The survey of planetary nebulae in Andromeda (M31) VII. Predictions of a major merger simulation model compared with chemodynamical data of the disc and inner halo substructures

Tsakonas et al. (2025) https://doi.org/10.1051/0004-6361/202453175 GAゼミ 2026/6/2 山口未沙

【アブストラクト】近傍最大の渦巻銀河であるアンドロメダ銀河 (M31) は、力学的に高温な恒星円盤、約2–4 Gyr前の広範囲にわたる星形成活動、および近年の銀河衝突を示唆する多数のハローサブ構造を有している。本研究では、質量比1:4の major merger に基づく既存の*N*体+流体力学シミュレーション (Hammer+ 2018, H18。粒子法のGIZMOを使用) と化学進化モデルを組み合わせ、M31 の現在 (z = 0) における化学力学的性質を調査した。特に、3つのサブ構造: Giant Stellar Stream (GSS)、North-East shelf (NE shelf)、Western shelf (W shelf) に対して、位相空間構造および金属量分布を計算し、近年得られた分光観測結果と比較した。その結果、各サブ構造内部に複数成分が存在すること、高金属量かつ大きな金属量分散を持つこと、さらに Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) 観測で示唆される位相空間構造や GSS の大きな距離分散を概ね再現できることが示された。また、複数回の衝突や M31円盤星の散乱に由来する位相空間上のridge 構造も観測と対応する可能性がある。これらの結果は、空間分布だけでなく、化学組成と位相空間構造の両面からM31 が約3 Gyr前に major merger を経験したことを支持し、M31 が MW とは異なる進化史を持つことを示唆する。

【ゴール】観測された GSS、NE shelf、W shelf の化学組成・位相空間構造を major merger シミュレーションと比較することで、 H18 シナリオの妥当性を検証する。

【オリジナリティ】従来のmerger シミュレーション研究が主に天球面上での恒星密度分布や stream・shelf の形状比較に基づいていたのに対し、本研究ではM31円盤の惑星状星雲 (PNe) の観測結果や stellar mass-metallicity relation (MZR) を用いて化学進化モデルを観測的に較正し、major merger シミュレーションに化学力学的制約を導入した。その上で、M31円盤星の運動を追跡し、GSS、NE shelf、W shelf やM31円盤の位相空間構造および金属量分布を同時に観測と比較した点。

【ロジック】表1：7.5Gyr (z ~ 1→ 0) にわたって行われたH18のシミュレーションの Main progenitor と Secondary progenitor の初期条件。各progenitorは初め、総質量の80%を占める暗黒物質ハローと、恒星とガスの両方を含む薄い円盤という2つの構成要素によってモデル化。ガス円盤のスケール長 (h_g)は星円盤のスケール長 (h_s) の3倍。星円盤とガス円盤のスケールハイトは、 h_s の1/10に等しいと仮定。

表1

Parameter	Main	Secondary
M_* [$M_\odot$]	6.63×10^{10}	0.66×10^{10}
log ($M_*/M_\odot$)	10.82	9.82
h_s [kpc]	×3 2.8	2.8
h_g [kpc]	8.4	8.4
f_{gas}	0.5	0.8
$(12+\log(O/H))_{<1R_s}$ [dex]	8.706 ± 0.15	8.518 ± 0.15
$\nabla(\log(O/H))$ [dex/kpc]	-0.1 ± 0.05	-0.1 ± 0.05

図1：major merger 後の M31 類似銀河の恒星分布。H18では、約3Gyr前の銀河全体の質量比1:4の major merger により、 M31 の高温な円盤と GSS・NE shelf・W shelf を同時に形成できることを示した。

3.5 Gyrは merger 時刻ではなく、PHAT (Panchromatic Hubble Andromeda Treasury) 観測 (Williams+ 2017) で示された第2の星形成活動の開始時刻である。これを境に、merger前の古い円盤星 (全体の約80-90%) と mergerに伴う星形成で生まれた若い星を分離。

図3：M31円盤の金属量分布の較正。$[M/H] = 12 + \log(O/H) - 8.69$ (1) で、金属量を定義 (太陽の酸素存在量：$12 + \log(O/H)_\odot = 8.69$ (Asplund+ 2019) が宇宙全体で共通と仮定) 。$(12 + \log(O/H))_{\mathrm{ini},R} = \nabla(12 + \log(O/H)) \times R + (12 + \log(O/H))_{R=0}$ (2) を用いて、各星粒子やガス粒子の初期金属量を設定。 z ≈ 1 の MZR から各 progenitor の中心酸素存在量を決定し、M31円盤内の複数のPNe の [O III] 輝線から求めた酸素存在量分布と比較することで、progenitor円盤の初期金属量勾配 (−0.1dex/kpc)を較正。

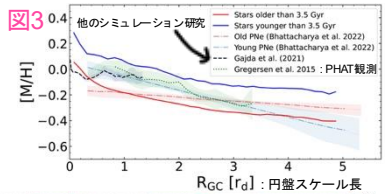


図3

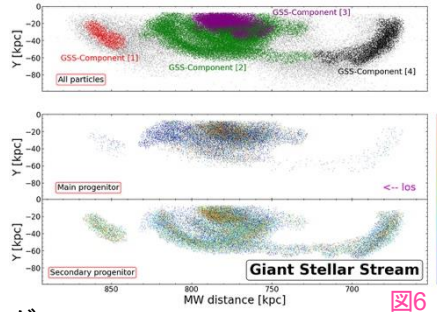


図6

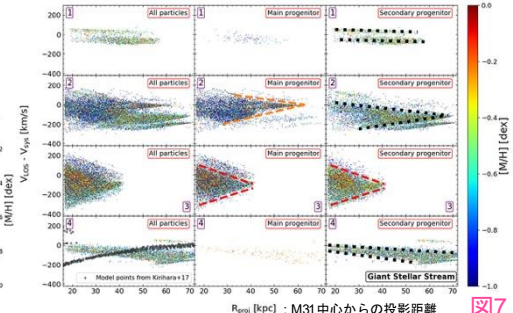


図7

【結果と議論】図6：GSSを構成する星粒子の空間分布。DBSCAN は密度に基づくクラスタリング手法であり、著者らはGSS内部の粒子を4つの成分に分解した。その結果、GSSは単一ストリームではなく、複数回の近点通過で放出された複数の tidal debris が重なった構造であることが示された。この複数成分構造が、後の位相空間図に現れる ridge や chevron の起源であると解釈される。

図7：DBSCANで分離したGSSの各成分の位相空間構造。破線は ridge (尾根)を示しており、オレンジは main progenitor、黒は secondary progenitor、赤は両者に共通する ridge を表す。DESI (Dey+ 2023b) で観測された ridge や複数の運動学的成分が、単一のストリームではなく、複数回の近点通過によって形成された wrap (折り返し) の重ね合わせである可能性を示している。

図13：GSS、NE shelf、W shelf の平均金属量 (×)と金属量分散の観測とシミュレーションとの比較。エラーバー: $\sigma[M/H]$。各サブ構造の平均金属量を概ね再現。また各成分は異なる金属量を持ち、大きな金属量分散を示す。著者はこれを、複数 wrap 構造の化学的支持と主張。

図14：GSSの距離分散。青の濃淡や×: シミュレーション。GSS はLOS 方向にも複数成分を持つ広がった構造であり、その距離分布・平均金属量・金属量分散を major merger モデルが概ね説明できる。

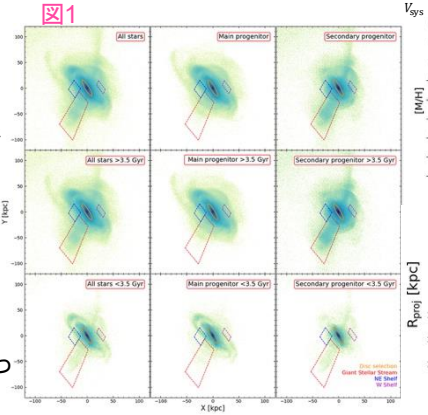


図1

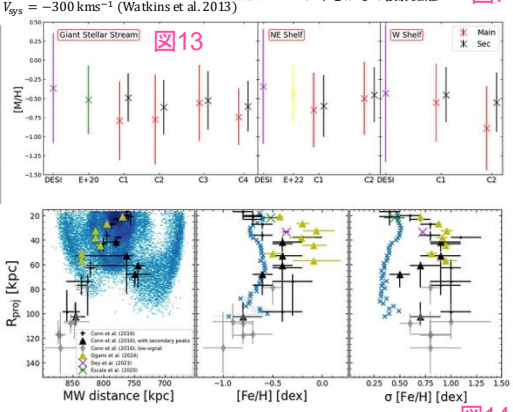


図13

図14

【コメント】 図1 : NE shelf、W shelfの再現性は何を以て担保している？ 7.5Gyr前に太陽はまだ誕生していないのに、その時代でも太陽金属量を仮定するのはいいのか？