

УДК 524.6-36/54
524.33-36

ПРОТИВОРЕЧИВОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗВЕЗДНЫХ НАСЕЛЕНИЙ В ПОДСИСТЕМЕ ТОЛСТОГО ДИСКА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

© 2020 В. А. Марсаков^{1*}, В. В. Коваль^{1**}, М. Л. Гожа^{1***}

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

Поступила в редакцию 18 марта 2019 года; после доработки 20 ноября 2019 года; принята к публикации 20 ноября 2019 года

Используя современные опубликованные данные о скоростях и спектроскопических определениях содержаний химических элементов в звездных объектах Галактики, мы исследовали связи химического состава с кинематикой разных населений. В работе показано, что старые звездные населения Галактики, принадлежащие по кинематическому критерию подсистеме толстого диска — шаровые скопления, переменные поля типа RR Lyrae (лириды), а также близкие F–G карлики и гиганты поля, имеют разный химический состав. В частности, карлики и гиганты поля оказываются в среднем более металличными, чем шаровые скопления и лириды поля. При этом относительные содержания α -элементов в диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ у шаровых скоплений оказываются самыми высокими, а у переменных типа RR Lyrae поля — самыми низкими. На основе анализа характера зависимостей $[\alpha/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ у этих объектов высказано предположение, что подсистема толстого диска в Галактике является составной и внутри нее существуют независимо по крайней мере три составляющие. Самая старая — это металлические шаровые скопления, которые образовались из единого протогалактического облака вскоре после начала вспышек в нем сверхновых типа Ia. Затем сформировалась подсистема звезд поля толстого диска в результате «разогрева» звезд уже образовавшегося в Галактике тонкого диска упавшей на нее довольно массивной карликовой галактикой-спутником. И, наконец, подсистемы звезд поля с кинематикой не только толстого, но даже и тонкого диска, выпавших на Галактику из этой захваченной галактики-спутника.

Ключевые слова: Галактика: структура — шаровые скопления: общее — звезды: переменные: RR Lyrae

1. ВВЕДЕНИЕ

Еще в пятидесятых годах прошлого века было замечено, что богатые металлами шаровые скопления занимают сравнительно небольшой объем вблизи центра Галактики, тогда как бедные металлами скопления встречаются в значительно большем пространстве галактического гало (см., например, Kinman (1959), Morgan (1959)). Несколько десятилетий продолжалась дискуссия: являются ли металлические скопления представителями дисковой подсистемы Галактики, или просто в сферическом галактическом гало существует отрицательный радиальный градиент металличности? Нужно сказать, что в те годы и расстояния, и металличности скоплений определялись с большими неопределенностями. О существовании в Галактике еще одной подсистемы, промежуточной

между дисковой и сферической составляющими, впервые заговорили после появления каталога шаровых звездных скоплений Kukarkin (1974), содержащего приведенные к единой системе характеристики 129 объектов. При исследовании по данным каталога был обнаружен провал функции металличности скоплений в окрестности значения $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0$, разделивший все скопления на две дискретные группы (Marsakov and Suchkov 1976). При этом малометаллическая группа оказалась сферически симметричной, медленно вращающейся подсистемой гало, а металлическая — довольно плоской быстро вращающейся подсистемой толстого диска (Zinn 1985). С тех пор так и продолжают выделять металлические скопления в отдельную подсистему, которая получила название «толстый диск.»

Оказалось, что распределение металлов и у звезд поля имеет дискретный характер, и среди них также можно по провалам на функции металличности выделить промежуточную подсистему.

*E-mail: marsakov@sfedu.ru

**E-mail: vvkoval@sfedu.ru

***E-mail: gozha_marina@mail.ru

му (Marsakov and Suchkov 1977). В итоге металличность стала критерием разделения звездных объектов по подсистемам Галактики, так как она является статистическим индикатором возраста. Действительно, в замкнутой звездно-газовой системе, каковой в первом приближении можно считать нашу Галактику, общее содержание тяжелых элементов со временем увеличивается. По наблюдениям самые старые звездные объекты Галактики имеют наименьшую металличность, тогда как звезды солнечного возраста — наибольшую. Поэтому, несмотря на современные представления о формировании гигантских спиральных галактик, типа нашей, в результате слияния нескольких менее массивных на ранних этапах эволюции Вселенной (см. стандартную космологическую модель Λ CDM), не потеряла актуальности и модель монолитного коллапса протогалактического облака, описанная в классической модели Eggen et al. (1962). Понятно, что единого и достаточного критерия стратификации не существует. Для надежного отнесения объекта к той или иной подсистеме следует учитывать многие характерные для каждой подсистемы параметры, в частности, положение в Галактике, кинематику, металличность, содержание разных химических элементов, а также возраст. Четкие границы у подсистем отсутствуют, поэтому оценить их размеры можно лишь приблизительно. Геометрические границы предполагают определенные величины и дисперсии скоростей объектов, принадлежащих данной подсистеме. Использование кинематических параметров считается наиболее надежным методом стратификации объектов по подсистемам. Именно таким способом разделяют по подсистемам Галактики близкие звезды поля. В частности, широкое распространение получила методика, описанная в работе Vensby et al. (2003), когда по компонентам остаточных скоростей вычисляются вероятности принадлежности близких звезд поля подсистемам тонкого, толстого диска или гало. При этом подразумевается, что компоненты пространственных скоростей звезд в каждой подсистеме подчиняются нормальным распределениям. Средние значения компонент скоростей, их дисперсии и относительные доли звезд в каждой подсистеме задаются по данным независимых исследований. Подсистемы различаются главным образом величиной скорости движения вокруг галактического центра: для толстого диска она оказывается промежуточной между соответствующими скоростями тонкого диска (примерно солнечная) и гало (практически нулевая). Для удаленных от Солнца объектов компоненты скоростей должны быть в цилиндрической системе координат, поскольку в прямоугольной системе координат компоненты скоростей окажутся разнонаправленными относительно центра и направления враще-

ния Галактики, величины которых в основном и определяют принадлежности ее подсистемам.

Механизм образования подсистемы толстого диска уже долгое время является предметом дискуссии. При моделировании структуры нашей Галактики основываются на результатах подсчета звезд поля обеих дисковых подсистем и исследования их химического состава. Все предлагаемые сценарии формирования толстого диска можно разделить на несколько категорий, но все оказываются в чем-то неудовлетворительными. Так, если толстый диск формируется в процессе коллапса протогалактического облака, то в нем неизбежно возникнет изменение относительного содержания α -элементов с ростом содержания тяжелых элементов (Prochaska et al. 2000). Трудность такого представления заключается в том, что время полного коллапса протогалактического облака значительно меньше, чем характерное время эволюции предсверхновых SNe Ia. Это несоответствие легко обходится в другом классе моделей, где подсистема толстого диска формируется в результате «разогрева» первичного звездного тонкого диска из-за взаимодействия Галактики с очень близкой галактикой-спутником (см. Kroupa (2002)). Проблема этой модели заключается в объяснении существования в толстом диске металлических шаровых скоплений. Разогреться, как звезды, галактикой-спутником они не в состоянии и могут возникнуть только в результате звездообразования, сопутствующего этому взаимодействию (Gratton et al. 2000). Другой механизм образования подсистемы предполагает захват малых карликовых галактик-спутников и попадание их звезд в толстый диск (Abadi et al. 2003). Возможно образование звездного толстого диска внутри нашей Галактики в результате так называемого «мокрого мерджинга» спутника, с большим количеством межзвездного вещества и аккреции его газа (Brook et al. 2004). И, наконец, толстый диск из звезд поля мог получиться просто из-за радиальной миграции звезд тонкого диска (см. Schönrich and Binney (2009)). К сожалению, как было отмечено выше, объяснить происхождение толстого диска с учетом детального химического состава пытаются лишь для стационарных звезд галактического поля, тогда как для шаровых скоплений и переменных звезд типа RR Lyrae поля такие модели не учитывают особенности содержаний в них химических элементов.

Данная работа является продолжением исследования химических и пространственно-кинематических свойств шаровых скоплений и переменных типа RR Lyrae поля, начатого в работах Marsakov et al. (2018; 2019b; c). В них мы, в частности, показали, что у обоих типов объектов кинематика плохо сочетается с металличностью, поэтому для отделения объектов толстого диска

от гало у скоплений надо руководствоваться провалом, а у лирид поля — изломом на их функциях металличности в окрестности $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.0$ ¹. Здесь мы проведем сравнение химического состава шаровых скоплений и двух типов звезд поля (близких F и G карликов и гигантов и звезд типа RR Lyrae), выделенных по кинематическому критерию в подсистему толстого диска.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа поведения некоторых химических элементов в шаровых скоплениях мы взяли металличности из компьютерной версии компилятивного каталога (Harris 2010), спектроскопические определения обилий железа и относительных содержаний двух α -элементов — титана и кальция — из нашего компилятивного каталога (Marsakov et al. 2019c). Компоненты пространственных скоростей для проведения стратификации по галактическим подсистемам 115 скоплений, определенные авторами работы Chemel et al. (2018) по данным современных каталогов, приведены в работе Marsakov et al. (2019b). Аналогичные данные, а также относительные содержания одного элемента медленных нейтронных захватов (иттрия), для 100 переменных звезд поля типа RR Lyrae взяты из нашего каталога², описанного в работе Marsakov et al. (2018). Для сравнения мы использовали каталог из работы Venn et al. (2004), в котором приведены металличности, относительные содержания α -элементов, s-элементов и компоненты пространственных скоростей для 785 звезд галактического поля во всем интересующем нас диапазоне металличности, а также каталог Bensby et al. (2014), содержащий аналогичные данные для 714 F–G карликов и гигантов поля, принадлежащих в основном дисковому подсистемам Галактики, то есть в выборке очень мало низкометаллических звезд. Ошибки усредненных относительных содержаний двух α -элементов, используемых в настоящей работе, у скоплений и лирид поля примерно одинаковые: $\langle \varepsilon[\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}] \rangle \approx 0.11$, а ошибки компонентов пространственных скоростей примерно 17 км с^{-1} (подробности см. в работах Marsakov et al. (2018; 2019b)).

На рис. 1a,b приведены функции металличности шаровых скоплений и переменных типа RR Lyrae поля и для сравнения — двух выборок близких звезд поля (1c,d). Внутри каждого распределения

более темным цветом выделены гистограммы тех же объектов, которые по кинематике попали в подсистему толстого диска. Подробнее о разделении наших лирид поля и шаровых скоплений по подсистемам Галактики можно узнать в работах Marsakov et al. (2018; 2019b). Несмотря на то, что методика стратификации всех объектов одинаковая (то есть компоненты остаточных скоростей всех объектов попадают в одинаковые диапазоны, величины которых задаются заранее), налицо различие распределений по металличности между разными объектами, попавшими в толстый диск. Главным образом обращает на себя внимание различие между звездами поля и более старыми объектами — шаровыми скоплениями и звездами типа RR Лиры поля. Из рис. 1 видно, что все звезды поля (кроме лирид) оказываются в среднем более металличными. Так, если у звезд поля толстого диска средние металличности $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -0.58 \pm 0.04$ и -0.44 ± 0.03 по данным Venn et al. (2004) и Bensby et al. (2014) соответственно, то у скоплений и лирид поля они на порядок меньше — $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -1.16 \pm 0.11$ и -1.39 ± 0.04 соответственно. Причем, если у шаровых скоплений объекты с кинематикой толстого диска довольно равномерно заполняют весь диапазон металличности, то лириды поля демонстрируют уверенный максимум в районе $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.3$. У близких звезд поля этот максимум наблюдается при значительно более высокой металличности — $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.4$ ³. Рассмотрим различие химического состава разных объектов подробнее.

3. ШАРОВЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Результаты работ Marsakov et al. (2019b; c) показывают, что для шаровых скоплений нашей Галактики кинематический метод стратификации вряд ли подходит, поскольку выделенные по кинематике скопления разных подсистем по химическим свойствам кардинально отличаются от звезд поля одноименных галактических подсистем. В частности, все металличные ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$) скопления, принадлежащие, согласно кинематическому критерию из Bensby et al. (2003), разным подсистемам, находятся в довольно ограниченных пределах относительно центра и плоскости Галактики. Зато в диапазоне меньшей металличности среди скоплений с кинематикой толстого диска имеются и весьма удаленные от галактической плоскости объекты, не говоря уже о скоплениях с кинематикой гало. Одновременно среди малометаллических скоплений, принадлежащих по кинематике не только гало, но

¹На самом деле, провал у шаровых скоплений расположен при несколько большем значении металличности (см. Borkova and Marsakov (2000)), но удобнее принять обычно используемую эту круглую цифру.

²<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?source=J/AZh/95/54>

³Заметим, что максимумы распределений у звезд поля толстого диска из-за длинных малометаллических «хвостов» имеют несколько большие металличности, чем средние значения.

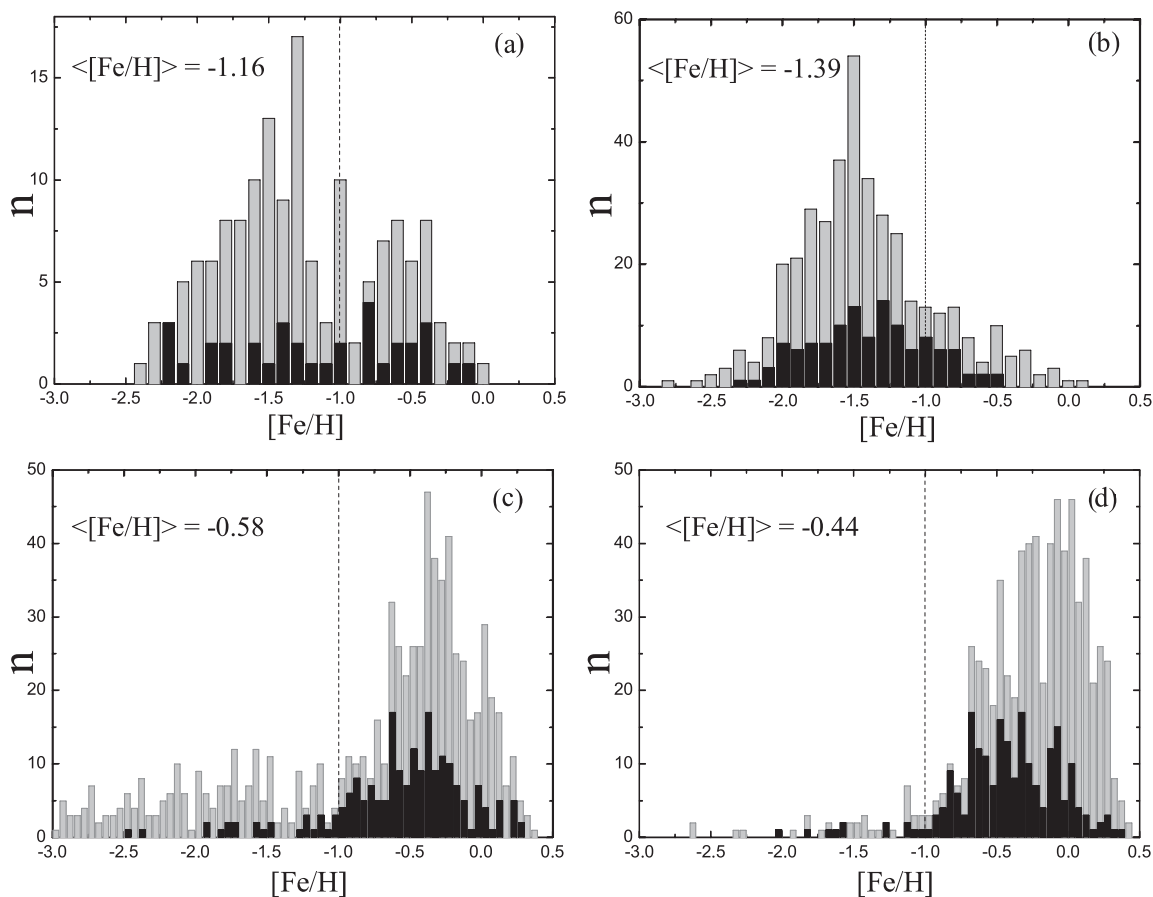


Рис. 1. Распределения по металличности шаровых скоплений (а), лирид поля (b), звезд поля из Venn et al. (2004) (c) и F–G-звезд поля из Bensby et al. (2014) (d). Темным цветом выделены распределения объектов с кинематикой толстого диска. Металличности для скоплений взяты из Harris (2010), для лирид из Dambis et al. (2013), а для звезд поля спектроскопические значения $[Fe/H]$ из указанных выше статей. Вертикальные штриховые линии на всех панелях при $[Fe/H] = -1.0$ примерно соответствуют для всех объектов провалу или перегибу на гистограммах. На панелях приведены средние значения металличности объектов толстого диска.

и толстому диску, большое количество лежащих далеко за пределами солнечного круга. Это отражается в хорошо известных отрицательных радиальном и вертикальном градиентах металличности у генеральной совокупности шаровых скоплений Галактики. В итоге получается, что традиционно используемая процедура отделения шаровых скоплений толстого диска от скоплений гало по металличности оказывается более приемлемой (см. обоснование в Marsakov et al. (2019b; c)).

Рассмотрим подробнее химический состав шаровых скоплений, по кинематике относящимся к разным подсистемам, основываясь на изучении относительных содержаний у шаровых скоплений только двух α -элементов — кальция и титана, как наиболее информативных для диагностики эволюции ранней Галактики. В видимом диапазоне спектра линий у этих двух химических элементов много, и их содержания довольно надежно определяются. Выбор этих элементов обусловлен тем, что средние относительные содержания двух

первичных α -элементов — кислорода и магния — в процессе эволюции шарового скопления уменьшаются по сравнению с содержаниями их в родительских протооблаках. А содержания еще одного α -элемента — кремния — определены для меньшего количества скоплений и совсем не определены для звезд поля из Venn et al. (2004), которые мы используем для сравнения. Хотя титан, строго говоря, не является исключительно α -элементом и частично принадлежит к элементам железного пика, производящимся в том числе и в SNe Ia, но его относительные содержания хорошо следуют поведению «чистых» α -элементов — O, Mg, Si и Ca (см., в частности, Bensby et al. (2014)). Эти же авторы отмечают, что в отличие от других α -элементов, неопределенность в $[Ti/Fe]$ низка и неизменна практически для всех параметров. Поэтому они (да и другие авторы) для исследования свойств галактических подсистем чаще всего используют результаты именно по титану, как более информативному элементу. На рис. 2 приведена диаграмма

«металличность — относительные содержания α -элементов» для звезд поля и шаровых скоплений. У обоих типов объектов разными значками обозначены принадлежности по кинематическим критериям разным галактическим подсистемам. Самыми темными, хорошо выделяющимися значками обозначены объекты с кинематикой толстого диска. Из рисунка хорошо видно, что скопления этой подсистемы имеют не только диапазон металличности отличный от диапазона звезд поля, но и существенно повышенные при одинаковой металличности относительные содержания α -элементов в диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$. Причем у 7 из 9 скоплений отношения $[\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}] > 0.2$, а у двух (NGC 6528 и NGC 6553) лишь немногим меньше. Три подписанные скопления в нижней части диаграммы в прошлом принадлежали разрушенным карликовым галактикам (см. Marsakov et al. (2019c)). Кроме того, у звезд поля толстого диска только 9% малометаллические ($[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$), тогда как у скоплений таких половина. Обратим внимание еще на одну особенность скоплений. Белыми маленькими кружками внутри больших кружков на рисунке обозначены скопления, которые мы посчитали генетически связанными с единым протогалактическим облаком. Это скопления с прямым обращением вокруг галактического центра, которые по положениям и элементам галактических орбит никто не связывал с разрушенными карликовыми галактиками-спутниками, и все они расположены или имеют максимальные удаления точек своих орбит менее 15 кпк. Таких скоплений в выборке 60%. Среди них оказались скопления с кинематикой всех трех выделенных нами галактических подсистем, а также все металлические скопления (кроме двух с кинематикой гало и ретроградными орбитами).

Не исключено, что различие химического состава у шаровых скоплений и звезд поля, выделяемых кинематическим критерием в подсистему толстого диска, указывает на отсутствие связи между одноименными подсистемами у этих объектов. Возможно, причины образования похожих подсистем у звезд поля и шаровых скоплений различны. Действительно, как хорошо видно из рис. 2, все богатые металлами ($-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.0$) скопления (за исключением аккрецированных скоплений Pal 12 и Ter 7) располагаются в верхней части полосы, занимаемой звездами поля. Расчет показывает, что среднее относительное содержание α -элементов и ошибка среднего у этих скоплений равны $\langle [\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}]_{\text{GC}} \rangle = 0.27 \pm 0.02$, тогда как у звезд поля толстого диска в том же диапазоне металличности за пределами ошибок меньше — $\langle [\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}]_{\text{field stars}} \rangle = 0.14 \pm 0.01$. Это различие хорошо видно из сглаженных трендов, построенных для шаровых скоплений и звезд поля

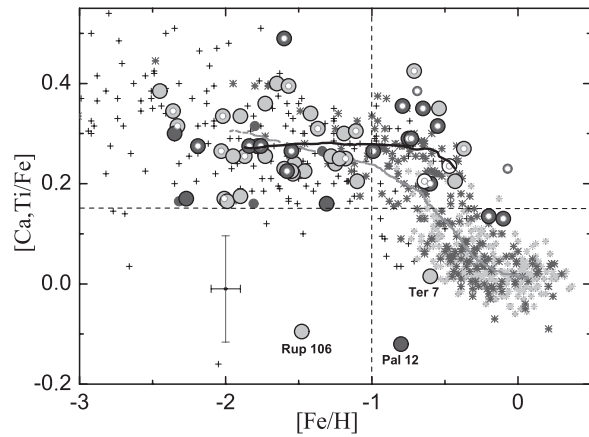


Рис. 2. Изменение относительных содержаний, усредненных по двум α -элементам (Ca и Ti), с изменением металличности у звезд поля из Venn et al. (2004) и шаровых скоплений из Marsakov et al. (2019b). Звезды поля обозначены: светло серыми снежинками — тонкий диск, темными снежинками — толстый диск, темными крестиками — гало. Большие кружки — скопления, принадлежащие по кинематическим признакам тонкому диску — светлые, толстому диску — темные, гало — серые. Небольшие темные кружки — нестратифицированные скопления. Белые кружки внутри больших кружков — генетически связанные скопления. Подписаны три скопления, потерянные карликовыми галактиками-спутниками. Темная и серая ломаные кривые — сглаженные тренды со скользящим средним для шаровых скоплений и звезд поля соответственно. Нанесены средние бары ошибок индивидуальных определений. Вертикальная штриховая линия $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$ разделяет скопления на две группы — бедную и богатую металлами, а горизонтальная линия $[\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}] = 0.15$ примерно проведена по нижней границе малометаллических шаровых скоплений и звезд поля.

на рис. 2. Напомним, что согласно современным представлениям α -элементы и небольшое количество железа выбрасываются в межзвездную среду сверхновыми типа II, время жизни которых менее 100 млн. лет. Основное же количество элементов железного пика производится во время вспышек сверхновых типа Ia, которые начинают массово взрываться примерно через 1 млрд. лет после начала звездообразования (Matteucci 2003). Поэтому после начала массовых вспышек SNe Ia в звездно-газовой системе наблюдается т.н. «излом» на зависимости « $[\text{Fe}/\text{H}]$ — $[\alpha/\text{Fe}]$ ». Как можно увидеть из сглаженного тренда для звезд поля из Venn et al. (2004) на рис. 2, в нашей Галактике «излом» наблюдается в окрестностях $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0$. Значит, высокие относительные содержания α -элементов у богатых металлами скоплений указывают на то, что они образовались в течение примерно миллиарда лет после начала звездообразования. А значит, богатые металлами звезды поля моложе шаровых скоплений такой же металличности.

Выделенные нами как генетически связанные скопления по определению расположены бли-

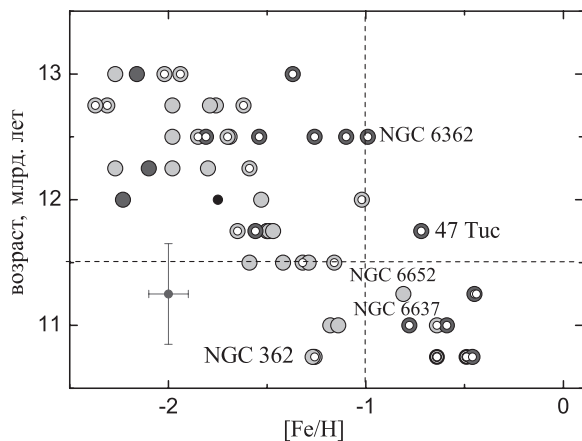


Рис. 3. Диаграмма «металличность — возраст» для всех шаровых скоплений. Металличности взяты из Harris (2010), а возрасты из VandenBerg et al. (2013). Обозначения, как на рис. 2. Подписаны скопления, о которых говорится в тексте. Вертикальная штриховая линия примерно соответствует провалу в функции металличности, а горизонтальная — значению возраста 11.5 млрд. лет.

же 15 кпк от галактического центра. Кроме того, как видно из рис. 2 и 3, именно они составляют абсолютное большинство в богатой металлами группе, которая на распределении по металличности (см. рис. 1а) около точки $[Fe/H] \approx -1.0$ отделяется провалом от менее металлических скоплений. Такие свойства богатых металлами скоплений можно, по-видимому, объяснить существованием активной фазы в эволюции Галактики (см. подробнее Marsakov and Suchkov (1976; 1977)). Период активной фазы наступает после массовых вспышек сверхновых в гало, разогревающих межзвездное вещество, в результате чего происходит задержка звездообразования. В период этой задержки уже загрязненное тяжелыми элементами межзвездное вещество Галактики перемешивается, остывает и коллапсирует до меньших размеров, после чего в ней вновь начинается звездообразование и формируются дисковые подсистемы. Однако такому сценарию образования подсистем у шаровых скоплений противоречат, как видно из рис. 2, высокие относительные содержания в них α -элементов: $[\alpha/Fe] > 0.2$. Как уже отмечалось выше, высокие отношения $[\alpha/Fe]$ практически у всех скоплений свидетельствуют о том, что все они образовались до начала вспышек SNe Ia, то есть в течение первого миллиарда лет после начала звездообразования в протогалактическом облаке. Из того же рисунка видно, что в пределах металлического диапазона у скоплений также можно заметить уменьшение относительных содержаний α -элементов с ростом металличности, но в среднем отношения $[\alpha/Fe]$ при любой металличности в этом диапазоне остаются у них выше, чем у звезд поля

толстого диска. В итоге в диапазоне $[Fe/H] > -1.0$, зависимость $[\alpha/Fe]$ от $[Fe/H]$ у них лежит выше и параллельно аналогичной зависимости для звезд. Причем среди них имеются скопления всех выделенных по кинематике подсистем. Заметная доля таких богатых металлами скоплений имеет кинематику, характерную для объектов гало, то есть оказывается на весьма вытянутых орбитах (эксцентриситеты вплоть до $e = 0.9$), хотя сами орбиты полностью расположены внутри солнечного круга (см. рис. 2 и 3). Такое вполне могло получиться при образовании этих скоплений в ходе возобновившегося после активной фазы коллапса уже обогащенного тяжелыми элементами вещества протогалактического облака.

Если появление металлических скоплений, генетически связанных с единым протогалактическим облаком, обязано своим происхождением активной фазе, то все они должны оказаться моложе менее металлических скоплений. Действительно, поскольку в нашей Галактике от гало к диску металличность со временем увеличивается, поэтому она является статистическим индикатором возраста. Это хорошо видно из рис. 3, где приведена связь металличности с возрастом для шаровых скоплений из работы VandenBerg et al. (2013). На рисунке выделены белыми кружками генетически связанные скопления. Видим, что все металлические скопления оказываются моложе 11.5 млрд. лет (47 Tuc лишь немного старше, а старое скопление NGC 6362, как видно из рис. 1а, находится несколько левее провала на гистограмме, т.е. в малометаллическом диапазоне), тогда как все менее металлические, генетически связанные скопления более старые (кроме NGC 362). (Правда, по определениям из Salaris and Weiss (2002) все металлические скопления старше этого возраста и возникли одновременно с самыми старыми наименее металлическими скоплениями, что говорит о недостаточной надежности определения возрастов скоплений.) Из рис. 3 видно уверенное монотонное уменьшение возрастов у полной выборки скоплений с увеличением металличности. При этом отчетливо выделяются две отдельные параллельные зависимости для скоплений различающейся металличности, причем диапазоны возрастов у этих зависимостей одинаковые, тогда как диапазоны $[Fe/H]$ у них соответственно: от -2.4 до -1.2 dex и от -1.3 до -0.3 dex. Видим, что более металлическая последовательность полностью состоит из генетически связанных скоплений (кроме NGC 6652). Примерно половина генетически связанных скоплений оказалась в менее металлической группе. Заметим, что сами авторы работы VandenBerg et al. (2013) не нашли однозначного объяснения природы двух последовательностей, но связали их возникновение с различием потери скоплениями газа, выброшенного

их гигантами асимптотической ветви — именно из этого газа рождается впоследствии второе поколение звезд скоплений с измененным химическим составом. Из рис. 3 также видно, что скопления только одной последовательности попадают в диапазон $[Fe/H] > -1.0$. Напомним, что в генетически связанные мы включили все близкие скопления ($R_G < 15$ кпк), не все из которых имеют вычисленные элементы орбит, поэтому среди них могут оказаться и далекие (т. е. с $R_{max} > 15$ кпк), а формально такие скопления не могут быть зачислены в эту группу. Обратим внимание, что обсуждаемый нами провал на функции металличности в окрестности $[Fe/H] \approx -1.0$ вряд ли можно считать следствием или причиной существования двух последовательностей скоплений с разными возрастами и металличностями на рис. 3, поскольку, хотя он и отсекает малометалличную последовательность, но зато металличную делит практически пополам. Заметим, что на рис. 3 имеется лишь одно столь же молодое, но малометалличное, генетически связанное скопление, орбита которого также полностью лежит внутри солнечного круга — NGC 362.

Получается, что наиболее богатые металлами, генетически связанные скопления родились позже. В металличном диапазоне на рис. 3 (в правом нижнем квадранте) можно увидеть статистически незначимую, слабую тенденцию уменьшения возраста с ростом металличности. По крайней мере, два самых молодых богатых металлами скопления по кинематике принадлежат тонкому диску. По определениям из Salariis and Weiss (2002) такая зависимость также очень неуверенная. Повидимому, для окончательного выяснения вопроса о поведении возрастов скоплений в диапазоне $[Fe/H] > -1.0$ необходимы их новые определения по современным фотометрическим и астрометрическим данным. Из богатых металлами скоплений на рис. 3 только два с кинематикой гало (NGC 6652 и NGC 6637). Причем у второго скопления орбита полностью лежит внутри солнечного круга. Согласно используемым нами возрастам из VandenBerg et al. (2013), сверхновые SNe Ia все же успевают обогатить металлами межзвездную среду, из которой впоследствии родились скопления металличной группы. В этом случае химические и кинематические свойства металличных скоплений не противоречат гипотезе об активных фазах в эволюции Галактики. При этом более высокие, по сравнению со звездами поля, относительные содержания α -элементов у всех богатых металлами скоплений можно объяснить тем, что они образовались из обогащенного тяжелыми элементами межзвездного вещества повышенной плотности после задержки звездообразования, которая привела к увеличению верхнего предела масс образующихся звезд, а следовательно, и сверхновых второго типа, выбрасывающих большее количество

α -элементов. Тогда малометаллические, генетически связанные скопления, орбиты которых также почти полностью лежат внутри солнечного круга, должны были родиться еще до наступления активной фазы. Действительно, как видно из рис. 3, возрасты менее металличных генетически связанных скоплений систематически больше. Возможно, что уже к моменту их рождения скорость коллапса протогалактического облака существенно замедлилась, что привело к появлению среди них скоплений с более «молодой» кинематикой толстого диска.

Таким образом, привлекая гипотезу об активных фазах в эволюции Галактики, можно попытаться дать непротиворечивое объяснение причинно-следственному изменению объема Галактики, занимаемого скоплениями при переходе через $[Fe/H] \approx -1.0$. Тем не менее существование старых малометаллических скоплений с кинематикой толстого диска и с орбитами, заключенными также внутри солнечного круга, оставляет открытым вопрос о причине расхождения результатов стратификации по металличности и кинематике скоплений и звезд поля. Получается, что то, что мы называем толстым диском у звезд поля и скоплений — это разные подсистемы.

В противном случае, если впоследствии окажется, что зависимость между металличностью и возрастом у шаровых скоплений отсутствует, то не удастся найти непротиворечивое объяснение, почему при переходе через $[Fe/H] \approx -1.0$ скопления скачком изменяют занимаемый объем в Галактике. Но в любом случае, высокие относительные содержания α -элементов в богатых металлами скоплениях указывают на их больший возраст, чем возраст звезд поля толстого диска, у которых эти содержания много меньше из-за массивированного загрязнения их родительской межзвездной среды выбросами сравнительно долгоживущих SNe Ia.

4. ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ ТИПА RR Lyrae ПОЛЯ

Противоречие, хотя и не столь резко выраженное, между критериями принадлежности к дисковому подсистемам и к гало по химическим и кинематическим свойствам наблюдается также между двумя типами звезд поля: F–G-карликами и гигантами с одной стороны и переменными типа RR Лиры, с другой (подробнее см. Marsakov et al. (2018)). Такие переменные звезды являются типичными представителями шаровых скоплений, поэтому сходство их функций металличности не удивляет. Из рис. 1 видно, что процент малометаллических объектов с кинематикой толстого диска у лирид поля даже выше, чем у шаровых скоплений. Зато, в отличие от скоплений, у металличных лирид относительные содержания α -элементов систематически уменьшаются с ростом

[Fe/H], как и у остальных звезд поля. Это хорошо видно на рис. 4, где приведена диаграмма «металличность — относительные содержания α -элементов» для звезд поля и переменных типа RR Lyrae поля. Содержания тех же, что и для шаровых скоплений, двух α -элементов — кальция и титана — взяты из авторского компилятивного каталога, описанного в работе Marsakov et al. (2018). В указанной работе мы предложили также возможное объяснение этих различий тем, что, являясь более старыми звездами, чем основная масса карликов, лириды отслеживают химический состав межзвездной среды на начальных этапах формирования подсистемы толстого диска. К сожалению, возрасты этих переменных определить, как в случае шаровых скоплений, не удается. Излом зависимости $[\alpha/\text{Fe}]$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$ у лирид указывает на тот факт, что в звездно-газовой системе, в которой они образовались, наступила эпоха вспышек сверхновых типа Ia, то есть с момента начала звездообразования прошло около 1 миллиарда лет. О большой длительности эволюции подсистемы толстого диска свидетельствуют также отчетливо наблюдаемые на рис. 1c,d и рис. 3c,d из работы Marsakov et al. (2018) систематические тренды в пределах данной подсистемы как металличности, так и относительных содержаний α -элементов с изменением кинематических показателей.

Обратим внимание на особенности химического состава лирид, наблюдаемые на рис. 4, которые можно связать с различием природы некоторых звезд поля. В частности, в недавней работе Mackereth et al. (2019) проанализированы относительные содержания α -элементов и скорости у нескольких десятков тысяч звезд в пределах 15 кпк от Солнца. Выборка составлена путем кросс-идентификации между каталогами SDSS-APOGEE DR14 и Gaia DR2. В итоге был сделан вывод о захвате на ранних этапах эволюции нашей Галактикой массивной (около $10^9 M_{\odot}$) галактики-спутника, в результате чего часть звезд поля, рожденных в этой галактике-спутнике, попали в нашу Галактику, а часть звезд уже образовавшегося тонкого диска при этом «разогрелась», сформировав подсистему толстого диска. Подчеркнем, что в работе Mackereth et al. (2019) отмечается, что природа таких низкоскоростных звезд до конца неясна, и авторы лишь предполагают, что подсистема толстого диска формировалась в результате одновременных процессов — звездообразования в едином протогалактическом облаке и аккреционных процессов. В пользу данного предположения говорят и выводы работы Belokurov et al. (2018), авторы которой исследовали изменение соотношения между классами по Оостерхофу звезд типа RR Lyr поля с удалением от галактического центра по данным GAIA. Они нашли подтверждение того

факта, что часть этих звезд попала в нашу Галактику из распавшейся карликовой галактики-спутника большой массы. К такому же выводу пришли и авторы работы Helmi et al. (2018), которые по данным обзора APOGEE и Gaia DR2, а также в результате численного моделирования показали, что во внутреннем гало преобладают остатки карликовой галактики более массивной, чем Малое Магелланово Облако, которую они назвали Гея-Энцелад. Они продемонстрировали, что среди исследованных ими звездных объектов сотни лирид и более дюжины шаровых скоплений образовались в этой галактике. Причем слияние с Гея-Энцеладом, по их мнению, привело к динамическому «разогреву» предшественника толстого диска Галактики и, следовательно, способствовало формированию этого компонента примерно 10 млрд лет назад.

Это означает, что не все лириды поля генетически связаны с нашей Галактикой. Действительно, к настоящему времени некоторые из таких «захваченных» звезд поля вполне могли стать переменными типа RR Lyrae. К сожалению, из-за недостатка наблюдательных данных отследить существование «излома» у наших лирид поля с известным содержанием химических элементов не представляется возможным. Однако по форме сглаженных трендов на зависимости $[\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ (рис. 4a) видно, что начиная от $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.3$ последовательность лирид располагается ниже, чем у звезд поля, причем это значение совпадает с металличностью «изгиба», отмечаемого в Mackereth et al. (2019) у аккрецированных звезд Галактики по данным APOGEE. Этот факт, а также несколько более низкие, по сравнению с близкими звездами поля, относительные содержания α -элементов (особенно титана, см. рис. 2 в Marsakov et al. (2018)) у большинства богатых металлами лирид с кинематикой толстого и тонкого дисков на рис. 4 может свидетельствовать в пользу внегалактического происхождения некоторых, в частности металличных лирид. Как показал расчет, в диапазоне $([\text{Fe}/\text{H}] > -0.5)$ все лириды в среднем имеют отношения $\langle [\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}]_{\text{RR Lyrae}} \rangle = -0.02 \pm 0.03$, что далеко за пределами ошибок и ниже чем у столь же металличных звезд поля:

$$\langle [\text{Ca}, \text{Ti}/\text{Fe}]_{\text{field stars}} \rangle = +0.042 \pm 0.003.$$

На рис. 4a видно, что практически все эти лириды лежат в нижней части полосы, занимаемой звездами поля⁴.

⁴Особенности изменения каждого из четырех α -элементов можно увидеть на рис. 2a–d в работе Marsakov et al. (2018), которые показывают, что наиболее низкие относительные содержания наблюдаются у титана, хотя и у других элементов они как правило ниже средних для звезд поля.

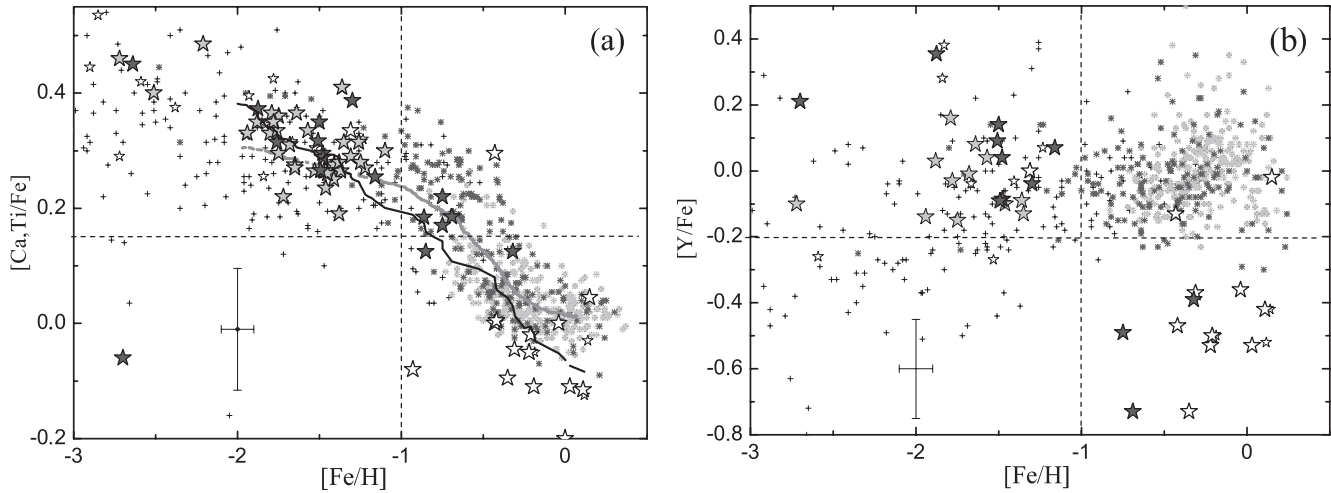


Рис. 4. Изменение относительных содержаний, усредненных по двум α -элементам (Ca и Ti) (a) и относительных содержаний иттрия (b) с изменением металличности у звезд поля из Venn et al. (2004) и звезд типа RR Lyrae поля из Marsakov et al. (2018). Обозначения, как на рис. 2, только лириды обозначены звездочками соответствующего цвета. Темная и серая ломаные кривые — сглаженные тренды для лирид и звезд поля соответственно (a). На обеих панелях вертикальные штриховые линии — как на рис. 2, а горизонтальные — примерно соответствуют нижним значениям соответствующих отношений $[el/Fe]$ у малометаллических лирид.

Известно, что вместе с α -элементами сверхновые типа SNe II выбрасывают также атомы элементов r -процессов, в частности, европия. Поэтому относительные содержания этого, хорошо определяемого в звездах элемента, хорошо зависят от металличности подобно α -элементам, что позволяет увеличить надежность определения хода зависимости « $[el/Fe]$ — $[Fe/H]$ » по одному химическому элементу. Но, к сожалению, ни европия, ни других r -элементов ни для одной лириды поля с $[Fe/H] > -1.0$ не найдено. Хотя для других металлических переменных звезд — цефеид — содержания европия хорошо определяются и отношения $[Eu/Fe]$ у них такие же, как у карликов и гигантов поля (Marsakov et al. 2013).

Однако очень низкие величины демонстрируют у металлических лирид поля не только отношения $[Ca, Ti/Fe]$, но и относительные содержания легкого s -элемента — иттрия. На рис. 4b, где показано изменение отношения $[Y/Fe]$ с изменением металличности для лирид поля и звезд сравнения это хорошо видно. Заметим, что тяжелые s -элементы у богатых металлами лирид дают практически солнечные отношения $[el/Fe]$. Причем, согласно современным представлениям, подавляющее количество атомов всех s -элементов производится в недрах гигантов асимптотической ветви с массами большими $4M_{\odot}$ (главная компонента s -процесса) и путем сброса оболочки попадает в межзвездное пространство. Напомним, что некоторые АВГ-звезды оказываются тесными двойными, которые взрываются впоследствии как сверхновые типа Ia. То есть время выбросов этих элементов и железа

примерно совпадают. Тем не менее, в металлическом диапазоне на рис. 4b вместе с резким скачкообразным уменьшением отношений $[Y/Fe]$ у лирид можно увидеть слабую тенденцию их увеличения с ростом $[Fe/H]$, как у стационарных звезд поля. Получается, что металлические лириды образуются из вещества, обедненного этим элементом. Подчеркнем, что на низкие отношения $[Y/Fe]$ в лиридах поля и ранее обращали внимание и пытались их объяснить необычным состоянием атмосфер этих переменных звезд. В частности, в работе Clementini et al. (1995) высказано предположение о том, что аномальное обилие иттрия вызвано сверхионизацией, обусловленной сильными эмиссионными линиями $Ly\alpha$, которые индуцируются ударными волнами в пульсирующей атмосфере. Однако авторы Liu et al. (2013) опровергли такую возможность из-за отсутствия аналогичного эффекта у малометаллических лирид и предложили считать это эффектом, вызванным различием поверхностной гравитации у проэволюционировавших звезд типа RR Lyrae и непроэволюционировавших карликов. Однако многочисленные определения ускорений силы тяжести на поверхности металлических лирид по спектрам высокого разрешения показали, что они заключены в интервале: $\lg g = (2.5-3.0)$, то есть примерно такие же, как у наших гигантов сравнения (см., например, Marsakov et al. (2019a)). Да и у других богатых металлами звезд — цефеид — ускорения силы тяжести даже меньше, чем у лирид, а отношения $[Y/Fe]$ несколько больше, чем у карликов и гигантов поля (см. Andrievsky et al. (2013)). Поскольку влиянием особенностей атмо-

сфер объяснить аномальные содержания иттрия у металлических лирид не удастся, можно предположить, что оно вызвано внешней причиной. Возможно в межзвездной среде, из которой образовались богатые металлами звезды, ставшие теперь лиридами, кроме избытка гелия были еще в дефиците α -элементы и легкий s -элемент — иттрий? Дело в том, что в работе Marsakov et al. (2019a) мы предположили, что сравнительно молодые богатые металлами лириды поля имеют повышенные содержания гелия, приводящие к более быстрой эволюции звезд, и в окрестности Солнца вынесены радиальной миграцией из центральных областей Галактики, где такие звезды уже обнаружены. Если теперь предположить, что часть лирид поля имеет внегалактическое происхождение, возникает необходимость объяснения, как такие богатые металлами звезды могли образоваться на ранних этапах эволюции теперь уже в карликовой галактике, а в нашей Галактике приобрести кинематику звезд поля толстого и тонкого дисков. Безусловно, данное предположение весьма поверхностное и требует всестороннего обоснования.

5. ВЫВОДЫ

Таким образом, различия в содержаниях некоторых химических элементов у двух представителей старых звездных населений Галактики — шаровых скоплений и переменных типа RR Lyrae поля, — от аналогичных содержаний у карликов и гигантов поля, которые по кинематическим параметрам принадлежат толстому галактическому диску, возможно свидетельствуют об их образовании из вещества, прошедшего различные пути химической эволюции. В итоге можно предположить, что подсистема толстого диска в Галактике оказывается составной, и внутри нее существуют независимо, по крайней мере, три составляющие. Самая старая — это металлические шаровые скопления, которые образовались из единого протогалактического облака вскоре после начала вспышек в нем сверхновых типа Ia. Затем образовалась подсистема звезд поля толстого диска в результате «разогрева» звезд уже образовавшегося в Галактике тонкого диска упавшей на нее довольно массивной карликовой галактикой-спутником. И, наконец, подсистема звезд поля с кинематикой не только толстого, но даже и тонкого диска, выпавших на Галактику из этой захваченной галактики-спутника. В данной работе представителями последней подсистемы мы полагаем богатые металлами переменные звезды типа RR Lyrae поля. В настоящее время мы подготавливаем к публикации статью, в которой на более объемном наблюдательном материале будут продемонстрированы различия в содержаниях и

других, кроме рассмотренных, химических элементов в переменных звездах типа RR Lyrae и стационарных звездах поля, а также проанализированы возможные причины их возникновения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за ценные замечания, заставившие более аргументированно изложить результаты работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарят за поддержку лабораторию Космомикрофизических исследований структуры и динамики Галактики НИИ физики Южного федерального университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. G. Abadi, J. F. Navarro, M. Steinmetz, and V. R. Eke, *Astrophys. J.* **597** (1), 21 (2003).
2. S. M. Andrievsky, J. R. D. Lépine, S. A. Korotin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **428** (4), 3252 (2013).
3. V. Belokurov, D. Erkal, N. W. Evans, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **478** (1), 611 (2018).
4. T. Bensby, S. Feltzing, and I. Lundström, *Astron. and Astrophys.* **410**, 527 (2003).
5. T. Bensby, S. Feltzing, and M. S. Oey, *Astron. and Astrophys.* **562**, A71 (2014).
6. T. V. Borkova and V. A. Marsakov, *Astronomy Reports* **44** (10), 665 (2000).
7. C. B. Brook, D. Kawata, B. K. Gibson, and K. C. Freeman, *Astrophys. J.* **612** (2), 894 (2004).
8. A. A. Chemel, E. V. Glushkova, A. K. Dambis, et al., *Astrophysical Bulletin* **73** (2), 162 (2018).
9. G. Clementini, E. Carretta, R. Gratton, et al., *Astron. J.* **110**, 2319 (1995).
10. A. K. Dambis, L. N. Berdnikov, A. Y. Kniazev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (4), 3206 (2013).
11. O. J. Eggen, D. Lynden-Bell, and A. R. Sandage, *Astrophys. J.* **136**, 748 (1962).
12. R. G. Gratton, E. Carretta, F. Matteucci, and C. Sneden, *Astron. and Astrophys.* **358**, 671 (2000).
13. W. E. Harris arXiv:1012.3224 (2010).
14. A. Helmi, C. Babusiaux, H. H. Koppelman, et al., *Nature* **563** (7729), 85 (2018).
15. T. D. Kinman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **119**, 538 (1959).
16. P. Kroupa, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **330** (3), 707 (2002).

17. B. V. Kukarkin, *Gobular star clusters. The general catalogue of globular star clusters of our galaxy, concerning information on 129 objects known before 1974* (Moscow, Sternberg State Astron. Inst., 1974). [in Russian].
18. S. Liu, G. Zhao, Y.-Q. Chen, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **13** (11), 1307-1329 (2013).
19. J. T. Mackereth, R. P. Schiavon, J. Pfeffer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (3), 3426 (2019).
20. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval, *Astronomy Reports* **62** (1), 50 (2018).
21. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', *Astronomy Reports* **63** (3), 203 (2019a).
22. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 403 (2019b).
23. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, *Astronomy Reports* **63** (4), 274 (2019c).
24. V. A. Marsakov, V. V. Koval', V. V. Kovtyukh, and T. V. Mishenina, *Astronomy Letters* **39** (12), 851 (2013).
25. V. A. Marsakov and A. A. Suchkov, *Sov. Astron. Letters* **2**, 148 (1976).
26. V. A. Marsakov and A. A. Suchkov, *Sov. Astron.* **21**, 700 (1977).
27. F. Matteucci, *Astrophys. and Space Sci.* **284** (2), 539 (2003).
28. W. W. Morgan, *Astron. J.* **64**, 432 (1959).
29. J. X. Prochaska, S. O. Naumov, B. W. Carney, et al., *Astron. J.* **120** (5), 2513 (2000).
30. M. Salaris and A. Weiss, *Astron. and Astrophys.* **388**, 492 (2002).
31. R. Schönrich and J. Binney, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396** (1), 203 (2009).
32. D. A. Vandenberg, K. Brogaard, R. Leaman, and L. Casagrande, *Astrophys. J.* **775** (2), 134 (2013).
33. K. A. Venn, M. Irwin, M. D. Shetrone, et al., *Astron. J.* **128** (3), 1177 (2004).
34. R. Zinn, *Astrophys. J.* **293**, 424 (1985).

Inconsistency of Chemical Properties of Stellar Populations in the Thick Disk Subsystem of Our Galaxy

V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha

Using modern published data on velocities and spectroscopic definitions of chemical elements in stellar objects of the Galaxy, we investigated the relationship of chemical composition with the kinematics of different populations. The paper shows that the old stellar populations of the Galaxy, belonging (by the kinematic criterion) to the thick disk subsystem—globular clusters, field variables of the type RR Lyrae (lyrids), as well as close F–G dwarfs and field giants, have different chemical composition. In particular, the dwarfs and giants of the field are on average more metallic than the globular clusters and lyrids of the field. Moreover, the relative abundances of α -elements in the range $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ are the highest for globular clusters, and are the lowest for field variables of the RR Lyrae type. Based on the analysis of the nature of the dependences of $[\alpha/\text{Fe}]$ on $[\text{Fe}/\text{H}]$ for these objects it was suggested that the thick disk subsystem in the Galaxy is composite and at least three components exist independently within it. The oldest one includes metal-rich globular clusters that formed from a single proto-galactic cloud shortly after the start of type Ia supernovae outbursts. Then the subsystem of field stars of a thick disk was formed as a result of “heating” of stars of already formed thin disk of the Galaxy by a rather massive dwarf satellite galaxy that fell on it. And finally, subsystems of field stars with the kinematics of not only a thick, but even a thin disk that fell on the Galaxy from this captured satellite galaxy.

Keywords: *Galaxy: structure—globular clusters: general—stars: variables: RR Lyrae*