

УДК 524.332-36

ОСОБЕННОСТИ СОДЕРЖАНИЙ НЕКОТОРЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МЕТАЛЛИЧНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗДАХ ТИПА RR ЛИРЫ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2020 М. Л. Гожа^{1*}, В. А. Марсаков¹, В. В. Коваль¹¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

Поступила в редакцию 7 декабря 2019 года; после доработки 25 февраля 2020 года; принята к публикации 25 февраля 2020 года

По данным дополненного авторского каталога спектроскопических определений содержаний химических элементов в атмосферах переменных звезд типа RR Лиры галактического поля показано, что богатые металлами (металлические) лириды ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$) имеют аномальные содержания некоторых химических элементов. В частности, относительные содержания скандия, титана и иттрия в богатых металлами переменных типа RR Лиры за пределами ошибок меньше, чем в звездах поля аналогичной металличности. Обсуждаются ошибки определения содержаний перечисленных химических элементов. Обращено внимание на то, что обилия европия, циркония и лантана не определены ни в одной металлической лириде. Анализируются возможные причины наблюдаемых особенностей химического состава богатых металлами лирид.

Ключевые слова: *звезды: переменные: RR Лиры*

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезды типа RR Лиры — маломассивные радиально пульсирующие переменные спектральных классов A–F, населяющие полосу неустойчивости горизонтальной ветви. Металличность лирид галактического поля варьируется в широком диапазоне. В отличие от лирид шаровых скоплений среди переменных типа RR Лиры поля Галактики есть обладающие высокой металличностью и кинематическими свойствами, характерными для дисковых подсистем. Переменные типа RR Лиры находятся на поздней стадии эволюции. Однако исследования показывают, что за время жизни лирид содержания большинства тяжелых химических элементов в их поверхностных слоях остаются неизменными (см., например, Clementini et al. 1995). Значит, по отношениям $[\text{el}/\text{Fe}]$ можно судить о химическом составе вещества, из которого эти звезды образовались.

В работах Marsakov et al. (2018a; b) на основе авторского каталога, содержащего данные о положениях, скоростях, металличности 415 переменных звезд типа RR Лиры поля и относительных содержаниях $[\text{el}/\text{Fe}]$ 12 химических элементов в ста лиридах, мы показали, что богатые металлами ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$), но с малыми относительными содержаниями α -элементов ($[\alpha/\text{Fe}] < 0.2$) звезды

типа RR Лиры поля в нашей Галактике обладают кинематикой, характерной для самой молодой подсистемы — тонкого галактического диска. Малые остаточные скорости этих переменных свидетельствуют о том, что такие звезды должны быть моложе самых старых звезд этой подсистемы, то есть иметь возраст менее 9 млрд. лет (см., например, Bensby et al. 2014). Однако, как показали наши оценки по Дартмутским эволюционным трекам (Marsakov et al. 2019a; b), массы этих звезд довольно малы $0.51\text{--}0.60M_{\odot}$, и согласно современным представлениям их начальные массы должны быть порядка $0.7\text{--}0.8M_{\odot}$ (см. Taam et al. (1976) и ссылки там). Время эволюции таких маломассивных звезд превышает возраст тонкого диска. В работе Marsakov et al. (2019a) мы предположили, что возможной причиной появления таких молодых богатых металлами лирид могут оказаться высокие начальные содержания гелия в их предшественниках.

В работах Marsakov et al. (2018a; b; 2020) мы исследовали зависимости относительных содержаний магния, кремния, кальция и титана (представителей α -элементов) от $[\text{Fe}/\text{H}]$ для F–G-карликов и лирид поля. В целом зависимости обилий α -элементов от металличности для лирид практически повторяют аналогичные зависимости для карликов поля. Однако при $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ относительные содержания титана в большинстве

*E-mail: gozha_marina@mail.ru

лирид значительно ниже, чем в карликах поля (при этом отношения $[Ti/Fe]$ таких лирид меньше солнечных значений). На аномальные относительные содержания некоторых химических элементов обращали внимание и авторы используемых нами оригинальных работ. В частности, Chadid et al. (2017), Clementini et al. (1995), Liu et al. (2013) даже попытались объяснить причины более низких относительных содержаний не только титана, но также скандия и иттрия в лиридах с $[Fe/H] > -1.0$ по сравнению со стационарными звездами такой же металличности.

Так, авторы работы Clementini et al. (1995) отмечают, что для двух металличных лирид их выборки получены аномально низкие содержания скандия и иттрия. Такие результаты авторам не удалось объяснить комбинациями ошибок в атмосферных параметрах или связать с процессами нуклеосинтеза. Они предположили, что столь низкие содержания этих элементов могли получиться из-за сверхионизации, вызванной фотонами, испускаемыми в линиях Лаймана, которые индуцируются ударными волнами в пульсирующей атмосфере лирид, поскольку стационарные звезды с атмосферными параметрами, как у переменных типа RR Лиры, не показывают дефицита скандия и иттрия. А недооценка эффекта сверхионизации в ЛТР-моделях атмосфер может привести к заниженным содержаниям этих элементов. Однако в этой же статье и в работе Liu et al. (2013) такое объяснение посчитали малоубедительным из-за отсутствия аналогичного эффекта у лирид с $[Fe/H] < -1.0$.

В противовес предыдущему объяснению, авторы работы Liu et al. (2013) оценивают возможность влияния того, что линии скандия подвержены сверхтонкому расщеплению, и находят, что оно незначительно. Они утверждают, что аномально низкие относительные содержания Sc и Y в богатых металлами звездах типа RR Лиры необъяснимы, поэтому их нельзя использовать для анализа химической эволюции Галактики. Авторы высказывают предположение, что поскольку содержания $[Sc/Fe]$ и $[Y/Fe]$ определяются с помощью линий ионизованных атомов, которые чувствительны к поверхностной гравитации, отклонения могут быть вызваны различиями величин $\lg g$ у переменных типа RR Лиры и карликов. Однако, как показал наш анализ многочисленных определений ускорений силы тяжести на поверхности металличных лирид по спектрам высокого разрешения, они заключены в интервале: $\lg g = 2.5-3.0$, то есть примерно такие же, как у красных гигантов (см., например, Gozha et al. 2019, Marsakov et al. 2019a). Да и у других богатых металлами переменных звезд — цефеид — ускорения силы тяжести даже

меньше, чем у лирид (например, Luck 2018), а отношения $[el/Fe]$ для рассматриваемых элементов (особенно для скандия и иттрия) у цефеид в среднем несколько больше, чем у карликов и гигантов поля, а также чем у металличных лирид (см. далее).

В работе Chadid et al. (2017) авторы утверждают, что природа металличных переменных типа RR Лиры уникальна, хотя и бедные, и богатые металлами лириды относятся к семейству звезд горизонтальной ветви с горением гелия в ядре. Они считают, что динамика и структура их атмосфер различны. Отличия, наиболее заметные для переменных типа RRAb, проявляются в силе и локализации ударных волн. При этом у лирид с высоким содержанием металлов интенсивность основного удара выше в фотосферах, тогда как у менее металличных — в верхних слоях атмосферы. Авторы полагают, что различия в механизмах распространения ударных волн связаны с различиями в параметрах атмосфер этих звезд, поскольку в их выборке эффективная температура и гравитационное ускорение больше у богатых металлами лирид, чем у менее металличных. Однако найденные нами в Marsakov et al. (2019a) для ста лирид значения T_{eff} и $\lg g$ хоть и оказались в среднем немного выше у металличных звезд, но в пределах ошибок значения параметров совпадают. Причем все богатые металлами лириды находятся внутри более широких диапазонов этих параметров у малометаллических лирид.

Ввиду неоднозначности высказанных разными авторами предположений для объяснения выявленных особенностей относительных содержаний некоторых химических элементов у переменных звезд типа RR Лиры галактического поля мы в данной работе проведем их критический обзор и подробнее рассмотрим относительные содержания тех химических элементов в богатых металлами ($[Fe/H] > -1.0$) лиридах поля, которые обнаруживают аномалии. В результате тщательного предварительного анализа всех доступных нам опубликованных определений содержаний химических элементов мы выявили те, которые уверенно демонстрируют аномальные относительные содержания в богатых металлами лиридах. Таковыми оказались скандий, титан, иттрий, а также европий, цирконий и лантан, которые вообще не обнаружены ни в одной металличной лириде.

2. ОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Согласно современным теоретическим представлениям изотопы химических элементов производятся в определенных реакциях ядерного синтеза в звездах различных масс. Напомним, как

и где синтезируются упомянутые выше химические элементы.

Скандий — элемент железного пика с нечетным числом протонов. Считается, что скандий производится в массивных звездах при взрывном горении кислорода и кремния в качестве радиоактивного прародителя ^{45}Ti , а также при горении неона. Кроме того, он образуется и в оболочках этих же звезд в слабой компоненте процесса медленных нейтронных захватов (s -процесс) при горении гелиевого и углеродного слоевых источников (Ernandes et al. 2018, Limongi and Chieffi 2003, Woosley and Weaver 1995).

Титан относят к α -элементам, но иногда о нем говорят как об элементе группы железа (например, Sneden et al. 2016). Этот элемент производится при взрывном горении кремния и кислорода в основном массивными ($M > 10M_{\odot}$) сверхновыми II типа и в небольших количествах сверхновыми SNIa (Thielemann et al. 2002, Tsujimoto et al. 1995, Woosley and Weaver 1995). Давно замечено, что относительные содержания титана в зависимости от металличности ведут себя подобно другим α -элементам.

К сожалению, современные теоретические модели не в состоянии воспроизвести наблюдаемые тренды для $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ti}/\text{Fe}]$, поэтому проблема нуклеосинтеза для скандия и титана окончательно не решена (см. Mishenina et al. 2017).

Иттрий синтезируется в процессах медленных нейтронных захватов. Элементы s -процесса образуются в звездах низких и промежуточных масс ($1.5\text{--}8M_{\odot}$) на стадии нестационарного горения двойного слоевого источника (главная компонента s -процесса) в результате тепловых пульсаций в оболочках гигантов асимптотической ветви (АВГ-звездах) и при сбросе оболочки попадают в межзвездное пространство (Gallino et al. 1998). Некоторое количество этих элементов производится и в ядрах массивных ($M \geq 8M_{\odot}$) звезд на стадии гидростатического горения гелиевого ядра (слабая компонента s -процесса). Необходимое для s -процессов количество нейтронов производится в атмосферах АВГ-звезд в реакциях $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ (Bisterzo et al. 2011, Gallino et al. 1998), а в недрах массивных звезд — в реакциях $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ (Pignatari et al. 2010, Woosley et al. 1994). Главная компонента обеспечивает около 70–90% содержания иттрия на Солнце (например, Arlandini et al. 1999, Travaglio et al. 2004). Синтез иттрия возможен и в r -процессе.

Цирконий и лантан своим происхождением обязаны s -процессу.

Европий — типичный представитель элементов быстрых нейтронных захватов (r -процесс). Содержание европия на Солнце на 94 % обеспечено

именно r -процессом (Bisterzo et al. 2017). Полагают, что синтез основного количества атомов элементов быстрых нейтронных захватов происходит непосредственно во время вспышек сверхновых II типа с массами $8\text{--}10M_{\odot}$ (Marsakov et al. 2019a). Хотя конкретные механизмы производства химических элементов в r -процессах до конца не выяснены, они так или иначе связаны с конечными стадиями эволюции короткоживущих массивных звезд (Thielemann et al. 2011).

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа поведения вышеперечисленных химических элементов в звездах типа RR Лиры галактического поля мы использовали спектроскопические определения металличности и относительных содержаний титана, иттрия, циркония, лантана и европия для ста лирид поля из нашего компилятивного каталога, описанного в работе Marsakov et al. (2018a). Каталог можно найти по адресу: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/AZh/95/54>. Значения $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $[\text{el}/\text{Fe}]$ в нем были собраны из 25 публикаций, вычислены как средневзвешенные в случаях двух и более определений разными авторами и приведены к единому солнечному обилию (см. Gozha et al. 2018).

К этим данным мы добавили для 77 лирид относительные содержания скандия $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ из 15 статей с 1995 по 2017 годы. В первоисточниках использовались спектры высокого разрешения, их анализ проводился в приближении локального термодинамического равновесия. Для 31 звезды обилия скандия были определены в нескольких работах (от двух до четырех). В этих случаях мы вычисляли средневзвешенные значения с коэффициентами, обратно пропорциональными авторским ошибкам. В нескольких статьях авторы не указали ошибки определения $[\text{Sc}/\text{Fe}]$, тогда для расчета средневзвешенного мы полагали неопределенности равными 0.1 dex. Для получения однородных данных мы привели определения $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ к солнечному обилию из работы Asplund et al. (2009). Заметим, что в результате мы получили довольно внушительный список относительных содержаний $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ в атмосферах лирид, равному которому по объему мы не обнаружили в других работах.

Таблица 1 содержит собранные и усредненные нами относительные содержания скандия. В первом столбце приведено название звезды. Во втором столбце даны значения $[\text{Fe}/\text{H}]$ для 68 лирид из нашего каталога (Marsakov et al. 2018a) и для 9 лирид из работы Sneden et al. (2017), шесть из которых в наш каталог не попали, а для еще трех в работе Marsakov et al. (2018a) не был определен

химический состав; эти лириды отмечены в таблице звездочкой). Далее показаны итоговые значения [Sc/Fe]. В последнем столбце приведены ссылки на источники данных для [Sc/Fe]. Литература, использованная для определения [Fe/H], [Ti/Fe] и [Y/Fe], указана в каталоге (Marsakov et al. 2018a).

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

Звезда	[Fe/H], dex	[Sc/Fe], dex	Ссылки [Sc/Fe]	Звезда	[Fe/H], dex	[Sc/Fe], dex	Ссылки [Sc/Fe]
(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
SW And	-0.22	-0.40	3, 11	V Ind	-1.45	-0.02	2
CI And	-0.43	-0.28	11	SS Leo	-1.75	0.03	2
WY Ant	-1.88	0.10	2, 7	ST Leo	-1.31	-0.10	2
XZ Aps	-1.79	0.06	2, 7	CM Leo	-1.93	0.36	5
BS Aps	-1.48	0.00	2, 7	TV Lib	-0.43	0.12	11
AA Aql	-0.32	-0.22	11	RR Lyr	-1.49	0.03	3,10, 11
SW Aqr	-1.38	-0.17	2	CN Lyr	-0.04	-0.32	11
BR Aqr	-0.69	-0.45	11	IO Lyr	-1.35	-0.03	11
DN Aqr	-1.76	0.01	2	KX Lyr	-0.42	-0.36	11
FV Aqr	-2.59	0.25	14	Z Mic	-1.51	-0.03	2, 7
X Ari	-2.51	0.28	2, 3	RV Oct	-1.64	-0.02	2, 7
ASAS J085254-0300.3	-1.53	0.12	8, 15	UV Oct	-1.75	-0.01	2, 7
ASAS J101332-0702.3*	-1.73	-0.12	15	V 413 Oph	-0.75	-0.27	11
ASAS J132225-2042.3*	-0.96	-0.27	15	V 445 Oph	0.11	-0.46	2, 3, 11
ASAS J143322-0418.2*	-1.48	-0.02	15	AO Peg	-1.26	0.00	11
ASAS J203145-2158.7*	-1.17	-0.68	15	AV Peg	-0.19	-0.43	2
ASAS J162158+0244.5	-1.84	0.12	8, 15	DH Peg	-1.31	-0.01	11
RS Boo	-0.21	-0.37	11	HH Pup	-0.93	-0.71	2
ST Boo	-1.73	0.05	3	V 701 Pup	-2.90	0.31	8, 15
BPS CS 22881-039	-2.72	0.20	6,9,13,14	SV Scl*	-2.28	0.03	15
BPS CS 22940-070	-1.41	0.08	6,14	VY Ser	-1.78	0.05	2,3,11
BPS CS 30317-056	-2.85	0.16	9	AN Ser	0.00	-0.51	2
BPS CS 30339-046	-2.70	-0.12	14	V 456 Ser	-2.64	0.10	14
YZ Cap	-1.50	-0.01	8, 15	T Sex	-1.55	0.13	15
RR Cet	-1.48	0.13	2,3,11	RU Sex*	-2.1	0.17	15
UU Cet	-1.36	0.02	3, 11	V 440 Sgr	-1.16	-0.11	3, 11
CU Com	-2.38	0.24	4	V 1645 Sgr	-1.94	-0.01	2, 7
W Crt	-0.75	-0.24	2	MT Tel*	-2.58	0.3	15

Таблица 1. (Продолжение)

Звезда	[Fe/H], dex	[Sc/Fe], dex	Ссылки [Sc/Fe]	Звезда	[Fe/H], dex	[Sc/Fe], dex	Ссылки [Sc/Fe]
(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)
Y Crv*	-1.39	-0.03	15	W Tuc	-1.76	0.02	2
DM Cyg	0.03	-0.48	11	TYC 4887-622-1	-1.79	0.10	8, 15
KP Cyg	0.15	-0.02	1	TYC 6644-1306-1	-1.78	0.25	8, 15
DX Del	-0.31	-0.35	2, 11	TYC 8776-1214-1	-2.72	0.11	8, 15
CS Eri	-1.70	-0.13	15	CD Vel	-1.67	0.02	2, 7
SX For	-1.80	-0.02	2	ST Vir	-0.85	-0.24	2
TY Gru	-1.88	0.03	7, 12	UU Vir	-0.86	-0.59	2
BO Gru	-1.83	0.00	8, 15	AS Vir	-1.68	-0.07	2, 7
TW Her	-0.35	-0.35	11	AU Vir*	-2.04	0.32	15
VX Her	-1.46	-0.13	3, 11	DO Vir	-1.57	0.09	11
DT Hya	-1.23	0.00	2, 7	—	—	—	—

Ссылки: 1 – Andrievsky et al. (2010), 2 – Chadid et al. (2017), 3 – Clementini et al. (1995), 4 – Clementini et al. (2000), 5 – Di Fabrizio et al. (2002), 6 – For and Sneden (2010), 7 – For et al. (2011), 8 – Govea et al. (2014), 9 – Hansen et al. (2011), 10 – Kolenberg et al. (2010), 11 – Liu et al. (2013), 12 – Preston et al. (2006a), 13 – Preston et al. (2006b), 14 – Roederer et al. (2014), 15 – Sneden et al. (2017).

Для сравнения мы воспользовались несколькими выборками звезд поля с известными металличностями и относительными содержаниями скандия, титана и иттрия. Данные для 7066 близких карликов, субгигантов и звезд вблизи точки поворота дисковых подсистем взяты из работы Buder et al. (2019). Каталог Reddy et al. (2006) стал источником [Fe/H] и [Sc/Fe] для 171 F–G-карлика с расстояниями до 150 пк от Солнца, которые в большинстве случаев принадлежат толстому галактическому диску (c [Fe/H] $\approx > -1.0$). В каталоге из работы Venn et al. (2004) приведены металличности, относительные содержания титана и иттрия для 781 звезды поля в широком диапазоне металличности, совпадающем с диапазоном для лирид поля. Относительные содержания рассматриваемых химических элементов в 435 цефеидах получены из работы Luck (2018).

4. ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В спектрах лирид, периодически пульсирующих переменных, наиболее симметричные и резкие линии, оптимальные для определения обилий химических элементов, образуются вблизи фазы мини-

мального блеска и максимального радиуса звезды ($\phi \approx 0.35$), когда в атмосфере не распространяются ударные волны (например, Sneden et al. 2011). В первоисточниках большая часть спектров для анализа линий рассматриваемых химических элементов была получена вблизи спокойной фазы минимума блеска. Однако было показано, что относительные содержания большинства химических элементов, в том числе исследуемых в работе, практически не зависят от фазы (в отличие от температуры и ускорения силы тяжести на поверхности звезды) (см. Rancino et al. 2015, и ссылки в ней).

В таблице 2 приведены статистические сведения об обилиях химических элементов, включенных в нашу работу, и их ошибках. Во втором столбце указано количество лирид, для которых известны относительные содержания химического элемента. Следующий столбец содержит среднюю ошибку, вычисленную по приведенным в статьях неопределенностям. Дисперсия посчитанных средневзвешенных значений относительных содержаний для случаев двух и более определений обилий каждого элемента для какой-либо звезды, которая дает оценку внешней сходимости определений [el/Fe] разными авторами, дана в четвертом столбце. Видим, что дисперсия вычисленных средневзвешен-

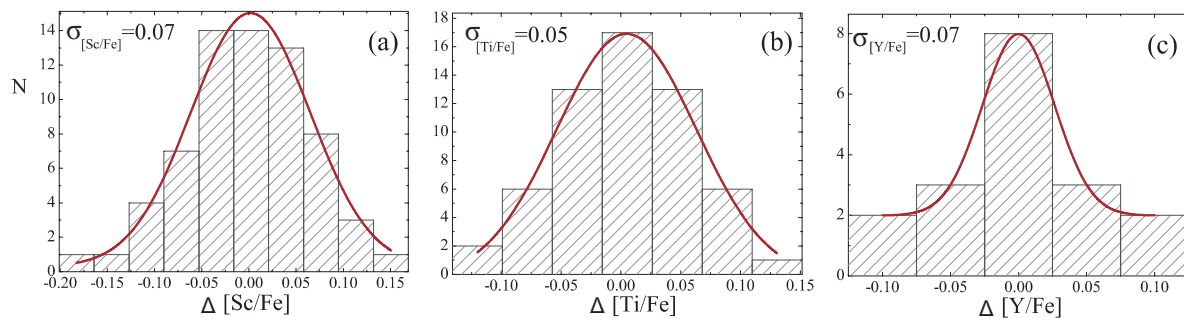


Рис. 1. Распределение отклонений $\Delta[\text{el}/\text{Fe}]$ авторских значений от вычисленных по ним средневзвешенных значений относительных содержаний скандия (а), титана (б) и иттрия (с). Гистограммы описаны гауссианами. На всех панелях показаны величины дисперсий.

Таблица 2. Статистика определений относительных содержаний химических элементов и их ошибок

Элемент	Кол-во звезд	Средняя заявленная ошибка	Дисперсия вычисленного среднего
(1)	(2)	(3)	(4)
Fe	100	0.14	0.12
Sc	77	0.14	0.07
Ti	83	0.13	0.05
Y	43	0.11	0.07

ных меньше средних ошибок, заявленных авторами первоисточников. Для скандия, титана и иттрия построены гистограммы отклонений авторских определений обилий от вычисленных средневзвешенных значений (рис. 1). К сожалению, количество пересекающихся определений невелико, особенно для иттрия. Распределения получились одновершинными, описываются нормальным законом, что позволяет считать ошибки случайными. Значит, наши вычисленные средневзвешенные обилия скандия, титана и иттрия наряду с собранными из первоисточников единичными определениями относительных содержаний этих химических элементов можно считать надежными и использовать для анализа поведения $[\text{el}/\text{Fe}]$ в переменных типа RR Лиры.

5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СОДЕРЖАНИЙ Sc, Ti И Y В БОГАТЫХ МЕТАЛЛАМИ ЗВЕЗДАХ ПОЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ

Для выяснения причин anomalно низких отношений $[\text{Sc}/\text{Fe}]$, $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ и $[\text{Y}/\text{Fe}]$ в богатых металлами лиридах сопоставим обилия исследуемых химических элементов в лиридах и в других группах звезд, как стационарных, так и переменных.

Одновременно проверим, насколько состоятельны объяснения особенностей поведения $[\text{el}/\text{Fe}]$ выделенных нами элементов в упоминаемых выше статьях. На рис. 2 показаны положения переменных типа RR Лиры поля (красные большие кружки) на диаграммах « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{el}/\text{Fe}]$ » для скандия (панели a, d, g), титана (панели b, e, h) и иттрия (панели c, f, i). Вертикальная пунктирная линия, проведенная через $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$, делит звезды на две группы по металличности. Видно, что на всех панелях рис. 2 лириды располагаются вдоль полосы, которая в области $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ проходит ниже областей, занимаемых звездами сравнения (см. далее). Прослеживается явная зависимость $[\text{Sc}/\text{Fe}]$, $[\text{Ti}/\text{Fe}]$, $[\text{Y}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$, причем с увеличением металличности относительные содержания всех рассматриваемых химических элементов уменьшаются.

На все панели рис. 2 нанесены звезды сравнения. На рис. 2a,b,c добавлены 7066 близких карликов, субгигантов и звезд вблизи точки поворота дисковых подсистем из работы Buder et al. (2019). Все звезды этого объемного каталога, кроме четырех с известными $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ и по десять с $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ и $[\text{Y}/\text{Fe}]$, имеют $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$. Именно из-за большого количества богатых металлами звезд удобно сравнивать поведение металличных лирид со звездами из этого каталога. На диаграммах « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ » (рис. 2a) и « $[\text{Fe}/\text{H}]$ – $[\text{Y}/\text{Fe}]$ » (рис. 2c) большинство металличных лирид лежат ниже области, занимаемой звездами из работы Buder et al. (2019). Исключение составляют лишь две звезды — KP Cyg и TV Lib, лежащие внутри области звезд сравнения. Однако о странности содержаний и других химических элементов, а также об anomalно высокой скорости вращения вокруг галактического центра этих звезд мы писали в работе Marsakov et al. (2018a). На зависимости « $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ » (рис. 2b) богатые металлами лириды лежат ниже звезд сравнения, и только четыре

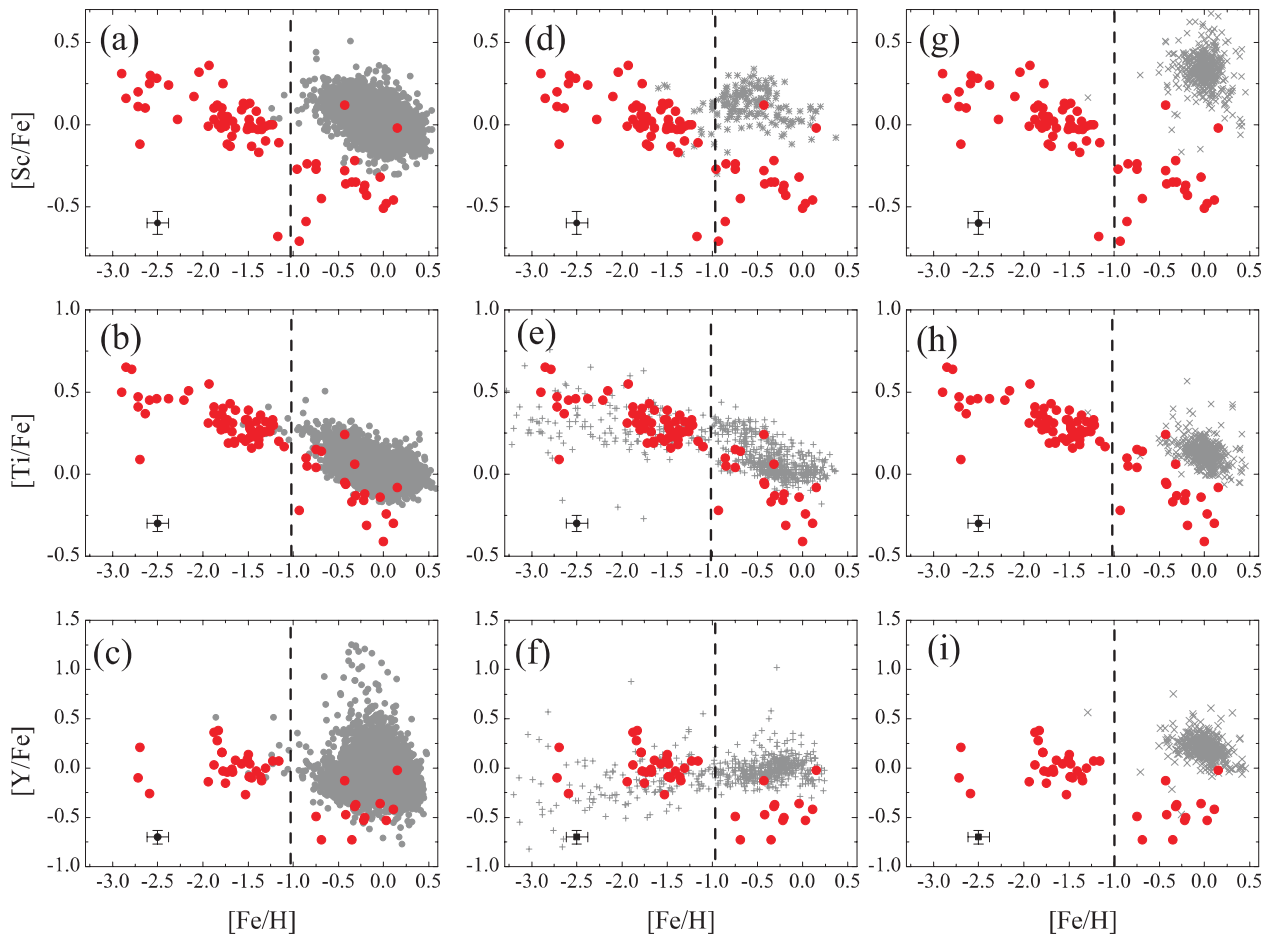


Рис. 2. Относительные содержания скандия, титана и иттрия в зависимости от металличности для переменных типа RR Лиры галактического поля (красные большие кружки). Звезды сравнения: маленькие серые точки — близкие карлики, субгиганты и звезды вблизи точки поворота из работы Buder et al. (2019) (a–c); серые снежинки — близкие F–G-карлики дисковых подсистем из работы Reddy et al. (2006) (d); серые прямые крестики — звезды разных подсистем из работы Venn et al. (2004) (e, f); серые косые крестики — цефеиды из работы Luck (2018) (g–i). Вертикальные пунктирные линии разделяют богатые и бедные металлами звезды. Показаны бары ошибок средневзвешенных значений $[e/Fe]$ для лирид.

металлические лириды попадают в компактную область, занимаемую стационарными звездами поля. Заметим, что обилия скандия и иттрия определены только по линиям ионизованных элементов Sc II и Y II, а обилия титана в большинстве случаев получены усреднением по линиям нейтрального Ti I и ионизованного титана Ti II (см. обсуждение ниже).

рис. 2d,e,f уточняются взаимные положения отношений $[e/Fe]$ звезд и лирид поля дополнительно и в малометаллическом диапазоне. На рис. 2d для сравнения пришлось нанести отношения $[Sc/Fe]$ 171 близкого F–G-карлика из каталога Reddy et al. (2006), среди которых только 15 малометаллических. Зато на рис. 2e,f приведена 781 звезда поля из работы Venn et al. (2004) с диапазоном металличности, как у лирид поля (определения содержания скандия этими авторами нам найти не удалось). Видим, что на панелях (d–f) рис. 2 в диапазоне

$[Fe/H] < -1.0$ положение лирид и звезд сравнения совпадают. Зато при более высокой металличности, как и в случае сравнения с данными каталога Buder et al. (2019), в большинстве лирид относительные содержания скандия, титана и иттрия за пределами ошибок меньше, чем в стационарных звездах сравнения.

Неоднократно высказывалось мнение, что anomalously низкие относительные содержания некоторых химических элементов в богатых металлами лиридах обнаруживаются из-за того, что в качестве звезд сравнения используются стационарные звезды. Предполагалось, что такие особенности связаны с пульсациями атмосфер переменных звезд. Рассмотрим теперь зависимости отношений $[Sc/Fe]$, $[Ti/Fe]$ и $[Y/Fe]$ от металличности для лирид по сравнению с аналогичными зависимостями для цефеид, которые представляют собой

другой тип радиально пульсирующих переменных. На панели (g-i) рис. 2 нанесены 435 цефеид из работы Luck (2018). Все они (за исключением одной) богаты металлами и занимают довольно компактные области на диаграммах. Видим, что положение цефеид на рисунках значительно выше полосы металлических лирид (особенно это заметно для скандия и иттрия). При этом для цефеид средние значения

$$\langle [\text{Sc}/\text{Fe}]_{\text{ceph}} \rangle = 0.33 \pm 0.01,$$

$$\langle [\text{Ti}/\text{Fe}]_{\text{ceph}} \rangle = 0.13 \pm 0.01,$$

$$\langle [\text{Y}/\text{Fe}]_{\text{ceph}} \rangle = 0.20 \pm 0.01,$$

а средние относительные содержания этих элементов в стационарных звездах сравнения либо равны, либо на 0.1 dex превышают солнечные значения, в то время как в том же диапазоне металличности, что и у цефеид ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$), у лирид поля

$$\langle [\text{Sc}/\text{Fe}]_{\text{RRL}} \rangle = -0.34 \pm 0.04,$$

$$\langle [\text{Ti}/\text{Fe}]_{\text{RRL}} \rangle = -0.08 \pm 0.04,$$

$$\langle [\text{Y}/\text{Fe}]_{\text{RRL}} \rangle = -0.44 \pm 0.06.$$

Ясно, что обилия в переменных типа RR Лиры с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ и в цефеидах отличаются далеко за пределами ошибок определений. Мы не считаем, чтобы столь низкие относительные содержания рассматриваемых элементов в металлических лиридах были связаны с тем, что эти звезды являются пульсирующими переменными.

6. ВЛИЯНИЕ НЕЛТР-ЭФФЕКТОВ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Можно предположить, что различия обилий в металлических лиридах и в звездах сравнения связаны с эффектами, вызванными отклонениями от локального термодинамического равновесия (ЛТР). Так, в работе Asplund (2005) утверждается, что гиганты обычно более подвержены отклонениям от ЛТР, чем, например, звезды-карлики. Однако среди наших звезд сравнения есть и гиганты, да и у цефеид ускорения силы тяжести на поверхности зачастую меньше, чем у лирид. При этом отношения $[\text{Sc}/\text{Fe}]$, $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ и $[\text{Y}/\text{Fe}]$ у них намного выше, чем у лирид аналогичной металличности.

Считается также, что отклонения от ЛТР влияют на линии нейтральных атомов сильнее, чем на линии ионизованных (например, Bergemann (2011), Hansen et al. (2011)). В статьях, которые послужили источниками информации об относительных содержаниях $[\text{el}/\text{Fe}]$, для определения обилий скандия и иттрия использовались только линии ионизованных элементов Sc II и Y II, а для вычисления $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ — линии как нейтрального, так и ионизованного титана (Ti I и Ti II). В большинстве первоисточников $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ получали как среднее значение между $[\text{Ti I}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ti II}/\text{Fe}]$.

Мы проводили аналогичную процедуру, если в статье были даны отдельно $[\text{Ti I}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ti II}/\text{Fe}]$, а затем вычисляли средневзвешенное значение по данным в разных источниках. Анализ информации из использованных нами статей показывает постоянное смещение между $[\text{Ti I}/\text{Fe}]$ и $[\text{Ti II}/\text{Fe}]$, причем обилия, получаемые по Ti I, как правило, выше, чем по Ti II. Аналогичный результат получили, например, For and Sneden (2010), For et al. (2011), Pancino et al. (2015). Авторы работ For and Sneden (2010), For et al. (2011) предположили, что такое смещение, вероятно, вызвано неопределенностью значений $\lg gf$ линий Ti I. В работе Bergemann (2011) настоятельно рекомендуется для звезд-гигантов вычислять $[\text{Ti}/\text{Fe}]$ исключительно по линиям Ti II, однако там же отмечается, что влияние неЛТР-эффектов на обилие Ti I в основном проявляется у звезд с низким содержанием металлов. В нашей выборке для металлических лирид есть случаи незначительных отличий в относительных содержаниях Ti I и Ti II, в основном в пределах ошибок. При этом, даже если использовать только значения $[\text{Ti II}/\text{Fe}]$, полученная закономерность не изменится.

Видимо, уникальность химического состава металлических лирид нельзя объяснить влиянием неЛТР-эффектов.

7. СОДЕРЖАНИЯ ЕВРОПИЯ, ЦИРКОНИЯ И ЛАНТАНА

Известно, что вместе с α -элементами сверхновые типа SNe II выбрасывают также и элементы r -процессов, в частности европия. Поэтому относительные содержания этого, хорошо определяемого в звездах элемента, ведут себя в зависимости от металличности подобно α -элементам, что позволяет увеличить надежность выявленного по одному типу химических элементов хода зависимости « $[\text{el}/\text{Fe}]$ – $[\text{Fe}/\text{H}]$ ». Но, к сожалению, ни содержания европия, ни других r -элементов ни для одной лириды поля с $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ не найдено. Хотя для других металлических переменных звезд — цефеид — содержания европия хорошо определяются. Отношения $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ в цефеидах такие же, как и в карликах и гигантах поля (Marsakov et al. 2013). В чем причина отсутствия данных о содержании европия в богатых металлами лиридах? Вероятно, авторы первоисточников не ставили цель их определить. Но нельзя исключить и возможность того, что европия в металлических лиридах настолько мало, что даже невозможно установить его содержание. Заметим, что элементы r -процесса образуются в сверхновых II типа с массами 8–10 M_{\odot} , а более массивные сверхновые выбрасывают в основном α -элементы (см., например, Woosley et al. (1994)).

Поэтому можно предположить, что вещество, из которого образовались богатые металлами лириды, обогащалось в основном массивными SNe II.

Мы также обратили внимание на отсутствие в нашем каталоге Marsakov et al. (2018a) данных об обилиях в металлических лиридах таких *s*-элементов, как лантан и цирконий. Зато в столь же богатых металлами переменных — цефеидах — содержания La и Zr определены, и они высокие. Заметим, что для некоторого количества бедных металлами лирид обилия европия, лантана и циркония известны.

Для уточнения причины отсутствия определений содержаний этих элементов в богатых металлами лиридах поля следует провести дополнительные исследования.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обосновать аномально низкие относительные содержания скандия, титана и иттрия в богатых металлами лиридах поля Галактики какими-либо ошибками определения содержаний этих элементов не удастся. Не получается объяснить их и эффектами, возникающими в нестационарной атмосфере этих звезд. Маловероятно, что такие низкие обилия связаны с эффектами, вызванными отклонениями от локального термодинамического равновесия. Непонятна причина отсутствия данных об обилиях европия, лантана и циркония в богатых металлами лиридах.

Похоже, что лириды приобрели именно такие содержания перечисленных элементов из родительского межзвездного вещества. Ранее мы показали, что малые остаточные скорости и близкий к солнечному химический состав металлических лирид поля свидетельствуют об их принадлежности подсистеме тонкого галактического диска. Это предполагает их столь малый возраст, что такие звезды могли достичь горизонтальной ветви лишь при высоких начальных содержаниях в них гелия (Marsakov et al. 2018a). Исходя из вышеизложенного, можно допустить, что металлические лириды поля, скорее всего, образовались из межзвездного вещества, испытавшего историю химической эволюции, отличную от той, которую прошло родительское межзвездное вещество большинства близких к Солнцу звезд поля. В предыдущих работах мы предположили, что такие богатые гелием звезды могли попасть в окрестности Солнца путем радиальной миграции из центральных областей Галактики, где такие звезды уже обнаружены (Marsakov et al. 2019a), или в результате захвата массивной карликовой галактики-спутника на ранних этапах эволюции нашей Галактики (Marsakov et al. 2020).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Т.В. Мишениной за предварительное знакомство с рукописью и полезные консультации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке лаборатории Космомикрофизических исследований структуры и динамики Галактики НИИ физики Южного федерального университета.

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 (2010).
2. C. Arlandini, F. Käppeler, K. Wisshak, et al., *Astrophys. J.* **525** (2), 886 (1999).
3. M. Asplund, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43** (1), 481 (2005).
4. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **47** (1), 481 (2009).
5. T. Bensby, S. Feltzing, and M. S. Oey, *Astron. and Astrophys.* **562**, A71 (2014).
6. M. Bergemann, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (3), 2184 (2011).
7. S. Bisterzo, R. Gallino, O. Straniero, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418** (1), 284 (2011).
8. S. Bisterzo, C. Travaglio, M. Wiescher, et al., *Astrophys. J.* **835** (1), 97 (2017).
9. S. Buder, K. Lind, M. K. Ness, et al., *Astron. and Astrophys.* **624**, A19 (2019).
10. M. Chadid, C. Sneden, and G. W. Preston, *Astrophys. J.* **835** (2), 187 (2017).
11. G. Clementini, E. Carretta, R. Gratton, et al., *Astron. J.* **110**, 2319 (1995).
12. G. Clementini, S. Di Tomaso, L. Di Fabrizio, et al., *Astron. J.* **120** (4), 2054 (2000).
13. L. Di Fabrizio, G. Clementini, M. Marconi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **336** (3), 841 (2002).
14. H. Ernanandes, B. Barbuy, A. Alves-Brito, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A18 (2018).
15. B.-Q. For and C. Sneden, *Astron. J.* **140** (6), 1694 (2010).
16. B.-Q. For, C. Sneden, and G. W. Preston, *Astrophys. J. Suppl.* **197** (2), 29 (2011).
17. R. Gallino, C. Arlandini, M. Busso, et al., *Astrophys. J.* **497** (1), 388 (1998).
18. J. Govea, T. Gomez, G. W. Preston, and C. Sneden, *Astrophys. J.* **782** (2), 59 (2014).
19. M. L. Gozha, V. A. Marsakov, and V. V. Koval', *Astrophysics* **61** (1), 41 (2018).

20. M. L. Gozha, V. A. Marsakov, and V. V. Koval', *Astrophysics* **62** (3), 369 (2019).
21. C. J. Hansen, B. Nordström, P. Bonifacio, et al., *Astron. and Astrophys.* **527**, A65 (2011).
22. K. Kolenberg, L. Fossati, D. Shulyak, et al., *Astron. and Astrophys.* **519**, A64 (2010).
23. M. Limongi and A. Chieffi, *Astrophys. J.* **592** (1), 404 (2003).
24. S. Liu, G. Zhao, Y.-Q. Chen, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **13** (11), 1307-1329 (2013).
25. R. E. Luck, *Astron. J.* **156** (4), 171 (2018).
26. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', *Astronomy Reports* **62** (1), 50 (2018a).
27. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', *Astronomy Reports* **63** (3), 203 (2019a).
28. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', *Astrophysics* **62** (4), 467 (2019b).
29. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, V. V. Koval', and E. I. Vorobyov, *Astrophysics* **61** (2), 171 (2018b).
30. V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha, *Astrophysical Bulletin* **75** (1), 21 (2020).
31. V. A. Marsakov, V. V. Koval', V. V. Kovtyukh, and T. V. Mishenina, *Astronomy Letters* **39** (12), 851 (2013).
32. T. Mishenina, M. Pignatari, B. Côte, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **469** (4), 4378 (2017).
33. E. Pancino, N. Britavskiy, D. Romano, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447** (3), 2404 (2015).
34. M. Pignatari, R. Gallino, M. Heil, et al., *Astrophys. J.* **710** (2), 1557 (2010).
35. G. W. Preston, C. Sneden, I. B. Thompson, et al., *Astron. J.* **132** (1), 85 (2006a).
36. G. W. Preston, I. B. Thompson, C. Sneden, et al., *Astron. J.* **132** (4), 1714 (2006b).
37. B. E. Reddy, D. L. Lambert, and C. Allende Prieto, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367** (4), 1329 (2006).
38. I. U. Roederer, G. W. Preston, I. B. Thompson, et al., *Astron. J.* **147** (6), 136 (2014).
39. C. Sneden, J. J. Cowan, C. Kobayashi, et al., *Astrophys. J.* **817** (1), 53 (2016).
40. C. Sneden, B.-Q. For, and G. W. Preston, *Carnegie Observatories Astrophysics Series* **5**, 196 (2011).
41. C. Sneden, G. W. Preston, M. Chadid, and M. Adamów, *Astrophys. J.* **848** (1), 68 (2017).
42. R. E. Taam, R. P. Kraft, and N. Suntzeff, *Astrophys. J.* **207**, 201 (1976).
43. F. K. Thielemann, A. Arcones, R. Käppeli, et al., *Progress in Particle and Nuclear Physics* **66** (2), 346 (2011).
44. F. K. Thielemann, D. Argast, F. Brachwitz, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **281** (1), 25 (2002).
45. C. Travaglio, R. Gallino, E. Arnone, et al., *Astrophys. J.* **601** (2), 864 (2004).
46. T. Tsujimoto, K. Nomoto, Y. Yoshii, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **277** (3), 945 (1995).
47. K. A. Venn, M. Irwin, M. D. Shetrone, et al., *Astron. J.* **128** (3), 1177 (2004).
48. S. E. Woosley and T. A. Weaver, *Astrophys. J. Suppl.* **101**, 181 (1995).
49. S. E. Woosley, J. R. Wilson, G. J. Mathews, et al., *Astrophys. J.* **433**, 229 (1994).

Peculiarities of Abundances of Selected Elements in Metal-Rich Field RR Lyrae Stars

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

We use the data of our extended catalog of spectroscopic determinations of elemental abundances in the atmospheres of Galactic-field RR Lyrae type variables to show that metal-rich RR Lyraes ($[Fe/H] > -1.0$) have anomalous abundances of some elements. In particular, the relative abundances of scandium, titanium, and yttrium in metal-rich RR Lyrae type variables are lower than the corresponding abundances in field stars of similar metallicity beyond the errors. We discuss the errors of the determination of the abundances of the above elements and point out the fact that no europium, zirconium, and lanthanum abundance determinations are available for metal-rich RR Lyrae type variables. We also analyze various possible causes of the observed peculiarities of the chemical composition of metal-rich RR Lyrae type variables.

Keywords: *stars: variables: RR Lyrae*