

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01928

研究課題名(和文)LHC鉛原子核衝突：フォトンで探る極初期状態(initial stage)

研究課題名(英文)Lead Nuclear Collision at LHC: Exploring Its Initial Stage with Photons

研究代表者

杉立 徹(Sugitate, Toru)

広島大学・先進理工系科学研究科(理)・名誉教授

研究者番号：80144806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：LHC第2期衝突実験最終年に収集した高統計データ解析を始動するも、TPC検出器飛跡データの歪みが発覚した。補正作業と並行してフォトン物理解析を構成する複数の測定法(PHOS, EMC, DCAL, PCM)による比較検討を遂行した。予備的結果ではあるが、鉛+鉛原子核衝突@5.02TeV/Aが発する単光子エネルギー分布を国際会議にて初めて公開した。原子核衝突極初期を解明する超前方検出器FoCalの開発を展開した。7カ国から成る共同研究組織のなかでもわが国大学チームは主導力を発揮した。国内外理論研究者との議論を通して、量子多体系を支配する非線形・非平衡物理を切り開く一端を担った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高エネルギー原子核衝突が創る高温物質の探求はLHC加速器実験2期10年を経過した。2009年初衝突以来、様々な知見を明らかにしてきた。その物質は単光子を熱輻射した。熱力学的平衡に達した熱源が存在し、ハドロン存在限界温度を越えるクォーク物質であることを証した。その探求は非摂動的QCDの振る舞いを理解するに留まらず、自発的対称性の破れた量子場という自然の核心的概念に結びつく。高エネルギー実験は極度にグローバル化した分野である。研究者は国籍問わず緊密に連携した共同体を立ち上げ、そこに掲げた目標に向けて日々議論し行動する。近年の事象はその基盤を奪った。私たちは強くその回復に努力する。

研究成果の概要(英文)：High-statistical data analysis of RUN2 was initiated, and distortions in TPC tracks were discovered. In parallel with the correction efforts, comprehensive photon analysis was performed with various measurements with PHOS, EMC, DCAL, and PCM. Although preliminary, a single-photon energy distribution emitted in Pb-Pb collisions at 5.02 TeV/A was presented for the first time at an international conference. Development of FoCal, an ultra-forward detector to elucidate the extreme early stages of nuclear collisions, was developed under collaborating work, where the team Japan played a leading role. Our extensive studies with theoretical researchers opened a broad interdisciplinary field, where non-linear and none-equilibrium nature governs a many-body quantum system.

研究分野：高エネルギー原子核物理学実験

キーワード：クォーク物質 フォトン物理 ALICE実験 クォークグルーオンプラズマ QGP

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私たちはフォトン検出器 PHOS 及びジェット対検出器 DCAL を主要検出器とし、欧州 CERN 研究所 LHC 加速器が最高性能を発揮した ALICE 実験原子核衝突第 2 期を完遂した。本研究課題はその成果と実績を継承し、わが国理論研究者とも協働して次の目標達成を目指した。

- LHC鉛原子核衝突@5.02TeV/Aにおけるフォトン物理RUN2総括
- 早期平衡化を探る超前方フォトン検出器FoCal開発及びRUN3実証機投入
- 普遍的な拡がりをもった新たな学術分野「強く相互作用する量子多体系」開拓

2. 研究の目的

- (1) 杉立 (代表) は史上最強フォトン検出器PHOSをALICE実験にロシアチーム他と共同建設し、LHC第1期衝突実験 (RUN1=2009-2013年) にて鉛原子核衝突@2.76TeV/Aが創るクォーク物質について様々な知見を得た。更なる高温物質創成が期待できるRUN2において、PHOSの優位性を発揮する熱輻射光子成分の解析を主導する。ハドロン物質の存在限界温度を遙かに超えるクォーク物質の実体解明は宇宙誕生直後に起こった時空発展のダイナミクスを解き明かす。
- (2) 当初得られたRHIC及びLHC原子核衝突実験データを量子流体力学モデルに沿って検討した結果、局所的熱力学平衡に達したクォーク多体系として概ね理解できると自負してきた。ところが研究の進展に伴い、理論モデルでは説明することが難しい奇妙な現象が複数発見された。衝突前の原子核パートン分布関数 (nPDF) 及び衝突極初期の熱化及び平衡化機構に起因すると考えられた。その究明を目指し、中條 (分担) は未開領域のグルーオン分布関数を実験的に突き止める超前方検出器FoCal開発を先導する。
- (3) クォーク多体系の探求は非摂動的QCDの振る舞いを理解するに留まらず、自発的対称性の破れた量子場という自然科学の核心的概念と結びつく。本研究はその実体を極めることにより新たな学問分野を切り拓く先駆的意義がある。三好 (分担) 他、理論研究者と協働しながら普遍的な拡がりを共有する「強く相互作用する量子多体系」の分野開拓に挑戦する。

3. 研究の方法

- (1) LHC第2期衝突実験 (RUN2=2015-2018年) 全データ解析の本格始動に向け、運用責任を分担するPHOS及びDCALの検出器較正及び品質保証を徹底し、全データ構築に貢献した。杉立は2015年に収集した鉛原子核衝突データから単光子成分の抽出に取り組み、予備的ながら中心衝突において摂動的QCD光子分布に重畳する熱輻射光子成分を認めた。最終年 (2018年) 収集した鉛+鉛原子核衝突@5.02TeV/Aの高統計データに期待するも、TPC飛跡検出器のイオンフィードバックに起因する飛跡データ歪みが発覚した。新型コロナウイルス感染症の世界的蔓延により大幅な減速を余儀なくされながらも補正作業に併行して、フォトン物理解析を構成するPHOSを含む複数の測定法 (EMC、DCAL、PCM) による比較検討を行った。
- (2) 熱輻射光子の物理解析過程で私たちは、熱源から等方輻射されるはずの熱光子が何らかのダイナミクスを反映していることに気付いている。衝突極初期の早期平衡化仮説を裏打ちする可能性ある方位角依存性は喫緊の重要課題である。しかし、2015年既得データでは不定性ない結果と明確な結論を導き出すことは統計的に困難であった。RUN2全データから非中心衝突を選択し、物質流に注目したフォトン物理解析を主導する。この解析結果は小数核子系に発現した非ハドロン現象を見極める重要な知見を与えると期待している。他実験 (ATLAS/CMS/LHCb) では近づくことのできないALICE実験の特色ある物理であるため、慎重に詳細な検討を進める。
- (3) 本研究課題開始と前後してLHC加速器は第2期長期保守期間 (LS2) に入り、ALICE実験はL3電磁石に内蔵する全ての検出器を引き抜き、必要に応じて地上施設で保守改修点検を行った。PHOSは全モジュールを地上施設に移動させ、一部に発覚していた読み出し回路不具合の改修を行った。2019年11月、全モジュールをP2実験地点に移動し、CPVと合体させた後、同じ架台に載るDCALと共に実験装置に組み込んだ。中條が主導したPHOS/DCAL事象選別機能は見事にジェット事象を選択することに成功した。衝突初期の摂動的QCD過程で創られたパートン対がクォーク物質中を突き抜けて作るジェット対をDCAL/PHOSと対向するEMC/TPCで同定し、散逸エネルギー量と方向を精度良く決定する。最終年収集の高統計データでは統計的に有意な γ -ジェット対相関結果が期待できる。

- (4) カラーガラス凝縮 (CGC) や早期平衡化機構の解明に焦点を絞る超前方検出器FoCalの開発導入を主導する。基本構造は微細化したSi-Wサンプリング電磁シャワー検出器であり、Si半導体センサー2種を組み合わせ、Pad型をわが国が主導し、他方Pixel型は欧州が分担する。先行研究で各種ビーム (@東北大ELPH, @CERN-PS&SPS) によるPad試作機評価実験を実施し、また、ALICE実験環境での試作機評価も実施した。わが国5機関を含む34機関が連携協力し、中條を含めた数名が中核となり、FoCal企画書 (LOI) を2019年に提案後、2020年4月ALICE実験執行部承認、同年6月LHCC実験提案承認など重要なステップを主体的に進めた。2021年7月、東北大学ELPHにて同検出器の鍵となるPad検出素子とHGROC読出回路部を組み合わせた初めてのビームテスト実験を実施し、基本的な性能を確認するとともに、いくつかの問題点を発見し改善策を検討した。更にオランダ・フランス・ノルウェー・インド・米国研究者と協働して量産型FoCal試作機による総合評価実験をCERN-SPSにて実施した。フランス・グルノーブルチーム撤退を受け、HGROC読出基板開発はわが国を主軸に受け継ぐ準備を進めている。Pad型検出器の最適化を追求し、ベンチテスト及びテストビームによる評価試験を継続する【図1, 2】。



図 1. 高強度赤外レーザ照射 Pad 検出素子評価装置. 2020 年撮影@筑波大

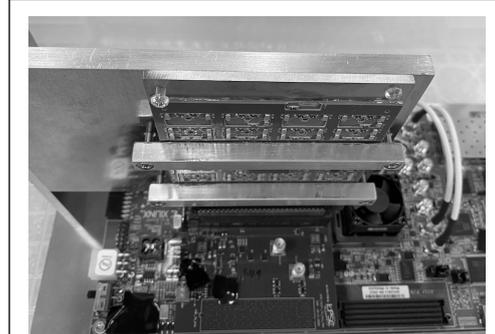


図 2. HGROC 読出回路を初めて実装した Pad 検出部. 2021 年撮影@東北大 ELPH

- (5) 新しい学術分野「強く相互作用する量子多体系」の醸成を模索するも、新型コロナウイルス禍のため、多くの研究者が一同に参加する国際研究会のような企画はまだ見通せなかったが、オンライン/オフライン含めて少しずつの議論の場は回復しつつある。
- (6) 研究者間の往来も平常を取り戻そうとする2022年2月、露国のウクライナ侵略が勃発した。ALICE実験に於いてフォトン物理を牽引するPHOS検出器は杉立が複数のロシアグループと共同建設した経緯から、その運用及びデータ解析にはロシアグループも重要な役割を担う。両国及びその周辺国も含めて研究者間における協力・信頼関係に変わりはないが、国際社会的な制約下でその活動力低下は否めない。

4. 研究成果

- (1) 杉立が運用責任を分担するPHOS、中條が分担するDCALとも、RUN2最終年 (2018年) 収集の高統計データセットを対象とした検出器較正及び品質保証を完了させ、RUN2全データセット構築への準備を整えた。LHC加速器第3期衝突実験 (2022-2025年予定) に向けたLHC加速器保守期間 (LS2) は2年間あるものの、多種類検出器を備えるALICE実験の分解組立スケジュールは複雑であり、その作業工程は技術審査部会の指示を厳守する必要がある。私たちが責任分担するPHOS及びDCALとも改修点検作業を完遂し、組み込みスケジュールを乱すことなく2019年11月、実験装置への組み込みを完了させた。2019年5月、杉立はPHOSの検出器較正手法についての技術論文を公表した。
- (2) RUN2全データ物理解析を組織的に実行する行動計画は2020年初め、世界的な新型コロナウイルス蔓延により大幅な減速を余儀なくされた。物理解析の終盤に達していたトピックスはオンライン会議などでも進捗を遂げるが、解析プロセス初期あるいは中途にあったトピックスはCERN研究所封鎖や世界的鎖国制限のため有機的連携体制を維持することが難しく、遅延あるいは期待通りに進められなかった行動もある。更に、2022年2月に勃発した露国のウクライナ侵略は国家間事情を複雑化し、国際協力/協調を基調とした物理解析行動に於いてもその影響は否めない。

(3) RUN2最終年データに発覚したTPC飛跡データ歪み補正作業と並行して、RUN2全データ解析を先行し、陽子+陽子衝突及び鉛+鉛原子核衝突データにおける検出器動作検証及び性能評価を実施した【図3】。フォトン物理解析を構成するPHOSを含む複数の測定法 (EMC、DCAL、PCM) による比較検討【図4, 5】を行ったが、完全なる協調体制の回復には暫く時間が必要である。厳しい状況の中での個別測定法による予備の結果ではあるが、2023年3月開催 (ドイツ) の「硬質及び電磁探索による国際会議 (HP2023)」にて、史上最高エネルギー@5.02TeV/Aの鉛+鉛原子核衝突が発する単光子エネルギー分布を初めて公開し、本研究課題目標のひとつを達成した。

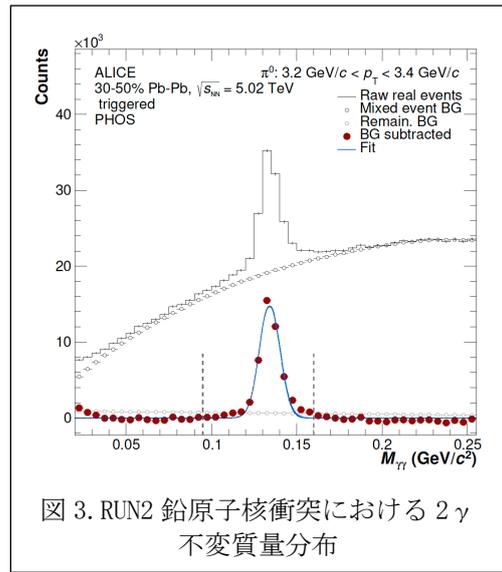


図 3. RUN2 鉛原子核衝突における 2γ 不変質量分布

(4) 原子核衝突の極初期現象解明に焦点を絞る超前方検出器FoCalの開発は、中條が中心となり建設的に進展した。先行研究による試作機開発成果を中條がALICE技術審査部会で報告し、ALICE実験計画のひとつとして組織承認を受け、2019年10月、わが国6大学を含むFoCal企画書 (LOI) を策定し公開した (ALICE-PUBLIC-2019-005)。E-pad, E-pixel, H-cal, trigger, readout, simulation, H/W-design等の測定器構成要素の責任分担を順次確定しながら詳細技術調査 (TDR) 作成に向けて活動を続けている。中條はE-pad、大山 (長崎総科大) が trigger/readoutの分担責任を担い、7カ国から成る国際共同研究組織の中なかでもわが国大学チームは主導力を発揮した。ALICE実験組織の支援のもと国内外の理論研究者との協働も強化され、加えて奈良女子大及び佐賀大からも強力な援軍が得られ、本研究課題目標のひとつを達成した。

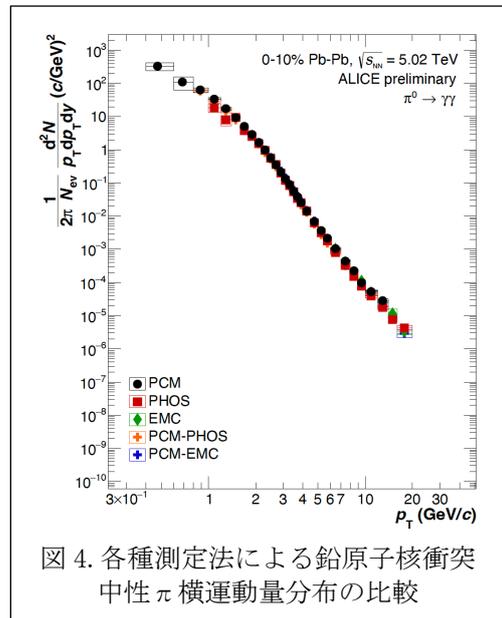


図 4. 各種測定法による鉛原子核衝突中性 π 横運動量分布の比較

(5) 量子多体系を支配する非線形・非平衡物理を理解するなかで普遍的な拡がりもつ学術領域を形成していくことが重要である。三好は高エネルギー原子核衝突物理とプラズマ物理学の学際研究を推進した。特に磁気流体力学にカイラル磁気効果を導入したカイラル磁気流体力学の先駆的研究を行い、「カイラル磁気流体におけるケルビン・ヘルムホルツ不安定性」および「高エネルギー重イオン衝突におけるプラズマ物理的課題」を議論し、学際的分野を切り開く一端を担った。

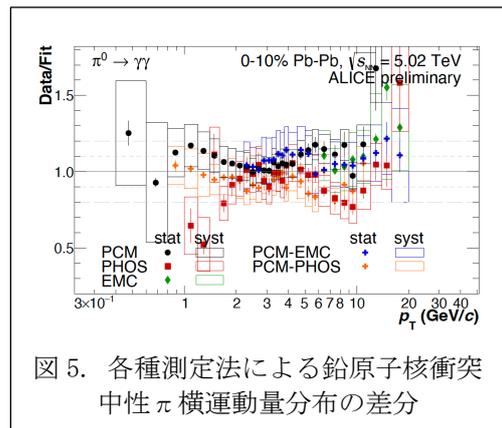


図 5. 各種測定法による鉛原子核衝突中性 π 横運動量分布の差分

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 18件 / うちオープンアクセス 18件）

1. 著者名 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 14
2. 論文標題 Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JOURNAL OF INSTRUMENTATION	6. 最初と最後の頁 P05025/1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/14/05/P05025	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 796
2. 論文標題 Measurement of jet radial profiles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICS LETTERS B	6. 最初と最後の頁 204-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.07.020	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 79
2. 論文標題 Measurement of the inclusive isolated photon production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C	6. 最初と最後の頁 896/1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-019-7389-9	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 100
2. 論文標題 Measurement of charged jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW D	6. 最初と最後の頁 092004/1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.092004	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 101
2. 論文標題 Measurements of inclusive jet spectra in pp and central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW C	6. 最初と最後の頁 034911/1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.034911	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 Minoshima Takashi, Kitamura Keiichi, Miyoshi Takahiro	4. 巻 248
2. 論文標題 A Multistate Low-dissipation Advection Upstream Splitting Method for Ideal Magnetohydrodynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 12/1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab8aee	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 101
2. 論文標題 Jet-hadron correlations measured relative to the second order event plane in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064901/1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.064901	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 Miyoshi Takahiro, Minoshima Takashi	4. 巻 423
2. 論文標題 A short note on reconstruction variables in shock capturing schemes for magnetohydrodynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109804/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.109804	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 102
2. 論文標題 Measurement of isolated photon-hadron correlations in sqrt(s_NN) = 5.02 TeV pp and p-Pb collisions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044908/1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.044908	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 80
2. 論文標題 Production of mesons in pp collisions at 7 TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1130/1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-08651-y	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 588
2. 論文標題 Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 232 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-3001-6	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 T. Awes, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 988
2. 論文標題 Design and performance of a silicon-tungsten calorimeter prototype module and the associated readout	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164796/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164796	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 81
2. 論文標題 Production of pions, kaons, (anti-)protons and mesons in Xe-Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 584/1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09304-4	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 819
2. 論文標題 Jet-associated deuteron production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136440/1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136440	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 104
2. 論文標題 $c^{(+)}$ production in pp and in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054905/1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.054905	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 128
2. 論文標題 Measurement of the Groomed Jet Radius and Momentum Splitting Fraction in pp and Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 102001/1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.102001	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 605
2. 論文標題 Direct observation of the dead-cone effect in quantum chromodynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 440-446
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-04572-w	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 S. Acharya, T. Chujo, T. Sugitate 他	4. 巻 833
2. 論文標題 Exploring the N -N coupled system with high precision correlation techniques at the LHC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137272/1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.137272	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

LHC ALICE実験 日本グループ http://alice-j.org

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	中條 達也 (Chujo Tatsuya) (70418622)	筑波大学・数理解物質系・講師 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	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	三好 隆博 (Miyoshi Takahiro) (60335700)	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・助教 (15401)	

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			
スイス	CERN研究所			
フランス	グルノーブル研究所(LPSC)			
米国	オークリッジ国立研究所	ローレンスバークレイ国立研究所		
オランダ	NIKHEF研究所	ユトレヒト大学		
インド	VECC研究所	BARC研究所		
ロシア連邦	クルチャトフ国立研究所	高エネルギー物理学研究所		