

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：82118
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2016～2021
課題番号：16K17681
研究課題名（和文）クォークとヒッグスで探る超対称性模型

研究課題名（英文）Quarks and Higgs in Supersymmetric Models

研究代表者

遠藤 基 (Endo, Motoi)

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・准教授

研究者番号：70568170

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子標準理論には限界があり、それを超える未知の素粒子理論が存在している。本研究ではその候補として超対称性模型など未知の理論の可能性を探った。その結果、まず第一に、素粒子の真空構造の量子効果およびフレーバーやCP対称性の破れにおける電弱量子補正の研究によって、これらの分野の基礎の発展につながる成果を得た。また、超対称性模型は依然として新しい理論として有力な候補であることを明らかにした。それと同時に、宇宙暗黒物質の正体など宇宙論における謎の解明に迫りうる可能性があることを示した。さらに、超対称性模型以外の理論模型が存在する可能性も探り、将来の実験で検証する道筋を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでに素粒子標準理論では説明することのできない素粒子事象が報告されている。本研究では、超対称性模型や他の理論模型がこれらの問題を解く有力な手がかりになることを示した。それにより、次世代の素粒子理論への理解が進むとともに、さらに、宇宙の暗黒物質の正体など、宇宙進化の謎を解く手がかりを与える。

研究成果の概要（英文）：There exists new physics beyond the standard model of particle physics. We explored new physics models such as the supersymmetric model. In particular, we developed fundamental frameworks of particle physics by studying quantum effects on vacuum structures and flavor/CP transitions. Also, we showed that the supersymmetric model is still one of the best candidates of new physics. The model could provide a clue to solving mysteries of particle cosmology. Moreover, we investigated other new physics models apart from the supersymmetric ones and discussed how to test them in future experiments.

研究分野：素粒子理論

キーワード：超対称性模型

1. 研究開始当初の背景

素粒子「標準理論」は多くの実験結果を高い精度で説明することに成功してきた。しかし、標準理論には限界があり、それを越えた新しい理論が存在することが知られている。新しい理論のエネルギースケールは理論的考察から $O(10)$ TeV 以下にあることが望ましいとされている。そのような TeV スケールの理論の候補のなかで超対称性模型は有力視されてきた。実際、この模型は標準理論の抱える多くの問題点を一つの理論で解決できる。その一方で、LHC 実験などの高エネルギー加速器実験において未知の素粒子は発見されていない。そのため、新しい理論のエネルギースケールは従来予想よりも高くなければいけない。

高いエネルギースケールの理論は重い新粒子の存在を予言する。重い粒子を直接生成することは難しい。しかし、「量子効果」によってこれらの粒子を仮想的に生成することが可能である。仮想的に生成された粒子を直接検出することはできないが、反応を精密に測定することでその効果を検出することができる。とくに超対称性模型では、ヒッグスセクターの特徴から様々なプロセスに対する量子効果が大きくなる可能性があることがわかってきた。実際、この模型ではヒッグスがスカラートップクォーク (トップクォークの超対称性粒子) と強く結合している可能性が高い。研究開始当初のヒッグスがつくる真空の構造の研究から、ヒッグスだけではなくクォークセクターにも大きな量子効果を及ぼす可能性があることがわかってきた。

2. 研究の目的

超対称性模型ではクォークやヒッグスセクターが大きな「量子効果」をもつことが期待される。そのため理論のエネルギースケールが高くても発見の可能性はある。この研究では、クォークの反応の精密測定やヒッグスがつくる真空の構造を研究することで、将来の実験で超対称性模型を検出・検証する具体的な方法を提唱する。さらに、未知の効果が発見された場合には、それが超対称性模型によるものなのか、もしくは他の理論を示唆しているのか明らかにする。そして、その理論の検証を目指す。

3. 研究の方法

本研究では素粒子反応 (とくにクォークの反応) とヒッグスセクターの構造から超対称性スケールを絞り込み、そのパラメータ領域の特徴から模型を検出・検証する方法を特定する。そのため、これらの量子効果を適切に評価することが不可欠である。

- (1) 真空の構造に対する量子効果の効果の評価
素粒子物理学において真空とはスカラー場のつくる (大局的もしくは局所的な) 最低エネルギー状態のことである。標準理論をはじめとする多くの素粒子理論では、この宇宙の真空は準安定 (局所的な最低エネルギー状態) にすぎない可能性が指摘されている。その場合、我々の真空はさらに低いエネルギーの真空に崩壊してしまい、その結果この宇宙が破綻してしまう可能性がある。この問題を避けるために、本研究では量子効果が真空の寿命に与える影響を評価する。
- (2) 素粒子反応に対する量子効果の効果の評価
フレーバー実験と呼ばれる低エネルギー素粒子実験では素粒子の変化を精密に測定する。それによって実験のビーム衝突エネルギーよりも遥かに高いエネルギースケールのつくる量子効果を検出することが可能になる。とくにスカラートップクォークの効果は標準理論の弱い相互作用を通じて **B** 中間子 (ボトムクォークを含むハドロン粒子) や **K** 中間子 (ストレンジクォークを含むハドロン粒子) に影響を与える可能性が高い。そのため、素粒子反応 (とくにクォークの反応) に注目して超対称性模型や他の可能性を探る。
- (3) 新しい素粒子理論の構築と検証
近年、**B** 中間子や **K** 中間子の崩壊では標準理論では説明のできない実験結果がいくつか報告されている。さらに、ミューオンの異常磁気モーメントなどレプトンセクターでも標準理論では説明のできない結果が知られている。これらの実験結果は標準理論を超えた新しい物理理論の効果の存在を強く示唆している。さらに、本研究期間には多くの実験結果が得られる予定である。そのため、これらの結果に基づいて新しい素粒子理論の方向性を探る。とくに上の(1)、(2)の結果を用いることで、新しい物理理論のエネルギースケールを絞り込み、そのパラメータ領域の特徴から模型を検出・検証する方法を特定する。

4. 研究成果

上の「3」で提案した研究方法・計画に基づいて主に以下の結果を得た。

(1) 真空崩壊のエネルギースケール不定性とゲージ不変性

真空の寿命は一般的に理論のエネルギースケールに依存した不定性をもつ。本研究では、この不定性が量子効果を適切に取り入れることで抑制できることを示した。また、標準理論をはじめとする多くの代表的な理論にはゲージ対称性と呼ばれる自由度がある。真空崩壊は量子効果を通じてゲージ相互作用の影響を受けるが、理論的整合性から、その崩壊率はゲージ自由度に依存してはいけない。従来の真空崩壊に関する解析ではゲージ不変性が明らかではなかったが、本研究では真空崩壊のゲージ不変な表式を与えた。これらの結果、真空の安定性の条件を適切に評価できるようになった。これは標準理論を含むすべての素粒子理論において満たされなければいけない。

(2) B 中間子や K 中間子の精密測定

近年、計算機物理の進展によって B 中間子や K 中間子に関する理論計算の精度が格段に良くなってきている。その結果、例えば CP 対称性の破れを伴う K 中間子崩壊について高い精度で理論値を求めることが可能になった。実際、研究開始当初このプロセスの標準理論の予想が実験結果と一致しないことが報告されていたが、その後、この問題は理論誤差が原因であったことが指摘されている。本研究では、スカラートップクォークがヒッグスと大きな結合をもつことで、K 中間子に大きな CP 対称性の破れを伴う量子効果を与える可能性を指摘した。この効果は近い将来の B 中間子や K 中間子の精密測定により検証することができるため、Belle II 実験や KOTO 実験での検証が期待されている。

(3) フレーバーや CP 対称性の破れにおける電弱量子補正

素粒子の精密測定の理論研究では低エネルギー有効理論が一般的に用いられる。エネルギー領域に応じて異なる有効理論が用いられており、そのなかでも電弱エネルギースケールよりも高い領域では SMEFT (Standard Model Effective Field Theory) とよばれる理論が使われる。本研究では SMEFT におけるフレーバーと CP の破れについて量子効果の定式化を行なった。とくに、従来の解析では適切に取り入れられてこなかった電弱量子補正 (仮想的な W ボソンがつくる量子効果) を評価する方法を提唱した。クォークは W ボソンと結合する際にその種類を変えて、さらに CP 対称性が破れるために、電弱量子補正はクォークのフレーバーや CP 対称性の破れの精密測定において無視することができない。そのため、この研究成果はこれからのクォークの精密測定の理論研究において重要な役割を果たす。

(4) レプトンの異常磁気モーメント

レプトン (とくに電子やミュオン) の異常磁気モーメントは標準理論の観測量のなかでもとくに高い精度で測定されてきた。標準理論の理論計算もそれに匹敵する精度で決定されてきている。そのため、これらの異常磁気モーメントにおいて未知の粒子がつくる量子効果の発見に期待が高まっている。とくに、2021 年に発表されたミュオンの異常磁気モーメントの測定結果は新しい理論の存在を示唆している。それ以前の結果も新しい理論の存在を示唆していたが、今回の測定によって実験値は標準理論の予想から 4.2 シグマ (標準偏差の 4.2 倍) もずれていることが発表された。この結果を受けて本研究では新しい理論の可能性を探った。とくに、この実験結果を超対称性粒子がつくる量子効果によって自然に説明できることを指摘した。さらに、このパラメータ領域では宇宙暗黒物質の残存量を自然に説明することができることを示した。今後、LHC 実験や宇宙暗黒物質の直接検出実験によってモデルを検証できる可能性が高いため、理論だけでなく実験分野でも期待が高まっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 16件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Endo Motoi, Iguro Syuhei, Kitahara Teppei, Takeuchi Michihisa, Watanabe Ryountaro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Non-resonant new physics search at the LHC for the $b \rightarrow c$ anomalies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2022)106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Endo Motoi, Iguro Syuhei, Kitahara Teppei	4. 巻 6
2. 論文標題 Probing $e\mu$ flavor-violating ALP at Belle II	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP06(2020)040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Endo Motoi, Mishima Satoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Muon $g-2$ and CKM unitarity in extra lepton models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP08(2020)004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Endo Motoi, Iguro Syuhei, Mishima Satoshi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Revisiting rescattering contributions to $B_s \rightarrow D(s)^{(*)}M$ decays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2022)147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Endo Motoi, Hamaguchi Koichi, Iwamoto Sho, Kitahara Teppei	4. 巻 2021
2. 論文標題 Supersymmetric interpretation of the muon g-2 anomaly	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2021)075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Endo Motoi, Daiki Ueda	4. 巻 4
2. 論文標題 Nuclear EDM from SMEFT flavor-changing operator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2020)053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Endo Motoi, Yin Wen	4. 巻 8
2. 論文標題 Explaining electron and muon g-2 anomaly in SUSY without lepton-flavor mixings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2019)122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Endo Motoi, Kitahara Teppei, Ueda Daiki	4. 巻 7
2. 論文標題 SMEFT top-quark effects on Delta F = 2 observables	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2019)182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Endo Motoi, Kitahara Teppei, Ueda Daiki	4. 巻 2019
2. 論文標題 SMEFT top-quark effects on $F = 2$ observables	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2019)182	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Amit Chakraborty, Motoi Endo, Benjamin Fuks, Bjoern Herrmann, Mihoko M. Nojiri, Priscilla Pani, Giacomo Polese	4. 巻 78
2. 論文標題 Flavour-violating decays of mixed top-charm squarks at the LHC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-018-6331-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Motoi Endo, Toru Goto, Teppei Kitahara, Satoshi Mishima, Daiki Ueda, Kei Yamamoto	4. 巻 1804
2. 論文標題 Gluino-mediated electroweak penguin with flavor-violating trilinear couplings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2018)019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Endo, T. Moroi, M. M. Nojiri and Y. Shoji	4. 巻 1711
2. 論文標題 False vacuum decay in gauge theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2017)074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Endo, K. Hamaguchi, S. Iwamoto and K. Yanagi	4. 巻 1706
2. 論文標題 Probing minimal SUSY scenarios in the light of muon g-2 and dark matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2017)031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Endo, T. Goto, T. Kitahara, S. Mishima, D. Ueda and K. Yamamoto	4. 巻 1804
2. 論文標題 Gluino-mediated electroweak penguin with flavor-violating trilinear couplings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2018)019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kyu Jung Bae, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Takeo Moroi	4. 巻 757
2. 論文標題 Diphoton Excess and Running Couplings	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Letters	6. 最初と最後の頁 493-500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2016.04.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Motoi Endo, Yoshitaro Takaesu	4. 巻 758
2. 論文標題 ATLAS on-Z Excess Through Vector-Like Quarks	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Letters	6. 最初と最後の頁 355-358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2016.05.030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Motoi Endo, Satoshi Mishima, Daiki Ueda, Kei Yamamoto	4. 巻 762
2. 論文標題 Chargino contributions in light of recent epsilon'/epsilon	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physics Letters	6. 最初と最後の頁 493-497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2016.10.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計10件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 遠藤基
2. 発表標題 Nonstandard interaction between leptons and heavy quarks
3. 学会等名 Exploration of Particle Physics and Cosmology with Neutrino (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤基
2. 発表標題 Theoretical overview of Muon g-2
3. 学会等名 Hunting SUSY@HL-LHC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤基
2. 発表標題 サハロフの3条件とバリオジェネシス まとめと展望
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤基
2. 発表標題 Theoretical overview of Muon g-2
3. 学会等名 The XXVIII International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤基
2. 発表標題 Muon g-2 vs LHC Run-II in SUSY models
3. 学会等名 新テラスケール研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤基
2. 発表標題 Belle II が挑戦する物理
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Motoi Endo
2. 発表標題 Theory Interplay between Flavor and Energy Frontier
3. 学会等名 Korean Physics Society Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Motoi Endo
2. 発表標題 Theory overview of nucleon EDM
3. 学会等名 Workshop on “ Nucleon electric dipole moments and spin structure ” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Motoi Endo
2. 発表標題 Interplay between collider and flavour physics
3. 学会等名 Joint Workshop of FKPL and TYL/FJPPL Particle Physics Laboratories (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Motoi Endo
2. 発表標題 Scale uncertainties in vacuum decay rate
3. 学会等名 1st KEK-KIAS-NCTS Joint Workshop on Particle Physics Phenomenology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ハンガリー	エトヴェシュ・ロラード大学			
イタリア	パドヴァ大学	INFN		
韓国	KAIST			
ドイツ	カールスルーエ工科大学			
イスラエル	テクニオンーイスラエル工科大学			
ドイツ	カールスルーエ工科大学			
フランス	LPTHE	LAPTH		
イタリア	INFN			
スイス	CERN			
イスラエル	Israel Institute of Technology			
ドイツ	Karlsruher Institut für Technologie			