

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800139

研究課題名(和文) 格子ゲージ理論を用いた強結合素粒子模型の数値シミュレーション

研究課題名(英文) Lattice Numerical simulation of strong gauge dynamics for beyond the standard model

研究代表者

大木 洋(Hiroshi, Ohki)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：50596939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：大きなフレーバー数を持つSU(3)ゲージ理論(QCD)は、(ウォーキング)テクニカラー模型と呼ばれる素粒子標準模型を超えた物理の一つの有力な候補と考えられている。その模型の非摂動的定式化である格子ゲージ理論を用いた第一原理計算を行い、そのハドロンスペクトラムの計算を行った。8、12フレーバーQCDのフレーバー重項スカラーの質量の計算結果から、有限フェルミオン質量領域では、擬スカラー中間子と同程度かそれよりも軽いことが明らかとなった。本研究結果は通常のQCDとは大きく異なるものであり、LHCで発見されたヒッグス粒子が複合スカラー粒子として存在できる可能性がある事を示唆する。

研究成果の概要(英文)：Non-perturbative nature of many-flavor QCD through the numerical simulation of the lattice gauge theory within the framework of the (walking) technicolor model has been investigated. Many-flavor QCD is a good candidate for the walking technicolor, where the flavor singlet scalar can be regarded as a technidilaton, a pseudo Nambu-Goldstone boson of the approximate scale symmetry. In this work, we studied the flavor dependence of the low-energy behavior systematically in comparison with various number of flavor  $N_f(=0), 8, 12$  based on a unique lattice setup. We discovered a signal of a flavor-singlet scalar meson lighter than the pseudo scalar in  $N_f=12$  case. In  $N_f=8$  case, we also observed a flavor-singlet scalar with mass comparable to or slightly smaller than that of the pseudo scalar in the fermion mass range of our simulations. This is a hint of the technidilaton as a composite Higgs to be identified with the Higgs boson which was discovered at LHC.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 格子ゲージ理論

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型を超えた物理の探索においては、これまで強結合理論や共形理論は、解析的に解く事が極めて困難であり、低エネルギー有効理論や近似計算などの限られた方法でしか知られておらず、あまり着目されていなかった。一方、近年格子ゲージ理論を用いた数値計算法の新展開、高エネルギー素粒子実験(LHC)による幾つかの興味深い結果が得られており、素粒子現象論的観点からも、非摂動効果が重要な電弱対称性の破れの起源の解明が極めて重要な意味を持つと考えられるようになってきており、そのような強結合ゲージダイナミクスを非摂動的に理解する研究の重要性が増していた。

実際、標準模型を超えた物理の有力な候補である動的な電弱対称性の破れの起源となるテクニカラーモデルは、非摂動的ゲージダイナミクスが本質的な役割を果たすため、そのようなモデルの研究が近年盛んに行われるようになっていた。特に LHC において、比較的軽い質量(125GeV)のヒッグス粒子が発見されたこともあり、その正体が一体何であるかということも明らかにすることが理論的研究の一つの重要な課題である。テクニカラーモデルのような強結合ゲージ理論におけるヒッグス粒子は、より基本的なフェルミ粒子の複合粒子として存在することが理論的に期待されている。ところが、強結合ゲージ理論として知られている量子色力学(QCD)では、QCD のスケールにおける軽いスカラー粒子は存在しておらず、テクニカラーモデルにおいて、ヒッグス粒子が存在するかどうかは明らかではない。一つの有力な可能性は、(近似的)スケール対称性を持つテクニカラーモデル(ウォーキングテクニカラー等)であり、そのようなモデルでは、複合ヒッグス粒子は、スケール対称性の自発的破れに伴う南部ゴールドストーン粒子と同定出来るため、QCD におけるパイ中間子のように軽い質量となる得るというものである。しかし、そのようなゲージ理論が非摂動的に存在しているか、また具体的にその低エネルギー質量スペクトラムがどのようになるかは、分かっておらず、量子ゲージ理論の相構造の理解と共に、重要な研究課題である。

以上より、本研究開始当時から強結合ゲージ理論としての複合ヒッグス粒子の存在可能性は極めて難しい問題であり、その解明に向けた量子ゲージ理論の研究の重要性が増している状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、強結合理論を中心とした標準模型を超えた物理の候補を、格子ゲージ理論を用いた第一原理計算に基づく数値計算を行い、新しい素粒子物理像の可能性を見出す事である。特に SU(2)という最も単純な非可換ゲージ理論における相構造の解明は、申請者が走る有効結合定数の格子ゲージ理論による計算を行うなど、先駆的に

われてきたものである。ゲージ理論の相構造の解明は、ゲージ理論の本質的な理解に繋がる課題であるため、引き続き研究を行う必要があり、本研究課題のターゲットとなる模型の一つである。更に、より素粒子現象論的に興味深い種々の低エネルギーハドロンスペクトラムを計算することは、高エネルギー素粒子実験(LHC)によって得られる可能性のある新粒子スペクトラムの予言、検証に繋がる重要な成果となるため、極めて重要な意味を持つ。以上より、これら強結合ゲージ理論の相構造の解明、及び低エネルギースペクトラムの計算を行い、電弱対称性の破れの起源の解明に向けた素粒子強結合模型の研究を進めることが本研究の目的である。研究の背景で述べたように、共形相近傍でのスカラー粒子を中心とした低エネルギースペクトラムの計算を行い、その理論構造及び、複合ヒッグス粒子としての可能性を探求することが本研究課題のより具体的な目的となる。本研究では、ウォーキングテクニカラー及び、共形テクニカラーモデルの候補と考えられる大きなフレーバー数を持つゲージ理論である、8及び12フレーバー QCD(SU(3)ゲージ理論)を格子ゲージ理論と呼ばれる非摂動定式化を用いた第一原理計算を行う。また、より挑戦的な研究課題である QCD とは異なるゲージ理論である SU(2)ゲージ理論における相構造の解明に向けた研究も並行して行う。

## 3. 研究の方法

(1) 素粒子現象論及び実験で有益となる様々な物理量に対して、格子上のゲージ理論での具体的な計算法を確立するための解析的研究を行う。その際、低エネルギー有効理論を用いた模型計算や対称性に基づく議論を行い、新たな計算法や効率の良い方法、従来との計算との比較を行う。また、素粒子標準模型を超えた物理の有力な候補である超弦理論などから導かれる模型によるトップダウン的アプローチとの比較検証も重要である。

(2) 具体的な格子ゲージ理論上での数値計算を行う。特にスカラー粒子のスペクトラムの計算を行うために、非連結ダイアグラムの計算が重要であり、それは極めて誤差が大きいものであることが予想されるため、統計数を増やすことや、様々な計算手法を用いることで、必要なシグナルを得られるように、改良することが必要である。ここでは、特に通常の QCD との比較を行う事で、共形相近傍の理解を進めることが重要であり、二つの模型 8 及び 12 フレーバー QCD におけるスカラー粒子を計算する。フェルミオンはカイラル対称性を持ち、比較的計算量が少なく済む、HISQ と呼ばれるスタッガードフェルミオン格子作用を用いる。計算内容は以下の通りである。

① 共形相と思われる 12 フレーバー SU(3) ゲージ理論におけるスカラー質量の測定のための

ゲージ配位生成。フェルミオン非連結グラフ、及びグルーボール演算子の両方によるフレーバー1重項スカラー粒子の計算。

②上記研究を踏まえ、8フレーバー理論におけるゲージ配位生成、及びフェルミオン演算子におけるスカラー粒子スペクトラムの計算。

両方の計算において、大規模な計算機時間を必要とするため、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構に新たに導入された高速クラスター型計算機 $\phi$ 、名古屋大学情報基盤センターのCX400、九州大学情報基盤研究開発研究センターのCX400, HA8000の計算機を用いた。

#### 4. 研究成果

初年度の一つの大きな成果として、12フレーバーQCDにおける低エネルギースペクトラムの計算が挙げられる。具体的には、12フレーバーQCDにおいて共形不変性と整合するハイパースケールリングと呼ばれる性質が、様々な質量スペクトラムに現れることを見出した。またこの理論におけるフレーバー1重項スカラー( $\sigma$ )粒子は、標準模型におけるヒッグス粒子に対応するため、その質量の測定は極めて重要な意味を持つ。本研究では、フレーバー1重項の非連結グラフの計算とそこから得られる $\sigma$ 粒子の質量の解析し、5000以上の統計量を用いる事により、その質量を精度よく求める事に成功した。その結果、通常のQCDとは異なり、擬スカラー( $\pi$ )中間子よりも軽い質量を持つ事が分かった。図1は、 $\sigma$ 粒子のフェルミオン質量( $m_f$ )依存性と $\pi$ 質量との比較を表し、様々な格子体積( $L=24, 30, 36$ )での結果から、有限体積効果による不定性も良く制御されていることが分かる。これは共形相近傍の大きなフレーバー数を持つQCDにおけるスカラー粒子の第一原理計算による初の成果であり、超対称性模型に代わる標準模型を超えた物理の有力な候補である複合ヒッグス

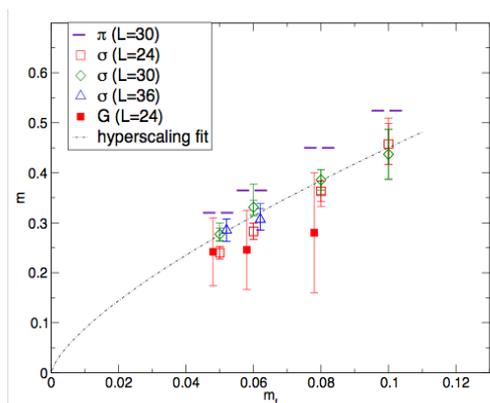


図1: 12フレーバーQCDにおける $\sigma$ 粒子質量( $m$ )の $m_f$ 依存性。Gはスカラーグルーボールの質量、破線は $\pi$ 粒子質量、点線はハイパースケールリングのフィットの結果を表す。

模型の可能性に対して、大きな進展をもたらす事に成功し、世界中から多くの注目を集めている。

次年度以降は、素粒子現象論的により興味深い8フレーバーQCDにおける低エネルギースペクトラムの解析に進む。それは、8フレーバーQCDは、先行研究からカイラル対称性の破れた相でありながら、有現フェルミオン質量領域における近似的共形対称性を持つ興味深い理論である可能性を持つからである。図2は、本研究における $\sigma$ 質量と $\pi$ 質量の比較を行ったものである。これから $\sigma$ 粒子の質量が $\pi$ 粒子と同程度であることが明らかになった。また、カイラル外挿によるゼロフェルミオン質量での計算結果も求め、その結果現状では極めて誤差が大きい、8フレーバーQCD(テクニカラー理論)の典型的なスケールと同程度であることが分かり、これは近年LHCで発見されたヒッグス粒子の質量125GeVを再現する可能性を持つことを示唆する重要な研究成果である。

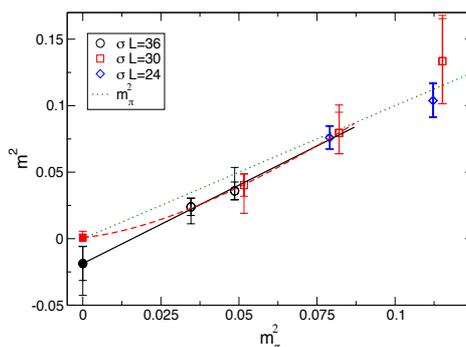


図2: 8フレーバーQCDにおける $\sigma$ 粒子質量( $m$ )の $\pi$ 粒子質量との比較を表す。破線、実線はそれぞれ異なる二つの方法を用いたカイラル外挿の結果であり、ゼロフェルミオン質量でどちらも小さな質量となる。

従来の予想では、QCDのような強結合理論における $\sigma$ 粒子は、 $\pi$ 粒子よりも軽くなる事はないと考えられていたが、第一原理計算に基づく数値計算を行った結果、テクニカラー模型の候補となるような大きなフレーバー数を持つ理論の場合、 $\sigma$ 粒子が軽く成りうる事を示した。これは、格子研究を始めとする場の理論の研究グループに大きなインパクトを与えただけでなく、素粒子現象論の研究者からも多くの注目を集める事となる。このように、格子ゲージ理論において、これまで誤差が大きいものや、計算が困難で調べられていなかった物理量に着目し、効率的に計算を行う事により、世界中の他

のグループに先駆けて成果を得る事に成功したものである。

また最終年度では、本研究の $\sigma$ 質量計算で用いられたゲージ配位を更なる計算に生かす研究に進展させる事が可能となった。それは、フレーバー1重項擬スカラー粒子( $\eta'$ )質量の測定である。これは、研究開始当初では、予期していなかったものである。本来、QCDにおける $\eta'$ は、その質量が重く、通常の測定では $\pi$ 粒子との混合が起こり、 $\eta'$ 質量のシグナルが小さくなり、その測定が極めて困難な物理量として考えられていた。所が、グラディエントフローと呼ばれる効率的な誤差縮減法が近年発見され、その方法を用いる事により、そのような困難な物理量も測定できるのではないかという発想に至り、研究を行ったものである。大きなフレーバー数を持つQCDでは、そのフェルミオンによる量子異常の効果が強められる可能性が指摘されており、ゲージ理論の理論的興味からもその解明が期待される物理量である。本研究では、 $\pi$ 粒子との混合を避けるため、トポロジカル密度演算子を用いた2点相関関数の測定から質量を求める方法を用いた。図3は、グラディエントフローによるトポロジカル密度演算子の改良により求めた $\eta'$ 質量のフロー時間依存性を表したものである。その結果、ベクトル中間子( $\rho$ )質量の2-3倍程度あることが分かり、通常のQCDとは大きく異なることがわかった。現状としては統計誤差のみ考慮されており、今後の展望としては、様々な系統誤差も考慮しなければならないが、極めて興味深い成果を得る事に成功した。本研究結果は、Lattice 2015国際会議やアメリカのアルゴンヌ国際研究所で行われたLattice for Beyond the Standard Model Physics 2016研究会におい

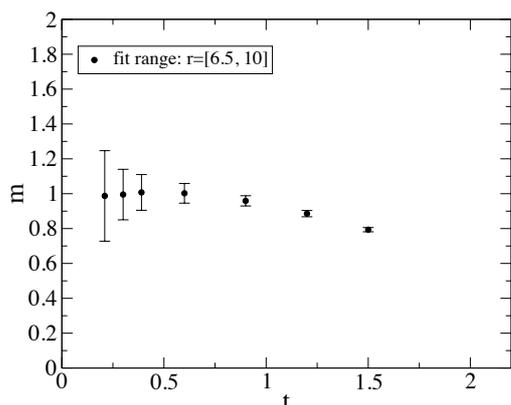


図3: 8フレーバーQCD,  $mf=0.02$  における $\eta'$ 粒子質量(m)のフロー時間(t)依存性。

て発表し、注目を集めている。

以上より、本研究の主な成果はテクニカラー模型に代表される複合粒子模型の有望性を格子ゲージ理論の第一原理計算による数値計算の立場から研究したものであり、本結果は

今後 LHC 実験等で検証されると考えられ、今後も大きな進展が期待される分野である。本研究で用いられた研究手法やデータは、既にスカラー粒子以外の $\eta'$ 粒子等のスペクトラムの解析にも用いられており、より精密な模型の検証を行う予定である。これらの研究により、物質質量の起源や暗黒物質の謎の解明、宇宙進化の謎に大きな進展がもたらされる事が期待される。

## 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 10 件)

1. Y. Aoki, T. Aoyama, E. Bennett, M. Kurachi, T. Maskawa, K. Miura, K. -i. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, and K. Yamawaki, and T. Yamazaki, “Walking and conformal dynamics in many-flavor QCD”, PoS LATTICE 2015, 213, 2016, 1-7, <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=251>, 査読無
2. Y. Aoki, T. Aoyama, E. Bennett, M. Kurachi, T. Maskawa, K. Miura, K. -i. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, and K. Yamawaki, and T. Yamazaki, “S-parameter and vector decay constant in QCD with eight fundamental fermions”, PoS LATTICE 2015, 245, 2016, 1-7, <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=251>, 査読無
3. C. Y. -H. Huang, I. Kanamori, C. -J. D. Lin, K. Ogawa, H. Ohki, A. Ramos, and E. Rinaldi, “Lattice study for conformal windows of SU(2) and SU(3) gauge theories with fundamental fermions”, PoS LATTICE 2015, 224, 2016, 1-7, <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=251>, 査読無
4. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, and Takeshi Yamazaki, “Light composite scalar in eight-flavor QCD on the lattice”, Physics Review D, 89, 111502(R), (1-5), 2014, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.111502, 査読有,

5. C. Y. -H. Huang, C. -J. D. Lin. K. Ogawa, H. Ohki, A. Ramos, and E. Rinaldi, “Phase structure study of SU(2) lattice gauge theory with 8 flavors”, PoS LATTICE, 240 2014, 1-7, <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=214>, 査読無

6. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Keiichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, and Takeshi Yamazaki, “Light Composite Scalar in Twelve-Flavor QCD on the Lattice”, Physica Review Letters, 111, 162001, 1-5, 2013, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.162001, 査読有,

7. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Keiichi Nagai, Hiroshi Ohki, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, and Takeshi Yamazaki, “Walking signals in Nf=8 QCD on the lattice”, Physical Review D87, 094511, 1-22, 2013, DOI:10.1103/PhysRevD.87.094511, 査読有

[学会発表] (計 14 件)

1. 大木洋, “Flavor-singlet sector in many-flavor QCD”, 2016年3月21日 日本物理学会第71回年次大会, 東北学院大学 泉キャンパス, 宮城県仙台市,

2. Hiroshi Ohki, “Walking and conformal dynamics in many-flavor QCD”, The 33<sup>rd</sup> International Symposium on Lattice Field Theory, 2015年7月14日, Kobe International Conference Center, 兵庫県神戸市

3. Hiroshi Ohki, “Analysis of the scalar and vector channels in many flavor QCD”, The 32<sup>nd</sup> International Symposium on Lattice Field Theory, 2014年6月23日-6月28日, New York, アメリカ

4. 大木洋, “Lattice study of the scalar and vector channels in many flavor QCD”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 18 日-9 月 21 日, 佐賀大学, 佐賀県佐賀市

5. Hiroshi Ohki, “Exploring for a light composite scalar in eight flavor QCD”, 31st International Symposium on Lattice

Field Theory, 2013 年 7 月 29 日-8 月 3 日, Johannes Gutenberg University, Mainz, ドイツ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大木 洋 ( Hiroshi Ohki )

国立研究開発法人理化学研究所, 仁科加速器研究センター, 基礎科学特別研究員

研究者番号: 50596939