

最大分離角重力レンズクエーサーの発見

稲田直久

〈東京大学理学系研究科物理学教室 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: inada@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp

大栗真宗

〈東京大学理学系研究科物理学教室 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: oguri@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp

現在標準的に用いられている冷たい暗黒物質モデルは、大質量の暗黒物質の集中により、これまでに知られている最大のおよそ7秒角をはるかに超える大きな分離角を持つ重力レンズクエーサーが存在しうることを予言している。我々はスローン・デジタル・スカイ・サーベイのデータを用いた探索により、世界初の銀河団による大分離角（およそ15秒角）の重力レンズクエーサー SDSS J1004+4112 を発見することに成功した。以下、この発見の過程およびその重要性について簡単に紹介する。

1. はじめに

今回報告する世界初の銀河団による大分離角重力レンズクエーサー、SDSS J1004+4112 の発見は、2002年10月7日に行われた秋の天文学会 (@宮崎シーガイア) における活動銀河核のセッションから始まった。この日の東京の朝は大荒れの天候で、出発時から少々疲れていたが何とか無事に口頭発表を終えた著者の一人（稲田、当時東大宇宙線研所属）のもとに一人の人間がやってきた。「あの一、大栗といいます。質問があるので

が……」「ああ、君が大栗君か。加用君（東大宇宙理論研所属で、著者らと同じくスローン・デジタル・スカイ・サーベイのデータを扱っている仲間である）から聞いたことがあるよ。君も重力レンズクエーサー^{*1}を研究しているんだって?」「ええ、今回はポスター発表をしてるのでよかったですら見にきませんか?」「うん、それじゃあどのような研究をしてるのか聞かせてよ。」この著者の一人（大栗）のポスター発表こそ、本稿の主題である、巨大な分離角^{*2}を持つ重力レンズクエーサーについての話であった。

^{*1} アインシュタインの一般相対性理論によると、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が予測されている。このような時空の歪みはまるで凸レンズのように働き、その時空を通過する光の経路を曲げる、という効果をもたらす。時空の歪み具合は物体の質量が増えるにつれて大きくなり、例えば銀河などの大質量の天体の周りの大きな時空の歪みは、ちょうどその視線方向にある遠方のクエーサーなどの天体からの光の経路を強く曲げ、見かけ上の形を歪めたり、あるいは最も極端な場合ももとは一つの天体であるにもかかわらず複数の像として観測されるという現象を引き起こす。このような天体現象は重力レンズ現象と呼ばれ、特に遠方のクエーサーが銀河（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。

^{*2} 重力レンズによって形成された各像の中心を結ぶ天球上の角を分離角と呼ぶ。図1参照。

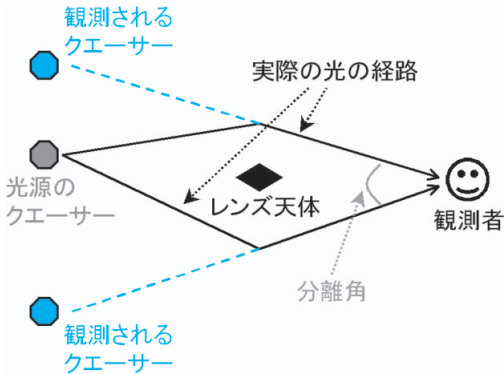


図 1 重力レンズの概略図. 複数像を見込む天球状上の角度が分離角である.

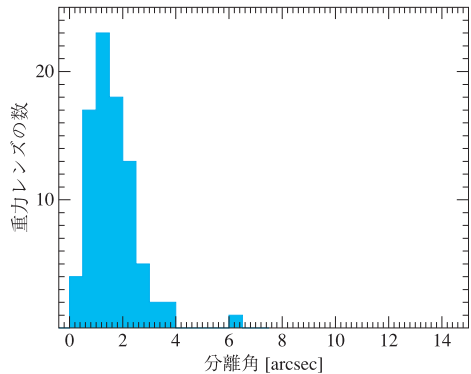


図 2 これまで観測されている重力レンズ像の分離角分布. ただし今回発見した大分離角重力レンズクエーサーは含まれていない.

2. 大分離角重力レンズクエーサー

重力レンズクエーサーは 1979 年に Q0957+561 が初めて発見されて¹⁾以来, これまでおよそ 70 個程度見つかった²⁾. しかし形成される各像の分離角の最大値は前述した Q0957+561 の 6.26 秒であり³⁾, この程度 of 分離角は銀河形成に伴って冷却され中心に集中したバリオン物質で説明がつく. 当時観測されていた重力レンズクエーサー分離角の分布を図 2 に示す.

しかし, 現在観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 (以下 CDM モデルとする) によると, 現在の宇宙には暗黒物質の銀河団スケールの集中が起きており (通常そのような暗黒物質の集中には銀河団が付随していると思われる), そのような暗黒物質の集中によって 7 秒角を大きく超える大分離角の重力レンズクエーサーが十分に観測できる割合で作られる. 理論的には CDM モデルを認めれば数万個のクエーサーのうち一つがそのような巨大分離角重力レンズクエーサーになるであろうと予想されていた^{4)~9)}. しかしながら, その存在が十分に予測されているにもかかわらず多くの (1 万

個以上の) クエーサーを使って探索しても大分離角の重力レンズクエーサーは発見されていなかった^{10), 11)}.

ここで注意すべきは, そのような大分離角の重力レンズクエーサーの起こる割合は仮定する暗黒物質のモデルに強く依存するということである. 実は, 標準的な CDM モデルは宇宙の大規模構造を極めてよく説明することができるが, 銀河スケールではさまざまな問題 (質量密度の中心集中問題, サブストラクチャー問題) が従来から指摘されており, これを解決する実にさまざまな暗黒物質のモデルが提案されてきた¹²⁾. これら亜種モデルのほとんどは標準的な 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言するため, そのような大分離角重力レンズクエーサーの発見は, これら暗黒物質のモデルに厳しい制限を与えることができる.

なぜ見つからないかという主な原因の一つは, 前述したようにクエーサーがそのような大分離角の重力レンズを受ける確率が非常に低いため, ということであった. それならば, 最終的にはおよそ 10 万個のクエーサーのカタログが作ら

*3 これより分離角の大きい重力レンズクエーサーの可能性のあるものとして RXJ0921+4529 があるが³⁾, これが本当に重力レンズ天体かどうかについては依然論争中である. しかしこの天体にしても分離角は 6.97 秒なので, 本当に重力レンズクエーサーだとしても以下の議論には影響しない.

れるスローン・デジタル・スカイ・サーベイ^{13)~15)}のデータを用いればあるいはその発見に成功するのではないかと思ひ、また、もし一つも見つからなかったとしても、その事実から暗黒物質のモデルに厳しい制限を与えることができそうなので、著者の一人(稲田)と一緒にその探索を始めましょう、ということを出した。この申し出はその場で快く了承され、こうして一つの共同研究が始まったのである。

3. スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)

本題に入る前に今回の発見の土台となったスローン・デジタル・スカイ・サーベイ(以下SDSSとする)について簡単に紹介しておく。このSDSSプロジェクトが現在までに作り出したおよそ3万個の膨大な数のクエーサーを含むクエーサーカタログこそ、今回の発見を引き出した最も大きな要因であり(もっとも、そのような巨大な分離角を持つ重力レンズクエーサーが存在するはずだと信じて疑わなかった我々の信念と、丹念なデータ解析もそれと同等に重要であった、と信じてはいるが……)、著者らにとってはSDSSのデータおよびその建設・観測に携わっているSDSSの人々はまさに足を向けて寝られない存在となっている。

このSDSSは、アメリカ合衆国の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されたSDSS専用広域視野専用望遠鏡(図3)を使い、およそ5年間をかけて北銀極を中心とする全天の4分の1(およそ10,000平方度!)という広大な領域を、可視光の領域で測光観測および分光観測をしようという大規模な日・米・独の共同プロジェクトである。このSDSSの観測は、

- (1) はじめにある領域の測光観測が行われ、その測光データ(測光カタログ)をもとに銀河・クエーサーなどの候補天体がいくつか選ばれる^{16), 17)}。

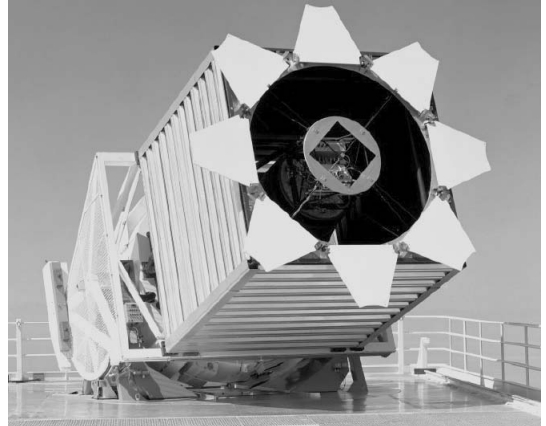


図3 アメリカ合衆国のニューメキシコ州にあるSDSS専用広域視野専用望遠鏡。SDSSのウェブページ(<http://www.sdss.org/>)より転載。

- (2) それらの候補天体に対して分光観測が行われ、銀河であるかクエーサーであるかなどが確定される。
- (3) これらを繰り返していくことで夜空を埋め尽くし、銀河・クエーサーなどの測光および分光カタログが作成されていく。

という形で行われている。本サーベイは2000年に始まり、サーベイ終了の予定は2005年であるため、現在はまだ進行中の段階である。現在までに測光観測のおよそ8割、分光観測のおよそ5割が終了している。サーベイ終了時にはあらゆるデータについて現在までに存在するものを総計したもののおよそ10倍を超えるデータが得られることが見積もられており(100万個の銀河の分光データ、10万個のクエーサーの分光データ、1億個の銀河の測光データなど)、今後数十年にわたって可視光天文学の基礎データとなることが期待されている。

このSDSSの主な目的は銀河やクエーサーの3次元地図を作成することであるが、その観測領域の広さや非常に良いデータの一様性から他のさまざまな目的においても過去の研究をはるかに凌駕する研究が行えることが予測されており、また実

際に行われている。現在までに、銀河、銀河団、大規模構造、クエーサー、重力レンズ、星、などに関するおよそ 300 編の論文が SDSS から出されていて、可視光域の観測天文学を行っている研究者の方々はおそらく 1 度は「SDSS」という言葉を聞いたことがあるのではないと思われる。著者は 2 人とも SDSS の正式なメンバーではないが、幸運にも著者らの指導教官が正式な SDSS のメンバーであるため、SDSS のルールによってその最新のデータにアクセスすることができる。なお、安心していただきたいのは、SDSS のデータは順次公開されることになっており、SDSS 以外の人でもある程度の時間を待てばそのデータにアクセスすることができるようになる。予定では、2006 年までにすべてのデータが公開されることになっており、現段階においてもすでに初期、1 回目、および 2 回目のデータ公開がなされている^{18)~20)}。

4. 巨大分離角重力レンズクエーサーを探そう！

さて、いよいよ本格的な大分離角重力レンズクエーサーの探索を行うことになったのだが、解決すべき主な問題点が三つあった。一つめの問題はどのようにして探索を行うかという探索方法（発見方法）についてである。SDSS は空間解像度がそれほど良くはなく、また観測望遠鏡のあるところの大気ゆらぎが大きいいため通常の（2, 3 秒角程度の分離角を持つ）重力レンズクエーサーは形成される各像がデータ上では分割されずに混ざってしまうため、その候補天体を見つけるためにはかなりの工夫を要する²¹⁾のだが、大分離角のものに対しては形成される像は十分に分解されて観測されるので、その種の工夫の必要はない。そこで、重力レンズ効果の持つ「見かけ上の明るさは変えるが、形成される各像の天体の色は変えない」という性質を利用し、ある分光されたクエーサーの周りの測光データを調べてクエーサーと同じ色を持つ天体があるものを候補天体とすることにし

た。しかしながら、本当の重力レンズ像でも実際にはある瞬間に発せられた光が全く異なる経路を通過してきてかつ異なった時刻に我々のもとに到着するために、経路の違いによる光の吸収などの違いやクエーサー自身の時間変動によって、必ずしも同じ色にはならない。しかし、だからといって、そのような別々の経路上でどのようなイベントが起こるかということも全く予測ができないため、とりあえずそのような色の变化する効果は無視することにした。当然ながら、色の違いが大きくなることを予測して探索を行えばその分レンズではないものが候補天体に多く入ってくるはずなので、追加観測の効率を考えれば（他の望遠鏡を用いた追加観測の時間は無限にあるわけではない！）とりあえず現段階でこの効果は無視するのは妥当であると思われる。

二つめの問題は、クエーサーの周りを探索する際にどのくらいの領域まで行るか、ということである。過去においてはかなり広い範囲まで探索を行っている例もある²²⁾。しかしながら、やはり追加観測の効率（当然ながら、領域を広くするほど候補天体の数は増える）を考え、理論的考察も合わせて 60 秒角を限界、すなわち基準となる分光されたクエーサーから半径 60 秒角以内を探索の範囲とした。ここで追加観測の効率という観点から一つ追加しておく、我々の探索では赤方偏移 2.3 を超えるクエーサーは最初から探索の対象とはしなかったことに注意しておく。当然ながら、遠くにあるクエーサーほど重力レンズ効果を受ける確率は高くなるのだが、赤方偏移 2.3 を超えるクエーサーについては、その色が通常の星と非常に似通ってしまい²³⁾、「クエーサーと星」のペアを非常に多く拾ってしまうため、無駄な追加観測を多数しなければならなくなる。この赤方偏移に対する制限をつけたため、結局調べたクエーサーの数は現在ある SDSS の全クエーサーから少し減って最終的に約 3 万個になった。

三つめの問題はデータの取得についてであっ

た。通常の重力レンズクエーサーについては、1つのクエーサーについてそれが複数の像からできているかそうでないかを判断すれば良いため、クエーサーのカタログのみでほとんどの探索が事足りていたが、このような大分離角の重力レンズの探索を行うためには、もともとのクエーサーのカタログに加えその周辺の天体の測光データが必要になり、これらのデータの取得が大きな問題であった。3万個の各クエーサーの周辺のデータを、すべてのデータが置いてあるフェルミ加速器研究所のマシンから一つ一つ取ってこなければならず、またその容量が大きいので、一つのデータの取得に長い時間が必要であった。これについては他に方法がないため、二人で協力してひたすら取り続ける、ということになった。取得中にメンテナンスなどのためにネットワークが切断されてやり直さなければならなかったことなどに苦しめられたが、数回の徹夜を繰り返し、およそ3カ月かかってすべてのデータの取得が終了した。以上の問題を解決し、これでようやく探索が行えるようになったのである。

5. 最初の結果

1回目の探索の結果、9個の候補天体（それぞれクエーサーの周り60秒以内に非常に色の近い天体が存在するもの）が見つかった。この9個についてはすべてクエーサーと色の近い天体が1つ、という合計二つの像の重力レンズの候補であった。いくつかの候補については、SDSSの画像上でそれぞれの天体の間に数個の銀河が確認され、「レンズ銀河団」の存在の可能性を示唆するものもあったため、すぐにこの結果をSDSSの重力レンズクエーサー探索チームに電子メールで流してみた。その結果、プリンストン大の大学院生 Bart Pindor 氏（現トロント大）、Joe Hennawi 氏が興味を持ち、SDSSと同じアパッチポイント天文台にある Astrophysical Research Consortium (ARC) 3.5 m 望遠鏡を使ってすぐに追加観測を

しようということになった。SDSSの分光観測は、装置の都合上基本的に一つの天体が分光観測された場合その半径55秒角以内の天体は分光できないため²⁴⁾、「同じ色の天体」が本当に重力レンズされた像であるか（この天体が本当にクエーサーであり、またもとのクエーサーと同じ赤方偏移かどうか）を確認するために、分光の追加観測が必要となるのである。

この追加観測の結果、この9個のうち3つが非常に赤方偏移の近いクエーサーのペアであることが分かった。ARC望遠鏡の観測ではそれ以上は分からなかったが、少なくとも赤方偏移が同じであることが分かり、大分離角重力レンズクエーサーであるかもしれない可能性がにわかに高まった。すぐにカリフォルニア大デービス校の Michael Gregg 氏、Robert Becker 氏らの申し出を受けて Keck 望遠鏡を使ってさらなる追加観測を行うことになった。この Keck 望遠鏡での追加観測の結果、何とこの3つの候補はすべてそれぞれの天体の赤方偏移はほぼ同じであったにもかかわらず、それぞれの輝線の様子が大きく異なり、したがって元が同じで重力レンズによって形成された像ではなく単なるクエーサーのペアであることが分かった。かくして、最初の探索は、数カ月の努力も空しく残念ながら1つも発見できないままに終わった。

6. 世界初の巨大分離角重力レンズクエーサーを発見??

最初の探索の不成功を受けてしばらくは著者らは少々落ち込んでい、そもそも理論的にも数の少ない天体ということもあり、SDSSのデータも今後まだ増え続けていくので、辛抱して今後も頑張っていくということではしばらく同様の探索を続けていくことになった。しかしながら、ある日、非常に重大なミスをしていたことに気がついた。何と、驚くべきことに、3万個のクエーサーのうち、その3割近いおよそ1万個のクエーサーに

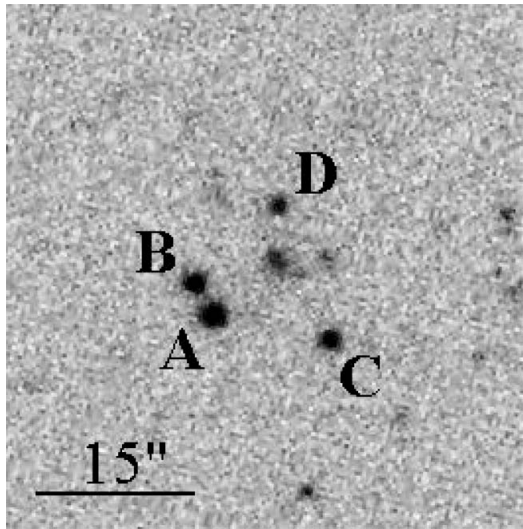


図 4 候補天体の SDSS の測光イメージ (iバンド). A から D まですべて似たような色を持っている. 天体 B が SDSS で分光されたクエーサーで, 他の A, C, D については SDSS では分光されていない.

ついてそのデータの取得が完全ではなかったの
ある. 直ちに二人でデータの取得を開始し, や
りそれには数週間の時間を要したのだが, よう
くすべてのデータを取りそろえ, それらに対して

探索を行った.

そしてその瞬間は突然訪れた. 2003 年 5 月 3 日
の深夜, 著者らは他に誰もいない研究室で候補天
体のチェックを行っていた. その中の一つに, 1
つのクエーサーの周りに 3 つの同じ色の天体 (元
のクエーサーを入れると合計 4 つの像) がある候
補天体があったのである! さらに驚くべきこと
に, SDSS 測光のデータを見るとそれらの天体の
配置が有名な 4 重像重力レンズ PG1115+080²⁵⁾
に酷似していた (図 4). その最大分離角はこれま
でに知られている最大値の 2 倍以上となるおよそ
15 秒角で, またその四つの像の間には複数の暗い
銀河 (レンズ銀河団の候補) であるのが確認され
た. この時点ですでにこれが世界初の大分離角重
力レンズクエーサーであることを確信した著者ら
は, すぐに再び SDSS の重力レンズクエーサー探
索チームに電子メールを送ってその発見を報告し
た.

その電子メールを送った時刻がちょうど (多く
の探索チームのメンバーが住んでいる) アメリ
カ合衆国の昼頃だったこともあり, すぐにプリン
ストン大の Jim Gunn 氏をはじめとするたくさん

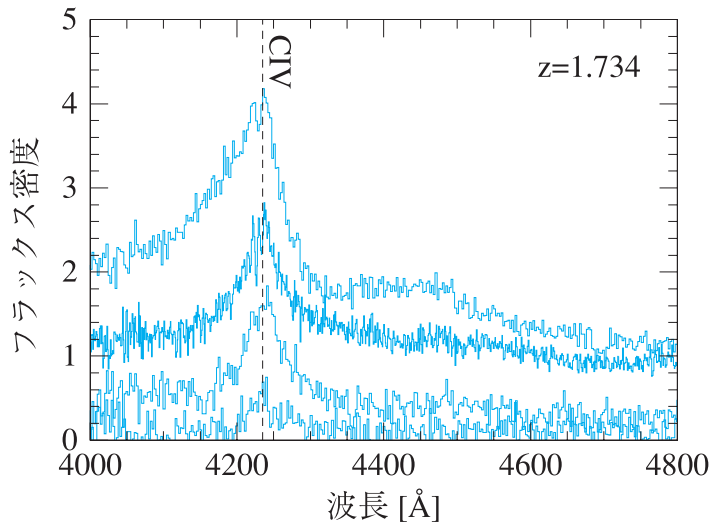


図 5 ARC 望遠鏡で観測された重力レンズ候補の分光の結果. 上から順に天体 A, B, C, D のスペクトルを示して
ある. ただし天体 B のスペクトルだけは SDSS で観測されたもの. 四つの天体すべてが 4,200 Å 付近に輝線
を持っているのが確認できる.

SDSS のメンバーから返信があり、メールサーバーが壊れないかと心配になるほどの（やや誇張）電子メールのやりとりが始まった。前回同様、これは直ちに追加観測すべきだ、ということになり、再び Bart Pindor 氏、Joe Hennawi 氏らが ARC 望遠鏡を使って分光の追加観測をすることになった。

彼らは、まず図 4 中の天体 A、C の分光観測をその日の夜に行い、同じ波長に一つの輝線を持つことを確かめた。これで重力レンズであることはまず間違いないと思われたが、事件はそのすぐ後に起こった。彼らは 5 月 6 日に最後の天体 D の分光観測を行いすぐにその結果を著者らに送ってくれたが、そのスペクトルを見てみると期待どおり輝線は見られたものの、その波長が有意にずれていたのである。すっかり落胆した我々はしばらくあとに「残念だったがこの結果を皆に知らせてもよいか」と尋ねた。彼らの返事は「そのスペクトルは波長較正がまだなので少し待ってくれ」というもの。再び高まる緊張。そして約 1 時間後に、「Congratulations」の言葉とともに、A~C と同じ位置に輝線をもつ天体 D のスペクトルが送られてきたのである（図 5）。また、ジョンズホプキンス大の Kuenley Chiu 氏、Wei Zheng 氏らが同じ ARC 望遠鏡を使って 1 バンドのみの長時間測光を行い、SDSS の画像上で確認された暗い天体が

間違いなく銀河であることを確認した。なおこの天体の名前は、SDSS の慣例に従って、天体の天球座標を用いて「SDSS J1004+4112」と名づけることにした。

6.1 追加観測その 1 —4 つの星状天体は同じ源か？—

かくして著者らの発見した SDSS J1004+4112 が初の巨大分離角重力レンズクエーサーであることはほぼ間違いないと思われたが、過去にも同じように巨大分離角の重力レンズの発見が報告され、それが打ち消されてきた歴史を考えると、さらに強力な、誰も文句のつけようのない証拠が必要であろう。そのためには (1) 本当に 4 つの像がもともと一つのクエーサーであることを示す、つまり広い波長域で分光観測を行ってそのスペクトルの形と赤方偏移がすべて同じであることを確認する。(2) 重力レンズ現象を引き起こしている天体（銀河団）の存在を確認する、の二つが必要である。

まず上記の (1)、すなわち広い波長域での分光観測であるが、幸運にも Michael Gregg 氏、Robert Becker 氏が再び Keck 望遠鏡を使った追加観測をすることを申し出てくれたため、それをお願いすることにした。Keck 望遠鏡を使った分光の追加観測結果を図 6 に示す。この図を見ればもはや説明がいらぬかもしれないが、4 つの天体

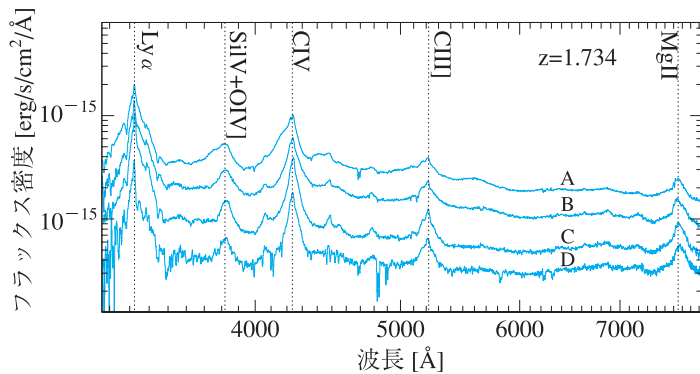


図 6 Keck 望遠鏡で観測された重力レンズ候補の分光の結果。スペクトルの形状が広い波長領域にわたって四つともすべてほぼ同一であることが確認できる。

の赤方偏移とスペクトルの形状は見事に一致し、4つの天体がもとは同じクエーサーで、それが重力レンズによって見かけ上複数のものとして観測されていることを非常に強く支持する結果が得られた*4。

6.2 追加観測その2 —レンズ銀河団は存在するか?—

あと我々に残されたものは、上記(2)、すなわち重力レンズ現象を引き起こしている天体の検出である。SDSSの画像から像の最大分離角は15秒程度であることが分かっているため、はじめに主張したようにレンズ天体は銀河ではなくて銀河団であるはずである。すでにARCの測光観測から四つの像の間には多数の銀河があることが分かっていたので、これらが本当に銀河団を形成しているのかどうかを確認することにした。

その確認のための追加観測として我々はすばる

望遠鏡を使わせてもらうことにした。当然ながら、すばる望遠鏡を使うためにはプロポーザルを提出して厳正な審査のもとに選ばれなければならない。今回の天体は直ちに追加観測されるべきと判断した著者らの指導教官の須藤 靖氏が奔走した結果、SDSSの正式メンバーである国立天文台の市川伸一氏の持つすばる望遠鏡の観測所時間を使わせてもらい観測することになった。市川氏から快諾をいただき、著者らはSuprime-Cam²⁷⁾を使って4バンド(g'i'r'z')の測光観測を行い、またFOCAS²⁸⁾を使って四つの像の間にある銀河をできるだけ分光してそれらの赤方偏移を測ることにした。

5月30日に行われた測光観測の結果(Suprime-Camのi'バンド、合計露光時間1,340秒)を図7に示す。四つのクエーサー像の中心にある明るい銀河を中心として、多数の銀河が存在しているこ

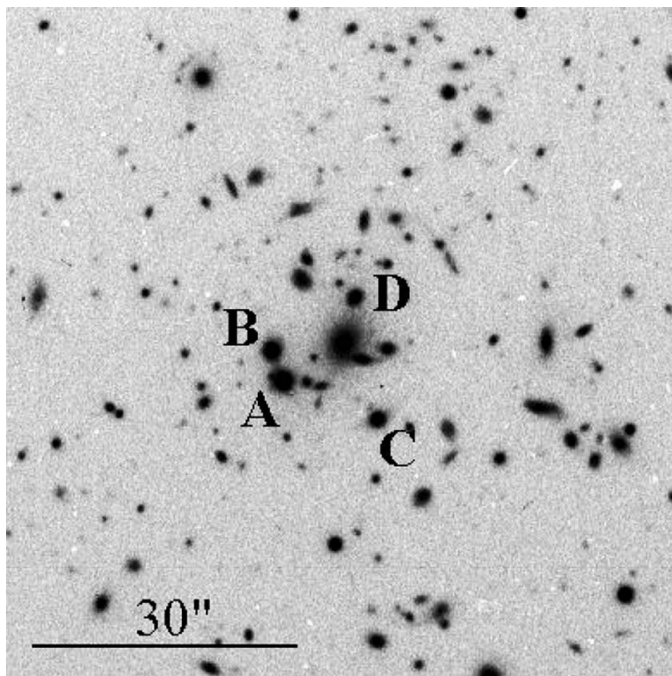


図7 すばる望遠鏡(Suprime-Cam)のi'バンド測光イメージ。明るい銀河を中心として(SDSSでは見えなかった)多数の銀河が銀河団を形成しているのが分かる。

*4 像Aの輝線の形が他と少々違うように見えると思うが、これは後の観測と解析で偶然このときに何らかのコンパクトな天体によるマイクロレンズ現象が起きていたためであることが分かっている²⁶⁾。

とが確認できる。さらに、他のバンドの結果を組み合わせたとここれらの銀河の多くは非常に赤い色の銀河であることが分かった。これは高赤方偏移の銀河団が存在する非常に強い証拠である。さらに、Keck と FOCAS を使って中心付近の三つの銀河の分光観測を行ったところ、そのすべてが赤方偏移 0.68 の銀河であることが分かり、したがって赤方偏移 0.68 の銀河団が確かに存在していることが確認されたのである。

以上の測光・分光の追加観測により、SDSS J1004+4112 が史上初の銀河団による重力レンズクエーサーであることが確認された。最大分離角の正確な値は 14.62 秒角で、我々の発見がこれまでの分離角の最大値を一挙に 2 倍以上も更新したのである²⁹⁾。

7. 巨大分離角重力レンズクエーサーの重要性

今回の発見の重要なところは、何ととってもやはりこれまでは未発見のまま大きな謎であるとされていた、銀河団によって強く重力レンズされたクエーサーを発見し、新たな種族の重力レンズ現象の存在を確立したということである。その存在は標準的な暗黒物質モデル (CDM モデル) から予測されていたため、この発見がその理論予言の正しさを実証したことになる。実際、今回使った SDSS のクエーサーの中から少なくとも一つの巨大分離角重力レンズが存在するという統計的な下限値が (まだ候補天体に対する追加観測がすべて終了しておらず、現時点では下限値となる)、標準的な CDM モデルを強く支持するという解析結果が得られている³⁰⁾。

同様の結果は銀河団に見られる重力レンズアーク (重力レンズ効果を受けて著しく歪んだ遠方の背景銀河) から得られているが³¹⁾、そのような重力レンズアークの探索はまず大きな銀河団を同定しその中心付近を深く測光することで行われる。したがって、ランダムな視線方向の密度分布

を測る大分離角重力レンズクエーサーからの制限は重力レンズアークとはまた一つ違った意味を持つ。また、実際的な問題としても、重力レンズ像の赤方偏移が測定しやすい、レンズ像の形が単純 (点源として取り扱える) である、などの利点もあるため、結果として大分離角重力レンズクエーサーはより直接的に暗黒物質の密度分布を調べることができる。

また、SDSS J1004+4112 が初の銀河団による大分離角重力レンズクエーサーであることの裏を返すと、今回の発見は、強い重力レンズ現象まで伴って一つの銀河団を調べることができる初めてのケースである、とすることができる。強い重力レンズから分かるレンズ天体の中心付近の密度分布に加え、今後、さらなる可視光での測光・分光観測、また X 線・電波領域の観測などあらゆる波長域での観測を行ってこの銀河団を詳細に調べていく予定である。すでに野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いた電波領域での観測が終了していて、近いうちにその報告がなされる予定である。これらの観測により、この銀河団の中心付近から外側に至るまでの詳細な質量・ガス密度分布を調べ、銀河団の形成、進化および宇宙の暗黒物質について詳細な情報を得ることを目標としている。

8. まとめ

著者らの天文学会での出会いによって始まった一つの共同研究の結果、また、SDSS という空前の大規模サーベイにかかわっている多くの人々の努力と苦勞の結果、史上初の銀河団によって強く重力レンズされたクエーサー SDSS J1004+4112 を発見することに成功した。今後著者らはさらなる追加観測を行う予定であり、またこの天体に対する他のグループまたは個人による理論的・観測的研究が数多くなされるであろうことが期待されている。今後出される論文等の報告の中でもし「SDSS J1004+4112」という単語を見かけたときにちょっとでも立ち止まって目を向けていただけ

たら、ということをお願いしている。

先にも記したように、SDSSは現在まだ進行中であり、今後さらにデータが増えていく予定である。またSDSS以外にも2dFというような大規模なサーベイも行われており、今後、SDSS J1004+4112を超える大分離角重力レンズクエーサーが発見されるのはもはや時間の問題であると思われる³²⁾。その幸運が再び著者らに訪れることを祈りつつ、またそれらの発見が最終的な暗黒物質解明の大きな手がかりになることを祈り、筆をおくことにする。

謝 辞

本稿はSDSS重力レンズクエーサー探索チームとの共同研究に基づいています。今回の研究に協力していただいたSDSS重力レンズクエーサー探索チームの皆様、そして何よりSDSSという素晴らしい観測計画にかかわるすべての方々に最大の感謝を表したいと思います。また、すばる望遠鏡の観測にご協力いただいた市川伸一氏(国立天文台)、そして研究のさまざまな段階で的確な助言をいただいた指導教官の須藤 靖氏(東京大)に心から感謝します。最後に、この原稿を書く機会を与えていただいた藤田 裕氏(国立天文台)に感謝と御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Walsh D., Carswell R. F., Weymann R. J., 1979, Nature 279, 381
- 2) Kochanek C. S., et al., <http://cfa-www.harvard.edu/castles/>
- 3) Muñoz J. A., et al., 2001, ApJ 546, 769
- 4) Narayan R., White S. D. M., 1988, MNRAS 231, 97
- 5) Maoz D., Rix H.-W., Gal-Yam A., Gould A., 1997, ApJ 486, 75
- 6) Wyithe J. S. B., Turner E. L., Spergel D. N., 2001, ApJ 555, 504
- 7) Keeton C. R., Madau P., 2001, ApJ 549, L25
- 8) Takahashi R., Chiba T., 2001, ApJ 563, 489

- 9) Oguri M., 2002, ApJ 580, 2
- 10) Phillips P. M., et al., 2001, MNRAS 328, 1001
- 11) Ofek E. O., et al., 2001, MNRAS 324, 463
- 12) Ostriker J. P., Steinhardt P., 2003, Science 300, 1909
- 13) York D. G., et al., 2000, AJ 120, 1579
- 14) Gunn J. E., et al., 1998, AJ 116, 3040
- 15) Fukugita M., et al., 1996, AJ 111, 1748
- 16) Strauss M. A., et al., 2002, AJ 124, 1810
- 17) Richards G. T., et al., 2002, AJ 123, 2945
- 18) Stoughton C., et al., 2002, AJ 123, 485
- 19) Abazajian K., et al., 2003, AJ 126, 2081
- 20) Abazajian K., et al., 2004, AJ, submitted
- 21) Inada N., et al., 2003, AJ 126, 666
- 22) Miller L., et al., 2004, MNRAS 348, 395
- 23) Fan X., 1999, AJ 117, 2528
- 24) Blanton M. R., et al., 2003, AJ 125, 2276
- 25) Weymann R. J., et al., 1980, Nature 285, 641
- 26) Richards G. T., et al., 2004, ApJ, submitted
- 27) Miyazaki S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 28) Kashikawa N., et al., 2002, PASJ 54, 819
- 29) Inada N., et al., 2003, Nature 426, 810
- 30) Oguri M., et al., 2004, ApJ, in press
- 31) Oguri M., Lee J., Suto Y., 2003, ApJ 599, 7
- 32) Wambsganss J., 2003, Nature 426, 781

The Discovery of the Largest Separation Gravitationally Lensed Quasar
Naohisa INADA and Masamune OGURI
Department of Physics, School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: The cold dark matter model of structure formation predicts the existence of quasars gravitationally lensed by concentrations of dark matter so massive that the quasar images would be split by over 7 arcsec. We succeeded in discovering the first large separation (about 15 arcsecond splitting) lensed quasar, SDSS J1004+4112, due to a cluster of galaxies by using the data of the Sloan Digital Sky Survey. Here we outline the discovery and the importance of this system.