



Обзор современных оценок массы Галактики

В.В. Бобылев^{1*}, А.Т. Байкова¹,

¹ ГАО РАН

Аннотация

Дан обзор методов, применяемых для оценки массы Галактики, и результатов, полученных различными авторами в последнее время по современным данным. В частности, рассмотрены оценки, полученные на основе анализа кривой галактического вращения, по кинематике карликовых галактик-спутников Млечного Пути и шаровым скоплениям, по шлейфам карликовых галактик, по далеким звездам гало, по скоростям убегания, а также по торможению местного Хаббловского потока. Рассмотрены оценки массы Галактики вида $M(< r)$, M_{200} и M_{vir} . По 20 индивидуальным оценкам найдено среднее значение $\overline{M}_{200} = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.06 \times 10^{12} M_{\odot}$. По 25 индивидуальным оценкам получено $\overline{M}_{\text{vir}} = 1.02 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.41 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Введение

Значение массы является ключевым параметром для построения динамической модели Галактики. Применяются разнообразные методы для оценивания этой величины. Все точные методы основаны на анализе кинематики звезд и шаровых скоплений, принадлежащих Галактике, окружающих ее карликовых галактик-спутников с их шлейфами, а также соседних галактик (имеется в виду туманность Андромеды с ее окружением).

Большое значение в этой задаче имеют точности определения расстояний до анализируемых объектов и их скоростей. Ведь основными объектами для анализа являются разнообразные звезды, например, цефеиды, красные гиганты, гиганты ветви, переменные типа RR Лут, звезды в шаровых скоплениях, звезды в шлейфах шаровых скоплений и галактиках-спутниках Млечного Пути.

В настоящее время источниками наиболее точных массовых кинематических данных являются каталоги с измеренными тригонометрическими параллаксами и собственными движениями звезд. Это каталоги, полученные в результате космических наблюдений, такие как Hipparcos (Esa, 1997) и Gaia (Gaia Collaboration и A. G. A. Brown, 2016), измерения скоростей шаровых скоплений и галактик-спутников Млечного Пути с борта космического телескопа им. Хаббла (например, Libralato и др., 2018).

В версии Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Gaia Collaboration и A. G. A. Brown, 2021) тригонометрические параллаксы около 500 млн звезд измерены с ошибками менее 0.2 миллисекунд дуги. Для звезд со звездными величинами $G < 15^m$ случайные ошибки измерения собственных движений лежат в интервале 0.02–0.04 миллисекунд дуги в год. В целом, собственные движения около половины звезд каталога измерены с относительной ошибкой менее 10%. В Gaia EDR3 значения лучевых скоростей были скопированы из предыдущей версии каталога, из Gaia DR2 Gaia Collaboration и A. G. A. Brown, 2018. Недавно опубликована версия каталога Gaia DR3 (Gaia

* e-mail: vbobylev@gaoran.ru

Collaboration и Vallenari, 2022), где существенно улучшены лучевые скорости звезд по сравнению со скоростями из Gaia DR2, а значения параллаксов и собственных движений звезд просто скопированы из Gaia EDR3.

Расстояния до звезд, расположенных от центра Галактики далее ~ 20 кпк оцениваются фотометрическим способом. Только в последнее время появились всенебесные фотометрические обзоры неба в ближнем инфракрасном диапазоне, крайне необходимые для надежного учета межзвездного поглощения, такие как WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Wright и др., 2010) или GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-plane Survey Extraordinaire, Benjamin и др., 2003), полученные в результате космических наблюдений.

Для этих целей важны массовые спектроскопические обзоры неба, такие как SDSS (Sloan Digital Sky Survey, York и др., 2000), APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, Eisenstein и др., 2011, Majewski и др., 2017), LAMOST (Large sky Area Multi-Object fiber Spectroscopic Telescope, Deng и др., 2012), RAVE (RAial Velocity Experiment, Steinmetz et al., 2006), или GALAH (GALactic Archaeology with HERMES spectroscopic survey, Buder и др., 2021), содержащие информацию о спектрах и лучевых скоростях сотен тысяч звезд.

Целью настоящей работы является обзор методов, которые применяются для оценки массы Галактики. А также обзор результатов, полученных в последнее время по самым надежным данным.

1 Системы координат

Непосредственно из наблюдений имеем лучевую скорость V_r и компоненты собственного движения звезды $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ , с использованием которых можем получить две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74d\mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74d\mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, d — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк.

Через компоненты V_r, V_l, V_b вычисляются скорости U, V, W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей гелиоцентрической системы координат x, y, z . Скорость U направлена от Солнца к центру Галактики, V в направлении вращения Галактики и W на северный галактический полюс. Две скорости: V_R , направленную радиально от галактического центра и ортогональную ей скорость V_{circ} , направленную вдоль вращения Галактики, можем найти на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} V_{circ} &= U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \\ V_R &= -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 . Расстояние от звезды до оси вращения Галактики R вычисляется на основе соотношения

$$R^2 = d^2 \cos^2 b - 2R_0 d \cos b \cos l + R_0^2. \quad (2)$$

Фактически здесь задана цилиндрическая система координат R, θ, z .

Используем также прямоугольную галактоцентрическую систему координат X, Y, Z , в которой ось X направлена из центра Галактики на Солнце, ось Y направлена в сторону галактического вращения (это левая система координат, но часто используется и правая), а ось Z направлена на северный полюс Галактики. Отметим, что координаты z и Z эквивалентны. В этой системе координат расстояние до звезды будем обозначать через r

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}. \quad (3)$$

2 Методы оценивания массы Галактики

Отметим работы Karukes и др., 2020; W. Wang и др., 2020, посвященные данной теме, послужившие нам образцом. Эти авторы сделали интересный обзор оценок массы Галактики, полученных

различными авторами, с классификацией методов получения оценок. Здесь мы продолжаем такую работу с добавлением ряда новых оценок.

2.1 По кривой вращения

Кривая вращения это зависимость круговых скоростей вращения звезд V_{circ} вокруг оси вращения Галактики от расстояния до ее оси вращения R . Кривая галактического вращения служит для определения параметров подходящей модели гравитационного потенциала Галактики $\Phi(R, z)$. Современные модели потенциала являются многокомпонентными, содержащими вклады от основных галактических подсистем, таких, например, как центральный балдж, диск и гало. В этом случае $\Phi(R, z) = \Phi_b(r(R, z)) + \Phi_d(r(R, z)) + \Phi_h(r(R, z))$, где $\Phi_b(r(R, z))$ — вклад балджа, $\Phi_d(r(R, z))$ — вклад диска и $\Phi_h(r(R, z))$ — вклад гало темной материи. Можно указать наиболее распространенные конкретные выражения в модели потенциала, применяемые в настоящее время для описания этих подсистем.

1). Сферой Пламмера Plummer, 1911 моделируется галактический балдж:

$$\Phi_b(r) = -\frac{GM_b}{\sqrt{r^2 + b_b^2}}, \quad (4)$$

2). Сжатым сфероидом моделируется диск в форме, предложенной в работе Miyamoto и Nagai, 1975:

$$\Phi_d(R, z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + \left[a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2} \right]^2}}, \quad (5)$$

3). Гало темной материи моделируется согласно работе Navarro, Frenk и White, 1997, подход называется моделью Наварро, Френка, Уайта:

$$\Phi_h(r) = -\frac{GM_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right), \quad (6)$$

где M_b, M_d, M_h — массы компонент, b_b, a_d, b_d, a_h — масштабные параметры компонент. В работах А. Т. Вайкова и V. V. Bobylev, 2016, 2017; А. Вайкова и V. V. Bobylev, 2017 и V. V. Bobylev, А. Т. Вайкова и Gromov, 2017 подход на основе соотношений (5)–(6) соответствует модели III.

Зная параметры потенциала $\Phi(R, z)$, можно оценить массу Галактики, содержащуюся в сфере радиусом r

$$M(< r) = \frac{r^2}{G} \frac{d\Phi(r)}{dr}, \quad (7)$$

где G — гравитационная постоянная, массу $M(< r)$ в дальнейшем будем обозначать через M_r . Например, M_{200} обозначает массу внутри сферы радиусом 200 кпк.

Отметим, что в самом простом случае сферически симметричного распределения звездной плотности, массу вещества в сфере радиусом r можно оценить по формуле:

$$M(< r) = \frac{rV^2}{G}, \quad (8)$$

которая может быть получена путем приравнивания центробежной силы к силе притяжения.

На рис. 1 дана кривая вращения Галактики (жирная красная линия) из работы Zhou и др., 2023. Осесимметричная модель гравитационного потенциала Галактики в их работе включала четыре следующих компонента: балдж, тонкий и толстый диски, а также гало темной материи. Для построения кривой вращения Галактики были использованы кинематические данные о примерно 54 000 звездах, принадлежащих ветви красных гигантов. Причем эти данные были взяты из каталога Gaia EDR3. Спектральная информация была взята из обзоров APOGEE

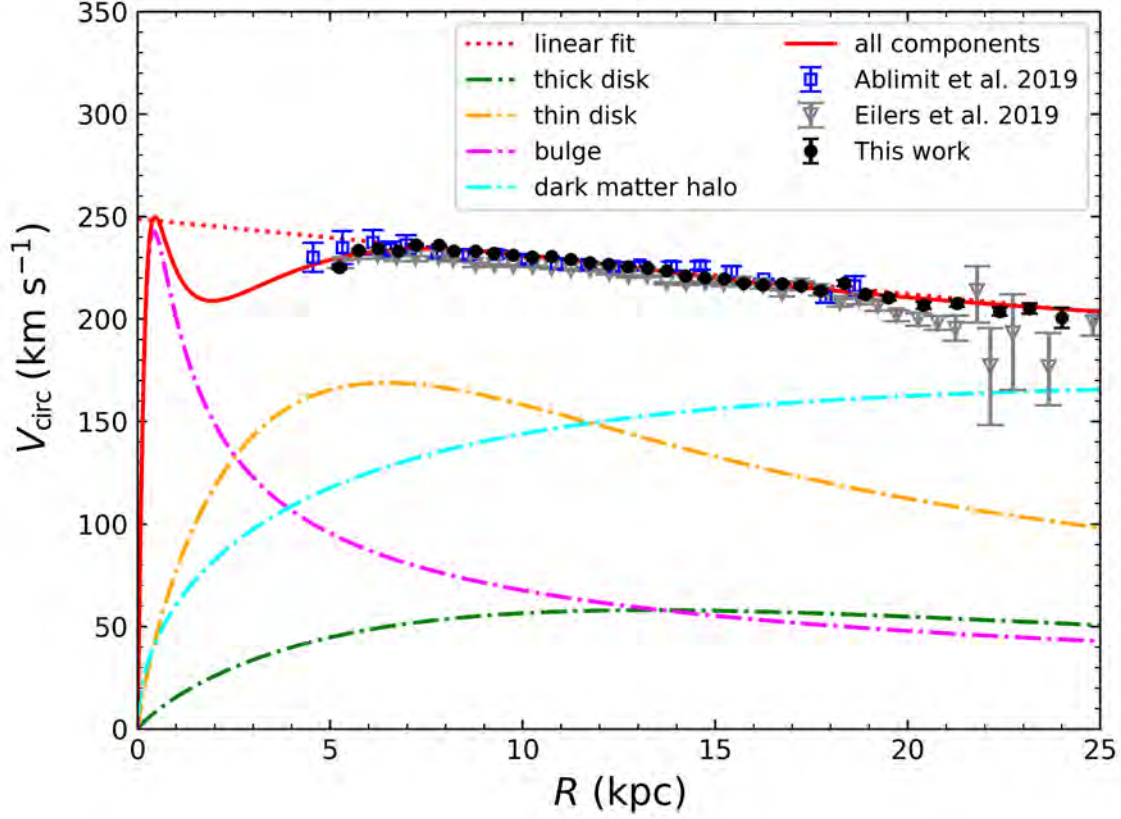


Рис. 1: Кривая вращения Галактики, построенная Zhou и др., 2023 на основе четырехкомпонентной осесимметричной модели потенциала. Дано также сравнение с кривыми вращения из работ Ablimit, Zhao и др., 2020 и Eilers и др., 2019. Рисунок взят из работы Zhou и др., 2023.

и LAMOST, а также использована фотометрия в ближнем инфракрасном диапазоне из каталога 2MASS (Skrutskie и др., 2006). В работе Zhou и др., 2023 была получена оценка массы Галактики $M_{\text{vir}} = (0.805 \pm 0.115) \times 10^{12} M_{\odot}$ с найденным значением вириального радиуса $r_{\text{vir}} = 192.37 \pm 9.24$ кпк.

Вириальная масса M_{vir} определяется как масса, заключенная в пределах вириального радиуса гравитационно связанной системы r_{vir} , где r_{vir} — радиус, в пределах которого система подчиняется теореме вириала, согласно которой система находится в равновесии с внешней средой если удвоенное значение усредненной кинетической T системы равно потенциальной U : $2\langle T \rangle = -\langle U \rangle$.

Иногда применяется следующий способ оценки M_{vir} (X. X. Хуе и др., 2008; Huang и др., 2016; Bird, X.-X. Хуе, Liu, Flynn и др., 2022):

$$M_{\text{vir}} = \frac{4\pi}{3} \rho_{\text{crit}} \Omega_m \delta_{\text{th}} r_{\text{vir}}^3, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/8\pi G$ — критическая плотность Вселенной (с которой должна сравняться плотность Галактики), Ω_m — вклад видимой материи в критическую плотность, δ_{th} — критическая сверхплотность при вириализации. Например, в работе X. X. Хуе и др., 2008 было принято $\Omega_m = 0.3$, $\delta_{\text{th}} = 340$, $H_0 = 65$ км/с/Мпк. Т.о., оценка M_{vir} (каким бы способом ее не вычисляли) сильно зависит от принятой модели.

На рис. 1 дано сравнение с двумя кривыми вращения из работ Ablimit, Zhao и др., 2020 и Eilers и др., 2019. Как можно видеть из этого рисунка, все три кривые вращения Галактики на интервале расстояний $R : 5 - 25$ кпк хорошо следуют линейной зависимости, показанной красными точками.

В работе Ablimit, Zhao и др., 2020 кривая вращения Галактики построена по выборке из 3500 классических цефеид. Для всех этих цефеид были собраны фотометрические данные в ин-

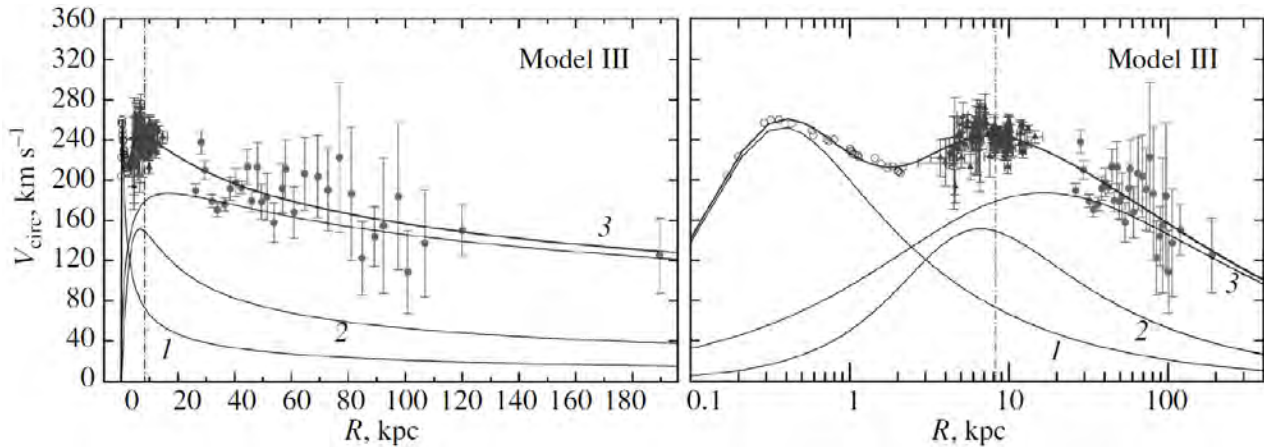


Рис. 2: Кривая вращения Галактики, построенная на основе трехкомпонентной осесимметричной модели потенциала на интервале $R \sim 200$ кпк. Рисунок взят из работы А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2016.

фрактальном диапазоне и получены оценки расстояния с использованием соотношения период-Весенхейт согласно калибровкам S. Wang и др., 2018. Для кинематического анализа, правда, было отобрано 1078 цефеид с измеренными лучевыми скоростями. В итоге были уточнены параметры гравитационного потенциала Галактики и получена новая вириальная оценка массы Галактики, $M_{\text{vir}} = (0.822 \pm 0.052) \times 10^{12} M_{\odot}$, где значение вириального радиуса Галактики найдено равным $r_{\text{vir}} = 191.84 \pm 4.12$ кпк.

Eilers и др., 2019 построили кривую вращения Галактики с использованием $\approx 25\,000$ красных гигантов, расположенных в интервале расстояний $R : 5 - 25$ кпк. Кинематические данные были взяты из каталога Gaia DR2, спектральная информация из обзора APOGEE, а фотометрия в ближнем инфракрасном диапазоне из каталога 2MASS. там же получили оценку вириальной массы Галактики, составившую $M_{\text{vir}} = (0.725 \pm 0.025) \times 10^{12} M_{\odot}$. О вириальном радиусе Галактики эти авторы не сообщают, при этом очевидно, что его значение в их модели мало отличается от оценок Zhou и др., 2023 и Ablimit, Zhao и др., 2020.

Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014 построили кривую вращения Галактики по данным, распространяющимся вплоть до $R \sim 200$ кпк. Для этого были использованы кинематические характеристики самых разнообразных объектов. В частности, участвовали водородные облака, рассеянные звездные скопления, OB-звезды, цефеиды, углеродные звезды, разнообразные гиганты, шаровые скопления и карликовые галактики-спутники Млечного Пути. Это еще не полный список. там же получили оценку $M_{200} = (0.68 \pm 0.41) \times 10^{12} M_{\odot}$.

А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2016, 2017; А. Vajkova и V. Bobylev, 2017 и V. V. Bobylev, А. Т. Vajkova и Gromov, 2017 в процесс построения кривой вращения Галактики добавили мазеры с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами, а для более далекого интервала использовали данные Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014. Протестированы были шесть моделей галактического потенциала. Отметим, что по кривой вращения Галактики, построенной по скоростям объектов во всем интервале $R : 0 - 200$ кпк получаем более надежную оценку массы M_{200} . По сравнению с той, что получают в результате экстраполяции. На основе наиболее подходящей модели (модель III), мы получили оценку $M_{200} = (0.75 \pm 0.19) \times 10^{12} M_{\odot}$. Кривая вращения Галактики, построенная с применением модели потенциала III, дана на рис. 2.

Для очень далеких объектов (далее ≈ 50 кпк от центра Галактики), таких как шаровые скопления и карликовые галактики, трудно найти круговые скорости вращения V_{circ} непосредственно по формуле (1). Для этого используют косвенные оценки скорости V_{circ} , основанные на применении уравнения Джинса, через дисперсии радиальных скоростей звезд. Один из вариантов подхода

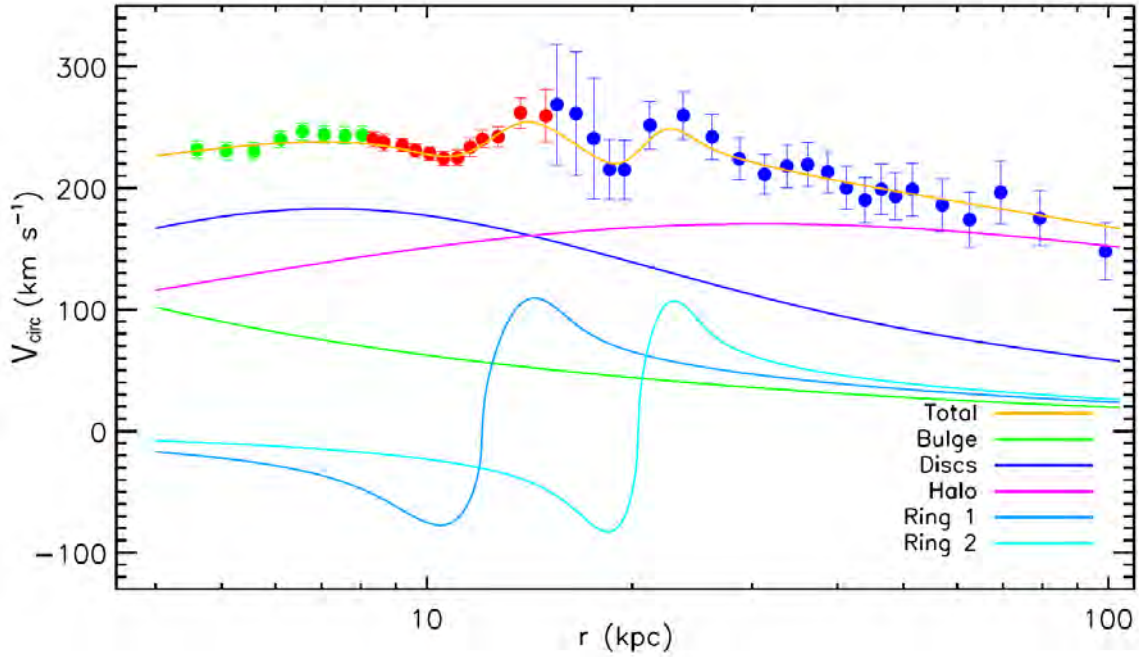


Рис. 3: Кривая вращения Галактики, построенная на основе пятикомпонентной осесимметричной модели потенциала. Водородные облака HI – зеленые точки, звезды сгущения красных гигантов – красные точки, K-гиганты гало – синие точки. Рисунок взят из работы Huang и др., 2016.

Binney и Tremaine, 1987 выглядит так:

$$V_{circ}^2(R) = -\frac{r}{\rho} \frac{d(\rho\sigma_r^2)}{dt} - 2\beta\sigma_r^2, \quad \beta = 1 - \frac{\sigma_t^2}{\sigma_r^2}, \quad (10)$$

где $\sigma_r(r)$ и $\sigma_t(r)$ – дисперсии радиальных и тангенциальных скоростей соответственно, $\rho(r)$ – звездная плотность, а β – параметр анизотропии. Такой подход, например, использован в работе Х. Х. Хуе и др., 2008 для вычисления круговых скоростей голубых гигантов горизонтальной ветви, где они нашли $M_{60} = (0.40 \pm 0.07) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Huang и др., 2016 кривая вращения Галактики построена по звездам, которые довольно плотно заполняют интервал расстояний вплоть до ~ 100 кпк. Для этого были использованы данные о водородных облаках HI во внутренней части Галактики, около 16 000 звезд, принадлежащих сгущению красных гигантов на диаграмме Герцшпрунга-Рэссела, а также около 5 700 гигантов гало спектрального класса K. В итоге эти авторы получили оценку $M_{vir} = (0.90^{+0.07}_{-0.08}) \times 10^{12} M_{\odot}$ с найденным значением $r_{vir} = 255.7^{+7.7}_{-7.7}$ кпк. Кривая вращения из работы этих авторов, где была применена пятикомпонентная модель потенциала Галактики, дана на рис. 3. Для вычисления круговых скоростей далеких K-гигантов этим авторам также пришлось использовать подход, основанный на уравнении Джинса (10).

Отметим, что McMillan, 2017 построил модель потенциала Галактики только по данным о мазерах с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и нашел $M_{100} = (0.82 \pm 0.11) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Sofue, 2012 построил кривую вращения Галактики, с охватом огромного диапазона расстояний – вплоть до $R \sim 1$ Мпк. Привлечены были данные о скоростях галактических шаровых скоплений и карликовых галактиках, окружающих Млечный Путь и туманность Андромеды. Оценка массы Галактики составила $M_{365} = (0.703 \pm 0.101) \times 10^{12} M_{\odot}$, где значение середины расстояния между Млечным Путем и туманностью Андромеды было выбрано в качестве радиуса вмещающей сферы $r = 365$ кпк. Для оценки массы Галактики проводилось “честное” интегрирование плотности вещества в соответствии с подобранной моделью потенциала Галактики.

2.2 По шаровым скоплениям Млечного Пути

Шаровые скопления очень важны для анализа. Для них имеется возможность вычислить средние значения расстояний и скоростей с относительно высокой точностью. Принадлежат шаровые скопления сферической составляющей Галактики. Распределены они в огромной области Галактики, дальше встречаются только карликовые галактики-спутники Млечного Пути. Поэтому шаровые скопления часто используют для построения кривой вращения Галактики как в комбинации с другими данными, так и отдельно.

В работе Sohn, Watkins и др., 2018 выполнен анализ 20 галактических шаровых скоплений. Значения их средних собственных движений были вычислены по наблюдениям космического телескопа им. Хаббла. Эти авторы нашли $M_{39.5} = (0.61^{+0.18}_{-0.12}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{\text{vir}} = (2.05^{+0.97}_{-0.79}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Posti и Helmi, 2019 проанализированы собственные движения 75 шаровых скоплений, которые были вычислены по данным из каталога Gaia DR2. Затем в выборку были включены еще 20 удаленных шаровых скоплений, значения средних собственных движений которых были получены с помощью космического телескопа им. Хаббла. Эти авторы нашли $M_{20} = (0.191^{+0.018}_{-0.017}) \times 10^{12} M_{\odot}$. Watkins, van der Marel и др., 2019 для анализа использовали 34 шаровые скопления. Вычисление кинематических характеристик этих скоплений сделано по данным каталога Gaia DR2 и наблюдениям с борта космического телескопа им. Хаббла. Эти авторы нашли $M_{39.5} = (0.42^{+0.07}_{-0.06}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Vasiliev, 2019 по данным Gaia DR2 были вычислены средние собственные движения 150 шаровых скоплений. В настоящее время это самый массовый каталог шаровых скоплений с известными оценками расстояний, собственных движений и лучевых скоростей. Из анализа кривой вращения, построенной на основе двухкомпонентной (диск и гало) модели потенциала, он получил оценку $M_{100} = (0.85^{+0.33}_{-0.20}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе J. Wang, Hammer и Yang, 2022 кривая вращения Галактики построена с использованием средних собственных движений 150 шаровых скоплений, которые были ими вычислены по данным каталога Gaia EDR3. Эти авторы заключили, что общая масса Галактики составляет от $M_{200} = (0.536^{+0.081}_{-0.068}) \times 10^{12} M_{\odot}$ до $M_{200} = (0.784^{+0.308}_{-0.197}) \times 10^{12} M_{\odot}$ в зависимости от модели гало. Причем эти оценки сделаны с учетом вклада Большого Магелланового Облака (БМО). Т.е., учет вклада БМО на интервале расстояний < 100 кпк слегка уменьшает анализируемые круговые скорости объектов. Поэтому эти авторы говорят о заниженных значениях оценок M_{200} по сравнению с известными.

В работе Sun и др., 2023 кривая вращения Галактики построена по 159 шаровым скоплениям. Их средние собственные движения, вычисленные по данным каталога Gaia EDR3, были взяты из работы Vasiliev и Baumgardt, 2021. Sun и др., 2023 нашли $M_{200} = (1.11^{+0.25}_{-0.18}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Приливные хвосты или звездные шлейфы образуются в результате разрушения рассеянных звездных скоплений, шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Когда такие шлейфы имеют большую протяженность, то фактически вычерчивают историю движения скопления или карликовой галактики на протяжении большого промежутка времени в поле притяжения Галактики. Анализ таких шлейфов дает еще один динамический метод оценки массы Галактики.

Отметим работу Kurper и др., 2015, в которой изучен шлейф от шарового скопления Palomar 5. Эти авторы получили оценку внутри сферы радиусом 19 кпк, который равен радиусу апогалактической орбиты скопления Palomar 5: $M_{19} = (0.21 \pm 0.04) \times 10^{12} M_{\odot}$, и даже оценили $M_{200} = (1.69 \pm 0.42) \times 10^{12} M_{\odot}$.

2.3 По кинематике галактик-спутников

Практически все авторы, которые анализируют галактические орбиты карликовых галактик-спутников Млечного Пути отмечают, что получаемые по этим объектам оценки массы Галактики сильно зависят от галактики Leo I (например, Boulan-Kolchin и др., 2013). Эта наиболее удаленная ($d = 261$ кпк) из карликовых галактик-спутников Млечного Пути, даже привлечение

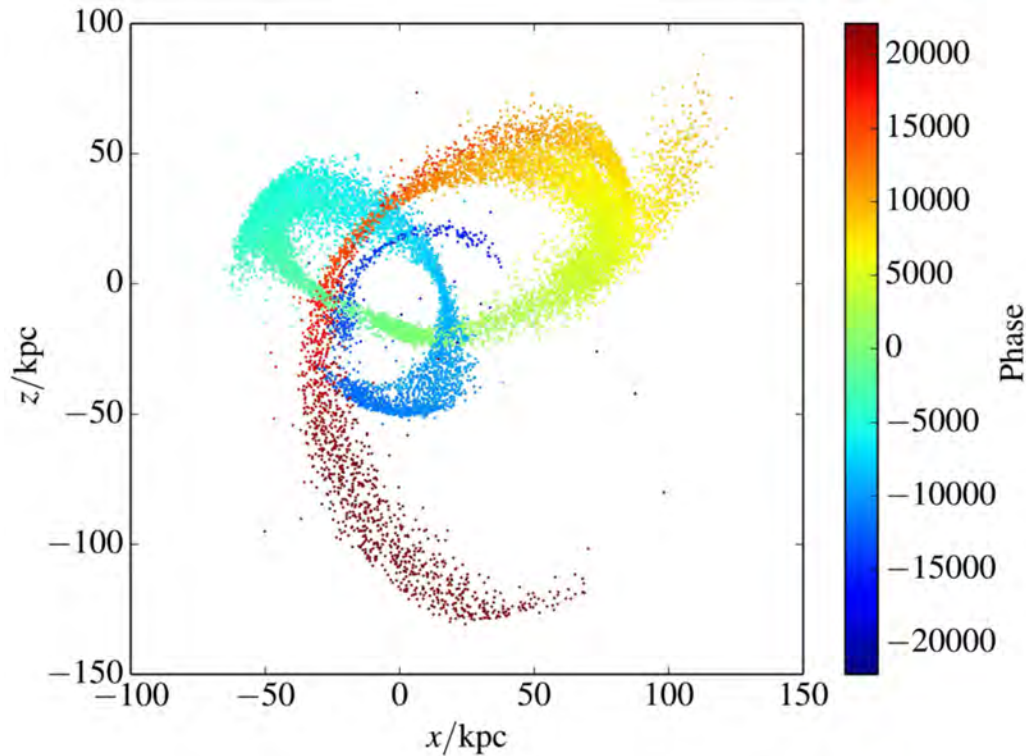


Рис. 4: Модельное распределение приливных хвостов, которые соответствуют четвертому перицентрическому проходу карликовой галактики в Стрельце, примерно через 4 млрд. лет после начала ее разрушения. Центр Галактике находится в начале системы координат. Рисунок взят из работы Gibbons, Belokurov и Evans, 2014.

измерений ее собственного движения с борта космического телескопа (Sohn, Besla и др., 2013) пока не позволяет однозначно сказать (А. Т. Vajkova и V. V. Bobylev, 2017) гиперболическая ли ее орбита или эллиптическая, т.е., связана она гравитационно с Галактикой или нет.

Boylan-Kolchin и др., 2013 проанализировали движение карликовой галактики Leo I с использованием измерений ее собственных движений, полученных с помощью космического телескопа им. Хаббла. В итоге эти авторы получили оценку массы Галактики $M_{\text{vir}} = 1.6 \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе G. M. Eadie, Harris и Widrow, 2015 исследована объединенная выборка из шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Эти авторы получили оценку массы Галактики $M_{260} = (1.37 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Fritz и др., 2020 выполнен анализ 45 карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Собственные движения и лучевые скорости звезд для вычисления средних значений были взяты из каталога Gaia DR2. Эти авторы получили оценку значения вириальной массы Галактики $M_{308} = (1.51^{+0.45}_{-0.40}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

2.4 По шлейфам галактик-спутников

В Галактике известно достаточно много шлейфов, образовавшихся в результате разрушения шаровых скоплений и карликовых галактик. Подробный обзор таких структур можно найти в работе Grillmair и Carlin, 2016. На слуху, например, такие названия, как Sagittarius stream, GD-1 или Orphan Stream.

В работе Gibbons, Belokurov и Evans, 2014 изучены шлейфы образованные карликовой галактикой-спутником Млечного Пути в Стрельце (Sagittarius stream). Эти авторы получили оценку $M_{100} = (0.41 \pm 0.04) \times 10^{12} M_{\odot}$, а экстраполяция на более далекое расстояния дало $M_{200} = (0.56 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$.

На рис. 4 из работы там же показаны результаты N -body моделирования приливных хвостов,

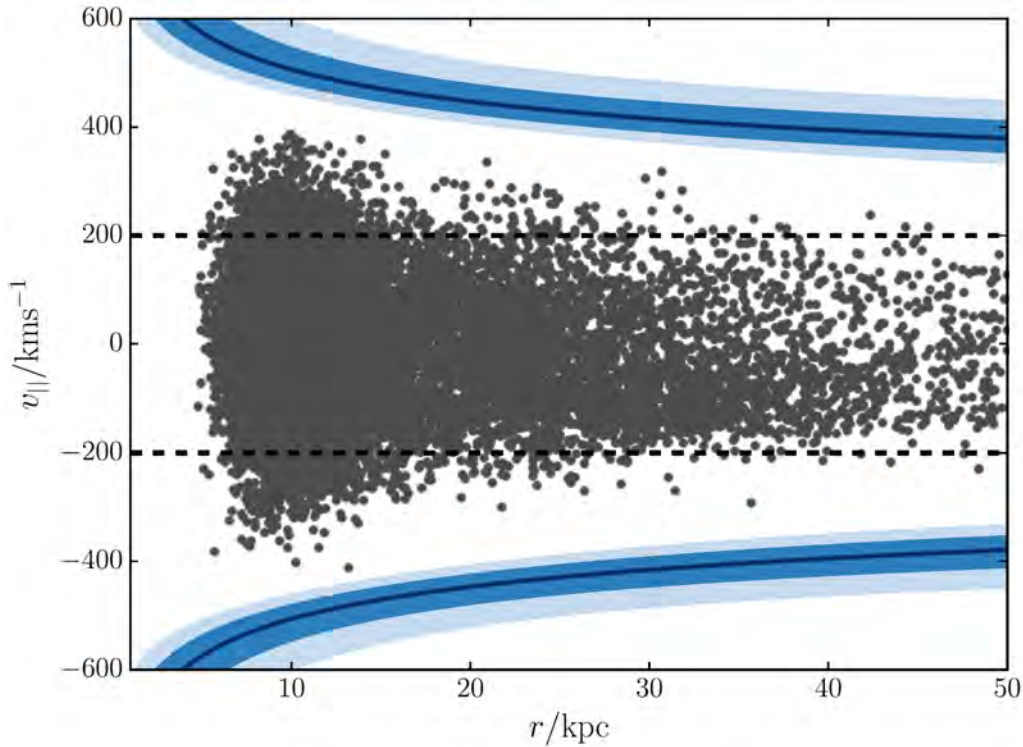


Рис. 5: Распределение лучевых скоростей звезд на плоскости $r - v_{||}$, горизонтальными пунктирными линиями отмечены уровни $v_{||} = \pm 200$ км/с. Цветными полосами даны ограничения найденной модели. Асимметрия при отрицательных лучевых скоростях происходит от К-гигантов потока Стрельца. Рисунок взят из работы Williams, Belokurov и др., 2017.

образованных карликовой галактикой в Стрельце на определенный момент времени после начала ее разрушения.

В работе Malhan и Ibata, 2019 для уточнения модели гравитационного потенциала Галактики были использованы данные о шлейфе GD-1. В итоге эти авторы нашли $M_{20} = (0.25 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$.

2.5 По скоростям вылета из Галактики

Значения скоростей вылета из Галактики, или скоростей убегания из ее гравитационного поля, зависят от расстояния R . Анализ таких скоростей позволяет уточнить модель гравитационного потенциала Галактики. При этом выражение (7) для оценки массы Галактики может быть преобразовано к следующему виду (Williams, Belokurov и др., 2017):

$$M(< r) = \frac{-r^2 V_{\text{esc}}^2}{G} \frac{dV_{\text{esc}}}{dr}, \quad (11)$$

где V_{esc} — скорость убегания.

На рис. 5 из работы там же дано наблюдаемое распределение лучевых скоростей звезд ($v_{||}$) на плоскости $r - v_{||}$ и ограничения найденной ими модели. Эти авторы использовали три звездные выборки индикаторов гало: MSTO (main-sequence turn-off stars), К-гиганты и VHBs (голубые звезды горизонтальной ветви) по данным из каталога SDSS (Ahn и др., 2012). Звезды MSTO многочисленны, но в основном наблюдаются на расстояниях до ≈ 3 кпк от Солнца. Статистические данные об этих звездах позволяют найти ограничения на значение скорости убегания в области Солнца. Количество К-гигантов и VHBs меньше, но они яркие и наблюдались на расстояниях ≈ 50 кпк от Солнца, что увеличило пространственную протяженность используемой выборки до диапазона $R \approx 40$ кпк. В итоге Williams, Belokurov и др., 2017 нашли значение $M_{50} = (0.30^{+0.07}_{-0.05}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

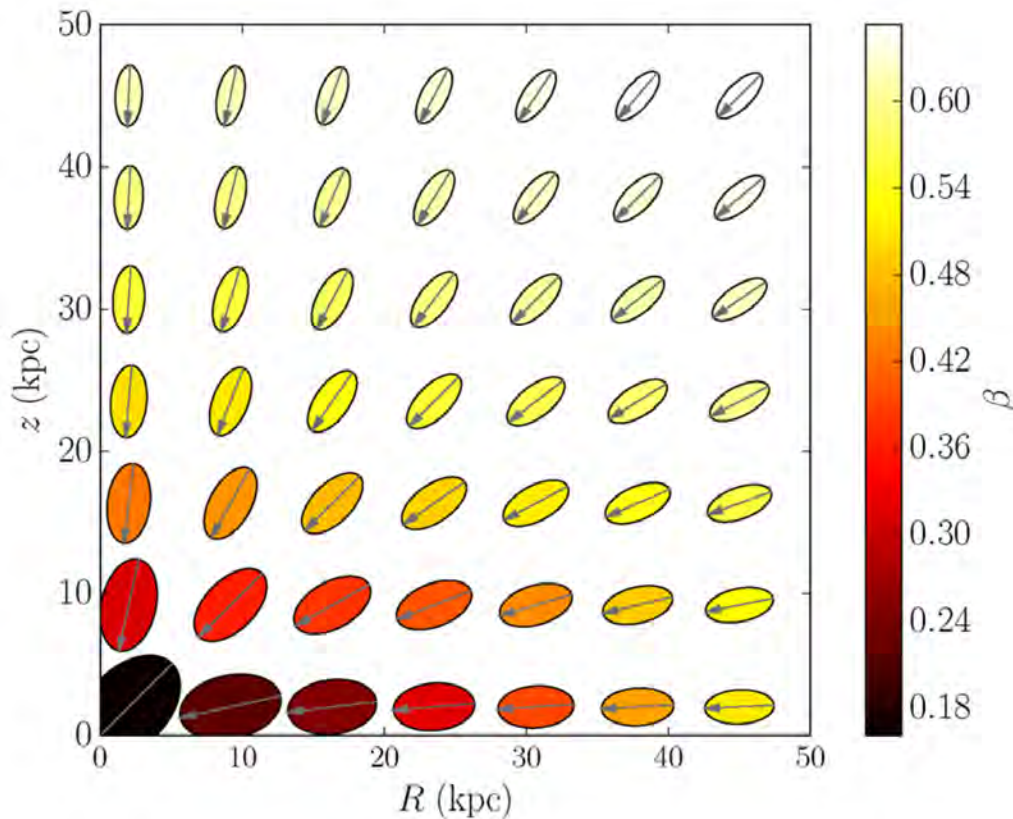


Рис. 6: Эллипсоиды скоростей, размер которых не сильно зависит от радиуса, что свидетельствует об относительно плоском профиле дисперсии скорости. Их форма становится более вытянутой с увеличением радиуса, указывая на то, что анизотропия скорости популяции звезд гало растет с удалением от центра Галактики. Рисунок взят из работы Williams и Evans, 2015.

2.6 По звездам гало

В работе Deason, Velokurov и др., 2012 произведен анализ голубых звезд горизонтальной ветви с измеренными лучевыми скоростями, распределенных в области $R > 80$ кпк. Эти авторы нашли $M_{150} : [0.5 - 1.0] \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Williams и Evans, 2015 проведено интересное изучение скоростей звезд гало. На рис. 6 из работы там же показаны эллипсоиды скоростей звезд гало. Эллипсы окрашены в зависимости от значения параметра $\beta = 1 - (\sigma_{\phi}^2 + \sigma_{\theta}^2)/2\sigma_r^2$, который является мерой локальной анизотропии скорости (здесь угол ϕ отсчитывается от галактической плоскости). Если $\beta > 0$ (< 0), то модель имеет радиальное (тангенциальное) смещение, а $\beta = 0$ подразумевает изотропную модель. В итоге, там же заключили, что $M_{50} \approx 0.45 \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Ablimit и Zhao, 2017 для построения кривой галактического вращения использованы 860 переменных типа RR Луг, принадлежащих звездному гало. Для этих звезд были определены высокоточные расстояния и лучевые скорости. Они распределены в интервале $r : 0 - 60$ кпк. Круговые скорости оценивались на основе уравнения Джинса. А на основе соотношения (8) была найдена масса Галактики $M_{50} = (0.375 \pm 0.133) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Bird, X.-X. Xue, Liu, Shen и др., 2020 по К-гигантам гало нашли $M_{200} = (0.55_{-0.11}^{+0.15}) \times 10^{12} M_{\odot}$, а по голубым гигантам ветви $M_{200} = (1.00_{-0.33}^{+0.67}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Среди звезд гало относительно недавно были обнаружены так называемые гиперскоростные звезды, летящие из центра Галактики со скоростями ≈ 700 км/с (W. R. Brown и др., 2010). Т.е., это убегающие звезды, поэтому они дают возможность оценить массу Галактики. В работе O. Y. Gnedin и др., 2010 с использованием выборки гиперскоростных звезд гало была получена оценка вириальной массы Галактики $M_{\text{vir}} = (1.6 \pm 0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ для найденного значения

$r_{\text{vir}} = 300$ крс. По данным о гиперскоростных звездах Fragione и Loeb, 2017 нашли, что масса Галактики заключена в интервале $[1.2 - 1.9] \times 10^{12} M_{\odot}$.

2.7 По равновесию с туманностью Андромеды

Имеются методы оценки массы Галактики без построения кривой ее вращения. Например, Karachentsev и др., 2009 получили оценку полной массы Местной группы $M_{\text{LG}} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$. Отношения масс Галактики и М31 составило 4:5, т.е., М31 со своим окружением немного массивнее системы Млечного Пути. Для этой оценки использован эффект торможения местного Хаббловского потока и данные о расстояниях и лучевых скоростях галактик в окрестностях Местной группы. Полученная этим независимым методом полная масса Галактики составляет $M_{350} = (0.84 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В настоящее время нет согласия в оценке общей массы Местной группы галактик. Например, в работе van der Marel и др., 2012, найдено $M_{\text{LG}} = M(\text{MW})_{\text{vir}} + M(\text{M31})_{\text{vir}} = (3.17 \pm 0.57) \times 10^{12} M_{\odot}$ с привлечением космических измерений собственных движений звезд в галактике М31. Здесь примерно половина массы приходится на массу Млечного Пути.

González, Kravtsov и N. Y. Gnedin, 2014 из анализа измерений собственного движения галактики М31 нашли $M(\text{MW})_{200} + M(\text{M31})_{200} = (2.40_{-1.05}^{+1.95}) \times 10^{12} M_{\odot}$, что лучше согласуется с описанными нами индивидуальными оценками массы Млечного Пути.

Из анализа кривой вращения Галактики Sofue, 2009, также как и, например, Karachentsev и др., 2009, Watkins, Evans и An, 2010, заключил, что масса Туманности Андромеды слегка превышает массу Млечного Пути. А вот Reñarubia и др., 2014, хотя и получили непротиворечивую оценку массы Местной группы, $M(\text{MW})_{200} + M(\text{M31})_{200} = (2.3 \pm 0.7) \times 10^{12} M_{\odot}$, утверждают, что масса Галактики немного превосходит массу туманности Андромеды, так как их отношение масс составляет $0.54_{-0.17}^{+0.23}$.

Наконец, недавно Carlesi, Hoffman и Libeskind, 2022 применили методы моделирования и машинного обучения для изучения скоростей Млечного Пути и туманности Андромеды в рамках стандартной ΛCDM космологической модели. В итоге они нашли $M_{\text{LG}} = (3.31_{-0.67}^{+0.79}) \times 10^{12} M_{\odot}$, $M_{\text{MW}} = (1.15_{-0.22}^{+0.25}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{\text{M31}} = (2.01_{-0.39}^{+0.65}) \times 10^{12} M_{\odot}$. Соотношение масс составляет $M_{\text{M31}}/M_{\text{MW}} = 1.75_{-0.28}^{+0.54}$, где масса туманности Андромеды почти в два раза превышает массу Млечного Пути.

3 Графики с результатами

Описанные в предыдущем разделе основные результаты отражены на рис. 7, где даны оценки массы Галактики внутри определенного радиуса r . В интервале $r : 0 - 200$ кпк оценки закономерно возрастают с ростом расстояния. При $r > 200$ кпк оценки массы Галактики в основном являются вириальными, даны только самые интересные. Для большего числа вириальных оценок будет дан отдельный рисунок.

Имеется достаточное для отдельного рассмотрения количество оценок вида M_{200} . Полученные путем интегрирования кривой вращения (см. формулу (7)), они являются более строгими, по сравнению с оценками M_{vir} . Следуя подходу Karukes и др., 2020, мы построили рис. 8, на котором отобразили только оценки M_{200} . Эти оценки взяты при условии, что их нашли с использованием кривой вращения Галактики и авторы точно указывают M_{200} , не отождествляя с вириальной. Отметим хорошее согласие в поведении данных на нашем рис. 7 и на рисунке 9 в обзоре там же.

Известно (например, Bland-Hawthorn и Gerhard, 2016), что оценки M_{200} и M_{vir} связаны между собой соотношением $M_{200} \approx 0.85 \times M_{\text{vir}}$. Нам интересно повторить вычисление средних по расширенной статистике, сравнить дисперсии оценок. Для этого были вычислены среднее \overline{M}_{200} и средневзвешенное с использованием весов, обратно пропорциональных ошибкам индивидуальных

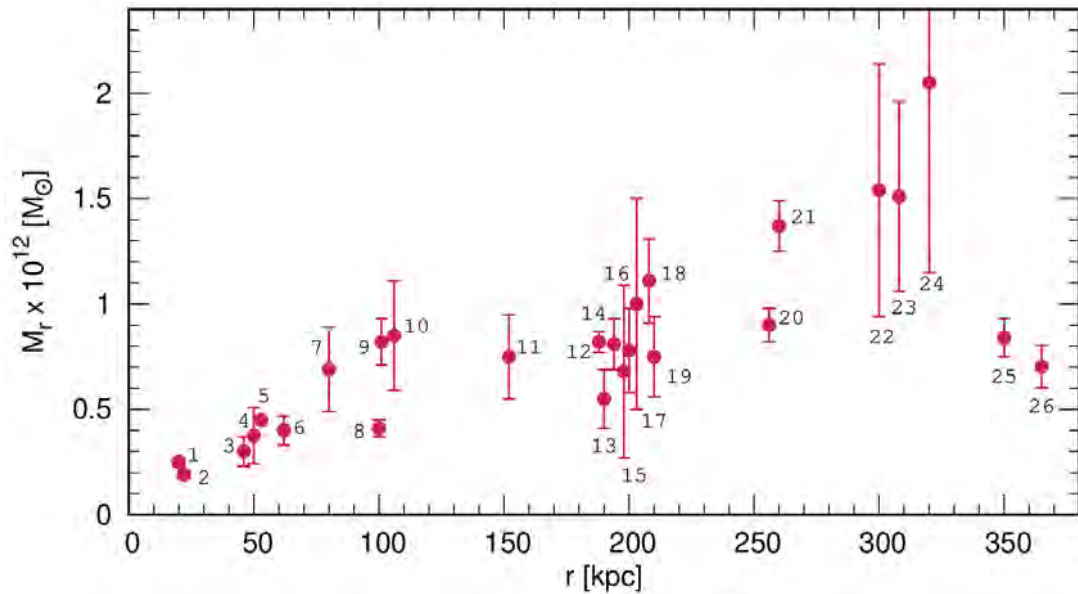


Рис. 7: Оценки массы Галактики вида M_T , 1 – Malhan и Ibata, 2019; 2 – Posti и Helmi, 2019; 3 – Williams, Belokurov и др., 2017; 4 – Ablimit и Zhao, 2017; 5 – Williams и Evans, 2015; 6 – X. X. Xue и др., 2008; 7 – O. Y. Gnedin и др., 2010; 8 – Gibbons, Belokurov и Evans, 2014; 9 – McMillan, 2017; 10 – Vasiliev, 2019; 11 – Deason, Belokurov и др., 2012; 12 – Ablimit, Zhao и др., 2020; 13 – Bird, X.-X. Xue, Liu, Flynn и др., 2022; 14 – Zhou и др., 2023; 15 – Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014; 16 – J. Wang, Hammer и Yang, 2022; 17 – Bird, X.-X. Xue, Liu, Shen и др., 2020; 18 – Sun и др., 2023; 19 – A. T. Bajkova и V. V. Bobylev, 2016; 20 – Huang и др., 2016; 21 – G. M. Eadie, Harris и Widrow, 2015; 22 – Watkins, Evans и An, 2010; 23 – Fritz и др., 2020; 24 – Sohn, Watkins и др., 2018; 25 – Karachentsev и др., 2009; 26 – Sofue, 2012.

оценок $w = 1/\sigma$, $(\overline{M}_{200})_w$:

$$\begin{aligned} \overline{M}_{200} &= (0.94 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}, \\ (\overline{M}_{200})_w &= (0.88 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}, \end{aligned} \quad (12)$$

где указаны ошибки среднего и средневзвешенного соответственно, а дисперсии σ этих двух оценок составляют $0.27 \times 10^{12} M_{\odot}$ и $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$. На рис. 8 темной линией показано среднее $(\overline{M}_{200})_w = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$, а заливкой дана доверительная область, соответствующая уровню ошибок 68% (уровню $1\sigma = 0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$).

Некоторые авторы приводят две оценки M_T и M_{vir} . Часть таких оценок M_T дана на рис. 7. На рис. 9 даны 25 оценок M_{vir} , полученных различными методами по разнообразным данным. Как можно видеть из этого рисунка, ошибки отдельных оценок и разброс результатов здесь больше по сравнению с данными рис. 8. Среднее значения \overline{M}_{vir} и $(\overline{M}_{vir})_w$, вычисленные по этим данным, таковы:

$$\begin{aligned} \overline{M}_{vir} &= (1.33 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}, \\ (\overline{M}_{vir})_w &= (1.02 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}, \end{aligned} \quad (13)$$

где указаны ошибки среднего и средневзвешенного соответственно, а дисперсии оценок, σ , составляют $0.58 \times 10^{12} M_{\odot}$ и $0.41 \times 10^{12} M_{\odot}$ соответственно. Видим меньшее согласие между двумя оценками и большими их ошибками по сравнению с результатом (12).

4 Обсуждение

Не все однако согласны с тем, что масса Галактики $\leq 1 \times 10^{12} M_{\odot}$. Например, Zaritsky и Courtois, 2017 промоделировали аналоги Млечного Пути, для которых подобрали из литературы измерения массы газа в звездах и дисках, измерения масс газа в гало, а также использовали хорошо

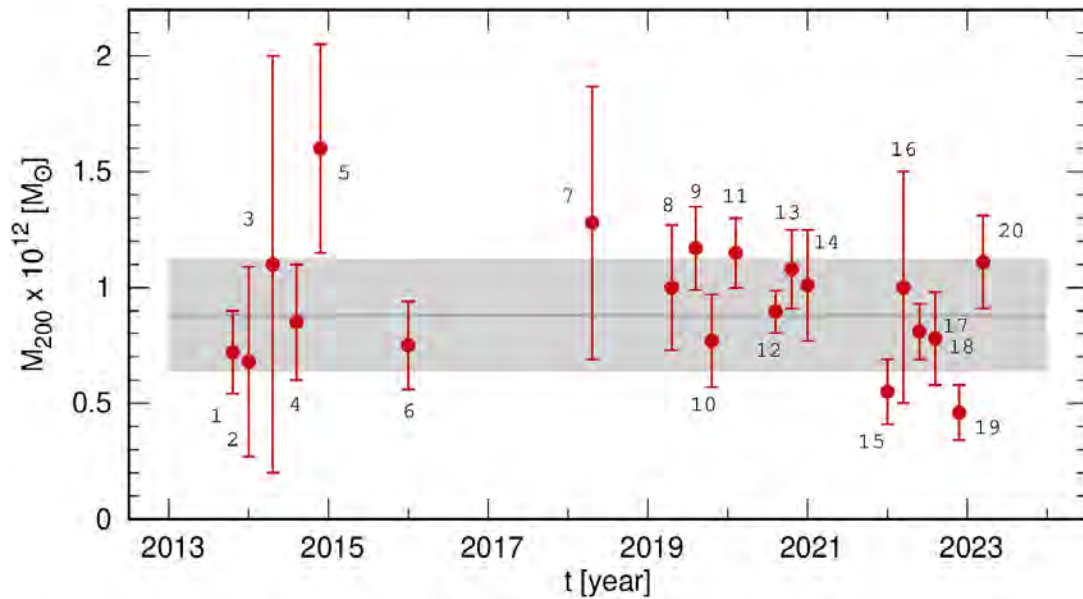


Рис. 8: Оценки массы Галактики вида M_{200} в зависимости от года публикации, 1 – Kafle и др., 2014; 2 – Bhattacharjee, Chaudhury и Kundu, 2014; 3 – Barber и др., 2014; 4 – Cautun, Frenk и др., 2014; 5 – Piffi и др., 2014; 6 – А. Т. Bajkova и V. V. Bobylev, 2016; 7 – Monari и др., 2018; 8 – Deason, Fattahi и др., 2019); 9 – Callingham и др., 2019; 10 – G. Eadie и Juric, 2019; 11 – Z.-Z. Li и др., 2020; 12 – Karukes и др., 2020; 13 – Cautun, Benitez-Llambay и др., 2020; 14 – Deason, Erkal и др., 2021; 15 – Bird, X.-X. Xue, Liu, Flynn и др., 2022; 16 – Bird, X.-X. Xue, Liu, Flynn и др., 2022; 17 – Zhou и др., 2023; 18 – J. Wang, Hammer и Yang, 2022; 19 – Necib и Lin, 2022; 20 – Sun и др., 2023.

установленное значение космологической доли барионов. Т.о., нижнюю границу массы Галактики они оценивали способом, не зависящим от динамики. В итоге эти авторы отвергают оценки малой массы Галактики ($\leq 1 \times 10^{12} M_{\odot}$), поскольку такие величины подразумевают долю галактической барионной материи, значительно превышающую общемировое значение. По их мнению, сближение между динамическими оценками массы и оценками, основанными на барионной массе, является важной вехой в понимании эволюции галактик.

В своем обзоре Bland-Hawthorn и Gerhard, 2016 нашли следующие средние значения массы Галактики $\bar{M}_{200} = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $\bar{M}_{\text{vir}} = (1.3 \pm 0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ внутри сферы радиусом $r_{\text{vir}} = 282 \pm 30$ кпк. Можно видеть, что эти результаты не противоречат нашим (12) и (13), а в пределах погрешностей средние находятся в хорошем согласии.

Заключение

Рассмотрены оценки массы Галактики, полученные различными авторами следующими наиболее часто применяемыми динамическими способами: а) из анализа кривой галактического вращения, б) по кинематике карликовых галактик-спутников Млечного Пути и шаровым скоплениям, с) по шлейфам карликовых галактик, d) по скоростям убегания, e) по далеким гигантам гало, f) по скоростям убегания, а также g) по торможению местного Хаббловского потока.

Отметим, что в диапазоне $R : 5 - 25$ кпк имеется отличное согласие кривых вращения Галактики (рис. 1), построенных различными авторами по современным кинематическим данным. Имеется хорошее согласие в оценивании значения массы Галактики вида M_r вплоть до расстояний 0–150 кпк, где в настоящее время возможно построить кривую вращения Галактики по реальным объектам.

Как нам представляется, особенно ценными являются такие методы, как оценивание массы

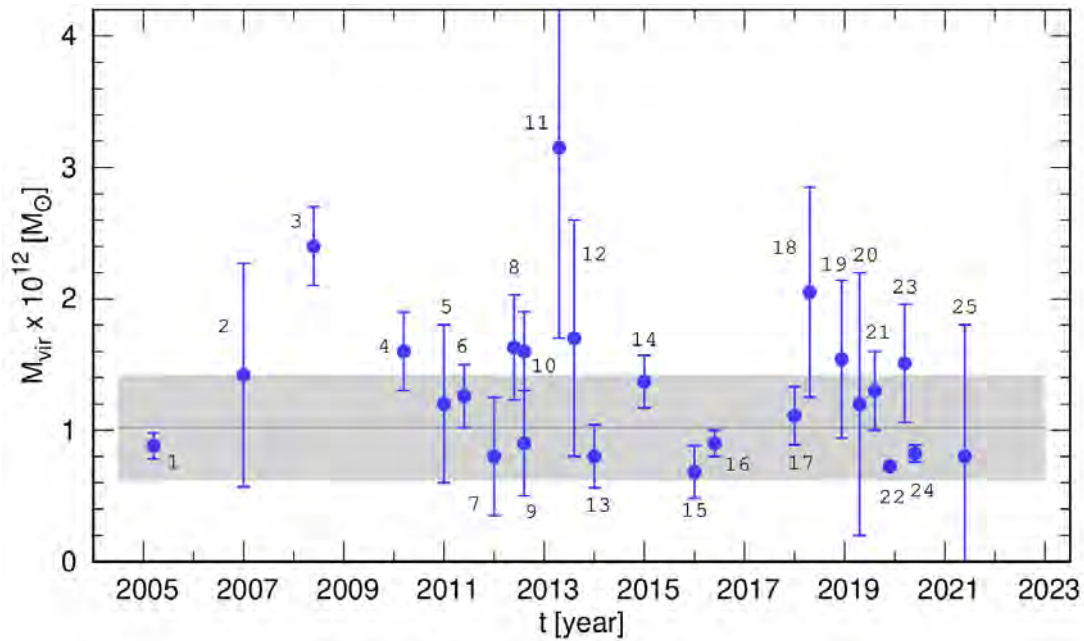


Рис. 9: Оценки массы Галактики вида M_{vir} в зависимости от года публикации, 1 – Battaglia и др., 2005; 2 – Smith и др., 2007; 3 – Y.-S. Li и White, 2008; 4 – O. Y. Gnedin и др., 2010; 5 – Busha и др., 2011; 6 – McMillan, 2011; 7 – Bovy и др., 2012; 8 – van der Marel и др., 2012; 9 – Kafle и др., 2012; 10 – Boylan-Kolchin и др., 2013; 11 – Sohn, Besla и др., 2013; 12 – Rashkov и др., 2013; 13 – Kafle и др., 2014; 14 – G. M. Eadie, Harris и Widrow, 2015; 15 – G. M. Eadie и Harris, 2016; 16 – Huang и др., 2016; 17 – Zhai и др., 2018; 18 – Sohn, Watkins и др., 2018; 19 – Watkins, van der Marel и др., 2019; 20 – Vasiliev, 2019; 21 – Posti и Helmi, 2019; 22 – Eilers и др., 2019; 23 – Fritz и др., 2020; 24 – Ablimit, Zhao и др., 2020; 25 – H. Li и др., 2021.

Галактики по длинной (далее ~ 100 кпк) кривой вращения Галактики, анализ галактических орбит далеких шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути или анализ скоростей убегания звезд. Т.е., методы, использующие гравитационный потенциал Галактики, основанные на анализе орбит звезд, шаровых скоплений и карликовых галактик. Методы, позволяющие напрямую оценить значение M_{200} .

Построены графики с оценками массы Галактики вида M_{r} , отдельно рассмотрены оценки вида M_{200} и M_{vir} . Показано, что современные оценки общей массы Галактики M_{vir} лежат в диапазоне $[0.5 - 2.5] \times 10^{12} M_{\odot}$, а оценки M_{200} — в диапазоне $[0.4 - 1.6] \times 10^{12} M_{\odot}$.

По 20 индивидуальным оценкам найдено средневзвешенное значение $\bar{M}_{200} = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.06 \times 10^{12} M_{\odot}$. По 25 индивидуальным вириальным оценкам аналогично получено $\bar{M}_{\text{vir}} = 1.02 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.41 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению рукописи. Авторы выражают благодарность Антону Смирнову за помощь в подготовке рукописи статьи.

Список литературы

- Esa, I. (1997). *VizieR Online Data Catalog: The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997)*. VizieR Online Data Catalog, с. I/239.
- Gaia Collaboration и A. G. A. Brown (2016). *Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties*. A&A 595, A2.
- Libralato, M., A. Bellini, L. R. Bedin, E. Moreno D., J. G. Fernandez-Trincado, B. Pichardo, R. P. van der Marel, J. Anderson, D. Apai, A. J. Burgasser, A. Fabiola Marino, A. P. Milone, J. M. Rees и L. L. Watkins (2018). *The HST Large Programme on ω Centauri. III. Absolute Proper Motion*. ApJ 854.1, с. 45.
- Gaia Collaboration и A. G. A. Brown (2021). *Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties*. A&A 649, A1.
- (2018). *Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties*. A&A 616, A1.
- Gaia Collaboration и A. Vallenari (2022). *Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties*. arXiv e-prints, arXiv:2208.00211.
- Wright, E. L., P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, R. M. Cutri, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, D. Padgett, R. S. McMillan, M. Skrutskie, S. A. Stanford, M. Cohen, R. G. Walker, J. C. Mather, D. Leisawitz, I. Gautier Thomas N., I. McLean, D. Benford, C. J. Lonsdale, A. Blain, B. Mendez, W. R. Irace, V. Duval, F. Liu, D. Royer, I. Heinrichsen, J. Howard, M. Shannon, M. Kendall, A. L. Walsh, M. Larsen, J. G. Cardon, S. Schick, M. Schwalm, M. Abid, B. Fabinsky, L. Naes и C.-W. Tsai (2010). *The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance*. AJ 140.6, с. 1868—1881.
- Benjamin, R. A., E. Churchwell, B. L. Babler, T. M. Bania, D. P. Clemens, M. Cohen, J. M. Dickey, R. Indebetouw, J. M. Jackson, H. A. Kobulnicky, A. Lazarian, A. P. Marston, J. S. Mathis, M. R. Meade, S. Seager, S. R. Stolovy, C. Watson, B. A. Whitney, M. J. Wolff и M. G. Wolfire (2003). *GLIMPSE. I. An SIRTf Legacy Project to Map the Inner Galaxy*. PASP 115.810, с. 953—964.
- York, D. G. и др. (2000). *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*. AJ 120.3, с. 1579—1587.
- Eisenstein, D. J., D. H. Weinberg, E. Agol, H. Aihara, C. Allende Prieto, S. F. Anderson, J. A. Arns, E. Aubourg, S. Bailey, E. Balbinot и et al. (2011). *SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems*. AJ 142.3, с. 72.
- Majewski, S. R., R. P. Schiavon, P. M. Frinchaboy, C. Allende Prieto, R. Barkhouser, D. Bizyaev, B. Blank, S. Brunner, A. Burton, R. Carrera, S. D. Chojnowski, K. Cunha, C. Epstein, G. Fitzgerald, A. E. Garcia Perez, F. R. Hearty, C. Henderson, J. A. Holtzman, J. A. Johnson, C. R. Lam, J. E. Lawler, P. Maseman, S. Meszaros, M. Nelson, D. C. Nguyen, D. L. Nidever, M. Pinsonneault, M. Shetrone, S. Smee, V. V. Smith, T. Stolberg, M. F. Skrutskie, E. Walker, J. C. Wilson, G. Zasowski, F. Anders, S. Basu, S. Beland, M. R. Blanton, J. Bovy, J. R. Brownstein, J. Carlberg, W. Chaplin, C. Chiappini, D. J. Eisenstein, Y. Elsworth, D. Feuillet, S. W. Fleming, J. Galbraith-Frew, R. A. Garcia, D. A. Garcia-Hernandez, B. A. Gillespie, L. Girardi, J. E. Gunn, S. Hasselquist, M. R. Hayden, S. Hekker, I. Ivans, K. Kinemuchi, M. Klaene, S. Mahadevan, S. Mathur, B. Mosser, D. Muna, J. A. Munn, R. C. Nichol, R. W. O’Connell, J. K. Parejko, A. C. Robin, H. Rocha-Pinto, M. Schultheis, A. M. Serenelli, N. Shane, V. Silva Aguirre, J. S. Sobek, B. Thompson, N. W. Troup, D. H. Weinberg и O. Zamora (2017). *The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)*. AJ 154.3, с. 94.
- Deng, L.-C., H. J. Newberg, C. Liu, J. L. Carlin, T. C. Beers, L. Chen, Y.-Q. Chen, N. Christlieb, C. J. Grillmair, P. Guhathakurta, Z.-W. Han, J.-L. Hou, H.-T. Lee, S. Lepine, J. Li, X.-W. Liu, K.-K. Pan, J. A. Sellwood, B. Wang, H.-C. Wang, F. Yang, B. Yanny, H.-T. Zhang, Y.-Y. Zhang, Z. Zheng и Z. Zhu (2012). *LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration (LEGUE) — The survey’s science plan*. Research in Astronomy and Astrophysics 12.7, с. 735—754.
- Buder, S., S. Sharma, J. Kos, A. M. Amarsi, T. Nordlander, K. Lind, S. L. Martell, M. Asplund, J. Bland-Hawthorn, A. R. Casey, G. M. de Silva, V. D’Orazi, K. C. Freeman, M. R. Hayden, G. F. Lewis, J. Lin, K. J. Schlesinger, J. D. Simpson, D. Stello, D. B. Zucker, T. Zwitter, K. L. Beeson, T. Buck, L. Casagrande, J. T. Clark, K. Cotar, G. S. da Costa, R. de Grijs, D. Feuillet, J. Horner,

- P. R. Kafle, S. Khanna, C. Kobayashi, F. Liu, B. T. Montet, G. Nandakumar, D. M. Nataf, M. K. Ness, L. Spina, T. Tepper-Garcia, Y.-S. Ting, G. Traven, R. Vogrincic, R. A. Wittenmyer, R. F. G. Wyse, M. Zerjal и Galah Collaboration (2021). *The GALAH+ survey: Third data release*. MNRAS 506.1, с. 150–201.
- Karukes, E. V., M. Benito, F. Iocco, R. Trotta и A. Geringer-Sameth (2020). *A robust estimate of the Milky Way mass from rotation curve data*. J. Cosmology Astropart. Phys. 2020.5, с. 033.
- Wang, W., J. Han, M. Cautun, Z. Li и M. N. Ishigaki (2020). *The mass of our Milky Way*. Science China Physics, Mechanics, and Astronomy 63.10, с. 109801.
- 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, J. F., C. S. Frenk и S. D. M. White (1997). *A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering*. ApJ 490.2, с. 493–508.
- 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.
- (2017). *Galactic orbits of selected companions of the Milky Way*. Astronomy Reports 61.9, с. 727–738.
- Bajkova, A. и V. Bobylev (2017). *Parameters of Six Selected Galactic Potential Models*. Open Astronomy 26.1, с. 72–79.
- 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.
- Zhou, Y., X. Li, Y. Huang и H. 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.
- Skrutskie, M. F., R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk и S. Wheelock (2006). *The Two Micron All Sky Survey (2MASS)*. AJ 131.2, с. 1163–1183.
- Xue, X. X., H. W. Rix, G. Zhao, P. Re Fiorentin, T. Naab, M. Steinmetz, F. C. van den Bosch, T. C. Beers, Y. S. Lee, E. F. Bell, C. Rockosi, B. Yanny, H. Newberg, R. Wilhelm, X. Kang, M. C. Smith и D. P. Schneider (2008). *The Milky Way’s Circular Velocity Curve to 60 kpc and an Estimate of the Dark Matter Halo Mass from the Kinematics of ~2400 SDSS Blue Horizontal-Branch Stars*. ApJ 684.2, с. 1143–1158.
- Huang, Y., X. .-. Liu, H. .-. Yuan, M. .-. Xiang, H. .-. Zhang, B. .-. Chen, J. .-. Ren, C. Wang, Y. Zhang, Y. .-. Hou, Y. .-. Wang и Z. .-. Cao (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.
- Bird, S. A., X.-X. Xue, C. Liu, C. Flynn, J. Shen, J. Wang, C. Yang, M. Zhai, L. Zhu, G. Zhao и H.-J. Tian (2022). *Milky Way mass with K giants and BHB stars using LAMOST, SDSS/SEGUE, and Gaia: 3D spherical Jeans equation and tracer mass estimator*. MNRAS 516.1, с. 731–748.
- Ablimit, I., G. Zhao, C. Flynn и S. A. Bird (2020). *The Rotation Curve, Mass Distribution, and Dark Matter Content of the Milky Way from Classical Cepheids*. ApJ 895.1, с. L12.
- Eilers, A.-C., D. W. Hogg, H.-W. Rix и M. K. Ness (2019). *The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5 to 25 kpc*. ApJ 871.1, с. 120.
- Wang, S., X. Chen, R. de Grijs и L. Deng (2018). *The Near-infrared Optimal Distances Method Applied to Galactic Classical Cepheids Tightly Constrains Mid-infrared Period-Luminosity Relations*. ApJ 852.2, с. 78.
- Bhattacharjee, P., S. Chaudhury и S. Kundu (2014). *Rotation Curve of the Milky Way out to ~200 kpc*. ApJ 785.1, с. 63.
- Binney, J. и S. Tremaine (1987). *Galactic dynamics*.

- McMillan, P. J. (2017). *The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way*. MNRAS 465.1, с. 76–94.
- Sofue, Y. (2012). *Grand Rotation Curve and Dark Matter Halo in the Milky Way Galaxy*. PASJ 64, с. 75.
- Sohn, S. T., L. L. Watkins, M. A. Fardal, R. P. van der Marel, A. J. Deason, G. Besla и A. Bellini (2018). *Absolute Hubble Space Telescope Proper Motion (HSTPROMO) of Distant Milky Way Globular Clusters: Galactocentric Space Velocities and the Milky Way Mass*. ApJ 862.1, с. 52.
- Posti, L. и A. Helmi (2019). *Mass and shape of the Milky Way’s dark matter halo with globular clusters from Gaia and Hubble*. A&A 621, A56.
- Watkins, L. L., R. P. van der Marel, S. T. Sohn и N. W. Evans (2019). *Evidence for an Intermediate-mass Milky Way from Gaia DR2 Halo Globular Cluster Motions*. ApJ 873.2, с. 118.
- Vasiliev, E. (2019). *Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2*. MNRAS 484.2, с. 2832–2850.
- Wang, J., F. Hammer и Y. Yang (2022). *Milky Way total mass derived by rotation curve and globular cluster kinematics from Gaia EDR3*. MNRAS 510.2, с. 2242–2260.
- Sun, G., Y. Wang, C. Liu, R. J. Long, X. Chen и Q. Gao (2023). *Classifying Globular Clusters and Applying them to Estimate the mass of the Milky Way*. Research in Astronomy and Astrophysics 23.1, с. 015013.
- Vasiliev, E. и H. Baumgardt (2021). *Gaia EDR3 view on galactic globular clusters*. MNRAS 505.4, с. 5978–6002.
- Küpper, A. H. W., E. Balbinot, A. Bonaca, K. V. Johnston, D. W. Hogg, P. Kroupa и B. X. Santiago (2015). *Globular Cluster Streams as Galactic High-Precision Scales—the Poster Child Palomar 5*. ApJ 803.2, с. 80.
- Boylan-Kolchin, M., J. S. Bullock, S. T. Sohn, G. Besla и R. P. van der Marel (2013). *The Space Motion of Leo I: The Mass of the Milky Way’s Dark Matter Halo*. ApJ 768.2, с. 140.
- Sohn, S. T., G. Besla, R. P. van der Marel, M. Boylan-Kolchin, S. R. Majewski и J. S. Bullock (2013). *The Space Motion of Leo I: Hubble Space Telescope Proper Motion and Implied Orbit*. ApJ 768.2, с. 139.
- Eadie, G. M., W. E. Harris и L. M. Widrow (2015). *Estimating the Galactic Mass Profile in the Presence of Incomplete Data*. ApJ 806.1, с. 54.
- Fritz, T. K., A. Di Cintio, G. Battaglia, C. Brook и S. Taibi (2020). *The mass of our Galaxy from satellite proper motions in the Gaia era*. MNRAS 494.4, с. 5178–5193.
- Grillmair, C. J. и J. L. Carlin (2016). *Stellar Streams and Clouds in the Galactic Halo. B: Tidal Streams in the Local Group and Beyond*. Под ред. H. J. Newberg и J. L. Carlin. Т. 420. Astrophysics and Space Science Library, с. 87.
- Gibbons, S. L. J., V. Belokurov и N. W. Evans (2014). *‘Skinny Milky Way please’, says Sagittarius*. MNRAS 445.4, с. 3788–3802.
- Williams, A. A., V. Belokurov, A. R. Casey и N. W. Evans (2017). *On the run: mapping the escape speed across the Galaxy with SDSS*. MNRAS 468.2, с. 2359–2371.
- Williams, A. A. и N. W. Evans (2015). *Halo light and dark: dynamical models of the stellar halo and constraints on the mass of the Galaxy*. MNRAS 454.1, с. 698–707.
- Malhan, K. и R. A. Ibata (2019). *Constraining the Milky Way halo potential with the GD-1 stellar stream*. MNRAS 486.3, с. 2995–3005.
- Ahn, C. P., R. Alexandroff, C. Allende Prieto, S. F. Anderson, T. Anderton, B. H. Andrews, E. Aubourg, S. Bailey, E. Balbinot, R. Barnes и et al. (2012). *The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*. ApJS 203.2, с. 21.
- Deason, A. J., V. Belokurov, N. W. Evans, S. E. Koposov, R. J. Cooke, J. Peñarrubia, C. F. P. Laporte, M. Fellhauer, M. G. Walker и E. W. Olszewski (2012). *The cold veil of the Milky Way stellar halo*. MNRAS 425.4, с. 2840–2853.
- Ablimit, I. и G. Zhao (2017). *The Milky Way’s Circular Velocity Curve and Its Constraint on the Galactic Mass with RR Lyrae Stars*. ApJ 846.1, с. 10.

- Bird, S. A., X.-X. Xue, C. Liu, J. Shen, C. Flynn и C. Yang (2020). [Galactic mass and anisotropy profile with halo K-giant and blue horizontal branch stars from LAMOST/SDSS and Gaia](#). B: Galactic Dynamics in the Era of Large Surveys. Под ред. М. Valluri и J. A. Sellwood. Т. 353, с. 91–95.
- Brown, W. R., M. J. Geller, S. J. Kenyon и A. Diaferio (2010). [Velocity Dispersion Profile of the Milky Way Halo](#). *AJ* 139.1, с. 59–67.
- Gnedin, O. Y., W. R. Brown, M. J. Geller и S. J. Kenyon (2010). [The Mass Profile of the Galaxy to 80 kpc](#). *ApJ* 720.1, с. L108–L112.
- Fragione, G. и A. Loeb (2017). [Constraining the Milky Way mass with hypervelocity stars](#). *New A* 55, с. 32–38.
- Karachentsev, I. D., O. G. Kashibadze, D. I. Makarov и R. B. Tully (2009). [The Hubble flow around the Local Group](#). *MNRAS* 393.4, с. 1265–1274.
- van der Marel, R. P., M. Fardal, G. Besla, R. L. Beaton, S. T. Sohn, J. Anderson, T. Brown и P. Guhathakurta (2012). [The M31 Velocity Vector. II. Radial Orbit toward the Milky Way and Implied Local Group Mass](#). *ApJ* 753.1, с. 8.
- González, R. E., A. V. Kravtsov и N. Y. Gnedin (2014). [On the Mass of the Local Group](#). *ApJ* 793.2, с. 91.
- Sofue, Y. (2009). [Pseudo Rotation Curve Connecting the Galaxy, Dark Halo, and Local Group](#). *PASJ* 61, с. 153.
- Watkins, L. L., N. W. Evans и J. H. An (2010). [The masses of the Milky Way and Andromeda galaxies](#). *MNRAS* 406.1, с. 264–278.
- Peñarrubia, J., Y.-Z. Ma, M. G. Walker и A. McConnachie (2014). [A dynamical model of the local cosmic expansion](#). *MNRAS* 443.3, с. 2204–2222.
- Carlesi, E., Y. Hoffman и N. I. Libeskind (2022). [Estimation of the masses in the local group by gradient boosted decision trees](#). *MNRAS* 513.2, с. 2385–2393.
- Kafle, P. R., S. Sharma, G. F. Lewis и J. Bland-Hawthorn (2014). [On the Shoulders of Giants: Properties of the Stellar Halo and the Milky Way Mass Distribution](#). *ApJ* 794.1, с. 59.
- Barber, C., E. Starkenburg, J. F. Navarro, A. W. McConnachie и A. Fattahi (2014). [The orbital ellipticity of satellite galaxies and the mass of the Milky Way](#). *MNRAS* 437.1, с. 959–967.
- Cautun, M., C. S. Frenk, R. van de Weygaert, W. A. Hellwing и B. J. T. Jones (2014). [Milky Way mass constraints from the Galactic satellite gap](#). *MNRAS* 445.2, с. 2049–2060.
- Piffl, T., C. Scannapieco, J. Binney, M. Steinmetz, R. -. Scholz, M. E. K. Williams, R. S. de Jong, G. Kordopatis, G. Matijeвиč, O. Bienaymé, J. Bland-Hawthorn, C. Boeche, K. Freeman, B. Gibson, G. Gilmore, E. K. Grebel, A. Helmi, U. Munari, J. F. Navarro, Q. Parker, W. A. Reid, G. Seabroke, F. Watson, R. F. G. Wyse и T. Zwitter (2014). [The RAVE survey: the Galactic escape speed and the mass of the Milky Way](#). *A&A* 562, A91.
- Monari, G., B. Famaey, I. Carrillo, T. Piffl, M. Steinmetz, R. F. G. Wyse, F. Anders, C. Chiappini и K. Janßen (2018). [The escape speed curve of the Galaxy obtained from Gaia DR2 implies a heavy Milky Way](#). *A&A* 616, с. L9.
- Deason, A. J., A. Fattahi, V. Belokurov, N. W. Evans, R. J. J. Grand, F. Marinacci и R. Pakmor (2019). [The local high-velocity tail and the Galactic escape speed](#). *MNRAS* 485.3, с. 3514–3526.
- Callingham, T. M., M. Cautun, A. J. Deason, C. S. Frenk, W. Wang, F. A. Gomez, R. J. J. Grand, F. Marinacci и R. Pakmor (2019). [The mass of the Milky Way from satellite dynamics](#). *MNRAS* 484.4, с. 5453–5467.
- Eadie, G. и M. Juric (2019). [The Cumulative Mass Profile of the Milky Way as Determined by Globular Cluster Kinematics from Gaia DR2](#). *ApJ* 875.2, с. 159.
- Li, Z.-Z., Y.-Z. Qian, J. Han, T. S. Li, W. Wang и Y. P. Jing (2020). [Constraining the Milky Way Mass Profile with Phase-space Distribution of Satellite Galaxies](#). *ApJ* 894.1, с. 10.
- Cautun, M., A. Benítez-Llambay, A. J. Deason, C. S. Frenk, A. Fattahi, F. A. Gomez, R. J. J. Grand, K. A. Oman, J. F. Navarro и C. M. Simpson (2020). [The milky way total mass profile as inferred from Gaia DR2](#). *MNRAS* 494.3, с. 4291–4313.

- Deason, A. J., D. Erkal, V. Belokurov, A. Fattahi, F. A. Gomez, R. J. J. Grand, R. Pakmor, X.-X. Xue, C. Liu, C. Yang, L. Zhang и G. Zhao (2021). [The mass of the Milky Way out to 100 kpc using halo stars](#). MNRAS 501.4, с. 5964–5972.
- Necib, L. и T. Lin (2022). [Substructure at High Speed. II. The Local Escape Velocity and Milky Way Mass with Gaia eDR3](#). ApJ 926.2, с. 189.
- Battaglia, G., A. Helmi, H. Morrison, P. Harding, E. W. Olszewski, M. Mateo, K. C. Freeman, J. Norris и S. A. Shtetman (2005). [The radial velocity dispersion profile of the Galactic halo: constraining the density profile of the dark halo of the Milky Way](#). MNRAS 364.2, с. 433–442.
- Smith, M. C., G. R. Ruchti, A. Helmi, R. F. G. Wyse, J. P. Fulbright, K. C. Freeman, J. F. Navarro, G. M. Seabroke, M. Steinmetz, M. Williams, O. Bienayme, J. Binney, J. Bland-Hawthorn, W. Dehnen, B. K. Gibson, G. Gilmore, E. K. Grebel, U. Munari, Q. A. Parker, R. .-. Scholz, A. Siebert, F. G. Watson и T. Zwitter (2007). [The RAVE survey: constraining the local Galactic escape speed](#). MNRAS 379.2, с. 755–772.
- Li, Y.-S. и S. D. M. White (2008). [Masses for the Local Group and the Milky Way](#). MNRAS 384.4, с. 1459–1468.
- Busha, M. T., P. J. Marshall, R. H. Wechsler, A. Klypin и J. Primack (2011). [The Mass Distribution and Assembly of the Milky Way from the Properties of the Magellanic Clouds](#). ApJ 743.1, с. 40.
- McMillan, P. J. (2011). [Mass models of the Milky Way](#). MNRAS 414.3, с. 2446–2457.
- Bovy, J., C. Allende Prieto, T. C. Beers, D. Bizyaev, L. N. da Costa, K. Cunha, G. L. Ebelke, D. J. Eisenstein, P. M. Frinchaboy, A. E. Garcia Perez, L. Girardi, F. R. Hearty, D. W. Hogg, J. Holtzman, M. A. G. Maia, S. R. Majewski, E. Malanushenko, V. Malanushenko, S. Meszaros, D. L. Nidever, R. W. O’Connell, C. O’Donnell, A. Oravetz, K. Pan, H. J. Rocha-Pinto, R. P. Schiavon, D. P. Schneider, M. Schultheis, M. Skrutskie, V. V. Smith, D. H. Weinberg, J. C. Wilson и G. Zasowski (2012). [The Milky Way’s Circular-velocity Curve between 4 and 14 kpc from APOGEE data](#). ApJ 759.2, с. 131.
- Kafle, P. R., S. Sharma, G. F. Lewis и J. Bland-Hawthorn (2012). [Kinematics of the Stellar Halo and the Mass Distribution of the Milky Way Using Blue Horizontal Branch Stars](#). ApJ 761.2, с. 98.
- Rashkov, V., A. Pillepich, A. J. Deason, P. Madau, C. M. Rockosi, J. Guedes и L. Mayer (2013). [A “Light,” Centrally Concentrated Milky Way Halo?](#) ApJ 773.2, с. L32.
- Eadie, G. M. и W. E. Harris (2016). [Bayesian Mass Estimates of the Milky Way: The Dark and Light Sides of Parameter Assumptions](#). ApJ 829.2, с. 108.
- Zhai, M., X.-X. Xue, L. Zhang, C.-D. Li, G. Zhao и C.-Q. Yang (2018). [The mass of the Galactic dark matter halo from ~9000 LAMOST DR5 K giants](#). Research in Astronomy and Astrophysics 18.9, с. 113.
- Li, H., F. Hammer, C. Babusiaux, M. S. Pawlowski, Y. Yang, F. Arenou, C. Du и J. Wang (2021). [Gaia EDR3 Proper Motions of Milky Way Dwarfs. I. 3D Motions and Orbits](#). ApJ 916.1, с. 8.
- Bland-Hawthorn, J. и O. Gerhard (2016). [The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties](#). ARA&A 54, с. 529–596.
- Zaritsky, D. и H. Courtois (2017). [A dynamics-free lower bound on the mass of our Galaxy](#). MNRAS 465.3, с. 3724–3728.

Review of current estimates of the Galaxy mass

V.V. Bobylev, A.T. Bajkova

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, RAS

An overview of the methods used to estimate the mass of the Galaxy and the results obtained by various authors recently according to modern data is given. In particular, the estimates obtained based on the analysis of the galactic rotation curve, on the kinematics of the Galactic dwarf satellites and globular clusters, on the streams of such dwarf galaxies, on escape speed, as well as on halo stars are considered. Estimates of the Galaxy mass in the form $M(< r)$, M_{200} and M_{vir} are considered. According to 20 individual estimates, the average value was found $\overline{M}_{200} = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$ with a dispersion of $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ and a weighted average error of $0.06 \times 10^{12} M_{\odot}$. According to 25 individual estimates, $\overline{M}_{\text{vir}} = 1.02 \times 10^{12} M_{\odot}$ was obtained with a dispersion of $0.41 \times 10^{12} M_{\odot}$ and a weighted average error of $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.