

銀河衝突で探るアンドロメダ銀河のダークマターハローの外縁構造

楠 尚久 (筑波大学大学院 数理物質科学研究科)

Abstract

コールドダークマター (CDM) 宇宙における銀河形成シミュレーションの結果によると、ダークマターハロー (DMH) の外縁部密度は中心からの距離の -3 乗に比例して減少すると予言される。一方でアンドロメダ銀河 (M31) にはステラーストリームや、星の作る殻状の構造等が発見され、銀河衝突の証拠とみられている。この銀河衝突の過程を詳細に調べることで、DMH の構造を知る手がかりを得る可能性がある。Kirihara et al. (2014) では、M31 の DMH の密度分布の冪を変更し、 N 体シミュレーションを用いて M31 と矮小銀河の衝突の数値実験を行った。その結果を観測で見られるステラーストリームやシェル構造と比較することで、CDM モデルの予言を検証した。また、DMH の質量を変化させるシミュレーションも行われた。その結果、最も観測をよく再現する外縁部の密度プロファイルは、CDM の予言である -3 乗の冪よりも、より距離の依存性が急な -3.7 乗が好まれた。また、観測された構造の再現のためには質量の大小ではなく密度分布が本質的に重要であるという結果が得られた。

本講演では Kirihara et al. (2014) のレビューを行うとともに修士論文の研究計画について報告する。修士論文の研究では、Kirihara et al. (2014) の数値シミュレーションの検証作業に加えて、Miki et al. (2014) での手法を取り入れることでより現実に近いシミュレーションを行う。

1 Introduction

コールドダークマター (CDM) モデルに基づいた構造形成の N 体シミュレーションによって、ダークマターハロー (DMH) の質量密度の分布が調べられてきた。得られた密度プロファイルは、NFW モデル (Navarro et al. 1996) に代表されるような DMH のスケールによらない共通の式であった。ハローの中心付近と外縁部で距離の依存性が異なる形で表現される。特に外縁部では $\rho(r) \propto r^{-3}$ として、距離の -3 乗に比例する。観測的にも星の分布が求められるため、銀河に付随するハローの中心付近の密度分布についてはこれまで多くの議論がなされてきた。一方で、ハローの外縁領域では星の密度が非常に小さく観測が困難なため、理論から予言される DMH の分布に対する観測的な検証は困難を極めていた。

近年の観測において、アンドロメダ銀河 (M31) の外部領域には "Giant Southern Stream (GSS)" と呼ばれる 120kpc 以上におよぶ星の分布や、東西に 30kpc ほど広がる二つの貝殻状の星の分布が発見されている。このような構造は M31 に矮小銀河を衝突させる N 体シミュレーションによって再現されている (Fardal

et al. 2007 ; Mori & Rich 2008)。また、これらの構造は質量分布の検証が困難であった DMH の外縁部にまで到達しているため、DMH の外縁部に対する密度分布の理論的な予言を検証するための良い対象であると考えられる。しかしながらほぼ全ての先行研究において、DMH の質量密度プロファイルについては NFW モデルが用いられていた。

Kirihara et al. (2014) では、理論から予言される DMH の外縁部の密度プロファイルの冪について検証を行った。初めに DMH の外縁部での密度分布プロファイルの冪を系統的に変化させ、M31 と矮小銀河の衝突を N 体シミュレーションで行う。これによって、M31 の外部領域に存在する星の構造を最も良く再現するようなプロファイルの冪を調べた。

2 Numerical models and Methods

この章では、シミュレーションにおける M31 と矮小銀河のモデル化について述べる。また、その初期条件と計算手法についても説明する。

M31 はバルジ、円盤、DMH を持つ固定された重力ポテンシャルとして考える (Fardal et al. 2007)。また衝突する矮小銀河は球対称な粒子分布で表現している。各成分について以下にそのモデルの詳細を紹介する。バルジは Hernquist プロファイルを用いた球対称分布であり、円盤は Exponential モデルで表現される。また矮小銀河は Plummer 球として、自己重力系かつ平衡な 250,000 個の球対称な粒子分布で表現した。Kirihara et al. (2014) では矮小銀河の初期位置及び初期速度は Fardal et al. (2007) で調査された値を用いており、衝突軌道は全てのシミュレーションで固定とした。

DMH は以下に示す式 (1) を用いて表現する。この式は外縁部の冪についてパラメータとして α を導入し、NFW プロファイルを拡張したものである。 r は球対称を仮定した DMH の中心からの距離を表す。 ρ_s はスケール密度であり、DMH の質量を決定するパラメータである。また r_s はスケール半径であり、DMH のプロファイルの振る舞いが中心付近と外縁部の領域で異なる境界の距離を表している。各プロファイルでの物理的なパラメータは観測で得られる M31 の回転曲線等を再現するように選ばれた (Geehan et al. 2006 ; Fardal et al. 2007)。

$$\rho_{DMH} = \rho_s (r/r_s)^{-1} (1 + r/r_s)^{\alpha+1} \quad (1)$$

Kirihara et al. (2014) では、二つのモデルで銀河の衝突をシミュレーションした。一つ目は DMH の外縁部の密度プロファイルの冪を検証するシミュレーションとして、ハローの質量を固定しながら冪 α を系統的に変化させるシミュレーションであった (モデル A)。その際の質量の固定方法としては、矮小銀河の衝突軌道を変えないために r_s と GSS の到達距離以内での質量を固定する方法が採用された。二つ目は、冪 α を NFW プロファイルと一致する時の値である $\alpha = -3.0$ に固定し、DMH の質量を変えるため ρ_s を変化させるシミュレーションであった (モデル B)。

銀河衝突の重力計算は著者が独自に開発した並列ツリーコードを用いて行われた。

3 Simulation Results

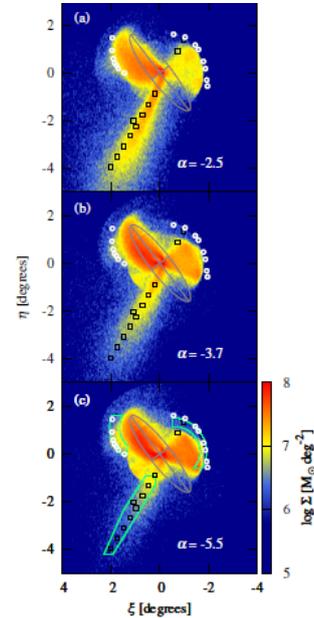


図 1: DMH の冪の変化に対する GSS 及びシエルの形状の変化の様子。縦軸と横軸はそれぞれ方角として北と東を意味している。このとき、原点は M31 の中心に固定されており、 1° は 13.6kpc に対応する。各図で灰色の線で囲まれた領域は M31 の円盤部分を意味する。また、色の濃淡は衝突した矮小銀河を構成していた粒子の表面密度を表している。

始めに、矮小銀河を構成していた粒子が銀河衝突においてどのように時間発展し、GSS やシエルを形成するに至ったかを簡単に説明する。まず矮小銀河が M31 の北西方向から M31 のバルジ付近に衝突する。その後衝突によって散りばめられた矮小銀河の星々が、M31 の南東側に引き伸ばされていき GSS を形成する。続いて一部の粒子が M31 のポテンシャルによって再度引き戻され再落下する。それらがバルジ付近を通過する際に軌道が曲げられることで、M31 の東側でシエルを構成するように広がっていく。最後に、東側のシエルから M31 に再落下した粒子群が M31 の中心で軌道を曲げられ、西側のシエルを形成する。

次に、DMH の外縁部密度プロファイルの冪の変化が衝突後の星の構造にどのように影響するのかを

確認する。図 1 は最も観測構造を良く再現する時刻において、衝突後の矮小銀河の粒子の表面密度を表す。3 種類の図はそれぞれ、DMH 密度プロファイルの冪が異なる場合の結果である。これによると、外部密度プロファイルの冪 α の大きさと GSS 及び西側のシェルの表面密度の大きさとの間に依存性が確認できる。より小さい冪において、表面密度が GSS では小さく、西側のシェルでは大きくなっている。これは、冪の値が小さいと DMH の質量分布がより内側に集中するため、矮小銀河の粒子がより大きな重力の影響を受けることに起因する。そのため粒子の速度が大きくなり自由落下時間が短くなるため、力学的な進化が短い時間スケールで進行する。

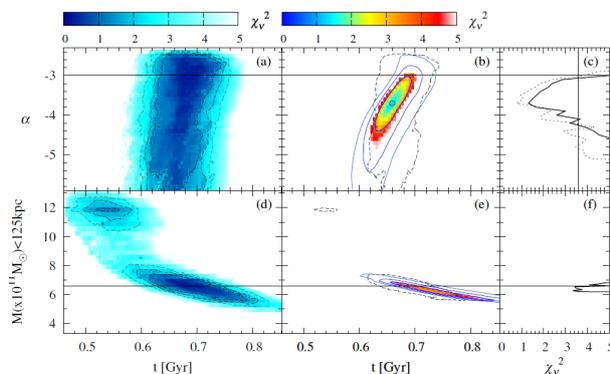


図 2: 冪の変化の影響に対する χ^2 の解析結果。横軸は衝突開始からのシミュレーション時間である。上段の図では縦軸は冪の変化を表している (モデル A)。図 2a, 2b での色の濃淡は χ^2 の大きさを表している。図 2a での点線や図 2b での実線で囲まれた領域は χ^2 の信頼区間を意味している。その値は内側から順に 1σ , 2σ , 3σ となる。図 2 の下段である図 2d, 2e, 2f はそれぞれ、モデル B での質量変化に対する解析結果。

シミュレーション結果と観測構造との定量的な比較を行うために、 χ^2 検定が行われた。まず、東西のシェル構造の位置に関する検証された。モデル A での検証結果は図 2a で示される。この時、信頼区間 1σ の中に全ての冪での結果が収まっているため、東西のシェル構造の位置に関する検証では冪の変化による影響は顕著に現れなかった。

次に GSS 及び二つのシェルの間で表面密度の比について、シミュレーションと観測の間で χ^2 検定を行っ

た。その結果は図 2b で示される。この解析によって、信頼区間 1σ に χ^2 が収まるためには、 $-4.3 < \alpha < -3.0$ として冪に制限が与えられる。また、このときの χ^2 の最小値も考察された (図 2c)。これによって、観測構造を最も良く再現する DMH の外縁部密度プロファイルの冪は $\alpha = -3.7$ であると結論づけられた。

ここまでモデル A についての解析結果について述べた。次にモデル B での解析結果を取り上げる。結果は図 2d, 2e, 2f で表される。これによると、観測構造の再現のためには DMH の質量は強い制限を受けることが分かる。また、図 2f での $\alpha = -3.0$ での χ^2 の最小値は、図 2c での $\alpha = -3.7$ での χ^2 の最小値よりも大きいことが分かる。このことから、本モデルで観測的な構造を再現するには、DMH の外縁部の密度プロファイルの冪は CDM モデルで予言される $\alpha = -3.0$ よりも、 $\alpha = -3.7$ の方が適切であることが分かった。この値では NFW プロファイルより距離の依存性が急になり、より質量が中心に分布することになる。

4 Summary and Discussion

CDM モデルで予言される DMH の密度プロファイルの冪を検証するために、冪を変化させた DMH を持つ M31 と矮小銀河の衝突をシミュレーションした。本モデルでの結果は、予言されていた外縁部の冪である $\alpha = -3.0$ ではなく、より距離の依存性が急な $\alpha = -3.7$ の冪を持つプロファイルが観測される構造をより良く再現するというものであった。この理論的に予言されていた冪との差異は、本モデルで考慮されなかった以下の要素によって解決されるかもしれない。

M31 に付随する衛星銀河や銀河系が及ぼす、衝突粒子への潮汐力の影響が考えられる。シミュレーションモデルの観点では、DMH が球対称分布ではなく三軸不等性を示す際の影響や衝突する矮小銀河の形態の違いによって分布の進化に影響することも考えられる。最後に今回は全シミュレーションで軌道を固定していたため、衝突軌道の変更による影響が挙げられる。

5 My Plan

この章では、私の修士論文の研究計画について述べる。私の研究の最終目標は、今回レビューした Kirihara et al. (2014) での手法と後述する Miki et al. (2014) での手法を用いて、より現実に則した衝突シミュレーションを行うことである。以下で Kirihara et al. (2014) での手法について検証し、改善箇所とその方法を示す。その次に Miki et al. (2014) を簡単に紹介し、私の研究の手法と意図を明確に示す。

一つ目は DMH の質量分布モデルの各幕でのスケール半径 r_s とスケール密度 ρ_s の値についてである。Kirihara et al. (2014) では幕を変えるシミュレーションで DMH の質量分布を決定する際に、矮小銀河が最初に衝突するまでの軌道があまり変化しないようにパラメータ設定を行っていた。具体的には、いずれのモデルにおいても、 $M(r_s)$ 及び $M(r_{GSS})$ が同一となるように、 r_s 及び ρ_s を決定した。ここで $M(r)$ は DMH の質量、 r_{GSS} は GSS のサイズである。得られた値を用いた DMH の回転曲線は、論文中に示されるように観測によって得られた回転曲線の誤差の範囲に収まる。しかし、その物理的な根拠は薄弱であると言わざるをえない。したがって、より物理的な視点に基づいて、この点を改めた新しい計算モデルを導入する。本研究では DMH モデルの各幕での r_s 、 ρ_s の値を系統的に変化させ、 χ^2 検定により観測される回転曲線を最も良く再現するような α 、 r_s 、 ρ_s の組み合わせを決定する方法を導入する。

二つ目は、矮小銀河の衝突軌道についてである。Kirihara et al. (2014) では矮小銀河の初期位置及び速度は、全てのシミュレーションで固定されていた。そこで私の修士論文の研究では、全ての DMH のモデルにおいて矮小銀河の初期位置及び速度を系統的に変えてシミュレーションすることを予定している。軌道を変更する方法としては Miki et al. (2014) に従う。Miki et al. (2014) では GSS やシェル構造を再現するような M31 と矮小銀河の衝突の N 体シミュレーションを実行し、矮小銀河が中心に持っていたブラックホール (SMBH) が衝突後にどの場所に存在するのかを理論的に予言した。その手法を簡単に説明する。始めに M31 と矮小銀河の衝突について初期位置及び速度を変化させて大規模なパラメータサー

ベイを行い、GSS 等の観測された構造を再現できる衝突軌道を制限する。その後、制限された軌道を用いて中心に SMBH を持つような矮小銀河と M31 の衝突の高解像度のシミュレーションを行い、SMBH の軌道運動を詳細に解析した。その結果、SMBH の天球面上の現在の位置を予言した。彼らの研究では、DMH の密度プロファイルは NFW プロファイルが用いられていた。私の研究では Miki et al. (2014) の手法を踏襲する予定であるが、衝突軌道と DMH の密度分布の幕の両方を変更するため、扱うパラメータ数が Kirihara et al. (2014) から大幅に増えることになる。

以下に私の研究で用いる具体的な計算手法等を説明する。私の研究の N 体計算では、共同研究者である Miki et al. (2014) の著者が現在開発しているコードを改変して用いる予定である。このコードは、Graphics Processing Units (GPU) を用いて演算を加速させ、筑波大学計算科学研究センターの GPU クラスタである HA-PACS 用に最適化されている。これにより、広いパラメータ空間でのシミュレーションを実行することができる。また、このコードはシミュレーション中に結果の解析を同時に行うことが出来る。これによって計算及び解析をより短時間で行えるため、Kirihara et al. (2014) よりもパラメータが増えた計算にも対応できる。ここでパラメータサーベイを行う領域はあらかじめ、Miki et al. (2014) での低解像度のシミュレーションで制限された軌道要素の付近で行うことで、計算量を削減する予定である。

この研究によって、大規模パラメータ空間を掃く高分解能の N 体シミュレーションを実行し、CDM 理論の検証作業を行い、銀河のハローを彷徨う SMBH の存在を理論的に予言する。

Reference

- M.A. Fardal, P. Guhathakurta, A. Babul, & A.W. Connachie, 2007, MNRAS, 380, 15
- T. Kirihara, Y. Miki, & M. Mori, 2014, PASJ, 66, L10
- Y. Miki, M. Mori, T. Kawaguchi, & Y. Saito, 2014, ApJ, 783, 87
- J.F. Navarro, C.S. Frenk, & S.D.M. White, 1996, ApJ, 462, 563