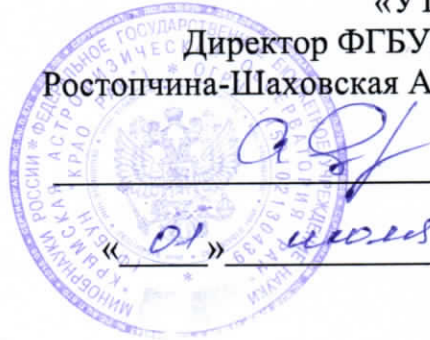


«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН «КрАО РАН»  
Ростопчина-Шаховская Алла Николаевна



« 01 » \_\_\_\_\_ 2024 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Крымская астрофизическая обсерватория РАН»  
о диссертации Г.А. Галазутдинова

Диссертация «Спектроскопические исследования Галактической межзвездной среды в оптическом диапазоне» выполнена в отделе физики звезд Крымской астрофизической Обсерватории РАН (КрАО РАН).

С период подготовки диссертации Галазутдинов Газинур Анварович работал в КрАО РАН в должности ведущего научного сотрудника.

В 1990 году Галазутдинов Г.А. окончил Казанский государственный университет по специальности «астрономия» с присуждением квалификации астронома. С 1990 по 1993 обучался в аспирантуре САО РАН. Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему «Спектроскопическое исследование пульсирующих звезд типа W Vir» защитил 27 октября 1995 года в диссертационном совете Специальной астрофизической обсерватории РАН (шифр Д 003.35.01.).

Диплом о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук выдан 9 февраля 1996 года (КТ 015607).

По результатам рассмотрения диссертации «Спектроскопические исследования Галактической межзвездной среды в оптическом диапазоне» принято следующее заключение:

Основные цели диссертационного исследования Галазутдинова Г.А. состояли в определении физических параметров полупрозрачных, диффузных облаков Галактики; анализе спектральных и кинематических свойств значимой выборки Галактических межзвездных облаков; обнаружении ранее неизвестных компонент межзвездной среды, в т.ч. молекул и новых диффузных межзвездных полос (ДМП) – проблема отождествления носителей ДМП является старейшей проблемой астрофизики, ждущей своего решения с 1922 года; оценке уровня корреляции (связи) ДМП с другими компонентами межзвездной среды; определении физических условий в межзвездной среде,

влияющих на образование/разрушение носителей ДМП; получении астрономических спектров исключительно высокого качества для определения точных профилей ДМП и сравнения профилей ДМП с лабораторными спектрами молекул в газовой фазе. Цели, связанные с изучением ДМП, направлены на определение возможных кандидатов в носители ДМП.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе были успешно решены следующие задачи:

- Создан комплекс программ и разработана методика наблюдений, используя которые были получены спектры более 500 горячих звезд с межзвездным покраснением, в т.ч. уникальные, с отношением сигнал/шум (S/N) до ~3500 и спектральным разрешением  $R=\lambda/\Delta\lambda$  до 300000.
- Создан список объектов, приоритетных для изучения межзвездной среды ввиду отсутствия видимого доплеровского расщепления в профилях межзвездных линий.
- Разработана методика и получены точные профили ряда ДМП сверхвысокого качества ( $R \sim 120000 - 300000$  и  $S/N \sim 1000-3500$  на основе которых сделаны модельные расчеты с целью определения параметров неизвестных носителей ДМП, предложены возможные кандидаты.
- Создан метод оценки расстояний в Галактическом диске по межзвездным линиям ионизованного кальция и ионизованного титана.
- Построена кривая вращения Галактики по межзвездным облакам и показан ее кеплеровский характер.
- Обнаружены: «серая» экстинкция, абсорбционные линии метастабильного гелия, уникальные облака типа CaFe.
- Предложено решение проблемы расстояния до Плеяд, изучена структура скопления.
- Обнаружены «новые» межзвездные молекулы, определены верхние пределы содержания для молекул, обнаружить которые не удалось.
- Обнаружены «новые» линии и полосы известных межзвездных молекул.
- Сделана оценка концентрации электронов, лучевой концентрации ряда атомов и молекул в различных облаках Галактики, в т.ч. в облаках типа CaFe.
- Обнаружена переменность интенсивности и положения ряда межзвездных линий, в т.ч. ДМП. Исследованы причины переменности и создана методика ее изучения и учета.
- Изучена и выполнена численная оценка корреляции между ДМП, атомами, молекулами, пылью, а также изучена зависимость ряда ДМП от ротационной температуры некоторых простых молекул.
- Создан метод определения длин волн покоя ДМП и предложен новый метод коррекции шкалы длин волн в «межзвездную» шкалу.

### **Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Более 70% наблюдательного материала было получено с участием соискателя в течение 1996-2018 годов. Более 90% спектральных изображений были обработаны лично соискателем с помощью программных средств собственной разработки. Все результаты, приведенные в пяти главах диссертации, опубликованы в 94 статьях в рецензируемых журналах, в том числе 39 с первым авторством. Вклад соискателя во всех публикациях был не меньшим, чем других соавторов.

### **Степень достоверности результатов проведенных соискателем исследований.**

Достоверность результатов не вызывает сомнения и подтверждена публикациями в ведущих российских и зарубежных журналах. Достоверность обеспечивается высоким качеством наблюдательных данных, полученных на 14 спектрографах высокого разрешения в различных обсерваториях РФ и за рубежом: CAO РАН и Терскол (РФ), BOAO (Южная Корея), McDonald, CFHT (США), La Silla, Paranal, Las Campanas (Чили), Roque de los Muchachos (Испания). Многие результаты основаны на использовании спектров, полученных на разных инструментах в различные даты, что позволяет контролировать возможное влияние инструментальных эффектов. Для оценки достоверности результатов использовалось сравнение результатов анализа разных спектров одного объекта, в т.ч. с использованием разных систем обработки и анализа данных. Дополнительно достоверность контролировалась путем сравнения полученных результатов с результатами других авторов.

### **Новизна проведенных соискателем исследований.**

Научная новизна исследований, представленных соискателем определяется следующим:

- Получен уникальный спектральный материал для более 500 горячих покрасневших звезд, в т.ч. с очень высоким соотношением сигнал/шум ( $>1000$ ) в сочетании с высоким спектральным разрешением ( $R$  от 30000 до 300000) в широком диапазоне длин волн. Впервые создан наиболее полный список объектов, рекомендованных для изучения межзвёздных линий в оптическом диапазоне спектра.
- Впервые предложен методы определения расстояний в Галактическом диске по линиям межзвездных линий ионизованного кальция и титана. Межзвездная шкала позволяет оценивать расстояние до пекулярных объектов с неточными параллаксами и/или неопределенным спектральным классом.
- Впервые построена кривая вращения межзвездных облаков в Галактике.
- Впервые обнаружен ряд объектов с т.н. «серым» поглощением, обусловленным наличием на луче зрения пылинок большого размера (сотни микрон).

- Выявлена вытянутая структура рассеянного скопления Плеяды.
- Впервые обнаружены облака типа CaFe, свободные от межзвездной пыли и эффекта обеднения металлов (depletion).
- Впервые обнаружены запрещенные линии поглощения межзвездного гелия.
- Впервые обнаружены линии ряда межзвездных молекул в оптическом диапазоне спектра (SH, OH<sup>+</sup>, NH) и новые, неизвестные ранее линии и полосы известных молекул (C<sub>3</sub>, NH, CH, CH<sup>+</sup>), уточнены или определены силы осцилляторов ряда известных молекул и вычислена лучевая концентрация. Для ряда молекул доказано низкое содержание (ниже предела обнаружения) в межзвёздной среде.
- Впервые обнаружена переменность интенсивности и положения ряда межзвездных линий, в т.ч. ДМП.
- Впервые обнаружено более 100 новых ДМП в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах.
- Впервые получены детальные профили ряда т.н. широких ДМП (FWHM – ширина на половине интенсивности > 10 Å).
- Получены самые детальные и точные до настоящего времени профили ряда диффузных полос, на основе которых выполнены модельные расчеты. Предложены возможные кандидаты в носители ДМП.
- Обнаружена связь между шириной профиля ряда ДМП и вращательной температурой ряда простых межзвездных молекул.
- Измерены точные длины волн диффузных межзвездных полос, предложен метод объективной оценки длин волн ДМП и метод измерения изменения сложных профилей ДМП.

#### **Практическая значимость и ценность научных работ соискателя.**

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для дальнейших исследований, связанных с феноменом диффузных межзвездных полос, а также для исследования физических процессов в Галактической межзвездной среде. Значимость результатов, полученных соискателем подтверждается высокой цитируемостью его публикаций: по состоянию на июнь 2024 имеется 1971 цитирований на 94 рецензируемых публикаций соискателя по теме диссертации. Наиболее востребованы обзоры диффузных полос, исследования тонкой структуры профилей ДМП, результаты сравнения астрономических данных с лабораторными спектрами, метод оценки расстояний в Галактическом диске по межзвездным линиям и исследования взаимосвязи различных компонент межзвездной среды.

#### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени.**

Результаты, представленные в диссертации, полностью изложены в 94 научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах, которые

индексированы в базах данных “Web of Science”, “Scopus”: 30 работ в Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 21 работа в “Astronomy and Astrophysics”, 12 работ в “Astrophysical Journal”, 5 работ в “Astrophysical Journal Letters”, 10 работ в “Acta Astronomica”, 6 работ в “Publications of the Astronomical Society of the Pacific”, 3 работы в “Astronomische Nachrichten”, 3 работы в журнале «Астрофизический бюллетень», 2 работы в “Astronomical Journal”, 1 работа в журнале “Письма в Астрономический Журнал”, 1 работа в “Journal of Korean Astronomical Society”. В 39 публикациях соискатель является первым автором. Основные результаты диссертации представлялись на астрофизических семинарах КРАО РАН, САО РАН, ГАО РАН, Центра астрономии университета Н. Коперника в г. Торунь (Польша), Института астрономии и космических исследований Кореи в г. Тэджон, Сеульского национального университета (Корея), Католического университета Севера в г. Антофагаста (Чили) и на различных конференциях и симпозиумах, в т.ч. 20 зарубежных.

### **Ценность научных работ соискателя ученой степени.**

Ценность научных работ соискателя заключается в следующем:

- Получены спектры уникального качества для более 500 горячих покрасневших звезд. Созданы списки объектов, рекомендованных для изучения межзвездной среды.
- Показана относительная равномерность распределения межзвездного ионизованного кальция и титана и определена связь между интенсивностью линий этих элементов и расстоянием до фоновой звезды в Галактическом диске. Межзвездная «линейка» является простым дополнительным инструментом для определения расстояний в Галактическом диске.
- Измерена лучевая скорость межзвездных облаков для более 250 объектов и показан кеплеровский характер кривой вращения Галактики, определяемой по межзвездным облакам.
- Обнаружен ряд объектов с т.н. “серым» поглощением, обусловленным наличием на луче зрения пылинок большого размера (сотни микрон). Видимый блеск таких объектов не соответствует их спектральному классу, что приводит к ошибочной оценке спектрального параллакса.
- Выявлена вытянутая структура рассеянного скопления Плеяды. Скопление состоит из двух частей с разным содержанием и кинематикой межзвездного вещества. Вероятно, Плеяды являются результатом слияния двух разных скоплений.
- Обнаружены необычные, очень редкие межзвездные облака типа CaFe, с солнечным содержанием кальция и железа, без молекул и межзвездной пыли.
- Обнаружены запрещенные линии поглощения межзвездного гелия, наблюдаемые только в спектрах очень горячих звезд с мощным УФ излучением. Показано, что эти линии образуются вне диффузных,

полупрозрачных облаков, вероятно на фронте ударной волны, расширяющейся H II оболочки.

- Обнаружены линии межзвездных молекул SH, OH<sup>+</sup>, NH и «новые», неизвестные ранее линии и полосы известных молекул C<sub>3</sub>, NH, OH, CH, CH<sup>+</sup> и т.д., уточнена или определена сила осцилляторов для многих линий. Оценено содержание ряда молекул в межзвездной среде и соотношение их обилия. В частности,  $N(\text{OH}/\text{H}_2) = 1.05 \pm 0.14 \times 10^{-7}$ .
- Обнаружено более 100 новых ДМП в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. Измерена их длина волн и интенсивность в различных объектах.
- Получены детальные профили широких ДМП 4430, 4882, 5450, 5779 и 6175 Å. Показано, что эти ДМП показывают хорошую корреляцию как с молекулой CH, так и с межзвездным калием.
- Получены самые детальные и точные до настоящего времени профили ряда диффузных полос, например, 6614, 6196 и мн. др. Определены возможные параметры носителей некоторых ДМП. Предложены возможные кандидаты в носители ДМП, например, ароматический углеводород кораннулен C<sub>20</sub>H<sub>10</sub>.
- Профили ДМП сравнены с лабораторными спектрами молекул в газовой фазе и оценен верхний предел содержания ряда молекул типа линейных углеводородов и ароматических углеводородов, например, нафталина, пирена, диацетилен и др.
- Обнаружена связь между шириной профиля ряда ДМП и вращательной температурой ряда простых межзвездных молекул, таких как C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>.
- Изучена взаимная корреляция различных компонент межзвездной среды. Некоторые примеры: указано, что содержания молекул H<sub>2</sub> и CH тесно связаны, что позволяет использовать молекулу CH в качестве индикатора H<sub>2</sub> – это важный вывод, поскольку линия CH 4300 Å легко доступна для измерений; показано, что молекулярная фракция водорода  $f(\text{H}_2)$  коррелирует с соотношением интенсивностей ДМП 5797 и 5780 Å, т.е. образование носителей узких ДМП происходит в более плотных областях межзвездных облаков, защищенных от УФ-излучения, где преобладает молекулярная фракция водорода.
- Изучена переменность положения и интенсивности некоторых межзвездных линий. Указано на инструментальное происхождение некоторых случаев смещения длин волн межзвездных линий. Измерены точные длины волн диффузных межзвездных полос, предложен метод объективной оценки длин волн ДМП и метод численной оценки изменений сложных профилей ДМП.

Текст диссертации соответствует установленным правилам научного цитирования, библиографические ссылки оформлены корректно.

Диссертационное исследование по своему содержанию соответствует заявленной специальности 1.3.1. – «Физика космоса, астрономия».



Основные идеи и положения работы изложены в 94 научных работах автора общим объемом 871 п.л. Все эти работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science/Scopus/RSCI.

Астрофизический семинар КрАО РАН пришел к заключению, что по своей актуальности, новизне и практической значимости диссертационная работа Галазутдинова Г.А. полностью удовлетворяет всем требованиям о присуждении ученых степеней и является завершённой научно-квалификационной работой. Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Спектроскопические исследования Галактической межзвездной среды в оптическом диапазоне» Галазутдинова Газинура Анваровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия» (физико-математические науки).

Заключение принято на астрофизическом семинаре Крымской астрофизической обсерватории РАН. На заседании присутствовало 27 чел. Результаты голосования: «за» - 27 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел. Протокол № 1 от «18» июня 2024 г.

Руководитель  
астрофизического семинара



Петр Петрович Петров,  
доктор физ.мат. наук, г.н.с.,  
отдела физики звезд

Секретарь астрофизического  
семинара



Бутузова Марина Сергеевна,  
кандидат физ.мат. наук, с.н.с.  
отдела радиоастрономии и  
геодинамики

Зам директора по научной  
Работе КрАО РАН



Кирилл Анатольевич Антонюк,  
кандидат физ.мат. наук