

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки «Крымская  
астрофизическая обсерватория РАН»  
А.Н.Ростоцина-Шаховская



2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию А.М. Романовской;  
"Определение фундаментальных параметров магнитных  
химически-пекулярных звезд методами спектроскопии"  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.02 - "Астрофизика и звездная астрономия"

Диссертационная работа Анны Михайловны Романовской "Определение фундаментальных параметров магнитных химически-пекулярных звезд методами спектроскопии" посвящена исследованию Ар-звезд, отличительной особенностью которых является наличие сильных магнитных полей и аномалий содержания химических элементов на их поверхности. Это звезды Главной Последовательности, спектральных классов от В5 до F5, в спектрах которых линии многих химических элементов тяжелее кремния соответствуют повышенному содержанию этих элементов (на 1-2 порядка выше, чем в атмосфере Солнца). Кроме того, большую разницу в содержании (также на 1-2 порядка) показывают спектральные линии, относящиеся к разным стадиям ионизации того или иного химического элемента. Предполагается, что такие аномалии химического состава возникают из-за того, что магнитные поля этих звезд подавляют перемешивание вещества атмосферы. При этом взаимные действия сил гравитации и лучевого давления приводят к относительному увеличению/уменьшению концентрации того или иного химического элемента в зависимости от глубины атмосферы. На процесс диффузии влияет также и магнитное поле звезды. Взаимодействие все этих сил, зависящих от многих атомных параметров, приводят к наблюдаемым "аномалиям". На настоящий момент нет полной ясности о деталях протекания физических процессов, приводящих к образованию этих аномалий. Кроме того, наличие таких аномалий сильно затрудняет определение фундаментальных параметров Ар-звезд, таких как светимость, радиус, эффективная температура и т.п. Таким образом актуальность представленного исследования не вызывает сомнений.

Диссертация А.М.Романовской состоит из Введения, трех глав, Заключения, Приложения и списка цитируемой литературы (150 наименований). Общий объем работы составляет 139 страниц, 42 рисунка и 15 таблиц. По теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 6 входит в перечень ВАК.

Во Введении диссертации обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи, приведено краткое содержание работы, отмечены новизна полученных результатов, личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 описываются методы определения фундаментальных параметров Ар-звезд с использованием спектроскопии. При этом используются модели атмосфер, рассчитанные с учетом стратификации ряда химических элементов; определяется магнитное поле звезды; проводится сравнение рассчитанного потока излучения звезды в

широком спектральном диапазоне с данными из различных литературных источников; уточняется содержание ряда химических элементов и изменение относительного содержания этих элементов по глубине фотосферы и т.д. Эти процессы проводятся итеративно, до согласования модельных расчетов с наблюдениями. В результате проведенных исследований, для десяти Ар-звезд были получены оценки фундаментальных параметров: эффективной температуры, светимости, радиуса и содержания большого числа химических элементов. Для железа, хрома и кальция была определена картина стратификации этих элементов по глубине фотосферы, согласно которой сильные скачки содержания наблюдаются у наиболее холодных звезд. Подтверждено, что с увеличением эффективной температуры скачок содержания уменьшается и смещается в верхние слои атмосферы.

В диссертации показано, что имеется хорошее согласие между фундаментальными параметрами, определенными с помощью спектроскопических методов для 13 Ар-звезд, с результатами исследования, где эти параметры базировались на радиусах звезд, измеренных интерференционным методом. В частности, радиусы, определенные этими двумя методами, в среднем отличаются всего на 5%, хотя индивидуальные различия могут достигать 19%. Таким образом, показано, что использование спектроскопических методов позволяет достаточно точно определять для Ар-звезд величины их радиусов без использования интерферометрии.

В Главе 2 продолжено исследование влияния стратификации химических элементов и неоднородностей поверхностного химического состава на определение параметров атмосфер Ар-звезд. Впервые показано, что наблюдаемая переменность потока из-за неоднородного распределения химических элементов по поверхности звезды соответствует изменению эффективной температуры на  $\pm 100$  градусов. Это значение сравнимо с типичной ошибкой определения этой величины спектроскопическими методами и значительно ниже ошибок фотометрических методов. На величину ускорения свободного падения на поверхности звезды указанные процессы практически не оказывают влияния. Таким образом, показано, что при исследовании подобных звезд достаточно использовать единую модель атмосферы для разных фаз вращения.

Для одной Ар-звезды проведено исследование стратификации железа, хрома и кальция в зависимости от фазы вращения. Показано, что наблюдаемая поверхностная неоднородность химического состава Ар-звезд может быть вызвана изменением профилей стратификации с фазой. Это может быть связано со структурой магнитного поля звезды.

В третьей главе приводится описание исследования химического состава 26 магнитных химически-пекулярных звезд. Для большинства исследуемых звезд были также определены параметры атмосфер и величина магнитного поля. Основной упор был сделан на определение содержаний четырех редкоземельных элементов (Ce, Pr, Nd, Eu) отдельно по линиям ионов в первой и второй стадий ионизации. Разница в содержании химического элемента ("аномалия") в зависимости от стадии ионизации может отличаться на несколько порядков. Для Ce и Eu подобные исследования проведены впервые. Для церия было показано, что происходит резкое (ступенчатое) уменьшение аномалии с ростом температуры. Данное уменьшение сдвинуто в сторону более высоких температур по сравнению с результатом для Pr и Nd. Для европия, напротив, получено постепенное уменьшение наблюдаемой аномалии с ростом эффективной температуры. Для Pr и Nd подтверждено наличие аномалий, на которые указывали более ранние работы. Делается вывод о том, что с ростом эффективной температуры нижняя граница слоя, обогащенного редкоземельными элементами, опускается в более глубокие слои атмосферы, обеспечивая общий рост содержания и уменьшая аномалии содержаний, получаемых отдельно по линиям первой и второй стадий ионизации.

В Заключении излагаются основные результаты диссертации. В Приложении содержатся вспомогательные таблицы к первой главе диссертации.

Диссертация, в целом, написана простым и грамотным языком, изложение материала демонстрирует хорошее понимание автором физики исследуемых процессов. Стоит отметить большую работу с литературой - автор ссылается на 150 источников. Актуальность, новизна и научная ценность работы не вызывает сомнений. Хочется отметить, что из шести статей, в которых опубликованы основные результаты диссертации, в четырех диссертант является первым автором.

Тем не менее, следует высказать ряд замечаний по диссертации, которые, однако, не носят принципиального характера.

Вызывает некоторое удивление порядок глав диссертации. В третьей главе используются более простые модели атмосфер и достаточно стандартные методы исследования химического состава Ар-звезд. В ней гораздо более расширенно, чем в предыдущих главах, описаны принципы теории диффузии химических элементов в атмосферах звезд с сильным магнитным полем. Было бы логично поставить ее на первое место.

Диссертант активно использует термины "интерферометрическая температура", "интерферометрическая светимость". На наш взгляд, такие термины могут вводить в заблуждение. С помощью интерферометров определяют только радиус звезды, при известном параллаксе. Можно догадаться, что под этими терминами понимаются величины, полученные с использованием интерферометрических радиусов. Подобную терминологию следует специально оговаривать. При этом надо отдавать себе отчет, что полученные таким образом оценки эффективной температуры и светимости будут сильно зависеть от величины и точности болометрической светимости звезды.

В преамбуле к Главе 1 говорится об исследовании в ней 9 Ар-звезд. Однако на странице 30 и далее появляется упоминание о еще одной звезде (HD204411), по которой отсутствует информация о спектрограммах, определении параметров атмосферы и т.п. В конце Главы 1 говорится об исследовании уже 10 Ар-звезд.

В ряде мест в диссертации встречаются неудачные выражения, возникшие из-за "механического" перевода текста статей диссертанта с английского языка на русский. Например, на стр. 47 фраза: "Результаты нашего анализа не сильно отличаются от стратификации Ca в HD188041 и HD111133 [44], и для стратификации исследуемых элементов, полученных в работе [45]" - это "машинный" перевод фразы "The results of our analysis do not differ much from the derived Ca stratification in HD 188041 and HD 111133 (Ryabchikova et al. 2008), and from Ca-Cr-Fe stratifications derived by Ryabchikova et al. (2005)."

Встречаются также ошибки оформления, такие как:

На стр.7 аббревиатура РЗЭ (редкоземельные элементы) - вводится дважды. С другой стороны, аббревиатура на английском языке (REE) используется неоднократно (напр. стр.38 и далее), хотя она и не определяется в тексте.

На стр. 32 вместо ссылки на Рис.1.3 указана ссылка на Рис.1.4.2.

И т.п.

Диссертант иногда использует некоторые "сленговые" выражения, например, на стр. 41: "Ионизованные элементы образуются глубже..." - вместо: "Концентрация ионизованных элементов возрастает с глубиной ...". И т.п.

Сделанные замечания не снижают благоприятного впечатления от представленной диссертации и сделанных в ней выводов. В целом, диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автореферат соответствует содержанию диссертации. В процессе исследования, промежуточные результаты работы неоднократно докладывались на отечественных и международных конференциях и всегда вызывали интерес у специалистов. Все основные результаты были опубликованы в журналах с высоким индексом цитирования. Можно отметить, что на данный момент число ссылок на

работы диссертанта приближается к 40. Результаты диссертации могут быть использованы во всех организациях, занимающихся исследованием химического состава звезд и их эволюции, в частности: САО РАН, ИНАСАН, КрАО РАН, ГАИШ МГУ, ГАО РАН и других астрономических институтах и обсерваториях.

Таким образом, диссертационная работа А.М.Романовской "Определение фундаментальных параметров магнитных химически-пекулярных звезд методами спектроскопии" отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия, а автор работы заслуживает присуждения ей искомой ученой степени.

Рецензент: ведущий научный  
сотрудник ФГБУН "КрАО РАН",  
доктор физ.-мат. наук,



Коротин С.А.

Отзыв обсужден и одобрен на объединенном научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» "16" декабря 2021 г., протокол № 1.

Руководитель объединенного научного семинара,  
доктор физ.-мат. наук,

Петров. П.П.

Подписи заверяю,  
Ученый секретарь  
ФГБУН "КрАО РАН",  
кандидат физ.-мат. наук,



Бакланов А.В.