

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13945

研究課題名（和文）LHC加速器の陽子+陽子衝突におけるカイラル対称性の回復現象の探索

研究課題名（英文）Search for the phenomena of chiral symmetry restoration in pp collisions at LHC

研究代表者

八野 哲 (Yano, Satoshi)

広島大学・先進理工系科学研究科（理）・助教

研究者番号：20850720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：2021年度に、MFT検出器のALICE検出器群へのインストール作業が完了し、機械学習を活用して粒子の飛跡を再構築するためのアルゴリズムやデータベースソフトウェアの開発を進めた。当初は2022年に10カ月間データを収集する予定であったが、Covid-19のパンデミックやウクライナの危機の影響で、データ収集期間は4カ月に短縮された。この遅れの影響で、予定していた質量変化の調査は完了できなかった。しかし、 J/ψ 中間子の存在を確認することはでき、MFT検出器が期待通りに動いていることを確かめた。来年度には、粒子の多い状況での質量変化の検証を行う予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陽子+陽子衝突においてクォーク物質の生成が確認された場合、これまで主流であった原子核衝突を用いた研究からのパラダイムシフトを提示する可能性がある。現在、LHC加速器の高輝度化(HL-LHC)の計画が進んでおり、近い将来、更に大きな統計量が利用できるため、現時点で陽子+陽子衝突におけるクォーク物質生成の真偽を明らかにすることは大きな意味を持つ。本研究期間には、MFT検出器を開発、インストールを完了し、2022年のデータを用いて正常に動作していることを確認した。この検出器は陽子-陽子衝突におけるクォーク物質の生成を検証することを可能にするため、今後の研究計画に大きな影響を与える。

研究成果の概要（英文）：In the fiscal year 2021, we successfully installed the MFT detector into the ALICE detector group and developed algorithms for reconstructing particle trajectories using machine learning and database software to store detector condition information. Originally, we planned to collect data for 10 months in 2022, but due to the Covid-19 pandemic and the crisis in Ukraine, the data collection period was shortened to 4 months. Because of this delay, we were unable to complete the investigation into mass modification as planned. However, we were able to confirm the existence of the J/ψ meson, verifying that the MFT detector is operating as expected. In the next fiscal year, we plan to verify mass changes in high-multiplicity events

研究分野：原子核物理（実験）

キーワード：カイラル対称性 レプトン対 QGP LHC ALICE

1. 研究開始当初の背景

誕生直後の宇宙の様相であったクォーク・グルーオン・プラズマ (クォーク物質) の性質解明は、強い相互作用の更なる理解や、極初期宇宙発展シナリオの検証に欠かせない。クォーク物質はパートンが閉じ込めから解放された熱平衡状態で、高エネルギー原子核衝突実験で人工的に作り出すことができる。実際に、BNL-RHIC 加速器や CERN-LHC 加速器の原子核衝突実験で成功した。

最近、LHC 加速器の陽子+陽子衝突の高粒子多重度事象 (生成粒子の多い稀な事象) において、クォーク物質の生成を示唆する複数の現象が発見された。陽子+陽子衝突では熱平行状態に至らず、クォーク物質は生成しないと考えられていたため、この結果は多くの研究者を驚かせた。しかし、発見された諸現象をクォーク物質の生成以外で説明する理論モデルが登場するなど、陽子+陽子衝突におけるクォーク物質生成の真偽は不明なままである。陽子+陽子衝突におけるクォーク物質の生成は、確立したと考えられていたクォーク物質の生成機構や生成条件の破綻を招くものであり、この真偽を明らかにすることは喫緊の課題である。

本研究では、“LHC 加速器 陽子+陽子衝突の高粒子多重度事象においてクォーク物質は本当に生成しているか?” を学術的な「問い」として設定する。

2. 研究の目的

本研究では、クォーク物質生成の強力な証拠である「カイラル対称性の回復現象」を陽子+陽子衝突の高粒子多重度事象で探索し、同物質生成の真偽を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

クォーク物質内部ではカイラル対称性が回復すると考えられている。この結果、クォーク物質が生成した場合、レプトン対に崩壊した低質量ベクトル中間子 (ρ , ω , ϕ) の質量が変化すると期待される。本研究は、このカイラル対称性の回復現象を捉えることで、陽子+陽子衝突におけるクォーク物質生成の真偽を明らかにする。

カイラル対称性の回復による質量の変化量は、低い横運動量領域で顕著に現れる。また、低質量ベクトル中間子のレプトン対崩壊分岐比は非常に小さい ($Br \sim 10^{-5}$) ため、高統計量データが必要となる。この両条件を満たすために、本研究は、低横運動量領域のレプトン対の高統計データが取得可能な ALICE 検出器を用いる。ALICE 検出器は、電子とミュー粒子の両方が測定できる。本研究は、電子ではなくミュー粒子に着目する。ミュー粒子は透過率が高く、誤認識を低く抑えた選別トリガーが構築でき、効率的にミュー粒子対データを収集できる利点がある。実際、LHC-Run2 (2015-2018 年) に、電子対の 400 倍近い統計量を取得した。

しかし、既存の ALICE 検出器だけでは、ミュー粒子対質量分解能が悪く、質量変化の探索ができない。この問題は、研究活動スタート支援「高エネルギー重イオン衝突における前方ミュー粒子対測定で紐解くハドロン質量の起源」(代表; 八野哲, 2019-2020) で、申請者自身が開発した新規シリコン飛跡検出器 (MFT 検出器) (図 1) を用いることで解決できる。同検出器を導入することで、4 倍の質量分解能が得られる。本研究は、MFT 検出器を用いて低質量ベクトル中間子質量を高精度で測定し、カイラル対称性の回復による質量変化を探索する。

4. 研究成果

本研究期間中 (2021-2022) は、Covid-19 による影響が色濃く残るとともに、ロシアのウクライナ侵攻が重なったため、計画通りに研究を進めることができなかった。2021 年度内は、Covid-19 による海外渡航制限のため、CERN 現地での作業は不可能であり、遠隔からの作業にとどまった。2022 年度には、海外渡航の規制が緩和され、限定的ではあるが CERN への長期出張が可能となり、現地での作業が可能となった。一方で、2022 年 2 月に起こったロシアによるウクライナ侵攻によるエネルギー問題などにより、当初 10 ヶ月の運転を目指していた 2022 年のデータ収集は 4 ヶ月へと短縮された。さらに、8 月には LHC 加速器の問題も重なり、当初予定していたデータ統計数には達しなかった。このような非常に厳しい状況のため、研究開始当初に予定していた低質量ベクトル中間子の質量変化の検証を達成することはできなかった。しかし、以下に示すように、MFT 検出器の準備は順調に進んでおり、2023 年度のデータを用いて、質量変化の検証が可能と期待されている。研究成果の具体的内容を以下に示す。

(1) MFT 検出器を用いたデータ収集

2021 年秋に LHC 加速器は、試運転としての重心系エネルギー 900 GeV 陽子-陽子衝突実験を行い、MFT 検出器でデータを取得した。同じ衝突エネルギーのデータは 2009 年に取得済みで、検出器システムを刷新した今回のデータと比較することで、現行検出器システムの最終調整を進めた。同年夏には、史上最高の重心系エネルギー 13.6 TeV 陽子-陽子衝突実験を開始し、同じく

MFT 検出器でデータを収集した。陽子-陽子衝突では、最高 500kHz の頻度で衝突データを取得した。高い衝突頻度により、MFT 検出器だけで再構成された荷電粒子がどの衝突から来たのかの判別が困難という課題に直面したが、MFT 検出器後方の時間分解能が優れた FIT 検出器の使用、あるいは再構成した荷電粒子の生成点 (DCA) を用いた手法などが提案された。現在は、これらの手法の最終的な検証を行っている。ミュオン粒子の再構成については、ミュオン粒子同定検出器 (MID) の時間分解能が優れているため、上述のような問題は生じなかった。同時に、ミュオン粒子対質量分布の測定も行い J/ψ 中間子質量ピークの再構成に成功した。 J/ψ 中間子の質量分解能を用いることで、ミュオン粒子運動量検出器 (MCH) の検出器アラインメントを測定することが可能で、全体として順調に進んでいる。 J/ψ 中間子に加えて、低い質量ベクトル中間子 (ρ , ω , ϕ) の質量ピークも確認できた。さまざまな生成粒子数イベントにおける質量分布を慎重に調べ、その質量変化の検証を進めている。

さらに、陽子-陽子衝突以外にも、過去最高衝突エネルギー 5.36TeV の鉛-鉛衝突の試運転データの取得も行った (図 1)。陽子-陽子衝突に比べてデータ量が増加すると予想される鉛-鉛衝突でも、データの正常な読み出しと荷電粒子の再構成が可能であることを確認した。衝突頻度が陽子-陽子衝突のそれに比べ低いため、上述のような問題は小さいと考えられる。これらのデータに基づき、正常に動作しないセンサーの同定やノイズ頻度の測定等も実施された (図 2)。

(2) 実検出器データを用いた検出器制御系ソフトウェアの開発

検出器の状態モニタリングおよびデータ取得開始時の設定状況をデータベースに保存するソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いて実際のデータ取得時の検出器状態をデータベースに保存することが可能であることを確認した。さらに、データ取得時に検出器設定情報をデータベースに自動で保存するシステムも構築に成功し、それは順調に稼働している。

(3) 実データを用いた機械学習トレーニングサンプルの抽出

本研究計画では、ミュオン粒子の飛跡再構成に機械学習を導入する。機械学習の性能はトレーニングデータの品質に大きく依存する。多様な分野でシミュレーションからトレーニングデータを生成するアプローチが採用されているが、その再現性の検証は慎重に行う必要がある。そこで、この問題を克服するために、収集した実データからトレーニングデータを生成する新たな手法を構築し、現在、その検証を進めている。具体的には、異なるイベントの MFT 検出器と MCH 検出器の飛跡を組み合わせ、100%不正確な組み合わせ (false event) のサンプルを実データから作成する。その一方で、 J/ψ 中間子質量ピークを用いた Tag-and-Probe 法により、正確な組み合わせ (correct event) のデータサンプルも実データから作成する。これらのデータを結合して学習することで、現実の実験環境 (検出器の状況や加速器情報など) を反映した学習サンプルを得ることができる。実データサンプルとシミュレーションデータサンプルとの比較から、衝突頻度や検出器物質質量に起因する微小な差異が存在することを確認し、これはシミュレーションデータで学習したモデルが、実データ解析に完全に最適化されていない可能性を示唆している。なお、この手法はデータ取得後 (飛跡再構成後) でも適用可能であり、既に取得されたデータに対しても適用できるというメリットがある。この新手法は 2023 年のデータ解析に活用される予定である。

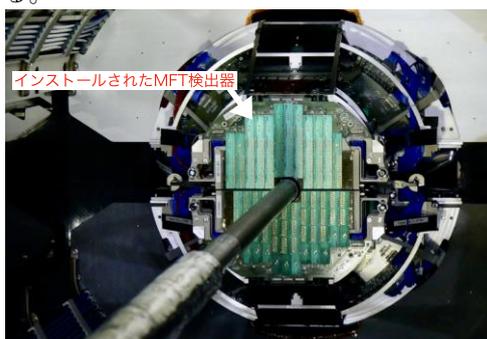


図 1 (左) : ALICE 検出器群にインストールされた MFT 検出器

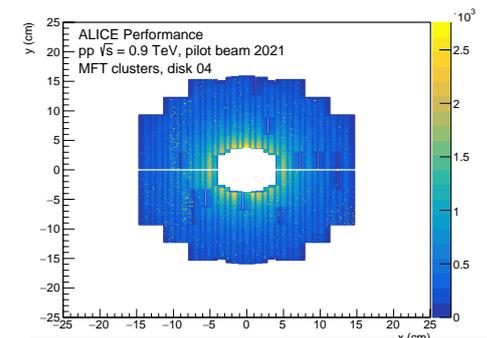


図 2 : MFT 検出器のヒットマップ

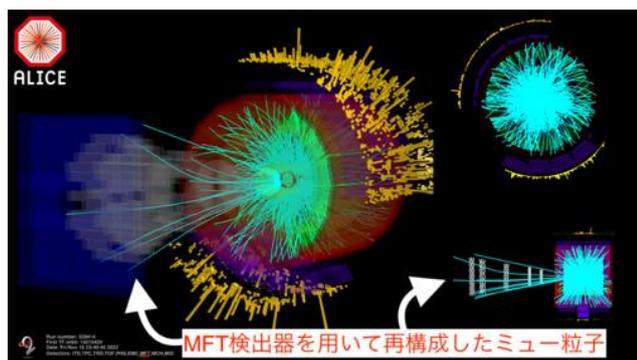


図 3 : 5.36TeV 鉛-鉛衝突実験のイベントディスプレイ

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 ALICE Collaboration (S. Acharya, S. Yano, et. al)	4. 巻 81
2. 論文標題 Energy dependence of phi meson production at forward rapidity in pp collisions at the LHC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Eur. Phys. J. C	6. 最初と最後の頁 772
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjc/s10052-021-09545-3	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤友, 志垣賢太, 八野哲, 山口頼人
2. 発表標題 ALICE実験Run 3データ解析に向けた μ 粒子検出効率の評価手法
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大矢元海 for the ALICE collaboration
2. 発表標題 LHCパイロットビームにおけるALICE実験前方ミュー粒子飛跡検出器を用いた試験的測定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 八野哲
2. 発表標題 Low mass dimuon measurement in heavy-ion collision
3. 学会等名 第7回クラスター階層領域研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江島廉 for the ALICE collaboration
2. 発表標題 ALICE 実験 Run3 における前方 μ 粒子飛跡再構成の特徴量エンジニアリング
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------