

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H04986
研究課題名：エータプライム中間子の原子核内光生成で紐解くハドロン質量の起源
研究代表者氏名（ローマ字）：村松 憲仁（MURAMATSU Norihito）
所属研究機関・部局・職：東北大学・電子光物理学研究センター・准教授
研究者番号：40397766

研究の概要：

本研究は、カイラル対称性の自発的破れによるハドロン粒子の質量獲得機構を実証し定量的に理解することを目的としている。カイラル対称性が部分的に回復する超高密度の原子核内で η' 中間子を光生成し、2個のガンマ線へ崩壊する事象の不変質量分布から核内 η' 中間子の姿を直接測定する。 η' 中間子の質量が原子核内で減る現象を定量測定するため、高統計・低バックグラウンドの次世代実験を推進する。

研究分野：素粒子・原子核実験（ハドロン物理）

キーワード：ハドロン質量の起源、 η' 中間子、原子核内光生成、カイラル対称性、 $U_A(1)$ 量子異常

1．研究開始当初の背景

ハドロン粒子の質量は、それを構成するクォークの質量和で説明できず、宇宙進化における真空の性質変化（カイラル対称性の自発的破れ、カイラル相転移）によって生じると考えられている。この質量獲得機構を実証して相転移の秩序変数等を定量的に理解するため、カイラル対称性が部分的に回復すると予想される超高密度環境の原子核内部でハドロン粒子を生成し、その質量が減る現象を実験的に捉えることが重要な課題となっている。本研究は、 $U_A(1)$ 量子異常によって異常に大きな質量を持ち、ハドロン有効模型で原子核内における質量が40-150 MeV/c²減少すると理論計算されている η' 中間子に着目する。

2．研究の目的

本研究の目的は、原子核内で2個のガンマ線へ崩壊する η' 中間子を我々が独自に開発した大立体角高分解能電磁カロリメータ BGOegg で検出し、崩壊前の不変質量の分布形状から η' 中間子の原子核内における姿を直接測定することである。これにより、カイラル対称性の自発的破れによる質量獲得機構の実験的証拠を得ると同時に、原子核内での質量減少量・質量幅・崩壊分岐比の高精度定量測定を目指す。現時点ではハドロン有効模型に依存して核内質量減少量の理論予想に幅があり、本研究による定量測定が成功すれば有効ラグランジアンに強い制限を与えると共にハドロン描像の構築に大きく寄与する。本研究の開始前に SPring-8 LEPS2 ビームラインで推進してきた第一期実験においては、炭素原子核標的に高エネルギー光子ビームを照射して光生成した核内 η' 中間子を解析し、統計的な有意度は高くはないものの質量減少の兆候を観測している。本研究は、核内で質量減少する信号の感度を飛躍的に高めた第二期次世代実験を推進して、第一期実験で観測された信号の兆候を確かめること及び質量減少量等の定量測定を通してハドロン構造の理解を深めることを最終的な目標としている。

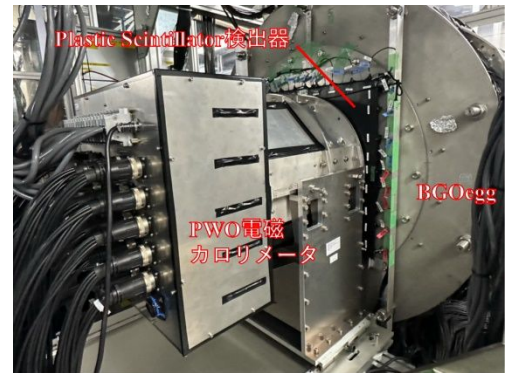
3．研究の方法

本研究は、SPring-8 の LEPS2 ビームラインにおいて第一期実験の既存セットアップをアップグレードして進める。レーザーコンプトン散乱で用いる外部同期型高出力紫外パルスレーザーを整備し、SPring-8 の電子ビームバンチのタイミングに合わせて入射することにより散乱効率を上げて光子ビームを大強度化する。 η' 中間子を核内光生成する標的には、これまで使用してきた炭素と比べて原子核半径が1.8倍大きい銅を用いる。単位面積当りの核内核子数を増やした上で標的厚を薄くすることができ、データの高統計化や質量分解能の向上が望める。更に、標的周りを覆う電磁カロリメータ系の拡張整備を進める。現時点では、極角24～144度の領域を1320本のBGO結晶で組み上げた電磁カロリメータ BGOegg で覆っており、1 GeV のガンマ線に対して世界最高のエネルギー分解能1.3%を達成している。本研究では、BGOegg の前方領域にPWO結晶252本で構成された別の既存電磁カロリメータを追加する。最終的にはこのPWO電磁カロリメータを拡張してほぼ全立体角を覆う。これにより、2個のガンマ線の不変質量分布を組む際にバックグラウンドとして混入する多重 π 中間子生成を大幅に低減できるようになる。不変質量分布の解析では、核内崩壊の割合が増える低運動量領域を選び、質量分布形状の変化を高運動量領域と比較する。

4．これまでの成果

第二期実験に向けたアップグレードが順調に進んでいる。写真に示す通り、大立体角電磁カロリメータ BGOegg の前方不感領域に別実験で使用実績のある PWO 電磁カロリメータと新規に製作した荷電判定用

プラスチック・シンチレータ検出器をインストールした。VME規格をベースとした新データ収集システムの整備も終え、既存の旧システムとの統合にも成功している。また、光子ビームの大強度化のため、新型の高出力パルスレーザーの導入も終えている。アップグレードした実験セットアップを用いて断続的にビームテストを行い、検出器系の調整をほぼ終えている。次年度に予定する物理データ収集の準備が整っており、第一期実験の結果を高統計で確認できる。また、これらの実験セットアップでデータ収集を進めると並行して、極角 $16^\circ \sim 24^\circ$ に残る電磁カロリメータ検出器系の不感領域を埋めるため、PWO結晶 150本を追加して前方PWO電磁カロリメータを拡張する準備も進行している。東北大学電子光物理学研究センターの陽電子ビームラインにおいて、使用するPWO結晶のサンプルに対するビーム照射試験を行った。エネルギー分解能が $1 \text{ GeV}/c$ 換算で 3%程度であり、計画通りの性能を持つことを確認できた。



5. 今後の計画

今後は、大立体角電磁カロリメータ BGOegg と既存の前方 PWO 電磁カロリメータを組み合わせた第一段階の実験アップグレードによる物理データ収集を進める。約 5 M 個 / 秒に大強度化した光子ビームを単位面積当りの核内核子数が 1.8 倍になった銅原子核標的に照射して数か月の実験を行う。データ取得後は直ちに較正と解析の作業を行う。また、銅標的を用いて得られる不変質量分布の比較サンプルとして、液体水素標的によるデータ収集も続けて行う。並行して、前方 PWO 電磁カロリメータの拡張に使用する PWO 結晶や光電子増倍管、高電圧印可装置、検出器フレーム、架台などを調達・準備し、第一段階の実験終了後に拡張検出器系を組み立てる。最終的に不感領域を無くした実験セットアップで銅原子核標的によるデータ収集を 1 年程度行い、 η' 中間子が核内で 2 個のガンマ線へ崩壊する割合が想定範囲の下限に近い場合でも高い統計的有意度で質量減少信号を検出できるようにする。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- “First measurement of differential cross sections and photon beam asymmetries for photoproduction of the $f_0(980)$ meson decaying into $\pi^0\pi^0$ at $E_\gamma < 2.4 \text{ GeV}$ ”, N. Muramatsu, S.K. Wang, Q.H. He, ..., T. Hotta, ..., M. Miyabe, ..., H. Shimizu, ..., A. Tokiyasu, et al. (LEPS2/BGOegg Collab.), Phys. Rev. C 107, L042201 (2023) [査読有].
- “Differential cross sections and photon beam asymmetries of η photoproduction on the proton at $E_\gamma = 1.3\text{--}2.4 \text{ GeV}$ ”, T. Hashimoto, T. Nam, N. Muramatsu, ..., T. Hotta, ..., M. Miyabe, ..., H. Shimizu, ..., A. Tokiyasu, et al. (LEPS2/BGOegg Collab.), Phys. Rev. C 106, 035201-1 ~ 15 (2022) [査読有].
- “SPRING-8 LEPS2 beamline: A facility to produce a multi-GeV photon beam via laser Compton scattering”, N. Muramatsu, M. Yosoi, T. Yorita, Y. Ohashi, ..., T. Hotta, ..., M. Miyabe, ..., H. Shimizu, ..., A.O. Tokiyasu, et al., Nucl. Instrum. Methods A 1033, 166677-1 ~ 14 (2022) [査読有].
- “First Missing Mass Spectroscopy of the $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaction with Simultaneous Measurement of an η' Meson”, N. Tomida and LEPS2/BGOegg Collab., Acta Phys. Pol. A 142, 356–360 (2022) [査読有].
- “Differential cross sections and photon beam asymmetries of η photoproduction on the proton in LEPS2/BGOegg experiment”, T. Hashimoto for the LEPS2/BGOegg Collab., JPS Conf. Proc. 37, 021001-1 ~ 5 (2022) [査読有].
- “Search for η' -meson bound nuclei using a GeV photon beam”, N. Muramatsu and N. Tomida, SPring-8/SACLA Research Frontiers 2020, 72–73 (2021) [査読有].
- “Direct measurement of the η' mass inside a copper nucleus at the BGOegg Phase-II experiment”, N. Muramatsu, M. Miyabe, A. Tokiyasu, Y. Matsumura, H. Shimizu, and T. Hotta, ELPH Annu. Rep. 2020, 53–59 (2021) [査読無].
- “BGOegg 実験における η' 中間子質量の核媒質効果の研究”, 松村裕二, 清水肇, 村松憲仁, 岡部雅大, 時安敦史, 橋本敏和, 宮部学, 他 LEPS2 BGOegg Collab., 日本物理学会 2023 年春季大会, オンライン, 2023 年 3 月 22–25 日.
- “Studies of the η' meson mass in nuclei with the BGOegg calorimeter”, M. Miyabe, EMMI workshop on Meson and Hyperon Interactions with Nuclei, Kitzbühel (Austria), 14–16 Sep. 2022.
- “核媒質効果の精密研究のための LEPS2/BGOegg 実験アップグレード計画”, 時安敦史, 村松憲仁, 宮部学, 清水肇, 松村裕二, 堀田智明, 日本物理学会 第 77 回年次大会, オンライン, 2022 年 3 月 15–19 日.
- “Studies of the in-medium eta-prime mass in the SPring-8 LEPS2/BGOegg experiment”, N. Muramatsu, 2nd J-PARC HEF-ex Workshop, Online, 16–18 Feb. 2022.

7. ホームページ等

<https://www1.lns.tohoku.ac.jp/~bgoegg/>