

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21740151

研究課題名（和文） 広域サーベイデータを用いた過去最大の重力レンズクエーサー探索

研究課題名（英文） The Largest Quasar Lens Search using the Wide Field Survey Data

研究代表者

稲田 直久 (INADA NAOHISA)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員

研究者番号：20462658

研究成果の概要（和文）：広域サーベイ観測計画「スローン・デジタル・スカイ・サーベイ」のデータを用い、2年間にわたって14個の新しい重力レンズクエーサーを発見した。これらの発見とそれ以前の発見をもとに、過去最大の重力レンズクエーサーカタログを作成することに成功し、さらにそのカタログを用いることで、他の観測結果と同様に「我々の宇宙においては暗黒エネルギーが主な構成要素であること」を確認した。加えて、特に興味深い重力レンズクエーサーについて、詳細な情報を得るための追加観測を行った。

研究成果の概要（英文）：We have succeeded in discovering 14 lensed quasars using the data of the Sloan Digital Sky Survey. We have also succeeded in constructing the largest lensed quasar catalog from the 14 new lensed quasars and the lensed quasars which we had previously discovered. Using the largest lensed quasar catalog, we have confirmed that dark energy is the main component of our universe, as shown in other works. In addition, we conducted follow-up observations for some interesting lensed quasars.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：観測天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：重力レンズ、クエーサー、暗黒エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

ある物体の重力を「その物体の周りの時空の歪み」としてとらえるアインシュタインの一般相対性理論は、遠方からの天体の光がその手前にある天体の周りの時空の歪みによって曲げられる「重力レンズ現象」と呼ばれる天体現象が起こることを予測している。実際、1979年に、遠方に存在するクエーサーと呼ばれる天体（活発に活動している銀河の中心

核）からの光がちょうどその視線方向にある手前の銀河（の重力）によって曲げられることにより、もともと1つのクエーサーがあたかも複数あるかのように見える「重力レンズクエーサー」現象の発見が初めて報告された。以後、多数の重力レンズクエーサーが発見され、重力レンズクエーサーはその有用性のために多くの理論的・観測的な研究が行われていたが、次の重大な課題が残されていた。それは、「真に統計的なカタログが存在しない

こと」というもので、すなわち、発見された重力レンズクエーサーは統一的なデータをもとにしたものではなく、様々なデータをもとに様々な方法によって発見されたものであった。この問題を解決することは、重力レンズクエーサーをより重要なものとして位置づけするために必須であり、また、その“統計カタログ”を用いることで、「宇宙が加速膨張していること」を検証できる（宇宙マイクロ波背景放射の観測や超新星の観測が示唆する暗黒エネルギーの存在量を検証できる）、という点においても非常に重要である。折しも、可視光全天サーベイ観測計画「スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)」が約 10 万個という未曾有の規模の様なクエーサーカタログを完成しつつあり、そのクエーサーカタログを用いた“系統的な”重力レンズクエーサー探索を実行（完成）できるという絶好の機会に恵まれていた。

## 2. 研究の目的

この SDSS のデータを基にした重力レンズクエーサーの探索は、2003 年頃に申請者自身により開始された。最初の数年間を（重力レンズクエーサーの）探索方法の確立およびその試行に費やし、その後本格的な探索を開始している。2009 年度において本研究課題が開始されるまでに、SDSS の全クエーサーの 30% までの重力レンズクエーサーカタログを公表することに成功していたが、SDSS クエーサーカタログの持つ一様性および大規模性から予測されていたとおり、この「30% までの」カタログにおいても、それまでに存在していた最大のものである Cosmic Lens All Sky Survey (CLASS) に匹敵する規模を有していた。そこで、本研究課題においては、SDSS のデータを用いた重力レンズ探索をさらに発展させ、可視光全天サーベイ SDSS が作り出すクエーサーカタログの“100%”に対する重力レンズ探索を完遂し、「SDSS データを基にした過去最大の重力レンズクエーサーカタログ」を作成・公表することを本研究の第一の目的とする。併せて、その過去最大のクエーサーカタログを用いた暗黒エネルギーの検証、および、特に興味深い重力レンズクエーサーに対するより詳細な（個別の）追加観測を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

可視光全天サーベイ「スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)」は、一様かつ大規模なクエーサーカタログを擁することで理想的な重力レンズクエーサー探索の母集団を提供する一方、1 つの重大な問題を抱えている。それはデータの「解像度」で、SDSS

のデータ上では、単体の銀河が引き起こす典型的な重力レンズ現象によって形成された見かけ上の像を分解することができない。すなわち、あるクエーサーが 1 つの銀河によって重力レンズされ見かけ上複数の像を形成していたとしても、SDSS のデータ上ではそれらは“混ざって”観測され、すなわち全体として 1 つの天体として検出されてしまうために通常は SDSS のデータから単体の銀河による重力レンズクエーサーを発見するのは不可能である。そこで申請者は、重力レンズ現象を受けたクエーサーがそうではないものよりも“わずかに”広がって見えるという性質を利用することで、効率的に重力レンズクエーサーの候補天体を選出するアルゴリズムを開発した（図 1 参照）。

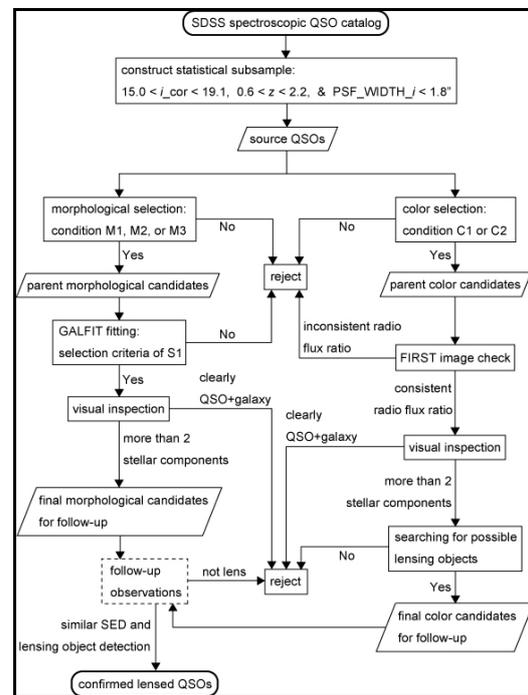


図 1：SDSS のデータを用いた重力レンズクエーサー探索アルゴリズムのフロー図

この方法（アルゴリズム）が持つ発見効率はすでに精密に検証されており、これを本研究の「重力レンズ探索のアルゴリズム」として用いる。なお、上述のように、SDSS ではその解像度等が（重力レンズクエーサー探索に対しては）不十分であるため、探索アルゴリズムによって選出された段階ではまだ「候補天体」であり、それが“本物の”重力レンズクエーサーであるかどうかの判定は SDSS のデータのみでは行うことができない。そこで、その点に関しては、より大きな口径を持ち、より解像度の高い装置を持つ別の望遠鏡による追加観測を行うことで対処する。以上の

一連の流れ(SDSS のデータに重力レンズクエーサーの探索アルゴリズムを適用→候補天体の選出→他の望遠鏡における撮像および分光の追加観測)を未解析の SDSS のデータに適用することを繰り返し、SDSS の重力レンズ探索を完了させ「過去最大の重力レンズクエーサーのカタログ」を完成させる。

#### 4. 研究成果

(1) 重力レンズクエーサー探索アルゴリズムを SDSS のデータ (SDSS のクエーサー) に適用し、ハワイ大学 2.2m 望遠鏡などによる撮像・分光観測を行うことで、14 個の新しい重力レンズクエーサーを発見、あるいはその発見の報告を行った。特に、SDSS J094604.90+183541.8 と呼ばれる天体においては、重力レンズ現象を受けているクエーサーの赤方偏移が 4.8 であり、これまでに見つかった重力レンズクエーサーのうち最遠にあるものを発見することに成功した。

(2) (1)における新しい発見、および、本研究課題が開始されるまでの発見をもとに、SDSS の全データ (SDSS 第 1 期および SDSS 第 2 期の全データ)を用いた重力レンズクエーサー探索を完結させた。そのうちの約 70% (77,429 個のクエーサーのうち 36 個が重力レンズクエーサーであることを同定し、さらにそれらのうちの 36,287 個のクエーサーから発見された 19 個の重力レンズクエーサーについては“統計的な扱い”が可能となっている)をカタログとして公表している。本研究以外によって公表されている重力レンズクエーサーカタログにおいては(研究目的の欄で記述したとおり)通称“CLASS”と呼ばれているものが最大であるが、今回の公表カタログは用いたクエーサーの数および発見された重力レンズクエーサーの数の両方においてその CLASS を大きく上回っており、あらゆる面において過去最大の重力レンズクエーサーカタログを公表することに成功している。

(3) (2)の統計カタログを用いた宇宙論検証により、我々の宇宙のエネルギー密度のうち 84%が「暗黒エネルギー」であることを導出した。この結果は、系統のおよび統計的エラーを考慮すると超新星の観測および宇宙マイクロ波背景放射の観測の結果とよく一致しており、すなわちそれらの観測が導出した宇宙の加速膨張を再確認している。

(4) 上記の成果に加え、重力レンズ現象を受けた“銀河”を 1 つ発見し、また、重力レンズされたクエーサー像の光路差を利用した重力レンズクエーサーの新たな発見方法の

開発を試みた。さらに、新たに発見を公表した(あるいはこれまでに発見を公表した)中で特に興味深い重力レンズクエーサー天体に対するより詳細な情報を得るための観測として、SDSSJ1029+2623(現在知られている中で最大の分離角を持つ重力レンズクエーサー)に対する VLA 電波望遠鏡を用いた高空間解像度の電波観測、および、SDSSJ1131+1915をはじめとする 5 つ重力レンズクエーサーに対する、Gemini 望遠鏡を用いた“各重力レンズ天体における像の間の吸収線の差異”を測定する観測を行った。

#### 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 9 件)

① Kratzer, Rachael M.; Richards, Gordon T.; Goldberg, David M.; Oguri, Masamune; Kochanek, Christopher S.; Hodge, Jacqueline A.; Becker, Robert H.; Inada, Naohisa, Analyzing the Flux Anomalies of the Large-separation Lensed Quasars SDSS J1029+2623, The Astrophysical Journal Letters, 査読有り、728 巻、L18、2011 年

② Inada, Naohisa; 他 22 名、The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search. IV. Statistical Lens Sample from the Fifth Data Release, The Astronomical Journal, 査読有り、140 巻、pp. 403-415、2010 年

③ McGreer, Ian D.; Hall, Patrick B.; Fan, Xiaohui; Bian, Fuyan; Inada, Naohisa; 他 4 名、SDSS J094604.90+183541.8: A Gravitationally Lensed Quasar at  $z=4.8$ , The Astronomical Journal, 査読有り、140 巻、pp. 370-378、2010 年

④ Kayo, Issha; Inada, Naohisa; 他 5 名、Eight New Quasar Lenses from the Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search, The Astronomical Journal, 査読有り、139 巻、pp. 1614-1621、2010 年

⑤ 稲田直久、可視光広域サーベイデータを用いた重力レンズクエーサーの探索、天文月報、査読無し、102 巻、747-758 ページ、2009 年

⑥ Lin, Huan; Buckley-Geer, Elizabeth; Allam, Sahar S.; Tucker, Douglas L.; Diehl, H. Thomas; Kubik, Donna; Kubo, Jeffrey M.; Annis, James; Frieman, Joshua A.; Oguri, Masamune; Inada, Naohisa, Discovery of a

Very Bright, Strongly Lensed  $z = 2$  Galaxy in the SDSS DR5, The Astrophysical Journal, 査読有り、699 巻、pp. 1242-1251、2009 年

⑦ Lacki, Brian C.; Kochanek, Christopher S.; Stanek, Krzysztof Z.; Inada, Naohisa; Oguri, Masamune、Difference Imaging of Lensed Quasar Candidates in the Sloan Digital Sky Survey Supernova Survey Region, The Astrophysical Journal、査読有り、698 巻、pp. 428-438、2009 年

⑧ Inada, Naohisa; 他 9 名、Five New High-Redshift Quasar Lenses from the Sloan Digital Sky Survey、The Astronomical Journal、査読有り、137 巻、pp. 4118-4126、2009 年

〔学会発表〕(計 2 件)

① Inada, Naohisa、Gravitationally Lensed Quasar Survey using BOSS Quasars、SDSS-III collaboration meeting、2010 年 9 月 17 日、Université Paris 7 (フランス、パリ)

② 稲田直久、可視光広域サーベイデータを用いた重力レンズクエーサーの探索、日本天文学会 2009 年秋期年会、2009 年 9 月 15 日、山口大学 (山口県山口市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲田 直久 (INADA NAOHISA)  
東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員  
研究者番号：20462658

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：