

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2007～2009
課題番号：19740160
研究課題名（和文） カイラル対称性を持つ2+1フレーバーの動的格子QCDとフレーバー物理への応用
研究課題名（英文） Lattice QCD simulation with 2+1 flavors of chiral symmetry

研究代表者
松古 栄夫（MATSUFURU HIDEO）
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・助教
研究者番号：10373185

研究成果の概要（和文）：量子色力学(QCD)の持つカイラル対称性は、QCD が記述するクォークの力学において重要な役割を果たす。QCD の近似によらない計算が可能な格子シミュレーションでは、最近になってこのカイラル対称性を厳密に扱えるようになった。本研究では、軽いu, dクォークとやや重いsクォークを含む、2+1 フレーバーの厳密なカイラル対称性を持つ格子 QCD の大規模シミュレーションを行い、素粒子標準理論の検証に必要な行列要素の計算など、フレーバー物理への応用を行った。

研究成果の概要（英文）：The chiral symmetry of Quantum Chromodynamics (QCD) plays an important role in the dynamics of quarks. In lattice QCD simulations, with which model independent computation of QCD is possible, only recently an exact chiral symmetry has become possible to simulate. In this study, we have performed a large scale numerical simulation of lattice QCD with 2+1 flavors which corresponds to u, d, and s quarks. We have computed various matrix elements in flavor physics which are important for tests of the standard model of elementary particle physics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	480,000	3,180,000

研究分野：数物系科学

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：格子QCD、フレーバー物理、カイラル対称性

1. 研究開始当初の背景
素粒子の標準理論は実験結果をよく説明し

てきたが、手で与えなければならないパラメータが多いなどの欠点を持つため、標準理論

の精密検証とそれを超える物理の探索が続けられている。B ファクトリーや LHC における高精度実験との比較によってこれを行うためには、理論計算も同等の精度が必要である。クォークの振る舞いを記述する QCD の効果を高精度で計算するためには、非摂動的な手法である格子 QCD シミュレーションが不可欠である。自然界では軽いクォークが質量をほぼ持たないことによる「カイラル対称性」がクォークの力学において重要な役割を果たしているが、これを格子上で厳密に保つ計算は困難とされてきた。最近になって理論的進展によりこれを可能とする定式化が発見され、またアルゴリズムの開発や計算力の向上によってそのような計算が現実的になった。KEK を中心とする JLQCD コラボレーションでは、この厳密なカイラル対称性を持つ大規模格子 QCD シミュレーションを開始し、申請者もこれに参加してコード開発やアルゴリズムの改良、フレーバー物理への応用を行ってきた。2 フレイバーの計算は順調に進み、次の課題は自然界と同じく軽い u , d クォークとやや重い s クォークを含む計算であり、そのための準備やアルゴリズムの改良が必要な状況だった。

2. 研究の目的

これまでの u , d クォークのみを含む計算(2 フレイバー)の手法を、更に s クォークを含む場合(2+1 フレイバー)に拡張し、それに伴う計算量の増大を抑えるためのアルゴリズムの改良などを行うことが第一の目的である。これを用いて実際に大規模シミュレーションを行い、フレーバー物理に必要な種々の物理量の計算を行うことが第二の目的である。また、標準理論を超えた物理の探索にこれらの方法を応用することも、研究の進展に従って重要であると認識し、目的の一つに加えた。

3. 研究の方法

格子 QCD シミュレーションの手法を大規模計算に適用して行う。カイラル対称性を厳密に持つ理論は、従来の方法に比べて 100 倍程度の計算力が必要である。これをアルゴリズムの改良やプログラムのチューニングによってできるだけ高速化し、また測定する物

理量についても効率のよい計算法を開発することが重要である。計算は主に KEK の大規模並列スーパーコンピュータを用いて行ったため、これに適した計算法を開発した。これらの研究は、KEK を中心とした共同研究プロジェクトである、JLQCD コラボレーションに参加して行った。

4. 研究成果

(1) 空間サイズ 16 の格子において、厳密なカイラル対称性を持つ 2+1 フレイバーのシミュレーションを行い、ゲージ場の配位を生成した。この配位データを用いて、静的クォークポテンシャルや軽いハドロンスペクトルのような基本的物理量を測定した。また空間サイズ 24 の格子での計算に着手した。これらは厳密なカイラル対称性を持つ 2+1 フレイバーの本格的計算としては世界初のものであり、大きなインパクトがある。

(2) アルゴリズムの改良として、4 次元の理論を 5 次元に拡張することによる高速化を行った。特にこの方法において、低い固有モードの処理を高速に行う手法を開発した。またその他の高速化技法の適用や研究を行った。これにより計算効率が大きく改善され、研究の迅速な進展が可能になった。

(3) すでに生成した、2 フレイバーのゲージ場配位を用いて、核子中のストレンジクォーク効果、カイラル摂動論との精密な比較、S パラメーターの測定、真空偏極による結合定数の計算などを行った。これらは厳密なカイラル対称性によって初めて可能になったものや、それが重要な役割を果たすものであり、世界的にも注目されている。

(4) 重いクォークを有効理論で扱い、ベクトル B メソンが B メソンとパイメソンに崩壊する過程の結合定数を精度よく求める方法についての研究を行った。これは B ファクトリーなどで行われている B の物理の研究に重要な意味を持つ。

(5) 標準理論を超えた物理の候補として注目を集めているテクニカラー理論を、格子シミュレーションを用いて研究するプロジェクトを開始した。結合定数のスケール依存性を求める手法の開発など、今後の研究のための準備を整えた。

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 17 件)

- [1] JLQCD and TWQCD collaborations: J.Noaki(1 番目), S.Hashimoto(4), H. Matsufuru (5), 他 5 名, Non-perturbative renormalization of bilinear operators with dynamical overlap fermions, Phys. Rev. D 81 (2010) 034502 (22 pages), 査読有.
- [2] E. Itou (3 番目), M. Kurachi (4), H.Matsufuru (6), T. Onogi(8), 他 5 名, A new scheme for the running coupling constant in gauge theories using Wilson loops, Phys. Rev. D 80 (2009) 034507 (14 pages), 査読有.
- [3] JLQCD and TWQCD Collaboration: J. Noaki(1 番目), S. Aoki(2), S. Hashimoto(5), H. Matsufuru(8), T. Onogi(9), 他 6 名 Convergence of the chiral expansion in two-flavor lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 202004 (4 pages), 査読有.
- [4] JLQCD Collaboration: S. Hashimoto(3 番目), T. Kaneko(6), H. Matsufuru(7), 他 10 名, Two-flavor QCD simulation with exact chiral symmetry, Phys. Rev. D 78 (2008) 014508 (22 pages), 査読有.
- [5] H. Ohki, H. Matsufuru, T. Onogi, *Determination of B^*B pi coupling in unquenched QCD*, Phys. Rev. D 77 (2008) 094509 (12 pages), 査読有.
- [6] JLQCD and TWQCD Collaboration: H. Fukaya (1 番目), S. Aoki(2), S. Hashimoto(4), H. Matsufuru(6), 他 6 名, Two-flavor lattice QCD in the epsilon-regime and chiral Random Matrix Theory, Phys. Rev. D 76 (2007) 054503 (12 pages), 査読有.

[学会発表] (計 10 件)

- [1] 松古栄夫, 格子 QCD シミュレーションにおける固有値問題, 特異値固有値合同ワークショップ, 2009 年 11 月 21-22 日, エポカルつくば, つくば市.
- [2] H.Matsufuru, Study of Aoki phase in $N_c=2$ gauge theories with fundamental and adjoint fermions, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory, 27 Jul 2009, Beijing, China.
- [3] 松古栄夫, Lattice QCD simulation with exact chiral symmetry, 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 2008 年 9 月 5 日, 京都大学基礎物理学研究所.
- [4] H.Matsufuru for JLQCD-TWQCD Collaboration, Simulation with 2+1 flavors of dynamical overlap fermions, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, 14-19 July 2008, College of William and Mary, Williamsburg, VA, USA.
- [5] 松古栄夫, Lattice QCD simulation with exact chiral symmetry, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 22-26 日, 近畿大学 (東大阪市)
- [6] H.Matsufuru for JLQCD and TWQCD Collaborations, Exploring chiral regime with dynamical overlap fermions, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory, 30 July - 4 August 2007, Univ. Regensburg, Germany.
- [7] 松古栄夫, 格子量子色力学の大規模シミュレーション, 第 39 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2007, 2007 年 6 月 14, 15 日, 航空研究開発機構 航空宇宙技術センター (東京都)

[その他]

ホームページ等

<http://suchix.kek.jp/~matufuru/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松古 栄夫 (MATSUFURU HIDEO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速

器研究機構・計算科学センター・助教
研究者番号：10373185