

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 24 年 6 月 14 日現在

機関番号：32668

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20540281

研究課題名（和文） ハドロンの性質に対するクォーク反クォーク対の影響

研究課題名（英文） The effects of the quark-antiquark pairs on the hadron properties

研究代表者

竹内 幸子 (Sachiko Takeuchi)

日本社会事業大学・社会福祉学部・教授

研究者番号：90251503

研究成果の概要（和文）：

負パリティの Λ 粒子、および、近年発見された $X(3872)$ 、 Z_b^\pm 中間子を解析し、 Λ については3クォーク系とバリオン-中間子系の、 $X(3872)$ については2中間子状態と c - \bar{c} 芯の重ね合わせであると考え、いずれも実験を再現する共鳴状態が得られ、また $X(3872)$ の崩壊時に見られるアイソスピンの破れも説明されることを明らかにした。さらに、その相互作用を用いると Z_b^\pm 中間子の共鳴も説明されることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We have investigated the negative-parity baryon $\Lambda(1405)$ and the recently found $X(3872)$ and Z_b^\pm mesons. We consider $\Lambda(1405)$ to be a superposition of the three-quark state and the baryon-meson state, and $X(3872)$ to be that of the c - \bar{c} core and two-meson state. In both of the cases, the observed features of the resonances are reproduced including a large isospin symmetry breaking found in the $X(3872)$ decay mode. The Z_b^\pm resonance can also be reproduced using the interaction consistent with that of $X(3872)$.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
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
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
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

キーワード：クォーク反クォーク対・励起ハドロン・クォーク模型・エキゾチックハドロン・ $\Lambda(1405)$ ・ $X(3872)$ ・ハドロン物理・理論核物理

1. 研究開始当初の背景

構成子クォーク模型の立場から記述する場合、通常、ハドロンは、バリオンであれば3クォーク(q^3)系、中間子であればクォーク反クォーク($q\bar{q}$)系を採り、それが閉じ

こめポテンシャルの中で相互作用している状態として扱われており、また、それは、一定の成功を収めてきた。

しかし、一方では、生成・崩壊反応から、軽い $q\bar{q}$ 対が重い $c\bar{c}$ 系の周りにある状態

と考えられる X(3872)粒子の発見や、ストレンジネス+1のバリオン Θ^+ の存在の可能性、あるいは、軽いスカラー中間子の質量スペクトルが、単なる $q\bar{q}$ 状態では説明し難いこと等、近年の国内外の実験結果は、 q^3 、 $q\bar{q}$ 系を超えた新しい型のクォーク多体系の存在を強く示唆していた。

また、中間子を基本粒子として扱う有効模型の立場からも、励起バリオンにはバリオン単体とバリオン中間子散乱状態とが強く混合していることが指摘されていた。

このような状況の中で、新しい型のクォーク多体系、中でも、 $q\bar{q}$ 対もしくは内部自由度を考慮した中間子が単純な q^3 系あるいは $q\bar{q}$ 系の周りには、 $q^4\bar{q}$ あるいは $q\bar{q}q\bar{q}$ といった配位を持つマルチクォーク系の性質を調べ、それが観測される散乱や崩壊スペクトラムとどう対応するかを明らかにすることが、国内外を問わず、興味の焦点となっていた。

2. 研究の目的

この領域全体の研究目的は、低エネルギー領域でのハドロンの性質を、より基礎的な自由度であるクォーク・グルーオン系のもので理解すること、また、ハドロン構造を作り出すダイナミクスに対する知見を得て、非摂動的なQCDの性質を現象論的に理解しようとするのである。

その中で、本研究の目的は、ハドロンにおけるクォーク反クォーク対($q\bar{q}$ 対)の影響を、クォーク内部自由度を考慮しつつ明らかにすることであった。つまり、余剰の $q\bar{q}$ 対を付け加えることによって可能になった配位の観測されるハドロンに対する影響を調べるのである。

研究対象は、当初、 $\Lambda(1405)$ 、 $N^*(1440)$ を始めとするバリオン共鳴状態、 $D_{s0}^*(2317)^\pm$ 、 $D_{s1}(2460)^\pm$ 、X(3872)等のパリティが正であるか、或いは、正と予想され、 $q\bar{q}q\bar{q}$ 系の可能性があると考えられている重いクォークを含む中間子、および、1GeVより軽いスカラー中間子とした。しかし、新たに Z_b^\pm 中間子の発見の報告があったため、 $D_{s0}^*(2317)$ 等の他の重いクォークを含む $q\bar{q}q\bar{q}$ 系中間子、および、軽いスカラー中間子についての研究は資料を集めるにとどめ、 Z_b^\pm 中間子に関する研究を優先して行った。

3. 研究の方法

利用した研究手法を、用いた場面と共に以下に挙げる。

(1) クォーク模型によるアプローチ

励起バリオンを、 q^3 、および、 $q^4\bar{q}$ 系の重ね合わせ、あるいは、正パリティの中間子を、 $q\bar{q}$ と $q\bar{q}q\bar{q}$ 系の重ね合わせとして扱う。

クォーク間相互作用としては、短距離部分には、有効1グルーオン交換、および、インスタントンに起因する相互作用のクォーク数を変えない部分、中長距離部分には中間子交換力を用い、バリオンを q^3 系、中間子を $q\bar{q}$ 系としたときの諸性質を再現するようなものを採る。連続状態と極の相互作用については、有効1グルーオン交換より来るものを用いる。

よく使われているクォーク間力としては、グルーオンによるものの他に、 π 中間子交換に起因するものがあるが、マルチクォーク系ではバリオンと中間子を同時に扱うので、ここでは、中間子の質量スペクトルをバリオンと共に再現できるグルーオン交換力を用いる。

状態の波動関数の軌道部分の取り扱いの違いで、クォーク模型によるアプローチは以下の方法に大別される。

①軌道部分を $(0s)^n$ の配位に限る方法

マルチクォーク系の短距離部分の大まかな性質を調べるために、軌道部分をハドロンの大きさの調和振動子の波動関数とし、スピン・フレーバー・カラー部分の波動関数について、可能な状態を分類する。その中で、引力的であり結合状態や共鳴状態として存在する可能性のあるマルチクォーク系を探す。また、ハドロンとしての相互作用を導き、そのチャンネル依存性を求めることで、ハドロン模型で使うべき有効相互作用を導く。

②Resonating-Groupの方法

2ハドロン散乱の連続状態に、軌道部分が励起した q^3 、 $q\bar{q}$ 系を極として埋め込み、ハドロンの内部自由度を積分してから、ハドロン相対の運動を求めるという Resonating-groupの方法で系を解く。この方法により、観測されている共鳴状態と対応するものがクォーク模型から現れるかどうかを直接に調べることが出来る。また、結果がどの程度クォーク間相互作用に依存するかも調べ、どのようなクォーク間相互作用が適切なものであるかについても考察する。

③確率的変分法

4体または5体系の結合状態の波動関数を数値的に解くには、よりエネルギーの低い状態と重なるの大きい基底を選んでゆく確率的変分法が有効であることが知られている。これを用いてX(3872)の軌道部分を解き、クォーク間相関を考慮して状態を調べる。

(2) ハドロン模型によるアプローチ

①Lippman-Schwinger 方程式を解く方法

一般的な散乱問題の解法であるが、軌道部分が励起した q^3 、 $q \bar{q}$ 状態を極として取り込んで解く必要がある。この結果が、クォーク模型による散乱の観測量を再現するようにして、ハドロン間の相互作用を決める。

②Green 関数の方法

X(3872) は、B 中間子の弱い相互作用による崩壊の $B \rightarrow K J/\psi \pi \pi$ チャンネルにピークとして現れる。このうち、弱い相互作用の起きた直ぐ後の $c \bar{c}$ 状態から $J/\psi \rho (\rightarrow \pi \pi)$ に移行する遷移強度を Green 関数の方法で計算する。このことにより、模型がその状態を説明できるか、また、逆に模型の満たすべき条件は何かを明らかにする。また、構成粒子である ρ 中間子の崩壊幅を、Green 関数の複素成分として取り入れ、大きな崩壊幅を持つ ρ 中間子から、X(3872) の小さな崩壊幅が出てくるメカニズムについても調べる。

③複素スケールリング法

散乱状態の波動関数の変数を複素数化することにより、変数の領域をコンパクトにし、数値的に解くことが可能となる。また、相互作用の変化に伴う極の動きがわかり、共鳴の起きる原因についての知見を得る。

(3) 物理量の計算

上記の方法により得られた状態や、その波動関数の成分やエネルギー依存性を見ることにより、散乱の観測量、電磁的性質、崩壊分岐比、アイソスピン破れの大きさ等を計算することが出来る。これらのうちで、マルチクォーク状態のシグナルとなり得るものを探し、実験的にマルチクォーク状態の存在の証となる観測量を見つける。

4. 研究成果

以下の通り、励起バリオン、X(3872)、 Z_b^\pm 中間子についての研究結果を述べる。

(1) $\Lambda(1405)$ 励起バリオンの解析

まず、配位を限ったクォーク 3 体系とクォーク 5 体系のチャンネル結合模型を用いて計算したところ、実験に見られる $\Lambda(1405)$ のピークを再現することが出来た。また、その模型においてクォーク間力からハドロン間力を導き、その特徴を取り入れた単純化したバリオン-中間子散乱模型を作り、クォーク模型による共鳴メカニズムをカイラルユニタリー模型によるものと比較した。特に、クォーク模型では質量が実験より 100MeV 程度高く予言されてしまう $\Lambda(1405)$ については、対応する q^3 状態を、バリオン-中間子散乱状態の極として導入する扱いをした。その結果、クォーク模型、および、カイラルユニタリー

模型は、共に、適切なバリオン-中間子間相互作用と、必要であれば q^3 コアを導入することにより、実験で見られる $\Lambda(1405)$ の特徴を再現する事を明らかにできた。特に、①カイラルユニタリー模型では q^3 コアを入れずに $\Lambda(1405)$ のピークが再現できること、②カットオフエネルギーを低くすると、カイラルユニタリー模型でも q^3 コアの導入が必要となること、③カラー磁気相互作用を基としたクォーク模型では $\bar{K}N$ 間の引力が弱いため q^3 コアの導入が必要であることがわかった。このコアは、クォーク模型から予言されるフレーバー一重項に対応する状態と考えられることから、これを必要とするのは模型として適切である。更に、 $\Lambda(1405)$ 中の q^3 コア成分が大きいと $\bar{K}N$ 散乱長は小さくなることから、実験値より q^3 コアの重要性を推定でき、従って、クォーク模型から得られる弱い $\bar{K}N$ 間力が正しいかどうか検証する可能性を示した。

(2) X(3872) 中間子の解析

エキゾチックハドロンの候補である X(3872) を、スピン 1、パリティ +、荷電パリティ + の量子数を持つ、2 中間子状態とクォーク反クォーク対 ($c \bar{c}$) の芯の重ね合わせであると仮定して解析した。 $c \bar{c}$ は、クォーク模型で予言はされているが見つからない P 波の状態と考えている。配位を制限したクォーク模型での計算では、実験で見られる X(3872) に対応する、 $D^0 \bar{D}^{*0}$ しきい値のすぐ下の浅い結合状態を再現することを示した。また、クォーク模型の特徴を取り入れたハドロン模型により、 $B \rightarrow X(3872) K$ の遷移強度をグリーン関数の方法を用いて調べると、 $c \bar{c}$ コアと $D \bar{D}^*$ 間の遷移相互作用が強ければ、強度スペクトルにコアに対応するピークが現れないことを明らかにした。

また、X(3872) を構成する粒子であるベクトル中間子 ρ 、 ω の崩壊幅は伝播関数の虚数部分として取り入れられること、その崩壊幅を取り入れて $J/\psi \rho (\rightarrow \pi \pi)$ 、 $J/\psi \omega (\rightarrow \pi^3)$ 、および、 $D \bar{D}^*$ に崩壊する遷移強度を求めると、観測されるような細かいピークとして現れる場合が実際にあることがわかった。また、 D^0 と D^\pm 中間子の質量の違いから来る、崩壊の起きる短距離部分では小さな影響しかないアイソスピンの破れにより、アイソスピンが 0 の状態の中にアイソスピンが 1 の状態が数%程度混じる。そして、 ρ 中間子の崩壊幅が ω 中間子の崩壊幅より非常に大きいことから、その小さな破れが拡大されたものとして実験の崩壊幅に見られるアイソスピンの大きな破れが理解されることを明ら

かにした。

(3) $Z_b(10610)^\pm$ と $Z_b(10650)^\pm$ の解析

$X(3872)$ を再現するような $D\bar{D}^*$ 間力からクォークの質量差を考慮して $B\bar{B}^*$ 間力を導き、それを用いて Z_b^\pm の状態を求めた。 Z_b^\pm には、 $X(3872)$ にある $c\bar{c}$ 芯に対応する状態がないために引力は弱くなるが、 B 中間子の質量が重いために $B\bar{B}^*$ 状態が結合状態を作り易くなる。ダイナミカルな計算をすると、これらの効果が相殺され、 Z_b^\pm は、浅い結合状態、または、しきい値の直ぐ上の共鳴状態となり、実験と無矛盾な結果となることを示した。また、構成粒子である B および B^* 中間子の崩壊を考えると、この浅い結合状態としきい値の直ぐ上の共鳴状態は、崩壊スペクトルとしては類似することも示した。

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19件)

- ① Sachiko Takeuchi, Kiyotaka Shimizu and Makoto Takizawa, "Charmonium and Meson-Molecule Hybrid Tetraquarks Vector Meson Width and the Isospin Breaking in the $X(3872)$ Decay," Few-Body Systems Online First, 1-5, 2012, 査読有, 10.1007/s00601-012-0404-4
- ② Makoto Takizawa, Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu, "The Charmonium-Molecule Hybrid Structure of the $X(3872)$," Few-Body Systems Online First, 1-4, 2012, 査読有, 10.1007/s00601-012-0403-5
- ③ S. Takeuchi, M. Takizawa and K. Shimizu, "Negative-parity ΛQ baryons in the baryon-meson continuum," AIP Conference Proceedings 1388, 366-369, 2011, 査読無, 10.1063/1.3647409
- ④ Y.-R. Liu, M. Oka, M. Takizawa, X. Liu, W.-Z. Deng and S.-L. Zhu, "D Dbar production and their interactions" Physical Review D82, 014011(1-18), 2010, 査読有, 10.1103/PhysRevD.82.014011
- ⑤ M. Takizawa and S. Takeuchi, "Heavy Mesons and Hadron Scattering — Structure of the Exotic Hadron $X(3872)$ —," Progress Theoretical Physics Supplement 186, 160-165, 2010, 査読有, 10.1143/PTPS.186.160

- ⑥ Makoto Takizawa and Sachiko Takeuchi, "Structure of the $X(3872)$ and its Isospin Symmetry Breaking," EPJ Web of Conferences 3, 03026(1-3), 2010, 査読有, 10.1051/epjconf/20100303026
- ⑦ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu, "Baryon resonances in the baryon meson scattering coupled to the q^3 -state," EPJ Web of Conferences 3, 07017(1-5), 2010, 査読有, 10.1051/epjconf/20100307017
- ⑧ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu, " $\Lambda(1405)$ in a baryon-meson scattering described from a quark-model viewpoint," International Journal of Modern Physics E19, 167-172, 2009, 査読有, 10.1142/S0218301310016958
- ⑨ Makoto Takizawa and Sachiko Takeuchi, "Structure of $X(3872)$ with coupling to multi-hadronic state," International Journal of Modern Physics E19, 173-177, 2009, 査読有, 10.1142/S021830131001696X
- ⑩ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu, " $\Lambda(1405)$ resonance in baryon-meson scattering with a bound state embedded in the continuum," Physical Review C 79, 045204-(1-12), 2009, 査読有, 10.1103/PhysRevC.79.045204

[学会発表] (計38件)

- ① Sachiko Takeuchi, 『Charmonium and meson-molecule hybrid tetraquarks』、The Fifth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 2011 (APFB2011)、2011年8月23日、Seoul, Republic of Korea
- ② Makoto Takizawa, 『The charmonium-molecule hybrid structure of the $X(3872)$ 』、The Fifth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 2011 (APFB2011)、2011年8月23日、Seoul, Republic of Korea
- ③ Makoto Takizawa, 『Heavy mesons and hadron scattering』、基研研究会 NFQCD 「Exotic hadrons」、2010年2月05日、京都大学基礎物理学研究所、日本
- ④ Sachiko Takeuchi, 『Multiquark hadrons in a quark model』、基研研究会 NFQCD 「Exotic hadrons」、2010年2月10日、京都大学基礎物理学研究所、日本
- ⑤ Sachiko Takeuchi, 『Isospin Symmetry

- breaking in the X(3872)』、Mini-Workshop Bled 2010 "Dressing Hadrons"、2010年7月4日、Bled, Slovenia
- ⑥ 瀧澤 誠、『X(3872)の構造について』、B Workshop 2010、2010年10月13日、熱海、日本
- ⑦ Kiyotaka Shimizu、『Hadron resonances with a quark core embedded in the continuum』、International Symposium "New Faces of Atomic Nuclei"、2010年11月15日、Okinawa Institute of Science and Technology, Japan
- ⑧ Sachiko Takeuchi、『Negative-parity Λ Q baryons in the baryon-meson continuum』、[Baryons' 10] International conference on the structure of baryons、2010年12月8日、大阪大学、日本
- ⑨ Makoto Takizawa、『The charmonium-molecule hybrid structure of the X(3872)』、[Baryons' 10] International conference on the structure of baryons、2010年12月08日、大阪大学、日本
- ⑩ Makoto Takizawa、『Structure of the X(3872) and its Isospin Symmetry Breaking』、[FB19] 19th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics、2009年9月3日、University of Bonn, Germany
- ⑪ Sachiko Takeuchi、『Baryon resonances in the baryon meson scattering coupled to the q_3 -state』、[FB19] 19th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics、2009年9月4日、University of Bonn, Germany
- ⑫ Sachiko Takeuchi、『X(3872) as a coupled two-meson molecular state with a tetraquark configuration』、[HAW09] Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan、2009年10月17日、Hawaii, USA
- ⑬ Makoto Takizawa、『Exotic Charm Mesons X(3872) and Z(4430) with Multi-Hadronic Components』、[HAW09] Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan、2009年10月17日、Hawaii, USA
- ⑭ Makoto Takizawa、『X(3872): a charmonium-molecule hybrid with isospin symmetry breaking』、[HNP09] Workshop on "Hadron and Nuclear Physics (HNP09)"、2009年11月17日、大阪大学、日本
- ⑮ Sachiko Takeuchi、『Lambda(1405) and X(3872) as multiquark systems.』、Mini-workshop Bled 2008 "Few-quark states and the continuum"、2008年9月17日、Bled, Slovenia
- ⑯ Sachiko Takeuchi、『 Λ (1405) in a baryon-meson scattering described from a quark-model viewpoint』、International symposium on "Strangeness in Nuclear and Hadronic Systems"、2008年12月14日、Sendai, Japan
- ⑰ Makoto Takizawa、『Structure of X(3872) with coupling to multi-hadronic state』、International symposium on "Strangeness in Nuclear and Hadronic Systems"、2008年12月14日、Sendai, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 幸子 (Sachiko Takeuchi)
日本社会事業大学・社会福祉学部・教授
研究者番号：90251503

(2) 研究分担者

瀧澤 誠 (Makoto Takizawa)
昭和薬科大学・薬学部・講師
研究者番号：90297044

(3) 連携研究者

清水 清孝 (Kiyotaka Shimizu)
上智大学・理工学部・機能創造理工学科・教授
研究者番号：00143363