

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД ТИПА RR ЛИРЫ ПОЛЯ
КАК ИНДИКАТОР ЭВОЛЮЦИИ ПОДСИСТЕМ
ГАЛАКТИКИ

В.А.МАРСАКОВ, М.Л.ГОЖА, В.В.КОВАЛЬ, Э.И.ВОРОБЬЕВ

Поступила 17 января 2018

Принята к печати 7 марта 2018

Исследованы связи между химическими и пространственно-кинематическими свойствами переменных звезд типа RR Lyrae (лириды) поля. Показано, что среди них есть металличные лириды с кинематикой тонкого диска, и обсуждается проблема существования таких лирид. Приводятся свидетельства уменьшения верхней границы массы образующихся звезд с увеличением металличности в тонком диске и лучшим перемешивании межзвездного вещества в этой подсистеме Галактики. Найдено, что лириды с кинематикой толстого диска в основном имеют металличности $[Fe/H] < -1.0$ и высокие отношения $[alpha/Fe] \approx 0.4$, тогда как у карликов поля такой химический состав имеют только примерно 10% звезд так называемого "малометаллического хвоста". При этом резкое уменьшение в Галактике отношений $[alpha/Fe]$ происходит у лирид, принадлежащих именно толстому диску, что свидетельствует о длительности периода формирования этой подсистемы. Выявлено несоответствие химического состава нескольких лирид их кинематике. Предполагается, что все они, скорее всего, имеют внегалактическое происхождение.

Ключевые слова: *переменные типа RR Lyrae; содержания α -элементов; подсистемы Галактики*

1. *Введение.* Переменные звезды типа RR Lyrae (лириды) находятся на продвинутой стадии своей эволюции и считаются одними из самых старых звезд Галактики. Поскольку эти звезды легко идентифицируются, видны на больших расстояниях, поэтому часто используются для изучения структуры и эволюции ранней Галактики. Традиционно население звезд типа RR Лир поля представляют составляющими двух подсистем Галактики - гало и толстого диска, отделяя лириды толстого диска по металличности критерием $[Fe/H] > -1.0$. Однако компоненты пространственных скоростей лирид поля настойчиво указывают, что часть из них наверняка принадлежит самой молодой подсистеме Галактики - ее тонкому диску. Анализ форм и размеров галактических орбит 217 лирид поля показал, что примерно треть из них имеют практически круговые орбиты, все точки которых остаются вблизи галактической плоскости [1]. Наряду с такими орбитами есть еще и ретроградные, которые с высокой вероятностью указывают, что их обладатели образовались не из единого протогалактического облака, а попали в нашу

Галактику в результате разрушения ее приливными силами карликовых галактик-спутников, т.е. имеют внегалактическое происхождение. Другими словами, кинематика свидетельствует о наличии среди лирид поля представителей, по крайней мере, четырех галактических подсистем - тонкого и толстого дисков, а также собственного и аккрецированного гало.

Поскольку тонкий диск моложе 9 млрд. лет (см., например, [2]), лириды этой подсистемы должны быть также молоды. Авторы работы [1] утверждают, что такие звезды имеют массу $< 2.5M_{\odot}$, и возраст некоторых из них может достигать 1 млрд. лет. К сожалению, возрасты лирид по теоретическим изохронам оценить не удастся. Несколько упорядочить хронологию образования этих звезд может помочь исследование содержаний в них химических элементов. Дело в том, что различные химические элементы синтезируются в реакциях термоядерного синтеза в звездах разных масс, эволюционирующих с разной скоростью и выбрасывающих эти элементы в межзвездную среду через разные промежутки времени. В частности, α -элементы, элементы быстрых нейтронных захватов и небольшое количество атомов железного пика выбрасываются массивными сверхновыми типа II через несколько десятков миллионов лет после образования этих звезд. С другой стороны, основная масса элементов группы железа образуется при вспышках сверхновых типа Ia, происходящих примерно через миллиард лет после их образования. Поэтому в замкнутой звездно-газовой системе отношения $[\alpha/Fe]$ у звезд, образующихся из межзвездной среды, обогащаемой сверхновыми, примерно через миллиард лет после вспышки звездообразования будут неуклонно уменьшаться со временем. Таким образом, относительные содержания этих химических элементов становятся статистическими индикаторами возраста звезд.

Авторы работы [3] по высокодисперсионным спектрам определили относительные содержания 15 химических элементов в 23 лиридах поля, которые по кинематическому критерию были стратифицированы по трем подсистемам Галактики. При этом 10 переменных попали в гало, три в толстый диск, а 10 - в тонкий диск. Все звезды, с высокой вероятностью попавшие в тонкий диск, оказались с $[Fe/H] > -0.5$ и с примерно солнечными $[\alpha/Fe]$. И наоборот, звезды с кинематикой толстого диска и гало оказались менее металличными и с высокими относительными содержаниями α -элементов. Причем, зависимости " $[Fe/H]$ - $[\alpha/Fe]$ " у лирид и карликов поля практически полностью совпали. Значит, молодые металличные лириды поля все же существуют? Однако, согласно современным представлениям об эволюции звезд, металличные звезды малой массы на стадии горения гелия в ядре должны попадать на диаграмме Герцшпрунга-Рессела в область красного сгущения, находящуюся в стороне от полосы неустойчивости, и поэтому пульсировать не могут. Поскольку обсуждаемые звезды все же попали в

полосу неустойчивости и стали пульсировать, можно предположить, что это более массивные переменные и их классификация требует уточнения.

Целью данной работы является исследование на значительном статистическом материале по данным созданного нами и представленного в [4] компилятивного каталога закономерностей между относительными содержаниями α -элементов и металличностью у лирид поля, принадлежащих разным галактическим подсистемам.

2. *Исходные данные.* Для проведения комплексных исследований в качестве основного источника пространственно-кинематических данных мы использовали каталог [5], в котором собраны интересующие нас металличности, вычисленные на основе индекса Престона, собственные движения и лучевые скорости для 392 лирид. На основе этих данных мы вычислили прямоугольные координаты, а также компоненты пространственных скоростей лирид. Еще для 14 лирид с найденными в литературе определениями содержания α -элементов мы взяли информацию для вычисления прямоугольных координат и скоростей из нескольких источников. Для 217 лирид мы взяли элементы галактических орбит из работы [1].

Для исследования химического состава мы собрали из литературы спектроскопические определения относительных содержаний α -элементов (Mg, Si, Ca, Ti) в 100 переменных типа RR Лиры поля, усреднили и свели их, по возможности, к единому солнечному содержанию. Источниками данных стали 25 статей с 1995 по 2017 годы. Средние значения ошибок для каждого химического элемента оказались в диапазоне (0.11-0.18), при среднем значении для всех химических элементов $\langle \varepsilon[\text{el}/\text{Fe}] \rangle = 0.14$. Подробнее о составлении компилятивного каталога и ошибках всех параметров лирид изложено в статье [4], а сам каталог описан в работе [6].

Для сравнения мы использовали данные из каталога [2], содержащего для 714 G-G-карликов поля металличности, относительные содержания α -элементов и компоненты пространственных скоростей.

3. *Стратификация лирид по галактическим подсистемам.* Как было уже отмечено, обычно населения старых объектов Галактики, таких как шаровые звездные скопления, субкарлики и переменные звезды типа RR Лиры, разделяют по металличности на две подсистемы - толстый диск и гало. Этому способствует провал или изгиб на их распределениях по металличности в окрестности $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0$. Понятно, что единого и достаточного критерия стратификации звезд по подсистемам Галактики не существует. Для надежного отнесения звезды к той или иной подсистеме следует учитывать многие характерные для каждой подсистемы параметры, такие как положение, кинематика, металличность, содержания разных

химических элементов, возраст и др. Поскольку целью настоящей работы является исследование химического состава лирид разных подсистем, мы ограничились определением подсистемы по кинематическим параметрам (подробнее, см. [6]). Для этого мы воспользовались методикой, предложенной в работе [7], где вычисляются вероятности принадлежности звезды поля подсистемам тонкого и толстого дисков и гало по компонентам их пространственных скоростей относительно локального центроида и дисперсиям этих компонентов в каждой подсистеме. В этом методе подразумевается, что компоненты пространственных скоростей звезд в каждой подсистеме подчиняются нормальным распределениям. При этом лирида относилась к той подсистеме, вероятность принадлежности к которой оказывалась выше.

Применение этой методики показало, что из 401 звезды нашего каталога с известными скоростями у 56 лирид вероятность принадлежности подсистеме

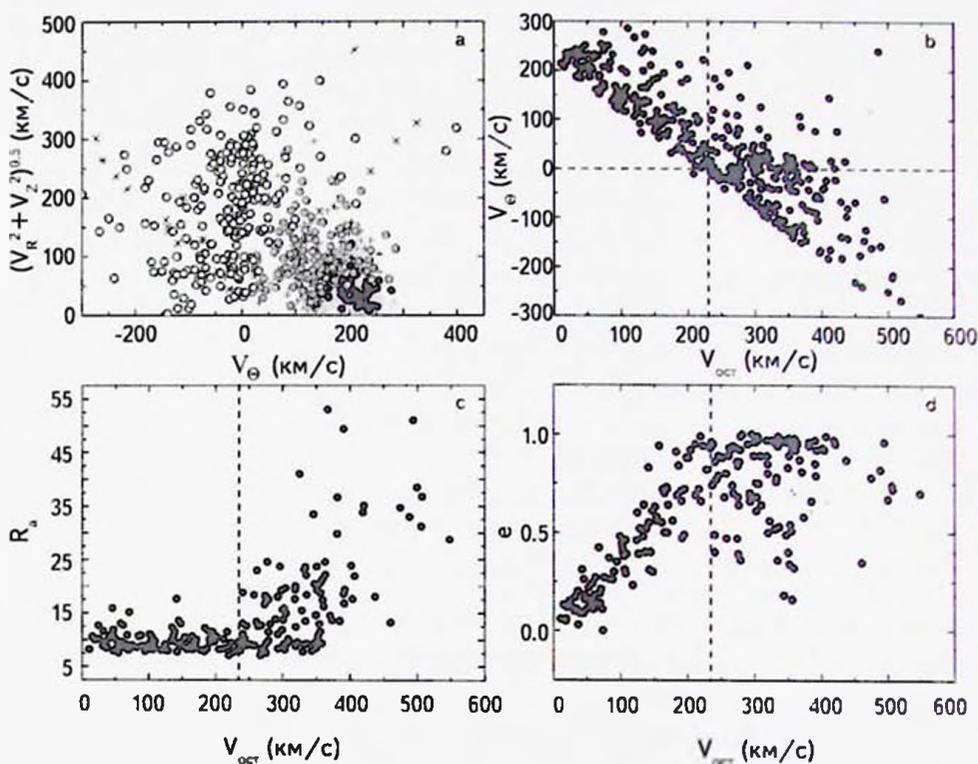


Рис.1. Диаграмма Гумре для карликов и лирид поля (а), зависимость азимутальной компоненты скорости (б), апогалактических радиусов галактических орбит (с) и эксцентриситетов орбит (д) от остаточной скорости для лирид поля. На панели (а) карлики поля обозначены: светлыми снежинками - тонкий диск, серыми крестиками - толстый диск, темными снежинками - гало; темными кружками обозначены лириды тонкого диска, серыми - толстого диска, открытыми - гало.

тонкого диска оказалась больше, чем другим подсистемам Галактики. Толстому диску с большей вероятностью принадлежат 122 лириды, а подсистеме гало - 223 лириды. На рис. 1а приведены распределения F-G-карликов и лирид поля выделенных подсистем на диаграмме Тумре - " $V_{\odot} - (V_R^2 + V_Z^2)^{0.5}$ ", где V_{\odot} , V_R и V_Z - компоненты скорости, направленные в сторону вращения Галактики, к центру и к северному галактическому полюсу, соответственно. В целом распределения обоих типов объектов примерно одинаковые. Однако при переходе к более старым подсистемам заметно увеличивается доля лирид по сравнению с более молодыми, в среднем, звездами ГП. Обращает на себя внимание, что традиционно считающиеся типичными представителями исключительно старых подсистем Галактики лириды, согласно кинематическим параметрам, присутствуют и в довольно молодой подсистеме тонкого диска. Согласно современным представлениям, гало, на самом деле, состоит из двух не связанных между собой подсистем - собственного гало и аккрецированного гало. Причем объекты собственного гало генетически связаны с объектами более молодых подсистем Галактики - тонкого и толстого дисков, образовавшихся из вещества единого протогалактического облака. Некоторые шаровые скопления и отдельные звезды, составляющие аккрецированное гало, захвачены в разное время Галактикой из разрушенных ее приливными силами карликовых галактик-спутников и образованы из вещества, испытавшего иную историю химической эволюции. При идентификации звезд внегалактического происхождения мы руководствовались предположением, что звезды, родившиеся в монотонно колапсирующем едином протогалактическом облаке, не могут быть на ретроградных орбитах. (В нашем каталоге лирид с $V_{\odot} < 0$ км/с в гало оказалось более половины - 139 звезд). В этом случае все звезды с обратным обращением вокруг галактического центра можно считать аккрецированными, но не только - мы включили в группу предположительно аккрецированных все звезды со столь же большими остаточными скоростями, как и у ретроградных, т.е. $V_{\text{ост}} > 230$ км/с. Именно при таком критическом значении остаточной скорости, как видно из рис. 1б, появляются в нашей выборке звезды на ретроградных орбитах. Рис. 1с демонстрирует, что при переходе через критическое значение остаточной скорости резко увеличивается разброс апогалактических радиусов орбит звезд, причем орбиты у звезд с прямым вращением имеют даже систематически большие размеры, чем у звезд с тем же значением остаточной скорости относительно локального центроида, но с ретроградным вращением. Эксцентриситеты орбит на рис. 1д не только резко увеличивают дисперсию при переходе через эту точку, но и демонстрируют различные зависимости. Вначале с ростом остаточных скоростей эксцентриситеты орбит почти линейно увеличиваются, достигая максимальной величины вблизи критического значения скорости. При дальнейшем увеличении

$V_{\text{ср}}$ среднее значение и разброс эксцентриситетов остаются постоянными в пределах ошибок. В нашей выборке оказались 222 лириды аккрецированного гало. При этом в собственном гало осталась только одна лирида со спектроскопическими определениями содержаний химических элементов - RV Oct. Впрочем, по химическому составу эта лирида может с равным успехом принадлежать как к гало, так и к толстому диску. Заметим, что некоторые авторы вообще отрицают существование собственного гало у нашей Галактики, объединяя эту подсистему с толстым диском (см., например, [8,9]). Таким образом, практически все лириды с кинематикой гало имеют, скорее всего, внегалактическое происхождение.

4. *Связи металличности с кинематикой.* На рис.2а приведены диаграммы "азимутальная скорость (V_{ϕ}) - металличность" для тех же объектов. Проведенные "на глаз" две наклонные штриховые линии приблизительно разделяют звезды галактических подсистем. При этом линии проходят по областям, занимаемым звездами с неуверенной стратификацией. Как можно увидеть, практически все лириды (как и карлики) с кинематикой тонкого диска оказались с высокой металличностью. Зато между лиридами и карликами поля с кинематикой толстого диска наличие существенное различие. Неожиданностью оказалось то, что подавляющая часть (83%) лирид толстого диска имеют $[Fe/H] < -1.0$. Из диаграммы видно, что несколько лирид с кинематикой тонкого диска оказались менее металличными, чем самые белые металлы

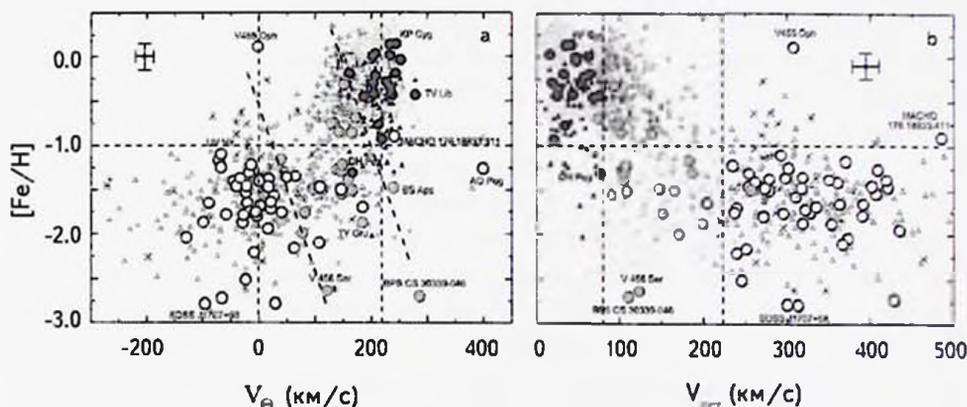


Рис.2. Зависимость металличности от скорости вращения вокруг галактического центра (а) и от полной остаточной скорости (б) для F-G-карликов и лирид поля. Лириды поля с металличностями из каталога [5] обозначены маленькими треугольниками, а со спектроскопическими металличностями - большими кружками: черные - тонкий диск, серые - толстый диск, светлые - гало. Наклонные (а) и вертикальные (б) штриховые линии демонстрируют условное разделение звезд разных подсистем на диаграммах. Пунктирные горизонтальные линии проведены через $[Fe/H] = -1.0$. Нанесены имена лирид, у которых спектроскопические металличности или скорости далеко отклоняются от средних для соответствующих подсистем.

F-G-карлики этой подсистемы. Большинство их попало как раз в зону неустойчивой стратификации, и некоторые из них на самом деле могут принадлежать толстому диску. Из рис.2а можно также увидеть, что ни в тонком диске, ни в гало явно выраженных зависимостей между азимутальными скоростями звезд и их металличностями не наблюдается. Зато в толстом диске у лирид наблюдается прогрессивное уменьшение верхней границы металличности с уменьшением азимутальной компоненты скорости (V_{ϕ}). Заметим, что у лирид V 456 Ser и BPS CS 30339-046 содержания железа оказались намного меньше, чем у остальных звезд толстого диска. У одной из них скорость вращения вокруг галактического центра даже больше солнечной. Далеко отклоняются они и на других диаграммах. Очень возможно, что эти лириды, имея скорости, характерные для объектов толстого диска, на самом деле попали в нашу Галактику из распавшихся галактик-спутников, как звезды движущейся группы Арктюра (см. [10]). Одна из этих лирид (V 456 Ser) по компонентам пространственной скорости вполне может принадлежать именно этому звездному потоку. Из рис.2а также видно, что практически все лириды гало имеют металличность $[Fe/H] < -1.0$. Но среди них есть и весьма металличные. Так у V 455 Ori спектроскопически определенное содержание металлов больше солнечного. Одна из наиболее удаленных от Солнца и самая малометалличная лирида из нашего каталога SDSS J170733.93+585059.7 (далее SDSS J1707+58) также имеет ретроградную орбиту.

Для разделения подсистем иногда используется и полная остаточная скорость звезды относительно локального центроида. На рис.2б приведены распределения звезд на диаграмме " $V_{ост} - [Fe/H]$ ". Видно, что на этой диаграмме зависимость металличности от скорости в толстом диске выступает отчетливее. Одновременно видно, что и этот кинематический параметр можно использовать в качестве статистического индикатора принадлежности звезды к той или иной подсистеме. Две вертикальные штриховые линии на диаграмме приблизительно отделяют звезды толстого диска от тонкого ($V_{ост} \approx 80$ км/с) и от гало ($V_{ост} \approx 230$ км/с).

Из двух последних диаграмм также можно увидеть, что линия $[Fe/H] = -1.0$ отделяет в богатую металлами группу у карликов поля практически полностью звезды обеих дисковых подсистем, тогда как у лирид поля - большую часть звезд с кинематикой тонкого диска и лишь малую долю с кинематикой толстого диска. Получается, что химический и кинематический критерии разделения подсистем для лирид не вполне однозначны.

5. *Связи относительных содержаний α -элементов с металличностью.* Как показал анализ зависимостей относительных содержаний магния и кальция от $[Fe/H]$ для F-G-карликов и лирид поля [6], последо-

вательности обоих объектов для магния и кальция практически совпадают в диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$. Тогда как в менее металличном диапазоне лириды демонстрируют в среднем некоторое превышение по сравнению с карликами поля. Несколько большие превышения при малой металличности показывают два других α -элемента - кремний и титан. Но у кремния при малой металличности наблюдается очень большой разброс относительных содержаний, а у титана при высокой металличности для всех лирид наблюдается значительное занижение отношений $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ по сравнению с карликами поля. В дальнейшем, чтобы минимизировать искусственно создаваемые закономерности, мы рассмотрим поведение зависимостей относительных содержаний α -элементов от металличности и скорости, усредненных всего по двум α -элементам - магнию и кальцию, для которых систематические отклонения находятся в пределах ошибок определения содержаний. А кроме того, одновременно определения всех четырех α -элементов имеются у меньшего числа лирид, чем у этих двух. Более подробно о содержаниях химических элементов в лиридах поля описано в работе [6].

На рис.3а приведены зависимости таких усредненных отношений $[\text{Mg}, \text{Ca}/\text{Fe}]$ от металличности для карликов и лирид поля. Видим, что оба типа объектов демонстрируют довольно близкие последовательности. Из рисунка следует, что зависимость отношений $[\text{Mg}, \text{Ca}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ у лирид подсистемы тонкого диска неплохо согласуется с поведением ее у карликов поля. Исключением является лирида DH Peg, которая оказалась менее металличной, чем самые бедные металлами карлики поля этой подсистемы. У лириды TV Lib с металличностью, характерной для большинства звезд тонкого диска, оказалось завышенное отношение $[\alpha/\text{Fe}]$. По положению на рис.3а лириды DH Peg и

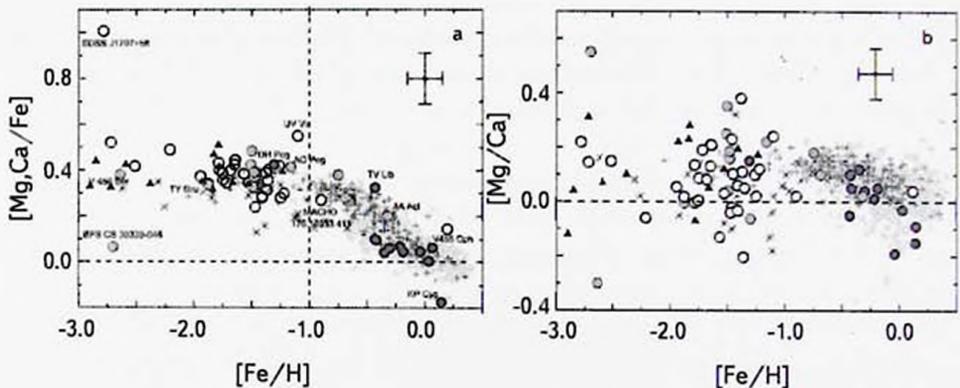


Рис.3. Зависимость относительных содержаний, усредненных по двум α -элементам (Mg и Ca) (а), и отношений первичных к вторичным α -элементам (б) от металличности для карликов и лирид поля. Темные треугольники - нестратифицированные лириды. Другие обозначения как на рис.1 и 2.

TV Lib естественнее отнести к толстому диску. Лирида KP Cug, имеющая у нас самое низкое относительное содержание $[Mg, Ca/Fe] = -0.18$, по кинематике также принадлежит тонкому диску (заметим, что содержания двух других α -элементов (Si и Ti) у нее наоборот, повышенные). Анализу химического состава этой очень металличной звезды с аномально высоким содержанием в атмосфере углерода и азота посвящена работа [11]. В ней делается предположение, что эта звезда, а также UY CrB, на самом деле не долгопериодические лириды, а короткопериодические цефеиды типа CWB. Другими словами, присутствие их в списках лирид находится под вопросом.

На рис.3b, где приведена диаграмма "[Fe/H]-[Mg/Ca]", можно увидеть, что у лирид тонкого диска, как и у карликов поля, наблюдается довольно узкая последовательность и четкое уменьшение отношений $[Mg/Ca]$ с увеличением металличности. У звезд толстого диска и гало разброс этих отношений заметно больше, чем в тонком диске. Напомним, что согласно современным представлениям, выход первичных α -элементов (в частности, магния) увеличивается с ростом массы вспыхивающей сверхновой второго типа по сравнению с выходом вторичных α -элементов (в частности, кальция). Поэтому отношение $[Mg/Ca]$ является индикатором массы вспыхивающей сверхновой. Поскольку металличность является индикатором возраста, уменьшение $[Mg/Ca]$ с увеличением $[Fe/H]$ в тонком диске у обоих типов звезды можно интерпретировать как уменьшение со временем верхней границы массы сверхновых SNe II. Большой разброс отношений $[Mg/Ca]$ в более старых подсистемах свидетельствует, скорее всего, о более слабом, чем в тонком диске, перемешивании в них межзвездного вещества.

Наибольшие систематические различия между лиридами и карликами поля наблюдаются среди звезд с кинематикой толстого диска. Одно отличие выше уже отмечалось, это вместо малочисленного "малометалличного хвоста", как у карликов этой подсистемы, у лирид малометаллические звезды преобладают. Из рис.3а также видно, что карлики толстого диска обнаруживают четкий излом зависимости "[Fe/H]- $[\alpha/Fe]$ " в окрестности $[Fe/H] \approx -0.5$ (см., также [12]). Зато у лирид на рис.3а отслеживается излом в окрестности $[Fe/H] \approx -1.0$. Однако заметим, что вывод о наличии излома у лирид именно при такой металличности не является статистически значимым из-за малого числа объектов. Видим также, что одна из двух лирид толстого диска с нехарактерно низкими для этой подсистемы металличностями BPS CS 30339-046 демонстрирует весьма заниженные относительные содержания α -элементов по сравнению со средними у звезд такой же металличности. Зато лирида V 456 Ser, удовлетворяющая кинематическому критерию принадлежности потоку Арктур, попала на рис.3а в середину общей последовательности для малометаллических звезд, точно так же, как и выявленные звезды поля этого

потока (см., [2,10]). Это является еще одним подтверждением принадлежности ее к потоку Арктур. Еще одна лирида TY Gru хоть и соответствует по кинематике толстому диску, но она для этой подсистемы имеет аномально низкое содержание тяжелых элементов и находится очень далеко от галактической плоскости ($z = -4.2$ кпк).

Лириды и карлики с кинематикой гало ведут себя примерно одинаково. Можно ожидать заметного разброса исследуемых отношений у лирид гало, поскольку химический состав атмосфер звезд, предположительно образованных в различных галактиках-спутниках, может оказаться иным, чем у генетически связанных объектов Галактики аналогичной металличности. И действительно, у одной из наименее металличных лирид выборки SDSS J1707+58 и содержания α -элементов оказались аномально высокими по сравнению со всеми звездами поля. Аномальную позицию на рис.3а занимает также лирида V455 Oph с практически вертикальной ретроградной орбитой, лежащая в полосе звезд тонкого диска.

6. *Связи относительных содержаний α -элементов с кинематикой.* На рис.4а, б приведены связи усредненных относительных содержаний двух α -элементов с кинематическими параметрами исследуемых звезд. Поскольку скорости, как и металличность, являются статистическими индикаторами возраста, не удивительно, что зависимости $[\alpha/Fe]$ от этих параметров несколько похожи. Однако есть и особенности. Так, две звезды гало (MACSO 176.18833.411 и AO Peg) с металличностями и относительными содержаниями α -элементов, удовлетворяющими как толстому диску, так и гало, имеют скорости вращения вокруг галактического диска существенно больше солнечной (рис.4а). MACSO 176.18833.411 посвящена работа [13], в

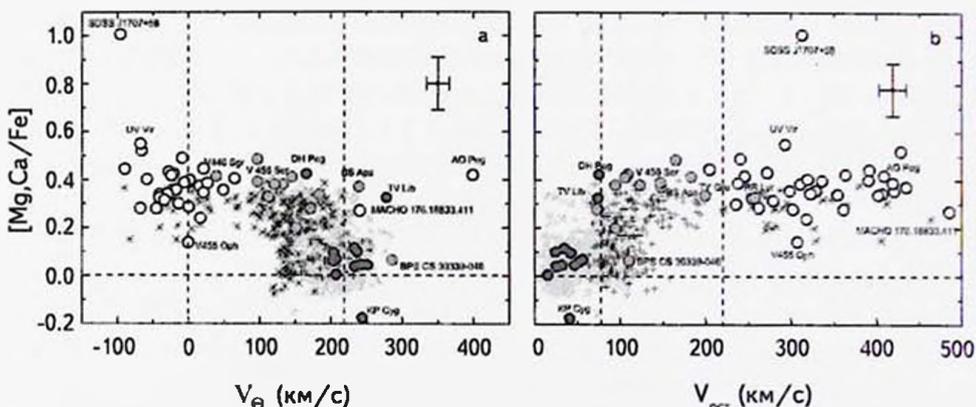


Рис.4. Зависимость отношений $[Mg, Ca/Fe]$ от скорости вращения вокруг галактического центра (а) и от полной остаточной скорости (б) для карликов и лирид поля. Обозначения как на рис.1 и 2.

которой, приняв во внимание ее положение вблизи галактического центра и форму ее орбиты, авторы пришли к выводу, что звезда, скорее всего, выброшена из центра Галактики и ведет свое происхождение от "малометаллического хвоста" галактического балджа. Самая малометаллическая и одновременно с наиболее высокой величиной $[\alpha/\text{Fe}]$ лирида с кинематикой аккрецированного гало SDSS J1707+58 имеет исключительно большую отрицательную азимутальную скорость. Лирида аккрецированного гало V455 Oph при практически нулевой компоненте азимутальной скорости (V_θ) и высокой V_z имеет очень низкую, за пределами ошибок отличающуюся от остальных всех звезд гало, величину $[\alpha/\text{Fe}] = 0.06$.

7. Обсуждение. Итак, анализ химических и кинематических свойств переменных звезд типа RR Лиры поля показал, что лириды присутствуют во всех четырех выделенных нами подсистемах Галактики - в тонком и толстом дисках, а также в собственном и аккрецированном гало. То есть, вопреки традиционным представлениям, среди них есть и лириды с типичными для звезд тонкого диска кинематикой, и химическим составом. Возраст тонкого диска по современным оценкам < 9 млрд. лет. Значит, в противоречие с традиционными представлениями, среди лирид присутствуют не только старые (> 10 млрд. лет), но и более молодые звезды. Как уже отмечалось, звезд типа RR Лиры с металличностью, характерной для тонкого диска, быть не может, поскольку горизонтальная ветвь таких звезд находится в области гигантов красного сгущения, т.е. в стороне от полосы неустойчивости, и эти звезды переменными быть не могут. Значит, причину такого несоответствия следует искать в классификации их, как переменных. Выше мы уже отмечали, что наиболее металлическая и долгопериодическая лирида из нашего списка - KP Cug - скорее всего, является классической цефеидой ультракороткого периода. Возможно, что все или часть из обсуждаемых металлических звезд на самом деле могут также оказаться цефеидами, пульсирующими в обертонах с периодами менее суток. В этом случае определяемые из наблюдаемых периодов массы, светимости и расстояния оказываются искаженными. Такие цефеиды уже открыты в Большом и Малом Магеллановых Облаках в рамках проекта OGLE. В любом случае, для их верификации требуется тщательное дополнительное исследование каждой такой переменной.

Основная масса лирид с кинематикой толстого диска оказалась в диапазоне величин $[\text{Fe}/\text{H}]$, который у звезд поля обычно считается "малометаллическим хвостом" толстого диска. Объяснить это можно тем, что являясь более старыми звездами, чем основная масса карликов, они отслеживают химический состав межзвездной среды на начальных этапах формирования этой подсистемы. Излом зависимости $[\alpha/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ указывает на тот факт, что в звездно-

газовой системе наступила эпоха вспышек сверхновых типа Ia, т.е. с момента начала звездообразования прошло около 1 млрд. лет. По-видимому, первые SNe Ia начали взрываться, когда металличность межзвездной среды в Галактике достигла величины $[Fe/H] \approx -1.0$. И только при достижении $[Fe/H] \approx -0.5$ SNe Ia начали взрываться в массовом порядке. О большой длительности эволюции подсистемы толстого диска свидетельствуют также отчетливо наблюдаемые на рис.2 и 4 систематические тренды в пределах данной подсистемы как металличности, так и относительных содержаний α -элементов с изменением кинематических показателей. Выявленные зависимости говорят в пользу гипотезы о длительном формировании толстого диска в процессе коллапса протогалактического облака. Две наименее металлические лириды этой подсистемы (BPS CS 30339-046 и V 456 Ser) демонстрируют химический состав за пределами ошибок, отличающийся от остальных лирид подсистемы. Это дает возможность предположить их внегалактическое происхождение, подобно звездам хорошо известного потока Арктюра. Причем лирида V 456 Ser, согласно величинам компонентов своей пространственной скорости, вполне может принадлежать этому потоку. В пользу внегалактического происхождения V 456 Ser свидетельствуют также очень малая величина отношения $[Mg/Ca] = -0.3$ и высокая величина относительного содержания элемента быстрых нейтронных захватов $[Eu/Fe] = 1.0$. Для лирид нашей выборки это самые экстремальные значения (см. наш каталог). Обе эти величины говорят о небольших массах сверхновых II типа, обогативших межзвездное вещество, из которого образовалась данная звезда. Выше мы уже отметили, что отношение $[Mg/Ca]$ уменьшается с уменьшением массы предсверхновой, тогда как практически весь Eu образуется в r-процессе, который происходит при взрывах наименее массивных SNe II массами $8-10 M_{\odot}$. В карликовых же галактиках малой массы с большей вероятностью происходят вспышки сверхновых небольших масс. Заметим, однако, что некоторые авторы отдают предпочтение гипотезе об образовании потока Арктюра в результате гравитационного возмущения звезд поля галактическим баром (см., [2] и ссылки в ней). В противоположность этой звезде, лирида BPS CS 30339-046 демонстрирует очень низкое относительное содержание α -элементов при весьма малой металличности. Такое могло получиться, если звезда действительно образовалась в карликовой галактике, в которой скорость звездообразования была настолько низкой, что SNe Ia начали вспыхивать, когда межзвездная среда была мало обогащена железом от сверхновых второго типа. Впрочем, эти предположения требуют дополнительных исследований.

Большинство лирид с кинематикой гало имеют несколько повышенные относительные содержания α -элементов, что соответствует их малой металличности. Такой химический состав у звезд поля мог получиться только в

случае образования их или из длинного протогалактического облака, или аккреции их из распавшихся довольно массивных галактик-спутников, в которых скорости звездообразования были бы сравнимы со скоростью в нашей Галактике. Но наблюдаемые в настоящее время отношения $[\alpha/\text{Fe}]$ у звезд карликовых галактик Местной Группы оказываются систематически ниже, чем у звезд поля нашей Галактики, как полагают, из-за малой в них скорости звездообразования (см., например, [14]). Вполне возможно, что изначально галактика Млечный Путь формировалась из более массивных карликовых галактик, что вполне соответствует современным представлениям об образовании крупных галактик. Одновременно оказалось, что некоторые лириды гало обнаруживают значительные отклонения относительных содержаний некоторых α -элементов при данной металличности от средних. Так, лирида SDSS J1707+58 считается малометалличной звездой с увеличенным содержанием углерода и s-элементов (см., [15]). Но у нее, как оказывается, еще и повышенные относительные содержания α -элементов. По-видимому, очень высокое отношение $[\alpha/\text{Fe}]$ у лириды SDSS J1707+58 можно объяснить тем, что ее протозвездное облако было обогащено выбросом очень массивной SNeII, взрыв которой и спровоцировал звездообразование в этом облаке, одновременно придав ему ускорение. Уникальным следует признать химический состав и у звезды V 455 Ori, которая при почти солнечных содержаниях исследованных в данной работе химических элементов имеет ретроградную орбиту, практически перпендикулярную галактической плоскости. Столь большое содержание металлов при такой высокой орбите вряд ли могло получиться в маломассивной карликовой галактике-спутнике. Действительно, согласно численному моделированию иерархического формирования галактического гало, только галактика-спутник малой массы может быть разрушена приливными силами Галактики, находясь еще на дальних подступах к ее плоскости, т.е. на перпендикулярной орбите. Подчеркнем еще раз, что для верификации всех выводов, касающихся индивидуальных звезд, требуются дополнительные исследования.

Авторы благодарны одному из авторов используемого в работе каталога пространственно-кинематических параметров переменных звезд типа RR Лиры А.С.Расторгуеву за вычисление расстояний до лирид. М.В.А. и Г.М.Л. благодарят за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание №3.5602.2017/БЧ), а К.В.В. благодарит за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание № 3.858.2017/4.6).

CHEMICAL COMPOSITION OF FIELD RR LYRAE STARS AS AN INDICATOR OF THE GALACTIC SUBSYSTEMS EVOLUTION

V.A.MARSAKOV, M.L.GOZHA, V.V.KOVAL', E.I.VOROBYOV

The relationships between chemical and spatial-kinematic properties of the field RR Lyrae variable stars are investigated. It is shown that among them there are metal-rich RR Lyrae variables with kinematics of the thin disk, and the problem of the existence of such RR Lyrae variables is discussed. The evidences of decrease in the upper limit of the mass of the formed stars with increasing metallicity in the thin disk and better mixing of interstellar matter in this Galactic subsystem are given. It is found that RR Lyrae variables with kinematics of the thick disk basically have metallicity $[Fe/H] < -1.0$ and high ratios $[\alpha/Fe] \approx 0.4$, whereas only about 10% of the field dwarfs of the so-called "metal-poor tail" have such chemical composition. In the Galaxy, a sharp decrease in the ratio $[\alpha/Fe]$ occurs in RR Lyrae variables belonging precisely to the thick disk, which indicates the duration of the period of this subsystem formation. The discrepancy between the chemical composition of several RR Lyrae variables and their kinematics is revealed. It is assumed that they all, most likely, have extragalactic origin.

Key words: RR Lyrae variables: α -element abundances: subsystems of the Galaxy

ЛИТЕРАТУРА

1. G.Maintz, K.S. de Boer, *Astron. Astrophys.*, **442**, 229, 2005.
2. T.Bensby, S.Feltzing, M.S.Oey, *Astron. Astrophys.*, **562**, A71, 2014.
3. S.Liu, G.Zhao, Y.-Q.Chen et al., *Research in Astron. Astrophys.*, **13**, 1307, 2013.
4. М.Л.Гозжа, В.А.Марсаков, В.В.Коваль, *Астрофизика*, **61**, 55, 2018. (*Astrophysics*, **61**, 41, 2018).
5. A.K.Dambis, L.N.Berdnikov, A.Y.Kniazev et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **435**, 3206, 2013.
6. В.А.Марсаков, М.Л.Гозжа, В.В.Коваль, *Астрон. ж.*, **95**, 54, 2018, (*Astron. Rep.*, **62**, 50, 2018).
7. T.Bensby, S.Feldzing, I.Lungstrem, *Astron. Astrophys.*, **410**, 527, 2003.
8. K.Fuhrmann, *New Astron.*, **7**, 161, 2002.
9. R.G.Gratton, E.Carretta, S.Desidera et al., *Astron. Astrophys.*, **406**, 131, 2003.
10. В.А.Марсаков, Т.В.Боркова, *Письма в Астрон. ж.*, **31**, 577, 2005. (*Astron.*

Letters, **31**, 515, 2005).

11. *S.M.Andrievsky, V.V.Kovtyukh, G.Wallerstein et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **122**, 877, 2010.
12. *M.Haywood, P. Di Matteo, M.D.Lehnert et al.*, Astron. Astrophys., **560**, 109, 2013.
13. *A.Kunder, R.M.Rich, K.Hawkins et al.*, Astrophys. J., **808**, 12, 2015.
14. *K.A.Venn, M.Irwin, M.D.Shetrone et al.*, Astrophys. J., **128**, 1177, 2004.
15. *T.D.Kinman, W.Aoki, T.C.Beers, W.R.Brown*, Astrophys. J. Letters, **755**, L18, 2012.

