

## 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24年 6月11日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21684013

研究課題名（和文） 厳密なカイラル対称性をもつ格子QCDによる標準理論の精密検証

研究課題名（英文） Testing the Standard Model on lattice QCD with exact chiral symmetry

研究代表者

金児 隆志（KANEKO TAKASHI）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：20342602

研究成果の概要（和文）：標準理論の精密検証に必要なハドロン行列要素を精密に決定するために、カイラル対称性を厳密に保った格子QCDの大規模数値シミュレーションを行った。 $\pi$ 中間子の電磁形状因子の精密計算によってカイラル有効理論と数値計算結果の整合性を綿密に検証した上で、ダークマター直接探索実験において重要な核子のストレンジクォーク成分や、小林・益川行列要素の決定に重要なK中間のセミレプトニック崩壊の形状因子を高精度で計算することができた。

研究成果の概要（英文）：We performed large-scale simulations of lattice QCD with exact chiral symmetry for a precise determination of the hadronic matrix elements needed for the precise test of the Standard Model. The reliability of the numerical simulations was demonstrated by carefully examining the consistency of our results for the pion electromagnetic form factor with chiral perturbation theory. We then precisely determine the nucleon strange quark content and the kaon semileptonic form factors which are important for the direct experimental searches for dark matter and precise determination of the CKM matrix elements.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費      | 合計         |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 5,900,000  | 1,770,000 | 7,670,000  |
| 2010年度 | 5,400,000  | 1,620,000 | 7,020,000  |
| 2011年度 | 4,600,000  | 1,380,000 | 5,980,000  |
| 総計     | 15,900,000 | 4,770,000 | 20,670,000 |

研究分野：素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：強い相互作用、ハドロン物理、格子上の場の理論、非摂動的な研究

## 1. 研究開始当初の背景

格子QCDの数値シミュレーションは強い相互作用の物理を非摂動的に解き明かすことができる強力な研究手法である。しかし、当時までの研究は、計算コストを大幅に削減するために、QCDの最も重要な対称性の一つであるカイラル対称性を頭壊すような定式化を用いていた。しかし、その代償として、

研究できる課題が非常に限られてしまっていた。

## 2. 研究の目的

標準理論の精密検証を通して新しい素粒子理論を構築することは素粒子物理の最重要課題である。このためには、加速器実験で研究される素粒子反応における強い相互作用

の効果を記述するハドロン行列要素を精密に計算する必要がある。しかし、上述のようにカイラル対称性を顕に破った場合、非常に限られた行列要素しか計算することができない。そこで、カイラル対称性を厳密に保った定式化を用いて大規模シミュレーションを行い、ハドロン行列要素の精密決定を行った。

### 3. 研究の方法

オーバーラップ型の定式化を用いて、カイラル対称性を厳密に保ったシミュレーションを行った。この定式化は計算コストが非常に大きいことが知られているが、大局的トポロジを固定することによって、計算コストを大幅に削減することに成功した。尚、トポロジを固定した効果は、解析的予言式と数値シミュレーションによって補正した。また、クォークの低エネルギーモードを活用することによって、物理量を低コスト、かつ、高精度で計算する手法を開発した。

### 4. 研究成果

(1) 高エネルギー加速器研究機構設置のスーパーコンピュータシステムを用い、また上述のような計算手法の改良を行うことによって、世界に先駆けて、カイラル対称性を厳密に保った大規模シミュレーションを行うことに成功した。将来的には、全ての数値シミュレーションはカイラル対称性を保って行うべきであり、それに先鞭をつけた意義は大きい。

#### (2) $\pi$ 中間子電磁形状因子の計算

シミュレーションの信頼性を検証するために、 $\pi$  中間子の電磁形状因子を高精度で計算し、カイラル摂動論の予言式との整合性を精密に検証した。その結果、通常は無視されることが多いカイラル摂動論の高次の効果を正しく取り入れることによって、その予言式とシミュレーション結果は非常に良く一致し、さらに実験値を再現することを明らかにした。なお、カイラル対称性を顕に破るとカイラル摂動論の予言式が使えなくなるため、カイラル対称性を厳密に保ったことは、上述の結論を得るために、本質的に重要であった。また、カイラル摂動論の不定パラメータを決定し、この理論に基づいた解析的計算にも貢献することができた。

#### (3) 核子のストレンジクォーク成分の計算

核構造の基本的なパラメータであり、また、ダークマター直接探索実験においても重要な物理量である核子のストレンジクォーク成分を非摂動的に計算した。カイラル対称性を破ると演算子混合によって大きな不定性が生じえることを示した上で、対称性を厳密

に保った本研究で精度良く計算することができた。

#### (4) K 中間子セミレプトニック崩壊の形状因子の計算

小林・益川行列要素の精密決定に必要な、時間反転偶な形状因子を 1% という高精度で計算した。さらに、時間反転奇な形状因子やその運動量遷移依存性をカイラル摂動の高次の予言式と比較検証することによって、上述の高精度計算の信頼性を強固なものとした。

### 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 11 件)

- ① T. Kaneko, Lattice studies of hadron physics with disconnected quark loops, Proceedings of Science、査読有、ICHEP2010、2011、368(1) - 368(4)
- ② T. Kaneko, S. Aoki, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Onogi, Kaon semileptonic form factors in QCD with exact chiral symmetry, Proceedings of Science、査読有、Lattice2011、2011、284(1) - 284(7)
- ③ K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, Nucleon strange quark content from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry, Physical Review D、査読有、83、2011、114506(1) - 114506(16)
- ④ H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice, Physical Review D、査読有、83、2011、074501(1) - 074501(16)
- ⑤ T. Kaneko, S. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Onogi, Proceedings of Science、査読有、Lattice2010、2011、146(1) - 146(7)
- ⑥ K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada, Nucleon strange quark content in 2+1 flavor QCD, Proceedings of Science、査読有、Lattice2010、2010、160(1) - 160(7)
- ⑦ E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada, Strong coupling constant from vacuum polarization functions in three flavor lattice QCD with dynamical overlap fermions, Physical Review D、査読有、82、2010、074505(1) - 074505(10)
- ⑧ T. Kaneko, Pion form factors from

- lattice QCD with exact chiral symmetry, Proceedings of Science, 査読有、CD09、2009、011(1) - 011(9)
- ⑨ K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada、Calculation of nucleon strange quark content with dynamical overlap quarks, Proceedings of Science, 査読有、LAT2009、2009、141(1) - 141(7)
- ⑩ T. Kaneko, S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, J. Noaki, E. Shintani, N. Yamada、Flavor-singlet mesons in  $N_f=2+1$  QCD with dynamical overlap quarks、Proceedings of Science, 査読有、LAT2009、2009、107(1)-107(7)
- ⑪ S. Aoki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada、Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry、Physical Review D、査読有、80、2009、034508(1) - 034508(20)
- [学会発表] (計 20 件)
- ① 金児隆志、厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD による K 中間子セミレプトニック崩壊の研究、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 25 日、関西学院大学 (兵庫県)
- ② 金児隆志、Lattice QCD applications to flavor physics、KEK Flavor Factory Workshop (KEK-FF2012)、2012 年 3 月 8 日、高エネルギー加速器研究機構 (茨城県)
- ③ 金児隆志、A precision study of kaon semileptonic decays、HPCI 戦略プログラム分野 5 研究会、2011 年 12 月 20 日、高エネルギー加速器研究機構 (茨城県)
- ④ 金児隆志、格子 QCD による K 中間子セミレプトニック崩壊の形状因子の計算、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学 (青森県)
- ⑤ 金児隆志、フレーバー物理のための精密 QCD 計算、格子 QCD の将来戦略研究会、2011 年 7 月 27 日、東京大学 (東京都)
- ⑥ 金児隆志、all-to-all クォークプロパゲータを用いた格子 QCD の研究、HPCI 戦略プログラム分野交流研究会、2011 年 7 月 26 日、筑波大学 (茨城県)
- ⑦ 金児隆志、Kaon semileptonic form factors in QCD with exact chiral symmetry、第 29 回格子上の場の理論国際会議 (Lattice2011)、2011 年 7 月 11 日、スクォーバレー (アメリカ)
- ⑧ 金児隆志、KEK スパコンで進める大規模 QCD シミュレーションの成果と展望、KEK 大型シミュレーション研究シンポジウム、2011 年 1 月 31 日、高エネルギー加速器研究機構 (茨城県)
- ⑨ 金児隆志、Hadron form factors from lattice QCD with exact chiral symmetry、日独セミナー2010、2010 年 11 月 4 日、三島商工会議所 (静岡県)
- ⑩ 金児隆志、厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD による軽い中間子の形状因子の計算、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 12 日、九州工業大学 (福岡県)
- ⑪ 金児隆志、Lattice studies of hadron physics with disconnected quark loops、第 35 回高エネルギー物理国際会議 (ICHEP2010)、2010 年 7 月 23 日、パレ・デ・コングレ (パリ) フランス
- ⑫ 武田 光平、Nucleon strange quark content in 2+1 flavor QCD、第 28 回格子上の場の理論国際会議 (Lattice2010)、2010 年 6 月 15 日、タンカヴィレッジ (サルディニア、イタリア)
- ⑬ 金児隆志、Light meson form factors in  $N_f=2+1$  QCD with dynamical overlap quarks、第 28 回格子上の場の理論国際会議 (Lattice2010)、2010 年 6 月 15 日、タンカヴィレッジ (サルディニア、イタリア)
- ⑭ 武田 光平、2+1 フレーバー格子 QCD によるストレンジクォーク含有量の計算、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 23 日、岡山大学 (岡山、岡山県)
- ⑮ 武田 光平、Nucleon strange quark content from lattice QCD with exact chiral symmetry、2009 Taipei Workshop on Lattice QCD、2009 年 12 月 13 日、台湾大学 (台北、台湾)
- ⑯ 金児隆志、Exploring meson physics with all-to-all quark propagators、2009 Taipei Workshop on Lattice QCD、2009 年 12 月 13 日、台湾大学 (台北、台湾)
- ⑰ 金児隆志、格子 QCD によるフレーバー 1 重項中間子の研究、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 12 日、甲南大学 (兵庫県)
- ⑱ 武田 光平、Calculation of nucleon strange quark content with dynamical overlap quarks、第 27 回格子上の場の理論国際会議 (LATTICE2009)、2009 年 7 月 28 日、レイクビューホテル (北京、中国)
- ⑲ 金児隆志、Flavor-singlet mesons in  $N_f=2+1$  QCD with dynamical overlap quarks、第 27 回格子上の場の理論国際

会議 (LATTICE2009)、2009年7月29日、  
レイクビューホテル (北京、中国)

- ⑳ 金児 隆志、Pion form factors from  
lattice QCD with exact chiral symmetry、  
第6回カイラルダイナミクス国際ワーク  
ショップ、2009年7月6日、ベルン大学  
(ベルン、スイス)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金児 隆志 (KANeko TAKASHI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：20342602

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

武田 光平 (TAKEDA KOHEI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員  
村野 啓子 (MURANO KEIKO)  
理化学研究所・仁科センター・研究員