

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П. Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Аракелян Наира Рубеновна

**Исследование взаимосвязи системы шаровых скоплений
Галактики и ее окружения**

Специальность 01.03.02 –
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), г. Москва.

Научный руководитель:

Пилипенко Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН

Официальные оппоненты:

Марсаков Владимир Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИИ физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону.

Никифоров Игорь Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент Кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга), г. Москва.

Защита состоится «15» сентября 2022 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д002.023.01 на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, улица Профсоюзная, дом 84/32, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан « » июня 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д002.023.01, к.ф.-м.н.

Шахворостова Н. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В стандартной космологической модели Λ CDM [1] галактики образуются постепенно путем иерархического сгущивания. Из-за наличия крупномасштабных движений вещества во Вселенной этот процесс происходит, в основном, по выделенным направлениям. Численные расчеты показывают, что это приводит к появлению анизотропии в распределении спутников в пространстве [2], а также к корреляции ориентаций осей вращения галактик по отношению к элементам крупномасштабной структуры, которая обнаружена и в наблюдениях [3]. Наша Галактика, а также ближайшие другие галактики представляют наилучшую возможность для изучения эффектов анизотропии в распределении спутников и связи их систем с крупномасштабной структурой, поскольку для них имеется наиболее полная информация о спутниках.

Обнаружение тонких дисков из спутников вокруг Млечного пути и Туманности Андромеды, по мнению ряда авторов [4, 5], ставит под сомнение общепринятый сценарий образования галактик. В альтернативной модели по крайней мере часть спутников образуется уже в гало нашей галактики из газа, оставшегося после слияния нашей Галактики с крупным объектом. Газ в этом случае двигался по орбите упавшего тела, и поэтому образование диска происходит естественным образом. Однако, в этом случае спутники должны быть практически лишены темной материи [6], и для объяснения наблюдаемых высоких скоростей звезд в них пришлось бы привлекать модифицированные теории гравитации (MOND).

В литературе очень много статей посвященных дискообразной структуре галактик – спутников вокруг Млечного Пути и о том, что этот диск почти перпендикулярен диску нашей Галактики. В самом начале речь шла о четырех галактиках – спутниках [7, 8, 9]. Линден Белл первый предположил, что некоторые карликовые сфероидальные галактики могли быть оторваны от общей галактики прародителя и возможно, что этим прародителем являются Магеллановы Облака. В статье отмечено, что все карликовые сфероидальные спутники Галактики лежат в одном из двух приливных остатков Магелланова потока. Но в статье Белла 1995 [10] года уже предложено помимо потока, связанного с Магеллановыми облаками, другие возможные потоки, такие как поток Печи (Fornax) и поток Стрельца.

Орбиты галактик–спутников Млечного Пути, M31 и Центавра А (CenA)

имеют тенденцию к выстраиванию в значительно сплюснутых конфигурациях [4, 11]. Более того, кинематика спутников показывает значительные корреляции. Этот факт получил название проблемы плоскостей галактик–спутников. Известно, что галактики–спутники Млечного Пути лежат почти на полярном большом круге [7, 12]. Более позднее исследование подтверждает существование вокруг Млечного Пути “обширной полярной структуры” (VPOS), включающей далекие шаровые скопления и звездные потоки [4]. Кроме того, кинематические измерения предполагают, что по крайней мере восемь из 11 хорошо измеренных спутников вращаются в плоскости VPOS [13, 14, 15]. Самые последние данные Gaia также подтверждают пространственные и кинематические корреляции спутников Млечного Пути [16, 17].

Раньше плоскость спутников M31 не была известна, но после обнаружения новых спутников оказалось, что 15 из 27 спутников лежат на одной поверхности, “гигантской плоскости Андромеды” (GPOA), которая выровнена с Гигантским звездным потоком в гало M31 [11, 18]. GPOA просматривается почти с ребра с нашей точки обзора, а скорости спутников в пределах прямой видимости указывают на сильную корреляцию. Тринадцать из пятнадцати спутников в плоскости предполагают вращение в одну и ту же сторону. Угол между плоскостями спутников Млечного Пути и M31 составляет от 40° до 50° , и они имеют схожие направления вращения. В работе [19] утверждается существование одной плоскости спутников, плоскости спутников Центавра А (CASP). CASP оказывается почти перпендикулярным плоскости галактического диска, подобно плоскости спутников Млечного Пути. С нашей позиции CASP виден почти с ребра, и обнаружено, что 14 из 16 спутников, имеющих измерения скорости по линии прямой видимости, вращаются в одной плоскости.

Плоское распределение орбит 11 спутников Млечного Пути изначально считалось несовместимым с изотропным распределением, предсказанным моделью холодной темной материи (CDM) [20]. Однако даже в CDM–парадигме образование галактик начинается с формирования блина Зельдович [21], т.е. плоской структуры, и остатки этого блина могут проявляться в анизотропном распределении спутников и шаровых скоплений (ШС). В зарубежной литературе также отмечают, что за анизотропию пространственного распределения спутников может быть ответственна преимущественная аккреция вдоль космических нитей [2, 22, 23] и трехосность гало родительской галактики [22].

Примером элемента крупномасштабной структуры, имеющий форму “бли-

на” Зельдовича, является Местное Сверхскопление галактик. Оно имеет размеры больше чем галактики и скопления галактик. Сверхскопление галактик содержит в себе Местную группу галактик, Скопление Девы (в центре сверхскопления) и несколько десятков небольших групп. Сверхгалактическая плоскость (SGP) было обнаружено де Вокулером в 1953 году. Де Вокулер [24, 25] определил сферическую систему координат SGL, SGB, в которой экватор примерно проходит вдоль SGP, с Северным полюсом ($SGB = 90^\circ$) в направлении Галактических координат ($l = 47^\circ.37; b = +6^\circ.32$).

Кроме нескольких десятков спутников, гало Галактики населяют более сотни ШС. В 1888 г. уже известно было про шаровые скопления и их отличие от рассеянных звездных скоплений [26]. В статье автор отмечает, что сэром Джоном Гершелем в 1864 году было перечислено 111 ШС. В дальнейшем это число не раз менялась. Количество ШС в Млечном Пути составляет 157 [27], но есть еще примерно 20 кандидатов в ШС и этот список все время растет. ШС – старые массивные звездные скопления (~ 13 млрд лет), состоящее из большого количества звезд, которые связаны между собой гравитацией и образовавшиеся на ранних стадиях формирования галактик, – обычно встречаются во всех галактиках, кроме самых маленьких карликов [28, 29, 30]. Концентрация звезд увеличивается к центру скопления. Количество звезд в шаровых скоплениях примерно $10^4 - 10^6$. Типичная масса для ШС $\sim 10^4 - 10^6 M_\odot$ [31]. Для галактик с популяциями ШС эмпирические данные свидетельствуют о том, что общая масса ШС почти пропорциональна общей массе гало галактики-хозяина, а не ее общей звездной массе [32, 33, 34]. ШС и карликовые галактики – спутники имеют близкие массы, но ШС значительно более плотные. Это связано с тем, что в возникновении галактик определяющая роль принадлежит темной материи, которая является бездиссипативной, и поэтому не может сильно уплотниться при образовании гравитационно-связанного объекта. ШС же образуются из облака газа в галактике и за счет диссипации и излучении энергии приобретают бóльшую плотность. В ШС газ и пыль почти отсутствуют. В ближайшем к Млечному Пути галактике – в Туманности Андромеды, их количество составляет примерно 500.

Среди ШС можно выделить два населения: старые, ассоциированные с центральной частью Галактики, и более молодые, разбросанные по ее гало. Считается, что ШС молодого населения так или иначе связаны со спутниками. ШС содержат важную информацию об истории образования населения гало Галактики: скопления, в отличие от галактик, формируются практи-

чески одномоментно, и их возраст может быть надежно измерен [35]; число скоплений гораздо больше, что существенно улучшает статистику.

Попытки разделить ШС на типы были еще примерно тридцать лет назад. В ряде работ отмечается 3 основных типа ШС (например, [36]): ШС в балдже/диске (BD) – это скопления, которые богаты металлами ($[Fe/H] > -0.8$), имеющие красные горизонтальные ветви и ограниченные балджем и внутренним диском Галактики; ШС в старом гало (OH) – бедные металлами скопления ($[Fe/H] \leq -0.8$), которые имеют синие горизонтальные ветвями (объекты со смещением больше -0.3) и находятся в гало галактики; ШС в молодом гало (YH) – скопления бедные металлами ($[Fe/H] \leq -0.8$), с красными горизонтальными ветвями (объекты со смещением меньше -0.3) и обычно располагаются в галактическом гало. В литературе также есть работы, где ШС делятся на другие возможные группы. Например, в работах Бачкова и др. [37] и Буданова и др. [38] ШС разделены на группы скоплений, которые принадлежат бару/балджу, толстому диску и гало Галактики.

Также ШС делятся по цвету: синие (бедные металлами) и красные скопления (богатые металлами) [39, 40, 41]. Почти каждая массивная галактика имеет бимодальное распределение цвета ШС, что указывает на две подгруппы ШС. В принципе, эти цветовые различия могут быть обусловлены возрастом или различиями в металличности, или их комбинацией. Наличие бимодальности указывает на то, что в истории большинства и, возможно, всех массивных галактик было по крайней мере две основные эпохи (или механизма) звездообразования. Возраст обеих субпопуляций может составлять примерно 11–12 млрд лет [42]. Последующие спектроскопические исследования показали, что бимодальность цвета обусловлена главным образом различием в металличности. ШС в гало бедные металлами (синие скопления) и не вращаются (как система), а также могут быть найдены на больших галактоцентрических радиусах. ШС в диске богаты металлами (красные скопления) и образуют сплюснутую, вращающуюся популяцию. Более поздняя работа Миннити [43] и Котэ [44] по пространственным и кинематическим свойствам ШС богатых металлами идентифицировали их с балджем Галактики, а не с его диском.

Такая бимодальность предполагает два механизма образования ШС. Авторы работ [45, 41, 46], утверждают, что красные скопления образуются на месте (in-situ), а синие – аккрецируются либо в результате слияния галактик-спутников с Галактикой, либо в результате приливного захвата самих скоп-

лений. Серл и Зинн [47] были первыми, кто утверждал, что некоторая часть системы ШС Млечного Пути имеет внешнее происхождение. Они пришли к выводу, что система ШС внешнего гало возникла из-за слияния и аккреции “протогалактических фрагментов” в медленном хаотичном порядке.

Еще более загадочным является существование ШС, показывающих разброс железа по звездам. Происхождение множественных популяций до сих пор неизвестно и может быть результатом вторичного звездообразования. Авторы работ [48, 49, 50] предположили, что скопления, рожденные в несколько разное время, могут сливаться, образуя ШС с наблюдаемым разбросом металличности. Мاستробуоно-Баттисти и др. [49] и Хоперсков и др. [51] обнаружили, что слияния между Галактическими ШС возможны в толстом диске [52].

Благодаря новым наблюдениям появилась возможность проверить гипотезу, что многие шаровые скопления были потеряны галактиками-спутниками. Так как при слиянии галактик, как правило, меньшая галактика разрушается постепенно, то из-за продолжения движения по орбите, за галактикой образуется приливной хвост из газа, пыли, звезд и ШС. При прохождении карликовой галактики вблизи центра массивной галактики из-за аккреции начинается процесс передачи ШС от одной галактики другой. Такие слияния происходили и с нашей Галактикой, за счет чего значительная часть ШС Галактики были аккрецированы извне. В литературе изучение приливных потоков и поиск скоплений, которые ранее принадлежали галактикам – спутникам была и остается актуальной задачей (например, [53, 54, 55, 56]). Чаще всего прародителями аккрецированных ШС в литературе отмечают карликовую сфероидальную галактику в Стрельце (Sgr dSph), Галактика Секвоя (Sequoia), Поток Хелми (H99), и Гайа Энцелад (Gaia-Enceladus). По мнению разных авторов процент аккрецированных скоплений варьируется от 43 до 60 % [57, 58, 59].

Первой подробной попыткой объяснить образование ШС в космологическом контексте была попытка Пиблза и Дикке [60], которые отметили, что типичные массы ШС вскоре после рекомбинации сравнимы с массой Джинса. Позже Фолл и Рис [61] предположили, что ШС могут образовываться в результате тепловой неустойчивости в коллапсирующих протогалактиках. Таким образом, в обоих этих сценариях образование ШС рассматривалось как особое явление ранней Вселенной, отличное от современного звездообразования. Открытие в локальной Вселенной молодых “сверхзвездных скопле-

ний” с массами и плотностью, равными или даже намного превышающими ШС (например, [62]), сместило акцент на сценарии, в которых ШС формируются в основном в результате нормальных процессов звездообразования. В литературе есть два семейства моделей образования и эволюции систем ШС в контексте формирования галактик. Первое семейство моделей связывает образование ШС с особыми условиями в маломассивных гало темной материи во время или до реионизации (например, [63, 64]). Второе семейство моделей рассматривает образование ШС как естественный побочный продукт активного процесса звездообразования, наблюдаемого при большом красном смещении [65, 66].

Целью данной диссертационной работы является изучение взаимосвязи эволюции нашей Галактики с ее окружением с помощью самых старых объектов в Галактике, а именно шаровых скоплений (ШС).

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие основные **задачи**:

1. Измерение степени неоднородности распределения систем ШС и галактик-спутников Млечного Пути с помощью метода, не включающего в себя предположений о дискообразном распределении этих систем. Создание случайных искусственных каталогов сравнения, позволяющих оценить вероятность того, что та или иная структура является случайным образованием (Глава 1).
2. Поиск ШС, предположительно связанных с приливным потоком Стрельца (Sgr stream). Для этого необходимо разработать новый и оригинальный метод поиска, а так же дополнить существующий каталог Харриса новыми данными, полученными обсерваторией Gaia о лучевых скоростях ШС, их собственных движениях и соотношениях возраст – металличность ($[Fe/H]$) (Глава 2).
3. Проверка пространственной ориентации системы ШС, которые образовались как внутри, так и вне Галактического диска и заведомо аккрецировавших на нашу Галактику извне. Сопоставление ориентации систем ШС, с диском Галактики, а также с плоскостью Местного Сверхскопления для выявления вероятного влияния Местного Сверхскопления на распределение ШС Млечного Пути (Глава 3).

Научная новизна:

1. Был разработан новый метод исследования неоднородности распределения ШС и спутников в пространстве. Впервые показано, что для ШС полная выборка проявляет значительную анизотропию только в диапазоне расстояний $2 < R < 10$ кпк. Впервые было получено, что пространственное распределение 6 самых отдаленных ШС показывает совпадение с известной плоской перпендикулярной галактическому диску структурой в распределении галактик–спутников и вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7 %. Также впервые было показано, что влияние зоны избегания на распределения ШС и галактик–спутников на низкой Галактической широте не очень сильное. Впервые была измерена анизотропия для трех типов ШС: ШС в балдже/диске (BD), ШС в старом гало (OH) и в молодом гало (YN). Описание метода и результаты исследования приведены в статье A1, A2
2. Впервые был разработан новый и оригинальный трехэтапный метод поиска ШС, принадлежавших в прошлом карликовой сфероидальной галактике в Стрельце (*Sgr dSph*). Впервые было получено, что из 157 ШС 17 с большой вероятностью связаны с *Sgr dSph*, которые в свою очередь делятся на 3 категории (А, Б, В), где категория А – лучшие кандидаты, а В – худшие. Описание метода, а так же последовательность его применения описаны в статье A3
3. Впервые был проведен анализ пространственной ориентации подсистем ШС, образовавшихся как внутри, так и вне нашей Галактики, и сопоставление их со структурами самой Галактики, близких галактик–спутников и крупномасштабной структурой вокруг Местной Группы . Результаты исследования опубликованы в статье A4

Научная и практическая значимость. Практическая значимость работы заключается в том, что данные о ШС и спутниках галактик быстро пополняются новыми наблюдениями, поэтому разработанные методы анализа будут применяться для обновления полученных результатов в дальнейшем. Результаты изучения неоднородности распределения спутников и ШС Галактики найдут применение при появлении новых наблюдений, особенно, касающихся систем спутников и ШС у других галактик. Результаты исследования истории возникновения системы шаровых скоплений нашей Галактики сей-

час очень востребованы космологами и астрофизиками, и ценны для изучения взаимодействия галактик и их крупномасштабного окружения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Найдены следующие особенности распределения шаровых скоплений (ШС) Галактики. Система ШС Галактики показывает статистически значимую анизотропию только в диапазоне расстояний $2 < R < 10$ кпк, и эта анизотропия связана с диском Галактики. Структура имеет удлиненную форму с отношением осей $c/a \approx 0.5$ и $b/a \approx 0.6$, с большой осью, лежащей в Галактической плоскости. Пространственное распределение шести самых отдаленных ШС показывает совпадение с известной плоской структурой в распределении галактик–спутников, которая может представлять собой остаток “блина Зельдовича”, а шесть ШС в этом случае были аккрецированы вместе с галактиками–спутниками. Вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7 %. Влияние зоны избегания на распределения ШС и галактик–спутников на низкой Галактической широте несущественное. (Глава 1).

2. Из 157 известных на данный момент ШС 17 с большой вероятностью связаны с карликовой сфероидальной галактикой в Стрельце и образованным при ее частичном разрушении приливным потоком. Эти 17 ШС делятся на три категории на основании того, совпадают ли они со звездным потоком только по пространственным положениям и соотношению “возраст –металличность” (В), также по лучевым скоростям (Б) или также по лучевым и пространственным скоростям (А):

А: несомненно в потоке, шесть ШС: *Terzan 8*; *Whiting 1*; *Arp 2*; *NGC 6715*; *Terzan 7* и *Pal 12*.

Б: кинематические выбросы, шесть ШС: *Pal 5*; *NGC 5904*; *NGC 5024*; *NGC 5053*; *NGC 5272* и *NGC 288*.

В: кандидаты низшего ранга, пять ШС: *NGC 6864*; *NGC 5466*; *NGC 5897*; *NGC 7492* и *NGC 4147*. (Глава 2).

3. Для ШС, принадлежащих известным на сегодня приливным потокам, образовавшимся при разрушении аккрецированных на Галактику спутников, не наблюдается статистически значимой анизотропии. Вместе с тем, пространственная ориентация распределения аккрецированных

ШС свидетельствует о том, что около 10 % ШС ошибочно отнесены другими авторами к аккрецированным, на самом деле они генетически связаны с Галактикой. (Глава 3).

4. 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. (Глава 3).

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и получены впервые.

Достоверность результатов. Достоверность результатов, полученных в настоящей работе, обеспечивается использованием новейших данных, извлеченных из астрономических баз данных и каталогов, в частности, результатов обсерватории GAIA и прозрачностью применяемых методик, позволяющих заключить, что и выводы работы достоверны. Достоверность представленных результатов подтверждается апробацией на российских и зарубежных конференциях, где присутствовали специалисты в данной области, а также публикациями в ведущих научных рецензируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах отдела теоретической астрофизики Астрокосмического центра ФИАН (Москва, Россия), на конференциях и симпозиумах:

1. *XXXIII Всероссийская конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”*, Пущино, Россия, 19–22 апреля 2016;
2. *59–я Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием*, Московская обл., г. Долгопрудный, Россия, 21–26 ноября 2016;
3. *XXXIV Всероссийская конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”*, Пущино, Россия, 18–21 апреля 2017;
4. *2017 Annual CLUES Workshop, Constrained Local UniversE Simulations*, Мирафлорес–де–ла–Сьерра, Мадрид, Испания, 18–23 июня 2017;

5. *Всероссийская астрономическая конференция (ВАК–2017) “Астрономия: познание без границ”*, Ялта, Крым, 17–22 сентября 2017;
6. *VII Молодежная конференция “Физика элементарных частиц и космология”*, ФИАН, Москва, Россия, 9–10 апреля 2018;
7. *XXXV Всероссийская конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”*, Пущино, Россия, 24–27 апреля 2018;
8. *Семинаре отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН*, Москва, Россия, 27 сентября 2018;
9. *Конференция “Астрономия – 2018”, Девятая конференция из цикла “Современная звездная астрономия”*, ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 22–26 октября 2018;
10. *10th Alexander Friedmann International Seminar on gravitation and cosmology; 4th Symposium on the Casimir Effect*, Санкт–Петербург, Россия, 23–29 июня 2019;
11. *BASIS Foundation Summer School 2019 “Evolution of galaxies and stars”*, Сочи, Россия, 15–27 июля 2019;
12. *Международная конференция Diversity of the Local Universe*, Нижний Архыз, Россия, 30 сентября – 04 октября 2019;
13. *Семинаре отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН*, Москва, Россия, 19 ноября 2020.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах. Всего имеется 5 научных статей [А1–А4, Б1], включая тезисы докладов научных конференций [Б1]. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, суммированы в 4 статьях [А1–А4], которые изданы в рецензируемых журналах, входящих в список Web of Science Core Collection и рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Министерстве образования и науки РФ. Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1** Arakelyan N. R., Pilipenko S. V., Libeskind N. I. Spatial distribution of globular clusters in the Galaxy // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – 2018, Vol. 481, Issue 1, P. 918–929.
- A2** Аракелян Н. Р. Влияние Галактического диска и галактик–спутников на пространственное распределение шаровых скоплений // Краткие Сообщения по физике ФИАН – 2019, № 3, С. 12–16 (Англоязычная версия: Arakelyan N. R. Effect of the Galactic disk and satellite galaxies on the spatial distribution of globular clusters // Bulletin of the Lebedev Physics Institute – 2019, Vol. 46, P. 86–88.)
- A3** Аракелян Н. Р., Пилипенко С. В., Шарина М. Е. Шаровые скопления, потерянные сфероидальной карликовой галактикой в Стрельце // Астрофизический Бюллетень – 2020, Т. 75, № 4, С. 444–458 (Англоязычная версия: Arakelyan N. R., S. Pilipenko V., Sharina M. E. Globular clusters lost by the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy // Astrophysical Bulletin – 2020, Vol. 75, Issue 4, P.394–406.)
- A4** Аракелян Н. Р., Пилипенко С. В. Шаровые скопления как индикаторы эволюции Галактики // Астрономический журнал – 2022, Т. 99, № 3, С. 179–188 (Англоязычная версия: Arakelyan N. R., Pilipenko S. V. Globular clusters as indicators of Galactic evolution // Astronomy Reports – 2022, Vol. 66, № 3, P. 191–199.)

Другие публикации автора по теме диссертации

- B1** Аракелян Н. Р., Пилипенко С. В., Шарина М. Е. Пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике // Известия Крымской Астрофизической Обсерватории – 2018, Т. 114, № 1, С. 171–173.

Личный вклад. Автор внес определяющий вклад во все результаты диссертации, выносимые на защиту. Автор диссертационной работы совместно с научным руководителем и соавторами активно участвовал в анализе данных, интерпретации и обсуждении результатов, формулировке выводов работы. Во всех опубликованных работах диссертант является первым автором, им проведены все расчеты, получены рисунки и графики, а также написаны основные тексты статей.

В работе [A1] вклад диссертанта определяющий в обработке (на языке

Python) и анализе данных, участие в постановке задачи и в обсуждении результатов. Равный вклад в разработке метода исследования неоднородности распределения ШС и спутников в пространстве. Также автор подготовил основную часть данной статьи.

В работе [A2] вклад диссертанта определяющий в обработке, анализе данных, а также в подготовке текста статьи.

В работе [A3] вклад диссертанта равен вкладу соавторов и включает постановку задачи, разработку новой и оригинальной трехэтапной методике поиска ШС, принадлежавших в прошлом карликовой сфероидальной галактике в Стрельце (*Sgr dSph*) и в обсуждении результатов, определяющий в обработке и анализе данных. Также основной в подготовке текста статьи.

В работе [A4] вклад диссертанта основной в постановке задачи, проведении анализа пространственной ориентации подсистем ШС, образовавшихся как внутри, так и вне Галактики и обсуждении результатов, определяющий в обработке и анализе данных. Также основной в подготовке текста статьи.

В работе [B1] вклад диссертанта основной в постановке задачи, определяющий в обработке, анализе данных, а также в подготовке текста статьи.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 117 страниц с 25 рисунками и 8 таблицами. Список литературы содержит 247 наименований на 24 страницах.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Также во введении приводятся основные результаты работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию анизотропного пространственного распределения галактик–спутников Млечного Пути и шаровых скоплений. Используя тензор гирации и редуцированный тензор, мы характеризуем анизотропию ШС. Мы проверяем, что этот метод воспроизводит хорошо известную плоскость спутников, однако ее значение несколько ниже, чем для других методов, используемых в литературе. Мы рассматривали только те

спутники, про которые в литературе в 2015 году (например, [67]) отмечалась дискообразная структура. Сейчас открыто много новых спутников, в т.ч. для них уже известна кинематика (например, [68]). Для ШС мы обнаружили, что полная выборка показывает значительную анизотропию только в диапазоне расстояний $2 < R < 10$ кпк. Структура имеет вытянутую форму с $c/a \approx 0.5$ и $b/a \approx 0.6$, причем большая ось лежит в пределах Галактической плоскости. Мы считаем, что эта структура связана с Галактическим диском. На расстояниях $R < 2$ кпк и $R > 18$ кпк, параметры тензора гирации очень близки к параметрам для случайных изотропных образцов.

Тем не менее, пространственное распределение шести наиболее удаленных ШС показывает совпадение с известной планарной структурой в распределении ГС. Вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7 процента. Измерение собственных движений этих ШС прольет свет на их связь с ГС; мы ожидаем, что собственные движения будут лежать более или менее в пределах указанной плоскости спутников, если связь между ШС и спутниками реальна.

Мы также разделяем ШС на три классических типа: ВД, ОН и УН и анализируем их анизотропию отдельно. ВД ШС демонстрируют изотропное распределение при $R < 2$ кпк и дискообразную структуру при $R > 3.5$ кпк с $c/a \approx 0.3$ и $b/a \approx 0.6$ копланарную с Галактическим диском. ОН ШС демонстрируют более сложную структуру. На малых расстояниях, $R < 3$ кпк, существует сигарообразная структура, перпендикулярная Галактической плоскости с $c/a \approx 0.3$ и $b/a \approx 0.7$. При $R > 6$ кпк она трансформируется в почти изотропное распределение, но слегка вытянутое с большой осью, лежащей близко к Галактической плоскости при $R < 20$ кпк. Мы пришли к выводу, что ШС в ОН представляют собой две популяции с динамически различными свойствами. Это может быть связано с тем, что по данным Макки и Гилмора [69] около 15–17% (10–12 объектов) ШС в ОН имеют внегалактическое происхождение. ШС УН не демонстрируют четкой анизотропии при анализе с помощью тензора гирации, но большая ось структуры на наибольших расстояниях направлена к Галактическому полюсу.

Вторая глава посвящена поиску 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, Б, В), шесть скоплений в первой категории, шесть во второй и пять в третьей: А – лучшие кандидаты, а В – худшие.

Наш список шаровых скоплений категории А, принадлежащих приливному потоку Sgr, хорошо согласуется со списками из работ [70, 71, 59, 72, 57, 73], полученными несколькими другими методами. В работе [72] авторы изучили зависимость “возраст – металличность” и исследовали морфологию горизонтальной ветви. Авторы [70] использовали динамические модели в сочетании с трехмерными данными о положении и скорости шаровых скоплений Галактики и dSph галактик. Также они изучили зависимость “возраст – металличность”. В работе [71] авторы представили широкопольную фотометрию для 23 шаровых скоплений. Авторы [59] объединили кинематическую информацию, предоставленную Gaia, изучили зависимость “возраст – металличность” и проанализировали динамические свойства шаровых скоплений. В [57] автор использовал интегралы движения, зависимость “возраст – металличность” и отношение альфа – элементов. В работе [73] авторы использовали переменные RR Лир, чтобы проследить поток в 6D, и выбрали скопления, которые соответствуют наблюдаемому потоку по положению и скорости.

Третья глава посвящена изучению системы ШС, которые образовались вне Галактического диска. Для этого мы взяли из работ Forbes [57], Massari [59] и Myeong [74] выборки ШС, которые образовались в разных приливных потоках. Изучив ряд работ, в том числе вышеуказанные, 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), Гайа–Энцелад (Gaia–Enceladus, возможно Gaia Sausage или SMa), низкоэнергетичная группа (Low-Energy, возможно Koala или Kraken) и высокоэнергетичная группа

(High-energy).

Мы измерили анизотропию распределения ШС, принадлежавших потокам с помощью тензора гирации. 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 [A1], обусловлена нахождением многих ШС в диске Галактики, и связана со скоплениями, образовавшимися *in situ*.

Тем не менее для трех выборок аккрецированных ШС большая ось тензора гирации 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 показано, что вероятность случайной 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 [53], 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”. На ней можно выделить две ветви: в менее металличной ветви в основном находятся скопления принадлежащие разным потокам, и у них большой разброс в возрасте и металличности. В то же время скопления в более металличной ветви, которые вероятнее всего образовались в Галактике, имеют разброс по металличности, но возрасты 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 от галактоцентрического расстояния. 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.

В **заключении** сформулированы результаты диссертации, а также обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] Peebles P. J. E. The Gravitational-Instability Picture and the Nature of the Distribution of Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* . 1974. Vol. 189. P. L51.
- [2] Libeskind N. I., Frenk C. S., Cole S. et al. The distribution of satellite galaxies: the great pancake // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2005. Vol. 363. P. 146–152.
- [3] Pahwa I., Libeskind N. I., Tempel E. et al. The alignment of galaxy spin with the shear field in observations // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2016. Vol. 457, no. 1. P. 695–703.
- [4] Pawlowski M. S., Pflamm-Altenburg J., Kroupa P. The VPOS: a vast polar structure of satellite galaxies, globular clusters and streams around the Milky Way // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2012. Vol. 423. P. 1109–1126.
- [5] Hammer F., Yang Y., Fouquet S. et al. The vast thin plane of M31 corotating dwarfs: an additional fossil signature of the M31 merger and of its considerable impact in the whole Local Group // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2013. Vol. 431. P. 3543–3549.
- [6] Bournaud F. Star Formation and Structure Formation in Galaxy Interactions and Mergers // *Galaxy Wars: Stellar Populations and Star Formation in Interacting Galaxies* / Ed. by B. Smith, J. Higdon, S. Higdon et al. Vol. 423 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 2010. P. 177.
- [7] Lynden-Bell D. Dwarf galaxies and globular clusters in high velocity hydrogen streams // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 1976. Vol. 174. P. 695–710.
- [8] Lynden-Bell D. The origin of dwarf spheroidal galaxies // *Internal Kinematics and Dynamics of Galaxies* / Ed. by E. Athanassoula. Vol. 100 of *IAU Symposium*. 1983. P. 89–91.
- [9] Lynden-Bell D. The Fornax-Leo-Sculptor system // *The Observatory*. 1982. Vol. 102. P. 202–208.
- [10] Lynden-Bell D., Lynden-Bell R. M. Ghostly streams from the formation of the Galaxy’s halo // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 1995. Vol. 275. P. 429–442.
- [11] Ibata R. A., Lewis G. F., Conn A. R. et al. A vast, thin plane of corotating dwarf galaxies orbiting the Andromeda galaxy // *Nature* . 2013. Vol. 493. P. 62–65.
- [12] Kunkel W. E., Demers S. The Magellanic Plane // *The Galaxy and the Local Group*. Vol. 182. 1976. P. 241.

- [13] Pawlowski M. S. The planes of satellite galaxies problem, suggested solutions, and open questions // *Modern Physics Letters A*. 2018. Vol. 33, no. 6. P. 1830004.
- [14] Pawlowski M. S., Kroupa P. The rotationally stabilized VPOS and predicted proper motions of the Milky Way satellite galaxies // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2013. Vol. 435. P. 2116–2131.
- [15] Pawlowski M. S., Dabringhausen J., Famaey B. et al. Considerations on how to investigate planes of satellite galaxies // *Astronomische Nachrichten*. 2017. Vol. 338, no. 7. P. 854–861.
- [16] Gaia Collaboration, Helmi A., van Leeuwen F. et al. Gaia Data Release 2. Kinematics of globular clusters and dwarf galaxies around the Milky Way // *Astron. and Astrophys.* . 2018. Vol. 616. P. A12.
- [17] Pawlowski M. S., Kroupa P. The Milky Way’s disc of classical satellite galaxies in light of Gaia DR2 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2020. Vol. 491, no. 2. P. 3042–3059.
- [18] Conn A. R., Lewis G. F., Ibata R. A. et al. The Three-dimensional Structure of the M31 Satellite System; Strong Evidence for an Inhomogeneous Distribution of Satellites // *Astrophys. J.* . 2013. Vol. 766. P. 120.
- [19] Müller O., Jerjen H., Pawlowski M. S. et al. Testing the two planes of satellites in the Centaurus group // *Astron. and Astrophys.* . 2016. Vol. 595. P. A119.
- [20] Kroupa P., Theis C., Boily C. M. The great disk of Milky-Way satellites and cosmological sub-structures // *Astron. and Astrophys.* . 2005. Vol. 431. P. 517–521.
- [21] Zel’Dovich Y. B. Reprint of 1970A&A.....5...84Z. Gravitational instability: an approximate theory for large density perturbations. // *Astron. and Astrophys.* . 1970. Vol. 500. P. 13–18.
- [22] Zentner A. R., Kravtsov A. V., Gnedin O. Y. et al. The Anisotropic Distribution of Galactic Satellites // *Astrophys. J.* . 2005. Vol. 629, no. 1. P. 219–232.
- [23] Libeskind N. I., Knebe A., Hoffman Y. et al. The preferred direction of infalling satellite galaxies in the Local Group // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2011. Vol. 411. P. 1525–1535.
- [24] de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin J. R. Second reference catalogue of bright galaxies // *Second reference catalogue of bright galaxies*. 1976. Vol. 1976. P. 0.

- [25] de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin Herold G. J. et al. Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. 1991.
- [26] Clerke A. M. Globular Star Clusters // *Nature* . 1888. Vol. 38, no. 981. P. 365–367.
- [27] Harris W. E., Harris G. L. H., Alessi M. A Catalog of Globular Cluster Systems: What Determines the Size of a Galaxy’s Globular Cluster Population? // *Astrophys. J.* . 2013. Vol. 772. P. 82.
- [28] Harris W. E. Massive star clusters in galaxies // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*. 2010. Vol. 368, no. 1913. P. 889–906.
- [29] Forbes D. A., Read J. I., Gieles M. et al. Extending the globular cluster system-halo mass relation to the lowest galaxy masses // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2018. Vol. 481, no. 4. P. 5592–5605.
- [30] Beasley M. A. Globular Cluster Systems and Galaxy Formation // *Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics; From Space Debris to Cosmology*. 2020. P. 245–277.
- [31] Brodie J. P., Strader J. Extragalactic Globular Clusters and Galaxy Formation // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* . 2006. Vol. 44, no. 1. P. 193–267.
- [32] Georgiev I. Y., Puzia T. H., Goudfrooij P. et al. Globular cluster systems in nearby dwarf galaxies - III. Formation efficiencies of old globular clusters // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2010. Vol. 406, no. 3. P. 1967–1984.
- [33] Hudson M. J., Harris G. L., Harris W. E. Dark Matter Halos in Galaxies and Globular Cluster Populations // *Astrophys. J. Lett.* . 2014. Vol. 787, no. 1. P. L5.
- [34] Harris W. E., Blakeslee J. P., Harris G. L. H. Galactic Dark Matter Halos and Globular Cluster Populations. III. Extension to Extreme Environments // *Astrophys. J.* . 2017. Vol. 836, no. 1. P. 67.
- [35] Marín-Franch A., Aparicio A., Piotto G. et al. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters. VII. Relative Ages // *Astrophys. J.* . 2009. Vol. 694, no. 2. P. 1498–1516.
- [36] Mackey A. D., van den Bergh S. The properties of Galactic globular cluster subsystems // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2005. Vol. 360. P. 631–645.
- [37] Bajkova A. T., Carraro G., Korchagin V. I. et al. Milky Way Subsystems from Globular Cluster Kinematics Using Gaia DR2 and HST Data // *Astrophys. J.* . 2020. Vol. 895, no. 1. P. 69.

- [38] Budanova N. O., Bajkova A. T., Bobylev V. V. et al. Chemical Composition of Globular Clusters of Milky Way Subsystems from Gaia DR2 Data // *Astronomy Reports*. 2019. Vol. 63, no. 12. P. 998–1009.
- [39] Zepf S. E., Ashman K. M. Globular cluster systems formed in galaxy mergers. // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 1993. Vol. 264. P. 611–618.
- [40] Peng E. W., Jordán A., Côté P. et al. The ACS Virgo Cluster Survey. IX. The Color Distributions of Globular Cluster Systems in Early-Type Galaxies // *Astrophys. J.* . 2006. Vol. 639, no. 1. P. 95–119.
- [41] Tonini C. The Metallicity Bimodality of Globular Cluster Systems: A Test of Galaxy Assembly and of the Evolution of the Galaxy Mass-Metallicity Relation // *Astrophys. J.* . 2013. Vol. 762, no. 1. P. 39.
- [42] Larsen S. S. The Luminosity Function of Star Clusters in Spiral Galaxies // *Astron. J.* . 2002. Vol. 124, no. 3. P. 1393–1409.
- [43] Minniti D. Metal-Rich Globular Clusters with $R \leq 3$ KPC: Disk or Bulge Clusters? // *Astron. J.* . 1995. Vol. 109. P. 1663.
- [44] Côté P. Kinematics of the Galactic Globular Cluster System: New Radial Velocities for Clusters in the Direction of the Inner Galaxy // *Astron. J.* . 1999. Vol. 118, no. 1. P. 406–420.
- [45] Côté P., Marzke R. O., West M. J. The Formation of Giant Elliptical Galaxies and Their Globular Cluster Systems // *Astrophys. J.* . 1998. Vol. 501. P. 554–570.
- [46] Renaud F., Agertz O., Gieles M. The origin of the Milky Way globular clusters // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2017. Vol. 465, no. 3. P. 3622–3636.
- [47] Searle L., Zinn R. Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo // *Astrophys. J.* . 1978. Vol. 225. P. 357–379.
- [48] Gavagnin E., Mapelli M., Lake G. A critical look at the merger scenario to explain multiple populations and rotation in iron-complex globular clusters // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2016. Vol. 461, no. 2. P. 1276–1287.
- [49] Mastrobuono-Battisti A., Khoperskov S., Di Matteo P. et al. Mergers, tidal interactions, and mass exchange in a population of disc globular clusters. II. Long-term evolution // *Astron. and Astrophys.* . 2019. Vol. 622. P. A86.
- [50] Mastrobuono-Battisti A., Khoperskov S., Di Matteo P. et al. Globular cluster tidal interactions and mergers in the Galactic disc // *Star Clusters: From the Milky Way to the Early Universe* / Ed. by A. Bragaglia, M. Davies, A. Sills et al. Vol. 351. 2020. P. 442–446.

- [51] Khoperskov S., Mastrobuono-Battisti A., Di Matteo P. et al. Mergers, tidal interactions, and mass exchange in a population of disc globular clusters // *Astron. and Astrophys.* . 2018. Vol. 620. P. A154.
- [52] Chemerynska I. V., Ishchenko M. V., Sobolenko M. O. et al. Kinematic characteristics of the Milky Way globular clusters based on Gaia DR-2 data // *arXiv e-prints*. 2022. P. arXiv:2201.07221.
- [53] Marsakov V. A., Koval' V. V., Gozha M. L. Physical and Chemical Properties of Galactic Global Clusters with Various Origins Identified from the Gaia DR2 Data // *Astronomy Reports*. 2020. Vol. 64, no. 10. P. 805–814.
- [54] Marsakov V. A., Koval' V. V., Gozha M. L. The Chemical Composition of Globular Clusters of Different Nature in Our Galaxy // *Astronomy Reports*. 2019. Vol. 63, no. 4. P. 274–288.
- [55] Marsakov V. A., Koval' V. V., Gozha M. L. Globular Clusters of the Galaxy: Chemical Composition vs Kinematics // *Astrophysical Bulletin*. 2019. Vol. 74, no. 4. P. 403–423.
- [56] Bajkova A. T., Bobylev V. V. Orbits of 152 globular clusters of the Milky-Way galaxy constructed from Gaia DR2 // *Research in Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 21, no. 7. P. 173.
- [57] Forbes D. A. Reverse engineering the Milky Way // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2020. Vol. 493, no. 1. P. 847–854.
- [58] Kruijssen J. M. D., Pfeffer J. L., Reina-Campos M. et al. The formation and assembly history of the Milky Way revealed by its globular cluster population // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2019. Vol. 486. P. 3180–3202.
- [59] Massari D., Koppelman H. H., Helmi A. Origin of the system of globular clusters in the Milky Way // *Astron. and Astrophys.* . 2019. Vol. 630. P. L4.
- [60] Peebles P. J. E., Dicke R. H. Origin of the Globular Star Clusters // *Astrophys. J.* . 1968. Vol. 154. P. 891.
- [61] Fall S. M., Rees M. J. A theory for the origin of globular clusters. // *Astrophys. J.* . 1985. Vol. 298. P. 18–26.
- [62] Holtzman J. A., Faber S. M., Shaya E. J. et al. Planetary Camera Observations of NGC 1275: Discovery of a Central Population of Compact Massive Blue Star Clusters // *Astron. J.* . 1992. Vol. 103. P. 691.
- [63] Katz H., Ricotti M. Clues on the missing sources of reionization from self-consistent modelling of Milky Way and dwarf galaxy globular clusters // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2014. Vol. 444, no. 3. P. 2377–2395.

- [64] Kimm T., Cen R., Rosdahl J. et al. Formation of Globular Clusters in Atomic-cooling Halos Via Rapid Gas Condensation and Fragmentation during the Epoch of Reionization // *Astrophys. J.* . 2016. Vol. 823, no. 1. P. 52.
- [65] Kruijssen J. M. D. Globular clusters as the relics of regular star formation in ‘normal’ high-redshift galaxies // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2015. Vol. 454, no. 2. P. 1658–1686.
- [66] Shapiro K. L., Genzel R., Förster Schreiber N. M. Star-forming galaxies at $z \sim 2$ and the formation of the metal-rich globular cluster population // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2010. Vol. 403, no. 1. P. L36–L40.
- [67] Pawlowski M. S., McGaugh S. S., Jerjen H. The new Milky Way satellites: alignment with the VPOS and predictions for proper motions and velocity dispersions // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2015. Vol. 453. P. 1047–1061.
- [68] Bajkova A. T., Bobylev V. V. Orbits of 47 dwarf satellite galaxies of the Milky Way in three models of the gravitational potential with different masses // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* 2021. Vol. 32, no. 3. P. 177–206.
- [69] Mackey A. D., Gilmore G. F. Comparing the properties of local globular cluster systems: implications for the formation of the Galactic halo // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2004. Vol. 355. P. 504–534.
- [70] Law D. R., Majewski S. R. Assessing the Milky Way Satellites Associated with the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy // *Astrophys. J.* . 2010. Vol. 718. P. 1128–1150.
- [71] Carballo-Bello J. A., Sollima A., Martínez-Delgado D. et al. A search for stellar tidal debris of defunct dwarf galaxies around globular clusters in the inner Galactic halo // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2014. Vol. 445. P. 2971–2993.
- [72] Forbes D. A., Bridges T. Accreted versus in situ Milky Way globular clusters // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2010. Vol. 404. P. 1203–1214.
- [73] Bellazzini M., Ibata R., Malhan K. et al. Globular clusters in the Sagittarius stream. Revising members and candidates with Gaia DR2 // *Astron. and Astrophys.* . 2020. Vol. 636. P. A107.
- [74] Myeong G. C., Vasiliev E., Iorio G. et al. Evidence for two early accretion events that built the Milky Way stellar halo // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2019. Vol. 488, no. 1. P. 1235–1247.