A statistical look on kinematic planes of satellite galaxies II: The physics behind their early formation in TNG50 MW/M31-like galaxies (M. Gámez-Marín et al., 2026)

GA Seminar S.Horigome
2026/05/19
[arXiv:2605.05972]

【Abstract】

TNG50 シミュレーション結果における **190 個の MW/M31-like host-satellite systems** 中から見つかった 46 個の early **KPPs**（kinematically persistent planes）についてその起源を調べる。高赤方偏移の **Lagrangian Volume (LV)** を追跡し、局所 Cosmic Web の主軸 $\vec{e}_i$ と衛星の **軌道軸**を比較。多くの KPP は最大圧縮軸 $\vec{e}_3$ に関係し、KPP 形成と LV 変形はいずれも $T_{\rm uni} \sim 4\,{\rm Gyr}$ に集中する。early KPP は ΛCDM の異方的質量流の **fossil remnant** と解釈される。

【Goal】

- **Satellite plane problem**（MW/M31 の衛星銀河が薄い面上に乗り、一部が共回転するように見える問題）の起源を調べる。

【Originality】

- **KPP**：瞬間的な空間配置ではなく運動学的に持続する面（KPP）に着目しその形成時刻と物理起源を遡る。
- **Statistical extension**：TNG50 で得られた多数のMW-like 統計サンプルを用い、LV と KPP の関係を大規模に調べる。

【Method】

- **Sample**：TNG50-1 から、$M_*(30{\rm kpc}) = 10^{10.5} - 10^{11.2} M_\odot$、円盤状の恒星形態、孤立（500 kpc 内に同程度以上の近傍銀河なし）、$M_{200c} < 10^{13} M_\odot$ を満たす MW/M31 に似た主銀河を抽出。190 系中、衛星 9 個以上の 123 系を解析し、前作で 46 系に KPP を同定。
- **KPP selection**：衛星の軌道軸が「最も多くの軌道軸がまとまる固定軸」$\vec{J}_{\rm stack}$ から 36.87° 以内（半球の $< 10\%$）に 4 Gyr 以上まとまる衛星を KPP 衛星とする。KPP 衛星が 6 個以上、かつ全衛星の 25% 以上を占める系だけ採用。
- **Lagrangian Volume (LV)**：$z_{\rm high} = 20.05$ で、将来 $z = 0$ の host halo を作る DM 粒子の重心周辺に半径 $15 R_{200c}(z=0)$ の球を置き、その中の DM 粒子を追跡する形成領域。reduced TOI（規格化されたDM粒子分布の慣性テンソル）から主軸 $\vec{e}_i$ と軸長 $a > b > c$ を得る。
- **Alignment test**：衛星の軌道軸と LV 主軸の角度を比較し、$\cos(\vec{J}_{\rm orb}, \vec{e}_i) \geq 0.8$（約 36.9° 以内）を「整列」と判定。KPP 衛星、KPP でない衛星、ランダムな向きに置いた場合の期待値を比較。
- **Kinematics**：運動エネルギーの内訳（回転 $\kappa_{\rm rot}$、鉛直 κ_z、半径方向 $\kappa_{\rm rad}$）と、衛星が KPP/LV 平面からどれだけ離れているかを比較。

【Main Results】

- **LV 主軸との整列**：KPP 衛星の軌道軸は 42/46 系で LV 主軸と整列。最大圧縮方向 $\vec{e}_3$ が **67.4%**、中間軸 $\vec{e}_2$ が **19.5%**、長軸 $\vec{e}_1$ は稀。KPP でない衛星やランダムな向きの場合とは統計的に異なる。
- **平面への定着**：KPP 衛星は高赤方偏移で KPP 平面 / LV 主軸に垂直な平面に落ち込み、平面外・半径方向の運動が低下。以後、面内回転が増えて円盤状の回転優勢な運動状態へ。
- **時刻の同時性**：軌道軸がまとまる時刻（$3.9^{+0.7}_{-0.5}$ Gyr）、衛星が平面へ落ち着く時刻（$4.2^{+1.0}_{-0.6}$ Gyr）、LV が扁平化する時刻（~ 3.4 Gyr）が近い。LV の早期扁平化と KPP 形成は host halo が急速に質量を増やす時期にほぼ同時。
- **形成経路**：多くは最大圧縮方向 $\vec{e}_3$ への初期流入後に軌道が曲がり、平面内運動へ移行。一部は高赤方偏移から中間軸/長軸方向と整列。
- **Interpretation**：衛星が既存シートへ降着したというより、(proto-)satellites も DM mass flows の一部として collapse し、平面構造と軌道軸 clustering が同時に作られる。
- **Merger scenario**：GSE-like merger は必要条件ではなく、多様な銀河で populated/thin early KPP が形成される。

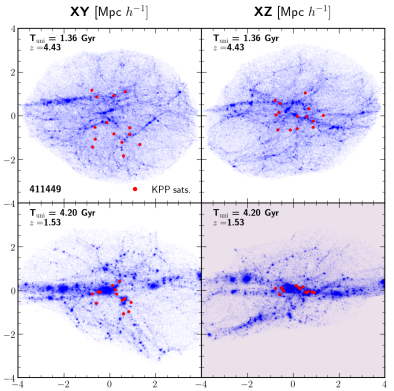


Fig.8a: LV collapse と KPP 衛星（赤点）の平面化例

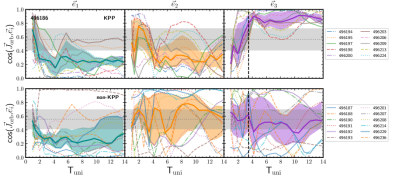


Fig.7: KPP / non-KPP 衛星の軌道軸と LV 主軸の整列例

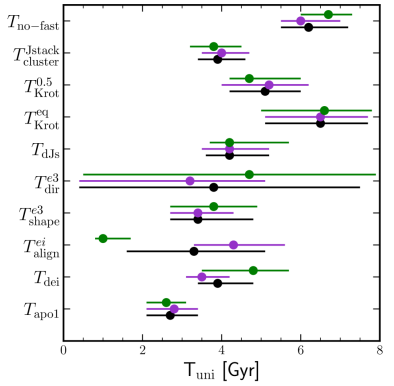


Fig.13: KPP 形成・LV 進化の代表時刻分布

【Comments】

- 観測されるサブハロー・矮小銀河の空間分布モデル？
- 矮小銀河の軸対象性との関連？