

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 23 年 3 月 31 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2011

課題番号：20540273

研究課題名（和文） 中間子原子核で探る核媒質中での量子色力学

研究課題名（英文） Mesic Nuclei and Finite Density QCD

研究代表者 比連崎 悟 (HIRENZAKI SATORU)
奈良女子大学・理学部・教授

研究者番号：60283925

研究成果の概要（和文）：本研究では、原子核中における中間子の性質の変化を通じて、有限密度における強い相互作用の対称性に関する新しい知見を得る為に種々の中間子-原子核系に関して理論的な研究を行った。その結果、 π 中間子原子、 K 中間子原子核、 η —、 $\eta(958)$ —、 ϕ —中間子原子核に関して、有限密度での強い相互作用の効果、束縛系の構造、生成断面積に関する新しい情報を系統的に得る事が出来た。また2核子移行反応による、重い中間子と原子核の系の生成が有用である事を理論的に示した。

研究成果の概要（英文）：We have studied various meson-nucleus systems theoretically to know the modification of meson properties in nucleus and to understand the aspects of symmetries of strong interaction at finite density. We have obtained the new information on strong interaction effects at finite density, structure of bound states, and formation cross sections for the systems of pionic atoms, Kaonic nuclei, η —, $\eta(958)$ —, and ϕ —mesic nuclei systematically. We have also studied the possibility to apply the two nucleon transfer reactions to the formation of the heavy meson and nucleus systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（理論）

キーワード：原子核（理論）、ハドロン、中間子

1. 研究開始当初の背景

1996年に深く束縛された π 中間子原子が日本の研究グループを中心にして初めて観測されて以降、中間子-原子核系を用いた、核媒質中でのハドロンの性質と強い相互作用の対称性の研究は、国際的にも関心を集めていた。開始当初までに、深く束縛された π 中

間子原子の観測から、有限密度中におけるカイラル対称性の回復が結論されたとの論文報告もなされていた。他の中間子-原子核系としては、 K —、 η —、 $\eta(958)$ —、 ϕ —中間子原子核の研究が開始されていた。

また、量子色力学の相構造を得る研究として相補的な重イオン衝突による研究や、核内で中間子が崩壊して生じたレプトン対の観

測から不変質量を求める実験の結果も報告されていた。

2. 研究の目的

現代におけるハドロン物理学の研究目標は、強い相互作用の基礎理論（量子色力学）から原子核を含むハドロン多体系のダイナミクスを理解し、量子色力学の持つ多様な相構造を理解する事である。本研究計画では、原子核-中間子の束縛系（中間子原子及び中間子原子核）に注目し、原子核中での中間子の性質の変化を通じて、有限核子密度における量子色力学の性質を理解する事を目的としている。

具体的には、中間子原子や中間子原子核と言った系の研究を通じて、中間子が核媒質中にあるためによって生じる現象を詳細に研究し、強い相互作用のもつ対称性とその媒質中での回復に関する正確な知見を得る事を目指している。

3. 研究の方法

研究方法は以下の通りである。研究の各段階において、十分な検討が必要である。徹視的な理論から実験可能性までの、全ての段階を視野に入れている。

(1) 量子色力学の対称性とその核内での部分的回復の描像に基づいて、原子核媒質中におけるハドロンの性質を理論的に研究する。

(2) (1) の研究を基に様々な中間子-原子核の組み合わせに対して、中間子-原子核複合系の構造を理論的に研究し、束縛系の研究から新しい知見が得られると期待される系を理論的に決定する。

(3) (2) で結論された興味深い系のハドロン原子核反応による生成方法について理論的に検討する。現在及び比較的近い将来に使用可能になる世界中の加速器施設を念頭におき、現実的な実験可能性について検討する（実験研究者の協力をあおぐ）。

4. 研究成果

以下に各項目毎に研究成果を報告する。国内外における位置づけとしては、どの項目に関しても重要で評価の高い先端的な成果になっている。

(1) π 中間子原子

以前、ドイツ GSI 研究所で行われた実験と我々の理論的研究により、錫同位体における π 中間子原子からカイラル対称性の部分的

回復に関する情報を得ることができた。この研究を、理化学研究所の新型加速器 RIBF を用いることにより、精度（定量性）と系統性の両面から更に発展させる可能性が示された。

具体的には、RIBF で期待される、よりエネルギー分解能の高い実験データから、 π 中間子-原子核相互作用の更に詳細が決定される可能性や、波動関数の繰り込み因子の決定可能性に関して理論的な検討が進んだ。

(2) K 中間子原子核

K 中間子-原子核系は、強い反 K 中間子-核子間の相互作用と、その為に生じる $\Lambda(1405)$ バリオン共鳴に関連して興味をもたれている。本研究計画の中では、カイラル有効理論を用いた、KN 相互作用を基礎とした、軽い原子核での K 中間子束縛系に関して、その崩壊チャンネルも含めて、系統的な研究が行われた。この結果は、近い将来に JPARC 加速器施設で行われる予定の実験に対して重要な指針を与える物である。

また、炭素標的に対する (K, N) 反応を用いた K 中間子原子核探索実験に関しては、バックグラウンド過程も考慮した解析を行い、明確な束縛状態の観測や、相互作用の強さの一意的な決定の難しさ等を、理論的に示した。

(3) η 中間子原子核

η 中間子原子核は、有限密度における N(1535) バリオン共鳴の性質に関連した興味を持たれて来た。二つのカイラル有効理論は、全く異なる N(1535) の描像を示す事が知られており、この共鳴の正体を理解する上でも η 中間子原子核の研究は重要である。

本研究計画の中では、 η 中間子原子核中では、 η 中間子状態と (N(1535) * N 空孔) 状態の二つの量子レベルが現れる事を考慮して、 η 中間子原子核における準位交差の研究を行った。また、二つの重陽子衝突に依る、ヘリウム 4 原子核中の η 中間子原子核生成に関しても理論的に研究した。

(4) $\eta(958)$ 中間子原子核

$\eta(958)$ は南部-Goldstone boson として理解されている他の疑スカラー中間子に比べて大変に重く、軸性量子異常の影響を強く受けていると考えられているユニークな中間子である。この中間子を原子核中においた時の性質の変化は、有限密度における軸性量子異常の効果を理解する上で大変に興味深い。

$\eta(958)$ 中間子原子核の研究は本研究計画の中で大きく進み、特定の模型に依存しない議論に基づく幅の狭い束縛系存在の可能性、既存の実験施設における観測の可能性、多体理論の第 2 次効果まで取り込んだ光学ポテンシャルの評価等が達成された。近い将

来に実験が実行されて更に研究が進むと期待される。

(5) ϕ 中間子原子核

QCD 和則に基づく理論計算や、レプトン対観測による不変質量などの研究から、 ϕ 中間子は原子核中で僅かながら質量が減少する事が予想されていた。本研究では、これらを基に ϕ 中間子原子核の生成可能性に関して系統的に研究し成果を論文として公表した。この系では原子核に依る中間子吸収過程の為に生じる準位幅が比較的大きい為に、束縛状態に対応する共鳴ピークを反応断面積中に明確に見る事は簡単ではない。 ϕ 中間子が核内で吸収/崩壊した後生じる粒子との coincident 観測などが必須と考えられる。

(6) 重い中間子原子核生成反応

中間子束縛系の研究は徐々に研究対象を広げ、重い中間子束縛系も視野に入れつつ有る。その為、重い中間子を原子核中に大きな確率で生成する、原子核/ハドロン反応を考える事は重要である。重要なポイントは生成反応の運動量移行である。中間子が原子核に対して小さな運動量で生成されれば、原子核に捕獲される確率は大きくなる。

本研究では、核子よりも重い中間子を、運動量 0 (無反跳) で生成する反応として、(γ, d) や ($p, 3\text{He}$) などの、原子核からの 2 核子移行反応を理論的に考察した。標的核が自由に選べない等の制限は有るが、将来実験研究の方法として有用な可能性を示す事が出来た。

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 8 件)

(1) N. Ikeno, H. Nagahiro, S. Hirenzaki;

'Pionic Atom Spectroscopy in the ($d, 3\text{He}$) reaction at finite angles'; European Physical Journal A47, 161 7pages (2011), 査読あり. DOI: 10.1140/epja/i2011-11161-9

(2) N. Ikeno, J. Yamagata-Sekihara, H. Nagahiro, D. Jido, and S. Hirenzaki;

'Formation of Heavy Meson Bound States by Two Nucleon Pick-up Reactions'; Phys. Rev. C 84: 054609 1-7, 2011, 査読あり. DOI:10.1103/PhysRevC.84.054609

(3) Natsumi Ikeno, Rie Kimura, Junko Yamagata-Sekihara, Hideko Nagahiro, Daisuke Jido, Kenta Itahashi, Li Sheng Geng and Satoru Hirenzaki;

'Precision Spectroscopy of Deeply Bound Pionic Atoms and Partial Restoration of Chiral Symmetry in Medium'; Progress of Theoretical Physics 126, 483-509 (2011), 査読あり. DOI:10.1143/PTP.126.483

(4) J. Yamagata-Sekihara, D. Cabrera, M. J. Vicednte-Vacas, S. Hirenzaki;

'Formation of Φ mesic nuclei'; Progress of Theoretical Physics 124, 147-162 (2010), 査読あり. DOI: 10.1143/PTP.124.147

(5) V. K. Magas, J. Yamagata-Sekihara, S. Hirenzaki, E. Oset, A. Ramos;

'Proton emission off nuclei induced by kaons in flight'; Phys. Rev. C81: 024609 1-10, 2010, 査読あり. DOI: 10.1103/PhysRevC.81.024609

(6) H. Nagahiro, J. Yamagata-Sekihara, E. Oset, S. Hirenzaki, R. Molina;

'The $\gamma\gamma$ decay of the $f(0)(1370)$ and $f(2)(1270)$ resonances in the hidden gauge formalism'; Phys. Rev. D79: 114023 1-7, 2009, 査読あり. DOI: 10.1103/PhysRevD.79.114023

(7) Hideko Nagahiro, Daisuke Jido, Satoru Hirenzaki;

'Formation of η -mesic nuclei by (π, N) reaction and $N^*(1535)$ in medium.'; Phys. Rev. C80: 025205 1- 13, 2009, 査読あり. DOI: 10.1103/PhysRevC.80.025205

(8) J. Yamagata-Sekihara, D. Jido, H. Nagahiro, S. Hirenzaki;

'Formation spectra of light kaonic nuclei by in-flight (anti-K, N) reactions with chiral unitary amplitude'; Phys. Rev. C80: 045204 1-12, 2009, 査読あり.

DOI: 10.1103/PhysRevC.80.045204

[学会発表] (計 14 件)

(1) S. Hirenzaki;

'eta' (958) bound states in nuclei and Partial Restoration of Chiral Symmetry'; XIV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2011), June 16, 2011, Künstlerhaus, München, Germany.

(2) S. Hirenzaki;

'Structure and Formation of Meson Nuclear Systems'; International conference BARYONS' 10, Dec. 7-11, 2010, Osaka, Japan.

(3) 比連崎悟、永廣秀子、慈道大介

「d+d 反応による η -4He 束縛状態の生成」
日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学、9月11-14日 (2010) .

(4) S. Hirenzaki;

'Formation of meson nucleus systems'; International Workshop on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei(Chiral10), June 21-24, 2010, Valencia, Spain.

(5) S. Hirenzaki;

'Formation of Mesic Nuclei'; International Symposium on Mesic Nuclei, Jagiellonian University, Krakow, Poland, 16 June 2010.

(6) S. Hirenzaki;

'Formation of eta mesic nucleus'; 11th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction (Meson2010), Krakow, Poland, 10-15 June 2010.

(7) S. Hirenzaki;

'Formation of meson nucleus systems'; Joint Symposium of 'Exotic Hadron' and 'Hadrons in Nuclei' (18 Feb. 2010) in New Frontiers in QCD 2010 --- Exotic Hadron Systems and Dense Matter -- (NFQCD10), Jan. 18(Mon.)-Mar.19(Fri), 2010, Kyoto, Japan.

(8) S. Hirenzaki;

'Meson properties in nuclear medium' Workshop on "Hadron and Nuclear Physics (HNP09)" Nov. 16-19, 2009, RCNP, Osaka University.

(9) S. Hirenzaki;

'Formation of Slow Heavy Mesons in Nuclei' 3rd Joint meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the Physical Society Japan, 13-17 Oct. 2009, Waikoloa Village, Hawaii, USA.

(10) S. Hirenzaki;

'Formation of Meson-Nucleus Systems'; US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, 11-12 Oct. 2009, Waikoloa Village, Hawaii, USA.

(11) S. Hirenzaki;

'Formation of Slow Heavy Mesons in Nuclei'; 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics "HYP-X", Sep. 14-18, 2009, "RICOTTI" in Tokai, Ibaraki, Japan.

(12) 山縣-関原淳子、比連崎悟*、D. Cabrera, M. J. Vicente-Vacas (登壇者：比連崎)；

「Structure and Formation of ϕ mesic nuclei」日本物理学会 第64回年次大会、立教大学、東京、3月27-30日(2009).

(13) S. Hirenzaki;

'Mesic Atoms and Mesic Nuclei: Recent Topics - ϕ mesic states -'; International Workshop on Hadron Dynamics, Almunecar, Spain, Sep. 25-28, 2008.

(14) S. Hirenzaki;

'Recent topics of mesic atoms and mesic nuclei: ϕ mesic nuclei exist?'; International Conference on Exotic atoms and Related topics (EXA08), Wien, Austria, Sep. 14-18, 2008.

〔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：

6. 研究組織

(1) 研究代表者

比連崎 悟 (HIRENZAKI SATORU)

奈良女子大学・理学部・教授

研究者番号：60283925

(3) 連携研究者

慈道 大介 (JIDO DAISUKE)

京都大学・基礎物理学研究所・助教

研究者番号：30402811