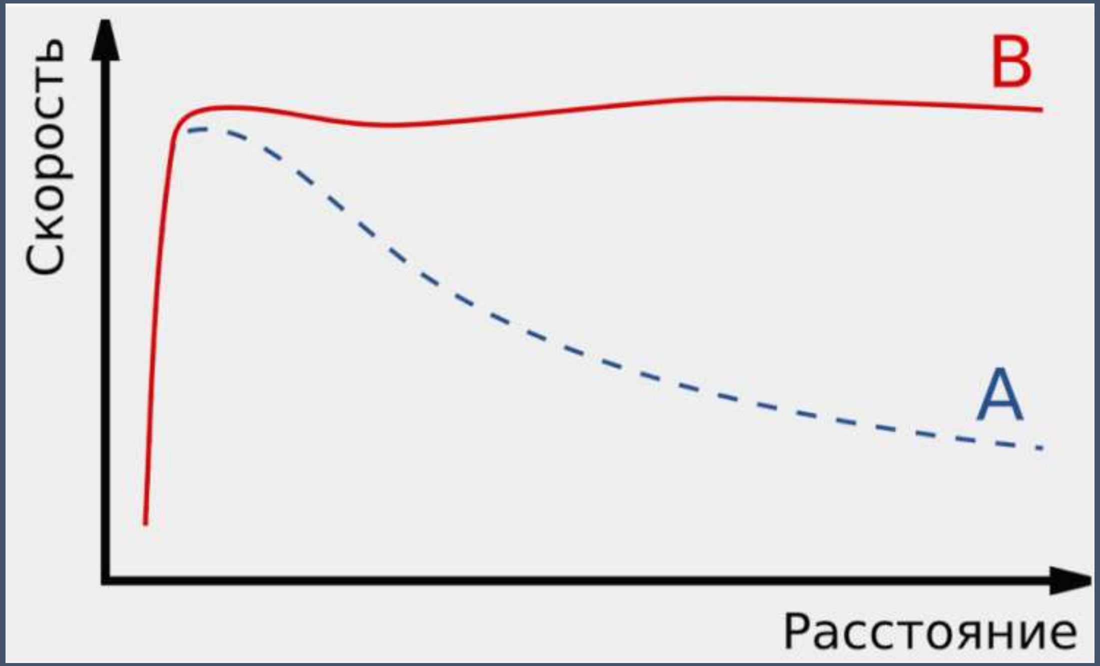
Восстановление профиля темной материи в карликовых сферических галактиках

Выполнил:
Бакаев Дмитрий
Научный руководитель:
Горбунов Д.С.

Введение


Скорость
B
A
Расстояние


МАССА-ЭНЕРГИЯ
темная материя
видимая материя
темная энергия
26%
5%
69%

Постановка задача

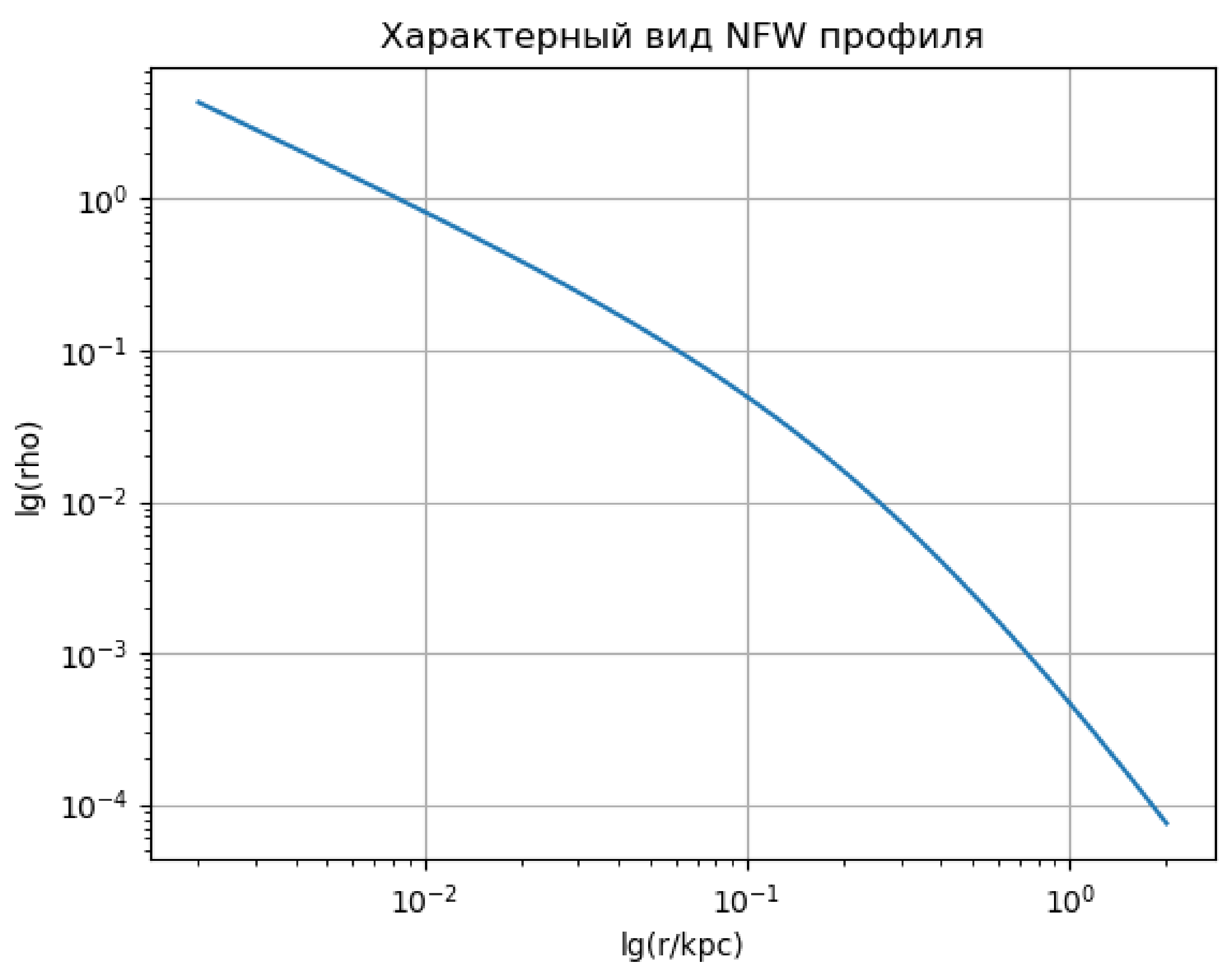
1. Моделирование карликовой сферической галактики.
2. Восстановление профиля темной материи смоделированной галактики при помощи GravSphere.
3. Сравнение результатов.

NFW – профиль

$$\rho(\mathrm{r}) = \frac{\rho_0}{\frac{\mathrm{r}}{\mathrm{R_s}}\left(1 + \frac{\mathrm{r}}{\mathrm{R_s}}\right)^2}$$

R_s и ρ_0 - заданные параметры

$$\phi(\mathrm{r}) = \frac{-4\pi G\rho_0 \mathrm{R_s^3}}{\mathrm{r}} \ln\left(1 + \frac{\mathrm{r}}{\mathrm{R_s}}\right)$$

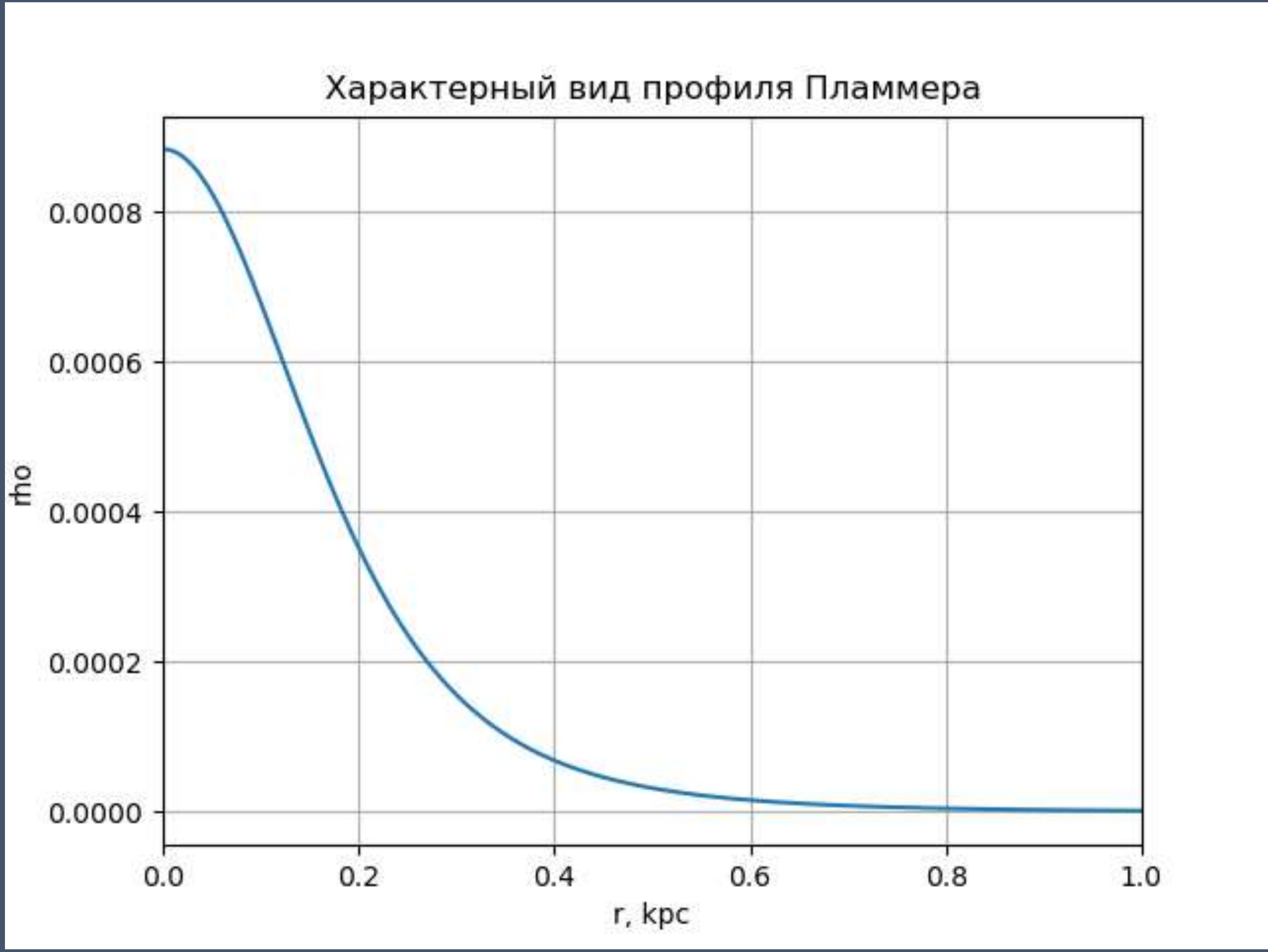

Характерный вид NFW профиля
lg(rho)
lg(r/kpc)
10^{0}
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}

Профиль Пламмера

$$\rho(r) = \frac{3M_0}{4\pi a^3}\left(1 + \frac{r^2}{a^2}\right)^{-\frac{5}{2}}$$

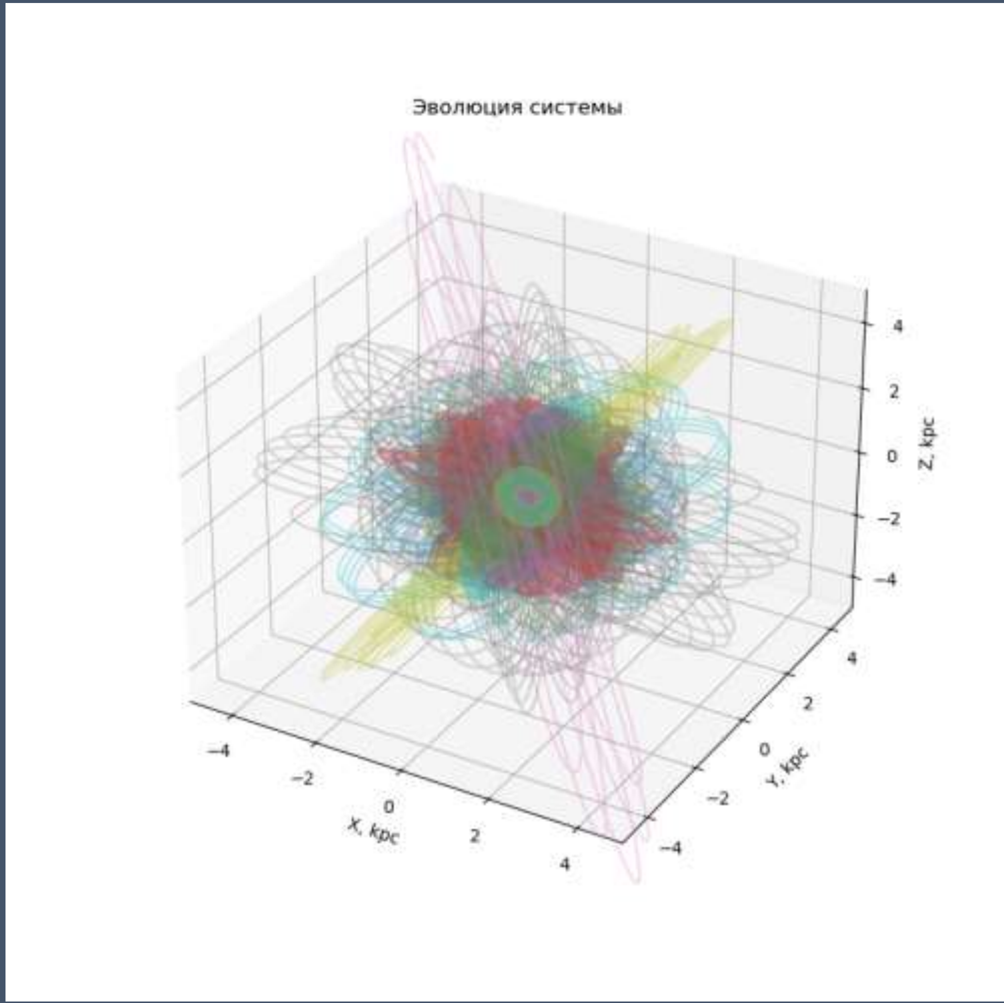
a и M_0 - характерный радиус и общая масса скопления соответственно.

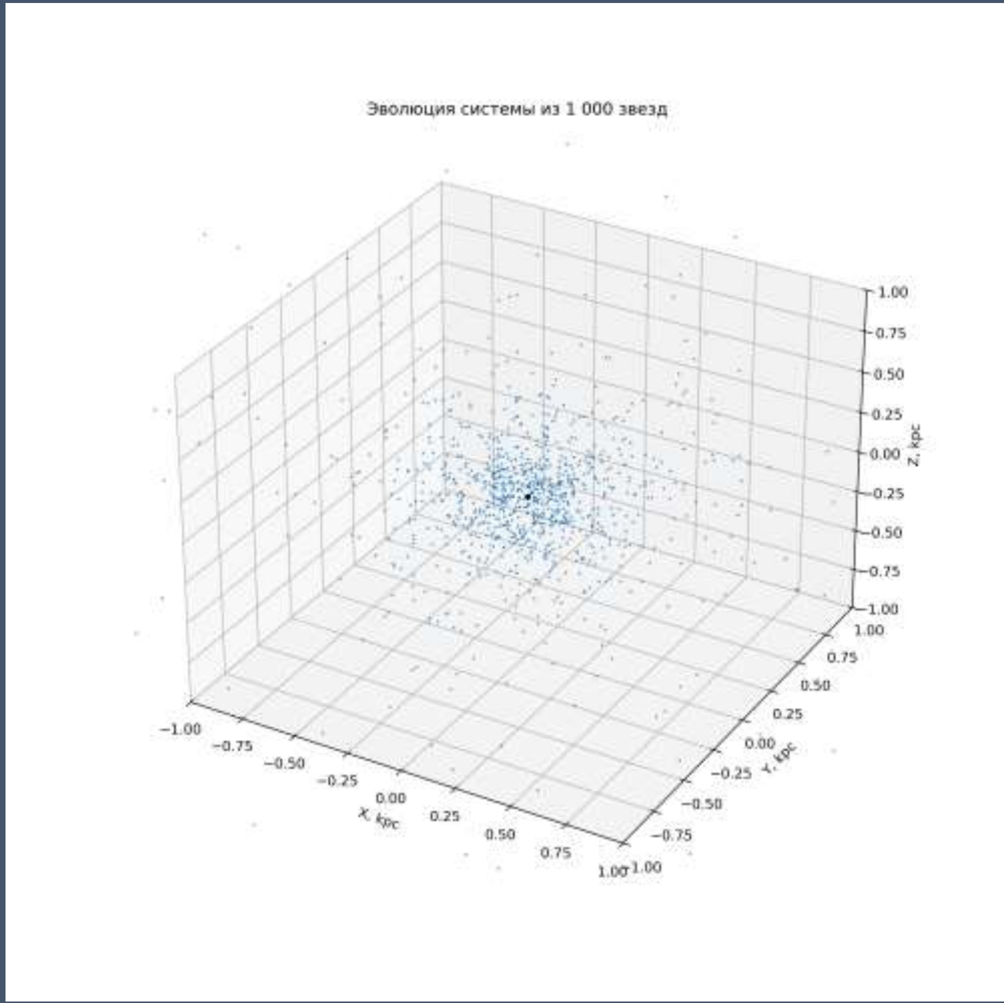
$$\phi(r) = \frac{-GM_0}{\sqrt{r^2 + a^2}}$$



Характерный вид профиля Пламмера
0.0008
0.0006
0.0004
0.0002
0.0000
rho
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
r, kpc

Результаты моделирования





Метод Gravsphere

Кинетическое уравнение Больцмана:

$$\frac{\mathrm{df}}{\mathrm{dt}} = \frac{\partial \mathrm{f}}{\partial \mathrm{t}} + \nabla_{\mathrm{x}} \mathrm{f}\vec{\mathrm{v}} - \nabla_{\mathrm{v}} \mathrm{f} \nabla_{\mathrm{x}} \phi = 0$$

$f(\vec{x}, \vec{v})$ – функция распределения звезд в фазовом пространстве

После интегрирования по радиальной скорости:

$$\frac{1}{\upsilon}\frac{\partial}{\partial \mathrm{r}}(\upsilon \sigma_{\mathrm{r}}^{2}) + \frac{2\beta(\mathrm{r})\sigma_{\mathrm{r}}^{2}}{\mathrm{r}} = -\frac{\mathrm{GM}(<\mathrm{r})}{\mathrm{r}^{2}}$$

Анизотропия скоростей системы: $\beta(r) = 1 - \frac{\sigma_t^2}{\sigma_r^2}$

Решая полученное уравнение и проецируя на луч зрения:

$$\sigma_{Los}^2(R) = \frac{1}{\sum_*(R)} \int_R^\infty \left(1 - \beta \frac{R^2}{r^2}\right) \frac{\nu(r)\sigma_r^2(r) r}{\sqrt{r^2 - R^2}} dr$$

$\sigma_{Los}(R)$ – дисперсия проекций скоростей на луч зрения

$\sum_*(R)$ – поверхностная плотность звезд

Параметризация ключевых функций

Анизотропия скоростей: $\beta(r) = \beta_0 + (\beta_\infty - \beta_0)\dfrac{1}{1 + \left(\dfrac{r_0}{r}\right)^n}$

Пространственная плотность звезд: $\nu = \displaystyle\sum_{j}^{N_p} \frac{3M_j}{4\pi a_j^3}\left(1 + \frac{r^2}{a_j^2}\right)^{-\frac{5}{2}}$

Плотность темной материи:

$$\rho_{dm}(r) = \begin{cases} \rho_0 \left(\dfrac{r}{r_0}\right)^{-\gamma_0} & r < r_0 \\ \rho_0 \displaystyle\prod_{n=0}^{j<N_{dm}} \left(\dfrac{r_{n+1}}{r_n}\right)^{-\gamma_n} \left(\dfrac{r}{r_{j+1}}\right)^{-\gamma_n} & r_j < r < r_{j+1} \end{cases}$$

Вириальные параметры

$$\mathrm{V}_{\mathrm{s}_1} = \frac{2}{5}\int_0^\infty \mathrm{GM}\nu(5-2\beta)\sigma_\mathrm{r}^2\mathrm{r}\,\mathrm{dr} = \int_0^\infty \Sigma_*\left\langle \mathrm{v}_\mathrm{Los}^4\right\rangle \mathrm{R}\,\mathrm{dR}$$

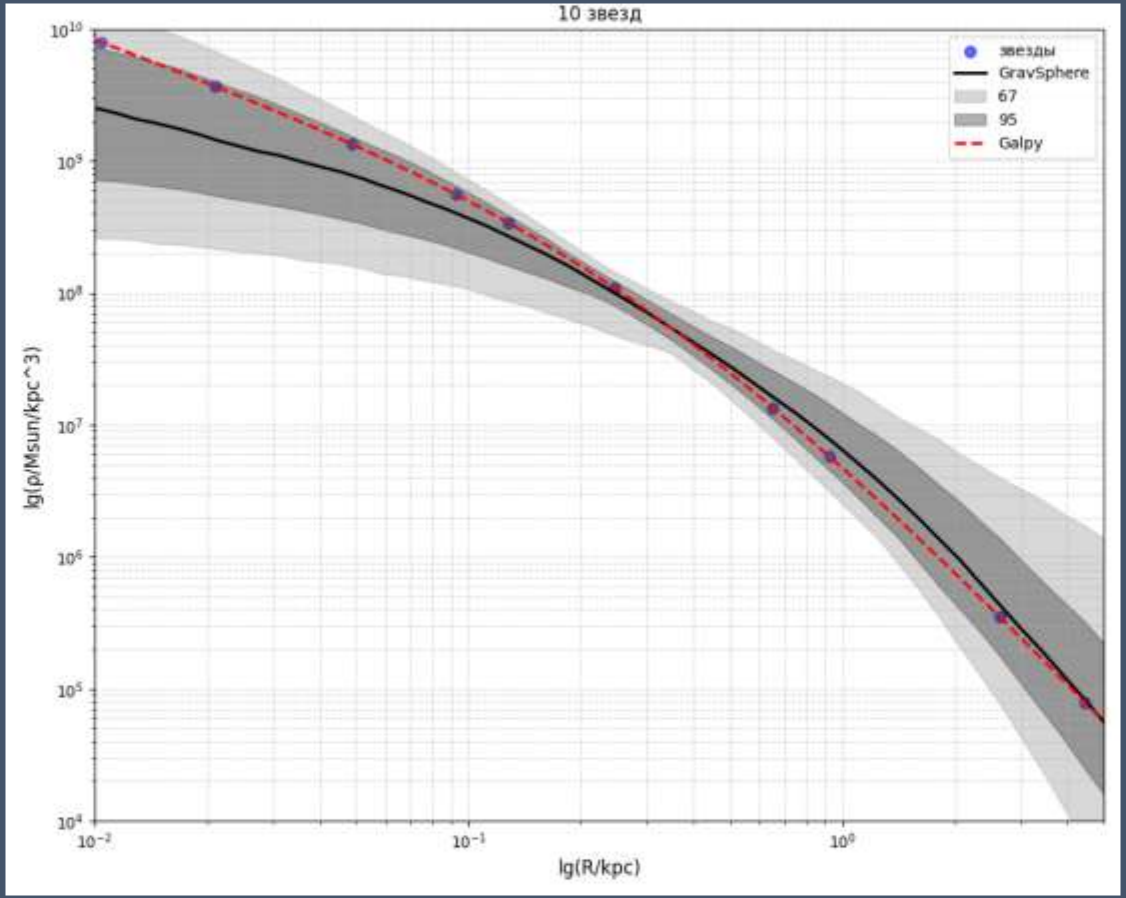
$$V_{s_2} = \frac{4}{35}\int_0^\infty GM\nu(7-6\beta)\sigma_r^2 r^3\,dr = \int_0^\infty \Sigma_*\langle v_{Los}^4\rangle R^3\,dR$$

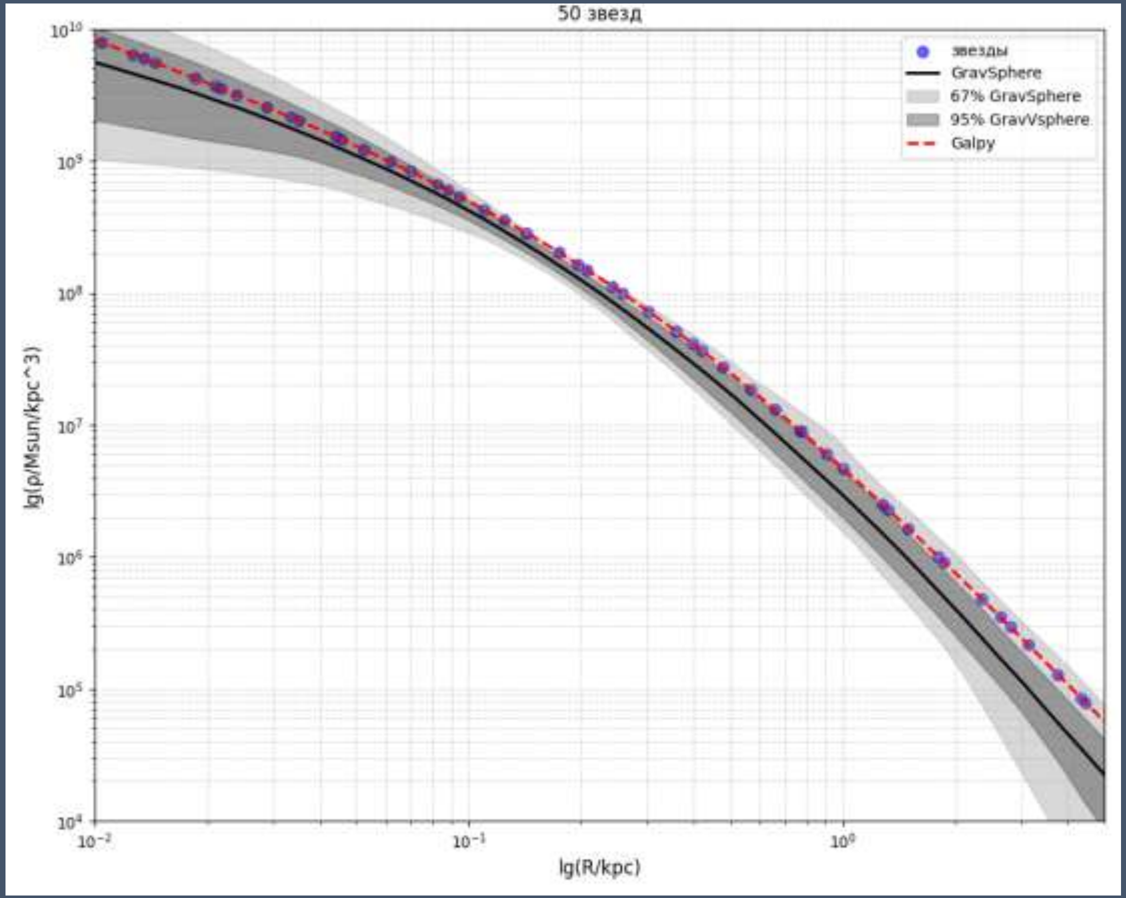
Дополнительные уравнения

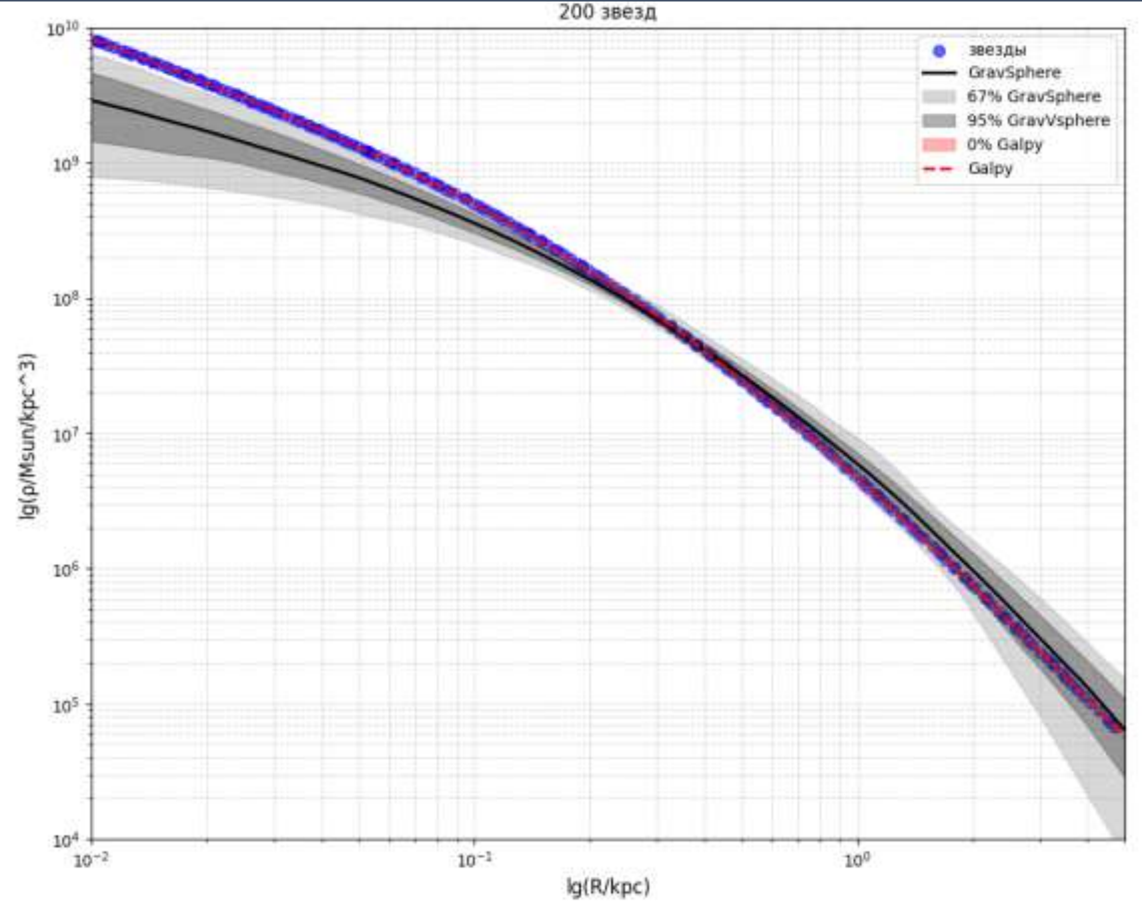
$$\mathrm{\sigma}^2_{\mathrm{pmr}}(\mathrm{R}) = \frac{1}{\Sigma_*(\mathrm{R})} \int\limits_{\mathrm{R}}^{\infty} \left(1 - \mathrm{\beta} + \mathrm{\beta}\frac{\mathrm{R}^2}{\mathrm{r}^2}\right) \frac{\nu(\mathrm{r})\mathrm{\sigma}^2_{\mathrm{r}}(\mathrm{r})\mathrm{r}}{\sqrt{\mathrm{r}^2 - \mathrm{R}^2}} \mathrm{dr}$$

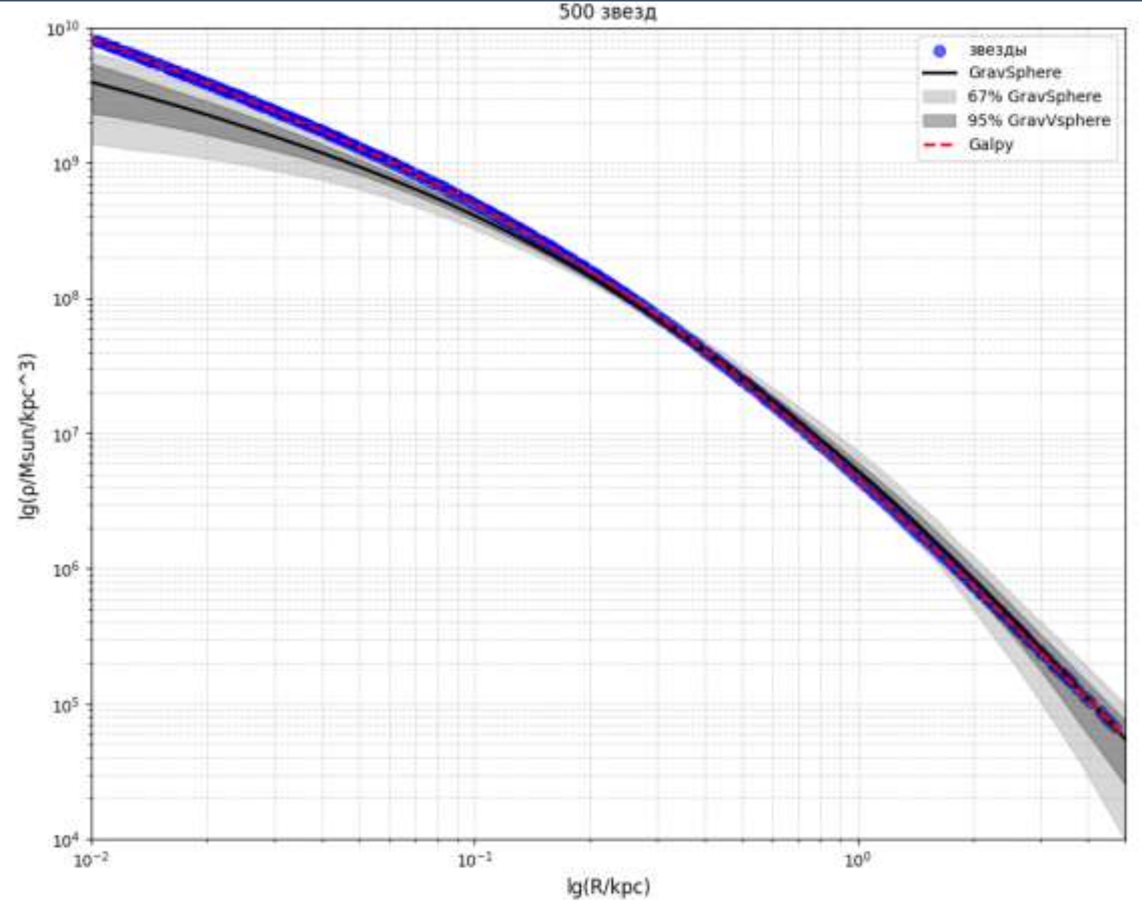
$$\sigma^2_{pmt}(R) = \frac{1}{\Sigma_*(R)} \int\limits_{R}^{\infty} (1 - \beta) \frac{\nu(r)\sigma^2_r(r)r}{\sqrt{r^2 - R^2}} dr$$

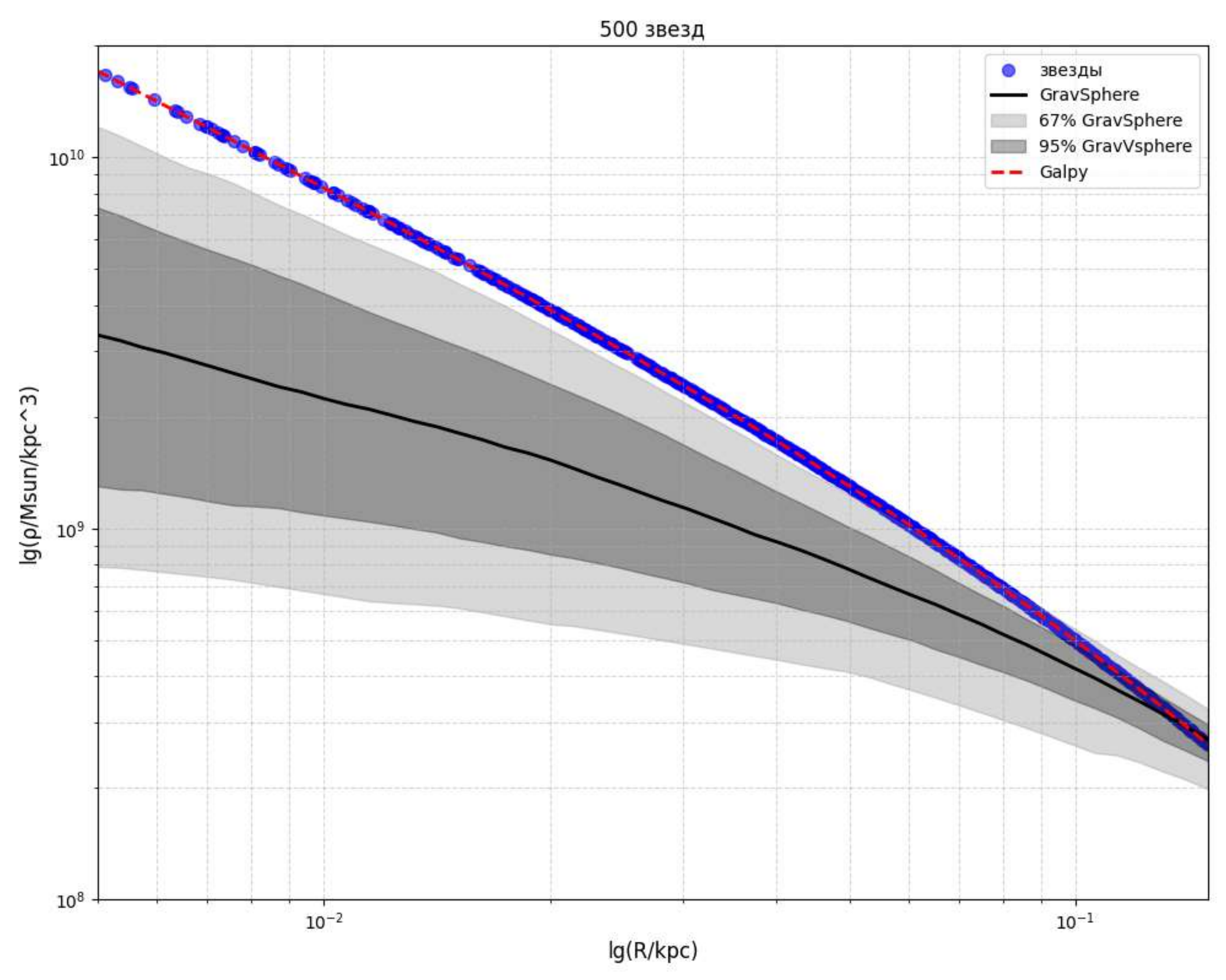
Результаты


10 звезд
звезды
GravSphere
67
95
Galpy
lg(ρ/Msun/kpc^3)
lg(R/kpc)

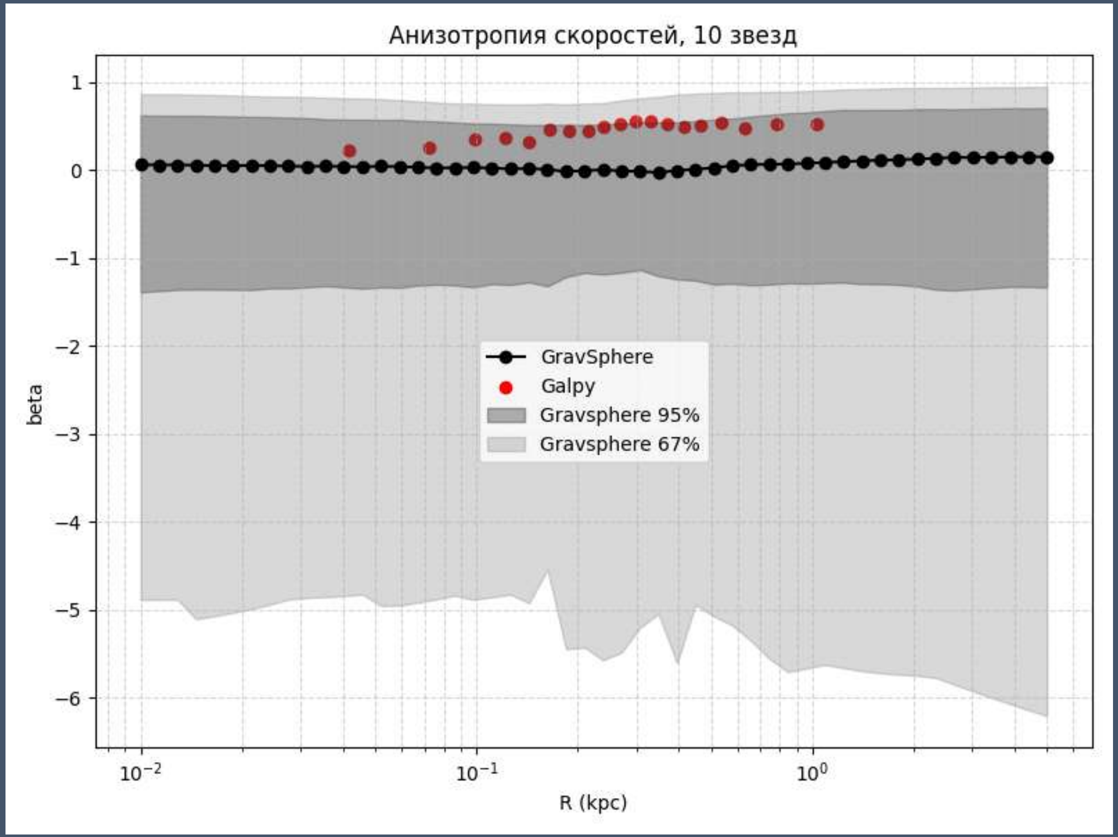

50 звезд
звезды
GravSphere
67% GravSphere
95% GravVsphere
Galpy
lg(ρ/Msun/kpc^3)
lg(R/kpc)


200 звезд
звезды
GravSphere
67% GravSphere
95% GravVsphere
0% Galpy
Galpy
lg(ρ/Msun/kpc^3)
lg(R/kpc)

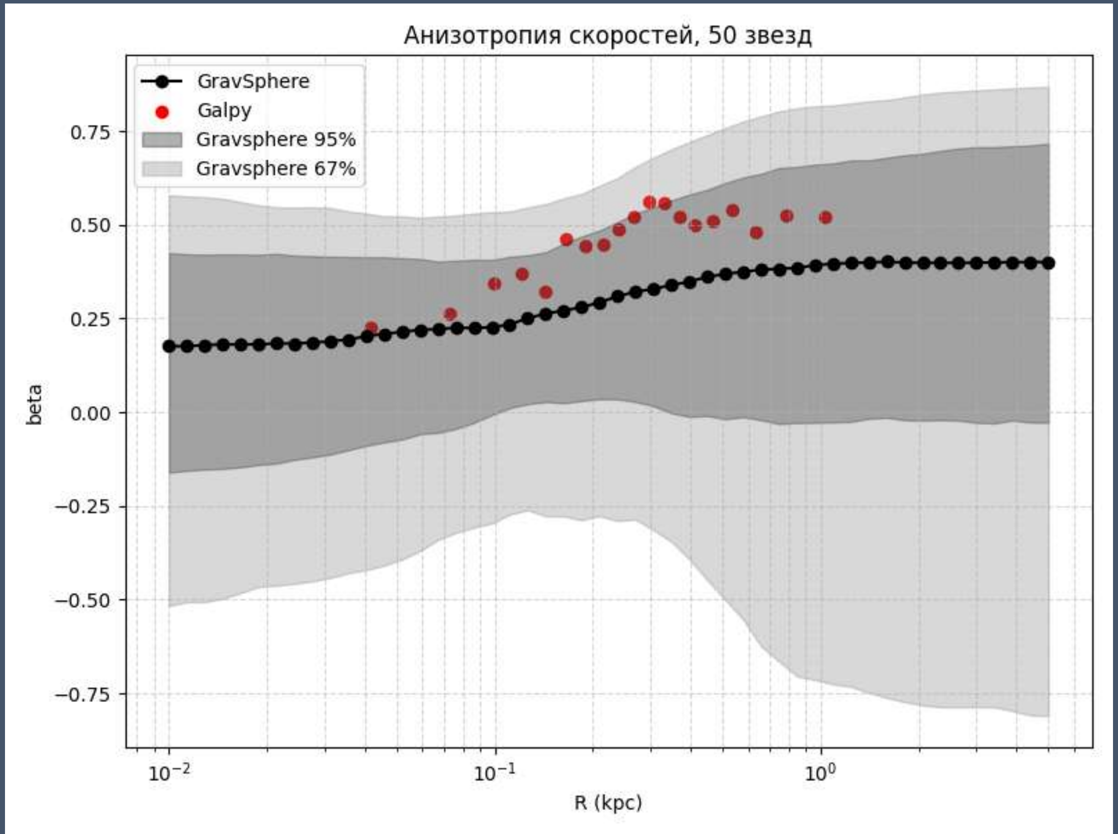

500 звезд
звезды
GravSphere
67% GravSphere
95% GravVsphere
Galpy
lg(ρ/Msun/kpc^3)
lg(R/kpc)



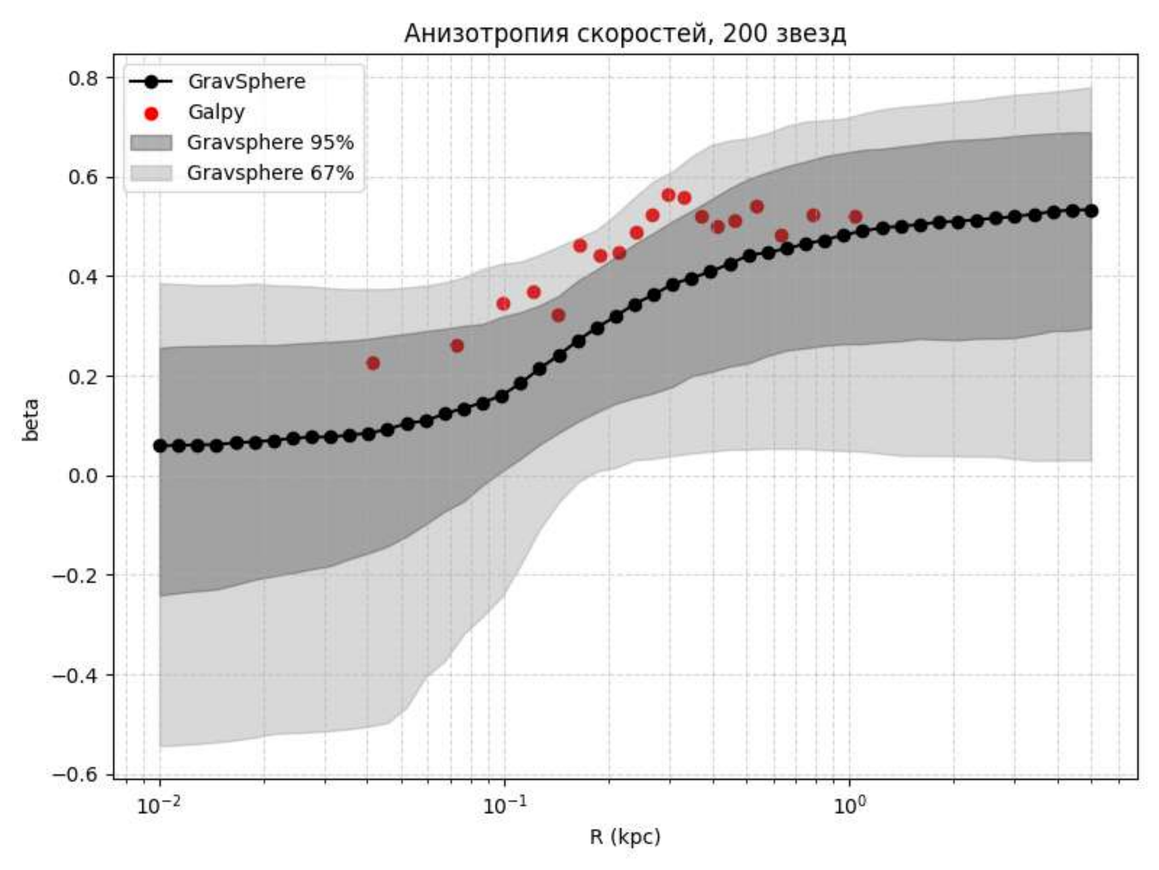
500 звезд
звезды
GravSphere
67% GravSphere
95% GravVsphere
Galpy
10^{10}
10^{9}
10^{8}
10^{-2}
10^{-1}
lg(ρ/Msun/kpc^3)
lg(R/kpc)



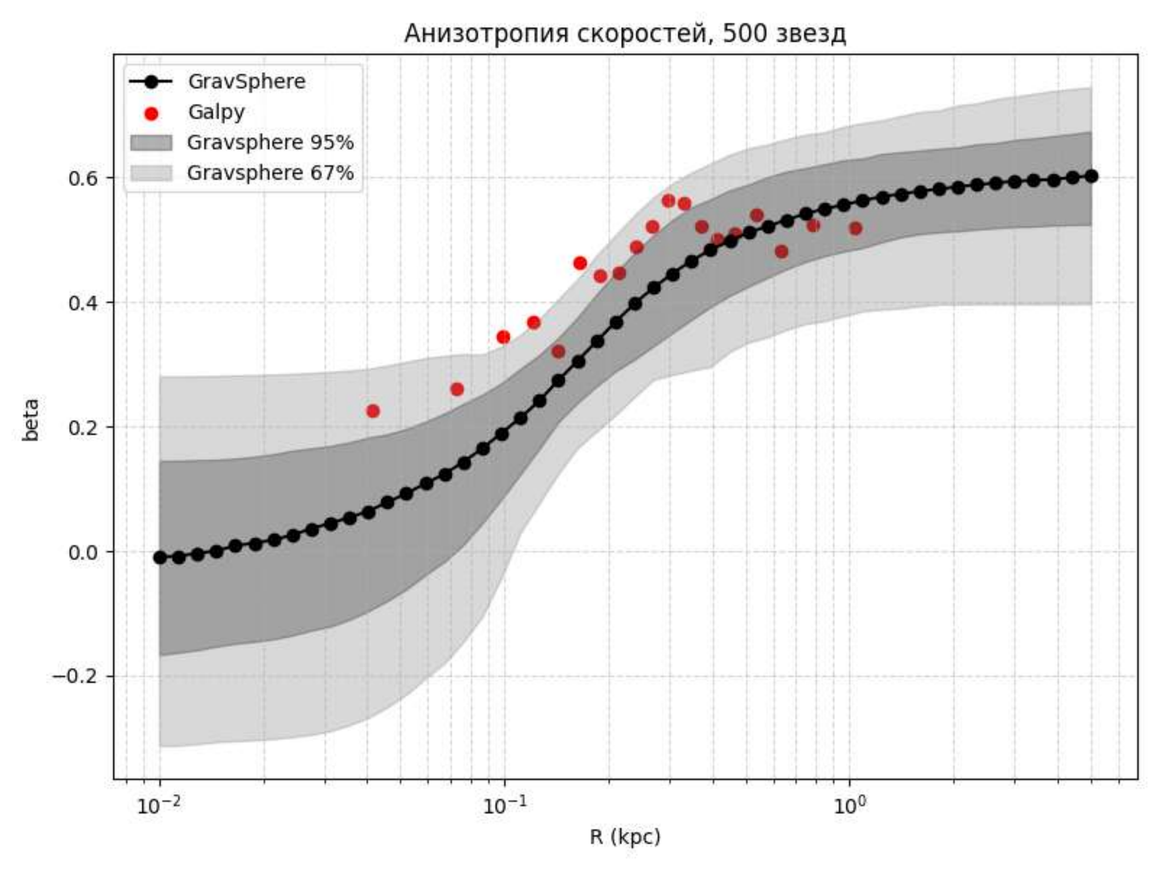
Анизотропия скоростей, 10 звезд
GravSphere
Galpy
Gravsphere 95%
Gravsphere 67%
beta
R (kpc)



Анизотропия скоростей, 50 звезд
GravSphere
Galpy
Gravsphere 95%
Gravsphere 67%
beta
R (kpc)



Анизотропия скоростей, 200 звезд
GravSphere
Galpy
Gravsphere 95%
Gravsphere 67%
beta
R (kpc)



Анизотропия скоростей, 500 звезд
GravSphere
Galpy
Gravsphere 95%
Gravsphere 67%
beta
R (kpc)