

対称性の破れとゲージダイナミクス Symmetry Breakings and the Gauge Dynamics

益川 敏英 (MASUKAWA TOSHIHIDE)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・特別教授



研究の概要

素粒子物理学における標準模型を超える新理論の発見と LHC 実験等での検証のため、対称性とその破れの起源についてゲージダイナミクスを通じて探求する。とくに質量の起源を担うヒッグス粒子の解明のため、現象論的・模型的研究と平行して、ゲージダイナミクスの研究を従来の解析的方法と新たに導入された専用計算機を用いた数値実験の両面から推進する。

研究分野：理工系・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：素粒子（理論）

1. 研究開始当初の背景

対称性の破れをコンフォーマル対称性（スケール不変性）のあるゲージダイナミクスで力学的に生成する仕事は、研究代表者らによって創始され、これが分担者山脇らによって複合ヒッグス模型に適用されて「ウォーキング・テクニカラー」として世界的に発展している。LHC 実験の稼働を目前にして複合ヒッグス模型の LHC での検証のため、従来の解析的方法のみならず、より信頼性の高い計算機数値実験での研究が求められていた。

2. 研究の目的

「ウォーキング・テクニカラー」は結合定数がスケールに依らず一定のため 1 に近い大きな異常次元を持ち、さらにこのスケール不変性のため軽い複合ヒッグス粒子（「テクニディラトン」）を予言する。この予言を、従来の解析的方法のみならず、より信頼性の高い計算機実験など多彩な方法で詳細に研究し、LHC 等による実験的検証を行う。他の複合ヒッグス模型も合わせ研究する。

3. 研究の方法

対称性の破れの非線型表現の一般論に加えて、「はしご近似」「ホログラフィー」などダイナミクスの解析的方法により、ウォーキング・テクニカラーで予言されるテクニディラトンやテクニパイオンなど軽い複合粒子の質量、結合の強さなどを調べて LHC 実験等で検証する。一方、より直接的で信頼性のある理論的方法で探求するため、候補としてのフレーバー数の大きな QCDなどを計算機実験で研究する。

4. これまでの成果

A) テクニディラトンと LHC 実験。

分担者山脇・松崎はウォーキング・テクニカラーにおけるカイラル対称性およびスケール不変性の両者の非線型表現を考察し、「はしご近似」「ホログラフィー」などに基づき、複合ヒッグス粒子「テクニディラトン」をはじめ「テクニパイオン」「テクニ ρ メソン」などの質量および結合定数を計算して最新の LHC 実験におけるウォーキング・テクニカラー模型の実験的検証を行った。

とくに最近 LHC で発見された 125 GeV の質量をもつヒッグス粒子はテクニディラトンと同定できることを発見した。とくに標準模型のヒッグスの予言がずれている 2 光子チャンネルのデータはテクニディラトンが自然に説明することを示した。はしご近似に基づく論文は、3 篇 (Phys. Rev. D に 2 篇、Phys. Lett. B に 1 篇)、ホログラフィーに基づく論文は 1 篇 (Phys. Rev. D)。

さらにウォーキング・テクニカラーにおけるテクニパイオンの LHC での検証についても考察した (Phys. Rev. D)。

B) 計算機実験によるウォーキング・テクニカラーの研究。

代表者益川および分担者山脇、青木、柴田ならびに本研究で雇用された特任助教を含む素粒子宇宙起源研究機 (KMI) の格子数値実験グループ (「LatKMI Collaboration」) は、H23年3月 KMI に導入された専用計算機「ファイ」を用いて標準模型を越える理論の探索を目指してその候補としてのフレーバー

数の大きな QCD の数値実験を行ってきた。

格子理論としてはスタガードフェルミオンを採用し、先行する研究との差別化を図るため、QCD の異なるフレーバー数 $N_f=4,8,12,16$ を同じセッティングで複合状態のスペクトルを測定・解析し系統的に比較研究する方針をとった。また、フレーバー数の大きな QCD の計算機実験では初めて HISQ (Highly Improved Staggered Quark) アクションを採用し格子理論の離散化誤差、スタガード特有の“フレーバー”対称性の破れを無視できる程度に抑え信頼性の高い結果を得た。

まず格子サイズ、フェルミオン質量の他、結合定数 β についても複数の値で最適パラメータ探索の後、データの解析を続け、H 2 2、2 3 年の Lattice Conference で発表した。

$N_f=12$ については、赤外固定点を持つコンフォーマルな (カイラル対称性の破れていない) 理論で異常次元の値は約 0.4 との結果を Physical Review D (PRD) に発表した。 $N_f=8,4$ との比較において説得的に分析し、さらに異常次元の普遍的な値を得るためにはフェルミオン質量の高次項補正を系統的に考慮する必要があることを、上記論文に先立ち PRD に発表したシュウィンガー・ダイソン方程式に基づく具体的な模型考察から指摘した。これにより $N_f=12$ に関してはコンフォーマルという結論が業界で定着した。

そこで $N_f=8$ がウォーキング・テクニカラーの候補となった。実際、これは模型構築上自然で、LHC 実験とも整合する。 $N_f=8$ の場合には、フェルミオン質量の非常に小さい領域でカイラル対称性の自発的破れの効果が見てとれる一方、自発的破れの程度よりもフェルミオン質量が少し大きい“中間領域”ではコンフォーマルの名残りが残り異常次元もほぼ 1 に近いことを示した。ウォーキングとしての期待される性質を示したのは我々が最初である。(PRD に論文投稿中)。

さらに大きな成果は、 $N_f=12$ の場合に他の複合粒子のどれよりも軽いフレーバー 1 重項のスカラー粒子を観測したことである。 $N_f=8$ の場合にも、フェルミオン質量の“中間領域”でこのスカラー粒子が他の複合粒子より軽いパイと同程度の質量を観測した。これにより複合ヒッグス粒子としてのテクニディラトンの候補となりうる軽いフレーバー 1 重項のスカラー粒子の兆候を世界で初めてとらえることに成功した。本研究計画の一環として開催した H 2 4 年 1 2 月の KMI 国際会議 SCGT 12、H 2 5 年 3 月の Moriond 会議、日本物理学会などで発表した。さらにエディンバラ大学に新設の Higgs Centre の国際会議で 4 月 2 4 日会議の opening talk として発表の予定。

一方、分担者早川は別のグループでウィルソンフェルミオンに基づく $N_f=10$ の計算機実験を“ファイ”で行い、結合定数の測定で赤外固定点を示す結果を PRD に発表した。

5. 今後の計画

これまでの成果 A), B) に引き続き

A) ウォーキング・テクニカラーの LHC 実験での検証、とくに複合ヒッグス粒子としてのテクニディラトンなどの複合粒子の性質を詳細に調べ、2 年後再開する LHC 実験の精密測定に備える。分担者山脇らの提唱した「トップクォーク凝縮模型」「隠れた局所対称性」など関連する複合模型を含め検討する。

B) さらに統計を上げて、ウォーキング・テクニカラーの格子理論の計算機実験による理論的検証とくに $N_f=8$ の QCD においてテクニディラトンの候補としての軽い複合スカラー粒子 (および他の軽い複合粒子) の質量および結合の強さなどを詳細に研究する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

[1]. Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K-i. Nagai, H. Ohki, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki,

“Exploring walking behavior in SU(3) gauge theory with 4 and 8 HISQ quarks”, PoS LATTICE2012, 035-141 (2012).

[2]. Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K-i. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki,

“The scalar spectrum of many-flavour QCD”, to appear at the Proceedings of the workshop SCGT 12, arXiv:1302.4577, 1-9 (2013).

[3]. S. Matsuzaki, K. Yamawaki,

“Is 125 GeV techni-dilaton found at LHC?”, Phys. Lett. B719, 378-382 (2013).

[4]. J. Jia, S. Matsuzaki, K. Yamawaki, “Walking techni-pions at LHC”, Phys. Rev. D87, 16006, 1-14 (2013).

[5]. S. Matsuzaki, K. Yamawaki, “Holographic techni-dilaton at 125 GeV”, Phys. Rev. D86, 115004, 1-12 (2012).

[6]. Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K-i. Nagai, H. Ohki, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki, “Lattice study of conformality in twelve-flavor QCD”, Phys. Rev. D 86, 054506, 1-19 (2012).

[7]. S. Matsuzaki, K. Yamawaki, “Discovering 125 GeV techni-dilaton at LHC”, Phys. Rev. D86, 35025, 1-17 (2012).

[8]. Y. Aoki, T. Aoyama, M. Kurachi, T. Maskawa, K-i. Nagai, H. Ohki, A. Shibata, K. Yamawaki, T. Yamazaki, Phys. Rev. D85, 074502, 1-13 (2012).

“Study of the conformal hyperscaling relation through the Schwinger-Dyson equation”

ホームページ等

<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/Projects/SCGT/>