

平成 22 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540257

研究課題名（和文） 超対称標準模型におけるフレーバー対称性の現象論的帰結

研究課題名（英文） Phenomenological consequences of flavor symmetry in the supersymmetric standard model

研究代表者

久保 治輔 (KUBO JISUKE )

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：40211213

研究成果の概要（和文）：フレーバー対称性を、陽子の崩壊モードが測定によって実験的に検証することができることを見いだしたこと、ニュートリノの質量が量子補正によって生成されるモデルでは、フレーバー対称性を導入すると、電荷を持った Higgs 粒子の崩壊のクリーンなシグナルが LHC で観測される可能性があることを指摘したこと、また、フレーバー対称性をもつモデルの枠組みで、中性 B 中間子の混合を記述する CP 対称性を破る位相の計算を行い、フレーバー対称性を LHCb 等の将来の実験で検証できる可能性を指摘したこと、などが主な成果である。

研究成果の概要（英文）：The main theoretical findings in this project are:

(1) Different flavor symmetries can be experimentally distinguished through observations of the proton decay. (2) When a flavor symmetry is introduced in a model with radiatively generated neutrino masses, the model predicts that the charged Higgs boson decay gives a clean signal of an electron (or a positron) with a large missing energy at LHC. (3) The flavor-specific CP asymmetry in the B meson decay is mostly negative and its size can be one order of magnitude larger than the standard model value. This prediction is consistent with the current experimental value, and might be experimentally tested in future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	660,000	3,960,000

研究分野：素粒子物理学

科研ひの分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子論、超対称性、フレーバー対称性、ニュートリノ、B の物理

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準理論を超対称化すると、超対称性の破れのために、SUSY フレーバー問題という深刻な問題が発生する。研究代表者は、数年前からこの問題と取り組んでいる。よくなされている仮定は、超対称性はフレーバーの構造に全く関係ないセクタで破れているので、超対称性を破る soft な項は universal になっているというものである。しかし、これと直交した理論的解決方法の提案もなされていて、当研究代表者も調査を行ってきた。その一つは、超対称性を破る soft な項のくりこみとくりこみ群の流れの性質を応用したものであり、超対称性を soft に破っているパラメータが赤外領域でフレーバーの構造に依存しない収束点に近づくことを非摂動的に示した。フレーバー対称性を使っての解決方法の研究は、過去に試みられていたが、これまでの対称性は大統一理論のスケールでの対称性で、しかも部分的な解決に留まっていた。研究代表者は、低エネルギーでしかも hard に破れていないフレーバー対称性の探求を行う研究を行なう一方、世界で初めて、この対称性が SUSY フレーバー問題を緩和していることを示した。また、Babu との共同研究で、 $Q_6$  という有限群に基づくフレーバー対称性をもった標準理論の超対称化を行ない、これまで現象論的にしか知られていなかったクォークの質量行列をフレーバー対称性から導くことに成功した。当研究では、底エネルギーで実現している可能性があるこれらのフレーバー対称性の実験的検証可能性について研究を行なうことにした。

## 2. 研究の目的

SUSY フレーバー問題とクォーク・レプトン混合が、非可換な有限群に基づくフレーバー対称性を通して実験的に検証可能な形で結びついていることを定量的に示し、将来計画されている様々な実験で具体的に検証可能であるかを調査することが目的であった。超対称標準模型に於ける低エネルギーフレーバー対称性の現実性は検証可能になってくることを示すとともに、興味深い現象論的予言を行いこれらの実験に刺激を与え、この分野の研究の進展に寄与することを目指した。

## 3. 研究の方法

当研究に至までの研究は、国際的な共同研究と同時に金沢大学、国内の大学の研究者と大学院生の共同研究のもとに行われてきた。これらの共同研究は、当研究計画の目的達成

のために欠くことができないものであり、海外の共同研究者 (E.Ma, UC, Riverside; A.Lenz, University of Regensburg; M. Mondragon, Mexico National University; K.S.Babu, Oklahoma State University) との共同研究と大学院生の動員 (主に博士研究員 1 名、大学院後期課程の大学院生 7 名) により研究を実施した。金沢大学には国内外の研究者や共同研究者を招き、当研究に関する情報収集を行ったり、共同研究者と集中的に議論し研究目的の達成を図った。また、代表者が所属する研究グループに所属する末松教授からは、研究分担者にはなっていないが、古くからの共同研究者として当研究目的達成のために協力を得ることができ、優秀な大学院生には積極的に研究会や国際会議に参加させ研究発表を行わせたり、情報収集、他の研究者と討論をさせ当研究目的達成に貢献させた。一方、代表者は研究補助金交付期間中 (2006-2009)、6 回の国際会議での招待講演で研究成果を発表するとともに、当研究に関する情報収集を行なった。さらに、代表者は、毎年富士吉田 (2006 年は韓国の Pohang、2008 年は台湾の Chi-Tou で開催) 開催される国際集会 [Summer Institute] の組織委員として会議の企画を行なっている。この研究集会に共同研究者や当研究課題に興味のある国内外の研究者、大学院生を招き、集中的な議論を様々な側面から行い研究の新たな発展を見いだすよう積極的に努力した。

## 4. 研究成果

素粒子の標準理論には物質粒子のフレーバーの構造 (その種類の仕組み) を決めている湯川相互作用を決定する原理が欠けており、このため、クォーク・レプトンの質量とその混合 (小林・益川のクォーク混合と牧・中川・坂田のニュートリノ混合) の構造を決められない。また、標準理論の Higgs 粒子の質量補正が 2 次発散をしているということ、Higgs 場の自己相互作用が漸近自由ではないという二つの理論的事実から、標準理論は Fermi エネルギースケールの約 10 倍以上では理論的・数学的に意味をなさないものであるということも知られている。当研究では、非可換有限群に基づくフレーバー対称性、特に、超対称標準理論への導入を試みた。フレーバー対称性は hard に破れていると、実験的に検証可能な定量的予言を行うのが難しくなる。このため、底エネルギーで (場の量子論的に) hard に破れていないフレーバー対称性に注目してきた。

当研究で、有限群  $Q_6$  に基づくフレーバー対称性は、陽子の寿命を約一万倍にしたり、実際に各種の崩壊モードが測定された場合、フレーバー対称性を実験的に検証すること

ができるところを見いだした。また、ニュートリノの質量が量子補正によって生成されるモデルに有限群 D6 に基づくフレーバー対称性を導入すると、電荷を持った Higgs 粒子がほとんど 100%の確率で電子と暗黒物質候補粒子に崩壊することを見いだした。この Higgs 粒子は、CERN の LHC 加速器実験で生成される可能性があり、もし生成されれば非常にクリーンなシグナルが観測されることになることを指摘した。

Q6 フレーバー対称性以外のフレーバー対称性を持つモデルについても考察した。特に、S3、D7 といった有限群に基づく底エネルギーで hard に破れていないフレーバー対称性を持つモデルの解析を行い、予言されるクォークの質量と混合行列の間にある関係について詳しく調査した。その結果、s-クォークの質量の精度が現在の倍くらいに達すると、フレーバー対称性の予言を検証できることが判明した。フレーバーの破れは超対称の破れと密接に関係しており、自然界では超対称は明らかに破れているので、フレーバーの破れの実験的検証は超対称性の間接的な実験的検証であると広く信じられている。

また、B Factory の実験における、フレーバー対称性の検証可能性について調査を行なった。特に、有限群 Q6 に基づくフレーバー対称性を持つ超対称モデルについて研究を行った。具体的には、粒子の種類が中性ヒッグス粒子の媒介によって変わる Flavor Changing Neutral Current (FCNC) 反応に注目して調査を行なった。標準理論の枠内では、FCNC 反応は非常に小さく、FCNC 反応の解析は標準理論が拡張されるモデルを考察する際に欠かすことができない。このような FCNC は、中性 B 中間子の質量の差に寄与し、標準理論の予言を変え、実験結果と矛盾する可能性がある。このモデルの枠組みで中性 B 中間子の質量の差を、QCD の量子補正も含めて計算した。その結果、FCNC を起こす中性のヒッグス粒子の質量の下限が約 500GeV であり、大型加速器 LHC で観測可能な範囲に入っていることが分かった。さらに、近年素粒子の標準理論からのずれがあるかもしれないと報告されている CP の破れに伴う物理量 (中性 B 中間子の混合を記述する CP 対称性を破る位相) の計算を行い、実験的検証可能性、特に、LHCb での可能性を検証した。

また、離散対称性と宇宙論との関係、特に、Z2 離散対称性と暖かい暗黒物質、離散対称性の量子異常と暗黒物質の崩壊について研究を行い、興味深い結果を得ることができた。

これらの研究結果は数々の国際会議で報告した。

当研究で対象とした将来の実験以外に、数々の素粒子・宇宙物理学の実験・観測が本格的にスタートする。これらの実験によって、

この十数年で、標準理論が果たしてどのように拡張されるべきなのかが明らかになる可能性が非常に高い。低エネルギーフレーバー対称性がフレーバーの構造を決めている原理であるとするならば、標準理論を拡張する上で重要な役割を果たすことは明らかである。従って、底エネルギーフレーバー対称性を導入することに基づいて超対称標準理論の拡張を行った場合、フレーバー対称性をどの実験においてどのような検証が可能かを明らかにするという当研究をさらに推進していきたいと考えている。

## 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 10 件)

1. K. Kawashima, J. Kubo, A. Lenz, Testing the new CP phase in a Supersymmetric Model with Q(6) Family Symmetry by B(s) Mixing, Phys. Lett. B681 (2009), 60–67, 査読有
2. H. Fukuoka, J. Kubo, and S. Daijiro, Anomaly Induced Dark Matter Decay and PAMELA/ATIC Experiments, Phys. Lett. B642 (2006), 18–23, 査読有
3. T. Araki and J. Kubo, Testing Flavor Symmetries by B-Factory, Int. J. Mod. Phys. A24 (2009), 5831–5844, 査読有
4. J. Kubo (他 5 名, 2 番目) Radiative seesaw: Warm dark matter, collider and lepton flavour violating signals Phys. Rev. D79 (2009), 013011(10), 査読有
5. J. Kubo (他 5 名, 3 番目) (Non-)Abelian discrete anomalies, Nucl. Phys. B805 (2008), 124–147, 査読有
6. N. Kifune, J. Kubo and, A. Lenz, Flavor Changing Neutral Higgs Bosons in a Supersymmetric Extension based on a Q6 Family Symmetry, Phys. Rev. D77 (2008), 076010(19), 査読有
7. Y. Kajiyama, J. Kubo and H. Okada, D6 Family Symmetry and Cold Dark Matter at LHC, Phys. Rev. D75 (2007), 033001(11), 査読有
8. Y. Kajiyama, E. Itou and J. Kubo, NonAbelian discrete family symmetry to soften the SUSY flavor problem and to suppress proton decay, Nucl. Phys. B743 (2006), 74–103, 査読有

9. J. Kubo, D. Suematsu and E. Ma,  
Cold Dark Matter, Radiative Neutrino Mass,  
 $\mu$  to  $e+\gamma$ , and Neutrinoless Double  
Beta Decay,  
Phys. Lett. B642 (2006), 18-23, 査読有
10. T. Araki, J. Kubo, and E. A. Paschos,  
S3 flavor symmetry and leptogenesis,  
Eur. Phys. J. C45 (2006), 465-475, 査読有

[学会発表] (計6件)

1. J. Kubo,  
Non-abelian Family Symmetries and the SUSY  
Flavor Problem,  
Int. Workshop on the Interconnection  
Between Particle and Cosmology,  
May 18-22, 2009, University of Oklahoma,  
Norman, USA
2. J. Kubo,  
Reduction in the Number of Coupling  
Parameters and the Yukawa Mission,  
Symposium Quantum Field Theory and Beyond,  
February 3-6, 2008, Ringberg Castle,  
Tegernsee, Germany
3. J. Kubo,  
Testing family symmetries,  
Int. Workshop on B Factories and New  
Measurements,  
January 24-26, 2008, Atami
4. J. Kubo,  
Discrete Non-abelian Family Symmetry at  
Low Energy,  
KEK 理論研究会「素粒子物理の現状と展望」,  
March 1-3, 2007, KEK
5. J. Kubo,  
Flavor Problem and Flavor Symmetry,  
International Symposium on Neutrino  
Physics and Neutrino Cosmology,  
January 24-26, 2007, Hong Kong
6. J. Kubo,  
Flavor symmetries,  
International Workshop on B Factories and  
New Measurements',  
December 18-19, 2006, Nara

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久保 治輔 (KUBO JISUKE )  
金沢大学・数物科学系・教授  
研究者番号：40211213