

**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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
канд. физ.-мат. наук
Пилипенко Сергей Владимирович

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Список иллюстраций	4
Список таблиц	10
Введение	11
1 Пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике	24
1.1 Введение	24
1.2 Измерение анизотропии	26
1.2.1 Статистическая значимость анизотропии	29
1.3 Анизотропия как функция расстояния	30
1.3.1 Степень анизотропии	30
1.3.2 Сравнение удаленных ШС с плоскостью спутников	38
1.4 Измерение анизотропии для трех типов ШС	40
1.5 Выводы	43
2 Шаровые скопления, потерянные сфероидальной карликовой галактикой в Стрельце	46
2.1 Введение	46
2.2 Определение шаровых скоплений, принадлежащих приливному потоку	48
2.2.1 Пространственные расположения	48
2.2.2 Кинематика шаровых скоплений	50
2.2.3 Свойства звездных населений Sgr dSph	56
2.2.4 Результаты	64
2.3 Выводы	65

3 Шаровые скопления как индикаторы эволюции Галактики . .	68
3.1 Введение	68
3.2 Шаровые скопления Млечного Пути в приливных потоках	70
3.2.1 Анизотропия распределения шаровых скоплений	72
3.3 Две ветви ШС на зависимости “возраст–металличность”	75
3.4 Роль местного сверхскопления	76
3.5 Выводы	79
Заключение	80
Приложение А	83
Приложение Б	91
Список литературы	94

Список иллюстраций

1.1	Распределение ШС. XYZ – Декартовы координаты относительно центра Галактики. Z совпадает с Галактическим полюсом, а координаты Солнца составляют (-8.34, 0, 0) кпк [1].	28
1.2	Распределение ГС. Координатные оси как на Рис. 1.1.	29
1.3	Распределение ГС по расстоянию. N – кумулятивное число объектов на расстоянии $\leq R$	31
1.4	Анизотропия 27 ГС, определенная с помощью тензора гирации (уравнение 1.1, верхний ряд) и редуцированного тензора гирации (уравнение 1.2, нижний ряд). Левые и средние колонки показывают распределение c/a и b/a в зависимости от Галактоцентрического расстояния спутника, соответственно. Каждая синяя точка представляет собой кумулятивное отношение собственных значений этих тензоров, рассчитанное для всех галактик, расположенных <i>внутри</i> данной позиции. Серые точки показывают результаты с добавлением неопределенности расстояния. Сплошная зеленая линия представляет медианное отношение собственных значений для 10 000 случайных выборок, которые сохраняют те же радиальные распределения, что и в реальных данных, но чьи полярные и азимутальные углы были рандомизированы. Пунктирные линии представляют $\pm 3\sigma$ таких случайных распределений. В правой колонке показаны углы, измеренные в градусах между галактическим полюсом Млечного Пути и большой (синие точки), а так же малой (зеленые треугольники) осью двух тензоров гирации. Зеленый треугольники, близкие к 90° , указывают на полярную плоскость.	32
1.5	То же, что и на Рис. 1.4, но для 11 ГС.	32
1.6	Распределение ШС по расстоянию. N – количество объектов; R – расстояние от центра Галактики.	33

- 1.7 Анизотропия 157 ШС. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. На панели слева сверху распределение c/a показывает четкую анизотропию в диапазоне $2 \leq R \leq 10$ кпк (синие точки ниже пунктирной линии обозначают 3σ разброс случайных изотропных реализаций). Левая нижняя панель – то же самое для редуцированного тензора гирации, она демонстрирует более высокую степень корреляции соседних измерений c/a для этого тензора. Правая верхняя панель показывает, что малая ось тензора гирации (зеленые треугольники) совпадает с полюсом Галактики в диапазоне $4 \leq R \leq 20$ кпк. 34
- 1.8 Вероятность иметь N измерений собственных значений c/a для тензора гирации для одной случайной выборки из 157 ШС ниже или выше области 3σ 34
- 1.9 То же, что и Рис. 1.7, но для одной случайной генерации выборки для ШС. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Колебания синих точек на самой верхней левой панели и колебания синих точек и зеленых треугольников на самых правых панелях показывают, что корреляции кумулятивных измерений тензора гирации могут привести к некоторой видимой “организации” даже для совершенно случайной выборки. 35
- 1.10 То же, что и нижняя панель Рис. 1.7, но для $R > 18$ кпк для ШС. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Показанные здесь измерения тензора гирации взвешены по количеству объектов, поэтому мы удалили все центральные ШС, составляющие большую часть выборки, чтобы проверить анизотропию на больших расстояниях. Видно, что распределение близко к изотропному. 36
- 1.11 Карта неба с распределением ШС в галактических координатах. Квадрат – большая ось тензора гирации; Треугольник – средняя ось тензора гирации; Круг – малая ось тензора гирации. 37
- 1.12 Распределение ШС вдоль наибольшего и наименьшего собственных векторов. На левой панели для выборки $R < 125$ кпк, а на правой панели для выборки $R < 10$ кпк. 38

1.13	Распределение ГС вдоль наибольшего и наименьшего собственных векторов, с добавлением шести наиболее удаленных ШС. Круг – ГС; треугольник – ШС.	39
1.14	Анизотропия ШС в образце ВД. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. На самой верхней левой панели показаны измерения собственного значения отношение c/a , которое показывает анизотропию при $R > 3$ кпк (синие точки под пунктирной линией, обозначающие 3σ разброс случайных изотропных реализаций). На самой верхней правой панели показано распределение полярных углов малой (зеленые треугольники) и большой (синие точки) осей тензора гирации. Из него видно, что анизотропная структура ВД ШС совпадает с Галактическим диском.	41
1.15	Анизотропия ШС в образце ОН. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Верхняя и нижняя левые панели показывают предельную анизотропию, но распределение малых осей тензора гирации (зеленые треугольники на самой верхней правой панели) показывает явную неслучайную ориентацию, ее значение обсуждается в тексте.	41
1.16	Анизотропия ШС в образце УН. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Анизотропия не обнаружена.	42
2.1	Приливной поток Sgr в трех проекциях (a,b,c). Серые точки соответствуют модели потока Sgr (LM10a), звездочками и треугольниками показаны звезды в ведущем и в ведомом рукавах потока соответственно (наблюдаемые данные). XYZ – Декартовы координаты относительно центра Галактики. Z указывает на Галактический полюс; положение Солнца (-8.34, 0, 0) кпк [1]	49

- 2.2 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 (а) 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. 51
- 2.3 Карта неба в Галактоцентрических Галактических координатах. Координаты Солнца: (-8.34, 0, 0) кпк [1] (а). 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 Б) и для остальных пяти шаровых скоплений (категория В) соответственно. Голубая стрелка – это среднее собственное движение шести ближайших модельных звезд в потоке, а голубая стрелка с фиолетовым кончиком – собственное движение Sgr dSph. 57
- 2.4 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 Б, отличающиеся по лучевым скоростям или по трехмерным скоростям. Черные кружки соответствуют пяти шаровым скоплениям категории В, которые расходятся по кинематике. Пустые кружки – остальные шаровые скопления Галактики. 59

2.5	Распределение шаровых скоплений по возрасту и металличности, согласно данным [2] и [3]. 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 [2] и [3] Результат соавтора из работы АЗ: [4]	61
2.6	Зависимость $[Ti/Fe]$ от $[Fe/H]$: (a) – по данным, собранным нами из разных источников, (b) – и по данным из компилятивного каталога [5] . 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 [2] и [3]. Результат соавтора из работы АЗ: [4]	63
3.1	Анизотропия ШС, количественно выраженная тензором гирации для выборок скоплений по Forbes, Massari и Myeong – верхняя строка, средняя строка и нижняя строка, соответственно. В левых и средних 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 10,000 случайных выборок. Пунктирными 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) а также малой (зеленые треугольники) осью тензора гирации. Зеленые треугольники, близкие к 90 градусам, указывают на полярную плоскость.	73
3.2	Возраст / металличность 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. . .	76

3.3 “Угол” как функция от галактоцентрического расстояния для 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. 78

Список таблиц

1.1	Каталог 157 Галактических ШС с координатами и типами, составленный по данным Харриса и др. [6] и Макки и ван ден Берга [7] (полная версия доступна в Приложении А – Таблица 3.1).	27
1.2	Каталог 27 ГС Млечного Пути, взятый из МкКоначи ([8], полная версия доступна в Приложении Б – Таблица 3.2).	28
1.3	Направление осей для различных выборок.	43
2.1	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 [7].	52
2.2	Пространственные скорости для 17 шаровых скоплений в потоке и средние пространственные скорости для ближайших шести звезд в модельном потоке.	54
2.3	Галактоцентрические координаты [9] (версия 2010 года), средний возраст и средняя металличность для 17 шаровых скоплений (среднее значение для образцов из [9] (издание 2010 года), [10, 11, 12, 2]).	58
3.1	Каталог 157 Галактических ШС с координатами и типами, составленный по данным Харриса и др. 2013 г. и Макки и ван ден Берга 2005 г.	84
3.2	Каталог 27 ГС Млечного Пути.	92

Введение

Актуальность темы исследования. В стандартной космологической модели Λ CDM [13] галактики образуются постепенно путем иерархического скучивания. 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 [14], а также к корреляции ориентаций осей вращения галактик по отношению к элементам крупномасштабной структуры, которая обнаружена и в наблюдениях [15]. 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 [16, 17], 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 [18], 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 [19, 20, 21]. 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 [22] 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, М31 и Центавра А (CenA) имеют тенденцию к выстраиванию в значительно сплюснутые конфигурации [16, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. 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 [19, 30]. Более позднее исследование подтверждает существование вокруг Млечного Пути “обширной полярной структуры” (VPOS), включающей далекие шаровые скопления и звездные потоки [16]. Кроме того, кинематические измерения предполагают, что по крайней мере восемь из 11 хорошо измеренных спутников вращаются в плоскости VPOS [31, 32, 33]. Самые последние данные Gaia также подтверждают пространственные и кинематические корреляции спутников Млечного Пути [34, 35].

Раньше плоскость спутников М31 не была известна, но после обнаружения новых спутников оказалось, что 15 из 27 спутников лежат на одной поверхности, “гигантской плоскости Андромеды” (GRoA), которая выровнена с Гигантским звездным потоком в гало М31 [23, 24]. GRoA 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 М31 составляет от 40° до 50° , и они имеют схожие направления вращения. В работе [28] 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) [36]. Однако даже в CDM–парадигме образование галактик начинается с формирования блина Зельдович [37], 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 [14, 38, 39, 40] и трехосность гало родительской галактики [38].

Примером элемента крупномасштабной структуры, имеющий форму “блина” 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 [41, 42] 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 [43]. 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 [6], 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 [44, 45, 46]. Концентрация звезд увеличивается к центру скопления. Количество звезд в шаровых скоплениях примерно $10^4 - 10^6$. Типичная масса для ШС $\sim 10^4 - 10^6 M_\odot$ [47]. 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 [48, 49, 50, 51, 52]. 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 уплотнится 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 практически одновременно, и их возраст может быть надежно измерен [53]; число скоплений гораздо больше, что существенно улучшает статистику.

Попытки разделить ШС на типы были еще примерно тридцать лет назад [54, 55]. В ряде работ отмечается 3 основных типа ШС [56, 57, 58, 7]: 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 ветви (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. [59] и Буданова и др. [60] 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) [56, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 47, 71, 72]. 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 [73]. Последующие спектроскопические

исследования показали, что бимодальность цвета обусловлена главным образом различием в металличности. Наличие субпопуляций ШС в Млечном Пути было замечено еще давно [57, 74] который выделил две группы ШС. ШС в гало бедны 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 [75] и Котэ [76] 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 [77, 71, 72], 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 скоплений. Серл и Зинн [56] 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 [78, 79, 80, 81, 82] предположили, что скопления, рожденные в несколько разное время, могут сливаться, образуя ШС с наблюдаемым разбросом металличности. Мاستробуоно-Баттисти и др. [80] и Хоперсков и др. [82] обнаружили, что слияния между Галактическими ШС возможны в толстом диске [83].

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 акту-

альной задачей [84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 10, 103, 109, 110, 111, 5, 112, 113, 114, 115, 116]. Чаще всего прародителями аккрецированных ШС в литературе отмечаются карликовая сфероидальная галактика в Стрельце (Sgr dSph), Галактика Секвоя (Sequoia), Поток Хелми (H99), и Гайя Энцелад (Gaia-Enceladus). По мнению разных авторов процент аккрецированных скоплений варьируется от 43 до 60 % [113, 117, 111].

Первой подробной попыткой объяснить образование ШС в космологическом контексте была попытка Пиблза и Дикке [118], которые отметили, что типичные массы ШС вскоре после рекомбинации сравнимы с массой Джинса. Позже Фолл и Рис [119] 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 скоплений” с массами и плотностью, равными или даже намного превышающими ШС (например, [120]), 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, [118, 121, 122, 123]). Второе семейство моделей рассматривает образование ШС как естественный побочный продукт активного процесса звездообразования, наблюдаемого при большом красном смещении [124, 125, 126].

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 образо-

ванием (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 (YH). 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 А3

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 А4

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 сейчас 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 [A1–A4, B1], включая тезисы докладов научных конференций [B1]. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, суммированы в 4 статьях [A1–A4], 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 основной текст 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 методе 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 [Б1] вклад диссертанта основной в постановке задачи, определяющей в обработке, анализе данных, а также в подготовке текста статьи.

Объем, структура и содержание 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.

Первая глава посвящена исследованию неоднородности распределения шаровых скоплений и галактик – спутников в пространстве. А также измерению анизотропии для трех типов шаровых скоплений: шаровые скопления в балдже/диске (BD), шаровые скопления в старом гало (OH) и в молодом гало (YH).

Вторая глава посвящена результатам разработанного нами нового и оригинального трехэтапного метода поиска шаровых скоплений, принадлежавших в прошлом карликовой сфероидальной галактике в Стрельце (Sgr dSph).

Третья глава посвящена анализу пространственной ориентации подсистем ШС, образовавшихся как внутри, так и вне нашей Галактики, и сопоставлению их со структурами самой Галактики, близких галактик – спутников и крупномасштабной структурой вокруг Местной Группы.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы, а также планы дальнейших исследований.

Глава 1

Пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике

Данная глава посвящена исследованию анизотропного пространственного распределения галактик – спутников Млечного Пути и шаровых скоплений. Проверена возможное совпадение пространственного распределения шести наиболее удаленных шаровых скоплений с известной планарной структурой в распределении галактик – спутников. Проверена влияние зоны избегания на распределения шаровых скоплений и галактик – спутников на низкой Галактической широте. А также измерена анизотропия для трех типов шаровых скоплений: шаровые скопления в балдже/диске (BD), шаровые скопления в старом гало (ОН) и в молодом гало (УН). Все результаты данной главы, включая все рисунки и таблицы, опубликованы в работе [A1], [A2]. Личный вклад автора в данную работу указан во Введении к диссертации.

1.1 Введение

Наличие космической паутины во Вселенной указывает на то, что движения материи коррелируют на масштабах, гораздо больших, чем размер области, из которой одна галактика собирает свою массу (например [127, 14, 40, 128]). Таким образом, космическая паутина должна быть связана с распределением материи внутри галактик. Этот эффект рассматривается как причина анизо-

тропного распределения спутников вокруг их галактик-хозяев (см., например, [129]). Млечный Путь имеет популяцию спутников, которые образует дискообразную структуру, почти перпендикулярную диску нашей Галактики (например, [36, 130]). Исторически это было впервые определено для четырех галактик – спутников (ГС; [19, 20, 21, 22]), но со временем это число достигло 11 [130, 131], далее 20 [132], а затем это было подтверждено для 14 вновь открытых спутников в Южном полушарии [133]. Галактика Андромеды также показывает “обширную, тонкую, со-вращающуюся” плоскость ГС [23, 24], хотя эта структура не является полярной, как в Млечном Пути. Галактики SDSS показывают некоторую однобокость в распределении спутников, направленных в сторону ближайшей другой массивной галактики [134], что также ожидается из космологических симуляций N-тел [135].

Помимо ГС, гало галактик также населено шаровыми скоплениями (ШС). Возраст ШС достигает 13 млрд лет, поэтому они могут представлять собой следы самых ранних стадий эволюции галактик. Некоторые ШС могут происходить из ГС, которые были аккрецированы на нашу Галактику [77, 136, 137, 58, 138, 47]. ШС обычно делятся на три классических типа: молодое гало (УН), старое гало (ОН), балдж/диск (ВД; [56, 57, 7]). Предполагается, что большинство ШС УН и около 15–17 процентов ШС ОН могут иметь внегалактическое происхождение [58].

Поскольку существующие в настоящее время спутники Млечного Пути образуют полярную плоскость вокруг Млечного Пути, представляет интерес поискать такую же анизотропию в распределении ШС. Это было сделано в нескольких работах [139, 36, 140, 141, 16]. В частности, Келлер и др. [141] проанализировали распределение УН и ОН ШС. Они показали наилучшее соответствие плоскости в распределении ШС, принимая во внимание неопределенности в измерениях расстояния до ШС для оценки надежности плоскости. Они обнаружили, что УН ШС формируют плоскость с ориентацией очень близкой к ориентации спутников. Анализируя выборки, расположенные на Галактоцентрических расстояниях > 10 , > 20 и > 30 кпк, они также обнаружили, что на больших расстояниях распределение ШС становится более ограниченным предпочтительным направлением. В отличие от УН ШС, ОН ШС не демонстрируют признаков плоской структуры. Павловски и др. [16] подтверждают предпочтительную ориентацию УН ШС, используя другой метод поиска плос-

кости, аналогичный тому, который использовался в работе Крупа и др. [142]. Они также расширили анализ, добавив 14 звездных потоков, динамически отделенных от аккрецированных спутников; они обнаружили, что семь из этих потоков лежат в пределах полярной структуры Млечного Пути.

Цель данной работы – внести больше деталей в изучение анизотропии ШС. Прежде всего, предыдущие работы предполагали плоское распределение и пытались определить плоскость, которая лучше всего соответствует распределению ШС. Вместо этого мы используем тензор гирации (gyration tensor) и проводим “слепой поиск” анизотропии. Во-вторых, система ШС претерпевает изменения из-за взаимодействия между ШС и Галактическим диском (например, [143]), поэтому можно ожидать, что ШС, которые были аккрецированы недавно и/или расположены дальше от центра Млечного Пути, сохраняют память о своей анизотропной аккреции. В частности, ожидается, что ШС с Галактоцентрическими расстояниями > 10 кпк будут долгоживущими, со временем жизни превышающим Хаббловское время. Чтобы изучить этот вопрос, мы не только разделили ШС на три классические группы, следуя Макки и ван ден Бергу [7], но и приводим все характеристики анизотропии как функцию расстояния от Галактического центра. Предыдущие работы были сосредоточены в основном на удаленных ШС с $R > 10$ кпк, в то время как мы анализируем анизотропию на всех расстояниях.

1.2 Измерение анизотропии

Наша Галактика содержит по меньшей мере 157 ШС [6]¹ и 27 ГС (число ГС местной группы равно 53; [8]). Используемые нами каталоги представлены в Таблицах 1.1 и 1.2. На Рис. 1.1 мы показываем распределение ШС по Галактоцентрическим расстояниям в кпк. Распределение представлено в x - y и x - z плоскостях в декартовых координатах относительно центра Галактики. Плоскость x - y соответствует диску Галактики. На рисунке легко заметить, что гало Галактики простирается примерно на 100 кпк. Распределение ГС можно увидеть на Рис. 1.2. Здесь также Галактоцентрические расстояния показаны в плоскостях x - y и x - z . Анизотропия в распределении спутников видна невооруженным глазом на правой панели Рис. 1.2, в то время как распределение ШС

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

Таблица 1.1: Каталог 157 Галактических ШС с координатами и типами, составленный по данным Харриса и др. [6] и Макки и ван ден Берга [7] (полная версия доступна в Приложении А – Таблица 3.1).

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
NGC 104	305.89	-44.89	4.5	BD
NGC 288	152.30	-89.38	8.9	ОН
NGC 362	301.53	-46.25	8.6	УН
Whiting 1	161.22	-60.76	30.1	UN
NGC 1261	270.54	-52.12	16.3	УН

- 1) Название ШС
- 2) Галактическая долгота (deg)
- 3) Галактическая широта (deg)
- 4) Расстояние от Солнца (кpc)
- 5) Тип, согласно Макки и ван ден Бергу [7]

не демонстрирует такого явного эффекта.

Чтобы проверить анизотропию распределений количественно, мы используем два различных тензора: тензор гирации и редуцированный тензор, которые построены следующим образом:

$$S_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^k x_j^k, \quad (1.1)$$

$$J_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{x_i^k x_j^k}{R_k^2}, \quad (1.2)$$

где S – тензор гирации, J – редуцированный тензор, N – количество объектов, x_i^k – расстояние от k -го объекта до центра Галактики вдоль i -ой координатной оси, $R_k^2 = x_k^2 + y_k^2 + z_k^2$, R_k – расстояние до каждой k -ой частицы. Три собственных значения тензора гирации (a , b и c) отсортированы в порядке возрастания так, что $a > b > c$. Степень анизотропии характеризуется отношениями собственных значений, c/a и b/a , оба из которых приближаются к 1 в случае изотропного распределения. Собственные векторы тензора дают нам направления анизотропии.

Таблица 1.2: Каталог 27 ГС Млечного Пути, взятый из МкКоначи ([8], полная версия доступна в Приложении Б – Таблица 3.2).

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾
Canis Major	240.0	-8.0	7
Sagittarius dSph	5.6	-14.2	26
Segue (I)	220.5	+50.4	23
Ursa Major II	152.5	+37.4	32
Bootes II	353.7	+68.9	42

- 1) Название галактик-спутников
- 2) Галактическая долгота (deg)
- 3) Галактическая широта (deg)
- 4) Расстояние от Солнца (кпк)

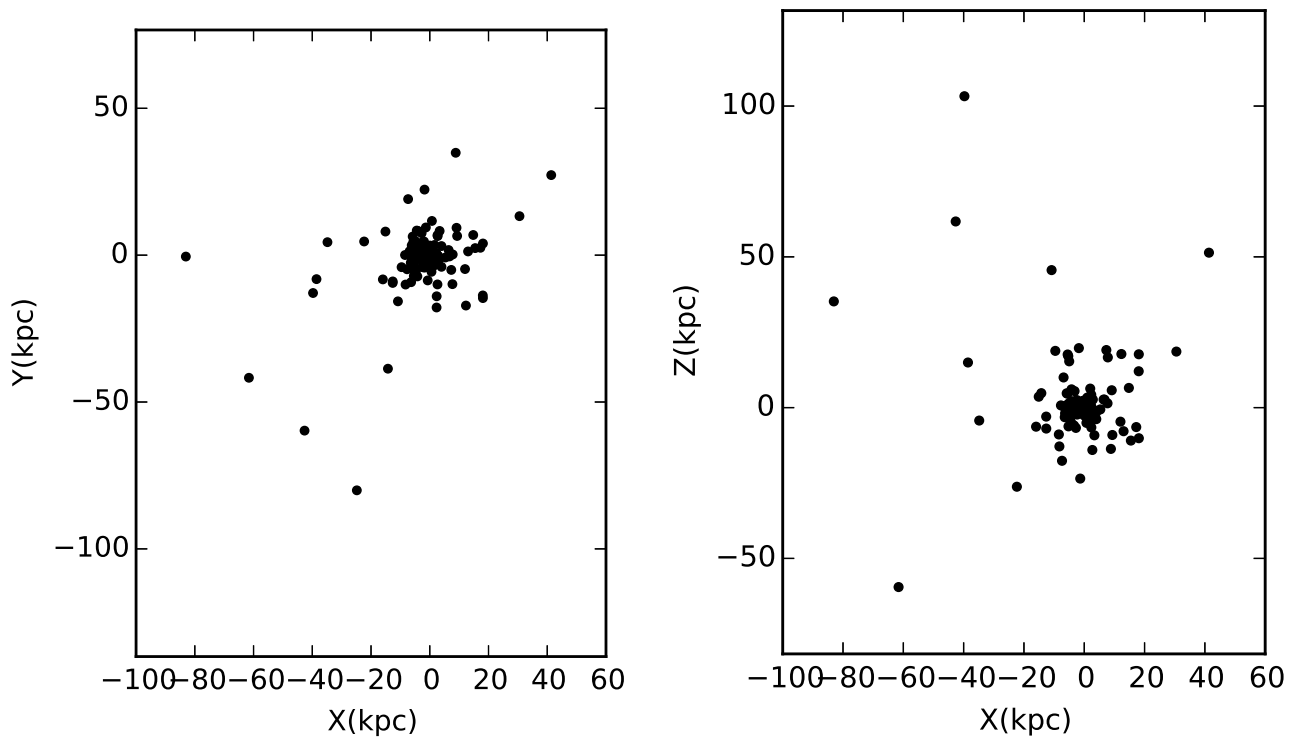


Рис. 1.1: Распределение ШС. XYZ – Декартовы координаты относительно центра Галактики. Z совпадает с Галактическим полюсом, а координаты Солнца составляют (-8.34, 0, 0) кпк [1].

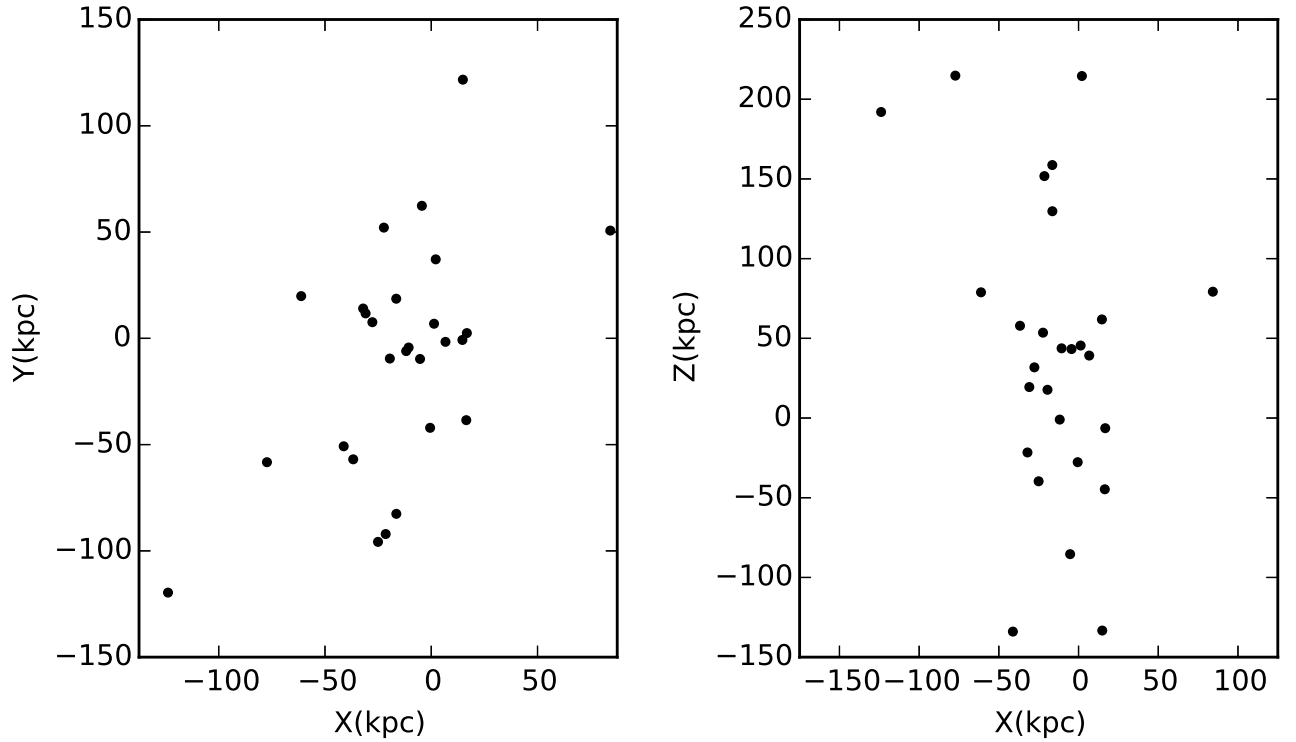


Рис. 1.2: Распределение ГС. Координатные оси как на Рис. 1.1.

Поскольку члены суммы в уравнении (1.1) пропорциональны квадрату расстояния, тензор гирации очень чувствителен к присутствию объектов с большим расстоянием. Редуцированный тензор (1.2), напротив, не учитывает расстояния. Поскольку ШС очень сосредоточены в направлении Галактического центра (см. Рис. 1.6), центральная часть Галактики дает наибольший вклад в редуцированный тензор. Ниже мы покажем влияние этих эффектов.

1.2.1 Статистическая значимость анизотропии

Для проверки статистической значимости найденных параметров системы ШС, мы генерируем 10 000 случайных выборок с тем же радиальным распределением и количеством объектов, что и в реальных каталогах, и измеряем медианное значение и среднеквадратичное значение отношения собственных значений тензоров. Мы называем анизотропию статистически значимой, если отношение собственных значений тензора для реального каталога отличается от медианы случайных выборок более чем на 3σ . Случайные выборки строятся путем фиксирования расстояний (R) от реальной выборки и рандомизации угловых координат.

Однако, поскольку мы строим график отношения собственных значений тен-

зора для подвыборок, ограниченных максимальным расстоянием, как функцию этого расстояния, у нас есть много измерений c/a или b/a для каждого каталога, так что вероятность того, что одно или несколько из этих измерений, лежащие за пределами определенного выше “ 3σ ”, не равна вероятности нахождения Гауссова случайного числа выше 3σ . Измерения кумулятивного тензора гирации и редуцированного тензора для разных подвыборок одного и того же каталога, ограниченного максимальным расстоянием, коррелируют, поэтому вероятность не может быть легко вычислена аналитически. Поэтому для каждого каталога с заданным числом измерений за пределами области 3σ мы оцениваем вероятность того, что в этой области имеется такое же или большее количество измерений в этой области из анализа 10 000 случайных выборок.

1.3 Анизотропия как функция расстояния

1.3.1 Степень анизотропии

Анизотропное распределение ГС вокруг Млечного Пути является хорошо известным результатом, поэтому мы начинаем данный раздел с демонстрации того, как тензор гирации описывает эту хорошо известную анизотропию. Распределение ГС по расстоянию показано на Рис. 1.3. Мы только проверяем ГС в том же регионе, где у нас есть ШС, т.е. в Млечном Пути, и, следовательно, мы игнорируем более удаленные карлики, принадлежащие к Местной группе.

На Рис. 1.4 показаны результаты измерений анизотропии для ГС с помощью тензора гирации и редуцированного тензора. На панелях, где показаны c/a и b/a как функция от R , распределения реальных объектов представлены точками, сплошная линия представляет медианный результат для 10 000 случайных выборок, а пунктирные линии представляют медиану $\pm 3\sigma$. “Угол” на этих панелях измеряется между нормалью к плоскости Галактики и малыми (зеленые треугольники) или большими (синие точки) осями распределения. Поскольку тензор гирации чувствителен к распределению наиболее удаленных объектов, результаты в верхнем ряду графиков для данного значения R можно интерпретировать как описывающие анизотропию близкую к R , а для редуцированного тензора как описывающие кумулятивные свойства при $< R$.

Из отношения c/a , показанного на Рис. 1.4 для обоих тензоров для выборки из 27 галактик, явная статистически значимая анизотропия наблюдается на

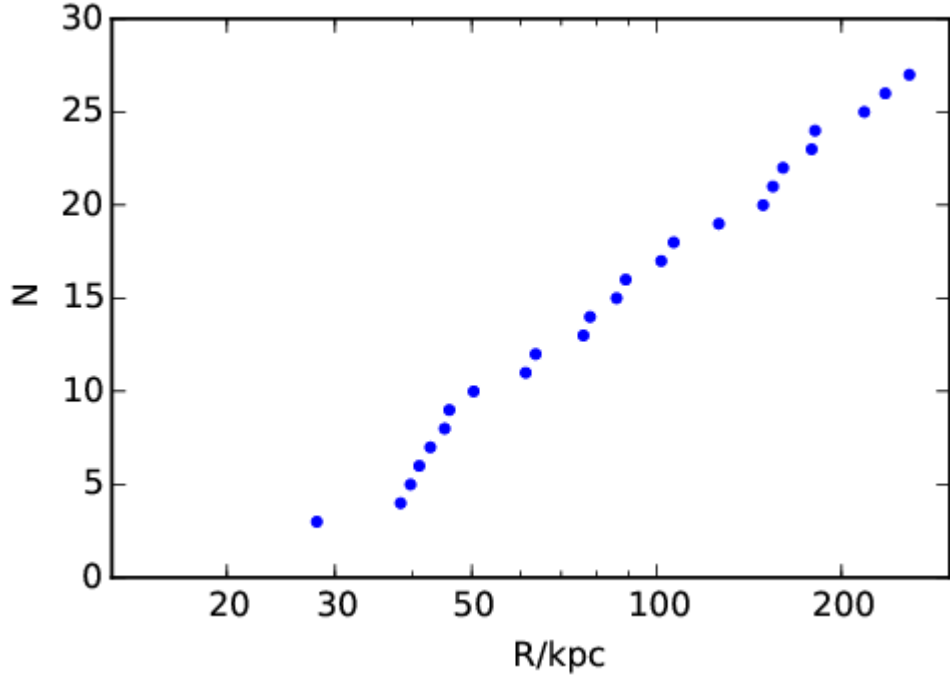


Рис. 1.3: Распределение ГС по расстоянию. N – кумулятивное число объектов на расстоянии $\leq R$.

расстояниях $R > 150$ кпк, но на меньших расстояниях она не очень выражена. На Рис. 1.4 видно, что три объекта находятся за пределами $\pm 3\sigma$. Для случайной реализации вероятность этого равна 0.007. Мы также проверяем влияние неопределенностей в расстояниях для ГС. Мы добавляем гауссовы случайные сдвиги к расстояниям от Солнца до всех объектов с нулевым средним и дисперсией, взятой из МкКоначи [8]. На Рис. 1.4 одна из таких реализаций показана серыми точками. Мы видим, что эффект от добавления этих сдвигов довольно мал.

Для известной выборки из 11 ГС, показанной на Рис. 1.5, анизотропия, обнаруженная нашим методом, менее выражена. Максимальное отклонение от медианы случайных выборок близко к 3σ и наблюдается на самых больших расстояниях. Редуцированный тензор на нижней панели показывает несколько меньшее отклонение от изотропного распределения. Во всех случаях большая ось распределения на крайних правых панелях Рис. 1.4–1.5 направлена почти перпендикулярно к плоскости Галактики, а малая лежит внутри плоскости. Шесть измерений направления малой оси имеют полярные углы между 70° и 90° . В случайных выборках это происходит с вероятностью 0.04. На верхней левой панели Рис. 1.5 мы видим, что все измерения находятся ниже меди-

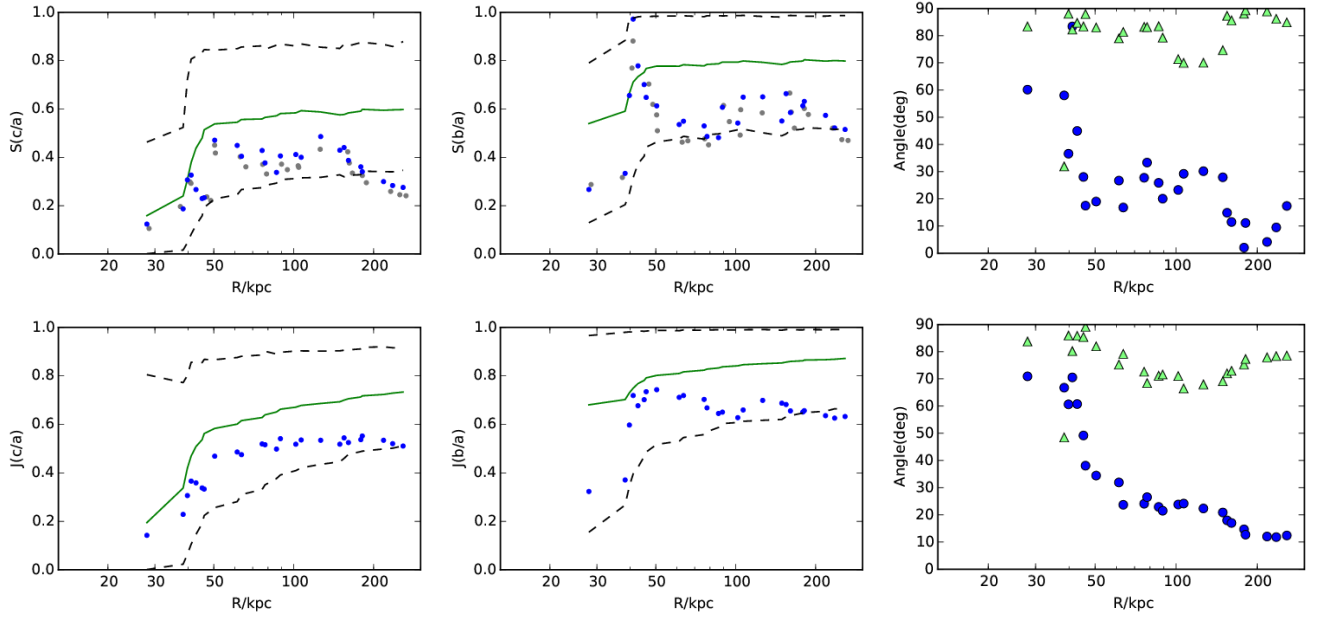


Рис. 1.4: Анизотропия 27 ГС, определенная с помощью тензора гирации (уравнение 1.1, верхний ряд) и редуцированного тензора гирации (уравнение 1.2, нижний ряд). Левые и средние колонки показывают распределение c/a и b/a в зависимости от Галактоцентрического расстояния спутника, соответственно. Каждая синяя точка представляет собой кумулятивное отношение собственных значений этих тензоров, рассчитанное для всех галактик, расположенных *внутри* данной позиции. Серые точки показывают результаты с добавлением неопределенности расстояния. Сплошная зеленая линия представляет медианное отношение собственных значений для 10 000 случайных выборок, которые сохраняют те же радиальные распределения, что и в реальных данных, но чьи полярные и азимутальные углы были рандомизированы. Пунктирные линии представляют $\pm 3\sigma$ таких случайных распределений. В правой колонке показаны углы, измеренные в градусах между галактическим полюсом Млечного Пути и большой (синие точки), а так же малой (зеленые треугольники) осью двух тензоров гирации. Зеленый треугольники, близкие к 90° , указывают на полярную плоскость.

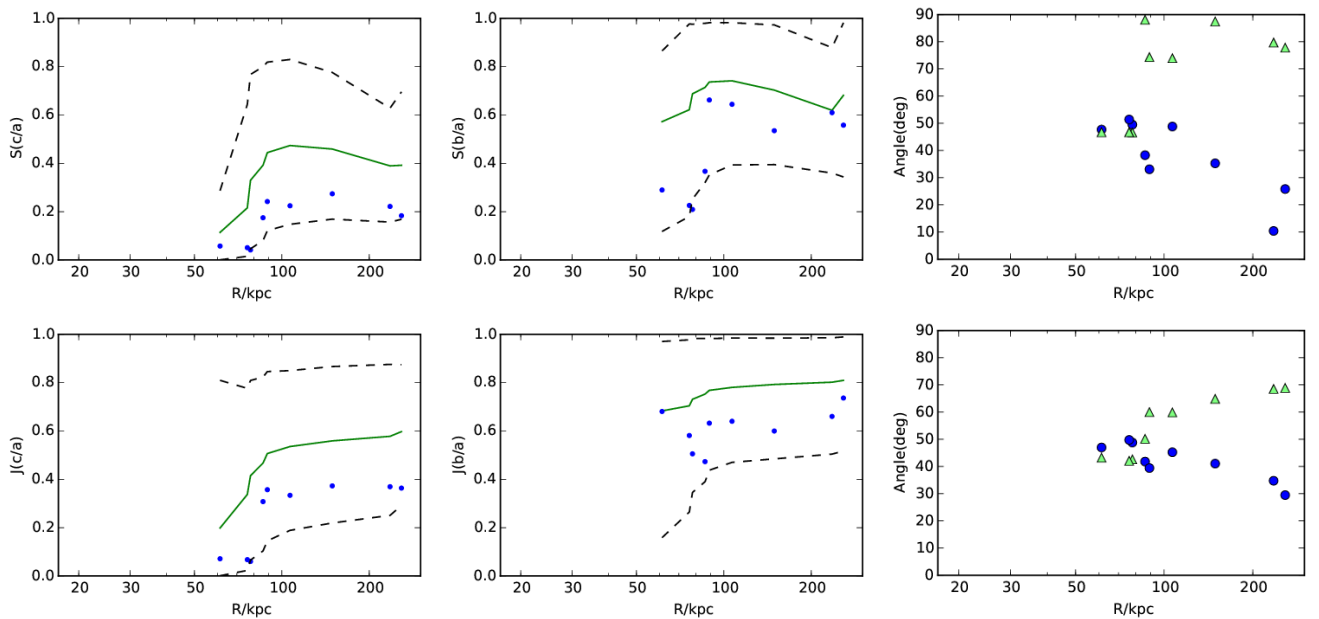


Рис. 1.5: То же, что и на Рис. 1.4, но для 11 ГС.

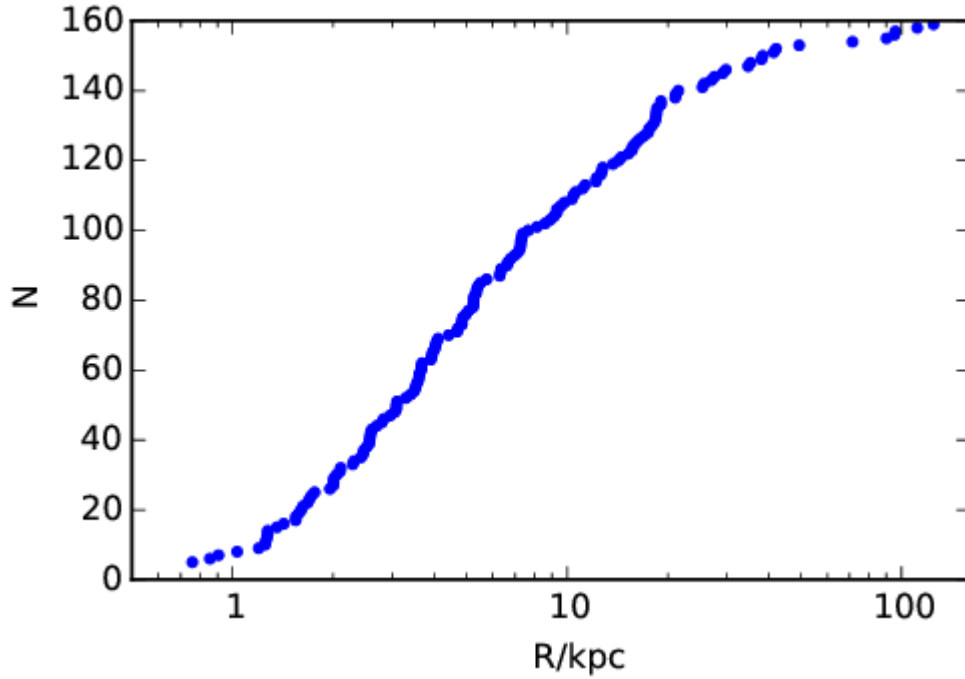


Рис. 1.6: Распределение ШС по расстоянию. N – количество объектов; R – расстояние от центра Галактики.

ны. Семь из них находятся ниже уровня 1σ , а четыре ниже 2σ . Вероятность этих конфигураций составляет 0.04 и 0.016, соответственно. Это показывает, что значимость анизотропии для этих 11 галактик меньше, чем предполагается в некоторых литературных источниках (например, [131]) другими методами, но это находится в соответствии с 2.5σ , найденными Павловским [31, 144] также на основе только положения спутников. Как следует из [144], статистическая значимость для 11 галактик составляет около 5σ только если также учитывать кинематическую информацию.

Радиальное распределение всех ШС Млечного Пути показано на Рис. 1.6. Из него видно, что ШС сильно сконцентрированы к центру Галактики. Из отношения c/a для полной выборки ШС, показанного на левой верхней панели рис. 1.7, можно четко увидеть значительную анизотропию при $2 \leq R \leq 10$ кпк. При $R > 18$ кпк отношение c/a становится близким к медианному для случайных изотропных выборок. Отношение c/a для редуцированного тензора остается значительно ниже, чем для изотропного случая при $R > 18$ кпк, что отражает различный вклад тензора гирации и редуцированного тензора (128 из 157 ШС расположены на $R < 18$ кпк).

Число объектов, выходящих за пределы $\pm 3\sigma$ на левой верхней панели Рис. 1.7,

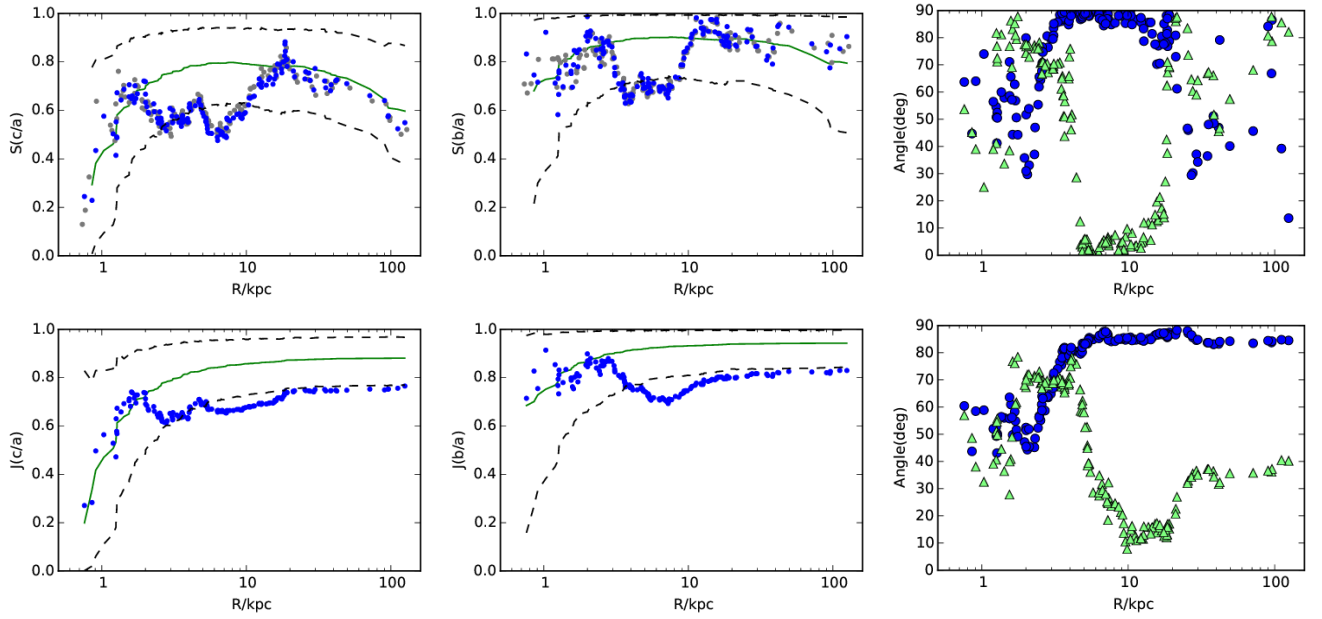


Рис. 1.7: Анизотропия 157 ШС. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. На панели слева вверху распределение c/a показывает четкую анизотропию в диапазоне $2 \leq R \leq 10$ кпк (синие точки ниже пунктирной линии обозначают 3σ разброс случайных изотропных реализаций). Левая нижняя панель – то же самое для редуцированного тензора гирации, она демонстрирует более высокую степень корреляции соседних измерений c/a для этого тензора. Правая верхняя панель показывает, что малая ось тензора гирации (зеленые треугольники) совпадает с полюсом Галактики в диапазоне $4 \leq R \leq 20$ кпк.

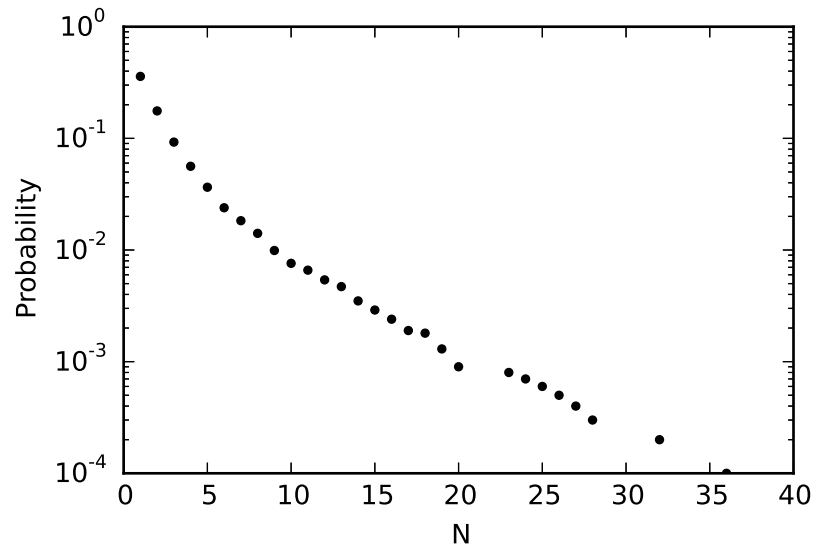


Рис. 1.8: Вероятность иметь N измерений собственных значений c/a для тензора гирации для одной случайной выборки из 157 ШС ниже или выше области 3σ .

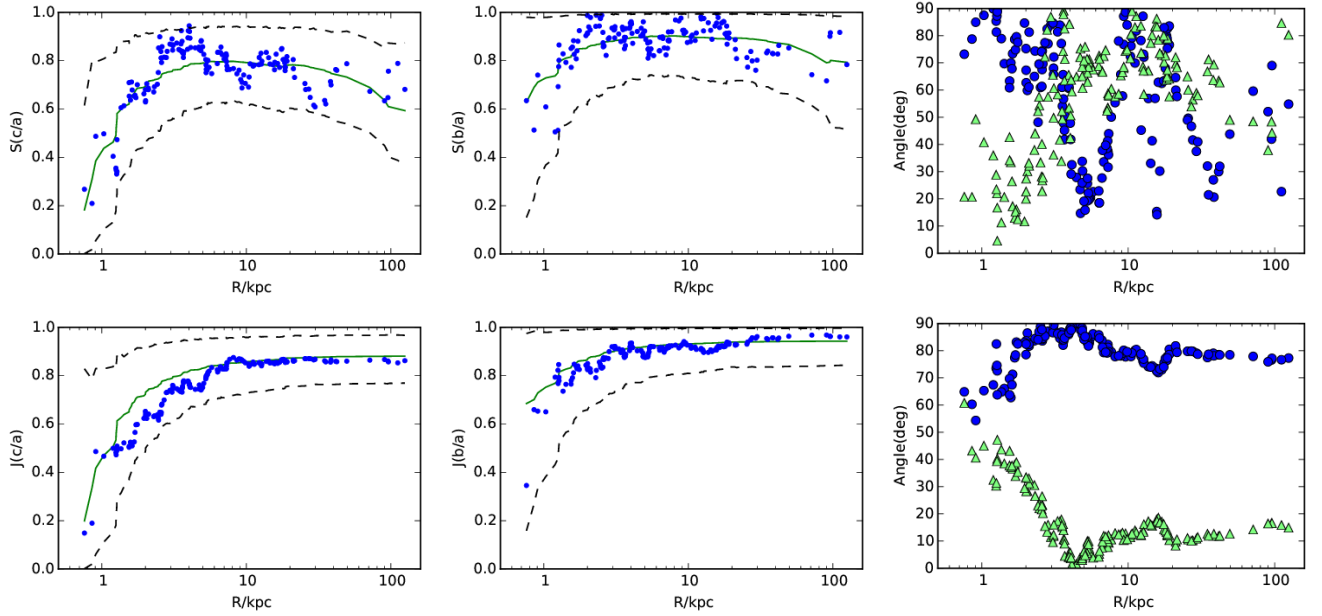


Рис. 1.9: То же, что и Рис. 1.7, но для одной случайной генерации выборки для ШС. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Колебания синих точек на самой верхней левой панели и колебания синих точек и зеленых треугольников на самых правых панелях показывают, что корреляции кумулятивных измерений тензора гирации могут привести к некоторой видимой “организации” даже для совершенно случайной выборки.

равно 54. На Рис. 1.8 видно, что для случайной выборки вероятность того, что максимум 36 объектов выйдут за пределы $\pm 3\sigma$, составляет уже 0.0001. Это означает, что наблюдаемое пространственное распределение ШС существенно отличается от изотропного. Мы считаем, что анизотропия на $R < 18$ кпк полностью связана с Галактическим диском. Это хорошо видно из самых правых панелей Рис. 1.7: большая ось тензора гирации лежит внутри диска, а малая ось перпендикулярна диску. Масштаб 18 кпк близок к радиусу Галактического диска, который составляет 14 кпк [145] или 25 кпк, если кольцо Единорога (Monoceros) интерпретировать как часть диска [146].

Ошибки расстояния для ШС не указаны в каталоге Харриса [6], поэтому мы приняли эту ошибку за пять процентов от расстояния. Расстояния до большинства скоплений были определены по ветви красных гигантов. Величина $[\text{Fe}/\text{H}]$ используется для определения светимости ветви красных гигантов, и мы пришли к выводу, что неопределенность в $[\text{Fe}/\text{H}]$ дает самую большую неточность в определении расстояния. Мы получили оценку точности на основе точности определения $[\text{Fe}/\text{H}]$, взятой у Харриса [9]². Из Рис. 1.7, мы видим, что при учете этих неопределенностей (измерения с их учетом показаны серыми точками), общая картина не сильно меняется.

²<http://physwww.mcmaster.ca/~harris/mwgc.ref>

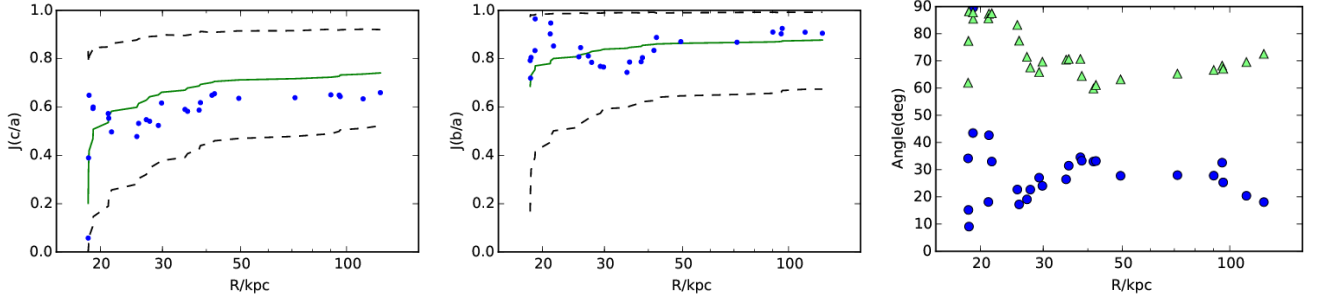


Рис. 1.10: То же, что и нижняя панель Рис. 1.7, но для $R > 18$ кпк для ШС. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Показанные здесь измерения тензора гирации взвешены по количеству объектов, поэтому мы удалили все центральные ШС, составляющие большую часть выборки, чтобы проверить анизотропию на больших расстояниях. Видно, что распределение близко к изотропному.

Мы показываем параметры тензора для одной случайной реализации 157 ШС на Рис. 1.9. Измерения c/a для тензора гирации показывают некоторые колебания, что свидетельствует о корреляции соседних измерений кумулятивных величин c и a . Редуцированный тензор показывает эти колебания только на малых расстояниях, $R < 10$ кпк. Это является следствием вклада ШС на $1/R^2$ для этого тензора. Поскольку большинство ШС расположены на $R < 10$ кпк, остальные несколько ШС на $R > 10$ кпк не могут существенно изменить собственные значения редуцированного тензора.

Чтобы устранить влияние малоудаленных ШС на редуцированный тензор (и попытаться выделить анизотропию, не связанную с диском), мы повторили анализ только для ШС с $R > 18$ кпк. Результаты показаны на Рис. 1.10. Распределение c/a не показывает никаких явных свидетельств анизотропии.

Интерпретация ориентации собственных векторов, представленных на правых панелях Рис. 1.7–1.10 для удаленных ШС на $R > 18$ кпк не столь однозначна. Распределение точек в правом верхнем углу панели Рис. 1.7 на этих расстояниях кажется хаотичным, в согласии с отсутствием анизотропии, и весьма похоже на результаты для одного случайного образца, показанного на Рис. 1.9. Результаты на Рис. 1.10 более стабильны и показывают, что распределение ШС при $R > 18$ кпк немного вытянуто в направлении, перпендикулярном Галактической плоскости.

При анализе соотношений собственных значений c/a и b/a тензоров гирации S или J , определенных в уравнениях (1.1–1.2), как функции расстояния, следует отметить, что (1) из-за ограниченной статистики, даже для 157 случайных точек медиана для случайных каталогов не приближается к 1.0 близко; (2) параметры, которые мы строим, коррелируют для точек с близкими расстояни-

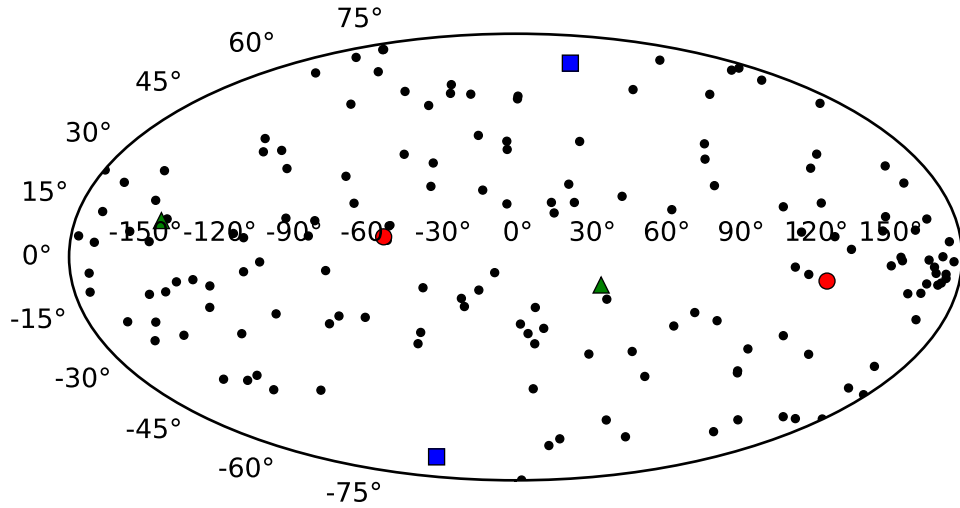


Рис. 1.11: Карта неба с распределением ШС в галактических координатах. Квадрат – большая ось тензора гирации; Треугольник – средняя ось тензора гирации; Круг – малая ось тензора гирации.

ями, что хорошо видно из Рис. 1.9, особенно для углов, измеренных с помощью редуцированный тензора (правая нижняя панель Рис. 1.9). Это означает, что такая корреляция сама по себе не может быть использована как признак наличия некоторой структуры.

На наблюдаемую степень анизотропии также может влиять эффект отбора, связанный с так называемой зоной избегания: объекты, лежащие близко к Галактическому диску, труднее наблюдать. Распределение ШС на небе вместе с направлениями наименьших (круги), средних (треугольники) и наибольших (квадраты) осей для полной выборки ШС показано на Рис. 1.11. Наблюдатель находится в Галактическом центре. Мы проверяем влияние зоны избегания, сначала проверив распределение ШС и ГС на низкой Галактической широте. Мы моделируем две версии зоны избегания: область с $|b| < 5^\circ$ и область с $|b| < 10^\circ$. В случае случайного распределения, из 157 ШС только 13.7 ± 3.5 будут расположены в пределах области $|b| < 5^\circ$, в то время как в реальном каталоге – 16 таких ШС. Для $|b| < 10^\circ$ случайный каталог содержит 27.3 ± 4.8 ШС в то время как в реальном каталоге их 39. Это уже показывает, что влияние зоны избегания не очень сильно для ШС.

Чтобы дополнительно исследовать влияние зоны избегания на ШС, мы проверили, как изменится статистическая значимость найденной анизотропии ШС, если в зоне с $|b| < 5^\circ$ и $|b| < 10^\circ$ не было ШС вообще. Мы обнаружили очень незначительное изменение значимости, измеренной по соотношению c/a , с ве-

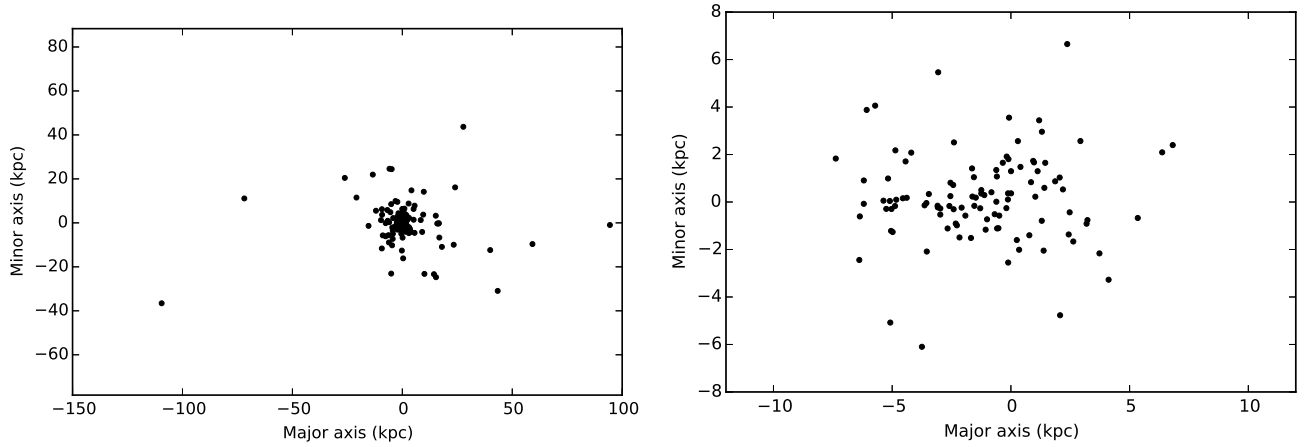


Рис. 1.12: Распределение ШС вдоль наибольшего и наименьшего собственных векторов. На левой панели для выборки $R < 125$ кпк, а на правой панели для выборки $R < 10$ кпк.

роятностью случайной реализации по-прежнему ниже 10^{-4} .

Для 27 ГС есть только один объект в пределах $|b| < 5^\circ$ и $|b| < 10^\circ$. Для случайной выборки из 27 объектов должно быть 2.4 ± 1.5 объекта для $|b| < 5^\circ$ и 4.7 ± 2 объекта для $|b| < 10^\circ$. Таким образом, влияние этой зоны также не очень важно для ГС. Влияние зоны избегания и полноты обследования на статистику ГС более подробно обсуждается в ряде работ, например, Толлеруд и др. [147] и Павловским [144].

Распределение ШС вдоль наибольшего и наименьшего собственных векторов показано на Рис. 1.12. На левой панели показано распределение ШС на расстоянии менее 125 кпк, которое содержит все 157 ШС. Ориентация вдоль наибольшей оси определяется немногими ШС на больших расстояниях, что иллюстрирует зависимость от расстояния тензора гирации. Из Рис. 1.7 видно, что анизотропия представленная этими несколькими ШС, статистически незначительна. На правой панели показано распределение 106 ШС, расположенных ближе 10 кпк к Галактическому центру. Дiskoобразная структура видна невооруженным глазом на правой панели. На Рис. 1.13 мы показываем распределение ГС вдоль наименьшего и наибольшего собственных векторов. Здесь можно четко различить вытянутую структуру.

1.3.2 Сравнение удаленных ШС с плоскостью спутников

На Рис. 1.13 видно, что ГС образуют вытянутую структуру с шириной ≈ 100 кпк и длиной 400 кпк. Более того, для большой оси $l = -132^\circ$, $b = 73^\circ$, а для малой оси $l = 154^\circ$, $b = -5^\circ$ и это почти совпадает с результатами Табли-

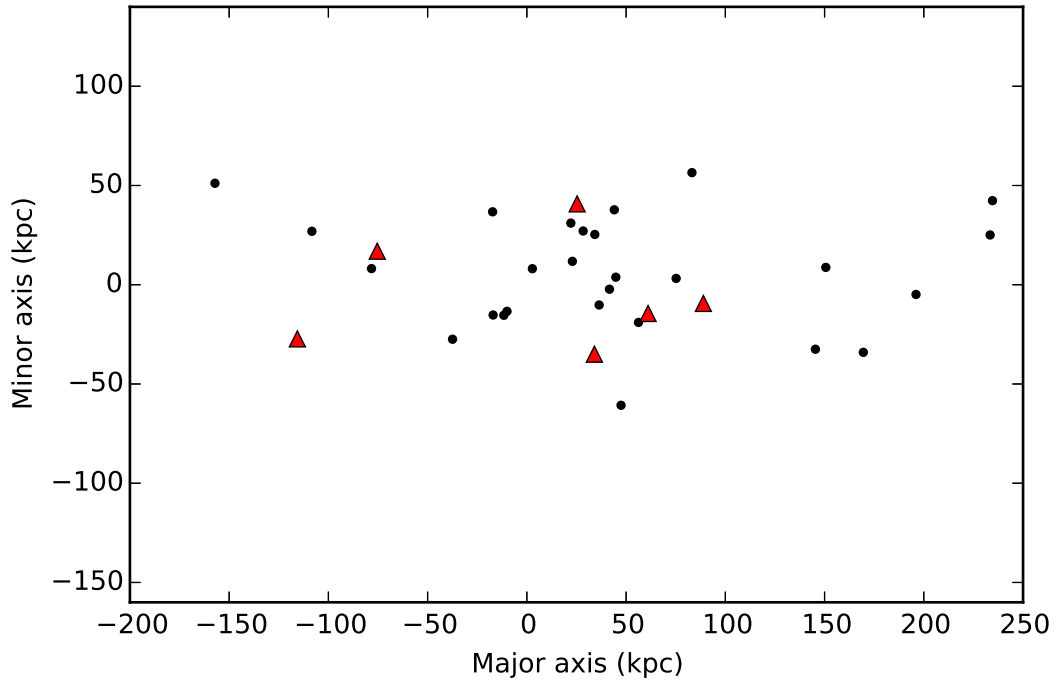


Рис. 1.13: Распределение ГС вдоль наибольшего и наименьшего собственных векторов, с добавлением шести наиболее удаленных ШС. Круг – ГС; треугольник – ШС.

цы 1 из Павловского и др. [16]. Интересно проверить, как распределены ШС в тех же координатных осях, определяемых собственными векторами системы ГС. Мы выбираем только те ШС, которые лежат на расстояниях, превышающих 50 кпк (половина толщины плоскости спутников) от центра Галактики, поскольку ШС на меньших расстояниях будут лежать полностью внутри структуры, образованной галактиками. Выбирается только шесть ШС. На Рис. 1.13 мы показываем их распределение вместе со спутниками. Можно видеть, что все шесть ШС лежат в пределах области ± 50 кпк вдоль малой оси тензора гирации ГС. Среднеквадратичная полутолщина для ГС составляет 28.7 кпк, а для ШС – 26.5 кпк. Это еще раз показывает сходство распределения ШС на больших расстояниях с распределением ГС.

Чтобы проверить, является ли этот вывод результатом совпадения, мы снова генерируем 10 000 случайных каталогов, используя наш метод измерения анизотропии и обнаружили, что вероятность того, что все шесть ШС находятся в пределах ± 50 кпк составляет 1,7%. Это значение не позволяет с уверенностью заключить, что ШС расположены в одной плоскости со спутниками, однако оно дает представление о том, что это может быть правдой. Дополнительная информация необходима для ответа на вопрос, существует ли реальная “плоскость ШС” в нашей Галактике. Анализ собственных движений ШС, который

будет доступен из Gaia, должен дать эту информацию.

1.4 Измерение анизотропии для трех типов ШС

Впервые ШС были разделены на несколько типов более двух десятилетий назад [55, 54]. Предложенная классификация дважды обновлялась: Макки и Гилмором [58] и Макки и ван ден Бергом [7]. Классификация ШС была сделана на основе металличности скопления и морфологии горизонтальной ветви. Богатые металлами ШС, имеющие красные горизонтальные ветви и ограниченные балджем и внутренним диском Галактики, обозначаются как “балдж/диск” (“bulge/disk” – BD). В то время как бедные металлами скопления с синими и красными горизонтальными ветвями называются “старое гало” (“old halo” – OH) и “молодое гало” (“young halo” – YH), соответственно, и обычно располагаются в галактическом гало. В классификации Макки и ван ден Берга [7] ШС делятся на пять типов: ШС в балдже/диске (BD – 37 объектов), ШС в старом гало (OH – 70 объектов); ШС в молодом гало (YH – 30 объектов); ШС, принадлежащие приливному потоку Стрельца (SG – шесть объектов); ШС неизвестного типа (UN – семь объектов). Из сценариев формирования ШС, рассмотренных во Введении, следует, что различные типы ШС должны демонстрировать различную анизотропию. Здесь, мы сосредоточились на анализе анизотропии только трех наиболее распространенных типов: BD, OH и YH. ШС в BD лежат от центра Галактики на расстоянии от 0.75 до 17.5 кпк. В OH и YH, ШС охватывают расстояния от 0.5 до 90.2 кпк и от 1.4 до 125 кпк, соответственно.

В каждой из наших выборок ШС очень сконцентрированы к центру: в BD из 37 ШС только восемь расположены на расстояниях более 5 кпк. В OH из 70 ШС только 20 ШС расположены на расстоянии более 8 кпк.

Для ШС в BD (Рис. 1.14) самая центральная область с $R < 2$ кпк имеет изотропное распределение, тогда как при $R > 3.5$ кпк для S и при $R > 7$ кпк для тензора J наблюдается статистически значимая анизотропия. Направление этого анизотропного распределения совпадает с Галактическим диском, что видно из третьей колонки Рис. 1.14. Для ШС в OH (Рис. 1.15), отклонение от случайных изотропных выборок всегда меньше 3σ , но приближается к нему на расстоянии $R \lesssim 3$ кпк. Из промежуточного столбца Рис. 1.15 видно, что отклонение от изотропного случая постепенно увеличивается в диапазоне расстояний

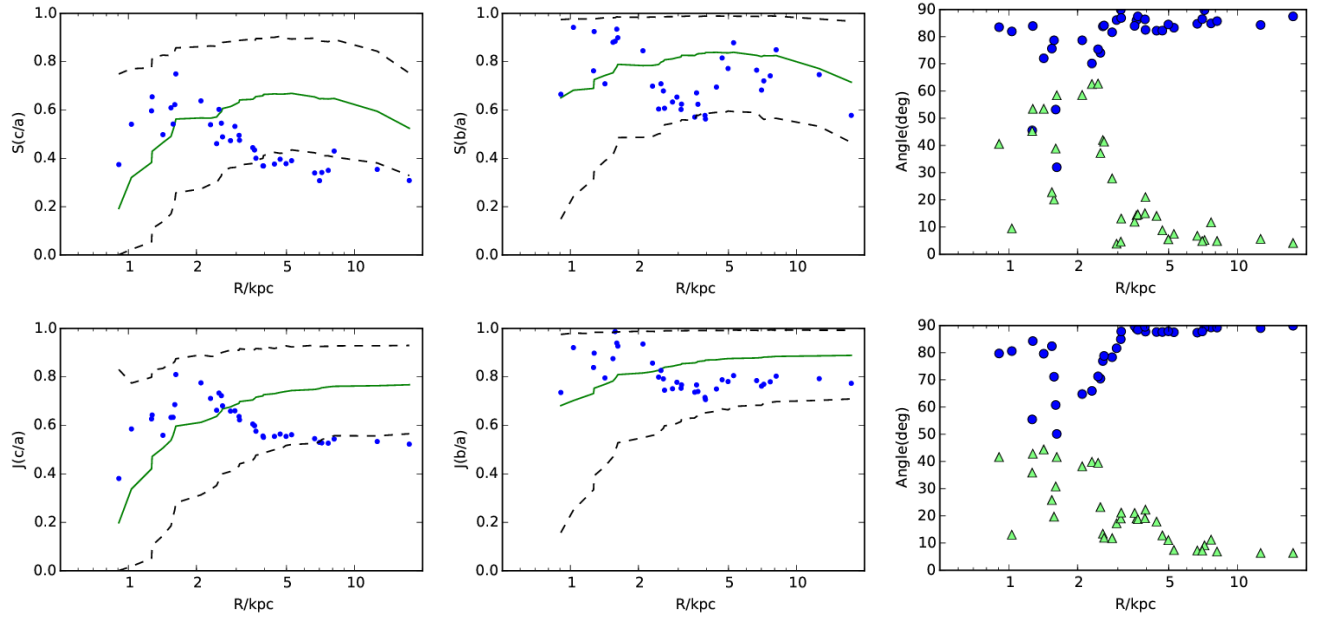


Рис. 1.14: Анизотропия ШС в образце ВД. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. На самой верхней левой панели показаны измерения собственного значения отношение c/a , которое показывает анизотропию при $R > 3$ кпк (синие точки под пунктирной линией, обозначающие 3σ разброс случайных изотропных реализаций). На самой верхней правой панели показано распределение полярных углов малой (зеленые треугольники) и большой (синие точки) осей тензора гирации. Из него видно, что анизотропная структура ВД ШС совпадает с Галактическим диском.

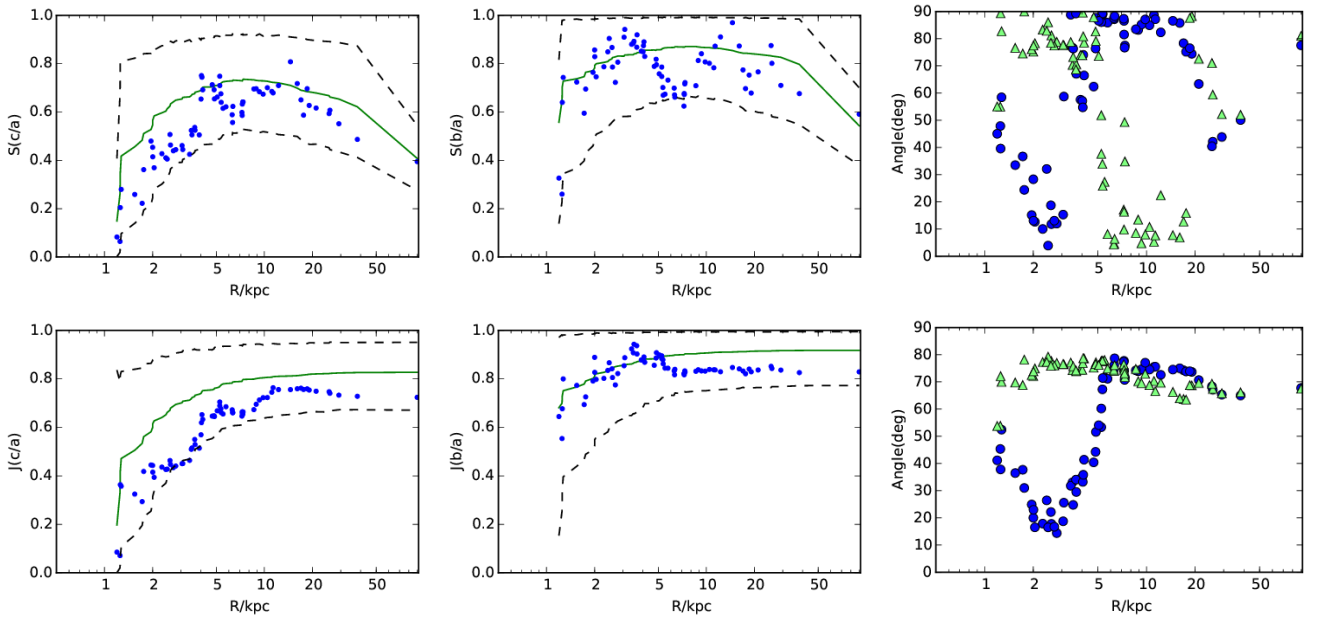


Рис. 1.15: Анизотропия ШС в образце ОН. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Верхняя и нижняя левые панели показывают предельную анизотропию, но распределение малых осей тензора гирации (зеленые треугольники на самой верхней правой панели) показывает явную неслучайную ориентацию, ее значение обсуждается в тексте.

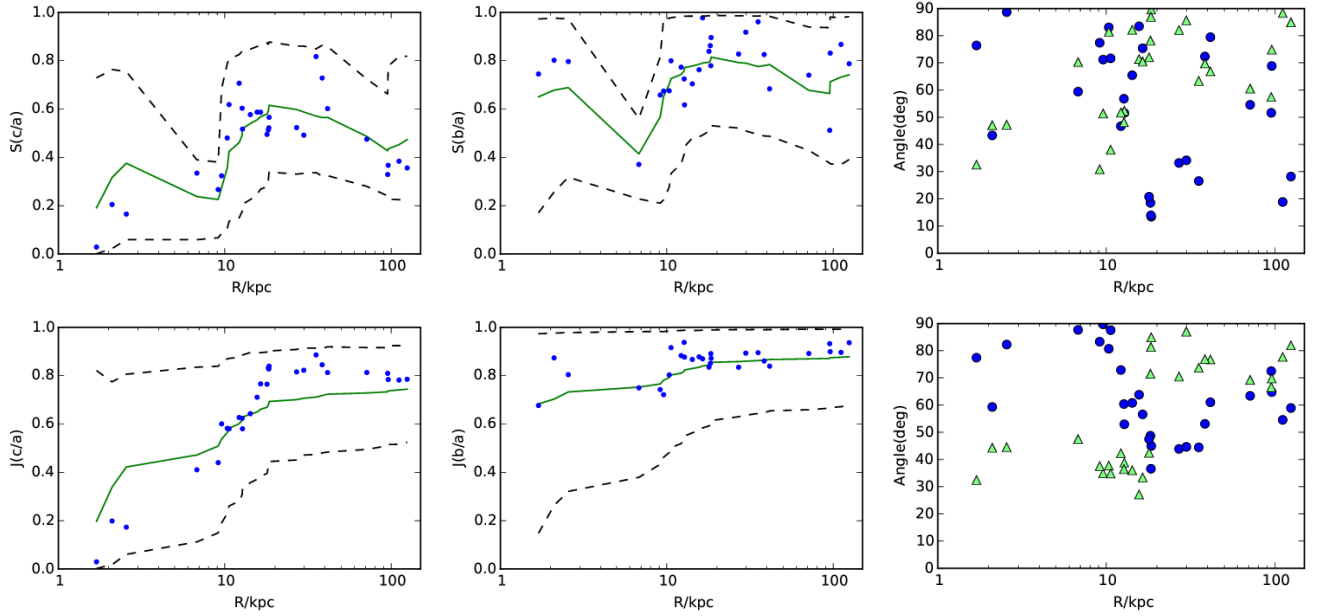


Рис. 1.16: Анизотропия ШС в образце УН. Панели и символы те же, что и на Рис. 1.4. Анизотропия не обнаружена.

$3 < R < 6$ кпк, а затем снова уменьшается к $R \sim 10$ кпк. В то же время на крайней правой панели Рис. 1.15 можно видеть изменение ориентации в том же диапазоне расстояний: при $R < 3$ кпк малая ось структуры лежит вблизи Галактической плоскости, большая ось близка к полюсу, в то время как при $R \approx 10$ кпк ситуация противоположная.

На расстоянии < 3 кпк имеется 16 измерений малой оси тензора гирации в диапазоне углов от Галактического полюса 70° – 90° . Вероятность того, что для случайной реализации такое же или большее число измерений будет находиться в одном и том же выбранном интервале равна 0.032. Если мы возьмем расстояние > 6 кпк и углы 0° – 20° малой оси, то для реального распределения в этой области существует 15 измерений (показаны зелеными треугольниками на Рис. 1.15), и вероятность случайной реализации равна 0.004. Если мы уменьшим диапазон расстояний до $6 < R < 20$ кпк, где все измерения с углом менее 20° , вероятность случайной выборки становится равной 0.001. Мы заключаем, что ОН ШС представляют собой две кинематически различные выборки: одна формирует полярную структуру вблизи центра Галактики, а другая распределена более похожи на ВД ШС.

Параметры УН ШС, показанные на Рис. 1.16, не дают никаких явных признаков анизотропии, в отличие от результатов, полученных Келлером и др. [141]. Мы интерпретируем это расхождение как следствие различия в используемых методах и различиями в отборе выборки УН ШС.

Таблица 1.3: Направление осей для различных выборок.

Выборка	Большая ось	Большая ось	Малая ось	Малая ось
	l	b	l	b
Все ШС	71°	76°	126°	-8°
ШС ($2 < R < 10$)	-4°	2°	-103°	80°
Все ГС ¹⁾	-132°	73°	154°	-5°
11 ГС ¹⁾	-143°	64°	153°	-12°
Все ВД ШС	-32°	-3°	21°	86°
ВД ($R > 3$)	-33°	-3°	20°	85°
Все ОН ШС	3°	-12°	91°	9°
ОН ($R < 3$)	-104°	78°	99°	11°
ОН ($6 < R < 20$)	-148°	-16°	122°	1°
Все УН ШС	62°	62°	142°	-5°

¹⁾ ГС – галактики спутники.

Третий столбец на Рис. 1.16 показывает, что в двух точках на самых больших расстояниях распределение УН ШС слегка вытянуто в сторону Галактического полюса, как было показано в разделе 1.3.2.

Направление осей для всех объектов и в областях, где мы обнаружили анизотропию, представлено в Таблице 1.3. Представленные результаты находятся в хорошем согласии с результатами Таблицы 1 из работы Павловского и др. [16] для ШС в популяциях ОН и ВД, но не для УН, что может быть вызвано немного разными используемыми образцами.

1.5 Выводы

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, [133]) отмечалась дискообразная структура. Сейчас открыто много новых спутников, в т.ч. для них уже

известна кинематика (например, [148]), поэтому представляет большой интерес проверить для них анизотропию. Для ШС мы обнаружили, что полная выборка показывает значительную анизотропию только в диапазоне расстояний $2 < R < 10$ кпк (см. Рис. 1.7). 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 (см. Рис. 1.14). ОН ШС демонстрируют более сложную структуру (см. Рис. 1.15). 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 [58] около 15–17% (10–12 объектов) ШС в ОН имеют внегалактическое происхождение. ШС УН (см. Рис. 1.16) не демонстрируют четкой анизотропии при анализе с помощью тензора гирации, но большая ось структуры на наибольших расстояниях направлена к Галактическому полюсу (см. также Рис. 1.10).

Найденные нами масштабы $R \approx 2 - 6$ кпк, на которых изменяются свойства распределения ШС, сравнимы с масштабами Галактического балджа — 1.5 кпк и бара — 5 кпк [149], а отмеченный масштаб 18 кпк близок к размеру диска, 14–25 кпк [145, 146]. Полученные нами данные указывают на сложное

распределение ШС на относительно небольших расстояниях, $R < 18$ кпк, которое включает два компонента ОН ШС с различной анизотропией и популяцию ВД ШС, совпадающую с Галактическим диском. Они могут отражать анизотропные аккреционные спутники, содержащие ШС, формирование ШС внутри Галактического диска и динамическое взаимодействие с гравитационным потенциалом диска и балджа. Анализ скоростей ШС пролет больше света на свойства этих популяций. Другой способ расширить наш анализ - определить ШС, принадлежащие к приливным потокам, таким как потоки Стрельца или Единорога [103, 150], и исследовать пространственное распределение ШС, принадлежащих и не принадлежащих к потокам.

Глава 2

Шаровые скопления, потерянные сфероидальной карликовой галактикой в Стрельце

Данная глава посвящена изложению полученных результатов разработанного нами нового и оригинального трехэтапного метода поиска шаровых скоплений, принадлежавших в прошлом карликовой сфероидальной галактике в Стрельце (Sgr dSph). Все результаты данной главы, включая все рисунки и таблицы, опубликованы в работе [A3]. Личный вклад автора в данную работу указан во Введении к диссертации. Рис. 2.5 и 2.6 результат соавтора.

2.1 Введение

Представляет интерес изучение взаимосвязи эволюции галактик и окружающей их среды. В стандартной космологической модели Λ CDM [13] галактики формируются постепенно, путем иерархического сгущивания: сначала образуются маломассивные объекты, а затем более массивные, путем их слияния. Млечный Путь не является исключением.

Некоторые карликовые галактики спутники, находящиеся в длительном взаимодействии с Галактикой, начинают частично разрушаться и сливаться с нею (например, [151, 152]). Из-за высоких скоростей движений возникают прилив-

ные хвосты и туда попадают газ, пыль, звезды и шаровые скопления. С близким прохождением карликовой галактики (приливных осколков) вблизи центра Галактики из-за аккреции начинается процесс переноса ее звезд и шаровых скоплений в Млечный Путь, которые становятся для нее строительным материалом.

Рядом с нашей Галактикой есть несколько приливных потоков (например [85, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 101, 102]). Один из них – это приливный поток Стрельца (Sgr stream) [84, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 88, 159, 94, 160, 99, 100, 103, 104, 105, 161]. 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.

В литературе есть много работ по поиску шаровых скоплений, которые могли бы образоваться в Sgr dSph (например [153, 22, 162, 163, 164, 155, 165, 166, 158, 156, 88, 58, 167, 108, 160, 99, 10, 100, 103, 168, 169, 170, 111, 113, 171]). 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 [5] и ссылки в этой статье).

Чтобы проверить, относятся ли шаровые скопления к приливному потоку Sgr, мы применяем свой метод. Мы используем данные об их собственных движениях, которые стали доступны недавно (см. [172]) после выхода релиза Gaia DR2 [173, 174, 34]. Мы также используем результаты моделирования приливного хвоста Sgr dSph. В литературе есть несколько таких моделей (например [175, 176]). Мы выбрали модель [175] (далее LM10a), поскольку эти данные можно найти в открытом доступе. Кроме того, в модели LM10a рукава приливного потока хорошо согласуются с данными наблюдений, в то время как для модели [176] существует несоответствие для ведущего рукава. Представленная в статье LM10a модель включает в себя потенциал Галактики, состоящий из трех компонент: дисковой, сферической и трехосного гало. Последняя компонента вытянута 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 [94]. Орбита спутника в момент наблюдения характеризуется направлением полюса $(l_p, b_p) = (273^\circ.8, -14^\circ.5)$ и лучевой скоростью 171 км/с.

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 [157, 177, 178, 179, 90, 180]. Так, найденная трехмерная скорость галактики в Стрельце $(V_x, V_y, V_z) = (230, -35, 195)$ км/с, нынешняя масса $2.5_{-1.0}^{+1.3} \times 10^8 M_{\odot}$. Модель LM10a представляет собой улучшенную версию прошлых моделей (см. [178, 179]), так как лучше всех приближена к наблюдательным данным по приливному потоку. Например в предыдущей модели приливного разрушения Sgr dSph авторы представили три различных модели для Галактического гало (осесимметричное в плоскости диска; сжатое сферически; вытянутое в направлении, перпендикулярно диску), но не одна из них не могла одновременно воспроизводить 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. [88, 178, 179] ¹) для звезд потока мы получаем больше возможностей для поиска ШС, принадлежащих Sgr dSph.

2.2 Определение шаровых скоплений, принадлежащих приливному потоку

2.2.1 Пространственные расположения

Согласно результатам моделирования LM10a, при разрушении исходного объекта отделившиеся от него звезды образуют поток характерной формы (Рис. 2.1). 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 IC 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

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

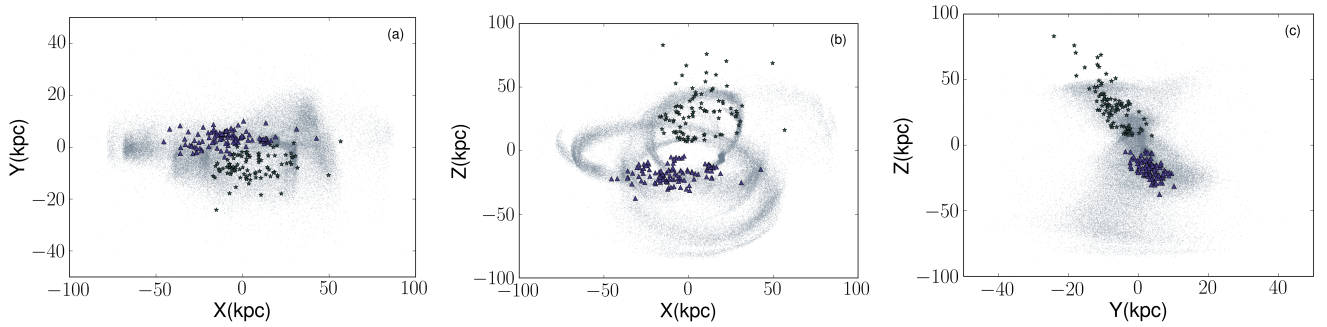


Рис. 2.1: Приливной поток Sgr в трех проекциях (a,b,c). Серые точки соответствуют модели потока Sgr (LM10a), звездочками и треугольниками показаны звезды в ведущем и в ведомом рукавах потока соответственно (наблюдаемые данные). XYZ – Декартовы координаты относительно центра Галактики. Z указывает на Галактический полюс; положение Солнца $(-8.34, 0, 0)$ кпк [1]

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 . Иными словами, радиус сферы – это расстояние до n -го ближайшего соседа. Мы приняли $n = 6$, но наши результаты слабо зависят от n . Саму плотность вычислять не обязательно, 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 меньшем d_6 к полному числу 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 принадлежат потоку. 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. Таблица 2.1).

Приливной поток от Sgr dSph можно разделить на два рукава: ведущий и ведомый. Для того, чтобы определить 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 [100, 111]. Координаты самой Sgr dSph [175] и *NGC 6715* ([6, 9] (версия 2010 года) ²) очень близки (Для Sgr $L_{Sgr} = 5.6^\circ$, $B_{Sgr} = -14.2^\circ$, $d_{\odot Sgr} = 28$ кпк, $R_{Sgr} \approx 20$ кпк, а для *NGC 6715* $L = 5.61^\circ$, $B = -14.09^\circ$, $d_{\odot} = 26.5$ кпк, $R \approx 19$ кпк).

2.2.2 Кинематика шаровых скоплений

Сформировав список из 17 шаровых скоплений, мы проверили, насколько хорошо лучевые скорости шаровых скоплений совпадают со скоростями звезд в наблюдаемых и модельных каталогах. Лучевые скорости для звезд (для наблюдаемых и для модельных данных) были взяты из [181, 175]³. А для шаровых скоплений лучевые скорости были взяты из [172]. В диссертационной работе все лучевые скорости приводятся в так называемом Галактическом стандарте

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

³<http://faculty.virginia.edu/srm4n/Sgr/index.html>

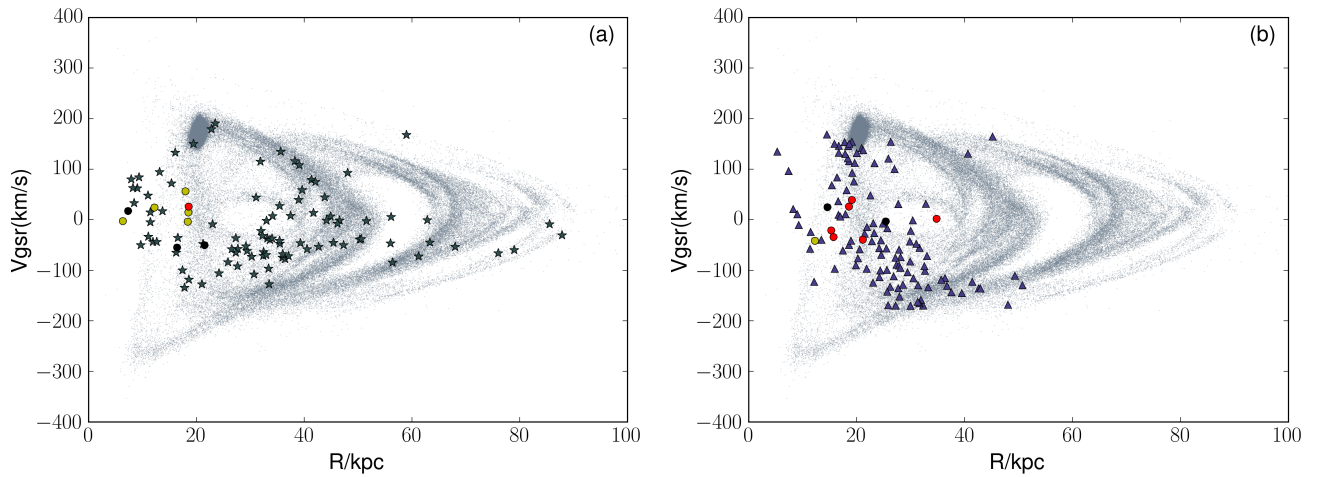


Рис. 2.2: Распределение лучевых скоростей в зависимости от Галактоцентрического расстояния: для шаровых скоплений нашей выборки (красные, желтые и черные кружки) и наблюдаемых звезд из ведущего (звездочки) и ведомого (треугольники) рукавов (панели (a) и (b) соответственно), а также модели LM10a приливного 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.

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:

$$V_{gsr} = V_{lsr} + 220 \sin(l) \cos(b) \text{ км/с.} \quad (2.1)$$

Результаты показаны на Рис. 2.2 и в Таблице 2.1.

На Рис. 2.2 показано распределение шаровых скоплений и звезд из потока по лучевым скоростям. Вероятности для каждого из 17 скоплений–кандидатов, принадлежащих потоку, приведены (в порядке возрастания вероятности) в Таблице 2.1, 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 [7] они принадлежат. Изучив Таблицу 2.1, можно выяснить, у каких шаровых скоплений лучевые скорости близки к таковым у 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.

Таблица 2.1: 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 [7].

Название	Вероятность	V_{gsr} (км с ⁻¹)	$\langle V_{gsr}^* \rangle$ (км с ⁻¹)	$\langle V_{gsr}^{**} \rangle$ (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

Ошибки для лучевых скоростей складываются из трех компонент: 1) для каждого скопления мы брали три стандартных отклонения от средних лучевых скоростей для ближайших 6 звезд в модельном потоке, 2) три стандартных отклонения из результатов измерений скоростей шаровых скоплений [172] 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 2.1 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 2.2 показывает пространственные скорости (V_x , V_y , V_z) в Галактическом стандарте покоя для 17 шаровых скоплений [172], 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 диссертационной работе данные из [172], однако мы сравнили их с данными из [182] и получили, что они хорошо согласуются друг с другом. После выхода релиза Gaia определение трехмерных скоростей шаровых скоплений стало актуально и в литературе появилось много работ посвященной этой задаче (например, [183]).

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. 2.3, где показана карта неба в Галактоцентрических координатах L, B . Используя данные L, B для 17 шаровых скоплений из Таблицы 2.3, можно определить местоположение каждого шарового скопления на карте неба (см. Рис. 2.3). Из Таблицы 2.2 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 6 (*NGC 288*; *NGC 5272*; *NGC 5053*; *NGC 5024*; *NGC 5904* и *Pal 5*) скоплений, для которых наблюдается расхождение по собственным движениям, становятся кандидатами (далее категория Б). Остальные пять шаровых скоплений из 17 (*NGC 6864*; *NGC 5466*; *NGC 5897*; *NGC 7492* и *NGC 4147*), которые не принадлежат потоку по кинематике, становятся менее вероятными кандидатами (далее категория В).

Таблица 2.2: Пространственные скорости для 17 шаровых скоплений в потоке и средние пространственные скорости для ближайших шести звезд в модельном потоке.

Название	V_x	V_y	V_z	$\langle V_x \rangle$	$\langle V_y \rangle$	$\langle V_z \rangle$
	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_z$	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_z$
	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)
NGC 6864	66.92	-83.26	49.40	-202.82	39.98	108.39
				478.13	113.00	221.00
NGC 5466	235.28	-50.46	232.32	341.41	10.72	62.21
				78.38	137.24	95.24

Продолжение на следующей странице

Название	V_x	V_y	V_z	$\langle V_x \rangle$	$\langle V_y \rangle$	$\langle V_z \rangle$
	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_z$
				(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)
NGC 288	9.89	-80.69	50.55	-232.32	80.45	-176.78
				291.17	74.39	207.83
NGC 5272	-60.46	135.49	-134.57	336.64	-76.25	-12.86
				108.89	258.14	204.53
NGC 5053	-52.38	148.20	35.11	333.11	-12.02	22.92
				68.72	90.50	281.93
NGC 5897	34.13	-133.63	88.40	378.21	-77.91	36.30
				99.05	142.43	160.49
NGC 5024	-58.06	158.52	-71.86	334.13	-8.40	49.14
				68.24	80.15	82.31
NGC 7492	-5.14	-95.43	63.68	-239.03	62.02	-74.85
				135.29	171.92	257.15
Pal 12	-339.19	12.40	116.00	-328.84	-30.82	105.78
				77.72	87.35	95.45
NGC 5904	-304.75	86.82	-183.79	284.51	-23.71	-7.75
				784.37	384.20	135.14
Pal 5	50.24	-170.32	-8.79	303.09	-19.26	117.33
				94.01	124.97	231.80
Terzan 7	-260.69	-5.65	182.9	-266.06	16.76	175.38
				183.56	210.95	191.66

Продолжение на следующей странице

Название	V_x	V_y	V_z	$\langle V_x \rangle$	$\langle V_y \rangle$	$\langle V_z \rangle$
	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	$3\sigma_x$	$3\sigma_y$	$3\sigma_z$
				(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)	(км с ⁻¹)
NGC 4147	40.98	-10.08	130.87	319.89	-34.38	30.07
				75.53	106.73	94.40
NGC 6715	-229.62	3.26	189.18	-247.83	-28.67	205.01
				84.02	87.77	81.35
Arp 2	-251.65	-20.12	180.69	-253.95	-31.41	173.64
				91.07	82.49	78.89
Whiting 1	-210.54	36.01	12.03	-254.12	7.99	-5.52
				103.82	110.99	99.65
Terzan 8	-271.58	-1.88	161.22	-265.75	-28.79	176.13
				81.59	79.37	82.73

2.2.3 Свойства звездных населений Sgr dSph

В Sgr dSph произошло несколько событий звездообразования (LM10a, [94, 184]). На основе глубокой звездной фотометрии на снимках, полученных на космическом телескопе имени Хаббла, авторы статьи [94] сделали вывод о существовании в Sgr dSph как минимум четырех звездных популяций:

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

Здесь $[\alpha/Fe]$ – содержание альфа-элементов ⁴ Более поздние спектроскопические исследования ~ 6600 звезд в центре Srg dSph [185] доказали существова-

⁴Мы используем стандартное определение, $[X/Y] = \log(X/Y) - \log(X_\odot/Y_\odot)$, где X и Y – массы конкретных элементов.

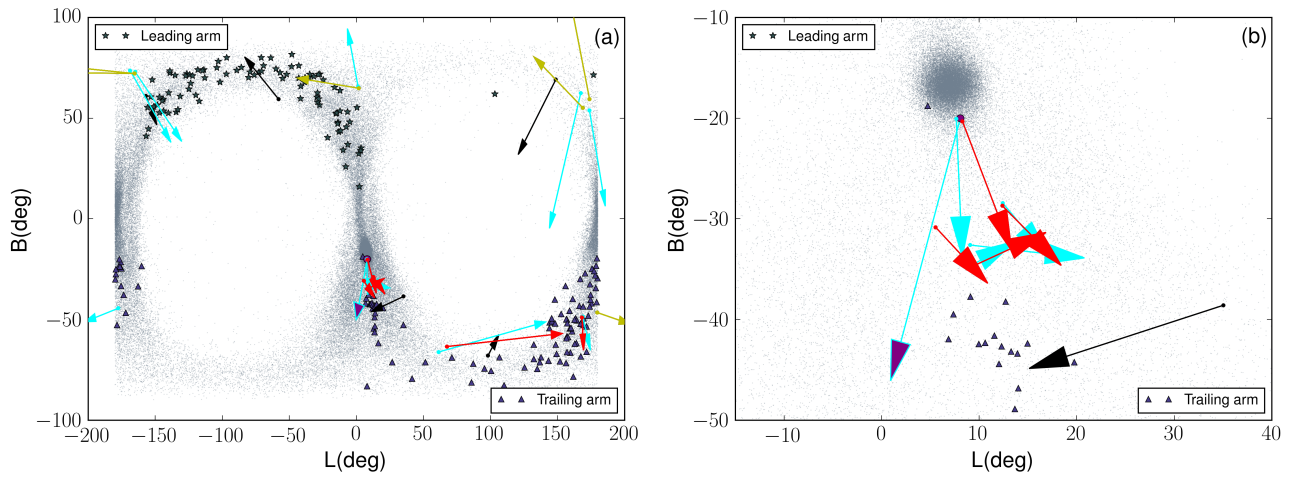


Рис. 2.3: Карта неба в Галактоцентрических Галактических координатах. Координаты Солнца: $(-8.34, 0, 0)$ кпк [1] (a). Увеличенная часть карты неба около Sgr dSph (b). Серые точки представляют модель приливного потока Sgr (LM10a). Звездочками показаны наблюдаемые звезды в ведущем рукаве, а треугольниками – 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 В) соответственно. Голубая стрелка – это среднее собственное движение шести ближайших модельных звезд в потоке, а голубая стрелка с фиолетовым кончиком – собственное движение Sgr dSph.

ние трех звездных популяций: 1) молодой, богатой металлами $[Fe/H] = -0.04$ и возрастом 2.2 млрд. лет; 2) промежуточного возраста богатой металлами $[Fe/H] = -0.29$, 4.3 млрд. лет и 3) старой, бедной металлами $[Fe/H] = -1.41$, 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” (см. Рис. 2.4) для шаровых скоплений [117] и частиц в модели LM10a как еще один способ проверки гипотезы о принадлежности шаровых скоплений потоку Sgr. Данные о возрасте [10] и металличности для 17 шаровых скоплений приведены в Таблице 2.3. Средняя металличность по всем статьям взята из каталога шаровых скоплений [9] (издание 2010) ⁵ и из работ [10, 11, 12, 2]. Отдельные группы модельных звезд на Рис. 2.4 представляют разные эпизоды звездообразования. Положение на этом рисунке шаровых скоплений, близких по координатам, лучевым скоростям и собственным движениям к Sgr dSph (см. Раздел 2.2.2), приблизительно совпадает с положением групп модельных звезд, то есть вспышек звездообразования. Мы видим, что возраст всех шаровых скоплений четко совпадает с эпизодами звездообразования. Для нескольких шаровых скоплений

⁵<http://physwww.mcmaster.ca/~harris/Databases.html>

Таблица 2.3: Галактоцентрические координаты [9] (версия 2010 года), средний возраст и средняя металличность для 17 шаровых скоплений (среднее значение для образцов из [9] (издание 2010 года), [10, 11, 12, 2]).

Название	L (°)	B (°)	\overline{Age} (Gyr)	$\overline{[Fe/H]}$
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

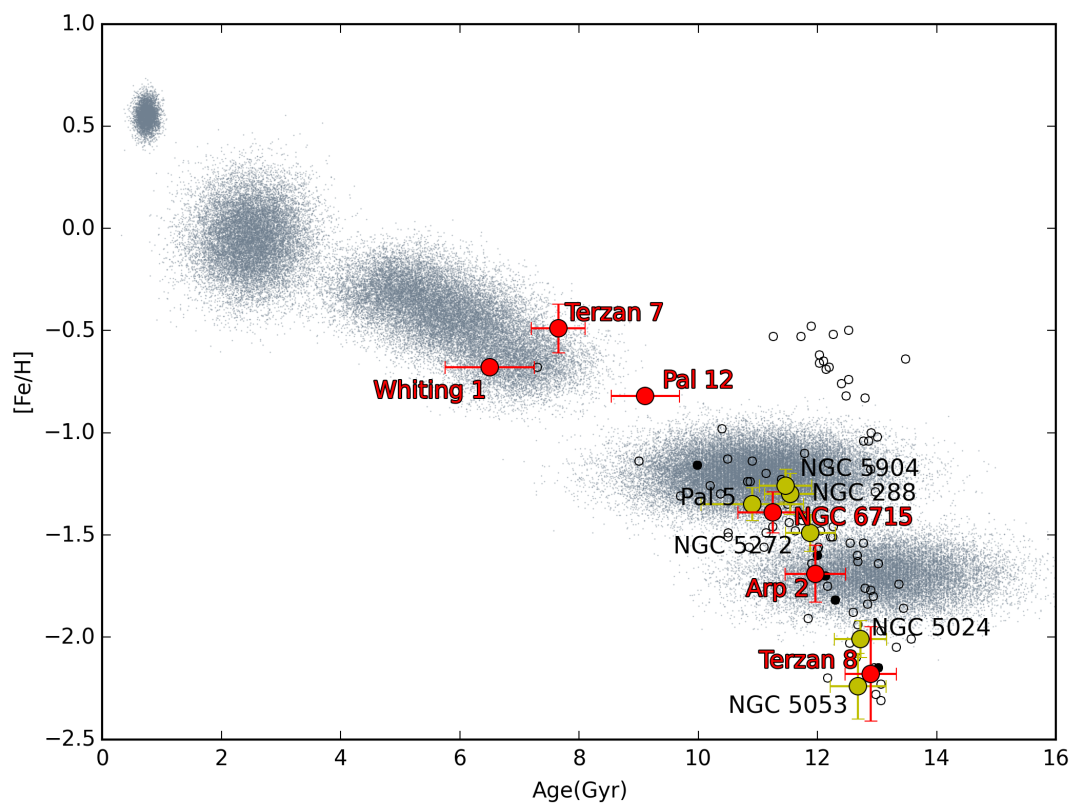


Рис. 2.4: Распределение шаровых скоплений по возрасту и металличности. Серые точки представляют модель приливного потока Sgr (LM10a). Красными кружками показаны шесть шаровых скоплений из категории А, принадлежащих потоку, желтые кружки – шесть скоплений категории В, отличающиеся по лучевым скоростям или по трехмерным скоростям. Черные кружки соответствуют пяти шаровым скоплениям категории В, которые расходятся по кинематике. Пустые кружки – остальные шаровые скопления Галактики.

мы получаем металличность, которая существенно отличается от металличности для частиц модели, а именно: их металличности 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 $[Fe/H] = -2.18$ dex. Для одного из скоплений категории В, в которую входит шесть объектов (см. Раздел 2.2.2) наблюдается отклонение от общей зависимости “возраст – металличность”. Это шаровое скопление *NGC 5053* с металличностью $[Fe/H] = -2.24$ dex. Для одного из скоплений категории В, в которую входит пять объектов (см. Раздел 2.2.2) тоже наблюдается отклонение от общей зависимости “возраст – металличность” и это – шаровое скопление *NGC 5466* с металличностью $[Fe/H] = -2.15$ dex.

На Рис. 2.4 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 образование 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 LM10b и статью [186]). Отметим, что этап наиболее тесного приливного взаимодействия Sgr dSph с нашей Галактикой был около 3 млрд. лет назад (например [187]).

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 (например [10]).

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. 2.5 воспроизведено соотношение “возраст – металличность” шаровых скоплений Млечного Пути по данным [2] и [3]. Данные для *Whiting 1* взяты из работы [160]. Оценки

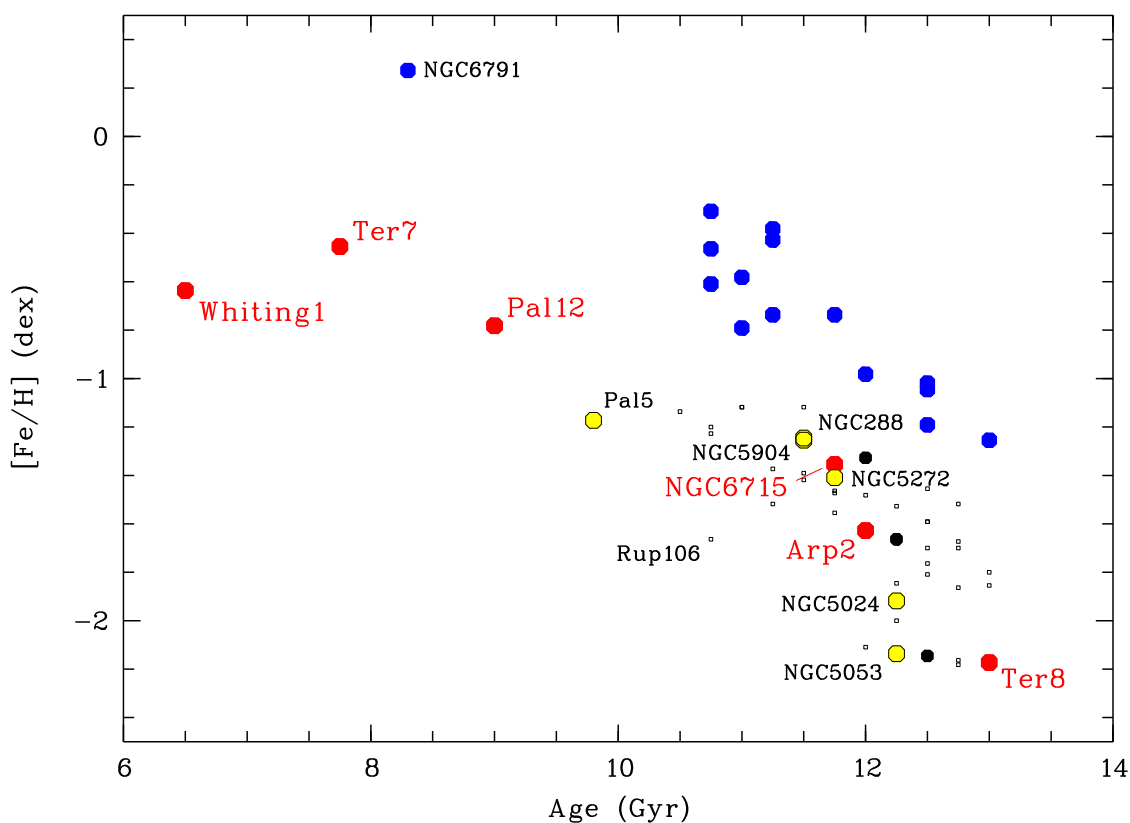


Рис. 2.5: Распределение шаровых скоплений по возрасту и металличности, согласно данным [2] и [3]. Красные, черные, желтые и пустые черные символы обозначают те же скопления, что и на Рис. 4. Синие кружки показывают скопления с высокой металличностью, принадлежащие диску, в соответствии с данными [2] и [3]
 Результат соавтора из работы АЗ: [4]

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 $[Fe/H] = -1.7$ dex до 11 млрд. лет при $[Fe/H] = -1.2$ dex, а другая сдвинута к более высокой металличности примерно на ~ 0.6 dex при фиксированном возрасте. Синими значками на Рис. 2.5 показаны скопления, которые с большой вероятностью по своей кинематике принадлежат диску, то есть формируются *in situ* [3]. *NGC 6791* – это старое рассеянное звездное скопление. Красные, черные и желтые символы на Рис. 2.5 показывают те же скопления, что и на Рис. 2.4. Возраст и металличность *Terzan 8* и *M 30* примерно одинаковы согласно [2]. Мы также отметили на Рис. 2.5 шаровые скопления Галактического гало с малой массой, например *Rup 106*. Оно скорее было аккрецировано, чем сформировалось *in situ* [10]. Объекты, более низкометаллические при данном возрасте (левая последовательность), принадлежат к населению гало Галактики, большей частью, по всей видимости, состоящего из скоплений аккрецированных спутников. На этом рисунке видно, что все шаровые скопления, выбранные 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 [188, 189, 190, 191], что звезды Sgr dSph имеют химический состав, значительно отличающийся от такового у звезд в Галактике. Например, содержание элементов альфа – процесса (*Mg, Si, Ca, Ti*) значительно ниже, чем у звезд Галактики при данной металличности (например [189, 190, 191]). 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 содержаний в зависимости от температуры, $\log g$ и металличности для *Ti* ниже, чем для других альфа – элементов [192]. В то время как значительные антикорреляции в содержаниях легких элементов встречаются практически у всех старых массивных шаровых скоплений Галактики, содержания наиболее тяжелых альфа – элементов (*Si, Ca, Ti*), элементов железного пика и других более тяжелых элементов меняются незначительно у звезд этих объектов (например [193]).

Данные $[Ti/Fe]$ в основном взяты из статьи [194]. Среднее содержание *Ti* взяты из следующих работ:

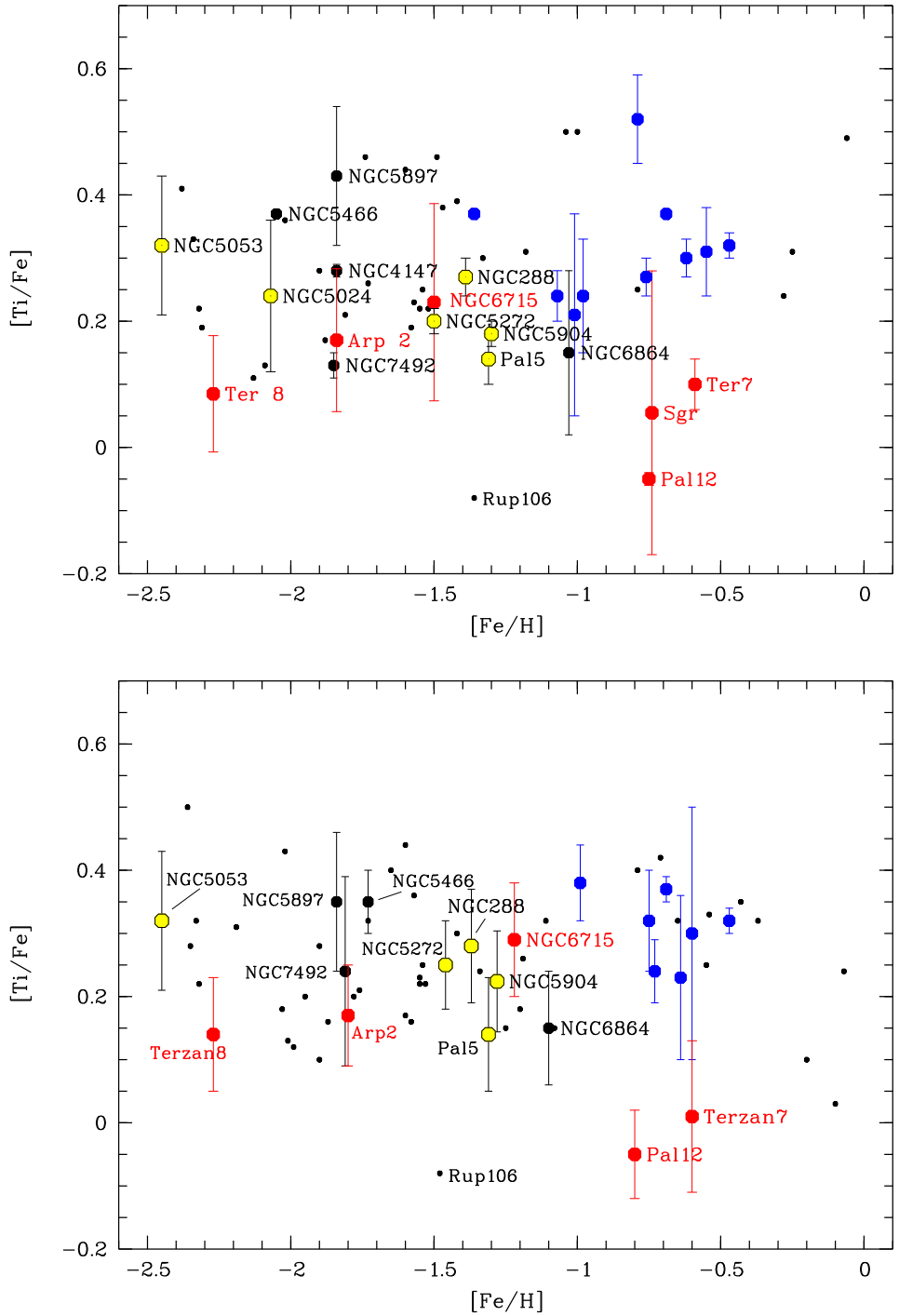


Рис. 2.6: Зависимость $[Ti/Fe]$ от $[Fe/H]$: (a) – по данным, собранным нами из разных источников, (b) – и по данным из компилятивного каталога [5]. Красные, черные, желтые и пустые черные символы соответствуют тем же объектам, что и на Рис. 4. Синие точки показывают скопления с высокой металличностью, принадлежащие диску, в соответствии с работами [2] и [3].

Результат соавтора из работы АЗ: [4]

для Sgr dSph, *Terzan 8*, *Arp 2*, *NGC 6715* – [195],
 для *NGC 5927* – [196],
 для *NGC 6362* – [197] и [194],
 для *NGC 6366* – [198] и [199],
 для *NGC 6624* – [200]),
 для *NGC 6717* – [201],
 для *NGC 6723* – [202],
 для *NGC 5024* – [203] и [204]),
 для *NGC 4147* – [205],
 для *NGC 6791* – [206],
 для *NGC 4590* – [207],
 для *NGC 6528* – [208],
 для *NGC 6864* – [209].

На Рис. 2.6 показаны зависимости содержаний Ti от металличности для шаровых скоплений Галактики по данным, собранным нами из разных источников (Рис. 2.6 а) и по данным из компилятивного каталога [5] (Рис. 2.6 б). 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. 2.6 похожи. Значения $[Ti/Fe]$ у скоплений, кинематически и пространственно с высокой вероятностью принадлежащих Sag dSph (красные символы), в среднем систематически ниже, чем у более высокометаллических скоплений, принадлежащих диску по данным [2] и [3] (синие точки на Рис. 2.5 и 2.6). Некоторые менее вероятные члены потока (желтые и черные крупные кружки на Рис. 2.6) тоже имеют низкие $[Ti/Fe]$.

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

2.2.4 Результаты

В итоге мы можем сделать вывод, что мы получаем 3 категории ШС:

A: 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*; *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.

В: 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 у *NGC 4147* выше, чем у *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.

2.3 Выводы

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 руках) 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, принадлежащих приливному потоку Sgr и отнесенных к категории А, хорошо согласуется со списками из работ [100, 103, 111, 10, 113, 171], полученными несколько другими методами. В работе [10] авторы изучили зависимость “возраст – металличность” и исследовали морфологию горизонтальной ветви. Авторы [100] 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 из Sgr. Также они изучили зависимость “возраст – металличность”. В работе [103] авторы представили широкопольную фотометрию для 23 шаровых скоплений. Авторы [111] объединили кинематическую информацию, предоставленную Gaia, изучили зависимость “возраст – металличность” и проанализировали динамические свойства шаровых скоплений. В [113] автор использовал интегралы движения, зависимость “возраст – металличность” и отношение альфа – элементов. В работе [171] авторы использовали переменные RR Лир, 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 [10, 108, 7, 103, 156], *NGC* 5634 [10, 103, 100, 156] и *NGC* 2419 [112, 170, 169, 168, 158, 113].

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, что *NGC* 4147 не принадлежит Sgr согласуется с результатом [210]. 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 у него вероятность принадлежать потоку по пространственному положению очень маленькая и у него нет ближайших соседей – наблюдаемых звезд из потока. В статье [169] *NGC 2419* причисляется к потоку на основании сходства орбит галактики Sgr и этого шарового скопления, 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 в [112, 184, 211], однако наш метод не использует это предположение, поскольку в модели LM10 начальная масса Sgr небольшая, 6×10^8 масс Солнца.

Статья [212] представляет пространственное распределение шаровых скоплений в Галактике с помощью анализа тензора гирации, 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 гирации резко меняется, причина чего неясна. 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.

Глава 3

Шаровые скопления как индикаторы эволюции Галактики

Данная глава посвящена изучению системы ШС, которые образовались вне Галактического диска. и сопоставлению их со структурами самой Галактики, близких галактик – спутников и крупномасштабной структурой вокруг Местной Группы. Также оценена доля ШС, возникших в диске Галактики и ошибочно отнесенных к аккрецированным. Все результаты данной главы, включая все рисунки и таблицы, опубликованы в работе [A4]. Личный вклад автора в данную работу указан во Введении к диссертации.

3.1 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 [13]. 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 [149] примерно 100 галактик – спутников аккрецировали в Галакти-

ку 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 меньше примерно $10^7 M_{\odot}$ имеют очень мало ШС [45]. Маен и др. [109] утверждают, что скопления, у которых полная удельная энергия $E \geq -1.6 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$, аккрецировали из карликовых галактик. Космологические гидродинамические симуляции показывают, что 15–40 процентов звезд в гало образовались вне Галактики (*ex situ*), т.е. в карликовых галактиках – спутниках, а затем аккрецировали [213, 214]. Большая часть звезд гало Галактики пришли из одного слияния со спутником 9–11 млрд. лет назад [215]. В результатах исследований разных авторов процент ШС, образовавшихся *ex situ*, отличается. Например, в работе [113] 54 процента ШС (87 скоплений из 160) образовались *ex situ* и потом аккрецировали, в работе [117] процент аккрецированных скоплений составляет 43, а в работе [111] данная величина составляет 60 процентов.

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 (например [36, 130, 212]). Эта структура может быть результатом аккреции нескольких галактик, прилетевших в нашу Галактику преимущественно с полярных направлений. В соответствии с теорией Зельдовича [37] 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 (например, [84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105]). 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 [106]. В указанной работе было показано, что аккрецированные ШС отличаются по содержанию альфа-элементов, а также по диапазону масс. Цель данной главы – 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 анализировано соотношение “возраст–металличность” для ШС, принадлежащих потокам, и обсуждена связь цветов ШС с их происхождением.

3.2 Шаровые скопления Млечного Пути в приливных потоках

В нашей Галактике сейчас известно 157 ШС [6, 9] (издание 2010 года)¹, со временем появляются статьи о новых скоплениях Млечного Пути (например *FSR* 1716 [216], *FSR* 1758 [110, 217], *VVV – CL001* [218], *VVV – CL002* [219], *BH* 140 [220], *Gran* 1 [221], *Pfleiderer* 2 [222], *ESO* 93–8 [223], *Mercer* 5 [224], *Segue* 3 [225], *Ryu* 059, *Ryu* 879 [226], *Kim* 3 [227], *Crater/Laevens* 1 [228, 229], *Laevens* 3 [230], *BLISS* 1 [231]). Хотя и до получения высокоточных данных GAIA были попытки выделить ШС, принадлежащие приливным потокам, (например, [107, 108, 10, 103]), но после появления данных GAIA эта задача получила значительное развитие [109, 110, 111, 5, 112, 113, 114, 115, 116]. В этой работе мы обращаем наше внимание на три работы: [111] (далее Massari), [110] (далее Myeong) и [113] (далее Forbes), в которых присутствуют наиболее полные списки ШС, принадлежащих разным приливным потокам.

В работе Forbes приводится 76 скоплений, которые принадлежат пяти прародителям – галактик–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–Энцеладу (Gaia–Enceladus), девять ШС – карликовой галак-

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

тике 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 высокоэнергетичной (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 (Gaia–Enceladus) – 26 ШС (+6 кандидатов), карликовая сфероидальная галактика Стрельца (Sgr dSph) – восемь ШС, поток Хелми (Helmi stream (H99)) – 10 ШС и галактика Секвоя (Sequoia) – семь ШС. Остальные 36 скоплений относятся к низкоэнергетичным (Low–Energy – 25 ШС) или высокоэнергетичным (High–energy – 11 ШС). Указанной привязке скоплений к каждой группе присуща неопределенность из-за частичного перекрытия обломков разных галактик-прародителей.

В статье Mueong речь идет о 34 ШС, которые аккрецировали в нашу Галактику. Для проверки авторы использовали кинематические данные GAIA [232] в сочетании с фотометрией из DECaPS (DECam Plane Survey, [233]). По мнению авторов, карликовой сфероидальной галактике Стрельца (Sgr dSph) принадлежат шесть ШС, галактике Секвоя (Sequoia) – 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. Карликовая сфероидальная галактика Стрельца (*Sgr dSph*) с ядром *NGC 6715 (M54)*;
2. Галактика Секвоя (Sequoia) с ядром *NGC 5139 (Omega Centauri (ω Cen))*;
3. Поток Хелми (Helmi stream (*H99*));
4. Гайя–Энцелад (Gaia–Enceladus) с ядром *NGC 1851*. Другие возможные вариации (названия) этого потока – Колбаса Гайи (Gaia Sausage) или Большой Пес (Canis Major (*CMa*));
5. Низкоэнергетический прародитель Коала, которому может быть эквива-

лентен Kraken, а так же низкоэнергетичная группа (Low–Energy, $E < -1.86 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$);

6. Высокоэнергетичная группа (High–energy, $E > -1.5 \times 10^5 \text{ км}^2 \text{ с}^{-2}$).

3.2.1 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 гирации, как и в работе [212]. Тензор строится следующим образом:

$$S_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^k x_j^k, \quad (3.1)$$

где S – тензор гирации, 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 одному. Собственные вектора тензора гирации 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 называем 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.

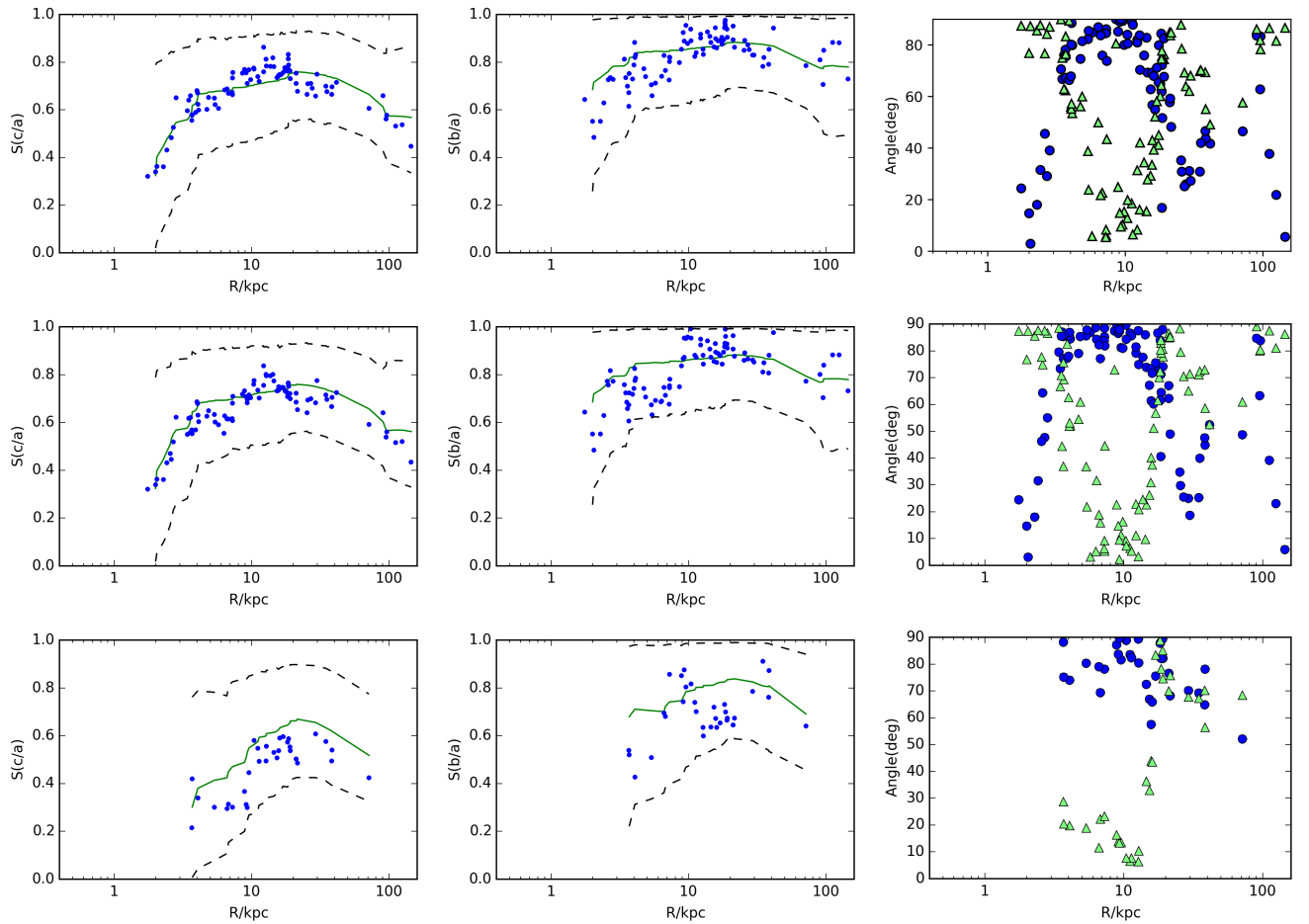


Рис. 3.1: Анизотропия ШС, количественно выраженная тензором гирации для выборок скоплений по Forbes, Massari и Mueong – верхняя строка, средняя строка и нижняя строка, соответственно. В левых и средних столбцах показаны отношения c/a и b/a как функции Галактоцентрического расстояния скопления, соответственно. 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 10,000 случайных выборок. Пунктирными 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) а также малой (зеленые треугольники) осью тензора гирации. Зеленые треугольники, близкие к 90 градусам, указывают на полярную плоскость.

На Рис. 3.1 приведены результаты измерения анизотропии для ШС с помощью тензора гирации. На панелях представлены отношения c/a и b/a как функции от R (рассчитанные для всех ШС с расстоянием меньше R). Распределения реальных объектов представлены точками, сплошная линия представляет медианный результат для 10 000 случайных выборок, а пунктирные линии представляют 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 гирации 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 [212] (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, т.е. образовавшихся *in situ*. В этой главе мы изучали пространственные распределения ШС, которые по мнению Forbes, Massari и Myeong принадлежат приливным потокам, то есть образовались *ex situ*. Как мы можем видеть на Рис. 3.1, для всех выборок пространственное распределение ШС, принадлежащих приливным потокам, изотропное. Это согласуется с выводом работы Аракелян, что статистически значимая анизотропия для всей выборки ШС в работе [212] 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 сгущение 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. 3.1 мы видим, что по всем трем выборкам (Forbes, Massari, Myeong) для ШС, которые принадлежат потокам, большая ось тензора гирации лежит в диске, на расстояниях примерно от 3 до 10–20 кпк. Представляется маловероятным, что такая ситуация может возникнуть при случайном изотропном распределении ШС. Такое распределение направлений осей тензора, как на Рис. 3.1 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. 3.1, т.е. когда большие оси

тензора гирации в диапазоне расстояний от 3,5 кпк до 20 кпк расположены под углом более 70 градусов 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 $n = 6, 16, 8$ ШС для выборок Forbes, Massari и Myeong, соответственно. Из этого можно сделать вывод, что некоторая часть ШС, образовавшихся по мнению указанных авторов вне нашей Галактики, на самом деле принадлежит ее диску. Следует заметить, что в работе [106] 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”.

3.3 Две ветви ШС на зависимости “возраст–металличность”

В литературе обсуждается тот факт, что население ШС Млечного Пути демонстрирует бимодальность цвета: синие и красные скопления [56, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72]. Это обусловлено бимодальностью металличности [234, 235, 77, 236, 237, 238, 239, 47, 240, 70, 68, 241]. Синие скопления в основном находятся в гало Галактики. Эти скопления, вероятно, ранее принадлежали галактик–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. [77, 71, 72] 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

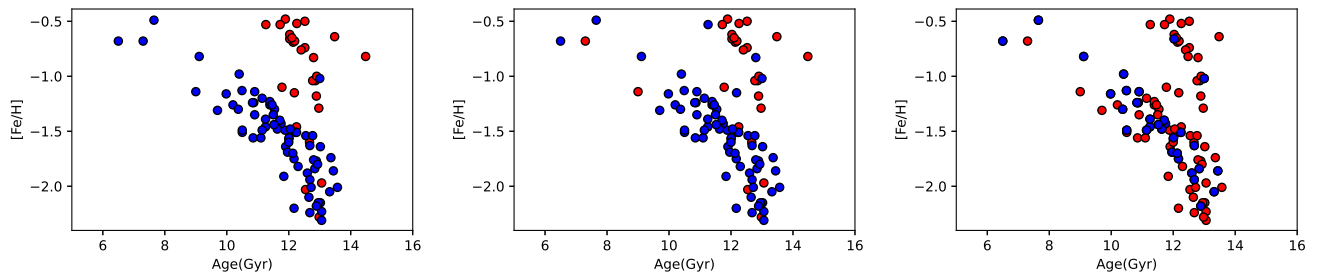


Рис. 3.2: Возраст / металличность ШС для выборок скоплений по Forbes, Massari и Myeong – левая, средняя и правая иллюстрации, соответственно. Синими точками представлены скопления, образовавшиеся *ex-situ*, а красные точки показывают скопления *in situ*.

представлены на Рис. 3.2.

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 шести млрд. лет. У скоплений более металличной ветви, образовавшихся *in situ*, тоже наблюдается разброс по металличности, но у всех скоплений возраста 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 [242]. К тому моменту она набрала только 1/5 своей нынешней полной массы (включая темное гало), а шесть млрд. лет назад (возраст самых молодых ШС) ее масса составляла около 60% сегодняшней [243].

3.4 Роль местного сверхскопления

В иерархической модели образования галактик аккреция вещества управляется крупномасштабными потоками, ответственными также за образование ячеистой структуры: “блинов”, филаментов. В соответствии с теорией Зельдовича [37], “блин” образуется из однородно заполненного объема, если по одному из

трех взаимоперпендикулярных направлений происходит сжатие, а по двум другим направлениям — расширение. Таким образом, крупномасштабная структура 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 (англ. Local Supercluster, LSC) [244, 245, 246, 247, 41, 42], 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 [36, 130, 212], поэтому мы не ограничивались анализом распределения ШС, но также рассмотрели и галактики-спутники. Для этого были получены распределения углов между осями тензора гирации (3.1) и плоскостью Местного Сверхскопления для карликовых галактик–спутников (27 спутников [8]) и для ШС: 1) для всей выборки ШС (157 ШС [6, 9] (издание 2010 года)), 2) для ШС из списка Forbes, 3) для ШС из списка Massari и 4) для ШС из списка Mueong. На Рис. 3.3 “Угол” представлен как функция от 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. 3.3 видим, что для галактик–спутников (верхний ряд, левый рисунок) 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, правый рисунок) 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, влия-

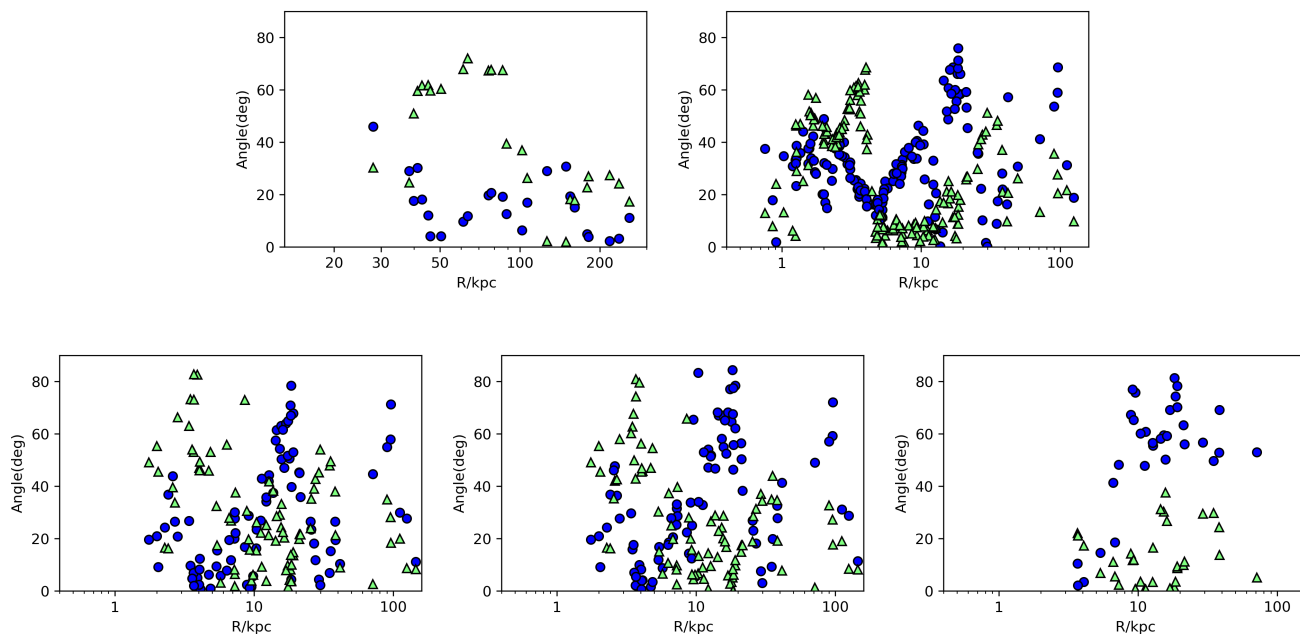


Рис. 3.3: “Угол” как функция от галактоцентрического расстояния для галактик–спутников, для всей выборки ШС (верхний ряд, слева направо) и для выборок скоплений по Forbes, Massari и Myeong (нижний ряд, слева направо, соответственно). “Угол” измеряется между плоскостью LSC и малой (зеленые треугольники) или большой (синие точки) осью распределения ШС.

ние 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 для 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 градусов для всех ШС и для Forbes, а для выборки Massari – в пределах 45 градусов. На расстоянии 25–40 кпк находятся всего десять ШС, из которых десять и девять 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.

3.5 Выводы

В этой главе 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 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), 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 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 (см. [212] (стр.7, рис.7)), обусловлена нахождением многих ШС в диске Галактики, и связана со скоплениями, образовавшимися *in situ*.

Тем не менее на Рис. 3.1 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 смоделировано распределение ШС со случайными угловыми координатами и 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 [106], 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. 3.2) . 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 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. Рис. 3.3 (верхний ряд, левый рисунок) 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.

Заключение

Диссертационная работа посвящена исследованию неоднородности распределения шаровых скоплений и галактик – спутников Млечного Пути в пространстве, анализу пространственной ориентации подсистем шаровых скоплений, а также представлены результаты поиска шаровых скоплений, принадлежавших карликовой сфероидальной галактике в Стрельце разработанным новым трехэтапным методом. Получены следующие результаты:

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. Вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7 %. Влияние зоны избегания на распределения ШС и галактик–спутников на низкой Галактической широте несущественное.
2. ШС балджа/диска показывают изотропное распределение при $R < 2$ и дискообразную структуру при $R > 3$ с $c/a \approx 0.3$ и $b/a \approx 0.6$ компланарную с Галактическим диском. ШС старого гало на $R < 3$ кпк, показывают сигараподобную структуру, перпендикулярную к Галактической плоскости с $c/a \approx 0.3$ и $b/a \approx 0.7$. При $R > 6$ кпк он трансформируется в почти изотропное распределение. ШС молодого гало не показывают явной анизотропии.
3. Из 157 известных на данный момент ШС 17 с большой вероятностью свя-

заны с карликовой сфероидальной галактикой в Стрельце и образованным при ее частичном разрушении приливным потоком. Эти 17 ШС делятся на 3 категории:

А: несомненно в потоке, 6 ШС: *Terzan 8*; *Whiting 1*; *Arp 2*; *NGC 6715*; *Terzan 7* и *Pal 12*. Выбранные скопления совпадают со звездным потоком по всем параметрам: по пространственным положениям, по положению на зависимости “возраст–металличность”, по лучевым и пространственным скоростям.

Б: кинематические выбросы, 6 ШС: *Pal 5*; *NGC 5904*; *NGC 5024*; *NGC 5053*; *NGC 5272* и *NGC 288*. Это шаровые скопления, которые совпадают с потоком по пространственному положению, по положению на зависимости “возраст –металличность”, но отличаются по пространственным скоростям.

В: кандидаты низшего ранга, 5 ШС: *NGC 6864*; *NGC 5466*; *NGC 5897*; *NGC 7492* и *NGC 4147*. Эти скопления совпадают с потоком по положению на зависимости “возраст–металличность”, и вероятности пространственного нахождения в потоке велики, но они расходятся по лучевым и пространственным скоростям.

4. 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.
5. 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.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Сергею Владимировичу Пилипенко за руководство проектом, критические замечания, возможность проведения научной работы, терпение и индивидуальный подход, ценные указания и наставления, Андрею Георгиевичу Дорошкевичу за ценные указания во время выполнения научной работы, Юрию Юрьевичу Ковалеву за советы при работе над проектом, соавторам опубликованных статей, всему коллективу Астрокосмического центра, своим родителям, близким и друзьям за поддержку.

Приложение А

Таблица 3.1: Каталог 157 Галактических ШС с координатами и типами, составленный по данным Харриса и др. 2013 г. и Макки и ван ден Берга 2005 г..

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
NGC 104	305.89	-44.89	4.5	BD
NGC 288	152.30	-89.38	8.9	OH
NGC 362	301.53	-46.25	8.6	YH
Whiting 1	161.22	-60.76	30.1	UN
NGC 1261	270.54	-52.12	16.3	YH
Pal 1	130.06	19.03	11.1	BD
AM 1	258.34	-48.47	123.3	YH
Eridanus	218.10	-41.33	90.1	YH
Pal 2	170.53	-9.07	27.2	YH
NGC 1851	244.51	-35.03	12.1	OH
NGC 1904	227.23	-29.35	12.9	OH
NGC 2298	245.63	-16.00	10.8	OH
NGC 2419	180.37	25.24	82.6	OH
Ko 2	195.12	25.54	34.7	UN
Pyxis	261.32	7.00	39.4	YH

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	$l^2)$	$b^3)$	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
NGC 2808	282.19	-11.25	9.6	OH
E 3	292.27	-19.02	8.1	UN
Pal 3	240.15	41.86	92.5	YH
NGC 3201	277.23	8.64	4.9	YH
Pal 4	202.31	71.80	108.7	YH
Ko 1	260.99	70.75	48.3	UN
NGC 4147	252.85	77.19	19.3	SG
NGC 4372	300.99	-9.88	5.8	OH
Rup 106	300.88	11.67	21.2	YH
NGC 4590	299.63	36.05	10.3	YH
NGC 4833	303.60	-8.02	6.6	OH
NGC 5024	332.96	79.76	17.9	OH
NGC 5053	335.70	78.95	17.4	YH
NGC 5139	309.10	14.97	5.2	UN
NGC 5272	42.22	78.71	10.2	YH
NGC 5286	311.61	10.57	11.7	OH
AM 4	320.28	33.51	32.2	UN
NGC 5466	42.15	73.59	16.0	YH
NGC 5634	342.21	49.26	25.2	OH
NGC 5694	331.06	30.36	35.0	OH
IC 4499	307.35	-20.47	18.8	YH
NGC 5824	332.56	22.07	32.1	OH

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
Pal 5	0.85	45.86	23.2	YH
NGC 5897	342.95	30.29	12.5	OH
NGC 5904	3.86	46.80	7.5	OH
NGC 5927	326.60	4.86	7.7	BD
NGC 5946	327.58	4.19	10.6	OH
BH 176	328.41	4.34	18.9	BD
NGC 5986	337.02	13.27	10.4	OH
Lynga 7	328.77	-2.80	8.0	BD
Pal 14	28.74	42.19	76.5	YH
NGC 6093	352.67	19.46	10.0	OH
NGC 6121	350.97	15.97	2.2	OH
NGC 6101	317.74	-15.82	15.4	OH
NGC 6144	351.93	15.70	8.9	OH
NGC 6139	342.37	6.94	10.1	OH
Terzan 3	345.08	9.19	8.2	BD
NGC 6171	3.37	23.01	6.4	OH
1636-283	351.91	12.10	8.3	YH
NGC 6205	59.01	40.91	7.1	OH
NGC 6229	73.64	40.31	30.5	YH
NGC 6218	15.72	26.31	4.8	OH
FSR 1735	339.19	-1.85	9.8	UN
NGC 6235	358.92	13.52	11.5	OH

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
NGC 6254	15.14	23.08	4.4	OH
NGC 6256	347.79	3.31 246	10.3	BD
Pal 15	18.88	24.30	45.1	OH
NGC 6266	353.57	7.32	6.8	OH
NGC 6273	356.87	9.38	8.8	OH
NGC 6284	358.35	9.94	15.3	OH
NGC 6287	0.13	11.02	9.4	OH
NGC 6293	357.62	7.83	9.5	OH
NGC 6304	355.83	5.38	5.9	BD
NGC 6316	357.18	5.76	10.4	BD
NGC 6341	68.34	34.86	8.3	OH
NGC 6325	0.97	8.00	7.8	OH
NGC 6333	5.54	10.71	7.9	OH
NGC 6342	4.90	9.72	8.5	BD
NGC 6356	6.72	10.22	15.1	BD
NGC 6355	359.59	5.43	9.2	OH
NGC 6352	341.42	-7.17	5.6	BD
IC 1257	16.54	15.15	25.0	OH
Terzan 2	356.32	2.30	7.5	BD
NGC 6366	18.41	16.04	3.5	OH
Terzan 4	356.02	1.31	7.2	OH
HP 1	357.44	2.12	8.2	OH

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	$l^2)$	$b^3)$	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
NGC 6362	325.55	-17.57	7.6	OH
Liller 1	354.84	-0.16	8.2	BD
NGC 6380	350.18	-3.42	10.9	BD
Terzan 1	357.57	1.00	6.7	YH
Ton 2	350.80	-3.42	8.2	BD
NGC 6388	345.56	-6.74	9.9	BD
NGC 6402	21.32	14.81	9.3	OH
NGC 6401	3.45	3.98	10.6	OH
NGC 6397	338.17	-11.96	2.3	OH
Pal 6	2.10	1.78	5.8	YH
NGC 6426	28.09	16.23	20.6	YH
Djorg 1	356.69	-2.47	13.7	UN
Terzan 5	3.84	1.69	6.9	BD
NGC 6440	7.73	3.80	8.5	BD
NGC 6441	353.53	-5.01	11.6	BD
Terzan 6	358.57	-2.16	6.8	BD
NGC 6453	355.72	-3.87	11.6	OH
UKS 1	5.13	0.76	7.8	BD
NGC 6496	348.03	-10.01	11.3	BD
Terzan 9	3.61	-1.99	7.1	YH
Djorg 2	2.77	-2.50	6.3	BD
NGC 6517	19.23	6.76	10.6	OH

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
Terzan 10	4.49	-1.99	5.8	BD
NGC 6522	1.02	-3.93	7.7	OH
NGC 6535	27.18	10.44	6.8	OH
NGC 6528	1.14	-4.17	7.9	BD
NGC 6539	20.80	6.78	7.8	BD
NGC 6540	3.29	-3.31	5.3	OH
NGC 6544	5.84	-2.20	3.0	OH
NGC 6541	349.29	-11.19	7.5	OH
2MS-GC01	10.48	0.11	3.6	UN
ESO-SC06	346.90	-12.57	21.4	UN
NGC 6553	5.26	-3.03	6.0	BD
2MS-GC02	9.79	-0.61	4.9	UN
NGC 6558	0.20	-6.02	7.4	OH
IC 1276	21.83	5.67	5.4	BD
Terzan 12	8.37	-2.10	4.8	BD
NGC 6569	0.48	-6.68	10.9	OH
BH 261	3.36	-5.27	6.5	UN
GLIMPSE02	14.14	-0.64	5.5	UN
NGC 6584	342.14	-16.41	13.5	YH
NGC 6624	2.79	-7.91	7.9	BD
NGC 6626	7.80	-5.58	5.5	OH
NGC 6638	7.90	-7.15	9.4	OH

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
NGC 6637	1.72	-10.27	8.8	BD
NGC 6642	9.81	-6.44	8.1	YH
NGC 6652	1.53	-11.38	10.0	OH
NGC 6656	9.89	-7.55	3.2	OH
Pal 8	14.11	-6.79	12.8	BD
NGC 6681	2.85	-12.51	9.0	OH
GLIMPSE01	31.31	-0.10	4.2	UN
NGC 6712	25.35	-4.32	6.9	OH
NGC 6715	5.61	-14.09	26.5	SG
NGC 6717	12.88	-10.90	7.1	OH
NGC 6723	0.07	-17.30	8.7	OH
NGC 6749	36.20	-2.21	7.9	OH
NGC 6752	336.49	-25.63	4.0	OH
NGC 6760	36.11	-3.92	7.4	BD
NGC 6779	62.66	8.34	9.4	OH
Terzan 7	3.39	-20.07	22.8	SG
Pal 10	52.43	2.72	5.9	BD
Arp 2	8.55	-20.79	28.6	SG
NGC 6809	8.79	-23.27	5.4	OH
Terzan 8	5.76	-24.56	26.3	SG
Pal 11	31.81	-15.57	13.4	BD
NGC 6838	56.75	-4.56	4.0	BD

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾	Тип ⁵⁾
NGC 6864	20.30	-25.75	20.9	OH
NGC 6934	52.10	-18.89	15.6	YH
NGC 6981	35.16	-32.68	17.0	YH
NGC 7006	63.77	-19.41	41.2	YH
NGC 7078	65.01	-27.31	10.4	YH
NGC 7089	53.37	-35.77	11.5	OH
NGC 7099	27.18	-46.84	8.1	OH
Pal 12	30.51	-47.68	19.0	SG
Pal 13	87.10	-42.70	26.0	YH
NGC 7492	53.39	-63.48	26.3	OH

1) Название ШС

2) Галактическая долгота (deg)

3) Галактическая широта (deg)

4) Расстояние от Солнца (кpc)

5) Тип, согласно Макки и ван ден Бергу 2005 года.

Приложение Б

Таблица 3.2: Каталог 27 ГС Млечного Пути.

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾
Canis Major	240.0	-8.0	7
Sagittarius dSph	5.6	-14.2	26
Segue (I)	220.5	+50.4	23
Ursa Major II	152.5	+37.4	32
Bootes II	353.7	+68.9	42
Segue II	149.4	-38.1	35
Willman 1	158.6	+56.8	38
Coma Berenices	241.9	+83.6	44
Bootes III	35.4	+75.4	47
LMC	280.5	-32.9	51
SMC	302.8	-44.3	64
Bootes (I)	358.1	+69.6	66
Draco	86.4	+34.7	76
Ursa Minor	105.0	+44.8	76
Sculptor	287.5	-83.2	86

Продолжение на следующей странице

Название ¹⁾	l ²⁾	b ³⁾	R-Sun ⁴⁾
Sextans (I)	243.5	+42.3	86
Ursa Major (I)	159.4	+54.4	97
Carina	260.1	-22.2	105
Hercules	28.7	+36.9	132
Fornax	237.1	-65.7	147
Leo IV	264.4	+57.4	154
Canes Venatici II	113.6	+82.7	160
Leo V	261.9	+58.5	178
Pisces II	79.2	-47.1	182
Canes Venatici (I)	74.3	+79.8	218
Leo II	220.2	+67.2	233
Leo I	226.0	+49.1	254

- 1) Название галактик–спутников
- 2) Галактическая долгота (deg)
- 3) Галактическая широта (deg)
- 4) Расстояние от Солнца (кпк)

Список литературы

- [1] Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A. et al. Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way // *Astrophys. J.* . 2014. Vol. 783. P. 130.
- [2] VandenBerg D. A., Brogaard K., Leaman R. et al. The Ages of 55 Globular Clusters as Determined Using an Improved $\Delta V^{\text{HB_TO}}$ Method along with Color-Magnitude Diagram Constraints, and Their Implications for Broader Issues // *Astrophys. J.* . 2013. Vol. 775. P. 134.
- [3] Leaman R., VandenBerg D. A., Mendel J. T. The bifurcated age-metallicity relation of Milky Way globular clusters and its implications for the accretion history of the galaxy // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2013. Vol. 436. P. 122–135.
- [4] Arkelyan N. R., Pilipenko S. V. Globular Cluster as Indicators of Galactic Evolution // *Astronomy Reports.* 2022. Vol. 66, no. 3. P. 191–199.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] McConnachie A. W. The Observed Properties of Dwarf Galaxies in and around the Local Group // *Astron. J.* . 2012. Vol. 144. P. 4.
- [9] Harris W. E. A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way // *Astron. J.* . 1996. Vol. 112. P. 1487.
- [10] Forbes D. A., Bridges T. Accreted versus in situ Milky Way globular clusters // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2010. Vol. 404. P. 1203–1214.
- [11] Dotter A., Sarajedini A., Anderson J. et al. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters. IX. Horizontal Branch Morphology and the Second Parameter Phenomenon // *Astrophys. J.* . 2010. Vol. 708. P. 698–716.
- [12] Dotter A., Sarajedini A., Anderson J. Globular Clusters in the Outer Galactic Halo: New Hubble Space Telescope/Advanced Camera for Surveys Imaging of Six Globular Clusters and the Galactic Globular Cluster Age-metallicity Relation // *Astrophys. J.* . 2011. Vol. 738. P. 74.
- [13] Peebles P. J. E. The Gravitational-Instability Picture and the Nature of the Distribution of Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* . 1974. Vol. 189. P. L51.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] Lynden-Bell D. Dwarf galaxies and globular clusters in high velocity hydrogen streams // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 1976. Vol. 174. P. 695–710.
- [20] 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.
- [21] Lynden-Bell D. The Fornax-Leo-Sculptor system // *The Observatory*. 1982. Vol. 102. P. 202–208.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Tully R. B., Libeskind N. I., Karachentsev I. D. et al. Two Planes of Satellites in the Centaurus A Group // *Astrophys. J. Lett.* . 2015. Vol. 802, no. 2. P. L25.
- [26] Crnojević D., Sand D. J., Caldwell N. et al. Discovery of a Close Pair of Faint Dwarf Galaxies in the Halo of Centaurus A // *Astrophys. J. Lett.* . 2014. Vol. 795, no. 2. P. L35.
- [27] Crnojević D., Sand D. J., Spekkens K. et al. The Extended Halo of Centaurus A: Uncovering Satellites, Streams, and Substructures // *Astrophys. J.* . 2016. Vol. 823, no. 1. P. 19.

- [28] 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.
- [29] Müller O., Pawlowski M. S., Jerjen H. et al. A whirling plane of satellite galaxies around Centaurus A challenges cold dark matter cosmology // *Science*. 2018. Vol. 359, no. 6375. P. 534–537.
- [30] Kunkel W. E., Demers S. The Magellanic Plane // *The Galaxy and the Local Group*. Vol. 182. 1976. P. 241.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.

- [38] 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.
- [39] Lovell M. R., Eke V. R., Frenk C. S. et al. The link between galactic satellite orbits and subhalo accretion // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2011. Vol. 413, no. 4. P. 3013–3021.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin Herold G. J. et al. Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. 1991.
- [43] Clerke A. M. Globular Star Clusters // *Nature* . 1888. Vol. 38, no. 981. P. 365–367.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Beasley M. A. Globular Cluster Systems and Galaxy Formation // *Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics; From Space Debris to Cosmology.* 2020. P. 245–277.
- [47] Brodie J. P., Strader J. Extragalactic Globular Clusters and Galaxy Formation // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* . 2006. Vol. 44, no. 1. P. 193–267.
- [48] Blakeslee J. P. The Dependence of Globular Cluster Number on Density for Abell Cluster Central Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* . 1997. Vol. 481, no. 2. P. L59–L62.

- [49] Spitler L. R., Forbes D. A. A new method for estimating dark matter halo masses using globular cluster systems // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2009. Vol. 392, no. 1. P. L1–L5.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] van den Bergh S. The proto-galaxy, globular clusters, and quasars // *Astrophys. J.* . 1993. Vol. 411. P. 178–187.
- [55] Zinn R. The Galactic Halo Cluster Systems: Evidence for Accretion // *The Globular Cluster-Galaxy Connection* / Ed. by G. H. Smith, J. P. Brodie. Vol. 48 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 1993. P. 38.
- [56] Searle L., Zinn R. Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo // *Astrophys. J.* . 1978. Vol. 225. P. 357–379.
- [57] Zinn R. The globular cluster system of the galaxy. IV - The halo and disk subsystems // *Astrophys. J.* . 1985. Vol. 293. P. 424–444.
- [58] 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.
- [59] 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.

- [60] 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.
- [61] Zepf S. E., Ashman K. M. Globular cluster systems formed in galaxy mergers. // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 1993. Vol. 264. P. 611–618.
- [62] Ostrov P., Geisler D., Forte J. C. The Metallicity Gradient and Distribution Function of Globular Clusters Around NGC 1399 // *Astron. J.* . 1993. Vol. 105. P. 1762.
- [63] Whitmore B. C., Sparks W. B., Lucas R. A. et al. Hubble Space Telescope Observations of Globular Clusters in M87 and an Estimate of H_0 // *Astrophys. J. Lett.* . 1995. Vol. 454. P. L73.
- [64] Elson R. A. W., Santiago B. X. The M87 globular cluster system revisited // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 1996. Vol. 280, no. 3. P. 971–976.
- [65] Gebhardt K., Kissler-Patig M. Globular Cluster Systems. I. V-I Color Distributions // *Astron. J.* . 1999. Vol. 118, no. 4. P. 1526–1541.
- [66] Larsen S. S., Brodie J. P., Elmegreen B. G. et al. Structure and Mass of a Young Globular Cluster in NGC 6946 // *Astrophys. J.* . 2001. Vol. 556, no. 2. P. 801–812.
- [67] Larsen S. S., Brodie J. P., Huchra J. P. et al. Properties of Globular Cluster Systems in Nearby Early-Type Galaxies // *Astron. J.* . 2001. Vol. 121, no. 6. P. 2974–2998.
- [68] 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.
- [69] Spitler L. R., Larsen S. S., Strader J. et al. Hubble Space Telescope ACS Wide-Field Photometry of the Sombrero Galaxy Globular Cluster System // *Astron. J.* . 2006. Vol. 132, no. 4. P. 1593–1609.
- [70] Strader J., Brodie J. P., Spitler L. et al. Globular Clusters in Virgo Ellipticals: Unexpected Results for Giants and Dwarfs from Advanced Camera for Surveys Imaging // *Astron. J.* . 2006. Vol. 132, no. 6. P. 2333–2345.

- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] Larsen S. S. The Luminosity Function of Star Clusters in Spiral Galaxies // *Astron. J.* . 2002. Vol. 124, no. 3. P. 1393–1409.
- [74] Armandroff T. E., Zinn R. Integrated-Light Spectroscopy of Globular Clusters at the Infrared CA II Lines // *Astron. J.* . 1988. Vol. 96. P. 92.
- [75] Minniti D. Metal-Rich Globular Clusters with $R \leq 3$ KPC: Disk or Bulge Clusters? // *Astron. J.* . 1995. Vol. 109. P. 1663.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] Bekki K., Tsujimoto T. Formation of Anomalous Globular Clusters with Metallicity Spreads: A Unified Picture // *Astrophys. J.* . 2016. Vol. 831, no. 1. P. 70.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J. A dwarf satellite galaxy in Sagittarius // *Nature* . 1994. Vol. 370. P. 194–196.
- [85] Majewski S. R., Munn J. A., Hawley S. L. Absolute Proper Motions to B approximately 22.5: Large-Scale Streaming Motions and the Structure and Origin of the Galactic Halo // *Astrophys. J. Lett.* . 1996. Vol. 459. P. L73.
- [86] Helmi A., White S. D. M., de Zeeuw P. T. et al. Debris streams in the solar neighbourhood as relicts from the formation of the Milky Way // *Nature* . 1999. Vol. 402. P. 53–55.
- [87] Newberg H. J., Yanny B., Rockosi C. et al. The Ghost of Sagittarius and Lumps in the Halo of the Milky Way // *Astrophys. J.* . 2002. Vol. 569. P. 245–274.
- [88] Majewski S. R., Kunkel W. E., Law D. R. et al. A Two Micron All Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. II. Swope Telescope Spectroscopy of M Giant Stars in the Dynamically Cold Sagittarius Tidal Stream // *Astron. J.* . 2004. Vol. 128. P. 245–259.
- [89] Rocha-Pinto H. J., Majewski S. R., Skrutskie M. F. et al. Exploring Halo Substructure with Giant Stars: A Diffuse Star Cloud or Tidal Debris around the Milky Way in Triangulum-Andromeda // *Astrophys. J.* . 2004. Vol. 615. P. 732–737.
- [90] Belokurov V., Zucker D. B., Evans N. W. et al. The Field of Streams: Sagittarius and Its Siblings // *Astrophys. J. Lett.* . 2006. Vol. 642. P. L137–L140.

- [91] Grillmair C. J. Detection of a 60deg *–long Dwarf Galaxy Debris Stream* // *Astrophys. J. Lett.* . 2006. Vol. 636. P. L40.
- [92] Grillmair C. J., Dionatos O. A 22deg *Tidal Tail for Palomar5* // *Astrophys. J. Lett.* . 2006. Vol. 636. P. L39.
- [93] Duffau S., Zinn R., Vivas A. K. et al. Spectroscopy of QUEST RR Lyrae Variables: The New Virgo Stellar Stream // *Astrophys. J. Lett.* . 2006. Vol. 636. P. L97–L100.
- [94] Siegel M. H., Dotter A., Majewski S. R. et al. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters: M54 and Young Populations in the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy // *Astrophys. J. Lett.* . 2007. Vol. 667. P. L57–L60.
- [95] Belokurov V., Evans N. W., Irwin M. J. et al. An Orphan in the “Field of Streams” // *Astrophys. J.* . 2007. Vol. 658. P. 337–344.
- [96] Sales L. V., Helmi A., Starkenburg E. et al. On the genealogy of the Orphan Stream // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2008. Vol. 389. P. 1391–1398.
- [97] Starkenburg E., Helmi A., Morrison H. L. et al. Mapping the Galactic Halo. VIII. Quantifying Substructure // *Astrophys. J.* . 2009. Vol. 698. P. 567–579.
- [98] Newberg H. J., Yanny B., Willett B. A. Discovery of a New, Polar-Orbiting Debris Stream in the Milky Way Stellar Halo // *Astrophys. J. Lett.* . 2009. Vol. 700. P. L61–L64.
- [99] Carraro G. The Globular Cluster AM 4: Yet Another Young Globular Associated with the Sgr Dwarf Spheroidal Galaxy? // *Astron. J.* . 2009. Vol. 137. P. 3809–3814.
- [100] 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.
- [101] Newberg H. J., Willett B. A., Yanny B. et al. The Orbit of the Orphan Stream // *Astrophys. J.* . 2010. Vol. 711. P. 32–49.
- [102] Williams M. E. K., Steinmetz M., Sharma S. et al. The Dawning of the Stream of Aquarius in RAVE // *Astrophys. J.* . 2011. Vol. 728. P. 102.

- [103] 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.
- [104] Carretta E., Bragaglia A., Lucatello S. et al. Chemical characterisation of the globular cluster NGC 5634 associated to the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy // *Astron. and Astrophys.* . 2017. Vol. 600. P. A118.
- [105] Navarrete C., Belokurov V., Koposov S. E. et al. A fork in the Sagittarius trailing debris // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2017. Vol. 467. P. 1329–1341.
- [106] 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.
- [107] Martin N. F., Ibata R. A., Bellazzini M. et al. A dwarf galaxy remnant in Canis Major: the fossil of an in-plane accretion on to the Milky Way // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2004. Vol. 348. P. 12–23.
- [108] Forbes D. A., Strader J., Brodie J. P. The Globular Cluster System of the Canis Major Dwarf Galaxy // *Astron. J.* . 2004. Vol. 127. P. 3394–3398.
- [109] Myeong G. C., Evans N. W., Belokurov V. et al. The Sausage Globular Clusters // *Astrophys. J. Lett.* . 2018. Vol. 863, no. 2. P. L28.
- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] 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.

- [113] Forbes D. A. Reverse engineering the Milky Way // Monthly Notices Royal Astron. Soc. . 2020. Vol. 493, no. 1. P. 847–854.
- [114] Arakelyan N. R., Pilipenko S. V., Sharina M. E. Globular Clusters Lost by the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy // Astrophysical Bulletin. 2020. Vol. 75, no. 4. P. 394–406.
- [115] Peñarrubia J., Petersen M. S. Identification of Sagittarius stream members in angular momentum space with gaussian mixture techniques // Monthly Notices Royal Astron. Soc. . 2021. Vol. 508, no. 1. P. L26–L31.
- [116] Bajkova A. T., Bobylev V. V. Orbits of 152 globular clusters of the MilkyWay galaxy constructed from Gaia DR2 // Research in Astronomy and Astrophysics. 2021. Vol. 21, no. 7. P. 173.
- [117] 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.
- [118] Peebles P. J. E., Dicke R. H. Origin of the Globular Star Clusters // Astrophys. J. . 1968. Vol. 154. P. 891.
- [119] Fall S. M., Rees M. J. A theory for the origin of globular clusters. // Astrophys. J. . 1985. Vol. 298. P. 18–26.
- [120] 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.
- [121] 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.
- [122] Trenti M., Padoan P., Jimenez R. The Relative and Absolute Ages of Old Globular Clusters in the LCDM Framework // Astrophys. J. Lett. . 2015. Vol. 808, no. 2. P. L35.
- [123] 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.

- [124] 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.
- [125] Elmegreen B. G. The Globular Cluster Mass Function as a Remnant of Violent Birth // *Astrophys. J. Lett.* . 2010. Vol. 712, no. 2. P. L184–L188.
- [126] 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.
- [127] Bond J. R., Kofman L., Pogosyan D. How filaments of galaxies are woven into the cosmic web // *Nature* . 1996. Vol. 380. P. 603–606.
- [128] Libeskind N. I., van de Weygaert R., Cautun M. et al. Tracing the cosmic web // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2018. Vol. 473. P. 1195–1217.
- [129] Libeskind N. I., Hoffman Y., Tully R. B. et al. Planes of satellite galaxies and the cosmic web // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2015. Vol. 452. P. 1052–1059.
- [130] Metz M., Kroupa P., Libeskind N. I. The Orbital Poles of Milky Way Satellite Galaxies: A Rotationally Supported Disk of Satellites // *Astrophys. J.* . 2008. Vol. 680. P. 287–294.
- [131] Metz M., Kroupa P., Jerjen H. The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2007. Vol. 374. P. 1125–1145.
- [132] Metz M., Kroupa P., Jerjen H. Discs of satellites: the new dwarf spheroidals // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2009. Vol. 394. P. 2223–2228.
- [133] 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.
- [134] Libeskind N. I., Guo Q., Tempel E. et al. The Lopsided Distribution of Satellite Galaxies // *Astrophys. J.* . 2016. Vol. 830. P. 121.

- [135] Pawlowski M. S., Ibata R. A., Bullock J. S. The Lopsidedness of Satellite Galaxy Systems in Λ CDM Simulations // *Astrophys. J.* . 2017. Vol. 850. P. 132.
- [136] Côté P., West M. J., Marzke R. O. Globular Cluster Systems and the Missing Satellite Problem: Implications for Cold Dark Matter Models // *Astrophys. J.* . 2002. Vol. 567. P. 853–864.
- [137] Beasley M. A., Baugh C. M., Forbes D. A. et al. On the formation of globular cluster systems in a hierarchical Universe // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2002. Vol. 333. P. 383–399.
- [138] Kravtsov A. V., Gnedin O. Y. Formation of Globular Clusters in Hierarchical Cosmology // *Astrophys. J.* . 2005. Vol. 623. P. 650–665.
- [139] Yoon S.-J., Lee Y.-W. An Aligned Stream of Low-Metallicity Clusters in the Halo of the Milky Way // *Science*. 2002. Vol. 297. P. 578–581.
- [140] Forbes D. A., Kroupa P., Metz M. et al. Globular Clusters and Satellite Galaxies: Companions to the Milky Way // *ArXiv e-prints*. 2009.
- [141] Keller S. C., Mackey D., Da Costa G. S. The Globular Cluster System of the Milky Way: Accretion in a Cosmological Context // *Astrophys. J.* . 2012. Vol. 744. P. 57.
- [142] Kroupa P., Famaey B., de Boer K. S. et al. Local-Group tests of dark-matter concordance cosmology . Towards a new paradigm for structure formation // *Astron. and Astrophys.* . 2010. Vol. 523. P. A32.
- [143] Gnedin O. Y., Ostriker J. P. Destruction of the Galactic Globular Cluster System // *Astrophys. J.* . 1997. Vol. 474. P. 223–255.
- [144] Pawlowski M. S. The alignment of SDSS satellites with the VPOS: effects of the survey footprint shape // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2016. Vol. 456, no. 1. P. 448–458.
- [145] Robin A. C., Creze M., Mohan V. The edge of the Galactic disk // *Astrophys. J. Lett.* . 1992. Vol. 400. P. L25–L27.

- [146] Xu Y., Newberg H. J., Carlin J. L. et al. Rings and Radial Waves in the Disk of the Milky Way // *Astrophys. J.* . 2015. Vol. 801. P. 105.
- [147] Tollerud E. J., Bullock J. S., Strigari L. E. et al. Hundreds of Milky Way Satellites? Luminosity Bias in the Satellite Luminosity Function // *Astrophys. J.* . 2008. Vol. 688, no. 1. P. 277–289.
- [148] 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.
- [149] Bland-Hawthorn J., Gerhard O. The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* . 2016. Vol. 54. P. 529–596.
- [150] Peñarrubia J., Martínez-Delgado D., Rix H. W. et al. A Comprehensive Model for the Monoceros Tidal Stream // *Astrophys. J.* . 2005. Vol. 626. P. 128–144.
- [151] Reshetnikov V., Sotnikova N. Global structure and formation of polar-ring galaxies. // *Astron. and Astrophys.* . 1997. Vol. 325. P. 933–942.
- [152] Reshetnikov V. P., Sotnikova N. Y. The Polar Stellar Ring and Dark Halo of NGC5907 // *Astronomy Letters*. 2000. Vol. 26. P. 277–284.
- [153] Da Costa G. S., Armandroff T. E. Abundances and Kinematics of the Globular Cluster Systems of the Galaxy and of the Sagittarius Dwarf // *Astron. J.* . 1995. Vol. 109. P. 2533.
- [154] Ibata R. A., Wyse R. F. G., Gilmore G. et al. The Kinematics, Orbit, and Survival of the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy // *Astron. J.* . 1997. Vol. 113. P. 634–655.
- [155] Bellazzini M., Ferraro F. R., Ibata R. The Stellar Population of NGC 5634: A Globular Cluster in the Sagittarius dSph Stream? // *Astron. J.* . 2002. Vol. 124. P. 915–923.
- [156] Bellazzini M., Ferraro F. R., Ibata R. Building Up the Globular Cluster System of the Milky Way: The Contribution of the Sagittarius Galaxy // *Astron. J.* . 2003. Vol. 125. P. 188–196.

- [157] Majewski S. R., Skrutskie M. F., Weinberg M. D. et al. A Two Micron All Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. I. Morphology of the Sagittarius Core and Tidal Arms // *Astrophys. J.* . 2003. Vol. 599. P. 1082–1115.
- [158] Newberg H. J., Yanny B., Grebel E. K. et al. Sagittarius Tidal Debris 90 Kiloparsecs from the Galactic Center // *Astrophys. J. Lett.* . 2003. Vol. 596. P. L191–L194.
- [159] Bonifacio P., Sbordone L., Marconi G. et al. The Sgr dSph hosts a metal-rich population // *Astron. and Astrophys.* . 2004. Vol. 414. P. 503–514.
- [160] Carraro G., Zinn R., Moni Bidin C. Whiting 1: the youngest globular cluster associated with the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy // *Astron. and Astrophys.* . 2007. Vol. 466, no. 1. P. 181–189.
- [161] Li J., FELLOW ., Liu C. et al. Detecting the Sagittarius Stream with LAMOST DR4 M Giants and Gaia DR2 // *Astrophys. J.* . 2019. Vol. 874. P. 138.
- [162] Irwin M. Proper Motions of Local Group Satellites // *The Stellar Content of Local Group Galaxies* / Ed. by P. Whitelock, R. Cannon. Vol. 192 of IAU Symposium. 1999. P. 409.
- [163] Dinescu D. I., Majewski S. R., Girard T. M. et al. The Absolute Proper Motion of Palomar 12: A Case for Tidal Capture from the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy // *Astron. J.* . 2000. Vol. 120. P. 1892–1905.
- [164] Dinescu D. I., Majewski S. R., Girard T. M. et al. Orbits of Globular Clusters in the Outer Galaxy: NGC 7006 // *Astron. J.* . 2001. Vol. 122. P. 1916–1927.
- [165] Palma C., Majewski S. R., Johnston K. V. On the Distribution of Orbital Poles of Milky Way Satellites // *Astrophys. J.* . 2002. Vol. 564. P. 736–761.
- [166] Martínez-Delgado D., Zinn R., Carrera R. et al. Remnants of the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy around the Young Globular Cluster Palomar 12 // *Astrophys. J. Lett.* . 2002. Vol. 573. P. L19–L22.
- [167] Martínez Delgado D., Dinescu D. I., Zinn R. et al. Mapping Tidal Streams around Galactic Globular Clusters // *Satellites and Tidal Streams* / Ed. by

- F. Prada, D. Martinez Delgado, T. J. Mahoney. Vol. 327 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 2004. P. 255.
- [168] Belokurov V., Koposov S. E., Evans N. W. et al. Precession of the Sagittarius stream // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2014. Vol. 437. P. 116–131.
- [169] Massari D., Posti L., Helmi A. et al. The power of teaming up HST and Gaia: the first proper motion measurement of the distant cluster NGC 2419 // *Astron. and Astrophys.* . 2017. Vol. 598. P. L9.
- [170] Sohn S. T., Watkins L. L., Fardal M. A. et al. Absolute Hubble Space Telescope Proper Motion (HSTPROMO) of Distant Milky Way Globular Clusters: Galactocentric Space Velocities and the Milky Way Mass // *Astrophys. J.* . 2018. Vol. 862, no. 1. P. 52.
- [171] 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.
- [172] Baumgardt H., Hilker M., Sollima A. et al. Mean proper motions, space orbits, and velocity dispersion profiles of Galactic globular clusters derived from Gaia DR2 data // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2019. Vol. 482. P. 5138–5155.
- [173] Gaia Collaboration, Babusiaux C., van Leeuwen F. et al. Gaia Data Release 2. Observational Hertzsprung-Russell diagrams // *Astron. and Astrophys.* . 2018. Vol. 616. P. A10.
- [174] Gaia Collaboration, Brown A. G. A., Vallenari A. et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. and Astrophys.* . 2018. Vol. 616. P. A1.
- [175] Law D. R., Majewski S. R. The Sagittarius Dwarf Galaxy: A Model for Evolution in a Triaxial Milky Way Halo // *Astrophys. J.* . 2010. Vol. 714. P. 229–254.
- [176] Dierickx M. I. P., Loeb A. Predicted Extension of the Sagittarius Stream to the Milky Way Virial Radius // *Astrophys. J.* . 2017. Vol. 836. P. 92.

- [177] Majewski S. R. Substructure in the Galactic Halo // *Publ. Astron. Soc. Australia* . 2004. Vol. 21, no. 2. P. 197–202.
- [178] Law D. R., Majewski S. R., Skrutskie M. F. et al. Modeling the Tidal Tails of the Sagittarius Dwarf Galaxy // *Satellites and Tidal Streams* / Ed. by F. Prada, D. Martinez Delgado, T. J. Mahoney. Vol. 327 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. 2004. P. 239.
- [179] Law D. R., Johnston K. V., Majewski S. R. A Two Micron All-Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. IV. Modeling the Sagittarius Tidal Tails // *Astrophys. J.* . 2005. Vol. 619. P. 807–823.
- [180] Yanny B., Newberg H. J., Johnson J. A. et al. Tracing Sagittarius Structure with SDSS and SEGUE Imaging and Spectroscopy // *Astrophys. J.* . 2009. Vol. 700, no. 2. P. 1282–1298.
- [181] Monaco L., Bellazzini M., Bonifacio P. et al. High-resolution spectroscopy of RGB stars in the Sagittarius streams. I. Radial velocities and chemical abundances // *Astron. and Astrophys.* . 2007. Vol. 464, no. 1. P. 201–209.
- [182] Vasiliev E. Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2019. Vol. 484, no. 2. P. 2832–2850.
- [183] Chemel A. A., Glushkova E. V., Dambis A. K. et al. Globular Clusters: Absolute Proper Motions and Galactic Orbits // *Astrophysical Bulletin*. 2018. Vol. 73, no. 2. P. 162–177.
- [184] Mucciarelli A., Bellazzini M., Ibata R. et al. Chemical abundances in the nucleus of the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy // *Astron. and Astrophys.* . 2017. Vol. 605. P. A46.
- [185] Alfaro-Cuello M., Kacharov N., Neumayer N. et al. A Deep View into the Nucleus of the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy with MUSE. I. Data and Stellar Population Characterization // *Astrophys. J.* . 2019. Vol. 886, no. 1. P. 57.

- [186] Tepper-García T., Bland-Hawthorn J. The Sagittarius dwarf galaxy: where did all the gas go? // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2018. Vol. 478. P. 5263–5277.
- [187] Dierickx M. I. P., Loeb A. An Upper Limit on the Milky Way Mass from the Orbit of the Sagittarius Dwarf Satellite // *Astrophys. J.* . 2017. Vol. 847. P. 42.
- [188] Battaglia G., North P., Jablonka P. et al. What is the Milky Way outer halo made of?. High resolution spectroscopy of distant red giants // *Astron. and Astrophys.* . 2017. Vol. 608. P. A145.
- [189] Carlin J. L., Sheffield A. A., Cunha K. et al. Chemical Abundances of Hydrostatic and Explosive Alpha-elements in Sagittarius Stream Stars // *Astrophys. J. Lett.* . 2018. Vol. 859. P. L10.
- [190] Hansen C. J., El-Souri M., Monaco L. et al. Ages and Heavy Element Abundances from Very Metal-poor Stars in the Sagittarius Dwarf Galaxy // *Astrophys. J.* . 2018. Vol. 855. P. 83.
- [191] Hasselquist S., Carlin J. L., Holtzman J. A. et al. Identifying Sagittarius Stream Stars by Their APOGEE Chemical Abundance Signatures // *Astrophys. J.* . 2019. Vol. 872. P. 58.
- [192] Bensby T., Feltzing S., Oey M. S. Exploring the Milky Way stellar disk. A detailed elemental abundance study of 714 F and G dwarf stars in the solar neighbourhood // *Astron. and Astrophys.* . 2014. Vol. 562. P. A71.
- [193] Bastian N., Lardo C. Multiple Stellar Populations in Globular Clusters // *Annual Rev. Astron. Astrophys.* . 2018. Vol. 56. P. 83–136.
- [194] Pritzl B. J., Venn K. A., Irwin M. A Comparison of Elemental Abundance Ratios in Globular Clusters, Field Stars, and Dwarf Spheroidal Galaxies // *Astron. J.* . 2005. Vol. 130. P. 2140–2165.
- [195] Carretta E., Bragaglia A., Gratton R. G. et al. Terzan 8: a Sagittarius-flavoured globular cluster // *Astron. and Astrophys.* . 2014. Vol. 561. P. A87.

- [196] Mura-Guzmán A., Villanova S., Muñoz C. et al. Chemical study of the metal-rich globular cluster NGC 5927 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2018. Vol. 474. P. 4541–4551.
- [197] Massari D., Mucciarelli A., Dalessandro E. et al. The chemical composition of the low-mass Galactic globular cluster NGC 6362 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2017. Vol. 468. P. 1249–1258.
- [198] Johnson C. I., Caldwell N., Rich R. M. et al. The Chemical Composition of Red Giant Branch Stars in the Galactic Globular Clusters NGC 6342 and NGC 6366 // *Astron. J.* . 2016. Vol. 152. P. 21.
- [199] Puls A. A., Alves-Brito A., Campos F. et al. Chemical analysis of eight giant stars of the globular cluster NGC 6366 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2018. Vol. 476. P. 690–704.
- [200] Valenti E., Origlia L., Rich R. M. High-resolution near-infrared spectra of NGC 6624 and 6569 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2011. Vol. 414. P. 2690–2695.
- [201] Costar D., Smith H. A. Metal abundances of RR Lyrae stars in or near seven globular clusters // *Astron. J.* . 1988. Vol. 96. P. 1925–1932.
- [202] Rojas-Arriagada A., Zoccali M., Vásquez S. et al. High resolution spectroscopic analysis of seven giants in the bulge globular cluster NGC 6723 // *Astron. and Astrophys.* . 2016. Vol. 587. P. A95.
- [203] Mészáros S., Martell S. L., Shetrone M. et al. Exploring Anticorrelations and Light Element Variations in Northern Globular Clusters Observed by the APOGEE Survey // *Astron. J.* . 2015. Vol. 149. P. 153.
- [204] Boberg O. M., Friel E. D., Vesperini E. Chemical Abundances in NGC 5024 (M53): A Mostly First Generation Globular Cluster // *Astrophys. J.* . 2016. Vol. 824. P. 5.
- [205] Villanova S., Monaco L., Moni Bidin C. et al. A spectroscopic study of the globular Cluster NGC 4147 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2016. Vol. 460. P. 2351–2359.

- [206] Carretta E., Bragaglia A., Gratton R. G. The chemical abundance of the very metal-rich old open clusters NGC 6253 and NGC 6791 // *Astron. and Astrophys.* . 2007. Vol. 473, no. 1. P. 129–141.
- [207] Schaeuble M., Preston G., Sneden C. et al. A Detailed Study of Giants and Horizontal Branch Stars in M68: Atmospheric Parameters and Chemical Abundances // *Astron. J.* . 2015. Vol. 149, no. 6. P. 204.
- [208] Muñoz C., Geisler D., Villanova S. et al. Chemical analysis of NGC 6528: one of the most metal-rich bulge globular clusters // *Astron. and Astrophys.* . 2018. Vol. 620. P. A96.
- [209] Kacharov N., Koch A., McWilliam A. A comprehensive chemical abundance study of the outer halo globular cluster M 75 // *Astron. and Astrophys.* . 2013. Vol. 554. P. A81.
- [210] Riley A. H., Strigari L. E. Snakes on a Plane: do Milky Way stellar streams and globular clusters align in a Vast Polar Structure? // *arXiv e-prints*. 2020. P. arXiv:2001.11564.
- [211] Gibbons S. L. J., Belokurov V., Evans N. W. A tail of two populations: chemodynamics of the Sagittarius stream and implications for its original mass // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2017. Vol. 464, no. 1. P. 794–809.
- [212] Arakelyan N. R., Pilipenko S. V., Libeskind N. I. Spatial distribution of globular clusters in the Galaxy // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2018. Vol. 481. P. 918–929.
- [213] Pillepich A., Springel V., Nelson D. et al. Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2018. Vol. 473, no. 3. P. 4077–4106.
- [214] Remus R.-S., Forbes D. A. Accreted or Not Accreted? The Fraction of Accreted Mass in Galaxies from Simulations and Observations // *arXiv e-prints*. 2021. P. arXiv:2101.12216.
- [215] Di Matteo P., Haywood M., Lehnert M. D. et al. The Milky Way has no in-situ halo other than the heated thick disc. Composition of the stellar halo and age-

- dating the last significant merger with Gaia DR2 and APOGEE // *Astron. and Astrophys.* . 2019. Vol. 632. P. A4.
- [216] Minniti D., Palma T., Dékány I. et al. FSR 1716: A New Milky Way Globular Cluster Confirmed Using VVV RR Lyrae Stars // *Astrophys. J. Lett.* . 2017. Vol. 838, no. 1. P. L14.
- [217] Barbá R. H., Minniti D., Geisler D. et al. A Sequoia in the Garden: FSR 1758—Dwarf Galaxy or Giant Globular Cluster? // *Astrophys. J. Lett.* . 2019. Vol. 870, no. 2. P. L24.
- [218] Minniti D., Hempel M., Toledo I. et al. Discovery of VVV CL001. A low-mass globular cluster next to UKS 1 in the direction of the Galactic bulge // *Astron. and Astrophys.* . 2011. Vol. 527. P. A81.
- [219] Moni Bidin C., Mauro F., Geisler D. et al. Three Galactic globular cluster candidates // *Astron. and Astrophys.* . 2011. Vol. 535. P. A33.
- [220] Cantat-Gaudin T., Jordi C., Vallenari A. et al. A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way // *Astron. and Astrophys.* . 2018. Vol. 618. P. A93.
- [221] Gran F., Zoccali M., Contreras Ramos R. et al. Globular cluster candidates in the Galactic bulge: Gaia and VVV view of the latest discoveries // *Astron. and Astrophys.* . 2019. Vol. 628. P. A45.
- [222] Ortolani S., Bonatto C., Bica E. et al. Pfeiderer 2: Identification of A New Globular Cluster in the Galaxy // *Astron. J.* . 2009. Vol. 138, no. 3. P. 889–894.
- [223] Bica E., Ortolani S., Barbuy B. The nature of the star clusters ESO 93-SC08 and ESO 452-SC11 // *Astron. and Astrophys. Suppl.* . 1999. Vol. 136. P. 363–372.
- [224] Mercer E. P., Clemens D. P., Meade M. R. et al. New Star Clusters Discovered in the GLIMPSE Survey // *Astrophys. J.* . 2005. Vol. 635, no. 1. P. 560–569.
- [225] Belokurov V., Walker M. G., Evans N. W. et al. Big Fish, Little Fish: Two New Ultra-faint Satellites of the Milky Way // *Astrophys. J. Lett.* . 2010. Vol. 712, no. 1. P. L103–L106.

- [226] Ryu J., Lee M. G. Discovery of Two New Globular Clusters in the Milky Way // *Astrophys. J. Lett.* . 2018. Vol. 863, no. 2. P. L38.
- [227] Kim D., Jerjen H., Mackey D. et al. KIM 3: An Ultra-faint Star Cluster in the Constellation of Centaurus // *Astrophys. J.* . 2016. Vol. 820, no. 2. P. 119.
- [228] Belokurov V., Irwin M. J., Koposov S. E. et al. ATLAS lifts the Cup: discovery of a new Milky Way satellite in Crater // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2014. Vol. 441, no. 3. P. 2124–2133.
- [229] Laevens B. P. M., Martin N. F., Sesar B. et al. A New Distant Milky Way Globular Cluster in the Pan-STARRS1 3π Survey // *Astrophys. J. Lett.* . 2014. Vol. 786, no. 1. P. L3.
- [230] Laevens B. P. M., Martin N. F., Bernard E. J. et al. Sagittarius II, Draco II and Laevens 3: Three New Milky Way Satellites Discovered in the Pan-STARRS 1 3π Survey // *Astrophys. J.* . 2015. Vol. 813, no. 1. P. 44.
- [231] Mau S., Drlica-Wagner A., Bechtol K. et al. A Faint Halo Star Cluster Discovered in the Blanco Imaging of the Southern Sky Survey // *Astrophys. J.* . 2019. Vol. 875, no. 2. P. 154.
- [232] Lindegren L., Hernández J., Bombrun A. et al. Gaia Data Release 2. The astrometric solution // *Astron. and Astrophys.* . 2018. Vol. 616. P. A2.
- [233] Schlafly E. F., Green G. M., Lang D. et al. The DECam Plane Survey: Optical Photometry of Two Billion Objects in the Southern Galactic Plane // *Astrophys. J. Suppl.* . 2018. Vol. 234, no. 2. P. 39.
- [234] Forbes D. A., Brodie J. P., Grillmair C. J. On the Origin of Globular Clusters in Elliptical and cD Galaxies // *Astron. J.* . 1997. Vol. 113. P. 1652.
- [235] Forbes D. A., Brodie J. P., Huchra J. Hubble Space Telescope Imaging of the Globular Cluster System Around NGC 5846 // *Astron. J.* . 1997. Vol. 113. P. 887.
- [236] Forbes D. A., Beasley M. A., Brodie J. P. et al. Age Estimates for Globular Clusters in NGC 1399 // *Astrophys. J. Lett.* . 2001. Vol. 563, no. 2. P. L143–L146.

- [237] Puzia T. H., Kissler-Patig M., Thomas D. et al. VLT spectroscopy of globular cluster systems. II. Spectroscopic ages, metallicities, and $[\alpha/\text{Fe}]$ ratios of globular clusters in early-type galaxies // *Astron. and Astrophys.* . 2005. Vol. 439, no. 3. P. 997–1011.
- [238] Strader J., Brodie J. P., Cenarro A. J. et al. Extragalactic Globular Clusters: Old Spectroscopic Ages and New Views on Their Formation // *Astron. J.* . 2005. Vol. 130, no. 4. P. 1315–1323.
- [239] Brodie J. P., Strader J., Denicoló G. et al. Old Globular Clusters Masquerading as Young in NGC 4365? // *Astron. J.* . 2005. Vol. 129, no. 6. P. 2643–2653.
- [240] Pierce M., Beasley M. A., Forbes D. A. et al. Gemini/GMOS spectra of globular clusters in the Leo group elliptical NGC 3379 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2006. Vol. 366, no. 4. P. 1253–1264.
- [241] Forbes D. A., Spitler L. R., Strader J. et al. Evidence for two phases of galaxy formation from radial trends in the globular cluster system of NGC 1407 // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2011. Vol. 413, no. 4. P. 2943–2949.
- [242] Hammer F., Puech M., Chemin L. et al. The Milky Way, an Exceptionally Quiet Galaxy: Implications for the Formation of Spiral Galaxies // *Astrophys. J.* . 2007. Vol. 662, no. 1. P. 322–334.
- [243] Carlesi E., Hoffman Y., Gottlöber S. et al. On the mass assembly history of the Local Group // *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* . 2020. Vol. 491, no. 2. P. 1531–1539.
- [244] de Vaucouleurs G. Evidence for a local supergalaxy // *Astron. J.* . 1953. Vol. 58. P. 30.
- [245] de Vaucouleurs G. The distribution of bright galaxies and the local supergalaxy // *Vistas in Astronomy*. 1956. Vol. 2, no. 1. P. 1584–1606.
- [246] de Vaucouleurs G. Supergalactic studies. III. The supergalactic distribution of nearby groups of galaxies. // *Astrophys. J.* . 1975. Vol. 202. P. 610–618.
- [247] de Vaucouleurs G. Supergalactic Studies.IV. Systematic Orientation of Galaxy Clouds Relative to the Supergalactic Plane // *Astrophys. J.* . 1975. Vol. 202. P. 616–618.