

## 論文内容の要旨

### 論文題目 Discoveries of Gravitationally Lensed Quasars from the Sloan Digital Sky Survey

(スローン・デジタル・スカイ・サーベイにおける重力レンズクエーサーの探索)

氏名 稲田直久

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銀河やクエーサー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、もともとは1つの天体であるにも関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」（以下レンズクエーサーとする）と呼ばれている。

1979年まではこのレンズクエーサーは実際には発見されておらず、それは天文学においてあまり重要なものではなかった。しかし、1979年に D. Walsh らが世界で初めてのレンズクエーサーである Q0957+561 を発見すると、その状況は一変した。レンズクエーサーは天文学における重要な観測対象となり、その後1980年代におよそ20個、1990年代以降では観測機器の向上や大規模なサーベイが行われたこともあっておよそ50個程度の新しいレンズクエーサーが発見された。今やレンズクエーサーは単なる一般相対性理論の観測的な証拠にとどまらず、有用な宇宙論の検証の道具の1つとして使えることが知られている。例えばその統計（クエーサーのサンプル中で重力レンズされたクエーサーが幾つ存在するか）

は宇宙項に対する制限を与え、重力レンズによって形成される各像の光路差の違い（これはもともとのクエーサーが時間変動するために、各像のモニタリングをすることで測定することができる）からはハッブル定数を見積もることができる。また、各像の間の離角の大きさからは正確にレンズ天体（銀河）の質量を求めることができるため、レンズクエーサーは（レンズ現象を引き起こしている）銀河の研究においても有用である。

このようにレンズクエーサーを宇宙論の検証として用いる場合（特に統計やレンズ銀河の系統的な研究）には、大規模でかつ一様なデータセットを用いたレンズクエーサー探査が必要となる。過去幾つかの電波望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡を用いた大規模な探査が行われてきたが、さらに精度の良い宇宙論の検証を行うためにより大規模な探査が必要とされていた。現在存在するものの中でその第一候補とされているのが、日本・アメリカ・ドイツの共同プロジェクトであるスローン・デジタル・スカイ・サーベイ（SDSS）である。この SDSS は本来銀河やクエーサーの全天地図を作成するために行われている巨大プロジェクトであるが、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様々な目的においても過去にない規模での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。レンズクエーサー探査もその例外ではなく、SDSS のデータからはこれまでに見つかったものを総計したものの 2 倍以上（個々の探査と比較すると 10 倍以上）のレンズクエーサーが見つかるはずであるということが予測されている。このような予測を受け、我々は過去最大のレンズクエーサーのカタログを作りそれを様々な宇宙論の検証に応用すること目的とした「SDSS のデータを用いたレンズクエーサー探査」を開始した。

しかしながら、SDSS のデータは本質的に多くのレンズクエーサーを含んでいるものの、観測地点での大気揺らぎが大きいため、重力レンズによって形成された各クエーサー像は分割されずに混ざってしまい、結果的に 1 つの天体として観測されてしまうという大きな問題があった。この問題のため、その初期においては幾つかの候補天体を見つけてより大きな望遠鏡を用いて追加観測したにも関わらず、1 つの重力レンズも見つけることができなかった。このような事態を受け、この論文は、SDSS のデータにおいて高い成功率をもってレンズクエーサーを見つけることができ、かつ今後の本格的な探査に用いることができる発見方法を確立し、またそれを使って実際に多くのレンズクエーサーを発見することで我々のレンズクエーサー探査の第一歩を築き、SDSS が将来において最大のレンズクエーサーカタログを作ることが確実であろうということを示すことを目標として始められた。

本論文の開始当時はまだ SDSS において 1 つもレンズクエーサーが見つかっていなかったのに加え、そのデータ中にはこれまでに知られているレンズクエーサーすらも含まれていなかった。そこで、我々は、まず始めに SDSS の天体の画像を直接目で確認していくことで最初のレンズクエーサーを発見し、それを詳細に調べることでレンズクエーサーが SDSS のデータのなかでどのように振舞うかを把握してから最終的な発見方法を開発していくことを決定した。しかしながら、SDSS のデータはその初期においても膨大であったため、全ての天体の画像を直接確認していくのは実質不可能であり、準備的な段階での方法

として「divided-color method」と呼ばれるものを開発した。これは1つの天体を強制的に2つに分割し、それぞれの領域の色を計算することでレンズクエーサー候補を絞り込もうという方法である（もし本物のレンズクエーサーならばそのように分割した部分の色が両方ともクエーサーの特徴を示し、かつ同じ色を示すはずである）。この方法によりおよそ100万個の天体が最終的におよそ1万個の候補天体に絞られた。この1万個について、その画像を細かく調べていくことで、SDSS初のレンズクエーサーの発見を試みた。

divided-color methodは準備的なものであったが、我々の予測どおり本物のレンズクエーサーを落とすことはなく、最終的にSDSS初のレンズクエーサー、SDSS J1226-0006の発見に成功した（図1・左）。このSDSS初のレンズクエーサーと、SDSSの観測領域の広がりによって同定された、すでに知られているレンズクエーサー1つを用い、これらの天体のSDSS中での振舞いを詳細にしらべることで、最終的な開発の方法を試みた。その結果、レンズクエーサー（候補）を選び出すためには、その画像上で銀河、星のプロファイルをフィッティングしたときのlikelihoodが非常に有用であることが分かり、これにより自動化された「profile-fitting likelihood method」を開発した。

この方法をおよそ4万個のクエーサーに適用して得られたおよそ40個の候補天体のうち、16個の候補天体について追加観測したところ、実際にそのうちの10個が本物のレンズクエーサーであることが確認され、また4万個のクエーサー中に含まれるすでに知られているレンズクエーサーを全て（5個）発見することに成功した。したがって実質上の（SDSS J1226-0006を含む）発見率は現段階ではおよそ70%で、本格的なSDSSのレンズクエーサー探索に用いることのできる非常に発見率の高い方法を開発することに成功した。またこの論文ではおよそ2年間で11個（SDSS J1226-0006を含む）の新しいレンズクエーサーを発見することに成功しており、予測どおりSDSSが確実に最大のレンズクエーサーカタログを作成するであろうことを証明した（これまではおよそ25年間で70個しか見つかっていなかった）。こうして本論文はSDSSによる最大レンズクエーサーサーベイの第一歩を築くことに成功した。

以上のような「通常の」銀河によるレンズクエーサー探索に加え、SDSSのデータはその観測領域の広さから特殊なレンズクエーサーの発見をもたらすであろうことも予測されていた。その1つが銀河団によってレンズ効果を受ける「巨大離角の重力レンズクエーサー」である。現在用いられている標準的なダークマターモデル（coldで、重力以外の作用をしない）によると、現在の宇宙には銀河団スケールの巨大なダークマターの塊がいくつかできており、そのような大質量のダークマターの塊（通常は銀河団が付随している）によって巨大な離角を持つレンズクエーサーが生み出されるであろうことが予測されていた。これまでに見つかっているレンズクエーサーは全て銀河スケールのバリオン物質によるものであったため、そのような天体の初の発見を試みた探索が過去多数行われてきたが、非常に数が少ないと予測されていた通り、そのどれもが失敗に終わっていた。そのような希少なレンズクエーサーに対してはSDSSの膨大なデータが効力を発揮するであろうことを予

測し、本論文ではそのような天体の探索も行った。その結果、初の銀河団によるレンズクエーサー、SDSS J1004+4112 (図1・右)の発見に成功した。このレンズクエーサーの最大離角はこれまでに知られている最大のもの(およそ6秒角)の2倍を上回るおよそ15秒角であった。この発見は、その存在を予測していた標準的なダークマターモデルが強く支持されるという大きな科学的な意味をもたらしている。

SDSSは現在でもまだ進行中であり、また現在までの全ての候補の追加観測も終了していないため、今後はそのような候補天体の追加観測と、SDSSの新しいデータに対するレンズクエーサー探査を行い最大のレンズクエーサーカタログを作成していく予定である。それが完成し次第、それを様々な宇宙論的な検証に用いていく予定である。

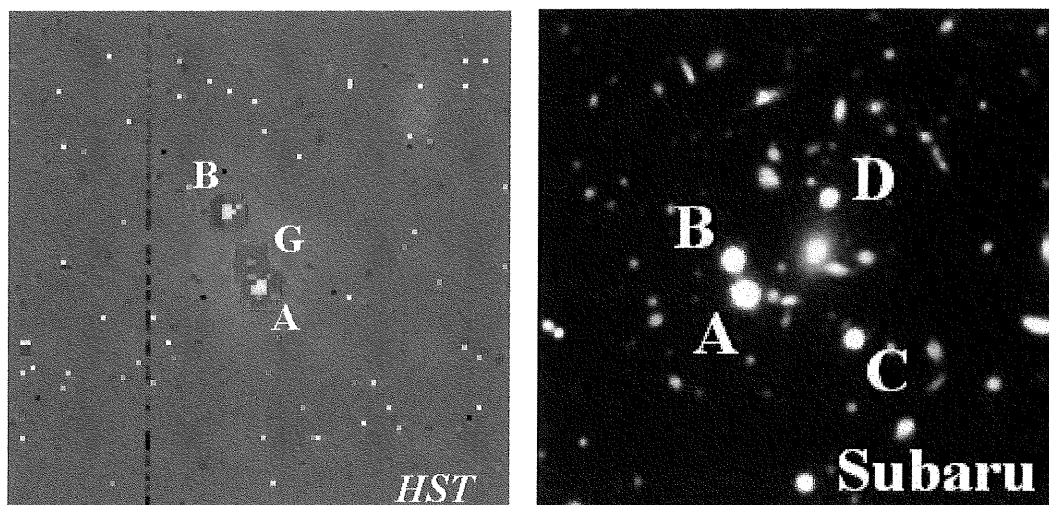


図1：(左) ハッブル宇宙望遠鏡で撮った SDSS J1226-0006 の H バンドの画像。クエーサー像 A・B の間にレンズを引き起こしている銀河 (G) が確認できる。A・B の間の離角は約 1.3 秒角。(右) すばる望遠鏡で撮った SDSS J1004+4112 の画像。gri バンドを合成してカラーにした。クエーサー像 A・B・C・D の間にレンズを引き起こしている銀河団(複数のオレンジ色の銀河の集団)が確認できる。最大離隔 (B・C の間) はおよそ 15 秒角。