

ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ КАК ИНДИКАТОРЫ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ

© 2022 г. Н. Р. Аракелян¹, *, С. В. Пилипенко¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: Н.Р. Аракелян: n.rubenovna@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 16.11.2021 г.

Принята к публикации 26.11.2021 г.

Мы изучили систему шаровых скоплений (ШС), которые образовались в других галактиках и со временем аккрецировали на Млечный Путь. Для этого из литературы были взяты выборки ШС, принадлежащих разным приливным потокам, полученные на основе новейших данных обсерватории GAIA. Мы измерили анизотропию распределения этих ШС с помощью тензора инерции и нашли, что распределение ШС в потоках изотропное. Тем не менее видно, что некоторая часть аккрецированных ШС из существующих выборок на самом деле принадлежит диску Галактики. Для уточнения происхождения ШС мы исследовали зависимость “возраст–металличность”. Эта зависимость демонстрирует бимодельность, и две разные ветви явно показывают разницу между скоплениями, образовавшимися в потоках и в диске Галактики. Так же было исследовано влияние крупномасштабного окружения Галактики (т.е. местного сверхскопления) на распределение галактик-спутников и ШС Галактики. Известно, что галактики-спутники Млечного Пути образуют анизотропную плоскую структуру, поэтому мы включили их в наш анализ. Проверка показала, что плоскость галактик-спутников перпендикулярна одновременно и диску Галактики, и сверхгалактической плоскости. Для ШС на расстояниях более 100 кпк наблюдается аналогичная картина.

Ключевые слова: (Галактика:) шаровые скопления: общий – Галактика: структура – галактики: карлик

DOI: 10.31857/S000462992203001X

1. ВВЕДЕНИЕ

Шаровые скопления (ШС) являются одними из самых старых объектов, населяющих галактики. Согласно иерархической теории, галактики формируются путем слияния сначала более мелких, а затем более крупных объектов [1]. При слиянии галактик, сильно различающихся по массе, как правило, меньшая галактика разрушается постепенно. Поскольку она продолжает свое движение по орбите, за галактикой образуется приливной хвост из газа, пыли, звезд и ШС, что и обогащает более крупную галактику. Такого типа слияния происходили и происходят до сих пор и с нашей Галактикой. По мнению Бланд-Ховторна и Герхарда [2] примерно 100 галактик-спутников аккрецировали в Галактику за время жизни Вселенной. Но вклад ШС из этих галактик-спутников в нашу Галактику дают только массивные спутники, так как галактики, у которых звездная масса $\leq 10^7 M_{\odot}$, имеют очень мало ШС [3]. Маен и др. [4] утверждают, что скопления, у которых полная удельная энергия $E \geq -1.6 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$, ак-

крецировали из карликовых галактик. Космологические гидродинамические симуляции показывают, что 15–40% звезд в гало образовались вне Галактики (*ex situ*), т.е. в карликовых галактиках-спутниках, а затем аккрецировали [5, 6]. В результатах исследований разных авторов процент ШС, образовавшихся *ex situ*, отличается. Например, в работе [7] 54% ШС (87 скоплений из 160) образовались *ex situ* и потом аккрецировали, в работе [8] процент аккрецированных скоплений составляет 43, а в работе [9] данная величина достигает 60%.

Таким образом, значительная часть ШС Галактики была аккрецирована извне. Информация о происхождении ШС может сохраниться как в свойствах звездного населения ШС, так и в пространственном распределении и динамике самих ШС. В частности, хорошо известно, что и для галактик-спутников, и для ШС наблюдается дискообразная структура, перпендикулярная диску Галактики (см., напр., [10–12]). Эта структура может быть результатом аккреции нескольких галактик, прилетевших в нашу Галактику преимущественно с полярных направлений. В соответствии с

теорией Зельдовича [13] образование крупномасштабной структуры Вселенной происходит путем независимого сжатия или расширения вещества по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Хорошим примером структуры, сжимающейся по одному направлению и расширяющейся по двум другим, является Местное Сверхскопление галактик, выглядящее как типичный “блин” Зельдовича. Эта структура задает выделенное направление в окрестностях Галактики, и поэтому может влиять на преимущественное направление аккреции и распределение аккрецированного материала в нашей Галактике.

В литературе есть много обсуждений приливных потоков Галактики [14–35]. Недавнее измерение собственных движений ШС с помощью обсерватории GAIA позволило выделить ШС, принадлежащие конкретным приливным потокам. Вопрос о различии физических свойств ШС, образовавшихся *in situ* и *ex situ*, детально исследовался в [36]. В указанной работе было показано, что аккрецированные ШС отличаются по содержанию альфа элементов, а также по диапазону масс. Цель нашей работы – проверить пространственную ориентацию системы ШС, принадлежащих потокам, т.е. заведомо аккрецировавших на нашу Галактику извне. Для этого была сопоставлена ориентация систем, выделенных разными авторами, с диском Галактики, а также с плоскостью Местного Сверхскопления. В дополнение к этому было проанализировано соотношение “возраст–металличность” для ШС, принадлежащих потокам, и обсуждена связь цветов ШС с их происхождением.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 описаны используемые выборки ШС и исследована анизотропия их распределения. В разделе 3 обсуждается зависимость “возраст–металличность” для ШС, в разделе 4 измеряется влияние Местного Сверхскопления. Выводы представлены в разделе 5.

2. ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ МЛЕЧНОГО ПУТИ В ПРИЛИВНЫХ ПОТОКАХ

В нашей Галактике сейчас известно 157 ШС [37, 38]¹, со временем появляются статьи о новых скоплениях Млечного Пути (например, FSR 1716 [39], FSR 1758 [40, 41], VVV–CL001 [42], VVV–CL002 [43], BH 140 [44], Gran 1 [45], Pfliegerer 2 [46], ESO 93–8 [47], Mercer 5 [48], Segue 3 [49], Ryu 059, Ryu 879 [50], Kim 3 [51], Crater/Laevens 1 [52, 53], Laevens 3 [54], BLISS 1 [55]). Хотя и до получения высокоточных данных GAIA были попытки выделить ШС, принадлежащие приливным потокам [33, 56–58], но после появления данных GAIA эта задача получила значительное развитие

[4, 7, 9, 40, 59–62]. В этой статье мы обращаем наше внимание на три работы: [9] (далее Massari), [40] (далее Myeong) и [7] (далее Forbes), в которых присутствуют наиболее полные списки ШС, принадлежащих разным приливным потокам.

В работе Forbes приведено 76 скоплений, которые принадлежат пяти прародителям – галактикам-спутникам. Для проверки принадлежности авторами использовались интегралы движения (integrals of motion (IOM)), зависимость “возраст–металличность” (age metallicity relation (AMRs)) и зависимости альфа элементов. Из этих 76 ШС девять принадлежат хорошо известной карликовой сфероидальной галактике Стрельца (Sgr dSph), 28 принадлежат карликовой галактике Гайя-Энцелад (Gaia-Enceladus), девять ШС – карликовой галактике Секвоя (Sequoia), 21 скопление – низкоэнергетическому спутнику Коала (Koala), девять скоплений принадлежат маломассивному спутнику – потоку Хелми (Helmi streams). Еще 11 ШС были объединены в отдельную группу, которую назвали высокоэнергетической (High energy group). У этих скоплений высокие энергии и большой диапазон угловых моментов, что позволяет предположить, что они произошли от разных прародителей.

Авторы работы Massari рассмотрели 151 ШС, для которых они собрали полную кинематическую информацию. Они пришли к выводу, что из этих скоплений 62 вероятнее всего образовались в Галактике (*in situ*), а остальные скопления (89 скоплений) скорее всего образовывались *ex situ*, а затем аккрецировали. В основном аккрецированные скопления связаны с четырьмя известными событиями слияния: Гайя-Энцелад – 26 ШС (+6 кандидатов), карликовая сфероидальная галактика Стрельца – восемь ШС, поток Хелми (H99) – 10 ШС и галактика Секвоя – семь ШС. Остальные 36 скоплений относятся к низкоэнергетическим (Low energy – 25 ШС) или высокоэнергетическим (High energy – 11 ШС). Указанной привязке скоплений к каждой группе присуща неопределенность из-за частичного перекрытия обломков разных галактик-прародителей.

В статье Myeong речь идет о 34 ШС, которые аккрецировали в нашу Галактику. Для проверки авторы использовали кинематические данные GAIA [63] в сочетании с фотометрией из DECaPS (DECam Plane Survey [64]). По мнению авторов, карликовой сфероидальной галактике Стрельца принадлежат шесть ШС, галактике Секвоя – семь ШС и Колбасе Гайи (Gaia Sausage) – 21 ШС.

Суммируя результаты трех указанных работ, получаем основной список приливных потоков, из которых аккрецировала значительная часть ШС:

¹ <http://physwww.mcmaster.ca/harris/Databases.html>

- 1) Карликовая сфероидальная галактика Стрельца с ядром NGC 6715 (M54).
- 2) Галактика Секvoja с ядром NGC 5139 (ω Cen).
- 3) Поток Хелми (H99).
- 4) Гайя-Энцелад с ядром NGC 1851. Другие возможные вариации (названия) этого потока: Колбаса Гайи или Большой Пес (СМа).
- 5) Низкоэнергетический прародитель Коала, которому может быть эквивалентен Kraken, а так же низкоэнергетичная группа ($E < -1.86 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$).
- 6) Высокоэнергетичная группа ($E > -1.5 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$).

2.1. Анизотропия распределения шаровых скоплений

Количество ШС, принадлежащих разным потокам по классификации рассматриваемых в этой статье авторов, следующее: по Forbes – 87 ШС, по Massari – 89 (эти скопления находятся на расстоянии от 1.42 до 144.77 кпк от центра Галактики) и по Myeong – 34 ШС (на расстоянии от 2.42 до 71.36).

Для того, чтобы понять, наблюдается ли какое-нибудь отличие в распределениях ШС, принадлежащих потокам и образовавшихся в Млечном Пути, мы решили проверить анизотропию распределения этих ШС с помощью тензора инерции, как и в работе [12]. Тензор строится следующим образом:

$$S_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^k x_j^k, \quad (1)$$

где S – тензор инерции, N – число объектов, x_i^k – расстояние от k -го объекта до центра Галактики вдоль i -й оси координат. Стандартные математические операции определения собственных значений и собственных осей тензора позволяют нам охарактеризовать анизотропию распределения. Собственные значения a , b и c для удобства отсортированы в порядке возрастания так, что $a > b > c$. Степень анизотропии характеризуется соотношениями собственных значений c/a и b/a , которые в случае изотропного распределения приближаются к 1. Собственные вектора тензора инерции определяют ориентацию анизотропного распределения в пространстве.

Чтобы проверить статистическую значимость найденных параметров системы ШС, мы генерируем 10 000 случайных выборок с тем же радиальным распределением и числом объектов, что и в наблюдаемых данных, и измеряем медианное значение и среднеквадратичное значение отношения собственных значений тензоров. Мы на-

зываем анизотропию статистически значимой, если отношение собственных значений тензора для реальных каталогов отличается от медианы случайных выборок более чем на 3σ . Случайные выборки строятся путем фиксирования расстояний (R) из реальной выборки и присвоения ШС случайных угловых координат.

На рис. 1 приведены результаты измерения анизотропии для ШС с помощью тензора инерции. На панелях представлены отношения c/a и b/a как функции от R , рассчитанные для всех ШС с расстоянием меньше R . Распределения реальных объектов показаны точками, сплошная линия представляет медианный результат для 10000 случайных выборок, а штриховые линии – медиану $\pm 3\sigma$. “Угол” на этих панелях измеряется между нормалью к плоскости Галактики и малой (зеленые треугольники) или большой (синие точки) осью распределения.

Из измерений анизотропии с помощью тензора инерции для всех выборок ШС в потоках из трех указанных выше работ следует, что распределение ШС в потоках изотропное, т.е. ни для одной выборки не наблюдается статистически значимая анизотропия. В статье [12, стр. 7, рис. 7] видно, что для всей выборки ШС на расстоянии от 2 до 10 кпк наблюдается статистически значимая анизотропия, которую Аракелян и др. связали с ШС, принадлежащими диску Галактики, то есть образовавшимся *in situ*. В этой работе мы изучали пространственные распределения ШС, которые по мнению Forbes, Massari и Myeong принадлежат приливным потокам, т.е. образовались *ex situ*. Как мы можем видеть на рис. 1, для всех выборок пространственное распределение ШС, принадлежащих приливным потокам, изотропное. Это согласуется с выводом работы Аракелян и др. [12], что статистически значимая анизотропия для всей выборки ШС обусловлена скоплениями, которые вероятнее всего образовались в Галактике или очень долгое время находятся во взаимодействии с диском Галактики. Важно также то, что скопления, которые принадлежат приливным потокам, не проявляют значимой структуры, чего мы могли ожидать, во-первых, потому, что сгущивание в основном происходит по выделенным направлениям, связанным со стенками и филаментами крупномасштабной структуры, а во-вторых, потому, что для галактик-спутников наблюдается анизотропное распределение.

Тем не менее на рис. 1 мы видим, что по всем трем выборкам (Forbes, Massari, Myeong) для ШС, которые принадлежат потокам, большая ось тензора инерции лежит в диске, на расстояниях примерно от 3 до 10–20 кпк. Представляется маловероятным, что такая ситуация может возникнуть при случайном изотропном распределении ШС.

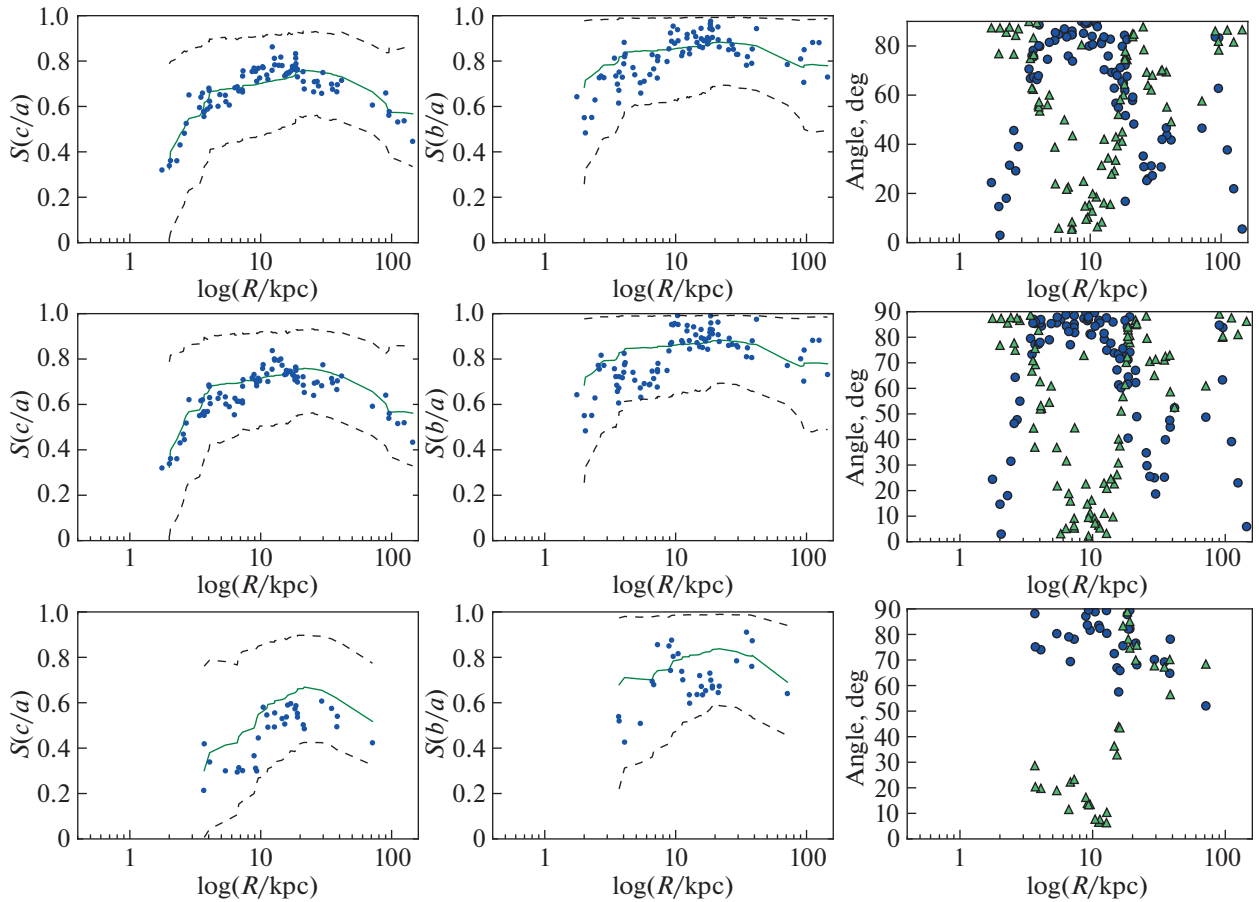


Рис. 1. Анизотропия ШС, количественно выраженная тензором инерции для выборок скоплений по Forbes (вверху), Massari (в центре) и Myeong (внизу). В левом и среднем столбцах показаны отношения c/a и b/a как функции галактоцентрического расстояния скопления соответственно. Каждая синяя точка представляет собой отношение собственных значений тензора, вычисленное для всех скоплений на расстоянии меньше R от центра Галактики. Сплошная зеленая линия представляет собой медианные отношения собственных значений для 10000 случайных выборок. Штриховыми линиями обозначены отклонения $\pm 3\sigma$ таких случайных распределений. В правом столбце показаны углы, измеренные в градусах, между галактическим полюсом Млечного Пути и большой (синие точки) и малой (зеленые треугольники) осью тензора инерции. Зеленые треугольники, близкие к 90° , указывают на полярную плоскость.

Такое распределение направлений осей тензора, как на рис. 1, можно ожидать, если часть ШС в каждой из выборок принадлежит диску. Мы демонстрируем это ниже с помощью случайных каталогов.

Для проверки вероятности попадания ШС из диска в выборку ШС из приливных потоков мы генерируем случайные каталоги, содержащие такое же количество ШС, что и реальные выборки. Более того, галактоцентрические расстояния ШС мы берем из реальных выборок. Угловые координаты задаются случайным образом. Чтобы смоделировать ситуацию, в которой часть скоплений принадлежит диску, для n скоплений приравнивается к нулю значение высоты над диском, т.е. декартова координата z .

С помощью таких моделей мы рассчитали условную вероятность получить распределение, подобное правому столбцу на рис. 1, т.е. когда большие оси тензора инерции в диапазоне расстояний от 3.5 до 20 кпк расположены под углом более 70° к направлению на полюс Галактики, при условии, что n скоплений принадлежат диску. В случае, когда распределение изотропное, т.е. $n = 0$, эта вероятность равна 4.5, 0.6 и 1.1% для выборок Forbes, Massari и Myeong соответственно.

Чтобы эта вероятность превысила, например, 10%, в диске должно находиться $n = 6$, 16 и 8 ШС для выборок Forbes, Massari и Myeong соответственно. Из этого можно сделать вывод, что некоторая часть ШС, образовавшихся по мнению ука-

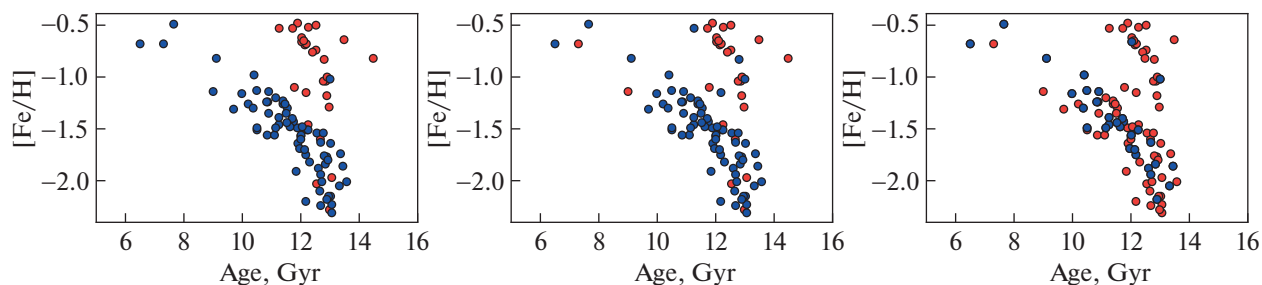


Рис. 2. Возраст в зависимости от металличности ШС для выборок скоплений по Forbes, Massari и Myeong — левая, средняя и правая иллюстрации соответственно. Синими точками представлены скопления, образовавшиеся *ex situ*, а красные точки показывают скопления *in situ*.

занных авторов вне нашей Галактики, на самом деле принадлежит ее диску. Следует заметить, что в работе [36] на основании анализа содержания альфа элементов было показано, что группа скоплений Low energy из работы Massari скорее всего образовалась *in situ*, что тоже свидетельствует о неточности разделения *in situ/ex situ* в выборке Massari. Для дальнейшей проверки происхождения ШС мы используем диаграмму “возраст–металличность”.

3. ДВЕ ВЕТВИ ШС НА ЗАВИСИМОСТИ “ВОЗРАСТ–МЕТАЛЛИЧНОСТЬ”

В литературе обсуждается тот факт, что население ШС Млечного Пути демонстрирует бимодальность цвета: синие и красные скопления [65–77]. Это обусловлено бимодальностью металличности [73, 75, 78–87]. Синие скопления в основном находятся в гало Галактики. Эти скопления, вероятно, ранее принадлежали галактикам-спутникам. В то же время красные скопления пространственно сконцентрированы к центру Галактики и вращаются вместе с ним. Синие скопления старые и бедные металлами, а красные скопления более молодые и богатые металлами. Пики $[Fe/H]$ для синих и красных скоплений в Млечном Пути составляют примерно -1.5 и -0.5 соответственно. Такая бимодальность предполагает два механизма образования ШС. Тонини, Реноу и др., Коте и др. [76, 77, 80] утверждают, что красные скопления образуются *in situ*, а синие — аккрецируются либо в результате слияния галактик-спутников с Галактикой, либо в результате приливного захвата самих скоплений.

Для того, чтобы понять, чем отличаются скопления, образовавшиеся *in situ* от скоплений, образовавшихся *ex situ*, мы нанесли эти выборки по данным работ Massari, Forbes и Myeong на диаграмму “возраст–металличность”. Результаты представлены на рис. 2.

На зависимости “возраст–металличность” отчетливо видно, что у ШС наблюдается две ветви. В менее металличной ветви лежат в основном скопления, которые принадлежат разным приливным потокам, образовавшимся из частичных разрушений галактик-спутников. У скоплений этой последовательности наблюдается большой разброс в возрасте и металличности, но нет скоплений с возрастом меньше 6 млрд. лет. У скоплений более металличной ветви, образовавшихся *in situ*, тоже наблюдается разброс по металличности, но у всех скоплений возраст больше 11 млрд. лет.

Стоит заметить, что скопления, возникшие *in situ*, образовались не в той Галактике, которую мы знаем, а в ее прародителе. В иерархической модели образования галактик масса галактики набирается постепенно за счет слияний, и у галактик в целом нет четко выраженного момента образования, поэтому для давно образовавшихся объектов трудно разграничить понятия *in situ* и *ex situ*. Однако конкретно для нашей Галактики считается, что она не испытывала слияний с сопоставимыми по массе объектами после $z = 2$ или 10.5 млрд. лет назад [88]. К тому моменту она набрала только 1/5 своей нынешней полной массы (включая темное гало), а 6 млрд. лет назад (возраст самых молодых ШС) ее масса составляла около 60% сегодняшней [89].

4. РОЛЬ МЕСТНОГО СВЕРХСКОПЛЕНИЯ

В иерархической модели образования галактик аккреция вещества управляется крупномасштабными потоками, ответственными также за образование ячеистой структуры — “блинов” и филаментов. В соответствии с теорией Зельдовича [13], “блин” образуется из однородно заполненного объема, если по одному из трех взаимно перпендикулярных направлений происходит сжатие, а по двум другим направлениям — расширение. Таким образом, крупномасштабная струк-

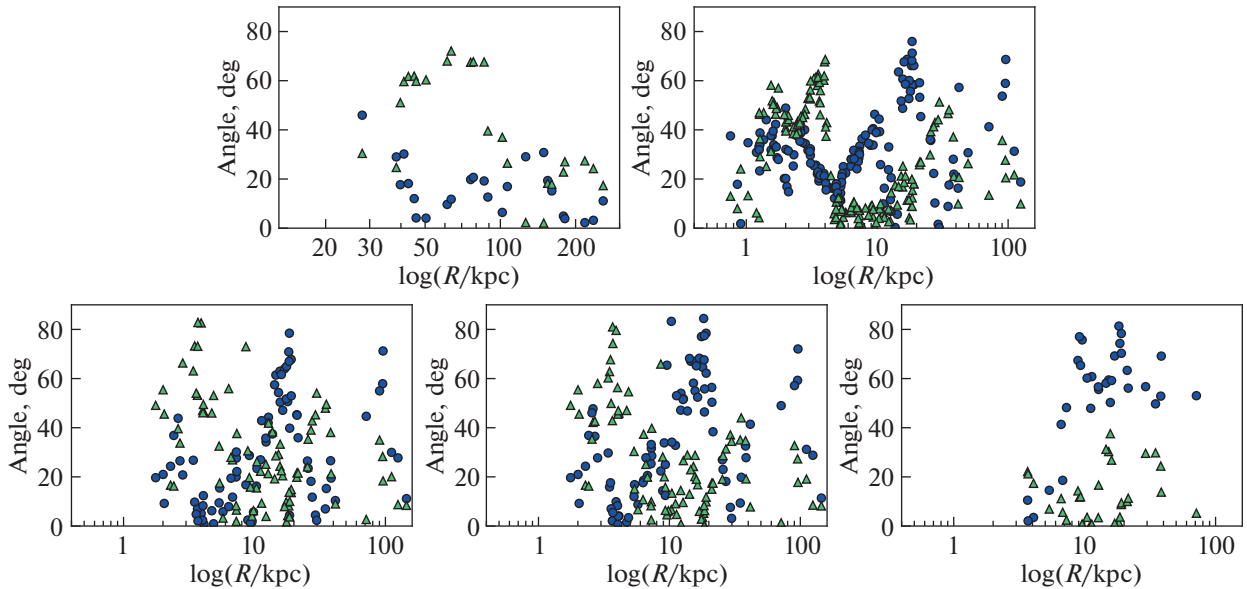


Рис. 3. “Угол” как функция галактоцентрического расстояния у галактик-спутников для всей выборки ШС (верхний ряд, слева направо) и для выборок скоплений по Forbes, Massari и Myeong (нижний ряд, слева направо соответственно). “Угол” измеряется между плоскостью LSC и малой (зеленые треугольники) или большой (синие точки) осью распределения ШС.

тура связана с анизотропными движениями вещества, и эта анизотропия может также оказывать влияние на распределение вещества в галактиках. Наша Галактика вместе с Местной Группой лежит внутри Местного Сверхскопления (Local Supercluster, LSC) [90–95], хорошо заметной блиноподобной структуры с размерами в десятки мегапарсек.

Мы проверили влияние местного сверхскопления на распределение ШС, а также карликовых галактик-спутников Млечного Пути в пространстве. Галактики-спутники заведомо были аккрецированы на нашу Галактику извне, и при этом образуют отчетливо выделяемую плоскую структуру [10–12], поэтому мы не ограничивались анализом распределения ШС, но также рассмотрели и галактики-спутники. Для этого были получены распределения углов между осями тензора инерции (1) и плоскостью Местного Сверхскопления для карликовых галактик-спутников (27 спутников [96]) и для ШС: 1) для всей выборки ШС (157 ШС [37, 38]); 2) для ШС из списка Forbes; 3) для ШС из списка Massari, и 4) для ШС из списка Myeong. На рис. 3 “Угол” представлен как функция галактоцентрического расстояния для ШС и спутников Галактики. “Угол” измеряется между плоскостью Местного Сверхскопления и малой (зеленые треугольники) или большой (синие точки) осью распределения ШС.

Из рис. 3 видим, что для галактик-спутников (верхний ряд, слева) на самых больших расстояниях большая и малая оси лежат в сверхгалактической плоскости. В то же время малая ось лежит в диске Млечного Пути, а большая перпендикулярна ему. Это означает, что плоскость галактик-спутников перпендикулярна и диску Галактики, и сверхгалактической плоскости.

Для ШС можем сказать следующее: для всех 157 ШС (верхний ряд, справа) на малых расстояниях, до 4 кпк, результат нас не интересует, так как это ШС центральной части Галактики, а от 4 до 20 кпк малая ось перпендикулярна диску Галактики и лежит в сверхгалактической плоскости. Большая ось лежит в диске Галактики и при этом перпендикулярна сверхгалактической плоскости на расстоянии около 20 кпк. Таким образом, в диапазоне от 4 до 20 кпк ориентация системы ШС соответствует диску Галактики, влияние сверхскопления не проявляется. То же самое можно сказать для скоплений из потоков, только с большим шумом. Малая ось показывает большой разброс, это может быть связано с тем, что в выборке из потоков меньше скоплений, принадлежащих диску Галактики.

На расстоянии порядка 100 кпк для ШС картина напоминает таковую у галактик-спутников для всех выборок, т.е. система ШС ориентирована перпендикулярно и диску, и Сверхскоплению.

Стоит отметить, что на таких расстояниях наблюдается всего шесть скоплений, что недостаточно для надежных выводов.

На расстоянии около 30 кпк во всех выборках, кроме Myeong, большая ось лежит в сверхгалактической плоскости, а малая составляет с ней большой угол, около 60° для всех ШС и для Forbes, а для выборки Massari – в пределах 45° . На расстоянии 25–40 кпк находятся всего 10 ШС, из которых 10 и 9 ШС принадлежат потокам по выборкам Forbes и Massari соответственно. Таким образом, в выборках Forbes и Massari на этих расстояниях могут быть признаки влияния сверхскопления на ориентацию системы аккрецированных ШС, но надежность данного вывода невысокая.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе мы изучали систему ШС, которые образовались вне Галактического диска. Для этого мы взяли из литературы выборки ШС, которые образовались в разных приливных потоках. Наш выбор мы остановили на работах Forbes, Massari и Myeong, так как их списки ШС, принадлежащих разным потокам, наиболее полные, и основаны на новейших данных обсерватории GAIA. Изучив ряд работ, в том числе указанные выше, мы получили основной список приливных потоков, которым принадлежали ШС и которые в дальнейшем аккрецировали: Карликовая сфероидальная галактика стрельца (Sgr dSph), Галактика Секвоя (Sequoia), Поток Хелми (H99), Гайя-Энцелад (Gaia-Enceladus, возможно Gaia Sausage или SMa), низкоэнергетичная группа (Low energy, возможно Koala или Kraken) и высокоэнергетичная группа (High energy).

Считается, что аккреция на Галактику происходила анизотропно, что проявляется, например, в виде дискообразной структуры из галактик-спутников. Мы измерили анизотропию распределения ШС, принадлежавших потокам с помощью тензора инерции. Результат измерения показал, что для аккрецированных ШС не наблюдается статистически значимой анизотропии. Получив этот результат, мы можем сказать, что анизотропная структура, которая наблюдается для полной выборки ШС (см. [12], стр. 7, рис. 7), обусловлена нахождением многих ШС в диске Галактики, и связана со скоплениями, образовавшимися *in situ*.

Тем не менее на рис. 1 для трех выборок аккрецированных ШС большая ось тензора инерции на расстоянии от 3 до 20 кпк лежит в диске. Это может быть вызвано тем, что в выборки попало значительное число ШС, возникших в диске Галактики. Для оценки их числа было смоделировано распределение ШС со случайными угловыми координатами и показано, что вероятность слу-

чайной реализации подобного распределения, при котором нет ШС, принадлежащих диску, составляет 4.5, 0.6 и 1.1% для выборок Forbes, Massari и Myeong соответственно. Этот вывод согласуется с выводом статьи [36], где было показано, что часть *ex situ* скоплений из каталога Massari на самом деле генетически связана с нашей Галактикой.

Мы также проверили, как ведут себя скопления, образовавшиеся *in situ* и *ex situ* на зависимости “возраст–металличность” (рис. 2). На зависимости “возраст–металличность” легко можно выделить две ветви: в менее металлической ветви в основном находятся скопления, принадлежащие разным потокам, и у них большой разброс в возрасте и металличности. В то же время скопления в более металлической ветви, которые вероятнее всего образовались в Галактике, имеют разброс по металличности, но их возраст выше 11 млрд. лет.

Для проверки вероятного влияния Местного Сверхскопления на распределение галактик-спутников и ШС Млечного Пути были приведены рисунки, где представлен угол, измеренный между плоскостью LSC и осями распределения систем ШС или галактик-спутников, как функция галактоцентрического расстояния. Рисунок 3 (верхний ряд, слева) показывает, что плоскость галактик-спутников перпендикулярна диску Галактики и сверхгалактической плоскости одновременно. Для ШС на расстояниях до 20 кпк прослеживается влияние только диска Галактики, на расстояниях около 30 кпк возможно совпадение ориентации системы ШС со сверхгалактической плоскостью, а на больших расстояниях (более 100 кпк) ориентация напоминает таковую для галактик-спутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. J. E. Peebles, *Astrophys. J. Letters* **189**, L51 (1974).
2. J. Bland-Hawthorn and O. Gerhard, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 529 (2016), arXiv:1602.07702 [astro-ph.GA].
3. D. A. Forbes, J. I. Read, M. Gieles, and M. L. M. Collins, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **481**, 5592 (2018), arXiv:1809.07831 [astro-ph.GA].
4. G. C. Myeong, N. W. Evans, V. Belokurov, J. L. Sanders, and S. E. Koposov, *Astrophys. J. Letters* **863**, id. L28 (2018), arXiv:1805.00453 [astro-ph.GA].
5. A. Pillepich, V. Springel, D. Nelson, S. Genel, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **473**, 4077 (2018), arXiv:1703.02970 [astro-ph.GA].
6. R.-S. Remus and D. A. Forbes, arXiv:2101.12216 [astro-ph.GA] (2021).

7. *D. A. Forbes*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **493**, 847 (2020), arXiv:2002.01512 [astro-ph.GA].
8. *J. M. D. Kruijssen, J. L. Pfeffer, M. Reina-Campos, R. A. Crain, and N. Bastian*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **486**, 3180 (2019), arXiv:1806.05680 [astro-ph.GA].
9. *D. Massari, H. H. Koppelman, and A. Helmi*, Astron. and Astrophys. **630**, id. L4 (2019), arXiv:1906.08271 [astro-ph.GA].
10. *P. Kroupa, C. Theis, and C. M. Boily*, Astron. and Astrophys. **431**, 517 (2005), arXiv:astro-ph/0410421.
11. *M. Metz, P. Kroupa, and N. I. Libeskind*, Astrophys. J. **680**, 287 (2008), arXiv:0802.3899 [astro-ph].
12. *N. R. Arakelyan, S. V. Pilipenko, and N. I. Libeskind*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **481**, 918 (2018), arXiv:1803.04770 [astro-ph.GA].
13. *Y. B. Zel'dovich*, Astron. and Astrophys. **500**, 13 (1970).
14. *R. A. Ibata, G. Gilmore, and M. J. Irwin*, Nature **370**, 194 (1994).
15. *S. R. Majewski, J. A. Munn, and S. L. Hawley*, Astrophys. J. Letters **459**, L73 (1996).
16. *A. Helmi, S. D. M. White, P. T. de Zeeuw, and H. Zhao*, Nature **402**, 53 (1999), arXiv:astro-ph/9911041.
17. *H. J. Newberg, B. Yanny, C. Rockosi, E. K. Grebel, et al.*, Astrophys. J. **569**, 245 (2002), arXiv:astro-ph/0111095.
18. *S. R. Majewski, W. E. Kunkel, D. R. Law, R. J. Patterson, et al.*, Astron. J. **128**, 245 (2004), arXiv:astro-ph/0403701.
19. *H. J. Rocha-Pinto, S. R. Majewski, M. F. Skrutskie, J. D. Crane, and R. J. Patterson*, Astrophys. J. **615**, 732 (2004), arXiv:astro-ph/0405437.
20. *V. Belokurov, D. B. Zucker, N. W. Evans, G. Gilmore, et al.*, Astrophys. J. Letters **642**, L137 (2006), arXiv:astro-ph/0605025.
21. *C. J. Grillmair*, Astrophys. J. Letters **645**, L37 (2006), arXiv:astro-ph/0605396.
22. *C. J. Grillmair and O. Dionatos*, Astrophys. J. Letters **641**, L37 (2006), arXiv:astro-ph/0603062.
23. *S. Duffau, R. Zinn, A. K. Vivas, G. Carraro, R. A. Méndez, R. Winnick, and C. Gallart*, Astrophys. J. Letters **636**, L97 (2006), arXiv:astro-ph/0510589.
24. *M. H. Siegel, A. Dotter, S. R. Majewski, A. Sarajedini, et al.*, Astrophys. J. Letters **667**, L57 (2007), arXiv:0708.0027 [astro-ph].
25. *V. Belokurov, N. W. Evans, M. J. Irwin, D. Lynden-Bell, et al.*, Astrophys. J. **658**, 337 (2007), arXiv:astro-ph/0605705.
26. *L. V. Sales, A. Helmi, E. Starkenburg, H. L. Morrison, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **389**, 1391 (2008), arXiv:0805.0508 [astro-ph].
27. *E. Starkenburg, A. Helmi, H. L. Morrison, P. Harding, et al.*, Astrophys. J. **698**, 567 (2009), arXiv:0903.3043 [astro-ph.GA].
28. *H. J. Newberg, B. Yanny, and B. A. Willett*, Astrophys. J. Letters **700**, L61 (2009), arXiv:0906.3291 [astro-ph.GA].
29. *G. Carraro*, Astron. J. **137**, 3809 (2009), arXiv:0901.2673 [astro-ph.GA].
30. *D. R. Law and S. R. Majewski*, Astrophys. J. **718**, 1128 (2010), arXiv:1005.5390 [astro-ph.GA].
31. *H. J. Newberg, B. A. Willett, B. Yanny, and Y. Xu*, Astrophys. J. **711**, 32 (2010), arXiv:1001.0576 [astro-ph.GA].
32. *M. E. K. Williams, M. Steinmetz, S. Sharma, J. Bland-Hawthorn, et al.*, Astrophys. J. **728**, id. 102 (2011), arXiv:1012.2127 [astro-ph.GA].
33. *J. A. Carballo-Bello, A. Sollima, D. Martínez-Delgado, B. Pila-Dez, R. Leaman, J. Fliri, R. R. Muñoz, and J. M. Corral-Santana*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **445**, 2971 (2014), arXiv:1409.7390 [astro-ph.GA].
34. *E. Carretta, A. Bragaglia, S. Lucatello, V. D'Orazi, R. G. Gratton, P. Donati, A. Sollima, and C. Sneden*, Astron. and Astrophys. **600**, id. A118 (2017), arXiv:1701.03116 [astro-ph.SR].
35. *C. Navarrete, V. Belokurov, S. E. Kposov, M. Irwin, M. Catelan, S. Duffau, and A. J. Drake*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **467**, 1329 (2017), arXiv:1612.06829 [astro-ph.SR].
36. *V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha*, Astron. Rep. **64**, 805 (2020), arXiv:2010.10890 [astro-ph.GA].
37. *W. E. Harris, G. L. H. Harris, and M. Alessi*, Astrophys. J. **772**, id. 82 (2013), arXiv:1306.2247 [astro-ph.GA].
38. *W. E. Harris*, Astron. J. **112**, 1487 (1996).
39. *D. Minniti, T. Palma, I. Dékány, M. Hempel, et al.*, Astrophys. J. Letters **838**, id. L14 (2017), arXiv:1703.02033 [astro-ph.GA].
40. *G. C. Myeong, E. Vasiliev, G. Iorio, N. W. Evans, and V. Belokurov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **488**, 1235 (2019), arXiv:1904.03185 [astro-ph.GA].
41. *R. H. Barbá, D. Minniti, D. Geisler, J. Alonso-García, M. Hempel, A. Monachesi, J. I. Arias, and F. A. Gómez*, Astrophys. J. Letters **870**, id. L24 (2019), arXiv:1812.04999 [astro-ph.GA].
42. *D. Minniti, M. Hempel, I. Toledo, V. D. Ivanov, et al.*, Astron. and Astrophys. **527**, id. A81 (2011), arXiv:1012.2450 [astro-ph.GA].
43. *C. Moni Bidin, F. Mauro, D. Geisler, D. Minniti, et al.*, Astron. and Astrophys. **535**, id. A33 (2011), arXiv:1109.1854 [astro-ph.GA].
44. *T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, et al.*, Astron. and Astrophys. **618**, id. A93 (2018), arXiv:1805.08726 [astro-ph.GA].
45. *F. Gran, M. Zoccali, R. Contreras Ramos, E. Valenti, et al.*, Astron. and Astrophys. **628**, id. A45 (2019), arXiv:1904.10872 [astro-ph.GA].
46. *S. Ortolani, C. Bonatto, E. Bica, and B. Barbuy*, Astron. J. **138**, 889 (2009), arXiv:0907.1225 [astro-ph.GA].

47. *E. Bica, S. Ortolani, and B. Barbuy*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **136**, 363 (1999).
48. *E. P. Mercer, D. P. Clemens, M. R. Meade, B. L. Babler, et al.*, *Astrophys. J.* **635**, 560 (2005).
49. *V. Belokurov, M. G. Walker, N. W. Evans, G. Gilmore, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **712**, L103 (2010), arXiv:1002.0504 [astro-ph.GA].
50. *J. Ryu and M. G. Lee*, *Astrophys. J. Letters* **863**, id. L38 (2018), arXiv:1808.03455 [astro-ph.GA].
51. *D. Kim, H. Jerjen, D. Mackey, G. S. Da Costa, and A. P. Milone*, *Astrophys. J.* **820**, id. 119 (2016), arXiv:1512.03530 [astro-ph.GA].
52. *V. Belokurov, M. J. Irwin, S. E. Koposov, N. W. Evans, E. Gonzalez-Solares, N. Metcalfe, and T. Shanks*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **441**, 2124 (2014), arXiv:1403.3406 [astro-ph.GA].
53. *B. P. M. Laevens, N. F. Martin, B. Sesar, E. J. Bernard, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **786**, id. L3 (2014), arXiv:1403.6593 [astro-ph.GA].
54. *B. P. M. Laevens, N. F. Martin, E. J. Bernard, E. F. Schlafly, et al.*, *Astrophys. J.* **813**, id. 44 (2015), arXiv:1507.07564 [astro-ph.GA].
55. *S. Mau, A. Drlica-Wagner, K. Bechtol, A. B. Pace, et al.*, *Astrophys. J.* **875**, id. 154 (2019), arXiv:1812.06318 [astro-ph.GA].
56. *N. F. Martin, R. A. Ibata, M. Bellazzini, M. J. Irwin, G. F. Lewis, and W. Dehnen*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **348**, 12 (2004), arXiv:astro-ph/0311010.
57. *D. A. Forbes, J. Strader, and J. P. Brodie*, *Astron. J.* **127**, 3394 (2004), arXiv:astro-ph/0403136.
58. *D. A. Forbes and T. Bridges*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **404**, 1203 (2010), arXiv:1001.4289 [astro-ph.GA].
59. *V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha*, *Astron. Rep.* **63**, 274 (2019), arXiv:1904.06256 [astro-ph.GA].
60. *V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha*, *Astrophys. Bull.* **74**, 403 (2019).
61. *N. R. Arakelyan, S. V. Pilipenko, and M. E. Sharina*, *Astrophys. Bull.* **75**, 394 (2020), arXiv:2105.09850 [astro-ph.GA].
62. *J. Peñarrubia and M. S. Petersen*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **508**, L26 (2021), arXiv:2106.11984 [astro-ph.GA].
63. *L. Lindegren, J. Hernández, A. Bombrun, S. Klioner, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A2 (2018), arXiv:1804.09366 [astro-ph.IM].
64. *E. F. Schlafly, G. M. Green, D. Lang, T. Daylan, et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **234**, id. 39 (2018), arXiv:1710.01309 [astro-ph.GA].
65. *L. Searle and R. Zinn*, *Astrophys. J.* **225**, 357 (1978).
66. *S. E. Zepf and K. M. Ashman*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **264**, 611 (1993).
67. *P. Ostrov, D. Geisler, and J. C. Forte*, *Astron. J.* **105**, 1762 (1993).
68. *B. C. Whitmore, W. B. Sparks, R. A. Lucas, F. D. Macchetto, and J. A. Biretta*, *Astrophys. J. Letters* **454**, L73 (1995).
69. *R. A. W. Elson and B. X. Santiago*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **280**, 971 (1996).
70. *K. Gebhardt and M. Kissler-Patig*, *Astron. J.* **118**, 1526 (1999), arXiv:astro-ph/9906499.
71. *S. S. Larsen, J. P. Brodie, B. G. Elmegreen, Y. N. Efremov, P. W. Hodge, and T. Richtler*, *Astrophys. J.* **556**, 801 (2001), arXiv:astro-ph/0104133.
72. *S. S. Larsen, J. P. Brodie, J. P. Huchra, D. A. Forbes, and C. J. Grillmair*, *Astron. J.* **121**, 2974 (2001), arXiv:astro-ph/0102374.
73. *E. W. Peng, A. Jordán, P. Côté, J. P. Blakeslee, et al.*, *Astrophys. J.* **639**, 95 (2006), arXiv:astro-ph/0509654.
74. *L. R. Spitler, S. S. Larsen, J. Strader, J. P. Brodie, D. A. Forbes, and M. A. Beasley*, *Astron. J.* **132**, 1593 (2006), arXiv:astro-ph/0606337.
75. *J. Strader, J. P. Brodie, L. Spitler, and M. A. Beasley*, *Astron. J.* **132**, 2333 (2006), arXiv:astro-ph/0508001.
76. *C. Tonini*, *Astrophys. J.* **762**, id. 39 (2013), arXiv:1211.1434 [astro-ph.CO].
77. *F. Renaud, O. Agertz, and M. Gieles*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **465**, 3622 (2017), arXiv:1610.03101 [astro-ph.GA].
78. *D. A. Forbes, J. P. Brodie, and C. J. Grillmair*, *Astron. J.* **113**, 1652 (1997), arXiv:astro-ph/9702146.
79. *D. A. Forbes, J. P. Brodie, and J. Huchra*, *Astron. J.* **113**, 887 (1997), arXiv:astro-ph/9612172.
80. *P. Côté, R. O. Marzke, and M. J. West*, *Astrophys. J.* **501**, 554 (1998), arXiv:astro-ph/9804319.
81. *D. A. Forbes, M. A. Beasley, J. P. Brodie, and M. Kissler-Patig*, *Astrophys. J. Letters* **563**, L143 (2001), arXiv:astro-ph/0111185.
82. *T. H. Puzia, M. Kissler-Patig, D. Thomas, C. Maraston, R. P. Saglia, R. Bender, P. Goudfrooij, and M. Hempel*, *Astron. and Astrophys.* **439**, 997 (2005), arXiv:astro-ph/0505453.
83. *J. Strader, J. P. Brodie, A. J. Cenarro, M. A. Beasley, and D. A. Forbes*, *Astron. J.* **130**, 1315 (2005), arXiv:astro-ph/0506289.
84. *J. P. Brodie, J. Strader, G. Denicoló, M. A. Beasley, A. J. Cenarro, S. S. Larsen, H. Kuntschner, and D. A. Forbes*, *Astron. J.* **129**, 2643 (2005), arXiv:astro-ph/0502467.
85. *J. P. Brodie and J. Strader*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **44**, 193 (2006), arXiv:astro-ph/0602601.
86. *M. Pierce, M. A. Beasley, D. A. Forbes, T. Bridges, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **366**, 1253 (2006), arXiv:astro-ph/0510838.

87. *D. A. Forbes, L. R. Spitler, J. Strader, A. J. Romanowsky, J. P. Brodie, and C. Foster*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **413**, 2943 (2011), arXiv:1101.3575 [astro-ph.CO].
88. *F. Hammer, M. Puech, L. Chemin, H. Flores, and M. D. Lehnert*, Astrophys. J. **662**, 322 (2007), arXiv:astro-ph/0702585.
89. *E. Carlesi, Y. Hoffman, S. Gottlöber, N. I. Libeskind, A. Knebe, G. Yepes, and S. V. Pilipenko*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **491**, 1531 (2020), arXiv:1910.12865 [astro-ph.GA].
90. *G. de Vaucouleurs*, Astron. J. **58**, 30 (1953).
91. *G. de Vaucouleurs*, Vistas Astron. **2**, 1584 (1956).
92. *G. de Vaucouleurs*, Astrophys. J. **202**, 610 (1975).
93. *G. de Vaucouleurs*, Astrophys. J. **202**, 616 (1975).
94. *G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, and J. R. Corwin*, *Second reference catalogue of bright galaxies 1976* (Austin: University of Texas Press, 1976).
95. *G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, J. Corwin, G. Herold, Jr., R. J. Buta, G. Paturel, and P. Fouque*, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (New York, USA: Springer, 1991).
96. *A. W. McConnachie*, Astron. J. **144**, id. 4 (2012), arXiv:1204.1562 [astro-ph.CO].