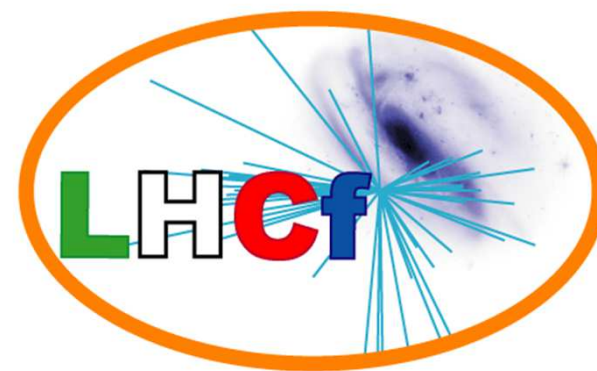


Knee領域および最高エネルギー領域での 宇宙線反応の実験的研究 (LHCf 実験)

増田公明(名大STE研)

LHCf collaboration

東大宇宙線研 福島正己 他

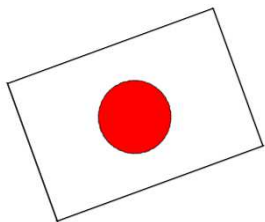


2014年12月13日

平成26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

- LHCf実験の遂行
 - LHC加速器の 900GeV $\sim$ 14 TeV (ビーム当たり 450 GeV $\sim$ 7 TeV, lab系で $4 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{17}$ eV) 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, 宇宙線と大気の実験の理解に近づく。
- 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。
- 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
 - 12月26日に検討会を開催予定
- 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, 埴隆志**,
牧野友哉, 松林恵理, 周啓東, 杉浦佑樹, 奥野友貴

名大理 毛受弘彰

名大KMI 櫻井信之

神奈川大学工 田村忠久

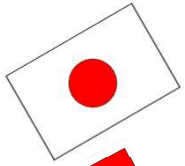
早稲田大学理工総研

鳥居祥二, 笠原克昌, 清水雄輝, 鈴木拓也

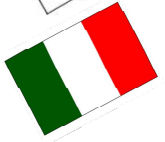
芝浦工大システム工 吉田健二

* spokesperson, ** technical coordinator

LHCf collaboration (6ヶ国, 36名)



LHCf Japan



Italy

(Univ. di Firenze)

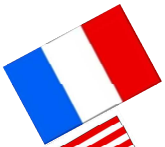
O. Adriani, E. Berti, L. Bonechi, M. Bongi, G. Castellini,
R. D'Alessandro, M. Delprete, M. Grandi, G. Mitsuka,
P. Papini, S. Ricciarini, A. Tiberio

(Univ. di Catania) A. Tricomi

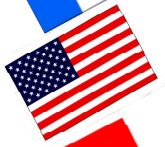


Spain

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



France (Ecole-Polytechnique, Paris) M. Haguenaer



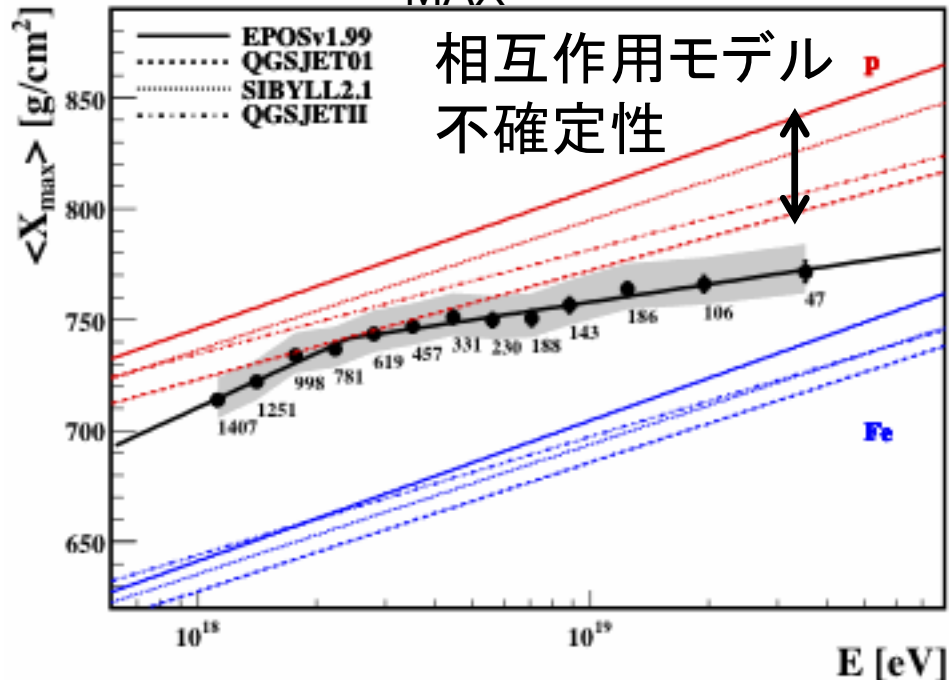
USA (UC Berkeley) W.C. Turner



Switzerland (CERN) A.-L. Perrot

Physics Motivation

$\langle X_{\text{MAX}} \rangle$ 分布



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

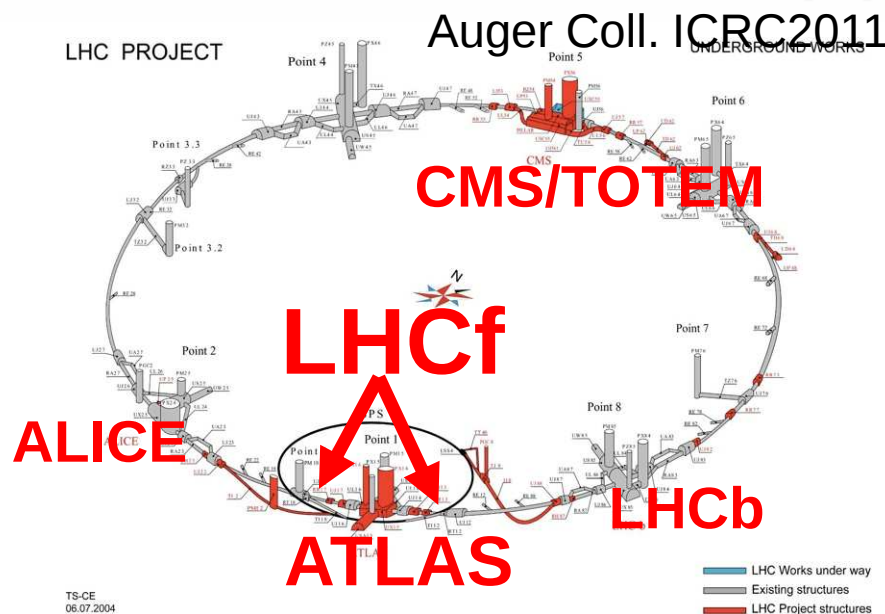
しかし, 空気シャワーシミュレーションで用いられているハドロン相互作用モデルによる不確定性は依然大きい。



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

Key parameters

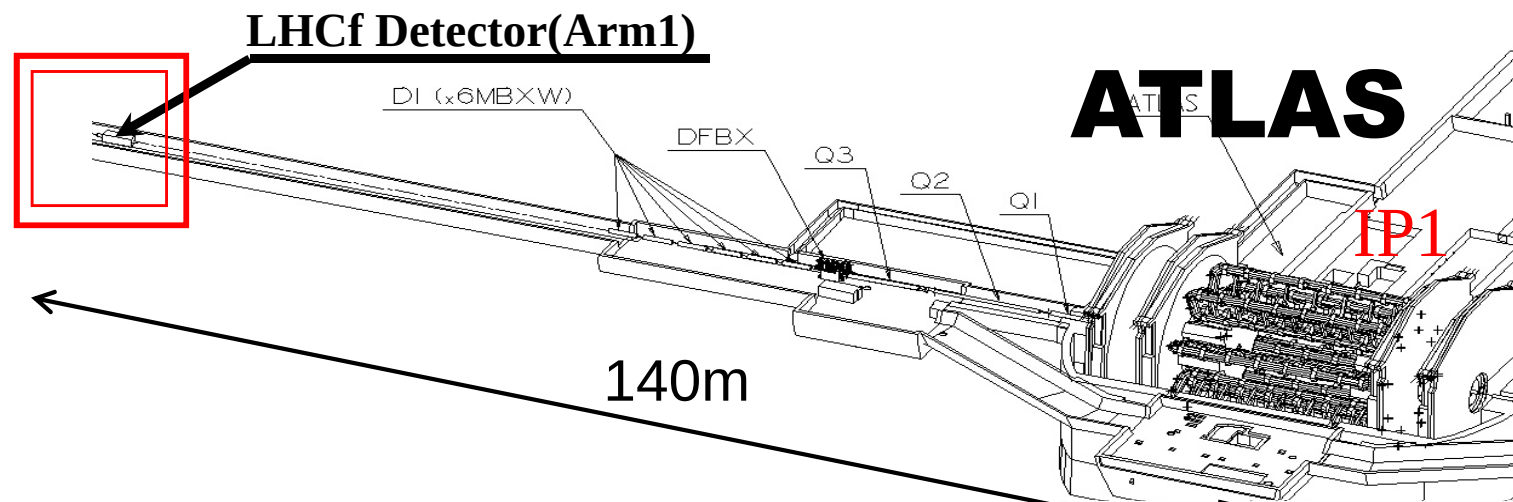
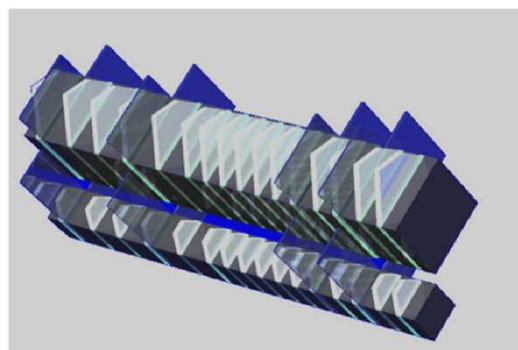
- **Total Cross Section**
→ *TOTEM*, (*ATLAS*, *CMS*)
- **Multiplicity**
→ *Central detectors*
- **Inelasticity/Secondary spectra**
→ ***LHCf***, *ZDCs*



LHCf 実験の概要

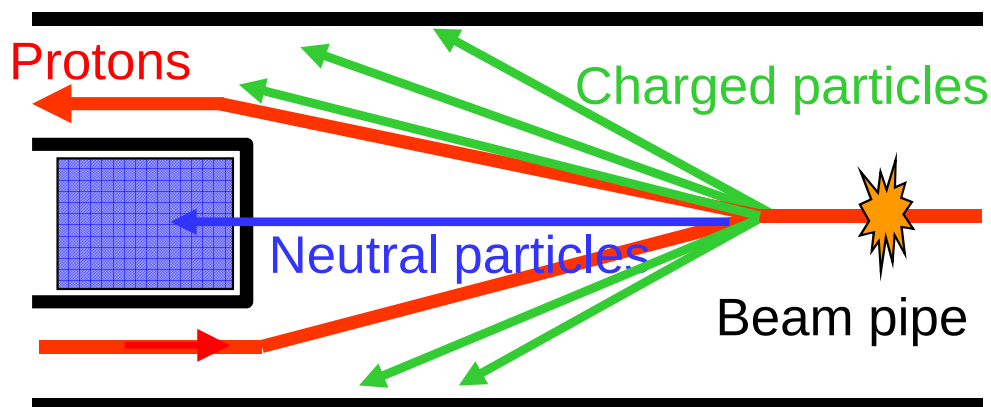
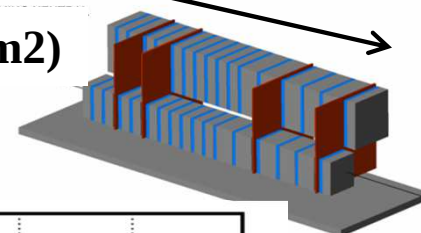
- 加速器実験でハドロン相互作用モデルを検証する
- CERNの最高エネルギー加速器 LHC (Large Hadron Collider) で, $450\text{GeV} \times 450\text{GeV} \sim 7\text{TeV} \times 7\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突実験を行い, 最前方放出中性粒子を測定する
- 実験室系 $4 \times 10^{14}\text{eV} \sim 1 \times 10^{17}\text{eV}$ の宇宙線反応と等価
- 陽子-原子核衝突実験を行なう
- その結果から 10^{17}eV までのハドロン相互作用モ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

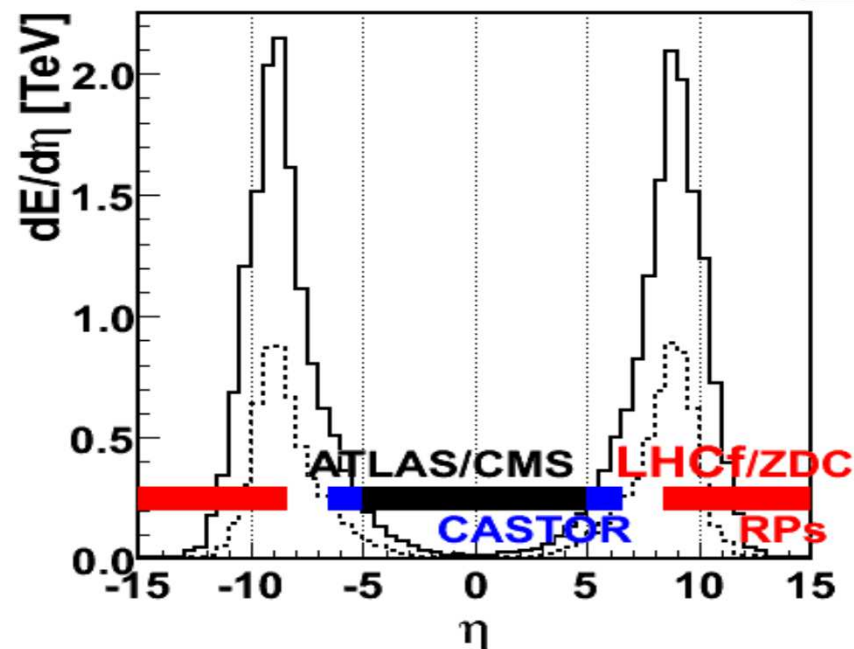


2台の検出器(Arm1, Arm2)を
LHCビームパイプの隙間に設置。
最前方領域($\eta > 8.4$)に散乱される
中性粒子(γ, n, π^0)を測定。

LHCf Detector (Arm2)



Energy Flux



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

LHCf Detectors

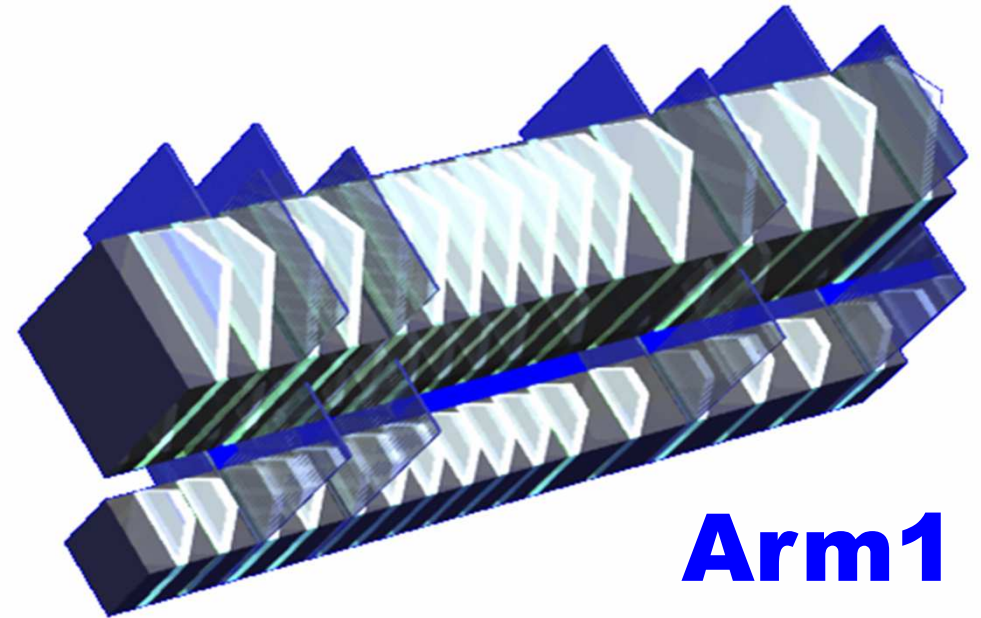
2つの検出器はそれぞれ2つの
カロリメータータワーを持つ

Arm1 20mm $\diamond$, 40mm $\diamond$

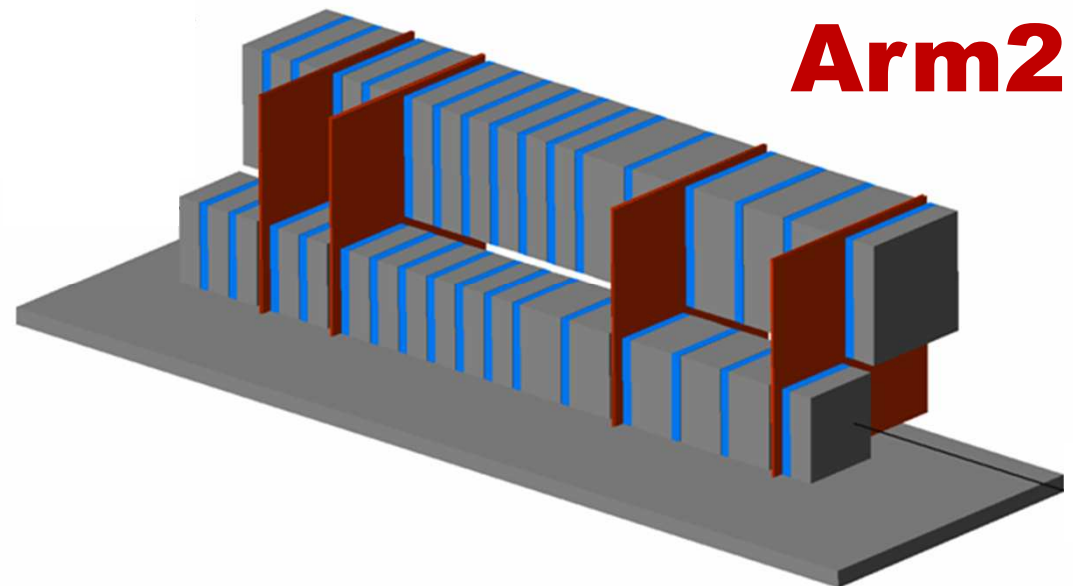
Arm2 25mm $\square$, 32mm $\square$

2γ イベント $\Rightarrow \pi^0$ 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)



Arm1



Arm2

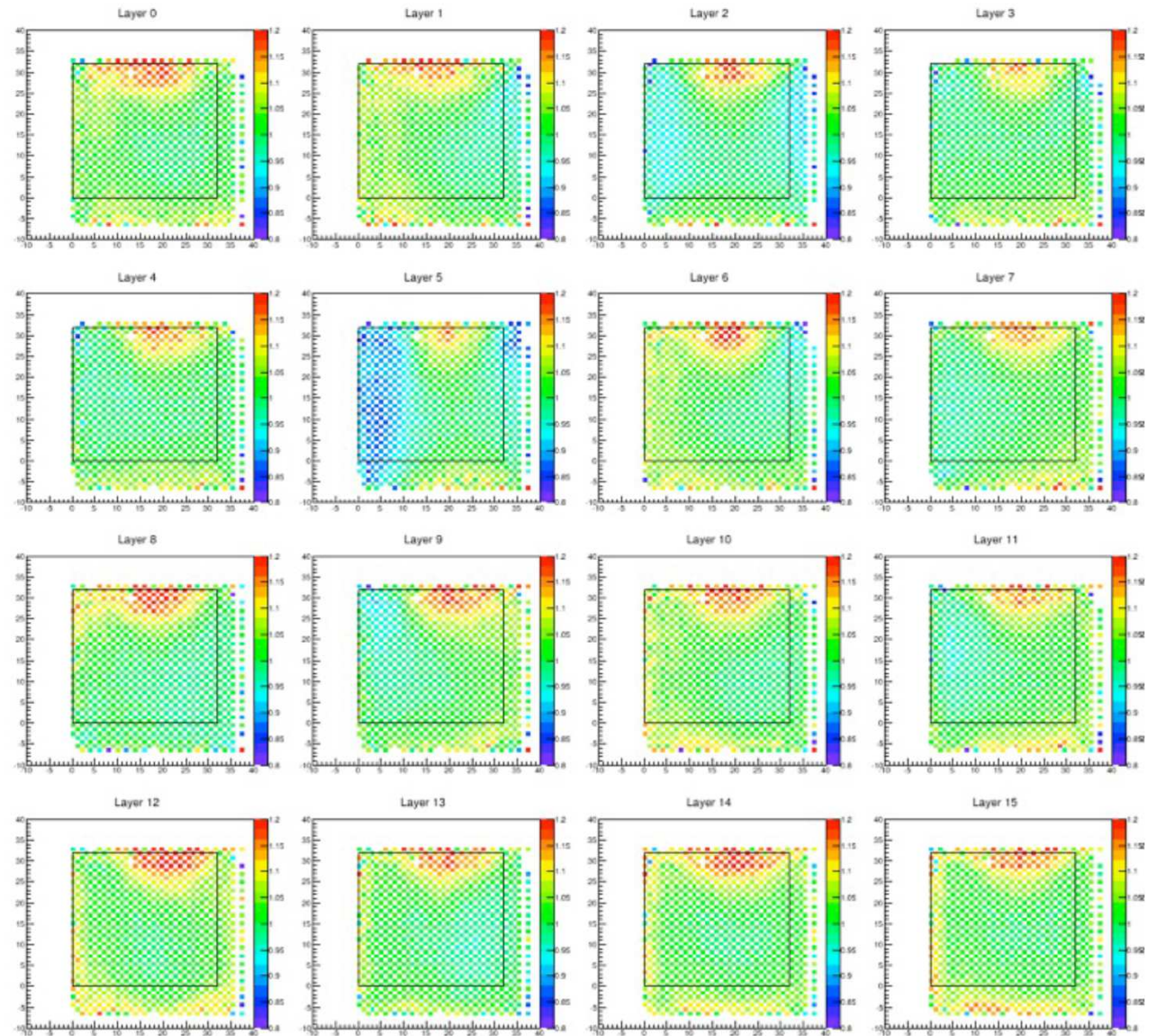
Phase-I 測定

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)

2014年の進捗状況と今後の予定

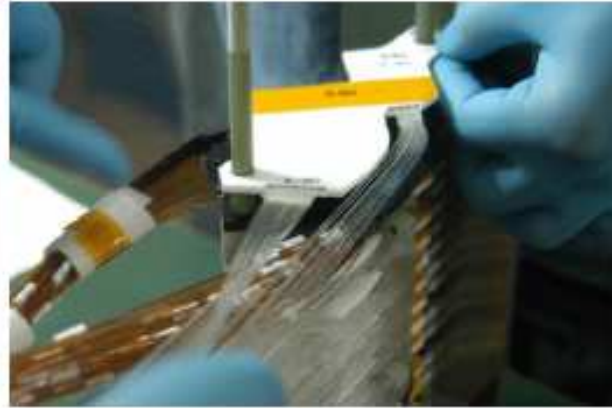
- 検出器のアップグレード
 - LHCのエネルギーupによる検出器の被曝線量の増加に対応して、プラスチックシンチレータから放射線耐性のあるGSOシンチレーション検出器にupgrade, 放医研HIMACでテスト・キャリブレーションを完了
 - 光量較正用新レーザーシステム, 温度管理システム構築
→ 系統誤差の抑制
- Upgrade検出器のインストール(2014年)
 - 8月: upgrade検出器の組立
 - 10月: CERN/SPSテストビームによるupgrade検出器の較正
 - 11月: LHCトンネルにインストール, 現在コミッショニング中
 - 2015年早々: LHC再稼働 ($\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ 陽子-陽子衝突)
 - 5月: 低ルミノシティでLHCf の測定を予定。

Calibration at HIMAC



Position dependence of light collection efficiency for GSO scintillators with 32 mm square of the 16 layers in the large tower of Arm2 detector

+ Full Assembling of Upgraded Arm1



解析, 論文発表の状況

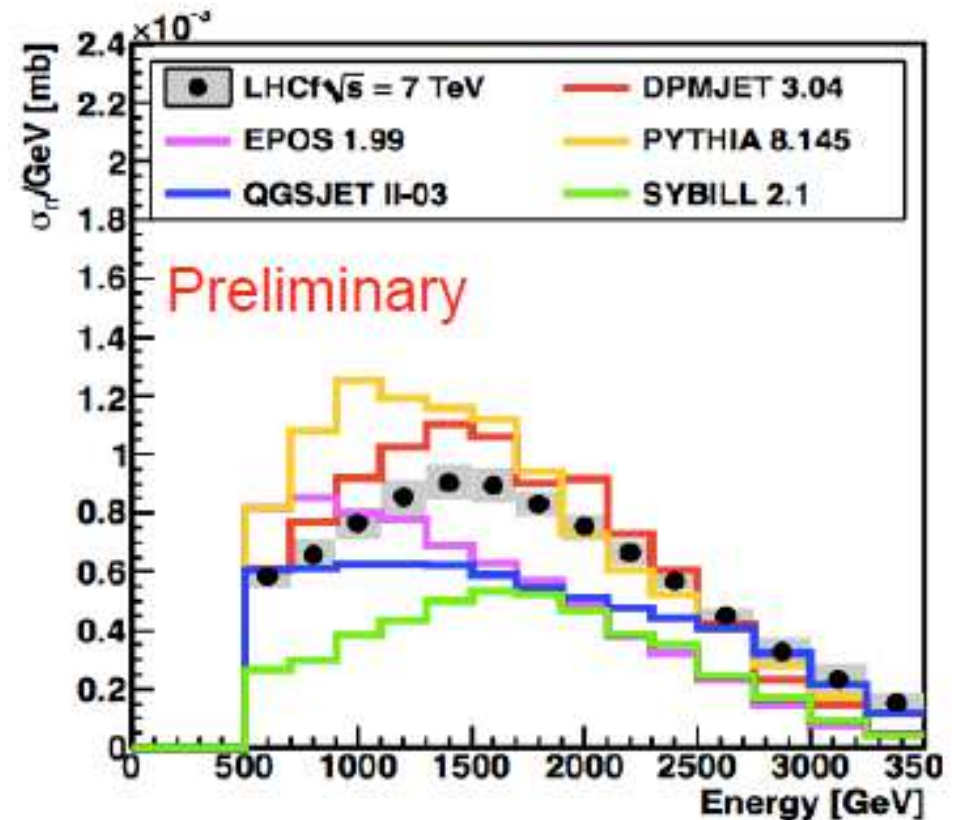
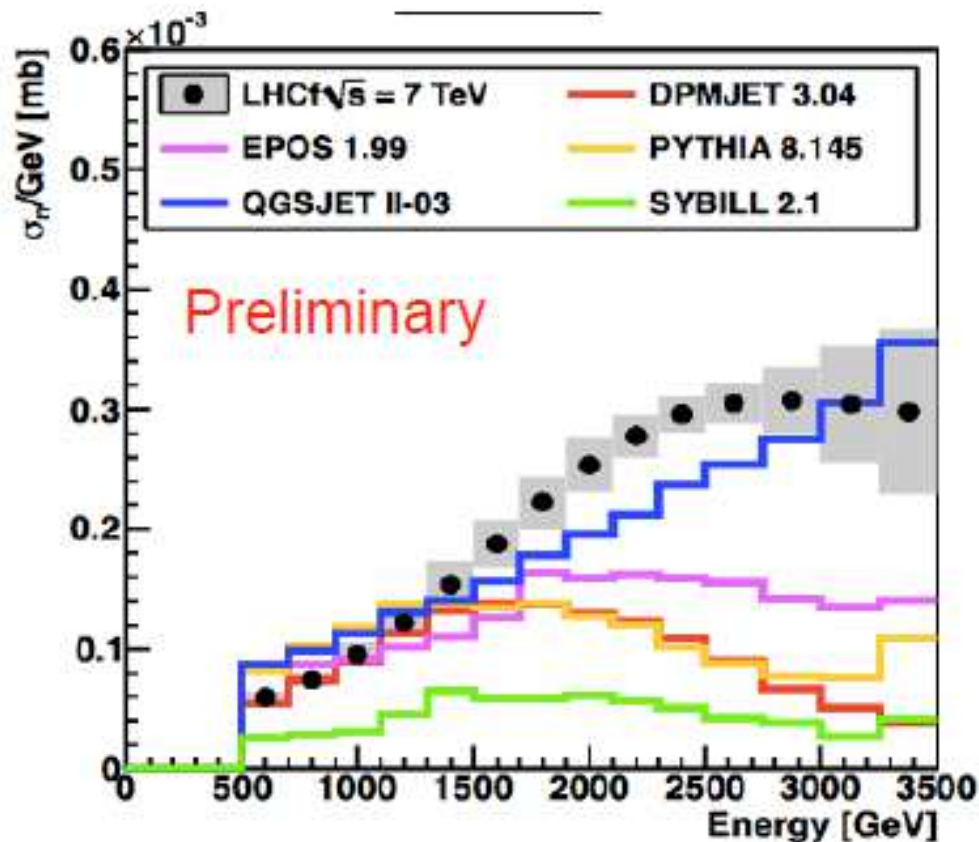
Year	Corresponding author	Journal	Title
2011 Aug	T. Sako	PLB	Measurement of zero degree single photon energy spectra for $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ proton-proton collisions at LHC
2011 Sep	K. Kawade	JINST	Study of radiation hardness of Gd_2SiO_5 scintillator for heavy ion beam
2012 Jan	K. Taki	JINST	Luminosity 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
2014 Mar	K. Kawade	JINST	The performance of the LHCf detector for hadronic shower
2014 June	G. Mitsuka	PRC	Transverse momentum distribution and nuclear modification factor of forward neutral pion in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02\text{ TeV}$

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

主な実験結果

- ハドロンモデルとの比較
 - どのモデルも部分的にはデータと一致するが、全体に合うモデルはない。
- 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 中性子スペクトル
- 5TeV p-Pb π^0 p_T スペクトル

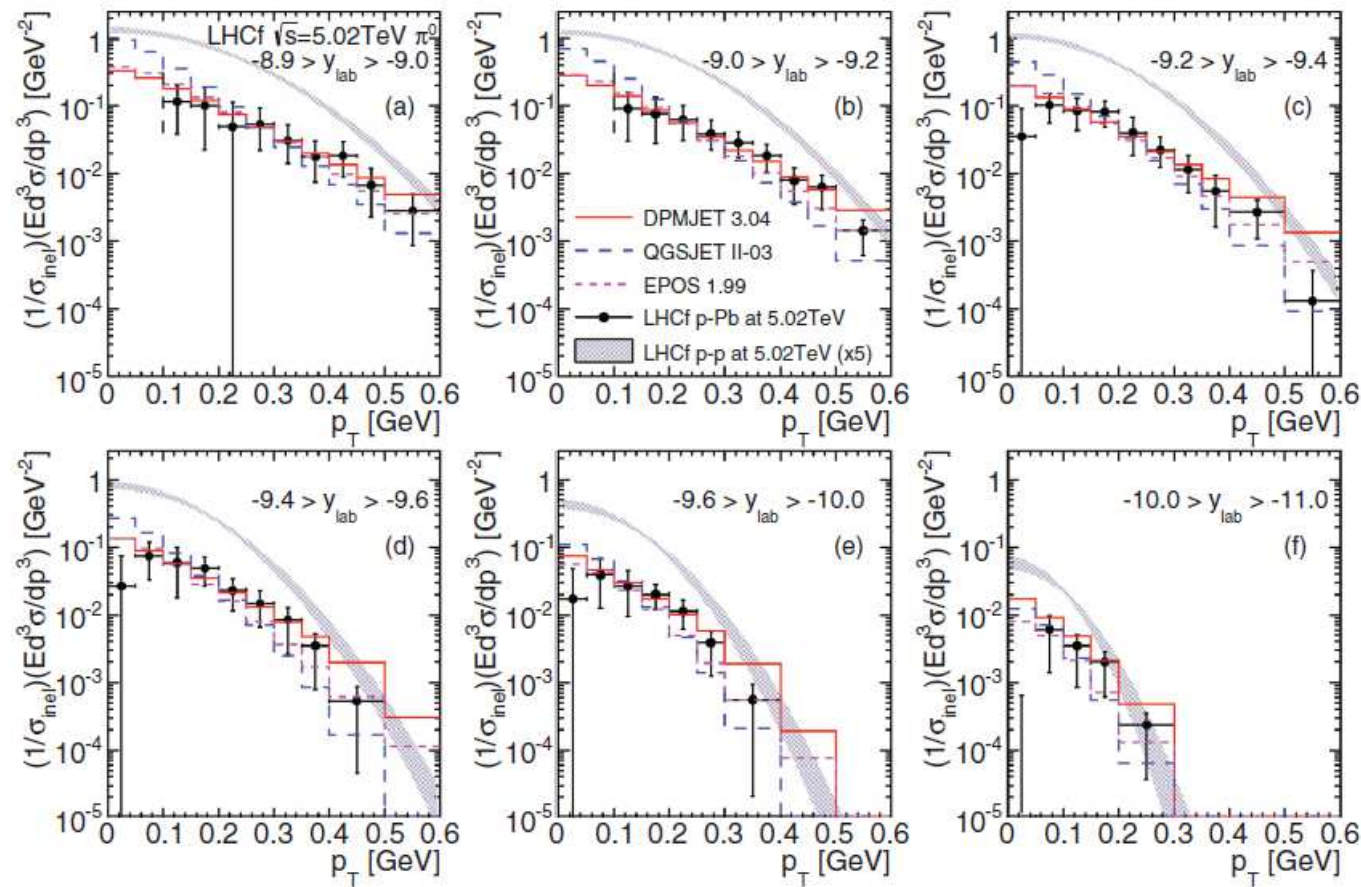
Neutron energy spectra at very forward region for $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ p-p collisions



Unfolded energy spectra

- ・ $\eta > 10.76$ の最前方においては高エネルギー中性子の生成が多い。(左図)
 - ・ QGSJET II-03 はデータをよく予測しているが、他のMCは合っていない。
 - ・ $8.99 < \eta < 9.22$ ではMCモデルのばらつき範囲内でデータと一致。(右図)
- (中性子に対するエネルギー分解能30% → unfolding法で推定)

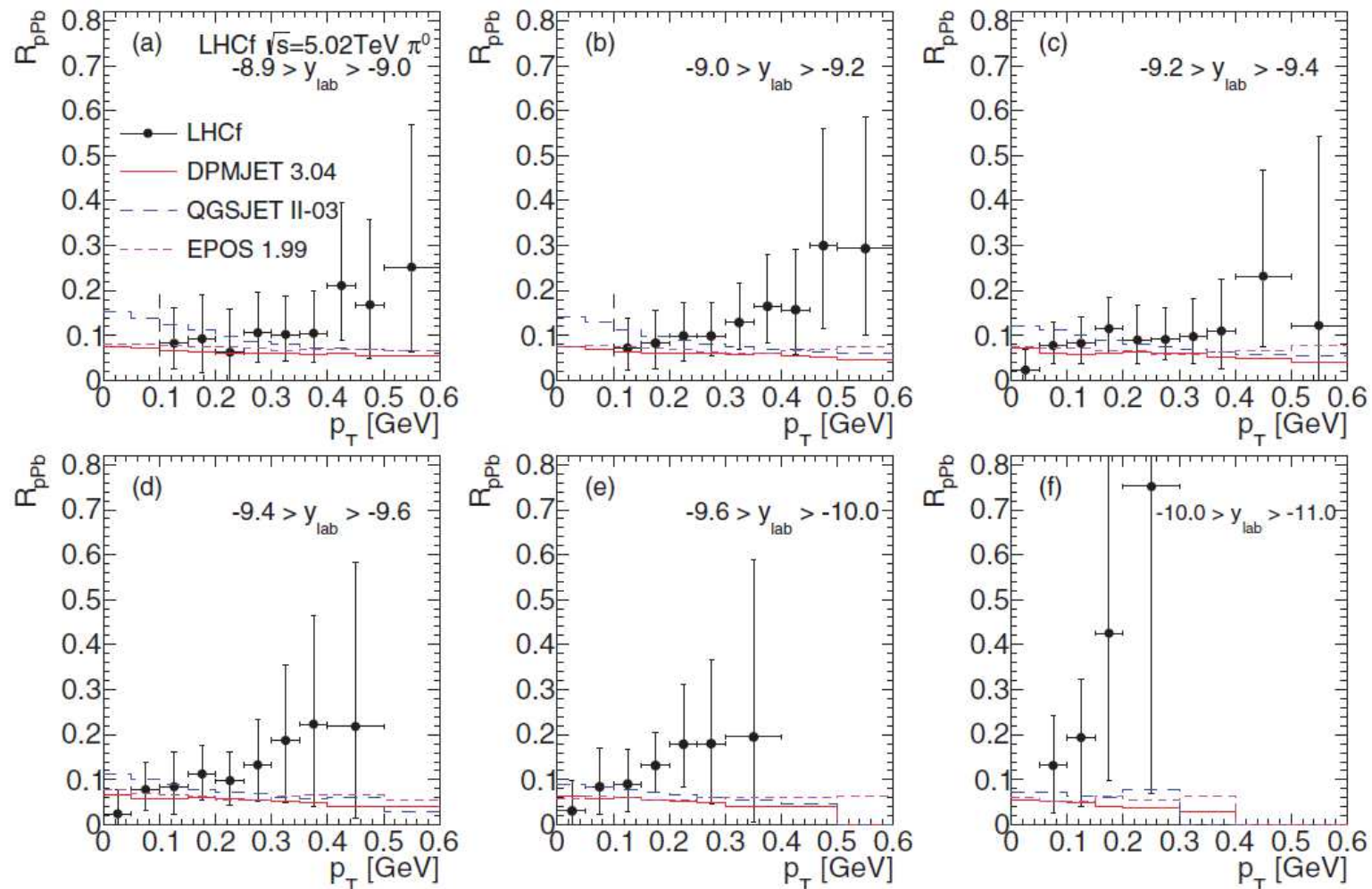
π^0 p_T spectra for very forward region in p-Pb collisions at $\sqrt{s} = 5.02\text{TeV}$



- DPMJET 3.04 と EPOS 1.99 はデータとよく一致。
- QGSJET II-03 はデータや他のMCと比べて、よりソフトなスペクトルを示す。
- p-Pb のデータは 5.02TeV換算の p-p データ ($\times 5$) よりハード。
(Ultra peripheral collision (UPC) は補正済み)

Nuclear modification factor for π^0

$$R_{pPb} \equiv \frac{\sigma_{inel}^{pp}}{\langle N_{coll} \rangle \sigma_{inel}^{pPb}} \frac{Ed^3\sigma^{pPb}/dp^3}{Ed^3\sigma^{pp}/dp^3}$$



- Nuclear modification factor, R_{pPb} , の値は原子核ターゲットにおける π^0 生成が単一核子ターゲットよりも強い抑制を受けていることを示している。
- 全てのモデルが不確定性の範囲でよく一致。

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加速器で最前方散乱中性粒子(γ , n , π^0)を測定
- 2009年からLHCが稼働し、2013年まで低ルミノシティビームでLHCf 測定
 $p\text{-}p: \sqrt{s} = 900\text{GeV}, 7\text{TeV}$ $p\text{-Pb}: \sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.04\text{TeV}$
- 2014年の主な解析: 5.04TeV $p\text{-Pb}$ 衝突, 7TeV $p\text{-}p$ 中性子解析
- LHCのエネルギーupに対応して、放射線耐性のあるGSO検出器にupgrade, HIMACでテスト・キャリブレーション, 較正用新レーザーシステム, 温度管理システム構築 → 系統誤差の抑制
- 2014年10月にupgrade検出器の較正, 11月にLHCトンネルにインストールし, 現在コミッショニング中。
- 2015年早々にLHC再稼働($\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ 陽子－陽子衝突), 5月に低ルミノシティで LHCf の測定を予定。
- $p\text{-}N$, $p\text{-}O$ などの実験を検討中。
- ATLASとの連携実験・解析を行う
- 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 upgraded on 17 Nov, 2014

