

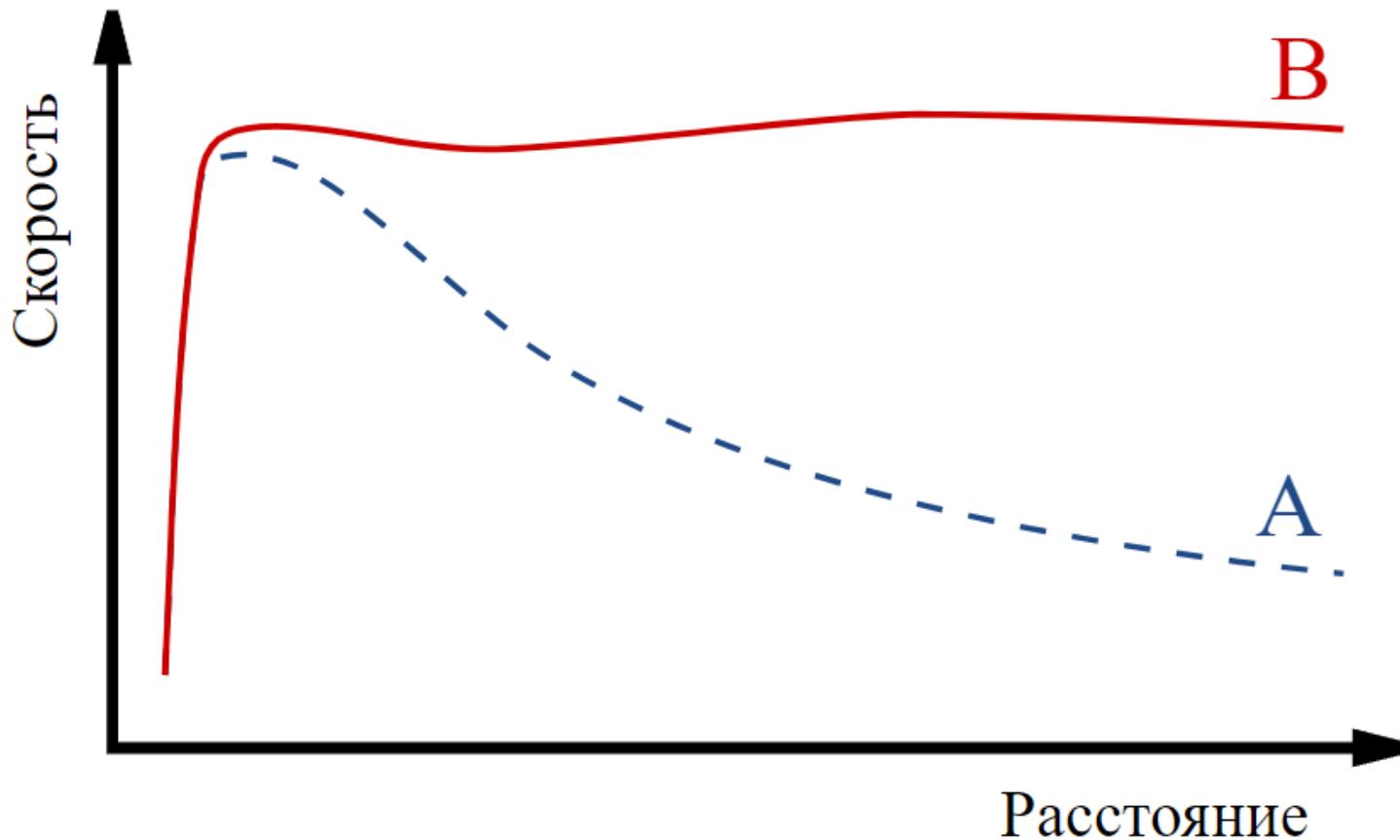
Курсовая работа

**Исследование тёмной материи с помощью кривой  
вращения галактики**

Кривенков Алексей Алексеевич

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н, член-корр. РАН, г.и.с. ОТФ ИЯИ РАН  
Горбунов Дмитрий Сергеевич

# Метод анализа с помощью кривых вращения



# Вывод теоретической кривой вращения

Гравитационный потенциал:  $\Phi(R, z) = \Phi_b(r(R, z)) + \Phi_d(r(R, z)) + \Phi_h(r(R, z))$

$$4\pi G \rho(R, z) = \nabla^2 \Phi(R, z)$$

$$\rho(R, z) = \frac{1}{4\pi G} \left( \frac{d^2 \Phi(R, z)}{d^2 R} + \frac{1}{R} \frac{d\Phi(R, z)}{dR} + \frac{d^2 \Phi(R, z)}{d^2 z} \right)$$

$$V_c(R) = \sqrt{R \frac{d\Phi(R, 0)}{dR}}$$

# Приближения для видимой материи

Bulge:

(Сфера Пламмера)

$$\Phi_b(r) = -\frac{M_b}{(r^2 + b_b^2)^{1/2}}$$

$$V_b^2(R) = \frac{M_b R^2}{(R^2 + b_b^2)^{3/2}}$$

$$\rho_b(r) = \frac{3b_b^2 M_b}{4\pi (r^2 + b_b^2)^{5/2}}$$

Disk:

(Диск Кузмина)

$$\Phi_d(R, z) = -\frac{M_d}{(R^2 + (a_d^2 + (z^2 + b_d^2)^{1/2})^2)^{1/2}}$$

$$V_d^2(R) = \frac{M_d R^2}{(R^2 + (a_d + b_d)^2)^{3/2}}$$

$$\rho_d(R, z) = \frac{b_d^2 M_d}{4\pi (z^2 + b_d^2)^{3/2}} \frac{a_d R^2 + \left(a_d + 3\sqrt{z^2 + b_d^2}\right) \left(a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2}\right)^2}{\left(R^2 + \left(a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2}\right)^2\right)^{5/2}}$$

# Приближения для тёмного гало

Профиль Наварро-Френка-Уайта (NFW):

$$\rho_h(r) = \frac{M_h}{4\pi} \frac{1}{r(r+a_h)^2} \quad V_h^2(R) = M_h \left[ \frac{\ln(1+R/a_h)}{R} - \frac{1}{R+a_h} \right]$$

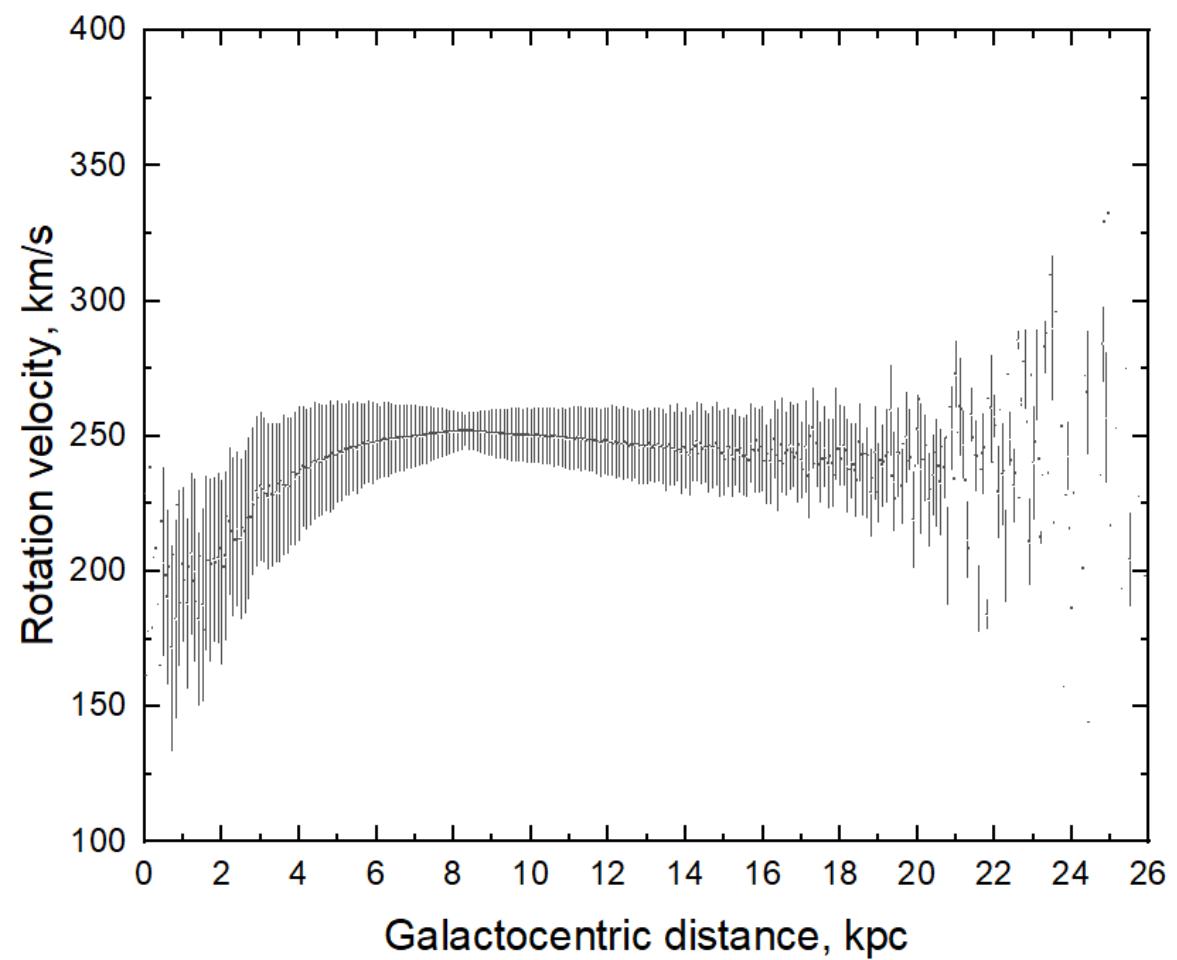
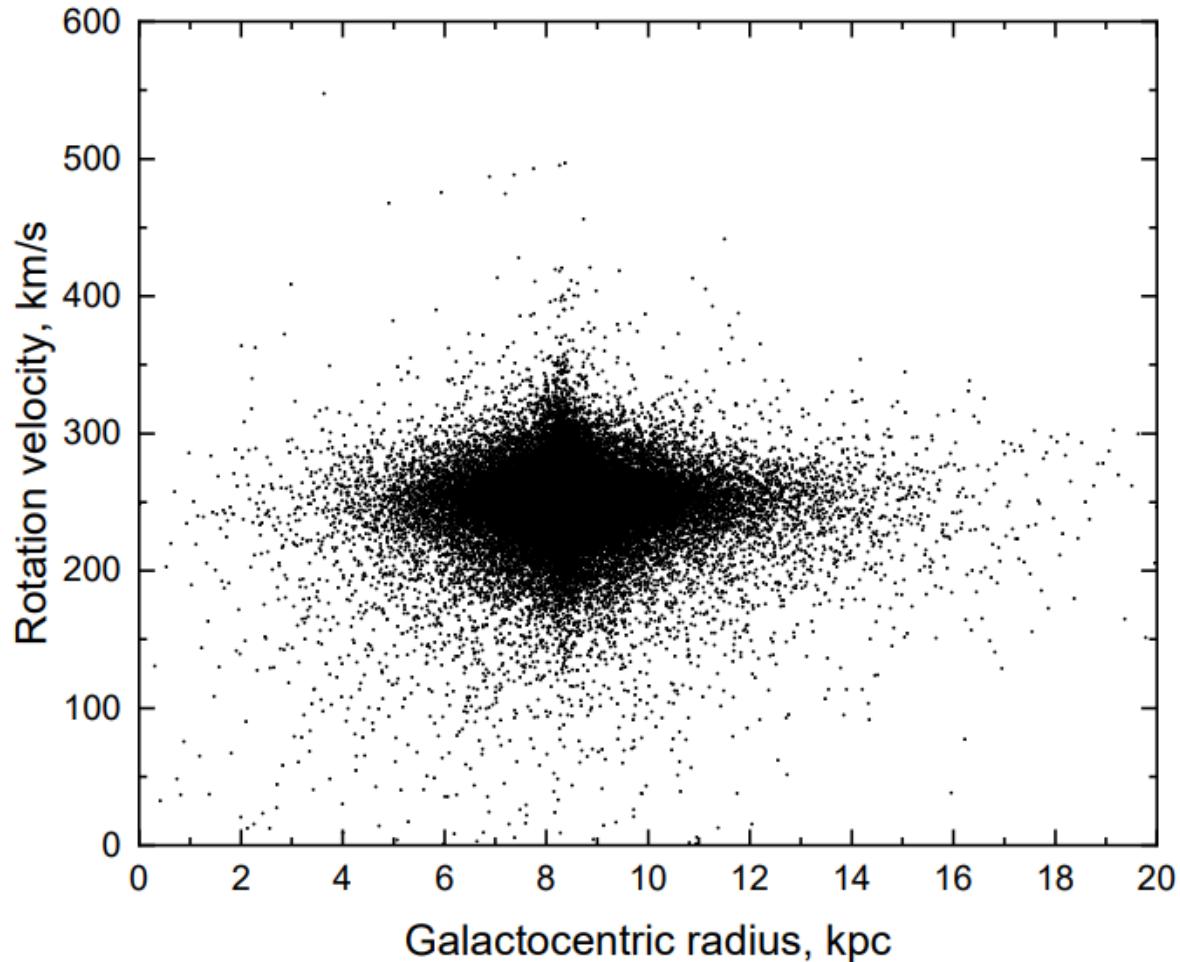
Профиль Эйнасто:

$$\rho_h(r) = \exp\left(-2\frac{\left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha - 1}{\alpha}\right) \quad V_h^2(R) = \frac{8\pi R^2}{3\alpha} \left(1 - \frac{3(R/r_s)^\alpha}{3+\alpha}\right)$$

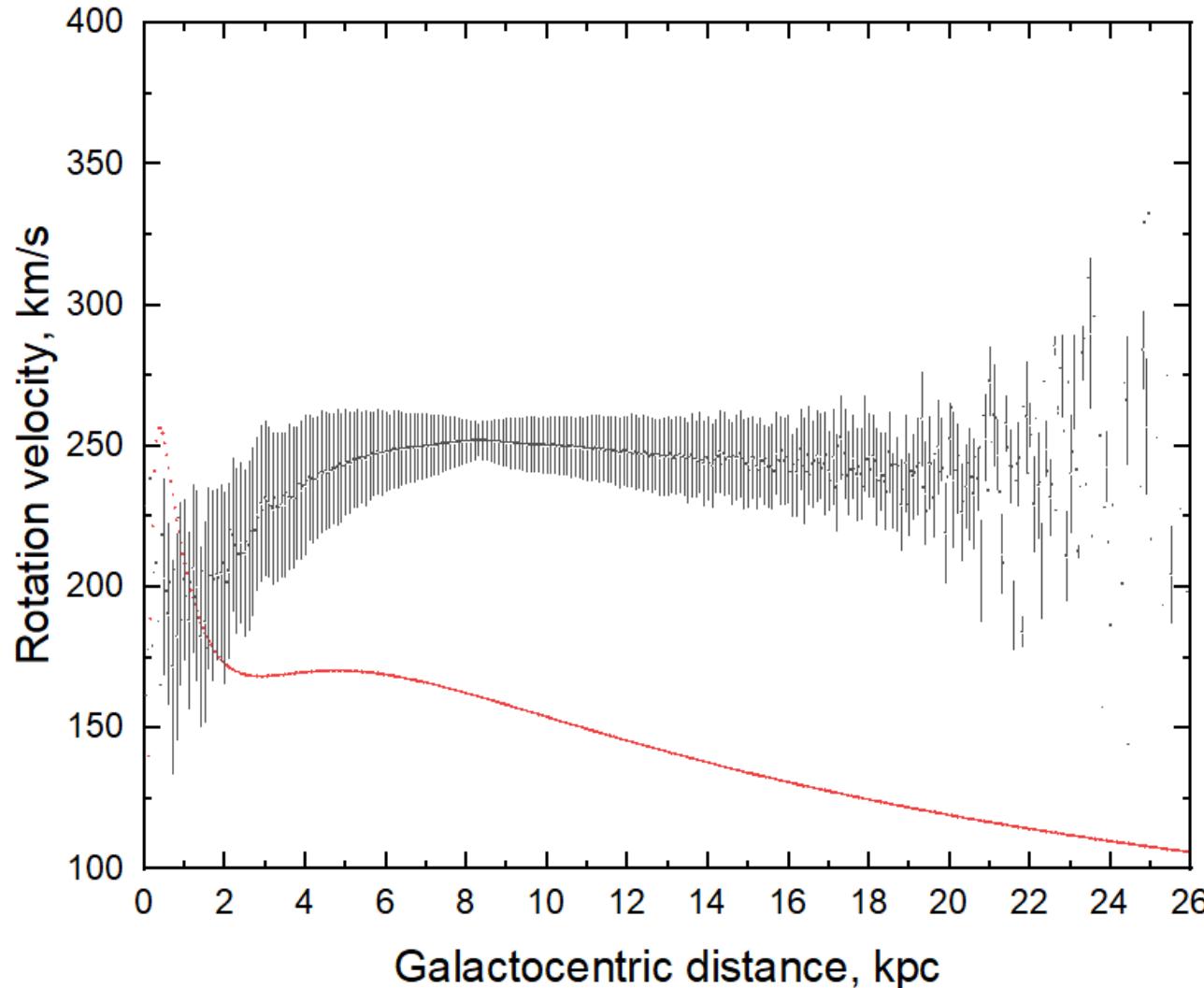
Псевдо-изотермальный профиль:

$$\rho_h(r) = \rho_o \frac{1}{(1 + (\frac{r}{r_c})^2)} \quad V_h^2(R) = 4\pi \rho_0 r_c^2 \left[1 - \frac{r_c}{r} \arctan\left(\frac{r}{r_c}\right)\right]$$

# Данные GAIA



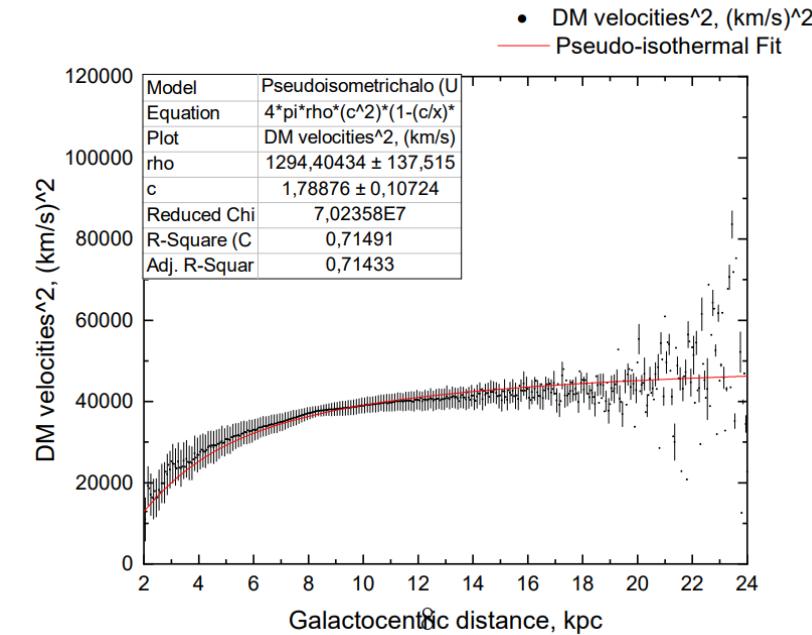
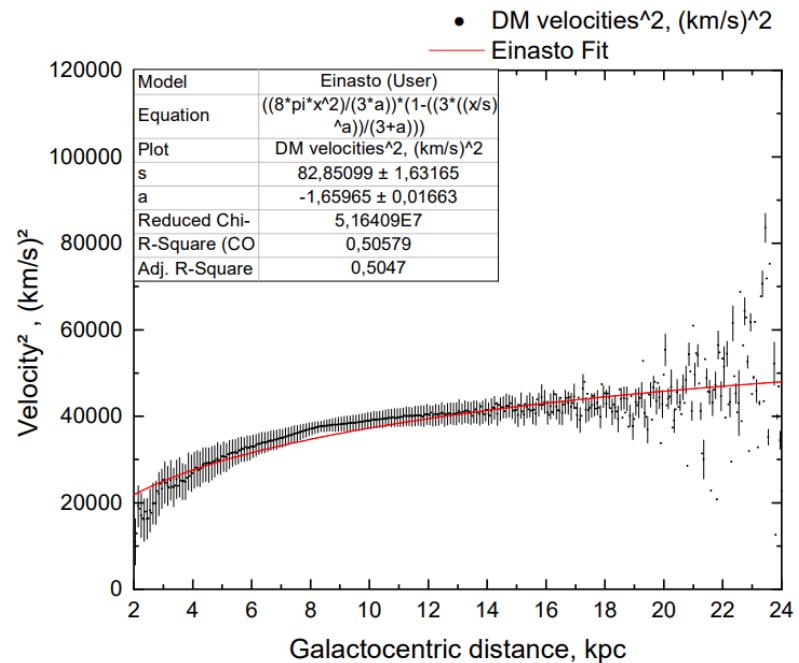
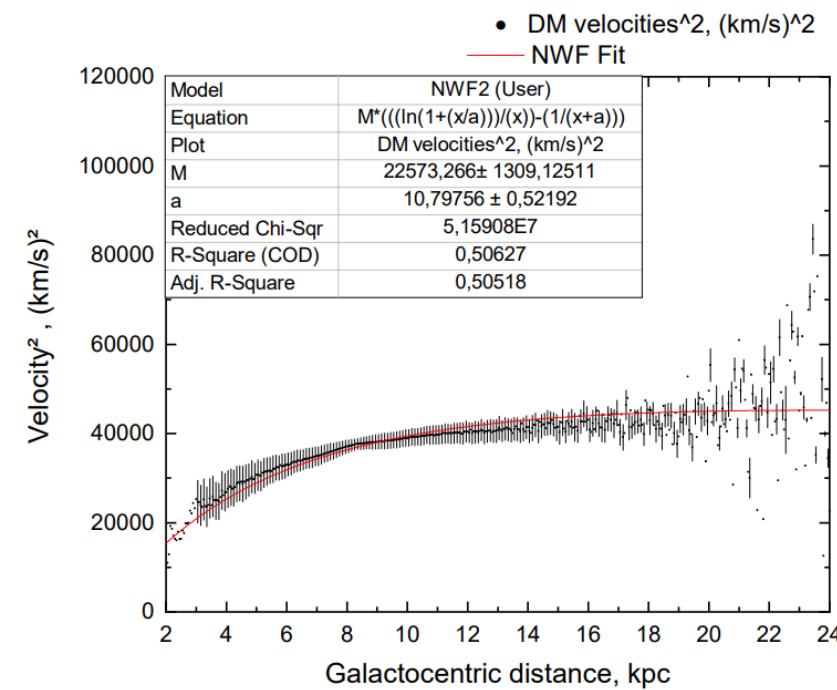
# Наблюдаемая кривая вращения



$$V_{theor}(R) = \sqrt{V_b^2(R) + V_d^2(R)}$$

# Аппроксимация приближениями

$$V_{dm}^2(R) = V_{obs}^2(R) - V_{theor}^2(R)$$



$$V_h^2(R) = M_h \left[ \frac{\ln(1 + R/a_h)}{R} - \frac{1}{R + a_h} \right]$$

$$M_h = (2.26 \pm 0.13) * 10^{11} M_\odot$$

$$a_h = (10,8 \pm 0,5) kpc$$

$$V_h^2(R) = \frac{8\pi R^2}{3\alpha} \left( 1 - \frac{3(R/r_s)^\alpha}{3 + \alpha} \right)$$

$$r_s = (82,9 \pm 1,63) kpc.$$

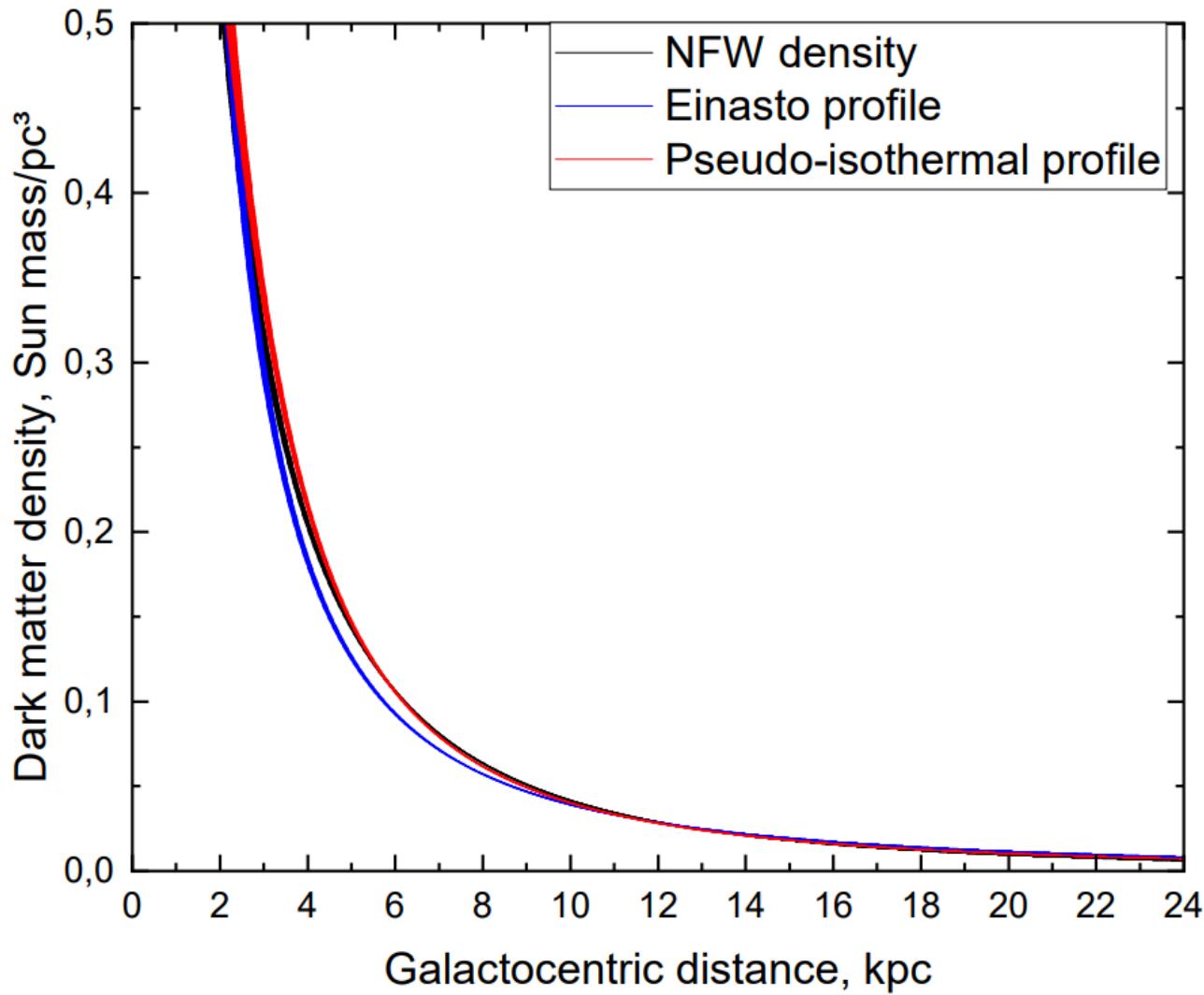
$$\alpha = -1,66 \pm 0,017$$

$$V_h^2(R) = 4\pi \rho_0 r_c^2 \left[ 1 - \frac{r_c}{r} \arctan\left(\frac{r}{r_c}\right) \right]$$

$$\rho_0 = (12.94 \pm 0.14) * 10^2 M_\odot / pc^3$$

$$r_c = (1.79 \pm 0.12) kpc$$

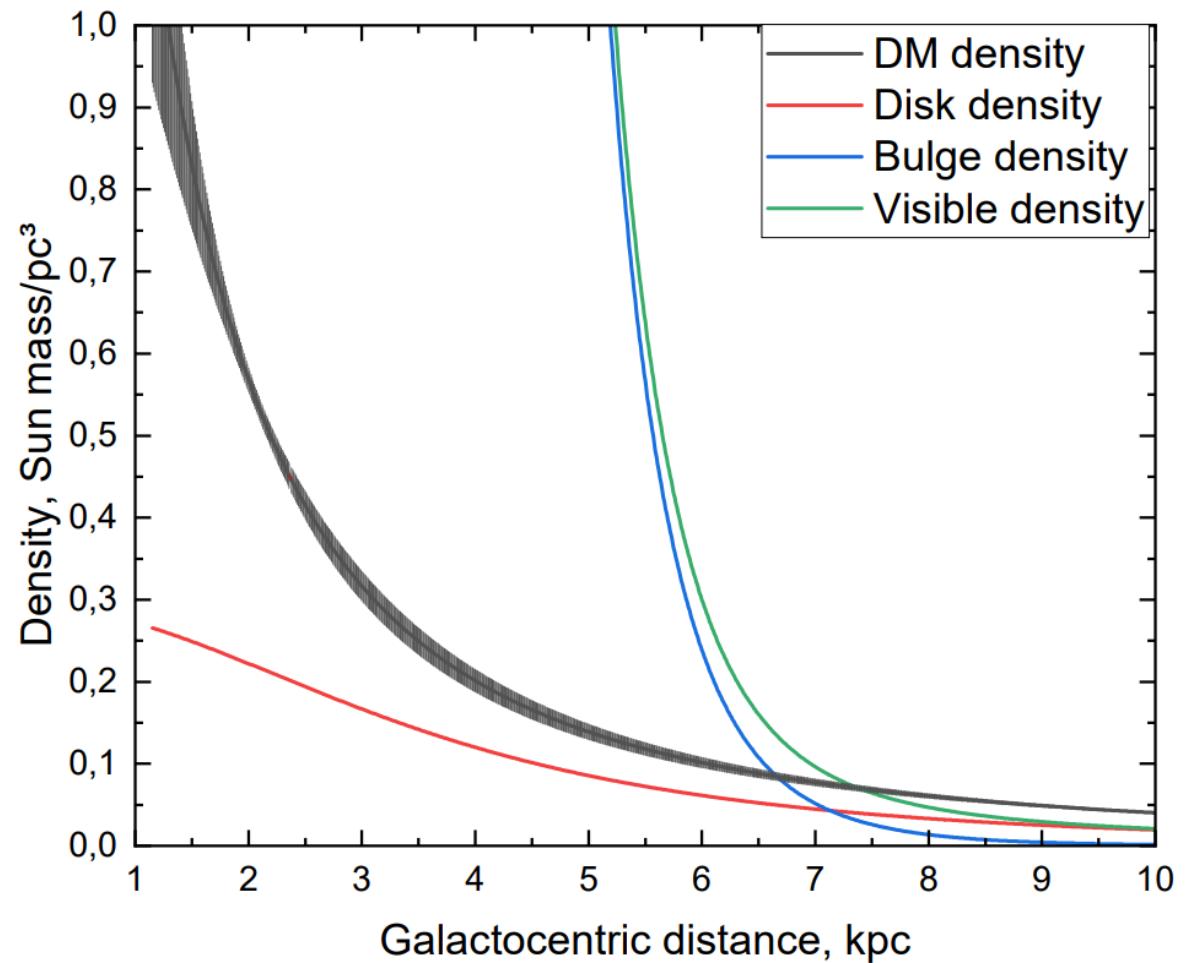
# Профиль плотности тёмной материи



$$\rho_{NFW}(r) = \frac{M_h}{4\pi} \frac{1}{r(r + a_h)^2}$$

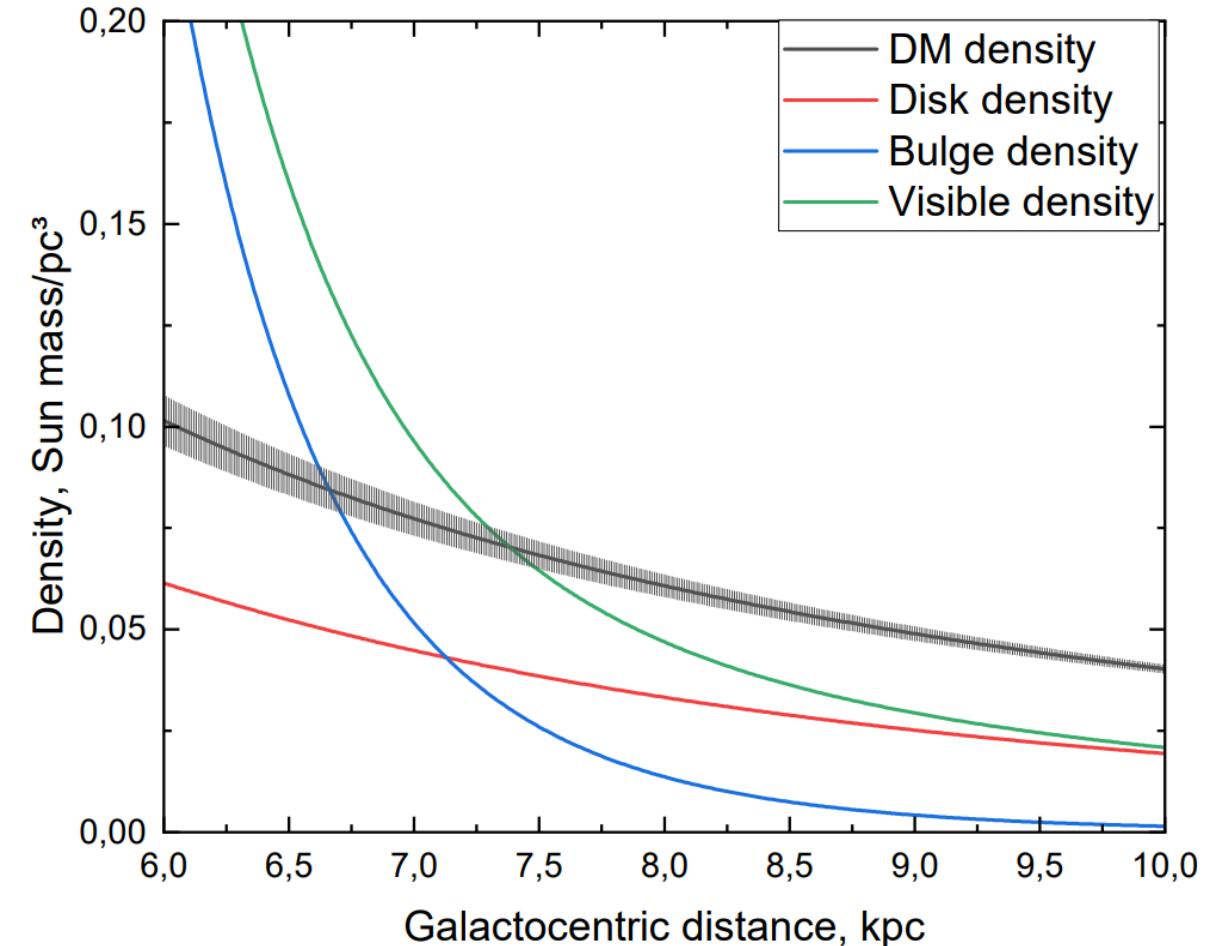
$$\rho_{Einasto}(r) = \exp\left(-2\frac{\left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha - 1}{\alpha}\right)$$

$$\rho_{P-I}(r) = \rho_o \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2\right)}$$



$$\rho_{\odot dm} = (0,05681 \pm 0,00237) M_{\odot}/pc^3$$

$$\rho_{\odot vm} = (0,0400 \pm 0,00320) M_{\odot}/pc^3$$



$$\rho_{\odot} = (0,097 \pm 0,006) M_{\odot}/pc^3$$

# Итоги работы:

- Построена кривая вращения в пределах от 0 до 26 килопарсек на основе данных космической обсерватории GAIA
- Найден вклад от темной материи в кривую вращения , проведено сравнение с вкладами от видимых барионных компонент (балджа и диска)
- Найден профиль плотности тёмной материи и проведено сравнение с аналогичным профилем для видимой материи
- Уточнено значение для локальной плотности тёмной материи в околосолнечной области:  $\rho_{\odot dm} = (0,0568 \pm 0,0024) M_{\odot}/pc^3$

**Спасибо за внимание.**

# Список литературы:

1. Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 339 (2003) 243
2. Miguel Pato, Fabio Iocco, Gianfranco Bertone, JCAP12(2015)001, 1504.06324
3. Astronomy Letters, 2016, Vol. 42, No. 9, pp. 567-582
4. Gaia Collaboration, R. L. Smart, L. M. Sarro, J. Rybizki, C. Reylé, A. C. Robin, N. C. Hambly and et al (2020d) Gaia Early Data Release 3: The Gaia Catalogue of Nearby Stars. arXiv e-prints, pp. arXiv:2012.02061.
5. Gaia Collaboration, *A&A* Volume 616, August 2018 Gaia Data Release 2, Mapping the Milky Way disc kinematics
6. J. Holmberg and C. Flynn, Mon. Not. R. Astron. Soc. 352, 440 (2004).
7. S. Garbari, C. Liu, J. I. Read, and G. Lake, Mon. Not. R. Astron. Soc. 425, 1445 (2012).
8. C.F. McKee, A. Parravano, and D.J. Hollenbach, Astrophys. J. 814, 13 (2015).