

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03959

研究課題名（和文）QCD和則によるハドロン共鳴状態の解析

研究課題名（英文）An Analysis of Hadron Resonances in QCD Sum Rules

研究代表者

岡 眞 (Oka, Makoto)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・客員主管研究員

研究者番号：60144606

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：クォークやグルーオンは低エネルギー領域では閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れに代表される非摂動的なダイナミクスに支配されている。ハドロンのスペクトルを求めるための手法の一つであるQCD和則では2点関数の複素平面での解析性と分散関係を用いて、状態に対応する特異点（極）を探ることができる。ここではこの手法を、ハドロンの共鳴状態に対応する複素平面上での極に拡張して、その位置と特異点構造を求めることを目指した。具体的には、複素エネルギー平面の第二リーマン面にある共鳴極を含む分散関係式の導出、演算子積展開を用いて和則を構築し、極の位置や留数を求めるために必要な解析方法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

21世紀の加速器実験で次々に発見された4個以上のクォークを含むエキゾチックハドロンの共鳴状態のダイナミクスと構造を調べるためには、ハドロン散乱状態の複素平面上での極構造の解析が必須である。本研究では、QCDの2粒子相関関数の複素平面での構造を直接解析することを目標として、その解析構造、第二リーマン面での共鳴極を含む分散関係式の導出、演算子積展開を用いた和則の構築および解析手法の開発を行った。今後、この手法を用いて新しいハドロンの性質や分類が可能となると想定している。

研究成果の概要（英文）：QCD sum rule is a non-perturbative method for analyzing low energy spectrum of hadrons, which is governed by the non-perturbative features, such as color confinement and chiral symmetry breaking. The sum rule utilizes the dispersion relation to explore the singularity (pole structure) of two-body correlation functions that corresponds to physical states. In this study, we extend the treatment to resonant poles on the second Riemann sheet of the complex energy variable. Concretely, we defined the dispersion relation that include a resonance pole and developed methods to compute the energy, width and residue of the resonance pole.

研究分野：原子核・ハドロン理論

キーワード：ハドロン共鳴 量子色力学 QCD和則 ヘビークォーク ハドロン共鳴

1. 研究開始当初の背景

21世紀に入って数多く発見されたヘビークォークを含むハドロンは、従来のクォーク・反クォークや3クォーク状態とは性質が異なり、質量や崩壊などの測定データの解析から、4つ以上のクォークを含んだり2つのハドロンの分子共鳴状態である可能性が指摘されている。強い相互作用の基礎理論である量子色力学における未解決課題であるカラー閉じ込めダイナミクスやハドロン間の相互作用の機構などを解明するためには、これらのエキゾチックハドロン共鳴の研究が喫緊の課題となっている。ところが、これらのハドロンのほぼ全てが2個(以上)のハドロンに崩壊する共鳴状態であり、不確定性原理によるエネルギー幅も大きい。そのため、これまでは量子色力学による第一原理計算が困難で、有効模型によるモデルに依存する解析に頼らざるを得なかった。

2. 研究の目的

本研究では、この状況を打開して第一原理から直接ハドロン共鳴状態を研究する手法として、QCD 和則の複素平面への拡張を提案した。QCD 和則は、散乱振幅の摂動的な性質と因果律を組み合わせることでハドロンの情報をQCDから直接引き出すことができる手法であり、束縛状態やいくつかの幅の狭い共鳴状態にも適用されて、量子色力学の第一原理計算としての有効性が示されてきた。

しかし、従来のQCD和則では、幅の広い共鳴状態を直接扱うことは出来ず、幅の狭い(デルタ関数で表される)状態があると仮定して近似的にそのエネルギーを求めるのが通常の扱いだった。やや進んだ最大エントロピー法を使ったスペクトル関数の解析でも、幅に関する情報は十分な精度で得られないことが解っていた。

そこで我々はQCD和則を複素平面上で拡張することでハドロン共鳴に直接アクセスすることを目指して本研究を進めた。QCD和則は因果律を反映する散乱振幅がエネルギーの複素平面上で解析性を示すことを用いて分散関係式を導き、ハドロンに対応する特異点(極)の位置や留数などの情報を取り出す手法である。ハドロン共鳴は通常の分散関係の範囲にないエネルギー複素平面の第2リーマン面上に現れる。したがって、QCD和則を第2リーマン面まで広げる必要がある。我々は摂動的に計算された散乱振幅を第2リーマン面に解析接続して、ハドロン共鳴状態の極の情報、エネルギー、崩壊幅、崩壊の強さなどの情報を与えるQCD和則を確立することを目指している。

3. 研究の方法

本研究の第一段階として、第2リーマン面での共鳴極の性質を調べる手法でポテンシャル模型などで頻繁に使われる複素スケールリング法による解析を行った。複素スケールリング法では座標と運動量変数を複素数にすることにより、共鳴状態と干渉する散乱状態を複素平面上で動かして共鳴状態が漸近状態を持たない極として現れるようにすることができる。したがってこの手法をQCD和則に導入することで散乱状態を回避できることが想定される。複素スケールリング法ではハミルトニアンの変数を複素化するので、まず解析可能な4体のクォーク系のハミルトニアンにこれを適用して、複素極の振る舞いを解析した。具体的にはチャームクォーク2個と反チャームクォーク2個からなるテトラクォークを対象に、束縛状態と共鳴状態を探索した。この物理系ではLHCの実験グループからいくつかの共鳴の存在が報告されているため、クォーク模型ハミルトニアンの更正にも使うことができる。その結果、クォーク4体の閉込め力を従来のものから変更してQCDのストリングタイプの閉込めが必要であることを示した。(Physical Review D誌に発表)

一方、QCD和則では複素平面上での共鳴極の情報を取り出すために、散乱振幅の因果律に基づく一般的な関係である分散関係を用いる。積分形で与えられる分散関係から物理的に有用な共鳴の情報(エネルギー、幅、結合の強さ)を取り出すためのパラメータ表示を導入する。さらに摂動的QCDによる散乱振幅の情報を分散関係に取り入れて必要なパラメータ値を求めることを目指し、その解析方法を探索している。まず、簡単な量子力学模型で共鳴状態への複素空間の拡張の有効性を示し、分散関係積分から共鳴状態のパラメータを正確に導くことができるかどうかを検証する。同時に、現実のハドロン共鳴の散乱振幅の複素平面上での振る舞いを調べるために、実際のメソンやバリオンのQCD和則の解析を行う。さらには、現状で解明が求められているマルチクォーク状態やハドロン分子状態などのエキゾチックハドロンに適用して物理的な予言を目指している。

4. 研究成果

複素平面上でのハドロンの不安定な励起状態である共鳴極の解析のために、複素スケールリング法を適用する研究を進めた。現実的な2つの系について模型による解析を行い、複素空間での散乱振幅の解析を行った。まず、チャーム2個と反チャーム2個のチャームテトラクォーク状態では、ポテンシャルクォーク模型による計算に複素スケールリングおよび実スケールリングの両手法を適用して、それらの

結果から共鳴の情報を得た。複素スケーリングでは量子数 $J^{PC} = 1^{++}$ に束縛状態、同じく 2^{++} に共鳴状態が存在する結果を得た。LHC 加速器実験グループから報告されている共鳴状態との比較を行い、従来のクォーク模型の範囲では低いエネルギーに現れる共鳴を説明できないことを明らかにした。この結果は、テトラクォーク系でのクォーク閉じ込めポテンシャルが従来のクォーク模型では不適切であることを示す証拠となっている。関連して、4 体系のクォーク閉じ込めについて、QCD により則したストリング模型による閉じ込めポテンシャルの提案を行った。これらの結果は Physical Review D 誌に発表した。

また、チャームクォークとストレンジクォークで作られる D_s メソンの励起状態の構造を調べるために、格子 QCD に基づく計算をカイラル相互作用およびクォークペア生成模型による有効ハミルトニアンを用いて解析した。格子 QCD との比較では、有効理論における有限体積効果を取り入れて、散乱状態と共鳴状態を区別することに成功し、その結果、 D_s メソンの 0^+ , 1^- の励起状態の構造の解明に成功した。この成果をまとめて、Physical Review Letter 誌に発表した。さらに、カイラル有効理論におけるハドロン分子的共鳴状態と格子 QCD のスペクトラムの関連を調べるために、同様の有限体積効果の解析を行い、格子 QCD ではコンパクトな構造が与えられて、ダブルポール構造は得られないことを示した。

続いて、強い相互作用によって生じるハドロン共鳴状態を第一原理である量子色力学によって解析をする新しい手法として、散乱振幅を複素数空間へと拡張し、その解析性を利用して、QCD 和則関係式を導入した。散乱振幅の解析性と有効な分散関係を調べるために、解析的に解ける量子力学ポテンシャル模型に注目した。ポテンシャルの強さのパラメータを変化させながら、束縛状態とパーティクル状態、さらに共鳴状態へ至る振る舞いと、対応する第 2 リーマン面の極の位置とその留数を抽出した。積分路を複素平面に拡張した分散関係に、それらの極の情報がどのように現れるかを解析した。複素エネルギー平面の第二リーマン面にある共鳴極を含む分散関係式の導出、演算子積展開を用いて和則を構築する手法、極の位置や留数を求めるために必要な解析方法の開発を行った。積分路の選び方は複素スケーリング法に倣って偏角を与える方法を用い、偏角を変化させて共鳴極の位置を探す。経路上での散乱振幅をパラメータ化して表し、与えたパラメータの偏角依存性が共鳴極の周辺で鋭く変化することをを用いて共鳴の情報を取り出す手法を開発した。この結果を公表する準備を進めている。

現実のハドロンの解析では、量子力学模型で開発した手法を ρ 中間子 QCD 和則の解析に適用することを試みた。解析が困難な事情がいくつか明らかになったが、これらを解決して現実的な和則を導くところに来ている。分散関係は複素平面上の経路の取り方にいくつかの候補があるため、それらの間の優位性を検討している。最新の結果を公表するための論文の作成を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Guang-Juan Wang, Qi Meng, Makoto Oka	4. 巻 106
2. 論文標題 The S-wave fully-charmed tetraquark resonant states	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 096005-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.106.096005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhi Yang, Guang-Juan Wang, Jia-Jun Wu, Makoto Oka, Shi-Lin Zhu	4. 巻 1
2. 論文標題 The investigations of the P-wave Bs states combining quark model and lattice QCD in the coupled channel framework	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 058-1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2023)058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang Guang-Juan, Meng Lu, Xiao Li-Ye, Oka Makoto, Zhu Shi-Lin	4. 巻 81
2. 論文標題 Mass spectrum and strong decays of tetraquark c-bar s-bar qq states	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 188-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjc/s10052-021-08978-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Pavao Rafael, Gubler Philipp, Fernandez-Soler Pedro, Nieves Juan, Oka Makoto, Takahashi Toru T.	4. 巻 820
2. 論文標題 The negative-parity spin-1/2 Lambda baryon spectrum from lattice QCD and effective theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136473 ~ 136473
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2021.136473	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Guang-Juan, Meng Lu, Oka Makoto, Zhu Shi-Lin	4. 巻 104
2. 論文標題 Higher fully charmed tetraquarks: Radial excitations and P-wave states	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 036016-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.036016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Q. Meng, E. Hiyama, A. Hosaka, M. Oka, P. Gubler, K.U. Can, T.T. Takahashi, H.S. Zong	4. 巻 814
2. 論文標題 Stable double-heavy tetraquarks: spectrum and structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136095-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Guang-Juan Wang, Lu Meng, Li-Ye Xiao, Makoto Oka, Shi-Lin Zhu	4. 巻 81
2. 論文標題 Mass spectrum and strong decays of tetraquark $c\bar{b}ar s\bar{b}ar q q$ states	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Physics Journal C	6. 最初と最後の頁 188-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-08978-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Bahtiyar, K.U. Can, G. Erko, P. Gubler, M. Oka, T.T. Takahashi	4. 巻 102
2. 論文標題 Charmed baryon spectrum from lattice QCD near the physical point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054513-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.054513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yang Zhi, Wang Guang-Juan, Wu Jia-Jun, Oka Makoto, Zhu Shi-Lin	4. 巻 128
2. 論文標題 Novel Coupled Channel Framework Connecting the Quark Model and Lattice QCD for the Near-threshold $D_s^* \rightarrow D^* \gamma$ States	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 112001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.112001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 岡眞
2. 発表標題 Fully-Charmed Tetraquark and Quark Confinement
3. 学会等名 ELPH Workshop ハドロン分光に迫る反応と構造の物理 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡眞
2. 発表標題 マルチクォーク系のクォーク閉込めポテンシャル
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Oka
2. 発表標題 Spectra, structure and decays of singly heavy baryons from a chiral effective theory of diquarks
3. 学会等名 Workshop on "Physics of heavy quark and exotic hadrons 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡 眞
2. 発表標題 テトラクォーク系のクォーク閉込めポテンシャル
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	GUBLER PHILIPP (Gubler Philipp) (00632390)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職 (82110)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	ワン グアンジャン (Wang Guang Juan)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	Peking University	Nanjing Univ.		
スペイン	Valencia Univ			
オーストラリア	Univ. Adelaide			
トルコ	Ozyegin Univ.			