

Кривенков Алексей Алексеевич

Исследование тёмной материи с помощью кривой вращения галактики

Курсовая работа

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

Содержание

1	Введение	3
2	Постановка задачи	4
2.1	Теоретическая кривая вращения	4
2.1.1	Балдж и диск	4
2.1.2	Темное гало	5
3	Практическая часть	6
3.1	Данные GAIA	6
3.2	Наблюдаемая кривая вращения	7
3.3	Сравнение с моделью	7
4	Итоги работы	12
4.1	Результаты	12
4.2	Выводы	12
5	Список литературы	13

1 Введение

Исследование кривых вращения - основной метод обнаружения влияния темной материи. В работе применяется данный метод на основе информации, собранной аппаратом GAIA в течение 5 лет. Данные GAIA позволили определить параллаксы (а значит, и позиции) и скорости более 7 миллионов звёзд (большинство из них располагаются в пределах радиуса 26 килопарсек от центра галактики) с высочайшей точностью на данный момент. С учетом разброса скоростей звёзд и иных небесных тел можно найти зависимость скорости вращения от галактоцентрического расстояния. Сравнивая эту зависимость с теоретической, построенной на основе моделирования плотности распределения видимой материи, можно получить указание на присутствие некой невидимой, но гравитационно взаимодействующей материи.

Используя классические приближения (Наварро-Френка-Уайта, Эйнасто и псевдо-изотермальный) можно получить профиль плотности темной материи внутри галактического диска и оценить массу гало темной материи.

2 Постановка задачи

2.1 Теоретическая кривая вращения

Для вывода формул, связывающих скорость вращения и галактоцентрический радиус, рассмотрим осесимметричный трехкомпонентный гравитационный потенциал галактики:

$$\Phi(R, z) = \Phi_b(r(R, z)) + \Phi_d(r(R, z)) + \Phi_h(r(R, z)); r = \sqrt{R^2 + z^2} \quad (2.1)$$

Будем использовать цилиндрическую систему (R, φ, z) с точкой отсчета в центре галактики. Выражение для плотности материи следует из уравнения Пуассона:

$$4\pi G\rho(R, z) = \nabla^2\Phi(R, z) \quad (2.2)$$

$$\rho(R, z) = \frac{1}{4\pi G} \left(\frac{d^2\Phi(R, z)}{d^2R} + \frac{1}{R} \frac{d\Phi(R, z)}{dR} + \frac{d^2\Phi(R, z)}{dz^2} \right) \quad (2.3)$$

Также нам необходимо знать связь скорости вращения (азимутальной, круговой) с гравитационным потенциалом:

$$V_c(R) = \sqrt{R \frac{d\Phi(R, 0)}{dR}} \quad (2.4)$$

Отдельно рассмотрим компоненты гравитационного потенциала и вклад этих компонент в скорость вращения

2.1.1 Балдж и диск

Используя классические выражения для гравитационного потенциала (сфера Пламмера для балджа и модель Кузмина для диска) можно найти вклад обоих этих компонент в общую скорость вращения:

$$\Phi_b(r) = -\frac{M_b}{(r^2 + b_b^2)^{1/2}} \quad (2.5)$$

$$V_b^2(R) = \frac{M_b R^2}{(R^2 + b_b^2)^{3/2}} \quad (2.6)$$

$$\rho_b(r) = \frac{3b_b^2 M_b}{4\pi (r^2 + b_b^2)^{5/2}} \quad (2.7)$$

$$\Phi_d(R, z) = -\frac{M_d}{(R^2 + (a_d^2 + (z^2 + b_d^2)^{1/2})^2)^{1/2}} \quad (2.8)$$

$$V_d^2(R) = \frac{M_d R^2}{(R^2 + (a_d + b_d)^2)^{3/2}} \quad (2.9)$$

$$\rho_d(R, z) = \frac{b_d^2 M_d}{4\pi (z^2 + b_d^2)^{3/2}} \frac{a_d R^2 + \left(a_d + 3\sqrt{z^2 + b_d^2}\right) \left(a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2}\right)^2}{\left(R^2 + \left(a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2}\right)^2\right)^{5/2}} \quad (2.10)$$

2.1.2 Темное гало

Используем различные приближения:

Профиль Наварро-Френка-Уайта (NFW):

$$\Phi_h(R, z) = -\frac{M_h}{r} \ln\left(1 + \frac{r}{a_h}\right) \quad (2.11)$$

$$\rho_h(r) = \frac{M_h}{4\pi} \frac{1}{r(r + a_h)^2} \quad (2.12)$$

В приближении NFW выражение для вклада скорости, обеспеченной массой темного гало, принимает следующий вид:

$$V_h^2(R) = M_h \left[\frac{\ln(1 + R/a_h)}{R} - \frac{1}{R + a_h} \right] \quad (2.13)$$

Профиль Эйнасто:

$$\rho_h(r) = \exp\left(-2 \frac{\left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha - 1}{\alpha}\right) \quad (2.14)$$

Вклад в скорость:

$$V_h^2(R) = \frac{8\pi R^2}{3\alpha} \left(1 - \frac{3(R/r_s)^\alpha}{3 + \alpha}\right) \quad (2.15)$$

Псевдо-изотермальный профиль:

$$\rho_h(r) = \rho_o \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2\right)} \quad (2.16)$$

Вклад в скорость:

$$V_h^2(R) = 4\pi \rho_o r_c^2 \left[1 - \frac{r_c}{r} \arctan\left(\frac{r}{r_c}\right)\right] \quad (2.17)$$

3 Практическая часть

3.1 Данные GAIA

Обсерватория GAIA определяет следующие характеристики движения звёзд, необходимые для дальнейшей работы: лучевая скорость относительно солнца (измеряется с помощью спектрометра) и движение в проекциях на прямое восхождение и склонение (получены с помощью наблюдения за перемещением звёзд в течение 5 лет).

Используя данные величины, можно получить информацию о истинном движении космического тела в пространстве, а также получить значение скорости вращения тела относительно галактического центра.

Также известны характеристики положения звезд: параллакс, галактические долгота и широта.

База данных обсерватории хранит положения почти 2 миллиардов звёзд, но из них только около у 7.5 миллионов объектов известны все необходимые нам величины.

Возьмем только те объекты, погрешности величин для которых не превышают 20%.

Итого получим 6 969 738 объектов, с которыми можно работать. Все они расположены на расстоянии от 0 до 26 килопарсеков от центра галактики

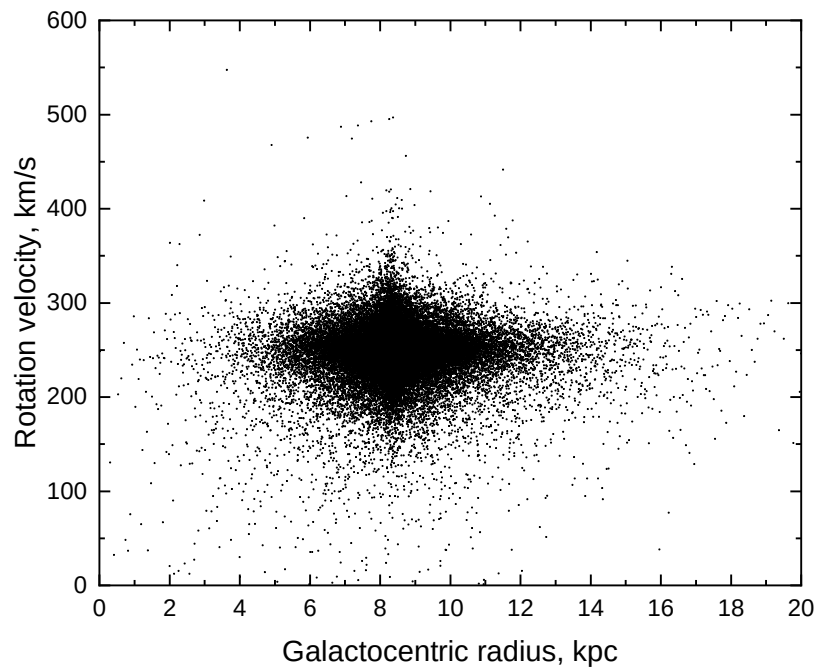


Рис. 1. Массив данных GAIA

3.2 Наблюдаемая кривая вращения

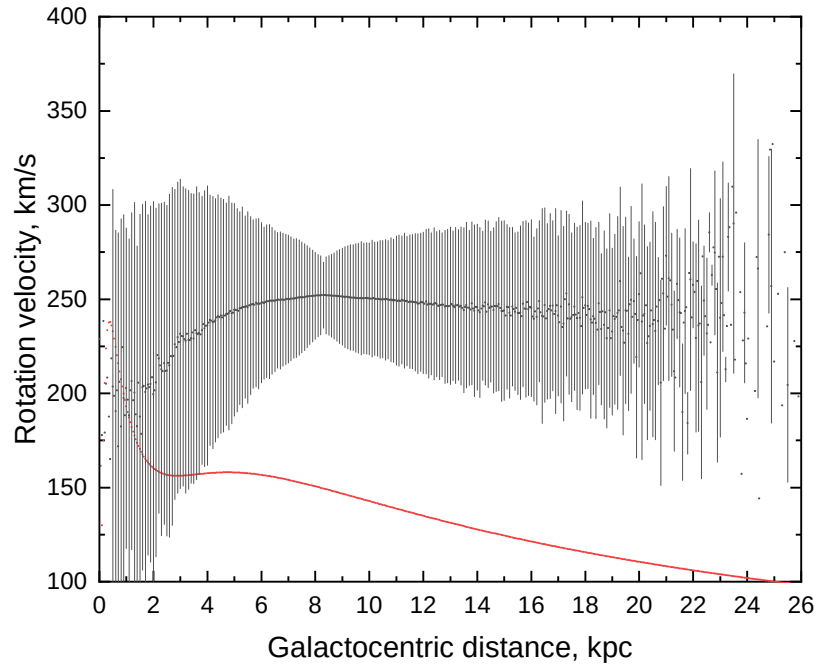


Рис. 2. Сравнение двух кривых вращения: наблюдаемое распределение скоростей (черные точки) и теоретическая зависимость, следующая из вкладов балджа и диска (красная кривая)

Переводя все значения скоростей и положений звезд из солнечной в галактическую систему координат, получим наблюдаемое распределение скоростей (Рис. 2).

Используя ранее полученные выражения (2.6) и (2.8) для скоростей, выведенные из моделей балджа и диска, найдем и построим теоретическую кривую.

$$V_{theor}(R) = \sqrt{V_b^2(R) + V_d^2(R)} \quad (3.1)$$

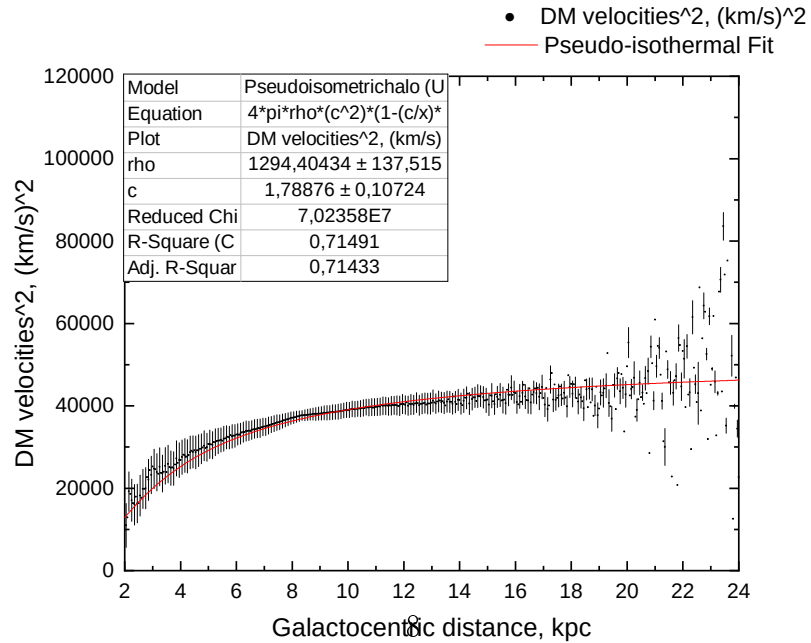
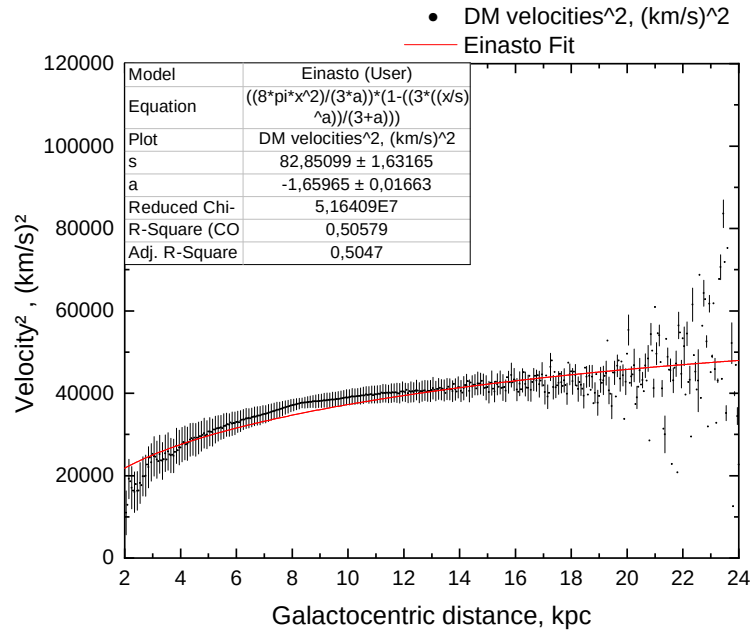
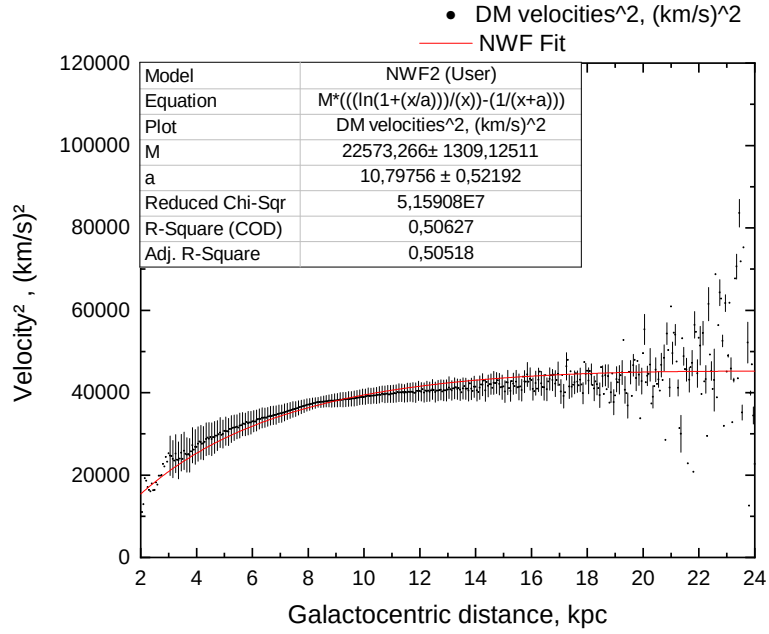
Как видно из графика Рис. 2, теоретические модели распределения массы в галактике не могут объяснить наблюдаемые данные о скоростях звёзд, из чего можно сделать вывод о присутствии достаточно большой массы темной материи в пределах галактики.

Именно эта масса обеспечивает тот вклад в общую кривую вращения, который должен "заполнить пробел" между теорией и наблюдением. Посчитаем его:

$$V_{dm}^2(R) = V_{obs}^2(R) - V_{theor}^2(R) \quad (3.2)$$

3.3 Сравнение с моделью

Получив распределение скоростей, обеспеченных вкладом темной материи в общую массу, аппроксимируем его уже рассмотренными приближениями для темной материи.



Таким образом получаем значения для коэффициентов в каждом из приближении:

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

$$M_h = (2.26 \pm 0.13) * 10^{11} M_\odot, a_h = (10, 8 \pm 0, 5) kpc$$

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

$$r_s = (82, 9 \pm 1, 63) kpc, \alpha = -1, 66 \pm 0, 017$$

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

$$\rho_0 = (12.94 \pm 0.14) * 10^2 M_\odot / pc^3, r_c = (1.79 \pm 0.12) kpc$$

Для большей наглядности приведён график Рис.4, на котором рассмотрены вклады в кривую вращения от различных компонент (взято приближение NFW как более распространённое)

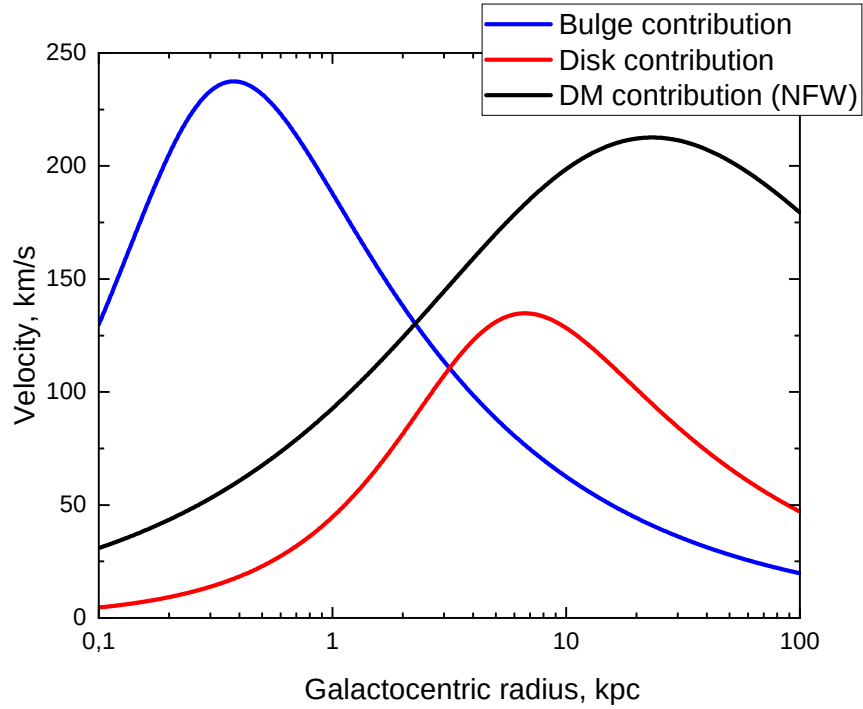


Рис. 4.

Зная значения коэффициентов и явные выражения плотности темной материи для каждого из приближений, построим профиль плотности темной материи в галактике.

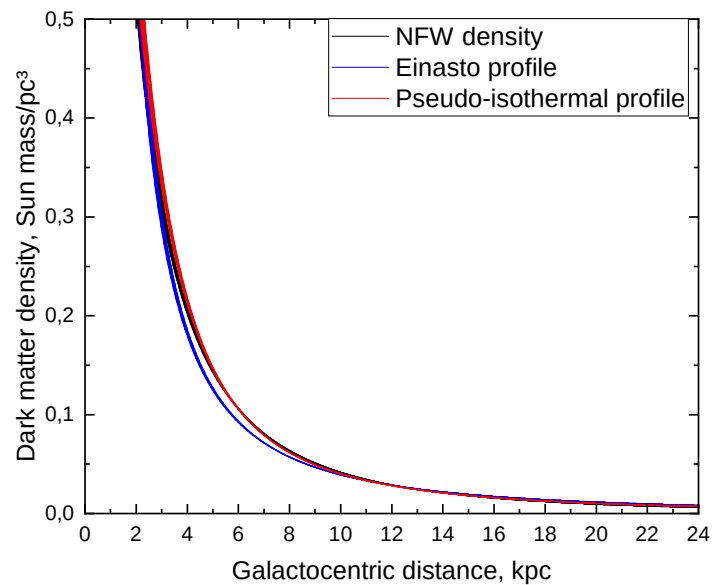


Рис. 5. Профиль плотности тёмной материи

В силу достаточно полного совпадения трех профилей, примем распределение плотности тёмной материи как среднее всех трёх и сравним с распределением плотности видимой материи, которое обуславливается моделями балджа и диска:

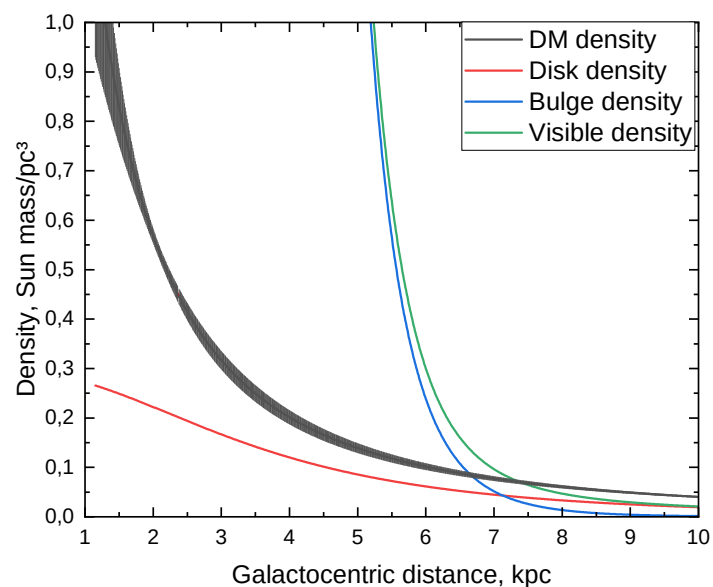


Рис. 6. Сравнение профилей плотности

Рассмотрим околосолнечную область:

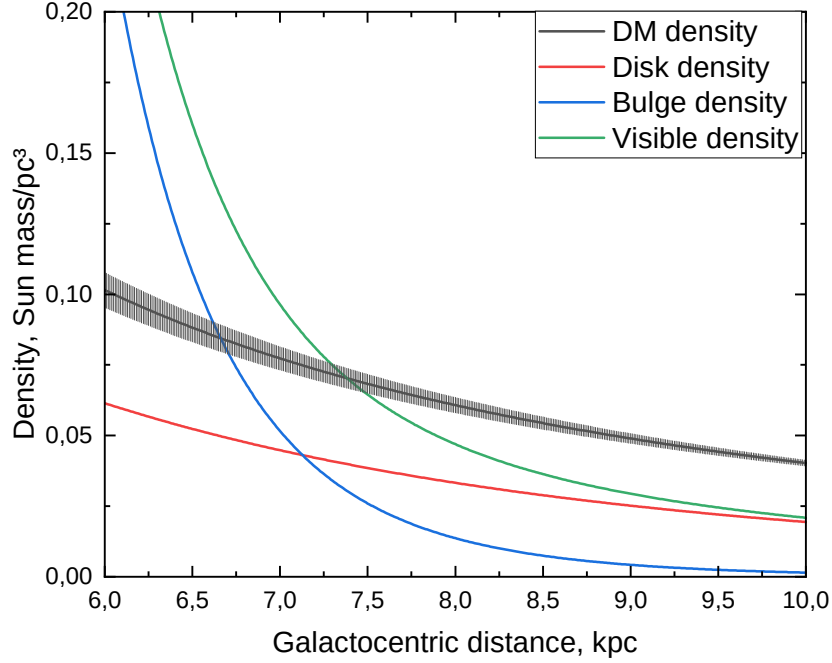


Рис. 7. Сравнение профилей плотности. Зелёная кривая - полная плотность видимой материи

Как видно из графика, преобладание тёмной материи в пространстве начинается с расстояния ~ 7.5 килопарсек.

Локальная плотность в околосолнечной области ($R_{\odot} = 8.3 \text{ kpc}$):

$$\rho_{\odot dm} = (0,05681 \pm 0,00237) M_{\odot}/pc^3 \quad (3.3)$$

$$\rho_{\odot vm} = (0,0400 \pm 0,00320) M_{\odot}/pc^3 \quad (3.4)$$

$$\rho_{\odot} = (0,097 \pm 0,006) M_{\odot}/pc^3 \quad (3.5)$$

Данное значение локальной плотности материи достаточно хорошо согласуется с другими аналогичными оценками, полученным в литературе: $\rho_{\odot} = (0,102 \pm 0,010) M_{\odot}/pc^3$ (Holmberg and Flynn (2000)), $\rho_{\odot} = (0,120 \pm 0,017) M_{\odot}/pc^3$ (Garbari et al. 2012), $\rho_{\odot} = (0,097 \pm 0,013) M_{\odot}/pc^3$ (McKee et al. 2015)

4 Итоги работы

4.1 Результаты

- Построена кривая вращения в пределах от 0 до 26 килопарсек на основе данных космической обсерватории GAIA
- Проведено сравнение наблюдаемой кривой вращения с теоретической зависимостью, выведенной из распределений плотности видимой материи
- Найден вклад от темной материи в кривую вращения, проведено сравнение с вкладами от видимых барионных компонент (балджа и диска)
- С помощью аппроксимации данного вклада тремя наиболее распространёнными моделями темной материи были уточнены профили Наварро-Френка-Уйата, Эйнасто и псевдо-изотермального
- Найден профиль плотности тёмной материи и проведено сравнение с аналогичным профилем для видимой материи
- Уточнено значение для локальной плотности тёмной материи в околосолнечной области: $\rho_{\odot} = (0,097 \pm 0,006) M_{\odot}/pc^3$

4.2 Выводы

- Все рассмотренные профили плотности темной материи совпадают друг с другом в пределах погрешности, что позволяет сделать вывод о их неразличимости как в локальной околосолнечной области, так и в других областях пространства. Дальнейший анализ свойств тёмной материи можно производить для любого профиля.
- Преобладание доли темной материи в галактике начинается с ~ 7.5 килопарсек и далее возрастает

5 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. Reyl  , 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).

This work has made use of data from the European Space Agency (ESA) mission *Gaia* (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), processed by the *Gaia* Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, in particular the institutions participating in the *Gaia* Multilateral Agreement.