

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14278

研究課題名（和文）宇宙暗黒物質とヒッグスから探る新物理

研究課題名（英文）New physics from dark matter and Higgs

研究代表者

石渡 弘治 (Ishiwata, Koji)

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号：40754271

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、素粒子標準理論によって説明不可能な宇宙暗黒物質存在の謎の解明のため、いまだ未知の多いヒッグス粒子とそれを含むスカラー粒子に着眼し、具体的な暗黒物質探索方法を提示することを目的とした。その結果、ヒッグス粒子と相互作用する擬南部ゴールドストーンスカラー粒子が暗黒物質となる場合には、直接探索実験とは違った探索実験が必要であることを示した。また超巨大質量を持つスカラー粒子が暗黒物質となる場合、先行研究に比べて非常に広い暗黒物質質量領域において発生しうる宇宙線全てについて網羅的にシミュレーションを行った結果、ガンマ線およびニュートリノ・反ニュートリノ宇宙線の観測が最も感度が高いことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2012年のヒッグス粒子発見により素粒子標準理論は確立したが、その一方で、素粒子標準理論と宇宙開闢時から現在に至る宇宙の進化の歴史との矛盾点は大きな課題として残ったままである。その矛盾点のうち最も大きな問題の一つが宇宙暗黒物質の存在である。宇宙暗黒物質の正体解明はすなわち、素粒子標準理論を越える新しい理論発見に直結する。そのため世界中で多くの研究者が実験・観測面と理論面から精力的に研究を続けている。本研究は素粒子標準理論においていまだ未知の多いスカラーセクターと暗黒物質との関連性に着目し、その正体解明に向けた新たな探索手法の提案を行うものであり、宇宙進化の謎を解き明かす重要な一役を担った。

研究成果の概要（英文）：The goal of this project is to propose concrete methods to detect dark matter of the Universe by focusing on the scalar sector including Higgs boson of the Standard Model.

It was found that the pseudo-Nambu-Goldstone boson dark matter that interact with Higgs is hard to detect in the future direct detection experiments, which indicates a new method required. For ultra-heavy dark matter, we simulated all kinds of cosmic-ray particles from dark matter in and outside the Galaxy. Consequently we found the gamma-ray and (anti)neutrino observations are most effective for the search of ultra-heavy dark matter.

研究分野：素粒子論的宇宙論

キーワード：暗黒物質 ヒッグス粒子 暗黒物質探索実験

1. 研究開始当初の背景

2012年にCERN LHC実験においてヒッグス粒子が発見され、素粒子標準理論はテラエレクトロンボルトスケール以下の素粒子物理現象を記述する理論として確立された。しかしながら、ヒッグス粒子の自己相互作用の強さ・ヒッグス以外のスカラー粒子の存在、そしてヒッグス粒子が主要な役割を果たす電弱対称性の破れの起源といった、スカラーセクターの全貌解明には至っていない。その一方、素粒子標準理論は宇宙論・天体の観測的事実との大きな矛盾点が指摘されている。その中でも重要な課題として世界中から注目されているのが、宇宙暗黒物質の存在である。宇宙暗黒物質の存在は、銀河回転曲線、弾丸クラスター、そして宇宙マイクロ波背景放射の精密観測により強く示唆される観測事実であるが、素粒子標準理論ではその正体や生成過程を一切説明できない。本研究は、これら、素粒子物理学においてようやく実験的にアクセス可能になったスカラーセクターの発展と、宇宙暗黒物質正体解明を目指した精力的な観測実験に強く動機付けられ、実験・観測事実から着想を得た理論的研究に続けられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、素粒子物理分野でついに実験的に観測可能となったヒッグス粒子を含むスカラーセクターの構造解明と、そのスカラーセクターが宇宙暗黒物質存在の問題にもたらすインパクトを調べることである。いずれも実験・観測事実を基礎とする理論研究であり、その理論計算をもとに新しい理論モデルを検証するための実験や観測手段の提案を行うこともプロジェクトに含まれる。

3. 研究の方法

研究計画1年目では、ヒッグスセクター(特に自己相互作用の強さ)をCERN LH実験で探るための加速器シミュレーションを行つたための計算コード作成を行う。ここでのアイデアは、ゲージ粒子の縦波成分同士の散乱を観測することである。素粒子標準理論における等価定理によれば、ゲージ粒子の縦波成分はヒッグス粒子と同等であり、したがってこれらの散乱を詳細に観測することで、ヒッグス粒子の自己相互作用の強さを間接的に測定することができる。それと並行し、素粒子標準理論のスカラーセクターを拡張した理論モデルに対して、ゲージ粒子の縦波成分の散乱が素粒子標準理論に比べてどの程度変わりうるかを理論計算によって定量的に明らかにする。2年目ではシミュレーションを実行し、結果を評価する。その結果をもとに、拡張スカラーモデルに暗黒物質の候補粒子が含まれる可能性を検討する。具体的には、暗黒物質の直接探索実験と宇宙線を用いた間接探索実験における検出可能性を理論的に評価する。特に後者については、暗黒物質を起源とする宇宙線の全て、つまり天の川銀河内と銀河外から飛来するガンマ線、電子・陽電子、陽子・反陽子、ニュートリノ・反ニュートリノの理論計算のため、伝搬シミュレーションを行う必要がある。そのためのコード作成に着手する。3年目においては、宇宙線伝搬シミュレーションを実行しその評価を行う。4年目では、パルサーなど天体を起源とする宇宙線の評価を開始する。これらは暗黒物質を起源とするシグナルを観測する上でのバックグラウンドとなるため、これらについても観測的かつ理論的理解を深めることが重要となる。さらに研究を宇宙物理学の方面で進展させ、矮小楕円銀河観測を応用した暗黒物質間接探索に着目する。それにより、これまで検討されていなかった新たな暗黒物質探索方法の提案を行う。

4. 研究成果

素粒子標準理論における等価定理を応用したヒッグス粒子の自己相互作用の探索の有効性を理論的に示すため、素粒子標準理論の拡張模型として有望視されている超対称素粒子標準理論を探索ターゲットとして定め、ゲージ粒子縦波成分の散乱断面積を計算した。複数のファインマンダイアグラムから構成される煩雑な理論計算であるが、等価定理を応用したクロスチェックを随時行い、正確な解析表式を得た。その結果、散乱断面積は素粒子標準理論の予言と比べて最大およそ30%程度ずれることが判明した [Figure 1, Phys.Rev.D96 (2017)1, 015009 より]。ただしこれはゲージ粒子縦波成分が直に観測できた場合の理論計算であり、実際CERN LHC実験でどのような物理量として観測可能かを示すには、加速器シミュレーションを行う必要がある。しかしながら、コード作成に成功したのち実際に実行してみると、ゲージ粒子縦波成分散乱は偶発的に他の散乱プロセスと互いに打ち

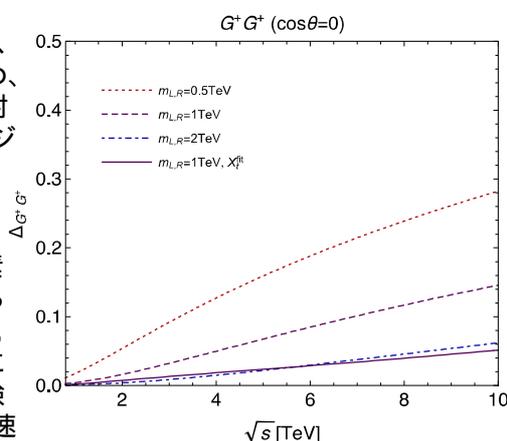


Figure 1 素粒子標準理論との予言の比

消し合い、加速器実験では直接観測できないことが判明した。これは予想外の事態であり、何か他に有意に観測可能なプロセス、あるいは観測手段がないか数年検討を重ねたが、残念ながら発見することができなかった。しかしながら結果的に成果として得られなかったものの、開発・検討段階で数値シミュレーションの蓄積が、他の理論計算に非常に大きく役に立つこととなった。したがって間接的に成果として現れたと言える。

素粒子標準理論のヒッグスセクターを拡張したスカラー暗黒物質が含まれるケースとして、当時注目を浴び始めた擬南部・ゴールドストーンボソンが暗黒物質となる可能性に着目した。この仮想粒子は陽子との散乱断面積が強く抑制される性質があり、量子補正を含めた計算がその散乱断面積決定に不可欠である。そのため、量子補正を量子色力学のネクストリーディングオーダーまで含めて系統的に計算する手法を応用し、断面積を求めた。その結果、次世代将来探索実験においても検出することが困難であることを明らかにした。したがってこの仮想粒子を捉えるには、別の観測手段が必要であることを明確にした [Figure 2, JHEP 12 (2018) 089 より]。

もう一つの暗黒物質探索手法として有力なものが、宇宙線観測を用いた間接検出実験である。この間接探索による暗黒物質検出の可能性を理論的な偏見なく網羅的に調べるため、典型的な質量スケールである TeV スケールから素粒子暗黒物質として可能な最大質量までを探索範囲と定め、暗黒物質を起源とする宇宙線の生成・伝搬シミュレーションを行うコードを開発した。このシミュレーションには複数段階のステップがある。まず、超巨大質量を持つ暗黒物質から生成される超高エネルギー粒子からは、その粒子と相互作用をもつ粒子が大量にカスケード的に生成されるため、生成過程におけるシミュレーションが必要となる。さらに、生成されたのちは宇宙線として宇宙を伝搬する。伝搬場所は天の川銀河と天の川銀河外とあり、それぞれにおいて異なる伝搬をする。特に銀河外では非常に大きなよりスケールで伝搬する間に、さらにカスケード的な宇宙線生成が起こる。こうしたシミュレーションを、ガンマ線、電子・陽電子、陽子・反陽子、ニュートリノ・反ニュートリノの全てに対して行い、それらを現在存在する宇宙線観測データ全てと比較することで、暗黒物質検出感度を提示した。その結果、主にガンマ線とニュートリノ・反ニュートリノ観測による探索感度が最も高いことが判明した [Figure 3, JCAP 01 (2020) 003 より]。

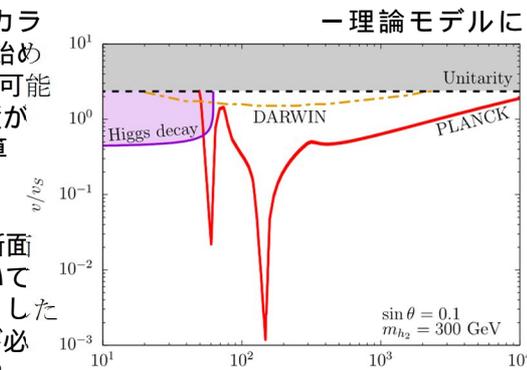


Figure 2 理論予言(赤線)に対する探索感度の下限値(オレンジ線)

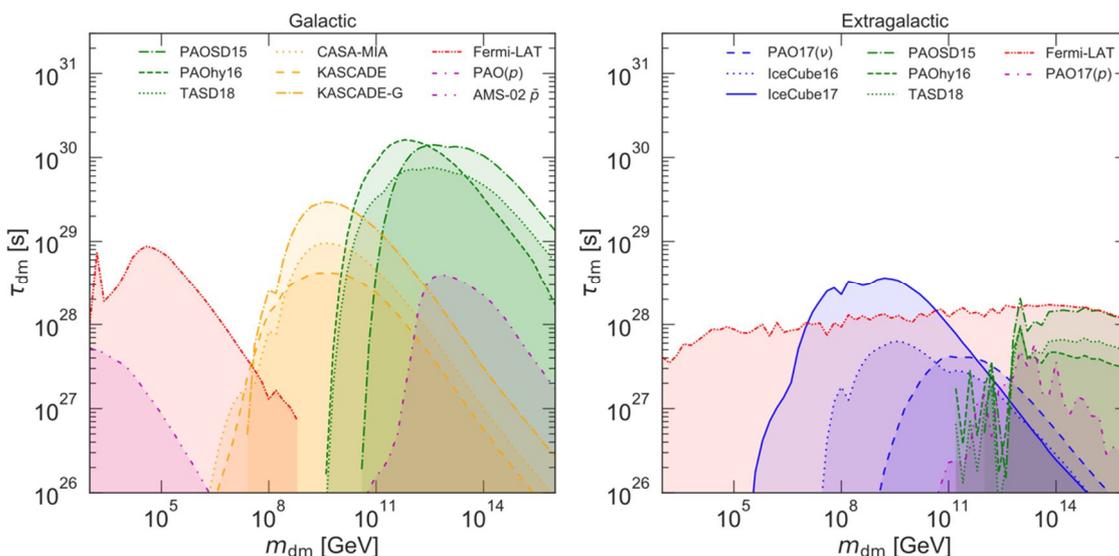


Figure 3 各観測データが示す暗黒物質寿命の上限。天の川銀河内宇宙線(左)、天の川銀河外宇宙線(右)それぞれについて分けてしめしている。

宇宙線観測による暗黒物質探索の可能性をさらに追求するため、矮小楕円銀河観測に着眼した。矮小楕円銀河は恒星やどの天体を多く含む銀河と比べて光学的なシグナル源の少ない天体であり、暗黒物質を起源とする宇宙線シグナルを探索するために有望視されている天体の一つである。しかしながら一方で、光学的に観測することが難しい天体であるため、その質量や大きさといった銀河プロファイルを決めるのが難しい天体でもある。銀河プロファイルは暗黒物質からのシグナルの理論予言を評価する際に中核的役割を果たすため、矮小楕円銀河観測を用いた暗黒物質探索可能性の議論には不可欠である。そこで近年考案された、サブハロー形成シミュレーションを用いた銀河プロファイルの確率的決定手法に着目した。これは、矮小楕円銀河の元となるサブハロー形成の理論的・観測的理解を矮小楕円銀河の観測データと合わせることにより、

正確な銀河プロファイルの決定を実現する新しい手法である。これを応用し、特に銀河プロファイルの影響が大きく現れると予想される暗黒物質候補粒子について、矮小楕円銀河から発生するガンマ線の理論計算を行った。その中でも特に、超対称素粒子標準模型において暗黒物質候補粒子として有望視されているウィーノについて、現在観測されている矮小楕円銀河全てにおいて発生しうるガンマ線を計算し、その結果、CTA 観測実験による Reticulum II、Ursa Major II などの矮小楕円銀河観測によって、熱的生成シナリオで実現するウィーノ暗黒物質の検出が可能であることを示した。これは、ウィーノ暗黒物質間接検出として有望視されている銀河中心探索に加わる、新たな間接検出の提案であり、相補的な観測手段として重要な役割を果たすことを示す結果である [Figure 4, arXiv:2103.01446]。

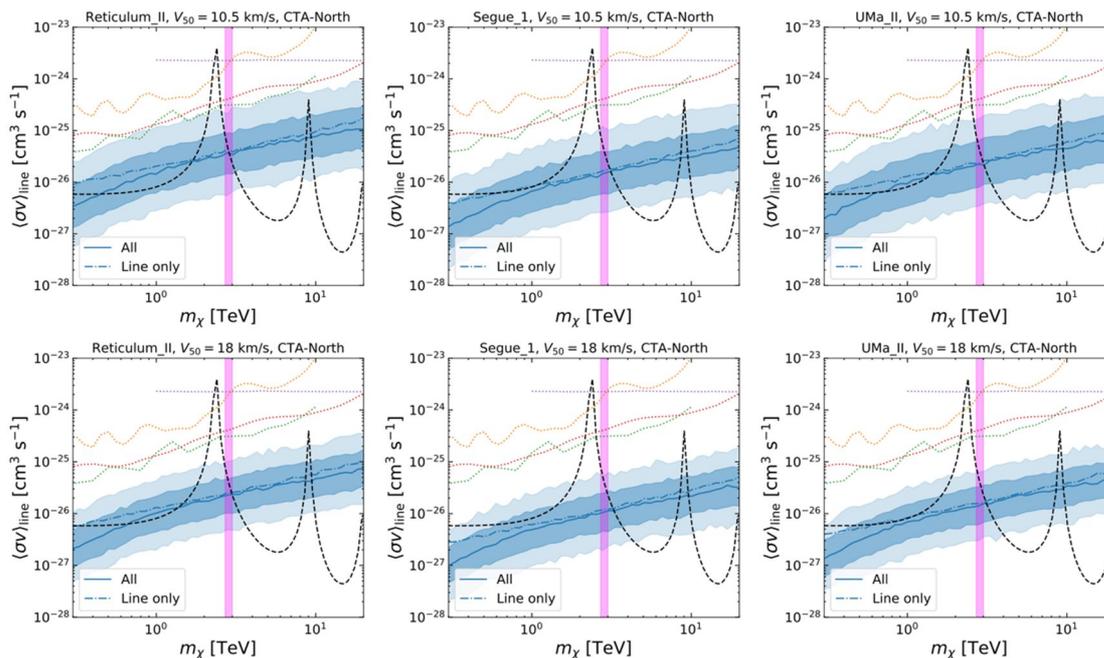


Figure 4 ウィーノ暗黒物質に対する観測感度（太青実線が感度の下限）。ピンクの帯が熱的生成ウィーノ暗黒物質が予測する質量領域を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshihiro Gunji, Koji Ishiwata	4. 巻 9
2. 論文標題 Leptogenesis after superconformal subcritical hybrid inflation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP09(2019)065	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 Ishiwata, Oscar Macias, Shin'ichiro Ando, Makoto Arimoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Probing heavy dark matter decays with multi-messenger astrophysical data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JCAP	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2020/01/003	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 該当する
1. 著者名 Ishiwata Koji	4. 巻 782
2. 論文標題 Superconformal subcritical hybrid inflation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 367 ~ 371
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2018.05.047	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 Ishiwata Koji, Toma Takashi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Probing pseudo Nambu-Goldstone boson dark matter at loop level	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 089-1-089-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP12(2018)089	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 K. Ishiwata, Y. Yonekura	4. 巻 96
2. 論文標題 Longitudinal W boson scattering in a light scalar top scenario	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.015009	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11件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Phenomenology of superconformal subcritical hybrid inflation
3. 学会等名 Miyazaki Workshop on Particle Physics and Cosmology (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Brief review of direct detection of dark matter
3. 学会等名 2019年度第1回CRC将来計画タウンミーティング (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Leptogenesis in superconformal subcritical hybrid inflation
3. 学会等名 Planck 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Probing heavy dark matter decays with multi-messenger astrophysical data
3. 学会等名 Scalar 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Superconformal Subcritical Hybrid Inflation
3. 学会等名 SUSY2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 インフレーションによるプランクスケール物理探索の可能性
3. 学会等名 質量階層性に対する新しい原理が導く多彩な物理現象とプランクスケールの物理
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Theoretical improvements in particle dark matter searches
3. 学会等名 Toyama International Symposium on "Particle at the Cosmic Frontier" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Constraining particle dark matter using local galaxy distribution
3. 学会等名 DESY Theory Workshop Fundamental physics in the cosmos: The early, the large and the dark Universe (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Constraining decaying dark matter using gamma rays and local galaxy distribution
3. 学会等名 宇宙観測と地上実験から探るダークマター研究の現状と展望
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Theoretical improvements in particle dark matter searches
3. 学会等名 The 3rd Winter Toyama Mini-Workshop on Particle Physics and Cosmology "Basis of the Universe with Revolutionary Ideas 2018" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koji Ishiwata
2. 発表標題 Probing heavy dark matter decays with multi-messenger astrophysical data
3. 学会等名 素粒子現象論研究会2020
4. 発表年 2020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			
オランダ	University of Amsterdam			