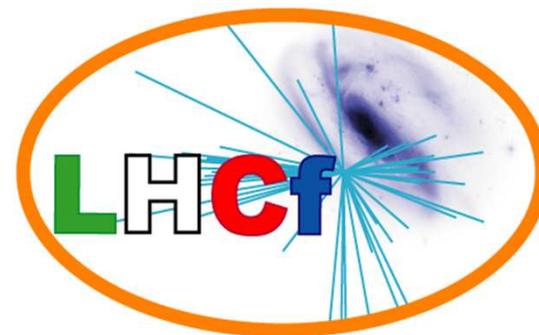


Knee領域および最高エネルギー領域での 宇宙線反応の実験的研究 (LHCf 実験)

増田公明(名大STE研)

LHCf collaboration

東大宇宙線研 福島正己 他



2013年12月21日

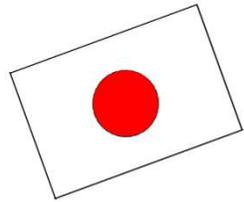
平成25年度 宇宙線研究所 共同利用研究成果発表会

共同利用研究課題

- LHC加速器の 900GeV ~ 14 TeV (ビーム当たり 450 GeV ~ 7 TeV) 陽子-陽子衝突によって生成される最前方中性粒子を測定し, 宇宙線反応に寄与するハドロン相互作用モデルの検証を行う(LHCf 実験)。
- 陽子-原子核衝突でもデータを取得し, 宇宙線と大気の反応の理解に近づく。
- モデルの違いによる $10^{17} \sim 10^{20}$ eVの宇宙線観測データの解釈に関して, TAグループ等と検討及び議論を行う。

平成25年度共同利用予算

- 査定額 旅費 150千円（名古屋一泊）
 - 宇宙線研でTAグループ等と種々の議論を行う
 - 1-3月に使用予定
- 共同利用計算機の使用
 - MCシミュレーション
 - データ解析



LHCf Japan (18名)

名大STE研

村木綏*, 伊藤好孝, 増田公明, 松原豊, 塔隆志**,
川出健太郎, 牧野友哉, 松林恵理, 周啓東, 杉浦佑樹

名大理 毛受弘彰

名大KMI 櫻井信之

神奈川大学工 田村忠久

早稲田大学理工総研

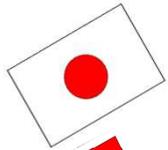
鳥居祥二, 笠原克昌, 鈴木拓也

芝浦工大システム工 吉田健二

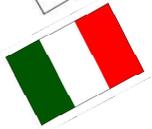
JAXA 清水雄輝

* spokesperson, ** technical coordinator

LHCf collaboration (6ヶ国, 34名)



LHCf Japan



Italy

(Univ. di Firenze)

O. Adriani, L. Bonechi, M. Bongi, G.Castellini,
R. D'Alessandro, M. Grandi, G. Mitsuka, P. Papini,
S. Ricciarini

(Univ. di Catania) A. Tricomi



Spain

(Centro Mixto CSIC-UVEG, Valencia) D.A. Faus, J. Velasco



France (Ecole-Polytechnique, Paris) M. Haguenuer



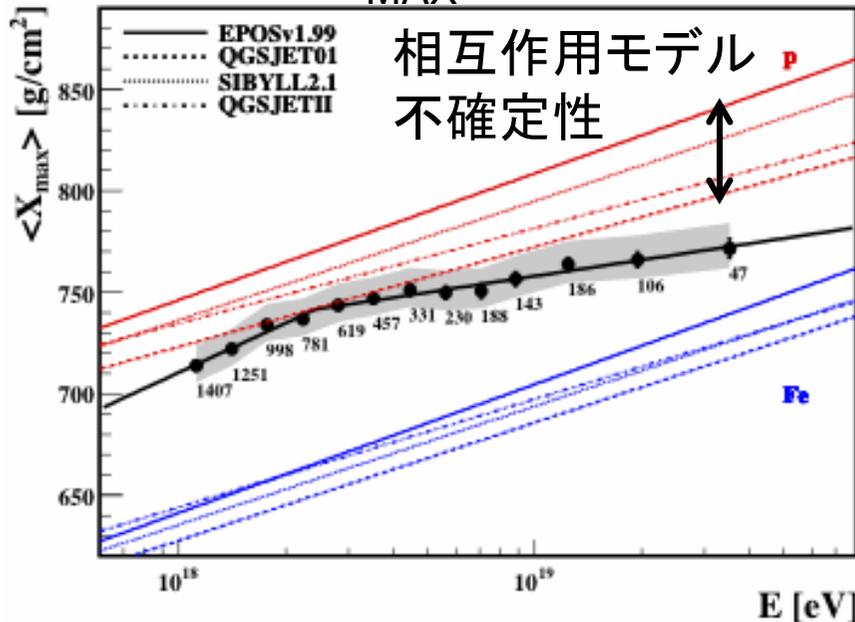
USA (UC Berkeley) W.C. Turner



Switzerland (CERN) A.-L. Perrot, D.Pfeiffer

Physics Motivation

$\langle X_{MAX} \rangle$ 分布



相互作用モデル
不確定性

UHECRs観測実験ではAuger, TAともに高統計データが得られきている。

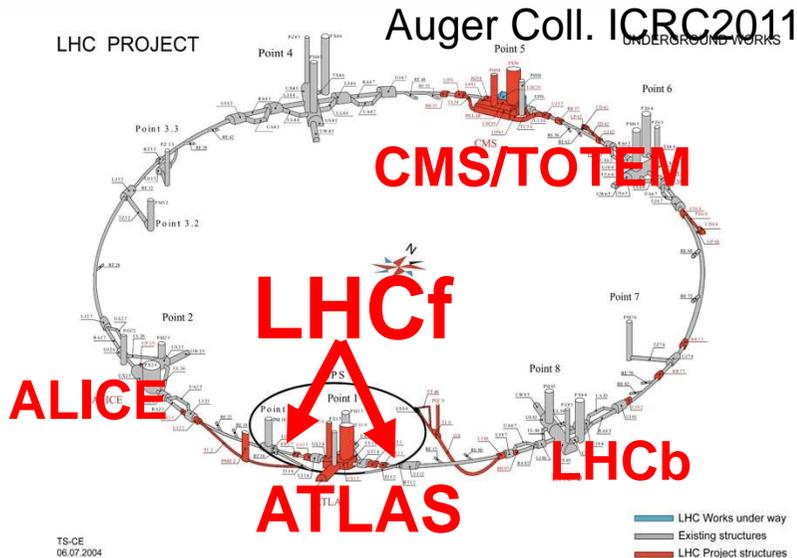
しかし、空気シャワーシミュレーションで用いられているハドロン相互作用モデルによる不確定性は依然大きい。



LHC ($E_{lab}=10^{17}$ eV)による
相互作用モデル検証

Key parameters

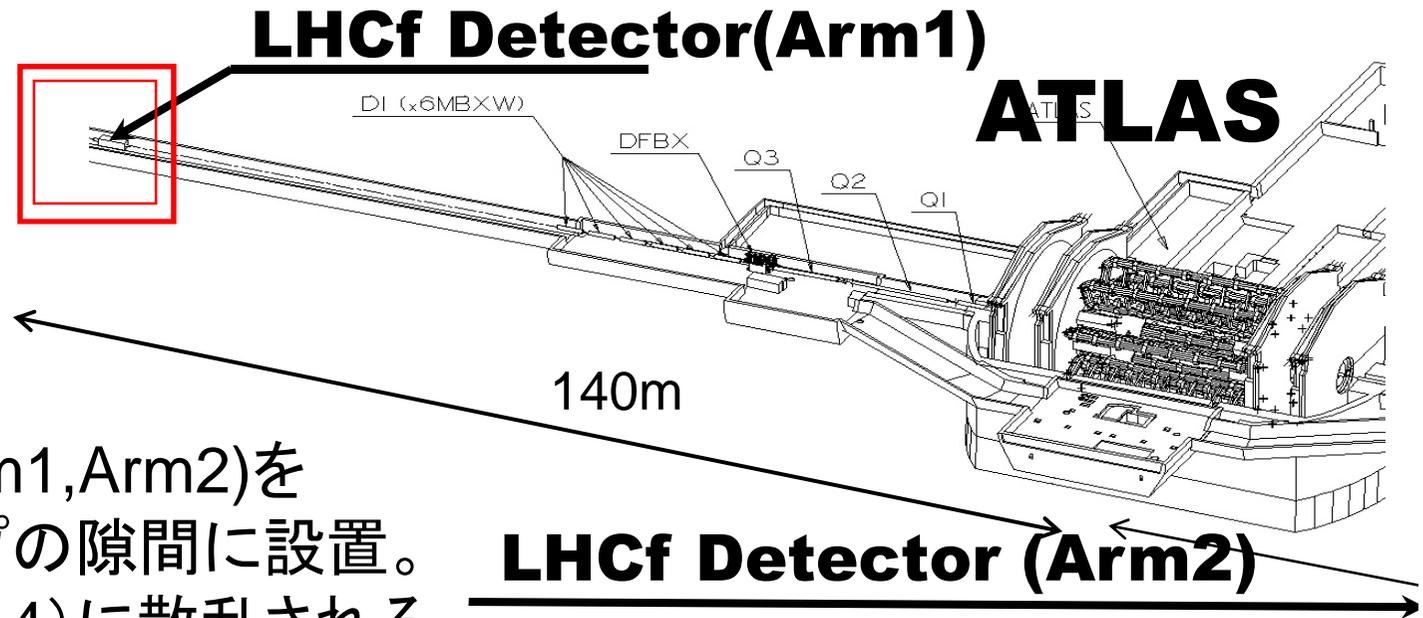
- **Total Cross Section**
→ *TOTEM, (ATLAS, CMS)*
- **Multiplicity**
→ *Central detectors*
- **Inelasticity/Secondary spectra**
→ *LHCf, ZDCs*



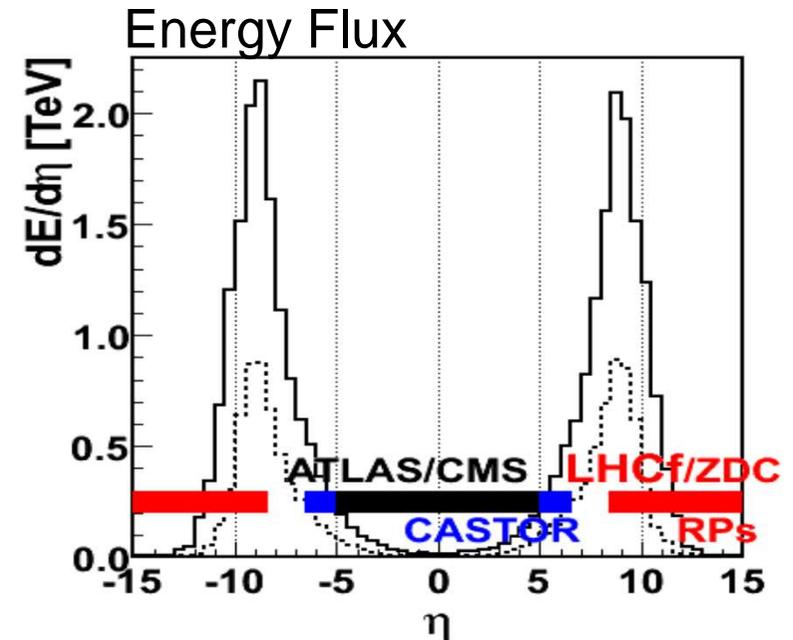
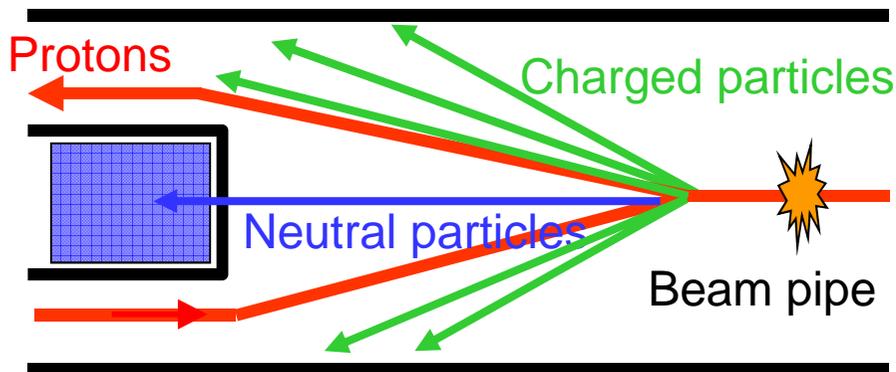
LHCf 実験の概要

- 加速器実験でハドロン相互作用モデルを検証する
- CERNの最高エネルギー加速器 LHC (Large Hadron Collider) で, $450\text{GeV} \times 450\text{GeV} \sim 7\text{TeV} \times 7\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突実験を行い, 最前方放出中性粒子を測定する
- 陽子-原子核衝突実験を行なう
- 実験室系 $4 \times 10^{14}\text{eV} \sim 1 \times 10^{17}\text{eV}$ の宇宙線反応と等価
- その結果から 10^{17}eV までのハドロン相互作用モデルを検証し, さらにこれより高い超高エネルギー宇宙線観測データの正しい解釈を行う

The LHCf experiment



2台の検出器(Arm1,Arm2)をLHCビームパイプの隙間に設置。最前方領域($\eta > 8.4$)に散乱される中性粒子(γ, n, π^0)を測定。



*) Pseudo-rapidity $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$, θ : 粒子散乱角

LHCf Detectors

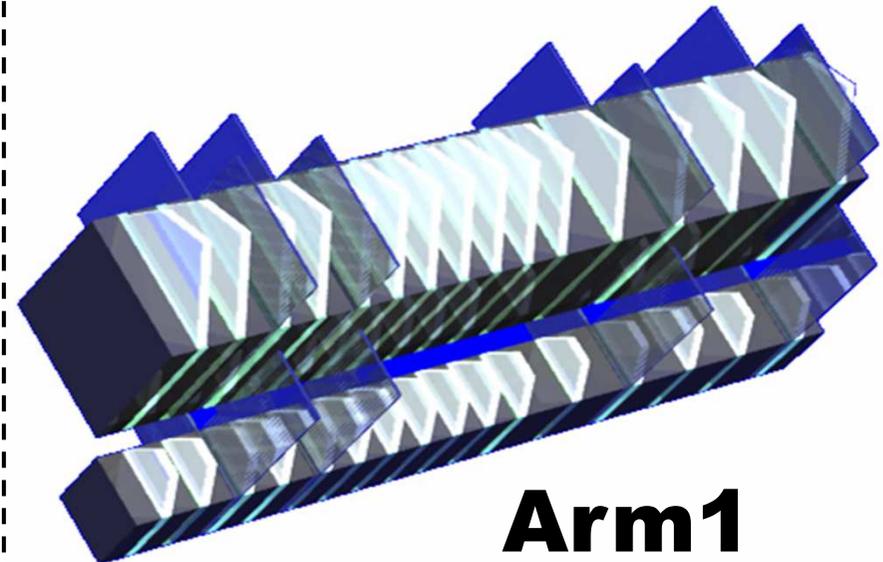
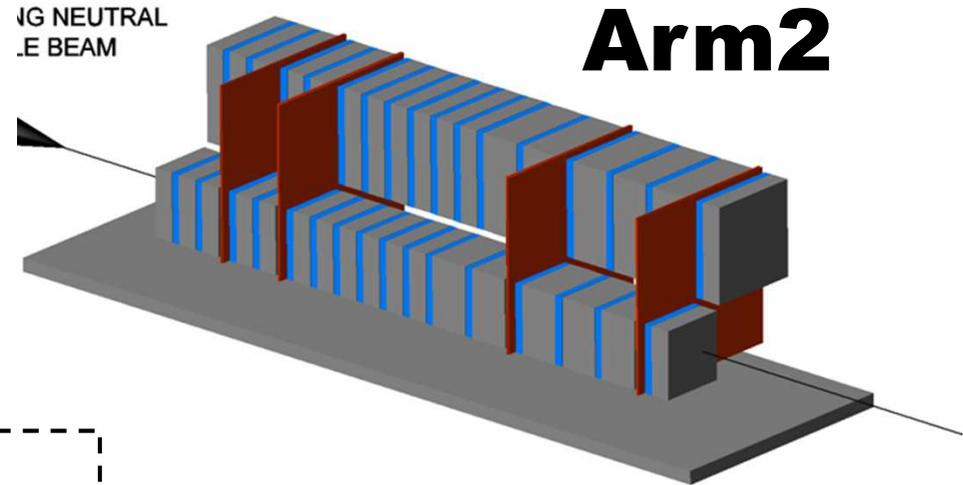
2つの検出器はそれぞれ2つの
カロリメータタワーを持つ

Arm1 20mm \diamond , 40mm \diamond

Arm2 25mm \square , 32mm \square

2 γ イベント \Rightarrow π^0 再構成

- Imaging Sampling Calorimeter
W 44 r.l, $1.6\lambda_I$
Plastic scintillator \times 16 layers
- Position Detector
Scifi \times 4 (Arm1) $\sigma_x = 0.17\text{mm}$
Silicon Tracker \times 4 (Arm2)
 $\sigma_x = 0.05\text{mm}$
- Energy Resolution
<5% (gamma), 30% (hadron)



Phase- I 測定

年月	項目
2009年12月	$\sqrt{s}=900\text{GeV}$ 陽子-陽子衝突の測定 28時間、約6,600 shower events の取得 @Luminosity $\sim 10^{26}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
2010年2月 ～ 7月	$\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突の測定 150時間、約 4×10^8 shower events, $10^6 \pi^0$ events $\sqrt{s}=900\text{GeV}$ 陽子-陽子衝突の測定 15時間、約 10^5 shower events の取得 @Luminosity $\sim 10^{27}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
2010年7月	Phase- I 測定完了, ビームラインより検出器撤去
2010年10月	Arm1/2 事後較正 (SPS)
2011年～	データ解析 検出器 upgrade
2013年1月 ～2月	$\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02\text{TeV}$ 陽子 (4TeV)-鉛 (1.58TeV/n) 衝突の測定 (Arm2)

解析, 論文発表の状況

Year	Corresponding author	Journal	Title
2011 Aug	T. Sako	PLB	Measurement of zero degree single photon energy spectra for $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ proton-proton collisions at LHC
2011 Sep	K. Kawade	JINST	Study of radiation hardness of Gd_2SiO_5 scintillator for heavy ion beam
2012 Jan	K. Taki	JINST	Luminosity determination in $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ proton collisions using the LHCf Front Counter at LHC
2012 Apr	T. Mase	NIM A	Calibration of LHCf calorimeters for photon measurement by CERN SPS test beam
2012 Aug	Y. Itow	PLB	Measurement of zero degree inclusive photon energy spectra for $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$ proton-proton collisions at LHC
2012 Nov	G. Mitsuka	PRD	Measurement of forward neutral pion transverse momentum spectra for $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ proton-proton collisions at LHC

解析中: 7 TeV p-p衝突 中性子スペクトル
宇宙線観測への影響
5TeV p-Pb衝突 光子スペクトル

今後の予定

年月	項目
2014年2月	Upgrade Detector: HIMAC pre-calibration
2014年 8 or 10月	Upgrade detectors: SPS performance test & calibration
2015年前半	$\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突の測定
2016年?	RHIC forward p-N衝突?
20??年	LHC p-O衝突?

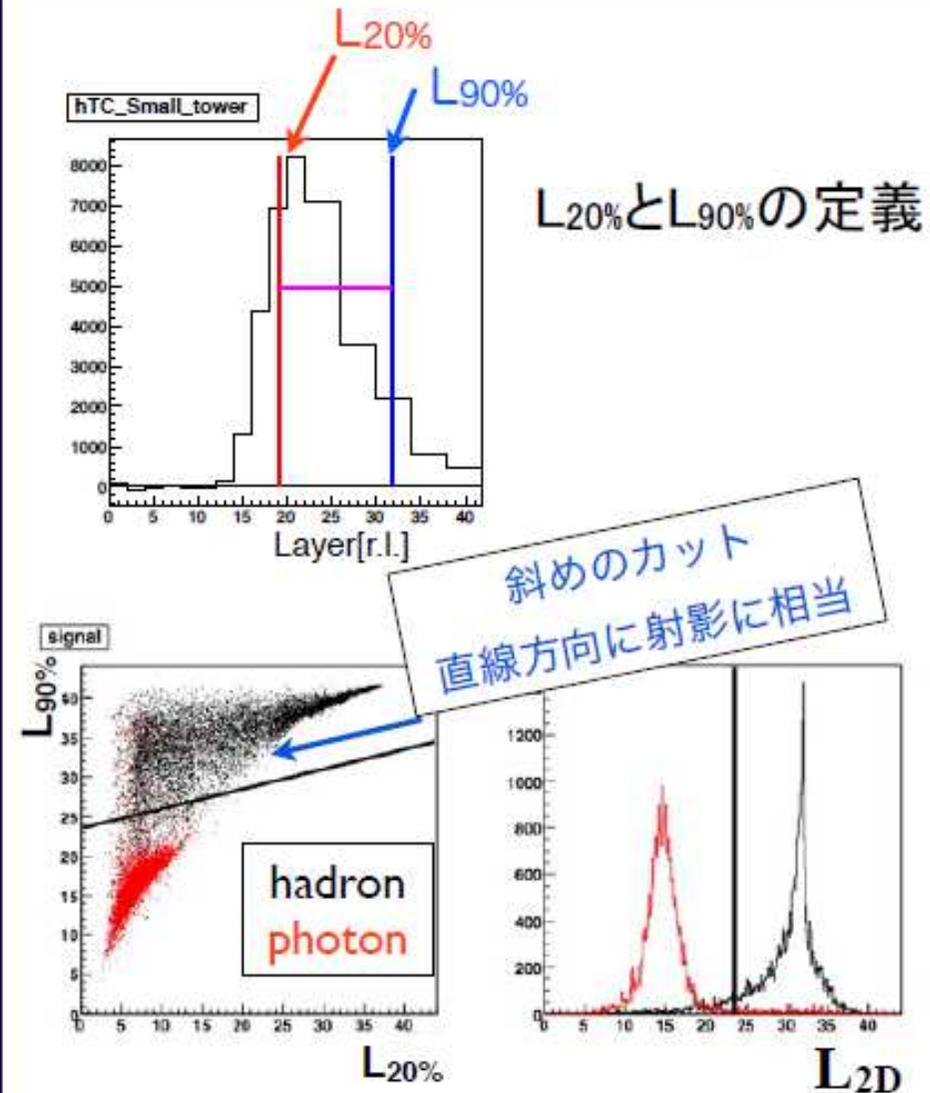
主な論文／解析のトピックス

- 7TeV photon:
 - どのモデルもデータを再現できない
 - データの系統誤差を小さくする必要
- 900GeVと7TeVの比較
 - X_F 分布の形状のエネルギー依存性は小さい
 - ファインマン・スケーリングを示唆
- 7TeV π^0 スペクトル
 - 全体に合うモデルはない。
- 7TeV 中性子
- P-Pb 解析(イタリア)

粒子弁別 PID

for neutrons

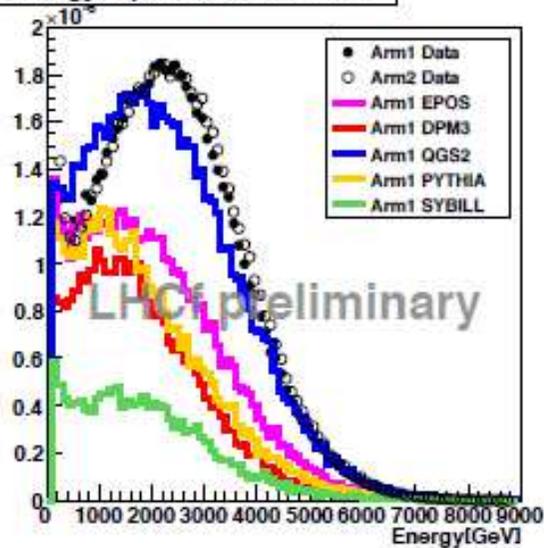
- photon成分とhadron成分の弁別を効率よく行いたい
 - photon → 浅いシャワー
 - hadron → 深いシャワー
- L_{20%} (L_{90%})を総シャワーの20% (90%)を含む深さとして定義する (右記)
- L_{20%}とL_{90%}を用いた2次元カットによるPIDを採用
- 最適な弁別基準としてL_{2D}を導入
$$L_{2D} = L_{90\%} - 1/4 * L_{20\%}$$



Energy spectra

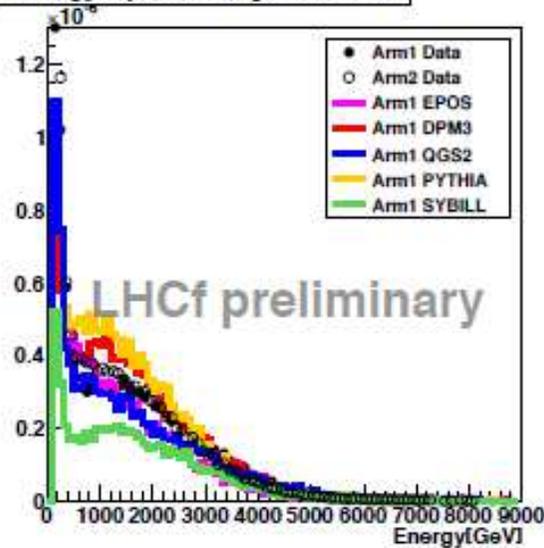
for neutrons

Energy_Spectra_Small_tower



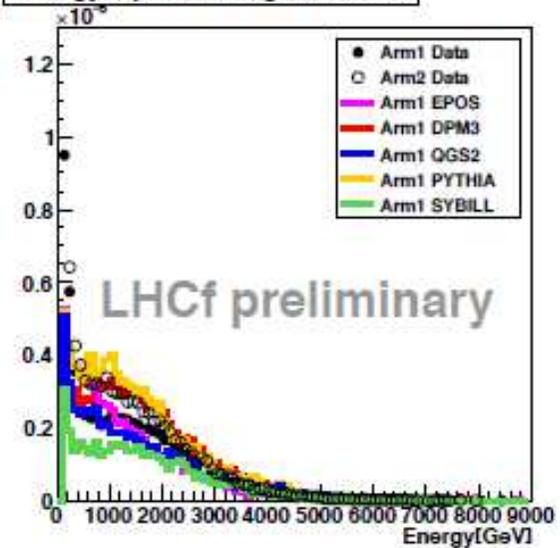
$r < 6\text{mm}$

Energy_Spectra_Large_tower_A



$28\text{mm} < r < 35\text{mm}$

Energy_Spectra_Large_tower_B



$35\text{mm} < r < 40\text{mm}$

- Arm1、Arm2、各相互作用モデルの比較
- Arm1とArm2の解析は独立に行っている
- どのモデルも実験データを完璧には再現しない

検出器アップグレード

$\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ p-p衝突測定では検出器に高い放射線耐性が必要

2010年 $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ 測定

被曝線量 約200Gy

10倍



$\sqrt{s} = 14\text{TeV}$ 測定

被曝線量(予想) 約2000Gy

検出器の基本構成はほぼそのまま、放射線耐性の高いものに入れ替える

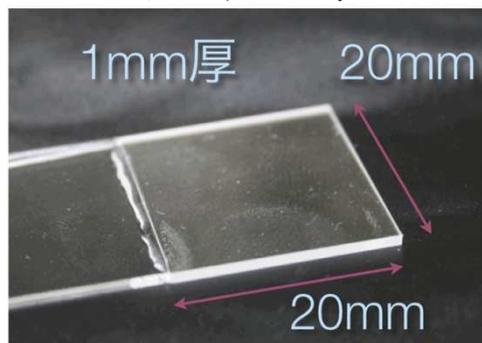
現検出器

プラスチックシンチレータ (Eljen Technology EJ260)
 シンチレーティングファイバー (KURARAY SCSF-38)
 シリコン検出器

アップグレード検出器

→ GSOシンチレータ
 → GSOシンチレータ バー
 → 耐性があるのでそのまま使用

GSO シンチレータ



GSOベルト試作
 1mm角 × 40mm × 5本



	EJ-260	GSO
放射線耐性(Gy)	100	10⁶
密度(g/cm ³)	1.02	6.71
放射長(cm)	14.2	1.38
発光減衰時間(ns)	9.6	30-60
発光強度 (NaI=100)	19.6	20

まとめ

- LHCf 実験は, 空気シャワーシミュレーションに用いられる**ハドロン相互作用モデルの検証を目的**として, LHC加速器最前方散乱中性粒子 (γ, n, π^0)を測定
- **2010年に $\sqrt{s}=900\text{GeV}$ と 7TeV 陽子-陽子衝突の測定**, 2011年以降はその結果の解析を行い, $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突でのガンマ線エネルギースペクトルの結果をpublish, さらに900GeVデータの解析や π^0 解析の結果をpublish
- 系統誤差の改善のためにビームテストデータの解析を進めている
- **2013年にp-Pb衝突実験**。解析中。
- **2015年に $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突での測定を予定**。これに向けて放射線耐性の高いGSOシンチレータを用いた検出器に**アップグレード**中。基礎特性試験は完了し, 実機製作を進めている
- 共同利用
 - 今後も計算機使用と観測グループ, モデル開発者との検討会を継続

Arm1

END