

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации  
121031500141-9

УТВЕРЖДАЮ  
Директор/декан

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ Г.

УДК  
524.7 Внегалактические системы

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Космология, гравитация, внегалактическая астрономия  
по теме:

Физические процессы в галактиках  
(промежуточный)

Зам. директора/декана  
по научной работе

\_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ Г.

Руководитель темы  
Засов А.В.

\_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ Г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

заведующий отделом, доктор  
физико-математических наук,  
профессор по кафедре

\_\_\_\_\_ (Засов А.В.)

Исполнители темы:

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук, доцент/с.н.с. по специальности

\_\_\_\_\_ (Артамонов Б.П.)

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Бизяев Д.В.)

ведущий научный сотрудник,  
доктор физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Блинников С.И.)

научный сотрудник

\_\_\_\_\_ (Бруевич В.В.)

ведущий научный сотрудник,  
доктор физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Гусев А.С.)

ведущий специалист, кандидат  
физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Дивлекеев М.И.)

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Ежкова О.В.)

научный сотрудник, кандидат  
физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Зайцева Н.А.)

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Каспарова А.В.)

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Катков И.Ю.)

инженер 2-ой категории

\_\_\_\_\_ (Ландер В.Ю.)

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Метлов В.Г.)

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Окнянский В.Л.)

ведущий специалист

\_\_\_\_\_ (Петроченко Л.Н.)

старший научный сотрудник,  
кандидат физико-математических наук  
лаборант  
научный сотрудник  
научный сотрудник, кандидат  
физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Сабурова А.С.)

\_\_\_\_\_ (Топтун В.А.)

\_\_\_\_\_ (Хоперсков С.А.)

\_\_\_\_\_ (Шимановская Е.В.)

## РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

кинематика галактик, эволюция галактик, структура галактик, звездообразование, межзвездная среда

Ключевые слова по-английски:

interstellar medium., kinematics of galaxies, structure of galaxies, star formation, evolution of galaxies

Можно выделить три направления работ в 2021 г. Первое направление работ – это получение новой информации путем реализации наблюдательных программ на доступных телескопах, то есть наблюдения, обработка и анализ результатов. В работе над темой государственного задания проводились наблюдения на 6-метровом телескопе Специальной Астрофизической обсерватории РАН, на Майданакской (бывшей российской) обсерватории, на крупнейшем в мире телескопе SALT (Южно-Африканская Республика) и ряде более мелких инструментов, включая 2.5 м телескоп в Кавказской горной обсерватории МГУ. Привлекался также материал открытых баз данных и обзоров (SDSS, HyperLeda, MANGA и др.). Все материалы, связанные с наблюдениями на больших телескопах, выполнялись и публиковались в соавторстве с коллегами из обсерваторий. Второе направление работ – это интерпретация имеющихся данных наблюдений и численное моделирование различных процессов в галактиках – от моделирования возникновения спиральных волн плотности в галактиках до моделирования взрывов сверхновых звезд, которые объясняли бы наблюдаемые проявления сверхновых в конкретных галактиках. Третье направление – это создание численных моделей объектов и сопоставление результатов моделирования с наблюдениями. Научная тематика проведенных по теме исследований в основном касается процессов в дисковых галактиках. Она охватывает широкий круг научных задач, связанных с объяснением наблюдаемых особенностей галактик.

## ВВЕДЕНИЕ

Целью работ, проводимых по данной теме, является комплексное исследование физических процессов, происходящих в галактиках и в их системах, основанное на интерпретации данных наблюдений и реализации наблюдательных программ, а также на численном моделировании физических процессов в галактиках, определяющих характер их эволюции. Изучение процессов, наблюдаемых в галактиках, представляет актуальное направление современной астрофизики, поскольку галактики являются фундаментальными единицами в структуре Вселенной, в которых сосредоточено основное количество наблюдаемой материи. Исследование галактик и их систем – это доминирующее направление в наблюдательных программах на всех крупных телескопах мира. В России практически единственным большим телескопом мирового уровня является 6-метровый телескоп Специальной астрофизической обсерватории (САО РАН). Для выполнения задач в рамках данной темы использовались наблюдения на этих телескопах, как и на нескольких других телескопах – как крупных (на Южно-африканском 10-метровом телескопе SALT, телескопе обсерватории Apache Point, (США)), так и небольших (телескопе Майданакской обсерватории, телескопы Крымской обсерватории МГУ). В настоящее время вошел строй 2.5-метровый телескоп в КГО (МГУ), который также будет использоваться в работе по данной теме. Суть подхода, реализуемого при выполнении темы – это комплексные спектральные и фотометрические исследования галактик, их интерпретация и моделирование в рамках определенной физической картины эволюции звездных и газовых составляющих галактик с использованием различных наблюдательных данных.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Работа по данной теме направлена на исследование физических процессов, ответственных за формирование наблюдаемых структурных особенностей галактик разных типов, и наблюдаемых активных процессов в галактиках, связанных с выбросом энергии. Галактики очень разнородны по своим физическим характеристикам и внутренней структуре, и отличаются разнообразием факторов, которые формируют их наблюдаемые особенности. Поэтому при исследовании физических процессов в галактиках требуются различные методические подходы в зависимости от поставленных задач. Можно выделить три направления работ в 2021 г. Первое направление работ – это получение новой информации путем реализации наблюдательных программ на доступных телескопах, то есть наблюдения, обработка и анализ результатов. В работе над темой государственного задания проводились наблюдения на 6-метровом телескопе Специальной Астрофизической обсерватории РАН, на Майданакской (бывшей российской) обсерватории, на крупнейшем в мире телескопе SALT (Южно-Африканская Республика) и ряде более мелких инструментов, включая 2.5 м телескоп в Кавказской горной обсерватории МГУ. Привлекался также материал открытых баз данных и обзоров (SDSS, HyperLeda, MANGA и др.). Все материалы, связанные с наблюдениями на больших телескопах, выполнялись и публиковались в соавторстве с коллегами из обсерваторий. Второе направление работ – это интерпретация имеющихся данных наблюдений и численное моделирование различных процессов в галактиках – от моделирования возникновения спиральных волн плотности в галактиках до моделирования взрывов сверхновых звезд, которые объясняли бы наблюдаемые проявления сверхновых в конкретных галактиках. Третье направление – это создание численных моделей объектов и сопоставление результатов моделирования с наблюдениями. Научная тематика проведенных по теме исследований в основном касается процессов в дисковых галактиках. Она охватывает широкий круг научных задач, связанных с объяснением наблюдаемых особенностей галактик. Здесь в работе над темой выделяются два тематических сектора исследований. Во-первых, – это динамика и структура звездно-газовых дисков, и вопросы их эволюции. Помимо исследования структуры (тонких и толстых компонент) звездных дисков нормальных галактик, отдельно рассматривались галактики с необычными свойствами дисков: галактики с двумя, в том числе противоработающими, дисками, галактики со сверхтонкими дисками и дисками низкой яркости. Во-вторых, – это активные процессы в галактиках. К ним относятся звездообразование, а также взрывные процессы (активность ядер галактик и взрывы сверхновых звезд). По каждому из этих секторов в текущем году получены оригинальные результаты, расширяющие наши представления о физических процессах, ответственных за наблюдаемые свойства галактик. В следующих разделах раскрыты содержания основных результатов по двум указанным выше направлениям работ.

### 1. Наблюдения, обработка и анализ результатов

а) Спектральные наблюдения и обработка. . В рамках проекта по исследованию галактик с противоработающими дисками ходе наблюдений на БТА во 2-м полугодии 2021 были получены данные глубокой длиннощелевой спектроскопии для 8 галактик со звездным противоработанием, отобранных в обзоре MaNGA. Идет обработка данных. (Катков) По данным длинно-

щелевой спектроскопии на телескопе SALT был обнаружен протяженный диск противовращающегося ионизованного газа в S0 галактике с кольцами NGC 254. Применяя ранее развиваемый подход одновременного моделирования спектра и широкополосной фотометрии удалось показать, что в ходе текущего звездообразования уже сформировалось около 1% (по массе) звезд в противовращающемся диске, которые было бы невозможно обнаружить на основе только оптических спектров. Этот подход может привести к выводу о сильной недооценке частоты встречаемости галактик с подобными особенностями. (Катков) Еще одним направлением работ было создание веб-сервиса (<https://ifu.voxastro.org/>) для интерактивной работы с публично доступными данными панорамной спектроскопии обзоров MaNGA, SAMI, Califa, Atlas3D. На текущий момент реализован лишь минимальный функциональный набор, который включает себя поиск спектральных кубов с использованием SQL-подобного синтаксиса запросов (Катков) С помощью спектрографа 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ проведены спектральные наблюдения 32 областей HII в спиральной галактике NGC 3963 и в неправильной галактике с перемычкой NGC 7292. Они использовались для оценки содержания кислорода и азота и электронной температуры в областях HII методом сильных линий. Обе галактики, как оказалось, имеют особенности в распределении химического состава, которые можно объяснить внешней аккрецией газа в случае NGC 3963 и слиянием галактик в случае NGC 7292. Статья опубликована в MNRAS. (Гусев) Для сравнения фотометрических свойств галактик на разных красных смещениях были рассчитаны т.н. K-поправки звездным величинам как функции наблюдаемого показателя цвета и красного смещения. Впервые были вычислены и представлены в аналитическом виде K-поправки для инфракрасных полос WISE. К настоящему моменту получен полный набор K-поправок, которые позволяют обрабатывать фотометрические измерения для галактик до красного смещения  $z = 1$ . Работа близка к завершению. (Какспарова) На БТА продолжались программы спектральных наблюдений приливных структур в системах взаимодействующих галактик и галактик низкой поверхностной яркости, диски которых ориентированы "с ребра". Идет обработка данных. б) Наблюдения активных ядер галактик В течение 2021г. продолжалась обработка фотометрических данных для ряда сейфертовских ядер за 20-летний период, полученных на Майданакской обсерватории (Артамонов).. В течение 2021 продолжался фотометрический и спектральный мониторинг активных ядер галактик меняющих свой спектральный тип: NGC2617, 4151, 3516, Mrk 6 и других. Наблюдения проводились на телескопах ГАИШ в Крыму и в Кисловодске, телескопах МАСТЕР, а также в сотрудничестве с обсерваториями WIRO (США) и ШАО (Азербайджан). Проводились наблюдения нескольких галактик на Swift по нашим заявкам. В NGC3516 обнаружено поярчание и появление широких линий в Hbeta с характерными пиками в красном и голубом крыльях и корональной линии FeX, которая шире остальных запрещенных линии и имеет голубое смещение.. С ноября 2020 амплитуда рентгеновской переменности (по наблюдениям на Swift) значительно выросла. Обнаружено несколько изменений типа ядра за это время. По результатам опубликована телеграмма готовится статья к отправке в MNRAS . (Окнянский, Метлов) Продолжены исследования оптической, ультрафиолетовой и рентгеновской переменности NGC1566, самого близкого меняющего свой тип активного ядра с использованием данных обсерватории Swift и MASTER

за период 2007-2020 гг. . Обсуждены возможные интерпретации наблюдаемых изменений. Свойства переменности ядра этой галактики были сопоставлены с результатами исследований (в ГАИШ) других активных ядер, меняющих свой тип, и выявлен ряд общих свойств этих объектов. (Окнянский)

В 2021г проведена работа по изучению центрального конического истечения из галактик с центральной вспышкой звездообразования с произвольным наклоном к лучу зрения по данным обзора MaNGA. Для этого было отобрано более 300 галактик с малым наклоном плоскости диска. . В большинстве этих объектов удалось обнаружить двойные пики радиальных скоростей ионизованного газа в центре.. Проведены прямые оценки скорости и темпа потери массы. (Бизяев)

## 2. Анализ и интерпретация имеющихся данных наблюдений

а) Содержание газа и звездообразование в галактиках Рассмотрено азимутальное распространение волны звездообразования в трех близлежащих спиральных галактиках: NGC 628, NGC 3726 и NGC 6946.. Анализ пространственного разделения молодых звездных скоплений и близлежащих к ним областей HII позволил определить положение радиуса коротации в исследованных галактиках. Фурье-анализ поля скоростей газа в тех же галактиках независимо подтвердил полученные оценки. Анализ азимутального смещения положений скоплений и областей HII показал, что в области спиральной структуры могут сосуществовать более одной моды волны плотности, каждая из которых вращается со своей собственной скоростью узора. В галактике с баром NGC 3726 идентифицировано три радиуса коротации,», что подтверждает мультирезонансную структуру в этой галактике. (Гусев) Выполнена работа по исследованию галактик с аномально высоким содержанием газа в дисках и проведено их сравнение с галактиками сходной светимости, не обладающими избыточной массой газа.. Показано, что в пределах оптического радиуса галактики богатые газом не отличаются от обычных. Основное различие – в протяженном газовом диске. На большом радиальном протяжении значительная часть дисков характеризуется почти постоянным значением параметра устойчивости по Тоомре (больше двойки). Аргументирован вывод о том, что в таких галактиках внешние диски должны иметь звездную составляющую низкой яркости. Работа готовится к публикации (Засов, Зайцева) . Из выборки обзора панорамной спектроскопии MaNGA проведён отбор и анализ галактик с рассогласованием вращения между газовым и звездным диском (или двумя газовыми, или двумя звездными, дисками). В коллаборации с китайскими коллегами из Университета Нанкина изучена связь галактического окружения с рассогласованием кинематики дисков. Построена согласованная картина, объясняющая наблюдаемые особенности таких галактик как результат аккреции вещества на галактику, и последующего его взаимодействия с диском галактики (Бизяев)

б) Исследование галактик низкой поверхностной яркости Были проанализировали результаты новых глубоких длиннощелевых оптических спектральных наблюдений, а также опубликованные данные по HI для 7 гигантских галактик низкой яркости, определены параметры их дисков и темного гало. Был сделан вывод, о том, что гигантские галактики низкой яркости – неоднородный по своей морфологии и кинематике класс объектов. Были предложены возможные сценарии их формирования. (Сабурова и др.) Был проведен комплексный анализ кинематики, фотометрии и звездных населе-



ний галактики низкой яркости Ark18, которая находится в войде Eridanus. Сделан вывод о том, что диск низкой яркости этой галактики образовался в результате слияния двух карликов не позднее, чем 300 млн лет назад. (Сабурова и др.)

в) Исследование галактик со сверхтонкими дисками. Проведено моделирование сверхтонких галактик (СТГ), для которых ранее были получены спектральные и фотометрические данные, с учетом гравитационного потенциала газового и звездного диска (с переменной вдоль радиуса толщиной), балджа и темного гало. . Приняты во внимание важные для галактик, видимых с ребра, эффекты проекции, конечного пространственного разрешения спектрографа, асимметричного дрейфа и пылевого поглощения. Полученные параметры дисков и темных гало коррелируют с массами галактик и показателями цвета, что является указанием на важность эволюционных эффектов для формирования сверхтонких галактик (Бизяев).

Проведен анализ связи направления вектора вращения с космологическими филаментами для имеющейся в наличии выборки галактик, наблюдаемых с ребра, включая сверхтонкие галактики. Показано, что тенденция галактик иметь спины параллельно филаментам заметна лишь для галактик с наиболее тонкими дисками. (Бизяев)

### 3. Создание численных моделей объектов

На основе результатов космологических симуляций эволюции материи, имеющих в открытом доступе (проект IllustrisTNG100), проведен анализ формирования противовращающихся компонент в галактиках на примере 25 модельных галактик с противовращением.. Показано, что звездный противовращающийся компонент возникает при смешивании первоначального газа в диске с газом, падающим на галактику, с последующим звездообразованием. Результаты моделирования сравниваются с данными наблюдений реальных галактик. . Аргументируется вывод о том, что аккреция газа с противовращением стимулирует активность ядра. (С.Хоперсков, Бизяев, Сабурова). Была проведена работа по анализу фотометрических и спектральных наблюдений и гидродинамическому моделированию трех сверхновых звезд. Предложен и проверен на примере двух сверхновых типа Ia метод оценки непрозрачности выбросов сверхновых, от которой зависит форма их кривой блеска (Блинников) Завершена и доведена до публикации большая работа по численному моделированию с использованием графических процессоров условий формирования спиральных ветвей в применении к маломассивным дисковым галактикам. Построено большое количество самосогласованных моделей для различных входных параметров звездно-газовых дисков, и сформулированы те условия, при которых гравитационная неустойчивость дисков может рождать долгоживущую спиральную структуру. Показано, что ключевым параметром является относительная толщина звездного диска при наличии достаточной массы газа. Результаты моделирования сравниваются с наблюдениями карликовых спиральных галактик. (Засов, Зайцева)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа над темой успешно выполнялась в соответствии с тематическим планом. Получены новые данные о галактиках различных типов, интерпретированы данные проведенных наблюдений, сделаны обоснованные выводы о процессах, происходящих в галактиках. Часть начатых исследований находится на разных стадиях выполнения, и работы над ними будут продолжены. ПУБЛИКАЦИИ: 25 статей, из которых 20- в высокорейтинговых журналах (Nature-1, MNRAS-12, Astrophysical Journal-4, Astronomy and Astrophysics-1).

УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИЯХ: Российские конференции: Приглашенные доклады - 3 Устные доклады - 17 Стендовые доклады - 2 Международные конференции: Приглашенные доклады - 4 Устные доклады - 11 Стендовые доклады - 7

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
Объем финансирования темы в 2021 году  
Таблица А.1

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