

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	村上 耕太郎
論文題目	Lattice QCD studies on baryon resonances and pentaquarks from meson-baryon scatterings (メソンバリオン散乱におけるバリオン共鳴およびペンタクォークの格子 QCD を用いた研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文には、クォークとグルーオンの力学であるQCDを非摂動的に取り扱える格子QCDを用いてハドロンの共鳴状態の理解を目指す研究がまとめられている。本研究では、共鳴状態が存在し得るメソン・バリオン系に対してHALQCD法を適用し、両者の間の相互作用ポテンシャルを計算し、それを解析することで共鳴状態の存否やその性質の解明を行っている。HALQCD法は、格子QCDの大規模数値計算を活用し2つのハドロン間の相互作用ポテンシャルを導き出す手法であり、これまでに核力やハイペロン力などのバリオン間ポテンシャルの計算で多くの成果を上げてきた。しかしながら、多くの共鳴状態が現れるメソン間やメソン・バリオン間のポテンシャルの計算は、クォークの生成消滅を含む計算方法が確立していなかったため、あまり進んでいなかった。最近になって、ようやく最も簡単な<math>\pi</math>中間子間のポテンシャルから<math>\rho</math>中間子に対応する共鳴状態を導き出すことに成功したところである。本研究では、HALQCD法の利点の1つである「バリオンを含む系でも信頼できる結果が出せる」を最大限活用するために、<math>\rho</math>中間子共鳴状態の解析に使われたさまざまな計算手法を改良し、メソン・バリオン間ポテンシャルの計算に適用し、HALQCD法により様々なメソン・バリオン間ポテンシャルの計算を行っている。本論文で得られた研究成果は以下である。</p> <p>(1) クォークの生成消滅過程を取り扱うには、全ての時空点から全ての時空点までのクォーク伝播関数が必要であるが、その計算手法がメソン・バリオン系でも正しく機能することを調べるために、あえて生成消滅過程がないK中間子と核子の間のS波のポテンシャルを計算し、十分な精度でポテンシャルが計算できることを示した。ポテンシャルから得られた位相差は低エネルギーでのわずかな引力を除いてほぼ斥力的であり、その定性的な振る舞いは実験で測られた位相差と無矛盾である。また、<math>\pi</math>中間子の質量が重い場合の計算ではあるが、得られたポテンシャルの解析から、一部の実験でこの系に存在することが示唆されていたペンタクォークは、共鳴状態でも束縛状態でも存在しないことが示された。</p> <p>(2) 上記の成功を受け、クォークの生成消滅過程を含むメソン・バリオン系のポテンシャルをHALQCD法を用いて計算し、<math>\Delta</math>バリオンと<math>\Omega</math>バリオンの性質を調べた。自然界では、<math>\Delta</math>は<math>\pi</math>中間子と核子の共鳴状態として、<math>\Omega</math>はK中間子と<math>\Xi</math>バリオンの束縛状態として存在するが、<math>\pi</math>中間子が自然界よりも重い今回の計算では両者とも束縛状態として存在する。計算されたポテンシャルは、<math>\Delta</math>と<math>\Omega</math>がメソン・バリオン系の束縛状態として現れることを示したが、束縛状態の波動関数の広がり非常に小さいため、両者ともメソン・バリオンの束縛状態と考えるよりも、同じ量子数を持つ3クォーク状態と考える方が自然であることも結論された。また、自然界でなぜ<math>\Delta</math>が共鳴状態なのに<math>\Omega</math>が束縛状態のままなのかを説明する機構に関しても詳細な検討を行った。</p> <p>(3) その性質がクォーク模型では説明できない奇妙な共鳴状態である<math>\Lambda(1405)</math>の正体をHALQCD法で調べる第一歩として、フレーバーSU(3)対称の極限で<math>\Lambda(1405)</math>に対応するポテンシャルを計算した。その結果、現在の方法ではポテンシャルは計算できる</p>			

がその振る舞いに特異性が現れるため信頼できる解析が出来ないことが分かり、その原因がクォークの生成消滅に伴う波動関数の近距離での振る舞いにあることを明らかにした。その知見をもとに、どのように計算方法を改良すれば特異性が除けるかなど、将来の  $\Lambda(1405)$  研究に向けての提案を行なった。

以上の結果に加えて、HALQCD法によるハドロン共鳴状態の研究に関する将来の展望を述べるとともに、補遺には、今まで論文としては未発表であったが有用である2つの粒子の質量が違う場合の時間依存HALQCD法の厳密な表式を与えている。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、自然界に多数存在するがその性質が完全には分かっていないハドロンの共鳴状態を、QCDという第一原理により理解しその性質を明らかにすることを目指し、格子QCDによる核力や $\rho$ 中間子共鳴状態の計算で成功を収めたHALQCD法を、奇妙な共鳴状態が多数現れるメソン・バリオン系に適用したものである。そこで得られた結果とその意義は以下の通りである。

(1) クォークの生成消滅を含むメソン間ポテンシャルの計算のために開発された手法をより計算の難しいメソン・バリオン間ポテンシャルの計算に拡張し、また、さらなる計算上の工夫を加えた。これにより全てのハドロンの相互作用の研究にHALQCD法のポテンシャルによる解析を適用する道筋を拓いた。

(2) クォークの生成消滅を含まないK中間子と核子間のポテンシャルを上記(1)で開発した方法で計算し、正しい結果を十分な精度で計算できることを示した。また、得られたポテンシャルから計算された位相差が実験値や先行研究の結果と整合的であるだけでなく、その詳細な解析から、一部の実験でその存在が示唆されていたペンタクォークの存在を否定するという重要な結果も得た。

(3) クォークの生成消滅を含むメソン・バリオン間ポテンシャルを初めて計算し、 $\pi$ 中間子の質量が重い場合は、 $\Delta$ バリオンも $\Omega$ バリオンを束縛状態になるという結果をポテンシャルから正しく導き出し、その束縛状態のエネルギーが $\Delta$ や $\Omega$ を3クォーク状態として計算した通常の結果と一致したことで、計算方法の正しさが確立した。一方、メソン・バリオンの束縛状態としては波動関数の広がりが小さく、3クォーク状態としての解釈が正当化されたことは興味深い結果である。

(4) クォーク模型で理解できない奇妙な束縛状態である $\Lambda(1405)$ の理解はハドロンの物理で解明すべき謎の1つであるが、その第一歩としてフレーバーSU(3)対称の極限で解析を行ったことは意義がある。残念ながら、得られたポテンシャルが特異性を持つため、非物理的な状態が現れてしまうという問題が出てきたが、その特異性の原因が、クォークの生成消滅に伴う近距離での波動関数の振る舞いにあることが同定できたことは重要である。そのことがポテンシャルの特異性を取り除く方法の提案に繋がっており、将来の $\Lambda(1405)$ の研究に希望が持てる知見である。

以上のように、本論文の成果は格子QCDの結果としてもハドロンの物理学の研究成果としても世界の第一線の水準のものであり、その学術的な意義は高い。また、本論文の研究により、ハドロンの共鳴状態のQCDによる統一的な理解に向けての研究の基盤が確立するなど、その成果は高い発展性を持つものである。さらに、本論文で導入され詳しく調べられた数値計算上の技法は、HALQCD法によるポテンシャルの計算だけでなく、格子QCDの他の分野への応用も可能でその波及効果は大きい。

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、令和5年1月17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