

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01917

研究課題名（和文）LHC陽子衝突の最前方領域でのストレンジメソンの測定

研究課題名（英文）Measurement of strange mesons at very forward region of LHC proton-proton collisions

研究代表者

毛受 弘彰（Menjo, Hiroaki）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教

研究者番号：10447849

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：2022年9月に重心系衝突エネルギー13.6 TeVの陽子陽子衝突の測定を行った。過去の測定時よりもデータ読み出し回路の改良やトリガーの改良によって効率的なデータ収集を行い、3億イベントのデータを取得した。これは2015年に行った測定よりも7倍以上の統計量である。2015年取得のデータも用いて中間子の微分生成断面積の測定を行った。これによって、相互作用モデルの中でもQGSJET IIIがよくデータを再現していることがわかった。中間子と0中間子比が一定の値となっていることから、中間子生成についてエネルギーによらないユニバーサルなプロセスがあることが予想される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では世界で初めて高エネルギーハドロン衝突の超前方領域でのストレンジメソンの生成断面積測定を行った。その結果、少なくとも中間子は多くの相互作用モデルの予想よりも少ない生成断面積であることがわかった。このことは、既存の相互作用モデルの改良が必要であり、これまでの空気シャワー発達シミュレーションの結果が変わることを意味する。これによって超高エネルギー宇宙線観測の観測結果、特に化学組成の測定結果の解釈に影響を与えると考えられる。これを通して、超高エネルギー宇宙線の加速源の解明に繋がっていくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：An operation has been performed with proton-proton collisions at the center-of-mass collision energy of 13.6 TeV in September 2022. Thanks to upgrade of data-readout system and trigger logic, the data were collected more efficiently than that in the past operations, and 300 M event in total were obtained. Including a 2015 operation data, we obtained results of differential production cross-section of eta meson. We found that QGSJET II model reproduced the result well. The eta/pi0 ratio showed mostly constant on the meson energy, and it indicate that a universal process produces such eta meson production.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：超高エネルギー宇宙線 ハドロン相互作用 LHC

1. 研究開始当初の背景

10²⁰eVにも達する超高エネルギーの宇宙線が宇宙のいったいどこで、どのように加速されているのか？この謎を解明するために、Pierre Auger(Auger)実験と Telescope Array(TA)実験が2000年代から観測を続けているが、いまだに解明には至っていない。その原因の1つが、超高エネルギー宇宙線が地球大気に入射した時に生じる空気シャワー現象の理解が不十分なことである。超高エネルギー宇宙線の観測はこの空気シャワー現象を観測することで行われるために、空気シャワー発達の理解が不可欠であり、その鍵となっているのが高エネルギーハドロン相互作用の理解である。そのために、さまざまな方法による研究が行われている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、世界最大の粒子加速器であるLarge Hadron Collider (LHC)を用いて、超高エネルギー宇宙線観測の鍵となっている高エネルギーハドロン相互作用の理解を行うことである。我々はこの目的を達成するべく、LHC forward (LHCf) 実験を行っている。これまでも様々な測定成果を得ているが、本研究ではその中でも超前方領域に生成されるストレンジクォークを含む中間子の生成に着目した。ハドロン相互作用でも最も多く生成される π 中間子に対して、ストレンジクォークを含む η 中間子や K 中間子は10-20%と少ない。しかし、これらの粒子は π 中間子とは異なる寿命や崩壊モードを持っていることから、予想と大きく違う生成断面積を持っていた場合には超高エネルギー宇宙線観測で問題となっているミュオン超過問題を解決する可能性が指摘されている。ミュオン過剰問題は、地上に到来する空気シャワー中のミュオン粒子数の観測結果がシミュレーションでの予想よりも30-50%も多いという問題である。これは、観測結果の解釈にシミュレーションが不可欠である高エネルギー宇宙線観測において大きな問題であり、現在観測を行っているAugerとTAだけでなく、これまでの空気シャワーを用いた宇宙線観測すべてに関わる問題である。

3. 研究の方法

本研究では、LHC加速器の超前方領域に設置したカロリメータ型検出器を用いて、重心系衝突エネルギー13.6TeVの陽子-陽子衝突での η 、 K_s^0 中間子の微分生成断面積の測定を行う。超前方領域は陽子-陽子衝突で生じる2次粒子のなかでも最もエネルギーが高い粒子が生成され、宇宙線空気シャワー発达到最も影響が大きい領域である。 η 、 K_s^0 中間子の様々な粒子に崩壊するが、その中でも下記のような崩壊モードを測定では用いる。

$$\eta \rightarrow 2\gamma \text{ (BR: 39\%)}$$

$$K_s^0 \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma \text{ (BR: 31\%)}$$

これらの崩壊モードでは2つもしくは4つの光子をLHCf検出器で同時測定することで、中間子のエネルギーなどを再構成することができる。

LHCf実験ではこれまでも複数回の測定を行っているが、 η 、 K_s^0 中間子は検出効率が低く、これらの測定には統計が不十分であった。そこで、解析に十分なイベント数を取得するために様々な改良を行った。①データ収集システムを改良および最適化することでこれまでよりも読み出しスピードを約2倍高速化した。② η 、 K_s^0 中間子を効率的に選択するトリガーを新たに導入した。③高ルミノシティで測定を実施した。

4. 研究成果

2022年9月に重心系衝突エネルギー13.6 TeVの陽子-陽子の測定を約4日間実施した。この測定は前回の2016年のLHC測定から6年ぶりであったことから、2021年に検出器の動作テストのため、2022年10月のLHC測定の直後に検出器キャリブレーションのため、それぞれCERN-SPS加速器を用いてビームテストも実施した。4日間の測定は入念な準備のおかげでトラブルなくデータ取得を行うことができた。この測定では、約3億イベントのデータを取得し、これは2015年に行った陽子-陽子衝突測定の取得イベント数と単純比較すると約7倍となる。さらに今回の測定では新たな導入したトリガーの効果で効率的に η 、 K_s^0 中間子事象を取得できたために、実際の解析に使用できるイベント数は10倍以上である。

本研究は、コロナの影響を受けて測定が当初の予定よりも大幅に遅れてしまい、全体のスケジュールの変更が余儀なくされてしまった。そのため、測定を待つ間にすでに取得した2015年のデータを使って η 中間子の微分生成断面積の測定結果を発表した(図1)。これによって、既存の相互作用モデルはデータを再現することができないが、QGSJET-IIモデルが高エネルギー領域では最もよくデータを再現することがわかった。また、 η 中間子と π^0 中間子の比をとると(図2)、ほぼエネルギーによらずに一定になること、QGSJET IIとDPMJET IIIモデルがよく再現することがわかった。これは前方領域でのストレンジオーク生成プロセスについての示唆を与える重要な結果である。また2022年のデータを使っての η 中間子解析も進んでおり、より高統計のデータによって、横軸運動量依存性についても測定を行うことができて(図3)。 K_s^0 の解析はまだ進めている段階である。

これらのデータは世界で初めての超前方領域でのストレンジメソン生成断面積の測定結果である。この結果によって、宇宙線空気シャワー発達の理解が進むことは確実である。

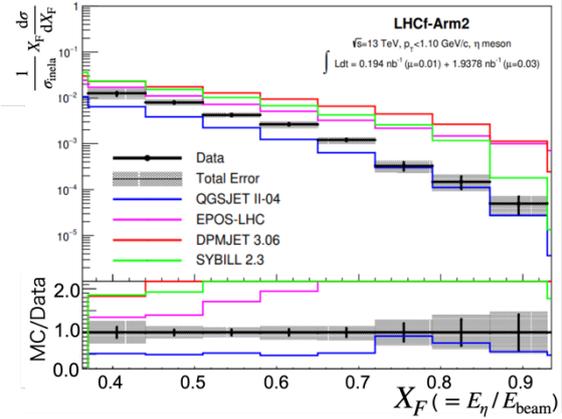


図1：超前方 η 中間子生成断面積の測定結果

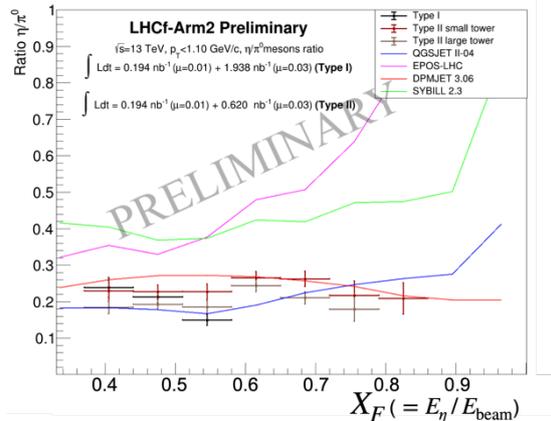


図2： η/π^0 比の測定結果

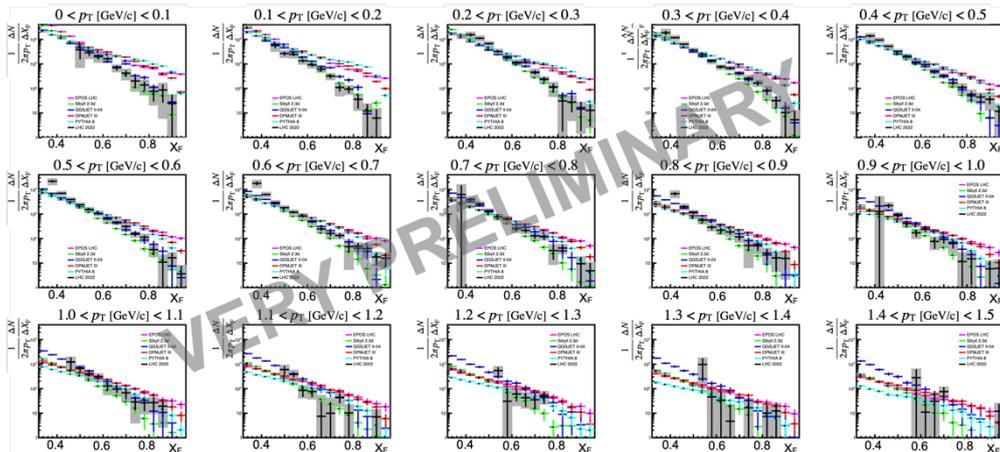


図3： η 中間子生成の横軸運動量依存性の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Adriani O. et al. (LHCf Collaboration)	4. 巻 2023
2. 論文標題 Measurement of the forward meson production rate in p-p collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the LHCf-Arm2 detector	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 169
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP10(2023)169	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Tiberio Alessio, et al. (LHCf Collaboration)	4. 巻 ICRC2023
2. 論文標題 The LHCf experiment at the Large Hadron Collider: status and prospects	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Sciences	6. 最初と最後の頁 444
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.444.0444	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kitagami Yuga et al. (LHCf Collaboration)	4. 巻 ICRC2023
2. 論文標題 Performances of the LHCf detectors during $\sqrt{s} = 13.6$ TeV p-p operation in 2022	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Sciences	6. 最初と最後の頁 483
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.444.0483	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Piparo Giuseppe, et al. (LHCf Collaboration)	4. 巻 ICRC2023
2. 論文標題 Measurement of the very forward π^0 and meson productions in p-p collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the LHCf detector	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Sciences	6. 最初と最後の頁 447
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.444.0447	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf and RHICf collaborations
2. 発表標題 Very forward particle measurements with LHCf and RHICf
3. 学会等名 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf collaboration
2. 発表標題 LHCf and Atm. Neutrino flux
3. 学会等名 2022年度新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf collaboration
2. 発表標題 Very forward strange hadron measurement at LHC
3. 学会等名 3rd Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range (WANP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Ohashi for LHCf collaboration
2. 発表標題 Status of the LHCf experiment
3. 学会等名 6th International Symposium on Ultra High Energy Cosmic-Rays (UHECR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kondo for LHCf collaboration
2. 発表標題 Performance evaluation of LHCf-ATLAS ZDC joint measurement using proton beam
3. 学会等名 6th International Symposium on Ultra High Energy Cosmic-Rays (UHECR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Ohashi for LHCf collaboration
2. 発表標題 Prospects of the LHCf operation in 2022
3. 学会等名 10th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf collaboration
2. 発表標題 LHCf: Very forward measurement at LHC
3. 学会等名 2nd International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf and RHICf collaborations
2. 発表標題 Recent results and Prospects of LHCf and RHICf
3. 学会等名 The 5th KMI International Symposium (KMI2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf and RHICf collaborations
2. 発表標題 LHCf/RHICfによるトランジション領域 における相互作用研究
3. 学会等名 第5回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 毛受弘彰 他LHCfコラボレーション
2. 発表標題 LHCf実験による 2022年陽子陽子衝突測定報
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北上悠河 他LHCfコラボレーション
2. 発表標題 LHCf 2022年測定時の検出器のエネルギースケール較正
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf and RHICf collaborations
2. 発表標題 Very forward particle measurements with LHCf and RHICf
3. 学会等名 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf collaboration
2. 発表標題 LHCf and Atm. Neutrino flux
3. 学会等名 2022年度新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf collaboration
2. 発表標題 Very forward strange hadron measurement at LHC
3. 学会等名 3rd Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range (WANP2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Ohashi for LHCf collaboration
2. 発表標題 Status of the LHCf experiment
3. 学会等名 6th International Symposium on Ultra High Energy Cosmic-Rays (UHECR 2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Kondo for LHCf collaboration
2. 発表標題 Performance evaluation of LHCf-ATLAS ZDC joint measurement using proton beam
3. 学会等名 6th International Symposium on Ultra High Energy Cosmic-Rays (UHECR 2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Ohashi for LHCf collaboration
2. 発表標題 Prospects of the LHCf operation in 2022
3. 学会等名 10th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf collaboration
2. 発表標題 LHCf: Very forward measurement at LHC
3. 学会等名 2nd International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf and RHICf collaborations
2. 発表標題 Recent results and Prospects of LHCf and RHICf
3. 学会等名 The 5th KMI International Symposium (KMI2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Menjo for LHCf and RHICf collaborations
2. 発表標題 LHCf/RHICfによるトランジション領域における相互作用研究
3. 学会等名 第5回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 毛受弘彰 他LHCfコラボレーション
2. 発表標題 LHCf実験による 2022年陽子陽子衝突測定報
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北上悠河 他LHCfコラボレーション
2. 発表標題 LHCf 2022年測定時の検出器のエネルギースケール較正
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	伊藤 好孝 (Itow Yoshitaka) (50272521)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授 (13901)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	さこ 隆志 (Sako Takashi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------