

СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ МАССЫ МЛЕЧНОГО ПУТИ

© 2023 г. В. В. Бобылев^{1,*}, А. Т. Байкова¹

¹Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулковое, Россия

*E-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.06.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Дан обзор различных методов, применяемых для оценки массы Галактики. Включены результаты, полученные на основе анализа кривой галактического вращения, по кинематике карликовых галактик-спутников Млечного Пути, по шаровым скоплениям, по шлейфам карликовых галактик, по далеким звездам гало, по скоростям убегания, по динамике Местной группы галактик, а также в результате моделирования. Рассмотрены оценки массы Галактики M вида а) $M(<r)$, т.е. масса, заключенная внутри сферы радиусом r , б) M_{200} , где $r = 200$ кпк, и в) вириальные оценки, M_{vir} . Такие оценки отобраны нами по литературным данным, значительная часть которых получена в эпоху Gaia. По 20 индивидуальным оценкам найдено среднее 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 28 индивидуальным оценкам получено $\bar{M}_{\text{vir}} = 1.05 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.44 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Ключевые слова: галактика Млечный Путь, кривая вращения, масса Галактики

DOI: 10.31857/S0004629923080029, EDN: NIUYRU

1. ВВЕДЕНИЕ

Значение массы является важнейшим параметром при построении динамической модели Галактики. Применяются разнообразные методы для оценивания этой величины. Все они основаны на анализе кинематики звезд и шаровых скоплений, принадлежащих Галактике, окружающих ее карликовых галактиках-спутниках с их шлейфами, а также кинематики соседних галактик.

Еще совсем недавно оценки массы Галактики, полученные различными авторами, отличались в разы. Например, $M(<r = 385 \text{ кпк}) = 0.7 \times 10^{12} M_{\odot}$ [1], или $M(<r = 200 \text{ кпк}) = 3.0 \times 10^{12} M_{\odot}$ [2]). Здесь дана оценка массы Галактики $M(<r)$, которая заключена внутри сферы радиусом r . В последнее время, благодаря различным факторам, дисперсия таких оценок постепенно уменьшается.

Отметим публикации Karukes et al. [3] и Wang et al. [4], посвященные оценкам массы Галактики, послужившие нам образцом. Эти авторы сделали интересные обзоры с классификацией методов получения оценок. Мы продолжаем такую работу с добавлением ряда новых оценок.

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 Lyr, 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 Gaia [5], или измерения скоростей шаровых скоплений и галактик-спутников Млечного Пути с борта космического телескопа им. Хаббла [6]. Наиболее востребованной является версия каталога Gaia DR3 (Gaia Data Release 3 [7]), содержащая массовые значения лучевых скоростей звезд. При этом в Gaia DR3 значения параллакса и собственных движений звезд просто скопированы из версии Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3 [8]), где тригонометрические параллаксы около 500 млн.

звезд измерены с ошибками менее 0.2 миллсекунд дуги.

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 [9]) или GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-plane Survey Extraordinaire [10]), полученные в результате космических наблюдений.

Для этих целей важны массовые спектроскопические обзоры неба, такие как SDSS (Sloan Digital Sky Survey [11]), APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment [12, 13]), LAMOST (Large sky Area Multi-Object fiber Spectroscopic Telescope [14]), RAVE (RAdial Velocity Experiment [15]), или GALAH (GALactic Archaeology with HERMES spectroscopic survey [16]), содержащие информацию о спектрах и лучевых скоростях сотен тысяч звезд.

Целью настоящей работы являются обзор методов, которые применяются для оценки массы Галактики, обзор результатов, полученных в последнее время по самым надежным данным, и вывод среднего значения массы Млечного Пути.

2. 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 $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$ 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, r – гелиоцентрическое расстояние звезды.

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:

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

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 $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$. Фактически здесь задана цилиндрическая система координат $R\theta z$.

3. МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ МАССЫ ГАЛАКТИКИ

3.1. По кривой вращения

Кривая вращения – это зависимость круговых скоростей вращения звезд V_{circ} вокруг оси вращения Галактики от расстояния до ее оси вращения R . На рис. 1 даны две кривые вращения Галактики, найденные по выборкам классических цефеид, имеющих высокоточные оценки расстояний, а также по большой выборке красных гигантов. Красной линией на рисунке дана кривая вращения, вычисленная нами в работе [17].

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 [21] моделируется галактический балдж:

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

2) сжатым сфероидом моделируется диск в форме, предложенной Миямото и Нагаи [22]:

$$\Phi_d(R, z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + \left[a_d + \sqrt{z^2 + b_d^2} \right]^2}}; \quad (3)$$

3) гало темной материи моделируется согласно работе [23], такой подход называется моделью Наварро–Френка–Уайта:

$$\Phi_h(r) = -\frac{GM_h}{r} \ln \left(1 + \frac{r}{a_h} \right), \quad (4)$$

где M_b, M_d, M_h – массы компонентов, b_b, a_d, b_d, a_h – масштабные параметры компонентов. В на-

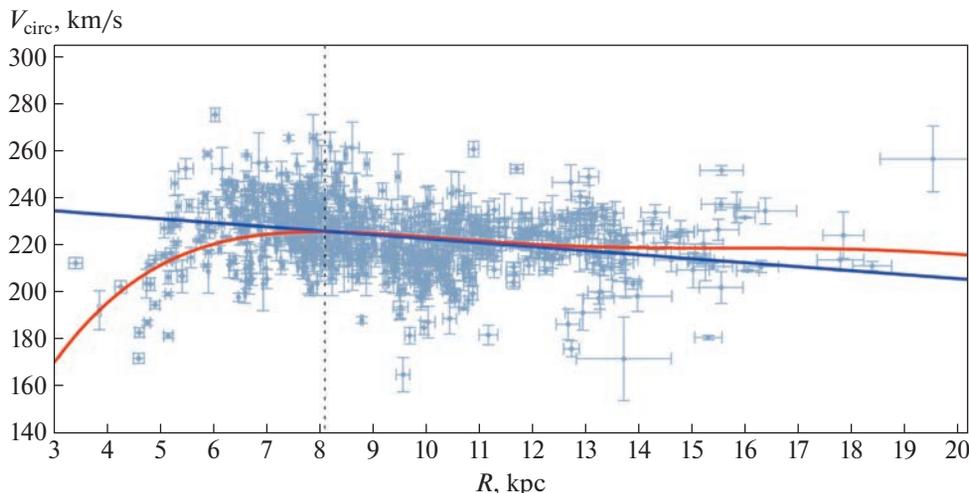


Рис. 1. Круговые скорости выборки классических цефеид V_{circ} , вычисленные нами в работе [17] с использованием расстояний из [18] и собственными движениями из Gaia EDR3. Красной линией дана найденная нами по цефеидам кривая вращения, а синей линией (линейная зависимость) дана кривая вращения из работы [19], найденная по большой выборке красных гигантов с собственными движениями из версии каталога Gaia DR2 [20], положение Солнца отмечено вертикальной штриховой линией.

ших работах [24–27] подход на основе соотношений (3)–(4) соответствует модели III.

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

$$M(<r) = \frac{r^2}{G} \frac{d\Phi(r)}{dr}, \quad (5)$$

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

В самом простом случае сферически симметричного распределения звездной плотности масса вещества в сфере радиусом r может быть оценена по формуле:

$$M(<r) = \frac{rV^2}{G}, \quad (6)$$

которая получена путем приравнивания центростремительной силы к силе притяжения.

Интересно отметить работу [28], в которой осесимметричная модель гравитационного потенциала Галактики включала четыре компонента: балдж, тонкий и толстый диски, а также гало темной материи. Для построения кривой вращения Галактики были использованы кинематические данные о примерно 54000 звезд, принадлежащих ветви красных гигантов. Данные о параллаксах и собственных движениях звезд были взяты из каталога Gaia EDR3, а спектральная информация – из обзоров APOGEE и LAMOST. Была использована фотометрия в ближнем ин-

фракрасном диапазоне из каталога 2MASS [29]. В итоге этими авторами была получена оценка $M_{\text{vir}} = (0.805 \pm 0.115) \times 10^{12} M_{\odot}$ 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 этой теореме, система находится в равновесии с внешней средой, если удвоенное значение усредненной кинетической энергии T системы равно потенциальной энергии U , т.е. $2\langle T \rangle = -\langle U \rangle$.

Иногда применяется следующий способ оценки M_{vir} [30–32]:

$$M_{\text{vir}} = \frac{4\pi}{3} \rho_{\text{crit}} \Omega_m \delta_{\text{th}} r_{\text{vir}}^3, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2/8\pi G$ – критическая плотность Вселенной (с которой должна сравниваться плотность Галактики), Ω_m – вклад видимой материи в критическую плотность, δ_{th} – критическая сверхплотность при вириализации. Например, в работе [30] было принято $\Omega_m = 0.3$, $\delta_{\text{th}} = 40$, $H_0 = 65$ км/с/Мпк. Таким образом, оценка M_{vir} , каким бы способом ее не вычисляли, сильно зависит от принятой модели.

В настоящей работе рассматриваем оценки трех видов: M_r , M_{200} и M_{vir} . Для этого мы постарались сформировать по возможности полную вы-

борку современных результатов, значительная часть которых получена уже в эпоху Gaia.

В работе [33] кривая вращения Галактики построена по выборке из 3500 классических цефеид. Для всех этих цефеид были собраны фотометрические данные в инфракрасном диапазоне и получены оценки расстояния с использованием соотношения период-Весенхейт согласно калибровкам из работы [34]. 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.

В работе [19] для построения кривой вращения Галактики было использовано $\approx 25\,000$ красных гигантов, расположенных в интервале расстояний $R \sim 5\text{--}25$ кпк. Кинематические данные были взяты из каталога Gaia DR2, спектральная информация из обзора APOGEE, а фотометрия в ближнем инфракрасном диапазоне — из каталога 2MASS. В работе [19] была получена оценка вириальной массы Галактики $M_{\text{vir}} = (0.725 \pm 0.025) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Bhattacharjee et al. [35] построили кривую вращения Галактики по данным, распространяющимся вплоть до $R \sim 200$ кпк. Для этого использовались кинематические характеристики 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. В итоге была получена оценка $M_{200} = (0.68 \pm 0.41) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работах [24–27] в процесс построения кривой вращения Галактики мы добавили мазеры с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами, а для более далекого интервала использовали данные из работы [35]. Протестированы были шесть моделей галактического потенциала. Отметим, что по кривой вращения Галактики, построенной по скоростям объектов во всем интервале $R \sim 0\text{--}200$ 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 $M_{200} = (0.75 \pm 0.19) \times 10^{12} M_{\odot}$.

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 [36] выглядит так:

$$V_{\text{circ}}^2(R) = -\frac{r}{\rho} \frac{d(\rho\sigma_r^2)}{dt} - 2\beta\sigma_r^2, \quad (8)$$

где

$$\beta = 1 - \frac{\sigma_t^2}{\sigma_r^2}. \quad (9)$$

Здесь $\sigma_r(r)$ и $\sigma_t(r)$ — дисперсии радиальных и тангенциальных скоростей соответственно, $\rho(r)$ — звездная плотность, а β — параметр анизотропии. Такой подход, например, использован в работе [30] для вычисления круговых скоростей голубых гигантов горизонтальной ветви, где была получена оценка $M_{60} = (0.40 \pm 0.07) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Huang et al. [31] 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–Рассела, а также около 5700 гигантов гало спектрального класса K. В итоге эти авторы получили оценку $M_{\text{vir}} = (0.90_{-0.08}^{+0.07}) \times 10^{12} M_{\odot}$ с найденным значением $r_{\text{vir}} = 255.7 \pm 7.7$ кпк. Для вычисления круговых скоростей далеких K-гигантов этим авторам также пришлось использовать подход, основанный на уравнении Джинса (8).

Отметим, что в работе [37] была построена модель потенциала Галактики только по данным о мазерах с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и получено $M_{100} = (0.82 \pm 0.11) \times 10^{12} M_{\odot}$. Софу [1] 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.

Оценки M , в частности, M_{200} , кроме всего прочего, зависят от конкретного выражения

для моделирования потенциала гало темной материи. В работе [26] рассмотрены шесть моделей гравитационного потенциала с шестью формами потенциала гало темной материи. Из анализа одних и тех же измерительных данных мы нашли, что оценки M_{200} лежат в интервале значений $[0.47-1.45] \times 10^{12} M_{\odot}$.

В последнее время появились работы [38–40], в которых найдены очень маленькие значения массы Галактики на основе применения модели Эйнасто [41]. В работах [38–40] при оценивании по тем же данным оценки массы Галактики получаются в 2–3 раза меньшими, чем на основе модели Наварро–Френка–Уайта (4). Однако кривые вращения в работах [38–40] строились по цефеидам из каталога Gaia DR3, которые распределены в достаточно узком интервале расстояний $r < 30$ кпк. Например, в работе [38] путем интерполирования кривой вращения до расстояния $r = 112$ кпк найдено $M_{112} = (0.27_{-0.05}^{+0.31}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.2. 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.

Sohn et al. [42] выполнен анализ 20 галактических шаровых скоплений. Значения их средних собственных движений были вычислены по наблюдениям космического телескопа им. Хаббла. Эти авторы нашли $M_{39.5} = (0.61_{-0.12}^{+0.18}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{\text{vir}} = (2.05_{-0.79}^{+0.97}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [43] 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. В работе [43] была получена оценка $M_{20} = (0.191_{-0.017}^{+0.018}) \times 10^{12} M_{\odot}$. В работе [44] 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. В работе [44] найдено $M_{39.5} = (0.42_{-0.06}^{+0.07}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [45] 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, была получена оценка $M_{100} = (0.85_{-0.20}^{+0.33}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [46] кривая вращения Галактики построена с использованием средних собственных движений 150 шаровых скоплений, которые были вычислены по данным каталога Gaia EDR3. В итоге авторы работы [46] заключили, что общая масса Галактики составляет от $M_{200} = (0.536_{-0.068}^{+0.081}) \times 10^{12} M_{\odot}$ до $M_{200} = (0.784_{-0.197}^{+0.308}) \times 10^{12} M_{\odot}$ в зависимости от модели гало. Причем эти оценки сделаны с учетом вклада Большого Магелланова Облака (БМО). То есть учет вклада БМО на интервале расстояний < 100 кпк слегка уменьшает анализируемые круговые скорости объектов. Поэтому авторы работы [46] говорят о заниженных значениях оценок M_{200} по сравнению с известными.

В работе [47] кривая вращения Галактики построена по 159 шаровым скоплениям. Их средние собственные движения были вычислены по данным каталога Gaia EDR3. Авторы работы [47] нашли $M_{200} = (1.11_{-0.18}^{+0.25}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

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 Kupper et al. [48], в которой изучен шлейф от шарового скопления Palomar 5. Эти авторы получили оценку массы Галактики 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 значение $M_{200} = (1.69 \pm 0.42) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.3. 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 кинематических свойств галактики Leo I (см., напр., [49]). Эта наиболее удаленная ($d = 261$ кпк) из карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Даже привлечение измерений ее собственного движения с борта космического телескопа им. Хаббла [50] пока не позволяет однозначно сказать [25], гиперболическая ли ее орбита или эллиптическая, т. е. связана она гравитационно с Галактикой или нет. В частности, авторы работы [49] проанализировали движение галактики Leo I с использованием измерений ее собственных движений, полученных с помощью космического телескопа им. Хаббла. В итоге они получили оценку массы Галактики $M_{\text{vir}} = 1.6 \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе Eadie et al. [51] 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 et al. [52] выполнен анализ 45 карликовых галактик-спутников Млечного Пути. Собственные движения и лучевые скорости звезд для вычисления средних значений были взяты из каталога Gaia DR2. Fritz et al. [52] получили оценку значения вириальной массы Галактики $M_{308} = (1.51_{-0.40}^{+0.45}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.4. По шлейфам галактик-спутников

В Галактике обнаружено достаточно много шлейфов, образовавшихся в результате разрушения шаровых скоплений и карликовых галактик. Подробный обзор таких структур можно найти в работе [53].

Gibbols et al. [54] изучили шлейфы, образованные карликовой галактикой-спутником Млечного Пути в Стрельце. Эти авторы получили оценку $M_{100} = (0.41 \pm 0.04) \times 10^{12} M_{\odot}$, а экстраполяция на более далекое расстояния дала $M_{200} = (0.56 \pm 0.12) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Данные о шлейфе GD-1 были использованы в работе [55] для уточнения модели гравитационного потенциала Галактики. В итоге авторы работы [55] нашли $M_{20} = (0.25 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Интересно отметить работу Vasiliev et al. [56], в которой проведено N -body моделирование эволюции потока Стрельца с учетом гравитационного влияния БМО. Vasiliev et al. [56] пришли к вы-

воду о том, что наблюдаемые свойства потока Стрельца не описываются хорошо в статичном Млечном Пути. Для адекватного же описания необходимо учитывать взаимодействие потока с Галактикой, что приводит к изменению формы гало темной материи Галактики со временем. В конечном итоге, Vasiliev et al. [56] нашли $M_{100} = (0.56 \pm 0.04) \times 10^{12} M_{\odot}$, $M_{200} = (0.80 \pm 0.10) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{\text{vir}} = (0.90 \pm 0.13) \times 10^{12} M_{\odot}$, $r_{\text{vir}} = 250 \pm 12$ кпк.

Взаимодействие между Млечным Путем и БМО создает возмущения в распределении и кинематике удаленных звезд гало, шаровых скоплений и галактик-спутников. Такие возмущения могут исказить оценки массы Млечного Пути. В работе [57] представлен метод компенсации этих возмущений, основанный на интегрировании траекторий Млечного Пути и БМО. При этом были использованы кинематические данные версии Gaia EDR3. Авторы работы [57] показали, что модели с БМО, имеющим массу в диапазоне $M_{\text{LMC}} = (1-2) \times 10^{11} M_{\odot}$, лучше соответствуют наблюдаемому распределению индикаторов, и дают оценку массы Галактики $M_{100} = (0.75 \pm 0.10) \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.5. 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 (5) для оценки массы Галактики может быть преобразовано к следующему виду [58]:

$$M(<r) = -\frac{r^2 V_{\text{esc}}^2}{G} \frac{dV_{\text{esc}}}{dr}, \quad (10)$$

где V_{esc} – скорость убегания.

В работе [58] были использованы три звездные выборки, содержащие индикаторы гало: MSTO (main-sequence turn-off stars), K-гиганты и VHBs (голубые звезды горизонтальной ветви) по данным из каталога SDSS (Sloan Digital Sky Survey [59]). 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 K-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 было найдено значение $M_{50} = (0.30_{-0.05}^{+0.07}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

По убегающим переменным типа RR Лиры с расстояниями $r < 28$ кпк в работе [60] было найдено значение $M_{20} = (0.21_{-0.01}^{+0.02}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{200} = (0.83_{-0.16}^{+0.29}) \times 10^{12} M_{\odot}$. Данные для этого исследования были взяты из каталогов Gaia EDR3, PanSTARRS-1 (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System [61]) и SDSS. Из нескольких тысяч анализируемых звезд были найдены 9 звезд со статусом убегающих.

3.6. По звездам гало

В работе Diason et al. [62] произведен анализ голубых звезд горизонтальной ветви с измеренными лучевыми скоростями, распределенных в области $R > 80$ кпк. Diason et al. [62] нашли $M_{150} \sim [0.5-1.0] \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [63] проведено интересное изучение скоростей звезд гало. Было построено распределение эллипсоидов скоростей звезд гало на плоскости $Z - R$. В итоге сделано заключение о том, что $M_{50} \approx 0.45 \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [64] для построения кривой галактического вращения использованы 860 переменных типа RR Лун, принадлежащих звездному гало. Для этих звезд были определены высокоточные расстояния и лучевые скорости. Они распределены в интервале $r \sim 0-60$ кпк. Круговые скорости оценивались на основе уравнения Джинса. А на основе соотношения (6) была найдена масса Галактики $M_{50} = (0.375 \pm 0.133) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [32] 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 [65]. То есть это убегающие звезды, поэтому они дают возможность оценить массу Галактики. В работе [66] 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 $r_{\text{vir}} = 300$ кпк. По данным о гиперскоростных звездах авторы работы [67] нашли, что масса Галактики заключена в интервале $[1.2-1.9] \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.7. По динамике Местной группы галактик

Из анализа кривой вращения Галактики Софу [68], также как и другие авторы [69, 70], заключил,

что масса Туманности Андромеды слегка превышает массу Млечного Пути. А вот авторы работы [71], 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 $0.54_{-0.17}^{+0.23}$.

Имеются методы оценки массы Галактики без построения кривой ее вращения. Например, в работе [69] получена оценка 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 использованы 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 [72] 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.

В работе [73] из анализа измерений собственного движения галактики М31 было найдено $M(\text{MW})_{200} + M(\text{M31})_{200} = (2.40_{-1.05}^{+1.95}) \times 10^{12} M_{\odot}$, что лучше согласуется с описанными нами индивидуальными оценками массы Млечного Пути.

В работе [74] можно найти обзор более десятка работ с оценками массы Местной группы галактик. Все эти оценки заключены в интервале $M_{\text{LG}} \sim [2.5-5.6] \times 10^{12} M_{\odot}$. Поэтому можем грубо оценить интервал оценок массы Млечного Пути как $M_{\text{MW}} \sim [1-2.5] \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.8. Некоторые результаты моделирования

Конечно, все перечисленные выше оценки в разной степени модельные. Здесь мы отметим результаты N -body моделирования, полученные путем генерирования модельных выборок и дальнейшей подгонкой к какому-то набору известных параметров.

В работе Zhai et al. [75] было выполнено N -body космологическое моделирование высокого разрешения с целью исследования формирования аналогов Местной группы галактик. Из ана-

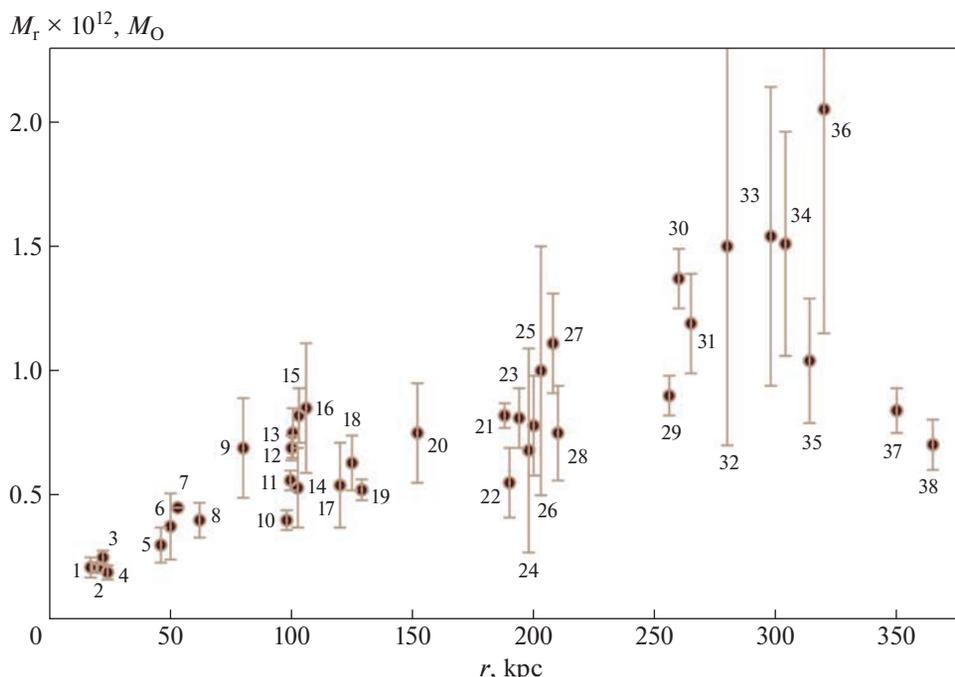


Рис. 2. Оценки массы Галактики вида M_r : 1 – Küpper et al. [48]; 2 – Malhan, Ibata [55]; 3 – Prudil et al. [60]; 4 – Posti, Helmi [43]; 5 – Williams et al. [58]; 6 – Ablimit, Zhao [64]; 7 – Williams, Evans [63]; 8 – Xue et al. [30]; 9 – Gnedin et al. [66]; 10 – Gibbons et al. [54]; 11 – Vasiliev et al. [56]; 12 – Shen et al. [79]; 13 – Magnus, Vasiliev [57]; 14 – Eadie, Jurić [80]; 15 – McMillan [37]; 16 – Vasiliev [45]; 17 – Battaglia et al. [81]; 18 – Eadie et al. [82]; 19 – Eadie, Harris [83]; 20 – Deason et al. [62]; 21 – Ablimit et al. [33]; 22 – Bird et al. [32]; 23 – Zhou et al. [28]; 24 – Bhattacharjee et al. [35]; 25 – Wang et al. [46]; 26 – Bird et al. [32]; 27 – Sun et al. [47]; 28 – Bajkova, Bobylev [24]; 29 – Huang et al. [31]; 30 – Eadie et al. [51]; 31 – Patel et al. [84]; 32 – Zhai et al. [85]; 33 – Watkins et al. [70]; 34 – Fritz et al. [52]; 35 – Peñarrubia et al. [86]; 36 – Sohn et al. [42]; 37 – Karachentsev et al. [69]; 38 – Sofue [1].

лиза орбитального движения сформированных аналогов Млечного Пути и туманности Андромеды Zhai et al. [75] нашли $M_{MW} = (1.5^{+1.4}_{-0.7}) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [76] предложен метод поиска ограничения на массу Млечного Пути с использованием данных о температуре газовой короны в рентгеновском диапазоне. Для заданного профиля плотности короны здесь получается распределение ее температуры в предположении об обобщенной модели равновесия с поддержкой нетеплового давления. Например, в предположении о распределении материи по закону Наварро–Фрэнк–Уайта (4), авторы работы [76] нашли $M_{vir} \sim [1.19-2.95] \times 10^{12} M_{\odot}$.

В работе [77] N -body моделирование членов Местной группы галактик выполнялось с использованием двух пакетов IllustrisTNG и SIMBA. В итоге авторы работы [77] получили несколько результатов, заключенных в интервале $M_{MW} \sim [1.0-2.6] \times 10^{12} M_{\odot}$ с ошибками индивидуальных оценок $\sim 1 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Наконец, недавно Carlesi et al. [78] применили методы моделирования и машинного обучения для изучения скоростей Млечного Пути и

туманности Андромеды в рамках стандартной Λ CDM космологической модели. В итоге эти авторы нашли $M_{LG} = (3.31^{+0.79}_{-0.67}) \times 10^{12} M_{\odot}$, $M_{MW} = (1.15^{+0.25}_{-0.22}) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $M_{M31} = (2.01^{+0.65}_{-0.39}) \times 10^{12} M_{\odot}$. Соотношение масс составляет $M_{M31}/M_{MW} = 1.75^{+0.54}_{-0.28}$, где масса туманности Андромеды почти в два раза превышает массу Млечного Пути.

4. ГРАФИКИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ

Описанные в предыдущем разделе основные результаты отражены на рис. 2, где даны оценки массы Галактики внутри определенного радиуса r . В интервале $r \sim 0-200$ кпк оценки закономерно возрастают с ростом расстояния. На всем интервале расстояний отлично виден рост дисперсии оценок с увеличением расстояния r . При $r > 200$ кпк оценки массы Галактики в основном являются вириальными, причем даны самые интересные. При этом на рис. 2 нанесено существенно больше точек по сравнению с аналогичным рисунком из нашего предварительного обзора [87]. Отметим, что для большего числа вириальных оценок дан отдельный рисунок (рис. 3).

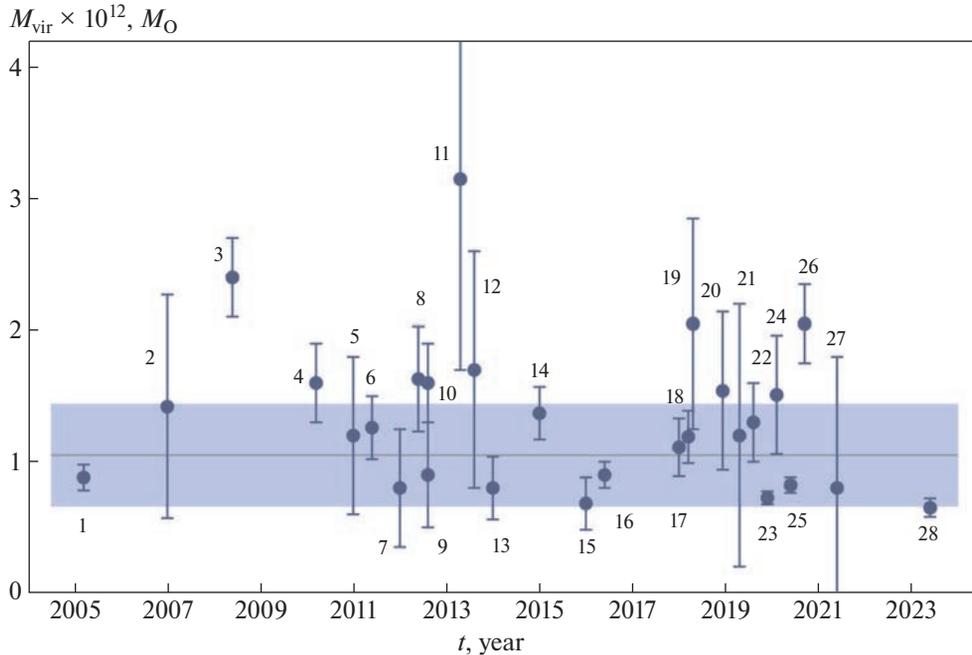


Рис. 3. Вириальные оценки массы Галактики M_{vir} в зависимости от года публикации, 1 – Battaglia et al. [81]; 2 – Smith et al. [88]; 3 – Li, White [89]; 4 – Gnedin et al. [66]; 5 – Busha et al. [90]; 6 – McMillan [91]; 7 – Bovy et al. [92]; 8 – Marel et al. [72]; 9 – Kafle et al. [93]; 10 – Boylan-Kolchin et al. [49]; 11 – Sohn et al. [50]; 12 – Rashkov et al. [94]; 13 – Kafle et al. [95]; 14 – Eadie et al. [51]; 15 – Eadie, Harris [83]; 16 – Huang et al. [31]; 17 – Zhai et al. [75]; 18 – Patel et al. [84]; 19 – Sohn et al. [42]; 20 – Watkins et al. [44]; 21 – Vasiliev [45]; 22 – Posti, Helmi [43]; 23 – Eilers et al. [19]; 24 – Fritz et al. [52]; 25 – Ablimit et al. [33]; 26 – Guo et al. [76]; 27 – Li et al. [96]; 28 – Labini et al. [97].

Имеется достаточное для отдельного рассмотрения количество оценок вида M_{200} . Полученные путем интегрирования кривой вращения (см. формулу (5)), по нашему мнению, они являются более строгими, по сравнению с оценками M_{vir} . Следуя подходу [3], мы построили рис. 4, 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. 2 и в обзоре [3], рис. 9.

Известно (например, [108]), что оценки M_{200} и M_{vir} связаны между собой соотношением $M_{200} \approx 0.85 M_{\text{vir}}$. Нам интересно повторить вычисление средних по расширенной статистике, сравнить дисперсии оценок. Для этого были вычислены среднее \bar{M}_{200} и средневзвешенное с использованием весов, обратно пропорциональных ошибкам индивидуальных оценок $w = 1/\sigma$, $(\bar{M}_{200})_w$:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{200} &= (0.94 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}, \\ (\bar{M}_{200})_w &= (0.88 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}, \end{aligned} \quad (11)$$

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. 4 темной линией показано среднее $(\bar{M}_{200})_w = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$, 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_r и M_{vir} . Часть таких оценок M_r дана на рис. 2. На рис. 3 даны 28 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. 4. Средние значения \bar{M}_{vir} и $(\bar{M}_{\text{vir}})_w$, вычисленные по этим данным, таковы:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{\text{vir}} &= (1.33 \pm 0.11) \times 10^{12} M_{\odot}, \\ (\bar{M}_{\text{vir}})_w &= (1.05 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}, \end{aligned} \quad (12)$$

где указаны ошибки среднего и средневзвешенного соответственно, а дисперсии оценок, σ , составляют $0.58 \times 10^{12} M_{\odot}$ и $0.44 \times 10^{12} M_{\odot}$ соответственно. Видим меньшее согласие между двумя оценками и большими их ошибками по сравнению с результатом (11).

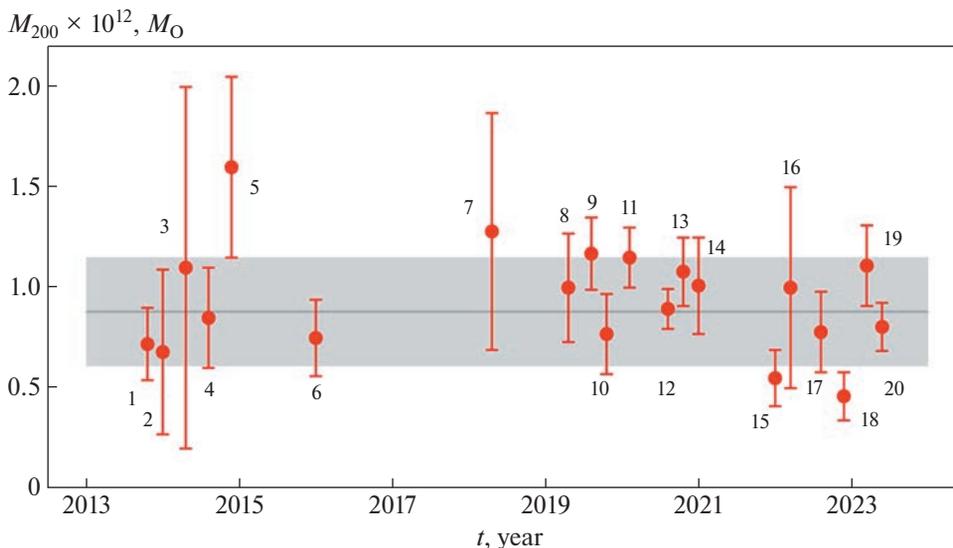


Рис. 4. Оценки массы Галактики вида M_{200} в зависимости от года публикации: 1 – Kafle et al. [95]; 2 – Bhattacharjee et al. [35]; 3 – Barber et al. [98]; 4 – Cautun et al. [99]; 5 – Piffl et al. [100]; 6 – Bajkova, Bobylev [24]; 7 – Monari et al. [101]; 8 – Deason et al. [102]; 9 – Callingham et al. [103]; 10 – Eadie, Jurić [80]; 11 – Li et al. [104]; 12 – Karukes et al. [3]; 13 – Cautun et al. [105]; 14 – Deason et al. [106]; 15 – Bird et al. [32]; 16 – Bird et al. [32]; 17 – Wang et al. [46]; 18 – Necib, Lin [107]; 19 – Sun et al. [47]; 20 – Zhou et al. [28].

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Не все, однако, согласны с тем, что масса Галактики $\leq 1 \times 10^{12} M_{\odot}$. Например, Zaritsky et al. [109] промоделировали аналоги Млечного Пути. Для таких объектов эти авторы подобрали из литературы измерения массы газа в звездах и дисках, измерения масс газа в гало, а также использовали хорошо установленное значение космологической доли барионов. Таким образом, нижнюю границу массы Галактики они оценивали способом, не зависящим от динамики. В итоге Zaritsky et al. [109] 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 нашем предварительном обзоре [87] по меньшим выборкам данных были получены следующие оценки: $\bar{M}_{200} = (0.88 \pm 0.06) \times 10^{12} M_{\odot}$ и $\bar{M}_{\text{vir}} = (1.02 \pm 0.09) \times 10^{12} M_{\odot}$.

В обзоре [108] были найдены 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

(11) и (12), а в пределах погрешностей средние находятся в хорошем согласии.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены оценки массы Галактики, полученные различными авторами, следующими наиболее часто применяемыми динамическими способами

- из анализа кривой галактического вращения,
- по кинематике карликовых галактик-спутников Млечного Пути и шаровым скоплениям,
- по шлейфам карликовых галактик,
- по скоростям убегания,
- по далеким гигантам гало,
- по динамике Местной группы галактик,
- некоторые результаты моделирования.

Отметим, что в диапазоне $R \sim 5\text{--}25$ кпк имеется отличное согласие кривых вращения Галактики, 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 Галактики по длинной (далее ~ 100 кпк) кривой вращения Галактики, анализ галактических ор-

бит далеких шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников Млечного Пути или анализ скоростей убегания звезд. То есть 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 $[0.5-3.5] \times 10^{12} M_{\odot}$, 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 28 индивидуальным вириальным оценкам получено $\bar{M}_{vir} = 1.05 \times 10^{12} M_{\odot}$ с дисперсией $0.44 \times 10^{12} M_{\odot}$ и ошибкой средневзвешенного $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Y. Sofue*, Publ. Astron. Soc. Japan **64**, 75 (2012).
2. *A. Irrgang, B. Wilcox, E. Tucker, and L. Schiefelbein*, Astron. and Astrophys. **549**, 137 (2013).
3. *E. V. Karukes, M. Benito, F. Iocco, R. Trotta, and A. Geringer-Sameth*, J. Cosmology and Astroparticle Phys. № 05, id. 033 (2020).
4. *W. Wang, J. Han, M. Cautun, Z. Li, and M. N. Ishigaki*, Sci. China Phys. Mechanics and Astronomy **63** (10), id. 109801 (2020).
5. *T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al.*, Astron. and Astrophys. **595**, id. A1 (2016).
6. *M. Libralato, A. Bellini, L.R. Bedin, E. Moreno, et al.*, Astrophys. J. **854**, id. 45 (2018).
7. *A. Vallenari, A. G. A. Brown, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, arXiv:2208.00211 [astro-ph.GA] (2022).
8. *A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, Astron. and Astrophys. **649**, id. A1 (2021).
9. *E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, et al.*, Astron. J. **140**, 1868 (2010).
10. *R. A. Benjamin, E. Churchwell, B. L. Babler, T. M. Bania, et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacific **115**, 953 (2003).
11. *D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., F. Scott, et al.*, Astron. J. **120**, 1579 (2000).
12. *D. J. Eisenstein, D. H. Weinberg, E. Agol, H. Aihara, et al.*, Astron. J. **142** (3), id. 72 (2011).
13. *S. R. Majewski, R. P. Schiavon, P. M. Frinchaboy, C. Allende Prieto, et al.*, Astron. J. **154** (3), id. 94 (2017).
14. *L.-C. Deng, H. J. Newberg, C. Liu, J. L. Carlin, et al.*, Res. Astron. and Astrophys. **12** (7), 735 (2012).
15. *M. Steinmetz, T. Zwitter, A. Siebert, F. G. Watson, et al.*, Astron. J. **132** (4), 1645 (2006).
16. *S. Buder, S. Sharma, J. Kos, A. M. Amarsi, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **506**, 150 (2021).
17. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, Res. Astron. and Astrophys. **23**, id. 045001 (2023).
18. *D. M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, A. Udalski, et al.*, Science **365** (6452), 478 (2019).
19. *A.-C. Eilers, D. W. Hogg, H.-W. Rix, and M. K. Ness*, Astrophys. J. **871** (1), id. 120 (2019).
20. *A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al.*, Astron. and Astrophys. **616**, id. A1 (2018).
21. *H. C. Plummer*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **71**, 460 (1911).
22. *M. Miyamoto and R. Nagai*, Publ. Astron. Soc. Japan **27**, 533 (1975).
23. *J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White*, Astrophys. J. **490**, 493 (1997).
24. *A. T. Bajkova and V. V. Bobylev*, Astron. Letters **42**, 567 (2016).
25. *A. T. Bajkova and V. V. Bobylev*, Astron. Rep. **61**, 727 (2017).
26. *A. T. Bajkova and V. V. Bobylev*, Open Astronomy **26**(1), 72 (2017).
27. *V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, and A. O. Gromov*, Astron. Letters **43**, 241 (2017).
28. *Y. Zhou, X. Li, Y. Huang, and H. Zhang*, Astrophys. J. **946**, id. 73 (2023).
29. *M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al.*, Astron. J. **131** (2), 1163 (2006).
30. *X. X. Xue, H. W. Rix, G. Zhao, P. Re Fiorentin, et al.*, Astrophys. J. **684** (2), 1143 (2008).
31. *Y. Huang, X.-W. Liu, H.-B. Yuan, M.-S. Xiang, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **463** (3), 2623 (2016).
32. *S. A. Bird, X.-X. Xue, C. Liu, C. Flynn, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **516** (1), 731 (2022).
33. *I. Ablimit, G. Zhao, C. Flynn, and S. A. Bird*, Astrophys. J. **895**, id. L12 (2020).
34. *S. Wang, X. Chen, R. de Grijs, and L. Deng*, Astrophys. J. **852** (2), id. 78 (2018).
35. *P. Bhattacharjee, S. Chaudhury, and S. Kundu*, Astrophys. J. **785**, id. 63 (2014).
36. *J. Binney and S. Tremaine*, Galactic Dynamics (Princeton: Princeton Univ. Press, 1987).
37. *P. J. McMillan*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **465**, 76 (2017).
38. *Y. Jiao, F. Hammer, H. Wang, and Y. B. Yang*, Astron. and Astrophys. **654**, id. A25 (2021).
39. *Y. Jiao, F. Hammer, H. Wang, J. Wang, and Y. Yang*, arXiv:2306.05461 [astro-ph.GA] (2023).
40. *X. Ou, A.-C. Eilers, L. Necib, and A. Frebel*, arXiv:2303.12838 [astro-ph.GA] (2023).
41. *J. Einasto*, Trudy Astrofiz. Instit. Alma-Ata **5**, 87 (1965).
42. *S. T. Sohn, L. L. Watkins, M. A. Fardal, R. P. van der Marel, A. J. Deason, G. Besla, and A. Bellini*, Astrophys. J. **862** (1), id. 52 (2018).
43. *L. Posti and A. Helmi*, Astron. and Astrophys. **621**, id. A56 (2019).
44. *L. L. Watkins, R. P. van der Marel, S. T. Sohn, and N. W. Evans*, Astrophys. J. **873**, id. 118 (2019).

45. *E. Vasiliev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **484**, 2832 (2019).
46. *J. Wang, F. Hammer, and Y. Yang*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **510**, 2242 (2022).
47. *G. Sun, Y. Wang, C. Liu, R. J. Long, X. Chen, and Q. Gao*, Res. Astron. and Astrophys. **23** (1), id. 015013 (2023).
48. *A. H. W. Küpper, E. Balbinot, and A. Bonaca*, Astrophys. J. **803**, id. 80 (2015).
49. *M. Boylan-Kolchin, J. S. Bullock, S. T. Sohn, G. Besla, and R. P. van der Marel*, Astrophys. J. **768** (2), id. 140 (2013).
50. *S. T. Sohn, G. Besla, R. P. van der Marel, M. Boylan-Kolchin, S. R. Majewski, and J. S. Bullock*, Astrophys. J. **768** (2), 139 (2013).
51. *G. M. Eadie, W. E. Harris, and L. M. Widrow*, Astrophys. J. **806**, id. 54 (2015).
52. *T. K. Fritz, A. Di Cintio, G. Battaglia, C. Brook, and S. Taibi*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **494**, 5178 (2020).
53. *C. J. Grillmair and J. L. Carlin*, *Stellar Streams and Clouds in the Galactic Halo. B: Tidal Streams in the Local Group and Beyond*, edited by H. J. Newberg and J. L. Carlin, Astrophys. Space Sci. Library **420**, 87 (2016).
54. *S. L. J. Gibbons, V. Belokurov, and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **445**, 3788 (2014).
55. *K. Malhan and R. A. Ibata*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **486**, 2995 (2019).
56. *E. Vasiliev, V. Belokurov, and D. Erkal*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **501**, 2279 (2021).
57. *L. C. Magnus and E. Vasiliev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **511**, 2610 (2022).
58. *A. A. Williams, V. Belokurov, A. R. Casey, and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **468**, 2359 (2017).
59. *C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. A. Prieto, Anderson, F. Scott, et al.*, Astrophys. J. Suppl. **203**, id. 21 (2012).
60. *Z. Prudil, A. J. Koch-Hansen, B. Lemasle, E. K. Grebel, et al.*, Astron. and Astrophys. **664**, id. A148 (2022).
61. *B. Sesar, N. Hernitschek, S. Mitrović, Ž. Ivezić, et al.*, Astron. J. **153**(5), 204 (2017).
62. *A. J. Deason, V. Belokurov, and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **425**, 2840 (2012).
63. *A. A. Williams and N. W. Evans*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **454**, 698 (2015).
64. *I. Ablimit and G. Zhao*, Astrophys. J. **846**, id. 10 (2017).
65. *W. R. Brown, M. J. Geller, S. J. Kenyon, and A. Diaferio*, Astron. J. **139**, 59 (2010).
66. *O. Y. Gnedin, W. R. Brown, M. J. Geller, and S. J. Kenyon*, Astrophys. J. Letters **720**, L108 (2010).
67. *G. Fragione and A. Loeb*, New Astronomy **55**, 32 (2017).
68. *Y. Sofue*, Publ. Astron. Soc. Japan **61**, 153 (2009).
69. *I. D. Karachentsev, O. G. Kashibadze, D. I. Makarov, and R. B. Tully*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **393**, 1265 (2009).
70. *L. L. Watkins, N. W. Evans, and J. H. An*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **406**, 264 (2010).
71. *J. Peñarrubia, Y.-Z. Ma, M. G. Walker, and A. McConnachie*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **443**, 2204 (2014).
72. *R. P. van der Marel, M. Fardal, G. Besla, R. L. Beaton, S. T. Sohn, J. Anderson, T. Brown, and P. Guhathakurta*, Astrophys. J. **753**, id. 8 (2012).
73. *R. E. González, A. V. Kravtsov, and N. Y. Gnedin*, Astrophys. J. **793**, id. 91 (2014).
74. *K. Chamberlain, A. M. Price-Whelan, G. Besla, E. C. Cunningham, N. Garavito-Camargo, J. Peñarrubia, and M. S. Petersen*, Astrophys. J. **942** (1), id. 18 (2023).
75. *M. Zhai, X.-X. Xue, L. Zhang, C.-D. Li, G. Zhao, and C.-Q. Yang*, Res. Astron. and Astrophys. **18** (9), id. 113 (2018).
76. *F. Guo, R. Zhang, and X.-E. Fang*, Astrophys. J. **904**, id. L14 (2020).
77. *P. Villanueva-Domingo, F. Villaescusa-Navarro, S. Genel, D. Anglés-Alcázar, et al.*, arXiv:2111.14874 [astro-ph.GA] (2021).
78. *E. Carlesi, Y. Hoffman, and N. I. Libeskind*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **513**, 2385 (2022).
79. *J. Shen, G. M. Eadie, N. Murray, D. Zaritsky, et al.*, Astrophys. J. **925** (1), id. 1 (2022).
80. *G. Eadie and M. Jurić*, Astrophys. J. **875**, id. 159 (2019).
81. *G. Battaglia, A. Helmi, H. Morrison, P. Harding, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **364**, 433 (2005).
82. *G. M. Eadie, A. Springford, and W. E. Harris*, Astrophys. J. **838**, id. 76 (2017).
83. *G. M. Eadie and W. E. Harris*, Astrophys. J. **829**, id. 108 (2016).
84. *E. Patel, G. Besla, K. Mandel, and S. T. Sohn*, Astrophys. J. **857**, id. 78 (2018).
85. *M. Zhai, Q. Guo, G. Zhao, Q. Gu, and A. Liu*, Astrophys. J. **890** (1), id. 27 (2020).
86. *J. Peñarrubia, F. A. Gómez, G. Besla, D. Erkal, and Y.-Z. Ma*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **456**, L54 (2016).
87. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, arXiv:2305.18408 [astro-ph.GA] (2023).
88. *M. C. Smith, G. R. Ruchti, A. Helmi, R. F. G. Wyse, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **379**, 755 (2007).
89. *Y.-S. Li and S. D. M. White*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **384**, 1459 (2008).
90. *M. T. Busha, P. J. Marshall, R. H. Wechsler, A. Klypin, and J. Primack*, Astrophys. J. **743**, 40 (2011).
91. *P. J. McMillan*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **414**, 2446 (2011).
92. *J. Bovy, C. A. Prieto, T. C. Beers, D. Bizyaev, et al.*, Astrophys. J. **759** (2), id. 131 (2012).
93. *P. R. Kafle, S. Sharma, G. F. Lewis, and J. Bland-Hawthorn*, Astrophys. J. **761**, id. 98 (2012).
94. *V. Rashkov, A. Pillepich, A. J. Deason, P. Madau, C. M. Rockosi, J. Guedes, and L. Mayer*, Astrophys. J. Letters **773**, id. L32 (2013).
95. *P. R. Kafle, S. Sharma, G. F. Lewis, and J. Bland-Hawthorn*, Astrophys. J. **794**, id. 59 (2014).
96. *H. Li, F. Hammer, C. Babusiaux, M. S. Pawlowski, Y. Yang, F. Arenou, C. Du, and J. Wang*, Astrophys. J. **916**, id. 8 (2021).
97. *F. S. Labini, Ž. Chrobáková, R. Capuzzo-Dolcetta, and M. López-Corredoira*, Astrophys. J. **945**, id. 3 (2023).

98. *C. Barber, E. Starkenburg, J. F. Navarro, A. W. McConachie, and A. Fattahi*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **437**, 959 (2014).
99. *M. Cautun, C. S. Frenk, R. van de Weygaert, W. A. Hellwing, and B. J. T. Jones*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 2049 (2014).
100. *T. Piffl, C. Scannapieco, J. Binney, M. Steinmetz, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **562**, id. A91 (2014).
101. *G. Monari, B. Famaey, I. Carrillo, T. Piffl, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **616**, id. L9 (2018).
102. *A. J. Deason, A. Fattahi, V. Belokurov, N. W. Evans, R. J. J. Grand, F. Marinacci, and R. Pakmor*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **485**, 3514 (2019).
103. *T. M. Callingham, M. Cautun, A. J. Deason, C. S. Frenk, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **484**, 5453 (2019).
104. *Z.-Z. Li, Y.-Z. Qian, J. Han, T. S. Li, W. Wang, and Y. P. Jing*, *Astrophys. J.* **894** (1), id. 10 (2020).
105. *M. Cautun, A. Benitez-Llambay, A. J. Deason, C. S. Frenk, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **494**, 4291 (2020).
106. *A. J. Deason, D. Erkal, V. Belokurov, A. Fattahi, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **501**, 5964 (2021).
107. *L. Necib and T. Lin*, *Astrophys. J.* **926**, id. 189 (2022).
108. *J. Bland-Hawthorn and O. Gerhard*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 529 (2016).
109. *D. Zaritsky and H. Courtois*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **465**, 3724 (2017).

MODERN ESTIMATES OF THE MASS OF THE MILKY WAY

V. V. Bobylev^a and A. T. Baykova^a

^a*The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, Saint-Petersburg, Russia*

An overview of various methods used to estimate the mass of the Galaxy is given. The results obtained on the basis of the analysis of the galactic rotation curve, on the kinematics of dwarf satellite galaxies of the Milky Way, on globular clusters, on the streams of dwarf galaxies, on distant halo stars, on escape velocities, on the dynamics of the Local group of galaxies, as well as results of N-body modeling are included. Estimates of the mass of the Galaxy M of the form (i) $M(< r)$, i.e. the mass enclosed inside a sphere with a radius of r , (ii) M_{200} , where $r \geq 0$ kpc, and (iii) virial estimates, M_{vir} . Such estimates were selected by us based on literary data, a significant part of which was obtained in the Gaia era. According to 20 individual estimates, the average value was found $\bar{M}_{200} = 0.88 \times 10^{12} M_{\odot}$ with a variance of $0.24 \times 10^{12} M_{\odot}$ and a weighted average error of $0.06 \times 10^{12} M_{\odot}$. According to 28 individual estimates we obtained $\bar{M}_{\text{vir}} = 1.05 \times 10^{12} M_{\odot}$ with variance $0.44 \times 10^{12} M_{\odot}$ and a weighted average error of $0.09 \times 10^{12} M_{\odot}$.

Keywords: Milky Way galaxy, rotation curve, mass of the Galaxy