



Построение новых моделей гравитационного потенциала Галактики

В.В. Бобылев¹, А.Т. Байкова¹, А.А. Смирнов¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 3 июня 2025 / Принята к публикации 16 июня 2025

Аннотация

Уточнены параметры осесимметричной модели гравитационного потенциала Галактики. Базовая кривая вращения Галактики на интервале расстояний $R : 0 - 190$ кпк строилась с использованием скоростей мазеров, классических цефеид, гигантов красного сгущения, голубых гигантов горизонтальной ветви, звезд гало, шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути. При этом кривая вращения подбиралась таким образом, чтобы не было доминирующего всплеска круговых скоростей в центральной ($R < 2$ кпк) области Галактики. В итоге построены две двухкомпонентные модели галактического потенциала, включающие вклады диска и гало невидимой материи, а также трехкомпонентная модель с заранее добавленным балджем небольшой массы. Такие модели могут быть полезными при изучении длительной орбитальной эволюции звезд, рассеянных и шаровых звездных скоплений в центральной ($R < 4$ кпк) области Галактики, где имеется сильное влияние бара. Проведен тест на самосогласованность построенных моделей путем сопоставления их кривых вращения с набором модельных, которые были сгенерированы с использованием программного пакета Illustris TNG50.

ключевые слова: Галактика (Млечный путь), кривая вращения, модель гравитационного потенциала, масса Галактики, динамика Галактики

Введение

Модель гравитационного потенциала Галактики имеет важное значение для изучения ее структуры и динамики. Одним из главных источников данных для построения такой модели являются круговые скорости вращения V_{circ} объектов, расположенных на различных расстояниях R от оси вращения Галактики. Зависимость V_{circ} от расстояния R называется кривой галактического вращения.

В настоящее время предложены разнообразные модели гравитационного потенциала Галактики. В основном, это осесимметричные многокомпонентные модели (Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014; Huang и др., 2016; Bobylev, Bajkova и Gromov, 2017; Ablimit и др., 2020; Jiao и др., 2023). Имеются неосесимметричные модели, учитывающие влияние бара и спиральной волны плотности (например, Hunter и др., 2024). Известны также модели, в которых круговые скорости вращения V_{circ} звезд меняются со временем из-за влияния Большого Магелланового Облака, что заметно влияет на оценку массы Галактики (Erkal, V. A. Belokurov и Parkin, 2020; Kravtsov и Winney, 2024).

В работах Bobylev, Bajkova и Gromov, 2017; Bajkova и Bobylev, 2016 были рассмотрены шесть осесимметричных трехкомпонентных (содержащих балдж, диск и гало) моделей гравитационного потенциала Галактики. Для уточнения параметров этих моделей были использованы наблюдательные данные, охватывающие диапазон расстояний R от 0 до ~ 200 кпк. При расстояниях

*e-mail: vbobylev@gaoran.ru

$R < 20$ кпк упор был сделан на данные о лучевых скоростях водородных облаков в тангенциальных точках, данные о 130 мазерах с измеренными тригонометрическими параллаксами, а на больших расстояниях были использованы усредненные скорости вращения Галактики из обзора Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014.

На кривой вращения Галактики хорошо известен пик в центральной области при R менее ~ 2 кпк. Этот пик известен исключительно благодаря данным об облаках нейтрального водорода в тангенциальных точках (например, Burton и Gordon, 1978; Clemens, 1985). В последнее время рядом авторов показано, что наличие пика на кривой вращения Галактики может быть вызвано ошибками в методе определения круговых скоростей по тангенциальным точкам в неосесимметричном диске внутри области 3–4 кпк (см. рисунок 9 в работе Chemin, Renaud и Soubiran, 2015).

С другой стороны, по мнению некоторых авторов, пик круговых скоростей звезд в центральной области Галактики зависит от массы балджа (например, Kataria и Das, 2018), а также связан с влиянием и ориентацией центрального бара (например, Khrapov, Khoperskov и Korchagin, 2021). Известно, что бар вращается с угловой скоростью, превышающей скорость вращения Галактики, поэтому его ориентация относительно направления Солнце–центр Галактики меняется со временем. Как показало моделирование Khrapov, Khoperskov и Korchagin, 2021, при изменении ориентации бара пик скоростей может смениться их глубоким минимумом. В итоге, многие авторы теперь предпочитают использовать модели гравитационного потенциала Галактики, в которых кривая вращения не имеет сильных колебаний в центральной области (например, Hunter и др., 2024; McMillan, 2017; Vasiliev, 2019; Ou и др., 2024; Matthieu Portail и др., 2017; Li и др., 2022).

Одной из целей настоящей работы является построение модели гравитационного потенциала Галактики, в которой кривая вращения не имеет значительного центрального пика скоростей. Необходимость в такой модели возникает при изучении длительной орбитальной эволюции звезд, рассеянных и шаровых звездных скоплений в центральной ($R < 4$ кпк) области Галактики, где имеется сильное влияние бара.

При спектральном анализе остаточных скоростей вращения звезд требуется кривая галактического вращения без резких колебаний на всех расстояниях, где имеются анализируемые объекты. Построение по современным данным гравитационного потенциала Галактики с такой кривой вращения может хорошо послужить и для спектрального анализа остаточных скоростей вращения звезд.

1 Данные

В настоящей работе для построения кривой вращения Галактики используются круговые скорости разнообразных галактических объектов, данные о которых были взяты нами из литературных источников. Это а) мазерные источники и радиозвезды с измеренными тригонометрическими параллаксами, б) классические цефеиды, в) гиганты красного сгущения, голубые гиганты горизонтальной ветви, далекие звезды гало, а также г) шаровые скопления и карликовые галактики-спутники Млечного Пути.

1.1 Выборка мазеров и радиозвезд

Применение РСДБ-метода для измерения тригонометрических параллаксов галактических мазеров сделало их первоклассными объектами для изучения Галактики. Наибольший интерес представляют мазерные источники, связанные с молодыми звездами и протозвездами, которые находятся в областях активного звездообразования. Выборка из примерно 200 таких источников представлена и проанализирована в работе Reid и др., 2019. Согласно этим авторам, случайные ошибки РСДБ-измерений тригонометрических параллаксов мазеров составляют менее 10%.

После фундаментальной работы Reid и др., 2019 было опубликовано еще несколько работ радиоастрономов, посвященных измерению тригонометрических параллаксов мазеров (например, Xu и др., 2021; Bian и др., 2022; Mai и др., 2023; Ortiz-León и др., 2023). Мы также при-

влекли высокоточные РСДБ-измерения параллаксных молодых радиозвезд в континууме (например, Ordóñez-Toro и др., 2024). В итоге наша выборка содержит 265 измерений тригонометрических параллаксных радиообъектов, случайные ошибки измерения которых составляют менее 30%. В настоящей работе используются 196 из них, с ошибками параллаксных менее 15%, расположенных далее 4 кпк от центра Галактики. Эти 196 источника были разбиты на 9 интервалов (с количеством мазеров более 5 в каждом) по расстоянию R , по которым были вычислены средние значения круговых скоростей и их ошибки.

1.2 Выборка классических цефеид

Для большого количества классических цефеид в работе D. M. Skowron, J. Skowron и др., 2019 были определены высокоточные гелиоцентрические расстояния с использованием соотношения “период–светимость”. Наблюдения этих цефеид были проведены в рамках программы OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Udalski, M. K. Szymański и G. Szymański, 2015; Soszyński и др., 2020). В настоящее время в обновляемый список наблюдений входит уже более 3500 звезд (Pietrukowicz, Soszyński и Udalski, 2021). В работах D. M. Skowron, J. Skowron и др., 2019; D. M. Skowron, Drimmel и др., 2025 показано, что случайные ошибки определения расстояний до цефеид в их каталоге по внутренней сходимости составляют менее 5%, а по внешней (из сравнения с тригонометрическими параллаксами цефеид из каталога Gaia DR3 Gaia Collaboration, Vallenari и др. 2023) – менее 10%.

Bobylev и Bajkova, 2023 получили выборку из около 2000 звезд путем отождествления цефеид из списка D. M. Skowron, J. Skowron и др., 2019 с каталогом Gaia EDR3 Gaia Collaboration, Brown, Vallenari, Prusti, de Bruijne, Babusiaux, Biermann и др., 2021, откуда были скопированы собственные движения цефеид. Лучевые скорости 773 цефеид нами были взяты из работы Mróz и др., 2019. Эту выборку мы используем в настоящей работе. Отметим, что в работе Mróz и др., 2019 были использованы собственные движения цефеид из каталога Gaia DR2 (Gaia Collaboration, Brown, Vallenari, Prusti, de Bruijne, Babusiaux, Bailer-Jones и др., 2018). Цефеиды были разбиты нами по расстоянию R на 15 интервалов (с количеством звезд более 4 в каждом), по которым были вычислены средние значения круговых скоростей и их ошибки.

1.3 Выборка красных гигантов

В работе Zhou и др., 2023 изучена выборка из более 250000 красных гигантов высокой светимости, где они обозначены как LRGB (Luminous Red Giant Branch). Это звезды, принадлежащие асимптотической ветви гигантов, располагаются на диаграмме Герцшпрунга-Рассела выше сгущения красных гигантов. Кривая вращения была построена этими авторами с использованием 54000 таких звезд с фотометрическими расстояниями. Необходимые фотометрические и спектральные (лучевые скорости) данные этими авторами были взяты из обзоров APOGEE (Majewski и др., 2017) и LAMOST (Luo и др., 2012; Deng и др., 2012). По мнению Zhou и др., 2023, случайные ошибки определения расстояний до выбранных звезд составили 10%–15%.

Оценки круговых скоростей вращения звезд вокруг центра Галактики $V_{\text{circ}}(R)$ Zhou и др., 2023 оценивали косвенным способом, основанным на применении уравнения Джинса (Binney и Tremaine, 2008) через дисперсии скоростей:

$$V_{\text{circ}}^2(R) = \langle V_\theta^2 \rangle - \langle V_R^2 \rangle \left(1 + \frac{\partial \ln \rho}{\partial \ln R} + \frac{\partial \ln \langle V_R^2 \rangle}{\partial \ln R} \right), \quad (1)$$

где уравнения записаны в цилиндрической системе координат (R, θ, z) , $\rho(R, z)$ — звездная плотность, а V_R и V_θ — соответствующие скорости звезд, а $\langle V_R^2 \rangle$ и $\langle V_\theta^2 \rangle$ — среднее квадратов соответствующих скоростей звезд. Второй член в правой части соотношения (1) называется асимметричным дрейфом.

Этот метод является модельнозависимым, так как необходимо хорошо знать закон распределения звездной плотности в зависимости от R и z , характер поведения дисперсий скоростей

Таблица 1: Оценки R_0 и V_0 .

R_0 , кпк	V_0 , км/с	$\partial V/\partial R$, км/с/кпк	n_*	Ref
8.15 ± 0.15	236 ± 7		~ 200 мазеров	Reid и др., 2019
8.122 ± 0.031	233.6 ± 2.8	-1.34 ± 0.21	773 цефеиды	Mróz и др., 2019
8.122 ± 0.031	229.0 ± 0.2	-1.7 ± 0.1	~ 20000 красных гигантов	Eilers и др., 2019
8.122 ± 0.031	234.0 ± 1.4	-1.84 ± 0.07	~ 54000 гигантов ветви	Zhou и др., 2023
8.122 ± 0.031	235.2 ± 0.8	-1.33 ± 0.1	~ 3500 цефеид	Ablimit и др., 2020
8.1 ± 0.1	236.3 ± 3.3		770 цефеид	Bobylev и Bajkova, 2023

анализируемых звезд в зависимости от R . Обычно все это хорошо известно только в ближайшей окрестности Солнца (вблизи R_0).

Отметим работы Pödder и др., 2023 и Коор и др., 2024, в которых кривая вращения Галактики строилась на основе соотношений (1) с использованием данных из каталога Gaia DR3. В работе Pödder и др., 2023 проанализированы скорости звезд, принадлежащих сгущению красных гигантов, расположенных в диапазоне расстояний $R : 5 - 14$ кпк. В работе Коор и др., 2024 кривая вращения Галактики была построена по данным о звездах из каталога Gaia DR3 с измеренными лучевыми скоростями, расположенными в интервале $R < 21$ кпк. Важно, что кривые вращения Галактики, построенные этими авторами, находятся в хорошем согласии с кривыми, построенными прямым способом (см. соотношение (3)).

1.4 Данные из работы Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014

Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014 построили кривую вращения Галактики в диапазоне галактоцентрических расстояний 0–200 кпк с использованием разнообразных кинематических данных. При этом на расстояниях R более ≈ 25 кпк использовались лучевые скорости следующих объектов толстого диска и гало: 1457 голубых гигантов горизонтальной ветви, 2227 К-гигантов, 16 шаровых скоплений, 28 далеких звезд гало и 21 карликовой галактики-спутника Млечного Пути. В работе Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014 кривая вращения Галактики была построена при значениях $R_0 = 8.3$ кпк и $V_0 = 244$ км/с. Оценки круговых скоростей вращения $V_{\text{circ}}(R)$ далеких объектов, расположенных на расстояниях более 25 кпк, оценивались на основе соотношения (1).

1.4.1 Круговые скорости вращения звезд

Из наблюдений для каждой звезды имеем лучевую скорость V_r , направленную вдоль луча зрения, и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74r\mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году. Через компоненты V_r, V_l, V_b вычисляются скорости U, V, W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат:

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b, \end{aligned} \quad (2)$$

где скорость U направлена от Солнца параллельно направлению на центр Галактики, точнее на ось галактического вращения, V в направлении вращения Галактики и W на северный галактический полюс. Вычисленные с использованием соотношений (2) скорости даны относительно Солнца. Чтобы получить скорости относительно местного стандарта покоя (МСП) необходимо учесть движение Солнца относительно МСП с компонентами скоростей $(U, V, W)_\odot$. Кроме того,

для правильного вычисления круговых скоростей необходимо учитывать поправку за асимметричный дрейф (1). В настоящее время широко используются значения компонент пекулярной скорости Солнца относительно МСП $(U, V, W)_{\odot} = (11.1, 12.24, 7.25)$ км/с, найденные в работе Schönrich, Binney и Dehnen, 2010. Поправка за асимметричный дрейф зависит от возраста звездной выборки. Для самых молодых звезд (например, мазеров ОВ-звезд или молодых цефеид) эта поправка близка к нулю, а для самых старых галактических объектов (например, звезд гало или шаровых скоплений), ее значение близко к 200 км/с. Отметим, что в настоящей работе мы не учитывали поправки за асимметричный дрейф для мазеров и цефеид. Но такие поправки учитывались для красных гигантов в работе Zhou и др., 2023, а также для разнообразных звездных выборок в работе Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014.

Значение круговой скорости вращения звезды вокруг галактического центра $V_{\text{circ}}(R)$ (ее направление совпадает с направлением вращения Галактики) можем найти из выражения

$$V_{\text{circ}} = U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \quad (3)$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, x, y, z — прямоугольные гелиоцентрические координаты звезды: ось x направлена от Солнца к центру Галактики, y в направлении вращения Галактики и z на северный галактический полюс (вдоль соответствующих осей x, y, z направлены скорости U, V, W), V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 .

Как можно видеть из соотношения (3), для вычисления V_{circ} необходимо задать конкретные значения двух величин — R_0 и V_0 . В таблице 1 дана небольшая сводка определений R_0 и V_0 , которые получены по различным объектам. Отметим, что в Bobylev и Bajkova, 2021 на основании статистического анализа большого количества индивидуальных оценок было найдено значение $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк. В итоге в настоящей работе принято $R_0 = 8.1$ кпк и $V_0 = 236$ км/с.

2 Метод

2.1 Модель потенциала Галактики

В большинстве случаев осесимметричный потенциал Галактики представляется в виде суммы трех составляющих — центрального сферического балджа $\Phi_b(r(R, z))$, диска $\Phi_d(r(R, z))$ и массивного сферического гало темной материи $\Phi_h(r(R, z))$:

$$\Phi(R, z) = \Phi_b(r(R, z)) + \Phi_d(r(R, z)) + \Phi_h(r(R, z)). \quad (4)$$

Здесь используется цилиндрическая система координат (R, θ, z) с началом координат в центре Галактики. В прямоугольной системе координат (x, y, z) с началом в центре Галактики расстояние до звезды будет $r^2 = x^2 + y^2 + z^2 = R^2 + z^2$. Гравитационный потенциал выражается в единицах $100 \text{ км}^2/\text{с}^2$, расстояния — в кпк, массы — в единицах галактической массы $M_g = 2.325 \times 10^7 M_{\odot}$, соответствующей гравитационной постоянной $G = 1$.

Выражение для плотности массы вытекает из уравнения Пуассона

$$4\pi G \rho(R, z) = \nabla^2 \Phi(R, z) \quad (5)$$

и имеет следующий вид:

$$\rho(R, z) = \frac{1}{4\pi G} \left(\frac{d^2 \Phi(R, z)}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{d\Phi(R, z)}{dR} + \frac{d^2 \Phi(R, z)}{dz^2} \right). \quad (6)$$

Сила, действующая в направлении z , перпендикулярном плоскости Галактики, определяется следующим образом:

$$K_z(z, R) = -\frac{d\Phi(z, R)}{dz}. \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) нам необходимы в дальнейшем для подгонки параметров моделей гравитационного потенциала с наложением ограничений на локальную динамическую плотность вещества ρ_0 и силу $K_z(z, R_0)$ при $z = 1.1$ кпк, известных из наблюдений (Holmberg и Flynn, 2004; Horta и др., 2024).

Кроме того, нам понадобятся выражения для вычисления

1) круговых скоростей

$$V_{circ}(R) = \sqrt{R \frac{d\Phi(R, 0)}{dR}}, \quad (8)$$

2) массы Галактики, содержащейся в сфере радиусом r

$$m(< r) = r^2 \frac{d\Phi(r)}{dr}, \quad (9)$$

3) параболической скорости, или скорости вылета звезды из поля притяжения Галактики

$$V_{esc}(R, z) = \sqrt{-2\Phi(R, z)}, \quad (10)$$

4) параметров Оорта

$$A = \frac{1}{2}\Omega'_0 \text{ и } B = \Omega_0 + A, \quad (11)$$

где $\Omega = V/R$ — угловая скорость вращения Галактики ($\Omega_0 = V_0/R_0$), Ω'_0 — первая производная угловой скорости по R , R_0 — галактоцентрическое расстояние Солнца.

5) поверхностной плотности гравитирующей материи в пределах расстояния z_{out} от галактической плоскости $z = 0$

$$\Sigma_{out}(z_{out}) = 2 \int_0^{z_{out}} \rho(R, z) dz = K_z/(2\pi G) + (B^2 - A^2)/(2\pi G), \quad (12)$$

В настоящей работе потенциалы балджа $\Phi_b(r(R, z))$ и диска $\Phi_d(r(R, z))$ представляются в следующей форме,

$$\Phi_b(r) = -\frac{M_b}{(r^2 + b_b^2)^{1/2}}, \quad (13)$$

$$\Phi_d(R, z) = -\frac{M_d}{\{R^2 + [a_d + (z^2 + b_d^2)^{1/2}]^2\}^{1/2}}. \quad (14)$$

Выражение (13) называют Пламмеровским потенциалом (Plummer, 1911), а выражение (14) для моделирования диска впервые было предложено в Miyamoto и Nagai, 1975, здесь M_b, M_d — массы компонент, b_b, a_d, b_d — масштабные параметры компонент в кпк. Вклады балджа и диска в круговую скорость составляют соответственно:

$$V_{circ(b)}^2(R) = \frac{M_b R^2}{(R^2 + b_b^2)^{3/2}}, \quad (15)$$

$$V_{circ(d)}^2(R) = \frac{M_d R^2}{(R^2 + (a_d + b_d^2)^2)^{3/2}}. \quad (16)$$

Для моделирования потенциала гало используем выражение, предложенное в Navarro, Frenk и White, 1997:

$$\Phi_h(r) = -\frac{M_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right), \quad (17)$$

которое обычно обозначается как модель NFW (Navarro, Frenk, White), в настоящее время такая модель гало достаточно широко используется, здесь вклад в круговую скорость составляет:

$$V_{circ(h)}^2(R) = M_h \left[\frac{\ln(1 + R/a_h)}{R} - \frac{1}{R + a_h} \right]. \quad (18)$$

2.2 Подгонка параметров

Как следует из Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014, скорости всех объектов на кривой вращения Галактики вычислены со значениями $R_\odot = 8.3$ кпк и $V_\odot = 244$ км/с. Параметры модели потенциала находятся путем подгонки (методом наименьших квадратов) к измеренным скоростям вращения (V_{circ}) галактических объектов, где

$$V_{circ}^2(R) = V_{circ(b)}^2 + V_{circ(d)}^2 + V_{circ(h)}^2. \quad (19)$$

Локальная динамическая плотность вещества ρ_0 , являющаяся суммой плотностей балджа, диска и невидимой материи в малой околосолнечной окрестности, вместе с поверхностной плотностью $\Sigma_{1.1}$, являются важнейшими дополнительными ограничениями в задаче подгонки параметров моделей потенциала к измеренным данным о круговых скоростях (Irtgang и др., 2013):

$$\rho_0 = \rho_b(R_0) + \rho_d(R_0) + \rho_h(R_0), \quad (20)$$

$$\Sigma_{1.1} = \int_{-1.1 \text{ кпк}}^{1.1 \text{ кпк}} (\rho_b(R_0, z) + \rho_d(R_0, z) + \rho_h(R_0, z)) dz. \quad (21)$$

Поверхностная плотность тесно связана с силой $K_z(z, R)$ в соответствии с соотношением (12). Поскольку значения двух важнейших параметров ρ_0 и $K_z/2\pi G$ известны из наблюдений с достаточно высокой точностью, то введение дополнительных ограничений на два этих параметра позволяет существенно уточнить параметры гравитационного потенциала.

При подгонке наших моделей к измерительным данным используются следующие целевые величины: 1) ограничение на локальную динамическую плотность вещества $\rho_0 = 0.1 M_\odot \text{ пк}^{-3}$, значение которой берем согласно Holmberg и Flynn, 2004 и 2) значение силы, действующей перпендикулярно к плоскости Галактики, $K_{z=1.1}/2\pi G = 72 M_\odot \text{ пк}^{-2}$, согласно оценке Norta и др., 2024. В итоге нами были использованы два дополнительных ограничения и задача подгонки параметров свелась к минимизации следующего квадратичного функционала F :

$$\min F = \sum_{i=1}^N (V_{circ}(R_i) - \tilde{V}_{circ}(R_i))^2 + \alpha_1(\rho_0 - \tilde{\rho}_0)^2 + \alpha_2(K_{z=1.1}/2\pi G - \tilde{K}_{z=1.1}/2\pi G)^2, \quad (22)$$

где N — число данных; данные измерений круговых скоростей обозначены тильдой; R_i — галактоосецентрические расстояния объектов; α_1, α_2 — весовые коэффициенты при дополнительных ограничениях, которые подбирались таким образом, чтобы достичь минимума невязки между данными и модельной кривой вращения при условии выполнения дополнительных ограничений с точностью не хуже 5%. Коэффициенты α_1 и α_2 могут быть выбраны с учетом ошибок в ρ_0 и K_z . В данном случае учет ошибок в ρ_0 и K_z как раз обеспечивает эти 5%.

Ошибки всех параметров, приведенных в таблице 2, были определены методом статистического моделирования Монте-Карло с использованием каждый раз 1000 независимых реализаций случайных ошибок измерения данных, подчиняющихся нормальному закону с нулевым средним и известным среднеквадратическим отклонением σ . Отметим, что вычисления выполнены с весами w вида $w = 1/\sigma^2$, где σ — значения ошибок скоростей.

3 Результаты и обсуждение

3.1 Модель 2-1

Из-за полного отсутствия данных при $R < 3$ кпк мы решили вначале построить двухкомпонентную модель осесимметричного потенциала Галактики, включающую вклады диска и гало невидимой материи. Значения параметров такой 2-х компонентной модели, полученной с использованием всех четырех описанных выше видов скоростей, даны в таблице 2. Обозначим ее как

Таблица 2: Найденные значения параметров 2-х компонентных (диск и гало) и 3-х компонентной (балдж, диск и гало) моделей галактического потенциала, $M_{\text{gal}} = 2.325 \times 10^7 M_{\odot}$

Параметры	модель 2-1	модель 2-2	модель 3
$M_b(M_{\text{gal}})$			203 ± 5
$M_d(M_{\text{gal}})$	2362 ± 17	2376 ± 16	2364 ± 14
$M_h(M_{\text{gal}})$	8091 ± 246	8257 ± 233	8687 ± 224
$b_b(\text{кпк})$			0.2700 ± 0.0002
$a_d(\text{кпк})$	4.20 ± 0.11	4.13 ± 0.09	4.30 ± 0.09
$b_d(\text{кпк})$	0.2416 ± 0.0005	0.2453 ± 0.0005	0.2740 ± 0.0004
$a_h(\text{кпк})$	4.74 ± 0.19	4.87 ± 0.18	5.30 ± 0.17

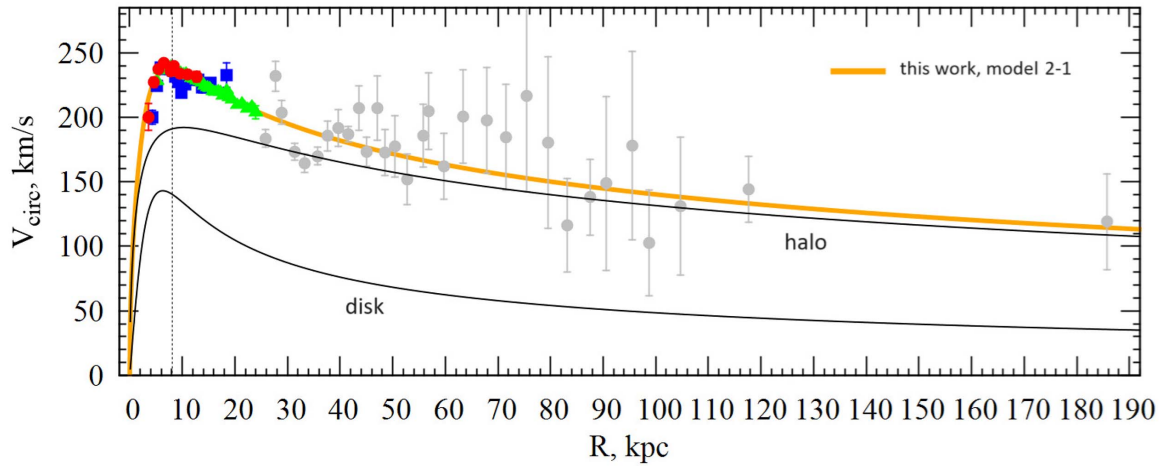


Рис. 1: Оранжевая жирная линия — кривая вращения Галактики для модели 2-1, вертикальной линией отмечено положение Солнца, тонкими черными линиями обозначены вклады диска и гало, синие квадратики — скорости классических цефеид, красные кружки — скорости мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами, зеленые треугольники — скорости красных гигантов высокой светимости из Zhou и др., 2023, серые кружки — скорости из Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014.

модель 2-1. При подгонке к данным были получены следующие значения двух целевых параметров: $K_{z=1.1}/2\pi G = 73.7 M_{\odot} \text{ пк}^{-2}$ и $\rho_0 = 0.11 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$, находящиеся в хорошем согласии с теми, к которым стремились изначально.

Значение линейной круговой скорости вращения Галактики на околосолнечном расстоянии здесь равно $V_0 = 233 \text{ км/с}$. С параметрами модели 2-1 получаем ряд важных оценок. Так, масса Галактики, заключенная внутри сферы радиусом 200 кпк, составляет $M(< 200 \text{ кпк}) = (0.68 \pm 0.18) \times 10^{12} M_{\odot}$. Скорость убегания на околосолнечном расстоянии $R_0 = 8.1 \text{ кпк}$ равна 515 км/с, а скорость убегания на расстоянии $R = 200 \text{ кпк}$ составляет 200 км/с.

Для сравнения укажем, что в работе Bajkova и Bobylev, 2016 с использованием трехкомпонентной модели потенциала (модель III), построенной по кривой галактического вращения с пиком скоростей в центральной области, получили оценку $M(< 200 \text{ кпк}) = (0.75 \pm 0.19) \times 10^{12} M_{\odot}$. Как показывает статистический анализ различных оценок массы Галактики, современное значение $M(< 200 \text{ кпк})$ близко к $1 \times 10^{12} M_{\odot}$ (Bobylev и Bajkova, 2023).

Кривая вращения Галактики для модели 2-1 дана на рис. 1. Здесь скорости объектов из Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014 были приведены к значениям $R_0 = 8.1 \text{ кпк}$ и $V_0 = 236 \text{ км/с}$ путем соответствующей корректировки.

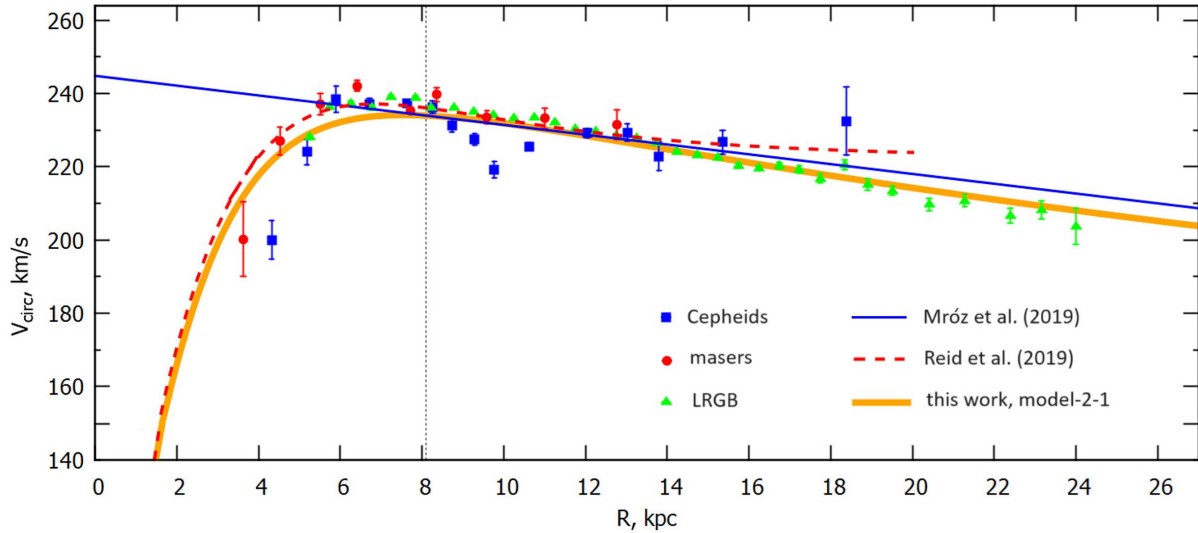


Рис. 2: Отрезки кривых вращения Галактики в околосолнечной окрестности, найденные различными авторами, в сравнении с кривой вращения модели 2-1, LRGB — luminous red giant branch.

Сопоставление кривых вращения Галактики в околосолнечной окрестности, найденных различными авторами, дано на рис. 2. Отметим, во-первых, что при заданном масштабе на рисунке хорошо видны усредненные круговые скорости мазеров, цефеид и красных гигантов. Во-вторых, дана кривая вращения Галактики, найденная по мазерам в Reid и др., 2019. В-третьих, дан линейный тренд, полученный из анализа кинематики 773 классических цефеид Mróz и др., 2019. Наконец, дана кривая вращения, соответствующая найденной в настоящей работе модели 2-1.

Можем заключить, что в области $R : [6-16]$ кпк имеется отличное согласие между всеми тремя кривыми вращения. Однако при $R > 16$ кпк расхождение между кривыми систематически растет. Как можно видеть, при $R \sim 20$ кпк разница с кривой Reid и др., 2019 составляет около 10 км/с. Такое расхождение имеет существенное значение при спектральном анализе остаточных скоростей вращения. Ведь остаточные скорости звезд получаются после вычитания из них скорости вращения Галактики. Для мазеров это не совсем актуально, так как мало пока имеется измерений тригонометрических параллаксов далеких мазеров. А вот для цефеид это актуально, так как имеется достаточно много далеких цефеид с кинематическими данными. Возмущения круговых скоростей от галактической спиральной волны плотности достигают значений 4–6 км/с. Поэтому необходимо иметь “правильную” (гладкую, без сильных скачков и загибов) кривую вращения Галактики на всем интервале расстояний R , где присутствуют анализируемые звезды.

3.2 Модель 2-2

Далее были оценены параметры 2-х компонентной модели, полученной с использованием только трех видов скоростей — по объектам, расположенным не далее 25 кпк от центра Галактики. Т.е. не использовались данные из Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014, обладающие большими ошибками средних значений скоростей. В результате этого подхода была получена модель 2-2, значения параметров которой даны в таблице 2.

В этой модели при подгонке к данным были получены следующие значения двух целевых параметров: $K_{z=1.1}/2\pi G = 72.1 M_{\odot} \text{ пк}^{-2}$ и $\rho_0 = 0.11 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$. Здесь масса Галактики, заключенная внутри сферы радиусом 200 кпк, составляет $M(< 200 \text{ кпк}) = (0.47 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$. Скорость убегания на околосолнечном расстоянии $R_0 = 8.1$ кпк равна 477 км/с, а на расстоянии $R = 200$ кпк составляет 161 км/с.

Кривые вращения Галактики модели 2-1 и 2-2 даны на рис. 3. Как видно из рисунка, кривая вращения Галактики, соответствующая модели 2-2, отлично проходит по данным Zhou и др., 2023,

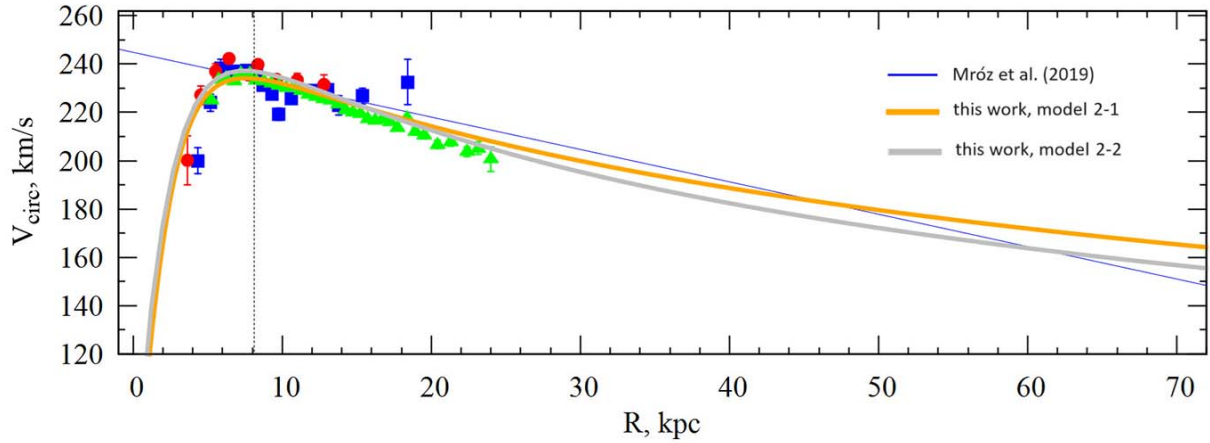


Рис. 3: Кривые вращения Галактики, соответствующие моделям 2-1 и 2-2.

Таблица 3: Найденные на основе модели 2-1 значения массы $M_d + M_h$, заключенной внутри сферы радиусом R . Даны также значения M_b , вычисленные как разности $(1.84 - M_d - M_h) \times 10^{10} M_\odot$, $M_{\text{gal}} = 2.325 \times 10^7 M_\odot$.

R (кпк)	$(M_d + M_h) \times 10^{10} M_\odot$	$M_b \times 10^{10} M_\odot$	$M_b (M_{\text{gal}})$
2.4	1.96	-0.08	-34
2.2	1.67	0.21	90
2.0	1.41	0.47	202
1.8	1.15	0.73	314

которые являются самыми многочисленными среди представленных. Кроме того, усредненные круговые скорости красных гигантов из работы Zhou и др., 2023 имеют очень маленькие случайные ошибки, что обеспечивает их большие веса при поиске решения. Кривая вращения этих авторов имеет пик скоростей в центральной области Галактики, поэтому их потенциал не совсем удобно применять при анализе объектов, расположенных в центральной области Галактики.

Как можно видеть из рис. 2 и 3, на расстояниях $R > R_0$ имеется хорошее согласие линейной зависимостью Mróz и др., 2019, с полученной ими по цефеидам, и кривой модели 2-1. Однако для формирования остаточных скоростей вращения звезд во внутренней области Галактики зависимость Mróz и др., 2019. Таким образом, как во внутренней области, так и во внешней области Галактики, везде где имеются цефеиды с оценками расстояний и кинематическими данными, лучше всего для этой цели подходит кривая вращения нашей модели 2-1.

3.3 Модель 3

Наконец, нами была построена 3-х компонентная модель, включающая балдж, диск и гало. Она, также как и модель 2-1, построена с использованием всех видов скоростей. Так как данные в центральной области отсутствуют, то потенциал балджа нами задавался вручную.

В работе M. Portail и др., 2015 была предложена динамическая модель арахисоподобного балджа, построенная с использованием высокоточных данных о гигантах красного сгущения. Балдж рассматривался в виде эллипсоида с размерами осей $(2.2 \times 1.4 \times 1.2)$ кпк. Масса такого эллипсоида составила $1.84 \times 10^{10} M_\odot$. Эта оценка содержит внутри заданного объема массу диска M_d , гало M_h и собственно балджа M_b .

Применяя двухкомпонентную модель 2-1, мы вычислили сумму масс $M_d + M_h$, заключенную внутри сферы радиусом R , для четырех значений R . Нашли также M_b в виде разности $(1.84 - M_d - M_h) \times 10^{10} M_\odot$. Результаты даны в таблице 3, где в последней колонке указана масса балджа

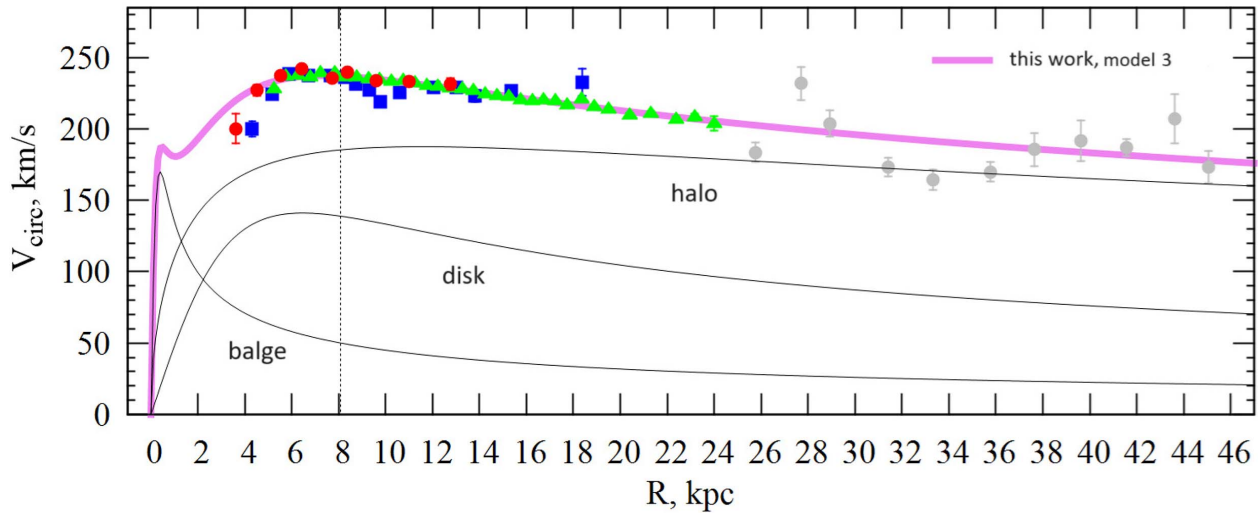


Рис. 4: Жирная линия — кривая вращения Галактики для модели 3, вертикальной линией отмечено положение Солнца, тонкими черными линиями обозначены вклады балджа, диска и гало, синие квадратики — скорости классических цефеид, красные кружки — скорости мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами, зеленые треугольники — скорости красных гигантов высокой светимости из Zhou и др., 2023, серые кружки — скорости из работы Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014.

M_b (M_{gal}) в единицах используемых нами моделей.

На основе полученных данных мы приняли следующие значения параметров балджа: $M_b = 203M_{\text{gal}}$ и $b_b = 0.27$ кпк (таблица 2). Отметим, что ранее, в нашей модели III (Bajkova и Bobylev, 2016), использовались параметры балджа с примерно в два раза большей массой: $M_b = 443M_{\text{gal}}$ и $b_b = 0.27$ кпк. Это давало максимум около 260 км/с на соответствующей кривой круговых скоростей.

В результате была построена модель 3, значения параметров которой даны в последней колонке таблицы 2. При подгонке к данным для этой модели получены следующие значения двух целевых параметров: $K_{z=1.1}/2\pi G = 72.2 M_{\odot} \text{ кпк}^{-2}$ и $\rho_0 = 0.10 M_{\odot} \text{ кпк}^{-3}$. Здесь значение круговой скорости вращения Галактики на околосолнечном расстоянии составляет $V_0 = 234$ км/с. Кроме того, для модели 3 $M(< 200 \text{ кпк}) = (0.60 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}$, $M(< 100 \text{ кпк}) = (0.47 \pm 0.10) \times 10^{12} M_{\odot}$, $M(< 50 \text{ кпк}) = (0.35 \pm 0.08) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M(< 30 \text{ кпк}) = (0.27 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Можем сравнить эти оценки с ограничениями на массу Галактики, полученными, например, в Vasiliev, V. Belokurov и Erkal, 2021, где получено $M(< 100 \text{ кпк}) = (0.56 \pm 0.4) \times 10^{12} M_{\odot}$, а также в Korosov и др., 2023, где найдено $M(< 32.4 \text{ кпк}) = (0.285 \pm 0.010) \times 10^{12} M_{\odot}$. Можем видеть, что имеется хорошее согласие оценок массы в модели 3 с оценками указанных авторов.

Отметим, что кривая скоростей с максимумом $V_{\text{circ}} \sim 150$ км/с, соответствующая вкладу балджа в кривую вращения в модели 3 (рис. 4) с принятыми в настоящей работе значениями параметров балджа (табл. 2), находится в хорошем согласии с аналогичными кривыми, используемыми другими авторами (Hunter и др., 2024; Ou и др., 2024; de Salas и др., 2019).

3.4 Сопоставление с численными расчетами эволюции галактик

Для построенных моделей 2-2 и 3 мы провели проверку на самосогласованность таких моделей. Дело в том, что с физической точки зрения отдельные компоненты должны быть каким-то образом связаны друг с другом, так как и темное гало, и звездный диск, и балдж должны участвовать во взаимном гравитационном взаимодействии. Поэтому и параметры, а, значит, и профили отдельных компонент, должны быть как-то неявно связаны. Определить точную связь здесь тя-

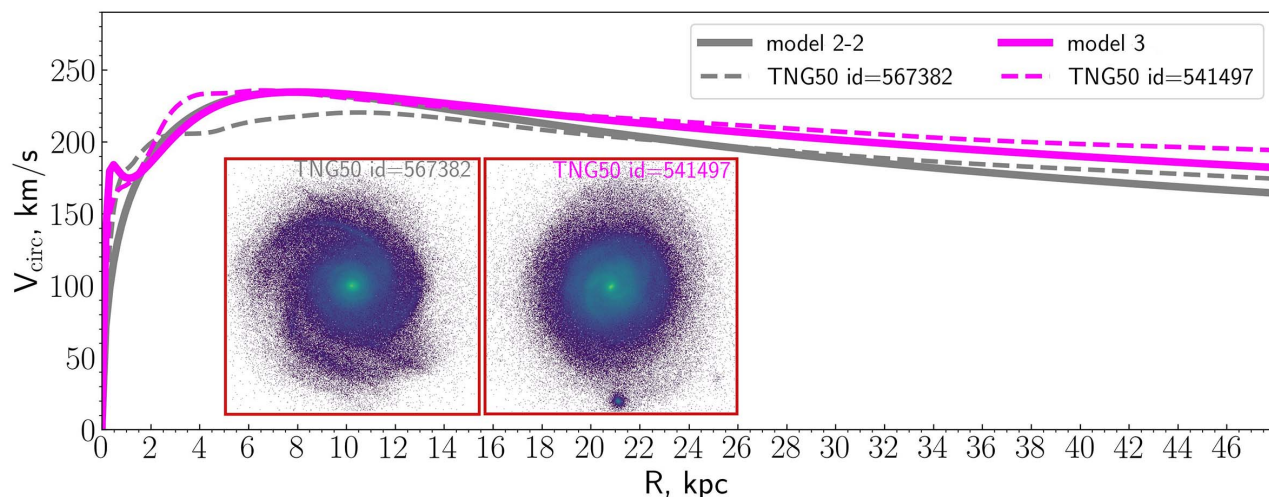


Рис. 5: Кривые вращения моделей 2-2 и 3 (сплошным) в сравнении с их аналогами из космологических симуляций TNG50 (пунктиром). Вставка показывает изображения плашмя звездных дисков симуляций в области от -15 кпк до 15 кпк относительно центра диска.

желю, так как в целом в многокомпонентной модели большое количество параметров. Тем не менее, если модель физична, то она должна образовываться в ходе самосогласованной эволюции галактик, а значит должна получаться и в космологических расчетах, которые представляют эволюцию галактик во Вселенной. Далее, если в космологических расчетах удастся найти модельную галактику с кривой вращения, близкой к наблюдаемой, то можно говорить, что такой потенциал мог возникнуть в самосогласованно эволюционирующей галактике. Если же в расчетах не удастся найти модельную галактику с полученной модельной кривой вращения, то ситуация сложнее. Отсутствие модельной галактики с кривой вращения, близкой к наблюдаемой, может говорить о том, что выборка модельных галактик просто не репрезентативна.

Был проведен следующий эксперимент. На сегодняшний день существует несколько каталогов модельных галактик, подобных Млечному Пути. Такие каталоги делаются на основе численных расчетов, выполненных в больших проектах типа Illustris TNG50 Pillepich, Nelson и др., 2019, где учитывается физика взаимодействия различных компонент, в том числе учитывается газ, звездообразование, магнитная гидродинамика и т. д. Мы воспользовались каталогом Pillepich, Sotillo-Ramos и др., 2024, построенным на основе таких численных расчетов и насчитывающим 198 модельных галактик. Далее для каждой модельной галактики определялась кривая вращения, а затем найденная кривая вращения сравнивалась с кривой вращения моделей 2-2 и 3 и определялось среднеквадратичное отклонение между кривыми на конечной сетке с шагом 100 пк от 0 до 46 кпк. Кривые вращения модельных галактик строились с помощью программного пакета AGAMA (Vasiliev, 2019), где определялось осесимметричное приближение потенциала и из него находились круговые скорости звезд. Это программа позволяет аппроксимировать потенциал модельных галактик с помощью цилиндрических сплайнов, что и было нами сделано. Для обеих моделей 2-2 и 3 мы нашли ближайшие в смысле кривой вращения модели из TNG50, см. рис. 5. На этом же рисунке во вставке приведены изображения модельных галактик плашмя (показана область от -15 кпк до $+15$ кпк относительно центра модели).

В случае модели 2-2 ближайшая кривая вращения из TNG50 хотя и близка в центральной области ($R < 4$ кпк) и далекой от центра области ($R > 20$ кпк), все же весьма плохо совпадает с ней в области Солнца. Значения круговых скоростей в численном расчете существенно ниже (~ 200 км/с) в этой области. В случае модели 3 ситуация при сравнении оказывается существенно лучше. Кривая вращения численного расчета хорошо совпадает с ней в области от 6 кпк до 24 кпк (в том числе в окрестности Солнца).

Тот факт, что для модели 3 удастся найти схожую модель галактики из численного расчета,

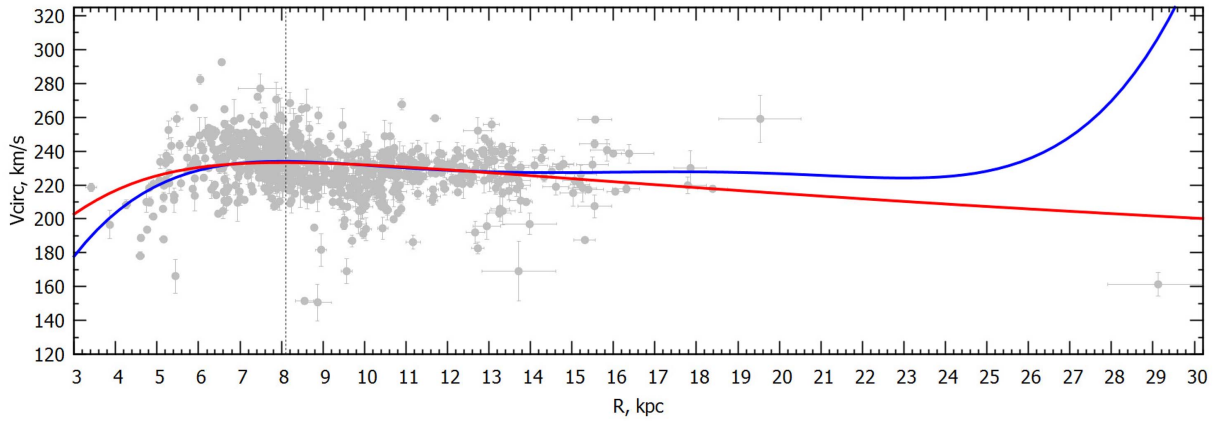


Рис. 6: Серые кружки — скорости вращения V_{circ} классических цефеид, синяя линия — кривая вращения из работы Bobylev и Bajkova, 2023, найденная по этим цефеидам на основе разложения угловой скорости вращения Галактики Ω в ряд вплоть до четвертой ее производной, красная линия — кривая вращения, соответствующая модели 3.

может свидетельствовать о том, что такая модель действительно является самосогласованной. В случае же модели 2-2 наличие существенных расхождений между ее кривой вращения и кривой численного расчета в области Солнца может быть вызвано как тем, что в самом каталоге Pillepich, Sotillo-Ramos и др., 2024 не охвачено все пространство возможных параметров галактик, так и тем, что модель 2-2 менее физична.

3.5 Остаточные скорости цефеид

Круговые скорости вращения Галактики в модели 3 (см. соотношения (15), (16) и (18)), с учетом того, что массы компонент, взятые из из таблицы 2, умножены на 100, вычисляются следующим образом:

$$V_{circ}^2 = 20300 \times R^2 / (R^2 + 0.27^2)^{1.5} + 236400 \times R^2 / (R^2 + (4.30 + 0.2740)^2)^{1.5} + 868700 \times (\ln(1 + R/5.30) / R - 1 / (R + 5.30)). \quad (23)$$

На рис. 6 даны скорости вращения цефеид с измеренными лучевыми скоростями. Показаны две кривые галактического вращения: а) кривая вращения из работы Bobylev и Bajkova, 2023, найденная по всей выборке цефеид на основе разложения угловой скорости вращения Галактики Ω в ряд в окрестности R_0 вплоть до четвертой ее производной, причем эта кривая затем приведена к скорости $V_0 = 234$ км/с (путем прибавления сдвига $\Delta V_0 = 8.3$ км/с) и б) кривая вращения, соответствующая модели 3 (23).

Значения параметров кривой вращения Галактики (которые являются членами ряда Тейлора: $\Omega_0 + \sum_{i=1}^4 (R - R_0)^i \Omega_0^{(i)} / i!$), найденные в работе Bobylev и Bajkova, 2023, следующие: $\Omega_0 = 27.87 \pm 0.09$ км/с, $\Omega_0' = -3.461 \pm 0.033$ км/с², $\Omega_0'' = 0.651 \pm 0.024$ км/с³, $\Omega_0''' = -0.105 \pm 0.011$ км/с⁴, $\Omega_0^{IV} = 0.009 \pm 0.002$ км/с⁵, где линейная скорость вращения околосолнечной окрестности составляет $V_0 = 225.7 \pm 2.9$ км/с (для принятого $R_0 = 8.1$ кпк).

Как видно из рис. 6, обе кривые имеют хорошее согласие как с данными, так и между собой, но на ограниченном интервале расстояний $R : 6 - 15$ кпк. При формировании остаточных скоростей вращения звезд для последующего спектрального анализа (и выявления, например, влияния спиральной волны плотности) желательно охватывать весь интервал расстояний со звездами. Кривая вращения Галактики, построенная на основе разложения угловой скорости в ряд, конечно, может использоваться для этой задачи. Но с увеличением размера анализируемой области, всякий раз

необходимо увеличивать количество членов ряда. А вот кривая вращения, построенная на основе галактического потенциала является универсальной (в этой задаче), применимой на любых расстояниях R .

Заключение

В настоящей работе уточнены параметры модели осесимметричного гравитационного потенциала Галактики. Основой для построения кривой вращения Галактики нам послужили взятые из литературы скорости мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами, классических цефеид, гигантов красного сгущения, гигантов высокой светимости, голубых гигантов горизонтальной ветви, далеких звезд гало, шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути.

Потенциал балджа представлен в форме Пламмеровского потенциала (Plummer, 1911), диска в форме (Miyamoto и Nagai, 1975), а для потенциала гало использована модель NFW (Navarro, Frenk и White, 1997). Построены две двухкомпонентные модели (2-1 и 2-2) галактического потенциала, включающие вклады диска и гало невидимой материи. В модели 2-1 исходная кривая вращения построена по данным, покрывающим интервал расстояний $R : 3 - 190$ кпк, а в модели 2-2 использован более короткий интервал $R : 3 - 24$ кпк. Трехкомпонентная модель 3 включает вклады диска и гало, а также балдж небольшой массы.

Проведен тест на самосогласованность построенных моделей 3 и 2-2 путем сопоставления их кривых вращения с набором модельных. Кривые вращения модельных галактик были сгенерированы с использованием программного пакета Illustris TNG50. Был сделан вывод о том, что модель 3 близка к самосогласованной, а модель 2-2 менее физична.

Показано, что кривые вращения построенных нами моделей хорошо подходят для формирования остаточных скоростей вращения звезд и последующего спектрального анализа. Они являются универсальными (в этой задаче), так как применимы на любых расстояниях R , где есть звезды.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

Список литературы

- Bhattacharjee, Pijushpani, Soumini Chaudhury и Susmita Kundu (2014). [Rotation Curve of the Milky Way out to \$\sim 200\$ kpc](#). *ApJ* 785.1, с. 63.
- Huang, Y. и др. (2016). [The Milky Way's rotation curve out to 100 kpc and its constraint on the Galactic mass distribution](#). *MNRAS* 463.3, с. 2623—2639.
- Bobylev, V. V., A. T. Bajkova и A. O. Gromov (2017). [Refinement of the parameters of three selected model Galactic potentials based on the velocities of objects at distances up to 200 kpc](#). *Astronomy Letters* 43.4, с. 241—251.
- Ablimit, Iminhaji, Gang Zhao, Chris Flynn и Sarah A. Bird (2020). [The Rotation Curve, Mass Distribution, and Dark Matter Content of the Milky Way from Classical Cepheids](#). *ApJ* 895.1, с. L12.
- Jiao, Yongjun и др. (2023). [Detection of the Keplerian decline in the Milky Way rotation curve](#). *A&A* 678, A208.
- Hunter, Glen H. и др. (2024). [Testing kinematic distances under a realistic Galactic potential: Investigating systematic errors in the kinematic distance method arising from a non-axisymmetric potential](#). *A&A* 692, A216.
- Erkal, Denis, Vasily A. Belokurov и Daniel L. Parkin (2020). [Equilibrium models of the Milky Way mass are biased high by the LMC](#). *MNRAS* 498.4, с. 5574—5580.
- Kravtsov, Andrey и Sophia Winney (2024). [Effect of the Large Magellanic Cloud on the kinematics of Milky Way satellites and virial mass estimate](#). *The Open Journal of Astrophysics* 7, с. 50.
- Bajkova, A. T. и V. V. Bobylev (2016). [Rotation curve and mass distribution in the Galaxy from the velocities of objects at distances up to 200 kpc](#). *Astronomy Letters* 42.9, с. 567—582.
- Burton, W. B. и M. A. Gordon (1978). [Carbon monoxide in the Galaxy. III. The overall nature of its distribution in the equatorial plane](#). *A&A* 63.1-2, с. 7—27.
- Clemens, D. P. (1985). [Massachusetts-Stony Brook Galactic plane CO survey: the galactic disk rotation curve](#). *ApJ* 295, с. 422—436.
- Chemin, Laurent, Florent Renaud и Caroline Soubiran (2015). [Incorrect rotation curve of the Milky Way](#). *A&A* 578, A14.
- Kataria, Sandeep Kumar и Mousumi Das (2018). [A study of the effect of bulges on bar formation in disc galaxies](#). *MNRAS* 475.2, с. 1653—1664.
- Khrapov, Sergey, Alexander Khoperskov и Vladimir Korchagin (2021). [Modeling of Spiral Structure in a Multi-Component Milky Way-Like Galaxy](#). *Galaxies* 9.2, с. 29.
- McMillan, Paul J. (2017). [The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way](#). *MNRAS* 465.1, с. 76—94.
- Vasiliev, Eugene (2019). [Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2](#). *MNRAS* 484.2, с. 2832—2850.
- Ou, Xiaowei, Anna-Christina Eilers, Lina Necib и Anna Frebel (2024). [The dark matter profile of the Milky Way inferred from its circular velocity curve](#). *MNRAS* 528.1, с. 693—710.
- Portail, Matthieu, Ortwin Gerhard, Christopher Wegg и Melissa Ness (2017). [Dynamical modelling of the galactic bulge and bar: the Milky Way's pattern speed, stellar and dark matter mass distribution](#). *MNRAS* 465.2, с. 1621—1644.
- Li, Zhi, Juntao Shen, Ortwin Gerhard и Jonathan P. Clarke (2022). [Gas Dynamics in the Galaxy: Total Mass Distribution and the Bar Pattern Speed](#). *ApJ* 925.1, с. 71.
- Reid, M. J. и др. (2019). [Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way](#). *ApJ* 885.2, с. 131.
- Xu, Y. и др. (2021). [Trigonometric Parallaxes of Four Star-forming Regions in the Distant Inner Galaxy](#). *ApJS* 253.1, с. 1.
- Bian, S. B. и др. (2022). [Parallax of Star-forming Region G027.22+0.14](#). *AJ* 163.2, с. 54.
- Mai, Xiaofeng и др. (2023). [The Parallax and 3D Kinematics of Water Masers in the Massive Star-forming Region G034.43+0.24](#). *ApJ* 949.1, с. 10.

- Ortiz-León, Gisela N. и др. (2023). The distance to the Serpens South cluster from H₂O masers. *A&A* 673, с. L1.
- Ordóñez-Toro, Jazmín и др. (2024). Dynamical Mass of the Ophiuchus Intermediate-mass Stellar System S1 with DYNAMO-VLBA. *AJ* 167.3, с. 108.
- Skowron, Dorota M., Jan Skowron и др. (2019). A three-dimensional map of the Milky Way using classical Cepheid variable stars. *Science* 365.6452, с. 478—482.
- Udalski, A., M. K. Szymański и G. Szymański (2015). OGLE-IV: Fourth Phase of the Optical Gravitational Lensing Experiment. *Acta Astron.* 65.1, с. 1—38.
- Soszyński, I. и др. (2020). Additional Galactic Cepheids from the OGLE Survey. *Acta Astron.* 70.2, с. 101—119.
- Pietrukowicz, P., I. Soszyński и A. Udalski (2021). Classical Cepheids in the Milky Way. *Acta Astron.* 71.3, с. 205—222.
- Skowron, Dorota M., Ronald Drimmel и др. (2025). The Milky Way as Seen by Classical Cepheids. I. Distances Based on Mid-infrared Photometry. *ApJS* 278.2, с. 57.
- Gaia Collaboration, A. Vallenari и др. (2023). Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties. *A&A* 674, A1.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2023). 3D Kinematics of Classical Cepheids According to Gaia EDR3 Catalog. *Research in Astronomy and Astrophysics* 23.4, с. 045001.
- Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann и др. (2021). Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties. *A&A* 649, A1.
- Mróz, Przemek и др. (2019). Rotation Curve of the Milky Way from Classical Cepheids. *ApJ* 870.1, с. L10.
- Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, C. A. L. Bailer-Jones и др. (2018). Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. *A&A* 616, A1.
- Zhou, Yuan, Xinyi Li, Yang Huang и Huawei Zhang (2023). The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5-25 kpc Using Luminous Red Giant Branch Stars. *ApJ* 946.2, с. 73.
- Majewski, Steven R. и др. (2017). The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE). *AJ* 154.3, с. 94.
- Luo, A. -Li и др. (2012). Data release of the LAMOST pilot survey. *Research in Astronomy and Astrophysics* 12.9, с. 1243—1246.
- Deng, Li-Cai и др. (2012). LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration (LEGUE) — The survey's science plan. *Research in Astronomy and Astrophysics* 12.7, с. 735—754.
- Binney, James и Scott Tremaine (2008). *Galactic Dynamics: Second Edition*.
- Pöder, Sven и др. (2023). A Bayesian estimation of the Milky Way's circular velocity curve using Gaia DR3. *A&A* 676, A134.
- Koop, Orlin, Teresa Antoja, Amina Helmi, Thomas M. Callingham и Chervin F. P. Laporte (2024). Assessing the robustness of the Galactic rotation curve inferred from the Jeans equations using Gaia DR3 and cosmological simulations. *A&A* 692, A50.
- Eilers, Anna-Christina, David W. Hogg, Hans-Walter Rix и Melissa K. Ness (2019). The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5 to 25 kpc. *ApJ* 871.1, с. 120.
- Schönrich, Ralph, James Binney и Walter Dehnen (2010). Local kinematics and the local standard of rest. *MNRAS* 403.4, с. 1829—1833.
- Bobylev, V. V. и A. T. Bajkova (2021). A New Estimate of the Best Value for the Solar Galactocentric Distance. *Astronomy Reports* 65.6, с. 498—506.
- Holmberg, Johan и Chris Flynn (2004). The local surface density of disc matter mapped by Hipparcos. *MNRAS* 352.2, с. 440—446.
- Horta, Danny и др. (2024). Orbital Torus Imaging: Acceleration, Density, and Dark Matter in the Galactic Disk Measured with Element Abundance Gradients. *ApJ* 962.2, с. 165.
- Plummer, H. C. (1911). On the problem of distribution in globular star clusters. *MNRAS* 71, с. 460—470.

- Miyamoto, M. и R. Nagai (1975). [Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies](#). PASJ 27, с. 533–543.
- Navarro, Julio F., Carlos S. Frenk и Simon D. M. White (1997). [A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering](#). ApJ 490.2, с. 493–508.
- Irrgang, A., B. Wilcox, E. Tucker и L. Schiefelbein (2013). [Milky Way mass models for orbit calculations](#). A&A 549, A137.
- Bobylev, V. V. и A. T. Baykova (2023). [Modern Estimates of the Mass of the Milky Way](#). *Astronomy Reports* 67.8, с. 812–823.
- Portail, M., C. Wegg, O. Gerhard и I. Martinez-Valpuesta (2015). [Made-to-measure models of the Galactic box/peanut bulge: stellar and total mass in the bulge region](#). MNRAS 448.1, с. 713–731.
- Vasiliev, Eugene, Vasily Belokurov и Denis Erkal (2021). [Tango for three: Sagittarius, LMC, and the Milky Way](#). MNRAS 501.2, с. 2279–2304.
- Koposov, Sergey E. и др. (2023). [S⁵: Probing the Milky Way and Magellanic Clouds potentials with the 6D map of the Orphan-Chenab stream](#). MNRAS 521.4, с. 4936–4962.
- de Salas, P. F., K. Malhan, K. Freese, K. Hattori и M. Valluri (2019). [On the estimation of the local dark matter density using the rotation curve of the Milky Way](#). J. Cosmology Astropart. Phys. 2019.10, с. 037.
- Pillepich, Annalisa, Dylan Nelson и др. (2019). [First results from the TNG50 simulation: the evolution of stellar and gaseous discs across cosmic time](#). MNRAS 490.3, с. 3196–3233.
- Pillepich, Annalisa, Diego Sotillo-Ramos и др. (2024). [Milky Way and Andromeda analogues from the TNG50 simulation](#). MNRAS 535.2, с. 1721–1762.

Construction of new models of the gravitational potential of the Galaxy

V. V. Bobylev¹, A. T. Bajkova¹, A. A. Smirnov¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 3 June 2025 / Accepted 16 June 2025

Abstract

The parameters of the axisymmetric model of the gravitational potential of the Galaxy have been refined. The basic curve of the Galaxy’s rotation in the distance interval $R : 0 - 190$ kpc was constructed using the velocities of masers, classical Cepheids, Red Clump stars, Blue Horizontal Branch stars, halo stars, globular clusters, and dwarf satellite galaxies of the Milky Way. The rotation curve was selected in such a way that there would be no dominant burst of circular velocities in the central ($R < 2$ kpc) region of the Galaxy. As a result, two two-component models of the galactic potential were constructed, including contributions from the disk and halo of invisible matter, as well as a three-component model with a small-mass bulge added in advance. Such models can be useful in studying the long-term orbital evolution of stars, open and globular star clusters in the central ($R < 4$ kpc) region of the Galaxy, where there is a strong influence of the bar. A self-consistency test of the constructed models was carried out by comparing their rotation curves with a set of model curves that were generated using the Illustris TNG50 software package.

key words: Galaxy (Milky Way), rotation curve, gravitational potential model, Galaxy mass, Galaxy dynamics