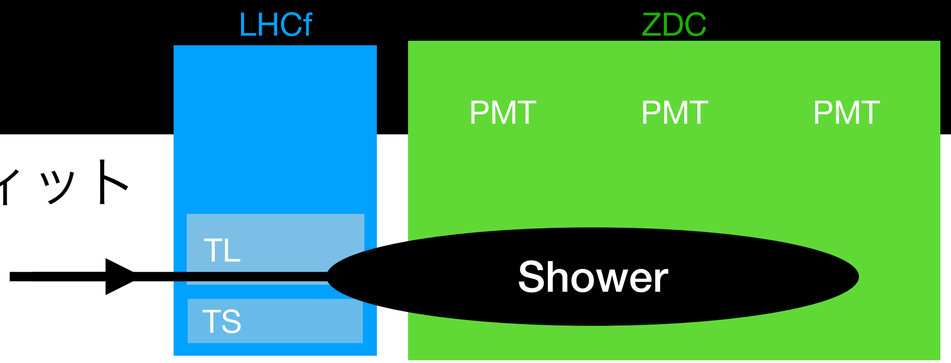
修正



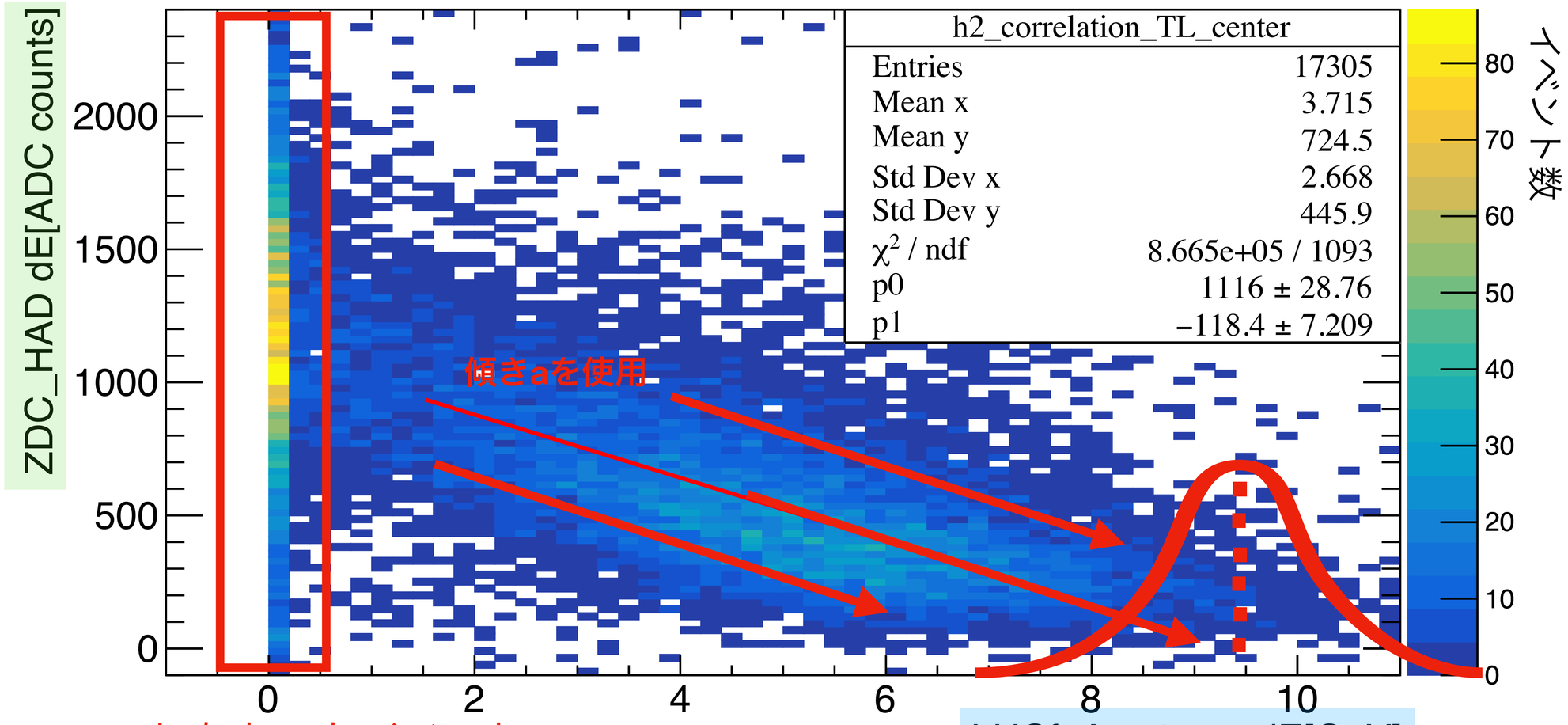
エネルギー分解能の評価

LHCf とZDC の相関関係、一次関数 $E_{ZDC} = a \times E_{LHCf} + b$ でフィット

カロリメータ中心（8 mm × 8 mm）のデータを使用



LHCf-ZDC proton TL



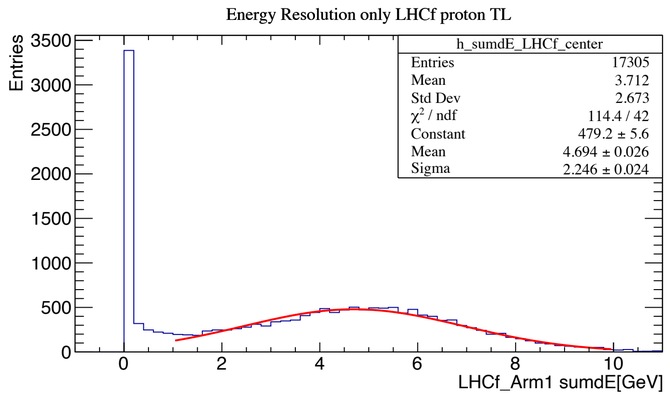
LHCfでinteractionしなかったイベント

エネルギー分解能の評価

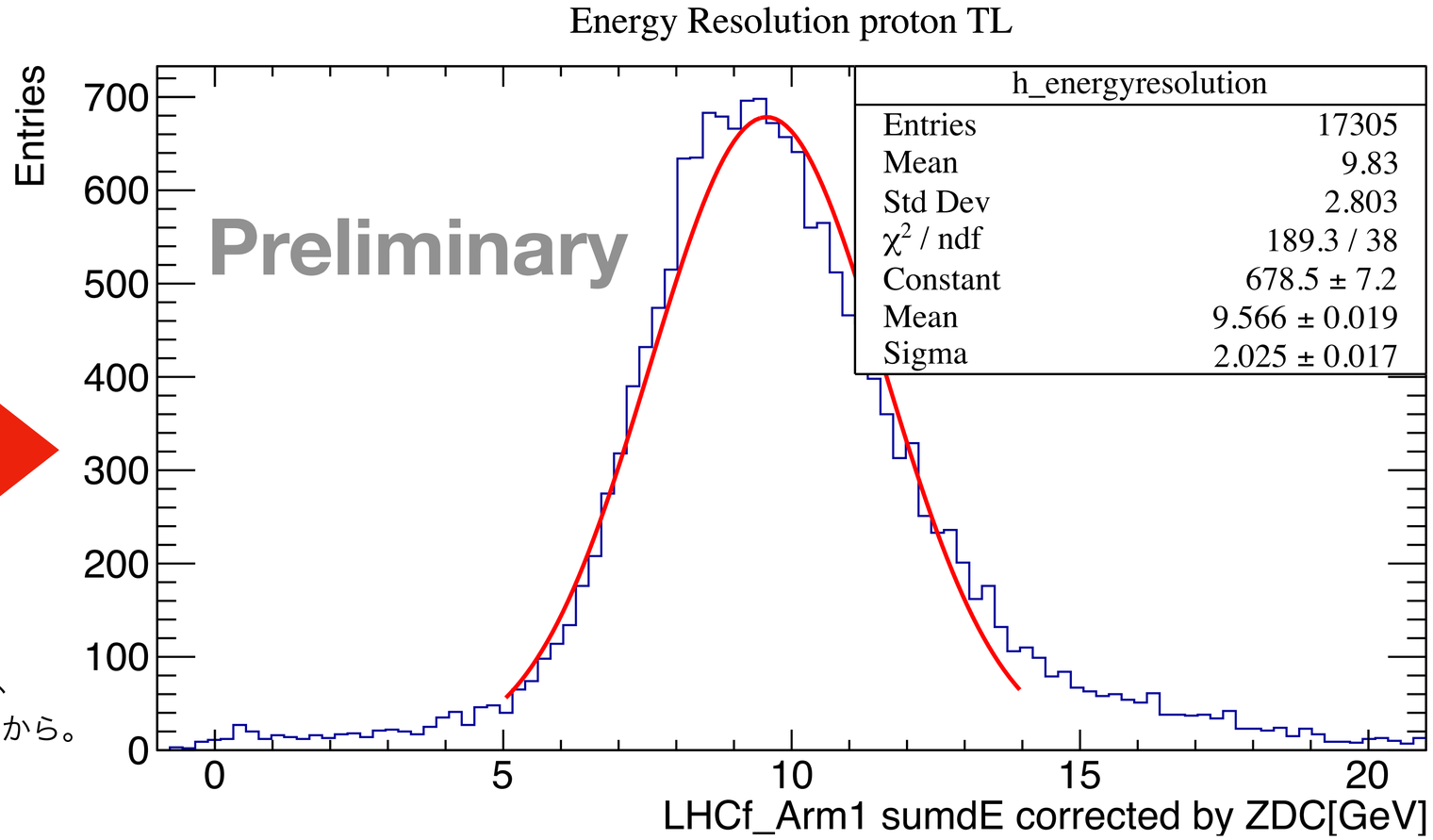
ZDCとの相関関係を用いて補正したエネルギー分布をガウスフィット。

LHCf のみを用いた場合　σ/E = 47.8 %　→　LHCf とZDCの共同解析　**σ/E = 21.2 %**

エネルギー分解能が
大幅に向上！



LHCf のみのエネルギー分解能が40%よりも悪いのは、
シャワーのトリガー条件（３層連続検出）をかけていないから。



まとめ

- 2022年9月の測定では、中性子測定性能向上のためにLHCf とATLAS ZDC の共同測定を実施する。

- 350 GeV 陽子ビームを用いて、エネルギー分解能が約40 % から21 %に向上することを確かめた。

今後の課題

- 一部未完了のキャリブレーションを実施。
  - ・ZDC 検出器のエネルギー校正
  - ・LHCf 検出器の位置依存性

- MCとの比較を行う。

Back up

ハドロン相互作用の不定性によるXmaxへの影響

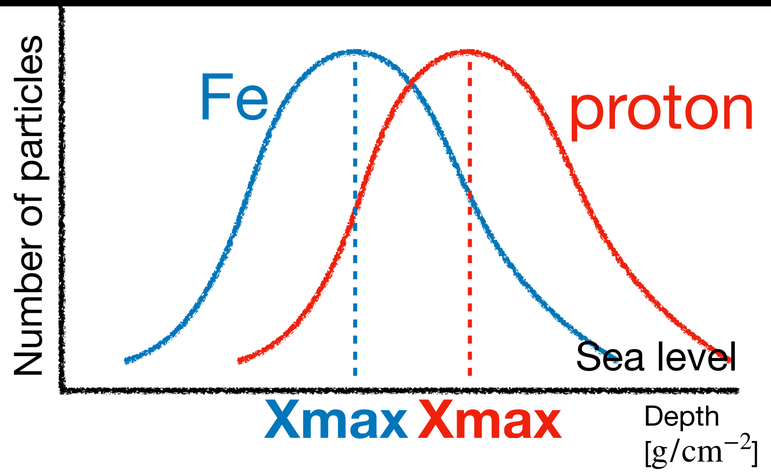
Cosmic ray composition is usually measured with X_{max}.
What is X_{max}?

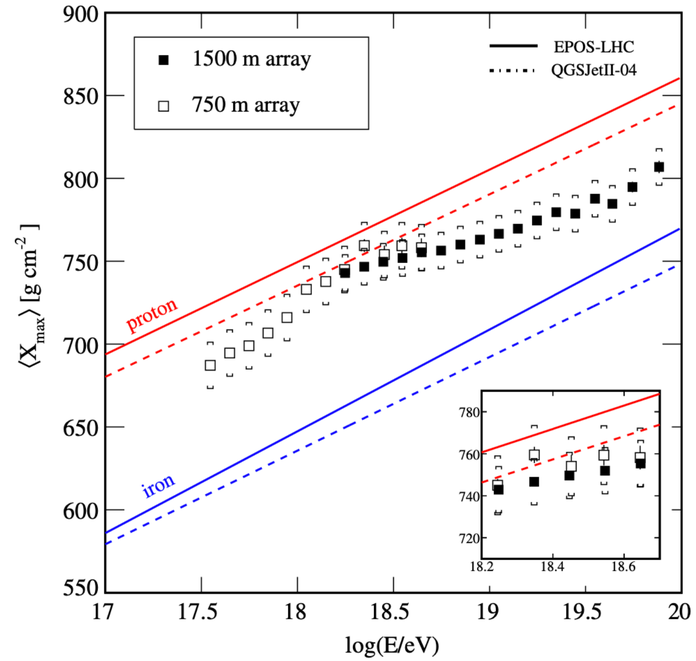
X_{max} = shower maximum [g/cm^-2]

Comparison proton and Iron

	proton	Iron
cross section	small	large
E/A	large	small

→Iron's shower develop faster than proton.





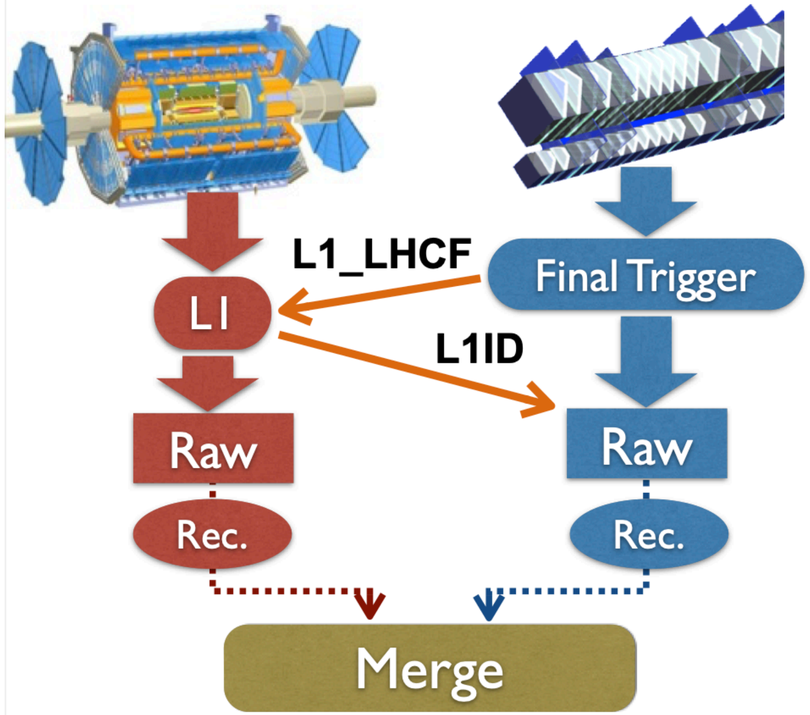
To study the composition,
compare data with MC

PHYSICAL REVIEW D 96, 122003 (2017)

ZDC の読み出し

- ATLAS のcentral detectorとのトリガーシステムの連携は2015年の実験で成功実績がある。LHCf のトリガーをATLASのトリガーシステムに送信し、LHCf トリガーでZDCのデータを取得できるようにした。

- 今回のSPS実験では、LHCfの解析ボードにZDCのADC出力を入れた。



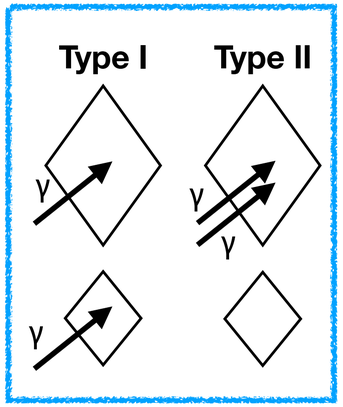
今までのLHCf 実験

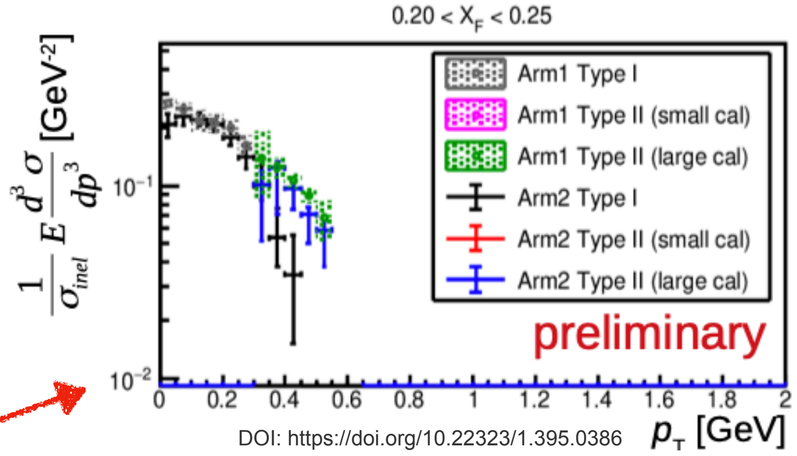
今までのラン

- p-p
  - 2009/2010 $\sqrt{s}$ = 0.9 TeV
  - 2013 $\sqrt{s}$ = 2.76 TeV
  - 2010 $\sqrt{s}$ = 7 TeV
  - 2015 $\sqrt{s}$ = 13 TeV
  - 2022 $\sqrt{s}$ = 14 TeV
- p - Pb
  - 2013/2016 $\sqrt{s_{NN}}$ = 5 TeV
  - 2016 $\sqrt{s_{NN}}$ = 8 TeV

解析

- Photon
- Neutron
- π^0

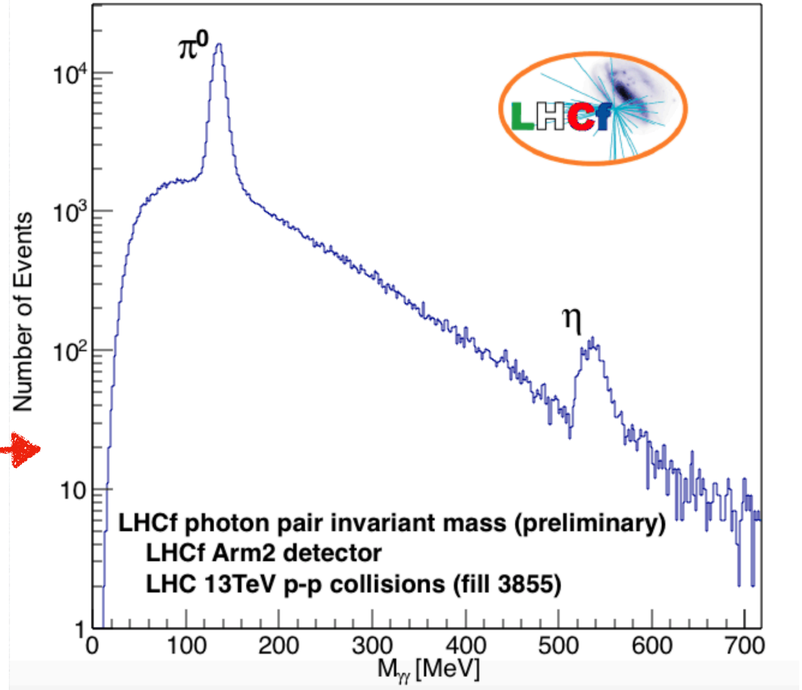




π^0解析

・スペクトル

横方向運動量 p_T

ファインマン-X ($X_F = 2p_Z/\sqrt{s}$)

・質量再構成