

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 7年 9月 12日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2024

課題番号：20K04016

研究課題名（和文）すばる望遠鏡HSCデータにおける重力レンズ探査

研究課題名（英文）Search for Gravitational Lenses from Subaru HSC data

研究代表者

加用 一者 (Kayo, Issha)

東京工科大学・教養学環・教授

研究者番号：80377928

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、すばる望遠鏡HSCデータを用いて重力レンズ現象を起こす天体の探索を行った。既存手法の改良による候補天体の同定と確認、10万近い天体に対する目視探査を通じた多数のレンズ候補の発見と論文発表に成功した。一方で機械学習による自動探査は模擬データ生成の困難により十分な成果を挙げられなかつたが、技術的習熟が進み、教育展開へと繋げることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、重力レンズ現象を通じて宇宙の構造やダークマター・ダークエネルギーの性質に迫るものであり、観測的宇宙論の発展に貢献する学術的意義を有する。また、限られた時間や環境下でも有効な探査手法を開発・実践し、研究の効率化や教育への応用に繋げた点で、今後の天文データ利活用や理系人材育成において社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this research, we explored gravitational lensing objects using Subaru Telescope's HSC data. We successfully identified and confirmed lens candidates by improving established methods and conducted extensive visual inspection of nearly 100,000 objects, resulting in the discovery and publication of numerous promising candidates. Although the machine learning-based approach did not yield sufficient results due to difficulties in generating realistic training data, technical expertise in deep learning was significantly enhanced and later applied to educational programs.

研究分野：天文学

キーワード：重力レンズ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

重力レンズとは、銀河などの大きな質量を持つ天体によって光の経路が曲げられることにより、その天体の向こう側にある別の天体の像が歪んだり、ときには複数に見えたりする現象である。重力レンズは重力そのものを検出することができるため、重力による間接的証拠しかないダークマター、重力に逆らった作用をするように見えるダークエネルギーといった、現代の物理学における大きな課題に立ち向かうための重要な手がかりとなっている。

研究代表者は研究開始当初までに Sloan Digital Sky Survey (SDSS) によって得られたデータの中から世界最大規模の重力レンズクエーサーカタログを構築してきた実績があった。そしてちょうどそのとき、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) による高品質な画像データが次々と生み出されている状況であった。そこで、HSC データの中からさらに重力レンズ天体を多く見つけ、宇宙論への応用を目指す研究を計画した。一方で、研究時間の極めて限られた環境にいるために、その中においても高い成果を上げられるような方策が必要であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、HSC データから重力レンズ天体（特にクエーサーがレンズされたもの）を多数発見し、ダークマターやダークエネルギーなど宇宙の「ダークな成分」の性質解明に寄与することである。手法として、(1) 既存手法の HSC データへの適用、(2) 通勤中などの隙間時間を活用した目視探査、(3) 深層学習による自動探査の 3 つを組み合わせ、多数の重力レンズ天体の発見を目指した。特に手法 (2) は、限られた研究時間の中で成果を上げるために着想した方策であった。

3. 研究の方法

手法 (1) では、SDSS データに対して成果を上げた既存の手法で見つけられた候補天体を、HSC データの中で探査し、HSC データの高画質を生かして詳細な分析を行なった。

手法 (2) では、事前に生成しておいた探査用画像を iPhone/iPad を用いて電車通勤中に目視で探査するという方法であった。また、その過程で見つかった興味深い天体に対しての詳細な画像分析を通勤電車内で行えるように、iPad 用の分析アプリの開発も予定していた（ただし、このアプリは、コロナ禍により通勤形態が大きく変化し、必要性が低下したため開発を中止した）。

手法 (3) では、深層学習に代表される機械学習の手法を用いて HSC データから重力レンズ天体を自動探査するものであった。しかし現実の重力レンズクエーサーは数が限られており、標準的な深層学習における学習データが大変に不足しているという状態である。この問題に対しては、重力レンズクエーサーを模擬した画像を大量に生成し、それを学習させることで克服できると期待していた。

4. 研究成果

手法 (1) により重力レンズ天体を同定し、論文として発表した（図 1）。この手法についてはほぼ確立されたものだったので、コロナ禍の影響も最小限に抑えることができ、当初の期待どおりに進捗し、成果を得た。

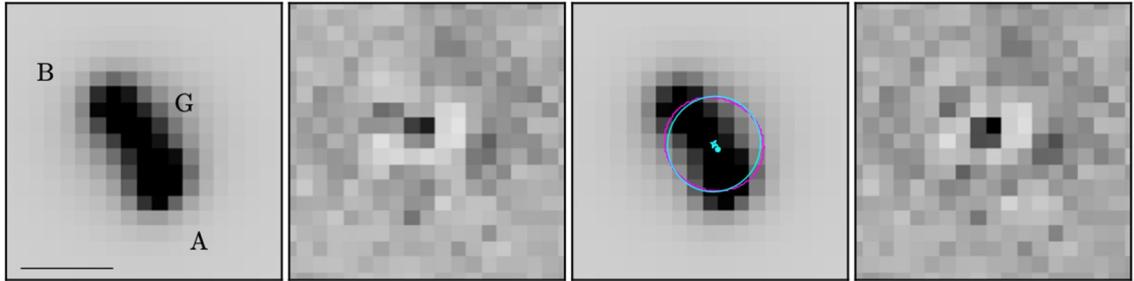


図 1: 発見された重力レンズクエーサー J1359+0128。左から HSC による画像、解析ソフトで候補天体を除去して残渣がないことを示す図、モデル計算された像、モデル計算された像を元の画像から差し引いた残渣が示されている。Jaelani et al., MNRAS 502, 1487-1493 (2021) より引用

手法 (2) では最終的には 10 万近くの天体の目視探査により多数のレンズ候補を抽出し、論文として発表した。しかし、本研究期間の初年度に襲ったコロナ禍の甚大な影響を受けた。なお、この手法では 1 天体、クエーサーが背景のクエーサーを重力レンズ効果で複数に見せているかもしれないという、本物なら世界初となる候補も見つけ大変に期待した。しかし詳細な追観測の結果、重力レンズ系ではないことが判明した。たいへん残念であった。

手法 (3)においては、動作原理を理解するための自作の機械学習コードと、大量生成した模擬データを用いて研究をスタートさせた。いくつかの既知の重力レンズを同定することもできはしたが、重力レンズとは似つかない対象を多数誤検出する結果となった。機械学習コードを高性能の汎用フレームワーク (PyTorch) を用いたものに置き換えたり、GPU を多く搭載した計算機を導入したりと高性能化を図ったが、模擬データに対しては極めて高い性能を示す機械も、本物のデータに対しては全く機能しなかった。おそらく模擬データが実際のデータの多様性を捉えきれていないためだと思われた。模擬データをより実際のデータに近づける努力に本研究期間の多くが費やされたが、成果を得るには至らないまま研究期間を終えた。残念なことに目に見える成果は得られなかったが、機械学習技術の習得と、この経験を基にした教育プログラムへの応用に繋がった。次々に現れる新しい機械学習の手法を試しながら、引き続き挑戦していきたい。

なお HSC と重力レンズに関連して、弱い重力レンズの研究も行なった。ここでは、質量密度揺らぎのデータの生成とその中を伝搬する光の計算、および重力レンズマップの生成をシームレスに行うことのできる公開コードを開発し、論文発表した (図 2)。すばる望遠鏡では現在、多天体分光器 (Prime Focus Spectrograph; PFS) が完成し、それによるサーベイ観測が開始されたが、研究代表者の開発したコードはその計画段階において用いられるものの一つとなり、観測計画にたいして基礎的な貢献を行うことができた。

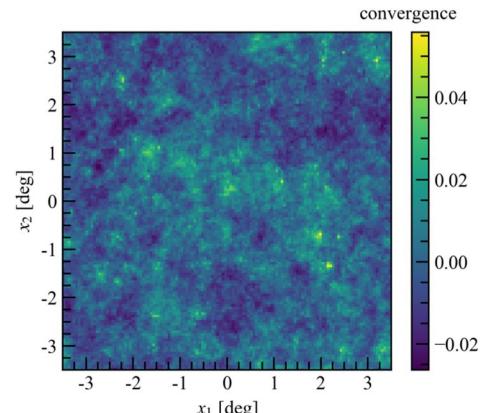


図 2: 開発したシミュレーションコードで生成した弱い重力レンズの convergence マップ。Makiya et al., JCAP03(2021)095 より引用

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] 計6件 (うち査読付論文 6件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件)

1. 著者名 Chan James H H, Wong Kenneth C, Ding Xuheng, Chao Dani, Chiu I-Non, Jaelani Anton T, Kayo Issha, More Anupreeta, Oguri Masamune, Suyu Sherry H	4. 卷 527
2. 論文標題 Survey of gravitationally lensed objects in HSC imaging (SuGOHI) - IX. Discovery of strongly lensed quasar candidates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6253 ~ 6275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2953	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 Wong Kenneth C, Chan James H H, Chao Dani C-Y, Jaelani Anton T, Kayo Issha, Lee Chien-Hsiu, More Anupreeta, Oguri Masamune	4. 卷 74
2. 論文標題 Survey of Gravitationally lensed objects in HSC Imaging (SuGOHI). VIII. New galaxy-scale lenses from the HSC?SSP	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1209 ~ 1219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac065	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 Schmidt T, Treu T, Birrer S, Shajib A J, Lemon C, Millon M, Sluse D, Agnello A, Anguita T, Auger-Williams M W, McMahon R G, Motta V, Schechter P, Spinelli C, Kayo I et. al.	4. 卷 518
2. 論文標題 STRIDES: automated uniform models for 30 quadruply imaged quasars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1260 ~ 1300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2235	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 Shenli Tang, et al.	4. 卷 922
2. 論文標題 Optical Spectroscopy of Dual Quasar Candidates from the Subaru HSC-SSP program	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1ff0	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, 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 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 Makiya Ryu, Kayo Issha, Komatsu Eiichiro	4.巻 2021
2.論文標題 Ray-tracing log-normal simulation for weak gravitational lensing: application to the cross-correlation with galaxies	5.発行年 2021年
3.雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6.最初と最後の頁 095~095
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/03/095	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 該当する

[学会発表] 計0件

[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