

УДК 524.31.02-36

Химический анализ красных гигантов

Л.И. Антипова, А.А. Боярчук, Ю.В. Пахомов

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 декабря 2005 года

Аннотация. Сравнительный анализ содержаний химических элементов в атмосферах красных гигантов, принадлежащих трем спектральным подгруппам – нормальным гигантам, умеренным и классическим бариевым звездам – показал, что во всех звездах наблюдаются избытки содержаний Na, Mg, Al и Si, величины которых растут с ростом светимости звезды (уменьшением $\lg g$); зависимость избытка содержаний каждого из этих элементов от $\lg g$ является единой для всех рассмотренных групп звезд, что свидетельствует о едином механизме их образования, а именно, они являются продуктами горения водорода в NeNa- и MgAl-циклах, вынесенными из недр звезды во внешние слои атмосферы звезды конвекцией. Для нормальных гигантов установлено наличие небольших избытков s-элементов, величины которых определяются величинами масс, металличностью и фазой эволюции, в отличие от классических бариевых, где эта величина определяется орбитальным периодом. У шести звезд обнаружены небольшие избытки кобальта, превышающие ошибки измерений; показано, что эти звезды являются более холодными по сравнению с остальными, их массы меньше, а возраст больше, кроме того они имеют избытки C и недостатки Cr, Mn и Na; по кинематическим характеристикам принадлежат толстому диску.

ABUNDANCES OF RED GIANTES, *by Antipova L.I., Boyarchuk A.A., Pakhomov Yu.V.* The comparative analysis of abundances of chemical elements in the red giants belonging to three spectral subgroups (to the normal giants, mild and classical barium stars) has shown, that in all stars overabundances of Na, Mg, Al and Si are observed; values of their overabundances increase with growth of luminosity of a star (decrease $\lg g$); dependence of overabundances of each of these elements from $\lg g$ is uniform for all considered groups of stars that testifies to their common mechanism formation, namely, they are products of burning of hydrogen in NeNa and the MgAl-cycles, that have been took out from the stellar interiors to outer atmospheric layers by convection. For normal giants a presence of small overabundances of s-elements which values are defined by stellar mass, metallicity and by a phase of evolution is established; but in the case of classical barium stars this value is defined by the orbital period. Small overabundances of cobalt, exceeding mistakes of measurements are found out in six stars; it is shown, that these stars are colder in comparison with the others, their masses are less, and the age is larger. Besides that they have overabundances C and underabundances Cr, Mn and Na; under kinematic characteristics they belong to a thick disk.

Ключевые слова: содержания химических элементов, красные гиганты, звездная эволюция

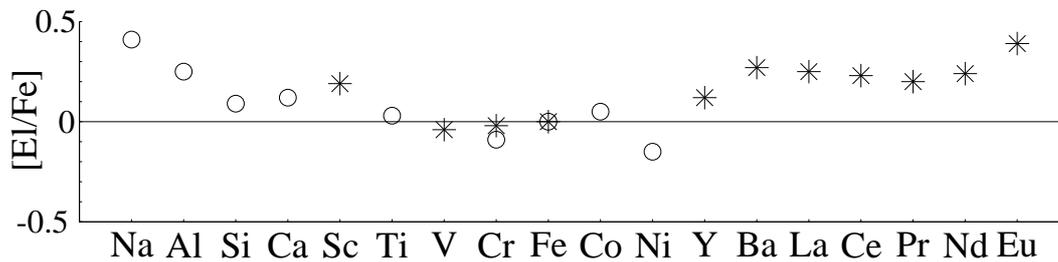


Рис. 1. Содержание химических элементов в атмосфере красного гиганта HD19787 относительно солнечных содержаний

1 Введение

К настоящему времени установлено, что основным источником энергии звезд являются ядерные реакции синтеза химических элементов, которые осуществляются в глубоких слоях звезды. На разных этапах эволюции протекают различные типы реакций, приводящие к образованию различных химических элементов в этих слоях. Когда звезда уходит с главной последовательности в область красных гигантов, у нее развивается конвективная оболочка, которая, постепенно увеличиваясь, достигает тех слоев, где во время пребывания звезды на стадии главной последовательности шли ядерные реакции, и выносит это вещество на поверхность звезды. Вследствие этого в атмосферах красных гигантов наблюдаются аномальные содержания отдельных элементов. Изучение этих аномалий дает важную информацию о внутреннем строении звезд, ядерном синтезе в их глубинах на различных стадиях эволюции звезды. С этой точки зрения исследование содержаний химических элементов в атмосферах красных гигантов является весьма актуальной темой для понимания эволюции звезд.

2 Анализ химического состава красных гигантов

В рамках исследования красных гигантов нами определены содержания ряда химических элементов в атмосферах около 60 звезд на основании наблюдений, выполненных с высоким разрешением, высоким отношением сигнала к шуму и единым методом. В этом смысле полученные данные можно рассматривать как однородные, поэтому на основании такого массива данных сравнительный анализ исследования содержаний различных элементов представляет интерес. Более половины всех наблюдений выполнены в Крымской астрофизической обсерватории на 2.6-м телескопе обсерватории им. Шайна (ЗТШ).

Как известно, красные гиганты не являются однородной группой звезд и по своим спектральным особенностям подразделяются на ряд подгрупп. Ранее нами уже проводились исследования содержаний химических элементов в звездах, принадлежащим трем из них; это “нормальные” красные гиганты (без спектральных особенностей), а также умеренные бариевые и классические бариевые звезды (Боярчук и др., 2000; Боярчук и др., 2001; Антипова, Боярчук, 2001; Боярчук и др., 2002; Антипова и др., 2003; Антипова и др., 2004; Антипова и др., 2005). Здесь мы предполагаем сделать небольшой обзор полученных результатов и выполнить сравнительный анализ содержаний некоторых элементов в звездах этих трех групп.

На рис. 1 показаны содержания химических элементов в спектре нормального красного гиганта HD19787 относительно солнечных содержаний. Эта картина содержаний является типичной для всех красных гигантов. Для нее характерно: а) наличие избытков содержаний элементов – Na, Mg, Al, Si; б) небольшие избытки содержаний s-элементов; в) относительные содержания элементов группы железа близки к солнечным значениям.

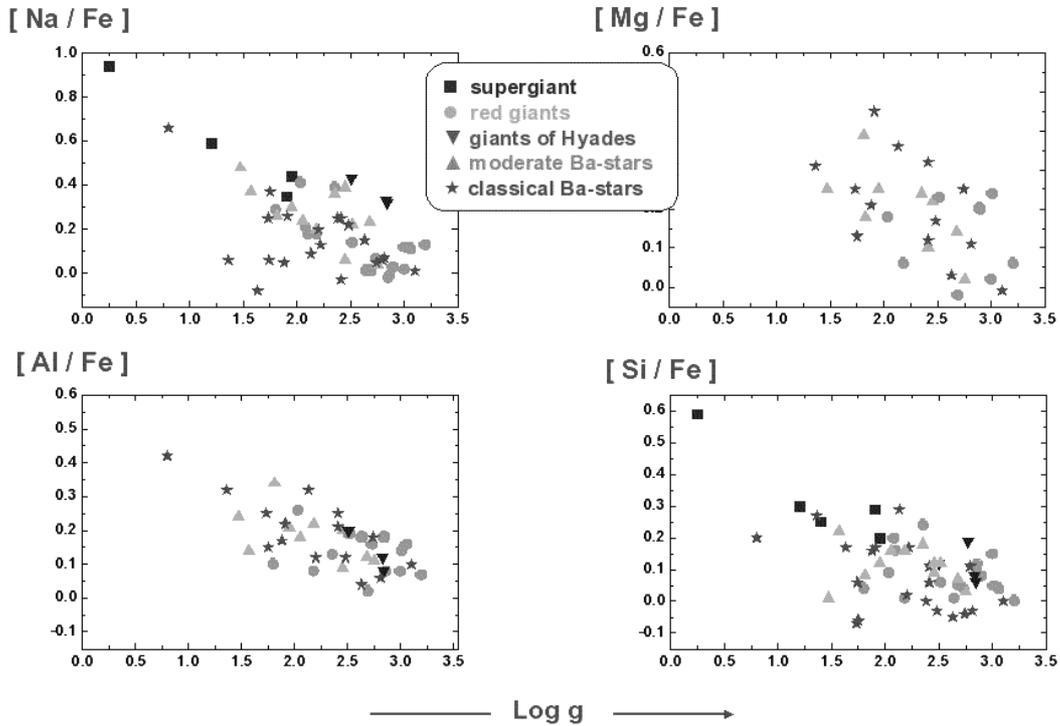


Рис. 2. Зависимость содержаний $[Na, Mg, Al, Si/Fe]$ от ускорения силы тяжести

Надо отметить, что избытки содержаний Na в спектрах некоторых звезд, сошедших с главной последовательности, а именно сверхгигантов класса F, были впервые обнаружены еще в восьмидесятые годы сотрудниками Крымской обсерватории (Боярчук, Боярчук, 1981; Боярчук, Любимков, 1981; Любимков, Боярчук, 1982; Боярчук, Любимков, 1983; Боярчук, Любимков и др., 1985). Ими обнаружена корреляция между величинами этих избытков и соответствующими величинами светимости звезд (или с уменьшением ускорения силы тяжести $\lg g$) (Боярчук, Любимков, 1983), а также, было установлено, что обнаруженные избытки содержаний Na не могут быть следствием не-ЛТР эффекта (Боярчук и др., 1985; Боярчук и др., 1988). Был сделан вывод о протекании NeNa-цикла горения водорода в недрах рассматриваемых сверхгигантов и выносом продуктов ядерных реакций в атмосферу конвекцией.

Проведенное в нашей группе исследование красных гигантов показало наличие избытков содержаний Na также и в этих объектах (Боярчук и др., 2000; Боярчук и др., 2001; Антипова, Боярчук, 2001; Боярчук и др., 2002; Антипова и др., 2003; Антипова и др., 2004; Антипова и др., 2005). Было найдено, что красные гиганты хорошо удовлетворяют зависимости величины избытка содержания Na от $\lg g$, построенной для сверхгигантов, и лежат на ее продолжении в область меньших светимостей (см. рис. 2). Отмечено также, что для всех рассмотренных спектральных подгрупп красных гигантов – “нормальных”, умеренных бариевых, классических бариевых – эта зависимость является единой. Это свидетельствует о едином механизме происхождения этих избытков. А именно, красные гиганты, как и сверхгиганты, являются звездами, покинувшими главную последовательность, поэтому и у тех, и у других развита конвекция, выносящая в наружные слои звезды продукты ядерных реакций, которые проходили в недрах звезды на стадии главной последовательности.

Отметим, что для большинства звезд нашей программы зависимость, показанная на рис. 2,

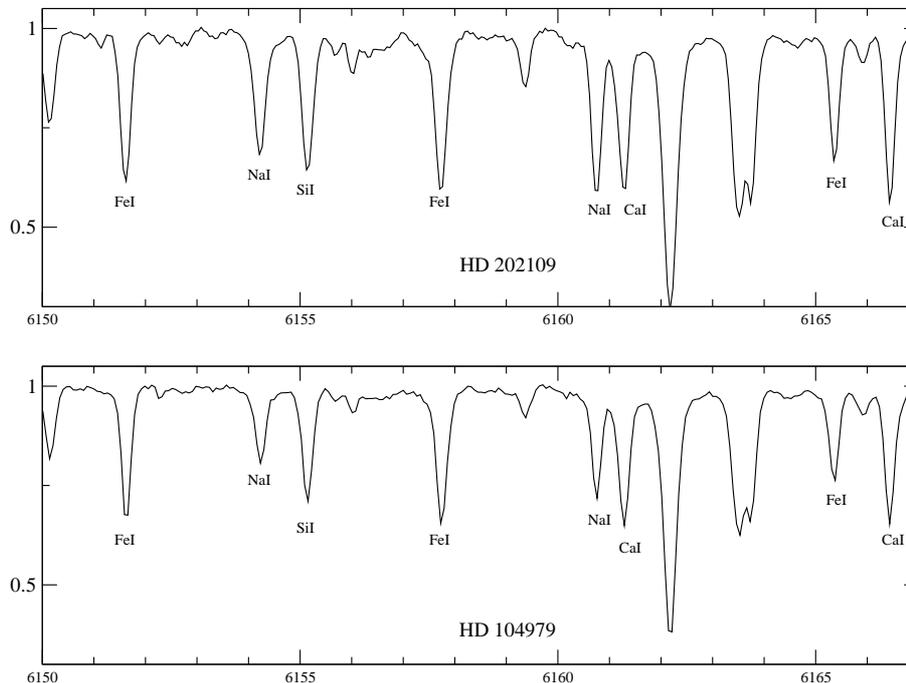


Рис. 3. Сравнение спектрограмм HD202109 и HD104979

является единой; однако имеются и некоторые исключения. У гигантов скопления Гиады избытки содержаний Na несколько больше, чем “должно быть” согласно зависимости на рис. 2. Кроме того, оказалось, что четыре звезды, наоборот, имеют более низкие содержания Na. Большинство исследованных нами звезд являются звездами тонкого диска и не сильно различаются по возрасту. Что же касается скопления Гиады, то надо заметить, что это молодое скопление; оно образовалось из межзвездного вещества, обогащенного веществом оболочек, сброшенных звездами, окончившими свой эволюционный путь в конце асимптотической ветви гигантов; в частности некоторые избытки Na являются характерными для молодых звезд (Боярчук, 2000). Теперь относительно четырех звезд с содержанием Na ниже ожидаемого. Было выполнено сравнение спектров двух звезд практически с одинаковыми атмосферными параметрами, из которых одна показывает содержание Na соответствующее зависимости на рис. 2, а другая лежит ниже этой зависимости. Из рисунка 3 следует, что у второй звезды линии Na слабее по сравнению с первой, в то время как интенсивности линий других элементов одинаковые. Таким образом, низкое содержание Na у нее следует признать реальным. Оказалось, что это более старые звезды, чем остальные (Антипова, 2005). Таким образом, из рис. 2 можно видеть, что зависимость избытков содержаний Na от ускорения силы тяжести для звезд разных поколений может несколько различаться.

При исследовании красных гигантов были обнаружены также избытки содержаний Mg, Al, Si; анализ полученных данных показал, что, как и в случае Na, величина этих избытков увеличивается со светимостью звезды (или уменьшается с ускорением силы тяжести $\lg g$, см. соответствующие графики на рис. 2). Был сделан вывод, что в недрах звезд на главной последовательности протекает не только NeNa-, но и MgAl-цикл горения водорода, продукты которого также выносятся в наружные слои звезды конвекцией, развивающейся при уходе звезды с главной последовательности. Согласно (Арнуд, 1999) производительность этих двух циклов зависит от многих параметров. Они связаны реакцией утечки Na в Mg; существует также утечка Mg в Si из MgAl-цикла, что приводит к выводу атомов из цикла; скорости реакций утечек очень сильно зависят от температур (Арнуд,

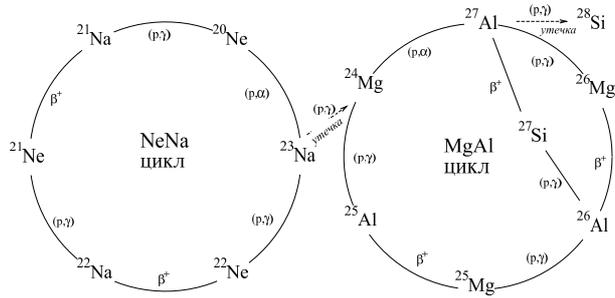


Рис. 4. Схема реакций NeNa- и MgAl-циклов горения водорода

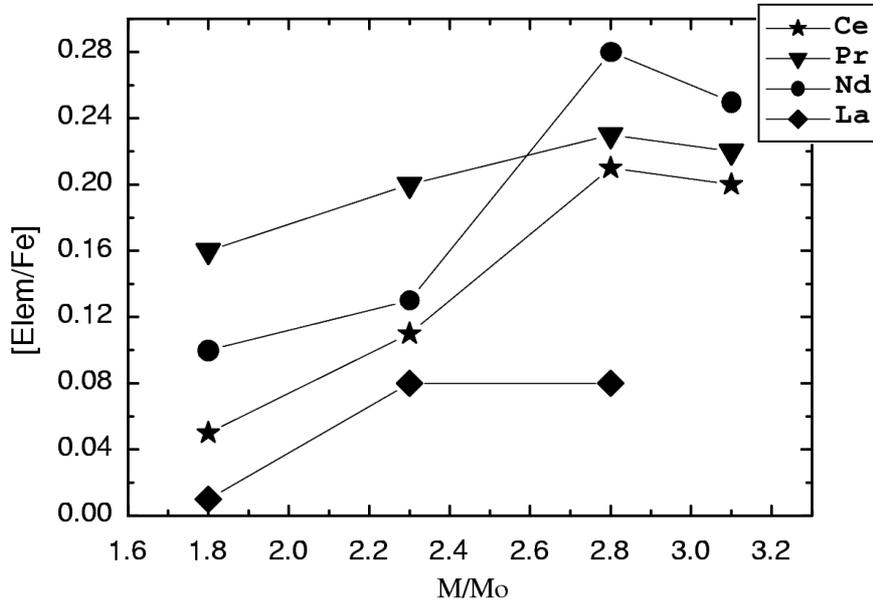


Рис. 5. Содержания элементов s-процесса в атмосферах нескольких нормальных красных гигантов с близкими атмосферными параметрами как функция массы звезды

1999), вследствие этих причин зависимости для Mg, Al, Si выглядят более “размытыми”, чем для Na. И тем не менее, единый характер зависимостей величин аномалий содержаний рассматриваемых элементов можно рассматривать как свидетельство развития конвекции с увеличением светимости звезды.

Как отмечено выше (см. также рис. 1), еще одной особенностью красных гигантов является наличие в их спектрах небольших избытков s-элементов. Это касается не только подгрупп умеренных и классических бариевых звезд, избытки s-элементов в спектрах которых довольно большие, что и позволило выделить их в отдельные подклассы; небольшие (до 0.3 dex) избытки s-элементов обнаружены и у нормальных (без спектральных особенностей) красных гигантов (Боярчук, 2001; Антипова, 2001). Было показано, что имеется тенденция увеличения избытков s-элементов с увеличением массы и уменьшением металличности этих звезд (Антипова, 2001),

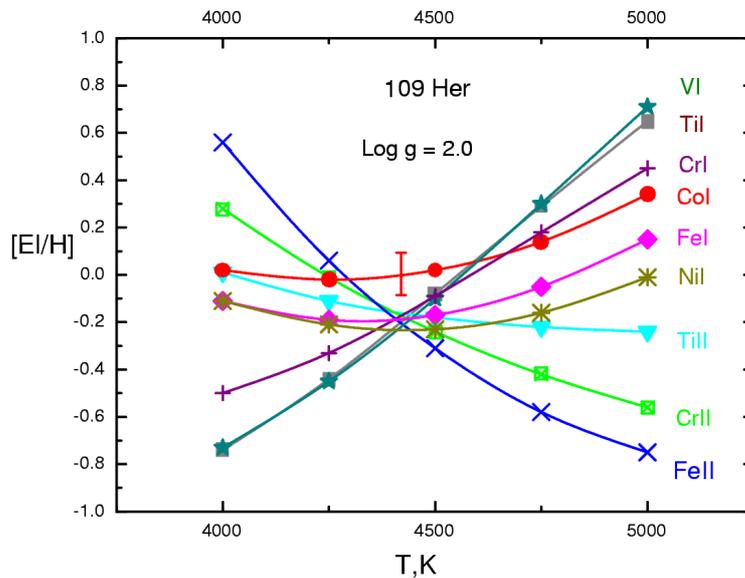


Рис. 6. Расчеты содержаний элементов группы железа в атмосфере звезды 109 Гер относительно их содержаний на Солнце, выполненные для $\lg g=2.00$ и нескольких значений температур

см. также рис. 5. Высказано предположение, что наблюдаемые s-элементы были образованы в недрах звезд на стадии главной последовательности в результате фотонейтронных реакций и вынесены на поверхность звезды конвекцией при переходе ее в стадию красного гиганта. В пользу эволюционного характера этой зависимости (рис. 5) свидетельствует и тот факт, что гиганты молодого скопления Гиады не имеют избытков s-элементов (малый возраст и большая металличность), а у гигантов поля эти избытки заметны. У умеренных бариевых звезд также наблюдается тенденция увеличения избытков s-элементов с массой звезды (Боярчук, 2002); сравнение полученных данных с аналогичными данными для нормальных гигантов, привело к выводу, что звезды этих двух подгрупп являются одиночными красными гигантами, и содержания химических элементов в их атмосферах могут быть объяснены в рамках эволюционных эффектов: стадией эволюции, величиной массы, светимостью и металличностью каждого конкретного объекта. Надо отметить, что подобная тенденция увеличения содержаний s-элементов с массой и фазой эволюции отсутствует у классических бариевых звезд. Это объяснимо в рамках двойственной природы этих звезд, согласно которой избытки s-элементов производятся в уже проэволюционировавшем спутнике, массу которого в настоящее время оценить невозможно, как и долю его вещества, осевшего на звезде, наблюдаемой ныне как бариевая.

В заключение, некоторые вопросы, касающиеся содержаний элементов железного пика. Оценки параметров атмосфер исследуемых объектов выполнялись с помощью методики, подробно изложенной Боярчуком и др., (1996). Основой ее является следующий критерий: согласно теории звездной эволюции, относительные содержания элементов группы железа не меняются во время жизни звезды на стадиях главной последовательности и гигантов, откуда следует, что содержание каждого элемента по отношению к его содержанию на Солнце должны быть одинаковыми и отражать металличность звезды. Поскольку исследуемые звезды расположены достаточно близко к Солнцу и принадлежат диску Галактики, относительные содержания элементов группы железа в каждой отдельно взятой звезде должны быть весьма близки (разброс значений в пределах 0.1 dex). Однако, с расширением базы исследованных звезд стали попадаться и исключения. На рис. 6 показаны расчеты содержаний элементов группы железа для красного гиганта 109 Гер,

выполненные для значения $\lg g=2.00$ и для ряда значений температуры. Из рисунка видно, что кривые, показывающие изменения содержаний разных элементов, хорошо сходятся в области $T=4450$ К (разброс не превышает 0.1 dex). Исключение составляет Co. Соответствующая ему кривая лежит существенно выше, причем отклонение ее от “нужного” положения превышает дисперсию значений содержания, полученным по разным линиям. Это свидетельствует о повышенном содержании Co в данной звезде. Отметим, что оно определялось по тем же линиям, что и в случае других звезд, показывающих нормальное содержание Co.

Таблица 1. Сравнительные характеристики звезд с повышенным и нормальным содержанием [Co/Fe]

HD	T К	$\lg g$	[Fe/H]	[Co/Fe]	M/M_{\odot}	Z пк	U км/с	V км/с	W км/с	Age лет
а) Звезды с избытком [Co/Fe]										
14585	4507	2.22	-0.19	+0.14	1.0	-128.0	-48	-3	-6	1.77e+10
16458	4560	1.73	-0.27	+0.14	1.9	50.0	-42	20	-26	1.30e+09
88562	4274	1.74	-0.16	+0.18	1.0	170.0	25	-16	-10	1.34e+10
94264	4750	2.90	-0.07	+0.23	1.7	26.0	26	-21	29	1.98e+09
139409	4731	2.13	-0.51	+0.20	1.9	89.0	47	-35	42	1.25e+09
169414	4458	2.08	-0.15	+0.15	1.7	10.0	4	-34	-57	2.46e+09
175190	4188	1.36	-0.13	+0.17	1.2	-15.0	-104	-4	-15	6.48e+09
б) Звезды с нормальным содержанием [Co/Fe]										
46407	4916	2.48	-0.14	+0.06	2.9	-19.0	14	28	2	4.12e+08
76294	4950	2.75	0.01	-0.03	3.0	23.0	-19	5	3	3.34e+08
77247	4978	2.20	0.09	-0.01	3.8	228.0	23	-5	0	2.03e+08
101013	5080	3.10	0.00	+0.06	3.1	125.0	-10	-14	1	3.36e+08
104979	4929	2.41	-0.30	+0.03	2.1	48.0	-44	12	-27	9.12e+08
113226	5187	3.20	0.24	+0.03	2.7	29.0	-27	-2	-4	6.90e+07
133208	5075	2.68	0.04	+0.01	3.5	58.0	6	-7	-1	1.38e+08
196673	4905	2.38	0.27	-0.02	3.9	-29.0	6	-12	0	1.80e+08

Сам по себе факт существования избытка Co у звезды, находящейся в окрестностях Солнца, является интересным. Co является одним из элементов группы железа, которые, как хорошо известно, образуются одновременно и только во время вспышек сверхновых звезд, преимущественно SNe Ia. Звезды новых поколений отражают химический состав межзвездного газа, из которого они образовались и которые содержат следы вспышек ряда сверхновых в этом районе галактики. Во время своей эволюции эти звезды сохраняют отношения содержаний элементов группы железа, присущие веществу, из которого они образовались. Именно поэтому избыток содержания Co (по сравнению с его содержанием на Солнце) у звезды в галактическом диске вблизи Солнца не представляется нормальным и требует исследования. Анализ базы данных исследованных нами звезд выявил шесть звезд с повышенным содержанием Co. В табл. 2а дан список этих звезд, а также приведены некоторые дополнительные сведения о них, взятых из табл. 6 в (Антипова, 2005). Для сравнения из этой же базы были выбраны звезды, которые имеют нормальные содержания Co; список этих звезд дан в табл. 2б. Сравнивая эти два списка, можно видеть, что звезды с избытком Co по сравнению со звездами, имеющими нормальное его содержание, являются более старыми, их пространственные скорости более высокими, а металличность более низкая; кроме того, они менее массивны и более холодные. Все это свидетельствует о том, что это звезды более старого поколения, чем звезды, имеющие “нормальное” содержание Co. На рис. 7 показаны усредненные для каждой из рассматриваемых групп значения содержаний различных химических элементов. Из рис. 7 видно, что звезды, богатые Co, имеют также повышенные содержания углерода, а также пониженные содержания Mn и может быть Sr, что характерно для звезд гало и толстого диска (МакУильям и др., 1996). По кинематическим характеристикам они близки к объектам толстого

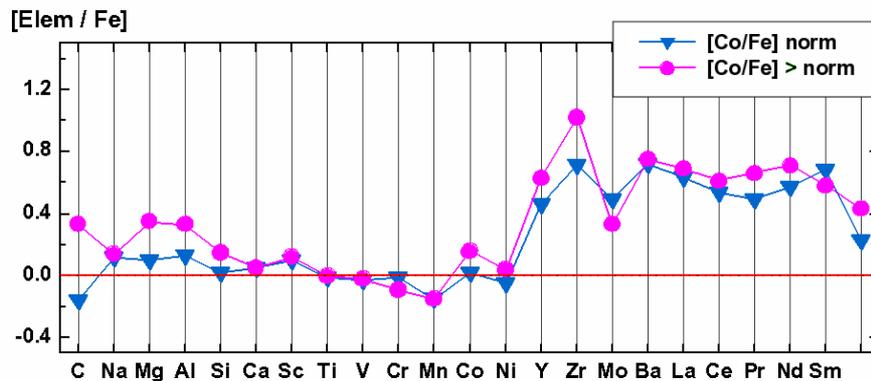


Рис. 7. Содержания химических элементов в атмосферах звезд, усредненные для каждой из групп звезд - с нормальным и увеличенным содержанием Co

диска. Таким образом, по всей вероятности эти звезды являются “примесью” звезд толстого диска к основной массе изученных звезд, принадлежащих тонкому диску Галактики.

Интересно отметить, что расчеты химических содержаний первых звезд Галактики (так называемого звезд III типа населения) показывают, что эти звезды должны иметь увеличенные содержания C, Co, Zn и уменьшенные содержания Mn, Cr (Номото и др., 2004), что и наблюдается для звезд с очень низкой металличностью. Более поздние вспышки сверхновых всех типов компенсировали частично недостатки и избытки этих элементов, однако, не полностью. Повидимому, обнаруженные у звезд гало (МакУильям и др., 1995) и толстого диска качественно похожие аномалии содержаний химических элементов подтверждают это.

3 Выводы

1. Сравнительный анализ содержаний элементов Na, Mg, Al и Si в атмосферах исследованных звезд, принадлежащих трем различным спектральным подгруппам – нормальным красным гигантам, умеренным и классическим бариевым звездам, а также нескольким сверхгигантам показал, что: – все эти элементы имеют избытки содержаний, величины которых растут с ростом светимости звезды ($\lg g$); – зависимость величин избытков содержаний какого-либо из рассмотренных элементов от светимости ($\lg g$) (см.рис. 2, (Боярчук и др., 2002; Антипова и др., 2003; Антипова и др., 2004)) является единой для всех рассмотренных групп звезд, что свидетельствует о едином механизме их образования, а именно, они являются продуктами горения водорода в NeNa- и MgAl- циклах (и соответствующими реакциями утечек из циклов), которые выносятся из недр звезды конвекцией, развивающейся постепенно при эволюции звезды от главной последовательности в сторону красных гигантов.
2. Выявлено “расщепление” зависимости величины избытков содержаний элементов $[Na/Fe]$ от $\lg g$ для звезд разных возрастных характеристик: группа звезд, возрастные и кинематические характеристики которых свидетельствуют о принадлежности их к более старому поколению, по сравнению с большинством исследованных звезд, обнаруживает более низкое содержание $[Na/Fe]$, в то время как красные гиганты скопления Гиалды, более молодого по сравнению с Солнцем, показывают более высокое содержание $[Na/Fe]$.
3. Для умеренных бариевых звезд наблюдается тенденция увеличения избытков s-элементов с массой звезды; для классических бариевых звезд такая тенденция отсутствует, что объяснимо в рамках двойственной природы этих звезд, согласно которой избытки s-элементов производятся

в уже проэволюционировавшем спутнике, массу которого оценить невозможно, как и долю его вещества, осевшего на звезде, наблюдаемой ныне как бариевая.

4. У шести звезд обнаружены небольшие избытки кобальта, превышающие ошибки измерений; показано, что они являются более холодными по сравнению с остальными, их массы меньше, а возраст больше, кроме того они имеют избытки С и недостатки Cr, Mn и Na; по кинематическим характеристикам принадлежат толстому диску. Химический состав вещества, из которого они образовались, еще хранят в себе следы населения III типа, будучи не полностью компенсированными более поздними выбросами сверхновых I и II-типов.

Наблюдения ряда звезд получены с ПЗС-матрицей SDS-900 фирмы Photometrics GmbH, установленной на 2.6-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории, благодаря грантам R2Q000 и U1C000 (International Science Foundation, грант A-05-067 ESO C&EE Programm).

Работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-02-17336), Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-162.2003.02), Программы Президиума РАН "Нестационарные явления в астрономии", ФЦНТП "Астрономия" (раздел 1102) и гранта РФФИ-ГФЕН (код 05-02-39005-ГФЕН_а).

Литература

- Антипова Л.И., Боярчук А.А. // Астрон. журн. 2001. Т. 78. С. 807.
- Антипова Л.И., Боярчук А.А., Пахомов Ю.В., Панчук В.Е. // Астрон. журн. 2003. Т. 80. С. 704.
- Антипова Л.И., Боярчук А.А., Пахомов Ю.В., Панчук В.Е. // Астрон. журн. 2004. Т. 81. С. 658.
- Антипова Л.И., Боярчук А.А., Пахомов Ю.В., Юшкин М.В. // Астрон. журн. 2005. Т. 82. С. 601.
- Арнулд и др. (Arnould M., Goriely S., Jorissen A.) // Astron. Astrophys. 1999. V. 347. P. 572.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Боярчук М.Е., Саванов И.С. // Астрон. журн. 1996. Т. 73. С. 862.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Боярчук М.Е., Саванов И.С. // Астрон. журн. 2000. Т. 77. С. 96.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Боярчук М.Е., Саванов И.С. // Астрон. журн. 2001. Т. 78. С. 349.
- Боярчук А.А., Боярчук М.Е. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1981. Т. 63. С. 66.
- Боярчук А.А., Губены И., Кубат И., Любимков Л.С., Сахибуллин Н.А. // Астрофизика. 1988. Т. 28. С. 343.
- Боярчук А.А., Любимков Л.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1981. Т. 64. С. 3.
- Боярчук А.А., Любимков Л.С. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 66. С. 130.
- Боярчук А.А., Любимков Л.С., Сахибуллин Н.А. // Астрофизика. 1985. Т. 22. С. 339.
- Боярчук А.А., Пахомов Ю.В., Антипова Л.И., Боярчук М.Е. // Астрон. журн. 2002. Т. 79. С. 909.
- Любимков Л.С., Боярчук А.А. // Астрофизика. 1982. Т. 18. С. 596.
- МакВильям и др. (McWilliam A., Preston G.W., Sneden Chr., Searle L.) // Astron.J. 1995. V. 109. P. 2757.
- Номото и др. (Nomoto K., Maeda K., Umeda H., Tominaga N., Ohkubo T., Deng J., Mazzali P.A.) // Mem.S.A.It. 2004. V. 75. P. 312.