

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05068

研究課題名(和文) 格子量子色力学による新たなハドロン存在形態の解明

研究課題名(英文) Explication of new hadron states by lattice QCD

研究代表者

滑川 裕介 (NAMEKAWA, Yusuke)

筑波大学・数理物質系・研究員

研究者番号：00377946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、格子量子色力学に基づく数値シミュレーションによる新たな複合粒子(ハドロン)存在形態の解明である。物質はハドロンの集合体であり、そのハドロンはクォークから構成されている。クォークを記述する量子色力学に基づいた第一原理計算により、ハドロンの定量的性質解明を目指した。本研究では、まず上記目的用コード開発を行い、格子量子色力学共通コードBridge++へ組み込んだ。その後、京コンピュータを用いて生成された極めて現実世界に近いデータを用いて、スペクトル、繰り込み因子、形状因子を計算した。また、世界初となる半質量殻散乱振幅計算に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is explication of new hadron states by lattice QCD. Materials consist of hadrons, and hadrons are made up with quarks. Using a fundamental theory of quarks, Quantum Chromo Dynamics(QCD), quantitative analysis of hadrons is performed. For this purpose, a simulation code is developed. It is merged to a lattice QCD common code. Then, on very realistic gauge configurations generated by K-computer, spectrum, renormalization factors, and form factor are calculated. Furthermore, a half off-shell amplitude is obtained for the world-first time.

研究分野：素粒子理論

キーワード：計算物理

1. 研究開始当初の背景

近年の主要な実験結果として、単純な構成子クォーク模型では説明できない複合粒子(ハドロン)の発見が挙げられる。ただし、報告されているハドロン全てが存在を確実視されているわけではない。複数の実験で存在が確認されたケースが有る一方、異なる実験間で結果に矛盾が有るケースも数多く報告されている。また、多くの場合、ハドロンを特徴づける基礎情報が不足している。種々の模型による理論的解析がなされている。ただし、模型依存性が大きく、結果の信頼性評価が難しい。模型依存性の無い格子量子色力学に基づく第一原理計算が待ち望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、格子量子色力学に基づく数値シミュレーションによる新たなハドロン存在形態の解明である。物質はハドロンの集合体であり、ハドロンはクォークから構成されている。クォークを記述する量子色力学に基づいた第一原理計算により、基本となる質量スペクトルに加え、ハドロンの大きさを示す形状因子などを求める。また、ハドロン1体系に加え、ハドロン2体系計算も試みる。新たに発見が報告されているハドロンの質量は既存のハドロン2体系に近く、計算には両者を含める必要が有る。このように、大規模数値シミュレーションにより、ハドロンの定量的性質解明を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、計算コードとして、格子QCD共通コード Bridge++ をベースに用いた。本研究に必要な測定を新たに Bridge++へ組み込んだ。

本研究のセットアップとしては、PACS Collaborationにより京コンピュータを用いて生成されたゲージ配位を使用した。このゲージ配位は物理点近傍のアップ、ダウン、ストレンジクォークの動的効果が含まれている。このため、極めて現実世界に近いシミュレーションが実行可能である。また、空間サイズが8 fmと巨大なため、有限格子サイズの影響を大幅に削減できる。有限格子サイズに起因する誤差は、物理点近傍でのシミュレーションにおける主要系統誤差である。この誤差が皆無である利点は大きい。さらに、スメアリングと呼ばれる新しい手法の導入により、格子間隔が有限であることに起因する誤差も効果的に削減できる。

上記に加え、ハドロン2体系の新手法をテストする。そのため、クォークの動的効果を無視したクエンチ近似でのシミュレーションを実行した。シミュレーションパラメータとしては、既知の値を用いた。既存の結果と新手法の結果を比較し、新手法の正当性を検

証するためである。

4. 研究成果

本研究では、まず基礎となるハドロン1体系の質量スペクトルを求めた。軽いアップ、ダウン、ストレンジクォークから構成されるハドロンの質量は1%の精度で実験結果を再現できた。同様に、重いチャームクォークを含んだハドロンスペクトルの場合、ほとんどのハドロンで実験結果との一致が見られた(図1)。ただし、チャーモニウムの超微細分裂において、実験結果との有意な差が確認できた。この差は、有限格子間隔に起因すると推測される。精密な比較には、より細かい格子を用いたシミュレーションが必要である。

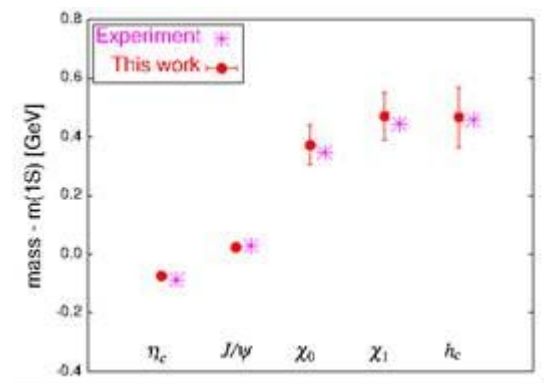


図1 : チャーモニウム質量スペクトル

次に、ハドロンの大きさを特徴づける形状因子計算を試みた。具体的には、パイ中間子の電磁形状因子をハドロン3点関数から引き出した。巨大な空間体積により、運動量の解像度が高く、精密な形状因子計算が出来た。この形状因子から得られた2乗荷電半径は $0.42(2) \text{ fm}^2$ である。この値は実験値と良い一致を示している。また、既存の格子計算と異なり、誤差も実験値と同程度という精度を達成出来た。

さらに、クォーク質量計算を行った。クォークは基礎理論である量子色力学の基本パラメータである。しかし、クォークはハドロン内部に閉じ込められているため、実験的に直接測定は出来ない。格子QCDシミュレーションが必要である。このクォーク質量を求める際、くりこみ因子が必要とされる。一般に、くりこみ因子の不定性は大きく、クォーク質量精密計算の妨げとなっていた。本研究では、スメアリングというゲージ場の平坦化操作を導入し、くりこみ因子の不定性削減に成功した。図2は、軸性ベクトルカレント(ZA)およびベクトルカレント(ZV)のくりこみ因子である。くりこみ因子の誤差は劇的に小さくなり、またその値も連続極限值である1に近い。このため、クォーク質量の精密化が可

能になった。

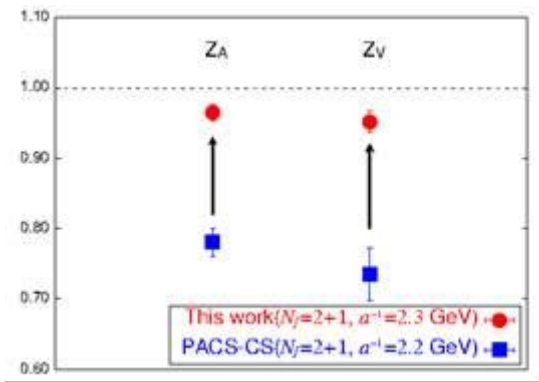


図2：軸性ベクトルカレント（ZA）およびベクトルカレント（ZV）くりこみ因子

図3は、チャームクォーク質量とストレンジクォーク質量の比である。世界平均値であるFLAGの誤差より50%の精度更新を達成できた。

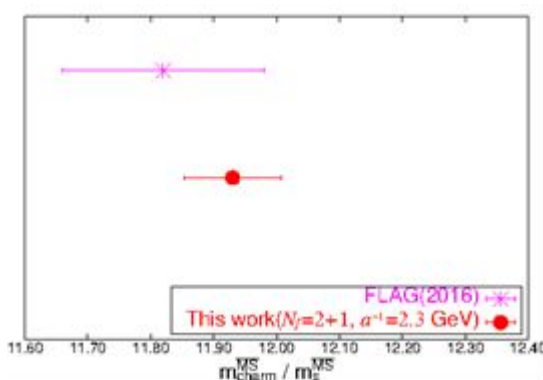


図3：チャームクォーク・ストレンジクォーク質量比

上記、ハドロン及びクォーク1体系の計算に加え、ハドロン2体系の計算も実行した。既知であるアイソスピン $I = 2$ のパイオン2体系において、既存の有限体積法と新しく提案された相互作用範囲内の波動関数を用いた散乱長計算を行った。両者は誤差の範囲で一致しており、新手法の正当性を確認できた。

また、このハドロン2体系計算の際、思いがけず、世界初となる半質量殻散乱振幅の非摂動計算に成功した。従来、質量殻のみ計算されてきた。本研究により、半分のみではあるが、質量殻外の散乱振幅も非摂動的に計算可能になった。図4は、半質量殻散乱振幅の運動量依存性である。

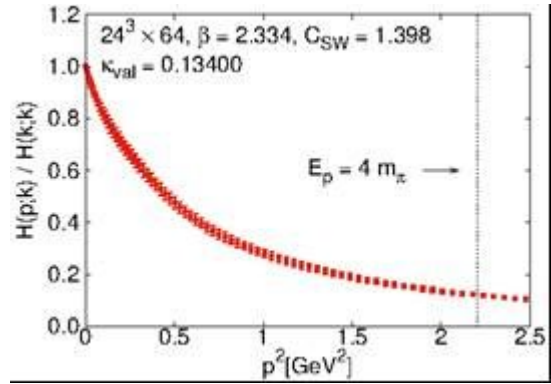


図4：半質量殻散乱振幅の運動量依存性

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計5件)

- (1) PACS Collaboration: J.Kakazu, K.I.Ishikawa, N.Ishizuka, Y.Kuramashi, Y.Nakamura, Y.Namekawa, Y.Taniguchi, N.Ukita, T.Yamazaki, T.Yoshie, “Electromagnetic pion form factor near physical point in Nf=2+1 lattice QCD”, PoS LATTICE2016(2017)160, 査読有, DOI:10.22323/1.256.0160
- (2) Y.Namekawa, “Charm physics by Nf=2+1 Iwasaki gauge and the six stout smeared O(a)-improved Wilson quark actions on a 96^4 lattice”, PoS LATTICE2016(2017)125, 査読有, DOI:10.22323/1.256.0125
- (3) PACS Collaboration: K.I.Ishikawa, N.Ishizuka, Y.Kuramashi, Y.Nakamura, Y.Namekawa, Y.Taniguchi, N.Ukita, T.Yamazaki, T.Yoshie, “2+1 flavor QCD simulation on a 96^4 lattice”, PoS LATTICE2015(2016)075, 査読有, DOI:10.22323/1.251.0075
- (4) S.Motoki, S.Aoki, T.Aoyama, K.Kanaya, H.Matsufuru, T.Miyamoto, Y.Namekawa, H.Nemura, Y.Taniguchi, S.Ueda, N.Ukita, “Lattice QCD code set Bridge++ on arithmetic accelerators”, PoS LATTICE2015(2016)040, 査読有, DOI:10.22323/1.251.0040
- (5) PACS Collaboration: K.I.Ishikawa, N.Ishizuka, Y.Kuramashi, Y.Nakamura, Y.Namekawa, Y.Taniguchi, N.Ukita, T.Yamazaki, T.Yoshie, “Mass and axial current

renormalization in the Schroedinger functional scheme for the RG-improved gauge ant the stout smeared O(a)-improved Wilson quark actions”, PoS LATTICE2015(2016)271,査読有, DOI:10.22323/1.251.271

(1)研究代表者
滑川 裕介 (NAMEKAWA, Yusuke)
筑波大学・数理物質系・研究員
研究者番号：00377946

〔学会発表〕(計6件)

- (1) 滑川裕介,
“格子 QCD による相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱長計算”,
日本物理学会第 73 回年次大会(2018)
- (2) 滑川裕介,
“Successful prediction to charmed single baryons and attempt on two-hadron by lattice QCD”,
研究会「ヘビークォークハドロンとエキゾチックハドロンの構造」(招待講演) (2018)
- (3) Y.Namekawa,
“Scattering length from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range”,
INT workshop “Multi-Hadron Systems from lattice QCD” (招待講演) (2018)
- (4) Y.Namekawa,
“Charm physics by Nf=2+1 Iwasaki gauge and the six stout smeared O(a)-improved Wilson quark actions on a 96⁴ lattice”,
34th International Symposium on Lattice Field Theory (2016)
- (5) Y.Namekawa,
“Charm physics from realistic lattice QCD”,
J-PARC Workshop “From exotic hadrons to QGP” (招待講演) (2016)
- (6) Y.Namekawa,
“Comparative study of topological charge in lattice QCD”
Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (2015)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等
格子 QCD 共通コード Bridge++
<http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>

6. 研究組織