

«Сверхновые, массивные звезды и их взаимодействие с окружающей средой»

1) Участники темы в 2022 году:

Научные сотрудники:

Егоров О.В. (к.ф.-м.н., с.н.с. отдела радиоастрономии) (рук.)

Лозинская Т.А. (д.ф.-м.н., в.н.с. отдела радиоастрономии)

Ситник Т.Г. (д.ф.-м.н., с.н.с. отдела радиоастрономии)

Студенты/аспиранты:

Васильев К.И. (аспирант, вед.инж. отдела радиоастрономии)

Герасимов И.С. (студент, инж. 2й кат. отдела радиоастрономии)

Ярлова А.Д. (аспирант, вед.инж. отдела радиоастрономии)

2) Публикации (опубликовано и принято в печать):

Всего публикаций – 6, из них 5 в Q1:

MNRAS – 2

Astronomical Journal – 1

Astrophysical Journal Letters – 2 (приняты к печати, pre-print)

Астрофизический бюллетень – 1

Помимо этого, 2 статьи в ApJS вошли в прошлогодний отчет, но опубликованы в 2022.

3) Конференции

Результаты работы представлены в виде докладов Герасимовым И.С. на 1 российской конференции (Современная звездная астрономия) и Ярловой А.Д. и Егоровым О.В. на 3 международных конференциях.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации
AAAA-A20-120012990080-2

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ г.

УДК
524.35 Сверхновые звезды и связанные с ними объекты. Пекулярные
звезды
524.3 Звезды
524.5 Межзвездная среда. Туманности (галактические)

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Галактическая астрономия. Физика межзвездной среды
по теме:
Сверхновые, массивные звезды и их взаимодействие с окружающей средой
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ г.

Руководитель темы
Егоров О.В.

«__» _____ г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

_____ (Егоров О.В.)

Исполнители темы:

ведущий научный сотрудник,
доктор физико-математических наук, профессор по специальности

_____ (Брюхарева Т.С.)

_____ (Лозинская Т.А.)

кандидат физико-математических наук

_____ (Марьева О.В.)

старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

_____ (Ситник Т.Г.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

сверхновые звёзды, звёздный ветер, межзвёздная и околозвездная среда, молекулярные облака, массивные звезды, газопылевые оболочки, области H II

Ключевые слова по-английски:

supernova stars, stellar wind, gas-dust shells, molecular clouds, H II regions, interstellar and circumstellar medium, massive stars

Благодаря воздействию ионизирующего излучения, звездного ветра и последующих взрывов сверхновых, массивные звезды играют одну из доминирующих ролей в регулировании структуры, динамики и химического состава межзвездной среды в галактиках со звездообразованием. Их влияние проявляется на различных пространственных и временных масштабах: от индивидуальных кольцевых туманностей, околозвездных оболочек и областей H II вокруг молодых массивных звезд, до гигантских газо-пылевых сверхоболочек, размером до 2-3 килопарсек. Целью НИР является исследование вышеупомянутых объектов и процессов взаимодействия массивных звезд и межзвездной среды.

Исследование опирается на данные собственных спектральных и фотометрических наблюдений на крупных российских и зарубежных телескопах. Важной частью исследований является панорамная спектроскопия изучаемых объектов с интерферометром Фабри-Перо и с классическими спектрографами интегрального поля. Исследования частично основаны на архивных наблюдательных данных наземных и космических телескопов в широком диапазоне энергий (VLT, HST, ALMA, VLA, GALEX, Chandra, Spitzer, WISE, JWST и др.), а выполняемый анализ данных опирается на результаты численного моделирования, проводимого как в рамках настоящей НИР, так и имеющихся в литературе.

В отчетном году были получены следующие результаты: Исследована пекулярная расширяющаяся туманность вокруг массивной звезды в галактике NGC 4068. Показано, что вероятнее всего туманность связана с выбросом из звезды WR массой около 80 солнечных. Обнаружены 10 расширяющихся оболочек ионизованного газа и следы галактического ветра в галактике Sextans A. Проведенный анализ свидетельствует о значительном вкладе звездного ветра, а также давления горячего газа и взрывов сверхновых в энергетический баланс между МЗС и массивными звездами в этой галактике. Исследование данных наблюдений в рентгеновском диапазоне галактики IC1613 выявило 31 новый источник, не являющихся остатками сверхновых, а также позволило получить верхнюю оценку интенсивности горячего диффузного газа в расширяющихся оболочках в этой галактике. Трехмерное моделирование эволюции расширяющихся сверхоболочек в карликовых галактиках показало, что возможно инициирование нового эпизода звездообразования на краях области их взаимодействия. Проанализированы наблюдательные данные в ИК-диапазоне, полученные с новым телескопом JWST для 4 галактик со звездообразованием по программе PHANGS. Полученные данные демонстрируют большое количество газо-пылевых оболочек и филаментов. Показано, что филаменты являются следствием действия грави-

тационной неустойчивости.

Полученные результаты найдут применение в дальнейших исследованиях: (а) процессов звездообразования в галактиках, (б) эволюции массивных звезд и их взаимодействия с окружающей средой. (в) эволюции газовых сверхоболочек под действием звездообразования внутри и в их стенках

В настоящем отчете НИР применяются следующие сокращения: ГСО: гигантская сверхоболочка; ЗО: звездообразование; МЗС: межзвездная среда; LBV: голубые переменные высокой светимости; WR: звезда Вольфа-Райе; BSG: голубой сверхгигант; ИК: инфракрасный; УФ: ультрафиолетовый; ИФП: сканирующий интерферометр Фабри-Перо

ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимодействия звездного ветра, ионизирующего излучения и сверхновых с окружающей межзвездной средой - одна из важнейших задач современной астрофизики. Значительная часть массы звезд класса O и B теряется в ходе эволюции в форме звездного ветра и в результате сброса вещества в виде оболочки. Звездный ветер и сверхновые в значительной степени регулируют свойства окружающей их межзвездной среды (структуру, кинематику, температуру, плотность, химический состав). В результате коллективного действия ветра и сверхновых от множества звезд в скоплениях формируются протяженные газо-пылевые оболочечные структуры, размер которых зачастую превышает толщину диска галактик. Это приводит к перераспределению продуктов нуклеосинтеза в межзвездной среде галактики, регулирует процессы звездообразования и, следовательно, эволюцию галактик.

Исследование межзвездной среды вокруг массивных звезд является важным инструментом для изучения их свойств на поздних стадиях эволюции. Компактные околозвездные структуры вокруг массивных звезд являются непосредственным результатом их воздействия на межзвездную среду. Обнаружение таких структур с помощью современных космических ИК-обсерваторий (Spitzer, Herschel, WISE) является эффективным методом поиска редких массивных звезд на поздних этапах их эволюции (Вольфа-Райе, LBV). Анализ кинематики ионизованного газа вокруг таких объектов также показал свою высокую эффективность для их обнаружения. Наблюдаемые свойства выметенных оболочек вокруг массивных звезд определяются во многом свойствами и эволюционным статусом центрального объекта. Следовательно, изучая туманности вокруг массивных звезд, мы можем получить информацию и о природе самих центральных объектов.

Анализ свойств межзвездной среды в областях звездообразования на масштабах десятков – сотен парсек необходим для понимания процессов регулирования звездообразования в галактиках и их эволюции в целом. Приток энергии от множества массивных звезд формирует сверхоболочки и ГСО ионизованного и нейтрального газа в межзвездной среде галактик. Наблюдения близких галактик позволили выделить несколько тысяч ГСО в них размером до 1–3 кпк и возрастом 10–200 млн лет. Во многих галактиках очаги современного ЗО, наблюдаемые как яркие области ионизованного газа, локализованы преимущественно в плотных стенках ГСО. Механизмы, инициирующие вспышки ЗО в стенках ГСО, а также эволюция ГСО под действием притока энергии от массивных звезд в их стенках, все еще не до конца ясны и требуют исследования. Оптимальными объектами для исследования природы ГСО и механизмов распространения ЗО в галактиках являются близкие иррегулярные галактики, что обусловлено рядом факторов: 1. Твердотельное вращение большей части диска HI (ГСО не разрушаются дифференциальным вращением). 2. Цикл взаимодействия звезд и газа не прерывается спиральными волнами. 3. Толщина газового слоя больше, а плотность газа меньше, чем в спиральных галактиках. Соответственно тот же приток энергии, что и в спиральных галактиках, формирует здесь ГСО большего размера, которые позднее прорываются в корону галактики. В то же время близкие спиральные галактики предоставляют возможность изучать менее протяженные и более молодые газовые сверхоболочки

в более широком диапазоне металличностей, плотностей, а также в различных окружения. Тем не менее, особую важность представляют исследования процессов взаимодействия массивных звезд с МЗС в условиях низкой металличности, приближенным к таковым в ранней Вселенной.

В цели и задачи работы в отчетном году входили следующие исследования:

1. Моделирование спектра низкометалличной туманности вокруг массивной звезды неизвестной природы в галактике NGC 4068. Определение свойств и эволюционной стадии центральной звезды.

2. Анализ кинематики ионизованного газа в близкой низкометалличной галактике Sextans A. Сопоставление кинематических свойств ионизованного и атомарного газа в этой галактике и определение вклада притока энергии от массивных звезд в общую динамику и морфологию газа в галактике.

3. Поиск следов горячего газа в расширяющихся сверхоболочках близкой низкометалличной галактики IC 1613. Поиск точечных источников излучения в рентгене и радиоконтинууме в этой галактике.

4. Моделирование сталкивающихся ГСО в МЗС карликовых галактик с целью прояснить возможность возникновения новой вспышки ЗО в результате столкновения ГСО. Сравнение с наблюдениями МЗС в близких карликовых галактиках.

5. Обработка наблюдательных данных в ИК-диапазоне с нового космического телескопа JWST, проведенных коллаборацией PHANGS для нескольких близких галактик со звездообразованием. Анализ свойств МЗС в этих галактиках по полученным данным.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исследован спектр туманности вокруг массивной звезды неизвестной природы в близкой карликовой галактике NGC 4068. Спектры были получены в предыдущие годы выполнения НИР со спектрографом TDS на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ и на 6-м телескопе БТА САО РАН. Исходя из данных архивных фотометрических наблюдений телескопа HST, светимость центральной звезды оценена как 1-2 млн. солнечных. Предложено несколько вероятных стадий эволюции звезды, включая WR и BSG. Построены модели спектра звезды для каждого рассмотренного сценария с помощью кода CMFGEN. Используя модельные спектры звезды в качестве источника ионизации, с помощью фотоионизационного кода Cloudy рассчитана сетка оптических спектров окружающей туманности в предположении различных физических и химических свойств. Путем минимизации разницы смоделированного и наблюдаемого спектров, нам удалось показать, что почти все наблюдаемые особенности в спектре туманности объясняются в том случае, если центральный объект является бедной металлами звездой WR с массой около 80 солнечных на короткой промежуточной стадии эволюции, которой соответствует сильный выброс азота в МЗС. Мы также обнаружили вероятную спектральную переменность эмиссионного спектра, что согласуется с предложенным нами объяснением. Измерение скорости расширения туманности вокруг звезды позволило оценить вероятный возраст туманности – около 0.5 млн. лет. Важным выводом проведенного анализа является не только открытие пекулярной массивной звезды в близкой низкометаллической галактике, но и подтверждение эффективности метода поиска подобных пекулярных объектов по локальным изменениям дисперсии скоростей ионизованного ионизованного газа, измеряемым по данным наблюдений с ИФП.

Исследована кинематика ионизованного газа в областях 30 близкой карликовой галактики Sextans A. Эта галактика является отличной лабораторией для изучения взаимодействия массивных звезд и МЗС в условиях низкой металличности так как является ближайшей к нам галактикой с экстремально низкой металличностью (около 7% от солнечной). В то же время кинематика ионизованного газа в этой галактике ранее практически не исследовалась. По данным наблюдений с ИФП на 6-м телескопе БТА, мы обнаружили 10 расширяющихся оболочек ионизованного газа размером 70-500 пк, возраст которых в основном не превышает 2 млн лет. Расчет требуемой энергии для формирования таких оболочек показал, что вероятнее всего они сформировались под совокупным воздействием сразу трех механизмов – ветра массивных звезд, давления горячего газа, нагретого массивными звездами в прилегающих HII областях, взрывами сверхновых. При этом анализ отношения интенсивностей эмиссионных линий показал, что часть оболочек может быть непосредственно связана с остатками сверхновых. Для части оболочек, не выявляющих признаков ударного возбуждения, необходим приток энергии от массивных звезд на стадиях, предшествующим взрывам сверхновых.

В галактике Sextans A обнаружено две области, скорости ионизованного и атомарного водорода в которых существенно отличается (на 20-30 км/с). Наблюдаемое распределение остаточных лучевых скоростей (после вычитания компоненты, связанной с круговым вращением галактики) поз-

волило сделать вывод об оттоке ионизованного газа из ярких комплексов ЗО в этих областях, вероятно формирующем слабый не наблюдавшийся ранее галактический ветер галактики. Измеренное высокое отношение линий [OIII]/Hbeta и низкое отношение [SII]/Halpha в одной из этих областей подтверждает вывод. Оцененный нами фактор нагрузки галактического ветра (отношение темпа потери массы к темпу ЗО) в Sextans A составляет около 6, что хорошо согласуется с космологическими симмуляциями для галактик такой же массы, однако выше чем было измерено ранее в нескольких (единичных) похожих объектах. Причины такого рассогласования наблюдений и симмуляций остаются неизвестными.

В процессе исследования кинематики ионизованного газа в Sextans A, особое внимание было уделено анализу непосредственных окрестностей спектрально подтвержденных низкометаллических O-звезд. Согласно теоретическим моделям, в условиях такой низкой металличности, как в Sextans A, их ветер должен быть слабым, а значит они не должны сильно возмущать МЗС. Тем не менее, мы обнаружили область высокой дисперсии скоростей ионизованного газа вокруг одной из таких звезд. По аналогии с исследованной туманностью в NGC 4068, можно предположить, что это является свидетельством наличия расширяющейся оболочки вокруг звезды, сформированной либо выбросом вещества из звезды, либо ее ветром. В любом случае, это указывает на существенно более сильное воздействие этой звезды на МЗС, чем предполагается согласно теоретическим моделям.

В IC 1613 - еще одной близкой низкометаллической галактике Местной группы - наблюдается протяженный комплекс взаимодействующих оболочек атомарного и ионизованного газа в стенке ГСО HI. С целью детектирования и измерения свойств горячего газа внутри этих оболочек были проанализированы наблюдательные данные в рентгеновском диапазоне и радиоконтинууме с космического телескопа Chandra и радиоинтерферометра VLA. В результате была получена верхняя оценка на поток от диффузного рентгеновского излучения в комплексе газовых оболочек (5×10^{35} эрг/с). В то же время обнаружен 31 новый точечный источник рентгеновского излучения и 11 источников излучения в радиоконтинууме. Анализ их спектра и яркости показал, что большинство объектов являются рентгеновскими двойными звездами или объектами фона, и только один объект оказался остатком сверхновой (хорошо изученным нами ранее).

Проведено трехмерное моделирование сталкивающихся газовых оболочек разного возраста, находящихся в плоскости галактических дисков. Целью исследования являлось изучение условий, создающихся в газовом слое между оболочками, и оценка возможности ЗО в этом слое. Изучена динамика и устойчивость газа в области столкновения оболочек. В результате выполненного моделирования при различных начальных условиях получено, что продолжительность существования плотного газового слоя выше в том случае, когда взаимодействующие оболочки, образованные вспышками сверхновых в скоплениях, расположенных на расстоянии, превышающем шкалу высоты диска (то есть обычно в случае старых оболочек). При столкновении молодых оболочек плотная газовая стенка между ними быстро разрушается под действием ударных волн, приходящими из горячей каверны, а значит условия не подходят для возникновения новой вспышки ЗО. В то же время обнаружено, что на краях взаимодействующего слоя плотный газ сохраняется на протяжении длительного времени (десятки млн лет) и

его масса постепенно возрастает. Таким образом, согласно проведенному моделированию, необходимые условия для возникновения ЗО создаются на краях области взаимодействия ГСО, или в том случае, когда ГСО являются старыми и ударные волны не оказывают существенного влияния на плотный газ в их стенках. Сравнение с распределением ЗО в близких галактиках позволило идентифицировать несколько объектов, где ЗО наблюдается преимущественно на краях слоя между взаимодействующими ГСО, в согласии с результатами моделирования (например, ГСО в галактиках Holmberg II, IC1613, Большом Магеллановом Облаке). В то же время, наблюдаемая картина в целом обычно гораздо более сложная и однозначное сравнение с результатами моделирования затруднено.

Благодаря новому космического телескопа JWST стало возможно исследовать пылевой компонент МЗС в относительно близких галактиках с разрешением, недоступным ранее. Были проанализированы находящиеся в открытом доступе данные наблюдений в ИК диапазоне с JWST/MIRI 4 спиральных галактик со звездообразованием (IC 5332, NGC 628, NGC 1365, NGC 7496), полученных в рамках обзора PHANGS-JWST. Разработан пакет программ, позволяющий проводить автоматизированную обработку изображений протяженных объектов с JWST/MIRI в полосах F770W, F1000W, F1130W и F2100W. Анализ полученных изображений показал наличие большого количества оболочек и протяженных филаментов, размерами от нескольких десятков парсек до килопарсека, которые могут быть связаны как с воздействием массивных звезд на МЗС, так и с гравитационной неустойчивостью газо-пылевой среды. Анализ распределения филаментов показал, что характерные расстояния между ними согласуются со сценарием их формирования в результате гравитационной неустойчивости, а не под действием ударных волн от массивных звезд.

Были проведены новые спектральные наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН с ИФП, панорамным и длиннощелевым спектрографами в составе многорежимного прибора SCORPIO-2. Объектами наблюдений являлись близкие галактики NGC 2366, NGC 1087 и UGC 1249. Исследование спектральных и кинематических свойств МЗС в этих объектах будет проводиться на следующих этапах.

Все поставленные задачи были выполнены. В частности, получены важные сведения о роли сверхновых и предшествующих им эволюционных стадий массивных звезд в регулировании структуры и кинематики МЗС в условиях низкой металличности, а также о том, как эти процессы влияют на распространение ЗО в галактиках. Показано, что свойства наблюдаемых структур ионизованного газа зачастую не полностью согласуются с теоретическими моделями, однако особенности процессов взаимодействия звезд и МЗС в условиях разной металличности все еще плохо изучены. Новые наблюдательные возможности и расширение выборки объектов исследования постепенно позволяет получить более полную картину, что в будущем позволит разрешить причины разногласий между теоретическими предсказаниями и наблюдаемыми характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения НИР получены следующие важные результаты: Определены свойства пекулярной туманности и связанной с ней центральной звезды в галактике NGC 4068. Показано, что вероятным источником ионизации туманности является звезда WR с массой около 80 солнечных. При этом сама туманность обогащена азотом, выброшенным из атмосферы звезды.

Обнаружены 10 расширяющихся оболочек и две области истечения ионизованного газа в галактике Sextans A. Показано, что совокупный вклад ветра звезд, давления горячего газа и взрывов сверхновых является источником энергии для обеспечения расширения наблюдаемых структур. Обнаружены следы действия ветра одной из наиболее низкометаллических O-звезд в галактике на МЗС, что является неожиданным результатом так как согласно теории, ветер O-звезд при такой металличности должен быть слабым. Выполнено трехмерное моделирование сталкивающихся ГСО и анализ стабильности и динамики газа в области столкновения. Показано, что условия на краях слоя между ГСО позволяют плотному газу существовать достаточно длительный период для инициирования нового эпизода ЗО.

Проанализированы данные рентгеновских наблюдений области ЗО в стенках ГСО в галактике IC 1613. Получена верхняя оценка на интенсивность диффузного горячего газа в наблюдаемых здесь сверхоболочках. Идентифицированы новые рентгеновские источники, которые однако не являются остатками сверхновых.

Создан пакет программ для автоматического анализа данных ИК-наблюдений МЗС в близких галактиках с новым телескопом JWST. Обработаны и проанализированы данные для 4 близких спиральных галактик. Обнаружено большое количество газо-пылевых оболочек и филаментов. Показано, что последние сформированы в результате действия гравитационной неустойчивости, а не массивных звезд.

Все запланированные задачи выполнены.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2022 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами