

の大域的な分布にさほど大きな違いは表れないが銀河団のような高密度領域の分布は大きな影響を受けることになる。具体的には散乱により中心密度がなまされ、かつより球対称に近い密度分布を示すことになる。ほかにも異なるダークマターの性質や重力理論を考えればそれに応じてダークマター分布の構造も大きく変化するので、観測によってダークマター分布を詳細に調べることによってこれらの仮定を検証することができることになる。

2. 重力レンズで探る銀河団

では、どうやって銀河団内のダークマターの密度分布を調べるかだが、その名前から容易に推測できるとおり決して簡単ではない。例えば銀河団の密度分布、形状を測る単純な方法の一つとしてメンバ銀河の分布を調べる方法があり、大雑把にはメンバ銀河の分布はダークマター分布に従うと期待されるが、実際には両者の分布の関係は銀河形成の詳細な物理過程や形成史にもよることからこれを用いてダークマター分布を正確に推定することは難しい。一方、銀河団中の高温ガスの X 線放射からダークマター分布を推定する方法もあり、具体的には静水圧平衡を仮定することでその密度分布を再構築できるが、いくつかの衝突銀河団で顕著に見られるように⁷⁾この仮定は必ずしも成り立っていないことに注意する必要がある。

そこで、ダークマター分布を調べる極めて強力な手法となるのが重力レンズである³⁾。簡潔に言うと、銀河団中のダークマターの重力場により背景の遠方銀河の分布、形状がゆがむ現象で、純粹に重力的な現象であることからダークマターの分布を直接測ることができる点がこの手法の大きな

利点となる。重力レンズは現在の重力の標準理論である一般相対論によって予言される現象であり、この理論を認めさえすれば質量分布から光の経路がどの程度ゆがみ曲がるかが理論的に曖昧さなく導出されるという意味でも好ましい。

銀河団領域における重力レンズは、強い重力レンズ (**strong lensing**) と弱い重力レンズ (**weak lensing**) に大別できる。強い重力レンズはダークマターが集中し質量密度の高い銀河団中心領域で起こる、背景天体が複数に分裂したり非常に引き延ばされて観測される現象である。視覚的にわかりやすいため、撮像観測で容易に同定することが可能である。一方弱い重力レンズは、多くの背景銀河の形状を平均することで重力レンズが引き起こすゆがみを検出する手法であり、重力レンズシグナルの弱い銀河団の中心から離れた外側領域のダークマター分布を調べるうえで威力を発揮する。銀河団の広い領域でダークマターを調べるには、これら 2 種類の重力レンズを適切に組み合わせることが大切である。

ちなみに、最初に見つかった銀河団重力レンズは 1986 年頃に発見された^{9), 10)}銀河団 A370 内の強い重力レンズ (巨大アーク) である⁴⁾。一方、銀河団領域の弱い重力レンズの最初の検出は、Tony Tyson らによる銀河団 A1689 と CL1409+52 の撮像観測によってなされた¹³⁾。現在では重力レンズが検出されている銀河団の数も飛躍的に増え、さまざまな統計的議論も可能になってきており、銀河団研究に欠くことのできない重要な道具として広く認識されている。

3. 検証 1: アインシュタイン半径

強い重力レンズを特徴づける最も基本的な量と

³⁾ 重力レンズを用いて銀河団内のダークマターを調べる可能性も早くも 1937 年に Zwicky によって指摘されている⁸⁾。

⁴⁾ 人によっては初のクエーサー重力レンズ Q0957+561¹¹⁾ を最初の銀河団重力レンズとする場合もあるが、個人的事由もあってこれを銀河団レンズと呼ぶことには抵抗を感じる。実際最近の弱い重力レンズ観測で得られたダークマター分布からハロー成分の速度分散がおよそ 420 km/s と見積もられており¹²⁾、銀河団というよりはむしろ銀河群と呼ぶほうが適切であろう。

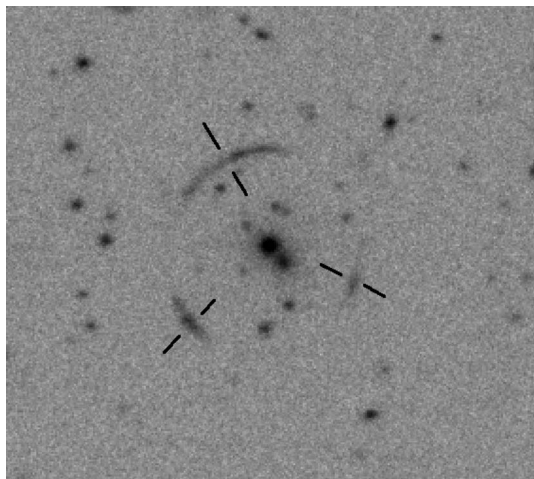


図1 実際に観測された銀河団内の強い重力レンズの例。重力レンズにより引き延ばされ複数に分裂した背景銀河を黒線で示している。これら重力レンズ像に沿った円筒の半径がアインシュタイン半径となる。

して、アインシュタイン半径がある*5。アインシュタイン半径は強い重力レンズの大きさを表す量であり、物理的にはアインシュタイン半径で囲まれる円筒内の質量で決まる(図1)。基本的に重い天体ほど大きなアインシュタイン半径を生じることができ、大きな銀河団内では数十秒角もの大きなアインシュタイン半径が観測されていた。このアインシュタイン半径はダークマターの密度分布に大きく依存するので、標準構造形成理論の良い検証となると期待される。

少し横道に逸れるが、この研究を行うに至った経緯は以下のとおりである。当時筆者はスタン

フォード大学のポスドクであり、所属していた研究所の所長が Roger Blandford だったのだが、彼は重力レンズの研究に関してもいくつもの先駆的な業績を有しており重力レンズ全般に対して少なからず興味をもっていた。そこで筆者が銀河団重力レンズ関係の話をするとう彼は決まって「宇宙最大のアインシュタイン半径は何か?」という問いを筆者に投げかけてきたのである。そのたびごとに「そのような統計量はコズミックヴァリエーション*6が大きい」などと言って撃退していたのであるが、何度も何度もこのようなやりとりを繰り返すうちにしだいに筆者は洗脳(?)され、この問題は割と面白いのではないかと思い始めた。

アインシュタイン半径は強い重力レンズが観測されさえすればかなり正確に見積もることができるという点で観測量といって良い。アインシュタイン半径が大きいということは強い重力レンズ確率も大きいということの意味するので、そのような銀河団はある程度深い撮像を行うことでほぼ確実に強い重力レンズが検出される。それゆえ最大アインシュタイン半径というのは観測的には簡潔かつ非常によく定義された明快な問いであり、一方、観測が現在の標準理論と無矛盾であるかは決して自明ではない。例えば、巨大重力レンズ銀河団アーベル 1689 の観測されたアインシュタイン半径は 50 秒角程度であり¹⁶⁾、これは弱い重力レンズや X 線観測で見積もられているこの銀河団の質量から単純に予測されるアインシュタイン半径よりずっと大きい¹⁷⁾。確かにコズミックヴァリ

*5 この名前は 1936 年に Einstein が重力レンズによるリング状の像の形成を指摘した¹⁴⁾ことに由来しているが、実はその前の 1924 年に Chwolson が同様の重力レンズ効果を指摘しており¹⁵⁾、そのためロシアの研究者を中心に Einstein-Chwolson 半径などと呼ぶ動きもあるが、定着はしていない。

*6 コズミックヴァリエーション (cosmic variance) とは宇宙の大きさに匹敵する大スケールの観測に必ず伴う統計的誤差である。基本的に理論が予言する量はアンサンブル平均、すなわち仮想的に多数の宇宙が存在したとしてその全宇宙での平均であるが、実際には観測する宇宙は一つのため観測量と期待値との間に統計的なずれが存在することになる。それでも空間的に小スケールの観測量であればそのスケールより十分大きく離れた宇宙のさまざまな場所での観測値の平均をとることによって疑似的にアンサンブル平均を求めることが可能だが、大スケールの観測ではそれが不可能であるためコズミックヴァリエーションが卓越する。有名な例としては宇宙背景放射の大角度スケール(低多重極成分)揺らぎがある。

アンスは大きい、密度揺らぎの非ガウス性など、いくつかの非標準理論においてはそのような極端な希少天体の出現期待値を大きく変え、したがって信号自体も大きいという側面もある。

ここまでの銀河団の強い重力レンズの統計といえば、いわゆるアーク統計が主流であった¹⁸⁾。アーク統計とは銀河団中心部で観測される強い重力レンズ効果を受け大きく引き延ばされた背景銀河像を数えて理論予言と比較し宇宙論的情報を引き出そうとする研究であるが、一つの大きな問題は期待されるアークの数が背景銀河の形状（見かけの大きさや固有楕円率）や光度関数、あるいはシーイングなどの観測条件などに大きく依存する点であり、ここが観測との詳細比較の際の一番の障害となっていた。一方、アインシュタイン半径はいわば銀河団に固有の観測量でありこれら背景銀河の詳細や観測条件にはよらないため理論予言とより直接的な比較ができる。また重力レンズアークの形成確率は銀河団内の下部構造（サブストラクチャー）にも結構依存するが知られている一方、これら下部構造は重力レンズの臨界曲線の形状をゆがめるだけでその内部の面積にはほとんど影響しないためアインシュタイン半径に対する影響も小さい。以上のことから、大きなアインシュタイン半径の統計は従来のアーク統計に比べてさまざまな利点があり、より信頼できる検証を可能とすることが理解できるだろう。

しかしながら、全天のアインシュタイン半径の理論予言はそれほど容易なことではない。銀河団の強い重力レンズの統計計算はしばしば N 体計算中の光線追跡によって行われるが、上記の理論予言には宇宙の全体積に相当するいわゆるハッブル体積の N 体計算が必要であり、一方、強い重力レンズを正確に予言するためにはその N 体計算の質量空間分解能が十分高くなければならず、この両者の要請を同時に満たすことは現在世界最速級の計算機をもってしても極めて困難である。またコズミックヴァリエーションを見積もるためにはその

ような計算が複数欲しいがそれは絶望的である。この点に関して、筆者は大学院生時代から銀河団の非球対称性を三軸不等楕円体模型を使って取り込んだ銀河団重力レンズ模型を構築し発展させており¹⁹⁾⁻²¹⁾、この模型を用いて半解析的な計算を行うことで信頼できる理論予言が可能であることに気がついた。具体的には、全天における重い銀河団を質量関数からモンテカルロ的に乱数を振って生成し、その形状や視線方向に対する向きも N 体計算で見積もられた確率分布に従って確率的に割り当て、全天で最大のアインシュタイン半径を計算し、これを何度も繰り返すことでコズミックヴァリエーションを見積もることができる。

最終的に得られた標準構造形成理論が予言する宇宙最大のアインシュタイン半径を図2に示す²²⁾。一方、対応する現在の観測はというと、例えば上で紹介した巨大重力レンズ銀河団アーベル

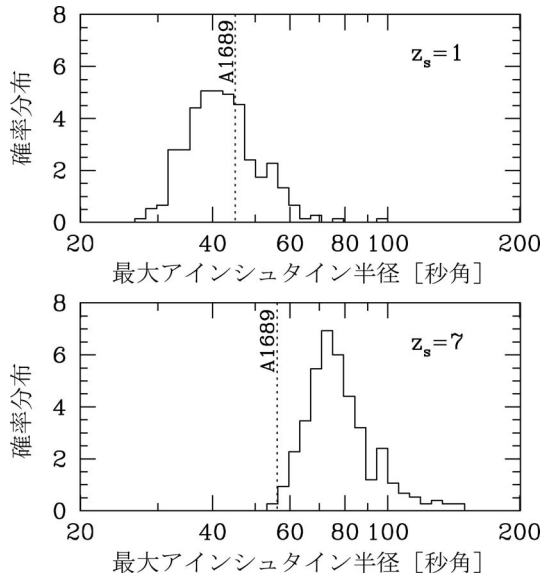


図2 標準構造形成理論が予言する全天で最も大きいアインシュタイン半径の確率分布²²⁾。背景銀河の赤方偏移が $z=1$ と 7 の二つの場合についての計算結果を示している。点線は巨大重力レンズ銀河団アーベル 1689 で観測されたそれぞれの背景銀河赤方偏移でのアインシュタイン半径の値に対応している。

1689があるが、背景銀河の赤方偏移 $z=1$ の場合観測されたアインシュタイン半径45秒角は理論予言と非常によく一致している。すなわち巨大重力レンズ銀河団アーベル1689は標準理論の枠内で十分説明がつくことをこの研究で初めて示した。

さらに面白いのは、背景銀河の赤方偏移が大きい場合に、理論が予言する最大のアインシュタイン半径はアーベル1689で観測された値よりもずっと大きい点である。計算結果によると、この場合に最大アインシュタイン半径をもつ銀河団の典型的な赤方偏移は0.7程度であり、アーベル1689の赤方偏移 $z=0.18$ よりずっと大きい。つまり、今後深宇宙探査が進展していけばさらに巨大な重力レンズ銀河団が見つかるであろうことを予言しているのである*7。どこまで巨大なアインシュタイン半径が今後発見されるのか、観測の進展に期待したい。

4. 検証2：銀河団の動径密度分布

ここまで統計的な検証をみてきたが、もちろん個々の銀河団のダークマター分布を詳細に調べる方法もある。上で用いた強い重力レンズ現象はダークマターの集まった高密度領域を調べるのには非常に強力だが、銀河団の中心部分の密度分布しか調べることができない。先に述べたように、弱い重力レンズ現象を組み合わせることで銀河団の外側の密度の低い領域を含めた広い範囲の密度分布を調べることができる。

これについて、筆者を含めたグループはスローンデジタルスカイサーヴェイ (SDSS) 画像を利用した重力レンズアーク探査を推進しており²⁴⁾、発見された重力レンズ銀河団をすばる望遠鏡主焦点カメラで広視野撮像することで弱い重力レンズの検出も行っている。強い重力レンズと弱い重力

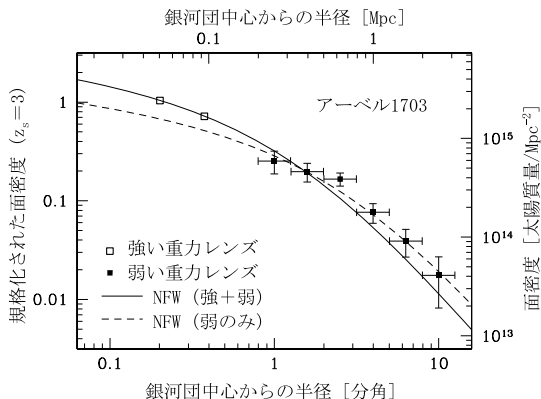


図3 重力レンズを用いて測定された、銀河団アーベル1703内のダークマター動径密度分布²⁵⁾。白と黒の四角がそれぞれ強い重力レンズと弱い重力レンズでの測定を示している。破線は弱い重力レンズの観測結果をNFWプロファイルを用いて最適化したもの、一方、実線は強い重力レンズと弱い重力レンズを両方最適化した結果。

レンズを組み合わせたダークマター密度分布の研究はここまで数個の限られた銀河団でのみで行われていたが、この探査によりそのような重力レンズ銀河団サンプルを飛躍的に増やすことができると期待している。

銀河団アーベル1703での実際の測定例を図3に示す²⁵⁾。強い重力レンズと弱い重力レンズを組み合わせて測定されたダークマターの動径密度分布は、標準理論が予言するNFWプロファイルとよく一致していることがわかる。しかしながら、観測で得られた分布は総じてべきの折れ曲がり理論期待よりも内側にきており、したがって銀河団の中心密度が超過していたのである。そのような密度超過の可能性はアーベル1689の解析すでに指摘されていたが^{26), 27)}、銀河団サンプルを増やしおおよそ10個の重力レンズ銀河団を調べることでそのような超過が普遍的にみられることがわかった。

*7 この論文がでた後に巨大アインシュタイン半径をもつ $z=0.55$ の銀河団が報告されている²³⁾。正確なアインシュタイン半径の推定はまだだが、背景銀河 $z=7$ の場合のアインシュタイン半径はおおよそ70秒角程度と見積もられており、筆者らの理論予言と依然としてよく一致している。

この中心密度の超過は何を意味するのだろうか？ 注意すべきは、強い重力レンズの選択効果である。銀河団が強い重力レンズを起こす確率は銀河団の中心質量密度に非常に敏感なため、強い重力レンズ現象が観測される銀河団は他の平均的な銀河団に比べて中心密度が高くなる。しかし、そのような選択効果を考慮しても依然として超過は残るように見える。まだ考慮されていない隠れた選択効果があるのだろうか、あるいはダークエネルギーの非一様性や原始密度揺らぎの非ガウス性など非標準的なモデルを示唆しているのだろうか？ 筆者らはアーク探査で発見したある程度アインシュタイン半径の大きいすべての銀河団をすばる望遠鏡で観測し同様の解析を行うことで選択効果を明確にし、より統計的に確かな結論を得ることを計画している。観測データは着実に増えているので、今後の展開に注目していただきたい。

5. 検証3: ダークマター分布の「ゆがみ」

最初に述べたように銀河団内のダークマター分布は球対称から大きくずれた「ゆがんだ」密度分布をもつことが予言されている。ここまで余り強調してこなかったが、この非球対称性は巨大アインシュタイン半径や強い重力レンズ銀河団の選択効果などの理論予言に際して非常に重要であることが筆者の一連の研究などにより明らかになっている。そうなると、実際にダークマターの分布はゆがんでいるのかどうか直接観測的に調べたいと

いうのは当然の流れであろう。

この問いに答えるため、銀河団の多波長サーベイ観測 LoCuSS (近傍銀河団下部構造探査) を詳しく解析し、特に弱い重力レンズ取得された約 20 個の銀河団のすばる望遠鏡主焦点カメラ画像²⁸⁾を二次元解析することでダークマター分布の非球対称性の直接検出を試みた。具体的には、銀河団の背景銀河の重力レンズによるゆがみの二次元マップを構築し、それを楕円質量密度分布から計算される重力レンズの信号と比較することでダークマター分布の楕円率を求めた^{*8}。その際、質量分布の中心や向きなどもすべて重力レンズデータそのものから測定しその誤差もすべて考慮しているので、不定性のほとんどない非常に直接的な密度分布のゆがみの測定となっている。弱い重力レンズ信号は重い銀河団であってもそれほど強くないので、質量分布の形状の測定は実は容易ではない。今回は広視野かつ高い集光能力、結像性能を誇るすばる望遠鏡の特性を最大限活用し、かつ多くの銀河団での結果を組み合わせることでダークマター分布の球対称性からの大きなずれを高い信頼性で初めて直接検出することに成功した。

重力レンズにより測定されたこれら銀河団のダークマター分布の平均の楕円率を図4に示す²⁹⁾。得られた平均の楕円率は 0.46 ± 0.04 であり、これは標準理論の予言 0.42 と非常によく一致している。ちなみにダークマター分布の球対称からのずれは 7σ の有意さで検出されている。一

*8 弱い重力レンズの観測から「再構築」されたダークマター分布の美しい図が数多く発表されている昨今であるので、読者の中にはそれらの分布から直接楕円率を測定すれば良いではないかと考える方もおられるだろう。しかし、重力レンズで実際に観測される背景銀河のゆがみ(シア)と求めたい質量密度分布はポアソン方程式を通して関係しているため、両者の関係は非局在的になっていることに注意する必要がある。すなわち観測されるシアはその場所の質量密度で決まるのではなく広く周囲の質量分布を反映したものになっている。それゆえ、再構築された質量密度マップは異なる点同士が独立ではなく非常に相関しており、したがって楕円率とその検出有意性を正確に見積もるには二次元質量分布の共分散を計算しこれを計算に取り入れなくてはならず非常に面倒である。今回楕円率から計算されるシアを直接観測と比較することでこの困難を回避したが、シアの理論計算もポアソン方程式を解いて行わねばならず矢張り面倒である。いずれにせよこの重力レンズ現象の非局在性というのが重力レンズ解析を複雑にする主要因の一つとなっている。

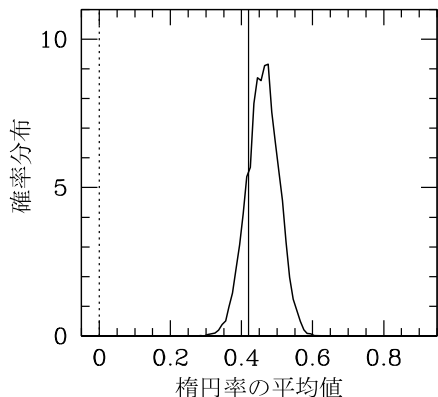


図4 18個の銀河団の弱い重力レンズ解析から得られた、銀河団ダークマター分布の楕円率の平均値の最尤値分布²⁹⁾。縦実線は標準理論が予言する、同じ銀河団サンプルに対する平均の楕円率。

つ面白いのは、ダークマター分布が銀河団のメンバー銀河の分布とそれほどそろっていないように見える点である。もちろん画像の色情報が少ないためメンバー銀河の選択が不十分であるというのも一因であろうが、ダークマターの存在を示唆しているとも言えるかもしれない。いずれにせよ観測と理論予言のゆがみの大きさの見事な一致は驚きであり、現在の標準構造形成理論を支持する強力な証拠の一つとなることは間違いないであろう^{*9)}。

また、この研究はさまざまな発展が期待できる。標準構造形成理論はダークマター分布のゆがみだけでなく、その下部構造との相対的な向きについても予言を行っている。したがって今回得られたダークマター分布の向きと個々のメンバー銀河の向きの相関を調べることでさらなる検証を行えるだろう。標準構造形成理論によるとダークマ

ター分布のゆがみは宇宙の大規模構造のフィラメント的構造を反映しているため、ゆがみの方向と銀河団周辺の銀河の大域的分布についても相関が見られるはずであろう。さらにはダークマター分布の形状とガス分布の形状を比較することで銀河団内のガスの物理状態や銀河団の形成進化についても何らかの示唆が得られるはずである。

6. 最後 に

ここまで、銀河団重力レンズ現象を用いた構造形成理論のさまざまな検証を紹介してしてきた。総じて言えることは、現在の冷たい無衝突ダークマターを仮定した標準理論が驚くほど成功している、という点である。元々は宇宙の大規模構造や線形揺らぎの観測から構築された理論が予言するダークマターの非線形領域の密度分布が観測と一致するかどうかは決して自明ではないが、実際に観測が予言された分布と非常に近いという事実は、立ち止まって考えるにつけてただ驚嘆するしかない。一方で銀河団の中心密度の超過といった、理論予言と一見食い違う観測事実もある。さらに詳しくいろいろな角度から検証を続けることが必要であろう。

最後に、このような検証というのはある意味地味な作業である。何が見えてくるか実際にやってみないとわからないという面もあり、例えばどこまでいっても標準理論の正しさをひたすら確認するだけで終わる可能性もある。しかし一方でわれわれが知っていることは、徹底的な観測的検証はしばしば新しい理論の突破口につながるという歴史的事実である。ダークマターやダークエネルギーがいつの日か真に「発見」されるのか、はた

^{*9)} この研究成果はアメリカ科学振興協会 (AAAS) が提供する科学記事コーナー ScienceNOW で紹介されたのだが、その記事のタイトルが「Dark Matter Halos Look a Bit Like a Football」というやや誤解を招きかねないものになっている。ここでの“football”はもちろん American football の意であり、球形のボールを使用する soccer (association football) と取り違えると結果の意味が 180 度変わってしまうので注意が必要である。なお記者の名誉のために付記しておく、American football で使用される楕円形のボールの長軸と短軸の比は規定によりちょうど 2:1 程度と決まっており、これは今回測定されたダークマター分布の軸比と無矛盾でありその意味では適切な比喩であった。

また実は第二のエーテルだったことが判明するの
か。今筆者にできることはただ目の前にある一つ
ひとつの観測事実と真摯に向き合っていくことだ
けである。

謝 辞

本稿で直接ないし間接的に紹介した論文でお世
話になった共同研究者の皆様に御礼申し上げます。
またこの原稿の執筆を助めてくださった柏川
伸成准教授に感謝します。本文中ではすべての方
の敬称を略させていただきます。何卒ご理解く
ださい。

参 考 文 献

- 1) Zwicky D., 1933, Helvetica Physica Acta 6, 110
- 2) Ostriker J. P., Steinhardt P., 2003, Science 300, 1909
- 3) Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1997, ApJ 490, 493
- 4) Navarro J. F., et al., 2010, MNRAS 402, 21
- 5) Wechsler R. H., et al., 2002, ApJ 568, 52
- 6) Jing Y. P., Suto Y., 2002, ApJ 574, 538
- 7) Clowe D., et al., 2006, ApJ 648, L109
- 8) Zwicky F., 1937, ApJ 86, 217
- 9) Lynds R., Petrosian V., 1986, BAAS 18, 1014
- 10) Soucail G., et al., 1987, A&A 172, L14
- 11) Walsh D., Carswell R. F., Weymann, R. J., 1979, Nature 279, 381
- 12) Nakajima R., et al., 2009, ApJ 697, 1793
- 13) Tyson J. A., Wenk R. A., Valdes F., 1990, ApJ 349, L1
- 14) Einstein A., 1936, Science 84, 506
- 15) Chwolson O., 1924, Astronomische Nachrichten 221, 329

- 16) Broadhurst T., et al., 2005, ApJ 621, 53
- 17) Broadhurst T., Barkana R., 2008, MNRAS 390, 1647
- 18) Bartelmann M., et al., 1998, A&A 330, 1
- 19) Oguri M., Lee J., Suto Y., 2003, ApJ 599, 7
- 20) Oguri M., Keeton C.R., 2004, ApJ 610, 663
- 21) Oguri M., et al. 2005, ApJ 632, 841
- 22) Oguri M., Blandford R. D., 2009, MNRAS 392, 930
- 23) Zitrin A., et al. 2009, ApJ 707, L102
- 24) Hennawi J.F., et al., 2008, AJ 135, 664
- 25) Oguri M., et al., 2009, ApJ 699, 1038
- 26) Broadhurst T., et al., 2005, ApJ 619, L143
- 27) Umetsu K., Broadhurst T., 2008, ApJ 684, 177
- 28) Okabe N., et al., 2010, PASJ 62, 811
- 29) Oguri M., et al., 2010, MNRAS 405, 2215

Tests of Dark Matter Distributions in Galaxy Clusters

Masamune OGURI

Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: There are a number of observational evidences of dark matter in our universe, yet its nature is not known. In this article, I will describe my recent work on the distribution of dark matter in massive galaxy clusters using gravitational lensing, aiming at critical tests of the current standard structure formation scenario.