“The Escape Velocity Profile of the Milky Way from Gaia DR3”

Roche, Necib et al. 2024 arXiv:2402.00108

GAゼミ@20240418 林航平

【アブスト】

銀河系の脱出速度はダークマターを含めた質量分布を制限する上で有効な観測量の１つである。Gaia DR3の6Dデータを用いて、銀河系の$r \simeq [4,11]\,\mathrm{kpc}$における脱出速度を求めた。脱出速度を求める際、速度分布のhigh-velocity tailに対してモデルを仮定するが、パラメータが収束しない・脱出速度が外挿からしか得られないなど問題がある。これらを解消するための新しいモデルを導入し、半径ごとの脱出速度を計算した。この脱出速度プロファイルと回転曲線を再現するNFWダークマターハローのtotal massを計算すると $M_{200c}^{\mathrm{DM}} = 0.55^{+0.15}_{-0.14} \times 10^{12} M_\odot$ となった。

【ゴール】

銀河系ダークマターハロー質量への制限

【オリジナリティ】

脱出速度を求めるため、新たなhigh-velocity tail modelを導入した。

【ロジック】

◆ DATA

- Gaia DR3 6D data（図４）。Selection criteriaは以下の通り。
  - `RUWE` ≤ 1.4
  - `RV_NB_TRANSITS` ≥ 10
  - `RV_EXPECTED_SIG_TO_NOISE` ≥ 10
  - Positive zero-point-corrected parallax $\varpi - \varpi_{zp} > 0$
  - Parallax error: $\sigma_\varpi / (\varpi - \varpi_{zp}) \leq 10\%$
  - Minimum speed: $v \geq 300\,\mathrm{km\,s^{-1}}$
  - Speed error: $\sigma_v / v \leq 1\%$

◆ MODELING THE TAIL

Likelihood function : $\mathcal{L}_\alpha = (1 - f_{\mathrm{out}}) p_\alpha(v_\alpha|\theta) + f_{\mathrm{out}} p_\alpha^{\mathrm{out}}(v_\alpha|\sigma_{\mathrm{out}})$

Functional forms of the tail:

1. Single power law (1PL)
2. Multiple power law (2PL)

$$p(v|v_{\mathrm{esc}}, k) \propto (v_{\mathrm{esc}} - v)^k$$

1,2の問題点：① v_{esc}とkの強い縮退。② v_{esc}がv_{min}に強く依存する(図５左)。

3. Stretched exponential power law (SEPL)：high velocity tailのpower lawを維持しつつ、v_{min}付近は指数関数で対応。

$$p(v|v_{\mathrm{esc}}, \beta, \gamma = 1, \tau) \propto (v_{\mathrm{esc}} - v)^\gamma \exp\left[\left(\frac{v_{\mathrm{esc}} - v}{\tau}\right)^\beta\right]$$

図1

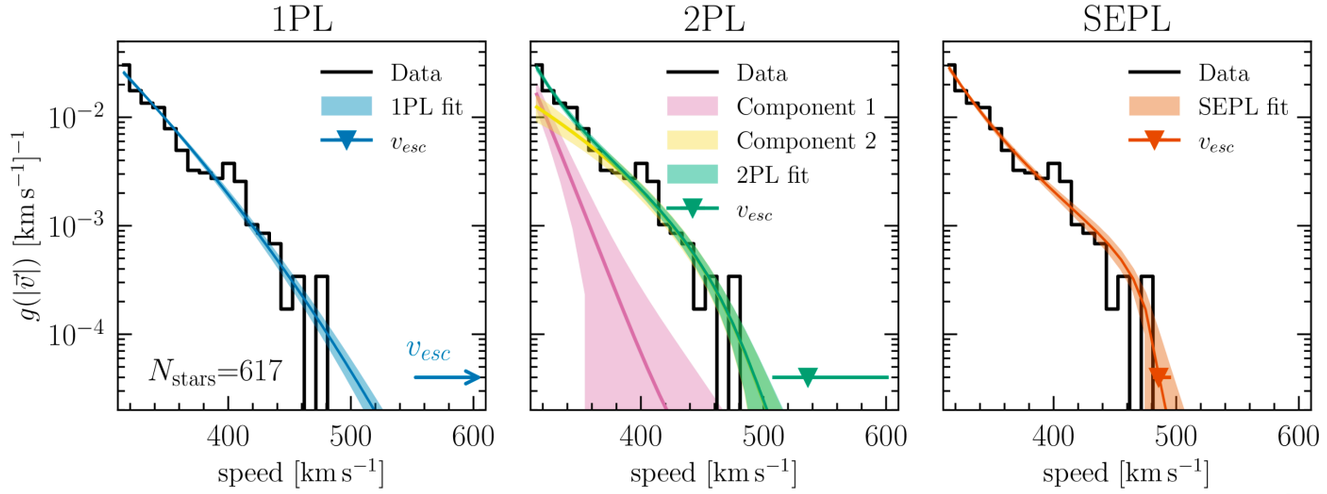


図2

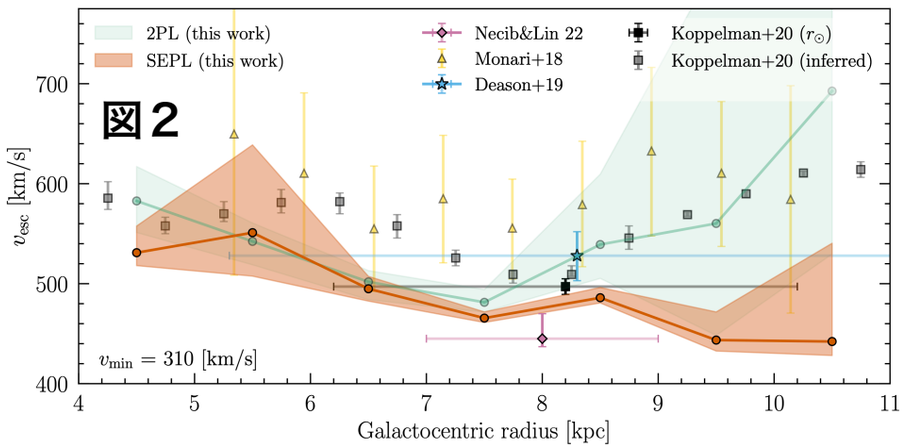
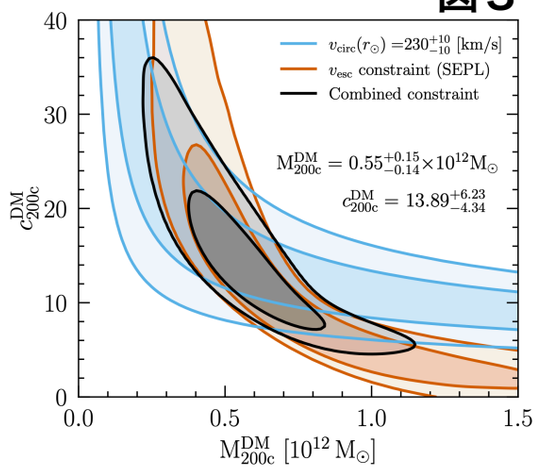


図3



◆ 結果

図１：$r \simeq [8,9]\,\mathrm{kpc}$での速度分布とmodel fitの結果($v_{\mathrm{min}} = 310\,\mathrm{km\,s^{-1}}$)。1PL, 2PLの場合、脱出速度がデータの無いところにある。⇒ 外挿から得られる結果。
SEPLは観測データを良く再現可＆脱出速度がデータの範囲内。赤池情報量規準でモデル比較してもSEPLがもっと良い。

図２：脱出速度のradial profileと先行研究との比較。2PLは外側ほど脱出速度が大きくなりunphysicalだと主張。5-6 kpc, 10-11kpcでエラーが大きいのはサンプル数の不足。

図３：NFW modelのパラメータ(c, M200)の事後分布。バリオン成分はgalpyを用いてBulge, thin/thick diskのpotentialを考慮。

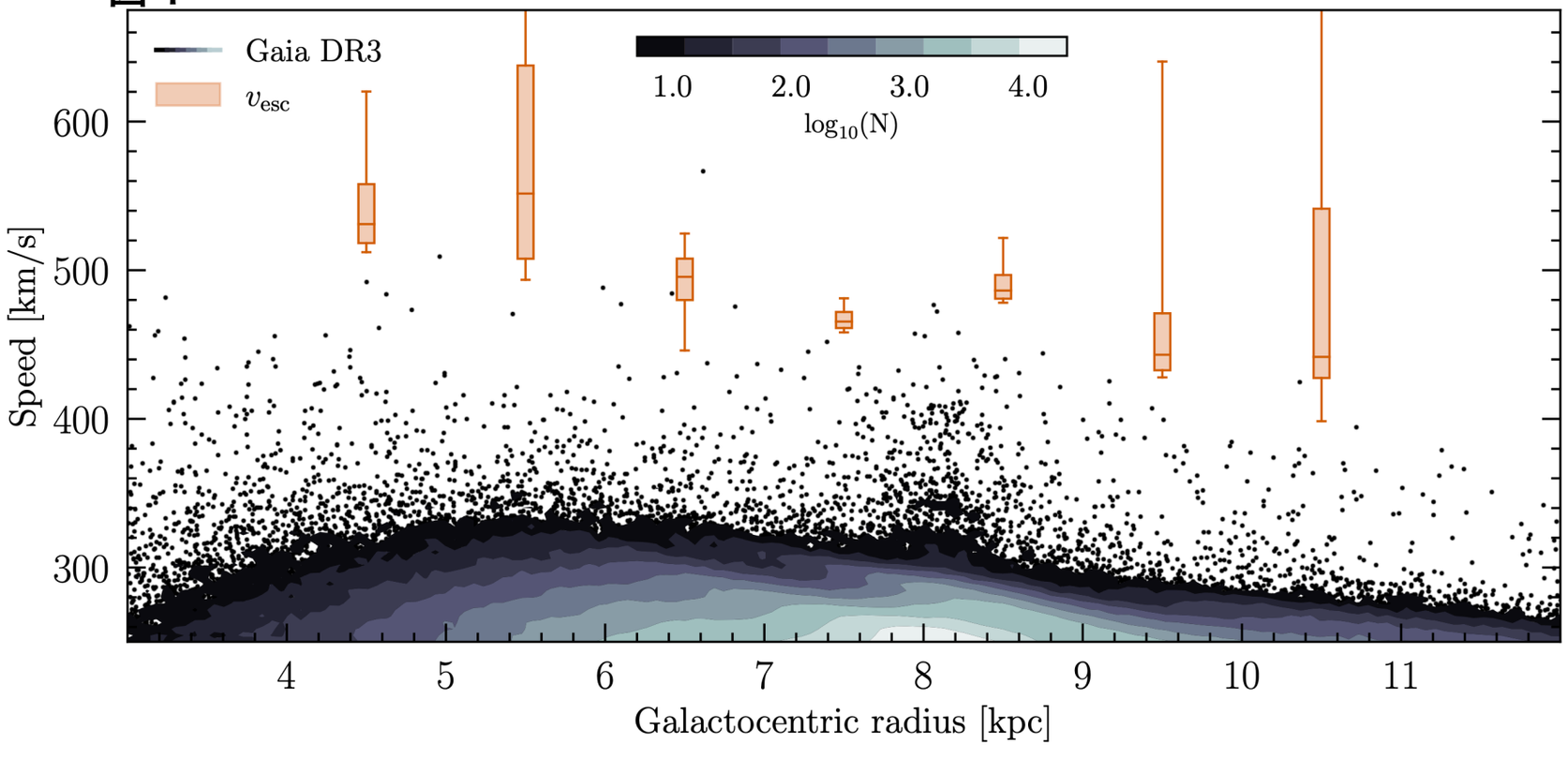
図５左：脱出速度推定のv_{min}依存性。1PL, 2PLモデルは強く依存するが、SEPLモデルはほとんど依存しない。

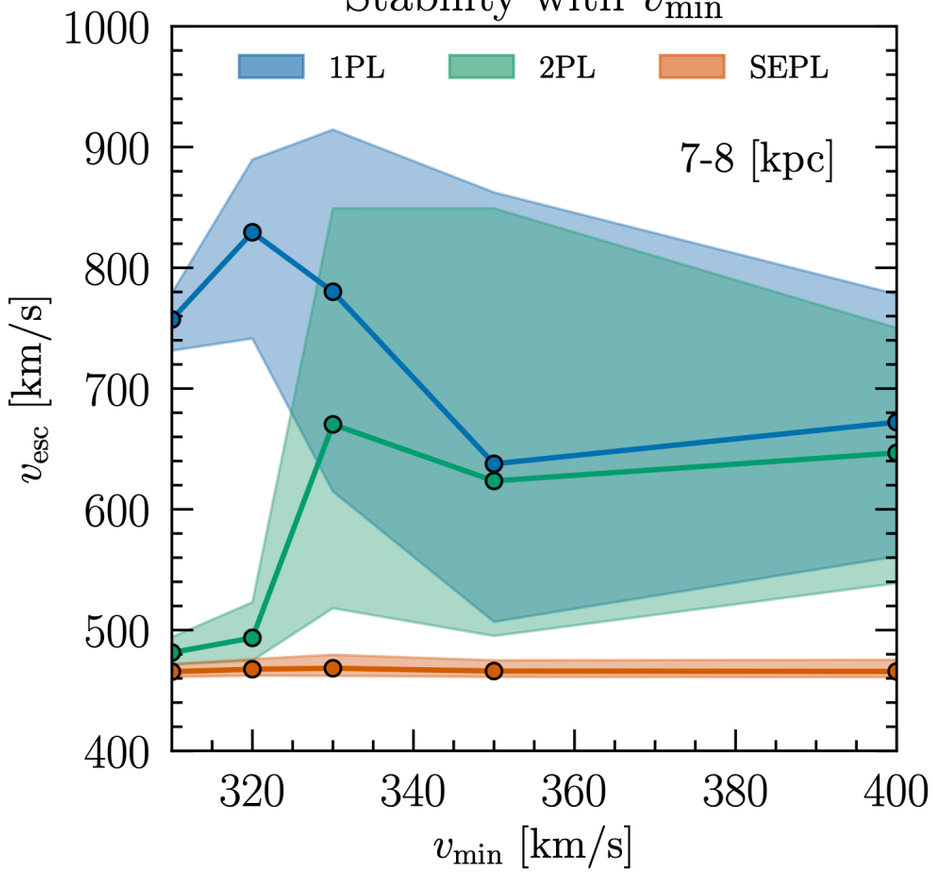
図５右：脱出速度推定のγ依存性。論文では$\gamma = 1$を採用（脱出速度がデータの範囲内になるので）。

【コメント＆感想】

- データの空間分布は？非球対称な重力ポテンシャルを考慮すべきか？
- 脱出速度がデータの範囲内になければいけない理由はあるのか？（外挿したくないのはわかるが）。この制約がlow DM massの要因になっているのでは。
- DM massがNFWだとだいぶ軽い。core DMが良い？全ての力学解析をcombineするとどうなるか？

図4


Gaia DR3
$v_{\rm esc}$
1.0
2.0
3.0
4.0
$\log_{10}$(N)
Speed [km/s]
600
500
400
300
4
5
6
7
8
9
10
11
Galactocentric radius [kpc]


Stability with $v_{\rm min}$
1PL
2PL
SEPL
7-8 [kpc]
1000
900
800
700
600
500
400
$v_{\rm esc}$ [km/s]
320
340
360
380
400
$v_{\rm min}$ [km/s]

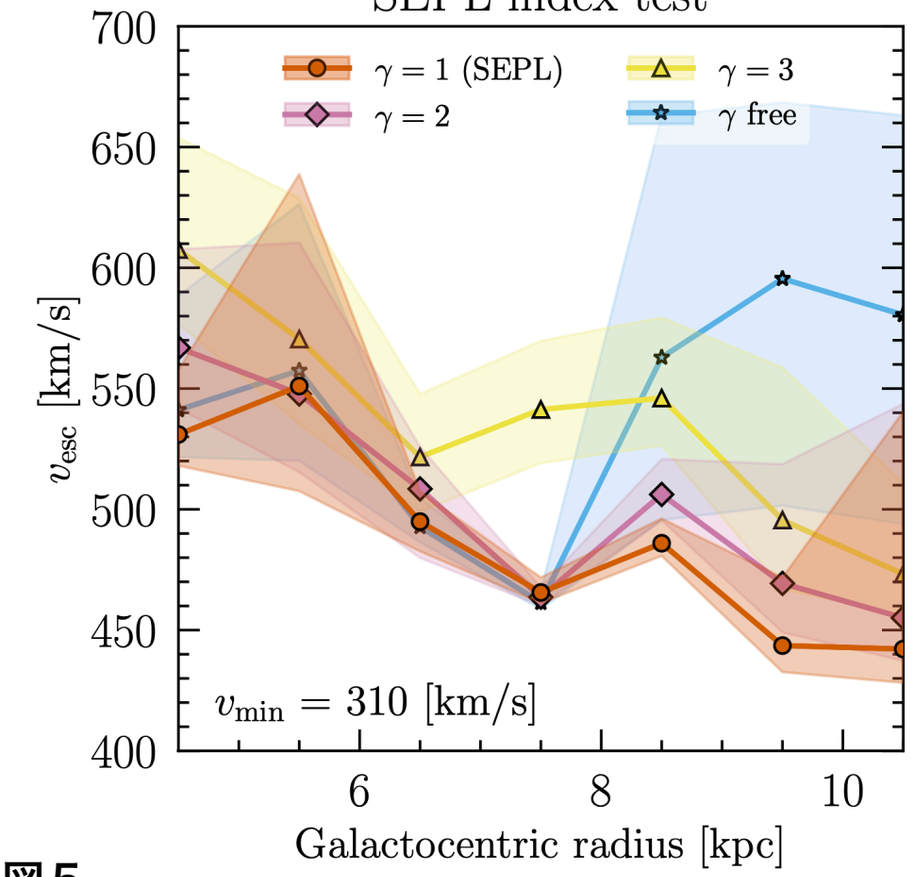

SEPL index test
$\gamma = 1$ (SEPL)
$\gamma = 2$
$\gamma = 3$
γ free
700
650
600
550
500
450
400
$v_{\rm esc}$ [km/s]
$v_{\rm min} = 310$ [km/s]
6
8
10
Galactocentric radius [kpc]

図5