

論文内容の要旨

論文題目: Strong Gravitational Lenses in a Cold Dark Matter Universe
(冷たい暗黒物質宇宙における強い重力レンズ現象)

氏名: 大栗 真宗

重力レンズ効果がどのように起こるかは重力レンズ天体の質量分布のみで決まるため、宇宙の質量分布、特に通常の電磁波を用いた方法では観測できない暗黒物質の分布を調べる有力な方法となる。そこで、暗黒物質模型の強非線形領域における検証の観点から、強い重力レンズ効果の理論的及び観測的研究を行った。まず、標準的な冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter; CDM) 模型を仮定し、強い重力レンズ現象がどの程度観測されるかを計算する解析的モデルを構築し理論的予言を行った。また、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) で得られたクエーサーサンプル及びその周りの撮像データを用いて、重力レンズクエーサーの探索を実際に行い、CDM 模型から理論的に予言されていた大分離角重力レンズクエーサーを初めて発見した。

本研究で仮定した CDM 模型は宇宙の大規模構造を極めて良く説明することができる模型であるが、強非線形領域では様々な問題 (質量密度の中心集中問題、サブストラクチャ問題) が従来から指摘されており、これらを解決する実にさまざまな暗黒物質の模型が提案されてきた。強い重力レンズを起こすような強非線形領域の暗黒物質の質量分布は仮定する暗黒物質の性質に極めて敏感なため、強い重力レンズ現象は CDM 模型が正しいか否かを検証するうえでの有用な道具となり得るであろうことが期待される。

まず、銀河団スケールにおける強い重力レンズの頻度を、レンズ天体の非球対称を取り入れた三軸不等楕円体模型を使って半解析的に計算した。解析的計算の利点としては、レンズ天体の多様性や観測の選択効果を比較的容易に取り入れることができる点、そして重力レンズ確率の質量分布や宇宙論パラメータなどの依存性を理解できる点にある。しかし非球対称を十分に考慮した解析的計算はその困難さのためこれまで例が無かった。そこで ray-tracing simulation と解析的手法を組み合わせることで、初めて非球対称性を考慮した解析的計算を成功させた。

上記の方法を用いて、まず重力レンズアークの数の理論的予言を行った。重力レンズアークとは、銀河団の背後にある遠方の銀河が銀河団の強い重力場によって著しく歪められる現象である。まず、三軸不等楕円体模型を使った場合、単純な球対称模型と比較して3倍から1桁多くの重力レンズアーク数を予言することを指摘した。これは即ち、非球対称性がアーク統計において本質的な役割を果たしていることを示している。また、現存する観測との詳細な比較の結果、CDM 模型が予言するアーク数が従来言われていたように少なすぎるということは無く、むしろ理論予言と観

測がよく一致していることを示した。観測を再現するには CDM 模型の予言する中心集中した密度分布と大きな非球対称性の両方が必要であり、従って CDM 模型を強く支持すると解釈できる。

さらに、上記の方法を用いてクエーサーの大分離角重力レンズの理論予言も行った。銀河団などによって引き起こされる大分離角重力レンズクエーサーは CDM 模型においてその存在が予言されているにもかかわらず未だに発見されていなかった現象である。三軸不等楕円体模型を使って重力レンズ確率及び複数像の個数・配置を調べたところ、以下の結論を得た。(1) 非球対称性を入れることで重力レンズ確率は数倍ないしそれ以上増える、(2) 従来ほとんど発見例のない naked cusp によって引き起こされるケースが大分離角重力レンズでは無視できない程度ある。これは、同じ程度の明るさの三つの像かレンズ天体に対して同じ側にあることから観測的に判別可能である。(3) 像が二重像か四重像かあるいは naked cusp によって引き起こされる三重像かは銀河団の非球対称性のみならず質量密度にも大きく依存し、従って重力レンズ複数像の個数は CDM 模型をテストする新たな統計となることを指摘した。

また、大規模サーベイ SDSS を用いて、これまで見つかっていなかった大分離角重力レンズクエーサーの探索も行った。SDSS で見つかった約 3 万個のクエーサーの領域の撮像データを用いることで、初の大分離角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。分離角は約 15 秒であり、これまで見つかった重力レンズクエーサーの分離角の 2 倍以上である。ケック望遠鏡による四つの像の分光観測から四つとも同じ赤方偏移をもつことがわかり、またすばる望遠鏡の撮像、分光観測およびケック望遠鏡の分光観測から $z = 0.68$ の銀河団を検出し、重力レンズ天体であることを確定させた。この観測された重力レンズ確率および複数像の個数を CDM 模型に基づく理論予言と比較したところ、両者がよく一致することがわかった。

以上から、相補的な二種類の重力レンズ統計(アークの数および大分離角重力レンズクエーサー)のいずれも CDM 模型を支持するという結論を得た。