

平成 21 年 6 月 23 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340069

研究課題名（和文）CERN-LHC における 10^{17} eV 領域での最前方散乱粒子の LHCf による測定研究課題名（英文）Measurement of particles with LHCf in the very forward region of LHC at the energy around 10^{17} eV

研究代表者

田村 忠久（TAMURA TADAHISA）

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：90271361

研究成果の概要：CERN-LHC の 7+7 TeV（実験室系 10^{17} eV）の陽子衝突実験で最前方に散乱されてくる中性粒子を測定し、超高エネルギー宇宙線の解析に必須なシミュレーションの相互作用モデルを検証する。本研究では LHCf 検出器を開発製作し、CERN-SPS 予備実験で期待通りの性能を確認した。現在は、LHC の P1 衝突点から 140 m の地点に検出器を設置しているが、LHC 試運転直後の加速器系トラブルで、実験再開の目的は 2009 年である。LHCf は、 10^{17} eV 領域の相互作用モデルを確固たるものにすべく、LHC 稼働初期のデータ取得に万全の態勢を整えることができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2007 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：宇宙線

科研費の分科・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：CERN-LHC, LHCf, 最前方散乱, 宇宙線, ガンマ線, 粒子検出器, シンチファイバ-, カロリメータ

1. 研究開始当初の背景

CERN では世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器 LHC を 2007 年から稼働させる準備が着々と進んでいた。LHC で実現される 7+7TeV の陽子衝突は、主要実験による素粒子物理学の発展のみならず、超高エネルギー領域の宇宙線観測についても、そのエネルギー決定などに付きまとう不確定性を払拭する鍵となり得る。なぜならば、実験室系に換算した LHC の衝突エネルギーは、超高エネルギ

ー宇宙線のエネルギー領域に匹敵する 10^{17} eV に達し、宇宙線観測の基盤である空気シャワーについて、その中で起こる核相互作用を直接検証する手段を提供してくれるからである。

このような超高エネルギー領域では、宇宙線のエネルギーや核種の決定をシミュレーションに頼っている。そのため、結果として得られるエネルギースペクトルに核相互作用モデルに依存した差が生じ、その不確定性が宇宙線の重要なテーマである化学組成や

最高エネルギーでのGZKカットオフの存否などの決着に対する妨げとなっている。我々はこれを解決すべく、空気シャワー現象で重要となる最前方に散乱してくる粒子の測定を行うLHCf実験を計画した。

2. 研究の目的

LHCfの検出器はイメージング機能をもった小型の電磁シャワーカロリメータである。これを、LHCの主要実験の衝突点（最終的にATLASの衝突点P1となった）から約140m離れた地点に設置する。ここは衝突点を含む1本のビームパイプが、LHCのリングにつながる2本の小径のビームパイプに分岐する地点で、小径ビームパイプ間の96mmという僅な隙間にタワー構造のカロリメータを置くことで、衝突点から最前方に散乱されてくる粒子を検出することができる。荷電粒子はマグネットによってはじかれるため、 γ （ γ ）などの中性粒子のみがここへ到達する。LHCfではこのガンマ線をビームパイプなどからのバックグラウンドの影響を受けない100 GeV以上の領域で測定し、各種のシミュレーションコードから予想されるエネルギースペクトルと比較することによって、最適な核相互作用モデルを確定するのが目的である。

本研究課題の申請時には、2006年度にLHCf本実験用装置の製作を早期に完了し、同年度にCERN-SPSでの予備実験を実施する計画であった。そして2007年度にはLHCにおける本実験を開始し、最終年度の2008年には実験を終了して、解析結果をまとめる予定となっていた。

3. 研究の方法

検出器は2本のタワーからなり、各タワーの断面は一辺がそれぞれ20mm、40mmの正方形である。各タワーの深さ方向にはW（タングステン）板を計48 radiation length (r.l.)分積層し、3mm厚のプラスチックシンチレータ板16枚を2または4 r.l.おきに挿入する。W吸収層は数TeVまでのガンマ線の測定を充分に行える厚みである。プラスチックシンチレータは1枚ごとに光電子増倍管（PMT）で読み出し、シャワーカーブを測定してエネルギー決定と粒子選別（ガンマ線と中性子）を行う。

シャワーのイメージングは、1mm角のシンチファイバー（SciFi）で組んだ直交する2枚のSciFiベルトを、6, 10, 32, 38 r.l.に挿入して行う。これによって入射粒子数を識別し、位置情報から横方向運動量 P_T を決定する。SciFiの読み出しには64チャンネルのマルチアノードPMT（MAPMT）を2タワー分で8本用いる。この読み出しの基本システムは

2004年のテスト実験で既に完成しており、本研究でさらに取り込み速度の向上とフロントエンド部分の小型化を行った。

この時点で、その他のLHCfの基礎的な装置の予備開発とビームテストによる性能評価はほぼ完了しており、宇宙線の重要な課題を決着に導く絶好の機会を逃さないように、LHC稼動時期におけるLHCfの本実験開始を目指して準備を進めた。

2006年度には本実験用のLHCf検出器を完成した。これを用いて、CERN-SPSで電子/陽子/ μ ビームを照射する性能試験を8月に行った。実験の結果、期待通りの性能が得られていることを確認した。

2007年度5月には、LHCf検出器をLHCトンネル内の測定場所に仮設置し、200m離れたデータ収集室間とのデータ通信と検出器制御のテストを行った。また8-9月には、CERN-SPSにおいて予備実験を行い、前年度よりもビームエネルギーの設定数を増加させて、エネルギーキャリブレーションの精度を向上させるとともに、本実験に向けた最終確認を行った。1-2月にはLHCトンネル内へのLHCf検出器の設置を完了させた。

一方、LHC計画は2007年に予定されていた7+7 TeV衝突の開始が延び、2008年度に5+5 TeV衝突が行われる予定となっていた。LHCfは既に完全に準備が整った状況で2008年9月のLHC加速器の試運転を迎えた。しかし、その直後に加速器系のトラブルが生じ、LHC加速器の修理が完了して実験が再開するのは2009年の見通しとなっている。

4. 研究成果

LHCf検出器の製作および性能試験も完了し、データ収集系も含めて全体の準備が整った。図1がLHCf検出器である。幅90mm、長さ290mmで、下部に20mm角と40mm角の



図1 LHCf検出器

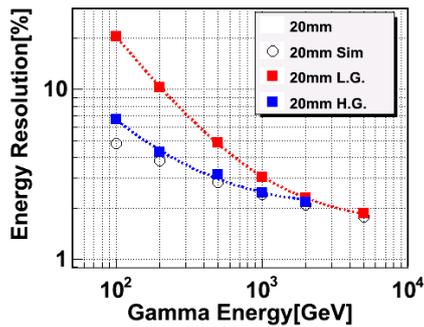


図2 20 mm タワーのエネルギー分解能

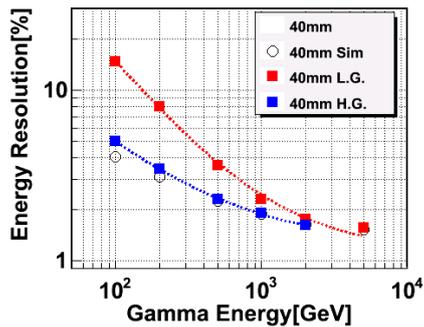


図3 40 mm タワーのエネルギー分解能

2本のタワーが横たわり、光ファイバーによって上部の光電子増倍管にシンチレーション光がガイドされている。この LHCf 検出器を LHC の ATLAS 実験のための衝突点 P1 から 140 m 離れた測定地点に設置して、LHC 実験の開始を待つ状況まで順調にこぎつけた。

2006年と2007年に CERN-SPS 加速器を用いて行った性能試験のための予備ビーム実験の結果を図 2~5 に示す。各図は電子ビームを照射して測定を行った結果である。

図2は20 mm タワーのエネルギー分解能である。エネルギー決定は、プラスチックシンチレータで得られるシャワーカーブによって行う。ダイナミックレンジに合わせてアンプ回路系のゲインを2系統用意しており、高ゲイン(H.G.)は低エネルギー側を、低ゲイン(L.G.)は高エネルギー側をカバーする。この2系統を連結すれば、シミュレーションから予測される性能が得られていることがわかる。図3は、40 mm タワーについてのエネルギー分解能で、こちらも期待通りの性能が得られていることがわかる。

図4と図5は、それぞれ20 mm タワー、40 mm についての入射粒子の位置決定精度である。SciFi によって得られるイメージ画像から入射位置を決定する。6 r.l.の SciFi ベルトを1段目(1st)、10 r.l.の SciFi ベルトを2段目(2nd)として、直行する X-Y 方向のそれぞれで位置決めを行う。これもシミュレーションで期待される性能を達成していることを確認した。

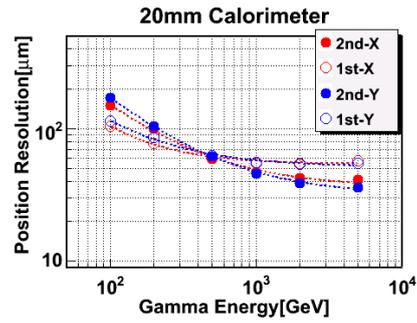


図4 20 mm タワーの位置決定精度

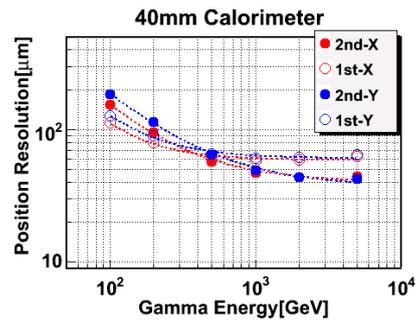


図5 40 mm タワーの位置決定精度

2008年9月に行われた5+5 TeVの陽子衝突を目指した加速器の試運転では、検出器前面に取り付けたフロントカウンターを用いて、ビームと同期した信号とのタイミング調整も行うことができた。残念ながら、その後に発生した加速器系のトラブル修復には時間を要するようである。そのため、本研究の最終年度中のデータ取得までには至らなかったが、LHCfはLHCの本格稼働の初期にデータを取得して、その成果を得る予定になっている。本研究が科学研究費補助金に採択されたことによって、これまでは推測でしかなかった 10^{17} eV 領域の相互作用モデルを確固なものすることができるデータの取得に向けて、万全の態勢を整えることができた。最後の重要な実験遂行は、LHCの稼働再開を待たねばならない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

O. Adriani, L. Bonechi, M. Bongi, G. Castellini, R. D'Alessandro, D. A. Faus, K. Fukui, M. Haguenaer, Y. Itow, K. Kasahara, D. Macina, T. Mase, K. Masuda, Y. Matsubara, H. Menjo, M. Mizuishi, Y. Muraki, P. Papini, A. L. Perrot, S. Ricciarini, T. Sako, Y. Shimizu, K. Taki, T. Tamura, S. Torii, A. Tricomi, W. C.

Turner, J. Velasco, A. Viciani, H. Watanabe, and K. Yoshida, "LHCf: a Calibration Tool for Cosmic Ray Physics at LHC", Journal of Physical Society of Japan, 78 Suppl. A, 125-129 (2009), 査読有り

M. Mizuishi, O. Adriani, L. Bonechi, M. Bongi, G. Castellini, R. D'Alessandro, D. A. Faus, K. Fukui, M. Grandi, M. Haguenaue, Y. Itow, K. Kasahara, D. Macina, T. Mase, K. Masuda, Y. Matsubara, H. Menjo, Y. Muraki, P. Papini, A. L. Perrot, S. Ricciarini, T. Sako, Y. Shimizu, K. Taki, T. Tamura, S. Torii, A. Tricomi, W. C. Turner, J. Velasco, A. Viciani, H. Watanabe, and K. Yoshida, "Performance of the Arm#1 Detector for LHCf Experiment", Journal of Physical Society of Japan, 78 Suppl. A, 173-176 (2009), 査読有り

The LHCf Collaboration, O. Adriani, L. Bonechi, M. Bongi, G. Castellini, R. D'Alessandro, D. A. Faus, K. Fukui, M. Grandi, M. Haguenaue, Y. Itow, K. Kasahara, D. Macina, T. Mase, K. Masuda, Y. Matsubara, H. Menjo, M. Mizuishi, Y. Muraki, P. Papini, A. L. Perrot, S. Ricciarini, T. Sako, Y. Shimizu, K. Taki, T. Tamura, S. Torii, A. Tricomi, W. C. Turner, J. Velasco, A. Viciani, H. Watanabe and K. Yoshida, "The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider", JINST (Journal of Instrumentation, An IOP and SISSA journal), 3 S08006, Electronic Journal (WWW.iop.org/EJ/jinst) (2008), 査読有り

Y. Muraki, "Current status of the LHCf experiment", Proceedings of 21st European Cosmic Ray Symposium in Kosice, Slovakia, <http://ecrs2008.saske.sk/dvd/s7.12.pdf> (2008), 査読無し

T. Sako, O. Adriani, L. Bonechi, M. Bongi, A. Faus, M. Haguenaue, Y. Itow, K. Kasahara, K. Masuda, Y. Matsubara, H. Matsumoto, H. Menjo, Y. Muraki, Y. Obata, T. Tamura, K. Tanaka, S. Torii, W. C. Turner, J. Velasco, K. Yoshida, "Performance of the prototype detector for the LHCf experiment", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 578, 146-159 (2007), 査読有り

増田公明, 村木綏, 伊藤好孝, 埜隆志, 毛受弘彰, 渡邊泰典, 間瀬剛, 田中隆之, 田村忠久, 日比野欣也, 奥野祥二, 片寄祐作, 陳鼎, 吉田 賢二, 村上健, "高エネルギー重イオンに対するプラスチックシンチレータと光電子増倍管の応答特性", 平成 18 年

度放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書, 226-227 (2007), 査読無し

埜隆志, "CERN LHC における宇宙線相互作用検証実験 LHCf - リモート操作可能なマニピュレータの開発 - ", 名古屋大学全学技術センター<<理学>> 装置開発系技術報告, 2, 13-16 (2007), 査読無し

埜隆志, "超高エネルギー宇宙線相互作用検証実験:LHCf", 名古屋大学太陽地球環境研究所研究会報告集 平成 18 年度 STE 研究会集 太陽圏シンポジウム, 127-132 (2007), 査読無し

〔学会発表〕(計 25 件)

埜隆志 他, "10¹⁷eV における最前方粒子測定実験 LHCf - 全体報告(09 年春) - ", 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学

毛受弘彰 他, "LHCf 実験のシミュレーションにおける性能評価()", 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学

間瀬 剛 他, "LHCf 実験における最前方中性子測定の研究", 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学

滝和也 他, "LHCf 実験におけるバックグラウンドの研究", 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学

中井幹夫 他, "LHCf における粒子識別性能について", 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学

田村忠久 他, "10¹⁷eV における最前方粒子測定実験 LHCf - 全体報告(08 年秋) - ", 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 山形大学

滝和也 他, "LHCf 実験におけるバックグラウンドの研究", 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 山形大学

福井謙一 他, "LHCf におけるトリガーシステムの開発", 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 山形大学

毛受弘彰 他, "LHCf 実験のシミュレーションによる性能評価", 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 山形大学

伊藤好孝 他, "LHC での超前方測定:LHCf 実験", 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 山形大学

埜隆志 他, "10¹⁷eV における最前方粒子測定実験 LHCf - 全体報告(08 年春) - ", 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学本部キャンパス

間瀬剛 他, "LHCf における中性子測定 -2007 年夏 CERN SPS ビームテストによる粒子弁別", 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学本部キャンパス

毛受弘彰 他, "LHCf 測定器の性能評価 -

2007年夏 CERN SPS ビームテスト解析結果 - ”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学本部キャンパス

渡邊泰典 他, “ LHCf 検出器の放射線損傷とその回復の評価 - 2007 年 炭素ビーム及び線照射テスト結果 - ”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学本部キャンパス

伊藤好孝 他, “ 10^{17} eV における最前方粒子測定実験 LHCf - 全体報告 (07 年秋) - ”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 23 日, 北海道大学札幌キャンパス

毛受弘彰 他, “ LHCf 測定器の性能評価 - 2006 年夏 CERN SPS ビームテスト解析結果 (I) - ”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 23 日, 北海道大学札幌キャンパス

水石光紀 他, “ LHCf 測定器の位置性能評価 - 2006 年夏 CERN SPS ビームテストの解析結果 - ”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 23 日, 北海道大学札幌キャンパス

渡邊泰典 他, “ LHCf 検出器の放射線ダメージ評価 - 2007 年 HIMAC ビームテスト結果 - ”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 23 日, 北海道大学札幌キャンパス

O. ADRIANI, D. MACINA, T. MASE, K. MASUDA, Y. MATSUBARA, H. MATSUMOTO, Y. MURAKI, P. PAPINI, A. L. PERROT, T. SAKO, Y. SHIMIZU, L. BONECHI, T. TAMURA, S. TORII, A. TRICOMI, W. C. TURNER, J. VELASCO, H. WATANABE, K. YOSHIDA, M. BONGI, G. CASTELLINI, R. D'ALESSANDRO, D. A. FAUS, M. HAGUENAUER, Y. ITOW, K. KASAHARA, “ Status of the LHCf experiment ”, Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conference, Meridia, Yucatan, Mexico (2007)

O. ADRIANI, D. MACINA, T. MASE, K. MASUDA, Y. MATSUBARA, H. MATSUMOTO, Y. MURAKI, P. PAPINI, A. L. PERROT, T. SAKO, Y. SHIMIZU, L. BONECHI, T. TAMURA, S. TORII, A. TRICOMI, W. C. TURNER, J. VELASCO, H. WATANABE, K. YOSHIDA, M. BONGI, G. CASTELLINI, R. D'ALESSANDRO, D. A. FAUS, M. HAGUENAUER, Y. ITOW, K. KASAHARA, “ The performance of the LHCf detectors ”, Proceedings of 30th International Cosmic Ray Conference, Meridia, Yucatan, Mexico (2007)

21 毛受弘彰 他, “ LHCf 実験用小型サンプリングカロリメータの性能評価 ”, 日本物理学会 2007 年春季大会, 2007 年 3 月 26 日, 首都大学

22 埜隆志 他, “ 10^{17} eV における最前方粒子測定実験 LHCf - 全体報告 (06 年秋) - ”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月

21 日, 奈良女子大学

23 松本秀紀 他, “ LHCf カロリメータの開発 - 線源と紫外レーザーによるキャリブレーション - ”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 21 日, 奈良女子大学

24 田村忠久, 日比野欣也, 奥野祥二, 内堀幸夫 他, “ LHCf 位置検出器の開発 - HIMAC による SciFi キャリブレーション - ”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 21 日, 奈良女子大学

25 毛受弘彰 他, “ LHCf 測定器の性能試験 - 2006 年夏の CERN SPS ビームテスト報告 - ”, 日本物理学会 2006 年秋季大会, 2006 年 9 月 21 日, 奈良女子大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

CERN 公式サイト

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHCf-en.html>

LHCf グループ公式サイト

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/~lhcf/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 忠久 (TAMURA TADAHISA)

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号: 90271361

(2) 研究分担者

日比野 欣也 (HIBINO KINYA)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号: 80260991

吉田 賢二 (YOSHIDA KENJI)

芝浦工業大学・システム工学部・准教授

研究者番号: 90260894

奥野 祥二 (OKUNO SHOJI)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号: 90281451

内堀 幸夫 (UCHIHORI YUKIO)

独立行政法人放射線医学総合研究所・宇宙放射線防護プロジェクト・研究員

研究者番号: 50342879

(3) 連携研究者