

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18340059

研究課題名（和文） 強結合ゲージ理論と質量の起源

研究課題名（英文） Strong Coupling Gauge Theories and Origin of Mass

研究代表者

山脇 幸一 (Koichi Yamawaki)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90135301

研究成果の概要：

質量の起源に対して、強結合ゲージ理論による複合ヒッグス模型を研究した。とくにウォーキングテクニカラー模型におけるSパラメーターをシュウィンガー・ダイソン方程式とベータ・サルピーター方程式に基づく直接的計算とホログラフィーの手法による方法とで評価し、いずれも実験との矛盾を緩和する方向性を見出した。また、トップクォーク凝縮を含む模型の可能性を分析し、新たな制限を見出した。国際会議SCGT06を開催した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2007年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

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：(1) ウォーキングテクニカラー (2) 対称性の力学的破れ (3) 隠れた局所対称性

(4) コンフォーマル固定点 (5) 強結合ゲージ理論 (6) ホログラフィックQCD

(7) 余剰次元 (8) 異常次元

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子の質量を「素」粒子としてのヒッグス粒子の凝縮によるものではなく、力学的に生成されたフェルミオン・反フェルミオン対の2次元的複合粒子の凝縮による模型の典型はQCDをそのままスケールアップしたテクニカラー理論であるが困難が生じた。これを回避するものとして、申請者らは大きな異常次元をもつコンフォーマル（保型的）な「ウ

ォーキングテクニカラー」を提唱し世界的流れを創出した。申請者らはさらに大きな異常次元をもつ理論の相構造を解明しそれに基づき「強結合ETCテクニカラー」、「トップクォーク凝縮」を提唱した。一方、申請者らは自らの独創した「隠れた局所対称性」の複合ゲージボソンの理論に基づき、「ベクターマニフェステーション」を提唱した。「隠れた局所対称性」はQCD物理のみならず「ム

ース、リトルヒッグス」「ヒッグスレス模型」「ホログラフィー」など最近の余剰次元によるヒッグス物理の中核に位置する概念となり盛んに研究されるに至っている。1988年以來 2002年まで4回の強結合ゲージ理論(SCGT)に関する名古屋国際会議(SCGT88、SCGT90、SCGT96、SCGT02)を開き、「異常次元の大きな対称性の力学的破れ」および「隠れた局所対称性」理論を世界標準として定着させるに至った。

LHCなどの実験の本格稼動を間近に控えこれらカイラル相転移による模型の検証が期待される状況になり、理論の発展が望まれていた。

## 2. 研究の目的

本研究計画は、素粒子の質量を‘素’粒子としてのヒッグスボソンによるものではなく、核子・ハドロン質量と同様に下部の基本理論(強結合ゲージ理論)における力学的質量すなわちカイラル相転移として統一的に解明することを目的とする。そこでは“ヒッグスボソン”は、力学的に生成されたフェルミオン・反フェルミオン対の2次元的な複合粒子となる。ヒッグスボソンの物理をハドロンの物理と同じ視点で解明する。両者いずれの発展も他方のブレークスルーを促すのが本研究計画の最大の特長である。

LHCのヒッグスボソン探索実験に照準をあわせて、申請者らの提唱した「ウォーキングテクニカラー」や「強結合ETCテクニカラー」、「トップクォーク凝縮」などの「大きな異常次元をもつ対称性の力学的破れ」を詳細な模型構築と現象論を通じて検証する。

さらに自らの独創した「隠れた局所対称性」理論と余剰次元理論のデコンストラクション、ホログラフィーとの関連での模型構築などを推し進める。

また、「隠れた局所対称性」理論に基づき、すでに新しいタイプのカイラル相転移「ベクターマニフェステーション」を提唱したが、さらに理論的検討を加え有限温度・密度QCDにおけるカイラル相転移の実験的検証を目指す。

これらに関して第5回名古屋国際会議SCGT06を開催しさらに理論の発展を図る。

## 3. 研究の方法

質量の起源を探るため申請者らが20数年来開拓してきた強結合ゲージ理論におけるカイラル相転移の研究を総合的に推し進め、LHC・ILCにおける複合ヒッグス模型の検証とRHIC・J-PARCにおける有限温度・密度QCDのカイラル相転移の検証に備える。

保型相転移点でのウォーキング/保型・テクニカラーや、余剰次元の場合を含めて強結合

ゲージ理論の相構造の解明を、主にシュウィンガー・ダイソン方程式およびベータ・サルピーター方程式による分析や「隠れた局所対称性」など有効理論による分析など、過去の大きな成果の延長として強力に推し進める。とくにSパラメーターの問題をこれらの手法のみならずゲージ・重力対応によるホログラフィーの手法(ホログラフィックQCD)の手法で解明する。

名古屋ワークショップSCGT(第5回)を開催する。LHCに照準を合わせ、 $t$  Hooftなどノーベル賞学者を含む世界のトップレベルの研究者を結集して理論的な可能性を徹底的に検討する。

## 4. 研究成果

質量の起源を力学的に解明する模型として、テクニカラー模型を拡張したETC(Extended Technicolor)にウォーキングテクニカラー模型とトップクォーク凝縮模型(トップモード模型)とを組み込む「トップモードETC模型」の構築を試みた。トップクォーク凝縮なしのウォーキングテクニカラーの従来の模型の困難を明らかにし、トップクォーク凝縮を組み込む場合の困難の分析から新しい可能性としてテクニフェルミオンとクォーク・レプトンを別のトップカラーに配置するETC模型を提唱した。さらにトップクォーク凝縮の臨界力学のためにトップパイオンの質量が従来の評価より遥かに小さくなることを発見した。(深野・山脇)

テクニカラー模型の困難であるSパラメーターのウォーキングテクニカラーにおけるシュウィンガー・ダイソン方程式およびベータ・サルピーター方程式による評価を、ETCによる4体フェルミ相互作用をいれて解析した(倉知-Shrock-山脇)。

また、同じ問題をゲージ・重力対応によるホログラフィーの手法で解析する一般的系統的な方法を提案した。また従来の断片的な研究結果がテクニフェルミオン凝縮のくりこみ点依存性を正しく扱っていない点に起因することを明らかにした。(羽場・松崎・山脇)。

ノーベル賞受賞者G. 't Hooftらトップクォークの研究を結集した国際ワークショップ「質量の起源と強結合ゲージ理論」(SCGT 06)を2006年11月に開催し、プロシーディングスをWorld Scientific社から出版した。今後の発展に重要な発表の記録を収録した。

また、益川敏英、小林誠、G. 't Hooftらを含む世界の指導的研究者多数の参加を得て「坂田模型50年記念シンポジウム」を2006年11月に開催し、プロシーディングスをProgress of Theoretical Physics, Supplementとして

出版した。クォーク模型の原型として大きな歴史的役割を果たした坂田模型発表50年にちなんで興味深い発表を収録した。ここには病気で出席をキャンセルした南部陽一郎の発表予定原稿も掲載されている。小林・益川理論に結実した坂田学派の複合模型の教訓を学ぶのに重要な歴史的証言も収録されている。

#### 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 3 件)

1. “S Parameter in the Holographic Walking/Conformal Technicolor”  
K. Haba, S. Matsuzaki and K. Yamawaki  
Prog.Theor.Phys.120:691-721,2008. Refereed
2. “Anatomy of Top-Mode Extended Technicolor Model.”  
H. Fukano and K. Yamawaki  
Prog.Theor.Phys.119:429-460,2008. Refereed
3. “Z Boson Propagator Correction in Technicolor Theories with ETC Effects Included”  
M. Kurachi, R. Shrock and K. Yamawaki  
Phys.Rev.D76:035003,2007. Refereed

[学会発表] (計 8 件)

1. 山脇幸一  
「対称性の力学的破れの物理とその発展」  
日本物理学会第64回年次大会、南部陽一郎氏ノーベル物理学賞受賞記念シンポジウム、  
2009年3月26日-29日 (立教大学)  
2009年3月27日
2. 山脇幸一  
“Quest for Dynamical Origin of Mass”  
湯川国際セミナー(YKIS), 2009年1月26日  
-3月25日 (京都大学基礎物理学研究所)  
2009年1月26日
3. 羽場一基  
“S-Parameter in Large  $N_f$  QCD from Vertex Ansatz”  
日本物理学会2008年大会  
2008年9月20日-23日 (山形大学)  
2008年9月22日
4. 山脇幸一  
“Conformal Phase Transition and Large  $N_f$  QCD”  
Mini-Workshop on Large  $N_f$  QCD  
12-13 May, 2008, Nagoya University

12 May, 2008

#### 5. 山脇幸一

“Holographic Walking/Conformal Technicolor”  
Workshop on From Strings to Things:  
String Theory Methods in QCD and  
Hadron Physics,  
24 March – 6 June, 2008  
Institute for Nuclear Theory, University of  
Washington, Seattle, USA  
17 April, 2008

#### 6. 山脇幸一

“Holographic QCD from the view of  
Hidden Local Symmetry and Walking/  
Conformal Technicolor”  
Radcliffe Institute for Advanced Study  
Exploratory and Advanced Seminars on  
Higgsless Electroweak Symmetry Breaking in  
the Large Hadron Collider - Era,  
31 July - 4 August, 2007, Harvard  
University, USA  
2 Aug. 2007

#### 7. 山脇幸一

“Walking over the Composites – In the  
Spirit of Sakata - ”  
2006 International Symposium: The Jubilee  
of the Sakata Model  
25-26 Nov., 2006  
Nagoya University, Nagoya, Japan  
26 Nov., 2006

#### 8. 棚橋誠治

“Higgsless Models and Deconstruction”  
International Workshop: Origin of Mass and  
Strong Coupling Gauge Theories  
(SCGT 06)” 21-24 Nov., 2006  
Nagoya University, Nagoya, Japan  
23 Nov., 2006

#### 9. 深野秀徳

“Toward a Top-Mode ETC”  
International Workshop: Origin of Mass and  
Strong Coupling Gauge Theories  
(SCGT 06)” 21-24 Nov., 2006  
Nagoya University, Nagoya, Japan  
23 Nov., 2006

#### 10. 菊川芳夫

“Electroweak Theory on the Lattice with  
Exact Gauge Invariance”  
International Workshop: Origin of Mass and  
Strong Coupling Gauge Theories  
(SCGT 06)” 21-24 Nov., 2006

Nagoya University, Nagoya, Japan  
22 Nov., 2006

11. 原田正康

“Dropping  $\rho$  and A1 Meson Masses at the Chiral Phase Transition in the Generalized Hidden Local Symmetry”  
International Workshop: Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories (SCGT 06)” 21-24 Nov., 2006  
Nagoya University, Nagoya, Japan  
21 Nov., 2006

12. 杉本茂樹

“Mesons and Baryons from String Theory”  
International Workshop: Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories (SCGT 06)” 21-24 Nov., 2006  
Nagoya University, Nagoya, Japan  
21 Nov., 2006

[図書] (計 4 件)

1. 原田正康、大貫義郎、沢田昭二、山脇幸一 (編集)  
理論物理学刊行会  
“Proceedings of International Symposium pn  $\Lambda$  50 The Jubilee of the Sakata Model” Progress of Theoretical Physics, Supplement No. 167, 2007 (178 pages, text)

2. 山脇幸一

理論物理学刊行会  
“Proceedings of International Symposium pn  $\Lambda$  50 The Jubilee of the Sakata Model” Progress of Theoretical Physics, Supplement No. 167, 2007 原田正康、大貫義郎、沢田昭二、山脇幸一 (編集)  
“Walking over the Composites – In the Spirit of Sakata - ” Page 127-143

3. 原田正康、棚橋誠治、山脇幸一 (編集)

World Scientific Publishing Company, Singapore, 2007  
“Proceedings of International Workshop: Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories (SCGT 06)”  
(424 pages, text)

4. 深野秀徳、山脇幸一

World Scientific Publishing Company, Singapore, 2007  
Proceedings of International Workshop: Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories (SCGT 06) 原田正康、棚橋誠治、山脇幸一 (編集)  
“Toward a Top-Mode ETC” Page 314-324

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山脇 幸一 (Koichi Yamawaki)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：90135301

(2) 研究分担者

棚橋 誠治 (Masaharu Tanabashi)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：00270398

原田 正康 (Masayasu Harada)  
名古屋大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：40311716

前川 展祐 (Nobuhiro Maekawa)  
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：40273429

(3) 連携研究者

上原 正三 (Shozo Uehara)  
宇都宮大学工学部・教授  
研究者番号：20168652

菊川 芳夫 (Yoshio Kikukawa)  
東京大学総合文化研究科・准教授  
研究者番号：20252421

杉本茂樹 (Shigeki Sugimoto)  
東京大学数物連携宇宙機構・教授  
研究者番号：80362408