

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740183

研究課題名(和文) 格子ゲージ理論で探る LHC の物理

研究課題名(英文) Exploring LHC Physics using Lattice Gauge Theory

研究代表者

山田 憲和 (Yamada, Norikazu)

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・研究機関講師

研究者番号：50399432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000 円、(間接経費) 960,000 円

研究成果の概要(和文)：素粒子標準模型を超える物理の有力な候補であるテクニカラー模型と呼ばれる強結合ゲージ理論の諸性質を格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションを行うことにより明らかにした。当研究におけるポイントは、理論が赤外領域で共形的になっているか否かであるが、ゲージ結合定数のスケール依存性、及び理論の低エネルギースペクトラムを詳細に調べることにより決定した。また、有限温度での理論の相構造、例えば相転移の有無や次数を決定する簡便な手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Various properties of strongly coupled gauge theory, or technicolor model, which is known to be an attractive candidate beyond the standard model in particle physics, was investigated by performing numerical simulations based on lattice gauge theory. A crucial point in the study is to identify whether a given gauge theory shows infrared conformality or not, and for a certain explicit model we have determined it by investigating the infrared fixed point of the running gauge coupling constant and by seeing low energy spectrum. We also developed a easy-to-use method to clarify the existence of finite temperature phase transition and its nature.

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：素粒論(理論) 格子ゲージ理論 数値シミュレーション LHC 強結合理論 相転移 共形場

1. 研究開始当初の背景

当該研究を開始した 2010 年時点において、ヒッグス粒子は素粒子物理学における標準模型を構成する素粒子の中で唯一の未発見粒子であり、質量をはじめとする諸性質は不定であった。一方既に、弱い相互作用のスケールが約 100 GeV であり、プランクスケール (約 10^{19} GeV) に比べ著しく小さいことは「階層性問題」として認識されており、この階層性の起源に対する自然な説明を探索することを通して、より自然なヒッグス粒子の在り方を予言する研究が盛んであった。特に、標準模型を超対称に拡張した際の帰結の研究には多くの研究者が取り組み、非常に進展した。ところで、この種の研究が盛んになった理由の一つは、諸量の予言にあたり解析的な計算が可能であること、つまりある意味において誰でも容易に予言できることにある。しかしながら、我々が探している標準模型の背後にあるより基本的な理論が解析的に取り扱えるものである保証はそもそも無いため、非常に偏った研究しか行われてこなかったと言える。実際、解析的に取り扱えない模型の中にも魅力的な候補は存在する。従って、解析的取り扱いの可/不可から一旦離れ、純粋に模型の根幹的な思想に焦点を当て、有力な候補を絞り込むという本来の視点に回帰することが重要であると考えた。考察の結果、非常に魅力的であるにも拘らず、原型が提案された 30 年前から殆ど実質的に進展していない、強結合ゲージ理論に基づく模型を知るに至った。

2. 研究の目的

素粒子標準理論の背後にある新しい物理の探索は、理論/実験双方の精度を極限まで高めた上で僅かなズレとして現れる量子効果を探す「精密探索」と、超高エネルギー衝突型実験により未発見粒子の直接生成を狙う「直接探索」とに大別できる。格子ゲージ理論はこれまで、強い相互作用 (QCD) の非摂動効果を厳密に取り扱える利点を活かし「精密探索」において重要な役割を果たしてきた。本研究では、これまで格子 QCD の研究で培われてきた様々なテクニックを用いて格子ゲージ理論を新しい物理の「直接探索」に応用し、同時進行で進む LHC 実験の結果と突き合わせることで、電弱相転移スケールより上のスケールの物理を探ることを目的とする。

これまで申請者は、格子上で「厳密なカイラル対称性」を保持するオーバーラップフェルミオンを用いて、「精密探索」に寄与してきた。この中で、「厳密なカイラル対称性」を持つ格子フェルミオンでカレント・カレント積の真空期待値を計算することにより、

1. 強い相互作用のゲージ結合定数
2. Peskin-Takeuchi により導入された S-parameter

・ 電磁相互作用 (QED) がカイラル対称性を陽に破っていることに起因する荷電 π 中間子と中性 π 中間子の質量差 (即ち、擬南部・Goldstone ボソン質量)

といった多くの重要な物理量を決定してきた。S-parameter と擬南部・Goldstone ボソン (PNGB) の質量は、新しい物理の有力な候補であるテクニカラー (TC) 模型の実験的検証において特に有用な物理量であり、これらの物理量を近似や仮定に依存することなく第一原理計算から予言できることは、以下に述べる理由により LHC の時代を迎えた今非常に大きな意義を持つ。

TC 模型とは QCD のような漸近自由でベクトル的な強い相互作用のゲージ理論であり、その自発的カイラル対称性の破れが電弱相転移を引き起こすというアイデアが核をなす。このモデルの最大の利点は、“素粒子”としてスカラー粒子を含まないため“fine tuning”の問題がない点である。単純な TC 模型は、

1. 既存の FCNC の制限を満たしつつ現実のクォーク質量を説明できない、
 2. S-parameter が大きくなりすぎる、
- ことにより既に排除されているが、ある特殊な条件下の TC 模型を考えると上述の 2 つの問題を回避できる可能性があることが指摘されている。特殊な条件とは、TC 模型のゲージ結合定数が“ゆっくりと run”することであり、この条件を満たす TC 模型は、Walking TC (WTC) と呼ばれている。ところが、模型が強結合の理論に基づいているため定量的な予言が困難であることがネックとなりこれまで進展は無かった。そこで、格子ゲージ理論を駆使し、WTC が新しい物理の候補たるか否かを第一原理計算で明らかにすることを目指した。既に、カラーの数 (N_c) が 3 でフレーバーの数 (N_f) が 2 の理論 (即ち 2-フレーバー QCD) で S-parameter と PNGB 質量を決定した。これを WTC 模型で行なうことが本研究課題の具体的な目的の一つであるが、以下のように段階的に行うのが現実的である。まず、WTC 模型の候補を挙げ、ゲージ結合定数が実際に Walk するかどうかを調べる。具体的には、ゲージ群やフレーバーの数を固定し、その理論の関数 (結合定数のスケール依存性を現す関数) を調べる。先行研究によると、有力な候補にはゲージ群の基本表現として変換するフェルミオンからなる理論だけでなく、その他の高次元表現のフェルミオンを含むものも含まれているが、フェルミオンの表現が何であろうと格子上で問題なく調べることができる。また別の先行研究では $N_c = 3$ で $N_f = 8, 12$ の理論のベータ関数を調べ、8 だと running が早過ぎ、12 だと遅い過ぎて、何れも WTC の候補からは排除されている。

ところで、自発的対称性の破れが起こらなければ TC 模型の良い候補にはなり得ないため、結合定数の振る舞いだけでなく理論

の非摂動ダイナミクスも調べなければならぬ。従って、Walking の振る舞いが確認できた候補については更に、自発的カイラル対称性の破れが起こるかどうかを調べる必要がある。これは、カイラル対称な格子フェルミオンの Dirac 演算子の固有値分布を調べ、その結果と Chiral Random Matrix Theory の予言を比較することにより、比較的小さい格子で検証できる。それでも生き残った候補に関しては、その大規模数値シミュレーションを展開し、その理論における様々な中間子やバリオンの質量スペクトラムを明らかにする。また同時に、格子 QCD の研究で培ったノウハウを活用して S-parameter や PNGB 質量を計算する。可能であれば、一番軽いスカラー中間子の質量も計算する。ここで得られた、スペクトラムを LHC 実験での観測と比較することにより、モデルの検証が可能となる。また S-parameter は電弱精密測定の実験結果と比較される。上述の研究により、現実的な WTC の存在の有無が明らかになる。勿論、TC 模型全てが候補から排除される可能性もあり、現象論に非常に大きなインパクトを与え、新しい物理の探索を新たな局面へ進展させることができる。

3. 研究の方法

既に発表されている関連する研究を調査した結果、WTC 模型の候補として

・ $N_c = 3, N_f = 10$, 基本表現フェルミオン (“10 フレーバー QCD”)

・ $N_c = 2, N_f = 2$, 随伴表現フェルミオン (“2 フレーバー、2 カラー随伴表現 QCD”) の理論が特に興味深いことが分かった。10 フレーバー QCD 理論については、まずベータ関数、及び質量異常次元を格子計算により決定する。この決定については、既に確立した方法(シュレディンガー-凡関数法)を採用する。この計算においてカイラル対称性は重要で無く、また比較的小さい格子サイズで可能である。従って計算コストのかからない従来の Wilson 型のフェルミオン形式で行う。既に申請者が利用可能な状態にある計算資源で遂行可能であり、年度内に最終的な結果を導く。

2 カラー随伴 QCD 理論については、まず低エネルギー領域におけるカイラル対称性の有無を調べ、破れる場合にはその秩序パラメーター(カイラル凝縮)とテクニパイオンの崩壊定数を決定する。この計算は、Dirac 演算子の固有値分布を Chiral Random Matrix Theory の予言と比較することにより実現する。既に、この手法が機能することを、対称性が破れることが分かっている、より計算コストの小さい理論で検証している。その結果、比較的少ない統計 ($O(100)$ 個のゲージ配位)で、且つ非常に小さい格子サイズ ($V=4^4$)であるにも拘らず、Chiral Random Matrix Theory の予言とよく一致するという、

encouraging な結果を得ている。ところで、この検証はカイラル対称性を自明に破っている Wilson 型フェルミオン形式ではできない(できたとしてもかなり困難)ため、厳密な対称性を持つオーバーラップフェルミオンでやらなければいけない。そのため計算コストがかかる。また、カイラル凝縮や南部・Goldstone ボソンの崩壊定数をコントロールされた誤差で決定するためには、ある程度大きな物理的体積が必要になることが予測される。このため、定量的な結果の発表は次年度以降にずれ込む可能性がある。

仮に、これら2つのゲージ理論が WTC の候補として適当でないことが判明した場合は、研究対象を他のゲージ理論へ移す。コードの一部(又は実行時のパラメーター)を少し変更するだけで実現できる。例えば、 $N_c=2, N_f=6$ の基本表現フェルミオンの理論を次の候補として考えている。

WTC の良い候補が見つからなかった場合は、平成 23 年度以降も引き続き上記の検証を可能な限り多くの候補について行なう。ただし、これまでの半定量的な研究から有力な候補はそれほど多くないことが分かっている点と、他の研究グループによってもいくつかの候補は我々と独立に検証されることが見込まれる点から、全てのグループの研究を総合すれば有力な候補を全て尽くしたとしても数年程で完了すると思われる。従って、他の研究グループの動向には注意を払いながら実際にシミュレーションする候補を取捨選択していく。

10 フレーバー QCD 理論のベータ関数、及び質量異常次元が WTC の候補としての条件を満たすことが分かった場合は、この理論の低エネルギー領域の研究を、先述の Dirac 演算子の固有値分布と行列模型の比較により行う。10 フレーバーの理論をオーバーラップフェルミオンでシミュレーションするには、計算コストがかかるため、約2年程時間がかかる見込みである。従って、この状況を少しでも改善するために、並行してコードの改良も行う。

2 カラー随伴 QCD 理論の質量異常次元については、既に研究を始めているグループもあることから、この模型に焦点を移すまでに、諸量は決定されていると予想される。その結果、大きな質量異常次元を示し、且つカイラル対称性が破れることが分かっていた場合、その理論の大規模数値シミュレーションを行ない理論の質量スペクトラム、崩壊定数、S-parameter の決定を行う。これまでの格子 QCD 研究で確立した手法を用いる。TC 模型の南部・Goldstone ボソンの崩壊定数はヒッグスの真空期待値と関係しているため、この関係を input として使うことによりカイラル凝縮をはじめ理論のオーバーオールスケールが決定される。系統誤差を正しく抑えるためには、有限体積効果の見積もりが重要であり、少なくとも2つの体積でシ

ミュレーションを実行する必要がある。当該部分の研究遂行において最も重要なことは、十分な計算資源の確保である。高エネルギー加速器研究機構のスーパーコンピュータシステム、及びその他の利用可能なシステムをフル活用すれば可能と思われるが、そのためには上述の計算結果が十分説得力のあるものでなければならない。従って、上述の数値的な研究に加え、LHC 実験の動向、現象論的研究の動向、他グループの動向にも注意を払いつつ、重要性を正しく認識しておく必要がある。この結果4年間で全てのステップを完遂することはできない可能性もあるが、仮に大規模シミュレーションを実現できなかったとしても十分インパクトのある成果を期待できる。従って、一つ一つ知識を積み上げていくことを本研究課題全般における基本的なスタンスとして取り組む。

4. 研究成果

(1)通常の2又は3フレーバーQCDでは、低エネルギー(赤外)領域で閉じ込めやカイラル対称性の破れを示すが、フレーバー数を徐々に増やしていきある臨界フレーバー数を越えると、それらの非摂動現象が起こらない(赤外領域での)共形的な理論になると考えられており、現象論からの要請により現実的なテクニカラー模型はその臨界数より少し小さいフレーバー数を持つ時に実現される。先行研究から臨界フレーバー数は8より大きく12より小さいことが示唆されていたため、10フレーバーのフェルミオンを持つQCD理論に着目し、そのゲージ結合定数のスケール依存性を調べた。結論を導くにはかなりの高統計を要したため時間がかかったが、赤外領域で結合定数はスケールに依存しなくなることを見だし、論文に纏め発表した。これにより、臨界フレーバー数 N_f^c は、 $8 < N_f^c < 10$ と狭めることができた。この種の計算では、4の倍数フレーバーしか取り扱えない staggered フェルミオンという格子フェルミオンを使うのが主流であるが、我々は Wilson フェルミオンを用い、4の倍数以外のフレーバー数での貴重な結果を提示した。次は質量異常次元の測定を行う。

(2)2フレーバーの随伴表現のフェルミオンを持つ $SU(N_c)$ ゲージ理論も現実的なテクニカラー模型の有力な候補である。先行研究では、カラーの数 $N_c=2$ の理論は共变的であることを示唆する結果が得られていた。そこで我々はこの理論のベータ関数が N_c に依らないことに着目し、 $N_c=3$ の理論を調べた。この極限を調べることの利点は、江口・川合等価性のため、体積が極端に小さい格子(例えば 1^4)でもダイナミクスを調べることができる点である。 2^4 のゲージ配位を生成し、格子上でカイラル対称性を厳密に保つオーバーラップ・ディラック演算子の固有値分布を調べカイ

ラル対称性の破れの有無を引き出せるかを調べた。まず手始めにクエンチ近似で near-zero モードの計算を行い、フェルミオンを持つ全自由度の内、割合でいって $(N_c-1)/N_c^2$ しか near-zero モードとして現れない、即ち低エネルギー物理現象に寄与せず、その原因もゲージ場の zero モードの個数と関連していることを見いだした。また、 N_c を増やしていった際の固有値間隔のスケールリング則が、bulk モードでは $1/N_c^2$ であるのに対し、near-zero では $1/N_c$ であることも指摘した。このスケールリング則がダイナミカルな理論でも正しいかは理論的に非常に興味深い問題であり、確かめるための計算が現在進行中である。

(3) $SU(2)$ のゲージ理論の研究は、純理論的に興味深いだけでなく、現実的なテクニカラー模型の候補の探索という意味でも意義がある。我々は6フレーバーを持つこの理論に着目し、そのベータ関数、及び低エネルギー質量スペクトラムを調べた。その結果、結合定数はスケール依存性を失い、スペクトラムもカイラル摂動論から予想される質量依存性とは異なる振る舞いを示したことから、この理論も赤外領域で共形的になることが分かった。質量異常次元も計算したが、その値は小さく現実的なテクニカラー模型としては排除されることが分かった。

(4)先述のように、QCD にフェルミオンを加えていくと、(赤外領域で)共变的になると考えられているが、このことは有限温度相転移もなくなることを意味する。このことを利用して臨界フレーバー数を決定することも原理的にできるはずである。一方、多フレーバーの理論を直接格子計算するのは計算コストが高く、あまり現実的ではない。しかしながら、フェルミオン質量が重ければ再加重法により任意の数のフレーバーを追加できる。このアイデアが機能するかを調べるため、軽い2フレーバーと重い N_f フレーバーを持つ $(2+N_f)$ フレーバーの系の熱的な性質を調べた。重い N_f フレーバーの質量を再加重法の適用範囲内で徐々に軽くしていくと、ある質量で系は1次相転移を示すはずである。実際に予想通りの現象を観測し、臨界質量を決定することができた。即ち、この簡便な手法の開発に成功し、Physical Review Letter にて発表した。現在は更にこれを応用し、QCD 分野における長年の問題である2-フレーバーQCDの相転移の次数の決定のための計算を行っている。

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14件)

1. T. Sato and N. Yamada, "More about vacuum structure of Linear Sigma Model", PoS LATTICE 2013, 430 (2013) [arXiv:1311.4621 [hep-lat]], <http://inspirehep.net/record/1265075> 査読無し
 2. M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, S. Takeda, M. Tomii and N. Yamada, "Lattice Study on quantum-mechanical dynamics of two-color QCD with six light flavors", Phys.Rev. D88 (2013) 094506, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.094506 査読有り
 3. M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, S. Takeda and N. Yamada, "Running coupling constant and mass anomalous dimension of six-flavor SU(2) gauge theory", Phys.Rev.D88, 094504 (2013), DOI: 10.1103/PhysRevD.88.094504 査読有り
 4. S. Ejiri and N. Yamada, "Endpoint of first order phase transition in many flavor lattice QCD at finite temperature and density", Phys.Rev.Lett. 110, 172001(2013), DOI:10.1103/PhysRevLett.110.172001 査読有り
 5. M. Hanada, J.-W. Lee and N. Yamada, "Large-Nc gauge theory and chiral random matrix theory", Phys.Rev.D88, 025046(2013), DOI:10.1103/PhysRevD.88.025046 査読有り
 6. M. Hayakawa, K.-I. Ishikawa, Y. Osaki, S. Takeda, S. Uno, N. Yamada, "Running coupling constant of ten-flavor QCD with the Schrodinger functional method", Phys.Rev.D83(2011)074509, DOI:10.1103/PhysRevD.83.074509 査読有り
 7. JLQCD and TWQCD Collaborations : H. Fukaya, S. Aoki, T.W. Chiu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, "Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice", Phys.Rev. D83 (2011) 074501, DOI:10.1103/PhysRevD.83.074501 査読有り
 8. T. Blum, R. Zhou, T. Doi, M. Hayakawa, T. Izubuchi, S. Uno, N. Yamada, "Electromagnetic mass splittings of the low lying hadrons and quark masses from 2+1 flavor lattice QCD+QED", Phys.Rev.D82(2010)094508, DOI:10.1103/PhysRevD.82.094508 査読有り
- [学会発表](計 22 件)
1. N. Yamada, "Exploring many-flavor QCD" using two-flavor configurations", JICFuS Mini-workshop on "Gauge theories with many flavors and related topics", YITP, Kyoto. March 10, 2014
 2. N. Yamada, "Exploring many-flavor QCD" using two-flavor configurations", SCGT14 mini, KMI, Nagoya. Feb. 7th 2014
 3. N. Yamada, "Study of SU(2) gauge theory with six flavors", SCGT14 mini, KMI, Nagoya. Feb. 7th 2014
 4. N. Yamada, "Phase Transition in Particle Physics", Invited Seminar, AIST, Tsukuba, Dec. 4th, 2013
 5. N. Yamada, "Why many flavor QCD is so interesting?", Invited Seminar, Shimane Univ. 2013.10.25
 6. N. Yamada, "有限温度多フレーバーQCDの相構造の研究(II)", 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 22 日@高知大学
 7. N. Yamada, "SU(2) gauge theory with 6-flavors", Origin of Mass 2013, CP3-Origins, SDU, Odense, Denmark, August 22, 2013
 8. N. Yamada, "Search for the endpoint of first order phase transition in many-flavor lattice QCD" The 31st International Symposium on Lattice Field Theory, Mainz, Germany 31th July 2013
 9. N. Yamada, "Phase structure of many flavor lattice QCD at finite

- temperature", Symposium on "Quarks to Universe in Computational Science", Nara Prefectural New Public Hall, Nara, 2012/12/13-16
10. N. Yamada, "Phase structure of many flavor lattice QCD at finite temperature", KMI/GCOE Workshop on "Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective", KMI, Nagoya, 2012/12/04-07
 11. N. Yamada, "Evaluation of hadronic contribution to muon g-2 by Lattice QCD", 6th g-2/EDM Experiment Collaboration meeting, KEK, 2012 Nov. 2
 12. N. Yamada, "g-2 --Recent progress on the lattice--", PPP2012, YITP, Kyoto, 2012.8.9
 13. N. Yamada, "muon g-2 --格子QCDからのアプローチ--", 斎藤研コロキウム, KEK, 2012.7.18
 14. N. Yamada, "Exploring Many Flavor QCD with Wilson Fermion", New Horizons for Lattice Computations With Chiral Fermions, BNL, 2012/05/16
 15. N. Yamada, "Searching for Walking Technicolor theory on the Lattice", Particle Physics Seminar at IPMU, Univ. of Tokyo, Feb. 17, 2011
 16. N. Yamada, "Search for Walking Technicolor theory using Lattice Gauge Theory", Particle Physics Seminar at Nihon University, Jan. 12, 2011
 17. N. Yamada, "Conformal window in many flavor QCD", International Symposium "From Quarks to Supernovae", Nov. 28-30, 2010, Atagawa Heights (Izu, Shizuoka, Japan)
 18. N. Yamada, "Revisiting Technicolor using lattice gauge theory" at RIKEN symposium "Lattice simulation on Next-Generation supercomputer", Sep. 25 2010, RIKEN
 19. N. Yamada, "Lattice Gauge Theories with Many Flavors" in Summer Institute 2010 "Particle Physics Phenomenology", Aug. 15, 2010, Fuji-Yoshida, Japan
 20. N. Yamada, "Searching for Walking Technicolor Theory Using Lattice", 金沢大学素粒子論研究室セミナー, 2010年6月25日, 金沢大学

[図書](計2件)

1. 堺井 義秀, 山田 憲和, 野尻 美保子,

- 「素粒子物理学」全238項、共立出版、2012年
2. 日本シミュレーション学会学会誌「シミュレーション」32巻1号(3月号)29頁-34頁

[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

山田 憲和 (Yamada Norikazu)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師
研究者番号: 50399432

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: