

## 弱重力レンズ解析で探る dark matter halo の splashback radius

村田 龍馬 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)

## Abstract

銀河団の周りにはダークマターハローという宇宙最大の自己重力束縛系がある。光を発しないダークマターの構造形成への役割を調べるためには、ダークマターの密度分布を調べることができる弱重力レンズ効果が有効である。今回の発表では、最近のシミュレーションで示唆されたダークマターハローの物理的な半径である跳ね返り半径 (splashback radius) と弱重力レンズ解析の方法の概要を紹介する。

## 1 Introduction

光輝く銀河団の周りには、ダークマター粒子が特に密集した宇宙最大の自己重力束縛系であるダークマターハローが存在する。

ダークマターハローを調べるには、弱重力レンズ効果が有効である。巨大な重力ポテンシャルによって、ダークマターハローの背景にある銀河から発せられた光の経路が曲げられ、結果として背景銀河の形状が本来の形から少し歪められる。多数の銀河団サンプルと大量の背景銀河の形状の測定を組み合わせることで、銀河団の周りのダークマターの平均的な空間分布を復元することができる (Miyatake et al. 2015-1)。

重力レンズ効果を用いた多くの先行研究から、CDM (冷たいダークマター) モデルに基づく N 体シミュレーションの予言である Navarro-Frenk-White(NFW) プロファイル (Navarro et al. 1996) が良くハローの密度分布を説明することが知られている。

$$\rho_{NFW}(R) = \frac{\rho_s}{(R/r_s)(1 + R/r_s)^2} \quad (1)$$

CDM 階層的構造形成のシナリオでは、質量の小さい天体 (ハロー) がまず形成され、それらの合体や質量降着によって、次第に質量の大きな天体 (ハロー) が形成されてきたと考えられている。つまり、ビリアル半径の周りあるいは外側は、質量降着がまさに起こっている階層的構造形成の現場である。この理由で、近年内側の領域に加え、質量降着が起きていると考えられている外側の質量動径プロファイ

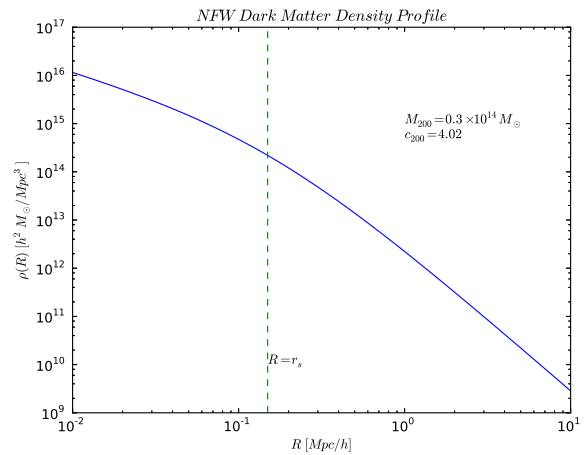


図 1: NFW プロファイルの典型例。

ルの研究に関心が集まっている。

最近の N 体シミュレーション (Diemer & Kravtsov 2015; More et al. 2015) によって、ダークマター粒子が降着する間にハローの重力ポテンシャルが次第に深くなっていくことから、粒子がエネルギーを失い、中心方向に初めて折り返すときの「跳ね返り半径 (splashback radius)」が典型的に中心から  $R = \chi_{lens} \delta\theta \simeq 1 \text{Mpc/h}$  ( $\chi_{lens}$ : レンズ天体 (銀河団) までの共動距離、 $\delta\theta$ : 天球面上でのレンズと背景銀河の角距離) に存在し、その周辺でダークマター粒子の密度が NFW プロファイルに比べて、急激に減ることが示唆されている。

質量降着率  $\Gamma = \frac{\Delta \log M_{vir}}{\Delta \log(a)}$  が大きいほど重力ポテンシャルの深くなる速度が大きくなるため、跳ね返り半径は小さくなるはずである。さらに、宇宙の膨張

速度もダークマターの粒子の運動に関わるので、跳ね返り半径の大きさは赤方偏移  $z$  にも依存する。

また、銀河の銀河団中心への集中度からダークマターハローの中心集中度を見積もることができる。同じ質量を持つダークマターハローを考えると、中心集中度が大きいということはより昔に質量降着が起きたと考えられ、現在の質量降着率は小さく、跳ね返り半径は大きくなると予想できる。逆も然りである。つまり、跳ね返り半径を調べることは、銀河団やダークマターハローの形成の歴史 (assembly history) を調べることに繋がると考えられる。

NFW プロファイルからのずれである跳ね返り半径 (splashback radius) を観測データから発見し、ハローの合体や降着の理解を深めるためには、従来の弱重力レンズ解析に加え、最近発表された新しい解析方法が有効な可能性がある。新しい解析方法では、NFW プロファイルの式におけるスケーリングを用いる (Niikura et al. 2015)。より詳しくは銀河 a3 の新倉広子氏の集録をご覧ください。

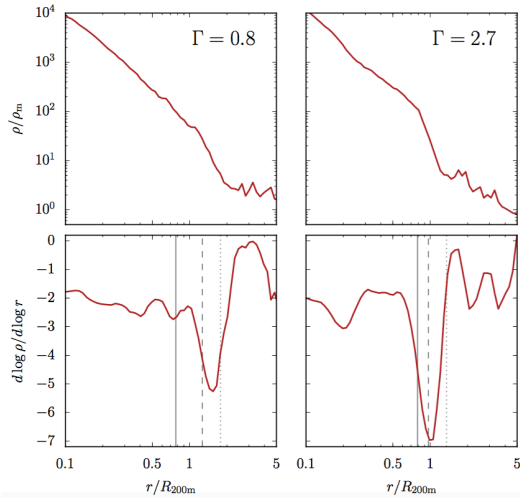


図 2: 最近の N 体シミュレーションの結果 (More et al. 2015)。微係数が極小になる半径が跳ね返り半径と定義される。

## 2 Methods

銀河団 (銀河) 周りのダークマターハローの平均的な空間分布を高い S/N で復元する解析方法があ

り、Cluster-galaxy lensing (もしくは Galaxy-galaxy lensing) と呼ぶ。同じような銀河団 (銀河) を多数選び、その周りのダークマターハローによる重力レンズ効果をスタッキング (統計平均) 解析することによって、銀河団 (銀河) 周りのダークマターハローの平均的な空間分布を復元することができる。

データ解析では、ダークマターハローの場所の目印となる前景銀河団 (銀河) の赤方偏移  $z_{lens}$  と天球座標  $(\alpha_{lens}, \delta_{lens})$  と、重力ポテンシャルによって形が歪む後景の銀河の赤方偏移  $z_{source}$ 、天球座標  $(\alpha_{source}, \delta_{source})$ 、精密に測定された銀河の楕円率  $e_1, e_2$  のデータが大量に必要なことになる。

従来からなされてきた Cluster-galaxy lensing と、NFW プロファイルのスケーリングを用いた新しい Cluster-galaxy lensing の解析方法の概略を説明する。

### 2.1 Cluster-galaxy lensing

楕円率  $e$  (重力レンズ効果からの歪み  $\gamma$  も同様) と天球面上での 2 つの成分は以下のように定義できる。 $a, b$  はそれぞれ銀河の長軸と短軸である。図 3 を参照。

$$e = \frac{a - b}{a + b} \quad (2)$$

$$e_1 = e \cos 2\phi \quad (3)$$

$$e_2 = e \sin 2\phi \quad (4)$$

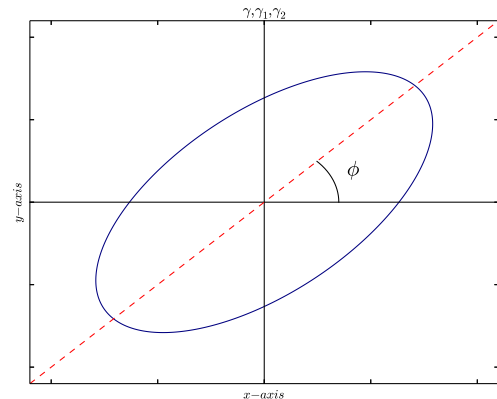


図 3: 楕円率の定義。

座標系の設定に  $e_1, e_2$  の値は依存する。特に、弱重力レンズ効果ではダークマターハローの重力ポテンシャルによって、背景銀河はハローと結んだ線に対して垂直方向に歪みを受けるが、座標変換して得られるその方向の成分を  $e_t(\gamma_t)$  と書く。 $\gamma_t$  に垂直な成分  $\gamma_x$  は統計平均で  $\langle \gamma_x \rangle = 0$  になるべき量で大気の揺らぎなどの系統誤差のチェックに使うことができる。

そもそも背景銀河は固有の楕円率  $e_{\text{typical}} \sim 0.3$  を持っている。 $R = \chi_{\text{lens}} \delta\theta$  が十分離れていて固有の銀河の向きがランダムだとすると、スタッキング解析して平均化することで弱重力レンズ効果のシグナルを  $R$  の関数として抽出できる。 $e_t^{\text{observed}}$  は観測された背景銀河の楕円率の背景銀河とハローを結んだ線に対する垂直成分であり、 $\gamma_t$  は重力レンズ効果由来の成分である。 $N$  はスタッキング解析に用いたレンズと背景銀河のペア数である。

$$e_t^{\text{observed}} = \gamma_t + O(e_{\text{typical}}) \quad (5)$$

$$\langle e_t^{\text{observed}} \rangle = \langle \gamma_t \rangle + O\left(\frac{e_{\text{typical}}}{\sqrt{N}}\right). \quad (6)$$

実際の解析では以下のようにスタッキング解析され、密度分布や理論から求めた式でフィッティングされる。 $w_{ls}$  はレンズ天体と背景銀河のペアに対する重み付けである。 $\Sigma_{\text{cr}}$  は  $z_{\text{lens}}, z_{\text{source}}$  に依存した臨界密度という量である。詳しくは、論文 (Miyatake et al. 2015-2) をご覧下さい。

$$\Delta\Sigma_t(R) = \langle \gamma_t \Sigma_{\text{cr}} \rangle = \frac{\Sigma_{ls} w_{ls} e_t^{(ls)} [(\Sigma_{\text{cr}}^{-1})^{(ls)}]^{-1}}{\Sigma_{ls} w_{ls}}, \quad (7)$$

図 4 に Galaxy-galaxy lensing の解析結果の例を載せる。レンズ天体には SDSS 分光楕円銀河 LRG、背景銀河には Canada-France-Hawaii Telescope からのデータを使っている。NFW プロファイルから計算できる赤い線が、 $R$  の小さい背景銀河の歪みの程度を良く説明している。また、 $R > 10\text{Mpc/h}$  では隣のハローの影響が平均的に見えており、黄色の理論曲線で説明できている。

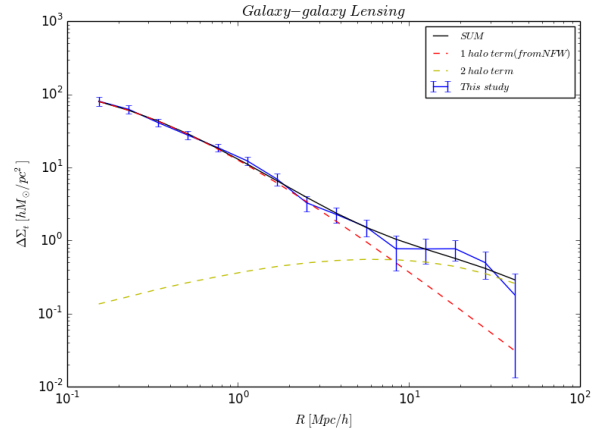


図 4: Galaxy-galaxy lensing での解析結果の例。

## 2.2 NFW プロファイルのスケーリングを用いた Cluster-galaxy lensing

以下のように、ハローの密度分布が NFW プロファイルの場合の弱重力レンズ効果の歪みの度合いが解析的に計算できる。 $f^{NFW}$  はある解析的な関数である。

$$\gamma_t^{NFW}(R) = \frac{\Delta\Sigma_t^{NFW}(R)}{\Sigma_{\text{cr}}} = 2\rho_s r_s \frac{f^{NFW}(x = R/r_s)}{\Sigma_{\text{cr}}} \quad (8)$$

従来の方法とは異なったスタッキングの式を使うことで  $f^{NFW}$  に対応するものをデータから計算できる。

$$\langle f^{NFW} \rangle(x) = \frac{1}{N} \sum_a \sum_{i_a} \frac{w_{(a,i_a)} \Sigma_{\text{cr}(a)} e_{(i_a)t}(x_{i_a})}{2\rho_s(M_{(a)}, c_{(a)}) r_s(M_{(a)}, c_{(a)})} \quad (9)$$

以上のようにスケーリングをすることで、それぞれのダークマターハローの異なる質量からの歪みを平均化している従来の方法に比べて、跳ね返り半径のような NFW プロファイルからのずれが、よりクリアに見える可能性があると考えられる。

詳しい方法や NFW プロファイルの普遍性の検出については、論文 (Niikura et al. 2015) をご覧下さい。

## 3 Results

現在、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の全天の約 4 分の 1 (10,000 平方度) に渡

る、多色撮像データから構築された銀河団カタログ (Rykoff et al. 2014) と背景銀河カタログを用いて、解析を進行している。発表当日は暫定的な結果を発表することを視野に入れている。

## 4 Future Prospect

従来の Cluster-galaxy lensing の解析方法をより深く習得するのに平行し、新しいスケーリングの方法の有効性を検討する。そして、SDSS やすばる望遠鏡 Hyper Supreme-Cam(HSC) のデータを使い、合体や質量降着が起きているダークマターハローの外側を探っていく。将来的には、X 線や Sunyaev-Zel'dovich 効果から得られる銀河団の情報を組み合わせ、ダークマターハローの理解を広げることを目指す。

## Acknowledgement

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。

さらに、ご支援とご協賛いただく全ての皆様に感謝いたします。

## Reference

- Miyatake, H. et al. 2015, arXiv150606135M  
Navarro, J.F. et al. 1996, ApJ 462 563N  
Diemer, B. & Kravtsov, A.V. 2015, ApJ 799 108D  
More, S. et al. 2015, arXiv150405591M  
Niikura, H. et al. 2015, arXiv150401413N  
Rykoff, E.S. et al. 2014, ApJ 785 104R  
Miyatake, H. et al. 2015, ApJ 806 1M