

令和 6 年 9 月 14 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01115

研究課題名（和文）高輝度ガンマ線を用いた原子核中の中間子の質量変化の研究

研究課題名（英文）Study of the mass modification of the rho meson in the nuclei using the high luminosity gamma beam

研究代表者

新山 雅之（NIYAMA, Masayuki）

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：90455361

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）：核子の質量の起源は真空中に凝縮したクォーク凝縮であるとされ、クォーク凝縮は環境の密度などによって変化し、ハドロンの質量も変化すると予想されている。しかし、密度変化によるハドロンの質量変化については確証が得られていない。本研究では、スプリングエイトで光子ビームを用いて（ロー）中間子の原子核中での質量を測定することを最終目標としている。そのために電磁力ロリメータ検出器を強化し、電子・陽電子を識別するための準備を整えた。原子核中で中間子が崩壊した際に生じる電子・陽電子対の不変質量の測定を進めてゆくことで、原子核中での中間子質量を明らかにするプロセスを確立できると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒッグス粒子の発見によって素粒子の質量の起源は広く知られるようになってきた。しかし、身の回りの物質の質量の起源であるハドロンの質量が強い相互作用によって生成されていることは社会的には認知されていない。本研究の最終目標である原子核中でのハドロンの質量の研究を進めることで、身の回りの質量の起源について認知度を上げることができる。本研究開始前には光子ビームでの実験を再検証できる施設は世界的に存在しなかったが、本研究によって検証実験の準備を進めることができた。

研究成果の概要（英文）：The origin of the mass of nucleons, which constitute the bulk of the mass of matter, is attributed to quark condensation, a phenomenon where quarks and antiquarks pair up and condense in the vacuum. It is hypothesized that quark condensation varies with environmental factors such as temperature and density, leading to corresponding changes in the mass of hadrons such as nucleons. However, experimental results regarding the change in hadron mass due to environmental variations are inconclusive, with some experiments indicating changes and others showing no change. In this study, we developed a detector at the SPring-8 facility in western Harima, Hyogo Prefecture, to measure the mass of the rho meson in atomic nuclei using a photon beam. By measuring the invariant mass of particles resulting from the decay of rho mesons within atomic nuclei, we aim to establish a process that will clarify the mass of rho mesons in nuclear environments.

研究分野：原子核物理

キーワード：原子核物理 ハドロンの物理 ハドロンの質量の起源

### 1. 研究開始当初の背景

物質の質量を担う核子の質量の起源はクォークと反クォークが対になって真空中に凝縮したクォーク凝縮であるとされている。クォーク凝縮は温度や密度など環境によって変化し、それに伴い核子などのハドロンの質量も変化すると予想される。このようなハドロンの質量変化を測定できれば、クォーク凝縮が物質の質量の起源であると実験で示すことができる。しかし、環境の変化によるハドロンの質量変化については、国内の高エネルギー加速器研究機構での陽子ビームを用いた実験で (ロー)中間子の質量変化を測定したという実験結果と、米国のジェファソン研究所での光子ビームを用いた測定での質量変化がないという実験結果とがあり、決着がついていない。ジェファソン研究所での光子ビームを用いた測定では 中間子が原子核中で崩壊したのか、原子核外で崩壊したのかを区別しておらず、原子核外で崩壊した 中間子を測定していた場合、質量変化は測定されなくても不思議ではない。 中間子の原子核中での質量を測定するためには、 中間子が原子核中で生成・崩壊したことを同定する必要がある。さらに、その崩壊で生じる電子と陽電子の運動量を測定し、不変質量分布を得ることが必要だ。光子ビームを用いた実験施設でこのような測定が可能な施設は世界中になく、ジェファソン研究所での実験結果を検証することはできない状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究の最終目標は光子ビームを用いて 中間子を原子核中で生成し、崩壊した電子・陽電子対の不変質量分布を測定することで、原子核中での 中間子の質量変化の問題について決着をつけることである。そのために原子核中での 中間子生成の同定と崩壊で生じる電子・陽電子の測定手法の確立を最初の目標としている。

### 3. 研究の方法

本研究は兵庫県スプリングエイトの高輝度ガンマ線ビームライン(LEPS2)で行う。原子核標的に高エネルギーガンマ線を照射し、 中間子を原子核中で生成する。LEPS2 ではソレノイド電磁石を中心とする荷電粒子飛跡検出器と電磁カロリメーターの一部が稼働している(図 1)。本研究ではこの電磁カロリメーターを増強し、電子や陽電子のエネルギーを測定可能にする。運動量測定とエネルギー測定を合わせることで、電子や陽電子の速さを求めることができ、パイ中間子や陽子などのハドロンと区別することができるようになる。さらに、 中間子生成時に原子核中から弾き出された陽子を前方飛跡検出器で測定することで、 中間子が原子核中で生成されたことを同定する。このような原子核中で生成された 中間子の崩壊で生じる電子・陽電子対の不変質量分布を測定することで、原子核中での 中間子の質量の問題に新たなデータを提供することができる。

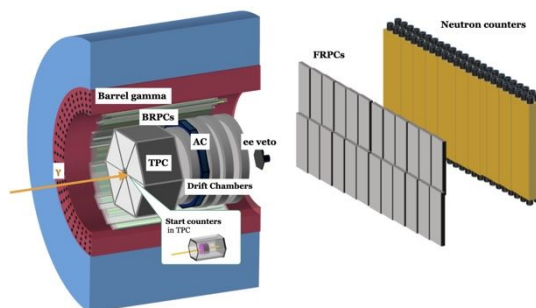


図 1 : LEPS2 ソレノイドスペクトロメータのセットアップ図。

### 4. 研究成果

2021 年度に、鉛・プラスチックのサンドイッチ型電磁カロリメーターでの電子(陽電子)の識別能力の向上のため信号読み出し回路の増強を行った。電子(陽電子)がカロリメーターに与えるエネルギーを電荷量として測定するための回路系を設置し、放射長を 1.5 倍に増強した。これによって、電子(陽電子)をカロリメーター中に静止させ運動エネルギーを測定できるようになった。図 2 が本研究で開発した電磁カロリメーターの 1 セグメントの模式図である。

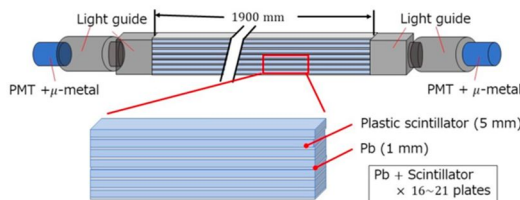


図 2 : 電磁カロリメーターの 1 セグメントの模式図。

また、電磁カロリメーターの準備と並行して前方に散乱した陽子の飛行時間を測定するための高抵抗板検出器を開発し、その性能を評価した。2022 年度、新設した電磁カロリメーターに宇宙線やガンマ線ビームからの荷電粒子を照射し、信号を測定した。本研究の電磁カロリメーターは動径方向に 3 層、包囲角方向に 48 セグメントに分割されており、合計で 144 セグメント存在する。電子や陽電子を識別するためには、カロリメーターの各セグメントからの信号が均一であることや、カロリメーター中でのヒット位置を得ることが必要である。宇宙線やガンマ線ビームで生成したハドロンのなかから高速の荷電粒子を選択し、カロリメーター中でのエネルギー損失の分布を測定した。得られた分布から、各セグメントの光電子増倍管の高電圧を調整し信号増

倍率を一様にした。さらに、荷電粒子の飛跡検出器で求めた飛跡を電磁カロリメーターまで延長し、カロリメーターでのヒット位置とカロリメーターの信号の相関を測定した(図3)。このデータを用いることで、カロリメーターの信号から粒子のヒット位置を得ることができるようになった。

2021年度に、鉛・プラスチックのサンドイッチ型電磁カロリメーターでの電子(陽電子)の識別能力の向上のため信号読み出し回路の増強を行なった。電子(陽電子)がカロリメーターに与えるエネルギーを電荷量として測定するための回路系を設置し、放射長を1.5倍に増強した。これによって、電子(陽電子)をカロリメーター中に静止させ運動エネルギーを測定できるようになった。また、並行して前方に散乱した陽子の飛行時間を測定するための高抵抗板検出器を開発し、その性能を評価した。本研究の状況について雑誌論文で報告した。

2022年度、新設した電磁カロリメーターに宇宙線やガンマ線ビームからの荷電粒子を照射し、信号を測定した。本研究の電磁カロリメーターは動径方向に3層、包囲角方向に48セグメントに分割されており、合計で144セグメント存在する。電子や陽電子を識別するためには、カロリメーターの各セグメントからの信号が均一であることや、カロリメーター中でのヒット位置を得ることが必要である。宇宙線やガンマ線ビームで生成したハドロンの中から高速の荷電粒子を選択し、カロリメーター中でのエネルギー損失の分布を測定した。各セグメントの光電子増倍管の高電圧を調整し信号増倍率を一様にした。また、本研究と密接に関係している中間子の光生成について論文雑誌で報告した。

2023年度、電磁カロリメーターを増強したソレノイドスペクトロメーターでガンマ線ビームを用いてデータ取得を行なった。水素標的と炭素でできた標的セルを用いて陽子や炭素原子核からの中間子生成を測定することができるようになった。荷電粒子の運動量測定は確認できており、電子・陽電子のエネルギー測定データの解析を進めており、粒子識別を可能にする見込みである。原子核中で中間子が崩壊した際に生じる粒子の不変質量の測定を進めてゆくことで、原子核中での中間子質量を明らかにするプロセスを確立できると考えている。本研究の状況について、国際会議や日本物理学会などで報告した。

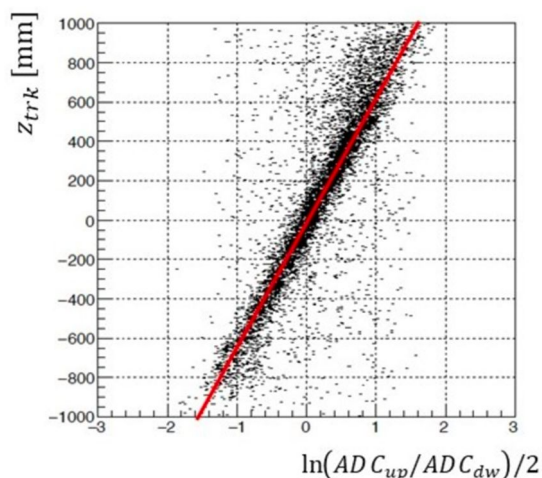


図3：飛跡検出器で求めたヒット位置とカロリメーターの信号の相関図。

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 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Hashimoto, M. Niiyama et al.	4. 巻 106
2. 論文標題 Differential cross sections and photon beam asymmetries of photoproduction on the proton at $E = 1.3\text{-}2.4$ GeV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.035201	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 M. Niiyama	4. 巻 62
2. 論文標題 Recent Results of Few Body System in the Hadron Physics with Photon Beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 4-99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01688-z	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 N. Muramatsu, M. Niiyama et al.	4. 巻 107
2. 論文標題 First measurement of differential cross sections and photon beam asymmetries for photoproduction of the $f_0(980)$ meson decaying into $0\ 0$ at $E < 2.4$ GeV	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW C	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.L042201	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. Hyodo, M. Niiyama	4. 巻 120
2. 論文標題 QCD and the strange baryon spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Prog. Part. Nucl. Phys.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnnp.2021.103868	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Nakamura, M. Sumihama, A. Tokiyasu, M. Yosoi, R. Kobayakawa, K. Watanabe, M. Niiyama
2. 発表標題 SPring-8/LEPS2実験におけるパレルガンマ検出器の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R.Kobayakawa, M.Yosoi, S.Y.Ryu, T.H,Nam, K.Watanabe, M.Niiyama, M.Sumihama, A.Tokiyasu, C.Yoshida
2. 発表標題 Performance of LEPS2 Solenoid spectrometer (1)
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Niiyama
2. 発表標題 Status and Prospects of the LEPS2 Solenoid Spectrometer
3. 学会等名 The 20th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure (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〕

-

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
---------	---------