Signatures of dark subhalos in dwarf spheroidal galaxies: I. Fluctuations in surface density
(E. Vitral, J. Peñarrubia and M. G. Walker, 2025)

【Abstract】

宇宙論の検証という観点からは小さな暗黒物質サブハローについて調べたくなるが、小さすぎて星を伴わないためにそれ自体の検出は難しい。本論文ではこのような、星を伴わず光学的に観測できないような小さなダークマターサブハローの検出方法として、矮小楕円体銀河の星密度分布にサブハローが及ぼす小さな揺らぎを解析することで、密度分布の観測データからサブハローの存在を間接的に検出する新たな手法を提案する。またこの手法をFornax dSphに適用したところ、分布へのサブハローの影響を示唆する結果が得られた。

【Goal/Originality】

N体シミュレーションを用い矮小楕円体銀河周辺に存在する暗黒物質サブハローが矮小楕円体銀河の星密度分布に与える平衡状態からの揺らぎの特徴を定量的に見積もることで、観測された分布の揺らぎからサブハローの存在を間接的に検出する手法を提供する。

【Method】

- **サブハロー分布関数**: Aquariusシミュレーションのサブハローの質量関数 $dN/dM \propto M^{-\alpha}$ ($\alpha \approx 1.9$) & Hernquistプロファイルに従う空間分布
- **星/DM分布**: Plummer分布 & Osipkov-Merritt型速度分散、$N_* = 10^3, 10^4, 10^5$ / Hernquistプロファイル、$M_{halo} = 3 \times 10^8, 10^9, 10^{10} M_\odot$
- **揺らぎの評価**: Plummer分布の時の星数 N_P と実際の星数 $N_{\rm obs}$ の差 $\chi = N_{\rm obs} - N_P/\sqrt{N_{\rm obs}}$ をフーリエ変換したパワースペクトルを解析

【Main Results】

- **星密度分布の揺らぎ**: サブハローの影響 (low pericentric passage) と考えられる星密度分布の広がり＆中心部の密度低下とスケール半径周辺での密度上昇が観測された (Fig. 2)。
- **パワースペクトル**: 動径方向波数 κ のパワースペクトル $\mathcal{S}_{\chi\chi}(\kappa)$ に特徴的なピークが観測された $(2\pi\kappa r_{scale} \sim 0.4)$ (Fig. 3)。またパワースペクトルがフォークト関数によりよくフィットできることを示した。
- **ローパスフィルタ**: ピーク構造が低波数領域に現れることに着目し、ローパスフィルタを適用し密度分布を平滑化することでノイズの影響を抑えサブハロー由来の揺らぎ成分を強調した(Fig. 4)。
- **ハロー質量依存性**: 重いハローほど揺らぎの振幅が大きくなる：$M_{halo} = 3 \times 10^8$ ではほとんどピークが見られない。
- **星数依存性**: tracerとなる星数が多いほど揺らぎの振幅が大きくなる傾向を示した：$N_* = 10^3$ ではほとんど揺らぎの影響が見られず、ノイズと区別がつかない。
- **サブハロー分布関数**: パワースペクトルのフォークト分布でのフィッティング結果に着目することで、ハロー質量を特定できる可能性を示した (Fig. 10)。

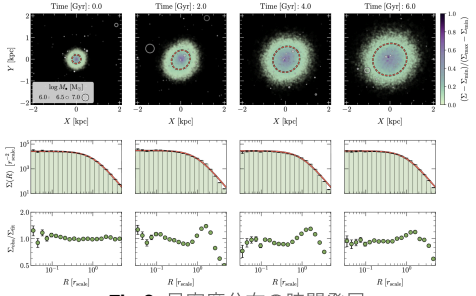


Fig.2: 星密度分布の時間発展

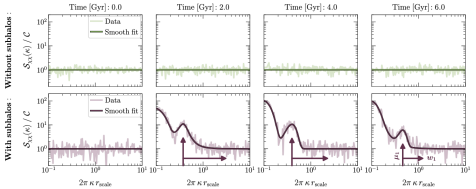


Fig.3: パワースペクトルの時間発展

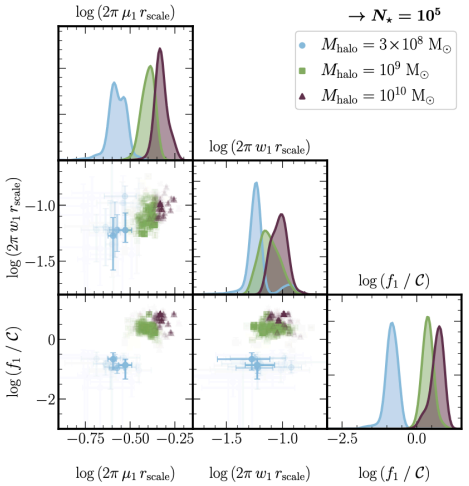


Fig.10: サブハロー質量に依存するパワースペクトルのフィッティング

【Comments】

- FDM, SIDM など他のDMモデルでのより詳細な検討？
- 密度揺らぎが見られた時/見られなかった時の周辺サブハロー分布？
- Jeans解析時にあえて非平衡分布を用いることで、サブハロー通過の影響を捉えられる？