

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА ГАЛАКТИКИ НА ОРБИТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА 152 ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ С ДАННЫМИ ИЗ КАТАЛОГА GAIA EDR3

© 2021 г. А. Т. Байкова^{1*}, А. А. Смирнов¹, В. В. Бобылев¹

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 19.06.2021 г.

После доработки 29.06.2021 г.; принята к публикации 29.06.2021 г.

Проведено исследование влияния эволюционирующего гравитационного потенциала галактики Млечный Путь на орбитальное движение 152 шаровых скоплений с данными о собственных движениях из каталога Gaia EDR3 и средними расстояниями из работы Баумгардта и Васильева (2021). Для построения полуаналитической космологической модели эволюционирующего потенциала с изменяющимися массами и размерами компонент Галактики мы использовали алгоритм, описанный в работе Хаги и др. (2015). Принятая осесимметричная трехкомпонентная модель потенциала Галактики включает сферический балдж, плоский диск Миamoto–Нагаи и темное сферическое гало Наварро–Фрэнк–Уайта. Интегрирование орбит производится назад во времени. Дается сравнение орбитальных параметров шаровых скоплений, полученных при статическом и эволюционирующем потенциалах при интегрировании орбит на 5 и 12 млрд лет назад. Впервые изучено влияние отдельно изменения масс и изменения размеров компонент Галактики. Показано, что изменения масс и размеров компонент действуют на орбитальные параметры противоположным образом. На малых галактоцентрических расстояниях это влияние максимально компенсируется. Наибольшие изменения претерпевают орбиты далеких шаровых скоплений и скоплений с большим апоцентрическим расстоянием. Показано, что на временах до –5 млрд лет орбиты шаровых скоплений в случае потенциала с изменяющимися как массами, так и размерами компонент, претерпевают в среднем незначительные изменения по сравнению со случаем статического потенциала. Эти изменения укладываются в пределы статистических неопределенностей, вызванных ошибками в данных. Так что на этих временах потенциал Галактики можно считать статическим. Приводятся таблицы с орбитальными параметрами шаровых скоплений, полученными как в статическом, так и эволюционирующем потенциалах.

Ключевые слова: шаровые скопления; Галактика (Млечный Путь), орбитальное движение, эволюционирующий гравитационный потенциал.

DOI: 10.31857/S0320010821070019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нашей галактике Млечный Путь насчитывается более 150 шаровых скоплений (ШС), вращающихся вокруг центра Галактики и распределенных на расстояниях до 200 кпк от центра. Шаровые скопления являются старейшими объектами, возраст которых достигает 13 млрд лет и сравним с возрастом Вселенной. По существу, они являются свидетелями самой ранней эпохи образования галактик, и потому их исследование является мощным средством изучения физических условий во Вселенной на протяжении ее эволюции.

Важнейшим аспектом изучения ШС является изучение их орбитальной истории, которая, в свою

очередь, определяется эволюцией галактического потенциала. Последняя зависит от многих процессов, в том числе от вековых процессов, таких как образование бара (Перес-Вильегас и др., 2020), и процессов, обусловленных взаимодействием с другими галактиками. Прежде всего это галактики-спутники (Гарроу и др., 2020). Особо надо отметить взаимодействие с самым массивным спутником — Большим Магеллановым Облаком (см. Батталия и др., 2021). Кинематика шаровых скоплений в целом также определяется историей иерархического образования галактик (Бекки и др., 2005; Арнольд и др., 2011; Трухильо-Гомес и др., 2021). Важной динамической особенностью ШС является также зависимость приливного радиуса скопления от общего потенциала галактики (Кинг, 1962). Наличие такой связи позволяет оценить массу галактики,

* Электронный адрес: bajkova@gaoran.ru

в которую пробное шаровое скопление движется, в том числе массу Млечного Пути (Беллаццини, 2004; Хаги и др., 2015).

Для изучения орбитального движения ШС многие авторы обычно используют статический потенциал, т.е. предполагают, что он остается неизменным при интегрировании орбит (см., например, Хелми и др., 2018; Массари и др., 2019; Байкова и др., 2020). Но наблюдения показывают, что размер и массовое содержание галактик значительно меняются с изменением красного смещения: размеры галактик на больших красных смещениях меньше, по сравнению с галактиками аналогичной массы в локальной вселенной (см., например, работу Хаги и др., 2015, и ссылки в ней).

Существует множество сценариев для объяснения физических процессов эволюции галактик, которые хорошо воспроизводят наблюдаемые свойства. Имеется ряд работ (Гомез и др., 2010; Корреа и др., 2015; Хаги и др., 2015; Сандерс и др., 2020; Армстронг и др., 2021), в которых для изучения орбитальной истории галактических объектов использованы различные модели изменяющегося во времени гравитационного потенциала, построенные на основе космологических моделей Вселенной. В некоторых работах рассматривается только изменение массы компонент потенциала Галактики (см., например, Армстронг и др., 2021), в других — и изменение массы, и изменение размеров компонент (Гомез и др., 2010; Хаги и др., 2015).

В настоящей работе мы принимаем алгоритм построения полуаналитической космологической модели эволюционирующего потенциала Галактики, подробно описанный в работах Гомеза и др. (2010) и Хаги и др. (2015). В качестве статического потенциала, или потенциала на настоящий момент времени, принимаем модель трехкомпонентного осесимметричного потенциала, состоящего из сферического балджа, плоского диска Миамото-Нагаи (Миамото, Нагаи, 1975) и темного сферического гало Наварро—Фрэнк—Уайта (Наварро и др., 1997), модифицированную нами ранее (Байкова, Бобылев, 2016) с использованием кривой вращения Бхатачарджи и др. (2014) в широком диапазоне галактоцентрических расстояний (от 0 до 200 кпк).

Целью нашей работы является изучение орбитальной истории 152 шаровых скоплений из списка Васильева (2019) по новейшим астрометрическим данным (Васильев, Баумгардт, 2021; Баумгардт, Васильев, 2021) путем численного интегрирования орбит назад во времени на космологических временах, сравнимых с возрастом Вселенной. Для проведения сравнительного анализа мы используем как статический, так и эволюционирующий галактические потенциалы. Мы ставим также целью изучение влияния на орбитальное движение ШС

отдельно изменения масс и изменения размеров компонент потенциала.

Работа структурирована следующим образом. Раздел 1 посвящен галактическому потенциалу: дается описание статического (п. 1.1) и эволюционирующего (п. 1.2) потенциалов, приводятся основные соотношения для интегрирования орбит (п. 1.3). В разделе 2 дается описание использованных данных о 152 шаровых скоплениях. Раздел 3 посвящен исследованию влияния на орбитальное движение ШС изменения масс и изменения размеров компонент потенциала. В разделе 4 представлены результаты интегрирования орбит ШС в различных потенциалах (п. 4.1) на различных временах (п. 4.2) и их сравнительному анализу. В Заключение суммируются основные результаты работы.

1. ГАЛАКТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

1.1. Статический потенциал

В качестве статического гравитационного потенциала Галактики мы рассматриваем осесимметричный потенциал, состоящий из трех компонент: центрального сферического балджа $\Phi_b(r(R, Z))$, диска $\Phi_d(r(R, Z))$ и сферического гало темной материи $\Phi_h(r(R, Z))$:

$$\Phi(R, Z) = \Phi_b(r(R, Z)) + \Phi_d(r(R, Z)) + \Phi_h(r(R, Z)). \quad (1)$$

Потенциалы балджа $\Phi_b(r(R, Z))$ и диска $\Phi_d(r(R, Z))$ выражаются в форме, предложенной Миамото, Нагаи (1975):

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

$$\Phi_d(R, Z) = -\frac{M_d}{\left[R^2 + \left(a_d + \sqrt{Z^2 + b_d^2} \right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (3)$$

Здесь использована цилиндрическая система координат (R, ψ, Z) с началом в центре Галактики. В прямоугольной декартовой системе координат (X, Y, Z) с началом в центре Галактики расстояние до звезды (сферический радиус) равно $r^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2 + Z^2$; M_b , M_d — массы балджа и диска; a_b , a_d , b_d — масштабные параметры, характеризующие размеры компонент.

В соответствии с принятым соглашением в работе Аллен, Сантьяна (1991) в данной статье гравитационный потенциал всех компонент выражается в единицах $100 \text{ км}^2/\text{с}^2$, расстояния — в кпк,

Таблица 1. Параметры модели потенциала в настоящее время, 5 и 12 млрд лет назад

Время t	Диск	Балдж	Гало
0 $z = 0$	$M_d = 6.51 \times 10^{10}$ $a_d = 4.40; b_d = 0.3084$	$M_b = 1.03 \times 10^{10}$ $a_b = 0.2672$	$M_h = 2.90 \times 10^{11}$ $a_h = 7.70$
-5 млрд лет $z = 0.474$	$M_d = 4.70 \times 10^{10}$ $a_d = 3.02; b_d = 0.2114$	$M_b = 7.45 \times 10^9$ $a_b = 0.1832$	$M_h = 2.10 \times 10^{11}$ $a_h = 5.28$
-12 млрд лет $z = 3.426$	$M_d = 6.04 \times 10^9$ $a_d = 0.55; b_d = 0.0383$	$M_b = 9.56 \times 10^8$ $a_b = 0.0331$	$M_h = 2.69 \times 10^{10}$ $a_h = 0.96$

Примечание. Массы и размеры компонент Галактики даны в M_\odot и кпк соответственно.

массы — в единицах галактической массы $M_{\text{gal}} = 2.325 \times 10^7 M_\odot$, соответствующей гравитационной постоянной $G = 1$.

Для описания компонента гало мы использовали выражение в форме Наварро–Френка–Уайта (NFW), использованного, в частности, в работах Иррганга и др. (2013), Байковой, Бобылева (2016) для подгонки модели гравитационного потенциала к новейшим данным о круговых скоростях галактических объектов:

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

Здесь весовой коэффициент M_h эквивалентен массе внутри сферы радиусом, в ~ 5.3 раза превышающим радиальный масштабный параметр a_h (Иррганг и др., 2013).

Выражение (4) для потенциала гало получается в результате совместного использования выражения для плотности массы согласно работе Наварро и др. (1997) (уравнение (1)) и уравнения Пуассона, связывающего плотность массы и потенциал (см. работы Иррганга и др., 2013; Байковой, Бобылева, 2016, уравнение (2)).

Параметры принятой нами модели галактического потенциала были получены в работе Байковой и Бобылева (2016) в результате их подгонки к данным о круговых скоростях облаков ионизованного водорода HI, мазерных источников и различных объектов гало с большими галактоцентрическими расстояниями R (вплоть до ~ 200 кпк) из работы Бхаттачарджи и др. (2014). При построении кривой вращения были использованы значения $R_\odot = 8.3$ кпк для галактоцентрического расстояния Солнца и $V_\odot = 244$ км/с для линейной скорости вращения местного стандарта покоя вокруг центра Галактики. Кроме того, при подгонке параметров были использованы ограничения на локальную динамическую плотность материи

$\rho_\odot = 0.1 M_\odot \text{ кпк}^{-3}$ и силу, действующую перпендикулярно плоскости Галактики $|K_{Z=1.1}|/2\pi G = 77 M_\odot \text{ кпк}^{-2}$ (Иррганг и др., 2013).

Параметры принятой статической модели приведены в первой строке табл. 1, где массы компонент выражены в единицах массы Солнца, а масштабные параметры — в кпк. Соответствующая кривая вращения приведена красным цветом на рис. 1. Эта кривая вращения соответствует как статическому потенциалу, так и переменному в настоящий момент времени, т.е. при $z = 0$. Масса Галактики, согласно этой модели (Байкова, Бобылев, 2016), равна $M_{G(R \leq 200 \text{ кпк})} = (0.75 \pm 0.19) \times 10^{12} M_\odot$. Это значение хорошо согласуется с современными независимыми оценками. Так, например, оценка массы NFW гало, полученная совсем недавно Коппельманом, Хелми (2020) по данным о скоростях убегающих звезд гало, составляет $M_{G(R \leq 200 \text{ кпк})} = 0.67_{-0.15}^{+0.30} \times 10^{12} M_\odot$. Принятая нами модель гравитационного потенциала Млечного Пути представляется более реалистичной по сравнению с другими известными моделями статического потенциала, поскольку она подкреплена данными на больших галактоцентрических расстояниях, что очень важно при интегрировании орбит далеких шаровых скоплений и скоплений с большим апоцентрическим расстоянием, а также дает хорошее согласие с современными оценками локальных параметров и рядом независимых оценок массы Галактики, тщательный обзор которых дан в недавней работе Ван и др. (2020). Однако отметим, что пик в самой центральной области (1–2 кпк), заметный для красной и фиолетовой кривых на рис. 1, может быть несколько завышен за счет сильной неосимметричности потенциала в центре, вызванной баром (см. раздел 6.4.3 в обзоре Бланд-Хоторна и Герхарда, 2016). Эта проблема требует специального изучения, поскольку единого взгляда на нее в литературе не существует. Но в

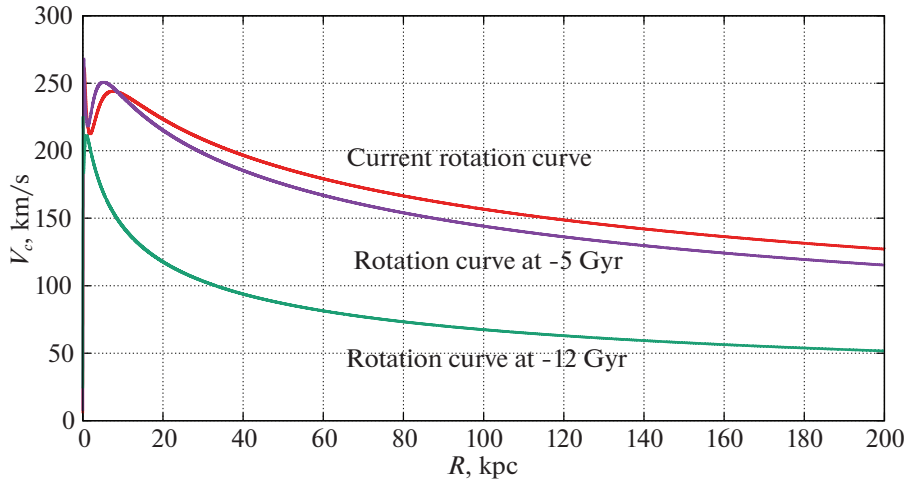


Рис. 1. Кривая вращения Галактики в три эпохи: настоящее время (красная линия), 5 млрд лет назад (фиолетовая линия) и 12 млрд лет назад (зеленая линия).

нашей задаче кривая вращения на таких малых галактоцентрических расстояниях не играет большой роли, поскольку наибольшему влиянию из-за эволюции потенциала Галактики подвержены, как будет показано ниже, как раз орбиты удаленных от центра Галактики объектов. Поэтому мы при решении нашей задачи придерживаемся традиционных подходов к интерпретации кривой вращения на малых расстояниях от центра Галактики.

1.2. Эволюционирующий потенциал

Для построения эволюционирующего галактического потенциала мы принимаем полуаналитическую космологическую модель, в которой характерные параметры, определяющие массу и размеры компонент Галактики, изменяются во времени. Мы использовали принцип построения эволюционирующего потенциала, рассмотренный в работах Гомеза и др. (2010) и Хаги и др. (2015) (см. также ссылки в этих работах). Но наши формулы немного отличаются от приведенных в этих работах, поскольку отличаются выражения для потенциала гало. У нас потенциал гало задается уравнением (4), параметрами M_h и a_h , в то время как в указанных ссылках потенциал гало задается через параметры вириальной массы, вириального радиуса и параметра концентрации.

В результате адаптированный под наши параметры алгоритм построения эволюционирующего потенциала, сохранивший принципы, изложенные в цитированных выше работах, выглядит следующим образом.

Эволюция массы гало (4) как функции от красного смещения z задается выражением

$$M_h(z) = M_h(z = 0) \exp(-2a_c z), \quad (5)$$

где постоянная $a_c = 0.34$ определяется как эпоха формирования гало (Гомез и др., 2010).

Для масс диска и гало используется соотношение, предложенное Баллоком, Джонстоном (2005):

$$M_{d,b}(z) = M_h(z) \frac{M_{d,b}(z = 0)}{M_h(z = 0)}, \quad (6)$$

аналогично для масштабных параметров компонент:

$$\{a_b, a_d, b_d\}(z) = a_h(z) \frac{\{a_b, a_d, b_d\}(z = 0)}{a_h(z = 0)}, \quad (7)$$

где масштабный параметр гало $a_h(z)$ вычисляется как

$$a_h(z) = \frac{K(z) a_h(z = 0)}{K(z = 0)}, \quad (8)$$

$$K(z) = \left(\frac{3M_h(z)}{4\pi\Delta_h(z)\rho_c(z)} \right)^{1/3}, \quad (9)$$

где

$$\Delta_h(z) = 18\pi^2 + 82[\Omega(z) - 1] - 39[\Omega(z) - 1]^2. \quad (10)$$

Здесь $\Omega(z)$ — плотность массы Вселенной,

$$\Omega(z) = \frac{\Omega_m(1+z)^3}{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}, \quad (11)$$

и $\rho_c(z)$ — критическая плотность Вселенной на данном z ,

$$\rho_c(z) = \frac{3H^2(z)}{8\pi G}, \quad (12)$$

где

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_m(1+z)^3}. \quad (13)$$

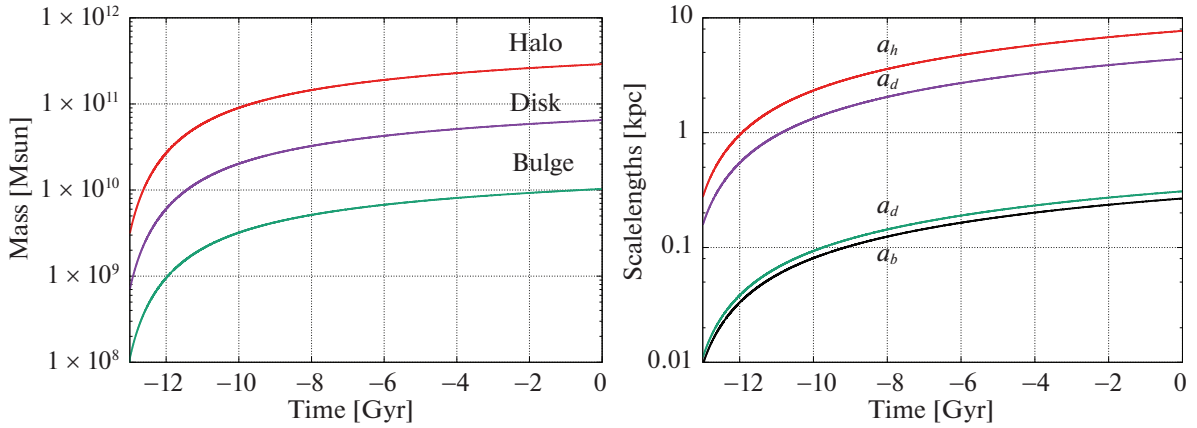


Рис. 2. Зависимость массы (левая панель) и масштабных параметров (правая панель) компонент Галактики от времени. Использована логарифмическая шкала.

Также предполагается, что Вселенная является плоской, в которой выполняется соотношение $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$. Мы принимаем параметры $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$. Значение постоянной Хаббла берем в соответствии с результатом миссии Planck $H_0 = 68$ км/с/Мпк (Аганим и др., 2020).

Соотношение, связывающее красное смещение z и время T , прошедшее с начала Большого взрыва, выглядит следующим образом:

$$z = \left[\frac{\Omega_m \sinh^2(\frac{3}{2} H_0 T \sqrt{\Omega_\Lambda})}{\Omega_\Lambda} \right]^{-1/3} - 1. \quad (14)$$

Из уравнения (14), полагая $z = 0$, легко получить зависимость произведения постоянной Хаббла H_0 на возраст Вселенной T_0 для модели плоской Вселенной от параметров Ω_m, Ω_Λ ($\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$). В нашем случае ($\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$) произведение $H_0 \times T_0 = 0.9641$. Таким образом, при постоянной Хаббла $H_0 = 68$ км/с/Мпк возраст Вселенной составляет $T_0 = 13.87$ млрд лет.

На рис. 2 представлены зависимости масс и масштабных параметров компонент Галактики от космологического времени t ($t = 0$ соответствует настоящему времени, т.е. $z = 0$). Отметим хорошее соответствие характера изменения масс и масштабов компонент зависимостям, полученным в работе Хаги и др. (2015). В табл. 1 во второй и третьей строках даны параметры компонент Галактики 5 ($z = 0.474$) и 12 ($z = 3.426$) млрд лет назад. Соответствующие кривые вращения показаны на рис. 1 фиолетовым и зеленым цветом. Зависимости масс и масштабных коэффициентов от времени мы с большой точностью представили в виде степенных полиномов восьмой степени, чтобы значения параметров можно было вычислять для любого времени ($t < 0$) при интегрировании орбит.

1.3. Интегрирование орбит

Уравнение движения пробной частицы в осесимметричном гравитационном потенциале может быть получено из лагранжиана системы \mathcal{L} (см., например, Приложение А в работе Иррганга и др., 2013):

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(R, Z, \dot{R}, \dot{\psi}, \dot{Z}) &= \quad (15) \\ &= 0.5(\dot{R}^2 + (R\dot{\psi})^2 + \dot{Z}^2) - \Phi(R, Z). \end{aligned}$$

Введя канонические моменты

$$\begin{aligned} p_R &= \partial \mathcal{L} / \partial \dot{R} = \dot{R}, \quad (16) \\ p_\psi &= \partial \mathcal{L} / \partial \dot{\psi} = R^2 \dot{\psi}, \\ p_Z &= \partial \mathcal{L} / \partial \dot{Z} = \dot{Z}, \end{aligned}$$

получаем уравнения Лагранжа в виде системы шести дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= p_R, \quad (17) \\ \dot{\psi} &= p_\psi / R^2, \\ \dot{Z} &= p_Z, \\ \dot{p}_R &= -\partial \Phi(R, Z) / \partial R + p_\psi^2 / R^3, \\ \dot{p}_\psi &= 0, \\ \dot{p}_Z &= -\partial \Phi(R, Z) / \partial Z. \end{aligned}$$

Для интегрирования уравнений (17) мы использовали алгоритм Рунге–Кутты четвертого порядка.

Пекулярная скорость Солнца относительно Местного стандарта покоя принималась равной $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (11.1, 12.2, 7.3) \pm (0.7, 0.5, 0.4)$ км с⁻¹ (Шонрих, 2010). Здесь мы используем гелиоцентрические скорости в подвижной декартовой системе координат со скоростью u , направленной в сторону галактического центра, v — в направлении вращения Галактики и w ,

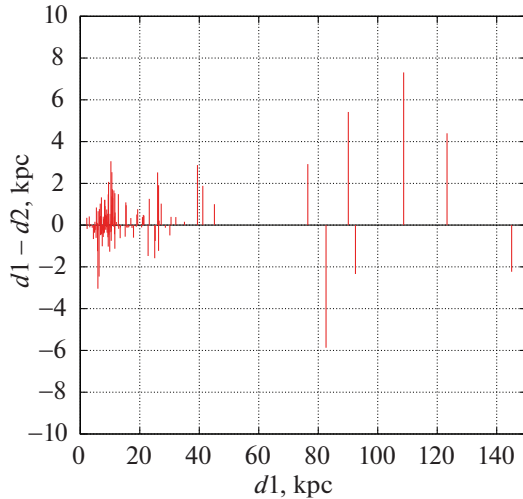


Рис. 3. Разности расстояний ($d1$) шаровых скоплений из каталога Харриса (2010) и средних расстояний ($d2$) из работы Баумгардта и Васильева (2021) в зависимости от $d1$.

перпендикулярной плоскости Галактики и направленной к ее северному полюсу.

Пусть начальные положения и пространственные скорости пробной частицы в гелиоцентрической системе координат равны $(x_o, y_o, z_o, u_o, v_o, w_o)$. Тогда начальные положения (X, Y, Z) и скорости (U, V, W) пробной частицы в декартовых галактических координатах задаются формулами

$$\begin{aligned} X &= R_{\odot} - x_o, Y = y_o, Z = z_o + h_{\odot}, \\ R &= \sqrt{X^2 + Y^2}, \\ U &= u_o + u_{\odot}, \\ V &= v_o + v_{\odot} + V_{\odot}, \\ W &= w_o + w_{\odot}, \end{aligned} \quad (18)$$

где R_{\odot} и V_{\odot} — галактоцентрическое расстояние и линейная скорость вращения Местного стандарта покоя вокруг центра Галактики, $h_{\odot} = 16$ пк (Бобылев, Байкова, 2016) — высота Солнца над плоскостью Галактики.

Начальные радиальная Π (\dot{R}) и круговая Θ ($\dot{\psi}$) скорости задаются выражениями $\Pi = -U\frac{X}{R} + V\frac{Y}{R}$ и $\Theta = U\frac{Y}{R} + V\frac{X}{R}$ соответственно.

2. ДАННЫЕ

Для исследованных нами ранее 152 шаровых скоплений, орбиты которых опубликованы в работе Байковой, Бобылева (2020) по данным из каталога Васильева (2019), мы взяли новые средние значения собственных движений и их неопределенностей из нового каталога Васильева, Баумгардта (2021), полученного из данных каталога Gaia EDR3. На

рис. 2 работы Байковой, Бобылева (2021) дается сравнение средних собственных движений из этих двух каталогов, полученных по измерениям Gaia DR2 и Gaia EDR3. Как следует из этого рисунка, новые значения собственных движений для ряда ШС заметно отличаются от старых. При этом точность измерения новых собственных движений в среднем повысилась в два раза.

Мы использовали новые средние гелиоцентрические расстояния из недавней работы Баумгардта, Васильева (2021), обладающие существенно более высокой точностью по сравнению с расстояниями из каталога Харриса (2010), которые были использованы ранее в работах Байковой, Бобылева (2020, 2021). Разности расстояний $d1$ шаровых скоплений из каталога Харриса (2010) и средних расстояний $d2$ из работы Баумгардта и Васильева (2021) в зависимости от $d1$ показаны на рис. 3. Видно, что значения расстояний изменились довольно существенно, особенно для далеких шаровых скоплений.

Все остальные астрометрические данные (лучевые скорости, координаты) остались прежними, как в каталоге Васильева (2019).

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА

Исходя из выражений (2)–(4) для потенциала галактических компонент, можно ожидать, что изменения масс и масштабных параметров во времени действуют на изменение потенциала противоположным образом. Действительно, параметры масс находятся в числителе выражений для потенциала, а масштабные параметры — в знаменателе. Мы исследовали отдельно влияние изменения масс и влияние изменения масштабных параметров.

Рассмотрим эту задачу на примере гало. Чтобы определить степень воздействия параметров, изменяющихся во времени, найдем производные потенциала по времени:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_h(t) &= -\frac{\dot{M}_h(t)}{r} \ln\left(1 + \frac{r}{a_h(t)}\right) + \\ &+ \frac{M_h(t)\dot{a}_h(t)}{a_h(t)(a_h(t) + r)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Из выражения (19) следует, что за скорость изменения потенциала гало из-за изменения его массы $M_h(t)$ ответственно первое слагаемое, а за скорость изменения потенциала из-за изменения масштабного параметра $a_h(t)$ ответственно второе слагаемое. Нахождение производных функций $\dot{M}_h(t)$ и $\dot{a}_h(t)$ не представляет проблемы благодаря их аппроксимации степенными функциями.

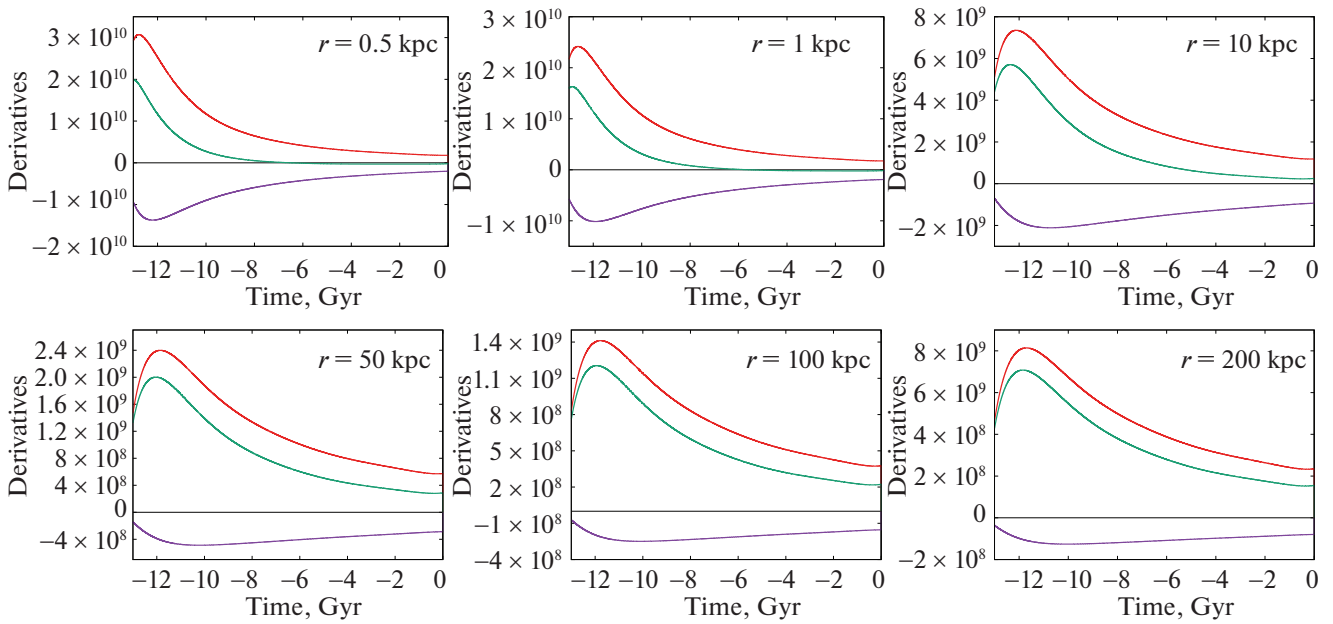


Рис. 4. Производные потенциала сферического гало по времени для различных расстояний от центра Галактики r . Красным цветом изображен график производной, определяемый изменяющейся массой гало, фиолетовым цветом — масштабным параметром (размером) гало, зеленым цветом изображен график суммарной производной.

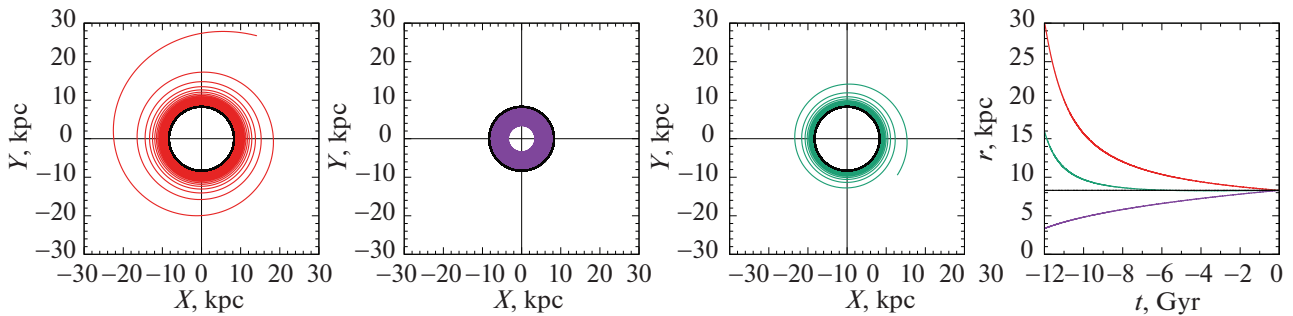


Рис. 5. Модельные орбиты частицы, полученные в трех видах эволюционирующего потенциала в интервале времени $[0, -12]$ млрд лет: 1) изменяются только массы компонент Галактики (левая панель), 2) изменяются только размеры компонент (вторая слева панель), 3) изменяются и массы, и размеры компонент (третья слева панель). Для сравнения на всех панелях черным цветом изображена круговая орбита, полученная в статическом потенциале. На правой панели изображено изменение радиус-вектора частицы со временем для всех видов потенциала.

На рис. 4 представлены функции производных потенциала сферического гало по времени для различных расстояний от центра Галактики r . Отдельно показаны составляющие производной, определяемые изменяющейся массой и масштабным параметром гало, также дается суммарная производная. Видно, что производные, определяемые изменяющейся массой и изменяющимся масштабным параметром, имеют противоположные знаки. Как следует из графиков, максимальная компенсация воздействий происходит при малых значениях радиальных расстояний r . С увеличением расстояния

от центра Галактики относительное воздействие изменения массы возрастает по сравнению с воздействием изменения масштабного параметра, хотя абсолютные значения всех производных с увеличением r уменьшаются. Максимальные значения производных достигаются в интервале времени от -13 до -11 млрд лет. Аналогичные зависимости можно получить для балджа и диска.

Для демонстрации непосредственного влияния изменения масс и масштабных параметров компонент Галактики на орбитальное движение галактических объектов мы провели моделирование дви-

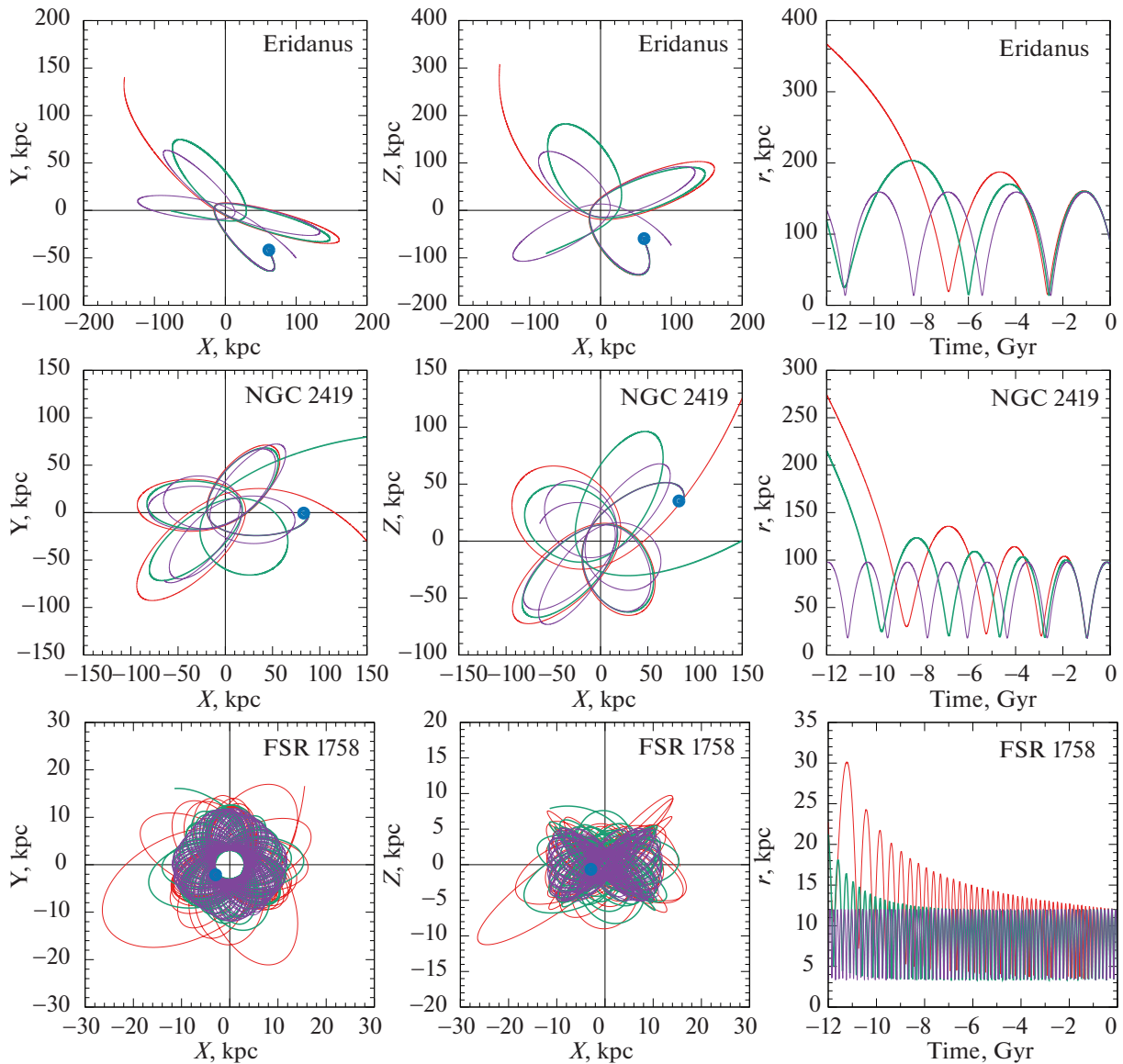


Рис. 6. Примеры орбит ШС, полученных в трех потенциалах: 1) в статическом потенциале, 2) в потенциале с изменяющимися массами компонент и 3) в потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент, изображенные фиолетовым, красным и зеленым цветами соответственно. Интегрирование орбит произведено на 12 млрд лет назад. Начало орбит обозначено синим кружочком.

жения пробной частицы в статическом и переменном потенциалах Галактики на интервале времени от 0 до -12 млрд лет. Результаты представлены на рис. 5. В качестве модельной орбиты в статическом потенциале была выбрана круговая орбиты частицы с радиусом 8.3 кпк, изображенная на рисунке черным цветом. Движение пробной частицы показано для трех видов эволюционирующего потенциала, когда 1) изменяются только массы компонент; 2) изменяются только масштабы компонент; 3) изменяются и массы, и масштабы компонент. Как видно из рисунков, изменение только масс компонент приводит к увеличению модуля радиус-вектора частицы при движении назад во времени.

Изменение только масштабов компонент, наоборот, ведет к его уменьшению. В потенциале с изменением и масс, и размеров компонент происходит сложение этих двух эффектов. На рисунке (самая правая панель) также показано изменение модуля радиус-вектора частицы в зависимости от времени для всех рассмотренных потенциалов.

Хотелось бы подчеркнуть важность проведенного исследования, поскольку иногда в литературе эволюция размеров компонент игнорируется, и рассматривается только эволюция массы (см., например, Армстронг и др., 2021), что может привести к переоценке изменения орбитальных параметров галактических объектов.

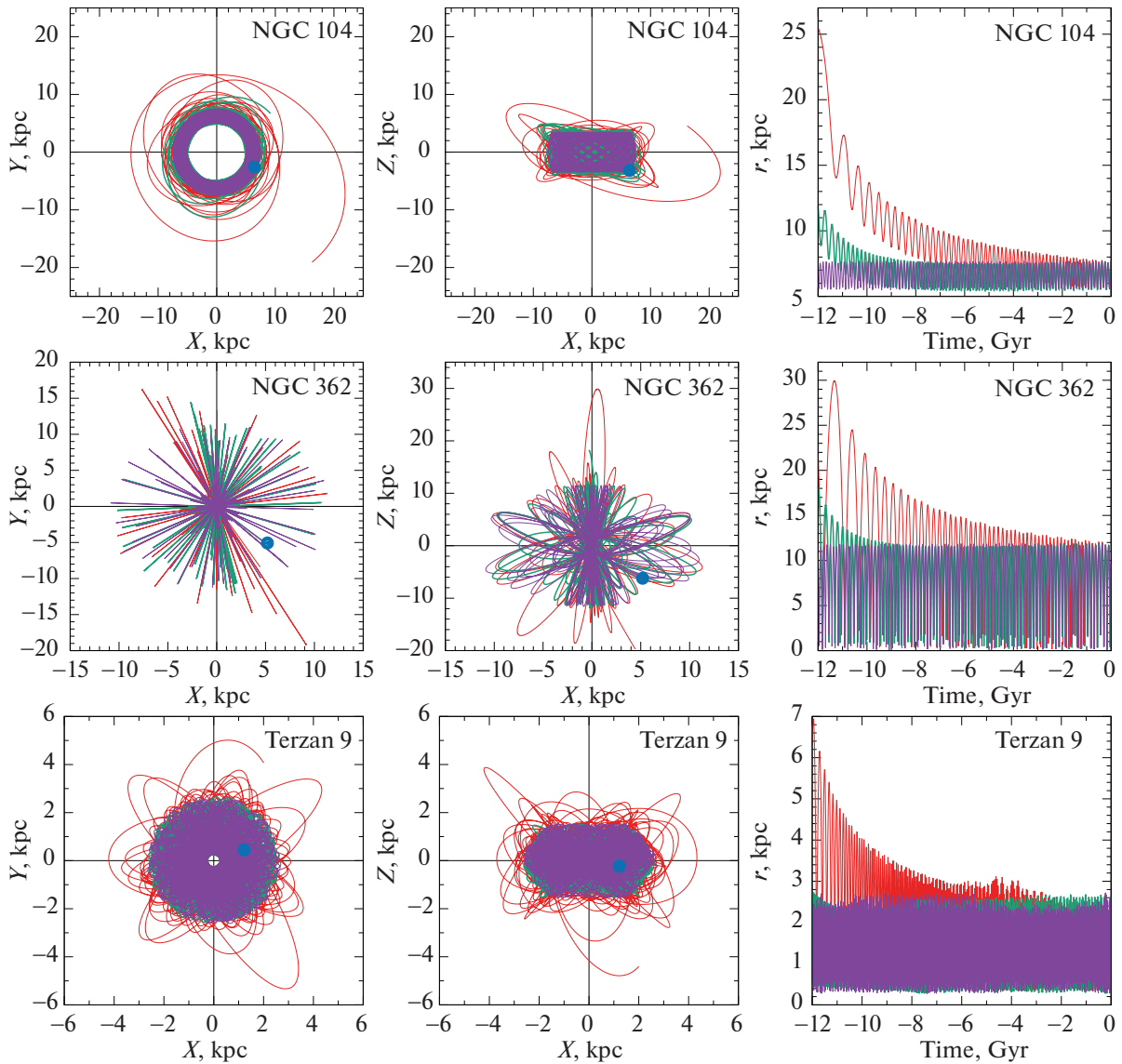


Рис. 6. Окончание.

4. СРАВНЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ В СТАТИЧЕСКОМ И ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩЕМ ПОТЕНЦИАЛАХ

4.1. Сравнение орбитальных свойств ШС в потенциале только с изменяющимися массами и потенциале с изменяющимися массами и размерами компонент

В этом разделе мы рассматриваем орбитальные свойства 152 галактических шаровых скоплений в построенном нами эволюционирующем потенциале в сравнении со статическим потенциалом.

В первую очередь мы провели сравнительный анализ орбитального движения ШС при интегрировании орбит назад во времени на 12 млрд лет с использованием трех потенциалов: 1) статического

потенциала, 2) эволюционирующего потенциала с изменяющимися массами компонент и 3) эволюционирующего потенциала с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент Галактики. Примеры орбит для шести шаровых скоплений (Eridanus, NGC 2419, FSR 1758, NGS 104, NGC 362, Terzan 9) с различными расстояниями от центра Галактики, принадлежащих различным подсистемам Млечного Пути (Массари и др., 2019; Байкова и др., 2020), приводятся на рис. 6. Здесь показаны орбиты в двух проекциях (X, Y) и (X, Z). Кроме того, на правой панели показано изменение длины радиус-вектора r орбиты от времени. Орбиты, относящиеся к различным потенциалам, изображены различным цветом (см. подрисуночную подпись).

Как следует из рис. 6, по сравнению с орбитами,

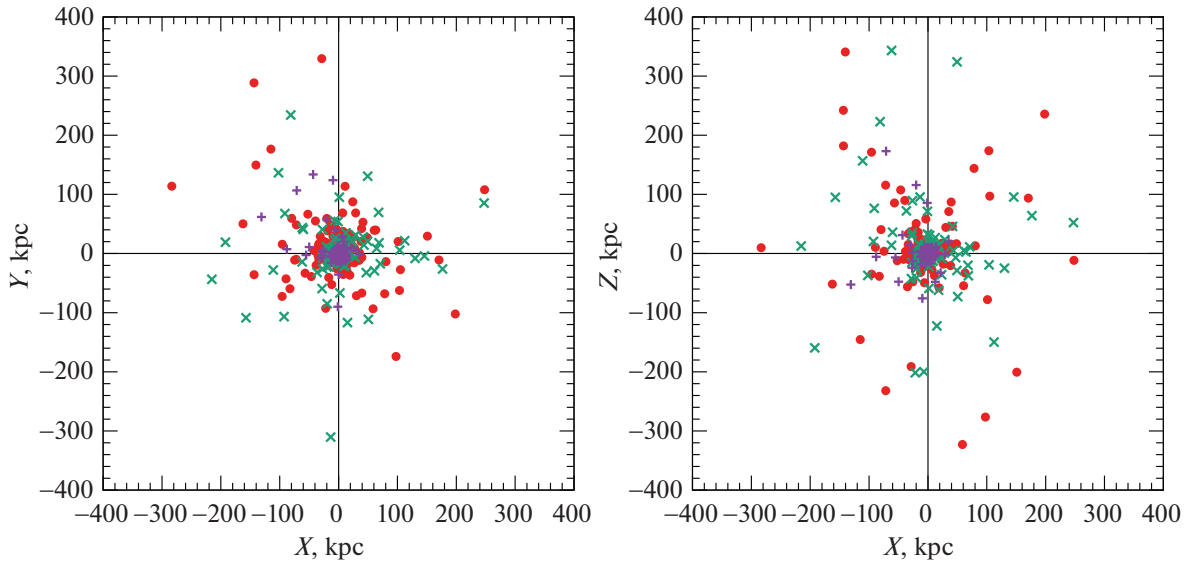


Рис. 7. Распределение ШС в плоскостях (X, Y) и (X, Z) 13 млрд лет назад в статическом потенциале (фиолетовые крестики), в потенциале только с изменяющимися массами компонент (красные кружочки) и в потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент (зеленые крестики).

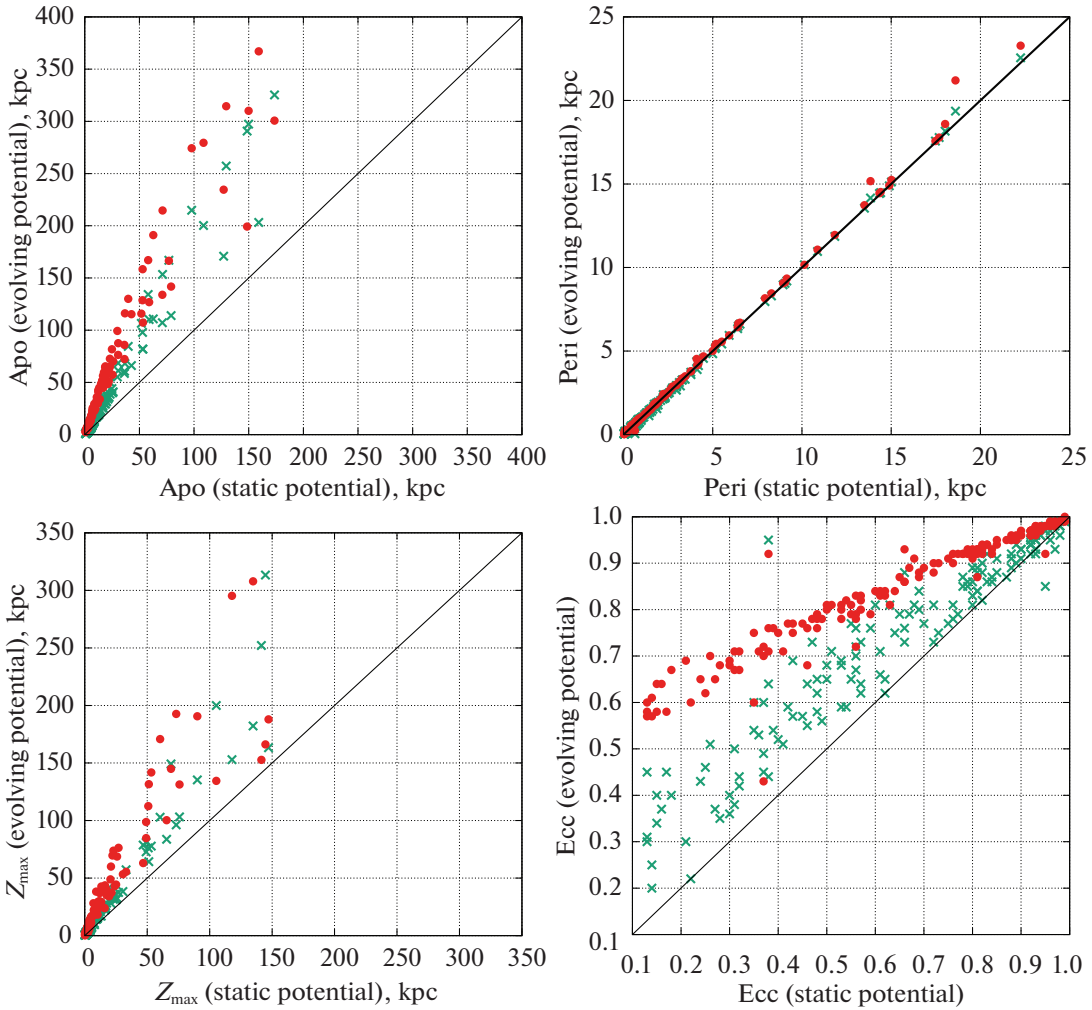


Рис. 8. Сравнение орбитальных параметров (apo , $peri$, Z_{max} , ecc), полученных в статическом потенциале, с параметрами, полученными в потенциале только с изменяющимися массами компонент (красные кружочки) и потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент (зеленые крестики). Интегрирование орбит произведено на 12 млрд лет назад. На каждой панели нанесена диагональная линия совпадения.

полученными в статическом потенциале, наибольшее изменение претерпели орбиты в потенциале только с эволюционирующими массами компонент. В потенциале с эволюционирующими и массами, и размерами компонент, изменение размеров существенно скомпенсировало эффект от изменения масс. Причем чем ближе объект к центру Галактики, тем сильнее оказалась компенсация. На примере самого близкого (из рассмотренных ШС) к центру Галактики ШС Terzan 9 можно видеть почти полное перекрытие орбит, полученных в статическом и эволюционирующем потенциале.

На рис. 7 показано распределение ШС в плоскостях (X, Y) и (X, Z) 13 млрд лет назад в статическом потенциале, в потенциале только с изменяющимися массами компонент и в потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент. Видно, что самой большой является область распределения ШС в потенциале с минимальными массами и максимальными неизменными размерами компонент. В потенциале с минимальными массами и минимальными размерами компонент распределение занимает меньшую область. Минимальный размер распределения наблюдается при статическом потенциале, когда массы компонент Галактики максимальны.

Сравнение таких орбитальных параметров, как апоцентрическое расстояние (apo), перицентрическое расстояние ($peri$), максимальное возвышение по Z (Z_{max}) и эксцентриситет (ecc), полученных в статическом потенциале, с параметрами, полученными в потенциале только с изменяющимися массами компонент и потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент, приведено на рис. 8. Из рисунков видно, что минимальному изменению подверглись перицентрические расстояния ШС. Остальные параметры изменились довольно существенно, особенно в случае потенциала только с изменяющимися массами компонент. В случае потенциала с изменяющимися и массами, и размерами компонент, изменение параметров произошло в меньшей степени, чего и следовало ожидать в соответствии с результатами исследования, проведенного в предыдущем разделе.

4.2. Сравнение орбитальных свойств ШС в потенциале с изменяющимися массами и размерами компонент за периоды времени $[0, -5]$ и $[0, -12]$ млрд лет

В этом разделе мы представляем результаты интегрирования орбит ШС в эволюционирующем потенциале с изменяющимися массами и размерами компонент на интервалах времени $[0, -5]$ и

$[0, -12]$ млрд лет. Параметры компонент потенциала на момент времени -5 и -12 млрд лет приведены в табл. 1. Соответствующие кривые вращения показаны на рис. 1.

Орбитальные параметры apo , $peri$, Z_{max} , ecc всех 152 ШС, полученные в статическом потенциале и в эволюционирующем потенциале на интервалах времени $[0, -5]$ и $[0, -12]$ млрд лет, приводятся в табл. 2. Сравнение орбитальных параметров, полученных в эволюционирующем потенциале, с параметрами, полученными в статическом потенциале, дано на рис. 9. Из этого рисунка следует, что расхождение между величинами параметров существенно на интервале времени $[0, -12]$ млрд лет, в то время как на интервале времени $[0, -5]$ млрд лет параметры орбит шаровых скоплений претерпевают в среднем незначительные изменения по сравнению с параметрами орбит в статическом потенциале, которые вполне укладываются в пределы статистических неопределенностей, вызванных ошибками в данных. Относительно последнего тезиса подобный вывод сделан и в работе Сандерса и др. (2020), где показано, что временная эволюция за последние 5 млрд лет вносит неопределенность в параметры орбиты спутников Млечного Пути, сравнимую с неопределенностью, вызванной ошибками наблюдений или неопределенностью гравитационного потенциала в настоящее время.

Как показано в работе Байковой, Бобылева (2020), среднее квадратическое отклонение неопределенности, вызванное ошибками в данных о собственных движениях, лучевых скоростях и расстояниях, которые доминируют, составляют 7.6% в относительных единицах (имеется в виду в единицах, вычисленных по отношению к эффективному диапазону изменения параметра) для эксцентриситета орбит и 3–4% для остальных параметров. Среднее квадратическое отклонение разностей в относительных единицах для эксцентриситета, Z_{max} , apo , $peri$ при интегрировании орбит в эволюционирующем и статическом потенциалах на интервале времени $[0, -5]$ млрд лет составляют 5.2, 1.2, 1.3, 1.9% соответственно, тогда как при интегрировании на интервале $[0, -12]$ млрд лет соответствующие отклонения составляют существенно большие величины (за исключением перицентрического расстояния), а именно, 13, 14.6, 16, 1.9%.

На рис. 10 в качестве иллюстрации показаны орбиты тех же шаровых скоплений, что и на рис. 6, полученные в статическом и эволюционирующем потенциалах на интервале времени $[0, -5]$ млрд лет.

Таким образом, на временах меньше 5 млрд лет потенциал Галактики можно считать постоянным, и для получения представления об орбитальном движении галактических шаровых скоплений на

Таблица 2. Орбитальные параметры ШС в статическом (верхний индекс “st”) и потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент (верхний индекс “–5” относится к периоду времени [0, –5] млрд лет, индекс “–12” относится к периоду времени [0, –12] млрд лет)

Имя	apo^{st} , КПК	$peri^{st}$, КПК	ecc^{st}	Z_{max}^{st} , КПК	apo^{-5} , КПК	$peri^{-5}$, КПК	ecc^{-5}	Z_{max}^{-5} , КПК	apo^{-12} , КПК	$peri^{-12}$, КПК	ecc^{-12}	Z_{max}^{-12} , КПК
NGC 104	7.7	5.51	0.16	3.5	7.7	5.42	0.17	3.5	11.9	5.42	0.37	5.1
NGC 288	12.4	1.43	0.79	10.2	12.4	1.46	0.79	10.3	18.9	1.46	0.86	16.3
NGC 362	11.9	0.08	0.99	11.6	11.9	0.10	0.98	11.5	18.2	0.10	0.99	18.2
Whiting 1	79.0	22.25	0.56	75.9	82.8	22.55	0.57	72.5	114.0	22.55	0.67	103.2
NGC 1261	21.3	0.84	0.92	16.9	21.4	0.93	0.92	17.2	33.9	0.93	0.95	25.8
Pal 1	19.4	14.89	0.13	4.8	20.0	14.89	0.15	5.0	39.3	14.89	0.45	8.6
E 1	129.4	5.19	0.92	117.8	140.1	5.23	0.93	119.6	257.2	5.23	0.96	152.9
Eridanus	159.2	13.84	0.84	134.8	170.3	14.16	0.85	135.8	203.2	14.16	0.87	182.1
Pal 2	39.8	1.35	0.93	9.1	40.9	1.31	0.94	8.5	84.5	1.31	0.97	16.3
NGC 1851	19.9	0.12	0.99	16.8	19.9	0.15	0.99	18.1	31.4	0.15	0.99	23.8
NGC 1904	19.9	0.24	0.98	14.7	19.9	0.26	0.97	14.2	31.6	0.26	0.98	25.9
NGC 2298	16.9	0.49	0.94	12.0	16.7	0.47	0.95	12.0	25.6	0.47	0.96	17.3
NGC 2419	97.8	18.02	0.69	73.2	103.3	18.16	0.70	67.0	214.8	18.16	0.84	96.2
Pyxis	173.6	18.60	0.81	144.6	188.1	19.36	0.81	141.1	325.2	19.36	0.89	313.4
NGC 2808	14.9	0.90	0.89	5.2	14.8	0.78	0.90	5.2	22.9	0.74	0.94	9.3
E 3	12.4	9.05	0.15	5.4	12.4	9.05	0.16	5.5	20.9	9.05	0.40	8.7
Pal 3	148.5	68.08	0.37	141.4	157.4	72.86	0.37	127.7	290.7	72.86	0.60	252.2
NGC 3201	24.9	8.29	0.50	10.3	25.6	8.30	0.51	10.8	44.1	8.30	0.68	15.2
Pal 4	108.7	4.10	0.93	105.3	113.6	4.37	0.93	98.3	200.2	4.37	0.96	199.9
Crater	149.9	71.69	0.35	147.1	165.7	74.72	0.38	163.3	297.3	74.72	0.60	163.3
NGC 4147	25.5	0.79	0.94	25.1	25.7	0.88	0.93	25.2	40.0	0.88	0.96	31.1
NGC 4372	7.3	2.96	0.42	2.1	7.3	2.88	0.43	2.1	11.2	2.85	0.59	3.6
Rup 106	36.8	4.48	0.78	22.9	37.9	4.56	0.79	23.2	68.1	4.56	0.87	31.6
NGC 4590	30.5	8.94	0.55	19.5	31.5	8.96	0.56	20.1	68.4	8.96	0.77	42.0
NGC 4833	8.0	0.63	0.85	3.7	8.0	0.60	0.86	3.6	10.9	0.52	0.91	5.6
NGC 5024	23.0	9.15	0.43	22.2	23.5	9.19	0.44	22.4	50.3	9.19	0.69	33.0
NGC 5053	18.1	10.87	0.25	17.5	18.4	10.96	0.25	17.5	29.8	10.96	0.46	28.3
NGC 5139	7.1	1.28	0.70	3.0	7.1	1.28	0.69	3.0	10.0	1.28	0.77	5.4
NGC 5272	15.9	5.14	0.51	13.3	15.9	5.15	0.51	13.5	30.5	5.15	0.71	23.5
NGC 5286	13.0	0.54	0.92	7.5	13.0	0.56	0.92	8.9	19.2	0.56	0.94	16.4

Таблица 2. Продолжение

Имя	apo^{st} , КПК	$peri^{st}$, КПК	ecc^{st}	Z_{max}^{st} , КПК	apo^{-5} , КПК	$peri^{-5}$, КПК	ecc^{-5}	Z_{max}^{-5} , КПК	apo^{-12} , КПК	$peri^{-12}$, КПК	ecc^{-12}	Z_{max}^{-12} , КПК
NGC 5466	52.9	5.92	0.80	49.2	54.9	5.94	0.80	49.9	97.8	5.94	0.89	72.8
NGC 5634	22.3	2.29	0.81	20.6	22.4	2.36	0.81	21.2	35.6	2.36	0.88	32.5
NGC 5694	71.0	2.75	0.93	49.1	74.7	2.80	0.93	52.0	107.1	2.80	0.95	80.9
IC 4499	29.9	6.43	0.65	27.1	30.6	6.49	0.65	27.6	55.2	6.49	0.79	37.5
NGC 5824	36.4	13.50	0.46	30.6	38.0	13.55	0.47	31.1	60.7	13.55	0.64	38.3
Pal 5	17.6	7.93	0.38	16.2	17.7	7.96	0.38	16.2	36.4	7.96	0.64	22.3
NGC 5897	8.8	1.94	0.64	7.6	8.8	1.95	0.64	7.6	13.7	1.95	0.75	10.9
NGC 5904	23.3	2.23	0.82	21.0	23.4	2.39	0.81	21.8	38.7	2.39	0.88	28.1
NGC 5927	5.5	4.13	0.15	0.8	5.5	3.94	0.17	0.8	7.9	3.89	0.34	1.6
NGC 5946	5.8	0.06	0.98	4.3	5.7	0.06	0.98	4.3	7.2	0.06	0.98	4.3
ESO 224-8	16.8	11.84	0.17	1.9	17.3	11.86	0.19	2.0	30.9	11.86	0.45	4.0
NGC 5986	5.6	0.20	0.93	3.9	5.1	0.25	0.91	3.8	6.3	0.25	0.92	4.8
FSR 1716	5.2	2.20	0.41	1.6	5.0	2.18	0.39	1.6	6.6	2.13	0.51	2.3
Pal 14	127.1	1.49	0.98	90.1	133.9	1.49	0.98	83.7	170.9	1.49	0.98	135.3
BH 184	4.7	1.65	0.48	1.5	4.7	1.53	0.50	1.5	5.7	1.52	0.58	2.2
NGC 6093	4.2	0.45	0.80	3.9	4.2	0.45	0.81	3.9	5.0	0.45	0.83	4.7
NGC 6121	6.8	0.61	0.84	3.1	6.8	0.62	0.83	2.9	8.6	0.62	0.86	4.4
NGC 6101	36.3	10.14	0.56	21.4	37.8	10.16	0.58	21.5	58.6	10.16	0.70	34.2
NGC 6144	3.4	1.56	0.37	3.2	3.4	1.55	0.37	3.2	4.1	1.55	0.45	3.9
NGC 6139	3.6	0.97	0.57	2.7	3.6	0.97	0.57	2.7	4.2	0.97	0.62	3.0
Terzan 3	3.1	2.33	0.14	1.7	3.1	2.24	0.16	1.7	3.6	2.19	0.25	2.2
NGC 6171	4.0	1.07	0.57	2.5	3.9	1.07	0.57	2.4	4.8	1.07	0.64	3.1
ESO 452-11	3.0	0.06	0.96	2.2	2.9	0.06	0.96	2.1	3.0	0.05	0.97	2.4
NGC 6205	8.8	0.97	0.80	7.8	8.8	0.97	0.80	7.8	12.7	0.97	0.86	9.6
NGC 6229	30.6	0.57	0.96	23.9	31.1	0.60	0.96	24.5	61.3	0.60	0.98	35.9
NGC 6218	4.9	2.08	0.40	2.8	4.9	2.05	0.41	2.8	6.4	2.04	0.52	4.1
FSR 1735	4.2	0.21	0.90	2.9	4.2	0.20	0.91	2.6	4.4	0.20	0.91	3.6
NGC 6235	7.2	3.13	0.39	4.9	7.1	3.12	0.39	4.9	10.5	3.12	0.54	6.8
NGC 6254	4.8	1.78	0.46	2.8	4.8	1.76	0.46	2.8	6.1	1.76	0.55	4.1
NGC 6256	2.4	1.53	0.22	0.7	2.4	1.52	0.22	0.7	2.4	1.52	0.22	0.9
Pal 15	52.9	1.30	0.95	51.3	55.1	1.31	0.95	51.5	82.0	1.31	0.97	64.3
NGC 6266	2.7	0.84	0.53	1.0	2.7	0.83	0.53	1.0	2.9	0.74	0.59	1.0

Таблица 2. Продолжение

Имя	apo^{st} , КПК	$peri^{st}$, КПК	ecc^{st}	Z_{max}^{st} , КПК	apo^{-5} , КПК	$peri^{-5}$, КПК	ecc^{-5}	Z_{max}^{-5} , КПК	apo^{-12} , КПК	$peri^{-12}$, КПК	ecc^{-12}	Z_{max}^{-12} , КПК
NGC 6273	3.5	0.85	0.61	3.4	3.5	0.85	0.61	3.4	4.2	0.85	0.66	3.9
NGC 6284	6.4	0.51	0.85	5.7	6.4	0.54	0.85	5.6	8.6	0.54	0.88	7.1
NGC 6287	4.4	0.48	0.81	4.2	4.4	0.48	0.80	4.2	5.4	0.48	0.84	4.9
NGC 6293	3.2	0.13	0.92	2.3	3.2	0.11	0.94	2.3	3.5	0.11	0.94	2.3
NGC 6304	3.0	1.58	0.32	0.9	3.0	1.49	0.34	0.9	3.4	1.39	0.42	1.2
NGC 6316	3.9	0.72	0.69	1.6	3.9	0.66	0.71	1.6	4.7	0.51	0.80	1.6
NGC 6341	10.8	0.43	0.92	9.9	10.8	0.53	0.91	9.9	16.8	0.53	0.94	14.5
NGC 6325	1.4	1.04	0.14	1.1	1.4	1.02	0.15	1.2	1.5	1.02	0.20	1.3
NGC 6333	6.4	0.88	0.76	4.4	6.4	0.89	0.76	4.4	8.6	0.89	0.81	7.1
NGC 6342	1.8	0.63	0.47	1.5	1.8	0.58	0.51	1.5	2.2	0.35	0.73	1.9
NGC 6356	8.5	2.96	0.48	4.7	8.5	2.94	0.49	4.8	12.5	2.94	0.62	7.1
NGC 6355	1.4	0.64	0.38	1.4	2.2	0.09	0.93	1.6	2.2	0.05	0.95	2.0
NGC 6352	4.2	3.19	0.13	0.7	4.2	3.00	0.16	0.7	5.6	2.91	0.31	1.3
IC 1257	20.1	0.69	0.93	7.2	20.0	0.74	0.93	7.1	36.4	0.74	0.96	15.9
Terzan 2	1.0	0.13	0.76	0.4	1.0	0.12	0.78	0.7	1.0	0.12	0.78	0.8
NGC 6366	5.9	2.24	0.45	2.0	5.9	2.18	0.46	2.0	8.0	2.15	0.57	3.3
Terzan 4	0.9	0.18	0.68	0.7	1.0	0.12	0.79	0.7	1.1	0.12	0.81	0.8
BH 229	2.7	0.04	0.97	2.1	2.8	0.03	0.98	2.1	2.8	0.02	0.99	2.7
FSR 1758	12.0	3.31	0.57	5.2	12.0	3.28	0.57	5.4	21.3	3.28	0.73	8.3
NGC 6362	5.4	2.48	0.37	3.3	5.3	2.44	0.37	3.3	7.2	2.44	0.49	4.3
Liller 1	0.8	0.12	0.75	0.2	0.8	0.12	0.75	0.5	0.9	0.12	0.77	0.6
NGC 6380	2.4	0.10	0.92	1.7	2.4	0.10	0.92	1.7	2.5	0.10	0.92	1.7
Terzan 1	2.8	0.67	0.62	0.1	2.8	0.67	0.62	0.1	3.1	0.65	0.65	0.3
Pismis 26	3.3	1.76	0.30	1.6	3.3	1.71	0.31	1.6	3.9	1.68	0.40	2.3
NGC 6388	4.2	1.00	0.61	1.6	4.2	0.95	0.63	1.6	4.9	0.85	0.71	1.9
NGC 6402	4.7	0.27	0.89	2.8	4.6	0.27	0.89	2.6	5.4	0.27	0.90	3.0
NGC 6401	2.0	0.04	0.96	1.5	2.0	0.05	0.95	1.5	2.0	0.05	0.95	1.7
NGC 6397	6.5	2.57	0.43	3.3	6.5	2.53	0.44	3.3	9.2	2.51	0.57	4.6
Pal 6	2.9	0.04	0.97	2.2	2.9	0.03	0.98	2.2	2.9	0.03	0.98	2.7
NGC 6426	16.7	3.28	0.67	7.0	16.7	3.26	0.67	7.5	27.6	3.26	0.79	13.8
Djorg 1	8.6	1.06	0.78	1.0	8.6	1.03	0.78	1.0	12.1	1.01	0.85	3.0
Terzan 5	1.9	0.22	0.80	1.1	2.0	0.22	0.80	1.0	2.1	0.22	0.81	1.0

Таблица 2. Продолжение

Имя	apo^{st} , КПК	$peri^{st}$, КПК	ecc^{st}	Z_{max}^{st} , КПК	apo^{-5} , КПК	$peri^{-5}$, КПК	ecc^{-5}	Z_{max}^{-5} , КПК	apo^{-12} , КПК	$peri^{-12}$, КПК	ecc^{-12}	Z_{max}^{-12} , КПК
NGC 6440	1.5	0.05	0.93	1.2	1.5	0.05	0.94	1.2	1.6	0.04	0.95	1.3
NGC 6441	4.7	1.43	0.53	1.4	4.7	1.29	0.57	1.4	6.0	1.13	0.68	1.6
Terzan 6	1.3	0.17	0.77	0.5	1.4	0.16	0.79	0.7	1.4	0.16	0.79	0.7
NGC 6453	3.0	0.08	0.95	2.2	2.6	0.21	0.85	2.2	2.6	0.21	0.85	2.2
NGC 6496	4.6	2.35	0.32	2.4	4.6	2.28	0.33	2.4	5.9	2.27	0.44	3.3
Terzan 9	2.7	0.27	0.82	1.6	2.7	0.27	0.82	1.4	2.7	0.27	0.82	1.5
Djorg 2	0.8	0.50	0.21	0.4	0.8	0.50	0.23	0.4	0.9	0.50	0.30	0.5
NGC 6517	3.7	0.23	0.88	2.4	3.7	0.23	0.88	2.2	4.0	0.22	0.89	2.3
Terzan 10	5.3	0.57	0.81	3.7	5.3	0.58	0.80	3.9	6.7	0.58	0.84	5.4
NGC 6522	1.4	0.42	0.54	1.1	1.4	0.41	0.55	1.1	1.6	0.41	0.59	1.3
NGC 6535	4.8	0.80	0.72	2.0	4.8	0.70	0.75	2.0	5.8	0.61	0.81	2.3
NGC 6528	1.1	0.23	0.66	0.9	1.4	0.10	0.87	0.9	1.5	0.10	0.88	0.9
NGC 6539	3.5	1.85	0.31	2.5	3.5	1.90	0.29	2.6	4.2	1.90	0.38	3.0
NGC 6540	2.6	1.14	0.38	0.5	2.5	1.11	0.39	0.5	2.7	1.05	0.44	0.8
NGC 6544	6.0	0.43	0.87	3.1	5.7	0.48	0.85	3.1	6.9	0.48	0.87	4.6
NGC 6541	3.8	1.29	0.49	2.4	3.7	1.29	0.49	2.4	4.6	1.29	0.56	3.0
ESO 280-06	13.7	0.72	0.90	10.6	13.7	0.75	0.90	10.8	22.1	0.75	0.93	17.2
NGC 6553	3.9	2.96	0.13	0.3	3.9	2.76	0.17	0.3	4.9	2.66	0.30	0.5
NGC 6558	1.7	0.26	0.72	1.3	1.7	0.27	0.72	1.3	1.7	0.27	0.73	1.6
Pal 7	7.2	3.78	0.31	0.7	7.2	3.62	0.33	0.8	10.7	3.59	0.50	1.7
Terzan 12	4.0	1.87	0.36	1.2	4.0	1.73	0.40	1.1	5.0	1.55	0.53	1.4
NGC 6569	2.6	1.46	0.28	1.3	2.6	1.44	0.29	1.3	2.9	1.41	0.35	1.6
ESO 456-78	3.2	1.81	0.27	1.3	3.2	1.77	0.28	1.3	3.8	1.71	0.37	1.8
NGC 6584	18.6	1.79	0.82	13.2	18.6	1.84	0.82	13.9	34.2	1.84	0.90	25.6
NGC 6624	1.7	0.07	0.92	1.3	1.8	0.06	0.94	1.3	1.9	0.06	0.94	1.3
NGC 6626	3.2	0.49	0.73	1.9	3.2	0.50	0.73	1.9	3.5	0.50	0.75	2.3
NGC 6638	2.7	0.04	0.97	2.0	2.5	0.09	0.93	2.0	2.5	0.09	0.93	2.1
NGC 6637	2.4	0.09	0.93	1.7	2.4	0.09	0.93	1.7	2.4	0.09	0.93	1.8
NGC 6642	2.2	0.08	0.93	1.6	2.3	0.08	0.93	1.6	2.3	0.08	0.93	1.9
NGC 6652	3.6	0.03	0.98	2.8	3.5	0.08	0.96	2.7	3.5	0.08	0.96	3.3
NGC 6656	9.8	2.98	0.53	3.7	9.8	2.92	0.54	3.9	16.1	2.92	0.69	6.3
Pal 8	4.2	0.87	0.66	1.7	4.2	0.82	0.67	1.7	5.0	0.69	0.76	1.7

Таблица 2. Окончание

Имя	apo^{st} , КПК	$peri^{st}$, КПК	ecc^{st}	Z_{max}^{st} , КПК	apo^{-5} , КПК	$peri^{-5}$, КПК	ecc^{-5}	Z_{max}^{-5} , КПК	apo^{-12} , КПК	$peri^{-12}$, КПК	ecc^{-12}	Z_{max}^{-12} , КПК
NGC 6681	5.0	0.48	0.83	4.8	5.0	0.49	0.82	4.8	6.4	0.49	0.86	5.7
NGC 6712	5.6	0.05	0.98	4.4	5.6	0.04	0.99	4.4	5.9	0.04	0.99	5.7
NGC 6715	51.8	14.41	0.56	46.8	54.9	14.48	0.58	46.9	106.6	14.48	0.76	78.7
NGC 6717	2.7	0.64	0.62	1.4	2.7	0.66	0.60	1.4	2.9	0.66	0.62	1.8
NGC 6723	3.1	1.68	0.30	3.1	3.1	1.68	0.30	3.0	3.6	1.68	0.36	3.5
NGC 6749	5.0	1.47	0.55	0.3	5.0	1.40	0.56	0.3	6.3	1.32	0.65	0.7
NGC 6752	5.6	3.46	0.24	2.1	5.6	3.33	0.26	2.1	8.3	3.31	0.43	3.5
NGC 6760	5.9	1.94	0.50	0.6	5.9	1.84	0.52	0.7	8.2	1.77	0.65	1.6
NGC 6779	13.2	0.71	0.90	9.3	13.2	0.74	0.89	9.4	21.4	0.74	0.93	14.1
Terzan 7	58.0	14.34	0.60	53.2	61.2	14.43	0.62	53.4	134.3	14.43	0.81	77.8
Pal 10	11.0	6.40	0.26	0.9	11.0	6.34	0.27	1.0	19.5	6.34	0.51	2.2
Arp 2	62.7	17.69	0.56	60.3	65.8	17.78	0.57	53.9	110.8	17.78	0.72	102.9
NGC 6809	5.8	1.18	0.66	4.7	5.8	1.20	0.66	4.7	7.8	1.20	0.73	6.3
Terzan 8	76.9	17.48	0.63	69.0	83.1	17.57	0.65	66.2	167.0	17.57	0.81	149.2
Pal 11	8.7	4.20	0.35	3.8	8.7	4.13	0.35	4.0	13.9	4.13	0.54	7.2
NGC 6838	7.3	5.00	0.18	0.7	7.3	4.85	0.20	0.7	11.2	4.84	0.40	1.6
NGC 6864	16.0	0.39	0.95	12.5	16.0	0.44	0.95	12.9	25.6	0.44	0.97	20.8
NGC 6934	42.7	2.69	0.88	16.2	44.3	2.69	0.89	18.1	66.1	2.69	0.92	26.8
NGC 6981	22.0	0.10	0.99	16.0	21.8	0.31	0.97	15.5	36.1	0.15	0.99	26.7
NGC 7006	53.3	2.21	0.92	33.1	55.4	2.22	0.92	36.9	81.9	2.22	0.95	57.2
NGC 7078	10.8	3.77	0.48	5.1	10.8	3.73	0.49	5.3	17.7	3.73	0.65	9.1
NGC 7089	19.0	0.51	0.95	13.3	18.9	0.46	0.95	13.0	29.1	0.32	0.98	17.0
NGC 7099	8.5	1.00	0.79	7.2	8.5	1.00	0.79	7.2	12.4	1.00	0.85	10.0
Pal 12	59.0	15.01	0.59	50.9	62.4	15.12	0.61	51.2	110.2	15.12	0.76	76.2
Pal 13	71.2	6.53	0.83	65.5	74.8	6.61	0.84	65.6	153.4	6.61	0.92	83.7
NGC 7492	26.1	1.72	0.88	25.9	26.4	1.82	0.87	25.7	41.0	1.82	0.91	32.6

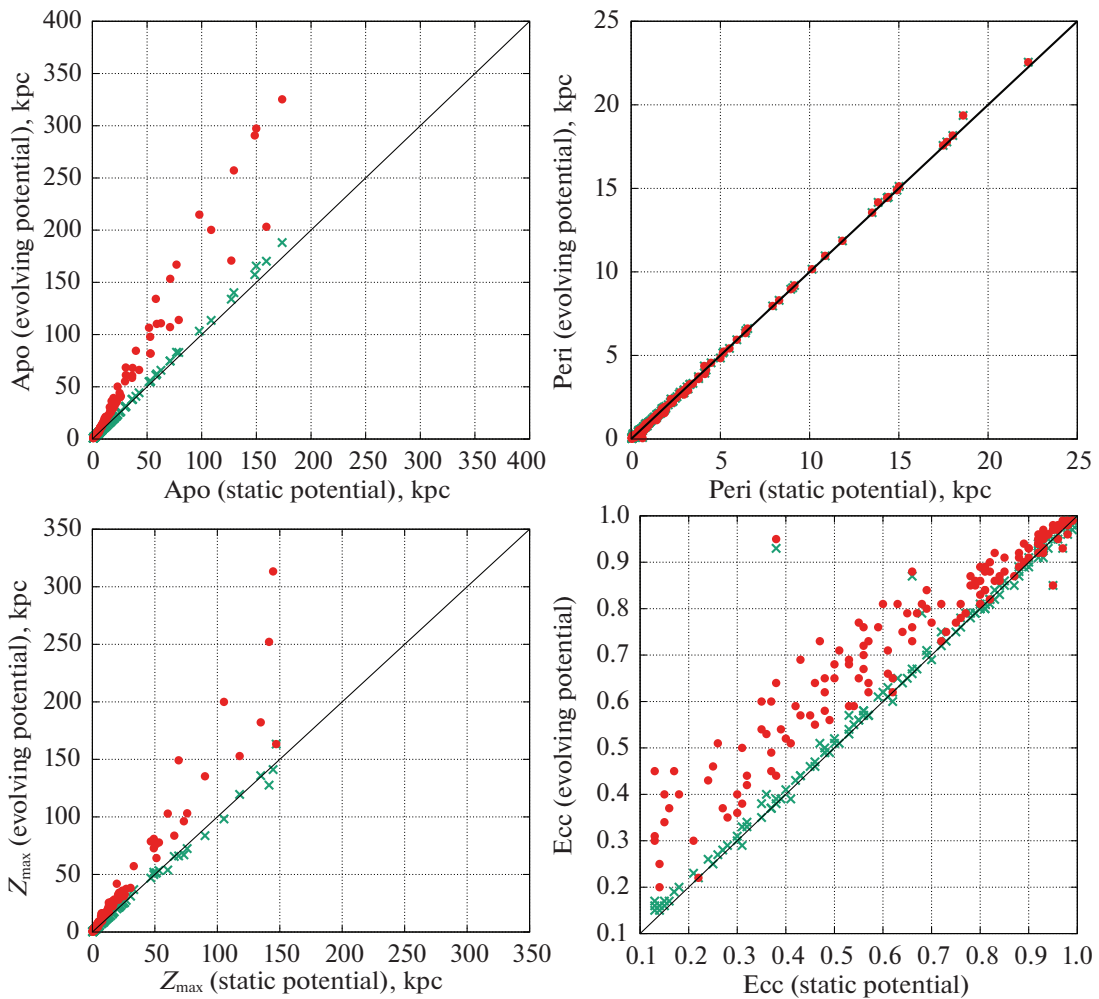


Рис. 9. Сравнение орбитальных параметров (apo , $peri$, Z_{max} , ecc), полученных в статическом потенциале, с параметрами, полученными в потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися масштабами компонент за период времени $[0, -5]$ млрд лет (зеленые крестики) и период времени $[0, -12]$ млрд лет (красные кружочки). На каждой панели нанесена диагональная линия совпадения. Среднеквадратические отклонения разностей в относительных единицах для apo , $peri$, Z_{max} , ecc на интервале времени $[0, -5]$ млрд лет равны 1.3, 1.9, 1.2, 5.2% соответственно, а на интервале времени $[0, -12]$ млрд лет — 16, 1.9, 14.6, 13%.

этих временах можно использовать, в частности, каталог Байковой, Бобылева (2020).

Мы также вычислили время падения на Галактику для каждого шарового скопления по смене знака полной энергии с положительного на отрицательный, что эквивалентно обнаружению самого раннего момента, когда ШС пересекает вириальный радиус своего родительского гало темной материи. В табл. 3 приведены моменты падения ШС на Галактику после -13 млрд лет. В таблице приводится также классификация ШС по подсистемам Галактики (ПГ) (Массари, 2019; Байкова, Бобылев, 2020) (приняты обозначения: D — диск, GE — галактика Sausage, или, Gaia-Enceladus, H99 — поток Хелми, Seq — галактика Sequoia, Sgr — карликовая галактика Sagittarius, HE (unassociated high energy group) — несвя-

занная высокоэнергетическая группа). Как следует из таблицы, в список ШС, упавших на Галактику позже -13 млрд лет, попало 20 объектов GE из 38, входящих во всю выборку, семь Sgr (из семи), семь H99 (из восьми), шесть HE (из шести), пять D (из 35), четыре Seq (из девяти).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До сих пор многие авторы используют неизменный, статический потенциал для изучения орбитального движения галактических объектов, несмотря на то, что за последние годы появились ряд работ (см., например, Армстронг и др., 2021; Хаги и др., 2015, и ссылки в этих работах) по построению эволюционирующего потенциала на

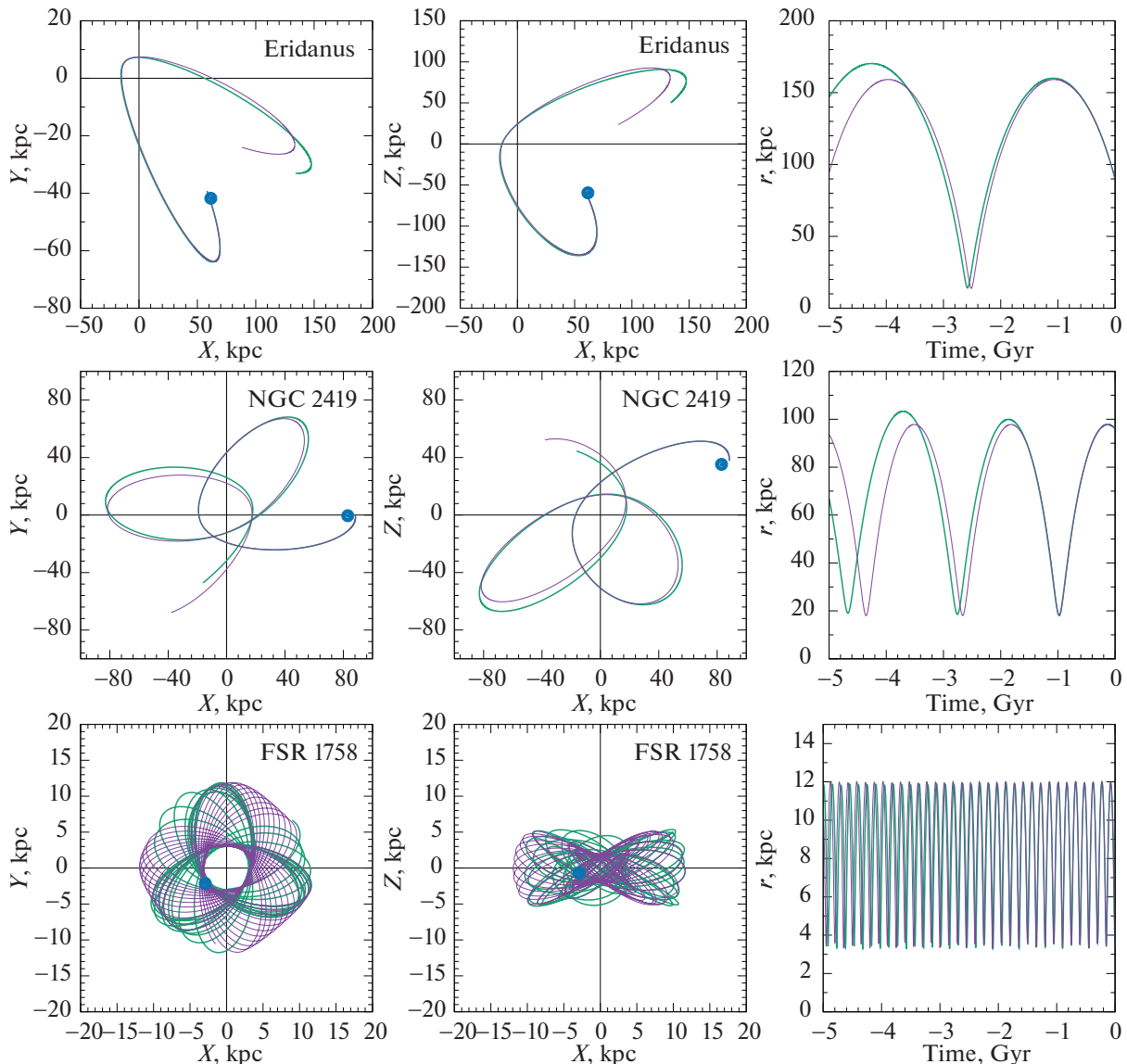


Рис. 10. Примеры орбит ШС, полученных в статическом потенциале и в потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент, изображенные фиолетовым и зеленым цветами соответственно. Интегрирование орбит произведено на 5 млрд лет назад. Начало орбит обозначено синим кружочком.

основе моделей, описывающих потенциал Галактики на настоящий момент времени, и космологических моделей Вселенной. Мы в данной работе для изучения орбитального движения шаровых скоплений конструируем эволюционирующий потенциал Галактики по алгоритму, основанному на полуаналитической космологической модели и подробно разработанному в статьях Гомеза и др. (2010), Хаги и др. (2015). В качестве модели статического потенциала и потенциала на настоящий момент времени мы рассматриваем осесимметричный трехкомпонентный потенциал с балджем и диском в форме Миamoto–Нагаи (1975) и со сферическим гало Наварро–Френка–Уайта (1997), модифицированный в работе Байковой,

Бобылева (2016) с использованием кривой вращения Бхатачарджи (2014) с галактоцентрическими расстояниями объектов до 200 кпк.

В построенном эволюционирующем потенциале во времени изменяются как массы, так и масштабные параметры, определяющие размеры компонент. Мы впервые изучили отдельно влияние изменения масс и изменения размеров компонент Галактики. Мы показали, что изменения масс и размеров компонент действуют на орбитальные параметры противоположным образом. На малых галактоцентрических расстояниях это влияние максимально компенсируется. Наибольшее влияние претерпевают орбиты далеких объектов и объектов с большим апоцентрическим расстоянием. На

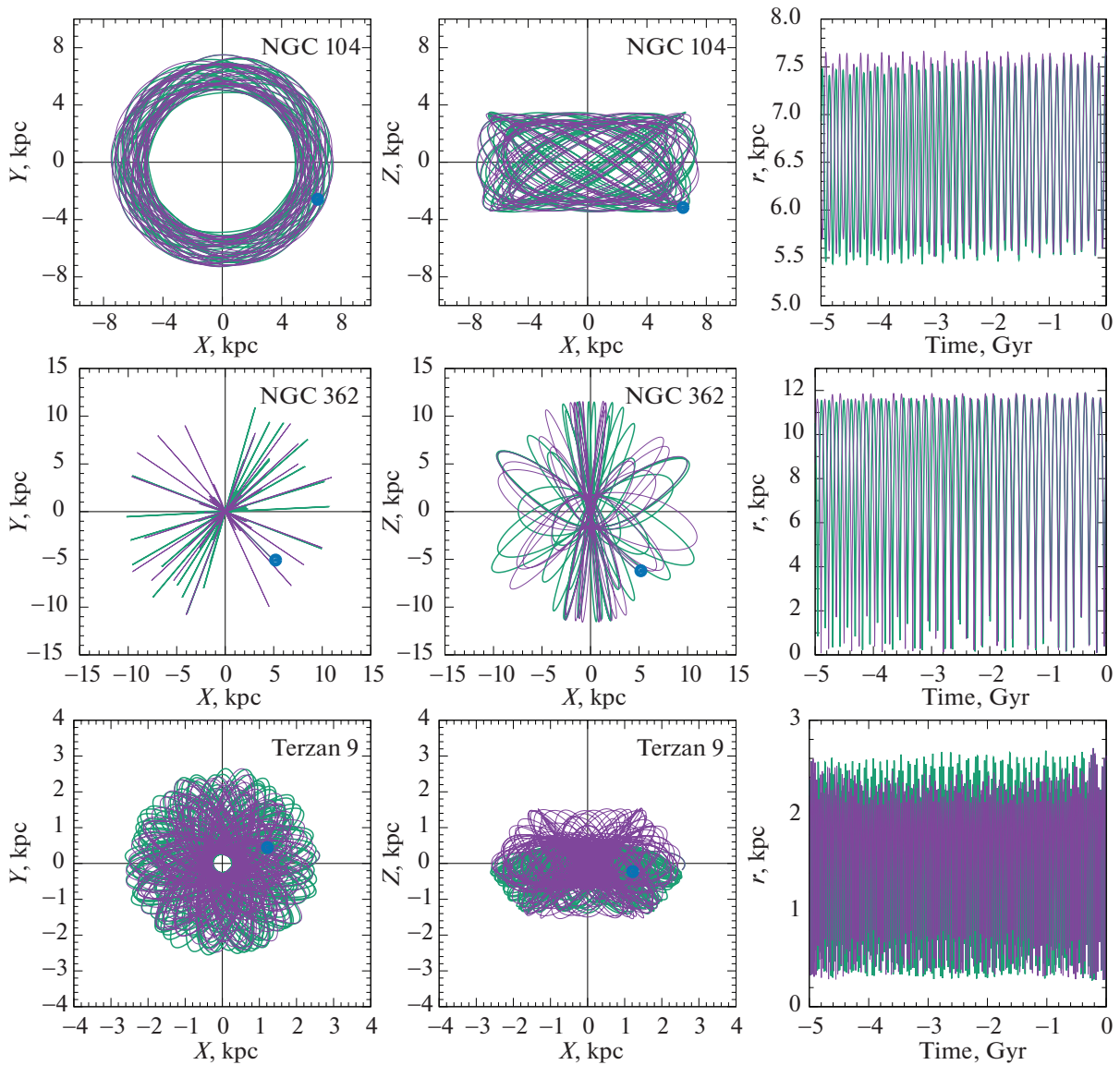


Рис. 10. Окончание.

примере шести реальных шаровых скоплений с различными расстояниями от центра Галактики мы показали эффект от изменения масс и масштабных параметров компонент потенциала. Важность проведенного исследования заключается в том, что иногда в литературе эволюция размеров компонент игнорируется, и рассматривается только эволюция масс, что может привести к переоценке изменения орбитальной истории галактических объектов.

В качестве исходных астрометрических данных для изучения орбитальных движений 152 шаровых скоплений из списка Васильева (2019) мы использовали самые последние на сегодняшний день высокоточные результаты наблюдений со спутника Gaia. В основном это собственные движения, вычисленные с использованием каталога EDR3 Васильевым, Баумгардтом (2021). Кроме того, мы

использовали новые средние высокоточные гелиоцентрические расстояния из работы Баумгардта, Васильева (2021).

Мы произвели численное интегрирование орбит на 5 и 12 млрд лет назад. Приводится таблица с орбитальными параметрами в статическом и в эволюционирующем потенциалах. Сравнение орбитальных параметров шаровых скоплений, полученных в статическом и эволюционирующем потенциалах, показало, что расхождение между величинами параметров существенно на интервале времени $[0, -12]$ млрд лет, в то время как на интервале времени $[0, -5]$ млрд лет параметры орбит шаровых скоплений претерпевают в среднем незначительные изменения по сравнению с параметрами орбит, полученными в статическом потенциале, которые вполне укладываются в пределы статистических

Таблица 3. Время падения шаровых скоплений на Галактику в эволюционирующем потенциале с изменяющимися массами и изменяющимися размерами компонент

Имя	ПГ	T_{infall} , млрд лет	Имя	ПГ	T_{infall} , млрд лет	Имя	ПГ	T_{infall} , млрд лет
NGC 288	GE	-12.818	NGC 5053	H99	-12.909	FSR 1758	Seq	-12.941
NGC 362	GE	-12.989	NGC 5272	H99	-12.855	Djorg 1	GE	-12.993
Whiting 1	Sgr	-11.777	NGC 5286	GE	-12.872	NGC 6584	GE	-12.820
Pal 1	D	-12.712	NGC 5466	GE	-12.329	NGC 6656	D	-12.983
E 1	HE	-12.043	NGC 5694	HE	-12.036	NGC 6715	Sgr	-12.905
Eridanus	HE	-11.310	IC 4499	Seq	-12.612	Terzan 7	Sgr	-12.739
NGC 2419	Sgr	-12.404	NGC 5824	H99	-12.359	Arp 2	Sgr	-12.027
Pyxis	HE	-12.807	Pal 5	H99	-12.852	Terzan 8	Sgr	-12.878
NGC 2808	GE	-12.837	NGC 5897	GE	-12.932	Pal 11	D	-12.931
E 3	D	-12.932	NGC 5904	GE	-12.711	NGC 6934	GE	-12.289
Pal 3	HE	-11.682	ESO 224-8	D	-12.715	NGC 6981	GE	-12.850
NGC 3201	Seq	-12.515	Pal 14	GE	-11.584	NGC 7006	GE	-12.225
Crater	HE	-12.180	NGC 6101	Seq	-12.623	Pal 12	Sgr	-12.129
NGC 4147	GE	-12.950	NGC 6205	GE	-12.993	Pal 13	GE	-12.471
Rup 106	H99	-12.706	Pal 15	GE	-12.100	NGC 7492	GE	-12.901
NGC 4590	H99	-12.996	NGC 6341	GE	-12.873	—	—	—
NGC 5024	H99	-12.987	IC 1257	GE	-12.635	—	—	—

неопределенностей, вызванных ошибками в данных, т.е. на временных масштабах от настоящего момента до -5 млрд лет потенциал Галактики можно считать постоянным.

Авторы выражают искреннюю благодарность анонимным рецензентам за очень интересные и полезные замечания, позволившие улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аганим и др. (Planck Collaboration: N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **641**, id. A6, 67 (2020).
- Аллен, Сантильян (C. Allen and A. Santillan), *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* **22**, 255 (1991).
- Армстронг и др. (B.M. Armstrong, K. Bekki, and A.D. Ludlow), *MNRAS* **500**, 2937 (2021).
- Арнольд и др. (J.A. Arnold, A.J. Romanowsky, J.P. Brodie, L. Chomiuk, L.R. Spitler, J. Strader, A.J. Benson, and D.A. Forbes), *Astrophys. J. Lett.* **736**, L26 (2011).
- Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **42**, 625 (2016) [A.T. Bajkova and V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **42**, 567 (2016)].
- Байкова, Бобылев (A.T. Bajkova and V.V. Bobylev), *astro-ph/2008.13624* (2020).
- Байкова А.Т., Бобылев В.В., *Астрон. журн.* **98**, 9 (2021) [A.T. Bajkova and V.V. Bobylev, *Astron. Rep.* **98**, Iss. 9 (2021)].
- Байкова и др. (A.T. Bajkova, G. Carraro, V.I. Korchagin, N.O. Budanova, and V.V. Bobylev), *Astrophys. J.* **895**, 69 (2020).
- Батталия и др. (G. Battaglia, S. Taibi, G.F. Thomas, and T.K. Fritz), *astro-ph/2106.08819* (2021).
- Баумгардт, Васильев (H. Baumgardt and E. Vasiliev), *astro-ph/2105.09526* (2021).
- Бекки и др. (K. Bekki, M.A. Beasley, J.P. Brodie, and D.A. Forbes), *MNRAS* **363**, 1211 (2005).
- Беллаццини (M. Bellazzini), *MNRAS* **347**, 119 (2004).
- Бланд-Хоторн, Герхард (J. Bland-Hawthorn and O. Gerhard), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 529 (2016).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 3 (2016) [V.V. Bobylev and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **42**, 1 (2016)].
- Баллок, Джонстон (J.S. Bullock and K.V. Johnston), *Astrophys. J.* **635**, 931 (2005).
- Бхаттачарджи и др. (P. Bhattacharjee, S. Chaudhury, and S. Kundu), *Astrophys. J.* **785**, 63 (2014).

17. Ван и др. (W. Wang, J. Han, M. Cautun, Z. Li, and M. Ishigaki), *South. California Publ. Manag. Associat.* **63**, id.109801 (2020).
18. Васильев (E. Vasiliev), *MNRAS* **484**, 2832 (2019).
19. Васильев, Баумгардт (E. Vasiliev and H. Baumgardt), *astro-ph/2102.09568* (2021).
20. Гарроу и др. (T. Garrow, J.J. Webb, and J. Bovy), *MNRAS* **499**, 804 (2020).
21. Гомез и др. (F.A. Gómez, A. Helmi, A.G.A. Brown, and Y.-S. Li), *MNRAS* **408**, 935 (2010).
22. Иррганг и др. (A. Irrgang, B. Wilcox, E. Tucker, and L. Schiefelbein), *Astron. Astrophys.* **549**, 137 (2013).
23. Кинг (I. King), *Astrophys. J.* **67**, 471 (1962).
24. Коппельман, Хелми (H.H. Koppelman and A. Helmi), *astro-ph/2006.16283* (2020).
25. Корреа и др. (C.A. Correia, J.S.B. Wyithe, J. Schaye, and A.R. Duffy), *MNRAS* **452**, 1217 (2015).
26. Массари и др. (D. Massari, H.H. Koppelman, and A. Helmi), *Astron. Astrophys.* **630**, L4 (2019).
27. Миямото, Нагаи (M. Miyamoto and R. Nagai), *Publ. Astron. Soc. Japan* **27**, 533 (1975).
28. Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, and S.D.M. White), *Astrophys. J.* **490**, 493 (1997).
29. Перес-Вильегас и др. (A. Perez-Villegas, B. Barbuy, L.O. Kerber, S. Ortolani, S.O. Souza, and E. Bica), *MNRAS* **491**, 3251 (2020).
30. Сандерс и др. (J.L. Sanders, E.J. Lilley, E. Vasiliev, N.W. Evans, and D. Erkal), *MNRAS* **499**, 4793 (2020).
31. Трухильо-Гомес и др. (S. Trujillo-Gomez, J.M.D. Kruijssen, M. Reina-Campos, J.L. Pfeffer, B.W. Keller, R.A. Crain, N. Bastian, and M.E. Hughes), *MNRAS* **503**, 31 (2021).
32. Хаги и др. (H. Hagi, A.H. Zonoozi, and S. Taghavi), *MNRAS* **450**, 2812 (2015).
33. Харрис (W. Harris), *astro-ph/1012.3224* (2010).
34. Хелми и др. (Gaia Collaboration: A. Helmi, F. van Leeuwen, P.J. McMillan, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 12 (2018).
35. Шонрих и др. (R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen), *MNRAS* **403**, 1829 (2010).