

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05429

研究課題名（和文）フレーバー物理によるテラスケールの新物理の現象論的研究

研究課題名（英文）Phenomenological study of new physics at the TeV scale with flavor physics

研究代表者

三島 智（Mishima, Satoshi）

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・協力研究員

研究者番号：90396424

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子標準模型の背後には更に基礎的な新物理理論が存在すると考えられている。そのような新物理に対して、クォークやレプトンの種類（フレーバー）を変える遷移を含む素粒子反応を対象とするフレーバー物理は感度が高い。フレーバー物理の研究は様々な物理量を統合的に解析することが重要であるため、そのための解析ツールHEPfitの開発を進めた。近年、フレーバー物理の実験データと理論値の間に幾つかの不一致があることが報告されている。本研究では、それらの不一致が示唆する新物理模型について、HEPfitを用いて統合解析を進めた。その結果、それらの新物理模型の構築・検証に関して多くの知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在世界各地でフレーバー物理の実験が進められており、また近い将来の稼働を目指して様々なフレーバー実験の準備が進められている。本研究の成果は、そのような豊富な実験データを包括的に解析するツールと手法を提供するものである。これは標準模型を越える新物理理論の解明に繋がり、我々を形作る物質の根源についての理解を一步進めるものだと期待される。

研究成果の概要（英文）：It is believed that there exists new physics beyond the Standard Model of particle physics. Flavor physics, which describes transitions between different quarks or leptons, is very sensitive to such new physics. Since it is essential to analyze various observables in flavor physics simultaneously, we developed a flexible open-source tool HEPfit to perform a global analysis of the flavor observables in the Standard Model or any of its extensions. Recent experimental data for several flavor-physics observables show tensions with the corresponding Standard-Model predictions. Using HEPfit, we studied several new-physics models in the light of the observed tensions, and made various predictions for flavor and other observables.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 新物理模型 フレーバー物理

1. 研究開始当初の背景

現在までに見つかっている素粒子(クォーク、レプトン、ゲージ粒子、ヒッグス粒子)は標準模型と呼ばれる枠組みによって記述される。標準模型は低エネルギーの実験結果を非常によく説明しているが、ゲージ群の構造、クォークとレプトンのフレーバー構造の起源等、理論的に未解決な問題が多く残されている。欧州で世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突実験(LHC実験)が進められているが、新粒子・新物理の発見には至っていない。そのような状況下において、LHC実験よりも低エネルギーの高強度・精密測定実験であるフレーバー物理実験による新物理の間接探索の重要性は益々高まってきている。フレーバー実験は衝突エネルギーが低いので重い新粒子を直接的に生成することはできないが、その高統計・高精度の測定により、新粒子の量子効果を間接的に測定することが可能である。世界各地でフレーバー物理に関する実験が進められており、それと密接に関わる理論研究は素粒子物理学の進展に重要な役割を果たす。

2. 研究の目的

本研究ではフレーバー物理を用いて、素粒子標準模型を超えるテラスケールの新物理模型を現象論的に研究する。標準模型は数100GeV程度までの現象をよく記述しているが、更に高エネルギーには新しい物理理論が存在することが示唆されている。B中間子崩壊およびK中間子崩壊を軸に様々なフレーバー物理量を統合的に解析し、新物理の情報を効果的・効率的に引き出す手法を構築する。本研究の成果は、新物理理論の解明のみならず、フレーバー構造の起源の解明にも繋がることを期待される。

3. 研究の方法

本研究では、フレーバー物理を用いてテラスケールの新物理を追求する。フレーバー物理とはクォークやレプトンの種類(フレーバー)を変える遷移を含む素粒子反応を対象とする物理のことである。フレーバー物理実験、LHC実験、そしてその他の様々な実験からの豊富なデータを有機的に組み合わせることにより、素粒子標準模型を超えるテラスケールの新物理模型に関する情報を効果的に引き出すことができる。

研究の初期段階では統合解析ツールHEPfitの開発を進める。HEPfitは種々の新物理模型において様々な物理量を計算し、統計解析を行うためのツールである。本研究の申請前、本研究代表者がローマ大学に所属していた際、その本格的な開発をスタートした計算コードである。本研究を進めるため、様々なフレーバー物理量および新物理模型を解析するためのコードをHEPfitに組み込む。

フレーバー物理には多くの観測量が存在し、それらには新物理模型毎に標準模型からのズレが異なるパターンで表れる。より多くの物理量を解析することで、新物理に関するより詳細な情報を得ることが可能となる。新物理の模型毎に解析するべきフレーバー物理量を検討し、HEPfitへの組み込みを進める。そして、近年報告されているフレーバー実験のデータと理論値の間の不一致をヒントにして新物理模型を構築し、HEPfitを用いてその統合解析を進める。これにより、新物理模型を峻別するために必要な物理量を調べ、より効果的・効率的に新物理の情報を引き出す方法を探っていく。

4. 研究成果

(1) K中間子崩壊および関連するフレーバー物理量への超対称粒子の寄与について調べた。K中間子が2つの中間子に崩壊する過程の直接的CP対称性の破れについての標準模型の理論計算が進展し、実験値との不一致があることが報告された。標準模型を超える新物理模型として最小超対称標準模型を考え、超対称粒子の一つであるグルーイーノの寄与により不一致が説明可能であることを示した。またK_s崩壊やK_sμμ崩壊、そしてb_s崩壊のCP対称性の破れがグルーイーノの寄与により標準模型の予言値よりも大きくなる可能性があることを指摘した。

(2) 統合解析ツールHEPfitの開発を進め、HEPfit version 1.0を公開した。このツールが他の研究者にも広く使用されるようにソースコードを公開し、HEPfitの仕様および使用方法についてまとめた論文を発表した。HEPfitを用いることにより、フレーバー物理、電弱精密測定、ヒッグス粒子崩壊等の様々な観測量を様々な新物理模型において統合的に解析することが可能である。

(3) ミュー粒子の異常磁気モーメントの実験値と標準模型の予言値の間には4%程度の不一致が存在し、新物理の可能性が盛んに議論されている。他方、クォークの世代間混合を表すカビボ・

小林・益川混合行列について、行列要素 V_{ud} と V_{us} の測定値が混合行列のユニタリー性と矛盾していることが最近の研究で報告されている。これらの不一致は、ミュー粒子と相互作用する新粒子の存在を示唆している。そのような新粒子の候補として標準模型のレプトン以外の新たなレプトンを考え、上記2つの問題の解決可能性を探った。それらの新たなレプトンは電弱精密測定およびヒッグス粒子崩壊にも寄与する。電弱精密測定およびヒッグス粒子崩壊の制限を考慮して、本研究で開発を進めた HEPfit を用いて統合解析を行った。その結果、SU(2) 2重項のレプトンと SU(2) 3重項のレプトンを加えれば、2つの不一致を同時に説明できることを示した。

(4) 標準模型有効理論 (SMEFT) は標準模型を超える新物理の有効理論である。これを用いることで標準模型を超える新物理を系統的に探ることができる。近年、標準模型有効理論を用いたフレーバー物理の研究が盛んに進められている。本研究では、従来の研究で無視されていたフレーバー混合の寄与を含めて、標準模型有効理論と標準模型のマッチングに対する 1 ループ補正の計算を行った。例として $b \rightarrow s \mu \mu$ 崩壊を考え、この 1 ループ補正の寄与が重要であることを示した。

(5) B 中間子が $D^{(*)}$ 中間子と軽い中間子に二体崩壊する過程において、素粒子標準模型における理論計算と実験値の間に不一致があることが報告されている。本研究ではこの不一致が終状態の粒子の擬弾性散乱によって説明可能かどうかを調べた。その結果、理論計算に擬弾性散乱の寄与を含めても実験値を説明できないことを示した。また標準模型を超える新物理の可能性についても検討し、擬弾性散乱の存在を考慮したとしても color-allowed 振幅とよばれる崩壊振幅に 10% 程度の新物理の寄与が要求されることを示した。解析には本研究で開発を進めた HEPfit を用いた。

(6) 素粒子標準模型の範囲内で電弱精密測定に関する様々な物理量をベイズ統計を用いて包括的に解析した。解析には理論・実験両面の最近の発展を取り入れ、従来の同様の解析の結果をアップデートした。解析には本研究で開発を進めた HEPfit を用いた。

(7) 45 次元表現スカラー粒子を含む SU(5) 大統一模型の構築とその現象論に関する研究を進めた。 $b \rightarrow s \mu \mu$ 遷移を含む B 中間子のセミレプトニック崩壊の複数の実験データに標準模型の予言との不一致があることが報告されている。それらの不一致はレプトンフレーバー普遍性を破るような相互作用の存在を示唆しており、従来考えられてきた新物理模型とは異なる模型を構築する必要がある。本研究では、レプトンフレーバー普遍性を破るような相互作用を持つスカラーレプトクォークが TeV スケールの質量をもつ場合を考え、そしてそのスカラーレプトクォークを SU(5) 大統一模型の 45 次元表現スカラーに埋め込む模型を構築した。この模型の特徴は、SU(5) 大統一模型における「ゲージ結合定数の統一」および「ダウNTタイプクォークと荷電レプトンの質量比」の2つの問題を解決可能なことである。様々な観測量について 1 ループ補正を含めた解析を行い、上記のセミレプトニック崩壊の不一致が説明できることを示した。解析には本研究で開発を進めた HEPfit を用いた。現在、研究成果をまとめた論文を執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Motoi Endo, Satoshi Mishima	4. 巻 2020-08
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 084 [23 pages]
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 Koji Harai, Ryosuke Itoh, Hideki Miyake, Satoshi Mishima	4. 巻 245
2. 論文標題 Monte Carlo event generator with model-independent new physics effects for $B \rightarrow K^{(*)} \ell \ell$ decays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06030 [6 pages]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202024506030	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 -
1. 著者名 Motoi Endo, Satoshi Mishima, Daiki Ueda	4. 巻 2021-05
2. 論文標題 Revisiting electroweak radiative corrections to $b \rightarrow s \ell \ell$ in SMEFT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 050 [29 pages]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2021)050	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 J. de Blas, D. Chowdhury, M. Ciuchini, A.M. Coutinho, O. Eberhardt, M. Fedele, E. Franco, G. Grilli di Cortona, V. Miralles, S. Mishima, A. Paul, A. Penuelas, M. Pierini, L. Reina, L. Silvestrini, M. Valli, R. Watanabe, N. Yokozaki	4. 巻 80
2. 論文標題 HEPfit: a code for the combination of indirect and direct constraints on high energy physics models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 456 [31 pages]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7904-z	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 J. de Blas, M. Ciuchini, E. Franco, S. Mishima, M. Pierini, L. Reina, L. Silvestrini	4. 巻 314
2. 論文標題 The Global Electroweak and Higgs Fits in the LHC era	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science (EPS-HEP2017)	6. 最初と最後の頁 467 [6 pages]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.314.0467	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 M. Endo, T. Goto, T. Kitahara, S. Mishima, D. Ueda, K. Yamamoto	4. 巻 2018-04
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 019 [28 pages]
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 Motoi Endo, Syuhei Iguro, Satoshi Mishima	4. 巻 2022-01
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 147 [28 pages]
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 J. de Blas, M. Ciuchini, E. Franco, A. Goncalves, S. Mishima, M. Pierini, L. Reina, L. Silvestrini	4. 巻 -
2. 論文標題 Global analysis of electroweak data in the Standard Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Accepted in Physical Review D	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) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 三島 智
2. 発表標題 Flavor physics in the SU(5) GUT with a TeV-scale triplet scalar leptoquark
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会, オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三島 智
2. 発表標題 Recent hot topics in B physics
3. 学会等名 新ヒッグス勉強会第26回定例会, 大阪大, 大阪府豊中市 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Mishima
2. 発表標題 '/ and new physics
3. 学会等名 16th Flavor Physics and CP Violation Conference (FPCP2018), Hyderabad, India (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Mishima
2. 発表標題 Global electroweak fits at CEPC
3. 学会等名 2018 International Workshop on High Energy Circular Electron Positron Collider (CEPC2018), Beijing, China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三島 智
2. 発表標題 Theoretical overview and global fit
3. 学会等名 Workshop “ Anomalies in b to sll and its implications,” 東京大学本郷キャンパス, 東京都文京区 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三島 智
2. 発表標題 Theoretical overview on $R_{K^{\{(*)\}}$
3. 学会等名 NP-Japan meeting, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県つくば市 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三島 智
2. 発表標題 Scrutinizing final-state interactions in charmed hadronic B decays
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2021, オンライン開催
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三島 智
2. 発表標題 Revisiting rescattering contribuitons to charmed hadronic B decays
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会, オンライン開催
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三島 智
2. 発表標題 Current status of B-physics anomalies
3. 学会等名 新ヒッグス勉強会第22回定例会, 大阪大, 大阪府豊中市 (招待講演)
4. 発表年 2018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
---------	---------