

アンドロメダストリームで探る銀河の内部構造

筑波大学大学院物理学専攻 宇宙物理理論研究室

桐原 崇亘

第 42 回天文・天体物理若手 夏の学校

8月1日～8月4日@福井県東尋坊

1 Abstract

近年の高精度観測により、アンドロメダ銀河 (M31) のハロー領域には、100kpc を超えるステラーストリーム (アンドロメダストリーム) や東西に広がるシェル状の星分布といった大規模構造が発見された。そして、その空間構造や視線速度構造等が詳細に観測されている。また、 N 体シミュレーションによる理論研究では、これらの構造は今から 1Gyr 程前に、 $10^9 M_{\odot}$ 程度の矮小銀河が M31 に衝突した残骸であることが示されてきた。

さて、近年の宇宙論的構造形成の数値シミュレーションによれば、銀河に付随するダークマターハロー (DMH) は、NFW プロファイルや FMM プロファイルに代表されるような、質量密度分布のユニバーサルティーを持つと予想されている。DMH の内縁部に関しては議論が分かれるところであるが、外縁部に関しては密度が中心からの距離の 3 乗に比例して減少することで両者一致している。しかしながら、銀河の外縁部質量分布を観測的に正確に検出することは非常に困難なため、これまで理論予想の検証はあまり行われてこなかった。

M31DMH の構造を、現在のストリームの空間構造や視線速度構造とシミュレーションの結果とを詳細に比較することにより調べた。本講演では特に、M31DMH の外縁部密度分布を変化させた銀河衝突の数値シミュレーションを行うことにより、直接観測のできない DMH の外縁部の構造について調べた。

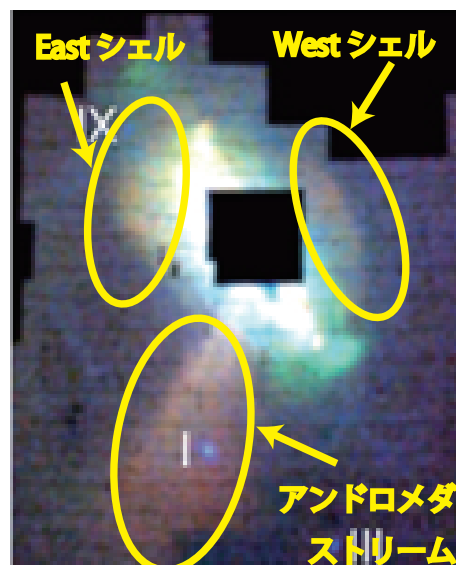


図 1 アンドロメダストリームとシェル状構造 McConnachie et al. 2009 を元に作成

図1は中央の黒塗りの部分に、よく画像で見られるM31の円盤がすっぽりと入っている。周辺にアンドロメダストリームや、East シェル、West シェルが見られる。

2 アンドロメダストリーム

近年の高精度観測により、M31のハロー領域には、100 kpc(1kpc $\simeq 3.09 \times 10^{19}$ m)を超えるようなステラーストリーム(アンドロメダストリーム)やシェル状の星分布といった大規模構造が発見されている。そして、これらの構造については、その空間構造や速度構造が詳細に観測されている。また、 N 体シミュレーションによる理論研究では、そのような構造は今から1 Gyr程前に、質量が $10^9 M_{\odot}$ 程度の矮小銀河がM31に衝突した残骸であることが示されてきた(Fardal et al. 2007; Mori & Rich 2008; Miki et al. 2010)。

3 研究目的

未だに力学的に緩和していない銀河衝突の痕跡からM31と衝突してきた母矮小銀河の内部構造を探る。本講演では、これまでに行った2つの研究について紹介している。

- I. アンドロメダストリームとシェル状構造を使って、M31のダークマターハローの外縁部密度構造を制限する。
- II. アンドロメダストリームの非対称な形状を母矮小銀河の内部構造から説明する。以下に詳説する。

4 研究I

4.1 CDM理論の予言

まず、cold dark matter(CDM)理論に基づく宇宙大規模構造の数値シミュレーションによると、銀河に付随するダークマターハローの密度分布は、内縁部では議論が分かれるところであるが、外縁部では密度分布が、 $\rho \propto r^{-3}$ であると予言している。(Navarro, Frenk & White 1995, Fukushige & Makino 1997, Moore et al. 1998)しかしながら、銀河の外縁部の質量密度分布を観測することがこれまで困難であったためにこれまで詳しく調べられてこなかった。本研究では、M31周辺に存在する大規模な銀河衝突の痕跡を頼りに、M31中心から遠方でのダークマターの質量分布を探る。

4.2 方法

M31に衝突した矮小銀河として、約5万体の球対称平衡解モデルであるPlummerモデルを仮定し、全質量を $2.2 \times 10^9 M_{\odot}$ とした。M31を原点に固定されたポテンシャルを仮定した。ポテンシャルは、円盤をExponential disk、バルジをHernquist bulgeとし、ダークマターハローの密度分布を次のように定義した。

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s)(1+r/r_s)^a} \quad (1)$$

a はダークマターハローの外縁部の密度構造を決める値となっており、 $a=2$ が予言された値となっている。 a をパラメータにした銀河衝突のシミュレーションを行い、アンドロメダストリームやシェル状の構造を再現して a に制限をつける。Orbitは、Fardal et al.(2007)で調べられたものを使っている。

シミュレーション後の解析方法として、次の3つを行う。2つのシェルの位置に対して χ^2 解析を行った。

この解析は、観測されているシェルの Edge とシミュレーションから得られるシェルの Edge の適合度を評価しており、 χ^2 値が最小となる時刻を現在の時刻と定義し、判定を行なっている。シェルの位置に対する解析を行った後、現在の時刻におけるストリームと2つのシェルとの面密度の比について χ^2 解析を行った。さらに、アンドロメダストリームの視線速度構造については観測がされているので、シミュレーションとの比較を行った。

4.3 結果・まとめ

M31 ダークマターハローの外縁部密度分布のパラメータ a を変えて衝突シミュレーションを行った結果を以下に示す。シェルの位置に対する χ^2 解析では、計算を行ったどのパラメータ a においても、 χ^2 値が小さな値を取り、シミュレーションが観測とよく合っているという結果が得られた。この解析で得られた現在の時刻におけるストリームと2つのシェルとの面密度の比について χ^2 解析を行った結果を図2に示す。すると、これまで予言されていた $a = 2$ では、観測とシミュレーション結果が合わず、 $a = 2.5$ や $a = 3.0$ で観測とシミュレーション結果がよく合うことが分かった。この時、ストリームの視線速度構造についても、観測で得られていたものと矛盾がない結果であった。

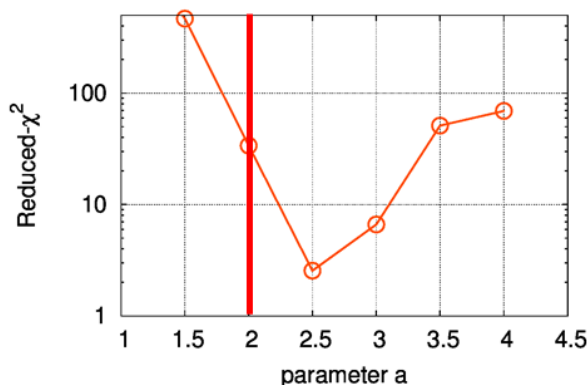


図2 χ^2 解析の結果

つまり、M31 に付随するダークマターアウターハローの密度分布は、予言されているものより早く密度が小さくなる。

5 研究 II

5.1 ストリームの非対称形状

図3に示したのは、オレンジのヒストグラムが、M31 中心からの方位角で、東方向を基準に南方向に $30^\circ < \theta < 100^\circ$ の範囲について、各方位角でのピーク値で規格化したスターカウントを描いたものである。ピーク値を取る方位角から東側（方位角の小さい側）では密度が急に小さくなるのに対して、西側（方位角の大きい側）では密度が緩やかに小さくなる非対称な形状が見られる。

これに対して、図3の青のヒストグラムは研究Iで行った球対称矮小銀河を用いたシミュレーション結果につ

いて上と同じ方法で描いたヒストグラムである。すると、シミュレーションではピーク値を取る方位角から東西ほぼ対称に密度が変化する。

ストリームの非対称な空間構造をこれまで行われてきた球対称な矮小銀河モデルでは説明できていない。これを矮小円盤銀河の衝突で説明出来るかどうか調べる。

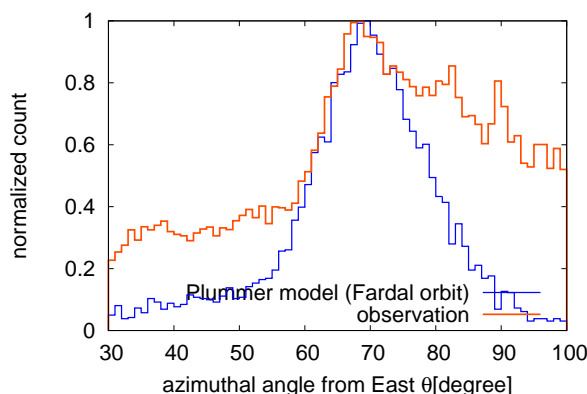


図3 ストリームの非対称形状

5.2 方法

M31 に衝突した矮小銀河として、約 20 万体の円盤銀河仮定し、全質量を $2.2 \times 10^9 M_{\odot}$ とした。円盤の scale length を 1.11kpc、scale height を 0.13kpc という薄い円盤銀河を設定した。(Kujiken & Dubinski (1995))M31 を原点に固定されたポテンシャルと仮定した。図 4 のように、M31 円盤の角運動量の方向を基準に、矮小銀河円盤の角運動量スピンの回転方向 θ, ϕ をパラメータとして取り、122 パラメータの計算を行った。Orbit は Fardal et al. (2007) で調べられたものを用いた。

シミュレーションを行った後の解析方法としては、I で行った 2 つのシェルの位置に対する χ^2 解析で現在の時刻を判定し、アンドロメダストリームの成分で最も明るい方位角と、アンドロメダストリームのピーク値を取る方位角から東西の幅について解析を行なった。

5.3 現状と今後

パラメータサーベイによる結果として、アンドロメダストリームの非対称な形状が見られる場合が存在することが確認できた。特徴的な状況としては、衝突時の矮小円盤銀河の角運動量スピンの方向が重要であり、幾つかのパラメータ領域で観測から得られた形状と矛盾のない結果が得られた。しかしながら、いずれのパラメータにおいてもピーク値を取る方位角から西側に広がるストリームの幅が狭いという状況が明らかとなった。これに対して現在近傍の矮小銀河円盤の多くが厚いことを考慮して scale height を大きくした場合にストリームやシェル構造にどのような変化が見られるか調べている。パラメータの中には、円盤の scale height を大きくするとピーク値を取る方位角から西側に広がるストリームの幅が広がるものが存在する結果が得られている。以下に結果の一例を示す。図 5 に示したのは、M31 との衝突により壊された矮小銀河の現在の分布で、青丸が観測されたアンドロメダストリームの領域から抽出された領域と東西のシェル上の分布の端として抽出

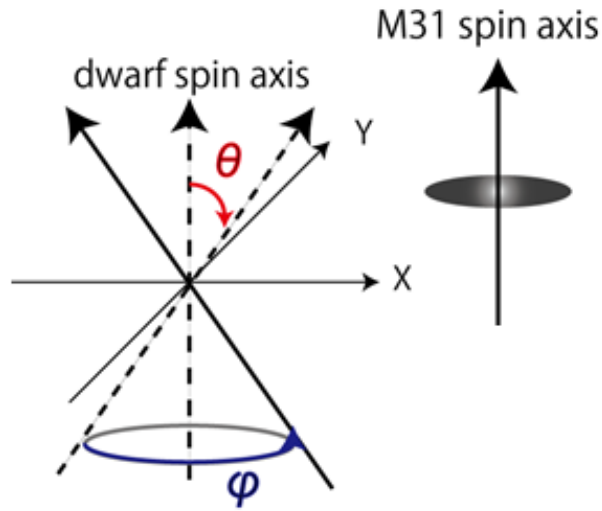


図4 矮小円盤銀河の回転方向の設定

された領域である。ストリームの青丸の東側 ($\xi > 0$ 側) では密度が急に小さくなるのに対して、西側 ($\xi < 0$ 側) には分布が広がり、密度が緩やかに変化する様子が見られる。

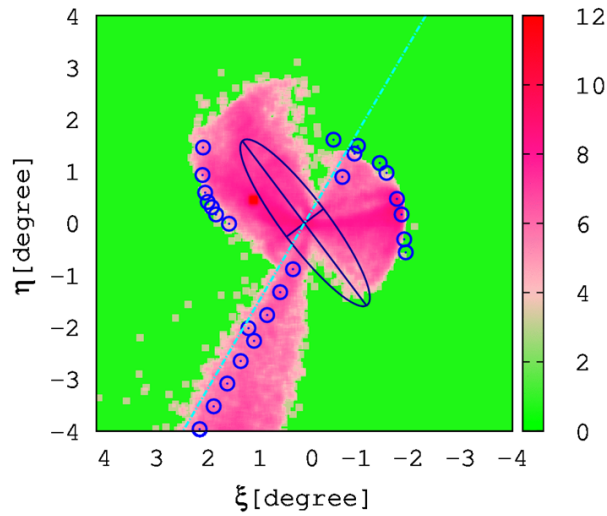


図5 観測をうまく再現する結果の一例

今後、衝突してきた矮小銀河の円盤の厚みがストリームやシェル状構造に与える変化を詳細に調べ、アンドロメダストリームの速度構造に与える影響についても調べていく。

6 参考文献

- Fardal et al. (2007)
- Mori & Rich (2008)

Navarro, Frenk & White (1995)
(※夏の学校申込時の参考文献に書いたもの)