

УДК 524.332-36

БОГАТЫЕ МЕТАЛЛАМИ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ ТИПА RR ЛИРЫ ПОЛЯ ГАЛАКТИКИ: ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ И СОДЕРЖАНИЙ НЕКОТОРЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2024 М. Л. Гожа^{1*}, В. А. Марсаков¹, В. В. Коваль¹¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

Поступила в редакцию 12 марта 2024 года; после доработки 12 апреля 2024 года; принята к публикации 25 апреля 2024 года

Проведен анализ особенностей относительных содержаний ряда химических элементов в атмосферах высокометаллических ($[Fe/H] > -1$) переменных звезд типа RR Лиры (лириды) галактического поля и их кинематических характеристик. Ранее мы показали, что относительные содержания α -элементов: магния, кремния, кальция, но в большей степени титана, а также иттрия и скандия в таких звездах ниже, чем у большинства звезд других типов аналогичной металличности. В данной работе найдено, что часть таких богатых металлами лирид обладают еще и очень низкими относительными содержаниями натрия, алюминия и никеля. Орбитальные параметры всех исследуемых в работе металлических переменных типа RR Лиры характерны для объектов тонкого или толстого дисков Галактики, однако необычный химический состав позволяет предположить возможное внегалактическое происхождение некоторых из них.

Ключевые слова: *звезды: содержания — звезды: переменные: RR Лиры*

1. ВВЕДЕНИЕ

Переменные звезды типа RR Лиры (лириды) — радиально пульсирующие переменные спектральных классов A–F, находящиеся на стадии горения гелия в ядре; на диаграмме Герцшпрунга–Рассела они попадают на горизонтальную ветвь. Звезды на столь продвинутой стадии эволюции традиционно полагают исключительно старой и бедной металлами звездной популяцией. Однако среди лирид галактического поля оказалось небольшое количество звезд с примерно солнечной металличностью. Такая высокая металличность входит в противоречие с современной моделью эволюции звезд, согласно которой только малометаллические звезды малой массы попадают на горизонтальную ветвь в полосу неустойчивости, причем эволюционируют до нее более 10 млрд лет, то есть дольше времени существования в Галактике подсистемы тонкого диска, для которой характерны столь высокие металличности. Заметим, что в богатых металлами шаровых скоплениях практически не наблюдаются переменные звезды типа RR Лиры, поскольку их горизонтальные ветви полностью лежат в области более низких температур, чем полоса неустойчивости.

В настоящей работе мы проводим новые исследования звезд типа RR Лиры галактического поля,

начатые Marsakov et al. (2018) и продолженные Marsakov et al. (2019) и Gozha et al. (2020). В этих работах мы использовали авторский каталог, содержащий данные о положениях, скоростях и металличностях для 415 лирид поля. Для сотни из этих звезд в литературе найдены сведения об относительных содержаниях нескольких химических элементов, полученных по спектрам высокого разрешения. Было показано, что большинство богатых металлами ($[Fe/H] > -1$) лирид с пониженными содержаниями магния, кремния, кальция, титана, скандия и иттрия обладают кинематикой, характерной для самой молодой подсистемы — тонкого галактического диска. Причем отношения $[Mg/Fe]$, $[Si/Fe]$ и $[Ca/Fe]$ в богатых металлами лиридах меньше, чем средние значения этих величин у звезд поля, тогда как величины $[Sc/Fe]$, $[Ti/Fe]$ и $[Y/Fe]$ в основном оказываются даже ниже, чем у всех звезд тонкого диска. Одновременно в этих звездах не обнаружено следов таких элементов, как европий, цирконий, лантан, присутствующих у всех звезд тонкого диска. Согласно нашей стратификации, некоторое количество богатых металлами лирид принадлежит по кинематике и к толстому диску.

Анализ кинематики лирид в наших ранних работах проводился с использованием значений компонентов пространственных скоростей, вычисленных на основе данных каталога Dambis et al. (2013),

*E-mail: gozha_marina@mail.ru

в котором использовались наземные измерения собственных движений звезд. В настоящей работе мы проверяем ранее полученные нами выводы по новым, более точным астрометрическим и фотометрическим спутниковым данным.

Hasselquist et al. (2021) исследовали химический состав звезд близких карликовых галактик и обнаружили дефицит некоторых химических элементов. Среди них оказались и элементы, которые мы у лирид еще не анализировали. В связи с этим мы посчитали необходимым продолжить исследование химических и кинематических свойств переменных типа RR Лиры галактического поля и прежде всего звезд, богатых металлами.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Значения $[Fe/H]$, определенные спектроскопически, для 100 переменных типа RR Лиры галактического поля, а также отношения $[Al/Fe]$ для 44 из них, взяты из авторского сводного каталога (Marsakov et al., 2018). Для него были собраны данные об обилиях химических элементов из 25 публикаций с 1995 по 2017 г. Относительные содержания химических элементов были вычислены как средневзвешенные в случаях двух и более определений разными авторами и приведены к единому солнечному обилию. Дисперсии вычисленных средних: $\sigma_{[Fe/H]} = 0.12$, $\sigma_{[Al/Fe]} = 0.17$. Подробная информация о каталоге приведена в работе Marsakov et al. (2018)¹.

Hasselquist et al. (2021) обнаружили дефицит относительных содержаний алюминия и никеля в звездах карликовых галактик-спутников. Сведения об относительных содержаниях никеля $[Ni/Fe]$, полученных спектроскопическим методом, в литературе нашлись для 55 лирид нашего каталога. Данные собраны из девяти статей с 1995 по 2015 г. Для определения значений $[Ni/Fe]$ мы проделали процедуры, аналогичные тем, которые применялись для получения относительных содержаний химических элементов при составлении каталога Marsakov et al. (2018). В частности, мы привели авторские величины $[Ni/Fe]$ для каждой лириды к единому солнечному обилию из работы Asplund et al. (2009) и вычислили их средневзвешенные значения. Поскольку значений $[Ni/Fe]$, полученных разными авторами для одной и той же звезды, мало, дисперсия средневзвешенного не вычислялась. Средняя ошибка, вычисленная с учетом неопределенностей, приведенных авторами значений $[Ni/Fe]$ из литературы, получилась равной 0.12 dex. Однако следует учесть, что эта величина на самом деле

является заниженной оценкой, поскольку только немногим более половины значений $[Ni/Fe]$ в литературных источниках были даны с указанием неопределенностей.

Кроме того, в настоящей работе проведен анализ относительных содержаний натрия, синтез которого в значительной степени аналогичен процессу образования алюминия. Однородные данные о содержаниях натрия $[Na/Fe]$ в атмосферах 18 лирид, определенных по спектрам высокого разрешения, заимствованы из недавней работы Takeda (2022). Декларируемая автором ошибка не превышает 0.2 dex.

Каталог Prudil et al. (2020), основанный на спутниковых измерениях расстояний и скоростей, послужил источником орбитальных параметров для 314 переменных типа RR Лиры. Из них авторы по двум произвольно выбранным жестким орбитальным критериям — малым эксцентриситетам орбит ($e < 0.2$) и небольшим максимальным удалениям точек орбит звезд от галактической плоскости ($Z_{\max} < 0.9$ кпк) — отобрали 22 лириды, принадлежащие, по их мнению, дисковым подсистемам Галактики. Было показано, что совокупность выбранных звезд характеризуется малыми дисперсиями скоростей ($\sigma_{V_{\text{tot}}} = 37 \text{ км с}^{-1}$ и $\sigma_{V_z} = 16 \text{ км с}^{-1}$ для полной скорости и вертикальной ее компоненты соответственно), высокой металличностью (среднее значение $[Fe/H]_{\text{aver}} = -0.60$) и примерно солнечными содержаниями α -элементов (для девяти звезд с известными обилиями кальция среднее значение $[Ca/Fe]_{\text{aver}} = 0.02$), что, по мнению авторов статьи, указывает на возможную принадлежность этих звезд к тонкому диску.

В качестве объектов сравнения мы использовали несколько выборок звезд поля с известными металличностями и относительными содержаниями алюминия, натрия и никеля, полученными по спектрам высокого разрешения. Из каталога APOGEE DR16 (Jönsson et al., 2020), включающего свыше четырехсот тысяч звезд Галактики, мы отобрали 13 828 звезд с информацией о химическом составе и с атмосферными параметрами, идентичными характеристикам атмосфер лирид. Данные о металличности и относительных содержаниях алюминия, натрия и никеля в 1918 красных гигантах мы взяли из каталога Hawkins et al. (2016). Источниками информации о $[Fe/H]$, $[Al/Fe]$ и $[Ni/Fe]$ в атмосферах переменных звезд послужили: для 435 цефеид — работа Luck (2018), а для 23 цефеид II типа (типов W Девы и VL Геркулеса) — статья Kovtyukh et al. (2018).

3. ОРБИТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В работе Marsakov et al. (2018) показано, что значительная часть высокометаллических лирид

¹Каталог можно найти по адресу: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/AZh/95/54>

движется в Галактике подобно объектам тонкого диска. Для стратификации лирид по подсистемам Галактики в этой работе мы использовали методику, предложенную Bensby et al. (2003). В ней вычисляется вероятность принадлежности звезд поля к подсистемам тонкого и толстого дисков и гало по компонентам их пространственных скоростей относительно локального центроида и дисперсиям этих компонентов в каждой подсистеме.

Для подтверждения принадлежности к галактическому диску богатыми металлами переменных типа RR Лиры обсудим некоторые их орбитальные характеристики, полученные по спутниковым данным. В каталоге Prudil et al. (2020) представлены кинематические и орбитальные параметры 314 переменных типа RR Лиры. Значения $[Fe/H]$ для 68 из них содержатся в каталоге Marsakov et al. (2018).

На рис. 1a, b приведено распределение переменных типа RR Лиры поля из каталога Prudil et al. (2020) по орбитальным параметрам. На рис. 1a изображена диаграмма «эксцентриситет e — максимальное удаление точек орбиты звезды от плоскости Галактики Z_{max} ». Для удобства мы ограничились вертикальной осью значением 30 кпк, за пределами области диаграммы остались две звезды из 314 лирид каталога Prudil et al. (2020). На рис. 1b представлена диаграмма «апогалактическое расстояние R_{apo} — максимальное отклонение точек орбиты звезды от галактической плоскости Z_{max} » для звезд каталога Prudil et al. (2020). За границами рис. 1b остались три звезды с наибольшими апогалактическими расстояниями.

Заметим, что из 22 лирид, обозначенных в работе Prudil et al. (2020) как звезды дисковых подсистем, в нашей ранней работе (Marsakov et al., 2018) по пространственно-кинематическому вероятностному критерию 21 переменная была отнесена к тонкому диску, тогда как FH Vul — к толстому. Для этой переменной Z_{max} и e близки к верхним предельным значениям, принятым в работе Prudil et al. (2020) для звезд диска. Таким образом, мы наблюдаем совпадение результатов стратификации переменных типа RR Лиры в двух исследованиях. При этом в работе Marsakov et al. (2018) критериями служили компоненты пространственных скоростей и их дисперсии, а в работе Prudil et al. (2020) — орбитальные параметры, полученные по спутниковым данным.

На диаграммах рис. 1a, b видим, что все звезды дисковых подсистем по Prudil et al. (2020) с известными спектроскопическими определениями металличности (таких лирид девять) оказались богаты металлами.

Мы решили проверить по современным спутниковым данным результаты стратификации богатых

металлами лирид по галактическим подсистемам, полученные ранее в Marsakov et al. (2018). Для этого использовались астрометрические параметры каталога Gaia DR3. Данные о лучевых скоростях подавляющего большинства исследуемых звезд также присутствуют в указанном каталоге. Значение лучевой скорости одной лириды найдено в каталоге Gaia DR2, и еще трех звезд — в базе данных SIMBAD. Компоненты пространственной скорости определялись с учетом значений положения и скорости Солнца, используемых Prudil et al. (2020). При этом для выявления принадлежности лирид различным подсистемам мы также применили здесь вероятностный метод из работы Bensby et al. (2003). Из 25 высокометаллических лирид только TV Lib, отнесенная Marsakov et al. (2018) к тонкому диску, по новым расчетам получилась звездой толстого диска. Для остальных богатых металлами лирид подтвердилось сделанное в работе Marsakov et al. (2018) заключение о принадлежности к галактическим подсистемам.

По результатам обновленной стратификации по подсистемам получаем, что из 17 переменных типа RR Лиры с $[Fe/H] > -1$ тонкого диска только девять звезд попало в эту подсистему, согласно жесткому орбитальному критерию Prudil et al. (2020). Таким образом, лириды SW And, RS Boo, DM Cyg, XZ Dra, TW Her, CN Lyr, V 445 Oph, AR Per и HH Pup со спектроскопически определенной металличностью $[Fe/H] > -1$ по кинематическим и орбитальным характеристикам можно признать объектами тонкого галактического диска. Еще у пяти лирид, отнесенных нами к тонкому диску согласно вероятностным критериям, лишь один из двух орбитальных параметров показывает незначительное превышение предельных значений, заявленных в Prudil et al. (2020). Поскольку в последней работе принятые предельные значения не являются математически четко определенными, следовательно и эти звезды — DX Del, RR Gem, KX Lyr, AV Peg и AN Ser — также могут быть отнесены к тонкому диску. Орбитальные параметры для трех богатых металлами звезд, причисленных в этой работе к тонкому диску, не посчитаны.

Семь богатых металлами лирид, выделенных в настоящей работе как объекты толстого диска, обладают эксцентриситетами $e = 0.19-0.45$ и удаляются от галактической плоскости на расстояния до $Z_{max} = 0.60-2.00$ кпк (по данным каталога Prudil et al., 2020). Такие значения орбитальных параметров вполне соответствуют характеристикам объектов толстого диска. Еще одна лирида с $[Fe/H] > -1$, классифицированная нами по кинематике как звезда гало, в каталоге Prudil et al. (2020) отсутствует.

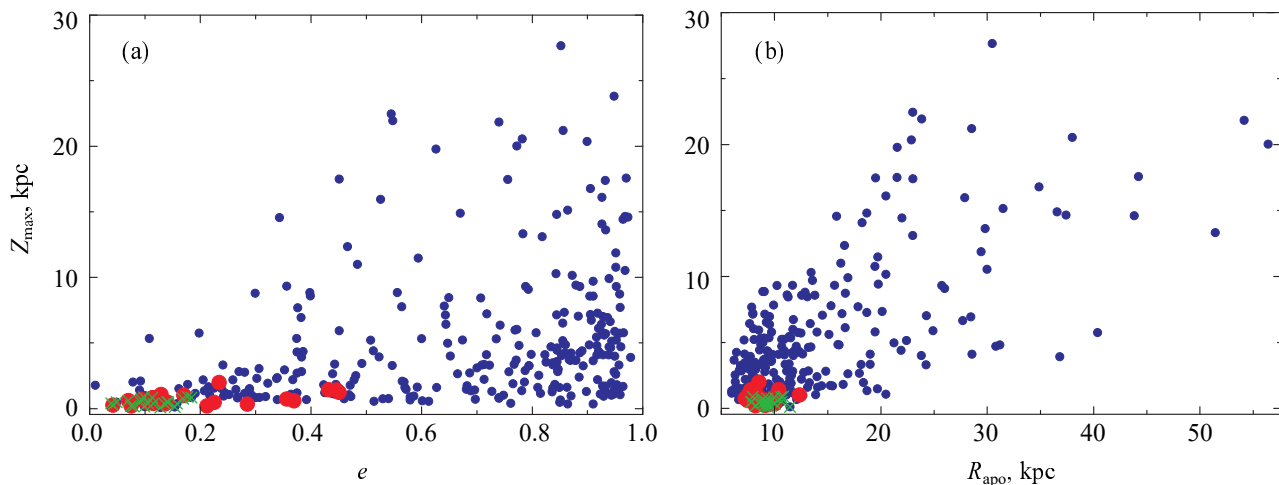


Рис. 1. Переменные типа RR Лиры из каталога (Prudil et al., 2020) на диаграммах « $e - Z_{\max}$ » (a) и « $R_{\text{apo}} - Z_{\max}$ » (b). Синие кружки — все звезды каталога Prudil et al. (2020), красные — лириды с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$, выделенные по каталогу Marsakov et al. (2018), зеленые крестики — лириды диска по Prudil et al. (2020).

4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Различные химические элементы вырабатываются звездами разных масс, вследствие чего они попадают в межзвездную среду на разных временных масштабах. Таким образом, химический состав атмосфер звезд отражает историю химической эволюции вещества, из которого они образовались. Поэтому каждую галактику отличает уникальная история обогащения металлами в зависимости от массы галактики, темпа звездообразования и масс вспыхивающих в ней сверхновых.

В настоящее время известны многочисленные события захвата звездно-газовой материи карликовых галактик приливными силами нашей Галактики в разное время ее эволюции (см., например, Kruijssen et al., 2020; Naidu et al., 2020). Поэтому представляет интерес выделение звезд в нашей Галактике с особенностями химического состава, отличающегося от того, который характерен для объектов, сформировавшихся в процессе эволюции единого протогалактического облака. Поскольку темп звездообразования в более крупных галактиках выше, чем в карликовых (см., например, Matteucci and Greggio, 1986), то и содержание некоторых химических элементов в звездах, рожденных в массивных галактиках, может отличаться от химического состава звезд, захваченных из карликовых галактик-спутников.

Звезды типа RR Лиры традиционно считаются старым населением Галактики, подавляющее большинство этих звезд низкометалличны. Однако некоторое количество лирид имеет нехарактерно высокую для старых звезд металличность ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1$). В ранних исследованиях было показано, что относительные содержания некоторых химических элементов в таких лиридах отличаются

от обилий тех же элементов в звездах с аналогичной металличностью. Так, в предыдущих работах (Marsakov et al., 2018; Gozha et al. 2020, 2021) было обращено внимание на недостаток в атмосферах богатых металлами лирид магния, кремния, кальция, а особенно скандия, титана и иттрия, по сравнению со звездами поля подобной металличности (в том числе и с переменными звездами).

Hasselquist et al. (2021) исследовали определенные по спектрам высокого разрешения обилия нескольких химических элементов в атмосферах красных гигантов в массивных спутниках Млечного Пути: в Большом и Малом Магеллановых Облаках, карликовых галактиках Стрелец и Печь, а также в разрушенной к настоящему времени системе Гайя–Энцелад. Содержания химических элементов в карликовых галактиках эти авторы сравнивали с соответствующими обилиями у звезд диска и балджа нашей Галактики. Среди исследуемых элементов — α -элементы, а также $[\text{Al}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ni}/\text{Fe}]$. На диаграммах зависимостей $[\text{X}/\text{Fe}]$ от металличности (рис. 5 в Hasselquist et al., 2021) звезды каждой из исследуемых карликовых галактик занимают области, практически не перекрывающиеся со звездами Млечного Пути. Особенно выделяются диаграммы « $[\text{Fe}/\text{H}] - [\text{Al}/\text{Fe}]$ » и « $[\text{Fe}/\text{H}] - [\text{Ni}/\text{Fe}]$ »: относительные содержания алюминия и никеля в звездах карликовых галактик-спутников более низкие, чем в звездах Галактики при любой металличности. Авторы объясняют этот факт различиями в историях химической эволюции в конкретной галактике.

Feuillet et al. (2022) обсуждают возможное присутствие в галактическом диске старых высокометалличных звезд, захваченных нашей Галактикой в ходе слияния с галактиками-спутниками. В работе

рассматривается выборка звезд-гигантов, в которой авторы выделяют звезды с необычным химическим составом и с кинематикой тонкого диска. Такие объекты авторы относят к аккрецированным. Из объектов диска (то есть с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.8$ и скоростью движения вокруг галактического центра $V > 110 \text{ км с}^{-1}$) они отбирают звезды с аномально низкими содержаниями алюминия. Аргументируется это тем, что относительные содержания алюминия ниже в звездах карликовых галактик — спутников Млечного Пути. В статье Feuillet et al. (2022) из девяти высокометаллических переменных типа RR Лиры с известными $[\text{Al}/\text{Fe}]$ и пространственными скоростями были выделены звезды с кинематикой тонкого диска и столь же низкими относительными содержаниями алюминия ($[\text{Al}/\text{Fe}] < -0.14$), как и у аккрецированных красных гигантов диска. Этим критериям, по мнению авторов работы, удовлетворяют пять лирид: CN Lyr, DM Cyg, DX Del, RS Boo, V445 Oph. К аккрецированным звездам авторы предлагают отнести и AA Aql с низким $[\text{Al}/\text{Fe}]$, но при этом с кинематикой толстого диска (или гало), и, возможно, SW And, для которой величина $[\text{Al}/\text{Fe}]$ чуть выше произвольного предельного значения, принятого в работе.

Возможное внегалактическое происхождение высокометаллических переменных типа RR Лиры поля мы также отмечали ранее (Marsakov et al., 2018; 2020), основываясь на заниженных содержаниях в них α -элементов.

4.1. Содержания алюминия, натрия и никеля

Рассмотрим характер зависимостей от металличности относительных содержаний алюминия, натрия и никеля в атмосферах переменных звезд типа RR Лиры поля из нашего каталога. Нас в первую очередь будут интересовать обилия этих элементов в богатых металлами лиридах.

Алюминий и натрий — легкие элементы с нечетным числом протонов. Основной механизм производства этих элементов — происходящие в ядрах массивных звезд реакции гидростатического горения углерода для натрия, а для алюминия — углерода и неона. Дополнительный синтез возможен в проходящих одновременно с CNO-циклом реакциях нейтронного захвата атомами магния в ядрах звезд промежуточных масс — для алюминия, а в реакциях нейтронного захвата атомами неона в ядрах звезд промежуточных масс и во время горения водорода в их слоевых источниках — для натрия. Натрий и алюминий, производимые в звездах в аналогичных процессах, показывают одинаковые тренды на диаграммах « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Na}/\text{Fe}]$ » и « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Al}/\text{Fe}]$ » (для примера см. рис. 18 и 19 в

статье Kobayashi et al., 2020). Кроме того, модели предсказывают, что относительные содержания алюминия и натрия уменьшаются с увеличением металличности при $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$, что связано с началом вспышек SN Ia (Hawkins et al., 2016). Поскольку алюминий и натрий формируются в практически одинаковых процессах, представляется целесообразным проанализировать не только обилия алюминия, но и натрия в богатых металлами лиридах.

Никель — элемент железного пика. Этот элемент, как и железо, производится и рассеивается в межзвездную среду в больших количествах в сверхновых типа Ia (см., например, Iwamoto et al., 1999), а некоторое количество никеля образуются в сверхновых типа II (см., например, Kobayashi et al., 2006).

Hasselquist et al. (2021) показали, что при любой металличности отношения $[\text{Al}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ в звездах исследованных карликовых галактик ниже обилий этих элементов в звездах Галактики. Feuillet et al. (2022) проанализировали содержания алюминия в металличных лиридах поля нашей Галактики с целью выявить аккрецированные звезды. Для этого они использовали значения $[\text{Al}/\text{Fe}]$ из работы Liu et al. (2013). В нашем каталоге (Marsakov et al., 2018) при определении относительного содержания алюминия в лиридах была использована информация из большого числа источников, данные были усреднены и приведены к единому солнечному обилию. Поэтому сейчас будет полезно сравнить выводы работы Feuillet et al. (2022) с результатами анализа данных каталога Marsakov et al. (2018), а также рассмотреть связь обилий никеля и металличности в лиридах.

Для исследования поведения обилия никеля мы определили отношения $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ в атмосферах 55 переменных типа RR Лиры по данным из литературы. В таблице 1 представлены собранные и усредненные значения относительного содержания никеля, а также приведены $[\text{Fe}/\text{H}]$ из каталога Marsakov et al. (2018) и ссылки на источники данных для $[\text{Ni}/\text{Fe}]$.

В таблице 2 для 14 богатых металлами переменных типа RR Лиры поля собраны металличности и относительные содержания химических элементов, исследуемых в наших работах. Значения $[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\text{Al}/\text{Fe}]$, $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ и $[\text{Y}/\text{Fe}]$ взяты из Marsakov et al. (2018), $[\text{Na}/\text{Fe}]$ — из Takeda (2022), $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ — из Gozha et al. (2020). Значения $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ получены в настоящей работе.

Таблица 1. Металличность и относительные содержания никеля в переменных типа RR Лиры галактического поля

Звезда	[Fe/H], dex	[Ni/Fe], dex	Ссылки [Ni/Fe]	Звезда	[Fe/H], dex	[Ni/Fe], dex	Ссылки [Ni/Fe]
SW And	-0.22	-0.04	[2, 8]	DH Hya	-1.53	0.19	[9]
CI And	-0.43	0.06	[8]	DT Hya	-1.23	0.51	[4]
DR And	-1.37	0.12	[9]	V Ind	-1.45	-0.07	[9]
WY Ant	-1.88	0.35	[4]	SS Leo	-1.75	0.90	[9]
XZ Aps	-1.79	0.47	[4]	TV Lib	-0.43	0.10	[8]
BS Aps	-1.48	0.56	[4]	RR Lyr	-1.49	-0.08	[2, 7, 8]
AA Aql	-0.32	0.06	[8]	CN Lyr	-0.04	-0.07	[8]
BR Aqr	-0.69	0.07	[8]	IO Lyr	-1.35	0.01	[8]
X Ari	-2.51	0.33	[9]	KX Lyr	-0.42	0.01	[8]
RS Boo	-0.21	-0.02	[8]	Z Mic	-1.51	0.50	[4]
ST Boo	-1.73	-0.05	[2]	RV Oct	-1.64	0.25	[4]
TW Boo	-1.47	0.10	[9]	UV Oct	-1.75	0.60	[4]
BPS CS 22881-039	-2.72	-0.16	[6]	V 413 Oph	-0.75	0.03	[8]
BPS CS 22940-070	-1.41	0.70	[3]	V 445 Oph	0.11	-0.12	[2, 8]
BPS CS 30317-056	-2.85	-0.10	[6]	AO Peg	-1.26	0.07	[8]
UZ CVn	-2.21	0.39	[9]	DH Peg	-1.31	0.01	[8]
YZ Cap	-1.50	0.48	[5]	VW Scl	-1.22	-0.07	[9]
RR Cet	-1.48	0.04	[2, 8]	VY Ser	-1.78	-0.07	[2, 8]
RX Cet	-1.38	-0.01	[9]	V 440 Sgr	-1.16	0.26	[2]
U Com	-1.41	0.08	[9]	V 1645 Sgr	-1.94	0.49	[4]
DM Cyg	0.03	-0.09	[8]	BK Tuc	-1.65	0.04	[9]
KP Cyg	0.15	0.03	[1]	TYC 4887-622-1	-1.79	0.47	[5]
DX Del	-0.31	-0.02	[8]	RV UMa	-1.25	-0.17	[9]
AE Dra	-1.46	0.21	[9]	TU UMa	-1.41	-0.20	[9]
BK Eri	-1.72	-0.02	[9]	CD Vel	-1.67	0.68	[4]
SZ Gem	-1.65	-0.08	[9]	UV Vir	-1.10	0.07	[9]
TW Her	-0.35	0.04	[8]	AS Vir	-1.68	0.39	[4]
VX Her	-1.46	0.09	[2, 8, 9]				

[1] — Andrievsky et al. (2010), [2] — Clementini et al. (1995), [3] — For and Sneden (2010), [4] — For et al. (2011), [5] — Govea et al. (2014), [6] — Hansen et al. (2011), [7] — Kolenberg et al. (2010), [8] — Liu et al. (2013), [9] — Pancino et al. (2015).

4.2. Связь $[Al/Fe]$, $[Na/Fe]$, $[Ni/Fe]$ с металличностью в лиридах и звездах других типов

На рис. 2 представлены диаграммы « $[Fe/H]$ – $[Al/Fe]$ » (панели a, b, c), « $[Fe/H]$ – $[Na/Fe]$ » (панели d, e, f) и « $[Fe/H]$ – $[Ni/Fe]$ » (панели g, h, i) для лирид и звезд сравнения. На все диаграммы нанесены переменные типа RR Лиры с известными относительными содержаниями рассматриваемых химических элементов. Используются следующие

литературные данные: значения $[Fe/H]$, $[Al/Fe]$ из каталога Marsakov et al. (2018); данные по $[Na/Fe]$ для 18 лирид из работы Takeda (2022) — в их списке лирид малой металличности немного (у всех их звезд $[Fe/H] > -1.5$). Отношения $[Ni/Fe]$ определены в настоящей работе.

Наряду с анализом поведения $[Al/Fe]$, $[Na/Fe]$ и $[Ni/Fe]$ относительно изменения металличности

Таблица 2. Относительные содержания некоторых элементов в высокометаллических ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1$) переменных типа RR Лиры

Звезда	$[\text{Fe}/\text{H}]$	$[\text{Na}/\text{Fe}]$	$[\text{Al}/\text{Fe}]$	$[\text{Sc}/\text{Fe}]$	$[\text{Ti}/\text{Fe}]$	$[\text{Ni}/\text{Fe}]$	$[\text{Y}/\text{Fe}]$
SW And	-0.22	-0.07	-0.07	-0.40	-0.16	-0.04	-0.53
CI And	-0.43	-0.23	—	-0.28	-0.05	0.06	—
AA Aql	-0.32	0.07	-0.18	-0.22	0.06	0.06	-0.39
BR Aqr	-0.69	0.03	—	-0.45	0.14	0.07	-0.73
RS Boo	-0.21	0.00	-0.16	-0.37	-0.12	-0.02	-0.50
DM Cyg	0.03	-0.10	-0.23	-0.48	-0.24	-0.09	-0.53
KP Cyg	0.15	—	0.25	-0.02	-0.08	0.03	-0.02
DX Del	-0.31	—	-0.19	-0.35	-0.13	-0.02	-0.37
TW Her	-0.35	0.06	—	-0.35	-0.17	0.04	-0.73
TV Lib	-0.43	0.12	0.23	0.12	0.24	0.10	-0.13
CN Lyr	-0.04	-0.12	-0.14	-0.32	-0.14	-0.07	-0.36
KX Lyr	-0.42	0.00	-0.04	-0.36	-0.06	0.01	-0.47
V 413 Oph	-0.75	0.06	—	-0.27	0.15	0.03	-0.49
V 445 Oph	0.11	—	-0.20	-0.46	-0.30	-0.12	-0.42

для полной выборки лирид сравним относительные содержания исследуемых в работе химических элементов в атмосферах богатых металлами переменных типа RR Лиры и звезд галактического поля. Проведем сравнение с обилиями алюминия, натрия и никеля в атмосферах красных гигантов, классических цефеид и цефеид II типа (типа W Девы и VL Геркулеса). На все панели рис. 2 с диаграммами связи относительных содержаний алюминия, натрия и никеля с металличностью добавлены звезды сравнения. Выбор объектов сравнения определялся близкими величинами светимости и температур этих звезд и переменных типа RR Лиры. При этом объекты, с которыми лириды сопоставлялись, относятся как к стационарным (красные гиганты), так и к переменным (молодые классические цефеиды и старые цефеиды II типа) звездам.

На диаграммах рис. 2 проведены линии трендов изменения относительных содержаний исследуемых элементов с ростом металличности для богатых металлами переменных типа RR Лиры (здесь мы не учитывали TV Lib и KP Cyg, отклоняющиеся от общей тенденции) и для звезд сравнения. На всех панелях рис. 2 (кроме рис. 2g) методом наименьших квадратов построены прямые регрессии. На диаграмме « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ » (рис. 2g) для красных гигантов использована аппроксимация полиномом второго порядка.

На рис. 2a, b, c показана связь относительного содержания алюминия и металличности в атмосферах переменных типа RR Лиры. Обилие алюминия в малометаллических лиридах варьируется в широком диапазоне, в то время как высокометаллические лириды (кроме TV Lib и KP Cyg) показывают небольшой разброс значений $[\text{Al}/\text{Fe}]$ в 0.2 dex. Относительные содержания алюминия в атмосферах богатых металлами лирид ниже солнечного. В лиридах с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$ значения $[\text{Al}/\text{Fe}]$ уменьшаются с увеличением $[\text{Fe}/\text{H}]$. На всех диаграммах « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Al}/\text{Fe}]$ » явно видим, что богатые металлами лириды лежат ниже областей, занимаемых звездами сравнения той же металличности (за исключением уже упомянутых TV Lib и KP Cyg).

Переменные типа RR Лиры на диаграммах « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Na}/\text{Fe}]$ » (рис. 2d, e, f) преимущественно высокометаллические. Здесь, как и в случае алюминия, в диапазоне металличности лирид наблюдается тенденция уменьшения $[\text{Na}/\text{Fe}]$ с повышением металличности. Тем не менее пять лирид с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$, в том числе TV Lib, имеют содержания натрия, превышающие солнечное. Для другой звезды с избытком алюминия — KP Cyg — относительное содержание натрия не определялось в работе Takeda (2022). Однако обилие натрия в атмосфере KP Cyg содержится в каталоге Marsakov et al. (2018), и оно тоже высокое ($[\text{Na}/\text{Fe}] = 0.31$).

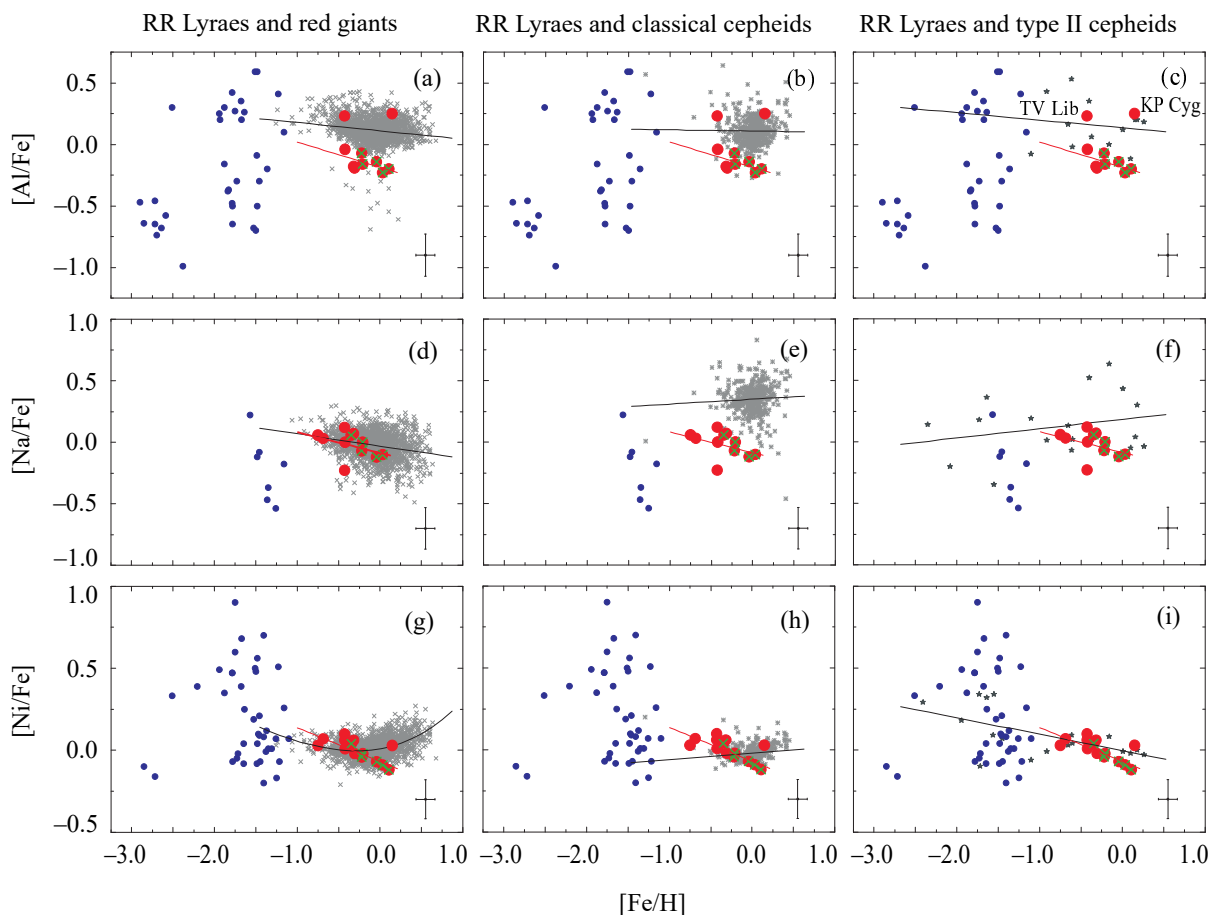


Рис. 2. Относительные содержания алюминия, натрия и никеля в функции металличности для переменных типа RR Лиры поля Галактики и звезд сравнения. Синие кружки — звезды типа RR Лиры каталога Marsakov et al. (2018) с $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$, красные — с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$. Зеленые крестики — лириды диска по Prudil et al. (2020). Звезды сравнения: серые косые крестики (a, d, g) — 1918 красных гигантов из Hawkins et al. (2016); серые снежинки (b, e, h) — 435 цефеид из Luck (2018); серые звездочки (c, f, i) — 23 цефеиды II типа (типа W Девы и BL Геркулеса) из Kovtyukh et al. (2018). Красные линии — тренды изменения относительного содержания химического элемента с увеличением металличности для лирид с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$, черные — для звезд сравнения. Показаны бары ошибок $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $[\text{X}/\text{Fe}]$ для лирид.

Среди богатых металлами лирид самое низкое обилие натрия ($[\text{Na}/\text{Fe}] = -0.23$) наблюдается в атмосфере CI And (впрочем, для этой звезды $[\text{Ni}/\text{Fe}] = 0.06$ близко к среднему значению для высокометаллических лирид, но содержание алюминия не определялось). Красные гиганты демонстрируют подобную лиридам тенденцию уменьшения обилий натрия с ростом металличности (рис. 2d), причем высокометаллические лириды оказываются практически в середине последовательности гигантов. То есть между этими объектами различий в относительных содержаниях натрия не наблюдается. Объяснить этот факт можно, если предположить, что в выборке звезд каталога Hawkins et al. (2016) в избытке присутствуют аккрецированные объекты. К сожалению, информации о принадлежности к галактическим подсистемам или о пространственных положениях и скоростях звезд в работе Hawkins et al. (2016) нет. Тем не менее можно увидеть, что

на диаграмме « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Na}/\text{Fe}]$ » (рис. 2d) самые высокометаллические лириды лежат все же немного ниже средней линии для красных гигантов. Далее, на рис. 2e отчетливо заметно, что содержания натрия в богатых металлами лиридах существенно ниже, чем у классических цефеид. Аналогичная ситуация наблюдается для обилия натрия при сравнении с цефеидами II типа, хотя с меньшей разницей (рис. 2f).

На рис. 2g, h, i с диаграммами « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ » при металличности $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ наблюдается существенный разброс значений относительных содержаний никеля (аналогично алюминию). Однако 14 богатых металлами лирид с известными отношениями $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ на графике образуют довольно компактную группу с уменьшением обилия никеля при росте металличности. Эта тенденция в большей степени относится к высокометаллическим звездам

с $[\text{Ni}/\text{Fe}] < 0$. Обратим внимание на TV Lib и KP Cyg, у которых относительные содержания никеля превышают солнечное (на диаграммах KP Cyg расположена далеко от компактной группы высокометаллических лирид, а у TV Lib — самое высокое значение $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ для лирид с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$). Обилия никеля в богатых металлами переменных типа RR Лиры и звездах сравнения не показывают существенной разницы, но и здесь около половины лирид с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1$ на диаграммах « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ » находятся ниже регрессионных линий для звезд сравнения. Hawkins et al. (2016) обратили внимание на расположение красных гигантов на диаграмме « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ » в среднем вдоль горизонтальной прямой со слабой тенденцией к повышению $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ с увеличением металличности при $[\text{Fe}/\text{H}] > 0$ (см. наш рис. 2g). Однако на диаграммах « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ » не наблюдаем для богатых металлами лирид замеченную в работе Hawkins et al. (2016) по большой выборке красных гигантов тенденцию к увеличению $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ с ростом металличности. Наоборот, высокометаллические переменные типа RR Лиры (кроме одной KP Cyg) четко демонстрируют уменьшение значений $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ с повышением металличности. Обратим внимание, что и в случае никеля (как и для натрия) богатые металлами лириды лежат внутри области красных гигантов.

Добавим сравнение поведения высокометаллических лирид относительно звезд из более представительных списков. На рис. 3 показаны диаграммы « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Al}/\text{Fe}]$ » и « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ » для переменных типа RR Лиры из каталога Marsakov et al. (2018) и звезд из обширного каталога APOGEE DR16 (Jönsson et al., 2020). Мы сделали выборку данных каталога APOGEE DR16: из почти полумиллиона звезд Галактики выделили 13 828 звезд с информацией о химическом составе по критериям $T_{\text{eff}} = (5900–7700)$ K и $\lg g \leq 4.2$, чтобы эти атмосферные параметры были близки к характеристикам атмосфер переменных типа RR Лиры. Подавляющее большинство звезд, которые мы отобрали для сравнения, оказались с той же металличностью, что и богатые металлами переменные типа RR Лиры. Отчетливо видно на рис. 3a, b — металлические лириды, кроме TV Lib и KP Cyg, расположены ниже областей повышенной плотности звезд каталога Jönsson et al. (2020).

На рис. 2 и 3 (а также из таблицы 2) видим, что значительная доля богатых металлами переменных типа RR Лиры обладает обилиями алюминия, натрия и никеля, не превышающими солнечные значения. Лириды с известными содержаниями всех шести химических элементов из таблицы 2,

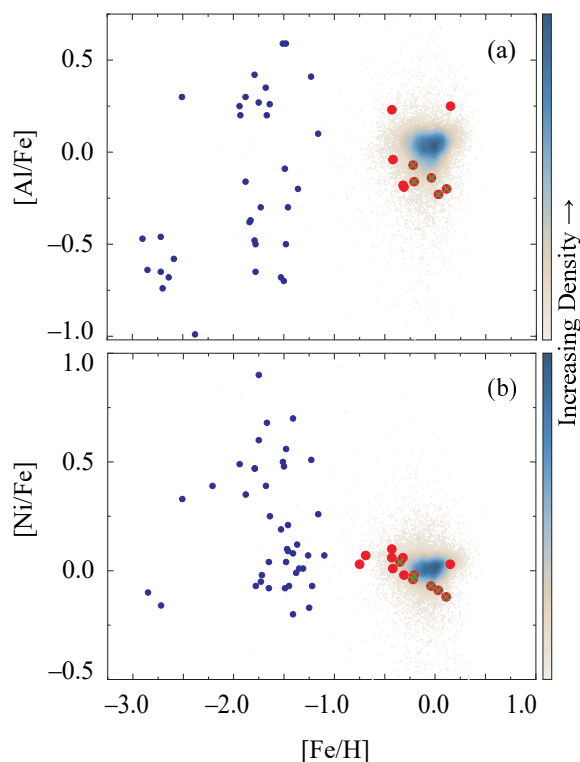


Рис. 3. Диаграммы « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Al}/\text{Fe}]$ » (a) и « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ » (b) для лирид каталога Marsakov et al. (2018) и звезд каталога Jönsson et al. (2020). Обозначения для лирид аналогичны рис. 1. Звезды каталога Jönsson et al. (2020) обозначены точками (плотность точек на диаграмме отображается цветом).

удовлетворяющие критерию $[\text{X}/\text{Fe}] \leq 0.0$: SW And, RS Boo, DM Cyg, CN Lyr.

Итак, относительные содержания алюминия, натрия и никеля в большинстве богатых металлами переменных типа RR Лиры значительно ниже, чем средние значения $[\text{Al}/\text{Fe}]$, $[\text{Na}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ в звездах сравнения, при этом наиболее заметное отличие наблюдается для алюминия. Однако с осторожностью следует говорить о результатах сопоставления высокометаллических лирид с красными гигантами для обилия натрия и никеля. Объяснить низкие значения $[\text{Al}/\text{Fe}]$, $[\text{Na}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ в богатых металлами переменных типа RR Лиры эффектами, возникающими в нестационарной атмосфере этих звезд, не удастся, поскольку сравнение проводилось как со стационарными, так и с переменными звездами поля.

Таким образом, мы наблюдаем аномально низкие относительные содержания магния, кремния, кальция, скандия, титана, иттрия (см. наши ранние работы), алюминия, натрия и никеля в атмосферах значительного количества высокометаллических переменных типа RR Лиры по сравнению со звездами

поля соответствующей металличности. И этому факту надо попытаться найти объяснение.

5. ОБСУЖДЕНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОМЕТАЛЛИЧНЫХ ЛИРИД

Рассмотрим свойства отдельных звезд. В атмосферах DM Cyg и CN Lyr обилие всех девяти химических элементов (магния, кремния, кальция, титана, иттрия, скандия, алюминия, натрия и никеля), изучаемых в настоящей и наших предыдущих работах, ниже, чем у большинства других высокометаллических лирид и у звезд сравнения аналогичной металличности. Эти звезды демонстрируют кинематику тонкого диска (Prudil et al., 2020; настоящая работа). Только из-за низких величин $[Al/Fe]$ Feuillet et al. (2022) посчитали их захваченными из галактик-спутников. Признанная в работе Feuillet et al. (2022) аккрецированной лирида V 445 Oph с низкими значениями обилий пяти химических элементов из таблицы 2 (кроме $[Na/Fe]$) обладает кинематикой тонкого диска (Prudil et al., 2020; настоящая работа). Звезда RS Boo, отнесенная к дисковому по кинематике (Prudil et al., 2020; настоящая работа) и к аккрецированным по химическому составу (Feuillet et al., 2022), показывает низкие содержания четырех химических элементов (кроме обилия натрия и никеля, которые близки к солнечным). Еще восемь лирид из таблицы 2 (кроме KP Cyg и TV Lib) содержат аномально низкие количества некоторых из девяти рассмотренных химических элементов. Таким образом, двенадцать из четырнадцати исследуемых богатых металлами переменных типа RR Лиры демонстрируют низкие содержания некоторых химических элементов по сравнению со звездами других типов такой же металличности.

В отличие от остальных высокометаллических лирид у KP Cyg и TV Lib относительные содержания изучаемых химических элементов в атмосферах довольно высоки (хотя содержание α -элементов у первой низкое, как у звезд тонкого диска). Marsakov et al. (2018) обратили внимание на завышенное отношение $[\alpha/Fe]$ у TV Lib, нехарактерное для высокометаллических звезд.

Интересно понять причину особенного химического состава атмосфер богатых металлами переменных типа RR Лиры галактического поля — и тех, которые демонстрируют аномально низкие обилия, и тех, которые отличаются от других металлических лирид высокими значениями содержания химических элементов.

Заметим, что по вероятностным кинематическим критериям только AA Aql, BR Aqr, TV Lib и V 413 Oph принадлежат к толстому галактическому диску, а все остальные богатые металлами лириды из таблицы 2 — к тонкому диску.

6. ВОЗМОЖНЫЕ ОБЪЯСНЕНИЯ ПРОИСХОЖДЕНИЯ И СВОЙСТВ БОГАТЫХ МЕТАЛЛАМИ ЛИРИД

Таким образом, кроме старых малометаллических переменных типа RR Лиры поля сферической подсистемы (какими мы ранее представляли все лириды) обнаружены звезды с кинематическими и орбитальными параметрами, типичными для дисковых подсистем Галактики, и с низкими относительными содержаниями некоторых элементов в их атмосферах. Понятно, что на появление таких необычных свойств оказали влияние или условия рождения звезд, или внешние события, произошедшие со звездой в ходе ее жизни. Далее мы, ссылаясь на работы свои и других авторов, появившиеся в последние годы, приведем несколько возможных объяснений происхождения и специфических свойств богатых металлами переменных типа RR Лиры. Заметим однако, что мы не можем исключить и возможную несогласованность определения относительных содержаний химических элементов у лирид и звезд других типов.

6.1. Увеличенное содержание гелия

Marsakov et al. (2019) предположили, что возможной причиной появления таких молодых, богатых тяжелыми элементами лирид могут оказаться высокие начальные содержания гелия в их предшественниках. Действительно, в этом случае звезды быстрее эволюционируют и даже с массами менее солнечной успевают дойти до стадии горения гелия в ядре за время существования тонкого галактического диска, то есть быстрее, чем за 10 млрд лет. Населения красных гигантов и лирид с высокими содержаниями гелия уже обнаружены в балдже, и часть из них вполне может быть вынесена в околосолнечные окрестности возмущениями, вызываемыми неоднородностями гравитационного потенциала Галактики. Но аномалии химического состава таких богатых металлами лирид радиальной миграцией их из галактического центра мы объяснить не можем.

Более логичным выглядело наше предположение, что низкие относительные содержания в них α -элементов скорее всего свидетельствуют об их внегалактическом происхождении (Marsakov et al., 2018; 2020), поскольку к тому времени уже мало кто сомневался, что гигантские спиральные галактики (типа нашей) формируются в результате слияния нескольких менее массивных на ранних этапах эволюции Вселенной (см. стандартную космологическую модель Λ CDM). В менее же массивных, разрушаемых Млечным Путем галактиках-спутниках, химическая эволюция межзвездного вещества происходила иначе. К тому же богатые металлами звезды в таких карликовых галактиках

могли появиться позже, чем в нашей Галактике. Наиболее существенным аргументом против внегалактического происхождения таких лирид мы полагаем появление в нашей Галактике на круговых (а не вытянутых) орбитах звезд, рожденных в карликовых галактиках. Кроме того, отсутствуют свидетельства наличия таких лирид в звездных потоках, остатках уже известных разрушенных карликовых галактик. Возможно, разрешить эту проблему поможет численное моделирование процессов захвата.

6.2. Двойственность богатых металлами лирид

Отметим еще одну вероятную причину появления высокометаллических лирид. Bobrick et al. (2024) с помощью численного моделирования проверили возможность образования богатых металлами лирид в результате эволюции тесных двойных систем. Согласно их гипотезе, звезда на стадии красного гиганта заполняет свою полость Роша, и ее внешняя оболочка перетекает на звезду-компаньон. В результате лишённые внешней оболочки звезды горизонтальной ветви становятся более голубыми по сравнению с подобными одиночными звездами и, таким образом, попадают в полосу неустойчивости. Bobrick et al. (2024) предполагают, что все богатые металлами лириды имеют долгопериодического компаньона.

Marsakov et al. (2019) обсудили вероятные причины малых масс богатых металлами лирид ($0.51\text{--}0.60 M_{\odot}$), если считать их объектами тонкого диска. Возможна следующая интерпретация. Чтобы достичь горизонтальной ветви и стать переменной типа RR Лиры за время существования подсистемы тонкого диска, звезда должна лишиться значительной доли своей первоначальной массы. Двойственность лирид могла бы объяснить потерю массы на стадии обмена веществом между компонентами. Но тогда все богатые металлами лириды тонкого диска должны входить в состав тесных двойных пар, а этого мы пока не наблюдаем. В настоящее время известны только две высокометаллические лириды в составе двойных систем.

К сожалению, в таком сценарии трудно объяснить существование связи двойственности и обусуждаемого в данной работе аномального химического состава атмосферы звезды.

6.3. Некорректная классификация переменных

Возможно, часть богатых металлами лирид неверно классифицирована. В этой связи обращают на себя внимание две звезды с высокой металличностью, которые демонстрируют заметно более высокие значения отношений $[Na/Fe]$, $[Al/Fe]$, $[Sc/Fe]$, $[Ti/Fe]$, $[Ni/Fe]$ и $[Y/Fe]$ по сравнению

с другими богатыми металлами лиридами (см. таблицу 2 и соответствующие диаграммы). Это звезды KP Cyg и TV Lib.

KP Cyg с довольно высоким для лирид периодом в $0^d.856$ может быть отнесена к цефеидам II типа (переменным типа BL Геркулеса), а не к звездам типа RR Лиры (Andrievsky et al., 2010). Среди богатых металлами переменных типа RR Лиры нашей выборки KP Cyg обладает наибольшей металличностью ($[Fe/H] = 0.15$), а также высокой светимостью по сравнению с другими высокометаллическими лиридами (Marsakov et al., 2019).

TV Lib известна как очень своеобразная звезда, особенно из-за ее экстремально короткого периода ($0^d.270$) (Molnar et al., 2016). Короткий период и форма кривой блеска TV Lib могут указывать на другую классификацию переменных — например, она может быть отнесена к переменным типа δ Щита (Kovacs and Kamathucham, 2021). Кроме того, светимость и период TV Lib говорят о ее более молодом возрасте, чем у большинства других лирид поля (Bono et al., 1997).

Таким образом, свойства этих двух звезд отличают их от других богатых металлами переменных типа RR Лиры. Если KP Cyg и TV Lib действительно относятся к другим типам переменных, то тогда не имеет смысла рассматривать их при исследовании свойств высокометаллических лирид.

6.4. Лириды с низкими содержаниями алюминия

Feuillet et al. (2022) предположили, что низкие относительные содержания алюминия свидетельствуют о внегалактическом происхождении нескольких высокометаллических переменных типа RR Лиры, обладающих дисковой кинематикой. Основанием такой гипотезы послужили низкие обилия алюминия в звездах карликовых галактик-спутников. Авторы считали звезды аккрецированными, если содержание алюминия в них ограничено в некоторой степени произвольным значением $[Al/Fe] < -0.14$. Лириды, отнесенные к аккрецированным в цитируемой статье, исследуются и в настоящей работе. Feuillet et al. (2022) сомневались относительно статуса SW And с обилием алюминия ($[Al/Fe] = -0.11$), незначительно превышающим установленное ими предельное значение. В нашем каталоге (Marsakov et al., 2018) отношение $[Al/Fe]$ для переменной SW And, полученное усреднением по двум определениям, оказалось $[Al/Fe] = -0.07$, то есть еще выше. Других высокометаллических звезд с известными обилиями алюминия, которые бы удовлетворяли условию $[Al/Fe] < -0.14$, в рассматриваемой нами выборке нет.

В итоге, к списку Feuillet et al. (2022) аккрецированных высокометаллических лирид с дефицитом алюминия мы ничего не добавили, но, возможно, сняли вопрос о принадлежности к этой категории переменной SW And.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены содержания некоторых химических элементов в переменных звездах типа RR Лиры, а также их орбитальные параметры. Особое внимание обращено на характеристики лириды с $[Fe/H] > -1$. В противовес более раннему представлению о лиридах как о старых малометаллических звездах гало Галактики обнаружено, что эти переменные по кинематическим критериям принадлежат к различным галактическим подсистемам. Все изучаемые в работе богатые металлами лириды демонстрируют орбитальные характеристики, типичные в основном для объектов тонкого и значительно реже толстого дисков Галактики.

Проведен анализ относительных содержаний нескольких химических элементов в атмосферах переменных типа RR Лиры. Обилия алюминия, натрия и никеля в большинстве богатых металлами переменных оказались ниже, чем средние значения $[Al/Fe]$, $[Na/Fe]$ и $[Ni/Fe]$ в звездах поля тонкого диска. Поскольку сопоставление проводилось как со стационарными, так и с переменными звездами поля, маловероятно, что низкие $[Al/Fe]$, $[Na/Fe]$ и $[Ni/Fe]$ связаны с нестационарными процессами, происходящими в атмосфере этих звезд. Результат об аномально низких обилиях алюминия, натрия и никеля в высокометаллических лиридах, дополненный выводами наших предыдущих работ (Gozha et al., 2020; Marsakov et al., 2018) о малых значениях отношений $[Mg/Fe]$, $[Si/Fe]$, $[Ca/Fe]$, $[Sc/Fe]$, $[Ti/Fe]$ и $[Y/Fe]$ в богатых металлами переменных типа RR Лиры по сравнению с другими типами звезд аналогичной металличности, говорит о необычной природе этих объектов. Оказалось, что двенадцать из четырнадцати изученных в работе высокометаллических переменных типа RR Лиры показывают отношения $[X/Fe]$ хотя бы для нескольких химических элементов ниже ожидаемых значений. А в атмосферах богатых металлами лирид DM Cyg, CN Lyr и V 445 Oph обнаружены низкие содержания всех исследованных в них химических элементов относительно звезд сравнения той же металличности.

Можно предположить, что наблюдаемые содержания рассматриваемых элементов в богатых металлами лиридах могут быть следствием их формирования из материи, история химической эволюции которой отличается от истории эволюции

родительского межзвездного вещества большинства звезд сравнения. Возможно, эти лириды были захвачены из галактик — спутников Млечного Пути, что подтверждается идентичностью химического состава высокометаллических лирид и звезд некоторых карликовых галактик-спутников (см. Hasselquist et al., 2021). Если допустить внегалактическое происхождение некоторых богатых металлами лирид, то можно говорить о присутствии этого типа звезд не только среди объектов, генетически связанных с единым протогалактическим облаком, но и об их наличии в подсистеме аккрецированного гало.

Необычный химический состав, а также малые массы богатых металлами лирид можно было бы попытаться объяснить двойственностью таких звезд. Однако к настоящему моменту известно слишком мало переменных типа RR Лиры с высокой металличностью, которые входят в состав двойных систем. Поэтому такое предположение не может считаться состоятельным и требует дальнейшей проверки.

Избыточное содержание гелия в прародителях богатых металлами лирид привело бы к более быстрой эволюции таких звезд и попаданию их в полосу неустойчивости. Хотя есть наблюдения, указывающие на некоторое количество таких звезд в центре Галактики, вопрос о дефиците отдельных химических элементов в их атмосферах все равно остается открытым.

Две звезды из нашего списка переменных типа RR Лиры с $[Fe/H] > -1$ — KP Cyg и TV Lib — демонстрируют химические свойства, отличающие их от других богатых металлами лирид. Можно заподозрить неверную классификацию этих звезд по типу переменности. Тогда выводы о свойствах высокометаллических лирид могут быть искажены присутствием в исследуемой выборке переменных другого типа.

Кинематические и орбитальные параметры, свидетельствующие о принадлежности к дисковым подсистемам, и аномальный химический состав богатых металлами переменных типа RR Лиры указывают на необычную природу этих звезд и побуждают нас продолжить исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи. В работе использовались данные миссии Gaia Европейского космического сообщества (ESA, <https://www.cosmos.esa.int/gaia>), подготовленные Консорциумом по обработке и анализу данных Gaia, Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). В исследовании

использовалась также база данных SIMBAD (<https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование было выполнено в Южном федеральном университете при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственный контракт GZ0110/23-10-IF).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. M. Andrievsky, V. V. Kovtyukh, G. Wallerstein, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122** (894), 877 (894) (2010). DOI:10.1086/655444
2. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 481 (2009). DOI:10.1146/annurev.astro.46.060407.145222
3. T. Bensby, S. Feltzing, and I. Lundström, *Astron. and Astrophys.* **410**, 527 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20031213
4. A. Bobrick, G. Iorio, V. Belokurov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **527** (4), 12196 (2024). DOI:10.1093/mnras/stad3996
5. G. Bono, F. Caputo, S. Cassisi, et al., *Astrophys. J.* **483**, 811 (1997). DOI:10.1086/304284
6. G. Clementini, E. Carretta, R. Gratton, et al., *Astron. J.* **110**, 2319 (1995). DOI:10.1086/117692
7. A. K. Dambis, L. N. Berdnikov, A. Y. Kniazev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (4), 3206 (2013). DOI:10.1093/mnras/stt1514
8. D. K. Feuillet, S. Feltzing, C. Sahlholdt, and T. Bensby, *Astrophys. J.* **934** (1), id. 21 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac76ba
9. B.-Q. For and C. Sneden, *Astron. J.* **140** (6), 1694 (2010). DOI:10.1088/0004-6256/140/6/1694
10. B.-Q. For, C. Sneden, and G. W. Preston, *Astrophys. J. Suppl.* **197** (2), article id. 29 (2011). DOI:10.1088/0067-0049/197/2/29
11. J. Govea, T. Gomez, G. M. Preston, and C. Sneden, *Astrophys. J.* **782** (2), article id. 59 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/782/2/59
12. M. L. Gozha, V. A. Marsakov, and V. V. Koval', *Astrophysical Bulletin* **75** (3), 311 (2020). DOI:10.1134/S1990341320030050
13. M. L. Gozha, V. A. Marsakov, and V. V. Koval', *Astronomical and Astrophysical Transactions* **32** (2), 147 (2021). DOI:10.17184/eac.5279
14. C. J. Hansen, B. Nordström, P. Bonifacio, et al., *Astron. and Astrophys.* **527**, id. A65 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201015076
15. S. Hasselquist, C. R. Hayes, J. Lian, et al., *Astrophys. J.* **923** (2), id. 172 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/ac25f9
16. K. Hawkins, T. Masseron, P. Jofré, et al., *Astron. and Astrophys.* **594**, id. A43 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201628812
17. K. Iwamoto, F. Brachwitz, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **125** (2), 439 (1999). DOI:10.1086/313278
18. H. Jönsson, J. A. Holtzman, C. Allende Prieto, et al., *Astron. J.* **160** (3), id. 120 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/aba592
19. C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *Astrophys. J.* **653** (2), 1145 (2006). DOI:10.1086/508914
20. C. Kobayashi, A. I. Karakas, and M. Lugaro, *Astrophys. J.*, **900** (2), id. 179 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/abae65
21. K. Kolenberg, L. Fossati, D. Shulyak, et al., *Astron. and Astrophys.* **519**, id. A64 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/201014471
22. G. Kovacs and B. Karamicham, *Astron. and Astrophys.* **654**, id. L4 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202142189
23. V. Kovtyukh, I. Yegorova, S. Andrievsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477** (2), 2276 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty671
24. J. M. D. Kruijssen, J. L. Pfeffer, M. Chevance, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **498** (2), 2472 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa2452
25. S. Liu, G. Zhao, Y.-Q. Chen, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **13** (11), article id. 1307 (2013). DOI:10.1088/1674-4527/13/11/003
26. R. E. Luck, *Astron. J.* **156** (4), article id. 171 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aadca
27. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', *Astronomy Reports* **62** (1), 50 (2018). DOI:10.1134/S1063772918010055
28. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', *Astronomy Reports* **63** (3), 203 (2019). DOI:10.1134/S1063772919020069
29. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, *Astrophysical Bulletin* **75** (1), 21 (2020). DOI:10.1134/S1990341320010058
30. F. Matteucci and L. Greggio, *Astron. and Astrophys.* **154**, 279 (1986).
31. L. Molnar, A. L. Juhasz, E. Plachy, and R. Szabo, *Inform. Bull. Var. Stars* **6175**, 1 (2016).
32. R. P. Naidu, C. Conroy, A. Bonaca, et al., *Astrophys. J.* **901** (1) id. 48 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/abaef4
33. E. Pancino, N. Britavskiy, D. Romano, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447** (3), 2404 (2015). DOI:10.1093/mnras/stu2616
34. Z. Prudil, I. Dékány, E. K. Grebel, and A. Kunder, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **492** (3), 3408 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa046
35. Y. Takeda, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **514** (2), 2450 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1431

Galactic-Field Metal-Rich RR Lyrae Variables: Features of Kinematics and Abundances of Selected Chemical Elements

M. L. Gozha¹, V. A. Marsakov¹, and V. V. Koval'¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006 Russia

We present an analysis of the relative abundance features of a number of chemical elements in the atmospheres of metal-rich ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1$) Galactic-field RR Lyrae variable stars and the kinematic characteristics of these stars. We have previously shown that the relative abundances of some α elements: magnesium, silicon, calcium, and to a greater extent of titanium, as well as yttrium and scandium in such stars are lower than in most other types of stars bearing similar metallicity. It is found here that some of these metal-rich RR Lyrae stars also have very low relative abundances of sodium, aluminum, and nickel. The orbital parameters of all the metal-rich RR Lyrae variables studied in this paper are typical of the Galactic thin or thick disk objects, however, the unusual chemical composition let us to suggest a possible extragalactic origin for some of them.

Keywords: *stars: abundances—stars: variables: RR Lyrae*