Stellar Mass Segregation in Dark Matter Halos (R. Errani, J. Peñarrubia, and M. G. Walker, 2025)

GA Seminar S.Horigome
[arXiv:2505.22717]

【Abstract】

ダークマター優勢天体と星優勢天体を区別する一つの指標に恒星の**質量隔離 (mass segregation)** がある。従来、質量隔離はバリオン優勢天体のみに起こると考えられてきたが、本研究ではこれが$\Upsilon_{\rm dyn}=10$程度の矮小銀河のような**ダークマター優勢天体でも起こりうる**ことを数値シミュレーションによって示した。この結果は、質量隔離の有無を両者の単純な識別基準とすることに注意が必要であることを示唆する。

【Goal/Originality】

近年観測された**Ursa Major 3/ Unions 1, Delve 1, Eridanus 3**で、各系の緩和時間を見積もり、年齢と緩和時間を比較して質量隔離が起こりうるかを議論する。その後N体数値シミュレーションを用いて、 実際に質量隔離が起きるか定量的に調べ、その特徴を議論する。

【Method】

- **緩和時間の評価**: 様々な力学質量対恒星質量比（$\Upsilon_{\rm dyn}$）で、DMサブハロー＆星系の緩和時間を計算。
- **シミュレーション**: PETARによる衝突系N体シミュレーション。低質量（$0.2\,M_\odot$）と高質量（$0.8\,M_\odot$）の2成分が質量で見て半々と仮定。
- **暗黒物質ハローモデル**: Hernquistプロファイル、初期には恒星系はその中心深くに埋め込まれていると仮定（$r_h/r_{\rm sub}=1/500$）。)
- **潮汐効果の導入**: UMa3/U1モデルに対して、暗黒物質ハローの質量を時間とともに減少させることで、天の川銀河による潮汐場の影響を検討。
- **連星形成の解析**: シミュレーション中に力学的に形成される恒星連星の数を追跡し、その形成率を理論予測と比較。

【Main Results】

- **緩和時間の評価**: Crossing time $T_{\rm cross}$ ごとの速度変化量Δv^2 の積算量がおよそ$\langle v^2\rangle$ と等しくなる（$\langle\Delta v^2\rangle\approx\langle v^2\rangle$）という条件から、緩和時間 $T_{\rm rel}$ の見積もり：
  - $T_{\rm rel}\approx\frac{1}{\sqrt{12\pi G}}(\Upsilon_{\rm dyn}r_h)^{3/2}N_\star M_\star^{-1/2}[\ln(\Lambda)-1.9]^{-1}$
    → UMa3/U1: $T_{\rm rel}\approx0.9$ Gyr, Delve1: $T_{\rm rel}\approx8.4$ Gyr <10 Gyr (年齢)
    → これらの系について、緩和による質量隔離が起こりうることを示唆。
- **質量隔離の観測的特徴**: N体シミュレーションの結果、10 Gyrの進化後、UMa3/U1モデル（$\Upsilon_{\rm dyn}=10$）では低質量星の集団の半光半径 r_h が高質量星の集団の約2倍に、Delve1では約1.4倍になることが示された（Fig. 3）。これは、暗黒物質が優勢な系（$\Upsilon_{\rm dyn}\gg1$）でも顕著な質量隔離が起こることを意味する。
- **力学的連星形成**: 高質量星の集団が収縮し冷却するにつれて、高質量星同士からなる力学的連星の形成率が増加することが確認された（Fig. 4）。これはPeñarrubia (2021)の理論予測とも一致する。逆に、低質量星と高質量星からなる連星は減る傾向にある。
- **$\Upsilon_{\rm dyn}$ への依存性**: 質量隔離の度合いは初期の$\Upsilon_{\rm dyn}$に依存し、UMa3/U1のような系では$\Upsilon_{\rm dyn}\lesssim50$で顕著になる（Fig. 5）。$\Upsilon_{\rm dyn}\gtrsim100$程度でようやく質量隔離は無視できるほど小さくなる。
- **潮汐場の影響と**: 弱い潮汐場による断熱的な膨張は、高質量星と低質量星の半光半径の比率（質量隔離の度合い）にはほとんど影響を与えないことが示された（Fig. 6）。強い潮汐場では、外側に追いやられた低質量星が優先的に剥ぎ取られ、質量隔離をより顕著にする可能性がある。

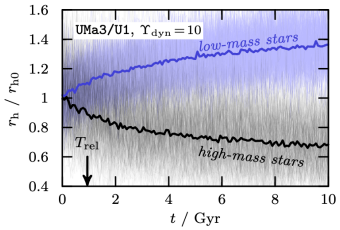


Fig.3: half-light radius時間変化

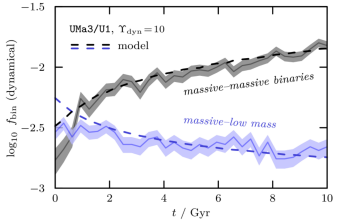


Fig.4: UMa3/U1モデルにおける高質量星の連星形成率の時間変化

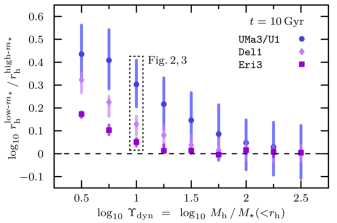


Fig.5: 各$\Upsilon_{\rm dyn}$における質量隔離度合い

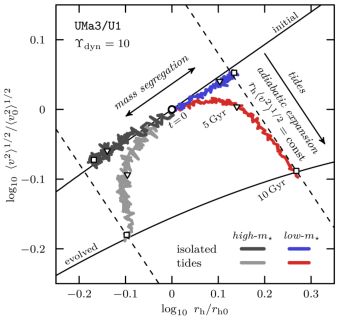


Fig.6: 半光半径の時間変化と質量隔離の度合い

【Comments】

- 既存のdSphのmultiple chemdynamical components?
- 中心大質量BH？
- より現実的な系？（~~重・軽半々~~ →質量分布）