

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K03535
研究課題名（和文）格子QCDによるダイクォーク相互作用、それを応用した Λ_c の励起スペクトルの研究
研究課題名（英文）Lattice QCD study of diquark interactions and its applications to the excitation spectrum of Λ_c baryon
研究代表者
石井 理修 (Ishii, Noriyoshi)
大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号：40360490
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：陽子や中性子を始めとするハドロンの内部構造を理解するため、2個のクォークからなるダイクォークに注目が集まっている。しかしながら、量子色力学のカラー閉じ込めという性質のため、ダイクォークの質量等の様々な性質は、実験的にも理論的にも定量的に調べる方法は確立していない。この研究の成果は、カラー閉じ込めの問題を避けて格子QCD第一原理計算でダイクォーク質量を定量的に計算する方法を提案し実践する事である。

研究成果の学術的意義や社会的意義
量子色力学のカラー閉じ込めに矛盾しない形で、クォーク2個からなるダイクォークの質量を始めとする様々な性質を定量的に調べる方法を定式化することは、ハドロンの物理学において難問の一つである。今回の研究で行った提案は、この問題に対する一つの解答を与える。

研究成果の概要（英文）：In order to understand the internal structure of hadrons such as protons and neutrons, an important role is expected to be played by diquarks, which consist of two quarks. However, due to the color confinement, one of the most important property of quantum chromodynamics (QCD), it is impossible to isolate a diquark. As a result, there exist no established ways to investigate various properties of diquarks such as mass, size, etc. both by experimental and theoretical approaches. The aim of this research is to propose and implement a method to quantitatively calculate the diquark mass using lattice QCD first-principles calculations with fully respecting the problem of color confinement.

研究分野：素粒子・原子核物理理論

キーワード：量子色力学 lattice QCD チャームクォーク ダイクォーク チャームバリオン 閉じ込めポテンシャル ハドロンの物理学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

陽子や中性子に代表される通常型のバリオンはクォーク 3 個の束縛状態、中間子や中間子に代表される通常型のメソンはクォークと反クォークの束縛状態と考えられている。この二つに分類できないハドロンは、エキゾチックハドロンと呼ばれる。最近、Belle や LHC 等の大型加速器実験施設で、重いクォークを含んだペンタクォークやテトラクォークのようなエキゾチックハドロン候補が多数発見されている。これらの内部構造を明らかにするため、クォークに加えて新しい有効自由度であるダイクォークに注目が集まっている。ダイクォークはクォーク 2 個からなる複合粒子で、ハドロンの内部構造を理解する上で重要な役割を演じる事が期待されている。また、中性子星内部のような超高密度状態においては、真空中に凝縮してカラー対称性を自発的に破ることによって、カラー超伝導を引き起こす事が予言される等、量子色力学 (QCD) が引き起こす現象論において、非常に重要な概念を提供することが知られている。

しかしながら、その重要性にもかかわらず、QCD の代表的性質である「カラー閉じ込め」のため、実験でも格子 QCD 第一原理計算でも、非中性のカラーを持つダイクォークは、単独で分離する事ができない。そのため、質量や相互作用はおろか、その存在自体も調べる方法は確立されておらず、全てにおいて不明な点だらけの状況である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ハドロンの構造論で注目が集まっている新しい構成要素であるダイクォークの性質 (質量や相互作用等) を格子 QCD 第一原理計算に基づいて定量的に解明することを可能にする方法を提案し、確立する事である。

3. 研究の方法

QCD のカラー閉じ込めと矛盾しない形で、格子 QCD 第一原理計算によってダイクォークの質量を計算する方法を提案する。格子 QCD でハドロンの質量を計算するには、通常、ハドロン場の 2 点相関関数を考える。カラー中性であるハドロン場の 2 点相関関数は運動量空間で一次の極を持つことが知られているため、実空間において single-exponential fit を行って極の位置を特定し、質量が計算することが可能である。これに対し、カラー閉じ込めのため、カラー中性でないダイクォークは、2 点相関関数が運動量空間で一次の極を持つことを仮定できず (全く極を持たないという理解が通常は優勢である) 通常の方法では質量が計算できない。カラー閉じ込めと矛盾しない質量計算の方法を考えるため、運動量空間の 2 点相関関数が一次の極を持つか持たないかに関係なく、質量を計算できる方法を開発する。このために、HAL QCD Coll. が提案するポテンシャル法をクォーク・ダイクォーク系に適用し、そこで得られる非相対論的クォーク・ダイクォークモデルの質量パラメータとして、質量を計算する方針を提案する。ここで、通常の HAL QCD 法に加えて、質量パラメータ追加で条件を与える必要がある。これには、河内と佐々木が $c\bar{c}$ 系で提案したスピン依存中心力が長距離でゼロになるべしという条件 (河内・佐々木の条件) や、今回の研究で新しく提案した負パリティセクタのハドロンスペクトルを HAL QCD 法で構築したクォーク・ダイクォークモデルが再現すべしという条件を課して決める。特に、現象論的に非常に重要な役割を果たすスカラダイクォークの質量を計算する際は、クォーク・ダイクォークモデルにはスピン依存中心力は存在せず、河内・佐々木の条件は使えないことに注意する。このため、負パリティセクタのスペクトル条件を課してダイクォーク質量を計算する方法を提案することは、非常に重要な意味がある。

4. 研究成果

(1) スカラダイクォーク質量

c バリオンを charm quark と scalar diquark の 2 体系とみなし、同時刻 quark-diquark Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数を格子 QCD で求め、それがシュレディンガー方程式を満たすことを要請して、quark-diquark ポテンシャルを求める (HAL QCD のポテンシャル法)。この際、このポテンシャルを使って計算した負パリティセクタの c 励起スペクトルが、 c の 2 点相関関数を使って得られる負パリティセクタの励起スペクトルを再現することを要請して、自己無矛盾に diquark 質量を決定する。

JLDG/ILDG から公開中の $32^3 \times 64$ 格子上で PACS-CS Coll. によって生成された 2+1 flavor QCD ゲージ配位 (pion 質量が約 700 MeV の物) を用いて、実際にこのアルゴリズムを実行し、Coulomb gauge 固定の元で同時刻 NBS 波動関数を求め、それに基づいて scalar diquark 質量と quark-diquark 間ポテンシャルを求めた。(charm quark 質量は、同じアルゴリズムを charmonium 系に適用して求めたものを使った) そうして得られた結果は自然で合理的なものであった。(i) 定性的な意味で、自然なサイズの scalar diquark 質量が得られた (構成クォーク質量を naive に見積もったもの (2/3 倍の核子質量や rho meson 質量) の 2 倍と定性的

に一致) (ii) Cornell 型の quark- diquark 間ポテンシャルが得られた。(ii.a) 長距離での閉じ込めの振る舞いは、 $q\bar{q}$ セクタの振る舞いと定性的に一致。(ii.b) 近距離の振る舞いは Coulomb 型であるが、 $q\bar{q}$ セクタと比べて弱くなっており、これは diquark が有限の大きさを持っていることと定性的に合致している。

(2) 質量やポテンシャルのゲージ依存性

これまでの全ての計算は、Coulomb gauge でゲージ固定を行った上で実行してきた。しかしながら、Coulomb gauge は繰り込み可能でないため、operator product expansion を使ったポテンシャルの近距離での議論が困難になったり、格子の連続極限の取り方に問題が生じたりする。この点において、Landau gauge は魅力的であるため、他に問題が生じないことを確認した上で、Landau gauge に移ってしまうことができればベストである。このため、クォーク・ダイクォーク系よりも取り扱いが簡単な $c\bar{c}$ 系において河内・佐々木の条件を採用して、チャームクォーク質量と $c\bar{c}$ ポテンシャルを Coulomb gauge と Landau gauge で比較した。Landau gauge の方で、空間の長距離での収束性が非常に遅かったため、時間依存型 HAL QCD 法を適用して改善を試みたが、かえって収束性が悪くなった。おそらく、Landau gauge の計算では DDbar threshold 以上からの寄与が非常に大きい事が原因と考えられる。改善できるかもしれない方法として、smearing source を用いた variational method があるが、これは時間の関係で今後の課題となる。現在までに言える結論は、(i) 中・近距離でスピン非依存中心力は Coulomb gauge と Landau gauge で非常に良く一致するが、長距離では統計が不足して確固たることを結論できない。(Heavy quark limit を用いた解析的計算から、スピン非依存中心力は一致する事が期待される) (ii) Landau gauge の方がクォーク質量は軽く出る。これは同時刻 NBS 波動関数の広がり Landau gauge の方が大きいことと合致しており、確定的な結論である。(iii) スピン依存中心力は smeared delta 関数型の短距離力であり、Landau gauge の方が Coulomb gauge よりも少し強い。

(3) 軸性ベクトルダイクォーク質量

Scalar diquark と axial-vector diquark の二つは、現象論的に非常に重要なダイクォークとして認識されているため、これら二つの比較を行うことは多くの関心を集める事が期待される。そこで、axial-vector diquark 質量を求めるため、 c バリオンを charm quark と axial-vector diquark の複合系とみなして、HAL QCD 法を適用した。Diquark 質量の決定には、(最初の第一歩として) 計算が簡単な河内・佐々木の条件を採用した。Quark-diquark ポテンシャルとして Cornell 型 (Coulomb+Linear 型) のスピン非依存中心力と、smeared delta 関数型のスピン依存中心力がえられた。しかしながら、axial-vector diquark 質量がサブ課題(1)で求めた scalar diquark 質量よりもかなり小さくなってしまった。これは一つには、統計が悪く、基底状態への収束にまだ甘さが残っている事が原因となっている。しかしながら、もう一つ重要な原因として、サブ課題(1)と違った条件を使って diquark 質量と charm quark 質量を求めたため、charm quark 質量がサブ課題(1)よりも重くなり、結果として diquark 質量が軽めに評価されたという事が考えられる。この点を改善するためには、サブ課題(1)と同じく負パリティスペクトルの条件を使って axial-vector diquark 質量を求める必要があるが、このためには反対称 LS 力を考慮する必要があり、それは今後の課題となる。

(4) スタティッククォークを用いる方法の開発

サブ課題(3)には別の打開策もある。charm quark 質量を無限大にして static quark を考える事である。結果として charm quark の spin が decouple して、scalar diquark の方の計算も axial-vector diquark の方の計算も非常に単純化される。特に axial-vector diquark の方では、反対称 LS 力を考える必要がなくなる上、charm quark 質量の決定法に由来する不定性も同時に解決される。統計ノイズが非常に大きい計算になるが、HYP smearing で改善できることを確認した。現在までに、static-quark と scalar diquark 間ポテンシャルが Cornell 型であることは確認したが、scalar diquark 質量については一つ計算間違いが見つかっており、これを訂正中の段階である。この方法を適用して、scalar diquark と axial vector diquark の比較を行うことは今後の課題となる。

サブ課題(1)を除いて、いずれも論文化は間に合っていない。また、新型コロナのパンデミックのため、海外での発表は回数が足りていない。国内を含めた国際研究会における宣伝活動は、今後活発にする事が必須である。また、 c の正パリティセクタの励起状態については、今回時間の関係で手がつけられなかった。この研究の結果を論文にまとめたのち、この研究で獲得したノウハウを用いて、最適のセットアップで c の励起状態の研究を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Watanabe Kai, Ishii Noriyoshi	4. 巻 62
2. 論文標題 Building Diquark Model from Lattice QCD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 45(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01627-y	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Watanabe Kai	4. 巻 105
2. 論文標題 Quark-diquark potential and diquark mass from lattice QCD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074510(1-17)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.074510	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 張天宸, 石井理修
2. 発表標題 Gauge dependence of cquark potential from Nambu-Bethe-Salpeter wave function in Lattice QCD (II)
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kai Wen Kelvin Lee, Noriyoshi Ishii
2. 発表標題 Diquark mass and diquark - static quark potential from Lattice QCD
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 西岡蒼矢, 石井理修
2. 発表標題 Charm-bad-diquark potentials for χ_c from NBS wave function in Lattice QCD (II)
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Soya Nishioka
2. 発表標題 Diquark mass and quark-diquark potential of the axial-vector diquark in Σ_c from Lattice QCD
3. 学会等名 International workshop on J-PARC hadron physics 2023 (J-PARC Hadron 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Noriyoshi Ishii
2. 発表標題 Mass and potential of diquarks from Lattice QCD
3. 学会等名 Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (3rd J-PARC HEF-ex WS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張天宸, 石井理修
2. 発表標題 Gauge dependence of $c\bar{c}$ potential from Nambu-Bethe-Salpeter wave function in Lattice QCD
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西岡蒼矢, 石井理修
2. 発表標題 charm-bad-diquark potentials for Σ_{mac} from NBS wave function in Lattice QCD
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Noriyoshi Ishii
2. 発表標題 Diquark mass and quark-diquark potential from LQCD
3. 学会等名 Second International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (2nd J-PARC HEF-ex WS) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noriyoshi Ishii
2. 発表標題 The qqbar potential from Wilson loop and the qqbar potential from NBS wave function
3. 学会等名 LATTICE21(The 38th International Symposium on Lattice Field Theory)(国際学会)
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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------