

弱い重力レンズ効果を用いた銀河のバリオン質量直接測定への展望

小林 将人 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

銀河形成・進化を研究するにあたり、バリオンとダークマターの相互作用を明らかにすることは非常に重要である。特に銀河とその周囲におけるバリオンとダークマターの分布は、銀河形成・進化の歴史を反映していると考えられる。弱い重力レンズ効果は、そうした銀河周囲の質量分布を探索できる強力なツールである。しかし現在、弱い重力レンズ効果の測定はダークハローの質量分布探索 (数百 kpc 以上のスケール) に限定されていることが典型である。もしこれをより小さなスケール (特に銀河近傍の数十 kpc スケール) まで推し進めることができれば、弱い重力レンズ効果から銀河のバリオン質量を直接捉えることも可能となる。バリオン質量の中でも、特に星質量は銀河の性質を評価するために基本的な物理量である。星質量は通常、銀河の年齢や金属量、初期質量関数などの仮定をもって、光度から換算して算出される。しかしこれらの仮定の取り方次第で、算出される星質量も異なってしまう (Courteau et al. (2014), Conroy et al. (2009))。仮に弱い重力レンズ効果の測定からこうした仮定を含まずに星質量の直接推定が実現すれば、これらの仮定へ制限を付けることも期待できる。本発表では、ハッブル宇宙望遠鏡 HST の ACS とすばる望遠鏡の Suprime-Cam で観測された COSMOS 領域のデータを解析し、1) 銀河の星質量算出のためには、弱い重力レンズ効果をどの程度小スケールまで測定する必要があるか、2) 将来観測による、弱い重力レンズ効果を用いた銀河の星質量測定の可能性、について検討した結果を報告する。

1 Introduction

質量は物質の存在を示す本質的な物理量であり、銀河とその周囲におけるダークマターとバリオンの質量分布は、宇宙の構造形成史と銀河の形成・進化史の情報を含んでいる。特にバリオン質量の中でも星質量は、銀河が有する星の総質量であり、各銀河の星形成史や衝突・合体の歴史を反映している。従って星質量は、銀河の性質、および銀河とダークマターの関係の評価するために正確に算出することが望まれる。星質量の精度良い算出は銀河形成・進化分野にとどまらず、観測量として銀河を利用する観測的宇宙論にとっても不可欠なことである。

今日行われている一般的な銀河の質量算出方法としては、(1) SED fitting、(2) stellar kinematics、(3) 強い重力レンズ効果の測定、が挙げられる。(1) では星質量が求まるが、銀河の年齢、金属量、ダスト減光、初期質量関数 (以後 IMF) などの仮定が必要となる。(2) では銀河内の星の運動を支配する力学的な質量が求まるが、星が持つ速度分散の非等方性を考慮するのは難しく、等方的として取り扱われている。

(3) は直接的な質量検出方法でありダークマターも含めた全質量が求まるが、この現象自体が極めて大質量な楕円銀河などに限られている (Gavazzi et al. (2007))。今回我々はこれらの手法以外に、(4) 弱い重力レンズ効果の測定から星質量を算出する可能性について検討を行った。弱い重力レンズ効果の測定が持つ利点は、ダスト減光など SED fitting が抱える仮定を含まずに直接的な質量検出ができること、および強い重力レンズ効果と異なり銀河全般に起こり得る現象であるため、広範な赤方偏移にある様々な質量の銀河についてその星質量を算出できること、にある。さらに、SED fitting と併せて行うことで、星質量の予想値を大きく変えてしまう SED fitting の仮定 (一例として IMF) へ制限を付けることも期待される。

今後 10 年は、衛星観測として欧州主導の Euclid、米国主導の WFIRST、地上観測として日本主導のすばる望遠鏡超広視野主焦点カメラ (以後 HSC) など、大規模な銀河サーベイが計画されており、弱い重力レンズ効果を数多く検出することでその統計精度向

上が期待される状況にある。また現在、異なる IMF から導かれる星質量の推定値の差異はファクター 2 程度であるので、IMF に制限を付けるためには弱い重力レンズ効果で $S/N = 2$ の精度で質量を決定することが必要となる。これらの背景を踏まえ本発表では、 $S/N = 2$ の精度を実現するために将来計画で観測しなければならない天球面の面積を、対象とする銀河の質量と赤方偏移ごとに算出した結果を発表する。

ただし、この手法 (4) は今後手法 (1)-(3) と並行して行い、お互いに整合的であるか検証することが大事である、ということにここで言及しておく。

2 Weak Lensing

重力レンズ効果には 3 つの構成要素がある。観測する我々、重力源となるレンズ銀河、そして我々から見てレンズ銀河より遠方にある背景銀河である。重力レンズ効果は、レンズ銀河の重力によって背景銀河の形がどの程度歪んでいるかを評価することで検出される。この定量的な評価の中でも shear(γ) について本研究では注目する。

γ は

$$\gamma(r) = \frac{\Delta\Sigma(r)}{\Sigma_{\text{crit}}} \quad (1)$$

によって定義される。 $\Delta\Sigma$ は

$$\Delta\Sigma(r) = \bar{\Sigma}(r) - \Sigma(r) \quad (2)$$

で定義される。 $\Sigma(r)$ は、レンズ銀河周囲に分布する質量を天球面上へ射影した時レンズ銀河から距離 r の地点での質量面密度のことである。 $\bar{\Sigma}(r)$ はレンズ銀河から距離 r 内にある質量面密度の平均値である。さらに Σ_{crit} とは臨界質量面密度のことであり

$$\Sigma_{\text{crit}} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_{\text{os}}}{D_{\text{ol}}D_{\text{ls}}} \quad (3)$$

で定義される。各 D は角径距離であり、 D_{os} は観測者と背景銀河間、 D_{ol} は観測者とレンズ銀河間、 D_{ls} はレンズ銀河と背景銀河間、である。従って $\gamma(r)$ は、レンズ銀河から距離 r の位置での質量面密度超過が臨界質量面密度に対してどの程度大きいかを表している。実際の観測ではこれを背景銀河の形状の歪みから測定する。

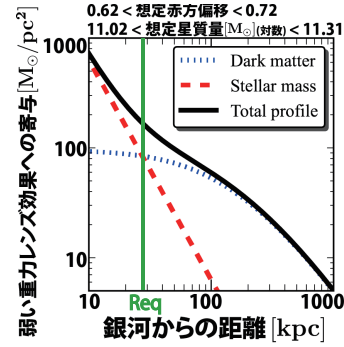


図 1: レンズ銀河周囲での $\Delta\Sigma$ の分布。縦軸が $\Delta\Sigma$ 、横軸がレンズ銀河からの距離。レンズ銀河近傍では銀河の星質量の $\Delta\Sigma$ がダークマターの $\Delta\Sigma$ より卓越している。

$\Delta\Sigma$ には全ての物質が含まれているため、ダークマター成分とバリオン成分に分解して記述できる。

$$\Delta\Sigma = \Delta\Sigma_{\text{dm}} + \Delta\Sigma_{\text{bar}} \quad (4)$$

我々が今回着目するレンズ銀河は比較的大質量であるため、バリオン質量の大半が星質量、すなわち $\Delta\Sigma_{\text{bar}} \simeq \Delta\Sigma_{\text{stellar}}$ として取り扱う。ここで $\Delta\Sigma_{\text{dm}} = \Delta\Sigma_{\text{stellar}}$ となる距離 r を R_{eq} と呼ぶことにする。今回はレンズ銀河を包容するダークマターハローよりもレンズ銀河のバリオン質量が $\Delta\Sigma$ を支配する領域に興味があるため、今回の研究ではこの R_{eq} より小スケールで弱い重力レンズ効果の S/N がどの程度得られるかを検討した。参考として、 R_{eq} 付近での $\Delta\Sigma$ の概形を図 1 に記した。実際の観測ではレンズ銀河近傍だが銀河自体より外側を観測することを念頭において、バリオン質量については点源のように扱い

$$\Delta\Sigma_{\text{bar}}(r) = \frac{M_{\text{bar}}}{\pi r^2} \simeq \frac{M_*}{\pi r^2}, \quad (5)$$

ダークマターについては NFW 分布に従うとして扱った。

3 Method

弱い重力レンズ効果をレンズ銀河のごく近傍で計測する場合、以下に挙げる様々な要素が影響してくる。例えば角径距離に応じた Σ_{crit} の変化、観測ごとの限界等級に応じたレンズ銀河と背景銀河の数の変

化、星質量-ハロー質量関係の変遷とそれに伴う R_{eq} の変化、観測の限界等級、天球面上で銀河同士が重なり合っていて背景銀河の形状が正しく計測できない、などである。この中でも特に解析的には評価できない「銀河の重なり合い」の効果を、本研究ではハッブル宇宙望遠鏡 (以後 HST) ACS によって観測された COSMOS 領域のデータを解析することで取り入れた。本データ内の各銀河について Source Extractor を利用して Kron 半径を算出し、これに基づき各銀河をフィットする楕円を描いて、この楕円同士が重なっているものは形状が正しく測定できない銀河として除外した。

残った銀河の中から、すばる望遠鏡 Suprime-Cam で photometric redshift の得られている銀河を選び出し、我々のサンプルとして採用した。この Suprime-Cam のカタログとしては Leauthaud et al. (2007) および Leauthaud et al. (2012) を採用し、カタログから各銀河について photometric redshift の他に、形状測定の誤差の見積もり、また K バンド光度から概算した星質量を利用した。(以後の議論で出てくる「星質量」は全てこの光度から見積もられた星質量を指す。) また Leauthaud et al. (2012) で研究された COSMOS 領域の星質量-ハロー質量関係を採用し、ハローの定義もこれに従い背景物質密度の 200 倍の密度を持つ球とした。

4 Results

Section 2 と Section 3 の設定の下行った計算結果を記す。

弱い重力レンズ効果は数多くの背景銀河の情報を重ね合わせることで評価されるが、 R_{eq} 以下のスケールでは背景銀河の数が少ないため、レンズ銀河個々の周囲で計測するのは極めて難しい。従って性質の近い (均一な) 数多くのレンズ銀河を観測し、それらの周囲にある背景銀河の情報を合計して平均をとることを考える。このレンズ銀河を数多く観測することが、将来観測で実現が期待されることである。

今回は、均一なレンズ銀河を用意して平均をとること、および将来観測での $S/N = 2$ 実現性をレンズ銀河の質量と赤方偏移に応じて求めたいこと、を

目標とするため、HST のデータに存在するレンズ銀河を以下の様な星質量ビン、赤方偏移ビンごとに区切って解析した。

$$\log M_* = 9.00, 9.37, 9.74, 10.11, \\ 10.49, 10.86, 11.23, 11.60 \quad (6a)$$

$$z = 0.30, 0.50, 0.62, 0.72, \\ 0.80, 0.87, 0.94, 1.00 \quad (6b)$$

星質量は対数で均等に 7 ビン、赤方偏移は共同体積が全て等しくなるように 7 ビンに区切った。

4.1 有効面積

実際に背景銀河が存在できるのは、 R_{eq} とレンズ銀河のベストフィット楕円の間領域である。観測者から見たこの領域の天球面上での面積を有効面積と呼ぶことにする。有効面積を各星質量ビン、各赤方偏移ビンについて算出した結果が図 2 である。この結果から、大星質量、低赤方偏移にあるレンズ銀河で有効面積が大きくなり、弱い重力レンズ効果測定に利用できる背景銀河がより多く存在しうることがわかる。

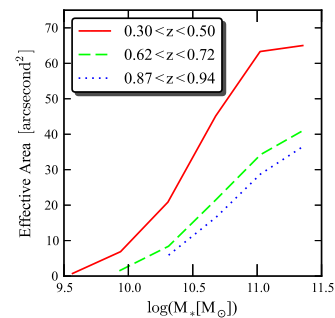


図 2: レンズ銀河ごとの有効面積の変化。縦軸が有効面積、横軸はレンズ銀河の想定星質量、異なる色の折れ線がレンズ銀河の異なる想定赤方偏移。

4.2 Area required to observe

将来観測で $S/N = 2$ を達成するために観測すべき天球面領域の面積を見積もった。前章 4.1 で求めた

有効面積内にある背景銀河を選定し、各銀河に与えられている形状測定の誤差を Leauthaud et al. (2012) から採用することで、COSMOS 領域と同じ面積だけ観測した場合における弱い重力レンズ効果の S/N 値を、対象とするレンズ銀河の星質量や赤方偏移ごとに算出した。これから、将来観測で $S/N = 2$ 達成に要請される観測面積を予測した結果が図 3 に折れ線で記されている。左パネルが衛星観測に対する予測、右パネルが地上観測に対する予測である。 $\log(M_*) \simeq 11.0$ で最も良い S/N が得られるため、この程度の星質量の銀河をターゲットとする場合、衛星観測でも地上観測でも観測領域が最も少なくて済むとわかる。さらに、将来観測の Euclid や HSC の観測予定面積を実線で併記した。この結果から、HSC の観測により弱い重力レンズ効果で星質量を $S/N = 2$ の精度で決定することが、今回扱った様々な星質量、広範な赤方偏移のレンズ銀河について可能であると示された。

5 Conclusions and Future Prospects

我々は銀河の新たな星質量算出方法として弱い重力レンズ効果を検討し、将来観測がもたらす統計精度向

上により、 $S/N = 2$ で星質量を決定できるか、またこの精度を達成するために必要な観測面積を算出した。その結果 Euclid や HSC といった将来観測で、星質量 $9.00 \leq \log M_* \leq 11.60$ 、赤方偏移 $0.30 \leq z \leq 1.00$ の範囲の銀河について $S/N = 2$ を達成できるという展望を得た。SED fitting との組み合わせからこの幅広い星質量、広範な赤方偏移の銀河についてその IMF への制限をつけ、IMF が宇宙の年齢や銀河の質量に応じて変遷してきた歴史を捉えることが可能かもしれないという示唆を得た。

ただし本発表の段階では、弱い重力レンズ効果の S/N の検討に止まっており、 γ の小スケールでのバイアスや、地上観測を行った場合の銀河の重なり合いなどを今後議論する必要がある。

Reference

- Courteau, S., et al. 2014, *Reviews of Modern Physics*, 86, 47
- Conroy, S., et al. 2009, *ApJ*, 699, 486
- Gavazzi, R., et al. 2007, *ApJ*, 667, 176
- Leauthaud, A., et al. 2007, *ApJ*, 172, 219
- Leauthaud, A., et al. 2012, *ApJ*, 744, 159

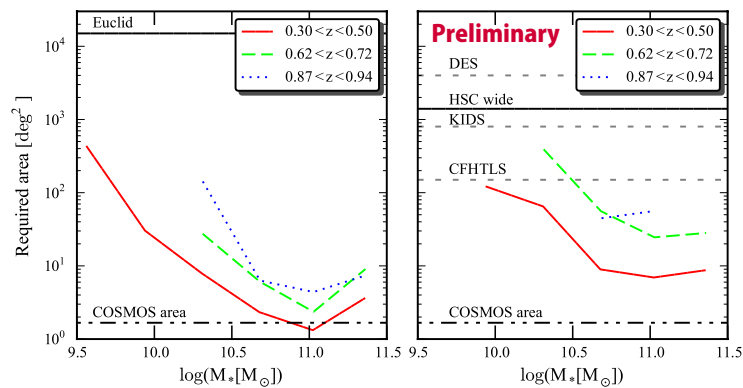


図 3: 星質量を $S/N = 2$ の精度で測定するために観測することが要請される天球面の面積を折れ線で示した。縦軸がその領域の大きさ、横軸はレンズ銀河の想定星質量、異なる色の折れ線がレンズ銀河の異なる想定赤方偏移。左パネルは衛星観測を行う場合 (HST 程度の限界等級を想定)、右パネルは地上観測を行う場合 (HSC の限界等級を想定)。左パネルには、HSC 以外の観測装置が観測する予定の面積も破線で記してあるが、HSC とは限界等級が異なるため、これらの観測に対する折れ線はこの図の折れ線とは異なってくることに注意が必要である。