

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03638

研究課題名（和文）格子量子色力学による新ハドロンの実在検証及び予言

研究課題名（英文）Lattice QCD study for verification and prediction of new hadrons

研究代表者

滑川 裕介（Namekawa, Yusuke）

京都大学・理学研究科・特定研究員

研究者番号：00377946

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究にて、ハドロン構造解析に重要な散乱振幅の計算法を検証できた。我々が開発した散乱振幅計算法をパイ中間子2体系に適用し、散乱長・有効範囲とも既存の結果を再現すること、かつ従来の計算法に比べ有効範囲の高精度化成功を確認した。また、K中間子の崩壊形状因子を求め、そこから素粒子標準理論の基礎パラメータであるキャビボ・小林・益川行列要素を決定した。上記に加え、当初予期していなかった研究成果として、複素ランジュバン法により高温高密度領域の一部ではあるが非摂動計算が実行可能であることを示せた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、ハドロン構造解析に重要な散乱振幅の計算法を確立できた点が挙げられる。また、ハドロン形状を記述する崩壊形状因子の精密決定を通して、素粒子標準理論の基礎パラメータであるキャビボ・小林・益川行列要素を決定できたことはハドロン物理的のみならず素粒子論的にも意義深い。加えて、ハドロンに対する有限密度媒質効果も中性子星内部で重要と想定されており、天体学としても意義深い。本成果はハドロンに対する有限温度・有限密度媒質効果の非摂動評価への第一歩となる。

研究成果の概要（英文）：We verified our method on scattering amplitude, which is important to clarify the structure of new hadrons. Our method is applied to two-pion system and can reproduce the scattering length and the effective range with high precision. We also calculate kaon form factors and extract a Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix element, a fundamental parameter of the standard model of particle physics. In addition, unexpected progress is obtained by the Complex Langevin method for QCD at finite temperature and density. Although the application range is limited, a non-perturbative calculation is proven to be successfully performed for QCD at finite density, overcoming the sign problem. This result is the first step toward the non-perturbative evaluation of the medium effect of new hadrons.

研究分野：計算物理

キーワード：原子核理論

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初は、新ハドロン候補となる粒子が実験的に多数報告されていた。新ハドロンとは、単純な構成子クォーク模型では説明できない複合粒子である。Belle、BABAR、LHCbにより、X、Y、Zといった様々な候補が挙げられた。また、チャームクォークを含んだ5つのクォークからなるチャームペンタクォーク状態のシグナル候補もLHCbにより発見されていた。加えて、Belle II実験の物理ランが始まろうとしており、より多くの発見が期待される状況であった。

他方、新ハドロンの性質は不明点が多かった。理論模型を用いた解析では模型依存性が大きく、確定的な結論が得づらい。また、強い相互作用のため、摂動論的解析も難しい。理論模型に依存しない第一原理計算を用いた新ハドロンの非摂動的性質解明が望ましい。ただし、新ハドロン状態はハドロン2体のエネルギーしきい値と近いいため、強力な研究手法である格子量子色力学による非摂動計算をもってしてもシグナル特定は困難であった。新ハドロンに対しても有効な計算手法が待ち望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究の最終目標は格子量子色力学シミュレーションによる新ハドロンの性質解明である。新ハドロンの性質は理論模型の不定性が大きく、不明な点が多い。例えば、ある模型では新ハドロンは空間的にコンパクトなハドロン、別の模型では非コンパクトな分子的ハドロン、さらに別の模型では新ハドロンは束縛状態や共鳴状態ではなく単なる運動学的なカスプ効果とされる。どの結論が正しいかの判定は難しい。格子量子色力学に基づく第一原理計算による模型不定性の無い結果が重要となる。ただし、既存の手法では高精度のシグナルを得ることは難しい。本研究は、新ハドロンに対しても有効なハドロン構造計算手法を得ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

目標達成のため、実験的に存在が確定している粒子に対する格子量子色力学シミュレーションを行い、ハドロン構造計算手法の開発・改善を試すと共に、計算手法の信頼性を確認した。単純なスペクトル計算に比べ、ハドロンの構造計算は複雑化しシグナルが得づらくなる。有効な手法は高精度のシグナル特定に必須となる。

具体的には、格子上の散乱振幅計算法の評価、ハドロンの構造を特徴づける形状因子計算を行った。新ハドロンは既知ハドロンの散乱状態近傍に位置するため、散乱振幅計算法が重要となる。散乱振幅計算に関しては、従来の相互作用範囲外の波動関数を用いた解析と共に、相互作用範囲内の波動関数を用いた解析も実施した。また、形状因子計算において、従来の単一の境界条件を用いた計算だけでなく、異なる境界条件を用いた計算をも組み合わせ、計算結果の精度向上を試みた。

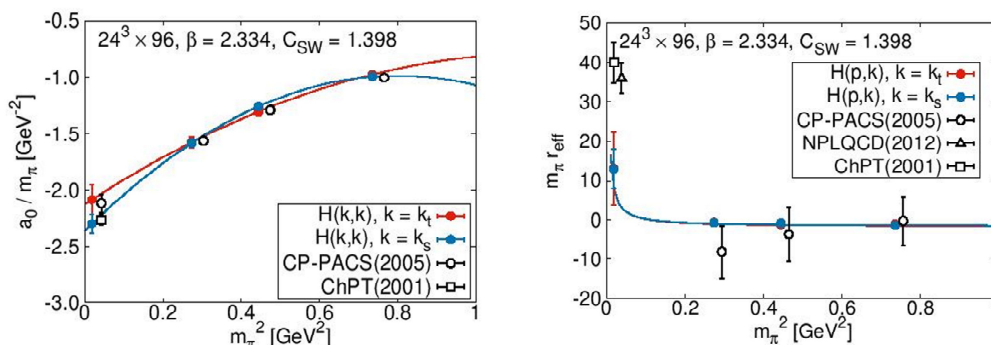
上記に加え、クォーク質量依存性・空間体積依存性の2つの系統誤差を評価した。計算手法の改善による統計誤差の減少に伴い、系統誤差の寄与が有意になる。精度向上のため、統計誤差のみならず系統誤差も抑制する必要がある。本研究では系統誤差の主要因であるクォーク質量依存性、空間体積依存性を調べた。

### 4. 研究成果

まず、パイ中間子2体系を用いて、格子散乱振幅計算法を評価した。従来の計算法では相互作用範囲外の波動関数を用いて散乱振幅を計算し、散乱長・有効範囲などを求める。本研究では、それに加えて、相互作用範囲内の波動関数を用いた解析も試みた。

その結果、従来の計算と本研究での計算結果の一致が確認できただけでなく、散乱長・有効範囲に対する回転対称性の破れに起因する有限格子間隔の影響が評価可能になった。従来の方法で

は異なる格子間隔のデータを用いなければ有限格子間隔誤差は判明しなかったが、本計算では単一の格子間隔データのみで有限格子間隔の影響が分かる。また、オンシェルの散乱振幅に加え、半オフシェルの散乱振幅データも取得可能となった。半オフシェルのデータを用いることで、特に有効範囲の誤差削減に成功した。クォーク質量依存性はカイラル有効理論と無矛盾ではあるが外挿の不定性は大きく、物理点直上での直接計算の重要性が示された。空間体積も当初想定したより大きな依存性が確認され、大体積での計算が必要と判明した。



図：散乱長  $a_0$  および有効範囲  $r_0$

次に、K13系での形状因子計算を試みた。K13系とはK中間子がレプトンを含む3体へと崩壊する過程である。形状因子はハドロンを特徴づけるだけでなく、崩壊率の実験結果からキャビボ・小林・益川行列要素を引き出すためにも必要であり、ハドロン物理だけでなく素粒子物理の観点からも重要な物理量である。特に、現在、キャビボ・小林・益川行列要素のユニタリティに3シグマのズレが生じており、素粒子標準理論を超えるシグナルの可能性が示唆されている。シグナル確定のためにも、高精度の格子シミュレーション結果が望まれている。

形状因子計算の際、系統誤差を抑えるべく、物理点直上かつ10 fmを超える大体積での格子量子色力学シミュレーションを実施した。これにより、クォーク質量依存性および空間体積依存性による系統誤差は無視できる値まで抑制できた。また、複数の境界条件を用いた計算を組み合わせ、精度向上を試みた。周期的境界条件と半周期的境界条件を組み合わせることで、時間方向の格子サイズ有限性に起因する影響の大幅削減に成功した。しかし、完全に影響を取り除けたわけではなく、解析時に時間方向の有限サイズを考慮する必要は依然として生じた。

得られた形状因子は従来の計算結果と無矛盾だが、大きく精度向上に成功した。ただし、形状因子から引き出したキャビボ・小林・益川行列要素は未だ素粒子標準理論を超えるシグナルを確定させる精度には到達していない。特に、本研究の計算結果には有限格子間隔に起因する系統誤差が残っており、これが最大の不定性を生んでいる。また、電磁相互作用による系統誤差も無視できない寄与を示し始めており、さらなる精度向上のためには電磁相互作用をも含めた格子シミュレーションが必要となる。

さらに、研究計画作成時には想定していなかった思いがけない研究成果として、有限密度での格子量子色力学による非摂動計算の成功が挙げられる。研究計画作成時はゼロ密度の場合のみを想定していた。新ハドロンに対する有限密度による媒質効果は、新ハドロンの質量・崩壊幅の性質変化、新ハドロンからクォーク物質への転移など興味深い現象をもたらすと予想されている。しかし、有限密度での格子量子色力学には符号問題が生じ、単純なシミュレーションでは有意なシグナルが得られないという困難が存在する。このため、伝統的なモンテカルロ法による計算は符号問題が厳しくない摂動的な低密度領域に限定されていた。

本研究では、折よく2021年のノーベル賞を受賞した Parisi らにより開発された複素ランジュバン法を用いることで、高密度領域の一部ではあるが非摂動的シミュレーション可能であ

ることを示した。複素ランジュバン法は、複素化した動変数に関するランジュバン過程を用いることで非摂動評価を実現する。この過程に確率分布は陽には含まれず、符号問題が有る系でもシミュレーション可能である。ただし、シミュレーション結果が元々の経路積分における期待値と一致するためには特定の条件を満たす必要が有る。本研究により、量子色力学の高密度領域においても、この条件を満たすパラメーターが存在していることが判明した。複素ランジュバン法により全ての高密度領域が研究可能になったわけではないが、一部でも非摂動計算可能となったことは大きな前進である。本研究成果は新ハドロンに対する有限密度効果の非摂動計算への第一歩として大変意義深い。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 PACS Collaboration: Kakazu Junpei, Ishikawa Ken-ichi, Ishizuka Naruhito, Kuramashi Yoshinobu, Nakamura Yoshifumi, Namekawa Yusuke, Taniguchi Yusuke, Ukita Naoya, Yamazaki Takeshi, Yoshie Tomoteru	4. 巻 101
2. 論文標題 K13 form factors at the physical point on a $(10.9 \text{ fm})^3$ volume	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.094504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamazaki Takeshi, Namekawa Yusuke	4. 巻 LATTICE2019, 032
2. 論文標題 Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 PACS Collaboration: Kakazu Junpei, Ishikawa Ken-ichi, Ishizuka Naruhito, Kuramashi Yoshinobu, Nakamura Yoshifumi, Namekawa Yusuke, Taniguchi Yusuke, Ukita Naoya, Yamazaki Takeshi, Yoshie Tomoteru	4. 巻 LATTICE2019, 186
2. 論文標題 K13 form factors in $N_f = 2+1$ QCD at physical point on large volume	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.363.0186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ito Yuta, Matsufuru Hideo, Namekawa Yusuke, Nishimura Jun, Shimasaki Shinji, Tsuchiya Asato, Tsutsui Shoichiro	4. 巻 2020
2. 論文標題 Complex Langevin calculations in QCD at finite density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2020)144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa K.-I., Ishizuka N., Kuramashi Y., Nakamura Y., Namekawa Y., Shintani E., Taniguchi Y., Ukita N., Yamazaki T., Yoshie T., PACS Collaboration	4. 巻 100,094502
2. 論文標題 Finite size effect on vector meson and baryon sectors in 2+1 flavor QCD at the physical point	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.094502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Namekawa Yusuke, Yamazaki Takeshi	4. 巻 99,114508
2. 論文標題 Quark mass dependence of on-shell and half off-shell scattering amplitudes from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.114508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 J. Kakazu, K.I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie	4. 巻 LATTICE2018),265
2. 論文標題 Calculation of $K \rightarrow \pi l \bar{\nu}$ form factor in $N_f = 2 + 1$ QCD at physical point on $(10 \text{ fm})^3$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa K.-I., Ishizuka N., Kuramashi Y., Nakamura Y., Namekawa Y., Taniguchi Y., Ukita N., Yamazaki T., Yoshie T., PACS Collaboration	4. 巻 99
2. 論文標題 Finite size effect on pseudoscalar meson sector in 2+1 flavor QCD at the physical point	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.014504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y.Namekawa and T.Yamazaki	4. 巻 LATTICE2018
2. 論文標題 Scattering length from BS wave function inside the interaction range	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yusuke Namekawa
2. 発表標題 Exploring QCD at finite temperature and density using complex Langevin method
3. 学会等名 YITP seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Namekawa
2. 発表標題 Scattering of hadrons by lattice QCD
3. 学会等名 Workshop on "Physics of heavy-quark and exotic hadrons 2021" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Namekawa
2. 発表標題 Activity of Lattice QCD common code "Bridge++" for manycore and GPU supercomputers
3. 学会等名 Fugaku QCD coding workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滑川裕介
2. 発表標題 Activity of Lattice QCD common code "Bridge++" for manycore and GPU supercomputers
3. 学会等名 QUCS2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滑川裕介
2. 発表標題 格子量子色力学におけるソルバーについて
3. 学会等名 第4回 HPC-Phys 勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 滑川裕介
2. 発表標題 格子 QCD による半質量殻外散乱振幅のクォーク質量依存性評価
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y.Namekawa
2. 発表標題 Scattering length from BS wave function inside the interaction range
3. 学会等名 The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)
4. 発表年 2018年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------