

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01102

研究課題名(和文)カイラル対称性回復現象の系統的研究

研究課題名(英文)Systematic study of restoration of broken chiral symmetry

研究代表者

青木 和也 (Aoki, Kazuya)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号：70525328

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)：J-PARCにおいてハドロン質量の起源を研究するため、J-PARC E16実験を提案しており、そのためにシリコン飛跡検出器(STS)およびGEM飛跡検出器(GTR)が必要である。本研究ではSTSをGSI研究所のCBM実験と共同開発した。プロトタイプを用いたビーム試験によって基礎試験を行った後、チェンバーや回路の設計・製作また必要な周辺機器を用意した。本番用チェンバーを完成させ、テストビーム実験を行って性能が十分であることを確認し、J-PARC E16実験ヘインストールした。GTRについても製造・インストールを行った。設計強度のビームを用いた試運転を行う事ができたので、解析をすすめる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハドロン質量の起源としてのカイラル対称性の自発的破れは、ハドロン物理の基本的な問題であり実験的検証がなされることは学術的意義が大きい。本研究費によって最内層シリコン検出器が完成してインストールでき、設計の最高機輝度ビーム下での動作確認ができた。また、その周囲を囲むGEM飛跡検出器についてもアクセプタンス増強を行うことができた。この実験の物理実験の採択を得るためには検出器の性能を示す必要があり、その為のデータを取得できことは、大きな一歩である。今後解析を行って検出器の性能を示し、物理実験の採択を得る。

研究成果の概要(英文)：We proposed J-PARC E16 experiment to study the origin of hadron mass. For that purpose we need Silicon Tracking System (STS) and GEM tracker (GTR). In this study we have developed STS with the CBM experiment team at GSI, Germany. We have prepared a prototype STS and evaluated its performance and learned about its characteristics and operations using electron beam. We have designed and built STS chamber and installed the silicon sensor into the chamber. We have evaluated the performance of the STS chamber and confirmed that the performance satisfied our needs. We have installed the chamber into the experimental area. We have also built and installed GTRs. We have performed commission run using proton beams with the highest design intensity. We are analyzing the data.

研究分野：素粒子原子核物理学実験

キーワード：カイラル対称性の自発的破れ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

QCD 真空におけるカイラル対称性の自発的破れが、ハドロンに質量の大部分を与えると考えられているが、実験的検証はえられていない。KEK-PS-E325 実験はその兆候をつかむことができたが統計的に十分でなく、その精度と統計を高めるため、J-PARC E16 実験を提案した。この科研費が採択されたころは、実験自体は J-PARC の実験課題採択委員会においてステージ 1 採択 (物理の重要性が認められる) を得ていたが、ステージ 2 採択 (物理実験遂行の採択) はまだであった。物理実験のステージ 2 採択の為に検出器の技術的達成度、すなわち用意した検出器で確かに物理実験が遂行可能であることを示す必要がある。その為にビームを用いた本実験用ビームラインとそこでの検出器のコミッションングを行うことについて、採択を得た。検出器を部分的に建設、部分的にコミッションングを行ったところであった。

2. 研究の目的

QCD 真空におけるカイラル対称性の自発的破れが、ハドロンに質量の大部分を与えると考えられているが、実験的検証は得られていない状況にある。QCD 真空は密度を変化させると破れた対称性が回復する可能性が示唆されており、それに伴い、ハドロン質量も変化すると考えられる。そこで本研究は、その変化を実験的に検出することで、質量獲得機構を検証する。そのために J-PARC E16 実験を行う。具体的には陽子ビームを原子核標的に照射し、生成するベクトル中間子の不変質量を、電子・陽電子崩壊を用いて再構成する。測定するベクトル中間子質量は、原子核中および外における質量が重なって見えるため、原子核内の中間子質量を知ることができる。この実験の為にベクトル中間子が崩壊してできる電子・陽電子の運動量を測定することと、粒子の種類識別が必要となる。運動量は磁場中の軌跡を検出する事で運動量を測定する飛跡検出器群と、電子識別を行う粒子識別検出器を建設する。高統計を得る為に、大きなアクセプタンスが必要である。ベクトル中間子を測定するためには、飛跡検出器と粒子識別装置をセットで建設する必要があるが、飛跡検出器のみを部分的に増強したとしても、粒子多重度によって事象選択を行うことができ、より系統的な研究が可能となる。また、将来に向けたアクセプタンス増強への布石にもなる。そのために、飛跡検出器部だけでも本研究費を用いてさらなるアクセプタンスの増強を行い、より系統的な研究を可能にすることが目的である。

3. 研究の方法

J-PARC E16 実験のスペクトロメーターは全て巨大な二極電磁石の中にインストールされる設計で、最内層から順にシリコン飛跡検出器(STS)・GEM 飛跡検出器(GTR)・ハドロンラインド型チェレンコフ検出器(HBD)・鉛ガラス検出器(LG)からなる。水平 30 度・垂直 30 度を覆う単位をモジュールとよび、第一目標が 8 モジュール製造、最終目標は 26 モジュールの設計としてある。

まず本研究では、最内層検出器であるシリコン検出器(STS)を開発・製造した。研究開発当時インストールしていたシリコン検出器は、借りた物で 6 モジュールしかなかった。また、古いもので量産はできず、第一目標の 8 モジュールを達成できる見込みがなかった。そこでドイツ GSI 研究所で準備が進められている CBM 実験と共同で、新しいシリコン検出器を開発することとした。第一目標の 8 モジュールを達成することに加えて、さらに本研究費を用いて 2 モジュール追加することとした。また、GTR についても同様にアクセプタンス増強のために、本研究費を用いて 2 モジュール GTR(100mm 角および 200mm 角を 2 セット)の製造・増強を行うこととした。

4. 研究成果

大きく分けて、シリコン検出器 (STS) と、GEM 飛跡検出器 (GTR) に関する成果にわけられる。この順で説明する。

4.1 STS プロトタイプの性能評価

まず基本的な動作を理解する為にプロトタイプのシリコン検出器を用意した。まず実験室におけるテストを行い、2021 年 12 月には東北大学・電子光物理学研究センターにおいて電子ビームを用いた動作確認・性能評価を行った。時間分解能については、5.6nsec という実験に十分な分解能が得られたが、検出効率は 1/4 程度で非常に悪かった。想定の三倍以上のノイズに苦しめられたことと、及びチェンバーの設計不良によって高電圧を十分に印可できなかったことが原因であった。後日設計の改善を行って高電圧印加を可能にし、配線の見直しやノイズフィルターの追加によってノイズをおさえる事に成功し、オペレーションや回路について理解を深めた。

4.2 STS チェンバーや本体設計・製造・インストール

シリコン検出器を J-PARC E16 実験にインストールする為のチェンバー設計を行った。図 1 左が、完成した設計を三次元図であらわしたものである。最内層で場所の制約が厳しい中、センサー本体とフロントエンド読み出し回路までを光・ノイズ遮蔽性能をもってサポートするチェンバーが必要であった。一度チェンバー設計を完成させた。しかしながら、センサーとフロントエンド回路を結ぶアナログ信号伝達ケーブルがウクライナ製なのであるが、戦争の影響でカスタムメイド不可能となってしまった。当該ケーブルはたわみがノイズの原因となるため長さまで厳密に設計したものだ。そこで既製造ケーブルから選定して配置を見直し、対応できるようにした。同時に、ビームの直接照射を回避しつつ光・ノイズ遮蔽性を担保したビーム用開口部の設計・製造を行った。

同時に GSI では、図 2 に示すようなセンサーセットの組み立てを行い、完成品を日本に輸送した。このセットは、シリコンセンサー、フロントエンド回路およびそれらをつなぐマイクロケーブル、そしてセンサー自体を機械的にサポートするカーボンファイバーのラダーからなる。10 セットの製造及び日本への輸送を完了した。

日本へ輸送後の単体調査・試験の結果、配線のはずれなどが見つかった。それらは日本における簡単な修理ののち、動作確認を行うことができ、充分低いノイズレベルが得られていることを確認した。それら 10 センサーを日本で設計・製造したチェンバーにインストールし、E16 STS チェンバーを完成させた。(図 1 右) また回路の冷却が必要であり、そのための冷却チラーとその配管を準備・実験エリアに設置した。

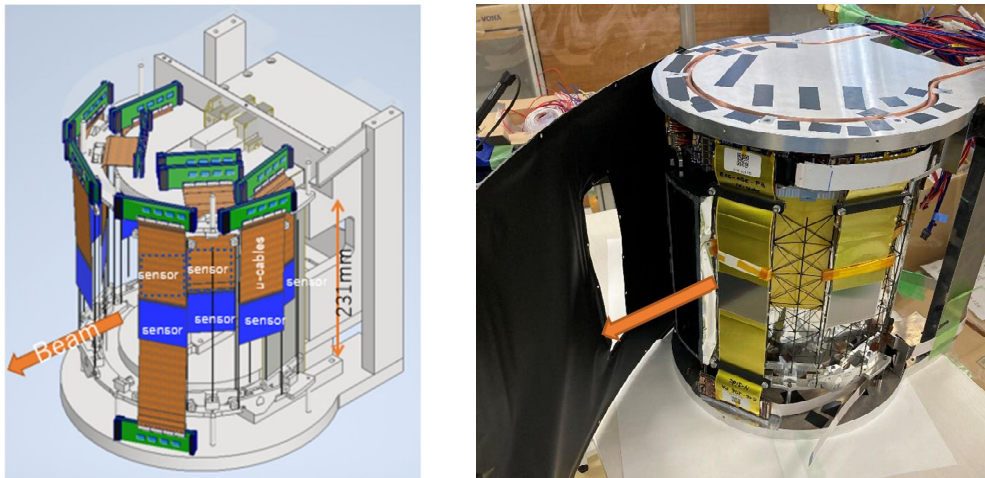


図 1 左)チェンバーの設計図。青部がセンサーで、そこから銅色のマイクロケーブルが出ており、緑色のフロントエンド読み出し回路まで接続されている。右)インストール後のチェンバー写真。オレンジの矢印はビームの方向を表している。外側カバーを外して中を露出した状態の写真。

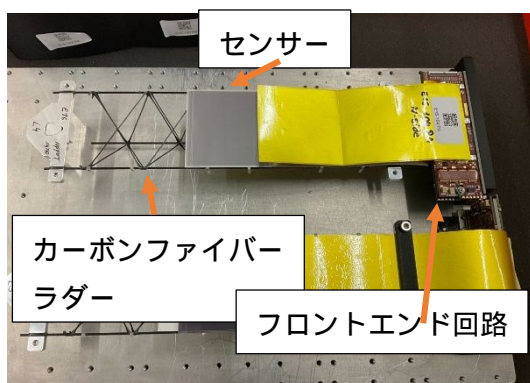


図 2 GSI において製造したセンサーと読み出し回路およびカーボンファイバーラダーのセット。マイクロケーブルは、黄色のシールドにかくれて見えない。

4.3 STS 読み出し回路

図 3 は完成した E16 STS の回路の図及び回路群の実物写真である。センサーから出力され

たアナログ信号は、フロントエンド回路によってデジタル化され、LVDS 信号として FFC(フレキシブル・フラット・ケーブル)によって外部に送信される。デジタル信号を受け取った GBTxEMU ボードにおいてデータはシリアル化され、光ファイバーケーブルで PCI express ボードである GERI ボードに送られ、PC にデータが記録される。

CBM 実験の元の設計では LVDS 信号は FFC によって 60cm 伝送するものであるが、E16 の制限で 10m 程度延長する必要があった。そこで信号劣化の少ないケーブルを調査して Cat6a ケーブルを選定し、FFC から Cat6a への変換基板 (FFC-Ethernet adaptor) 及び信号増幅中継器 (LVDS Repeater) を設計・製作することで信号の延長を実現した。

またこのシステムはもともとストリーミング読み出し用に開発されたものであるが、J-PARC E16 トリガー情報の取得と、オンラインのトリガータイミングマッチングを行ってデータを大幅に削減するシステムを完成させることができた。

Readout electronics of STS for J-PARC E16

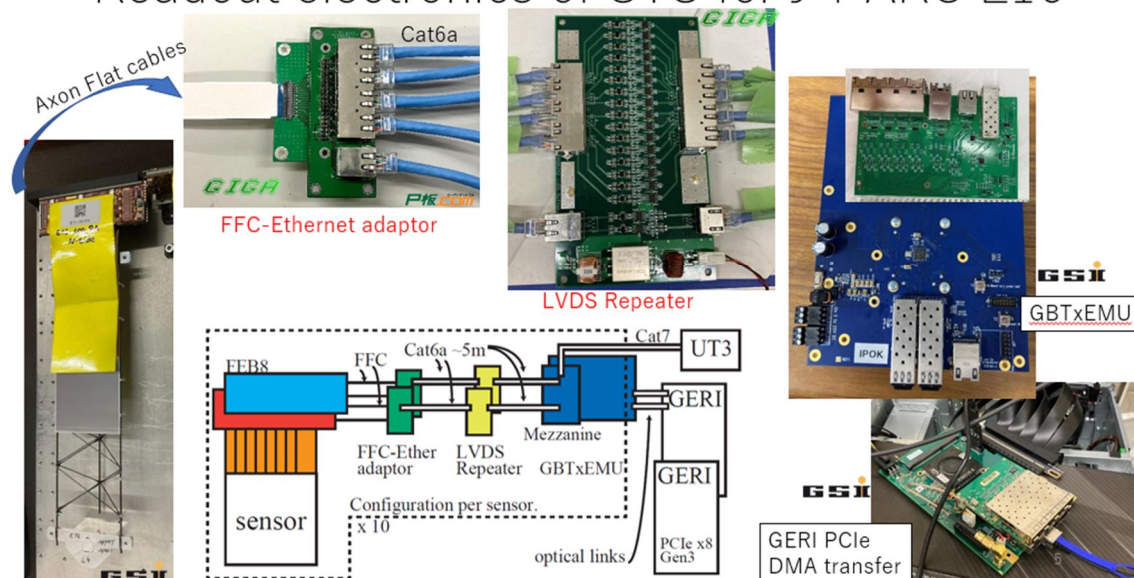


図3 E16 STS(シリコン検出器)の読み出し回路。中央下部が読み出し回路の schematic である。センサーからのアナログ信号はフロントエンド回路 (FEB8) でデジタル化され、FFC (フレキシブル・フラット・ケーブル) で 60cm ほど送信されたあと、変換ボードで Cat6a のケーブルに変換され、LVDS リピーターで信号増幅したのち、GBTxEMU ボードに送られる。ここでデータがシリアル化され、PCIe ボードである GERI ボードを用いて PC にデータとして読み出される。周りは実物の写真である。

4.4 STS のビームを用いたコミッショニング、及び PF-AR におけるテスト実験

E16 実験エリアヘインストールしてむかえた 2023 年 6 月のコミッショニング実験は、加速器の事情により 10 時間で終了してしまい、十分な性能評価ができなかった。そこで 2023 年 11 月、PF-AR において電子ビームを用いた性能評価、データ収集システムのテストを行った。

その結果 4.8nsec という十分な時間分解能と、99%以上という高い検出効率を得られることがわかった。しかし同時に、斜め入射に対して効率が著しく悪化し 60%となってしまう事が判明した。センサーからのアナログ信号はフロントエンド回路で 2 つにわけられ、一方から ADC を取得、他方から TDC を得る構造となっている。ADC の方の閾値は問題なかったが、TDC の方の閾値設定が高すぎた事が原因であることがわかった。ストリップ幅が 58um と細いため、斜め入射だと信号が多くのストリップに分散し、信号強度が減少してしまう。一般的なシリコン検出器と異なりセルフトリガー仕様で動作させなければならない為、閾値の設定は肝要である。自由に生信号を見ることができず、また TDC 用信号は性格上ノイズがのりやすいが、制約の中で適切な閾値を設定する手法を確立した。

テスト実験中に新たに発生した問題として、シリコンにバイアス電圧をかけると LVDS デジタル通信が不安定になるという現象がある。これについては LVDS 伝送用の信号線が完全にフローティングであったことに着目し、信号線を抵抗を介してグランドに落とすことによって通信の安定性を向上させることができた。これら改善を施し、シリコン検出器を再び E16 実験エリアヘインストールした。研究期間終了後ではあるが、2024 年 4 月-6 月間にデータ収集を行い、

コミッショニングランは成功裏に終わった。GTR との相関も見えている。今後解析をすすめて結果をまとめ、物理実験のステージ2 採択を得て、物理データ取得を行う。

4.5 GTR の増強

また、同時に荷電粒子へのアクセプタンスを拡張するための、内側から2・3層目のトラッキング検出器であるGTRについて、部品調達組み立て、信号確認を行い、2モジュール分インストールを行った(図4)。2023年6月のコミッショニングランにおいてデータ収集を行った。今後解析を進める。

4.6 まとめ

これまで述べたように、J-PARC E16 飛跡検出器の製造・増設を行い、コミッショニングランを成功裏に終わらせることができた。解析の結果、J-PARC E16 実験の準備が整っていることを示し、実験課題審査委員会で物理実験についてのステージ2 採択を勝ち取る為の重要な一歩を達成できた。



図4 インストールしたGTR

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kouki Kanno, Kazuya Aoki, et al	4. 巻 18
2. 論文標題 Commissioning of a hadron blind detector for dielectron measurement in pA reactions at J-PARC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C06021: 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/18/06/C06021	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 -

1. 著者名 Aoki Kazuya, et al	4. 巻 64
2. 論文標題 Experimental Study of In-medium Spectral Change of Vector Mesons at J-PARC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 63:1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-023-01828-7	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 Murakami T.N., Aoki K. et al.	4. 巻 1058
2. 論文標題 Construction of gas electron multiplier tracker for the J-PARC E16 experiment	5. 発行年 2024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 168817: 1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2023.168817	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 -

1. 著者名 Park In Woo, Sako Hiroyuki, Aoki Kazuya, Gubler Philipp, Lee Su Houng	4. 巻 107
2. 論文標題 Disentangling longitudinal and transverse modes of the phi meson through dilepton and kaon decays	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074033-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.074033	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. Nakasuga, K. Aoki, et al.	4. 巻 1041
2. 論文標題 Commissioning of the electron identification system for Dilepton measurement in pA collisions at J-PARC	5. 発行年 2022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 167335 ~ 167335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.167335	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 K. Ozawa, K. Aoki et al.	4. 巻 142
2. 論文標題 Towards the Measurement of the Mass Modifications of Vector Mesons in a Finite Density Matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica A	6. 最初と最後の頁 399 ~ 404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12693/APhysPoIA.142.399	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 M. Ichikawa, K. Aoki et al.	4. 巻 16
2. 論文標題 Commissioning Runs of J-PARC E16 Experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement	6. 最初と最後の頁 1-A143.1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/aphyspolbsupp.16.1-a143	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. Takahashi, K. Aoki, et al	4. 巻 68
2. 論文標題 Data Acquisition System in the First Commissioning Run of the J-PARC E16 Experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1907 ~ 1911
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2021.3087635	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 K. Aoki
2. 発表標題 Experimental study of in-medium spectral change of vector mesons at J-PARC
3. 学会等名 Reimei Workshop: Polarization phenomena and Lorentz symmetry violation in dense matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Aoki
2. 発表標題 Experimental study of in-medium spectral change of vector mesons in nuclear medium at J-PARC
3. 学会等名 Baryons 2022 (The 2022 International Conference on the Structure of Baryons) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Aoki
2. 発表標題 Experimental investigation of in-medium spectral change of vector mesons at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC ハドロン研究会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田蓮斗、青木和也 他
2. 発表標題 J-PARC E16実験に向けたシリコンストリップ検出器の性能評価及び開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山口佳奈子、青木和也 他
2. 発表標題 J-PARC E16実験で用いるシリコンストリップ検出器のための読み出し回路開発
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023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			
ドイツ	GSI	フランクフルト大学		
ポーランド	ワルシャワ工科大学			