



УТВЕРЖДАЮ:

М. Е. Сачков

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
астрономии Российской академии наук

проф. РАН, д.ф.-м.н. Сачков М. Е.

«05» декабря 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, в которой выполнена диссертация

Выписка из протокола Астрофизического семинара Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) от 05 декабря 2024 г. Присутствовали 35 научных сотрудников, в том числе:

к.ф.-м.н. А.А. Акимкин, д.ф.-м.н. М.В. Барков, д.ф.-м.н. Д.В. Бисикало, д.ф.-м.н. Д.З. Вибе, д.ф.-м.н. О.Б. Длужневская, д.ф.-м.н. А.Г. Жилкин, к.ф.-м.н. П.В. Кайгородов, к.ф.-м.н. Д.А. Ковалева, к.ф.-м.н. О.В. Кочина, д.ф.-м.н. Л.И. Машонкина, к.ф.-м.н. М.С. Мурга, к.т.н. М.А. Наливкин, к.ф.-м.н. А.М. Романовская, к.ф.-м.н. А.П. Топчиева, к.ф.-м.н. Д.А. Чулков, к.ф.-м.н. Л.А. Максимова, к.ф.-м.н. Ю.В. Пахомов, А.А. Фарафонтова, д.ф.-м.н. Я.Н. Павлючёнков, д.ф.-м.н. Т. А. Рябчикова, д.ф.-м.н. Н. Н. Самусь, д.ф.-м.н. А. В. Тутуков, к.ф.-м.н. Н. В. Чупина, д.ф.-м.н. Н.Н. Чугай, Г.Н. Цуриков, д.ф.-м.н. Ю.А. Фадеев, д.ф.-м.н. В.И. Шематович, д.ф.-м.н. Б. М. Шустов.

Слушали: доклад М.С. Кирсановой о диссертации «Многоволновые исследования структуры и кинематики областей образования массивных звезд», представляемой на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Кирсанова Мария Сергеевна, род. 11.11.1981, в 2005 г. окончила Уральский государственный университет имени А. М. Горького со степенью магистра физики по направлению «Физика». В 2009 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия на тему «Химия и динамика газа вблизи молодых массивных звезд». Работает в ИНАСАН в отделе физики и эволюции звезд с 2005 г., в настоящее время – в должности старшего научного сотрудника. Научным консультантом является д.ф.-м.н., проф. РАН Вибе Дмитрий Зигфридович, заведующий отделом физики и эволюции звезд Института астрономии РАН.

По итогам обсуждения диссертации «Многоволновые исследования структуры и кинематики областей образования массивных звезд» принято следующее заключение:

Актуальность. В XX веке астрономия вышла из узкого оптического участка спектра и в настоящее время оперирует в полном диапазоне электромагнитных волн — от радио- и миллиметрового диапазона до рентгена и гамма-диапазонов. Участки спектра, недоступные для наблюдений с поверхности Земли, успешно исследуются внеатмосферными и космическими телескопами. Одновременно происходит постоянный рост наблюдательных мощностей и наземных инструментов. Возможность работать с наблюдательными данными в широком диапазоне длин волн привели к осознанию связанности звездного населения галактики и межзвездной среды (МЗС), круговорота химических элементов в циклах звездной эволюции, синтеза и переноса межзвездных молекул, взаимозависимости микро- и макропроцессов в космосе.

Объектами исследования в представленной диссертации являются области образования массивных звезд. Массивные звезды придают форму звездным и газовым структурам в галактиках посредством радиационного и механического воздействия на окружающую межзвездную среду и являются маяками звездообразования. Это воздействие легко обнаруживается прежде всего по оптическому излучению областей ионизованного водорода (НП) в линии $H\alpha$.

Теория показывает, что ударные волны, связанные с расширением областей НП, сжимают нейтральный межзвездный газ и пыль и собирают их в плотные молекулярные оболочки, распространяющиеся по МЗС. При этом, если компактные и протяженные области НП наблюдаются в оптическом диапазоне, то гипер- и ультракомпактные – только в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах (в континууме или рекомбинационных радиолниях). Из-за малого углового размера сведения о строении и свойствах этих областей получают сегодня из интерферометрических наблюдений на таких инструментах как ALMA, NOEMA, но сведения эти фрагментарны и требуют проверки на большой выборке объектов.

Сложный характер как структуры, так и кинематики областей образования массивных звезд: наличие горячего ионизированного и холодного нейтрального газа, областей фотодиссоциации (ФДО), присутствие ударных волн, движущихся впереди фронта ионизации в окружающем газо-пылевом веществе – требует для их полноценного изучения наблюдений (включая спектральные) в широком диапазоне волн, от ультрафиолета (УФ) до радио. Особый интерес представляют ФДО – переходные регионы, где можно проследить передачу энергии и импульса от ионизованных областей к молекулярному газу.

Актуальным является и вопрос о структуре инфракрасных кольцевых туманностей, наблюдавшихся на телескопах Spitzer, WISE и Herschel, которые в литературе часто связываются с трехмерными сферическими оболочками, хотя эти объекты, выглядящие как кольца в плоскости неба, реально могут иметь другую геометрию. Это важный вопрос, поскольку он может пролить свет на детальную структуру распределения нейтрального вещества в областях звездообразования, на взаимодействие массивных звезд с родительскими молекулярными облаками, на эволюцию пыли в окрестностях массивных звезд, а также на возможность и масштабы индуцированного звездообразования. Однако вопрос о геометрии ИК-кольцевых туманностей еще далек от решения.

Актуальность темы диссертации связана с тем, что несмотря на все приложенные усилия неясно, обладают ли ИК-кольцевые туманности общими характеристиками структуры и кинематики. До сих пор не закрыт вопрос о

роли расширяющихся областей НП в процессе образования звезд в их окрестностях. Не найдено примеров сферических областей НП, со всех сторон погруженных в молекулярные оболочки, чьи характеристики соответствовали бы классическим теоретическим моделям. Благодаря непрерывно растущему потоку астрономических данных в широком диапазоне длин волн становится возможным детально исследовать окрестности молодых массивных звезд и ответить на поставленные выше вопросы.

Научная новизна. Новыми являются как проведенные наблюдения, так и теоретическое моделирование расширяющихся областей НП. Численная модель MARION не имеет мировых аналогов, так как включает в себя и химико-динамическую эволюцию газа. В модели MARION было впервые объяснено слияние фронтов диссоциации молекул H_2 и CO по наблюдениям интерферометра ALMA. Впервые показано, что в нестационарной ФДО может образовываться беспылевая область, где экранирование молекул CO от фотодиссоциации происходит только за счет перекрытия линий поглощения с молекулярным водородом.

Моделирование при помощи MARION впервые позволило оценить теоретические параметры слоя, сжатого ударной волной от расширяющейся области НП RCW120. Затем этот слой был обнаружен в наблюдениях линий излучения молекул CO(6–5).

Разработана методика восстановления трехмерной структуры областей НП и их нейтральных оболочек. Впервые получены распределения поглощающего вещества и электронной плотности по всей видимой поверхности областей НП S235, S255 и S257, определены расстояния между фронтами ионизации и диссоциации в S255 и S257. Впервые оценены скорости расширения протяженных областей НП S235, S255, а также компактной S235A.

Впервые определена трехмерная структура областей НП, и показано, что области S235 и S257 являются структурами типа блистера, а S255 окружена плотной нейтральной оболочкой. Впервые показано, что для объяснения

высокой оптической толщины линий излучения [СП], а также для объяснения взаимного расположения фронтов ионизации и диссоциации нейтральный газ вокруг областей НП должен иметь клочковатую структуру, состоящую из плотных сгустков, погруженных в более разреженный газ.

Впервые показано, что в ФДО с умеренным УФ-полем содержания молекул наследуются с предыдущей стадии плотного и холодного молекулярного облака.

Научная и практическая значимость. Научная и практическая значимость диссертации заключается в комплексном использовании различных методов наблюдений объектов межзвездной среды: областей НП, ФДО и молекулярных облаков. Физические параметры этих областей отличаются на порядки величины: температура понижается от 10^4 К в ионизованной до 10–20 К в молекулярной, а плотность, напротив, растет от $1\text{--}10\text{ см}^{-3}$ до $10^5\text{--}10^6\text{ см}^{-3}$, соответственно. Использование многоволновой астрономической информации позволяет комплексно исследовать эти области.

Предложенный способ исследования структуры областей НП и их нейтральных оболочек, основанный на наблюдениях линий излучения ионизованного газа в широкополосных фильтрах и дополнении этих наблюдений архивными данными в дальнем ИК-диапазоне открывает возможность проведения комплексного исследования областей НП и других туманностей северного неба с помощью российских телескопов. Благодаря ИК-наблюдениям на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ можно изучать не только ионизованные области, но и окружающие ФДО.

Широкоугольные изображения туманностей, полученные на телескопах Цейсс-1000 САО РАН и 2.5-м КГО ГАИШ МГУ, выложены в открытый доступ. Они могут и далее использоваться для исследования свойств межзвездной среды в Галактике.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается применением проверенных методов и подходов и обоснованным выбором объектов исследования, данных наблюдений и методов обработки, прошедших апробацию, а также согласованностью с опубликованными результатами других авторов и обсуждением полученных результатов на российских и международных конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад соискателя. Подготовка заявок на выделение наблюдательного времени и проведение наблюдений молекулярных облаков в линиях молекул на 20-м миллиметровом телескопе в Онсале и 30-м миллиметровом телескопе IRAM. Обработка и анализ данных. Подготовка заявок на выделение наблюдательного времени и анализ данных наблюдений на субмиллиметровом телескопе APEX и стратосферной обсерватории SOFIA. Подготовка заявок на выделение наблюдательного времени и анализ данных наблюдений на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Анализ данных наблюдений на телескопах Цейсс-1000, БТА САО РАН, а также на радиотелескопе RT-22 ПРАО ФИАН. Разработка химико-динамической части кода MARION. Тестирование кода для стандартных задач физики ФДО. Моделирование областей НП S235A, S235C, RCW120, S255 и ФДО Барьер Ориона, анализ результатов моделирования.

Все положения, выносимые на защиту, должным образом аргументированы и изложены в 26 работах, 22 из которых опубликованы в журналах из списка журналов, рекомендованных ВАК.

По представленному докладу на семинаре ИНАСАН были заданы следующие вопросы:

М. В. Барков. О моделировании диаграмм «позиция-скорость» в ФДО RCW120.

Д. В. Бисикало. Об ошибках физических параметров областей НП.

Б. М. Шустов. О необходимости моделирования Барьера Ориона нестационарной моделью ФДО.

Докладчик ответил на все поставленные вопросы.

В выступлении Д. З. Вибе оценил высокое качество работы и организационные способности докладчика.

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 доктора физико-математических наук.

Диссертация Кирсановой Марии Сергеевны «Многоволновые исследования структуры и кинематики областей образования массивных звезд» рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Секретарь Астрофизического семинара ИНАСАН

к.ф.-м.н. В. В. Акимкин



Ученый секретарь ИНАСАН

к.ф.-м.н. М. С. Мурга

