

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 5 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006—2011

課題番号：18071001

研究課題名（和文） フレーバー混合における標準理論を超える物理の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical studies on physics beyond the Standard Model
with flavor mixing

研究代表者

日笠 健一（Ken-ichi HIKASA）

東北大学 大学院理学研究科 教授

研究者番号：20208739

研究成果の概要（和文）：

クォーク・レプトンのフレーバー混合の現象は、素粒子の標準模型を超える新しい物理法則への重要な手がかりを与えるものである。本研究では、理論的な立場から、新しい物理の有力な候補である超対称理論や余剰次元理論等、および関連する宇宙論に関する研究を推進し、それぞれについて多くの新しい知見を得ることができ、分野の発展に貢献した。これらの結果は現行および将来のフレーバー物理実験に対し種々の示唆を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：

Phenomena of flavor mixing of quarks and leptons provide important clue on the physics beyond the Standard Model. This project contains various theoretical studies on candidates of the physics beyond the Standard Model such as supersymmetry and extra dimensions, as well as related cosmology. We have obtained many new insights on each of these and contributed to the development of the field. Suggestions to present and future flavor physics experiments are given.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,100,000	0	2,100,000
2007 年度	9,700,000	0	9,700,000
2008 年度	9,700,000	0	9,700,000
2009 年度	9,700,000	0	9,700,000
2010 年度	9,700,000	0	9,700,000
2011 年度	9,700,000	0	9,700,000
総計	50,600,000	0	50,600,000

研究分野：素粒子物理学

科研費の分科・細目：原子核・素粒子・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子理論，素粒子実験，宇宙論

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準理論は、強・弱・電磁相互作用の3つを統一的に記述することに成功したが、質量とフレーバー混合の起源は未解明のままである。標準理論に代わるものとして有力な超対称理論においてもこの事情は変

わらず、標準理論にはないフレーバー混合の新しい原因を含むためむしろ複雑になっている。また高次元理論においては、フレーバーの理解がモデルの構築に対するひとつの手がかりとなっている。このような状況下でフレーバー混合の理解を進めるには、実験か

らの新しいデータは貴重である。フレーバー混合の基礎定数を精度良く測定することとともに、標準理論の枠内では理解できない現象を探求することにより、超対称理論等に対して高エネルギーフロンティアの実験からは得られない、質量の非対角成分についての情報を得ることができる。

2. 研究の目的

本研究は、特定領域「フレーバー物理の新发展」計画研究のうち唯一の理論的研究であり、超対称理論などにおいて予測されるフレーバー混合現象を解析し、実験に対する指針を提供すること、及び実験から得られたデータの分析によって、新しい物理への手がかりを探っていくことを目的とする。これにより、素粒子の世代構造の理解が深まることが期待される。

3. 研究の方法

超対称理論に関して、モデル構築、モデルの分析による実験への提案、摂動論に基づいた高次補正の計算、実験データを用いたパラメータ空間の解析といった多面的な方向で研究を進める。余剰次元理論については、高エネルギー領域で強結合となることが不可避なので、非摂動的手法により分析を行う。また初期宇宙論の研究により超対称理論をはじめとする素粒子モデルに対する重要な手がかりを得る。

4. 研究成果

超対称理論、余剰次元理論、関連する初期宇宙論に関して多くの新しい知見を得た。以下主要な成果を述べる。

(1) 超対称理論において、トップクォークのフレーバーを変える中性カレントによって引き起こされるさまざまな崩壊過程および LHC コライダーにおける生成過程の計算を系統的に行った。全部で 11 のチャンネルを評価し、それに対し現存の種々の実験からくる超対称理論のパラメータに対する制限を適用した。このうちチャームクォークとグルオンからトップクォークが生成される過程、およびトップクォークがチャームクォークとヒッグスボソンに崩壊する過程が LHC における実験で観測できる可能性があることを示した。

(2) ボトムクォークがストレンジクォークとニュートリノ対に崩壊する過程を超対称標準理論において、真空期待値の比である $\tan\beta$ が大きい場合について調べた。標準理論の予想と比較して、既知のチャージノのループによる寄与以外に、グルイノおよび荷電ヒッグスボソンのループの寄与が大きくなる可能性があることが示された。しかし、ボトムクォークがストレンジクォークと光子

に崩壊する過程の実験値によって、可能な寄与の大きさが制限されることを見出した。また、 B_s メソンの μ 粒子対への崩壊分岐比からくる制限を吟味した。

(3) 超対称 SU(5)大統一理論におけるフレーバーの破れに関して、スフェルミオン質量の混合に対する制限を調べた。スフェルミオン質量全体が小さい場合は、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が右巻きダウンスクォーク混合について強い制限を与えるが、大きい場合には B メソン混合やハドロンの電気双極子が重要であることを見出した。

また、テバトロンにおける B_s 混合の測定結果を用いると、レプトンフレーバーを破る μ や τ の崩壊が測定可能な範囲内で起こりうるということが分かった。

(4) 超対称理論において誘起されるレプトンフレーバー非保存崩壊率を評価し、B ファクトリーにおける τ レプトン崩壊の実験探索上限値を用いて理論のパラメータ空間に対する制限を導いた。

(5) レプトンフレーバーを破る $\mu \rightarrow e$ 過程の実験結果からモデルの判別がどこまで可能であるかを調べた。ハドロン行列要素の不定性が問題となるが、格子ゲージ理論の結果を用いることにより、誤差を小さくすることが可能であることを明らかにした。

(6) 階層性問題の解としての超対称性が存在し、かつメッセンジャーのスケールが低くヒッグス質量への補正が比較的小さいとすれば、軽い超対称粒子としてスカラトップクォーク、ヒッグスおよびグラビティーノが想定される。この場合 LHC コライダー実験においてどのような兆候が見えるか、そのカバーする領域、質量測定法を調べた。

(7) 弱 SU(2)_L 多重項の重い粒子はほとんど質量が縮退しているが、高次補正により有限の質量差が生じる。重いフェルミオンに対する 2 ループの補正を実際に評価し、MeV 程度の差が現れることを見出した。

(8) 余剰次元理論のエッセンスを抽出した 3 サイトのヒッグスレスモデルにおいて、電弱精密測定 of 物理量である S, T パラメータに関する 1 ループのくりこみ群方程式をリストアップし、実験結果と矛盾しないためにこのモデルに含まれるカルザ・クライン・フェルミオンとゲージボソンの質量がみたすべき条件を導出した。

また、このモデルにおいて、崩壊 $Z \rightarrow b\bar{b}$ の幅に対する、フレーバーに依存するカイラル対数補正を計算した。実験からの制限は比較的ゆるく、モデル中の重いディラックフェルミオンの質量が 1 TeV 以上であれば矛盾がないことを示した。

(9) 超対称 QCD の強結合ダイナミクスにより電弱対称性の破れが起こる可能性を調べた。大きなトップクォークの質量もダイナミ

カルに生成し、複合状態としてヒッグス場が現れるのと同時にフレーバーを変える中性カレントの効果を抑制することができる。双対性を用いた解析により、強い相互作用のダイナミクスを摂動論の適用可能な理論にマップできるが、フレーバー数が多い場合にはカイラル対称性を破る真空が安定に存在できることがわかった。

(10) トップクォークの対生成の測定において、標準理論の予測をはるかに超える値の前後方非対称性が、**Tevatron** の実験において観測されている。この原因として、新しい荷電ゲージボソン W' や、ダイクォークの存在を仮定するモデルが提案されている。これらのモデルにおいて、**LHC** でのトップクォーク生成におけるトップの偏極や荷電非対称性を予測した。初期 **LHC** 実験の結果はすでに W' のモデルに厳しい制限を与えることが見いだされた。

(11) ミューオンの異常磁気モーメントの理論計算におけるハドロン真空偏極の効果を、最新の電子陽電子衝突の実験データを用いてアップデートした。その結果と実験による測定値とのずれは標準偏差の 3.3 倍という大きな値となっており、比較的軽い超対称粒子などの存在を示唆している。また、同じデータを用いて Z ボソンのスケールにおける微細構造定数の値を求めた。

(12) 宇宙初期においてニュートリノに崩壊する長寿命の粒子が存在したとして、その粒子存在量に対する原初元素合成、宇宙背景輻射などによる制限を導いた。これは粒子の寿命およびそのハドロン終状態、電磁的終状態への崩壊分岐比によって大きく変化する。

(13) 超対称性を持つ標準模型に属するモデルである **MSSM** やそれを拡張した **NMSSM** について、ニュートラリーノ暗黒物質の宇宙物質密度を調べた。**CDMS-II** や **XENON100** などの最近の直接探索の結果および種々の現象論的な条件をみたすパラメータ領域のスキャンを行った。モデルにより許される領域が大きく異なり、それぞれに特徴的な粒子のスペクトルが出現することを見いだした。

特に **NMSSM** においては、直接探索の一部の実験で示唆されているような軽い暗黒物質は許されることがわかったが、同時にヒッグス粒子が暗黒物質に崩壊する分岐比が非常に大きくなることを見いだされ、このモデルの可否は **LHC** 実験の結果に大きく左右されることがわかった。

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 72 件) [すべて査読有]

1. Testing new physics models by top charge asymmetry and polarization at the LHC, J. Cao, K. Hikasa, L. Wang, L. Wu, and J.M. Yang, *Physical Review D* **85**, 014025 (2012).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.85.014025>
2. Flavor structure of the three-site Higgsless model, T. Abe, R.S. Chivukula, E.H. Simmons, and M. Tanabashi, *Physical Review D* **85**, 035015 (2012).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.85.035015>
3. Light dark matter in NMSSM and implication on Higgs phenomenology, J. Cao, K. Hikasa, W. Wang, and J.M. Yang, *Physics Letters B* **703**, 292-297 (2011).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2011.07.086>
4. $(g-2)_\mu$ and $\alpha(M_Z^2)$ re-evaluated using new precise data, K. Hagiwara, R. Liao, A.D. Martin, D. Nomura, and T. Teubner, *Journal of Physics G* **38**, 085003 (2011).
<http://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/38/8/085003>
5. SuperTopcolor, H. Fukushima, R. Kitano, and M. Yamaguchi, *Journal of High Energy Physics* **1101**, 111 (2011).
[http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01\(2011\)111](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP01(2011)111)
6. Dark matter direct detection constraints on the minimal supersymmetric standard model and implications for LHC Higgs boson searches, J. Cao, K. Hikasa, W. Wang, J.M. Yang, and L.-X. Yu, *Physical Review D* **82**, 051701 (2010).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.82.051701>
7. SUSY dark matter in light of CDMS II results: a comparative study for different models, J. Cao, K. Hikasa, W. Wang, J.M. Yang, and L.-X. Yu, *Journal of High Energy Physics* **1007**, 044 (2010).
[http://dx.doi.org/10.1007/JHEP07\(2010\)044](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP07(2010)044)
8. Right-handed sneutrino dark matter and big-bang nucleosynthesis, K. Ishiwata, M. Kawasaki, K. Kohri, and T. Moroi, *Physics Letters B* **689**, 163-168 (2010).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2010.04.054>
9. Electroweak two-loop contribution to the mass splitting within a new heavy $SU(2)_L$ fermion multiplet, Y. Yamada, *Physics Letters B* **682**, 435-440 (2010).

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb>
.2009.11.044
10. On the model discriminating power of $\mu \rightarrow e$ conversion in nuclei, V. Cirigliano, R. Kitano, Y. Okada, and P. Tuzon, *Physical Review D* **80**, 013002 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.80.013002>
 11. $Z \rightarrow b\bar{b}$ and chiral currents in Higgsless models, T. Abe, R.S. Chivukula, N.D. Christensen, K. Hsieh, S. Matsuzaki, E.H. Simmons, and M. Tanabashi, *Physical Review D* **79**, 075016 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.79.075016>
 12. B_s mixing phase and lepton number violation in supersymmetric SU(5), J.-h. Park and M. Yamaguchi, *Physics Letters B* **670**, 356–362 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2008.11.023>
 13. Sflavor mixing map viewed from a high scale in supersymmetric SU(5), P. Ko, J.-h. Park, and M. Yamaguchi, *Journal of High Energy Physics* **0811**, 051 (2008).
<http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2008/11/051>
 14. Testing the littlest Higgs model with T-parity at the Large Hadron Collider, S. Matsumoto, T. Moroi, and K. Tobe, *Physical Review D* **79**, 055018 (2008).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.79.055018>
 15. Does the three site Higgsless model survive the electroweak precision tests at loop?, T. Abe, S. Matsuzaki, and M. Tanabashi, *Physical Review D* **78**, 055020 (2008).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.78.055020>
 16. Flavor and CP conserving moduli mediated SUSY breaking in flux compactification, K. Choi, K.S. Jeong, and K. Okumura, *Journal of High Energy Physics* **0807**, 047 (2008).
<http://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/2008/07/047>
 17. Cosmology of gravitino LSP scenario with right-handed sneutrino NLSP, K. Ishiwata, S. Matsumoto, and T. Moroi, *Physical Review D* **77**, 035004 (2008).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.77.035004>
 18. $B \rightarrow s \nu \nu$ decay in the MSSM: Implication of $b \rightarrow s \gamma$ at large $\tan \beta$, Y. Yamada, *Physical Review D* **77**, 014025 (2008).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.77.014025>
 19. Cosmological constraints on neutrino injection, T. Kanzaki, M. Kawasaki, K. Kohri, and T. Moroi, *Physical Review D* **76**, 105017 (2007).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.76.105017>
 20. Supersymmetry-induced flavor-changing neutral current top-quark processes at the CERN Large Hadron Collider, J.J. Cao, G. Eilam, M. Frank, K. Hikasa, G.L. Liu, I. Turan, and J.M. Yang, *Physical Review D* **75**, 075021 (2007).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.75.075021>
 21. Parity-odd asymmetries in W-jet events at the Fermilab Tevatron, K. Hagiwara, K. Hikasa, and H. Yokoya, *Physical Review Letters* **97**, 221802 (2006).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.221802>
- [学会発表] (計 27 件)
1. Effects of top-quark compositeness on Higgs boson production at the LHC, 野村大輔, 日本物理学会, 弘前大学, 2011 年 9 月 18 日
- [図書] (計 3 件)
1. Weak Interaction, K. Hikasa, in *Encyclopedia of Applied High Energy and Particle Physics* (WILEY-VCH, 2009), pp. 147–168.
- [その他]
ホームページ
<http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~flavor/index.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
日笠 健一 (Ken-ichi HIKASA)
東北大学 大学院理学研究科 教授
研究者番号 : 20208739
 - (2) 研究分担者
山口 昌弘 (Masahiro YAMAGUCHI)
東北大学 大学院理学研究科 教授
研究者番号 : 10222366
(2010 年度まで)
北野 龍一郎 (Ryuichiro KITANO)
東北大学 大学院理学研究科 准教授
研究者番号 : 50543451

(2009 年度より)

山田 洋一 (Youichi YAMADA)
東北大学 大学院理学研究科 助教
研究者番号 : 00281965

棚橋 誠治 (Masaharu TANABASHI)
名古屋大学 基礎理論研究センター 教授
研究者番号 : 00270398

戸部 和弘 (Kazuhiro TOBE)
名古屋大学 大学院理学研究科 准教授
研究者番号 : 20451510

(2008 年度より)

諸井 健夫 (Takeo MOROI)
東京大学 大学院理学系研究科 教授
研究者番号 : 60322997

奥村 健一 (Ken-ichi OKUMURA)
九州大学 大学院理学研究院 助教
研究者番号 : 40403935

(2009 年度より)

(3) 研究協力者

郡 和範 (Kazunori KOHRI)
高エネルギー加速器研究機構 素核研 助
教

研究者番号 : 50565819

野村 大輔 (Daisuke NOMURA)
東北大学 大学院理学研究科 助教
楊 金民 (Jin Min YANG)

中国科学院 理論物理研究所 教授