УДК 524.6-36

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ПОДСИСТЕМ МЛЕЧНОГО ПУТИ ПО ДАННЫМ Gaia DR2

© 2019 г. Н. О. Буданова¹, А. Т. Байкова², В. В. Бобылев², В. И. Корчагин¹

¹ Южный федеральный университет, НИИ физики, Ростов-на-Дону, Россия ²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия Поступила в редакцию 11.06.2019 г.; после доработки 22.07.2019 г.; принята к публикации 22.07.2019 г.

Представлены результаты исследования кинематических и химических свойств шаровых скоплений Млечного Пути, базирующиеся на данных каталога Gaia DR2 и измерениях Космического телескопа им. Хаббла. Предложен новый метод разделения шаровых скоплений на подсистемы Галактики по элементам их галактических орбит. Получены выборки шаровых скоплений, принадлежащих бару/балджу, толстому диску Галактики, и скоплений, принадлежащих гало Млечного Пути. Для подсистем шаровых скоплений вычислены средние значения металличностей. Мы подтверждаем, что существует статистически значимое различие между средними значениями металличности для шаровых скоплений, принадлежащих толстому диску и гало Млечного Пути. В то же время отсутствуют статистически значимые различия между средними значениями металличности шаровых скоплений гало, вращающихся в сторону вращения диска Галактики и в ретроградном направлении, что свидетельствует против предположения о различной природе ретроградных шаровых скоплений и скоплений, вращающихся в прямом направлении.

DOI: 10.1134/S000462991912003X

1. ВВЕДЕНИЕ

Химический состав шаровых скоплений является важным индикатором их происхождения. Известно, что химический состав шаровых скоплений коррелирует с их кинематическими характеристиками и пространственным распределением. Анализ этих связей позволяет сделать выводы о разделении Галактики на подсистемы, о характере динамической эволюции и об истории звездообразования Млечного Пути на ранней стадии эволюции. В ряде работ обращалось внимание на то, что химический состав шаровых скоплений гало и толстого диска Галактики различен. Впервые на этот факт обратил внимание Морган [1, 2], который ввел понятие дисковых скоплений, отнеся к ним объекты сравнительно поздних спектральных классов.

Морган предложил классификацию интегральных спектров шаровых скоплений, основанную на определении интенсивностей линий металлов. Основываясь на этом подходе, Морган разделил шаровые скопления на восемь групп. К группе I были отнесены скопления с самыми слабыми линиями металлов, к группе VIII — скопления с сильными линиями металлов. Кинман [3] отметил, что шаровые скопления с низким содержанием металлов распределены по всему объему гало и имеют низкую концентрацию к галактической плоскости, в то время как скопления с высоким содержанием

металлов концентрируются к плоскости Галактики и находятся преимущественно на расстояниях меньше радиуса Солнца. Бингэм и Мартин [4] выделили скопления с высоким содержанием тяжелых элементов, назвав их "сверхдиском", диаметр которого в плоскости Галактики по их определению достигает 18 кпк, а толщина — 6 кпк. Шаров [5] разделил шаровые скопления на две группы: скопления с низким содержанием металлов, имеющие сферическое распределение, и скопления с высоким содержанием тяжелых элементов, относящиеся к диску. Марсаков и Сучков [6], используя данные Кукаркина [7], выделили три группы шаровых скоплений и продемонстрировали дефицит объектов в областях $[Fe/H] = -1.0 \text{ dex } \mu [Fe/H] =$ $= -0.5 \, \text{dex.}$

Провал в распределении металличности шаровых скоплений отмечался рядом других авторов. Батлер и др. [8], по результатам определения металличности звезд типа RR Лиры в скоплениях показали, что распределение металличности шаровых скоплений является бимодальным с провалом в распределении в окрестности [Fe/H] = = -1.0 dex. В работе Зинна [9] показано, что скопления с металличностью [Fe/H] ≤ -0.8 dex принадлежат гало Млечного Пути и имеют сравнительно небольшую скорость вращения $V = 50 \pm$ ± 23 км/с и дисперсию скоростей $\sigma = 144$ км/с. Зинн показал, что скопления с более высоким содержанием металлов [Fe/H] ≥ -0.8 dex принадлежат дисковой подсистеме и, вращаясь со скоростью $V = 152 \pm 29$ км/с, обладают сравнительно небольшой дисперсией скоростей $\sigma = 71$ км/с. Кроме того, Зинн [10] оценил скорости вращения для "молодого" и "старого" гало: $V = 64 \pm 74$ км/с (19 скоплений) и $V = 75 \pm 39$ км/с (24 скопления) соответственно. Выборка Да Косты и Армандроффа [11] из 21 скопления "молодого гало" и 27 скоплений "старого гало" дала скорости вращения, равные $V = 46 \pm 81$ км/с и $V = 40 \pm 41$ км/с соответственно. Эти авторы высказали предположение о том, что скопления "старого гало" были сформированы вместе со всей Галактикой, в то время как скопления "молодого гало" образовались из фрагментов. захваченных Галактикой из внегалактического пространства на более поздних стадиях эволюции.

Отметим работу Дамбиса [12], в которой были вычислены средние абсолютные собственные движения 92 шаровых скоплений Млечного Пути с использованием каталога UCAC2 [13]. Средняя ошибка собственного движения скопления составила около 1 миллисекунды дуги в год (мсд/год). Было показано, что поперечные скорости шаровых скоплений остаются в среднем практически постоянными, а их полные пространственные скорости относительно Галактическго центра остаются в среднем неизменными, составляя около 190 км/с на галактоцентрическом расстоянии около 20 кпк, что согласуется с общей изотермической структурой галактического гало.

Основываясь на самых современных высокоточных собственных движениях каталога Gaia DR2 [14], Хельми [15] и Васильев [16] определили кинематические характеристики 75 и 150 шаровых скоплений Галактики соответственно. Баумгардт и др. [17] переопределили собственные движения 154 шаровых скоплений Галактики, также основываясь на данных каталога Gaia DR2. Кинематические данные всех авторов хорошо согласуются между собой и с измерениями собственных движений, основанными на наблюдениях Космического телескопа им. Хаббла (Сон и др. [18]), являясь, таким образом, надежной основой для исследования свойств подсистем шаровых скоплений Галактики. Как отмечалось в работе Васильева [16], пространственное распределение шаровых скоплений сильно отличается от однородного с дефицитом скоплений на противоположной стороне диска Галактики. Для динамически релаксированной выборки, каковой является система шаровых скоплений Галактики, естественно предполагать более однородное распределение шаровых скоплений в

пространстве, что, как отмечается в работе [16], указывает на возможную наблюдательную селекцию из-за поглощения галактической пылью. Выводы о "двугорбом" распределении шаровых скоплений по металличности поэтому не могут считаться достоверно установленными. Точные кинематические данные для шаровых скоплений Галактики позволяют по-новому подойти к вопросу определения металличностей подсистем шаровых скоплений.

Никифоров и Агладзе [19] провели структурный анализ системы шаровых скоплений Галактики. Для северных и южных скоплений независимо ими были выделены упорядоченные вертикально связные осевые зоны избегания со сходными характеристиками.

Чемель и др. [20] рассчитали орбиты для 115 шаровых звездных скоплений Галактики. Расчеты проводились в двух моделях галактического гравитационного потенциала: одна модель содержала только осесимметричную составляющую (диск, сфероид, гало), а другая, помимо этих трех компонентов, включала также вращающийся Галактический бар. Из 115 скоплений 5 оказались улетающими из Галактики, а именно Terzan 3, NGC 5634, Rup 106, Pyxis и Pal 2. Анализ зависимости "орбитальный момент-металличность" для 110 шаровых скоплений показал, что 77 скоплений имеют высокую дисперсию орбитальных моментов и низкую металличность и тем самым являются представителями гало Галактики, 33 скопления, наоборот, имеют низкую дисперсию орбитальных моментов и высокую (относительно) металличность и, вероятно, принадлежат толстому диску.

В настоящей работе на основании кинематических характеристик орбит шаровых скоплений, полученных с учетом астрометрических данных, представленных в работе [16], определены галактические орбиты шаровых скоплений. Это позволило определить принадлежность шарового скопления к той или иной подсистеме Млечного Пути и оценить средние значения металличностей подсистем шаровых скоплений Галактики.

В разделе 2 описана модель потенциала Галактики, принятая для расчетов орбит шаровых скоплений. В разделе 3 приведены критерии разделения шаровых скоплений по подсистемам. В разделе 4 приводятся результаты определения химического состава шаровых скоплений в подсистемах Млечного Пути. В разделе 5 представлены основные результаты работы.

2. МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛА ГАЛАКТИКИ

Шаровые скопления распределены в широком диапазоне галактоцентрических расстояний (более 100 кпк), интерес поэтому представляют модели

гравитационного потенциала, построенные по скоростям объектов, перекрывающих этот диапазон. В работах Байковой и Бобылева [21, 22] были уточнены параметры шести наиболее популярных осесимметричных трехкомпонентных (балдж, диск, гало) моделей потенциала Галактики, отличающиеся распределением плотности в гало. Балдж и дисковый компонент задавались потенциалом Миямото и Нагаи [23]. Для описания гало были использованы модели Аллена и Сантильяна [24], Вилкинсона и Эванса [25], Наварро и др. [26], логарифмическиий потенциал Бинни [27], распределение Пламмера [28] и потенциал Хернквиста [29]. Для уточнения параметров моделей авторами [21, 22] были использованы наблюдательные данные, охватывающие диапазон галактоцентрических расстояний до ≈200 кпк. Подгонка кривой вращения к известным из наблюдений скоростям вращения галактических объектов производилась в [21, 22] с учетом дополнительных ограничений на околосолнечную плотность материи в диске Галактики и на значение градиента потенциала перпендикулярно к плоскости галактического диска. Как было показано Байковой и Бобылевым [21, 22], модель Наварро и др. [26] (NFW) обеспечивает наименьшую невязку между наблюдательными данными и модельной кривой вращения. Именно эта модель используется в настоящей работе.

Таким образом, модель осесимметричного гравитационного потенциала Галактики представляется в виде суммы трех составляющих: центрального сферического балджа $\Phi_b(r(R, Z))$, диска $\Phi_d(r(R, Z))$ и массивного сферического гало темной материи $\Phi_h(r(R, Z))$:

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

Потенциалы балджа $\Phi_b(r(R,Z))$ и диска $\Phi_d(r(R,Z))$ представлены в форме, предложенной Миямото, Нагаи [23]:

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

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

где M_b , M_d — массы компонентов, b_b , a_d , b_d — масштабные параметры компонентов в кпк. Потенциал гало представлен согласно работе Наварро и др. [26] в виде:

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

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019

Таблица 1. Значения параметров модели галактическо-го потенциала

Параметры	Значения
$M_b\left(M_{ m gal} ight)$	443 ± 27
$M_d\left(M_{ m gal} ight)$	2798 ± 84
$M_h\left(M_{ m gal} ight)$	12474 ± 3289
b_b (кпк)	0.2672 ± 0.0090
a_d (кпк)	4.40 ± 0.73
b_d (кпк)	0.3084 ± 0.0050
a_h (кпк)	7.7 ± 2.1
M_{bar}	$43.1 M_{gal}$
q_b (кпк)	5.0
a_b/b_b	1/0.42
a_b/c_b	1/0.33

В табл. 1 приведены значения параметров модели галактического потенциала (2–4), взятые из работты [23], и используемые в настоящей работе.

3. РАЗДЕЛЕНИЕ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ПОДСИСТЕМАМ ГАЛАКТИКИ

Единого критерия, позволяющего провести идентификацию скоплений по их принадлежности к той или иной подсистеме Галактики, не существует. Любой из таких параметров как возраст, скорость, пространственное положение, элементы галактических орбит, или химический состав могут выступать в качестве критерия принадлежности скоплений к подсистемам Галактики.

В работе Бинни и Вонга [30] шаровые скопления Млечного Пути описываются при помощи двухкомпонентной функции распределения, определяющей параметры дисковой подсистемы шаровых скоплений Галактики и ее гало. Бинни и Вонг [30] предположили, что шаровые скопления находятся в динамическом равновесии со статическим потенциалом Галактики. Двухкомпонентная функция распределения определяется восемью параметрами, которые можно определить из наблюдений, используя статистические критерии. Пости и Хельми [31], следуя работе [30], использовали выборку из 75 шаровых скоплений с собственными движениями, взятыми из каталога Gaia DR2, и 20 шаровых скоплений с собственными движениями, полученными с помощью Космического телескопа им. Хаббла. По оценке Пости и Хельми [31], гало Млечного Пути имеет незначительное вращение со скоростью около 14 км/с, в то время как диск Млечного Пути вращается со скоростью около 210 км/с в околосолнечной окрестности.

Васильев [16], используя аналогичный подход, использовал однокомпонентную функцию распределения шаровых скоплений для описания населения шаровых скоплений. Васильев [16] оценил, что шаровые скопления в пределах 10 кпк от центра Галактики имеют среднюю скорость вращения около 50–80 км/с и дисперсию скоростей порядка 100–120 км/с.

Мы применяем другой подход для разделения шаровых скоплений по подсистемам. Очевидно, что скопления на вытянутых и высоко наклоненных по отношению к плоскости Галактического диска орбитах вероятнее всего принадлежат гало, тогда как скопления на почти круговых орбитах, лежаших близко к плоскости диска Галактики. являются частью ее дисковой подсистемы. Для идентификации звезд по принадлежности к той или иной подсистеме Млечного Пути (тонкий диск, толстый диск, гало) Пости и др. [32] использовали орбиты звезд. Мы следуем идее Пости и др. [32] в вопросе разделения шаровых скоплений по подсистемам Млечного Пути, определяя принадлежность шаровых скоплений Галактики к той или иной ее подсистеме (бар/балдж, толстый диск, гало) по элементам орбит.

Используя координаты и собственные движения шаровых скоплений, представленные в работе Васильева [16], а также радиальные скорости шаровых скоплений, взятые из работы Харриса [33], мы вычислили галактоцентрические координаты, и компоненты пространственных скоростей скоплений Галактики, исправленные за движение Солнца. При вычислениях компоненты пекулярной скорости Солнца относительно локального центроида принимались равными $(U, V, W)_{\odot} =$ = (11.1, 12.2, 7.3) км/с, расстояние Солнца до центра Галактики 8.3 кпк [34] и скорость вращения локального центроида (LSR) вокруг центра Галактики 244 км/с. В выбранной нами системе координат компонент скорости V_R направлен на центр Галактики, V_{θ} — в сторону галактического вращения, а компонент скорости V_Z направлен на Северный галактический полюс.

Разделение шаровых скоплений по подсистемам Галактики — балджу, толстому диску и сферическому гало осуществлялось в два этапа. На первом этапе из геометрических соображений выделялись объекты балджа и гало. Принадлежность шаровых скоплений балджу определялась в соответствии с результатами исследований плотности распределения звезд в области бара/балджа Галактики (Вегг и Герхард [35]), установившими границы бара/балджа в центральной области Галактики 2.2 × 1.4 × 1.1 кпк. Таким образом, принадлежность шаровых скоплений бару/балджу определялась из условий $|X| \le 2.2$ кпк, $|Y| \le 1.4$ кпк, $|Z| \le 1.1$ кпк. Принадлежность шаровых скоплений к гало Млечного Пути определялась из условия |Z| > 3.5 кпк, вытекающего из факта, что вертикальный масштаб толстого диска Галактики по разным оценкам около 1 кпк, поэтому на высотах более 3.5 кпк преобладают объекты гало. В результате было выделено 17 объектов балджа и 55 объектов гало. Число объектов, подлежащих дальнейшему разделению, составило 75 скоплений.

На втором этапе было произведено разделение оставшихся шаровых скоплений на скопления, принадлежащие толстому диску и гало. В основе подхода лежит построение функции распределения по параметрам шаровых скоплений, которая бы показывала явную бимодальность, присущую двум различным классам объектов. Принимая во внимание, что в отличие от объектов гало шаровые скопления, принадлежащие толстому диску, должны двигаться по орбитам, близким к круговым с относительно небольшими эксцентриситетами и большими вращательными скоростями, удалось эмпирически подобрать комбинацию параметров орбит шаровых скоплений, функция распределения по которой имеет явно выраженную бимодальность. Такой комбинацией параметров является отношение проекции углового момента шарового скопления L_z к эксцентриситету его орбиты e, $L_z/e = Q \times R/e$. Иллюстрация подхода приведена на рис. 1, на котором изображена гистограмма распределения шаровых скоплений в области |z| << 3.5 кпк по параметру L_z/e , а также две аппроксимирующие гауссианы, представляющие собой выборки скоплений толстого диска и гало Галактики. Зная параметры гауссиан (табл. 2), можно вынести решение о принадлежности каждого шарового скопления к той или иной выборке. В итоге число объектов, принадлежащих бар/балджу, составило 17 скоплений (табл. 3), число шаровых скоплений, принадлежащих толстому диску Галактики, составило 31 скопление (табл. 4), а в гало вошли 100 шаровых скоплений (табл. 5).

4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ В ПОДСИСТЕМАХ ГАЛАКТИКИ

Считается, что скопления, принадлежащие различным подсистемам Галактики, отличаются по металличности. Так, шаровые скопления с малым содержанием металлов принадлежат сферически симметричному и медленно вращающемуся гало



Рис. 1. Гистограмма распределения шаровых скоплений по параметру L_z/e (отношение проекции углового момента ШС к эксцентриситету его орбиты) и аппроксимация гауссовыми распределениями.

Галактики, в то время как шаровые скопления с большим содержанием металлов принадлежат ее быстро вращающемуся толстому диску. Для исследования химического состава шаровых скоплений Галактики, принадлежащих ее различным подсистемам, нами были использованы данные по металличностям шаровых скоплений, взятые из работы Харриса [33], и для скопления Crater из работы [36]. На рис. 2 показано распределение металличности шаровых скоплений для двух подсистем Галактики (гало и толстый диск) в зависимости от расстояния до галактического центра. Незаполненные символы соответствуют скоплениям, принадлежащим гало, в то время как заполненные символы обозначают скопления, относящиеся к диску. Отметим, что наряду со скоплениями с высоким содержанием металлов, имеющими дисковую кинематику, несколько малометалличных скоплений также имеют кинематические

Таблица 2. Параметры подогнанных гауссовых функций распределения

	Modified N	FW модель
Параметр гауссианы	левая гауссиана	правая гауссиана
Амплитуда	22.8	7.2
Среднее (m), кпк км/с	-139	1405
СКО (σ), кпк км/с	287	441

характеристики, типичные для дисковой подсистемы Галактики. Этот же результат прослеживается и на рис. 3, на котором показано распределение по металличности для шаровых скоплений гало и толстого диска Галактики в зависимости от расстояния до плоскости диска z. Из рис. 3 видно, что наряду со скоплениями дисковой подсистемы Галактики, шаровые скопления, принадлежащие по кинематическим признакам гало Млечного Пути (незаполненные символы), также концентрируются к плоскости диска, что, вероятно, указывает на неполноту выборки шаровых скоплений Галактики.

На рис. 4 показана зависимость скорости шаровых скоплений гало вдоль галактоцентрического радиуса (незаполненные символы) и шаровых скоплений диска (заполненные символы) от содержания в них тяжелых элементов. Как видно из рисунка, большая часть шаровых скоплений, принадлежащих дисковой подсистеме, находится в области $[Fe/H] \ge -1.0$ dex, в то время большинство скоплений, принадлежащих гало, имеет низкое содержание металлов с [Fe/H] < -1.0 dex и значения радиальных скоростей менее 50 км/с, в то время как практически все скопления, по кинематическим характеристикам принадлежащие к гало Млечного Пути, имеют низкое содержание металлов и большой интервал значений радиальной скорости, вплоть до 300 км/с.

После работы Форбса и Бриджес [37] принято считать, что ретроградное вращение является отличительным признаком того, что шаровые скопления были аккрецированы в процессе эволюции

Name	<i>Z</i> кпк	<i>R</i> кпк	<i>U</i> км/с	V км/с	W км/с	П км/с	Ө км/с	е кпк	$Z_{ m max}$ кпк	$R_{ m max}$ кпк	[Fe/H] dex
NGC 6266	0.88	1.77	-91.01	90.29	67.90	43.72	120.51	0.62	1.02	2.45	-1.18
NGC 6316	1.06	2.10	86.57	-73.43	86.35	101.82	50.19	0.76	1.50	2.91	-0.45
NGC 6355	0.89	0.86	-200.31	124.57	145.78	-209.26	-108.86	0.55	-1.94	1.99	-1.37
Terzan 2	0.32	0.95	107.40	21.78	-44.02	-103.68	-35.50	0.89	0.36	1.10	-0.69
Terzan 4	0.18	1.23	-54.57	62.21	97.02	24.50	79.04	0.67	0.77	1.26	-1.41
BH 229	0.32	0.39	49.56	-24.71	-288.25	8.94	-54.65	0.47	0.79	0.81	-1.0
Liller 1	-0.01	0.75	36.05	-115.28	24.78	107.05	-55.95	0.80	-0.15	0.82	-0.33
Terzan 5	0.22	1.49	-59.31	90.56	-26.55	84.45	67.73	0.77	0.79	1.64	-0.23
NGC 6440	0.58	1.15	-32.16	91.68	-37.37	88.38	-40.35	0.80	-1.03	1.39	-0.36
Terzan 1	0.13	1.63	61.19	75.94	6.88	-73.51	64.08	0.78	0.77	1.76	-1.03
Terzan 6	-0.24	1.52	141.89	-31.72	39.92	-137.48	-47.34	0.86	1.21	1.95	-0.56
Terzan 9	-0.23	1.30	83.99	3.97	-54.15	-77.51	32.61	0.83	-0.93	1.39	-1.05
Djorg 2	-0.26	2.04	-137.79	178.15	-45.97	162.77	155.66	0.57	0.38	3.21	-0.65
NGC 6522	-0.51	0.63	-13.69	99.19	-190.39	34.80	93.89	0.67	0.89	1.17	-1.34
NGC 6528	-0.56	0.45	223.73	38.07	-38.03	-196.50	113.54	0.61	-0.88	1.05	-0.11
NGC 6558	-0.76	0.94	-184.33	99.10	14.00	187.00	93.97	0.71	1.35	1.68	-1.32
NGC 6624	-1.07	0.62	59.69	28.81	-120.45	-29.08	59.56	0.76	1.28	1.48	-0.44

Таблица 3. Параметры шаровых скоплений бар/балджа

Галактики. Если эта гипотеза верна, то следует ожидать различий в значениях средних металличностей для аккрецированных шаровых скоплений гало, обладающих ретроградным вращением, и скоплений, вращающихся в сторону вращения галактического диска, которые, как полагают, родились in citu в процессе эволюции Галактики. Основываясь на металличностях шаровых скоплений, взятых из работы Харриса [33], мы вычислили средние значения металличности шаровых скоплений, принадлежащих различным подсистемам Галактики. Для дисковой подсистемы среднее значение металличности оказалось равным [Fe/H] = $= -0.96 \pm 0.11$ dex, для объектов гало [Fe/H] = $= -1.58 \pm 0.05$ dex, и для объектов, входящих в область бар/балджа $[Fe/H] = -0.95 \pm 0.08$ dex. Знание орбит шаровых скоплений позволяет выделить скопления, принадлежащие гало Млечного Пути, находящиеся на ретроградных орбитах по отношению к вращению галактического диска, и скопления, вращающиеся в направлении вращения диска Галактики. Для выяснения возможных различий в химических составах указанных групп шаровых скоплений был применен статистический двухвыборочный t-критерий Стьюдента. Средние значения металличности скоплений, принадлежащих толстому диску и гало Млечного Пути, показывают статистически значимые различия, что указывает на различные истории химической эволюции для этих групп скоплений. С другой стороны, применение критерия Стьюдента к выборкам шаровых скоплений, принадлежащих диску Галактики и принадлежащих бару/балджу Млечного Пути, показывает, что средние металличности для этих групп скоплений статистически неразличимы.

Средние значения металличности ретроградных шаровых скоплений гало и скоплений, вращающихся в прямом направлении, не показывают статистически значимых различий в содержании тяжелых элементов в этих группах, что не подтверждает предположения о различной природе шаровых скоплений гало, вращающихся в направлении и против вращения диска Млечного Пути. Если,

Таблица 4. Параметры шаровых скоплений диска

Namo	Z	R	U	V	W	П	Θ	e	$Z_{\rm max}$	R_{\max}	[Fe/H]
Ivallie	КПК	КПК	км/с	км/с	км/с	км/с	км/с	КПК	КПК	КПК	dex
NGC 104	-3.16	6.93	-77.42	175.49	45.11	6.43	191.70	0.16	-3.41	7.52	-0.72
E 3	-2.62	8.91	-227.00	117.14	103.94	44.36	251.57	0.18	5.80	13.04	-0.83
NGC 4372	-0.98	7.26	-101.84	86.93	67.27	16.51	132.88	0.42	2.14	7.33	-2.17
NGC 5927	0.67	4.63	-196.39	131.02	5.95	-39.18	232.81	0.11	0.72	5.21	-0.49
ES224-8	1.45	12.55	-229.62	-125.00	-0.65	-43.55	257.79	0.17	-1.90	16.83	0.00
BH 184	-0.37	4.40	-135.72	7.63	-89.03	38.11	130.49	0.43	-1.44	4.60	-0.67
Terzan 3	1.33	2.14	-186.70	105.15	98.64	-60.77	205.47	0.18	1.92	2.99	-0.74
NGC 6218	2.15	4.32	44.92	127.56	-81.10	-8.84	134.95	0.37	2.68	4.86	-1.37
NGC 6235	2.71	2.89	105.61	-207.43	-48.73	120.49	199.15	0.28	-3.80	4.91	-1.28
NGC 6254	1.74	4.52	116.28	110.45	47.03	-87.22	134.59	0.41	2.39	5.15	-1.56
NGC 6304	0.57	2.48	-109.86	175.52	71.98	77.91	191.85	0.29	0.99	3.18	-0.45
NGC 6356	2.70	6.69	72.11	-90.44	108.16	46.10	106.09	0.53	-4.47	7.77	-0.40
NGC 6352	-0.68	3.51	-163.74	178.59	8.73	51.40	236.77	0.16	0.77	4.39	-0.64
NGC 6366	0.98	5.22	-65.02	150.02	-62.53	94.20	133.64	0.45	-1.98	5.85	-0.59
NGC 6362	-2.28	4.71	-116.14	46.17	99.64	17.16	123.80	0.37	3.31	5.16	-0.99
NGC 6397	-0.46	6.27	-51.83	121.41	-120.77	35.15	127.25	0.40	-2.92	6.39	-2.02
NGC 6496	-1.95	3.47	-240.38	-213.93	-59.07	-36.82	319.68	0.41	3.93	8.91	-0.46
NGC 6539	0.94	2.95	109.59	42.99	170.91	0.73	117.72	0.30	-2.48	3.17	-0.63
NGC 6540	-0.29	3.03	2.31	149.96	56.75	12.68	149.44	0.31	0.51	3.05	-1.35
NGC 6541	-1.44	1.74	-227.12	22.29	-111.67	122.46	192.58	0.50	-2.36	3.74	-1.81
NGC 6553	-0.30	2.40	11.57	249.48	-4.94	45.76	245.52	0.19	-0.33	3.30	-0.18
Pal 7	0.55	3.87	202.42	192.85	27.38	-73.71	269.69	0.26	-0.79	5.99	-0.75
Terzan 12	-0.16	3.62	125.15	150.48	97.63	-93.85	171.76	0.33	-1.27	4.30	-0.50
NGC 6569	-1.25	2.53	-33.44	-176.09	24.94	-39.76	174.77	0.23	-1.31	2.92	-0.76
NGC 6656	-0.40	5.20	-153.80	217.72	-143.27	175.76	200.41	0.52	3.52	9.78	-1.70
Pal 8	-1.50	5.08	52.89	-106.15	-30.09	-22.78	116.39	0.52	-1.74	5.49	-0.37
NGC 6749	-0.29	5.05	109.50	22.24	2.00	-21.34	109.68	0.53	0.31	5.07	-1.60
NGC 6752	-1.71	5.20	-26.90	178.69	59.57	-23.63	179.15	0.23	-2.05	5.59	-1.54
NGC 6760	-0.49	4.94	84.41	150.37	-14.58	92.58	145.48	0.45	-0.52	5.55	-0.40
Pal 10	0.30	6.63	170.79	92.50	20.33	-56.06	185.97	0.27	-0.42	7.04	-0.10
NGC 6838	-0.30	6.96	63.26	197.98	39.06	39.25	204.11	0.19	-0.70	7.25	-0.78

Таблица 5. Параметры шаровых скоплений гало	
--	--

Name	<i>Z</i> кпк	<i>R</i> кпк	<i>U</i> км/с	<i>V</i> км/с	<i>W</i> км/с	П км/с	Ө км/с	е кпк	$Z_{ m max}$ кпк	$R_{ m max}$ кпк	[Fe/H] dex
NGC 288	-8.88	8.38	-8.55	-41.25	50.69	8.33	-41.30	0.80	-10.24	11.84	-1.32
NGC 362	-6.19	7.25	-89.73	-89.29	-70.78	126.58	-1.18	1.00	10.24	11.76	-1.26
Whiting 1	-26.22	22.79	220.24	64.12	11.37	-202.50	107.75	0.53	26.89	63.97	-0.70
NGC1261	-12.85	12.94	74.66	61.72	68.34	-95.07	-18.59	0.93	16.17	20.84	-1.27
Pal 1	3.64	17.06	68.77	203.25	-21.71	34.99	211.70	0.12	-4.38	18.37	-0.65
E 1	-92.29	83.82	119.03	-35.49	85.98	-1.30	-124.20	0.15	-125.14	116.88	-1.70
Eridan	-59.49	74.36	80.45	35.86	135.50	-86.70	-15.50	0.28	-136.70	103.40	-1.43
Pal 2	-4.27	35.07	106.15	-7.12	4.37	-106.20	6.31	0.98	-12.73	40.57	-1.42
NGC 1851	-6.93	15.42	-82.99	-63.53	-81.20	104.45	-3.63	0.98	14.88	19.81	-1.18
NGC 1904	-6.31	17.95	-45.78	-10.70	4.82	45.57	11.56	0.96	9.66	19.53	-1.60
NGC 2298	-2.96	15.74	93.26	31.98	76.09	-93.77	-30.46	0.87	-11.18	17.98	-1.92
NGC 2419	35.24	83.01	2.82	57.43	-61.33	-3.16	57.41	0.62	49.27	83.04	-2.15
Pyxis	4.82	41.19	108.97	222.77	190.45	-246.68	-25.47	0.66	-141.97	146.11	-1.20
NGC 2808	-1.86	11.16	55.79	153.24	28.80	-157.93	40.65	0.87	-4.67	14.25	-1.14
Pal 3	61.75	73.37	26.04	176.07	72.77	-158.48	81.02	0.27	61.75	161.93	-1.63
NGC 3201	0.75	9.07	256.00	-194.76	150.97	-113.87	-300.84	0.52	-10.87	25.69	-1.59
Pal 4	103.28	41.74	29.39	-24.97	54.26	-20.25	-32.82	0.77	103.28	57.64	-1.41
Crater	107.52	96.97	15.83	98.31	64.42	-98.33	-15.68	0.02	107.52	142.65	-1.9
NGC 4147	18.84	10.40	-41.92	-20.06	127.36	46.43	-1.96	0.96	22.15	24.08	-1.80
Rupr 106	4.31	17.97	-122.19	227.96	31.62	-242.02	91.23	0.78	23.54	37.47	-1.68
NGC 4590	6.08	8.36	-170.93	293.12	16.67	-168.28	294.65	0.54	16.82	28.34	-2.23
NGC 4833	-0.90	7.18	-98.31	-53.09	-42.42	104.36	39.90	0.83	-3.46	7.95	-1.85
NGC 5024	17.63	5.65	54.99	160.75	-71.76	-94.26	141.34	0.43	-20.27	20.10	-2.10
NGC 5053	17.09	5.44	53.46	151.93	34.63	-90.11	133.50	0.26	-17.40	17.76	-2.27
NGC 5139	1.36	6.44	98.75	-13.49	-81.20	-70.47	-70.47	0.74	2.85	7.36	1.53
NGC 5272	10.02	6.95	66.05	135.20	-134.76	-38.71	145.41	0.49	-13.41	15.71	-1.50
NGC 5286	2.16	8.62	60.60	215.51	7.38	-219.53	-43.88	0.89	-6.88	13.70	-1.69
NGC 5466	15.37	5.80	-220.23	-30.08	225.75	172.05	-140.72	0.80	-48.34	44.76	-1.98
NGC 5634	19.11	8.91	-58.95	-8.69	-26.37	-43.79	40.42	0.81	19.29	21.01	-1.88
NGC 5694	17.71	23.29	-110.95	153.22	-171.24	-182.55	-49.64	0.92	48.30	53.56	-1.98
IC 4499	-6.56	14.20	31.83	252.57	-62.09	-243.63	-73.81	0.64	-27.01	29.32	-1.53
NGC 5824	12.08	22.71	-97.90	-60.50	-181.98	-41.50	107.34	0.45	31.13	37.23	-1.91
Pal 5	16.67	7.86	-46.40	-164.65	-12.26	-51.41	163.16	0.27	-16.93	18.54	-1.41
NGC 5897	6.32	3.75	-33.12	-126.47	88.17	88.81	95.94	0.64	7.57	8.52	-1.90
NGC 5904	5.48	3.20	302.39	93.39	-181.61	-290.54	125.49	0.81	-21.16	22.41	-1.29
NGC 5946	0.79	5.70	-27.57	-31.43	105.93	28.22	30.85	0.86	-4.19	5.88	-1.29
NGC 5986	2.40	4.08	-7.01	-64.61	-12.98	60.82	22.92	0.90	3.80	4.88	-1.59

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019

Таблица 5. Продолжение

Name	<i>Z</i> кпк	<i>R</i> кпк	<i>U</i> км/с	<i>V</i> км/с	<i>W</i> км/с	П км/с	Ө км/с	е кпк	$Z_{ m max}$ кпк	$R_{ m max}$ кпк	[Fe/H] dex
Pal 14	51.40	49.56	113.29	44.60	128.14	119.15	25.06	0.95	51.40	112.40	-1.62
NGC 6093	3.35	1.60	9.76	-35.61	-60.67	33.23	16.11	0.85	3.68	4.09	-1.75
NGC 6121	0.62	6.22	51.83	12.68	-8.71	-52.43	9.89	0.96	4.11	6.37	-1.16
NGC 6101	-4.18	10.31	296.82	96.62	-193.46	-16.58	-311.70	0.59	23.72	41.00	-1.98
NGC 6144	2.42	1.22	184.53	98.61	42.00	-69.73	-197.26	0.21	-2.92	2.86	-1.76
NGC 6139	1.24	3.29	-69.35	-28.22	136.30	-0.40	74.87	0.54	2.73	3.44	-1.65
NGC 6171	2.52	2.44	14.75	76.80	-65.25	-3.69	78.12	0.72	-2.74	3.74	-1.02
E452-11	1.76	1.17	18.64	20.64	-103.97	-24.32	-13.50	1.00	18.65	62.85	-1.50
NGC 6205	4.67	7.20	-32.34	-6.98	-79.85	20.42	-26.04	0.79	7.76	8.58	-1.53
NGC 6229	19.75	22.39	2.72	31.55	50.29	31.24	5.17	0.97	-23.64	30.89	-1.47
FSR 1735	6.88	9.90	-30.34	102.17	208.86	100.30	36.04	0.74	-18.10	19.39	—
NGC 6256	0.61	2.79	-126.92	114.34	96.26	-168.65	27.17	0.94	2.83	4.27	-1.02
Pal 15	18.60	33.35	136.46	67.11	47.17	151.90	-7.24	0.95	-48.12	33.35	-2.07
NGC 6273	1.45	0.60	128.46	224.90	179.01	-98.56	-239.52	0.59	-3.50	3.79	-1.74
NGC 6284	2.66	6.78	15.08	0.07	110.39	15.04	-1.04	0.98	17.06	41.14	-1.26
NGC 6287	1.81	0.93	-296.83	57.44	80.42	-295.45	-64.14	0.73	-4.90	4.98	-2.10
NGC 6293	1.31	1.17	-115.80	126.70	-156.45	-151.48	-80.73	0.90	-2.39	3.57	-1.99
NGC 6341	4.76	8.58	-25.77	47.27	94.31	52.27	12.87	0.93	-9.37	10.65	-2.31
NGC 6325	1.10	0.59	38.74	-194.52	79.17	-80.85	-181.12	0.12	-1.23	1.20	-1.25
NGC 6333	1.48	0.94	248.81	132.33	52.30	-46.14	278.01	0.53	-2.70	3.55	-1.77
NGC 6342	1.45	0.72	160.80	-35.02	-31.24	-24.40	162.75	0.31	1.49	1.59	-0.55
IC 1257	6.55	16.35	-63.82	17.50	-13.20	-50.57	-42.69	0.84	6.62	18.11	-1.70
NGC 6380	-0.63	3.05	-25.45	64.66	11.30	-59.53	-35.85	0.85	2.19	3.28	-0.75
Pismis 26	-0.47	1.33	-181.83	143.94	201.62	-111.81	203.17	0.56	-1.80	3.16	-0.70
NGC 6388	-1.15	2.74	54.69	100.14	-16.94	-65.27	-93.60	0.68	-1.56	3.44	-0.55
NGC 6402	2.39	3.27	48.38	-22.31	21.39	-21.18	48.89	0.88	2.39	4.77	-1.28
NGC 6401	0.75	2.34	-63.85	238.19	161.58	3.20	-246.58	0.29	-2.13	4.18	-1.02
Pal 6	0.20	2.52	196.92	5.77	152.92	-195.74	22.35	0.94	3.28	4.45	-0.91
NGC 6426	5.78	13.05	29.04	-123.12	-13.36	-67.47	107.00	0.58	-6.16	14.95	-2.15
NGC 6441	-1.00	3.44	-11.04	-67.13	-24.18	15.20	66.32	0.66	-1.41	3.49	-0.46
NGC 6453	-0.77	3.35	-104.26	-9.84	-159.49	-98.21	36.37	0.60	-3.56	3.75	-1.50
NGC 6517	1.26	3.83	51.87	33.11	-34.33	52.11	32.73	0.89	2.62	4.41	-1.23
NGC 6535	1.25	3.85	-122.37	22.72	44.32	92.65	-83.11	0.64	1.64	4.49	-1.79
NGC 6544	-0.10	5.33	-3.76	6.25	-90.80	4.11	6.03	0.96	-3.83	5.33	-1.40
E280-06	-4.64	12.94	22.64	-26.58	-83.19	30.79	16.46	0.87	12.48	13.69	-1.80
NGC 6584	-3.80	5.65	69.29	-208.94	-239.31	196.06	100.10	0.82	12.41	17.92	-1.50
NGC 6626	-0.52	2.97	40.90	47.06	-94.06	-27.83	55.80	0.75	-1.87	3.10	-1.32

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019

Таблица 5. Окончание

Name	Ζ	R	U	V	W	П	Θ	e	$Z_{\rm max}$	$R_{\rm max}$	[Fe/H]
	КПК	КПК	км/с	км/с	км/с	км/с	км/с	КПК	КПК	КПК	dex
NGC 6638	-1.15	1.59	60.57	47.58	23.98	74.17	20.75	0.85	-1.74	2.17	-0.95
NGC 6637	-1.55	0.44	75.13	-52.59	85.47	29.54	86.82	0.80	1.70	2.00	-0.64
NGC 6642	-0.89	1.42	-4.64	114.18	-50.38	111.47	25.17	0.93	1.53	1.95	-1.26
NGC 6652	-1.96	1.52	-60.69	-36.57	177.91	-66.08	25.58	0.93	-3.08	3.86	-0.81
NGC 6681	-1.93	0.65	201.12	106.73	-174.55	220.27	57.63	0.74	-4.34	4.43	-1.62
NGC 6712	-0.50	3.61	-62.88	133.45	-146.22	145.28	25.67	0.93	3.66	5.37	-1.02
NGC 6715	-6.43	17.46	236.32	-17.73	209.17	231.31	51.53	0.58	34.15	51.80	-1.49
NGC 6717	-1.33	2.16	80.92	71.95	26.97	-4.54	108.19	0.68	-1.35	3.06	-1.26
NGC 6723	-2.57	0.01	-101.46	177.46	-37.02	99.97	-178.31	0.99	-246.46	608.50	-1.10
NGC 6779	1.38	9.19	-75.27	146.47	101.30	164.65	-3.47	1.00	6.61	160.38	-1.98
Terzan7	-7.81	13.14	260.98	-0.55	183.46	259.71	25.67	0.54	-39.01	38.41	-0.32
Arp 2	-10.13	18.57	251.34	-15.47	181.61	242.21	68.88	0.57	42.72	58.67	-1.75
NGC 6809	-2.12	3.48	210.92	31.45	-55.89	-199.01	76.62	0.65	-4.70	5.67	-1.94
Terzan 8	-10.91	15.68	269.06	3.57	156.86	266.43	37.66	0.56	40.55	48.12	-2.16
Pal 11	-3.58	7.31	123.43	-65.19	-7.56	-15.59	138.72	0.40	-3.62	7.95	-0.40
NGC 6864	-9.06	11.41	-70.59	-69.23	48.44	-97.52	16.35	0.95	12.85	15.99	-1.29
NGC 6934	-5.03	11.67	84.03	-294.48	122.74	-288.33	103.18	0.87	-13.59	38.94	-1.47
NGC 6981	-9.16	8.91	-71.29	-149.04	177.46	-164.96	-9.10	0.96	-16.78	23.56	-1.42
NGC 7006	-13.67	35.97	-67.07	-129.25	81.15	-141.80	-33.10	0.91	26.64	50.48	-1.52
NGC 7078	-4.76	9.46	100.78	61.86	-28.29	7.93	117.98	0.50	4.86	10.54	-2.37
NGC 7089	-6.71	7.97	-76.25	153.64	-173.11	170.47	-18.95	0.94	12.92	18.86	-1.65
NGC 7099	-5.89	4.22	-7.80	-61.73	109.35	-30.82	-54.05	0.78	-6.91	8.14	-2.27
Pal 12	-14.03	7.04	336.74	18.16	114.55	146.88	303.56	0.64	36.75	68.03	-0.85
Pal 13	-17.62	20.44	-167.80	219.52	-80.08	265.11	-77.88	0.83	76.45	38.42	-1.88
NGC 7492	-23.52	9.52	-0.40	-87.98	63.45	-87.11	-12.38	0.80	26.10	27.97	-1.78
FSR 1758	-0.64	3.62	251.71	246.50	197.74	57.38	-347.60	0.59	6.11	13.92	_

как считается, шаровые скопления Галактики, имеющие ретроградные орбиты, были захвачены вместе с галактиками-спутниками, находящимися на ретроградных орбитах, то следует, вообще говоря, ожидать различия в химических составах скоплений, находящихся на прямых и ретроградных орбитах. Отсутствие таковых различий свидетельствует в пользу того, что шаровые скопления на ретроградных орбитах образовались в силу естественной начальной дисперсии скоростей протогалактических облаков.

Марсаков и др. [38] представили компилятивный каталог кинематических характеристик и химического состава шаровых скоплений Млечного Пути. Определение галактоцентрических пространственных скоростей для 72 шаровых скоплений в работе Марсакова и др. [38] основывалось на каталоге собственных движений Эди и Харриса [39], которые в свою очередь использовали дан-



Рис. 2. Распределение металличности шаровых скоплений для двух подсистем Галактики (гало и толстый диск) в зависимости от расстояния до центра Галактики.



Рис. 3. Зависимость металличности шаровых скоплений от расстояния до плоскости диска Галактики z.

ные наземных измерений собственных движений шаровых скоплений, многие из которых были взяты из работ Казетти-Динеску [40–43]. Как показано Васильевым [16], наземные определения собственных движений шаровых скоплений существенно отличаются от измерений с помощью космических телескопов им. Хаббла и Gaia. Поэтому кинематические свойства шаровых скоплений, приведенные в работе [38] не могут считаться надежно установленными.

5. ВЫВОДЫ

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы. Основываясь на значениях элементов орбит шаровых скоплений Млечного Пути, мы определили их принадлежность к подсистемам Галактики. Для 148 шаровых скоплений с собственными движениями, взятыми из каталога Васильева [16], были получены выборки скоплений, принадлежащих бару/балджу (17 объектов), скоплений, входящих в толстый диск Галак-



Рис. 4. Зависимость скорости шаровых скоплений гало вдоль галактоцентрического радиуса (незаполненные символы) и скоплений диска (заполненные символы) от содержания в них тяжелых элементов.

тики (31 объект), и скоплений, принадлежащих гало Млечного Пути (100 объектов). Для шаровых скоплений с определенными кинематическими параметрами и орбитами были вычислены средние значения металличностей для подсистем Млечного Пути. Для дисковой подсистемы среднее значение металличности оказалось равным [Fe/H] = -0.96 ± 0.11 dex, для шаровых скоплений гало среднее значение металличности равно [Fe/H] = -1.58 ± 0.05 dex. Для шаровых скоплений, принадлежащих бару/балджу Млечного Пути, среднее значение металличности [Fe/H] – 0.95 ± 0.08 dex.

Применение двухвыборочного t-критерия Стьюдента к шаровым скоплениям, принадлежащим толстому диску Галактики и ее гало, показывает статистически значимые различия, что указывает на различные истории химической эволюции для этих групп скоплений. С другой стороны, применение критерия Стьюдента к выборкам шаровых скоплений, принадлежащим диску Галактики и к скоплениям, принадлежащим бару/балджу Млечного Пути, показывает, что средние металличности для этих групп скоплений статистически неразличимы.

Средние значения металличности ретроградных шаровых скоплений гало и скоплений, вращающихся в прямом направлении, не показывают статистически значимых различий в содержании тяжелых элементов в этих группах, что не подтверждает предположение об их различной природе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки 3.858.2017/4.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. W. W. Morgan, Publ. Astron. Soc. Pacif. 68, 509 (1956).
- 2. W. W. Morgan, Astron. J. 64, 432 (1959).
- 3. T. D. Kinman, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **119**, 538 (1959).
- 4. R. G. Bingham and W. L. Martin, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **167**, 137 (1974).
- 5. A. S. Sharov, Astron. J. 53, 702 (1976).
- V. A. Marsakov and A. A. Suchkov, Sov. Astron. 21, 700 (1977).
- 7. B. V. Kukarkin *Globular Star Clusters* (Nauka, Moscow, 1974).
- D. Butler, R. J. Dickens, and E. Epps, Astrophys. J. 225, 148 (1978).
- 9. R. Zinn, Astrophys. J. 293, 424 (1985).
- 10. R. Zinn, ASP Conf. Ser. 48, 38 (1993).
- 11. G. S. Da Costa and T. E. Armandroff, Astron. J. **109**, 2533 (1995).
- 12. A. K. Dambis, Astron. and Astrophys. Trans. **25**, 185 (2006).
- N. Zacharias, S. E. Urban, M. I. Zacharias, G. L. Wycoff, D. M. Hall, D. G. Monet, and T. J. Rafferty, Astron. J. 127, 3043 (2004).
- 14. Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al., Astron. and Astrophys. **616**, 1 (2018).
- Gaia Collaboration, A. Helmi, F. van Leeuwen, P. J. McMillan, et al., Astron. and Astrophys. 616, 12 (2018).
- 16. E. Vasiliev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **484**, 2832 (2019).

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12 2019

2019

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 12

- 17. H. Baumgardt, M. Hilker, A. Sollima, and A. Bellini, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **482**, 5138 (2019).
- S. T. Sohn, L. L. Watkins, M. A. Fardal, R. P. van der Marel, A. J. Deason, G. Besla, and Andrea Bellini, Astrophys. J. 862, 52 (2018).
- 19. I. I. Nikiforov, E. V. Agladze, Astron. Lett. 43, 75 (2017).
- A. A. Chemel, E. V. Glushkova, A. K. Dambis, A. S. Rastorguev, L. N. Yalyalieva, Astron. Bull. 73, 162 (2018).
- 21. A. T. Bajkova and V. V. Bobylev, Astron. Lett. **42**, 567 (2016).
- 22. A. T. Bajkova and V. V. Bobylev, Open Astronomy **26**, 72 (2017).
- 23. M. Miyamoto and R. Nagai, Publ. Astron. Soc. Japan. 27, 533 (1975).
- C. Allen and A. Santillan, Rev. Mex. Astron. Astrofis. 22, 255 (1991).
- 25. M. I. Wilkinson and N. W. Evans, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **310**, 645 (1999).
- 26. J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, Astrophys. J. **490**, 493 (1997).
- 27. J. Binney, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **196**, 455 (1981).
- H. C. Plummer, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 71, 460 (1911).
- 29. L. Hernquist, Astrophys. J. 356, 359 (1990).
- 30. J. Binney and L. K. Wong, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., **467**, 2446 (2017).

- 31. L. Posti and A. Helmi, Astron. and Astrophys. **621**, 56 (2019).
- 32. L. Posti, A. Helmi, J. Veljanoski, M. A. Breddels, Astron. and Astrophys. **615**, 70 (2018).
- 33. W. E. Harris, arXiv:1012.3224 (2010).
- 34. R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., **403**, 1829 (2010).
- 35. C. Wegg, O. Gerhard, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **435**, 1874 (2013).
- 36. B. P. M. Laevens, N. F. Martin, B. Sesar, E. J. Bernard, et al., Astrophys. J. **786**, L3 (2014).
- 37. D. A. Forbes and T. Bridges, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **404**, 1203 (2010).
- 38. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, Astron. Rep. 63, 274 (2019).
- 39. G. M. Eadie and W. E. Harris, Astrophys. J. **829**, 108 (2016).
- 40. D. I. Dinescu, B. A. Keeney, S. R. Majewski, and T. M. Girard, Astron. J. **128**, 687 (2004).
- 41. D. I. Dinescu, T. M. Girard, and W. F. van Altena, Astron. J. **117**, 1792 (1999).
- 42. D. I. Dinescu, D. Martinez-Delgado, T. M. Girard, J. Peñarrubia, H.-W. Rix, D. Butler, and W. F. van Altena, Astrophys. J. **631**, 49 (2005).
- 43. D. I. Dinescu, T. M. Girard, and W. F. van Altena, Astron. J. 117, 1792 (1999).