

# アンドロメダ銀河南天のアーチ構造の起源説明

三木 洋平

東京大学情報基盤センター

## 1. まえがき

本稿は、2018年2月に実施された「Reedbush-H 大規模 HPC チャレンジ」の結果報告である。

## 2. はじめに

銀河の外縁部（ハロー）には、過去の銀河どうしの衝突合体の痕跡などの銀河の形成・進化史を探る上での重要な手がかりが多数残されている。近傍銀河であるアンドロメダ銀河（M31）は、銀河系サイズの銀河としてはもっとも近傍に位置するため暗い構造まで詳細に観測可能であり、また系外銀河であるために全体の構造を外側から俯瞰して観測できるため、銀河の進化過程を探る上で格好のターゲットである。このため、M31 を対象とした複数の大規模サーベイプロジェクトが実施されている。代表的なものは、PAndAS (Pan-Andromeda Archaeological Survey: McConnachie et al. 2009) や SPLASH survey (Spectroscopic and Photometric Landscape of Andromeda's Stellar Halo: Gilbert et al. 2009) であり、現在はずばる望遠

鏡に搭載された Hyper Suprime-Cam を用いた観測が進行中である (Komiyama et al. 2018)。こうした最近の観測によって、M31 のハロー領域には位相空間上で力学的に緩和していない恒星系が多数発見されている (図1)。こうした構造は銀河衝突の痕跡であると考えられているが、その形成過程が明らかにされたものは少ない。

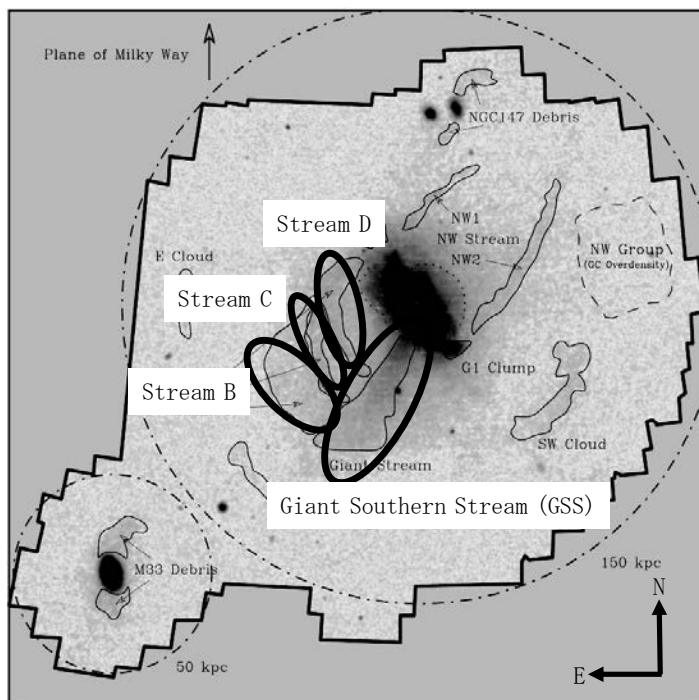


図 1: アンドロメダ銀河周辺の恒星分布<sup>1</sup>。

本研究で注目している構造を、Lewis et al. (2013) の Figure 1 上に示した。中心付近にある M31 から南東方向 (図中左下向き) に Giant Southern Stream が伸びており、これに対して垂直に Streams B, C, D が接

<sup>1</sup> Lewis et al. (2013) の Figure 1 を転載した。

している。

M31 ハローに残る銀河衝突の痕跡のうち、その形成過程を詳細に調べられているのは Giant Southern Stream (GSS : 図 1 で M31 から南東方向に伸びている構造) と North-Western Stream (図 1 中の NW2) の 2 つのみである。特に GSS については、数多くの先行研究によって M31 に衝突した矮小銀河の質量、サイズ、形態やその軌道要素などが詳細に調べられている (Fardal et al. 2006, 2007, 2008, 2012, 2013; Mori & Rich 2008; Miki et al. 2014, 2016; Kirihara et al. 2014, 2017)。こうした先行研究によって、M31 の東西に観測されているシェル構造については、GSS を作った銀河衝突によってできた同一起源の構造であることが示されている。また、この GSS には Streams B, C, D という 3 つの恒星ストリーム構造と天球面上においてほぼ垂直に接していることが知られており、GSS と同一の銀河衝突によって形成されたのではないかとする仮説が提案されている (Fardal et al. 2008)。しかし、Streams B, C, D のいずれかと GSS を同時に再現できることを示した銀河衝突モデルは今のところ存在しない。さらに、Conn et al. (2016) によって GSS までの距離に加えて Streams C, D への距離も測定されたため、その 3 次元構造が再現できるかを精密に検証できる状況が整った。そこで本研究では、 $N$  体シミュレーションを用いて M31 と矮小銀河の衝突実験を行い、Streams B, C, D のいずれかと GSS を同時に再現できるかを検証する。

### 3. モデル設定

現時点において、GSS を最も精密に再現しているモデルは Kirihara et al. (2017) による M31 と矮小円盤銀河との衝突モデルである。McConnachie et al. (2003) によって、GSS の面密度は東側では急激に、西側では面密度がなだらかに低下していくという東西方向に非対称な構造を持つことが報告されている。Kirihara et al. (2017) では、こうした非対称構造を再現するためには M31 に落下してくる矮小銀河が回転成分を持つことが重要であることを明らかにし、かつての矮小円盤銀河は天球面上で反時計方向 (GSS の領域では東側から西側へと向く方向) に回転していたと結論づけた。一方で、Streams B, C, D は GSS の東側に接する構造であるため、Kirihara et al. (2017) とは逆方向の回転成分を導入することで再現できる可能性がある。そこで本研究では、Kirihara et al. (2017) の矮小円盤銀河の円盤成分のうち 20% が逆行回転成分であるという銀河モデルを作り、M31 との衝突実験を行った。Kirihara et al. (2017) で用いられた矮小銀河モデルは、ダークマターハローを lowered Evans model ( $M = 2.6 \times 10^9 M_{\odot}$ ,  $r_s = 0.98$  kpc;  $N = 11692417$ ), バルジ成分を King model ( $M = 3.8 \times 10^8 M_{\odot}$ ,  $r_0 = 0.23$  kpc,  $r_t = 0.74$  kpc;  $N = 1716428$ ), 銀河円盤を exponential disk ( $M = 7.4 \times 10^8 M_{\odot}$ ,  $R_d = 1.1$  kpc,  $z_d = 0.40$  kpc;  $N = 3368370$ ) を用いて表現したものであり、本研究ではこのモデルに中心ブラックホール粒子 ( $M = 7.5 \times 10^5 M_{\odot}$ ) を追加した上で、MAGI (Miki & Umemura 2018) を用いて粒子分布を生成した。

また、M31 のモデルとしては 2 通りのモデルを実験した。1 つは M31 を外場ポテンシャルとして扱うモデルで、もう 1 つは M31 についても粒子系として表現するモデルである。どちらのモデルにおいても M31 の質量分布は同一であり、先行研究で用いられてきたモデル (Geehan et al. 2006; Fardal et al. 2007) に恒星ハロー成分 (Gilbert et al. 2012, Ibata et al. 2014) を追加し、円盤成分の  $Q$ -value の最小値は Tenjes et al. (2017) に従い  $Q = 1.8$  とした。具

体的な質量分布は、ダークマターハローを Navarro-Frenk-White model ( $M = 8.1 \times 10^{11} M_{\odot}$ ,  $r_s = 7.6$  kpc;  $N = 30644871$ ), 恒星ハロー成分を Sérsic プロファイル ( $M = 8.0 \times 10^9 M_{\odot}$ ,  $r_s = 9.0$  kpc,  $n = 2.2$ ;  $N = 302292$ ), バルジ成分を Hernquist model ( $M = 3.2 \times 10^{10} M_{\odot}$ ,  $r_s = 0.61$  kpc;  $N = 1224283$ ), 銀河円盤を exponential disk ( $M = 3.7 \times 10^{10} M_{\odot}$ ,  $R_d = 5.4$  kpc,  $z_d = 0.60$  kpc;  $N = 1382986$ ) を用いて表現したものであり, MAGI (Miki & Umemura 2018) を用いて粒子分布を生成した。

初期条件における矮小銀河の軌道要素は Fardal et al. (2007) と同様であり, また矮小銀河円盤の傾け方については Kirihara et al. (2017) のベスト・フィットモデルに揃えた。

$N$  体シミュレーションには, Miki & Umemura (2017) によって開発された重力ツリーコード GOTHIC を用いた。GOTHIC は階層化時間刻み法の採用に加え, 関数の実行時間を監視しながら動的な最適化を施すことで高速化されている。また, 重力ソフトニング長は 15.6 pc, 重力計算の精度を制御するパラメータの値は  $2^{-9} = 1.953125 \times 10^{-3}$  とした。

#### 4. シミュレーション結果

Reedbush-H を全系使用して M31 を粒子系として表現した計算モデルについては, 大規模 HPC チャレンジ中に計算が終了しなかったため, 以下では M31 を外場ポテンシャルとして扱った場合の計算結果を紹介する。計算結果は図 2 に示したとおりであり, 先行研究と同様に GSS および東西のシェル構造をよく再現できている。特に GSS については, 天球面上での分布 (図 2e) だけではなく, Conn et al. (2016) による距離観測の結果についてもよく再現できている (図 2a), その 3 次元的な構造を精密に再現することができている。一方で, 本研究で着目している

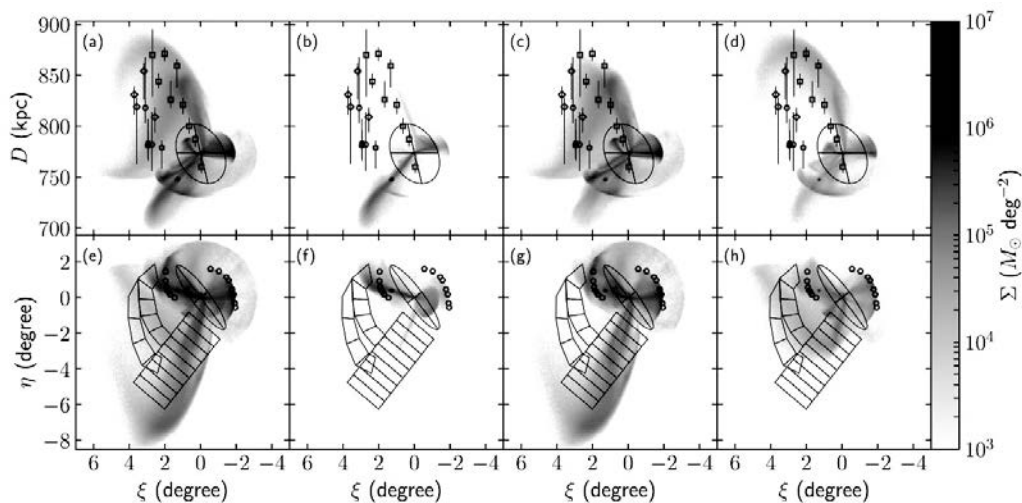


図 2:  $N$  体シミュレーションによって得られた面密度分布。

恒星粒子の面密度分布を示した。下段 (e-h) には天球面上での分布を, 上段 (a-d) には奥行方向の分布を示している。各パネルには異なる成分の恒星分布 [バルジ成分 (b, f), 順行回転する円盤成分 (c, g), 逆行回転する円盤成分 (d, h)] の分布, 全恒星成分の重ね合わせ (a, e) を示した。図中の楕円は M31 の銀河円盤である。下段に示した白丸は東西のシェル構造のエッジ位置 (Fardal et al. 2007) であり, 残りの多角形は Conn et al. (2016) による GSS (南側の 8 個の長方形), Stream C (東側の 4 個の多角形), Stream D (残りの 5 個の多角形) の観測フィールドである。上段に示した誤差棒付きの記号は Conn et al. (2016) による距離観測

[GSS (正方形), Stream C (菱形), Stream D (丸)] の結果を示している。

Streams B, C, D については、図 2e を見る限りでは Stream D に対応する領域にストリーム上の構造が形成されていることがわかる。この構造は、逆行回転する円盤成分によって形成されている (図 2h) のものであり、逆行回転する円盤成分を追加することによって GSS に直交するストリーム構造を形成可能であることがわかった。その一方で、Conn et al. (2016) による Stream D までの距離観測の結果と比較すると、シミュレーション結果は観測を再現していないことがわかる。つまり、本研究で試行したモデルでは、GSS に直交するストリーム構造を形成することは可能だが、Stream D の 3 次元構造を再現するには至らないということがわかった。GSS と Streams B, C, D との関係性を明らかにするには、今後、矮小銀河モデル、M31 への突入軌道、矮小銀河円盤の回転軸を同時に変化させた大規模なパラメータ探査を遂行することが必要だろう。また、現段階では Stream B までの距離や 3 本のストリーム構造の運動状態は明らかになっていないため、今後の観測的な研究の進展にも期待したい。

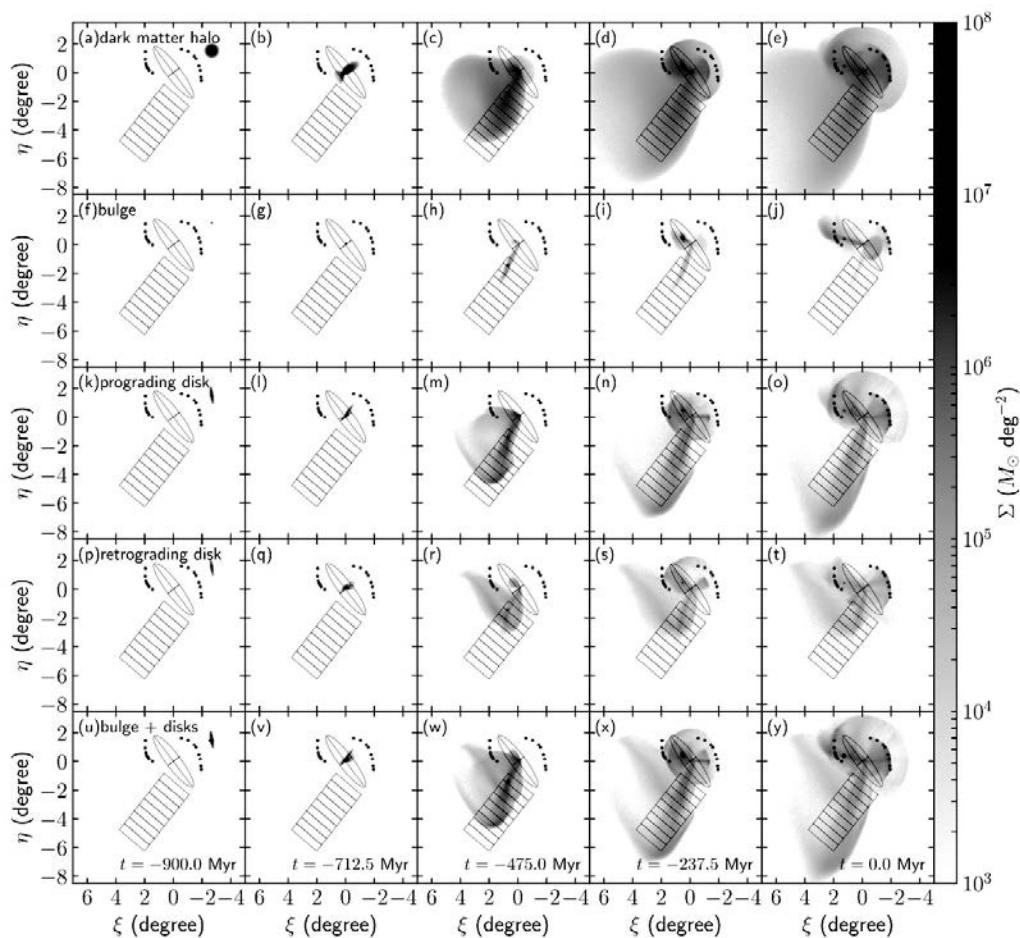


図 3 : 天球面上の分布の時間進化。

成分ごとに天球面上での面密度分布の時間進化を示した。図中の楕円は M31 の銀河円盤、黒丸は東西のシェル構造のエッジ位置 (Fardal et al. 2007)、南側の長方形は Conn et al. (2016) による GSS の観測フィールドである。上段から順に衛星銀河のダークマターハロー (a-e)、バルジ成分 (f-j)、順行回転する円盤成分 (k-o)、



逆行回転する円盤成分 (p-t), 全恒星成分の重ね合わせ (u-y) を示した。左側から順に  $t = -900$  Myr (初期条件),  $t = -712.5$  Myr (1回目の最接近時),  $t = -475$  Myr,  $t = -237.5$  Myr,  $t = 0$  Myr (現在) の分布を示している。

図3には天球面上の, 図4には奥行方向の構造の時間進化を成分ごとに示した。矮小銀河円盤の順行回転成分は南側および奥行方向に大きく広がり, GSS や東西のシェル構造を作っていくのに対し, 逆行回転成分はあまり南側には広がらずに GSS に直交するストリーム構造を形成することがわかる。

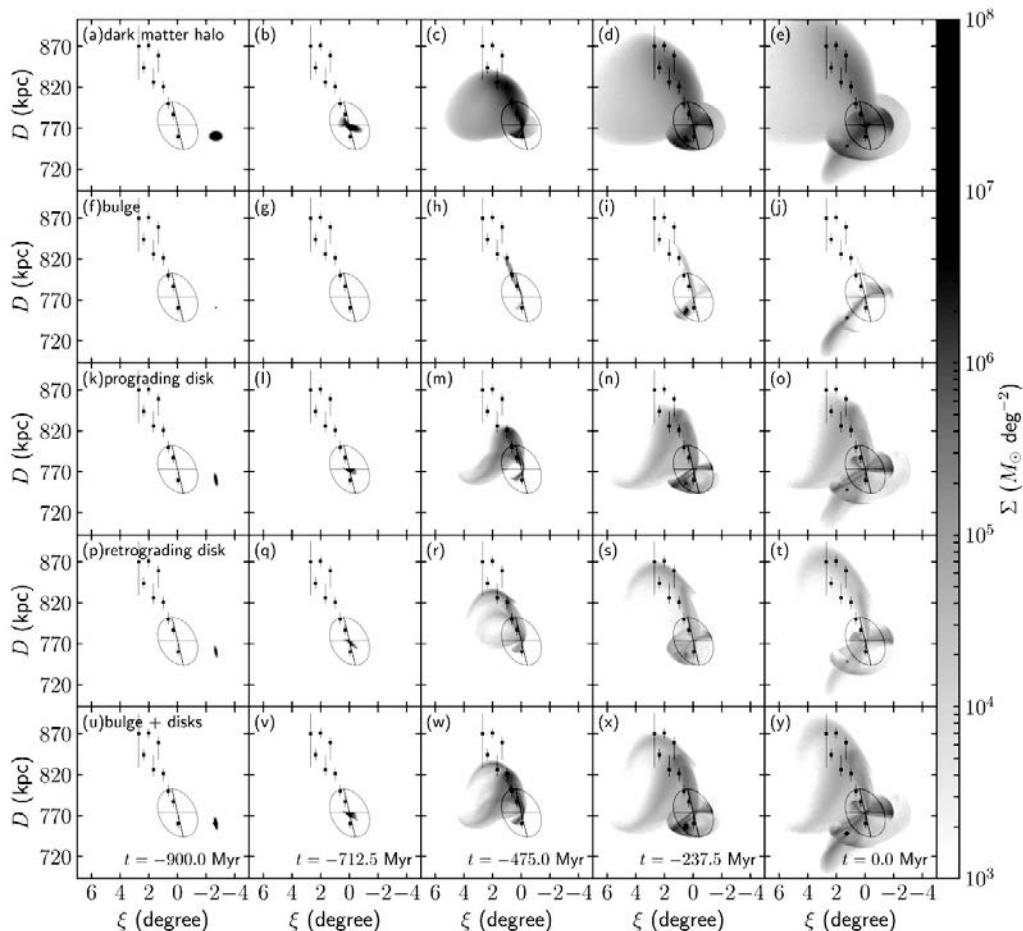


図4：奥行方向の時間進化。

成分ごとに奥行方向の面密度分布の時間進化を示した。図中の楕円は M31 の銀河円盤, 黒丸は Conn et al. (2016) による GSS の距離観測の結果である。上段から順に衛星銀河のダークマターハロー (a-e), バルジ成分 (f-j), 順行回転する円盤成分 (k-o), 逆行回転する円盤成分 (p-t), 全恒星成分の重ね合わせ (u-y) を示した。左側から順に  $t = -900$  Myr (初期条件),  $t = -712.5$  Myr (1回目の最接近時),  $t = -475$  Myr,  $t = -237.5$  Myr,  $t = 0$  Myr (現在) の分布を示している。

## 5. GPU 温度の測定結果

Reedbush-H を全系使用した際に測定した, GPU 温度とそのステップごとの変化を図5に示す。

GPU 温度の測定には NVML (NVIDIA Management Library) に含まれる `nvmlDeviceGetTemperature()` 関数を用いた。全 240 GPUs の結果を示しているが、温度差は最大でも 10°C 程度であり、全体としてよく冷却されていることがわかる。また、測定精度が 1°C であるのは `nvmlDeviceGetTemperature()` 関数によって取得できる温度の値が `unsigned int` 型で返されるためである。また、GPU の動作周波数については、全 GPU、全時刻において 1.48 GHz で保たれていた。

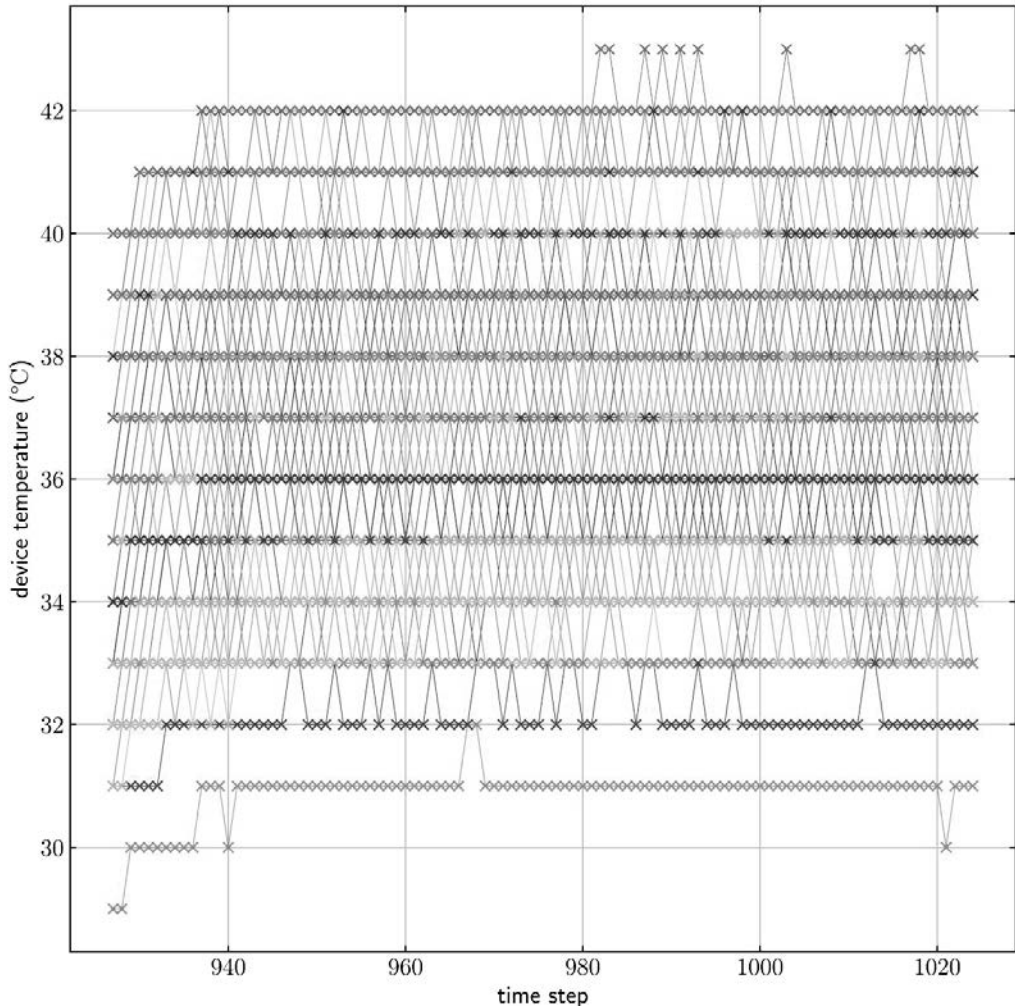


図 5 : 全系実行時の GPU の温度変化。

Reedbush-H 全系使用時に測定した、タイムステップごとの各 GPU の温度を示した。

## 6. まとめ

本研究では、アンドロメダ銀河南天に観測されているストリーム構造 GSS に直交する構造である Streams B, C, D の起源を調べた。Reedbush-H を用いて実行した  $N$  体シミュレーションによって、GSS に直交するストリーム構造を形成することは可能であるが、観測されている立体構造までは再現できていないことがわかった。今後のさらなる理論的・観測的研究によって、アンドロメダ銀河南天の構造の起源を明らかにし、銀河の形成・進化史の理解へとつなげてい

きたい。

## 謝辞

千葉大学・統合情報センターの桐原崇亘氏には、本計算の初期設定に際して多大な助力をいただきました。深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- Conn et al. 2016, “Major substructure in the M31 outer halo: distances and metallicities along the giant stellar stream”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458, 3282
- Fardal et al. 2006, “Investigating the Andromeda stream - II. Orbital fits and properties of the progenitor”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366, 1012
- Fardal et al. 2007, “Investigating the Andromeda stream - III. A young shell system in M31”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 380, 15
- Fardal et al. 2008, “Was the Andromeda Stream Produced by a Disk Galaxy?”, *Astrophysical Journal*, 682, L33
- Fardal et al. 2012, “A spectroscopic survey of Andromeda’s Western Shelf”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 3134
- Fardal et al. 2013, “Inferring the Andromeda Galaxy’s mass from its giant southern stream with Bayesian simulation sampling”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 434, 2779
- Geehan et al. 2006, “Investigating the Andromeda stream - I. Simple analytic bulge-disc-halo model for M31”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366, 996
- Gilbert et al. 2009, “The Splash Survey: A Spectroscopic Portrait of Andromeda’s Giant Southern Stream”, *Astrophysical Journal*, 705, 1275
- Gilbert et al. 2012, “Global Properties of M31’s Stellar Halo from the SPLASH Survey. I. Surface Brightness Profile”, *Astrophysical Journal*, 760, 76
- Ibata et al. 2014, “The Large-scale Structure of the Halo of the Andromeda Galaxy. I. Global Stellar Density, Morphology and Metallicity Properties”, *Astrophysical Journal*, 780, 128
- Kirihara, Miki, & Mori, 2014, “Puzzling outer-density profile of the dark matter halo in the Andromeda galaxy”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66, L10
- Kirihara et al. 2017, “Formation of the Andromeda giant stream: asymmetric structure and disc progenitor”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 3509
- Komiyama et al. 2018, “Stellar Stream and Halo Structure in the Andromeda Galaxy from a Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey”, *Astrophysical Journal*, 853, 29
- Lewis et al., 2013, “PANDAS in the Mist: The Stellar and Gaseous Mass within the Halos of M31 and M33”, *Astrophysical Journal*, 763, 4
- McConnachie et al. 2003, “The three-dimensional structure of the giant stellar stream

- in Andromeda” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 343, 1335
- McConnachie et al. 2009, “The remnants of galaxy formation from a panoramic survey of the region around M31” , Nature, 461, 66
- Miki et al. 2014, “Hunting a Wandering Supermassive Black Hole in the M31 Halo Hermitage” , Astrophysical Journal, 783, 87
- Miki, Mori, & Rich, 2016, “Collision Tomography: Physical Properties of Possible Progenitors of the Andromeda Stellar Stream” , Astrophysical Journal, 827, 82
- Miki & Umemura, 2017, “GOTHIC: Gravitational oct-tree code accelerated by hierarchical time step controlling” , New Astronomy, 52, 65
- Miki & Umemura, 2018, “MAGI: many-component galaxy initializer” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 475, 2269
- Mori & Rich, 2008, “The Once and Future Andromeda Stream” , Astrophysical Journal, 674, L77
- Tenjes et al. 2017, “Spiral arms and disc stability in the Andromeda galaxy” , Astronomy & Astrophysics, 600, A34