

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K05355

研究課題名(和文)核媒質中における中間子の精密研究と強い相互作用の対称性

研究課題名(英文)Accurate studies of the meson properties in the nuclear medium and symmetry of the strong interaction

研究代表者

比連崎 悟(Hirenzaki, Satoru)

奈良女子大学・自然科学系・教授

研究者番号：60283925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、原子核中における中間子の性質を可能な限り精密に調べ、そこから有限核密度中での強い相互作用の対称性の振る舞いに関して新しい知見を得ることである。

本研究では、理化学研究所における深く束縛された中間子原子の研究、ドイツのCOSY及びGSI研究所における中間子原子核と $\eta(958)$ 中間子原子核の研究、JPARCにおけるK中間子原子核の研究等と共同研究を行い、それぞれの中間子の性質に関して新しい知見を得ることができた。また、この知見から強い相互作用の対称性に関する理解も進展させつつある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強い相互作用の研究は、湯川博士の中間子理論、南部博士の自発的対称性の破れの概念の導入によって発展してきた。本研究は、強い相互作用のカイラル対称性が真空中では自発的に破れているが原子核中では部分的に回復する事を実証するという点で学術的に意義がある。さらに、有限なクォーク質量による明からさまなカイラル対称性の破れと、軸性量子異常と呼ばれる対称性の破れの効果も、原子核中の複数の中間子の性質を精密に研究することによって同時に明らかにしようとするものである。本研究では、複数の中間子の原子核中での新たな性質を知ることができた。この知見から強い相互作用の対称性に関する理解を進展させることができる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present project is to investigate the meson properties in the nucleus as accurately as possible and to deduce the new information on the strong interaction symmetry at finite density from them.

In this project, we made collaborations for researches on deeply bound pionic atoms at RIKEN, eta and eta(958) mesic nucleus at COSY and GSI in Germany, and kaonic nucleus at JPARC, and we obtained new information on properties of each meson. Based on the new information, we are trying to deepen our understandings of the strong interaction symmetry.

研究分野：ハドロン原子核理論

キーワード：中間子原子 中間子原子核 強い相互作用

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用の基礎理論 (QCD: 量子色力学) の持つ多様な性質 - 特に対称性の自発的な破れとその回復 - に関する知見を得ることを目的とした中間子-原子核系の研究は、1990年代半ばの鉛原子核に深く束縛された中間子原子の発見を契機として盛んに行われるようになっていた。この発見に刺激を受けた理論的な研究の進展から、核媒質中での中間子の性質と QCD の対称性の関係が明らかになりつつあった。これにより種々の中間子の原子核中での性質を知ることによって、QCD の対称性の情報を得ることが可能になりつつあり、「カイラル対称性が核内で部分的に回復する」というシナリオで、核内中間子の性質を統一的に理解できるかどうかは挑戦的な課題となっていた。

またこの研究は、RHIC/LHC 等の重イオン衝突を利用する研究とは相補的である。重イオン衝突は、高温高密度領域を含む QCD 相図の広い範囲をダイナミカルに探索するものであるが、我々の研究は、低温の原子核の標準核密度近傍を準静的な系を用いて理解するものであって、QCD の精密な分光学的研究とも言えるような特徴を持っている。

2. 研究の目的

本研究では、原子核中における中間子の性質を、種々の中間子-原子核の系 (中間子原子、中間子原子核、中間子生成反応等) より、可能な限り高い精度で精密に決定し、有限密度中での QCD の対称性に対するより正確な知見を得ることを最終的な目的としている。具体的には、核内中間子の状態や生成反応に関する理論的な研究と、RIKEN/RIBF、JPARC、GSI 等の実験施設で得られると考えられる実験データを基に、QCD の情報を演繹するものである。

3. 研究の方法

本研究では、実験的に観測可能な種々の中間子と原子核からなる系の性質と QCD を関連つけて、QCD の持つ対称性の破れと回復に関して新たな知見を従前の研究に比べて高い精度で得ることを目指している。したがって、より信頼度の高い理論計算と実験データの両方が必要になる。我々理論サイドは、以下の各項目に対する高いレベルの研究を実行することが求められる。

(1) QCD 対称性の破れと核内での回復の様相が中間子の性質としてどのように顕在化するか理解する。異なる中間子夫々の性質の間にある関係性も理解する。具体的には、

中間子: s 波のアイソベクトル散乱長とカイラル凝縮の大きさ

(958): 質量と軸性量子異常の影響の大きさ

K: KN 系と強く結合するバリオン共鳴の性質

: N 系と強く結合するバリオン共鳴の性質、核子のカイラルパートナー

等を検討する必要がある。

(2) 中間子-原子核系の構造を正確に理解する。中間子の性質や核との相互作用の情報を、中間子-原子核系から抽出するためには、相互作用が与えられた場合の系の構造を十分正確に理解しておく必要がある。

(3) 中間子-原子核系の生成反応を正確に評価できる必要がある。不安定な系に対して分光学的な研究を行うためには、系の生成反応の適切な予言と定量的な生成断面積の評価が、具体的な実験計画立案のために必要である。実験研究者との情報交換/共同研究が必要になる。

(4) ハドロン共鳴と強く結合する中間子の系では、極めて短寿命のハドロン共鳴の核内での性質を抽出できる可能性がある。ハドロン共鳴の性質から QCD の対称性を探る可能性の検討が必要である。

4. 研究成果

(1) 中間子原子

深く束縛された中間子原子の研究は、以前のドイツにおける実験研究から理化学研究所の加速器を用いて国内で生成できるようになり、生成効率や分解能が大幅に改善された。この高精度データを基に実験研究者と共同で中間子のアイソベクトル型相互作用を精密に測定し、核内におけるカイラル対称性の部分的回復の情報を得る研究を継続してきた。実験データの解析に理論の面から協力し結果を論文として出版した。しかし残念ながら中間子と原子核の間に働く斥力のために、今まで以上の詳細研究を進めるのは困難であり、カイラル凝縮の密度依存性

を 中間子原子の情報から抽出する等の大きな進歩には至らなかった。今後は N シグマ項の不定性が観測量に与える影響を精査し、 N シグマ項の高精度決定の可能性を探る予定である。

中間子系の別の可能性として、中間子が2個同一の原子核に束縛された2重中間子原子の構造を理論的に検討し、2つの中間子間の強い相互作用の効果を評価した。カイラル有効理論によれば、中間子間の相互作用も核内で変化するはずであり、種々の中間子系についての検討をさらに進めたい。

また、 $(d, ^3\text{He})$ 反応による中間子原子生成では、原子核に核子空孔が存在する。この空孔によって生じる残留相互作用の効果が、実験的に得られたエネルギースペクトルの解析に重要な可能性があり、その定量的評価も進展させつつある。

(2) (958) 中間子

(958) 中間子が原子核に束縛した中間子原子核は現在までに生成/観測された事がないので、まずは生成反応に関する理論的研究を進めた。運動量移行を減少させることを目的とした2核子移行反応を理論的に検討し成果を論文として出版した。また、我々が理論的に提案した (p, d) 反応による生成は、ドイツの研究所で実際に実験が実施され、結果の詳細な報告が出版された。我々の理論的な検討を加えることにより実験結果から (958) 中間子の相互作用に関する新たな情報(相互作用の強さに関する制限)が導かれた。

さらに (958) 中間子-原子核系の構造に関する理論的な研究から、原子核が圧縮される効果が無視できない可能性があることが示された。(958) 中間子系に関する研究は、中間子系に比べるとまだ初歩的な段階にあるが、核内での軸性量子異常の効果を見る上でユニークな系であるので、今後も研究を進める予定である。

(3) 中間子

中間子の束縛系も詳細な実験的な情報は存在しない。本研究期間中には海外との共同研究を通じて、軽い ^3He 及び ^4He 原子核と中間子の系に関する研究が進んだ。具体的には、重陽子衝突から高エネルギーの核融合反応によって ^4He -中間子の束縛系を研究する試み、 ^3He -

中間子の系が複数の光子を射出して崩壊する現象を利用した研究、同じ系が中間子を射出して崩壊する現象を用いた研究などが進展し、成果が理論/実験それぞれの論文として出版された。明確な束縛系の生成/同定には至らなかったが、 ^4He 間の相互作用についての情報は得られた。特に束縛状態の幅と崩壊過程の遷移確率には直接的な関係があるので、今後さらに興味深い理論的な検討が可能であると考えている。

(4) K 中間子

K 中間子-原子核束縛系(K 中間子原子及びK 中間子核)の生成反応として用いられている、炭素原子核を標的とした (K, p) 反応データの詳細な解析に理論研究者として参画し成果を実験研究者との共著論文として報告した。解析の結果、K 中間子生成の寄与では説明できない過剰の分量の反応が起こっていることが結論づけられた。過剰な反応は非常に低いエネルギー領域(K 中間子が存在するとすれば非常に強く束縛された領域)で生じており、KN 系と強く結合するバリオン共鳴が核内に存在する状態からの寄与の可能性も示唆される非常に興味深いものである。今後、研究を進展させる必要があると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 D. Jido, H. Masutani, S. Hirenzaki	4. 巻 2019
2. 論文標題 Structure of eta' mesonic nuclei in a relativistic mean field theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 053D02 22page
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz031	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 -
1. 著者名 M. Skurzok, S. Hirenzaki, S. Kinutani, H. Konishi, P. Moskal, H. Nagahiro, O. Rundel	4. 巻 993
2. 論文標題 Non-mesonic decay of the eta-mesic ^3He via $pd \rightarrow (^3\text{He}-\eta)\text{bound} \rightarrow ^3\text{He}2\gamma(6\gamma)$ reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 121647 8page
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2019.121647	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 P. Adlarson 他 (計84名、S. Hirenzaki 25番目)	4. 巻 802
2. 論文標題 Search for mesic ^3He with the WASA-at-COSY facility in the $pd \ ^3\text{He}2$ and $pd \ ^3\text{He}6$ reactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135205 6page
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135205	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 他 (計39名、S. Hirenzaki 9番目, N. Ikeno 11番目, H. Nagahiro 24番目)	4. 巻 120
2. 論文標題 Spectroscopy of pionic atoms in $^{122}\text{Sn}(d,^3\text{He})$ reaction and angular dependence of the formation cross sections	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 152505 (5pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.152505	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. Skurzok, P. Moskal, N. G. Kelkar, S. Hirenzaki, H. Nagahiro, N. Ikeno	4. 巻 B782
2. 論文標題 Constraining the optical potential in the search for η -mesic ^4He	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters	6. 最初と最後の頁 6-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.04.047	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. Ikeno, H. Nagahiro, D. Jido, and S.Hirenzaki	4. 巻 53
2. 論文標題 η -nucleus interaction from the d+d reaction around the η production threshold	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Eur. Phys. J. A	6. 最初と最後の頁 194 - 207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/i2017-12381-7	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 -

1. 著者名 Y. K. Tanaka 他 (計54名、S. Hirenzaki 16番目、N. Ikeno 19番目、D. Jido 21番目、H. Nagahiro 29番目)	4. 巻 97
2. 論文標題 Missing-mass spectroscopy of the $^{12}\text{C}(p,d)$ reaction near the η' emission threshold	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 015202(13pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.015202	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 Miyatani M., Ikeno N., Nagahiro H., Hirenzaki S.	4. 巻 52
2. 論文標題 Formation of η' (958) meson bound states by the $^6\text{Li}(\gamma,d)$ reaction	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 193-202
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/i2016-16193-y	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 -

1. 著者名 Adlarson P.他 (計83名、Hirenzaki S. 27番目)	4. 巻 102
2. 論文標題 Search for the mesic He3 in the $pd \rightarrow dp + n$ reaction with the WASA-at-COSY facility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044322 (9pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevc.102.044322	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 Ichikawa Yudai, Yamagata-Sekihara Junko 他 (計45名、Hirenzaki Satoru 16番目)	4. 巻 2020
2. 論文標題 An event excess observed in the deeply bound region of the $^{12}\text{C} (K^-, p)$ missing-mass spectrum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 123D01 (34pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa139	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 Tani Akari, Ikeno Natsumi, Jido Daisuke, Nagahiro Hideko, Fujioka Hiroyuki, Itahashi Kenta, Hirenzaki Satoru	4. 巻 2021
2. 論文標題 Structure of double pionic atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033D02 (16pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab023	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9件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 S. Hirenzaki
2. 発表標題 Recent topics on Mesic atoms and Mesic nuclei
3. 学会等名 3rd Jagellonian Symposium on Fundamental and Applied subatomic physics, Jagiellonian univ., Poland (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Hirenzaki
2. 発表標題 Formation of Mesonic Atoms and Mesonic Nuclei
3. 学会等名 Workshop on Chiral and Heavy Quark symmetries in quark-hadron physics, Osaka univ., Japan (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Hirenzaki
2. 発表標題 Structure and Formation of Meson-Nucleus bound systems
3. 学会等名 Workshop series on Nuclear Physics-2, Hadrons in nuclear matter, Yonsei Univ., Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoru Hirenzaki
2. 発表標題 Meson Properties at Finite Density from Meson-Nucleus Systems
3. 学会等名 International Workshop on "Hadron structure and interaction in dense matter", KEK Tokai campus (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoru Hirenzaki
2. 発表標題 eta-nucleus interaction from the d+d reaction around the eta production threshold
3. 学会等名 2nd Jagiellonian Symposium On Fundamental and Applied Subatomic Physics (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 比連崎 悟
2. 発表標題 Meson Properties at Finite Density from Meson-Nucleus Systems
3. 学会等名 J-PARCエネルギー領域重イオン衝突のダイナミクス(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 比連崎 悟
2. 発表標題 d + d 反応による eta 中間子原子核生成 - eta-原子核相互作用の導出に関して
3. 学会等名 東北大ELPH拠点研究会「マルチフレーバーで探るエキゾチックハドロンとハドロン多体系の物理」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 比連崎 悟
2. 発表標題 -nucleus interaction from the d + d reaction around the production threshold
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 Satoru Hirenzaki
2. 発表標題 Meson properties from mesic atoms and mesic nuclei
3. 学会等名 KEK theory center workshop on Hadron and Nuclear Physics in 2017 (KEK-HN-2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

真空の謎に迫る精密実験始動 - パイ中間子で探る超高密度の世界 -
http://www.riken.jp/pr/press/2018/20180413_1/
中間子と原子核からできている『新しい原子』の研究
<http://www.nara-wu.ac.jp/rigaku/Research/201701.html>

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
連携研究者	慈道 大介 (Jido Daisuke) (30402811)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	
連携研究者	永廣 秀子 (Nagahiro Hideko) (10397838)	奈良女子大学・自然科学系・准教授 (14602)	
連携研究者	関原(山縣) 淳子 (Yamagata-Sekihara Junko) (90548215)	京都産業大学・理学部・准教授 (34304)	
連携研究者	池野 なつ美 (Ikeno Natsumi) (30756086)	鳥取大学・農学部・講師 (15101)	

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			
ポーランド	ヤゲロニアン大学			
ドイツ	重イオン研究所(GSI)			