

令和元年6月7日現在

機関番号：12611

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05314

研究課題名(和文) LHCでの光子-光子衝突過程による標準模型を超える物理の研究

研究課題名(英文) Physics beyond the Standard Model via photon-photon collision processes at the LHC

研究代表者

曹基哲(Cho, Gi-Chol)

お茶の水女子大学・基幹研究院・教授

研究者番号：10323859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：LHCを始めとする現在及び将来のコライダー実験における標準模型を超える物理の現象論的研究を行った。LHCでの前方検出器を用いた光子・陽子衝突過程を通じた、スピン1媒介粒子によるフェルミオン暗黒物質の生成およびその探索可能性について調べた。標準模型を超える物理を起源とするレプトン・フレーバーの破れについて、それが重い粒子の媒介で起きたときの有効理論である4体フェルミ相互作用に基づいて、将来の電子・陽電子コライダーでの探索可能性について調べた。暗黒物質の起源に関して複数の可能性を吟味し、その現象論的帰結について分析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で示した電子・陽電子コライダー実験におけるレプトン・フレーバーの破れ(LFV)の探索可能性は、将来実験として検討されている国際リニアコライダー実験(ILC実験)で期待される新物理探索の可能性を示したものである。LFVの探索は現在進行中であるBell-II実験でも行われるが、同実験のLFV探索感度とILCを比較し、一部のLFV結合定数に対する感度はILCの方が高いことを示した。これにより、ILC実験の物理的意義の一つが明らかにされた。また、LHCで設置が検討されている前方検出器の有用性を検討する上で、本研究で行われた光子・陽子衝突過程における新物理探索は一定の意義を持つものである。

研究成果の概要(英文)：We studied phenomenology of physics beyond the Standard Model at present and future collider experiments such as the LHC or the ILC (International Linear Collider). First, we investigated possibilities of production of the fermionic dark matter from decay of the spin 1-mediator in a certain dark sector scenario via photon-proton collision at the LHC using the forward detector. Second, on the lepton flavor violation which is a typical phenomena of physics beyond the SM, we studied the four-Fermi contact interaction as a low-energy effective theory which describes physics processes mediated by heavy particles. We discussed possibilities to search for LFV processes at future e^+e^- linear collider. Third, we studied a few scenarios which explain the origin of dark matter, and examined phenomenological consequences.

研究分野：素粒子物理学理論

キーワード：コライダー実験 レプトン・フレーバーの破れ 暗黒物質 大統一理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LHC 実験でのヒッグス粒子発見以降、素粒子現象論研究における次の主なターゲットはヒッグス粒子の性質を精密に決定することに加えて標準模型を越える物理の探索を実験家と協同して行うことであった。当時、LHC の次世代実験として前方検出器の設置が検討されており、そこでの測定可能な現象の一つに陽子から放出された準光子を用いた衝突があった。よって放出された準光子同士もしくは準光子と陽子の衝突を通じた新物理探索の可能性を調べる必要があった。また同時に、このようなセットアップの実験以外で行われる新物理探索との比較・検討が課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は LHC 実験における陽子から放出される準光子を用いた衝突過程(光子・光子および光子・陽子)における、新物理探索の可能性を調べ、この過程での新物理模型研究のために必要な解析手法を構築し、従来の陽子・陽子衝突過程による探索に対する優位性、相補性を明らかにしようとするものである。特に陽子・陽子衝突過程では一般に不得意とされる、カラー量子数を持たない新粒子の探索手法、模型のパラメータ解析手法について、準光子衝突の特徴を活かした新たな枠組みの提案を目指すものである。加えて、新物理模型探索実験の進展に伴って生じる諸問題について調べようとするものである。

3. 研究の方法

LHC 実験での陽子から放出される準光子同士もしくは準光子と陽子内部のパートンとの衝突による新粒子探索の感度を、前方検出器を想定したモンテカルロ・シミュレーションによって調べる。また本研究課題の主要な対象である LHC 実験のような陽子・陽子衝突型コライダーと相補的な関係にある、電子・陽電子型コライダーにおける新物理探索可能性の研究を、モンテカルロ・シミュレーションを用いて行う。

4. 研究成果

(1) 準光子・陽子衝突過程における新物理探索

前方検出器を用いた、光子・陽子衝突過程による新粒子探索としてスピン 1 を持つ媒介粒子による、フェルミオン暗黒物質の生成及びその探索可能性について模型の詳細によらない(model independent)枠組みで調べた。通常、模型の詳細によらない新物理探索は高次元演算子を導入して行われるが、その場合は媒介粒子の寄与を積分してしまうため、新相互作用による終状態生成において必要な情報が失われる場合があり、現実的な現象論的解析には適さない可能性があった。本研究では暗黒物質を含む「ダークセクター」がフェルミオン暗黒物質とスピン 1 粒子 Y を含むと仮定し、このスピン 1 粒子 Y が標準模型の粒子とも相互作用する場合に、光子・陽子衝突から生成された Y がフェルミオン暗黒物質対へと崩壊する過程に注目した。この場合、模型のパラメータは Y とフェルミオン暗黒物質の質量、 Y と暗黒物質との相互作用の結合定数および Y とクォークとの結合定数である。 Y が暗黒物質および標準模型フェルミオンとそれぞれベクトルおよび軸性ベクトル型相互作用する際の結合定数をパラメータとし、前方検出器を用いた光子・陽子衝突過程からの制限を求めた。その結果は日本物理学会、海外でのシンポジウムなどで発表し、現在学術誌への投稿の準備を進めている。

(2) コライダー実験におけるレプトン・フレーバーの破れの探索

電子・陽電子コライダーにおけるレプトン・フレーバーの破れ(LFV)を調べた。LFV の起源が重い粒子の媒介による場合、粒子の質量が実験を行うエネルギースケールより十分大きければ、低エネルギー有効模型として 4 体フェルミ型相互作用を用いるのが適切である。本研究では将来実験計画として検討されている国際リニアコライダー実験(ILC)を想定し、スカラー型、ベクトル型など、計 6 つある LFV 結合定数に対する ILC 実験の感度を調べた。標準模型相互作用から生じる膨大な背景事象を抑制するための、運動学的変数に対するカットの条件を詳細に調べ、終状態レプトンに対する横質量(transverse mass)へのカットが有効であることを指摘した。ILC 実験のエネルギー、ルミノシティなどを想定し、検出器シミュレーションを含む詳細な解析の結果、ILC 実験における LFV 探索は十分現実的であることが示された。特に、現在進行中である Belle-II 実験で期待される LFV 探索への感度と ILC のそれとを比較し、ILC では Belle-II と同程度の感度が期待され、一部の LFV 結合定数では Belle-II を上回ることを示した。また従来このような LFV 結合定数に対する研究では、一つの結合定数が他に比べて支配的である(他の結合定数は無視できるほど小さい)という、single coupling dominance hypothesis を用いることが多く、本研究でもそれを採用しているが、より現実的な解析を行うため、2 つ存在するスカラー型 LFV 結合定数について相関を調べ、

それが実験結果からの制限としてどのように反映されるのかを示した。これらの研究成果は複数の国際会議や学会で発表し、学術論文として Physics Letters B 誌、Modern Physics Letters A 誌などに投稿、掲載された。

(3) 暗黒物質の起源とコライダー実験における検証

暗黒物質は宇宙背景放射や重力レンズ効果など、天文学的観測ではその存在が確定的だがコライダー実験など、素粒子実験では未だ発見には至っていない。特に「直接検出実験」と呼ばれる、暗黒物質による標的原子核の散乱実験はその感度が年々向上しているにも関わらずシグナルが検出されず、同過程の散乱断面積に対する上限が厳しくなる一方である。本研究では標準模型に複素スカラー場を一つ導入した新物理模型において、暗黒物質と原子核の散乱が抑制される機構を提案した。この模型ではスカラーポテンシャルに対して CP 不変性を要請することで、暗黒物質（導入した複素スカラー場の虚数部分）が安定化する（崩壊が禁じられる）。また複素スカラー場の実数部分は標準模型ヒッグスと質量混合を起こし、質量固有状態として 2 つの中性、かつ CP-even なスカラー粒子が存在する。このうち一つは LHC 実験で発見された 125GeV の質量を持つスカラー粒子である。本研究では、2 つの CP-even スカラー粒子の質量が縮退する極限で、カレント固有状態から質量固有状態へ移る $O(2)$ 変換の対称性が復活し、その結果クォークと暗黒物質の散乱振幅が 2 つの CP-even スカラー粒子の媒介するダイアグラム同士で打ち消すことを示した。これはフレーバー物理における「GIM 機構」に相当する。これにより、暗黒物質の熱的残存量の観測結果に抵触することなく、暗黒物質・原子核散乱が抑制されることが示された。このシナリオの直接的帰結は質量がほぼ 125GeV のスカラー粒子が 2 つ存在することである。そのような 2 つの（ほぼ）縮退したスカラー粒子がこれまでの LHC 実験で排除できないこと、将来の ILC 実験ではその縮退を見出す可能性があることなどを指摘した。本研究の成果は複数の国際会議や学会などで発表し、現在学術誌への投稿を準備中である。

(4) 大統一理論と暗黒物質、コライダー現象論における帰結の検討

暗黒物質を説明する最小の拡張模型の可能性として、標準模型に $SU(2)_L$ の多重項を一つ加え、その中で電気的中性成分を暗黒物質とみなす、というアプローチがある。しかしこのようなアプローチでは暗黒物質が担うべき安定性（軽い粒子への崩壊を禁じる離散対称性）が保証されず、人為的にそれを導入しなくてはならない。本研究ではそのような $SU(2)_L$ 多重項および暗黒物質の起源としてある種の大統一模型を検討した。 $S(10)$ 大統一模型は、そのランクの大きさから標準模型ゲージ群に加えて余分な $U(1)$ ゲージ群を持つ。この $U(1)$ 電荷が偶数の場が真空期待値をとって標準模型のゲージ群へと対称性が破られる場合、離散対称性が残り、よってそれが暗黒物質の安定性を保証することが知られている。本研究ではそのような可能性と共にゲージ結合定数統一の条件から望ましい $S(10)$ の表現を求めた。ゲージ結合定数が統一するためには暗黒物質を含む $SU(2)_L$ 多重項に加えて $SU(3)$ 8 重項のスカラーが必要であること、これが $S(10)$ のどのような表現に含まれるべきか、などを示し、カラー 8 重項スカラーの質量スケールが概ね 2TeV 程度、と LHC の実験の探索可能な範囲であることを指摘した。この結果は複数の国際会議や学会などで発表し、コライダー現象論について調べた後、その結果を学術誌へ投稿する予定である。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

[G.C. Cho](#), Y. Fukuda, T. Kono, Lepton flavor violation via four-Fermi contact interactions at the International Linear Collider, Physics Letters B789 (2019) 399-404 (査読有)

[G.C. Cho](#), H. Shimo, Search for lepton flavor violation at future lepton colliders, Modern Physics Letters A32 (2017) 1750127 (査読有)

[G.C. Cho](#), N. Maru, K. Yotsutani, Perturbative unification of gauge couplings in supersymmetric E_6 models, Modern Physics Letters A31 (2016) 1650130 (査読有)

[学会発表] (計 30 件)

Sachiho Abe, Suppression of dark matter-nucleon scattering in singlet Higgs extension of the SM and its signature at collider experiments, The 4th International Workshop

on “Higgs as a Probe of New Physics 2019”

Kana Hayami, Coupling unification in an extension of the minimal dark matter model and collider signatures, The 4th International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2019”

Miki Yonemura, Constraints on a light scalar in a singlet Higgs extension of the SM at Belle-II, The 4th International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2019”

曹基哲, Suppression of dark matter-nucleon scattering in singlet Higgs extension of the SM and its signature at collider experiments, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年)

日色史奈, Constraints on light scalar in singlet Higgs extension of the SM at Belle-II, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年)

速水香奈, Coupling unification in an extension of the minimal dark matter model and collider signatures, 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年)

福田裕香, 河野能知, 曹基哲, 電子・陽電子コライダーによるレプトン・フレーバーを破る 4 体フェルミ相互作用の探索, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年)

米村美紀, 越野茉依羅, 曹基哲, 光子 陽子衝突におけるダークフォトン生成崩壊, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年)

阿部祥歩, 曹基哲, スカラーダークマターと核子の散乱抑制機構について, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年)

速水香奈, 曹基哲, 他 1 名, Coupling unification in minimal dark matter models, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018 年)

Gi-Chol Cho, Lepton-flavor violation via four-Fermi contact interactions at e+e-linear collider, Asian Linear Collider Workshop 2018 (ALCW 2018)

速水 香奈, 拡張された minimal dark matter model における gauge 結合定数の統一, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2018」

阿部 祥歩, スカラーダークマター模型の核子散乱抑制条件と現象論的制限, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2018」

米村 美紀, 光子-陽子衝突におけるスピン 1 粒子を媒介とした暗黒物質の探索について, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2018」

阿部祥歩, スカラーダークマター模型の核子散乱抑制条件と現象論的制限, 日本物理学会 2018 年秋季大会

米村美紀, 光子-陽子衝突におけるスピン 1 粒子を媒介とした暗黒物質の探索について, 日本物理学会 2018 年秋季大会

速水香奈, 拡張された minimal dark matter model における gauge 結合定数の統一, 日本物理学会 2018 年秋季大会

Gi-Chol Cho, Lepton-flavor violation via four-Fermi contact interactions at e+e-linear collider, Asian Linear Collider Workshop 2018 (ALCW 2018)

- ②1 速水 香奈、拡張された minimal dark matter model における gauge 結合定数の統一、基
 研研究会「素粒子物理学の進展 2018」
- ②2 阿部 祥歩、スカラーダークマター模型の核子散乱抑制条件と現象論的制限、基研研究会「素
 粒子物理学の進展 2018」
- ②3 米村 美紀、光子-陽子衝突におけるスピン 1 粒子を媒介とした暗黒物質の探索について、
 基研研究会「素粒子物理学の進展 2018」
- ②4 福田裕香、河野能知、曹基哲、電子・陽電子コライダーによるレプトン・フレーバーを破
 る 4 体フェルミ相互作用の探索、日本物理学会 2017 年秋季大会
- ②5 Gi-Chol Cho, Lepton flavor violation via four-Fermi contact interactions at future
 lepton colliders, The 7th KIAS workshop on particle physics and cosmology, 2017, KOREA
- ②6 Miki Yonemura, Searching for signatures of the Dark Sector in Collider Experiments,
 8th Ewha-JWU-Ochanomizu Joint Symposium 2017
- ②7 Kana Hayami, Search for the Possibility of Grand Unification and Higgs Inflation,
 8th Ewha-JWU-Ochanomizu Joint Symposium 2017
- ②8 曹 基哲、Lepton flavor violation via four-Fermi contact interactions at future
 lepton colliders、大阪ワークショップ 2017 地上実験で検証可能な新物理」、2017 年
- ②9 下華奈子、曹基哲、Search for lepton flavor violation in an e⁻ e⁻ collider、日本物
 理学会 2016 年秋季大会
- ③0 山下公子、曹基哲、他 4 名、スピン 2 の粒子を媒介とした暗黒物質模型への制限と LHC で
 の探索可能性について、日本物理学会 2016 年秋季大会

6 . 研究組織

(1)研究分担者
 なし

(2)研究協力者
 研究協力者氏名：河野 能知
 ローマ字氏名：KONO, Takanori

研究協力者氏名：馬渡 健太郎
 ローマ字氏名：MAWATARI, Kentarou

研究協力者氏名：速水 香奈
 ローマ字氏名：HAYAMI, Kana

研究協力者氏名：米村 美紀
 ローマ字氏名：YONEMURA, Miki

研究協力者氏名：阿部 祥歩
 ローマ字氏名：ABE, Sachihō

研究協力者氏名：日色史奈
 ローマ字氏名：HI IRO, Fumina

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。