

銀河団の重力レンズ質量密度プロファイルの普遍性の検出

新倉 広子 (東京大学大学院理学系研究科)

Abstract

銀河団の質量密度プロファイルは宇宙構造形成の情報を含み、その性質は冷たい暗黒物質 (CDM) のモデルに基づいた N 体シミュレーションで詳しく調べられている。N 体ハローが示唆する重要な性質として、ハローの質量密度プロファイルが普遍的な関数形 (NFW モデル) でよく表されるという性質が知られている。このモデルは、銀河団の質量密度プロファイルが質量の大小に関わらず、適切にスケール変換するとパラメータに依存しない形で表される事を示唆している。構造形成史を探るためには質量プロファイルの観測的検証が有効であり、とりわけ弱い重力レンズ効果は銀河団の暗黒物質の空間分布を調べる強力な手法である。しかしながらそこから復元される銀河団の質量プロファイルはノイズが大きいため、従来の手法では複数の銀河団の情報をスタックした平均的な質量分布を調べるに留まり、質量の大小による普遍性は検証出来ていなかった。本研究では、重力レンズ効果を用いて復元した銀河団の質量プロファイルに対して NFW モデルに基づいたスケール変換を試行する事で、「銀河団の質量プロファイルの普遍性」を調べる新たな手法を考案した。すばる望遠鏡の Suprime-Cam の重力レンズデータと X 線の質量データを組み合わせて X 線光度で最も明るい、最大質量級の 50 個の銀河団 ($z \simeq 0.23$) に対して手法の検証を行った。検証の結果、50 銀河団については質量の大小に関わらず、 $4-6\sigma$ レベルで普遍的な NFW プロファイルが検出された。

1 Introduction

銀河団は宇宙最大の自己重力系天体である。その構造形成過程では暗黒物質の重力相互作用が優勢であり、宇宙論の標準理論である Λ CDM モデルに基づいた構造形成シミュレーションを用いて性質がよく調べられている。シミュレーションが示唆する最も重要な性質に、質量プロファイルが普遍的な関数形で表されるというものがある。これは初めに Navarro et al. (1996, 1997, 以降 NFW) で提唱された性質で、ハローの質量プロファイルが、ハローの質量に依らず 2 つのパラメータで特徴づけられるというものである。NFW プロファイルの性質は物理的な解釈も試みられており (Dalal et al. 2010)、観測と理論を比較して性質を探る研究が活発に行われている。

銀河団の質量密度プロファイルを観測データで調べるには、弱い重力レンズのデータが強力である。この弱い重力レンズのデータから再現されたプロファイルの性質を調べるには、複数の銀河団の情報をスタックする手法が非常に有効である。スタックの手法の利点は、重力レンズの信号が小さい銀河団につ

いても複数の銀河団の情報を足す事で、銀河団サンプルの平均的な性質を調べることが出来る点である。この手法で調べられる平均的な質量密度プロファイルは NFW プロファイルと非常によく合っていることが確かめられている。(Okabe et al. 2013) しかしながらスタックの手法で求まるのは平均的なプロファイルであり、個々の銀河団の質量の情報は失われてしまう。このため質量の大小によるプロファイルの普遍性はこれまで検証されていなかった。

そこで本研究では新しい重力レンズ解析法を考案し、質量依存性も含めて NFW の予言がデータで成り立つ事の検証を行った。以下では $\Omega_m = 0.27, \Omega_\lambda = 0.73$ の平坦な Λ CDM モデルで表記する。

2 Methods

2.1 Lensing of Navarro-Frenk-White halo

本研究では、銀河団の質量プロファイルのモデルとして、Navarro-Frenk-White (1997, ; 以降 NFW) モデル

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_c}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}, \quad (1)$$

を用いる。このモデルは 2 つのパラメータ ρ_c と r_s でハローの NFW 質量密度プロファイルを特徴づけている。 ρ_c は

$$\rho_c = \frac{\Delta \rho_{\text{cr}}(z) c_\Delta^3}{3m_{\text{NFW}}(c_\Delta)} = \frac{M_\Delta}{4\pi r_s^3 m_{\text{NFW}}(c_\Delta)}, \quad (2)$$

である。このとき $m_{\text{NFW}}(c_\Delta) \equiv \int_0^{c_\Delta} dx \, x/(1+x)^2 = \ln(1+c_\Delta) - c_\Delta/(1+c_\Delta)$ 、 $\Delta(z)$ はビリアル半径を決めるパラメータである。このように上述した 2 つのパラメータ ρ_c と r_s は質量パラメータ $M_\Delta \equiv (4\pi/3)r_\Delta^3 \rho_{\text{cr}}(z)\Delta$ と中心集中度を表すパラメータ $c_\Delta \equiv r_\Delta/r_s$ の 2 つのパラメータで表される。

実際の観測から求まる質量密度プロファイルは 2 次元に射影されている。解析的な convergence と shear プロファイルは、(Bartelmann 1996; Golse & Kneib 2002):

$$\begin{aligned} \kappa^{\text{NFW}}(R) &\equiv \frac{\Sigma^{\text{NFW}}(R)}{\Sigma_{\text{cr}}(z_1, z_s)}, \\ &= 2\rho_c r_s \frac{g^{\text{NFW}}(R/r_s)}{\Sigma_{\text{crit}}(z_1, z_s)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \gamma_+^{\text{NFW}}(R) &\equiv \frac{\Delta \Sigma^{\text{NFW}}(R)}{\Sigma_{\text{cr}}(z_1, z_s)}, \\ &= 2\rho_c r_s \frac{f^{\text{NFW}}(R/r_s)}{\Sigma_{\text{crit}}(z_1, z_s)}, \end{aligned} \quad (4)$$

で表される。ここで R はハロー中心からの射影半径 (共同座標系) であり、関数 $f^{\text{NFW}}(x)$ と $g^{\text{NFW}}(x)$ は

$$g^{\text{NFW}}(x) = \begin{cases} \frac{1}{x^2-1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \cosh^{-1} \frac{1}{x}\right), & (x < 1) \\ \frac{1}{3}, & (x = 1) \\ \frac{1}{x^2-1} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{x^2-1}} \cos^{-1} \frac{1}{x}\right), & (x > 1) \end{cases}$$

$$f^{\text{NFW}}(x) = \begin{cases} \frac{2}{x^2} \ln \frac{x}{2} + \frac{1}{1-x^2} \left(1 + \frac{2-3x^2}{x^2\sqrt{1-x^2}} \cosh^{-1} \frac{1}{x}\right), & (x < 1) \\ \frac{5}{3} - 2 \ln 2, & (x = 1) \\ \frac{2}{x^2} \ln \frac{x}{2} - \frac{1}{x^2-1} \left(1 + \frac{2-3x^2}{x^2\sqrt{x^2-1}} \cos^{-1} \frac{1}{x}\right), & (x > 1). \end{cases}$$

である。また、背景銀河の赤方偏移 z_s 、レンズ銀河の赤方偏移 z_l での臨界面密度 Σ_{crit} は

$$\Sigma_{\text{crit}}(z_l, z_s) = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_A(z_s)}{D_A(z_l)D_A(z_l, z_s)(1+z_l)^2},$$

で与えられる。(但し $D_A(z)$ は角径距離である。)

これらの関係式を用いると、実際の重力レンズの観測で得られる reduced shear プロファイルは

$$\langle e_+ \rangle(R) \rightarrow \frac{\gamma_+^{\text{NFW}}(R)}{1 - \kappa^{\text{NFW}}(R)}, \quad (5)$$

で表される。

2.2 Stacked lensing w/o NFW scaling

次に弱い重力レンズ効果の観測量から求まる質量密度プロファイルを考える。 N_c 個の銀河団についてスタックしたプロファイルは、Johnston et al. (2007) と Mandelbaum et al. (2013) の方法から

$$\langle \widehat{\Delta \Sigma} \rangle(R) = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^{N_c} \sum_{i_a; |\mathbf{R}_{(a)i_a}| \in R} w_{(a,i_a)} \Sigma_{\text{cr}(a)} e_{(i_a)+}(\mathbf{R}_{i_a}), \quad (6)$$

と表される。 $e_{(i_a)+}$ は a 番目の銀河団領域での i_a 番目の背景銀河の tangential な楕円率を表し、規格化定数 N は $N = \sum_{a=1}^{N_c} \sum_{i_a} w_{(a,i_a)}$ 、weight は Okabe et al. (2010) と同じ定義の値を臨界面密度で重み付けた値を用いた。また、プロファイルの各 bin での不確かさも Okabe et al. (2010) と同様に

$$\sigma_{\langle \Delta \Sigma \rangle}(R)^2 = \frac{1}{2N^2} \sum_a \sum_{i_a; |\mathbf{R}_{(a)i_a}| \in R} w_{(a,i_a)}^2 \Sigma_{\text{cr}(a)}^2 (z_a, z_{i_a})^2 e_{(i_a)}^2.$$

から求めた。

これまで述べた質量密度プロファイル (5) と NFW プロファイル Eqs. (4) は対応関係にあり、

$$\begin{aligned} \langle \widehat{\Delta \Sigma} \rangle(R) &\Leftrightarrow \frac{\Delta \Sigma^{\text{NFW}}(R)}{1 - \kappa^{\text{NFW}}(R)} \\ &\simeq \Delta \Sigma^{\text{NFW}}(R) \left[1 + \left\langle \frac{1}{\Sigma_{\text{cr}}} \right\rangle \Sigma^{\text{NFW}}(\langle R \rangle) \right], \quad (7) \end{aligned}$$

が成り立つ。この対応関係から、スタックプロファイルのを NFW 関数でフィッティングすることにより質量パラメータ M_Δ と中心集中度のパラメータ c_Δ を求める事が出来る。

2.3 Stacked lensing with NFW scaling

NFW モデルの予言によると、質量プロファイルを振幅、半径方向に

$$\frac{\rho^{\text{NFW}}}{\rho_c}(x = r/r_s) = \frac{1}{x(1+x)^2}, \quad (8)$$

のようにスケーリングすると理論的には1つのカーブになることが期待される。この性質を以下では”NFW スケーリング”と呼ぶことにする。

以下では重力レンズ観測量から復元したプロファイルを NFW スケーリングする方法を述べる。式 (5) に倣うと、スケール変換は a 番目の銀河団について半径方向に $\mathbf{x}_{(a)i_a} \equiv \mathbf{R}_{(a)i_a}/r_s(M_{(a)}^X, c_{(a)}^X)$ とし、振幅方向には $2\rho_c(M_{(a)}^X, c_{(a)}^X) r_s(M_{(a)}^X, c_{(a)}^X)$ で割ることと得られる。

理想的な NFW スケーリング検証したのが図 1 である。半径が小さいところで reduced shear の効果により分散が大きくなっているが、スケーリングした場合の方が分散が小さくなるのが分かる。

スタックプロファイルについても同様に NFW スケーリングすると

$$\begin{aligned} \langle \widehat{f^{\text{NFW}}} \rangle(x) &= \frac{1}{N} \\ &\times \sum_{a=1}^{N_c} \sum_{i_a: |\mathbf{x}_{(a)i_a}| \in x} \frac{w_{(a,i_a)} \Sigma_{\text{cr}(a)} e_{(i_a)}(\mathbf{x}_{i_a})}{2\rho_c(M_{(a)}^X, c_{(a)}^X) r_s(M_{(a)}^X, c_{(a)}^X)}. \end{aligned}$$

のように求まる。エラーバー $\sigma_{\langle \widehat{f^{\text{NFW}}} \rangle}(x)$ も同様のスケーリングから求まる。

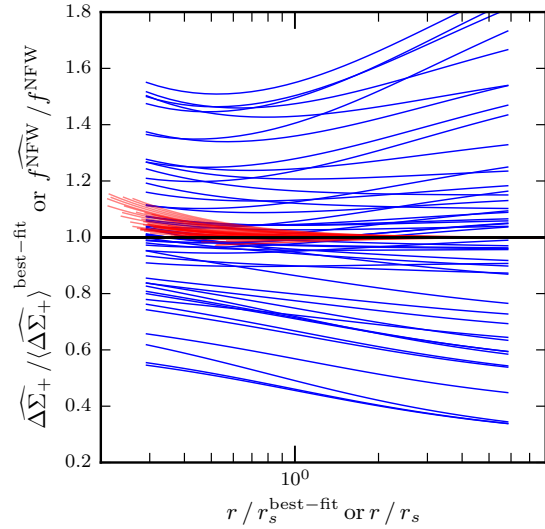


図 1: すばるの 50 銀河団の X 線静水圧平衡質量と DK14 で示唆される中心集中度パラメータの NFW プロファイルの分布。青線は NFW スケーリングなしでの 50 個のハローの NFW 質量密度プロファイル、赤線が既知のパラメータで NFW スケーリングした理想的なスケーリングのプロファイルで、それぞれスタックプロファイルで規格化されている。

この NFW スケーリングを定量的に検証するため、以下では

$$d^2 \equiv \sum_{a=1}^{50} \sum_i \frac{\left[\widehat{\Delta \Sigma}_{(a)}(R_{(a)i}) - \Delta \Sigma^{\text{bf-NFW}}(R_{(a)i}; M_{\text{bf}}, c_{\text{bf}}) \right]^2}{\sigma_{\Delta \Sigma(a)}(R_{(a)i})^2} \quad (9)$$

というパラメータを導入する。NFW スケーリングをした場合については

$$d_{\text{w-scaling}}^2 \equiv \sum_{a=1}^{50} \sum_i \frac{\left[\widehat{f_{(a)}^{\text{NFW}}}(x_{(a)i}) - f^{\text{NFW}}(x_{(a)i}) \right]^2}{\sigma_{f^{\text{NFW}(a)}}(x_{(a)i})^2}. \quad (10)$$

と表される。このパラメータは、スタックプロファイルの NFW 関数でのベストフィットカーブからの各銀河団のプロファイルのずれの和を表している。 $\Delta \Sigma^{\text{bf-NFW}} = f^{\text{NFW}} = 0$ のときは $d^2 = d_{\text{w-scaling}}^2$ が成り立ち、銀河団の質量密度プロファイルが NFW の形に近ければ、 $d_{\text{w-scaling}}^2 < d^2$ となることが期待される。

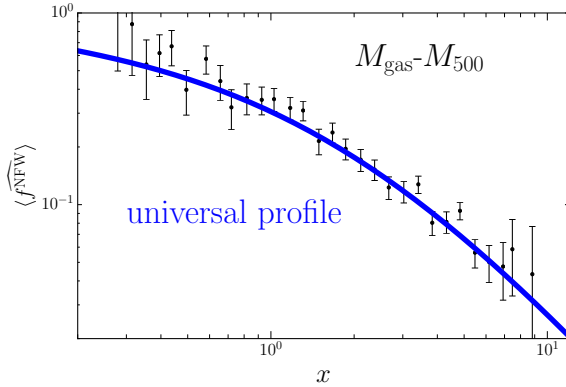


図 2: すばるの 50 銀河団の NFW スケーリングでのスタックプロファイル。図は質量パラメータに X 線のガス質量の観測量を用いた場合。

3 Results

上述した NFW スケーリングを 50 銀河団について適用した結果を示す。重力レンズのデータには、Okabe et al. (2013) と同じ、すばる望遠鏡の Suprime-Cam で取得したデータを用いた。スケーリングに用いる銀河団の質量パラメータには、Chandra 衛星と XMM-Newton 衛星の観測量 (Martino et al. 2014) を、中心集中度のパラメータは DK14 の質量 – 中心集中度関係から求めた。検証の結果の 1 例を図 2 に示す。X 線質量としては、静水圧平衡から求まる質量 (HSE) と Gas 質量を用いた場合 ($M_{\text{gas}}-M_{500}$) を検証したが、

$$\begin{aligned} \Delta d^2 &\equiv d^2 - d_{\text{w-scaling}}^2 \\ &= \begin{cases} 543.2 - 527.1 \simeq (4.0)^2, & (\text{HSE}) \\ 543.2 - 504.6 \simeq (6.2)^2, & (M_{\text{gas}}-M_{500}) \end{cases} \end{aligned}$$

であり、いずれの場合も改善が見られた。

4 Discussion

前述の結果の解釈のため、NFW スケーリングから得られる結果と、 Λ CDM モデルの構造形成理論の予言から期待される結果の比較を行った。検証には N 体シミュレーションと重力レンズのシミュレーションを組み合わせ、 d^2 を調べ、その値をモデルの予言とした。比較の結果、N 体シミュレーションの方が観測

に比べて $d_{\text{w-scaling}}^2$ が系統的に小さくなることが分かった。考えられる原因として、X 線の観測質量の不確かさが挙げられる。詳細なテスト結果は Niikura et al. (2015) にあるので参照されたい。

以上より、レンズ以外の X 線 proxy でスケーリングが改善したことから、(1) 銀河団の質量分布が NFW 的相似分布であるかつ (2) mass と proxy の相関が十分強い (scatter が十分に小さい) という示唆が得られた。本手法は銀河団プロファイルの多様な性質をプローブする可能性があり、今後も検討したいと考えている。¹

Reference

- Bartelmann, M. 1996, A&A, 313, 697
- Dalal, N., Lithwick, Y., & Kuhlen, M. 2010, ArXiv e-prints:1010.2539
- Diemer, B., & Kravtsov, A. V. 2014a, ArXiv e-prints:1407.4730 (DK14) —. 2014b, ApJ, 789, 1
- Golse, G., & Kneib, J.-P. 2002, A&A, 390, 821
- Johnston, D. E., et al. 2007, ArXiv e-prints:0709.1159
- Mandelbaum, R., Slosar, A., Baldauf, T., Seljak, U., Hirata, C. M., Nakajima, R., Reyes, R., & Smith, R. E. 2013, MNRAS, 432, 1544
- Martino, R., Mazzotta, P., Bourdin, H., Smith, G. P., Bartalucci, I., Marrone, D. P., Finoguenov, A., & Okabe, N. 2014, MNRAS, 443, 2342
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, ApJ, 462, 563
- . 1997, ApJ, 490, 493
- Niikura, H., Takada, M., Okabe, N., Martino, R., & Takahashi, R. 2015, ArXiv e-prints:1504.01413
- Okabe, N., Smith, G. P., Umetsu, K., Takada, M., & Futamase, T. 2013, ApJ, 769, L35
- Okabe, N., Takada, M., Umetsu, K., Futamase, T., & Smith, G. P. 2010a, PASJ, 62, 811
- Okabe, N., Zhang, Y.-Y., Finoguenov, A., Takada, M., Smith, G. P., Umetsu, K., & Futamase, T. 2010b, ApJ, 721, 875
- Takahashi, R., Sato, M., Nishimichi, T., Taruya, A., & Oguri, M. 2012, ApJ, 761, 152

¹謝辞：基礎物理学研究所 (研究会番号：YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。