

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01242

研究課題名（和文） 核分光実験によるQCD真空へのアプローチ

研究課題名（英文）Spectroscopy of eta'-mesic nuclei as an approach to study of QCD vacuum

研究代表者

板橋 健太 (Itahashi, Kenta)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員

研究者番号：30322093

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）：ドイツ重イオン研究所にて実施した 核分光実験(実験課題番号 S490)を実施した実験は約5日間のビームタイムで行われ、毎秒一億個程度の 2.5GeV 陽子ビームを炭素標的に照射し、 $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応により前方に放出される重陽子と、標的周囲に放出される粒子を大立体角検出器WASAでコインシデンス計測することで行った。現在、前方の破碎核分離装置 FRS と WASA のデータを結合した解析を行っており、解析の状況については国際会議を含む研究会等で発表し、プロシーディングの形で報告している。解析が終わり次第、論文執筆を行い、投稿、出版の予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

擬スカラー 中間子を原子核という超高密度物質中で分光することで、物質質量の起源に関する知見を得ることをめざす。中間子の質量は素粒子物理における重要な問題、問題として捉えられており、その解決が待たれている。本研究では、陽子ビームを使った 中間子原子核の生成・分光実験を実施し、当初の予定通りの統計量のデータを得る事に成功した。2024/5現在解析を行っており、終了次第論文執筆、投稿を行う。

研究成果の概要（英文）：The nuclear spectroscopy experiment (Experimental Task No. S490) was carried out at the German Heavy Ion Research Institute (GSI) with a beam time of about 5 days. A beam of about 100 million 2.5 GeV protons per second was irradiated onto a carbon target. Deuterons emitted forward by the $^{12}\text{C}(p,d)$ reaction were measured in the forward spectrometer in coincidence with the particles emitted around the target measured by a large solid angle detector WASA. The analysis is in progress, and the status of the analysis is being reported in the form of proceedings and presentations at research conferences. As soon as the analysis is completed, a paper will be written, submitted and published.

研究分野：ハドロン実験

キーワード：量子異常 軸性U(1)対称性

1. 研究開始当初の背景

一般に“何もない状態”として思い浮かべる真空は空なのか。現代の理論物理から見た真空は、ヒッグスやクォーク、グルーオンが凝縮して空ではない。ヒッグス粒子の発見は、電弱相互作用からみた一つの回答を提示するが、複雑な真空の構造を理解するには、多方面からのアプローチが必要だ。その一つが強い相互作用 (QCD) から見た真空へのアプローチである。中間子にはさまざまな種類があり、これらの性質を系統的に研究することが重要である。一方、それぞれの中間子は QCD 真空の異なる構造・性質を探るプローブとしての役割を果たす。なかでも同種の中間子と比べて異常に大きい質量を持つ η' の質量は、カイラル対称性(=クォークのつくる真空の構造)と軸性 U(1) 対称性(=グルーオンのつくる真空の構造)に由来する。このような理論研究の進展に対して、実験からのフィードバックが強く待ち望まれている。

2. 研究の目的

本研究は η' -原子核の束縛状態生成・分光実験により、真空構造の実験データに基づく解明をめざす。研究の目的は、 η' の核内束縛状態(= η' 核)を生成・分光することである。ピークは η' が原子核中に(準)安定な量子状態として存在することを意味する。スペクトルを解析して位置と幅を決定し、 η' の核密度中での質量と寿命を直接導出する。質量を $1 \text{ MeV}/c^2$ オーダーの精度で決定できれば、理論へのフィードバックとして大きなインパクトがあり、真空の構造と対称性を研究する上で貴重な情報を与える。

3. 研究の方法

分光実験(S490 実験)は、 $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応を用いてドイツ国立重イオン研究所で行う。実験が実施可能なのは、良質のビームを供給する加速器と高分解能で自由度の高い独自のスペクトロメータを持つ同研究所だけである。申請者は代表者として既に先行的な実験を 2014 年に実施しており [1,2]、そこで得た経験と知見を踏まえ、大きく発展させた研究を行う。

S490 実験では、S/B 比を以下の手法により劇的に改善する。 η' 核が生成した後の崩壊チャンネルに着目すると、主なチャンネルは、最新の理論により予想される η' が核子二個に吸収されるチャンネル約 40%である。このチャンネルは、他と比べてはるかに高エネルギーの陽子を放出する。この陽子を標識化することで、 η' 核の生成・崩壊事象を選択できる。核内輸送モデルによるシミュレーションで評価すると、以下で述べる実験セットアップを用いることで、約 100 倍の S/B 比改善が見込まれる。シミュレーションによると 10 日間の計測により η' 核生成によるピークをクリアに確認できる。陽子標識化しない場合と比べて、約 100 倍 S/B 比が改善するため、4 日間の計測でも、ピークが同定できる。

このような標識化した測定、準排他的測定のため、独ユーリッヒ研究所で使用されていた大型検出器 WASA を GSI 研究所に移設し、必要な検出器を新規開発して追加して使用する。WASA は、最大磁場 1 T の超伝導ソレノイド電磁石を中心に、ストローチューブ荷電粒子飛跡検出器 (MDC)、バレル状プラスチックシンチレータ (PSB)、CsI 電磁カロリメータ等から構成されるが、PSB は旧式の PMT で片側から読み出す仕様となっており、実験の要求性能を満たしていなかった。そのため下記の通り、本補助金により新規開発した検出器で置き換える。また、読み出し系は全て刷新する。これらの大規模な研究開発事業を研究期間内に行い、実験実施、データの解析を行う。

4. 研究成果

研究成果は主に以下の 2 点である。

- 新規開発する PSB 検出器について、必要な時間分解能、エネルギー損失分解能、磁場中での運用、耐放射線性能等、多角的に検討を進め、本補助金を用いて部材等を購入して実機を作成した。
- 世界で初めて $^{12}\text{C}(p,d)$ 反応による質量欠損分光測定を、陽子放出事象のコインシデンス下で行い、準排他的測定をによる η' 核探索実験を行った。

PSB の開発においては、レート耐性、時間分解能、パイルアップ（重畳）事象の判別、ノイズ耐性、温度依存性等様々な見地から検討を行った。チェックソース、宇宙線によるテストを経て、ユーリッヒ研究所 COSY 施設で陽子ビームを用いたビームテスト実験に実地に近い条件での評価を行った。光検出器が MPPC の場合と PMT の場合の比較検討を行い、MPPC が優位である事がわかった。シンチレータの位置、角度等を変えながら時間分解能の安定性を調べるとともに、光検出器として、MPPC を使用しパラメータや増幅器を変化させながら計測し、最適化を行った。MPPC の計数率に対するゲイン変動も 2 MHz 程度までは、10%程度に抑制することができ、PMT と同様であった。2 MHz を超えた領域では、増幅器のパラメータ等に依存するが、ゲインの落ち込みが大きいことが分かった。以上から MPPC 読み出しによるシンチレータの性能は概ね必要性能を満たすことがわかり、実機の製作を開始した。

図 1 に示した実機は、46 本の $550 \times 38 \times 8 \text{ mm}^3$ の EJ-230(Eljen Technology)シンチレータの両側に、それぞれ 3 個の MPPC S13360-6050CS(浜松ホトニクス)を接着した構成となっている。ケーブル等は全て非磁性の部材で構成されている。MPPC の電源供給機能を兼ねるアンプは、文献[3]にあるアンプに独自の改良を施したものを新規に設計し製作した。データの読み出し系については、従来型の QDC/TDC でデータを取得する場合と、波形デジタイザによる取得を比較した。従来型の場合データの容量が小さく、データ収集系や解析に係る付加が小さくて済むという利点がある



図 1 PSB の実機

が、パイルアップ事象やベースラインのドリフトに対応するのが容易でない。波形デジタイザを使用した場合には、データ取得量が大幅に増加するという問題点があるが、検討の結果、時間分解能を確保しながらパイルアップ事象を抑制するために、波形デジタイザの採用を決定した。波形デジタイザとしては、既存のデータ取得装置との整合性から、V1742 型 VME モジュール(CAEN)を選定した。ハードウェアの CFD ディスクリミネータと同等の機構を持つ解析プログラムを作成してテスト実験のデータを評価したところ、2.5 GHz での波形取得により必要とされる時間分解能より十分良い約 80ps()を達成することが分かった。

PSB の支持構造を新規に設計製作した。支持構造は、内側にストローチューブ検出器(MDC)、外側には超伝導ソレノイドが配置される形でインストールされる。そのため動径方向のクリアランスは合計数ミリ程度しかない。また、支持構造の部材は、非磁性であることが必要である。自重による撓みを見積もり、数値計算により精密に評価することで、強度と厚みや形状を最適化し、実機の設計・製作を行った。実機の製作は、国内(理研)で行い、実際に撓み等の計測を行うと同時に、インストール方法、遮光方法等の確認を行った。また、多数のプラスチックカウンタに同時に電圧を印加し、読み出す方法、ノイズのレベル、データ収集系等の確認と最適化を行い、本番環境でのインストールの準備を行った。

2021 年から現地ドイツ重イオン研究所(GSI)にて、スペクトロメータとして使用する破砕核分離装置 FRS の F2 焦点面に、WASA 検出器のインストールを開始した。COVID-19 の影響により現地への渡航が厳しく制限され、様々な作業に大きな支障を来したが、2021 年一杯かけてインストールを終えることができた。2022/1 のコミッショニングを経て、本研究の主要な目的である S490 実験を 2022/2 月に実施した。研究代表者は実験代表者として現地において全体を統括した。約一週間、陽子ビームを用い $^{12}\text{C}(p,dp)$ 反応による準排他的測定による本実験を行った。加速器やソレノイド冷却系の問題、ロシアのウクライナ侵攻に伴う、ヘリウムガスの入手困難などの問題が発生したものの、検出器群は順調に動作し、最終的にプロポーザルの見積もりに対して 106% の統計量という、高品質・高統計のデータ取得に成功した。

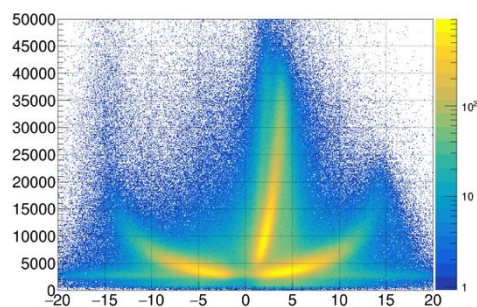


図 2 WASA で検出した荷電粒子の運動量の逆数(横軸)とシンチレータ中のエネルギー損失(縦軸)。中間子や陽子が粒子識別されている。

2022/4 以降データ解析を行っており、図 2 にあるように FRS + WASA 検出器のシステムが当初計画通りの性能を発揮しており、物理成果を得るのに十分な統計量を確保していることが分かっている。2024/6 現在、準排他的測定スペクトル導出に向けた解析を継続している。

< 引用文献 >

[1]Y.K. Tanaka et al., Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 202501

[2]Y.K. Tanaka et al., Phys. Rev. C. 97 (2018) 015202

[3]P.W. Cattaneo et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 61 (5) (2014) 2657-2666

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 E. Liu et al.	4. 巻 1064
2. 論文標題 A compact start time counter using plastic scintillators readout with MPPC arrays for the WASA-FRS HypHI 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 169384 ~ 169384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2024.169384	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 T. Nishi, K. Itahashi et al.	4. 巻 19
2. 論文標題 Chiral symmetry restoration at high matter density observed in pionic atoms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 788-793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-023-02001-x	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.	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 Phys. Polon. Supp.	6. 最初と最後の頁 4-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/APhysPoIBSupp.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 T.R. Saito et al.	4. 巻 2586
2. 論文標題 Studies of three-and four-body hypernuclei with heavy-ion beams, nuclear emulsions and machine learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 12148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2586/1/012148	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 Nucl. Instrum. Meth. B	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

1. 著者名 C. Rappold et al.	4. 巻 290
2. 論文標題 Study of light hypernuclei in Europe: The hypertriton and Λ puzzles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conf.	6. 最初と最後の頁 9007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202329009007	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 R. Sekiya et al.	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 Instruments and Methods in Physics Research Section 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.	4. 巻 1643
2. 論文標題 Search for Λ -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 12181
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 Tanaka Y.K. et al.,	4. 巻 51
2. 論文標題 Spectroscopy of α -mesic Nuclei with WASA at GSI/FAIR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B	6. 最初と最後の頁 39 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/APhysPolB.51.39	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6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

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

1. 発表者名 関屋涼平
2. 発表標題 "GSIにおけるWASA検出器を用いたハイパー核分光及びeta'中間子原子核探索実験のためのプラスチックシンチレータバレルの開発(IV)",
3. 学会等名 第76回日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関屋涼平
2. 発表標題 GSIにおけるWASA検出器を用いたハイパー核分光実験及びeta'中間子原子核探索実験のためのプラスチックシンチレータバレルの開発(III)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenta Itahashi
2. 発表標題 Mesons in nuclei: review and perspectives
3. 学会等名 3rd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Sekiya
2. 発表標題 Search for eta'-mesic nuclei in $^{12}\text{C}(p,dp)$ reaction with the WASA detector at GSI-FRS
3. 学会等名 Hadron 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Web for etaprime http://meson.riken.jp/etaprime

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1件

国際研究集会 Hadron in Nucleus 2020	開催年 2021年～2021年
----------------------------------	--------------------

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	重イオン研究所	ユーリッヒ研究所		