

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間	：2020年度～2024年度
課題番号	：20H05647
研究課題名	：高輝度陽子ビームによる原子核中での明確な中間子質量変化の実験的 確立
研究代表者氏名（ローマ字）	：小沢 恭一郎（OZAWA Kyoichiro）
所属研究機関・部局・職	：高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号	：20323496

研究の概要：

陽子や中性子などのハドロンの質量は、周囲の媒質との関係で決まる動的な性質であると考えられている。本研究では、媒質と動的質量の関係を明らかにするために、有限密度媒質である原子核中で中間子の質量変化の明確な測定を行う。実験は、東海村 J-PARC ハドロン実験施設の新設陽子ビームラインで進められ、本研究課題によりビームラインと検出器の性能を飛躍的に強化し、高統計での測定を実施する。

研究分野：原子核物理

キーワード：ハドロン質量の起源、カイラル対称性、有限密度 QCD 媒質

1. 研究開始当初の背景

標準的なクォーク模型では、陽子はクォーク3個から構成される。しかし、その質量は単純なクォーク質量の和では理解できない。陽子が $938\text{MeV}/c^2$ の質量を持つのにに対して、その内部にあるクォークは、元々はヒッグス機構によりたかだか数 MeV/c^2 程度の質量しか持たないからである。この質量差は、カイラル対称性の自発的破れにより陽子が動的な質量を獲得するためと理解されている。

この考え方は広く受け入れられた考え方であり、この機構を検証するために、これまでに様々な実験的な試みがなされている。しかし、実験的には、ハドロン質量が環境によって動的に変化するという直接的な証拠は得られていない。有限密度・温度を持つ媒質中におけるハドロンの質量変化を実験的に明確に測定することは、ハドロン物理学の大きな課題の一つである。

2. 研究の目的

クォークを多数含む有限密度媒質である原子核において、 ϕ 中間子の質量が明確に変化していることを示すことが本研究の目的となる。

原子核中の ϕ 中間子の質量は、電子・陽電子崩壊を用いて測定されるが、右図で示すように、本研究で測定が期待される質量分布では、自由空間中での ϕ 中間子質量の位置とは異なる位置に原子核中での ϕ 中間子質量が新たなピークとして出現する。この新たなピークを捉えることが ϕ 中間子の質量が原子核中で明確に変化している証拠となる。

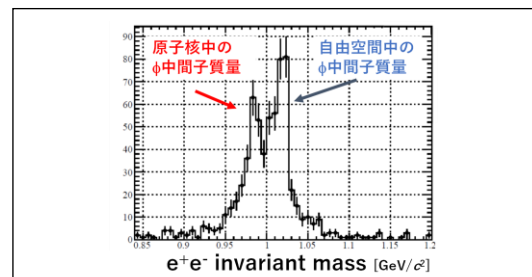


図1 期待される質量分布

3. 研究の方法

本研究課題では、J-PARC ハドロン実験施設の一次陽子ビームラインと実験装置を完成し、先行実験で得た統計の30倍、73000個の ϕ 中間子崩壊事象を収集する。

実験では、J-PARC MR 加速器からの高強度一次ビーム (30 GeV, 最大 0.5×10^{10} protons per second) を、原子核標的 (放射長で最大 0.5%、鉛標的 30 μm) に照射し ϕ 中間子を生成する。生成された ϕ 中間子の崩壊による電子・陽電子対を大立体角の検出器で測定する。

高統計測定の実現を目指し高強度ビームを用いるため、反応率は 1×10^7 Hz となり、高計数率に対応した検出器が必要である。そのために、GEM (ガス電子増幅器) を用いた検出器を採用した。研究代表者を中心に開発した GEM 飛跡検出器と電子同定用のハドロンプラインド検出器 (HBD、ガスチェレンコフ検出器の一種) は、本研究で目指す測定に対して十分な性能を持つ。

さらに、本研究では、過酷なビーム状況に対応するため、一次陽子ビームの高品質化、高バックグラウンド状況に対応するための新たな飛跡検出器の導入、電子同定装置の増強を実施し、上記の質量変化の測定を目指す。

4. これまでの成果

本研究課題の中心となる物理データの本格収集は、2023年1月に予定されている。そのため、実験に用いるビームと検出器の準備を、2022年11月完成を目標に進めている。具体的には、研究計画に記述した以下の3点の課題を進めてきた。

- 一次陽子ビームの高品質化
- 高バックグラウンド状況に対応するための新たな飛跡検出器の導入
- 電子同定装置の増強

一次陽子ビームの高品質化

実験に用いる一次陽子ビームのビーム状況を診断するために、各種のモニター装置を本研究課題の中で準備し、2021年2月及び6月に測定を実施した。本研究課題では、様々なビーム光学に対してビーム状況を測定した。ビーム起因のバックグラウンドヒットの影響は、検出器の稼働限界内に収まっていた。これらの測定を通じて、実験を実施する際の光学系を最適化した。研究の中で、加速器からのビーム取り出しの時間構造に起因するバックグラウンド事象が観測されたので、次のデータ収集に向けて対策を施した。

高バックグラウンド状況に対応するための新たな飛跡検出器の導入

ビームラインの性能向上は進んでいるが、当初の計画どおりの十分なビーム量を得るためには、新たな飛跡検出器の導入が必須である。研究計画に記述したシリコン検出器の導入をドイツ・FAIR-CBM 実験と協力し進めている。

本研究課題の採択後から詳細設計を開始し、プロトタイプ製作に取り組んだ。2021年12月に東北大学電子光物理学研究センターにおいてプロトタイプを用いたビームテストを行った。テストの結果、想定のパフォーマンスが得られた。本実験に最適な検出器・読み出し回路の配置を実現したフレームの設計は完了し、2022年度に製作・インストールを実施予定である。

電子同定装置の増強

本実験の電子同定装置であるハドロンブラインド電子検出器(HBD, ガスチェレンコフ検出器の一種)、後段:鉛ガラス電磁カロリメータを、それぞれ2モジュール製作する予定である。鉛ガラス電磁カロリメータに関しては、既に製作を完了し、実験装置へと据え付けられている。ハドロンブラインド電子検出器(HBD)に関しては、GEMフォイルやCsI蒸着フォイルなどの検出器部品の製作を進めており、2022年前半に組み立てを実施し、2022年秋に実験装置へとインストールの予定である。

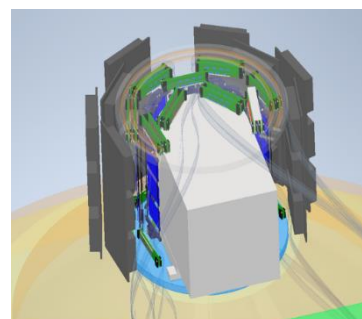
5. 今後の計画

引き続き、シリコン検出器とハドロンブラインド電子検出器の製作を進める。シリコン検出器は、プロトタイプのテストは終了しているため、設置用のフレームを年度前半に製作し、2022年10月に実験装置にインストールする。右図に示すような概念図を元に、既に部品設計まで終了し、年度当初から製作を開始する予定である。ハドロンブラインド電子検出器は、物品の調達完了しており、物品の動作確認テスト、組み立てを2022年10月までに実施する。

2023年1月には、ビーム調整および物理データの収集を予定している。収集したデータの解析は、順次、進めていく。

2023年度には、さらに、データ収集を実施する。2ヶ月のデータ収集を2回、計4ヶ月程度のビームタイムを予定している。

2024年度には、結果を論文にまとめ、各種研究会、国際会議などで発表を行う。



図：シリコン検出器の配置図

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

T.N. Takahashi, K. Aoki, S. Ashikaga, W.C. Chang, E. Hamada, R. Honda, M. Ichikawa, M. Ikeno, S. Kajikawa, K. Kanno, D. Kawama, T. Kondo, C.S. Lin, C.H. Lin, Y. Morino, T.N. Murakami, W. Nakai, S. Nakasuga, M. Naruki, Y. Obara, K. Ozawa, H. Sako, S. Sato, H. Sendai, K. Suzuki, Y. Takaura, M. Tanaka, T. Uchida, S. Yokkaichi, "Data Acquisition System in the First Commissioning Run of the J-PARC E16 Experiment," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 68, no. 8, pp. 1907-1911, Aug. 2021, doi: 10.1109/TNS.2021.3087635.

7. ホームページ等

<http://high-p.kek.jp>

<https://ribf.riken.jp/~yokkaich/E16/E16-index.html>