

Title	Model-independent study on the internal structure of exotic hadrons( Abstract_要旨 )
Author(s)	Kamiya, Yuki
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2019-03-25
URL	<a href="https://doi.org/10.14989/doctor.k21558">https://doi.org/10.14989/doctor.k21558</a>
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	神谷 有輝
論文題目	Model-independent study on the internal structure of exotic hadrons		

(論文内容の要旨)

近年のハドロン物理学における最も重要な成果の1つは、単純な $q\bar{q}$ メソンにも $qqq$ バリオンにも分類されない、エキゾチックハドロンとよばれる状態の多くの候補の発見である。これらの状態の内部構造を特定し、より安定なクォーク配位の知識を獲得することによって、非摂動領域の量子色力学 (QCD) の理解を深めることができる。理論的な曖昧さを避けつつエキゾチック候補の内部構造を特定する方法として、実験的観測量から決定できる on-shell 散乱振幅に基づいて構造を議論する方法がある。本論文の目的は、散乱振幅と固有状態の構造との関係を導き、エキゾチックハドロン候補の内部構造のモデル非依存な識別方法を構築することである。

本論文の2章では、固有状態のうちにおける複合的状態の成分の割合を表すハドロン複合性に着目する。ここでは、複合性と観測可能量との間の関係を与える Weinberg の弱束縛関係式を拡張することで、これまで直接適用できなかった状態に対しても観測可能量から複合性が議論できることが示された。まず崩壊チャネルを取り込んだ非相対論的有効場の理論の解析から、不安定状態に対する弱束縛関係式の拡張がなされた。この拡張された関係式から、不安定状態であっても十分閾値に近い状態であれば、複合性を観測可能量から決定できることが示された。不安定状態の複合性が複素数になり解釈ができない問題に対処するため、実数化された複合性を導入した解釈方法が提案された。また複合性を観測可能量からより定量的に評価するため、複合性の誤差解析の方法が構築された。次に有効レンジ展開が使えないような場合への弱束縛関係式の拡張が議論され、元の Weinberg の議論では仮定されていた有効レンジ展開の収束性は複合性の決定に必ずしも必要でないことが示された。

3章では、散乱振幅の解析的構造に着目し、固有状態の起源を散乱振幅のゼロ点として定義される Castillejo-Dalitz-Dyson (CDD) ゼロの位置から識別する方法が構築された。チャネル結合振幅のゼロ結合極限での固有状態をあらわす極の振る舞いから固有状態の起源が識別できる。散乱振幅の位相から定義されるトポロジカル不変量に基づいた議論から、着目したチャネル以外に起源を持つ状態の極近傍には CDD ゼロが存在することが示された。これらの議論から、実験データの解析から得られた散乱振幅の複素エネルギー平面上の極と CDD ゼロの位置を調べることで、固有状態の起源を定性的に識別する方法が構築された。この手法は深く束縛した状態や $s$ -波以外の部分波状態にも適用できるため、2章で構築された手法に比べ広い適用範囲を持つことが示された。

4章では、2章と3章で構築された手法を用いて、エキゾチックハドロン候補の内部構造が議論された。結果として、 $\Lambda(1405)$  バリオンの high-mass 状態は $\bar{K}N$ 複合的状態が、low-mass 状態は $\pi\Sigma$ 複合的状態が主要な起源となっていることが示された。また、 $a_0(980)$  メソンにおける $\bar{K}K$ 複合的成分は小さいことが示された。最後に、ストレンジネス  $S = -3$ 、スピ-ン-パリティ  $J^P = 2^+$  の系に現れることが予言されているダイバリオン状態が $N\Omega$ 複合的であると結論された。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文の研究対象であるエキゾチックハドロンは、主に近年の高エネルギー実験の進展によりデータ精度が向上し、新しい状態が次々と見つかっている。理論的にも従来のクォーク模型の描像を超えた新奇な構造が期待されており、様々な理論的アプローチが試みられているハドロン物理学の中心的な課題である。一般にハドロン構造の研究では、強い相互作用の基礎理論であるQCDを直接扱うのではなく、低エネルギーでの記述に有効な自由度を抽出した模型計算が使われる。しかし得られた結果の模型依存性を排除することは容易ではなく、ハドロンの構造について確定的な結論を引き出せないという長年の課題があった。

本論文ではこの問題を克服するため、模型に依存せずに状態の構造を議論する2つの手法が構築された。エキゾチックハドロン候補のほとんどは強い相互作用での崩壊に対して不安定であり、ハドロン散乱中の共鳴状態として記述される。ハドロン散乱振幅は原理的に実験から一意的に決められるものであるため、散乱振幅とそこに現れる共鳴状態の構造を関係付けることで、模型依存性を持たない内部構造の議論が可能となった。

論文前半では、束縛状態の内部構造の定量的な指標である複合性が、束縛エネルギーが小さい極限で観測可能量と関係するという弱束縛関係式が、不安定な状態にも適用できるように拡張された。有効場の理論の手法によって関係式の系統的な導出を行い、有効レンジ展開の収束性の議論や誤差解析の方法の整備を通じて、弱束縛関係式の物理的理解が深められた。さらに不安定状態への拡張が行われたことで、初めてエキゾチックハドロンに適用することが可能となった。

論文後半では散乱振幅の持つゼロ点 (CDDゼロ) の位置から固有状態の起源を明らかにする方法が議論された。この散乱振幅の位相が持つトポロジカル不变量など一般的な原理に基づいた議論であり、極めて広い適用範囲を持つ。

特に従来の手法の適用限界を超えた高次の部分波に存在する共鳴の構造を高く評価できる。

2つの手法は、現状での実験データの解析から決定された散乱振幅の情報を用いて実際のハドロン共鳴の解析に応用され、具体的なハドロンの構造の解明に有用であることが示された。ハドロン散乱振幅の決定は、内外の実験施設で精密なデータが収集されているほか、格子QCDを用いた第一原理計算も近年発展していることから、今後さらに情報が蓄積され、本論文で確立された手法がハドロン内部構造の解明に重要な役割を果たすことが期待される。

このように、本論文は十全な理論的手法に則ったものであり、ハドロン構造の物理学に基礎的な進展をもたらすとともに、新たな知見を与える研究成果である。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、平成31年1月15日、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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降