

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01227

研究課題名(和文)衝突型加速器による高エネルギー宇宙線衝突での超前方粒子生成の総括的解明

研究課題名(英文) Integrated study in very forward productions in high energy cosmic ray interactions by colliders

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) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：10の14乗から17乗電子ボルトの超高エネルギー宇宙線が起こす空気シャワーの精密理解のために、LHC13TeV陽子陽子衝突、及びRHIC510GeV偏極陽子陽子衝突での超前方に放出される中性粒子の研究を行ない、LHCとRHICの衝突エネルギー間での超前方ガンマ線生成のファイマンスケール則の成立、ATLAS実験との運動解析、RHIC横偏極衝突での超前方中性パイ中間子放出の左右非対称性の発見、などの成果を得た。また超前方粒子生成を担う回折散乱が空気シャワー発達に及ぼす影響について理解を進めた。加えて、LHC Run-3や陽子-酸素原子核衝突などの将来の測定への準備を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核子 核子衝突での超前方粒子生成は、最もありふれた散乱事象であり、二次粒子が最も大きな縦運動量を担う過程として、宇宙線の空気シャワー発達や、大気ニュートリノ生成などに重要である。本課題では、2種の衝突型加速器LHCとRHICと用いて、 $10^{14}$ eVから $10^{17}$ eVにいたるエネルギー領域で超高エネルギー宇宙線の超前方生成中性粒子を研究するLHCfおよびRHICf実験を推進し、その包括的解明を進めてきた。これらは世界で初めての貴重な測定データであり、宇宙線物理から高エネルギースピ物理まで幅広い分野を横断したユニークな横断研究の創出にもつながっている。

研究成果の概要(英文)：Towards the precise understanding of the air showers caused by ultra-high energy cosmic rays from the  $10^{14}$  to  $10^{17}$  electron volt regions, we have studied very-forward neutral particle productions in LHC 13TeV proton-proton collisions and in RHIC 510GeV polarized proton-proton collisions.

We have found good Feynman scaling in the very-forward gamma-ray productions by comparing the RHIC and the LHC data. We also discovered the transverse asymmetry of very-forward neutral pion productions in the RHIC transverse polarized collisions. We have also studied diffractive scattering by ATLAS-LHCf combined analysis, which is responsible for very forward particle production, and its effects on the development of air showers.

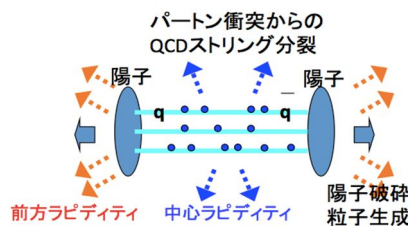
In addition, we have prepared for future measurements such as LHC Run-3 and proton-oxygen nuclear collisions at LHC and possible extension of RHICf-II.

研究分野：宇宙線

キーワード：宇宙線 素粒子実験 実験核物理 国際協力 加速器 超前方散乱 偏極実験

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙線は、高エネルギーに加速された核子や原子核であり、物質との衝突によって中間子などの多くの二次粒子を生成する。右下図が示すように、陽子-陽子衝突からの粒子生成は、陽子の破砕反応に起因する入射粒子の進行方向(超前方)への低横運動量の粒子生成と、陽子中のパートン多重衝突に起因する高横運動量の生成に大別される。この超前方粒子生成は、大きな断面積を持つありふれた反応であり、入射粒子の大部分の運動量を担う過程として、宇宙線の空気シャワー発達や、大気ニュートリノ生成など、様々な宇宙線が起こす現象に重要な過程である。しかしながら、超前方散乱過程は非摂動的QCDが支配する厳密な理論計算ができない領域であり、実験的な困難から測定データも限られており、十分な理解が進んでいなかった。我々は、衝突型加速器LHCおよびRHICにおいて、超前方に放出されるガンマ線、中性子を測定する専用の小型イメージングカロリメーターを設置し、 $10^{14}$  eV から  $10^{17}$  eV にいたるエネルギー領域で超高エネルギー宇宙線の超前方生成中性粒子を研究するLHCfおよびRHICf実験をおこなってきた。本課題開始までに、LHCfでの重心系14TeV陽子-陽子衝突、および重心系核子あたり8TeV陽子-鉛原子核衝突データと、RHICfでの重心系510GeV偏極陽子-陽子衝突データの取得を完了し、解析を進めてきた。しかしながら、LHCfとRHICfなど超前方検出器とATLAS、STARの中央検出器との相関解析や、異なる衝突エネルギーでのデータを合同した解析など、全データを包括した研究はまだ未完の状態であった。



## 2. 研究の目的

本研究では、衝突型加速器LHCおよびRHICの加速器トンネル内に設置した独自の小型イメージングカロリメーター検出器を用いて、衝突の超前方領域に生成されるガンマ線、中性子などの中性粒子の生成スペクトルを測定し、 $10^{14}$  eV から  $10^{17}$  eV の幅広いエネルギー領域での超高エネルギー宇宙線の反応での超前方粒子生成モデルの包括的な解明を行ってきた。具体的な目的は以下である。

1) 粒子生成において、陽子破砕が関与する超前方領域と、パートン多重衝突が関与する中心ラビディティ領域と、それぞれを包括的に理解できる描像と、衝突エネルギーによるその描像の変化を理解する。

2) 超前方領域の粒子生成について、陽子の偏極との相関研究を行い、スピン自由度をプローブとした超前方粒子生成の解明を行う。

3) 超前方粒子生成における原子核効果の解明を行う。特に宇宙線の空気シャワー現象に重要なデータを与える陽子-軽原子核衝突測定での物理を検討する。

4) これらの考察による粒子生成の知見を活かし、超高エネルギー宇宙線の空気シャワー現象や、大気ニュートリノ生成、拡散ガンマ線生成などに与える影響について考察する。

本研究では特に、LHCf実験とRHICf実験の両データを統合解析した、超前方粒子生成における衝突エネルギーのスケーリング則「ファイマンスケーリング」の検証と、LHCf実験とATLAS実験の連動解析による回折散乱での陽子破砕からの粒子生成の研究を行う。

## 3. 研究の方法

衝突型加速器での陽子陽子衝突において、超前方領域に生成されるガンマ線、中性パイ中間子、中性子のエネルギー分布及び生成角度分布を、タングステン板とGSOシンチレーターを積層したサンプリング型カロリメーターに、GSOホドスコープ位置検出器を組み合わせた専用検出器を加速器トンネルに設置し測定をおこなったLHCf実験、およびRHICf実験のデータ解析を進め、特に以下の項目について研究を進めた。

- LHCf実験での陽子陽子衝突(重心系0.9, 2.76, 7, 13TeV)と、RHICf実験での偏極陽子陽子衝突(重心系510GeV)の異なる重心系エネルギーにおいて解析したファイマン $x_F$ 分布を導出し、超高エネルギー衝突においても重心系エネルギーに寄らない普遍性(ファイマンスケーリング則)が成り立っているか、について検証を行う。
- RHICf実験での横偏極陽子と陽子との衝突からの超前方中性パイ中間子及び中性子について、左右非対称度を測定し、その横運動量、 $x_F$ 依存性を解析する。
- LHCf検出器とATLAS検出器の連動解析を行い、ATLAS中央飛跡検出器の情報によ

り回折散乱と非回折散乱を弁別した超前方粒子スペクトル導出を行う。同様の解析を RHICf 検出器と STAR 検出器との連動解析についても行う。

- 超前方粒子生成の精密解析を空気シャワー発達、大気ニュートリノ生成などへ水平展開するためのシミュレーション研究、研究会の開催を行う。
- これらの研究成果をもとに LHCf 実験、RHICf 実験の次期計画の策定と準備を行う。特に LHC Run3 と、陽子-酸素原子核衝突での超前方データ取得に向け準備する。

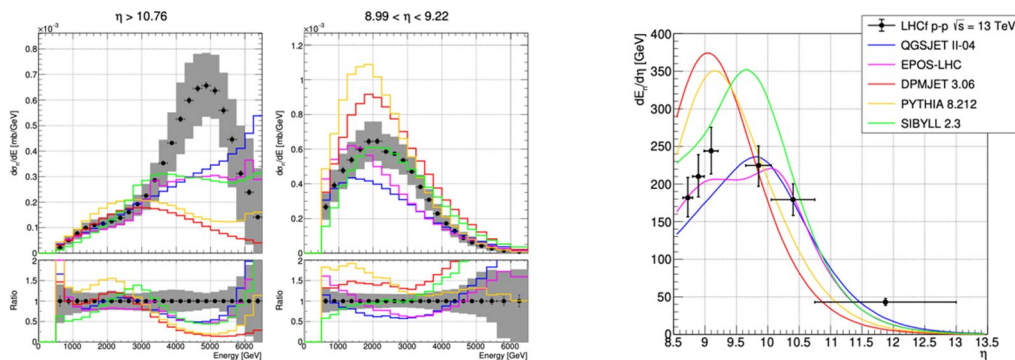
## 4. 研究成果

### 4.1 LHCf13TeV 陽子陽子衝突での超前方中性子測定とエネルギーフローの導出

*Journal of High Energy Physics 11(2018) 073*

*Journal of High Energy Physics 07(2020) 016*

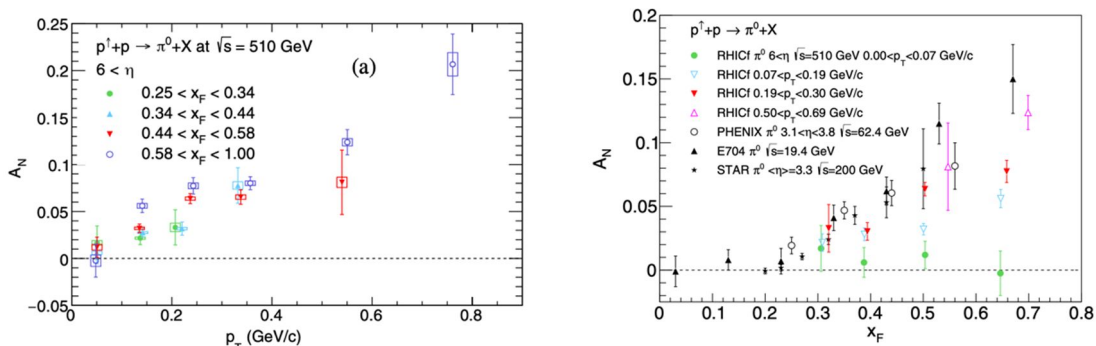
LHCf 13TeV 陽子-陽子衝突からの超前方中性子エネルギースペクトルを導出した(左図)。出版済みの 7TeV 陽子-陽子衝突からの超前方中性子エネルギースペクトルとの比較から、超前方中性子生成においてもファイマンスケールが成り立っていることを明らかにした。また、超前方中性子が衝突エネルギーの大半を担うことから、衝突のエネルギーフローの擬ラピディティ依存性を求め、宇宙線反応モデルとの比較を行った(右図)。その結果、QGSTJET II-04 及び EPOS-LHC が最もデータを再現していることが分かった。



### 4.2 RHICf 510GeV 偏極陽子-陽子衝突での超前方パイ中間子の左右非対称性の発見

*Physical Review Letters 124(2020) 252501*

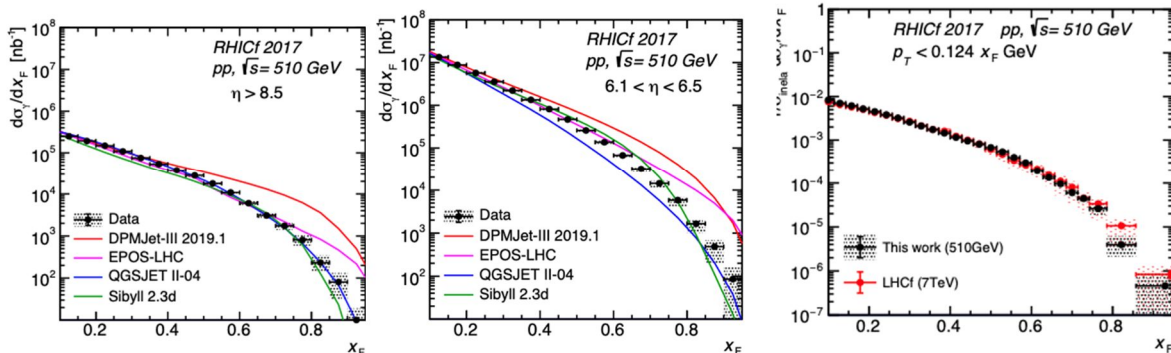
RHICf 実験において、水平面方向に横偏極させた陽子ビームによる 510GeV 偏極陽子-陽子衝突からの超前方中性パイ中間子生成を測定し、予想外の大きな Transverse single-spin asymmetry(陽子の進行方向の左右(この場合、鉛直上下方向)どちらに放出されやすいか)を発見した(左図)。高エネルギー横偏極陽子衝突においては、数 GeV/c 以上の横運動量領域において、中性パイ中間子の Transverse asymmetry が観測されていたが、本結果は 1GeV/c 以下の低運動量領域であり、従来提唱されてきた QCD パートン描像による機構では説明がつかない現象である。興味深い事に、先行研究と本結果は、異なる衝突エネルギー、生成横運動量の領域であるにもかかわらず、観測された asymmetry は  $x_F$  でよくスケールしているようにも見える(右図)。この事は、従来 QCD パートン描像で解釈されてきた Transverse asymmetry が大  $x_F$  領域での共通起源によるものであることを示しているのかもしれない。そのような機構として、理論研究者により Triple Reggeon 交換などのプロセスが提案されているが、現在解析中の超前方中性子の Transverse asymmetry と合わせ、超前方粒子生成の機構解明に結びつく糸口として期待される。



### 4.3 RHICf510GeV 陽子-陽子衝突からの超前方ガンマ線スペクトル測定とファイマンスケールリング則の検証

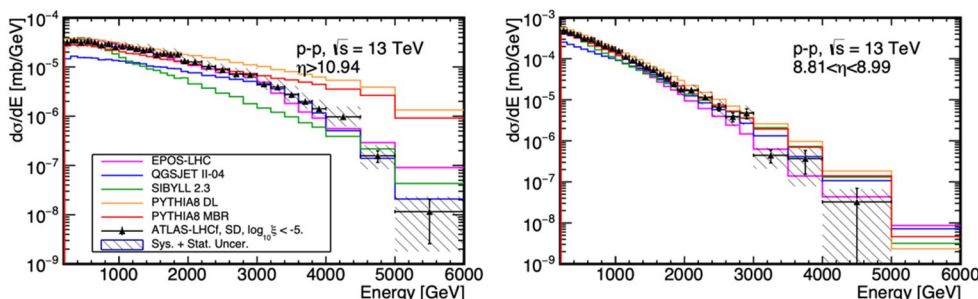


RHICf 510GeV 陽子-陽子衝突からの超前方ガンマ線エネルギースペクトルを測定し、 $10^{14}$  eV 領域の高エネルギー宇宙線の反応モデルを検証した(左図、中央図)。その結果、この領域においてはQGSJET II-04とSibyll 2.3dがよく再現し、EPOS-LHCはややハードすぎるスペクトルを与えているようである。異なる衝突エネルギーを持つLHCf 7 TeV 陽子-陽子衝突からの超前方ガンマ線の  $x_F$  分布と、共通の横運動領域で比較すると、非常に良い一致を見た(右図)。実験系  $10^{14}$  eV から  $10^{17}$  eV の広いエネルギー超前方ガンマ線生成において、ファイナンスケーリングがよく成り立っている事がわかる。



4.4 ATLAS-LHCf 連動解析による回折散乱事象からの超前方ガンマ線スペクトラムの導出  
Ken Ohashi, Ph.D. thesis 2022, Nagoya University

13TeV 陽子-陽子衝突において、ATLASとLHCfの連動解析を進め、ATLAS中央飛跡検出器において飛跡のない事象を選別することで、回折散乱事象のみからの超前方ガンマ線エネルギー分布を導出し、宇宙線反応作用モデルと比較を行った。その結果、EPOS-LHCがデータとよい一致を示し(左図)、擬ラピディティが少し大きい領域(右図)ではPYTHIA8 MBRも比較的よい一致を示すことが分かった。これらの結果は学位論文(大橋健、名古屋大学2022)としてまとめられた。



4.5 空気シャワー発達における回折散乱の影響と不定性の研究  
Progress of Theoretical and Experimental Physics 033F01 (2021)

超高エネルギー宇宙線の空気シャワー観測への回折散乱の影響を初めて系統的、網羅的に調べ、様々な不定性が宇宙線の化学組成決定に用いられるシャワー最大発達高度( $X_{max}$ )の及ぼす影響を明らかにした。その結果、非弾性散乱全体に回折散乱が占める割合の不定性が $X_{max}$ の不定性に最も効くことが分かった。また、LHCでのALICE実験、CMS実験により行われた回折散乱測定とその不定性を吟味し、空気シャワー発達における $X_{max}$ の不定性として、+4.0, -5.5 g/cm<sup>2</sup>を得た。この大きさは、空気シャワー観測機器の系統誤差起因の不定性と同程度であり、回折散乱の理解が無視できない不定性ひとつであることを示している。

4.6 超高エネルギー宇宙線反応と関連した国際研究会の開催  
EPJ Web of Conference 208 (2019), Proceedings 20<sup>th</sup> International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI2018): Nagoya, May 21-25, 2018

研究成果の発信と議論のため、様々な国際会議、国際研究会を主催した。2018年5月21-25日には20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interaction (ISVHECRI 2018)を名古屋大学で主催した(17か国から122名参加、含む外国人73名、65講演)(左図)。超高エネルギー宇宙線観測とそのハドロン反応にフォーカスした様々な発表が行われた他、高エネルギーニュートリノ反応への進展もあった。その会

議録は、EPS Web of Conference 208(2019)として出版されている。

2019年3月20-22日には、Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range (WANP2019)を名古屋大学で開催し、約30名の宇宙線反応研究者、空気シャワー研究者、ニュートリノ研究者が集まった(右図)。3種類の大気ニュートリノフラックス計算と、宇宙線反応モデルの不定性の寄与について紹介が行われた他、ニュートリノ振動研究への進展など横断的な議論が行われた。

2021年1月12-13日には、第2回研究会がオンラインで開催され、大気ニュートリノモデル構築進捗のフォローアップが行われた他、関連するCERN-SPSなどでの固定標的による前方粒子生成実験の検討が行われた。



#### 4.6 LHCf Run-3 及び陽子-酸素原子核衝突の準備

*LHCf, Technical Proposal for the LHC Run3, CERN-LHCC-2019-008, LHCC-P-014*

重心系 14TeV 陽子-陽子衝突を予定する LHC の Run-3 運転での LHCf データ取得計画を CERN LHC 委員会に提案し、数日間のデータ取得を承認された。LHCf Run-3 でのデータ取得に向けた検出器の改造や再立ち上げ作業を行い、特に LHCf Arm2 検出器のデータ取得速度を大きく向上させた。2021年9月にはCERN SPSでのテストビーム実験を行い、検出器の性能確認と共に、ATLAS-ZDC 検出器との統合データ取得を行なって、ハドロンシャワーのエネルギー分解能を約半分に向うことができること実証した。2022年現在、2022年9月に予定される Run-3 データ取得に向けて順調に実験準備を進めている。

衝突型加速器実験により、大気中での宇宙線の相互作用を知るためには、最終的には陽子-軽元素衝突データにより、軽元素原子核の原子核効果を実測する必要がある。LHC で運転可能な陽子-酸素原子核衝突に向けて測定計画 Technical Proposal を LHC 委員会へ提出し、2024年までに測定のための承認を得た。超高エネルギー宇宙線の粒子生成測定の最終段階として、決定的な成果が得られるだろう。

#### 4.7 次期 RHICf-II 実験の検討

RHIC での 510GeV 偏極陽子-陽子実験として様々な成果を上げた RHICf 実験の後継として、ALICE 実験 FoCAL 検出器に用いられるピクセル型検出器を導入した大立体角を持つ新たなイメージングサンプリングカロリメーターによる超前方中性粒子測定実験 RHICf-II の実験提案を行った。大立体角を生かした超前方中性 K 中間子測定や高横運動量までカバーした超前方中性パイ中間子、中性子の Transverse asymmetry の測定を行う計画であった。しかしながら RHIC 加速器での実験体制が sPHENIX や EIC へ転換するため、適切な実験体制を見いだせないため、現時点までに実験提案は承認されていない。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Adriani O., The LHCf collaboration, Berti E., Bonechi L., Bongi M., D'Alessandro R., Detti S., Haguenaer M., Itow Y., Kasahara K., Menjo H., Muraki Y., Ohashi K., Papini P., Ricciarini S., Sako T., Sakurai N., Sato K., Tamura T., Tiberio A., Torii S., Tricomi A., Turner W.C., Ueno M.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Measurement of energy flow, cross section and average inelasticity of forward neutrons produced in $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions with the LHCf Arm2 detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2020)016	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 Itow Yoshitaka	4. 巻 26
2. 論文標題 Initial Results from the RHICf Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 21020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.021020	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 Berti Eugenio, Adriani Oscar, Bonechi Lorenzo, Bongi Massimo, D'Alessandro Raffaello, Haguenaer Maurice, Itow Yoshitaka, Kasahara Katsuaki, Makino Yuya, Masuda Kimiaki, Menjo Hiroaki, Muraki Yasushi, Ohashi Ken, Papini Paolo, Ricciarini Sergio, Sako Takashi, et al.	4. 巻 207
2. 論文標題 The LHCf experiment: recent physics results	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (ICHECP2018)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.340.0207	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 Itow Y., Masuda K., Menjo H., Muraki Y., Ohashi K., Sato K., Ueno M., Zhou Q.D., Sako T., et al.	4. 巻 208
2. 論文標題 Recent results from the LHCf and RHICf experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 05004 ~ 05004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201920805004	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 Ohashi Ken, Menjo Hiroaki, Itow Yoshitaka	4. 巻 26
2. 論文標題 MC study for the effect of diffractive events on air shower developments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (KMI2019)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.356.0026	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 -

1. 著者名 Dembinski H.P., Arteaga-Velazquez J.C., Cazon L., Conceicao R., Gonzalez J., Itow Y., Ivanov D., Kalmykov N.N., Karpikov I., Müller S., Pierog T., Riehn F., Roth M., Sako T., Soldin D., Takeishi R., et. al.	4. 巻 210
2. 論文標題 Report on Tests and Measurements of Hadronic Interaction Properties with Air Showers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02004 ~ 02004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201921002004	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 Kim M. H., Hong B., Goto Y., Nakagawa I., Seidl R., Park J. S., Tanida K., Itow Y., Menjo H., Sato K., Ueno M., Zhou Q. D., Sako T., Kasahara K., Suzuki T., Torii S., Sakurai N., Adriani O., Bonechi L., Berti E., D'Alessandro R., Tricomi A.	4. 巻 208
2. 論文標題 Transverse single spin asymmetry for very forward $\pi^0$ production in polarized proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 05007 ~ 05007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201920805007	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 Menjo Hiroaki, Adriani Oscar, Berti Eugenio, Bonechi Lorenzo, Bongi Massimo, Castellini Guido, D'Alessandro Raffaello, Haguenaue Maurice, Itow Yoshitaka, et al.	4. 巻 349
2. 論文標題 The results and future prospects of the LHCf experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (ICRC2019)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0349	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 Ohashi Ken, Menjo Hiroaki, Itow Yoshitaka, Sako Takashi, Kasahara Katsuaki	4. 巻 376
2. 論文標題 A simulation study for the effect of diffractive collisions on the air shower developments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (ICRC2019)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0376	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 Sato Kenta, Itow Yoshitaka, Menjo Hiroaki, Ueno Mana, Ohashi Ken, Sako Takashi, GOTO Yuji, Nakagawa Itaru, Saidi R., Park Junsang, Kim Minho, Hong Byungsik, Tanida Kiyoshi, Torii Shoji, Kasahara Katsuaki, Sakurai Nobuyuki, Adriani Oscar, D'Alessandro Raffaello, Bonechi Lorenzo, Berti Eugenio, Tricomi Alessia	4. 巻 413
2. 論文標題 The energy spectrum of forward photons measured by the RHICf experiment in $\sqrt{s} = 510$ GeV proton-proton collisions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (ICRC2019)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0413	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 Adriani O., Berti E., Bonechi L., Bongi M., D'Alessandro R., Haguenaer M., Itow Y., Iwata T., Kasahara K., Makino Y., Masuda K., Matsubayashi E., Menjo H., Muraki Y., Papini P., Ricciarini S., Sako T., Sakurai N., Shinoda M., Suzuki T., Tamura T., Tiberio A., Torii S., Tricomi A., Turner W.C., Ueno M., Zhou Q.D.	4. 巻 780
2. 論文標題 Measurement of forward photon production cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the LHCf detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 233 ~ 239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2017.12.050	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 Adriani O., Berti E., Bonechi L., Bongi M., D'Alessandro R., Detti S., Haguenaer M., Itow Y., Kasahara K., Makino Y., Masuda K., Menjo H., Muraki Y., Ohashi K., Papini P., Ricciarini S., Sako T., Sakurai N., Sato K., Shinoda M., Suzuki T., Tamura T., Tiberio A., Torii S., Tricomi A., Turner W. C., Ueno M., Zhou Q. D.	4. 巻 11
2. 論文標題 Measurement of inclusive forward neutron production cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the LHCf Arm2 detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2018)073	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 Kim M.?H., Adriani O., Berti E., Bonechi L., D'Alessandro R., Goto Y., Hong B., Itow Y., Kasahara K., Lee J.?H., Ljubicic T., Makino Y., Menjo H., Nakagawa I., Ogawa A., Park J.?S., Sako T., Sakurai N., Sato K., Seidl R., Tanida K., Torii S., Tricomi A., Ueno M., Zhou Q.?D., RHICf Collaboration	4. 巻 124
2. 論文標題 Transverse Single-Spin Asymmetry for Very Forward Neutral Pion Production in Polarized Collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 252501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.252501	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 Ohashi Ken, Menjo Hiroaki, Itow Yoshitaka, Sako Takashi, Kasahara Katsuaki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Simulation study on the effects of diffractive collisions on the prediction of the observables in ultra-high-energy cosmic-ray experiments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Adriani O., Berti E., Bonechi L., D'Alessandro R., Goto Y., Hong B., Itow Y., Kasahara K., Kim M.H., Menjo H., Nakagawa I., Ohashi K., Sako T., Sakurai N., Sato K., Seidl R., Tanida K., Torii S., Tricomi A.	4. 巻 16
2. 論文標題 Performance of RHICf detector during operation in 2017	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P10027 ~ P10027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/10/P10027	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

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、佐藤健、大橋
2. 発表標題 Very forward particle productions at LHCf and RHICf
3. 学会等名 11th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 LHCf実験における13TeV陽子衝突の最前方 0エネルギースペクトル測定
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 回折事象の宇宙線空気シャワー発達への影響2
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 RHICf実験：510GeV陽子衝突測定データを用いた超前方光子生成断面積解析(2)
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 LHCf-ATLAS連動解析：超前方中性子イベントの解析 (I)
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 The results and the future prospects of the LHCf experiment
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference_ (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 The energy spectrum of forward photons measured by the RHICf experiment in $\sqrt{s} = 510$ GeV proton-proton collisions
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference_ (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受
2. 発表標題 A simulation study for the effect of diffractive collisions on the air shower developments
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference_ (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 LHCf: LHC forward experiment for CR interaction study
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受、上野、大橋、佐藤健
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和元年度東京大学宇宙線研共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受
2. 発表標題 Update of atmospheric neutrino calculation ATMNC
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤、毛受
2. 発表標題 Toward precise modeling of atmospheric neutrinos and cosmic ray interactions
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤好孝
2. 発表標題 Initial results from RHICf
3. 学会等名 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 Recent results from the LHCf experiment
3. 学会等名 Ultra High Energy Cosmic Rays 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 LHCf/RHICf: a zero degree calorimeter at LHC and RHIC
3. 学会等名 International Workshop on Forward Physics and Forward Calorimeter Upgrade in ALICE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 High energy hadron physics at zero-degree
3. 学会等名 The 4th KMI international Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 LHC forward experiment: LHCf
3. 学会等名 International school for Astroparticle physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 An idea for improvement of neutrino flux calculation
3. 学会等名 Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 Results and future prospects of LHCf and RHICf
3. 学会等名 第三回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 LHCf実験とRHICf実験におけるパイゼロ解析の進展状況
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 LHCf実験の陽子-酸素原子核衝突測定に向けた検討
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshitaka Itow
2. 発表標題 LHCf experiment: Current status and future prospect
3. 学会等名 Low-x 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 LHCf実験の次期測定計画とその準備状況
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 Physics and detectors of LHCf/RHICf
3. 学会等名 KEK研究会「素粒子・原子核コライダー物理の交点」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Menjo
2. 発表標題 Status and Prospects of the LHCf and RHICf experiments
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Menjo
2. 発表標題 Very forward hadron measurements with LHCf/RHICf detectors
3. 学会等名 3rd Forward Physics Facility Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Menjo
2. 発表標題 Future physics plan from RHICf
3. 学会等名 2021 RHIC/AGS Annual Users' Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 LHCf/RHICfによるトランジションエネルギー領域の相互作用研究
3. 学会等名 第五回 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 2021年

1. 発表者名 毛受弘彰
2. 発表標題 次期pp衝突測定に向けたLHCf実験の準備状況
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

The LHCf experiment <a href="http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/LHCf/">http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/LHCf/</a> The RHICf experiment <a href="http://crportal.isee.nagoya-u.ac.jp/RHICf">http://crportal.isee.nagoya-u.ac.jp/RHICf</a> 【研究成果】陽子衝突からの左右非対称な中間子生成 - 粒子生成の起源にせまる新たな発見 - <a href="http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2020/06/23/rhicf/">http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2020/06/23/rhicf/</a> 衝突型加速器を使った超高エネルギー宇宙線の相互作用研究、名大の系譜 <a href="http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2020/06/23/rhicf_bts/">http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/blog/2020/06/23/rhicf_bts/</a> 陽子衝突からの左右非対称な中間子生成 - 粒子生成の起源に迫る新たな発見 - <a href="https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/research-results/20200624.html">https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/research-results/20200624.html</a> The LHCf experiment <a href="http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/LHCf/">http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/LHCf/</a> The RHICf experiment <a href="http://crportal.isee.nagoya-u.ac.jp/RHICf">http://crportal.isee.nagoya-u.ac.jp/RHICf</a> Welcome to the LHCf - Florence web page <a href="http://hep.fi.infn.it/LHCf/index.html">http://hep.fi.infn.it/LHCf/index.html</a> LHCf <a href="https://home.cern/science/experiments/lhcf">https://home.cern/science/experiments/lhcf</a>
--

## 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	後藤 雄二 (Goto Yuji) (00360545)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・前任研究員  (82401)	
研究分担者	毛受 弘彰 (Menjo Hiroaki) (10447849)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教  (13901)	
研究分担者	さこ 隆志 (Sako Takashi) (90324368)	東京大学・宇宙線研究所・准教授  (12601)	

## 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3件

国際研究集会 2nd Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 20th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interaction	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range	開催年 2019年～2019年

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			
イタリア	University of Florence	University of Catania		
ドイツ	Karlsruhe Institute of Technology			
韓国	Soul National University	Korea University		