

КИНЕМАТИКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЗВЕЗД В ПРЕДЕЛАХ 300 пк ОТ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ Gaia DR3

© 2023 г. А. В. Тутуков¹, Н. В. Чупина¹, С. В. Верещагин^{1,*}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: svvs@ya.ru

Поступила в редакцию 05.07.2023 г.

После доработки 26.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

По данным Gaia DR3 изучена кинематика звезд из Солнечных окрестностей с радиусом 300 пк. Наша выборка включает $n = 970\,171$ звезд – AG300 (A – ансамбль, G – Gaia, 300 – радиус исследуемой зоны в пк). Кинематика этих звезд отражает морфологию основных звездных населений Галактики: звездного диска, балджа, гало и звездной короны сверхмассивной черной дыры (СМЧД). Наличие в AG300 звезд со скоростями, превосходящими скорость ухода из Галактики, свидетельствует о присутствии в околосолнечном пространстве внегалактических звезд, принадлежащих звездному компоненту локального скопления галактик. Показано, что известные механизмы ускорения пространственного движения звезд позволяют создать звездное гало галактик, звездную корону СМЧД в ее ядре, межгалактическую звездную среду скоплений галактик и пространства между скоплениями галактик. Каталог AG300 позволяет идентифицировать представителей всех названных компонентов.

Ключевые слова: звездные потоки, астрометрия, окрестности Солнца, каталог Gaia DR3

DOI: 10.31857/S0004629923120125, **EDN:** ZVGZIH

1. ВВЕДЕНИЕ

Так называемые “быстрые звезды” движутся в пространстве со скоростями, заметно превосходящими средние скорости пространственного движения звезд в окрестностях Солнца. Они составляют несколько десятков километров в секунду. Эти звезды давно привлекают к себе внимание астрономов. Их появление связано с мощными процессами, сопровождающими эволюцию звездного состава галактик и определяющими как форму галактик, так и кинематику их звездного населения. Результатам изучения кинематических свойств быстрых звезд и механизмов их ускорения посвящены сотни статей. Представим кратко пять основных возможных механизмов появления быстрых звезд, наблюдаемых в окрестностях Солнца.

1. Взрыв сверхновой звезды в тесной двойной системе [1], сопровождаемый сбросом заметной доли массы системы. Он ускоряет пространственное движение оставшейся системы или спутника сверхновой до величины порядка орбитальной скорости компонентов данной системы. Этот механизм особенно эффективен при взрыве вырожденного карлика, ведущем к его исчезновению [2].

2. Распад неустойчивых тройных звездных систем [3, 4]. В ходе взаимодействия компонентов тройных звездных систем два наиболее массивных компонента образуют пару, а компонент наименьшей массы ускоряется до скорости порядка орбитальной и покидает систему, унося избыток кинетической энергии.

3. Важная разновидность последнего сценария – взаимодействие двойной звезды со сверхмассивной черной дырой в ядре галактики [5–7]. Этот механизм дает возможность ускорить звезды до скоростей, составляющих заметную долю скорости света.

4. Разрушение галактик в их плотных массивных скоплениях [8, 9]. В итоге часть звезд скопления галактик заполняет весь объем скопления, а скорость звезд в этом случае отражает скорость движения галактик в скоплении. Она составляет порядка тысячи километров в секунду.

5. Звезды первого поколения, движущиеся со скоростями порядка параболических для данной галактики [10]. Величина их скоростей отражает гравитационный потенциал галактик и составляет обычно несколько сот километров в секунду.

Большое внимание привлекают звезды, ускоренные в ходе взаимодействия двойных звезд со сверхмассивной черной дырой ядра Галактики.

В работе [11] найдена звезда, двигающаяся от центра нашей Галактики с радиальной скоростью около 709 км/с. Моделирование процесса ускорения СМЧД ядра показало, что в процессе такого ускорения компонентов двойных звезд, являющихся звездами главной последовательности, могут быть достигнуты максимальные скорости порядка 1000 км/с [12]. Кроме того, в итоге этого исследования стало ясно, что изучение орбит высокоскоростных звезд — эффективный метод получения информации о величине и форме Галактического потенциала. Детальное исследование звезд гало Галактики на основе каталога GAIA привело к выводу, что у большинства звезд с большими скоростями векторы их скоростей направлены от Центра Галактики [13]. Это обстоятельство подтверждает большую роль СМЧД, расположенной в ядре Галактики, в ускорении звезд окрестностей ядра до наблюдаемых высоких скоростей.

Исследование звездной структуры Галактики и ее компонентов традиционно основывается на изучении положения звезд в трех пространственных координатах: X , Y , Z . Спектральная информация о радиальных скоростях, учет движения Солнца в Галактике, долговременное изучение движения звезд на небесной сфере при известных параллаксах соответствующих звезд позволяет найти компоненты их пространственных скоростей U , V , W . Особенно эффективен в оценке отмеченных шести параметров каталог Gaia DR3 [13], позволяющий найти эти параметры для почти двух миллиардов звезд Галактики. Морфология звездного компонента Галактики была, в основном, восстановлена на основе исследования положения ее компонентов в пространстве. Привлечение скоростей звезд, в основном из окрестностей Солнца, с хорошо определенными координатами и скоростями позволяет установить связь между кинематическими характеристиками звездного населения Галактики с морфологическими параметрами их семейств. Изучение кинематики околосолнечных звезд с большими, более ~300 км/с, скоростями позволяет идентифицировать представителей балджа и короны Галактики, внегалактические звезды. Исследование звездного компонента Галактики в пределах доступных окрестностей Солнца демонстрирует, что свойства кинематики локального звездного населения тесно связаны с пространственной структурой Галактики, химическим составом и кинематикой ее популяций [14, 15].

Близость звезд к Солнцу позволяет получить наиболее надежные наблюдательные оценки трех основных компонентов их пространственной скорости, необходимые для исследования их кинематики. Это звезды диска, балджа, гало Галактики и свободные межгалактические звезды. Последние заполняют околосолнечное простран-

ство, будучи потерянными в силу процессов, происходящих в нашей и соседних галактиках.

Каталог Gaia дает хорошие возможности по исследованию кинематики звезд околосолнечной окрестности. Надежные пространственные и скоростные характеристики позволяют эффективно использовать метод поиска генетического родства звезд по исследованию расположения их апексов на небесной сфере. Звездные скопления, ОВ ассоциации и спутники Галактики, распадаясь со временем, превращаются в потоки звезд. Звезды потоков сохраняют свою генетически предопределенную кинематику практически Хаббловское время. Это обстоятельство позволяет проследить генетические связи звездных популяций в течение большого времени при достаточной плотности последних.

2. ДАННЫЕ

С целью изучения кинематики и морфологии Галактики и ее периферии мы составили каталог 970 171 звезд в пределах сферы с радиусом 300 пк по данным Gaia DR3. Далее этот каталог мы будем называть AG300 (A — ансамбль, G — Gaia, 300 — радиус исследуемой зоны в пк). При отборе учитывались только звезды с ошибками лучевых скоростей менее 20%, ошибками собственных движений менее 0.1 мсд/год, ошибками параллаксов менее 0.1 мсд и значениями параметра $RUWE < 1.4$. Полное же число звезд в указанной зоне ~ 10^7 .

3. МЕТОД

Метод апексов — эффективное средство поиска генетических связей звезд. Он восходит к рекомендациям Леонардо да Винчи художникам по передаче трехмерных перспектив городов на двухмерном холсте. Это было названо им законом перспектив. Параллельные линии фасадов и карнизов должны на картине сходиться в единой точке — “апексе”. Такая же задача стоит и перед астрономом при анализе картины движения звезд в трехмерном пространстве звездных групп.

Исследования кинематики околосолнечных звезд — популярное направление современной астрономии. Признание группового образования звезд в скоплениях и ОВ ассоциациях и последующего разрушения этих агрегатов с превращением в звездные потоки привело к выводу о том, что пространство звездного поля галактик представляет собой сумму звездных потоков разной степени сохранности [16]. Кинематический анализ звезд солнечного окружения, принадлежащих звездному диску Галактики, подтвердил этот вывод [17, 18]. Последние работы позволили найти несколько десятков звездных потоков звезд диска

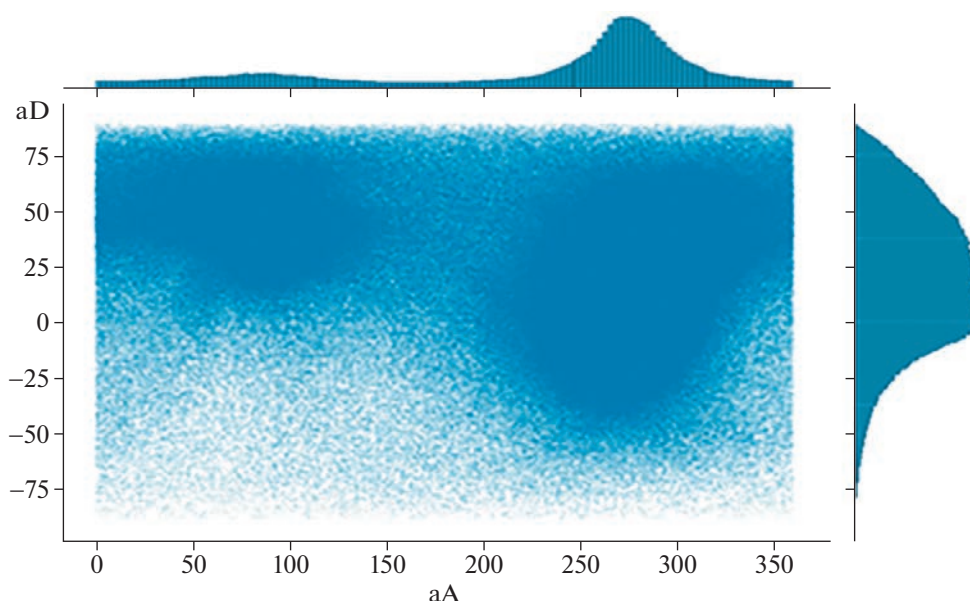


Рис. 1. Антиапексы околосолнечных звезд каталога AG300 (в координатах, связанных с Солнцем).

в солнечных окрестностях. Целью настоящей работы является анализ кинематики звезд AG300 с высокими скоростями в области Галактики при $R < 300$ пк.

4. ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ ЗВЕЗД ПО ВЫБОРКЕ AG300

Кинематика звезд диска Галактики в пределах 30 пк была изучена нами ранее [19]. В ходе этой работы было подтверждено существование двух обильных звездных потоков Каптейна. Расширение зоны обзора до 300 пк сохранило присутствие этих широких потоков, рис. 1. При этом левый поток ($aA = 50^\circ$) показал признаки расщепления на две части (рис. 1), а правый поток ($200^\circ \leq aA \leq 360^\circ$) расширяется по склонению и прямому восхождению. Звезды AG300 при $V(\text{км/с}) < 0$ с дисперсией скоростей по $U \approx 300$ км/с принадлежат сферическому компоненту Галактики (рис. 2). Дисперсия скоростей этих звезд по V и W (рис. 2) сравнима. Звезды этого компонента имеют значительную дисперсию обилия железа [20], что оставляет надежду на поиск первых звезд нашей Галактики и звезд, поглощенных спутников Галактики (с меньшим содержанием металлов).

Для изучения кинематики звезд AG300 и соотношения их с морфологией нашей Галактики наблюдаемые скорости в системе координат, связанной с Солнцем, пересчитаны в систему, относящуюся к Центру Галактики. Параметры вектора скорости Солнца были приняты равными: $U = 11.1$ км/с, $V = 247.21$ км/с и $W = 7.25$ км/с [21]. Далее звезды AG300 мы делим на несколько

групп, ориентируясь на координаты апексов и величину их пространственной скорости. Это звезды диска, звезды звездного гало (балджа) Галактики, звезды короны ядра Галактики (короны СМЧД) и свободные звезды локального скопления галактик.

Для изучения звездных популяций в околосолнечном пространстве Галактики построен рис. 2, на котором изображены звезды AG300 в трех проекциях их скоростей относительно Центра Галактики: V , U , W . Особенно интересна плоскость UV , в которой все звезды могут быть условно разделены на несколько семейств. Большинство звезд окрестностей, естественно, принадлежат диску с характерной дисперсией скоростей ~ 300 км/с по каждой координате. Звезды с $V \approx 240$ км/с и дисперсией по $U \sim 200$ км/с можно отнести к звездам диска — основного звездного компонента нашей Галактики. Сдвиг по V этих звезд отражает их вращение около центра Галактики. В плоскости UV (рис. 2) звезды в пределах околосолнечной сферы с радиусом 300 пк могут быть разделены на четыре семейства: диск, балдж, гало и свободные звезды скопления галактик вокруг двойной галактики, включающей нашу Галактику и галактику Андромеды. Звезды диска включают звезды двух потоков Каптейна, как свидетельствуют диаграммы распределения скоростей по U и V . Внешний контур звезд диска задан звездами толстого диска и балджа Галактики с дисперсией скоростей ~ 300 км/с как по оси U , так и по оси V . Толщина звездного диска Галактики коррелирует с обилием α -элементов [22]: чем больше W -компонента, тем больше обилие $[C/Fe]$.

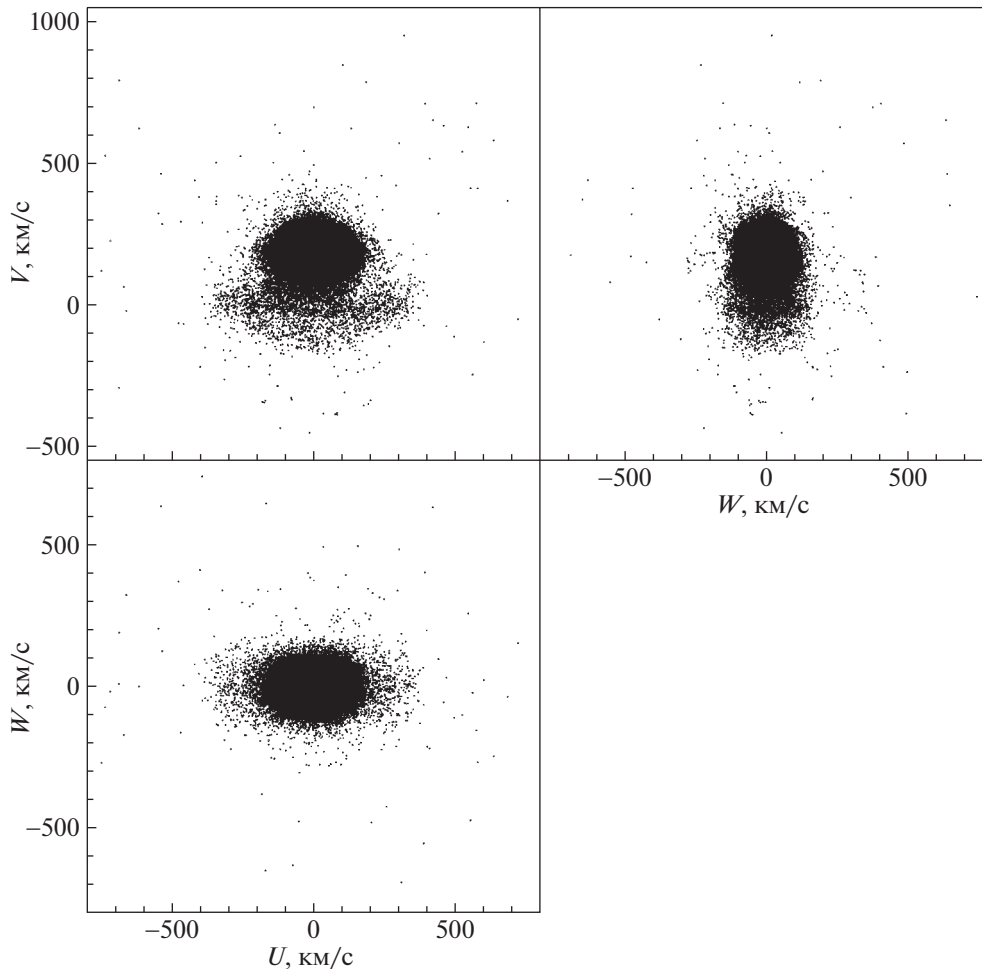


Рис. 2. UV, WV и WU распределения звезд каталога AG300. Компоненты скорости относительно Центра Галактики.

Хорошо заметна скоростная асимметрия звезд балджа (W-U, рис. 2). Вероятно, ее причина обусловлена генетически. Звезды балджа являются вероятными членами двух популяций: предельно старых звезд молодой сфероидальной Галактики [23, 24] и звезд — близких спутников нашей Галактики, поглощенных ею в прошлом [25]. Действительно, около 16% звезд балджа моложе 10^9 лет [11, 24]. Распределение по пространственным скоростям звезд этих двух популяций балджа Галактики практически совпадает, но детальное исследование химии этих звезд, вероятно, поможет в будущем разделить их. И, наконец, часть звезд имеют скорости в плоскости UV, превосходящие ~ 350 км/с, но менее ~ 500 км/с. Они, по нашему представлению, представляют звезды гало нашей Галактики.

Сравнительное исследование металличности и отношения $[Mg/Fe]$ для звезд диска и гало нашей Галактики продемонстрировало, что звезды гало имеют металличности $-2 \leq [Fe/H] \leq -0.2$, фактически смыкаясь со звездами диска $-0.8 \leq$

$[Fe/H] \leq 0.4$ [26]. При этом звезды гало с $[Fe/H] \leq -1$ могли принадлежать поглощенным в прошлом спутникам Галактики, а звезды гало с $-0.8 \leq [Fe/H] \leq -0.3$ “продолжают” кинематику звезд диска такой же металличности. То есть эти звезды принадлежат толстому звездному диску Галактики, возникшему на ранних стадиях ее эволюции [15], когда, согласно модели, газовый диск Галактики был сфероидален [4].

Задачей настоящей статьи мы считаем анализ кинематики близких к Солнцу звезд с целью изучения звездной структуры самой Галактики и ее окрестностей на основе каталога Gaia.

Для изучения кинематики быстрых звезд гало Галактики (балджа) в рис. 2 отобраны звезды с $V < 0$ в системе координат Центра Галактики. Таким образом, мы не рассматриваем звезды, движущиеся в направлении вращения диска (левая половина диаграммы на рис. 3). Рисунок 2 свидетельствует, что звезды балджа (гало) с $V < 0$ в системе координат Центра Галактики частично пересекаются со звездами толстого диска, обладаю-

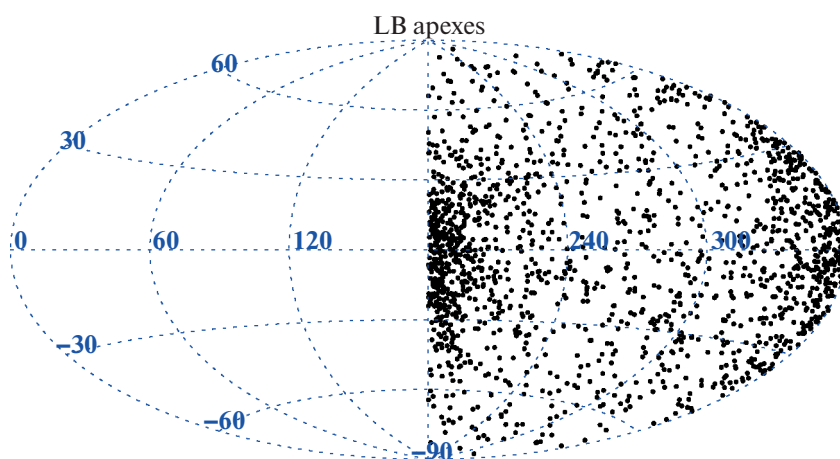


Рис. 3. Диаграмма апексов в галактической системе координат (LB) для звезд с $V < 0$ (с рис. 2).

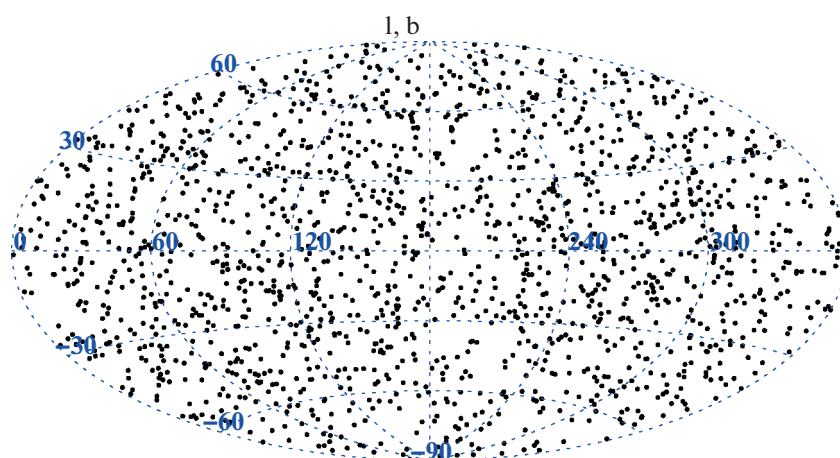


Рис. 4. Распределение звезд, показанных на рис. 3, в галактической системе координат lb. Звезды с $V < 0$ на небесной сфере.

щими, как увидим позже, очень высокой ~ 300 км/с дисперсией пространственных скоростей. Распределение по небу выбранных звезд на LB диаграмме (рис. 3) однородно, рис. 4. Очень информативна диаграмма для апексов звезд балджа с $V < 0$ (рис. 3): звезды на ней сравнительно равномерно заполняют свою половину небесной сферы. Нет признаков звездных потоков, за исключением двух заметных концентраций апексов в двух противоположных направлениях: на центр и антицентр Галактики: $L \approx 0^\circ$ и $L \approx 180^\circ$. Эти потоки представлены звездами, выброшенными из ядра Галактики — звезды короны и ядра. Детальное представление этой новой звездной компоненты будет изложено при обсуждении рис. 8. Звезды гало имеют почти случайные направления векторов скоростей (рис. 4). Эксцентриситеты орбит основной части этих звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.8$ менее ~ 0.4 , но эксцентриситеты некоторых

звезд гало Галактики достигают ~ 0.9 [27]. Звезды гало с малыми эксцентриситетами орбит являются, вероятно, предельно старыми звездами Галактики, а звезды с большими эксцентриситетами — возможные продукты ускорения звезд в ядре Галактики и разрушения галактик-спутников в ее ядре [16].

5. СЦЕНАРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗВЕЗД С ВЫСОКИМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ СКОРОСТЯМИ

Для анализа кинематики и морфологии высокоскоростных звезд AG300 необходимо знать механизмы ускорения звезд, действующие в нашей и других галактиках. Ниже приведен их краткий обзор.

Рассмотрим эволюцию кратных звезд и галактик в поисках путей возникновения околосол-

нечных звезд с высокими пространственными скоростями, превосходящими характерные скорости движения звезд в галактиках и галактик в их скоплениях: $v = 300 \left(\frac{M}{10^{11} M_\odot} \right)^{1/4}$ км/с [25], где M — масса галактики или скопления галактик. Последнее соотношение позволяет оценить и скорости движения галактик в их скоплениях с массами $10^7 - 10^{15} M_\odot$ в 30–3000 км/с. Столкновения и слияние галактик в их скоплениях часто приводят к их распаду и освобождению звезд [28, 25]. В итоге непрерывная среда межгалактических звезд скопления галактик состоит из звезд, движущихся со скоростями родительских галактик. Но наша Галактика с галактикой Андромеды образуют двойное ядро бедного локального скопления с массой $\sim 2 \times 10^{12} M_\odot$ [29, 30], поэтому столкновение близких галактик не могут дать скорости заметно выше ~ 600 км/с.

Гораздо более эффективен для ускорения звезд процесс слияния галактик, обладающих сверхмассивными черными дырами в их ядрах [31, 32, 25]. В этом случае звезды могут быть ускорены до скоростей порядка орбитальных скоростей этих звезд вокруг сверхмассивных черных дыр при условии, что приливные силы не разрушат ускоряющую звезду, или $\frac{m}{r^3} > \frac{M}{a^3}$, где m и r — масса и радиус звезды, M — масса черной дыры и a — большая полуось орбиты звезды.

Итоговая максимальная скорость для звезд главной последовательности равна $v = 300 \times (M/m)^{1/3}$ км/с [33]. То есть черная дыра в ядре Галактики с массой $\sim 4 \times 10^6 M_\odot$ способна ускорять звезды главной последовательности до 3×10^4 км/с, а вырожденные компактные карлики — до значительно больших скоростей. Звезды, ускоренные СМЧД имеют, как будет показано далее, специфическую кинематику. Интересно, что в пределах $\sim 10^{17}$ см от СМЧД в ядре Галактики степень двойственности звезд с $v = 10^3$ км/с понижена [34], что может быть свидетельством распада тесных двойных и ускорения компонентов до соответствующей скорости.

Появление звезд главной последовательности около СМЧД обеспечивается несколькими путями: слияние галактик, звездообразование в ядре галактики и поглощение своих шаровых скоплений. Изучение орбит шаровых скоплений Млечного пути показало, что орбиты некоторых из них погружены глубоко в ядро Галактики [35]. При этом несколько шаровых скоплений, расположенных на расстояниях в несколько кпк, приближаются в ходе орбитального движения в ядре Га-

лактики на расстояние, меньшее 50 пк от Центра Галактики.

Звезды могут быть ускорены также в результате взрыва сверхновой в тесной двойной системе, если при взрыве один компонент уменьшает свою массу более чем в два раза [36]. Второй компонент с массой m при этом, сохраняя свою орбитальную

скорость: $v = 300 \left(\frac{M_{\text{SN}}}{m} \right)^{1/3} \frac{\text{км}}{\text{с}}$ оказывается среди высокоскоростных одиночных звезд. Численное исследование спектра скоростей звезд, возникших после взрыва сверхновых в двойной системе и распада последней, подтверждает приведенную оценку их максимальных пространственных скоростей [37]. При этом изменение массы, ускоренной при взрыве звезды, от $0.8 M_\odot$ до $0.2 M_\odot$ ведет к увеличению ее скорости от ~ 550 до ~ 1100 км/с.

Еще один эффективный механизм ускорения одиночных звезд — распад тесных кратных систем. Например, при распаде самых тесных тройных систем с двумя массивными звездами с массами M третий компонент с массой m согласно условию сохранения энергии может быть ускорен

до скорости $v \approx 300 \left(\frac{M}{m} \right)^{1/2}$ км/с, если он является звездой главной последовательности. Этот сценарий ускорения звезд в Галактике может быть одним из основных по частоте в околосолнечном пространстве. Для оценки его частоты используем эмпирическое распределение двойных звезд по большим полуосям a : $dn = 0.2 \cdot d \lg a$. Для устойчивости орбит тройной звезды $d \lg a \geq 0.17$, т.е. несколько процентов таких звезд может подвергнуться распаду и ускорению своих компонентов меньшей массы до указанных скоростей. Следовательно, распад самых тесных тройных звезд с большим контрастом масс компонентов создает высокоскоростные звезды.

Еще один вариант сценария распада кратных систем состоит в столкновении маломассивной двойной системы с массивными компонентами m с массивной одиночной звездой с массой M . Конечная скорость v ускоренной звезды с массой m в ходе образования новой двойной системы с большим контрастом M/m масс компонентов

главной последовательности: $v \approx 300 \left(\frac{M}{m} \right)^{1/2}$ км/с.

Этот вариант ускорения особенно эффективен при столкновении кратных звезд солнечной массы со сверхмассивными черными дырами ядер шаровых скоплений с массами до $10^4 M_\odot$ [38, 39]. Интересно, что второй компонент двойной звезды, разрушаемой при столкновении с СМЧД, может быть разорван в процессе ускорения приливными силами. Разрушения звезд в ядрах галактик (tidal disruption) — одна из наиболее популярных

тем в астрономии последних лет [40]. Эти явления, с одной стороны, являются свидетельствами возможного ускорения звезд СМЧД в ядрах галактик, а с другой, способствуют росту масс самих СМЧД.

Взаимодействия звезд в ядрах шаровых скоплений между собой и с массивными черными дырами приводят к появлению быстрых звезд со скоростями до 2000 км/с [41]. Выброшенные из центральных областей Галактики, где сосредоточены шаровые скопления, эти звезды теряются Галактикой при $v \geq 500$ км/с, либо выходят на квазирadiaльные орбиты с большими эксцентриситетами при меньших скоростях. Эволюция таких орбит была изучена, она сводится к вращению большой полуоси орбит таких звезд со временем [42]. Таков один из путей формирования и эволюции орбит звезд короны ядра Галактики, обнаруженных нами и анализируемых далее.

Кроме того, сейчас ясно, что все рассмотренные выше сценарии, включающие столкновения, особенно эффективны в плотных ядрах своих галактик. Там же происходит и разрушение спутников галактик при столкновении их с материнской галактикой [43]. Таким образом, возникают наблюдаемые звездные потоки галактических масштабов и звезды, покидающие свои галактики со скоростями порядка параболических для разрушающих свои спутники галактик: 100–1000 км/с.

Стоит отметить, что самые большие скорости, вплоть до 10^5 км/с, возникают у звезд, участвующих в слиянии сверхмассивных черных дыр ядер сливающихся галактик [33] и компонентов тесных двойных звезд, разрушенных при взаимодействии их со сверхмассивными черными дырами. А самый обильный компонент межгалактических звезд скопления является, вероятно, продуктом распада сталкивающихся галактик.

Перечисленные выше пути ускорения звезд помогают понять морфологические особенности галактик, подобных нашей Галактике, что позволяет выделить следующие их звездные компоненты [44]. Тонкий и толстый диски являются в основном продуктами поздних и ранних стадий эволюции газового компонента галактик [45]. Балдж представляет звездные компоненты галактик малой массы, слившихся в прошлом с массивной галактикой. В гало галактик попадают звезды, ускоренные в ходе эволюции диска галактики одним из описанных выше механизмов. Но основной компонент звезд гало, судя по их химическому составу, представлен первыми звездами Галактики и звездами разрушенных карликов [46]. Это простое описание звездных компонентов массивных галактик стоит дополнить звездами гало с почти радиальными относительно центра галактики орбитами, которые были ускорены в ядре галактики при участии СМЧД. Этот ком-

понент, как будет показано дальше, надежно выделяется среди звезд, близких к Солнцу.

Звезды, ускоренные СМЧД, как показывает анализ, представляют особый интерес. Они заполняют не только родительские галактики с их полостями Роша, но и скопления галактик с их полостями Роша и всю Вселенную (рис. 5). Галактики являются членами скоплений с массами $10^{12} - 10^{15} M_{\odot}$, расположенных на расстояниях ~ 30 Мпк друг от друга [47]. Характерные скорости движения галактик в их скоплениях ~ 1000 км/с [48]). Скопления галактик удаляются от соседних скоплений со скоростями ~ 3000 км/с в силу космологического расширения Вселенной. В итоге становится ясно, что звезды, каким-либо образом ускоренные в своих галактиках до скоростей выше $\sim 300 \left(\frac{M_G}{10^{11} M_{\odot}} \right)^{1/4}$ км/с [25], но менее $\sim 10^3$ км/с,

покидают свои галактики и заполняют за $\sim 10^9$ лет объем родительского скопления галактик (рис. 5). Они пополняют население межгалактических звезд скопления, возникающих, в основном, при распаде сталкивающихся карликовых галактик.

Звезды, ускоренные в галактиках до скоростей $\sim 3 \times 10^3$ км/с, становятся членами звездных корон скоплений галактик (рис. 5) и, наконец, звезды со скоростями выше ~ 3000 км/с способны преодолеть вызванное Хаббловским расширением удаление скоплений галактик друг от друга. В результате они почти равномерно заполняют расширяющуюся Вселенную, обеспечивая обмен звездами между скоплениями галактик. Но сверхмассивные черные дыры ускоряют не только звезды, но и планеты, астероиды. Таким образом, в итоге, осуществляется и обмен высокоскоростными звездами, планетами и астероидами между галактиками и скоплениями галактик (рис. 5). И, что интересно, скорость высокоскоростных звезд является их важным генетическим признаком.

6. АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ ЗВЕЗД AG300: ДИСК, БАЛДЖ (ГАЛО) ГАЛАКТИКИ, ЗВЕЗДНАЯ КОРОНА СМЧД, МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДЫ

Кинематические характеристики звезд солнечной окрестности и морфологические свойства Галактики тесно связаны и взаимно обусловлены. Это позволяет разделить околосолнечные звезды на пять популяций и связать эти популяции с морфологией Галактики и локального скопления галактик. Кроме того, удастся установить существование нового компонента нашей и, вероятно, других массивных галактик с СМЧД —

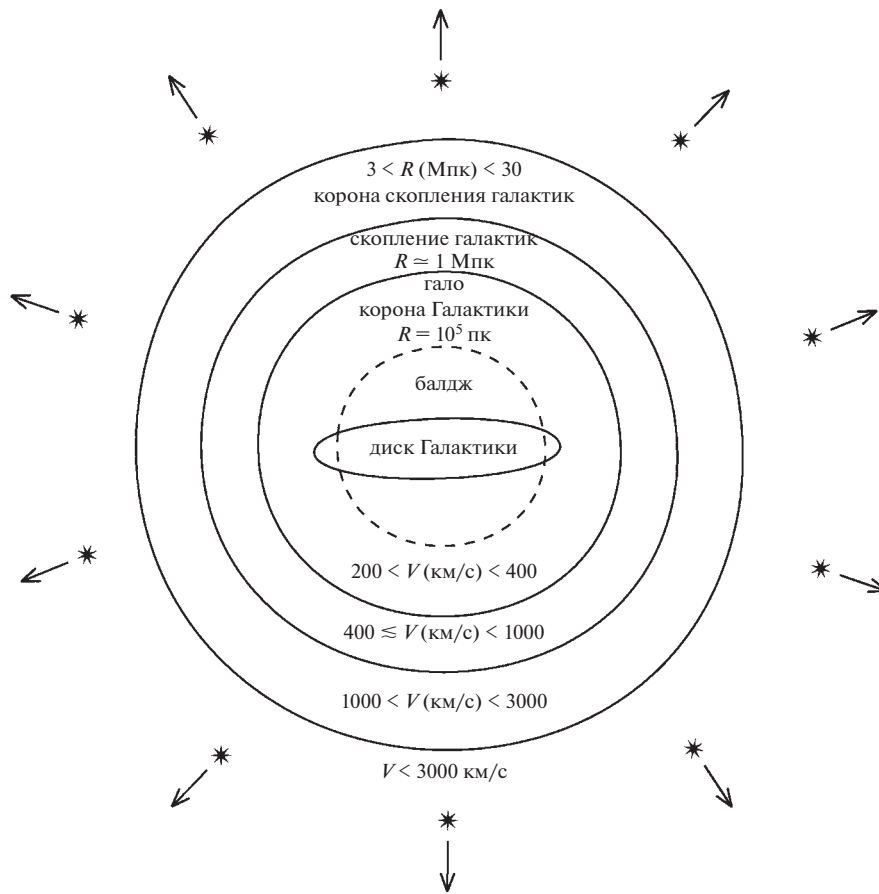


Рис. 5. Быстрые звезды в Галактике, скоплениях галактик и Вселенной.

звездной короны СМЧД ядра. Ее образуют звезды, ускоренные с участием СМЧД в ядре Галактики до скоростей, достаточных для удаления из ядра, но не достаточных для покидания Галактики. Они образуют звездный аналог облака Оорта планетных систем, обладая высокими ~ 1 эксцентриситетами своих орбит около СМЧД.

На рис. 6 и 7 представлены распределения звезд AG300 по величине пространственной скорости в системе координат, связанной с Центром Галактики. Приведены линейные и логарифмические версии спектра скоростей звезд. Эти спектры позволяют выделить несколько популяций звезд, отличающихся характерными скоростями своих членов. Основная часть принадлежит двум потокам звезд диска Галактики, обнаруженным Каптейном. Их скорости ~ 230 и ~ 250 км/с. Поток 230 км/с почти в два раза интенсивней потока 250 км/с. Звезды потока в толстом диске имеют характерные скорости ~ 285 км/с. Этот рисунок позволяет оценить долю звезд балджа и гало, в ансамбле AG300 она не превышает 3%. Поток при $V_{\text{SGal}} \approx 230$ км/с принадлежит, судя по характерной скорости, диску нашей Галактики и пред-

ставляет, вероятно, левый поток (рис. 1). Специальное исследование показало (рис. 1), что левый поток Каптейна неоднороден и расщеплен. На рис. 7 показано распределение самых быстрых звезд с $V_{\text{SGal}} > 300$ км/с из AG300 по скоростям. Очевидно наличие перехода при скорости, близкой к параболической на орбите Солнца в Галактике $V_{\text{SGal}} \approx 450$ км/с. При этом число звезд с $V_{\text{SGal}} \leq 450$ км/с, продолжая спектр скоростей рис. 6, быстро уменьшается с ростом их пространственной скорости. При скоростях выше ~ 450 км/с спектр скоростей становится практически плоским в интервале 450–1100 км/с. Ясно, что эти звезды принадлежат не нашей Галактике, а вероятно, локальному скоплению галактик (рис. 5). Они являются, в основном, продуктами ускорения звезд в процессах, представленных в предыдущем параграфе статьи.

Звезды гало Галактики заполняют ее полость Роша, образуемую взаимодействием с галактикой Андромеды. Эксцентриситеты их орбит в Галактике: 0–0.99. В перифериях они достигают расстояний до одного килопарсека, удаляясь в апоцентрах до ~ 200 кпк [49]. Распределение по

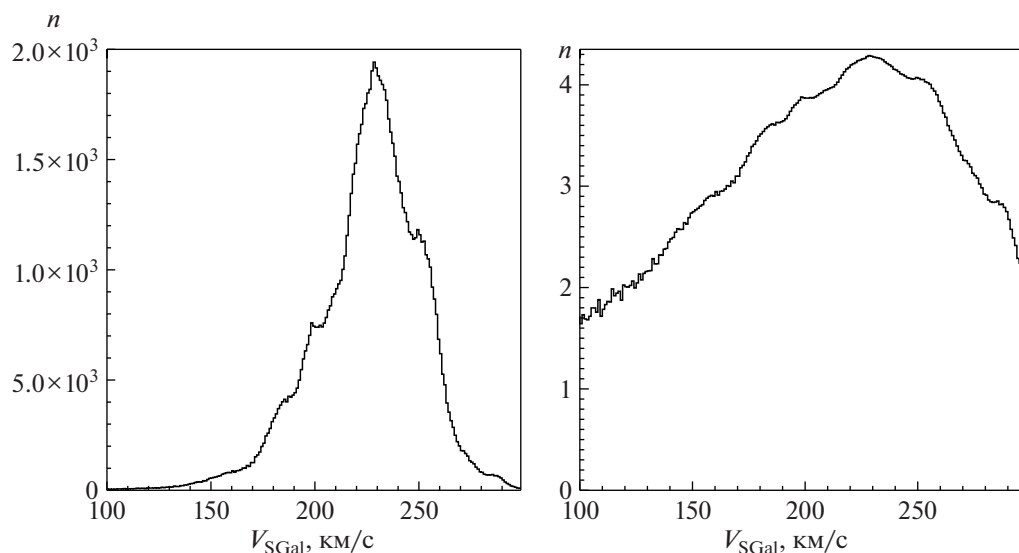


Рис. 6. Спектр пространственных скоростей звезд AG300 по величине скорости на интервале 100–300 км/с.

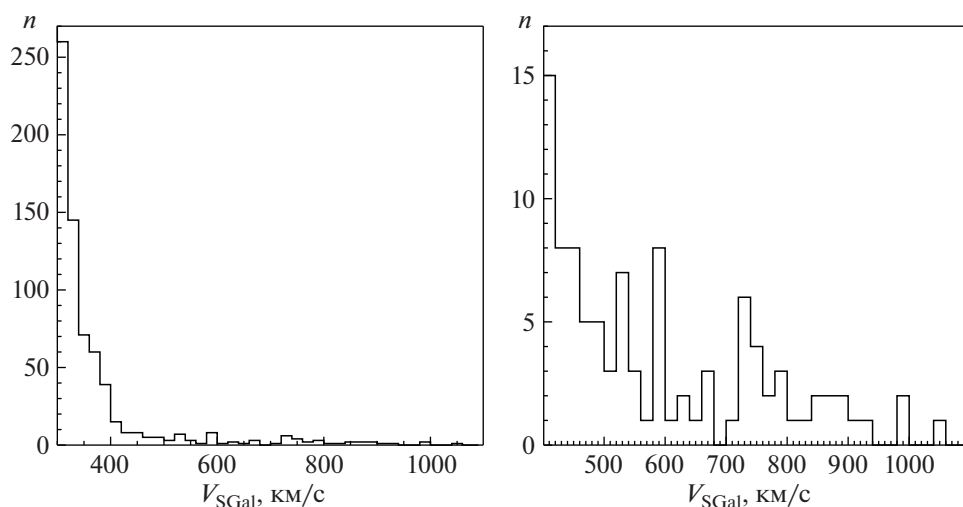


Рис. 7. Спектр пространственных скоростей звезд AG300 по величине скорости на интервале 500–1100 км/с.

возрасту звезд балджа и гало демонстрирует присутствие двух популяций [50, 51], что кажется естественным, поскольку эти компоненты звездного населения Галактики образованы в ходе двух процессов: исходного коллапса протогалактики и поглощения близких спутников малой массы. Участие процесса аккумуляции в образовании балджа и гало галактик подтверждается демонстрацией наблюдаемой корреляции доли эллиптических галактик в скоплении галактик с его поверхностной плотностью [52]). С ростом последней доля эллиптических галактик в скоплении галактик — продуктов столкновений галактик — быстро растет.

Для детального исследования кинематики звезд AG300 построен рис. 8, на котором представлена картина изменения распределения апексов звезд в зависимости от их пространственных скоростей V_{SGal} . Локальные скорости движения звезд относительно Солнца приведены после учета его движения относительно центра Галактики. Анализ зависимости картины положения апексов от величины пространственной скорости позволяет найти около Солнца звезды, принадлежащие различным населением Галактики и локального скопления галактик.

На рис. 8.1 нанесены апексы практически “покоящихся” в галактическом потенциале звезд со

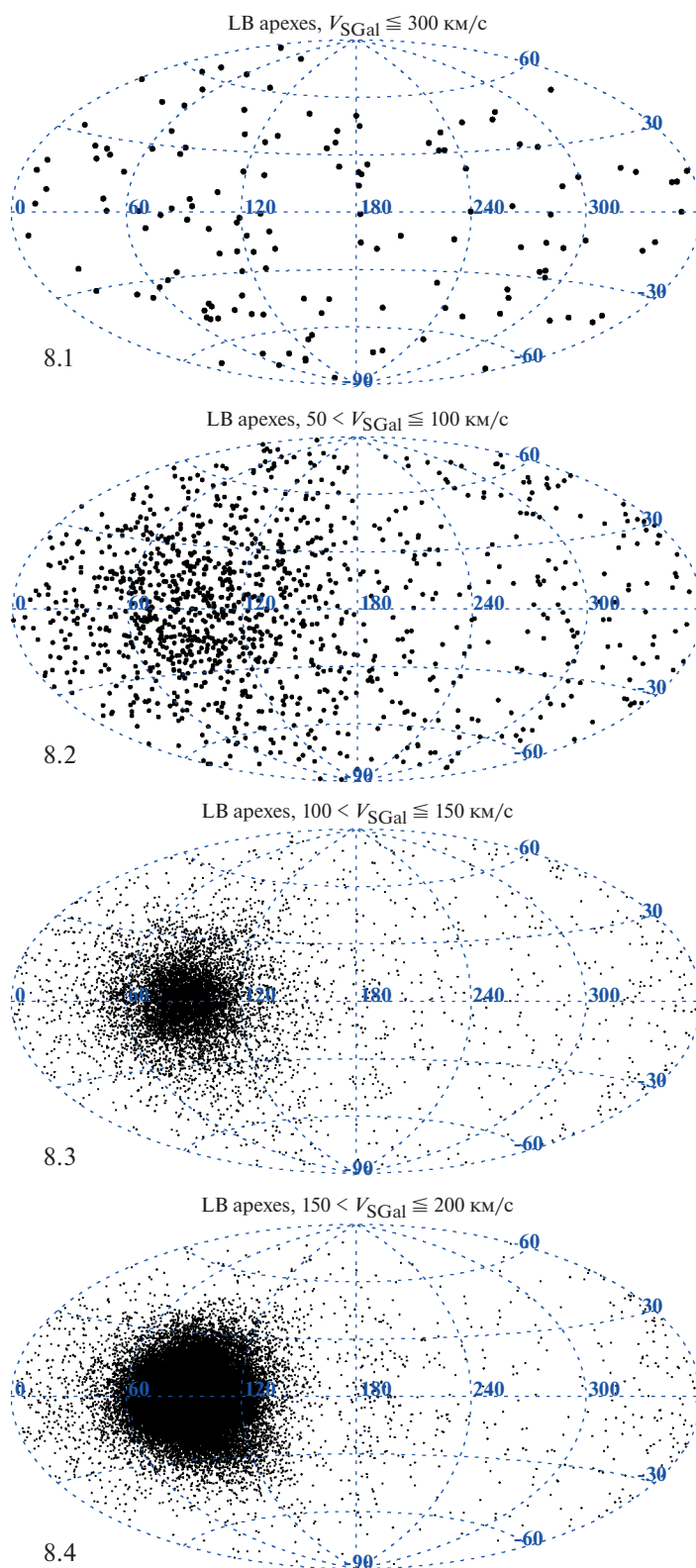


Рис. 8. Диаграммы апексов (L, B) звезд AG300 (относительно галактического Центра) в зависимости от их скорости в диапазоне 0–1100 км/с. Серым — $500 < V_{\text{SGal}} < 600$, черным — $600 < V_{\text{SGal}} < 800$, красным — $V_{\text{SGal}} > 800$ км/с. Зеленый крестик — апекс движения Солнца относительно внегалактических SNIa [41], $V \approx 370$ км/с. Красный крестик — положение скопления галактик Дева [54].

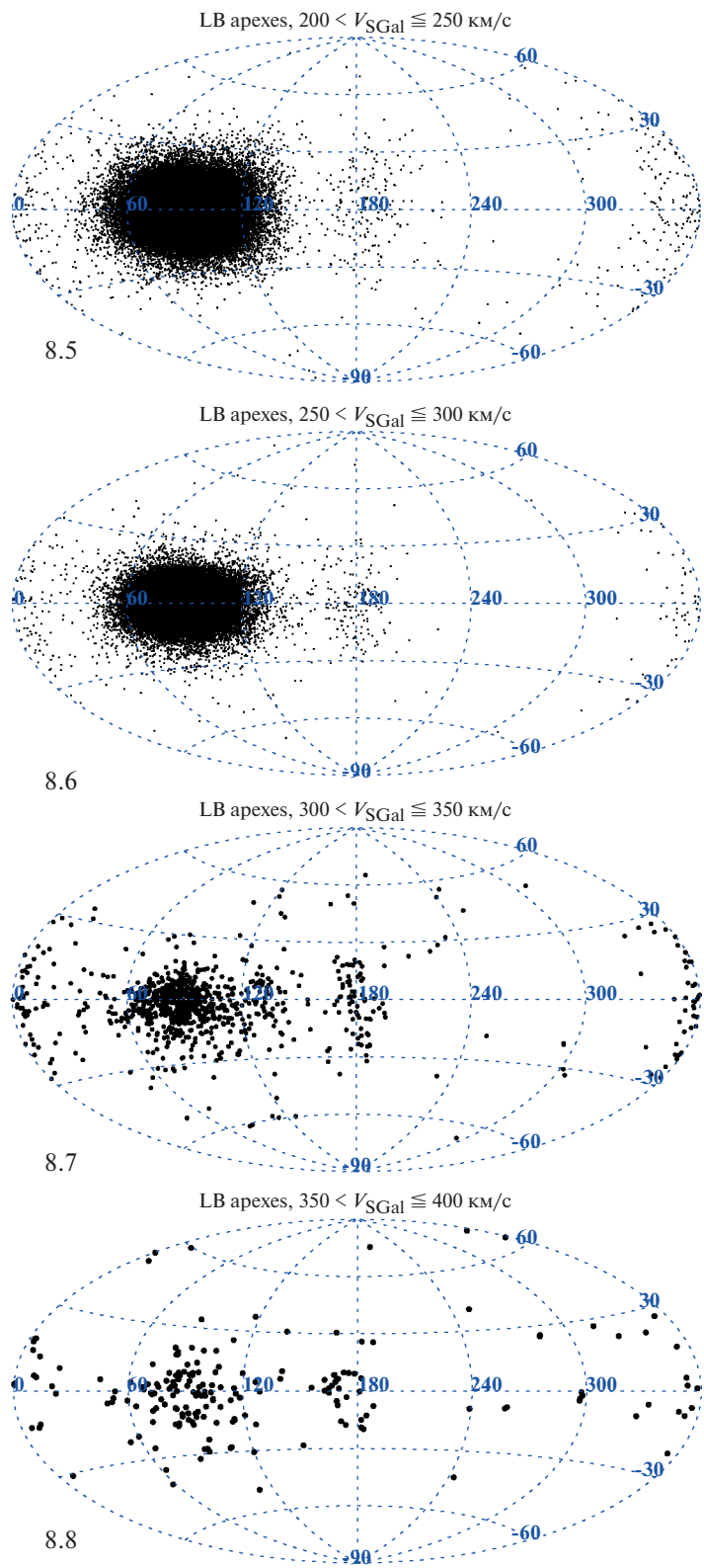


Рис. 8. Продолжение

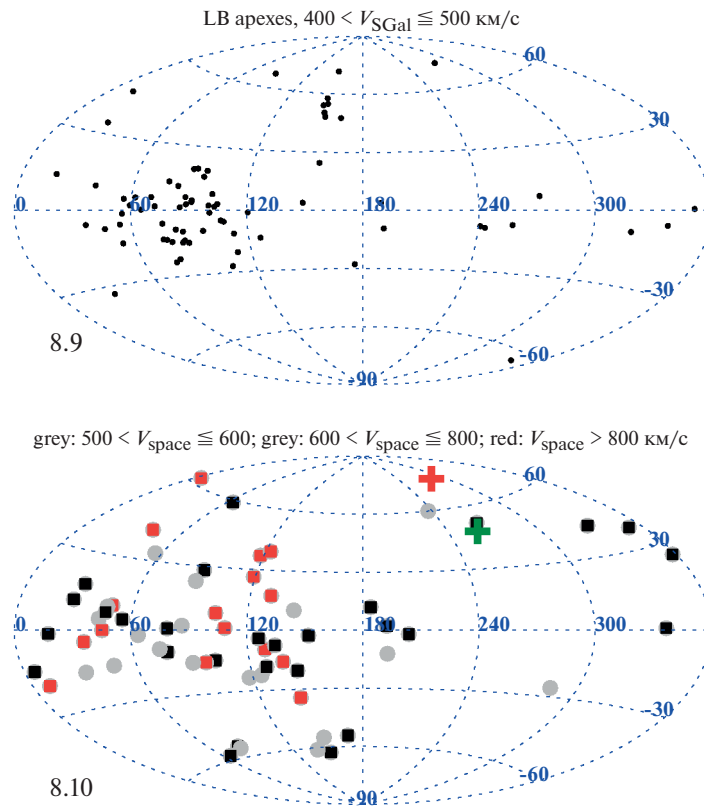


Рис. 8. Окончание

скоростями, меньшими 50 км/с. Распределение апексов этих звезд практически однородно, не выделен ни центр ($L = 0^\circ$), ни антицентр Галактики ($L = 180^\circ$). Но заметен небольшой $\sim 50\%$ избыток звезд в левой половине ($L \approx 90^\circ$) небесной сферы, отвечающий, как мы увидели на рис. 8.2–8.9, толстому диску Галактики. Звезды рис. 8.1 представляют, в основном, население балджа с предельно большими эксцентриситетами своих орбит. Их количество невелико — $\sim 0.01\%$ от числа звезд AG300.

Увеличение предельной скорости до ~ 100 км/с (рис. 8.2) резко меняет картину апексов, обогащая ее звездами толстого диска и медленно вращающегося гало Галактики ($L \approx 80^\circ$ – 120°). Увеличивается и число звезд балджа, равномерно заполняющих небесную сферу. Центр и антицентр Галактики остаются невыделенными. Возможно, что звездный толстый диск неоднороден и показывает признаки звездных потоков.

Увеличение предельной скорости до 150 км/с (рис. 8.3) сужает дисковый компонент Галактики, демонстрируя возможные звездные потоки. Апексы звезд балджа продолжают почти однородно заполнять небесную сферу. В районе центра Галактики ($L \approx 180^\circ$) и ее антицентра ($L \approx 0^\circ$)

на рис. 8.3 появляется новый компонент, получающий развитие на рис. 8.4–8.8. Этот компонент присутствует и на рис. 3. Угловые размеры этого компонента $\approx 30^\circ$ на рис. 8.5–8.8. Они, по крайней мере, частично, как уже отмечалось ранее, задаются остающимися неопределенностями величины компонентов пространственных скоростей каталога Gaia, но сам факт существования этого нового компонента на рис. 8.3–8.8 не вызывает сомнения. Он составлен звездами балджа и звездами, ускоренными в ядре нашей Галактики и составляющими корону СМЧД.

Для изучения скоростей радиального движения звезд этого нового компонента Галактики мы выделили звезды AG300 с апексами в пределах $\pm 30^\circ$ от центра Галактики по l и b . В итоге этот ансамбль содержит 1349 звезд. Из них 734 звезды движутся к центру и 606 звезд — от центра Галактики, что в пределах стандартного $\sqrt{N}$ допускает их равенство. Оба потока демонстрируют концентрацию к центральной зоне в пределах круга с радиусом в $\approx 10^\circ$. Распределение по величине пространственных скоростей звезд этих противоположно направленных потоков практически одинаково и заключено в пределах $0 < V_{\text{SGal}} < 430$, что свидетельствует о принадлежности их звезд к на-

шей Галактике. Семь звезд двух потоков имеют скорости, превышающие 500 км/с. Это свидетельствует об их внегалактическом происхождении и случайном попадании в зону небесной сферы, ограниченную тридцатью градусами. Распределение этих звезд на небесной сфере приблизительно равномерно.

Рассмотрим возможные причины изменения скорости звезд этих почти радиальных потоков, кроме остающихся неопределенностей вектора пространственной скорости, как причины расширения указанных потоков звезд. Однако ограничение AG300 звездами с ошибками скоростей в пределах ~5% не позволило уменьшить угловое рассеяние. Возможно также и рассеивающее влияние звезд диска Галактики и близких спутников Галактики в пределах ее полости Роша. Список около пятидесяти спутников в пределах 200 кпк показывает их концентрацию к Галактике [55]. Поскольку время жизни короны СМЧД порядка Хаббловского, их гравитационное взаимодействие со звездами диска и спутниками Галактики может изменить вектор скорости членов звездной короны СМЧД. А последнее способно расширить зону концентрации этих звезд с почти радиальными относительно СМЧД в начале орбитами.

Для понимания возможных причин рассеяния апексов звезд короны ядра Галактики оценим величину изменения их скоростей под влиянием сближения этих звезд со звездами диска и шаровыми скоплениями за время их жизни, полагаемому равным Хаббловскому времени T . Примем скорость звезд короны порядка параболической V для однородного скопления с массой M и радиусом R , состоящего из гравитирующих тел с массой m . Характерная величина изменения скорости при сближении звезды на расстояние r с пробным телом: $v = Gm/Vr$, где G — постоянная гравитации. Тогда простая алгебра позволяет найти, что $v/V = (m/M)^{1/2} (T/t)^{1/2}$, где $t = R/V$ — динамическое время для принятого нами скопления. Ясно, что при характерном $T/t = 100$ звезды диска солнечных масс не могут заметно изменить скорости звезд короны ядра. Для существенного изменения их скоростей необходимо привлечение взаимодействия звезд короны с наиболее массивными потенциальными спутниками Галактики в прошлом.

Еще одной причиной расширения потока звезд от ядра Галактики может быть соучастие СМЧД ядер шаровых скоплений в ускорении звезд. Околоядерные шаровые скопления занимают на небесной сфере круг с радиусом ~15° [56]. Не исключено также, что в рассеянии орбит звезд короны СМЧД участвует отклонение потенциала темного гало Галактики от сферической симметрии [57, 58]. Это может оказывать суще-

ственное влияние на движение звезд короны СМЧД в апоцентрах их орбит. Эта возможность нуждается в дополнительном численном исследовании.

То есть в окрестностях Солнца есть звезды, движущиеся по орбитам с большим эксцентриситетом около центра (СМЧД) нашей Галактики. Радиальные скорости этих звезд около центра Галактики в интервале 100–400 км/с. Одна из возможных причин появления этих звезд — распад кратных систем в ядре Галактики путем их взаимодействия с СМЧД в центре Галактики и при слиянии галактик [25, 32, 33]. Звездная корона СМЧД является аналогом облаков Оорта планетных систем. Ясно, что наиболее быстрые члены этого компонента покидают нашу Галактику, пополняя среду свободных звезд локального скопления галактик. Общее число звезд этого нового, интересного компонента каталога AG300 не превосходит ~0.1%. Полагая ее однородной и сферически симметричной, можно оценить общее число таких звезд в Галактике (с радиусом ~10 кпк) в ~10⁸, а частоту их возникновения ~2 в год. Назовем этот компонент звездной короной ядра Галактики (СМЧД), ее члены имеют практически радиальное направление векторов скорости относительно центра Галактики.

Другое возможное объяснение причин появления компонента с большими эксцентриситетами орбит около ядра — генерация этих звезд в околоядерной звездной области, например, путем распада тройных звездных систем. Но преодоление потенциала ядра Галактики требует высокой, ~10³ км/с начальной скорости, что в системе звезд главной последовательности кажется недостижимым. Поэтому генерация этих звезд короны и ядра с почти радиальными орбитами при участии СМЧД в ядре Галактики и, возможно, массивных черных дыр в ядре шаровых скоплений и спутников Галактики кажется сейчас предпочтительной. Распределение звезд короны ядра (СМЧД) каталога AG300 по небу, как показало специально проведенное исследование, однородно. Это кажется естественным, поскольку размеры этой системы велики, порядка размеров полости Роша Галактики в локальном скоплении галактик: ~10⁵ парсек. Распределение звезд короны по скоростям с максимумом при 150–250 км/с в интервале 0–400 км/с не зависит от направления на центр-антицентр Галактики. Существование подобных звездных корон СМЧД в ядрах других массивных галактик кажется сейчас неизбежным и общим.

Не исключено, что звезды с низким угловым моментом найденной нами короны ядра Галактики являются продуктами распада карликовой галактики Gaie-Enceladus [59–61]. Оценка массы

этого карлика составляет $3 \times 10^8 - 3 \times 10^9 M_{\odot}$. Низкий угловой момент звезд короны ядра требует высокого, близкого к единице эксцентриситета орбиты галактики, столкнувшейся с нашей Галактикой и, поэтому, давнего столкновения, превратившего эту галактику в звездный поток. Однако образование быстрых звезд в ядре Галактики кажется более естественным объяснением низких угловых моментов звезд короны ядра.

Звезды диска наиболее обильны на рис. 2 и на рис. 8.5 со стандартными скоростями вращения звезд относительно центра Галактики 200–250 км/с. Структура диска на этих рисунках остается неясной, она будет предметом исследования другой нашей статьи. Диск на рис. 8 истощается при абсолютных скоростях, больших ~300 км/с, что позволяет видеть неоднородность его структуры, включающей звездные потоки с большими эксцентриситетами орбит в Галактике. Отметим, что звезды диска со скоростями, меньшими круговой на орбите Солнца (рис. 8.2–8.4), обладая небольшими эксцентриситетами орбит в Галактике, находятся в апоцентрах своих орбит. А звезды диска со скоростями, большими круговых (рис. 8.6–8.9), – в перицентрах своих орбит в Галактике.

Звезды балджа или звездного гало Галактики представлены на всех рис. 8 при скоростях, меньших ~500 км/с, достигая наибольшего числа при $v \approx 200$ км/с (рис. 8.4). Но их общее число на периферии Галактики в районе Солнечной орбиты остается небольшим.

7. ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДЫ AG300 ($V_{\text{S GAL}} > 500$ КМ/С)

Для идентификации внегалактических звезд оценим пространственную скорость, необходимую околосолнечной звезде для ухода ее из Галактики. В предположении сферической симметрии распределение гравитирующего вещества Галактики найдем его аналитическое представление. Массы Галактики в пределах Солнечной орбиты с $R \approx 8$ кпк $\sim 0.87 \times 10^{11} M_{\odot}$ [62], а в пределах $R = 200$ кпк $\sim 10^{12} M_{\odot}$ [63–65]. Эти данные позволяют дать степенное представление для зависимости массы Галактики от расстояния до ее центра как:

$$M \approx 2.1 \times 10^{41} \left(\frac{R}{\text{пк}} \right)^{0.75}, \text{ г} \quad (1)$$

Эта аппроксимация верна в пределах 200– 2×10^5 пк [66].

Последнее соотношение позволяет оценить зависимость параболической скорости v_{esc} от рас-

стояния до центра Галактики из уравнения энергии:

$$v_{\text{esc}} = 610 \left(\frac{1}{r_4^{0.25}} - \frac{1}{R_4^{0.25}} \right)^{1/2} \text{ км/с}, \quad (2)$$

где r_4 и R_4 – минимальное и максимальное расстояние до центра Галактики в единицах 10^4 пк. Если принять за границу Галактики радиус местного скопления: ~300 кпк [67], то $v_{\text{esc}} \approx 490$ км/с. Эти оценки близки к величине локальной скорости освобождения, найденные ранее [69]. Постоянство скорости вращения Галактики прослежено до минимальных расстояний от СМЧД в центре ~200 пк [70, 66]. Это дает возможность оценить величину скорости, необходимую звезде из ядра нашей Галактики для присоединения к “свободным” звездам локального скопления галактик: ~860 км/с. Естественно, что эти оценки остаются пока недостаточно фиксированными. Исследования кинематики околосолнечных звезд каталога AG300 позволяет оценить “параболическую” скорость на орбите Солнца в 450 км/с (рис. 8).

Очевидно, что скорость освобождения звезды с орбиты Солнца в Галактике определяется гравитационным потенциалом Галактики. Среди имеющихся в литературе оценок имеется величина $v_{\text{esc}} \approx 530$ км/с [57]. Распределение апексов скоростных звезд в Галактике может помочь уточнить величину предельной скорости, отделяющей звезды гало Галактики от межгалактических звезд локального скопления галактик. Потенциал Галактики, стоит признать, остается пока недостаточно определенным, что делает оценку скорости освобождения на уровне орбиты Солнца в Галактике с радиусом ~8 кпк заключенной в интервале 500–620 км/с [62, 71]. Однако изучение рис. 8 показало, что увеличение скорости звезд до ~450 км/с ведет к истощению короны ядра, что указывает величину скорости освобождения.

При поиске скорости освобождения звезды с околосолнечной орбиты в Галактике необходимо изучить направление векторов скорости звезд AG300 и их зависимость от величины наблюдаемой скорости. Звезды со скоростью, превышающей 500 км/с, принадлежат некоему звездному фону, заполняющему местную группу звезд, представленную Галактикой и Андромедой. Звезды, летящие от центра Галактики и к центру – участники и свидетели процесса ускорения в ядре Галактики.

Звезды малой массы, движущиеся со скоростью ~1000 км/с, за Хаббловское время преодолевают расстояния ~10 Мпк. Поэтому естественно желание установить связь околосолнечных звезд с большими пространственными скоростями

($V_{\text{SGal}} > 500$ км/с) с их потенциальными источниками — близкими галактиками и их скоплениями. Это будет возможно с установлением геометрии гравитационного потенциала нашей Галактики и параметров кинематики близких галактик. Сейчас для понимания кинематики скоростных звезд необходимо знание их пространственных скоростей вне Галактики.

Для анализа звезд AG300 с большими пространственными скоростями нами был составлен список этих звезд ($n = 63$), для которых взяты данные из каталога Gaia DR3 [13], данные приведены в табл. 1. Таблица 1 содержит: GDR3 ID — номер по каталогу GDR3, α , δ — прямое восхождение и склонение звезды (ICRS) на эпоху $J_0 = 2016.0$, ω , μ — параллакс, G , mag — звездная величина, T_{eff} , K — эффективная температура, $[\text{Fe}/\text{H}]$ — металличность. Посчитанные нами параметры этих звезд приведены в табл. 2, которая содержит GDR3 ID — номер по каталогу GDR3, aA , aD — координаты антиапека звезды в экваториальной системе координат (скорость относительно Солнца), L , B — координаты апека звезды в галактической сферической системе координат (скорость относительно центра Галактики), V_{SGal} , км/с — пространственная скорость звезды относительно центра Галактики, U , V , W , км/с — компоненты пространственной скорости звезды относительно центра Галактики, dist , пк — расстояние от Солнца, x , y , z , пк — координаты звезды в гелиоцентрической прямоугольной системе координат.

Положив параболическую скорость в около-солнечном пространстве равной ~ 500 км/с, скорость звезды вне Галактики можно оценить как $v_0 = \sqrt{v^2 - 500^2}$ км/с. Для звезд из табл. 1 со скоростями около Солнца $500 \lesssim v \left(\frac{\text{км}}{\text{с}}\right) \lesssim 1100$ скорости вне Галактики будут $0 \lesssim v_0 \lesssim 1000 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Важно, что найденный интервал скоростей характерен для спутников нашей Галактики и галактик, близких к ней [72, 73]. Такие скорости характерны для бедных скоплений галактик с массами $\sim 10^{12} M_{\odot}$ [74, 75], которым является группа галактик около нашей и галактики Андромеды.

Масса локальной группы галактик, включающей нашу Галактику и Андромеду в качестве ее двойного ядра $\sim 4 \times 10^{12} M_{\odot}$ [76], что при размере $\sim 2 \times 10^5$ пк дает характерные пространственные скорости галактик ~ 300 км/с. Предстоящее столкновение с галактикой Андромеды нашей Галактики через миллиарды лет [77] определяет направление движения Галактики в пределах локальной группы. Координаты ядра Андромеды

(M31): $\alpha = 00^{\text{h}}40^{\text{m}} (10^{\circ})$ и $\delta = 41^{\circ}$ [78]. Возможно, что движение Галактики в местной группе галактик, включающей M31, объясняет асимметрию распределения апеков звезд с $V_{\text{SGal}} \geq 500$ км/с на небесной сфере (рис. 8.10).

Распределение звезд AG300 с $V_{\text{SGal}} \geq 500$ км/с в пространстве показывает, что основная их часть оказывается в пределах сферы радиусом всего ~ 150 пк, поскольку эти звезды слабы, имея характерные массы $\sim 0.3 M_{\odot}$, судя по их температуре (табл. 1). При числе межгалактических звезд каталога AG300, равном 63, можно оценить общее число таких звезд в локальном скоплении галактик, полагая его однородным с радиусом, равным ~ 350 кпк. Оно оказывается порядка 10^{12} , а их масса $\sim 10^{11} M_{\odot}$. Эти звезды являются, в основном, продуктами распада карликовых галактик при их столкновениях и ускорения звезд в галактиках.

Распределение апеков самых быстрых звезд каталога AG300 дано на рис. 8.10. Как было показано ранее, эти звезды, судя по их пространственным скоростям, гравитационно не связаны с нашей Галактикой, а принадлежат, вероятно, локальному скоплению галактик с двойным ядром, представленным нашей Галактикой и Андромедой. Очевидное смещение картины апеков в левую полусферу на рис. 8.10 может быть, например, отражением движения нашей Галактики со скоростью порядка двухсот километров в секунду в направлении, обратном направлению вращения Галактики в районе Солнца.

Если принять характерную массу самых быстрых звезд AG300 порядка 0.3 Солнечной, найдем, что масса звезд фона не превышает $\sim 1.0\%$ от общей массы локального скопления галактик. Следует, конечно, отметить, что найденная нами оценка локальной плотности звезд фона является пока весьма неопределенной в силу ряда причин, главные среди которых — степень полноты AG300 и степень однородности звездного фона локального скопления галактик. Распад карликовых галактик в ходе их столкновения между собой и с галактиками-гигантами ведет к появлению сравнительно контрастных звездных потоков и фона свободных звезд скоплений [43, 79–81]. Поэтому локальная плотность межгалактических звезд может быть заметно больше средней в случае, когда Солнце попадает в такой поток галактических масштабов.

Изучение соседей нашей Галактики в пределах 13 Мпк продемонстрировало, что их характерная радиальная скорость заключена в пределах 200–400 км/с [82]. Разрушение таких галактик и потеря ими своих звезд являются вероятными причинами заполнения межгалактического пространства свободными звездами [83]. В итоге все галак-

Таблица 1. Данные из Gaia DR3 [13] для 63 звезд с $V_{\text{SGal}} \geq 500$ км/с

GDR3 ID	α , °	δ , °	ω , мсд	G , mag	T_{eff} , K	[Fe/H]
71309655549854080	53.59224	27.39584	7.5707	15.560	3428.0	−0.1304
101778050467398784	36.43417	23.70949	8.9732	15.735	3378.4	−0.0465
118636553018901248	48.52412	27.79204	7.0906	15.283	3510.4	−0.4595
139045756573808512	46.27319	36.99740	6.8156	15.774	3435.9	−0.5533
140319815672187008	44.22895	35.08352	4.2238	15.278	4003.4	−0.1511
185579390765231872	76.41360	35.81324	7.4120	15.588	3428.2	−0.2207
295721799844057728	24.48361	27.13745	22.9176	15.838	3003.7	−0.2988
298278851573463040	29.76650	27.92747	4.5053	15.499	3772.1	0.0654
301461594138594304	30.25238	30.83595	8.1747	15.677	3442.5	0.0167
384561583453755136	2.28729	42.83360	5.5244	16.093		
451427180510779136	39.68364	52.00968	7.7621	15.934		
460980974485934976	43.50803	58.38339	7.6526	15.664	3487.9	−0.1215
486021183573637248	88.61360	70.85440	5.0827	14.514	6068.0	−4.1162
671600913636322176	116.67779	18.31820	4.9762	15.261	3813.2	0.1080
958663883317793920	95.97196	42.87580	4.8318	15.424		
1061822400696509696	168.55612	68.82834	6.7190	14.816		
1134435282466919296	165.51772	81.96568	15.8264	15.824		
1203321747531837440	239.96355	19.22352	3.3158	15.385	4065.2	0.1277
1227763787936437632	216.55457	14.01541	6.6801	15.378	3595.5	−0.1164
1451976542670188160	207.90079	28.32882	8.4353	15.738	3411.8	0.3349
1841257466253265152	315.44724	25.00911	6.2584	15.783		
1928116685826146304	344.81241	37.61089	23.8813	14.553		
2011907580771393024	359.77570	61.38749	10.0088	15.479		
2081694752016507520	304.97168	45.74862	5.5360	15.284	3704.2	−0.0055
2229879644935269888	340.22015	71.61967	4.5382	15.325		
2365275121684416768	3.74558	−19.63124	7.8881	15.691	3474.5	0.1224
2381856890901926272	351.76221	−24.24261	11.2851	15.796		
2507972936192261632	30.85471	0.40484	6.1067	15.548	3576.1	0.0818
2678510071583725184	336.24615	1.05068	4.0562	14.993	4061.0	−0.1170
2828925843538552960	344.04465	16.47157	17.5177	15.602		
3001468183198140800	94.63031	−10.63223	4.5201	15.237	3896.8	0.1069
3051502593696680576	106.03419	−8.51326	6.2573	15.586	3468.9	−0.2370
3113552398538504192	102.79841	0.38556	3.9651	15.372		
3120252616236231680	95.86829	0.15694	16.5631	15.215		
3294619629797088384	73.25861	10.87692	5.8903	15.383		
3320184202856435840	89.10410	5.35934	123.1989	13.969		
3923188986919137664	177.01872	14.27379	7.0768	15.452	3427.6	−0.5682
4056420453085448320	267.67685	−29.97498	6.3699	15.396	3688.1	−0.1478
4135621848968014208	258.60718	−16.91111	5.9680	15.362	3603.7	−0.3038
4169985951009587584	264.65588	−6.17295	9.9054	16.007	3325.2	−0.0171
4185354306086304128	287.13049	−14.29782	4.3802	15.478	3612.7	−0.3498
4202505656701123840	285.27151	−10.20339	5.4222	14.411	4160.4	0.1387
4255635020637075072	283.44019	−3.87178	7.3117	15.662	3556.3	−0.2596
4286540986806313472	280.25912	7.29500	6.4380	15.212	3414.3	−0.1533
4318135419078001280	293.14517	14.24537	9.2333	15.595	3436.0	−0.1100

Таблица 1. Окончание

GDR3 ID	$\alpha, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	ω , мсд	G , mag	T_{eff} , K	[Fe/H]
4476929568399167232	275.29102	6.25211	4.8948	15.608		
4761243758998206208	76.55130	−60.35573	23.7943	16.175	2945.5	−0.3870
4775087744262465536	68.75396	−58.00059	5.4594	15.688	3422.5	−0.4466
5112062666328832512	53.63010	−15.11663	10.6525	15.555	3429.9	−0.2673
5114000074535737216	56.86290	−13.48659	5.2627	15.645		
5129921587022433920	36.16017	−20.92945	17.2711	15.888		
5166063908616390272	48.05496	−10.47316	6.1829	15.648	3387.3	−0.4029
5269617425550807168	119.15926	−70.64725	3.4952	15.412	3580.3	−0.5959
5454798754446091008	160.51881	−29.92814	7.1831	15.462		
5544743925212648320	123.11242	−35.49550	89.5064	14.346		
5709740415340475392	127.26099	−17.26705	6.0024	15.249	3778.8	−0.2877
5999591888268822528	232.56932	−45.02344	9.4517	15.965		
6097896886432620160	218.39101	−47.73183	7.3607	15.804	3326.8	0.0881
6306255164518133504	223.08987	−17.62204	10.1302	15.383	3491.1	−0.6549
6388075665896900608	350.57184	−68.55028	15.4346	15.007		
6707637313089673088	273.29376	−47.47193	4.2938	15.213		
6715312316559725824	283.12408	−42.96785	16.2385	15.797		
6756084097505643904	288.51306	−33.06128	16.3555	15.483		

тики оказываются в среде быстрых свободных звезд своих родительских скоплений.

Согласно табл. 1 практически все высокоскоростные звезды имеют малую яркость ($G \approx 15^m - 16^m$) и светимость ($M_G \approx 10^m$), что исключает оценку радиальной скорости более далеких и более слабых звезд. Привлечение скоростных звезд-гигантов высокой (до $\sim 100 L_\odot$ при $M \sim M_\odot$) светимости позволило найти 72 звезды с $v \geq 500$ км/с [84] в пределах ~ 5 кпк от Солнца. Эти звезды имеют малую металличность: $-3 \leq [\text{Fe}/\text{H}] < -1$. Это, вероятно, указывает, что большинство высокоскоростных звезд являются продуктами распада галактик малой массы местной группы галактик при их столкновениях между собой и галактиками-гигантами [25]. Таким образом, местное бедное скопление галактик, включающее Галактику и Андромеду в качестве двойного ядра, имеет обильную популяцию межгалактических звезд. В богатых скоплениях галактик доля межгалактических звезд доходит до половины [85].

Интересно, что 53 высокоскоростных звезды из 63 табл. 2 с $V_{\text{Gal}} > 500$ км/с имеют $L < 180^\circ$ (рис. 8.10). Эта асимметрия заслуживает особого внимания. С целью изучения ее причин были построены распределения высокоскоростных звезд по компонентам их пространственных скоростей относительно центра Галактики (UVW) (рис. 9).

Распределение по U оказалось почти однородным в интервале скоростей от -700 до $+750$ км/с с величиной медианной скорости ~ 0 . Распределение по W обнаружило небольшую концентрацию к медианной нулевой скорости при пределах: -700 и $+750$ км/с. Распределение по V этих звезд демонстрирует очевидные признаки бимодальности, 22 звезды почти равномерно распределены в интервале: $-444 \leq V$ (км/с) ≤ 950 , а остальная 41 звезда сосредоточена в интервале: $350 \leq V$ (км/с) ≤ 950 . Если звезды первого семейства обнаружили признаки равномерного распределения своих апексов по небесной сфере, то звезды высокоскоростного семейства ($V \geq 350$ км/с) сосредоточены в правой половине рис. 8.10 и рис. 10. То есть, наряду со сравнительно однородной средой скоростных звезд, в которую погружена наша Галактика, мы, вероятно, наблюдаем звездный поток с $350 \leq V$ (км/с) ≤ 950 с медианной скоростью ~ 650 км/с. Сдвиг первого семейства по V обусловлен вращением звезд диска Галактики. Среди генераторов этого потока стоит иметь в виду близкие галактики.

Очевидный сдвиг распределения скоростных звезд по V (рис. 9) примерно на 300 км/с в сторону положительных скоростей возможно, по крайней мере, частично отражает движение Солнца в поле “свободных” внегалактических звезд. Действительно, изучение движения Солнца относительно внегалактических сверхновых SNIa показало его смещение со скоростью ~ 370 км/с в направлении

Таблица 2. Параметры высокоскоростных звезд, вычисленные нами

GDR3 ID	$aA, ^\circ$	$aD, ^\circ$	$L, ^\circ$	$B, ^\circ$	$V_{\text{SGal}},$ км/с	$U,$ км/с	$V,$ км/с	$W,$ км/с	$dist,$ пк	$x,$ пак	$y,$ пак	$z,$ пак
5269617425550807168	299.6	66.1	285.0	-26.0	503.4	-117.2	-436.9	-221.1	286.1	60.8	-261.3	-99.4
4169985951009587584	85.5	6.0	46.6	9.7	508.5	-344.2	364.3	85.5	101.0	93.1	31.7	23.0
5454798754446091008	163.8	-26.1	90.1	-15.2	509.7	0.7	492.0	-133.4	139.2	4.7	-126.0	59.0
4775087744262465536	67.8	-59.3	88.4	23.0	510.2	-13.2	469.6	199.0	183.2	-5.8	-138.9	-119.3
5166063908616390272	226.9	15.8	150.1	-55.0	517.9	257.6	148.3	-424.1	161.7	-94.9	-22.0	-129.1
4476929568399167232	274.5	7.0	192.9	-12.1	521.7	497.2	-114.1	-109.5	204.3	164.8	115.8	34.0
5709740415340475392	132.4	-17.2	74.3	-8.4	525.2	-141.0	500.0	-77.2	166.6	-81.4	-140.9	36.0
671600913636322176	117.9	18.9	48.1	-14.6	528.6	-341.7	380.7	-133.2	201.0	-174.8	-71.0	69.3
1203321747531837440	58.3	-16.4	56.3	33.3	542.4	-251.9	377.1	297.6	301.6	175.1	113.4	217.8
2081694752016507520	131.0	-46.7	86.5	2.1	542.6	-33.5	541.2	20.3	180.6	23.6	178.3	16.8
5129921587022433920	218.9	19.0	140.3	-61.0	548.4	204.8	169.9	-479.5	57.9	-20.3	-8.1	-53.6
301461594138594304	218.4	-25.3	124.8	-22.4	553.3	292.0	419.9	-211.1	122.3	-81.5	68.1	-60.6
958663883317793920	272.8	-42.4	144.0	10.1	554.5	441.7	320.8	97.6	207.0	-199.0	30.3	48.0
3320184202856435840	91.5	10.3	43.2	4.7	555.7	-403.7	379.2	45.2	8.1	-7.4	-3.0	-1.4
298278851573463040	208.8	-25.5	117.9	-23.4	559.9	240.5	454.2	-222.1	222.0	-144.7	118.5	-119.6
2678510071583725184	337.9	4.8	236.7	60.0	573.1	157.2	-239.4	496.4	246.5	72.2	159.0	-174.0
6756084097505643904	110.5	32.8	31.9	-16.4	575.2	-468.3	291.9	-162.3	61.1	57.7	4.7	-19.7
2365275121684416768	183.6	22.4	80.8	-55.9	575.4	-51.7	318.7	-476.3	126.8	7.3	23.6	-124.3
4318135419078001280	114.0	-11.5	63.8	-2.1	583.4	-257.4	523.1	-21.6	108.3	69.2	83.2	-4.5
101778050467398784	34.3	26.1	352.1	37.6	607.2	-476.3	-66.3	370.7	111.4	-79.1	47.1	-62.8
4286540986806313472	99.8	-6.4	55.5	4.6	609.1	-344.0	500.3	48.7	155.3	121.4	95.7	15.2
3120252616236231680	91.2	2.8	46.2	7.4	611.3	-419.3	437.9	78.7	60.4	-52.2	-29.6	-6.5
3051502593696680576	284.5	8.0	203.8	-2.0	615.0	562.3	-248.0	-21.3	159.8	-118.8	-106.8	-3.0
295721799844057728	19.3	28.9	331.1	42.1	615.2	-399.9	-220.7	412.2	43.6	-25.6	25.2	-24.8
5544743925212648320	123.8	-35.3	78.9	0.8	616.7	-119.0	605.1	8.7	11.2	-3.2	-10.7	-0.2
4255635020637075072	283.5	-1.6	192.4	2.2	617.0	602.0	-132.9	23.3	136.8	118.7	67.8	-5.4
4135621848968014208	77.1	18.7	28.0	11.7	617.6	-534.0	283.6	125.6	167.6	162.6	17.9	36.4
2828925843538552960	342.8	16.7	264.8	51.8	627.0	35.3	-386.0	492.8	57.1	2.4	44.8	-35.3
384561583453755136	179.0	-38.4	102.1	-14.5	656.5	133.5	621.3	-164.7	181.0	-71.4	155.1	-60.0
1841257466253265152	138.4	-24.2	77.9	-9.9	658.9	-135.7	634.7	-113.6	159.8	50.4	146.6	-38.6
3294619629797088384	73.1	11.4	30.4	17.9	666.6	-547.0	321.3	204.6	169.8	-157.6	-23.4	-58.7
5112062666328832512	231.6	15.4	168.7	-54.3	680.6	389.1	77.5	-553.0	93.9	-54.8	-24.2	-72.3
140319815672187008	220.0	-33.4	128.6	-18.3	693.2	410.3	514.6	-217.8	236.8	-191.5	110.1	-85.2
6707637313089673088	93.4	49.6	5.3	-14.3	693.7	-669.4	62.2	-170.8	232.9	219.8	-53.8	-55.0
118636553018901248	49.0	28.8	358.0	26.1	736.1	-660.7	-23.1	323.8	141.0	-118.0	48.4	-60.2
4185354306086304128	287.5	-14.2	184.1	12.0	740.4	722.5	-52.3	153.4	228.3	208.4	84.1	-40.4
460980974485934976	48.7	57.5	336.8	0.8	747.2	-686.6	-294.7	9.9	130.7	-97.8	86.7	-1.7
4056420453085448320	87.3	31.5	17.4	-1.3	751.5	-716.9	224.7	-17.2	157.0	156.9	-0.9	-4.1
1451976542670188160	31.0	-26.0	64.4	59.1	754.3	-167.3	349.7	647.1	118.5	20.5	18.2	115.3
71309655549854080	234.9	-24.9	144.8	-20.6	758.9	580.3	410.0	-266.6	132.1	-115.7	37.8	-51.4
5999591888268822528	233.4	-43.7	134.3	-7.6	759.7	525.7	539.0	-100.6	105.8	90.6	-52.0	17.1
2381856890901926272	174.3	24.5	65.5	-58.0	766.5	-168.8	369.7	-649.9	88.6	23.3	17.5	-83.7
3923188986919137664	178.9	15.4	80.6	-54.8	772.2	-72.7	439.0	-631.1	141.3	-15.6	-44.7	133.1
1227763787936437632	217.5	16.3	150.6	-62.7	777.4	310.3	174.5	-691.0	149.7	64.4	7.9	134.9

Таблица 2. Окончание

GDR3 ID	$aA, ^\circ$	$aD, ^\circ$	$L, ^\circ$	$B, ^\circ$	$V_{\text{SGal}}, \text{ км/с}$	$U, \text{ км/с}$	$V, \text{ км/с}$	$W, \text{ км/с}$	$dist, \text{ пк}$	$x, \text{ пк}$	$y, \text{ пк}$	$z, \text{ пк}$
185579390765231872	256.5	-35.0	151.9	-2.7	777.7	685.3	366.0	-36.8	134.9	-132.5	24.4	-7.4
451427180510779136	223.1	-52.7	126.1	-4.1	782.7	459.6	631.2	-55.6	128.8	-96.7	83.5	-16.7
4761243758998206208	69.8	-61.3	90.1	28.3	790.7	1.4	696.3	374.7	42.0	-0.3	-33.9	-24.9
6715312316559725824	104.3	46.6	9.0	-19.6	803.6	-747.9	118.2	-269.3	61.6	58.1	-6.8	-19.3
1061822400696509696	351.3	-68.4	118.0	37.0	806.2	302.7	568.7	484.8	148.8	-73.6	72.9	106.9
2229879644935269888	153.8	-69.8	103.3	8.3	815.1	185.8	784.9	117.3	220.4	-84.2	199.0	43.3
6306255164518133504	224.4	-13.5	143.5	-34.4	836.0	554.8	410.2	-472.0	98.7	74.4	-27.7	58.7
2507972936192261632	26.4	1.0	3.8	62.1	840.4	-392.9	26.4	742.5	163.8	-81.6	33.0	-138.1
486021183573637248	270.1	-68.1	131.1	17.3	870.3	546.5	625.9	258.9	196.7	-146.4	110.9	70.6
3113552398538504192	102.8	1.3	45.3	0.0	875.0	-615.7	621.8	0.5	252.2	-212.6	-135.7	0.5
1928116685826146304	166.9	-36.9	97.0	-15.3	883.1	103.8	845.6	-232.2	41.9	-6.5	38.8	-14.4
139045756573808512	228.2	-35.4	137.7	-15.9	895.2	636.9	579.1	-245.7	146.7	-121.1	68.3	-46.8
1134435282466919296	323.3	-80.8	119.1	26.5	905.6	394.0	708.5	403.8	63.2	-31.7	41.5	35.5
4202505656701123840	102.7	13.3	35.5	-4.6	906.2	-735.0	525.2	-72.3	184.4	166.1	77.1	-21.7
6097896886432620160	220.1	-46.7	129.0	-9.6	927.5	575.6	710.8	-154.0	135.9	102.1	-85.2	27.5
5114000074535737216	55.4	-13.1	40.6	42.0	953.1	-537.9	461.2	637.4	190.0	-119.2	-52.0	-138.5
6388075665896900608	346.9	-67.6	122.9	39.2	1001.2	421.8	650.8	633.3	64.8	31.3	-31.8	-47.0
2011907580771393024	176.0	-62.7	108.7	1.0	1002.7	321.0	949.8	18.3	99.9	-44.9	89.2	-1.5
3001468183198140800	94.7	-10.6	49.1	10.3	1063.5	-685.5	790.3	190.9	221.2	-168.6	-135.6	-46.3

$L = 260^\circ \pm 20^\circ$, $B = 48^\circ \pm 20^\circ$, отмеченном на рис. 8.10 [53]. Возможно, это обстоятельство объясняет смещение распределения основной массы “свободных” звезд по V на рис. 9. Для поиска причин появления наблюдаемого на рис. 9 высокоскоростного потока со скоростью по $300 \leq V(\text{км/с}) \leq 650$ на рис. 8.10 нанесено положение близкого массивного скопления галактик Дева [53, 54]. Пока нет аргументов в пользу того, что этот скоростной поток как-то связан со скоплением Дева. “Простое” объяснение причин появления потока со скоростью около 500 км/с сводится к разрушению спутника Галактики, двигавшегося со скоростью порядка параболической на орбите Солнца в Галактике. Скорость звезд этого потока на бесконечности согласно (1) ~ 300 км/с. Этот поток нуждается в дополнительном изучении.

В поисках причин асимметрии распределения апексов “свободных” звезд (рис. 8.10) и при поиске источника возможно представленного на нем звездного потока естественно обратиться к сравнению химического состава их звезд. Характерные металличности быстрых звезд (табл. 1) $-0.6 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.35$ с максимумом при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.2$. Металличность звезд ЛМС близка к металличности быстрых звезд [86]. Не исключено, что избыток звезд в левой части рис. 8.10 является

следствием наличия звездного потока, рожденного недавним (7.5×10^6 лет назад) близким происхождением ($R_{\text{min}} \approx 15$ кпк ЛМС [87]). Необходимо отметить, что наблюдаемая металличность звезд с $v > 500$ км/с близка к металличности звезд балджа Галактики ($-1.0 \leq \frac{Z}{Z_\odot} \leq 0.5$) [88]. Это делает

вполне вероятным общность механизма образования звезд центральных областей нашей Галактики, короны ядра Галактики и свободных звезд местного скопления галактик.

Распределение галактик в окрестностях нашей Галактики неоднородно. В [89] находят, что близкие спутники Галактики расположены в некоем толстом супердиске с радиусом в несколько оптических радиусов нашей Галактики. Этот супердиск наклонен к диску Галактики примерно на 50° . Распределение апексов сверхскоростных звезд по небу (рис. 9) не обнаруживает корреляции с положением супердиска. Вероятно, роль галактик указанного диска в образовании межгалактических звезд недостаточно велика для того, чтобы быть обнаруженной в рамках очень ограниченной по числу нашей статистики звезд с $v \geq 500$ км/с.

Звезды с абсолютной скоростью выше ~ 500 км/с покидают нашу Галактику, образуя по-

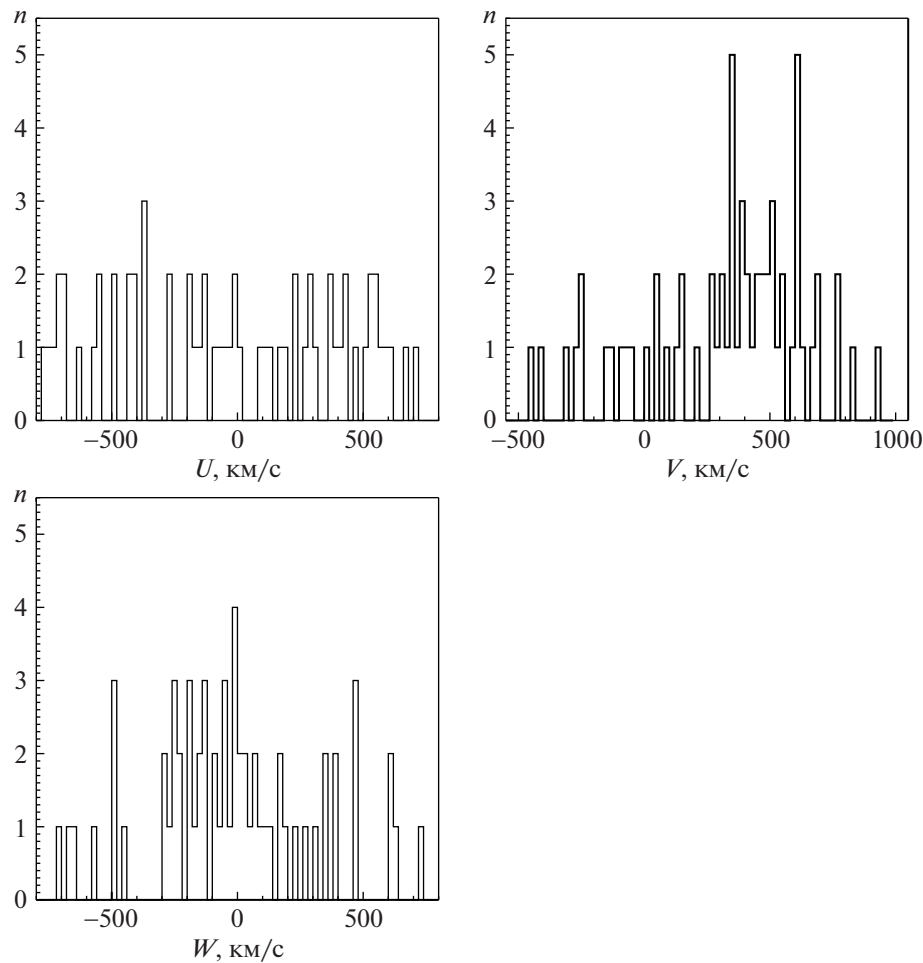


Рис. 9. Распределение звезд с $V_{\text{SGal}} \geq 500$ км/с по компонентам их скорости UVW.

ле межгалактических звезд. Обширное исследование высокоскоростных ($V_{\text{SGal}} \geq 500$ км/с) звезд Галактики было выполнено [90, 91]. Из почти двух миллионов звезд с известными скоростями, изученных ими, оказалось 414 звезд со скоростями, большими 500 км/с [90]. Расширение каталога до 7×10^6 звезд позволило найти три звезды с рекордными скоростями около 1200 км/с [91]. Быстрые звезды были найдены в широком диапазоне расстояний от центра Галактики, от 2 до 43 кпк. Очень важно, что изучение направлений движения двадцати высокоскоростных звезд относительно центра Галактики, который в силу наличия в ядре сверхмассивной черной дыры предполагается ускорителем, показало практически полную их симметрию [90]. Это означает, что часть высокоскоростных звезд, вероятно, являются внегалактическими, а некоторая часть в силу недооценки авторами параболической скорости на орбите Солнца не являются “свободными”, а находятся на орбитах с эксцентриситетами, близкими к единице. То есть они могут

быть представителями указанной выше короны ядра Галактики.

Конечно, список известных звезд с большими пространственными скоростями не ограничивается околосолнечной зоной Галактики. Список 39 звезд со скоростями более 275 км/с в пределах сферы с радиусом 112 кпк от Солнца приведен [92]. При всей остающейся неопределенности гравитационного потенциала Галактики звезды со скоростями выше ~ 400 км/с и расстояниями более ~ 70 кпк покидают Галактику, будучи, как правило, ускоренными, по мнению авторов, сверхмассивной черной дырой в ядре нашей Галактики. Возможная связь этих звезд с S-звездами ядра Галактики обсуждается с целью установления, по возможности, однозначного отождествления конкретных ускорителей изученных звезд [93]. Скорости отдельных звезд из списка [92] достигают величины ~ 700 км/с при расстоянии от центра Галактики ~ 110 кпк, что, на наш взгляд, допускает их внегалактическое происхождение. Список 20 высокоскоростных около га-

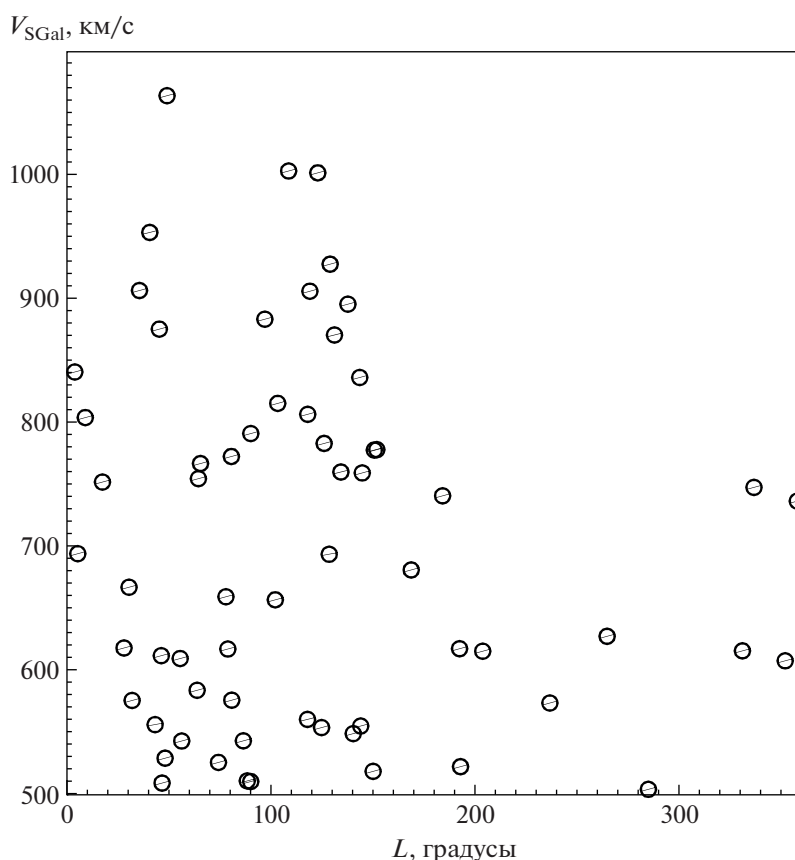


Рис. 10. Распределение апексов звезд с $V_{\text{SGal}} \geq 500$ км/с по галактической долготе.

лактических звезд со скоростями 600–1200 км/с приведен в [90]. Важно, что большинство этих звезд, как показывают направления векторов их скоростей, не связано с Галактикой. И, судя по величине наиболее быстрых звезд, они покидают локальное скопление галактик малой массы.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей работы является исследование скоростей звезд каталога Gaia DR3 из около-солнечной зоны с радиусом 300 парсек и связи между скоростями звезд и звездной структурой Галактики и окологалактического пространства. Для объяснения причин появления высокоскоростных звезд привлечены четыре сценария, включающие распад кратных систем и взаимодействие кратных систем со сверхмассивными черными дырами ядер шаровых звездных скоплений и галактик. Проведено сопоставление спектра скорости околосолнечных звезд и звездной структуры Галактики и скоплений Галактик.

Детальное исследование связи скоростей звезд каталога AG300 с картиной апексов их пространственных скоростей позволило найти звезды, представляющие свои родительские популяции:

галактический диск, балдж, звездное гало Галактики. Эта работа позволила идентифицировать звезды, ускоренные СМЧД в ядре Галактики. Они, имея эксцентриситеты своих орбит, близкие к единице, образуют звездную корону СМЧД, ядра Галактики. Существование таких звезд было предсказано Хиллсом (1988), но идентификация звездной короны СМЧД выполнена впервые. Такие короны должны быть у всех массивных галактик с СМЧД в их ядрах.

Звезды AG300 со скоростями менее ~ 500 км/с представляют звездные популяции нашей Галактики. Звезды со скоростями 500–3000 км/с заполняют пространство скоплений Галактик, а звезды со скоростями выше ~ 3000 км/с заполняют пространство между скоплениями галактик, создавая непрерывную и почти однородную звездную и, вероятно, планетную среду Вселенной. То есть идентификация звезд со сверхвысокими скоростями позволяет найти в нашей Галактике не только звезды других галактик, но, потенциально, и звезды других скоплений галактик.

Отметим, что в каталоге Gaia DR3 имеется много звезд с недостаточно надежно измеренными лучевыми скоростями. Так, ошибки лучевой скорости в нем могут превышать несколько де-

сятков км/с. Понятно, что для высокоскоростных звезд эта величина в относительном выражении составляет не более 20%. Поэтому мы использовали только звезды с относительной ошибкой лучевой скорости, не превышающей указанные 20%.

В табл. 1 и табл. 2 приведены основные параметры звезд с пространственными скоростями относительно центра Галактики выше 500 км/с. Основная их часть имеет температуру 3300–4000 К и принадлежит, судя по светимости, к числу звезд главной последовательности, имея массы $0.3\text{--}0.5M_{\odot}$. Последнее естественно, поскольку большая часть звезд, согласно функции их масс, имеет именно такие массы. Эффекты наблюдаемой селекции пока препятствуют обнаруживать хорошо, согласно функции масс, представленные высокоскоростные коричневые карлики и свободные планеты. Обилие металлов быстрых звезд, как правило, ниже солнечного, что отражает, вероятно, их образование в маломассивных галактиках местного скопления галактик, разрушенных в ходе столкновений галактик в прошлом. Характерное расстояние до быстрых звезд AG300 ~ 100 пк. Расстояние до ближайшей быстрой звезды в табл. 1 с $m_G \approx 14^m$ всего около восьми парсек.

Стоит специально отметить, что наряду с указанными выше звездными популяциями Галактики должны существовать и соответствующие звездным населениям коричневых карликов и планет. Наблюдаемая функция масс [94] делает два последних семейства сопоставимыми по численности с численностью звезд малых масс. Их представители найдены в солнечной окрестности [95] и балджа [96]. Простые оценки показывают, что планеты с массами порядка массы Юпитера могут быть потеряны своими системами при больших полуосях их орбит $a \geq 100R_{\odot}$ ($P_{\text{orb}} \geq 100$ дней). Действительно, изучение планетных систем показало, что эксцентриситеты орбит планет уже при орбитальном периоде, большем трех дней, становятся ~ 0.3 , а при периодах более 100 дней они приближаются к единице [97]. Это означает, что планеты в родительских системах активно взаимодействуют друг с другом и часть планет на неустойчивых орбитах теряется своими звездами, образуя поле свободных планет Галактики. Далее планеты и коричневые карлики могут участвовать в описанных выше процессах ускорения наряду со звездами и формировать соответствующие популяции галактических и внегалактических скоростных объектов.

Девятилетнее изучение микролинзирования планетами и звездами балджа нашей Галактики позволило надежно ценить функцию масс свободных планет в интервале $10^{-6} \leq M_p/M_{\odot} \leq 0.02$

[81, 95]. Она оказалась близкой к универсальной функции масс космических объектов: $dN/dM_p \sim M_p^{-2}$ [98]. Оценка общей массы свободных планет гало Галактики оказалась около $0.25M_{\text{Jupiter}}$ на одну звезду [95], что сопоставимо со средней массой планет звездных планетных систем. То есть планетообразование около звезд балджа нашей Галактики активно, причем заметная доля планет, возникающих около звезд, оказывается в результате взаимодействия планет между собой свободными, создавая планетный балдж и гало Галактики. Очевидно, что достаточно плотное поле свободных планет существует и в объеме звездного диска Галактики [99]. То есть процесс планетообразования около звезд сопровождается созданием поля свободных планет, кинематика и морфология которого близки к кинематике и морфологии соответствующих звездных компонентов, так как скорости потерянных планет относительно родительских звезд невелики: до 50 км/с.

Выполненное на основе каталога AG300 исследование кинематики высокоскоростных звезд околосолнечной окрестности с радиусом 300 парсек позволило изучить морфологические свойства этого компонента. Показало, что она состоит из звезд диска Галактики, звезд балджа и короны ядра Галактики, звезд гало Галактики и внегалактических звезд. Звезды короны ядра рождены в центральных областях Галактики при вероятном взаимодействии двойных звезд со сверхмассивной черной дырой в центре. Корона ядра состоит из двух потоков: к центру и от центра Галактики и является вероятным продуктом ускорения звезд в ядре до скоростей, недостаточных для ухода из Галактики. Корона ядра является звездным аналогом кометно-астероидного облака Оорта, рожденного Юпитером. Внегалактические звезды со скоростями выше ~ 500 км/с принадлежат двум компонентам. Один из них заполняет межгалактическое пространство локального скопления галактик с Андромедой и нашей Галактикой в его ядре. Второй компонент демонстрирует наличие некоторого звездного потока звезд со скоростями 600–1000 км/с относительно Центра Галактики.

Распределение по массам быстрых звезд AG300 почти не зависит от их скорости. В качестве индикатора массы мы принимаем эффективную температуру этих звезд малой массы, полагая их звездами главной последовательности. Звезды со скоростями 250–500 км/с, принадлежащие короне ядра Галактики (рис. 8.4–8.9), имеют температуру в интервале 3000–6800 К, что отвечает массам $0.3\text{--}1.1M_{\odot}$. Температуры звезд AG300 с $v > 500$ км/с заключены в интервале 3300–4500 К, что отвечает массам $0.3\text{--}0.75M_{\odot}$.

Выполненное нами исследование близких к Солнцу звезд каталога AG300 ставит новые интересные задачи:

1. Использовать метод апексов для изучения звездных потоков звезд диска и выяснения природы этих потоков.

2. Изучить динамику звезд и свойства звезд звездной короны СМЧД ядра нашей Галактики. Судя по их скоростям в окрестностях Солнца, скорость, которую они получили при распаде двойных в ядре Галактики, $\sim 10^3$ км/с. Это соответствует распаду двойных с большими полуосями исходных орбит менее 10^{17} см в поле СМЧД.

3. Просканировать орбиты звезд со скоростями, превышающими 500 км/с, с целью выявления среди них тех, которые не принадлежат локальному скоплению галактик со сравнительно малой массой и низкой ~ 300 км/с скоростью освобождения. Отметим, что скорость ~ 1000 км/с достаточна, чтобы за Хаббловское время преодолеть расстояние до ближайших скоплений галактик.

БЛАГОДАРНОСТИ

В этой работе использовались данные миссии Gaia Европейского космического агентства (ESA) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные Консорциумом обработки и анализа данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Финансирование DPAC было предоставлено национальными учреждениями, в частности учреждениями, участвующими в Многостороннем соглашении Gaia. Веб-сайт миссии Gaia: <https://www.cosmos.esa.int/gaia>. Веб-сайт архива Gaia: <https://archives.esac.esa.int/gaia>. Авторы благодарят за полезные консультации А. Засова и О. Сильченко.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Blaauw, *BAIN* **15**, 265 (1961).
2. I. Iben, A. Tutukov, *Astrophys. J. Supl. Ser.* **54**, 335 (1984).
3. P. Hut, J. Bahcall, *Astrophys. J.* **268**, 319 (1983).
4. V. Gvarnadamadze, A. Gualandris, S. Portegies Zwart, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **396**, 570 (2009).
5. J. Hills, *Nature* **331**, 687 (1988).
6. G. Dremova, V. Dremov, A. Tutukov, *Astron. Rep.* **58**, 291 (2014).
7. G. Dremova, V. Dremov, A. Tutukov, *Astron. Rep.* **63**, 862 (2019).
8. G. Dremova, V. Dremov, A. Tutukov, *Astron. Rep.* **51**, 495 (2007).
9. H. Li, C. Du, J. Ma, et al. *Astrophys. J.* **933**, 13 (2022).
10. W. Brown, M. Geller, S. Kenyon, *Astrophys. J. Lett.* **622**, L33 (2005).
11. S. Kenyon, B. Bromley, W. Brown, et al., *Astrophys. J.* **793**, 122 (2014).
12. W. Brown, M. Lattanzi, S. Kenyon, et al., *Astrophys. J.* **866**, 39 (2018).
13. A. Vallenari, A. Brown, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne et al., *Astron. and Astrophys.* **674**, A1 (2023).
14. W. Schuster, L. Parrao, M. Contreras Martinez, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **97**, 951 (1993).
15. J. Bovy, H.-W. Rix, E. Schially, et al., *Astrophys. J.* **823**, 30 (2016).
16. A. Tutukov, M. Sizova, S. Vereshchagin, *Astron. Rep.* **64**, 827 (2020).
17. I. Kushniruk, T. Bensby, S. Feltzing, et al., *Astron. and Astrophys.* **638**, 154 (2020).
18. I. Kushniruk, T. Schirmer, T. Bensby, *Astron. and Astrophys.* **608**, 73 (2017).
19. A. Тутуков, Н. Чупина, С. Верещагин, *Астрон. журн.* **99**, 991 (2022).
20. R. Giribaldi, R. Smiljanic, *Astron. and Astrophys.* **673**, A18 (2023).
21. R. Schönrich, J. Binney, W. Dehnen, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **403**, 1829 (2010).
22. A. Queiroz, F. Anders, C. Chiappini, et al., *Astron. and Astrophys.* **673**, A155 (2023).
23. A. Tutukov, B. Shustov, D. Wiebe, *Astron. Rep.* **44**, 711 (2000).
24. M. Joyce, Ch. Johnson, M. Marchetti et al., *Astrophys. J.* **946**, id.28 (2023).
25. A. Tutukov, *Astron. Rep.* **63**, 79 (2019).
26. S. Feutzing, D. Feuillet, *astro-ph/2303.00016* (2023).
27. J. Han, Ch. Conroy, Bebol Johnson, *Astron. J.* **164**, 249 (2022).
28. A. Tutukov, A. Fedorova, *Astron. Rep.* **55**, 383 (2011).
29. S. McGaugh, P. van Dokkum, *Research Notes of the AAS* **5**, 23 (2021).
30. J. Samuel, A. Wetzel, S. Shapman, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **504**, 1801 (2021).
31. J. Hills, *Astron. J.* **102**, 704, (1991).
32. G. Dryomova, V. Dryomov, A. Tutukov, *Balt. Astron.* **25**, 280 (2016).
33. G. Dryomova, V. Dryomov, A. Tutukov, *Astron. Rep.* **62**, 971 (2018).
34. D. Chu, T. Do, A. Ghez, *astro-ph/2303.16977* (2023).
35. M. Ishchenko, M. Sobolenko, D. Kuratova, et al., *astro-ph/2304.02311* (2023).
36. I. Iben, A. Tutukov, *Astrophys. J.* **491**, 303 (1987).
37. P. Neunteutel, M. Kruckow, Geirer Sebal, *Astron. and Astrophys.* **646**, L8 (2021).
38. J. Hills, *Astrophys. J.* **97**, 222 (1989).
39. Y. Ni, J. Di Mateo, N. Chen, *Astrophys. J.* **940**, 49 (2022).

40. *E. Hammerstein, S. van Velzen, S. Gezari*, *Astrophys. J.* **942**, 33L (2023).
41. *T. Cabrera, C. Rodriguez*, *Astrophys. J.* **953**, 18 (2023).
42. *A. Bajkova, A. Smirnov, V. Bobylev*, *astro-ph/2302.03048* (2023).
43. *A. Tutukov, S. Vereshchagin, M. Sizova*, *Astron. Rep.* **65**, 1085 (2021).
44. *S. Ortega-Martinez, A. Obreja, R. Dominguez-Tenreiro*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **516**, 197 (2022).
45. *D. Wiebe, A. Tutukov, B. Shustov*, *Astron. Rep.* **42**, 1 (1998).
46. *R. Lucchesi, C. Lardo, P. Tablonka, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **511**, 100 (2022).
47. *L. Guzzo*, *astro-ph/0102062* (2001).
48. *A. Aguado-Barahona, J. Rubino-Martin, A. Farragamo, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **659**, 126 (2022).
49. *C. Kieley, K. Venn, F. Sestito, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **505**, 1239 (2021).
50. *L. Costantin, P. Perez-Gonzalez, J. Mendez-Abren, et al.*, *Astrophys. J.* **929**, 121 (2022).
51. *S. Torres, A. Rebassa-Mansergas, M. Camisassa*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **502**, 1753 (2021).
52. *F. Combes*, *astro-ph/2302.12913* (2023).
53. *Ch. Gordon, K. Land, A. Slosar*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **387**, 371 (2008).
54. *К. Аллен Астрофизические величины* (М., Мир, 1977).
55. *D. Makarov, S. Khoperskov, D. Makarov, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **521**, 3540 (2023).
56. *J. Kadar, C. Pilachewski, Ch. Johnson, et al.*, *Astrophys. J.* **940**, 78 (2022).
57. *A. Deason, V. Belokurov, J. Sanders*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **490**, 3428 (2019).
58. *A. Tutukov, A. Fedorova*, *Astron. Rep.* **60**, 16 (2016).
59. *G. Limberg, S. Souza, A. Perez-Villegas*, *Astrophys. J.* **935**, 109 (2022).
60. *A. Carrillo, A. Deason, A. Fattahi, et al.*, *astro-ph/2306.00770* (2023).
61. *A. Carrillo, A. Deason, A. Fattahi, et al.*, *astro-ph/2306.00770* (2023).
62. *S. Balberg, G. Yassur*, *Astrophys. J.* **952**, 149 (2023).
63. *S. Koposov, D. Erkol, T. Li, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **521**, 4936 (2023).
64. *T. Fritz, A. Di Cintio, G. Battaglia, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **494**, 5178 (2020).
65. *Z. Li, Y-Z. Qian, J. Han, et al.*, *Astrophys. J.* **894**, 10L (2020).
66. *A. Bajkova, V. Bobylev*, *Astron. Letters* **42**, 567 (2016).
67. *S. Recchia, S. Gabici, F. Aharonian, et al.*, *Astrophys. J.* **914**, 135 (2021).
68. *S. Kenyon, B. Bromley, W. Brown, et al.*, *Astrophys. J.* **864**, 130 (2018).
69. *H. Koppelman, A. Helmi*, *Astron. and Astrophys.* **694**, 136 (2021).
70. *Y. Sofie, Y. Tutui, M. Honma, et al.*, *Astrophys. J.* **523**, 136 (1999).
71. *Y-B. Li, A. Luo, Y-J. Lu, et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **252**, 3 (2021).
72. *D. Zaritsky, E. Olszewski, R. Schommer, et al.*, *Astrophys. J.* **345**, 750 (1989).
73. *J. La Fortune*, *astro-ph/2307.00397* (2023).
74. *Y. Tian, P-Ch. Yn, P. Li, et al.*, *Astrophys. J.* **910**, 56 (2021).
75. *J. Sorce, R. Mohayaee, M. Aghanim, et al.*, *astro-ph/2301.01305* (2023).
76. *E. Patel, K. Mandel*, *astro-ph/2211.15928* (2022).
77. *R. van der Marel*, *Int. Astron. Union Symp.* **311**, 1 (2015).
78. *C. de Vanconleers, R. Leach*, *Publications Astron. Soc. Pacific* **93**, 190 (1981).
79. *K. Malhan, R. Ibata, S. Sharma*, *Astrophys. J.* **926**, 107 (2022).
80. *S. Ahad, Y. Bahe, H. Hoekstra*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **518**, 3685 (2023).
81. *H. Joo, J. Jee*, *Nature* **613**, 37 (2023).
82. *K. I. Banik, H. Zhao*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **473**, 4033 (2018).
83. *E. Bortolas*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **511**, 2885 (2022).
84. *E. Caffau, L. Monaco, P. Bonifacio, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **638**, 122 (2020).
85. *M. Arnaboldi, D. Gerhard*, *Front. Astron. Space Sci.* **972283A** (2022).
86. *V. Hocde, R. Smolec, P. Moskalik, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **671**, 157 (2023).
87. *D. Erkal, T. Li, S. Koposov, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **481**, 3148 (2018).
88. *T. Bensby, S. Feltzing, A. Gould, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **605**, 89 (2017).
89. *X. Zhao, G. Mathews, L. Philips, et al.*, *astro-ph/2302.05774* (2023).
90. *T. Marchetti, E. Rossi, A. Brown*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **490**, 157 (2019).
91. *T. Marchetti, E. Rossi, A. Brown*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **515**, 767 (2022).
92. *B. Bromley, S. Kenyon, W. Brown, et al.*, *Astrophys. J.* **868**, 25 (2018).
93. *Г. Дремова, В. Дремов, А. Тутуков*, в печати (2023).
94. *T. Sumi, N. Koshimoto, D. Bennett, et al.*, *astro-ph/2303.08280* (2023).
95. *A. Gould, Y-H. Ryu, J. Yee, et al.*, *Astron. J.* **166**, 100 (2023).
96. *N. Koshimoto, T. Sumi, D. Bennett, et al.*, *Astron. J.* **166**, 107 (2023).
97. *S. Barros, O. Demangeon, E. Armstrong*, *Astron. and Astrophys.* **673**, 4 (2023).
98. *B. Shustov, A. Tutukov*, *Astron. Rep.* **62**, 724 (2018).
99. *N. Miret-Roig*, *Astrophys. & Space Sci.* **368**, 17 (2023).

KINEMATICS OF HIGH-SPEED STARS WITHIN 300 PCS FROM THE SUN ACCORDING TO GAIA DR3

A. V. Tutukov^a, N. V. Chupina^a, and S. V. Vereshchagin^a

^a*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The kinematics of stars from the solar neighborhood with a radius of 300 pc has been studied using the Gaia DR3 data. Our sample includes $n = 970\,171$ stars – AG300 (A – ensemble, G – Gaia, 300 – radius of the studied zone in pc). The kinematics of these stars reflects the morphology of the main stellar populations of the Galaxy: the stellar disk, bulge, halo, and stellar corona of a supermassive black hole (SMBH). The presence of stars in AG300 with velocities exceeding the escape velocity from the Galaxy indicates the presence in the circumsolar space of extragalactic stars belonging to the stellar component of the local cluster of galaxies. It is shown that the known mechanisms of acceleration of the spatial motion of stars make it possible to create a stellar halo of galaxies, a stellar corona of SMBH in its core, an intergalactic stellar medium of galaxy clusters, and spaces between galaxy clusters. The AG300 catalog makes it possible to identify representatives of all named components.

Keywords: stellar streams, astrometry, solar neighborhoods, Gaia DR3 catalog