

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740152

研究課題名(和文)カイラル動力学を用いたK中間子と核子系の研究

研究課題名(英文)Study of kaon-nucleon systems with chiral dynamics

研究代表者

兵藤 哲雄 (Hyodo, Tetsuo)

京都大学・基礎物理学研究所・助教

研究者番号：60539823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はカイラル有効理論を用いた解析により、K中間子核子系において現れるLambda(1405)粒子の特異な構造の解明を中心に推進された。主な研究成果として(1)Lambda(1405)粒子のハドロン分子的構造の確立と現実的KbarN相互作用の構築、(2)ハドロン複合性の決定法の不安定状態への拡張、(3)重いクォークを含む系への発展が挙げられる。ハドロン分子的構造がストレンジネス系を中心とした多彩な分野で発現することが明らかになり、模型に依存せず実験的に内部構造を検証する方法が示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, with the analysis of chiral effective theories, the novel structure of the Lambda(1405) in the antikaon-nucleon systems is clarified. The main results are (1) the establishment of the hadron molecule structure of Lambda(1405) and the construction of the realistic Kbar N interaction, (2) the generalization of the method to determine the hadron compositeness to unstable states, and (3) the extension to the heavy quark systems. It is shown that the hadron molecule structures ubiquitously emerge in a wide range of fields including the strangeness systems, and the technique to experimentally determine the internal structure in a model-independent manner is developed.

研究分野：原子核理論

キーワード：ハドロン構造 ストレンジネス核物理 エキゾチックハドロン

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用の基礎理論である QCD は、非摂動的効果が顕著になる低エネルギー領域では解析的な計算が困難で、従来は有効モデルに基づいた研究が行われていた。構成子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 $\bar{q}q$ と qqq 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。しかし、近年の理論/実験技術の発展により、従来の枠組みで分類できないエキゾチックなハドロン励起状態の存在と、その多彩な物理が明らかになりつつある。例として $\Lambda(1405)$ 粒子は通常の構成子クォーク模型での記述が困難であり、K 中間子と核子の準束縛状態であると期待されている。

本研究で注目するハドロン共鳴の分子的構造は、従来のクォーク内部自由度の励起による記述ではなく、ハドロン自身を構成要素としてハドロン間相互作用によって形成されるハドロン分子的(クラスターの)な全く新しい物質形態である。これまでの模型を用いた定性的な議論によって、一部のハドロン共鳴では分子的成分が支配的になりうるという興味深い結果が得られている。現在はこれらの成果を踏襲しつつ、定量的かつ模型に依存しない構造の定義を用いてより一般的な議論を行う段階に来ている。

2. 研究の目的

本計画では近年注目されているハドロン共鳴にみられる分子的(クラスターの)構造に焦点をあて、カイラル対称性に基づいた有効理論を軸としてその解明を行う。従来の定性的あるいは模型に依存した議論から一歩進んで、より普遍的な模型に依存しない構造の定義を構築する。分子的構造が顕著にあらわれると期待されるストレンジネス少数バリオン系を中心に、構造の包括的理解とその実験的検証に迫る。

3. 研究の方法

具体的な研究は、以下の3つの観点に注目して推進する。

(1) $\Lambda(1405)$ の構造：ストレンジネス核物理で興味を持たれている $\Lambda(1405)$ 粒子についての近年の理論的・実験的進展として、K 中間子水素原子の精密測定とカイラル有効モデルによるその解析によって、 $\bar{K}N$ 閾値近傍の散乱振幅が精度よく決定されたことがある(発表論文¹⁶参照)。この解析に使われたカイラル有効モデルの枠組みを、相互作用ポテンシャルの構築や反応過程の解析に応用することで、実験に対し現実的な予言を与える。

(2) ハドロン複合性の定式化：ハドロンの分子的構造を特徴付ける量として複合性の概念が提案されている。安定な弱束縛状態については確率として解釈できる複合性を観測可能量と関連づけることができることが知られている。実際に興味のある不安定なハドロン励起状態に同じ議論を適用するために、不安定状態への定式化の拡張を行うことで、共鳴状態についても意味のある物理量を引き出す方法を議論する。

(3) 重いフレーバーへの拡張：ハドロンの分子的構造はチャームやボトムなど重いフレーバーを持ったハドロンにおいても議論されている。特に近年見つかっている XYZ 粒子の存在はエキゾチックな構造が重いセクターでも多くみられることを示唆している。ここではストレンジネス系との比較を通じて、類似点と相違点を明らかにし、重いクォーク系特有の対称性(ヘビークォーク対称性)の発現の効果を議論する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を、研究方法に基づき大きく4つに分けて説明する。

(1) $\Lambda(1405)$ の構造

多体問題を取り扱う上で基本的になるのは2体相互作用ポテンシャルである。発表論文¹⁶で、精密なカイラル動力学の結果を、複素エネルギー平面の広い範囲で再現するような現実的 $\bar{K}N$ 座標空間ポテンシャルを構築した。ポテンシャルから計算した波動関数は通常のハドロンよりも空間的に大きく広がっており、 $\Lambda(1405)$ のハドロン分子的構造を示唆している。さらに、得られたポテンシャルは重イオン衝突実験でのハドロン間相関の計算に応用されている(発表論文¹⁶)。

$\Lambda(1405)$ の特異な構造を検証するためには、実験での生成反応で純粋な共鳴シグナルを同定する必要がある。発表論文¹⁶ および総合報告である発表論文¹⁷ では、 Λ_c 粒子の3体弱崩壊反応において $\Lambda(1405)$ を含むスペクトルを計算した。一般の過程では $l=1$ 成分が干渉効果で共鳴シグナルを歪めるのに対し、崩壊過程を詳しく分析することで Λ_c 弱崩壊においては $l=1$ 成分が寄与しないことを示し、純粋な $\Lambda(1405)$ のシグナルが得られることを明らかにした。また、現在 J-PARC で行われている K-d 反応を用いた $\Lambda(1405)$ 生成について、3体終状態相互作用を厳密に取り込んだ手法で反応計算を行い(発表論文¹⁷)、実験と比較できるスペクトルを得た。

一連の成果は発表論文^{16,17} に総合報告としてまとめられている。

(2) ハドロン複合性の定式化

複合性を共鳴状態に拡張する上で重要になるのは複素数値の解釈の問題である。例えば通常は実数で与えられる平均2乗半径の値も、不安定状態では複素数になり、物理的な解釈が困難である。発表論文¹⁸では有限体積効果を用いることで実数の大きさを定義し、カイラル動力学モデルを有限体積中で調べることでハドロン共鳴の内部構造を明らかにできることを示した。

複合性そのものを共鳴状態へ拡張する試みは、有効レンジ展開を用いた方法(発表論文¹⁴)、波動関数との関係を用いた定式化(発表論文¹⁵)、有効場の理論を使った定式化(発表論文¹⁶)という一連の研究で議論された。これらの成果は招待レビュー論文¹³でも報告されている。安定な束縛状態について示されていた弱束縛関係式が、閾値近傍の不安定状態について拡張できることが明らかになり、共鳴状態の構造を観測可能量のみを用いて議論できる画期的な枠組みを与えた。また、束縛エネルギーが完全に0になる極限で状態が完全に複合的になるという定理が発表論文¹⁰で示され、ヨスト関数の展開を用いた閾値スケールリングの研究に活用された。

具体的な応用例として、発表論文¹⁷で拡張された弱束縛関係式が $\Lambda(1405)$ の構造の解析に適用された。散乱長と固有エネルギーという観測可能量のみインプットにして、 $\Lambda(1405)$ の $\bar{K}N$ 分子的成分が支配的であることが明らかにされた。

(3) 重いフレーバーへの拡張

ストレンジネス系で $\bar{K}N$ の準束縛状態として $\Lambda(1405)$ が記述されることをチャーム系に拡張すると、 $\bar{D}N$ の準束縛状態として $\Lambda_c(2595)$ が記述できると期待できる。実際に $SU(4)$ 対称性を用いた点状相互作用モデルで $\bar{D}N$ 相互作用を構築することで、 $\Lambda_c(2595)$ が動的に生成される。発表論文¹⁹では、同じ相互作用を用いて DNN 3 体系について変分計算と Faddeev 方程式に基づく計算を行い、ストレンジネス系での $\bar{K}N$ 系に対応する DNN 準束縛状態が存在していることを指摘した。

重いクォーク系でのカラー磁気相互作用の性質により、 T_{cc} と呼ばれるテトラクォーク状態が安定に存在する可能性が理論的に示唆されている。発表論文¹⁷では電子陽電子衝突によって T_{cc} が生成される断面積を非相対論的 QCD の方法で評価した。結果として、 T_{cc} 中の異なるカラー相関が運動量分布や角度分布などの観測量に影響を与えることを明らかにした。

クォーク質量が無限に重い極限では、重いクォークを1つ含むハドロン中で重いクォークのスピンの保存するヘビークォーク対称性(HQS)が現れることが知られている。一方で、ハドロン分子的構造のような多体ハドロン系でHQSがどのように成立するのかは明らかでない。発表論文^{11, 15}では、一般的な議論に基づいてHQSが多体ハドロン系でも成り立つことを示し、模型空間の基底の変換を行うことでHQSが明白な形式で解析できることを示した。また、既存のモデル計算や実験スペクトルを詳細に調べることでHQS多重項の同定が可能であることを議論した。

(4) その他関連する分野への拡張

ハドロン間相互作用や分子的構造の研究はハドロン物理を超えた諸分野の研究とも関連を持って拡張される。

発表論文¹²では、QCDでクォーク質量を変えたときにパイ中間子間の相互作用が変化すること、特に重たいクォーク領域でパイ中間子間の散乱長が発散する点があることに注目し、散乱長の大きい3体系で普遍的に現れるエフィモフ効果がQCDで発現することを議論した。エフィモフ効果は相互作用の強さを制御できる冷却原子系で近年盛んに議論されているが、QCDでもクォーク質量を可変パラメーターと考えることで同様の議論が可能であることが示された。

パイ中間子間の相互作用はカイラル対称性によって制限されているが、これはパイ中間子が対称性の自発的破れに伴う南部ゴールドストーン(NG)粒子であることに起因する。一方でローレンツ対称性がない系での自発的対称性の破れは、相対論的な場合より複雑な分散を持つモードや、ギャップを持ったモードが現れることが近年明らかになっている。発表論文²⁰では有効場の理論を用いて量子スピン系でのNGモード(マグノン)を議論し、フェリ磁性相でギャップを持つNGモードが現れることを指摘した。さらに有効場の理論を用いて散乱長を計算し、ギャップを持つNGモードの関係する散乱長が有限でギャップに比例することを示した。

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)

A. Ohnishi, K. Morita, K. Miyahara, T. Hyodo, Hadron-Hadron Correlation and Interaction from Heavy-Ion Collisions, Nucl. Phys. A 掲載決定, 査読あり

<http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2016.05.010>

Y. Kamiya, K. Miyahara, S. Ohnishi, Y. Ikeda, T. Hyodo, E. Oset, W. Weise, Antikaon-nucleon interaction and Lambda(1405) in chiral SU(3) dynamics, Nucl. Phys. A 掲載決定, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2016.04.013>

S. Gongyo, Y. Kikuchi, T. Hyodo, T. Kunihiro, Effective field theory and the scattering process for magnons in the ferromagnet, antiferromagnet, and ferrimagnet, Prog. Theor. Exp. Phys. 掲載決定, 査読あり

E. Oset, W.-H. Liang, M. Bayar, J.-J. Xie, L.R. Dai, M. Albaladejo, M. Nielsen, T. Sekihara, F. Navarra, L. Roca, M. Mai, J. Nieves, J. Morais Dias, A. Feijoo, V.K. Magas, A. Ramos, K. Miyahara, T. Hyodo, D. Jido, M. Doering, R. Molina, H.-X. Chen, E. Wang, L. Geng, N. Ikeno, P. Fernandez-Soler, Z. F. Sun, Weak decays of heavy hadrons into dynamically generated resonances, Int. J. Mod. Phys. E 25, 1630001, 2016, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1142/S0218301316300010>

S. Ohnishi, Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, Structure of the Lambda(1405) and the K-d to pi Sigma n reaction, Phys. Rev. C 93, 025207, 2016, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.93.025207>

Y. Kamiya, T. Hyodo, Structure of near-threshold quasi-bound states, Phys. Rev. C 93, 035203, 2016, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.93.035203>

K. Miyahara, T. Hyodo, E. Oset, Weak decay of Lambda_c^+ for the study of Lambda(1405) and Lambda(1670), Phys. Rev. C 92, 055204, 2015, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.92.055204>

K. Miyahara, T. Hyodo, Structure of Lambda(1405) and construction of KbarN local potential based on chiral SU(3) dynamics, Phys. Rev. C 93, 015201, 2016, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.93.015201>

T. Sekihara, T. Hyodo, D. Jido, Comprehensive analysis of the wave function of a hadronic resonance and its compositeness, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 063D04, 2015, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptv081>

T. Hyodo, Hadron mass scaling near the s-wave threshold, Phys. Rev. C 90, 055208, 2014, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.90.055208>

Y. Yamaguchi, S. Ohkoda, A. Hosaka, T. Hyodo, S. Yasui, Heavy quark symmetry in multi-hadron systems, Phys. Rev. D 91, 034034, 2015, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.91.034034>

T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, Universal physics of three bosons with isospin, Phys. Rev. C 89, 032201, 2014, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.032201>

T. Hyodo, Structure and compositeness of hadron resonances, Int. J. Mod. Phys. A 28, 1330045, 2013, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1142/S0217751X13300457>

T. Hyodo, Structure of Near-Threshold s-Wave Resonances, Phys. Rev. Lett. 111, 132002, 2013, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.132002>

S. Yasui, K. Sudoh, Y. Yamaguchi, S. Ohkoda, A. Hosaka, T. Hyodo, Spin degeneracy in multi-hadron systems

with a heavy quark, Phys. Lett. B 727, 185-189, 2013, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2013.10.019>

岡田信二、早野龍五、兵藤哲雄、池田陽一、K 中間子水素原子 X 線精密分光実験の拓く物理、日本物理学会誌 第 68 巻 29, 2013、査読あり、<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009586200>

T. Hyodo, Y.-R. Liu, M. Oka, K. Sudoh, S. Yasui, Production of doubly charmed tetraquarks with exotic color configurations in electron-positron collisions, Phys. Lett. B 721, 56-60, 2013, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2013.02.045>

T. Sekihara, T. Hyodo, Size measurement of dynamically generated hadronic resonances with finite boxes, Phys. Rev. C 87, 045202, 2013, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.87.045202>

M. Bayar, C.W. Xiao, T. Hyodo, A. Dote, M. Oka, E. Oset, Energy and width of a narrow $I=1/2$ DNN quasibound state, Phys. Rev. C 86, 044004, 2012, 査読あり, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.86.044004>

[学会発表](計 20 件)

Y. Yamaguchi, T. Hyodo, Quark mass dependence of the Lambda-Lambda interaction, YITP workshop on Exotic hadrons from high energy collisions, 2016 年 3 月 24 日, 京都大学基礎物理学研究所

Y. Yamaguchi, T. Hyodo, $S=-2$ バリオン間相互作用のクォーク質量依存性, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学

T. Hyodo, Compositeness of hadrons from effective field theory, Workshop on critical stability in Few-body system, 2016 年 2 月 5 日, 理研(和光市)

兵藤哲雄, ハドロンの共鳴状態の物理, KEK 理論センター研究会「原子核・ハ

ドロン物理の課題と将来」, 2015 年 11 月 24 日, KEK, つくば

T. Hyodo, Current status of Lambda(1405) and its structure, Seminar Strong Interaction, 2015 年 10 月 26 日, ミュンヘン工科大学

T. Hyodo, Recent studies of Lambda(1405), Frontiers in hadron and nuclear physics with strangeness and charm, 2015 年 10 月 21 日, ECT* トレント

T. Hyodo, What we know about the Lambda(1405), XVI International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 2015), 2015 年 9 月 15 日, ニューポートニュース

T. Hyodo, Compositeness of hadrons and near-threshold dynamics, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), 2015 年 9 月 10 日, 東北大学

T. Hyodo, Compositeness of hadrons and near-threshold dynamics, 研究会「チャームハドロンの構造と相互作用」, 2015 年 8 月 6 日, J-PARC 分室 KEK 理論センター

T. Hyodo, Compositeness of hadrons and near-threshold dynamics, 1st Hadron Spanish Network Days and Spanish-Japanese JSPS Workshop, 2015 年 6 月 17 日, バレンシア大

T. Hyodo, Compositeness of hadrons and near-threshold dynamics, The 10th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons (NSTAR2015), 2015 年 5 月 26 日, 大阪大学

T. Hyodo, s 波閾値近傍でのハドロンの質量スケーリング, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 22 日, 早稲田大学

T. Hyodo, Antikaon-nucleon interaction and Lambda(1405) in chiral SU(3) dynamics, Hadrons and Hadron Interactions in QCD (HHIQCD 2015), 2015 年 2 月 19 日, 京都大学基礎物理学研究所

T. Hyodo, Structure of near-threshold hadrons, International Workshop on Critical Stability in Few-Body Systems,

2015年1月30日, 理研(和光市)

T. Hyodo, Compositeness of hadrons and near-threshold dynamics, セミナー, 2015年1月30日, KEK, つくば

T. Hyodo, Compositeness of hadrons and near-threshold dynamics, Charm Hadron and Nuclear Physics, 2014年11月11日, 東京工業大学

T. Hyodo, Hadron mass scaling near an s-wave threshold, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, 2014年10月9日, ハワイ

T. Hyodo, Toward realistic prediction of the $\Lambda(1405)$ production in K-d reaction, HaPhy-CLAS Workshop on Hadron Productions, 2014年8月28日, Kyungpook National University

T. Hyodo, Universal physics of three bosons with isospin, セミナー, 2014年6月17日, 名古屋大学

T. Hyodo, Universal physics of three bosons with isospin, Hadron physics symposium, 2014年4月19日, 名古屋大学

〔その他〕

Particle Data Group による The Review of Particle Physics (<http://pdg.lbl.gov>) に $\Lambda(1405)$ に関する Mini-review を寄稿。
<http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2015-rev-lam-1405-pole-struct.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

兵藤 哲雄 (HYODO, Tetsuo)
京都大学・基礎物理学研究所・助教
研究者番号: 60539823