

МЕТАЛЛИЧНОСТЬ И КИНЕМАТИКА ОКОЛОСОЛНЕЧНОГО ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ ГАЛАКТИКИ

© 2024 г. А. В. Тутуков¹, Н. В. Чупина¹, С. В. Верещагин^{1,*}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: svvs@ya.ru

Поступила в редакцию 17.01.2024 г.

После доработки 19.02.2024 г.

Принята в печать 11.03.2024 г.

Продолжено исследование кинематики и генетики звездных популяций Галактики в пределах сферы радиусом 300 парсек на основе каталога Gaia (AG300). Основное внимание уделено химическому составу и генетике звезд короны ядра (гало) Галактики с высокоэллиптическими орбитами и звезд с гиперболическими орбитами из окрестностей Солнца. Рассмотрена возможная роль различных механизмов ускорения пространственного движения звезд в формировании звездной короны (гало) Галактики и звезд с высокими гиперболическими ($v > 500$ км/с) скоростями в окрестностях Солнца. Взрывы сверхновых звезд в тесных двойных и распад неустойчивых тесных тройных звезд предложен в качестве возможных механизмов ускорения этих звезд. Обилие железа в звездах короны совпадает с обилием железа в шаровых скоплениях, что является аргументом в пользу их родства. Показано, что около 7% звезд низкой металличности ($[Fe/H] < 3$), судя по положению их апексов, могут принадлежать «первым» звездам Галактики, либо они продукт распада спутников Галактики малой массы.

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

DOI: 10.31857/S0004629924050069 **EDN:** JNWMLE

1. ВВЕДЕНИЕ

Продолжено исследование кинематики и морфологии звезд из окрестностей Солнца с радиусом 300 парсек на основе каталога Gaia (AG300) [1]. Каталог AG300 [1] составлен из звезд, выбранных из Gaia по следующим критериям (обозначения параметров взяты из описания Gaia DR3 Part 1. Main source, I/355/gaiadr3): параллакс $\rho_{\text{plx}} > 3.3$ мсд (взяты звезды в пределах ≈ 300 пк от Солнца), звездная величина G_{mag} — не пусто, параметр $\text{RUWE} \leq 1.4$, ошибки собственного движения и параллакса $e_{\text{pmRA}} \leq 0.1$ мсд/год, $e_{\text{pmDEC}} \leq 0.1$ мсд/год, $e_{\text{plx}} \leq 0.1$ мсд соответственно, относительная ошибка лучевой скорости $e_{\text{RV}}/\text{RV} \leq 0.2$. По данным критериям отобрано 970771 звезд — каталог AG300. Каталог AG300 дал возможность изучить кинематику звезд галактического диска и выделить два хорошо представленных компонента Галактики: звезды короны ядра и «свободные» звезды с высокими (> 500 км/с) скоростями. Звезды короны ядра имеют орбиты с высокими эксцентриситетами вокруг центра Галактики. Положения их апексов сосредоточены на небесной сфере в направлениях центра и антицентра Галактики в областях с угловыми радиусами $\sim 10^\circ$. Апексы высокоскоростных ($v > 500$ км/с) звезд продемонстрировали наличие двух популяций. Одна показала равномерное

распределение по небесной сфере, другая — признаки потока, совпадающего по направлению с направлением движения звезд диска Галактики. В нашей предыдущей работе [1] мы назвали их звездами короны ядра Галактики, атрибутируя тем самым их генетику. Однако, как будет показано ниже, металличность этих звезд более разнообразна, чем металличность звезд балджа и центральных областей Галактики, а их генетика остается не вполне ясной. Поэтому в настоящей статье мы используем термины звезды короны ядра Галактики и звезды гало Галактики как синонимы.

Звезды диска Галактики разделены большими расстояниями, в 10^8 раз превосходящими их размеры. Это делает редкими их сближения в пространстве, что способствует сохранению их орбит, как правило, с малыми эксцентриситетами. Редкие парные сближения способны лишь незначительно увеличить эксцентриситеты их орбит до ~ 0.2 и, как показало численное исследование модели N точек [2], увеличить толщину звездного диска до $\sim 40\%$ его размера. Изучение апексов звезд AG300 демонстрирует звездный диск Галактики в районе солнечной орбиты примерно такой же толщины [1]. Отметим, что два кинематически выделенных семейства звезд AG300 (звезды короны ядра и быстрые «сво-

бодные» звезды с пространственной скоростью относительно ГЦ ($v > 500$ км/с), вероятно, не могут быть объяснены в рамках классического сценария, описывающего эволюцию звездного диска. По этой причине возникла задача более детально рассмотреть связь их металличности и кинематики для установления природы этих звезд.

Для статистических оценок по выборкам звезд из каталога AG300 необходимо иметь представление о степени полноты данных Gaia для окосолнечных звезд. Для этого на рис. 1 представлены распределения по расстоянию от Солнца указанных выше популяций звезд AG300. На рис. 1 представлены: все звезды каталога AG300 (черным), звезды гало (зеленым), низкометаллические (голубым), высокоскоростные (розовым). Апексы звезд короны ядра (гало) расположены в области с координатами $|L - 180^\circ|, \delta L, \delta B \leq 30^\circ$. Как уже говорилось, звезды с $[Fe/H] < -3$ мы называем низкометаллическими, быстрыми называем звезды с $v > 500$ км/с. Оценка полноты AG300 сделана из предположения однородности распределения и средней плотности звезд приблизительно 1 пк^3 [3, 4, 5, 6].

Каталог Gaia DR3 включает информацию о расстояниях и видимых звездных величинах m_G . Это позволяет оценить по стандартной процедуре абсолютные звездные величины M_G . Большинство звезд AG300 являются звездами главной последовательности, что делает возможным оценить массы этих звезд (M_{MS}). Представление графических данных для звезд с $4 \leq M_G \leq 14$ [7] и звезд с $-3 \leq M_G \leq 14$ [8] аналитической аппроксимацией приводит к формуле:

$$\lg \frac{M_{MS}}{M_\odot} = 0.52 - 0.11 M_G \quad (1)$$

для звезд главной последовательности с массами $0.1 \leq \frac{M_{MS}}{M_\odot} \leq 10$. Большинство звезд AG300, принадлежащие к звездам короны ядра Галактики и быстрым ($v > 500$ км/с) звездам, имеют M_G в указанном выше интервале и массы (согласно (1)) меньше Солнечной. Абсолютная звездная величина звезды главной последовательности теперь может быть оценена по ее массе:

$$M_G = 4.7 - 9.1 \cdot \lg \frac{M}{M_\odot} \text{ (mag)} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) использованы при анализе звезд AG300 и построении рис. 2.

Весьма вероятно, что в ходе своего формирования Галактика поглощала галактики — близкие спутники. Поэтому часть звезд Галактики могла возникнуть в процессе поглощения из этих спутников. Знание

химического состава спутников становится необходимым при анализе металличности звезд Галактики. Изучение металличности спутников нашей Галактики [9–12] с массами звездной составляющей $10^3 - 10^9 M_\odot$ позволяет предложить следующее выражение для связи металличности спутника с его массой:

$$[Fe/H] = -3.4 + 0.3 \lg \frac{M_g}{M_\odot} \quad (3)$$

Это соотношение, в частности, показывает, что для объяснения причин появления в Галактике звезд с $[Fe/H] \leq -3$, хорошо представленных в AG300, необходимо либо обращение к самым ранним стадиям ее эволюции, либо к поглощению спутников с массами, меньшими $\sim 10^3 M_\odot$. Обсуждению причин появления звезд низкой металличности посвящена четвертая глава настоящей работы.

Для анализа эволюции металличности галактик со временем необходима наблюдательная информация о металличности галактик. Изучение зависимости металличности от звездной составляющей массы галактик при $z \approx 2.5$ [13], что отвечает возрасту галактик $\sim 2 \cdot 10^9$ лет, показало, что при

$9 \leq \lg \frac{M_g}{M_\odot} \leq 11$ выполняется соотношение:

$$[Fe/H] = -4.1 + 0.33 \cdot \lg(M_g/M_\odot) \quad (4)$$

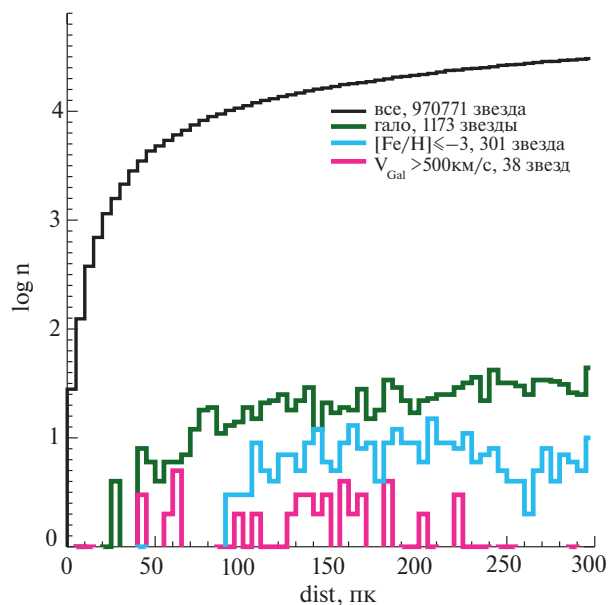


Рис. 1. Распределения звезд по расстоянию от Солнца. Показаны все звезды каталога AG300 (черным), звезды гало (зеленым), низкометаллические (голубым), высокоскоростные (розовым).

Это соотношение, как продемонстрировало сравнение с результатами других авторов в пределах дисперсии оценок $[\text{Fe}/\text{H}]$, справедливо при $1.6 \leq z \leq 5.0$. Следовательно, нужно иметь в виду, что при оценке металличности и массы звезд других галактик, поглощенных нашей Галактикой на ранних стадиях эволюции, разница составляет ~ 0.7 для металличности старых (3) и молодых (4) галактик. Последние почти в сто раз массивнее старых галактик при одинаковых $[\text{Fe}/\text{H}]$. Кроме того, при анализе химического состава звезд нужно иметь в виду, что массивные галактики имеют значительную разницу в металличности центральных и периферийных областей. Например, для нашей Галактики она достигает $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0.7$ [14].

Анализ кинематики звезд AG300, выполненный нами ранее, показал наличие нескольких кинематически выделенных семейств звезд [1]. Основная часть звезд AG300 представлена звездами диска Галактики, размеры которого диктуются начальным угловым моментом протогалактического вещества. Другой, хорошо населенный компонент AG300, — это звезды короны ядра (гало) Галактики, число которых достигает ~ 1500 . Звезды короны ядра представлены двумя почти равными по численности семействами звезд, движущихся к центру и антицентру Галактики по орбитам высокой ~ 0.8 эллиптичности. Третий компонент AG300 включает 76 высокоскоростных ($v > 500$ км/с) звезд. Указанное

значение пространственной скорости относительно ЦГ делает их «свободными» от гравитационной связи с Галактикой.

Для оценки степени полноты каталога AG300 построен рис. 1. Шкала высоты в окрестности Солнца звездного диска Галактики для М-карликов, представляющих согласно функции масс большинство звезд, превышает ~ 300 пк [5]. Это позволило считать распределение М-карликов однородным в пределах 300 пк от Солнца. На рис. 1 показана зависимость от расстояния от Солнца полного числа звезд нескольких выбранных нами для детального изучения их химического состава звездных населений AG300. При средней плотности звезд в пространстве ~ 1 пк $^{-3}$ оценка полного числа звезд в сфере с радиусом 300 пк составляет $\sim 10^7$, что почти на порядок превышает число звезд, включенных в AG300 (рис. 1). Это обстоятельство необходимо принимать во внимание при оценке числа звезд в Галактике, опираясь на численность каталога AG300. Фактически все оценки численности звезд, выполненные на основе каталога AG300, представляют собой только нижнюю границу численности соответствующих звездных популяций в Галактике, что осложняет наши количественные оценки.

На рис. 2 представлены распределения по массам указанных выше звездных населений в AG300. Массы оценены по абсолютным звездным величинам M_G

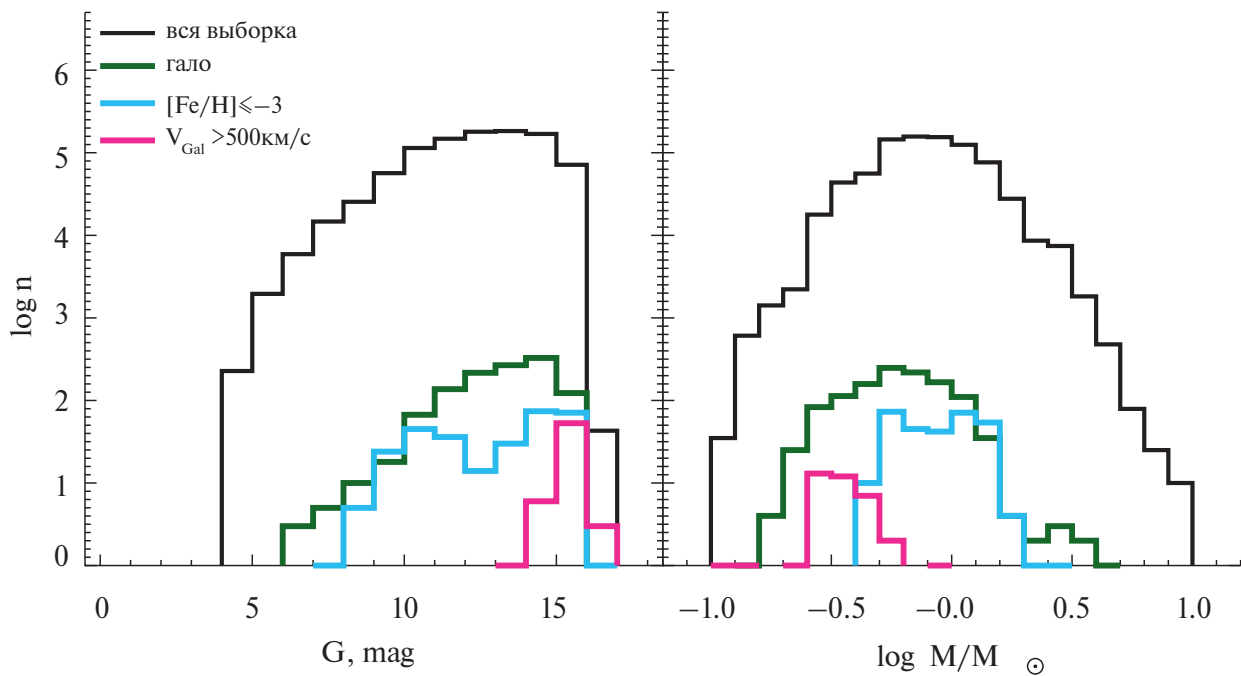


Рис. 2. Распределение числа звезд по звездной величине G (левая панель) и массе (правая панель). Значения $\lg M_g / M_\odot$ определены, исходя из предположения, что звезда принадлежит главной последовательности.

с помощью соотношения (1). Полагается, что все звезды являются звездами главной последовательности. Естественно, что основная часть звезд каталога AG300 имеют массы, близкие к Солнечной массе. Уменьшение числа звезд с массами, меньшими Солнечной, предопределяется неполнотой каталога Gaia.

Соотношение (1) показывает, что звезда с массой $0.1M_{\odot}$ имеет $M_G \approx 13.8^m$. Видимая звездная величина звезды с массой $M \approx 0.1M_{\odot}$ на границе выбранного нами предельного расстояния от Солнца ~ 300 парсек равна $m_G \approx 21^m$, что близко к предельной звездной величине каталога Gaia также равной $\sim 21^m$. Следовательно, наш ансамбль AG300 условно полон для звезд главной последовательности с массами, большими $\sim 0.12M_{\odot}$. Поэтому указанное выше малое количество звезд AG300 по сравнению с ожидаемым (рис. 1) и уменьшение числа звезд с уменьшением массы при $M \leq 0.5M_{\odot}$ на рис. 2 обусловлено не малой их яркостью, а эффектами наблюдаемой селекции Gaia. При оценке распределения звезд AG300 по массе (рис. 2, правая панель) следует иметь в виду, что распределение звезд с массами $0.1M_{\odot} - M_{\odot}$ может быть представлено функцией $dN/dM \sim M^{-1.3}$ [16]. Большинство этих звезд имеет время жизни, превышающее Хаббловское время. Уменьшение числа звезд при $M \leq 0.5M_{\odot}$ на рис. 2 является следствием неполноты Gaia и, следовательно, и AG300 при $dist \geq 50$ пк (рис. 1).

Уменьшение числа более массивных звезд, чем Солнце, с их массой (рис. 2, правая панель) задается начальной функцией масс этих звезд и сокращаемым временем их жизни на главной последовательности с ростом массы. Большинство интересующих нас в данной работе семейств имеют массы звезд, как правило, меньшие Солнечной массы. Обращает на себя внимание низкая средняя масса $\sim 0.3M_{\odot}$ высокоскоростных звезд ($v > 500$ км/с) относительно центра Галактики. Вероятная причина этого обстоятельства будет обсуждена в третьей главе, это, вероятно, механизм ускорения пространственного движения таких звезд.

2. ЗВЕЗДЫ КОРОНЫ ЯДРА (ГАЛО) ГАЛАКТИКИ

Для сравнительного анализа выделенных во Введении трех звездных популяций AG300 на рис. 3 построено их распределение по металличности. Обилие железа в данном случае служит мерой химической эволюции звездных населений. Также оно помогает установить генетические связи между звездами популяции Галактики и ее спутников. На рис. 3 выделяется максимум при $-1.0 \leq [Fe/H] \leq 0.3$, отмечающий обилие металлов большей части звезд тонкого и толстого диска Галактики [18, 19]. Такое

обилие металлов в газе диска устанавливается после $2 \cdot 10^9$ лет с начала эволюции дисковой галактики с массой порядка массы нашей Галактики [20]. При этом, как показали численные модели, в течение $\sim 10^{11}$ лет производство металлов сверхновыми звездами уравнивается поступлением в межзвездную газовую среду обедненного металлами вещества старых планетарных туманностей. Это обеспечивает практическое постоянство $[Fe/H]$ в течение $\sim 10^{10}$ лет.

Распределение звезд каталога AG300 по металличности на рис. 3 близко к ожидаемому: заметно, что $N \sim [Fe/H]$ при $[Fe/H] \leq 0$ в рамках простой консервативной модели обогащения межзвездного газа металлами, за исключением двух групп звезд при $[Fe/H] \approx -2.5$ и $[Fe/H] \leq -3$. Максимум при $[Fe/H] \approx 2.5$ является вероятным следствием округления. Число звезд с $[Fe/H] \leq -3$ составляет 301 или $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ от общего числа звезд AG300. В итоге оценка полного числа звезд с $[Fe/H] \leq -3$ в Галактике, учитывая неполноту каталога AG300, составляет не менее 10^7 . Эти звезды могли принадлежать, вероятно, к числу первых звезд нашей Галактики и, возможно, первых звезд ее спутников, поглощенных ею в прошлом. Они будут рассмотрены позже в четвертой главе.

Изучение распределения апексов звезд AG300 позволило выделить около полутора тысяч звезд с апексами, сконцентрированными в сравнительно

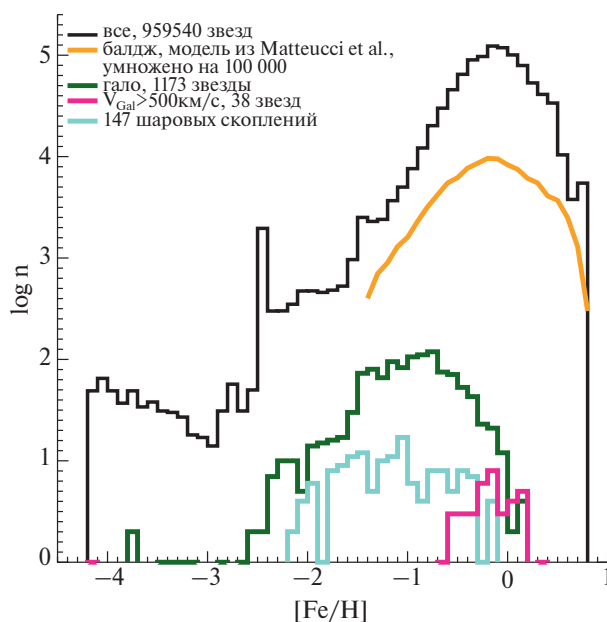


Рис. 3. Распределение по металличности звезд AG300 и шаровых скоплений, значения $[Fe/H]$ взяты из Gaia. Данные для шаровых скоплений взяты из каталога [17].

узких противоположных направлениях. Угловой размер области концентрации апексов $\sim 30^\circ$ с центрами, совпадающими с направлениями на центр и антицентр Галактики. Эти звезды, названные нами звездами короны ядра, вероятно, представляют звездное гало Галактики, исследованию которого посвящено много работ. Звезды гало могут возникнуть как в результате процессов в ядре (балдже) Галактики, так и в ходе процесса приливного разрушения близких спутников Галактики [21–24]. Число звезд короны AG300 $\sim 10^3$ близко к оценке их числа на основе модели Галактики [24].

Рассмотрим распределение звезд короны ядра Галактики по металличности, приведенное на рис. 3. Оно практически совпадает с распределением по металличности популяции шаровых скоплений Галактики [26–28]. Это может говорить об общей генетике звезд этих двух популяций. Отдельно приведенное исследование ($350 < v$ (км/с) < 500) звезд короны ядра из AG300 показало, что оно практически совпадает с распределением всех остальных звезд диска (рис. 3). Это распределение по металличности не демонстрирует признаков родственности звезд короны ядра семейству быстрых звезд AG300 с $v > 500$ км/с. Важно, что быстрые звезды, согласно их металличности, образуют отдельное семейство, и они не являются высокоскоростным «продолжением» звезд короны ядра Галактики. Распределение звезд короны по массам (рис. 2) показывает, что они имеют, как правило, массу меньше Солнечной, что обеспечивает время их жизни порядка Хаббловского времени. Звезды рис. 2 с $M \geq 1.0 M_\odot$ являются, вероятно, субгигантами с $M \approx M_\odot$ и оценки их масс формальны в силу использованного нами соотношения $M_G - M/M_\odot$ для звезд главной последовательности (1).

Часть звезд ($n \sim 900$) с эксцентриситетами орбит $e > 0.8$ и сравнительно высокими металличностями ($-2.0 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.0$) на рис. 3 принадлежит, вероятно, толстому диску нашей Галактики. К такому выводу пришли Kim, Lerpine 2022 [29], изучив металличность около 550000 звезд, орбиты которых имеют большие эксцентриситеты. Распределения по металличности звезд гало и толстого диска Галактики частично перекрываются. Часть звезд гало Галактики и звезд со скоростями более ~ 500 км/с могли возникнуть в результате распада двойных звезд ядра Галактики в поле гравитации сверхмассивной черной дыры в ее центре [30]. Звезды ядра Галактики имеют, как правило, высокую металличность, сопоставимую с металличностью звезд бал-

джа. Поэтому такие звезды среди звезд гало Галактики редки. Возможно, они представлены немногочисленными звездами каталога [29] и звездами короны ядра каталога AG300 (рис. 3) с $[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0$.

Шаровые скопления Галактики обнаруживают большое разнообразие их металличностей: $-2.8 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \lesssim 0$ [26–28]. Это согласуется с их образованием, как в ходе химической эволюции Галактики, так и в результате ее слияния с маломассивными спутниками. Шаровые скопления, судя по их кинематике и металличности, в итоге, могли участвовать в формировании короны ядра Галактики. Интересно, что среди шаровых скоплений пока не известны объекты с $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3$, хотя в Галактике такие звезды есть (рис. 3). Изучение спектров ~ 600000 звезд в поиске первых звезд Галактики с $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3$ позволило найти пять звезд, удовлетворяющих этому строгому критерию [29]. Ожидаемое относительное число звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -3$ на основе моделирования химической эволюции Галактики составляет $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ [30]. Большая их часть расположена в области с радиусом, в несколько раз превышающим радиус Галактики. Вероятная причина последнего — молодость этих звезд.

Вопрос о происхождении шаровых скоплений нашей Галактики исследовался на основе изучения химического состава и кинематики в [31–33]. Итоги этой работы показали, что от 20% [31] до 45% [32] шаровых скоплений Галактики являются членами поглощенных ею в прошлом спутников — галактик малой массы. Не исключено также, что доля «чужих» скоплений зависит от массы «галактики-агрессора», меняясь от нуля до $\sim 80\%$ с ростом массы последнего [31]. Следует признать естественным, что наряду с шаровыми скоплениями спутников при слияниях поглощался и их звездный компонент низкой металличности. В этих обстоятельствах подобие металличности шаровых скоплений с металличностью звезд короны ядра (гало) Галактики имеют, возможно, генетическое объяснение. То есть, звезды короны ядра (гало) Галактики могут представлять в этом случае звездный компонент поглощенных в прошлом ее спутников малой массы. Аккумуляционный характер образования галактик введен в классической работе [34].

Концентрация апексов звезд короны ядра (гало) Галактики в направлении центр-антицентр является простым следствием высокой плотности ядра Галактики. Последняя, при почти постоянной скорости вращения звезд диска Галактики, растет как R^{-2} , где R — расстояние от центра Галактики. Для спутников Галактики масса $M = 0.2 \cdot R^2$ [35], а плотность

растет как $M^{-1/2}$. То есть, маломассивные и поэтому плотные спутники могут разрушаться в звездные потоки, только погружаясь в плотные ядра массивных галактик. Это обстоятельство, вероятно, предопределяет выделенность кинематических параметров звезд короны ядра Галактики, найденную нами ранее [1].

Звездный балдж Галактики, в принципе, может являться потенциальным участником обогащения солнечных окрестностей своими быстрыми звездами. Возраст [36] и химический состав [37–39] звезд балджа близки к возрасту [40] и химическому составу звезд центральных областей диска Галактики [41], но заметно отличаются от химического состава и возраста звезд короны (рис. 3). При этом характерный возраст звезд балджа заключен в пределах $6 \cdot 10^9 - 14 \cdot 10^9$ лет [40], а металличность в пределах $-5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.5$.

Детальное изучение химического состава звезд балджа Галактики обнаружило возможное деление его населения на две популяции с характерной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.3$ и $+0.3$ [38]. Это обстоятельство свидетельствует, возможно, о двух стадиях (механизмах) формирования балджа Галактики, активированных, например, слиянием с ее крупными спутниками, а также баром Галактики. Важно отметить, что металличность звезд балджа заметно превосходит как металличность короны ядра Галактики, так и металличность звезд шаровых скоплений Галактики (рис. 3).

Звездное гало Галактики в пределах 10 кпк от Солнца на основе данных Gaia рассмотрено в [42]. Обнаруженная корреляция металличности с эксцентриситетом орбит звезд гало является, вероятно, следствием того, что низкометаллические спутники Галактики малых масс разрушаются за счет приливов на периферии Галактики, в то время как более высокометаллические спутники для своего разрушения должны погружаться в плотные, центральные области Галактики. Полный интервал металличностей звезд гало практически совпадает с интервалом металличности звезд короны ядра (рис. 3). Таким образом, звезда короны ядра, судя по концентрации их апексов к центру и антицентру Галактики, по металличности представляют, вероятно, звезды гало.

Подводя итоги краткому обсуждению вариантов генетики звезд короны ядра (гало) Галактики каталога AG300, можно заключить, что наиболее вероятным сценарием их возникновения является разрушение спутников малой массы в плотном звездном ядре Галактики на ранних стадиях ее эволюции. Совпадение распределения звезд гало и шаровых

скоплений по металличности является наиболее надежным аргументом в пользу такого сценария.

Рассмотрим потенциальный вклад других компонентов нашей Галактики в выборке AG300. Звезды балджа Галактики имеют $-1 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.5$ с максимумом при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0.2$ [37, 42] причем металличность звезд балджа увеличивается с приближением к галактическому центру [50]. Звезды балджа, как правило, более богаты металлами, чем звезды солнечной окрестности, на величину $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] \simeq 0.4$. Среди возможных причин появления звезд балджа считается ускоряющее влияние бара на звезды ядра Галактики [43–46]. Слияние с маломассивными спутниками Галактики, как причина появления основной части звезд балджа, отклоняется на основе высокого обмена металлов в звездах балджа (рис. 3).

Другая возможная причина появления сфероидальных балджей галактик — вспышки звездообразования в ядрах галактик, связанные с быстрой потерей газа ядром за счет вспышек массивных сверхновых звезд [47]. Привлекательная возможность объяснить формирование балджей слиянием с маломассивными спутниками Галактики, наталкивается на химический «барьер» ввиду малой металличности последних. Но звезды короны ядра Галактики (рис. 3), судя по их химическому составу (3), могут быть продуктами слияния таких спутников с массой $M \simeq 10^6 - 10^9 M_\odot$.

3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ГЕНЕТИКА БЫСТРЫХ ($v > 500$ км/с) ЗВЕЗД AG300

Характерные относительные пространственные скорости звезд диска Галактики в солнечных окрестностях ~ 30 км/с. Еще в пятидесятых годах прошлого столетия в ОВ-ассоциациях были найдены молодые звезды со скоростями ~ 100 км/с. Детальный анализ возможных причин появления звезд со столь высокими скоростями привел к выводу о том, что взрывы массивных компонентов тесных двойных звезд в качестве сверхновых звезд могут привести к появлению звезды со скоростью ~ 100 км/с [48]. Данные о звездах с большими скоростями позднее были использованы для исследования структуры галактического гало [49] и ранних стадий эволюции Галактики [50]. Большое внимание было уделено изучению механизмов ускорения звезд до предельно высоких скоростей в рамках модели распада тройных систем, включающих сверхмассивные черные дыры [51]. Каталог AG300 позволил найти около семидесяти звезд со скоростями выше ~ 500 км/с, по всей вероятности, не связанных гравитационно с

нашей Галактикой [1]. Сравнительному анализу их характеристик посвящена эта глава.

Распределение звезд AG300 по пространственным скоростям относительно центра Галактики дано на рис. 4. Большинство звезд принадлежат звездному диску Галактики, имея средние скорости, близкие к скорости вращения диска ~ 230 км/с. Звезды короны ядра (гало) Галактики имеют большую дисперсию скоростей от ~ 20 км/с до ~ 400 км/с. Переход от звезд, принадлежащих Галактике к «свободным», быстрым звездам происходит при скоростях 450–500 км/с. Обращает на себя внимание совпадение распределения по скоростям звезд с низким обилием металлов ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3$) с распределением по скоростям звезд диска галактики. При этом важно отметить, что апексы низкометаллических звезд совпадают с апексами звезд диска Галактики. Причины этого совпадения будут обсуждены в Главе 4 настоящей работы.

Обсудим возможные пути ускорения звезд Галактики до высоких скоростей, представленных на рис. 4. Оценим частоту появления быстрых звезд, ускоренных взрывами сверхновых в тесных двойных системах, сопровождаемых распадом таких систем. Распределение двойных звезд по массам первичных компонентов M , большим полуосям орбит a и отношению масс компонентов q задается соотношением [52]:

$$d^3N = 0.2 d \lg \frac{a}{R_\odot} \cdot \frac{dM/M_\odot}{(M/M_\odot)^{2.35}} dq \text{ год}^{-1} \quad (5)$$

при $10 \lesssim a/R_\odot \lesssim 10^6$.

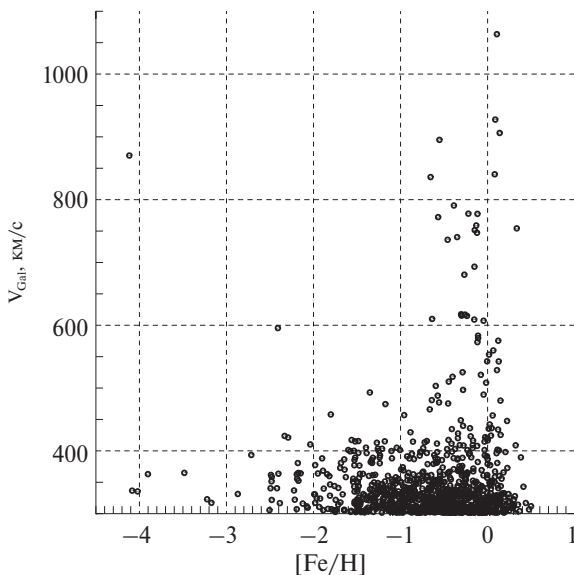


Рис. 4. Соотношение металличность — пространственная скорость для звезд AG300 со скоростями $v \geq 300$ км/с.

Масса звезды, необходимая для взрыва сверхновой, составляет $M \gtrsim 8M_\odot$ [52]. Околосолнечная масса спутника требует $dq \approx 0.1$. Для получения высокой скорости спутника сверхновой после преодоления им стадии с общей оболочкой: $d \lg \frac{a}{R_\odot} \approx 0.3$.

Итоговая оценка частоты появления быстрых звезд в Галактике составляет $\sim 10^{-3}$ год $^{-1}$. Скорость звездообразования в Галактике $\sim M_\odot / \text{год}$ (5), а частота сверхновых, заканчивающих эволюцию массивных звезд, ~ 0.03 в год, что при массе Галактики $\sim 10^{11} M_\odot$ дает полное число сверхновых за Хаббловское время $\sim 3 \cdot 10^9$ и число быстрых долгоживущих звезд с массой, меньшей солнечной $\sim 3 \cdot 10^6$. Итоговая оценка числа быстрых звезд в пределах 300 парсек AG300 в предположении сферической симметрии их распределения составляет ~ 100 .

Эта оценка недостаточна для объяснения всех звезд короны ядра (гало) Галактики каталога AG300, которое составляет ~ 1400 [1]. Кроме того, обилие металлов большинства быстрых звезд, произведенных в тесных двойных звездах с помощью сверхновых звезд, должно быть порядка солнечного, а звезды короны, как правило, имеют низкую металличность ($[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim 0$) (рис. 3). Стоит отметить, что этот сценарий может генерировать достаточное количество быстрых звезд, необходимых для объяснения происхождения звезд с $v > 500$ км/с и солнечным обилием металлов (рис. 3). Этот сценарий мог бы помочь в понимании причины концентрации апексов большинства звезд с $v > 500$ км/с в направлении вращения звездного диска Галактики, отмеченную нами ранее. Возможно, это следствие их рождения в диске [1]. Интересно, что часть химически peculiar звезд имеют пространственные скорости, достаточные для отнесения их к числу звезд гало Галактики [53]. Избыток обилия тяжелых элементов для них может быть отнесен к прошлому близкому взрыву сверхновых в предельно тесных двойных системах.

Потеря в ходе взрыва сверхновой более половины массы такой двойной системы приводит ее к распаду, а потеря большей части массы системы практически сохраняет орбитальную скорость маломассивного спутника в качестве его пространственной скорости. Орбитальная скорость спутника главной последовательности сверхновой звезды при заполнении им своей полости Роша может быть записана как:

$$v = 300 (M_{\text{SN}}/m)^{\frac{1}{3}} \text{ км/с}, \quad (6)$$

где $M_{\text{SN}} \approx 0.1(M_{\text{MS}}/M_{\odot})^{1.4}$ — масса гелиевой предсверхновой в тесной двойной, а m — масса ее спутника, звезды главной последовательности. При $M_{\text{MS}} \approx 40M_{\odot}$, $M_{\text{SN}} \approx 17.5M_{\odot}$, $m \approx 0.5M_{\odot}$ скорость освобожденного спутника будет ~ 960 км/с. Взаимодействие оболочки сверхновой со спутником может увеличить нашу оценку скорости (6).

Другой потенциально возможный механизм ускорения звезд диска Галактики — распад предельных тесных тройных звезд. Из закона сохранения энергии системы в этом случае скорость «освобожденного» маломассивного компонента с массой m может быть оценена как:

$$v = 300(M/m)^{\frac{1}{3}} \text{ км/с}, \quad (7)$$

где M — масса одинаковых компонентов оставшейся тесной двойной системы. В этом сценарии мы снова можем получить высокие скорости маломассивных компонентов, если тесная тройная система с неустойчивыми орбитами имеет большой контраст масс компонентов. Эта возможность достойна специального внимания, ибо при выводе соотношения (7) полагалось, что минимальное расстояние при сближении компонентов превышает 2.5 радиуса звезды главной последовательности. Учитывая малую массу протяженных оболочек звезд, они могут сближаться и теснее, теряя несущественную массу и сохраняясь. Это обстоятельство может увеличить оценку (3) в полтора-два раза, что позволяет понять причину появления звезд со скоростями $\sim 10^3$ км/с.

Для выяснения природы высокоскоростных звезд построен рис. 4, на котором показана корреляция пространственной скорости звезд AG300 с их металличностью. Выбраны звезды с $v \gtrsim 300$ км/с. Рис. 4 демонстрирует, что звезды с $v \lesssim 450$ км/с гравитационно связаны с нашей Галактикой за счет гравитации темного гало последней. Условия связи были детально обсуждены в нашей предыдущей работе по AG300 [1]. Эти звезды имеют металличности на широком интервале $-2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.3$. Звезды низкой металличности либо представляют первые звезды нашей Галактики, либо являются продуктом распада ее спутников малой $\sim 10^9 M_{\odot}$ (4) массы. Важно, что звезды с $v \gtrsim 450$ км/с на рис. 4 имеют подчеркнуто околосолнечные металличности, позволяющие надежно отнести их к звездам диска Галактики. Это обстоятельство поддерживает возможность их возникновения в ходе распада неустойчивых тесных тройных звездных систем и в процессе распада тесных двойных звезд, один из компонентов которых испытывает взрыв сверхновой звезды.

Стоит добавить, что на рис. 3 большинство звезд AG300 представляют звездный диск Галактики с солнечным обилием металлов. Околосолнечные звезды кинетически делятся, как было подтверждено нами ранее [1], на два потока, найденных Каптейном. Отношение численности звезд этих потоков по AG300 определяется как $576524 / 249513$. Сравнение распределений по $[\text{Fe}/\text{H}]$ звезд двух потоков показало их совпадение во всем исследуемом интервале металличности $-4.2 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.8$.

Распределение быстрых звезд AG300 со скоростями большими 500 км/с по их абсолютной светимости M_G помогло с помощью (1) найти, что масса быстрых звезд с $V > 500$ км/с заключена на интервале $0.1M_{\odot} - 0.9M_{\odot}$ (рис. 2). Это оставляет их звездами главной последовательности в течение Хаббловского времени. Обилие металлов в быстрых звездах — порядка Солнечного (рис. 3), что относит их образование либо к разрушению очень массивных галактик их местного скопления с массами галактик согласно (2) порядка $10^8 M_{\odot} - 10^{11} M_{\odot}$. Либо, учитывая концентрацию их апексов в направлении вращения звезд диска Галактики (рис. 5), например, к распаду неустойчивых тройных звезд диска нашей Галактики. К сожалению, только 38 звезд с высокими пространственными скоростями имеют известные металличности. Быстрые звезды со случайно распределенными на небесной сфере апексами (рис. 8.10 из [1]), будучи продуктами распада спутников Галактики малой массы, имеют $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$. Последняя возможность требует дополнительного исследования и обоснования. Остальные быстрые звезды, вероятно, возникают в диске Галактики.

Оценим частоту генерации быстрых звезд ($v \gtrsim 500$ км/с) в Галактике на основе каталога AG300 для того, чтобы сравнить эту оценку с теоретической оценкой частоты распада тесных двойных звезд под влиянием взрыва их компонентов как сверхновых и с оценкой частоты распада неустойчивых тесных тройных систем в Галактике. Число звезд каталога AG300 с $v > 500$ км/с, апексы которых близки к апексам звезд диска Галактики, составляет ~ 30 . Принимая радиус Галактики ~ 10 кпк, время пересечения Галактики этими звездами $2 \cdot 10^7$ лет, получим, что частота появления этих звезд в Галактике ~ 0.003 в год. Эта частота сравнима с наблюдаемой частотой вспышек сверхновых в Галактики [54]. Ясно, что для получения столь высоких скоростей звезд, потерянных при взрыве сверхновых звезд в тесных двойных системах, необходим строгий подбор параметров этих систем. Это уменьшает потенциальную частоту генерации быстрых звезд в тесных двой-

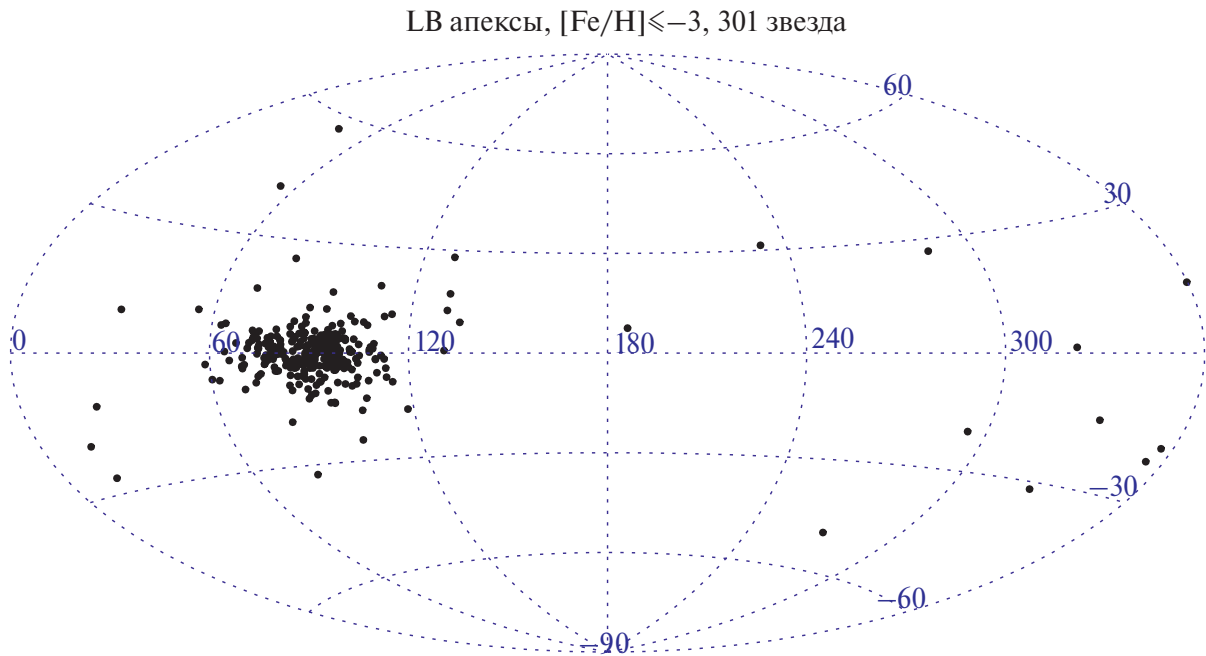


Рис. 5. Диаграмма апексов (L, B) относительно галактического Центра для низкометаллических звезд AG300.

ных, обусловленную взрывами их компонентов как сверхновых звезд.

Оценим потенциальную частоту распада самых тесных тройных систем. Примем, что рождение компонентов кратных звездных систем Галактики описывается выражением $dN = 0.2 d \lg \frac{a}{R_\odot} \text{год}^{-1}$ (5). Двойная система такой тройной звезды должна быть тесной, то есть, $d \lg \frac{a}{R_\odot} \approx 0.3$. Итоговая частота рождения таких систем в Галактике: ~ 0.06 в год. Третий компонент на неустойчивой орбите с $d \lg \frac{a}{R_\odot} \approx 0.3$ возникает также с частотой ~ 0.06 в год. Итоговая частота появления требуемых тройных систем, необходимых для ускорения ~ 0.004 в год. Эта оценка близка к эмпирической оценке частоты их проявления, приведенной выше. Следует признать, что пока остается неясным, учитывая остающиеся неопределенности всех выполненных выше оценок, достаточно ли полученного согласия для окончательных выводов. Важно, что распад предельно тесных тройных систем диска Галактики дает возможность понять как высокую металличность большей части околосолнечных быстрых звезд, практически совпавшую с металличностью звезд диска, так и концентрацию их апексов в направлении вращения диска Галактики.

Естественно, что часть быстрых звезд принадлежит межгалактическим звездам местного скопления

галактик, однако звезды с низкой металличностью среди быстрых звезд AG300 пока не обнаруживаются (рис. 3). Однако ясно, что распадаются при столкновениях, в первую очередь, галактики малых масс с пониженной металличностью [55]. Поэтому становится очевидным, что теперь необходимо дополнительное изучение химического состава быстрых звезд, которое существенно затрудняется их малой массой и светимостью. Важно только, что быстрые звезды с апексами, ориентированными в направлении вращения звезд диска Галактики, были рождены не более $\sim 2 \cdot 10^7$ лет назад, поэтому их возникновение не может быть отнесено к ранним, экзотическим стадиям эволюции Галактики.

В итоге обсуждения возможных вариантов генетики приходим к выводу, что предположение о генерации существенной части быстрых ($v \geq 500$ км/с) звезд в ходе взрывов сверхновых звезд в предельно тесных двойных системах и распада тесных тройных систем со спутниками малой ($M \lesssim M_\odot$) массы могут объяснить как солнечный химический состав быстрых звезд, так и концентрацию апексов движения большей их части в направлении движения Солнца вокруг центра Галактики. Быстрые звезды с равномерным распределением апексов по небесной сфере, около трети всех быстрых звезд AG300 [1], — вероятные продукты распада других галактик — членов местной группы и, возможно, тройных звезд гало Галактики.

4. ЗВЕЗДЫ AG300 С $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$

Звезды низкой $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ металличности издавна привлекают к себе повышенное внимание в поисках первых звезд своих галактик. Их металличности ниже характерной металличности шаровых скоплений и звезд балджа Галактики [5]. Они, как правило, имеют высоко эксцентричные орбиты в Галактике, приближаясь в перицентрах на расстояние в несколько кпк к центру Галактики и удаляясь в апоцентрах на расстояние 10–40 кпк от него [56, 57]. Генетика звезд низкой металличности и свойства кинематики ансамбля ~ 8000 звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$ были изучены в работе [58]. В результате изучения кинематики этих звезд было выделено 179 динамически особых групп, 67 из которых имеют более 10 членов. Десять групп были ассоциированы с шаровыми скоплениями Галактики. Все это свидетельствует о том, что семейство звезд низкой металличности неоднородно и склонно к формированию звездных потоков, что естественно в силу того, что все молодые звезды образуются в звездных скоплениях разного вида.

Для анализа причин появления очевидного избытка звезд при $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ (рис. 3) рассмотрим металличность различных популяций звезд нашей и других галактик. Известно, что современная средняя металличность галактики с возрастом порядка Хаббловского коррелирует с ее массой M_g (3) для галактик с массой $3 \lesssim \lg \frac{M_g}{M_\odot} \lesssim 8$. Это эмпирическое соотношение было ранее найдено в [9, 59], а для галактик с массой $9 \lesssim \lg \frac{M_g}{M_\odot} \lesssim 10.5$ в [12, 60]. Наблюдения показывают, что соотношение (3) обладает заметной дисперсией по металличности $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} \approx 0.3$, и оно справедливо только при $z = 0$. Поэтому (3) может служить только для оценки возможного вклада звезд спутников Галактики малой массы, поглощенных ею в прошлом. Рис. 3, в результате, демонстрирует, что звезды с $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -3$ не могут быть ассоциированы со спутниками Галактики малой массы, поглощенными ею в прошлом.

Примечательной особенностью рис. 3 является избыток звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$. При этом особенно заметен максимум при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4$, возможно, являющийся, как и пик при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -2.5$, результатом округления. Ансамбль звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ включает 301 звезду, что составляет $\sim 4 \cdot 10^4$ от полного числа звезд AG300 с известной металличностью. Моделирование динамической и химической эволюции Галактики показало, что продолжительность стадии

с $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4$ составляет $\sim 10^8$ лет при скорости звездообразования $\sim 0.5 M_\odot/\text{год}$ [20]. За это время могло образоваться, согласно результатам моделирования, $\sim 5 \cdot 10^7 M_\odot$ звезд указанной металличности или $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ от полной массы Галактики в пределах Солнечной орбиты (8 кпк). То есть, модельное относительное число звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4$ порядка наблюдаемого на рис. 3. Однако, это совпадение формально, ибо модельная толщина диска Галактики на ранних стадиях его эволюции $\sim 10^4$ пк, а каталог AG300 ограничен звездами галактического диска в пределах ~ 300 пк. То есть, модельную относительную долю звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4$ нужно уменьшить в ~ 30 раз, до 10^{-5} . Это делает необходимым искать другие причины для объяснения отмеченного избытка числа звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$.

Кинематика предельно низко металличных ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3$) звезд каталога AG300 демонстрируется рис. 5. Рис. 5 показывает, что большинство из таких звезд имеют скорости по величине практически совпадающие со скоростью вращения звезд диска Галактики: ~ 230 км/с. Апексы большинства низкометаллических звезд показывают случайную ориентацию, что позволяет отнести их либо к звездам разрушенных спутников Галактики малой массы, либо к предельно ранним стадиям ($t \lesssim 10^7$ лет) ее формирования. Большинство ($n \sim 400$) низкометаллических звезд AG300, судя по их апексам, принадлежит диску и их появление должно быть отнесено к ранним стадиям его формирования. Дисковая структура звезд Галактики с $-2 \lesssim [\text{Fe}/\text{H}] < -1$ была отмечена [61]. Звезды с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$, таким образом, являются частью этого диска (рис. 5), обостряя вопрос о природе этого диска.

Число звезд низкой металличности в каталоге AG300 — 301. Объем пространства в пределах сферы с радиусом ~ 100 пк, судя по N-Dist (рис. 1) достигается полнота $\sim 3 \cdot 10^6$ пк³, а объем диска Галактики $\sim 10^{11}$ пк³. Следовательно, нижняя оценка числа звезд диска Галактики с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ составляет $\sim 10^7$. Выше было отмечено, что число AG300 звезд низкой металличности со случайной ориентацией апексов на небесной сфере ~ 30 . Объем Галактики с радиусом ~ 15 кпк оставляет $\sim 10^{13}$ пк³. Следовательно, нижняя оценка числа звезд низкой металличности каталога AG300 в сферическом компоненте Галактики $\sim 10^8$. Отметим, что последняя оценка близка к числу звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ на основе теоретической модели эволюции звездного состава Галактики [20]. Примечательной особенностью кинематики молодых звезд является большая толщина звездного диска

Галактики на ранних, $\sim 3 \cdot 10^8$ лет, стадиях его эволюции $\sim 10^4$ пк. Таким образом, можно заключить, что наблюдаемое число звезд низкой металличности сферического компонента в окрестностях Солнца с радиусом ~ 100 пк порядка предсказанного моделью [20] для сферического компонента, но причина большого числа таких звезд в диске Галактики (рис. 3) остается неясной.

Существующие текущие оценки наблюдаемого числа звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ очень низки. Так, изучение химического состава БМО позволило отождествить только семь звезд с $-4 \lesssim [\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -3$ [62]. Исследование химического состава ≈ 600000 звезд Галактики выявило присутствие только пяти звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ [63]. Эта доля $\sim 10^{-5}$ заметно ниже оцененной нами для каталога AG300 (рис. 3) $\sim 3 \cdot 10^{-4}$. Обилие низкометаллических звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ среди звезд гало Галактики ~ 0.01 согласно [64]. Для звезд столь малых металличностей характерны большие эксцентриситеты орбит в Галактике, как правило, большие ~ 0.8 . Примечательно, что доля звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ среди звезд гало Галактики превосходит таковую для звезд шаровых скоплений [64], что, вероятно, отмечает поглощение нашей Галактикой галактик малой массы, обилие шаровых скоплений в которых, как показало специальное исследование, заметно понижено [65]. Детальное изучение галактик разных масс показало, что в галактиках с массой меньшей $\sim 10^7 M_\odot$ шаровые скопления, к сожалению, практически отсутствуют [66].

Другая возможность понять причину избытка звезд низкой металличности в каталоге AG300 и их концентрации к плоскости Галактики (рис. 3) состоит в поглощении Галактикой спутника малой массы и металличности. Будучи разрушенным, он превратился к настоящему моменту в околосолнечный звездный поток. Однако масса этого гипотетического спутника неправдоподобно мала, согласно (3) $\sim 30 M_\odot$. Кроме того, средняя плотность галактик увеличивается с массой согласно формуле $M \approx 0.2 R^2$ [35], поэтому спутники малой массы разрушаются, как правило, в плотных, центральных областях Галактики [55, 67, 68]. Появление потока звезд малой металличности около Солнца с апексом, совпадающим с апексом звезд диска, кажется маловероятным. Причина появления избытка звезд малой металличности в AG300 связана с нерепрезентативностью данных Gaia в отношении обилия металлов.

При поиске причин появления звезд низкой металличности в диске Галактики было рассмотрено несколько возможных сценариев. Часть их может

быть продуктами распада галактик малой массы [69, 70]. Их апексы на рис. 5 распределены на небесной сфере случайным образом. Но большинство звезд AG300 с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ имеют апексы, близкие к апексам звезд диска, что исключает поглощение маломассивных спутников в качестве единственного объяснения очевидного избытка. Не исключено, что, по крайней мере, часть имеющегося в Gaia избытка этих звезд может быть результатом повышенного внимания к поискам первых звезд Галактики [71]. Апексы звезд $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ указывают на принадлежность большинства этих звезд к звездам диска Галактики.

На рис. 5 представлено распределение апексов 301 звезды низкой ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3$) металличности AG300 на небесной сфере. Этот рисунок демонстрирует, что семейство низкометаллических звезд распадается на две популяции. Одна из них, ~ 30 звезд, имеет случайные направления векторов скоростей. Вероятно, большинство звезд этого семейства принадлежит действительно к первым звездам Галактики и галактикам малой массы, поглощенным нашей Галактикой в прошлом. Эти звезды по своему числу «укладываются» в продолжение функции $\lg n - [\text{Fe}/\text{H}]$ рис. 3. Однако, ясно, что большинство звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ имеют апексы, совпадающие с апексами звезд диска Галактики. Важно, что и характерная величина скорости совпадает со скоростью вращения звезд диска, см. рис. 6. Это позволяет отнести большинство

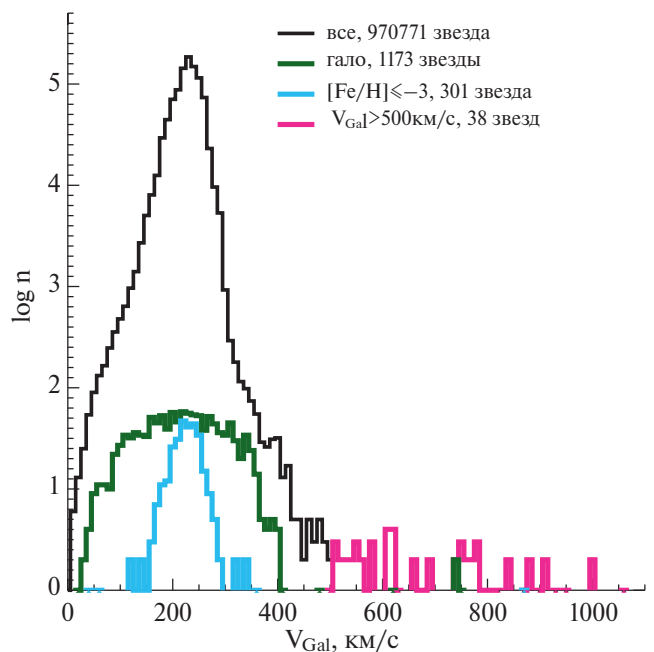


Рис. 6. Распределение пространственной скорости звезд AG300 различных населений Галактики.

звезд низкой металличности AG300 к диску Галактики, а их слишком низкие металличности этого каталога к ошибкам оценки ее по цвету звезд, принятой для большинства звезд Gaia. Стоит отметить избыток звезд на рис. 3 с $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$. Явно выделен избыток звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.5$. Эти избытки являются следствием «округления» металличности, распространенной в данных Gaia.

В итоге обсуждения возможных причин наблюдаемого избытка звезд AG300 низкой $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ металличности приходим к выводу, что большая их часть является результатом принятого в Gaia метода оценки металличности. Большинство звезд, как следует из описания каталога Gaia, «получило» свою металличность на основе цветовых характеристик этих звезд. Следует признать, что при малых металличностях звезд этот метод приводит, вероятно, к занижению $[\text{Fe}/\text{H}]$ звезд низкой металличности, что и объясняет избыток числа этих звезд в Gaia и повышение их числа с уменьшенным $[\text{Fe}/\text{H}]$. Последнее является следствием концентрации звезд к левой границе полосы главной последовательности.

На рис. 5 видно, что большинство звезд низкой металличности демонстрирует дисковую структуру. Этот диск совпадает по положению на диаграмме апексов с диском звезд солнечной металличности, что дало основание авторам [72] обсудить возможные причины его появления. Из приведенного выше обсуждения свойств этих звезд следует, что, прежде чем признать этот диск реально существующим, необходимо убедиться в надежности оценок металличности этих звезд.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги. Большинство звезд нашего каталога, согласно их кинематике и обилию металлов, принадлежит звездному диску Галактики (рис. 3). Звезды короны ядра (гало) Галактики с высокими эксцентриситетами орбит и апексами, сконцентрированными в направлении центра и антицентра Галактики с $-3 \lesssim [\text{Fe}/\text{H}] \lesssim 0$ (рис. 3) являются, в основном, продуктами разрушения в прошлом спутников Галактики малой массы в ее плотном ядре. Высокоскоростные звезды с $v > 500$ км/с представлены двумя семействами. Семейство с равномерным распределением апексов по небесной сфере с высоким обилием металлов ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx 0$) — вероятные продукты ускорения в ядрах и дисках других маломассивных галактик. Более многочисленное семейство быстрых звезд с апексами, отражающими вращение звездного диска Галактики, могут быть продуктами взрыва массивных сверхновых звезд в пре-

дельно тесных двойных и результатом распада предельно тесных тройных звезд Галактического звездного диска [73]. Избыток звезд AG300 с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ является, в основном, результатом оценки $[\text{Fe}/\text{H}]$ на основании цветовых характеристик звезд, принятой в Gaia. Только около 7% звезд AG300 низкой металличности (~30 звезд) с равномерным распределением апексов по небесной сфере (рис. 5) могут быть либо первыми звездами нашей Галактики, либо продуктом распада в прошлом ее спутников малой массы.

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 Ольгу Сильченко за обсуждение условий формирования балджа и гало нашей Галактики и Людмилу Машонкину за обсуждение проблемы оценки металличности звезд. Авторы благодарят рецензента за внимательное прочтение статьи и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. В. Тутуков, Н. В. Чупина, С. В. Верецагин, Астрон. Журн. 100, 1286 (2023).
2. A. Mitrašinić, B. Vukotić, M. Micic, et al., Publications Astron. Soc. Australia 40, 54 (2023).
3. К. Аллен Астрономические величины (М: Мир, 1977).
4. D. Grether, G. H. Lineweaver, Astrophys. J. 640, 1051 (2006).
5. J. Binney, E. Vasiliev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 520, 1832 (2023).
6. J. Binney, S. Tremaine Galactic Dynamics: Second Edition (USA: Princeton University Press, 2008).
7. M. R. Giovanazzi, C. H. Blake, Astron. J. 164, 164 (2022).
8. I. Banik, Ch. Pittordis, W. Sutherland, et al., astro-ph / 2311.03436 (2023).
9. E. Kirby, J. Cohen, ASPC 458, 329 (2012).
10. E. Kirby, K. Gilbert, I. Escala, et al., Astron. J. 159, 46 (2020).
11. A. Mason, R. Crain, R. Schiavon, et al., astro-ph/2311.00041 (2023).

12. *A. Gallazzi, A. Pasquali, S. Sibetti, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 502, 4457 (2021).
13. *N. Chartab, A. Newman, G. Rudil, et al.*, astro-ph/2310.12200 (2023).
14. *E. Spitoni, G. Cescutti, A. Recio-Blanco, et al.*, Astron. and Astrophys. 680, 85 (2023).
15. *B. Holwerda, M. Trenti, W. Clarkson*, Astrophys. J. 788, 77 (2014).
16. *P. Kroupa, C. Weidner, J. Pflamm-Allenburg*, Planets, Stars and Stellar Systems 5, 115 (2013).
17. *N. V. Kharchenko et al.*, J/A+A/558/A53/catalog (2013).
18. *G. da. Costa, M. Bessel, T. Nordlander et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 520, 917 (2023).
19. *F. Vincenzo, C. Kobayashi*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 496, 80 (2020).
20. *A. Tutukov, B. Shustov, D. Wiebe*, Astron. Rep. 44, 711 (2000).
21. *A. Rodriguez-Puebla, J. Primack, V. Avila-Reese et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 470, 651 (2017).
22. *G. Garcia- Bethencourt, Ch. Brook, R. Grand et al.*, astro-ph/2310.11300 (2023).
23. *S. Khoperskov, I. Minchev, M. Steinmetz et al.*, astro-ph/2310.05287 (2023).
24. *T. Donlon, H. Newberg, R. Sanderson et al.*, astro-ph/2310.09376 (2023).
25. *J. Binney, E. Vasiliev*, astro-ph/2306.11602 (2023).
26. *D. Horta, R. Schiavon, J. Mackereth et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 493, 3363 (2020).
27. *S. Larsen, P. Eitner, E. Magg et al.*, Astron. and Astrophys. 660, 88 (2022).
28. *C. Rodriguez, Z. Hafen, V. Grudic et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 521, 124 (2023).
29. *B. Kim, S. Lepine*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 510, 4308 (2022).
30. *G. Dremova, V. Dremov, A. Tutukov*, Astron. Rep. 58, 291(2014).
31. *A. Sharazi, P. Khalaj, H. Haghi*, astro-ph/2310.04492 (2023).
32. *D. Massari, H. Koppelman, A. Helmi*, Astron. and Astrophys. 630, 41(2019).
33. *N. Choksi, O. Gnedin*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 488, 5409 (2019).
34. *S. White, M. Rees*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 183, 341 (1978).
35. *A. Tutukov*, Astron. Rep. 63, 79 (2019).
36. *Y. Jin, L. Zhu, S. Zibetti et al.*, astro-ph/2310.07201 (2023).
37. *F. Matteucci, V. Grisoni, E. Spitoni et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 487, 5363 (2019).
38. *C. Johnson, R. Rich, I. Simion et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 515, 1469 (2022).
39. *J. Lian, G. Zasowski, S. Hasselquist et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 500, 282 (2021).
40. *M. Joyce, C. Johnson, T. Marchetti et al.*, Astrophys. J. 946, 28 (2023).
41. *C. Jonson, R. Rich, M. Young et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 449, 2357 (2020).
42. *V. Belokurov, D. Erkal, N. Evans, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 478, 611 (2018).
43. *M. Schultheis, R. Rich, L. Origlia et al.*, Astron. and Astrophys. 627, A152 (2019).
44. *J. Lian, G. Zasowski, S. Hasselquist, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 500, 282 (2021).
45. *V. Korchagin, A. Litsenko, R. Trachenko et al.*, astro-ph/2310.10327.
46. *J. Sanders, D. Kawata, N. Matsunaga et al.*, astro-ph/2311.00035.
47. *A. Tutukov, E. Krugel*, Astron. and Astrophys. 299, 25 (1993).
48. *A. Blaauw*, BAN 15, 265 (1961).
49. *M. Schmidt*, Astrophys. J. 202,22 (1973).
50. *C. Allen, W. Schuster, A. Poveda*, Astron. and Astrophys. 244, 280 (1991).
51. *G. Dryomova, V. Dryomov, A. Tutukov*, Astron. Rep. 62, 971 (2018).
52. *I. Iben, A. Tutukov*, Astroph. J., Suppl. Ser. 54, 335 (1984).
53. *N. Faltova, M. Prisegen, K. Bernhard et al.*, Astron. and Astrophys. 674, 215 (2023).
54. *А. Масевич, А. Тутуков* Эволюция звезд: теория и наблюдения (М: Наука, 1988).
55. *А. Тутуков, С. Верецагин*, Усп. Физ. наук. 66, 859 (2023).
56. *F. Sestito, K., Venn, A. Arensen, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 518, 4557 (2023).
57. *G. Limberg, S. Rossi, T. Beers, et al.*, Astrophys. J. 907, 10 (2021).
58. *D. Shank, D. Komater, T. Beers, et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser. 261, 19 (2022).
59. *J. Kim, M. Jeon, H. Richstain et al.*, astro-ph/ 2310.11623 (2023).
60. *A. Font, K. Jonson, J. Bullok et al.*, Astrophys. J. 638, 585 (2006).
61. *S. Feltzing, D. Feuillet*, Astrophys. J. 953, 143 (2023).

62. *W. S. Oh, T. Nordlander, G. S. Da Costa, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 524, 577 (2023).
63. *G. Da Costa, M. Bessell, T. Nordlander, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 520, 917 (2023).
64. *B. Carney, J. Laird, D. Latham et al.*, Astrophys J., 112, 668 (1996).
65. *D. Zaritsky*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 513, 2609 (2022).
66. *G. Eadie, W. Harris, A. Springford*, Astrophys J. 928, 162 (2022).
67. *A. Tutukov, M. Sizova, S. Vereshchagin*, Astron. Rep. 64, 827 (2020).
68. *N. Martin, R. Ibata, E. Starkenburg et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 516, 533 (2022).
69. *G. Medina, C. Hansen, R. Munoz et al.*, astro-ph/2309.03271 (2023).
70. *D. Sotillo-Ramos, M. Bergemann, F. Friske et al.*, astro-ph/2307.14421 (2023).
71. *C. Prieto, D. Aguado, J. Hernandez et al.*, astro-ph/2306.06321 (2023).
72. *M. Rah, M. Yatman, A. Taani et al.* astro-ph/2402.07045 (2024).
73. *I. Iben, A. Tutukov*, Astrophys. J. 511, 324 (1999).

METALLICITY AND KINEMATICS OF THE CIRCUMSOLAR STELLAR POPULATION OF THE GALAXY

A. V. Tutukov^a, N. V. Chupina^a, S. V. Vereshchagin^{a,*}

^a*Institute of Astronomy of RAS, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: svvs@ya.ru*

The study of the kinematics and genetics of stellar populations in the Galaxy continued within a sphere with a radius of 300 parsecs based on the Gaia catalog (AG300). The main attention is paid to the chemical composition and genetics of stars in the corona of the core (halo) of the Galaxy with highly elliptical orbits and stars with hyperbolic orbits from the vicinity of the Sun. The possible role of various mechanisms of acceleration of the spatial motion of stars in the formation of the stellar corona (halo) of the Galaxy and stars with high hyperbolic ($v > 500$ km/s) velocities in the vicinity of the Sun is considered. Supernova explosions in close binaries and the disintegration of unstable close triple stars have been proposed as possible mechanisms for the acceleration of these stars. The abundance of iron in corona stars coincides with the abundance of iron in globular clusters, which is an argument in favor of their relationship. It is shown that about 7% of low metallicity stars ($[Fe/H] < 3$), judging by the position of their apexes, may belong to the “first” stars of the Galaxy, or they are products of the decay of low-mass satellites of the Galaxy.

Keywords: stellar streams, astrometry, solar neighborhood, Gaia DR3 catalog.