

氏名(本籍)	やまざき 山崎	たけし 剛	(千葉県)
学位の種類	博士(理学)		
学位記番号	博甲第3382号		
学位授与年月日	平成16年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	物理学研究科		
学位論文題目	I=2 S-wave Pion Scattering Phase Shift with Two Flavor Dynamical Quark Effect (2フレーバー動的クォーク効果を含んだI=2 S-波パイ中間子散乱位相差)		
主査	筑波大学教授	理学博士	宇川 彰
副査	筑波大学教授	理学博士	青木 慎也
副査	筑波大学教授	理学博士	金谷 和至
副査	筑波大学助教授	理学博士	石塚 成人

論文の内容の要旨

本論文は、格子量子色力学において up クォークと down クォークの動的効果を取り入れた数値シミュレーションを行い、パイ中間子の2体散乱のアイソスピン $I = 2$ チャネルの散乱位相差を求めたものである。

量子色力学(QCD)は、素粒子の強い相互作用の基礎理論と考えられているが、低エネルギー領域で非線形・強結合の理論であるために解析的に理論の予言を引き出すことが困難である。格子QCDは、理論を離散な時空格子上に定義することによりモンテカルロ法などの数値的方法の適用を可能とし、系統的にQCDの予言を抽出する方法として発展を遂げてきた。既に、ハドロンの質量や崩壊幅等の一体の静的な物理量については多くの結果がある。本論文は、ハドロンの一体の物理量を越えて、動的情報であるハドロン同士の散乱を特徴付ける散乱位相差の計算を試み、格子QCDによる強い相互作用の理解を一層深く進めようとしたものである。

散乱の位相差の閾値(運動量ゼロでの値)は散乱長と呼ばれ、以前から多くのクエンチ近似計算が行われて来た。アイソスピン $I = 2$ のチャネルだけでなく、計算上は遥かに困難な $I = 0$ チャネルに対する試みもある。しかしながらクエンチ近似は、理論のユニタリティを破るため、散乱長には人為的な赤外発散が生じることが理論的に指摘されている。また、散乱を特徴付けるには、散乱長だけではなく、入射エネルギーの関数として位相差を求めることが必要である。本論文では、up クォークと down クォークの動的効果を取り入れたグルオン配位を用いて、 $I = 2$ チャネルのパイ中間子の2体散乱位相差を求めた。これらの配位は、ハドロン質量やクォーク質量に対するクォークの動的効果を研究する目的で、繰り込み群により改善されたグルオン作用とクローバーフェルミオン作用を用いて以前に生成されたものである。3つの格子間隔と、各々の格子間隔に対して4つの動的クォーク質量のグルオン配位があるが、本論文の計算では、これら全てに対して散乱位相差を計算することにより、各格子間隔でのカイラル極限(up, down クォーク質量がほぼゼロの極限)を取った後に、格子間隔ゼロの連続極限を取ることが可能となった。理論的の矛盾を含まない枠組み(クエンチ近似でない)で、且つ系統的に連続極限值が求められたのは、散乱情報については初めてのことである。

計算は、有限空間体積でのパイ中間子の2体状態のエネルギー固有値と散乱振幅を結びつける Luescher の関係式を用いて行われた。2体のエネルギー固有値はパイ中間子の4点関数から求められるが、一般に複数の固有値を分解しなければならない困難がある。本論文では Luescher-Wolf の方法を用いてこの分解が可能であることを示し、その結果を用いた。さらに、通常 Luescher の公式を用いる時には、2体のパイ中間子の重心系を仮定するが、本論文では Rummukainen-Gottlieb による運動量がゼロでない場合への一般化された公式をも利用し、各格子間隔に対して、11個という多数のエネルギー固有値を求めた。このうち6個を位相差の計算に用い、残り5個は計算値の信頼性のチェックに用いられている。以上の計算データから $I = 2$ チャンネルでの位相差の連続極限での値が抽出され、実験値を良く説明している。

本論文には、研究の動機 (1章)、パイ中間子散乱に関する実験の現状並びに有効理論 (カイラル摂動論) による現象論的解析のまとめ (2章)、計算に用いた格子 QCD の概要と従来の結果 (3, 4章)、本研究で用いた有限体積の方法と2体エネルギー固有値を求めるための対角化法 (5, 6章) が述べられ、それに続いて本研究の詳細と結論 (7, 8, 9章) が述べられている。最後に、不安定ハドロンの物理性質や CP 不変性を破る K 中間子崩壊の研究に、本研究の方法が有効であると考えられることが述べられ、今後の課題とされている (11章)。

審査の結果の要旨

本研究は、単にクォークの動的効果を含んだ最初の位相差の計算と言うだけでなく、理論的に矛盾のない計算の枠組みを用いて、カイラル極限と連続極限の二つの外挿を行い、QCD の連続極限での予言としての位相差が求められた点に大きな進歩が認められる。このような計算は世界的にも最初であり、格子 QCD による強い相互作用の研究を大きく推し進めた研究として高く評価できる。本研究で行われたのはアイソスピン $I = 2$ の場合であるが、アルゴリズムの改善によりアイソスピン $I = 0$ や $I = 1$ のチャンネルに対しても適用可能と考えられる。これらのチャンネルは、K 中間子の CP 非保存崩壊振幅における final state interaction の問題 ($I = 0$) や、ハドロン共鳴状態の問題 ($I = 1$) と密接に関係しており、本研究は多様な分野への展開の先鞭としても重要な意味がある。

よって、著者は博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。