

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20403004

研究課題名(和文)

超高エネルギー宇宙線解明のためのLHC陽子衝突での超前方測定

研究課題名(英文)

Measurement at very forward in LHC p-p collisions for ultra high energy cosmic rays

研究代表者：

伊藤 好孝 (Yoshitaka Itow)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：50272521

研究成果の概要(和文)：

2009-2010年の0.9TeV及び7TeVでのLHC陽子陽子衝突に於いて、超前方領域における中性粒子の測定LHCf実験を行い、超高エネルギー宇宙線の空気シャワー形成に重要な0度ガンマ線スペクトルを測定した。7TeV衝突での0度でのガンマ線エネルギー分布の解析を進め、ハドロン相互作用モデルとの比較を行った最初の成果を公開した。その結果、データは従来のハドロン相互作用モデルの予測とは完全には一致せず、空気シャワー実験の解釈に一定の影響を及ぼすと示唆される。

研究成果の概要(英文)：

We have carried out the LHCf experiment for measurement of neutral particles at 0 degree of proton-proton collisions in LHC at 0.9TeV and 7TeV in CMS energy in 2009-2010, which is relevant to air shower development of very high energy cosmic rays. We have reported the first result of experiment for the data of gamma ray energy spectra at 0 degree of 7TeV proton-proton collisions compared with various hadron interaction models relevant to air showers. As the result data looks incompatible with any of existing hadron interaction models completely and suggest possible impact on implication of air shower development.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2009年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：宇宙線物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線

キーワード：宇宙線、素粒子実験、加速器、実験核物理、国際協力

1. 研究開始当初の背景

10^{20} 電子ボルトを超えるエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線の存在は、そのエネルギースペクトルと化学組成、加速伝播機構を含め宇宙物理学上の大きな謎となっている。特に、宇宙線陽子の宇宙背景輻射光子との共鳴散乱によるGZKカットオフの有無は20

年来の大きな問題となっていた。昨今、AUGER実験等の超大型宇宙線観測計画による高統計精度のデータにより、GZKカットオフを思わせるエネルギースペクトルの折れ曲がりが存在する事は確定的となった。しかし、超高エネルギー宇宙線の絶対エネルギー較正にまだ不定性がある事、化学組成測定の

結果が陽子よりむしろ重い原子核を示唆するデータもある事から、単純に GZK カットオフと結論できない混沌として状況となっている。超高エネルギー宇宙線観測は、宇宙線が大気と衝突して2次粒子を生成する空気シャワーの測定によって行われるが、超高エネルギー宇宙線のハドロン相互作用モデルの持つ不定性のため、宇宙線のエネルギーや化学組成決定に不定性が存在する事が知られている。特に、宇宙線シャワー形成に大きく寄与する衝突エネルギーの集中する超前方領域の粒子生成は、摂動的 QCD の計算は適用できず超高エネルギーでの実験データも存在しない領域で、信頼できるハドロン反応モデルの不在が問題となっていた。

一方、欧州原子核研究機構 (CERN) で 2009 年より本格稼動を開始した大型ハドロンコライダー (LHC) では、重心系エネルギー 14 テラ電子ボルト (TeV) の陽子陽子衝突が実現する。これは 10^{17} 電子ボルト相当の宇宙線の反応に相当する。このような背景から、我々は宇宙線ハドロン相互作用モデル検証のための LHC 0 度測定 LHCf 実験を計画し、実験提案、検出器の開発、設置へ向けての交渉などの準備を進め、LHC 6 番目の正式実験として認められるに至った。

2. 研究の目的

LHC の陽子陽子衝突点からビーム進行方向 (超前方領域) に放出されるガンマ線、中性子等中性粒子の生成微分断面積、エネルギースペクトル等を測定し、超高エネルギー宇宙線の空気シャワーシミュレーションに使用されている代表的なハドロン反応モデル (SIBYLL, QGSJET, DPMJET, EPOS) との比較を行い、超前方領域での粒子生成機構の精密化を図ると共に、これら新たな測定結果の超高エネルギー宇宙線の空気シャワー解析へフィードバックし、観測の精度向上を行う。

3. 研究の方法

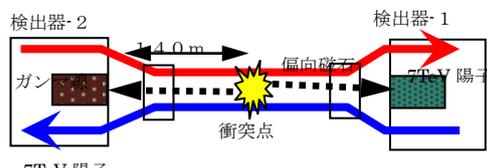


図1 LHCf 実験レイアウト

LHC での陽子陽子衝突点 IP1 から両側 140m 離れた箇所では陽子ビームパイプが 2 股に分かる箇所があり、陽子陽子衝突 0 度方向に放出され、ビームパイプ内を通過して到達する中性粒子を測定するスロットが設けられている。この箇所に小型シャワーサンプリング形イメージングカロリメーター検出器 (Arm1,

Arm2) をそれぞれ設置し、ガンマ線、中性子等の入射位置、エネルギーを測定する。カロリメーターは 16 層のタングステン板 (2 放射長) とプラスチックシンチレーターを交互に挟み込んだサンプリング部と、4 層の X, Y 位置検出層 (Arm1 はプラスチックシンチレーティングファイバー、Arm2 はシリコンストリップ検出器) からなっている。各検出器は 2 対のカロリメーターで構成され、それぞれで 2 本の崩壊ガンマ線の入射位置とエネルギーを捉えることで中性 π 中間子の再構成を行う。中性 π 中間子の普遍質量分布を用いてエネルギースケールの較正を行う。検出器は上下に稼動でき異なる横運動量領域をカバーする。また検出器上流のカウンターによりル

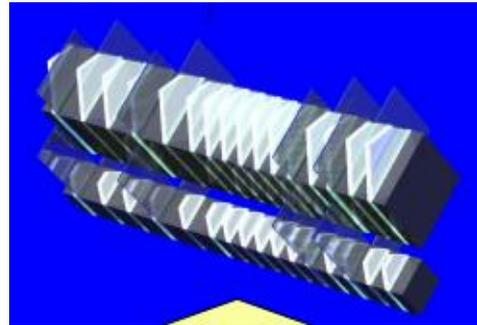


図2 LHCf カロリメーター検出器

ミノシティのモニターを行う。

データ取得は LHC 加速器試運転時の低ルミノシティ時に行った。2009 年 12 月の LHC 初衝突時には重心系 900GeV の陽子陽子衝突、2010 年 3 月からは重心系 7TeV 衝突のデータを取得し、同年 7 月の高ルミノシティ運転前に検出器を撤収した。検出器は LHC データ取得前後の 2007 年秋、2010 年秋の 2 回にわたり CERN SPS での 200GeV 電子ビーム、陽子ビームを用いて、絶対エネルギースケール、分解能、位置依存性を調べた。

4. 研究成果

- SPS ビームテストによる性能評価

2007 年の SPS でのビームテスト実験の結果から検出器の性能を明らかにした。50~200GeV 電子ビームによる各サンプリング層のエネルギー較正を行い、エネルギー分解能について 100GeV 電子シャワーにたいして 3% を得た。これはシミュレーションの結果とよく一致する。シャワー入射位置分解能については Arm1 について約 $200 \mu\text{m}$ 、Arm2 について約 $50 \mu\text{m}$ を得た。2009~2010 年の LHC でのデータ取得後に再び SPS でのビームテストを行い、放射線耐性等による性能劣化を調べた。その結果、エネルギー分解能や位置分解能の劣化はほとんどない事を確認した。

- 放射線耐性の評価

放医研 HIMAC による重イオンビーム照射、コバルト 60 照射施設によるガンマ線照射の

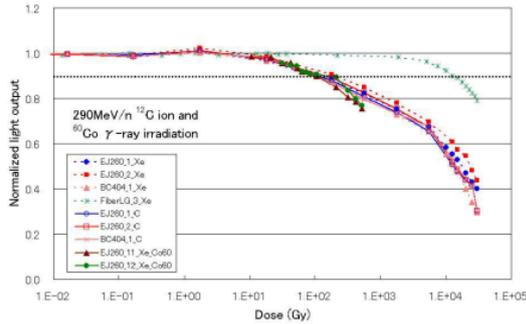


図3 放射線耐性テストの結果

2種類の方法で検出器に使用されているプラスチックシンチレーター部の耐放射線性能を調べた。290MeV/u 炭素イオンビーム照射による測定では、100Gy 照射では1割程度のシンチレーション光の減光が見られた。Co60線源によるガンマ線照射でもほぼ同様の効果が見られた。このことから LHCf 本実験での低ルミノシティ時では、重心系エネルギー7TeV 衝突であればほとんど放射線損傷が問題にならないレベルであるという事が分かった。

・検出器の現地への設置とラン計画立案

2007年のSPSでのビームテスト終了後、検出器をLHC加速器トンネル内に設置し、現地でのキャリブレーション、ノイズ対策、データ取得ソフトウェアの準備等を行い、2009年のLHCビーム初周回時には、ビームパイプ中の残留ガスとの衝突イベントの検出に成功した。一方、その直後に起こったLHC加速器の事故の影響によりLHCの運転計画は大幅に変更を余儀なくされた。衝突エネルギーは当初の重心系14TeVではなく、2TeV, 7TeVもしくは10TeVと段階的にあげられるプランが示され、LHCf実験計画もそれに応じて、加速器グループや他LHC実験との調整などの対応を行った。また、異なる重心系エネルギーでデータを取得する事で、ハドロン相互モデルのエネルギー依存性を明らかにする検討を行った。

・重心系900GeV及び7TeVデータの取得

2009年12月のLHC初衝突時に、重心系900GeVの陽子陽子衝突からデータを初取得に成功した。2010年3月からは重心系7TeV衝突のデータを取得し、同年6月より徐々に高ルミノシティを上げながら検出器の垂直位置を変えて異なる横運動量領域のデータを取得した。また5月には高統計の900GeVデータを取得した。7月中旬に、高ルミノシティ運転開始直前に検出器を撤収を行い、第一期のLHCf実験データ取得は成功裏に完了した。

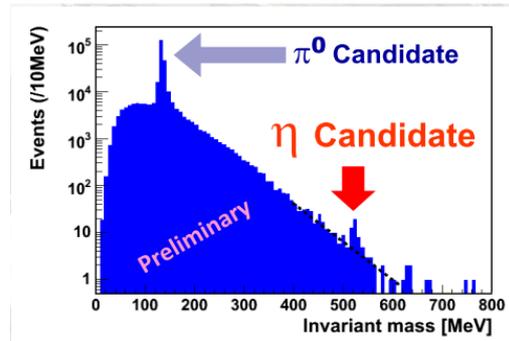
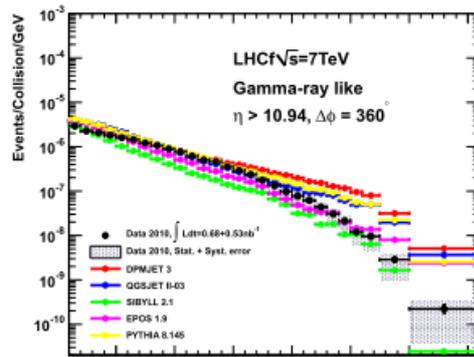


図3 π^0 及び η 普遍質量分布

・重心系7TeVの中性 π 中間子データの解析
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ からの2本の γ 線入射イベントを再構成し、中性 π 中間子の同定に成功した。これはTeVを超える最も高いエネルギーの人工ガンマ線検出例である。得られた π^0 普遍質量分布からTeV領域でのエネルギー絶対スケールの較正を行い、SPSビームテストで得られたエネルギースケールと7%以内で一致していることを確かめた。また高統計のデータから $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ の同定にも成功した。

・重心系7TeVでの超前方ガンマ線測定



条件のよい低ルミノシティ運転時の7TeVデータを解析し(約 0.7nb^{-1} 相当)、超前方(ラピディティ領域 $\eta > 10.4$ 及び $8.99 > \eta > 8.81$)に放出されるガンマ線のエネルギー分布を求めハドロン反応モデルとの比較を行った。これらの結果をLHCf実験の最初の結果として論文にまとめ投稿し、また結果の概要についてCERN現地においてセミナーを行った。得られたスペクトルとQGSJET2, DPMJET3, SYBILL, EPOS, PYTHIAなど、高エネルギー宇宙線や高エネルギー物理学で利用されているハドロン反応モデルの比較を行ったところ全てのエネルギー領域でよく一致するモデルは無かった。これらの結果は空気シャワーシミュレーションの解釈の不定性が起こることを示唆し、今後空気シャワー形成と0度反応モデルとの関連が重要となると考えられる。

・重心系900GeV衝突データの解析

2009年12月と2010年5月に取得された重心

系 900GeV 衝突でからの超前方ガンマ線、および中性子エネルギースペクトルの初期解析を行った。

・FCによる絶対ルミノシティ決定の評価
カロリメーター上流に設置されたフロントカウンター (FC) での計測数を用いて、ビーム衝突のルミノシティ測定を行うために、Van der Mer Scan と呼ばれる較正ランでのデータを取得し、FCによるルミノシティ測定の確率とその精度の評価を行った。

図3 0度ガンマ線エネルギー分布

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 16 件)

① H. Menjo, (8 人略), Y. Itow, (4 人略), K. Masuda, (1 人略), G. Mitsuka, (6 人略), T. Sako, (他 9 人), “Monte Carlo Study of forward π^0 production spectra to be measured by the LHCf experiment for the purpose of benchmarking hadron interaction models at 10^{17} eV”, 査読有, *Astroparticle Phys.* 34, 2011, 513-520.

② O. Adriani, (8 人略), Y. Itow (10 番目), (3 人略), K. Masuda (14 番目) (1 人略), H. Menjo (16 番目), (5 人略), T. Sako (21 番目) (他 10 人), “The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider”, 査読有, *Journal of Instrumentation* 3:S08006, 2008, 39pp

③ L. Bonechi, (6 人略), Y. Itow (8 番目), (4 人略) K. Masuda, (13 番目), (8 人略), T. Sako, (他 8 人)
“Production and test of the LHCf microstrip silicon system”, 査読無, *Nucl. Instr. Meth A*, 596, (2008) 85-87.

④ Y. Itow, “The first year results of the LHCf experiment to verify cosmic ray interaction models at LHC energy.”, 査読有, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 187 (2011) 273-280.

⑤ Y. Itow, “The LHCf experiment:: Verification of interaction models of cosmic rays at 10^{17} eV.”, 査読無, *J. Phys. Conf. Ser.* 120:062028, 2008.

⑥ Y. Itow, “Verification of hadron interaction models of cosmic rays at 10^{17} eV by the LHCf experiment.”, 査読無, *AIP Conf. Proc.* 1040:

206-210, 2008

[学会発表] (計 17 件)

① T. Sako “LHCf Measurements of Very Forward Particles at LHC” 査読有 (招待) VI International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interaction, Fermi Lab(USA), Jun28-Jul2 2010

② Y. Itow “First results from the LHCf experiment”, 査読有 (招待), High Energy Strong Interaction (HESI2010), YITP Kyoto Univ, Aug 10-13, 2010

③ T. Sako “First Results of LHCf: Very Forward Particles at LHC Collision”, 査読有 (招待), ICATPP Conference on Cosmic Rays for Particle and Astroparticle Physics, Como Italy Oct 7-8 2010.

④ Y. Itow “The LHCf experiment: From cosmic rays to hadron physics”, 査読有 (招待), KEK Theory Center Cosmophysics Group Workshop on High Energy Astrophysics (HEAP09), KEK, 10-12, Nov 2009

⑤ 伊藤好孝, 「LHCでの超前方測定:LHCf実験」 査読有 (招待) 宇宙線・宇宙物理領域・実験各物理領域、理論核物理領域合同シンポジウム、超高エネルギー宇宙線とハドロン構造、物理学会 2008 年秋 (山形大)

⑥ さこ隆志, 「LHCf実験」 査読有 (招待) 「超高エネルギー宇宙線とハドロン構造 2008」 2008 年 4 月 25-26 日, KEK

[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

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

<http://hep.fi.infn.it/LHCf/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 好孝 (Yoshitaka Itow)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号: 50272521

(2) 研究分担者

増田 公明 (Kimiaki Masuda)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号：40173744
さこ 隆志 (Takashi Sako)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号：90324368

解析センター・特任助教
研究者番号：10447849
三塚学 (Gaku Mitsuka) H20→
名古屋大学・太陽地球環境研究所・GCOE 研
究員
研究者番号：00566804

(3) 連携研究者

毛受弘彰 (Hiroaki Menjo)
名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構現象