

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14499

研究課題名（和文）WASA-FRS実験による 中間子原子核の分光

研究課題名（英文）Spectroscopy experiment of eta'-mesic nuclei with WASA detector at GSI-FRS

研究代表者

田中 良樹 (Tanaka, Yoshiki)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：00868440

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、 η' 中間子の原子核密度中での性質を調べることを目指し、 η' 中間子と原子核の束縛状態（ η' 中間子原子核）を探索する分光実験を行った。分光感度を先行研究よりも大幅に向上するために、 $^{12}\text{C}(p, dp)$ 反応の準排他的測定による新たな実験手法を考案し、この実現のため、大立体角のWASA検出器と高分解能スペクトロメータFRSを組み合わせた新たな実験セットアップを開発した。特に本課題では、FRSでの粒子識別システムを開発した。2022年に、ドイツGSI重イオン研究所にて2.5GeVの陽子ビームを用いて、 η' 中間子原子核の分光実験を実施し、予定した統計量のデータを取得することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中間子と原子核の束縛状態の研究は、量子色力学の真空の構造とハドロンの質量の起源を探る上で重要な意味を持つ。しかし、 η' 中間子のような質量の比較的大きい中間子の束縛状態については、大量のバックグラウンド過程の混入により、高分解能かつ高感度での分光実験を行うことがこれまで困難であった。本研究で開発したWASA-FRS実験セットアップでは、高分解能スペクトロメータFRSと大立体角検出器WASAを組み合わせることで、高分解能測定とシグナル・バックグラウンド過程の選別を同時に行うことを可能とした。これにより、 η' 中間子を含む様々な中間子と原子核の束縛状態を系統的に研究する道を拓くことができる。

研究成果の概要（英文）：We performed spectroscopy of η' -meson nucleus bound states aiming at investigating η' -meson properties at finite nuclear density. In order to achieve significantly improved experimental sensitivity compared to previous studies, we proposed a novel experimental method with a semi-exclusive measurement of the $^{12}\text{C}(p, dp)$ reaction. We developed a new experimental setup combining the high-resolution spectrometer FRS with the large-acceptance WASA detector system to realize the proposed experiment. In particular, the particle identification system of the FRS has been developed within this project. In 2022, we successfully conducted the spectroscopic experiment of the η' -meson nucleus bound states using a 2.5 GeV proton beam at the GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research in Germany.

研究分野：ハドロン物理

キーワード： η' 中間子 中間子原子核 ハドロン QCD真空 カイラル対称性 飛行時間検出器 イオン光学系

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) では、真空状態がクォークやグルーオンの凝縮した構造を持っている (対称性が自発的に破れている) ことが、ハドロンの質量等の性質を理解する上で重要な役割を持つと考えられている。特に、擬スカラー中間子の 9 重項 (η, K, η' , 中間子) は、QCD の対称性の様相と密接に関係しているため、様々な対称性の状況下でこれらの中間子の性質を調べることが、QCD の真空の構造やハドロンの質量起源を探るために重要な情報をもたらすと期待されている。

そのための実験的な研究手段として、高温 (~ 1 兆度) や高密度 (\sim 原子核密度) 環境下での中間子の性質を測るという手法が有効である。このような環境下では、真空中では自発的に破れているカイラル対称性が部分的に回復する。このことを利用して、対称性の変化に応じて中間子の性質がどのように変化するかを実験的に調べることができる。特に、中間子と原子核の束縛状態は、中間子と原子核が有限の重なりを持つという特徴があり、原子核密度中での中間子の情報を実験的に引き出すための重要なプローブとなる。

現在まで、中間子や K 中間子と原子核の束縛状態の研究は、理化学研究所 RIBF や J-PARC 等の施設で精力的に進められてきた。一方で、中間子や中間子についても包括的に、原子核との束縛状態を調べる研究が進展することが待ち望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、中間子の原子核密度中での性質変化の情報を実験的に得ることを目指し、中間子と原子核の束縛状態 (中間子原子核) を探索する分光実験を、後述する新たな実験手法を用いて実施する。

中間子は擬スカラー中間子 9 重項の中で例外的に大きな質量を持ち、その起源は、量子異常効果による軸性 U(1) 対称性の破れとカイラル対称性の自発的破れの 2 つに起因すると考えられている。中間子が原子核密度中に置かれた場合、有限密度中でのカイラル対称性の部分的回復を反映して、中間子の質量が減少することが予想されている。この場合、中間子と原子核との間に引力ポテンシャルが生じることになり、中間子原子核の束縛状態の存在が予想される。本研究は、中間子原子核を実験的に初観測すること、それにより、有限密度中での中間子の質量変化を検証し、QCD 真空における軸性 U(1) 対称性とカイラル対称性についての実験的な知見を得ることを目指している。

3. 研究の方法

本研究では、中間子原子核を探索する分光実験を、 $^{12}\text{C}(p,dp)$ 反応の準排他的測定という新たな実験手法を用いて実施する。この手法の特徴は、 $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応で中間子原子核を生成し、前方に放出される重陽子の高精度測定から中間子原子核のエネルギー準位を得ると同時に、他のバックグラウンド過程に起因する重陽子の放出事象を棄却するために、中間子原子核が生成された場合に特徴的な陽子などの崩壊粒子を検出するということである。この手法を用いることで、過去に行われた研究 [Y.K.Tanaka et al., Phys Rev. Lett. 117, 202501 (2016)] よりも大幅に向上した実験感度での分光を実現することができる。

この新手法の実験を実現するために、2.5 GeV の陽子ビームを供給できるドイツ GSI 重イオン研究所において、大立体角をカバーする WASA 検出器群 (図 1) と前方高分解能スペクトロメータ FRS を組み合わせた実験セットアップを開発する (図 2)。GSI 研究所の SIS-18 加速器から供給される 2.5 GeV の陽子ビームを、WASA 検出器内部に設置した炭素標的に入射し、 $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応で前方に放出される重陽子の運動量を、FRS スペクトロメータを用いて高分解能で

測定する。同時に、中間子原子核の崩壊から放出されると予想される 500 MeV 程度のエネルギーを持つ陽子を WASA 検出器で識別することで、中間子原子核の励起エネルギースペクトルにおけるシグナル/バックグラウンド比を大幅に向上する。

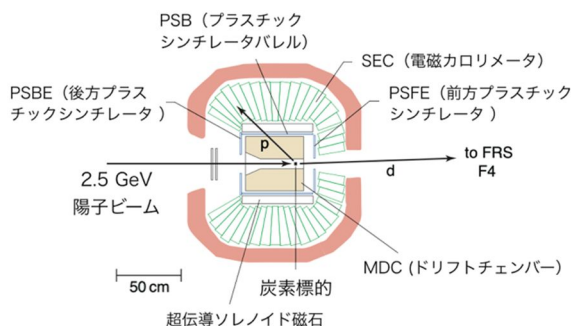


図 1: WASA 検出器群の概略図

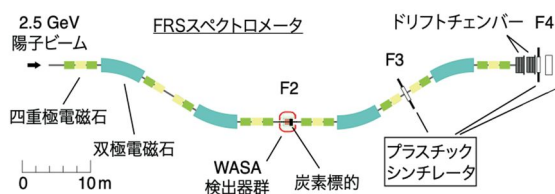


図 2: WASA-FRS 実験セットアップ

4. 研究成果

本研究では、ドイツ GSI 研究所において WASA-FRS 実験のための各種検出器、データ読み出し回路系の開発を 2019 年から 2021 年にかけて行った。WASA-FRS 実験全体の開発を進めると同時に、特に本課題では、FRS スペクトロメータにおける粒子識別システムの構築を行った。2022 年には、システム全体を統合して WASA-FRS 実験セットアップを完成させ、このセットアップを用いて、中間子原子核を探索する分光実験を実施した。実験後には、データの解析を進めている。以下、各々の成果についてまとめる。

(1) WASA-FRS 実験セットアップ全体の開発

図 1 に示される WASA 検出器は、GSI 研究所へ移設される前にはユーリッヒ研究所において使用されていたが、FRS と組み合わせて WASA-FRS 実験を実施するためには、以下のような様々な開発が必要であった。2019 年から 2021 年にかけて GSI 研究所に滞在し、これらの開発を遂行した。

- ・飛跡検出器であるドリフトチェンバー (MDC) およびエネルギー測定のための電磁カロリメータ (SEC) について、データ収集回路系の刷新を行い、WASA-FRS 実験での使用に十分なレート耐性と読み出し速度を達成した。
- ・時間およびエネルギー損失測定のための WASA 内のプラスチックシンチレータ (PSB, PSBE, PSFE) について、時間分解能の向上を目指し、検出器全体を新規開発した。その結果、WASA-FRS 実験のために十分な時間分解能 ~ 80 ps を達成した。

[R.Sekiya et al., Nucl. Instr. Meth.A 1034, 166745 (2022)]

- ・超伝導ソレノイド磁石の冷却およびモニターシステムの刷新を行い、4 K までの冷却と 1 T での励磁に成功した。

(2) FRS 粒子識別システムの構築

本実験では、FRS スペクトロメータの下流焦点面 F4 に、測定対象である重陽子だけでなく、その約 200 倍の量の陽子がバックグラウンドとして到達する。そのため、効率良くデータ収集を行うためには、データ収集システムのトリガー段階でまず大部分の陽子を棄却する必要がある。そして、トリガー段階で棄却されずに取得データに混入した陽子イベントについては、事後のデータ解析の段階で棄却するという 2 段階の粒子識別システムを構築した。

トリガー段階での粒子識別では、反応が起きてからデータ収集回路にトリガーをかけるまでの約 100 ns 以内に識別を行う必要がある。FRS スペクトロメータ内で同じ運動量を持つ陽子と

重陽子の速度が異なることを利用し、F3 と F4 の位置にあるプラスチックシンチレータの信号の時間差を適切に調整した上で論理積を取ることで、99.5%の陽子を棄却できるトリガー回路を開発した。

このトリガー回路で除去できずに取得データに混入する陽子事象は、F3 のシンチレータに偶発的なバックグラウンド粒子のヒットを持ち、F3 と F4 間の飛行時間が重陽子であるかのような値を持つため、これらのシンチレータを見る限りでは完全な粒子の識別することができない。そこで、F4 の限られた実験エリア内で、2.5 m の距離での飛行時間測定を行うアレイ状のプラスチックシンチレータを MPPC を用いて新規開発した。

(3) 中間子原子核を探索する分光実験の実施と解析

2021-2022 年には、それまで個別に開発、準備をしていた検出器群を統合し、WASA-FRS 実験セットアップを完成させた。2022 年 1 月に陽子ビームを用いてシステム全体の調整を行い、2 月には、中間子原子核を探索する分光実験を実施した。初回の実験として予定していた統計量（重陽子数 $\sim 10^7$ ）のデータ取得に成功した。3 月には、WASA-FRS セットアップを用いた 2 つ目の実験である重イオンビームを用いたハイパー核分光実験のデータ取得も実施した。[Y. K. Tanaka et al., Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. 16 4-A27(2023)]

詳細なデータ解析は進行中であるが、これまでの解析の結果、本課題で開発した FRS スペクトロメータにおける粒子識別検出器については、当初の設計性能(時間分解能 50 ps)を達成できていることを確認した。これにより、最終的なデータ解析に用いる重陽子の事象を、バックグラウンドの混入無く、完全に識別することに成功した。今後、FRS 側の解析と WASA 検出器側の解析を合わせて得られる中間子原子核の励起エネルギースペクトルについて解析を進めることで、中間子原子核の存在とその性質についての研究が進められると期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 R. Sekiya, V. Drozd, Y. K. Tanaka, K. Itahashi, H. Fujioka, S.Y. Matsumoto, T.R. Saito, K. Suzuki	4. 巻 1034
2. 論文標題 Time resolution and high-counting rate performance of plastic scintillation counter with multiple MPPC readout	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A	6. 最初と最後の頁 166745
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.166745	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 Y. K. Tanaka et al. (WASA-FRS/Super-FRS Experiment Collaboration)	4. 巻 16
2. 論文標題 WASA-FRS Experiments in FAIR Phase-0 at GSI	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement	6. 最初と最後の頁 4-A27.1, 10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5506/APhysPolBSuppl.16.4-A27	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 Y. K. Tanaka et al.	4. 巻 1643
2. 論文標題 Search for π^- -mesic nuclei using (p,d) reaction with FRS/Super-FRS at GSI/FAIR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012181 ~ 012181
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1643/1/012181	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.R. Saito et al.	4. 巻 542
2. 論文標題 The WASA-FRS project at GSI and its perspective	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 22 ~ 25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nimb.2023.05.042	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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Y. K. Tanaka for WASA-FRS and Super-FRS Experiment Collaboration
2. 発表標題 Search for Λ -mesic nuclei in (p,dp) reaction at GSI/FAI
3. 学会等名 4th Jagiellonian Symposium on Advances in Particle Physics and Medicine, Krakow, Poland (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. K. Tanaka for WASA-FRS and Super-FRS Experiment Collaboration
2. 発表標題 WASA-FRS experiments in FAIR Phase-0 at GSI
3. 学会等名 The Zakopane Conference on Nuclear Physics 2022, Zakopane, Poland (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. K. Tanaka for WASA-FRS and Super-FRS Experiment Collaboration
2. 発表標題 Status of the recent WASA-FRS experiments at GSI/FAIR
3. 学会等名 EMMI Workshop “Meson and Hyperon Interactions with Nuclei”, Kitzbuehel, Austria (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. K. Tanaka et al.
2. 発表標題 Status of WASA-FRS experiments in 2022
3. 学会等名 NUSTAR Week 2021, GSI, Darmstadt, Germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. K. Tanaka
2. 発表標題 Meson nucleus bound states studied with high-resolution missing-mass spectroscopy
3. 学会等名 17th International Workshop on Meson Physics (MESON 2023) (招待講演) (国際学会)
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(重イオン研究所)	Giessen University	