

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理 学 )	氏名	赤星 友太郎
論文題目	Rho resonance from lattice QCD: Technical improvement and its application (格子QCDによるロー中間子共鳴の研究：技術的改善とその応用)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文には、強い相互作用に現れる共鳴状態をクォークとグルーオンの力学を非摂動的に取り扱う格子QCDにより理解することを目指した研究がまとめられている。本研究では、主に典型的な共鳴状態であるロー中間子を2つの<math>\pi</math>中間子の散乱から解析するために、HALQCD法という手法を用いている。HALQCD法は、格子QCD計算により2つのハドロン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あげてきた。しかしながら、ロー共鳴が現れる2つの<math>\pi</math>中間子の散乱過程にはクォーク・反クォークの対生成消滅が存在し、そのことが中間子間ポテンシャルの格子QCD計算を著しく困難にしている。特に全ての時空点から全ての時空点までのクォークの伝搬関数（以下では、all-to-all propagatorと呼ぶ）が必要であり、HALQCD法と組み合わせた先行研究はなかった。本論文では、以下の成果が得られている。</p> <p>(1) all-to-all propagatorを計算する手法の1つであるハイブリッド法を用いて、クォーク・反クォークの対生成消滅がない場合の<math>I=2</math>の<math>\pi</math>中間子間ポテンシャルをHALQCD法で計算し、微分展開の最低次のポテンシャルが計算できることを示した。ここで<math>I</math>はアイソスピンを表す。</p> <p>(2) テスト計算として、<math>\pi</math>中間子の質量が重く、ロー中間子が束縛状態として現れる状況でクォーク・反クォークの対生成消滅が存在する<math>I=1</math>の<math>\pi</math>中間子間ポテンシャルをハイブリッド法により計算した。(1)でのやり方では統計誤差が大きくなってしまったため、統計誤差を減らす様々な工夫をして精度をあげることで最低次のポテンシャルを得ることができた。そのポテンシャルを用いてシュレディンガー方程式を解き束縛状態のエネルギーを求めたところ、分かっているロー中間子の質量から予想される値と統計誤差と系統誤差の範囲で一致した。</p> <p>(3) ロー共鳴状態の存在が分かっているゲージ配位は体積が大きいため、(2)でうまくいった統計誤差を減らす方法が使えない。そのため、3つの新たな方法を導入し、系統誤差を軽減を図った。3つの方法とは、(a)one-end-trick (b)sequential source (c)covariant approximation averaging であり、これらの工夫により、現実的な計算時間でポテンシャルが計算できた。その結果は以下である。</p> <p>(A) 得られた最低次のポテンシャルを用いて計算された位相差は共鳴状態の存在を示唆する振る舞いを示したが、同じゲージ配位を使った有限体積法から得られた先行研究の結果との不一致が見られた。</p> <p>(B) 2つの演算子ソースを用いて、世界で初めて微分展開の高次項を含めた<math>\pi</math>中間子間ポテンシャルを決定した。そのポテンシャルを使って計算した位相差は、ロー共鳴状態の存在を示し、そのエネルギー領域では、有限体積法の結果と一致した。</p> <p>(C) 高次項を含めたポテンシャルを用いてS行列を構成し、そこから共鳴状態に対応する複素極の決定し、共鳴状態のエネルギーおよび崩壊幅を引き出した。共鳴状態のエネルギーは先行研究の結果と一致したが、崩壊幅はかなり大きくなった。その原因</p>			

は低エネルギー領域の位相差の振る舞いの違いにあることがわかった。

(4) 計算で使われた $I=1$ の2つの $\pi$ 中間子の重心系は低エネルギー領域の状態を含んでいないことがその領域での正しい位相差が得られなかった理由である。それを解決する手段の1つは有限体積法でも使われた実験室系での計算である。そのテストとして $I=2$ の $\pi$ 中間子間ポテンシャルを計算し、その位相差が重心系の結果と一致することを確認した。

以上の結果に加えて、論文の最後にHALQCD法によるハドロン共鳴状態の研究に関する将来展望を述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、自然界に多数存在するハドロンの共鳴状態を、QCDという第一原理により理解し解明することを目指し、その第一歩として典型的な共鳴状態であるロー中間子を、核力の格子QCD計算で成功を収めたHALQCD法を用いて研究したものである。そこで得られた結果とその意義は以下の通りである。

(1) さまざまな数値計算上の工夫をすることで、クォーク反クォークの生成消滅が起こる散乱過程に対応するHALQCDポテンシャルの計算が可能であることが示された。このことにより、バリオン間力だけでなく、クォーク反クォークの生成消滅を含む中間子間力やバリオン・中間子間力にも、HALQCD法のポテンシャルによる解析を適用する道筋が拓かれた。

(2) 格子QCDの先行研究では、 $\pi$ 中間子が重い場合はロー中間子が安定なハドロンとして存在することが分かっていたが、そのような場合に $\pi$ 中間子間のポテンシャルの束縛状態としてロー中間子が理解できることが分かった。このことは、ハドロンの物理的な描像に新たな視点を与えることになった。

(3)  $\pi$ 中間子の質量を軽くしてロー中間子が共鳴状態になることが期待される場合に、 $\pi$ 中間子間のポテンシャルを微分展開の高次項まで計算し、ポテンシャルから求めた位相差の振る舞いより共鳴状態としてのロー中間子の存在を示した。ロー中間子のような典型的な共鳴状態が、格子QCDにより得られた $\pi$ 中間子間のポテンシャルから直接導き出されたことは、今後の共鳴状態の研究にとっての基盤となる結果であり意義深い。特に、ポテンシャルから計算されたS行列の複素極として共鳴状態を記述できることが分かったので、実験で得られた共鳴的な位相差の振る舞いが本当に共鳴状態であるかをQCDにより判別できることになり、ハドロンの共鳴状態の統一的な理解に繋がることが期待される。

(4) 有限体積法による先行研究の結果と比べると得られた崩壊幅が大きすぎるとう問題が発見された。これは重心系による計算の限界を示すもので、実験室系でのHALQCDポテンシャルの計算の必要性を示している。本論文では、 $I=2$ の $\pi$ 中間子間ポテンシャルを実験室系で計算し、そのような計算が可能であることを示した。今後のロー共鳴状態の計算の改善が期待される。

以上のように本論文の成果は、格子QCDの数値計算としても、ハドロン物理学の研究としても、世界最高水準の結果のものであり、その学術的意義は極めて高い。また、今後、ハドロン共鳴状態のQCDによる統一的な理解を目指すことが可能となり、発展性の高い成果となっている。さらに、本論文により詳しく調べられた数値計算上のさまざま改良手法は、HALQCDポテンシャルの計算でなく、格子QCDの他の分野への応用も可能であり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、平成4年1月19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、博士論文としての高い水準が確認でき、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年              月              日以降