

平成23年5月2日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540275

研究課題名（和文） ハドロンのマルチクォーク成分とそのダイナミクス

研究課題名（英文） Multi-quark Components of Hadrons and their Dynamics

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）：エキゾチックな多クォーク状態がメソンおよびバリオンのスペクトルにどのように現れるかを、強い相互作用の基礎理論である量子色力学（QCD）に基づいて解明した。格子QCDによる励起状態バリオンや、ハドロン間相互作用、バリオンとメソンの結合定数、形状因子の計算、QCD和則による結合定数の計算、スペクトル関数やハドロン構造の解析などで多くの成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Analyses of exotic multi-quark hadrons in the mesonic and baryonic spectra have been carried out based on Quantum Chromo-Dynamics (QCD) the fundamental theory of strong interaction. Lattice QCD is applied to excited baryons, hadronic interactions, meson-baryon coupling constants and form factors. QCD sum rule technique is applied to evaluation of coupling constants, spectral functions, and hadron structure.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
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

キーワード：理論核物理、素粒子論、ハドロン物理、量子色力学

1. 研究開始当初の背景

2003年のペンタクォークの発見を契機に、ハドロン分光分野で多くの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、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

実しつつある。

これらの研究の多くは、カイラル有効理論などを用いて行われるが、多くのパラメータを含むことが多い。第一原理である量子色力学 (QCD) によって、その有効性を確かめることが求められる。ここでは、マルチクォーク状態に焦点を当てて、そのダイナミクスを QCD がどのように予言するかを明らかにすることを目指した。

2. 研究の目的

エキゾチックな多クォーク状態がメソンおよびバリオンのスペクトルにどのように現れるかを、強い相互作用の基礎理論である QCD に基づいて解明する。特に格子 QCD および QCD 和則の手法をクォーク模型などの有効模型と組み合わせることにより、ペンタクォーク Θ^+ 、励起バリオン Λ^* 、その他のハドロン励起状態のクォーク構造を解明する。さらに、同じく QCD に基づいてハドロン間の相互作用とハドロンの分子的共鳴状態の構造を解明する。

3. 研究の方法

この研究では、理論的手法の開発も大きく進んでいる。とりわけ、QCD による第一原理計算である格子 QCD では、最近の計算機と技術的な進展で、非クエンチ近似のゲージ配位を用いた様々なハドロン状態の解析が可能になった。この研究では、励起ハドロン状態の解析、ハドロン間相互作用、バリオンとメソンの結合定数、形状因子の計算などが大きく進んだ。

また、これと相補的な解析的手法として QCD 和則を用いた。和則を構築するには、局所演算子の相関関数を用いるが、演算子として複合的な演算子を取り入れてハドロンの構造の情報を引き出す手法と、最大エントロピー法を用いてスペクトル関数を仮定なしに導く方法、また相関関数の線形結合から基底状態の情報を引き出す手法などの開発により、ハドロンの励起状態への和則の適用が可能となった。

4. 研究成果

主要な成果として以下のものがある。

(1) QCD 和則によるメソンのクォーク数の評価 (論文 24)

スカラームesonにおける余分なクォーク・反クォーク対の混合の定量的評価を、QCD 和則を用いて行った。

(2) QCD 和則によるバリオンのクォーク数の評価 (論文 20)

同じく SU(3) 1 重項の Λ バリオン励起状態における 3 クォークと 5 クォーク状態の混合の定量的評価を QCD 和則を用いて行った。

(1), (2) の研究共に、余分なクォーク・反

クォーク対を含む状態が 90% 近くを占める主成分であることを指摘した。これは、QCD に基づいての定量的な解析としては初めての成果である。

(3) 高エネルギー反応におけるクォーク数解析 (論文 18)

クォーク破碎関数による多クォークハドロンの同定可能性を高運動量移行反応における破碎関数のフレーヴァー依存性を解析して、スカラームesonの 4-クォーク成分を特定して行うことを提案した。これは今後、エキゾチックハドロンの同定に重要な方法の一つとなると考えられる。

(4) チャームメソンにおける 4-クォーク成分の混合とアイソスピン対称性の破れの可能性 (論文 23)

インスタントン効果によるフレーヴァー混合寄与を取り入れたクォーク模型を用いた解析の結果、グルーオン交換効果とインスタントン効果とが釣り合うことでフレーヴァー混合が抑圧される場合に、アイソスピンの破れが強くなる場合があることを指摘した。

(5) ペンタクォーク Θ^{\pm} の量子数 (論文 9, 11)

QCD 和則を用いて、ペンタクォーク Θ^+ の量子数と質量の解析を行った。QCD 和則の信頼度を高めるために高次数の演算子まで積展開を行った上、2 つの相関関数の差をとる方式で連続状態との結合を抑制して、極の効果をも十分に取り出す工夫を行った。その結果、アイソスピン 0 および 1 でスピン 3/2、パリティ + のペンタクォークが 1.5 GeV あるいは少し高い質量で存在する可能性が高いことを示した。

(6) 格子 QCD による Λ 励起状態 (論文 6)

格子 QCD (2-flavor full QCD) の解析から求めた負パリティの Λ バリオン状態を解析し、SU(3) 1 重項と 8 重項を主成分とする 2 つの状態が 1.6 GeV 程度に現れることを結論した。この結果、1.4 GeV 付近に現れる Λ 状態は、3-クォークではなく 5-クォークあるいは NK 束縛状態などの分子共鳴状態である可能性が高いことを明らかにした。引き続き、5-クォークを含む格子 QCD による解析が必要であることを示唆した。

(7) Λ^*N 相互作用と Λ^* ハイパー核の質量 (論文 3, 21)

K-メソンを原子核に吸収させて作られる Λ^* 原子核の束縛エネルギーを求めるために Λ^* と核子の相互作用をメソン交換模型を元に構築し、その性質と束縛状態の様子を調べた。その結果、カイラルユニタリ模型で予言されている 2 つの Λ^* 極の中で、 $K\bar{N}$ と強く結合する幅の狭い共鳴が核子と束縛状態を作る可能性があることを示した。束縛状態は、 $K\bar{N}-N$ 束縛状態と見なすこともできる。この結果を他の理論的方法による結果と比較するとともに、その崩壊幅の計算を行い、実

験的な探索への手がかりを与えた。

(8) 格子QCDによるメソンの散乱位相差
(論文2, 12)

この研究では、格子QCDの最新ゲージ配位を用いて、 π -K 散乱の散乱長ならびに散乱振幅を求めることを目指した。 π -K の $I=3/2$ 系はこれまでも計算が行われているが、 $I=1/2$ は技術的に難しく、これまで精密計算がされていない。これまでに、散乱長の解析を行い、カイラル摂動論との比較を行い、低エネルギー定数を求めた。

(9) 最大エントロピー法をQCD和則に適用することによるハドロンのスペクトル関数の導出 (論文1)

QCD和則ではハドロンのスペクトル関数の形を仮定してそのパラメータを和則から求める方法が用いられてきた。しかし、そこでしばしば用いられる Pole+ Continuum のスペクトル関数は、演算子と強く結合してピークを与えるような状態があることを仮定して始めて有効であることから、エキゾチックハドロンなど、存在の可否が問われる場合には予言能力に限界があった。この研究では、最大エントロピー法を適用してスペクトル関数を形を仮定せずに推定することができることを示した。実際のこの方法を ρ メソンやチャームハドロンに適用し、この方法の有効性を示した。

(10) 格子QCDによるバリオンとメソン、軸性流との結合定数、形状因子の解析 (論文4, 5, 13)

格子QCDの非クエンチゲージ配位を用いて、8重項バリオンの擬スカラーならびに軸性ベクトル結合定数および有限運動量移行での形状因子を解析した。特にSU(3)の破れ、Goldberger-Treiman 関係式の破れに注目した研究を行い、結合定数のSU(3)対称、反対称の2つの成分の比(F/D比)のクォーク質量依存性を調べた。その結果、擬スカラー、軸性ベクトル共にSU(3)対称性が非常に良く保たれる一方、F/D比はクォーク質量に依存していることを明らかにした。これらの結果は、低エネルギーハドロン有効理論の構築において重要な情報を提供している。

(11) ヘビークォークバリオンの束縛状態の探索 (学会発表3)

チャームクォークを含むバリオン Λ_c , Σ_c , Σ_c^* と核子およびヘビーバリオン同志の相互作用を中間子交換力描像に基づいて求め、バリオン2体系の分子的束縛状態の可能性を追求した。中間子とヘビーバリオンの結合定数は、ヘビークォーク対称性とカイラル対称性に基づく有効相互作用ラグランジアンを用いて決定した。ヘビークォーク対称性により、 Σ_c と Σ_c^* の質量差が小さいため、パイオン交換のテンサー力による Σ_c , Σ_c^* の混合の役割が重要であることを指摘し、 Σ_c , Σ_c^*

を含む状態とのチャネル結合を含む2体系の計算を行った結果、 $\Lambda_c N$ のスピン0, 1の状態に束縛状態を予想した。同様の計算をチャームを2個含む $\Lambda_c \Lambda_c$ 系についても行い、同じく Σ_c , Σ_c^* を含む状態との結合により束縛状態が存在する可能性が高いことを示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計25件)

1. P. Gubler, M. Oka, A Bayesian approach to QCD sum rules, Prog. Theor. Phys. 124, 995-1018, 2010.

2. K. Sasaki, N. Ishizuka, T. Yamazaki, M. Oka, S-wave π K Scattering Length in 2+1 Flavor Lattice QCD, Prog. Theor. Phys. S186, 187-192, 2010.

3. T. Uchino, T. Hyodo, M. Oka, $\Lambda^* N$ Bound State Based on Chiral Dynamics, Prog. Theor. Phys. S186, 240-243, 2010.

4. T.T. Takahashi, G. Erkol, M. Oka, Pseudoscalar-Meson Octet-Baryon Coupling Constants from two-flavor Lattice QCD, Nucl. Phys. A835, 346-349, 2010.

5. G. Erkol, T.T. Takahashi, M. Oka, Axial Charges of Octet Baryons in Two-flavor Lattice QCD, Phys. Lett. B686, 36-40, 2010.

6. T.T. Takahashi, M. Oka, Low-lying Λ Baryons with spin 1/2 in Two-flavor Lattice QCD, Phys. Rev. D81, 034505, 2010.

7. Y.-R. Liu, M. Oka, M. Takizawa, X. Liu, W.-Z. Deng, S.-L. Zhu, DDbar production and their interactions, Phys. Rev. D82, 014011, 2010.

8. D. Jido, T. Sekihara, Y. Ikeda, T. Hyodo, Y. Kanada-En'yo, E. Oset, The nature of $\Lambda(1405)$ hyperon resonance in chiral dynamics, Nucl. Phys. A835, 59-66, 2010.

9. 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, 114030, 2009.

10. G. Erkol, M. Oka, Spin Content of Lambda in QCD Sum Rules, Phys. Rev. D79, 114028, 2009.

11. P. Gubler, D. Jido, T. Kojo, T. Nishikawa, M. Oka, Spin-3/2 Pentaquark in QCD Sum Rules, Phys. Rev. D79, 114011, 2009.

12. K. Sasaki, N. Ishizuka, T. Yamazaki, M. Oka, S-wave π K scattering length from lattice QCD, PoS LAT2009, 098, 2009.

13. G. Erkol, M. Oka, T.T. Takahashi, Pseudoscalar meson-octet-baryon coupling constants in two-flavor lattice QCD, Phys. Rev. D79, 074509, 2009.

14. M. Oka, G. Erkol, T.T. Takahashi, Recent QCD results on the strange hadron systems, PoS CD09, 021, 2009.
15. G. Erkol, M. Oka, G. Turan, Meson-baryon sigma terms in QCD sum rules, Phys. Rev. D78, 094003, 2008.
16. G. Erkol, M. Oka, G. Turan, QCD Sum Rules study of meson-baryon sigma terms, Phys. Lett. B659, 176-183, 2008.
17. T. Nakamura, P. Gubler, M. Oka, Chiral Symmetry of Nucleon Resonances in QCD sum rules, Phys. Rev. D78, 014010, 2008.
18. M. Hirai, S. Kumano, M. Oka, K. Sudoh, Proposal for exotic-hadron search by fragmentation functions, Phys. Rev. D77, 017504, 2008.
19. G. Erkol, M. Oka, Finite-width effects on Delta baryons in QCD Sum Rules, Nucl. Phys. A801, 142-153, 2008.
20. T. Nakamura, J. Sugiyama, T. Nishikawa, M. Oka, Exotic quark structure of $\Lambda(1405)$ in QCD sum rule, Phys. Lett. B662, 132-138, 2008.
21. A. Arai, M. Oka, S. Yasui, Λ^* -hyper-nuclei in phenomenological nuclear forces, Prog. Theor. Phys. 119, 103-115, 2008.
22. T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka, Origin of the resonances in the chiral unitary approach. Phys. Rev. C78, 025203, 2008.
23. S. Yasui, M. Oka, Triquark structure and isospin symmetry breaking in exotic D_s mesons, Phys. Rev. D76, 034009, 2007.
24. 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, 114010, 2007.
25. N. Ishii, T. Doi, M. Oka, H. Suganuma, Five-quark picture of $\Lambda(1405)$ in anisotropic lattice QCD, Prog. Theor. Phys. Suppl. 168, 598-601, 2007.

[学会発表] (計 8 件)

1. M. Oka, Two novel methods in QCD sum rules, invited talk, Int. Workshop on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei, June 21-24, 2010, Valencia, Spain.
2. M. Oka, Prospects of the Hadron Physics at J-PARC, invited talk, Int. Sympo. on Nanoscience and Quantum Physics 2011, Jan. 26-28, 2011, Tokyo, Japan.
3. Y.R. Liu, M. Oka, Possible bound state in the $\Lambda_c N$ channel, Int. conf. on the structure of baryons, Dec. 7-11, 2010, Osaka, Japan.
4. P. Gubler, M. Oka, A Bayesian Analysis of QCD Sum Rules, Int. conf. on the

structure of baryons, Dec. 7-11, 2010, Osaka, Japan.

5. M. Oka, Keynote on QCD: Hadron Spectroscopy in QCD, keynote talk, US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, Oct. 12, 2009, Hawaii, USA.
6. M. Oka, How exotic can hadrons be? シンポジウム講演, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日 (立教大学、東京)
7. M. Oka, Meson-Baryon Couplings in QCD, invited talk, Workshop on Hadron Dynamics, Sept. 26, 2008, Almuñecar, Spain.
8. M. Oka, Recent results on strange systems from QCD sum rules and lattice QCD, invited talk, Sendai Int. Symposium on Strange-ness in Nuclear and Hadronic Systems, Dec. 15, 2008, Sendai, Japan.

[図書] (計 1 件)

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

[その他]

ホームページ等

www.th.phys.titech.ac.jp/~oka

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：6 0 1 4 4 6 0 6

(2) 研究分担者

西川 哲夫 (TETSUO NISHIKAWA)

了徳寺大学・教養教育センター・准教授
研究者番号：10391806

(3) 連携研究者

兵藤哲雄 (HYODO TETSUO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
佐々木潔 (SASAKI KIYOSHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・PD 研究員

高橋 徹 (TAKAHASHI TORU)

群馬高等専門学校・講師

(4) 研究協力者

Philipp Gubler

東京工業大学・大学院理工学研究科・大学院生

