

アンドロメダストリームを用いたダークマターハローの外縁構造の探査

桐原 崇亘 (筑波大学大学院 数理物質科学研究科)

Abstract

階層的な構造形成理論に基づいた宇宙論的な構造形成の数値シミュレーションによると、銀河や銀河団に付随するダークマターハローは特徴的な密度構造をもつと予言されている。その密度分布は、一般に中心からの距離のべき乗で表現される。分布の内側のべき構造については活発に議論がなされているが、外縁部については中心からの距離の -3 乗で密度が変化することでほぼ一致している。一方で、観測的にハロー外縁部の密度構造を探ることはその密度の低さから困難であり、その検証はほとんどなされていない。

近年、近傍のアンドロメダ銀河 (M31) のハロー領域に複数の矮小銀河衝突の痕跡が発見された。特に、M31 中心から 100 kpc を超えて帯状に分布する巨大な恒星ストリーム (アンドロメダストリーム) は、その空間構造や速度構造が観測されてきた。また、理論面からも N 体計算によって、衝突した矮小銀河の質量や軌道が調べられてきた。本研究では、M31 のダークマターハローの外縁部密度のべきを変更して銀河衝突の数値シミュレーションを行った。そして、アンドロメダストリームと東西に広がる貝殻状の星分布を再現するという条件から M31 のダークマターハローの外縁部密度構造に対して、理論予言の検証を行った。得られた結果は、標準理論で示唆されるよりも、遠方で急に密度が小さくなることを示している。

1 Introduction

現在の宇宙に存在する銀河や銀河団のような大きな構造は、より小さな構造が衝突・合体を繰り返してきた、という階層的な構造形成シナリオが広く受け入れられている。そのような考えに基づいた標準的なコールドダークマター (ACDM) モデルのもとで行われた、宇宙論的な構造形成のシミュレーションによると、ハロー状に分布する DM がユニバーサルな密度プロファイルを持つことが示唆され、Navarro-Frenk-White (NFW) プロファイルや Moore プロファイルといった質量密度プロファイルが提唱された (Navarro et al. 1996; Fukushige & Makino 1997; Moore et al. 1998)。これらのプロファイルをはじめとして、ハローの内側の密度プロファイルについては理論と観測の両面から議論が絶えないが、外縁部については中心からの -3 乗に比例して密度が減少するということがほとんど一致している。つまり、銀河の外縁部における DM ハローの質量密度分布を調べることは CDM モデルの予言を検証するという重要な意味をもつ。しかしながら、観測的に銀河の外縁部の質量密度を観測することは、その密度の低さから現在の観測機器をもってしても困難であり、検証がほとんどできてい

いのが現状である。

近年の高精度な観測により、近傍の巨大銀河であるアンドロメダ銀河 (M31) のハロー領域には複数の矮小銀河衝突の痕跡が発見された (Ibata et al. 2001; McConnachie et al. 2009)。特に、アンドロメダストリーム (GSS) と呼ばれる M31 中心から帯状に伸びる星の構造は、100 kpc を超えるような巨大な構造であり、その空間構造、速度構造が観測されている。また、GSS とともに M31 の東西に広がる貝殻状の星の構造は、過去に起こった矮小銀河の衝突の痕跡であることが N 体計算による研究で調べられてきた (Fardal et al. 2007; Mori & Rich 2008)。本研究では、矮小銀河の衝突の痕跡を再現するようなシミュレーションを行うことで、実際の銀河に付随する DM ハローの外縁部密度プロファイルのべき構造について調べた。

2 Methods

本研究では、M31 を原点に固定したポテンシャルとして取り扱う。ポテンシャルの成分としては、Fardal et al. (2007) に基づいて、バルジ、円盤、DM ハロー成分を設定した。Mori & Rich (2008) は、バルジ、円

盤, DM ハロー成分をすべて N 体粒子で表現し, 自己重力系として扱い, その中での矮小銀河の衝突をシミュレーションした。その結果, $5 \times 10^9 M_\odot$ よりも質量が小さい衛星銀河の衝突では, M31 に与える重力ポテンシャルの影響はほとんど無視できることが示された。つまり, この結果は, M31 をポテンシャルとして取り扱っても問題がないことを示している。本研究では, バルジモデルとして Hernquist モデル (Hernquist 1990), 円盤モデルとして Exponential モデルを採用した。ただし, バルジの全質量は $M_b = 3.24 \times 10^{10} M_\odot$, スケール長は $r_b = 0.61$ kpc を, 円盤の中心表面密度は $\Sigma_0 = 2.0 \times 10^8 M_\odot \text{ kpc}^{-2}$, スケール長は $R_d = 5.40$ kpc, スケール高は $z_d = 0.60$ kpc を採用する (Geehan et al. 2006; Fardal et al. 2007)。

DM ハローのモデルとしては, 宇宙の標準的な構造形成論において, 広く受け入れられている, NFW モデルを拡張したものをを用いた。NFW プロファイルは, 宇宙論的な N 体計算の結果から得られた DM ハローをフィットした密度プロファイルで, 次のように表される。

$$\rho_{\text{NFW}}(r) = \rho_s (r/r_s)^{-1} (1 + r/r_s)^{-2} \quad (1)$$

ただし, r_s と ρ_s はそれぞれハローのスケール長とスケール密度である。Fardal et al. (2007) では, $r_s = 7.63$ kpc, $\rho_s = 6.17 \times 10^7 M_\odot \text{ kpc}^{-3}$ という値を採用した。NFW モデルでは, DM ハローの外縁部の密度プロファイルは中心からの距離 r に対して $\rho_{\text{DMHalo}}(r) \propto r^{-3}$ である。

CDM ハローの外側の密度プロファイルが標準理論で予言されているプロファイルとなっているのか, M31 で検証するために, 式 (1) を拡張する。具体的な表式として, 外側のべきのパラメータ $\alpha (< -2)$ として,

$$\rho_{\text{DMH}}(r) = \rho_{s, \alpha} (r/r_{s, \alpha})^{-1} (1 + r/r_{s, \alpha})^{\alpha+1} \quad (2)$$

ただし, $r_{s, \alpha}$ と $\rho_{s, \alpha}$ はそれぞれ各パラメータ α におけるスケール長とスケール密度である。この式で表される DM ハローの外縁部の密度プロファイルは中心からの距離 r に対して $\rho_{\text{DMHalo}}(r) \propto r^\alpha$ となる。半径 r 以内の質量は, 密度の式 (2) を空間積分するこ

とで次のようになる。

$$M(r) = \begin{cases} 4\pi\rho_{s, \alpha} r_{s, \alpha}^3 \left(\ln(1 + r/r_{s, \alpha}) - \frac{r/r_{s, \alpha}}{1+r/r_{s, \alpha}} \right) & \text{if } \alpha = -3, \\ \frac{4\pi\rho_{s, \alpha} r_{s, \alpha}^3}{\alpha+3} \left(\frac{1}{\alpha+2} - \frac{1/(\alpha+2) - r/r_{s, \alpha}}{(1+r/r_{s, \alpha})^{-\alpha-2}} \right) & \text{if } \alpha \neq -3. \end{cases} \quad (3)$$

Fardal et al. (2007) で採用されているハローモデルは $\alpha = -3$ に対応する。各モデルで, 半径 $r_{s, -3}$ 以内の質量を $M(r_{s, -3}) = 6.66 \times 10^{10} M_\odot$ で固定した。これは, 観測されている M31 の円盤の回転速度を再現するためである。また, $R = 125$ kpc 以内の質量 $M(R) = 6.59 \times 10^{11} M_\odot$ も全モデルで固定する。この距離は, GSS が M31 中心から伸びている距離とほぼ対応する。パラメータ α を 2.3 から 5.9 まで 0.1 ずつ変更した M31 の重力ポテンシャルモデルを作成した。

銀河の回転曲線は, 銀河に付随する DM ハローの外側の構造を決める有力な手掛かりとして知られている。しかしながら, 観測可能な回転速度は DM ハローのサイズに比べてずっと内側の情報に過ぎない。作成した M31 ポテンシャルモデルを用いて描いた, M31 の回転曲線を図 1 に示した。本モデルで用いた, $\alpha = -2.5$ や $\alpha = -5.5$ のように極端に α を変更した場合でも, 観測される回転速度と誤差の範囲で一致する。

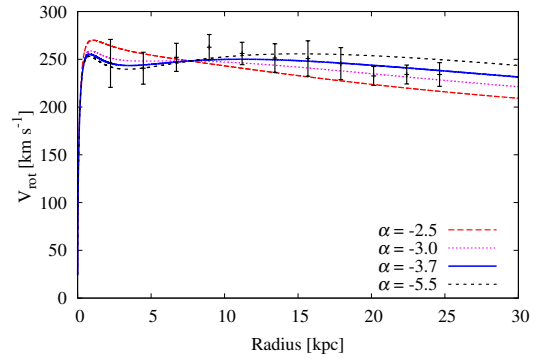


図 1: M31 ポテンシャルモデルの回転曲線。各線はそれぞれ $\alpha = -2.5, -3.0, -3.7, -5.5$ の場合の回転速度である。観測データを黒棒で描いている (Kent 1989; Braun 1991)。

N 体系として取り扱う, M31 に衝突する矮小銀河の

モデルとして Plummer モデルを仮定した。Plummer モデルは、力学平衡モデルであり、球状星団の観測とよく合うモデルとして知られている。矮小銀河モデルの総質量とスケール長は、Fardal et al. (2007) と揃えており、総質量は $2.2 \times 10^9 M_\odot$ 、スケール長は 1.03 kpc と設定した。矮小銀河の質量分布を、245,760 個の粒子で表現した。 N 体計算は、並列ツリーコードを用いて行なった。計算機は、T2K-Tsukuba を用いた。

3 Results

まず、矮小銀河の軌道運動について説明する。採用した矮小銀河の軌道モデルでは、初めの近点通過が 0.7Gyr ほど前に起こり、ほとんど head-on で M31 に衝突する。衝突後、矮小銀河を構成する成分は壊され、GSS が M31 の南東方向に伸びていく。それと同時に、一部の成分は M31 に再突入し、M31 の北東方向に貝殻状の構造を作る。この構造をイーストシェルと呼ぶ。また、北東方向に移動した成分の一部は、再び M31 に再突入し、M31 の西側にも貝殻状の構造を作る。この構造をウェストシェルと呼ぶ。この 2 つのシェルは時間が進むにつれて広がっていくので、観測されるシェルのサイズはシミュレーションにおける時間の指標になりうる。

図 2 に示したのは、それぞれの α におけるベストフィット時間での壊された矮小銀河の表面密度分布である。パラメータ α が小さくなるにつれて、GSS の表面密度は下がっていく。この主な要因としては、GSS が伸びる距離以内の DM ハロー質量が変わるところにある。ハロー質量が大きくなると、系の力学進化時間が短くなる。観測される構造の成り立ちと対応付けると、 α が小さいモデルでは系の進化が早く、GSS を構成する粒子がより早くシェルに移動していく。

観測とシミュレーション結果との間で定量的な比較を行うため、東西のシェルの位置、GSS と東西のシェルとの間の表面密度比に対して、そのずれを χ^2_ν 解析を用いて評価した。図 3 は各時間での χ^2_ν 解析の結果を表している。図 3a は、シェルの位置と形状についての解析の結果で、 $\alpha \lesssim -2.4$ では、シミュレーション

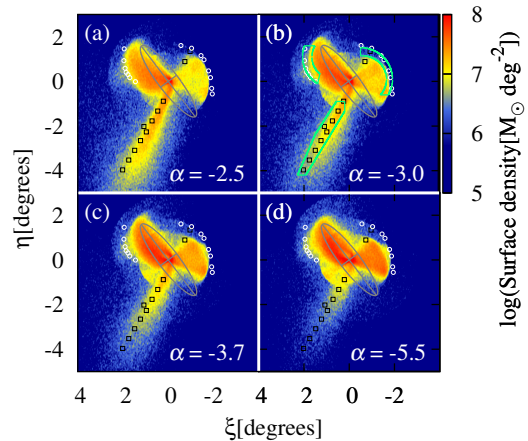


図 2: 壊された矮小銀河の表面密度分布。各パネルは (a) $\alpha = -2.5$, (b) $\alpha = -3.0$, (c) $\alpha = -3.7$, (d) $\alpha = -5.5$ の場合に対応する。 ξ と η はそれぞれ、M31 を中心として天球面上での東と北を指し、 1° は、13.6 kpc に相当する。各パネルの灰色の楕円は M31 の円盤の形状を表し、黒四角と白丸はそれぞれ GSS の観測フィールド (Font et al. 2006) とシェルのエッジ (Fardal et al. 2007) に対応する。パネル (b) 内の緑線で囲まれた領域は表面密度比の解析に用いた領域である。

開始から 0.6–0.7Gyr の間であれば 1σ レベルに入ることが見て取れる。また、面密度比を評価した図 3b、図 3c では、 $-4.3 < \alpha < -3.0$ で観測される面密度比を再現できることが見て取れる。なお、GSS の視線速度構造も観測と比較しているが、いずれのパラメータにおいても、観測データの誤差の範囲内で一致する。これらの結果を組み合わせると、観測される構造をうまく再現するようなべき指数は $-4.3 < \alpha < -3.0$ で、ベストフィットは $\alpha = -3.7$ である。これは、CDM により予言されている $\alpha = -3.0$ よりも急勾配である。

4 Summary & Discussion

矮小銀河と M31 の衝突シミュレーションを行うことで、M31 の DM ハローの密度プロファイル調べた。その結果、GSS と東西の貝殻状構造を再現できるような、M31 の DM ハローの外縁部密度プロファイルのべき $\alpha(\rho(r) \propto r^\alpha)$ を、 $-4.3 < \alpha < -3.0$ と制限

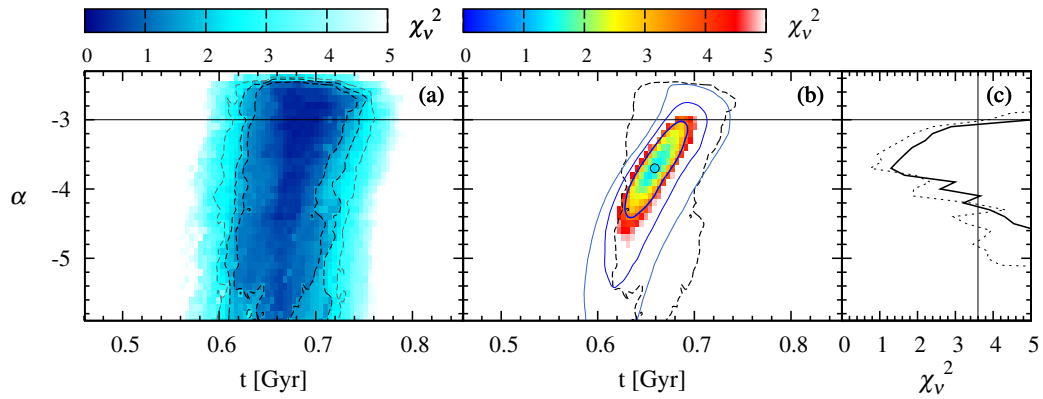


図 3: シミュレーション結果と観測データとを比較した χ^2 map。(a) 東西のシェルの形状についての結果, (b)GSS と東西のシェルの面密度比についての結果, (c) 面密度比の最小 χ^2 値。(a), (b) 内のコントアはそれぞれ $\Delta\chi^2$ で 1 σ (thick), 2 σ (middle), 3 σ (thin) confidence level を示している。(b) 内の点線は, (a) の 1 σ level を示している。(b) 内の黒丸はこのサーベイにおけるベストフィットを指し示している。(c) の実線 (点線) は高 (低:粒子数 5 分の 1) 解像度のサーベイの結果であり, 縦の実線は 1 σ level を表している。

することができた。この結果は, M31 の DM ハローの外縁部での質量密度分布が, 標準理論によって予言される ($\alpha = -3$) よりもスティープになっており, 早く密度が小さくなることを示唆している。

この理論予言と本検証とのずれの原因として, 本研究のモデルに取り込まれていない情報が影響した可能性がある。例えば, DM ハローの非等方性, 近傍の銀河の潮汐効果, 衝突した矮小銀河の形態といった情報である。一方で, CDM 理論に基づいた構造形成では Mpc スケール以上では観測をよく再現するが, Mpc 以下の小スケールにおいてはいくつか未解決問題が存在する。例えば, シミュレーションと比較して観測される衛星銀河が圧倒的に足りないという missing satellite problem (Navarro et al. 1996; Moore et al. 1999) や, DM ハローの中心部のべき構造に関する Core-Cusp problem (Moore 1994; Burkert 1995; Ogiya et al. 2014) といった問題がある。考慮すべき問題はまだまだ残されているが, 本研究で得られた銀河に付随する DM ハローの外縁部の密度構造についても, 解決すべき問題の 1 つとなるかもしれない。

Reference

Braun, R. 1991, ApJ, 372, 54

Burkert, A. 1995, ApJ, 447, L25

Fardal, M. A., Guhathakurta, P., Babul, A., & McConnachie, A. W. 2007, MNRAS, 380, 15

Font, A. S., Johnston, K. V., Guhathakurta, P., Majewski, S. R., & Rich, R. M. 2006, AJ, 131, 1436

Fukushige, T., & Makino, J. 1997, ApJ, 477, L9

Geehan, J. J., Fardal, M. A., Babul, A., & Guhathakurta, P. 2006, MNRAS, 366, 996

Hernquist, L. 1990, ApJ, 356, 359

Ibata, R., Irwin, M., Lewis, G., Ferguson, A. M. N., & Tanvir, N. 2001, Nature, 412, 49

Kent, S. M. 1989, PASP, 101, 489

McConnachie, A. W., Irwin, M. J., Ibata, R. A., et al. 2009, Nature, 461, 66

Moore, B. 1994, Nature, 370, 629

Moore, B., Ghigna, S., Governato, F., et al. 1999, ApJ, 524, L19

Moore, B., Governato, F., Quinn, T., Stadel, J., & Lake, G. 1998, ApJ, 499, L5

Mori, M., & Rich, R. M. 2008, ApJ, 674, L77

Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, ApJ, 462, 563

Ogiya, G., Mori, M., Ishiyama, T., & Burkert, A. 2014, MNRAS, 440, L71