

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21840006

研究課題名（和文） 超対称性の破れとその現象論的応用に関する研究

研究課題名（英文） Supersymmetry breaking and its application to phenomenology

研究代表者

北野 龍一郎 (KITANO RYUICHIRO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50543451

研究成果の概要（和文）：超対称性がマイクロな世界にあらわれているという仮定は、理論的に美しく、長年議論されてきたテーマである。本研究では、超対称性の破れがヒッグス粒子やトップクォークとどのように結合しているかに着目し、その理論的定式化と現象論への応用について研究した。理論的な側面として「隠れた重力」模型の構築に成功した。また、スカラートップクォークのコライダー現象論や、超対称トップカラー模型の構築も成しとげた。

研究成果の概要（英文）：Supersymmetry has been studied as a possible symmetry of nature which appears at a very short distance scale. We have considered various possibilities for the coupling of the Higgs/top quarks to the supersymmetry breaking sector. On the theoretical side, we have constructed the “Hidden Gravity” model, and studied applications to the collider physics. We have also studied the collider phenomenology of the scalar top quarks, and the model building of the supersymmetric topcolor scenario.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,090,000	327,000	1,417,000
2010年度	990,000	297,000	1,287,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,080,000	624,000	2,704,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子論

## 1. 研究開始当初の背景

電弱対称性の破れを自然に引き起こすために超対称性が重要な役割を果たすという仮説は1980年代から考えられてきた魅力的なものである。この仮説の最も重要な点は、超対称性が自発的に破れていることと、それが電弱対称性の破れを引き起こすことである。しかし、その両方の部分において、完全に満足のいく模型が提唱されていないのが実情である。

そこで、これまで、様々な研究がなされてきた。フレーバー変換過程やCP非保存過程からの制限から、超対称性の破れのセクターがフレーバーと無関係なものであるような模型が考えられたり、また、大統一理論の示唆から、それと超対称性の破れとの関係に着目した研究などがなされてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、電弱対称性の破れに着目し、それが超対称性の破れとどのように関連しているかについて広い視野から考察するのが目的である。

超対称性の破れのメカニズムや、その電弱対称性の破れとの関連の詳細をバイパスし、広い模型の範囲に適用できる有効理論の構築とその現象論的応用（予言）を調べる。

### 3. 研究の方法

低エネルギー有効理論の構築においては、非線形な超対称理論と線形な超対称理論を結合させる方法の構築から行った。非線形な超対称ラグランジアンは、古くから知られているが、それを線形なセクターと結合させる簡単な形式化が必要である。そこで、非線形超対称ラグランジアンを超空間に埋め込む方法を調べた。QCDのアナロジーとして、超対称性の破れのセクターに現れるハドロンについても考察した。

電弱対称性の破れに着目すると、スカラートップクォークがとても重要であることが分かる。これは、単純に、ヒッグス場とトップクォークとの結合が大きいことに由来する。そこで、電弱対称性の破れが自然におこるためには、どのようなスペクトラムであるべきか、また、それをLHC実験でどう探索するか、考察した。

また、電弱対称性の破れのセクターがもっと複雑であるような場合も考察し、一例として超トップカラー模型を構築した。これは、超対称QCDの解析に基づき、それを電弱対称性の破れに適用した。

### 4. 研究成果

(1) まずは、超対称性の破れとヒッグス粒子が直接的に強く結合している可能性に着目した。この場合の低エネルギー有効理論として、ヒッグス場が超対称性のもとで非線形に変換するようなラグランジアンの構成法を確立した。

この構成法によると、ヒッグス場のスーパーパートナーであるヒッグシーノが存在しないような超対称ラグランジアンが構成できる。また、ヒッグス場の質量も、ゲージ相互作用と無関係になり、現象論的にこれまでと全く異なる性質を持っているところが興味深い。

(2) また、そのラグランジアンに、QCDで

いう $\rho$ 中間子に対応するスピン2の場を導入することに成功し、これを「隠れた重力」と名付けた。LHC実験での検証可能性を議論した。

超対称性を自発的に破ると、ゴールドスティーノと呼ばれる、質量ゼロのフェルミ粒子の存在が帰結される。このゴールドスティーノの散乱振幅を非線形ラグランジアンで計算すると、その崩壊定数のエネルギースケールで強結合となり、理論の予言がなくなる。線形なラグランジアンでは、ゴールドスティーノのスーパーパートナーとして、スピンゼロの粒子が存在して、それが散乱振幅を高エネルギーで小さくする効果があるが、その役割をスピン2の粒子が担うことができることを示した(図1)。実験でこの粒子が発見されれば、超対称性の破れの物理に関して有用な情報となる。

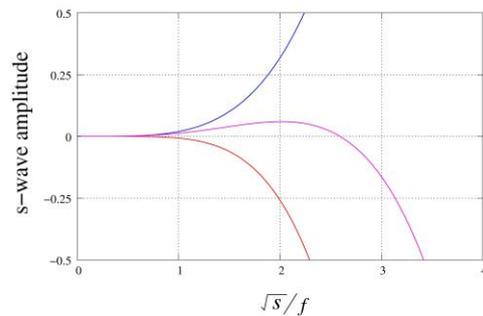


図1：ゴールドスティーノの散乱振幅

(3) 上の研究と正反対のアプローチも考えた。超対称標準模型において、電弱対称性の破れを自然に引き起こすためには、スカラートップクォークとヒッグシーノは軽い必要がある。このことに着目して、この場合にLHC実験でどのようにスカラートップクォークを発見することができるのか調べ、新しい発見法を提唱した。

自然な電弱対称性の破れに着目すると、ヒッグスポテンシャルへの輻射補正が小さい必要がある。これには二つの要素があり、ひとつは超対称性の破れの小ささ、つまりスカラートップクォークの質量が小さいこと、もうひとつは、輻射補正のlogの効果が小さいこと、つまり超対称性を回復するスケールが小さいこと(伝搬スケールの小ささ)である。

これらを総合すると、スカラートップクォークはヒッグシーノに崩壊し、また、ヒッグシーノはゴールドスティーノへ崩壊するという、連続した崩壊が起こるであろうと予想される(図2)。

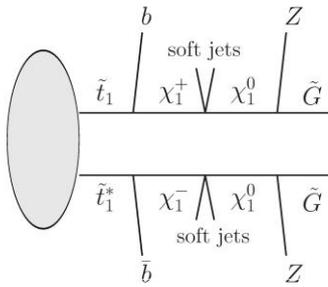


図2：スカラートップクォークの生成と崩壊過程

このような崩壊過程のLHCでの発見法はいままで議論されておらず、その研究は急務であった。この研究では、崩壊によって生成されるボトムクォークとZボソンそれから、ゴールドストーンによるエネルギーの持ち逃げを同時に観測して、発見する方法を提唱した。

この方法でLHC実験の早いうちに、スカラートップクォークの発見や質量測定が可能であることを、シミュレーションによって確認した(図3)。

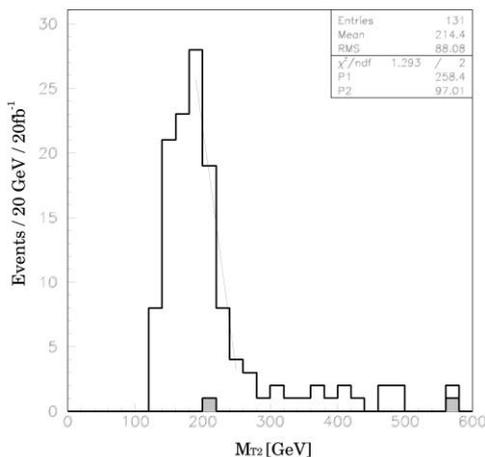


図3：スカラートップクォークの質量測定

(4) また、さらに異なるアプローチとして、超対称模型のヒッグスセクターをダイナミカル模型へ拡張することを考えた。

そこで、電弱対称性の破れとトップクォークの質量はなんらかのゲージ作用によって引き起こされたとする、トップカラー模型に着目して、超対称トップカラー模型を現実的な枠組みとして提唱することができた。

最も単純な超対称模型のヒッグスセクターは、超対称性の破れによって、ヒッグスポテンシャルの原点を不安定にし、それを弱いゲ

ージ相互作用で安定化させるというものである。この模型では、ヒッグス粒子の質量が非常に軽いことが予言され、これまでの実験によって厳しい制限がつけられている。この状況を重要視すると、ヒッグスセクターはなにかしら他に強く結合しているというシナリオが考えられる。そこで、超対称模型において、ヒッグス場が複合粒子であるような模型の構築を試みた。

ヒッグス粒子が複合粒子であるような場合、次に問題になるのは、トップクォークの質量をどう説明するかである。そこで、トップクォークも複合粒子であるような模型である、トップカラー模型に着目した。トップカラー模型自体は、様々な点で不完全なシナリオであったが、今回超対称性の存在によって、短距離でゲージ理論となるような完全な模型として提唱することに成功した。

この模型は、高エネルギーで、単純なSU(3)超対称QCD理論として定義され、低エネルギー理論はそのサイバーク双対な理論である、SU(2)ゲージ理論となる。この双対理論の中に、ヒッグス場やトップクォークが中間子として存在する。トップクォークの質量や電弱対称性の破れは、非摂動効果と超対称性の破れを通じて引き起こされる興味深い模型である。

## 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 R. Kitano, M. Kurachi, M. Nakamura, N. Yokoi, “Spectral-Function Sum Rules in Supersymmetry Breaking Models,” *Physical Review D* 85 (2012) 55005, 査読有
- ② R. Kitano, “Hidden local symmetry and color confinement,” *Journal of High Energy Physics* 1111 (2011) 124, 査読有
- ③ H. Fukushima, R. Kitano, M. Yamaguchi, “Supertopcolor,” *Journal of High Energy Physics* 1101 (2011) 111, 査読有
- ④ M. Asano, H. D. Kim, R. Kitano, Y. Shimizu, “Natural Supersymmetry at the LHC,” *Journal of High Energy Physics* 1012 (2010) 019, 査読有
- ⑤ R. Kitano, M. Nakamura, “Tau polarization measurements at the LHC in supersymmetric models with a long-lived stau,” *Physical Review D*

- 82 (2010) 035007, 査読有
- ⑥ R.Kitano, H. Ooguri, Y. Ookouchi, "Supersymmetry Breaking and Gauge Mediation," Annual Review of Nuclear and Particle Science 60 (2010) 491, 査読有
- ⑦ M. Asano, R.Kitano, "Constraints on Scalar Phantoms," Physical Review D 81 (2010) 054506, 査読有
- ⑧ T. Ito, R.Kitano, T. Moroi, "Measurement of the Superparticle Mass Spectrum in the Long-Lived Stau Scenario at the LHC," Journal of High Energy Physics 1004 (2010) 017, 査読有
- ⑨ K. Hamaguchi, R.Kitano, F. Takahashi, "Non-thermal Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation," Journal of High Energy Physics 0909 (2009) 127, 査読有
- ⑩ M. Graesser, R.Kitano, M. Kurachi "Higgsinoless Supersymmetry and Hidden Gravity," Journal of High Energy Physics 0910 (2009) 077, 査読有

[学会発表] (計 5件)

- ① R.Kitano, "Supertopcolor," SUSY Breaking ' 11, 2011年5月20日, CERN, スイス
- ② R.Kitano, "Non-thermal Gravitino Dark Matter in Gauge Mediation," the Non-Thermal Cosmological Histories of the Universe Workshop, 2010年10月20日, ミシガン大学, アメリカ合衆国
- ③ R.Kitano, "Natural Supersymmetry," SLAC workshop on Topologies for Early LHC Searches, 2010年9月22日, スタンフォード大学, アメリカ合衆国
- ④ R.Kitano, "Thoughts on Supersymmetry and Electroweak Symmetry Breaking," the KITP workshop on Strings at the LHC and in the Early Universe, 2010年3月16日, カリフォルニア大学サンタバーバラ校, アメリカ合衆国
- ⑤ R.Kitano, "Higgsinoless SUSY and Hidden Gravity," Strong Coupling Gauge Theories in LHC Era (SCGT' 09), 2009年12月11日, 名古屋大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北野 龍一郎 (KITANO RYUICHIRO)  
 東北大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：50543451

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：