

LHCfによる超前方中性子測定

名古屋大学 上野真奈

空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会

3月30日 東京大学 宇宙線研究所

目次

* 序論

- 宇宙線とハドロン相互作用
- 中性子生成断面積のエネルギー依存性
- LHCf実験

* LHC $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突測定データ解析

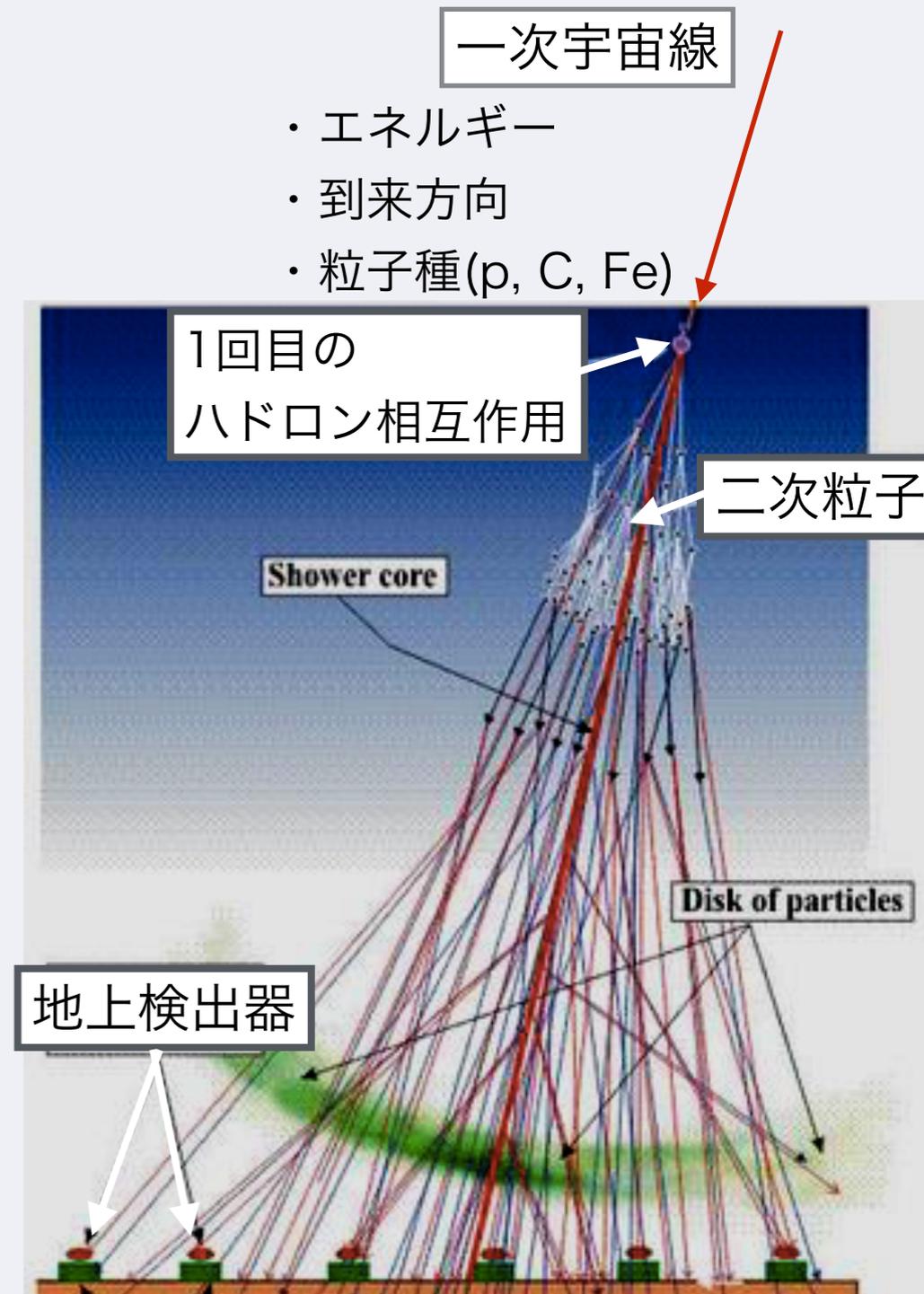
- イベント再構成
- 事象選別
- 結果および比較

* まとめ

宇宙線とハドロン相互作用

- 地上観測実験では、空気シャワー中の二次粒子を測定するため、一次宇宙線の物理量の推定にはMCシミュレーションが用いられる。
- 一次宇宙線の物理量を正しく求めるには、宇宙線と大気原子核のハドロン相互作用を理解する必要がある。
- ハドロン相互作用は実験的には加速器で検証される。

	実験室系(宇宙線の) エネルギー	重心系衝突 エネルギー(\sqrt{s})
ISR加速器	10^{13} eV	62.7GeV
RHIC加速器	10^{14} eV	510GeV
LHC加速器 (2010 -)	10^{16} eV	7TeV
LHC加速器 (2015 -)	10^{17} eV	13TeV



宇宙線とハドロン相互作用

- 地上観測実験では、空気シャワー中の二次粒子を測定するため、一次宇宙線の物理量の推定にはMCシミュレーションが用いられる。
- 一次宇宙線の物理量を正しく求めるには、宇宙線と大気原子核のハドロン相互作用を理解する必要がある。
- ハドロン相互作用は実験的には加速器で検証される。

	実験室系(宇宙線の) エネルギー	重心系衝突 エネルギー(\sqrt{s})
--	---------------------	------------------------------

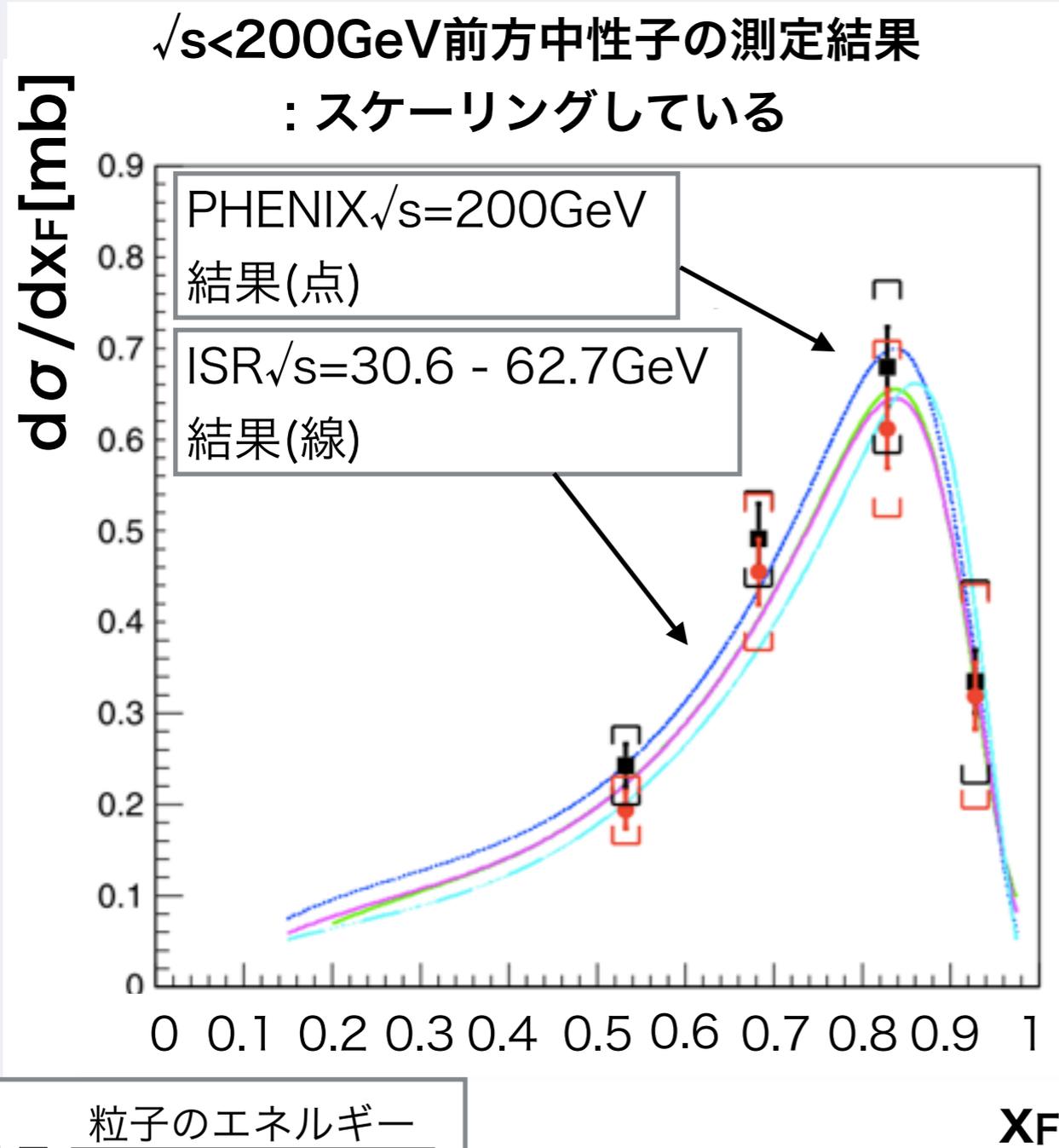
ISR加速器	10^{13}eV	62.7GeV
RHIC加速器	10^{14}eV	510GeV
LHC加速器 (2010 -)	10^{16}eV	7TeV
LHC加速器 (2015 -)	10^{17}eV	13TeV

低エネルギーから高エネルギーへのハドロン相互作用のエネルギー依存性の検証が重要



中性子生成断面積の衝突エネルギー依存性

同一 p_T 領域において、衝突エネルギーで規格化したエネルギースペクトルを比較



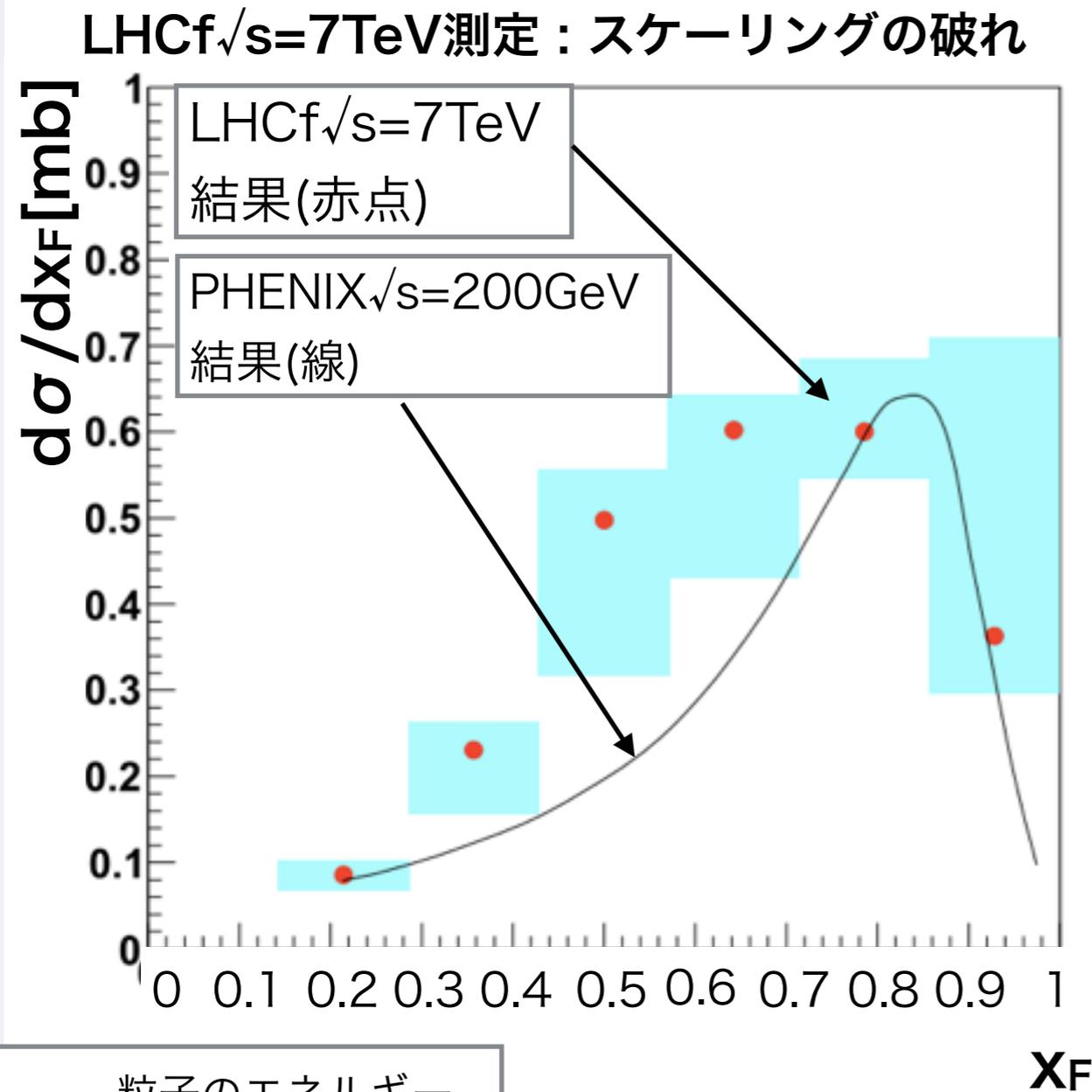
- 衝突エネルギー $\sqrt{s} = 30.6 \text{ GeV} - 200 \text{ GeV}$ でスケーリングの検証
- $\sqrt{s} < 200 \text{ GeV}$ ではスケーリングが成り立つ

$$x_F = \frac{\text{粒子のエネルギー}}{\text{ビームエネルギー}}$$

A. Adare. et al. (2013)

中性子生成断面積のエネルギー依存性

同一 p_T 領域において、衝突エネルギーで規格化したエネルギースペクトルを比較



- 衝突エネルギー $\sqrt{s}=30.6\text{GeV} - 200\text{GeV}$ でスケーリングの検証
- $\sqrt{s} < 200\text{GeV}$ ではスケーリングが成り立つ

- 衝突エネルギー $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ (LHC)でスケーリングの検証
- LHCf実験の $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ の測定結果はスケーリングの破れを示唆

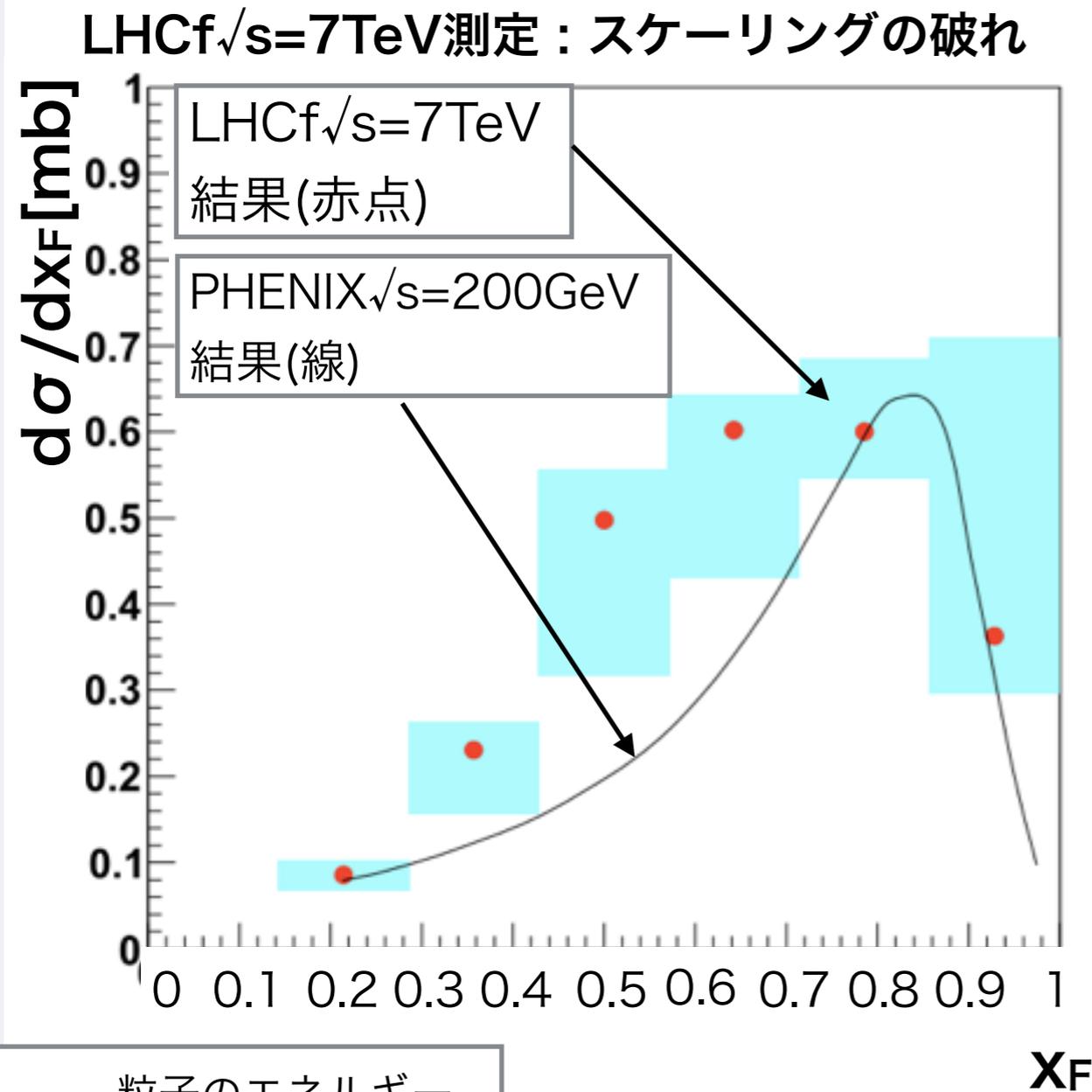
- 衝突エネルギー大でスケーリングが破れる?

$$X_F = \frac{\text{粒子のエネルギー}}{\text{ビームエネルギー}}$$

K. Kawade (2014)

中性子生成断面積のエネルギー依存性

同一 p_T 領域において、衝突エネルギーで規格化したエネルギースペクトルを比較



- 衝突エネルギー $\sqrt{s}=30.6\text{GeV} - 200\text{GeV}$ でスケーリングの検証
- $\sqrt{s} < 200\text{GeV}$ ではスケーリングが成り立つ

- 衝突エネルギー $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ (LHC)でスケーリングの検証
- LHCf実験の $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ の測定結果はスケーリングの破れを示唆

- 衝突エネルギー大でスケーリングが破れる?

$$X_F = \frac{\text{粒子のエネルギー}}{\text{ビームエネルギー}}$$

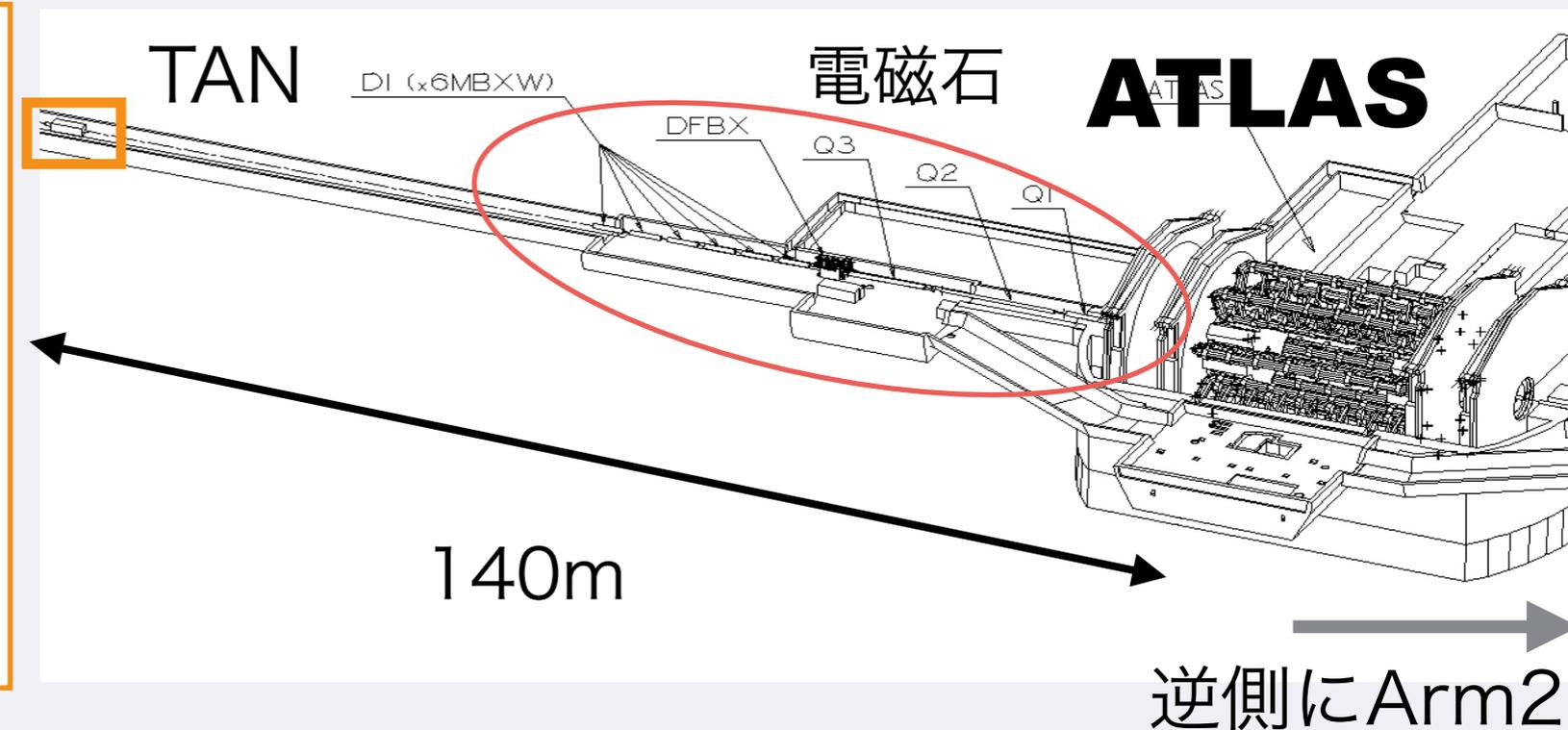
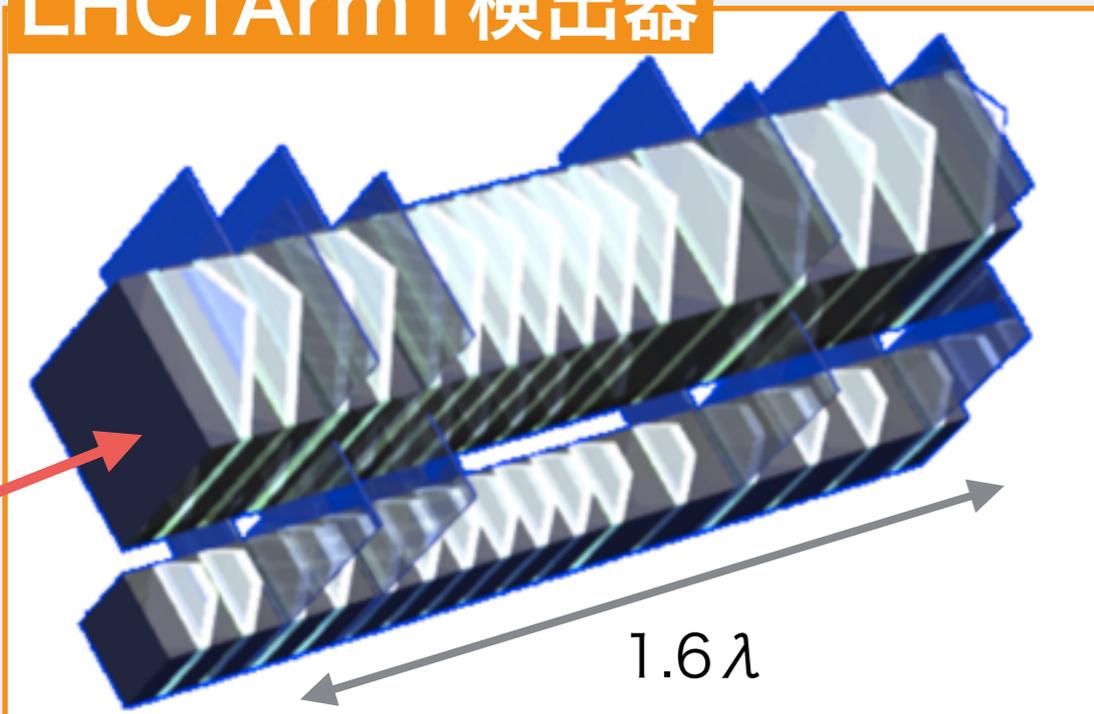
K. Kawade (2014)

$\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 衝突で $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ の結果を検証

LHCf実験

- Large Hadron Collider forward (LHCf)実験はCERN-LHC加速器でハドロン散乱の超前方領域への中性粒子生成を測定する。
- これまでに $\sqrt{s}=900\text{GeV}$, 2.76TeV , 7TeV , 13TeV で測定を行った。

LHCfArm1 検出器



- $20\text{mm}\times 20\text{mm}$ と $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ の2つのカロリメータで構成。
- それぞれ、発達層(タングステン)と16層のシンチレータからなる。間に4層の位置検出層が挿入。
- 検出器の性能はビームテストで検証。
- エネルギー分解能は41%、位置分解能は 1.0mm @proton 300GeV

LHC $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突測定データ解析

- 使用データ：2015年6月12日 22:32 - 6月13日 1:30
- 取得イベント数： 2.1×10^6
- Arm1 検出器のデータ解析を行った
Arm2 検出器のデータも独立に解析
→クロスチェックを実施

データ解析方法

1) エネルギー再構成

2) 以下の項目でイベント選別

- 低エネルギー事象の除去

- 解析領域の決定

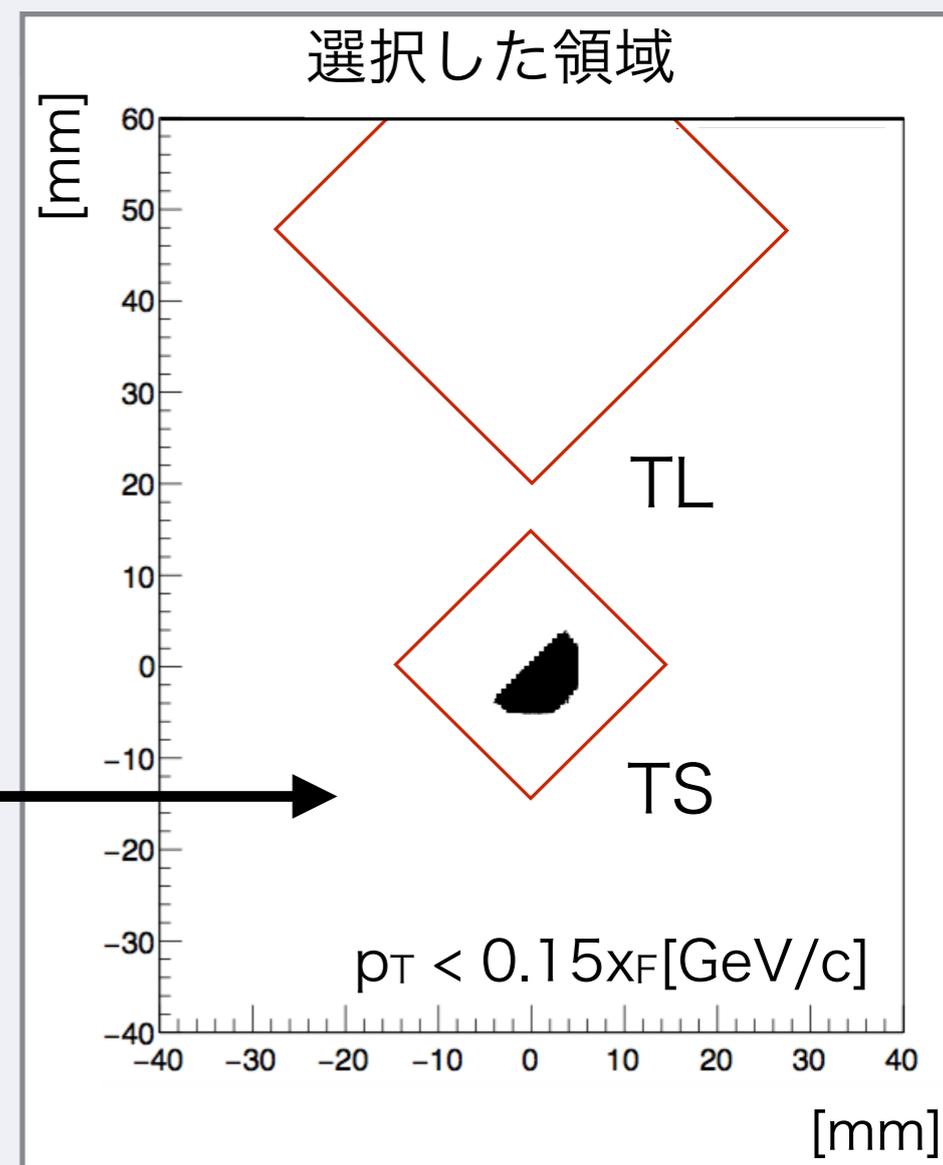
(Arm2と比較)

$$p_T < 0.15x_F [\text{GeV}/c]$$

($\sqrt{s}=7\text{TeV}$ と比較)

$$p_T < 0.11x_F [\text{GeV}/c]$$

- 粒子種選別



エネルギー再構成

入射粒子エネルギーEは以下の式で求められる。

$$E = J(F(x, y)S')$$

測定量

$$S' = \sum_{i=2}^{15} n_{step} dE_i \quad n_{step} = \begin{cases} 1 (i = 2 - 11) \\ 2 (i = 12 - 15) \end{cases}$$

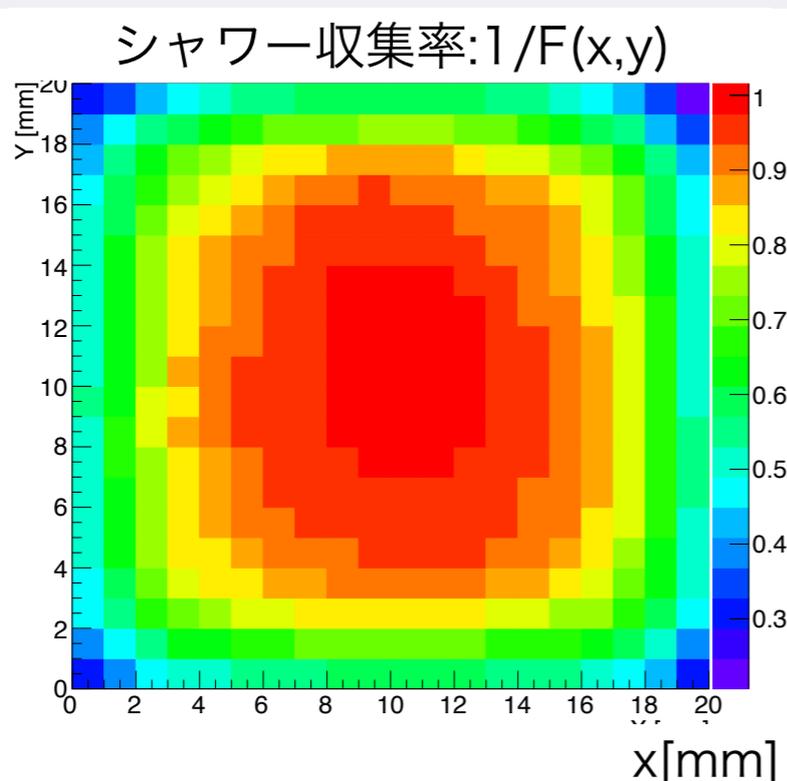
S' : シンチレータ各層におけるエネルギー損失の総和

F(x, y) : 粒子の入射位置に依存した補正值

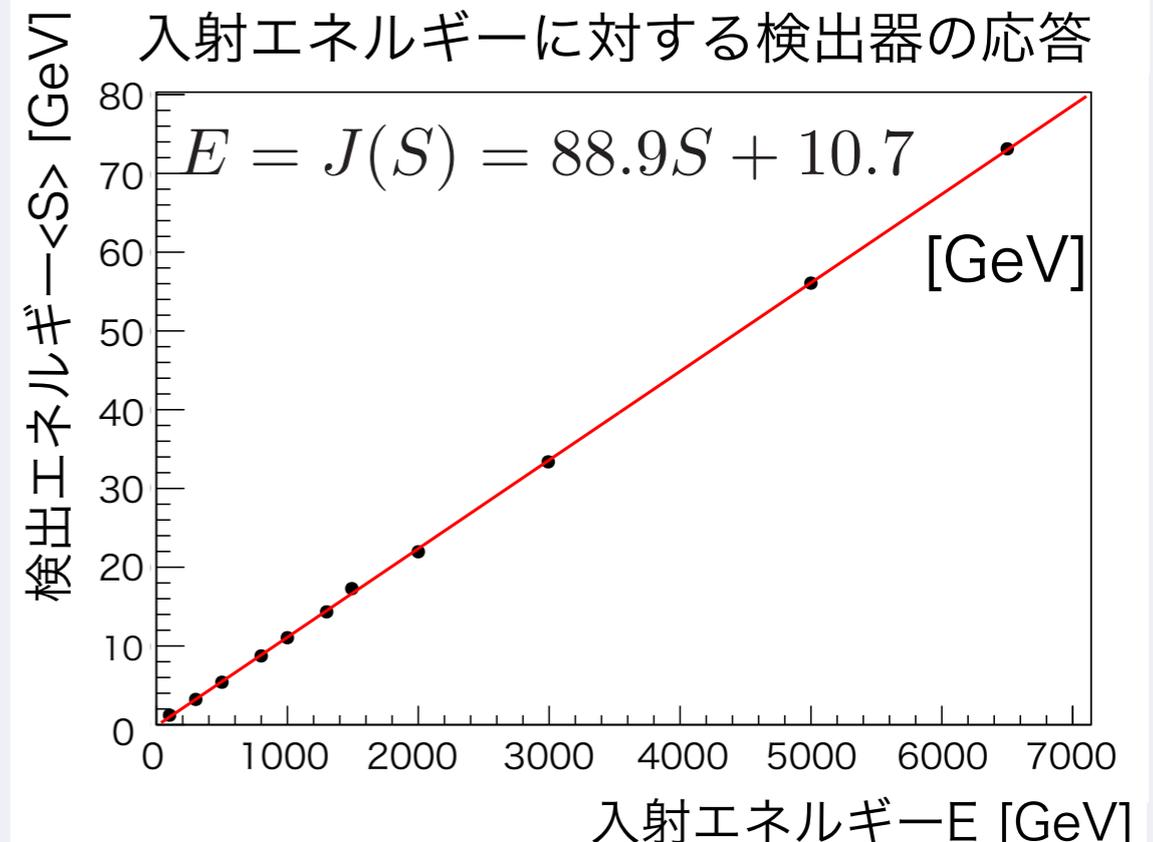
J(S) : 入射エネルギーに対する検出器応答

MCシミュレーション

F(x, y)

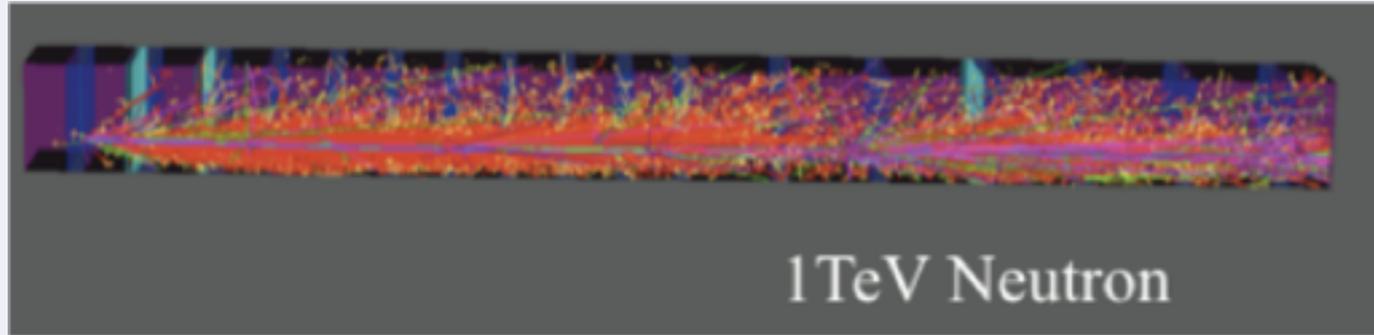


J(S)

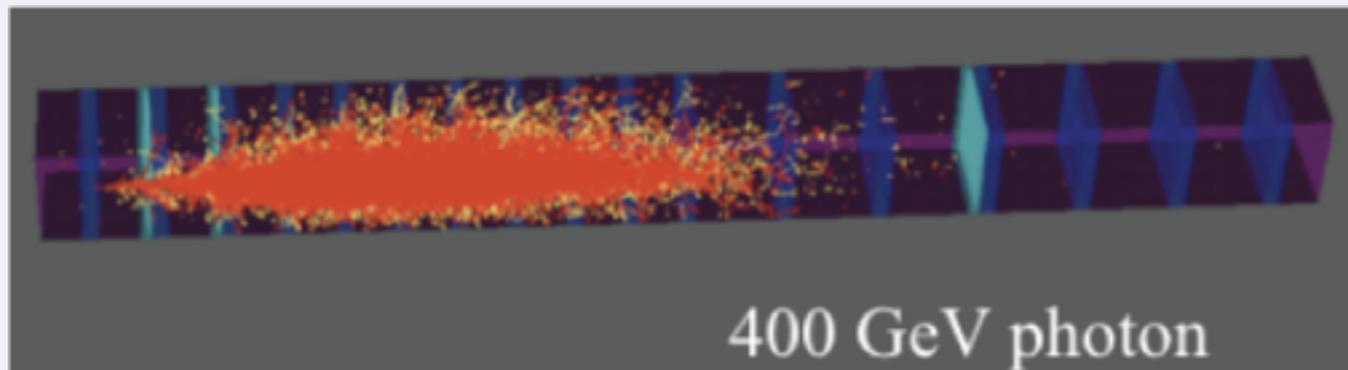


粒子種選別

中性子→ハドロンシャワー：検出器後方層で発達



ガンマ線→電磁シャワー：検出器前方層で発達

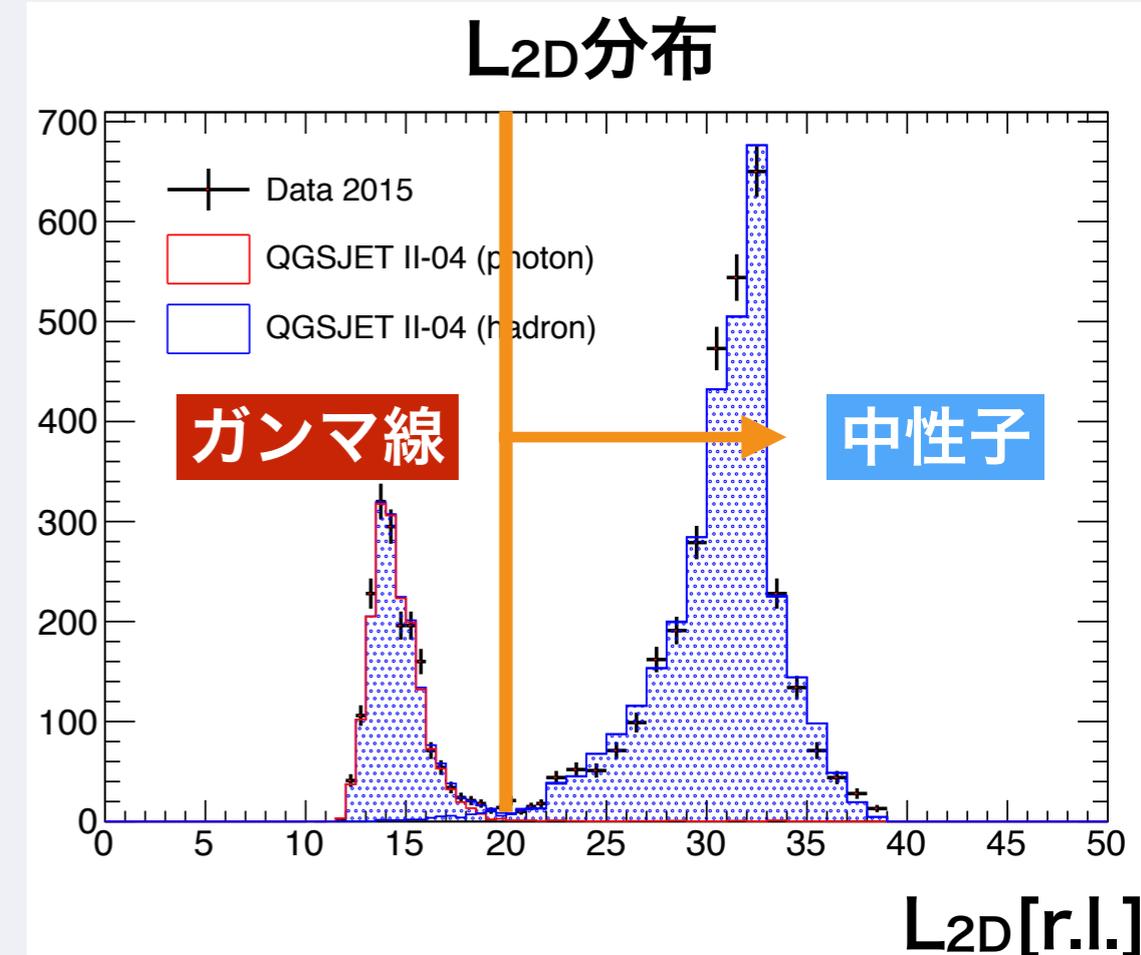


- 検出器には主に中性子とガンマ線が入射
→検出器応答の違いを用いて
粒子種を選別

シャワーの発達深度を表すパラメータ

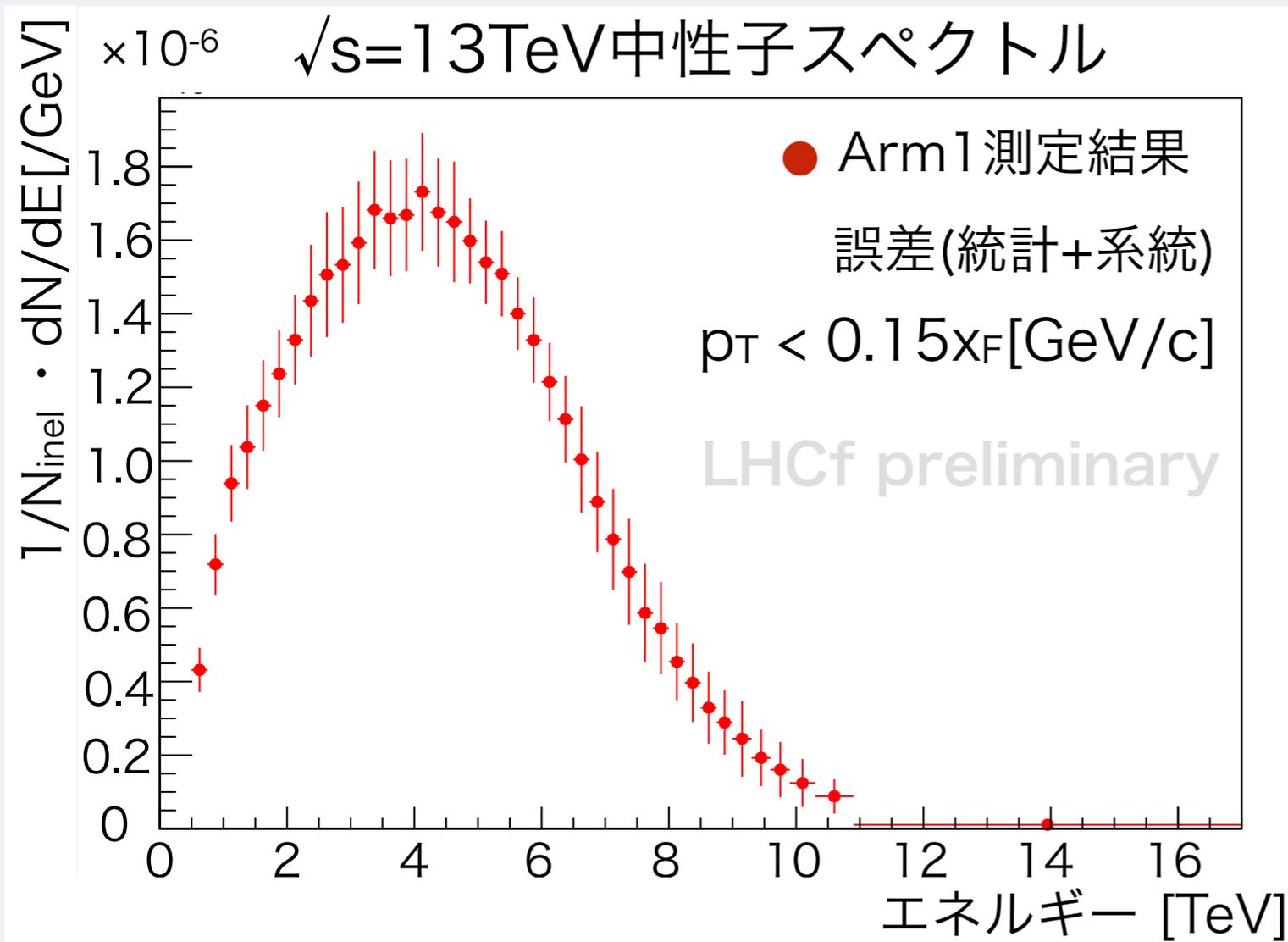
$$L_{2D} = L_{90\%} - 0.25 \times L_{20\%}$$

$L_X\%$ は 検出器におけるエネルギー損失の総和のうち
 $X\%$ のエネルギー損失がなされた深さ



$\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 陽子陽子衝突測定結果

- ・ 解析により $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 衝突における中性子のエネルギースペクトルを得た。
 - ・ 得られた結果にはArm2で見積もられた系統誤差をつけた。
- 以下の二つの比較をおこなう。

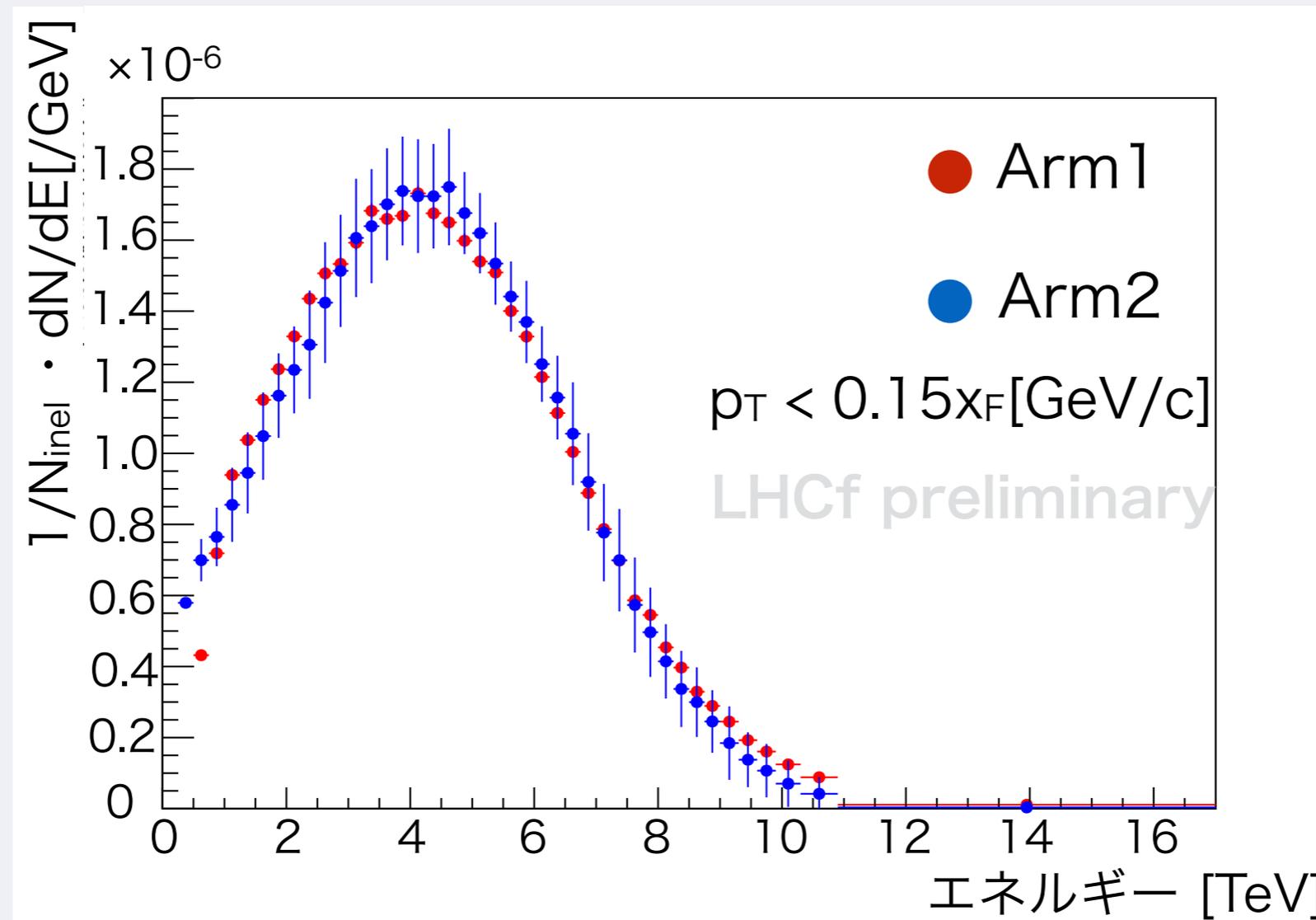


・ Arm2検出器の結果と比較
→独立解析によって結果を検証
($p_T < 0.15x_F [\text{GeV}/c]$)

・ $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 衝突測定結果と比較
($p_T < 0.11x_F [\text{GeV}/c]$)

Arm2検出器測定結果との比較

Arm1 検出器で測定された結果を独立解析されたArm2検出器の結果と比較

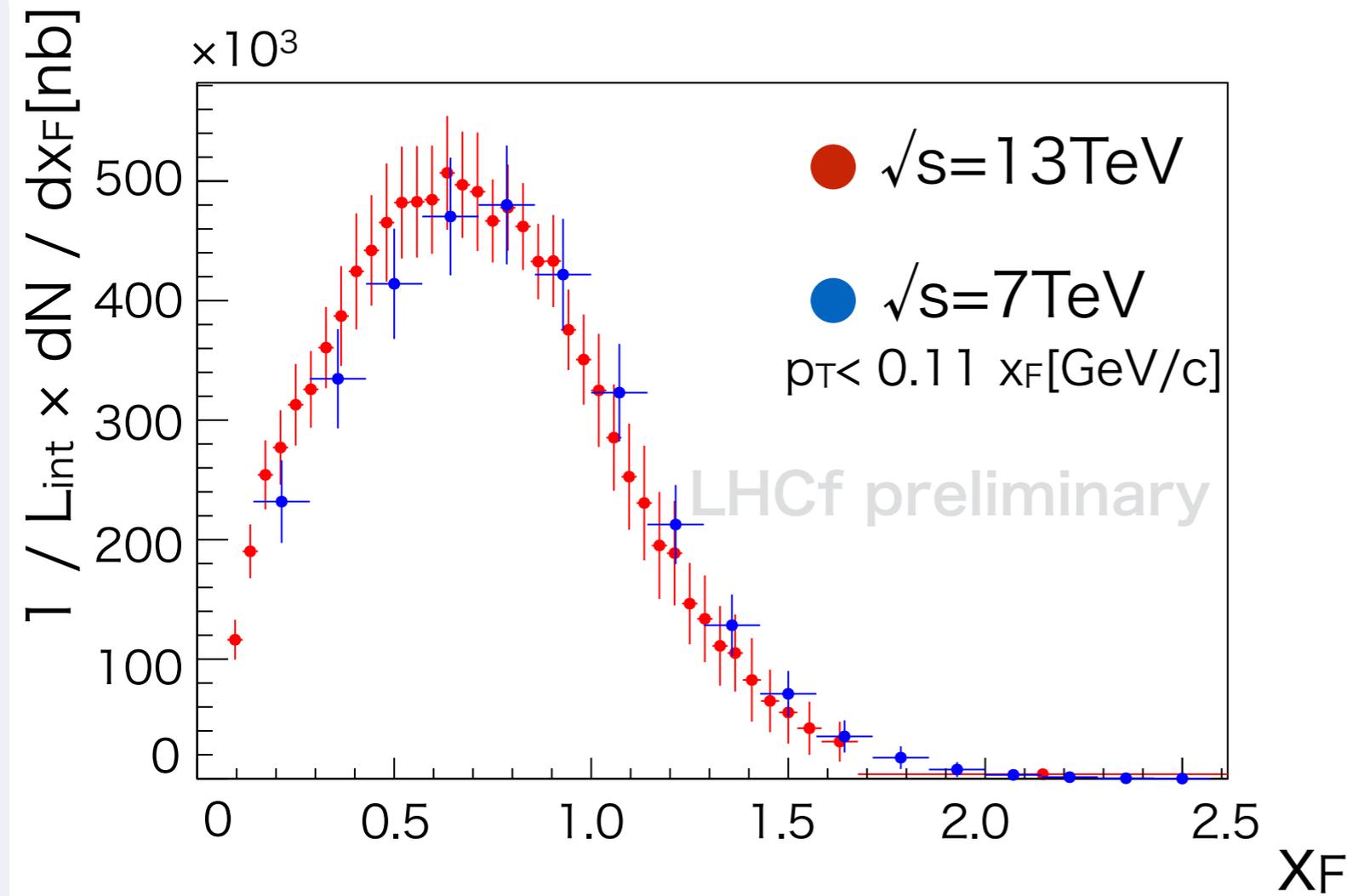


- 二つの検出器で測定された結果は誤差の範囲で一致

$\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 衝突結果との比較

- $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 衝突で測定で得られた結果を $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ の測定結果と検出器効果が含まれているスペクトルで比較した。

$\sqrt{s}=13\text{TeV}$ と $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 中性子スペクトルの比較



- 新検出器と旧検出器のエネルギー分解能は同等。
→ エネルギースペクトルは直接比較が可能。
- $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 結果は低エネルギー側へのピークの遷移を示唆する。
- $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 測定データは $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 測定データと誤差の範囲で一致。

$$x_F = \frac{\text{粒子のエネルギー}}{\text{ビームエネルギー}}$$

まとめ

- * $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 陽子陽子衝突の中性子エネルギースペクトル解析を進行中
- * 約40%のエネルギー分解能の効果を含んだ状態で、
 $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 陽子陽子衝突の中性子スペクトルを導出
- * $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 衝突における中子のエネルギースペクトルと比較
 - 系統誤差の範囲で一致
 - 衝突エネルギー大で中性子の生成断面積がエネルギー依存性を持つ可能性を支持
- * 今後は検出器効果を除き、Arm1の中性子スペクトルを得るとともに、
Arm2検出器測定データとの複合解析を行い、最終結果を導出する
- * RHICf実験で $\sqrt{s}=510\text{GeV}$ 陽子陽子衝突測定を今年度実施予定
 - 広い衝突エネルギー範囲でエネルギー依存性を検証する

BACK UP

What to be measured at accelerators?

1. Inelastic cross section
(interaction mean free path)

2. Particle production

3. Nuclear effect

Note: $v_s=14\text{TeV}$

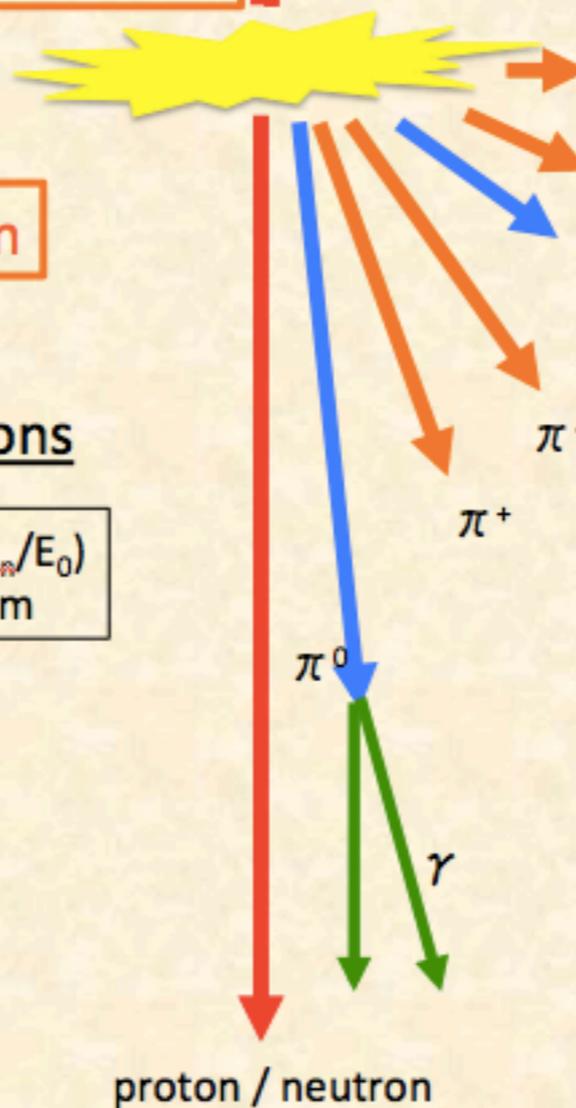
$\Leftrightarrow E_{\text{lab}}=10^{17}\text{eV}$

Leading baryons

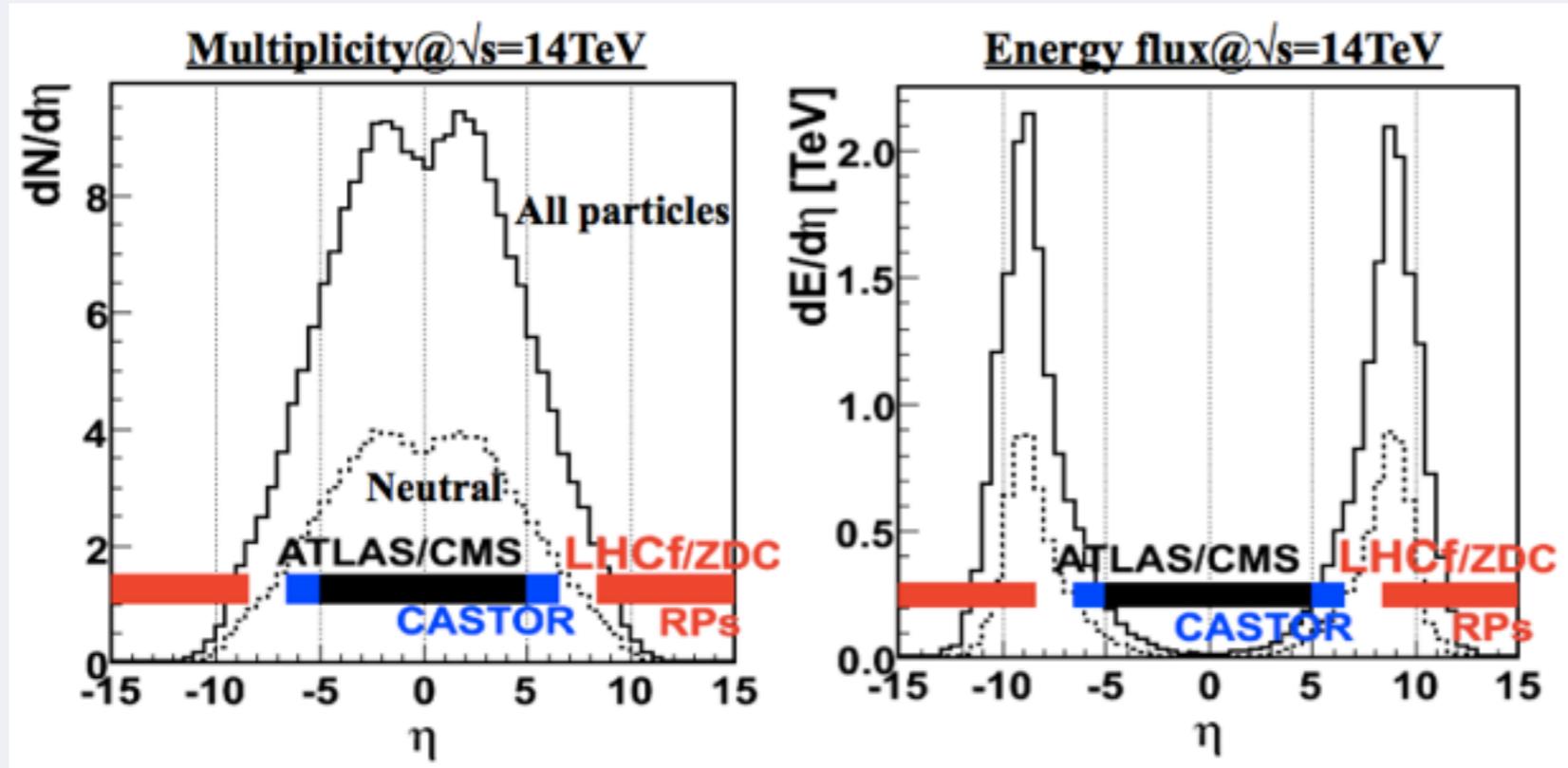
elasticity (E_{baryon}/E_0)
baryon spectrum

Multi meson production

inelasticity ($E_{\text{meson}}/E_0 = 1 - \text{elasticity}$)
multiplicity
meson spectrum



超前方粒子生成



$$\eta = -\log \left[\tan \frac{\theta}{2} \right]$$

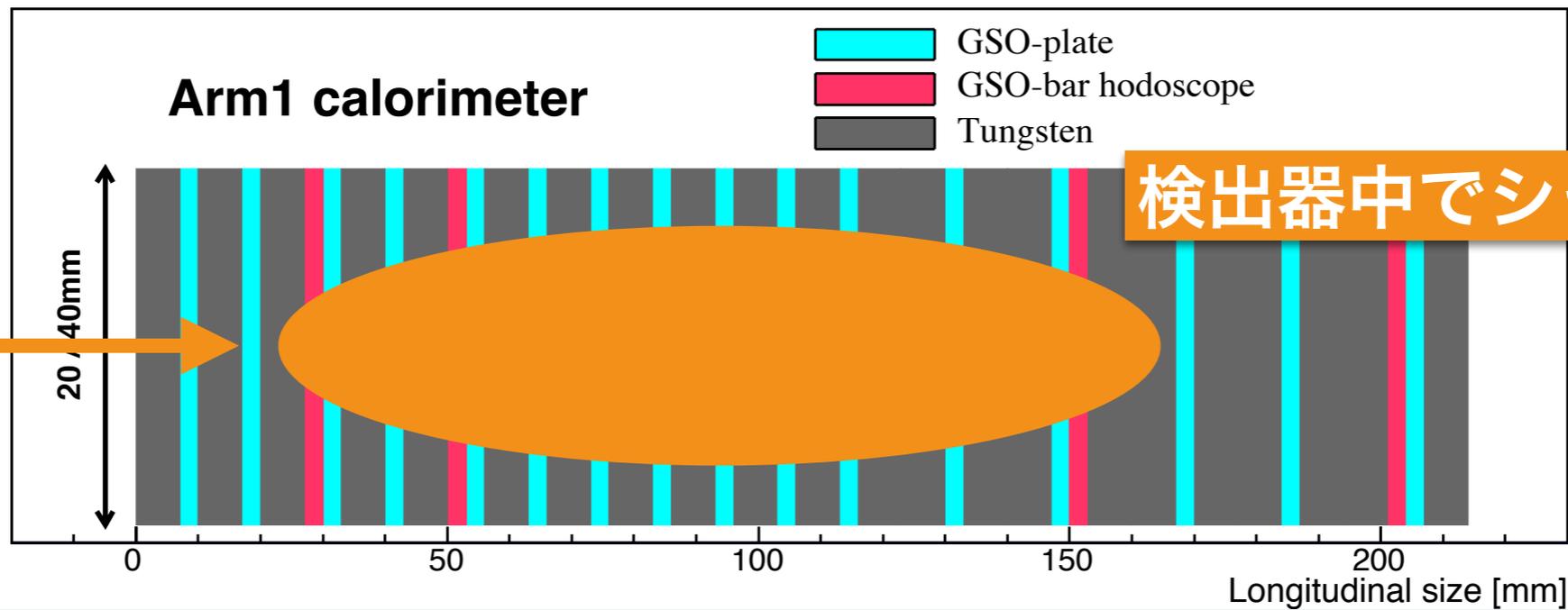
- 粒子種や運動量に依存しない散乱角の指標
- θ : 粒子の進行方向とビームのなす角

- MC シミュレーションによって予測される $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突による二次粒子の多重度(左)とエネルギーフラックス(右)の依存性。
- 生成される粒子の数はATLAS 実験やCMS 実験の測定するビームの進行方向に対して垂直な角度領域に多い。
- 一方で、多くのエネルギーが超前方方向に分布。
- LHCf 実験の測定する $\eta > 8$ の領域には、数は少ないが非常に高いエネルギーを持つ粒子が飛来。

LHCf検出器における測定

←衝突点方向

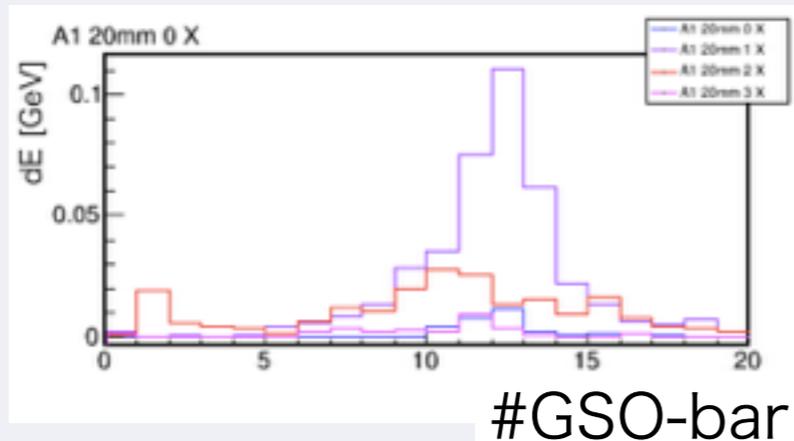
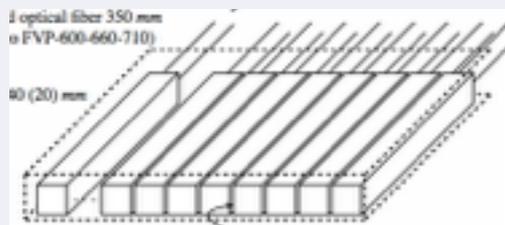
中性子
ガンマ線



検出器中でシャワーが発達

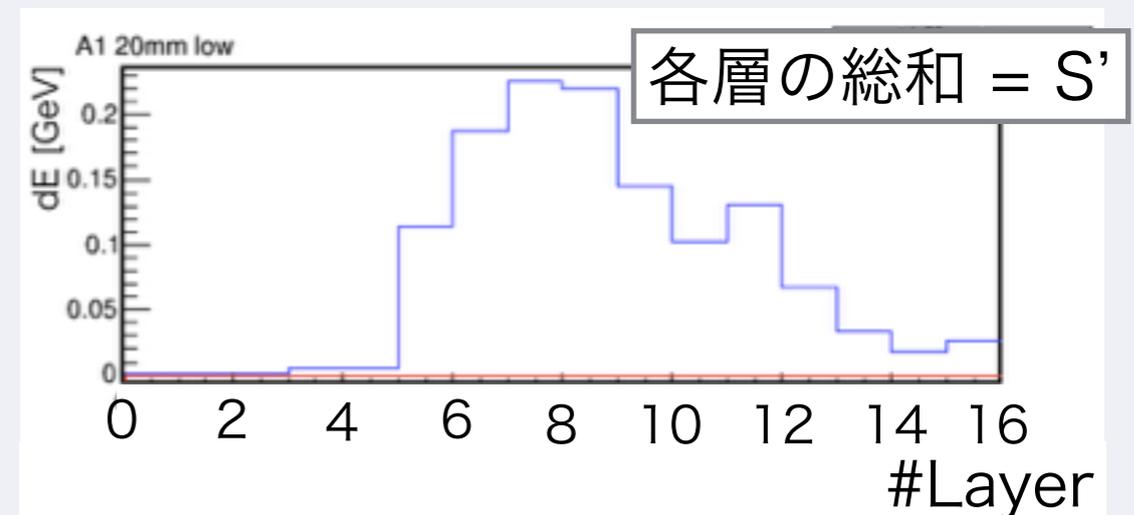
位置検出層(赤)

帯状のシンチレータをx、y方向に配置
→粒子の入射位置を決定



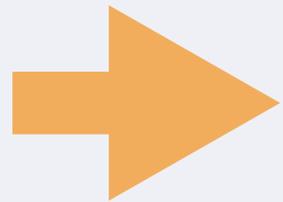
シンチレータ層(水色)

シャワーをサンプリング
→粒子の入射エネルギーを決定



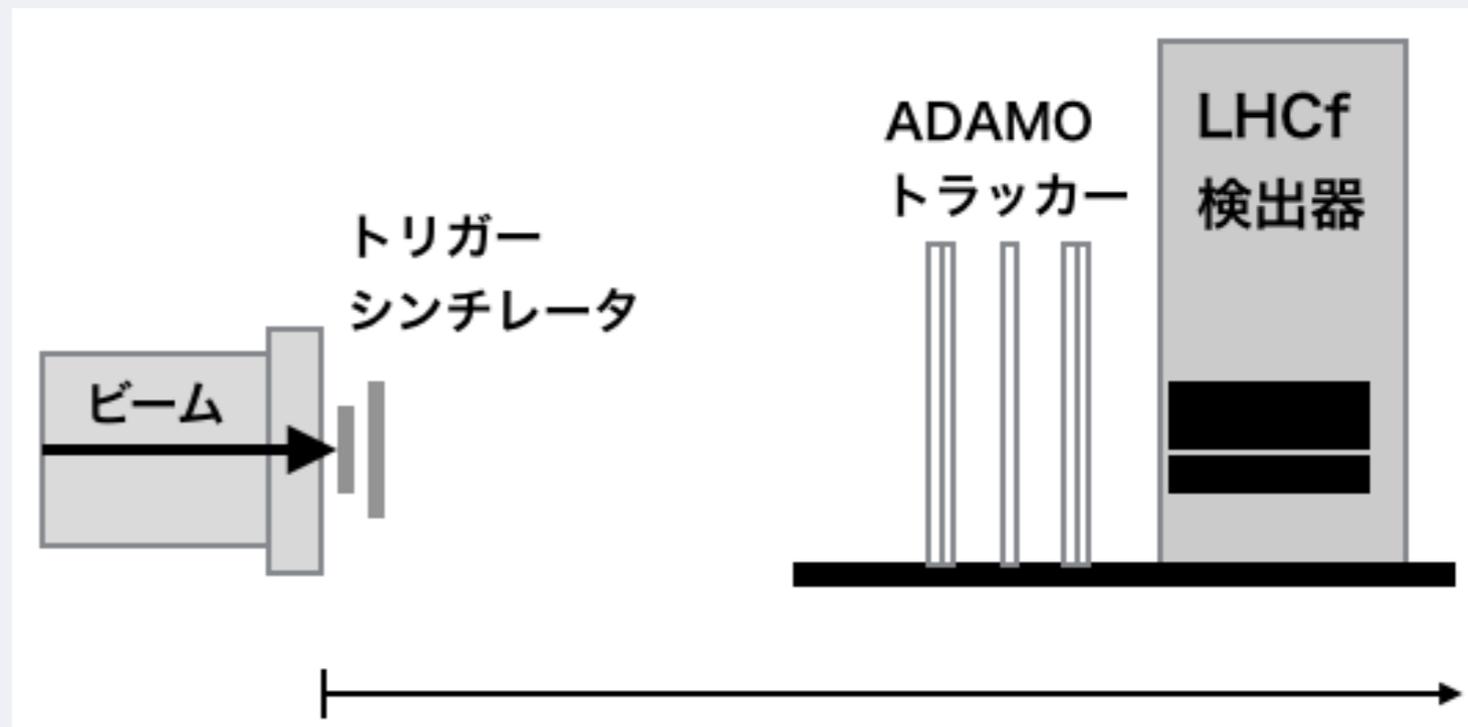
新検出器の性能評価試験

- $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 衝突測定後、検出器をアップグレード。
- アップグレードの目的は放射線耐性の向上で、検出器の基本性能は旧検出器と同等であることが期待される。



CERN-SPS加速器でビームテストを行い、
新検出器のハドロン事象測定性能を評価

- 2015年7月29日 - 8月11日に測定
- 250 - 350GeV陽子ビームを使用
 - 陽子ビームは検出器中でハドロンシャワーを発達させる
- 各エネルギーに対して 2×10^5 イベントを取得



- MCシミュレーション
 - シミュレータ：COSMOS(v. 7.645)、EPICS(v.9.165)
 - ハドロン相互作用モデル：DPMJET
 - 各エネルギーに対して 5×10^5 イベント
 - SPSビームテストのセットアップを考慮 (ビームパイプ、検出器のフレームなど)

粒子の入射位置に依存した補正值 $F(x, y)$

粒子の入射位置(x, y)による補正が考えられるものは、

シンチレータの集光効率 → 測定済み(深津、2011年)

検出器側面からのシャワー漏れ

→ MCシミュレーションで検証

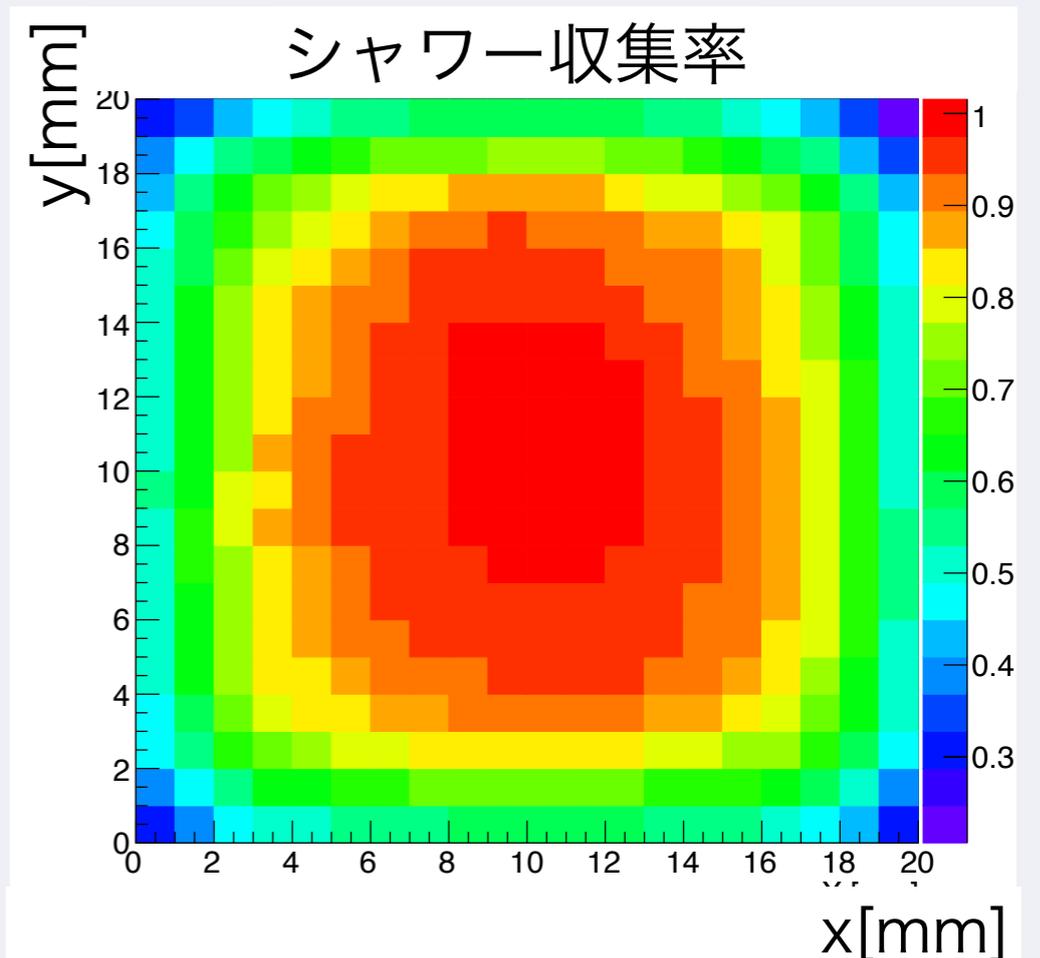
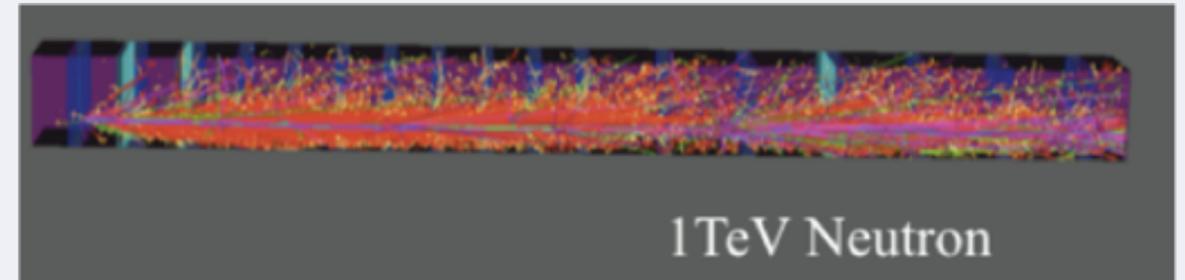
- MCシミュレーションで測定で得られた。集光効率の位置依存性を考慮。
- 検出器全面に対して1TeV の中性子を入射。
- 1mm×1mmごとに $\langle S'(x, y) \rangle$ を算出。
- シャワー収集率を

$$f(x, y) = \langle S'(x, y) \rangle / \langle S'_{center} \rangle$$

とした。ここから、

$$F(x, y) = \frac{1}{f(x, y)}$$

$$E = J(F(x, y)S')$$



S' : シンチレータ各層におけるエネルギー損失の総和

$F(x, y)$: 粒子の入射位置に依存した補正值

$J(S)$: 検出エネルギーから入射エネルギーへの変換関数

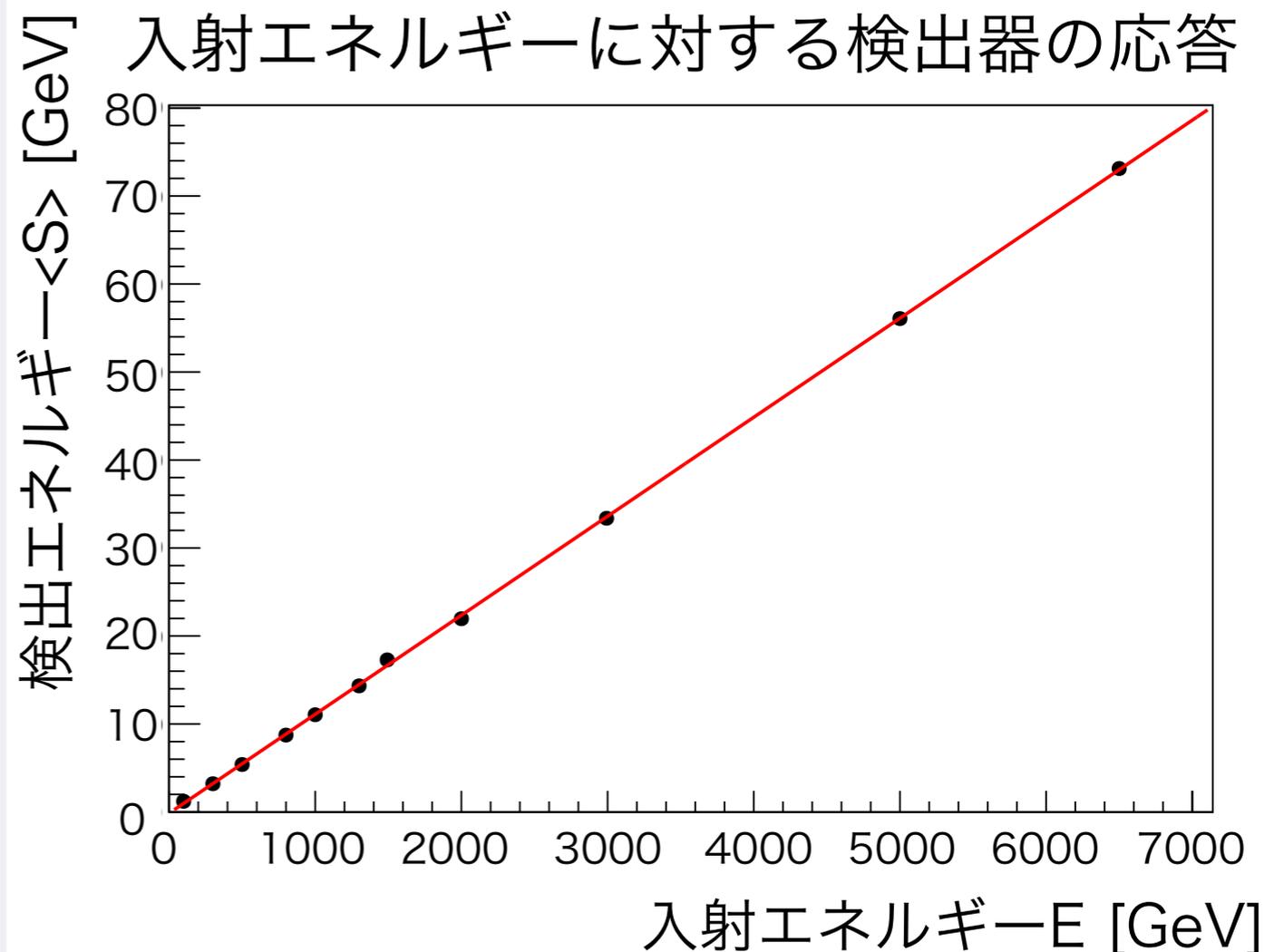
エネルギー変換関数： J(S)

LHCf検出器はサンプリングカロリメータであり、
検出エネルギー $S \neq$ 入射粒子エネルギー E

➡ MCシミュレーションで、入射エネルギーに対する検出器の応答を調べた。

- 検出器の中心 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ に対して $100 - 6500 \text{ GeV}$ の中性子ビームを入射。
- 各事象に対して $S = F(x, y)S'$ を算出、平均値 $\langle S \rangle$ を得た。
- 線形近似より、

$$E = J(S) = 88.9S + 10.7 \text{ [GeV]}$$



$$E = J(F(x, y)S')$$

S' : シンチレータ各層におけるエネルギー損失の総和

$F(x, y)$: 粒子の入射位置に依存した補正值

$J(S)$: 検出エネルギーから入射エネルギーへの変換関数

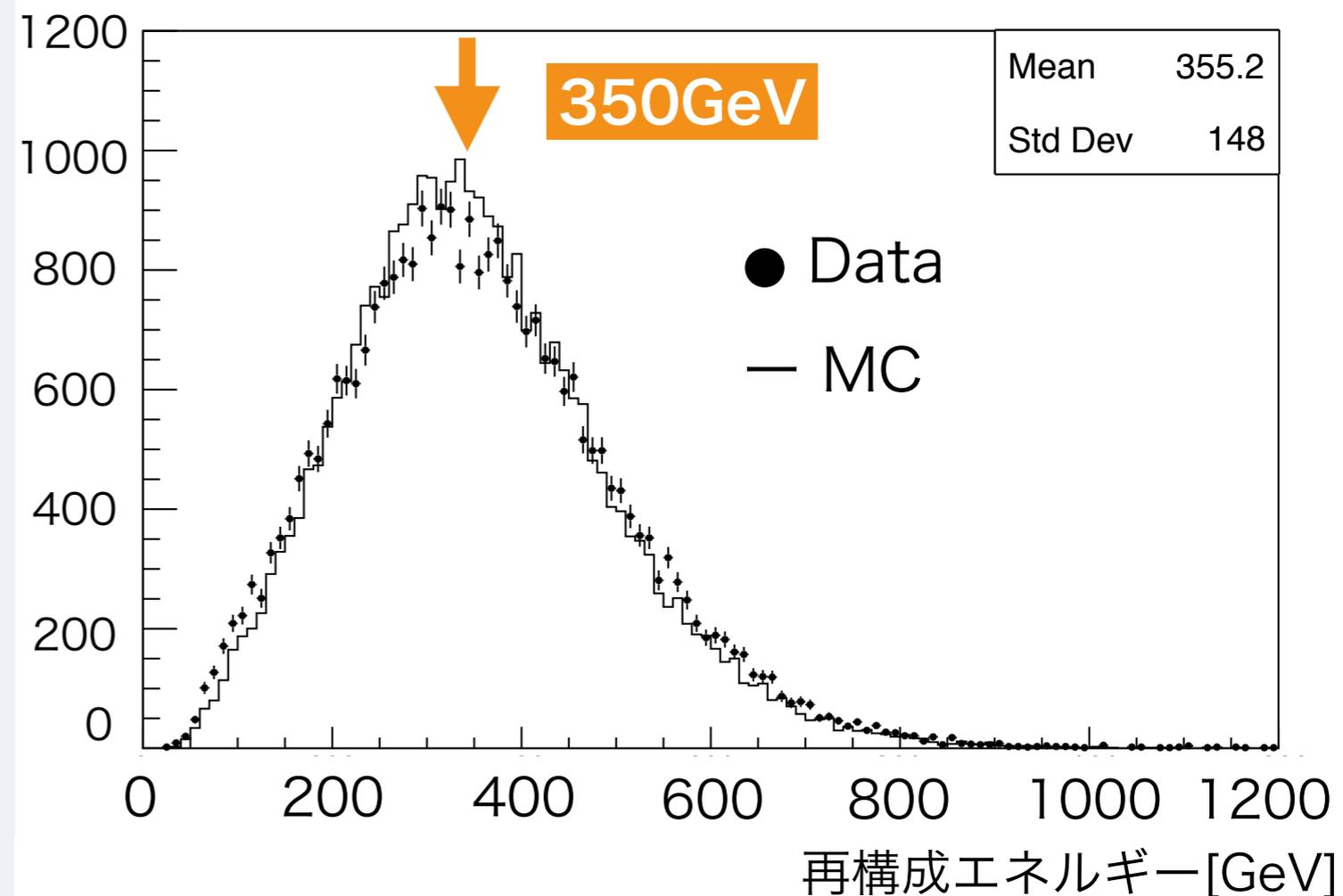
決定されたエネルギーの分布

ビームテスト測定データのエネルギー再構成を行い、結果を検証した。

- 350GeVの陽子ビームを検出器に入射した時のエネルギー再構成した。
- MCシミュレーションでも同様の処理を行い比較した。

- 粒子のエネルギーを正しく決定できていることを確認。
- MCシミュレーションは実験結果を再現している。
→ハドロンに対する検出器の応答を正しく理解していることを確認。

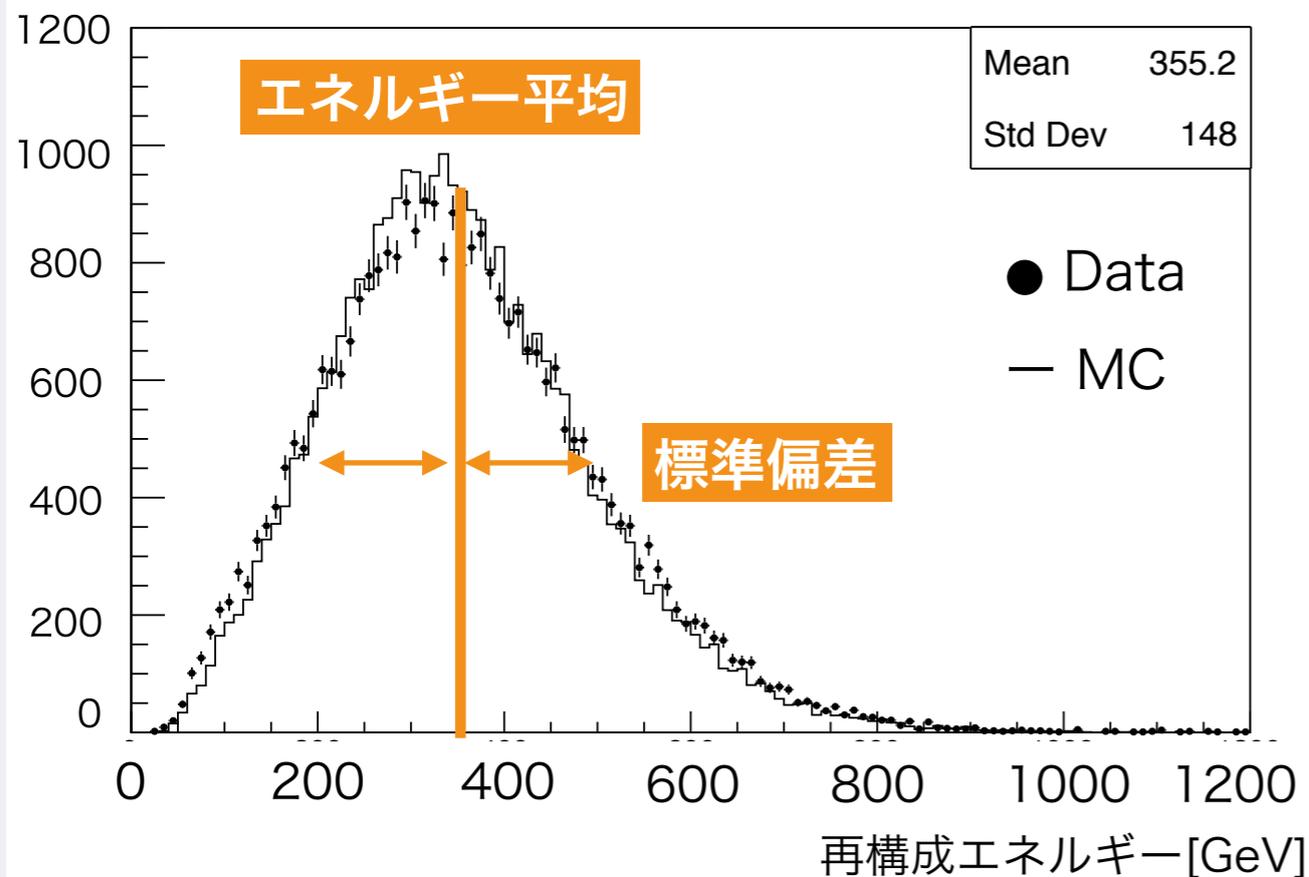
350GeVの陽子ビームの再構成エネルギー分布



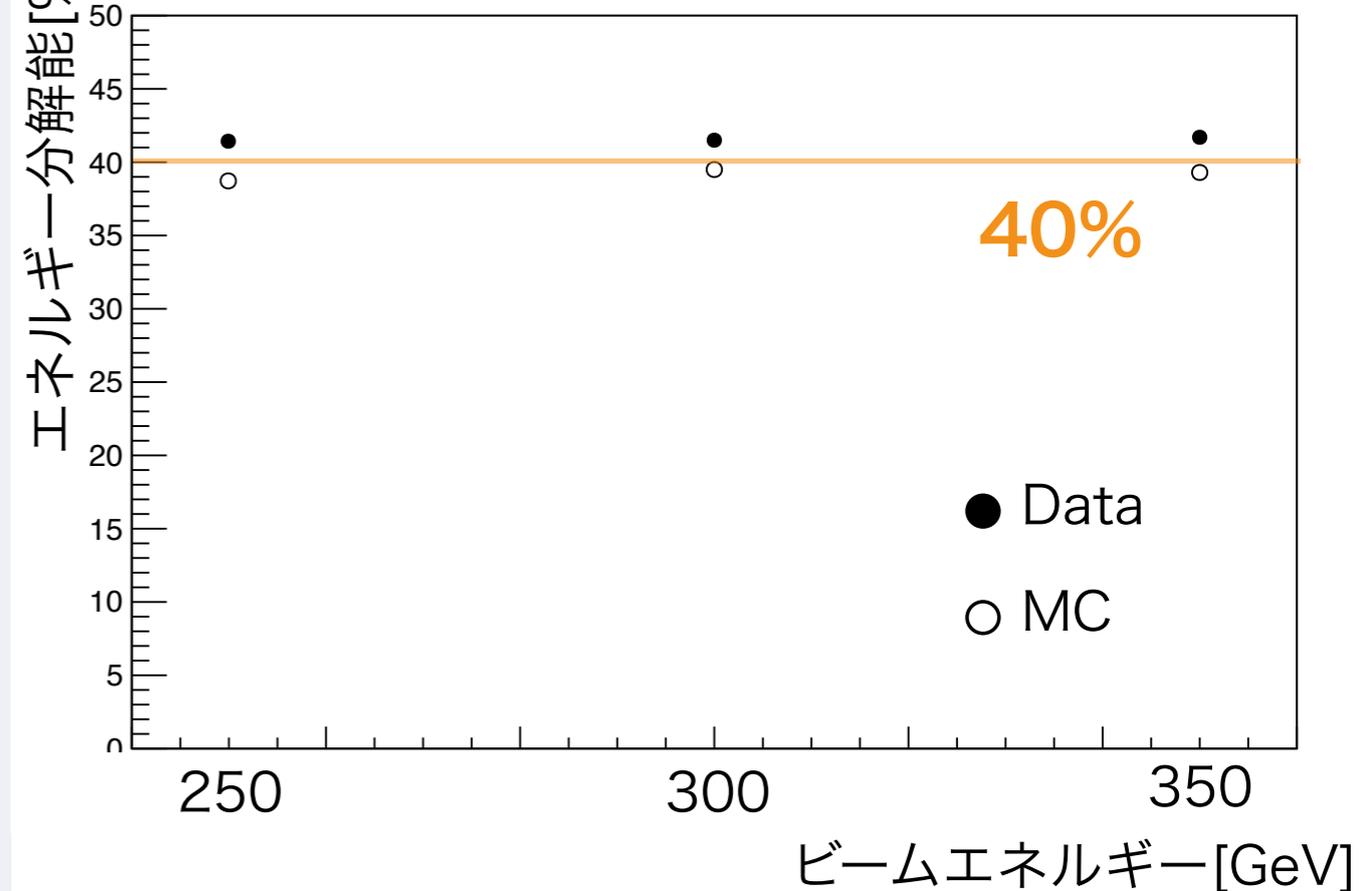
エネルギー分解能

エネルギー分解能 $\equiv \frac{\text{標準偏差}}{\text{エネルギーの平均値}}$ として評価した。

350GeVの陽子ビームの再構成エネルギー分布



エネルギー分解能の入射エネルギー依存性

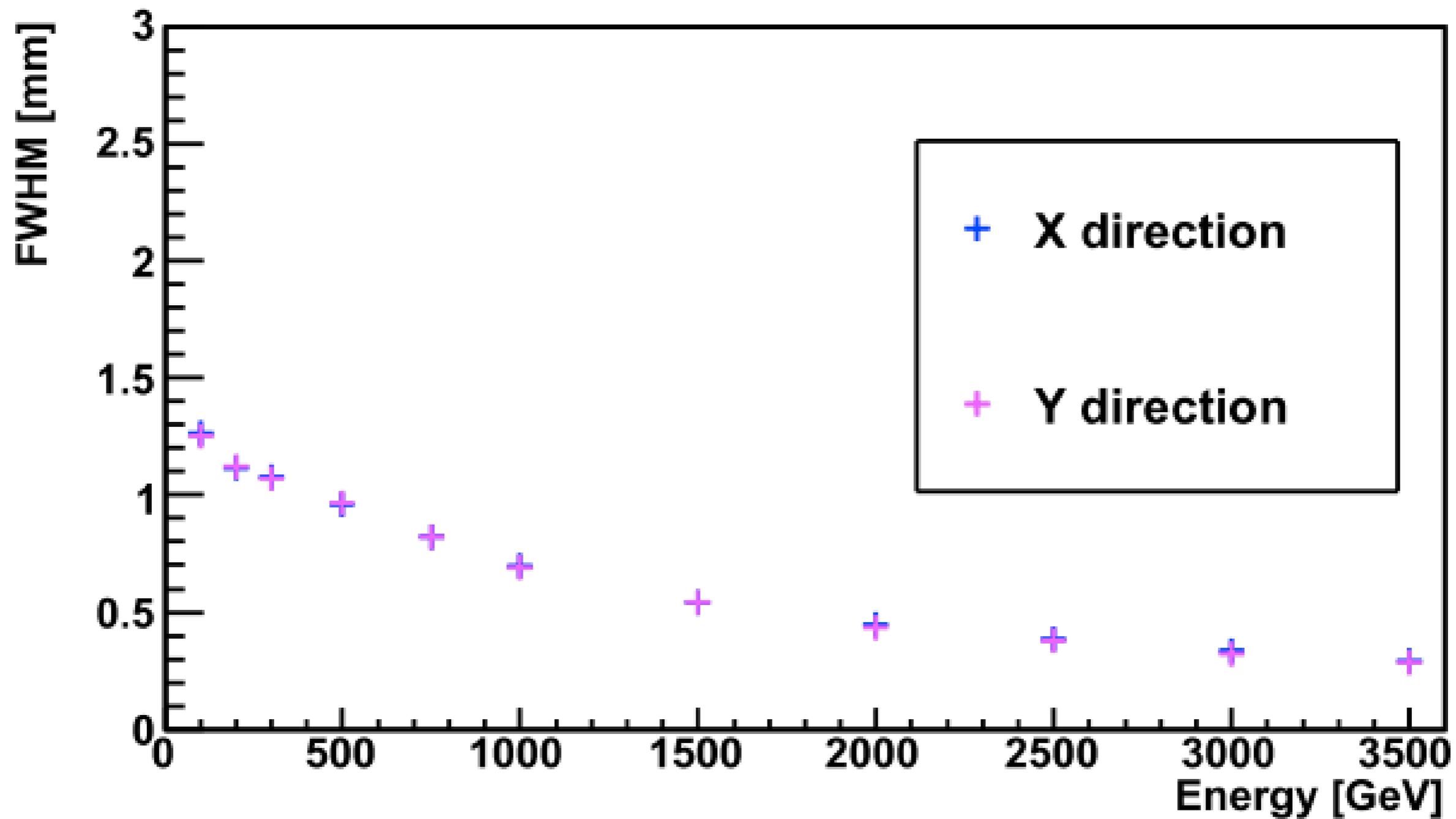


- エネルギー分解能は41%であった。
- 分解能は入射ビームのエネルギーに依存しない。
- MCシミュレーションはデータを再現した。
- 新検出器は旧検出器のエネルギー分解能は40%と同等の分解能をもつ。

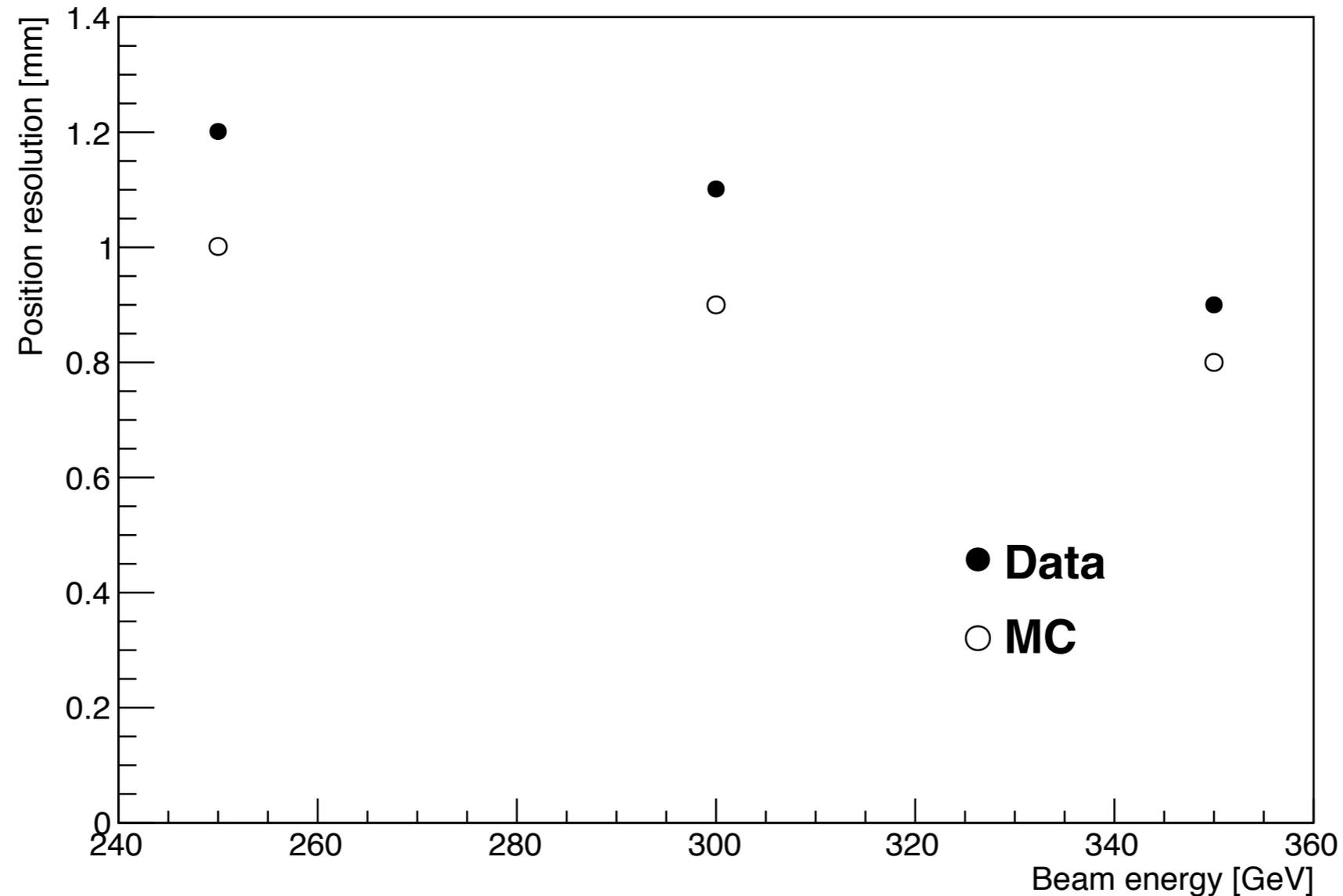
エネルギー分解能

	入射エネルギー [GeV]	Mean [GeV]	RMS [GeV]	エネルギー分解能 [%]
データ	250	263.3	109.0	41.4
	300	306.2	127.2	41.5
	350	355.2	148.0	41.7
MC	250	255.5	98.68	38.6
	300	304.3	120.2	39.5
	350	352.4	138.6	39.3

旧検出器の位置分解能



位置分解能のエネルギー依存性



- ΔX の半値全幅を位置分解能と定義した
- 位置分解能は1.1mm - 0.9mm
- エネルギーに依存して改善する

Arm2の系統誤差の内訳

	η_0	η_1	η_2
Energy	1–25 %	0–36 %	0–29 %
Beam Center	0–4 %	1–7 %	1–6 %
PID	1–2 %	2–6 %	2–6 %
N_{inel}	5–5 %	5–5 %	5–5 %
Position Resolution	0–25 %	1–9 %	3–10 %
Multihit	0–4 %	0–3 %	0–3 %
σ_{int}	6–6 %	6–6 %	6–6 %
Unfolding Method	1–8 %	0–17 %	0–32 %
Unfolding Model	2–17 %	0–71 %	1–71 %
Unfolding Interaction	0–55 %	0–11 %	0–9 %

Table 4.3: Minimum–maximum systematic uncertainties for each contribution in the three pseudorapidity regions selected for the analysis. Numbers refer to the final unfolded spectra.