

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06007

研究課題名（和文）'中間子光生成による対称性と質量の起源の研究

研究課題名（英文）Study of the origin of the nucleon mass via photo-production of eta-prime meson

研究代表者

新山 雅之 (NIIYAMA, Masayuki)

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：90455361

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 16,800,000円

研究成果の概要（和文）：物質の質量を担う核子の質量の起源はクォーク凝縮であるとされていますが、実験的な確証は得られていません。近年、原子核中でクォーク凝縮が減少すると中間子の質量が非常に軽くなり、中間子を束縛した原子核が存在すると予想されてきました。このような原子核を発見できれば、核子等のハドロンの質量生成の起源がカイラル対称性の破れたという証拠となります。本研究では、中間子束縛核の2陽子崩壊探査のための検出器を開発し、並行して中間子束縛核の中間子・陽子崩壊を探査しました。信号は見えず中間子と原子核の間の引力が非常に強いという可能性は低い事が分かりました。この結果を論文にまとめ公表しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果の1つとして大面積の高時間分解能検出器の開発が挙げられます。この検出器は素粒子・原子核の様々な実験で利用できます。さらに、ミュオン透視などの素粒子・原子核分野以外の幅広い分野での応用が期待できます。

本研究によって中間子の質量が原子核中で非常に軽くなる可能性は低い事が分かりました。この結果から原子核中の中間子の質量がどのようにして生成されているのか、また原子核中のクォーク凝縮量との関係について理論模型に制限をかけ、より正確に理解できるようになりました。これは、身の回りの物質の質量の起源を理解する上で重要な情報になると考えています。

研究成果の概要（英文）：The mass of material is the mass of nucleons in the nucleus, and theoretically explained that its origin is the quark condensation due to the strong interaction between quarks. According to recent theoretical study, the quark condensation reduces in the nucleus, and the mass of eta-prime meson become much lighter than that in the vacuum, which results in the formation of eta-prime bound nucleus. We searched for the eta-prime nucleus using the gamma ray beam at SPring-8. We did not observe the signal of eta-prime nucleus, and the interaction between a eta-prime meson and a nucleus is not strong as expected. We published this results in the physics journal.

研究分野：原子核物理学

キーワード：核中のハドロンの性質

## 1. 研究開始当初の背景

物質の質量を担う陽子・中性子の質量の 99% は強い相互作用によるクォーク凝縮(カイラル対称性の破れ)で生じると考えられている。この質量生成機構によると高温・高密度中ではクォーク凝縮量が減少し、ハドロンの質量が軽くなるとされている。この機構を検証するためには「高温・高密度中での対称性の破れの回復によって質量が減少するか？」を測定する事が重要である。原子核中では 30% 程度クォーク凝縮が減少する事が中間子原子の測定から分かり、ハドロンの質量も変化すると予想されてきた。

しかし、核中の中間子質量の直接測定データは乏しい。陽子ビームによる 1 つの実験が核中の中間子や中間子の質量変化を報告しているが、光子ビームを用いた実験では中間子の質量変化はないと報告しているなど、結論が出ていない。

核中の中間子質量の直接測定に加え、中間子を束縛した原子核の束縛エネルギーからも核中の中間子の質量を得られる。中間子はストレンジクォークを含み寿命が長く核中の質量測定に適している。近年の理論計算で、中間子の質量はカイラル対称性の変化に鋭敏に反応し、原子核中で約 100 MeV も質量が変化し、中間子束縛核を作ると予想されてきた。また、真空中での中間子・核子相互作用は  $0 \pm 0.43$  fm と非常に小さい値が示唆されており、原子核中で大きな質量変化が観測されれば、通常の相互作用ではなく原子核中でクォーク凝縮が変化した事が質量変化の主要因であると推定できる。

本研究に先駆けて、ドイツ GSI 研究所で中間子束縛核の探査実験が行われた。この実験では炭素標的に陽子ビームを照射し前方に散乱された重陽子を検出する事で中間子束縛核が探査された。高統計のデータであったが、中間子束縛核の信号は検出されなかった。この先行研究では中間子生成とは無関係な背景事象が大量に混入していた事と、素過程の中間子の生成率が不明であるため、そもそも中間子がどの程度生成されるのかが分からず、中間子束縛核生成量の理論予想による系統誤差が大きい事が問題であった。

## 2. 研究の目的

本研究では先行研究の問題点であった次の 2 点を改善し、中間子束縛核を探査する事が目的である。

- (1) 中間子生成とは無関係な背景事象を抑制する事
- (2) 素過程の中間子の生成率を測定し、中間子束縛核生成の理論的な予想量に対する不定性を抑制する事

これらの改善を行い、スプリングエイト LEPS2 ビームラインでのガンマ線ビームを用いて中間子束縛核を探査する。また、中間子束縛核の崩壊様式を調べるための高時間分解能の飛行時間検出器を開発する。本研究によって中間子と原子核の間の相互作用について情報を得、ハドロンの質量の起源について知見を得る事が目的である。

## 3. 研究の方法

本研究は SPring-8 の LEPS2 ビームラインでの高輝度ガンマ線ビームを用いて行った。炭素標的を用いて  $p + C \rightarrow p + X$  反応を測定し、中間子束縛核を探査した。前方に散乱した陽子を高時間分解能の飛行時間検出器で測定し、エネルギー保存則を用いて原子核と中間子の系の励起エネルギーを測定する事で中間子束縛核の信号を探した。

先行研究の問題点の一つであった中間子と無関係な背景事象を抑制するために、中間子束縛核の崩壊で生じると予想される粒子を測定した。LEPS2 ビームラインに設置されている BGOegg 電磁カロリメータを用いて中間子束縛核の崩壊で生じると予想される中間子と陽子を同時に測定する事で中間子生成とは無関係な背景事象を大幅に抑制することに成功した。また、LEPS2 ビームラインで開発しているソレノイドスペクトロメータを用いて中間子束縛核が 2 つの陽子を含む崩壊様式へ崩壊する事象を探査するため、高抵抗板検出器を用いた大面積の高時間分解能検出器を開発した(図 1)。1 チャンネルあたりの有効面積を大きくするため長さ 2m 幅 2.5cm の読み出しストリップを用いた。ストリップ上での信号の減衰を抑えるために検出器内の誘電体の誘電率を調整し、広い範囲で 80~90 ps の高い時間分解能を実現した。この検出器の開発と性

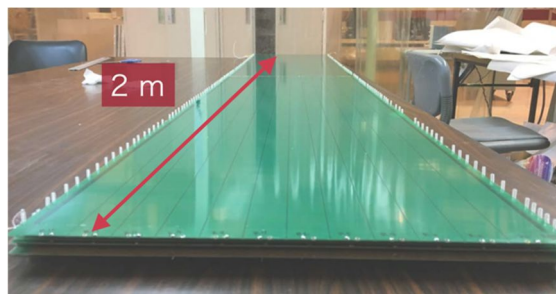


図 1: 本研究で開発した大面積高時間分解能検出器

能評価について、放射線検出器についての国際的な論文雑誌である Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A に掲載、発表した。この検出器は素粒子・原子核の様々な実験で活用できる。また、ミュオン透視など素粒子・原子核分野以外への応用も期待できる。

先行研究の2つ目の問題点であった「中間子束縛核生成の予想量の不定性を抑えるために、炭素原子核中で生成され束縛せずに原子核外で崩壊した「中間子を BG0egg 検出器で測定することで「中間子の素過程での生成率を測定した。この素過程での生成率を元に「中間子束縛核生成の予想量の不定性を抑える事ができた。

#### 4. 研究成果

SPring-8 の LEPS2 ビームラインでのガンマ線ビームを炭素標的に照射し前方に散乱した陽子( $p_f$ )を飛行時間検出器で測定した。側方に放出された2つのガンマ線の不変質量分布から中間子を同定し、さらに側方の陽子( $p_s$ )の同時測定を行った。これらの事象には2段階過程によって生成された中間子と陽子( $p_s$ )が混入している事が分かったため、測定した粒子の運動エネルギーや運動方向についてさらに条件を加えて事象を選択した。

図2が「中間子の放出方向と原子核の励起エネルギーの2次元分布を示している。赤で網掛けされた領域が「中間子束縛核の信号領域であり、青点が観測した実験データである。信号領域には実験データは含まれず、今回の測定では「中間子束縛核の信号は検出できなかった。

この結果から、「中間子束縛核の生成率についての上限值を得る事ができた。さらに得られた上限値から「中間子と原子核との間の引力ポテンシャルの強さについても制限をつける事ができた。図3が「中間子束縛核の生成断面積と原子核中の「中間子が「中間子と核子へ崩壊する分岐比の2次元グラフである。横に伸びる黒線が「中間子束縛核の生成断面積について実験で得られた上限値であり、緑とオレンジの領域が「中間子と原子核の間の引力ポテンシャルの強さを100 MeV, 20 MeV 仮定した時の「中間子束縛核の生成断面積である。実験データの上限値を表す線よりも上の領域は実験データと矛盾することになる。この図から100 MeVの強い引力ポテンシャルは横軸の広い範囲で実験結果の上限値を超えており、否定されている事が分かる。この結果から「中間子と原子核の間の引力ポテンシャルは弱いか、原子核中の「中間子が「中間子と核子へ崩壊する分岐比が小さい事が確定した。これらの結果を、米国の論文雑誌である Physical Review Letters で発表した。本研究の結果から「

中間子と原子核中との間に非常に強い引力が働く可能性は低いことが分かった。この結果によって原子核中の「中間子の質量について理論模型に制限をつけ、より正確に理解できるようになった。これは、身の回りの物質の質量の起源を理解する上で重要な情報になると考えている。

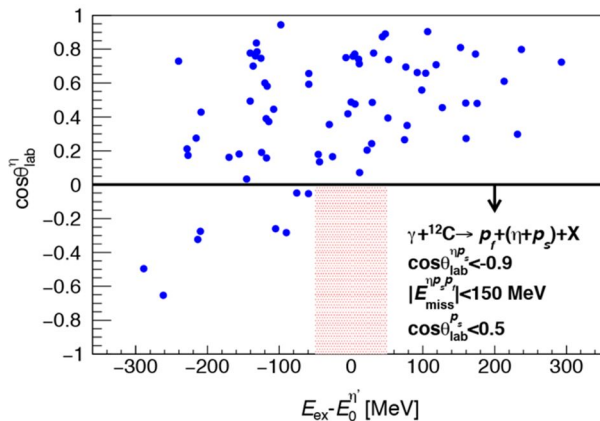


図2: 「中間子の放出方向と原子核の励起エネルギーの2次元分布。赤の網掛け部が信号領域、青点が測定データ。

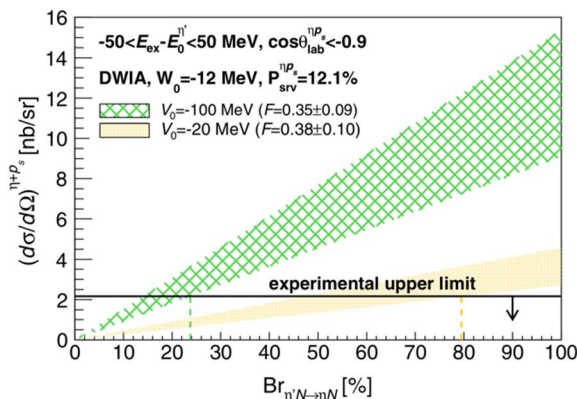


図3: 「中間子束縛核の生成断面積と原子核中の「中間子が「中間子と核子へ崩壊する分岐比の2次元グラフ。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 N. Tomida, N. Muramatsu, M. Niiyama et al.	4. 巻 124, 202501
2. 論文標題 Search for Bound Nuclei in the $^{12}\text{C}(\alpha, p)$ Reaction with Simultaneous Detection of Decay Products	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW LETTERS	6. 最初と最後の頁 1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.202501	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 K. Watanabe, S. Tanaka, W.C. Chang, H. Chen, M.L. Chu, J.J. Cuenca-Garcia, T. Gogami, D. Gonzalez-Diaz, M. Niiyama, Y. Ohashi, H. Ohnishi, N. Tomida, M. Yosoi	4. 巻 925
2. 論文標題 A compensated multi-gap RPC with 2 m strips for the LEPS2 experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A	6. 最初と最後の頁 188-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.02.014	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 M. Niiyama	4. 巻 13
2. 論文標題 Status and Prospects of LEPS2 Solenoid Spectrometer	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020009-1, 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.13.020009	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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Masayuki Niiyama
2. 発表標題 Recent results of few body system in the hadron physics with photon beam
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Niiyama
2. 発表標題 Hadron physics with photon beam
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富田夏希
2. 発表標題 LEPS2/BGOegg実験における '中間子束縛核探索の実験結果
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊憲
2. 発表標題 LEPS2実験におけるBarrel RPC ToF system の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小早川亮
2. 発表標題 LEPS2用TPCの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Niyama
2 . 発表標題 Recent results and prospects from Belle I, Belle II and LEPS 1, LEPS 2
3 . 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Watanabe, M. Niyama, S. Tanaka, M. Yosoi
2 . 発表標題 The Development of 2 m long multigap RPCs for LEPS2 experiment
3 . 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 R. Kobayakawa, M. Niyama, , M. Yosoi, S. Ajimura, S. Y. Ryu, Y. Sada, K. Mizutani
2 . 発表標題 Performance evaluation of Time Projection Chamber for LEPS2/SPRING-8
3 . 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 新山 雅之
2 . 発表標題 Status and Prospects of LEPS2 Solenoid Spectrometer
3 . 学会等名 The 14th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 T. H. Nam
2. 発表標題 photo-production from proton target at LEPS2/BGOegg experiment (1)
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本敏和
2. 発表標題 LEPS2/BGOegg 実験における液体水素標的を用いた 中間子光生成反応(2)
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊 憲
2. 発表標題 LEPS2 実験でのトリガースタディと e+e- 除去用検出器の作成
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小早川 亮
2. 発表標題 LEPS2実験に用いる TIME PROJECTION CHAMBER(TPC) の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

SPring-8 での研究活動  
<http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/~niiyama/sp8/>

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			
スイス	欧州原子核研究機構			
米国	Ohio university			
韓国	Korea university			