

アンドロメダ銀河のダークハロー構造

林 航平 (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

アンドロメダ銀河は、銀河系に最も近い大質量円盤銀河である。この質量スケールにおけるダークハロー構造を解明することは、銀河の形成と進化におけるダークマターの役割を知る上で重要になる。アンドロメダ銀河ダークハロー構造に関する研究では、ハロー領域に分布している球状星団や矮小銀河の視線方向の空間分布と速度情報に基づいて一般的に解析される。ところが、これまでの先行研究ではダークハローの総質量に焦点を当てており、さらに採用するモデルとして恒星系やダークハローの密度分布を最も簡単な球対称と仮定したものしか無かった。一方で、Cold Dark Matter (CDM) 理論に基づく階層的構造形成シミュレーションの結果からは、銀河系スケールのダークハローの形状は非球対称であり、その形状はダークマターの合体・集積の歴史を反映していることが示唆されている。そこで我々は、Hayashi & Chiba (2012) で構築した軸対称モデルを採用し、それをアンドロメダ銀河における最新の球状星団と矮小銀河の運動データに適用して、ダークハローの形状に対する議論を行った。その結果、アンドロメダ銀河ダークハローは、円盤に対して垂直方向に長軸を持つプロレイトな形状をしている確率が高いことがわかった。さらに矮小銀河がその長軸方向に非等方に分布していることから、その方向にダークマターがフィラメント状に存在し、それに沿って物質降着が行われた間接的証拠を得ることができた。この結果は銀河系スケールにおける CDM 理論の予測と一致しており、アンドロメダ銀河ハローの力学進化に重要な知見を与える事ができた。

1 INTRODUCTION

銀河系やその最も近傍にあるアンドロメダ銀河は CDM 理論における銀河の形成と進化を調べるユニークな実験場となっている。宇宙の構造形成における現代のパラダイムである CDM モデルは、ダークマターの階層的な集積過程の結果としてダークハローの密度分布はユニバーサルであると予測している。よって、銀河系やアンドロメダ銀河スケールのダークマターが実際どのように分布しているかを調べることは、CDM モデルの枠組みの中における銀河の形成と進化に対してダークマターがどんな役割をするのかという重要な知見を得るのに重要となってくる。特にその形状はダークマターの集積・合体の歴史を反映しており、それは伴銀河の空間分布にも影響を与えることが分かっている。アンドロメダ銀河のダークハローに関する研究では、ハロー領域に分布する球状星団や矮小銀河の視線方向の空間分布と速度情報に基づいて解析する手法が一般的である。ところが、先行研究ではダークハローの総質量に焦点を当てているものが多く、さらに、採用するモデルとし

て、恒星系やハローの密度分布が最も簡単な球対称の仮定の上で解析が行われてきた (例えば、Evans & Wilkinson 2000 や Watkins et al. 2010 など)。そこで我々は、アンドロメダ銀河ダークハロー質量分布により現実的な制限を与えるため、Hayashi & Chiba (2012) で構築した軸対称モデルを採用し、それをアンドロメダ銀河における最新の球状星団と矮小銀河の運動データに適用して、ダークハローの形状に対する議論を行った。

2 THE DATA AND THE MODEL

2.1 The Observational Data Sets

本研究で用いる GCs と dSphs の観測データは、それぞれ Revised Bologna Catalogue of M31 GCs and candidates (RBC v.4¹) と、Tollerud et al. (2012) (15 target objects: And I, III, V, VII, IX, X, XI,

¹available from <http://www.bo.astro.it/M31>

XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVIII, XXI, XXII) である。これらの空間分布を図 1 に示す。この図の黒楕円は Racine (1991) が定義したアンドロメダ銀河の円盤とハローの境界であり長軸に約 30 kpc、短軸に 6 kpc の長さを持つ。また、アンドロメダ銀河の基本情報として、中心座標が (RA, DEC) = (10.7°, 41.2°)、ピッチ角と傾斜角が $PA = 38^\circ$ and $i = 12.5^\circ$ 、太陽からの距離が 785 kpc、Galactic rest frame での視線速度は -123 km s^{-1} である。また、これらの運動データを Galactocentric velocity に直すために、太陽 (銀河中心から 8 kpc) での circular velocity を $V_{\text{lsr}} = 220 \text{ km s}^{-1}$ 、太陽の固有運動を $(U, V, W) = (11.4, 12.24, 7.25) \text{ km s}^{-1}$ と仮定して、それを求めた。

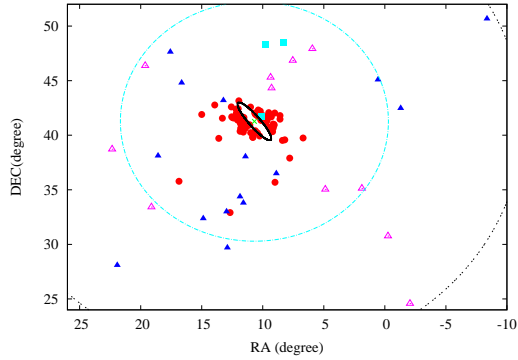


図 1: アンドロメダ銀河ハロー領域にある天体の空間分布。シアン点破線と黒の2点線はアンドロメダ銀河中心から投影半径 150 kpc と 300 kpc を示す。赤点と青三角はそれぞれ GCs と dSphs を表す。また紫三角とシアン四角は、今回扱わない dSph と矮小楕円銀河 (dE) を表している。

2.2 Axisymmetric Jeans Equations

アンドロメダ銀河のハロー領域にある天体は、ダークハローの重力ポテンシャル中で力学平衡状態であると仮定する。また星の速度分布は $\overline{v_R^2} = \overline{v_z^2} \equiv \sigma^2$ であるとする、その分布関数は $f(E, L_z)$ に対応する。よって、軸対称ジーンズ方程式は以下の2式で

書き表すことができる (Binney & Tremaine 2008)

$$\overline{v_z^2} = \overline{v_R^2} = \sigma^2 = \frac{1}{\nu(R, z)} \int_z^\infty \nu \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz, \quad (1)$$

$$\overline{v_\phi^2} = \sigma^2 + R \frac{\partial \Phi}{\partial R} + \frac{R}{\nu} \frac{\partial (\nu \sigma^2)}{\partial R}. \quad (2)$$

ここで、 ν は恒星系の3次元密度分布であり、 Φ はダークハローの重力ポテンシャルを示す。このジーンズ方程式の解をアンドロメダ銀河の視線速度データと比較するために、Tempel & Tenjes (2006) 方法を用いて σ^2 と $\overline{v_\phi^2}$ から視線速度分散を求める。

2.3 Density Profile of the Halo Tracers and dark halo

GCs と dSphs の表面数密度分布を $\Sigma_*(m'_*) \propto m'_*{}^\gamma$ と仮定する。ただし、 $m'_*{}^2 = x^2 + y^2/q'^2$ であり、 q' は投影面上での軸比を示す。 χ^2 検定を用いて表面数密度分布をフィッティングしたところ、 $\gamma = -3.00 \pm 0.05$ という結果を得た。この3次元数密度分布は単に表面数密度分布を deprojection すれば良いので、 $\nu(m_*) \propto m_*^{-\gamma-1}$ となり、 $m_*^2 = R^2 + z^2/q^2$ で q は intrinsic な軸比を示す。一方で、 q' を得るために、シミュレーションで用いられている “reduced” inertia tensor 法 (Allgood et al. 2006 など) を適用した。その結果、 $q' \simeq 1.18 \pm 0.20$ という値を得た。ただしこの誤差はモンテカルロから得られたランダムエラーである。

次にダークハローの密度分布は以下を仮定する

$$\rho(R, z) = \rho_0 \left(\frac{m}{b_{\text{halo}}} \right)^\alpha \left[1 + \left(\frac{m}{b_{\text{halo}}} \right)^2 \right]^\delta, \quad (3)$$

$$m^2 = R^2 + z^2/Q^2. \quad (4)$$

ここで、 ρ_0 はスケール密度、 b_{halo} はスケール長さ、 Q はダークハローの軸比であることを示す。本研究ではダークハローの形状に注目するため、 (α, δ) を $(\alpha, \delta) = (-2, 0)$ 、 $(\alpha, \delta) = (-1, -1)$ 、そして $(\alpha, \delta) = (-2, -0.5)$ の3つを仮定し、解析を行う。1つ目は isothermal density profile (hereafter SIS)、2つ目は Navarro-Frenk-White profiles (hereafter NFW: Navarro et al. 1996,) に対応している。最後の3つ目は、SIS と NFW の組み合わせ (hereafter HYB: hybrid profile) である。これは、アンドロメダ銀河ス

ケールのダークハロー中心には大量のバリオンが存在すると考えられ、そのバリオン重力によって中心部の密度プロファイルがより深く急勾配になると考えたからである。またフリーパラメータ ρ_0 について、今回は 200 kpc 内の球対称極限 ($\rho(r)$ with $m \rightarrow r$ for $Q \rightarrow 1$) での質量、

$$M_{(\leq 200 \text{ kpc})} = 4\pi \int_0^{200} \rho(r)r^2 dr. \quad (5)$$

を用いることとする。本研究では、3つのフリーパラメータ ($Q, b_{\text{halo}}, M_{(\leq 200 \text{ kpc})}$) に対してフィッティングを行う。

2.4 Maximum Likelihood Analysis

上記のパラメータを観測データから得るために、今回は最尤法を用いて解析を行う。ある位置で観測される星の速度分散は、速度分散からの intrinsic dispersion と観測の不定性からの random error の和になる。得られる視線速度の分布関数がガウシアンであると仮定するとその確率分布は、

$$P(\mathbf{v}_{\text{los}}|u, \sigma_t) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(v_{\text{los},i} - u)^2}{\sigma_i^2}\right]. \quad (6)$$

と表される。ここで、 u は系の systemic velocity、 N が object の数、 σ_i^2 は i 個目の星の全体の分散で $\sigma_i^2 = \sigma_{t,i}^2 + \sigma_{m,i}^2$ で表される。 σ_t はジーンズ方程式から得られる intrinsic dispersion で、 $\sigma_{m,i}^2$ は観測不定性から来る分散である。ベイズの定理から $P(\mathbf{v}_{\text{los}}|u, \sigma_t)$ は $P(\mathbf{v}_{\text{los}}|u, \sigma_t) \propto P(u, \sigma_t|\mathbf{v}_{\text{los}})$ と表されるため、パラメータの関数と考えた時、それはパラメータの尤度関数とみなすことができる。

3 RESULTS

最尤法から得られたフィッティング結果を表 1 に示す。また、ダークハロー軸比 Q に対する likelihood function を図 2 に示す。これらの結果から明らかのように、アンドロメダ銀河ダークハローの best-fit shapes は、ダークハローの密度分布に依らず $Q > 1$ の prolate な形状をしている事がわかった。

この結果がどの程度 rigid なものなのかを調べるため、ハロートレーサーの数密度 ν の不定性 ($\Delta\gamma = 0.05, \Delta q' = 0.20$) を考慮して、再度フィッティングを行った。すると、 $\Delta\gamma$ のダークハロー軸比に対する影響は無視出来るほど小さく ($\Delta Q = 0.05$)、その一方で、 $\Delta q'$ の影響は大きいことがわかった ($\Delta Q = 0.45$)。しかしながら、これらの誤差を考慮したとしてもダークハロー軸比の値は $Q > 1$ (NFW: $Q > 1.17$, SIS: $Q > 1.58$, HYB: $Q > 1.42$) となるため、アンドロメダ銀河ダークハローが prolate であるという結果は変わらない。

またデータサンプリングの違いによって、どの程度ダークハロー軸比に影響を及ぼすのかも調べた。そのサンプリングは、アンドロメダ銀河中心から 150 kpc 以内のみ、GC のみ、dSph のみのサンプルの 3 種類である。これらのサンプルで再度フィッティングをしても、ダークハロー軸比の値はやはり $Q > 1$ となり、アンドロメダ銀河ダークハローが prolate であるという結果はより rigid である事を確かめた。

最後に、アンドロメダ銀河ダークハローの質量について先行研究との比較を行った。Watkins et al. (2010) では、200 kpc 以内の質量を $1.1 \sim 1.5 \times 10^{12} M_{\odot}$ と見積もっており、最近の研究、Veljanoski et al. (2013) が示すには、200 kpc 以内の質量を $(1.2 - 1.5) \pm 0.2 \times 10^{12} M_{\odot}$ であるとしている。一方、表 1 の結果を見ると、200 kpc 以内の質量は先行研究のそれよりも 2~4 倍大きいことがわかった。

表 1: Maximum likelihood results for the M31 halo.

| Halo Model | Q | b_{halo} (kpc) | $M_{\leq 200\text{kpc}}$ ($10^{12} M_{\odot}$) |
|------------|------------------------|-------------------------|--|
| SIS | $2.54^{+1.06}_{-1.14}$ | $27.5^{+22.0}_{-10.2}$ | $1.82^{+0.88}_{-0.92}$ |
| NFW | $1.62^{+0.44}_{-0.25}$ | $46.2^{+13.8}_{-16.2}$ | $4.43^{+0.47}_{-2.42}$ |
| HYB | $2.43^{+0.57}_{-0.73}$ | > 98.0 | $0.88^{+0.22}_{-0.30}$ |

4 DISCUSSION AND CONCLUDING REMARKS

我々は、軸対称分布の仮定のもとではアンドロメダ銀河ダークハローは prolate な形状をしていることを明らかにした。またこれは、ダークハローの長

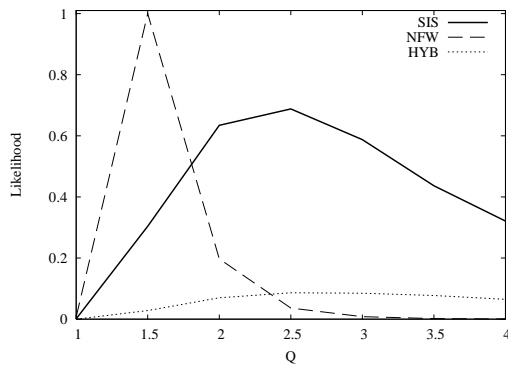


図 2: Likelihood distributions of the axial ratio, Q , of the dark halo normalized by the maximum likelihood for the NFW model. SIS, NFW and HYB models are indicated by solid line, dashed line, and dotted line, respectively.

軸が円盤に対して垂直方向にあることを示しており、さらに、Ibata et al. (2013) で見つかった矮小銀河の非等方分布にほぼ沿う事を示している。これらの結果は、サテライト銀河がそのホストハローの長軸にそって非等方かつ優先的に分布しており、さらにホストハローの長軸はコズミック・ウェブのフィラメントに沿う方向にあるという CDM シミュレーション (e.g., Libeskind et al. 2005) の予測と一致する結果となった。

非球対称ダークハローはその中にある銀河の形成・進化、具体的にはサブハローや矮小銀河の軌道や潮汐効果に大きな影響を与える。それは即ち、銀河の厚い円盤や恒星ハローの形成に影響を与えることになる。しかし、これまでの先行研究のほとんどはダークハローを球対称として銀河進化を記述している。例えば Carlberg et al. (2011) では、アンドロメダ銀河中心から北西 120 kpc にある恒星ストリームからダークマターサブハローの存在量に制限を与えているが、彼らはホストダークハローを球対称と仮定して解析を行なっている。しかし、アンドロメダ銀河ダークハローが prolate であると、そのサブハローの力学的影響 (軌道や速度楕円体) が異なるためサブハロー存在量の見積もりも大きく異なると考えられる。したがって、我々の結果はハロートレーサーの力学や潮汐ストリームの軌道進化に対する理解に重要な

知見を与えると考えられる。

本研究では、Hayashi & Chiba (2012) で構築した軸対称質量分布モデルを用いて、アンドロメダ銀河ダークハローの大局的な形状と密度分布に対して新たな制限を与え、またその結果を CDM 理論と比較した。我々のモデルをアンドロメダ銀河ハローの GCs と dSphs の最新の運動データに適用して解析を行った結果、アンドロメダ銀河ダークハローは、円盤に対して垂直方向に長軸を持つプロレイトな形状をしている確率が高いことがわかった。さらに矮小銀河がその長軸方向に非等方に分布していることから、その方向にダークマターがフィラメント状に存在し、それに沿って物質降着が行われた間接的証拠を得ることができた。この結果は銀河系スケールにおける CDM 理論の予測と一致しており、アンドロメダ銀河ハローの力学進化に重要な知見を与える事ができた。今後、すばる望遠鏡に取り付けられる Hyper Suprime-Cam や Prime Focus Spectrograph を用いた、アンドロメダ銀河ハローサーベイが計画されている。それによって、新たな GCs や dSphs が発見されより正確な運動データを得ることができるので、アンドロメダ銀河ダークハローに対してよりタイトな制限を与えることができるだろう。

Reference

- [1] Allgood, B. et al. 2006, MNRAS, 367, 1781
- [2] Binney, J., & Tremaine, S. 2008, Galactic Dynamics (2nd ed.; Princeton, NJ: Princeton Univ. Press)
- [3] Carlberg, R. G. et al. 2011, ApJ, 731, 124
- [4] Evans, N. W., & Wilkinson, M. I. 2000, MNRAS, 316, 929
- [5] Hayashi, K., & Chiba, M. 2012, ApJ, 755, 145
- [6] Ibata, R. A., Lewis, G. F., Conn, A. R., et al. 2013, Nature, 493, 62
- [7] Libeskind N. I. et al. 2005, MNRAS, 363, 146
- [8] Navarro J. F., Frenk C. S., & White S. D. M. 1996, ApJ, 462, 563
- [9] Tempel, E., & Tenjes, P. 2006, MNRAS, 371, 1269
- [10] Veljanoski, J. et al. 2013, arXiv: 1303.7368
- [11] Watkins, L. L., Evans, N. W., An, J. H., 2010, MNRAS, 406, 264