Multi-component, axisymmetric dynamical models of dSphs based on distribution functions: inferences on dark matter and intermediate-mass black holes in Draco and Ursa Minor

GAゼミ@2026/06/02 佐藤恭輔

R. Pascale, G. Battaglia, J.M. Arroyo-Polonio, E. Vasiliev, C. Nipoti, G.F. Thomas 2026 arxiv.org/abs/2604.24855

【アブスト】解析的な星の軌道の分布関数(DF)に基づいた、軸対称で化学動力学的に異なるMultiple Stellar Popを仮定した力学モデルを導入し、Draco、Ursa Minorの二種の分光データセットに対して適用した。これらの化学動力学的に異なる恒星分布はDMやIMBHによって作られる球対称な重力ポテンシャルをトレースする。また、扁平な1成分モデルや球対称の2成分モデルを含む、異なるモデル仮定のもとで推定されるDMの性質も比較する。その結果、両銀河は、異なる化学・力学的性質を持つ2つの恒星集団でよく記述されることが分かった。また、両銀河で弱い回転の兆候を検出したが、これは力学的には重要でないため、モデルでは無視した。DracoではCusp状のDM密度プロファイルが得られ($\gamma = 0.98^{+0.28}_{-0.26}$)、Ursa MinorではCore型のプロファイルが得られた($\gamma = 0.37^{+0.31}_{-0.24}$)。Dracoではデータ間の差異、モデル間の際が小さく頑健な結果と言えるが、Ursa Minorに関してはモデル間の差異が大きかった。IMBHの存在証拠は見つからなかったが、95%の信頼水準で、Dracoでは$M_{BH} < 10^{5.2} M_\odot$,Ursa Minorでは$M_{BH} < 10^{3.33} M_\odot$が得られた。

【オリジナリティ】：軸対象の解析的分布関数モデル。【ゴール】：Core-Cusp Problemへの制限とIMBHの検出。

【解析的分布関数モデル】通常のJeans解析では速度分散の分布などを用いるのに対してDF解析では位相空間分布をモデル化する。観測されていない奥行き方向の位置 z と、X,Y方向の固有運動は、DFが予測する分布に従う変数として積分消去している

$$f_i(\boldsymbol{J}) = f_{\star,i} \frac{M_\star}{(2\pi J_{\star,i})^3} \left[1 - \beta \frac{J_{c,i}}{h_i(\boldsymbol{J})} + \left(\frac{J_{c,i}}{h_i(\boldsymbol{J})}\right)^2\right]^{-\frac{\Gamma_i}{2}} \times \left[1 + \left(\frac{J_{\star,i}}{h_i(\boldsymbol{J})}\right)^{\eta_i}\right]^{\frac{\Gamma_i}{\eta_i}} \left[1 + \left(\frac{g_i(\boldsymbol{J})}{J_{\star,i}}\right)^{\eta_i}\right]^{-\frac{B_i}{\eta_i}}$$

$$\rho_{\rm DM}(r) = \rho_s \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{r_s}\right)^{\alpha}\right]^{-\frac{\beta-\gamma}{\alpha}}, \quad (8)$$

DMの密度プロファイルモデル。ただし、DMは球対称な分布を仮定

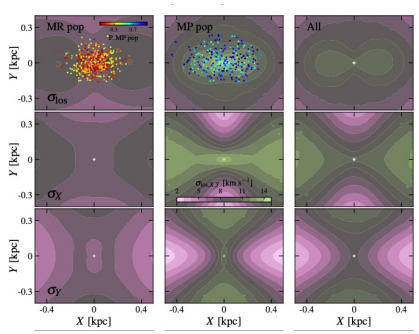
with ある恒星が、ある軌道Jをどれくらい持っているか示す位相空間分布

$$h_i(\boldsymbol{J}) = h_{r,i} J_r + h_{\phi,i} |J_\phi| + h_{z,i} J_z,$$
$$g_i(\boldsymbol{J}) = g_{r,i} J_r + g_{\phi,i} |J_\phi| + g_{z,i} J_z.$$

特定の軌道を制限するような関数。扁平な軌道を好むように制限

$$\mathcal{F}([\mathrm{Fe/H}], \boldsymbol{J}) = w_{\rm MR}\, \mathcal{F}_{\rm MR}([\mathrm{Fe/H}], \boldsymbol{J}) + w_{\rm MP} \mathcal{F}_{\rm MP}([\mathrm{Fe/H}], \boldsymbol{J}), \quad (2)$$

Multiple Popを 仮定した extended DF



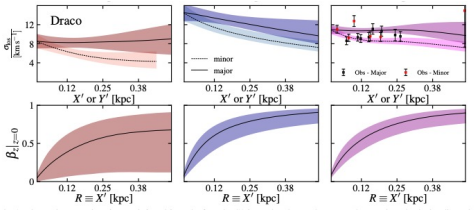


図３：推定したDM+IMBHの重力ポテンシャルの中での星の軌道情報(左図). 視線速度分散の半径プロファイルと、速度異方性の半径依存性。

【結果とディスカッション】

図４ DFモデルによるmultiple popの分類結果。Dracoでは[Fe/H]_MR =-1.98, MP=-2.37, Ursa MinorではMR=-2.18, -2.52ほどだと見積もられた。Dracoでは明らかな二峰は見えないが、Ursa Minorではmetal-poorなtaleが見える。

図6, 7：矮小銀河のsystemic velocityと方角ごとの星の視線速度の比較。Ursa MinorではMP成分にProlate rotationを検知.

図８：DM密度プロファイル。Sphericalな($J_\phi = J_z = L_z$)軌道のモデル、扁平で１成分のモデル、扁平で２成分のモデルをGeha+26, Walker+23のカタログに適用しinner slopeの傾きγを推定した。

Dracoではモデル、データに依存なくCusp型のプロファイルを示すのに対して、Ursa Minorでは $\gamma_{W23} = 0.74^{+0.22}_{-0.33}, \gamma_{G26} = 0.37^{+0.31}_{-0.24}$ とcore傾向だが不定性が高い。球対称モデルでは、Cuspだと Biasする傾向があるので、軸対称を仮定することが重要。

IMBHに関して：dSphの中で力学的に検出することは難しい。中心部のサンプルが少ないこと、重力ポテンシャルをDMが強く支配しているため。この論文の結論としては、Draco, Ursa Minorの中心に大きなIMBHはない。

【コメント】Dwarf-dwarf merger（特にminor merger）がcore型のDM halo profileを作るとしている理論研究(Orkney+2021)との比較をしても面白いかもしれない。

図6

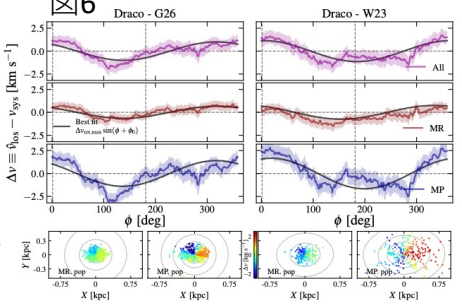


図7

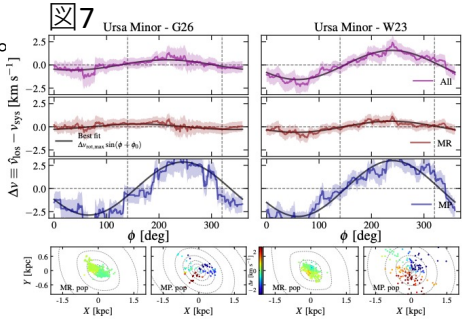


図４

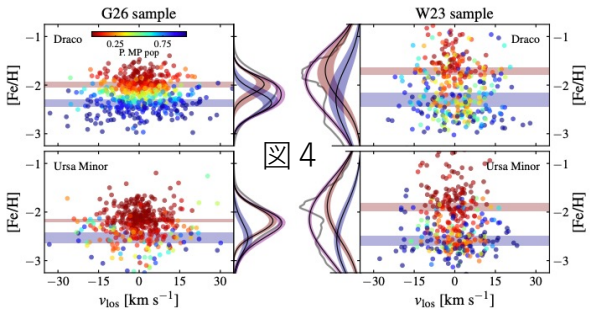


図8

