

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840026

研究課題名（和文） カイラル動力学に基づいたエキゾチックなハドロン共鳴状態の研究

研究課題名（英文） Exotic hadron resonances based on chiral dynamics

研究代表者

兵藤 哲雄 (HYODO TETSUO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任助教

研究者番号：60539823

研究成果の概要（和文）：

強い相互作用は量子色力学で記述されるが、低エネルギーでは非摂動的効果がはたらく、ハドロンが物理的な自由度としてあらわれる。本研究ではハドロンの自由度のカイラル有効理論に基づいた解析で、エキゾチックなハドロンの構造を、実験による検証手段も考慮して解明した。結果としてLambda(1405)共鳴やシグマ中間子のハドロン分子的構造が、重イオン衝突実験での生成率や対称性の部分的回復に伴うスペクトル変化を調べる事で明らかにできることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Strong interaction is governed by quantum chromodynamics. At low energy, due to the nonperturbative dynamics, hadrons emerge as the physical degrees of freedom. In this study, based on the chiral effective theory with hadronic degrees of freedom, we investigate the structure of exotic hadrons as well as the methods to verify the structures in experiments. It is shown that the hadronic molecular structure of the Lambda(1405) resonance and the sigma meson can be clarified by observing the particle yields in the heavy ion collisions and the modification of the spectrum along with the partial symmetry restoration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010年度	990,000	297,000	1,287,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,080,000	624,000	2,704,000

研究分野：原子核理論

科研費の分科・細目：数物系科学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ハドロン構造、エキゾチックハドロン、ストレンジネス核物理

1. 研究開始当初の背景

低エネルギーQCDにおけるハドロンの研究では、非摂動的効果が顕著になり解析的な計算

が困難で、従来は有効模型によって調べられてきた。構成的クォーク模型の系統的な成功は、ハドロン励起状態の構造においてクォーク・反クォーク対と3クォーク状態で記述さ

れる成分がある程度支配的であることを明らかにしたが、励起状態の構造に関しては十分な理解が得られていない。

特に2ハドロン閾値近傍にあらわれるs波のハドロン共鳴は、閾値チャンネルとの結合が強いと考えられ、通常ハドロンとは異なるエキゾチックな状態があらわれ、多様な物理を示すことが予想されている。

2. 研究の目的

本計画では励起ハドロンの構造を、その共鳴状態としての側面に注目して解明する。静的なクォーク描像を超えて、ハドロン間の相互作用から生じる動力学的な構造を、クォーク的な励起で構成されている成分から分離する方法を開発し、エキゾチックな構造を持つと考えられるハドロン共鳴状態に適用する。同時に構造を実験的に検証する方法を提案するために、物理量の評価や反応計算を行う。

3. 研究の方法

手法はQCDの持つカイラル対称性やフレーバー対称性を反映したハドロンの自由度で構成される有効模型を用いる。ハドロン間の散乱振幅を構成する際に指導原理となるのは、低エネルギーでのカイラル対称性と、散乱振幅の持つユニタリー性、解析性などの一般的な性質である。これらを組み合わせたカイラル対称性に基づくチャンネル結合法（カイラルユニタリー模型）は、ハドロンの励起状態の性質を議論する上で強力な理論的方法である。QCDのもつカイラル対称性とその自発的破れは、低エネルギー定理を通じてハドロン間相互作用に関して制限を与える。特に、s波のカイラル相互作用の主要項は、系の群論的な性質にのみ依存して相互作用の強さや性質が決定される。他方、散乱行列のユニタリー性は確率の保存から導かれ、物理的な散乱振幅が当然満たすべき性質である。これら2つの基本原理に立脚したカイラルユニタリー模型を用いる事で、系統的にハドロン相互作用や共鳴状態を研究することが可能である。

4. 研究成果

カイラル対称性に基づいたハドロン有効模型を用いてエキゾチックな粒子の構造と、その検証手段を調べた。Lambda(1405)粒子やシグマ中間子などのエキゾチックハドロンの内部構造を理論計算で明らかにし、ハドロン生成機構の解析から構造の解明に必要な物理量を示した。主な研究成果は以下の通り。

(1) Lambda(1405)の電磁氣的構造

粒子の構造を調べる標準的な方法は電磁的プローブに対する応答を調べることである。ここでは標準的な3クォークでの記述が難しく、エキゾチックな構造を持つと考えられているLambda(1405)粒子をカイラル動力学模型で記述し、2体の散乱振幅に光子を結合させた図形から電磁的なカレントによる形状因子を計算した。

この結果、Lambda(1405)粒子の空間的な大きさが通常の基底状態のハドロンに比べ顕著に大きく、3クォークではなくメソン・バリオン分子的な構造を持つ事を示唆していることがわかった。

(2) Lambda(1405)の構造と pi Sigma 閾値の振る舞い

Lambda(1405)はKbar N 散乱の閾値下に存在し、pi Sigma チャンネルに崩壊する。これまでの実験でKbar N 散乱のデータが多く集められ、モデルのパラメーターを決めるのに利用されてきた。しかし、Lambda(1405)の構造や、最近活発に議論されているK中間子原子核の研究には、閾値よりエネルギーの低い領域でのKbar N 相互作用が重要になる。よって、よりエネルギーの低いpi Sigma チャンネルに注目し、閾値での物理量とLambda(1405)の構造との関係を議論した。

ここではKbar N と pi Sigma の2チャンネルのモデルをいくつか用意し、Kbar N 閾値で散乱振幅を決めて低いエネルギーへ外挿し、その不定性を調べた。その結果、pi Sigma チャンネルでの散乱長や有効レンジといった閾値パラメーターが、Lambda(1405)の性質と密接に関係していることが分かり、これらの物理量を実験的に決定することが構造の解明に不可欠であることを示した。

(3) 重イオン衝突実験でのエキゾチックハドロンの生成

従来ハドロンの構造の解明には、実験で得られた質量や崩壊の詳細な性質と、模型計算との比較が用いられてきた。また、エキゾチックハドロンの探索は、主に低エネルギーの非包括的反応で行われてきた。本研究ではRHICやLHCにおける相対論的重イオン衝突実験に注目し、生成機構に粒子の内部構造を反映できるコアレスセンス模型を採用し、パラメーターをこれまでに観測されている通常ハドロンの生成量で決定した上で、種々のエキゾチックハドロンの生成量の予言を行った。

その結果、重イオン衝突実験において粒子生成数と内部構造に相関があること、および重いクォークを含むエキゾチックハドロンが多数生成される可能性があることを示した。これによりハドロン構造やエキゾチックハドロン研究に対して重イオン衝突という新たな視点が加わり、より多彩な研究が可能になった。

(4) シグマ中間子のソフト化と内部構造

シグマ中間子はパイ中間子のカイラルパートナーと考えられており、カイラル対称性の自発的破れの機構で中心的な役割を果たす。シグマ中間子のソフト化現象はカイラル対称性の部分的回復に伴いスペクトル関数が閾値付近で鋭いピークを示す現象である。本研究では2フレーバーの枠組みを用いて、カイラルパートナーとして記述されたシグマ中間子と動力学的に生成された共鳴のシグマ中間子の違いや共通点を、対称性の部分的回復と関連づけて議論した。

ソフト化現象自体はシグマ中間子の起源がカイラルパートナーであっても動力学的に生成された共鳴であっても起こるが、その機構が両者で異なり、動力学的に生成された複合粒子である場合はs波共鳴の性質を反映し、スペクトルの変化のパターンに特徴があらわれる。よって、カイラル対称性の回復に付随するスペクトル変化から内部構造を調べることができる事がわかった。

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13件)

① Takayasu Sekihara、Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Probing internal structure of Lambda(1405) in meson-baryon dynamics with chiral symmetry、AIP Conf. Proc. 掲載決定、2011、査読無

② Akira Ohnishi、Sungtae Cho、Takenori Furumoto、Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Che Ming Ko、Su Hounng Lee、Marina Nielsen、Takayasu Sekihara、Shigehiro Yasui、Koichi Yazaki、Exotics from Heavy Ion Collisions、AIP Conf. Proc. 掲載決定、2011、査読無

③ Yoichi Ikeda、Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Hiroyuki Kamano、Toru Sato、Koichi Yazaki、Structure of Lambda(1405) and threshold behavior of pi Sigma scattering、Prog. Theor. Phys. 掲載決定、2011、査読有

④ Takayasu Sekihara、Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Internal structure of resonant Lambda(1405) state in chiral dynamics、Phys. Rev. C、83、055202、2011、査読有

⑤ Sungtae Cho、Takenori Furumoto、Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Che Ming Ko、Su Hounng Lee、Marina Nielsen、Akira Ohnishi、Takayasu Sekihara、Shigehiro Yasui、Koichi Yazaki、Phys. Rev. Lett.、106、212001、2011、査読有

⑥ Toshitaka Uchino、Tetsuo Hyodo、Makoto Oka、Lambda*N Bound State Based on Chiral Dynamics、Prog. Theor. Phys. Suppl.、186、240-243、2010、査読無

⑦ Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Atsushi Hosaka、Compositeness of bound states in chiral unitary approach、AIP Conf. Proc.、1322、374-378、2010、査読無

⑧ Tetsuo Hyodo、Chiral dynamics and baryon resonances、Nucl. Phys. A、844、255-259、2010、査読無

⑨ Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Teiji Kunihiro、Nature of the sigma meson as revealed by its softening process、Nucl. Phys. A、848、341-365、2010、査読有

⑩ 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. A、835、59-66、2010、査読無

⑪ Tetsuo Hyodo、Wolfram Weise、Kaon-nucleon dynamics and role of chiral symmetry、Physica E、43、835-838、2011、査読有

⑫ Tetsuo Hyodo、Daisuke Jido、Atsushi Hosaka、Meson-baryon nature of Lambda(1405) in chiral dynamics、Nucl. Phys. A、835、402-405、2010、査読無

⑬ Tetsuo Hyodo、Chiral dynamics、structure of Lambda(1405)、and Kbar N phenomenology、Int. J. Mod. Phys. E、19、2618-2623、2010、査読無

[学会発表] (計16件)

① Tetsuo Hyodo, Compositeness of bound states and resonances in chiral dynamics, International conference on the structure of baryons (BARYONS' 10), 2010年12月7日、大阪大学コンベンションセンター

② Tetsuo Hyodo, Toward a realistic Kbar N-pi Sigma interaction, KEK 研究会「ストレンジネス核物理 2010」, 2010年12月4日、高エネルギー加速器研究機構

③ Tetsuo Hyodo, Toward a realistic Kbar N-pi Sigma interaction, Workshop "Strangeness in Nuclei", 2010年10月12日、ECT*, トレント

④ Tetsuo Hyodo, Compositeness of bound states and resonances in chiral unitary approach, 日本物理学会 2010年秋季大会, 2010年9月13日、九州工業大学

⑤ Tetsuo Hyodo, Compositeness of resonances in chiral unitary approach, Chiral10 Workshop, 2010年6月21日、Valencia Univ., バレンシア

⑥ Tetsuo Hyodo, Exotic hadrons and hadronic molecules in s-wave chiral dynamics, YITP Workshop on Exotics from Heavy Ion Collisions (ExHIC10), 2010年5月25日、京都大学基礎物理学研究所

⑦ Tetsuo Hyodo, Kbar N interaction and Lambda* N interaction in chiral SU(3) dynamics, Workshop "Strangeness production in hadron collisions", 2010年5月18日、Max-Planck-Institute for Astrophysics, ミュンヘン

⑧ Tetsuo Hyodo, Origin of resonances in chiral dynamics, 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp-X), 2009年9月17日、東海, 茨城

6. 研究組織

(1) 研究代表者

兵藤 哲雄 (HYODO TETSUO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・特任助教

研究者番号：60539823