

ATLAS-LHCf連動解析による ハドロン相互作用モデルの検証

YMAP 秋の研究会@東大宇宙線研

2018/10/5

名古屋大学 ISEE 大橋健

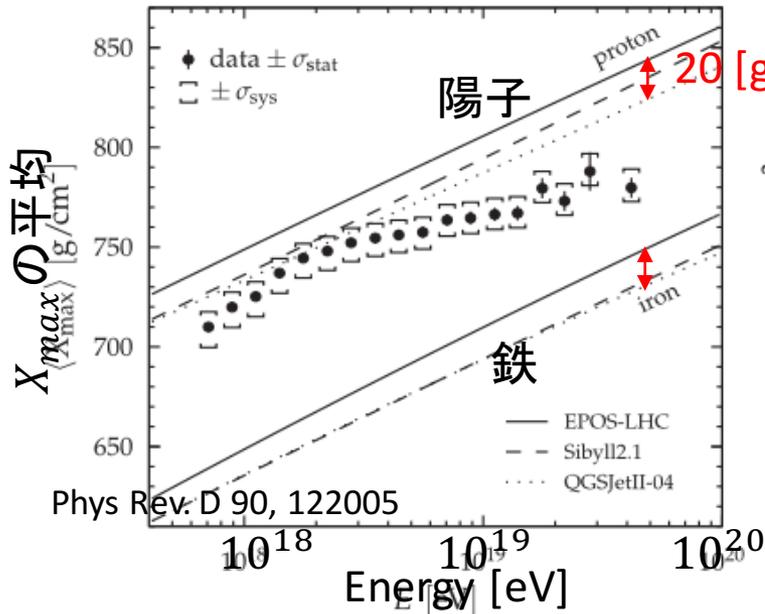
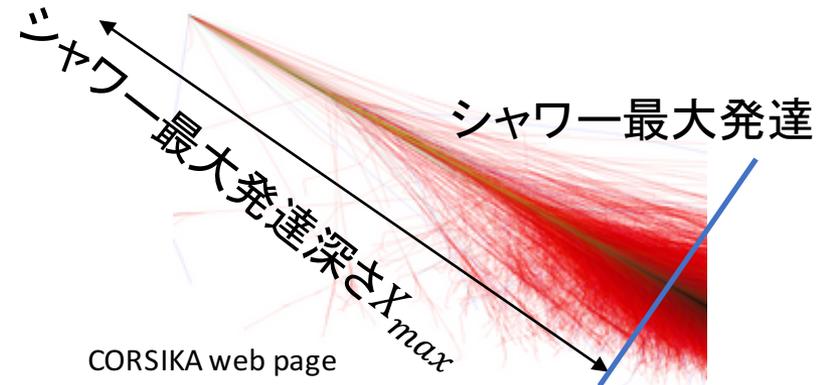
自己紹介

- 大橋健
- 名古屋大学 ISEE CR研
- 所属実験グループ LHC forward(LHCf)

高エネルギー宇宙線

高エネルギー宇宙線の観測は、宇宙線の作る空気シャワー現象を有効面積の大きな検出器で捉えることで行われている。
宇宙線の起源を知る上では、宇宙線の核種を知ることが重要である。

10¹⁵ eVの陽子が入射した時の空気シャワー



シャワー最大発達深さ X_{max} は核種が重いほど浅くなる。
 X_{max} はシミュレーションに用いるハドロン相互作用モデルにより20 [g/cm²]程度異なり、核種の解釈が困難になっている。
=> 加速器によりモデルを検証

ハドロン相互作用モデル

ハドロン相互作用

量子色力学(QCD)は特定の場合しか計算をすることができない。そのため、MCシミュレーションでは現象論のハドロン相互作用モデルを用いて計算している。

ハドロン相互作用モデル改良のためには、加速器実験によりモデルを検証することが必要

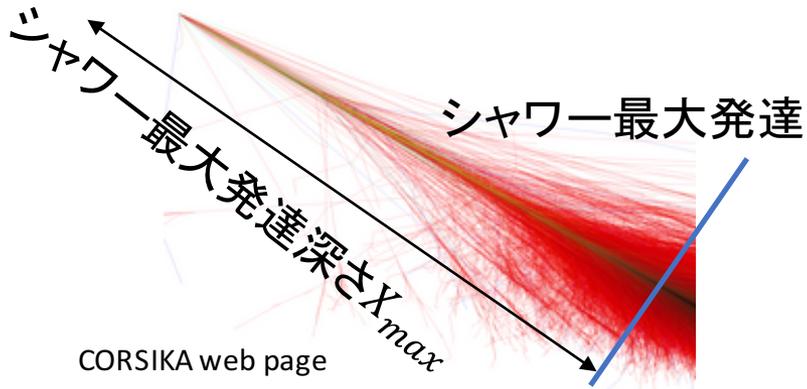
代表的なモデル
PYTHIA
EPOS LHC
QGSJET II
SIBYLL 2.3

コンテンツ

- ハドロン相互作用と空気シャワー
- 今回注目するdiffractive事象(ハドロン相互作用の1つの分類)と、空気シャワーの関係性
- ATLAS-LHCf連動解析によるdiffractive事象の解析

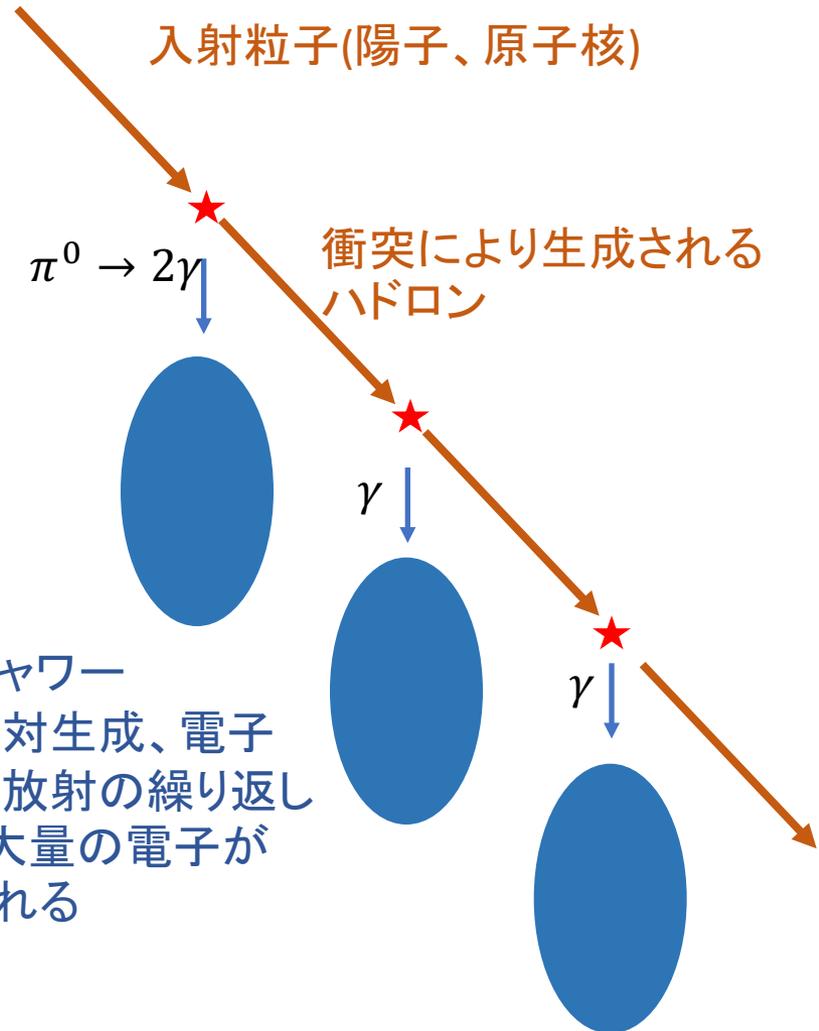
衝突と空気シャワー

10^{15} eVの陽子が入射した時の
空気シャワー



空気シャワーの荷電粒子
の大半は電磁シャワーに
より生成される電子

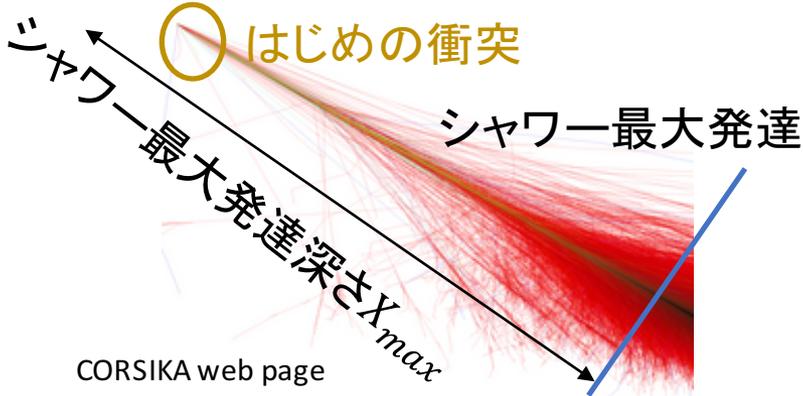
電磁シャワー
光子の対生成、電子
の制動放射の繰り返し
により大量の電子が
生成される



個々の衝突と空気シャワー

- 陽子・中性子
- その他ハドロン
- 大気原子核

10¹⁵ eVの陽子が入射した時の
空気シャワー

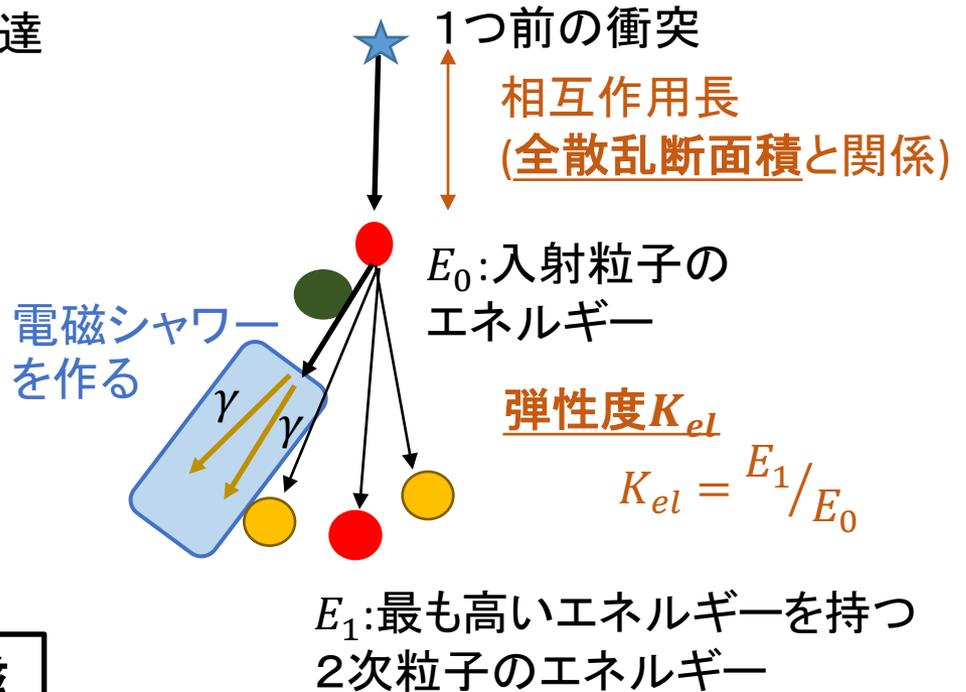


空気シャワーの荷電粒子の大半は電子

π^0 が生成して光子に崩壊すると、光子・電子の対生成・制動放射により大量の電子が生成される

弾性度 K_{el} が大きいと、電磁シャワーがより深いところで生成され、 X_{max} が深くなる。

1回のハドロン衝突



弾性度 K_{el} は、典型的には次のハドロン衝突に使われるエネルギー

diffractive事象

p-p 重心系エネルギー 13TeV 散乱断面積

弾性散乱: ~20mb

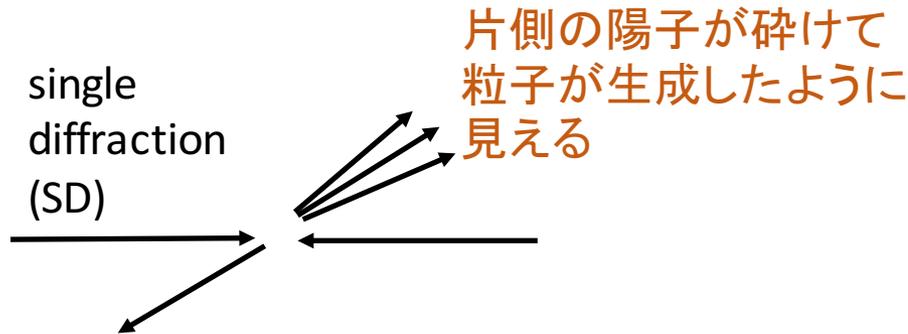
非弾性散乱: ~80mb

diffractive ~20mb

非diffractive ~60mb

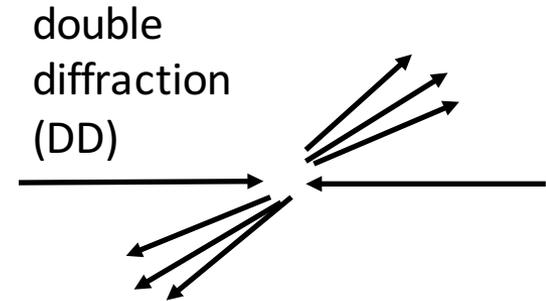
重心系エネルギー 13TeV
(LHCのエネルギー)
~宇宙線エネルギー 10^{17} eV

diffractive事象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



片側の陽子は、単に散乱される

片側の陽子が碎けて
粒子が生成したように
見える



陽子の破砕が両側で起こる場合もある

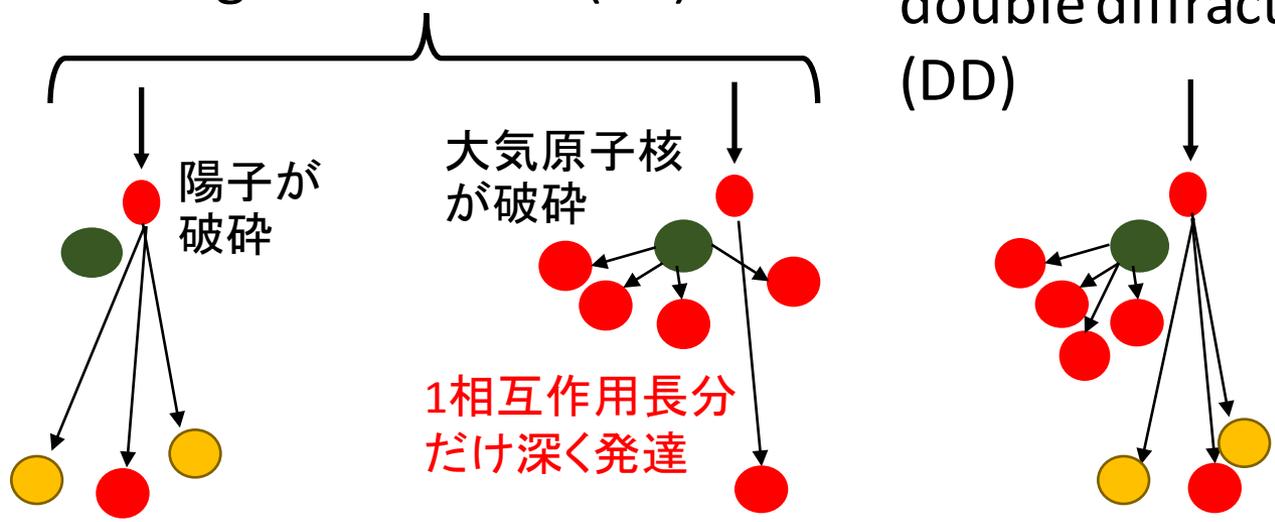
ハドロン相互作用モデルでは、diffractive事象の発生確率と粒子生成に分けて記述されている。

diffractive事象の空気シャワーへの影響

single diffractive (SD)

double diffractive (DD)

- 陽子・中性子
- その他ハドロン
- 大気の原子核



Non-diffractive (ND)			
事象と比べて	弾性度が高い	弾性度が非常に高い	弾性度が高い
($K_{el} = 0.45$)	($K_{el} = 0.55$)	($K_{el} = 0.99$)	($K_{el} = 0.54$)

LHC シミュレーション: 重心系 p-p $\sqrt{s} = 13$ [TeV] モデル: SIBYLL2.3

一般に弾性度が高くなると、シャワー発達は深くなる

diffractive事象の分類により、シャワー発達が異なる

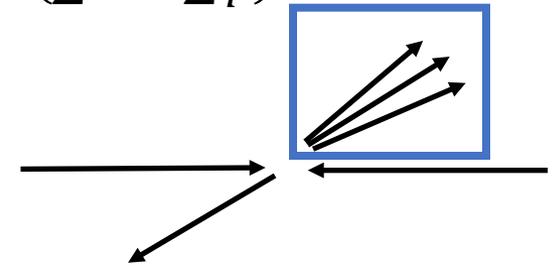
diffractive事象の空気シャワーへの影響

diffractive事象の主なモデル間の違い

- 特徴量 M_X に対する生成量(発生確率)
- 特徴量 M_X に対する粒子生成のモデル (粒子生成)
- SDとDDの割合

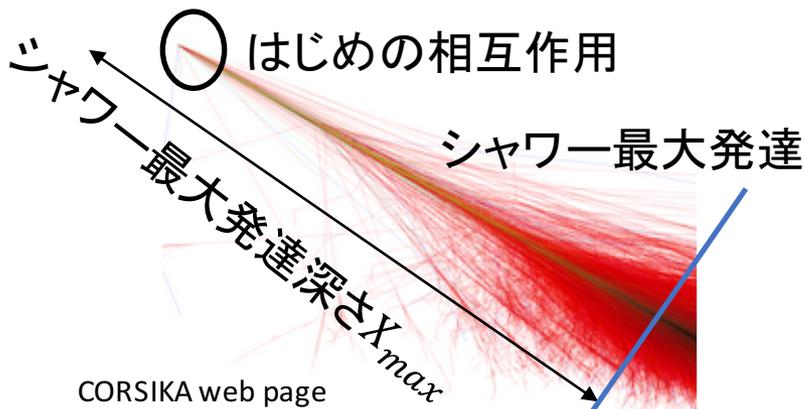
M_X は破碎系の不変質量

$$M_X = (\sum E - \sum p)^2$$



空気シャワーシミュレーションを用いて、diffractive事象の影響を評価

10^{15} eVの陽子が入射した時の
空気シャワー



CORSIKA web page
<https://www-zeuthen.desy.de/~jknapp/fs/proton-showers.html>

空気シャワーシミュレーションを実行

- COSMOS 8.031
- 入射粒子: 10^{15} eVの陽子
- 10万イベント
- シャワー発達の情報に加えて、はじめの相互作用の情報を取り出す

はじめの相互作用のdiffractiveの情報でイベントを分類し、それぞれ X_{max} をプロット

SDとDDの割合の空気シャワーへの影響

空気シャワーシミュレーション : COSMOS 8.031を用いる primary: 陽子 10^{15} eV

はじめの相互作用の種類により分類して X_{max} をもとめる

		Non-diff	SD(陽子破碎)	SD(原子核破碎)	DD
SIBYLL 2.3c	X_{max} の平均 [g/cm ²]	617.0	643.4	671.4	633.6
	割合 [%]	74.0	15.1	8.6	2.3

(SIBYLL 2.3cは他のモデルと比べてSDの割合が極端に高い)

例えば
SD:DD ~ 2:1と仮定

target SDとprojectile SDの比及びdiffractiveの割合を固定して、SDとDDの割合を変化させる

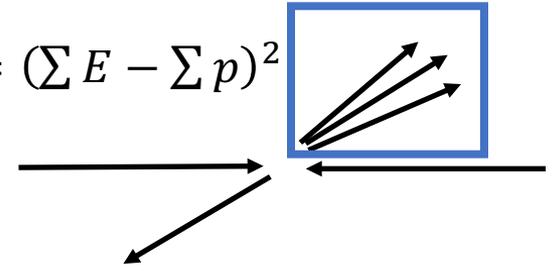
➡ X_{max} の変化:-1.27 [g/cm²] (SIBYLL 2.3c)

ここでは考慮できていないが、2次以降の衝突も変化する

diffractive事象の空気シャワーへの影響

M_X は破碎系の不変質量 M_X

$$M_X = (\sum E - \sum p)^2$$

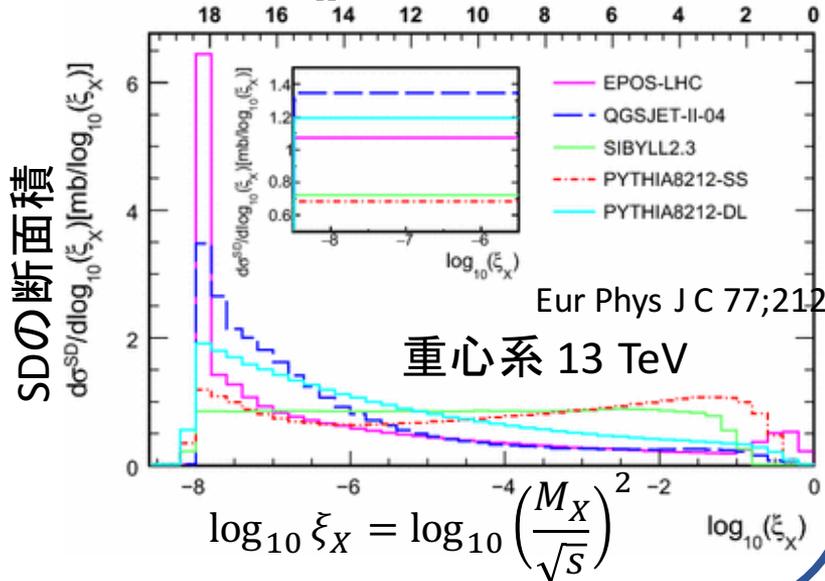


diffractive事象の主なモデル間の違い

- 特徴量 M_X に対する生成量の違い(発生確率の違い)
- 特徴量 M_X に対する粒子生成のモデルの違い
- SDとDDの割合

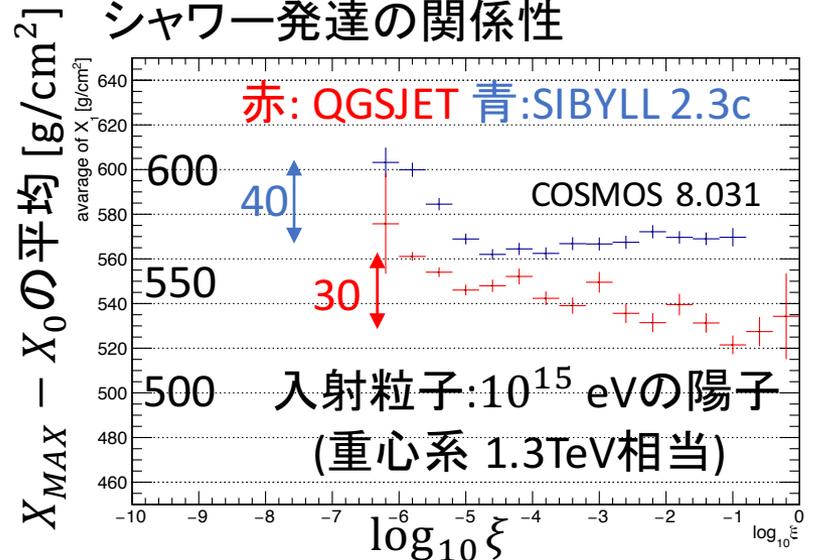
発生確率の予測はモデルごとに大きく異なる

モデルごとの M_X 依存性の違い



M_X が小さいほどシャワーは深くなる

SD(陽子破碎)の M_X に対する空気シャワー発達の関係性



X_0 : はじめの衝突までの深さ

LHCf実験

LHC forward (LHCf)実験

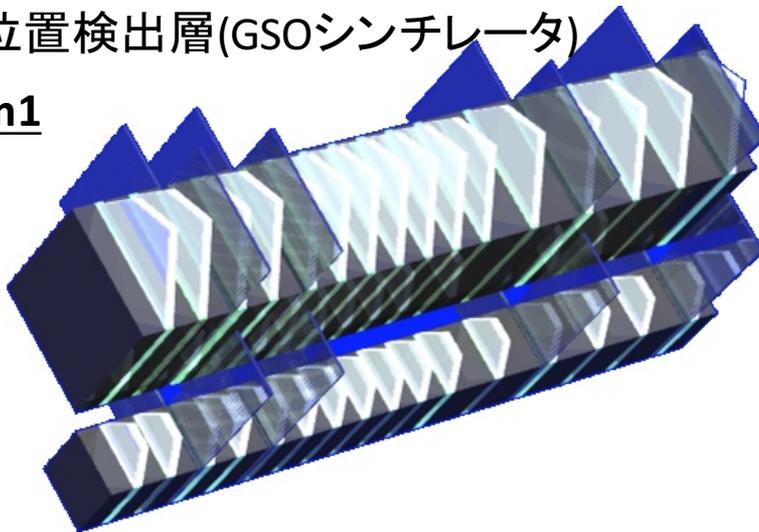
世界最高エネルギーの加速器 Large Hadron Collider (LHC)の衝突点の0度方向に検出器を置いた実験。

0度方向でハドロン相互作用モデルを検証する

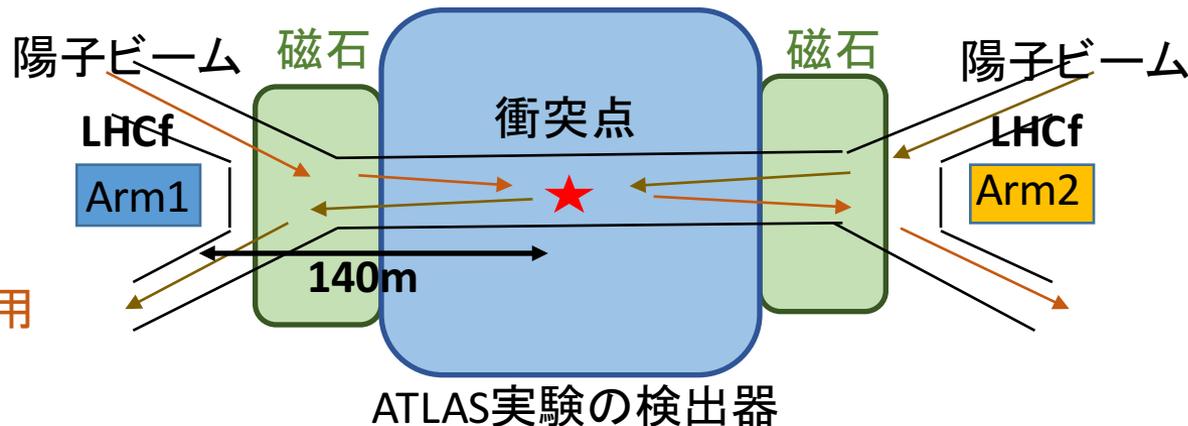
LHCf 検出器: サンプリングカロリメータ

吸収層(タングステン)とサンプリング層・位置検出層(GSOシンチレータ)

Arm1



主に衝突点の0度方向に生じる光子・中性子・ π^0 を検出



LHCf Arm1 データ取得

p-p 0.9 TeV (2009/2010)

p-p 2.76 TeV (2013)

p-p 7 TeV (2010)

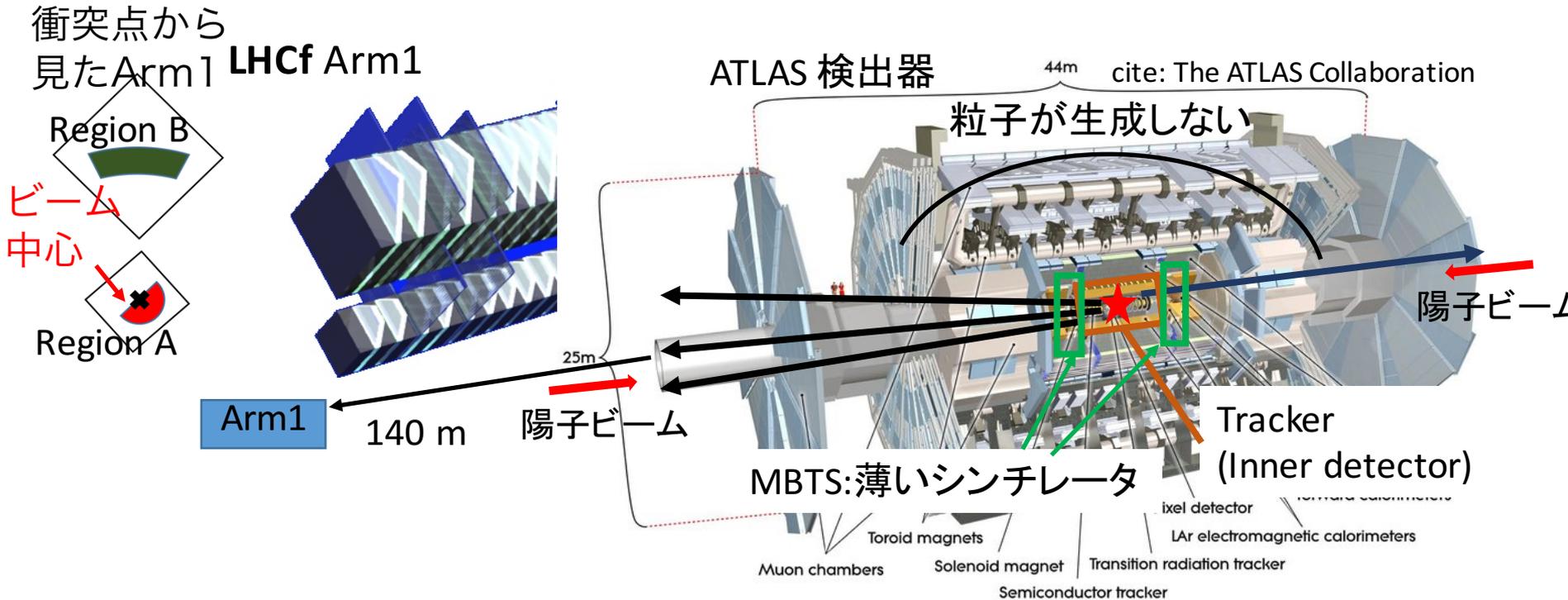
p-p 13 TeV (2015)

ATLAS-LHCf連動解析

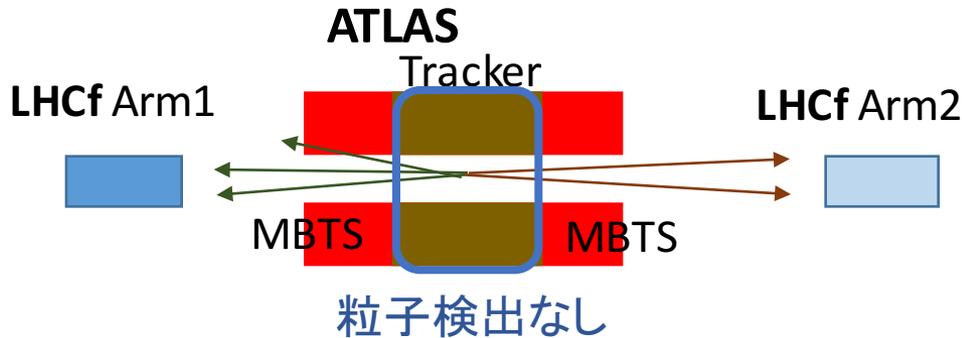
重心系エネルギー 13TeV
 (LHCのエネルギー)
 ~宇宙線エネルギー 10^{17} eV

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)



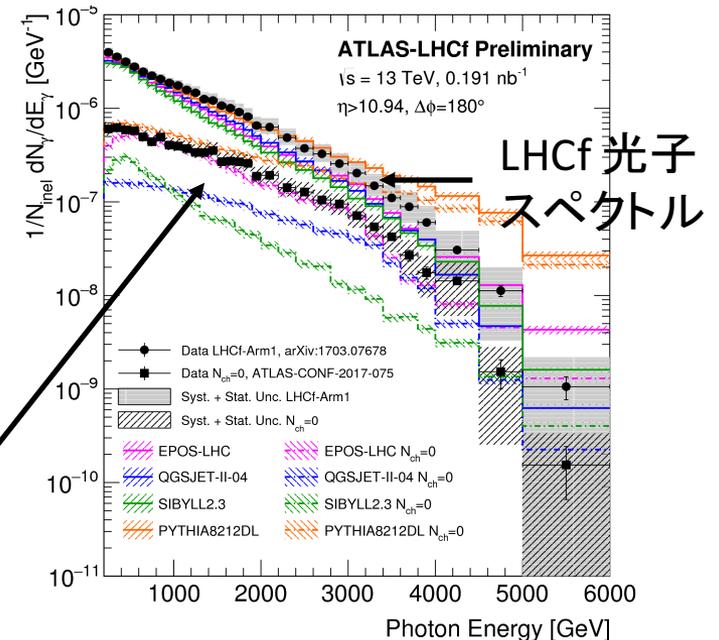
diffractive事象を判別(春の学会で報告(周啓東))

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

SDとDDのみが含まれる

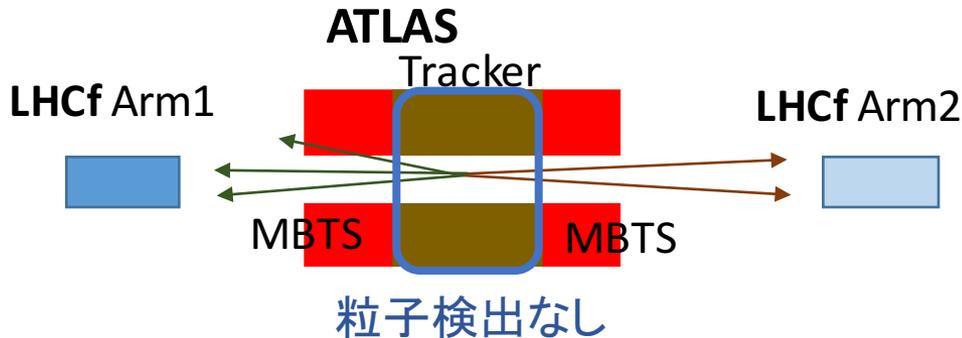
LHCf Arm1光子スペクトル



ATLAS-CONF-2017-075

13TeV陽子陽子衝突データ
(2015年取得)

ATLAS-LHCf連動解析によるsingle diffractive事象割合測定



「ATLAS trackerで粒子検出なし & Arm1 光子検出」の条件のみでは、SDとDDの両方の事象由来の光子を検出してしまう。



ATLAS TrackerとLHCf Arm1とは異なる角度感度を持つMBTS検出器を活用し、SD/DD判別を行う。

現在、解析中

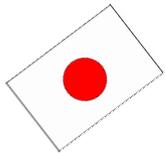
まとめ

- 空気シャワー発達のシミュレーションの改良のためにはハドロン相互作用モデルの加速器による検証が必要
- diffractive事象は陽子陽子衝突の約20%を占め、弾性度が高いという特徴がある。
- diffractive事象の空気シャワー発達 X_{max} シミュレーションへの影響を評価した。
 - SDとDDの割合が変化する影響は-1.3 [g/cm²]程度
 - M_X 依存性の変化は、 X_{max} に数 g/cm² 程度影響する
- 現在、ATLAS実験とLHCf実験の連動解析によりdiffractive事象により生成した光子を解析している。

backup

LHCf実験

*,**Y.Itow, *K.Masuda, *Y.Matsubara, *H.Menjo, *Y.Muraki, *K.Ohashi,
*K.Sato, *M.Shinoda, *M.Ueno, *Q.D.Zhou



*Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Japan

**Kobayashi-Maskawa Institute, Nagoya University, Japan

***Graduate School of Science, Nagoya University, Japan

T.Sako ICRR, University of Tokyo, Japan

K.Yoshida Shibaura Institute of Technology, Japan

K.Kasahara, T.Suzuki, S.Torii

Waseda University, Japan

Y.Shimizu, T.Tamura Kanagawa University, Japan

N.Sakurai Tokushima University, Japan

M.Haguenaer Ecole Polytechnique, France

W.C.Turner LBNL, Berkeley, USA

O.Adriani, E.Berti, L.Bonechi, M.Bongi, G.Castellini, R.D'Alessandro,

P.Papini, S.Ricciarini, A.Tiberio

INFN, Univ. di Firenze, Italy

A.Tricomi

INFN, Univ. di Catania, Italy



ハドロン相互作用と空気シャワー

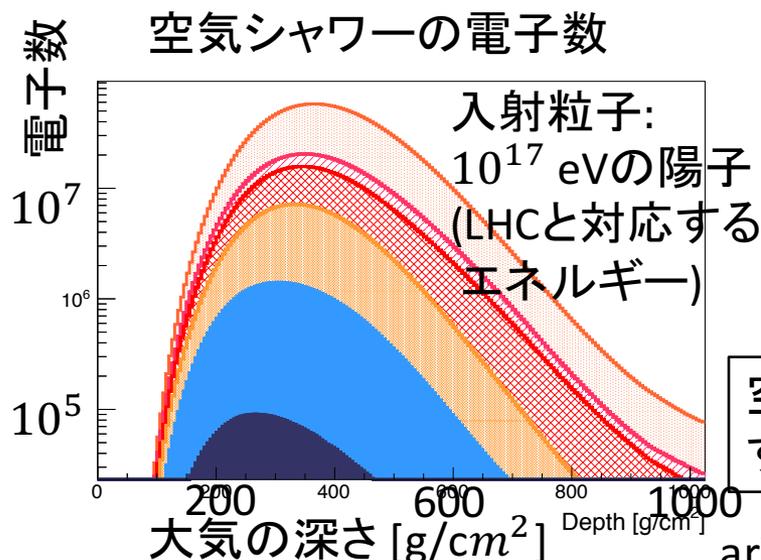
ハドロン相互作用

量子色力学(QCD)は特定の場合しか計算をすることができない。そのため、MCシミュレーションでは現象論のハドロン相互作用モデルを用いて計算している。

ハドロン相互作用モデル改良のためには、加速器実験によりモデルを検証することが必要

代表的なモデル
PYTHIA
EPOS LHC
QGSJET II
SIBYLL 2.3

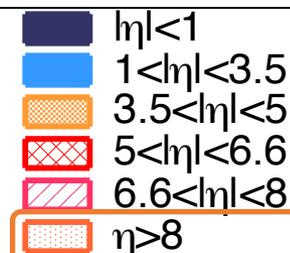
空気シャワーとの関係



はじめの衝突で生成した粒子の、LHC相当での角度で色分け

LHCfのカバーする0度方向の領域

$$\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$

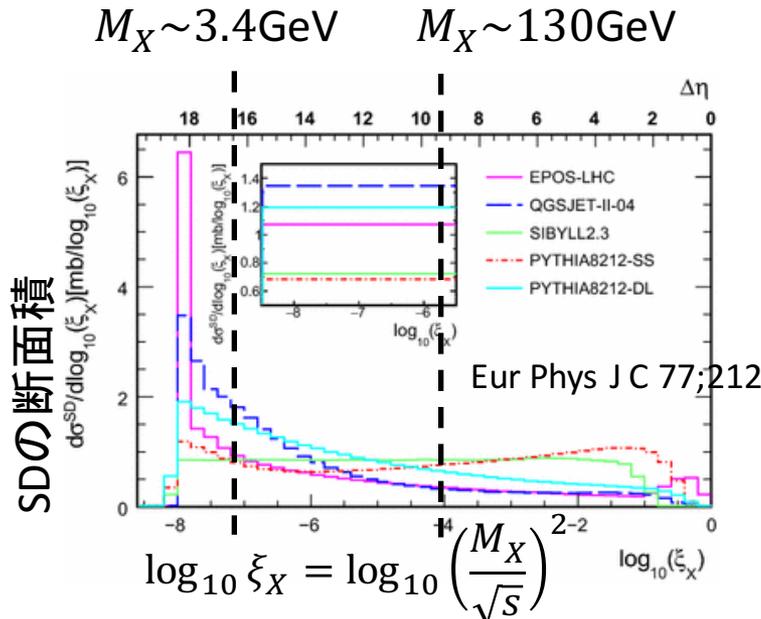
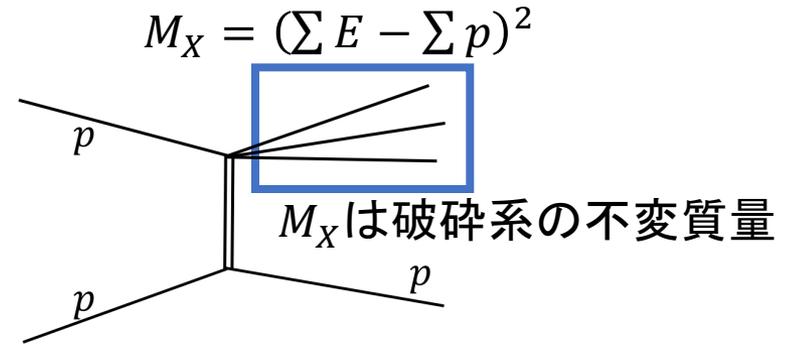


空気シャワーの50%以上の粒子生成はLHCfのカバーする最前方領域での粒子生成と関連している。

diffractive事象

今回はハドロン相互作用の中でもdiffractive事象に注目する

diffractive事象 (LHC 陽子陽子衝突の約20%)
 陽子陽子衝突で入射した陽子が破砕する。
 片側のみの陽子が破砕する single diffractive (SD)と両側の陽子が破砕するdouble diffractive (DD)がある。



diffractive事象により生じる光子(中性子)の生成断面積は

- 破砕系不変質量 M_X のdiffractive事象の起きる確率 (SDの断面積)
- 破砕系不変質量 M_X のdiffractive事象で光子(中性子)の生じる確率 (粒子生成)からなる。

モデル間で大きな差があり、モデル間の違いの原因の1つとなっている。

diffractive事象の空気シャワーへの影響

diffractive事象の主なモデル間の違い

- 特徴量 M_X に対する生成量(発生確率)
- 特徴量 M_X に対する粒子生成のモデル
- SDとDDの割合

粒子生成と
空気シャワーの関係性

空気シャワーシミュレーションではじめの衝突の情報とシャワー発達の関係性を確認

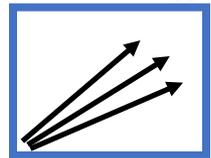
はじめの衝突がSD(陽子破碎)の場合を抜き出し、 M_X とシャワー最大発達深さを計算

$$\log_{10} \xi_X = \log_{10} \left(\frac{M_X}{\sqrt{s}} \right)^2$$

M_X での粒子生成に対するシャワー最大発達 X_{max} の関係性

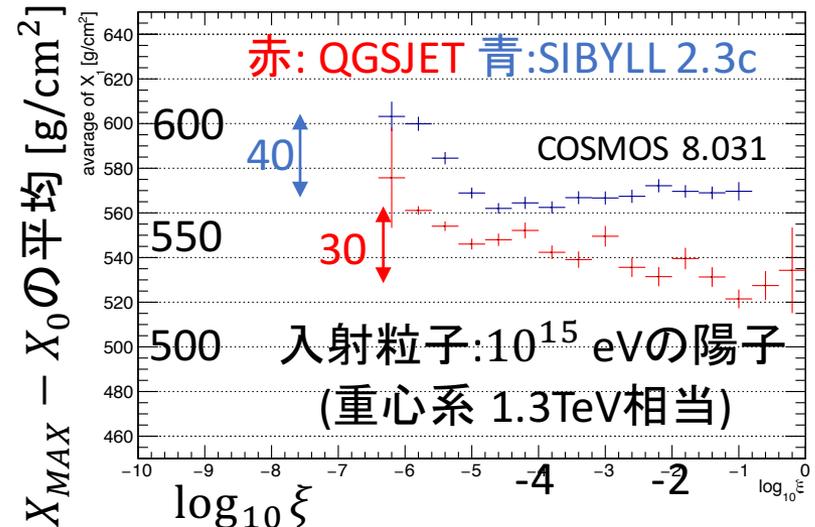
M_X は破碎系の不変質量

$$M_X = (\sum E - \sum p)^2$$



全体の1割程度

SD(陽子破碎)のdiffractive massに対する空気シャワー発達の関係性



X_0 : はじめの衝突までの深さ

diffractive事象の空気シャワーへの影響

diffractive事象の主なモデル間の違い

- 特徴量 M_X に対する生成量(発生確率)
- 特徴量 M_X に対する粒子生成のモデル
- SDとDDの割合

粒子生成と
空気シャワーの関係性

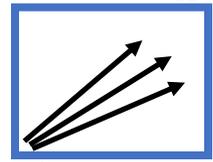
M_X が小さいと空気シャワーの発達は深くなる

M_X に対するdiffractive事象の生成量が極端に変化すると、diffractive事象の作るシャワーは最大40 [g/cm²] 変化する

約1割が最大40 [g/cm²] 変化
=> 最も大きい場合で4 [g/cm²] 程度の変化
(はじめの衝突の変化のみを考慮)

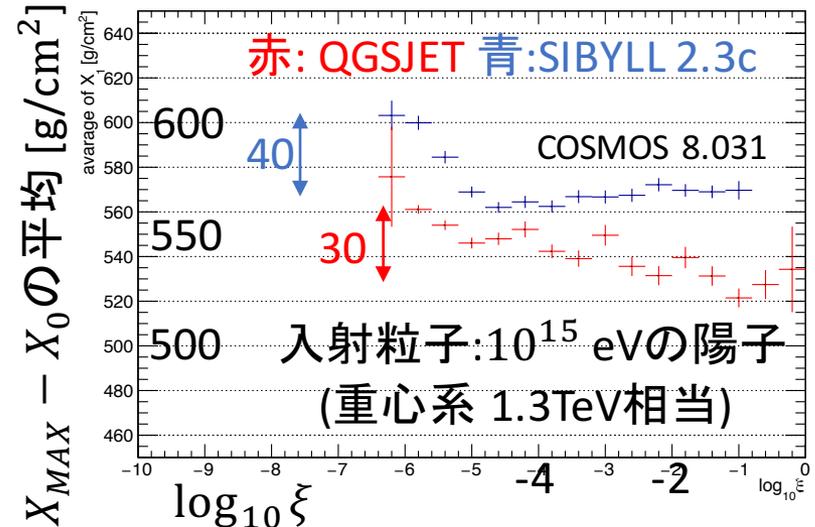
M_X は破碎系の不変質量

$$M_X = (\sum E - \sum p)^2$$



全体の1割程度

SD(陽子破碎)のdiffractive massに対する空気シャワー発達の関係性



X_0 : はじめの衝突までの深さ

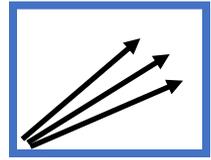
diffractive事象の空気シャワーへの影響

diffractive事象の主なモデル間の違い

- 特徴量 M_X に対する生成量の違い(発生確率の違い)
- 特徴量 M_X に対する粒子生成のモデルの違い
- SDとDDの割合

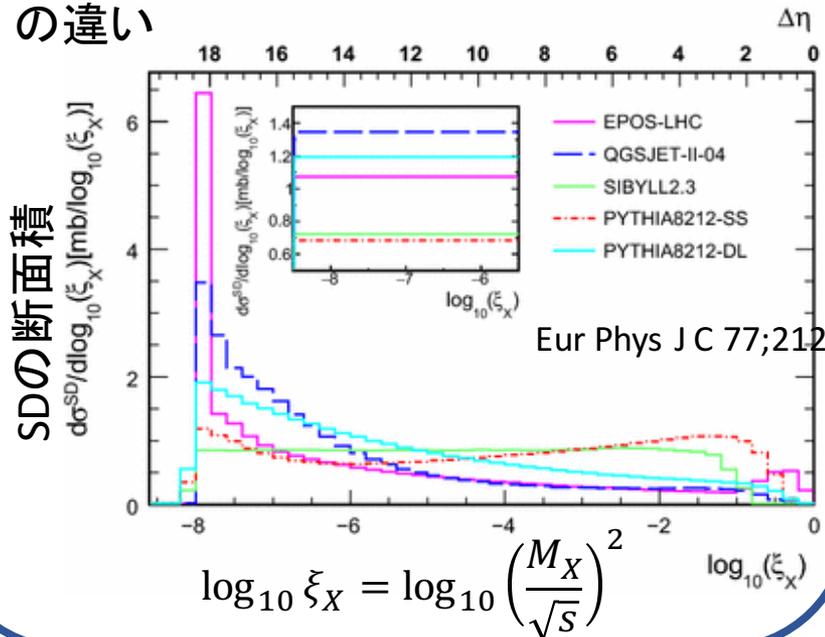
M_X は破碎系の不変質量

$$M_X = (\sum E - \sum p)^2$$



全体の1割程度

モデルごとのdiffractive mass依存性の違い



SD(陽子破碎)のdiffractive massに対する空気シャワー発達の関係性

