

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Рохас Гарсия *Маделайне Митчел*

**АНОМАЛИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ЗВЕЗД ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И МАЛЫХ
МАСС**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ - 2013

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук

Холтыгин Александр Федорович

Официальные оппоненты:

Бикмаев Ильфан Фяритович,
доктор физ.-мат. наук, доцент,
(Казанский (Приволжский) федеральный университет, профессор);

Валявин Геннадий Геннадиевич,
кандидат физ.-мат. наук,
(Специальная астрофизическая обсерватория РАН, ст. науч. сотр.).

Ведущая организация:

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Защита диссертации состоится 24 декабря 2013 г. в 15 ч. 30 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, ауд. 2143 (Математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан

<_____> 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Орлов Виктор Владимирович

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность работы

Исследования химического состава звезд являются одной из наиболее важных задач в астрофизике. Такие исследования позволяют детально исследовать эволюцию как самих звезд, так и тех звездных систем (звездных скоплений и галактик), в которых они находятся. Особый интерес в этой связи представляют звезды, на содержание элементов в атмосферах которых влияет их околозвездное окружение. К таким звездам относятся бариевые звезды, звезды с планетными системами и звезды с пылевыми дебрис-дисками. Содержание элементов в атмосферах этих звезд заметно отличается от их содержания в атмосферах одиночных звезд.

На содержание элементов в атмосферах бариевых звезд, являющихся маломассивными двойными системами, существенно влияют процессы перетекания вещества со вторичного компонента на проэволюционировавший первичный компонент. Несмотря на долгий период, прошедший с начала исследований химического состава звезд в таких системах, природа физических процессов, приводящих к аномальностям в содержаниях элементов, остается до настоящего времени не вполне ясной. Спектральные наблюдения таких звезд в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах позволяют детально исследовать как меняется их химический состав в зависимости от их возраста и массы и эффективности обмена веществом между компаньонами двойной системы. Тем самым можно сделать вывод, что исследование химического состава звезд в двойных системах с перетеканием вещества является актуальной астрофизической задачей.

Еще менее известен химический состав звезд, обладающих планетными системами. Известно пока лишь то, что химический состав таких звезд заметно отличается от характерного для звезд, не имеющих планетных систем. Предполагается, что звезды с планетными системами имеют в среднем повышенную металличность $[Fe/H]$ по сравнению со звездами, таких систем не имеющих. При этом содержания элементов у объектов одного типа, определяемое разными авторами, зачастую сильно различаются. Например, авторы работ [2, 5, 7] обнаружили повышенное содержание лития у звезд с экзопланетами по сравнению со средним содержанием лития у обычных звезд, что интерпретируется как результат усиления процессов перемешивания и/или увеличения глубины конвективной зоны.

В то же время Melendez et al. [8] обнаружили, что содержание лития

одинаково у обеих групп звезд. Подобные расхождения характерны и для других элементов. Так, авторы работы [3, 9] считают, что в атмосферах звезд с планетными системами повышено содержание кислорода, тогда как в работах [1, 6] этот вывод не подтверждается.

Особый класс объектов представляют звезды с пылевыми осколочными (дебрис)-дисками. К таким объектам относятся старые маломассивные звезды ($0.5 M_{\odot} - 3 M_{\odot}$) с возрастaми в промежутке $t = 10^7 - 10^9$ лет. В ряде случаев в дебрис-дисках выделяют заметные пылевые кольца. Размер дисков составляет $10 - 100$ а.е., а их масса $\approx M_{\text{moon}}$. Считается, что дебрис-диски создаются и поддерживаются столкновениями между планетезималями. Даже если общая масса частиц пыли меньше массы Земли, они могут затмевать родительскую звезду. Обычно звезды с дебрис-дисками находят, исследуя звездную систему в ИК области спектра [4] по ИК избыткам. Эти избытки вызваны поглощением излучения звезды диском и последующим переизлучением его в ИК диапазоне.

Тем самым можно заключить, что как звезды с планетами, так и звезды с дебрис-дисками представляют различные стадии эволюции звезд с планетными системами. На тесную связь этих объектов указывает существование гибридных систем, в которых найдены как планеты, так и пылевые дебрис-диски.

Исследования зависимости химических аномалий элементов у звезд с планетами и дебрис-дисками от температуры их конденсации T_c в твердой фазе могут пролить свет на детали формирования планетных систем и, в том числе, планет подобных нашей Земле. Зависимость содержаний элементов от T_c пока еще недостаточно хорошо известна, что указывает на необходимость ее изучения для широкого круга звезд и, в том числе, на актуальность изучения химического состава подобных звездных систем.

1.2 Цели диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является определение содержаний химических элементов и установление эволюционного статуса звезд с аномалиями химического состава.

Для достижения этой цели решалась задача определения фундаментальных параметров и содержаний как легких, так и тяжелых элементов в атмосферах 20 программных звезд, включающих Вa II-звезды, звезды с экзопланетами и с дебрис-дисками.

В решение этой задачи входило:

- получение из литературных источников атомных параметров, необходимых для анализа спектров программных звезд;
- анализ спектрального наблюдательного материала высокого разрешения, который был получен на 2.2-м телескопе ESO в Чили со спектрографом FEROS;
- определение фундаментальных параметров (эффективная температура, ускорение силы тяжести на поверхности звезды и микротурбулентная скорость) и эволюционного статуса программных звезд с использованием ЛТР моделей атмосфер звезд;
- определение содержания выбранных химических элементов в атмосферах исследуемых звезд, в том числе тугоплавких, летучих элементов и элементов s-процесса;
- исследование зависимости металличности $[Fe/H]$ от различных параметров программных звезд;
- анализ зависимости относительного содержания элементов $[X/H]$ от их температуры конденсации T_c , чтобы подтвердить или опровергнуть различные гипотезы формирования планетных систем.

1.3 Научная новизна

- В диссертации впервые детально проанализированы спектры высокого разрешения звезд CD-65°2893, HD 22229, HD 66812, HD 56523 и HD 31341 и установлено, что эти звезды являются умеренными бариевыми звездами.
- Впервые выполнено исследование единым методом как звезд с дебрис-дисками, так и звезд с экзопланетами и гибридных систем.
- Впервые исследована зависимость содержаний элементов в атмосферах звезд с дебрис-дисками от их температуры конденсации.

1.4 Научная и практическая значимость работы

Разработанная в диссертации методика анализа спектров звезд малых и промежуточных масс с аномалиями химического состава может быть использована для массового анализа содержаний элементов в объектах подобного типа.

Результаты анализа программных звезд применимы для уточнения классификации химически пекулярных звезд.

Проведенный в диссертационной работе анализ зависимости содержания элементов в атмосферах звезд с дебрис-дисками и планетными системами от их температуры конденсации применим к широкому кругу подобных звездных систем и может использоваться для выяснения механизмов обогащения атмосфер звезд малых и промежуточных масс летучими и тугоплавкими элементами.

1.5 Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Объем работы составляет 126 страниц и содержит 34 рисунка и 36 таблиц. Список цитируемой литературы включает 122 наименования.

1.6 Апробация результатов

Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях и симпозиумах:

- 39-ой Всероссийской научной конференции "Физика Космоса", Коуровская Астрономическая обсерватория, Свердловская обл., Россия, 01 - 05 февраля 2010;
- Международной конференции "JENAM-2011: European Week of Astronomy and Space Science", Санкт-Петербург, Россия, 4-8 июля 2011;
- Международной конференции "10th Pacific Rim Conference", Сеул, Корея, 27-31 мая 2013;
- Международной конференции "Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars", Москва, Россия, 3 - 7 июня 2013;

- Международной конференции "European Week of Astronomy and Space Science", Турку, Финляндия, 8 - 13 июля 2013;
- Всероссийской астрономической конференции "Многоликая Вселенная (ВАК-2013)" Санкт-Петербург, Россия, 23-27 сентября 2013.

Кроме того, результаты диссертации были представлены на астрофизических семинарах Кафедры астрофизики СПбГУ и астрофизических подразделений ГАО РАН.

2 Краткое содержание работы

В **Первой главе (Введении)** содержится обзор научных работ по исследованиям химически пекулярных звезд, в том числе бариевых звезд, звезд с планетными системами и с осколочными дебрис-дисками. Показана актуальность работы, указаны ее цели, новизна и актуальность работы и дано краткое содержание диссертации.

Во **Второй главе** диссертации описана методика определения фундаментальных параметров и химического состава программных звёзд. Делаются оценки погрешностей определяемых величин.

В **разделе 2.1** описаны наблюдения программных звезд и детально изложена методика обработки их спектров. Дан список 20 программных звезд и указано к какой группе звезд с пекулярным химическим составом: умеренные бариевые звезды, звезды с дебрис-диском или с планетами, они отнесены.

В **разделе 2.2** обсуждаются модели атмосфер и используемые атомные данные. В диссертации были использованы модели атмосфер Kurucz (Atlas 9), рассчитанные на основе предположений о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР). Даны ссылки на работы, из которых были взяты атомные данные для элементов, линии которых анализируются в спектрах программных звезд.

Раздел 2.3 посвящен описанию методики определения эквивалентных ширин линий с помощью программы ARES. Представлены оценки эффективных температур программных звезд T_{eff} и их металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$, полученных с помощью ARES.

Методам определению фундаментальных параметров звезд и их химического состава посвящены **разделы 2.4 и 2.5**.

В разделе 2.6 описывается как определялись погрешности при определении содержаний элементов. Для иллюстрации представлены результаты определения химического состава атмосферы звезды HD 10700 и погрешности определенных содержаний элементов.

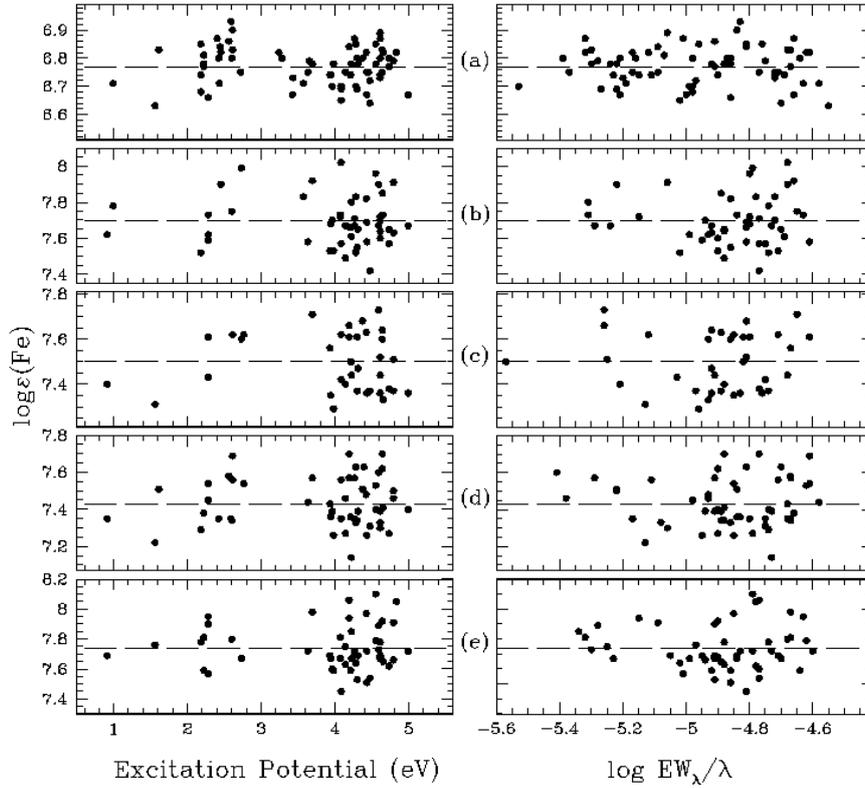


Рис. 1. Зависимость содержания железа, полученного по отдельным линиям Fe I, $\log \varepsilon(\text{Fe})$, от потенциала возбуждения нижнего уровня (χ) и приведенной эквивалентной ширины ($\log \frac{W_\lambda}{\lambda}$) для следующих бариевых звезд: (a) CD-65°2893, (b) HD 22229, (c) HD 66812, (d) HD 56523 и (e) HD 31341. Пунктирной линией показана линейная аппроксимация методом наименьших квадратов.

Процедура определения скоростей вращения и лучевых скоростей программных звезд изложена в разделе 2.7, а в разделе 2.8 описывается применение методики синтетических спектров для определения содержаний элементов.

Третья глава посвящена определению фундаментальных параметров и химического состава группы умеренных бариевых звезд. Определены следующие параметры: эффективная температура, ускорение силы тяжести,

микротурбулентная скорость и металличность. При оценке атмосферных параметров для каждой звезды на основании измеренных эквивалентных ширин проводились расчеты содержаний железа. Полученные результаты анализировались с целью получения таких параметров модели атмосферы, при которых разброс относительных содержаний железа, полученных по разным линиям Fe I, был бы минимальным и при которых совпадают содержания, полученные по линиям нейтральных атомов Fe I и линиям ионов Fe II.

Обработка спектров Ba 0-звезд описана в **разделе 3.1**, а в **разделе 3.2** даны результаты определения фундаментальных параметров звезд этой группы. Зависимости содержания Fe I в функции эквивалентной ширины и потенциала возбуждения представлены на рисунке 1.

Анализ содержаний элементов s-процесса в атмосферах Ba 0-звезд дан в **разделе 3.3**. Получены содержания таких элементов s-процесса как Y, Zr, Ba, La, Ce и Nd, а также рассчитаны относительные содержания [ls/Fe] "легких" (Y и Zr) и "тяжелых" (Ba, La, Ce и Nd) элементов s-процесса. Установлено, что у всех исследуемых Ba 0-звезд содержания элементов s-процесса повышено на 0.3-0.4 dex по сравнению с солнечным, но при этом это повышение существенно меньше, чем у классических Ba II звезд. Тем самым делается вывод, что исследуемые звезды относятся к группе умеренно-бариевых (Ba 0) звезд.

Ошибки содержаний элементов, обусловленные неточностью принятых значений параметров модели звездных атмосфер, даны в **разделе 3.4**. Детально анализируются неточности в содержаниях из-за ошибок в определении фундаментальных параметров звезд.

В **разделе 3.5** описана процедура определения содержания Ba в атмосферах программных звезд. Содержание Ba было получено по двум линиям: Ba II λ 6141.713 и λ 6496.900 Å. Линия Ba II λ 6141.713 Å блендирована линией Fe I λ 6141.732 Å, поэтому для определения содержания бария профили этих линий были проанализированы с использованием методики построения синтетических спектров звезд для того, чтобы уменьшить возможные ошибки в оценке содержания Ba.

Выводы к **Третьей главе** представлены в **разделе 3.6**.

Четвертая глава посвящена определению химического состава звезд с планетными системами и с дебрис-дисками. Получены содержания тугоплавких и летучих элементов в атмосферах звезд с экзопланетами и дебрис-дисками. Проведен анализ ошибок в определениях содержаний химических

элементов при изменении найденных параметров.

Характеристики звезд с дебрис-дисками представлены в **разделе 4.1**, а металличность звезд с дебрис-дисками и планетными системами дана в **разделе 4.2**. Обсуждаются различные гипотезы происхождения отличий в металличности у звезд с планетами и звезд с такими же фундаментальными параметрами, но не имеющими планет. Дана таблица металличностей программных звёзд с планетами и дебрис-дисками.

Определение фундаментальных параметров программных звезд с планетами, дебрис-дисками и гибридных систем, у которых были обнаружены как планеты, так и дебрис-диски, представлено в **разделе 4.3**. Обсуждается методика определения параметров и выполнено сравнение параметров, полученных разными методами.

Определение содержания элементов описано в **разделе 4.4**. Программные звезды разделены на 2 группы: имеющих пониженную или повышенную по сравнению с солнечной металличность $[Fe/H]$. Обнаружены существенные различия в содержаниях элементов у звезд этих групп.

В **разделе 4.5** выполнен анализ содержания тугоплавких и летучих элементов в атмосферах программных звезд. Проанализирована зависимость относительного содержания летучих и тугоплавких элементов в зависимости от их температуры конденсации T_c в атмосферах программных звезд с низкой и высокой металличностью. Обнаружена положительная корреляция между относительными содержаниями элементов и их температурами конденсации для группы звезд с металличностью $[Fe/H] > 0$.

Выводы к **Главе 4** сформулированы в **разделе 4.6**.

В **Пятой главе** проводится анализ положения исследуемых звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Светимость определялась по видимым звездным величинам и расстояниям до исследуемых звезд, полученных по их параллаксам. Были также найдены массы звезд и их радиус. На основании полученных фундаментальных параметров звезд уточнен эволюционный статус программных звезд.

В **разделе 5.1** изложен байесовский метод определения звездных параметров, реализованный на веб-портале PARAM1.2 (<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/param>). С помощью теоретических изохрон для звезд промежуточных масс оцениваются и другие звездные параметры такие как: возраст, масса, радиус, теоретическое значение показателей цвета $(B-V)_0$ и $\log g$. Анализируется зависимость между возрастом и металличностью программных звезд.

Раздел 5.2 посвящен определению физических параметров программных звезд. Для всех программных звезд найдены массы, радиусы и светимости. Значения параметров, полученных разными методами, оказались близкими.

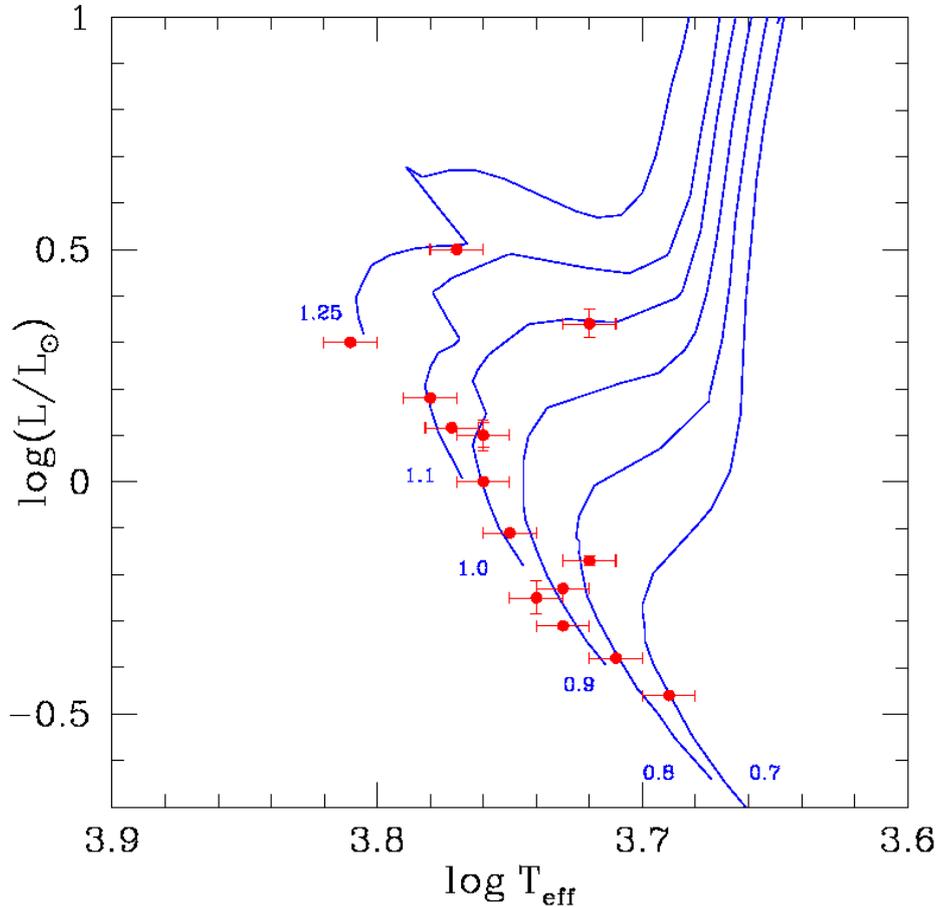


Рис. 2. Положение программных звезд с дебрис-дисками и/или планетами на диаграмме Герцшпрунга-Рессела

Положения трех $Ba0$ -звёзд с известными параллаксами на диаграмме Герцшпрунга-Рессела даны в **разделе 5.3**. Указанные звезды попадают на треки звезд с массами $2 - 3 M_{\odot}$, находящиеся на стадии красных гигантов.

В **разделе 5.3** представлены массы, светимости, радиусы, показатели цвета $(B-V)_0$ и возраста программных звезд с планетами и дебрис-дисками. Обсуждается эволюционный статус программных звезд и сделан вывод, что все эти звезды являются маломассивными с массами $M < 1.25 M_{\odot}$. Из рисунка 2 видно, что практически все звезды с дебрис-дисками и/или планетами находятся на главной последовательности; только одна звезда HD 210681 находится на стадии субгиганта. Ее эволюционный статус по-

дробно рассмотрен в главе 6.

Выводы к **Главе 5** представлены в **разделе 5.5**.

В **Шестой главе** впервые исследован спектр высокого разрешения звезды HD 210681, полученный на 2.2-м телескопе в обсерватории (ESO) в Чили со спектрографом FEROS $R = 48000$. Определены основные параметры звезды: T_{eff} , $\log g$, ξ и $[\text{Fe}/\text{H}]$ и проведен расчет химического состава атмосферы звезды для 17 тугоплавких и летучих элементов. Физические параметры HD 210681 указывают на то, что звезда находится на фазе субгиганта. Звезда HD 210681 имеет наибольший возраст из всех исследуемых звёзд с дебрис-дисками: $t = 10.08 \pm 0.85$. Все исследованные элементы в атмосфере HD 210681 кроме Al имеют содержание выше солнечного.

Спектральные наблюдения HD 210681 и их обработка представлены в **разделе 6.1**, а в **разделе 6.2** детально описана процедура определения физических параметров звезды. Положение HD 210681 на диаграмме Герцшпрунга-Рессела существенно отличается от положений других программных звезд с дебрис-дисками. Сделан вывод, что эта звезда является наиболее проэволюционировавшей из всех программных звезд и находится на фазе субгиганта.

В **разделе 6.3** описан анализ химического состава HD 210681. Для определения содержаний элементов, а также скорости вращения $V \sin i$ использовался метод синтетических спектров. Наилучшее согласие между наблюдаемым и теоретическим спектрами достигается при $V \sin i = 3$ км/с. Было определено относительное содержание тугоплавких и летучих элементов в фотосфере звезды. Зависимость относительного содержания элементов от температур конденсации показана на Рис. 3. Обнаружено значимое увеличение избытков содержания элементов в атмосфере HD 210681 с ростом температуры конденсации элементов T_c .

В **разделе 6.4** даны выводы к **Главе 6**.

В **Заключении (Глава 7)** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В **приложении А** представлены физические параметры звезд с планетами и дебрис-дисками, а также даны содержания элементов в их атмосферах.

Лучевые скорости V_a 0-звёзд, полученные по различным линиям в их спектрах, даны в **приложении В**. В этом же приложении табулированы ошибки содержаний элементов в атмосферах этих звезд, обусловленные неточностью принятых значений фундаментальных параметров звезд.

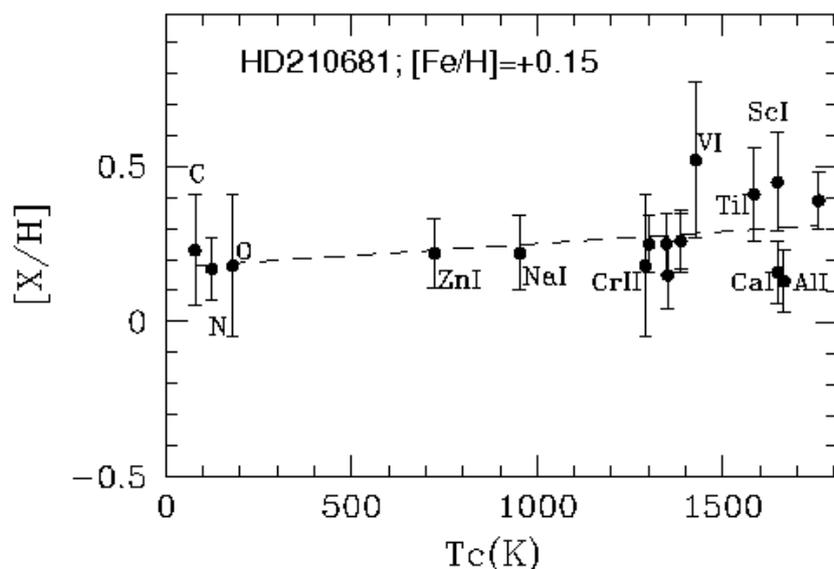


Рис. 3. Относительное содержание $[X/H]$ летучих и тугоплавких элементов в зависимости от их температуры конденсации T_c в атмосфере звезды HD 210681.

В **приложении С** даны атомные данные для линий в спектрах умеренных бариевых звезд и приведены эквивалентные ширины линий в спектрах.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Результаты спектроскопических исследований пяти пекулярных звезд (CD-65°2893, HD 22229, HD 66812, HD 56523 и HD 31341) и вывод о том, что эти объекты являются умеренными бариевыми звездами.
2. Результаты определения фундаментальных параметров и содержания химических элементов в атмосферах 15 звезд с экзопланетами, дебрис-дисками и гибридных систем, имеющих как планетные системы, так и дебрис-диски.
3. Вывод о повышенных содержаниях тугоплавких элементов по сравнению с солнечными для звезд с дебрис-дисками и гибридных систем, имеющих металличность $[Fe/H] > 0$.

Публикации по теме диссертации:

Материалы диссертации опубликованы в восьми печатных работах:

1. *Rojas M.M.*, Бариевые звёзды, Труды 39-ой Международной студенческой научной конференции "Физика Космоса", стр. 146 (2010);
2. *Rojas M., Drake N.A., Pereira C.B.*, Physical parameters and Chemical compositions of a group of mild Barium stars, JENAM 2011, European Week of Astronomy and Space Science, Book of Abstract, p. 81 (2011);
3. *Рохас М., Драке Н.А., Перейра К.Б., Холтыгин А.Ф.*, Физические параметры и химический состав группы умеренных Бариевых звёзд, *Астрофизика*, **56**, 69-79 (2013);
4. *Rojas M.M., Drake N.A., Chavero C., Pereira C.B., Kholtygin A.F.*, Abundance pattern analysis of planet-hosting and debris-disk stars, Tenth Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics, Abstract Book, p. 34 (2013);
5. *Рохас М., Драке Н.А., Чаверо К., Перейра К.Б., Холтыгин А.Ф., Соловьев Д.И.*, Анализ химического состава атмосфер звёзд с дебрис-дисками и планетными системами, *Астрофизика*, **56**, 503-515 (2013)
6. *Rojas M.M., Drake N.A., Chavero C., Pereira C.B., Kholtygin A.F., Cahuasqui J.A.*, Abundances for planet-hosting and debris-disk stars Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars, Abstract Book, p. 37 (2013);
7. *Rojas Garcia M.M., N.A. Drake, C. Chavero C, C.B. Pereira, A.F. Kholtygin, J.A. Cahuasqui*, Fundamental parameters and abundance patterns of a sample of debris-disks and planet-hosting stars, EWASS 2013, European Week of Astronomy and Space Science, Abstract Book, p. 120 (2013);
8. *Рохас М.М., Драке Н.А., Чаверо К., Перейра К.Б., Холтыгин А.Ф., Соловьев Д.И.*, Анализ химического состава атмосфер звёзд с дебрис-дисками и планетными системами, *Астрофизика*, Всероссийская астрономическая конференция Многоликая Вселенная, Тезисы докладов, стр. 225 (2013).

Личный вклад автора:

В статьях 1, 3, 5, 6, 8 автору принадлежат определение фундаментальных параметров программных звезд и содержаний элементов в их атмосферах и частично выяснение их эволюционного статуса.

В статьях 2, 4 и 7 автору принадлежат определение параметров звезд и анализ полученных результатов совместно с другими соавторами.

Список литературы

- [1] *Bond J.C., Lauretta D.S., Tinney C.G., et al.*, *Astrophys. J.*, **682**, 1234 (2008).
- [2] *Chen Y.Q., Zhao G.*, *Astrophys. J.*, **131**, 1816 (2006).
- [3] *Ecuwillon A., Israelian G., Santos N. C., et al.*, *Astron. Astrophys.*, **445**, 663 (2006).
- [4] *Golimowski D.A., Ardila D.R., Krist J.E., et al.*, *Astron. J.*, **131**, 3109 (2006).
- [5] *Gonzalez G.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **386**, 928 (2008).
- [6] *Gonzalez G., Laws C.*, *Astron. J.*, **119**, 390 (2008).
- [7] *Israelian G., Delgado M.E., Santos N.C., et al.*, *Nature*, **462**, 189 (2009).
- [8] *Melendez J., Ramirez I., Casagrande L., et al.*, *Astrophys. and Space Science*, **328**, 193 (2010).
- [9] *Robinson S.E., Laughlin G., Bodenheimer P., et al.*, *Astrophys. J.*, **643**, 484 (2006).