

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800123

研究課題名(和文)暗黒物質を含む素粒子模型とその初期宇宙論およびコライダー現象論

研究課題名(英文)Dark matter models and their application to cosmology and collider phenomenology

研究代表者

濱口 幸一 (Hamaguchi, Koichi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：80431899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：標準模型の理論的問題である世代間階層性および強いCP問題を同時に解き、アクシオン暗黒物質を含む「フラクシオン模型」を提案した。この模型は、バリオン非対称性、ニュートリノ質量、インフレーションも同時に説明できる。  
また、超対称性理論におけるニュートラリーノ暗黒物質のうち、特にヒッグス粒子(125GeV)やZボゾン(91GeV)のresonanceを通して対消滅する質量0(10GeV)の暗黒物質について、コライダー実験や直接検出実験での検証可能性を包括的に調べ、近い将来ほぼ全てのパラメータ領域において検証可能であることを定量的に示した。  
その他、暗黒物質に関する様々な理論的研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We proposed “flaxion model”. This model not only explains the hierarchical flavor structure in the quark and lepton sector (including the neutrino sector), but also solves the strong CP problem as well as the Dark Matter puzzle. Moreover, the model can also explain the inflation and the cosmological baryon asymmetry in the Universe.  
We also studied comprehensively the constraints and future prospects of the search for Higgs- and Z-resonant 0(10 GeV) neutralino dark matter in supersymmetric models. It was shown that almost all the parameter space of the scenario will be probed complementarily by the collider search and the direct detection experiments.  
We also conducted several other theoretical researches on Dark Matter.

研究分野：素粒子論

キーワード：暗黒物質 初期宇宙論 LHC

## 1. 研究開始当初の背景

### 【標準模型を超える物理】

暗黒物質の存在は標準模型を超える物理の最も確実な証拠の1つである。

### 【直接探索実験】

近年目覚ましい進展があり、研究期間中も飛躍的な感度向上が期待されていた。また  $0(1-10)\text{GeV}$  の軽い質量領域に「暗黒物質の兆候か?」と注目されているイベントも報告されていた。

### 【LHC 実験】

研究期間中に重心系エネルギーを  $13-14\text{TeV}$  に上げての実験再開が予定されていた。カラーを持った  $\text{TeV}$  領域の粒子だけでなく、カラーを持たない  $0(100)\text{GeV}$  の粒子に対する感度も格段に良くなり、暗黒物質と標準模型粒子との相互作用を媒介する新粒子が見えてくる可能性があった。

## 2. 研究の目的

本研究の大きな目的は、暗黒物質を含む素粒子模型とその初期宇宙論およびコライダー現象論を突破口として、標準模型を超える物理を探索する事である。目的は大きく分けて3つある。

(1)  $0(1-10)\text{GeV}$  の軽い暗黒物質に関する無矛盾な素粒子模型+初期宇宙シナリオを構築する。

(2)  $0(100)\text{GeV}$  のニュートラリーノ暗黒物質を含む超対称性模型について徹底検証する。

(3) 研究期間中に LHC 実験もしくは直接探索実験の新しい結果が発表されたら随時

(1)(2)の研究に反映させ、実験結果に基づいた素粒子模型および初期宇宙シナリオの構築を進める。

## 3. 研究の方法

(1)  $0(1-10)\text{GeV}$  の軽い暗黒物質について、LHC 現象論(特にカラーを持った媒介粒子の LHC シグナル)の研究を行う。また、暗黒物質の非熱的生成を含む初期宇宙シナリオの研究を行う。

(2)  $0(100)\text{GeV}$  のニュートラリーノ暗黒物質を含む超対称性模型について、暗黒物質残存量とミュオン異常磁気能率を同時に説明出来るパラメータ領域の同定と、その領域における LHC シグナルを解析する。

(3) 直接探索実験と LHC 実験の実際の最新データを随時反映させ、 $0(1-100)\text{GeV}$  の暗黒物質を含む一貫した素粒子模型および初期宇宙シナリオの構築を目指す。

## 4. 研究成果

研究目的に沿って、暗黒物質に関する様々な理論的研究を行った。以下、そのいくつかの成果について記述する。

・アイソスピンを破る暗黒物質シナリオについて、暗黒物質とクォークとの相互作用がカラーを持った粒子によって媒介されて

いる模型を調べた [発表論文 16]。いくつかの暗黒物質直接探索実験によって、軽い暗黒物質の発見可能性を示唆するイベントが報告されていた。一方、この領域は他の直接探索実験によって厳しく制限されていた。この一見矛盾した状況を解決するシナリオとして、暗黒物質の相互作用がアイソスピン対称性を破っている可能性が指摘されていた。本研究では暗黒物質とクォークとの相互作用がカラーを持った粒子によって媒介されている模型を解析し、カラーを持った媒介粒子の質量が  $0(1)\text{TeV}$  程度であること、暗黒物質が初期宇宙で熱的に生成されたとすると残存量が多すぎる(観測されている暗黒物質密度を超えてしまう)ことを示した。 $0(1)\text{TeV}$  のカラーを持った粒子は  $14\text{TeV}$  の LHC で発見可能である。さらにフレーバーや CP の破れからの制限を解析し、模型の結合定数の間に厳しい tuning が必要であることを明らかにした。

・超対称性理論においてグラビティーノが暗黒物質となるゲージ伝達模型を再考察した [発表論文 15]。ヒッグス粒子の質量  $126\text{GeV}$  をインプットとし、さらに CP の保存を要求する(境界条件としてヒッグスの B-term をゼロとする)minimal な模型を考えた。その結果、広いパラメータ領域で荷電粒子スタウが長寿命となり、さらにその質量が  $1\text{TeV}$  であることが分かった。 $1\text{TeV}$  の長寿命荷電粒子スタウは将来の LHC 実験で検証出来るため、これは重要な結論である。

・AMS-02 衛星が宇宙線反陽子のフラックスの超過成分を報告したことを受けて、これを暗黒物質の対消滅あるいは崩壊によって説明できること、特にウィーノ暗黒物質の対消滅がよい候補であることを示した [発表論文 12]。

・超対称性理論におけるニュートラリーノ暗黒物質のうち、特にヒッグス粒子の質量 ( $125\text{GeV}$ ) や Z ボゾンの質量 ( $91\text{GeV}$ ) の約半分の質量を持ち resonance を通して対消滅する軽い Bino-Higgsino 暗黒物質について、(i) LHC でのチャージーノ/ニュートラリーノ探索、(ii) ヒッグスの invisible 崩壊 (LHC および ILC)、(iii) 暗黒物質の直接検出、などの制限および検証可能性を包括的に調べ、近い将来ほぼ全てのパラメータ領域において検証可能であることを定量的に示した [発表論文 10]。

・ATLAS, CMS によって報告された  $750\text{GeV}$  diphoton excess を受けて、本研究課題のターゲットである暗黒物質と関連したいくつかの研究を行った。 $750\text{GeV}$  diphoton excess を説明出来る素粒子模型のうち、約  $375\text{GeV}$  の vector-like クォークが  $750\text{GeV}$  の束縛状態を作りそれが diphoton excess を説明する

ような模型について、模型構築を行い、LHC での他の excess のヒント(ATLAS on-Z excess)を同時に説明する可能性や暗黒物質の現象論について解析を行った [発表論文 8]。また、vector-like クォークが (i) diphoton excess を説明するループダイアグラムに寄与すると共に、(ii) LHC での他の excess のヒント(multilepton excess)を同時に説明するような模型構築を行い、LHC でのシグナルや暗黒物質の現象論について解析を行った [発表論文 7]。

・標準模型の理論的問題である、世代間階層性および強い CP 問題を同時に解くフラクシオン模型を提案した。さらにこの模型では暗黒物質、バリオン非対称性、ニュートリノ質量、インフレーションといった標準模型を超えた物理が必要とされる現象も同時に説明できる [発表論文 4]。

・暗黒物質の熱的残存量とミュオン異常磁気能率のずれを同時に説明できる超対称性模型の研究を行った [発表論文 3]。超対称性模型において、ニュートラリーノ暗黒物質の初期宇宙での熱的残存量が現在の観測値と一致する典型的なパラメータ領域では、カラーを持たない超対称性粒子が  $O(100)\text{GeV}$  の質量をもっている。このようなパラメータ領域においては、ミュオン異常磁気能率の理論値と実験値のずれを説明出来る可能性がある。そのようなパラメータ領域を同定し、その大部分が、将来の LHC の高ルミノシティ実験で探索可能であることを明らかにした。

・宇宙背景放射の観測から求められたハッブル定数と、近傍宇宙の観測から求められたハッブル定数の値の間に食い違いがあることが指摘されている。このずれを説明する模型として、超対称性模型の枠組みの中で、グラビティーノとアクシーノが 1 番目と 2 番目に軽いようなシナリオを提案し、論文を発表した [発表論文 1]。

## 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 16 件)(全て査読あり)

1) Gravitino/Axino as Decaying Dark Matter and Cosmological Tensions

By Koichi Hamaguchi, Kazunori Nakayama, Yong Tang.

arXiv:1705.04521 [hep-ph].

10.1016/j.physletb.2017.06.071.

Phys.Lett. B772 (2017) 415-419.

2) Predictions for the neutrino parameters in the minimal gauged  $U(1)[L_\mu-L_\tau]$  model  
By Kento Asai, Koichi Hamaguchi, Natsumi

Nagata.

arXiv:1705.00419 [hep-ph].

10.1140/epjc/s10052-017-5348-x.

Eur.Phys.J. C77 (2017) no.11, 763.

3) Probing minimal SUSY scenarios in the light of muon g-2 and dark matter

By Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Sho Iwamoto, Keisuke Yanagi.

arXiv:1704.05287 [hep-ph].

10.1007/JHEP06(2017)031.

JHEP 1706 (2017) 031.

4) Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model

By Yohei Ema, Koichi Hamaguchi, Takeo Moroi, Kazunori Nakayama.

arXiv:1612.05492 [hep-ph].

10.1007/JHEP01(2017)096.

JHEP 1701 (2017) 096.

5) Affleck-Dine Leptogenesis with Varying Peccei-Quinn Scale

By Kyu Jung Bae, Howard Baer, Koichi Hamaguchi, Kazunori Nakayama.

arXiv:1612.02511 [hep-ph].

10.1007/JHEP02(2017)017.

JHEP 1702 (2017) 017.

6) Probing the origin of 750 GeV diphoton excess with the precision measurements at the ILC

By Kyu Jung Bae, Koichi Hamaguchi, Takeo Moroi, Keisuke Yanagi.

arXiv:1604.08307 [hep-ph].

10.1016/j.physletb.2016.06.026.

Phys.Lett. B759 (2016) 575-582.

7) From the 750 GeV diphoton resonance to multilepton excesses

By Kyu Jung Bae, Chuan-Ren Chen, Koichi Hamaguchi, Ian Low.

arXiv:1604.07941 [hep-ph].

10.1103/PhysRevD.94.015035.

Phys.Rev. D94 (2016) 015035.

8) Models of a 750 GeV quarkonium and the LHC excesses

By Koichi Hamaguchi, Seng Pei Liew.

arXiv:1604.07828 [hep-ph].

10.1103/PhysRevD.94.035012.

Phys.Rev. D94 (2016) no.3, 035012.

9) Diphoton Excess and Running Couplings

By Kyu Jung Bae, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Takeo Moroi.

arXiv:1602.03653 [hep-ph].

10.1016/j.physletb.2016.04.031.

Phys.Lett. B757 (2016) 493-500.

10) Prospects for Higgs- and Z-resonant Neutralino Dark Matter

By Koichi Hamaguchi, Kazuya Ishikawa.  
arXiv:1510.05378 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.93.055009.  
Phys.Rev. D93 (2016) no.5, 055009.

11) How to decontaminate overlapping fat jets

By Koichi Hamaguchi, Seng Pei Liew, Martin Stoll.  
arXiv:1505.02930 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.92.015012.  
Phys.Rev. D92 (2015) no.1, 015012.

12) AMS-02 Antiprotons from Annihilating or Decaying Dark Matter

By Koichi Hamaguchi, Takeo Moroi, Kazunori Nakayama.  
arXiv:1504.05937 [hep-ph].  
10.1016/j.physletb.2015.06.041.  
Phys.Lett. B747 (2015) 523-528.

13) Reconstruction of Vector-like Top Partner from Fully Hadronic Final States

By Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Kazuya Ishikawa, Martin Stoll.  
arXiv:1405.2677 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.90.055027.  
Phys.Rev. D90 (2014) no.5, 055027.

14) Complexified Starobinsky Inflation in Supergravity in the Light of Recent BICEP2 Result

By Koichi Hamaguchi, Takeo Moroi, Takahiro Terada.  
arXiv:1403.7521 [hep-ph].  
10.1016/j.physletb.2014.05.006.  
Phys.Lett. B733 (2014) 305-308.

15) Testing the Minimal Direct Gauge Mediation at the LHC

By Koichi Hamaguchi, Masahiro Ibe, Tsutomu T. Yanagida, Norimi Yokozaki.  
arXiv:1403.1398 [hep-ph].  
10.1103/PhysRevD.90.015027.  
Phys.Rev. D90 (2014) no.1, 015027.

16) Isospin-Violating Dark Matter with Colored Mediators

By Koichi Hamaguchi, Seng Pei Liew, Takeo Moroi, Yasuhiro Yamamoto.  
arXiv:1403.0324 [hep-ph].  
10.1007/JHEP05(2014)086.  
JHEP 1405 (2014) 086.

[学会発表](計19件)

(1) 国際会議 計11件

Koichi Hamaguchi, 2018.3, "Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model", Moriond Electroweak 2018.

Koichi Hamaguchi, 2018.2, "Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model", PACIFIC 2018.

Koichi Hamaguchi, 2017.10, "Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model", IBS Conference on Dark World.

Koichi Hamaguchi, "Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model," 2017.2.16, KEK-PH 2017, KEK.

Koichi Hamaguchi, "Beyond the Standard Model," 2016年9月10-12日, The 22nd Vietnam School of Physics (VSOP-22), Quy Nhon, Vietnam.

Koichi Hamaguchi, "Probing the origin of the 750 GeV diphoton excess with the precision measurements at the ILC," 2016年6月1日, ECFA-LC 2016, Santander, Spain.

Koichi Hamaguchi, "Diphoton Excess and Running Coupling Constant" 2016年3月8日, Beyond the Standard Model in Okinawa 2016, OIST

Koichi Hamaguchi, "Neutrinoless double beta decay and Leptogenesis" 2015年12月3日, IBS-PNU Joint Workshop on Particle Physics, String Theory and Cosmology, 釜山, 韓国

Koichi Hamaguchi, "Neutrinoless double beta decay and Leptogenesis" 2015年11月17日, Particle Cosmology and beyond 2015, 金沢

Koichi Hamaguchi, "Prospects for Higgs- and Z-resonant neutralino dark

matter” 2015年7月15日,  
Anticipating Discoveries: LHC14 and  
Beyond, MIAPP, Munich, Germany.  
Koichi Hamaguchi, “SUSY Dark Matter  
(after Higgs discovery)”, Dark  
Matter: Astrophysical probes,  
Laboratory test, Theory aspects, 2-27  
February 2015, MIAPP, Munich, Germany.

## (2) 国内会議 計8件

濱口幸一, 2017.5, “チュートリアル講  
演 二重ベータ崩壊 + レプトジェネシ  
ス”, 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子  
原子核研究」2017年領域研究会(岡山大  
学).

濱口幸一, “新物理 直接探索” 2016.10,  
Flavor Physics Workshop 2016, 岩室温  
泉ゆもとや, 新潟県.

濱口幸一, “LHCの最新結果を踏まえた  
TeV コライダーによる新物理探  
索” 2016.9, 日本物理学会, 宮崎大学.

濱口幸一, レプトジェネシスおよび  
0 2 発見時の右巻きニュートリノへの  
質量制限などについて, 2016年2月, 第  
一回A班主催若手研究会, 大阪大学

濱口幸一, “SUSY 今後の展望 やっぱり  
SUSYは軽い” 2015年12月, 新学術領域  
研究会 テラスケール2015 先端加速器

LHCが切り拓くテラスケールの素粒子物  
理学, 東京工業大学大岡山キャンパス

濱口幸一, “ダブルベータ崩壊とレプト  
ジェネシスと Higgs- and Z-resonant  
neutralino DM” 2015年9月, 基研研究  
会 素粒子物理学の進展2015, 基礎物理  
学研究所

濱口幸一, “ダブルベータ崩壊への期  
待” 2015年5月「宇宙の歴史をひもと  
く地下素粒子原子核研究」2015年領域研  
究会, 神戸大学

濱口幸一, “もしも Dark Matter の兆  
候が見えたら・・・ SUSY の場合”, 第2  
回 松江現象論研究会, 2014年11月, 島  
根県民会館

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

濱口 幸一 (Hamaguchi, Koichi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号: 80431899