

# Jedan novi pogled na kretanje zvezda tankog diska iz Sunčeve okoline

Milan Stojanović

Astronomska opservatorija Beograd

*mstojanovic@aob.rs*

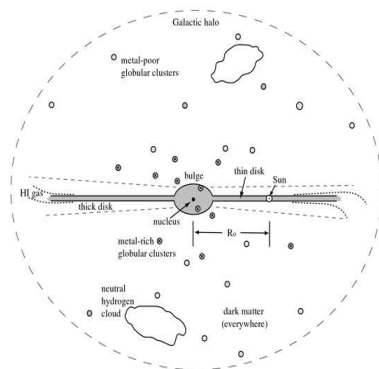
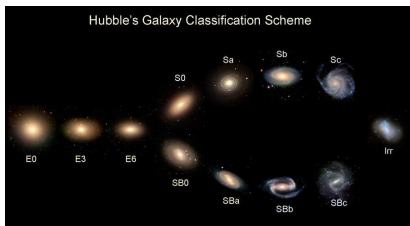
09.05.2017.

# Pregled

- 1 Uvod
  - Mlečni put - osnovne karakteristike
  - Kretanje proizvoljne zvezde u polju Mlečnog puta
  - Kružna brzina i potencijal
- 2 Sunčeva okolina
  - Sunčeva okolina definicija
  - Približno određivanje  $R_m$  i  $e$
  - Katalog SPOCS i rezultati
- 3 Periodično kretanje
  - Kružne učestanosti
  - Katalog GCS III i rezultati

# Mlečni put - osnovne karakteristike

Spiralna galaksija tipa SBb, apsolutna velicina  $M_V = -20.6$  mag



Podsistemi su centralni oval, disk i halo.

# Kretanje proizvoljne zvezde u polju Mlečnog puta

- Neka je  $V$  brzina neke zvezde u odnosu na središte MP
  - $\vec{V} = \vec{u} + \vec{v}$ , gde je  $\vec{u}$  brzina centroida, a  $\vec{v}$  sopstvena brzina
  - $\overline{V^2} = \overline{u^2} + \overline{v^2}$ , srednji kvadrat brzine u odnosu na središte MP
- Neka je  $q$  bilo koja veličina koja opisuje MP,  $t$  vreme i  $(R, \theta, Z)$  cilind. galaktocent. koor. sistem, onda je značenje
  - $\frac{\partial q}{\partial t} = 0$  stacionarno stanje
  - $\frac{\partial q}{\partial \theta} = 0$  obrtna simetrija
- Sferna simetrija je poseban slučaj obrtne simetrije kada  $q$  zavisi samo od promenljive  $\mathcal{R}$ ,  $\mathcal{R} = \sqrt{R^2 + Z^2}$
- Putanje centroida su kružnice u ravnima paralelnim sa  $Z = 0$
- Kod centralnog ovala i haloa u ukupnoj k.e. preovladjuje član od sopstevnih brzina, slaba spljoštenost sistema, sferna simetrija
- Kod diska preovladjuje član od obrtanja sistema, izražena spljoštenost, brzina obrtanja zavisi od  $R$  i  $|Z|$ .

# Kretanje proizvoljne zvezde u polju Mlečnog puta

- Neka je  $\Pi$  potencijal Galaksije i  $J_z$  komponenta specifičnog momenta količine kretanja, u opštem slučaju kretanje probne materijalne tačke (pmt) se događa u tri dimenzije. Ako vazi stacionarno stanje i obrtna simetrija dobijamo:

- $\ddot{R} - \frac{J_z^2}{R^3} = \frac{\partial \Pi}{\partial R}$       Lagranževe jednačine
- $\ddot{Z} = \frac{\partial \Pi}{\partial Z}$

$\Delta \Pi = -4\pi G \rho$  ,    gde je  $\rho$  gustina MP

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2}$$

- Zbog stacionarnog stanja biće:  $E = \frac{1}{2}V^2 - \Pi = const$  ,

$V^2 = \dot{R}^2 + \Theta^2 + \dot{Z}^2$ ,  $\Theta \equiv R\dot{\theta}$ , zbog obrtne simetrije  $J_z = R\Theta = const$ .

- Ukoliko još važi uslov za separabilnost potencijala:  $\Pi = \Pi_R + \Pi_Z$

- U tom slučaju postoje dva integrala energije:

- $E_R = \frac{1}{2}(\dot{R}^2 + \Theta^2) - \Pi_R$  ,     $E_Z = \frac{1}{2}\dot{Z}^2 - \Pi_Z$

- Zajedno sa  $J_z$  oni obrazuju sistem od tri nezavisna jednoznačna integrala kretanja koji određuju orbitu probne materijalne tačke.

# Kretanje proizvoljne zvezde u polju Mlečnog puta

- Ako je zvezda vezana gravitacijom ( $E < 0$ ), ona će se uvek nalaziti između dva koaksijalna valjka i dve paralelne ravni:

$$R = R_p, R = R_a, \text{ odnosno } Z = h, Z = -h.$$

- Umesto toga koristimo dve veličine srednje rastojanje i ekscentričnost:  $R_m = \frac{R_a + R_p}{2}$ ,  $e = \frac{R_a - R_p}{R_a + R_p}$

- Separabilnost je primenljiva na orbite bliske kružnicama!

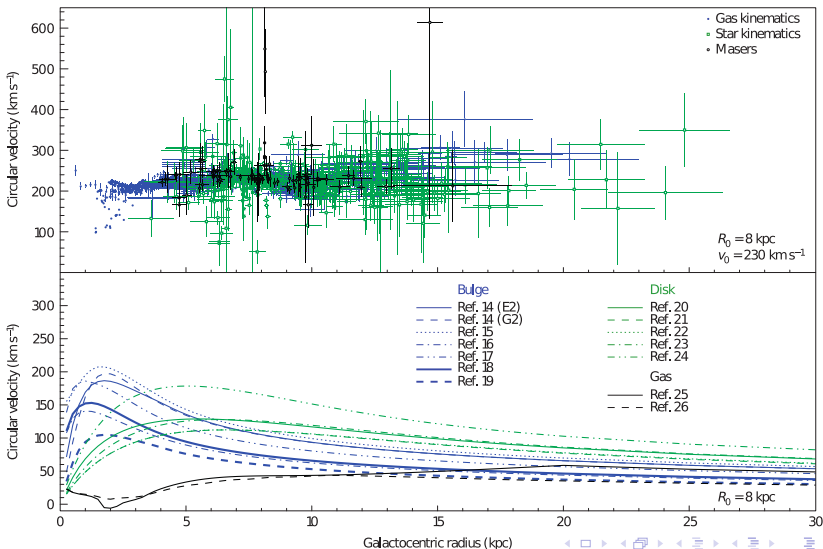
- U slučaju kružnog kretanja važi:  $\dot{R} = 0$ ,  $|\Theta| = u_c$ ,  $\dot{Z} = 0$

$u_c$  je kružna brzina i definiše se za određeno  $R$  u ravni  $Z = 0$ .

$$u_c = \sqrt{-R \frac{\partial \Pi}{\partial R}} \quad \text{i tada važi} \quad |J_z| = R \sqrt{-R \frac{\partial \Pi}{\partial R}}$$

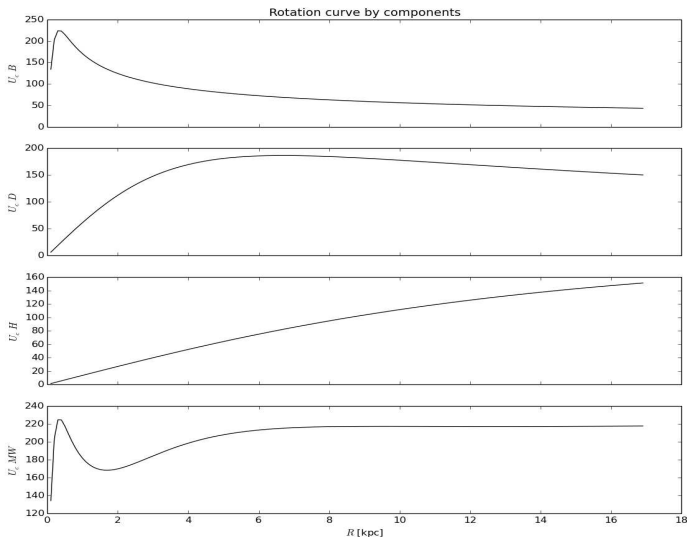
# $u_c$ - posmatrački materijal za MP

(Iocco et al. 2015, Nature physics, vol. 11, p. 245)



# Potencijal - trokomponentni analitički model

(Ninković 1992, Astronomische Nachrichten, vol. 313, p. 83)





# Sunčeva okolina

- Sunčeva okolina je mala oblast. Predstavlja *elemetaranu makroskopsku zapreminu*.
  - Elementarna jer je mnogo manja od ukupne zapremine Galaksije,
  - Makroskopska jer sadrži velik broj zvezda, dovoljno velik da bude opravdana primena statističkog metoda unutar nje.
- Odabir uzorka tj. kataloga i problem selektivnog efekta
- Odabir zvezda tankog diska, dva metoda:
  - prema heliocentričnoj brzini zvezde i
  - prema ekscentričnosti i maksimalnoj udaljenosti od ravni.

## Približno određivanje $R_m$ i $e$

- Ako je ekscentričnost dovoljno mala onda će interval  $[R_{pmin}, R_{amax}]$  biti dovoljno uzak da bi važila aproksimacija stepenim zakonom za kružnu brzinu unutar intervala:

$$\bullet u_c(R) \propto R^{\frac{1-\alpha}{1+\alpha}} \quad (*), \quad \alpha = \frac{A}{|B|}$$

- Pošto se sve zvezde iz uzorka nalaze na (približno) istoj poziciji:  $R = R_\odot$ ,  $Z = 0$ , a ispunjen je uslov (\*), uz to da su galaktocentrične komponente brzine  $\dot{R}$  i  $\Theta$  poznate, onda se vrednosti  $R_m$  i  $e$  mogu odrediti relativno lako prateći proceduru koja je opisana u radu Ninković (2011, Astrophysics, vol. 54, p. 439).

- Dalje treba ustanoviti koliko je ovakva aproksimacija opravdana.

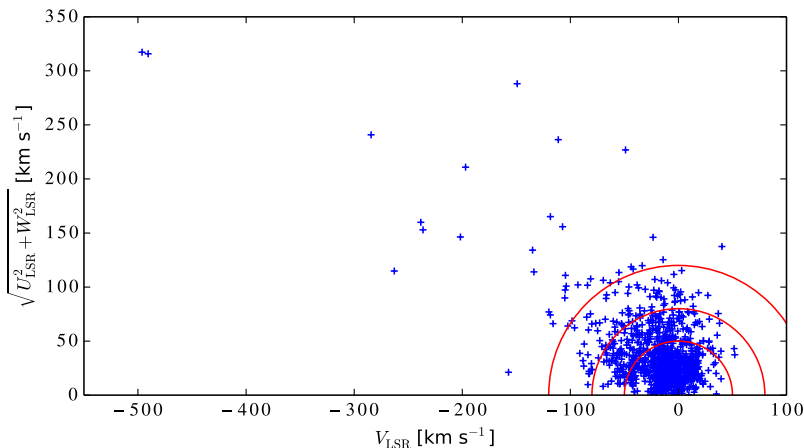
- Iste parametre odredimo za isti uzorak rešavajući Lagranževe jednačine. Rezultati su dati u radu (Stojanović 2015, SAJ, vol. 191, p. 75). Numericki integrator, RK4 metod.

- Medjutim ta procedura nije baš jednostavna i zahteva dosta računarskog vremena, dok je ovaj drugi metod mnogo brži ali je aproksimativan.

# Katalog SPOCS

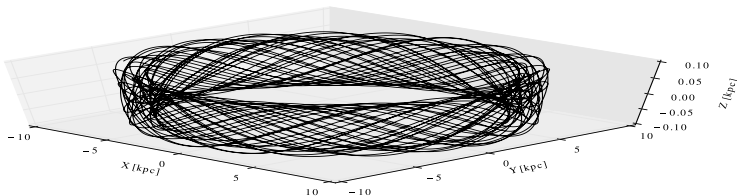
- Katalog Spectroscopic Properties Of Cool Stars (SPOCS) (Valenti & Fisher, 2005, ApJ, vol. 159 p.141)
- Sadrži spektroskopske podatke o 1040 obližnjih zvezda koje su posmatrane u okviru "Keck, Lick and AAT planet search programs". Spektri visokog kvaliteta su kombinovani sa fotometrijom u V filtru i trigonometrijskim paralaksama sa Hiparkos satelita.
- Ovo je jedan od najkompletnijih kataloga u odnosu na zapreminu koju obuhvata, za Sunčevu okolinu. Za ukupno 1026 zvezda imamo sve podatke koji nam trebaju ovde a to su pozicija zveze, sopstveno kretanje, radijalna brzina i udaljenost.

# Katalog SPOCS - odabir zvezda

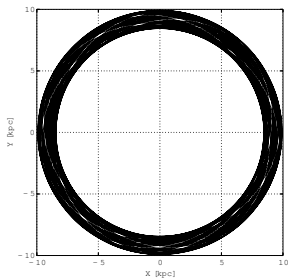
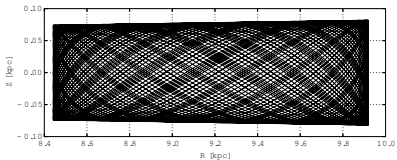


Tumrov dijagram za SPOCS katalog, linije pokazuju granice za heliocentričnu brzinu za 50, 80, 120  $\text{km s}^{-1}$  redom.

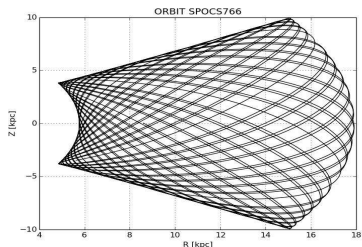
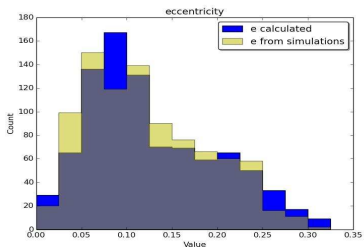
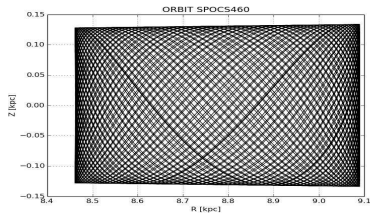
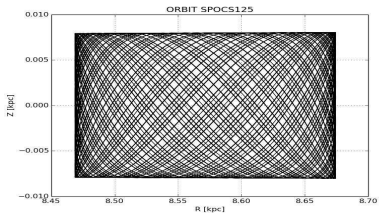
# Primer orbite



gore: prikaz u 3D; dole: prikaz u meridijanskoj ravni i projekcija na galaktičku ravan

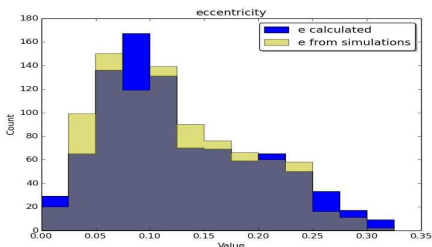
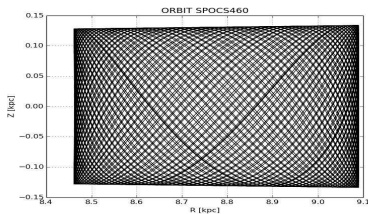


# Rezultati



# Prednosti i mane ovog pristupa

- Numerički model daje veliku tačnost za  $R_m$ ,  $e$  i  $|Z|_{max}$  za tanki disk
- Orbite jasno ukazuju na pripadnost tankom disku
- Provera odbačenih zvezda iz uzorka
- Dobijeno je poklapanje sa izračunatim vrednostima za  $R_m$  i  $e$



- Odredjen odnos Ortovih konstanti blizu 1
- Dužina trajanja računanja orbite
- Moguće samo na malim uzorcima

## Periodično kretanje zvezde u tankom disku

- Kretanje zvezde u tankom disku je takvo da postoje tri vrste periodičnog kretanja:

- po kružnici  $R = R_m$ ,  $Z = 0$  i linearnog harmonijskog oscilovanja u odnosu na kružnicu ,
- u ravni  $Z = 0$ ,
- i duž normale na ravan  $Z = 0$ .

- Za te tri vrste kretanja definišu se kružne učestanosti:  $\omega_c$ ,  $\kappa_p$ ,  $\kappa_z$  koje zavise od  $R_m$ . Ako je  $R_m = R_\odot$  onda je:

- $\omega_c = \frac{u_c}{R_\odot}$  ,  $A = -\frac{1}{2}R_\odot \left( \frac{d\omega_c}{dR} \right)_\odot$  ,  $B = A - \omega_c(R_\odot)$  ,

- $\kappa_p(R_\odot) = \frac{2(A-B)}{\sqrt{\alpha+1}}$  ,  $C = \sqrt{-\left( \frac{\partial^2 \Pi}{\partial Z^2} \right)_\odot}$  ,  $\kappa_z(R_\odot) = C$

$\omega_c$  - ugaona brzina,  $A$ ,  $B$  - Ortove konstante,

$\kappa_p$ ,  $\kappa_z$  - kružne (epiciklične) učestanosti,  $C$  - Kuzminova konstanta



# Katalog GCS III

- Katalog GCS III (Nordström et al. (2004) A&A, vol. 418, p. 989) sadrži 16682 zvezde, sa preciznim merenjima radijalne brzine,  $uvby\beta$  fotometrijom, Hiparkos paralakse i Tycho-2 svojstvene brzine.
- U radu (Cubarsi, Stojanović, Ninković, Serb. Astron. J., 2017) uradjena je analiza ovog kataloga i izračunate su lokalne kinematičke konstante iz poduzoraka zvezda tankog diska.
- Odabir zvezda tankog diska je uradjen prema sledećem kriterijumu:  $e < 0.3$  i  $|Z|_{max} \leq 0.5$  kpc i ukupno 12056 zvezda je odabrano.
- Zatim su napravljeni poduzorci koristeći sledeći princip:
  - Fiksiramo  $|Z|_{max} \leq 0.5$  kpc i pravimo poduzorke tako što postepeno smanjujemo ekscentričnosti, i analogno fiksiramo  $e < 0.3$  i smanjujemo  $|Z|_{max}$ .
  - Odatle su izračunati lokalna ugaona brzina i dve epiciklične učestanosti. Zatim odredjeni su momenti svojstvenih brzina drugog reda, odnos Ortovih konstanti i uticaj asimetričnog drifta.

# Tabela sa rezultatima za poduzorke prema $e$

$N$	$e_0$	$\bar{e}$	$\overline{e^2}$	$z_0$	$\overline{ Z _{max}}$	$\overline{ Z _{max}^2}$	$U_0$	$V_0$	$W_0$
12056	0.29	0.105	0.014	0.50	0.162	0.038	$-9.5 \pm 0.26$	$-15.74 \pm 0.16$	$-6.93 \pm 0.11$
11119	0.20	0.0932	0.0109	0.50	0.159	0.037	$-9.23 \pm 0.24$	$-13.68 \pm 0.15$	$-6.89 \pm 0.11$
9719	0.15	0.0809	0.0078	0.50	0.156	0.036	$-9.89 \pm 0.22$	$-11.58 \pm 0.14$	$-6.8 \pm 0.11$
7170	0.10	0.0646	0.0048	0.50	0.152	0.034	$-9.94 \pm 0.2$	$-9.52 \pm 0.13$	$-6.63 \pm 0.13$
2409	0.05	0.0355	0.0014	0.50	0.155	0.035	$-9.62 \pm 0.19$	$-5.97 \pm 0.14$	$-6.96 \pm 0.23$
1052	0.03	0.0221	0.0006	0.50	0.146	0.031	$-9.83 \pm 0.18$	$-5.9 \pm 0.13$	$-7.61 \pm 0.33$
213	0.01	0.0089	0.0001	0.50	0.136	0.028	$-10.32 \pm 0.17$	$-5.55 \pm 0.14$	$-7.04 \pm 0.71$

kpc

 $\text{km s}^{-1}$ 

$N$	$e_0$	$\overline{v_R^2}$	$\overline{v_{R\theta}}$	$\overline{v_\theta^2}$	$\overline{v_{RVZ}}$	$\overline{v_{\theta VZ}}$	$\overline{v_Z^2}$	$\kappa_p$	$\gamma^2$
12056	0.29	$843.28 \pm 11.12$	$89.83 \pm 4.85$	$325.5 \pm 4.56$	$-1.67 \pm 3.23$	$6.95 \pm 2.12$	$135.33 \pm 1.57$	40.14	2.59
11119	0.20	$653.02 \pm 7.72$	$69.32 \pm 3.57$	$247.82 \pm 3.36$	$-0.69 \pm 2.84$	$6.08 \pm 1.86$	$130.94 \pm 1.6$	40.78	2.64
9719	0.15	$489.66 \pm 5.63$	$59.05 \pm 2.61$	$178.77 \pm 2.32$	$-2.06 \pm 2.54$	$0.46 \pm 1.65$	$126.93 \pm 1.68$	41.71	2.74
7170	0.10	$278.28 \pm 3.4$	$47.85 \pm 1.84$	$130.57 \pm 1.7$	$-2.77 \pm 2.16$	$-4.2 \pm 1.53$	$122.13 \pm 1.92$	40.13	2.13
2409	0.05	$83.18 \pm 1.73$	$6.38 \pm 1.05$	$46.35 \pm 1.01$	$1.83 \pm 2.13$	$0.49 \pm 1.62$	$128.6 \pm 3.44$	40.00	1.79
1052	0.03	$33.48 \pm 1.02$	$0.47 \pm 0.6$	$17.17 \pm 0.6$	$1.17 \pm 1.9$	$-0.32 \pm 1.48$	$116.93 \pm 4.77$	40.93	1.95
213	0.01	$5.88 \pm 0.43$	$0.03 \pm 0.28$	$3.92 \pm 0.28$	$-0.73 \pm 1.6$	$-1.76 \pm 1.59$	$107.09 \pm 10.69$	42.83	1.50

 $\text{km}^2 \text{s}^{-2}$  $\text{km s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$



# Epiciklična formula

- Kada je brzina centroida poznata, može se za svaku zvezdu poduzorka odrediti svojstvena brzina. Najniži red za momente svojstvenih brzina je drugi. Može se definisati šest takvih momenata po koordinatnim osama sistema. Oni obrazuju jedan tenzor:

$$\begin{bmatrix} \overline{v_R^2} & \overline{v_R v_\theta} & \overline{v_R v_Z} \\ \overline{v_\theta v_R} & \overline{v_\theta^2} & \overline{v_\theta v_Z} \\ \overline{v_Z v_R} & \overline{v_Z v_\theta} & \overline{v_Z^2} \end{bmatrix}$$

Mogu se definisati relacije izmedju dinamičkih konstanata i srednjih kvadrata svojstvene brzine:

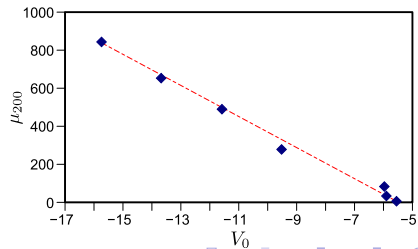
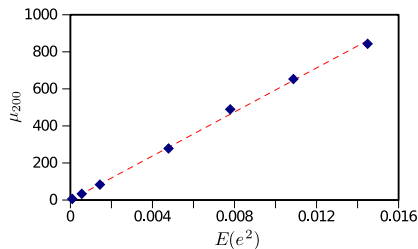
- $\overline{v_R^2}(R_\odot, 0) \approx \frac{1}{2} R_\odot^2 \frac{4(A-B)^2}{\alpha+1} e^2 = \frac{1}{2} R_\odot^2 \kappa_p^2(R_\odot) e^2$
- $\overline{v_\theta^2}(R_\odot, 0) \approx \frac{1}{2} R_\odot^2 \frac{4(A-B)^2}{(\alpha+1)^2} e^2$
- $\overline{v_Z^2}(R_\odot, 0) \approx \frac{1}{2} C^2 |Z|_{max}^2 = \frac{1}{2} \kappa_z^2(R_\odot) |Z|_{max}^2$

- $\frac{\overline{v_\theta^2}(R_\odot, 0)}{\overline{v_R^2}(R_\odot, 0)} = \frac{1}{1+\alpha}$
- $\gamma_c^2 = \overline{v_R^2} / \overline{v_\theta^2}$

# Rezultati

- Za fiksirano  $|Z|_{max}$  što je manja vrednost  $e$  to su manji  $\overline{v_R^2}$  i  $\overline{v_\theta^2}$
- Epiciklična učestanost u ravni  $\kappa_p = 41.1 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$

- Fit pokazuje odsecaj na  $x$  osi koji daje  $v_\odot = 5.25 \pm 0.3$



# Rezultati

- Kod grafika za  $\overline{v_\theta^2}$  problem je kod  $\gamma_c$

- Popravka za asimetrični drift je

$$\Delta^2 = \gamma_c^{-2} \overline{v_R^2} - \overline{v_\theta^2}$$

onda sledi da je  $\alpha \approx 1$

onda se dobija vrednost  $\omega_c = 29.2$

za vrednost  $R_\odot = 8.5$  kpc.

- Odredjena je i epiciklična

učestanost duž normale

$$\kappa_z = 84.0 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$$

