

令和 5 年 4 月 30 日現在

機関番号：13201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2022

課題番号：19K23446

研究課題名（和文）理論・可視光観測・ガンマ線観測の一本化による暗黒物質探査

研究課題名（英文）Dark matter search unifying theory, gamma-ray and optical observations

研究代表者

廣島 渚（Hiroshima, Nagisa）

富山大学・学術研究部理学系・助教

研究者番号：60845741

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では天の川銀河の暗黒物質ハローのサブ構造としての矮小楕円銀河のハローに注目し、サブ構造としての矮小楕円銀河の形成史の考慮することで可視光観測から得られる暗黒物質空間密度分布評価の精度を向上し、この評価に基づきガンマ線データを使ってweakly interacting massive particle (WIMP) と呼ばれる候補粒子の対消滅断面積の制限を再評価した。本研究で得られた対消滅断面積の制限は従来のもより2-6倍程度弱いものとなりうることを示した。また、複数の関連研究を遂行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サブハローとしての矮小楕円銀河ハローの特徴に着目することで、物理過程に即した形で密度分布の評価が向上した。構造形成の文脈での暗黒物質とその対消滅シグナルの探査を直接的に結びつける成果である。本研究では対消滅断面積に対して従来よりも数倍程度弱い永源が得られ、銀河中心方向の過剰ガンマ線シグナルに対する暗黒物質解釈が矮小楕円銀河の観測からは棄却できないことを示すものであり、その起源に関してさらなる議論や検証が必要なことを示唆するものである。また、関連研究の遂行により、暗黒物質候補としてWIMPに限った場合でさえも多波長の観測量を組み合わせることの重要性を再確認した。

研究成果の概要（英文）：Dwarf spheroidal galaxies, which are important objects to probe nature of dark matter especially for so-called weakly interacting massive particle (WIMP), can be regarded as those reside in subhalos of the Milky Way dark matter halo. We have improved the estimates about the amount of DM in those galaxies by combining the evolutionary model of subhalos and the line-of-sight velocity measurements in optical wavelength, which improves the precision of the estimate of the profiles. Based on the updated estimates, we update the constraints of the WIMP annihilation cross-section obtained from gamma-ray data analysis. Several works related to this topic are also published.

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する理論

キーワード：暗黒物質 構造形成 ガンマ線

## 1. 研究開始当初の背景

暗黒物質の正体解明は現代物理学の最重要課題の一つである。宇宙論及びさまざまなスケールの宇宙観測から、現在の宇宙のエネルギー密度の約 25%を占めること、及び重力以外の相互作用が非常に弱いことがわかっている。種々のモデルの中で有力と目されるものの一つに Weakly Interacting Massive Particle (WIMPs) と呼ばれる新粒子があり、この標準理論粒子への対消滅断面積に  $O(100)\text{GeV}$  程度の質量領域で強い制限を与えているのがフェルミ衛星による矮小楕円銀河観測である。

矮小楕円銀河のガンマ線観測から WIMP 対消滅断面積に制限をつける際には矮小楕円銀河内の暗黒物質密度分布を精密に求める必要があり、その不定性が現在得られている対消滅断面積の制限の不定性を支配しているという現状があった。実際に密度分布を求める過程においては可視光観測による銀河内の星の視線速度分散を求め、この速度分散を再現する重力ポテンシャルを導出する必要がある。重力ポテンシャルの導出においては、暗黒物質ハロー構造形成についての数値計算や解析計算から推定した密度分布が用いられる。従来、ガンマ線解析と密度分布の推定、及び密度分布推定における可視光観測の解釈と構造形成理論の研究が独立に進行しており、相互の知見が十分に反映されていないという状況及びその改善による暗黒物質の理解の進展が見込めるとの期待があった。

## 2. 研究の目的

本研究では暗黒物質候補として WIMP に注目し、矮小楕円銀河の観測から得られるその標準理論粒子への対消滅断面積の制限を質的に改善することを目的とする。そのために、冷たい暗黒物質としての WIMP の振る舞いと対応づく構造形成の理論、可視光観測に基づく重力ポテンシャルの再構成、ガンマ線データ解析の 3 研究を一続きに結び WIMP 対消滅断面積に対する制限を再検討する。関連して、現在の矮小楕円銀河観測で棄却できないパラメータ領域の検討を進める。

## 3. 研究の方法

### (1) 暗黒物質サブハロー形成史を反映した暗黒物質対消滅断面積の制限

ガンマ線観測から対消滅断面積に制限をつける際には、暗黒物質ハローの密度分布について関数形を仮定した上で、可視光観測で得られる矮小楕円銀河中の星の視線速度分散データと照らし合わせてそのパラメータを決める必要があるが、このパラメータのフィッティングが収束せずパラメータ縮退が解けないという問題がある。準解析的モデルを用いて観測されている矮小楕円銀河の特性を満たすハローサンプルを生成し、これを事前確率分布として用いるベイズ統計の手法で密度分布パラメータを決定する。得られた密度分布の評価をもとにフェルミ衛星のガンマ線データから得られる制限の再検証を行う。

### (2) 暗黒物質対消滅に対応したガンマ線輝線の探査

WIMP のような暗黒物質の場合、対消滅先の標準理論粒子対にはさまざまな粒子種が考えられいずれの場合にもガンマ線の放射が生成され、そのスペクトルは対消滅先の粒子種によって異なる特徴を示す。いずれの粒子種に対消滅する場合についても、WIMP の質量が  $O(1)\text{GeV}-O(100)\text{GeV}$  の領域では既に厳しい制限がついており、最も厳しく制限されるのは対消滅により光子対が生成する場合である。この時光子スペクトルは暗黒物質質量に対応した輝線となり、天体起源の放射とは明確に違った特徴を示す。 $O(1)\text{TeV}$  の領域は比較的未探査であるため、この対消滅に起因したガンマ線輝線について、MAGIC 望遠鏡による天の川銀河中心方向のデータから求める。密度分布の不定性についても検討する。

### (3) 宇宙再電離付近の暗黒物質対消滅によるエネルギー注入についての電波での検出可能性

計画(2)で示した比較的重たい WIMP の場合に加え、比較的重い質量  $O(1)\text{GeV}$  以下程度の WIMP についてはガンマ線での探査と比較して高赤方偏移の宇宙観測が有効となる。特に、対消滅先の標準理論粒子による宇宙再電離に与える影響は将来の 21cm 線観測で検証可能と期待される。この時、観測量に寄与するハローの質量スケールのクラスタリングを評価する必要があるが、非線形構造形成の効果が無視できないため準解析的手法でのハロー考察が難しい。高分解能 N 体計算から得られるハローデータを用いてクラスタリングを評価し、暗黒物質からの粒子及びエネルギー注入がある場合の再電離期における電子・光子場の時間発展を数値的に解くことで、将来の 21cm 線観測で期待される制限を導出する。

#### 4. 研究成果

(1) 視線速度分散から密度分布パラメータを決めるフィッティングの事前確率分布として準解析的構造形成モデルから得られるものを用いることで(図1)、パラメータの決定精度が実際に向上した。矮小楕円銀河を複数個解析した結果、従来の評価と比較して暗黒物質の総量が小さくなる傾向の結果が得られた。得られた密度分布モデルとフェルミ衛星のガンマ線観測のデータを用いて暗黒物質対消滅断面積の制限を導出し、従来得られていた制限は数倍程度の過大評価であったことを示した。制限が弱まったことで、楕円銀河のガンマ線観測の結果から棄却されたと思われていた銀河中心の過剰ガンマ線放射に対する暗黒物質対消滅シナリオのパラメータ領域はまだ実現可能であり、今後その起源についてさらなる検証が必要であることがわかった。

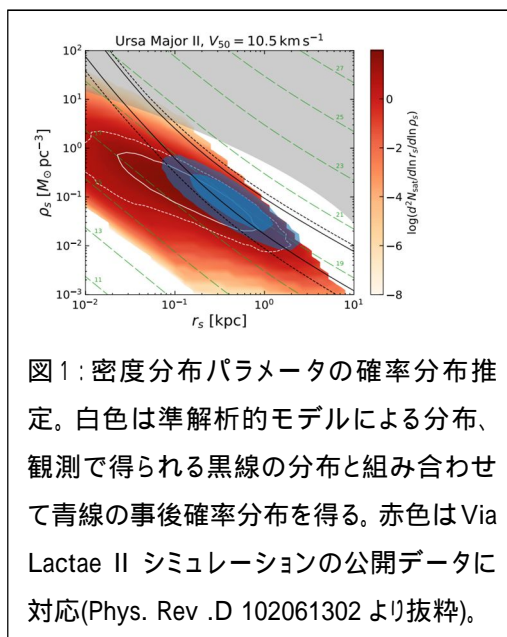


図1: 密度分布パラメータの確率分布推定。白色は準解析的モデルによる分布、観測で得られる黒線の分布と組み合わせ青線の事後確率分布を得る。赤色はVia Lactae II シミュレーションの公開データに対応(Phys. Rev .D 102061302 より抜粋)。

(2) 銀河中心 223 時間のデータに対し、銀河中心の密度分布としてコア状 Zhao プロファイルを仮定した最尤法解析によって暗黒物質質量が  $O(1) \text{ GeV}$  以上の領域で光子対への対消滅断面積は  $O(10^{-26}) \text{ cm}^3/\text{s}$  以下との制限をつけた。H.E.S.S.望遠鏡による 254 時間の観測に基づく先行研究と同じ Einasto プロファイルを仮定した解析では 2 桁程度厳しい上限値 ( $O(10^{-28}) \text{ cm}^3/\text{s}$ ) を得ており、天の川銀河中心付近の暗黒物質密度分布の決定精度を今後向上していく必要があることを示す結果となった。本論文では単色輝線の解析のみを行なったが、今回得られたコア状 Zhao プロファイルでの上限値は、より現実的な Wino 暗黒物質モデルで残存量を説明する際のガンマ線輝線スペクトルのフラックスと同程度の値となっている。

(3) 再電離期の暗黒物質対消滅による粒子・エネルギー注入の計算から、将来の 21cm 線観測で質量  $O(10) \text{ MeV} - O(1) \text{ GeV}$  程度の WIMP 対消滅断面積が制限可能な見込みであることを示した。WIMP 質量が  $O(10) \text{ GeV}$  以下程度の領域においては暗黒物質対消滅で生成する標準理論粒子のハドロン共鳴により注入される粒子スペクトルの予言が困難となるが、本研究ではエネルギー収支が物理を決めることに注目し電子・光子対の注入を起点に再電離期の宇宙の物質温度進化を追跡し、 $O(10) \text{ GeV}$  以上の領域での数値的なスペクトルの注入の場合と明確に接続する計算結果が得られている。小スケール暗黒物質ハローのクラスタリング効果を N 体計算に基づき評価したことで、線形理論からの予測と比較して赤方偏移  $z \sim 20$  以下程度のところで無視できなくなる非線形効果の考慮にも成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroshima Nagisa, Kohri Kazunori, Sekiguchi Toyokazu, Takahashi Ryuichi	4. 巻 104
2. 論文標題 Impacts of new small-scale N-body simulations on dark matter annihilations constrained from cosmological 21-cm line observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.083547	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 -

1. 著者名 Ando Shin' ichiro, Geringer-Sameth Alex, Hiroshima Nagisa, Hoof Sebastian, Trotta Roberto, Walker Matthew G.	4. 巻 102
2. 論文標題 Structure formation models weaken limits on WIMP dark matter from dwarf spheroidal galaxies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 16302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.061302	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 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 Implications from DM substructures: from low z to high z
3. 学会等名 Upcoming CMB observations and Cosmology
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣島渚, 郡和範, 関口豊和, 高橋龍一
2. 発表標題 21cm線観測による暗黒物質探査における非線形構造形成の効果
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会(2022年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 WIMP annihilation signals in dwarf spheroidal galaxies as subhalos of the Milky Way
3. 学会等名 Kashiwa Dark Matter Symposium 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 Impacts of new small-scale N-body simulations on dark matter annihilations constrained from cosmological 21cm line observations
3. 学会等名 素粒子現象論研究会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 VHDM search & DM halo
3. 学会等名 1st workshop: Multimessenger Study of Heavy Dark Matter
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 Implications from the structure formation models of DM halo to gamma-ray search of DM
3. 学会等名 2021年度素粒子論グループ北陸支部研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 Dark matter search in extended dwarf spheroidal galaxies with very-high-energy gamma-ray observations
3. 学会等名 29th Regular Meeting of the New Higgs Working Group (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 Dark matter search in dwarf spheroidal galaxies combined with structure formation models of halo
3. 学会等名 南部陽一郎物理学研究所 素粒子現象論研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 Dependence of accessible DM annihilation cross-sections on the density profiles of dSphs with CTA
3. 学会等名 KEK-PH - KEK-Cosmo Joint Lectures and Workshop on "Dark matter"
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nagisa Hiroshima
2. 発表標題 ガンマ線での暗黒物質探査
3. 学会等名 素粒子物理学の進展2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Ando, A. Geringer-Sameth, N. Hiroshima, S. Hoof, R. Trotta, M. Walker
2. 発表標題 Structure Formation Models Weaken Limits on WIMP Dark Matter from Dwarf Spheroidal Galaxies
3. 学会等名 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 初田 哲男、柴藤 亮介、宮崎弘安、田中章詞、入谷亮介、廣島 渚	4. 発行年 2021年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 212
3. 書名 数理の窓から世界を読みとく	

〔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
---------	---------