

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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540289

研究課題名（和文）

カイラルフェルミオンを用いた素粒子標準模型とそれを越える物理の解析

研究課題名（英文）

Analysis of the standard model of particle physics and beyond using chiral fermions

研究代表者

青木 保道 (AOKI, Yasumichi)

名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授

研究者番号：20292500

研究成果の概要（和文）：素粒子物理学の現時点での集大成である素粒子標準模型中のキャビボ-小林-益川(CKM)理論の精密検証に導く、格子QCD数値計算の新技术の試験/開発を行った。その結果、標準模型の基本定数である、sクォーク質量、udクォーク平均質量の主たる系統誤差を5分の1に縮小し、 π 、K中間子崩壊定数、中性K中間子混合パラメタの高精度計算が実現され、B中間子崩壊定数、中性B中間子混合パラメタの高精度計算、標準模型を超える物理法則の探索に重要な陽子崩壊行列要素計算に応用された。

研究成果の概要（英文）：A series of new techniques in the lattice QCD computation are constructed or tested, aiming a precision test of Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) theory in the standard model (SM) of particle physics, which is the current compilation of the particle physics. These yielded the reduction of the main systematic error to 1/5 on the s-quark mass, average ud quark mass, which are the fundamental parameters in SM, made it possible to determine the π , K meson decay constant and neutral K meson mixing parameter to a high precision, and have been used to a precision measurements of the B meson decay constants and mixing parameters, as well as to the calculation of the proton decay matrix elements needed for the quest of the physics beyond SM.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：物理学

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、カイラルフェルミオン、第一原理計算、数値計算、標準模型、キャビボ-小林-益川(CKM)行列、クォーク質量

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型は、これまでの無数の素粒子実験データとほぼ無矛盾であり、自然の基礎法則としての地位を築いている。しかし、素粒子に質量を与えるヒッグス機構が、理論に不自然な階層構造をもたらすこと、また、機構を担うヒッグス粒子が実験で未発見であることから、自然法則の究極の理論である事

には疑いがもたれている。標準模型ではクォークのフレーバーの変化する反応の基本構造は、キャビボ-小林-益川(CKM)行列で与えられる。この 3×3 ユニタリ行列の成分は、それをパラメタとした理論計算と実験との比較によってもとめられる。Bファクリーなどの実験で観測される様々な実験事象から、ある程度の精度で矛盾の無いCKM行列が求めら

れている。実験精度は驚異的に向上しており、理論計算の精度を上げる事が、標準模型の精密検証に不可欠となってきた。

また、標準模型で安定な陽子は、標準模型を超える物理では一般に崩壊する。それを検出するべく構築された Super KAMIOKANDE を代表とする地下実験は、未だ崩壊を観測できてはいないが、寿命の下限の制限を進める事が出来る。これと、模型の未決定な構造をパラメタとする理論計算を比べることにより、模型を制限する事が出来る。

上記理論計算は反応を起こす複合粒子が標準模型中の QCD による強い相互作用をするため手計算が困難であるが、計算機能力と計算アルゴリズムの向上により、格子ゲージ理論を用いた QCD の数値計算(格子 QCD)による第一原理計算が可能となりつつあった。

2. 研究の目的

本研究では、素粒子標準模型の基本パラメタであるキャビボ-小林-益川(CKM)行列とクォーク質量の精密決定を念頭に、現在広く用いられている格子 QCD 計算の解析手法の大幅な改良を目指す。計算機能力と計算アルゴリズムの改善により、非摂動効果をもれなく取り込んだ QCD の第一原理計算が可能になってきている状況を最大限利用し、新技術の開拓応用により、精度向上が急務な物理量の高精度計算を実現する。特に CKM 行列決定に必要なハドロン遷移行列要素の精密計算を成功に導き、それと、実験からのデータを突き合わせる事により、標準模型の精密検証につなげる。また、改良技術を大統一理論における陽子寿命の予言などに応用し、標準模型を超えた物理法則を探索する。

3. 研究の方法

本研究の目的のための実践的な最良解として、ドメインウォールフェルミオン シミュレーションによる第一原理計算の開発・応用を、研究代表者及び連携研究者のグループ(RBC コラボレーションとそれに続く、RBC-UKQCD コラボレーション)で 10 年間にわたって押し進めてきた。旧来から使われている、ウィルソンフェルミオンに仮想的な 5 次元方向を加える事により実現するこの手法はカイラル対称性を良く保つものであるため、演算子混合、くりこみ、さらには、格子間隔にまつわる誤差を低く抑える事ができる。本研究では、さらに、これまでの解析手法の大幅な改良を導くための、以下の新技術の試験／開発を行う。

- A) 非例外条件(non-exceptional condition)を用いた非摂動くりこみ。
- B) 重率変換法(reweighting)
 - I. クォーク質量間
 - II. 異フェルミオン間

- C) フェルミオンモード分解と低モードの厳密な取り扱い。
- D) 演算子の改良。

A) では、これまでの非摂動くりこみでは外部運動量が例外条件を満たしてしまい、低エネルギーのゴミによる大きな系統誤差を導いたことを認識し、それを排除する新しいくりこみスキームの開発と応用を行う。B) では、I:シミュレーションを行うクォーク質量と現実の質量との差を埋めるための処方の実践と、II:異なるフェルミオン格子理論間の橋渡しを実現する手法の開発を行う。C) はシミュレーションで得られた真空配位から、高精度の測定を高効率で得るための手法である。D) では、特に、B メソン系の行列要素を求めるために用いられる静的近似を用いた b-クォークに関わる演算子の連続極限の振る舞いを改良する。

これらの新技術の試験／開発を、本科学研究費で導入した計算サーバを用いて行い、実用の目処が立ったものから、大規模数値計算で得られた、軽いクォークの動力学を矛盾無く取り入れた 2+1 フレーバー・ドメインウォールフェルミオンを用いて生成された真空配位上の計算に応用する。新技術が間に合わないものについては、従来の解析手法を取り入れ、目的の物理量の計算結果を導く。特に精度が必要な K, B メソンの行列要素と、クォーク質量については、2つの異なる格子間隔を用い、連続極限の値を導出する。また、陽子崩壊行列については、初めての、2+1 フレーバーシミュレーションの結果を導く。

4. 研究成果

研究成果を、新技術の試験／開発と各物理量での新技術による成果に分けて解説する。

1) 新技術の試験／開発

- A) クォーク質量のためのくりこみ処方では、非例外条件が低エネルギーのゴミの混入を防ぐために有効であり、従って、その系統誤差を低減する事は分かっていた。摂動論の解析(発表論文⑦)により、連続極限で便利なくりこみスキームである \overline{MS} への変換係数の摂動論由来の系統誤差も低減出来る事が分かり、従来の手法からの大幅な系統誤差縮小を実現した(発表論文④③)。同様の手法は中性 K メソン混合における 4 フェルミ演算子のくりこみにも応用され(発表論文①)、より信頼度の高い系統誤差の導出と、その縮小が実現された。非例外条件を用いたくりこみはクォーク質量では 2つ(SMOM, SMOM _{ν_μ})、中性 K メソン混合では 4つの異なる新しいスキームを導き、それを中間スキームとする非摂動くりこみで、摂動論にまつ

わる系統誤差と、格子間隔由来の誤差の明確な分離を行い、後者を連続極限によって取り除く手法(発表論文④③①)の開発につながられた。

B) 重率変換

I. クォーク質量間の重率変換は変換前後のクォーク質量の差が小さい場合には成功に導く事が出来たため、 u d クォークより重く、直上のシミュレーションが可能な s クォークの質量について、シミュレーション実行後の質量点の微調整に用いる事により、系統誤差の縮小を実現した(発表論文③)。

II. 異フェルミオン間の重率変換は、その前段として、ドメインウォールフェルミオン同士で、カイラル対称性のよりよい、大きな5次元サイズに変換する手法の試験開発を、連携研究者石川を中心に行った(発表論文⑤)。その結果、行列式の n 乗根をとる事によって効率的に重率係数を求められる事が分かった。しかし、5次元サイズの差とともに著しく増大する重率係数の統計揺らぎが、比較的調整しやすい、ゲージ場のパラメタのシフトだけでは吸収出来ず、その他のパラメタを含めた多次元の微調整が必要となり、将来の課題として残す事にした。

C) フェルミオンモード分解と低モードの厳密な取り扱い、カイラル対称性を厳密に保つオーバーラップフェルミオンでは実現されている。B-II で異種フェルミオン間の重率変換でオーバーラップフェルミオンへの変換が成功すれば実現可能であったが、開発が不調であったため、ドメインウォールフェルミオンで閉じた手法の開発が必要となった。本課題年度での開発は未完に終わったが、連携研究者出淵を中心に継続研究が行われている。

D) 演算子の改良では、 b -クォークに静的近似を用いた双一次演算子、4 フェルミ演算子の摂動論による改良が、連携研究者石川を中心に行われた(発表論文②)。また、同じ系で、これまで困難と考えられてきた、非摂動くりこみの一つの指針が連携研究者出淵によって示された(学会発表⑨)。非摂動くりこみは摂動論によるくりこみでは一般的に大きい系統誤差を抑える事が出来、今後の手法の完成に向け、期待がもたれる。

2) クォーク質量への応用: 新技術 A、B-I は、標準模型の基本パラメタである、クォーク質量の決定に用いられた。ドメインウ

オールフェルミオンを用いた二つの格子間隔のシミュレーションから連続極限をとることによって、 s クォーク質量と、 ud クォークの平均質量の結果を得、これまで支配的であったくりこみ由来の誤差を5分の1に縮小する事に成功した(発表論文③)。

3) π 、 K 崩壊定数(π 、 K から真空への電弱電流密度演算子による遷移行列要素)への応用: 新技術 B-I と、連続極限により、高精度の結果を導き(発表論文③)、CKM 行列のユニタリー性がここで得られた高精度で保たれている事を確認した。

4) 中性 K メソン混合行列要素への応用: 新技術 A、B-I の応用により、中性 K メソンの混合パラメタ B_K の高精度計算を実現し(発表論文①)、CKM 行列のユニタリティ三角形の頂点を制限する、 ϵ_K バンドの縮小を導いた。

5) B メソン崩壊定数と中性 B メソン混合行列要素への応用: 新技術 D を応用した試験的研究(発表論文⑥)を行った。さらに、クォーク波動関数の最適化と、より現実 ud クォークに近いシミュレーションを用いる事により、大幅に統計、系統誤差を縮小出来る事を確認した(学会発表④)。震災のための遅延があったが、大規模数値計算を実行中で、2つの格子間隔を用いた連続極限での値の導出を平成24年度中に行う予定である。この完成を待って、4)の BK とともに、CKM ユニタリティ三角形の頂点の制限を行い、他の QCD 非摂動効果の少ない遷移崩壊モードからの制限と無矛盾であるかの議論につなげる。

6) 陽子崩壊行列要素への応用: 新技術 A を用いた陽子崩壊行列要素の初めての第一原理計算が終了し、論文掲載準備中である。途中結果は学会招待講演(学会発表①⑦)で発表している。これまでに得られている精度で、前段のクエンチ近似の計算と、2+1 フレーバーの計算ではあるが、ソフトパイオン定理を用いた近似計算のどちらも、無矛盾である結果を得た。しかし、重い陽子と運動量を伴った π 、 K メソンの行列要素であるため、統計誤差が大きく、まずは、新技術 C を発展させることにより、統計誤差を格段に縮小させること目指した研究を継続している。

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 Y. Aoki, T. Izubuchi (8 番目)、他 18 名、Continuum Limit of B_K from 2+1 Flavor

- Domain Wall QCD, Phys. Rev. D 84 (2011) 014503-1-32、査読有
- ② T. Ishikawa, Y. Aoki, J. M. Flynn, T. Izubuchi, O. Lektik, One-loop operator matching in the static heavy and domain-wall light quark system with $O(a)$ improvement, JHEP 05(2011)40-1-77、査読有
- ③ Y. Aoki, T. Izubuchi (9 番目)、他 24 名、Continuum limit physics from 2+1 flavor domain wall QCD, Phys. Rev. D 83 (2011) 0074508-1-72、査読有
- ④ Y. Aoki, Non-perturbative renormalization in lattice QCD, PoS LAT2009(2010)012-1-20、査読無
- ⑤ T. Ishikawa, Y. Aoki, T. Izubuchi, Improving chiral property of domain-wall fermions by reweighting method, LAT2009(2010)035-1-20、査読無
- ⑥ C. Albertus, Y. Aoki, T. Ishikawa (7 番目), T. Izubuchi (8 番目)、他 10 名、Neutral B-meson mixing from unquenched lattice QCD with domain-wall light quarks and static b quarks, Phys. Rev. D 82 (2010) 014505-1-29、査読有
- ⑦ C. Sturm, Y. Aoki, N. H. Christ, T. Izubuchi, C. T. C. Sachrajda, A. Soni, Renormalization of quark bilinear operators in a momentum-subtraction scheme with a nonexceptional subtraction point, Phys. Rev. D 80 (2009) 014501-1-11

[学会発表] (計 12 件)

- ① 青木保道, Proton decay matrix elements from lattice QCD, International symposium on grand unified theories [GUT2012] (招待講演)、2012. 3. 16、京都大学 (京都府)
- ② 青木保道, Light quark masses from RBC & UKQCD collaborations, Symposium on Lattice Gauge Theory (招待講演)、2011. 5. 2、University of Wuppertal, (Wuppertal, Germany)
- ③ 青木保道, SM & BSM Hadronic Matrix Elements — heavy mesons and nucleons —, 次世代格子ゲージシミュレーション研究会 (招待講演)、2010. 9. 25、理化学研究所 (埼玉県)
- ④ 青木保道, Neutral B meson mixing with 2+1 flavor domain-wall light and static heavy quarks, The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory [Lattice 2010]、2010. 6. 15、Villasimius (Sardinia, Italy)
- ⑤ 出淵卓, Lattice QCD: achievements and the future plans, 理研・格子 QCD 研究

- 会 (招待講演)、2009. 12. 22、理化学研究所 (埼玉県)
- ⑥ 青木保道, Lattice QCD perspective, RIKEN BNL Research Center Symposium (招待講演)、2009. 12. 9、Brookhaven National Laboratory (Upton, NY, USA)
- ⑦ 青木保道, Proton Decay Matrix Elements from Lattice QCD, 2009 Workshop on Lepton and Baryon Number Violation [LBV09] (招待講演)、2009. 9. 23、University of Wisconsin (Madison, WI, USA)
- ⑧ 青木保道, Non-perturbative renormalization, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory [Lattice 2009] (招待講演)、2009. 7. 28、北京大学 (中国、北京)
- ⑨ 出淵卓, Renormalization factors of static quarks, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory [Lattice 2009]、2009. 7. 28、北京大学 (中国、北京)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 保道 (AOKI, Yasumichi)
名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授

研究者番号：20292500

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者

石川 智己 (ISHIKAWA, Tomomi)

理化学研究所・理研 BNL 研究センター・研究員

研究者番号：70375377

出渕 卓 (IZUBUCHI, Taku)

理化学研究所・理研 BNL 研究センター・研究員

研究者番号：60324068