

# 加速器実験の系統誤差の

## $X_{\max}$ 予測への影響

大橋健 (名大ISEE)

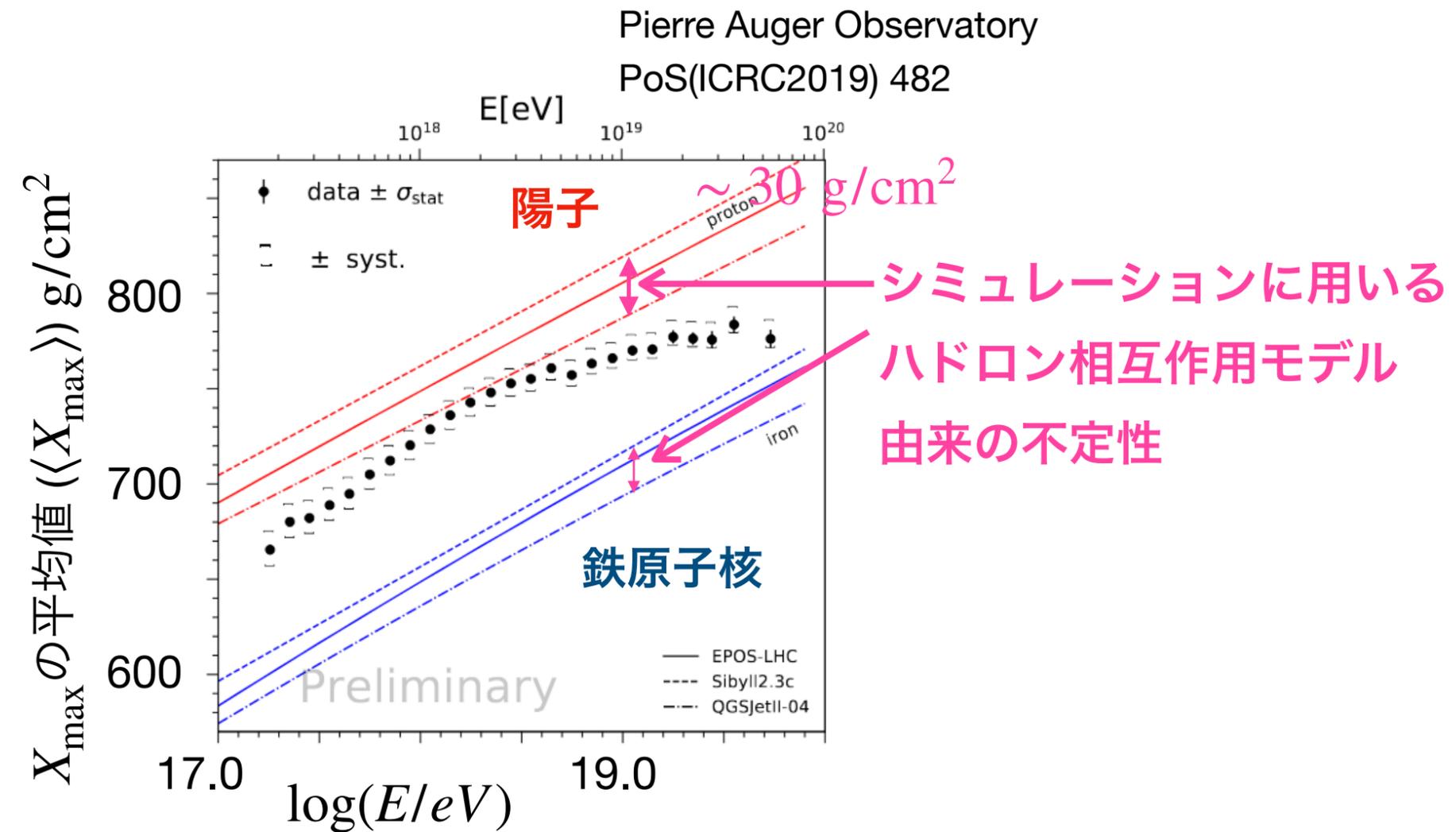
# 超高エネルギー宇宙線の質量組成

## 宇宙線質量組成

シミュレーションの予測と測定を比較することにより推定

シミュレーションの予測は、ハドロン相互作用モデルを変えると容易に変化

ハドロン相互作用モデルの間の差がハドロン相互作用の不定性を適切に反映しているとは限らない

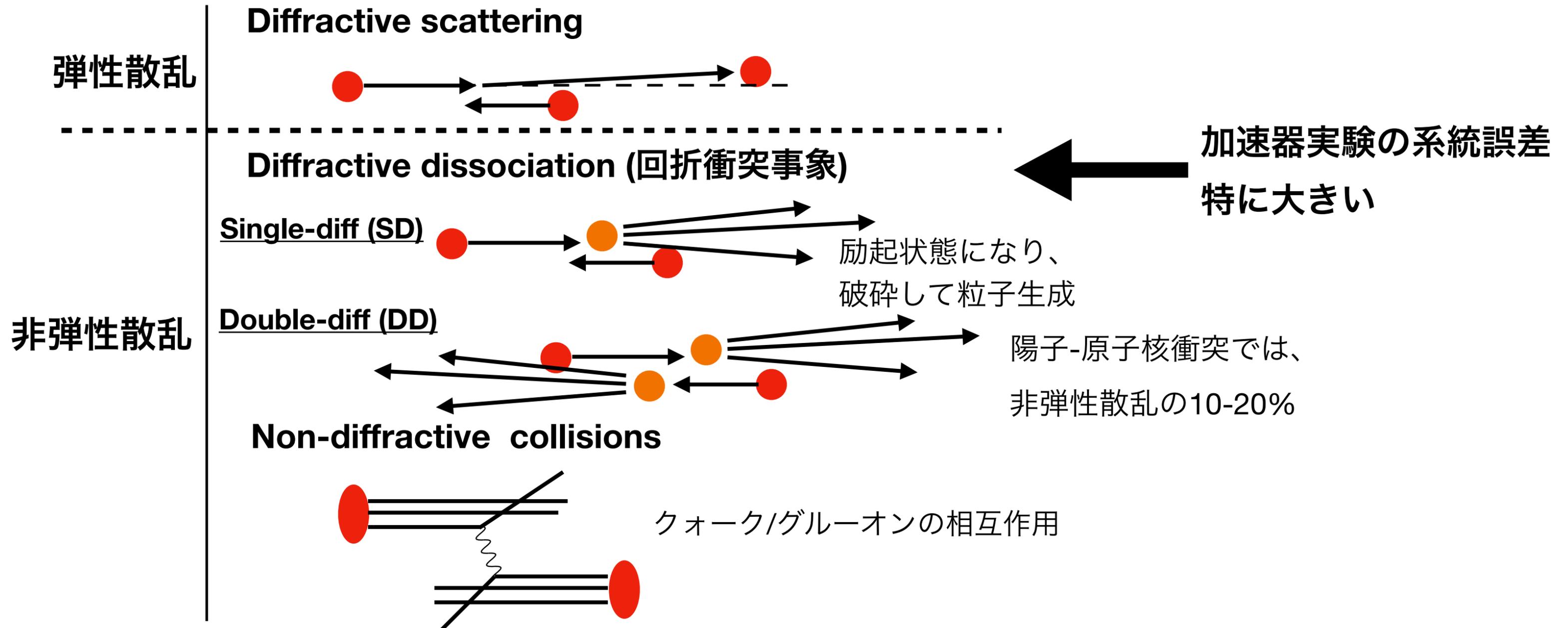


ハドロン相互作用の不定性により質量組成の解釈が困難になっている

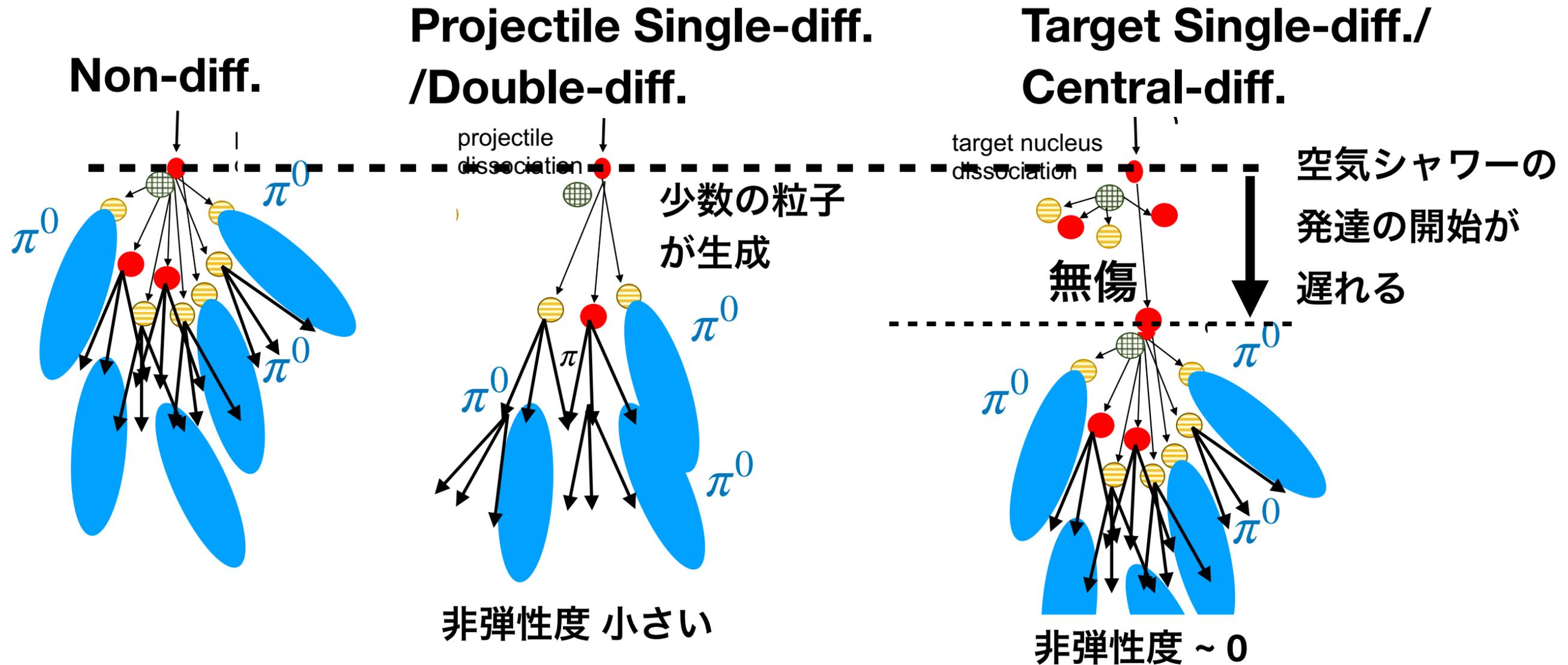
# ハドロン相互作用

ハドロン相互作用は、量子色力学で記述されるが、第一原理からの計算は困難

=> 現象論を組み合わせて計算



# 回折衝突事象と空気シャワー発達



回折衝突事象では、非弾性度が小さくなる。

=> 空気シャワーがより深いところで発達

# 回折衝突事象のこれまでの研究

## 加速器実験での測定

- LHC加速器では、CMS実験とALICE実験がこれまでに測定を行なっている。
- 系統誤差が非常に大きい。
- LHCf実験とATLAS実験の連動解析が進行中

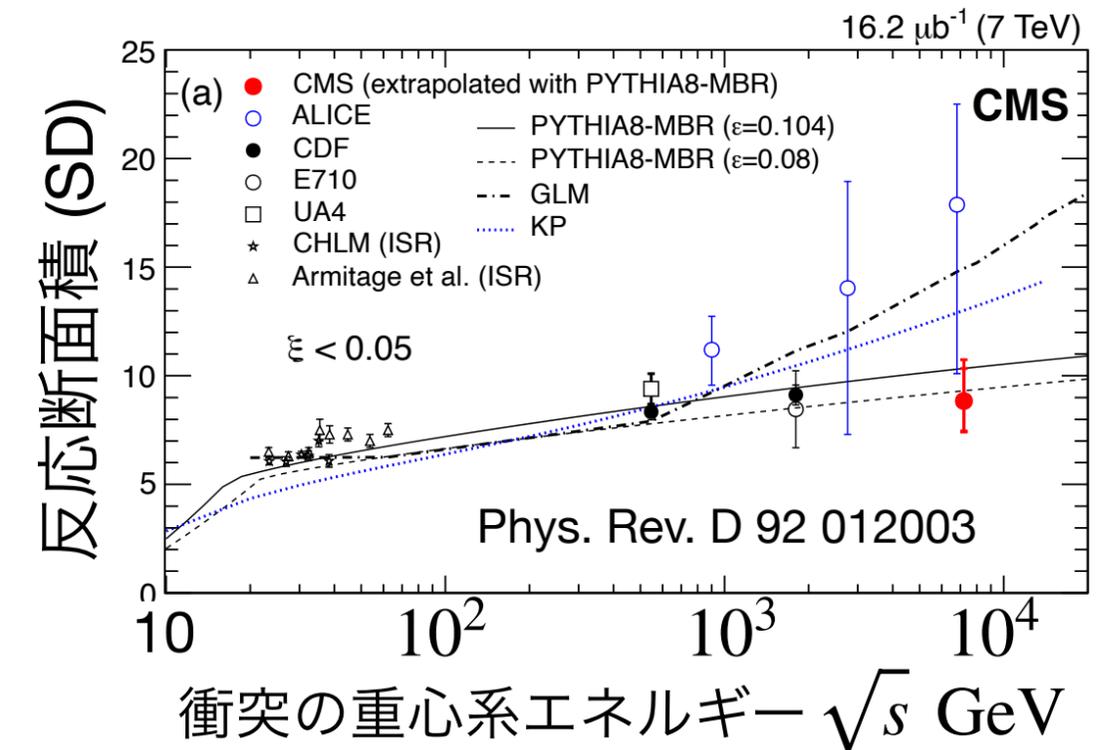
## 空気シャワー測定( $X_{\max}$ )への影響

Ken Ohashi et al, Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 033F01 (22 pages)

- 回折衝突事象全体の非弾性散乱に対する割合は $\langle X_{\max} \rangle$ に大きく影響
  - 回折衝突事象のモデル間の差は、 $8.9 \pm 0.4 \text{ g/cm}^2$ に相当
  - 回折衝突事象の場合、シャワー全体での影響の $\langle X_{\max} \rangle$ は、最初の衝突での影響の最大2.4倍

本講演のテーマ：では、この加速器実験の系統誤差は、 $\langle X_{\max} \rangle$ に換算してどのくらいか？

## Large Hadron Collider (LHC)での測定



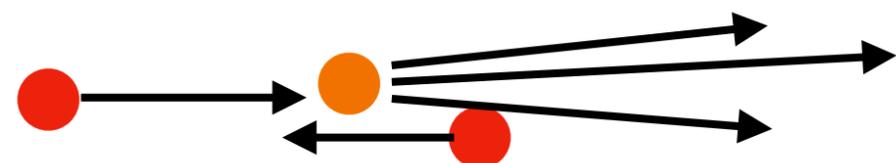
# ALICE実験の結果と系統誤差

ALICE実験, Eur. Phys. J. C 73:2456 (2013)

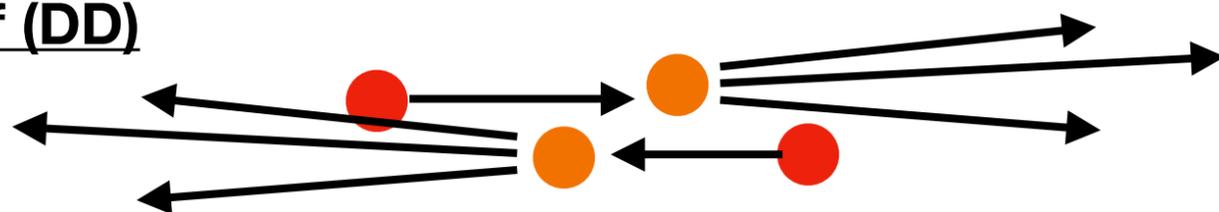
$$\sigma^{\text{SD}} = 14.9^{+3.4}_{-5.9} \text{ mb} \quad (M_X < 200 \text{ GeV}/c^2)$$

$$\sigma^{\text{DD}} = 9.0 \pm 2.6 \text{ mb} \quad (\Delta\eta > 3, \text{Non-diff.の混入も含む})$$

Single-diff (SD)



Double-diff (DD)

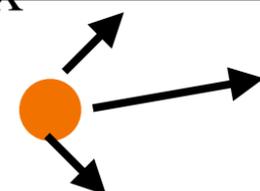


Diffractive mass  $M_X$   
(励起状態の質量)

$M_X$  が小さい



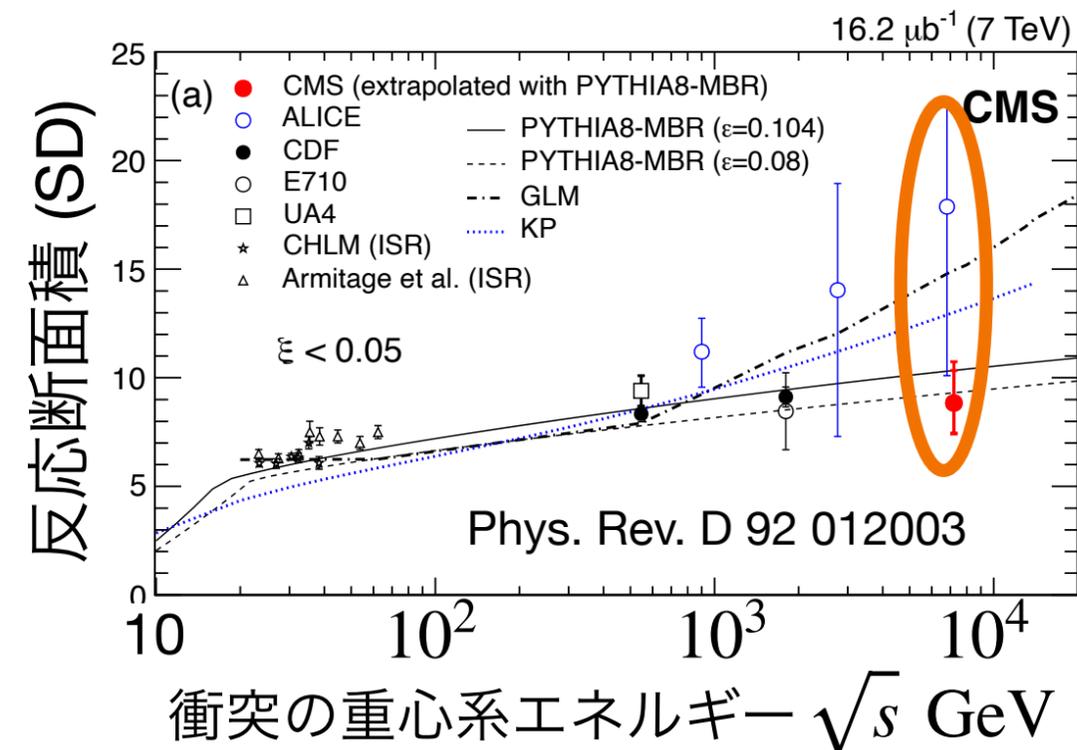
$M_X$  がとても大きい



静止系



Large Hadron Collider (LHC)での測定

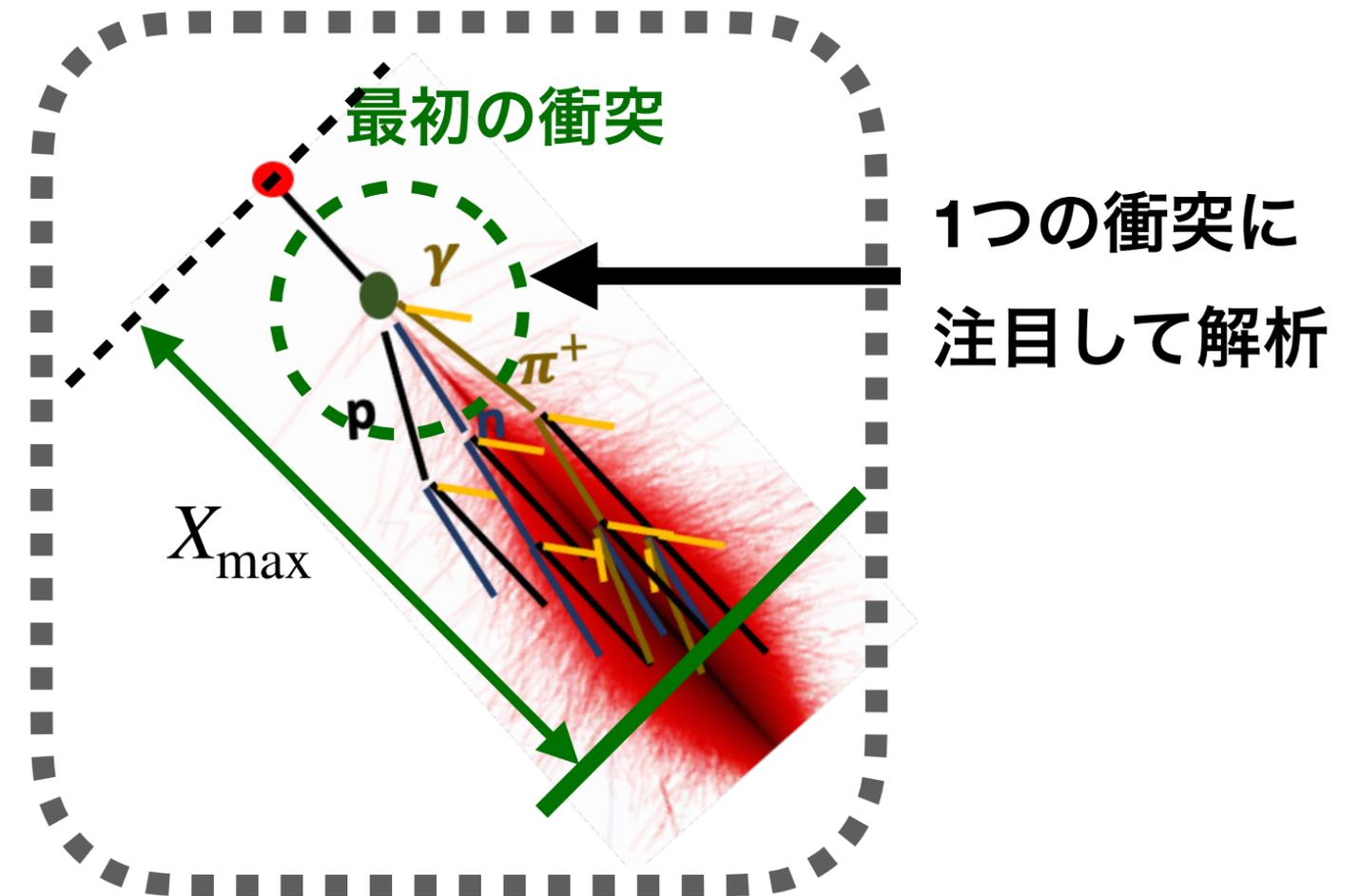


加速器実験の測定は  $M_X$  に依存  
これらの条件を新たに考慮する

# 加速器実験の系統誤差の影響の解析

## 加速器実験の条件に合わせて、最初の衝突を分類

- 空気シャワーシミュレーション CONEX (version 6.4)
  - 入射粒子： $10^{17}$  eVの陽子
  - $X_{\max}$ と最初の衝突の情報を $M_X$ や $\Delta\eta$ も含め、書き出す。
  - 最初の衝突に注目して解析する
  - 回折衝突事象の場合、シャワー全体での影響の $\langle X_{\max} \rangle$ は、最初の衝突で回折衝突事象の影響を考えた場合の最大2.4倍



本来シャワー全体にわたって影響するはず。  
後で影響を2.4倍することで、考慮する

# 計算方法と仮定

ALICE実験の条件に合わせた、シミュレーション結果

| 衝突の種類ごとの割合 [%]  | SD (入射粒子が破碎) | SD (大気原子核が破碎) | DD (ND混入も含む) | その他   |
|---|--------------|---------------|--------------|-------|
| <b>EPOS-LHC</b><br>割合[%]  | 2.0          | 2.7           | 13.1         | 82.2  |
| <b>EPOS-LHC</b><br>$\langle X_{\max} \rangle$<br>[g/cm <sup>2</sup> ] | 732.3        | 735.5         | 721.5        | 688.0 |

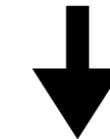
$$\langle X_{\max}^{\text{average}} \rangle = \sum_i f_i \langle X_{\max}^i \rangle$$

ALICE実験の結果(陽子陽子衝突)からシミュレーション予測の実験に対する比

$R = (\text{実験}) / (\text{シミュレーション})$

$$SD : 1.95^{+0.45}_{-0.78} \quad DD : 0.54^{+0.16}_{-0.16}$$

この割合をかけて、シミュレーションを補正する (LHCでの陽子陽子衝突でのRが陽子原子核衝突にも適用できると仮定)



$$f_i^{\text{mod}} = R \times f_i, \quad \pm \Delta f_i^{\text{mod}} = (\pm \Delta R) \times f_i$$



$$\langle X_{\max}^{\text{mod}} \rangle = \sum_i f_i^{\text{mod}} \langle X_{\max}^i \rangle$$

$\langle X_{\max}^{\text{mod}} \rangle$ と

回折衝突事象に限った場合の不定性

# 計算手順

## ALICE実験の条件に合わせた、シミュレーション結果

| 衝突の種類ごとの割合 [%]  | Projectile SD | Target SD | DD (ND混入も含む) | その他   |
|---|---------------|-----------|--------------|-------|
| <b>EPOS-LHC</b><br>割合[%]  | 2.0           | 2.7       | 13.1         | 82.2  |
| <b>EPOS-LHC</b><br>$\langle X_{\max} \rangle$<br>[g/cm <sup>2</sup> ] | 732.3         | 735.5     | 721.5        | 688.0 |

R = (実験)/(シミュレーション)

(EPOS-LHC)

$$SD : 1.95^{+0.45}_{-0.78}$$

$$DD : 0.54^{+0.16}_{-0.16}$$

$$f_i^{\text{mod}} = R \times f_i$$

| 衝突の種類ごとの割合 [%] | Projectile SD | Target SD | DD  |
|----------------|---------------|-----------|-----|
| Rをかける          | 3.9           | 5.3       | 7.1 |
| R-系統誤差         | 2.3           | 3.2       | 5.0 |
| R+系統誤差         | 4.8           | 6.5       | 9.2 |

最初の衝突に注目して

推定した影響

$$694.6^{+1.2}_{-1.8} \text{ g/cm}^2$$

シャワー全体での

系統誤差の影響

$$+2.9$$

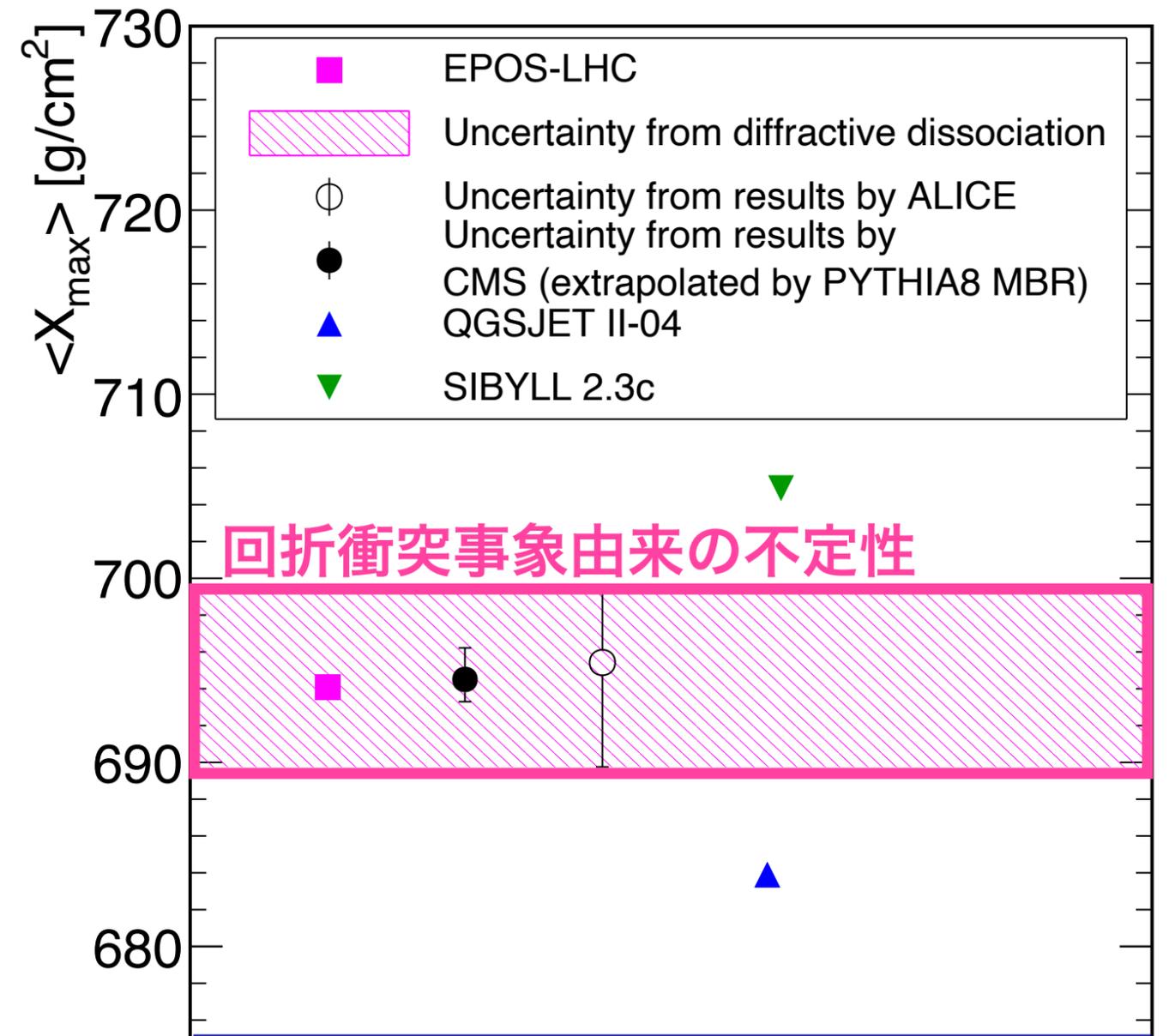
$$-4.3 \text{ g/cm}^2$$

$$\langle X_{\max}^{\text{mod}} \rangle = \sum_i f_i^{\text{mod}} \langle X_{\max}^i \rangle$$

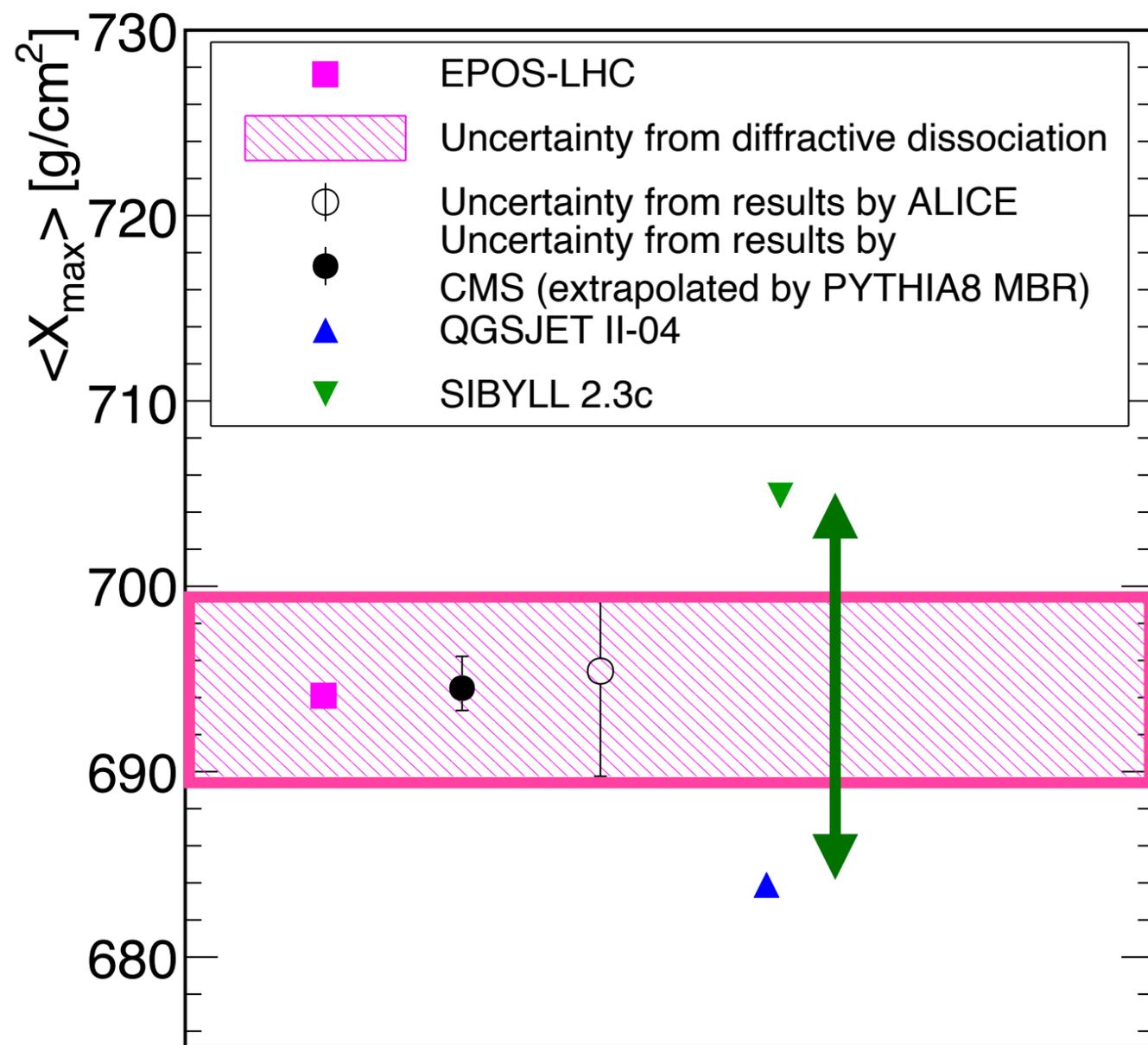
# 換算結果

## ALICE実験の結果を換算

- EPOS-LHCで求めた割合 $f^i$ を使った場合
  - $694.6^{+1.2}_{-1.8} \text{ g/cm}^2$
- SIBYLL 2.3c で求めた割合 $f^i$ を使った場合
  - $696.2^{+1.5}_{-2.2} \text{ g/cm}^2$
- 2つの換算の差
  - $1.6 \text{ g/cm}^2$
  - 陽子原子核でのモデルの考え方の違いに相当
- これらの換算は、最初の衝突のみを考慮
  - シャワー全体での影響は 最初の衝突の2.4倍
- => ALICE実験の系統誤差は、 $^{+4.0}_{-5.6} \text{ g/cm}^2$ に相当



# 換算結果とモデル間の差の比較



## 今回は、回折衝突事象の加速器実験のみに注目

- 求めた不定性 ${}^{+4.0}_{-5.6}$  g/cm<sup>2</sup>は、回折衝突事象のみ
- 非弾性散乱のうち80-90% を占める部分の影響は考慮していない

## モデル間の差には、回折衝突事象以外の影響も含まれている

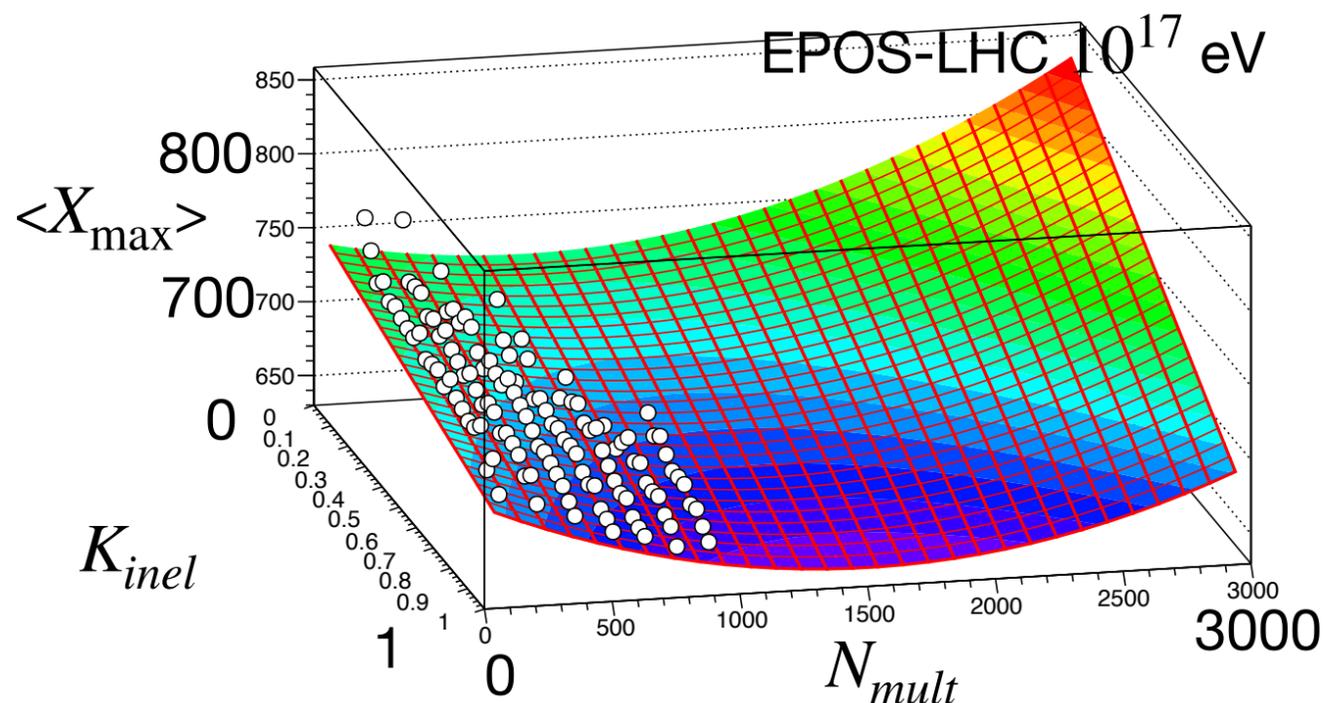
- 衝突における弾性度や多重度の違いの影響

## 今後の課題

- 弾性度や多重度の違いについても加速器実験ベースで検討する
- LHCf実験の測定、ATLAS実験やCMS実験による荷電粒子生成の測定

# 回折衝突事象以外の影響

非弾性度  $K_{inel}$ , 多重度  $N_{mult}$  と  $\langle X_{max} \rangle$  の関係



$K_{inel}$  や  $N_{mult}$  の変化が  $\langle X_{max} \rangle$  にどう影響するか?

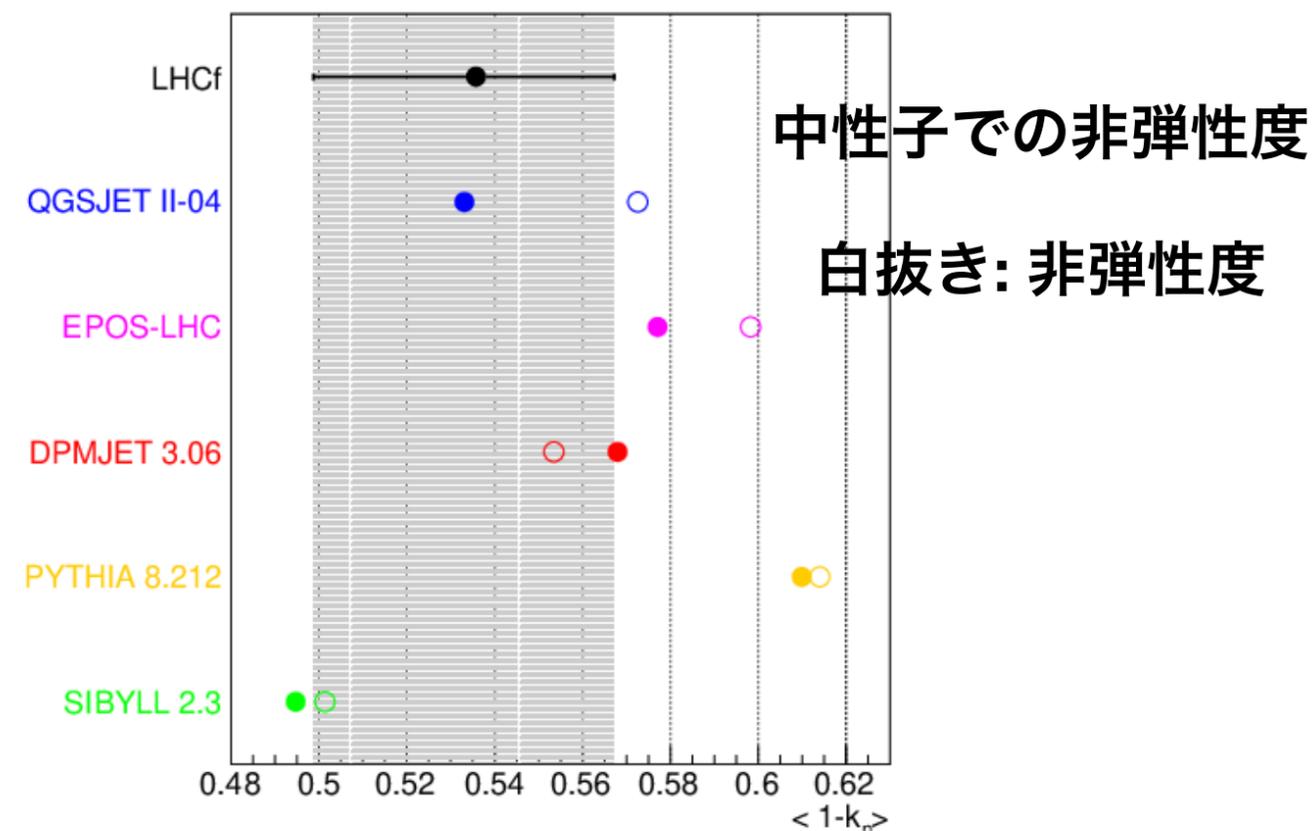
=> 2021年春の学会で報告

$K_{inel}$  が0.6から0.7になると、 $5.4 \text{ g/cm}^2$  変化する

$N_{mult}$  が500から600になると $4.0 \text{ g/cm}^2$  変化する

加速器実験での測定

JHEP 2007 (2020) 016

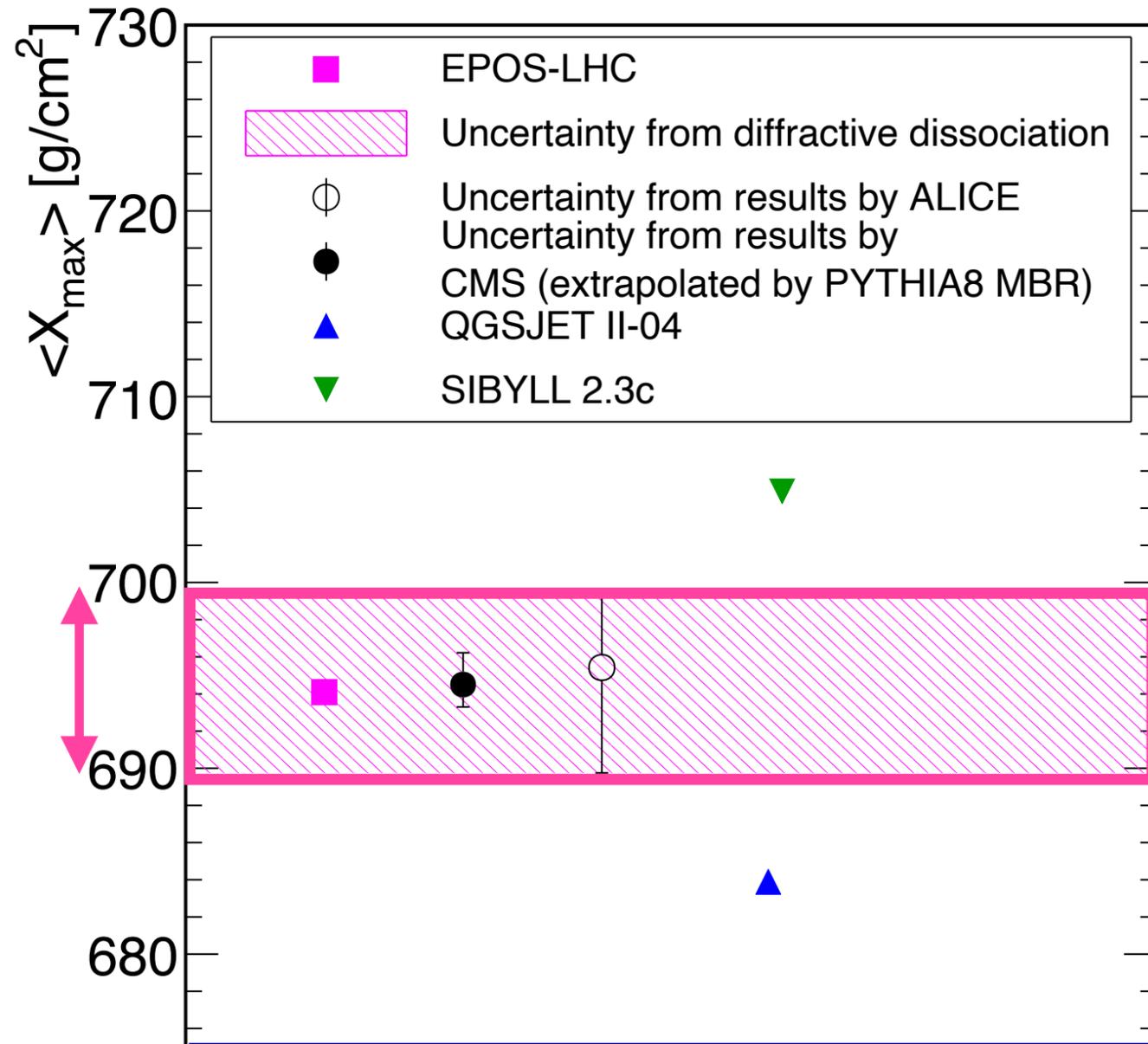


先導粒子が中性子の場合の非弾性度の平均

陽子陽子衝突については、加速器実験の系統誤差から、不定性を見積もれる。

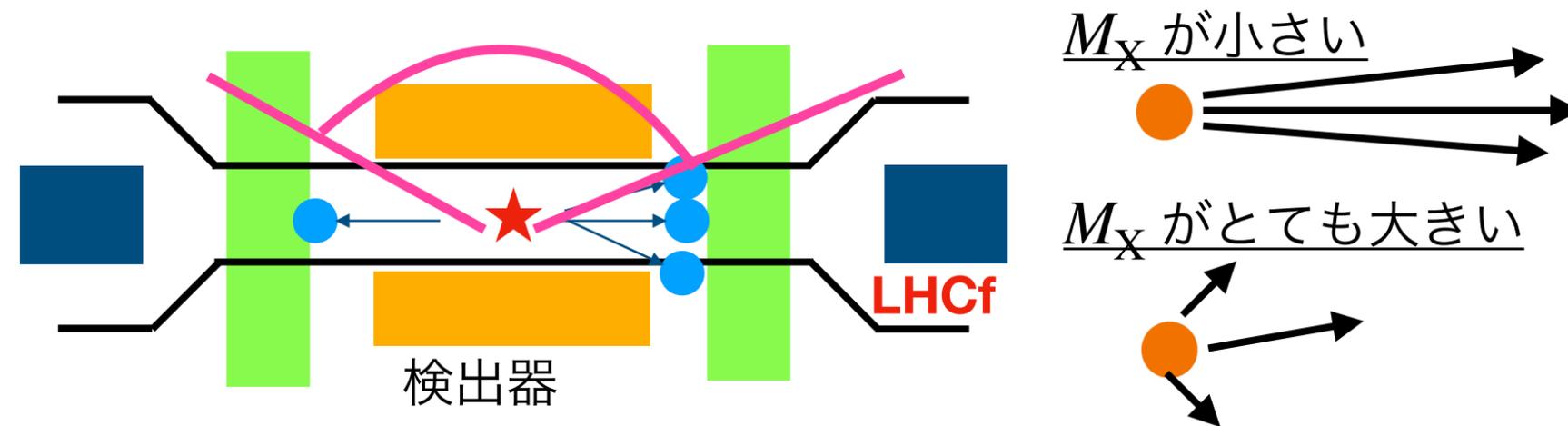
ただし、 $\pi/K$ 中間子などの起こす衝突については、加速器実験は低エネルギーのみ

# 回折衝突事象由来の不定性の削減



## 今後の課題

- 加速器実験の系統誤差を減らして、 $+4.0$   $-5.6$   $g/cm^2$  を小さくする。
- 加速器実験の系統誤差の原因は、散乱角0度付近の測定



Diffractive mass  $M_X$  が小さすぎると、CMS実験やALICE実験の検出器にかからない。

=> その部分をカバーするLHCf実験の測定器を活用  
(現在内部レビューの最終段階)

# まとめ

- 高エネルギー宇宙線の質量組成の推定は、 $X_{\max}$ などの測定とシミュレーションを比較することにより行われているが、シミュレーションの予測はハドロン相互作用モデルによって容易に変化する。
- ハドロン相互作用モデルごとの予測の差が、ハドロン相互作用の不定性を適切に反映しているとは限らない。
- そこで、回折衝突事象に注目し、加速器実験の系統誤差を、 $\langle X_{\max} \rangle$ に換算することを試みた。
- $10^{17}$  eVの陽子が入射した場合の空気シャワーに注目し、ALICE実験の系統誤差を換算したところ、ALICE実験の系統誤差は、 ${}^{+4.0}_{-5.6} \text{ g/cm}^2$ に相当した。
- ${}^{+4.0}_{-5.6} \text{ g/cm}^2$ は、 $\langle X_{\max} \rangle$ の測定の系統誤差よりは小さいが、無視できる大きさではない。
- 系統誤差の原因となっている事象の測定のために、LHCf実験とATLAS実験の連動解析が進行中。
- 今回は回折衝突事象のみに注目した。非弾性度や多重度に注目して加速器実験の系統誤差の $X_{\max}$ への影響を議論することは今後の課題。

バックアップ