

УДК 524.47, 524.74

ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ, ПОТЕРЯННЫЕ СФЕРОИДАЛЬНОЙ КАРЛИКОВОЙ ГАЛАКТИКОЙ В СТРЕЛЬЦЕ

© 2020 Н. Р. Аракелян^{1*}, С. В. Пилипенко¹, М. Е. Шарина²¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 117997 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 4 марта 2020 года; после доработки 25 июня 2020 года; принята к публикации 25 июня 2020 года

Проведен поиск шаровых скоплений, принадлежащих приливному потоку Стрельца (Sgr stream). Мы проанализировали пространственные расположения, лучевые скорости относительно галактического стандарта покоя (V_{GSR}), собственные движения и соотношения «возраст–металличность» ($[\text{Fe}/\text{H}]$) шаровых скоплений и звезд в приливном потоке. В результате выделены три категории шаровых скоплений: А — несомненно находящиеся в потоке: Terzan 8, Whiting 1, Arp 2, NGC 6715, Terzan 7, Pal 12; В — кинематические выбросы: Pal 5, NGC 5904, NGC 5024, NGC 5053, NGC 5272, NGC 288; С — кандидаты низшего ранга: NGC 6864, NGC 5466, NGC 5897, NGC 7492, NGC 4147.

Ключевые слова: Галактика: шаровые скопления: общий — Галактика: структура — галактики: карликовые

1. ВВЕДЕНИЕ

Представляет интерес изучение взаимосвязи эволюции галактик и окружающей их среды. В стандартной космологической модели Λ CDM (Peebles 1974) галактики формируются постепенно, путем иерархического сгущивания: сначала образуются маломассивные объекты, а затем, при их слиянии, более массивные. Млечный Путь не является исключением.

Некоторые карликовые галактики-спутники, взаимодействующие с Галактикой в течение длительного времени, начинают частично разрушаться и сливаться с ней. Из-за высоких скоростей движений возникают приливные хвосты, в которые попадают газ, пыль, звезды и шаровые скопления. При прохождении карликовой галактики (приливных осколков) вблизи центра Галактики из-за аккреции начинается процесс переноса в Млечный Путь ее звезд и шаровых скоплений, которые становятся для него строительным материалом.

Рядом с нашей Галактикой есть несколько приливных потоков (см., например, Belokurov et al. 2007; 2006, Duffau et al. 2006, Grillmair 2006, Grillmair and Dionatos 2006, Helmi et al. 1999, Majewski et al. 1996, Newberg et al. 2010; 2002; 2009, Rocha-Pinto et al. 2004, Sales et al. 2008, Starkenburg et al. 2009, Williams et al. 2011). Один из них — это приливный поток Стрельца (Sgr stream) (Bellazzini et al. 2002; 2003,

Bonifacio et al. 2004, Carballo-Bello et al. 2014, Carraro 2009, Carraro et al. 2007, Carretta et al. 2017, Da Costa and Armandroff 1995, Ibata et al. 1994; 1997, Law and Majewski 2010b, Li et al. 2019, Majewski et al. 2004; 2003, Navarrete et al. 2017, Newberg et al. 2003, Siegel et al. 2007). В процессе продолжающейся в настоящее время аккреции при длительном взаимодействии карликовой сфероидальной галактики Sgr (Sgr dSph) с Млечным Путем некоторые шаровые скопления от нее отделились и теперь разбросаны по всему гало Галактики.

Есть много работ, посвященных поиску шаровых скоплений, которые могли бы образоваться в Sgr dSph (например, Bellazzini et al. 2002; 2003; 2020, Belokurov et al. 2014, Carballo-Bello et al. 2014, Carraro 2009, Carraro et al. 2007, Da Costa and Armandroff 1995, Dinescu et al. 2000; 2001, Forbes 2020, Forbes and Bridges 2010, Forbes et al. 2004, Irwin 1999, Law and Majewski 2010b, Lynden-Bell and Lynden-Bell 1995, Mackey and Gilmore 2004, Majewski et al. 2004, Martínez Delgado et al. 2004, Martínez-Delgado et al. 2002, Massari et al. 2019; 2017b, Newberg et al. 2003, Palma et al. 2002, Sohn et al. 2018). В каждой из этих работ предлагается несколько таких объектов (например, Pal 2, Pal 5, Pal 12, NGC 2419, NGC 5634, Whiting 1, NGC 4147, NGC 5053, NGC 6715, Arp 2, Terzan 7, Terzan 8, NGC 7492, AM 4, NGC 5824) (см. также Marsakov et al. (2019b) и ссылки в этой статье).

*E-mail: n.rubenovna@mail.ru

Чтобы проверить, относятся ли шаровые скопления к приливному потоку Sgr, мы применяем в этой работе свой метод. Мы используем данные об их собственных движениях, которые стали доступны недавно (см. Baumgardt et al. (2019)), после выхода релиза Gaia DR2 (Gaia Collaboration et al. 2018a; b; c), а также результаты моделирования приливного хвоста Sgr dSph. В литературе есть несколько таких моделей (например, Dierickx and Loeb 2017b, Law and Majewski 2010a). Мы выбрали модель Law and Majewski (2010a) (далее LM10a), поскольку эти данные можно найти в открытом доступе. Кроме того, в модели LM10a рукава приливного потока хорошо согласуются с результатами наблюдений, в то время как для модели Dierickx and Loeb (2017b) существует несоответствие для ведущего рукава. Модель LM10a включает в себя потенциал Галактики, состоящий из трех компонентов: дискового, сферического и трехосного гало. Последний компонент вытянут в направлении, почти перпендикулярном галактическому диску. Для карликовой сфероидальной галактики в Стрельце в LM10a приняты галактические координаты $(l, b) = (5^\circ 6, -14^\circ 2)$ и расстояние от Солнца 28 кпк (Siegel et al. 2007). Орбита спутника в момент наблюдения характеризуется направлением полюса $(l_p, b_p) = (273^\circ 8, -14^\circ 5)$ и лучевой скоростью 171 км с^{-1} . Остальные параметры спутника были найдены путем подгонки численных моделей его приливного разрушения к данным о скорости движения наблюдаемых звезд ведомого рукава потока с последующей проверкой совпадения результатов модели и наблюдаемых положений звезд и для ведущего потока. Данные для наблюдаемых звезд потока получены из обзоров 2MASS и SDSS (Belokurov et al. 2006, Law et al. 2005; 2004, Majewski 2004, Majewski et al. 2003, Yanny et al. 2009). Так, найденная трехмерная скорость галактики в Стрельце $(V_x, V_y, V_z) = (230, -35, 195) \text{ км с}^{-1}$, нынешняя масса $2.5_{-1.0}^{+1.3} \times 10^8 M_\odot$. Модель LM10a представляет собой улучшенную версию более ранних моделей (см. Law et al. (2005; 2004)), так как наиболее приближена к наблюдательным данным по приливному потоку. Например, в предыдущей модели приливного разрушения Sgr dSph авторы представили три различных варианта для галактического гало (осесимметричное в плоскости диска; сжатое сферически; вытянутое в направлении, перпендикулярно диску), но не один из них не мог одновременно воспроизвести для ведущего рукава угловые положения, расстояния и лучевые скорости. В модели LM10a промоделировано неосесимметричное, почти сплющенное гало и воспроизведены все ограничения в пределах разумной точности. Используя ее вместе с реальными данными по

гигантам класса M (см. Law et al. (2005; 2004), Majewski et al. (2004)¹) для звезд потока, мы получаем больше возможностей для поиска шаровых скоплений (ШС), принадлежащих Sgr dSph.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 описаны метод выборки ШС и «метод ближайших соседей», который мы применили для идентификации шаровых скоплений в рукавах приливного потока Sgr. Принадлежность к потоку мы проверяем по лучевым и пространственным скоростям и по распределению «возраст–металличность». Обсуждение и выводы представлены в разделе 3.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ, ПРИНАДЛЕЖАЩИХ ПРИЛИВНОМУ ПОТОКУ

2.1. Пространственные расположения

Согласно результатам моделирования LM10a, при разрушении исходного объекта отделившиеся от него звезды образуют поток характерной формы (рис. 1). Такая же судьба должна постигнуть и скопления, которые ранее принадлежали галактике-спутнику. Большая часть звезд сосредоточена в сравнительно узком потоке, в то время как остальные распределены довольно широко по Галактике. Иными словами, с некоторой ненулевой вероятностью звезда или ШС из Sgr dSph может оказаться как в узком потоке, так и вне него. Поэтому для поиска шаровых скоплений, ранее принадлежавших Sgr dSph, мы используем информацию о пространственной плотности звезд из модели LM10a.

Чтобы выяснить, может ли скопление принадлежать потоку, мы измеряем плотность звезд потока вокруг каждого скопления и сравниваем ее с таковой вокруг каждой звезды. Поскольку плотность звезд потока сильно меняется в пространстве, для измерений мы фиксируем не радиус сферы, а число звезд в ней, считая его равным n . Иначе говоря, радиус сферы — это расстояние до n -го ближайшего соседа. Мы приняли $n = 6$, но наши результаты слабо зависят от n . Саму плотность вычислять необязательно, мы используем для дальнейшего анализа расстояние до шестого соседа d_6 .

Распределение расстояний до шестого соседа дает нам вероятность для звезды в модели LM10a иметь такого соседа на некотором расстоянии или меньше. Вероятность для расстояния d_6 равна отношению числа частиц в модели, имеющих шестого соседа на расстоянии меньше d_6 , к полному числу

¹<http://faculty.virginia.edu/srm4n/Sgr/index.html>

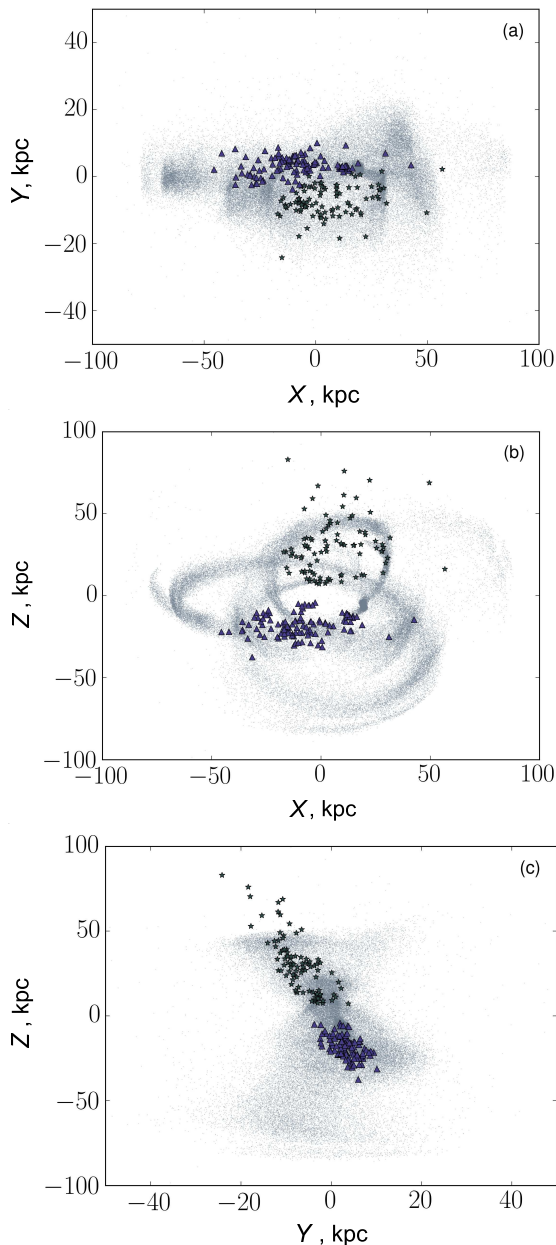


Рис. 1. Приливный поток Sgr в трех проекциях. Серые точки соответствуют модели потока Sgr (LM10a), звездочками и треугольниками показаны звезды в ведущем и в ведомом рукавах потока соответственно (наблюдаемые данные). X , Y , Z — декартовы координаты относительно центра Галактики. Z указывает на галактический полюс; положение Солнца $-8.34, 0, 0$ кпк (Reid et al. 2014)

частиц. Для всех 157 шаровых скоплений мы находим расстояние до ближайшего шестого соседа — звезды из модели LM10a — и из распределения расстояний между звездами в модели определяем соответствующую этому расстоянию вероятность, как указано выше. Эти вероятности оказались в пределах от 10^{-4} до 0.6. Однако не стоит считать,

что найденная вероятность — это вероятность для шарового скопления принадлежать потоку. В самом модельном потоке есть звезды с вероятностью до 10^{-5} , которые, тем не менее, по построению модели потоку принадлежат. Если есть N объектов, принадлежащих потоку, то полученная через распределение расстояний d_6 вероятность для них может быть порядка $1/N$ или выше. К тому же распределение звезд в модели LM10a может несколько отличаться от реального потока в силу различий модельного и реального потенциалов Галактики. Поэтому мы в дальнейшем рассматриваем как кандидаты в принадлежащие потоку все шаровые скопления с вероятностью более 0.01. В результате мы получаем 17 ШС-кандидатов с вероятностями от 0.013 до 0.586 (см. таблицу 1).

Приливной поток от Sgr dSph можно разделить на два рукава: ведущий и ведомый. Чтобы установить, к какому из этих рукавов принадлежит каждое из 17 скоплений, мы определяем расстояния d_6 для каждой звезды в рукавах приливного потока (звезды из каталога <http://faculty.virginia.edu/srm4n/Sgr/index.html>). После этого мы берем медиану этих расстояний и проверяем, какие шаровые скопления находятся на этом или меньшем расстоянии от звезд в потоке. Иными словами, мы определяем принадлежность к рукаву на основании данных о ближайших наблюдаемых звездах из потока (в модели LM10a тоже присутствуют оба рукава, но данные приведены в одном списке, без деления звезд по рукавам).

Количество наблюдаемых звезд в ведущем и ведомом приливных рукавах составляет 94 и 108 соответственно. В результате нашего анализа пространственного распределения шаровых скоплений для наблюдаемых звезд в потоке мы получаем по восемь шаровых скоплений в ведущем и в ведомом рукавах приливного потока Sgr. Только одно шаровое скопление из 17 не относится ни к одному из рукавов — скопление NGC 6715. Это не случайно, поскольку NGC 6715 находится непосредственно в центре карликовой галактики Sgr (Law and Majewski 2010b, Massari et al. 2019). Координаты самой Sgr dSph (Law and Majewski 2010a) и NGC 6715 (Harris 1996, версия 2010 г.)², и (Harris et al. 2013) очень близки: для Sgr $L_{\text{Sgr}} = 5^{\circ}6$, $B_{\text{Sgr}} = -14^{\circ}2$, $d_{\odot \text{Sgr}} = 28$ кпк, $R_{\text{Sgr}} \approx 20$ кпк, а для NGC 6715 $L = 5^{\circ}61$, $B = -14^{\circ}09$, $d_{\odot} = 26.5$ кпк, $R \approx 19$ кпк.

2.2. Кинематика шаровых скоплений

Сформировав список из 17 шаровых скоплений, мы проверили, насколько хорошо совпада-

²<http://physwww.mcmaster.ca/~harris/Databases.html>

ют лучевые скорости ШС и звезд из наблюдаемых и модельных каталогов. Лучевые скорости для звезд (для наблюдаемых и для модельных данных) были взяты из работ Law and Majewski (2010a), Monaco et al. (2007) (<http://faculty.virginia.edu/srm4n/Sgr/index.html>), а для шаровых скоплений — из статьи Baumgardt et al. (2019). В нашей работе все лучевые скорости приводятся в так называемом галактическом стандарте покоя, то есть они скорректированы за вращение Галактики в месте нахождения Солнца. Лучевая скорость в галактическом стандарте покоя V_{GSR} связана со скоростью в местном стандарте покоя V_{LSR} формулой:

$$V_{\text{GSR}} = V_{\text{LSR}} + 220 \sin l \cos b \text{ км с}^{-1}. \quad (1)$$

На рис. 2 показано полученное распределение шаровых скоплений и звезд потока по лучевым скоростям. Вероятности для каждого из 17 скоплений-кандидатов, принадлежащих потоку, приведены (в порядке возрастания вероятности) в таблице 1, где также указаны их лучевые скорости в галактическом стандарте покоя (V_{GSR}) и средние лучевые скорости для ближайших шести звезд в потоке: для звезд из модели LM10a (V_{GSR}^*) и для звезд из реальных данных (V_{GSR}^{**}) для каждого шарового скопления. Также показано, в каком рукаве были обнаружены эти скопления и к какому типу по классификации Maskey and van den Bergh (2005) они принадлежат. Изучив таблицу 1, можно выяснить, у каких шаровых скоплений лучевые скорости близки к таковым для звезд потока. Данные о средней лучевой скорости звезд-соседей скопления NGC 6715 в таблице не приводятся, так как ближайшие наблюдаемые звезды находятся от него слишком далеко.

Ошибки для лучевых скоростей складываются из трех компонент: 1) для каждого скопления мы брали три стандартных отклонения от средних лучевых скоростей для ближайших шести звезд в модельном потоке, 2) три стандартных отклонения из результатов измерений скоростей шаровых скоплений (Baumgardt et al. 2019) и 3) добавочная ошибка, введенная для учета расхождения реального и модельного потенциалов Галактики. Последняя была оценена путем сравнения лучевых скоростей наблюдаемых звезд и ближайших к ним звезд из модели.

Из таблицы 1 следует, что для 13 шаровых скоплений лучевые скорости в пределах ошибок совпадают со скоростями звезд из модели. И в случае наблюдаемых звезд это справедливо для 13 шаровых скоплений. Для 11 шаровых скоплений лучевые скорости совпадают с данными и модели, и каталога наблюдаемых звезд. К этому списку добавим еще NGC 6715, так как его

лучевая скорость совпадает со скоростями ближайших частиц из модели, а совпадение по наблюдаемым звездам мы проверить не сможем, поскольку, как говорилось выше, это скопление не принадлежит рукавам и находится рядом с Sgr. В итоге получаем 12 шаровых скоплений, принадлежащих приливному потоку Sgr по лучевым скоростям: NGC 288, NGC 5272, NGC 5053, NGC 5024, Pal 12, NGC 5904, Pal 5, Terzan 7, NGC 6715, Arp 2, Whiting 1 и Terzan 8.

Более подробную информацию о шаровых скоплениях и их принадлежности к потоку Sgr можно получить по картине трехмерных собственных движений шаровых скоплений и звезд в потоке. Таблица 2 показывает пространственные скорости (V_x , V_y , V_z) в галактическом стандарте покоя для 17 шаровых скоплений (Baumgardt et al. 2019), где ось X направлена от центра Галактики к Солнцу, Y совпадает с направлением вращения Галактики в солнечной позиции и Z указывает на северный галактический полюс. Мы использовали в своей работе данные Baumgardt et al. (2019), однако мы сравнили их с данными Vasiliev (2019) и обнаружили, что они хорошо согласуются друг с другом.

Аналогично тому, как это делалось выше для лучевых скоростей, мы нашли средние галактоцентрические скорости $\langle V_x \rangle$, $\langle V_y \rangle$, $\langle V_z \rangle$ для шести ближайших соседних частиц модели для каждого из 17 шаровых скоплений. В таблице также представлены ошибки (три стандартных отклонения $3\sigma_x$, $3\sigma_y$, $3\sigma_z$), которые были посчитаны таким же образом, как и для лучевых скоростей. Собственные движения шаровых скоплений относительно движений ближайших звезд в потоке проиллюстрированы на рис. 3, где показана карта неба в галактоцентрических координатах L , B . Используя данные о координатах L и B для 17 шаровых скоплений (см. таблицу 3), можно определить местоположение каждого шарового скопления на карте неба (см. рис. 3). Из таблицы 2 следует, что пространственные скорости шаровых скоплений Pal 12, Terzan 7, NGC 6715, Arp 2, Whiting 1 и Terzan 8 хорошо согласуются со средними собственными движениями их ближайших соседей, и можно заключить, что эти шесть скоплений по пространственным скоростям принадлежат потоку Sgr.

Если сравнить список из 12 шаровых скоплений, полученный по совпадению лучевых скоростей, и список из шести шаровых скоплений с совпадающими трехмерными скоростями, то заметим, что шесть скоплений есть в обоих списках, и этот факт приводит к выводу, что по кинематике эти шесть скоплений (Pal 12, Terzan 7, NGC 6715, Arp 2, Whiting 1 и Terzan 8) точно принадлежат потоку (далее категория А), в то время как остальные шесть скоплений (NGC 288,

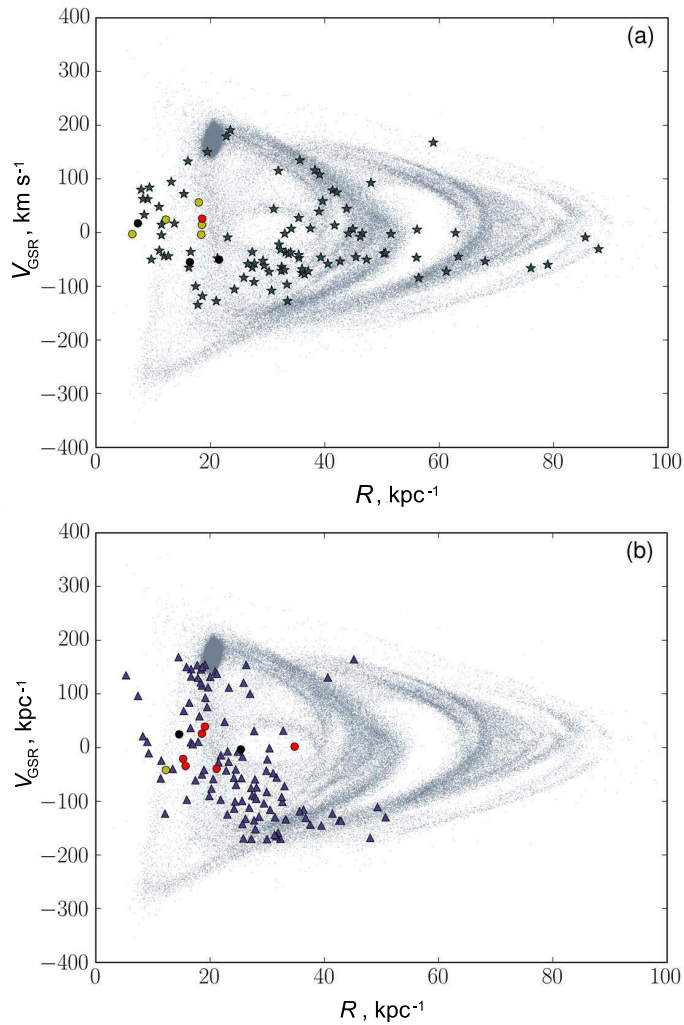


Рис. 2. Распределение лучевых скоростей в зависимости от галактоцентрического расстояния: для шаровых скоплений нашей выборки (красные, желтые и черные кружки) и наблюдаемых звезд из ведущего (звездочки) и ведомого (треугольники) рукавов (панели (a) и (b) соответственно), а также модели LM10a приливного потока Sgr (серые точки). Красными кружками показаны шаровые скопления, с большой вероятностью принадлежащие потоку (пять шаровых скоплений в ведомом рукаве и еще одно шаровое скопление — NGC 6715, — находящееся в центре Sgr dSph (показано на обеих панелях)). Желтые кружки — кандидаты в шаровые скопления—члены потока Sgr (пять шаровых скоплений в ведущем и одно в ведомом рукавах). Черными кружками показаны остальные пять шаровых скоплений.

NGC 5272, NGC 5053, NGC 5024, NGC 5904 и Pal 5), для которых наблюдается расхождение по собственным движениям, могут считаться кандидатами (далее категория B). Остальные пять шаровых скоплений из 17 (NGC 6864, NGC 5466, NGC 5897, NGC 7492 и NGC 4147), которые не принадлежат потоку по кинематике, отнесены к менее вероятным кандидатам (далее категория C).

2.3. Свойства звездных населений Sgr dSph

В Sgr dSph произошло несколько событий звездообразования (Law and Majewski 2010a, Mucciarelli et al. 2017, Siegel et al. 2007). На

основе глубокой звездной фотометрии снимков, полученных на космическом телескопе имени Хаббла, Siegel et al. (2007) сделали вывод о существовании в Sgr dSph как минимум четырех звездных популяций:

- 1) $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.8$, $[\alpha/\text{Fe}] = +0.2$ с возрастом порядка 13 млрд лет;
- 2) $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.6$, $[\alpha/\text{Fe}] = -0.2$ с возрастaми от 4 до 6 млрд лет;
- 3) $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.1$, $[\alpha/\text{Fe}] = -0.2$ с возрастом около 2.3 млрд лет;
- 4) $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.6$, $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0$ с возрастaми от 0.1 до 0.8 млрд лет.

Таблица 1. Вероятности принадлежности шаровых скоплений потоку Sgr, лучевые скорости для 17 шаровых скоплений (V_{GSR}) в потоке и средние лучевые скорости для ближайших шести звезд в потоке (V_{GSR}^* для звезд из модели LM10a и V_{GSR}^{**} для наблюдаемых звезд). Приведены ошибки в три стандартных отклонения. Кроме того, указаны рукав приливного потока, к которому принадлежит скопление, и тип шарового скопления по классификации Mackey and van den Bergh (2005)

Название	Вероятность	V_{GSR} , км с ⁻¹	$\langle V_{\text{GSR}}^* \rangle$, км с ⁻¹	$\langle V_{\text{GSR}}^{**} \rangle$, км с ⁻¹	Рукав	Тип
NGC 6864 (M75)	0.013	-189.08	129.40 ± 377.31	147.12 ± 99.31	Ведомый	ОН
NGC 5466	0.016	106.93	-32.85 ± 102.40	-53.47 ± 189.40	Ведущий	УН
NGC 288	0.019	-44.83	154.59 ± 260.99	-34.31 ± 167.99	Ведомый	ОН
NGC 5272 (M3)	0.036	-147.28	-72.07 ± 213.21	-36.70 ± 135.21	Ведущий	УН
NGC 5053	0.048	42.77	-35.98 ± 274.16	-51.16 ± 193.16	Ведущий	УН
NGC 5897	0.052	101.31	-264.20 ± 126.87	53.56 ± 132.87	Ведущий	ОН
NGC 5024 (M53)	0.060	-62.85	-4.01 ± 102.88	-63.52 ± 210.88	Ведущий	ОН
NGC 7492	0.071	-176.70	156.99 ± 264.21	-5.92 ± 115.21	Ведомый	ОН
Pal 12	0.076	27.91	104.26 ± 110.60	69.52 ± 116.60	Ведомый	SG
NGC 5904 (M5)	0.079	53.70	-189.19 ± 471.07	25.57 ± 207.07	Ведущий	ОН
Pal 5	0.083	-58.60	-124.22 ± 159.52	74.13 ± 174.52	Ведущий	УН
Terzan 7	0.092	159.45	183.57 ± 172.53	151.15 ± 94.53	Ведомый	SG
NGC 4147	0.100	179.52	51.25 ± 89.13	-91.64 ± 149.13	Ведущий	SG
NGC 6715 (M54)	0.144	143.06	187.46 ± 91.94			SG
Arp 2	0.252	123.01	169.73 ± 93.48	146.45 ± 87.48	Ведомый	SG
Whiting 1	0.275	-130.41	-114.02 ± 118.97	-106.11 ± 139.97	Ведомый	UN
Terzan 8	0.586	148.53	164.84 ± 87.39	146.45 ± 84.39	Ведомый	SG

Здесь $[\alpha/\text{Fe}]$ — содержание α -элементов³. Более поздние спектроскопические исследования примерно 6600 звезд в центре Sgr dSph (Alfaro-Cuello et al. 2019) доказали существование трех звездных популяций: 1) молодой, богатой металлами $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.04$ и возрастом 2.2 млрд лет; 2) промежуточного возраста, богатой металлами $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.29$, 4.3 млрд лет и 3) старой, бедной металлами $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.41$, 12.2 млрд лет. Наиболее молодые и высокометаллические звезды Sgr dSph концентрируются к центру этой галактики. В центре также находится старое и низкометаллическое шаровое скопление NGC 6715.

Мы рассматриваем распределение «возраст–металличность» (рис. 4) для шаровых скоплений (Kruijssen et al. 2019) и частиц в модели LM10a как еще один способ проверки гипотезы о при-

надлежности шаровых скоплений потоку Sgr. Данные о возрасте (Forbes and Bridges 2010) и металличности для 17 шаровых скоплений приведены в таблице 3. Средняя металличность по всем статьям взята из Каталога шаровых скоплений Harris (1996) (версия 2010 г., <http://physwww.mcmaster.ca/~harris/Databases.html>) и из работ Dotter et al. (2011; 2010), Forbes and Bridges (2010), VandenBerg et al. (2013). Отдельные группы модельных звезд на рис. 4 представляют разные эпизоды звездообразования. Положение на этом рисунке шаровых скоплений, близких по координатам, лучевым скоростям и собственным движениям к Sgr dSph (см. раздел 2.2), приблизительно совпадает с положением групп модельных звезд, то есть всплеск звездообразования. Мы видим, что возраст всех шаровых скоплений четко совпадает с эпизодами звездообразования. Для нескольких шаровых скоплений мы получаем металличность, которая существенно отличается от металличности для частиц модели, а именно: их металличности

³Мы используем стандартное определение $[\text{X}/\text{Y}] = \lg(\text{X}/\text{Y}) - \lg(\text{X}_{\odot}/\text{Y}_{\odot})$, где X и Y — массы конкретных элементов.

Таблица 2. Пространственные скорости для 17 шаровых скоплений (Baumgardt et al. 2019) в потоке и средние пространственные скорости для ближайших шести звезд в модельном потоке

Название	V_x , км с ⁻¹	V_y , км с ⁻¹	V_z , км с ⁻¹	$\langle V_x \rangle$, км с ⁻¹	$3\sigma_x$	$\langle V_y \rangle$, км с ⁻¹	$3\sigma_y$	$\langle V_z \rangle$, км с ⁻¹	$3\sigma_z$
NGC 6864	66.92	-83.26	49.40	-202.82	478.13	39.98	113.00	108.39	221.00
NGC 5466	235.28	-50.46	232.32	341.41	78.38	10.72	137.24	62.21	95.24
NGC 288	9.89	-80.69	50.55	-232.32	291.17	80.45	74.39	-176.78	207.83
NGC 5272	-60.46	135.49	-134.57	336.64	108.89	-76.25	258.14	-12.86	204.53
NGC 5053	-52.38	148.20	35.11	333.11	68.72	-12.02	90.50	22.92	281.93
NGC 5897	34.13	-133.63	88.40	378.21	99.05	-77.91	142.43	36.30	160.49
NGC 5024	-58.06	158.52	-71.86	334.13	68.24	-8.40	80.15	49.14	82.31
NGC 7492	-5.14	-95.43	63.68	-239.03	135.29	62.02	171.92	-74.85	257.15
Pal 12	-339.19	12.40	116.00	-328.84	77.72	-30.82	87.35	105.78	95.45
NGC 5904	-304.75	86.82	-183.79	284.51	784.37	-23.71	384.20	-7.75	135.14
Pal 5	50.24	-170.32	-8.79	303.09	94.01	-19.26	124.97	117.33	231.80
Terzan 7	-260.69	-5.65	182.9	-266.06	183.56	16.76	210.95	175.38	191.66
NGC 4147	40.98	-10.08	130.87	319.89	75.53	-34.38	106.73	30.07	94.40
NGC 6715	-229.62	3.26	189.18	-247.83	84.02	-28.67	87.77	205.01	81.35
Arp 2	-251.65	-20.12	180.69	-253.95	91.07	-31.41	82.49	173.64	78.89
Whiting 1	-210.54	36.01	12.03	-254.12	103.82	7.99	110.99	-5.52	99.65
Terzan 8	-271.58	-1.88	161.22	-265.75	81.59	-28.79	79.37	176.13	82.73

несколько ниже, чем для модели. Этот факт может означать, что их формирование несколько опережало формирование основной массы старых звезд. Однако эти несоответствия не очень велики, если принять во внимание ошибки измерения металличности. Для одного шарового скопления из шести категории А, по кинематике принадлежащих потоку, мы получаем металличность несколько ниже, чем для модели: это Terzan 8 с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.18$ dex. Для одного из скоплений категории В, в которую входит шесть объектов (см. раздел 2.2), наблюдается отклонение от общей зависимости «возраст–металличность». Это шаровое скопление NGC 5053 с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.24$ dex. Для одного из скоплений категории С, в которую входит пять объектов (см. раздел 2.2), тоже наблюдается отклонение от общей зависимости «возраст–металличность», и это — шаровое скопление NGC 5466 с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.15$ dex.

На рис. 4 также можно заметить, что среди найденных нами кандидатов нет шаровых скоплений моложе 6 млрд лет. Это может означать, что либо в этот период не происходило образо-

вание скоплений, либо они были разрушены или изменили траектории своего движения в результате взаимодействия с плотными газовыми слоями диска Галактики (см. раздел 7 и рис. 11 в работе Law and Majewski (2010b) и статью Terreg-García and Bland-Hawthorn (2018)). Отметим, что этап наиболее тесного приливного взаимодействия Sgr dSph с нашей Галактикой был около 3 млрд лет назад (см., например, Dierickx and Loeb 2017a).

В литературе уже давно обсуждается деление шаровых скоплений Галактики примерно на две группы: 1) шаровые скопления, следующие соотношению «возраст–металличность» Sgr dSph, Большого Пса (Canis Major) и других вероятных аккрецированных спутников нашей Галактики; 2) шаровые скопления, имеющие возраст, сравнимый с возрастом Вселенной, при различной металличности (см., например, Forbes and Bridges 2010). Первая группа ассоциируется с карликовыми спутниками, которые упали на Галактику, самыми крупными из которых, по-видимому, были Sgr dSph и Canis Major. Вторая группа сформировалась на месте (*in situ*). На рис. 5 воспроизведено соотношение «возраст–металличность» шаровых скоп-

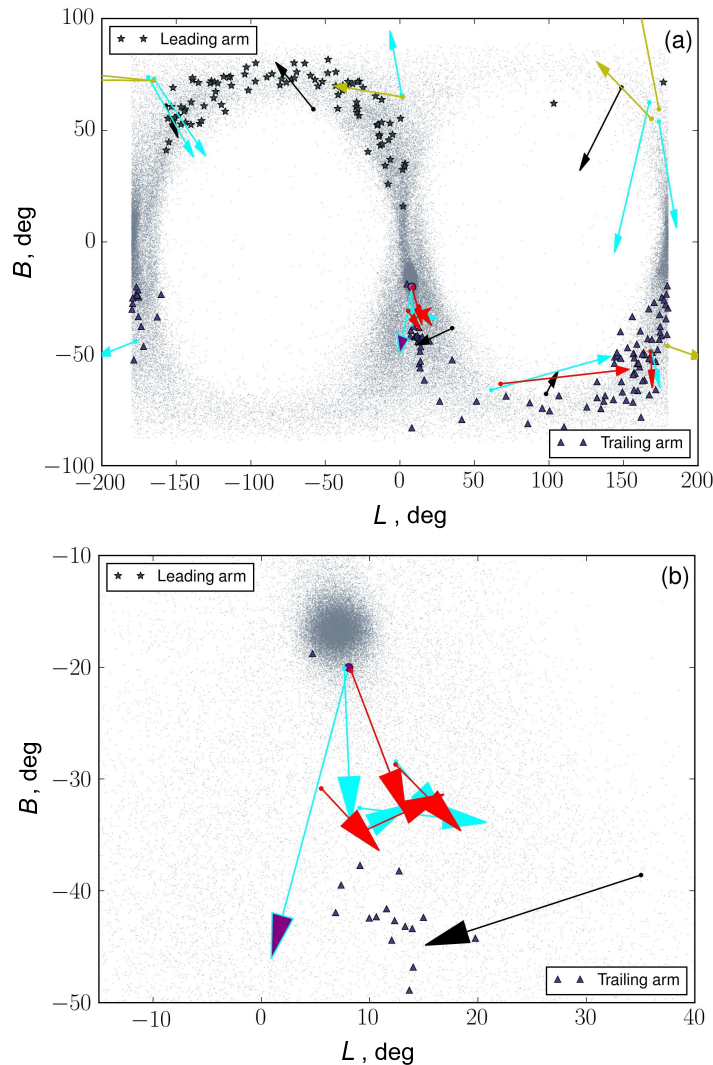


Рис. 3. Карта неба в галактоцентрических галактических координатах. Координаты Солнца: $-8.34, 0, 0$ кпк (Reid et al. 2014) (a). Увеличенная часть карты неба около Sgr dSph (b). Серые точки представляют модель приливного потока Sgr (LM10a). Звездочками показаны наблюдаемые звезды в ведущем рукаве, а треугольниками — в ведомом. Красные, желтые и черные стрелки показывают собственные движения для шести шаровых скоплений, принадлежащих потоку (категория А), для шести кандидатов (категория В) и для остальных пяти шаровых скоплений (категория С) соответственно. Голубые стрелки — это среднее собственное движение шести ближайших модельных звезд в потоке, а голубая стрелка с фиолетовым кончиком — собственное движение Sgr dSph.

лений Млечного Пути по данным Vandenberg et al. (2013) и Leaman et al. (2013). Данные для Whiting 1 взяты из работы Carrago et al. (2007). Оценки возраста и металличности сделаны в единой системе. Авторы оценок отметили, что зависимость делится на две: одна ветвь проходит примерно от 12.5 млрд лет при $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.7$ dex до 11 млрд лет при $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.2$ dex, а другая сдвинута к более высокой металличности примерно на 0.6 dex при фиксированном возрасте. Синими значками на рис. 5 показаны скопления, которые с большой вероятностью по своей кинематике принадлежат диску, то есть формируются *in situ* (Leaman et al. 2013). NGC 6791 — это старое рассеянное звезд-

ное скопление. Красные, черные и желтые символы на рис. 5 показывают те же скопления, что и на рис. 4. Возраст и металличность Terzan 8 и M 30 примерно одинаковы, согласно Vandenberg et al. (2013). Мы также отметили на рис. 5 шаровые скопления галактического гало с малой массой, например, Rup 106. Оно скорее было аккрецировано, чем сформировалось *in situ* (Forbes and Bridges 2010). Объекты, более низкометаллические при данном возрасте (левая последовательность), принадлежат населению гало Галактики, большей частью, по всей видимости, состоящего из скопленных аккрецированных спутников. На этом рисунке видно, что все шаровые скопления, выбранные в

Таблица 3. Галактоцентрические координаты (Harris 1996) (версия 2010 г.), средний возраст и средняя металличность для 17 шаровых скоплений (среднее значение по выборкам из каталогов Harris (1996) (версия 2010 г.), Dotter et al. (2011; 2010), Forbes and Bridges (2010), VandenBerg et al. (2013))

Название	L , deg	B , deg	$\overline{\text{Age}}$, Gyr	$\overline{[\text{Fe}/\text{H}]}$
NGC 6864	35.04	-38.59	9.98 ± 0.51	-1.16 ± 0.13
NGC 5466	148.70	69.17	13.02 ± 0.48	-2.15 ± 0.12
NGC 288	179.69	-46.57	11.54 ± 0.43	-1.30 ± 0.99
NGC 5272	168.93	55.05	11.88 ± 0.42	-1.49 ± 0.09
NGC 5053	-165.48	72.23	12.68 ± 0.47	-2.24 ± 0.16
NGC 5897	-57.99	59.37	12.30 ± 1.20	-1.82 ± 0.09
NGC 5024	-165.29	72.09	12.72 ± 0.44	-2.01 ± 0.09
NGC 7492	98.06	-67.97	12.0 ± 1.40	-1.6 ± 0.19
Pal 12	67.57	-63.43	9.11 ± 0.57	-0.82 ± 0.02
NGC 5904	173.87	59.38	11.46 ± 0.44	-1.26 ± 0.08
Pal 5	1.76	64.84	10.9 ± 0.86	-1.35 ± 0.08
Terzan 7	5.54	-30.84	7.65 ± 0.45	-0.49 ± 0.12
NGC 4147	-156.93	60.99	12.13 ± 0.46	-1.7 ± 0.12
NGC 6715	8.29	-20.32	11.25 ± 0.59	-1.39 ± 0.10
Arp 2	12.38	-28.71	11.96 ± 0.51	-1.69 ± 0.14
Whiting 1	168.23	-48.97	6.5 ± 0.75	-0.68 ± 0.03
Terzan 8	8.83	-34.94	12.89 ± 0.43	-2.18 ± 0.23

этой статье в качестве членов Sgr dSph, лежат в левой последовательности. Некоторые из них, например, Whiting 1, имеют более молодой возраст, чем другие объекты левой последовательности при данной металличности.

Спектроскопия высокого разрешения показала (Battaglia et al. 2017, Carlin et al. 2018, Hansen et al. 2018, Hasselquist et al. 2019), что звезды Sgr dSph имеют химический состав, значительно отличающийся от такового у звезд в Галактике. Например, содержание элементов α -процесса (Mg, Si, Ca, Ti) значительно ниже, чем у звезд Галактики при данной металличности (см., например, Carlin et al. 2018, Hansen et al. 2018, Hasselquist et al. 2019). Мы демонстрируем этот эффект для шаровых скоплений в Sgr dSph на примере зависимости содержания титана [Ti/Fe] от металличности [Fe/H]. Мы выбрали химический элемент Ti, потому что неопределенности в оценке содержания в зависимости от температуры, $\lg g$ и металличности для Ti ниже, чем для других α -элементов (Bensby et al. 2014). В то время как значительные антикорреляции в содержаниях легких элементов

встречаются практически у всех старых массивных шаровых скоплений Галактики, содержания наиболее тяжелых α -элементов (Si, Ca, Ti), элементов железного пика и других более тяжелых элементов меняются незначительно у звезд этих объектов (см., например, Bastian and Lardo 2018).

Данные [Ti/Fe] в основном взяты из статьи Pritzl et al. (2005). Средние содержания Ti взяты из следующих работ:

для Sgr dSph, Terzan 8, Arp 2, NGC 6715 — Carretta et al. (2014),

для NGC 5927 — Mura-Guzmán et al. (2018),

для NGC 6362 — Massari et al. (2017a) и Pritzl et al. (2005),

для NGC 6366 — Johnson et al. (2016) и Puls et al. (2018),

для NGC 6624 — Valenti et al. (2011),

для NGC 6717 — Costar and Smith (1988),

для NGC 6723 — Rojas-Arriagada et al. (2016),

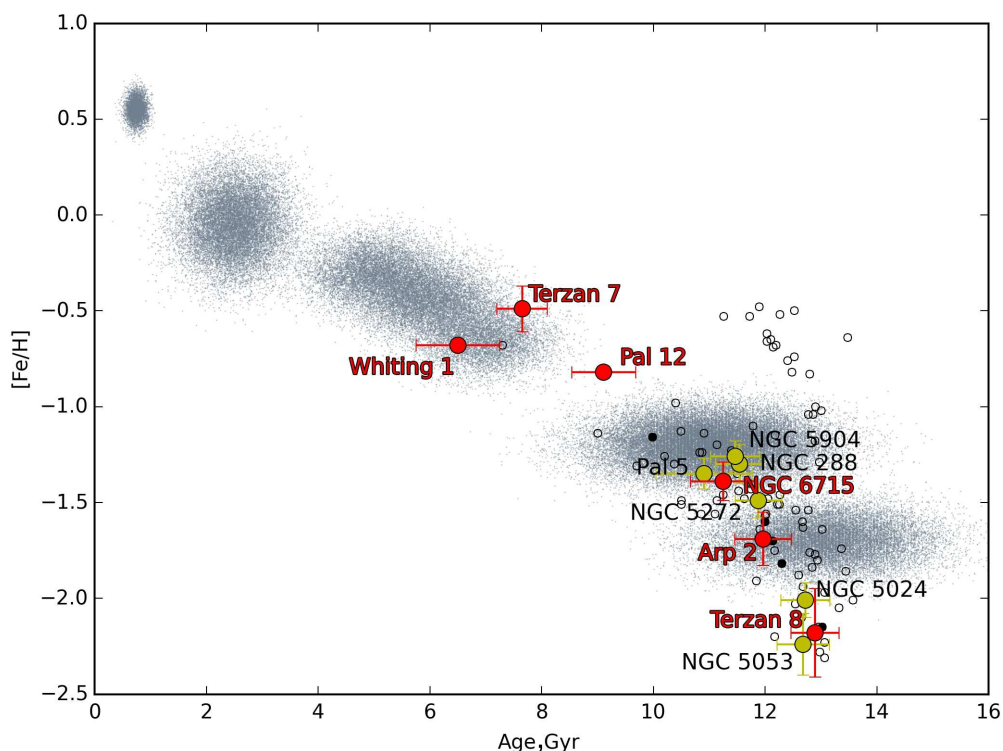


Рис. 4. Распределение шаровых скоплений по возрасту и металличности. Серые точки представляют модель приливного потока Sgr (LM10a). Красными кружками показаны шесть шаровых скоплений из категории А, принадлежащих потоку, желтые кружки — шесть скоплений категории В, отличающиеся по лучевым скоростям или по трехмерным скоростям. Черные кружки соответствуют шести шаровым скоплениям категории С, которые расходятся по кинематике. Пустые кружки — остальные шаровые скопления Галактики.

для NGC 5024 — Mészáros et al. (2015) и Voberg et al. (2016),

для NGC 4147 — Villanova et al. (2016),

для NGC 6791 — Carretta et al. (2007),

для NGC 4590 — Schaeuble et al. (2015),

для NGC 6528 — Muñoz et al. (2018),

для NGC 6864 — Kacharov et al. (2013).

На рис. 6 показаны зависимости содержаний Ti от металличности для шаровых скоплений Галактики по данным, собранным нами из разных источников (рис. 6a) и по данным из компилятивного каталога Marsakov et al. (2019b) (рис. 6b). В указанном каталоге нет данных для NGC 4147, NGC 5024 и NGC 6723. Несмотря на большие ошибки содержаний, в целом зависимости [Ti/Fe] от [Fe/H], представленные на двух панелях рис. 6, похожи. Значения [Ti/Fe] у скоплений, кинематически и пространственно с высокой вероятностью принадлежащих Sgr dSph (красные символы), в среднем систематически ниже, чем у более высокометаллических скоплений, принадлежащих диску по данным VandenBerg et al. (2013) и Leaman et al.

(2013) (синие точки на рис. 5 и 6). Некоторые менее вероятные члены потока (желтые и черные крупные кружки на рис. 6) тоже имеют низкие [Ti/Fe].

Подводя итог, следует отметить, что литературные данные о возрасте, металличности и содержаниях легких элементов у шаровых скоплений, выбранных в данной статье в качестве членов Sgr dSph, в целом подтверждают сделанный выбор.

2.4. Результаты

Все выделенные шаровые скопления можно разделить на три категории:

А: несомненно находящиеся в потоке — шесть шаровых скоплений: Terzan 8, Whiting 1, Arp 2, NGC 6715, Terzan 7 и Pal 12. Выбранные скопления совпадают по всем параметрам: по пространственным положениям, по положению на зависимости «возраст–металличность», по лучевым и пространственным скоростям. С большой вероятностью они относятся к приливному потоку Sgr. Для этих скоплений мы можем с уверенностью назвать Sgr dSph галактикой-хозяином.

В: кинематические выбросы — шесть шаровых скоплений: Pal 5, NGC 5904, NGC 5024,

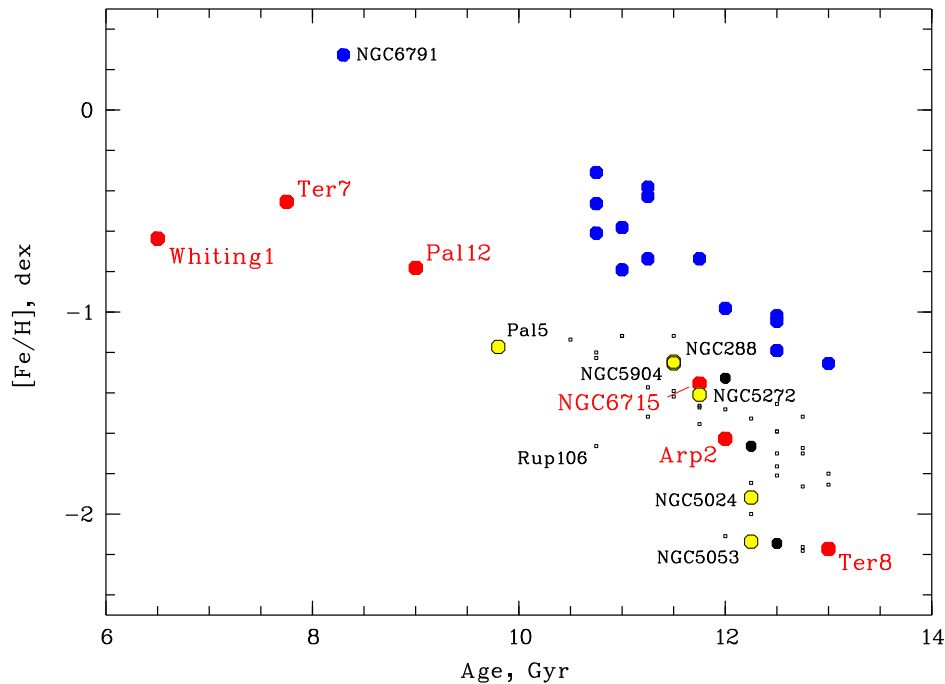


Рис. 5. Распределение шаровых скоплений по возрасту и металличности, согласно данным VandenBerg et al. (2013) и Leaman et al. (2013). Красные, черные, желтые и пустые черные символы обозначают те же скопления, что и на рис. 4. Синие кружки показывают скопления с высокой металличностью, принадлежащие диску, в соответствии с данными VandenBerg et al. (2013) и Leaman et al. (2013).

NGC 5053, NGC 5272 и NGC 288. Это шаровые скопления, которые совпадают по пространственному положению, по положению на зависимости «возраст–металличность», но отличаются по пространственным скоростям. Так что с низкой вероятностью они принадлежат потоку, и их можно отнести к списку кандидатов.

С: кандидаты низшего ранга — пять шаровых скоплений: NGC 6864, NGC 5466, NGC 5897, NGC 7492, и NGC 4147. Эти скопления совпадают по положению на зависимости «возраст–металличность», и вероятности пространственного нахождения в потоке велики (например, вероятность пространственного нахождения в потоке NGC 4147 выше, чем Terzan 7, который точно находится в потоке), но они расходятся по лучевым и пространственным скоростям. Таким образом, эти пять кандидатов низшего ранга с большой вероятностью ранее не принадлежали приливному потоку Sgr.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы провели поиск шаровых скоплений, принадлежащих приливному потоку Sgr, которые в данный момент времени разбросаны по всему Млечному Пути. Для этого мы изучили систему шаровых

скоплений в нашей Галактике (157 шаровых скоплений) и поток Sgr, для которого имеются реальные данные о звездах (202 звезды в рукавах) и данные модели LM10a (10^5 частиц). Шаровые скопления, которые пришли в нашу Галактику из Sgr dSph, могут все еще сохранять память о своем прошлом хозяине в их пространственном распределении и кинематике. Для идентификации шаровых скоплений, принадлежащих потоку Sgr, мы выделили 17 шаровых скоплений, используя «метод ближайших соседей» и информацию о пространственной плотности звезд из модели LM10a. После этого для 17 шаровых скоплений были исследованы пространственные распределения, распределения по лучевым скоростям, собственные движения и положение на зависимости «возраст–металличность» с теми же параметрами для звезд из наблюдательных данных и для модели LM10a. В результате мы получили три категории шаровых скоплений (А, В, С), шесть скоплений в первой категории, шесть во второй и пять в третьей: А — лучшие кандидаты, а С — худшие.

Наш список шаровых скоплений, принадлежащих приливному потоку Sgr и отнесенных к категории А, хорошо согласуется со списками из работ Bellazzini et al. (2020), Carballo-Bello et al. (2014), Forbes (2020), Forbes and Bridges (2010),

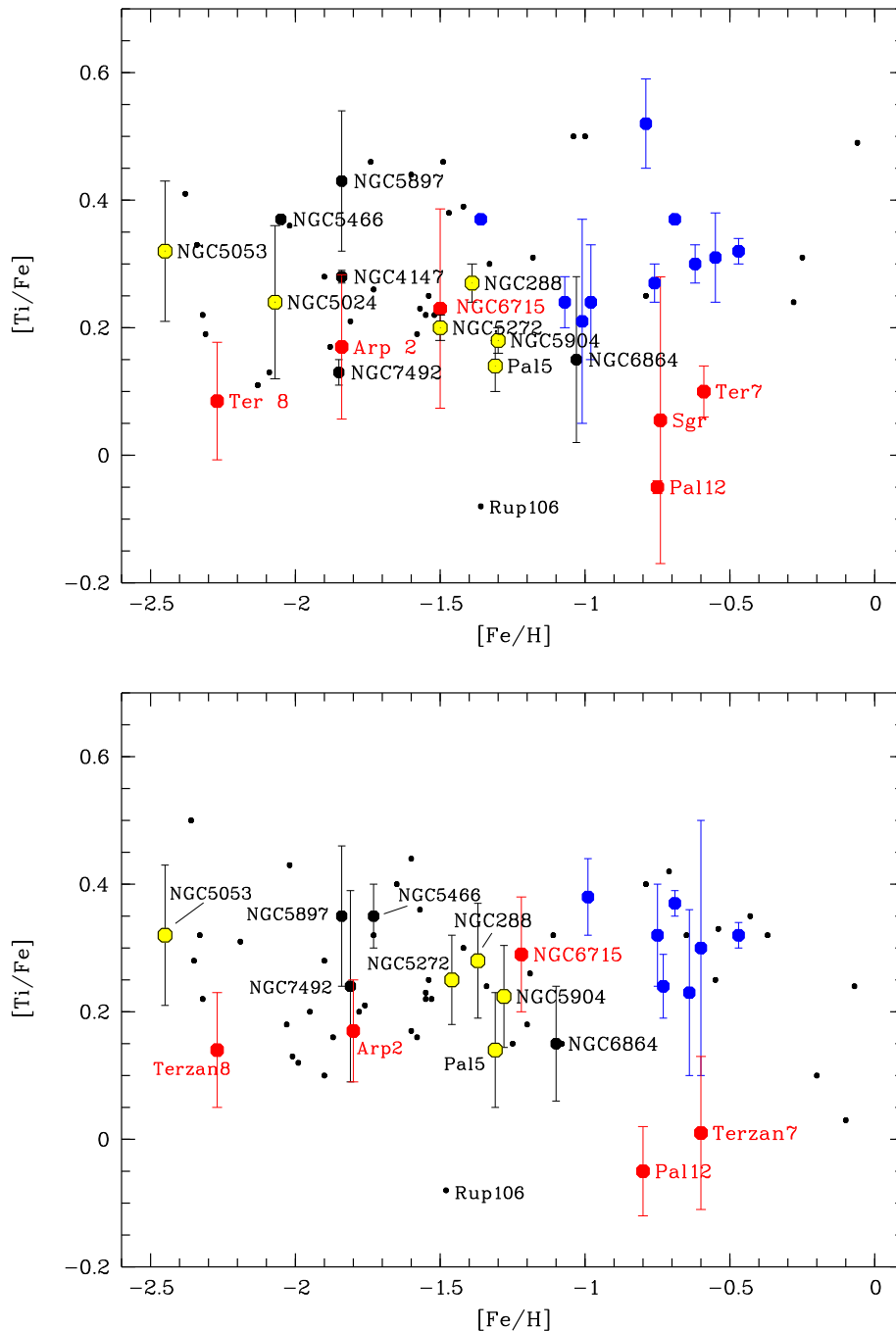


Рис. 6. Зависимость $[Ti/Fe]$ от $[Fe/H]$: (a) — по данным, собранным нами из разных источников, и (b) — по данным из компилятивного каталога Marsakov et al. (2019b). Красные, черные, желтые и пустые черные символы соответствуют тем же объектам, что и на рис. 4. Синие точки показывают скопления с высокой металличностью, принадлежащие диску, в соответствии с работами VandenBerg et al. (2013) и Leaman et al. (2013).

Law and Majewski (2010b), Massari et al. (2019), полученными несколько другими методами. Forbes and Bridges (2010) изучили зависимость «возраст–металличность» и исследовали морфологию горизонтальной ветви. Law and Majewski (2010b) использовали динамические модели в сочетании

с трехмерными данными о положении и скорости шаровых скоплений Галактики и dSph галактик для того, чтобы идентифицировать те спутники Галактики, которые первоначально сформировались в гравитационной потенциальной яме Sgr dSph и покинули Sgr. Также они изучили зависимость

«возраст—металличность». Carballo-Bello et al. (2014) представили широкопольную фотометрию для 23 шаровых скоплений. Massari et al. (2019) объединили кинематическую информацию, полученную Gaia, изучили зависимость «возраст—металличность» и проанализировали динамические свойства шаровых скоплений. Forbes (2020) использовал интегралы движения, зависимость «возраст—металличность» и отношение α -элементов. Bellazzini et al. (2020) использовали переменные RR Лиры, чтобы проследить поток в 6D, и выбрали скопления, которые соответствуют наблюдаемому потоку по положению и скорости.

Все шаровые скопления из нашей категории А причисляются к потоку в этих работах. Однако есть несколько скоплений, которые чаще остальных в литературе классифицируются как принадлежащие потоку Sgr, но не попавшие в категорию А. Это скопления NGC 4147 (Bellazzini et al. 2003, Carballo-Bello et al. 2014, Forbes and Bridges 2010, Forbes et al. 2004, Mackey and van den Bergh 2005), NGC 5634 (Bellazzini et al. 2003, Carballo-Bello et al. 2014, Forbes and Bridges 2010, Law and Majewski 2010b) и NGC 2419 (Belokurov et al. 2014, Forbes 2020, Marsakov et al. 2019a, Massari et al. 2017b, Newberg et al. 2003, Sohn et al. 2018).

Для шарового скопления NGC 4147 были найдены расхождения по средней лучевой скорости ближайших шести наблюдаемых звезд и по пространственной скорости, хотя оно принадлежит потоку по положению на небе и по соотношению «возраст—металличность». Наш вывод о том, что NGC 4147 не принадлежит Sgr, согласуется с результатом Riley and Strigari (2020). Мы не рассматривали шаровое скопление NGC 5634, так как для него была невелика вероятность (0.009) принадлежности потоку по пространственному положению. А по кинематике получается, что его лучевая скорость совпадает со средней лучевой скоростью ближайших шести звезд в потоке в пределах 3σ при принятом нами методе оценки ошибок, но не совпадает по трехмерным скоростям.

Скопление NGC 2419 мы не включили в рассмотрение, поскольку для него вероятность принадлежать потоку по пространственному положению очень маленькая и нет ближайших соседей — наблюдаемых звезд из потока. В статье Massari et al. (2017b) NGC 2419 причисляется к потоку на основании сходства орбит галактики Sgr и этого ШС, хотя говорится, что NGC 2419 находится на гораздо большем расстоянии, чем текущая орбита Sgr. Это возможно, если Sgr был гораздо массивнее в прошлом и его обломки тогда будут занимать большой диапазон расстояний. Свидетельства в пользу этого предположения обсуждаются Gibbons et al. (2017), Marsakov et al. (2019a), Mucciarelli et al. (2017), однако наш метод

не использует это предположение, поскольку в модели LM10a начальная масса Sgr небольшая, $6 \times 10^8 M_{\odot}$.

Статья Arakelyan et al. (2018) представляет пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике с помощью анализа тензора инерции, где показано, что на расстоянии менее 18 кпк имеется статистически значимая анизотропия, то есть распределение сплюснуто к диску. Кроме того, на расстоянии около 18 кпк наблюдается некая особенность в распределении шаровых скоплений: отношение осей собственных значений тензора инерции по непонятной причине резко меняется. Мы предполагаем, что это может быть связано с прохождением приливных потоков на этом расстоянии, в частности, с прохождением приливного потока Sgr. Дальнейшее изучение влияния шаровых скоплений Sgr на пространственное распределение скоплений Галактики прольет свет на этот вопрос.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РАН КП 19-270 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с использованием методов наземных наблюдений и космических исследований». М. Е. Шарина благодарит РФФИ за поддержку грантом 18-02-00167а.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Alfaro-Cuello, N. Kacharov, N. Neumayer, et al., *Astrophys. J.* **886** (1), 57 (2019).
2. N. R. Arakelyan, S. V. Pilipenko, and N. I. Libeskind, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **481**, 918 (2018).
3. N. Bastian and C. Lardo, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 83 (2018).
4. G. Battaglia, P. North, P. Jablonka, et al., *Astron. and Astrophys.* **608**, A145 (2017).
5. H. Baumgardt, M. Hilker, A. Sollima, and A. Bellini, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482**, 5138 (2019).
6. M. Bellazzini, F. R. Ferraro, and R. Ibata, *Astron. J.* **124**, 915 (2002).
7. M. Bellazzini, F. R. Ferraro, and R. Ibata, *Astron. J.* **125**, 188 (2003).
8. M. Bellazzini, R. Ibata, K. Malhan, et al., *Astron. and Astrophys.* **636**, A107 (2020).
9. V. Belokurov, N. W. Evans, M. J. Irwin, et al., *Astrophys. J.* **658**, 337 (2007).
10. V. Belokurov, S. E. Koposov, N. W. Evans, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **437**, 116 (2014).

11. V. Belokurov, D. B. Zucker, N. W. Evans, et al., *Astrophys. J.* **642**, L137 (2006).
12. T. Bensby, S. Feltzing, and M. S. Oey, *Astron. and Astrophys.* **562**, A71 (2014).
13. O. M. Boberg, E. D. Friel, and E. Vesperini, *Astrophys. J.* **824**, 5 (2016).
14. P. Bonifacio, L. Sbordone, G. Marconi, et al., *Astron. and Astrophys.* **414**, 503 (2004).
15. J. A. Carballo-Bello, A. Sollima, D. Martínez-Delgado, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445**, 2971 (2014).
16. J. L. Carlin, A. A. Sheffield, K. Cunha, and V. V. Smith, *Astrophys. J.* **859**, L10 (2018).
17. G. Carraro, *Astron. J.* **137**, 3809 (2009).
18. G. Carraro, R. Zinn, and C. Moni Bidin, *Astron. and Astrophys.* **466**, 181 (2007).
19. E. Carretta, A. Bragaglia, and R. G. Gratton, *Astron. and Astrophys.* **473**, 129 (2007).
20. E. Carretta, A. Bragaglia, R. G. Gratton, et al., *Astron. and Astrophys.* **561**, A87 (2014).
21. E. Carretta, A. Bragaglia, S. Lucatello, et al., *Astron. and Astrophys.* **600**, A118 (2017).
22. D. Costar and H. A. Smith, *Astron. J.* **96**, 1925 (1988).
23. G. S. Da Costa and T. E. Armandroff, *Astron. J.* **109**, 2533 (1995).
24. M. I. P. Dierickx and A. Loeb, *Astrophys. J.* **847**, 42 (2017a).
25. M. I. P. Dierickx and A. Loeb, *Astrophys. J.* **836**, 92 (2017b).
26. D. I. Dinescu, S. R. Majewski, T. M. Girard, and K. M. Cudworth, *Astron. J.* **120**, 1892 (2000).
27. D. I. Dinescu, S. R. Majewski, T. M. Girard, and K. M. Cudworth, *Astron. J.* **122**, 1916 (2001).
28. A. Dotter, A. Sarajedini, and J. Anderson, *Astrophys. J.* **738**, 74 (2011).
29. A. Dotter, A. Sarajedini, J. Anderson, et al., *Astrophys. J.* **708**, 698 (2010).
30. S. Duffau, R. Zinn, A. K. Vivas, et al., *Astrophys. J.* **636**, L97 (2006).
31. D. A. Forbes, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (1), 847 (2020).
32. D. A. Forbes and T. Bridges, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **404**, 1203 (2010).
33. D. A. Forbes, J. Strader, and J. P. Brodie, *Astron. J.* **127**, 3394 (2004).
34. Gaia Collab., C. Babusiaux, F. van Leeuwen, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A10 (2018a).
35. Gaia Collab., A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A1 (2018b).
36. Gaia Collab., A. Helmi, F. van Leeuwen, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A12 (2018c).
37. S. L. J. Gibbons, V. Belokurov, and N. W. Evans, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 794 (2017).
38. C. J. Grillmair, *Astrophys. J.* **645**, L37 (2006).
39. C. J. Grillmair and O. Dionatos, *Astrophys. J.* **641**, L37 (2006).
40. C. J. Hansen, M. El-Souri, L. Monaco, et al., *Astrophys. J.* **855**, 83 (2018).
41. W. E. Harris, *Astron. J.* **112**, 1487 (1996).
42. W. E. Harris, G. L. H. Harris, and M. Alessi, *Astrophys. J.* **772**, 82 (2013).
43. S. Hasselquist, J. L. Carlin, J. A. Holtzman, et al., *Astrophys. J.* **872**, 58 (2019).
44. A. Helmi, S. D. M. White, P. T. de Zeeuw, and H. Zhao, *Nature* **402**, 53 (1999).
45. R. A. Ibata, G. Gilmore, and M. J. Irwin, *Nature* **370**, 194 (1994).
46. R. A. Ibata, R. F. G. Wyse, G. Gilmore, et al., *Astron. J.* **113**, 634 (1997).
47. M. Irwin, *IAU Symp.* **192**, 409 (1999).
48. C. I. Johnson, N. Caldwell, R. M. Rich, et al., *Astron. J.* **152**, 21 (2016).
49. N. Kacharov, A. Koch, and A. McWilliam, *Astron. and Astrophys.* **554**, A81 (2013).
50. J. M. D. Kruijssen, J. L. Pfeffer, M. Reina-Campos, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486**, 3180 (2019).
51. D. R. Law, K. V. Johnston, and S. R. Majewski, *Astrophys. J.* **619**, 807 (2005).
52. D. R. Law and S. R. Majewski, *Astrophys. J.* **718**, 1128 (2010b).
53. D. R. Law and S. R. Majewski, *Astrophys. J.* **714**, 229 (2010a).
54. D. R. Law, S. R. Majewski, M. F. Skrutskie, and K. V. Johnston, *ASP Conf. Ser.* **327**, 239 (2004).
55. R. Leaman, D. A. Vandenberg, and J. T. Mendel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **436**, 122 (2013).
56. J. Li and FELLOW, C. Liu, X. Xue, et al., *Astrophys. J.* **874**, 138 (2019).
57. D. Lynden-Bell and R. M. Lynden-Bell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **275**, 429 (1995).
58. A. D. Mackey and G. F. Gilmore, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **355**, 504 (2004).
59. A. D. Mackey and S. van den Bergh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **360**, 631 (2005).
60. S. R. Majewski, *Publ. Astron. Soc. Australia* **21** (2), 197 (2004).
61. S. R. Majewski, W. E. Kunkel, D. R. Law, et al., *Astron. J.* **128**, 245 (2004).
62. S. R. Majewski, J. A. Munn, and S. L. Hawley, *Astrophys. J.* **459**, L73 (1996).
63. S. R. Majewski, M. F. Skrutskie, M. D. Weinberg, and J. C. Ostheimer, *Astrophys. J.* **599**, 1082 (2003).
64. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 403 (2019a).
65. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, *Astronomy Reports* **63** (4), 274 (2019b).
66. D. Martínez Delgado, D. I. Dinescu, R. Zinn, et al., *ASP Conf. Ser.* **327**, 255 (2004).
67. D. Martínez-Delgado, R. Zinn, R. Carrera, and C. Gallart, *Astrophys. J.* **573**, L19 (2002).
68. D. Massari, H. H. Koppelman, and A. Helmi, *Astron. and Astrophys.* **630**, L4 (2019).
69. D. Massari, A. Mucciarelli, E. Dalessandro, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **468**, 1249 (2017a).
70. D. Massari, L. Posti, A. Helmi, et al., *Astron. and Astrophys.* **598**, L9 (2017b).
71. S. Mészáros, S. L. Martell, M. Shetrone, et al., *Astron. J.* **149**, 153 (2015).

72. L. Monaco, M. Bellazzini, P. Bonifacio, et al., *Astron. and Astrophys.* **464**, 201 (2007).
73. C. Muñoz, D. Geisler, S. Villanova, et al., *Astron. and Astrophys.* **620**, A96 (2018).
74. A. Mucciarelli, M. Bellazzini, R. Ibata, et al., *Astron. and Astrophys.* **605**, A46 (2017).
75. A. Mura-Guzmán, S. Villanova, C. Muñoz, and B. Tang, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **474**, 4541 (2018).
76. C. Navarrete, V. Belokurov, S. E. Koposov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 1329 (2017).
77. H. J. Newberg, B. A. Willett, B. Yanny, and Y. Xu, *Astrophys. J.* **711**, 32 (2010).
78. H. J. Newberg, B. Yanny, E. K. Grebel, et al., *Astrophys. J.* **596**, L191 (2003).
79. H. J. Newberg, B. Yanny, C. Rockosi, et al., *Astrophys. J.* **569**, 245 (2002).
80. H. J. Newberg, B. Yanny, and B. A. Willett, *Astrophys. J.* **700**, L61 (2009).
81. C. Palma, S. R. Majewski, and K. V. Johnston, *Astrophys. J.* **564**, 736 (2002).
82. P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **189**, L51 (1974).
83. B. J. Pritzl, K. A. Venn, and M. Irwin, *Astron. J.* **130**, 2140 (2005).
84. A. A. Puls, A. Alves-Brito, F. Campos, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476**, 690 (2018).
85. M. J. Reid, K. M. Menten, A. Brunthaler, et al., *Astrophys. J.* **783**, 130 (2014).
86. A. H. Riley and L. E. Strigari, arXiv e-prints arXiv:2001.11564 (2020).
87. H. J. Rocha-Pinto, S. R. Majewski, M. F. Skrutskie, et al., *Astrophys. J.* **615**, 732 (2004).
88. A. Rojas-Arriagada, M. Zoccali, S. Vásquez, et al., *Astron. and Astrophys.* **587**, A95 (2016).
89. L. V. Sales, A. Helmi, E. Starkenburg, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **389**, 1391 (2008).
90. M. Schaeuble, G. Preston, C. Sneden, et al., *Astron. J.* **149** (6), 204 (2015).
91. M. H. Siegel, A. Dotter, S. R. Majewski, et al., *Astrophys. J.* **667**, L57 (2007).
92. S. T. Sohn, L. L. Watkins, M. A. Fardal, et al., *Astrophys. J.* **862** (1), 52 (2018).
93. E. Starkenburg, A. Helmi, H. L. Morrison, et al., *Astrophys. J.* **698**, 567 (2009).
94. T. Tepper-García and J. Bland-Hawthorn, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **478**, 5263 (2018).
95. E. Valenti, L. Origlia, and R. M. Rich, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **414**, 2690 (2011).
96. D. A. Vandenberg, K. Brogaard, R. Leaman, and L. Casagrande, *Astrophys. J.* **775**, 134 (2013).
97. E. Vasiliev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (2), 2832 (2019).
98. S. Villanova, L. Monaco, C. Moni Bidin, and P. Assmann, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460**, 2351 (2016).
99. M. E. K. Williams, M. Steinmetz, S. Sharma, et al., *Astrophys. J.* **728**, 102 (2011).
100. B. Yanny, H. J. Newberg, J. A. Johnson, et al., *Astrophys. J.* **700** (2), 1282 (2009).

Globular Cluster Lost by the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy

N. R. Arakelyan¹, S. V. Pilipenko¹, and M. E. Sharina²

¹P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhizy, 369167 Russia

In this work a search was carried out for globular clusters belonging to the Sagittarius (Sgr) tidal stream using the analysis of spatial positions, radial velocities relative to the Galactic Standard of Rest (V_{GSR}), proper motions and ratio of age–metallicity: ξ ($[\text{Fe}/\text{H}]$) for globular clusters and for stars in the tidal stream. As a result, three categories of globular clusters were obtained: A—most certainly in the stream: Terzan 8, Whiting 1, Arp 2, NGC 6715, Terzan 7, Pal 12; B—kinematic outliers: Pal 5, NGC 5904, NGC 5024, NGC 5053, NGC 5272, NGC 288; C—lowest rank candidates: NGC 6864, NGC 5466, NGC 5897, NGC 7492, NGC 4147.

Keywords: Galaxy: globular clusters: general—Galaxy: structure—galaxies: dwarf