

平成23年4月28日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009年度

課題番号：17070002

研究課題名（和文）エキゾチックなクォーク・ハドロン多体系の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical Study of Exotic Multi-Quark and Multi-Hadron Systems

研究代表者

岡 真 (OKA, MAKOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60144606

研究成果の概要（和文）：

3つの主要分野 A. ハドロン分光 B. ハドロン物質 C. ハイパー核分光 における理論研究者を有機的に組織し、SPing-8 や J-PARC などの実験施設における実験研究との連携、および若手研究者の育成を主要な目標として、研究を推進した。その結果、ペンタクォークを含むエキゾチックハドロンの構造と相互作用、K 中間子原子核、有限密度 QCD の相構造、ハイパー核のガンマ線分光によるハイペロンの相互作用、格子 QCD によるバリオン間力の計算、ダブルハイパー核の構造の研究などの分野で顕著な進展があった。

研究成果の概要（英文）：

Three major subjects, A. Hadron Spectroscopy, B. Hadronic Matter, C. Hypernuclear Spectroscopy, have been extensively explored by organizing theoretical research groups all over in Japan. We focused our efforts on collaborations with experimental physicists carrying out experiments at SPing-8 and J-PARC etc., and also on to educate and encourage young students and post-doc researchers in these fields. We have achieved major development in the areas of exotic hadron spectroscopy including pentaquarks, possible K nucleus states, dense QCD and its phase structure, gamma spectroscopy of hypernuclei and generalized nuclear force, lattice QCD computation of baryon-baryon interactions, structure of double hypernuclei.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	3,600,000	0	3,600,000
2006年度	14,800,000	0	14,800,000
2007年度	14,800,000	0	14,800,000
2008年度	14,800,000	0	14,800,000
2009年度	14,800,000	0	14,800,000
総計	62,800,000	0	62,800,000

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

キーワード：クォーク、ハドロン、原子核、ストレンジネス

1. 研究開始当初の背景

量子色力学(QCD)に基づくハドロン物理の研究は21世紀に入って新しい進展を見せている。とりわけ、2003年に発見されたペンタクォークを契機に大きく領域が拡大したエキゾチックなクォーク・ハドロン多体系の物理研究では、その性質をQCDに基づく理論体系によって統一的に記述することがハドロン物理の重要な課題となった。

研究開始時には建設中であった大強度陽子加速器実験施設 J-PARC は、主リングである50GeVシンクロトロンからのビームを用いて、クォーク多体系としてのハドロンや原子核の性質およびその相互作用を解明することを目指している。ハドロン理論の研究者がJ-PARCやSPing-8などにおいて行われる原子核・ハドロン物理の実験的研究と緊密に連携し、実験研究者グループと日常的に議論を重ねて、個々のプロジェクトをサポートすることが急務となっていた。

2. 研究の目的

この計画研究では、研究テーマを上図の通り、次の3つに分類し、それぞれの役割と目的を次のように設定した。

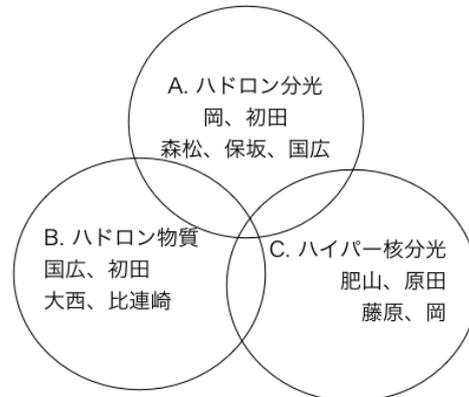
A. ハドロン分光

21世紀に入って注目を集めた、ペンタクォーク(Θ^+)、新しいチャームメソン(D_s^* , X)などは、従来のクォーク模型、カイラル模型の枠にはまらない新しいエキゾチックハドロンとして、多くの理論・実験研究者が相競って研究を進めてきた。またこれに伴い、バリオン励起状態に対する従来の解釈も変更を求められ、QCDを直接用いた研究と、それに基づく新しいハドロン構造の概念と有効理論の構築が求められた。この研究計画では、格子QCD、QCD和則などの計算を元に、クォークの閉じ込め機構とカイラル対称性を反映した有効模型を用いて、ハドロンの構造と生成反応機構を明らかにすることを目指してきた。

B. ハドロン物質

中性子星などのコンパクト星内部では高密度状態が実現し、カラー超伝導などのエキゾチックな物質相が現れる可能性が指摘されてきた。また、原子核の密度でハドロンの質量や結合定数が変化する、カイラル対称性回復の前駆現象が予想されている。さらに、K中間子原子核では、Kの強い引力の媒介で核子密度が極めて高くなる可能性も指摘されてきた。本領域の実験計画では、J-PARCにおけるメソンの核内生成、K原子核分光による有限密度での中間子の性質解明を目指す。

この研究計画では、有限密度QCDに基づくカイラル対称性の回復、有限温度・密度でのQCDの相図の解明、コンパクト星の構造、 π 原子核、K原子核などの生成、構造を明ら



主要研究分野と研究担当者

かにすることを目指してきた。

C. ハイパー核分光

ストレンジネスを持ったハドロンの相互作用の研究は、この10年間のハイパー核物理の実験的、理論的な大進展により、通常の原子核の研究に匹敵するレベルとなってきている。本領域の主目的であるJ-PARCにおける実験計画の中心課題は、ハイパー核、ダブルハイパー核の生成、構造、崩壊過程の解析である。ここでは、領域内の研究計画で遂行される実験と緊密な連携をとりつつ、QCDに基づくYNおよびYY相互作用の構築、ハイパー核の構造、反応、ダブルハイパー核、核内でのストレンジネス弱崩壊の仕組みを解明することを目指した。

これらの3分野の研究は互いに独立ではなく、QCDの非摂動領域での基本的な問題に強く関連して互いに補いあうテーマとなっている。また、いくつかの実験的研究に同時に関わり、それぞれ緊密な情報交換による具体的な実験の提案、結果の精密な理論解析を行ってきている。いずれのテーマ分野も、もともと日本の研究者が研究の端緒を開き、世界のリーダーとして推進してきた実績を持つ。この研究計画の代表者、分担者(および各研究機関におけるその協力者)はこれまで理論分野においてその中核となる役割を果たしてきたが、さらに、この計画研究および公募研究を通じて、若手研究者を含む周辺の研究者の総力を集結することにより、領域として強力な理論研究体制を構築するとともに、各実験計画と緊密な協力関係を保ち、領域全体の到達目標を実現するプレーンとして最大の推進力となることが期待された。

世界的に見ても、新しい世界最高強度の加速器施設 J-PARC を得て、これを中心とした物理の成果へ向けて、国内外の研究者が新しい組織的展開をして行く事が急務であるが、その中心的な役割を担うのは、これまでもこの分野をリードしてきた日本の理論グループであり、この研究計画はその組織的中心と見なされる。

3. 研究の方法

本研究計画では、当該分野を代表する全国の研究機関に所属する理論研究者によって研究班を組織し、一研究機関にそれぞれ数名程度所属する研究者による小規模の研究班を複数構成し、小中規模の研究会を開催して、緊密に情報交換を行い、内容の濃い議論を徹底的に行った。加えて、その成果を国際的なものとするために、代表者、分担者を主催者として本分野に関連する国際ワークショップを開催した。

また、若手研究者の育成のために、各年度3名-4名程度の研究支援PDを雇用し各研究グループに配置したほか、サマースクールを開催して、本領域全体として若手研究者を育成し、研究のいっそうの組織化、進展を図った。

3つの研究の柱、A. ハドロン分光、B. ハドロン物質、C. ハイパー核分光を中心に、それぞれの研究機関において組織した研究グループが緊密に連携協力して研究を実施した。また、特定領域の中心課題である J-PARC における原子核・ハドロン実験を遂行する実験グループ・プロジェクトをサポートし、個々の実験計画の詳細についての議論も綿密に行うことを目指した。

4. 研究成果

A. ハドロン分光分野

2003年のペンタクォークの発見を契機に、ハドロン分光ルネッサンスと呼ばれるほど、新しい研究が展開を始め、その拡大によって新しい研究者を多く巻き込んで研究が進展した。その結果多数の新しい知見が得られたが、その研究の最前線を日本の研究者、とりわけ本研究計画の研究者グループがリードしてきた。2007年以後はペンタクォーク研究は下火となったが、このブレイクスルーをきっかけに、ハドロンの励起状態の新しい見方と可能性が次々に明らかとなり、理論的研究が大きく広い対象へと展開した。とりわけ、多クォーク系の存在形態の一つであるハドロン分子的束縛（共鳴）状態の存在が指摘され、これを巡る理論研究とそれに触発された実験による探索が進んだ。また、電子・陽電子衝突型の加速器による新しいチャーモニウム型状態の発見も相次ぎ、3番目のフレーヴァーであるストレンジネスから4番目のチ

ャームへの研究が進展し、新しい分野となって結実した。この分野では、2009年度から新しく新学術領域研究「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的研究」が生まれている。

この研究では、理論的手法の開発も大きく進んだ。とりわけ、量子色力学 (QCD) による第一原理計算である格子 QCD および解析的手法として QCD 和則、有効理論としてカイラルユニタリ模型、分子共鳴とクォーク多体系の結合系のダイナミクスやハドロンの多体系のダイナミクスを扱う手法の開発が進み、ハドロン共鳴状態の理解が進んだ。

主要な成果として以下のものがある。

- (1). ペンタクォークの性質と構造、生成機構の解明
- (2). 格子 QCD を用いた共鳴状態探索の手法の開発と適用
- (3). QCD 和則の方法による励起状態研究手法の開発
- (4). 多クォークエキゾチックハドロン

B. ハドロン多体系およびハドロン物質分野

この分野は、ストレンジネスを用いてハドロン物質を探索する手法を用いて、ハドロンの質量を生み出すカイラル対称性の自発的破れの解明を目指すとともに、有限密度核物質中でのハドロンのダイナミクスを探求してきた。特に、次の各研究分野で世界をリードする重要な成果を上げた。

- (1). カイラル理論に基づくハドロン共鳴の構造
- (2). K 中間子束縛原子核のスペクトルや構造、崩壊幅、従来への解析への批判
- (3). メソンやバリオン (π , K, η , η' , N^* , Θ^+) を含むエキゾチック核
- (4). 有限密度 QCD

C. ハイパー核と一般化核力

本領域の主目的である J-PARC における研究の中心課題として、ハイパー核、ダブルハイパー核の生成、構造、崩壊過程の解析を行い、蓄積されてきた Λ , Σ , およびダブル Λ ハイパー核実験データを元に一般化された核力の解明が進んだ。さらに、格子 QCD による核力の第一原理計算が大きく進み、ハイペロン核子間にも応用された。その結果、一般化核力の解明が大きく進んでいる。主要分野は以下の通りである。

- (1). ハイパー核の精密分光によるハイペロンと核子の相互作用（一般化された核力）解明
- (2). 一般化核力の模型の構築
- (3). 格子 QCD による核力の研究

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 30 件)

○ペンタクォーク、エキゾチックハドロン、に関するもの

1. P. Gubler, D. Jido, T. Kojo, T. Nishikawa, M. Oka, Possible quantum numbers of the pentaquark $\Theta^+(1540)$ in QCD sum rules, Phys. Rev. D80 (2009) 114030
2. T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka, Origin of the resonances in the chiral unitary approach. Phys. Rev. C78 (2008) 025203
3. M. Hirai, S. Kumano, M. Oka, K. Sudoh, Proposal for exotic-hadron search by fragmentation functions, Phys. Rev. D77 (2008) 017504
4. J. Sugiyama, T. Nakamura, N. Ishii, T. Nishikawa, M. Oka, Mixings of 4-quark components in light non-singlet scalar mesons in QCD sum rules, Phys. Rev. D76 (2007) 114010
5. E. Hiyama, M. Kamimura, A. Hosaka, H. Toki, M. Yahiro, Five-body calculation of resonance and scattering states of pentaquark system, Phys. Lett. B633 (2006) 237
6. S. -I. Nam, A. Hosaka, H. C. Kim, Suppression of Θ^+ ($J^\pi=3/2^+$) photoproduction from the proton, Phys. Lett. B633 (2006) 483
7. T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka, Exotic hadrons in s-wave chiral dynamics, Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 192002
8. Y. Kanada-En'yo, O. Morimatsu, T. Nishikawa, Narrow $J^\pi = 1/2^+$, and $3/2^+$ states of Θ^+ in a quark model with antisymmetrized molecular dynamics, Phys. Rev. C71 (2005) 045202
9. A. Hosaka, M. Oka, T. Shinozaki, Decay of Θ^+ in a quark model, Phys. Rev. D71 (2005) 074021
10. N. Ishii, T. Doi, H. Iida, M. Oka, F. Okiharu, H. Suganuma, Penta-quark baryon in anisotropic lattice QCD, Phys. Rev. D71 (2005) 034001
11. N. Ishii, T. Doi, Y. Nemoto, M. Oka, H. Suganuma, Spin 3/2 penta-quarks in anisotropic lattice QCD, Phys. Rev. D71 (2005) 074503
12. T. T. Takahashi, T. Umeda, T. Onogi, T. Kunihiro, Search for the possible $S=+1$ pentaquark states in quenched lattice QCD, Phys. Rev. D71 (2005) 114509

○核内ハドロン、有限密度 QCD に関するもの

13. K. Miura, T. Z. Nakano, A. Ohnishi, N. Kawamoto, Phase diagram evolution at finite coupling in strong coupling lattice

QCD, Phys. Rev. D80 (2009) 074034

14. T. Koike, T. Harada, Deeply bound K^-pp state in the ${}^3\text{He}(\text{in-flight } K^-, n)$ spectrum, and its moving pole near the $\pi \Sigma N$ threshold, Phys. Rev. C80 (2009) 055208
15. D. Jido, T. Hatsuda, T. Kunihiro, In-medium Pion and Partial Restoration of Chiral Symmetry, Phys. Lett. B670 (2008) 109-113
16. A. Arai, M. Oka, S. Yasui, Λ^* -hyper-nuclei in phenomenological nuclear forces, Prog. Theor. Phys. 119 (2008) 103-115
17. C. Ishizuka, A. Ohnishi, K. Tsubakihara, K. Sumiyoshi, S. Yamada, Tables of Hyperonic Matter Equation of State for Core-Collapse Supernovae, Jour. Phys. G35 (2008) 085201(1-19)
18. H. Nagahiro, S. Hirenzaki, Formation of η' (958)-mesic nuclei and axial U(1) anomaly at finite density, Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 2325031

○ハイパー核と一般化核力にかんするもの

19. T. Inoue et al. (HAL QCD Collaboration), Baryon-Baryon Interactions in the Flavor SU(3) Limit from Full QCD Simulations on the Lattice, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 591-603.
20. A. Umeya, T. Harada, The Lambda-Sigma coupling effect in the neutron-rich Lambda-hypernucleus ${}^{10}_\Lambda\text{Li}$, Phys. Rev. C79 (2009) 024315
21. E. Hiyama, Y. Yamamoto, T. Motoba, M. Kamimura, Structure of $A=7$ iso-triplet Λ hypernuclei studied with the four-body model, Phys. Rev. C80 (2009) 054321
22. T. Harada, A. Umeya, Y. Hirabayashi, Feasibility of extracting a Sigma-admixture probability in the neutron-rich ${}^{10}_\Lambda\text{Li}$ hypernucleus, Phys. Rev. C79 (2009) 014603
23. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Hyperon-nucleon force from lattice QCD, Phys. Lett. B673 (2009) 136-141
24. E. Hiyama, Y. Yamamoto, T. Motoba, Th. A. Rijken, M. Kamimura, Light Ξ hypernuclei in four-body cluster models, Phys. Rev. C78 (2008) 054316
25. Y. Fujiwara, Y. Suzuki, M. Kohno, K. Miyagawa, Addendum: Triton and hyper triton binding energies calculated from SU_6 quark-model baryon-baryon interactions, Phys. Rev. C77 (2008) 027001
26. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, The Nuclear Force from Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 022001

27. Y. Fujiwara, Y. Suzuki and C. Nakamoto, Baryon-baryon interactions in the SU₆ quark model and their applications to light nuclear systems, Prog. Part. Nucl. Phys. 58 (2007) 439-520.

28. T. Harada, Y. Hirabayashi, Sigma-production spectrum in the inclusive (π^- , K^+) reaction on ^{209}Bi and the Σ^- -nucleus potential, Nucl. Phys. A767 (2006) 206-217

29. E. Hiyama, Y. Yamamoto, Th. A. Rijken, T. Motoba, Four-body structure of $^7_\Lambda\text{Li}$ and ΛN spin-dependent interaction, Phys. Rev. C74 (2006) 054312

30. T. Harada, Y. Hirabayashi, Is the Sigma-nucleus potential for Sigma- atoms consistent with the $^{28}\text{Si}(\pi^-, K^+)$ data?, Nucl. Phys. A759 (2005) 143-169

[学会発表] (計 7 件)

1. M. Oka, Recent results on strange systems from QCD sum rules and lattice QCD Sendai International Symposium on Strangeness in Nuclear and Hadronic Systems (SENDAI08), 2008 年 12 月 15 日 東北大学、仙台

2. M. Oka, Meson-Baryon Couplings in QCD, Workshop on Hadron Dynamics, 2008 年 9 月 26 日, Almuñecar (Spain)

3. M. Oka, Dynamics of Multiquark Systems: Mass, Width and Exotics, The 18th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB18), Santos, Sao Paulo, Brazil, 21-26 Aug 2006.

4. M. Oka, Exotic hadrons: What have we learned from Pentaquarks? The International Workshop on Quark Nuclear Physics 2006, Kanazawa Photon Science Institute, JAEA, Kizuka, 16-18 Feb, 2006

5. M. Oka, Spectroscopy of Pentaquark Baryons, The 3rd Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, Nakhon Ratchasima, Thailand, 26-30 Jul 2005.

6. M. Oka, Spectroscopy of pentaquark baryons, The International Conference on QCD and Hadronic Physics, Beijing, China, 16-20 Jun 2005.

7. M. Oka, Spectroscopy of Pentaquarks Japan-US Workshop on Electromagnetic Meson Production and Chiral Dynamics, April 8-9, 2005, Osaka Univ.

[図書] (計 1 件)

S. Nagamiya, M. Oka et al., Nuclear physics. Proceedings of the 23rd International Conference, (INPC2007) Elsevier Pub. Co.) (2008) pp589

[その他]

シンポジウム、研究会、サマースクール等

これらの成果は、本研究計画の代表者、分担者、公募研究の研究グループ、本計画研究経費により採用されたポストドク研究員を始め、多くの当該分野の研究者が関わって得られたものである。本研究計画では、広く国際的な研究協力と情報交換を促進するとともに、ポストドク、学生など将来のこの分野を担う若手研究者の育成にも努めた。本計画研究班の企画・主催あるいは支援によって実施された主要な研究集会等は以下の通りである。

○サマースクール 実践講座

実践講座サマースクールは 2006 年度から 2009 年度の 4 回行い、各回に下記の実践講座テーマから 3 つずつを開講した。

サマースクール校長は岡真、副校長は肥山詠美子が務めた。また、このサマースクール各講座の講義ノートをもとめて、原子核研究、53 巻 Supplement 2 号 (2009 年 3 月) ならびに 54 巻 Supplement 2 号 (2010 年 2 月) として冊子として発表、広く配布した。

実践講座テーマ一覧

1. ハイパー核の変分計算

講師：肥山詠美子 (理研)、新村昌治 (岐阜大)

2. エキゾチック原子核の生成反応計算

講師：比連崎悟 (奈良女大)、原田融 (大阪電通大)

3. ハイパー核の構造の AMD 計算

講師：大西明 (京大基研)、土手昭伸 (KEK 素核研)、木村真明 (北大)

4. ハドロンの光生成反応計算

講師：保坂淳 (阪大 RCNP)、慈道大介 (京大基研)

開催日程、場所

第 1 回 「ハイパー核実践講座」

日程 2006 年 7 月 24 日-27 日 (参加者 31 名) 場所 高エネルギー加速器研究機構

第 2 回 「エキゾチック原子核実践講座」

日程 2007 年 9 月 11 日-14 日 (参加者 37 名) 場所 高エネルギー加速器研究機構

第 3 回 「エキゾチック原子核実践講座」

日程 2008 年 8 月 3 日-6 日 (参加者 48 名) 場所 理化学研究所

第 4 回 「エキゾチック原子核実践講座」

日程 2009 年 8 月 4 日-7 日 (参加者 45 名) 場所 理化学研究所

○企画研究会

以下の研究会を本研究計画の主催で行った。
・理論班研究報告会 (大阪大学核物理研究セ

ンター、2006年5月6日、参加者 15名)

・「ストレンジネスとエキゾティクス・理論の課題」研究会(鳥羽、2007年3月1日-3日、参加者 50名)

・「ストレンジネスを含むクォーク多体系分野の理論的将来を考える」研究会(熱海、2009年2月27-28日、参加者 57名)

・「ストレンジネスから新ハドロンへ」研究会(大阪大学吹田キャンパス、2009年12月11日-12日、参加者 33名)

○支援したシンポジウム

・湯川記念国際シンポジウム(YKIS) New Frontiers in QCD - Exotic Hadrons and Hadronic Matter -

場所 京都大学基礎物理学研究所

日程 2006年11月20日~12月8日(外国人40名を含む150名程度)

○ホームページ等

<http://www.th.phys.titech.ac.jp/~exotic>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡 真 (OKA MAKOTO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 60144606

(2) 研究分担者

比連崎 悟 (HIRENZAKI SATORU)

奈良女子大学・理学部・教授

研究者番号: 60283925

国広 悌二 (KUNIHIRO TEIJI)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号: 20153314

原田 融 (HARADA TORU)

大阪電気通信大学・医療福祉工学部・教授

研究者番号: 70238187

保坂 淳 (HOSAKA ATSUSHI)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号: 10259872

初田 哲男 (HATSUDA TETSUO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 20192700

大西 明 (OHNISHI AKIRA)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号: 70250412

肥山 詠美子 (HIYAMA EMIKO)

理化学研究所・仁科加速器研究センター・准主任研究員

研究者番号: 10311359

藤原 義和 (FUJIWARA YOSHIKAZU)

京都大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号: 70199397

森松 治 (MORIMATSU OSAMU)

高エネルギー加速器研究機構・

素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 60210184

(3) 協力研究者 (ポスドク研究員)

石井 理修 (ISHII NORIYOSHI)

(東京大学、17-18年度)

安井 繁宏 (YASUI SHIGEHIRO)

(東京工業大学、17年度-18年度)

大谷 宗久 (OHTANI MUNEHISA)

(素粒子原子核研究所、18年度)

遠藤 友樹 (ENDO TOMOKI)

(大阪大学核物理研究センター、18年度)

高橋 徹 (TAKAHASHI TORU)

(東京工業大学、19年度)

NAM SEUNG-IL

(京都大学、19-20年度)

梅谷 篤史 (UMEYA ATSUSHI)

(大阪電通大、19-20年度)

佐々木 健志 (SASAKI KENJI)

(奈良女子大、19-20年度)

三浦 光太郎 (MIURA KOTARO)

(京都大学、20-21年度)

佐々木 潔 (SASAKI KIYOSHI)

(東京工業大学、20-21年度)

松尾 衛 (MATSUO MAMORU)

(素粒子原子核研究所、21年度)