



УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
астрономии Российской академии наук
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Бисикало Д. В.
"14" октября 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, в которой выполнена диссертация

Выписка из протокола Астрофизического семинара Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) от 14 октября 2021 г. Присутствовали 28 научных сотрудников, в том числе:

к.ф.-м.н. В. В. Акимкин, д.ф.-м.н. Д. В. Бисикало, д.ф.-м.н. Д. З. Вибе, к.ф.-м.н. М. А. Ибрагимов, к.ф.-м.н. Д. А. Ковалева, д.ф.-м.н. А. Э. Пискунов, д.ф.-м.н. Т. А. Рябчикова, д.ф.-м.н. Н. Н. Самусь, к.ф.-м.н. А. М. Соболев, к.ф.-м.н. В. Г. Сурдин, к.ф.-м.н. А. П. Топчиева, д.ф.-м.н. А. В. Тутуков, к.ф.-м.н. Н. В. Чулина, д.ф.-м.н. Л. И. Машонкина, к.ф.-м.н. Ю. В. Пахомов, д.ф.-м.н. М. В. Барков, к.ф.-м.н. С. И. Барабанов, д.ф.-м.н. Ю. А. Фадеев, к.ф.-м.н. М. С. Кирсанова, д.ф.-м.н. Н. Н. Чугай, Dr. rer. nat. P. Voley.

Слушали: доклад А. М. Романовской о диссертации «Определение фундаментальных параметров магнитных химически-пекулярных звезд методами спектроскопии», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Романовская Анна Михайловна, род. 12.04.1994, в 2017 г. окончила Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова и получила степень специалиста по направлению «Астрофизика и звездная астрономия». В период 2017 – 2021 гг. проходила обучение в аспирантуре ИНАСАН. Работает в ИНАСАН в отделе нестационарных звезд и звездной спектроскопии с января 2015 г. на должности инженера, с октября 2017 г. младшим научным сотрудником до настоящего времени. Научным руководителем является д.ф.-м.н. Рябчикова Татьяна Александровна, ведущий научный сотрудник отдела нестационарных звезд и звездной спектроскопии ИНАСАН.

По итогам обсуждения диссертации «Определение фундаментальных параметров магнитных пекулярных звезд» принято следующее заключение:

Актуальность. Магнитные химически пекулярные (Ap) звезды принадлежат к группе звезд Главной Последовательности (ГП) спектральных классов от B5 до F5. Они отличаются от нормальных A звезд наличием в их атмосферах глобальных магнитных полей

преимущественно полоидального типа, интенсивность продольного компонента которых достигает до десятков килогаусс.

В спектрах этих звезд наблюдаются аномально интенсивные для соответствующего спектрального класса линии, анализ которых приводит к значениям содержаний некоторых химических элементов в их атмосферах, на порядки превышающие содержания в атмосфере Солнца. Магнитное поле стабилизирует атмосферу Ар-звезды и может напрямую влиять на диффузию химических элементов, в частности Fe и Cr. Разделение элементов приводит к созданию вертикальных градиентов химического состава, которые могут создавать наблюдаемые аномалии в содержании. Процесс диффузии очень медленный, в атмосферах нормальных звезд процессу разделения элементов в атмосфере препятствуют конвективные (в звездах с эффективными температурами менее 7000 К) и турбулентные движения (в более горячих атмосферах), а также меридиональная циркуляция при быстром вращении, типичном для звезд спектрального класса А и В.

Для редкоземельных элементов (РЗЭ), которые являются своеобразной 'визитной карточкой' Ар-звезд, теоретических расчетов диффузии нет, хотя наблюдения свидетельствуют о возможном наличии слоев с избытком этих элементов. Рябчикова и др. в работе 2004 г. показали, что в холодных пекулярных звездах с температурой меньше 8000 К содержание редкоземельных элементов Pr и Nd, определенное по линиям второй стадии ионизации, на 1--2 порядка выше, чем по линиям первой стадии ионизации. В звездах горячее 8000 К РЗЭ-аномалия уменьшается почти до нуля. Однако данных недостаточно для более полного представления о температурном поведении содержания редкоземельных элементов.

Аномальный химический состав вместе со стратификацией влияет на спектральное распределение энергии (Spectral energy distribution -- SED) через поглощение в линиях, что может отличать его от SED у нормальных звезд. Для Ар-звезд стандартные фотометрические и спектроскопические калибровки, разработанные для определения фундаментальных параметров нормальных звезд, часто неприменимы. В магнитных звездах наличие магнитных полей и значительных индивидуальных аномалий химического состава требует детального изучения звездной химии, чтобы построить адекватную модель атмосферы, которая может наиболее точно описать наблюдаемое распределение энергии.

Поэтому для анализа атмосфер Ар-звезд была предложена самосогласованная процедура одновременного моделирования спектра и распределения потока Шуляком Д.В. для Ар-звезды HD~24712 и затем использована еще для нескольких Ар-звезд. Успешность предложенного метода подтверждена прямыми измерениями радиусов пяти Ар-звезд (α Cir, β CrB, γ Equ, 10 Aql, HD 24712) с использованием интерферометрических наблюдений.

Существуют различные точки зрения на эволюционный статус магнитных пекулярных звезд. Согласно работе Hubrig et al. (2000), показано, что магнитные поля у звезд появляются после значительного времени жизни на ГП. Эффективные температуры звезд определялись по калибровкам Женевской и Стремгеновской фотометрических систем. Позднее, статистический анализ положения Ар-звезд на ГР-диаграмме был проведен Кочуховым и Баныюло (2006), которые показали, что есть тенденция к уменьшению магнитного поля с возрастом звезды. Эффективные температуры для большинства звезд выборки были

определены по калибровкам Женевской фотометрической системы. В обеих вышеуказанных работах при определении эффективной температуры индивидуальные аномалии, а также неоднородное распределение химических элементов по глубине атмосферы не учитывались. Спектроскопическое определение эффективной температуры и радиуса по наблюдаемому распределению энергии с учетом результатов детального анализа химического состава было сделано только для нескольких звезд (HD 137909, HD 201601, HD 137949, HD 24712, HD 101065, HD 103498, HD 128898) Д. Шуляком, Т. Рябчиковой и О. Кочуховым в работе 2013 г.

Точность определения фундаментальных параметров, полученных спектроскопическими методами, определяется путем их сравнения с прямыми определениями радиуса (температуры и светимости) звезды с помощью интерферометрических наблюдений. Для осуществления этой задачи была выбрана эталонная группа Ар-звезд, интерферометрические наблюдения которых собраны в статье Perraut et. al (2020). Одновременно с интерферометрическими наблюдениями в рамках программы сопровождения был проведен спектроскопический анализ звезд эталонной группы. В эталонную группу было включено 14 звезд, для пяти из которых спектроскопический анализ был уже проведен (см. выше). Поэтому одной из основных задач диссертации явилось проведение самосогласованного спектроскопического анализа оставшихся звезд эталонной группы, сравнение фундаментальных параметров звезд группы, полученных независимыми методами интерферометрии и спектроскопии, и оценка точности определения параметров по спектроскопии.

Научная новизна. Следующие результаты получены впервые:

1. Проведен детальный анализ атмосфер звезд HD~4778, HD~108662, HD~110066, HD~111133, HD~118022, HD~120198, HD~153882, HD~188041, HD~204411 и HD~220825 методом спектроскопии с использованием спектров высокого разрешения и отношения сигнала к шуму. Проведено исследование стратификации Fe, Cr и Ca для группы звезд, и ее влияние на спектральное распределение энергии.
2. Показано, что спектроскопический (косвенный) метод определения фундаментальных параметров (радиусов звезд) сравним по точности с прямыми методами измерений (интерферометрия). Это позволяет расширить границы определений точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны. Сравнение с фундаментальными параметрами, полученными по фотометрическим калибровкам, показало, что несмотря на более низкую точность фотометрического метода, его можно использовать для статистических исследований.
3. На примере звезд HD~118022 и HD~220825 впервые проведено исследование влияния поверхностной неоднородности химического состава на определение параметров атмосферы. Показано, что наблюдаемая переменность потока из-за неоднородного распределения химических элементов по поверхности звезды соответствует изменению эффективной температуры ~ 100 K, что является типичной ошибкой определения для Ар-звезд самосогласованным методом спектроскопии и ниже ошибки определения температуры по фотометрии. Это позволяет использовать одну эффективную температуру для моделирования атмосферы звезды. Для звезды HD~120198 обнаружено влияние содержания кремния на SED в ультрафиолетовой области спектра: заниженное содержания Si приводит к увеличению потока в области 1500\AA .

4. Исследование изменения стратификации элементов Fe, Cr и Ca с фазой вращения показало, что поверхностная неоднородность химического состава Ар-звезд может быть вызвана изменением профилей стратификации (изменение положения скачка содержания элементов по глубине). Это, вероятно, связано со структурой магнитного поля, поскольку изменение положения скачка коррелирует с изменением величины магнитного поля.
5. На расширенной выборке звезд подтверждено наличие аномалии редкоземельных элементов Pr и Nd, которое впервые было получено в работе (Ryabchikova et. al (2004)). Впервые получены подобные аномалии в содержании Ce и Eu. Температурное поведение Ce-аномалии (различие в содержаниях элемента, определенных отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации) указывает на резкое уменьшение этой аномалии с ростом температуры, однако падение сдвинуто в сторону более высоких температур по сравнению с Pr и Nd. Для Eu получено постепенное уменьшение наблюдаемой аномалии с ростом эффективной температуры. Полученные результаты свидетельствуют об одинаковом характере стратификации РЗЭ в атмосферах Ар-звезд.

Научная и практическая значимость. Результаты диссертационной работы показывают, что спектроскопические наблюдения, т.е. непрямой метод определения фундаментальных параметров - описывают параметры с точностью, сравнимой с интерферометрическими определениями. Это позволяет расширить границы определений точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны. Тем не менее, сравнение с фундаментальными параметрами, полученными по фотометрическим калибровкам, показало, что несмотря на более низкую точность фотометрического метода, его можно использовать для статистических исследований. Исследование влияния поверхностной неоднородности химического состава, типичной для Ар-звезд, на выходящий поток показало, что переменность потока соответствует изменению эффективной температуры ± 100 К, что является типичной ошибкой определения фундаментальных параметров для Ар звезд в самосогласованном методе спектроскопии. Этот результат позволяет использовать одну эффективную температуру для исследования Ар-звезд, несмотря на химическую неоднородность их поверхности.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов определения фундаментальных параметров Ар-звезд методом спектроскопии подтверждается сравнением с результатами определений методами интерферометрии и фотометрии. Полученные результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и семинарах, как специализированных, так и широкопрофильных. Ключевые результаты исследования опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают результаты, полученные соискателем. В работе 1 соискателем проведен подбор модели атмосферы из фотометрических индексов и анализ содержания редкоземельных элементов в атмосферах 26 магнитных звезд. В работах 2, 3, 4, 6 соискателем проведен анализ химического состава атмосфер исследуемых звезд и анализ стратификации элементов Fe, Cr и Ca, также в работе 5 дополнительно выполнен расчет болометрических потоков для эталонной выборки звезд, и предоставление данных для сравнения с

интерферометрическими параметрами. В работе 6 соискателем также выполнен анализ факторов, влияющих на спектральное распределение энергии.

Все положения, выносимые на защиту, должным образом аргументированы и изложены в 14 работах, 6 из которых опубликованы в журналах из списка журналов, рекомендованных ВАК.

По представленному докладу на семинаре ИНАСАН были заданы следующие вопросы:

Д. В. Бисикало. О сильной зависимости скачка содержания от магнитного поля. О попытках определения параметров магнитного поля через анализ стратификации элементов.

Н. Н. Чугай. О содержании химических элементов и обедненном кислороде на 2 порядка. О теории выталкивания и сегментации. Об уровне, до которого кислород может быть обеднен.

Т. М. Ситнова. О точности определения эффективной температуры звезды Пшибыльского.

А. В. Тутуков. Об общей массе атмосферы, которая обнаруживает химическую аномалию.

Докладчик ответил на все поставленные вопросы.

В выступлении Д. В. Бисикало оценил высокое качество работы. Замечаний к представленной работе не было.

Участники Астрофизического семинара ИНАСАН считают, что представленная диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, уровень которой полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация Романовской Анны Михайловны «Определение фундаментальных параметров магнитных пекулярных звезд» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании Астрофизического семинара Института астрономии РАН 14 октября 2021 г. Присутствовало на заседании 28 чел. Результаты голосования: «за» – 28 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 4 от 14 октября 2021 г.

Секретарь Астрофизического семинара ИНАСАН
к.ф.-м.н. В. В. Акимкин



Ученый секретарь ИНАСАН
к.ф.-м.н. А. М. Фатеева

