

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор

федерального государственного
автономного образовательного учреждения

высшего образования

«Южный федеральный университет»

д.х.н., старший научный сотрудник

А.В. Метелица

«27» февраля 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования

«Южный федеральный университет»

на диссертационную работу Кирсановой Марии Сергеевны

«Многоволновые исследования структуры и кинематики областей
образования массивных звезд», представленную на соискание ученой

степени доктора физико-математических наук

по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертационная работа посвящена исследованию взаимодействия молодых массивных звезд, то есть звезд спектральных классов O, B, с окружающими их молекулярными облаками. Массивные звезды являются одним из ключевых элементов галактической эволюции. Исследование их формирования, эволюции и взаимодействия с окружающей средой является одной из важнейших современных областей астрофизики. Посредством радиационного и механического воздействия на окружающую межзвездную среду, массивные звезды придают характерную форму молекулярным облакам в галактиках и являются маяками звездообразования на изображениях галактической плоскости в ультрафиолетовом, оптическом,

инфракрасном и радио диапазонах. Именно многоволновому исследованию структуры и кинематики областей образования массивных звезд, дополненному численным моделированием, и посвящена диссертационная работа М.С. Кирсановой. Таким образом, актуальность данной работы не вызывает сомнений.

Наблюдения исследуемых областей выполнены М.С. Кирсановой на телескопах БТА САО РАН, КГО ГАИШ МГУ, IRAM, APEX, внеатмосферной обсерватории SOFIA. Дополнительно привлекались архивные данные обсерваторий Herschel, AKARI, JCMT и Spitzer. Для численного моделирования наблюдаемых областей звездообразования использовался программный код MARION, разработанный в ИНАСАН под руководством автора диссертации.

Диссертационная работа содержит введение, шесть глав, заключение и пять приложений.

Во введении выполнен обзор предшествующих исследований по тематике диссертационной работы, обосновывается актуальность, формулируются цели и задачи, научная новизна, научная и практическая значимость, кратко изложены результаты диссертации и описан личный вклад соискателя в эти результаты.

Глава 1 посвящена выбору объектов исследования в спиральном рукаве Персея галактики Млечный путь. Объекты содержат ионизованные области HII и молодые массивные звездные объекты на периферии ионизованных областей, что подтверждается наличием мазеров метанола II класса. Из полного списка источников представлено подробное описание нескольких наиболее перспективных объектов для последующих многоволновых наблюдательных исследований и численного моделирования. Кроме этого, в выборку включены еще два объекта вне рукава Персея: Барьер Ориона и RCW120.

Во второй главе выполнено описание программного комплекса MARION, разработанного под руководством автора диссертации и предназначенного для расчета свойств расширяющихся областей НП внутри газопылевого облака. Приводятся результаты тестирования численной модели. Показано, что наблюдательные особенности структуры Барьер Ориона в линиях излучения молекул и ионов объясняются формированием сжатого слоя на границе области фотодиссоциации и дрейфом пыли под действием давления излучения массивной звезды. Отмечается необходимость использования динамической модели формирования и эволюции областей НП для объяснения особенностей структуры Барьера Ориона.

В третьей главе диссертационной работы представлены наблюдения области НП S 235, а также областей НП из комплекса S 234–S 258 в линиях излучения водорода и ионов серы, азота и кислорода. Исследована структура данных областей ионизации и их нейтральных оболочек. Вычислено распределение нейтрального поглощающего вещества по всей площади туманности, а также распределение электронной плотности в областях НП. Установлено, что S 235 и S 237 представляют собой структуры типа блистера, в которых ионизованный газ свободно вытекает из одной из сторон. На основании исследований свойств пыли в S 255 и S 257 делается предположение о дефиците мелкой пыли в этих ионизованных областях.

В четвертой главе выполнено исследование комплекса звездообразования S 235 внутри гигантского молекулярного облака G174+2.5. Приводятся результаты наблюдений гигантского молекулярного облака в радиолиниях молекул монооксида углерода, сероуглерода и ряда других молекул. Показано, что массивное молекулярное волокно WB 673 может быть примером объекта, на формирование которого повлияли расширяющиеся ионизованные оболочки вокруг массивных звезд. На основе численного моделирования динамических и оптических параметров областей НП сделано предположение, что холодная нейтральная среда, окружающая зоны

фотодиссоциации, не является пространственно однородной, а состоит из плотных сгустков, сквозь которые может проникать диффузное ультрафиолетовое излучение на значительно большее расстояние, чем предсказывает упрощенная одномерная модель. Отмечается, что количество газообразного метанола в фотодиссоционных областях S 235, S 235A и S 235C может быть объяснено реактивной десорбцией с поверхности пылинок.

В пятой главе диссертации выполнено исследование структуры и физических условий в фотодиссоционных областях S 255, S 257, S 140, NGC7358 и Барьер Ориона. Обсуждается взаимное расположение фронтов ионизации атомов H и диссоциации молекул H₂, а также пространственных структур, предположительно связанных с образованием молодых звезд на периферии областей НП. Численное моделирование подтвердило выводы предыдущей главы о неоднородной структуре нейтральной среды, окружающей области фотодиссоциации, и представляющей собой мелкие плотные сгустки, погруженные в более разреженный газ. Предположено, что ультрафиолетовые фотоны, способные диссоциировать молекулярный водород, могут диффундировать между сгустками, в результате чего расстояние между фронтами ионизации и диссоциации увеличивается.

Шестая глава диссертации целиком посвящена наблюдениям молекулярной оболочки области НП RCW120 в линиях излучения CO, CS и ряда других молекул. Посредством наблюдений и моделирования показано, что геометрия этой плотной оболочки, представляющей почти идеальным кольцом на инфракрасных изображениях, имеет, на самом деле, уплощенную форму. Обсуждаются свойства сжатого газа в RCW 120 и отсутствие связи звездообразования в молекулярной оболочке области НП с распространением ударной волны.

В заключении сформулированы основные итоги диссертации и перспективы их применения. К основным результатам можно отнести следующее:

1. Разработан комплексный подход к изучению структуры и кинематики областей образования массивных звезд, основанный на наблюдательных данных в нескольких диапазонах длин волн и дополненный сферически симметричным моделированием динамической эволюции областей НП с детальным описанием химических процессов и динамики многокомпонентной пыли.
2. Показана важность нестационарного моделирования эволюции зон НП для объяснения слияния фронтов диссоциации молекул H_2 и CO в Барьере Ориона. Установлено, что в области слияния фронтов образуется дефицит пыли.
3. Впервые детально исследована трехмерная структура и кинематика областей НП и их нейтральных оболочек в объектах S 235, S 235 A, S 235 C, S 255, S 256 и S 257. Показано, что нейтральный газ вокруг исследованных областей НП не является однородным, а представляет собой плотные сгустки, погруженные в разреженную среду.
4. Впервые показано, что форма плотной молекулярной оболочки области НП RCW 120, вопреки распространенному мнению, не близка к идеальной сфере, а представляет собой уплощенное облако, видимое плашмя, которое, в свою очередь, погружено в протяженное диффузное облако.
5. На пересечении старого остатка сверхновой и области НП S 231 обнаружено пространственно неоднородное молекулярное волокно с характеристиками, согласующимися с теоретической моделью образования подобных объектов в ходе последовательного обжатия молекулярного газа расширяющимися оболочками.

Все вышесказанное показывает, что диссертационная работа М.С. Кирсановой представляет собой объемное и детальное исследование свойств областей НП вокруг массивных звезд, а также наблюдаемой структуры и кинематики молекулярных облаков в областях интенсивного

звездообразования. Все результаты новые и достоверные, что обусловлено использованием первичных данных с наземных и внеатмосферных телескопов, моделированием уникальным программным комплексом MARION, а также публикациями в рецензируемых журналах. Все результаты опубликованы в астрономических журналах, рекомендованных ВАК.

Имеются следующие вопросы и замечания, изложенные ниже:

1. Следовало бы более подробно описать параметры массивных звезд, полученных при моделировании химико-динамической эволюции зон НП. Звезды каких масс наиболее хорошо воспроизводят структуру и динамику зон НП и областей фотодиссоциации в каждом из рассмотренных объектов?
2. Сдувание пыли излучением массивной звезды приводит к пространственной сегрегации пыли и газа. Следовало дать оценки отношения массы пыли к газу как функцию расстояния от звезды. Какова максимальная величина данного отношения? Какова амплитуда отклонения от начального отношения 1:100?
3. Следовало выполнить оценки упрощающих допущений при интерпретации наблюдений зон НП, таких, как пространственная однородность распределения плотности пыли и газа, а также температуры.

Данные замечания не снижают общей высокой оценки работы, не затрагивают основных ее выводов и положений, выносимых на защиту. Результаты диссертационной работы опубликованы в двадцати двух статьях, все – в журналах, рекомендованных ВАК, в одиннадцати из которых М.С. Кирсанова является первым автором, а также представлены на 18 российских и международных конференциях.

**Диссертационная работа Кирсановой Марии Сергеевны
«Многоволновые исследования структуры и кинематики областей**

образования массивных звезд», удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, является комплексным научным исследованием и достижением, существенно расширившим научные представления о влиянии массивных звезд на структуру и кинематику молекулярных облаков. Ее автор Кирсанова Мария Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Отзыв подготовлен д.ф.-м.н., ведущим научным сотрудником (01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия) НИИ физики Южного федерального университета Воробьевым Эдуардом Игоревичем (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, тел. 8(988)5651832, email: eivorobev@sfedu.ru).

Отзыв обсужден и утвержден на заседании объединенного астрофизического семинара кафедры физики космоса Южного федерального университета и отдела космических исследований Научно-исследовательского института физики Южного федерального университета 25 февраля 2025 г., протокол № 17.

Зав. кафедрой физики космоса

Южного федерального университета

кандидат физ.-мат. наук, доцент,

председатель семинара



Ирина Александровна Ачарова

Сведения о ведущей организации

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Тел.: +7(863) 305-19-90,

факс: +7(863) 263-87-23,

email: info@sfedu.ru



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

личную подпись

ЗАВЕРЕНО:

Главный специалист по управлению персоналом

«25» февраля 2025 г.