

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19540286
 研究課題名 (和文) 格子ゲージ理論における対称性と非摂動的繰り込みの研究
 研究課題名 (英文) Study of symmetry and nonperturbative renormalization
 in lattice gauge theory
 研究代表者 大野木哲也 (ONOGI TETSUYA)
 大阪大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：70211802

研究成果の概要 (和文)：

格子 QCD の非摂動的数値計算を用いてカイラル対称性、重いクォーク対称性、非摂動繰り込みをテーマに場の理論と素粒子現象論に重要な物理現象や物理量の研究を行った。まず厳密なカイラル対称性を持つ格子上のフェルミオン作用(Overlap フェルミオン)を用いた数値計算を世界で初めて実現し、カイラル凝縮、崩壊定数、 σ 項などの決定を行った。重いクォークの物理で重要な B 中間子の π 中間子結合の定数を重いクォークの有効理論である HQET を用いて決定した。また非摂動的なゲージ結合定数の定式化と格子 QCD 計算による決定を行った。

研究成果の概要 (英文)：

Symmetries and nonperturbative renormalization are extremely useful concept in field theory. Using the nonperturbative lattice QCD simulations based on chiral symmetry, heavy quark symmetry and nonperturbative renormalization, I studied various phenomena or physical quantities which are important for field theory and particle physics phenomenology. First, we carried out the first large scale QCD simulations using a fermion formalism with exact chiral symmetry (the Overlap fermion) and determined the chiral condensate, decay constant and the sigma term. Exploiting HQET, which is an effective theory of the heavy quark, we computed the pionic coupling of the B meson. We also proposed a new scheme for the nonperturbative gauge coupling and determined the nonperturbative running coupling.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：格子ゲージ理論、カイラル対称性、HQET、有効理論、非摂動繰り込み

1. 研究開始当初の背景

格子 QCD の進展に伴って、格子ゲージ理論においてカイラル対称性を厳密に保つ **Overlap** フェルミオンと呼ばれる新しい作用が発見された。これまで従来の **Wilson** フェルミオンと呼ばれるフェルミオン定式化による格子 QCD 計算が勧められていたが、厳密なカイラル対称性がないために生じる様々な困難があり、この新しい作用の応用が望まれていたが多くの数値計算上の困難により応用が進んでいなかった。また、非摂動的繰りこみが提案されその応用として繰りこみ群の研究が可能になってきた。

2. 研究の目的

そこでこの機をとらえ新しい定式化を応用した新たな格子ゲージ理論の数値計算を実現すること、また厳密なカイラル対称性によって初めて可能になる新しい物理を開拓することを目的とした。一方、非摂動的繰りこみ群の方法を用いて新たな場の理論の研究を行うことをもう一つの柱とした。

3. 研究の方法

Neuberger の **Overlap** フェルミオン作用を用いた動的格子 QCD の数値計算を実現すべく、アルゴリズム、作用、計算手法の開発を行う。またそれを応用した様々な場の理論、素粒子現象論の研究を行う。また非摂動的繰りこみ群のもっとも単純な応用はゲージ理論における赤外固定点の探究である。その応用にむけ格子ゲージ理論の計算手法を開発する。

4. 研究成果

(1) **Overlap** フェルミオンの動的シミュレーションは計算コストが非常に大きいとくにゲージ配位の空間の中でトポロジーの境界付近が大きな律則段階となる。ところがこれは連続理論では存在しない格子化 artifact である。そこでトポロジーの境界を抑制するゲージ作用を用いることで計算コストの問題を解決した。この方法の欠点はトポロジー固定されてしまうため、トポロジーの足し上げが自動的にできない点にある。われわれはこのために生じる有限体積効果を評価する表式をもとめ、その応用として固定されたトポロジーの計算を行って後で足し上げる理論的手法を開発することによって完

全な解決を得た。これによって世界発の **Overlap** フェルミオンによる 2 フレーバー QCD の格子間隔は 0.12fm で $16^3 \times 32$ の格子サイズでの大規模数値計算を実現した。このためアルゴリズムの改良も行った。もっとも軽いクォーク質量領は $m_s/6$ である。私たちは格子スケールとオーバーラップオペレータの場所を固定する静的なクォークポテンシャルのために詳細に生産シミュレーションと現在の結果の私たまた副産物として位相感受率を決定する新しい方法も提案した。

(2) 厳密なカイラル対称性にもとづく格子ゲージ理論を応用して、QCD における自発的対称性の破れの検証、位相感受率の決定、カイラル有効理論の低エネルギー定数の決定、 σ 項の決定などを行った。ア) 位相感受率の決定に関しては擬スカラー演算子の 2 点相関関係の遠方での振舞いから抽出した。小さいクォーク質量ではカイラル摂動論の予想通りクォーク質量に比例した。Leutwyler-Smilga による位相感受率とカイラル凝縮を結び付ける公式を用いてカイラル凝縮パラメータ $\Sigma^{1/3}(2\text{GeV})$ が $252(5)(10) \text{ MeV}$ となり、以前のわれわれの独立な計算と一致した。イ) カイラル摂動論の低エネルギー定数の一つである L_{10} と π 中間子の質量分岐を決定のため真空偏極関数を計算した。これらの量はテクニカラー理論での重要な物理量の決定につながる可能性がある。ウ) σ 項については **Baryon Chiral Perturbation Theory** の NNLO 公式により核子の質量の格子計算の結果をフィットした。次に **Feynman-Hellman** 定理を用いて valence quark と sea quark の寄与の評価を行った。その結果、ストレンジクォーク含有量が前の格子計算と現象論の見積りより非常に小さいことを発見した。この結果は現在進行中の暗黒物質の直接探索実験からのクォーク・暗黒物質散乱断面積の評価に大きな影響を与えるものである。エ) われわれは力学的なオーバーラップクォークの 2 フレー場格子 QCD により QCD のカイラル凝縮の正確な計算を実行した。アップ・ダウンクォーク質量を $3\text{-}100\text{MeV}$ の範囲で変化させた。最も軽いクォークは ϵ -領域にあるのでディラック演算子の低い固有値スペ

クトルを NLO のカイラル摂動論の予言とフィットすることでカイラル凝縮パラメータを予測に合わせることによって、 $\Sigma(2\text{GeV})$ を $242(04)(+0-18)\text{MeV}^3$ と決定した。

- (3) B 中間子の pionic 結合は重い中間子の有効理論の基本パラメータであり B 中間子の結合定数、バグ定数およびのカイラル極限の振る舞いを決定するとともに B 中間子の準レプトニック崩壊の形状因子の決定に重要なパラメータである。われわれは重いクォークに対し Static クォーク作用、軽いクォークに対し改良されたウィルソン軽いクォーク作用を用いて CP-PACS collaboration によって生成された 2 フレーバー QCD のゲージ配位上で pionic 結合の決定を 1-2% の精度で行った。
- (4) 我々はゲージ結合定数の $O(a)$ 誤差のない新しい繰りこみスキームとしてウィルソン・ループを用いた方法を提案した。これは格子シミュレーションにおけるクロイツ比から定義される。ゼータ関数再加算のテクニックを用いて tree-level の係数決定し、クエンチ近似 QCD でベンチマークテストを実行した。結合定数の running はステップ・スケーリングを用いて決定できる。統計的精度を改良するためのいくつかの方法を使用して、私たちは、running 結合定数が少ないゲージ配位で精度よく決定できることを示した。さらに Walking テクニカラーの実現を目指し、フレーバー数が多いときの QCD の非自明固定点の初期的探究を行った。

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 8 件)

1. H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, “Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD”, Phys. Rev. Lett. 104, 122002 (2010)
2. E. Bilgici, A. Flachi, E. Itou, M. Kurachi, C.-J. D. Lin, H. Matsufuru, H. Ohki, T. Onogi, T. Yamazaki, “A new cheme for the running coupling constant in gauge theories using

Wilson loops”, Phys. Rev. D80, 034507 (2009)

3. S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, K.-I. Ishikawa, K. Kanaya, T. Kaneko, H. Matsufuru, M. Okamoto, M. Okawa, T. Onogi, A. Ukawa, N. Yamada, T. Yoshié (JLQCD Collaboration), “Two-flavor simulation with exact chiral symmetry”, Phys. Rev. D78, 014508 (2008)
4. E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada (JLQCD Collaboration) “S-parameter and pseudo-Nambu-Goldstone boson mass from lattice QCD”, Phys. Rev. Lett. 101, 242001 (2008)
5. H. Ohki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, and N. Yamada (JLQCD Collaboration), “Nucleon sigma term and strange quark content from lattice QCD with exact chiral symmetry”, Phys. Rev. D78, 054502 (2008)
6. H. Ohki, H. Matsufuru, T. Onogi, “Determination of $B^*B\pi$ coupling in unquenched QCD”, Phys. Rev. D77, 094509 (2008)
7. JLQCD and TWQCD Collaborations, S. Aoki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, K. Ogawa, T. Onogi, N. Yamada, “Topological susceptibility in two-flavor QCD with exact chiral symmetry”, Phys. Lett. B665, 294-297 (2008)
8. S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Onogi, “Finite volume QCD at fixed topological charge”, Phys. Rev. D76, 054508 (2007)

[学会発表] (計 1 件)

1. T. Onogi “Results from lattice Q” CD with exact chiral symmetry”, invited talk at Komaba 2010 Recent Developments in Strings and Fields, Feb. 13 2010 at Univ. Tokyo, Komaba

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野木哲也 (ONOGI TETSUYA)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70211802

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：