

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА
Государственный Астрономический институт
им.П.К.Штернберга

На правах рукописи
УДК 524.3-36

Пахомов Юрий Васильевич

**ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
БАРИЕВЫХ ЗВЕЗД**

Специальность 01.03.02 - астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2004

Работа выполнена в Институте Астрономии РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН
Боярчук Александр Алексеевич
(ИНАСАН, Москва)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, академик АН
Республики Татарстан
Сахибуллин Наиль Абдуллович
(КазГУ, Казань)

кандидат физико-математических наук,
Архипова Вера Петровна
(ГАИШ МГУ, Москва)

Ведущая организация: Специальная астрономическая обсерватория РАН

Защита состоится 2 декабря 2004 г. в 14 ч. 00 мин на заседании Диссертационного совета по астрономии Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, шифр Д501.001.86

Адрес: 119992, г. Москва, Университетский проспект, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга МГУ (Москва, Университетский проспект, 13)

Автореферат разослан 1 ноября 2004 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Алексеев С.О.

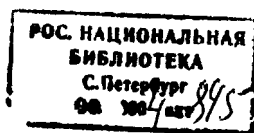
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Как известно, большинство звезд-гигантов поздних спектральных классов имеют нормальный химический состав, то есть содержания химических элементов в их атмосферах соответствуют солнечным содержаниям. Однако отдельные звезды показывают в своих спектрах различные химические аномалии, например, CN- и CH-звезды, SrII-звезды, а также, так называемые, бариевые звезды (или Ball-звезды), исследованию которых и посвящена диссертация.

Особенностью бариевых звезд являются усиленные спектральные линии бария и других редкоземельных элементов по сравнению с нормальными гигантами того же спектрального класса. По интенсивности этих линий различают умеренные и классические бариевые звезды. Для классических бариевых звезд содержание s-элементов на порядок и более превышают соответствующие содержания в нормальных красных гигантах. Подобные химические аномалии характерны для звезд класса S, находящихся на асимптотической ветви гигантов, где при двухслойном горении гелия и водорода могут возникать потоки нейтронов, необходимые для образования s-элементов. Однако бариевые звезды имеют гораздо меньшую светимость и находятся на ветви красных гигантов, где ожидать подобных аномалий не приходится. Поэтому исследование такого рода объектов стало весьма интересной задачей для астрофизики.

Открытие двойственности ряда бариевых звезд дало надежду к некоторому пониманию природы этих объектов. В настоящее время считается, что бариевые звезды входят в двойные системы, в которых более массивный компонент уже проэволюционировал и сбросил свою оболочку, обгатаю элементами s-процесса, на звезду, которую мы наблюдаем как бариевую.



В современный список бариевых звезд входит около 400 таких объектов [1]. Он включает в себя как классические, так и умеренные бариевые звезды. Несмотря на многочисленные исследования как содержаний химических элементов, так и доказательств двойственности (изменений лучевых скоростей, поиски горячего спутника в ультрафиолетовой части спектра), в проблеме природы бариевых звезд остается еще много неясного. Например, одни авторы считают, что и классические, и умеренные бариевые звезды имеют высокую степень двойственности [2], другие [3] - наоборот, что классические бариевые звезды имеют более высокую степень двойственности по сравнению с умеренными бариевыми звездами; в то же время в работе [4] отмечается, что большинство умеренных бариевых звезд, по-видимому, являются двойными и, некоторые из них могли быть связаны со вспышкой ее компоненты как сверхновой (эта гипотеза нашла свое развитие в [5]). В работе [6] отмечено, что гипотеза двойственности не является универсальной. В работе [7] сделан вывод, что эволюционный статус бариевых звезд еще до конца не выяснен, а также что имеются сомнения в однородности класса бариевых звезд.

Таким образом задача исследования содержаний химических элементов в атмосферах бариевых звезд (как классических, так и умеренных) и их сравнительный анализ с аналогичными результатами для нормальных красных гигантов является актуальной задачей для понимания природы этих объектов. Кроме того, это важно для понимания химической эволюции Галактики, поскольку аномалии химического состава отражают синтез элементов в недрах звезды и процесс их выноса в ее атмосферу в различные фазы эволюции, а также в межзвездную среду. Возросшие возможности современной техники наблюдений и их обработки позволяют достичь высокой точности в определении содержаний химических элементов в атмосферах звезд, что дает возможность более надежно оценивать и исследовать особенности химического состава звездных атмосфер.

Цели и задачи диссертационной работы

Главной задачей диссертации является исследование химического состава бариевых звезд с целью выяснения их природы. В решение этой задачи входило:

- получение спектрального наблюдательного материала высокого качества для трех групп красных гигантов: нормальных красных гигантов, умеренных бариевых и классических бариевых звезд;
- определение содержаний химических элементов атмосфер исследуемых звезд с возможно большей точностью;
- выполнение сравнительного анализа содержаний химических элементов в атмосферах трех групп красных гигантов

Научная новизна работы

Все пункты, приведенные ниже, получены впервые из собственных спектральных наблюдений автора.

- Для большинства исследованных звезд анализ содержаний химических элементов выполнен на основании наблюдательного материала, существенно превосходящего по спектральному разрешению материалов ранее проводимых наблюдений.
- Для двух исследованных звезд (HD 88562 и HD 183915) определение химического состава атмосфер выполнено впервые.
- Впервые показано существование в атмосферах бариевых звезд (как классических, так и умеренных) избытков содержаний химических элементов Na, Al, Mg, Si, величины которых зависят от ускорения силы тяжести в атмосфере звезды, то есть от ее светимости. Причем для каждого из элементов такая зависимость совпадает с аналогичной зависимостью для нормальных сверхгигантов и гигантов, что свидетельствует о единой природе происхождения этих избытков.

- Впервые выявлена зависимость избытка магния от ускорения силы тяжести для нормальных красных гигантов и бариевых звезд.
- Впервые для классических бариевых звезд из наблюдений выведена зависимость избытков s-элементов от металличности
- Впервые показано, что умеренные и классические бариевые звезды являются разными по природе группами объектов:
 - умеренные бариевые представляют собой одиночные красные гиганты, находящиеся на более поздней стадии эволюции, чем нормальные красные гиганты; наблюдаемые избытки s-элементов у них определяются развитой конвекцией, которая выносит в атмосферу продукты ядерных реакции;
 - классические бариевые являются компонентами в двойных системах; происхождение избытков s-элементов связано с двойственностью: быстрая эволюция более массивного компонента и сброс его оболочки на звезду, которая наблюдается сейчас как бариевая;
- Построены двенадцать калибровочных зависимостей, основанных на данных среднелосновой фотометрии и по температурам, которые определены методом инфракрасных потоков. Калибровочные зависимости позволяют оценивать эффективные температуры звезд по показателям цвета среднелосновой 13-цветной фотометрии [8].

Научная и практическая ценность работы

- Практическую ценность имеет спектральный материал высокого разрешения, полученный при выполнении данной задачи. В основе его лежат ПЗС-спектрограммы с высоким отношением сигнала к шуму. Спектрограммы могут быть использованы для решения других задач.

- Научную значимость представляют выведенные фундаментальные параметры звезд: эффективная температура, ускорение силы тяжести, светимость, масса, металличность, содержание химических элементов, микротурбулентная скорость. Полученные данные могут быть использованы другими исследователями при сопоставлении с результатами анализа химического содержания других звезд.
- Научную значимость представляют зависимости содержаний элементов Na, Mg, Al, Si в атмосферах умеренных и классических бариевых звезд и нормальных красных гигантах от ускорения силы тяжести, а также выявленная из наблюдений зависимость содержаний s-элементов в атмосферах исследованных звезд от их металличности.
- Научную значимость имеет вывод о единой природе умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов, а также о разной природе классических и умеренных бариевых звезд. Полученные результаты и выводы могут быть полезны при исследовании эволюции звезд и химической эволюции Галактики.

Основные результаты, выносимые на защиту

Все выводы получены впервые в мире на основе анализа собственных спектральных наблюдений автора.

1. Результаты определения содержаний химических элементов в атмосферах 23 звезд с точностью, превосходящей точность ранее опубликованных результатов других авторов.
2. Существование избытков химических элементов Na, Mg, Al, Si в атмосферах бариевых звезд (умеренных и классических), а также одинаковой зависимости этих избытков от ускорения силы тяжести в атмосферах бариевых звезд и нормальных красных гигантов - вывод

о единой природе возникновения аномалий в содержаниях Na, Mg, Al, Si в атмосферах этих трех групп звезд

- 3 Существование зависимости величины избытков s-элементов в атмосферах классических бариевых звезд не только от величины орбитального периода, но и от их металличности
- 4 Вывод, что умеренные и классические бариевые звезды являются разными по природе объектами умеренные бариевые представляют собой одиночные красные гиганты на более поздней стадии эволюции, чем нормальные красные гиганты, классические бариевые - это компоненты в двойной системе, происхождение избытков s-элементов связано с двойственностью

Апробация результатов

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, достаточно обоснованы в диссертации и положенных в ее основу публикациях. Результаты работы обсуждались на следующих семинарах и конференциях

- 1 астрофизические семинары Института астрономии РАН
- 2 астрофизический семинар Крымской Астрофизической Обсерватории (Крым, Украина)
- 3 конференции ИНАСАН "Конкурс молодых ученых"(2002,2003)
- 4 XXX международная студенческая научная конференция "Физика Космоса" (2001, Екатеринбург, АО УрГУ)
- 5 "9-th Open Scientist's Conference on Astronomy and Space Physics" (2002, Украина, Киев)
- 6 "Chemical and dynamic evolution of stars and galaxies" (2002, Украина, Одесса)

Личный вклад автора в совместные работы

Автор диссертации:

принимал непосредственное участие в наблюдениях на 2.6-м телескопе ЗТШ (КраО), предварительной обработке полученного спектрального материала, а также ассистировал в части наблюдений на 6-м телескопе БТА (СаО).

выполнил обработку спектрального материала (проведение уровня непрерывного спектра, измерение эквивалентных ширин спектральных линий), а также определение параметров атмосферы и содержания химических элементов для 4 из 7 умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов и для 13 из 16 классических бариевых звезд;

провел сравнительный анализ эквивалентных ширин по спектрам β Gem, полученным на 2.6-м телескопе ЗТШ и на 6-м телескопе БТА;

выполнил определение фундаментальных параметров звезд: эффективной температуры, ускорения силы тяжести, светимости, массы, на основе паралаксов и выведенных фотометрических калибровок, а также на основе метода инфракрасных потоков (IRFM). Сделал учет межзвездного поглощения на основе анализа двухцветной диаграммы;

активно участвовал в анализе полученных данных, в частности в анализе зависимостей содержаний Na, Mg, Al, Si от ускорения силы тяжести и содержаний s-элементов в атмосферах исследованных звезд от их металличности.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, 5-х глав и Заключения. Объем работы составляет 146 страниц и содержит 32 рисунка и 18 таблиц. Список цитируемой литературы включает 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обзор научных работ по бариевым звездам. Показана актуальность работы, сделана постановка задачи и даны характеристики диссертации.

Первая глава описывает наблюдательный спектральный материал высокого разрешения и с высоким отношением сигнала к шуму, полученный на телескопах ЗТШ (2.6-м, Крымская астрофизическая обсерватория, п.Научный, Крым, Украина) и БТА (6-м, Специальная астрофизическая обсерватория, п.Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия). Даются характеристики наблюдений и описывается их предварительная обработка. Выполнен сравнительный анализ эквивалентных ширин по двум спектрограммам одной звезды (*(3 Gem)*). Отмечено отсутствие систематических отклонений, что свидетельствует о возможности дальнейшего совместного анализа данных, полученных на этих двух инструментах. Приводится список 23 исследованных звезд, включающий в себя 2 нормальных красных гиганта, 5 умеренных бариевых и 16 классических бариевых звезд.

Вторая глава посвящена методу определения параметров звездных атмосфер и их химического состава. В работе применяется метод моделей атмосфер и используется приближение локального термодинамического равновесия. Параметры звездных атмосфер - эффективная температура, ускорение силы тяжести и микротурбулентная скорость,- определены следующим методом.

Согласно современным представлениям теории звездной эволюции, относительные содержания элементов железной группы не меняются во время эволюции звезды на стадиях главной последовательности и гиган-

тов, откуда следует, что содержание каждого элемента этой группы в атмосфере гиганта по отношению к содержанию его на Солнце должны быть одинаковы и отражать металличность звезды. Поэтому для оценки атмосферных параметров для каждой звезды на основании измеренных эквивалентных ширин проводились расчеты содержаний химических элементов группы железа (Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni) при различных значениях эффективных температур и ускорений силы тяжести, близких к ожидаемым (например из спектрального класса и светимости, из показателей цвета, из литературы и т.д.). Полученные результаты анализировались с целью нахождения таких параметров модели атмосферы, при которых разброс относительных содержаний элементов группы железа был бы минимальным. Как показано в работах [9,10], в рамках каждой сетки моделей всегда удастся найти такую модель, которая наилучшим образом описывает наблюдаемый спектр. При этом получаемые содержания химических элементов имеют наименьший разброс, совпадают содержания, полученные по линиям нейтральных атомов и ионов, отсутствует систематический ход содержаний с изменением потенциала возбуждения.

По найденным параметрам вычислялись модели атмосфер для каждой исследуемой звезды. В диссертации для вычисления моделей звездных атмосфер использовалась программа ATLAS9 с усовершенствованной теорией конвекции [11]. Для вычисления содержаний химических элементов по эквивалентным ширинам линий и с соответствующей моделью атмосферы применялась программа WIDTH9. При анализе отбирались неблендированные линии с эквивалентной шириной не более 100 мÅ для уменьшения влияния нЛТР эффектов и минимизации ошибок из-за неопределенностей в атомных параметрах затухания.

Отмечается актуальность выбора метода дифференциального анализа содержаний химических элементов в звездных атмосферах по отношению к Солнцу, в рамках одной сетки моделей атмосфер и по единой методике. Часть Главы посвящена оценкам ошибок в определениях со-

держаний химических элементов, обусловленным возможной неточностью выбора параметров модели звездных атмосфер, влиянием выбора модели конвекции и сверхтонким расщеплением.

Третья глава посвящена определению и анализу химического состава умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов и сравнению полученных результатов. Рассматриваются содержания элементов Na, Al, Si, которые находятся в избытке как в нормальных красных гигантах, что было обнаружено раньше [12], так и в умеренных бариевых звездах. И эти избытки коррелируют с ускорением силы тяжести и имеют одну зависимость для этих двух групп звезд. Сделан вывод о едином механизме возникновения избытков этих элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов, а именно вынос из недр звезд в их атмосферу конвективным перемешиванием продуктов ядерных реакций, проходивших на стадии главной последовательности. Повышенные избытки элементов Na, Al, Si в атмосферах умеренных бариевых звезд по сравнению с нормальными красными гигантами свидетельствуют о более развитой конвекции в них. На основании сопоставления результатов наблюдений с теоретическими работами сделан вывод о том, что эти элементы образуются в NeNa- и MgAl-циклах горения водорода, что свидетельствует о ходе этих реакции параллельно p-p- и CNO-циклам в недрах звезд на главной последовательности.

Отмечено, что ускорения сил тяжести для умеренных бариевых звезд в среднем ниже, чем для нормальных красных гигантов, что говорит о их большей светимости и об их более поздней стадии эволюции по сравнению с нормальными красными гигантами.

Анализ литературных данных по содержаниям продуктов CNO-цикла в атмосферах умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов показал, что конвекция в недрах звезд первой группы развита сильнее, чем во второй, что также является следствием более продвинутой стадии их эволюции.

Проанализированы величины избытков элементов s-процесса и показана единая природа их происхождения как в умеренных бариевых звездах, так и в нормальных красных гигантах. Повышенное содержание s-элементов в умеренных бариевых звездах также говорит о более глубоком проникновении конвекции и более продвинутой фазе эволюции.

Сделан вывод, что умеренные бариевые звезды представляют собой одиночные красные гиганты, находящиеся на более поздней фазе эволюции, чем нормальные красные гиганты. Большие величины избытков элементов в умеренных бариевых звездах определяются более развитой конвективной оболочкой в них. А образование небольших избытков s-элементов, вероятно, связано с потоком нейтронов, возникающем в ходе фотонейтронных реакций, во время которых энергичные гамма-кванты могут выбить нейтроны из атомных ядер.

Четвертая глава посвящена определению и анализу химического состава классических бариевых звезд. Для них, как и для умеренных бариевых звезд, были обнаружены избытки содержаний элементов Na, Al, Si, а также Mg. Найдено, что величины этих избытков удовлетворяют зависимостям от ускорения силы тяжести, выведенным ранее для умеренных бариевых звезд, нормальных гигантов и сверхгигантов. Это свидетельствует, что эти избытки в атмосферах звезд всех трех рассматриваемых групп имеют единую природу происхождения: в результате реакций горения водорода в NeNa- и MgAl-циклах в недрах звезд и последующим выносом их в атмосферу конвективным перемешиванием на стадии красных гигантов.

Проведен анализ содержаний s-элементов, и рассматриваются различные факторы, влияющие на возникновение феномена бариевой звезды. Подтверждено, что избытки в содержаниях элементов s-процесса увеличиваются с уменьшением орбитального периода, что и должно наблюдаться согласно гипотезе о двойственности бариевых звезд. Показано также, что избытки s-элементов тем больше, чем меньше металличность. В различ-

ных случаях может быть определяющим как один так и другой фактор.

Сделан вывод, что для объяснения спектральных особенностей классических бариевых звезд необходимо привлечение гипотезы об их двойственности: в двойной системе с компонентами, различающимися по массе, более массивная звезда быстрее эволюционирует и сбрасывает оболочку, содержащую большое количество продуктов ядерных реакций, на звезду, наблюдаемую сейчас как бариевая. Это подтверждается также и тем, что в атмосферах классических бариевых звезд наблюдаются избытки углерода. Показано, что подгруппа звезд, у которых не обнаружена двойственность, является неоднородной и включает в себя два класса объектов: классические бариевые звезды, находящиеся в широких парах или имеющие перпендикулярное расположение плоскости орбиты к лучу зрения, и умеренные бариевые звезды с низкой металличностью.

В пятой главе проводится анализ положений исследуемых звезд на диаграмме "температура-светимость". Для определения положений звезд на диаграмме необходимо знать их эффективные температуры и светимости.

Поскольку полученные нами параметры звездных атмосфер выведены на основе анализа спектров с помощью метода моделей атмосфер, то точность их соответствия реальным параметрам зависит от точности соответствия математической модели реальной звездной атмосфере. Поэтому для анализа положений исследуемых звезд на диаграмме "температура-светимость" рассматриваются эффективные температуры, которые получены неспектроскопическими методами, основанными на построении калибровочных зависимостей эффективных температур от показателей цвета различных фотометрических систем. Калибровочные зависимости построены по опорным звездам, чьи эффективные температуры получены методом инфракрасных потоков. Из фотометрических систем рассматриваются две: широкополосная система Джонсона UVV (13) и среднеполосная 13-цветная фотометрия [8].

Светимость определялась из видимых звездных величин с учетом межзвездного поглощения и расстояний до исследуемых звезд (использовались данные каталога HIPPARCOS).

Из рассмотрения положений звезд на эволюционных треках [14, 15] были выведены их массы. Последующий анализ диаграммы "температура-светимость" показал, что у умеренных бариевых звезд и нормальных красных гигантов с большими избытками s-элементов есть тенденция располагаться в областях треков с большими массами и более поздней стадии эволюции. Это подтверждает вывод о том, что умеренные бариевые звезды - это нормальные красные гиганты с более развитой конвекцией и в более продвинутой стадии эволюции. Для классических бариевых звезд такой тенденции не было замечено, что и следовало ожидать в рамках гипотезы об их двойственности.

Заключение подводит итог всей работы и содержит выводы диссертации.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Боярчук А. А., Пахомов Ю. В., Антипова Л. И. и Боярчук М.Е., "Анализ содержаний химических элементов в атмосферах умеренных бариевых звезд", *Астрономический журнал*, 2002, том 79, № Ю, стр. 909
2. Антипова Л. И., Боярчук А. А., Пахомов Ю. В. и Панчук В. Е., "Исследования классических бариевых звезд", *Астрономический журнал*, 2003, том 80, № 8, стр. 704
3. Антипова Л. И., Боярчук А. А., Пахомов Ю. В. и Панчук В. Е., "Анализ химического состава атмосфер классических бариевых звезд", *Астрономический журнал*, 2004, том 81, № 6, стр. 658

Литература:

- [1] P. K. Lu. *Astron. J.* 101, 2229 (1991)
- [2] E. Bohm-Vitense, J. Nemeц, C Proffitt. *Astrophys. J.* 278, 726 (1984)
- [3] M. H. Pinsonneault, C Sneden, V. V. Smith. *Publ. Astron. Soc. Pac* 96, 239 (1984)
- [4] R. F. Griffin. *The Observatory* 102, 82 (1982)
- [5] J. H. Elias, B. Gregory, M. M. Phillips, R. E. Williams, J. R. Graham, W. P. S. Meikle, R. D. Schwartz, B. Wilking. *Astrophys. J. Letters* 331, 9 (1988)
- [6] R. A. Malaney. *Astrophys. J.* 321, 832 (1987)
- [7] Л. Зач. *Сообщения CAO* 63, 160 (1990)
- [8] H. L Johnson, R. I. Mitchell. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* 1, 299 (1975)
- [9] А. А. Боярчук, Л. И. Антипова, М. Е. Боярчук, И. С. Саванов. *Астрон. журн.* 73, 862 (1996)
- [10] А. А. Боярчук, Л. И. Антипова, М. Е. Боярчук, И. С. Саванов. *Астрон. журн.* 75, 586 (1998)
- [И] V. M. Canuto, I. Mazzitelli. *Astrophys. J.* 370, 295 (1991)
- [12] А. А. Боярчук, Л. И. Антипова, М. Е. Боярчук, И. С. Саванов. *Астрон. журн.* 78, 349 (2001)
- [13] H. L Johnson, B. Iriarte, R. I. Mitchell, W. Z. Wisniewskj. *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory* 4, 99 (1966)
- [14] G. Schaller, D. Schaerer, G. Meynet, A. Maeder. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 96, 269 (1992)

- [15] D. Schaerer, G. Meynet, A. Maeder, G. Schaller. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 98, 523 (1993)

Для заметок

Заказ № 435 Подписано в печать 25 10 04 Тираж 100 экз Усл. п. л. 1

ООО "Цифровичок", тел. 741-18-71, 505-28-72

www.cfr.ru

№ 2 1 1 1 1

РНБ Русский фонд

2005-4

15926