“Action-based distribution function modeling for constraining the shape of the Galactic dark matter halo”

Hattori, Valluri & Vasiliev 2020 arXiv:2012.03908

GAゼミ@20201224 林航平

【アブスト】
作用変数を用いた分布関数モデルをGaia DR2で得られたRRL星の5次元データに適用し，観測エラーを含めたベイズ推定から30kpc以内のダークマター密度分布を調べた．ダークハローの軸比qは事後分布の99%がq>0.963となり扁平なダークハローを棄却する結果となった（ただしq>1は考慮していない）．密度プロファイルの冪は内側でNFWとほぼ一致する．また太陽近傍のダークマター密度を求めると$\rho_{\mathrm{DM},\odot} = 0.342^{+0.007}_{-0.007}\ \mathrm{GeV/cm^3}$が得られた．

【ゴール】
銀河系ダークマター構造の解明

【オリジナリティ】
GaiaDR2のRRL星のデータを用いて，観測的不定性を考慮したベイズ推定から銀河系ダークハロー構造を推定した．

【ロジック】

・RRL星

Clean RRL catalog from Gaia DR2 (Iorio & Belokurov 2019).
Sgr stream, satellite gals, GCsのRRLは取り除いている．
$|b| \geq 20°$, $|z| \geq 5\mathrm{kpc}$, $d \leq 20\mathrm{kpc}$の星を選択．最終的にサンプル数は16197個（図1）．
観測データは次の五次元：$\mathbf{u} = (\ell, b, \mathscr{D}, \mu_\alpha, \mu_\delta)$

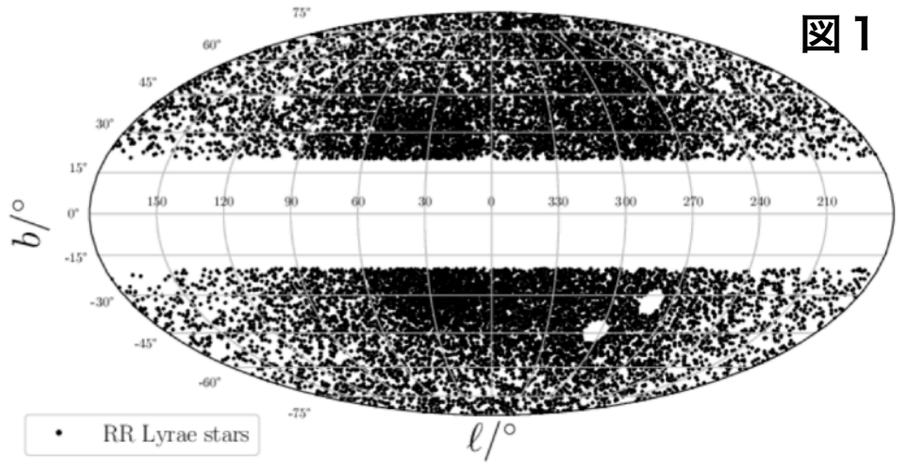


図１

・モデル

1. 密度プロファイル(軸対称を仮定)
バルジ・恒星円盤(thin,thick)・ガス円盤・ダークマターハローの密度分布を考慮

$$\rho_{\mathrm{DM}}(R,z) = \rho_0 \frac{a^3}{m^\gamma (a+m)^{3-\gamma}} \exp\left[-\left(\frac{m}{4\mathrm{kpc}}\right)^6\right] \qquad m^2 = R^2 + z^2/q^2 \ (q \leq 1)$$

2. Action-based DF：Posti+(2015)のdouble power-lawモデルを採用(裏面)

3. Likelihood function

Selection function　　ヤコビアン

$$\Pr(\bar{\boldsymbol{u}}_i|M) = \frac{S(\boldsymbol{x}(\bar{\boldsymbol{u}}_i)) \int \mathrm{d}^6\boldsymbol{u}'\ E(\bar{\boldsymbol{u}}_i|\boldsymbol{u}', M) f(\boldsymbol{u}'|M) \left|\frac{\partial(\boldsymbol{x}',\boldsymbol{v}')}{\partial \boldsymbol{u}'}\right|}{\int \mathrm{d}^6\boldsymbol{u} \int \mathrm{d}^6\boldsymbol{u}'\ E(\boldsymbol{u}|\boldsymbol{u}', M) f(\boldsymbol{u}'|M) S(\boldsymbol{x}(\boldsymbol{u})) \left|\frac{\partial(\boldsymbol{x}',\boldsymbol{v}')}{\partial \boldsymbol{u}'}\right|}$$

真の観測量$\mathbf{u}'$とモデルパラメータMが与えられた時に観測量$\mathbf{u}$が得られる確率

・視線速度v_{los}のデータが無いので，コーシー分布を仮定し尤度分布に重み付けする．
・RRLに加えて，回転曲線(v_{circ})と垂直方向の重力($K_{z,1.1\mathrm{kpc}}$)のデータも用いてフィッティング（図３）

・結果(図２)

(a) ダークハロー軸比の事後確率分布．q<0.963以下を棄却する結果．ただしprolateは考慮していないことに注意（DFが対応していない）．
(b), (c) R,z方向のダークマター密度分布．データは$5 \leq r/\mathrm{kpc} \leq 30$の範囲．
(d) 密度スロープ．中心部ではNFWと同じ-1を持つ．
その他の物理量：$M_{200} = 0.730^{+0.046}_{-0.052} \times 10^{12} M_\odot$, $M_{\mathrm{DM}}(<20\mathrm{kpc}) = 0.134^{+0.003}_{-0.002} \times 10^{12} M_\odot$
図４は太陽近傍のダークマター密度のサマリー．Hattori+2020は非常に精度良く決まる？

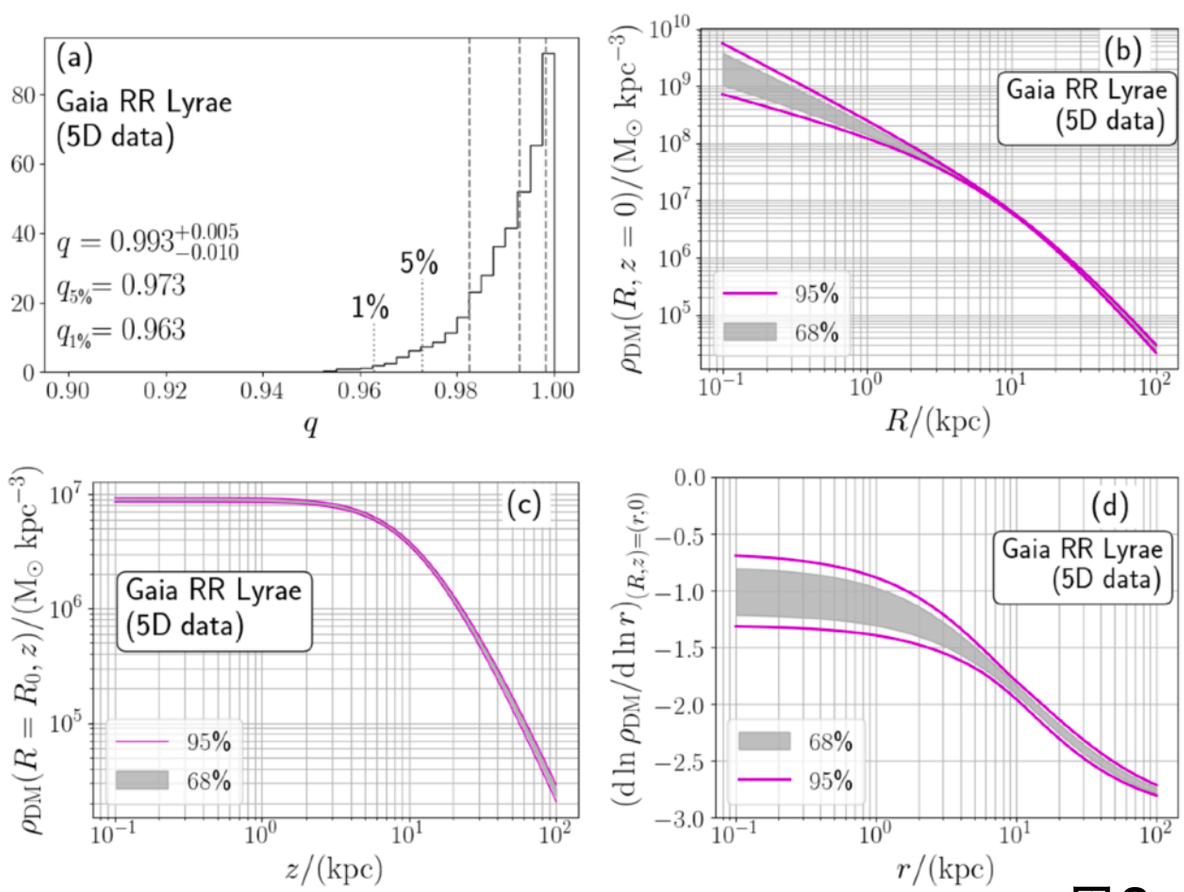


図２

【コメント＆感想】
・銀河系ハローが非平衡状態だと，qが大きい値にバイアスされるらしい．
・ダークハロー質量や，太陽近傍ダークマター密度が非常に良い精度で決まっている．ナゼ？
・視線速度データ＋スパースモデリングで更に精度が良くなるか？・Prolateも考慮した力学モデルの構築．

図3

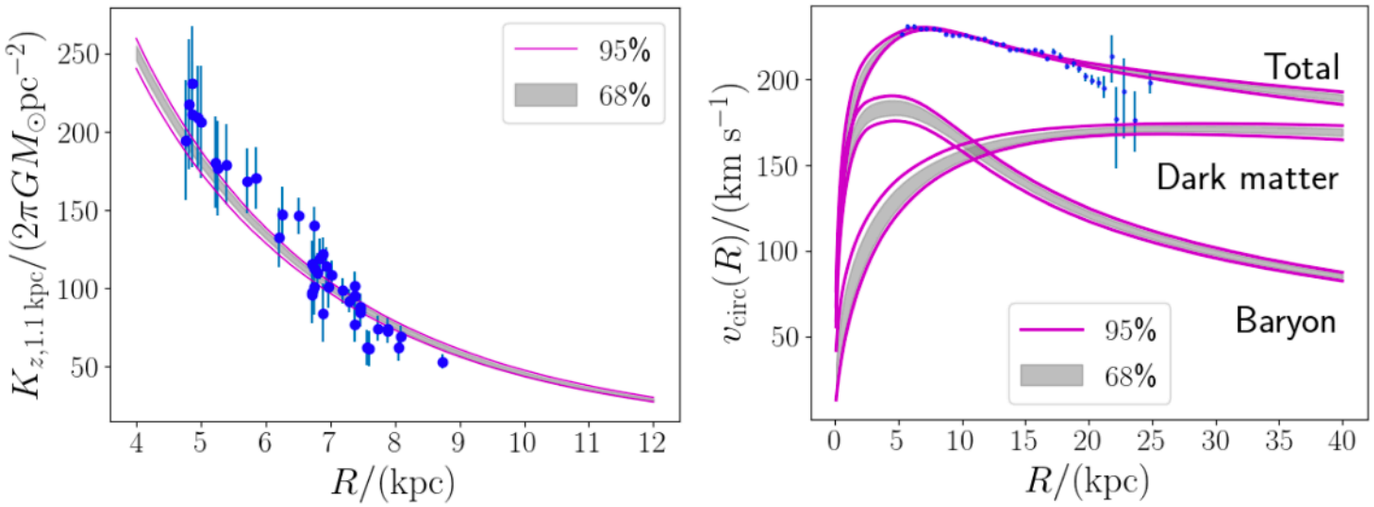
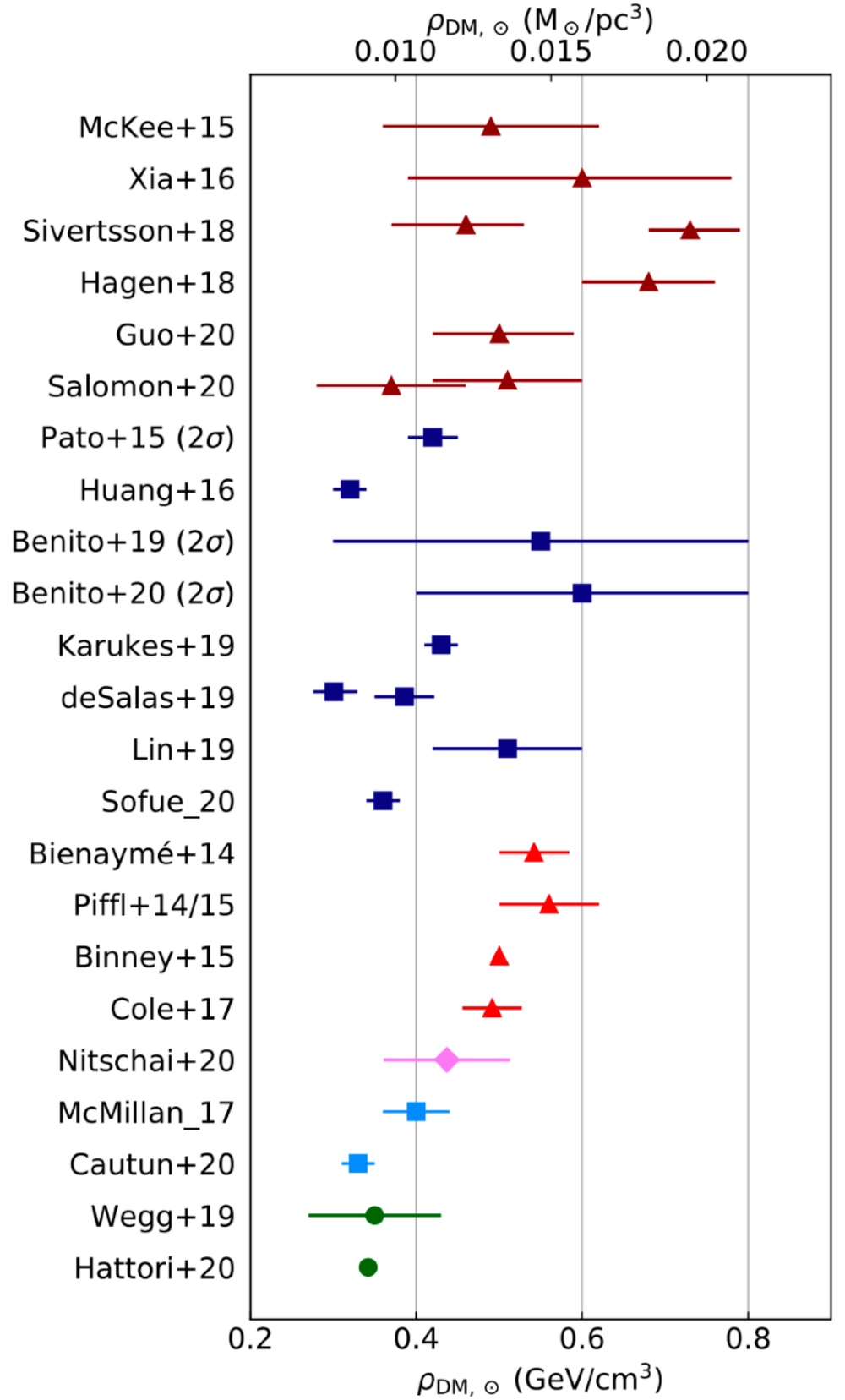


図4



分布関数

$$f(\boldsymbol{x},\boldsymbol{v}) = (1-\eta) f_{\mathrm{main}}(\boldsymbol{J}[\boldsymbol{x},\boldsymbol{v}]) + \eta f_{\mathrm{outlier}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{v}).$$

$$f_{\mathrm{main}}(J_r, J_\phi, J_z) =$$

$$\frac{C_A}{(2\pi J_0)^3}\left(\frac{h(\boldsymbol{J})}{J_0}\right)^{-\Gamma}\left[1+\left(\frac{g(\boldsymbol{J})}{J_0}\right)\right]^{(\Gamma-\boldsymbol{B})}\left[1+\kappa\tanh\left(\frac{J_\phi}{J_{\phi,0}}\right)\right]$$

$$f_{\mathrm{outlier}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{v}) = \begin{cases} 0, & (\text{if } \boldsymbol{x} \text{ is outside survey volume}) \\ C_B\left(2\pi\sigma^2_{\mathrm{outlier}}\right)^{-3/2}\exp\left[-\frac{|\boldsymbol{v}|^2}{2\sigma^2_{\mathrm{outlier}}}\right], & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

de Salas & Widmark (2020), arXiv:2012.11477