

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540274

研究課題名(和文) 中間子 原子核系で探る核媒質中での対称性の様相

研究課題名(英文) Aspects of symmetry at finite nuclear density by meson-nucleus systems

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、中間子-原子核系の研究から有限密度での種々の中間子の性質を知ることによって、量子色力学の対称性の様相の研究を進めることである。対称性の破れと回復の様相を知るためには、様々な現象や中間子の性質の間の関係を知る必要がある。重イオン衝突による研究と相補的で特色ある研究であると言える。本計画の主な研究成果としては、有限密度におけるeta(958)中間子の性質に基づくeta(958)--原子核束縛系の構造及び生成反応、深く束縛されたパイ中間子原子の精密分光、核内ベクトル中間子の性質と実験観測量、それぞれに関する研究の発展があげられる。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this research is to investigate the aspects of the symmetry of the strong interaction by knowing the properties of various mesons at finite density through meson-nucleus systems. The pattern of the symmetry breaking and its restoration are considered to be understood by the relations between various phenomena and properties of various mesons. This kind of study is unique and complementary to that of the high energy heavy ion collisions. The main results of this project are the developments of the theoretical studies of (i) the structure and formation of eta(958) meson-nucleus bound states based on eta(958) properties at finite density, (ii) the high precision spectroscopy of the deeply bound pionic atoms, and (iii) the properties of vector mesons at finite density and observables.

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

1. 研究開始当初の背景

量子色力学の対称性に関する知見を得ることを目的とした中間子-原子核系の研究の端緒となったのは、日本の研究者を中心としたグループによる 1996 年の深く束縛されたパイ中間子原子の発見であった。この発見とその後の理論的研究の推進により、本研究課題開始当初には、中間子-原子核系の観測可能量を通じて得られる核媒質中でのハドロンの性質と量子色力学の対称性の様相の研究は大きな関心を集めるようになっていた。当時から大がかりな施設 / 組織を擁して盛んに行われていた RHIC/LHC などの重イオン衝突を用いた研究とは、相補的な研究である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、中間子-原子核系（中間子原子、中間子原子核、中間子-原子核散乱状態等）の研究から有限密度における種々の中間子の性質を知ることによって、量子色力学の対称性の様相-カイラル対称性の回復の様子や軸性量子異常の効果の変化（密度依存性）-に関する、より精密で新しい知見を得て理解を進めることである。

3. 研究の方法

本研究課題では、実際に現象として観測される種々の中間子-原子核系の性質と、量子色力学のもつ対称性とを関係付けることで、中間子-原子核系の観測量から対称性とその真空中での破れや核媒質中での部分的回復に関する新たな知見を得ることを目指している。このためには、以下の各項目に関して高いレベルの研究を遂行する必要がある。

- (1) 核媒質中でのカイラル対称性の部分的回復が、種々の中間子の性質にどのように顕在化するかに関する系統的 / 定量的理解、
- (2) 中間子-原子核系の構造や反応を記述する適切な有効理論の構築、
- (3) 核内での中間子の性質の変化を基礎とした、中間子-原子核系の構造研究、
- (4) 中間子-核子系と強く結合するハドロンの共鳴の核内での性質の変化の理解、
- (5) 種々の中間子-原子核系の生成・観測に有効なハドロンの理論的評価と、実験研究者との議論に基づく現実的な実験計画立案、実験実施への協力

これらの各項目を各中間子系それぞれに関して発展させてゆくことが必要である。

4. 研究成果

深く束縛されたパイ中間子原子の分光学的な研究に関しては、主な実験施設をドイツ GSI 研究所から理化学研究所に移し、以前から知られていたよりも精密な束縛エネルギーの情報を得て、より定量的にクォーク凝縮の値を決定することが重要であった。また、線形近似を超えたクォーク凝縮の密度依存性や、非対称核物質中でのカイラル対称性の回復の様子も大きな興味であった。このため本研究課題では、奇数中性子数の原子核を標的とした(d,3He)反応によるパイ中間子原子生成に関する理論的研究と、グリーン関数法によるパイ中間子原子生成に関して理論的な研究を遂行した。

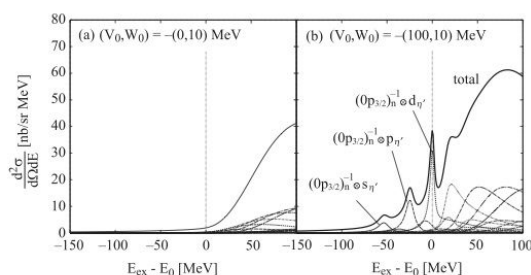
奇数中性子数の原子核を標的とした場合は、終状態でパイ中間子はいわゆる「偶-偶核」に束縛されることになり、原子核との残留相互作用の影響を受けなくなる。この効果は、典型的にはオーダー10keV程度であるが、現在の精度においては結果の不定性に影響を与えうるものである。また、グリーン関数法を用いた研究では、原子核の吸収効果による反応スペクトラムの変化を評価することができる。この効果も、パイ中間子原子の束縛エネルギーの決定の際に考慮が必要になる可能性が有る。以上の結果はすでに査読付き学術論文として出版されている。

$\eta(958)$ 中間子-原子核束縛系に関して本課題の研究期間全体を通じて、研究を発展させた。はじめに、軸性量子異常とカイラル対称性の破れから $\eta(958)$ 中間子の大きな質量が生成されるメカニズムに関して理解を深め、核内でのカイラル対称性の部分的回復が軸性量子異常の $\eta(958)$ 中間子質量に対する「効果」を減少させて質量減少を引き起こすはずであるという結論に至った。この理解に基づき、(p,d)反応による $\eta(958)$ 中間子-原子核束縛系生成の理論的研究を進めた。実験研究者にも議論に加わっていただき、本研究課題の成果を基にして、現実的な実験計画を立案し、GSI 研究所での実験がすでに行われた。得られたデータは現在解析の最終段階にあり、もうじき実験結果が論文として査読誌に投稿される予定である。

これと並行して、ハドロンの有効模型の1つであるカイラルユニタリー模型を用いた、 $\eta(958)$ 中間子-原子核相互作用の理論的研究も進めた。その中で軸性量子異常の効果がハドロンの有効相互作用としてどのように顕在化する可能性があるか、また、その強さが束縛状態にどのように影響するかが理解された。

さらに、光子を ${}^6\text{Li}$ 原子核に入射する (γ, d) 反応を用いて、 $\eta(958)$ -原子核束縛系を生成する可能性に関して、理論的な研究を終えることができた。この研究で2核

子移行反応を利用した、核子よりも重たい中間子の束縛系生成に関して、そのメリット及びデメリットを明らかにすることができた。これは将来の研究にとっても重要である。以上の理論研究の結果は、2核子移行反応の研究を除いて査読付き論文として出版されている。2核子移行反応の論文は投稿中(査読中)であり、まだ受理はされていないが、近い将来に出版できる見込みである。



ここでは、研究結果の例として $^{12}\text{C}(p, d)$ 反応による $\eta(958)$ 中間子原子核生成の理論スペクトラムを図示する。入射陽子のエネルギーは 2.5 GeV であり、重陽子が前方 0 度に射出される場合の計算結果である。 $\eta(958)$ 中間子と原子核の相互作用の強さが異なる 2 つの場合について図示されている。 $\eta(958)$ 中間子の質量が原子核中で大きく減少して、束縛状態が存在した場合には、右図のようなピーク構造が現れることが期待されている。

さらに、核内ベクトル中間子の性質に関する研究も進み、中間子の透過確率測定による実験結果と、不変質量分布測定による実験結果の齟齬に関して、両方を無矛盾で理解できる可能性を示すことができた。ここで重要であったのは、透過確率評価のための実験結果のもつ意味の再検討であり、最終的な結論を得るためには、現実的なシミュレーション計算などに基づく定量的な評価がさらに必要であるが、将来の J PARC での実験に向けて議論を進める土台ができたと考えている。この内容は近い将来論文にまとめられると考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

(1) N. Ikeno, J. Yamagata-Sekihara, H. Nagahiro and S. Hirenzaki,

'Formation spectra of pionic atoms in the Green's function method', 査読あり

Prog. Theor. Exp. Phys., no. 3, (2015) 033D01,

DOI: 10.1093/ptep/ptv013

(2) H. Nagahiro, D. Jido, H. Fujioka, K. Itahashi and S. Hirenzaki,

'Formation of $\eta'(958)$ -mesic nuclei by (p, d) reaction', 査読あり

Phys. Rev. C87, no. 4, (2013) 045201, DOI: 10.1103/PhysRevC.87.045201

(3) N. Ikeno, J. Yamagata-Sekihara, H. Nagahiro and S. Hirenzaki,

'(d, ^3He) reaction on odd-neutron nuclear target for the formation of deeply bound pionic atoms' 査読あり

Prog. Theor. Exp. Phys., no. 6, (2013) 063D01,

DOI: 10.1093/ptep/ptt035

(4) D. Jido, H. Nagahiro and S. Hirenzaki,

'Nuclear bound state of $\eta'(958)$ and partial restoration of chiral symmetry in the η' mass', 査読あり

Phys. Rev. C85, (2012) 032201,

DOI: 10.1103/PhysRevC.85.032201

(5) H. Nagahiro, S. Hirenzaki, E. Oset and A. Ramos,

' η' -prime nucleus optical potential and possible η' -prime bound states', 査読あり

Phys. Lett. B709, (2012) 87,

DOI: 10.1016/j.physletb.2012.01.061

(6) K. Itahashi, H. Fujioka, H. Geissel, R. S. Hayano, S. Hirenzaki, S. Itoh, D. Jido, V. Metag, H. Nagahiro, M. Nanova T. Nishi, K. Okochi, H. Ota, K. Suzuki, T. Suzuki, Y. K. Tanaka, H. Weick,

'Feasibility Study of Observing η' Mesic Nuclei with (p, d) Reaction', 査読あり

Prog. Theor. Phys. 128, 601 (2012),

DOI: 10.1143/PTP.128.601

[学会発表](計 14 件)

(1) 比連崎悟

中間子-原子核束縛系の構造と生成

日本物理学会第 71 回年次大会

2016 年 3 月 19 日

東北学院大学 泉キャンパス、仙台

(2) S. Hirenzaki

Meson Properties at finite density from Meson Nucleus Systems

International workshop on Progress on J-PARC hadron physics in 2016

2016年3月4日 Tokai, Ibaraki, Japan

(3) S. Hirenzaki

Meson Properties at finite density from meson-nucleus systems

1st Hadron Spanish Network Days and Spanish-Japanese JSPS Workshop

2015年6月15日 Burjassot, Valencia, Spain

(4) Satoru Hirenzaki

Meson Properties at Finite Density from Meson Nucleus Systems

The Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics

2015年6月10日

ヤゲロニアン大学、Krakow, Poland

(5) 比連崎悟

Meson Properties at Finite density from Mesic Nuclei

ELPH 研究会 C009「光生成反応によるハドロン間相互作用の研究の進展」

2014年11月5日 東北大学電子光理学研究センター、仙台、宮城

(6) S. Hirenzaki

Formation of Mesonic atoms and Mesonic nuclei

Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (HAWAII2014)

2014年10月9日 Hawaii Island, Hawaii, USA

(7) S. Hirenzaki

Exotic atoms and exotic nuclei

II International Symposium on Applied Nuclear Physics and Innovative Technologies

2014年9月26日 Krakow, Poland

(8) S. Hirenzaki

Meson Properties from Mesic Atoms and Mesic Nuclei

13th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (MESON2014)

2014年6月3日 Krakow, Poland

(9) S. Hirenzaki

Meson Properties at finite density from meson-nucleus systems

Int. Workshop on J-PARC hadron physics in 2014

2014年2月11日 Tokai, Ibaraki, Japan

(10) S. Hirenzaki

Meson Properties at Finite density from Mesic atoms and Mesic nuclei

II International Symposium on Mesic Nuclei

2013年9月23日

ヤゲロニアン大学、Karakow, Poland

(11) S. Hirenzaki

Formation of eta(958) bound states in Nuclei

The 12th Asia Pacific Physics Conf. of AAPPS (APPC12)

2013年7月18日

Makuhari Messe, Chiba, Japan

(12) S. Hirenzaki

Structure and formation of eta(958)-mesic nuclei

Baryons2013, International conference on the structure of baryons

2013年6月27日 Glasgow, Scotland, UK

(13) S. Hirenzaki

Nuclear Bound state of Meson and Partial Restoration of chiral symmetry

The 8th JSPS core-to-core symposium of JSPS core-to-core program 'Establishment an International Collaboration Platform for Strangeness Nuclear Physics by Electron Beams'

2012年10月6日 Barcelona, Spain

(14) S. Hirenzaki

Formation of eta(958) mesic nuclei

12th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (Meson2012)

2012年5月31日 Krakow, Poland

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

比連崎 悟 (HIRENZAKI, Storu)
奈良女子大学・自然科学系・教授
研究者番号：60283925

(2) 連携研究者

慈道 大介 (JIDO, Daisuke)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号：30402811

(3) 連携研究者

永廣 秀子 (NAGAHIRO, Hideko)
奈良女子大学・自然科学系・准教授
研究者番号：10397838