

氏 名	こ じょう とおる 古 城 徹
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3237 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	The Correlator Study of Exotic Hadrons ～Sum rules, low-energy dominance, and $1/N_c$ (エキゾチック・ハドロンの相関関数の研究～和則, 低エネルギー・ドミナンスと $1/N_c$)
論文調査委員	(主 査) 准教授 菅 沼 秀 夫 教 授 國 廣 悌 二 教 授 川 合 光

論 文 内 容 の 要 旨

申請論文では、量子色力学 (QCD) の非摂動的な性質を解析する有効な方法のひとつである「QCD和則」を用いて、近年実験的に報告され注目を集めている、ペンタクォーク (クォーク 5 体系) やテトラクォーク (クォーク 4 体系) などのマルチクォーク系のエキゾチック・ハドロンの適用した、一連の研究成果を示し、また、その解析の過程で生じた、QCD和則の新しい解析方法等についての提案も行った。

QCD和則は、演算子積展開 (OPE) と分散関係を用いて、様々なハドロンの相関関数を解析する方法であり、クォーク・グルーオンのダイナミクスを高エネルギー部分は摂動論的に扱い、非摂動領域の物理を局所演算子の真空期待値の形で取り入れることで、相関関数を表現する。一方、これは分散関係を用いると、ハドロンのスペクトル関数の積分で表すことができ、従って、ハドロンのスペクトル関数と QCD レベルの演算子の真空期待値とを関連づける和則を得ることができ、ハドロンの質量や結合定数などが、QCD の非摂動効果の特徴づける真空期待値で表現される。このような QCD 和則による計算方法は、通常の間接子やバリオンの研究において大きな成功を収めてきた。

本論文では、QCD和則を、その適用条件を厳格に考慮しつつ、マルチクォーク系に適用した。まず過去に行なわれたマルチクォーク系に対する QCD 和則による解析の根本的な誤りを指摘すると同時に、その解決策を提示した。その際、重要な提言として、ハドロンのスペクトル積分を基底状態で飽和させることと、低エネルギーの相関を十分に取り込む為に OPE を十分な次数まで展開することの必要性を指摘した。そのような解析をペンタクォークとテトラクォークに対して実際に行ない、QCD 和則が意味をなす範囲で物理量を議論した。ペンタクォーク系に対しては、上述の条件を満たす解析を行う為に、カイラリティーの異なる相関関数同士の差を考慮することで高エネルギーの寄与を相殺し、低エネルギーの寄与が支配的となる和則を構築した。結果として、質量は 1.68GeV 程度、パリティは正であるという結果を得た。またテトラクォークの候補である σ (600) 中間子に対しても同様の和則を構築し、崩壊幅などの不定性も含めた誤差の範囲で質量の中心値が $650\text{--}800\text{MeV}$ であるという結論を得た。また、この解析の過程で、どのような動的プロセスが重要かを特定した。

申請論文では、更に、非摂動的 QCD において有効性が指摘されている「 $1/N_c$ 展開」を用いてマルチクォークの相関関数を系統的に検討した。まず、 $1/N_c$ 展開によって QCD レベルのダイアグラムとハドロンのダイナミクスとの対応関係を明確にし、スペクトル関数の積分における共鳴状態とそれ以外の寄与を分離する方法を提唱した。この方法は有用であり、質量の評価と崩壊幅の評価を系統的に調べることができる。更に、 $1/N_c$ 展開が QCD 和則と相性の良い展開法であり、0 次の展開で QCD 和則における幾つかの近似が正当化されることを示した。更に、以上の定式化が実際に機能するかどうかをテトラクォークの場合で検討し、4 つの独立な相関関数を調べた結果、いずれの場合においても、 σ 中間子と同じ量子数のスカラー中間子の共鳴状態が、 1 GeV 以下の質量領域に現れることを示し、 σ 中間子がテトラクォーク系である可能性を強く指摘した。

論文審査の結果の要旨

強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) は、低エネルギー領域ではクォークとグルーオンの強結合系になる為、摂動論等による系統的な解析が難しくなる。この様な低エネルギーでのハドロンの性質を QCD から直接説明することは、現在のクォーク・ハドロン物理学において非常に重要な研究課題の 1 つである。また、2003 年にクォーク 5 体系であるペンタクォーク Θ^+ (1530) が実験的に報告され、以来、高エネルギー実験においても、 X (3872) や Z^+ (4430) などのチャームを含むクォーク 4 体系のテトラクォーク候補が次々と発見され、マルチクォーク系に対する関心が実験的にも理論的にも大きく高まっている。通常の間接子やバリオンとは異なるエキゾチック・ハドロンは、QCD の低エネルギー領域での性質やダイナミクスに対する新しい視点を与える可能性も多く含んでおり、その意味でも重要な研究対象である。

申請論文では、ハドロンに関する物理量と QCD の物理量とを現象論的に結びつける非摂動的な方法である「QCD 和則」の枠組みを用いて、マルチクォーク系の性質を研究し、そこで得られた確度の高い研究結果と、解析の過程で生じた新しいアプローチ等について報告している。

QCD 和則は、ウィルソンの演算子積展開と分散関係を用いて様々なハドロンの相関関数を解析する方法であり、通常の間接子やバリオンの分析においては多大な成功を収めてきた。しかしながら、この枠組みが、通常の間接子やバリオン以外の、マルチクォーク系に対しても有効か否かは自明ではなかった。

申請者は、まず、一般的に、QCD 和則を用いたハドロン解析の適用条件を厳格な形で吟味し、QCD 和則を用いた先行のマルチクォークの研究が、致命的な問題を有していることを明らかにした。それと同時に、その問題点を分析することで、マルチクォーク系に対する信頼できる水準の QCD 和則の理論的枠組みを構築し、これを基にペンタクォークとテトラクォークの双方について信頼性の高い定量的な解析を行なった。その結果、 Θ^+ (1530) に対して、質量の理論値 1.68 GeV を与え、パリティが正など、量子数等に関する理論的予測を与えた。また、軽いテトラクォークに対しても、QCD 和則と $1/N_c$ を用いた詳細な解析を行ない、クォーク模型では 1 GeV 以下という小さな質量が説明できない「 σ (600) 間接子」について、テトラクォーク描像の妥当性を検証した。

申請論文では、QCD 和則で用いられる近似の意味を明確にすると共に、QCD のカイラル対称性を利用した有効な解析方法を提示し、更には、 $1/N_c$ 展開を用いてマルチクォークの相関関数を系統的に分析し、その応用として、それらを組み合わせた新しいタイプの有効な QCD 和則の方法等についても提案している。

また、参考論文には、クォークの閉じ込め現象と関連する「超伝導系でのアプリコソフ渦糸における新しいタイプの励起モード（蠕動モード）の研究」及び「超弦理論を用いた QCD の非摂動解析の研究」もあり、申請者は、素粒子物理から物性物理までの広範な視点から、クォーク・ハドロンの物理に関連する重要課題を研究し、幾つもの有用な研究成果を挙げている。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。