

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Романовской Анны Михайловны  
«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

Определение температур, радиусов, светимостей и масс звезд - это фундаментальная проблема астрофизики. Построить физико-динамическую модель нашей Галактики можно только зная вышеуказанные параметры и эволюционный статус входящих в нее звезд. Прямыми методами в настоящее время можно определить расстояния и радиусы, а значит светимости и остальные фундаментальные параметры только для ближайших объектов. Несмотря на впечатляющие результаты, полученные в миссии Gaia, надежно расстояния можно определить только для объектов ближе 1 кпк.

Современные методы интерферометрии позволяют измерять видимые радиусы звезды на уровне 1 мс. Хотя нет особых оснований считать, что в разных частях Галактики фундаментальные параметры звезд будут разными, тем не менее это следует проверить экспериментально. Поэтому разработка косвенных спектроскопических и фотометрических методов решения этой задачи весьма актуальна.

Задача решается путем очень точного построения распределения энергии и нахождения болометрической светимости звезды. Это достигается при помощи высокоточных спектроскопических и фотометрических наблюдений в максимально возможном широком спектральном диапазоне, а потом при помощи различных калибровок определяются фундаментальные параметры.

Для звезд Главной последовательности с нормальным химическим составом задача успешно решается. Сравнение результатов спектроскопии и интерферометрии для близких объектов показывает надежность результатов косвенных определений. Однако имеются аномальные объекты.

Тема диссертации А. М. Романовской «Определение фундаментальных параметров химически-пекулярных звезд методами спектроскопии» актуальна, так как для этих объектов до сих пор не решены многие вопросы происхождения их магнитного поля и аномалий

химического состава, хотя они имеют в первом приближении, ту же массу и светимость что и нормальные звезды с солнечным химическим составом.

Аномальный химический состав влияет на спектральное распределение энергии через поглощение в линиях, что может отличать его от распределения в нормальных звездах. Поэтому для таких звезд стандартные фотометрические и спектроскопические калибровки, разработанные для определения фундаментальных параметров нормальных звезд часто неприменимы.

В диссертации была выбрана группа Ар-звезд с имеющимися интерферометрическим определениями радиусов. Выборка звезд в эталонную группу осуществлялась в соответствии с инструментальными ограничениями, которые требовали, чтобы звезды были яркими ( $V < 6^m$ ) и с относительно высокими угловыми диаметрами больше  $0.2 \text{ mas}$ .

Одна из основных задач диссертации являлось проведение самосогласованного спектроскопического анализа звезд эталонной группы, сравнение фундаментальных параметров звезд группы, полученных независимыми методами интерферометрии и спектроскопии, и оценка точности определения параметров по спектроскопии.

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Объем диссертации 139 страниц, 42 рисунка и 15 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований, по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них 6 входит в перечень ВАК.

Во **Введении** описана актуальность работы, представлены задачи и новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость.

В **Главе 1** изложен метод определения фундаментальных параметров CP-звезд по спектроскопии. Представлены фундаментальные параметры 9 звезд. Моделирование осуществлялось с учетом аномального химического состава и стратификации элементов. Фундаментальные параметры получены из сравнения теоретического спектрального распределения энергии к наблюдаемому. Получены содержания для 36 элементов. В основном наблюдается типичная картина: в атмосферах Ар-звезд наблюдается дефицит легких элементов CNO по сравнению с солнечными значениями, завышенное содержание элементов железной группы и значительный избыток редкоземельных элементов на 3-4 порядка.

При анализе стратификации использовалась ступенчатая модель распределения энергии по глубине атмосферы. Анализ стратификации железа и хрома удалось провести для

7 звезд. Оказалось, что спектральные радиусы примерно на 5% меньше интерферометрических.

Оппоненту представляется, что Главу 1 было бы целесообразно разделить на две части. Она большая (55 стр), по сравнению с Главами 2 и 3, которые занимают 14 и 20 стр. соответственно.

В Главе 2 рассмотрены факторы, влияющие на спектральное распределение энергии. Изложен анализ влияния фазовой переменности, вызванной химической неоднородностью поверхности. Было найдено, что вариаций температуры в пределах  $\pm 100$  К достаточно для описания наблюдений во всех фазах вращения. Было исследовано влияние изменения содержания с высотой на спектральное распределение энергии. Можно сделать вывод, что для Ар-звезд достаточно использовать единую модель атмосферы для всей поверхности звезды.

Результат получился ожидаемый. Вряд ли можно было предполагать, что такой тонкий эффект, как стратификации химических элементов по высоте в атмосфере пекулярной звезды способна привести к изменению в Главе 3 распределения энергии в континууме. Но в диссертации с высокой тщательностью проанализированы все возможные искажающие факторы и теперь вместо общих соображений получаем точный и надежный результат: фазовую переменность и стратификацию элементов для получения спектрального распределения энергии учитывать нет необходимости.

В Главе 3. приводится исследование зависимости редкоземельных элементов от их эффективной температуры для 26 магнитных химически пекулярных звезд. Проведен анализ содержания редкоземельных элементов с учетом магнитного усиления линий. Показано, что с ростом температуры, как РЗЭ-аномалии, так и сами содержания резко уменьшаются, приближаясь к ионизационному равновесию при  $T_{\text{eff}} = 8500-9500$  К. Впервые получено различие в содержаниях элементов Ce и Eu, определенных отдельно по линиям первой и второй стадии ионизации.

В **Заключении** сформулированы основные выводы диссертации.

Работа основана на спектральном материале очень высокого качества, полученном на спектрополяриметре ESPADONS CFHT с разрешением  $R=68000$ . Обработка и анализ данных проводился с использованием разработанных и внедренных в ИНАСАН методик. Результаты опубликованы в ведущих мировых журналах. Поэтому выводы работы надежные.

Следующие результаты получены **впервые**. Проведен детальный анализ атмосфер 10 звезд методом спектроскопии. Проведено исследование стратификации Fe, Cr и Ca для группы звезд и ее влияние на спектральное распределение энергии. Показано, что спектроскопический метод определения фундаментальных параметров сравним по точности с прямыми методами измерений, основанными на интерферометрии. На примере двух звезд впервые исследовано влияние поверхностной неоднородности на определение параметров атмосферы. Показано, что переменность потока соответствует изменению температуры на  $\pm 100$  К. Это позволяет использовать одну эффективную температуру для моделирования атмосферы звезды. Исследование изменения стратификации элементов с фазой вращения показало, что поверхностная неоднородность может быть связана со структурой магнитного поля. Впервые получено различие в содержаниях церия и европия, определенных отдельно по линиям первой и второй стадии ионизации. Полученные результаты свидетельствуют об одинаковом характере стратификации РЗЭ в атмосферах Ар-звезд.

Результаты диссертационной работы показывают, что спектроскопические наблюдения описывают параметры с точностью, сравнимой с интерферометрическими определениями. Это позволяет расширить границы определения точных параметров для слабых по яркости объектов, для которых интерферометрические наблюдения пока невозможны. Реально это означает увеличение размеров области в которой могут быть измерены фундаментальные параметры Ар-звезд не менее, чем на порядок.

Работа выполнена на очень высоком научном и методическом уровне. Новизна работы и ее практическая ценность несомненны, положения выносимые на защиту надежны и убедительные.

Хотелось бы обратить внимание автора на ряд замечаний.

В Актуальности первое предложение. Написано: с помощью миссий HIPPARCOS и Gaia удалось с достаточной точностью измерить расстояния и собственные движения около двух миллиардов звезд, что позволяет построить динамическую модель Вселенной. Надо полагать, что речь идет только о нашей Галактики.

В диссертации не хватает пары абзацев, демонстрирующих на примере звезд с нормальным химическим составом, как согласуются данные интерферометрии и спектроскопии/фотометрии для них. Имеются ли какие-нибудь систематические отклонения? Какие точности?

Никак не характеризуется эталонная выборка звезд, имеется только ссылка [33]. Но оказывается А. М. Романовская является соавтором данной работы. Можно было бы охарактеризовать подробнее на основании чего отобраны эти эталонные звезды. Тогда не возникли бы другие вопросы. Например, почему анализируются только Ар-звезды? Вр-звезды имеют радиусы по крайней мере в 2 раза больше (в зависимости от эффективной температуры) и надо полагать интерферометрию можно выполнить точнее для близких объектов и продвинуться в область более далеких звезд. А для спектроскопии объектов ярче 10 звездной величины вообще нет проблем.

Глава I очень большая. Она занимает половину диссертации. Можно было разделить ее на две. Например: Определение химического состава и стратификации, и вторая часть – определение фундаментальных параметров.

В диссертации очень детально проанализирован химический состав 10 Ар-звезд. В прошлые года подобный анализ даже одной звезды был бы предметом диссертации. В рецензируемой работе детально анализируется каждая из них. Приводится большое количество абсолютно нужных рисунков с еле заметными тонкими различиями в спектрах. Видимо, кроме автора диссертации, различия в них никому не увидеть. И тут возникает не замечание, а проблема: как эту всю громадную работу отразить более компактно и наглядно. Рецензент не знает. Но все, что нарисовано указывает на фундаментальный подход автора к изложению результатов.

В диссертации, хотя довольно редко, но имеются опечатки. Последняя из них довольно курьезная: в Благодарностях дама превращена джентльмена.

Но эти замечания не относятся к научной сути диссертации, а лишь к ее оформлению. Они имеют только рекомендательный характер для будущей работы диссертанта.

Выполнена большая фундаментальная работа на высоком мировом уровне. Результаты опубликованы в ведущих мировых журналах. Личный вклад автора имеет определяющий характер: проведен подбор моделей атмосфер, проведен анализ химического состава и стратификации элементов. Выполнен анализ содержания редкоземельных элементов в атмосферах 26 магнитных звезд. Выполнен расчет болометрических потоков для эталонной выборки звезд.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Положения, выносимые на защиту достоверны и обоснованы. Работа имеет большую практическую ценность и ее результаты могут быть использованы в России и других странах в астрономических учреждениях, в которых изучается физика звезд (САО РАН, ГАИШ МГУ, ГАО РАН, КраО РАН и кафедрах астрономии университетов Санкт-Петербурга, Казани, Ростова-на-Дону).

Считаю, что диссертация «Определение фундаментальных параметров магнитных химически-пекулярных звезд методами спектроскопии», представленная на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия полностью соответствует требованиям ВАК, а ее автор Романовская Анна Михайловна безусловно заслуживает получения искомой степени.

Доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией исследований звездного магнетизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН)

Иосиф Иванович Романюк

19 января 2022 г.

Почтовый адрес:

Специальная астрофизическая обсерватория,  
Нижний Архыз, Зеленчукский район,  
Карачаево-Черкесская республика, Россия  
369167

Телефон: +7 87822 93359

Эл. адрес: roman@sao.ru

Подпись И. И. Романюка заверяю,  
ученый секретарь САО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук.



Елена Ивановна Кайсина