

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 524.78-52/782

Опарин Дмитрий Владимирович

**ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ
НА ИОНИЗОВАННЫЙ ГАЗ В ГАЛАКТИКАХ**

(01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Нижний Архыз – 2020

Работа выполнена в Лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель: **Моисеев Алексей Валерьевич**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
САО РАН

Официальные оппоненты:

Васильев Евгений Олегович
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Южный федеральный университет"

Каратаева Гульнара Мирсатовна
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры астрофизики
математико-механический факультет СПбГУ

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук

Защита состоится "____" декабря 2020 г. в ____ часов на открытом заседании
Диссертационного совета Д.002.203.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зе-
ленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "____" октября 2020 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук _____ Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Процессы звездообразования, происходящие в галактиках, оказывают влияние как на них самих, так и на их окружение. Фотоионизирующее излучение OB-звезд, кинетическая энергия звездных ветров и взрывов сверхновых нагревают газ, формируют как упорядоченные, так и хаотические истечения. Часть газа покидает галактику, воздействуя на межгалактическую среду. Часть, охлаждаясь, возвращается обратно, способствуя новым виткам звездообразования. Современные наблюдения обнаруживают все больше косвенных указаний на то, что объяснение многих аспектов эволюции галактик невозможно без учета аккреции газа из межгалактической среды [1]. Учет такого взаимовлияния (feedback) сейчас является необходимым компонентом как для изучения космологической эволюции в целом, так и для объяснения структуры и кинематики отдельных галактик в современную эпоху [2].

Галактический ветер (галактическое истечение, сверхветер, далее – ГВ) – одно из наиболее выразительных и масштабных проявлений воздействия звездообразования на межзвездную и даже межгалактическую среду. Он выглядит как поток газа (ионизованного, нейтрального, молекулярного), выбрасываемый из галактики в результате коллективного действия явлений, связанных с молодыми звездными группировками: радиационного давления, ветров звезд-гигантов, взрывов сверхновых. ГВ оказывают серьезное влияние на структуру и химсостав межзвездной среды и распределение массы в ней, перемешивая её, перенося кинетическую энергию и запуская процессы звездообразования [3]. Результаты численных расчетов подчеркивают важную роль ГВ в галактической эволюции (см., к примеру [4]), что подтверждается также наблюдениями проявлений ГВ среди галактик на больших красных смещениях [5]. Наблюдения галактик с мощным звездообразованием показывают, что практически во каждой из них в той или иной форме проявляется галактическое истечение, хотя бы как широкая подложка в основании эмиссионных линий [6]. ГВ также могут объяснить происхождение некоторых глобальных свойств галактик, таких как отношение массы к металличности [7] или обогащение межгалактической среды металлами [8].

С момента открытия в галактике M 82 ветра, происходящего из центральной области [9], было выполнено множество работ, нацеленных на изучение процессов, порождающих ГВ в активных галактических ядрах (AGN), при вспышках звездообразования и слиянии галактик, обзор которых приведен, к примеру, в [3].

Понимание процессов, стоящих за ГВ, играет важную роль в изучении эволюции галактик, поскольку они оказывают огромное влияние на межзвездную среду: энергия, высвобождаемая во время вспышки звездообразования, и активность AGN может подогревать газ гало, предотвращающий его падение на тело маломассивной

галактики, влияя на количество вещества, участвующего в новом витке звездообразования [4].

Сверхветра имеют сложную многокомпонентную структуру. Как правило, они состоят из нескольких газовых фаз (атомарной, молекулярной, ионизованной), движущихся с разными скоростями [3]. ГВ, порождённые вспышками звездообразования, могут выметать вещество с темпами от десятков до тысяч M_{\odot} в год со скоростями от 100 км/с для холодного компонента до более, чем 1000 км/с в газе высокой ионизации. Известно, что сверхветра очень распространены в галактиках с поверхностной плотностью звездообразования более $0,1 M_{\odot}^{-12}$, как в ближней вселенной [10], так и на больших красных смещениях [11].

В настоящее время идет продолжительная дискуссия об источниках ионизации диффузного газа (diffuse ionized gas, DIG) в галактиках, на роль которых отводят старое звездное население, утечку Лайман-квантов из областей III, а также, возможно, ударные фронты, вызванные процессами звездообразования [12, 13]. Для изучения протяжённых структур низкой яркости в галактиках наиболее эффективно применять методы панорамной (называемой также интегрально-полевой или 3D) спектроскопии. Так, в недавней работе [14], основанной на результатах спектрального обзора SDSS MaNGA, был сделан вывод о том, что DIG связан в основном с проэволюционировавшим звездным населением (звезды AGB и т.п.). В то же время отмечалось, что ударные волны также могут быть причиной наблюдаемого увеличения соотношения потоков запрещенных и Бальмеровских линий. Но проверить это сложно, так как спектральное разрешение обзора MaNGA примерно в два раза ниже, чем требуется, чтобы увидеть эффекты умеренных ударных волн (со скоростью менее 500 км с^{-1}) в наблюдаемой кинематике ионизованного газа. К сожалению, большинство имеющихся наблюдательных данных по спектроскопии и кинематике газа близких галактик получено со спектральным разрешением $FWHM > 5 \text{ \AA}$, что соответствует более 100 км с^{-1} , в терминах дисперсии лучевых скоростей или более 230 км с^{-1} , в терминах FWHM в линии H α . Наблюдения с таким разрешением являются вынужденным компромиссом при изучении объектов низкой поверхностной яркости.

В обзоре галактик методом 3D-спектроскопии SAMI [15] на 3.9-м Англо-Австралийском телескопе построены диаграммы "соотношение потоков линий – дисперсия скоростей" для галактик с активным звездообразованием. Отмечалась положительная корреляция σ ионизованного газа с характерными соотношениями потоков эмиссионных линий, которая интерпретировалась как вклад ударных волн со скоростями $\sim 200\text{--}300 \text{ км с}^{-1}$, сопровождающими вспышку звездообразования. Спектральное разрешение обзора SAMI выше, чем в MaNGA и составляет $R \approx 4500$. Но существенным ограничением этих двух, наиболее массовых на сегодняшний день, обзоров галактик методом 3D-спектроскопии, является довольно низкое пространствен-

ное разрешение (более 1 кпк). В этих обзорах исследуются относительно далекие ($z > 0.01$) галактики. В то же время, наибольший вклад в кинематику межзвездной среды от взрывов сверхновых и ветров молодых звезд в областях звездообразования вносится на значительно меньших пространственных масштабах (от десятков до сотни парсек). Соответственно, любые наблюдаемые проявления ударных фронтов в областях звездообразования существенно замываются при усреднении на масштабах в килопарсек и выше. Примеры уменьшения максимальной дисперсии скоростей ионизованного газа в карликовых галактиках при ухудшении пространственного разрешения приводятся в работе [16], в работе [17] этот же эффект рассмотрен для результатов моделирования совместных вспышек сверхновых.

При изучении пространственно разрешенных свойств галактик огромным преимуществом перед классической длиннощелевой спектроскопией обладают методы интегрально-полевой спектроскопии, позволяющие одновременно изучать различные компоненты галактики. Сочетание изображения и спектроскопии обеспечивает лучшее понимание свойств таких галактик. В частности, данные методики использовались при исследованиях вклада ударного возбуждения в ионизацию газа в ходе ГВ [15]

Основной целью, данного исследования являлось детальное наблюдательное изучение кинематики и состояния ионизации газа в ряде близких галактик с умеренным темпом звездообразования, определение основных параметров газовых истечений ("галактических ветров"), поиск источников ионизации газа. Последнее особенно актуально в связи с непрекращающейся дискуссией о природе диффузного ионизованного газа (DIG), наблюдаемого как в Млечном Пути, так и в других галактиках. До сих пор не ясно, что же ионизует этот газ – старое звездное население, "утечка" Лайман-квантов из областей звездообразования, или же коллективное воздействие ударных волн и вспышек сверхновых.

Цели и задачи исследования

Целью данной диссертационной работы является исследование текущих процессов звездообразования и ионизованной межзвездной среды на масштабах от сотен парсек до нескольких килопарсек в ряде близких галактик с помощью данных оптической панорамной спектроскопии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Построение карт кинематических параметров ионизованного газа методом панорамной спектроскопии на основе наблюдений с редуктором светосилы SCORPIO-2 первичного фокуса 6-м телескопа БТА САО РАН.
2. Разработка и построение моделей, описывающих наблюдаемую кинематику галактических ветров, с целью определения основных параметров истечений.

3. Разработка методов определения источников ионизации диффузного газа в галактиках с помощью сочетания классических спектрофотометрических методик с информацией о дисперсии лучевых скоростей газа
4. Разработка методов сравнительного анализа данных, полученных различными методами панорамной спектроскопии, включая и разработанный в CAO РАН фотометр с перестраиваемым фильтром MaNGaL.

Научная новизна

1. Впервые проведено спектральное картирование галактического ветра в карликовой галактике NGC 4460, уточнены оценки ветровых параметров: скорости истечения, выметенной массы, возраста ветровой структуры. В рамках модели псевдоизотермического холодного гало тёмной материи сделан вывод, что скорость выброса меньше параболических скоростей, и выметенное вещество со временем вновь упадёт на галактику.
2. Впервые проведено картирование галактического ветра в галактике UGC 10043, определены основные физические характеристики ветра. Наблюдаемое состояние ионизации газа объясняется в рамках сетки моделей ионизации газа ударными волнами. Требуемая величина удара хорошо согласуется с оценками скорости ветра, полученными в рамках пространственной модели истечения на основе наших измерений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП).
3. Впервые реализован метод диагностики состояния межзвездной среды галактик на основе совместного использования данных о кинематике ионизованного газа, полученных с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо и данных интегрально-полевой спектроскопии о потоках в эмиссионных линиях. Изучены источники ионизации в нескольких близких галактиках с умеренным (менее $0.5M_{\odot}$ в год) темпом звездообразования. Показано, что в ряде случаев наблюдается положительная корреляция между дисперсией лучевых скоростей и вкладом ударного возбуждения в ионизацию газа.
4. Впервые в практике отечественных обсерваторий состояние ионизованного газа в галактиках изучается с помощью узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром. С помощью этого метода исследовано состояние ионизации газа в галактике NGC 3077.

Научная и практическая значимость

1. Полученные в диссертации параметры галактических ветров накладывают ограничения на уже существующие модели потери газа галактиками и могут исполь-

зоваться для численного моделирования процессов звездообразования в галактиках.

2. Обнаруженная в ряде галактик с умеренным звездообразованием четкая связь между параметрами ионизации газа и дисперсией его лучевых скоростей может использоваться для построения моделей взаимодействия звездных комплексов с окружающим газом на масштабах около 1 кпк и для прояснения природы диффузного ионизованного газа в близких галактиках.
3. Представленный в диссертации метод, сочетающий анализ наблюдений со сканирующим ИФП и узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром, позволяет решать задачи по исследованию состояния ионизации протяжённых эмиссионных объектов (в том числе и объектов с низкой поверхностно яркостью и малой дисперсией скоростей) на существующих российских телескопах, в том числе малого и среднего диаметра. По сравнению с панорамной спектроскопией данная методика обеспечивает в несколько раз большее поле зрения и лучшую пространственную дискретизацию.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Совокупность параметров галактических ветров в галактиках NGC 4460 и UGC 10043. Для NGC 4460 уточнена оценка характерных скоростей выметаемого вещества в интервале $30 - 80 \text{ км с}^{-1}$, возраст ветровой структуры не превышает 50 млн. лет. Показано, что значения скоростей истечения меньше параболических, и выметенное вещество вернётся в галактику. Скорость выметаемого газа в UGC 10043 составляет $100 - 250 \text{ км с}^{-1}$, что согласуется с оценкой скоростей ударных волн по фотоионизационным моделям.
2. Результаты тестирования метода диагностики состояния ионизованного газа с помощью совместного использования данных о кинематике ионизованного газа в пяти галактиках, полученных с помощью сканирующего ИФП и данных интегрально-полевой спектроскопии о потоках в эмиссионных линиях. Показано, что высокое ($R \sim 16000$) спектральное разрешение сканирующего ИФП позволяет исследовать объекты с низкими значениями дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа.
3. Вывод о том, что использование узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром для изучения состояния ионизации газа по соотношениям оптических эмиссионных линий обеспечивает в многократное улучшение пространственного разрешения и большее поле зрения по сравнению с с большинством методов панорамной спектроскопии, что делает данную технику актуальной для исследования протяжённых объектов с низкой поверхностной яркостью и сложной

морфологией. Эффективность предложенного метода проверена на примере исследования галактики NGC 3077.

4. Вывод, полученный на основании распределения лучевых скоростей в галактике NGC 3077, о том, что часть областей с многокомпонентным профилем эмиссионных линий, ранее считавшихся расширяющимися сверхоболочками, являются отдельными кинематическими компонентами, обусловленными как истечениями газа, так и выпадениями вещества на галактику из приливного хвоста M 81.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на конкурсе-конференции САО РАН, а также представлялись в виде докладов на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва, ИКИ РАН, 21-24.12.2015 г. – стендовый доклад "Наблюдательное изучение галактического ветра", Опарин Д.В., Моисеев А.В.
2. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН, 19-22.04.2016 – устный доклад "Галактический ветер в карликовых галактиках: кинематика ионизованного газа.", Опарин Д.В., Моисеев А.В.
3. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пушино, ПРАО АКЦ ФИАН, 18-21.04.2017 – устный доклад "Поиск источников ионизации газа в галактиках: дополнение к классическим методам", Опарин Д.В., Моисеев А.В.
4. "11th Serbian Conference of Spectral Line Shapes in Astrophysics", Сербия, Шабач 21-25.08.2017 г. – устный доклад, "Kinematics of ionized gas outflows caused by star formation", Опарин Д.В., Моисеев А.В.
5. "Всероссийская Астрономическая Конференция", Ялта, КрАО РАН 18-22.09.2017 – устный доклад "Поиск источников ионизации газа в галактиках: дополнение к классическим методам" Опарин Д.В., Моисеев А.В.
6. "The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflows", Германия, Потсдам, 02-07.09.2018 – стендовый доклад "Kinematics and ionization properties of gas outflows in nearby galaxies viewed with Fabry-Perot interferometry" Moiseev, A.; Oparin, D.
7. "The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflows", Германия, Потсдам, 02-07.09.2018 – стендовый доклад "Diagnostics of

ionized gas in galaxies with the “BPT- σ ” relation”, Moiseev, A.; Perepelitsyn A., Oparin, D., Keel W.C.

8. Diversity of the local universe, Нижний Архыз, САО РАН 30.09-04.10.2019 – устный доклад “BPT- σ relation in local galaxies.”, Опарин Д.В., Моисеев А.В., Егоров О.В.

Публикации по теме диссертации

1. **Oparin D.V.**, Moiseev A.V.; “Galactic wind in NGC 4460: New observations”, *Astrophysical Bulletin*, Vol.70, Issue 4, pp. 411–424 (2015)
2. Lopez-Coba C., Sanchez S.F., Moiseev A.V., **Oparin D.V.** et al.; “Star Formation Driven Galactic Winds in UGC 10043”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* Vol. 467, Issue 4, pp. 4951–4964 (2017).
3. **Oparin D.V.**, Moiseev A.V.; “Diagnostics of Ionized Gas in Galaxies with the “BPT-Radial Velocity Dispersion” Relation”, *Astrophysical Bulletin*, Vol.73, Issue 3, pp. 298–309, (2018)
4. **Д. Опарин**, А. Моисеев. “Поиск источников ионизации газа в галактиках: дополнение к классическим методам”, *Изв. Крымской Астрофиз. Obs.*, том. 114, N.4, стр.186-191 (2018)
5. Keel W. C., Bennert V. N., Pancoast, A., Harris Chelsea E., Nierenberg A., Chojnowaki S. Drew, Moiseev A. V., **Oparin D. V.**, Lintott C. J., Schawinski K., Mitchell G., Cornen C. “AGN photoionization of gas in companion galaxies as a probe of AGN radiation in time and direction” *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, Vol. 483, pp. 4847–4865 (2019)
6. **Oparin, D. V.**; Moiseev, A. V.; Egorov, O. V. “Ionized gas in the NGC 3077 galaxy” *Astrophysical Bulletin*, Vol.75, Issue 4, pp. 360–375 (2020)
7. Moiseev A.; Perepelitsyn A., **Oparin D.** “Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL): new tunable filter imager for Caucasian telescopes”, *Experimental Astronomy Experimental Astronomy*, Online First (2020) , arXiv:2005.14598 , DOI 10.1007/s10686-020-09672-x

Личный вклад автора

В работах [1], [2] – обработка и анализ наблюдательных данных со сканирующим ИФП, моделирование пространственной структуры ветровых истечений, оценка кинематических параметров ветра. Обсуждение результатов наравне с соавторами. В

работах [3], [4] – обработка наблюдательных данных с ИФП, анализ всего массива наблюдательных данных. Совместное обсуждение результатов. В работе [5] – получение наблюдательного материала методом фотометрии с перестраиваемым фильтром. В работе [6] – получение наблюдательного материала на 2.5 м телескопе, обработка и анализ наблюдательных данных, совместное обсуждение результатов. В работе [7] – методическая работа с фотометром, получение наблюдательного материала.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 122 страницы с 28 рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит 124 наименования.

Во Введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи работы, описывается научная новизна и практическая значимость работы. Приводится список публикаций, содержащих основные результаты исследования. Описывается апробация полученных результатов.

Первая глава содержит описание особенностей методик наблюдений и обработки данных, применявшихся в данной работе. В диссертации использован наблюдательный материал, полученный на нескольких российских и зарубежных телескопах. Для изучения кинематики ионизованного газа применялся сканирующий интерферометр Фабри-Перо (далее – ИФП), установленном в фокальных редукторах светосилы SCORPIO и SCORPIO-2. Состояние ионизации газа изучалось по соотношениям линий, полученным с помощью методов панорамной спектроскопии низкого разрешения, узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром и длиннощелевой спектроскопии. Последняя так же применялась для оценки металличности газа.

Раздел 1.1 содержит описание наблюдений шести галактик со сканирующими ИФП на фокальных редукторах светосилы SCORPIO и SCORPIO-2 в первичном фокусе телескопа БТА в спектральном интервале вокруг линий $H\alpha$ и $[N II]$. Кратко перечисляются основные шаги по обработке наблюдательного материала, итогом которых является так называемый ”куб данных”, где каждому пространственному элементу соответствует индивидуальный спектр. Аппроксимация получившихся спектров функцией Фойгта позволяет получить поля лучевых скоростей и дисперсий лучевых скоростей ионизованного газа в исследуемых объектах в поле зрения b' с масштабом $\approx 0.7''/px$ [18]. Спектральное разрешение при наблюдениях с различными интерферометрами составляло $R \sim 4000 - 16000$

В **разделе 1.2** описываются наблюдательные данные, полученные методами панорамной спектроскопии низкого разрешения. Для изучения состояния ионизации газа в трёх галактиках использовалась спектральная информация, полученная на спектрографе РРАК 3.5-м телескопа обсерватории Calar-Alto в рамках обзора CALIFA

[19]. Массив световолокон РРАК состоит из 331 пространственных элемента диаметром $2.7''$, образующих шестиугольное поле $74'' \times 64''$. В работе использовались данные, полученные при наблюдениях в режиме низкого разрешения ($R \sim 850$, спектральный диапазон составлял $3750 - 7500 \text{ \AA}$). Галактика VII Zv 403 наблюдалась в первом фокусе 6-м телескопа БТА с мультизрчковым волоконным спектрографом MPFS [20]. Данный прибор позволяет одновременно регистрировать спектры от 256 пространственных элементов диаметром $1''$, образующих квадратное поле $16'' \times 16''$. Спектральный диапазон составлял $4250-7200 \text{ \AA}$, $R \sim 900$.

В **разделе 1.3** рассматривается анализ наблюдательных данных галактики NGC 3077, полученных на приборе SCORPIO-2 в режиме длиннощелевой спектроскопии. В работе использованы наблюдения при двух позиционных углах со щелью $1''$. Использовалась объёмно-фазовая голографическая решётка с разрешением $\delta\lambda \approx 5 \text{ \AA}$ и со спектральным диапазоном $3650 - 7250 \text{ \AA}$.

В **разделе 1.4** описывается узкополосная фотометрия с перестраиваемым фильтром с афокальным редуктором светосилы MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines). Данный метод позволяет проводить картирование в эмиссионных линиях протяжённых объектов, что делает его актуальным для изучения состояния ионизации газа. По сравнению с классическими методами панорамной спектроскопии данный метод обеспечивает лучшее пространственное разрешение и в несколько раз большее поле зрения. Наблюдения проводились на 2.5-м телескопе Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ. Описываются основные принципы работы прибора и последовательность обработки наблюдательных данных.

Во второй главе описывается изучение кинематических характеристик галактических ветров с помощью моделирования их пространственной структуры.

Раздел 2.1 содержит описание исследования карликовой изолированной галактики NGC 4460. На основании кинематических карт, полученных по данным наблюдений со сканирующим ИФП, создана биконическая модель галактических истечений, с помощью которой исследуется кинематика выметенного вещества. Получены оценки скоростей истечения $V_{out} = 30 - 80 \text{ км с}^{-1}$, массы выброшенного из диска газа $M_{wind} = 1.7 \cdot 10^5 M_{\odot}$ и его кинетической энергии $E_{wind} = 0.3 - 2.2 \cdot 10^{52} \text{ эрг}$. Возраст образованной ветром структуры лежит в пределах 20-50 млн. лет

В рамках модели псевдоизотермического гало тёмной материи получен вывод о том, что выброшенный газ, не обладая достаточными скоростями, со временем вновь вернётся в галактический диск.

В **разделе 2.2** исследуется видимая с ребра галактика UGC10043. Сопоставляются данные интегрально-полевой спектроскопии низкого разрешения, полученные в рамках обзора CALIFA (Calar-Alto Legacy Integral Field Area, [21]), и результаты наблюдений со сканирующим ИФП на телескопе БТА. Показано, что оценки скоростей галактического ветра, полученные с помощью пространственной модели ветровой

структуры, хорошо согласуются с оценками скоростей ударных волн, полученных в рамках моделей ударного возбуждения по диагностическим диаграммам соотношений эмиссионных линий.

Третья глава посвящена изучению состояния ионизации газа. Одним из широко известных способов анализа источников ионизации газа являются ВРТ-диаграммы, названные так в честь Baldwin, Phillips и Terlevich [22], позже усовершенствованные [23, 24]. Данный метод базируется на соотношениях потоков близких оптических эмиссионных линий – как бальмеровских, так и запрещённых. С их помощью можно определить, является ли основным источником ионизации газа излучение молодых массивных O, B-звёзд, или же жесткое ионизирующее излучение активных галактических ядер. Однако с помощью ВРТ-диаграмм трудно диагностировать такие источники ионизации газа, как ударные волны, излучение звезд асимптотической ветви гигантов или ядер галактик типа LINER (Low-Ionization Narrow Emission-line Region).

Учёт в анализе дополнительного параметра – дисперсии лучевых скоростей (σ) позволяет выделить газ, ионизованный ударными волнами. Этот способ основан на эффекте повышения турбулентности газа за волновым фронтом. Однако по сравнению с измерениями потоков в эмиссионных линиях оценка σ требует заметно лучшего спектрального разрешения. Поэтому до недавнего времени зависимость соотношений потоков линий, характеризующих ударную ионизацию, от σ изучалась преимущественно для объектов с $\sigma > 100 - 200 \text{ км с}^{-1}$, таких как галактики с мощным звездообразованием.

В данной главе представлено исследование возможности оценки вклада ударного возбуждения в состояние ионизации газа с помощью соотношений "ВРТ- σ " на примере выборки из четырёх галактик, имеющих разную морфологию и историю звездообразования. Кинематика газа изучалась по данным 3D-спектроскопии со сканирующим ИФП, обеспечивающим в несколько раз лучшее спектральное разрешение по сравнению с классическими методами интегрально-полевой спектроскопии. Это позволяет использовать данный метод при изучении объектов, где дисперсия лучевых скоростей ионизованного газа находится на уровне нескольких десятков км с^{-1} . Показано, что в ряде случаев применение таких кинематических диаграмм позволяет разрешить вопрос о том, чем обусловлено наблюдаемое состояние диффузного ионизованного газа. Для нескольких галактик обнаруживается положительная корреляция между дисперсией лучевых скоростей и вкладом ударного возбуждения в ионизацию газа. С помощью данного метода подтверждено предположение о прямом столкновении газовых облаков на наклонных орбитах с основным диском галактики Agr 212.

Четвёртая глава посвящена комплексному исследованию близкой карликовой галактики NGC 3077, имеющей сложную морфологию. Межзвездная среда этой галактики находится под воздействием нескольких возмущающих факторов, прежде

всего, к ним относятся центральная вспышка звездообразования и приливные структуры в группе M 81. Кинематика газа изучалась по данным 3D-спектроскопии со сканирующим ИФП. По данным длиннощелевой спектроскопии уточнена оценка металличности газа в галактике $Z = 0.6Z_{\odot}$. Диагностика состояния ионизации газа проводилась на основе картирования в основных оптических эмиссионных линиях с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ и по данным длиннощелевой спектроскопии, при этом оба метода показывают хорошее согласие друг с другом. Пространственно-разрешенные диагностические диаграммы соотношений эмиссионных линий не выявляют корреляции между состоянием ионизации газа и его дисперсией скоростей, что, скорее всего, связано с мощной фотоионизацией молодыми звездами, в то время как вклад ударных волн в возбуждение эмиссионных линий менее существенен. Изучены области локализации многокомпонентных профилей $H\alpha$. Приводятся аргументы в пользу того, что в основном они связаны не с расширяющимися оболочками, как считалось ранее, а с отдельными кинематическими компонентами вдоль луча зрения. Предположительно здесь наблюдается комбинация ветрового истечения из областей звездообразования и аккреции из облаков межгалактического газа в группе M 81.

В Заключении приводится описание основных результатов, достигнутых в рамках данного исследования.

Список литературы

- [1] The host galaxies of active galactic nuclei / G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti et al. // MNRAS. — 2003. — Vol. 346. — P. 1055–1077.
- [2] Dense molecular gas: a sensitive probe of stellar feedback models / P. F. Hopkins, D. Narayanan, N. Murray, E. Quataert // MNRAS. — 2013. — Vol. 433. — P. 69–77.
- [3] Veilleux, S. Galactic Winds / S. Veilleux, G. Cecil, J. Bland-Hawthorn // ARAA. — 2005. — Vol. 43. — P. 769–826.
- [4] Hopkins, P. F. Stellar feedback in galaxies and the origin of galaxy-scale winds / P. F. Hopkins, E. Quataert, N. Murray // MNRAS. — 2012. — Vol. 421. — P. 3522–3537.
- [5] Infrared Observations of Nebular Emission Lines from Galaxies at $Z \sim 3$ / M. Pettini, M. Kellogg, C. C. Steidel et al. // The Astrophysical Journal. — 1998. — Vol. 508. — P. 539–550.
- [6] Ionized gas outflows and global kinematics of low- z luminous star-forming galaxies / S. Arribas, L. Colina, E. Bellocchi et al. // Astronomy and Astrophysic. — 2014. — Vol. 568. — P. A14.

- [7] The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey / C. A. Tremonti, T. M. Heckman, G. Kauffmann et al. // *ApJ*. — 2004. — Vol. 613. — P. 898–913.
- [8] Oppenheimer, B. D. Mass, metal, and energy feedback in cosmological simulations / B. D. Oppenheimer, R. Davé // *MNRAS*. — 2008. — Vol. 387. — P. 577–600.
- [9] Lynds, C. R. Evidence for an Explosion in the Center of the Galaxy M82. / C. R. Lynds, A. R. Sandage // *ApJ*. — 1963. — Vol. 137. — P. 1005.
- [10] Dahlem, M. An X-Ray Minisurvey of Nearby Edge-on Starburst Galaxies. I. The Data / M. Dahlem, K. A. Weaver, T. M. Heckman // *ApJS*. — 1998. — Vol. 118. — P. 401–453.
- [11] The Rest-Frame Optical Spectra of Lyman Break Galaxies: Star Formation, Extinction, Abundances, and Kinematics / M. Pettini, A. E. Shapley, C. C. Steidel et al. // *ApJ*. — 2001. — Vol. 554. — P. 981–1000.
- [12] SDSS IV MaNGA: Deep observations of extra-planar, diffuse ionized gas around late-type galaxies from stacked IFU spectra / A. Jones, G. Kauffmann, R. D’Souza et al. // *A&A*. — 2017. — Vol. 599. — P. A141.
- [13] Complexes of triggered star formation in supergiant shell of holmberg ii / O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, Y. A. Shchekinov // *MNRAS*. — 2017. — Vol. 464. — P. 1833–1853.
- [14] SDSS-IV MaNGA: the impact of diffuse ionized gas on emission-line ratios, interpretation of diagnostic diagrams and gas metallicity measurements / K. Zhang, R. Yan, K. Bundy et al. // *MNRAS*. — 2017. — Vol. 466. — P. 3217–3243.
- [15] The SAMI Galaxy Survey: shocks and outflows in a normal star-forming galaxy / I.-T. Ho, L. J. Kewley, M. A. Dopita et al. // *MNRAS*. — 2014. — Vol. 444. — P. 3894–3910.
- [16] Moiseev, A. V. Ionized gas velocity dispersion in nearby dwarf galaxies: looking at supersonic turbulent motions / A. V. Moiseev, T. A. Lozinskaya // *MNRAS*. — 2012. — Vol. 423. — P. 1831–1844.
- [17] Vasiliev, E. O. Velocity dispersion of ionized gas and multiple supernova explosions / E. O. Vasiliev, A. V. Moiseev, Y. A. Shchekinov // *Baltic Astronomy*. — 2015. — Vol. 24. — P. 213–220.
- [18] Moiseev, A. V. Reduction of CCD observations made with the Fabry-Perot scanning interferometer. II. Additional procedures / A. V. Moiseev, O. V. Egorov // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — Vol. 63, № 2. — P. 181–192.

- [19] PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. II. The Wide Integral Field Unit PPak / A. Kelz, M. A. W. Verheijen, M. M. Roth et al. // *PASP*. — 2006. — Vol. 118. — P. 129–145.
- [20] Afanasiev, V. L. Kinematics of Circumnuclear Regions of Galaxies: 2D Spectroscopy on SAO RAS 6m Telescope / V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, A. V. Moiseev // *Stellar Dynamics: from Classic to Modern* / Ed. by L. P. Ossipkov, I. I. Nikiforov. — 2001. — P. 103.
- [21] Califa, the calar alto legacy integral field area survey / S. F. Sánchez, R. C. Kennicutt, A. Gil de Paz et al. // *A&A*. — 2012. — Vol. 538. — P. A8.
- [22] Baldwin, J. A. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects / J. A. Baldwin, M. M. Phillips, R. Terlevich // *PASP*. — 1981. — Vol. 93. — P. 5–19.
- [23] Theoretical Modeling of Starburst Galaxies / L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland et al. // *ApJ*. — 2001. — Vol. 556. — P. 121–140.
- [24] The host galaxies and classification of active galactic nuclei / L. J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, T. Heckman // *MNRAS*. — 2006. — Vol. 372. — P. 961–976.

Бесплатно

Опарин Дмитрий Владимирович

Изучение воздействия звездообразования на ионизованный газ в галактиках

Специальная астрофизическая обсерватория РАН