# Which Milky Way masses are consistent with the slightly declining 5-25 kpc rotation curve?

**Y. Jiao, F. Hammer, J. L. Wang, & Y. B. Yang** (arXiv:2107.00014, accepted in A&A)

2021/07/19, 梨本 真志

**[Abst.]** 高精度な銀河の回転曲線（RC）はDM分布のモデル検証に有用．本研究はMWの5-25kpcの範囲にあるRCの僅かに減少していることがDMプロファイルを用いた銀河の総質量推定にもたらす影響を調べる．その結果，Einastoプロファイルが DM分布を表すのにより相応しく，他モデルより小さな質量が期待されることが分かった．

**[Goal]** 渦状銀河の質量測定精度を向上させる手法の確立に向け，仮定するDM分布の違いによる影響を調べる．

**[Originality]** 複数のバリオンモデルを考慮し，外側の高精度なRCデータを加味したDMモデルの検証

**[Logic]** MW RC（図1）をDMプロファイルを用いてフィッティングし，モデルごとの$\chi^2$確率分布を比較

**データ**…APOGEE(DR14)/Gaia((DR2)/2MASS/WISEによるRG星(23129個)をJeansモデルに適用し回転速度を導出

**モデル**…DMハロー：NFW，generalized NFW，Einasto （$\rho_{(g)NFW} = \rho_0/[(r/r_0)^{\gamma}(1+r/r_0)^{3-\gamma}]$，$\rho_{Ein} = \rho_0 \exp[-(r/h)^{1/n}]$）

総バリオン：**S** (バルジ：Plummer, thin円盤：宮本-永井)
**A&S**(バルジ：Plummer, thin円盤：宮本-永井)
**I**(バルジ：Plummer, thin&thick円盤：指数関数型)

バルジ：**E2** (三軸不等型)、**G2**(boxyな三軸不等型)； 円盤：**dJ, J, CM** (double 指数関数型)

**結 果**…

図 3：A&Sモデルに対する結果は他と傾向が異なる(表4) → A&Sモデルはthick disk が加味されていないから？
EinastoはNFWやgNFWと比べて広い質量範囲で$\chi^2$確率の値が大きくより低質量を好む(表4)
Einastoはバリオン質量が小さくなるにつれ総質量が大きくなるが、NFWやgNFWはその逆の傾向を示す
→バリオン，DM成分ともに質量が大きいほど回転曲線の寄与が大きくなるので，Einastoの挙動は妥当的
NFWの場合，スケール半径を大きくして回転曲線にフィットするように働くため質量が大きくなる．

図 5：contracted DM haloの質量分布をEinastoはよくフィットするがNFWやgNFWではフィットが困難
→RCと矛盾なく説明できるEinastoがDMプロファイルとしてより相応しいと考えられる．

図 6：(球状星団の運動エネルギー) < (Einastoから期待される質量($2.6\times10^{11}M_\odot$)に基づくポテンシャルの絶対値)
→ 質量の下限値 ($M_{tot} \sim 2.6\times10^{11}M_\odot$) は球状星団の観測と無矛盾（∵ 束縛系の全エネルギーは負）

**結 論**…RCの再現にはEinastoが良く，$2.5 < M_{tot}/10^{11}M_\odot < 18$ と推定．制限を絞るには$r > 25$ kpcの情報も有用．

**[Comments]**

- RCのerror barの妥当性は？（cf. Eilers+19）
- バリオンモデルをフリーにしたら？
- 他の銀河では？
  - RCはdecliningしてる？
  - Einastoがより相応しいのは普遍？
  - 同様の手法で解析可能？

**図1 MW RC のモデルと観測データ**

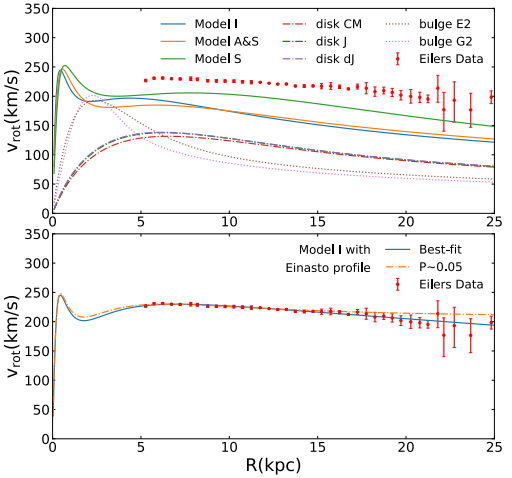



**図3 chi-squared 確率分布**

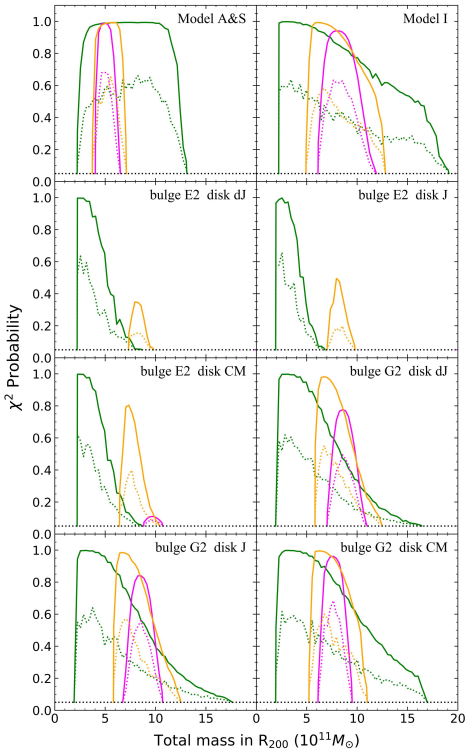



**図5 DM質量 vs. 半径**

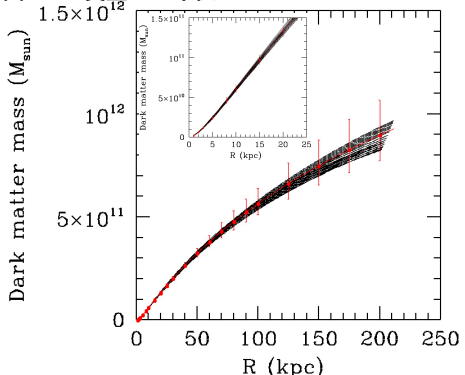
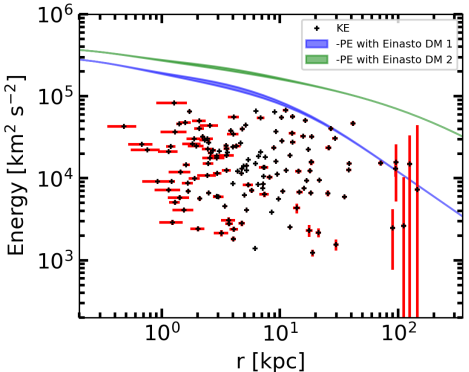



**図6 球状星団の運動エネルギー**



**Model S, A&S, and I**

$$\rho_{\rm MN} = \frac{b^2 M}{4\pi} \frac{\left(R^2 a + 3\sqrt{z^2+b^2}\right)\left(a+\sqrt{z^2+b^2}\right)^2}{\left[R^2+\left(a+\sqrt{z^2+b^2}\right)^2\right]^{5/2}\left(z^2+b^2\right)^{3/2}}$$

$$\rho_{\rm Plum} = \frac{3 b_{\rm bulge}^2 M_{\rm bulge}}{4\pi\left(r^2+b_{\rm bulge}^2\right)^{5/2}}$$

**Model E2 and G2**

$$\rho_{\rm E2} = \rho_0 \exp\left[-\sqrt{\left(\frac{x}{x_b}\right)^2+\left(\frac{y}{y_b}\right)^2+\left(\frac{z}{z_b}\right)^2}\right]$$

$$\rho_{\rm G2} = \rho_0 \exp\left[-\frac{1}{2}\sqrt{\left(\left(\frac{x}{x_b}\right)^2+\left(\frac{y}{y_b}\right)^2\right)^2+\left(\frac{z}{z_b}\right)^4}\right]$$

**Model CM, J, and dJ**

$$\rho_{\rm CM} = \Sigma_{\rm thin}\left[\frac{1}{2H_1}\exp\left(-\frac{R}{L_1}-\frac{z}{H_1}\right)+f_{\rm thick}\frac{1}{2H_2}\exp\left(-\frac{R}{L_2}-\frac{z}{H_2}\right)\right]$$

$$\rho_{\rm J/dJ} = \rho_{\rm thin,\odot}\left[e^{R_\odot/L_1}\exp\left(-\frac{R}{L_1}-\frac{z}{H_1}\right)+f_{\rm thick}e^{R_\odot/L_2}\exp\left(-\frac{R}{L_2}-\frac{z}{H_2}\right)\right]$$

**表1 Model S, A&S, and I のパラメータ**

| Parameter | Model I | Model A&S | Model S |
|---|---|---|---|
| $M_{\rm bulge}(10^{10}M_\odot)$ | 1.067 | 1.406 | 2.5 |
| $M_{\rm thin}(10^{10}M_\odot)$ | 3.944 | 8.561 | 11.2 |
| $M_{\rm thick}(10^{10}M_\odot)$ | 3.944 | — | — |
| $a_{\rm thin}$(kpc) | 5.3 | 5.3178 | 5.73 |
| $a_{\rm thick}$(kpc) | 2.6 | — | — |
| $b_{\rm bulge}$(kpc) | 0.3 | 0.3873 | 0.87 |
| $b_{\rm thin}$(kpc) | 0.25 | 0.25 | — |
| $b_{\rm thick}$(kpc) | 0.8 | — | — |

**表2 Model E2 and G2 のパラメータ**

| Parameter | bulge E2 | bulge G2 |
|---|---|---|
| $M_{\mathbf{bulge}}(10^{10}M_\odot)$ | 2.41 | 2.12 |
| $x_b$(kpc) | 0.899 | 1.239 |
| $y_b$(kpc) | 0.386 | 0.609 |
| $z_b$(kpc) | 0.250 | 0.438 |

**表3 Model CM, J, and dJ のパラメータ**

| Parameter | disk CM | disk J | disk dJ |
|---|---|---|---|
| $M_{\mathbf{thin}}(10^{10}M_\odot)$ | 3.11 | 3.17 | 3.33 |
| $M_{\mathbf{thick}}(10^{10}M_\odot)$ | 0.82 | 0.90 | 0.78 |
| $L_{\mathbf{1}}$(kpc) | 2.75 | 2.6 | 2.6 |
| $L_{\mathbf{2}}$(kpc) | 4.1 | 3.6 | 4.1 |
| $H_{\mathbf{1}}$(kpc) | 0.25 | 0.3 | 0.25 |
| $H_{\mathbf{2}}$(kpc) | 0.75 | 0.9 | 0.75 |

**表4 総質量・ビリアル半径のベストフィットモデル**

| Baryon model | $M_{\rm bar}$ | $M_{\rm tot}$ Einasto best fit | $R_{200}$ Einasto best fit | $M_{\rm tot}$ Einasto average | $M_{\rm tot}$ NFW best fit | $R_{200}$ NFW best fit | $M_{\rm tot}$ NFW average | $M_{\rm tot}$ gNFW best fit | $R_{200}$ gNFW best fit | $M_{\rm tot}$ gNFW average |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S | 1.370 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| A&S | 0.997 | $7.36^{+3.11}_{-2.85}$ | $186.22^{+20.07}_{-40.21}$ | $7.20^{+2.24}_{-2.34}$ | $4.93^{+1.03}_{-0.54}$ | $151.17^{+14.04}_{-12.30}$ | $5.13^{+0.66}_{-0.60}$ | $5.83^{+0.95}_{-0.66}$ | $161.92^{+15.02}_{-12.13}$ | $5.26^{+0.74}_{-0.66}$ |
| I | 0.896 | $2.77^{+6.13}_{-0.29}$ | $134.48^{+70.29}_{-9.12}$ | $6.56^{+4.70}_{-3.12}$ | $8.02^{+2.49}_{-0.97}$ | $184.26^{+24.45}_{-13.59}$ | $8.66^{+1.48}_{-1.45}$ | $6.15^{+3.09}_{-0.76}$ | $166.44^{+30.60}_{-13.34}$ | $8.23^{+1.82}_{-1.61}$ |
| E2 dJ | 0.652 | $2.37^{+1.03}_{-0.23}$ | $127.63^{+17.75}_{-10.13}$ | $3.01^{+0.70}_{-0.46}$ | — | — | — | $7.93^{+0.85}_{-0.70}$ | $186.47^{+8.52}_{-13.45}$ | $8.42^{+0.68}_{-0.65}$ |
| E2 J | 0.648 | $2.56^{+1.60}_{-0.13}$ | $130.99^{+17.78}_{-14.46}$ | $3.13^{+0.93}_{-0.82}$ | — | — | — | $7.97^{+1.09}_{-0.74}$ | $186.79^{+9.92}_{-14.62}$ | $8.51^{+0.79}_{-0.75}$ |
| E2 CM | 0.634 | $2.41^{+1.30}_{-0.75}$ | $128.34^{+18.66}_{-18.43}$ | $3.59^{+1.01}_{-0.81}$ | $9.68^{+1.45}_{-0.51}$ | $200.24^{+9.77}_{-14.37}$ | $9.72^{+0.80}_{-0.89}$ | $7.44^{+1.48}_{-0.61}$ | $182.41^{+15.54}_{-11.74}$ | $8.08^{+0.94}_{-0.93}$ |
| G2 dJ | 0.623 | $3.08^{+3.72}_{-0.10}$ | $139.3^{+48.34}_{-7.93}$ | $4.10^{+2.40}_{-1.40}$ | $8.58^{+1.30}_{-1.11}$ | $192.00^{+10.12}_{-18.24}$ | $9.01^{+1.06}_{-1.07}$ | $6.82^{+2.20}_{-0.86}$ | $176.89^{+20.79}_{-14.63}$ | $8.26^{+1.47}_{-1.23}$ |
| G2 J | 0.619 | $3.11^{+4.68}_{-0.14}$ | $139.82^{+58.41}_{-6.41}$ | $4.46^{+3.04}_{-1.61}$ | $8.41^{+1.25}_{-1.30}$ | $190.64^{+12.75}_{-16.62}$ | $8.76^{+0.93}_{-1.09}$ | $6.70^{+2.79}_{-0.74}$ | $175.79^{+26.47}_{-13.41}$ | $8.57^{+1.62}_{-1.53}$ |
| G2 CM | 0.605 | $3.29^{+4.80}_{-0.28}$ | $142.39^{+59.48}_{-10.11}$ | $5.69^{+3.95}_{-2.49}$ | $7.53^{+1.18}_{-0.93}$ | $183.45^{+12.61}_{-14.05}$ | $7.82^{+0.82}_{-0.89}$ | $6.19^{+2.32}_{-0.58}$ | $170.99^{+23.49}_{-11.31}$ | $7.60^{+1.36}_{-1.19}$ |