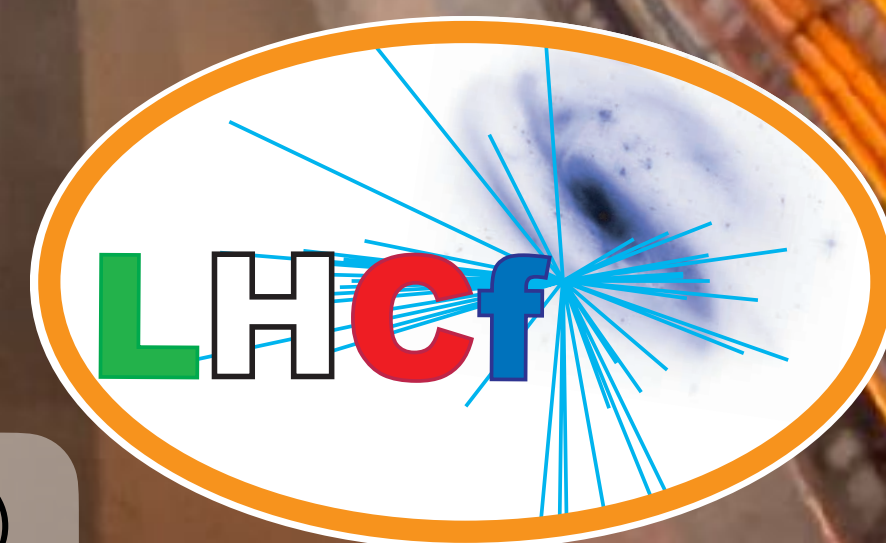


LHCf実験による LHCのビーム軸上でのハドロン測定

毛受弘彰 (名大ISEE)

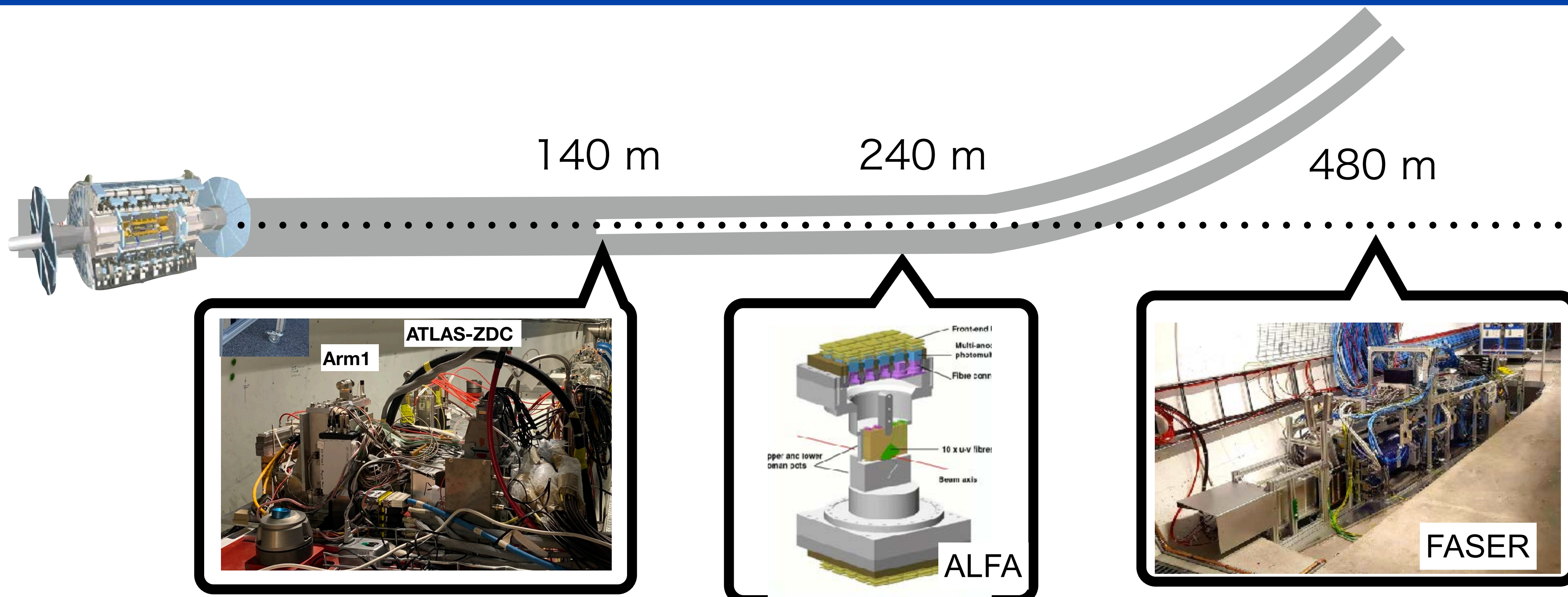
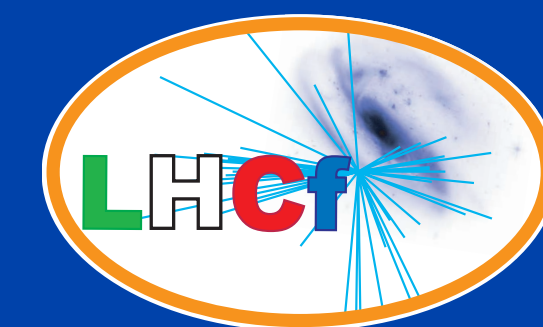
ISEE

Institute for
Space-Earth Environmental Research



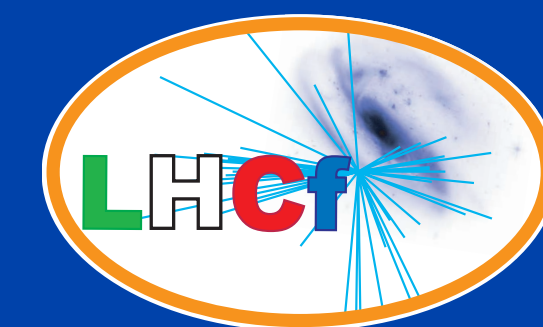
第21回高エネルギーQCD・格子構造勉強会・2023年11月1日・理研(和光)

LHCでの超前方領域測定



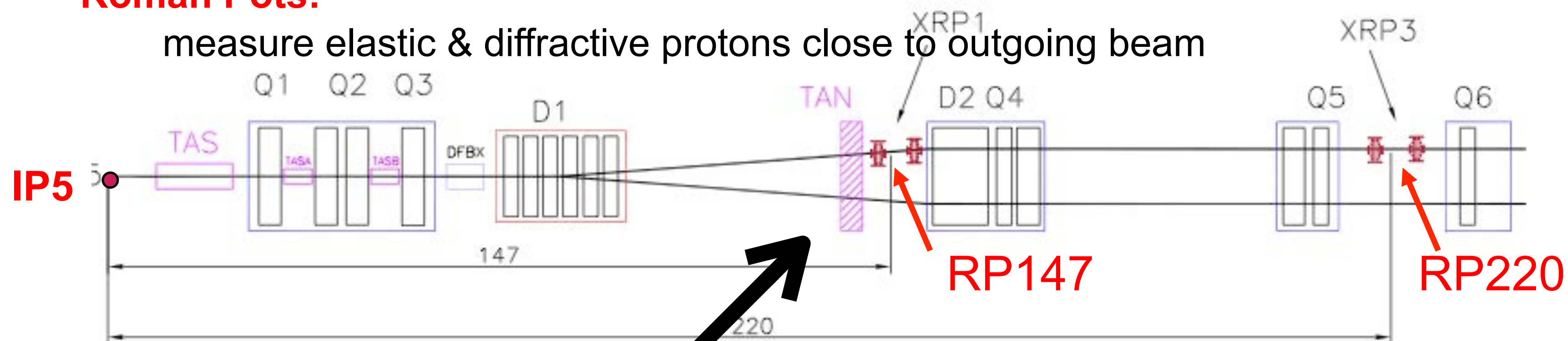
- 散乱陽子：TOTEM, ATLAS/CMS RPs
- 中性ハドロン：LHCf, ZDCs
- ニュートリノ・長寿命未知粒子：FASER, SND

LHCf実験の設置場所



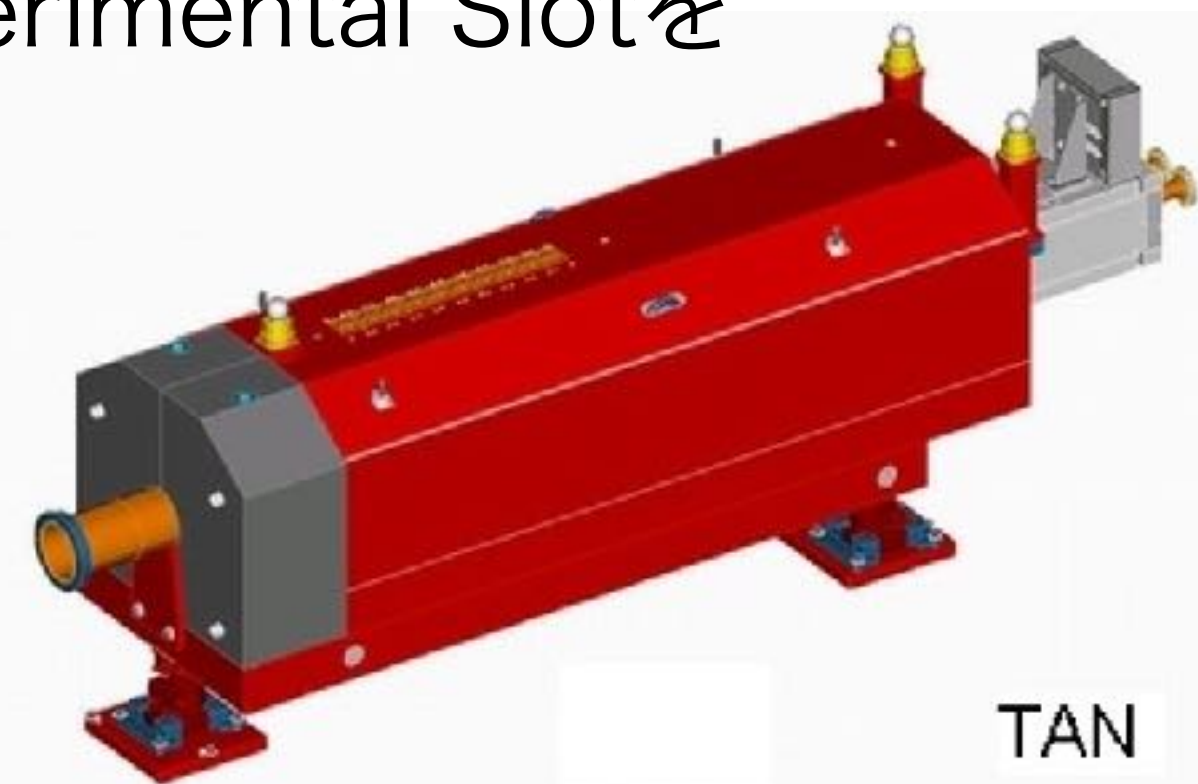
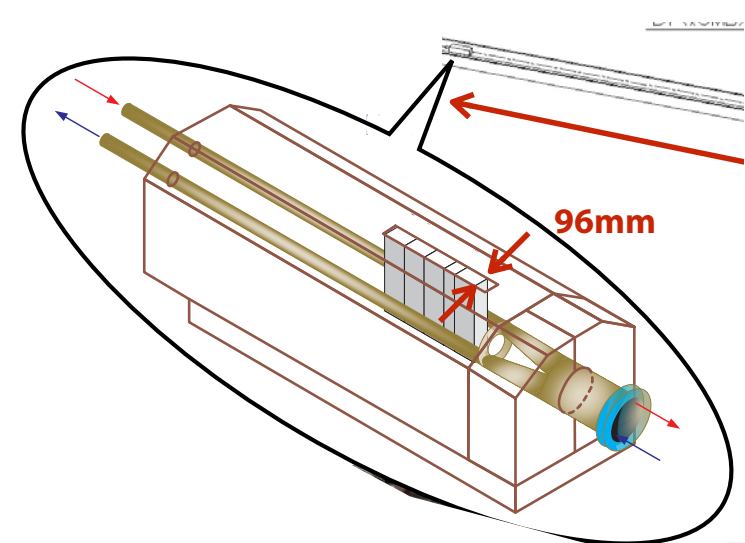
Roman Pots:

measure elastic & diffractive protons close to outgoing beam

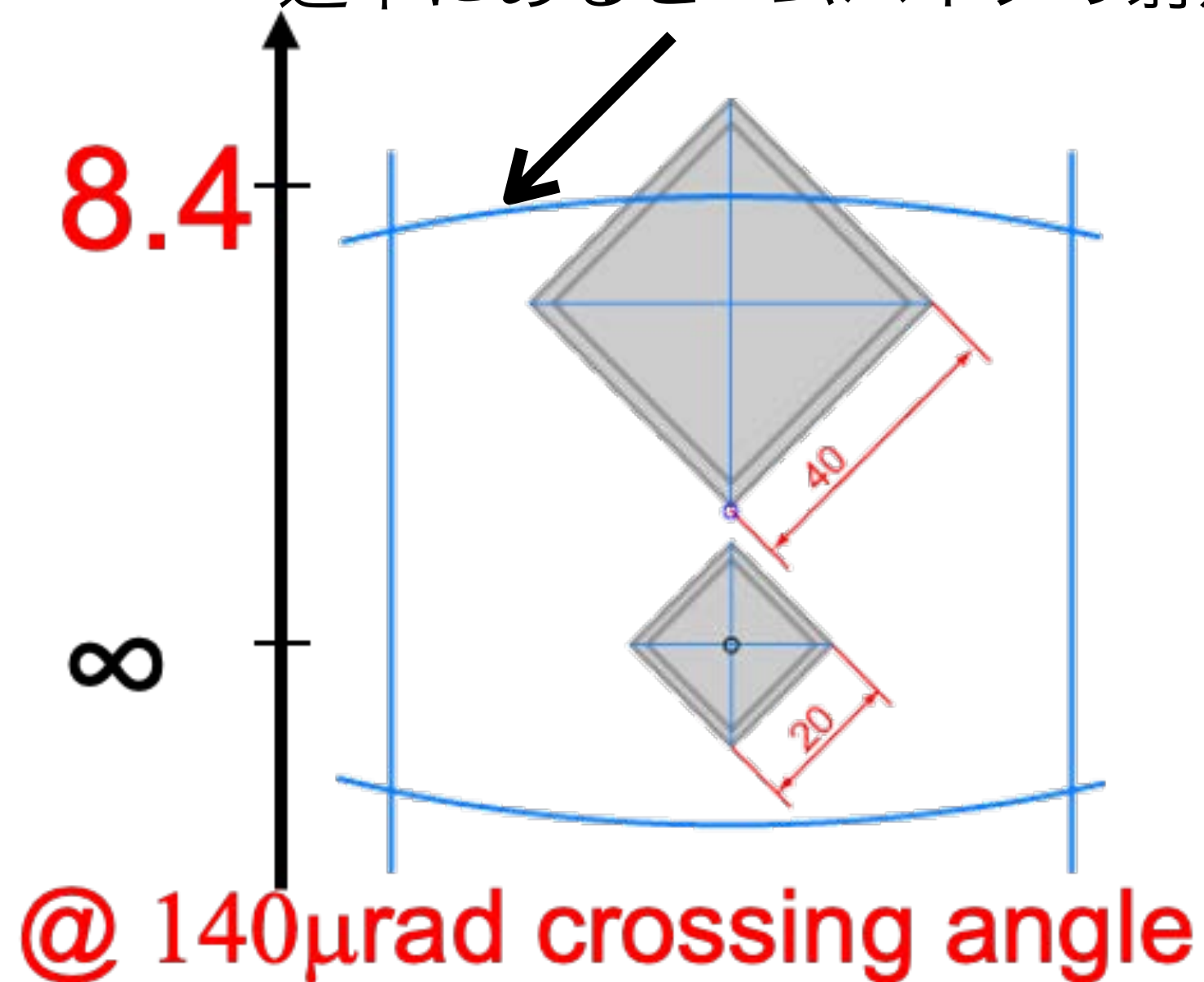


TAN

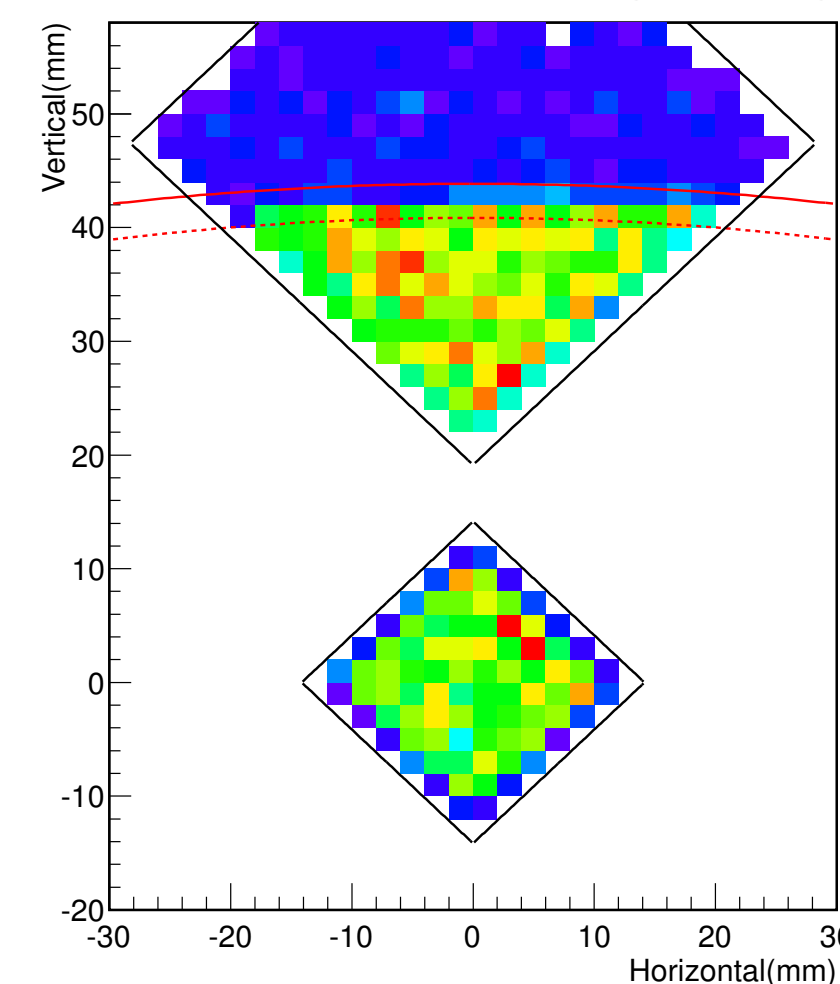
- 後方の電磁石の放射線損傷を防ぐ目的
- 内部で1→2本にビームパイプが分岐
- 96mm幅のExperimental Slotを持つ。



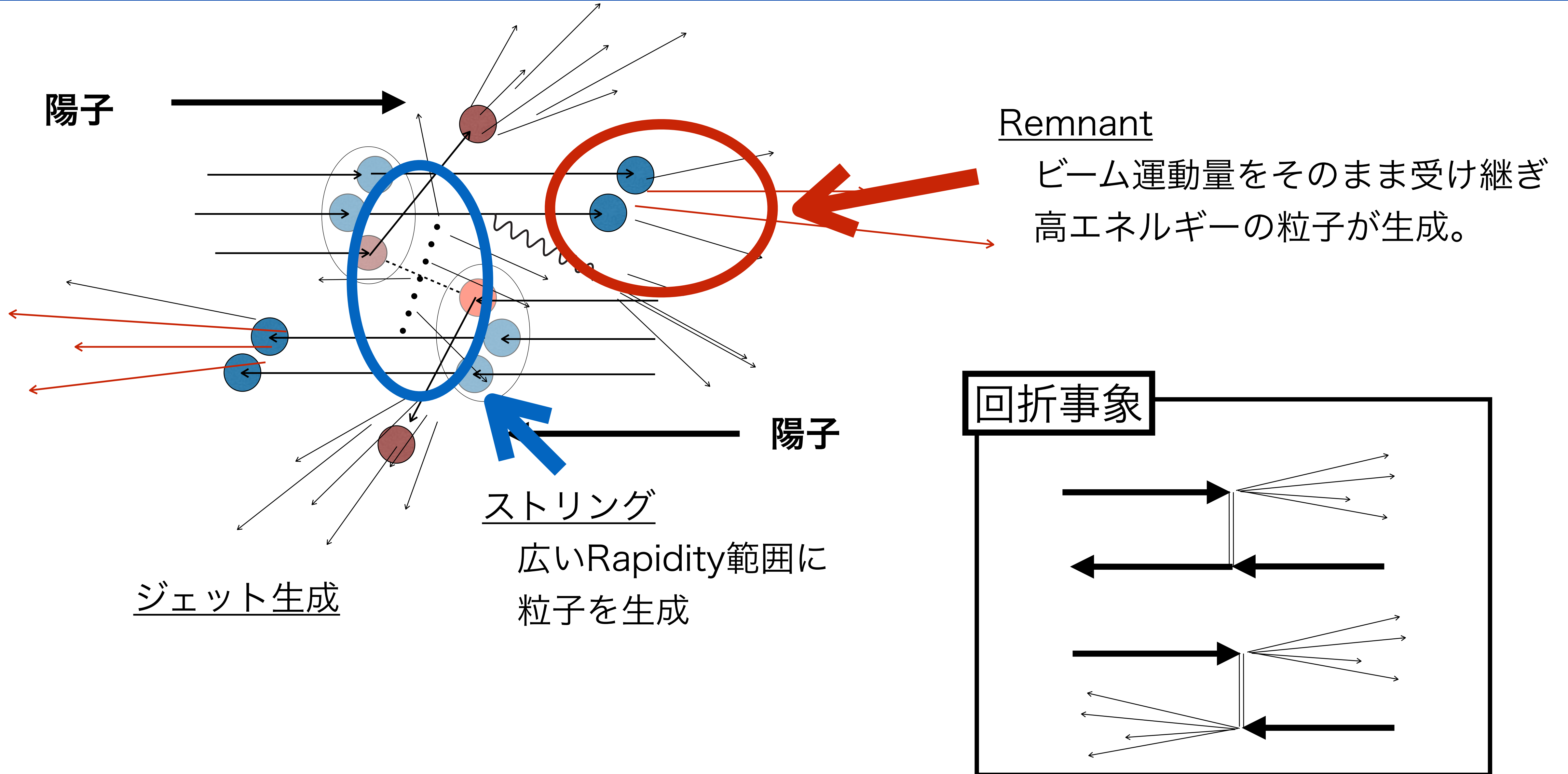
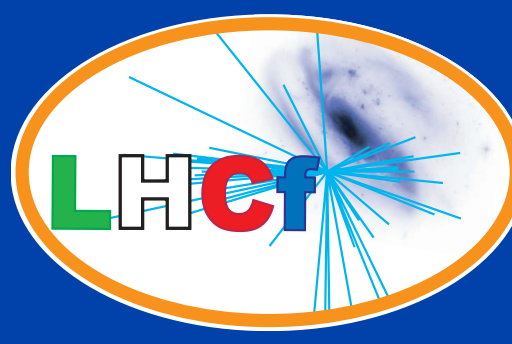
途中にあるビームパイプの射影



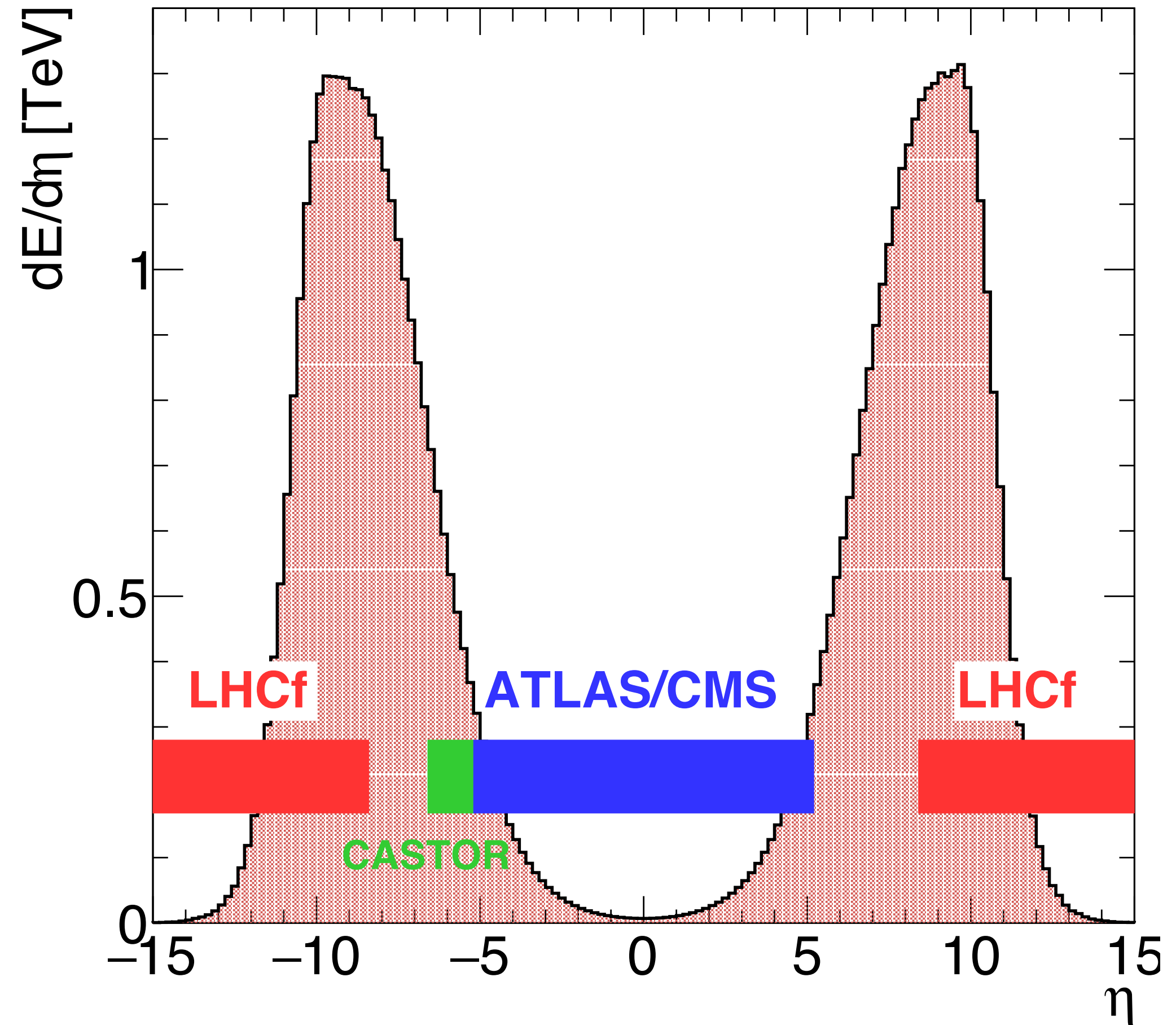
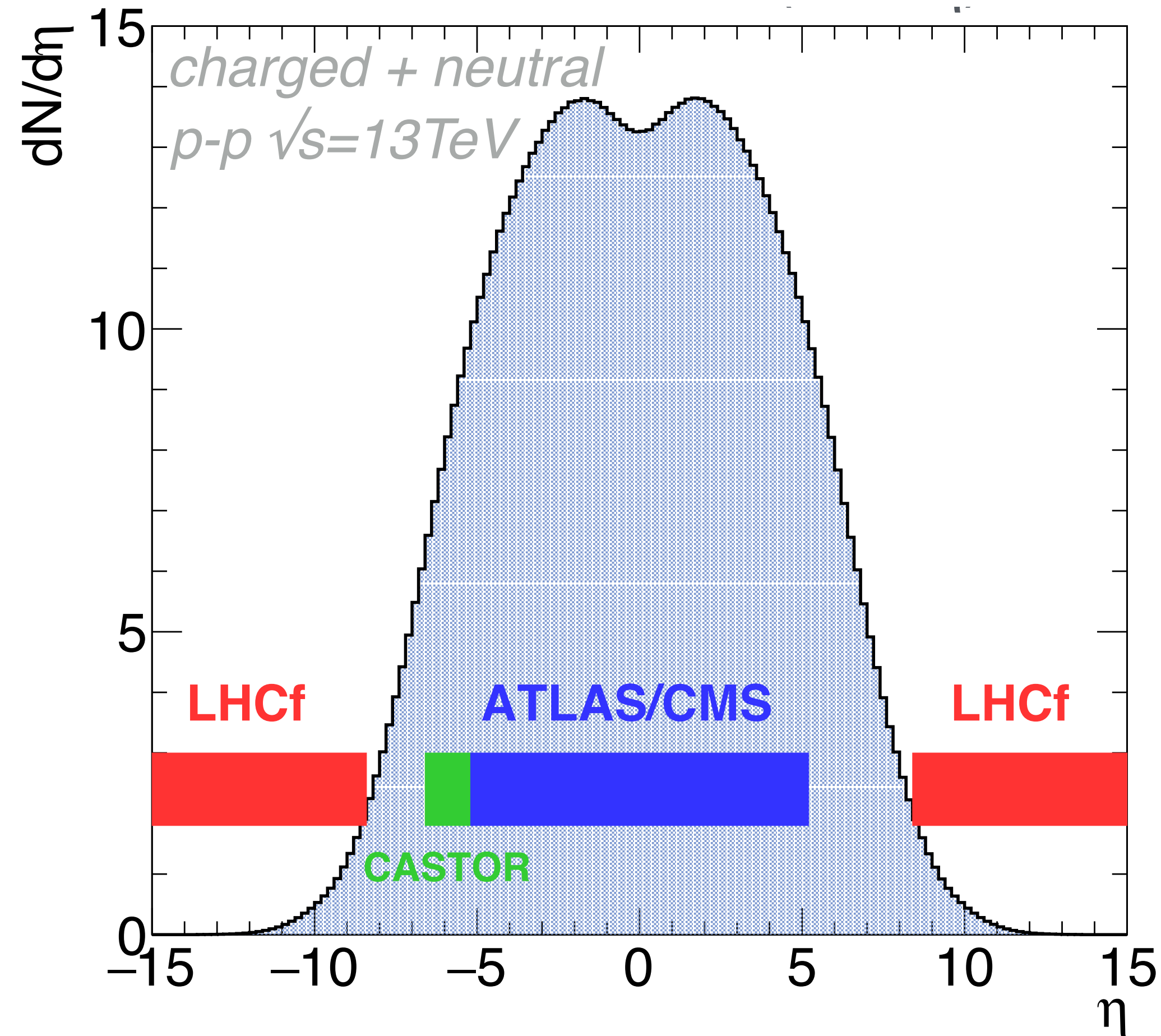
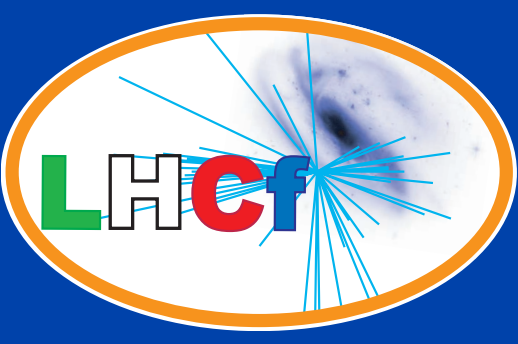
光子事象の
ヒットマップ
@ pp $\sqrt{s}=0.9$ TeV
zero crossing angle



超前方領域の粒子生成

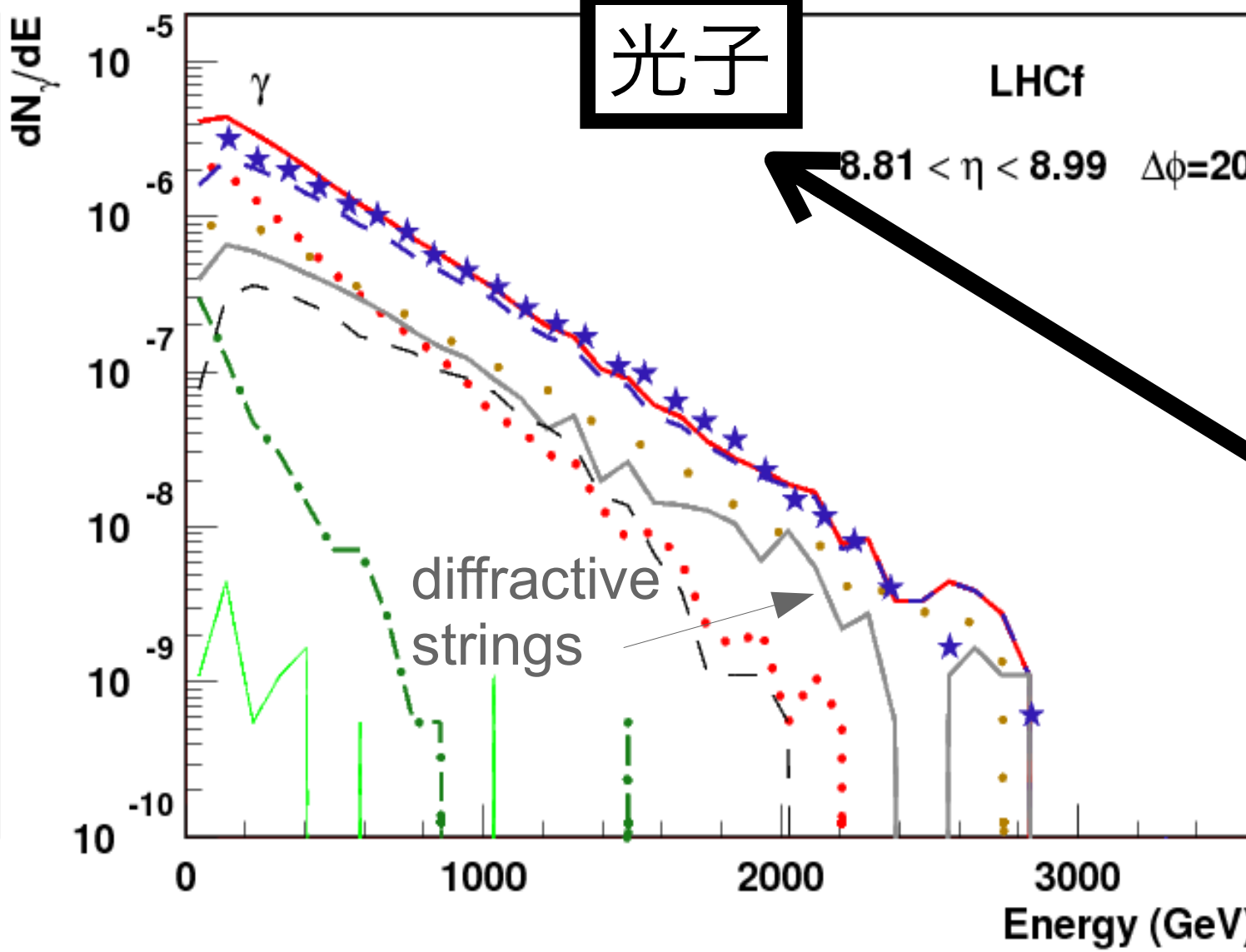
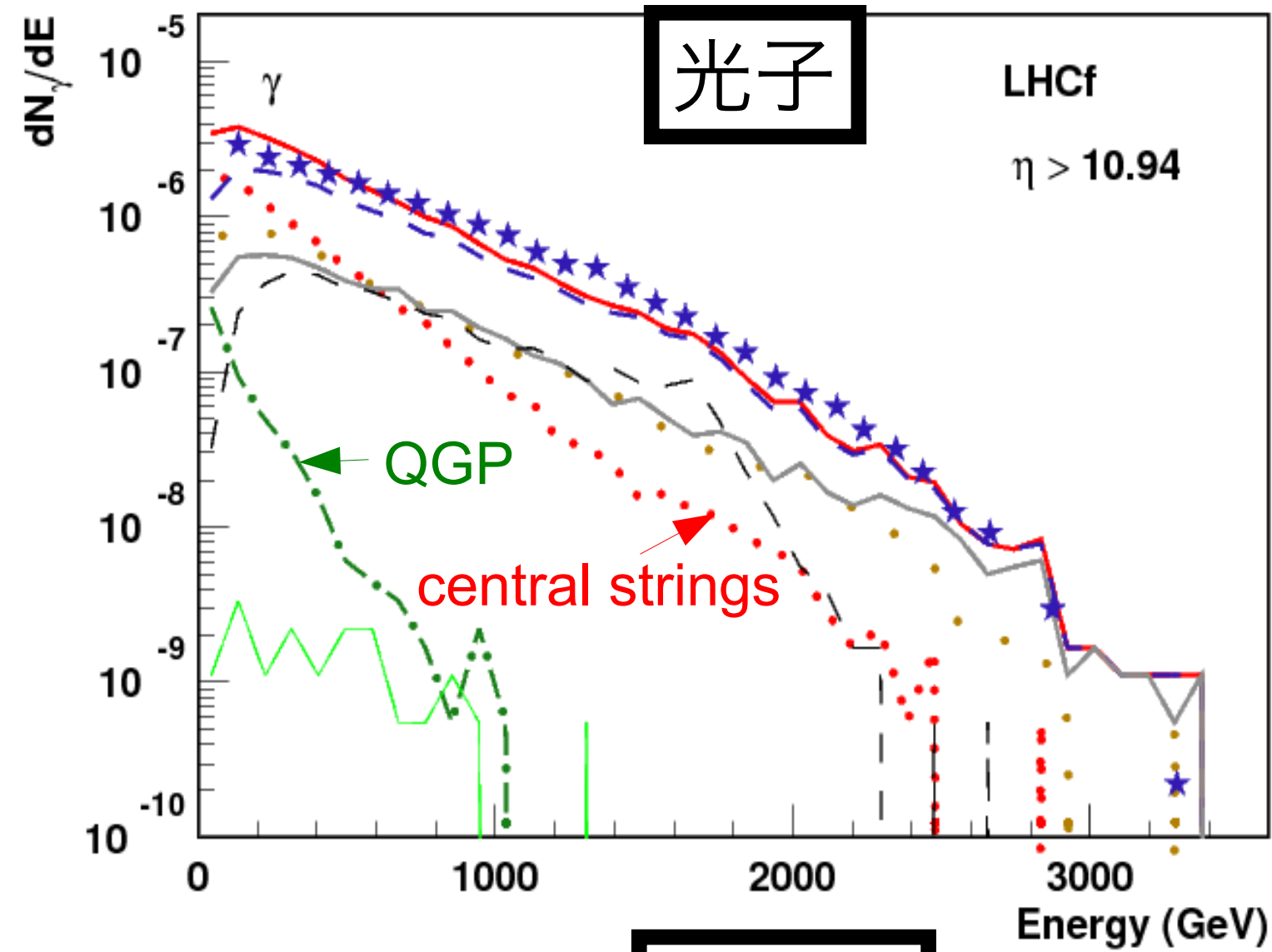
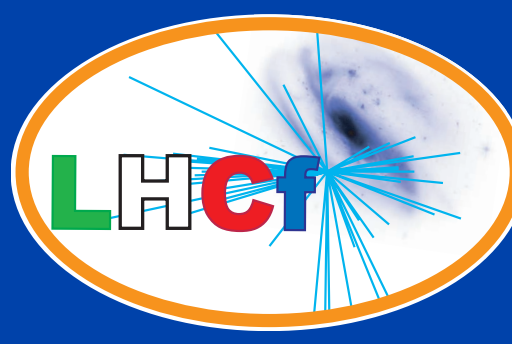


ラピディティ分布



超前方領域は粒子の生成断面積は小さいが、エネルギー流量は最も大きい

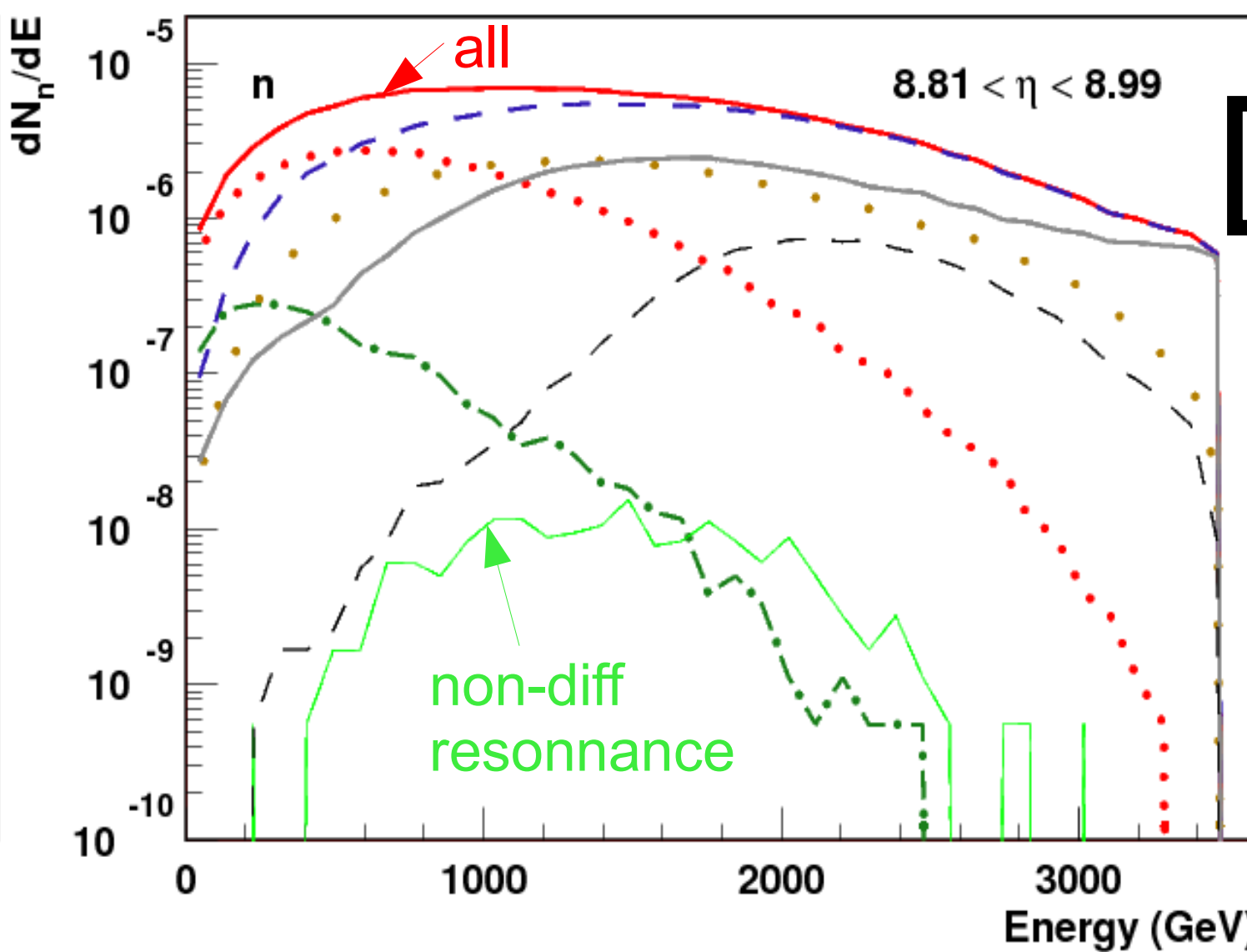
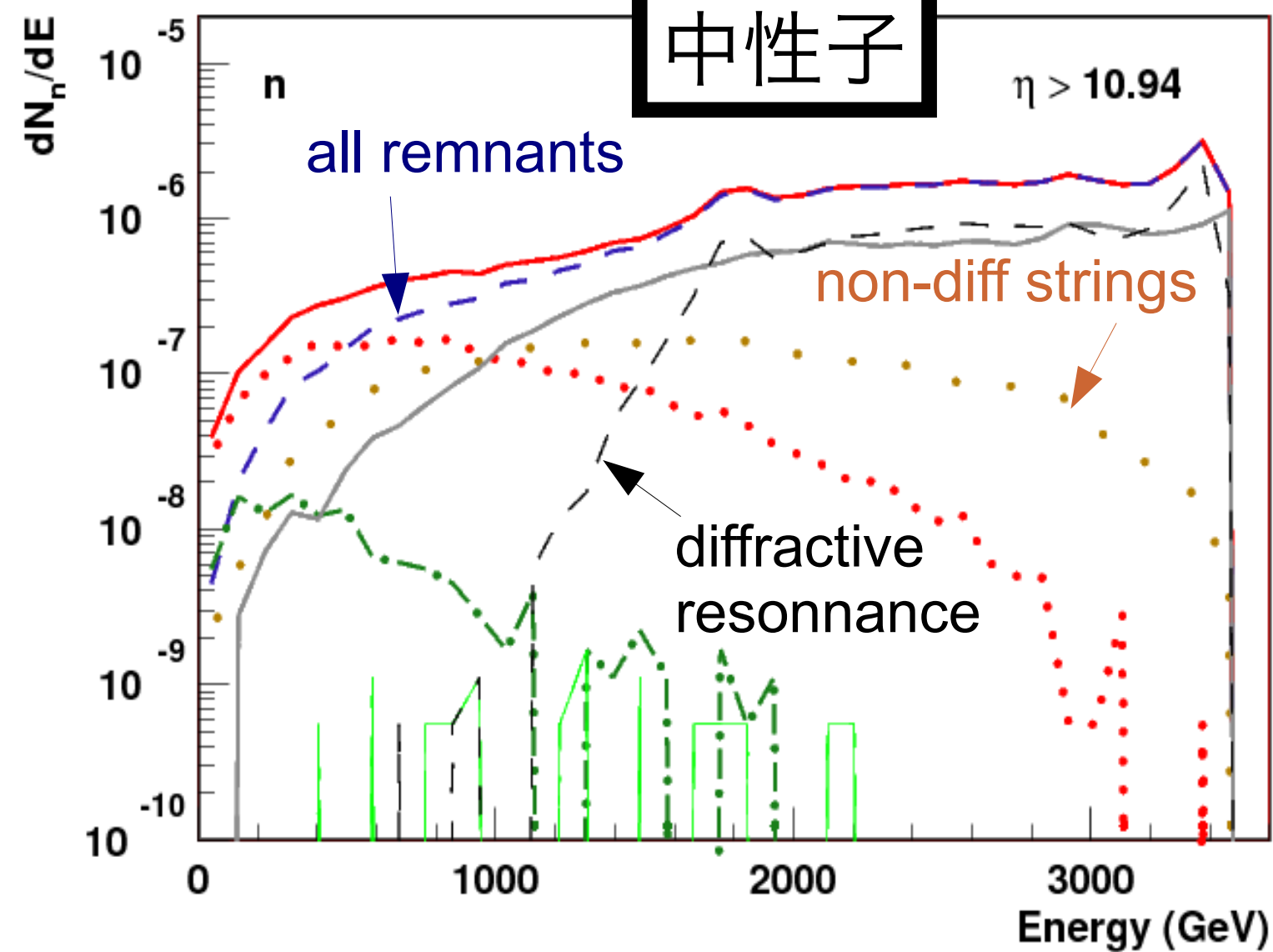
超前方領域のエネルギースペクトル



生成プロセスごとの断面積

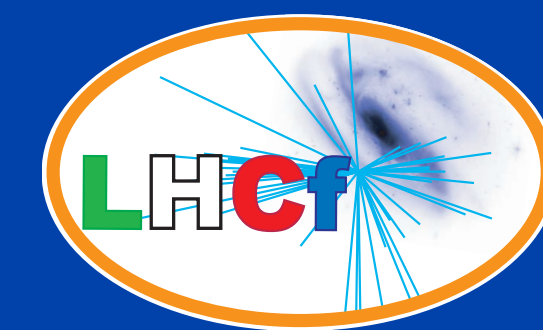
pp $\sqrt{s} = 7$ TeV by EPOS-LHC
T. Pierog 氏提供

- ・ ほとんどは π^0 崩壊からの光子
- ・ π^0 断面積を反映している。

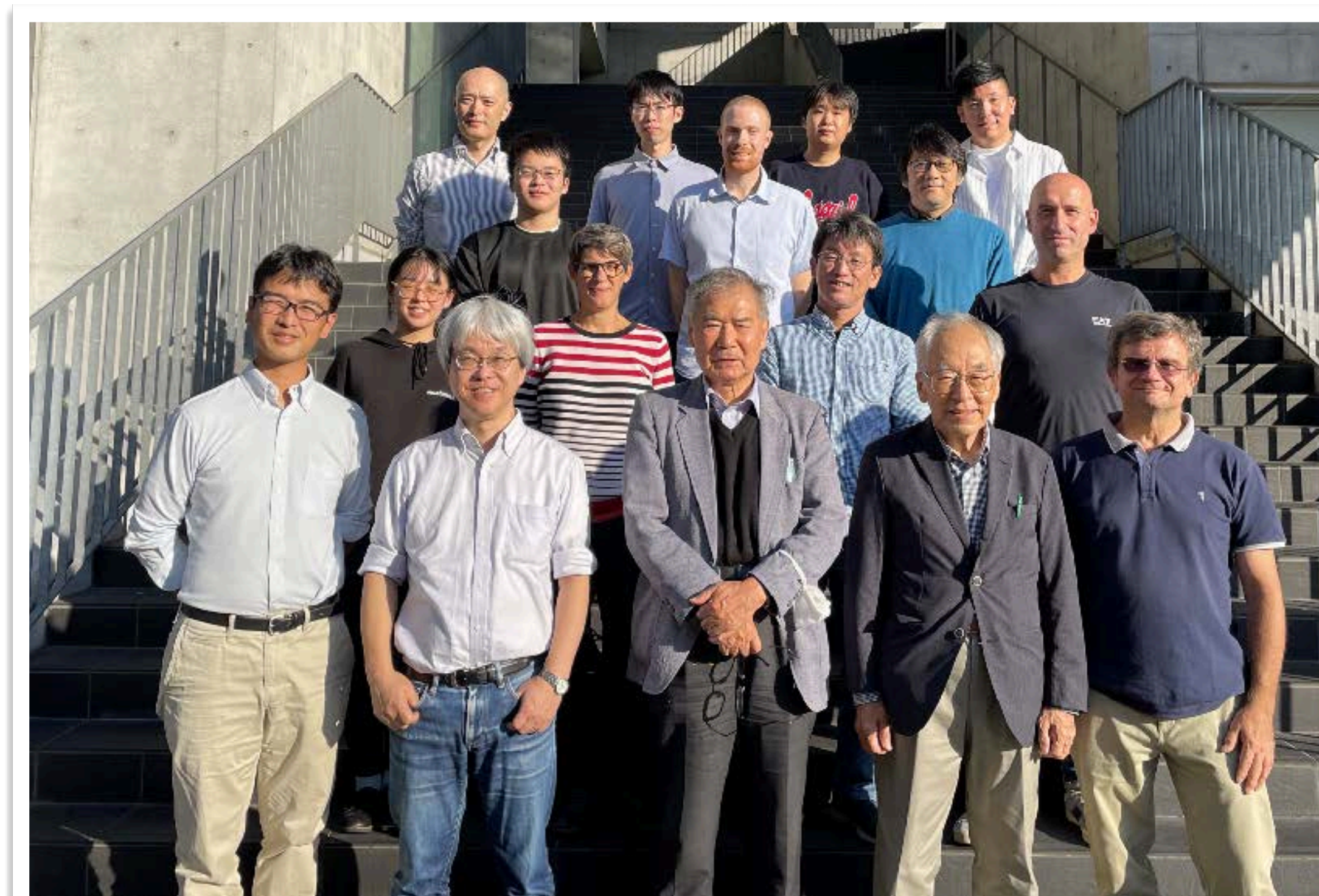


ほぼ diffractive 含む
Remnant から生成

目次

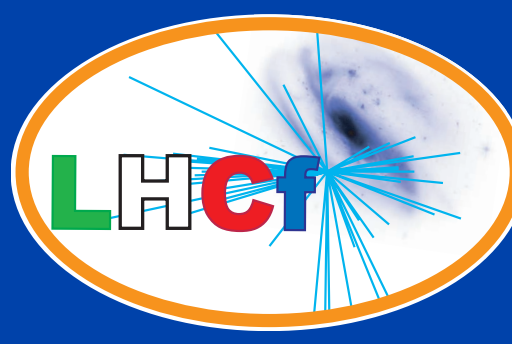


- イントロダクション
 - 宇宙線空気シャワー観測
 - LHCf実験のセットアップ検出器
- 測定結果
 - 超前方中性子測定
 - η 中間子測定
- ATLAS-LHCf共同測定
 - 共同測定でできる物理
 - 2022年のデータ取得
- 陽子-原子核衝突測定
 - 2024年の陽子-酸素原子核測定



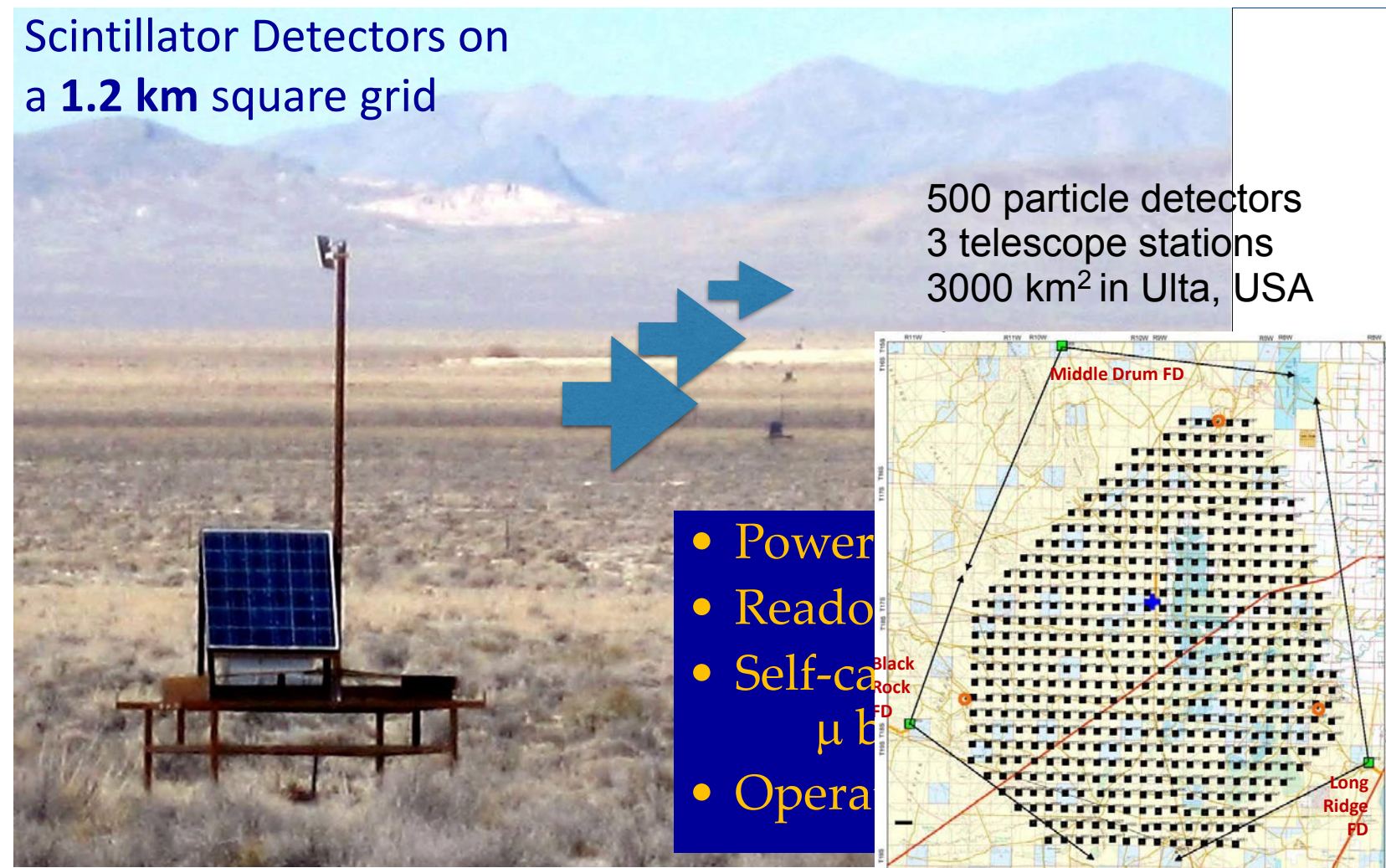
LHCf (+RHICf) コボラミーティング
記念写真 @ 名古屋 2023年10月

超前方領域測定のもちベーション



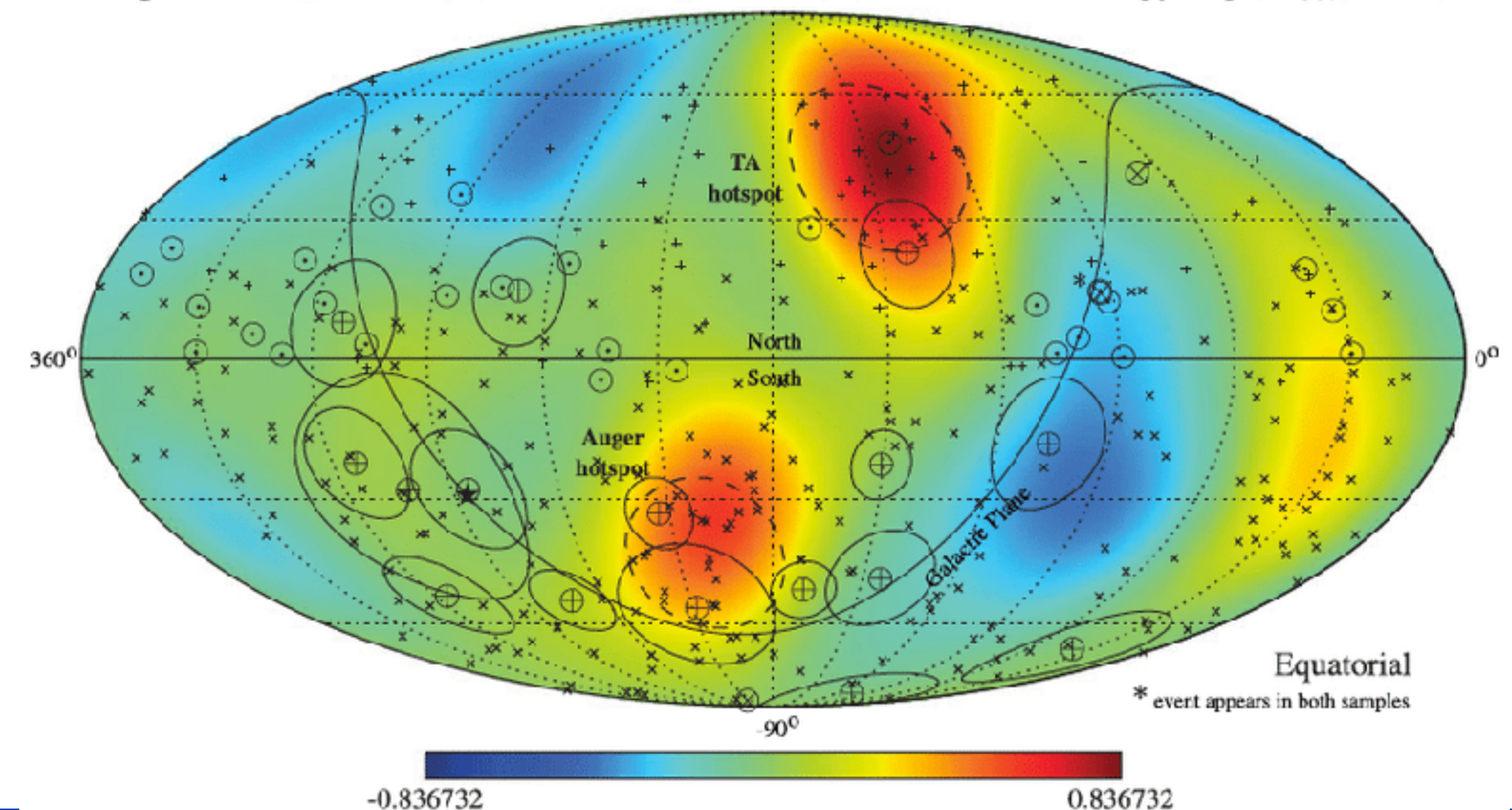
- 高エネルギー宇宙線と地球大気との相互作用の理解
 - 超高エネルギー宇宙線観測
 - 高エネルギーニュートリノ観測
- FASER ν へ入射するニュートリノフラックスの理解 ← **New**

超高エネルギー宇宙線観測

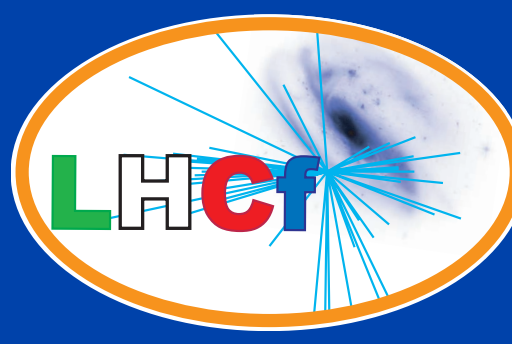


到来方向分布に非一様成分 (ホットスポット)

Auger 2014 $E \geq 52$ EeV (\times) / TA 2014 $E \geq 57$ EeV ($+$) / smoothed anisotropy map ($\Delta\theta_{50\%} = 20^\circ$)



高エネルギー宇宙線観測とハドロン相互作用



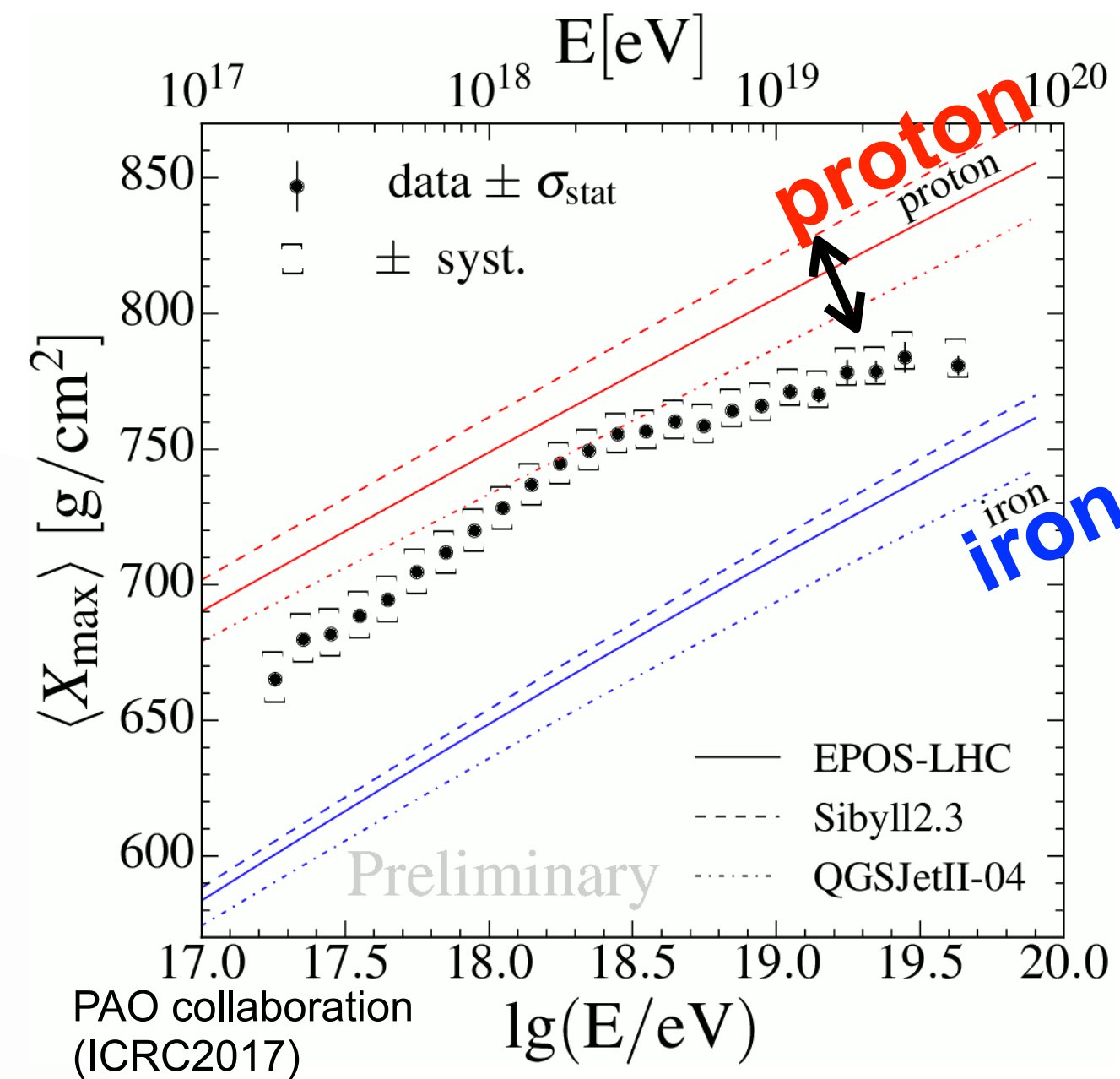
空気シャワー観測

✓ 高精度観測には、
空気シャワー発達の
正確な理解が不可欠。

✓ ハドロン相互作用の
モデリングが観測結果
の解釈に影響

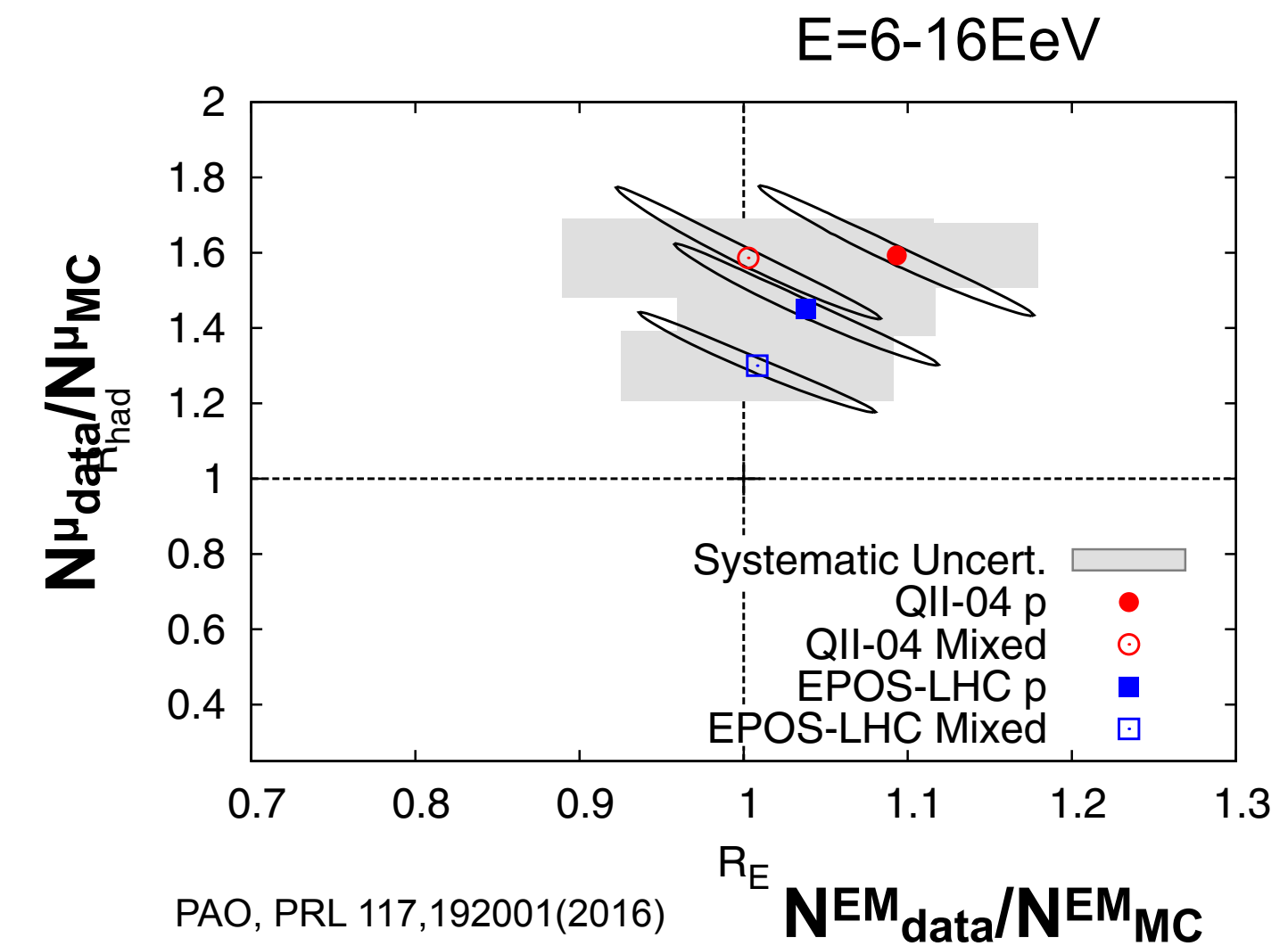
加速器実験
データの不足

化学組成推定



- ▶ 観測結果の解釈に大きな
相互作用モデル依存性
- ▶ 観測量ごとに $\langle A \rangle$ の
推定結果が異なる

ミューオン超過問題

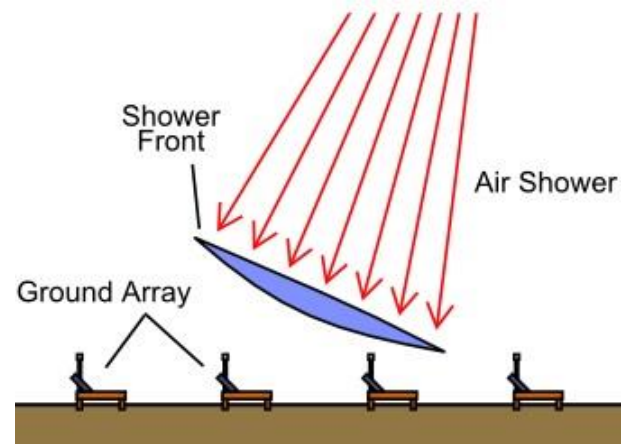


- ▶ ミューオン量は E_{π^0}/E^{had} に敏感
- ▶ いろいろなアイディア
 - ベクターメソン生成
 - ストレンジ粒子 (K中間子)

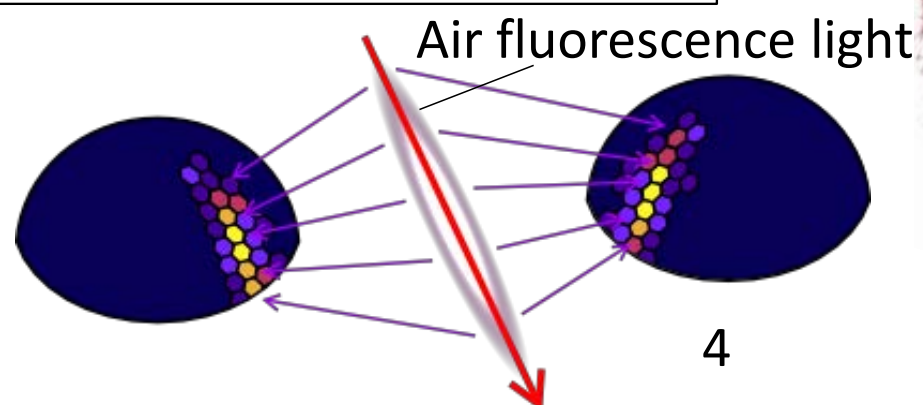
加速器実験によるハドロン相互作用モデルの検証が不可欠

宇宙線と
大気原子核が衝突

Surface detector (SD)

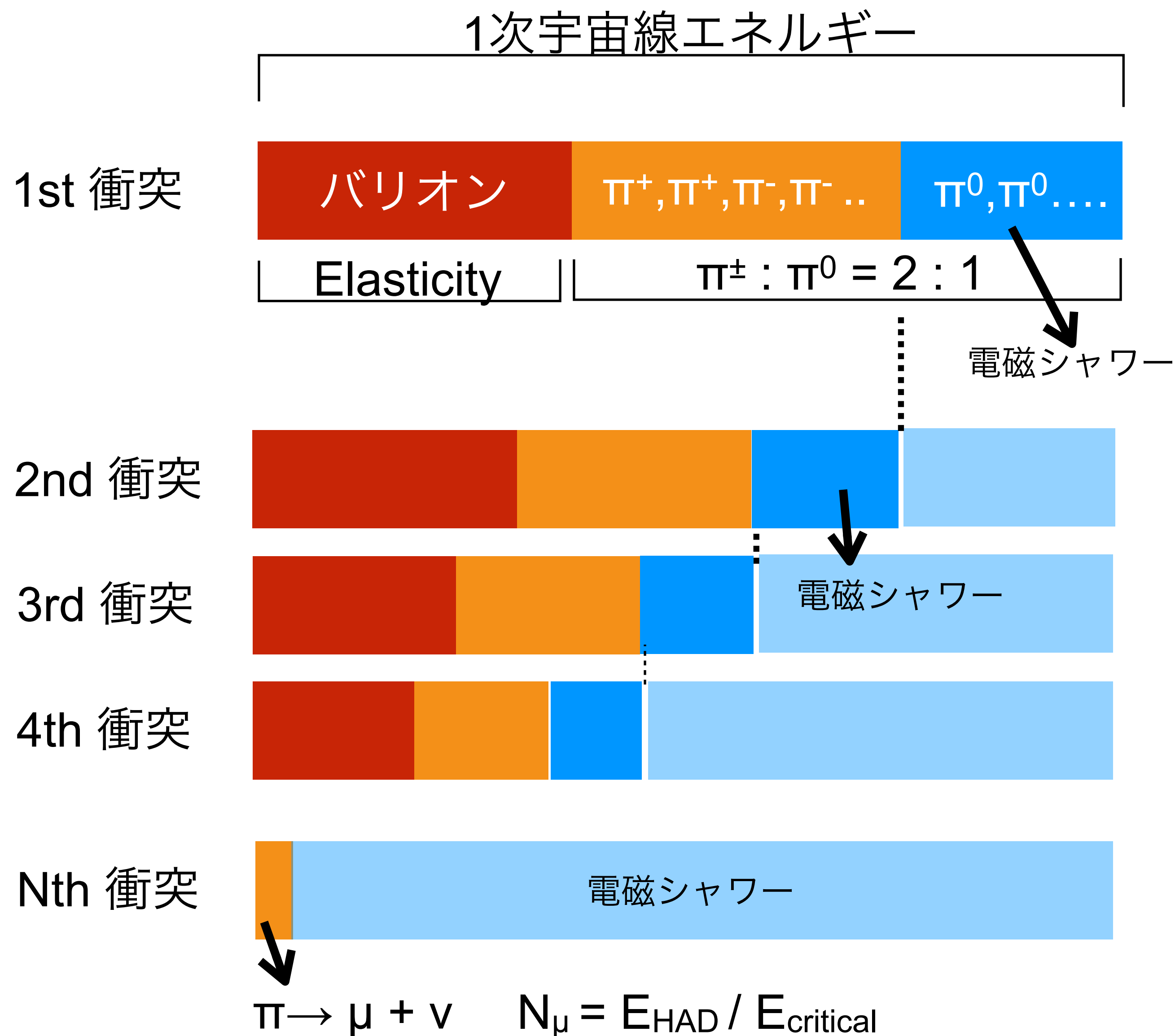
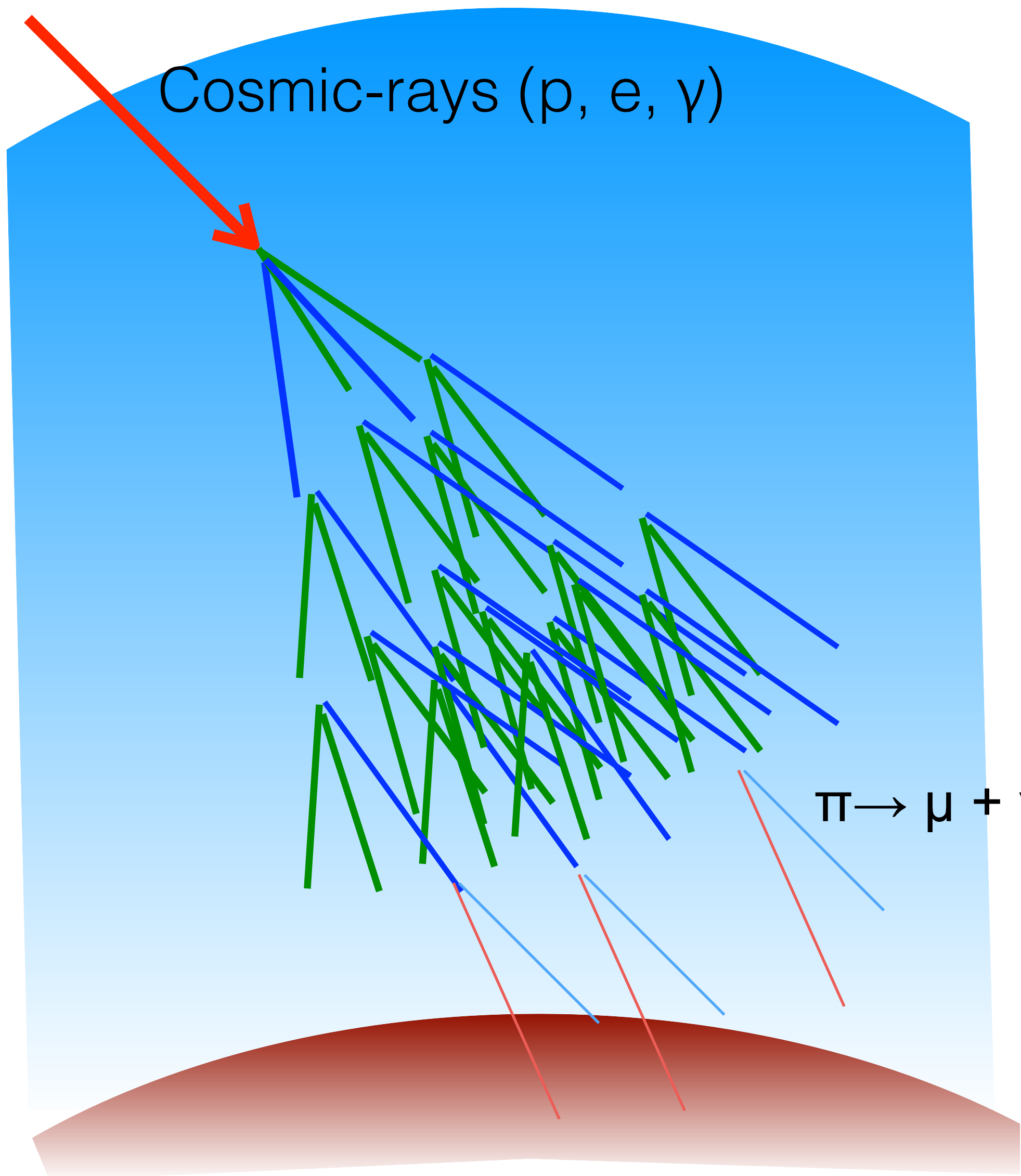
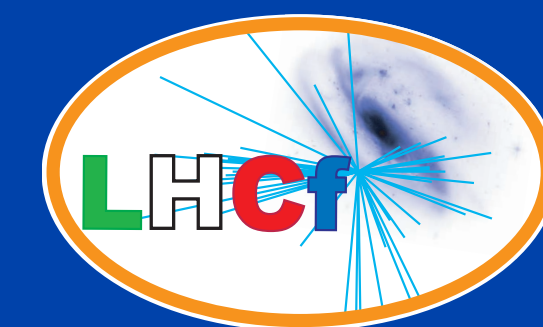


Fluorescence detector (FD)

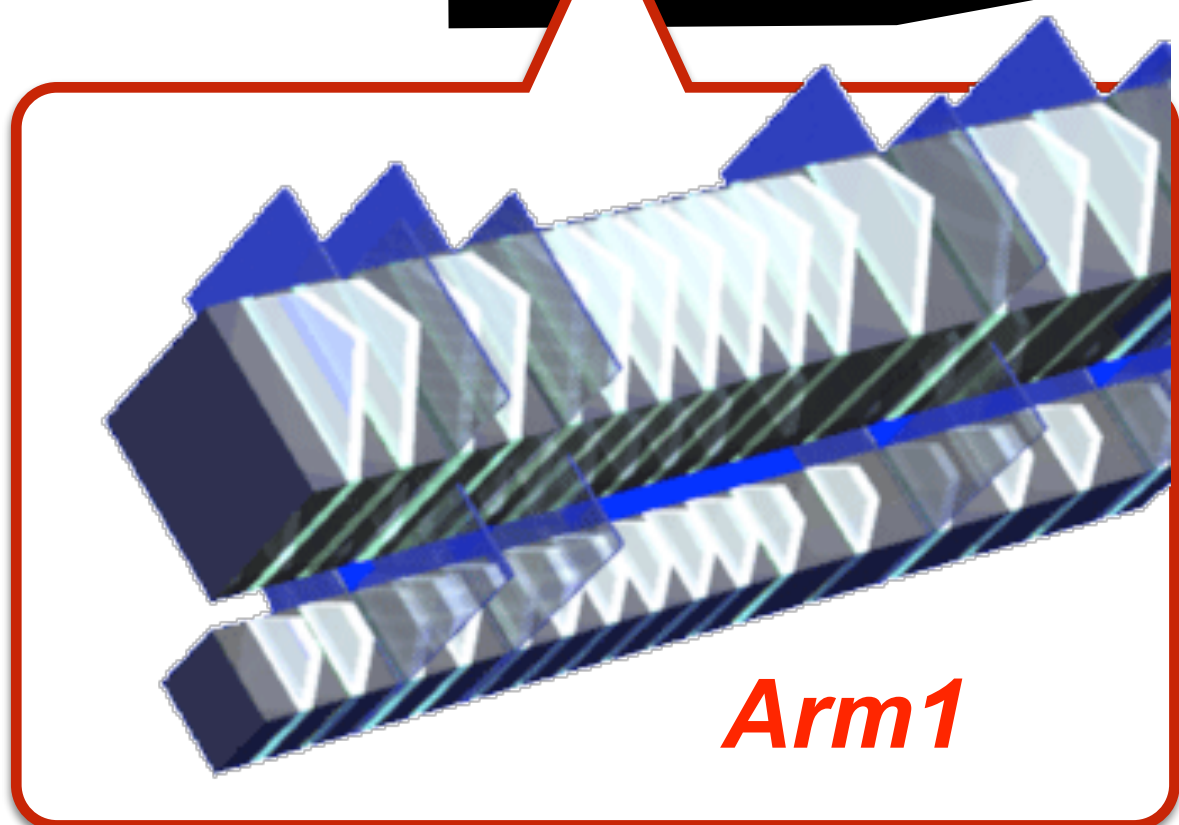
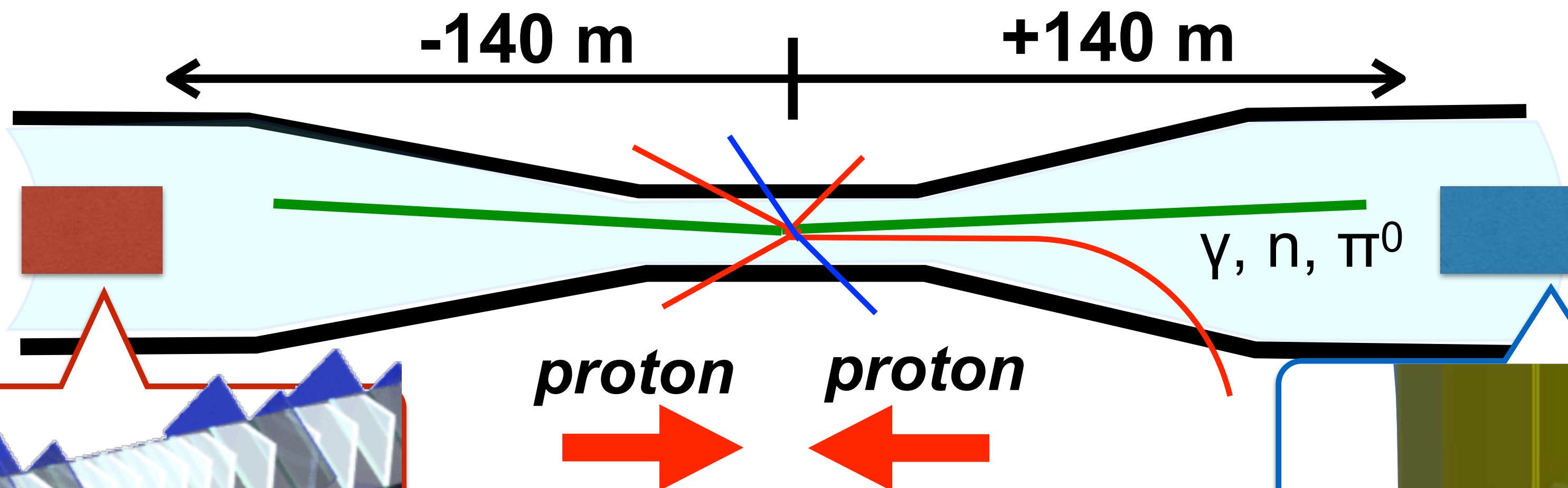


4

空気シャワー発達と N_μ



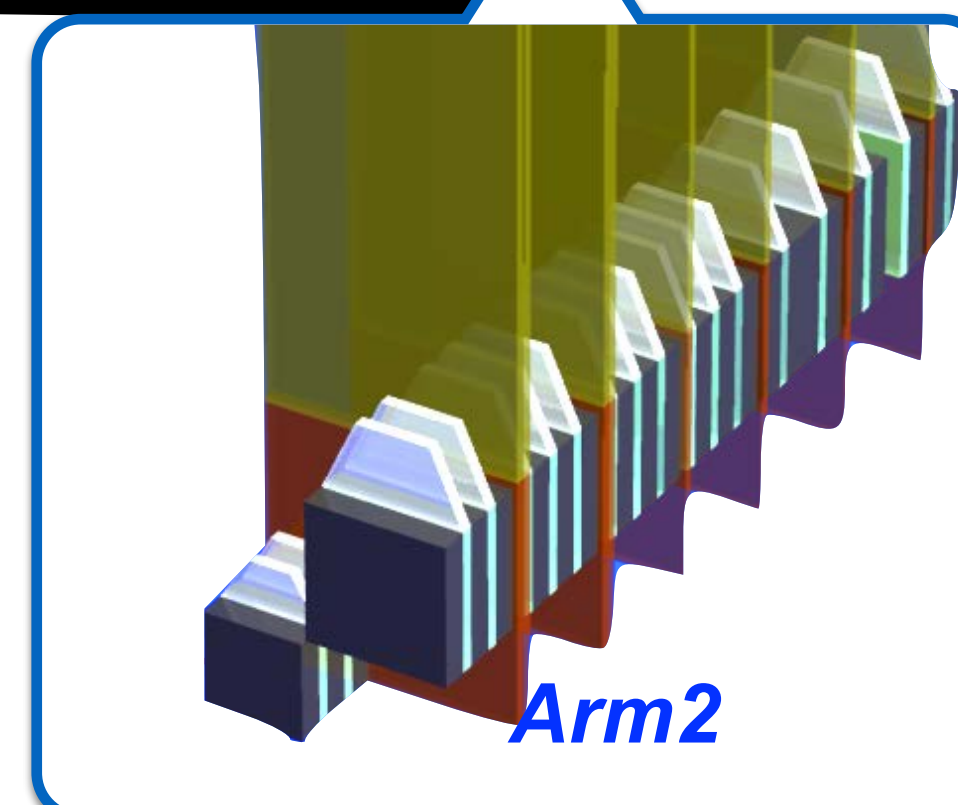
LHC forward (LHCf)実験



Arm1

Location

- ▶ ATLAS 衝突点
- ▶ IPから +/- 140m
- ▶ pseudo rapidity $\eta > 8.4$
($\theta < 0.35$ mrad)

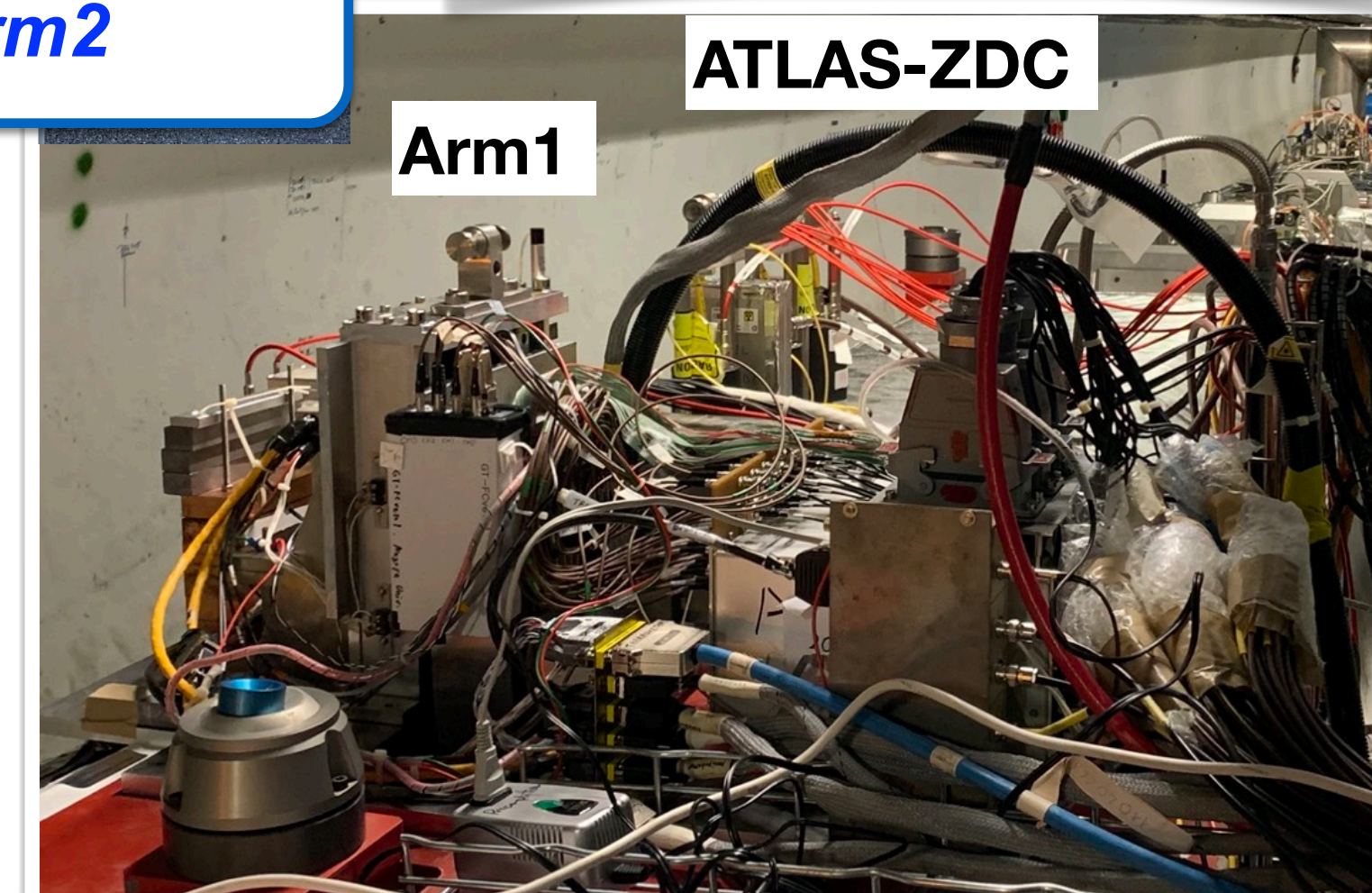


Arm2



LHCf 検出器

- ▶ サンプリングカロリメータ
- ▶ 20x20, 40x40mm² (Arm1) , 25x25, 32x32mm²(Arm2)
- ▶ タングステン, GSOシンチレータ 16層, 位置検出層 4層
(Arm1: GSO bar X-Yホドスコープ, Arm2: シリコン検出器)
- ▶ 検出器厚さ: 44 r.l. / 1.7 λ



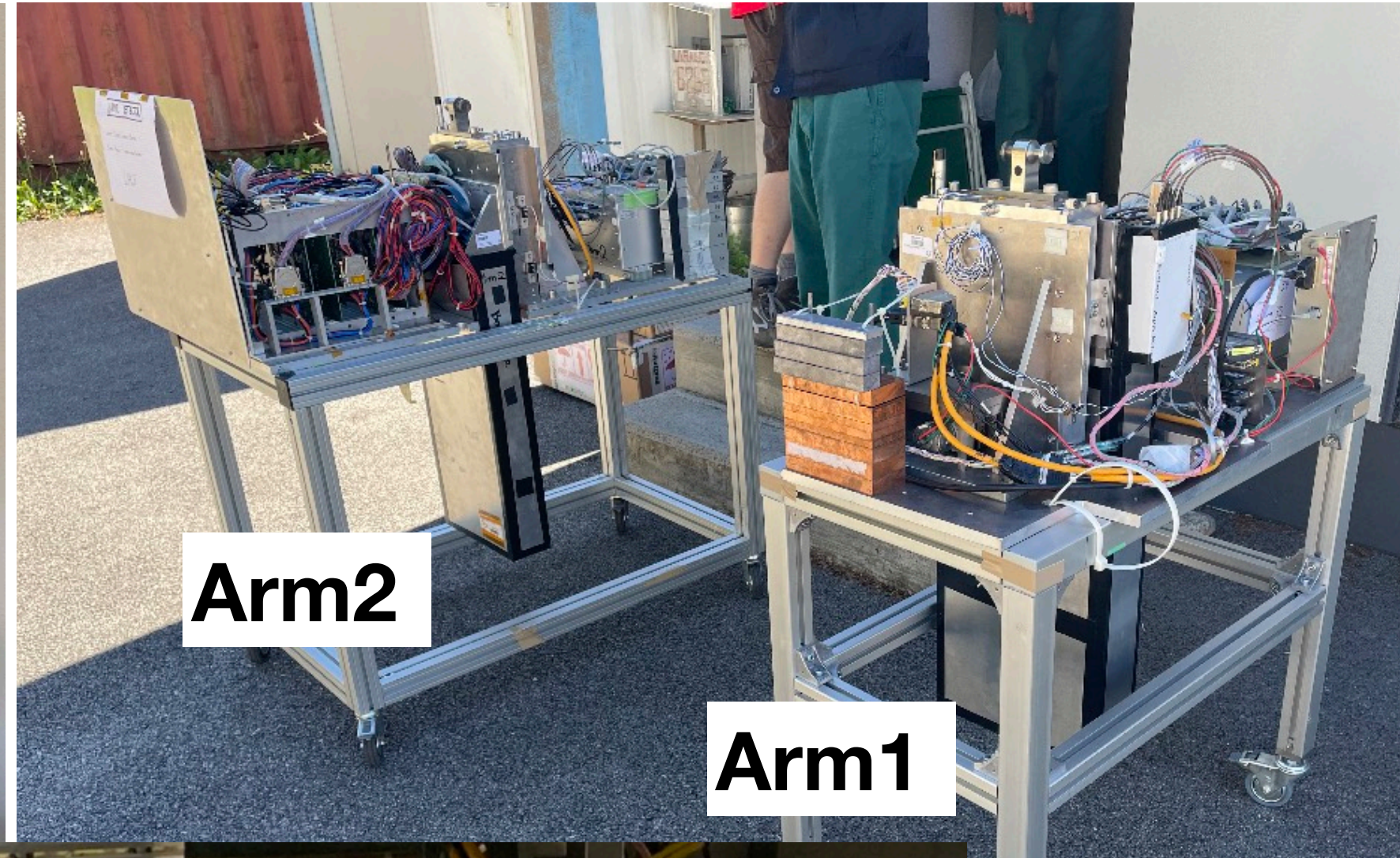
LHCf 測定

Preparation



Arm2

Arm1



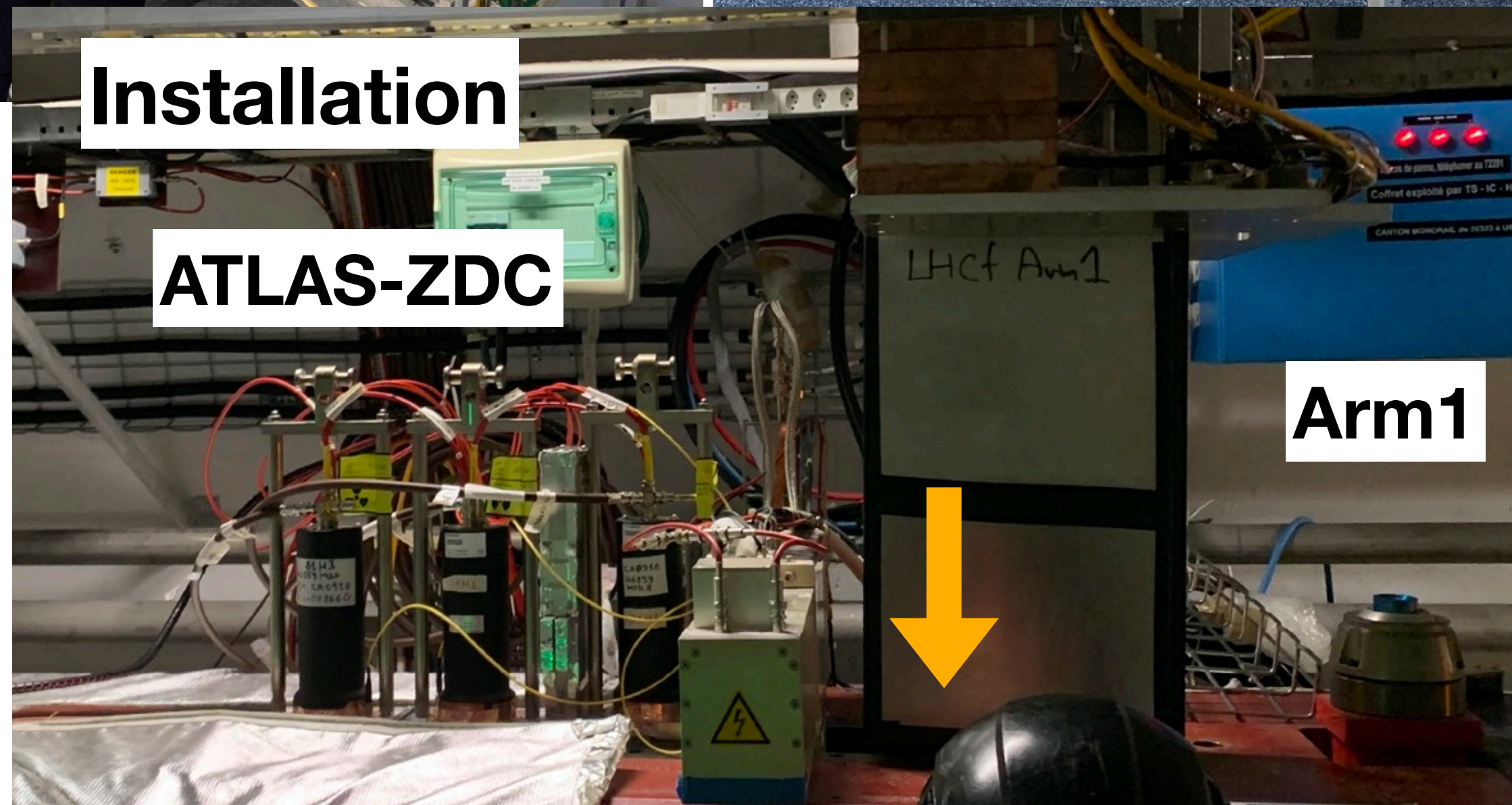
低ルミノシティの Special Run時に測定

- 放射線損傷を避ける
 - イベントのPile upを避ける
- 測定毎に検出器の設置、取り外し

Installation

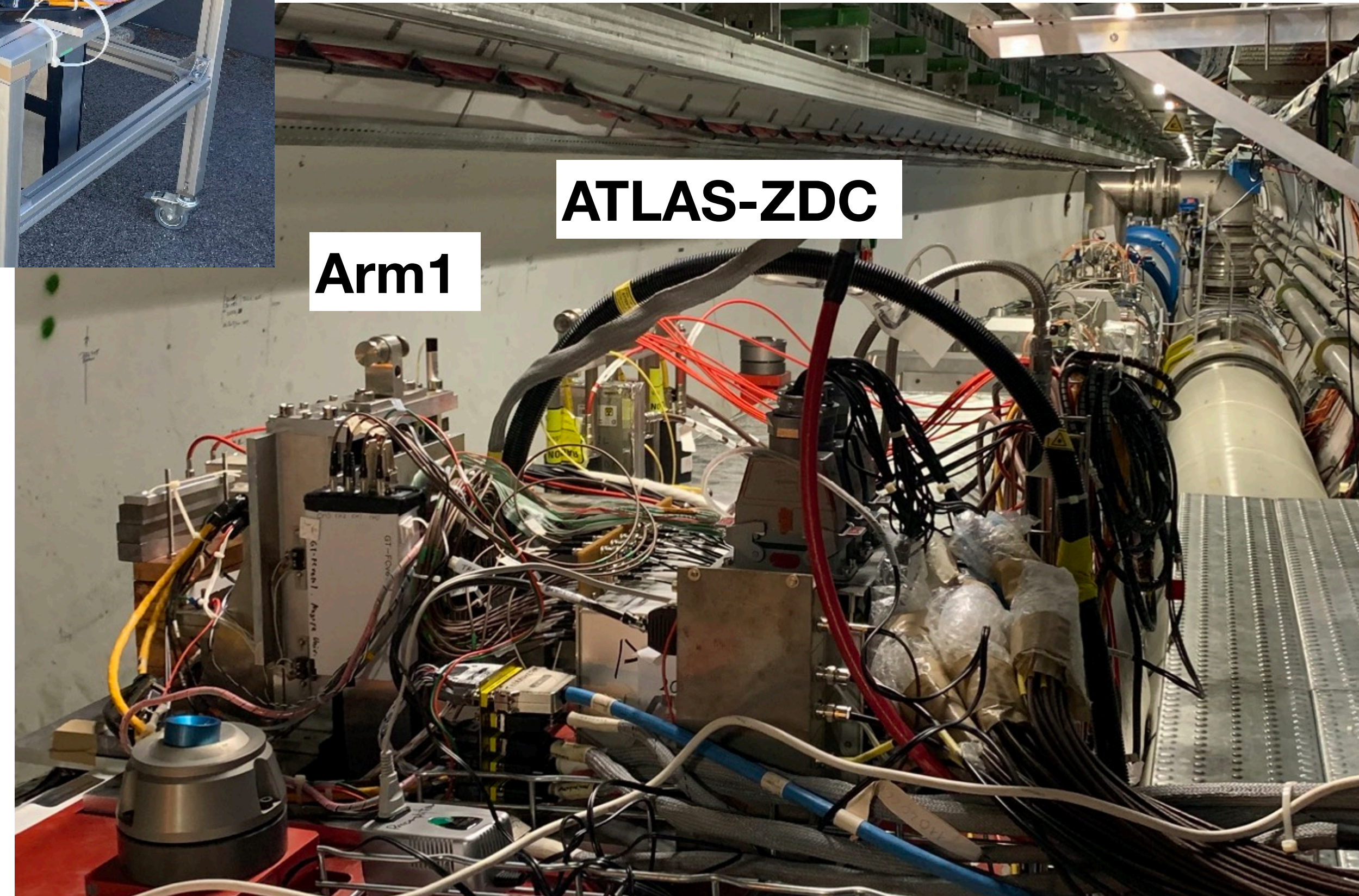
ATLAS-ZDC

Arm1

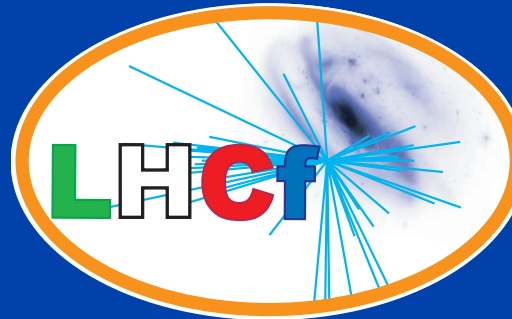


ATLAS-ZDC

Arm1

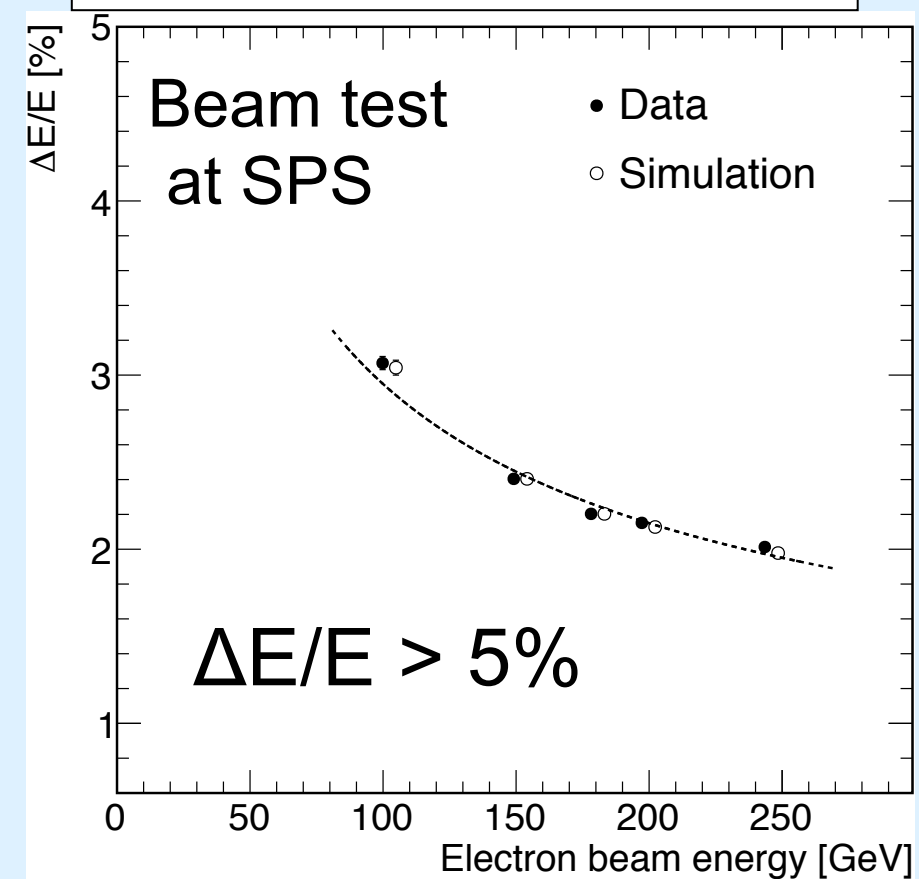


Detector Performances

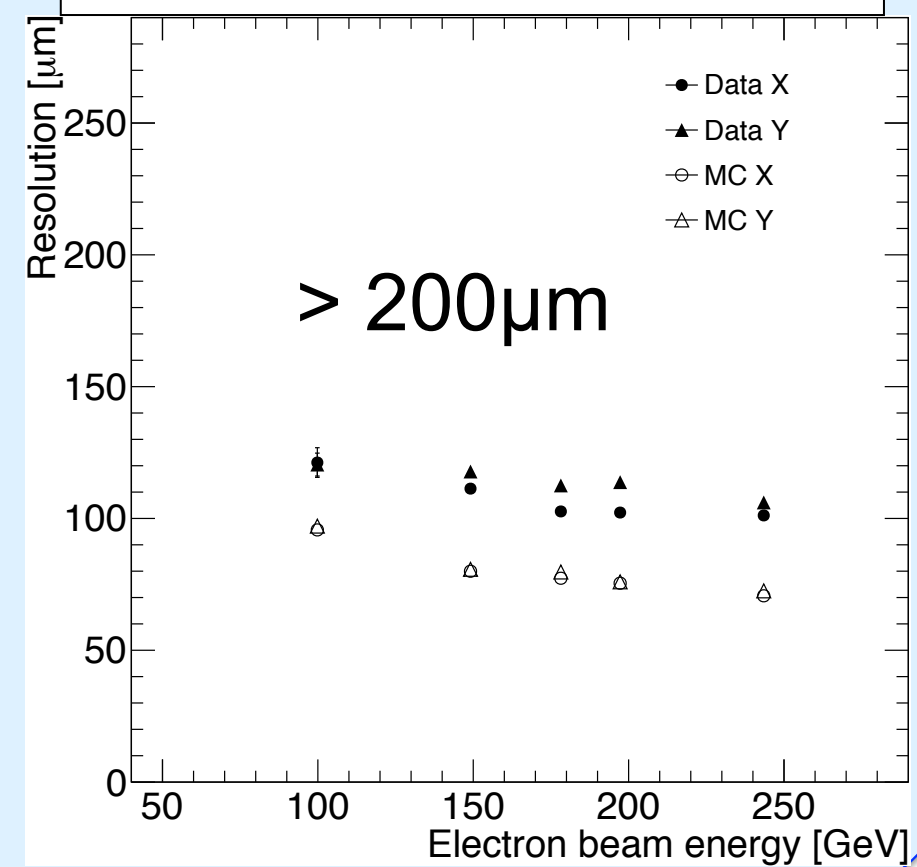


EM showers

Energy resolution

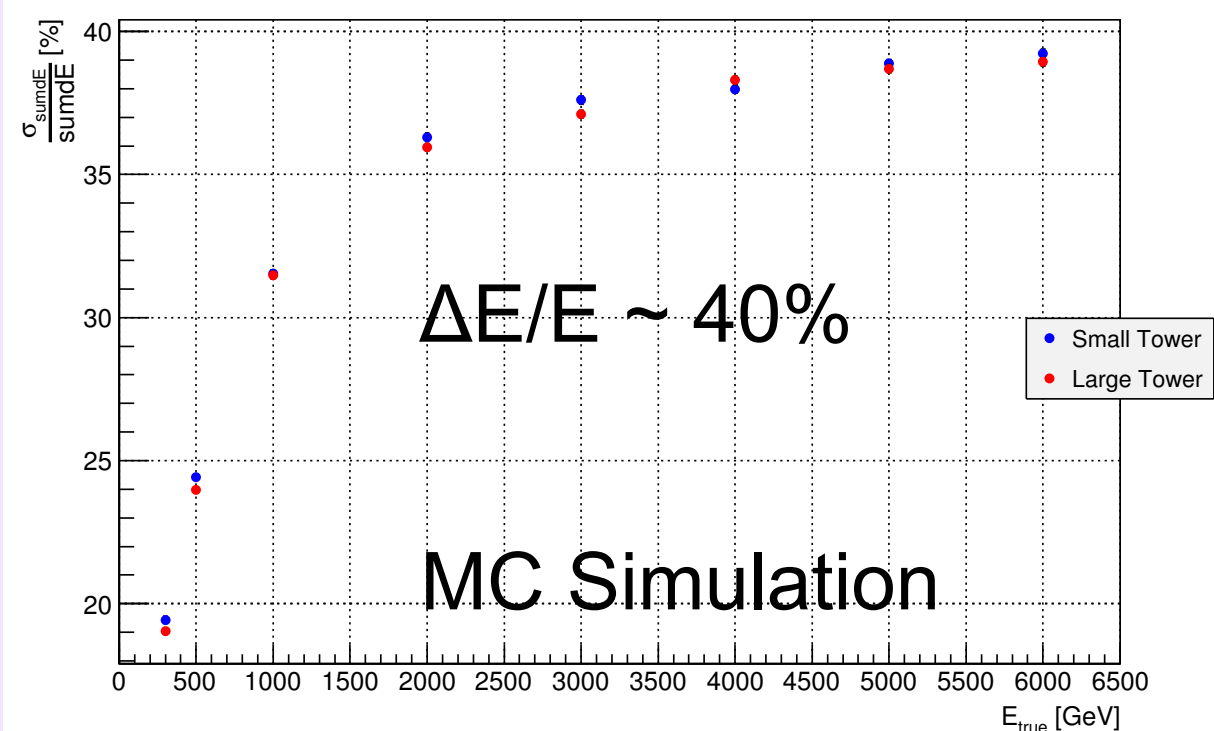


Position resolution

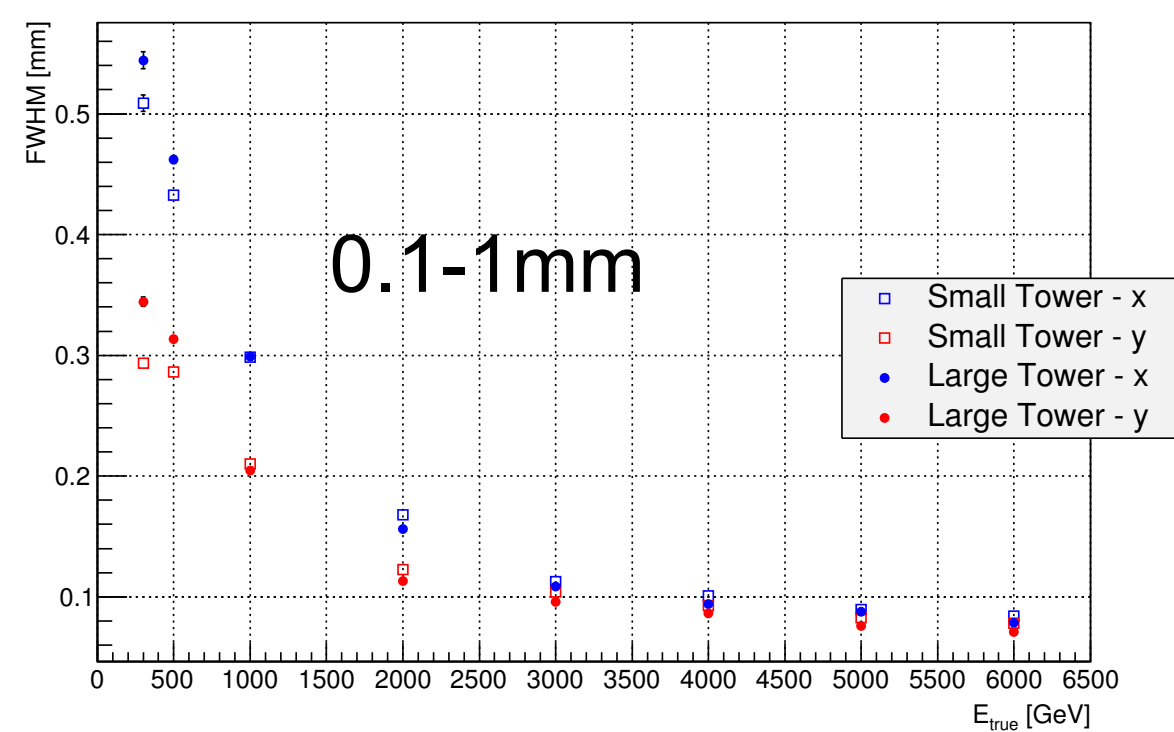


Had. showers

Energy resolution

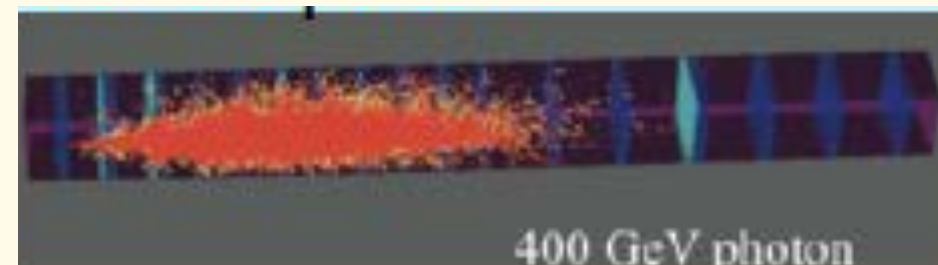


Position resolution

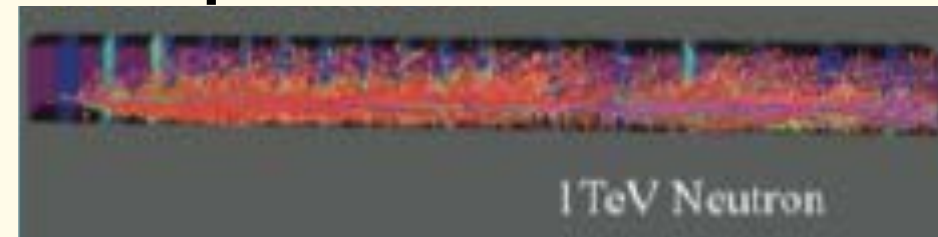


PID

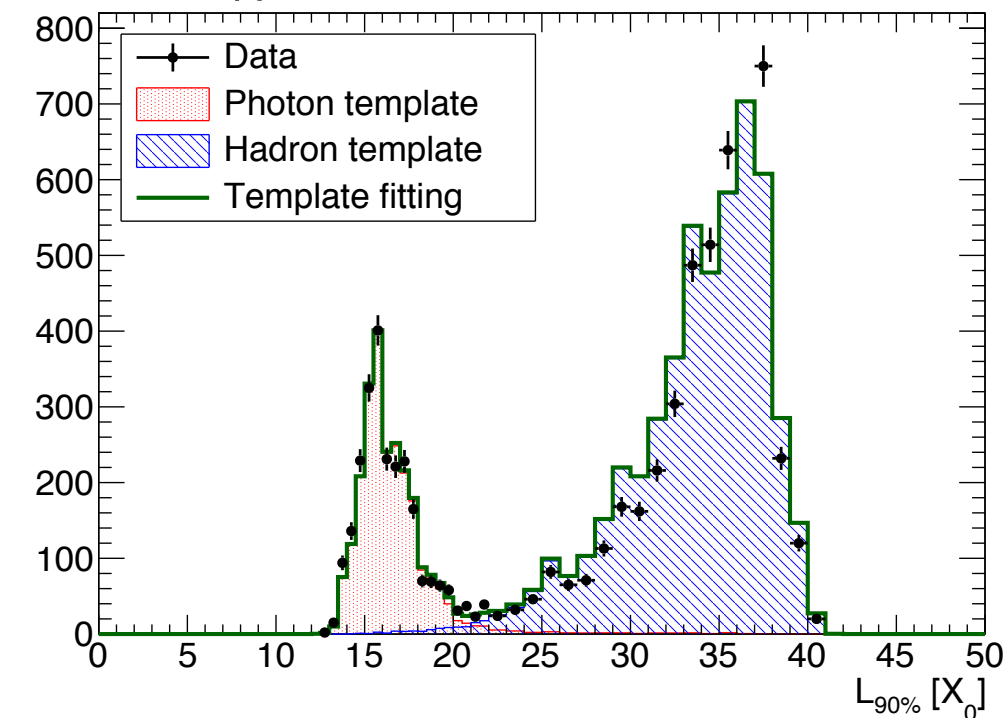
400 GeV photon



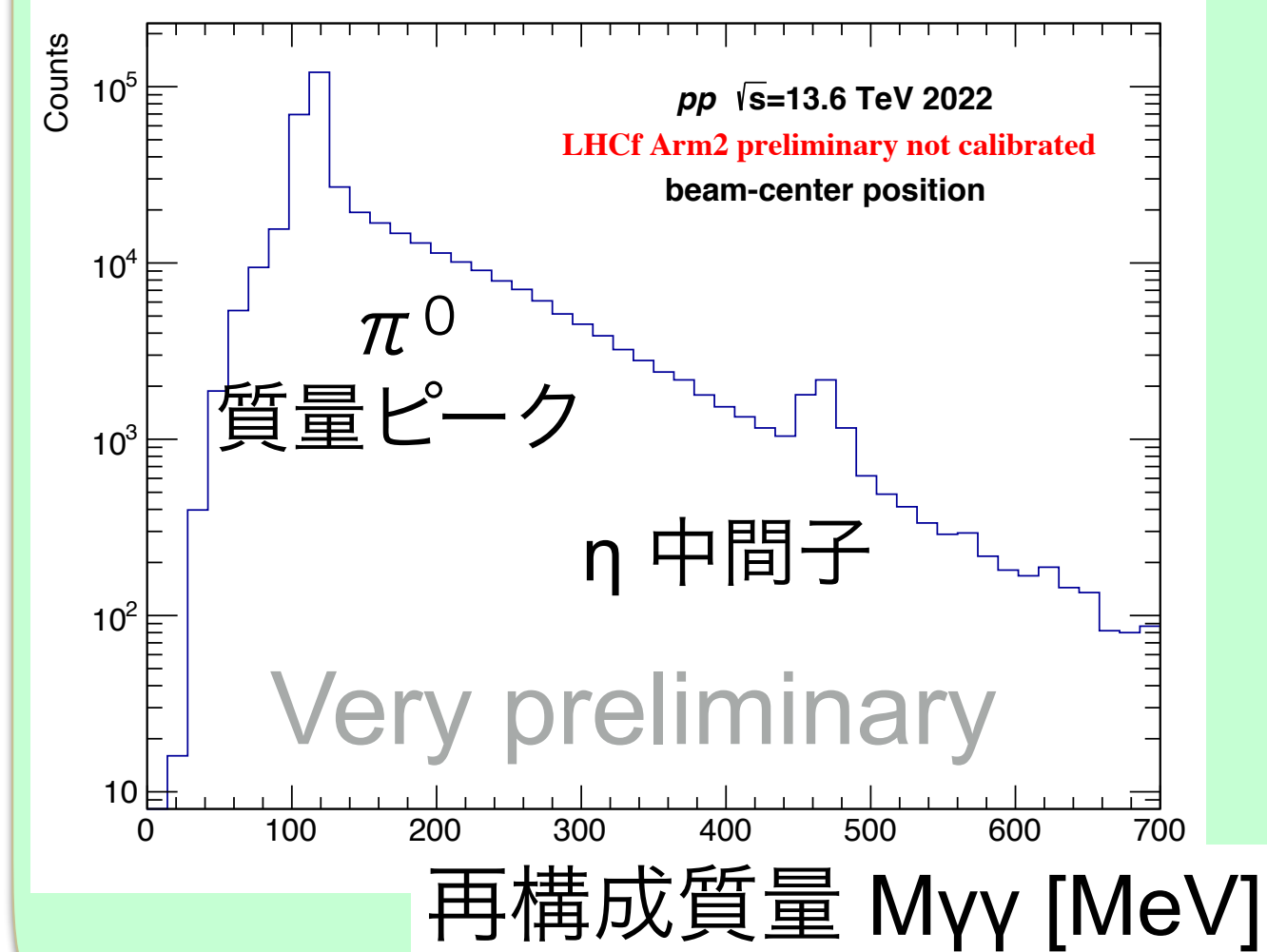
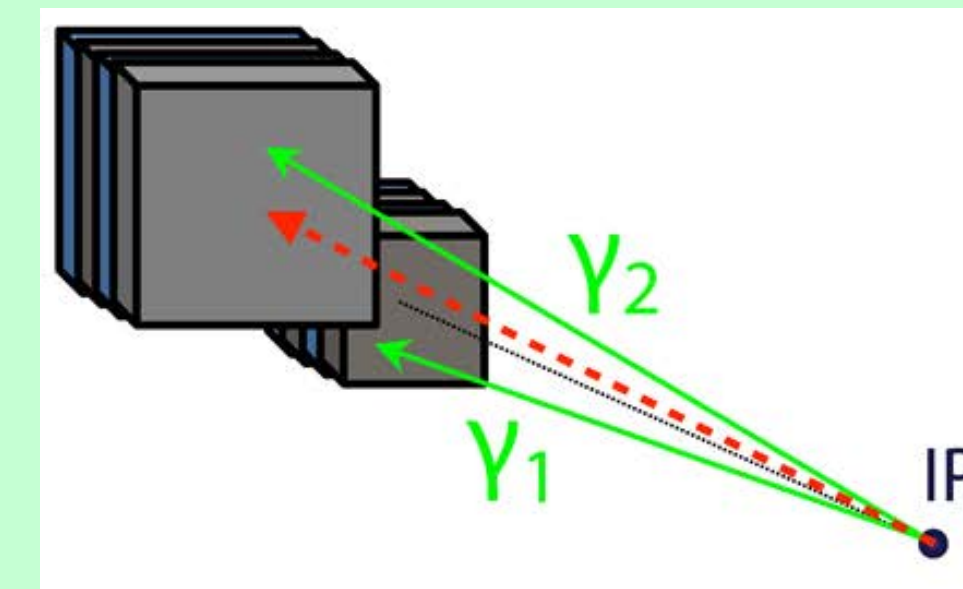
1TeV photon



L90% distribution



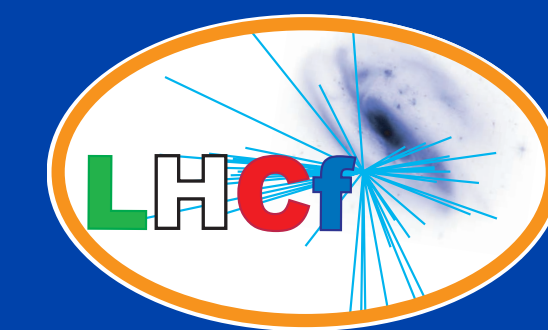
π⁰再構成



LHCf/RHICf オペレーションと解析まとめ

Run	E_{lab} (eV)	Photon	Neutron	π^0	LHCf-ATLAS joint analysis
p-p $\sqrt{s}=0.9\text{TeV}$ (2009/2010)	4×10^{14}	PLB 715, 298 (2012)		-	
p-p $\sqrt{s}=2.76\text{TeV}$ (2013)	4×10^{15}			PRC 86, 065209 (2014)	PRD 94 032007 (2016)
p-p $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ (2010)	3×10^{16}	PLB 703, 128 (2011)	PLB 750 360 (2015)	PRD 86, 092001 (2012)	
p-p $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ (2015)	9×10^{16}	PLB 780, 233 (2018)	JHEP 2018, 73 (2018) JHEP 2020, 016 (2020)	preliminary	
p-p $\sqrt{s}=13.6\text{TeV}$ (2022)	1×10^{17}	← New!!			Photon in diffractive coll. Preliminary: ATLAS-CONF-2017-075
p-Pb $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5\text{TeV}$ (2013,2016)	1.4×10^{16}			PRC 86, 065209 (2014)	
p-Pb $\sqrt{s_{\text{NN}}}=8\text{TeV}$ (2016)	3×10^{16}	preliminary			
RHICf p-p $\sqrt{s}=510\text{GeV}$ (2017)	1.4×10^{14}	Submitted ArXiv:2203.15416		Spin Asymmetry PRL 124 252501 (2021)	with STAR

超前方中性子測定

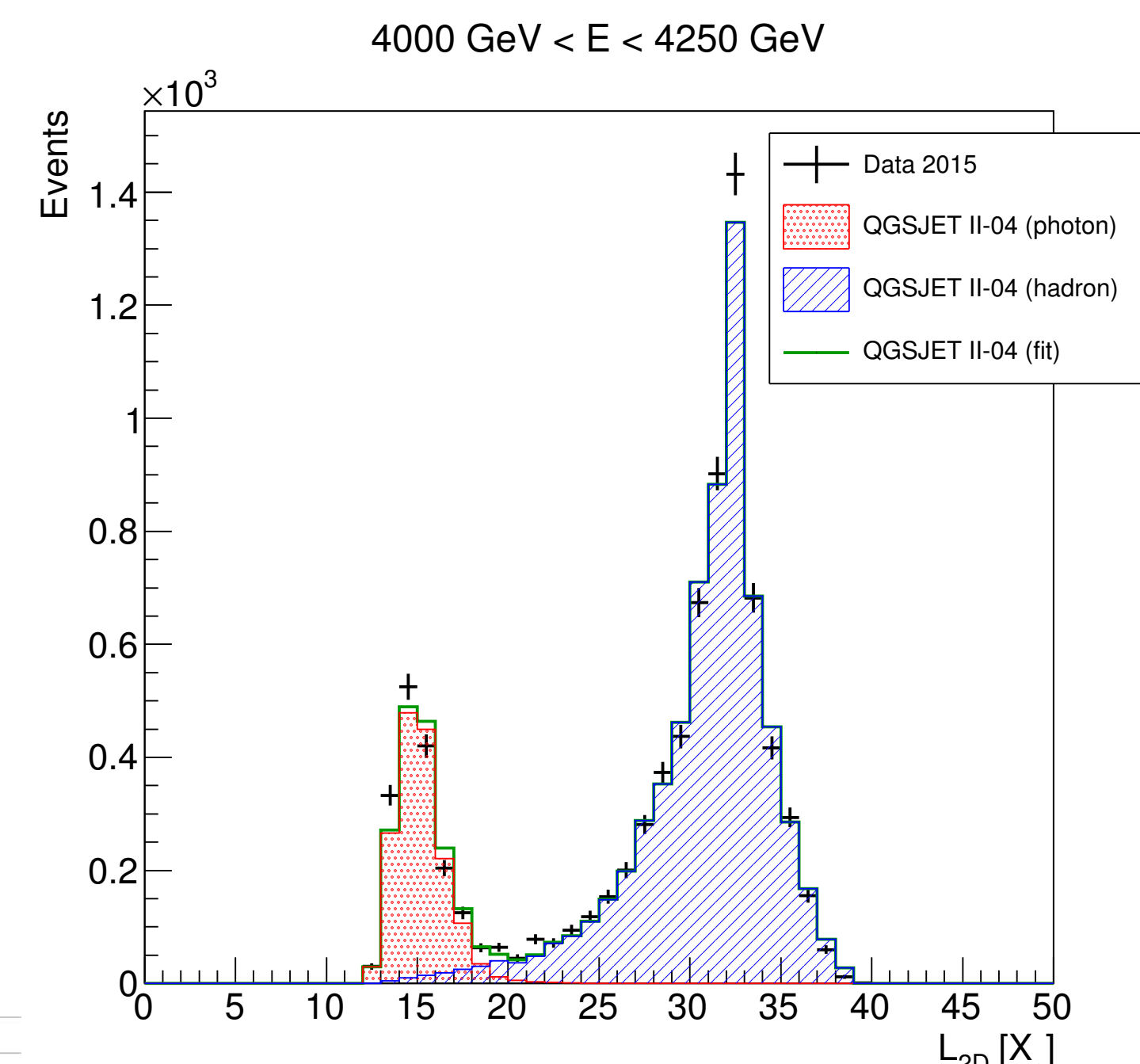
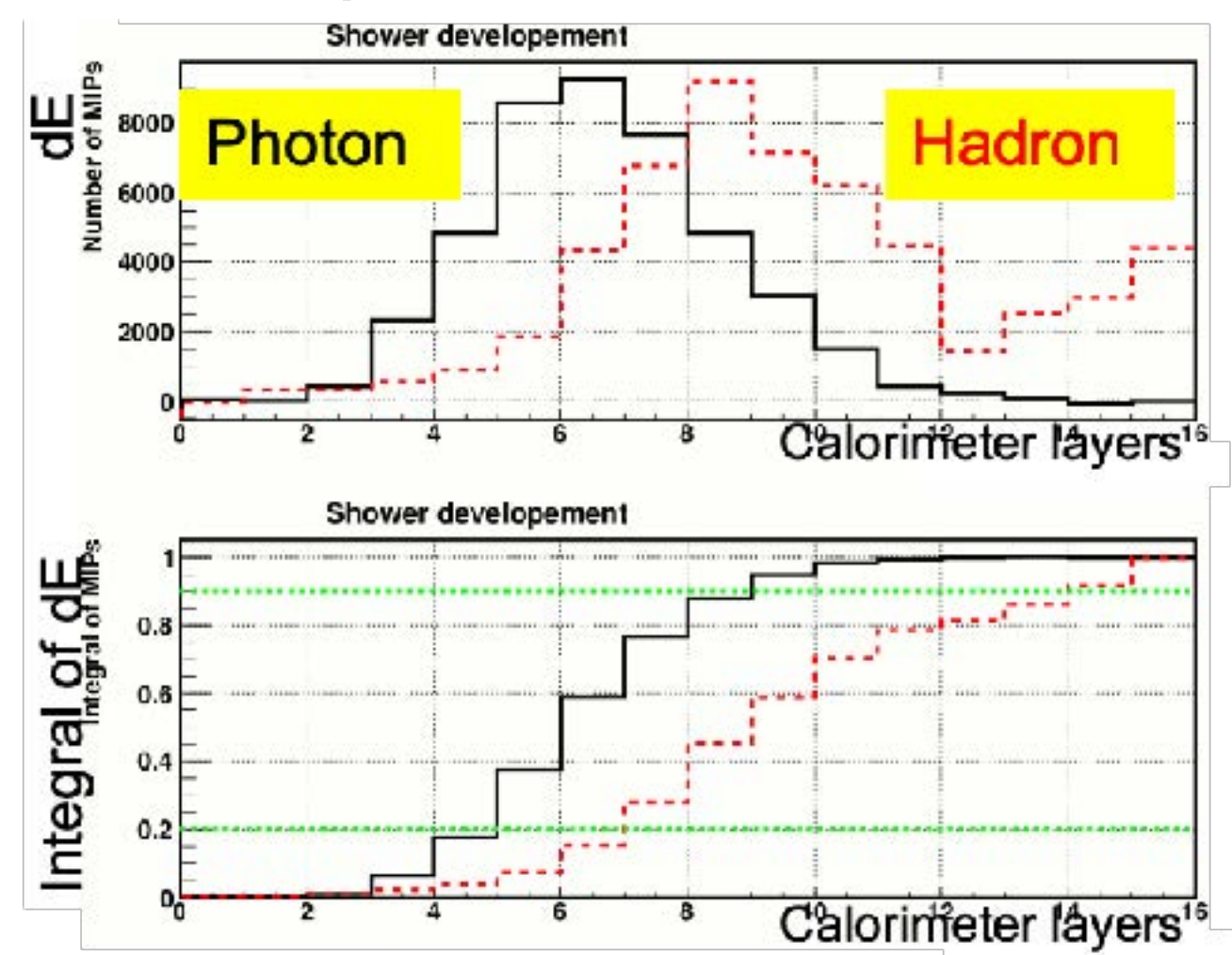


■ 中性子測定の意義

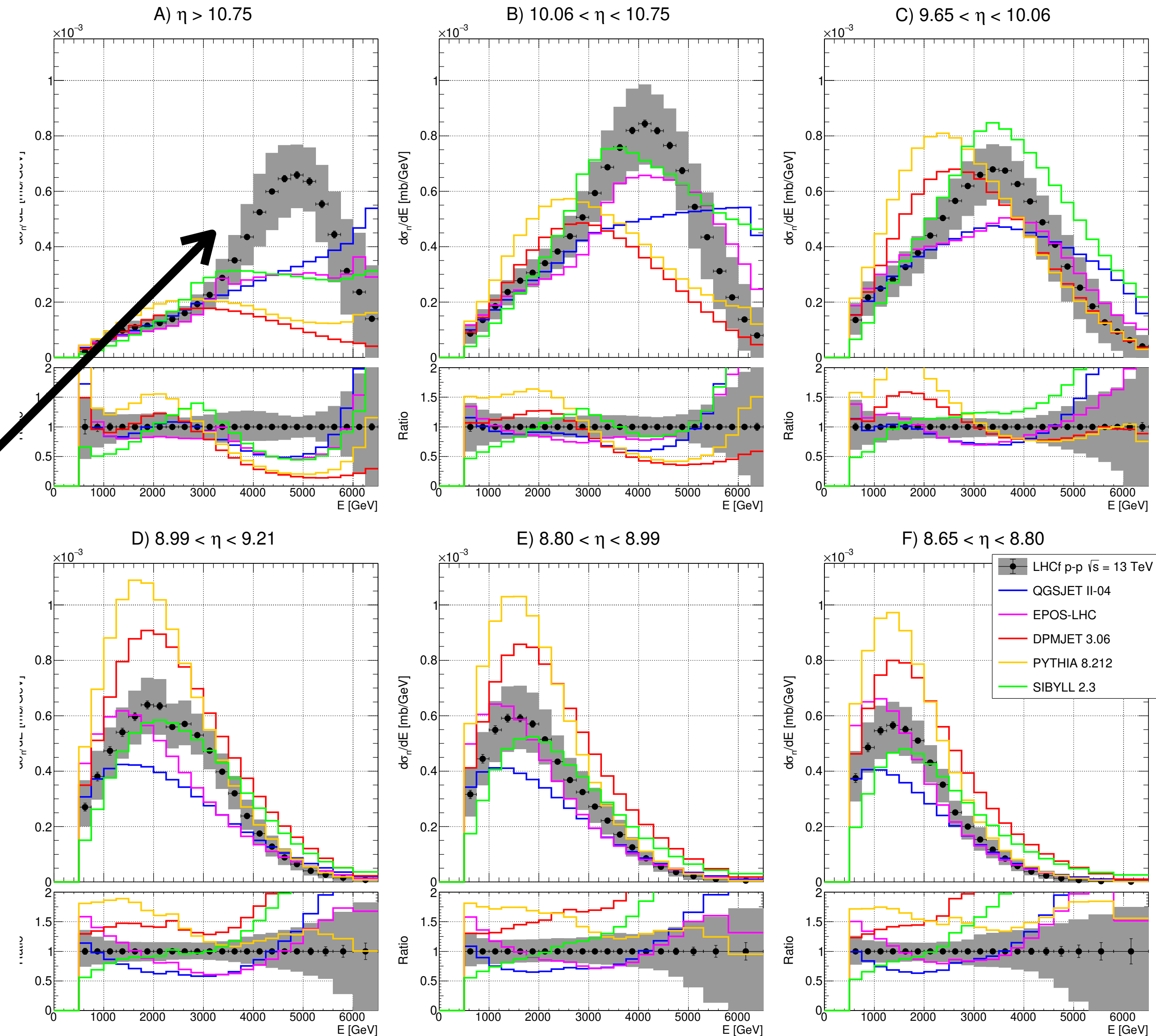
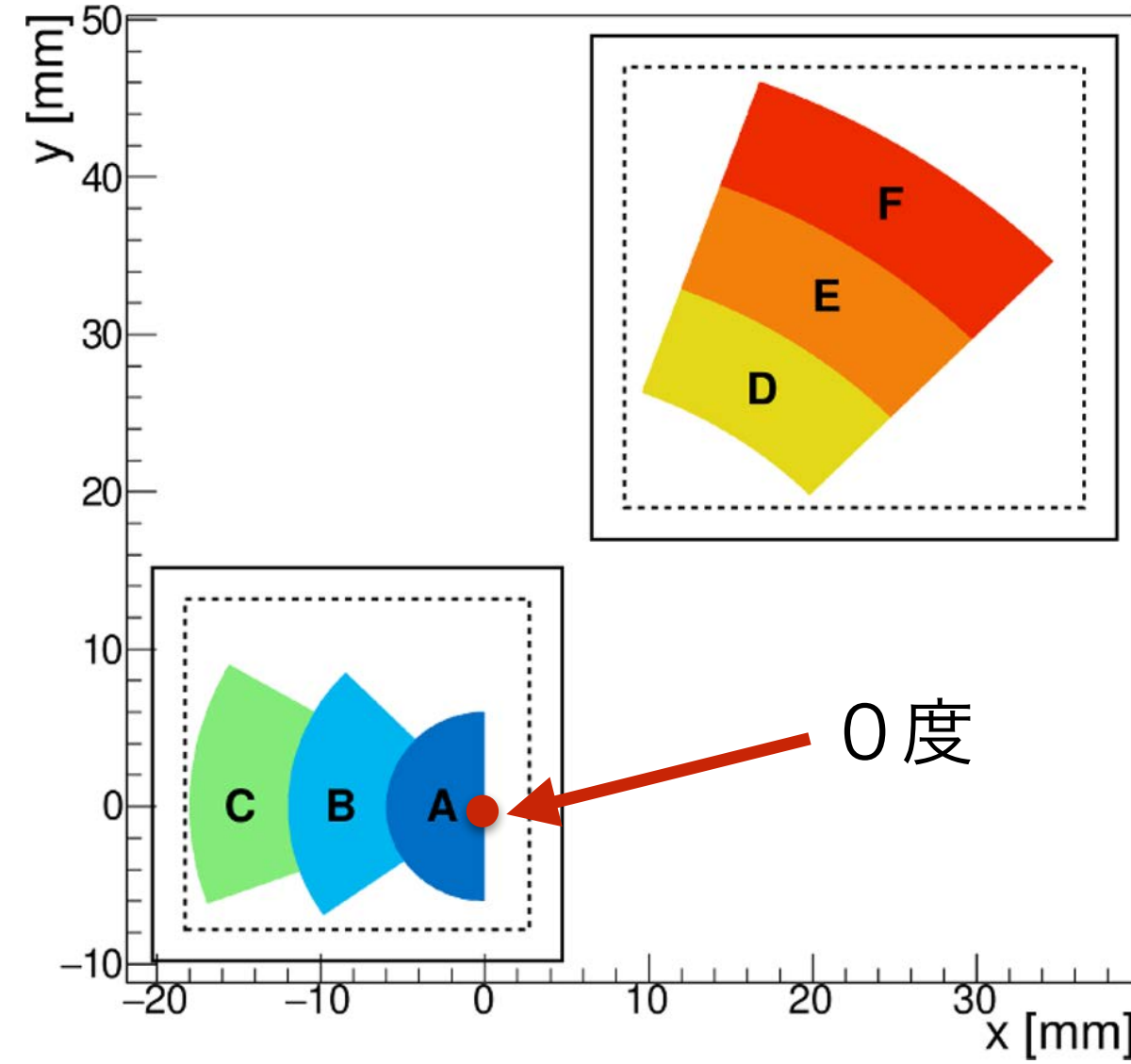
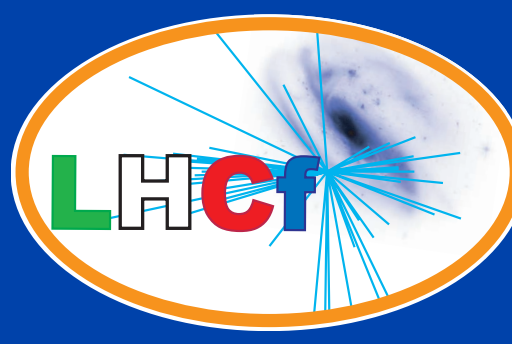
- リーディング粒子を測定することで被弾性度($1 - k_n$: 粒子生成に使われるエネルギーの割合)の測定が可能。

■ 解析

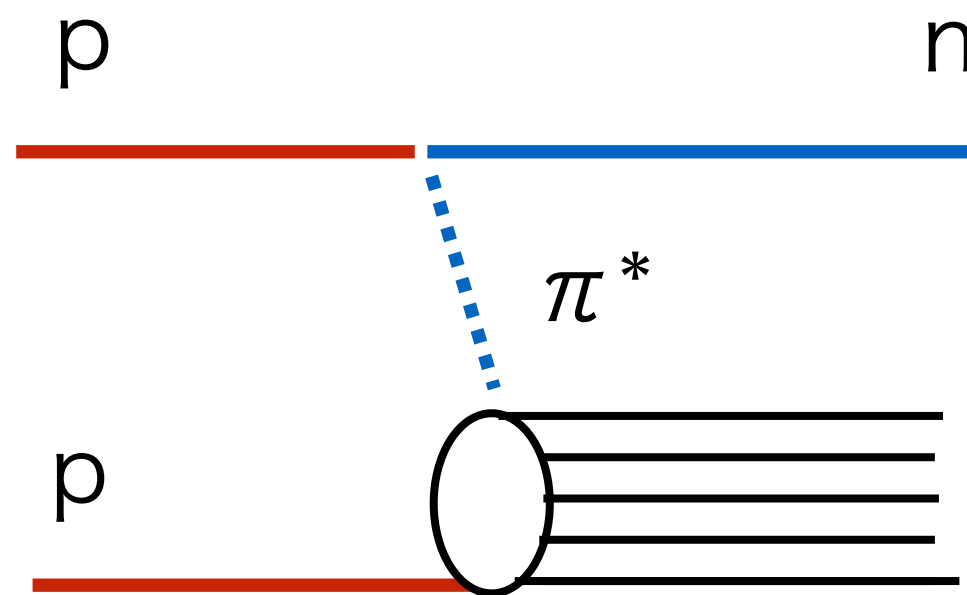
- データ: pp, $\sqrt{s} = 13$ TeV, Arm2 検出器を使用
- PID: EMシャワーとの縦方向発達の違いを利用。
- Λ^0 , K^0_L のコンタミはMCで推定して差っ引く
- Unfolding でエネルギー分解能(40%)の補正



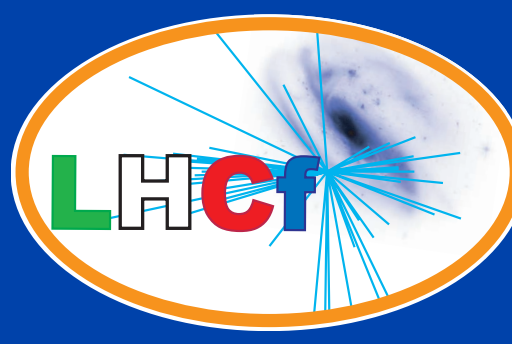
中性子測定結果 $pp \sqrt{s}=13 \text{ TeV}$



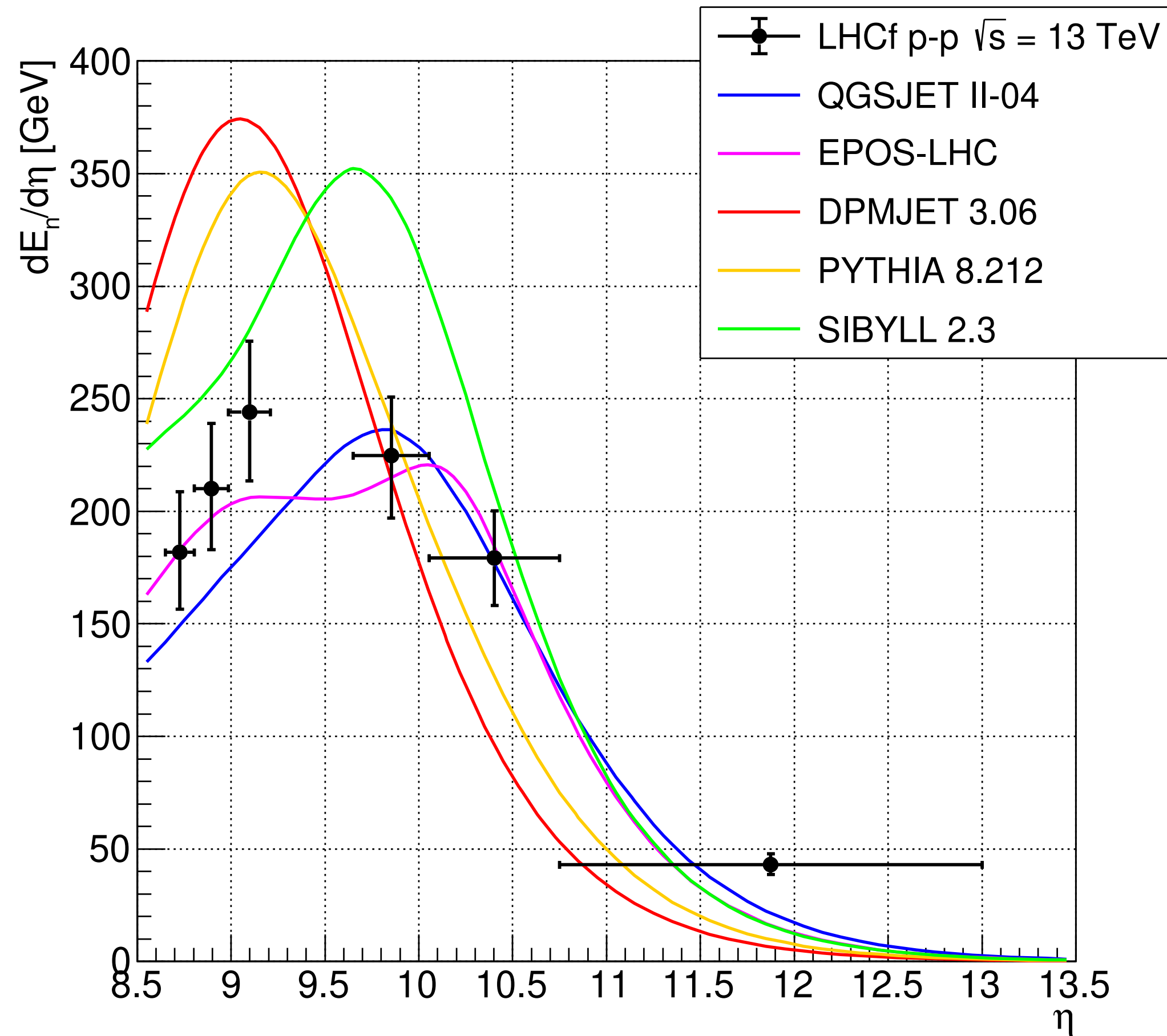
One-Pion-Exchange (OPE)による中性子生成ピーク



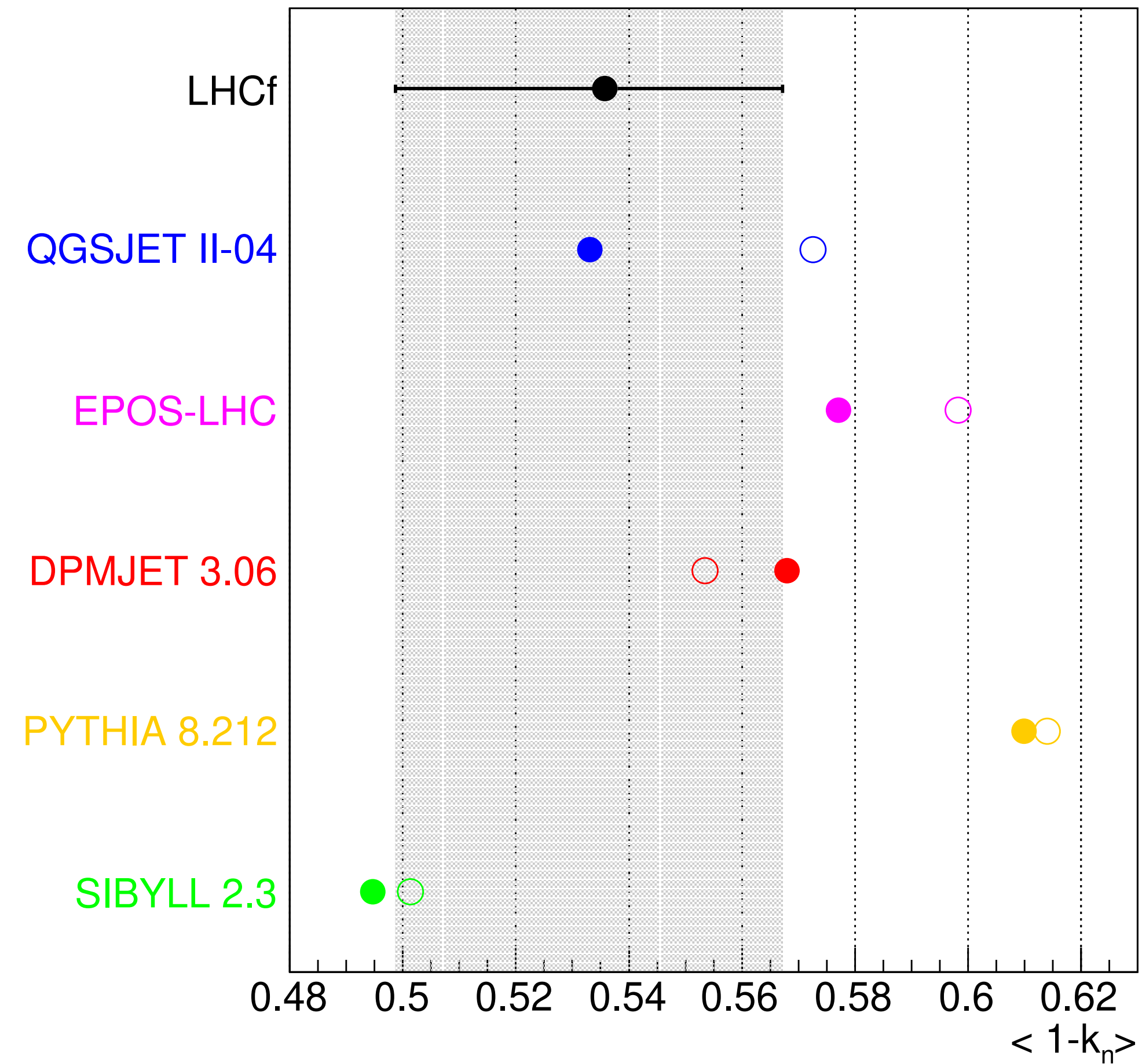
中性子測定結果 pp $\sqrt{s}=13$ TeV



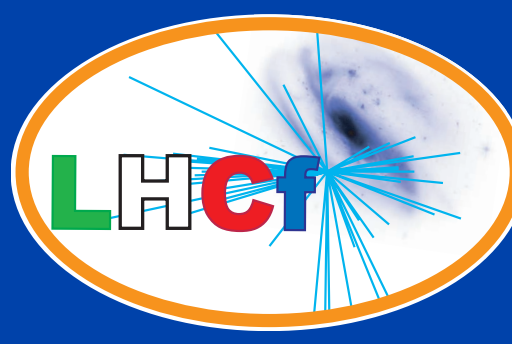
エネルギー流量



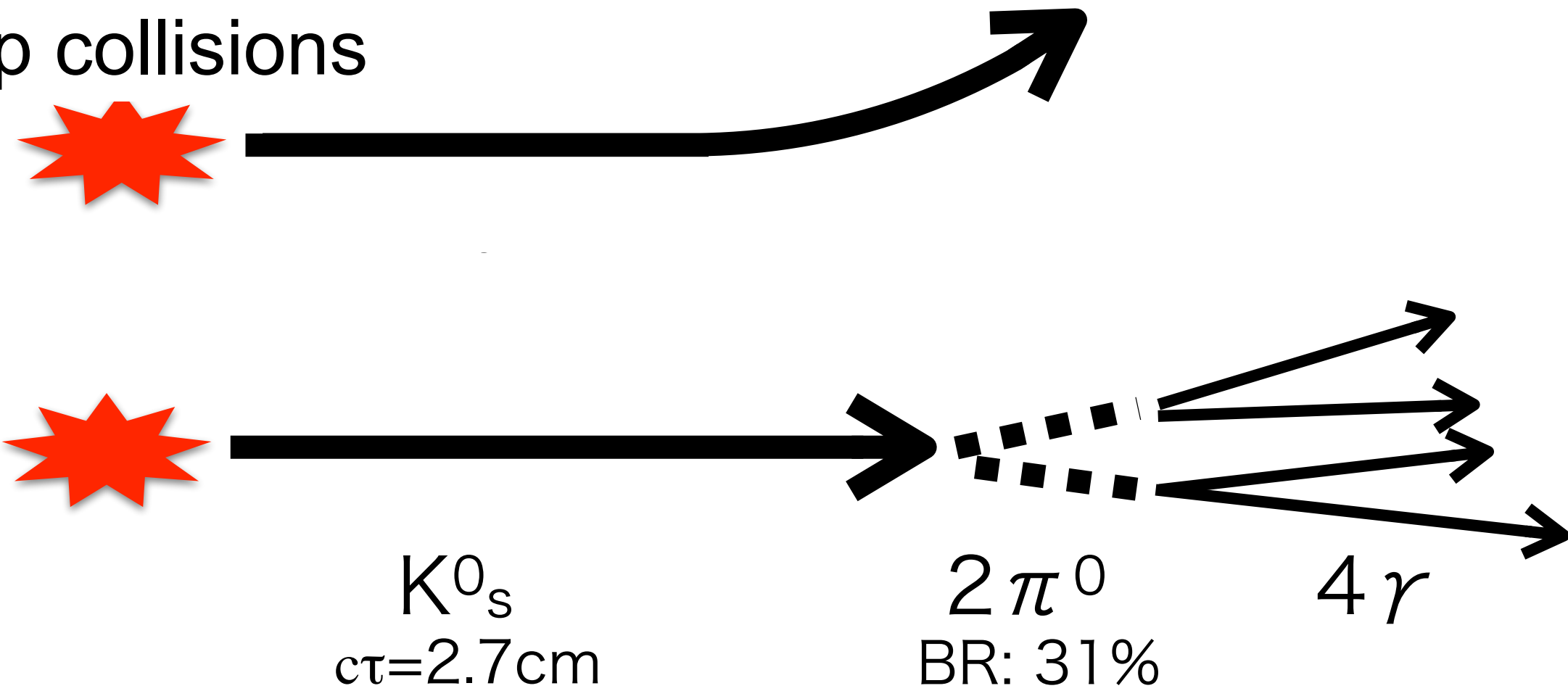
被弾制度



超前方ストレンジ粒子の測定



pp collisions



K^\pm **X** D1の磁場で曲げられて入射しない。

K^0

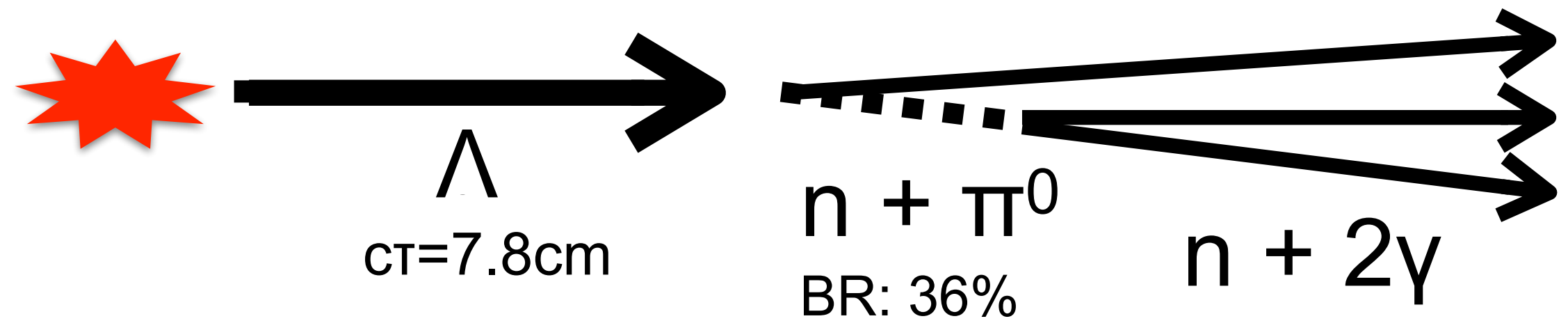
K^0_s はIPと検出器の間で崩壊

$K^0_s \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$

アクセプタンスが小さいため

高統計データが必要 → 2022年測定

Other channels

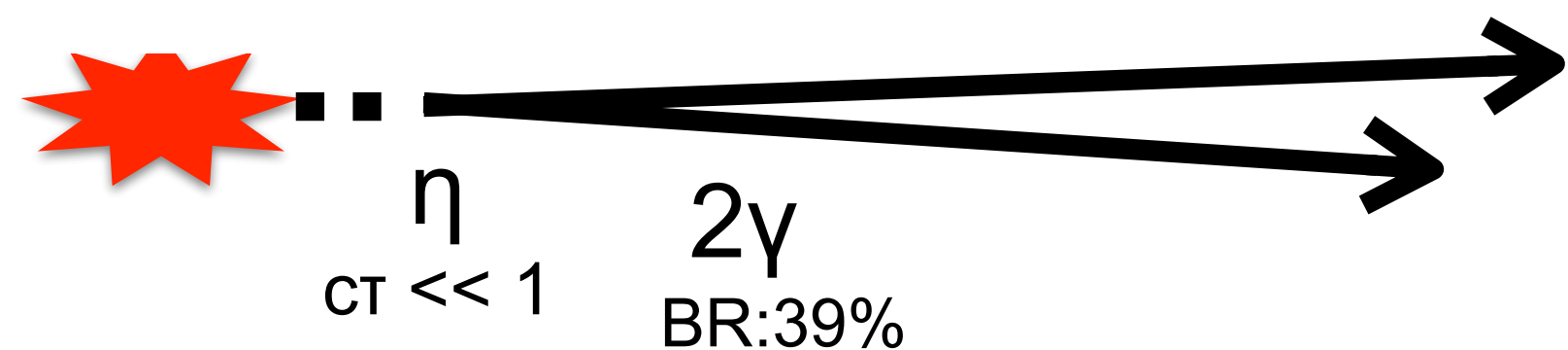


Λ
(uds)

IPと検出器の間で崩壊

$\Lambda \rightarrow n + \pi^0 \rightarrow n + 2\gamma$

電磁シャワーとハドロンシャワーの同時再構成が必要。



η
($u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}$)

π^0 と同様の解析手法が使える

η 中間子測定の意味

■ η 中間子の特徴

- $M_\eta = 547 \text{ MeV}$ ($\leftrightarrow M_{\pi^0} = 135 \text{ MeV}$)
- 主な崩壊モード ($c\tau \ll 1$)

- $\eta \rightarrow 2\gamma$ (BR=39%)
- $\eta \rightarrow 3\pi^0$ (BR=33%)
- $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (BR=23%)

空気シャワー中では
電磁成分を形成

- クォーク構成

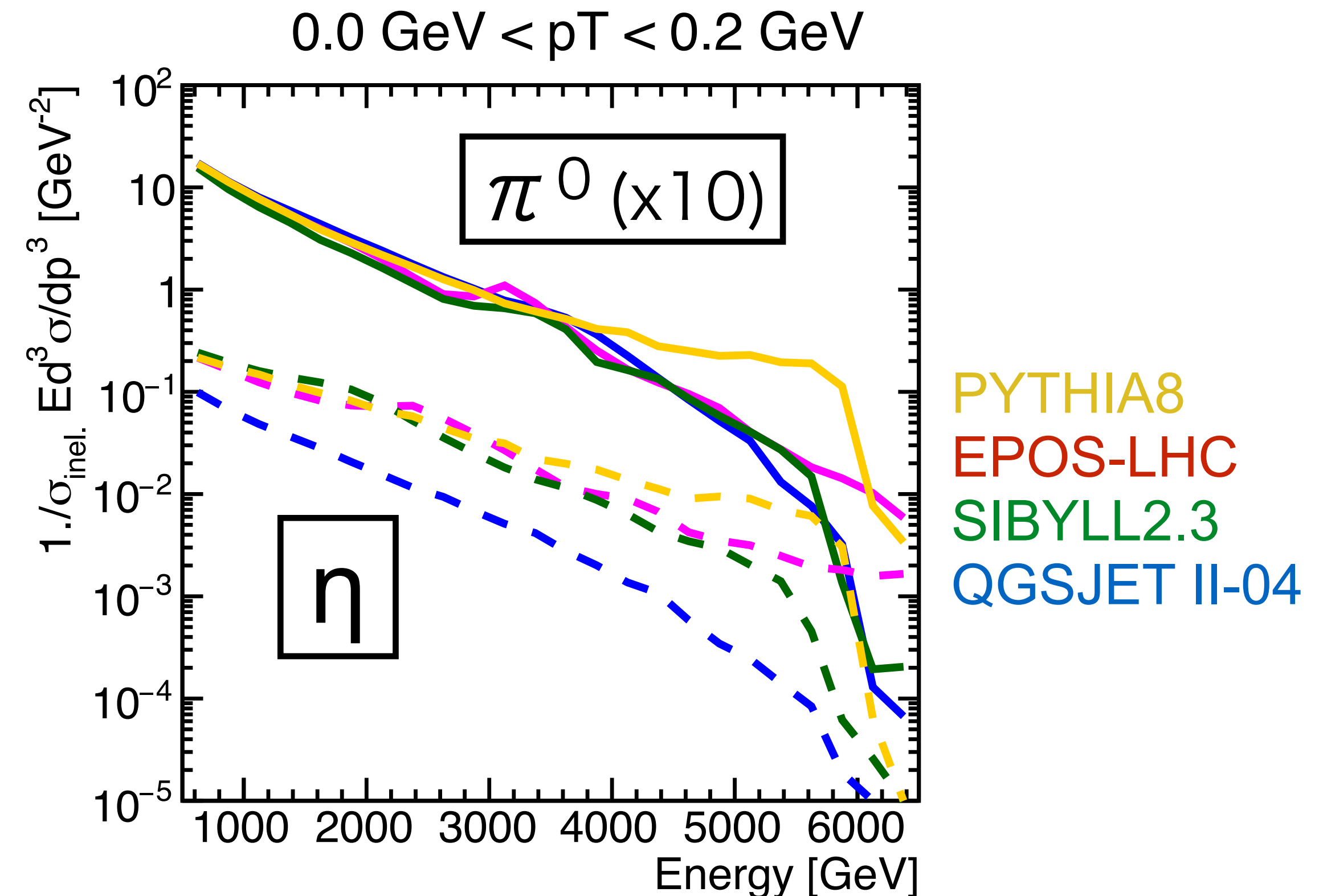
$$(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})/\sqrt{6}$$

sクォーク生成の間接的なプローブ

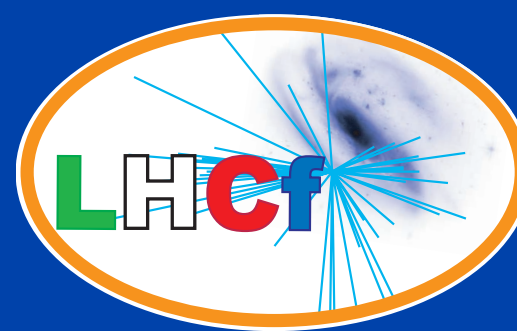
→ sを含む代表的な中間子 Kは
空気シャワー中のミュオン生成に寄与

■ η 中間子の生成

- 生成断面積： π^0 の約20%
- ハドロン相互作用モデル間で大きな違い



η中間子の解析手法



■ データ

- 2015年陽子陽子衝突
- Arm2検出器のπ⁰トリガー事象

■ 解析手法 (=π⁰解析)

- 光子が各カロリメータタワーに入射
- 再構成質量を用いてη事象を選別

事象再構成

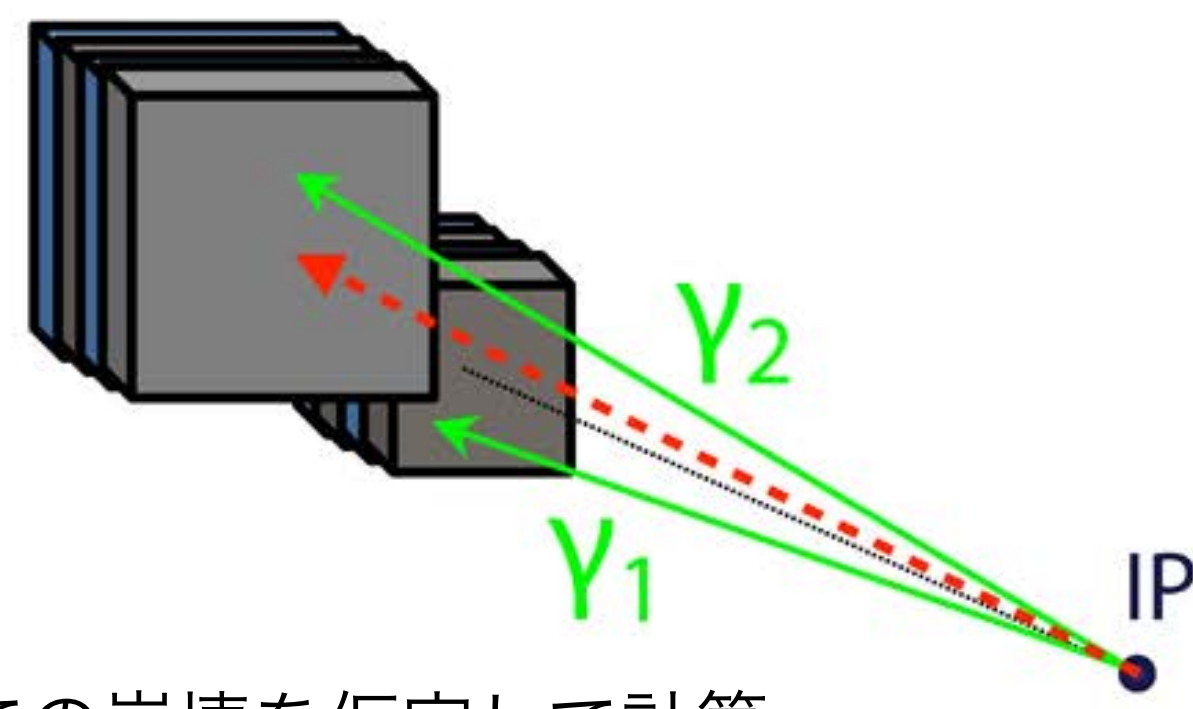
$$E_{\eta} = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}$$

$$M_{\gamma\gamma} = \theta \sqrt{E_{\gamma_1} E_{\gamma_2}}$$

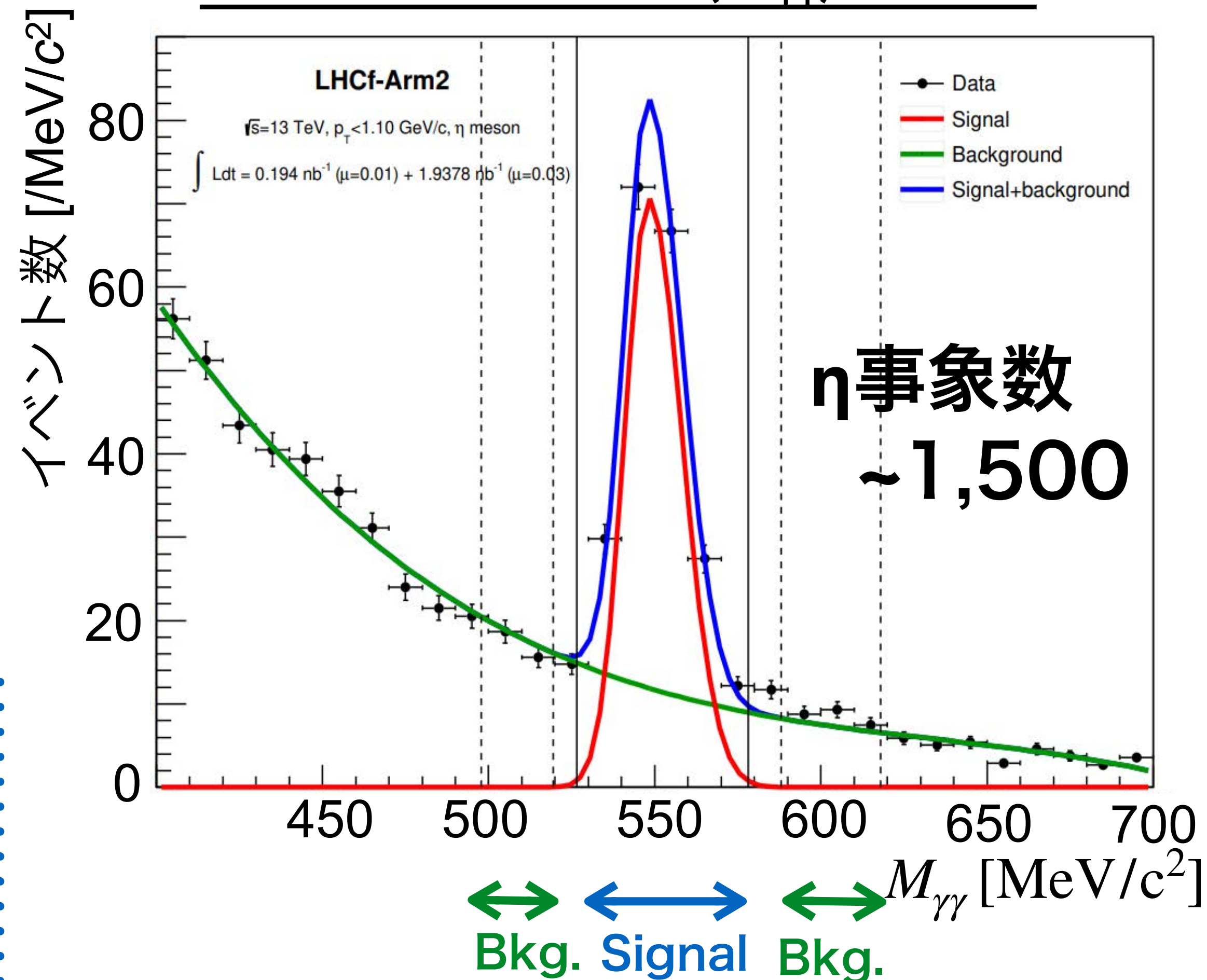
$E_{\gamma_1}, E_{\gamma_2}$: 光子エネルギー

θ : 2光子の開口角。

検出器入射位置とIPでの崩壊を仮定して計算

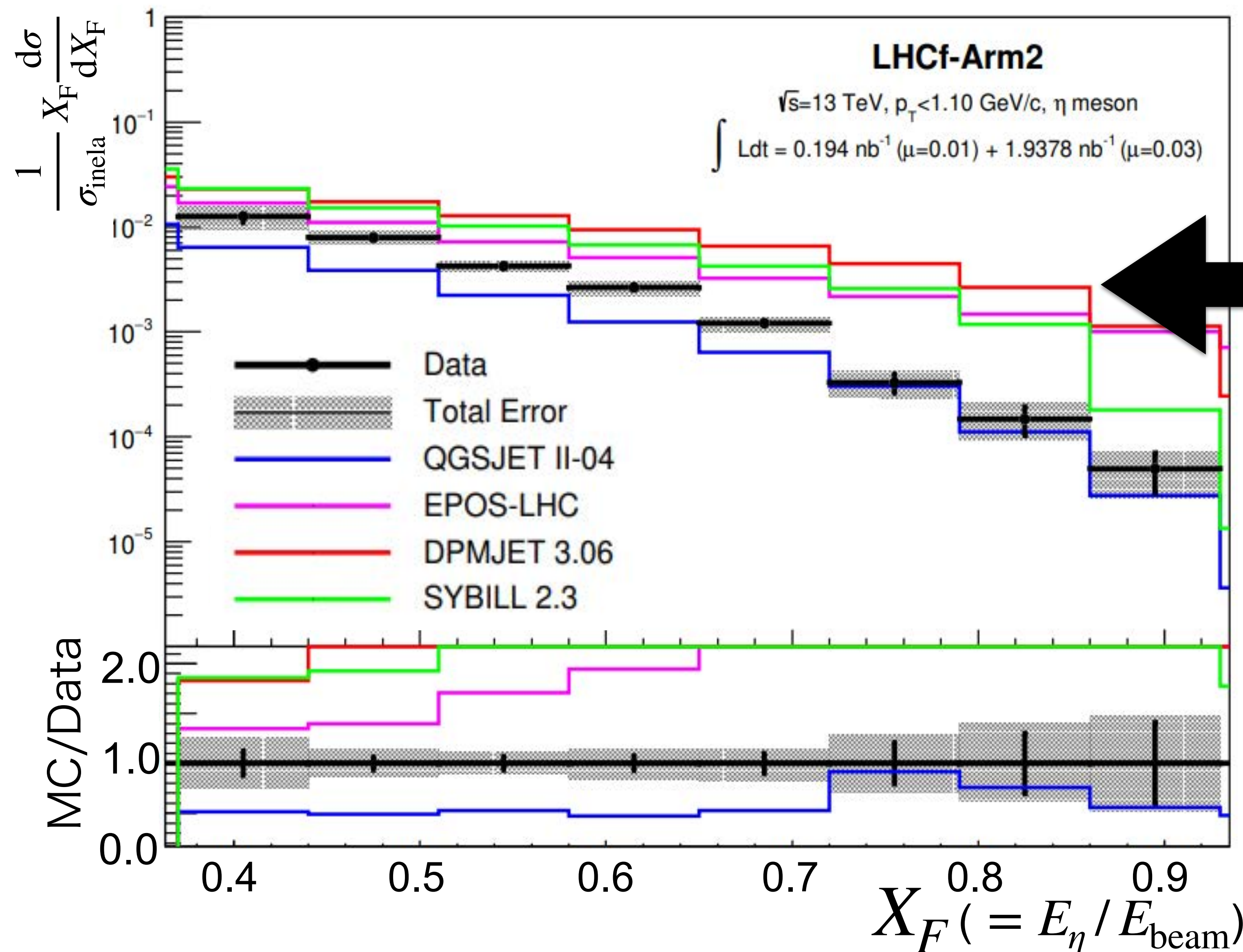
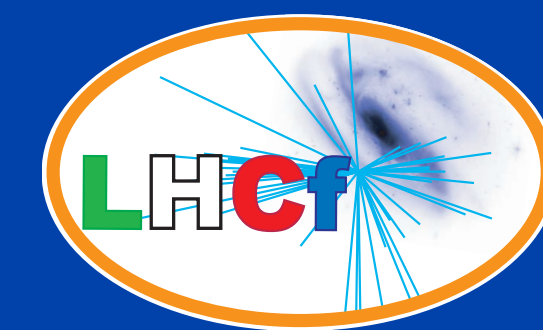


2光子再構成質量($M_{\gamma\gamma}$)の分布

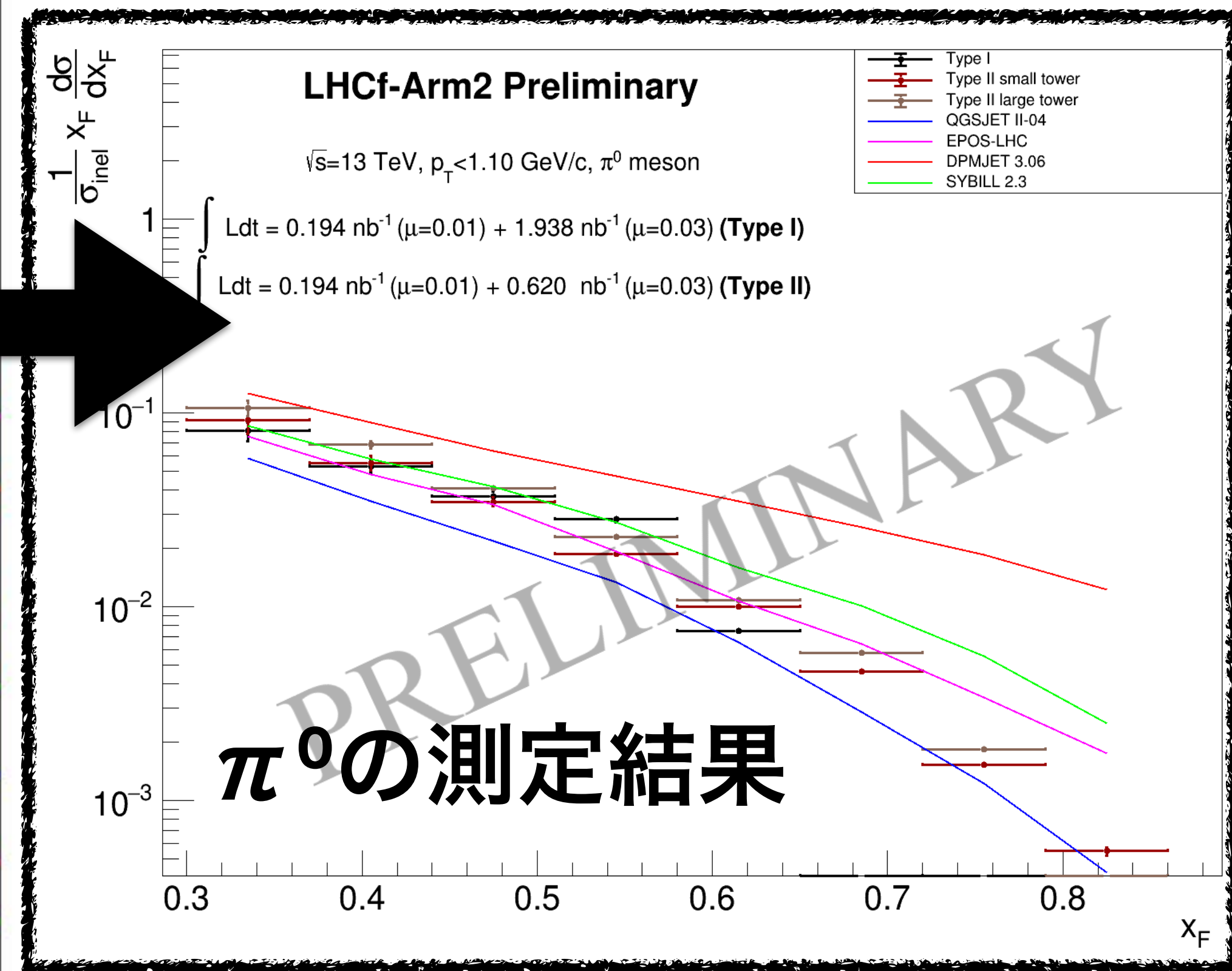


サイドバンド法を用いて
シグナル領域のバックグラウンドを推定

η 中間子測定結果：微分生成断面積

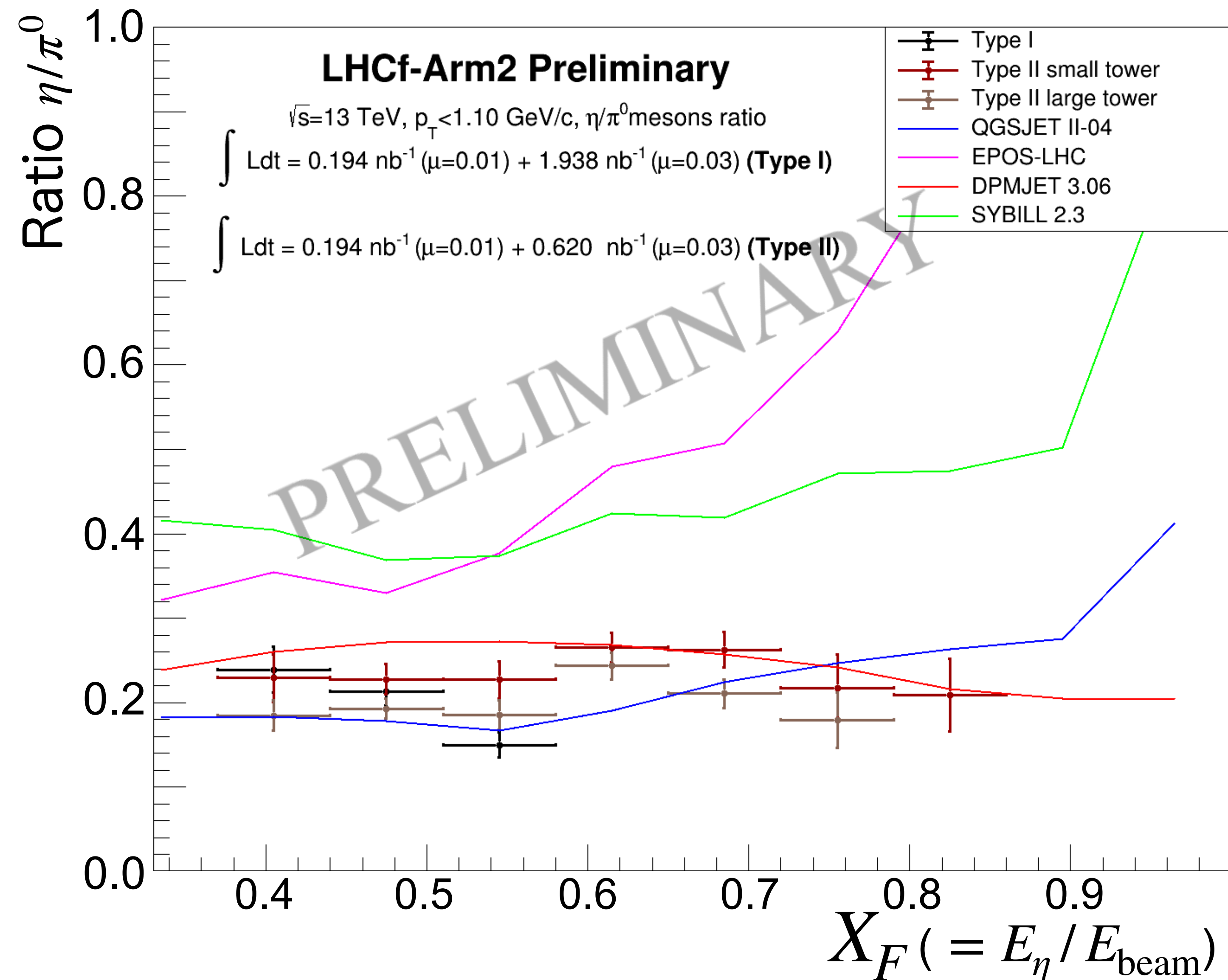
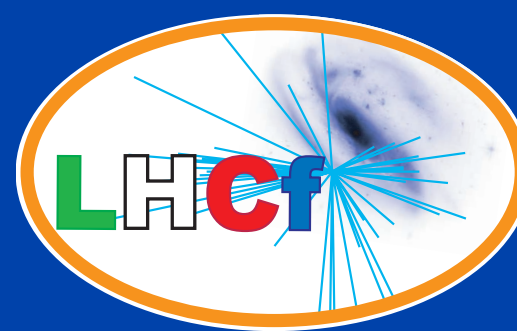


論文投稿済み (ArXiv:2305.06633)



- ▶ これは何を反映している？
- π^0 含む中間子生成全般の傾向？
- η 中間子生成のみの特徴？

測定結果： η/π^0 Ratio



■ 実験結果

□ 0.2 でほぼ一定

EPOS-LHC, SIBYLL2.3

- ▶ p, Λ などのレゾナンスを生成を実装
それらの崩壊によって η 生成
→ X_F 依存性が生じる

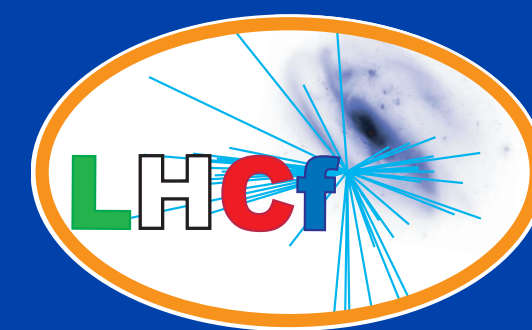
▶ データより大きな値

QGSJETII-04, DPMJET III

- ▶ レゾナンス生成を考慮しない
シンプルなハドロン生成
→ X_F 依存がない
- ▶ よくデータを再現

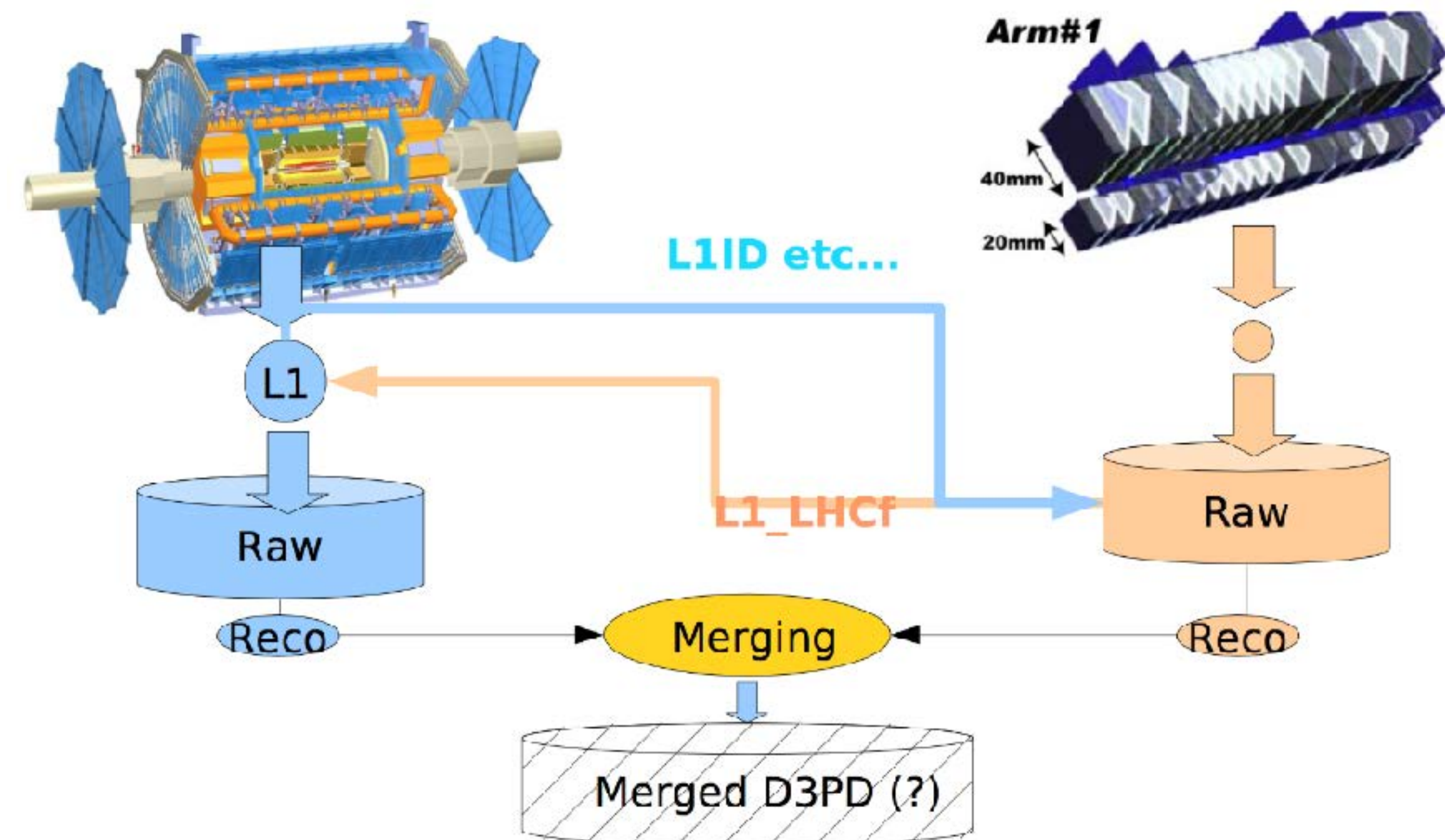
LHCf-ATLAS共同測定

LHCf-ATLAS共同データ取得



■ 共同測定の方法

- DAQは、ATLASとLHCfで独立
- LHCfのトリガーをATLASに送ってATLAS L1トリガーに入力 (L1_LHCf)
- ATLAS High Level Trigger はパススルー
- 各実験で再構成後にイベントマッチングをオフラインで実施

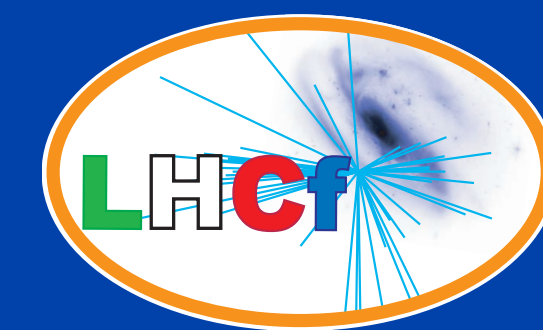


■ 陽子-陽子衝突時の共同データ取得

- 2010年 $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ → 共同測定なし (フラグは記録)
- 2015年 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ → 実施。ただし、L1_LHCfに対してプリスケール。
- 2022年 $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ → 大成功!! LHCfトリガーすべてでATLASでもデータ取得

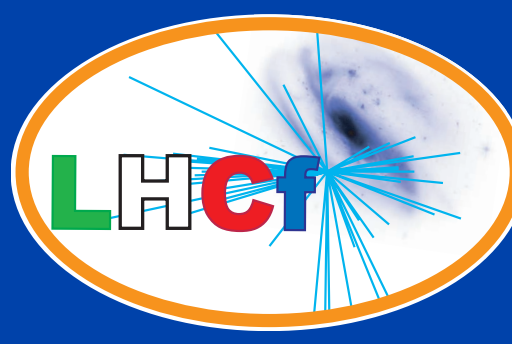
6 M イベント @ 2015 → 300 M イベント @ 2022

共同測定で実現できる様々な物理



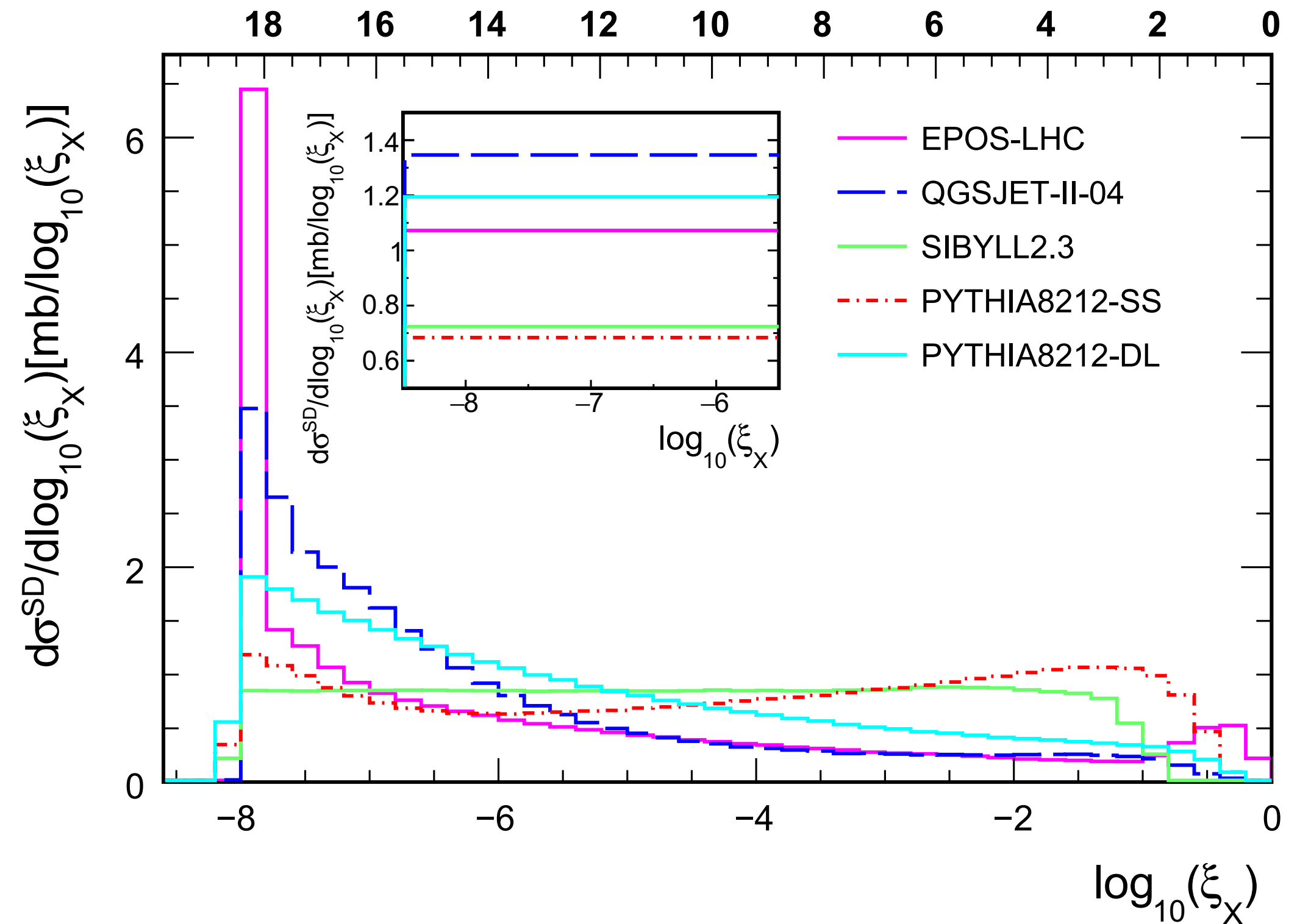
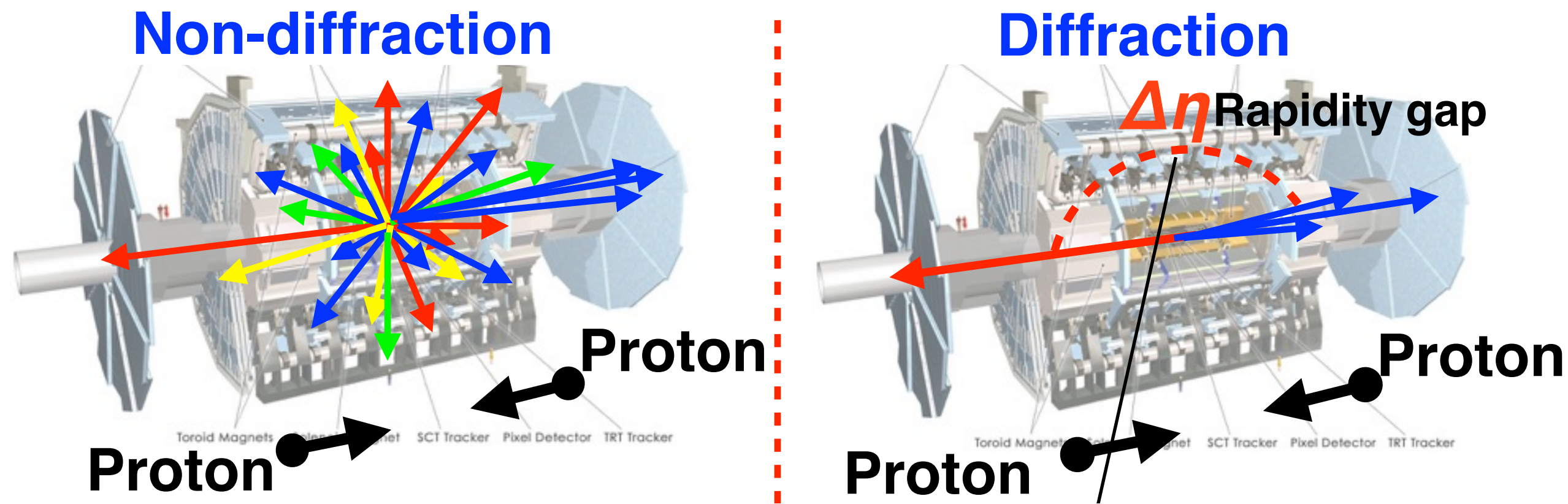
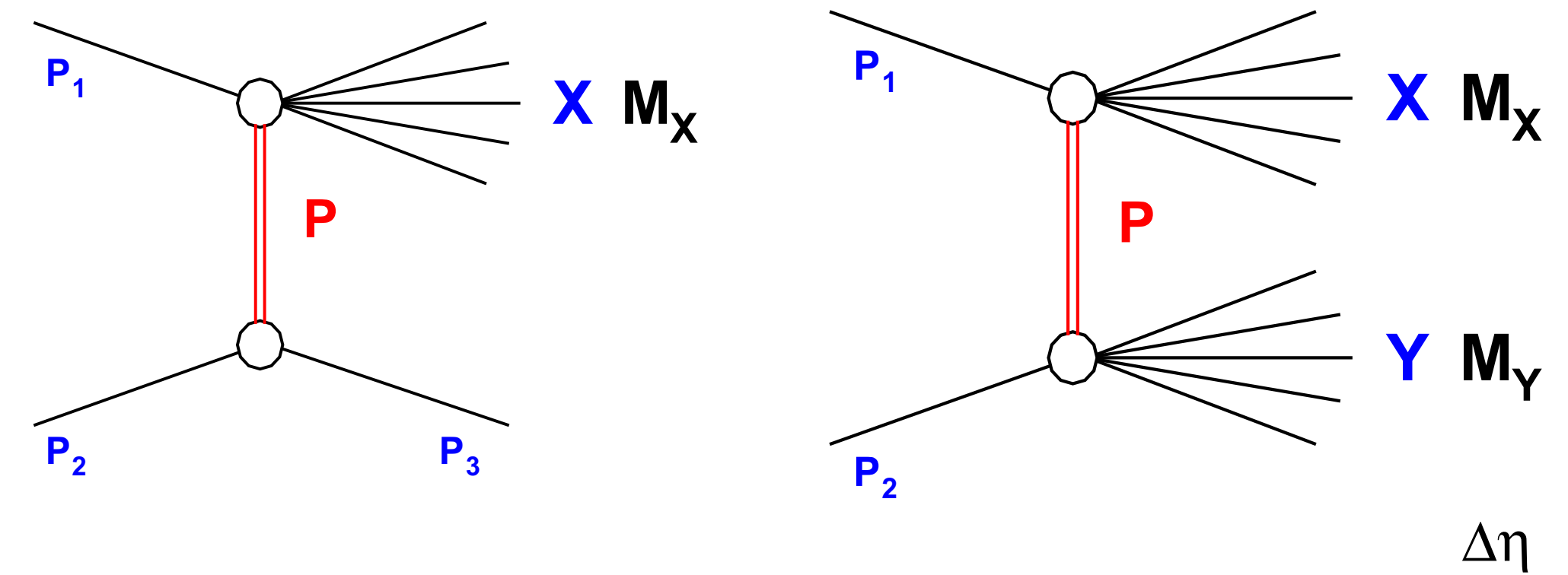
- Diffractive Collisions (回折事象)の研究
 - ATLASで粒子検出がない事象を選択することで低質量Diff. Collisionを選別可能。
 - RP(AFP)で散乱陽子をタグすることでSingle Diff.事象の詳細研究が可能。
- Multi-Parton Interaction (MPI) の研究
 - Parton衝突数が増えていったときに、MPIに使われる総エネルギーとの関係を前方中性子(LHCf)と中心領域粒子数(ATLAS)の相関を用いて測定。
- 陽子- π 中間子衝突の測定
 - One-Pion-Exchangeを用いて、仮想パイオンと陽子の衝突を測定。
 - 仮想パイオンを出した陽子は中性子になるので、LHCfで中性子をタグすることで事象選択できる。残ったバックグラウンド事象との弁別のために、LHCf+ATLAS ZDCを用いて高いエネルギー分解能の改善 (40%→20%) を実現。
- Resonanceの測定
 - $\Lambda \rightarrow p + \pi^0$ や $\Delta \rightarrow p + \pi^0$ をAFPとLHCfの2つを使った事象再構成を行って測定。

LHCf+ATLASによる回折事象の測定

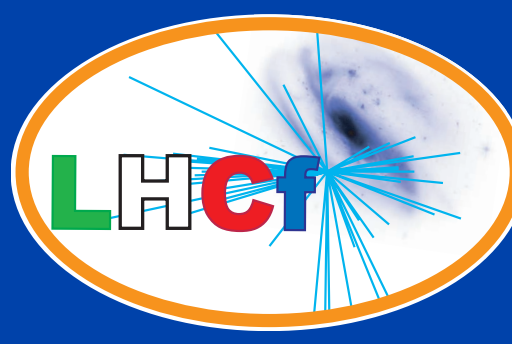


■ 回折事象

- 片側もしくは両側の陽子が励起して崩壊。
- ラピディギャップ ($\Delta\eta$)で特徴づけられる。
- 超前方領域の粒子生成に寄与
- 低質量の断面積にモデル依存性が大きい。



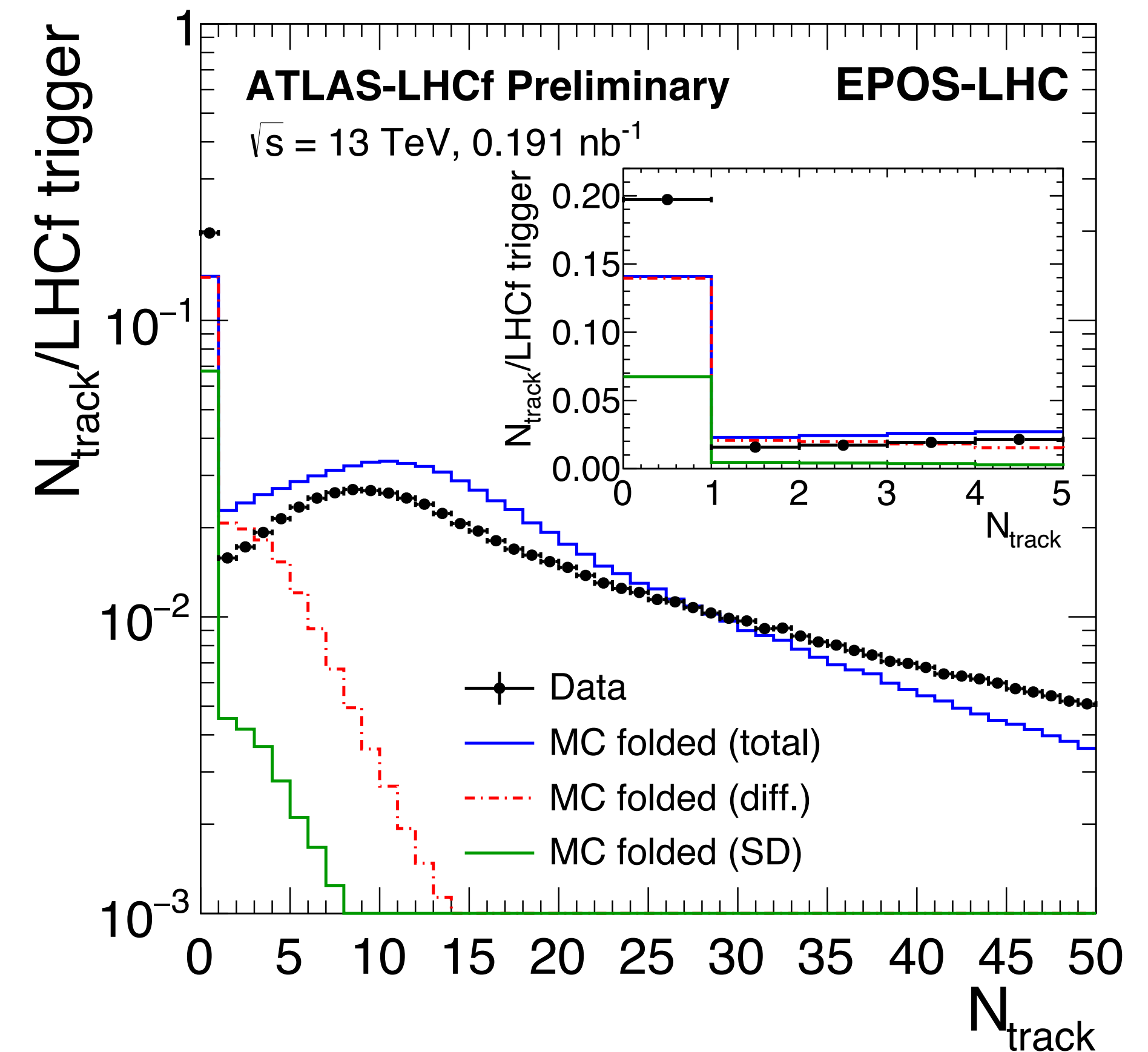
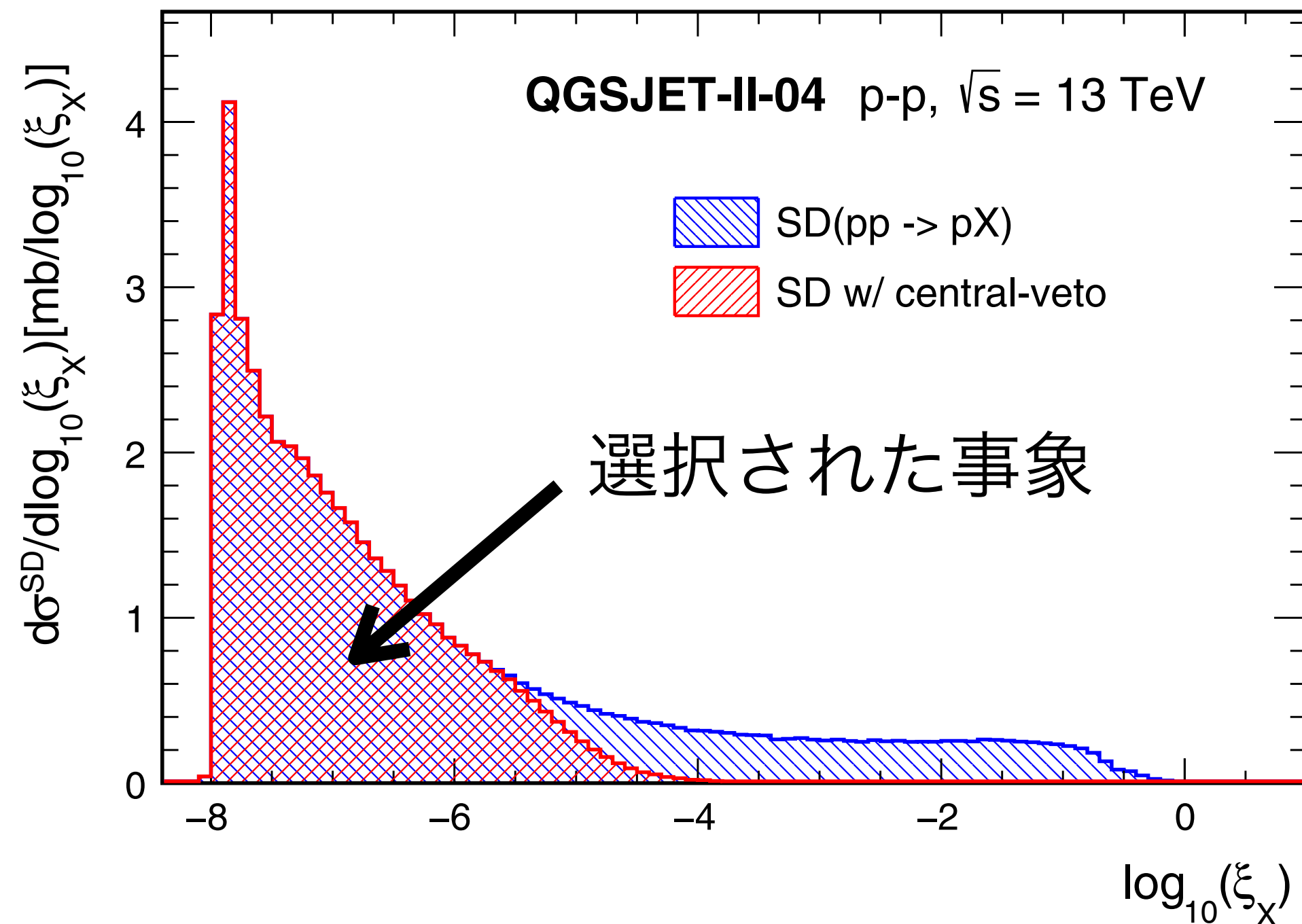
LHCf+ATLASによる回折事象の測定



ATLASを使った回折事象の選択

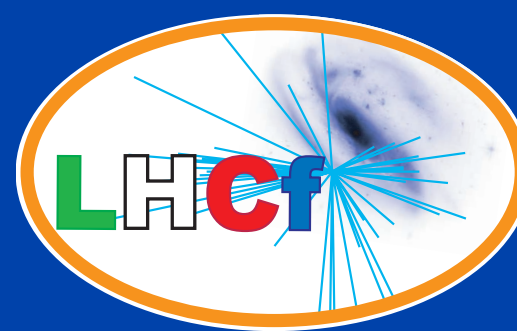
内部飛跡検出器での荷電粒子検出数 $N_{ch} = 0$

$|\eta| < 2.5, p_T > 0.1 \text{ GeV}/c$



➡ ピュアなLow-mass diffractive 事象 ($\log_{10} \xi < -5.5, M_X < 50 \text{ GeV}$) を選択

$N_{ch}=0$ 選別による光子スペクトル

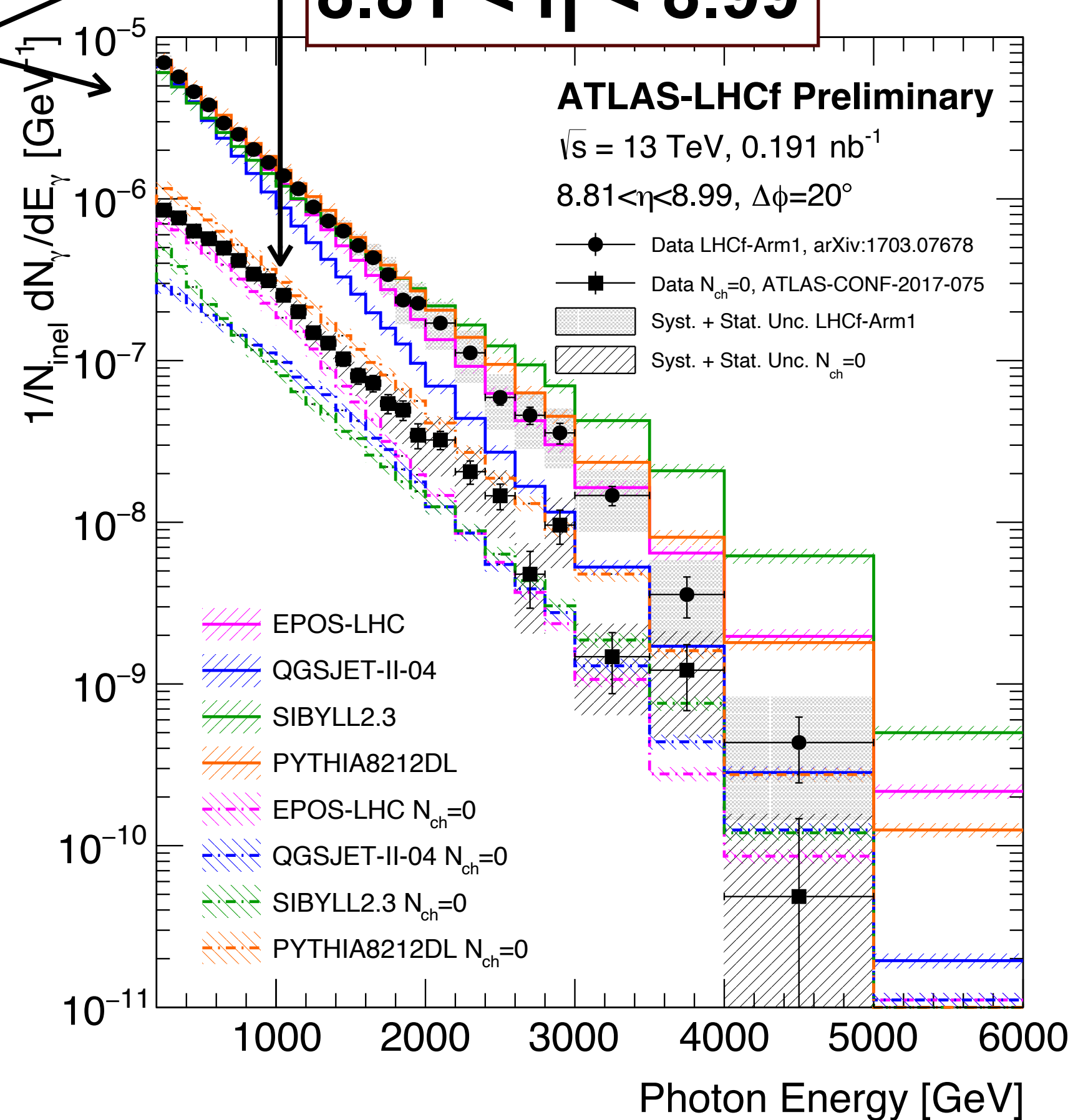
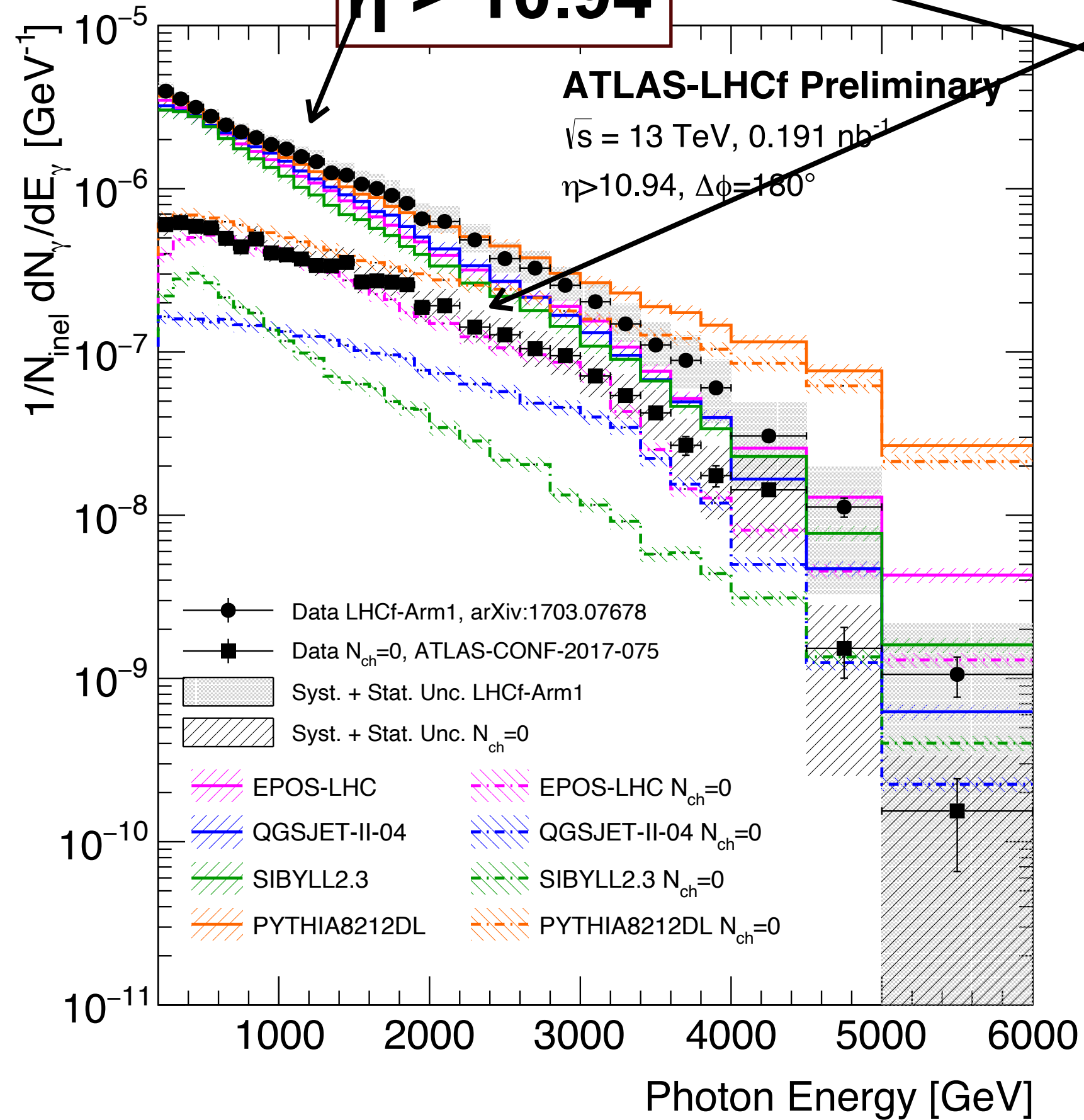


全光子スペクトル

w/ $N_{ch} = 0$ 事象選別

$\eta > 10.94$

$8.81 < \eta < 8.99$



Data

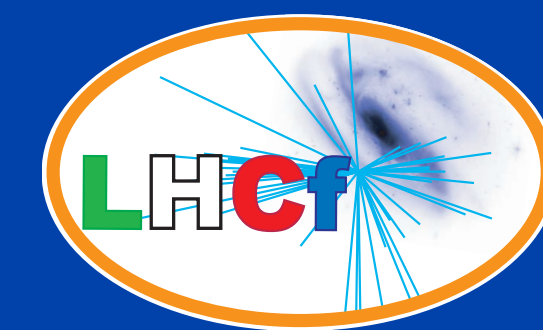
pp, $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 2015$

解析

ATLAS $N_{ch}=0$ 選別

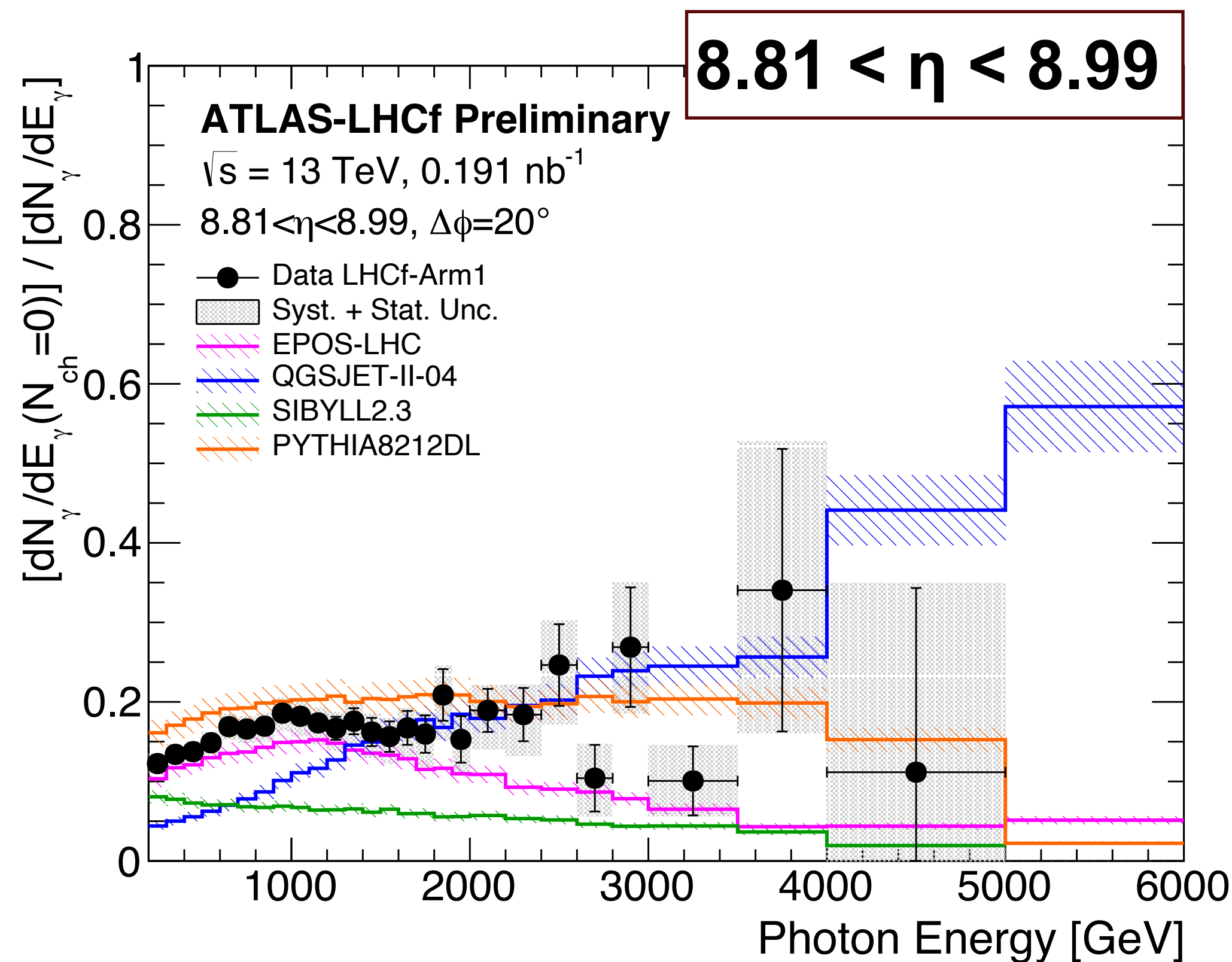
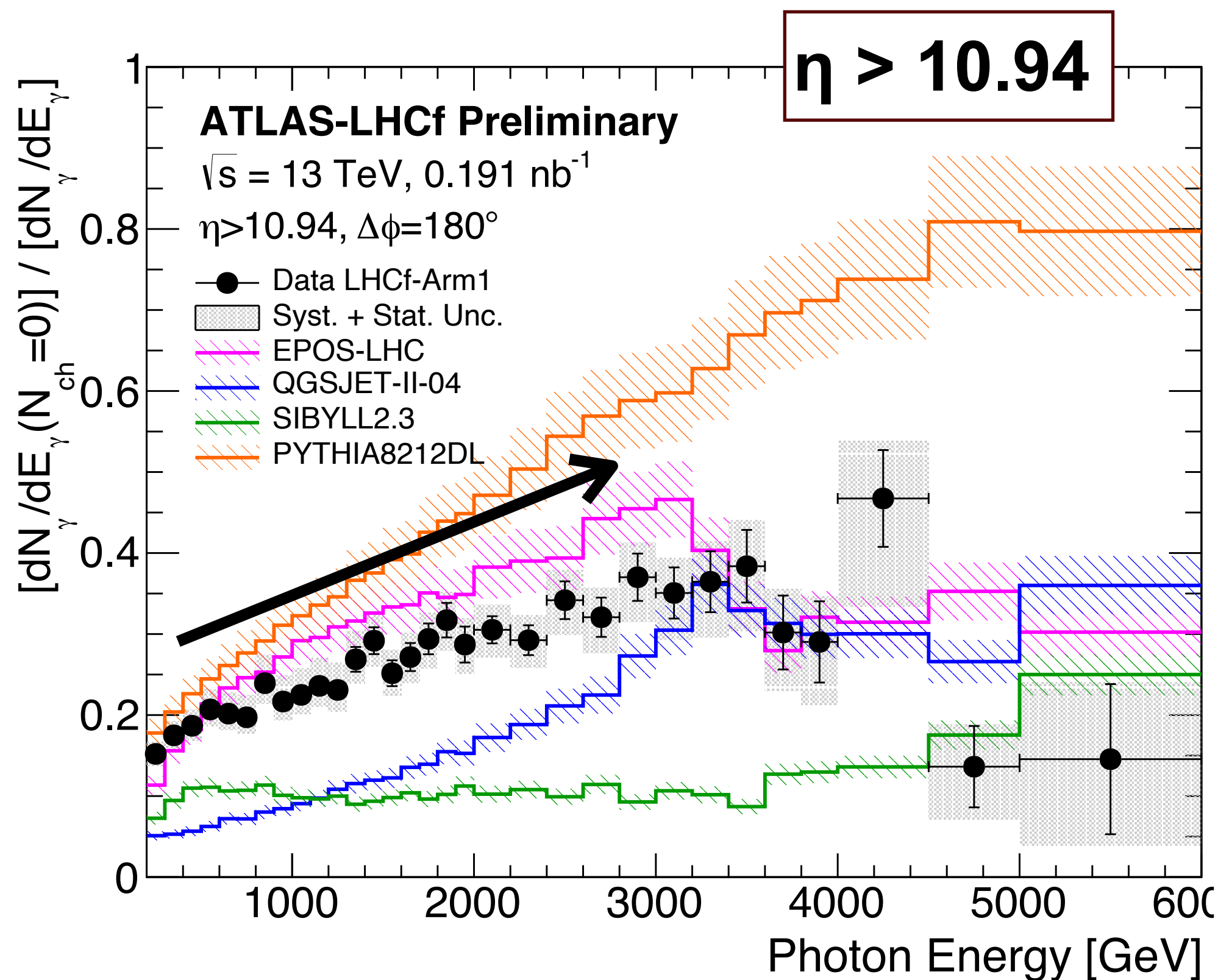
以外は同じ解析を適用。

$N_{ch}=0$ 選別による光子スペクトル



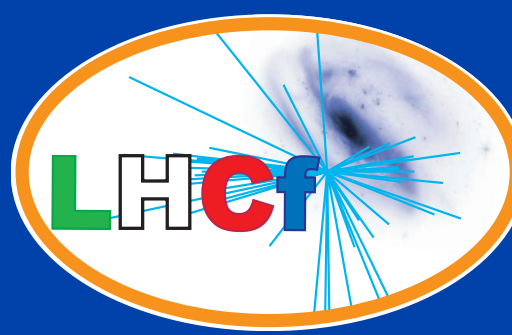
Ratio ($N_{ch}=0$ /Inclusive)

ATLAS-CONF-2017-075

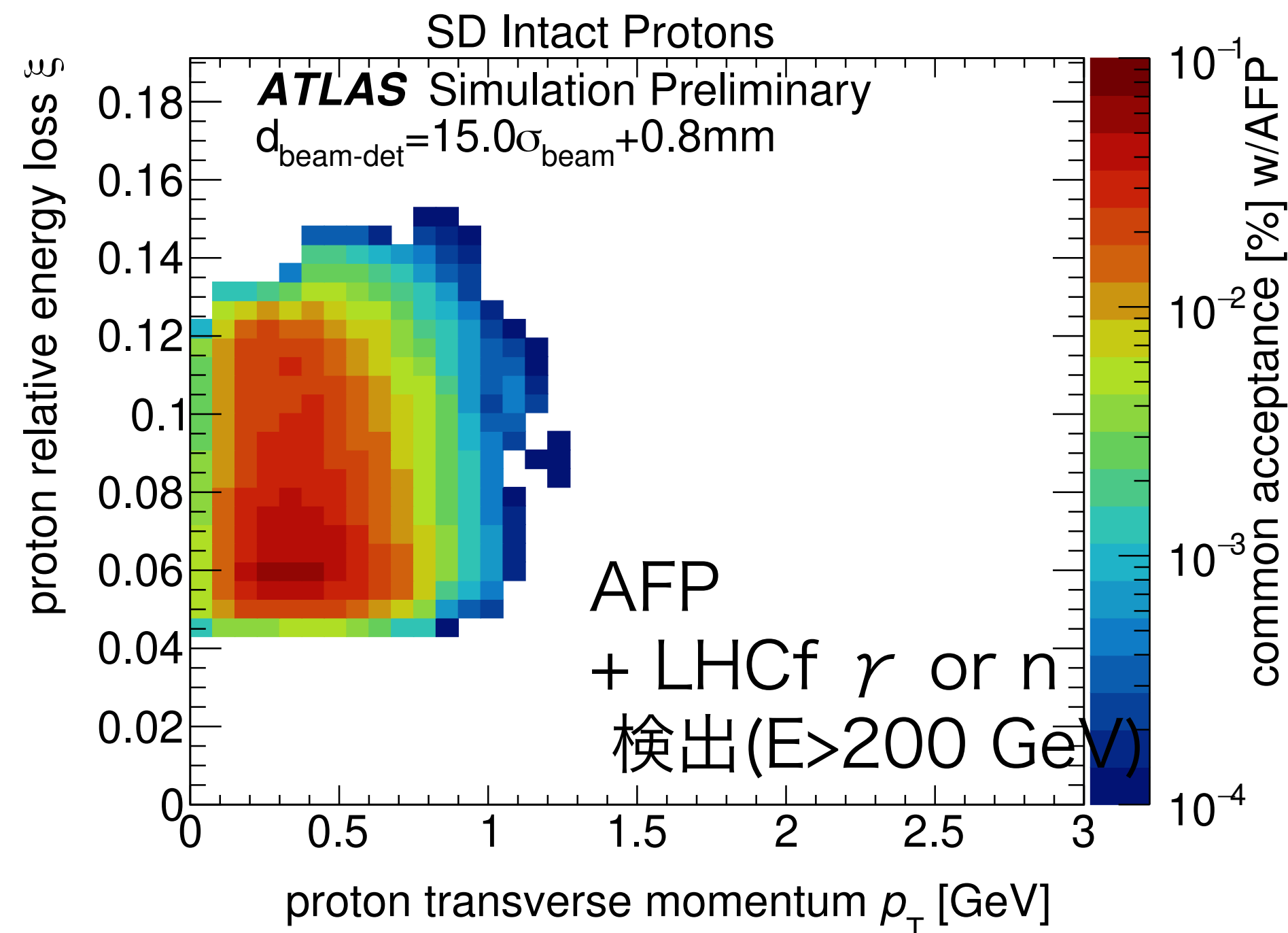
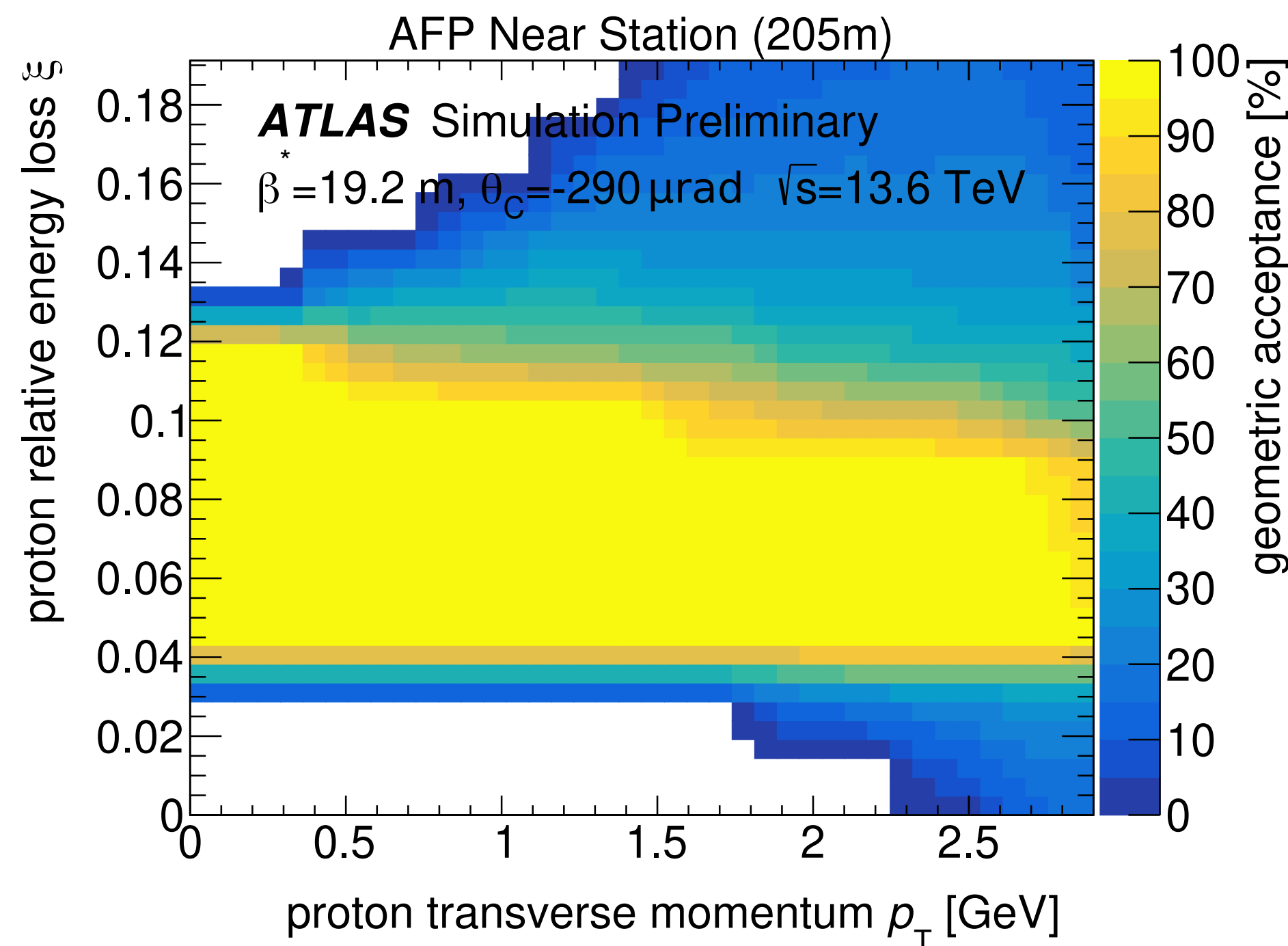
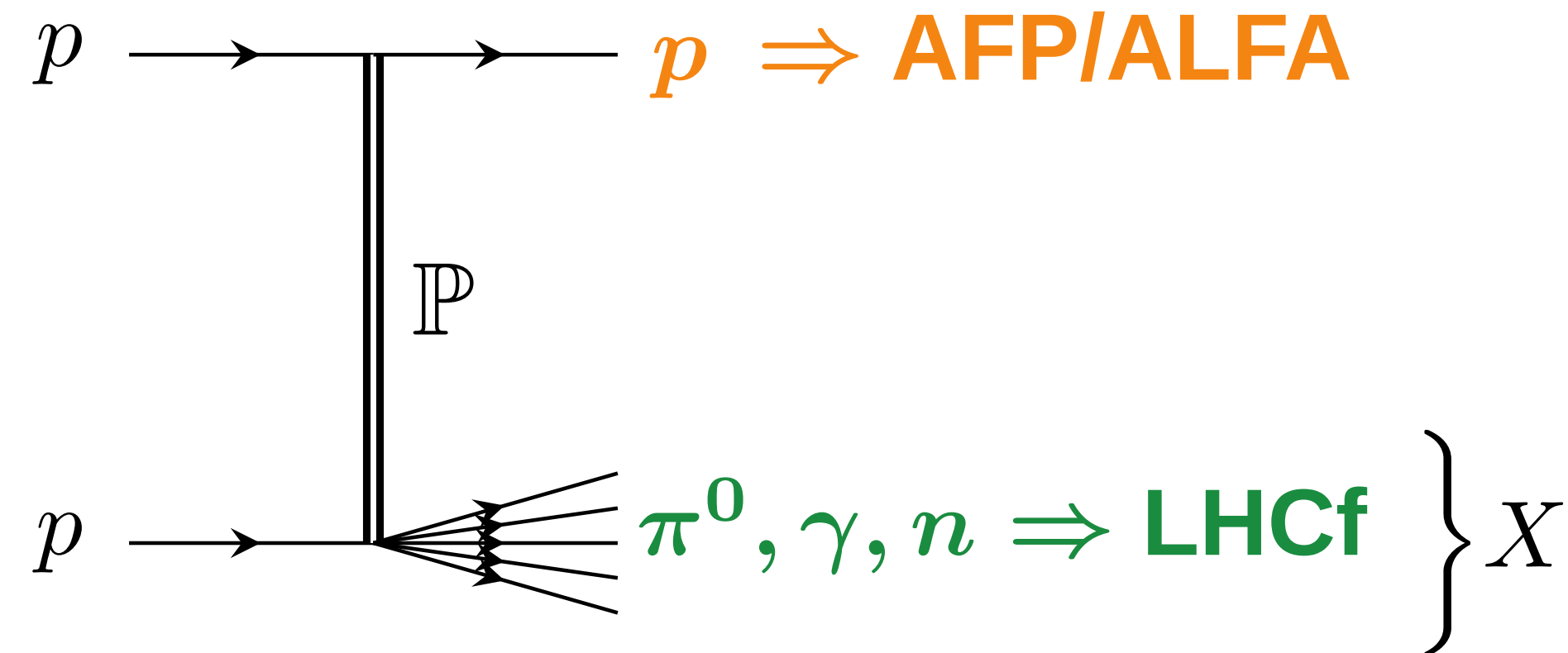


- Low Mass Diff.事象の光子生成への寄与は $> \sim 20\%$
- Low Mass Diff.事象の方がスペクトルがハード

RPとの共同測定によるSingle Diff.の詳細研究

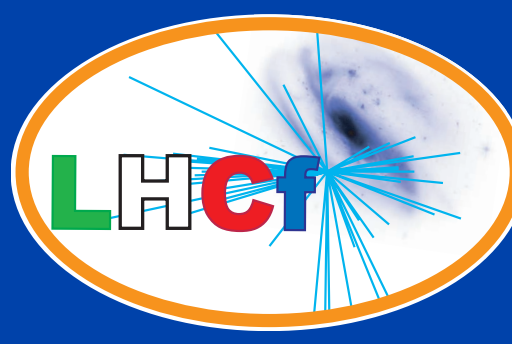


- 散乱陽子をAFP/ALFAで検出。
 - Single Diff.のみを選別
 - Diff.質量 (ξ)をイベントごとに決定
- 特定のDiff. 質量のときのハドロン生成を調べることが可能になる。



陽子-原子核衝突の測定

2024年 陽子-酸素原子核衝突 測定



- p-O衝突は宇宙線-大気相互作用を再現する理想的な条件 !!
 - コライダーでの軽原子核衝突は世界初
 - 原子核効果のモデリングの違いがモデル予測の違いの要因の1つ

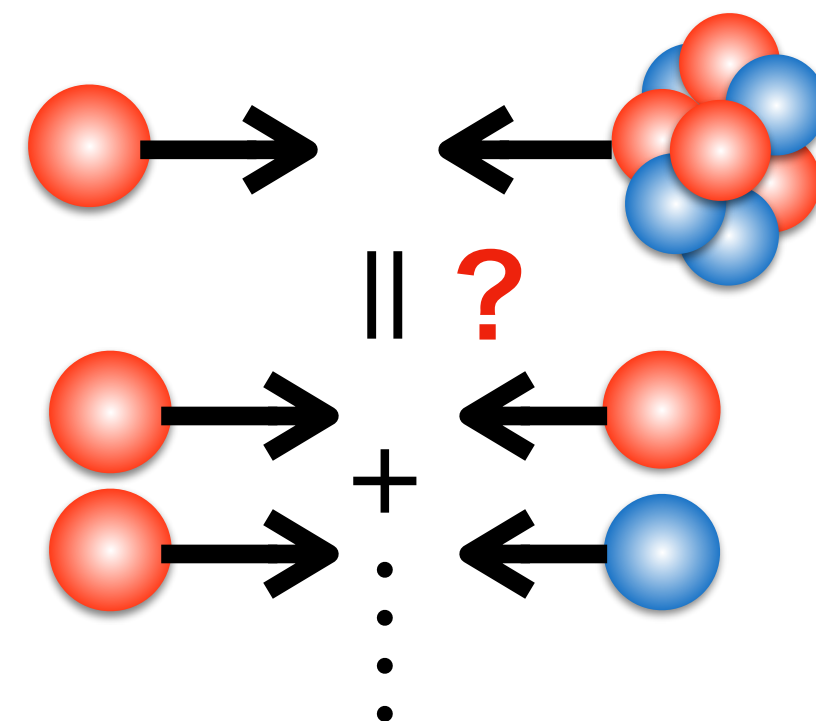
■ p-O相互作用

□ Glauber理論

p-O衝突をp-p衝突の重ね合わせで記述

□ 原子核効果

- ▶ Nuclear Shadowing
- ▶ Limiting Fragmentation
- ▶ QGP (core-corona)

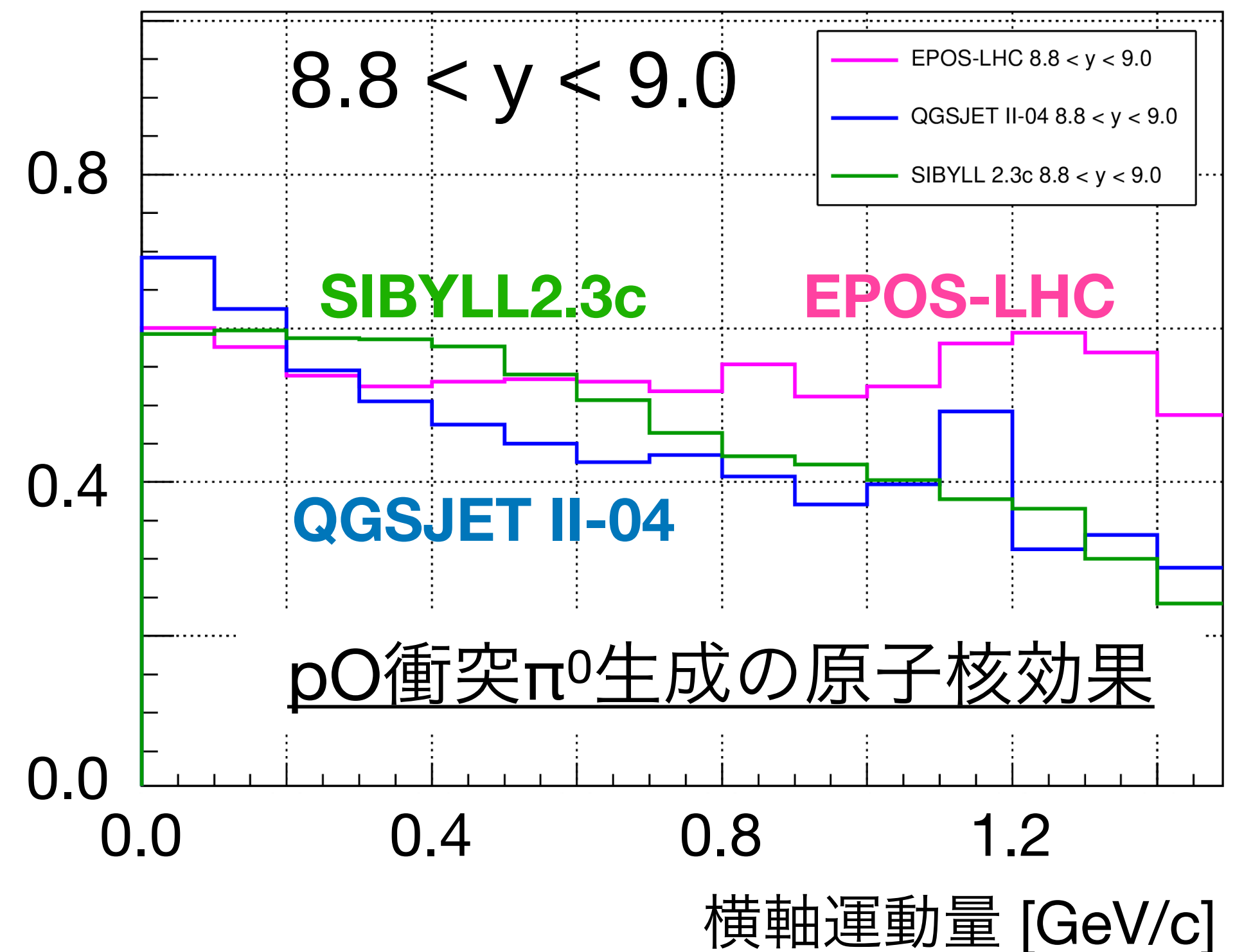


Nuclear Modification Factor

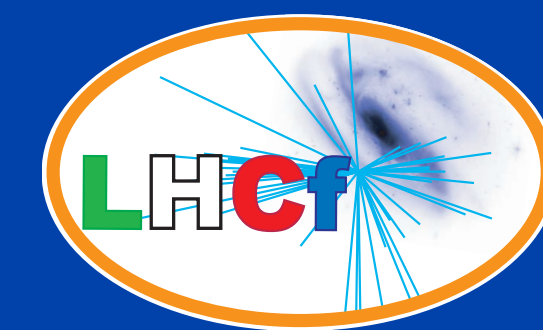
$$R = \frac{\sigma_{pO}}{A \sigma_{pp}}$$

A: 平均核子核子衝突数

原子核効果 (R)

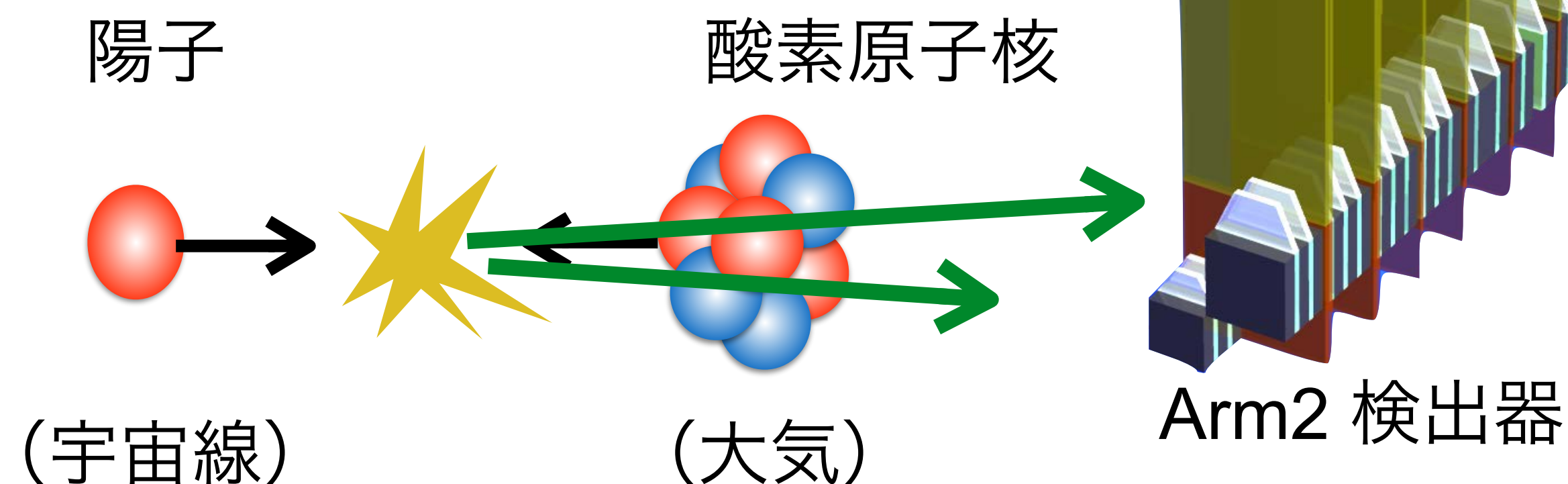


p-O測定のスケジュールとプラン



■ 測定セットアップ

- "Arm2"を陽子の最前方領域に設置
- DAQシステム等はこれまでと同じ
- ATLASとの共同測定



■ スケジュール

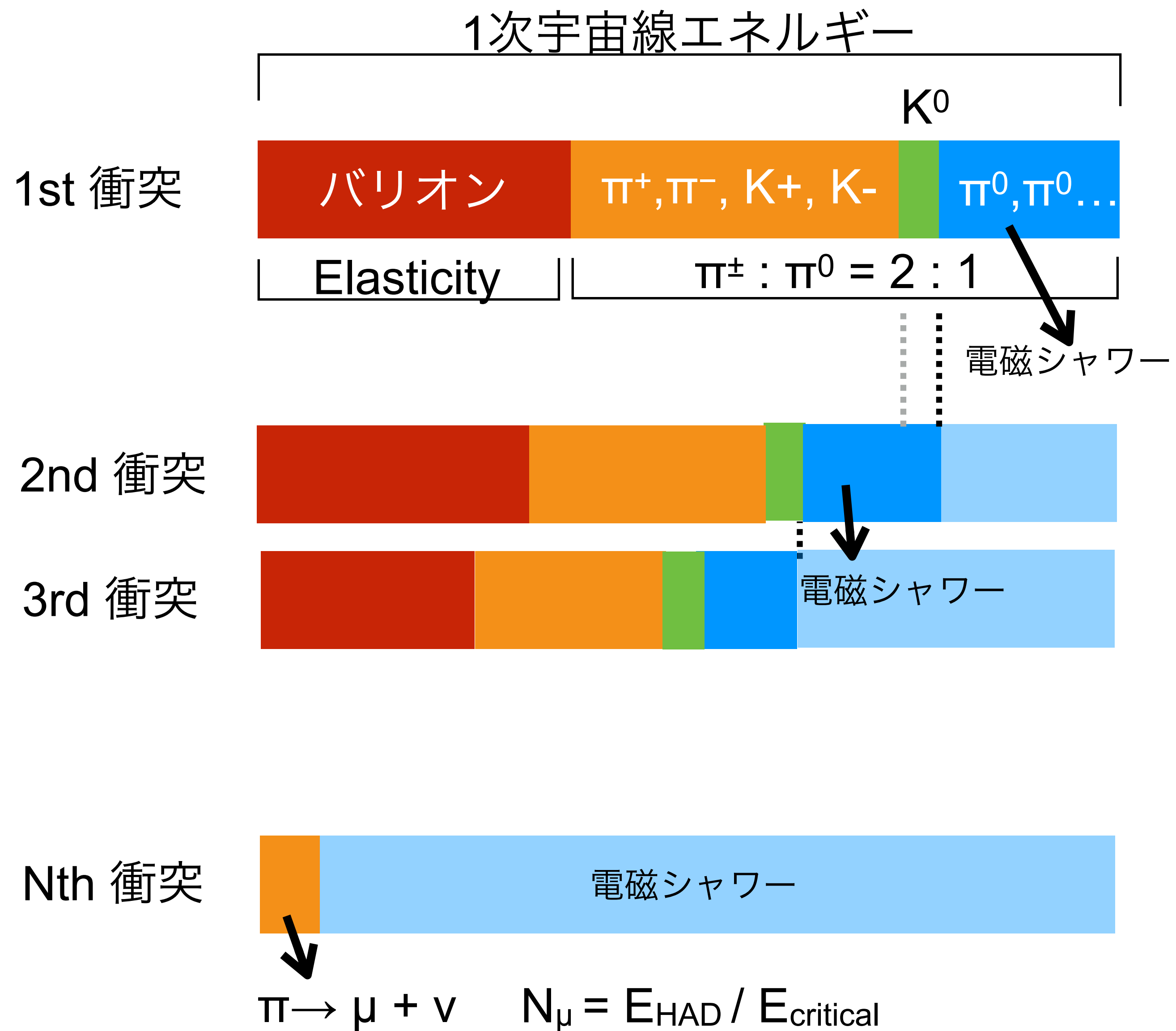
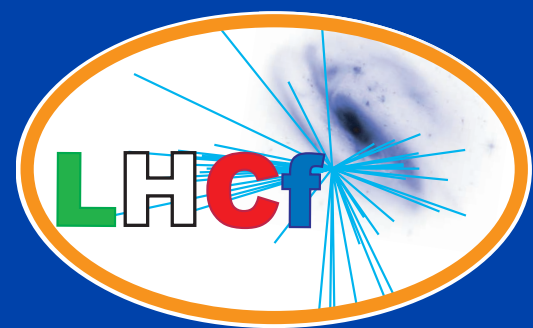
- 測定は2024年6月のOxygen Run期間中（1週間）に実施
 - 検出器の設置（TS期間中に実施）
 - 酸素ビームのコミッショニング（1日）
 - 酸素原子核-酸素原子核衝突（2日）基本的に測定なし
 - **陽子-酸素原子核衝突（2日） ← LHCf オペレーション**
 - 検出器の取り外し（半日）

- 中性子入射が多数で測定が難しい
- 後ろのATLAS ZDC検出器への影響を避ける。

- LHCf実験は超前方領域の中性粒子測定をLHC稼働初期から実施
 - 中性子を用いた被弾性度の測定、 η 中間子の測定を紹介。
 - K^0_s 中間子の解析を2022年データで進めていく予定。
- LHCf -ATLASの共同測定
 - 2022年に高統計(300 M)のデータ取得に成功
 - 回折事象、MPI、 p - π 衝突などさまざまな物理の測定。
2015年のデータを含めて、順次、解析を進めている。
- 陽子-酸素原子核衝突の測定を2024年6月に予定
 - 宇宙線-大気相互作用を再現する理想的な実験条件。
 - 2日間のオペレーションを成功するために準備作業を進めている。

Backup

空気シャワー発達中のKを含んだ場合

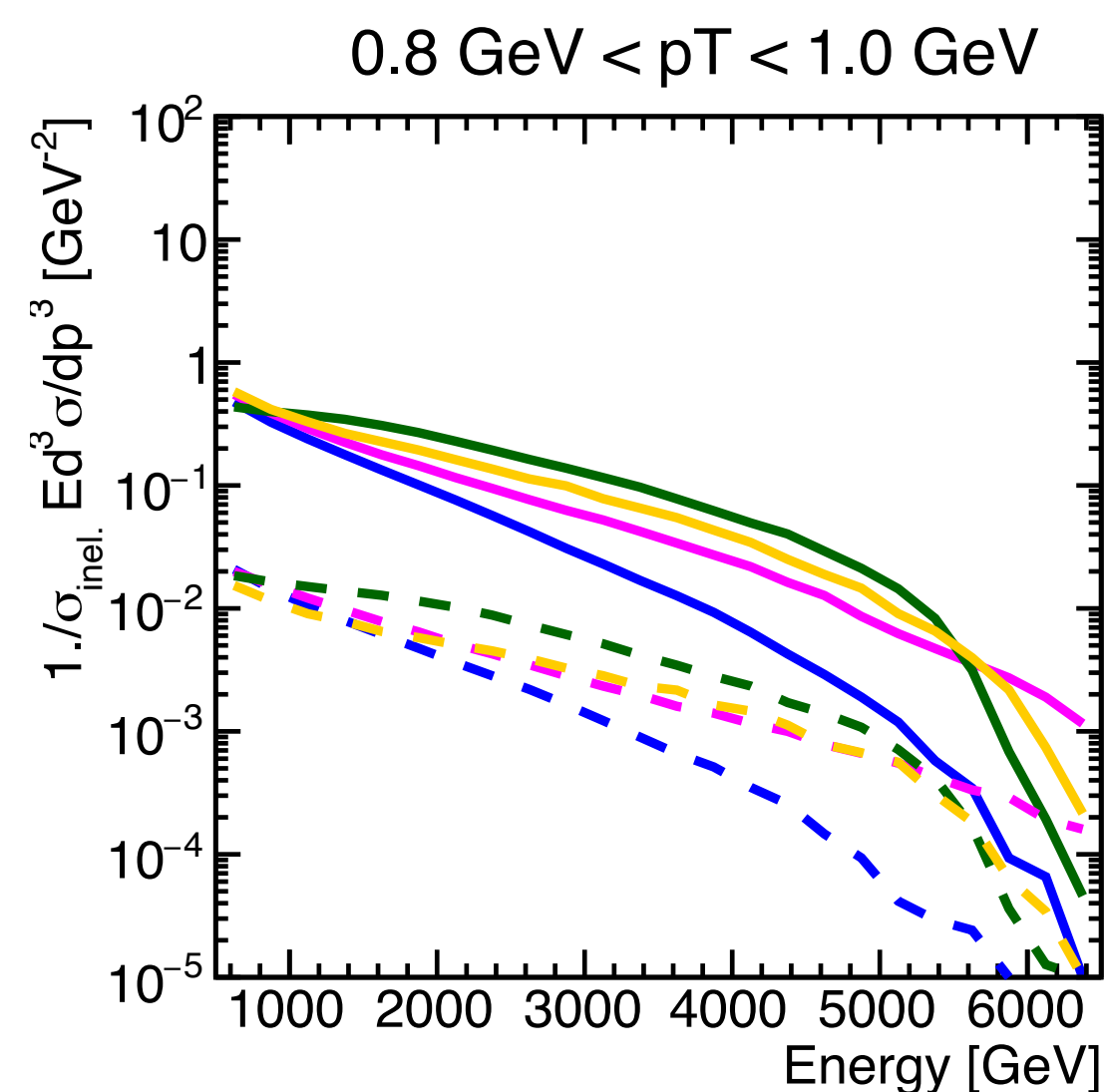
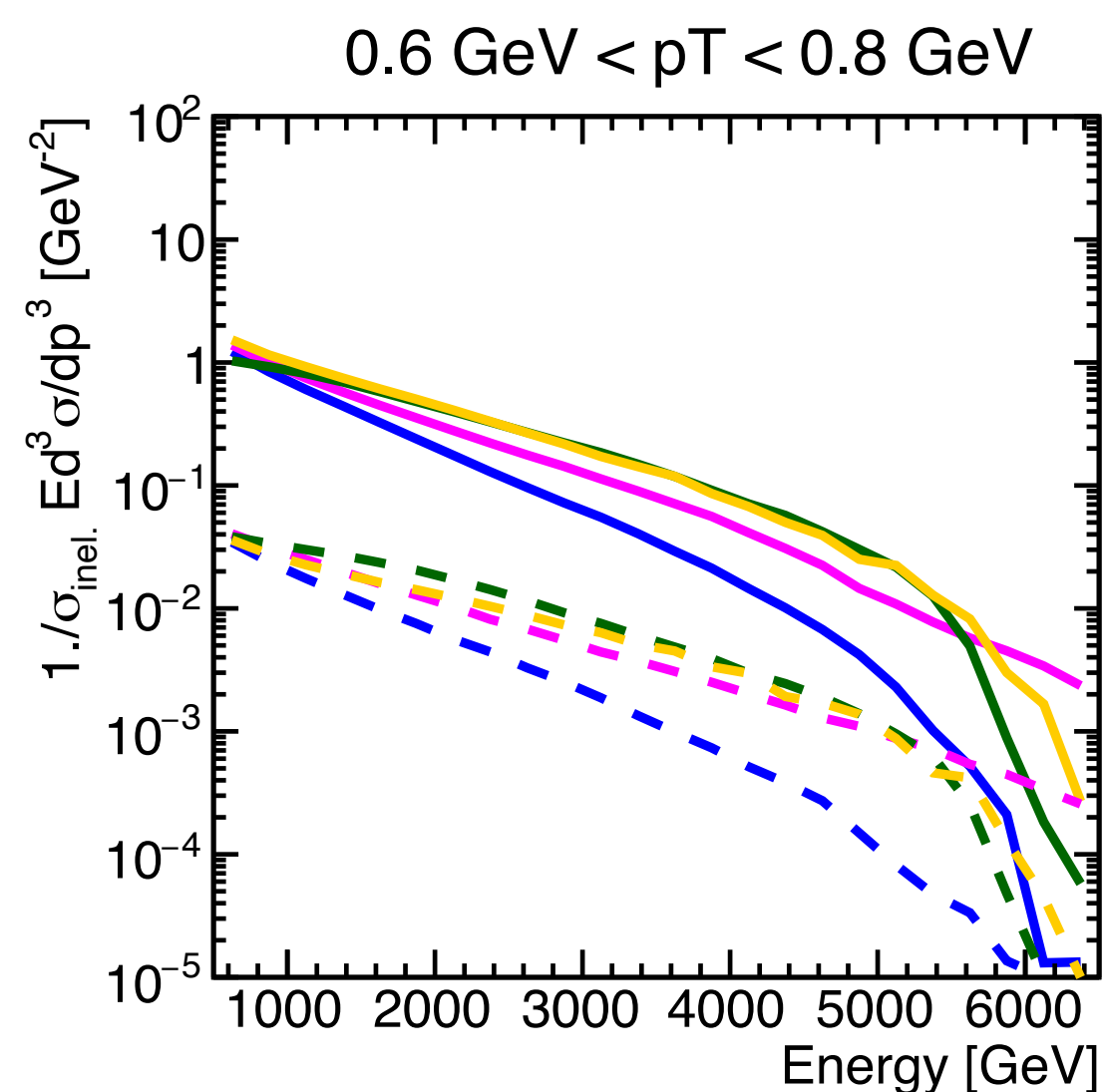
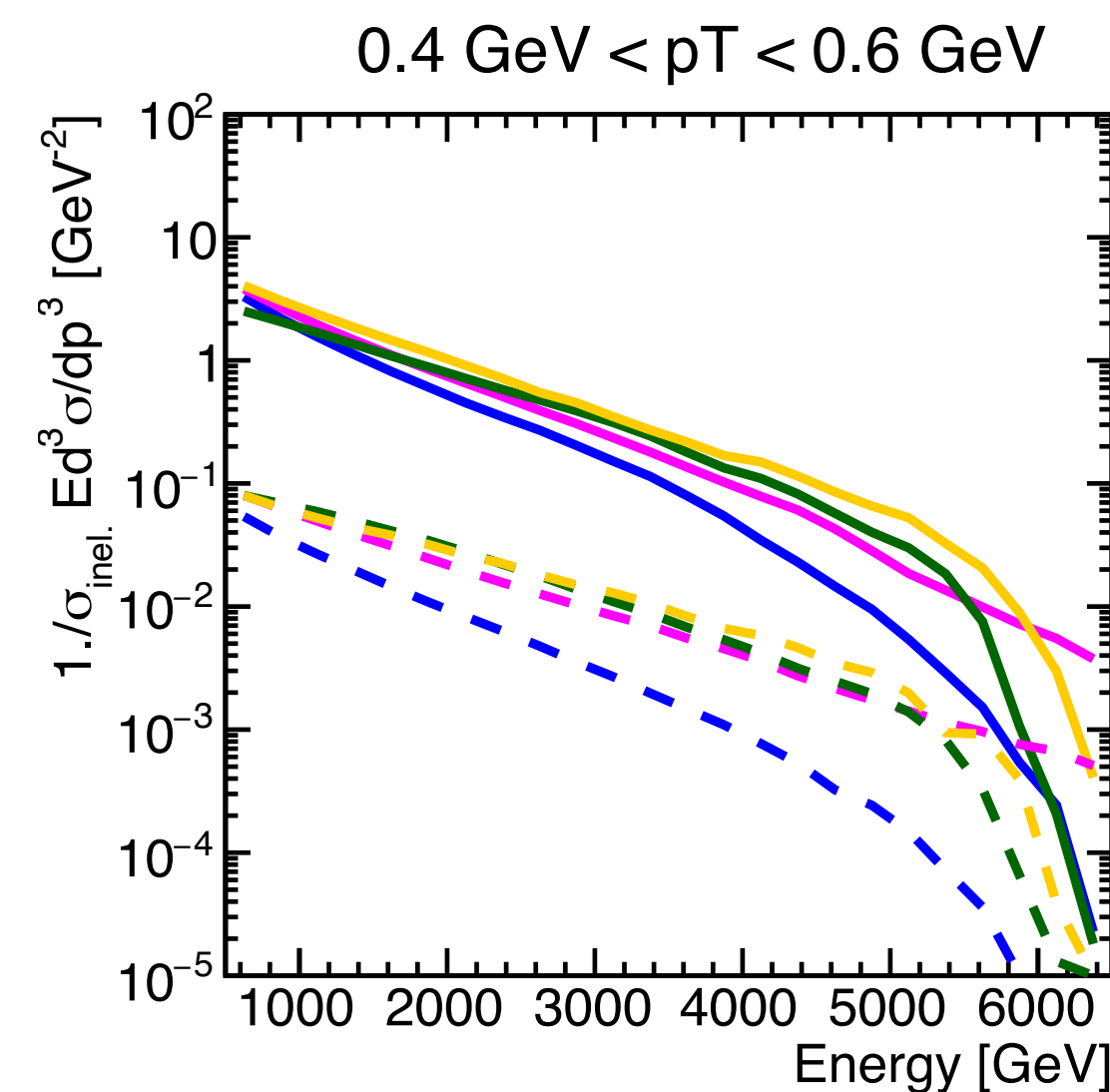
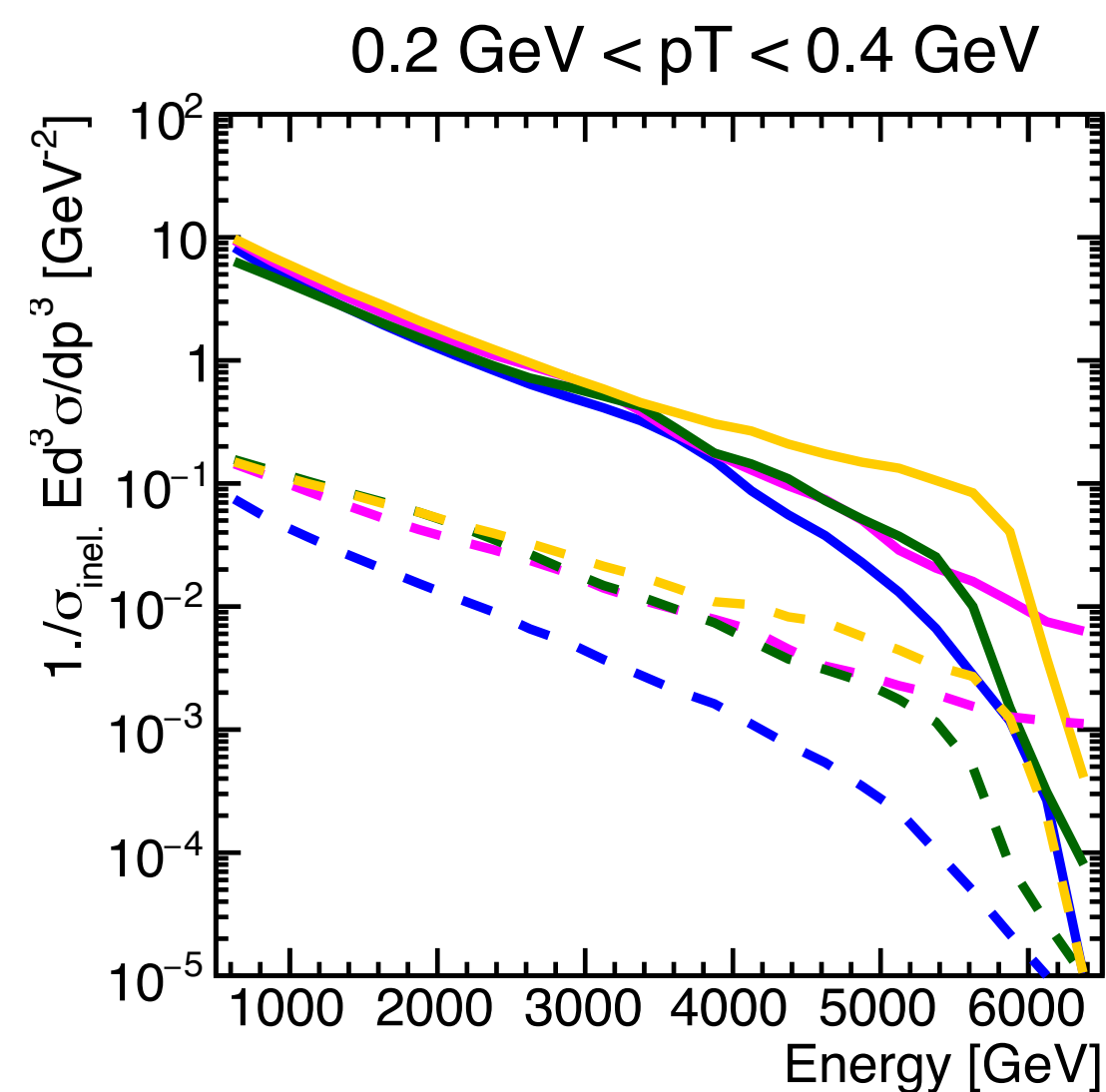
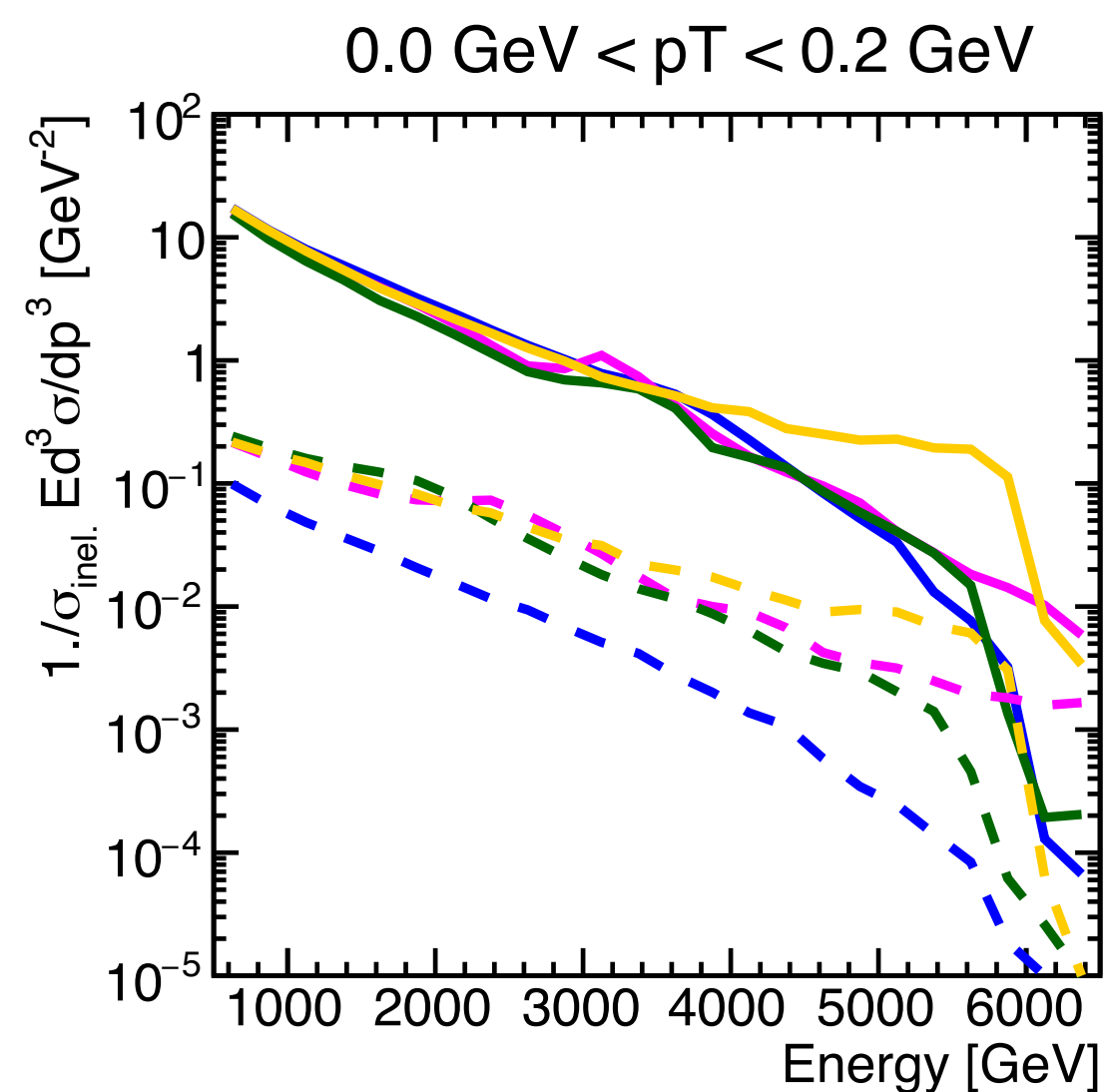
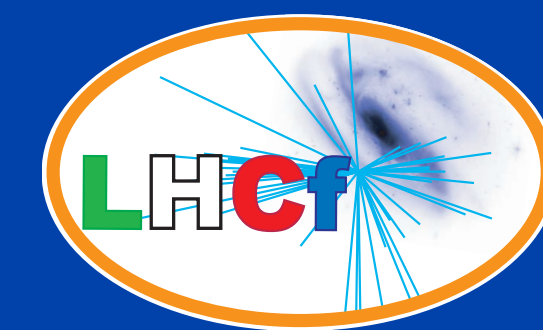


π 中間子以外の中間子の寄与
 K中間子：sクォークを含む中間子

$\pi^0: c\tau = 25 \text{ nm}$
 → 電磁シャワー

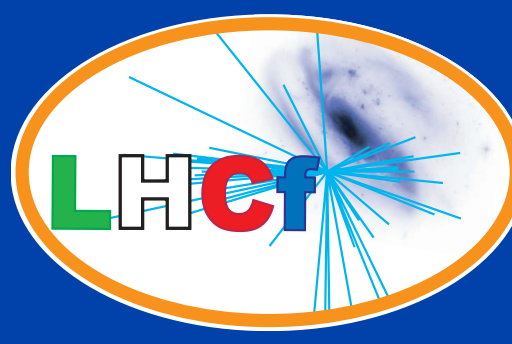
$K^0_s: c\tau = 2.6 \text{ cm}$
 → 崩壊する前に衝突
 → ハドロンシャワー

π^0 と η の生成断面積のモデル予測



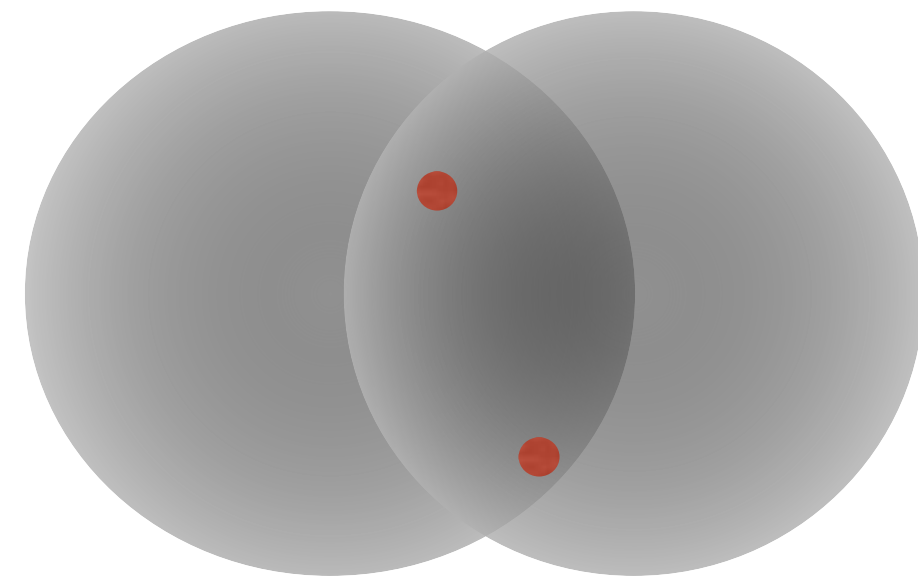
- π^0 QGSJET II-04 (x10)
- π^0 EPOS-LHC (x10)
- π^0 SIBYLL 2.3 (x10)
- π^0 PYTHIA 8.212 (x10)
- - η QGSJET II-04
- - η EPOS-LHC
- - η SIBYLL 2.3
- - η PYTHIA 8.212

① MPIモデルの検証

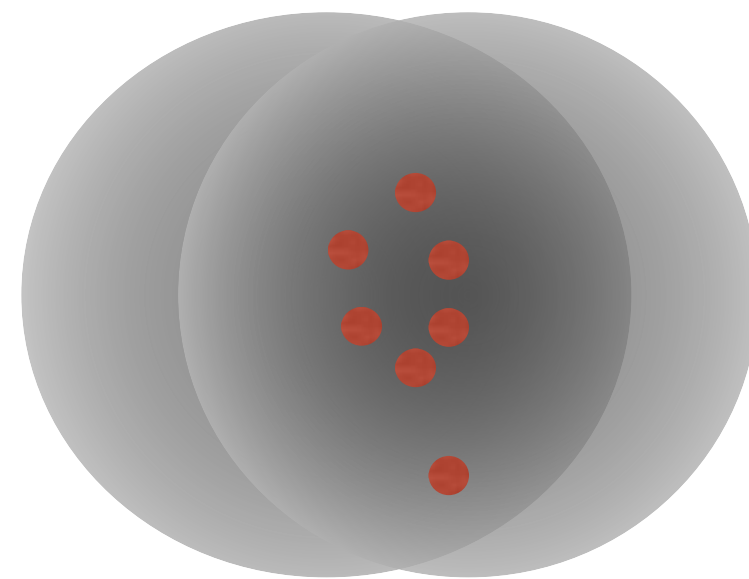


■ Multi-Partonic Interaction (MPI)

Low energy



High energy



Fedynitch, YITP workshop

高エネルギーになればなるほどPartonの衝突数は増える。

→ 全断面積は増加していく。

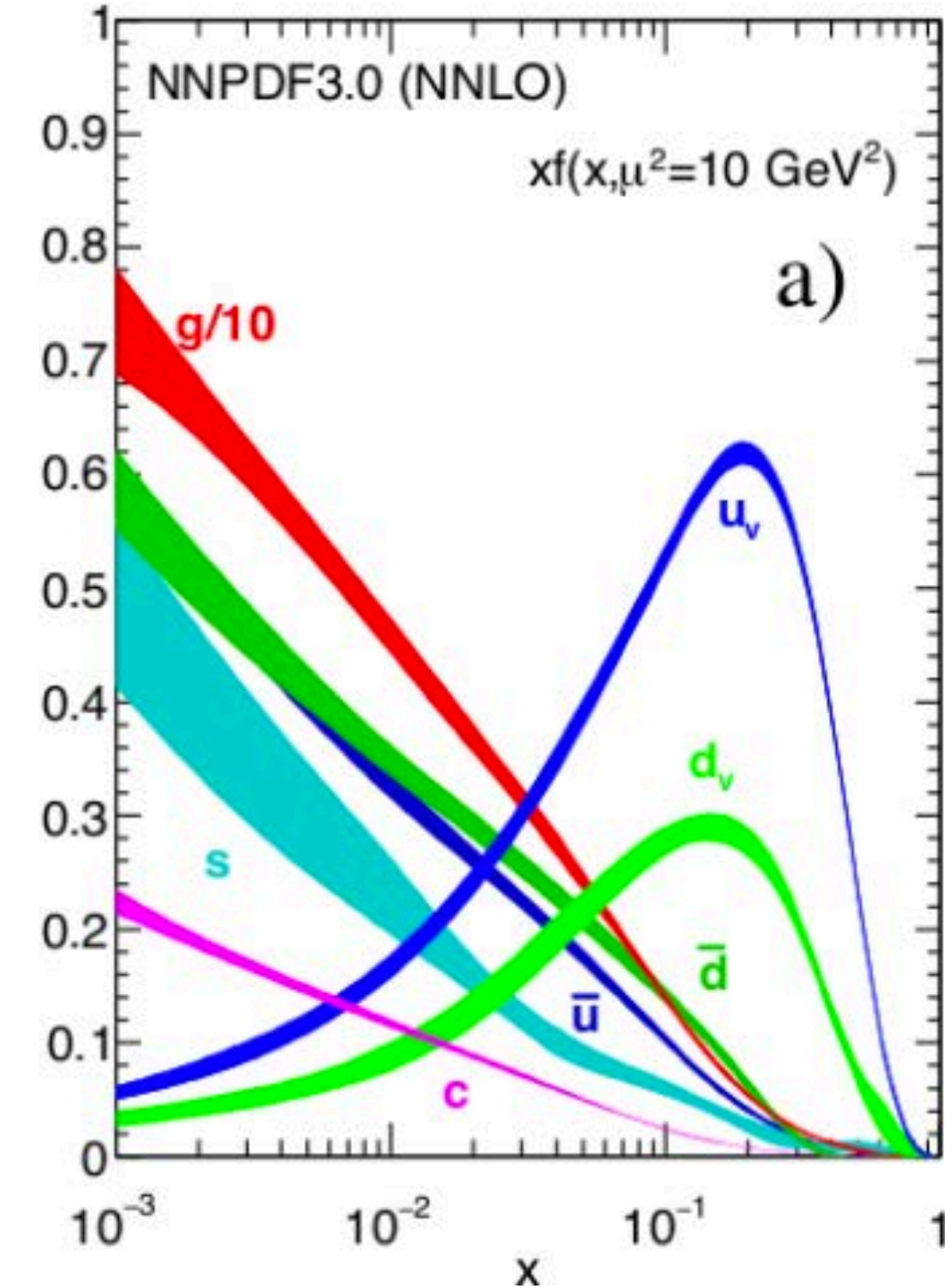
→ このParton間の衝突の足し合わせのみで考えると

衝突するPartonのエネルギーが陽子エネルギーを超えうる。

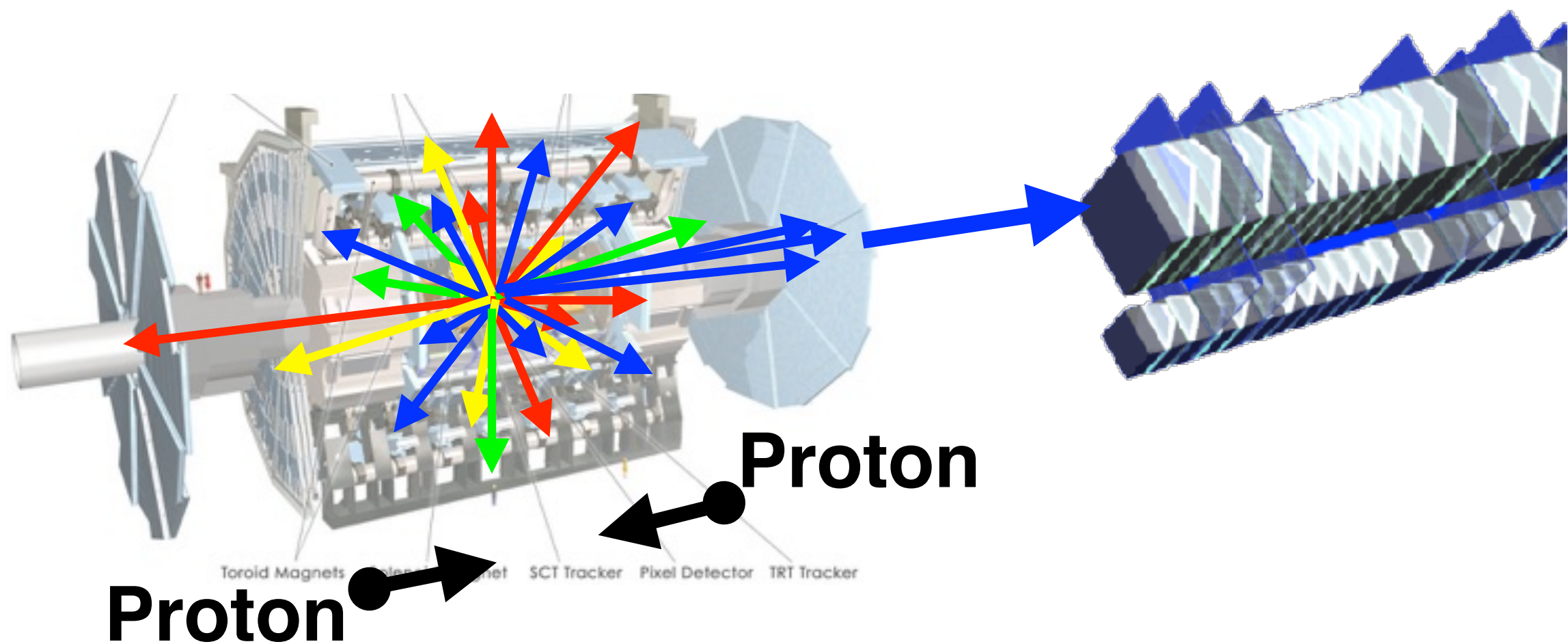
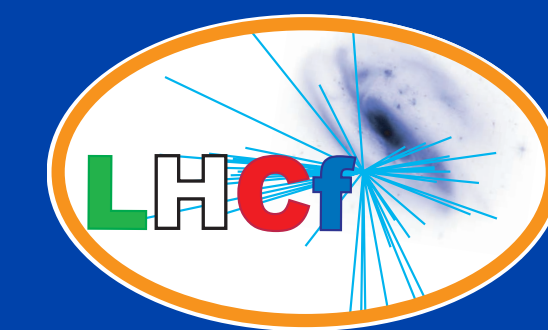
MPIのモデルに2つのアプローチ

1. SIBYLL, PYTHIA, DPMJET (幾何学から使用するエネルギーを制限)
2. EPOS, QGSJET (PDFを変更)

Parton Distribution Function

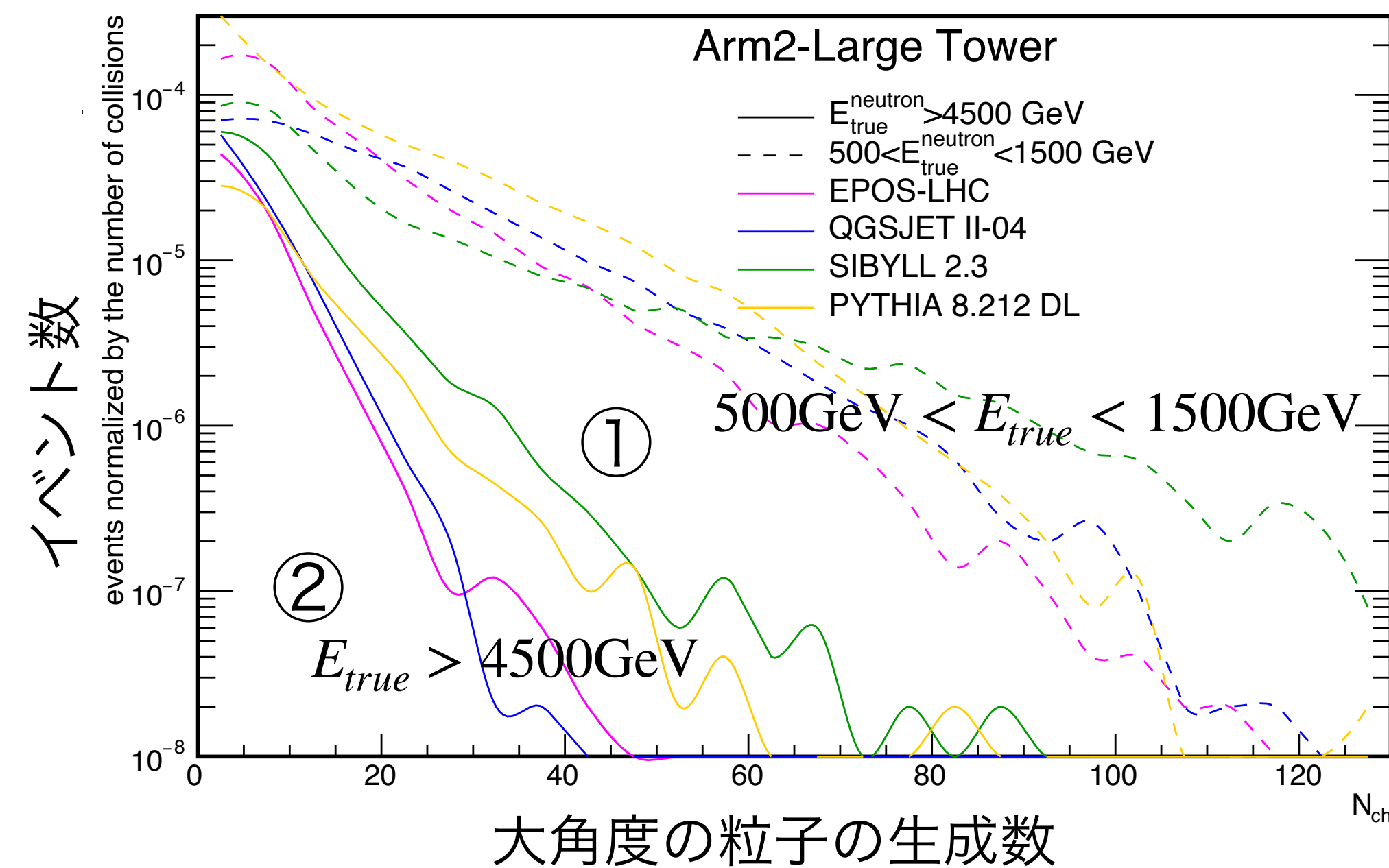
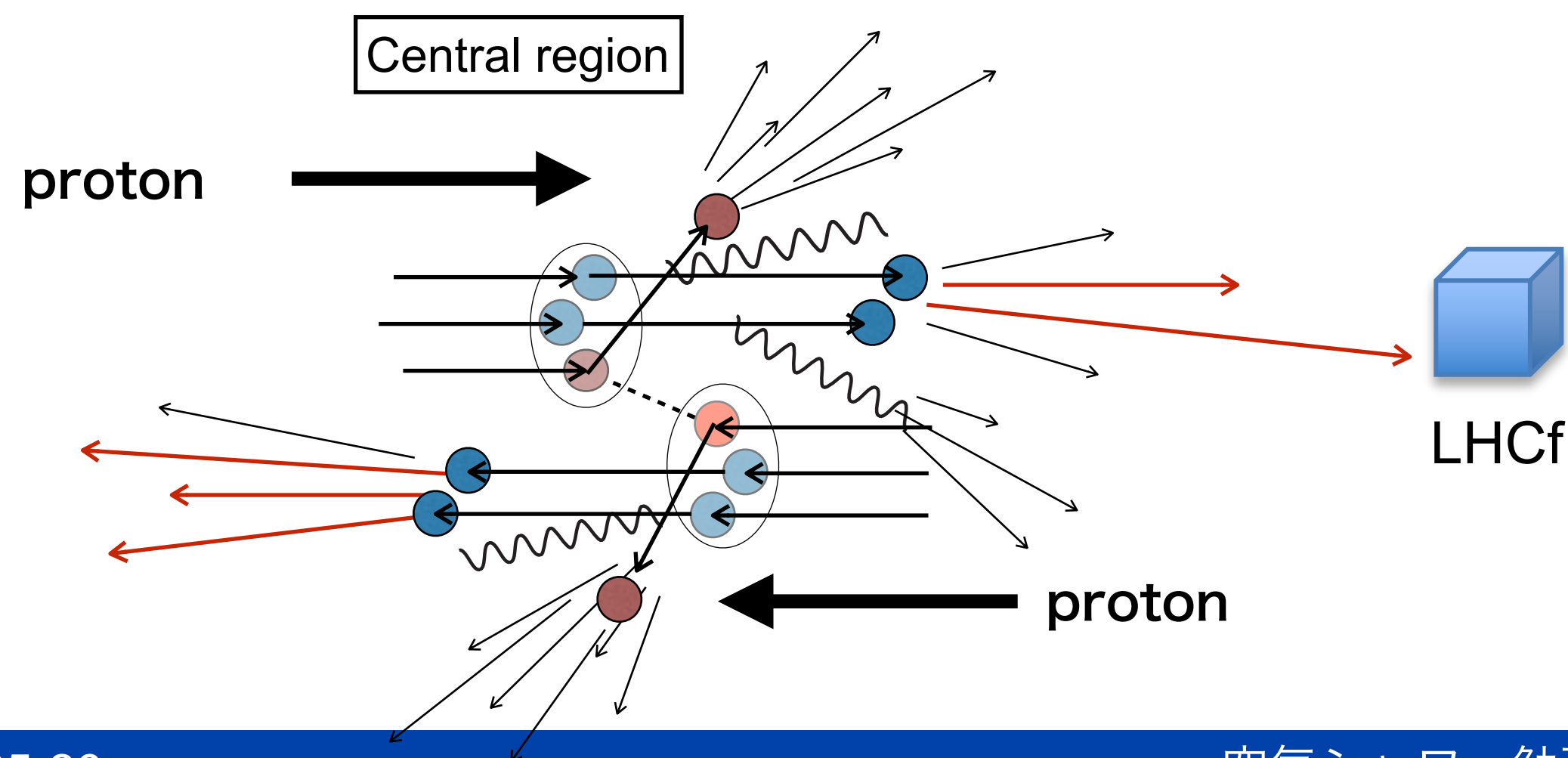


LHCf-ATLASによるMPIモデル検証



ATLAS領域での粒子数
 \propto MPI数

LHCf検出の中性子エネルギー
 \propto MPIに使われなかったエネルギー



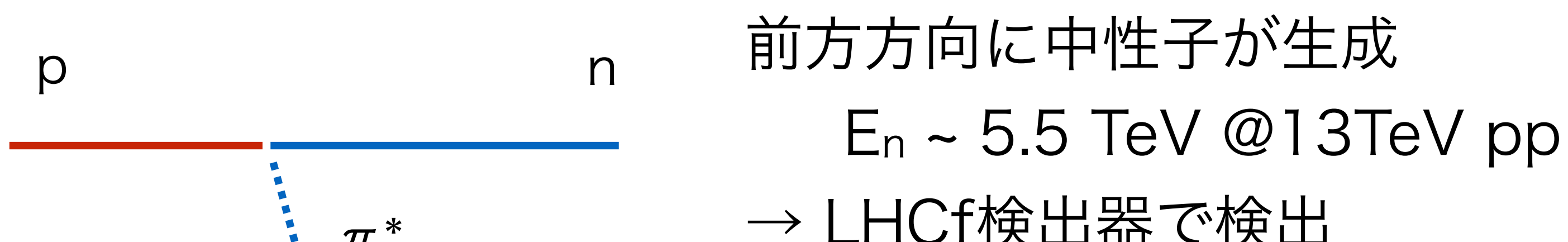
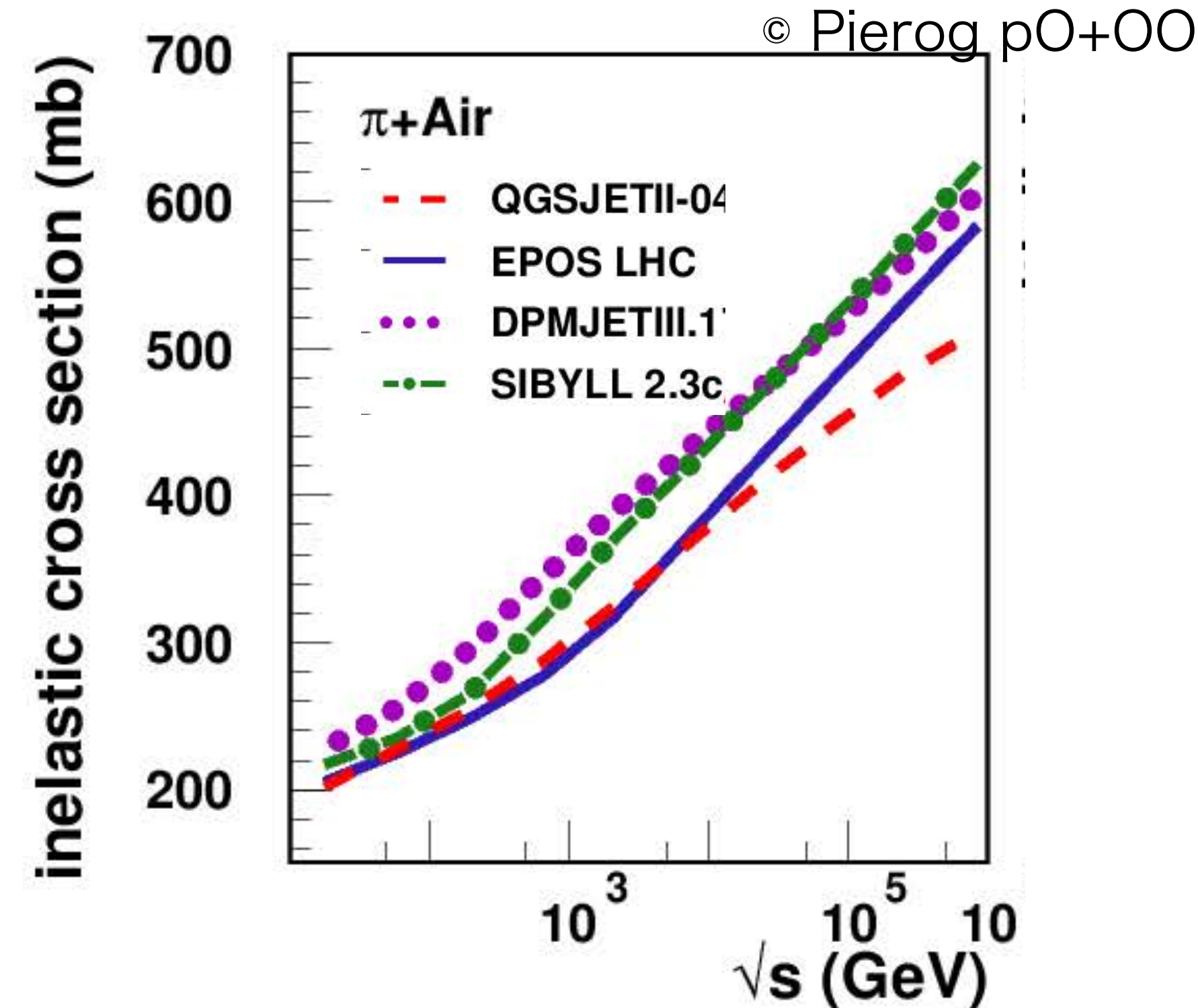
大橋 JPS20秋

**LHCf-ATLAS連動解析によって
 MPIモデルの検証可能**

現在、解析を進めている。

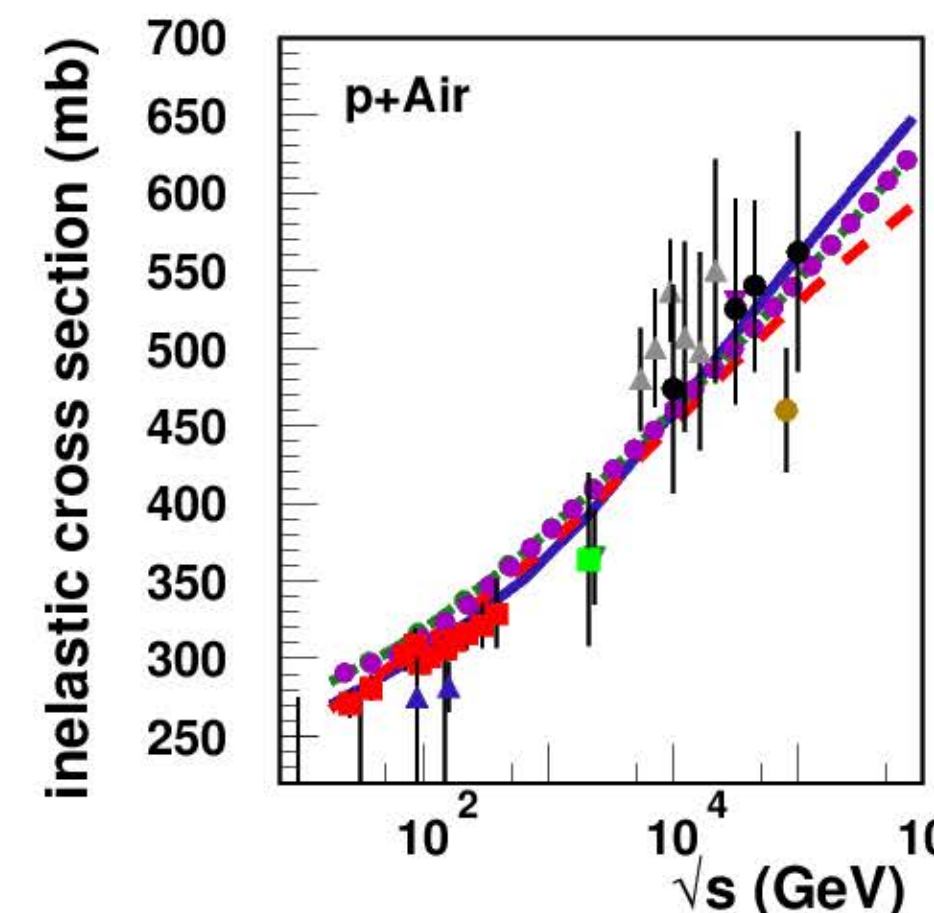
② pp衝突を用いたpπ衝突の測定

- pπ衝突
 - 2次宇宙線-大気衝突の主成分
 - 実験データが固定標的実験 (E<150GeV) のみ
→モデル予測のばらつきが大きい
- pp衝突を用いたpπ衝突測定
 - 陽子とVirtual Pion(パイオン雲)との衝突
One Pion Exchange (OPE)

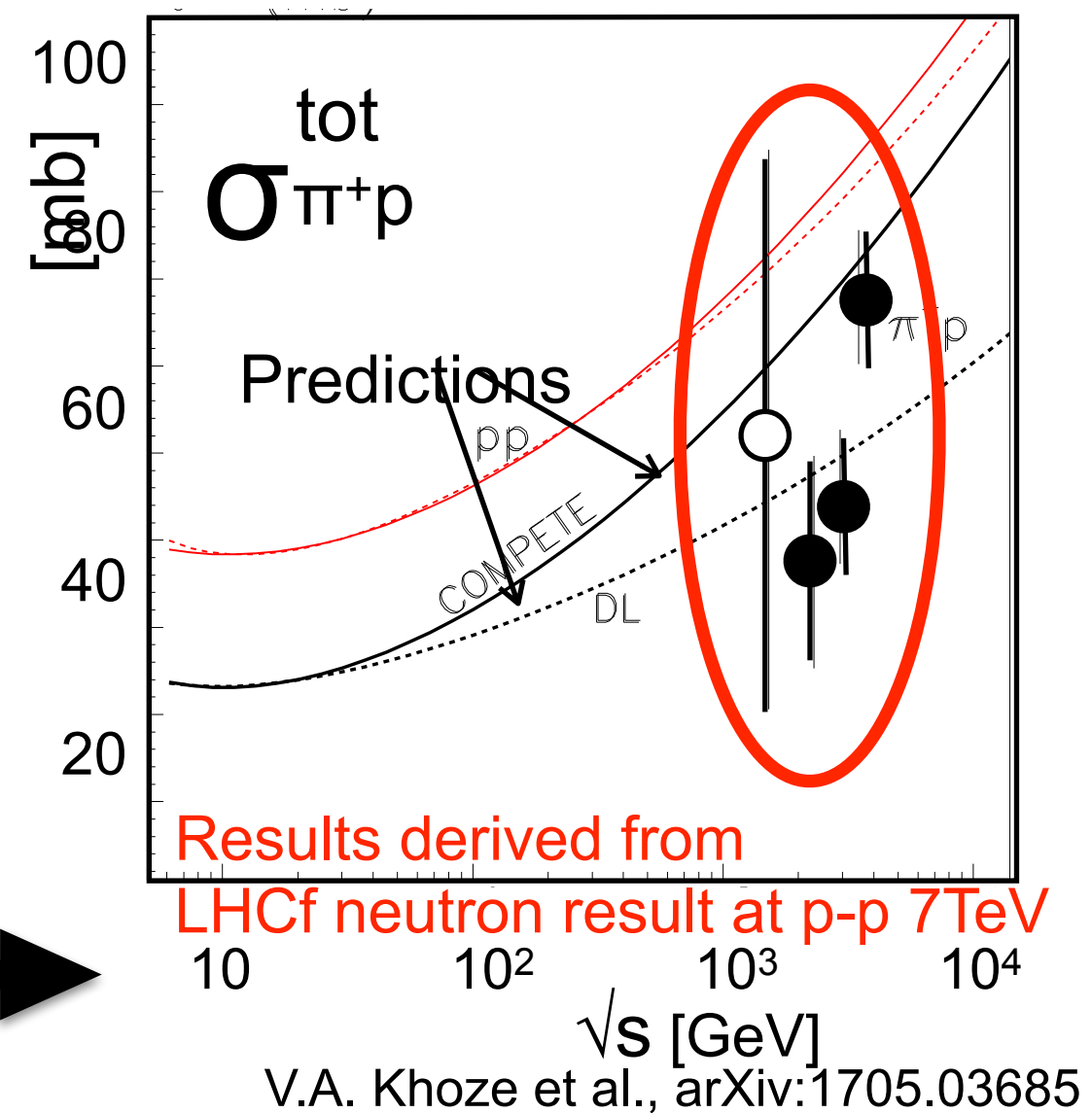
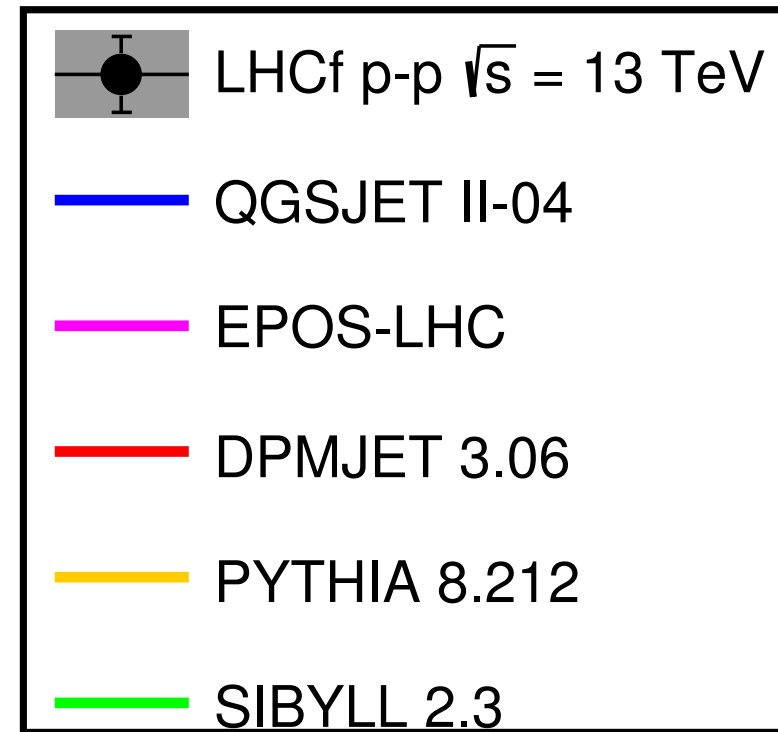
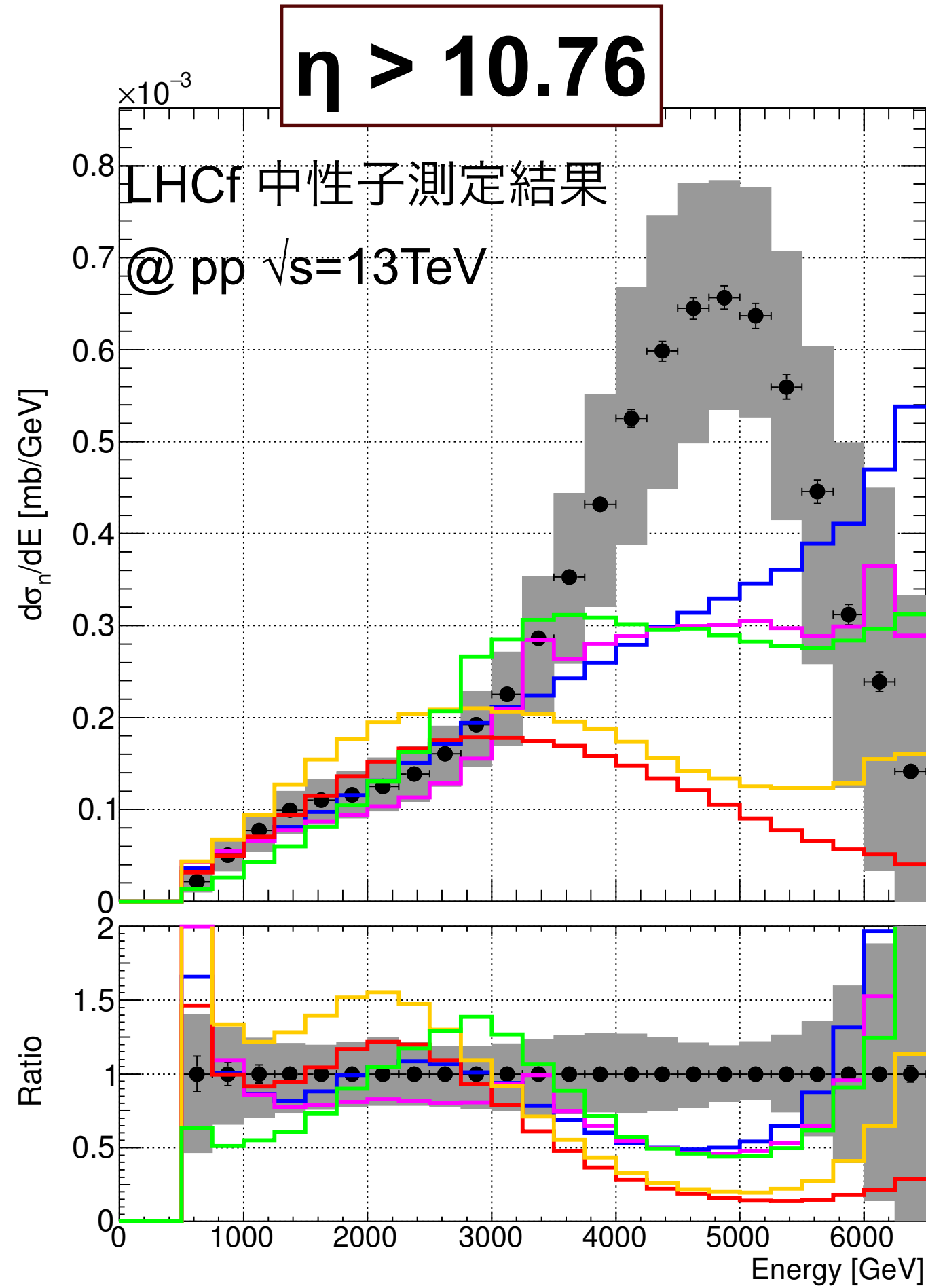
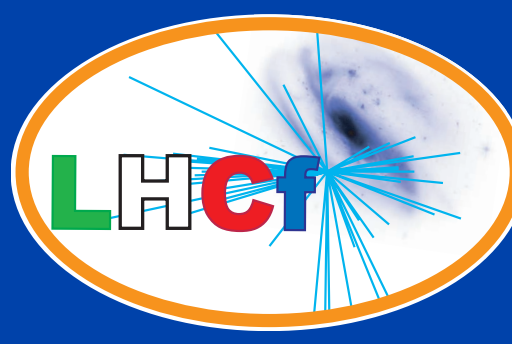


$$\sigma_{OPE}(E_n) = \sigma_{p\pi}(E_{beam} - E_n) \frac{F(E_{beam} - E_n)}{\pi^* \text{フラックス}}$$

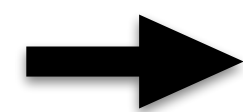
中性子測定



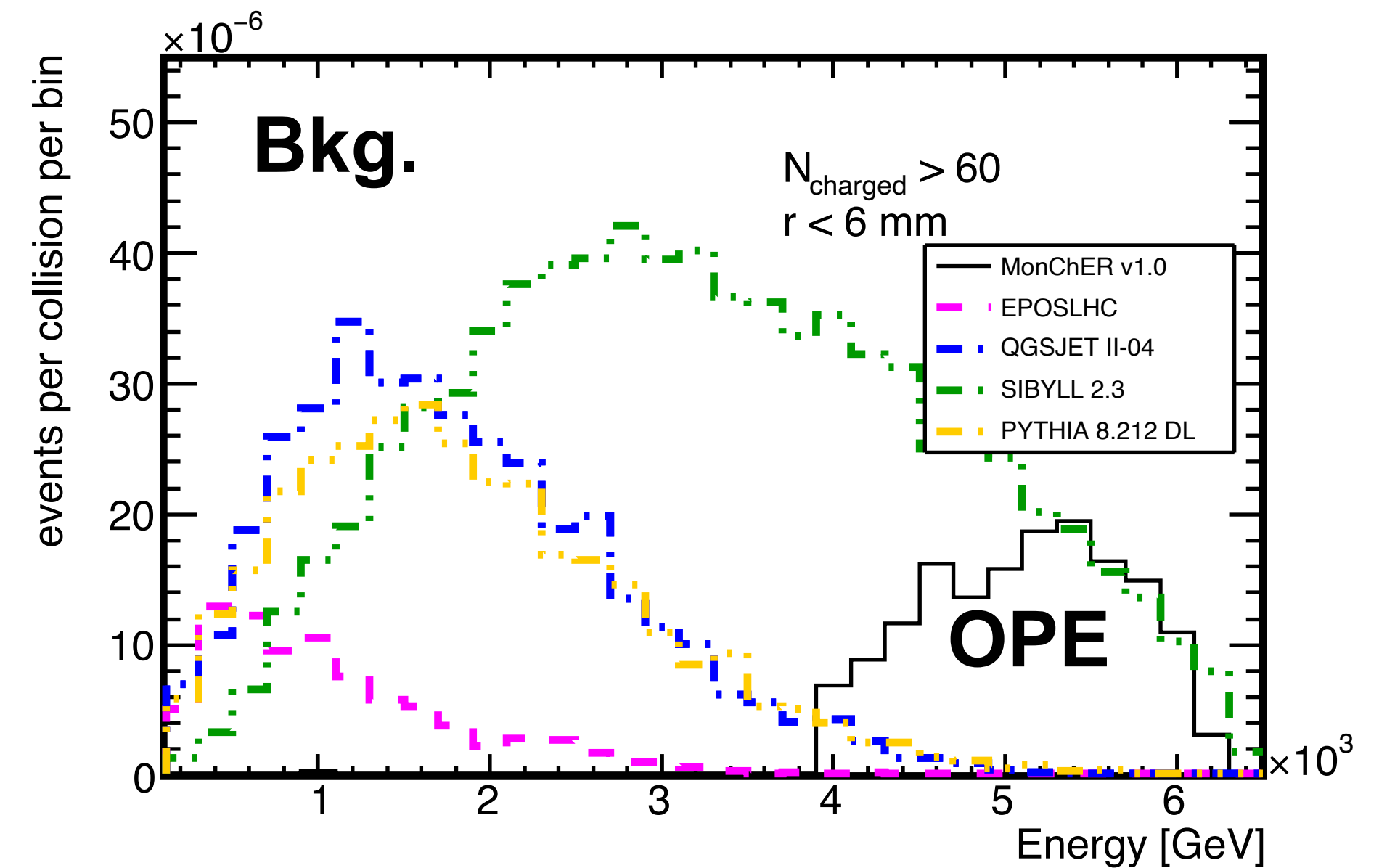
pp衝突を用いたpπ衝突の測定



実際にLHCf結果(@pp,7TeV)から
 $\sigma_{p-\pi}$ を算出

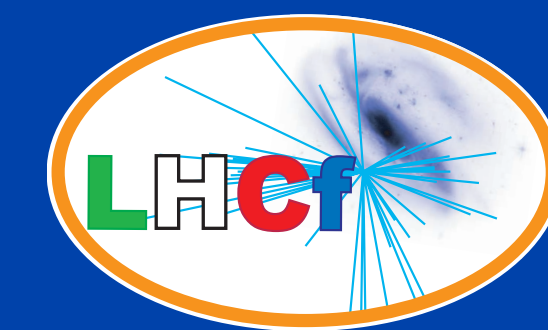


OPE以外からの中性子生成の寄与
(バックグラウンド) は、ATLASとの
共同解析で見積もることができる。



- ・ これまでの解析でOPEの寄与は見えてきている。
- ・ LHCf-ZDCの共同測定により
中性子エネルギー分解能向上40%→20%

③ K^0 測定

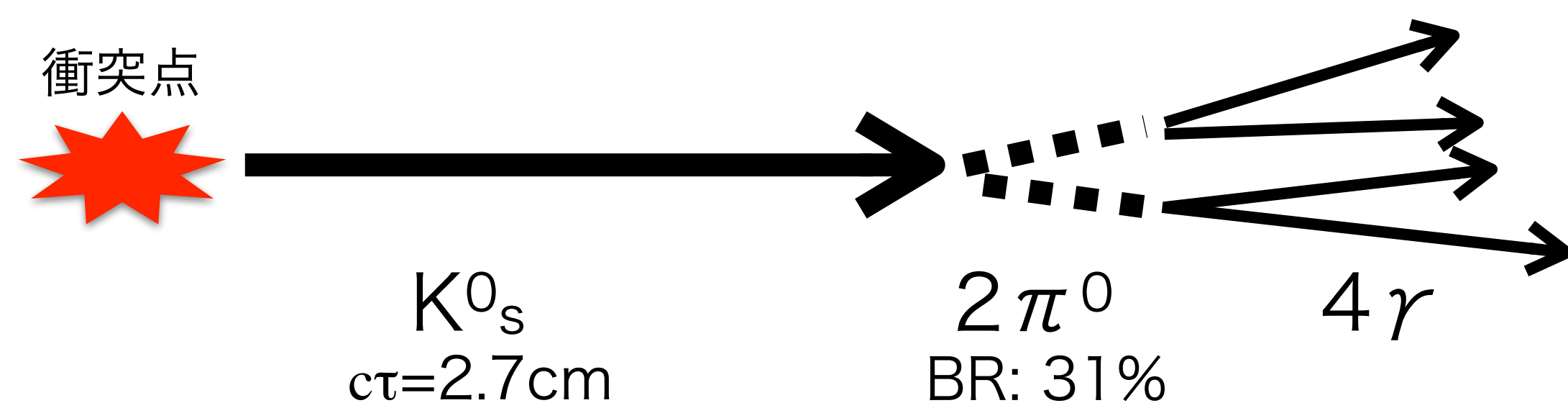


■ モチベーション

- EM/HAD比を変更によって地上ミュオン量に寄与。
(K^0 は π^0 に比べて寿命が長いので崩壊前に衝突)
- K 中間子(sクォーク含む)はモデル予測のばらつきが大きい。

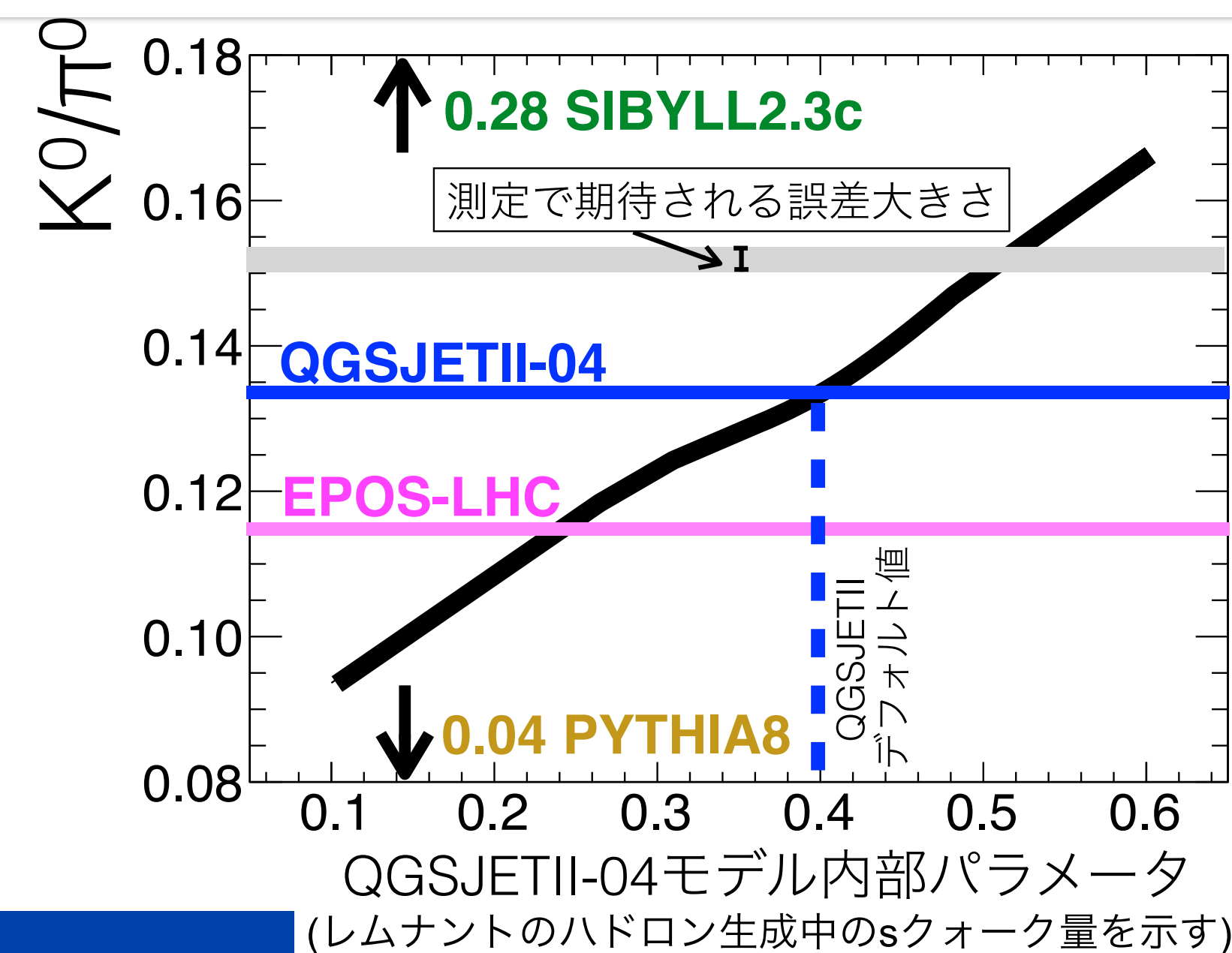
■ 測定手法

- K^0_s 崩壊による4つの γ 線を同時検出 ($K^0_s \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$)

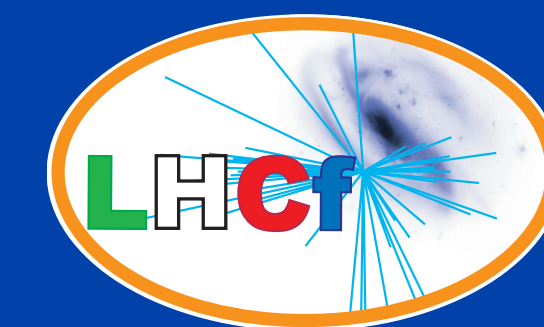


- ▶ 低い幾何学的アクセプタンス ($<10^{-3}$) → 高統計データが必要
- ▶ 4光子入射の事象再構成 → チャレンジング!!

K中間子測定は大気ニュートリノ生成にも関係!!

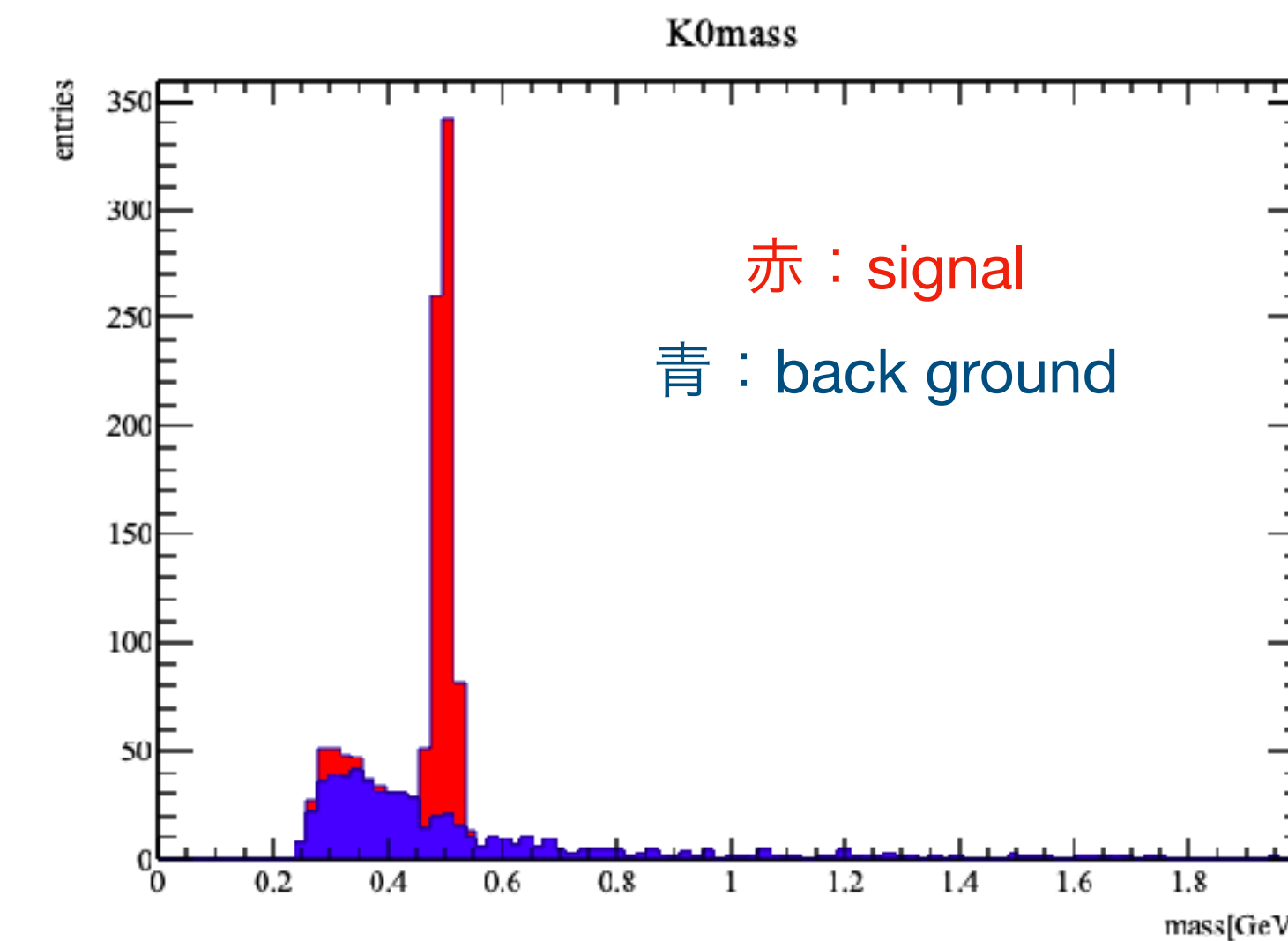
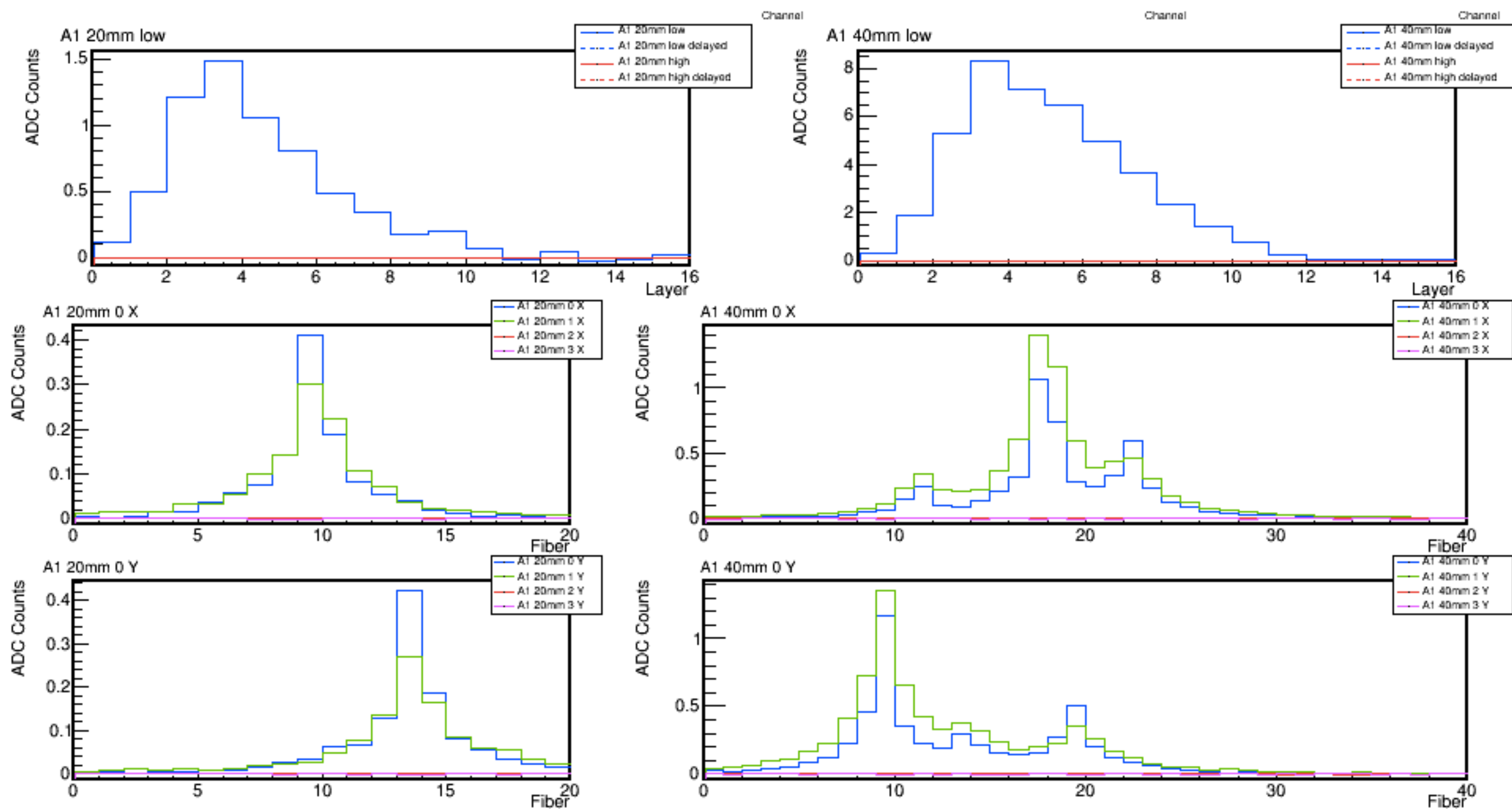


③ K⁰事象のイベント再構成



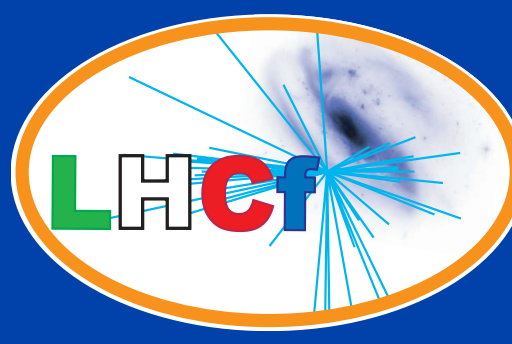
4つの入射粒子からそれぞれの位置とエネルギーを再構成

MCによる再構成質量

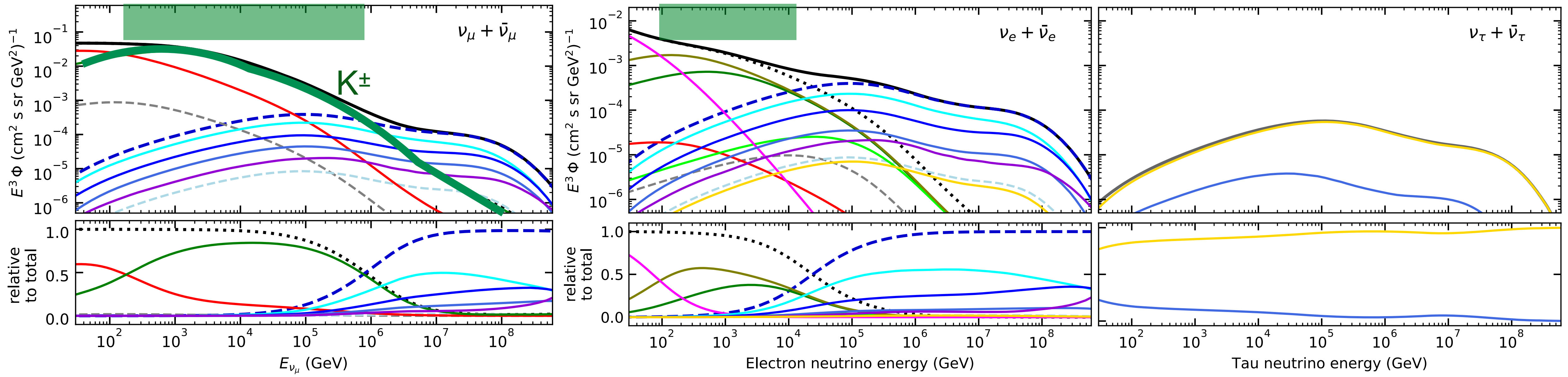
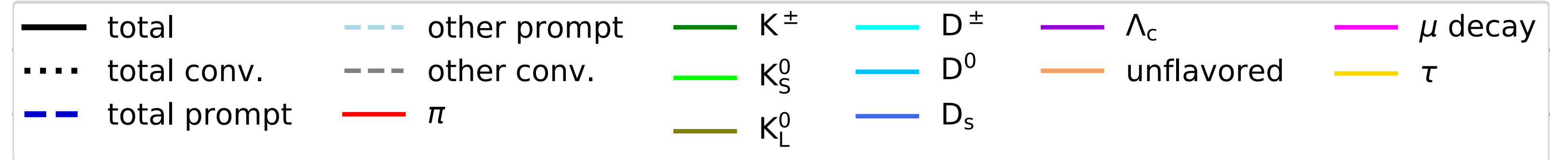


近藤卒論

高エネルギー大気ニュートリノ

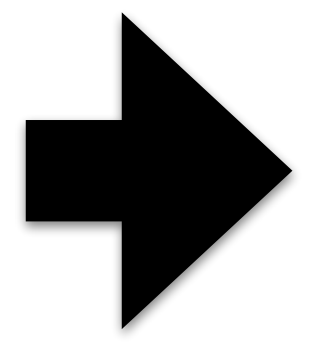


大気ニュートリノの親粒子



K中間子は大気ニュートリノ生成に寄与

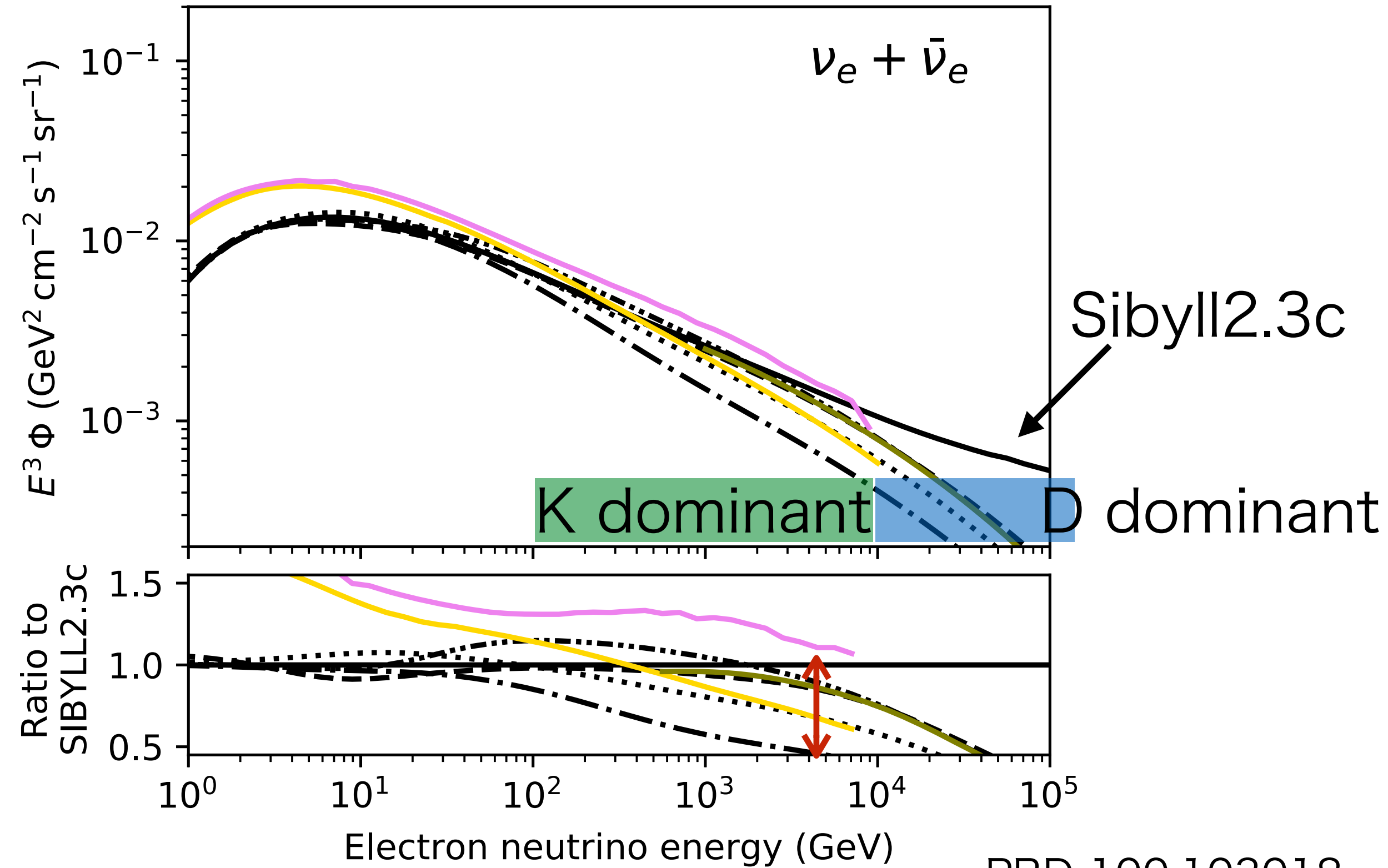
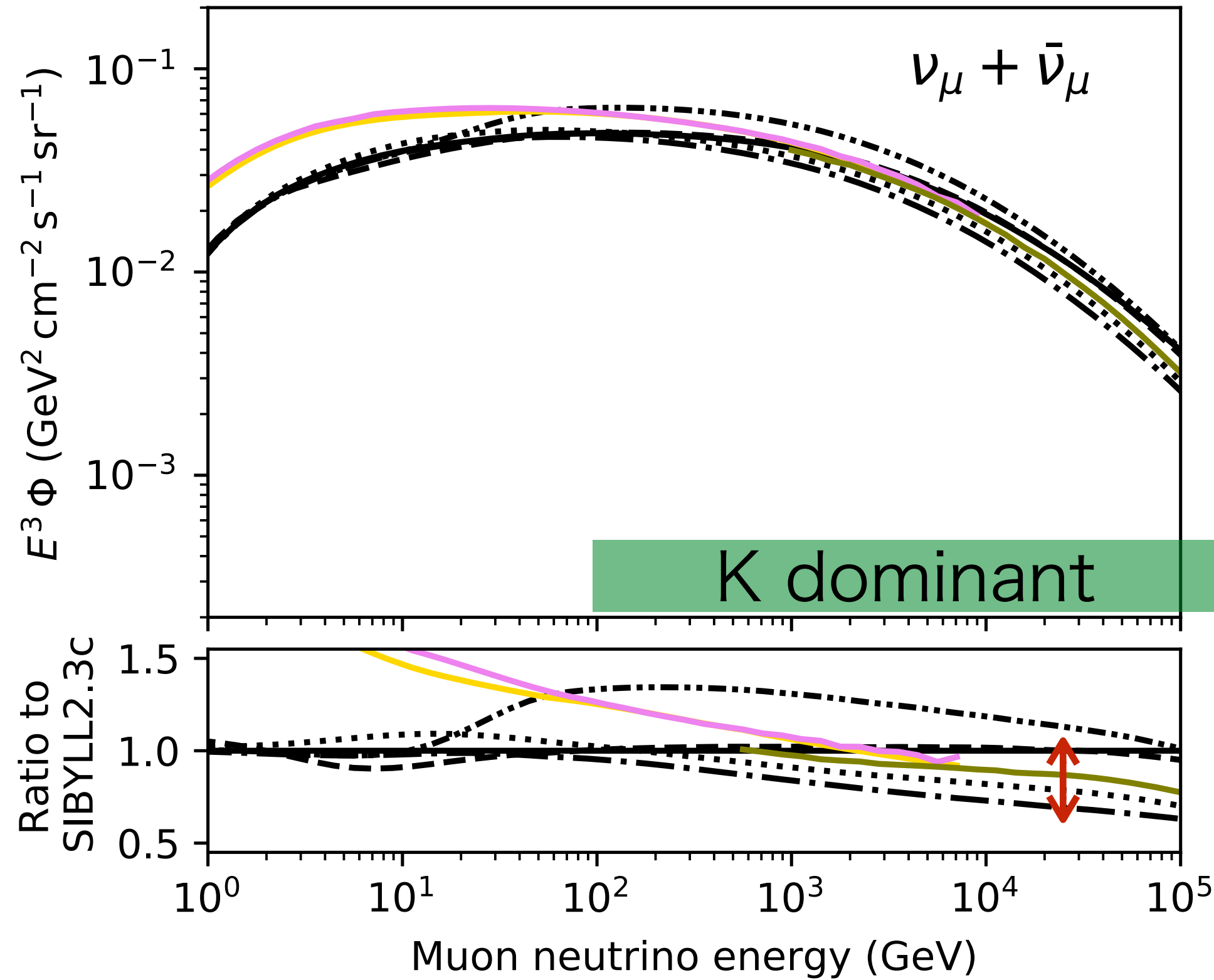
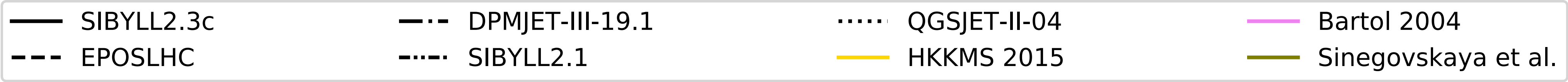
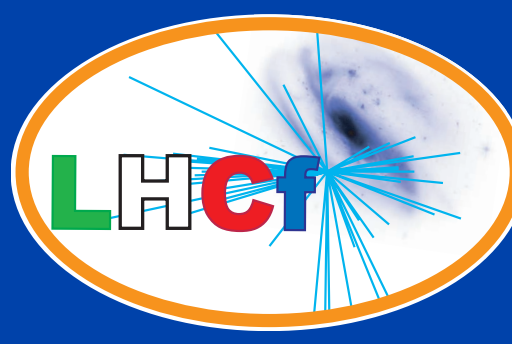
- ν_μ 100GeV-1PeVでK中間子がDominant
- ν_e 100GeV-10TeVでK中間子がDominant



K中間子測定によって
 大気ニュートリノフラックス見積もり精度向上
 = IceCubeによる天体ニュートリノ探索
 のバックグラウンド

PRD 100.103018

大気ニュートリノフラックス



PRD 100.103018

モデル予測の違いが30–50%。

ν_e $E > 10 \text{ TeV}$ ではさらに大きなモデル依存性。(D中間子の寄与)