

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



稲田直久

〈理化学研究所基幹研究所牧島宇宙放射線研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: naohisa.inada@riken.jp

可視光広域サーベイ「スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)」のデータを用いた重力レンズクエーサーの探索について紹介する。この探索は「The SDSS Quasar Lens Search (SQLS)」と名づけられており、SDSSの非常に優れたデータにより過去最大規模の重力レンズクエーサー探索を展開することに成功している。以下、研究の動機からSDSSにおける初の発見、さらには「世界初の銀河団による大離角重力レンズクエーサーの発見」および「過去最大の重力レンズクエーサーの統計サンプルの構築」という本研究の二つの大きな成果について記述する。

1. 研究の出発点：科学的な側面

重力レンズ現象、特に強く重力レンズされたクエーサー^{*1}は、非常にユニークな宇宙論あるいは天体物理学の研究の“道具”になることが知られている¹⁾。例えば、個々の重力レンズクエーサーからは重力レンズ現象を引き起こしている銀河の質量分布やサブストラクチャーに対する情報を得ることが可能であり、また、「一つの銀河を複数の視線方向から観測できる」という意味においては、クエーサー像の吸収線などを利用することで銀河間物質の研究に大きく役立てることができる。あるいはまた、クエーサーが時間的に変動する天体であることと、重力レンズ現象によって形成される見かけの像には光路差が存在することによって測定できる time delay は、重力レンズのポ

テンシャルが既知のものであるとすればハッブル定数に対する制限を与え、逆に、宇宙論パラメーターが既知のものであるとすれば重力レンズポテンシャルに対する一つの大きな制限を与えることができる。もしモニタリング観測によってマイクロレンズ現象が観測されれば、(現時点では直接観測することが難しい)クエーサーの中心部分の構造に対する情報を得ることも可能になる。さらに、その統計サンプル(クエーサーの様な母集団の中でどのくらい強い重力レンズ現象を受けているか)と理論計算との比較からは宇宙項定数(ダークエネルギー)に制限をつけることが可能になるなど、その有用性を挙げるときりがない。

これらの理由により、一般相対性理論の発表以降長らくは主として理論研究の対象であった重力レンズクエーサーは、1979年のQ0957+561の発

^{*1} アインシュタインの一般相対性理論は、物体の重力はその物体の周りの時空の歪みとして記述されるであろうということを予測している。このような時空では光の経路となる「最短距離」は直線ではなくなり、その時空を通過する光の経路が曲線になる、という効果もたらされる。この効果が最も極端になると背景にある(一つの)天体が見かけ上複数の像として観測され、このような天体現象を(強い)重力レンズ現象と呼ぶ。特に遠方のクエーサーがちょうどその手前にある銀河(あるいは銀河団)の周りの歪んだ時空の影響で見かけ上複数の天体として観測されているものは「重力レンズクエーサー」と呼ばれている。図1に概略を示す。

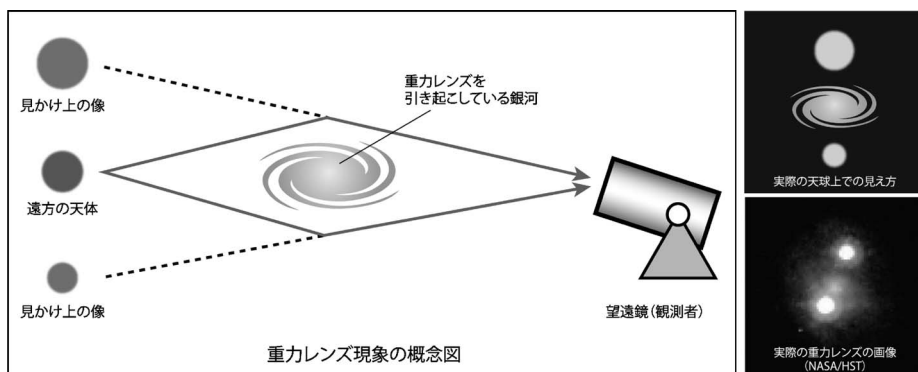


図1 重力レンズの概略図。複数の像を見込む天球上の角度が分離角である。

見²⁾以降、爆発的にその観測的な研究が進展した。この記事において述べるわれわれの重力レンズ探索が始まる前の2000年ころまでにおいても約60個ほどの発見がなされており、Cosmic Lens All Sky Survey (CLASS)^{3), 4)}やハッブル宇宙望遠鏡を用いたスナップショットサーベイ⁵⁾など、いくつかの系統的な重力レンズ探索も行われた。しかしながら、依然としてその数(個々の系統的な探索の規模や、あるいは発見された総数においても)は精密な研究を行うには不十分で、より数を増やすこと、より大規模な系統的探索を行わなければならないことは必至であった。また、1980年代ころから予測されていた⁶⁾、「冷たい暗黒物質モデル(CDM)が予測する“銀河団による”大離角の重力レンズクエーサー」も未発見のまま、さまざまな角度から、より大きな母集団を基にする重力レンズクエーサー探索を行うことが必要とされていた。次節で示すように、折りしも筆者が研究を始めた時期はそれを実現させることが可能な大規模サーベイ観測が開始する時期にも重なり、過去最大規模の重力レンズクエーサー探索を行うための絶好の機会に恵まれていた。

2. 研究の出発点：時期的な側面

前節最後に少し触れたように、本研究を開始するにあたっては、いわゆる時期的な動機によるものも大きい。筆者が大学院に入学した1999年4

月は、後に最も大規模かつ最も大きな成功を収めた可視光域の広視野撮像・分光サーベイの一つとして知られることになる「スローン・デジタル・スカイ・サーベイ(以下SDSSとする)⁷⁾」がその撮像ファーストライトを終えた直後の(1998年5月)、また間もなく分光ファーストライトが完了する直前の(1999年5月)、正に(2000年からの本格運用を前にした)“祭りの前夜”であった。もちろん、当時の筆者はまだ若すぎたために、また、学部生時代には理論研究を行っていたために観測研究に関する知識が乏しかったこともあり、それらの出来事をもつ重大性をあまりよく理解してはいなかったが、SDSSはそのcommissioning観測の段階ですでに後の大成功を暗示させるような華々しい結果を収めており、「この段階ですでに(SDSSが始まるまでの)過去最大に匹敵する規模がある」というメールや会話がグループ内で飛び交っていたのを薄々と記憶している。このような状況のなか、すなわち、過去最大の重力レンズ探索を実現できる土台ができてつつあるなか、筆者は当時東京大学の宇宙線研究所に所属していた関口真木先生(現在では天文の研究からは離れておられますが)の下で研究を行うことになった。関口先生は、このSDSSの建設に大きく貢献した「SDSS日本グループ(Japan Participation Group)」の一員であり、筆者は当然のようにSDSSのデータを用いた研究を行うことになっ

た。SDSSには銀河・銀河団・クエーサーといういわゆるキープロジェクトがあったが、筆者と関口先生が話し合っ出て出した研究のテーマは「SDSSのデータを使って“過去最大の”重力レンズされたクエーサーの探索を行おう」というものになった。この重力レンズクエーサー探索はSDSSにおいてはいわゆる派生的な研究ではあったが、「遠方の(一つの)クエーサーからの光が、その手前にある天体の重力場の影響によって見かけ上複数の像として観測される」という重力レンズ現象のダイナミックさや、「重力レンズの確率によると commissioning 観測のデータからも数個は見つかってもいいはずなのに、いまだに一つも発見されていない。かつ、過去日本人の研究者による強い重力レンズ現象を受けたクエーサーの“発見”は全く例がない」という挑戦的な研究を行うことに非常に魅力を感じていた。また、上述のようにSDSSデータの威力はすでにその片鱗を見せ始めていたので、「このデータを用いれば、まず間違いなくこれまでの規模を大きく上回る重力レンズクエーサーの研究を展開できる」という皮算用もあった*2。こうして、科学的な重要性と合わせて、「SDSSにおける重力レンズクエーサーの発見方法を確立し、その過去最大の探索を行う」ということにチャレンジすることになったのである。

3. SDSSにおける初めての発見

具体的な探索の話に移る前に、SDSSについて簡単に紹介しておきたい。SDSSは、米国ニューメキシコ州にあるアパッチポイント天文台に設置

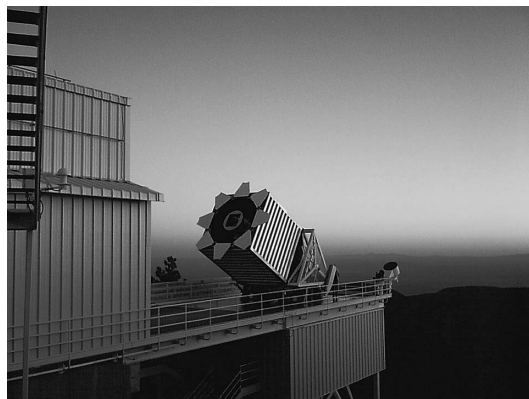


図2 夕焼けの中のSDSS 2.5 m 望遠鏡。筆者撮影。

された2.5 mの広域視野望遠鏡(図2)を用いて、北銀極を中心としたおよそ10,000平方度の天域を、可視光の領域で測光および分光のサーベイ観測をするという大規模な国際共同プロジェクトである。第一期(SDSS-I)の観測は2000年から2005年にかけて行われ、引き続き2008年まで行われた第二期(SDSS-II)と合わせて、撮像観測に対しては合計約12,000平方度、分光観測に対しては合計約9,400平方度の様なサーベイ観測を完了させている*3。観測の方法としては、まず撮像観測が行われ、そのデータ(色、等級など)をもとに銀河やクエーサーの候補天体が選別され、それらに対してファイバー分光を行う、という順序で行われている(例えば参考文献9などを参照)。このSDSSの成果はサーベイ観測として過去最大級の規模をもち、今後数十年にわたる可視光天文学の基礎データとして、またさまざまな将来計画における最も重要な基礎データの一つとして用いられている。このSDSSの威力はおそらく可視光を

*2 おおざっぱには、1,000個のクエーサーに対して1個が(強い)重力レンズ現象を受けている、と考えられている⁹⁾。SDSSでは最終的に10万個の分光同定されたクエーサーが発見される予定であったため、当時はおよそ100個程度の新しい重力レンズクエーサーが発見されると見積もられていた。

*3 2008年8月、SDSS発祥の地である米国シカゴにおいて、SDSSの20周年、またその当初の目的の完了を記念した「The Sloan Digital Sky Survey: From Asteroids to Cosmology」というシンポジウムが開催された。SDSS計画の発案者の一人であるプリンストン大学のJames Gunn教授のConference Summaryに対する感動的なスタンディングオベーションをもって、SDSSはひとまずその幕切れを迎えている。なお、現在ではSDSS-IIIと名づけられた新たな枠組みでの計画が進行している。

専門とする研究者以外にも十分に知れわたっているかと思われ、近年行われたあらゆる研究会において一度も「SDSS」という言葉が発せられない、ということはまずなかったであろう。現在ではこのSDSSの（第二期までの）データはすべて公開されており¹⁰⁾、誰でも無償で入手することが可能となっている。

さて、このSDSSの主な目的は銀河やクエーサーの3次元宇宙地図を作成することであるが、その大規模性、あるいはその非常に優れた一様性により、キーププロジェクト以外にもさまざまな研究が行えることが考え出され、実際に数々の素晴らしい研究が行われている。重力レンズクエーサー探索もその一つで、当然のことながら筆者がそれに手をつける前に、プリンストン大学のEdwin Turner教授らの発声のもとすでにその研究が始動していた。しかしながら、SDSSのデータを用いれば続々と発見されるであろう、あるいは少なくとも数個は発見されるであろう（全く発見されないということはないであろう）という予測のなか、筆者が記憶する限りでも数人がこの課題に取り組んでいたにもかかわらず、誰もその発見に成功することはできていなかった。最も大きな原因としては、SDSSの撮像データにおける0.4秒角/pixel、アパッチポイント天文台における典型的なシーイング約1.5秒角という条件の中で、典型的な分離角が1秒角程度の重力レンズクエーサーを発見するのは非常に難しい、ということがあったと考えられる^{*4}。すなわち、SDSSのデータにおいては、約2秒角以下の離角をもつ天体はそれぞれの像に分割されず一つの天体として扱われてしまうために、大半の重力レンズクエーサーは、複数の像が形成されているという大きな特徴が（データ上）かき消されてしまうのである。

このような状況の中で「重力レンズクエーサー探索」業界に参入した筆者であったが、当然のようにまずは「どうしたらSDSSのデータから重力レンズを発見できるか（重力レンズを発見するためのアルゴリズムを確立できるか）」という難題を解決しなければならなかった。そこで筆者が取った方法は、以下のとおりある意味科学研究としてはふさわしくないかもしれない、非常に泥臭いものであった。それは、「天体の全体にわたってクエーサーに近い色をしている^{*5}広がった天体を選び出し、それらをすべて目でチェックする」というものである。もちろん、この方法をとった目的にはとにかく何が何でも（SDSSにおいて）初の重力レンズクエーサーを発見したいということがあったが、筆者なりに、将来の研究へとつなげるためのもくろみもあった。一つは、“本物”がSDSSでどのように見えるかがわからない段階で探索アルゴリズムの開発をしても良い結果にはつながらないであろうという考えで、「このようにして発見された重力レンズクエーサーを徹底的に調べることで、本格的に用いることができる（効率の良い）探索アルゴリズムを開発できるであろう」、ということである。二つめは、やはり将来の探索アルゴリズムの開発のために、「どのような種類の天体が重力レンズ探索の“不純物”として混ざってくるのか」を視覚的にかつ徹底的に頭に叩き込んでおきたい、という考えがあった。

この方法が功を奏したのか、あるいは単なる幸運のためによるものなのか、“Enter”キーを押して続けて数万にのぼる天体を見続けた結果、ついに「SDSS J1226-0006」という、重力レンズクエーサーの可能性が非常に高い天体を発見した（図3）。この発見をすぐに関口先生やSDSS重力レンズグループに報告したが、筆者の興奮に反し

^{*4} 1999～2000年ころの時点ではSDSSの分光サーベイによるデータがまだ完全には整っておらず、すなわち、探索の母集団を完全にクエーサーだけに限定できずに青い銀河やそのペアなどが母集団に含まれてしまったことも大きな原因であったかもしれない。

^{*5} 当時、筆者は“ある天体の一部分の色”を測定する方法を開発していた。

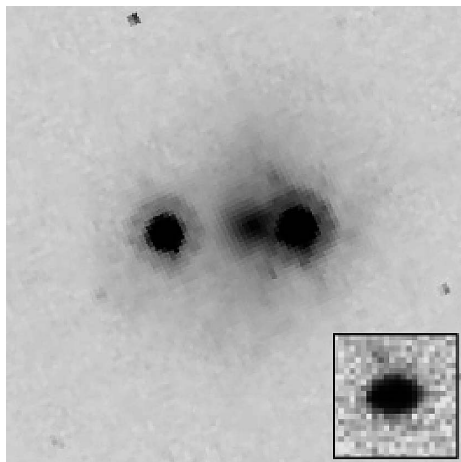


図3 SDSS J1226-0006 のハッブル宇宙望遠鏡 (ACS, *I* バンド) による撮像データ (上が北で左が東). 二重像の重力レンズクエーサーで, 明るいほうの像のすぐ左側に見える広がった天体が重力レンズ現象を引き起こしている銀河である. $z_s=1.121$, $z_l=0.517$ で, 最大離角は 1.24 秒角. 右下の挿入図に, SDSS の *i* バンドにおける画像を示す.

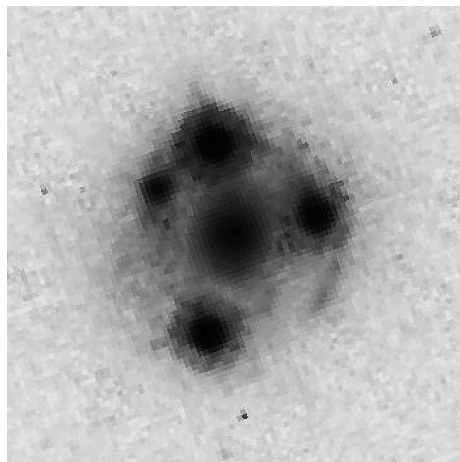


図4 SDSS J0924+0219 のハッブル宇宙望遠鏡 (ACS, *I* バンド) による撮像データ (上が北で左が東). 四重像の重力レンズクエーサーで, 中央の広がった天体が重力レンズ現象を引き起こしている銀河である. $z_s=1.524$, $z_l=0.394$ で, 最大離角は 1.78 秒角. ホスト銀河のレンズ像も見えている.

てその反応は意外と冷めており, 肯定的なものもあれば否定的なものもある, といった状況であった. しかし, 数万という天体を見続けた筆者にはこれが間違いなく本物であるという確証があったため (他の天体とはその様相が全く異なっていた), アリゾナ大学の Daniel Eisenstein 氏の協力のもと, 稼動し始めたばかりの南米チリにあるマゼラン望遠鏡のうちの 1 台を使って追加観測^{*6}を推し進めた. 結果は良好で, 分光・撮像ともにこれが間違いなく重力レンズクエーサーであるという証拠を得たのである.

その後の流れは筆者の計画どおりで, この SDSS J1226-0006 を徹底的に細かく調べることで, 重力レンズクエーサーの候補天体を効率よく

見つけるための特徴的なパラメーターを発見し, それをもとに探索アルゴリズムを構築していった. 一番最初に作成したものは全く未熟なものではあったが, その当時の SDSS の全データに対して実行したところ, 早速いくつかの非常に良い候補が見つかり (後の追加観測で本物の重力レンズクエーサーと確認されている), なかには SDSS J0924+0219 (図4)¹¹⁾ と呼ばれる, 後に SDSS の重力レンズクエーサー探索の中で最も有名な天体の一つになるものが含まれていた^{*7}. 非常に正確に発見された順番を挙げると上述の SDSS J1226-0006 が 1 番最初のものとなるが, 論文としての公表の順序の関係で, “歴史上” はこの SDSS J0924+0219 が SDSS 初, あるいは日本人の研究者としても初の重力レンズクエーサーの発見となっている

*6 SDSS の性質上, そのデータだけでは「ある天体が本物の重力レンズクエーサーである」ということを結論づけるのは不可能であるため, 他の大望遠鏡を用いた追加観測が常に必須である. すなわち, SDSS のデータだけでは, 重力レンズクエーサーの“候補天体”を見つけるところまでしか行かない.

*7 非常に特異なフラックス比をもつ四重像の重力レンズクエーサーとして有名になっている. 例えば参考文献 12 などを参照.

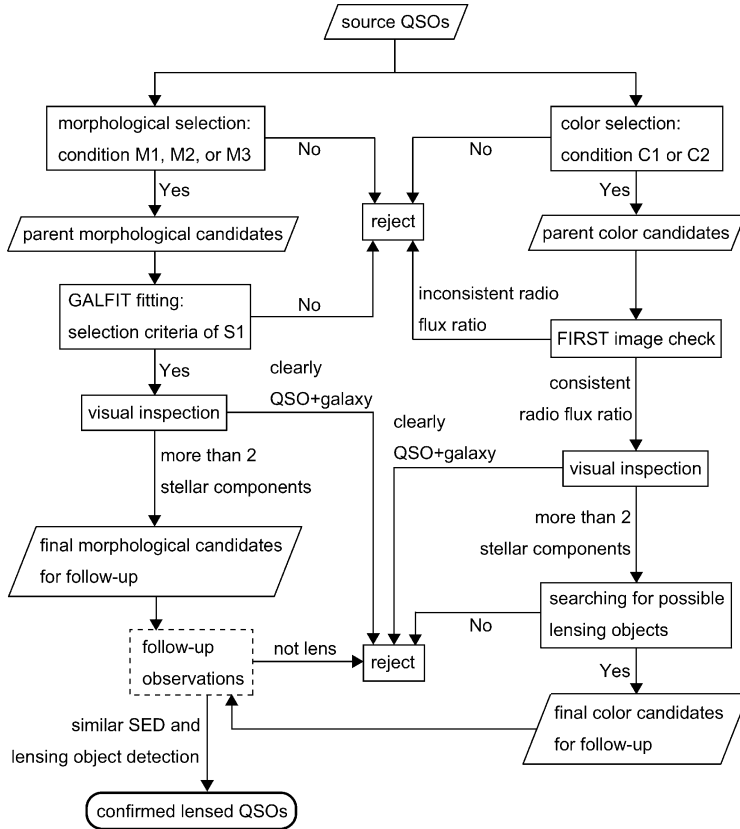


図5 筆者らが開発した重力レンズ探索アルゴリズム。重力レンズ現象によって作られた像がSDSSのデータ上で分離される場合とそうでない場合に分けて探索を行い、最終的には追加観測によって本物であることを確認する。細かい条件については、参考文献13および14を参照。

る。なお、SDSS J1226-0006の発見後、数年間にわたるアルゴリズムの推敲を繰り返し、(次節に挙げる共同研究者の大栗氏と共同で)最終的には図5に示すような探索アルゴリズムを完成させている¹³⁾。

4. 共同研究者

探索アルゴリズムさえ完成してしまえば、あとはそれを順次SDSSの最新のデータに適用させて候補天体を選び出し、さらにそれらを追加観測していくといういわば単純作業によって、当初の目的である過去最大の重力レンズ探索が完遂できる。しかし、単純作業とはいっても、SDSSの規模は半端ではないため、追加観測まで含めた作業を

一人で行うことはまず不可能であった。すなわち、本研究がもたらしたたくさんの発見の成功は多くの共同研究者たちのおかげであり、文章の途中ではあるが感謝の意を述べさせていただきたい。SDSS重力レンズクエーサー探索チームの広範なネットワークにより、日本人の研究者がアクセスしやすいすばる望遠鏡、ハワイ大学88インチ望遠鏡、英国赤外線望遠鏡(UKIRT)の三つに加え、(日本人には)敷居の高いケック望遠鏡(米国ハワイ島)、ARC 3.5 m望遠鏡(米国アパッチポイント)、TNG 3.6 m望遠鏡(スペイン領カナリア諸島)、Magellan望遠鏡(チリ)などの世界中の望遠鏡を利用することで、追加観測が滞ることなくスムーズに研究の進展を行うことができ、

数々の発見に成功することができた。また、チームのメンバーは（外国，特に米国やヨーロッパは望遠鏡をたくさん所有していて余裕があるせいか）“失敗に寛容”で，観測した候補天体がすべて重力レンズクエーサーでないといわることが多々あったが，何度となく「とてもエキサイティングだったので，また候補が出揃ったらぜひ観測しよう」と言ってもらったことを記憶している。観測による研究には（良い）共同研究者が欠かせないが，筆者はその面においても非常に幸運であった。

なお，この研究の最初の段階においては，探索チームの主なメンバーは筆者以外はすべて外国人の研究者であったために地理的・時間的な差異が大きく，これを解消するためにぜひ日本人の共同研究者をもちたいということも筆者の長年の夢であった。これに快く賛同していただいた大栗真宗氏^{*8}（現 国立天文台理論研究部研究員），加用一者氏（現 東京大学数物連携宇宙研究機構学振特別研究員 PD），諸隈智貴氏（現 国立天文台光赤外研究部学振特別研究員 PD），および，現在では天文学の研究からは離れておられる川野羊三氏（当時名古屋大学理学部物理学科 At 研所属）には特別の感謝を申し上げたい。この4氏，および他の探索チームのメンバーの努力は本当に大きく，また彼らの高い能力があれば，おそらく筆者がいなかったとしてもこの SDSS 重力レンズクエーサー探索は何の問題もなく現在以上の成果が得られていたであろう，と本気で信じている。特に，理論的な研究に非常に精通していた大栗氏の加入は大きく，彼の参入により，本研究の意義を確固たるものとして確立することができ，また現在では彼はこの SDSS 重力レンズクエーサー探索の主導者の一人でもある。ちなみに，本研究が行っている SDSS のデータを用いた重力レンズ探索には

「The SDSS Quasar Lens Search」，略して SQLS，という名前がつけられているが，この命名も彼の提案によるものであった。

5. 研究成果

さて，以下2小節にわたって，本重力レンズクエーサー探索 SQLS の具体的な成果について紹介したい。本研究の目的は，上述のようにひとこと言うところ「過去最大のサーベイをする」ということになり，これまでに数々の発見やそこから派生したさまざまな結果が得られているが，ここでは「銀河団による」大離角の重力レンズクエーサーの発見，「過去最大規模の，母集団から発見された重力レンズ天体のすべてに対して“完全に”統計的なサンプルの構築」の2点について記述する。両者とも，重力レンズクエーサー業界において残された大きな課題であり，また SDSS の大規模性と非常に良い一様性を最大限に活かすことで得られた，筆者らの探索における最も大きな成果である。

5.1 銀河団による大離角重力レンズクエーサーの発見

はじめに，銀河団による大離角の重力レンズクエーサーの探索に対する結果について述べる。これは文字どおり単体の銀河や数個程度の銀河のグループではなく，銀河団によって（もちろん銀河団なので質量の大部分は暗黒物質になるが）重力レンズされた，分離角が通常のものに比べて桁違いで大きい重力レンズクエーサーである。重力レンズ現象の分離角はおおよそレンズ天体の速度分散の2乗に比例するため，典型的に 200～300 km/s の速度分散をもつ単体の銀河によって形成される1秒角程度の通常重力レンズクエーサーに対し，約 1,000 km/s の速度分散によって10秒角以上の分離角をもつと考えられている。現在観

^{*8} 大栗氏は，重力レンズの理論研究に対する絶大な貢献により，2008年度（第3回，2009年3月）の日本物理学会の若手奨励賞を受賞している。

測されている大規模構造をよく説明する標準的な冷たい暗黒物質モデルは、十分に発見可能な量としてその存在を予測していたが*9, CLASS,あるいは2dFのデータを用いた比較的大きな探索^{15), 16)}でもその発見には成功していなかった。考えられる原因は主として二つあり、一つは、その存在確率が非常に低いためより多くのクエーサーを調べる必要があったこと、もう一つは、実はCDM予想が間違っており、宇宙の暗黒物質は標準的なCDMモデルよりもはるかに少ない割合の大分離角重力レンズクエーサーを予測するような種のものなのではないか¹⁷⁾、ということであった。いずれにせよ、存在確率が低い希な天体を発見することは正に大規模サーベイSDSSの十八番であり、通常のものに加えてそのような重力レンズ天体にも着目した探索を行うことになった。

大分離角の重力レンズクエーサーは、さすがのSDSSにおいても十分に形成された各レンズ像に分解されているため比較的容易に探索アルゴリズムを構築できるはずではあったが、それにしても発生したさまざまな問題を解決すべく数々の試行錯誤を繰り返しながら探索を進めていった。そして、その探索が開始されてから約8カ月後、ついにその時がやってきたのである。候補天体の中に、一つのクエーサーの周りに同じような色をした三つのクエーサーがあることを発見し（すなわちもとのクエーサーを入れると四つ）、それらが典型的な四重像の重力レンズクエーサーの像の配置（図6）を伴っていたのである*10!! しかもその最大分離角は約15秒角で、まさに銀河団でないと思えないほどの大分離角であった。すぐにグループに電子メールを送るとその反応はすさまじく（しかし、このような歴史的な発見をいきなりメーリングリスト全体に送るのはどうしたものか、と当時の指導教官である須藤 靖先生に後で

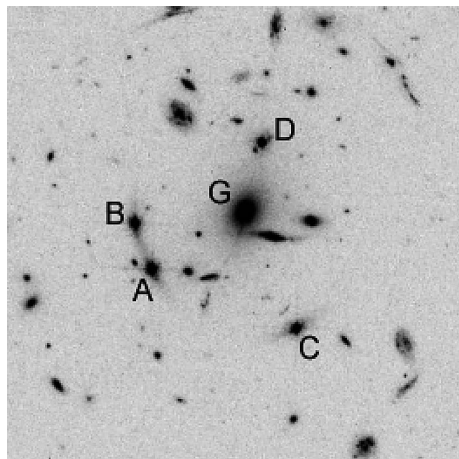


図6 SDSS J1004+4112のハッブル宇宙望遠鏡(ACS, Iバンド)による撮像データ(上が北で左が東)。A-Dが重力レンズされたクエーサーの像で、明るい銀河(G)を中心にした銀河団が重力レンズ現象を引き起こしている。像A-Cの周りにはホスト銀河のレンズ像が、上端および右上端には同じ銀河団によって重力レンズされた背景の銀河の像(アーク)が見える。なお、図では確認できないが、Gの中心近くに5番目のクエーサーレンズ像が確認されている¹⁹⁾。 $z_s = 1.732$, $z_l = 0.680$ で、最大分離角は14.62秒角。

指摘され反省もしたが)、直ちに追加観測が行われることになった。結果、撮像・分光観測ともに申し分なく、これが本物であることが確認された。こうして「long predicted but previously undetected (プリンストン大学のMichael Strauss教授による表現)」な天体の存在の確認に成功したのである。すぐに大栗氏の計算によりその存在確率がCDM予想と矛盾しないことが示され、銀河団スケールにおいてもCDMが支持される、という科学的な結果も得られた¹⁸⁾。なお、天体の名前としては、SDSSの慣例に従ってその座標(J2000)を用いて「SDSS J1004+4112」とすることになった。

*9 数万個のクエーサーを見ればそのうちの一つ程度がそのようなレンズ天体であることが予測されていた。

*10 あまりに興奮して机の上のペットボトルのお茶を倒してしまったことを記憶している。

この SDSS J1004+4112 は、世界初の銀河団重力レンズクエーサーとして、*Nature* 誌²⁰⁾においてその発見が報告されている*11。また発見後、筆者が把握しているだけでもすばる望遠鏡、野辺山 45 m 電波望遠鏡、東京大学マグナム望遠鏡、ARC 3.5 m 望遠鏡、MDM 2.4 m 望遠鏡、チャンドラ X 線望遠鏡、ハッブル宇宙望遠鏡、スピッツァー赤外線宇宙望遠鏡などでさらなる追加観測が行われた。得られた結果は多岐にわたりまたそれぞれ興味深いものではあるが、詳細は個々の論文に委ねることにする²¹⁾⁻²⁵⁾。また、SDSS J1004+4112 の発見は 2004 年の天文月報でも紹介されており²⁶⁾、興味のある方にはぜひそちらも参照していただきたい。

さて、SDSS の威力はやはり絶大なもので、本研究による探索は 2 例目の銀河団重力レンズクエーサー (図 7) をもたらしてくれた。これは SDSS J1029+2623 と名づけられ、その最大離角は SDSS J1004+4112 のそれを超える約 23 秒角にのぼっている。発見当初は二重像のシステムであると考えられていて、その特異なレンズ像の配置 (二重のレンズ像の位置が、レンズ現象を引き起こしている銀河団の中心から大きく外れている) により重力レンズシステムではない可能性も疑われたが、可視光域における撮像・分光の追加観測に加え、VLA を用いた電波観測によってそれが本物の重力レンズであることが確証された²⁷⁾。しかしながら依然としてその特異な像の配置を解明する必要があったが、大栗氏はこのシステムは銀河団スケールにおいて比較的良好に見られる「naked cusp」によって作られた実は三重像の重力レンズシステムであり、像 B のすぐ下にある星状の天体 (像 C) が三つ目のレンズ像であればその矛盾が解決できるものであると考えていた。そしてその発見から約 1 年後、この像 C の分光観

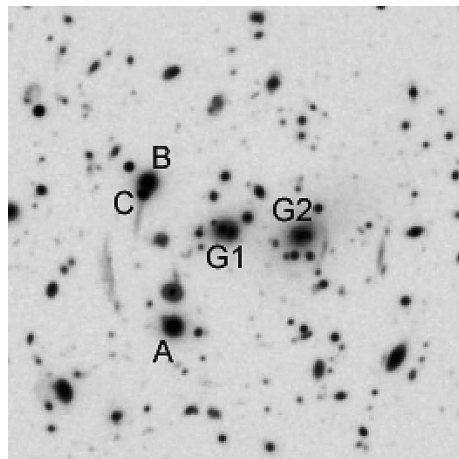


図 7 SDSS J1029+2623 のすばる望遠鏡 (Suprime-Cam, r バンド) による撮像データ (上が北で左が東)。当初は像 A および B が重力レンズ像と考えられていたが、その後像 C もレンズ像であることが確認され、これが「naked cusp」によるシステムであることが確認された。G1 および G2 を中心にした銀河団が重力レンズ現象を引き起こしており、SDSS J1004+4112 同様いくつかのアークも確認できる。 $z_s=2.197$, $z_l=0.600$ で、最大離角は 22.50 秒角。

測がケック望遠鏡によって行われ、それが間違いなくレンズ像であることが確認されたのである²⁸⁾!! さらにその後、より高解像度の VLA による電波観測も行われ、その結果 (SDSS J1029+2623 が三重像の重力レンズクエーサーであること) を追確認している。なお、このような「naked cusp」によるレンズが存在することで、よりいっそう CDM 予想が強く支持されるという結果が得られた²⁸⁾。こうして SDSS の大規模データはその力を存分に発揮して、「銀河団重力レンズクエーサー」という新たな種類のレンズ天体を確立することに成功している。SDSS J1004+4112 については引き続きさまざまな追加観測が行われていく (行っていく) であろうし、SDSS J1029+2623 に

*11 この論文は実に 5 番目の著者までが大学院生であり、これが筆者のひそかな自慢となっている。もちろん、多くの先生方の協力なくしてはなしえないものではあったが…。

ついても、その特徴を利用した多波長観測を行うことを予定している。今後論文などでこれらの名前を目にした際には、ぜひ注目していただければ幸いである。

5.2 重力レンズクエーサーの統計サンプルの構築

次に、われわれ **SQLS** が構築した重力レンズクエーサーの統計サンプルについて述べたい。重力レンズ天体はその一つ一つが重要な科学研究の手段となりうるため、ただ単にそれらを数多く発見することだけでもそれなりに意義はあるが、その力を最大限に発揮するためにはやはり“統計的な”サンプルを構築することが欠かせないことが容易に考えられるであろう。特に重力レンズクエーサーを宇宙論的な研究に応用するためには（大規模な）統計的サンプルを作ることは必須である。**CLASS** やハッブル宇宙望遠鏡によるスナップショットサーベイは非常に素晴らしい仕事をしているが、**CLASS** においてはその母集団の規模はそれなりに大きいもののそれらの赤方偏移分布が完全に明らかにはなっていないという問題がある²⁹⁾。ハッブルのサーベイにおいては母集団はクエーサーに限定されているものの、その数は約 500 個と統計的な議論をするにはやや物足りない。これに対して **SDSS** は、単に規模が大きいというだけではなく非常に良い一様性をもっており、また“すべてが分光同定された”クエーサーに基づいてレンズ探索を行うことが可能であるという点において、より精密な研究を行うための大規模な重力レンズクエーサーの統計サンプルを構築することに適合している。

さて、その重力レンズクエーサーの統計サンプルを構築していくわけであるが、まずはじめに注意すべきは **SDSS** によって作られたクエーサーカタログは重力レンズ探索に対して完全に無バイアスではない、とういことがある。すなわち、元来本研究の対象となるものは“**SDSS** によって分光同定されたクエーサーすべて”であるが、単純に

そこから始めてしまうと（重力レンズクエーサーの）統計的なサンプルを構築することはできない。すなわち、その目的に適した（バイアスのない）サブサンプルを作り、それを母集団としてスタートすることで初めて統計的なサンプルを構築できるようになるのである。ここでは、筆者らが開発した探索アルゴリズムで使われているパラメーター、**SDSS** が撮像データから分光ターゲットを選ぶときの特徴、また条件があまりよくないときに撮られた撮像データを省く、などを考慮して、「(**Galactic extinction** を考慮した) i バンドの明るさが 19.1 等級より明るいもの」、「赤方偏移が 0.6 以上 2.2 以下であるもの」、「撮像データの **seeing** が 1.8 秒角以下であるもの」、という三つの条件を課すことが必要であることがわかった¹⁴⁾。こうして作られたサブサンプルを母集団として探索アルゴリズムを適用し、候補天体を選び出す。次にそれらの追加観測を行うわけであるが、単に重力レンズクエーサーを見つけるためだけなら候補天体のうち可能性の高そうなものだけを観測していけば良いのに対し、ここでは統計サンプルを構築するため、選び出された候補天体のすべてに対してその是非が完全に結論づけられるまで観測を行う必要がある。本研究の探索アルゴリズムは入力したクエーサーを約 100 分の 1 まで絞ってくれるが、もとの母集団が数万あるため、すなわち数百個の候補天体の一つ一つ詳細に観測しなければならないことが非常に骨の折れる仕事であった。こうして発見された重力レンズクエーサーのうち、探索アルゴリズムがほぼ 100% の成功率で働く「最大分離角が 1 秒角以上」、「(二重像の場合) レンズ像のフラックス比が 1.25 等級以内」のもの¹⁴⁾が、統計的な扱いが可能な重力レンズクエーサーサンプルとして構築されている。現在までの結果としては、多くの観測時間を提供してくれたハワイ大学 88 インチ望遠鏡（の日本人研究者 梓）などのおかげもあり、**SDSS** の 5 回目のデータリリース (**DR5**, **SDSS** 全体の約 70%) ま

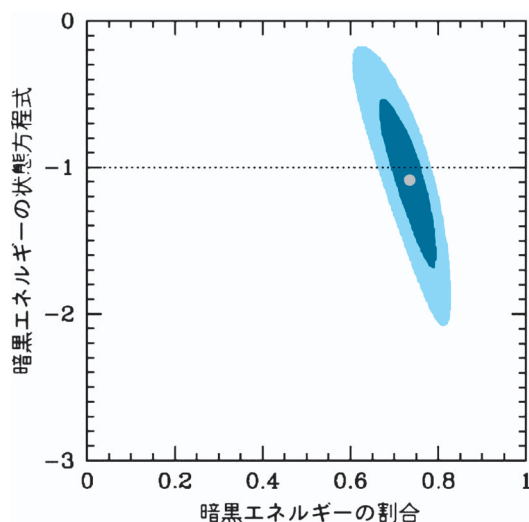


図8 SDSS DR3のデータを用いた重力レンズクエーサーの統計サンプルとBAOの結果³²⁾を合わせた暗黒エネルギーに対する制限。横軸が Ω_A で縦軸が w となる。中心値が点で表されており、色の濃い領域は 1σ を、薄い領域は 2σ を表している。大栗氏提供。

でのデータに対し、上述の細心の流れに従った統計サンプルを完成させている³⁰⁾。もともとのDR5のクエーサーは77,429個で、ここから統計サンプルの母集団となる36,287個のクエーサーサブサンプルを作成する。このうち356個が重力レンズクエーサーの候補天体として選ばれ、一つ一つに対して詳細な観測を行い、19個の統計サンプルを構築している。

この統計サンプルの応用は多岐にわたるが、直ちに行えるものの一つとして宇宙論の検証がある。重力レンズクエーサーが発生する確率は宇宙の暗黒エネルギーの量（あるいは宇宙項定数の値）に強く依存することが知られており、すなわち統計的なサンプルにおけるレンズ確率と理論的な予想を比較することで Ω_A の値に制限をつけられる。筆者らのDR5の観測結果からは、宇宙項定数への制限に対しては $\Omega_A = 0.79$ 、あるいはSDSSのバリオン音響振動(BAO)の結果と合わせた暗黒エネルギーへの制限に対しては $\Omega_A =$

0.75 および $w = -1.1$ (暗黒エネルギーの状態方程式) という結果³⁰⁾が得られた (誤差を含めると超新星などを用いた他の結果に矛盾していない)。

このDR5の結果はまだ (査読付き) 論文として未公表であるため、図にはDR3までの暗黒エネルギー検証の結果 (クエーサー 22,683 個、候補天体 220 個、統計サンプル 11 個) を示す³¹⁾。DR3とDR5の結果はほぼ同じになっているが、DR5ではその統計的不定性が半減している³⁰⁾。

現在、SDSSのすべてのデータ (DR7) に対する統計的サンプルの構築を進行させており、また、これらの統計サンプルを用いた (宇宙論検証以外の) ささまざまな応用研究を進展させている。SDSS J1004+4112 や SDSS J1029+2623 といった銀河団重力レンズクエーサーの応用研究同様、こちらのほうの結果も今後注目をいただければ非常に光栄である。

6. 最後 に

重力レンズというダイナミックな天体現象の魅力、あるいはそれを実際に発見したいという欲求からスタートした本研究であるが、多くの共同研究者たちに支えられ、当初の予想を大幅に上回る大きな研究成果を上げることができた。現在までに、二つの銀河団大離角重力レンズクエーサーを含む38個の新発見に成功し、用いた母集団、発見された重力レンズクエーサーの数 (もちろんそこから生み出された「統計サンプル」についても) の両方において過去最大規模を誇るまでに至っている。

現在、すばる望遠鏡におけるHyper Suprime-Cam計画をはじめ、世界中でさまざまな大規模サーベイ観測が計画されている。今後は、SDSSの重力レンズクエーサー探索の完遂を目指しつつ、そこで培った経験をそのような将来計画の中で活かしていきたい。SDSSでの経験をもとに今後の重力レンズの観測的研究に対して少しでも貢献することができれば、このうえない光栄である。

謝 辞

第4節において記述しましたように、本研究は数多くの共同研究者の方々の援助なしには成り立たないものでした。特に、SDSSの基礎を築き、また筆者にそのデータを用いた研究を行う機会を与えていただいたSDSS Japan Participation Groupの皆様、観測などに多くの時間を費やしていただいたSDSS重力レンズクエーサー探索チームの皆様、またさまざまな助言や励ましをいただいた指導教官の皆様に対しまして、心からの感謝と御礼を申し上げます。また、本稿は筆者の記憶などに基づいてそれを忠実に記述したつもりではありますが、もし誤認などがありましたら何卒ご容赦いただければと思います。以上、稚拙な文章にて失礼いたしました。

参 考 文 献

- 1) Kochanek C. S., Schneider P., Wambsganss J., 2004, arXiv: astro-ph/0407232
- 2) Walsh D., Carswell R. F., Weymann R. J., 1979, Nature 279, 381
- 3) Myers S. T., et al., 2003, MNRAS 341, 1
- 4) Browne I. W. A., et al., 2003, MNRAS 341, 13
- 5) Maoz D., et al., 1993, ApJ 409, 28
- 6) Narayan R., White S. D. M., 1988, MNRAS 231, 97
- 7) York D. G., et al., 2000, AJ 120, 1579
- 8) Turner E. L., Ostriker J. P., Gott J. R. III, 1984, ApJ 284, 1
- 9) Richards G. T., et al., 2002, AJ 123, 2945
- 10) Abazajian K., et al., 2009, ApJS 182, 543
- 11) Inada N., et al., 2003, AJ 126, 666
- 12) Schechter P. L., Wambsganss J., 2002, ApJ 580, 685
- 13) Inada N., et al., 2008, AJ 135, 496
- 14) Oguri M., et al., 2006, AJ 132, 999
- 15) Phillips P. M., et al., 2001, MNRAS 328, 1001
- 16) Ofek E. O., et al., 2001, MNRAS 324, 463
- 17) Ostriker J. P., Steinhardt P., 2003, Science 300, 1909
- 18) Oguri M., et al., 2004, ApJ 605, 78
- 19) Inada N., et al., 2005, PASJ 57, L7
- 20) Inada N., et al., 2003, Nature 426, 810
- 21) Richards G. T., et al., 2004, ApJ 610, 679
- 22) Sharon K., et al., 2005, ApJ 629, L73
- 23) Ota N., et al., 2006, ApJ 647, 215
- 24) Fohlmeister J., et al., 2008, ApJ 676, 761
- 25) Inada N., et al., 2008, PASJ 60, L27
- 26) 稲田直久, 大栗真宗, 2004, 天文月報 97, 415
- 27) Inada N., et al., 2006, ApJ 653, L97
- 28) Oguri M., et al., 2008, ApJ 676, L1
- 29) Muoz J. A., et al., 2003, ApJ 605, 614
- 30) Inada N., et al., 2009, AJ, 準備中
- 31) Oguri M., et al., 2008, AJ 135, 512
- 32) Eisenstein D. J., et al., 2005, ApJ 633, 560

Quasar Lens Search Using the SDSS Data Naohisa INADA

*Cosmic Radiation Laboratory, RIKEN, 2-1
Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

Abstract: We review our gravitationally lensed quasar survey using the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) data, which is named “the SDSS Quasar Lens Search (SQLS).” In the course of the SQLS, we are now carrying out the current largest lensed quasar survey. In this review, we focus on the motivation for the study and the first discovery of a lensed quasar in the SDSS data, and introduce our two main results of 1) the discoveries of cluster-scale lensed quasars and 2) the construction of the largest statistical sample of lensed quasars.