

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02868

研究課題名（和文）高解像度電波観測で切り拓く小スケール宇宙論の新展開

研究課題名（英文）Probing small scale cosmology with high-resolution radio observation

研究代表者

井上 開輝（Inoue, Kaiki）

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：70388495

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：重力レンズ効果を受けたクエーサーの観測画像から重力レンズのモデルを構築する新しい解析アルゴリズムを考案した。このアルゴリズムは従来の手法に比べ、より複雑な輝度分布をもつ光源や重力ポテンシャルの揺らぎを精度良く再現することができる。我々のチームがアルマ望遠鏡で観測した重力レンズ効果を受けたクエーサーを用いて、レンズ銀河中のサブハローや視線方向にあるハロー等による質量密度揺らぎの大きさを見積もったところ、サブハローだけでは説明できないほど大きな揺らぎが存在することが判明した。また、ニューラルネットワークを用いた検出ツールを構築し、HSC銀河カタログを用いて多数の重力レンズ候補天体を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙に存在するダークマター（光でみえない質量）の有効な候補がCDM（冷たいダークマター）である。ダークマターが全てCDMであれば、天の川銀河のような大質量の銀河の中に、多くの矮小銀河が含まれていることが分かっている。しかし、今までの観測からは少数の矮小銀河しかみつかっていない。また、銀河間空間にも多くの矮小銀河があることが理論的に分かっているが、未だ観測されていない。我々の重力レンズ天体の観測結果は、従来の観測方法では検出できないほど暗い矮小銀河が銀河間空間にも数多くあることを示唆している。ダークマターモデルの宇宙論的な制限として新しい結果であり、意義深いものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We developed a new algorithm for constructing a gravitational lens model from an image of a lensed quasar. Compared to the previous algorithms, our algorithm is much suitable for reconstructing a complex gravitational potential and a source with a complex surface brightness distribution. We applied our new algorithm to the image of a lensed quasar that we observed with the ALMA telescope. Then we found that the measured amplitude of fluctuations of matter density is too large if only subhaloes in the lensing galaxy are taken into account. We also developed a new tool for detecting gravitational lenses. We discovered many candidates of gravitational lenses in the HSC galaxy catalogue.

研究分野：宇宙論

キーワード：重力レンズ ダークマター クエーサー 銀河 宇宙論

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、コールドダークマターに基づく構造形成シナリオが様々な観測により支持されている。しかし、10kpc 以下の小スケールでは理論と観測が一致しない幾つかの問題が知られている。その1つとして「行方不明の矮小銀河問題」(Klypin et al.1999)が挙げられる。銀河ハロー内において予言されているサブハローの数が観測されている矮小銀河の数より圧倒的に多い、という問題である。この不一致の原因として A)非自明なバリオン物理 B)温かいダークマターの自由流による減衰 C)非自明なインフレーションダイナミクスなどが考えられるが、その原因は依然としてわかっていない。

4重像をもつクエーサー-銀河重力レンズ系でレンズ像の位置は理論予言と合うがフラックス比は合わない「フラックス比異常」(Mao & Schneider 1998, Chiba 2002)がしばしばみられる。従来レンズ銀河ハロー中のサブハローによる重力的摂動がその主な原因であると考えられてきた。もし、そうであれば観測されている矮小銀河の数が少ない原因は A)である可能性が高い。

しかし、我々による4重像重力レンズの理論的研究により、銀河間空間にあるポイドやハロー等の小スケール非線形構造によっても「フラックス比異常」が生じることが分かってきた(Inoue & Takahashi 2012, Inoue 2016) (図1)。実際、高い赤方偏移をもつ光源ほど「フラックス比異常」を示す割合が高い傾向が、観測データの解析から初めて明らかになった。つまり、主な原因は銀河間空間にあるポイドやハロー等の小スケール非線形構造である可能性が高い。銀河内のサブハロー数が何らかの原因で大きく減っていたとしても、視線方向の構造さえあれば「フラックス比異常」を説明できるため、B)、C)が不一致の原因である可能性がある。

一方で、我々が2015年に電波干渉計ALMAを用いて観測した重力レンズクエーサーMG0414+0534の近傍に、暗い矮小銀河と考えられる天体(オブジェクトY)を検出した(図2) (Inoue et al. 2016)。この天体は可視/近赤外光においては著しく輝度が低く、サブミリ波以外で検出するのは極めて困難である。我々はオブジェクトYがMG0414+0534にみられる「フラックス比異常」だけでなく、長らく謎であったレンズ像A1、A2の著しい赤化も同時に説明できることを示した。この天体はレンズ銀河ハロー内ではなく、銀河間空間にある可能性もある。

2. 研究の目的

研究の目的は以下の通りである。

- 1) 4重像重力レンズの電波観測を行い、「フラックス比異常」が銀河内のサブハローだけで説明できるのか、視線方向の構造による影響も考えなくてはならないのかどうか確かめる。
- 2) 4重像重力レンズの観測結果を用いてコールドダークマター以外のダークマター粒子を含むモデルへの制限を行う。
- 3) ダークマターモデルに制限をつけられるような4重像重力レンズを多数探し出す。
- 4) 広がった光源のレンズ像を用いて矮小銀河スケールのサブハローや視線方向の構造などの質量分布を明らかにする新しい解析パイプラインを構築する。

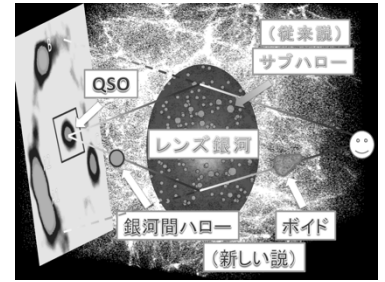


図1 4重像QSO-銀河重力レンズ

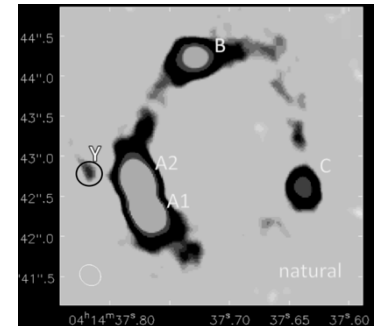


図2 MG0414+0534のALMA連続波画像(350GHz)円内がオブジェクトYを示す。

3. 研究の方法

- 1) 広がった光源のレンズ像を用いて矮小銀河スケールのサブハローや視線方向の構造などの質量分布を明らかにする新しい解析パイプラインを構築する。
- 2) アルマ望遠鏡を用いて 4 重像重力レンズ MG0414+0534 の高解像度観測を実行し、アインシュタインリングのわずかなゆがみから、レンズ銀河以外の重力ポテンシャル揺らぎの場合、像のシフト場、収束場のパワースペクトル(レンジングパワースペクトル)を求める。
- 3) 中間赤外線やセンチ波の観測結果とのシナジーで、MG0414+0534 の周辺の収束場を高精度で求める。
- 4) 長寿命荷電粒子等を含む混合ダークマターモデルに対し、N 体シミュレーションを実行し、矮小銀河スケールのサブハローや視線方向の小構造による重力レンズ効果を明らかにする。
- 5) ダークマターモデルに制限をつけられる 4 重像重力レンズを探すため、銀河カタログを用いて多くの 4 重像重力レンズ候補天体を検出する。

4. 研究成果

- 1) 4 重像重力レンズクエーサーの観測画像から重力レンズモデルを構築する新しい手法を考案し、モックシミュレーション画像の歪みからレンジングパワースペクトルを推定することに成功した。また、ゆらぎをフーリエモードの重ね合わせで表すことにより、視線方向の質量密度揺らぎに起因する複雑な重力レンズポテンシャルを精度よく再現できることが判明した。この手法は、光源の輝度分布のアンサンブルが一様等方なランダムガウス場として記述できない場合においても、光源の輝度分布を精度よく再現できるという優れた性質を備えている。また、複数の多重像を重ね合わせることで、観測解像度を超える超解像を達成できるため、天文学的にも意義深い成果であると考えられる。
- 2) アルマ望遠鏡を用いて 4 重像重力レンズ MG0414+0534 の連続波と一酸化炭素分子による輝線の高解像度観測を 2017 年秋に実行した。得られた画像に対して 1)の方法を適用し、重力ポテンシャル、光路のシフト、収束という 3 つの物理量に対するレンジングパワースペクトル(視線方向に射影された物理量の自己相関関数のフーリエ変換)を得た。観測結果を説明するには、レンズ銀河内のサブハローだけでなく、視線方向の小構造からの寄与を考える必要があることが判明した。
- 3) 中間赤外線 で得られたレンズ像のフラックス比や VLBI による高解像度観測とのシナジーにより、MG0414+0534 の周辺の収束場を高精度で求めた。その結果、ダストを多く含む矮小銀河と考えられるオブジェクト Y 周辺に矮小銀河スケールのハローが存在する可能性が高いことが判明した。
- 4) 長寿命荷電粒子等を含む混合ダークマターモデルに対し、N 体シミュレーションを実行し、密度揺らぎのパワースペクトルを数値的に求めた。視線方向の小構造による重力レンズ効果(4 重像レンズに対するフラックス比異常)から、長寿命荷電粒子の寿命やコールドダークマターに対する比率への制限を求めた。
- 5) 畳み込みニューラルネットワークを用いた重力レンズ天体の検出ツールを構築し、Subaru 望遠鏡で観測された HSC 銀河カタログに適用することによって、銀河スケールの重力レンズ候補天体を多数発見した。また、別の方法を用いて、重力レンズクエーサーを 3 天体、銀河群スケールの重力レンズ候補天体を多数発見した。

6) 2)の観測データから重力レンズモデルを用いてレンズ効果を受けていない光源の放射強度を再構築した。その結果、世界で初めて活動銀河核起源の若い電波ジェットによって激しく揺さぶられている一酸化炭素分子ガスの姿を深宇宙で捉えることにはじめて成功した(Inoue et al, 2020)。この結果は、クエーサーのような放射が強い天体であっても、星間ガスに対し巨大ブラックホールから出るジェットの影響が無視できるものではないことを示唆しており、ブラックホールと銀河の共進化を理解する上で重要な発見となった。この成果は ALMA 観測所や国立天文台のニュース WEB サイト、昼の NHK ニュースなどで報道されるなど、内外に強いインパクトを与えた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ayuki Kamada, Kaiki Taro Inoue, Kazunori Kohri and Tomo Takahashi	4. 巻 2017
2. 論文標題 Constraints on long-lived electrically charged massive particles from anomalous strong lens systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2017/11/008	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 Kaiki Taro Inoue	4. 巻 58
2. 論文標題 Detecting sub-lunar mass compact objects toward the Local Group galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Astronomy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.16/j.newast.2017.07.006	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 Jaelani Anton T, More Anupreeta, Sonnenfeld Alessandro, Oguri Masamune, Rusu Cristian E, Wong Kenneth C, Chan James H H, Suyu Sherry H, Kayo Issha, Lee Chien-Hsiu, Inoue Kaiki T	4. 巻 494
2. 論文標題 Discovery of an unusually compact lensed Lyman-break galaxy from the Hyper Suprime-Cam Survey	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3156 ~ 3165
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/staa583	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 Inoue Kaiki Taro, Matsushita Satoki, Nakanishi Kouichiro, Minezaki Takeo	4. 巻 892
2. 論文標題 ALMA 50-parsec-resolution Imaging of Jet-ISM Interaction in the Lensed Quasar MG J0414+0534	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L18 ~ L18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/2041-8213/ab7b7e	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 Jaelani Anton T, More Anupreeta, Oguri Masamune, Sonnenfeld Alessandro, Suyu Sherry H, Rusu Cristian E, Wong Kenneth C, Chan James H H, Kayo Issha, Lee Chien-Hsiu, Chao Dani C-Y, Coupon Jean, Inoue Kaiki T, Futamase Toshifumi	4. 巻 495
2. 論文標題 Survey of Gravitationally Lensed Objects in HSC Imaging (SuGOHI) - V. Group-to-cluster scale lens search from the HSC?SSP Survey	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1291 ~ 1310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1062	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 Jaelani Anton T, Rusu Cristian E, Kayo Issha, More Anupreeta, Sonnenfeld Alessandro, Silverman John D, Schramm Malte, Anguita Timo, Inada Naohisa, Kondo Daichi, Schechter Paul L, Lee Khee-Gan, Oguri Masamune, Chan James H H, Wong Kenneth C, Inoue Kaiki T	4. 巻 502
2. 論文標題 Survey of Gravitationally Lensed Objects in HSC Imaging (SuGOHI) - VII. Discovery and confirmation of three strongly lensed quasars†	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1487 ~ 1493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab145	査読の有無 無
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 2件)

1. 発表者名 Tomoyuki Shigeno, Kaiki Taro Inoue
2. 発表標題 拡がった光源に対する重力レンズ効果のモデリング
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kaiki Taro Inoue
2. 発表標題 重力レンズで探る暗黒矮小銀河とダークマター
3. 学会等名 ダークマター研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kaiki Taro Inoue
2. 発表標題 Probing Dark Dwarf Galaxies with Gravitational Lensing
3. 学会等名 ALMA long Baseline Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kaiki Taro Inoue
2. 発表標題 Detecting Sub-lunar Mass Compact Objects toward the Local Group Galaxies
3. 学会等名 理論研究部理論コロキウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuo, Horiguchi, Kaiki Taro Inoue
2. 発表標題 クェーサーMG0751+2716 の重力レンズモデル
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kaiki Taro Inoue, Tomoaki Ishiyama, Takashi Hamana
2. 発表標題 トラフレンズによる10kpc 以下の密度ゆらぎの制限
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀口康男
2. 発表標題 クエーサーMG0751+2716の重力レンズモデル
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kaiki Taro Inoue, Satoki Matsushita, Kohichiro Nakanishi, Takeo Minezaki
2. 発表標題 ALMA Resolves Jet-driven Molecular Outflows in the Lensed QSO MGJ 0414+0534
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kaiki Taro Inoue, Takeo Minezaki, Satoki Matsushita, Kohichiro Nakanishi
2. 発表標題 重力レンズクエーサーによる小スケール密度ゆらぎの測定
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaiki Taro Inoue
2. 発表標題 Line-of-sight Lensing -a New Window to Dark Matter and Distant Dwarf Galaxies
3. 学会等名 Time-Domain Cosmology with Strong Gravitational Lensing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上開輝, 峰崎岳夫, 松下聡樹, 中西康一郎
2. 発表標題 重力レンズクエーサーで切り拓く小スケール宇宙論- レンズングパワースペクトルの測定-
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021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
研究協力者	ティムル ジャエラニ アントン (Timur Jaelani Anton)	バンドン工科大学・Faculty of Mathematics and Natural Sciences・Lecturer	
研究協力者	鎌田 歩樹 (Kamada Ayuki)	ワルシャワ大学・Institute of Theoretical Physics・Assistant Professor	
研究協力者	峰崎 岳夫 (Minezaki Takeo)	東京大学・大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・准教授	
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・Research Fellow	
研究協力者	中西 康一郎 (Nakanishi Koichiro)	国立天文台・アルマプロジェクト・特任准教授	

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
---------	---------