

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740165

研究課題名(和文) 超対称性および電弱対称性の破れとLHCの物理

研究課題名(英文) Supersymmetry breaking, Electroweak symmetry breaking and LHC physics

研究代表者

北野 龍一郎 (Kitano, Ryuichiro)

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・教授

研究者番号：50543451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：電弱対称性の破れの背後には、なにかしら大きな枠組みが潜んでいるであろうというのが、大方の素粒子論研究者の予測(期待)である。本研究では、ヒッグス粒子の起源に時空の対称性である超対称性があるという仮説に着目し、新しい可能性の追求とその検証方法の考察を行った。

本研究では、様々なアプローチからその全体像に迫った。主な成果として、ワインバーグ和即とよばれる、超対称性の破れに付随して現れる粒子の相互作用と質量に関するルールの導出、ヒッグス場が力学的にポテンシャルを獲得する機構の発見(Partially Composite Higgs)、超重力子が暗黒物質となるシナリオの構成などがある。

研究成果の概要(英文)：It is widely believed among particle theorists that there is some larger framework behind the electroweak symmetry breaking via the Higgs mechanism. In this research, we consider the possibility that the deeper stage of the theory possesses supersymmetry.

In this research, we have approached to the picture of supersymmetric world from various directions. We have first considered the rules which should be obeyed in all class of the supersymmetry breaking models. Such universal rules, the (super) Weinberg sum rules, have been derived which are relations among the strength of the interactions and masses of the particles. We have also constructed a model in which the Higgs field obtains its potential through a supersymmetry dynamics (Partially Composite Higgs). In the approach from the cosmology, we have discussed a new possibility that the dark matter of the Universe is explained by the gravitinos (the superpartner of the graviton) produced in the early Universe.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論

1. 研究開始当初の背景

LHC 実験によりヒッグス粒子が発見される以前から、その存在は有力視されていた。しかし、ヒッグス場やその真空期待値の起源に関しては謎だらけであり、標準模型を含むより大きな枠組みを探ることは、素粒子物理学の1つの方向性を与えている。ヒッグス場を内在する枠組みとして、これまで、さまざまな模型が提案されてきた。超対称標準模型もその一つで、超対称性は、「ヒッグス場がなぜ、電弱スケールで真空を複雑化するか？」という問いに自然な説明を与える要素を持っている。当時、本格的始動したばかりの LHC 実験では、ヒッグス粒子の探索とともに、様々な手法を用いた超対称粒子の探索が行われていた。ただ、超対称模型にも、様々な理論的動機から多様なものがあり、どのようなシグナルを探すべきか、模型ごとの考察が必要であった。

2. 研究の目的

電弱対称性の破れの背後には、なにかしら大きな枠組みが潜んでいるであろうというのが、大方の素粒子論研究者の予測(期待)である。それが何であるのか、LHC 実験はまさに今、発見しようとしている。本研究では、その有力候補である超対称性を LHC 実験でどう探索すべきか新しい視点から考察をする。自然界では超対称性は自発的に破れた形でしか存在できない。また、超対称性の発見を予測する理論的動機は「電弱対称性の破れ」との関連である。これら二つの対称性の破れがどう関連しているのかに着目し、模型の構築を通じてその探索法・検証法を議論する。

3. 研究の方法

「模型構築」「シグナルベース」「有効理論」の3つのアプローチによって、超対称模型の理論的考察と実験的検証方法を探る。「模型構築アプローチ」では、「超対称トップカラー模型」を構築し、その予言を調べるところから始める。この模型には、ヒッグス場が複合場として現れるが、そのほかにもさまざまな新粒子を予言する。これらの発見方法を議論する。「有効理論アプローチ」では超対称性の破れのセクターのカレントの2点関数間にある関係式「超ワインバーグ和則」の導出を試みる。これを、「隠れた重力」の拡張である、「隠れた超重力」のラグランジアンに適用して、実験での検証方法を議論する。

4. 研究成果

超対称性の破れが電弱対称性の破れを引き起こしているという仮説は魅力的なものであるが、実際に理論を構築しようとする

様々な可能性が考えられる。超対称性の破れが非常にミクロなスケールで起こりその小さな影響が電弱対称性を引き起こす場合、超対称性の破れと電弱対称性の破れが同じ力学的機構の場合などが考えられ、どの模型も興味深い。

そこで、本研究では模型によらずに成り立つような、超対称性の破れの一般的性質を調べた。特に、超対称性を破るセクターの粒子たちが従うべき法則を QCD のワインバーグ和則にならって導出した。これらは、超対称性の破れの有効理論を構築する際に、制限をあたえる。また、超対称性の破れのセクターを実験で直接観測できるような理論の場合には、和則の確認は超対称性の証拠となりうる。これらの結果は論文にまとめ、Physical Review 誌に掲載された。

また、具体的模型の構築として、ヒッグス場のポテンシャルが TeV エネルギースケールにおける力学的機構により生成される超対称模型についての新しい枠組み「Partially Composite Higgs in Supersymmetry」を提唱した。この枠組みでは電弱対称性の破れを引き起こすセクターのダイナミクスが電弱対称性自身によって引き起こされるいわば自己無撞着なシステムとなっている。この新しい可能性は今まで考えられていた模型よりも電弱対称性の破れが自然に説明できることを示した。

また、その枠組みの応用として、ヒッグス場が M 理論のような超対称余剰次元理論から出現した可能性について考察した。超対称ゲージ理論における双対性を応用することによって具体的模型の構築が可能であり、その結果、ヒッグス粒子やトップクォークの質量などの現在の実験結果をよく説明できることを示した。

一方、ヒッグス場による電弱対称性の破れと QCD における閉じ込め、およびカイラル対称性の自発的破れの類似性に着目し、ヒッグス場の背後には、何かしらの強結合理論が隠れている可能性に関する理論的研究を行った。まずは、QCD のより深い理解を目指した研究を行った。超対称ゲージ理論の非摂動的性質がよく知られていることを利用した、QCD におけるクォーク閉じ込めの新しい解釈を提案した。特に、超対称ゲージ理論に超対称性を破る効果を摂動として導入して QCD の性質を理解することを試みた。これによって、実際に QCD の低エネルギー理論と同じ構造を発見することができ、また、そのとき、中間子が QCD の Magnetic 描像におけるゲージ粒子であると同定されることをみた。これはすなわち、中間子が質量をもつ機構の双対描像がクォーク閉じ込めであるということを示唆していて、興味深い。これらの成果は論

文にまとめ、JHEP 誌に掲載された。

その研究をさらに進め、高い超対称性 ($N=2$) を持つゲージ理論の厳密解、サイバーク・ウィッテン曲線を用いた考察から、現実の QCD における閉じ込めやカイラル対称性の破れが、双対ゲージ理論におけるカラー自由度とフレーバー自由度のロッキング現象で説明できる可能性について指摘した。この研究を応用して、ヒッグス場の起源に迫る可能性についても考察し、国際研究会などで発表した。

また、超対称模型の宇宙論についての研究も行った。この研究では、超対称性を破るセクターにある擬モジュライ粒子の宇宙初期における挙動を計算し、さらに、その粒子の崩壊によって、宇宙における暗黒物質や輻射が生成されるシナリオを構成した。具体的なゲージ媒介模型に適用した計算により、現在の宇宙の観測と無矛盾な宇宙論的シナリオが可能であることを示した。

また、それに関連して、初期宇宙で超重力子が熱的に生成される過程についての詳細な計算を行った。これまでに重要視されていなかった、メッセンジャー場の寄与や超対称性の破れに付随する擬モジュライ粒子の崩壊過程などを考慮すると、宇宙の再加熱温度が高くできる可能性を指摘し、これにより、熱的に宇宙のバリオン数生成が可能であることも示した。最新の LHC 実験結果を考慮することにより、上記のシナリオが現実的なものであることを示した。

ヒッグス場と宇宙における暗黒物質との関連も調べた。右巻きニュートリノが暗黒物質である可能性と、宇宙のインフレーションおよびバリオン数生成機構の整合性を調べ、暗黒物質の質量が PeV 領域であると整合性が保たれることを示した。これにより、IceCube 実験において観測された PeV エネルギーの宇宙ニュートリノが暗黒物質の崩壊によって説明できる可能性を指摘した。

また、ヒッグス場が南部 = ゴールドストーン粒子として出現する複合ヒッグス場模型において、暗黒物質がヒッグス場のポテンシャルを生成する可能性についても調べた。現在の暗黒物質の残存量を説明するパラメータ領域と、ヒッグス粒子の質量との間に非自明な整合性があることを発見し、今後の暗黒物質探索実験において検証可能であることを指摘した。

さらに、暗黒物質の正体の様々な可能性を考え、残存量から暗黒物質とヒッグス場との相互作用の大きさを模型ごとに調べ、その検証可能性を調べた。特に、今後の電子や中性子の電気双極子モーメントの探索実験や、国際リニアコライダー実験において、多くの模型

を検証し、また区別できることをみた。

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 14 件)
(すべて査読有)

1. Discrimination of dark matter models in future experiments, Tomohiro Abe, Ryuichiro Kitano, Ryosuke Sato, Phys.Rev. D91 (2015) 9, 095004.

2. Partially Composite Dark Matter, Masaki Asano, Ryuichiro Kitano, JHEP 1409 (2014) 171.

3. Neutrino Universe, Tetsutaro Higaki, Ryuichiro Kitano, Ryosuke Sato, JHEP 1407 (2014) 044.

4. Gravitino thermal production revisited and a new cosmological scenario of gauge mediation, Hiraku Fukushima, Ryuichiro Kitano, JHEP 1401 (2014) 081.

5. Quark confinement via magnetic color-flavor locking, Ryuichiro Kitano, Naoto Yokoi, JHEP 1311 (2013) 129.

6. Phenomenology of Partially Composite Standard Model, Tomohiro Abe, Ryuichiro Kitano, Phys.Rev. D88 (2013) 1, 015019.

7. Emergent Higgs from hidden dimensions, Ryuichiro Kitano, Yuichiro Nakai, JHEP 1304 (2013) 106.

8. Minimal Dilaton Model, Tomohiro Abe, Ryuichiro Kitano, Yasufumi Konishi, Kin-ya Oda, Joe Sato, Shohei Sugiyama, Phys.Rev. D86 (2012) 115016.

9. Cosmologically viable gauge mediation, Hiraku Fukushima, Ryuichiro Kitano, Fuminobu Takahashi, JHEP 1302 (2013) 140.

10. Partially Composite Higgs in Supersymmetry, Ryuichiro Kitano, Markus A. Luty, Yuichiro Nakai, JHEP 1208 (2012) 111.

11. Making confining strings out of mesons, Ryuichiro Kitano, Mitsutoshi Nakamura, Naoto Yokoi, Phys.Rev. D86 (2012) 014510.

12. Spectral-Function Sum Rules in Supersymmetry Breaking Models, Ryuichiro Kitano, Masafumi Kurachi,

Mitsutoshi Nakamura, Naoto Yokoi,
Phys.Rev. D85 (2012) 055005.

13. Hidden local symmetry and color
confinement, Ryuichiro Kitano, JHEP 1111
(2011) 124.

14. On Supersymmetric Effective Theories
of Axion, Tetsutaro Higaki, Ryuichiro
Kitano, Phys.Rev. D86 (2012) 075027.

〔学会発表〕(計 15 件)
(講演者はすべて研究代表者)

1. "Hidden Local Symmetry as magnetic
gauge theory," at the Sakata Memorial KMI
Workshop on "Origin of Mass and Strong
Coupling Gauge Theories," (SCGT15),
March 3-6, 2015, Nagoya University, Nagoya,
Japan.

2. "Emergent Higgs," at the Solvay
workshop on "Exploring Higher Energy
Physics," November 4-6, 2013, ULB,
Brussels, Belgium.

3. "SUSY+beyond," at the Tohoku Forum
for Creativity, "Particle Physics and
Cosmology after the discovery of Higgs
boson," October 21 - 25, 2013, Sendai,
Miyagi, Japan.

4. "Flavor structures and new physics,"
at the 12th Asia Pacific Physics
Conference of AAPPs, July 14 - 19, 2013,
Makuhari, Chiba, Japan.

5. "Emergent Higgs and Color
Confinement," at the GGI workshop
on "Beyond the Standard Model after the
first run of the LHC", May 20 - July 12,
2013, Florence, Italy.

6. 「標準模型を超えた物理 vs LHC」, 日本
物理学会シンポジウム「LHC によるテラスケ
ールの物理の展開」, 2013年3月27日

7. "Partially Composite Higgs in
Supersymmetry," at the KMI-GCOE Workshop
on "Strong Coupling Gauge Theories in the
LHC Perspective (SCGT 12)", December 4-7,
2012, Nagoya, Japan.

8. "SUSY vs LHC," at the Hadron Collider
Physics Symposium 2012, November 12-16,
2012, Kyoto, Japan.

9. 「ヒッグス機構の背後の理論」, 日本物理
学会企画講演、2012年9月13日

10. "Hadron physics as Seiberg dual of

QCD," at Summer Institute 2012,
August 18-24, 2012, Sun Moon Lake, Taiwan.

11. "Hadron physics as Seiberg dual of
QCD," at SUSY 2012, the 20th International
Conference on Supersymmetry and the
Unification of Fundamental Interactions,
August 13-18, 2012, Beijing, China.

12. "Higgs mechanism as a magnetic
picture of dynamical symmetry breaking,"
at the Santa Fe 2012 Summer Workshop, "LHC
now," July 9-13, 2012, Santa Fe, New
Mexico, USA.

13. "Higgs mechanism as a magnetic picture
of dynamical symmetry breaking
(supertopcolor model)," at the KMI
Mini-Workshop on "Conformality in Strong
Coupling Gauge Theories at LHC and
Lattice" (SCGT12Mini), March 18-20, 2012,
Nagoya, Japan.

14. "Higgs mechanism and confinement,"
at the International Workshop on Grand
Unified Theories, March 15-17, 2012, Kyoto,
Japan.

15. "Supertopcolor," at SUSY
Breaking '11, May 16-21, 2011, CERN,
Geneva, Switzerland.

〔その他〕

スクール講義:

「ヒッグス粒子と新物理」, 国際基督教大学、
2014年2月18日

「標準模型を超えた物理」, 中部夏の学校、
2013年9月1日~3日、山中湖

高エネルギー物理 春の学校 2013、
2013年5月31日

一般講演:

「ヒッグス粒子を超えて」, 早稲田大学、
2013年10月27日

「ヒッグス粒子を超えて」, 東京工業大学、
2013年11月9日

「ニュートリノと宇宙の謎」, 高エネルギー
加速器研究機構、2013年12月21日

「ヒッグス粒子に迫る」, 東京大学、2012年
9月1日

「ヒッグス粒子の謎」, 東京大学、2012年3
月31日

その他:

月刊「化学」にノーベル賞の解説記事を掲載

日本評論社の単行本「物理学ガイダンス」に
素粒子論の研究についての記事を掲載

BS ジャパン「咲くシーズン」に出演（2014年3
月15日放送）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北野 龍一郎 (KITANO, Ryuichiro)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・教授

研究者番号：50543451