

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287062

研究課題名(和文) 重力レンズ現象から探る始原ミニハローの起源

研究課題名(英文) Probing the origin of primordial minihalos with gravitational lensing

研究代表者

井上 開輝 (INOUE, Kaiki)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：70388495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：4重像をもつ重力レンズを用いて、レンズ銀河内のサブハロー(小質量のハロー)もしくは視線方向のダークマターの構造によるレンズ効果を理論および観測的に求めた。その結果、以下の事が判明した。1) 観測データはコールドダークマター(CDM)に基づく宇宙モデルと矛盾しない。2) ウォームダークマター(WDM)から成る宇宙モデルでは、観測データを説明することが難しく、粒子の質量は電子の質量の約400分の1より大きくなければならない。これらの結果から、原始銀河の母体であると考えられる始原ミニハローの起源はCDMである可能性が高まった。一方で、近傍矮小銀河の観測データはCDMモデルの予言と矛盾することが分かった。

研究成果の概要(英文)：We estimated the lensing effect caused by subhalos in a lensing galaxy and dark matter structures in the line-of-sight using quadruple gravitational lenses. We found that: 1) The observed data are consistent with the cold dark matter (CDM) based cosmological model. 2) The observed data are not consistent with the warm dark matter (WDM) model if the WDM mass is smaller than 1/400 of the electron mass. These results imply that the origin of primordial minihalos, which are considered to be the progenitors of primordial galaxies is CDM rather than WDM. On the other hand, we found that observational data of the Milky Way and the Andromeda galaxies suggest that some associated dwarf galaxies have a core rather than a cusp. This result is not consistent with the CDM prediction.

研究分野：宇宙論

キーワード：ダークマター 重力レンズ 宇宙論 銀河形成 サブハロー サブミリ波 フラックス比異常 矮小銀河

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、WMAP 衛星による宇宙マイクロ波背景輻射の温度揺らぎや Ia 型超新星による光度距離の測定から今日の宇宙の約 7 割はダークエネルギー、約 3 割はダークマターから成り、空間はほぼ平坦で一様方であるという結果が得られていた。しかし、それら暗黒成分の正体は謎のベールに包まれている。

ダークマターの最有力候補はコールドダークマター (CDM) と呼ばれる粒子であり、宇宙初期に熱浴から脱結合した際の粒子の速度分散が光速よりはるかに小さいため、ゆらぎを脱結合後の粒子のランダム運動によって消す効果がほとんどない。一方インフレーション理論によると、宇宙時間一定面では物質ゆらぎの大きさは小スケールほど大きい。従って、CDM 理論では、まず小スケールのゆらぎが成長して、大きな塊 (ハロー) となり、それらが集合してさらに大きなハローへと成長する、というボトムアップ型のシナリオが成立する。

しかし、このシナリオでは銀河ハローの中に非常に多数のサブハローと呼ばれるダークマターの塊が多数存在することになり、全てのサブハローが矮小銀河に対応していると仮定した場合、銀河系のような典型的な銀河における矮小銀河数の観測結果と矛盾してしまう。すなわち CDM 理論では、観測結果より遙かに多い数の矮小銀河の存在を予言する。この「行方不明の矮小銀河問題」は宇宙論や銀河形成論にとって非常に大きな問題であった。宇宙再電離時の紫外線放射によるバリオン冷却の抑制により、サブハロー中の星形成を抑制することは可能ではあるものの、矮小銀河内の若い星の生成をうまく説明出来ないことも既に知られていた。

一方、ウォームダークマター (WDM) と呼ばれる粒子は、熱浴から脱結合した際の粒子の速度分散が光速に近く、ゆらぎを脱結合後の粒子のランダム運動によって消す効果がある (自由流)。つまり、パラメーターの選び方によっては、矮小銀河の質量スケール以下で宇宙初期における質量ゆらぎを小さくすることができるため、サブハローそのものの数を減少させることによって「行方不明の矮小銀河問題」を解決することが可能である。しかし、原始銀河を形成するためには形成母体であるダークマターハローが太陽質量の約 100 万倍から約 1000 万倍の質量をもつ必要があることが知られている (始原ミニハロー)。WDM モデルでは、自由流のため銀河間空間に存在するこれら始原ミニハロー起源の天体の数が、CDM モデルに比べ遙かに少なくなるはずであるが、宇宙論的スケールにおけるその観測的性質、特に低赤方偏移における性質については、研究開始当初まであまり明らかにされていなかった。

銀河スケール以下の質量ゆらぎを観測的に調べるためには重力レンズが有用である。

特に手前の銀河によって遠方の光源が 4 重像に分裂してみえる重力レンズシステムは像のサンプル数が 2 重像レンズに比べ多いため、個々の詳細なモデリングが可能であり、サブハローによる重力レンズ効果を測定しやすい。実際いくつかのシステムでは像の位置は合うがフラックス比は理論予測と合わない、いわゆる「フラックス比異常」が報告されている。従来、レンズ銀河中のサブハローがその主要原因とされてきたが、銀河間空間に存在する視線方向のハローによって引き起こされる可能性も考えられる。どちらが主要原因なのかは研究開始当初まで十分明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

銀河スケールより小さいスケールにおける宇宙の質量ゆらぎを観測的に決定し、銀河ハロー内におけるサブハローの有無と始原ミニハローの起源 (CDM/WDM) を明らかにすること。そのため、4 重像レンズにおける「フラックス比異常」の原因を解明すること。又、銀河中のサブハローの進化や矮小銀河の形成過程、銀河間中における始原ミニハローの進化やその分布を理論的に解明すること。

3. 研究の方法

4 重像重力レンズのモデル解析

4 重像をもつ QSO-銀河もしくは銀河-銀河重力レンズシステムを用いて、レンズ銀河内のサブハローもしくは視線方向のダークマターの構造によるレンズ効果を観測的に求める。又、N 体シミュレーションによってダークマターの空間分布とその時間進化を求め、光子におよぼす重力レンズ効果を理論的に評価する。そして、理論予言と比較検討してモデルの妥当性を評価する。

近傍銀河内サブハローのモデル解析

数値実験を用いてサブハローの内部密度分布や空間分布の情報を入手するとともに、実際の銀河、特に銀河系やアンドロメダ銀河の衛星銀河 (矮小楕円体銀河) に付随するダークハローの密度分布を、メンバー星の詳細な動力学解析から観測的に求め、数値実験の理論予言と比較検討する。

4. 研究成果

1) CDM モデルにおいて約 10 億個の粒子を用いた N 体シミュレーションを実行し、得られたダークマター分布を用いて視線方向にある銀河間空間内の非線形構造による弱重力レンズ効果を求めた (10kpc 以下のスケールでは世界初) (Takahashi & Inoue, 2014 MNRAS 440, 870)。その結果、以下のことが分かった。

・「フラックス比異常」はサブハロー効果を考慮しなくても、視線方向の構造のみで説明できる。

・ハローだけでなく、局所的に密度が低いポイドによってもレンズ効果を受ける。

・レンズ像の位置変化(アストロメトリックシフト)を考慮すると、ポイドによるレンズ確率は50パーセント程度になる。

2) アタカマサブミリ波ミリ波電波干渉計(ALMA)によって観測されたサブミリ波銀河SDP.81の4重重力レンズ像を用いて、以下のことが判明した(Inoue, Minezaki, Matsushita, Chiba 2016, MNRAS 457, 2936)。

・拡がった光源に対する「フラックス比異常」を発見した。特にその内、パリティ(像の表裏)が正であるレンズ像が系統的に暗くなっていることを初めて発見した。

・この効果は銀河間空間において局所的に密度が低いポイド領域を考えれば説明できる。また、その表面質量密度は1秒角の2乗あたり太陽質量の10の8乗倍程度である。

・一酸化炭素の輝線から0.01秒角のオーダーのアストロメトリックシフトが観測され、視線方向の非線形構造による重力レンズ効果と解釈して矛盾は生じない。

3) 4重像 QSO レンズ MG0414+0534 にみられるフラックス比異常がレンズ銀河内のサブハローだけでなく、視線方向に存在するポイドやフィラメントによっても説明可能であることを初めて示した(Inoue 2015, MNRAS 447, 1452)。

4) 「フラックス比異常」を示す4重像 QSO レンズを用いて WDM の質量に下限を付けた(Inoue, Takahashi, Takahashi, Ishiyama 2015, MNRAS 448, 2704)。即ち電子の質量の1/400より大きくなければならないことが分かった。従って、赤方偏移 $0 < z < 3$ の領域において、「カスプ問題」や「行方不明の矮小銀河」問題を解決する可能性をもつ温かいダークマターモデルにとってやや否定的な結果となった。言い換えると、視線方向に太陽質量の一億倍程度以上の質量をもつ構造がなければ、フラックス比異常を説明することは困難であるということが分かった。一方、CDM理論では観測と矛盾することなく、視線方向の非線形構造で「フラックス比異常」を説明できることが分かった。

銀河系とアンドロメダ銀河に付随する矮小楕円体銀河の恒星系に対して、それらの視線速度分布を詳細に理論解析することによって、背景にあるダークハローの密度分布、すなわち、銀河系やアンドロメダ銀河に対して、そのホストハローに付随するサブハローの密度分布を求めた(Hayashi & Chiba 2015, ApJ, 810, 22)。そして、矮小楕円体銀河によっては、その中心部のダークマターの分布がカスプ状であるものと、コアを持つものの2種類があることがわかった。また、これら

のサブハローは大きく扁平な形状をしていることが示唆され、CDMに基づく数値シミュレーションの結果と食い違うことが判明した。さらに、サブハローの質量分布をその回りの円軌道を想定した際の回転速度で表現する際、回転速度が最大となる半径以内に含まれるダークマターの面密度が、どれも1パーセク平方あたりおおよそ太陽質量の20倍となり、しかもこの値はどの大きさのハローでも一定のユニバーサルな値であることを発見した(Hayashi & Chiba 2015, ApJ, 803, L11)。これから、ダークマターの集積過程において、その内側の平均密度が一定に保たれるような機構が働くことが示唆され、しかもこのようなダークマターの進化が、矮小楕円体銀河における星形成史を大きく支配していることがわかった(Okayasu & Chiba 2016, ApJ submitted (ArXiv:1601.00375))。

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 11 件)

Kaiki Taro Inoue, Takeo Minezaki, Satoki Matsushita, and Masashi Chiba

“ALMA imprint of intergalactic dark structures in the gravitational lens SDP.81”, 2016, MNRAS, 査読有, 457 2936 DOI:10.1093/mnras/stw168

Kaiki Taro Inoue, Ryuichi Takahashi, Tomo Takahashi, and Tomoaki Ishiyama

“Constraints on warm dark matter from weak lensing in anomalous quadruple lenses”, 2015, MNRAS, 査読有, 448 2704 DOI: 10.1093/mnras/stv194

Kaiki Taro Inoue

“Weak Lensing by Minifilament or Minivoid as the Origin of Flux-ratio Anomalies in Lensed Quasar MG0414+0534”, 2015, MNRAS, 査読有, 447 1452 DOI: 10.1093/mnras/stu2507

Kohei Hayashi and Masashi Chiba

“Structural Properties of Non-spherical Dark Halos in Milky Way and Andromeda Dwarf Spheroidal Galaxies”, 2015, ApJ, 査読有, 810:22 1 DOI: 10.1088/0004-637X/810/1/22

Kohei Hayashi and Masashi Chiba

“A Common Surface-density Scale for the Milky Way and Andromeda Dwarf Satellites as a Constraint on Dark Matter Models”, 2015, ApJ, 査読有, 803:L11 1

DOI: 10.1088/2041-8205/803/1/L11

Takeo Minezaki and Kyoko Matsushita
“A New Black Hole Mass Estimate for Obscured Active Galactic Nuclei”, 2015, ApJ, 査読有, 802 98
DOI: 10.1088/0004-637X/802/2/98

Ido, Ben-Dayan and Ryuichi Takahashi
“Constraints on small-scale cosmological fluctuations from SNe lensing dispersion”, 2015, MNRAS, 査読有, 455 552
DOI:10.1092/mnras/stv2356

Ryuichi Takahashi and Kaiki Taro Inoue
“Weak lensing by intergalactic minstructures in quadruple lens systems: simulation and detection”, 2014, MNRAS, 査読有, 440 870
DOI: 10.1093/mnras/stu328

Kohei Hayashi and Masashi Chiba
“The Prolate Dark Matter Halo of the Andromeda Galaxy”, 2014, ApJ, 査読有, 789:62 1
DOI: 10.1088/0004-637X/789/1/62

Kaiki Taro Inoue, Valery, Rashkov, Joseph Silk, and Piero Madau
“Direct gravitational imaging of intermediate mass black holes in extragalactic haloes”, 2013, MNRAS, 査読有, 435 2092
DOI: 10.1093/mnras/stt1425

Ryuichi Takahashi and Hideki Asada
“Observational Upper Bound on the Cosmic Abundances of Negative-mass Compact Objects and Ellis Wormholes from the Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search”, 2013, APJL, 査読有, 768:L16 1
DOI: 10.1088/2041-8205/768/1/L16

〔学会発表〕(計 10 件)

井上開輝、「4重像レンズにおけるフラックス比異常の起源について」
日本天文学会、2016.3.16、首都大学東京、八王子市

井上開輝、「非線形構造から迫る宇宙暗黒成分の起源」(招待講演)
第4回観測的宇宙論ワークショップ、2015.11.18、基礎物理学研究所、京都市

井上開輝、他、「サブミリレンズ銀河 SDP.81におけるダークマター小構造の痕跡」
日本天文学会、2015.9.9、甲南大学、神戸市

井上開輝、他、「4重像重力レンズを用いた温かいダークマターの質量の制限」
日本天文学会、2015.3.15、大阪大学、豊中市

高橋龍一、他、「Weak Lensing by Intergalactic Mini-Structures in Quadruple Lens Systems: Simulation and Detection」
Workshop “Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing”、KIPMU、2014.11.18、柏市、千葉

井上開輝、他、「Line-of-sight structures as the origin of flux-ratio anomalies in quadruple QSOs」
Workshop “Galaxies and Cosmology in Light of Strong Lensing”、KIPMU、2014.11.18、柏市、千葉

井上開輝、他、「系外銀河ハロー内にある中間質量ブラックホールの重力的直接撮像」
日本天文学会、2013.9.11、東北大学、仙台市

林航平、千葉柁司、「矮小銀河カスプ問題：非球対称モデルからの制限」
日本天文学会、2013.9.11、東北大学、仙台市

井上開輝、「Probing dark matter with mini-gravitational lensing」
日本天文学会、2013.7.15、台湾中央研究院、台北市、台湾

井上開輝、「ミニ重力レンズで探るダークマターの起源」
東大天文センター談話会、2013.6.27、東大天文教育センター、三鷹市

〔その他〕
ホームページ等

「アルマ望遠鏡の重力レンズ画像に隠された、暗い矮小銀河」
ALMA ホームページ
http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/info/2016/0414post_647.html

「アインシュタインリングから暗黒物質の「むらむら」を発見」
近畿大学宇宙論研究室ホームページ
<http://www.cosmology.jp/whats-new/261>

「「温かい」ダークマターはどれだけ重たいか？」
近畿大学宇宙論研究室ホームページ
<http://www.cosmology.jp/whats-new/240>

「異常フラックス比の原因は視線方向の
三二構造？」
近畿大学宇宙論研究室ホームページ
<http://www.cosmology.jp/whats-new/227>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 開輝 (INOUE Kaiki)
近畿大学・理工学部・准教授
研究者番号：70388495

(2) 研究分担者

千葉 柁司 (CHIBA Masashi)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：50217246

峰崎 岳夫 (MINEZAKI Takeo)
東京大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：60292835

高橋 龍一 (TAKAHASHI Ryuichi)
弘前大学・理工学研究科・助教
研究者番号：60413960

(3) 研究協力者

松下 聡樹 (MATSUSHITA Satoki)
中央研究院天文及天文物理研究所
副研究員