

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23444

研究課題名（和文）高エネルギー重イオン衝突における前方ミュオン粒子対測定で紐解くハドロン質量の起源

研究課題名（英文）Understanding of hadron mass origin by forward muon pair measurements in high-energy heavy-ion collisions

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） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ハドロン質量とカイラル対称性を直接結びつける実験的証拠を得るために新規シリコンピクセル飛跡検出器（MFT検出器）を開発し、CERN-LHC ALICE実験検出器群に組み込む。MFT検出器と既存のALICEミュオン粒子検出器（MUON検出器）を組み合わせることで、上記検証に感度のある低質量ベクトル中間子質量分布の高精度測定が実現する。MFT検出器のLHC-Run3（2022-）からの運転を目指し、本研究期間中に（1）MFT検出器の最終調整、（2）MFT検出器を用いた飛跡再構成アルゴリズムの開発、（3）実データを用いた既存のMUON検出器の性能評価を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はハドロン物理学の積年の課題である「物質の質量獲得機構の解明」に決着をつける。また、過去最高衝突エネルギーLHC加速器で高温媒質が生成する「物理的中央領域」がビーム軸方向に拡張し、低横運動量ミュオン粒子の粒子識別が可能な「測定技術的前方領域」と重なる。本研究は、このLHC加速器が拓く「衝突点前方ミュオン粒子を用いた中央物理の研究」という新たな探針を開拓する。高エネルギー重イオン衝突実験に新しい視点を与え、物質の創生機構、真空構造、初期宇宙の時空発展の理解を加速させる。

研究成果の概要（英文）：In this study, I develop a new silicon pixel tracking detector (Muon Forward Tracker: MFT) to obtain the experimental evidence that directly links hadron mass and chiral symmetry, and install it into the CERN-LHC ALICE experiment. By combining the MFT and the existing ALICE muon detector (MUON), highly accurate measurement of the low mass vector meson mass distribution that is sensitive to obtain the evidence will be realized. Aiming to operate the MFT from LHC-Run3 (2022-), (1) final commissioning of the MFT, (2) development of track reconstruction algorithm using the MFT, (3) evaluation of the existing MUON performance using LHC-Run2 real data, have been done.

研究分野：高エネルギー原子核実験

キーワード：カイラル対称性 クォーク・グルーオン・プラズマ QGP 高エネルギー原子核衝突実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ハドロン質量の大部分は「カイラル対称性の自発的破れ」によって発現することが量子色力学により示唆される。しかし、ハドロン質量とカイラル対称性を直接結びつける実験的証拠はまだなく、ハドロン物理の重要な未解決課題である。

カイラル対称性とハドロン質量の関係を明らかにする方法として、高温媒質内のハドロン質量測定が知られている。高エネルギー重イオン衝突で生成する高温媒質内では、真空では破れているカイラル対称性が部分的に回復する。その結果、高温媒質内のハドロンは通常の真空と比べて質量が変化すると指摘されている。この検証には低横運動量・低質量ベクトル中間子(ρ , ω , ϕ)のレプトン対崩壊が有効なプローブである。これまでに複数の先行実験が電子対を用いてこの検証に挑み、質量分布が変化していることを確認した。しかし、膨大な背景事象による小さな S/N 比により変化量を定量的に評価出来なかったため、全ての実験がその要因をカイラル対称性と結びつけることが出来なかった。

2. 研究の目的

これらの背景を踏まえ、研究代表者は電子対ではなくミュオン粒子対に着目することで先述の課題を解決できるのではないかと考えた。ミュオン粒子対測定では小さな S/N 比の主な原因となっていた π^0 中間子のダリツ崩壊が無視できるため大幅な背景事象の排除が可能になる。高エネルギー重イオン衝突実験において低横運動量ミュオン粒子を測定できるのは CERN-LHC ALICE 実験のみである。しかし、同実験の既存の検出器だけでは運動量ベクトル分解能が悪く、質量変化の要因に迫ることはできない。

この問題を解決するために研究代表者らは、新型シリコン飛跡検出器(Muon Forward Tracker : MFT)を導入する計画を進めてきた。MFT 検出器と既存の ALICE 実験ミュオン粒子検出器群(MUON 検出器)を組み合わせることで、ミュオン粒子の運動量ベクトル決定制度が格段に向上し、低質量ベクトル中間子質量の高分解能測定が可能になる。また、MFT 検出器と MUON 検出器は新しいデータ読み出し系(Online-Offline : O2)を LHC-Run3 (2022-) から搭載する。これは事象選別トリガを用いることなくデータを連続的に読み出し、大型 FPGA クラスタを用いてオンライン処理する新技術で、これまで(LHC-Run1+2)の 10-100 倍の統計量が LHC-Run3 以降に取得できる。

本研究は、先行研究が観測した低質量ベクトル中間子の質量変化の要因を明らかにし、ハドロン質量とカイラル対称性を直接結びつける実験的証拠を得るために MFT 検出器の開発を進めることが目的である。

3. 研究の方法

本来の研究計画では研究代表者自身が現地(CERN)で検出器の組み立て及びインストール作業を行う予定であったが、Covid-19 の影響により渡航できず、研究計画を変更せざるを得なかった。本研究は MFT 検出器の LHC-Run3 からの運用を目指し、検出器の最終調整及び新しいデータ読み出し系に搭載するソフトウェアの開発を推進する。加えて、既存の MUON 検出器の低質量ベクトル中間子の測定感度を LHC-Run2 で収集した実データを用いて評価する。具体的内容を以下で説明する。

(1) MFT 検出器の最終調整 :

MFT 検出器から読み出された検出器校正データをデータベースへ保存及び読み出しするソフトウェアを実装する。

(2) MFT 検出器を用いた新しい飛跡再構成アルゴリズムの開発 :

新しいミュオン粒子飛跡再構成アルゴリズムを開発する。MFT 検出器で再構成した飛跡と既存の MUON 検出器で再構成した飛跡を組み合わせることでミュオン粒子の粒子同定及び運動量ベクトルの測定を行う。そのため両検出器の飛跡を正しく組み合わせること(マッチング)の純度が精密測定の鍵を握る。本研究では、注目されている機械学習を用いた多変数解析を使用したマッチングアルゴリズムを開発する。

(3) 既存の MUON 検出器を用いた低横運動量・低質量ベクトル中間子の測定可能性の評価 :

LHC-Run2 (2015-2018) で取得した重心系エネルギー 13TeV 陽子+陽子衝突における低質量ベクトル中間子を測定することで、既存の MUON 検出器の低横運動量・低質量ベクトル中間子質量分布測定に対する応答を評価する。

4. 研究成果

(1) MFT 検出器の最終調整 :

現地の研究者の協力により 2020 年度中に MFT 検出器は ALICE 検出器群へインストールできた。研究代表者は検出器の校正に必要なデータをデータベースに保存するソフトウェアを実装した。MFT 検出器から校正ソフトウェアにより得られたノイズマップが期待通りに保存及び読み出せることを確かめた。他の検出器校正パラメータに関しても順次実装と確認を進めていく。

(2) MFT 検出器を用いた新しい飛跡再構成アルゴリズムの開発 :

機械学習を用いた飛跡マッチングアルゴリズムを開発した。機械学習モデルとして学習時間及び分類精度に定評のある勾配ブースティング決定木を採用した。最も大きな質量変化が期待される重心系エネルギー 5.5TeV 鉛鉛衝突の最中心衝突事象(0-10%)の生成粒子種及び生成粒子数を再現したシミュレーションを用いて性能を評価した。本研究で開発した手法と従来のカイ 2 乗

を用いた手法の横運動量に対するマッチング純度の結果を図 1 に示す。機械学習を用いた方法は、従来の方法に比べ全ての横運動量領域でマッチング純度が向上していることが分かる。特に、本研究で重要になる低横運動量領域 ($1\text{GeV}/c$ 以下) において 5 倍以上の純度を得ることに成功した。この結果を日本物理学会第 76 回年次大会で報告した。今後はより多くの学習サンプルを用いてアルゴリズムを最適化し、マッチング純度及び検出効率を向上させる。

(3) 既存の低横運動量・低質量ベクトル中間子の測定可能性の評価：
 LHC-Run2 (2015-2018) で取得した重心系エネルギー 13TeV 陽子+陽子衝突データ約 35pb^{-1} を用いて、低質量領域のミュオン粒子対質量分布を測定した。このデータはミュオン粒子トリガに横運動量閾値が設定されておらず、測定できるミュオン粒子の運動学的領域が LHC-Run3 のそれとほぼ同じである。そのため既存の MUON 検出器が与える低横運動量・低質量ベクトル中間子測定への影響を実データから正確に見積もることができる。図 2 に低横運動量・低質量領域のミュオン粒子対質量分布を示す。低質量ベクトル中間子の質量ピークが確認でき、またシミュレーションで計算した中間子質量分布がデータを再現していることが分かる。横運動量 $0.5\text{GeV}/c$ 以下のミュオン粒子対はハドロン遮蔽体を通すことができないため測定が難しいことが明らかになったが、横運動量 $1\text{GeV}/c$ 程度でも質量変化が期待できるため質量変化測定には十分な性能である。低い横運動量ミュオン粒子対に対する MUON 検出器の応答を正しく評価したことにより、MFT 検出器導入後の解析カットパラメータの最適化や各アルゴリズムの選定などのシミュレーション研究の基礎的情報を得ることができた。この結果を日本物理学会 2020 年秋季大会で報告した。

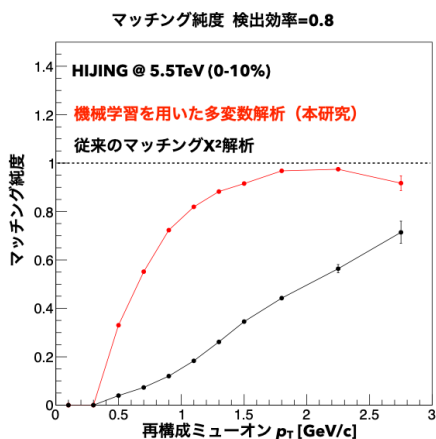


図 1 : マッチング純度の比較

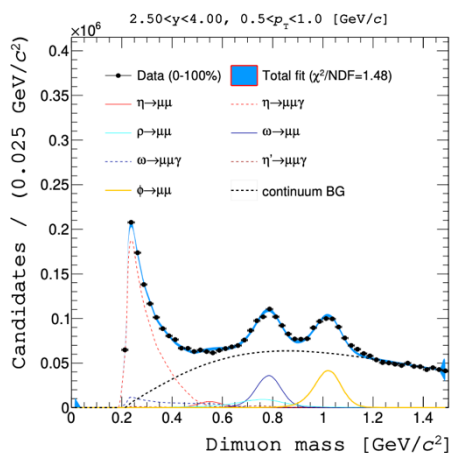


図 2 : MUON 検出器で測定した低横運動量・低質量領域ミュオン粒子対質量分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 2020
2. 論文標題 Coherent photoproduction of ρ^0 vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 035 ~ 035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/jhep06(2020)035	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 2020
2. 論文標題 Higher harmonic non-linear flow modes of charged hadrons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 85 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/jhep05(2020)085	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 805
2. 論文標題 Investigation of the p - p interaction via femtoscopy in pp collisions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135419 ~ 135419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135419	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 805
2. 論文標題 Centrality and transverse momentum dependence of inclusive J/ψ production at midrapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135434 ~ 135434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135434	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 804
2. 論文標題 Longitudinal and azimuthal evolution of two-particle transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135375 ~ 135375
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135375	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 101
2. 論文標題 Production of (anti-)He3 and (anti-)H3 in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044906 ~ 044906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.101.044906	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 2020
2. 論文標題 Underlying event properties in pp collisions at $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 192 ~ 192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/jhep04(2020)192	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 802
2. 論文標題 Evidence of rescattering effect in Pb-Pb collisions at the LHC through production of K(892)0 and $\rho(1020)$ mesons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135225 ~ 135225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135225	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 2020
2. 論文標題 Measurement of electrons from heavy-flavour hadron decays as a function of multiplicity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 077 ~ 077
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/jhep02(2020)077	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	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 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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 804
2. 論文標題 Measurement of electrons from semileptonic heavy-flavour hadron decays at midrapidity in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135377 ~ 135377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135377	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 805
2. 論文標題 Measurement of the (anti-)3He elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135414 ~ 135414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135414	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 101
2. 論文標題 Production of charged pions, kaons, and (anti-)protons in Pb-Pb and inelastic pp 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 1 ~ 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.101.044907	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	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 ~ 034911
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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 2020
2. 論文標題 Studies of J/ψ production at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 041 ~ 041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/jhep02(2020)041	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 A. Shangaraev, S. Yano et al. for the ALICE Collaboration	4. 巻 101
2. 論文標題 Global polarization of hyperons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}= 2.76$ and 5.02 TeV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.101.044611	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 八野哲
2. 発表標題 Measurement of forward low-mass dimuon in small collision system at LHC-ALICE
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会オンライン
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 八野哲
2. 発表標題 Forward muon reconstruction performance with ALICE in Run3
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江島廉, 志垣賢太, 八野哲, 山口頼人
2. 発表標題 前方ミュオン粒子の多重散乱を考慮した ALICE 実験 Run 3 における飛跡再構成
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
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			
フランス	CEA Paris-Saclay			
スイス	CERN			