

令和元年6月17日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247037

研究課題名(和文) LHC13TeV陽子衝突での超前方粒子生成とファイマンスケールリングの研究

研究課題名(英文) Study on very forward particle productions and their Feynman scaling in 13TeV p-p collisions at LHC

研究代表者

伊藤 好孝 (Itow, Yoshitaka)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：50272521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,300,000円

研究成果の概要(和文)：超高エネルギー宇宙線の観測手段である空気シャワーの精緻な理解のため、2つの衝突型加速器、CERN LHC及びブルックヘブンRHICにおいて、超前方生成ガンマ線、中性子、及び中性中間子のエネルギースペクトル測定を行なった。宇宙線エネルギーとして 10^{14} eVから 10^{17} eVに至る幅広いエネルギーにおいて宇宙線ハドロン相互作用の研究を行ない、超前方粒子スペクトルの衝突エネルギー不変性「ファイマンスケールリング」の検証を行なった。さらにLHC ATLAS検出器との連動解析を行い、回折的散乱と非回折的散乱それぞれからの超前方ガンマ線生成スペクトルを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高エネルギー宇宙線の空気シャワー観測において、特に衝突エネルギーの大部分を担う超前方への粒子生成について、加速器実験データの不在による不定性が問題だった。本研究は、これまでで最高エネルギーである 10^{17} eV相当の宇宙線が起す超前方粒子生成について、LHCを用いた測定を行い初めて明らかにした。さらに、RHICでの測定を行い、単一検出器による 10^{14} eVから 10^{17} eVの幅広いエネルギー領域における系統的な超前方粒子生成データを取得し、衝突エネルギー依存性を明らかにした。また、RHICでの測定は偏極陽子陽子衝突での超前方測定として新しい核子構造研究の道を開くと期待される。

研究成果の概要(英文)：Towards precise understanding of extensive air-showers, which are used for observation of ultra-high energy cosmic rays, measurements of very forward productions of gamma-rays, neutrons and neutral pions were performed. A study of hadronic interaction of cosmic rays was made for a wide range of energies from 10^{14} eV to 10^{17} eV, and for the Feynman scaling, scale invariance nature of very forward energy spectra independent on collision energies. In addition, the energy spectra of gamma-ray energy spectra each from diffractive and non-diffractive interactions were firstly obtained thanks to combined analysis with the ATLAS central detector.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 加速器実験 国際協力 実験核物理 素粒子実験 国際研究者交流 ラージハドロンコライダ
— CERN

1. 研究開始当初の背景

最高エネルギー宇宙線研究の状況

10^{20} eV のエネルギーにまで至る最高エネルギー宇宙線は、その正体、加速源など大きな謎をはらんでいる。宇宙線の空気シャワー観測では、宇宙線が大気中の原子核と衝突して生成する二次粒子が、次々に大気中原子核と衝突して雪崩的に粒子が増殖する「空気シャワー」を観測する。総粒子数からエネルギーが、粒子数が最大になる高度から宇宙線の化学組成がわかる。2014 年に TA 実験は、 5.7×10^{19} eV 以上の宇宙線の到来方向について、北天の特定の方向に集中が見られる「Hot Spot」を報告した。これは、最高エネルギー宇宙線の化学組成が宇宙磁場によって曲がりにくい陽子である事を示唆している。一方 PAO 実験は、シャワー最大発達高度の解析から、最高エネルギー宇宙線の組成は原子核であると結論している。また、化学組成の重さと相関するシャワー中のミュオン数は、最もミュオン数が多くなる鉄組成に比べ2倍も多い事が知られている。これらはいずれも、空気シャワーシミュレーションに用いられている宇宙線ハドロン相互作用モデル(QGSJET, DPMJET, SYBILL, EPOS 等)が完全ではないことを示唆しており、超高エネルギー宇宙線の衝突エネルギーにおける加速器実験データによる検証が必要となっていた。

陽子陽子衝突型加速器での宇宙線ハドロン相互作用研究の状況

超高エネルギー宇宙線の研究には、その観測手段である空気シャワーの精緻な理解が必須であり、我々は、スイス CERN の陽子陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) で、 10^{17} eV 相当の宇宙線のハドロン相互作用モデルの検証が行われ、その改善が行われてきた。しかし、特に衝突エネルギーの大部分を担う超前方への粒子生成はシャワー発達を大きく左右するものの、加速器実験データによる検証は不十分であった。

この観点から我々は、専用の小型イメージングカロリメーター検出器2台を設置し、超前方(擬似ラピディティ > 8.6)に放出されるガンマ線や中性子などの中性粒子のエネルギースペクトル LHCf 実験を行ない、重心系 0.9TeV、2.76TeV、7TeV の各重心系エネルギーでの陽子陽子衝突、さらに重心系 5.02TeV の陽子鉛原子核衝突のデータを取得し、LHC において初めて超前方粒子生成スペクトルを明らかにした。その結果、データは空気シャワー発達の計算に使用されてきたどのハドロン相互作用モデルとも一致せず、超前方領域でよりソフトなスペクトルを示していた。また、これらの傾向は 0.9TeV と 7TeV の異なる衝突エネルギーで非常によく似通っていることが判った。さらに高い衝突エネルギーではどうなっているか、LHC で実現できる最高エネルギー重心系 14TeV 衝突での超前方生成粒子スペクトルの取得が待望されていた。

一方で、超前方生成スペクトルの衝突エネルギー依存性を調べるために、LHC の異なる重心系エネルギーデータを比較する上で、各データの横運動量測定範囲が異なるため、エネルギー依存性の考察が限られる事がわかってきた。このため、LHC より一桁以上低い重心系エネルギーで、横運動量の測定範囲が LHC と同等の測定が可能な米国ブルックヘブン研究所 Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) での超前方粒子測定 RHICf 実験を提案し、その準備を進めてきた。また RHIC の偏極陽子陽子衝突において、超前方生成中性子の左右非対称性が報告されており、その高精度の検証と起源の理解が期待されていた。

2. 研究の目的

超高エネルギー宇宙線の空気シャワーの精密理解に必須となる超前方生成粒子、ガンマ線、中性子、中性中間子のエネルギースペクトルについて、LHC13TeV 陽子陽子衝突での測定を行い、これまで最も高い衝突エネルギーでの超前方粒子スペクトルを取得する。さらに、RHIC510GeV 偏極陽子陽子衝突での超前方粒子スペクトルを取得し、宇宙線エネルギーとして 10^{14} eV から 10^{17} eV にいたる幅広いエネルギー領域にわたるデータを系統的に解析し、超前方粒子生成エネルギースペクトルの形状が衝突エネルギーに依存しないという不変性、ファインマンスケール則の検証を行い、LHC エネルギーよりもさらに高い 10^{20} eV 宇宙線への外挿の指針を得る。さらに、ATLAS 中央検出器の情報を用いた連動解析により、回折的散乱と非回折的散乱を選別した解析を行う。また、偏極陽子陽子衝突による超前方生成粒子の横非対称度の測定を行い、超前方粒子生成についての知見を得る。

これらの成果を国内外へ発信し関連研究者との議論を通じて、宇宙線ハドロン相互作用モデルの改良、および空気シャワーとその関連研究への展開を行う。

3. 研究の方法

LHCf13TeV 衝突へ向けた LHCf 検出器の準備

本研究では、2cm 角と4cm 角の2本の電磁カロリメーターを持つ LHCf Arm1 検出器、および 2.5cm および 3.5cm の電磁カロリメーターを持つ LHCf Arm2 検出器を、LHC の陽子陽子衝突である IP1 から 140m 離

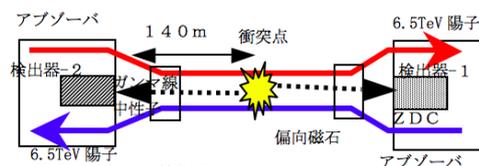


図 1 LHCf の実験セットアップ概念図。RHICf 実験もほぼ同様のレイアウトとなるが、衝突点から検出器までの距離が 18m となる。

れた場所のビームパイプ間隙に挿入する。この場所の上流側にある磁石により荷電粒子は全て除去され、ビーム進行方向0度(超前方)に放出される中性粒子(ガンマ線、中性子等)のみを測定する事ができる(図1)。両検出器はそれぞれ GSO ホドスコープもしくはシリコン検出器からなる4層の位置検出層を持ち、粒子入射位置を測定できる。この情報により、2つのガンマ線の不変質量再構成から中性パイ中間子を同定し、横運動量を測定する事ができる。検出器はまた鉛直方向に移動できるため、異なる横運動量領域をカバーすることができる。ATLAS 実験と陽子陽子衝突点を共有するが、トリガーやデータ取得は ATLAS 実験とは独立に行ない、両実験の事象間の対応を取るために、トリガー情報、イベント番号情報を交換し互いに記録している。GSOを用いた検出器のアップグレードとビームテスト実験による較正作業、さらに ATLAS との連動データ取得の準備を進めた。また、LHCf 検出器を RHICf へ移設する検討と準備を進め、STAR 検出器と連動してデータ取得する準備を進めた。

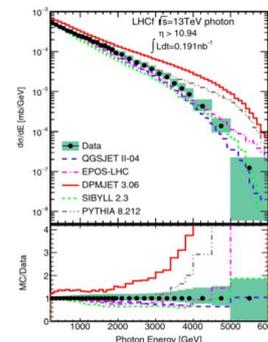


図2 LHCf 13TeV 衝突で得られた超前方ガンマ線スペクトル。

LHCf 実験での 13TeV 陽子陽子衝突および 8TeV/n 陽子鉛原子核衝突測定

2015年6月に行われた LHC13TeV 陽子陽子衝突において2台の LHCf 検出器を LHC IP1 衝突点から 140m の加速器トンネル内に設置し、LHCf 実験専用の低い衝突輝度(10^{29} - 10^{30} cm²/s)で合計 24 時間分のデータを取得し、約 4000 万個のシャワー事象と約 50 万個の中性パイ中間子を収集した。データ取得自身は ATLAS 実験と独立に行なったが、その後の共同データ解析を可能とするために、両データ取得システムの間でそれぞれのトリガー情報、イベント番号の交換を行なった。また、2016年11月に行われた LHC での核子あたり 8TeV 衝突エネルギーの陽子鉛衝突においても、LHCf Arm2 検出器 1 台を加速器トンネル内に設置してデータ取得を行なった。

RHICf 実験での 0.51TeV 偏極陽子陽子衝突測定

RHICf 専用として 2017 年 6 月に行われた 510GeV 偏極陽子陽子衝突において、LHCf Arm1 検出器 1 台を、STAR 実験が行われている陽子陽子衝突点から 18m 離れた場所の 2 本のビームパイプの間隙に挿入して測定を行なった。この場所の上流には LHCf と同様にビーム分離用磁石があり、荷電粒子をすべて除いた後の中性粒子のみが測定できる。ただし、ビームエネルギーが LHC の 20 分の 1 以下であるため、RHICf 実験では LHCf 実験より 10 倍近い場所に設置箇所があり、結果的に LHCf 実

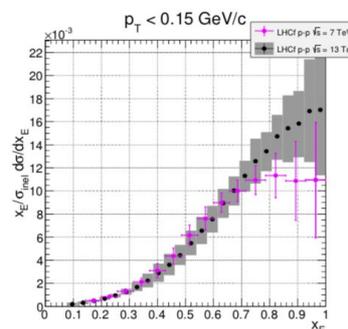


図3 LHCf 13TeV 衝突(黒)と 7TeV 衝突(紫)で得られた超前方中性子スペクトルの x_F 分布での比較。

験と同等の横運動量領域をカバーすることができる。RHIC では、陽子を偏極させることができるが、今回は偏極方向を横倒し(リング外向き)に設定した。こうすることで、検出器の移動方向(鉛直方向)を用いて、横運動量のカバー範囲を最大限に取る事ができる。また LHCf 実験と同様に、衝突点を共有する STAR 実験とトリガーやイベント番号情報を共有し、STAR 検出器との連動解析が可能となるようにした。

4. 研究成果

LHCf13TeV 陽子陽子衝突での超前方ガンマ線、中性子測定とファイマンスケーリング則

LHCf13TeV 陽子陽子衝突から得られた超前方ガンマ線エネルギースペクトルと各宇宙線相互作用モデルとの比較を図2に示す。7TeV 陽子陽子衝突で得られた結果と概ね同じ傾向であり、これらのモデルの中では EPOS-LHC が最もよくデータを再現している(成果論文6)。図3は、LHCf 7TeV と 13TeV 陽子陽子衝突での、二つの超前方中性子エネルギースペクトルの比較である(E.Berti 博士論文)。ここでは同じ横運動領域($p_T < 0.15$ GeV/c)を用いている。両者は誤差の範囲内で一致しており、ファイマンスケーリング則を示唆している。しかしながら、エネルギー分解能の悪さに起因する系統誤差が大きいため、分解能を向上させた検出器でのさらなる測定が望まれる。

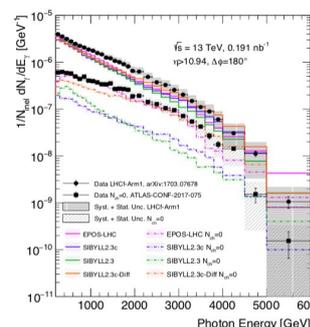


図4 ATLAS 連動解析による LHCf 13TeV 衝突での非回折的散乱と回折的散乱からの超前方ガンマ線スペクトル。

ATLAS との連動解析による回折的散乱からの超前方ガンマ線生成

ATLAS の中央飛跡検出器での荷電粒子の有無の情報を用いて、回折的散乱と非回折的散乱を衝突ごとに選別し、それぞれからの超前方ガンマ線エネルギー分布を世界で初めて導出した(図4)(成果論文 8)。これによれば、回折的散乱では、EPOS-LHC がデータと

比較的よい一致を示しているが、非回折的散乱を含めると一致していない。今後は中性子や中性パイ中間子生成についても、回折的/非回折的散乱を弁別した解析を行なってゆく。

LHCf 2.36TeV および 7TeV 陽子陽子衝突での超前方中性パイ中間子のスケーリング則

本研究期間以前に取得済みの 2.76TeV, 7TeV 陽子陽子衝突での中性パイ中間子生成の二つの超前方スペクトルの比較を行なった(図 5)(成果論文。両衝突エネルギー間で、誤差の範囲で一致し

ており、ファイマンスケーリングを示している。LHCf 1.3TeV と RHICf 510GeV データを用いた高精度での検証が期待される。

国際会議・国際研究会の開催

本研究成果を国内外に発信し、宇宙線ハドロン相互作用研究と超高エネルギー宇宙線研究、さらにニュートリノや宇宙ガンマ線観測などの周辺トピックとの連携を深めるため、以下の国際研究会を主催あるいは開催に協力した。

- (主催) Workshop on Forward Physics and High Energy Scatterings at Zero Degree 2015, 2015 年 9 月 9 日-12 日、名古屋大学、<https://indico.cern.ch/event/407524/>
- (協力) International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Ray 2016, 2016 年 10 月 11 日-14 日、京都市サーチパーク、京都、<https://indico.cern.ch/event/504078/>
- (主催) Workshop on Forward Physics and High Energy Scatterings at Zero Degree 2017, 2017 年 9 月 26 日-29 日、名古屋大学、<https://indico.cern.ch/event/590974/>
- (主催) 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 2018 年 5 月 21 日-25 日、名古屋大学、<https://indico.cern.ch/event/639198/>

5. 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 8 件)

- (1) O. Adriani, (6名略), Y. Itow, (6名略), H. Menjo, (6名略), T. Sako, (以下9名略), “Transverse-momentum distribution and nuclear modification factor for neutral pions in the forward-rapidity region in proton-lead collisions at root sNN=5.02 TeV”, Physical Review C89 (2014) 65209, 10.1103/PhysRevC.89.065209, 査読有
- (2) O. Adriani, (6名略), Y. Itow, (6名略), H. Menjo, (6名略), T. Sako, (以下9名略) O. Adriani, (6名略), Y. Itow, (6名略), H. Menjo, (6名略), T. Sako, (以下9名略), “Measurement of very forward neutron energy spectra for 7 TeV proton-proton collisions at the Large Hadron Collider”, Physics Letter B750 (2015) 360-366, 10.1088/1748-0221/10/06/P06015, 査読有
- (3) O. Adriani, (6名略), Y. Itow, (6名略), H. Menjo, (6名略), T. Sako, (以下9名略), “Measurements of longitudinal and transverse momentum distributions for neutral pions in the forward-rapidity region with the LHCf detector”, Physical Review D94 (2016) no.3, 032007, 10.1103/PhysRevD.94.032007, 査読有
- (4) Makino Y., Tiberio A., O. Adriani, (8名略), Y. Itow, (4名略), H. Menjo, (4名略), T. Sako, (以下略) et al., “Performance study for the photon measurements of the upgraded LHCf calorimeters with Gd2SiO5(GSO) scintillators”, Journal of Instrumentation 12 (2017) P3023, 10.1088/1748-0221/12/03/P03023, 査読有
- (5) Qi-Dong Zhou, Yoshitaka Itow, Hiroaki Menjo, Takashi Sako, “Monte Carlo study of particle production in diffractive proton-proton collisions at root-s = 13TeV with the very forward detector combined with central information”, European Physical Journal C77 (2017), no.4, 212., 10.1140/epjc/s10052-017-4788-7 査読有

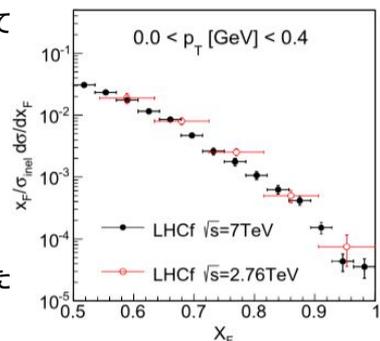


図 5 LHCf 2.76TeV(紫)と 7TeV 衝突(黒)で得られた超前方中性パイ中間子スペクトルの x_F 分布での比較。

(6) Adriani O., (5名略)、Itow Y.,(5名略)、Menjo H.(3名略)、Sako T., (以下略)et.al., “Measurement of forward photon production cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ with the LHCf detector”, Physics Letters B780 (2018), 233-239, 10.1016/j.physletb.2017.12.050, 査読有

(7) Adriani O., (6名略)、Itow Y., (3名略)、Menjo H., (4名略)、Sako T., et al., “Measurement of inclusive forward neutron production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ with the LHCf Arm2 detector”, Journal of High Energy Physics 1811 (2018)73, 10.1007/JHEP11(2018)073, 査読有

(8) The ATLAS and LHCf Collaborations, “Measurement of contributions of diffractive processes to forward photon spectra in pp collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ ”, ATLAS LHCf CONF NOTE, ATLAS-CONF-2017-075, 2017年、査読無

[学会発表] (計 15 件)

(1) T.Sako, “LHCf results and prospects”, QCD and Forward Physics at the LHC, 2014年04月14日 2014年04月18日, Trento, Italy

(2) T.Sako, “Introduction and results of the LHCf experiment”, low-X workshop, 2014年06月17日 2014年06月21日, 京都大学

(3) Y.Itow, “Forward hadron production at the LHC”, 18th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interaction 2014, 2014年08月18日 2014年08月22日, CERN, ジュネーブ, スイス

(4) T.Sako, “Recent LHCf results and possible future plans at RHIC for p-A or A-A runs”, The LHC Forward Physics and Diffraction WG meeting, 2014年09月03日 2014年09月06日, Lawrence and Kansas city

(5) H.Menjo, “Performance of LHCf in Run II”, The Third Annual Large Hadron Collider Physics, 2015 8/31-9/5, St. Petersburg, Russia

(6) H.Menjo, “Forward particle productions in UPC at $\sqrt{s_{NN}}=5\text{TeV}$ p+Pb from first LHCf-ATLAS collaborated analysis”, Workshop on Forward Physics and High-Energy Scattering at ZERO Degrees, 2015/9/9-9/12, Nagoya, Japan

(7) T.Sako, “RHICf: zero degree measurement at RHIC”, , Workshop on Forward Physics and High-Energy Scattering at ZERO Degrees, 2015/9/9-9/12, Nagoya, Japan

(8) T.Sako, “LHCf: Results and plan for RUN II”, The LHC Working Group on Forward Physics and Diffraction, 2015/4/21-2015/4/25, Madrid, Spain

(9) T.Sako, “Results of the LHCf experiment and the forward measurements at LHC”, The 19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Rays, 2016年, モスクワ, ロシア

(10) H.Menjo, “The resent results from the LHCf experiment”, International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays 2016, 2016年, Kyoto

(11) T.Sako, “Review of accelerator experiments relevant to air shower development”, International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays 2016, 2016年, Kyoto

Hiroaki Menjo, “Status of the LHCf experiment”, 35th International Cosmic-Ray Conference (ICRC2017), 2017, Korea

(12) Takashi Sako, “Status of the RHIC forward experiment”, Workshop on forward physics and high-energy scattering at zero degrees 2017, 2017

(13) Hiroaki Menjo, “LHCf/RHICf: a zero degree calorimeter at LHC and RHIC”, International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE, 2018

(14) Hiroaki Menjo, "LHC forward experiment: LHCf", International school for Astroparticle physics. 2018, CERN

(15) Takashi Sako, "Recent results from LHCf and RHICf", 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 2018, Nagoya

(図書) (計 1 件)

EPJ Web of Conferences Volume 208 (2019)

ISVHECRI 2018 - XX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions
Nagoya, Aichi, Japan, May 21-25, 2018

B. Pattison, Y. Itow, T. Sako and H. Menjo (Eds.)

ISBN: 978-2-7598-9067-5

(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

The LHCf experiment uses particles thrown forward by LHC collisions to simulate cosmic rays

<https://home.cern/science/experiments/lhcf>

LHC Forward Experiment

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

LHCf Welcome to the LHCf - Florence web page

<http://hep.fi.infn.it/LHCf/index.html> <http://home.cern/about/experiments/lhcf>

LHCf/RHICf 実験

<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/research/interactions/>

参加プロジェクト 名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構(KMI)

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/collaboration-projects/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: さこ隆志

ローマ字氏名: SAKO Takashi

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 宇宙線研究所

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 90324368

研究分担者氏名: 毛受弘彰

ローマ字氏名: MENJO Hiroaki

所属研究機関名: 名古屋大学

部局名: 宇宙地球環境研究所

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 10447849

研究分担者氏名: 増田公明

ローマ字氏名: MASUDA Kimiaki

所属研究機関名: 名古屋大学

部局名: 宇宙地球環境研究所

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 40173744

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。