

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВОЙ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ХИМИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД ИЗБРАННЫХ ТИПОВ

Л. А. Зач, В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук

Рассмотрены различия на кривой распространенности звезд - членов рассеянных скоплений и динамических групп (А- и F-звезды главной последовательности, К-гиганты) и звезд с усиленными линиями тяжелых элементов (Am-звезды, звезды типа δ Sct, бариевые звезды). Для перечисленных групп звезд сделаны оценки дисперсии содержания химических элементов в атмосферах звезд каждой группы. Выделена компонента "дисперсии химсостава", имеющая методическое происхождение. Рассмотрены различия химического состава бариевых и Am-звезд. Низкие светимости бариевых звезд и особенности кривой распространенности химических элементов в их атмосферах в совокупности с результатами измерения вариаций лучевых скоростей служат основой гипотезы о происхождении феномена бариевой звезды на стадии эволюции маломассивной двойной системы солнечного химсостава после переноса на субгигант вещества, облученного медленными нейтронами на AGB-стадии эволюции главного компонента. Гипотеза об эволюционной связи бариевых и металлических звезд не отвергается.

The paper reports on differences of the abundance curve of stars, members of open clusters and dynamical groups (A and F stars of the main sequence, K-giants) and stars with the enhanced lines of heavy elements (Am-stars, the stars of δ Sct type, barium stars). Dispersions of chemical elements abundance in the atmospheres of stars of each group are estimated. A component "chemical abundance dispersion" which has methodical origin is distinguished. Differences of chemical abundance of Ba and Am stars are considered. Low brightness of Ba stars and peculiarities of chemical elements abundance curve in their atmospheres together with the measurement results of radial velocity variations cause the hypothesis on the phenomenon origin of a Ba star at the evolution stage of lowmass binary system of solar chemical abundance after the transfer of the matter illuminated by slow neutrons at the AGB stage of the main component evolution onto the supergiant. A hypothesis on the evolutionary relation of barion and metallic stars is not rejected.

В задаче определения химического состава звездных атмосфер весьма трудно определить степень влияния на результат следующих факторов:

- а) точность результата измерения спектра;
- б) точность определения физических параметров атмосферы;

в) различия между используемыми сетками моделей атмосфер и их адекватность реальным атмосферам;

г) эффекты сепарации химических элементов по высоте атмосферы и по ее поверхности;

д) реальные различия химического состава от звезды к звезде.

Для преодоления ряда из перечисленных трудностей в САО реализован подход к проблеме, позволяющий выделить некоторые из указанных эффектов путем массовых спектроскопических наблюдений однородных выборок звезд с последующим анализом каждого спектра методом моделей атмосфер. Исследованная совокупность звезд разной температуры и светимости (Клочкова, Панчук, 1985; Клочкова, Панчук, 1988а; Мишенина, 1985; Клочкова, Панчук, 1989) позволяет перейти к сравнительному анализу кривой распространенности химических элементов у звезд, имеющих нормальный, солнечный химический состав, и звезд, имеющих особенности в спектрах. Данная работа развивает отмеченные выше особенности подхода за счет привлечения результатов исследования звезд с усиленными линиями тяжелых элементов: "металлических" Ам-звезд (Любимков, Саванов, 1983а; Любимков, Саванов, 1983б; Любимков, Саванов, 1983в; Любимков, Саванов, 1984; Саванов, 1985а; Саванов, Халилов, 1985; Саванов, 1985б), пульсирующих F-звезд типа δ Sct (Рачковская, 1988), бариевых звезд (Зач, 1989 а, б, в; Зач, 1990). Эти объекты объединены феноменологически - в их спектрах усилены линии редкоземельных элементов, что при стандартной процедуре анализа химического состава приводит к "перекоосу" кривой распространенности. Основные гипотезы, объясняющие усиление этих линий, различаются: для атмосфер Ам-звезд наиболее приемлемым механизмом считается диффузия ионов различного сорта, тогда как у бариевых звезд мы наблюдаем, по-видимому, последствия синтеза дополнительного количества тяжелых элементов в реакциях на медленных нейтронах (*s*-процесс). Существуют указания о кинематической общности групп Ам- и Ва-звезд, принадлежащих галактическому диску (Хэскила, 1988, 1989), что в сочетании с подобием средних кривых распространенности элементов и практическим совпадением средних масс у звезд обоих типов остается беспокоящим фактором. Различная частота встречаемости Ам-звезд среди А-звезд и бариевых звезд среди К-гигантов также не является аргументом против гипотезы об эволюционной связи Ам- и Ва-звезд, так как сегодня представляется затруднительным оценить время пребывания звезд в обоих эволюционных состояниях.

Содержание редкоземельных элементов определяется преимущественно по переходам с невысокими потенциалами возбуждения, поэтому возможно влияние методических эффектов, связанных с неадекватностью моделей атмосфер (Густафссон, 1983; Гопка и др., 1989). Мы полагаем, что наряду с рафинированием метода моделей атмосфер конструктивным для выявления методических ошибок определения химсостава может оказаться расширение интервала эффективных температур, в котором выполняется сравнение нормальных и пекулярных звезд. Поэтому в данном исследовании привлечены результаты определения химсостава в атмосферах нормальных (Клочкова, Панчук, 1988) и пекулярных (Рачковская, 1988) F-звезд, тем самым интервал T_{eff} между А- и К-звездами заполнен. Важным обстоятельством считается то, что все используемые нами исследования химического состава выполнены по спектрам, фотометрическая точность и спектральное разрешение которых достаточны для задачи исследования химического состава (см., например, сравнение систем эквивалентных ширин в работах Клочковой и др. (1990), Зача (1989б)). Все используемые исследования химсостава А- и F-звезд выполнены на сетке моделей

(Куруч, 1979), а исследования по K- и Ba-звездам на сетке (Белл и др., 1976). При определении химического состава использованы однородные шкалы сил осцилляторов.

ДИСПЕРСИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДЛЯ ГРУПП ЗВЕЗД

Дисперсия химического состава данной выборки звезд зависит от способа отбора объектов для детальной спектроскопии. Если пекулярные объекты отобраны на средствах, позволяющих работать только методом спектральной классификации, то неизбежной является потеря доли звезд со слабо выраженными пекулярными характеристиками, неразличимыми на спектрах с низкой обратной линейной дисперсией. Этот способ выбора пока является единственным, так как тотальные наблюдения с высоким разрешением всех звезд - членов данной группировки - на практике невозможны. Следовательно, сегодня мы не имеем возможности детально

изучить статистические характеристики перехода от нормальных к пекулярным звездам. Поэтому будем сравнивать дисперсии содержаний химических элементов, оцениваемые отдельно для каждой из перечисленных групп. На рис. 1 даны примеры такого сравнения. Общим свойством практически всех фрагментов рис. 1 является увеличение среднеквадратичного отклонения содержания элемента $\sigma \lg \epsilon(x)$ при переходе к группам звезд с более высокой средней эффективной температурой. Таким образом, на большем количестве групп звезд и с привлечением

большого количества химических элементов подтвержден один из выводов работы Ключковой и др. (1989). На рис. 2 приводим зависимости среднеквадратичных отклонений содержаний различных элементов от произведения $\theta \chi_i$ для данного элемента, где $\theta = 5040/T$ - средняя обратная эффективная температура для каждой группы звезд, а χ_i - потенциал ионизации атома i -того элемента. Видно, что σ слабо антикоррелирует с основным членом уравнения Саха, т. е. с параметром, характеризующим ионизационную способность данного химического элемента.

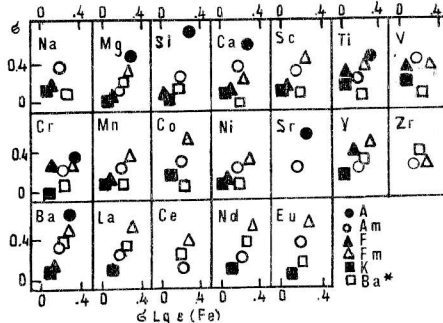


Рис. 1. Связь среднеквадратичного отклонения величины $\lg \epsilon(x)$ со среднеквадратичным отклонением $\sigma \lg \epsilon(\text{Fe})$, определенная для разных групп звезд.

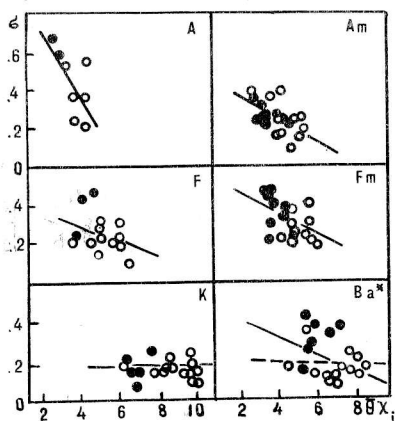
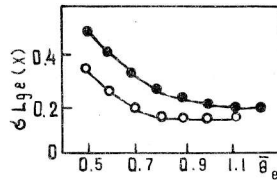


Рис. 2. Сравнение среднеквадратичных отклонений величин $\lg \epsilon(x)$, вычисленных для звезд каждой группы, с величиной $\theta \chi_i$ (см. текст). Темными кружками обозначены редкоземельные элементы. Нанесены регрессионные соотношения, пунктир - регрессия без учета элементов S-процесса, но с учетом европия.

Вычисляя коэффициенты линейной регрессии между σ и $\theta\chi_1$ для каждой из групп, мы построили нелинейное регрессионное соотношение между σ , θ и χ_1 . На рис. 3 для двух крайних значений потенциала ионизации приводим результаты вычислений по этому регрессионному соотношению. Таким образом получили первое указание на методическое происхождение величин σ , определенных для элементов, отличных от железа.

Рис. 3. Средняя зависимость "дисперсии химсостава", рассчитанная по результатам анализа рис. 2, в функции средней эффективной температуры группы звезд. ● - условный редкоземельный элемент с $\chi_1 = 5.2$ eV, ○ - условный элемент железного пика с $\chi_1 = 8.1$ eV.



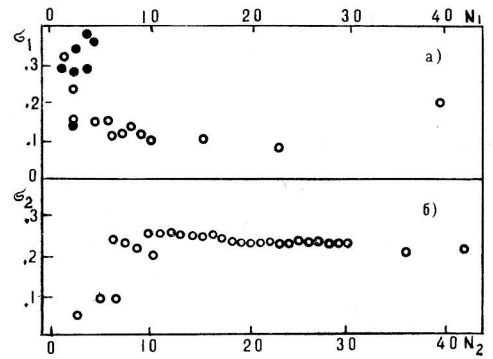
Для группы бариевых звезд мы построили две линейные регрессии; на общую зависимость регрессионных коэффициентов от температуры лучше ложатся те значения регрессионных коэффициентов (им соответствует пунктир на рис. 2), которые определены без учета величин $\sigma \lg \epsilon (x)$ у элементов, синтезируемых преимущественно в s -процессе (Y, Sr, Ba, La, Ce, Nd). Отметим, что для бариевых звезд ожидается повышенный разброс определений $\lg \epsilon (x)$ именно для этих элементов.

В работе Ключковой и др. (1989) рассмотрен вопрос о дисперсии химического состава для звезд - членов скоплений. Исходя из гипотезы о химической однородности вещества скопления, был сделан вывод о методическом происхождении повышенной дисперсии металличности у A-звезд - членов скоплений. Поэтому предположим, что величина $\sigma = 0.16$, на которую асимптотически выходят кривые (см. рис. 3) при понижении средней температуры рассматриваемой группы звезд, уже свободна от вклада в σ , определяемого неадекватностью моделирования атмосфер. Здесь можно возразить, указывая на то, что при вычислении химического состава данной звезды содержание различных элементов мы определяем по различному числу линий, и среднеквадратичное отклонение содержания каждого элемента отражает число линий, по которым определялись величины $\lg \epsilon (x)$ для каждой звезды. Так как содержание редкоземельных элементов определяется по небольшому числу линий, то и $\sigma \lg \epsilon (x)$ для этих элементов должно быть выше. С целью проверки данного возражения для каждой группы звезд мы анализировали также связь среднеквадратичных отклонений $\sigma \lg \epsilon (x)$ с количеством линий, по которым определено содержание данного элемента (пример см. на рис. 4а). Другим способом анализа зависимости "дисперсии химсостава" от числа линий является построение зависимости $\sigma \lg \epsilon (Fe)$ от числа линий нейтрального железа, по которым для данной звезды определяется $\lg \epsilon (Fe)$, причем процедура уменьшения числа используемых линий является случайной (рис. 4б). Интересно отметить, что среднеквадратичное отклонение σ , начиная с $N_2 = 15$, практически не зависит от увеличения числа линий Fe, по которым вычисляется средняя металличность данной звезды. Из рис. 4а следует, что реальная дисперсия химсостава (элементы s -процесса) группы бариевых звезд обнаруживается даже в тех случаях, когда содержание данного элемента в спектре каждой звезды определяется по одной-двум линиям. Подчеркнем, что среднеквадратичное отклонение металличности группы бариевых звезд, определяемой по средним $\lg \epsilon (Fe)$, вычисленным для каждой звезды по 40 линиям Fe (рис. 4а), практически совпадает с величиной $\sigma \lg \epsilon (Fe)$, характеризующей разброс индивидуальных

определений металличности по 42 линиям Fe в спектре одной звезды (рис. 4б). В целом приходим к выводу, что различие дисперсий химсостава для легкоионизуемых элементов и элементов железного пика не является следствием различий в числе используемых линий.

Рис. 4. а) Зависимость "дисперсии химсостава" от числа линий, по которым определяется содержание данного элемента, полученная для исследованной группы бариевых звезд. Темные кружки - элементы S-процесса и европий ($\sigma \lg \varepsilon (\text{Eu}) = 0.12$).

б) Зависимость среднеквадратичного уклонения величины $\lg \varepsilon (\text{Fe})$, определяемой по спектру F-сверхгиганта (долгопериодическая цефеида SV Vul), от числа определения металличности по отдельным линиям нейтрального железа.



Таким образом, мы показали, что дисперсия содержания химических элементов у звезд данной группы увеличивается при переходе к легкоионизуемым элементам, причем достоверность этого феномена растет с переходом к относительно более горячим группам звезд. По-видимому, определенная доля дисперсии содержания редкоземельных элементов определяется методическими эффектами, т.е. реальная, космическая дисперсия элементов у звезд каждой группы должна быть ниже. Каково происхождение этого методического вклада?

Из сравнения левой и правой частей рис. 2 следует, что при переходе от A к Am и от F к Fm величины $\sigma \lg \varepsilon (x)$ не увеличиваются. Увеличения среднеквадратичных уклонений химсостава для групп Am и Fm можно было бы ожидать как следствия применения химически однородных моделей атмосфер к атмосферам звезд, где в качестве основного механизма, обеспечивающего спектральные аномалии, признается сепарация атомов и их ионов. При естественном предположении о неодинаковой степени сепарации в атмосферах разных звезд данного типа можно ожидать повышенную "дисперсию химсостава" для типа в целом. Так как ожидаемое увеличение $\sigma \lg \varepsilon (x)$ при переходе к металлическим звездам не выявлено, приходим к выводу, что как внутри групп A-звезд, так и внутри F-звезд величина $\sigma \lg \varepsilon (x)$ не определяется механизмами, объединенными феноменологическим термином "металличность" и обеспечивающими различия в спектрах A и Am, F и Fm-звезд соответственно. Но различия в абсолютных содержаниях химических элементов между нормальными A и F и металлическими Am и Fm-звездами, выявляемые на данном уровне теоретического описания звездных спектров, признаются существующими. Поэтому, если изменение в абсолютных содержаниях у звезд этого типа объяснять эффектами диффузии, то необходимо также объяснить, почему атмосферы нормальных и металлических звезд характеризуются в целом одним и тем же уровнем "дисперсии химсостава", хотя естественно предположить, что механизмы диффузии, чувствительные также к турбуленции и вращению, должны обеспечить повышенный разброс химического состава у групп металлических звезд.

Другим обстоятельством в пользу различия "дисперсий химсостава" металлических и нормальных звезд является различие в средних величинах $v \sin i$, что, безусловно, влияет на точность измерения эквивалентных ширин и на точ-

ность определения химсостава у звезд каждой группы. В работе Клочковой, Панчука (1985) для спектроскопических исследований нормальных А-звезд были выбраны объекты с минимальными значениями $vsini$ для данного скопления, то же условие выполнено при исследовании F-карликов в скоплениях (Клочкова, Панчук, 1988а). Безусловно, при исследовании Am и Fm-звезд поля возможность отобрать звезды с малыми $vsini$ всегда выше. Если у исследованной группы А-звезд средняя величина $vsini$ превышает таковую для Am-звезд, то при сравнении F-карликов и Fm-звезд типа δ Sct имеем обратную картину. Отсюда следует предположение о том, что различия в средних $vsini$ не являются определяющими для различий в $\sigma \lg \epsilon (Fe)$.

Третьим доводом в пользу различия среднеквадратичных уклонений $\sigma \lg \epsilon (Fe)$ между группами нормальных и металлических звезд является чувствительность определения химсостава к величине микротурбулентной скорости ξt . Действительно, у звезд Am и Fm величина ξt , определяемая из условия независимости содержания железа от эквивалентной ширины используемых линий, в среднем выше, чем у нормальных звезд этой же температуры. Следовательно, на долю величины $\lg \epsilon (\chi_1)$ остается пониженная роль в обеспечении данных значений эквивалентных ширин W_λ . Так как число линий средней интенсивности в спектрах металлических звезд повышено, то и общая чувствительность вида спектра к ожидаемым изменениям химического состава должна быть ниже.

Для А, Am, F и Fm-звезд мы не нашли корреляций между средними значениями $vsini$ и $\sigma \lg \epsilon (x)$ и между ξt и $\sigma \lg \epsilon (Fe)$. Таким образом, приходим к выводу, что причину одинаковой "дисперсии химсостава" для нормальных и металлических А- и F-звезд следует связывать не с особенностями количественного анализа, на модельном уровне не отражающими феномен металличности, а с общим уровнем описания атмосфер звезд этих спектральных классов. При этом следует признать, что степень неадекватности модельного описания атмосфер нормальных и металлических звезд одинакова и "забывает" влияние феномена металличности на дисперсию химического состава.

Следующим наиболее естественным предположением является предположение о влиянии ошибок определения параметров моделей атмосфер (главным образом, эффективной температуры) на "дисперсию химсостава" звезд данной группы. Мы проверили это предположение, вычисляя коэффициенты корреляции между T_{eff} и $\lg \epsilon (x)$ для групп звезд - членов скоплений, относительно которых естественно предполагать однородность химсостава. Как для этих групп, так и для групп пекулярных Am, Fm и Ba-звезд такие корреляции статистически не значимы (см. также работу Клочковой и др., 1989). Следовательно, ошибки ΔT_{eff} а, значит, и ошибки определения "ионизационных" температур не определяют величину $\sigma \lg \epsilon (x)$. Можно предположить, что величина "дисперсии химсостава" отражает степень отклонения от ионизационного равновесия, причем степень этого отклонения растет в среднем при переходе к группам более горячих звезд.

Сравнение К-гигантов с Ba-звездами показывает, что дисперсии содержания редкоземельных элементов для этих групп различны (исключая европий), тогда как дисперсии содержания остальных элементов практически совпадают (исключая литий). Ранее было показано (Мишенина, Панчук, 1986; Гопка и др., 1989), что для гигантов ошибка определения среднего содержания железа, имеющая методическое происхождение, составляет 0.1 dex. Для 20 К-гигантов это соответствует среднеквадратичным уклонениям химсостава (см. рис. 2), не превышающим 0.19 dex. Нет оснований считать, что для бариевых звезд эти величины выше. Тогда на долю "космической" дисперсии содержания редкоземельных элементов в группе

бариевых звезд остается $0.35 > \sigma > 0.22$ dex. Напомним, что эта первая оценка может быть существенно понижена расширением списка изученных бариевых звезд в сторону звезд с умеренными аномалиями в спектрах.

ВЗАИМНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ранее при изучении взаимных корреляций "элемент-элемент" в качестве опорной координаты мы принимали содержание ядер железа (Клочкова, Панчук, 1987, 1988б, 1989). Исследуя феномен усиления линий редкоземельных элементов, который сильнее всего проявляется в спектре ионизованного бария, заменим переменную $lg \epsilon (Fe)$ на $lg \epsilon (Ba)$. На рис. 5-7 показаны коэффициенты корреляции содержания разных элементов с величиной содержания бария. В правой части каждого рисунка даны коэффициенты корреляции $lg \epsilon (Ba)$ с параметрами атмосфер. Из рис. 5 следует, что степень коррелированности химсостава с содержанием бария одинакова для A- и Am-звезд, причем максимальные значения коэффициента корреляции (0.8-0.9) характерны как для элементов железного пика, так и для части редкоземельных элементов. Из рис. 6 следует, что степень коррелированности химсостава с $lg \epsilon (Ba)$ различна для F- и Fm-звезд - корреляции для F-звезд практически отсутствуют (за исключением $lg \epsilon (Ca)$), тогда как для звезд типа δ Sct максимальные значения коэффициента корреляции характерны как для элементов железного пика, так и для всех редкоземельных элементов, включая европий. Из рис. 7 следует, что как элементы, синтезируемые в α -процессе, так и элементы железного пика практически не коррелированы по величине $lg \epsilon (X)$ с содержанием бария. Средний коэффициент корреляции содержания редкоземельных элементов с $lg \epsilon (Ba)$ выше для бариевых звезд, тогда как для K-гигантов поведение этих элементов от звезды к звезде практически некоррелировано. Отметим, что в отличие от Fm-звезд, содержание европия в атмосферах Ba-звезд не коррелирует с содержанием бария. Если вспомнить, что европий синтезируется в r-процессе, интерпретируем рис. 5, рис. 6 и рис. 7 как свидетельство ядерной природы избытка редкоземельных элементов в атмосферах бариевых звезд и атомно-ионной природы избытка редкоземельных элементов в атмосферах металлических звезд.

Ранее мы выполнили анализ химического состава нормальных A- и F-звезд в скоплении Волосы Вероники (Клочкова, Панчук, 1985; Клочкова, Панчук, 1988а) и пришли к выводу о химической однородности вещества, из которого образовались звезды скопления. Упоминаем именно это скопление с целью подчеркнуть, что в этом же скоплении находится группа Am-звезд. Сравнение спектрограмм с дисперсией 9 А/мм, полученных на БТА для этих звезд, свидетельствует о разной степени проявления феномена "металличности" у разных Am-звезд, принадлежащих скоплению. Сравнение среднего химического состава для нормальных звезд - членов скоплений и звезд поля также свидетельствует о химической однородности исходного вещества (Клочкова, Панчук, 1988а; Клочкова, Мишенина, Панчук, 1989). Отсюда следует наша гипотеза об одинаковом исходном химсоставе для рассматриваемой совокупности Am-звезд поля.

Итак, для бариевых звезд гипотеза о едином исходном химсоставе основана на минимальном значении $\sigma lg \epsilon (X)$ по элементам железного пика, совпадающим с таковым для нормальных K-гигантов, а для металлических звезд - на присутствии Am-звезд в скоплениях с однородным химсоставом.

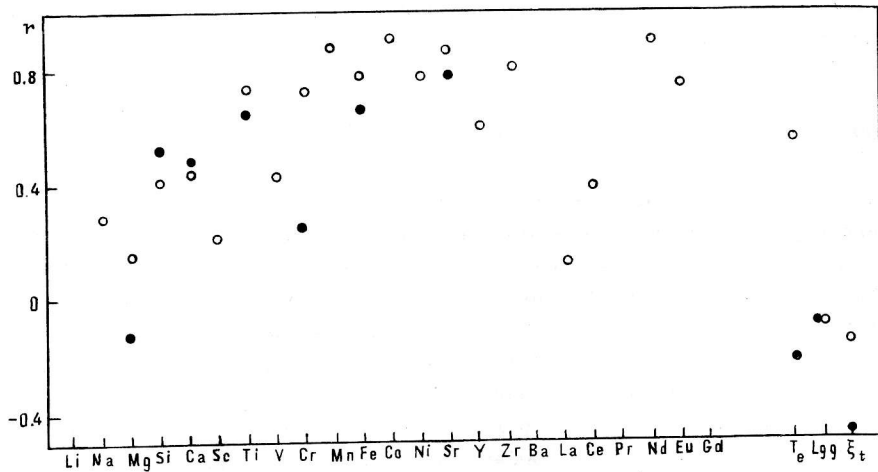


Рис. 5. Коэффициент корреляции величин $\lg \varepsilon (x)$ с величиной $\lg \varepsilon (Ba)$, вычисленный для групп A и Am-звезд. Показана также степень корреляции $\lg \varepsilon (Ba)$ с параметрами атмосфер. Обозначения: ● - A, ○ - Am.

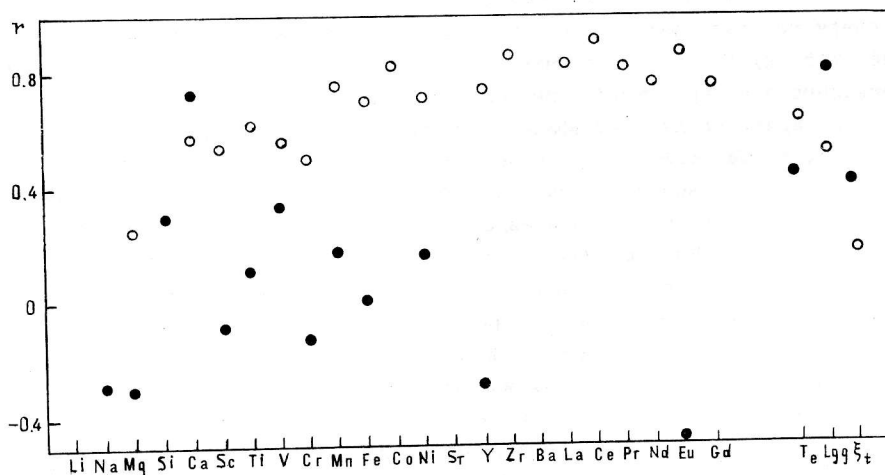


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но для групп F и Fm-звезд: ● - F, ○ - Fm.

К ПРОБЛЕМЕ ФЕНОМЕНА БАРИЕВЫХ ЗВЕЗД

На рис. 8 приведены отклонения от средних кривых распространенности химических элементов, вычисленные для металлических Am-звезд относительно химического состава Солнца (Росс, Аллер, 1976), и для бариевых звезд, относительно химического состава ε Vir, также исследованной нами при помощи описанного в работе Заца (1989б) метода. Химический состав ε Vir изучался ранее неоднократно и принято рассматривать эту звезду в качестве спектрального стандарта, имеющего солнечный химсостав. Отметим основные особенности рис. 8.

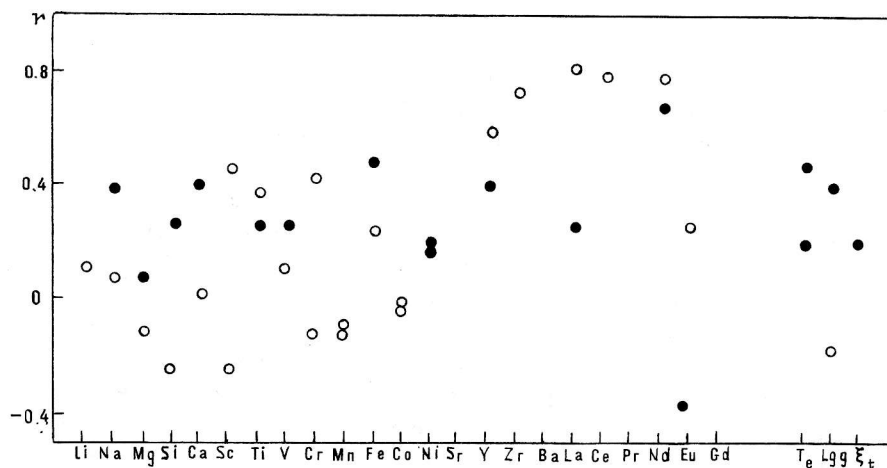


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, но для групп К-гигантов и бариевых звезд. Обозначения: ● - К, ○ - Ва.

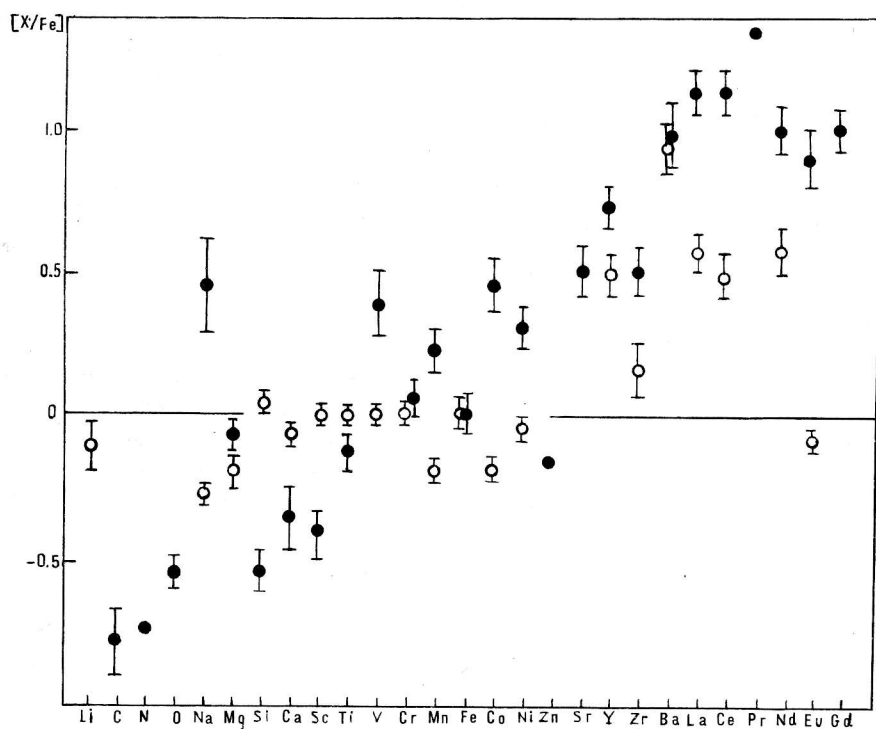


Рис. 8. Средние отклонения химического состава Ам (●) и бариевых (○) звезд относительно солнечного химсостава. Указаны ошибки средних.

Упомянутый выше одинаковый характер перекоса кривых распространенностей для Ам и Ва-звезд при детальном рассмотрении рис. 8 не остается в качестве основной черты рисунка. Действительно, группы звезд значительно различаются по содержанию натрия, кремния, кальция, скандия. Среднее содержание элементов железного пика в атмосферах Ам-звезд превышает солнечное, тогда как для

Ва-звезд равно солнечному. Средние содержания железа совпадают для обеих групп. Для тяжелых элементов наиболее принципиальным является различие в средних содержаниях европия. Различие в средних содержаниях ряда других редкоземельных элементов также статистически значимое.

Сравнение ошибок определения средних также информативно. У бариевых звезд величина ошибок для элементов s -процесса и лития совпадает с ошибками средних, характерных для Am-звезд. Ошибки среднего содержания других элементов у бариевых звезд существенно ниже, что позволяет делать вывод о химической однородности вещества, из которого образовались эти звезды. Тогда приходим к выводу, что кроме увеличенного содержания элементов s -процесса атмосферы бариевых звезд характеризуются пониженным содержанием натрия, магния, марганца и кобальта. Из-за того, что определение химического состава стандартной звезды ϵ Vir характеризуется точностью, типичной для одной звезды, эти различия установлены на пределе значимости; более надежный вывод можно получить, сравнивая химсостав группы бариевых звезд с химсоставом группы K-гигантов. В работе Мишениной (1985) для 9 K-гигантов - членов рассеянных скоплений по результатам наблюдений на ОЗСП БТА, выполненных авторами (К. В. Г. и П. В. Е.) в том же наблюдательном варианте, что и наши наблюдения бариевых звезд, определена средняя величина избытка натрия относительно солнечного химсостава: $[Na/Fe] = +0.33$. Таким образом приходим к выводу, что дефицит натрия в атмосферах бариевых звезд реален.

Низкая светимость бариевых звезд затрудняет интерпретацию особенностей химического состава их атмосфер в рамках гипотезы об эволюции одиночной звезды на стадии асимптотической ветви гигантов. С другой стороны, низкая светимость оставляет больше надежд на то, что при анализе спектров методом моделей атмосфер справедливо приближение об ионизационном равновесии атомов и ионов железа. Это условие использовалось при вычислении $lg g$ в атмосферах K-гигантов (Мишенина, 1985) и бариевых звезд (Зач, 1989б). Калибровку $M_V - lg g$ мы построили, используя W_λ линий Fe I и Fe II для 8 K-гигантов - членов рассеянных скоплений (5 из них исследованы в работе Мишениной (1985) и для трех спектрофотометрии на ОЗСП БТА выполнена впервые). По указанным W_λ методом моделей атмосфер определены $lg g$, что в сочетании с данными фотометрии звезд в скоплениях позволяет калибровать M_V . Для 13 K-гигантов и бариевых звезд удалось оценить M_V по величине хромосферной эмиссии в линии K Ca II (Уилсон, 1976). На рис. 9 показано положение бариевых звезд на эволюционных треках, вычисленных в работе Медера и Менэ (1988) с учетом дополнительного перемешивания и потери массы. Видно, что до уровня светимости AGB-звезд у бариевых звезд недостает нескольких порядков. Единственным способом увязать факт низкой светимости и факт дополнительного синтеза тяжелых элементов является предположение о том, что вещество, наблюдаемое сейчас на поверхности субгиганта, прошло стадию высокой светимости в соседней звезде. Исследование лучевых скоростей бариевых звезд подтверждает гипотезу двойственности, имеется ряд указаний на низкую светимость компонент бариевых звезд (подробнее см. в обзоре Зача, 1989а). Поэтому наиболее подходящим объяснением феномена бариевых звезд является гипотеза обогащения атмосфер субгигантов элементами s -процесса, синтезированными в оболочке главного компонента на стадии AGB и переброшенными на вторичный компонент на стадии эволюции тесной двойной звезды с общей оболочкой (Масевич и Тутуков, 1988).

Дополним эту схему еще одним аргументом. Согласно рис. 7 содержания лития и

бария не коррелируют. Но если избыток бария в атмосфере одиночной звезды является, в частности, и следствием перемешивания, то результатом этого же перемешивания должно быть практически полное исчезновение лития в атмосфере за счет его разрушения в зоне слоевого источника. Если же принять гипотезу эволюции тесной двойной звезды умеренной массы, то наблюдаемый литий может принадлежать веществу субгиганта (известно, что в спектрах субгигантов линия лития наблюдается довольно часто (Боярчук, 1976). Образование дополнительного количества лития на периферии протяженных атмосфер AGB-звезд в реакциях скалывания на галактических космических лучах, по-видимому, несущественно изменит содержание лития из-за относительной кратковременности AGB-стадии.

Итак, подобие средних кривых распространенностей химических элементов для групп металлических и бариевых звезд определяется лишь тем фундаментальным обстоятельством, что строение электронных оболочек атомов и ионов отражает свойства атомных ядер. Действительно, сложная структура электронных оболочек и нарушение порядка их заселения обеспечивают богатство спектра ионов редкоземельных элементов, т.е. их хорошую "парусность" относительно поля излучения, что является одним из определяющих факторов в процессах диффузии. Сложная структура электронных оболочек отражает сложную структуру ядер редкоземельных элементов, совокупность свойств которых определяет условия для последовательного синтеза большинства редкоземельных элементов путем захвата нейтронов. Поэтому подобие кривых распространенности мы не рассматриваем в качестве аргумента в пользу эволюционной связи металлических и бариевых звезд. Такими аргументами остаются высокий процент двойственности у звезд обоих типов и совпадение средних масс Am и Ba-звезд. В целом гипотезу об эволюционной связи этих групп отвергнуть нельзя.

Важным обстоятельством для исследования бариевых звезд считается обнаружение избытка элементов s-процесса в атмосферах красных гигантов - членов шаровых скоплений (Ллойд Эванс, 1983). Во-первых, это может способствовать проверке применимости указанной выше гипотезы для звезд малых и умеренных масс с дефицитом металлов. Во-вторых, открывается возможность оценить частоту встречаемости бариевых звезд среди субгигантов и K-гигантов II-го типа населения и рассмотреть пекулярности у звезд, имеющих светимости, промежуточные между светимостями AGB-звезд и светимостями классических бариевых звезд. В-третьих, проблема может оказаться физически связанной с общей проблемой дисперсии содержания химических элементов в атмосферах звезд - членов шаровых скоплений. Последнее позволяет надеяться на конструктивность нашего подхода к проблеме пекулярности звездных спектров, сочетающего достоинства метода моделей атмосфер и массовых спектроскопических наблюдений звезд в скоплениях.

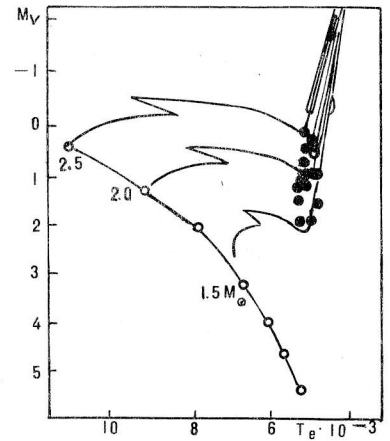


Рис. 9. Положение бариевых звезд на эволюционных треках, соответствующих массам Am и Fm-звезд.

ЛИТЕРАТУРА

- Белл и др. (Bell R. A., Eriksson K., Gustafsson B., Nordlund D.): 1976, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 23, p. 37.
- Боярчук М. Е.: 1976, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 55, с. 127.
- Густафссон (Gustafsson B.): 1983, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 95, p.101.
- Гопка В. Ф., Панчук В. Е., Комаров Н. С.: 1989, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 27, с. 13.
- Зач Л. А.: 1989а, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, 60, с. 57.
- Зач Л. А.: 1989б, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, 60, с. 70.
- Зач Л. А.: 1989в, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, 63, с. 160.
- Зач Л. А.: 1990, *Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв.*, 64, с. 45.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1985, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 20, с. 16.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1987, *Астрон. ж.*, 64, с. 74.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988а, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 26, с. 14.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1988б, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 26, с. 27.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е.: 1989, *Письма в астрон. ж.*, 15, с. 617.
- Клочкова В. Г., Мишенина Т. В., Панчук В. Е.: 1989, *Письма в астрон. ж.*, 15, с. 315.
- Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Федорова О. В.: 1990, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 29, с. 84.
- Курч (Kuruch R. L.): 1979, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 40, p.1.
- Любимков Л. С., Саванов И. С.: 1983а, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 67, с. 3.
- Любимков Л. С., Саванов И. С.: 1983б, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 68, с. 121.
- Любимков Л. С., Саванов И. С.: 1983в, *Астрофизика*, 19, с. 505.
- Любимков Л. С., Саванов И. С.: 1984, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 69, с. 50.
- Ллойд Эванс (Lloyd Evans T.): 1983, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 204, p. 961.
- Масевич А. Г., Тутуков А. В.: 1988, *Эволюция звезд: теория и наблюдения*. М.: Наука, 280 с.
- Мишенина Т. В.: 1985, *Канд. диссертация*, Одесса, 149 с.
- Мишенина Т. В., Панчук В. Е.: 1986, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 21, с. 12.
- Мэдер и Менэ (Maeder A., Meynet G.): 1988, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 76, p. 411.
- Рачковская Т. М.: 1988, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 80, с. 3.
- Росс и Аллер (Ross J. E., Aller L. H.): 1976, *Science*, 191, No. 4233, p. 1223.
- Саванов И. С.: 1985а, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 71, с. 144.
- Саванов И. С., Халилов А. М.: 1985, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 72, с. 106.
- Саванов И. С.: 1985б, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 73, с. 92.
- Уилсон (Wilson O. C.): 1976, *Astrophys. J.*, 205, p. 823.
- Хэкила (Hakkila J.): 1988, *Are the barium and Am stars related? in Scientific program IAU Colloq. No. 106, Bloomington, Indiana, USA.*
- Хэкила (Hakkila J.): 1989, *Astron. J.*, 98, p. 699.

Поступила в редакцию
22 мая 1990 г.