

空気シャワーシミュレーションによる 超高エネルギー宇宙線の予測 とLHCf実験

第4回YMAP 秋の研究会@名古屋・ISEE

名古屋大学 CR研 D1 大橋健

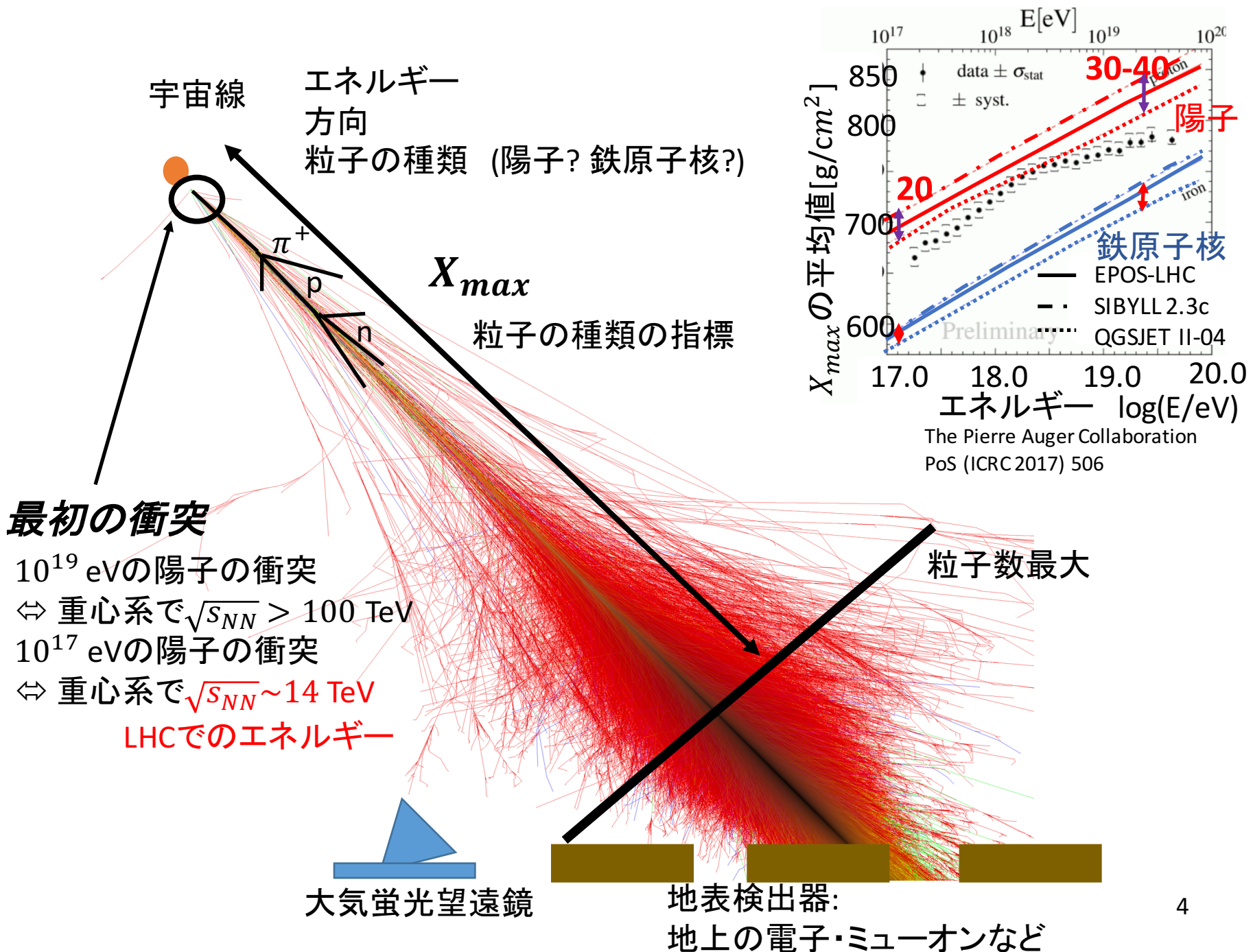
自己紹介

- 大橋健
- 名古屋大学 ISEE CR研
- 所属実験グループ
LHC forward(LHCf)
- これまでに行った海外出張
 - CERN (スイス)、フィレンツェ (イタリア)、マディソン (USA)
 - 合計4回海外に行き、2回空港で足止め。



コンテンツ

- 超高エネルギー宇宙線とLHC forward実験の関係
 - なんで、超高エネルギー宇宙線のための加速器実験が必要なのか?
 - 超高エネルギー宇宙線の観測と化学組成
 - 加速器実験によるハドロン相互作用モデルの改良
 - どのようなアプローチでモデルの改良を行っているか
- これまでのLHCf実験、とくにATLAS実験とLHCf実験の連動解析



宇宙線

エネルギー
方向
粒子の種類 (陽子? 鉄原子核?)

最初の衝突

K_{el} :
衝突で生じた一番エネルギーの大きな粒子
により持ち去られたエネルギーの割合

電磁シャワー(主成分)

電子->
制動放射(光子生成)
光子->
電子陽電子対生成

$K_{inel} = 1 - K_{el}$ のうち
の一部が $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

衝突で生成した粒子の数 n_{mult}
そのうち π^0 の割合 r

X_{max} の予測の上で大切な点

- 散乱断面積
- どこでどのくらいのエネルギーの光子が生成されたか?

=> K_{el}, n_{mult}, r が重要

大気蛍光望遠鏡

地表検出器:
地上の電子・ミュオンなど

宇宙線

エネルギー

方向

粒子の種類 (陽子? 鉄原子核?)

最初の衝突

加速器実験 (LHC)

散乱断面積 σ_{inel}

<= TOTEM, ATLAS, CMS

n_{mult}

<= ATLAS, CMS

K_{el}

<= LHCf, (TOTEM), (ATLAS), (CMS)

エネルギーの高い π^0 の生成量

<= LHCf

大気蛍光望遠鏡

地表検出器:

地上の電子・ミュオンなど

X_{max} の予測の上で大切な点

- 散乱断面積
- どこでどのくらいのエネルギーの光子が生成されたか?

=> K_{el}, n_{mult}, π^0 の割合が重要

シミュレーションでの衝突の取り扱い

シミュレーションパッケージ

CORSIKA, (COSMOS)

近似を用いた一次元シミュレーション
CONEX

ハドロン間の衝突の取り扱い:

ハドロン相互作用モデル

Energy > 80 GeV :

EPOS-LHC, QGSJET II, SIBYLL 2.3c

Energy < 80 GeV:

UrQMD, FLUKA

電磁成分の取り扱い:

EGS4

ハドロン相互作用モデル

摂動QCDは、粒子間の運動量のやりとり
が大きい時のみ適用可能
摂動QCDの適用できない領域(soft QCD)
は、モデルにより記述

p_T の大きな領域 <= 摂動QCD + 一部モデル
 p_T の小さな領域 <= モデル
cross section <= これまでの測定結果を外挿

空気シャワーシミュレーションで大切な要素
散乱断面積 σ_{inel} <= 測定結果の外挿

n_{mult} <= p_T の大きな領域

K_{el} <= p_T の小さな領域

ハドロン相互作用モデルと 加速器実験

ハドロン相互作用モデル

摂動QCDは、粒子間の運動量のやりとり
が大きい時のみ適用可能
摂動QCDの適用できない領域(soft QCD)
は、モデルにより記述

p_T の大きな領域 \Leftarrow 摂動QCD + 一部モデル
 p_T の小さな領域 \Leftarrow モデル
cross section \Leftarrow これまでの測定結果を外挿

空気シャワーシミュレーションで
大切な要素

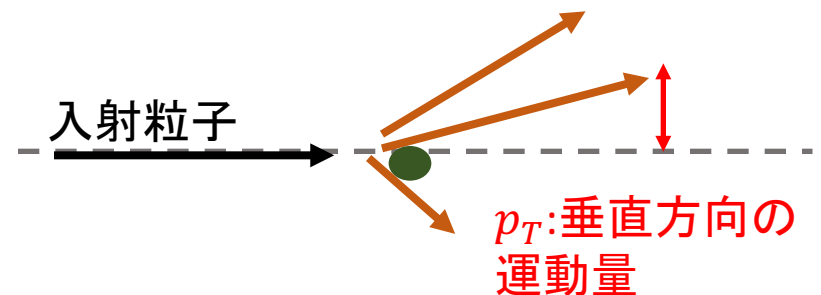
散乱断面積 σ_{inel}

\Leftarrow 測定結果の外挿

n_{mult} \Leftarrow p_T の大きな領域

K_{el} \Leftarrow p_T の小さな領域

入射粒子



p_T : 垂直方向の
運動量

モデルに依存する部分は加速器実験により
測定し、検証する必要がある。

ハドロン相互作用モデルと 加速器実験

ハドロン相互作用モデル

摂動QCDは、粒子間の運動量のやりとり
が大きい時のみ適用可能
摂動QCDの適用できない領域(soft QCD)
は、モデルにより記述

p_T の大きな領域 \leq 摂動QCD + 一部モデル
 p_T の小さな領域 \leq モデル
cross section \leq これまでの測定結果を外挿

空気シャワーシミュレーションで
大切な要素

散乱断面積 σ_{inel}

\leq 測定結果の外挿

n_{mult} \leq p_T の大きな領域

K_{el} \leq p_T の小さな領域

**加速器実験による検証の考え方1:
空気シャワーの重要な特徴量を測定する**

モデルに依存する部分は加速器実験により
測定し、検証する必要がある。

ハドロン相互作用モデルと 加速器実験

ハドロン相互作用モデル

摂動QCDは、粒子間の運動量のやりとり
が大きい時のみ適用可能
摂動QCDの適用できない領域(soft QCD)
は、モデルにより記述

p_T の大きな領域 \leq 摂動QCD + 一部モデル
 p_T の小さな領域 \leq モデル
cross section \leq これまでの測定結果を外挿

空気シャワーシミュレーションで
大切な要素

散乱断面積 σ_{inel}

\leq 測定結果の外挿

n_{mult} \leq p_T の大きな領域

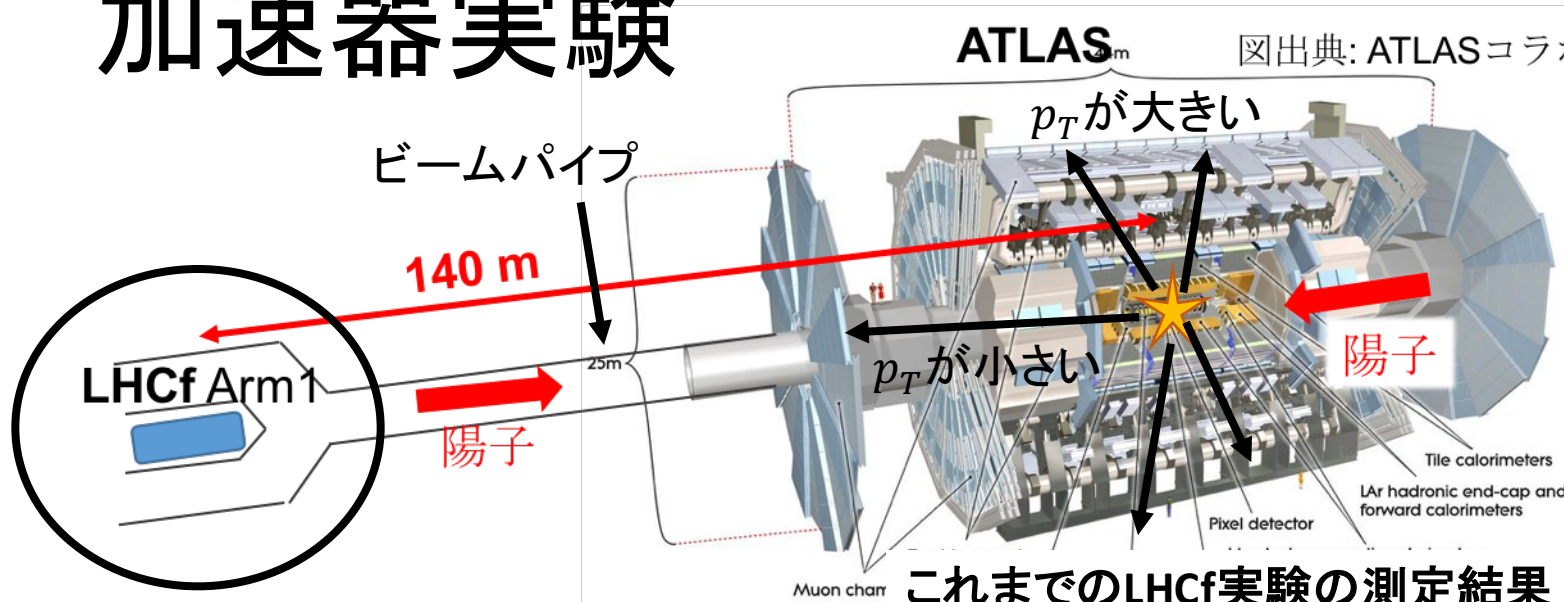
K_{el} \leq p_T の小さな領域

**加速器実験による検証の考え方2:
原因として指摘されている部分のモデル
を検証する**

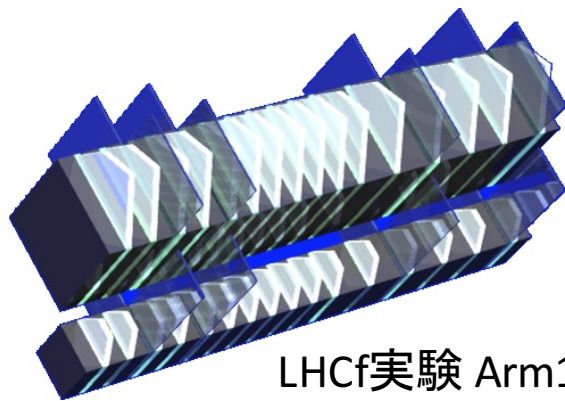
これまでに X_{max} のモデル間の違いの原因として指摘されているもの

- K_{el} 予測のモデル間の違い
- diffractive collision (K_{el} に影響; soft QCDかつあまり測定されていない)
- π^+ -Air, K^+ -Air衝突でのcross section, n_{mult} , K_{el} などの予測
(π^+ などの加速器の結果は低エネルギーのみ)

加速器実験



摂動QCDが適用できないような
 p_T の小さい中性粒子を測定



LHCf実験 Arm1検出器

これまでのLHCf実験の測定結果

陽子-陽子 重心系エネルギー7TeV

π^0 , 中性子, 光子

陽子-陽子 重心系エネルギー13TeV

中性子, 光子 (π^0 は解析中)

陽子-鉛 重心系エネルギー 5.02, 8TeV

π^0

空気シャワーの重要な特徴量(の一部)を測定

ATLAS実験とLHCf実験の連動解析

diffractive collisionで生成された光子

原因として指摘されている部分を測定

これまでの研究

- ATLAS-LHCf 連動解析によるdiffractive collisionの研究
 - ATLAS実験の測定器で衝突の種類を判別し、LHCf実験の測定器で粒子を測定する。
- diffractive collisionのモデル間の違いの X_{max} 予測への影響を空気シャワーシミュレーションにより求める
 - diffractive collisionのモデルが改良された場合、空気シャワーのシミュレーション結果はどのように変化するか?
 - diffractive collisionの種類/割合の X_{max} 予測への影響を定量的に求める。

diffractive collisions

p-p 重心系エネルギー 13TeV 散乱断面積

弾性散乱: ~20mb

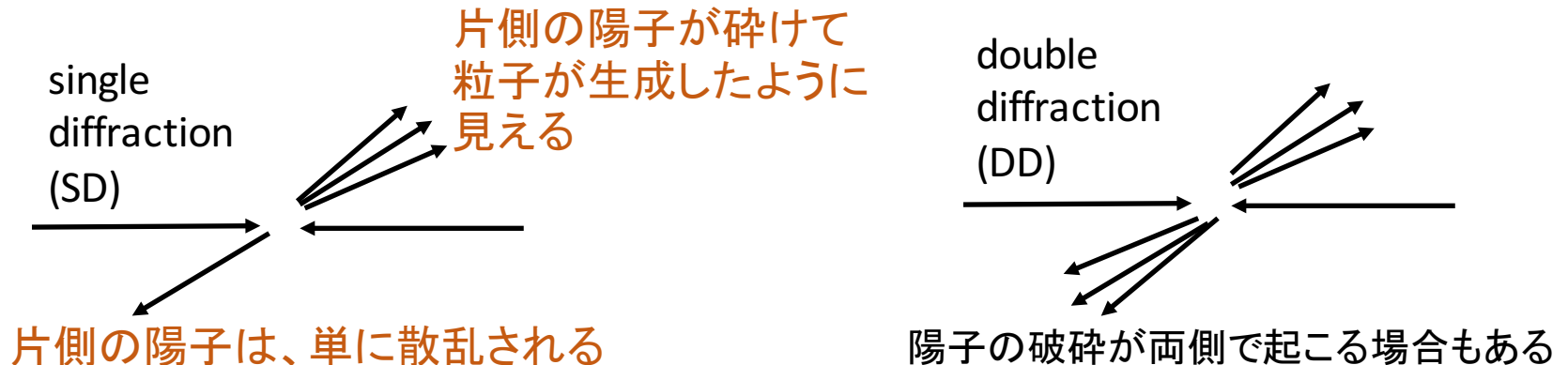
非弾性散乱: ~80mb

diffractive collision ~20mb

非diffractive collision ~60mb

重心系エネルギー 13TeV
(LHCのエネルギー)
~宇宙線エネルギー 10^{17} eV

diffractive collisionは非弾性散乱であるが、弾性散乱に近い事象で全体の2割程度を占める

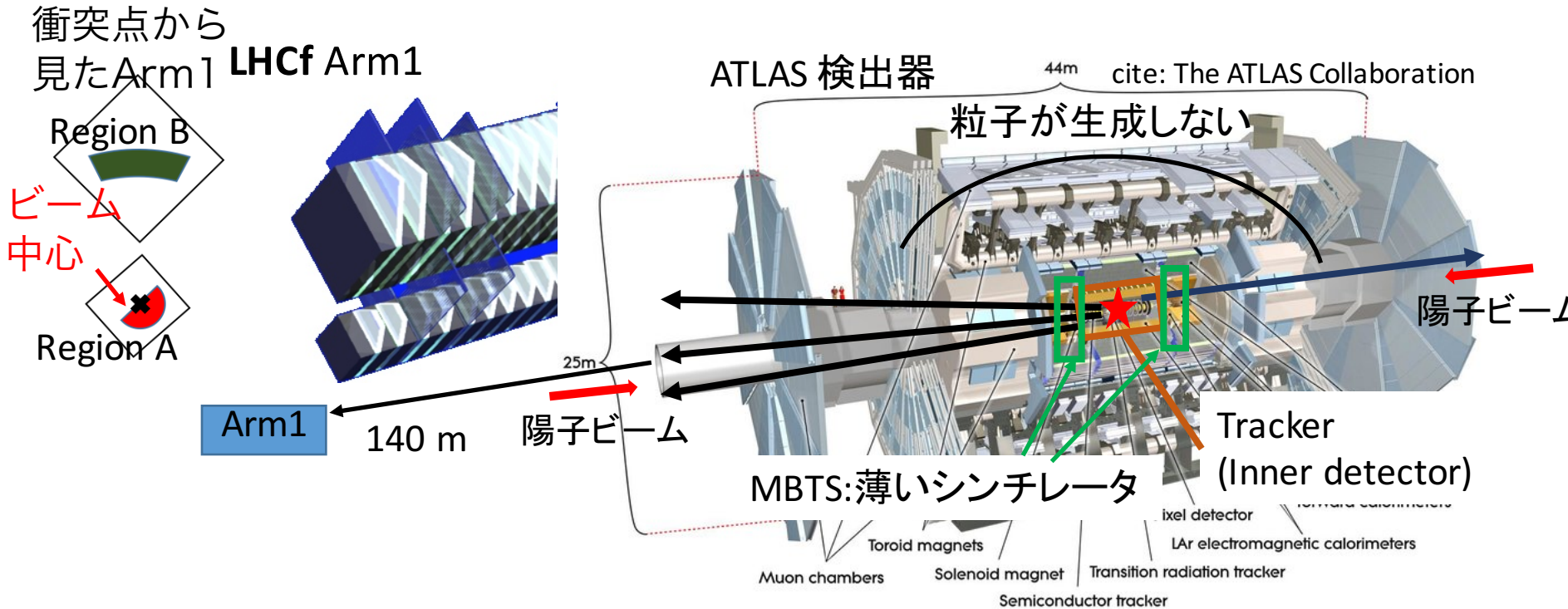


p_T の大きな粒子がほとんど生じず、生成される粒子のエネルギーが他の場合より大きい
摂動QCDでは記述できず、モデルにより記述されている

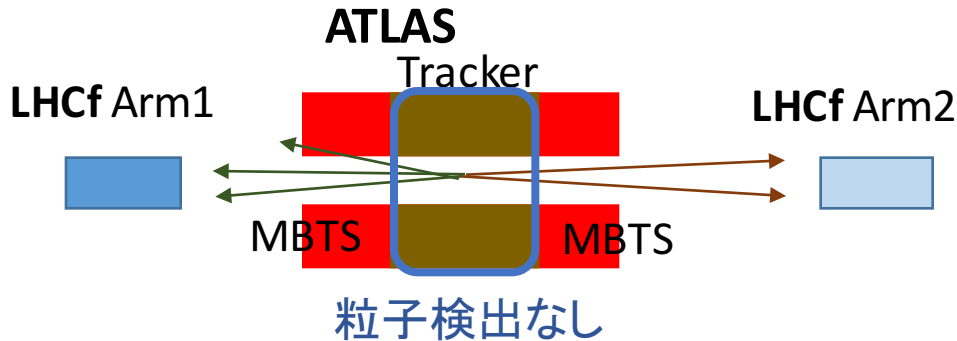
ATLAS-LHCf連動解析

diffractive事象では粒子が前方のみに生成する
(粒子生成の角度分布にギャップがある)

ATLAS実験の検出器とLHCf実験の検出器で同じイベントを見ることで、
LHCfで検出イベントがdiffractiveかどうかを判別する。



ATLAS-LHCf連動解析による diffractive事象判別



diffractive事象では粒子が前方のみに生成する
(粒子生成の角度分布にギャップがある)

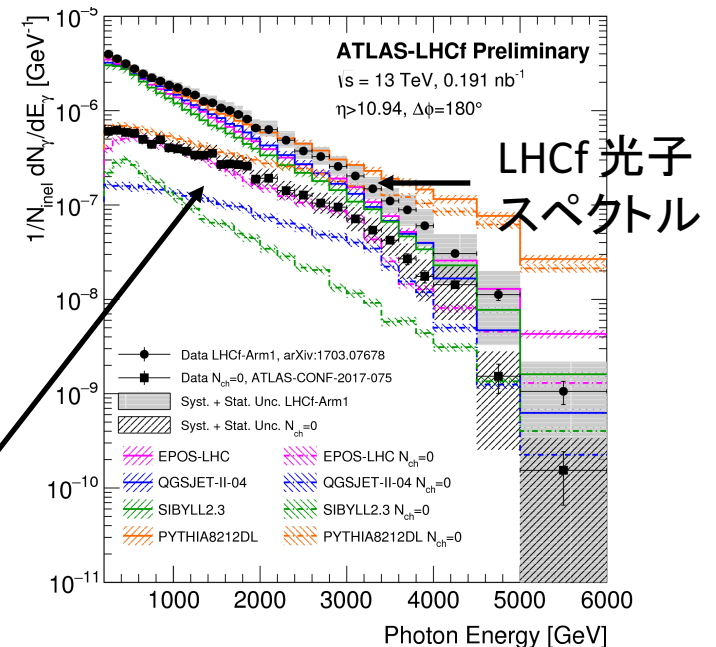


diffractive事象を判別

LHCf Arm1で光子を検出
ATLAS Trackerで粒子を検出しない

ギャップありイベント

LHCf Arm1光子スペクトル



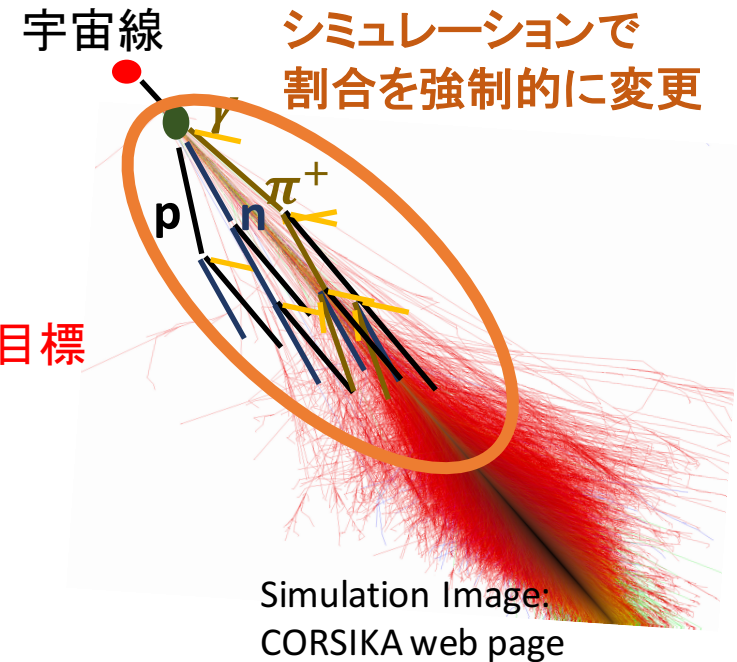
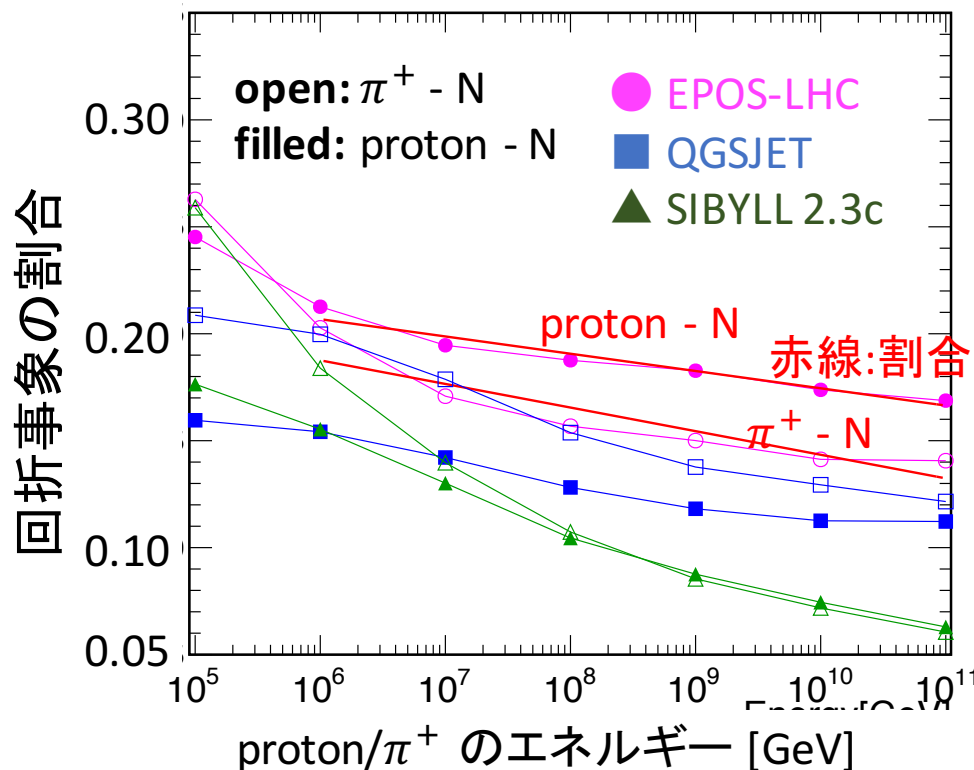
ATLAS-CONF-2017-075

13TeV陽子陽子衝突データ
(2015年取得)

diffractive collisionの割合の X_{max} 予測への影響

diffractive collisionの非弾性散乱全体に対する割合を変えたら、 X_{max} はどのように変化するか?

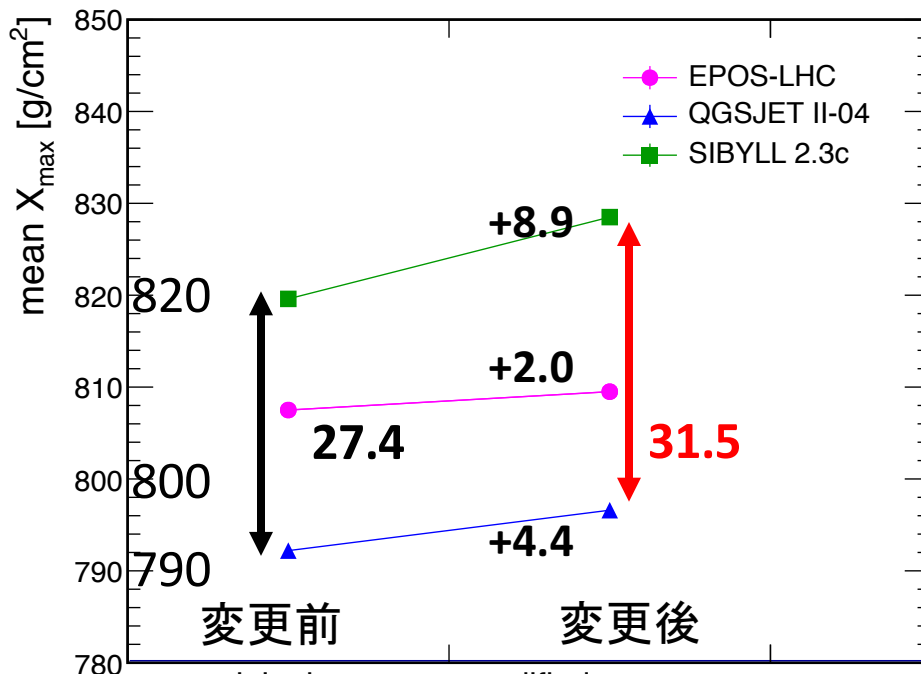
シミュレーション: 10^{15} eV以上の衝突についてdiffractive collision
COENX, 10^{19} eV陽子 の割合の予測をEPOS-LHCの値で置き換える



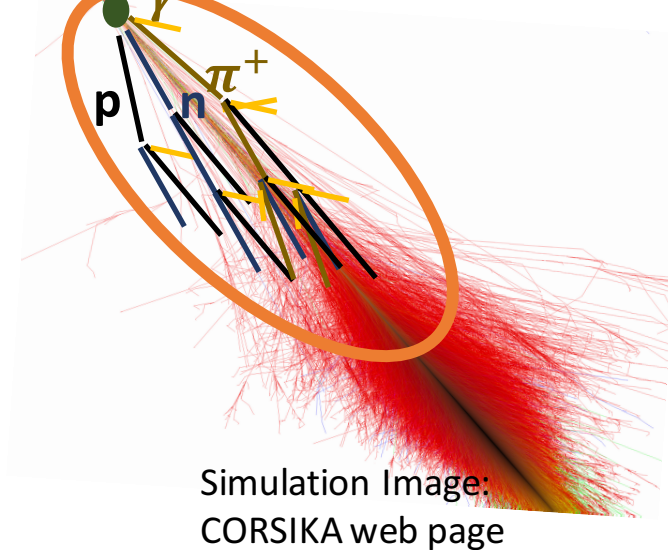
diffractive collisionの割合の X_{max} 予測への影響

diffractive collisionの非弾性散乱全体に対する割合を変えたら、 X_{max} はどのように変化するか?

シミュレーション: 10^{15} eV以上の衝突についてdiffractive collision
COENX, 10^{19} eV陽子 の割合の予測をEPOS-LHCの値で置き換える



宇宙線
シミュレーションで割合を強制的に変更



まとめ

- 超高エネルギー宇宙線の化学組成の決定のためには、ハドロン相互作用モデルの改良が必要
 - ハドロン相互作用モデルの改良のためには、加速器実験によりモデルを検証することが必要
 - LHCf実験は、加速器で生成する粒子のうち0度方向 (~エネルギーの大きな粒子)を見ている
 - ATLAS実験とLHCf実験の連動解析により、モデルの記述のうち空気シャワーへの影響が大きい部分を検証
- これまでのATLAS実験とLHCf実験の連動解析では diffractive collisionを測定
 - diffractive collisionにより生成した光子を測定し、モデルの生成量の予測を検証
 - diffractive collisionの生成量の予測のモデル間の違いは X_{max} 予測に 8.9 g/cm^2 影響する。

backup