

すばる HSC サーベイによる暗黒物質モデルの制限に向けたサブハロー質量関数の決定

黒川 拓真 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

宇宙定数 Λ と冷たい暗黒物質から成る Λ CDM モデルは、大スケールにおいて観測を非常に良く説明する。一方小スケールでは、 Λ CDM モデルの予言と矮小銀河の観測との不一致が指摘されている。これを解決しうるモデルとして、冷たい暗黒物質の代わりにより質量の軽いを温かい暗黒物質を導入したモデルが存在する。温かい暗黒物質は自由流によってその質量に対応するカットオフスケール以下の密度ゆらぎを減衰させる性質があり、これによって理論と観測の不一致が解消される可能性が議論されている。このように、宇宙論の標準モデルが正しく、本当に暗黒物質が冷たい暗黒物質かどうかは未だ決着していない問題である。

この問題に対して、国立天文台すばる望遠鏡の新型主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam(HSC) を用いた重力レンズ観測は大きな進展を生むと期待されている。重力レンズは、系の力学的な状態などに依存せず天体の質量を直接的に測定できるため、これまでの手法に比べ理論的不定性が少ない。HSC による大規模サーベイは銀河系サイズのハローの平均質量を正確に決定することを可能にし、これを用いて暗黒物質質量に対するこれまでとは独立な制限を与えることができる。

本研究では N 体シミュレーションを用いてサブハロー質量関数を求めた。さらにすばる HSC による観測を想定して統計的誤差を評価し、実際に暗黒物質質量に対する制限が得られるであろうことを示した。これは質量の下限値自体は先行研究の方がより強い制限であるが、上述のように理論的不定性の小さい制限という点が非常に重要である。

1 Introduction

未だ謎に包まれている暗黒物質の正体を明らかにすることは、宇宙論・素粒子物理学において最も重要な課題の一つである。宇宙論では、暗黒物質は質量が重く速度分散の小さい冷たい暗黒物質 (CDM: Cold Dark Matter) であると考えられている。CDM と加速膨張を説明する宇宙定数から成る Λ CDM モデルは、宇宙マイクロ波背景放射の温度非等方性や銀河の 3 次元分布など大スケールの観測と非常に良く一致する。一方、小スケールにおいては矮小銀河の数や密度プロファイルについて Λ CDM モデルの予言と観測の不一致 (Missing satellite problem (Bullock, 2010), Cusp/Core problem (de Blok, 2010)) が指摘されている。これらの問題は、 Λ CDM モデルが小スケールの密度ゆらぎを大きく予言し過ぎている可能性を示している。

これらの問題は、 Λ CDM モデルに加えて超新星爆

発や活動銀河核など天体現象の効果を正しくモデル化することで説明される可能性がある一方、標準モデルとは異なる温かい暗黒物質 (WDM: Warm Dark Matter) によって説明される可能性がある。温かい暗黒物質とは、質量が軽く冷たい暗黒物質よりも長い時間無視できない速度分散を持つ暗黒物質である。このような暗黒物質の自由流は、その質量に対応するスケール以下の密度ゆらぎが減衰させる。この減衰は暗黒物質の質量が軽い程大きく、逆に重ければ Λ CDM モデルに近づく。したがって、小スケールにおける密度ゆらぎの大きさを観測することで暗黒物質の質量に制限を与えることが可能となる。

本研究では、モデル不定性の少ない制限を行うためにサブハロー質量関数に注目する。ここでサブハローとは、銀河団サイズのハローに含まれる銀河サイズのサブハローを指している。サブハロー質量関数を用いる理由として、まず銀河以下のスケールでは先述の天体現象の効果と温かい暗黒物質の効果の

縮退を解くのが難しい。一方大スケールでは温かい暗黒物質の効果が非常に小さく観測が難いため、銀河～銀河団スケールが最も制限に適したスケールである。さらにすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) による大規模な重力レンズ観測によって、正確なサブハロー質量関数の測定が期待されるためである。重力レンズは系の力学的な状態などの仮定無しに系の質量を直接的に測定することを可能にする (Okabe et al. 2013)。

このような背景から、本研究ではすばる HSC による観測から暗黒物質の質量を制限するために複数の暗黒物質モデルに対してサブハロー質量関数の理論予言を行った。

2 Methods

2.1 N 体シミュレーション

手法は N 体シミュレーションを用いている。 Λ Cold Dark Matter モデルと複数の Λ Warm Dark Matter モデルに対して 512^3 粒子の暗黒物質のみのシミュレーションを行った。 Λ WDM モデルの暗黒物質質量は、0.5, 0.3, 0.1keV である。Gadget-2 コード (Springel. 2005) を使用し、宇宙論パラメータは WMAP-7 (Komatsu et al. 2011) の値である。シミュレーションの出力結果からハローを同定する手法としては Friends-Of-Friends (FOF) アルゴリズム (Davis et al. 1985) を使用し、さらにサブハローを同定する手法として SUBFIND アルゴリズム (Springel et al. 2001) を用いている。

Box size	z_{ini}	Ω_m	Ω_Λ	h	n_s
100 Mpc/h	127	0.272	0.728	0.704	0.963
mass of particle	softening length				
$5.62 \times 10^8 M_\odot/h$	5.86 kpc/h				
σ_8	CDM	0.5keV	0.3keV	0.1keV	
	0.809	0.808095	0.805879	0.76965	

表 1: シミュレーションに使用した主なパラメータ

N 体シミュレーションにおいて、CDM と WDM の違いは初期条件だけである。これは構造形成が始

まる時期には WDM は十分冷え、速度分散の効果は無視できる程度の大きさになるためである。 Λ CDM モデルの初期条件は CAMB (Lewis et al. 2000) を用いて $z=127$ で生成し、 Λ WDM モデルの場合の初期条件は、WDM の場合の線形物質パワースペクトルのフィッティング公式 (Viel et al. 2005)

$$T_{\text{WDM}}(k) \equiv \left[\frac{P_{\text{WDM}}}{P_{\text{CDM}}} \right]^{1/2} = [1 + (\alpha k)^{2\nu}]^{-5/\nu} \quad (1)$$

$$\alpha = 0.049 \left(\frac{m_{\text{WDM}}}{\text{keV}} \right)^{-1.11} \left(\frac{\Omega_{\text{WDM}}}{0.25} \right)^{0.11} \left(\frac{h}{0.7} \right)^{1.22} [h^{-1} \text{Mpc}] \quad (2)$$

を用いて Λ CDM モデルの場合の線形物質パワースペクトルから求める。ここで $\nu = 1.12$ である。

2.2 重力レンズ

重力レンズとは、銀河や銀河団などの巨大な重力源によって観測者から見て重力源のさらに遠方にある天体の像が歪んで観測される現象である。このゆがみの大きさは重力源の系の暗黒物質も含めた質量の情報を持つため、系の質量を直接的に測定できる。しかし銀河の像の変形度合いを調べるには、もとの銀河の形を正確に知らなければならない。これは非常に困難であるため、スタックと呼ばれる方法が用いられる。多数の重力レンズを受けた銀河の像を重ね合わせる (スタックすること) ことで、銀河固有の形状の寄与を 0 に近づけ、重力レンズの信号だけを取り出すことができる。より多くの銀河を観測すれ

ば、より弱い信号、つまりより小さな天体の質量を推定することができるため、次に述べるすばる HSC による観測のような大規模な重力レンズサーベイが非常に重要となる。

2.3 Hyper Suprime-Cam

Hyper Suprime-Cam (HSC) は国立天文台すばる望遠鏡に新しく取り付けられた広視野カメラである。HSC は満月 9 個分に相当する直径 90 分角もの視野の広さを持ち、これにより多数の銀河や銀河団が観測できると期待されている (図 1)。

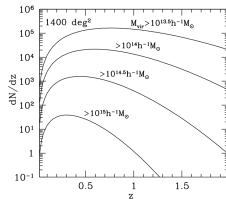


図 1: HSC wide survey で観測が期待される銀河団の個数。HSC white paper より引用。

例えば $z=0.4 \sim 0.5$ の質量 $M > 10^{14} h^{-1} M_{\odot}$ の銀河団は約 2000 観測される。個々の銀河団はさらに複数の銀河を含むので、重力レンズを用いる上で非常に強力な観測となる。

3 Results

前章で述べた N 体シミュレーションによって得られたサブハロー質量関数を図 2 に示す。

HSC による観測では、 $10^{12} h^{-1} M_{\odot}$ 程度のサブハローまで観測可能と評価されており、図 2 から 0.1keV モデルについては確実に制限が期待される。0.3keV 以上のモデルではシミュレーションの誤差が大きいため、現在解像度が同じで 8 倍領域の大きいシミュレーションを実行し解析中である。発表時にはこちらの結果を見せられるはずである。

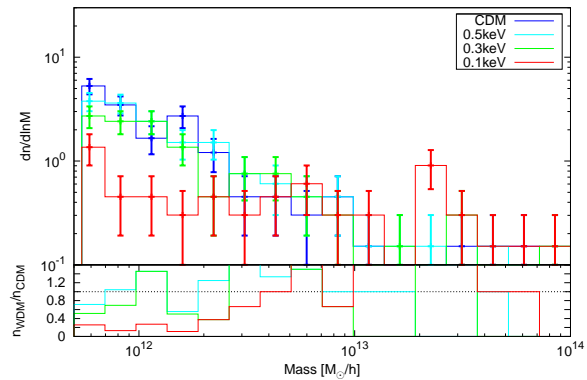


図 2: 上図: $z=0.4$ におけるサブハロー質量関数。青が CDM、水色が 0.5keV、緑が 0.3keV、赤が 0.1keV の WDM モデルをそれぞれ表す。縦軸は 20 個の銀河団サイズのハローについて平均している。誤差棒は縦軸の値を各質量ピンに含まれるサブハローの数の平方根で割ったものである。下図: Λ CDM モデルとの比率

4 Conclusion

すばる Hyper Suprime-Cam を用いた重力レンズ観測によって、サブハロー質量関数を用いて暗黒物質の質量に対する制限を得ることが可能である。現時点の結果では 0.1keV 以下は確実に制限、さらに 0.3 ~ 0.5keV 程度の質量へも制限を得られる可能性がある。この制限は既存の暗黒物質質量への制限に比べると、制限範囲という意味では弱いものである (例えば Ly- α forest による制限は 3σ レベルで 1.5keV (Boyarisky et al. 2009))。しかしこれらの手法には大きな理論的仮定が必要であり、重力レンズを用いた方法で新たな制限を得ることは非常に大きな意味がある。本研究は理論予測であり、最終的には HSC の観測データが利用できるようになり次第、観測データを用いた実際の制限を行う予定である。

Reference

J. S. Bullock 2010. arXiv 1009.4505
W.J.G. de Blok. 2010. adv.Astron. 789293

2013 年度 第 43 回 天文・天体物理若手夏の学校

N. Okabe, T. Futamase, M. Kajisawa, R. Kuroshima
2013. arXiv 1304.2399

V. Springel. 2005 MNRAS 364:1105 1134

E. Komatsu et al. 2011 APJS 192:18

M. Davis, G. Efstathiou, C. S. Frenk and S. D. M. White
1983 APJ 292:371 394

V. Springel, S. D. M. White, G. Tormen and G. Kauff-
mann 2001 MNRAS 328:276

A. Lewis, A. Challinor and A. Lasenby 2000 APJ
538:473-476

M. Viel, J. Lesgourgues, M. Haehnelt, S. Matarrese and
A. Riotto 2005 Phys.Rev. D71:063534

A. Boyarsky, J. Lesgourgues, O. Ruchayskiy and M. Viel
2009 JCAP 0905:012