

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22244018

研究課題名（和文） 強い相互作用が織り成す物質形態の QCD による統一的研究

研究課題名（英文） Comprehensive research on the structure of matter in the strong interactions based on QCD

研究代表者

藏増 嘉伸（KURAMASHI YOSHINOBU）

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：30280506

研究成果の概要（和文）：

強い相互作用によって織り成される様々な物質の存在形態を格子 QCD シミュレーションを用いて統一的理解・解明することを目指した。具体的成果として、(i)電磁相互作用と u-d クォーク質量差を取り入れた 1+1+1 フレーバー格子 QCD+QED シミュレーションの開発、(ii)散乱位相に基づく $\rho(770)$ メソンの共鳴エネルギーと崩壊幅の計算、(iii)質量数 4 以下 ($A \leq 4$) の原子核の直接構成と束縛エネルギーの計算、(iv)有限温度・有限密度 QCD における有限サイズスケールリング法を用いた相構造解析、が挙げられる。

研究成果の概要（英文）：

We have made a comprehensive investigation on various structures of matters in the strong interactions with lattice QCD simulations. What we have achieved are as follows: (i) development of 1+1+1 flavor lattice QCD+QED simulation with the electro-magnetic interactions and the u-d quark mass difference, (ii) measurement of the resonance energy and the decay width of the $\rho(770)$ meson state based on the scattering phase shift, (iii) direct construction of the nuclei with atomic mass number $A \leq 4$ and calculation of their binding energies, (iv) analysis of the phase structure of QCD at the finite temperature and finite density employing the finite size scaling method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2011 年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2012 年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
年度			
年度			
総計	34,900,000	10,470,000	45,370,000

研究分野：素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子

キーワード：格子 QCD, クォーク質量, 共鳴状態, 有限温度, 有限密度, 原子核

1. 研究開始当初の背景

格子 QCD を用いた数値計算の最大の特徴は非摂動的な第一原理計算という点であり、それは強い相互作用の定量的理解を可能と

する。しかしながら、クォーク質量が軽くなるにつれてシミュレーションに要する計算量は飛躍的に増大するため、物理的な u,d,s クォーク質量上でシミュレーションを行う

ことは、格子 QCD 創始以来 30 年にわたる目標であった。これまでの典型的な計算においては、先ず u, d クォーク質量を縮退させ(アイソスピン対称、今後 ud クォーク質量と呼ぶ)、更にその物理的な平均質量の約 10 倍程度の質量で計算を行い、結果を縮退した ud クォーク質量に関して外挿するという方法が取られてきた。この問題を克服すべく、我々は平成 18 年に稼働を開始した超並列クラスター計算機 PACS-CS(ピーク性能 14.3Tflops)を用いて、物理的な ud, s クォーク質量上でのシミュレーションを実現し、更にそれが物理的に本質的に重要であることを示した。この歴史的マイルストーンに到達した現在、格子 QCD 研究の次の展開として、強い相互作用によって織り成される様々な物質の存在形態を QCD に基づいて統一的に理解・解明することを目指す。

2. 研究の目的

具体的課題として以下の 4 つを大きな柱とする。(i)電磁相互作用と $u-d$ クォーク質量差を取り入れたハドロン微細構造の精密計算とそれに基づいた u, d クォーク質量の決定、(ii)散乱位相に基づく共鳴状態の解析と新種のクォーク複合系の探索、(iii)中性子過剰核を含めた軽い原子核の構成と格子 QCD による魔法数の導出、(iv)有限温度・有限密度 QCD における相構造解析、である。

これら 4 つの課題のキーワードは微細化と多体系への展開である。先ず、微細化とは電磁相互作用やアイソスピン対称性の破れの効果を取り入れたシミュレーションの実現(課題(i))を意味する。QCD の基本パラメータであるクォーク質量を精確に決定することの重要性は論をまたないが、強い相互作用における閉じ込め効果により、特に u, d, s クォーク質量を実験によって決めることは難しい。他方、格子 QCD による第一原理計算においても u, d クォーク質量の決定には特別な困難が存在する。それは、両者の差が微小であるために電磁相互作用を導入し $u-d$ クォーク質量の縮退を解いたシミュレーションを実行することが不可欠なのである。

次に多体系への展開としては 3 つの方向性が考えられる。一番目は散乱位相に基づく共鳴状態の解析と新種のクォーク複合系の探索(課題(ii))である。近年格子 QCD では強い相互作用で崩壊する不安定粒子(共鳴状態)を散乱位相から研究することが我々を含めた幾つかのグループでようやく行われ始めてきたが、これらの研究では計算コストの問題により物理的な値よりもはるかに重いクォーク質量での計算しか行われていない。しかしながら、不安定粒子の研究においては物理的クォーク質量を用いることが結果の信頼性に対して本質的に重要である。なぜならば、

人為的に重くした非物理的クォーク質量では、例えば $2m_\pi < m_\rho$ という条件を満たさなくなってしまう現実の $\rho \rightarrow \pi\pi$ 崩壊現象を再現できない。そこで、我々の目的は物理的クォーク質量における不安定粒子の性質を散乱位相を用いて系統的に調べることにある。先ず、実験的に存在が確認されている $\rho(770)$, $K^*(892)$, $\Delta(1232)$ などの粒子から解析を行う。これらの計算結果を実験と比較することによって研究手法の信頼性を検証する。その成果を踏まえ、近年実験で存在が示唆されている新しいタイプのクォーク複合系に対してその研究手法を適用し、未知の粒子の存在とその諸性質解明を目指す。

二番目は QCD に基づく原子核の構成とその諸性質の解明(課題(iii))である。研究期間開始当初、格子 QCD を用いた原子核の直接計算の成功例はなかったが、当時我々は原子核構造論において最も基本となる ${}^4\text{He}$ 原子核の直接計算を試みており、良好な結果を得ていた。将来的には、段階的に質量数を増やして魔法数の導出を目指す。魔法数はスピン軌道結合力の帰結として説明されているが、これを格子 QCD を用いて導出することの意義は深い。なぜならば、これは階層性を持つ物理システム(クォーク・グルーオン \Rightarrow 陽子・中性子 \Rightarrow 原子核)をクォーク・グルーオンの力学を記述する QCD だけで説明しようとする野心的試みだからである。これを達成した後、中性子過剰核を構成してその諸性質解明に向けての先鞭をつけたいと考えている。中性子過剰核は宇宙における重い原子核合成過程にとって重要であるにも関わらず、実験によって調べることが難しいため格子 QCD の果たす役割は大きい。

三番目は有限温度・有限密度下における QCD の相構造解析(課題(iv))である。QCD は宇宙初期のような高温ではクォーク・グルーオン・プラズマ相を、また低温ではハドロン相を予言する。両者間の相転移はクォークのフレーバー数と質量によって異なるが、いまのところ格子 QCD による計算では物理的 ud, s クォーク質量においては発散のないクロスオーバーだと言われている。ただし、その根拠となる計算には不完全な部分もあり、相転移の次数については完全に確立したとは言えない状況である。他方、高密度 QCD は高エネルギー重イオン衝突や中性子内部で実現される可能性があるが、その相構造の解析は殆ど進んでいない。問題は、格子 QCD を用いて有限密度シミュレーションを行う場合、化学ポテンシャルの導入が符号問題を引き起こしてしまうことである。符号問題とは分配関数におけるボルツマンウェイトが複素数になってしまい確率解釈ができなくなることである。現在広く用いられている方法は化学ポテンシャル μ が小さいとし

て $\mu=0$ のまわりで展開し、その展開係数を評価するというものである。当然のことながら、この方法は収束半径の制約によって $\mu=0$ の近傍でしか有効ではなく、真に物理的に興味のある領域では使えない。我々は、展開法に代わる新しい方法を用いて、化学ポテンシャルの幅広い領域における相構造解析を行う。

3. 研究の方法

(1) 研究人員体制

本課題の研究規模の大きさに鑑み、研究全体の統括は蔵増(研究代表者)が行うが、4つの課題各々は担当者を中心として研究を推進する。各課題の担当者は以下の通り。課題(i): 石川(研究分担者), 中村(研究分担者)。課題(ii): 山崎(連携研究者), 蔵増(研究代表者)。課題(iii): 石塚(研究分担者)。課題(iv): 武田(研究分担者), 中村(研究分担者)。研究代表者・研究分担者・連携研究者の所属機関が地理的に離れていることから、テレビ会議システムを利用して数週間に一回程度の定期的なミーティングを開催し、お互いの担当課題の進捗状況の把握と情報の共有を行う。

(2) 設備備品

本研究では、主に筑波大学計算科学研究センターにおいて平成18年7月より稼働中の超並列クラスタ計算機PACS-CS(ピーク性能14.3Tflops)および平成20年6月導入・稼働開始の筑波大学・東京大学・京都大学三学連携のT2K オープンスパコン(筑波大: ピーク性能95Tflops, 東大: ピーク性能140Tflops, 京大: ピーク性能70Tflops)を利用する。前者は研究期間開始当初の時点で導入から3年余りが経過しており、研究期間半ばの平成23年9月に稼働を停止した。後者の筑波大機は、3年の研究期間を通じて稼働を続けた。また、平成23年度末に稼働を開始したPACS-CS機の後継である演算加速型超並列計算機HA-PACS(GPU部ピーク性能713Tflops, CPU部ピーク性能89Tflops)も利用した。

(3) 各課題の研究遂行方法

①課題(i)

Reweighting法を用いて、物理的クォーク質量上で電磁相互作用とu-dクォーク質量差を導入する。これにより、メソンおよびバリオン基底状態の質量スペクトルの微細構造を精密に解析することが可能となる。特に、荷電-中性 π メソン質量差や陽子-中性子質量差を再現できるか否かを調べることは物理的に大変興味深い。こうして得られたハドロン質量スペクトルをインプットとして格子QCD上で定義された裸のクォーク質

量を決めることが可能である。

②課題(ii)

実験的に存在が確認されている $\rho(770)$, $K^*(892)$, $\Delta(1232)$ などの不安定粒子に対して散乱位相に基づいた解析を行う。具体的には、格子上に相対運動量を持った2粒子(例えば $\rho(770)$ に対しては π メソン2個)を置き、Lüscherの有限体積公式に基づいてこの2粒子から構成される共鳴状態のエネルギー値や崩壊幅などを求める。これらの計算結果を実験と比較することによって研究手法の信頼性を検証する。その後、近年実験で存在が示唆されている新しいタイプのクォーク複合系にその研究手法を適用し、未知の粒子の存在とその諸性質解明を目指す。

③課題(iii)

最初の目標として ^4He 原子核の直接構成を目指す。その際、計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ物理的な値よりも重いクォーク質量を採用する。その後段階的に質量数を増やしていき、原子核の基底状態の結合エネルギーを調べることによって魔法数の導出や中性子過剰核の構成を目指す。原子核の直接構成における大きな問題の一つはクォークダイアグラムの数である。格子QCDではクォーク場を用いて原子核の質量数を持つ演算子を組み、クォーク場の縮約を取ったダイアグラムを考えるのであるが、質量数が多くなるにつれて縮約の「場合の数」が発散してしまう。例えば、炭素 ^{12}C の場合、uクォーク18個、dクォーク18個から構成されているので、単純に考えればクォークダイアグラムの数は $(18!)^2 \sim 4 \times 10^{31}$ という天文学的数字となる。原子核の直接構成は、格子QCD計算の歴史の中で初めての試みであり、研究の過程において想定していなかった問題や課題に遭遇することも予想されるため、研究到達目標は流動的である。

④課題(iv)

有限密度シミュレーションにおける符号問題(前出の「研究の目的」の項目で既述)をいかに解決するかが研究の成否の鍵である。現在広く行われている方法は化学ポテンシャル μ に関する展開法であるが、この方法では $\mu=0$ の近傍でしか適用できない。この現状を打破すべく、我々は巻き付き展開法と呼ばれる新しい計算手法を用いて有限密度QCDの研究を推進する。巻き付き展開法の大きな利点の一つは、符号問題の原因であるクォーク行列式の複素位相を解析的に調べるのが可能なことである。この方法の有効性を4フレーバーQCDシミュレーションを用いて数値的に検証した後、3フレーバーQCD、2+1フレーバーQCDの相構造解析を行う。なお、最終的な目標は2+1フレーバーQCDにおける相構造解析であるが、4,3フレーバーQCDにおいて予想されている相構造は2+1フ

レーバーQCDよりも単純であるため、有限密度QCDにおける相構造解析のための手法確立が主な目的である。

4. 研究成果

4つの課題各々についてその成果を述べる。

(1) 課題(i)

まず、物理的クォーク質量上での1+1+1フレーバー格子QCD+QEDシミュレーションの実現を目指し、電磁相互作用とu-dクォーク質量差を取り入れるためのreweighting法の開発に取り組んだ。その際、変形block BiCGSTABアルゴリズムの開発を行うことによって、reweighting法の高効率実行を可能とした[雑誌論文④]。これにより、1+1+1フレーバー格子QCD+QEDシミュレーションを実現し、u, d, sクォーク質量の決定を行った[雑誌論文②, ⑦, ⑨]。図1は電磁相互作用とu-dクォーク質量差を取り入れた K^0 メソンと K^+ メソンの伝播関数の比を時間の関数としてプロットしたものである。赤線は K^0 と K^+ の平均質量の1%未満から期待される傾きであり、計算結果は誤差の範囲で実験値を再現している($t=0$ 近傍は励起状態の寄与のため実験値からずれている)。

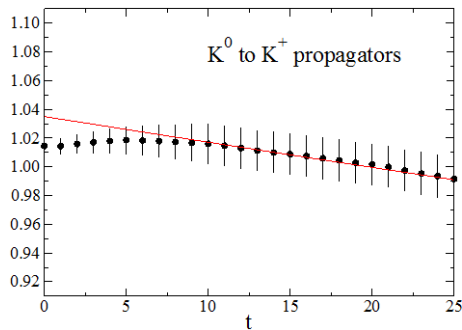


図1: K^0 メソンと K^+ メソン伝播関数の比。

(2) 課題(ii)

現実よりも重いクォーク質量で生成された2+1フレーバーの格子QCD配位を用いて、実験的に存在が確認されている ρ (770)メソン共鳴状態のエネルギー値と崩壊幅を計算した。図2は $\rho \rightarrow \pi\pi$ 崩壊における $\rho\pi\pi$ 有効結合定数 $g_{\rho\pi\pi}$ と ρ メソン共鳴エネルギーの m_π^2 依存性を示している。崩壊幅の実験結果から得られる $\rho\pi\pi$ 有効結合定数の値は $g_{\rho\pi\pi} = 5.874 \pm 0.014$ であり、我々の結果と誤差の範囲内で一致している。他方、 ρ メソン共鳴エネルギーの実験結果は770MeV程度であり、我々の結果よりも15%程度小さい。ただし、格子QCDの計算結果が大きな m_π^2 依存性を示していることから、物理的クォーク質量($m_\pi^2 = (0.135 \text{ GeV})^2 = 0.0182 \text{ GeV}^2$ に相当)上での計算が重要であることがわかる。

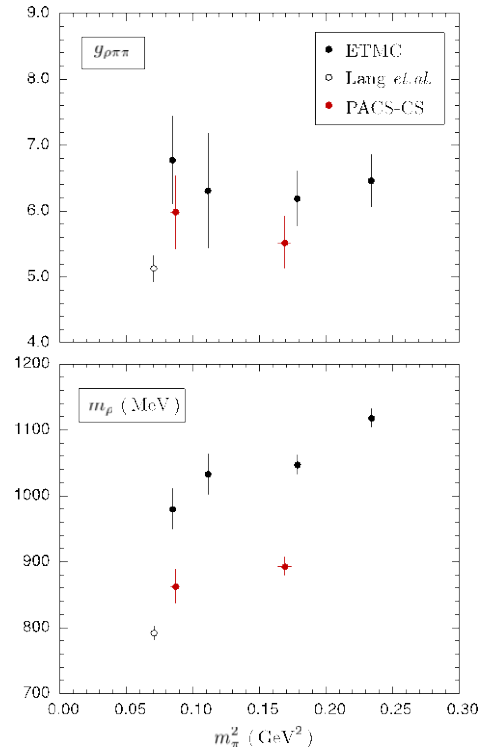


図2: $\rho\pi\pi$ 有効結合定数(上)と共鳴エネルギーの m_π^2 依存性(下)[雑誌論文⑥]。PACS-CSグループの結果は2+1フレーバー格子QCD計算により得られたもの、他の結果は2フレーバー格子QCD計算。

(3) 課題(iii)

2010年世界で初めて格子QCDによるヘリウム原子核の構成に成功した後[雑誌論文⑧]、2核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した[雑誌論文⑤]。ただし、これらは計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ物理的な値よりも重いクォーク質量で行った計算であるため、次のステップとしてクォークの真空偏極効果を取り入れた2+1フレーバー格子QCD計算へ拡張した。その結果、クエンチ近似だけでなく2+1フレーバーQCDにおいてもヘリウム原子核と重陽子が束縛することが確認された[雑誌論文⑩]。ただし、クォーク質量は依然として物理的な値よりも重く、 $m_\pi = 0.51 \text{ GeV}$ 相当である。図3は ^4He 原子核のエネルギーシフト $\Delta E_L(^4\text{He})$ の空間体積依存性を表している。ここで、エネルギーシフトは ^4He 原子核の基底状態と自由な4個の核子の質量との差 $\Delta E_L(^4\text{He}) = E_{^4\text{He}} - 4m_N$ で定義される。有限の空間体積(L^3)では、4個の核子同士の散乱の効果も ΔE_L に含まれるため、束縛エネルギーのみを取り出すためには、空間体積無限大極限($1/L^3=0$)への外挿が必要となる。星印は束縛エネルギーの実験結果を表しており、我々の計算結果も同程度

の値を再現していることがわかる。図4は重陽子のエネルギーシフト $\Delta E_L(^3S_1) = E_{3S1} - 2m_N$ の空間体積依存性を表している。重陽子の場合、束縛エネルギーの計算結果が実験結果よりも5倍程度大きい。これは、クォーク質量が物理的な値よりも重いためではないかと推察しており、今後クォーク質量を更に軽くして現実の値に近づけていくことが重要である。

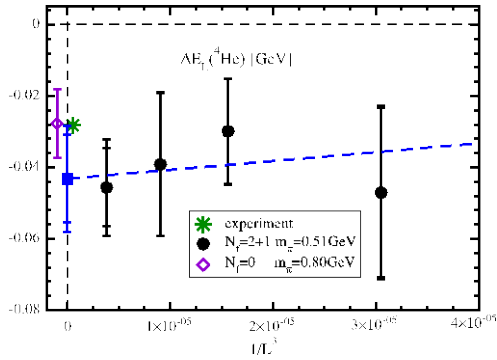


図3: L^3 空間格子サイズにおける ^4He 原子核のエネルギーシフト $\Delta E_L(^4\text{He})$ の空間体積依存性。四角は空間体積無限大極限 ($1/L^3=0$) への外挿値。星印は束縛エネルギーの実験結果。また、白抜きダイヤはクエンチ近似の計算結果。

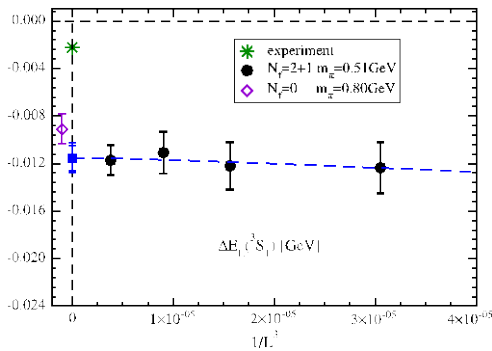


図4: L^3 空間格子サイズにおける重陽子のエネルギーシフト $\Delta E_L(^3S_1)$ の空間体積依存性。四角は空間体積無限大極限 ($1/L^3=0$) への外挿値。星印は束縛エネルギーの実験結果。また、白抜きダイヤはクエンチ近似の計算結果。

(4) 課題 (iv)

有限密度シミュレーションにおける長年の懸案であった符号問題を解決するためのアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは巻き付き展開法と呼ばれ、2つの大きな利点がある。一つは、符号問題の原因であるクォーク行列式の複素位相を解析的に調べることが可能なことである。もう一つは、有限温度・有限密度QCDの相図において最も

興味深い領域である低温・高密度への適用可能性である。我々は先ず小さな格子サイズを用いたテスト計算によってアルゴリズムの有効性を確認し、論文に取り纏めた[雑誌論文③]。その後、次のステップとして4フレーバーQCDに対して有限サイズスケリング解析を行った。4フレーバーQCDはあるクォーク質量領域において一次相転移を起こすことが期待されており、それを示せるか否かは我々の計算手法の良いベンチマークテストとなる。図5は「時間方向」の格子サイズを4に固定し、空間格子サイズを $V=6^3 \sim 10^3$ まで変化させた場合の様々な物理量に対する感受率のピークの高さの V 依存性を表している。その依存性が線形であることから、一次相転移と結論することができる。これは世界で初めての有限密度QCDに対する有限サイズスケリング解析の応用であり、その有効性を実証できた意義は大きい。現在結果を論文に取り纏めている。

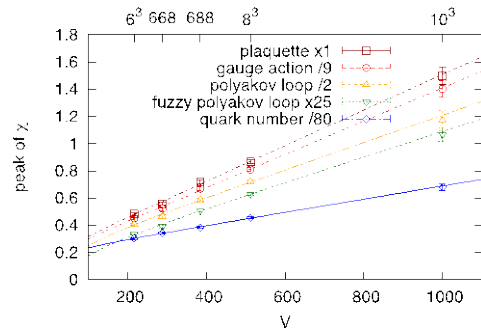


図5: 様々な物理量に対する感受率のピークの高さの V 依存性。

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13件)

- ① T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, “Helium Nuclei, Deuteron and Dineutron in 2+1 Flavor Lattice QCD”, *Physical Review D* 86 (2012) 074514, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.86.074514.
- ② PACS-CS Collaboration: K.-I. Ishikawa (2番目), Y. Kuramashi (5番目), Y. Nakamura (6番目), 他9名, “1+1 Flavor QCD+QED Simulation at the Physical Point”, *Physical Review D* 86 (2012) 034507, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.86.034507.
- ③ S. Takeda, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, “Phase of Quark Determinant in Lattice QCD with Finite Chemical Potential”, *Physical Review D* 85

- (2012) 096008, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.85.096008.
- ④ Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, T. Sakurai, and T. Tadano, “Modified Block BiCGSTAB for Lattice QCD”, Computer Physics Communications 183 (2012) 34–37, 査読有, DOI:10.1016/j.cpc.2011.08.010.
- ⑤ T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, “Two-Nucleon Bound States in Quenched Lattice QCD”, Physical Review D84 (2011) 054506, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.84.054506.
- ⑥ PACS-CS Collaboration: K.-I. Ishikawa(2 番目), Y. Kuramashi(5 番目), T. Yamazaki(11 番目), 他 9 名, “ ρ Meson Decay in 2+1 Flavor Lattice QCD”, Physical Review D84 (2011) 094505, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.84.094505.
- ⑦ PACS-CS Collaboration: K.-I. Ishikawa(2 番目), Y. Kuramashi(7 番目), T. Yamazaki(12 番目), 他 11 名, “Physical Point Simulation in 2+1 Flavor Lattice QCD”, Physical Review D81 (2010) 074503, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.81.074503.
- ⑧ T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, “Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD”, Physical Review D81 (2010) 111504, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.81.111504.
- ⑨ PACS-CS Collaboration: K.-I. Ishikawa(2 番目), Y. Kuramashi(6 番目), 他 11 名, “Non-Perturbative Renormalization of Quark Mass in $N_f=2+1$ QCD with the Schrödinger Functional Scheme”, Journal of High Energy Physics 1008 (2010) 101, 査読有, DOI:10.1007/JHEP08(2010)101.

[学会発表] (計 18 件)

- ① Yoshinobu Kuramashi, “Lattice QCD - From Quarks to Nuclei -”, 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR2012), Kobe University, Kobe, July 20, 2012, 国際会議招待講演 (plenary).
- ② Yoshinobu Kuramashi, “1+1+1 Flavor QCD+QED Simulation at the Physical Point”, Workshop on “New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions”, Brookhaven National Laboratory, New York, USA, May 16, 2012, 国際会議招待講演 (plenary).
- ③ Takeshi Yamazaki, “Light Nuclei from

Quenched Lattice QCD”, Workshop on “New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions”, Brookhaven National Laboratory, New York, USA, May 16, 2012, 国際会議招待講演 (plenary).

- ④ 藏増 嘉伸, “PACS-CS における素粒子物理学研究”, 第 2 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム, 筑波大学, つくば市, 2011 年 9 月 12 日, 国内シンポジウム招待講演 (plenary).
- ⑤ 山崎 剛, “格子 QCD によるヘリウム原子核の研究”, 日本物理学会秋季大会素粒子論領域-理論核物理領域合同企画講演, 九州工業大学, 北九州市, 2010 年 9 月 12 日, 学会招待講演.
- ⑥ Yoshinobu Kuramashi, “Progress in Lattice QCD”, 35th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2010), Palais des Congrès, Paris, France, July 27, 2010, 国際会議招待講演 (plenary).
- ⑦ Takeshi Yamazaki, “Calculation of Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD”, The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2010), ATAHOTEL, Sardinia, Italy, June 17, 2010, 国際会議招待講演 (plenary).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藏増 嘉伸 (KURAMASHI YOSHINOBU)
筑波大学・数理解物質系・准教授
研究者番号: 30280506

(2) 研究分担者

石塚 成人 (ISHIZUKA NARUHITO)
筑波大学・数理解物質系・准教授
研究者番号: 70251030

石川 健一 (ISHIKAWA KEN-ICHI)
広島大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 60334041

武田 真滋 (TAKEDA SHINJI)
金沢大学・数物科学系・助教
研究者番号: 60577881

中村 宜文 (NAKAMURA YOSHIFUMI)
理化学研究所・計算科学研究機構・研究員
研究者番号: 40598231

(3) 連携研究者

山崎 剛 (YAMAZAKI TAKESHI)
名古屋大学・基礎理論研究センター・助教
研究者番号: 00511437