

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**

Специальность 01.03.02 —

«Астрофизика и звёздная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук Моисеев А.В.

Нижний Архыз – 2020

Содержание

Введение	4
I. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ	20
1 Сканирующий интерферометр Фабри-Перо	20
2 Панорамная спектроскопия. Спектры низкого разрешения	24
3 Длиннощелевая спектроскопия	25
4 Узкополосная фотометрия с MaNGaL	26
4.1 Калибровка потока	30
5 Выводы и результаты Главы 1	33
II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ВЕТРОВ	34
1 NGC4460	35
1.1 Анализ распределения лучевых скоростей	36
1.2 Обсуждение	43
1.3 Скорость покидания галактики	45
2 UGC10043	46
2.1 Анализ спектров низкого разрешения	47
2.2 Анализ кинематики газа по данным ИФП	55
2.3 Кинематика и состояние ионизации газа	59
3 Выводы и результаты Главы 2	61
III. ДИАГНОСТИКА ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА В ГАЛАКТИКАХ С ПОМОЩЬЮ СООТНОШЕНИЯ $V_{\text{PT}}-\sigma$	64

1	Проблема связи кинематики и параметров ионизации газа	64
2	Спектральные данные и их анализ	66
2.1	Выборка галактик	66
3	Диаграммы ВРТ- σ	69
3.1	Галактический ветер в UGC 10043	69
3.2	Mrk 35 и VII Zw 403: карликовые галактики со вспышкой звездообразования	70
3.3	Apr 212: галактика с полярным кольцом	76
4	Выводы и результаты Главы 3	77
 IV. Использование фотометрии с перестраиваемым фильтром для построения диагностических диаграмм.		
1	Введение	81
2	Учет поглощения и карта яркости в линии $H\beta$	84
3	Результаты наблюдений	89
3.1	Анализ кинематики в линии $H\alpha$	89
3.2	Анализ длиннощелевых спектров	91
3.3	ВРТ-диаграммы по данным узкополосной фотометрии	95
4	Выводы и результаты Главы 4	101
Заключение		104
Литература		107

Введение

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 межзвёздной 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 показывает, что практически во каждой из них в той или иной форме проявляет себя 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 М 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 приведён, 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 подогреть газ гало, предотвращая 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^{-1} для холодного компонента до более, чем 1000 км с^{-1} в газе высокой ионизации. Известно, что сверхветра очень распро-

странены в галактиках с поверхностной плотностью звездообразования более $0,1 M_{\odot} \text{ лет}^{-1} \text{ кпс}^2$, 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 $\text{H}\alpha$. 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 характерны-

ми 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 пространственное 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 САО 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 использоваться 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", Пущино, 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", Пущино, 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, Шабац 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. Обс.*, 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 полученных спектров функцией Фойгта позволяет получить поля лучевых скоростей и дисперсий лучевых скоростей ионизованного газа в исследуемых объектах в поле зрения $6'$ с масштабом $\approx 0.7''/\text{px}$ [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 первичном фокусе 6-м телескопа

БТА с мультиспектральным 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 Å, $R \sim 900$.

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 $\delta\lambda \approx 5\text{Å}$ и со спектральным диапазоном 3650 - 7250 Å.

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

$E_{wind} = 0.3 - 2.2 \cdot 10^{52}$ 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.

I. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Панорамная спектроскопия является важным направлением развития методов астрономических наблюдений, позволяющих получать спектральную информацию с двумерного поля, что особенно актуально при исследованиях протяжённых объектов со сложной морфологией. Результаты таких наблюдений, как правило, представляются в виде так называемого трёхкоординатного "куба данных". В таком кубе две координаты являются пространственными, в то время как третья соответствует длинам волн λ . Таким образом, каждому элементу изображения соответствует свой спектр.

Наблюдательный материал, используемый в данной работе, был получен при наблюдениях с фокальными редукторами SCORPIO и SCORPIO-2 в первичном фокусе 6-м телескопа БТА САО РАН, а также при наблюдениях в режиме узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром с картировщиком эмиссионных линий MaNGA на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ.

1. Сканирующий интерферометр Фабри-Перо

Для построения кинематических карт использовались данные наблюдений в первичном фокусе 6-м телескопа БТА САО РАН со сканирующим интерферометром Фабри-Перо, установленном в фокальных редукторах SCORPIO [25] и SCORPIO-2 [26]. Эмиссионная линия ($H\alpha$ или $[NII]\lambda 6583$) выделялись с помощью узкополосного фильтра шириной $\sim 20\text{\AA}$. Галактики NGC4460 и NGC3077 наблюдались с интерферометром IFP751, обеспечивающим спек-

Таблица 1. Параметры наблюдений галактик со сканирующим ИФП

Галактика,	D Мпк	M_B	Сканирующий ИФП		
			$\Delta\lambda$	$\delta\lambda, \text{\AA}$	θ''
NGC4460	9.59	-17.73	H α	0.4	2.2
UGC 10043	34.9	-17.6	[N II]	1.7	1.5
VII Zw 403 (UGC 6456)	4.34	-13.87	H α	0.8	2.2
Mrk 35 (NCG 3353)	15.6	-17.75	H α	0.8	2.1
Arp 212 (NGC 7625)	23.5	-18.9	H α	0.8	2.7
NGC3077	3.85	-17.62	H α	0.4	2.0

тральное разрешение $\text{FWHM}=0.4\text{\AA}$, UGC 10043 – с IFP186, с разрешением $\text{FWHM}=1.7\text{\AA}$. В наблюдениях остальных галактик применялся IFP501 с разрешением $\text{FWHM}=0.8\text{\AA}$. В наблюдениях VII Zw 403 масштаб изображений составлял $0.56''/\text{px}$ при поле зрения $4'8$, для остальных галактик, соответственно, $0.7''/\text{px}$ и $6'1$. Результатом обработки набора интерферограмм являлся куб данных, где каждый пиксель содержал спектр выбранной эмиссионной линии из 36–40 каналов. Детали обработки данных и журналы наблюдений опубликованы в статьях, где эти наблюдения впервые использовались, см. ссылки в главе III. Так как инструментальный контур интерферометра хорошо описывается профилем Лоренца, то наблюдаемые профили эмиссионных линий аппроксимировались функцией Фойгта — свёрткой профилей Гаусса и Лоренца [18]. Это подразумевает, что исходный (без инструментального уширения) профиль эмиссионной линии хорошо описывается одной гауссианой, что является хорошим приближением при наблюдениях областей НЦ, за исключением отдельных peculiarных случаев (расширяющиеся оболочки, окрестности звезд Вольфа–Райе и т.п., см [16, 13]. По результатам аппроксимации строились монохроматические изображения в данной линии, распределения лучевых скоростей ионизованного газа и карты дисперсии лучевых скоростей, свободные от аппаратного уширения профиля спектральной линии [18].

Обработка наблюдений

Кратко рассмотрим принципы обработки наблюдений со сканирующим ИФП на примере наблюдательных данных, полученных на фокальных редукторах SCORPIO, SCORPIO-2 6-м телескопа БТА.

Исходными кадрами для обработки являются:

- **OBJECT** – интерферограммы исследуемого объекта.
- **NEON** – калибровочные изображения от He-Ne-Ar лампы, вырезаемые узким интерференционным фильтром.
- **FLAT** – равномерная засветка поля лампой с континуальным спектром, получаемая с тем же узкополосным фильтром, что и интерферограммы исследуемого объекта.
- **BIAS** – кадры ”тока смещения”.
- **TEST** – изображения колец в отдельных каналах ИФП, получаемые при засветке He-Ne-Ar лампой до и после накоплений объекта в том же положении телескопа. Нужны для отслеживания точности сканирования и для контроля смещения центра колец из-за гнутый прибора.

Первым шагом при обработке является усреднение кадров тока смещения и вычитание их из всех научных и калибровочных накоплений. После этого кадры объектов и калибровок поканально собираются в кубы однотипных данных.

Далее проводится чистка следов космических частиц в калибровочных кубах **NEON** и **FLAT**. Используется простой σ -фильтр: отсчеты в спектре, отличающиеся от среднего на установленное пороговое значение, заменяются полусуммой отсчетов из соседних каналов. Строится Λ -куб – массив, содержащий значения длин волн в каждой точке куба данных объекта [27]. Поскольку на

каждой отдельной интерферограмме длина волны не является константой, а изменяется с расстоянием от центра колец, то в каждой точке кадра смешивается пространственная и спектральная информация.

Куб **ОБЪЕСТ** нормируется на куб **FLAT** для учёта кривой пропускания узкополосного фильтра. Осуществляется чистка следов космических частиц **ОБЪЕСТ**.

При вычитании спектра ночного неба в каждом канале куба **ОБЪЕСТ** эмиссия фона неба усредняется по азимутальному углу в узких кольцах, с центром на оптической оси ИФП. Затем средний профиль яркости вычитается из интерферограммы объекта.

Фотометрическая коррекция куба объекта производится на основании результатов поканальной фотометрии заранее выбранных звезд в поле зрения. Измеряются вариации FWHM и интегрального потока звёзд, относительные смещения центра изображения. Строятся усредненные зависимости этих параметров от номера канала в кубе. Данная процедура позволяет учесть вклад нестабильности атмосферы и ошибок гидирования. Для коррекции качества изображений кадры сворачиваются с двумерными гауссианами так, чтобы результирующее FWHM было таким же, как в кадрах с наихудшими изображениями.

Линеаризация – перевод куба данных объекта в шкалу длин волн. Данная процедура осуществляется с помощью ранее созданного Λ -куба. Если в процессе обработки в кубе **ОБЪЕСТ** выполнялись смещения каналов (например, при коррекции по положениям звёзд поля или при учёте сдвига центра колец **TEST** по отношению к калибровочным изображениям **NEON**), то точно такие же смещения проводятся в соответствующих каналах Λ -куба. Таким образом, для каждого трёхмерного куба данных сохраняются корректные длины волн, соответствующие каждому пикселю изображения. Преобразование в шкалу длин волн осуществляется путем интерполяции наблюдаемых в каждой точке (x,y)

интенсивностей со шкалы Λ -куба на равномерную по длинам волн сетку.

2. Панорамная спектроскопия. Спектры низкого разрешения

Для UGC 10043, Mrk 35 и Agr 212 использовались данные обзора CALIFA, проводившегося с режиме интегрально-полевой спектроскопии широкого поля PPAK[19] спектрографа PMAS [28] на 3.5-м телескопе обсерватории Calar Alto. Массив световолокон PPAK состоит из 331 элемента диаметром $2.7''$, собранных в шестиугольное поле $74'' \times 64''$. Использовались кубы, полученные в режиме низкого разрешения, покрывающие весь оптический диапазон ($V500$, $R \sim 850$). Обработанные данные представлены в виде кубов, экстраполированных с гексагональной сетки на квадратную с размером пространственного элемента (spaxel) в $1''$.

Галактика VII Zw 403 наблюдалась с мультисрачковым спектрографом MPFS ([20]) на БТА. Массив квадратных линз в сочетании со световолокнами обеспечивал поле зрения 16×16 элементов с масштабом $1''$ на линзу. Куб данных, представленный в [29] является мозаикой размером $49'' \times 31''$ из семи полей MPFS. Спектральный диапазон составлял $4250\text{--}7200 \text{ \AA}$, разрешение – 8 \AA .

Для анализа использовались кубы, бинированные 2×2 к масштабу $2''$ на элемент. Аппроксимация линий в спектрах проводилась однокомпонентной функцией Гаусса. Отношения потоков линий измерялись только по спектрам, в которых для каждой эмиссионной линии отношение сигнал–шум $S/N > 2$. Учитывался локальный уровень континуума вблизи каждой линии.

Таблица 2. Параметры наблюдений галактик методами интегрально-полевой спектроскопии

Галактика,	Интегрально-полевая спектроскопия			
	Прибор	$\Delta\lambda$, Å	$\delta\lambda$, Å	θ''
UGC 10043	РРАК	3750-7500	5-9	2.7
VII Zw 403 (UGC 6456)	MPFS	4250-7200	8	2.0
Mrk 35 (NCG 3353)	РРАК	3750-7500	5-9	2.7
Arp 212 (NGC 7625)	РРАК	3750-7500	5-9	2.7

3. Длиннощелевая спектроскопия

С помощью того же прибора SCORPIO-2 6-м телескопа САО РАН в режиме спектроскопии с длинной щелью (размер щели $6.1 \times 1''$) были получены спектрограммы разрезов при двух позиционных углах ($PA=234^\circ$ и 312°), проходящих через полость в распределении ионизованного газа в линии $H\alpha$ на севере центральной части галактики. Локализация щелей спектрографа показана на Рис. 23. Использовалась решетка VPHG 1200@540, обеспечивающая спектральное разрешение $\delta\lambda \approx 5\text{Å}$ в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 3650 - 7250\text{Å}$.

Обработка наблюдений проходила стандартным образом с помощью пакета программ, написанного на языке IDL для редукации длиннощелевых данных со SCORPIO-2. Основные этапы обработки включали вычитание тока смещения, чистку следов космических частиц, деление на спектр плоского поля, линейаризацию, вычитание эмиссионного спектра ночного неба. Для привязки к шкале длин волн использовался спектр сравнения He-Ne-Ar лампы, снятый в ту же ночь. Для калибровки за спектральную чувствительность и привязки к абсолютным энергетическим единицам были использованы спектрофотометрические стандарты BD+28d4211 и BD+33d2642, спектры которых были получены в одну ночь с NGC 3077 на близком зенитном расстоянии.

С помощью пакета программ ULySS ¹ [30] мы смоделировали спектр подстилающего звездного населения для каждого положения вдоль щелей и вычли

¹<http://ulyss.univ-lyon1.fr>

Таблица 3. Журнал наблюдений NGC 3077

Режим	Дата	T_{exp} , с	θ , "	$\Delta\lambda$, Å	$\delta\lambda$, Å	scale, "/px
LS PA=312	2013/10/11	6×1200	1.6	3650-7250	5.2	0.35
LS PA=234	2014/02/21	6×1200	2.8	3650-7250	5.2	0.35

его из полученных спектров. Это позволило нам провести анализ эмиссионного спектра ионизованного газа в галактике. Измерения потоков в эмиссионных линиях проводились путем аппроксимирования наблюдаемого профиля линии в каждом положении вдоль щели однокомпонентной Гауссианой с помощью написанного нами пакета программ в IDL, основанного на процедуре MPFIT [31]. Показанные ниже в тексте и на графиках ошибки измерения потоков являются квадратичной суммой ошибок, связанных с шумом и первичной редукцией, и погрешностью аппроксимирования функцией Гаусса.

Все приведенные в статье величины потоков исправлены за межзвездное поглощение внутри NGC 3077. При этом избыток цвета $E(B - V)$ был определен для каждой области из наблюдательного Бальмеровского декремента ($H\alpha/H\beta$) и сравнения с теоретическим отношением потоков $H\alpha/H\beta=2.86$ для $T_e = 10000$ К. Для исправления за покраснение мы использовали кривую поглощения из работы [32], параметризованную в работе [33]. Журнал с основными параметрами проведенных наблюдений приводится в таблице 3.

4. Узкополосная фотометрия с MaNGaL

Проблемой классической интегрально-полевой спектроскопии при изучении протяженных объектов (галактик и галактических туманностей) является относительно небольшое поле зрения, диаметр которого даже у самого современного и дорогостоящего прибора этого класса – спектрографа MUSE 8-м телескопе VLT составляет всего 1 минуту дуги. Спектрометры на основе сканирующего ИФП высокого разрешения, описанные выше, позволяют получить большое по-

ле зрения, но ценой уменьшения спектрального диапазона до 10-20 Å, так что наблюдения сводятся к изучению всего одной-двух спектральных линий.

Также большое поле зрения в задачах спектрофотометрии можно получить с помощью фотометрии в узких фильтрах, но обычно используемые фильтры с шириной полосы 50-100 нм не позволят разделять близкие линии с разными механизмами возбуждения, что важно для точной диагностики ионизованного газа. Типичный пример – линии $H\alpha + [NII]$. А применение более узких фильтров требует точного контроля центральной длины волны, которая меняется как от температуры, так и от наклона фильтра. Кроме того, фильтры шириной около 1 нм дороги и отличаются не очень высоким пропусканием по сравнению с более широкими полосовыми фильтрами.

Одним из эффективных решений описанной проблемы является использование сканирующего ИФП с малым зазором между пластинами, т.е. работающего в низких порядках интерференции. Такие системы называют фотометрами с перестраиваемым фильтром (tunable-filter).

Специально для проведения подобных наблюдений в САО РАН разработан фотометр с перестраиваемым фильтром Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL) [34]. Прибор представляет собой афокальный редуктор светосилы, перед камерой которого в сходящемся пучке лучей от телескопа установлен сканирующий пьезоэлектрический ИФП низкого разрешения (порядок интерференции ~ 20 в линии $H\alpha$). Ширина инструментального контура (т.е. узкополосного фильтра) в используемом спектральном диапазоне составляет $FWHM = 15 \pm 1 \text{Å}$, центральную длину волны (CWL) можно задавать с помощью управляемого дистанционно контроллера CS-100² с точностью около 0.4Å .

Принятая оптическая схема, в отличие от классической установки ИФП в коллимированом пучке, позволяет получить относительно большой диаметр мо-

²Все используемые для наблюдений ИФП и контроллеры изготовлены IC Optical Systems Ltd, Великобритания

нохроматического пятна (пятна Жакино, Jacquinet spot [35]).

Во время наблюдений последовательно выполняются накопления изображений при настройке полосы фильтра на эмиссионную линию (с учетом средней скорости галактики и гелеоцентрической поправки) и на континуум, смещенный на $30 - 50 \text{ \AA}$. Проведение наблюдений такими сериями позволяет усреднить вклад от вариаций атмосферной прозрачности и seeing. Пики пропускания от соседних порядков интерференции блокировались с помощью среднеполосных фильтров шириной полосы около 250 \AA , отдельные фильтры использовались для наблюдений в линиях $[\text{O III}] + \text{континуум}$, $\text{H}\alpha + [\text{N II}] + \text{континуум}$ и $[\text{S II}] + \text{континуум}$. В случае линий $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$ изображения в континууме наблюдались в спектральных полосах по обе стороны от линии и затем усреднялись, в остальных линиях – только в одной полосе.

Принцип работы

В сканирующем интерферометре расстояние между пластинами изменяется путем установки цифрового значения Z_s на контроллер, управляющий пьезоэлектрическими кристаллами. При этом связь между этим значением, длиной волны и порядком интерференции может быть записана, как

$$n\lambda = A + BZ_s \quad (1)$$

Текущий порядок на каждой длине волны с одинаковым зазором связан с некоторым указанным порядком

$$n\lambda = n_{ref}\lambda_{ref} \quad (2)$$

где $\lambda_{ref} = 656,3$ (линия $\text{H}\alpha$). На рисунке 4 показан пример линий излучения калибровочной лампы, выбранных блокирующим фильтром и сканированных с помощью нашего ИФП. У нас есть 2–4 несмешанных калибровочных линии в каждом 25-нм блокирующем фильтре, поэтому мы можем определить три

константы (n_{ref} , A, B) из (1) и (2). Однако в случае относительно небольшого зазора (в нашем случае 10 мкм) зависящее от длины волны изменение фазы в отражениях между оптическими покрытиями на внутренних поверхностях пластин может быть важным [3,6]. На практике это означает, что A не является постоянной величиной, а зависит от длины волны $A = A(\lambda)$. Поэтому мы используем линейную аппроксимацию отношений ($n\lambda$ vs. Z_s) с наклоном B, но с разными $A(\lambda)$ в разных блокирующих фильтрах. На рис. 4 (справа) показан пример такой подгонки для центра поля обзора. Сдвиг фильтра CWL для каждой точки по полю зрения также определяется сканированием спектров той же калибровочной лампы (см. Рисунок 3). Положение линий определяется с помощью аппроксимации контуром Лоренца, который дает хорошее приближение инструментального профиля ИФП:

$$\frac{1}{1 + \left(\frac{2(\lambda - \lambda_0)}{\delta\lambda}\right)^2} \quad (3)$$

где λ_0 - длина волны линии.

Первичная обработка изображения

Обработка данных MaNGaL в целом аналогична той, что применяется для «стандартных» кадров ПЗС прямых изображений. Он включает в себя: вычисление и вычитание среднего bias (с используемой в фотометре MANGAL ПЗС-матрицей для типичных экспозиций 10-20 мин влияние темнового тока несущественно), коррекцию плоского поля, и совмещение монохроматических изображений по звездам. После этого происходит удаление следов космических частиц и сложение кадров, сделанных на одной длине волны.

Кадры плоского поля получают с помощью засветки лампой непрерывного спектра в том же фильтре полосы пропускания и при тех же значениях Z_s , что и кадры объектов. Относительно большое пятно Жакино позволяет избежать сложного процесса удаления колец от линий ночного неба. Вообще,

в большинстве случаев распределение свечения ночного неба по полю можно принять однородным.

Перед вычитанием из изображений в линиях континуум домножается на коэффициент C_{cont} , чтобы минимизировать остатки потока от звезд поля. На практике, если мы чередуем экспозиции в континууме и в эмиссионных линиях и нормализуем кадры на время экспозиции, то на этот коэффициент влияют только изменения пропускания вырезающего фильтра, и $C_{cont} \approx 1.00 \pm 0.1$, поскольку мы стараемся избегать наблюдений вблизи крыльев кривая пропускания фильтра.

4.1 Калибровка потока

Калибровка отсчетов ПЗС по потоку в физических единицах [эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$] выполняется в соответствии с алгоритмом и уравнениями, приведенными в [3]. Вкратце, мы наблюдаем стандартные звезды с теми же настройками (вырезающий фильтр и Z_S), что и кадры объекта. Ожидаемый поток от стандартной звезды рассчитывается как свертка табличного спектра звезды и инструментального профиля ИФП, то есть профиля Лоренца с $\delta\lambda$, полученным из подбора калибровочных линий ламп, см. (3). Поправка на атмосферное поглощение выполняется с помощью кривой поглощения для сайта САО РАН [17].

Получаемый спектр можно представить как результат свертки реального спектра с инструментальным профилем $L(\lambda)$. Если две эмиссионные линии, отстоящие друг от друга на шкале длин волн на $\Delta\lambda_{12}$, имеют потоки F_1 , F_2 , их отношение $r_{12} = F_2/F_1$, то при наблюдениях с перестраиваемым фильтром сглаженное наблюдаемое отношение будет:

$$r_{obs} = \frac{F_1 + F_2 L(\Delta\lambda_{12})}{F_2 + F_1 L(\Delta\lambda_{12})} = \frac{r_{12} + L(\Delta\lambda_{12})}{1 + r_{12} L(\Delta\lambda_{12})} \quad (4)$$

Следовательно:

$$r_{12} = \frac{r_{obs} - L(\Delta\lambda_{12})}{1 - r_{obs}L(\Delta\lambda_{12})} \quad (5)$$

Для случая трёх линий уравнение примет вид:

$$r_{12} = \frac{r_{obs} - L(\Delta\lambda_{12})}{1 + r_{23}L(\Delta\lambda_{23}) - r_{obs}[L(\Delta\lambda_{12}) + C * L(\Delta\lambda_{13})]} \quad (6)$$

где $\Delta\lambda_{ij} = \lambda_i - \lambda_j$.

Калибровочные соотношения 5 и 6 следует учитывать при создании соответствующих карт линейных соотношений.

Обработка полученных изображений мало отличается от стандартной редукции прямых снимков. После учета тока смещения (bias) и плоского поля (засветка прибора лампой накаливания через интегрирующую сферу), кадры, полученные в одной спектральной полосе, совмещаются вместе, затем проводится чистка следок космических частиц с последующим сложением. Полученные суммарные изображения совмещаются по реперным изображениям звезд. Из изображений, центрированных на эмиссионные линии, вычитаются изображения в континууме, которые домножаются на коэффициент, близкий к единице, определяемый так, чтобы результирующий поток от изображений звезд фона был нулевым. Благодаря тому, что континуум наблюдается на длинах волн, очень близких к эмиссионной линии, качество его вычитания заметно лучше, чем при стандартных наблюдениях с фильтрами шириной полосы 50 – 200 Å.

Калибровка изображений в шкалу абсолютных потоков осуществляется по наблюдениям звезд–спектрофотометрических стандартов.

Первым опубликованным научным результатом, полученным с перестраиваемым фильтром с афокальным редуктором MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО, являются наблюдения автора диссертации, проведенные по просьбе W. Keel в рамках изучения конусов ионизации активных галактических ядер. В рамках этой работы 16.04.2018 наблюдалась UGC 6081, система с двумя взаимодействующими сефертовскими (Sy2) ядрами. Ширина инструментального контура

Таблица 4. Журнал наблюдений галактики NGC 3077 с фотометром с перестраиваемым фильтром

Режим	Дата	T_{exp} , с	θ , "	$\Delta\lambda$, Å	$\delta\lambda$, Å	scale, "/px
MaNGaL	2018/04/10	3×300	1.8	H α	15	0.66
	2018/04/10	6×300	1.8	[N II] λ 6583	15	0.66
	2018/04/10	6×150	1.8	H α cont1	15	0.66
	2018/04/10	5×150	1.8	H α cont2	15	0.66
	2018/04/10	4×300	1.9	[S II] λ 6717	15	0.66
	2018/04/10	4×300	1.9	[S II] λ 6731	15	0.66
	2018/04/10	3×300	1.9	[S II] cont.	15	0.66
	2018/04/11	7×300	2.0	[O III] λ 5007	15	0.66
	2018/04/11	5×300	2.0	[O III] cont.	15	0.66

(т.е. узкополосного фильтра) составляла в используемом спектральном диапазоне $FWHM = 15 \pm 1 \text{Å}$, с центром пика пропускания на эмиссионных линиях [O III] λ 5007 и H α , исправленных за красное смещение. Изображения галактики в континууме смещались на $\sim 50 \text{Å}$ по спектральному диапазону.

Наблюдения с перестраиваемым фильтром позволили обнаружить связанные с каждым из AGN сложные протяжённые эмиссионные структуры, отстоящие от источника ионизации на расстояние до 18 кпк.

В этой работе метод фотометрии с перестраиваемым фильтром применялся для исследования галактики NGC 3077. Узкополосные изображения галактики в эмиссионных линиях [O III] λ 5007, H α , [N II] λ 6583, [S II] λ 6717, 6731 были получены с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGaL, установленного в фокусе Несмит-2 на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ [36]. Журнал с основными параметрами проведенных наблюдений приводится в таблице 4.

В данном случае CWL пропускания ИФП изменяется не более, чем ($\pm 0.5FWHM$) по всему полю зрения размером 5'.6. Поэтому вариациями CWL вдоль видимого изображения NGC 3077 можно пренебречь. Отметим также, что, согласно полученному нами полю лучевых скоростей (рис. 25), доплеровские изменения длины волны эмиссионных линий не превышают 2-3Å, т.е. малы в сравнении с шириной фильтра.

5. Выводы и результаты Главы 1

В данной главе описан большой массив наблюдательных данных длинно-целевой и 3D спектроскопии и узкополосной фотометрии, полученных как на 6-м телескопе БТА, так и на других отечественных и зарубежных телескопах. Представлен обзор методов наблюдений и обработки данных, использованных в диссертации.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ВЕТРОВ

Галактики с текущим звездообразованием зачастую демонстрируют признаки наличия сверхветров галактического масштаба. Галактический ветер возникает, когда кинетическая энергия, высвобождаемая взрывами сверхновых и ветрами массивных звезд, эффективно термализуется. Это означает, что кинетическая энергия ветра преобразуется в тепловую энергию посредством ударного возбуждения с небольшими (благодаря высокой температуре и низкой плотности) потерями энергии. Совокупное влияние сверхновых и звездных ветров создаёт вокруг региона звездообразования пузырь горячего газа ($T \sim 10^8$ К) с давлением, большим, нежели в окружающей невозмущённой среде.

Поскольку пузырь расширяется и "нагребаёт" перед собой вещество межзвёздной среды, он быстро переходит в стадию высвечивания. Если же окружающая среда, как в случае галактических дисков, неоднородна, пузырь будет расширяться в направлении градиента давления, то есть перпендикулярно диску. При этом скорость горячего газа может достигать нескольких тысяч км с^{-1} ([37]). Как только пузырь достигнет определенного масштаба, его расширение будет ускоряться, и он дробиться на фрагменты. Это позволяет газу свободно расширяться в гало и межгалактическую среду, формируя биполярную структуру из коллимированных истечений. Это так называемая фаза выдувания, когда пузырь превращается в сверхветер. Оптическое и рентгеновское излу-

чение на данной стадии идёт от препятствий (молекулярных облаков, фрагментированных оболочек), испытывающих ударное возбуждение при встрече с выметаемым веществом.

Хотя феномен галактических ветров и фонтанов хорошо известен (см. обзор [3]), детальное изучение эмиссионных туманностей, созданных ГВ, с достаточно высоким пространственным разрешением выполнено только для немногих близких галактик, таких, как М 82 [38], NGC 253 [39], NGC 1569 [40], NGC 3079 [41]. Поэтому многие вопросы остаются открытыми, в частности, относящиеся к ГВ в карликовых галактиках. В зависимости от энергии ветра и массы самой галактики вещество может как выметаться в межгалактическую среду, так и, не имея достаточной начальной скорости, возвращаться обратно в галактический диск. В каких случаях реализуется тот или иной сценарий? Здесь требуются как детальные теоретические расчеты для конкретных объектов (см. к примеру, [42]), так и новые наблюдательные данные.

1. NGC4460

NGC 4460 – карликовая линзовидная галактика, не имеющая заметных компаньонов и находящаяся в рассеянном облаке Гончих Псов. Согласно базе данных галактик Местного объема [43] ее абсолютная зв. величина $M_B = -17.73$, полная масса $M = 6.4 \cdot 10^9 M_\odot$, принятое расстояние 9.59 Мпк, что даёт видимый масштаб около 47 пк/угл. сек.

Здесь в ходе H α -обзора близких галактик [44] была обнаружена протяженная эмиссионная туманность. Ее спектральное исследование представлено в работе [45]. Было показано, что большая часть излучения в эмиссионных линиях исходит из компактной (диаметром примерно 1 кпк) области в центре галактического диска, что так же подтверждается оптическими (HST, SDSS) и УФ (Galex) снимками. В то же время, диффузное излучение в линии H α распреде-

лено вдоль оси вращения галактики по обе стороны от ядра на значительные расстояния (до 1.5 кпк). Ионизация газа в данных областях объясняется комбинированным воздействием фотоионизации молодых горячих звёзд и ударных волн, связанных с современным звездообразованием. Таким образом, согласно [45], протяженная туманность в NGC 4460 порождена галактическим ветром. Сделанные в той же работе оценки скорости истечения составили $\geq 130 \text{ км с}^{-1}$, кинетической энергии ветра - $5.8 \cdot 10^{52}$ эрг, а характерное время формирования наблюдаемой структуры - 10-12 млн. лет.

Информация о движениях ионизованного газа в области ГВ была получена в статье [45] на основании только двух спектральных разрезов с разрешением, соответствующим, $FWHM \approx 110 \text{ км с}^{-1}$ в линии $\text{H}\alpha$, область центрального килопарсека также наблюдалась с панорамным спектрографом с разрешением $FWHM \approx 160 \text{ км с}^{-1}$. Этого было достаточно для измерения состояния ионизации газа. Однако для детального изучения кинематики галактического ветра желательно более высокое разрешение по лучевой скорости для возможного большего числа излучающих областей. Это и выполнено в данной работе, основанной на наблюдениях со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП).

1.1 Анализ распределения лучевых скоростей

Модель вращения галактического диска

Построенное по наблюдениям с ИФП поле скоростей ионизованного газа уже использовалось в работе [46] для получения средней кривой вращения галактики. Интересно, что даже вне плоскости диска – в области ГВ – в распределении лучевых скоростей доминирует компонент, соответствующий круговому вращению. Помимо звёздного ветра в лучевую скорость каждой точки данной галактик также вносит вклад вращение самой галактики. Поэтому, чтобы его исключить, требовалось построить модель кругового вращения, после че-

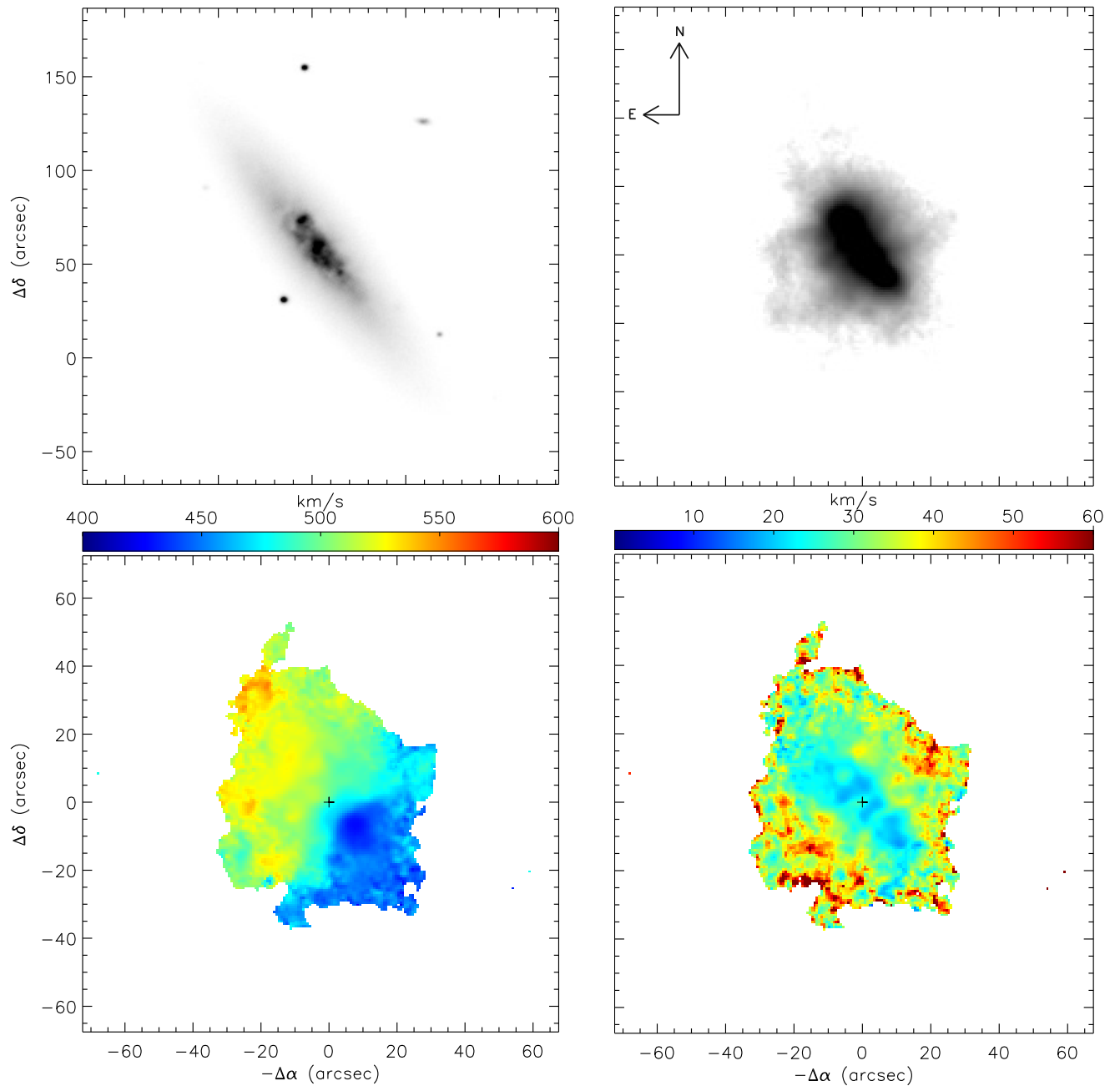


Рис. 1. Сверху: слева - изображение из SDSS-обзора в фильтре g , справа - изображение в эмиссионной линии $H\alpha$. Снизу, слева - карта поля скоростей, справа - карта поля дисперсии лучевых скоростей.

го вычесть её из поля скоростей. Построение модели вращения производилось методом наклонных колец ("tilted-rings"), в рамках предположения о плоском тонком диске (подробнее см. [46])

Для построения модели вращения использованы следующие параметры, взятые из [45]:

$PAo = 42^\circ \pm 2^\circ$ – позиционный угол линии узлов,

$V_{sys} = 487 \pm 1 \text{ км с}^{-1}$ – системная скорость,

$i = 77^\circ$ – угол между картинной плоскостью и плоскостью галактического диска.

Кривая вращения диска галактики, полученная из поля скоростей, приведена на рис. 2. В следующем подразделе мы экстраполируем эту кривую вращения на область, занятую галактическим ветром.

Моделирование ветрового конуса

Истечение вещества из области активного звездообразования происходит в направлениях, перпендикулярных плоскости галактики, поскольку плотность вещества на данном направлении существенно ниже, чем в экваториальной плоскости. Таким образом, происходит "всплытие" расширяющейся выметенной оболочки в менее плотную среду, как это наблюдается в детально исследованных галактиках, таких как NGC 1482, NGC 3079 или M 82 (см. ссылки во Введении). В наблюдаемом поле скоростей доминирует круговое вращение. Это указывает на то, что выметаемое вещество не встречает серьёзного сопротивления, поэтому можно предположить, что его момент вращения сохраняется. С помощью вышесказанного можно построить модель вращения выброшенных оболочек.

Мы предположили, что выбрасываемое вещество из области активного звездообразования истекает в виде одной большой структуры-оболочки. Такую оболочку можно аппроксимировать усечённым конусом, ось которого совпадает с центром галактики, а меньшее основание расположено в галактическом дис-

ке. При этом в линии $H\alpha$ будут наблюдаться в основном только стенки этого конуса, горячий же газ внутри него в бальмеровских эмиссионных линиях не излучает. Следует отметить, что эти стенки вовсе не должны быть сплошными, поскольку в других галактиках с ГВ конуса, излучающие в оптических линиях, как правило, состоят их отдельных филаментов, образующихся под действием разного рода неустойчивостей [3]. Несколько таких филаментов заметны и на $H\alpha$ изображении NGC 4460.

Угол раствора конуса принят равным 60° , что достаточно хорошо описывает наблюдаемую структуру.

При моделировании конуса мы принимали, что истекающее вещество не испытывает значительных потерь скорости вращения, поскольку момент вращения сохраняется (см. выше), а вещество выбрасывается не из самого ядра, а из протяженной килопарсековой области, так что перемещение по радиусу от оси вращения не существенно. В рамках данного предположения вклад вращения в лучевую скорость оказывается не зависящим от того, какую сторону конуса мы наблюдаем – ближнюю или дальнюю от нас, а так же какой из конусов ближе к нам.

Скорости вращения конуса взяты согласно принятой кривой вращения (рис. 2). Угол наклона картинной плоскости к лучу зрения $i = 77^\circ$, отметим, что из-за неразличимости деталей на основе анализа изофот сложно судить об ориентации диска относительно наблюдателя.

Остаточные скорости

Вычитание модели вращения ветра из поля скоростей дает карту остаточных скоростей, показанную на рис. 3 (слева внизу). Мы видим отсутствие значительных градиентов скоростей по направлению вращения, что позволяет считать наше предположение о малых отличиях скоростей вращения в диске и в ветре достаточно адекватным.

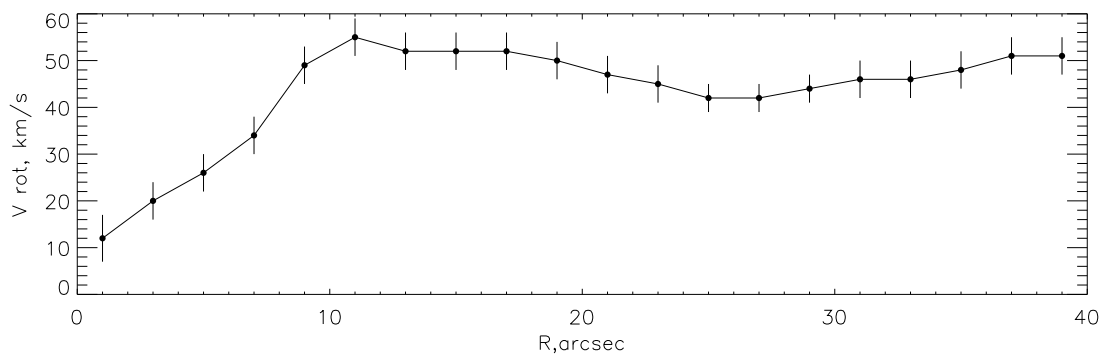


Рис. 2. Кривая вращения галактики.

Благодаря тому, что ось вращения галактики отклонена от картинной плоскости всего на 13° и предполагая, что весь наблюдаемый в конусах газ относится к стенкам и движется только по направлению от диска, мы можем утверждать, что отрицательная остаточная лучевая скорость означает движение по ближней к нам стенке конуса, положительная – по дальней. Зона, где данное правило не будет работать, так как участки обеих стенок конуса окажутся по одну сторону от картинной плоскости, составит менее десяти процентов от радиуса конуса в данной точке, то есть в пределах двух-трёх пикселей на краях конуса (Рис.4). Таким образом, после вычитания модели вращения и системной скорости можно судить о пространственном распределении излучающего в $H\alpha$ газа, а также о скоростях его движения.

Пересчёт скоростей осуществляется по формуле, полученной из простых геометрических соображений (Рис.4):

$$V_{out} = \frac{V_{res}}{(\cos(\alpha/2)\cos(i) + \sin(\alpha/2)\sin(i)\sin(\phi))}$$

где:

V_{out} – искомая скорость движения газа вдоль стенок конуса скорость, V_{res} – остаточная лучевая скорость после вычитания круговой составляющей, i – угол между картинной плоскостью и плоскостью галактического диска, $\alpha/2$ – поло-

винный угол раствора проекции конуса, ϕ – азимутальный угол относительно оси конуса.

Из-за неопределённости пространственной ориентации оси галактики нельзя с уверенностью сказать, какой из моделируемых конусов ближе к наблюдателю, что требуется, чтобы пересчитать остаточные лучевые скорости в скорости движения газа вдоль стенок конуса. Поэтому мы будем рассматривать оба варианта ориентации конусов. Кроме того, из-за эффекта проекции на картинную плоскость возникает неопределенность с тем, в какой из стенок данного конуса находится излучающая точка – ближней или дальней к наблюдателю. Эта неопределенность влияет на величину угла ϕ . Однако, как было замечено выше, мы можем понять, на какой из сторон конуса находится излучающая точка, зная знак остаточных лучевых скоростей.

После учета эффекта проекции получаем, что модель, в которой юго-восточный конус принят расположенным ближе к наблюдателю, имеет явно неодинаковое распределение скоростей для ветра по обе стороны галактики: $130-150 \text{ км с}^{-1}$ для юго-восточного и $10-30 \text{ км с}^{-1}$ для северо-западного конусов. В то же время вторая модель (где юго-восточный конус принимается дальним от наблюдателя) дает значительно более близкие скорости истечения для обоих конусов. Поэтому в дальнейшем именно эту пространственную ориентацию мы считаем корректной. Участки больших скоростей на границах конусов мало пригодны для анализа, как потому, что здесь мы не можем однозначно определить, к какой стороне, ближней или дальней, относится вещество, а значит – не можем вычислить угол ϕ , так и из-за отличия нашей простой модели от реальной морфологии ветра, которая на малых значениях $|\sin(\phi)|$ приводит к явно ложным результатам.

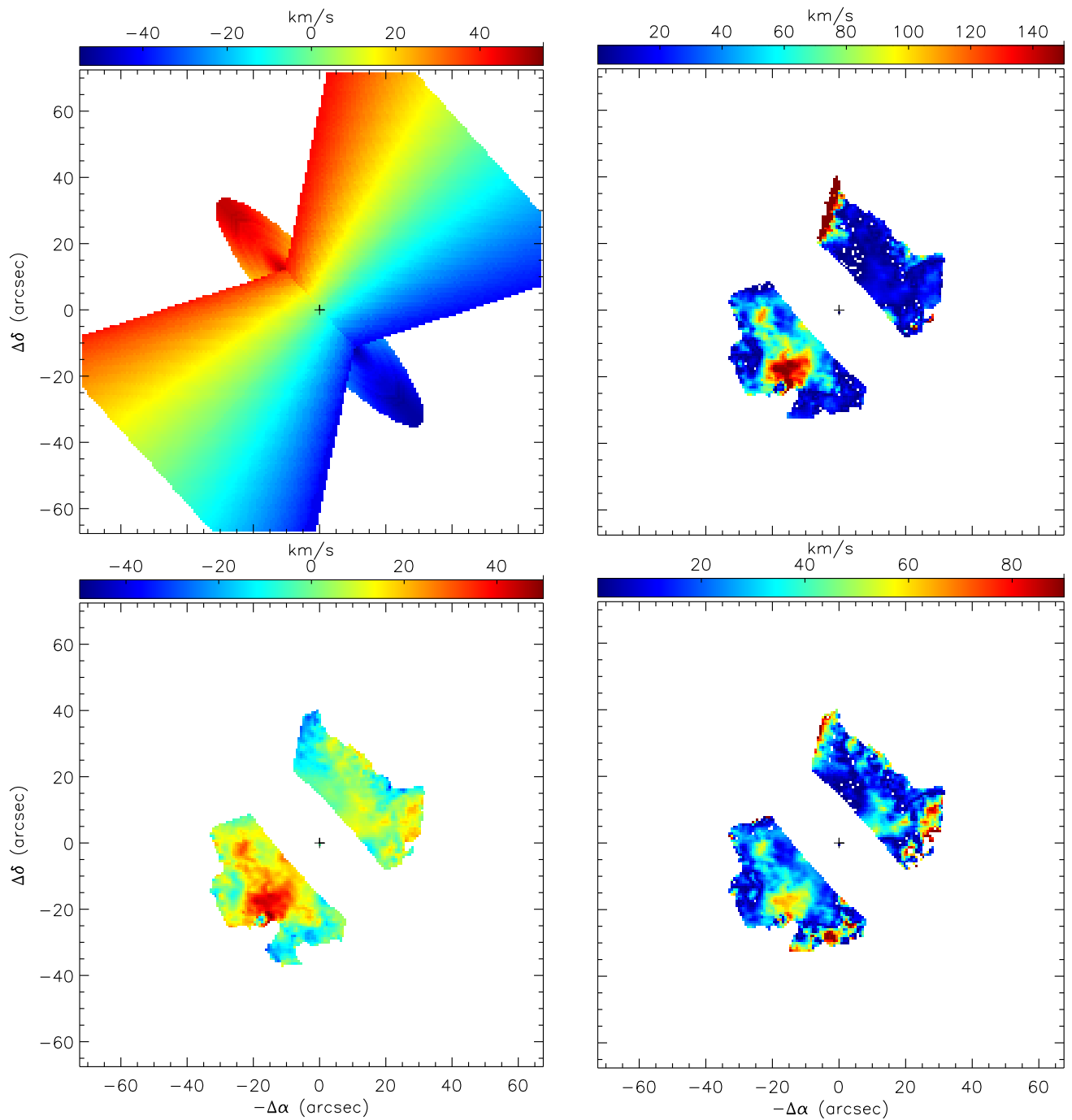


Рис. 3. Слева: сверху – модель вращения диска галактики и выметаемого вещества галактического ветра; снизу – карта остаточных скоростей, центральные области замаскированы. Справа: сверху – карта скоростей движения выметаемого вещества вдоль стенок конуса (учтен эффект проекции) для случая, когда юго-восточный конус ближе к наблюдателю; снизу – аналогичная карта для случая, когда к наблюдателю ближе северо-западный конус. Именно эту ориентацию мы считаем наиболее правдоподобной

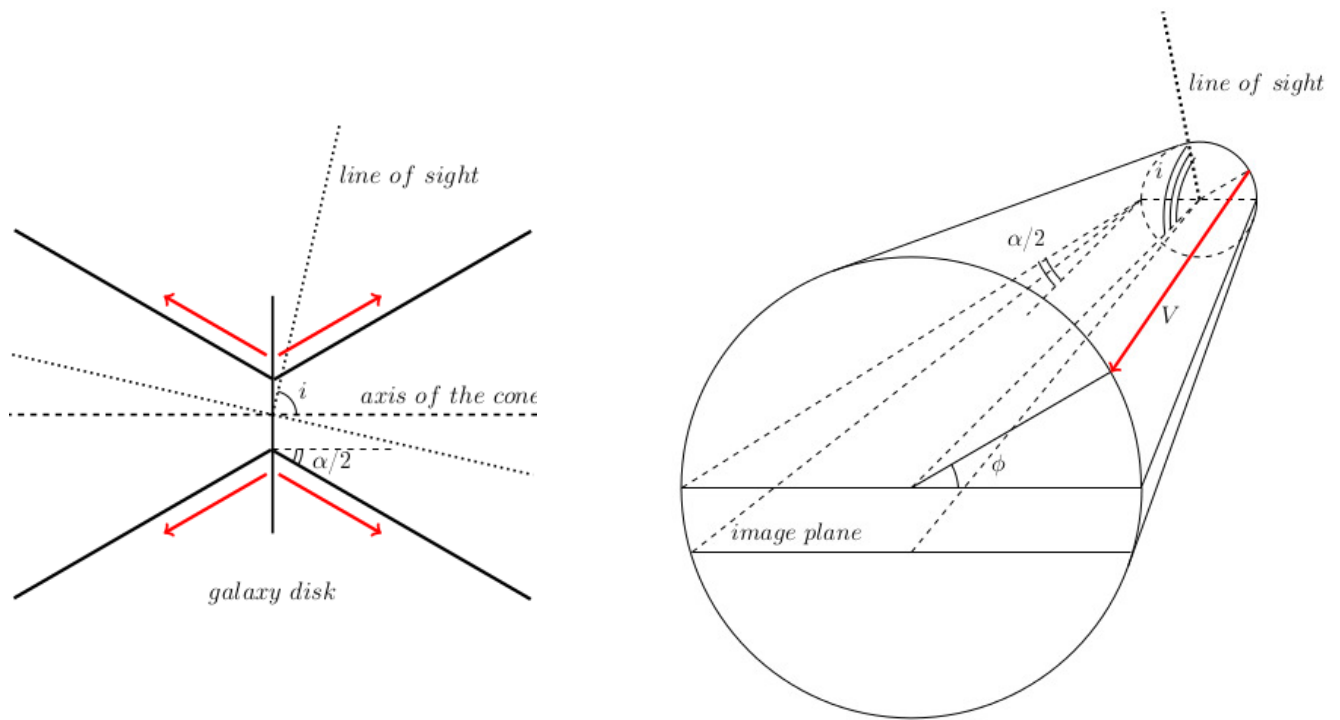


Рис. 4. Схема движения газа в конусе в зависимости от пространственного расположения. Слева - вид из плоскости, перпендикулярной диску галактики, справа – вид со стороны оси конуса. Линия зрения показывает направление на наблюдателя. Видно, что если угол ϕ будет достаточно мал, т.е. точка будет лежать близко к видимой границе конуса, то для обоих возможных её положений (на ближней и дальней стенке конуса от наблюдателя) векторы скоростей истечения будут направлены в одну сторону от картинной плоскости.

1.2 Обсуждение

Параметры ветра. Сравнение с другими галактиками.

На построенной карте скоростей истечения (Рис.3 справа-внизу) на фоне относительно медленного газа $V_{out} = 10 - 20 \text{ км с}^{-1}$ выделяются отдельные быстро движущиеся филаменты. На (Рис.5) приведены гистограммы распределения скоростей внутри таких областей, каждая из которых показана отдельным цветом. Анализ этих гистограмм позволяет сделать вывод, что характерные скорости галактического ветра в NGC 4460 лежат в пределах $30-80 \text{ км с}^{-1}$.

При сравнении с другими галактиками, например, NGC 1482, где скорости истечения достигают 250 км с^{-1} [47], или $300-350 \text{ км с}^{-1}$ в M 82, ветер в NGC 4460 демонстрирует значительно меньшие скорости, сопоставимые с истечениями в карликовых галактиках, таких как NGC 2366 ($30-50 \text{ км с}^{-1}$) или

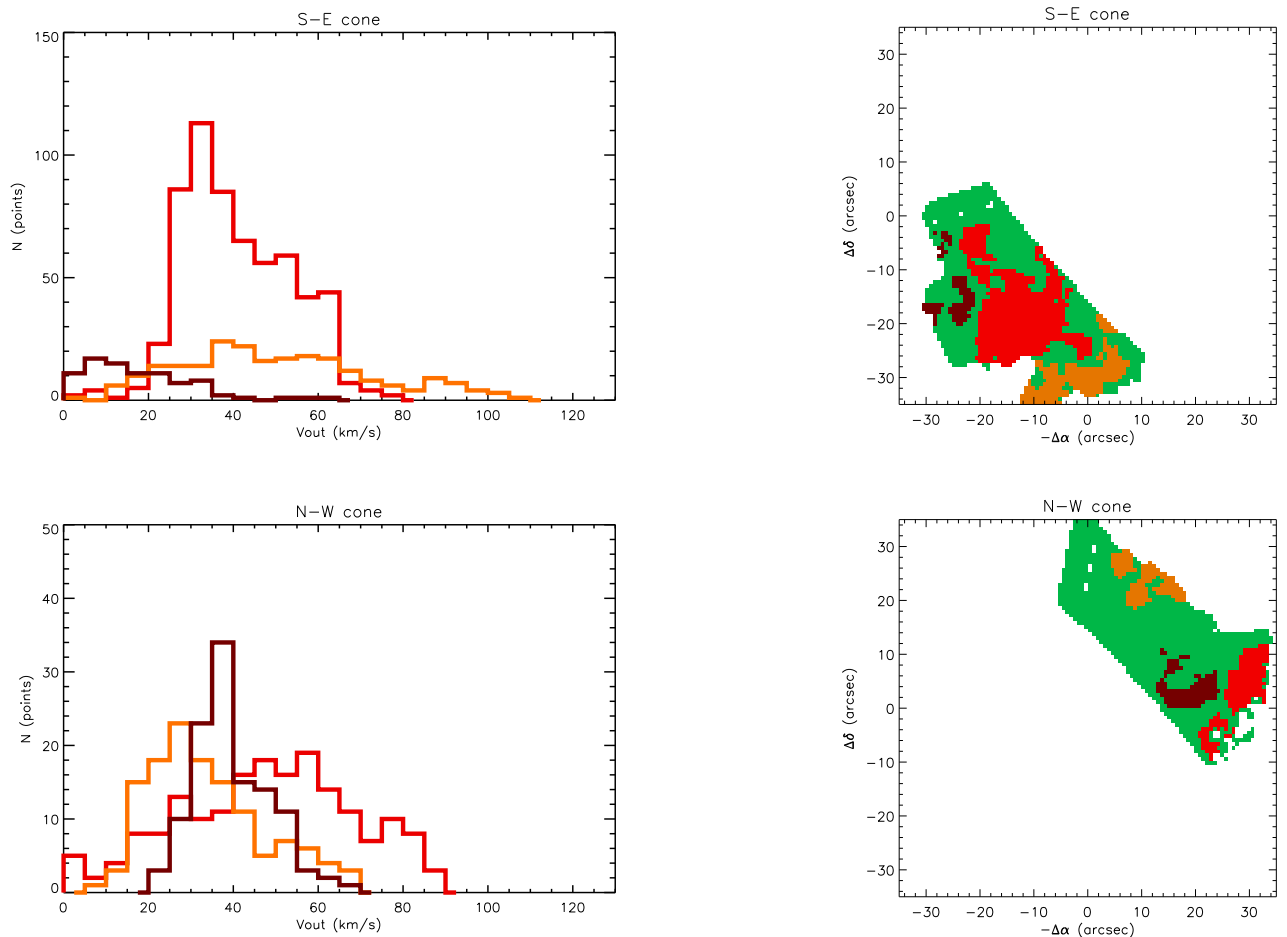


Рис. 5. Распределение скоростей в наиболее быстрых филаментах для дальнего (юго-восточного, сверху) и ближнего (северо-западного, снизу конусов). Справа – расположение рассматриваемых филаментов на картинной плоскости, слева – гистограмма распределения скоростей в них. Зелёным цветом выделены фоновые области с низкими ($10\text{--}20\text{ км с}^{-1}$) скоростями, не представленные на гистограмме. Другими цветами обозначались локальные области с большими скоростями движения вдоль стенок конуса.

NGC 4681 ($30\text{--}80\text{ км с}^{-1}$) [48] и [49] соответственно. Отметим, что в отличие от этих двух галактик, где наблюдались отдельные изолированные истечения от областей III, в NGC 4460 присутствует значительно более масштабная и коллимированная структура галактического ветра.

Ранее, по ширине линий, измеренных в спектрах низкого разрешения, была получена оценка скорости ветра $\geq 130\text{ км с}^{-1}$ [45]. Теперь же мы значительно уточнили этот параметр, так как наша геометрическая модель позволила уверенно выделить в поле скоростей компонент, соответствующий ГВ. Это позволило скорректировать значения прочих параметров ветра: возраст образо-

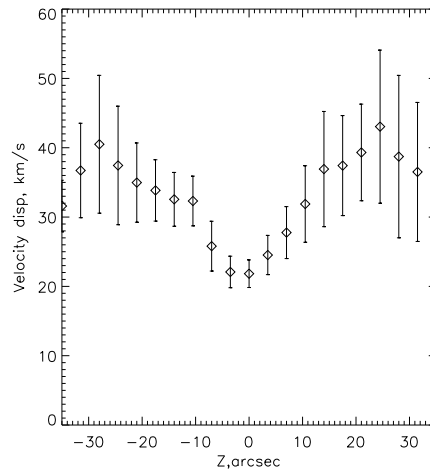


Рис. 6. Зависимость дисперсии скоростей от расстояния до диска галактики и от скорости истечения.

ванной ветром структуры лежит в пределах 20-50 млн. лет, при массе выброшенного из диска газа $M_{wind} = 1.7 \cdot 10^5 M_{\odot}$ его кинетическая энергия составит $E_{wind} = 0.3 - 2.2 \cdot 10^{52}$ эрг.

Распределение дисперсии лучевых скоростей (Рис.6) перпендикулярно к галактическому диску демонстрирует, что вне ярких плотных областей в газе становятся существенны турбулентные движения: значения дисперсии скоростей достигают $40-50 \text{ км с}^{-1}$, что сопоставимо с самой скоростью истечения, согласно нашим оценкам. Отметим, что небольшой вклад в измеряемую дисперсию скоростей вносит тепловое уширение эмиссионных линий, составляющее около 10 км с^{-1} для электронной температуры $\sim 10\,000 \text{ К}$, характерной для областей НII.

1.3 Скорость покидания галактики

Используя методику, аналогичную применяемой в работах [48, 49], попытаемся определить, является ли скорость ветра достаточной для того, чтобы преодолеть силу притяжения галактики и быть выброшенным в межгалактическое пространство.

Для оценки скорости, необходимой газу для покидания галактики, восполь-

зуемся моделью сферического псевдоизотермического гало тёмной материи, достаточно хорошо описывающей внешние кривые вращения для карликовых галактик.

В этой модели скорость покидания галактики:

$$V_{esc}(r) = \sqrt{2V_c^2(1 + \ln(r_h/r))}$$

где V_c - скорость вращения галактики, r_h - радиус тёмного гало [50].

Радиус гало примем равным Холмберговскому радиусу галактики $2.2'$ [43], что составляет приблизительно 6 кпк.

Построим график распределение скоростей истечения вещества в зависимости от расстояния до центра галактики (Рис.7). Если наложить на него кривую модельной скорости покидания галактики, можно увидеть, что подавляющая масса вещества находится значительно ниже, т.е. не достигает данных скоростей. Несколько точек, формально оказавшихся выше линии $V_{esc}(r)$, скорее всего объясняются ошибками, вызванными иным направлением вектора скорости, нежели предполагаемое в разделе 1.

Таким образом, истечение вещества происходит с энергией, недостаточной для покидания галактики.

2. UGC10043

UGC 10043 – это спиральная галактика, видимая с ребра, расположенная на расстоянии около 35 Мпк. UGC 10043 представляет собой очень тонкий диск в сочетании с большим и ярким балджем. Оптические изображения показывают ярко выраженную пылевую полосу вдоль диска. [51] предположили, что наблюдаемый приливный перекося диска объясняется взаимодействием UGC 10043 и соседней карликовой галактики MD2004. Используя узкополосные наблюдения Hubble Space Telescope (HST) в $H\alpha + [N II]$, [51] обнаружили признаки звездооб-

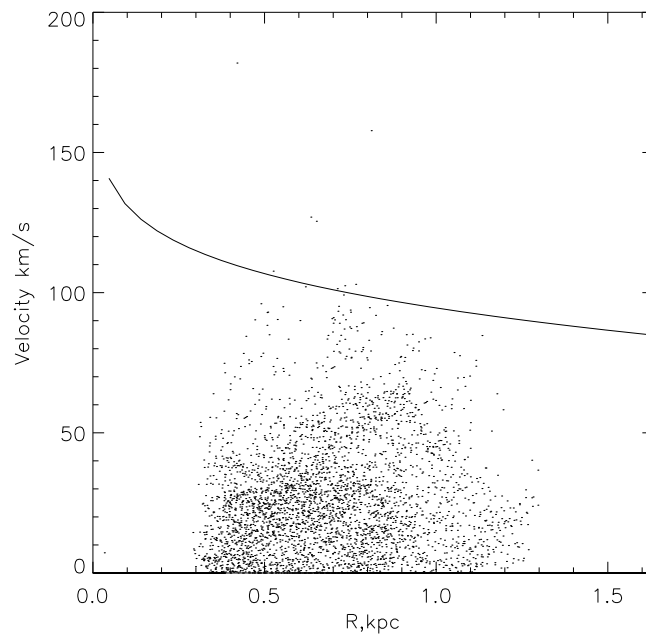


Рис. 7. Распределение скоростей истечения вещества из плоскости галактического диска (точки) в зависимости от расстояния до центра галактики. Сплошная линия - зависимость скорости, необходимой для покидания веществом галактики в рамках модели псевдоизотермического гало радиуса 6 кпк.

разования ядре галактики, а так же ортогональную диску эмиссионную туманность, имеющую приблизительно биконическую структуру, образованную предположительно под действием галактического ветра. По оценкам этих авторов скорость ветра составляет $\approx 100 \text{ км с}^{-1}$, а размер кинематической структуры в ≈ 3.5 кпк от плоскости диска. Aguirre et al. (2009) нанесли на карту UGC 10043 с VLA. Они утверждали, что UGC 10043 взаимодействует с MCG+04-37-035, что подтверждается наблюдаемым протяжённой структурой нейтрального водорода, соединяющими эти галактики.

2.1 Анализ спектров низкого разрешения

Диагностические диаграммы

Для анализа изменения в соотношениях линий по всему полю зрения в данной работе использованы так называемые диагностические диаграммы. Baldwin, Phillips and Terlevich предложили диаграмму, на которой сопоставляются со-

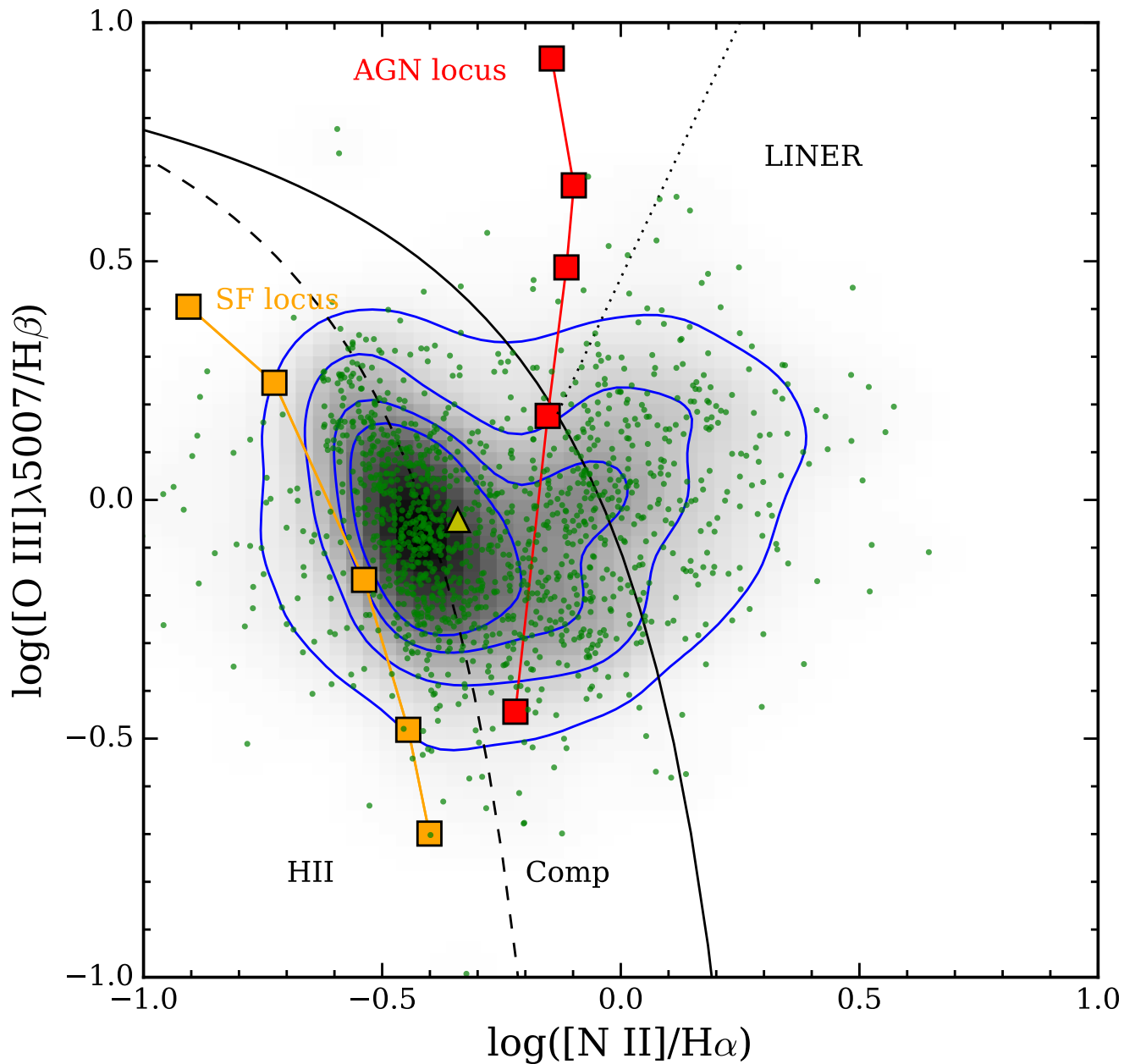


Рис. 8. Диагностические BPT-диаграммы $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ от $[\text{O III}]/\text{H}\beta$. Каждая зелёная точка соответствует отношению эмиссионных линий в различных областях галактики. Голубым выделены профили плотности. Внешний контур включает 90% точек, остальные – 75, 55 и 35 соответственно. Чёрные штриховая и сплошная линии – кривые [1] и [23]. Чёрная пунктирная прямая – демаркационная линия, разделяющая области LINER и Сейферта [1]. Красная и жёлтая линии представляют области AGN и звездообразования соответственно, полученные путём реконструкции потоков эмиссионных линий с помощью (MFICA) from [52] и [53].

отношения интенсивностей линий $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ и $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ [22], чтобы разделить излучение от сравнительно слабых источников ионизации, таких как H II области, и объектов с более высокой ионизирующей способностью – например, активных галактических ядер (AGN). Тем не менее, эти соотношения линий не столь точны в случаях объектов с низкой ионизацией, таких как слабые AGN, газ, испытывающий ударное возбуждение, планетарные туманности и ионизация post-AGB звездами [54, 55, 56, 57, 58, 59]. [60] расширил эту схему, включив в нее диагностические диаграммы для соотношений линий $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$. Эти соотношения чувствительны к ударной ионизации, при этом $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$ наиболее чувствительны.

Для этих трёх диаграмм было предложено несколько вариантов демаркационных линий. Наиболее часто применяются [23] и [1]. Кривая [23] определяется с помощью фотоионизационных моделей. Это огибающая максимально достижимых значений для случая, если источником ионизации служит одна или несколько вспышек звездообразования. Кривая [1] была получена эмпирически из наблюдений галактик Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Она ограничивает приблизительный верхний предел области звездообразования на BPT-диаграмме. Две кривые часто используются для выделения областей звездообразования (ниже кривой Кауффмана) и AGN (выше кривой Кьюли). Промежуточная область между двумя кривыми обычно интерпретируется как ”смешанная” зона, где комбинируются различных источники ионизации. Тем не менее, сюда так же может относиться ионизация в галактиках с текущей вспышкой звездообразования, ионизация под влиянием звезд пост-AGB [57, 61, 62], ударная ионизация [63, 15], или даже классические H II области [64].

На рис. 8 показана классическая диаграмма BPT для отдельных спакселей. Согласно пространственному распределению соотношений линий на рис. 9, можно сделать вывод, что фотоионизация молодыми звездами скорее всего не является причиной появления эмиссионной туманности вне плоскости галак-

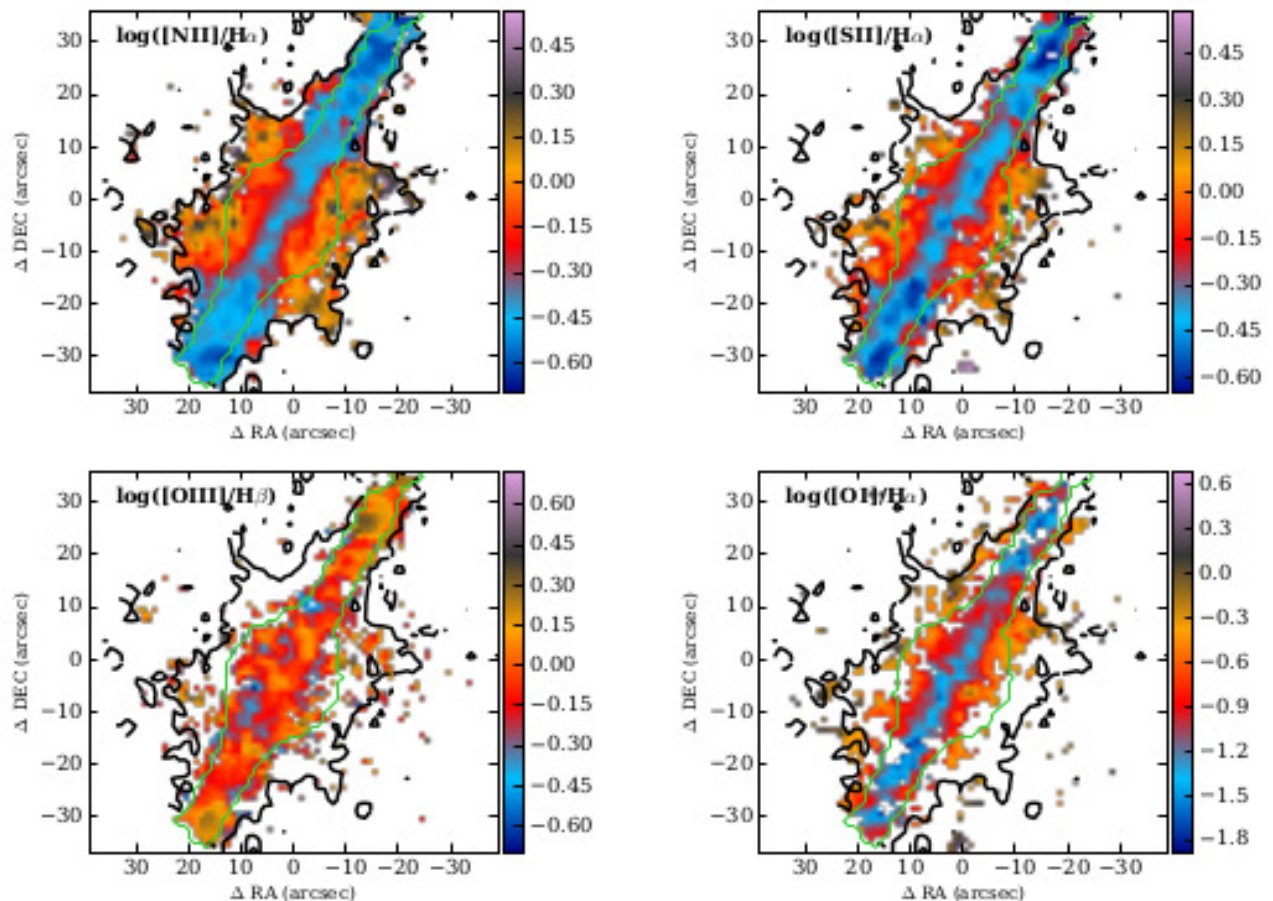


Рис. 9. Карты отношения линий для $[N II]/H\alpha$, $[S II]/H\alpha$, $[O III]/H\beta$ и $[O I]/H\alpha$. $[S II]$ представляет собой сумму дублетов ионов серы $[S II] = [S II]\lambda 6731 + [S II]\lambda 6717$. Зеленый контур выделяет 70 % потока в фильтре V. Черным контуром показана биконическая структура, видимая в эмиссионной линии $[N II]$.

тики. Точки на диаграмме демонстрируют тренд от области доминирования фотоионизации к региону, в котором классически преобладают AGN. Однако нет никаких свидетельств наличия активного галактического ядра в этой галактике, что также согласуется с ее небольшой массой и балджем.

Учитывая форму и геометрию эмиссионной туманности, распределение соотношений линий от области звездообразования к AGN и отсутствие признаков AGN, можно полагать, что излучение газа здесь связано с ударной ионизацией галактическим ветром из центрального региона звездообразования. На рис. 9 наблюдается симметричное распределение внеплоскостного газа относительно диска галактики. Если предположить, что вспышка звездообразования имеет

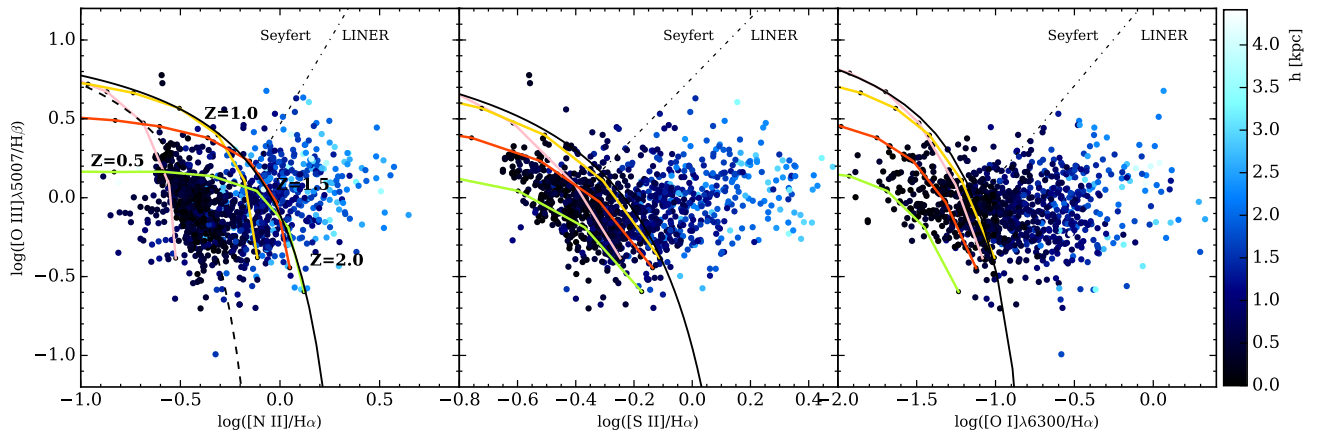


Рис. 10. Диагностические диаграммы для зависимостей соотношений линий $[N II]/H\alpha$, $[S II]/H\beta$ и $O I/H\alpha$ от $[O III]/H\beta$. Каждая точка соответствует одному спакселю, цветом обозначено расстояние до плоскости диска в кпк (в обоих направлениях). Чем темнее цвет, тем ближе данная область к диску. Цветные линии представляют предсказания фотоионизационных моделей от воздействия молодых звёзд в условиях текущего звездообразования для разных степеней звездной населённости, от $(Z/Z_{\odot} = 0.5$ до звездной населённости $(Z/Z_{\odot} = 2$, и, соответственно, различной силой ионизации на каждой кривой. Штриховая линия на диаграмме $[N II]/H\alpha$ – кривая [1], а сплошные чёрные линии на всех трёх диаграммах – кривые [23]. Пунктирные прямые на диаграммах $[N II]/H\alpha$, $[S II]/H\alpha$ и $[O I]/H\alpha$ – демаркационные линии между галактическими ядрами типа LINER и Сейферта [1] [24].

место в околоядерной области галактики, и при условии идеального биконического распределения ионизованного газа [37], то мы можем проследить границы области истечения на основе распределения эмиссионных линий. Ожидаемая коническая структура уже показана на рис. 9.

Фотоионизационные модели

На рис. 10 сравниваются наблюдаемые соотношения линий с предсказанными в рамках фотоионизационных моделей: $[N II]/H\alpha$, $[S II]/H\alpha$, $[O I]/H\alpha$ против $[O III]/H\beta$. Цветовая маркировка точек соответствует расстоянию от диска галактики. Три панели включают значения, предсказанные в рамках фотоионизационных моделей MAPPINGS-III [65] для непрерывных процессов звездообразования и с использованием библиотеки синтетических звезд PEGASE¹, как

¹<http://www2.iap.fr/pegase/pegasehr/>

описано в [66] и [23]. Каждая линия соответствует своей звездной населённости ($Z/Z_{\odot} = 0.5, 1, 1.5$ and 2). Для каждого случая ионизация изменяется от высокого уровня ионизации (вверху слева) до низкой (внизу справа). Для всех случаев принята средняя электронная плотность $n_e = 350 \text{ cm}^{-3}$. Нужно отметить, что степень ионизации возрастает с удалением от галактического диска (до ~ 4 кпк).

Использование модели фотоионизации для случая непрерывного звездообразования позволяет воспроизвести отношения линий, лежащих ниже кривых [23], чье пространственное местоположение находится в диске галактики. Эти регионы, скорее всего, связаны с областями звездообразования, однако в то же время, как будет показано позже, ударная ионизация покрывает часть области звездообразования. Кроме того, в диагностических диаграммах есть несколько отношений линий, которые не охватываются в пространстве параметров этих фотоионизационных моделей.

Модели ударной ионизации

На рис. 8 и 10 описано два основных компонента механизма ионизации, один из которых порождается молодыми звездами в диске, а другой относится к газу вне его плоскости, параметры ионизации которого не воспроизводятся с помощью фотоионизационных моделей. Скорее всего, причиной ионизации газа в этом случае может быть ударное возбуждение во время теплой фазы ($T \sim 10^4$ К) галактического ветра. Наблюдаемый ионизированный газ может быть локализован вдоль стенок конических структур или в филаментах, тянущихся из околоядерной области. На диагностических диаграммах для ударной ионизации характерны зоны, лежащие между классическими зонами III и областями, где доминирует ионизация активным галактическим ядром [67].

Характерными признаками ударных волн в ионизованном газе являются двойные пики или уширенные компоненты в профиле дисперсии скоростей. Это

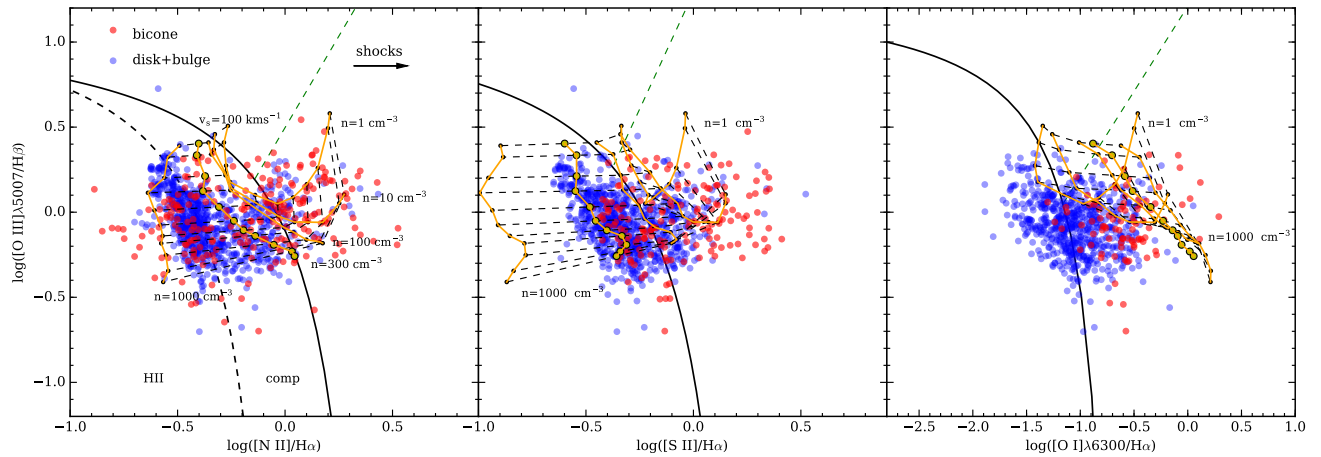


Рис. 11. Диагностические диаграммы для зависимостей отношений линий $[N II]/H\alpha$, $[S II]/H\beta$ и $O I/H\alpha$ от $[O III]/H\beta$. Красным точкам соответствуют области, относящиеся к конусам, голубыми - те, что лежат в плоскости диска галактики. Каждая жёлтая линия отображает модель ударной ионизации для значения магнитного поля $B = 5 \mu G$ и скоростей, растущих слева направо от 100 до 400 km s^{-1} . Чёрным пунктиром соединяются модели с одинаковыми скоростями. Жёлтые точки отображают интерполяцию моделей для плотностей $n = 100 \text{ cm}^{-3}$ и $n = 1000 \text{ cm}^{-3}$ в модель для $n = 300 \text{ cm}^{-3}$.

вызвано тем, что несколько кинематических компонент могут оказаться на луче зрения. Из-за низкого спектрального разрешения данных CALIFA оказывается невозможным разделить различные кинематические компоненты в профилях дисперсий скоростей, а значит и проанализировать их каждый в отдельности.

На длине волны $H\alpha$ инструментальный профиль данных CALIFA составляет $\sigma \sim 116 \text{ km s}^{-1}$, что превышает типичные значения дисперсии скоростей $H II$ областей ($< 100 \text{ km s}^{-1}$, [68, 69]). Поэтому нет возможности выделить отдельные кинематические компоненты, ожидаемые при наличии ударных волн [70]. Более того, даже данные ИФП, имеющие значительно более высокое спектральное разрешение ($\sigma \sim 33 \text{ km s}^{-1}$), не позволяют разрешить многокомпонентную структуру профиля эмиссионной линии $[N II]$, и демонстрируют только уширение линий и асимметричные профили (см. раздел 2). Уширение профилей в областях за пределами галактического диска также наблюдалось в галактических ветрах [71]. Наличие широких линейных профилей предполагает возможность существования сложных кинематических компонент, которые не

могут быть разрешены. Поэтому требуется сравнить наблюдаемые отношения линий с предсказаниями моделей ударной ионизации, чтобы определить степень вклада ударных волн в ионизацию газа.

В работе использованы сетки моделей ударной ионизации из библиотеки MAPPINGS III. [72, 73, 74, 65]. Диапазон модельных скоростей ударных волн выбран (v_s) от 100 до 400 км с⁻¹ с интервалом 25 км с⁻¹, плотность потока поперечного магнитного поля 5 μ G. Для газовой составляющей при моделировании использовались как солнечная, так и сверхсолнечная металличность, и плотности среды до удара 1, 10, 100 и 1000 см⁻³ соответственно. На рис. 11 представлены диагностические диаграммы для различных отношений линий, аналогичных рис. 9, вместе со значениями, предсказанными различными моделями ударной ионизации. На данные диаграммы добавлена разделительная линия LINER - AGN. Она представляет собой биссектрису, которая отделяет ударную ионизацию от AGN, оцененного по двум опорным чистым объектам этого вида ионизации с использованием данных интегрально-полевой спектроскопии согласно [75]. Помимо представленных моделей исследовалось большое количество комбинаций плотности невозмущенной среды и магнитных полей. Тем не менее, ни с одной из них не воспроизводятся наблюдаемые соотношения линий на трех диаграммах одновременно.

Модели ударного возбуждения на диаграммах [N II]/H α и [S II]/H α занимают области, часто ассоциируемые текущим звездообразованием [23, 64] и объектами типа LINER [76]. Можно видеть, что большинство точек над кривыми Кьюли расположены по правую сторону биссектрисы в направлении зоны ударного возбуждения, и при этом относятся к области вне плоскости диска. На данных диаграммах разделены области, относящиеся к диску, и те, что находятся в конусах. Также есть ионизованный газ, пространственно принадлежащий конической структуре, соответствующие которому точки на диаграмме находятся ниже кривой Кауфмана, скорее всего, из-за малых скоростей ударных

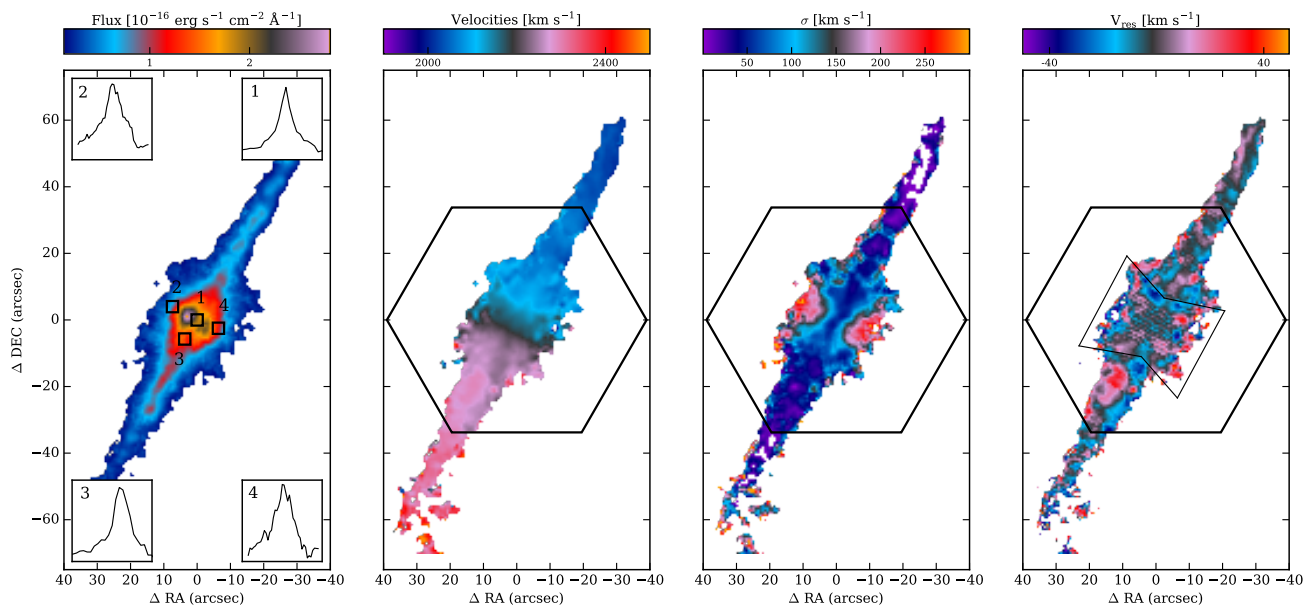


Рис. 12. Результаты наблюдений с ИФП на 6-м телескопе БТА в эмиссионной линии $[\text{N II}]$. Слева направо: карта интенсивностей в линии $[\text{N II}]$, поле лучевых скоростей, поле дисперсий лучевых скоростей, исправленных за инструментальный профиль и карта остаточных лучевых скоростей после вычитания усреднённой кривой вращения. Шестиугольник отображает поле зрения CALIFA. Биконическая модель, использованная для оценки скоростей истечения вещества в ветре, представлена на правом рисунке. Вставки на первом рисунке отображают полученные по данным ИФП профили эмиссионной линии в соответствующих областях.

компонент в эмиссионных линиях. Выбранная модель ударного возбуждения хорошо описывает отношения линий для истечений на диаграммах $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ и частично покрывает наблюдаемые отношения линий $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$. Модели шока описывают область истечения для ветра с уменьшением плотности до удара в сторону удаления от плоскости диска и ростом скоростей до $< 400 \text{ km s}^{-1}$ в том же направлении.

2.2 Анализ кинематики газа по данным ИФП

Данные интерферометра Фабри-Перо предоставляют информацию о кинематике ионизированного газа с разрешением по скорости, в четыре раза лучшим, чем разрешение данных PPAK / V500, в значительно большем поле зрения, но с меньшей глубиной. Наблюдаемые профили линии $[\text{N II}]$ были снабжены функцией Фойгта, которая представляет собой свертку функции Лоренца и

Гаусса, соответствующей инструментальному профилю ИФП и уширению наблюдаемых эмиссионных линий соответственно [18]. Спектр линии излучения очень хорошо описывается однокомпонентным профилем Фойгта без двойных или многокомпонентных структур. На рис. 12 показаны двумерные карты, полученные в результате процесса подгонки, включая карту интенсивности [N II], его поле скоростей на линии прямой видимости и дисперсию (σ) лучевых скоростей, определяемую по расширению линии излучения. Карты маскируются с использованием порога $S/N < 3$ в интенсивности потока. На первой панели также представлены спектры ключевых областей в галактике: показаны две области внутри диска и две другие в областях максимальной дисперсии скоростей, расположенных по оси конуса истечения. Наблюдаются широкие и асимметричные профили без заметного разделения двойных или множественных компонентов, обычно характерных для галактических ветров из областей звездообразования (например, [49]).

Внешние участки диска демонстрируют относительно низкий уровень дисперсии лучевых скоростей ($10 \approx 40 \text{ км с}^{-1}$), что характерно для гигантских областей НII в галактиках (например, [69]). В то же время в биконических ветровых структурах σ превышает 100 км с^{-1} , увеличиваясь в направлении больших расстояний от галактического диска, достигая значений $\approx 300 \text{ км с}^{-1}$, вероятно, в силу меньшей плотности межзвёздной среды на больших расстояниях от диска. Данные значения дисперсии лучевых скоростей примерно соответствуют описанным выше моделям ударного возбуждения, для которых ожидаемые скорости будут ниже 400 км с^{-1} .

ИФП-карта показывает, что круговое вращение вносит основной вклад в наблюдаемые линейные скорости даже в области галактического ветра. Эта картина типична для краевых дисковых галактик с относительно умеренным истечением (например, NGC 4460, [77]). Для устранения вклада кругового движения из наблюдаемого поля скоростей была вычтена усреднённая кривая вращения.

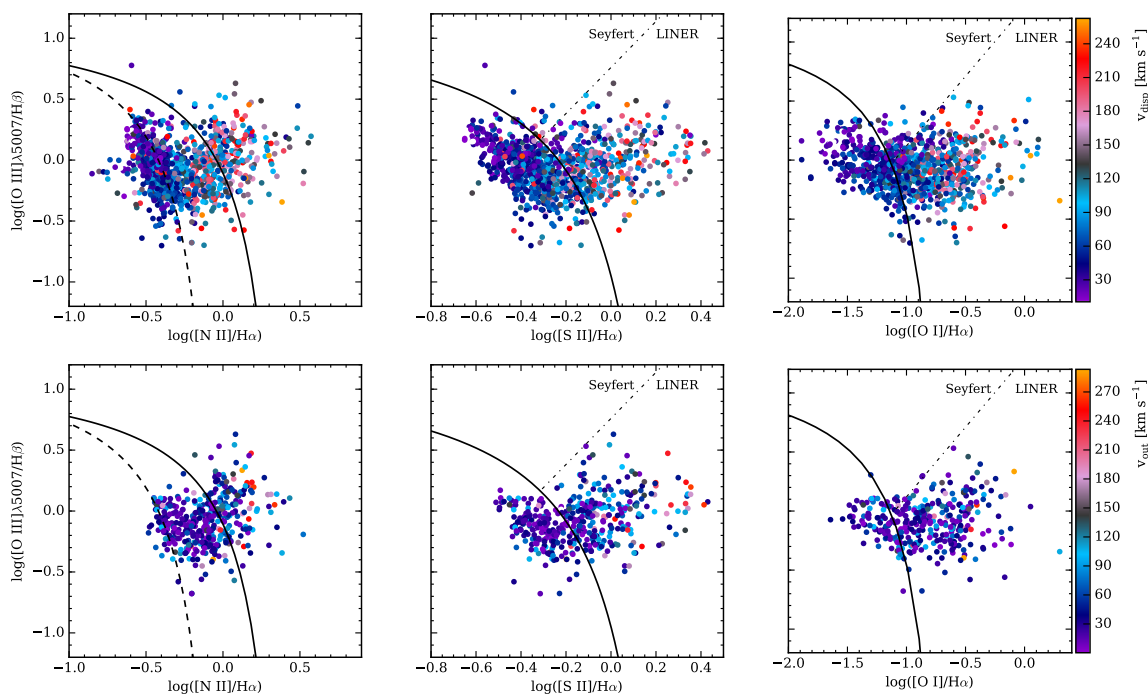


Рис. 13. Диагностические диаграммы, аналогичные рис. 10, однако здесь цветом отображаются значения дисперсии лучевых скоростей σ (сверху), и скоростей истечения газа V_{out} (внизу) по данным наблюдений ИФП. Представлены только точки, принадлежащие ветровым конусам.

Для этого была использована модель прозрачного вращающегося цилиндра, которая обеспечивает хорошее приближение полей скоростей в вращающихся дисковых галактиках с ребрами, как подробно описано в (Моисеев 2015). Кривая вращения рассчитывалась путём усреднения по точкам вдоль оси вращения галактики, при этом амплитуда вращения ионизированного газа в UGC10043 достигает 150 км с^{-1} . Средняя кривая вращения была экстраполирована за пределы плоскости диска, чтобы создать модель вращения галактики. Остаточные лучевые скорости после вычитания компоненты кругового вращения показаны на последней панели рис. 9. На этой карте видно несколько ”пятен” внутри конусов истечений с характерными остаточными скоростями $\pm 30 \text{ км с}^{-1}$. Симметричное распределение остатков относительно главной оси подразумевает, что мы можем наблюдать реальные регулярные отклонения лучевых скоростей от кругового вращения, вызванные действием ветра.

Скорости истечения

В рамках простой геометрической модели, представленной [77], мы перевели наблюдаемые остаточные лучевые скорости в скорости движения вещества галактического ветра. Ветровая туманность описывается двумя вращающимися усеченными конусами. Вещество, выметенное из околоядерной области галактики, формирует большую единую оболочку. Стенки конусов наблюдаются в линиях оптической рекомбинации, в то время как внутренний горячий газ прозрачен на видимых длинах волн. Из карты дисперсии скоростей, показанной на рис. 12, видно, что ударный ионизированный газ следует коническому распределению с низкой дисперсией скоростей в центральных областях ($< 100 \text{ км с}^{-1}$) и по краям конуса. Угол раскрытия конусов мы оцениваем, как $\theta_{kin} \sim 45^\circ$ (как показано на рис. 12), проводя границы на глаз по максимальному градиенту на карте дисперсий лучевых скоростей. Этот угол раскрытия меньше, чем угол, оцененный по морфологии эмиссии ионизированного газа на основе данных CALIFA. Скорее всего это вызвано тем, что в первом случае граница проводится по наблюдаемому перепаду в дисперсии скоростей, тогда как во втором – по наибольшему уширению ионизированного газа. Отметим, что аналогично данным наблюдений ветров в других галактиках, (например, M 82), стенки конуса, видимые в оптическом диапазоне, не являются однородными, а состоят из нескольких эмиссионных филаментов.

В рамках этого предположения наблюдаемый газ принадлежит стенкам конуса и движется вдоль них от галактического диска со скоростью истечения V_{out} . Для видимой с ребра галактики положительные скорости соответствуют веществу на ближайших к нам стенках, тогда как газ с отрицательными скоростями движется вдоль дальних. Согласно к формуле в [77] для наклона галактики $i = 90^\circ$:

$$V_{out} = \frac{V_{res}}{(\cos(\alpha/2)\cos(i) + \sin(\alpha/2)\sin(i)\sin(\phi))}$$

где V_{res} – остаточная лучевая скорость после вычитания компоненты кругового вращения, ϕ - азимутальный угол относительно оси конуса. При преобразовании с помощью этого уравнения несколько областей с большой амплитудой V_{res} превратились в быстро движущиеся филаменты с $V_{out} \approx 100\text{--}250 \text{ км с}^{-1}$, в то время как скорости в соседних точках значительно ниже. Получившиеся скорости истечения лежат в диапазоне тех, которые обнаруживаются на поверхности биполярных структур [37]. Помимо этого данные измерения скорости ветра согласуются с моделями ударного возбуждения, как в случае распределения σ (см. 2).

2.3 Кинематика и состояние ионизации газа

Как ранее было показано, кинематические параметры истечений, полученные из наблюдений с ИФП, $\sigma < 300 \text{ км с}^{-1}$ и $V_{out} < 250 \text{ км с}^{-1}$, хорошо согласуются с нашей оценкой скорости ударных волн, полученной из моделей ударного возбуждения ($100\text{--}400 \text{ км с}^{-1}$). Интересно сравнить непосредственно спаксель-в-спаксель обе величины с отношением эмиссионных линий на ВРТ-диаграммах. Для этого было проведено ребинирование карт ИФП к размеру пикселя CALIFA.

Результаты представлены на рис. 13 и 14. Рисунок 13 демонстрирует те же диагностические диаграммы, показанные на рис. 10 и 11, со значениями, помеченными в соответствии со скоростью и дисперсией скоростей по данным ИФП. На диаграммах видно, что точки, имеющие высокую скорость истечения и/или дисперсию скоростей, действительно расположены в области, соответствующей ударному возбуждению запрещенных линий. Это отношение ярко выражено в случае дисперсии скорости, однако разброс точек с теми же V_{out} слишком высок для однозначного заключения. Последнее может быть связано с ограничениями, налагаемыми очень простой геометрической моделью, а также с тем, что точки на диаграммах не соответствуют в точности точкам на стенках конусов.

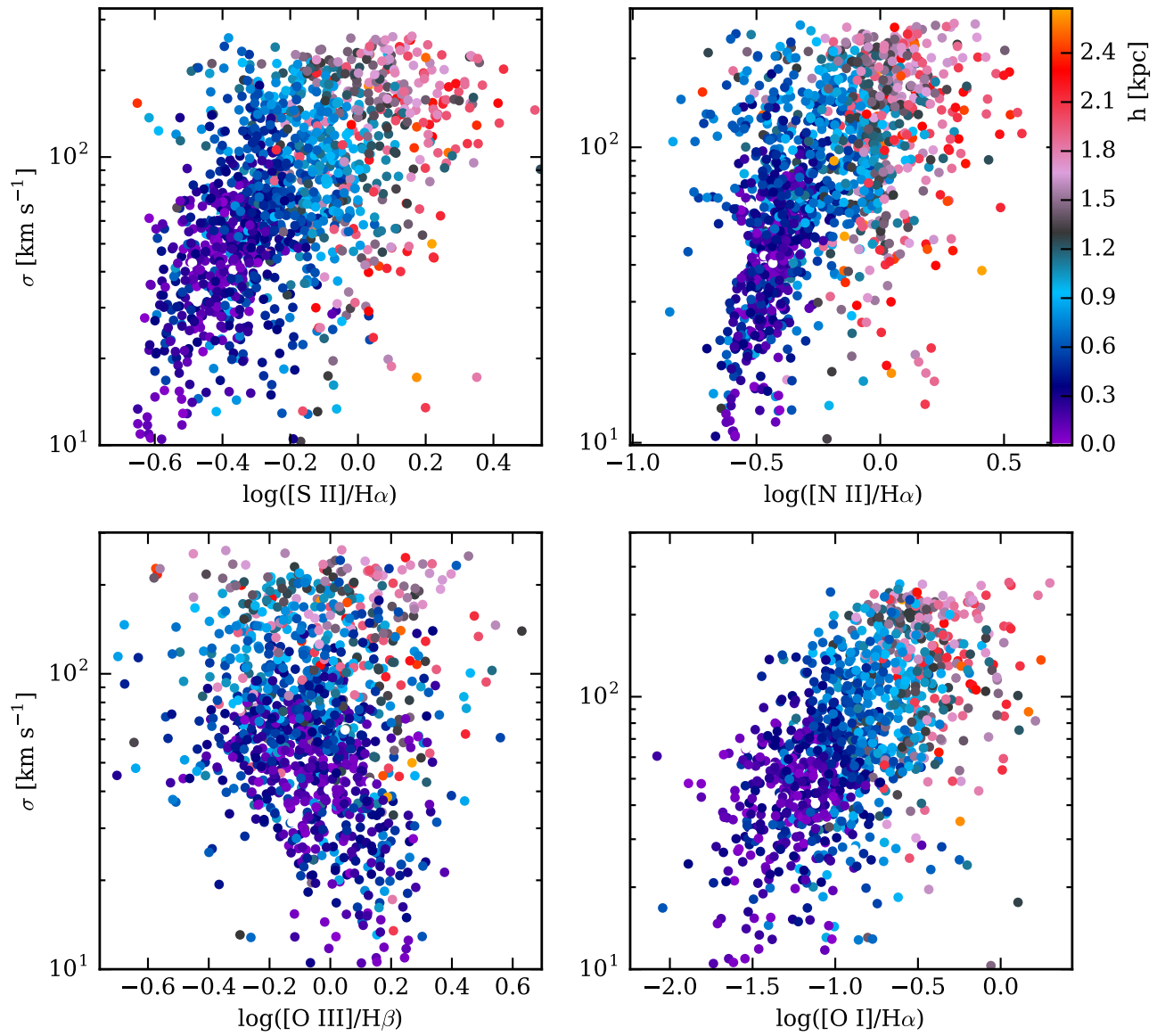


Рис. 14. Корреляции между отношениями линий и дисперсиями лучевых скоростей для точек, для которых есть одновременно данные ИФП и CALIFA. Цветом отображается расстояние до галактического диска в кпк

В действительности в каждом пикселе мы наблюдаем интегральные значения вдоль луча зрения как для интенсивности линии, так и их скорости.

На рис. 14 представлены четыре основных отношения эмиссионных линий, сопоставленные с соответствующими дисперсиями лучевых скоростей. На этом рисунке видна четкая корреляция между дисперсией скоростей и соотношениями линий, указывающими на ударное возбуждение ($[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$). В то же время для $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ она пропадает, поскольку связь между этим соотношением линий и типом источника ионизации неоднозначна для $[\text{O III}]/\text{H}\beta < 10$. Удаление точек от плоскости галактического диска на этих картах меньше, чем показано на рис. 10 из-за ограниченной глубины данных BAG. Аналогичные графики с положительной корреляцией между дисперсией скорости и отношениями линий были рассмотрены различными авторами, которые использовали метод 3D-спектроскопии при исследованиях сейфертовских галактик и ULIRG [78, 79, 15, 80]. Корреляции для UGC 10043 показаны на рис. 13, и тренд с расстояниями до центра галактики является дополнительным аргументом в пользу ударно-волнового происхождения излучения эмиссионных линий в ветровых туманностях.

3. Выводы и результаты Главы 2

Наблюдения с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо с достаточно высоким спектральным ($\sim 19 \text{ км с}^{-1}$) и пространственным ($\sim 120 \text{ пк}$) разрешением позволили изучить структуру галактического ветра в NGC 4460:

- галактический ветер в NGC4460, в основном, представлен двумя потоками, истекающими из плоскости диска галактики в противоположных направлениях, характерные скорости этих потоков составляют $30\text{--}80 \text{ км с}^{-1}$.
- галактический ветер в NGC4460 является клочковатой, сильно возмущён-

ной сложной структурой.

Сравнение скоростей галактического ветра и модельных скоростей убегания для случая псевдоизотермического гало тёмной материи позволяет сделать вывод, что энергии ветра недостаточно, чтобы выбросить газ за пределы области гравитационного влияния галактики. Поэтому следует ожидать, что по прошествии времени, охладившись, вещество вновь упадёт на галактический диск. Этот вывод согласуется с аналогичными результатами [48, 49], полученными для локальных истечений ионизованного газа в NGC 2366 и NGC 4681.

На основании наблюдений интегрально-полевой спектроскопии (ИФП и IFU) подтверждено, что протяжённая эмиссионная структура вне плоскости галактического диска UGC10043 является галактическим ветром из центральной области звездообразования галактики с низким значением темпа звездообразования $SFR = 0.35 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$.

Морфология истечений позволяет сделать вывод, что, скорее всего, ветер в UGC 10043 находится в фазе выдувания, при которой пузырь утратил целостность. На этом этапе ветер свободно расширяется в межгалактическое пространство, унося массу, импульс и тяжёлые элементы. Карты [N II], [S II] и H α демонстрируют, что ветровые структуры имеют форму песочных часов, растущих из центральной области звездообразования галактики. Применение симметричной биконической модели и карт распределения ионизованного газа позволило определить угол раскрытия конусов морфологически в $\theta_{\text{morph}} \approx 80^{\circ}$ и кинематически в $\theta_{\text{kin}} \approx 45^{\circ}$.

В рамках моделей ударной ионизации газа отношения линий, полученные по данным панорамной спектроскопии, лучше всего описываются моделью быстрого удара ($v_s = 100\text{--}400 \text{ км с}^{-1}$), при этом плотность невозбуждённых областей уменьшается в сторону удаления от плоскости галактического диска. Полученные результаты для скоростей ударных волн соответствуют кинематическим

параметрам истечения, полученным при наблюдениях со сканирующим ИФП: дисперсия скоростей по лучу зрения $\sigma < 300 \text{ км с}^{-1}$ и скорости $V_{out} < 250 \text{ км с}^{-1}$.

На примере двух галактик апробировано применение биконической модели истечений для вычисления кинематических параметров ветровых структур.

III. ДИАГНОСТИКА ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА В ГАЛАКТИКАХ С ПОМОЩЬЮ СООТНОШЕНИЯ $VPT-\sigma$

1. Проблема связи кинематики и параметров ионизации газа

Диаграммы отношения потоков оптических эмиссионных линий широко применяются для диагностики источников ионизации газа в галактиках. В классической работе Baldwin–Phillips и Terlevich [22] для разделения объектов, в которых наибольший вклад в ионизацию газа вносят молодые OB-звёзды (далее – тип III) от объектов, где доминирует жесткое ионизирующее излучение активного галактического ядра (AGN), была предложена двумерная диаграмма отношения потоков линий $[O\ III]\lambda 5007/H\beta$ и $[N\ II]\lambda 6583/H\alpha$. Метод стал популярным благодаря использованию измерений ярких в оптическом диапазоне близких по длинам волн линий, поэтому отношение их интенсивностей слабо зависит от межзвездного поглощения. Позже метод был расширен добавлением отношений $[S\ II]/H\alpha$ и $[O\ I]/H\alpha$ ¹, [60, 23]. Все три перечисленных диаграммы часто в литературе кратко называют в честь первых авторов метода “BPT-диаграммы”. С их помощью можно разделять области, где наибольший вклад в ионизацию газа вносят молодые массивные звёзды, и области доминирования жесткого ионизирующего излучения активного галактического ядра (AGN). В то же время на

¹Здесь и далее для краткости, как это часто делается, мы будем обозначать поток в $[O\ I]\lambda 6300$ как $[O\ I]$, $[O\ III]\lambda 5007$ как $[O\ III]$, $[N\ II]\lambda 6583$ как $[N\ II]$ и $[S\ II]\lambda 6717+[S\ II]\lambda 6731$ как $[S\ II]$.

диаграммах смешиваются области, ионизованные ударными волнами, излучением звезд асимптотической ветви гигантов или ядер галактик типа LINER (Low-Ionization Narrow Emission-line Region, ударная ионизация газа в которых может быть связана как со вспышкой звездообразования, так и со слабой активностью ядра). Были предложены различные варианты демаркационных линий [81, 15], однако однозначно разделить вклад ионизирующих источников с мягким спектром оказывается часто проблематичным.

Добавление к классическим диагностическим диаграммам ещё одного параметра – дисперсии скоростей ионизованного газа по лучу зрения (σ), даёт возможность разрешить эту неопределённость в тех случаях, когда рост σ указывает на увеличение турбулентных скоростей газа за фронтом ударной волны. Но для уверенных оценок σ необходимо заметно лучшее спектральное разрешение, чем обычно требуется для измерения потоков и лучевых скоростей отдельных спектральных линий. Поэтому до недавнего времени зависимость отношения потоков линий, характеризующих ударную ионизацию от σ рассматривалась лишь изредка и, в основном, для объектов с $\sigma > 100 - 200 \text{ км с}^{-1}$, таких как галактики с мощным звездообразованием [81, 15]. Подобный подход ранее не применялся для изучения ионизации диффузного газа в карликовых галактиках, вокруг отдельных областей звездообразования, или же на удалении от плоскости галактического диска.

Для наблюдательного изучения соотношения между состоянием ионизации газа и его дисперсией лучевых скоростей в галактиках без активного ядра и с умеренным темпом звездообразования требуются данные панорамной спектроскопии с достаточно высокими спектральным и пространственным разрешениями одновременно.

В данной главе рассматривается это соотношение для нескольких близких галактик, при этом используется комбинация двух спектральных техник с близким пространственным разрешением и достаточно большим полем зрения. Дан-

ные о дисперсии скоростей взяты из результатов наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП) на 6-м телескопе САО РАН, информация об отношении потоков основных эмиссионных линий получена из открытых данных интегрально-полевой спектроскопии с низким спектральным разрешением. Журналы с основными параметрами проведенных наблюдений приводятся в главе I в таблицах 1 (наблюдения со сканирующим ИФП) и 2 (панорамная спектроскопия низкого разрешения).

Мы используем различные способы, чтобы показать связь между дисперсией скоростей и отношениями потоков эмиссионных линий, характеризующих состояние ионизации: выделением цветом на ВРТ-диаграммах, графики “ σ -отношение линий”, “ σ -расстояние от демаркационной линии НII/AGN”. В качестве общего названия рассматриваемых зависимостей мы предлагаем ввести термин “соотношение ВРТ- σ ”. Классические ВРТ-диаграммы являются двумерными графиками, где по осям отложены отношения потоков линий. Включение в анализ еще и дисперсии скоростей равносильно переходу к трехмерным графикам, где к каждой диаграмме добавлена координатная ось σ . Более привычные двумерные графики, приводимые в нашей статье и в процитированных выше работах, являются проекцией общего соотношения ВРТ- σ на выбранную плоскость.

2. Спектральные данные и их анализ

2.1 Выборка галактик

Выборка галактик, для которых имеются данные о состоянии ионизованного газа, полученные двумя методами 3D-спектроскопии, была составлена следующим образом. Мы составили список близких галактик, для которых по наблюдениям со сканирующим ИФП на 6-м телескопе САО РАН были построены поля дисперсии скоростей ионизованного газа в эмиссионных линиях $H\alpha$ или [N II].

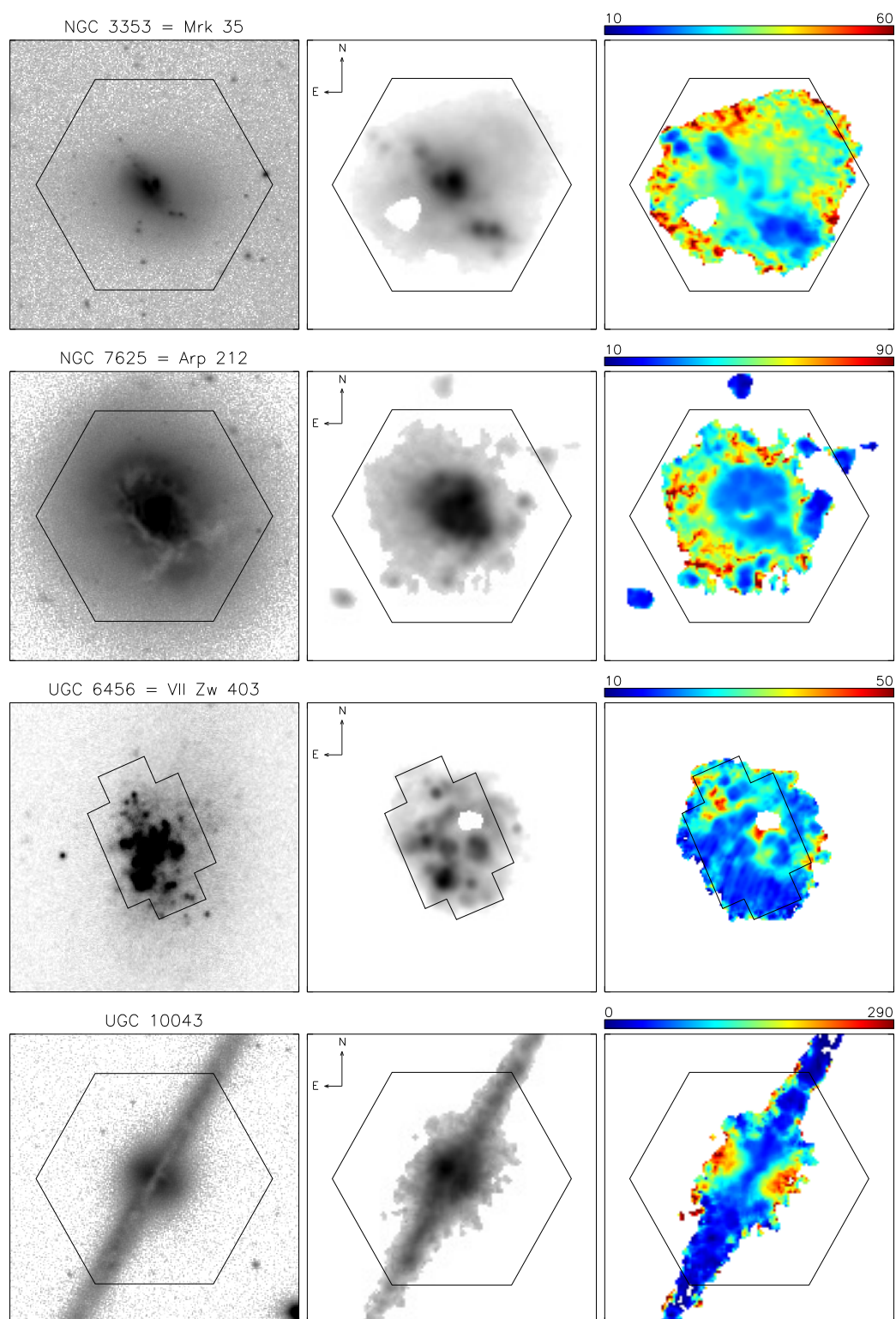


Рис. 15. Изучаемые галактики. Левый столбец – изображения в фильтре r обзора SDSS из [82], для UGC 6456 приведено изображение в фильтре R из [83]. Средний столбец – изображения в эмиссионной линии $[\text{NII}]\lambda 6593$ (UGC 10043) или $\text{H}\alpha$ (для остальных) по данным наблюдений с ИФП на БТА. Правый столбец – дисперсия скоростей ионизованного газа, шкала – в km s^{-1} . Размер изображений $90'' \times 90''$. Показано расположение полей зрения интегрального полевых спектрографов: обзор CALIFA и мозаика MPFS (для UGC 6456). Поле дисперсии скоростей взяты из [69] и [84] (для UGC 10043) без исправления за тепловое уширение линий.

Всего это около 60 объектов, наблюдавшихся в 2002 – 2015 гг., большая часть которых представлена в статье [69]. Для каждой из галактик списка мы проверили наличие в открытых источниках кубов, полученных методом интегрально-полевой спектроскопии. Для трех галактик – Arp 212, Mrk 35 и UGC 10043 – такие данные были получены в рамках обзора CALIFA (the Calar-Alto Legacy Integral Field Area, [85]). Использовался 3-й релиз данных CALIFA, спектры которого доступны на сайте проекта². Отметим, что UGC 10043 наблюдалась на 6-м телескопе специально по заявке команды CALIFA. Результаты были представлены в нашей совместной статье [84] и во многом послужили стимулом дальнейшего изучения соотношения BPT- σ . Тем не менее, для однородности, мы повторили анализ данных UGC 10043 и в настоящей работе, используя те же методы, что и для остальных галактик. Для галактики VII Zw 403 имелся куб данных, полученный в результате совмещения нескольких полей спектрографа MPFS в наблюдениях на 6-м телескопе САО РАН, представленный в [29].

Карты σ на рис. 15 показаны с оригинальной дискретизацией изображений ИФП ($0.6 - 0.7''$), которая несколько лучше, чем в используемых данных интегрально-полевой спектроскопии ($1''/\text{spaxel}$), при том, что само угловое разрешение θ обоих наборов данных близко (см. таб. 1 и 2). Для учета этого эффекта мы сперва интерполировали куб данных ИФП на более грубую сетку, соответствующую данным CALIFA или MPFS. Точность совпадения обоих наборов данных контролировалась по изображениям в эмиссионных линиях и континууме и была лучше, чем $0.2 - 0.5''$. С целью лучшего выделения эмиссионных линий в областях низкой поверхностной яркости, мы выполнили по-пиксельное сложение (биннинг) 2×2 обоих совмещенных наборов данных. Эта процедура также уменьшила возможные ошибки от небольшого различия в угловом разрешении данных ИФП и интегрально-полевой спектроскопии. Поэтому все представленные ниже измерения выполнены по кубам с размером элемента

²<http://califa.caha.es/>

2". После совмещения и бининга в кубах ИФП мы выполняли процедуру построения карт σ . Карты σ маскировались так, что оставлялись только точки, для которых сигнал шум был не ниже $S/N=3$. Исправления карт дисперсий скоростей за тепловое уширение линий не проводилось.

3. Диаграммы ВРТ- σ

3.1 Галактический ветер в UGC 10043

UGC 10043 – видимая с ребра спиральная галактика. Наблюдения в линиях $H\alpha$ и $[NII]$, проведённые на HST ([86]), обнаружили признаки звездообразования в галактическом ядре, а так же перпендикулярную диску протяжённую эмиссионную структуру, являющуюся результатом воздействия галактического ветра. В работе [84] представлены диагностические диаграммы для центральной части галактики по данным обзора CALIFA. Часть точек на графике, относящихся к центральной области звездообразования, лежит в области, характерной для фотоионизации молодыми звездами, в то время как другие точки попадали в область, свойственную для ударного возбуждения. В рамках модели ударного возбуждения было наложено ограничение на скорость ветра — не более 400 км/с. Анализ поля скоростей газа в линии $[N II]$, построенного со сканирующим ИФП, позволил нам получить более жесткое ограничение на скорость галактического ветра – менее 250 км с^{-1} , в согласии с моделью ударного возбуждения газа. В той же статье [84] было показано существование четкого соотношения ВРТ- σ в ветровой туманности UGC 10043.

На рис. 16 (верхний ряд) представлены диагностические ВРТ-диаграммы. Линии, разделяющие с разным типом ионизации: области HII, объекты со смешанным (Comp) типом ионизации, активные сейфертовские галактики (Seyfert) и объекты типа LINER, взяты из [24]. На рисунке видно, что области с ударным возбуждением эмиссионных линий в ветровой туманности характеризуются бо-

лее высокой дисперсией скоростей, в сравнении с областями, где доминирует фотоионизация. При этом наблюдается положительная корреляция между отношениями потоков линий $[SII]$ к $H\alpha$, $[NII]$ к $H\alpha$, $[OI]$ к $H\alpha$ и σ (см. рис. 16). В то же время прослеживается отрицательная корреляция между отношением интенсивностей линий дублета серы ($[S II]\lambda 6731 / [S II]\lambda 6717$) и σ . Это означает, что более высокая дисперсия скоростей характерна для диффузного газа с меньшей электронной плотностью n_e .

Количественно охарактеризуем соотношение BPT- σ . Для каждой точки на диаграммах отношения потоков в линиях можно определить минимальное расстояние до кривой, ограничивающей область ионизации типа III из работы [23] (в случае диаграммы $[NII]/H\alpha$ – $[OIII]/H\beta$ на наших рисунках это граница раздела областей Comp и AGN). Это расстояние мы обозначили как ρ и определили его так, что отрицательные величины ρ соответствуют смещению точек от демаркационной линии в сторону, соответствующей фотоионизации молодыми звёздами, положительные — в сторону иных механизмов ионизации. Примеры соотношений с использованием этого параметра показаны на рис. 17, для краткости и удобства чтения мы обозначили величину ρ для диаграмм $[N II]/H\alpha$ – $[O III]/H\beta$ — как $\rho([NII])$, для диаграмм $[S II]/H\alpha$ – $[O III]/H\beta$ — как $\rho([SII])$ и для диаграмм $[O I]/H\alpha$ – $[O III]/H\beta$ — как $\rho([OI])$. Можно видеть, что во всех представленных случаях рост дисперсии скоростей по лучу зрения коррелирует с удалением на BPT-диаграмме от зоны, характерной для ионизации молодыми звёздами.

3.2 Mrk 35 и VII Zw 403: карликовые галактики со вспышкой звездообразования

VII Zw 403 — одна из ближайших голубых компактных карликовых галактик с несколькими эпизодами недавнего звездообразования. Текущая вспышка локализована в центральном килопарсеке, где выделяются несколько компакт-

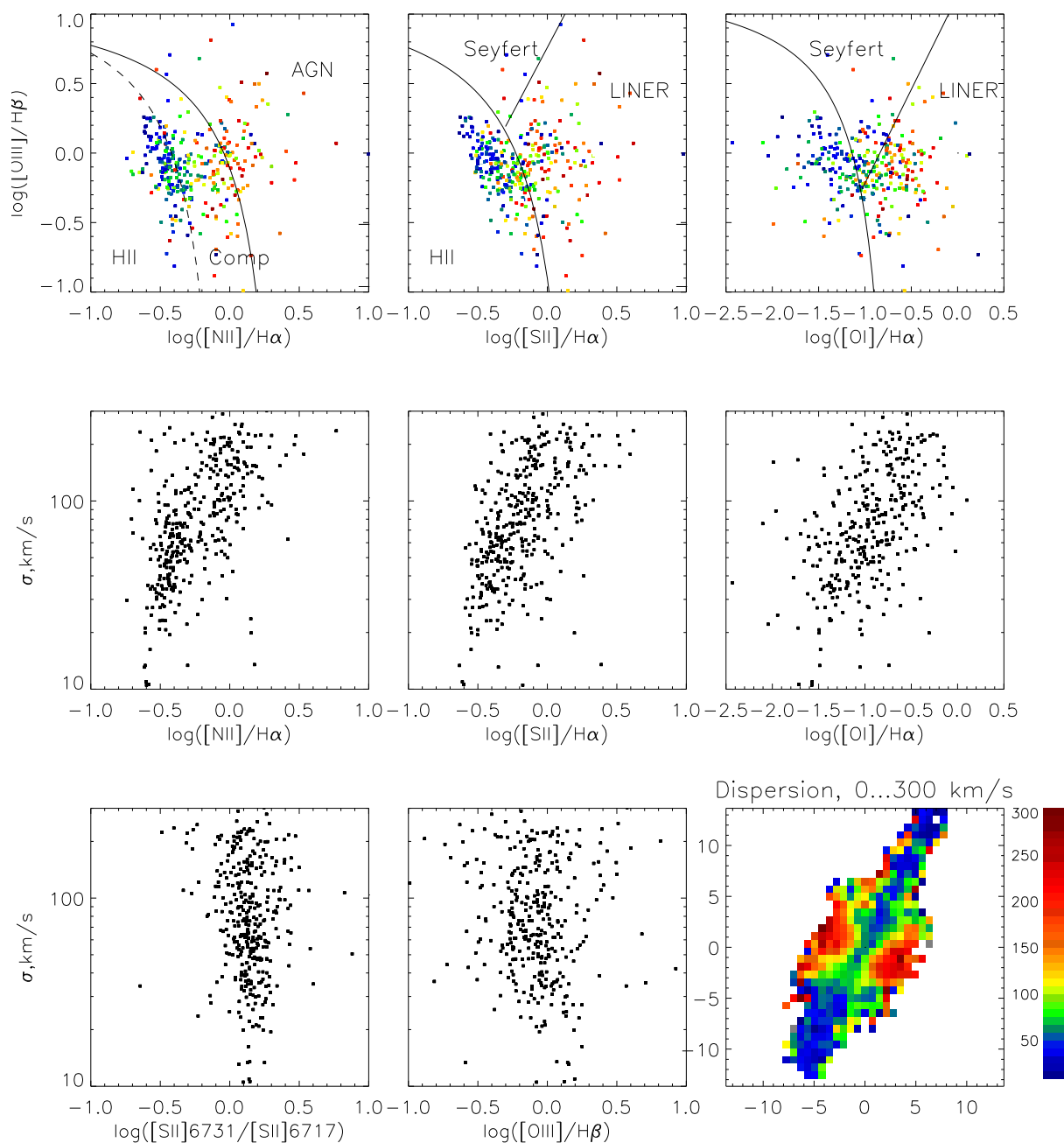


Рис. 16. Верхний ряд – ВРТ-диаграммы для UGC 10043. Цветом показана дисперсия скоростей ионизованного газа по лучу зрения в данном пикселе, в соответствии с картой, приведенной внизу справа. Линии, разделяющие области HII, объекты со смешанным (Comp) типом ионизации, активные сейфертовские галактики (Seyfert) и объекты типа LINER, взяты из [24]. Остальные графики — зависимость дисперсии скоростей от отношения потоков эмиссионных линий.

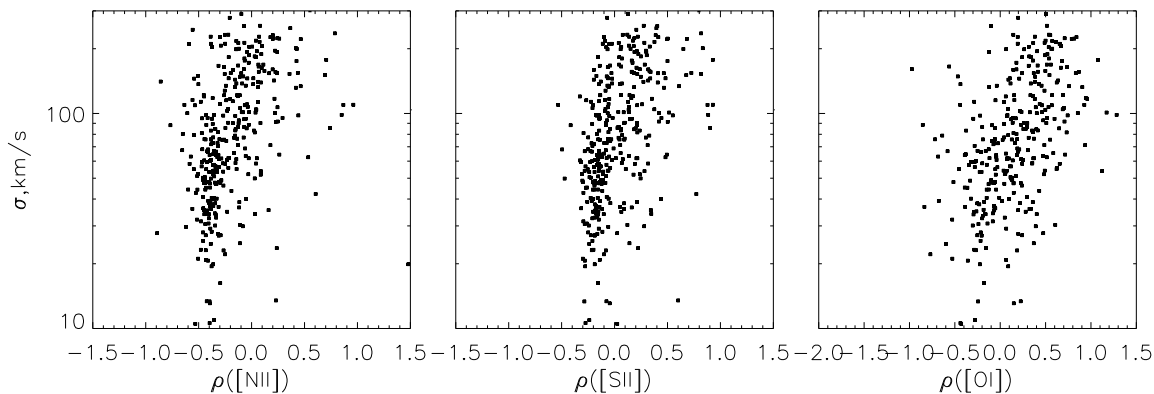


Рис. 17. UGC10043. Зависимость σ от расстояния точки до демаркационной кривой на ВРТ-диаграмме, разделяющей III области и регионы с иными механизмами ионизации ([23]).

ных ассоциаций ОВ-звёзд и связанные с ними расширяющиеся оболочки III, погружённые в диффузный ионизованный газ (см. [87] и ссылки там). Поля лучевых скоростей и дисперсий лучевых скоростей ионизованного газа в этой галактике ранее рассматривались в работах [88, 16, 69], где отмечалась достаточно спокойная кинематика газа с низким уровнем пекулярных скоростей. Величина σ лежит в диапазоне $\sim 15\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$. На ВРТ-диаграммах большинство точек располагается в области фотоионизации (см. рис. 18). Некоторое количество точек с более высокой дисперсией оказывается вблизи разделительной кривой. При этом расширяющиеся оболочки III, связанные с яркими областями звездообразования, характеризуются меньшей величиной $\sigma \sim 20 \text{ км с}^{-1}$. Одна из областей с более высокой σ располагается между двумя такими оболочками. Другие расположены на периферии диска ионизованного газа ([16]). На диаграммах “отношение линий – дисперсия скоростей” не заметно значимых корреляций (рис. 18). Поэтому мы можем сделать вывод о том, что вклад ударного возбуждения в ионизацию газа в данной галактике в целом незначителен и даже на границах расширяющихся оболочек заметно уступает фотоионизации (тип III). На это же указывает отсутствие заметной корреляции между ρ и σ на рис. 20.

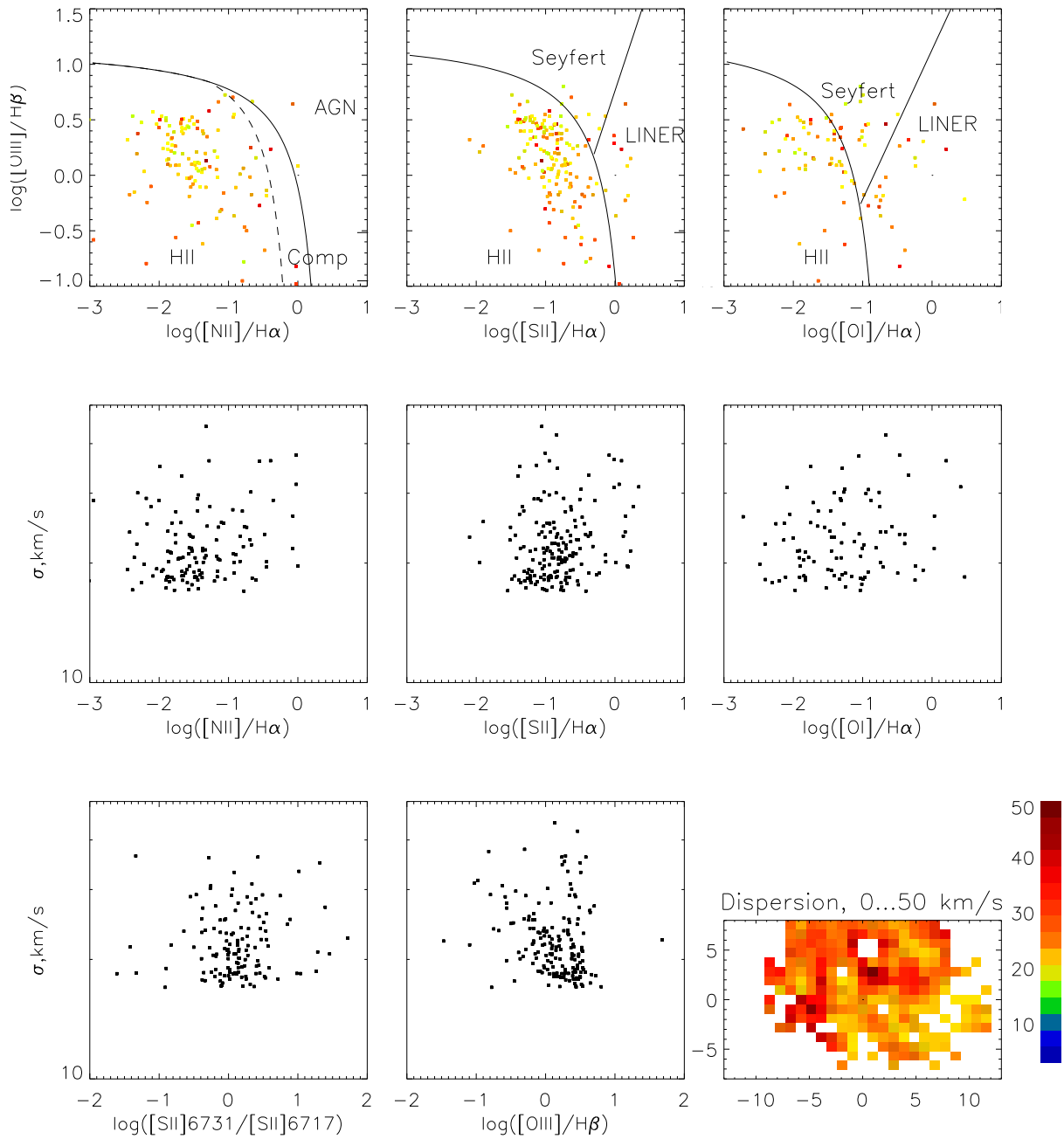


Рис. 18. Диаграммы, аналогичные рис. 16 для VII Zw 403.

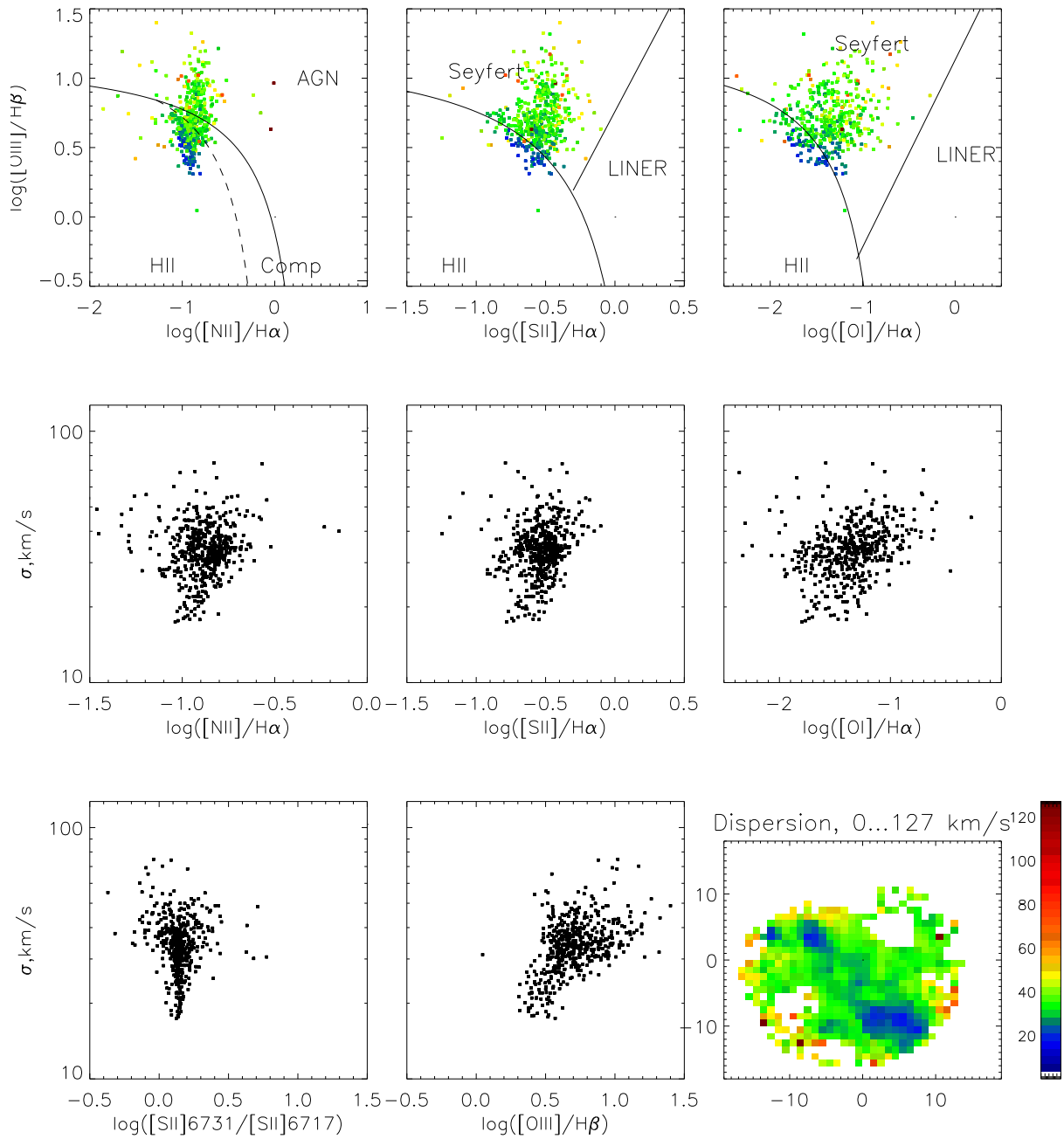


Рис. 19. Диаграммы, аналогичные рис. 16 для Mrk 35.

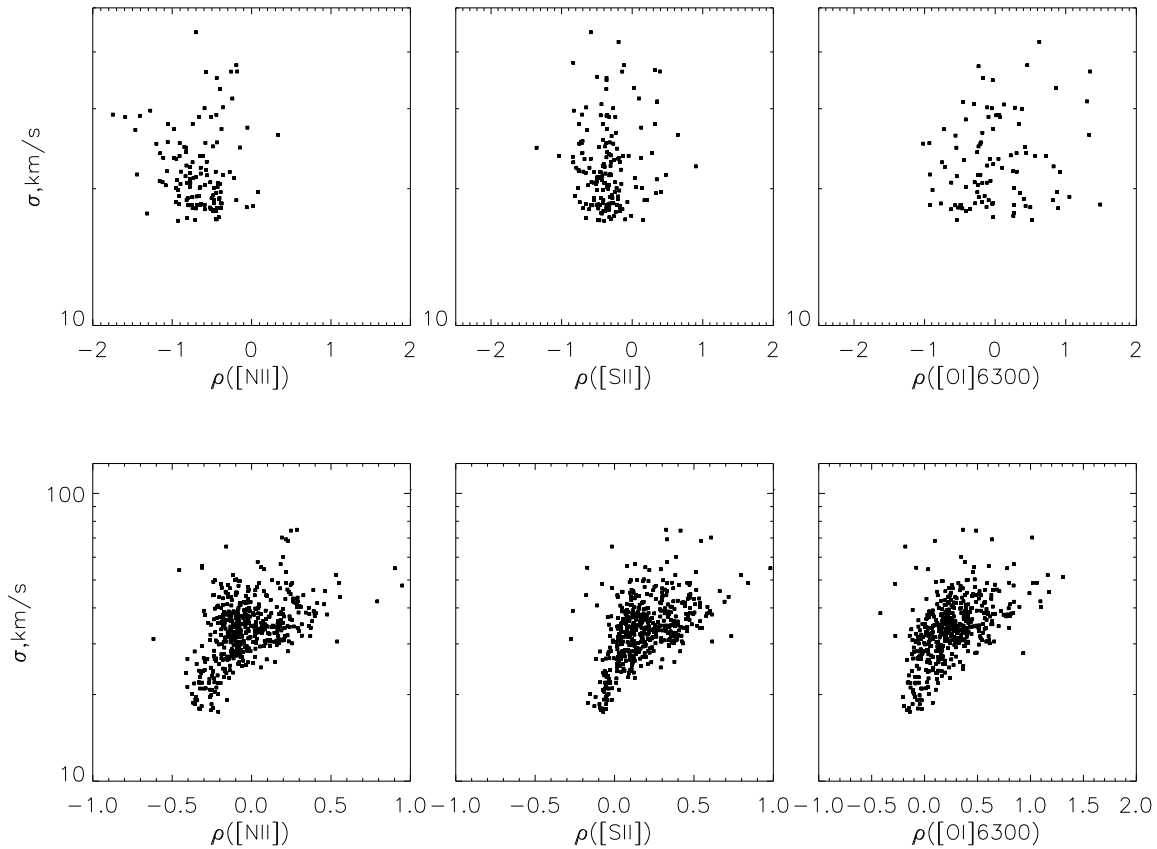


Рис. 20. Диаграммы, аналогичные рис. 17 для VII Zw 403 (вверху) и Mrk 35 (внизу).

Mrk 35 – ещё один пример голубой компактной галактики. Текущее звездообразование здесь сосредоточено в нескольких ярких компактных регионах. Области звездообразования вблизи оптического центра галактики образуют бароподобную структуру, где наблюдается популяция звёзд Вольфа-Райе ([89]). Тогда как дисперсия лучевых скоростей ионизованного газа в галактике достигает $\sim 70 \text{ км с}^{-1}$, в центральных областях она лежит в пределах $\sim 20\text{--}35 \text{ км с}^{-1}$. При этом наиболее высокую дисперсию лучевых скоростей демонстрирует газ, находящийся между тремя центральными областями звездообразования. В ”рукавах” дисперсия оказывается несколько ниже по сравнению с центральными регионами и в целом не превышает $\sim 20 \text{ км с}^{-1}$. На ВРТ-диаграммах (см. рис. 19) точки, соответствующие областям текущего звездообразования, расположены в области фотоионизации. Внешние части галактики, характеризующиеся низкой поверхностной яркостью и высокой дисперсией лучевых скоростей, оказываются

ся вблизи разделительных кривых, что позволяет предположить определённый вклад ударных волн в ионизацию газа этих регионов. Как и в UGC 10043, отношение интенсивностей линий дублета серы $[\text{S II}]\lambda 6717/[\text{S II}]\lambda 6731$ на рис. 19 демонстрирует обратную зависимость. Диаграммы σ – ρ демонстрируют положительную корреляцию между расстоянием до модельной кривой и дисперсией скоростей (рис. 20).

3.3 Agr 212: галактика с полярным кольцом

Agr 212 – пекулярная галактика, в которой обнаружены две кинематически различные вращающиеся газовые подсистемы: внутренний диск размером 3.5 кпк и внешние области НII, орбиты которых располагаются под значительным углом к звёздному диску [90]. Наблюдаемая картина объяснялась в предположении, что газ (в основном – нейтральный) во внешних областях галактики расположен в широком кольце диаметром около 20 кпк, вращающемся в плоскости, примерно ортогональной к диску. По мере уменьшения радиусов орбит газовых облаков угол их наклона уменьшается, и на радиусе 2–3 кпк газ из кольца начинает выпадать в плоскость галактики, провоцируя вспышку звездообразования. Именно здесь наблюдается наиболее высокая дисперсия лучевых скоростей, достигающей до 80–100 км/с (см. рис. 21). При этом точки, относящиеся к этой зоне столкновения газовых подсистем на ВРТ-диаграммах (рис. 21) смещены от областей с доминированием фотоионизации в сторону области доминирования ударной ионизации. В то же время в центральной части галактики фотоионизация явно доминирует.

Как и в UGC 10043 и Mrk 35, здесь видна положительная корреляция между σ и ρ для всех ВРТ-диаграмм (рис. 22). Важно отметить, что во всех трёх галактиках эта зависимость начинает прослеживаться для дисперсий скоростей выше чем 30–40 км с⁻¹ и практически пропадает для меньших σ . Иными словами, корреляция между σ и ρ проявляет себя при наличии ударного возбуждения

в диффузном газе (DIG) и исчезает в областях III, характеризующихся низким уровнем турбулентных движений. Подтверждением этому так же может служить отсутствие выраженных корреляций $\sigma - \rho$ в галактике VII Zw 403, где во всех точках $\sigma < 40 \text{ км с}^{-1}$.

В отличие от UGC 10043 и Mrk 35, отношение интенсивностей линий серы в Ayr 212 не демонстрирует выраженной зависимости от σ , что согласуется с предположением о том, что здесь высокая дисперсия скоростей наблюдается не только в DIG с низкой электронной плотностью, но и в более плотной среде сталкивающихся газовых облаков.

4. Выводы и результаты Главы 3

Для наблюдательного изучения связи между турбулентными движениями ионизованного газа в близких галактиках и его состоянием ионизации требуются данные панорамой спектроскопии одновременно с большим полем зрения и достаточно высоким спектральным разрешением. А так как наблюдать необходимо области низкой поверхностной яркости с угловым разрешением около $1''$, то требуется оптический телескоп большого ($D > 3 - 5 \text{ м}$) диаметра. Все эти требования вместе пока реализованы только в уникальном приборе MUSE на 8-м телескопе VLT [91].

Наша идея состоит в совместном использовании карт дисперсии скоростей ионизованного газа, полученных из наблюдений со сканирующим ИФП и панорамных данных по спектрофотометрии галактик с низким спектральным разрешением. Наблюдаемая дисперсия лучевых скоростей, характеризующая турбулентные движения ионизованного газа, может быть обусловлена разными причинами, такими как вириальные движения в гравитационном потенциале галактики, воздействие на газ расширяющихся оболочек или, более обще — энергией, ”впрыскиваемой” в межзвездную среду процессами звездообразования ([69, 92]).

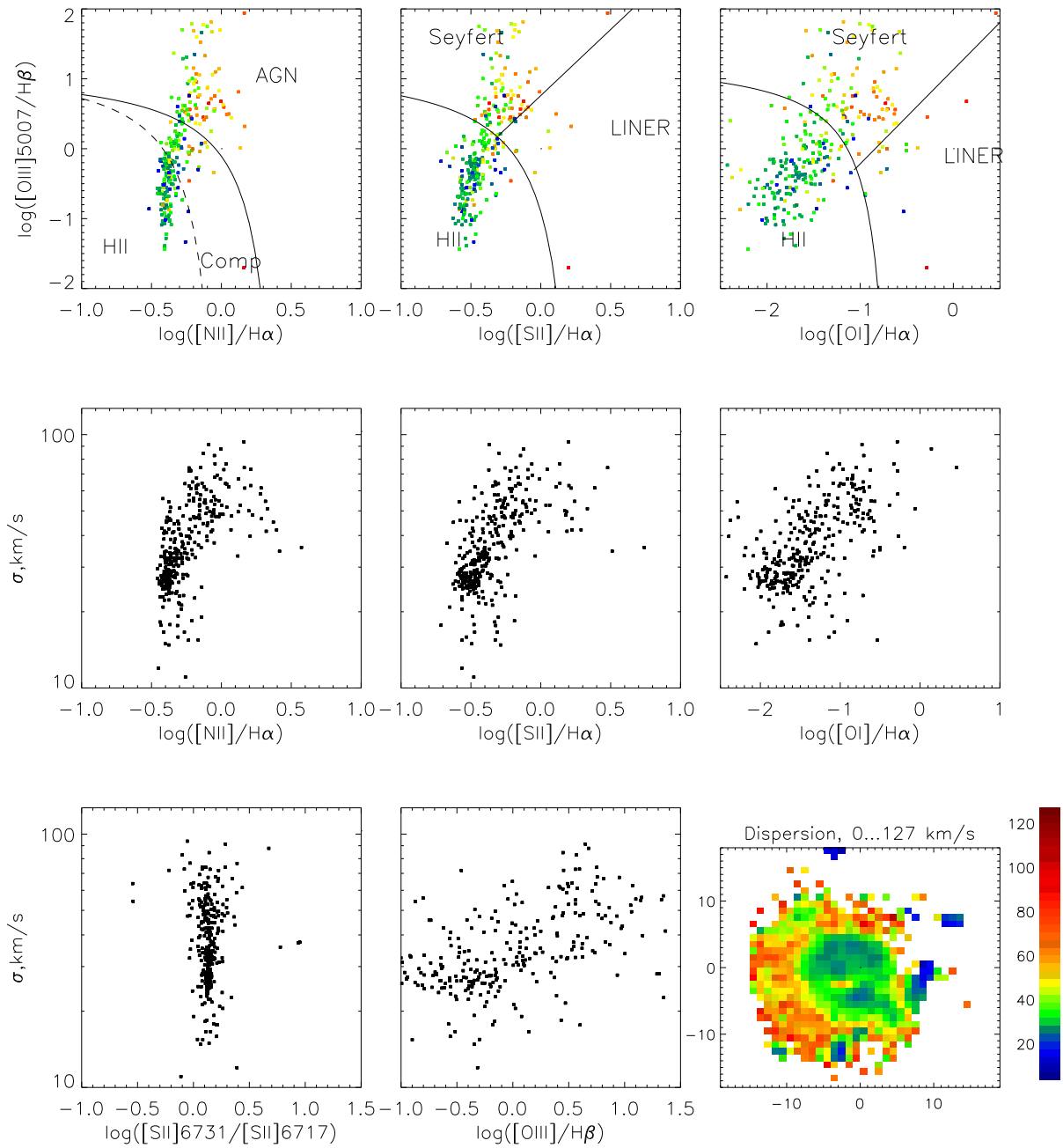


Рис. 21. Диаграммы, аналогичные рис. 16 для Abg 212.

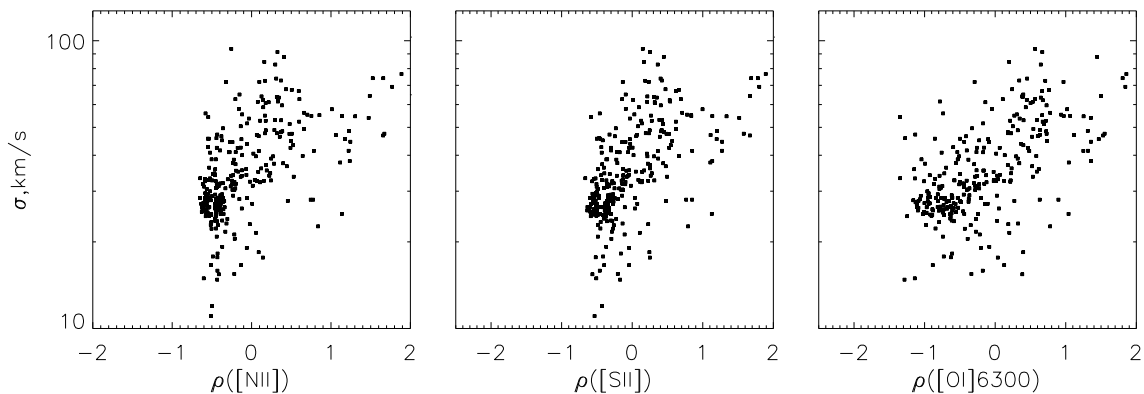


Рис. 22. Диаграммы, аналогичные рис. 17 для Arp 212.

Также, различные причины влияют на величину отношения потоков линий с разным механизмом возбуждения. Объединение этой информации позволяет в ряде случаев сделать однозначные выводы о вкладе ударных волн в ионизацию газа в областях с низкой поверхностной яркостью. Только по отношению потоков линий в конической туманности в UGC 10043 нельзя однозначно сказать, с чем связан рост относительной интенсивности запрещенных линий – с ионизацией ударными волнами от центральной вспышки звездообразования, или со старым звездным населением толстого диска, в котором она расположена. Но добавление информации о кинематике газа говорит о том, что наблюдается галактический ветер. В Arp 212 наш подход позволил подтвердить ранее высказанное в работе [90] предположение о прямом столкновении газовых облаков на наклонных орбитах с основным диском галактики, порождающем ударные фронты.

Таким образом, использование метода диаграмм ВРТ- σ , в дополнение к классическим методам диагностики по отношению спектральных линий, помогает лучше понять причины ионизации межзвездной среды галактик в каждом конкретном случае. Единственная галактика, в которой мы не нашли корреляции между σ и характеристическими отношениями потоков линий (или параметром ρ) – VII Zw 403. Темп текущего звездообразования здесь самый низкий

в нашей выборке и составляет всего около $0.015 M_{\odot}/yr$ [88]. Видимо, по этой причине вклад ударных волн в ионизацию газа практически не заметен.

IV. Использование фотометрии с перестраиваемым фильтром для построения диагностических диаграмм.

1. Введение

NGC 3077 – карликовая галактика, принадлежащая к группе М 81, её абсолютная звездная величина $M_B = -17.62$, принятое расстояние 3.85 Мпк [93]. Среди близких галактик NGC 3077 выделяется своей пекулярной морфологией: многочисленными филаментами в линиях ионизованного газа и связанными с ними пылевыми полосами, заметными на оптических изображениях (рис. 23). Наблюдения в нейтральном водороде показывают, что галактика расположена рядом с гигантской приливной структурой, соединяющей её с М 81 и М 82 [94, 95], всю систему иногда называют “триплетом М 81” [96]. С южной стороны от галактики наблюдается цепочка из скоплений голубых звёзд и компактных областей Н II – карликовая приливная галактика “Гирлянда” [97, 98], находящаяся в области повышенной плотности Н I. Темп текущего звездообразования NGC 3077, оцененный по светимости в линии $H\alpha$, и масса нейтрального водорода составляют $SFR \approx 0.1 M_{\odot}/\text{год}$ и $M_{HI} = 6.3 \cdot 10^8 M_{\odot}$ соответственно [99, 100], что довольно существенно для карликовой галактики.

В [101] с помощью $H\alpha$ эшеллеграмм показано наличие в NGC 3077 областей уширения и раздвоения эмиссионной линии, трактуемых как несколько расширяющихся оболочек ионизованного газа. Оценка вириальных скоростей

показала, что их энергетики недостаточно, чтобы выбросить вещество из галактики. По данным наблюдений H I построена кривая вращения галактики, скорость вращения достигает 50 км с^{-1} . В то же время, наблюдения в линии H α не обнаруживают признаков вращения [102].

В [103] показано наличие скопления компактных рентгеновских источников в центре галактики, пространственно связанных с одной из ранее обнаруженных в оптическом диапазоне расширяющихся оболочек. Можно сделать предположение, что речь идёт об остатках сверхновых. Отмечается, что видимые в оптических эмиссионных линиях оболочки заполнены оптически тонким горячим газом. При этом, в отличие от остальных семи карликовых галактик со вспышкой звездообразования, рассмотренных в статье, NGC 3077 имеет около-солнечную металличность [104] и довольно низкую яркость в рентгеновском диапазоне.

При изучении состояния ионизации газа важным инструментом являются диаграммы отношений потоков в ярких оптических эмиссионных линиях ($[\text{O III}]/\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$), предложенные в классической работе Baldwin, Phillips и Terlevich (BPT-диаграммы) [105], позже развитые в [60]. Использование отношений близких линий, слабо зависящих от межзвездного поглощения, позволяет применять их для исследования разнообразных эмиссионных объектов. С их помощью можно уверенно разделять области газа, ионизованного излучением OB-звёзд, от тех, где основной вклад в возбуждение газа вносят другие источники ионизации (излучение активного галактического ядра, ударные волны). В то же время на данных диаграммах не всегда удается разделить вклад ионизации ударными волнами от излучения старых звёзд асимптотической ветви гигантов или галактических ядер типа LINER.

Анализ BPT-диаграмм, выполненный для отдельных областей NGC 3077 в работе [106] по данным оптической узкополосной фотометрии на телескопе Хаббла, проведенной [107], продемонстрировал наличие вклада ударного воз-

буждения в ионизацию газа в областях, расположенных ближе к периферии галактики. При этом авторы отмечают, что слабые проявления ударных волн в ионизованном газе могут теряться на фоне мощного излучения ярких областей H II.

Оценить вклад ударных волн в состояние ионизации газа позволяет добавление к классическим ВРТ-диаграммам дополнительного параметра – дисперсии скоростей ионизованного газа по лучу зрения (σ), рост которой связан с увеличением турбулентных скоростей газа за фронтом ударной волны. Однако для точных измерений величины σ требуется относительно высокое спектральное разрешение $R > 5\,000 - 6\,000$. Поэтому в большинстве обзоров такой подход применяется для исследования объектов с достаточно большими значениями лучевых дисперсии скоростей (галактики с активными ядрами или мощным звездообразованием, где $\sigma > 100 - 200 \text{ км с}^{-1}$), оставаясь малоэффективным при изучении карликовых галактик, а также протяжённых областей диффузного ионизованного газа (diffuse ionized gas = DIG) с низкой поверхностной яркостью.

При исследованиях подобных объектов в работах [108, 109] использовались соотношения линий, полученные классическими методами панорамной спектроскопии, совместно с данными наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП) с достаточно высоким для оценки дисперсии лучевых скоростей спектральным разрешением.

В данной главе представляются результаты комплексного исследования состояния ионизованного газа в NGC 3077 на основе нового наблюдательного материала: длиннощелевой и 3D-спектроскопии со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП) на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской Академии Наук (САО РАН) и узкополосной фотометрии с прибором MaNGaL на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории Государственного Астрономического Института им. П.К. Штернберга Московско-

го Государственного университета им. М.В. Ломоносова (КГО ГАИШ МГУ). Проведенные нами наблюдения и их обработка описаны в разделе I. Журналы с основными параметрами проведенных наблюдений приводятся в таблицах 1 (наблюдения со сканирующим ИФП), 3 (наблюдения с длинной щелью) и 4 (узкополосная фотометрия с перестраиваемым фильтром). Раздел 3 содержит описание основных полученных наблюдательных результатов. В частности, в разделе 3 приводятся результаты анализа кинематики ионизованного газа по данным наблюдений с ИФП; раздел 3 посвящен анализу эмиссионного спектра галактики и металличности газа по данным длиннощелевой спектроскопии; в разделе 3 проводится анализ состояния ионизации газа по данным узкополосной фотометрии с MaNGaL. Раздел 4 суммирует полученные нами выводы.

2. Учет поглощения и карта яркости в линии $H\beta$

Для построения диагностических диаграмм, разделяющих вклад от разных источников ионизации важно измерить отношение эмиссионных линий $I([\text{O III}]\lambda 5007)/I(H\beta)$. Мы не проводили наблюдений с MaNGaL в линии $H\beta$, так как наблюдаемый поток в ней в несколько раз слабее, чем в $H\alpha$, что потребовало бы слишком длительных экспозиций. Поэтому мы попробовали рассчитать распределение яркости в $H\beta$, используя изображение в $H\alpha$ и оценку поглощения по данным оптической фотометрии SDSS DR9, используя два различных метода.

Метод 1 интерпретирует уменьшение яркости I в данной точке относительно среднего на данном радиусе I_0 в фильтре g как пылевое поглощение: $A_g = -2.5 \lg I/I_0$. Профиль $I_0(r)$ усреднялся в эллипсах, соответствующих ориентации внешних изофот ($PA = 50^\circ$, $a/b = 0.85$), на исходном изображении маскировались звезды фона, области звездообразования и наиболее заметные пылевые прожилки. Из-за асимметрии в пылевом поглощении усреднение вы-

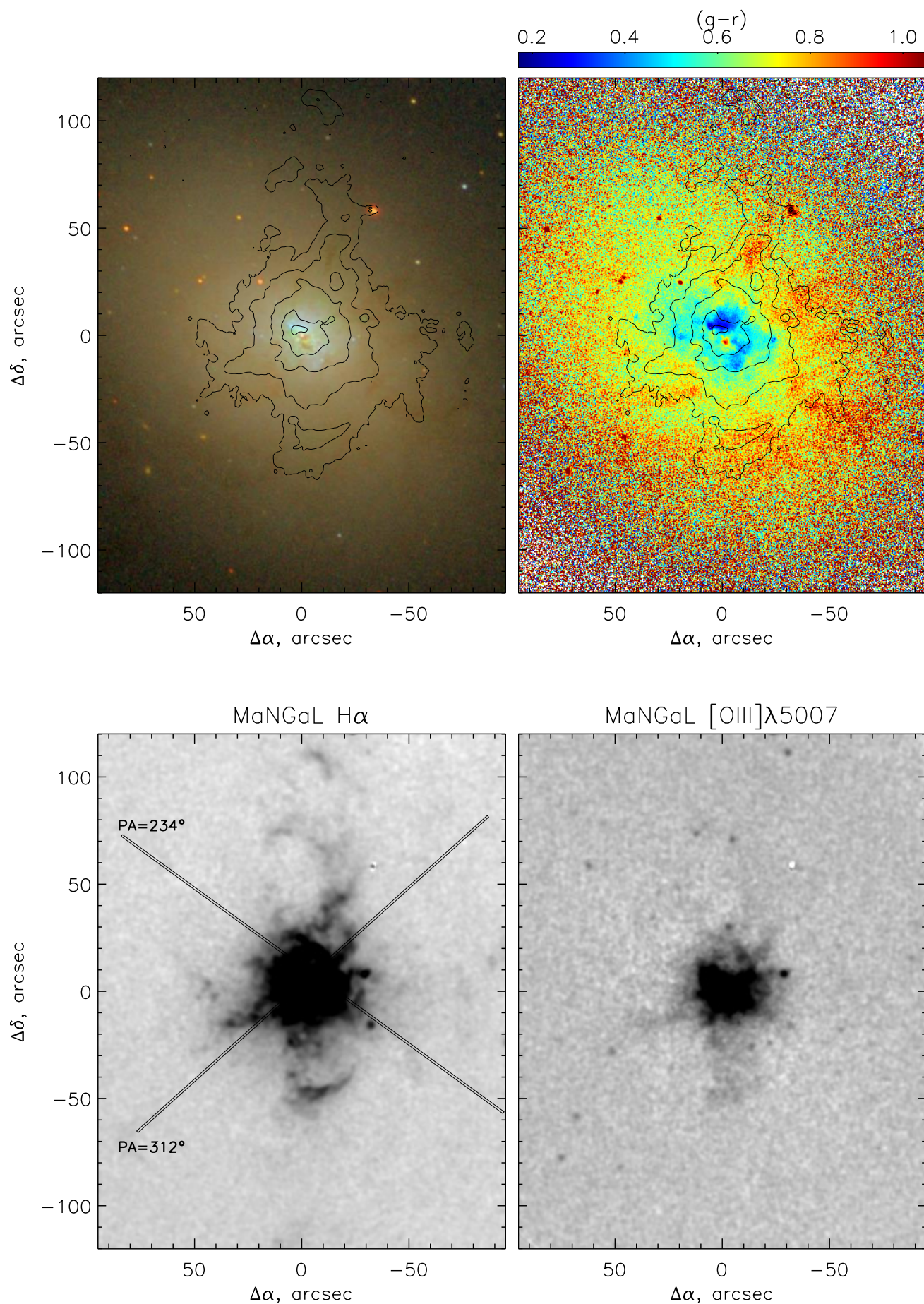


Рис. 23. Верхний ряд: композитное цветное изображение NGC3077 из обзора SDSS DR15 (слева) и карта показателя цвета $(g - r)$ (справа). Показаны изофоты в линии $H\alpha$, построенные по данным наблюдений с ИФП на 6-м телескопе. Нижний ряд: изображения, полученные с MaNGaL на 2.5-м телескопе, $H\alpha$ с положением щелей спектрографа SCORPIO-2 (слева) и [O III] (справа).

полнялось отдельно по разные стороны от большой оси, для получения итоговой карты A_g обе половинки совмещались, избыток яркости относительно I_0 интерпретировался как отсутствие поглощения.

В Методе 2 за основу бралась карта показателя цвета $(g - r)$, по которой строился средний радиальный профиль показателя цвета $(g - r)_0$ звездного населения, полученный усреднением в таких же эллиптических кольцах, как и в методе 1. Аналогично выполнялось маскирование пекулярных областей. Тогда избыток цвета вычислялся как $E(g - r) = (g - r) - (g - r)_0$, а пылевое поглощение $A_g = 3.1E(g - r)$.

Оба использованных метода могут давать систематическую ошибку в оценках поглощения, прежде всего потому, что пыль в NGC 3077 распределена сложно и неравномерно относительно распределения звезд, видны отдельные филаменты, сложным образом связанные с областями H II и диффузным газом. Поэтому полученные обоими методами карты "фотометрического" поглощения $A_g(phot)$ сравнивались со спектральными оценками $A_g(sp)$ вдоль двух имеющихся спектральных разрезов, вычисленных стандартным методом Бальмеровского декремента, это описано выше в главе 3. Сравнение показало, что в обоих случаях требуется введение некоторого поправочного коэффициента $k = A_g(sp) - A_g(phot)$. При таком определении k учитывает также поглощение по лучу зрения в Млечном пути. Однако Метод 1 лучше описывает вариации поглощения, наблюдаемые вдоль щели спектрографа, а поправочный коэффициент имеет меньшую величину. Поэтому расчет карты распределения яркости в H β выполнялся Методом 1.

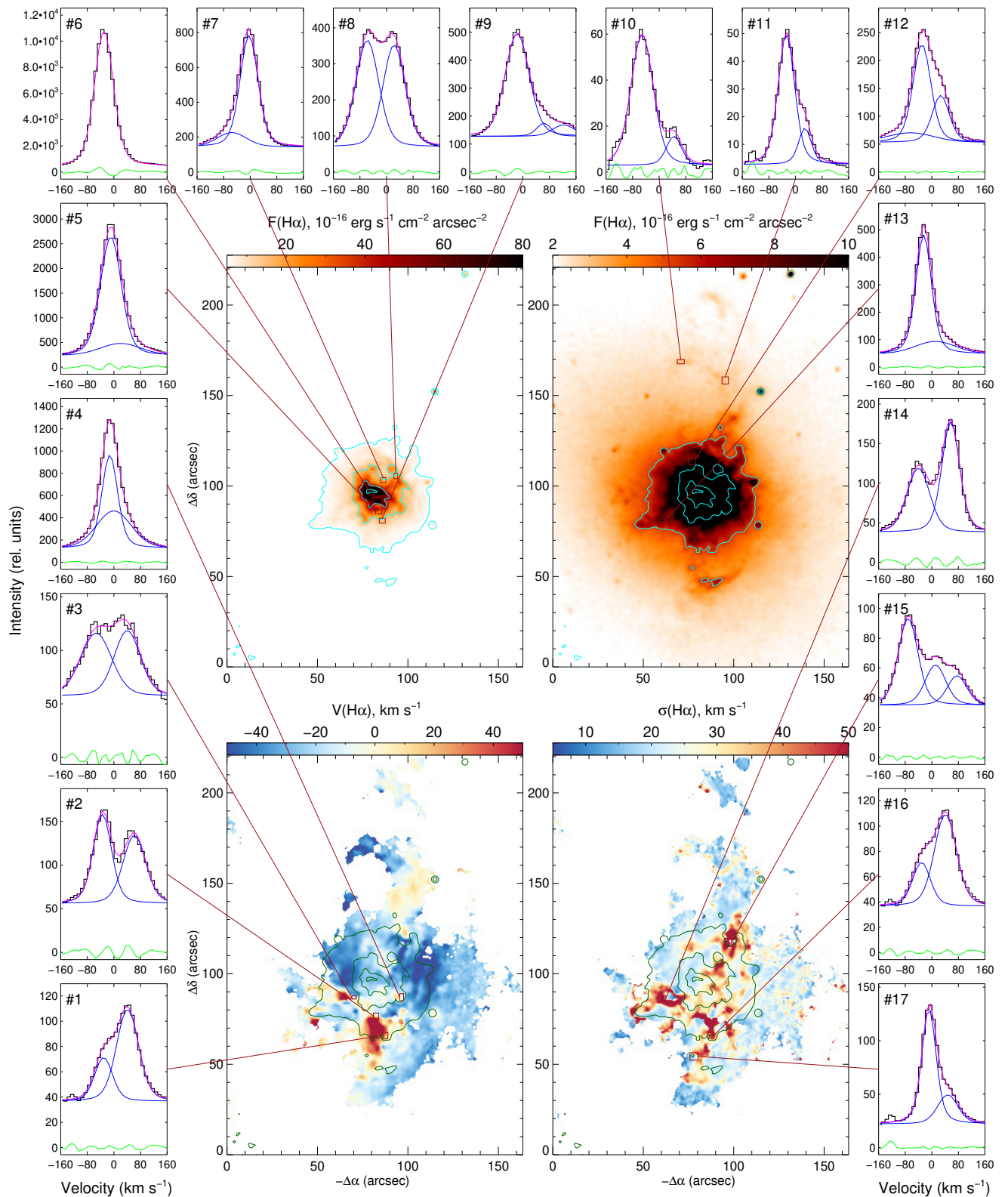


Рис. 24. Пример наблюдаемых профилей линии H α и результат их декомпозиции на 1–3 функции Фойгта (соответствующие профили показаны синим цветом, а зеленым цветом – остаток от их вычитания из наблюдаемого спектра). Профили получены путем интегрирования в прямоугольных областях, отмеченных на изображениях. Верхний ряд изображений демонстрирует распределение потока в линии H α для разных уровней интенсивности. Нижний ряд показывает поля лучевых скоростей (слева) и дисперсии скоростей (справа), полученные путем аппроксимации наблюдаемых профилей однокомпонентной функцией Фойгта. Изофоты соответствуют постоянным уровням яркости в линии H α , равным $(0.2, 0.5, 1.6, 4.9, 14.6) \times 10^{-16}$ эрг/с/см 2 /угл.сек. 2

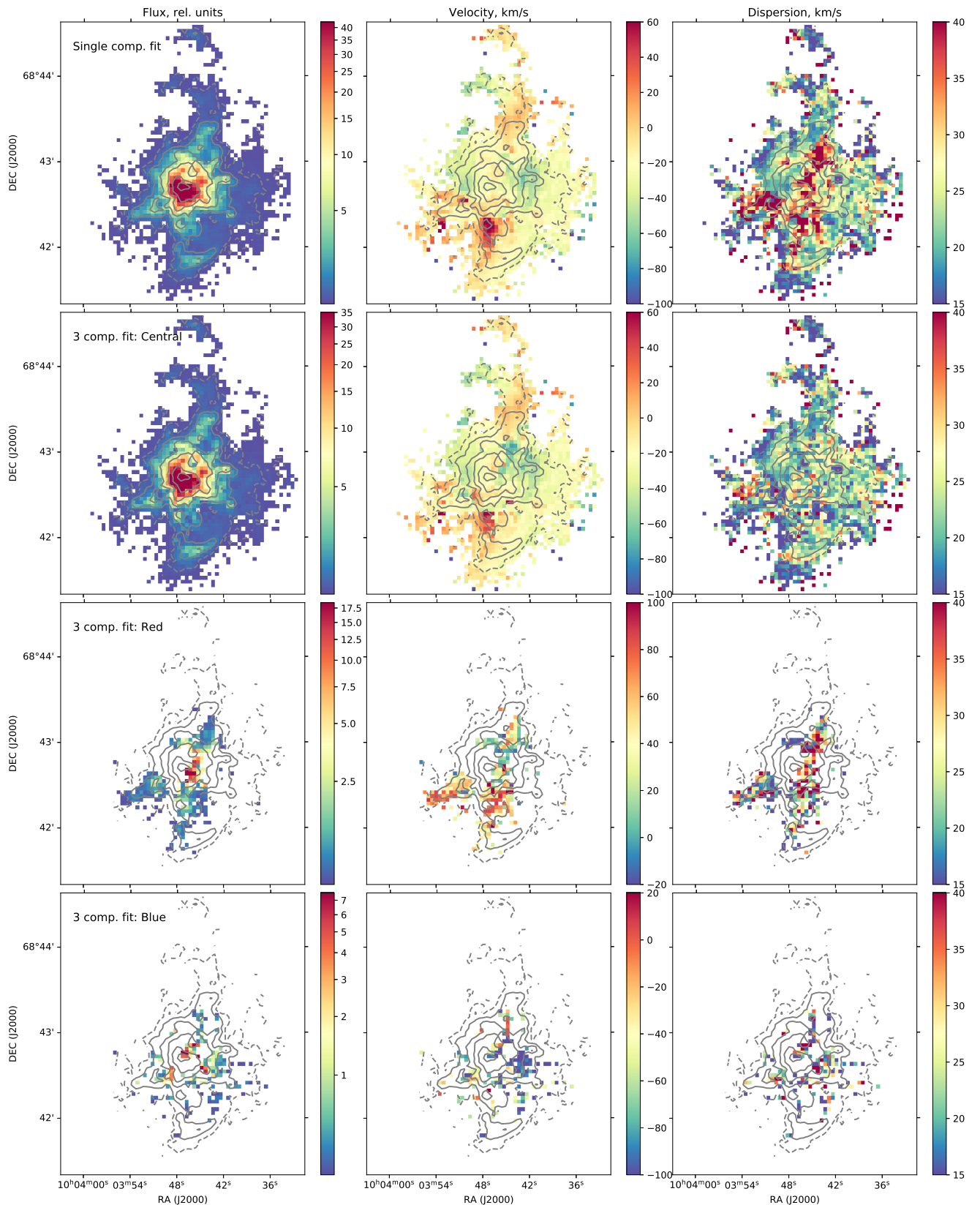


Рис. 25. Результаты декомпозиции куба данных ИФП в линии $H\alpha$ для NGC 3077 на одну и три кинематически выделенных компоненты. Слева направо – карты потока, лучевой скорости, дисперсии скоростей в линии $H\alpha$. Верхние панели получены путем декомпозиции одиночным профилем Фойгта, в то время как нижние три панели содержат информацию о центральной и смещенных в красную и синюю сторону компонентах при декомпозиции трехкомпонентным профилем Фойгта.

3. Результаты наблюдений

3.1 Анализ кинематики в линии $H\alpha$

Профили эмиссионных линий ионизованного газа, наблюдаемые с ИФП, как правило, хорошо описываются функцией Фойгта [18, 27]. Результат такой аппроксимации индивидуальных спектров в кубе данных позволяет построить изображения галактики в эмиссионной линии и в континууме, а также карты лучевых скоростей и дисперсий скоростей (σ), свободной от аппаратного уширения. На нижних панелях рисунка 24 показаны карты распределения лучевой скорости и σ , полученные путем аппроксимации куба данных однокомпонентным профилем Фойгта (верхние панели демонстрируют распределение поверхностной яркости $H\alpha$ по данным наблюдений с MaNGaL в том же масштабе).

Хотя на карте лучевых скоростей галактики обнаруживается некоторый (≈ 20 км/с.) градиент с запада на восток, она не демонстрирует явно заметной вращательной структуры, выделение оси вращения и аппроксимация кругового движения чёткой моделью невозможны. Это согласуется с результатами, полученными в работе [102]. Полученные нами значения дисперсии лучевых скоростей в линии $H\alpha$ в основном не превышают 20-30 км/с, в отдельных компактных областях достигая 35-60 км/с. В частности, некоторые из этих областей повышенной дисперсии совпадают с компактными рентгеновскими источниками из работы [103].

При изучении куба данных NGC 3077 в $H\alpha$ были выявлены многочисленные области, демонстрирующие сложную структуру профиля эмиссионной линии: несимметричность, разделение на две или три компоненты (см. примеры декомпозиции профилей на рис. 24). В самом центре галактики наблюдается яркий выраженный однокомпонентный профиль линии $H\alpha$. В то же время за пределами самой яркой области HII в галактике практически везде обнаруживаются сложные многокомпонентные профили. В частности, во всех областях с высо-

кой дисперсией скоростей, полученной из аппроксимации одной компонентой, наблюдаются профили линии $H\alpha$, четко разделяющиеся на 2 или 3 компоненты (см., например, профили #14–17 на рис. 24). Аналогичная картина наблюдается и в областях с наибольшими значениями лучевой скорости (профили #1–4).

Чтобы оценить характер движения газа в галактике, мы попытались осуществить декомпозицию профилей линии $H\alpha$ на кинематически выделенные компоненты во всем кубе данных и проследить пространственное распределение каждой компоненты. Для этой цели мы аппроксимировали профиль $H\alpha$ в каждом пространственном элементе куба данных (предварительно биннированного с размером окна в 4 пикселя для увеличения сигнал/шум) 1–3 компонентами. Процедура выполнялась итеративно, начиная с наименьшего числа компонент и с добавлением следующей компоненты в случае, если остаток от вычитания модели трехкратно превышает уровень шума. В некоторых областях число компонент регулировалось вручную по результатам визуального контроля результатов автоматического анализа. Далее мы выделили “центральную”, “синюю” и “красную” компоненты (в соответствии с их лучевыми скоростями) и рассмотрели пространственное распределение их характеристик. В случае двухкомпонентного профиля за “центральную” принималась наиболее яркая компонента. Результаты анализа представлены на рис. 25 (верхняя панель показывает прежний результат аппроксимации одной компонентой для сравнения).

Карты кинематически выделенных компонент показывают, что практически все области повышенной дисперсии на рис. 24 и верхней панели рис. 25 показывают наличие смещенной компоненты в красную (в основном) или синюю сторону. При этом дисперсия скоростей центральной компоненты в среднем совпадает с таковой в невозмущенных областях галактики. Заметим, что локализация красной и синей компонент совпадает с видимыми на изображениях из SDSS пылевыми прожилками, а так же с найденными по данным эшелле-спектроскопии в [101] оболочкам.

Отметим, что, ввиду сложной структуры профиля линии, однозначное разделение компонент и их пространственного распределения сильно затруднено, что не позволяет нам надежно восстановить объёмную структуру ионизованного газа. Тем не менее, мы не наблюдаем характерной для расширяющихся сверхоболочек картины распределения лучевых скоростей, где разница скоростей между компонентами максимальна в центре оболочки и убывает по краям. В то же время мы не можем исключать существования компактных оболочечных структур, как, например, в [110, 111], или же наличия расширяющихся оболочек в существенно неоднородной среде [112, 113].

Заметим также, что некоторые из профилей, показанных на рис. 25 (#5, 7, 12, 13), демонстрируют наличие широкой подложки с низкой яркостью, которая на самом деле может быть выделена для существенной части галактики, но ее вклад не учитывался на рис. 25. Таким образом, может идти речь об ещё одном компоненте с низкой яркостью ($\sigma > 100 - 150 \text{ км с}^{-1}$). Эта оценка дисперсии скоростей получена в предположении, что FWHM сравнима или превышает рабочий диапазон ИФП и поэтому не может быть оценена. Отметим, что недавно наличие широких компонент в нескольких гигантских областях звездообразования в галактике M 101 было достоверно показано в работе [114]. Ширина этих компонент, измеренная по уровню нулевой интенсивности (FWZI, Full Width at Zero Intensity), достигала 750–1300 км с⁻¹, что дает нам оценку дисперсии скоростей $\sigma = 100 - 200 \text{ км с}^{-1}$ (в предположении, что $\text{FWHM} \approx \text{FWZI}/3$). Наличие такой широкой компоненты в областях активного звездообразования может быть связано с действием ветра массивных звезд на окружающие молекулярные облака.

3.2 Анализ длиннощелевых спектров

На рисунке 26 показаны результаты анализа распределения отношений потоков в некоторых эмиссионных линиях и металличности вдоль щелей спек-

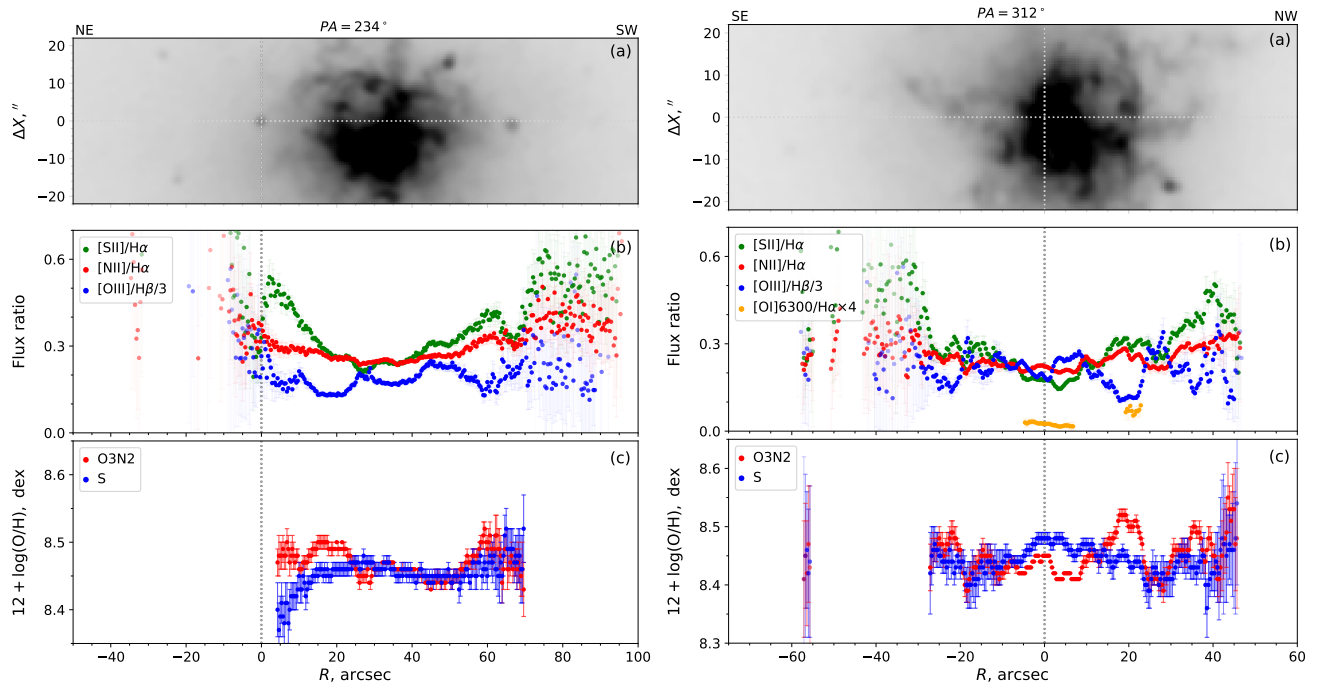


Рис. 26. Результаты анализа эмиссионного спектра, полученного при положениях щели спектрографа $PA=234^\circ$ (слева) и $PA=312^\circ$ (справа). Панели сверху вниз: (a) Карта галактики в линии $H\alpha$, полученная с MaNGaL (горизонтальная линия соответствует локализации щели спектрографа); (b) распределение отношений потоков в линиях; (c) распределение относительного содержания кислорода $12 + \log(O/H)$, оцененного двумя эмпирическими методами.

трографа, локализация которых показана горизонтальной линией на верхней панели.

До настоящего времени металличность межзвездной среды в NGC 3077 была оценена только в работе [104] по интегральному оптическому спектру центральной части галактики в большой апертуре. Полученное ими значение относительного содержания кислорода (являющегося индикатором металличности газа в межзвездной среде) $12 + \log(O/H) = 8.64$ указывает на солнечное содержание тяжелых элементов, что нехарактерно для карликовых галактик такой светимости (галактика отклоняется от зависимости “светимость-металличность” из работы [115]). Используя тот же спектр, авторы работы [107] получили еще большее значение $12 + \log(O/H) = 8.9$. Полученное существенное различие связано в первую очередь с тем, что авторы использовали разные семейства методов сильных линий (калиброванные по N Побластям с надежными оценками

электронной температуры T_e и по фотоионизационным моделям), что может приводить к разногласию до 0.6 dex (см., например, [116]). Используя наши данные длиннощелевых наблюдений мы можем не только уточнить значение металличности газа в NGC 3077, но и проследить ее распределение вдоль щелей.

Для оценки относительного содержания кислорода $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ мы использовали два эмпирических метода – O3N2 [117] и S [118], использующих отношения ярких эмиссионных линий $[\text{O III}]/\text{H}\beta$, $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ (только в случае S-метода). Оба метода калиброваны по областям H II с имеющимися надежными измерениями электронной температуры T_e и металличности, выполненными T_e -методом. Мы исключали из анализа пиксели вдоль щелей, не попадающие в области HII на BPT-диаграммах (см. ниже) или имеющие эквивалентную ширину $EW(\text{H}\alpha) < 6\text{\AA}$. Как следует из рис. 26, оба метода демонстрируют сходные значения без признаков градиента металличности, но с небольшими вариациями, которые могут быть связаны с вариацией ионизационного параметра вкладом DIG и просто с погрешностью методов, составляющей около 0.10–0.15 dex.

Оценки, полученные двумя методами по интегральному спектру центральной части $PA = 312^\circ$ ($-5 - +7$ угл.сек. вдоль щели) составляют $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\text{O3N2}} = 8.43 \pm 0.02$ и $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\text{S}} = 8.47 \pm 0.03$ (ошибки не учитывают погрешность методов). В данной области сигнал/шум в синей части спектра был достаточен, чтобы использовать для анализа металличности также отношение $[\text{OII}]\lambda 3727/\text{H}\beta$. Добавив это отношение к анализу, и используя таким образом метод R из работы [118], мы получили согласующуюся с указанными значениями оценку $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\text{R}} = 8.49 \pm 0.05$. Таким образом, в отличие от того, как считалось ранее, согласно нашим измерениям, металличность газа в галактике существенно ниже солнечной и составляет $Z = 0.6Z_\odot$. Существенных вариаций содержания кислорода вдоль щели нами не выявле-

но, хотя, как сказано далее в разделе 3, более обогащенный газ, связанный с приливным потоком от M 81, может наблюдаться на периферии галактики. Полученная нами оценка металличности газа хорошо согласуется с зависимостью “светимость–металличность” из работы [115] для принятого для NGC 3077 значения $M_B = -17.62$.

Построенные по результатам спектральных наблюдений диагностические диаграммы $[O\ III]/H\beta$ vs $[N\ II]/H\alpha$, $[S\ II]/H\alpha$ и $[OI]/H\alpha$ приведены на рис. 27. На верхних панелях цветом показана поверхностная яркость в линии $H\alpha$, черные линии отмечают положение кривой из [119], отделяющей области, где излучение может объясняться фотоионизацией, от областей с другим механизмом излучения (AGN, ударные волны). Серая линия на левой панели из работы [120] разделяет области H II от областей с композитным механизмом ионизации. Прямая на диаграмме $[O\ III]/H\beta - [S\ II]/H\alpha$ из работы [121] разделяет области Seyfert и LINER. На рисунке также показаны модели ударных волн, взятые из работы [65] для металличности $Z = 0.6Z_{\odot}$, соответствующей нашей оценке для NGC 3077. Различные цветные кривые соответствуют моделям для разной скорости ударных волн. При этом на верхних панелях показаны модели с учетом вклада прекурсора, а на нижних – только ударных волн. Как следует из диаграмм, вся наблюдаемая яркая эмиссия связана с фотоионизацией массивными звездами в областях звездообразования, в то время как в области композитного возбуждения и LINERs лежат только точки, соответствующие DIG с низкой поверхностной яркостью. Как видно из сопоставления диагностических диаграмм с моделями ударных волн, их действие может объяснить ионизацию областей низкой поверхностной яркости (рассогласование моделей ударных волн и наблюдений в случае $[OI]/H\alpha$ связано с отсутствием данных в линии $[OI]$ от областей DIG). При этом заметим, что модели ударных волн без учета прекурсора от фотоионизации хуже объясняют наблюдаемые данные, что позволяет сделать вывод о существенной роли утечки ионизирующих кван-

тов из областей звездообразования в ионизации DIG в областях, попавших на щели. При этом роль ударных волн должна быть несущественна в ионизации наблюдаемых ярких областей ионизованного газа, в том числе протяженных филаментов и оболочечных структур.

Нижние панели рисунка 27 демонстрируют BPT- σ диаграммы, на которых цветом показана дисперсия лучевых скоростей (измеренная по спектрам ИФП в результате декомпозиции однокомпонентным профилем), измеренная вдоль щели спектрографа. Как видно из данных диаграмм, в случае NGC 3077 области повышенной дисперсии скоростей связаны с областями звездообразования, а не с ударными волнами. Тем не менее, на диаграмме [S II]/H α небольшое смещение областей высокой дисперсии в сторону повышенного отношения линий выявляется.

3.3 BPT-диаграммы по данным узкополосной фотометрии

BPT-диаграммы, построенные по данным длиннощелевой спектроскопии, не позволяют провести анализ состояния ионизованного газа во всей галактике. Поэтому мы строим отношения эмиссионных линий по данным фотометрии с перестраиваемым фильтром.

На рис. 28 представлены диагностические BPT-диаграммы, полученные при помощи картирования с MaNGaL для отношения линий [O III]/H β , [N II]/H α и [S II]/H α . Цветовая маркировка соответствует дисперсии лучевых скоростей, полученных по данным ИФП. На рисунке представлены три набора диаграмм для различных областей галактики (см. ниже). Карты дисперсии лучевых скоростей для областей, включенных в каждый набор, представлены на правых панелях. Параметризация кривых, разделяющих области с разным типом ионизации (области фотоионизации – III, объекты со смешанным типом ионизации – Comp., активные сейфертовские галактики – Seyfert, объекты типа LINER), взята из работы [121]. Цветные линии, как и на рис. 27, соответствуют мо-

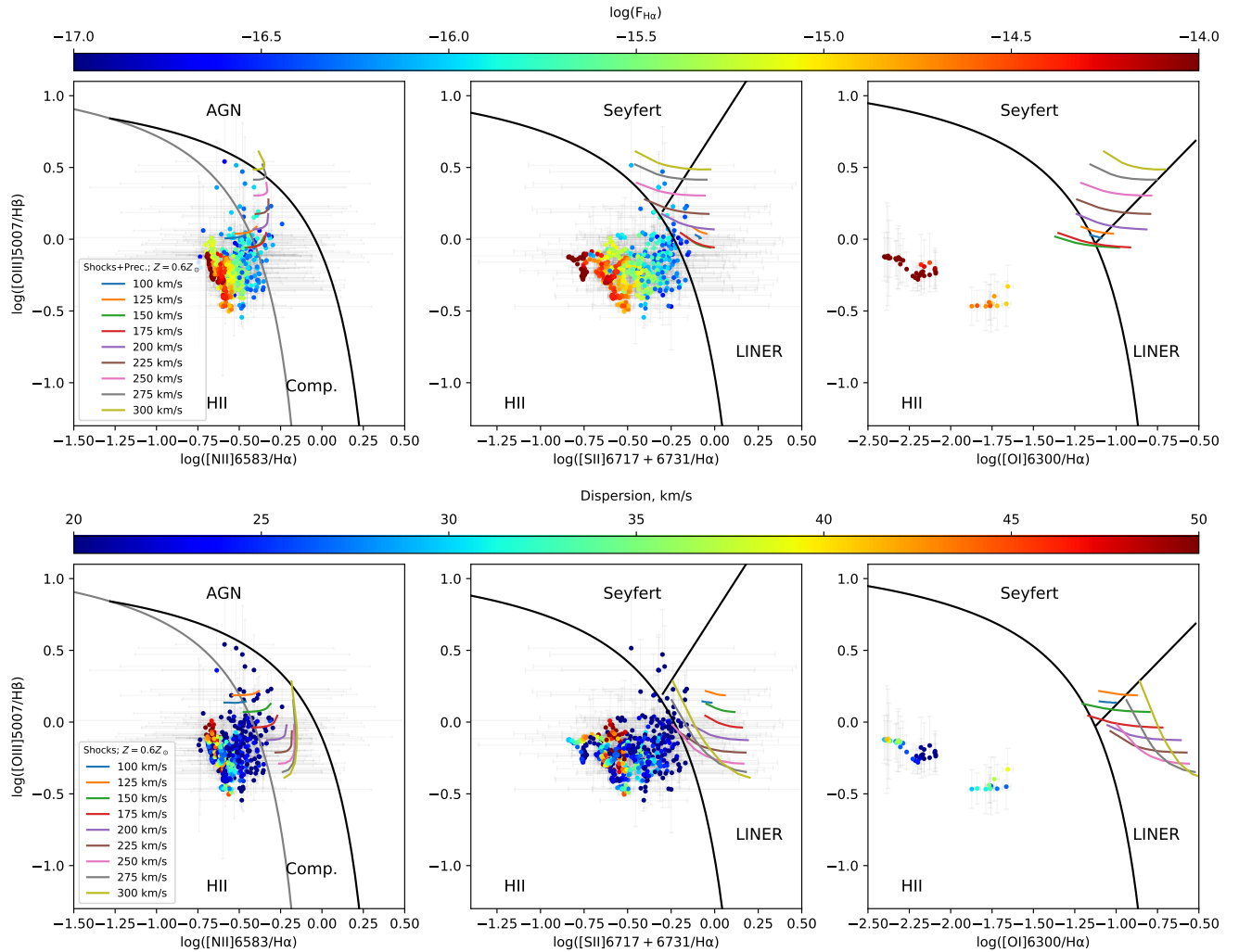


Рис. 27. BPT-диаграммы, построенные по данным спектральных наблюдений. Цветом закодированы логарифм поверхностной яркости в линии $H\alpha$ (верхняя панель) и значения дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа (нижняя панель). Черные и серые кривые из работ, разделяющие области звездообразования, композитного механизма ионизации и LINERs взяты из [119] и [120]. Диагональная линия, разделяющая области Seyfert и LINERs – из [121]. Цветные линии соответствуют моделям ударных волн согласно [65] для разных скоростей при металличности $Z = 0.6Z_{\odot}$. На верхних панелях приведены модели с учетом прекурсора, на нижних – исключительно для ударных волн.

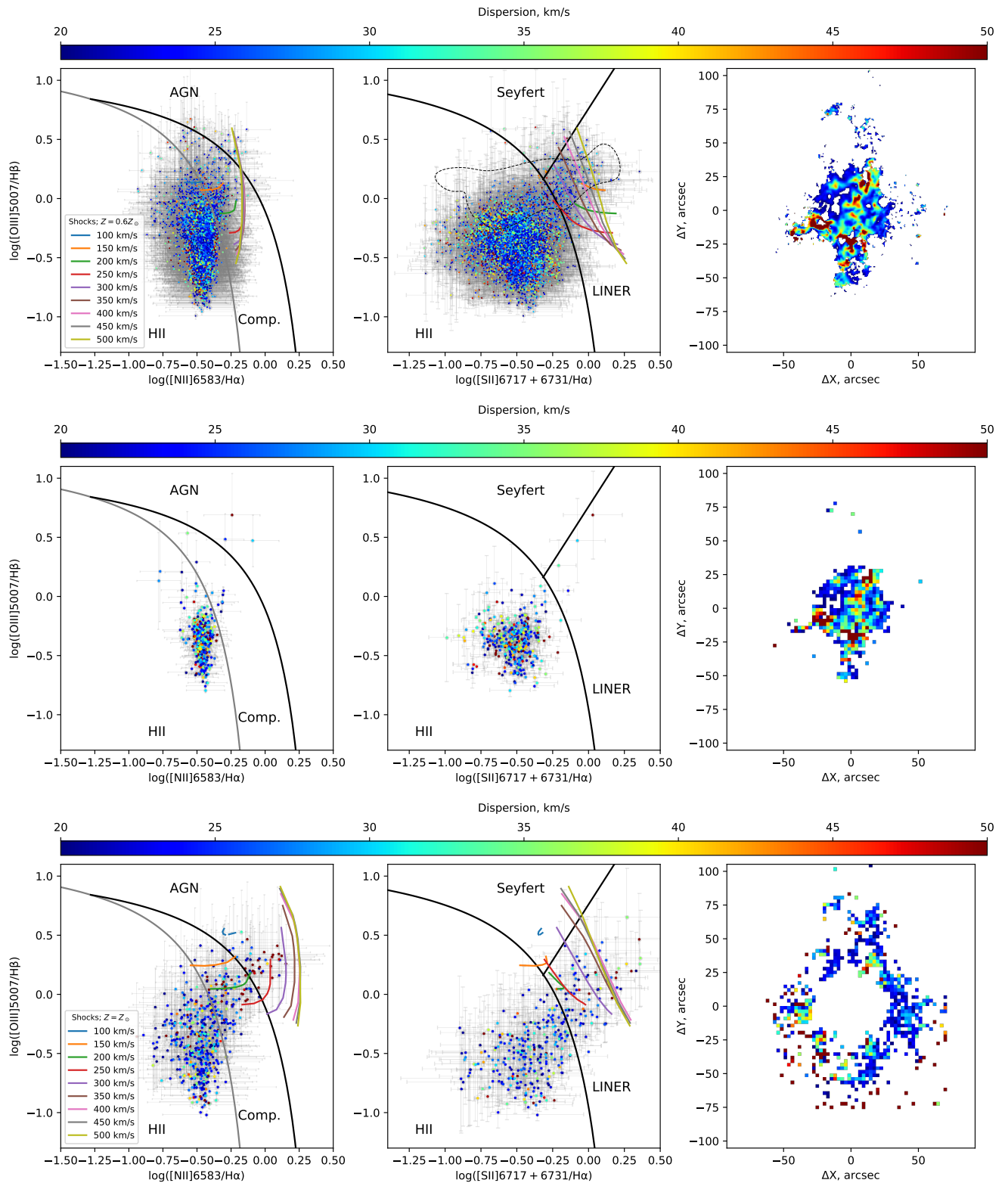


Рис. 28. ВРТ-диаграммы, построенные по данным наблюдений с перестраиваемым фильтром. Верхние панели – результат, полученный для всей галактики с оригинальным размером пикселя. Средняя и нижние панели – диаграммы для внутренней и внешней областей по данным с биннингом 4. Цветом закодирована дисперсия скоростей $H\alpha$; карта ее распределения для каждого набора областей показана на правых панелях. Кривые, разделяющие области диаграммы с различными механизмами ионизации газа, аналогичны таковым на рис. 27. Цветные кривые соответствуют моделям ударных волн согласно [65] для разных скоростей и металличностей $Z = 0.6Z_{\odot}$ (верхние панели) и $Z = Z_{\odot}$ (нижние панели). Штриховой кривой на верхней средней панели обведена область наблюдаемых отношений потоков линий согласно работе [106]

делям ударных волн для разных скоростей из работы [65], однако на нижней панели приведены значения для солнечной металличности (на верхней – для $Z = 0.6Z_{\odot}$).

На верхней панели рис. 28 показаны диаграммы, построенные для всей галактики по данным с оригинальным размером пикселя. Подавляющее большинство точек на диаграммах попадает в области, характерные для фотоионизации излучением ОВ-звёзд и не демонстрирует сколь-нибудь заметного вклада ударного возбуждения. Лишь незначительная их часть оказывается в областях смешанной ионизации. Данный результат согласуется с результатами наших длиннотелевых наблюдений, однако в то же время, по сравнению с диаграммами, представленными в [107], [106], точки оказываются смещены вниз. По нашему мнению это связано с особенностями применяемой техники фотометрии в узко- и средне-полосных фильтрах на космическом телескопе *HST*. В частности, в них для учёта вклада континуума звёздного населения из изображений в линиях [O III] и $H\beta$ вычитались кадры в фильтре F547M, что относительно далеко по длинам волн от изучаемых линий. Учёт континуума по двум изображениям на близких длинах волн, применённый нами для фотометрии с перестраиваемым фильтром, позволил с большей точностью получить значения потоков в эмиссионных линиях. Кроме того, полученные нами спектры показывают, что в области $H\beta$ существенно влияние абсорбционной линии звездного населения. Этот эффект сложно корректно учесть в фильтровых снимках, что, по видимому, также является причиной завышения отношения [O III]/ $H\beta$ в указанных работах. Используемая же нами методика расчета распределения $H\beta$ по изображению в $H\alpha$ с учетом карты поглощения свободна от этого недостатка, что подтверждается согласием между соотношениями линий, построенными по данным SCORPIO-2, где учитывалась модель звездного населения и по данным фотометрии с MaNGaL.

Поверхностная яркость в линии [O III] λ 5007 во внешних областях галактики

существенно ниже, чем в линиях [N II] и [S II], что характерно для DIG. В нашем случае это приводит к тому, что из анализа ВРТ диаграмм исключаются внешние области галактики, в которых яркость в линии кислорода оказывается ниже уровня шума, но в то же время хорошо заметен сигнал в линиях азота и серы. Чтобы обойти это ограничение, мы искусственно задали значение потока в линии [O III] λ 5007 равным стандартному отклонению уровня шума для тех областей, где уверенно детектируются линии [N II] и [S II] и не детектируется [O III]. Таким образом, заданное значение потока в линии [O III] является его верхней границей. Такая процедура позволяет нам отследить вариации механизма возбуждения по изменению соотношений [N II]/H α и [S II]/H α на ВРТ диаграммах, в том числе и в областях с недостаточным S/N в линии [O III] λ 5007. На рис. 28 представлены ВРТ-диаграммы и карта дисперсии скоростей для "внутренних" регионов галактики, где линия [O III] λ 5007 уверенно детектируется (средняя панель), а так же для внешних областей, где $S/N \leq 3$ (нижняя панель).

Как видно из средней панели рис. 28, эмиссия в центральной части галактики NGC 3077 полностью может быть объяснена фотоионизацией OB-звездами, в том числе и в областях с наиболее высокой дисперсией скоростей. С другой стороны, во внешних частях галактики (нижние панели) прослеживается четкий тренд в правую часть ВРТ-диаграммы, за пределы области фотоионизации молодыми звёздами, лежащий ниже демаркационной линии между областями Seyfert и LINER. Поскольку принятое нами значение потока в линии [O III] λ 5007 во внешних областях является его оценкой сверху, в реальности точки на ВРТ диаграмме должны располагаться не выше их положения на рис. 28.

Заметим, что наблюдаемое положение на ВРТ диаграммах в области LINER хорошо объясняется моделями ударных волн [65] как для металличности, близкой к полученной нами оценке для NGC 3077 (см. модели на верхней панели), так и для $Z = Z_{\odot}$ (см. нижнюю панель). Добавление к этим моделям прекурсо-

ра от фотоионизации позволяет еще лучше объяснить распределение потоков на левой панели, но существенно хуже – для $[S II]/H\alpha$, что указывает на наличие существенного вклада ударных волн в ионизацию во внешних областях. Корреляции с дисперсией скоростей ионизованного газа при этом не наблюдается. В случае внешних областей, положение точек на ВРТ диаграмме может быть хорошо воспроизведено при значительно меньших скоростях ударных волн в случае, если они распространяются в среде с солнечным содержанием тяжелых элементов, чем если рассматривать металличность периферии такой же, как оценено нами по данным длинноцелевой спектроскопии в центральной части.

Анализ ВРТ диаграммы для периферии NGC 3077 позволяет предположить, что мы наблюдаем здесь существенный вклад ударных волн, распространяющихся в среде с возможно более высокой металличностью газа, чем в центральной части галактики. Такую картину можно объяснить как взаимодействием галактики с гигантской приливной структурой H I, так и проявлениями галактического ветра, выбрасывающего обогащенный газ на периферию. Оба процесса могут быть ответственными за наличие ударных волн и, возможно, повышенную металличность газа на периферии. Но в случае внешней аккреции газовых облаков трудно ожидать высокоскоростных ударных волн: лучевая скорость облаков H I, согласно нашему анализу опубликованных карт в [122, 123], составляет около $-5 \pm 15 \text{ км с}^{-1}$, что хорошо совпадает с системной скоростью NGC 3077, а предположение, что все взаимные движения происходят в картинной плоскости, является излишне смелым. С другой стороны, в случае существенного истечения вещества мы могли бы ожидать заметных проявлений ударных волн в направлении центра галактики. Однако ВРТ-диаграммы в центральной части галактики признаков ударных волн не выявляют, а основные кинематически выделенные сверхзвуковые движения газа наблюдаются вдоль крупномасштабных газо-пылевых волокон или связаны с локальными рентгеновскими источниками (сверхновыми), а не с крупномасштабным истечением газа из га-

лактики. Мы можем заключить, что фотоионизация УФ-излучением молодых звезд в центральной части NGC 3077 явно вносит основной вклад в ионизацию газа, сравнительно с ударными волнами. Отметим, что такая картина типична для известных случаев галактического ветра: отношение $I([\text{N II}])/I(\text{H}\alpha)$ соответствует областям H II в диске галактике, но растет к периферии, с удалением от областей центрального звездообразования, см., к примеру [108, 124]. При этом наличие низкоконтрастной широкой компоненты в линии H α в центральных областях галактики свидетельствует в пользу истечения высокоскоростного газа из областей звездообразования.

Несмотря на указанные выше признаки истечения газа, мы не видим сколько-либо заметной корреляции между отношением линий и σ , наблюдаемой в карликовых галактиках с текущим звездообразованием, прежде всего, с галактическим ветром [108, 109]. Скорее всего, это объясняется тем, что вдоль луча зрения мы видим “смесь” из нескольких эмиссионных компонент: газ в самих областях звездообразования, газ истекающий из диска и аккреционные потоки к диску. Мы наблюдаем многокомпонентную структуру профилей в данных ИФП. Но нам пока не удалось однозначно сопоставить дисперсии скоростей каждого компонента с соответствующим именно ему диагностическим отношением линий, поскольку данные отношения измерены по спектрам низкого разрешения. Возможно, это удастся сделать в дальнейшем, привлекая дополнительные спектральные данные и новые алгоритмы декомпозиции профилей.

4. Выводы и результаты Главы 4

На основе наблюдений, выполненных на 6-м телескопе БТА САО РАН и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ методами длиннощелевой и 3D-спектроскопии, а также узкополосной фотометрии в эмиссионных линиях, мы провели исследование ионизованного газа в галактике NGC 3077.

Картирование со сканирующим ИФП позволило построить карты распределений лучевых скоростей и дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа галактики с высоким пространственным разрешением. По результатам длиннощелевой спектроскопии мы оценили относительное содержание кислорода в межзвездной среде центральной области галактики $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.43 - 8.49$ ($Z \sim 0.6Z_{\odot}$), что существенно ниже полученной ранее оценки $Z = Z_{\odot}$ и соответствует ожидаемому значению для NGC 3077 при ее светимости. Мы не выявили радиального градиента металличности. Диаграммы отношений эмиссионных линий, построенные по данным длиннощелевой спектроскопии и фотометрии с перестраиваемым фильтром, позволили уточнить результаты, полученные ранее в [106]. Хорошее согласие ВРТ-диаграмм, полученных двумя разными методами, показывает, что использование фотометрии с перестраиваемым фильтром для изучения состояния ионизации может служить хорошей альтернативой классическим методам спектроскопии при изучении источников ионизации газа протяжённых объектов, в том числе и объектов с низкой поверхностной яркостью.

Несмотря на наличие в NGC 3077 отдельных областей относительно высокой (до $\sigma \approx 60$ км/с) дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа мы, как и в случае карликовой галактики VII Zw 403 [109] не наблюдаем здесь корреляции между расположением точек на ВРТ-диаграмме и σ . В центральных частях NGC 3077 вообще не обнаруживается сколь-нибудь заметного вклада ударных волн в ионизацию газа. Скорее всего, это связано с мощной фотоионизацией непосредственно в областях звездообразования: слабый вклад ударных волн в возбуждение [NII] и [SII] может не быть заметен в крыльях яркой линии $\text{H}\alpha$, смещая отношения [NII]/ $\text{H}\alpha$, [SII]/ $\text{H}\alpha$ влево на ВРТ-диаграмме. Повышенная дисперсия скоростей $\text{H}\alpha$ при этом объясняется наложением нескольких компонент на луче зрения. Проведенная декомпозиция куба данных, полученного с ИФП в линии $\text{H}\alpha$, позволила проследить распределение как минимум трех ки-

нематически выделенных компонент в галактике. При этом во многих областях наблюдается вклад широкой компоненты ($\sigma > 100$ км/с) низкой поверхностной яркости, вероятно связанной с проявлением ветра массивных звезд в областях звездообразования.

Полученная нами картина распределения лучевых скоростей позволяет предполагать, что часть ранее обнаруженных по данным эшелле-спектроскопии [101] областей с ярко выраженным многокомпонентным профилем эмиссионных линий является не расширяющимися сверхоболочками, а отдельными кинематическими компонентами, что подтверждается так же совпадением части из них с пылевыми прожилками на оптических изображениях. По нашему мнению, речь идёт о выпадении холодного газа из приливной структуры на диск галактики. Это провоцирует звездообразование в центре NGC 3077.

Заключение

Для выполнения поставленных задач был обработан значительный массив архивных наблюдательных данных, полученных с многорежимными фокальными редукторами первичного фокуса 6-м телескопа SCORPIO и SCORPIO-2, включающих в себя длиннощелевые снимки, прямые изображения, наблюдения со сканирующим интерферометром Фабри-Перо нескольких галактик. Так же был получен новый наблюдательный материал, в том числе данные узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром с прибором MaNGaL на 2.5-м телескопе КГО.

Кратко перечислим основные результаты данной работы.

С помощью моделирования на основании кинематических карт пространственной структуры галактических ветров проведены оценки кинематических параметров ветровых структур. Показано, что галактический ветер в NGC 4460, представляет собой два направленных ортогонально плоскости галактического диска, истечения из центральной области звездообразования с характерными скоростями $\sim 30\text{-}80$ км/с. Так же получены другие параметры истечений: возраст $\sim 20\text{-}50$ млн. лет, масса выброшенной материи $M_{wind} = 1.7 \cdot 10^5 M_{\odot}$, его кинетическая энергия $E_{wind} = 0.3 - 2.2 \cdot 10^{52}$ эрг. Выметенное вещество не достигает параболических скоростей и со временем вернётся в галактику.

Аналогичное моделирование, проведённое для ветровой структуры галактики UGC10043, позволило оценить характерные значения скоростей ГВ, достигающие $V_{out} < 250$ км/с. Это согласуется с модельными оценками скоростей ударных волн, что позволяет сделать вывод о преимущественно ударном меха-

низме ионизации газа в ветровой туманности.

На примере выборки из нескольких галактик с разной морфологией показано, что добавление нового параметра – дисперсии скоростей ионизованного газа по лучу зрения – к классическим диаграммам отношения линий является эффективным способом для проведения анализа вклада ударных волн в ионизацию газа в объектах низкой поверхностной яркостью. В галактиках UGC 10043, Mrk 35 и Arp 212 обнаруживается положительная корреляция между дисперсией лучевых скоростей и вкладом ударного возбуждения в ионизацию газа. Получено доказательство прямого столкновения газовых облаков на наклонных орбитах с основным диском галактики Arp212. В галактике VII Zw 403 благодаря низкому темпу звездообразования вклад ударных волн в ионизацию газа практически не заметен.

В галактике NGC 3077 пространственно-разрешенные диагностические диаграммы отношений 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. Анализ сложного профиля линии $\text{H}\alpha$ в галактике, позволил выделить как минимум три кинематических компоненты в галактике. При этом речь может идти об аккреции газа на галактику из приливного хвоста галактики M 81. Также во многих областях наблюдается вклад широкой компоненты ($\sigma > 100$ км/с) низкой поверхностной яркости, вероятно связанной с проявлением ветра массивных звезд в областях звездообразования.

Хорошее согласие ВРТ-диаграмм, полученных при наблюдениях с длинной щелью и по данным картировщика эмиссионных линий MaNGa1 на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, показывает, что использование фотометрии с перестраиваемым фильтром для изучения состояния ионизации может служить хорошей альтернативой классическим методам спектроскопии при изучении ис-

точников ионизации газа протяжённых объектов, в том числе и протяжённых объектов с низкой поверхностной яркостью и сложной морфологией. При этом обеспечивается лучшее пространственное разрешение и гораздо большее поле зрения.

Оценка металличности галактики NGC 3077 по данным длиннощелевой спектроскопии составляет $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.43 - 8.49$ ($Z \sim 0.6Z_{\odot}$), что существенно ниже полученной ранее оценки $Z = Z_{\odot}$ и соответствует ожидаемому значению для NGC 3077 при ее светимости.

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю Моисееву А.В. за всестороннюю поддержку, соавторам статей, лёгших в основу данной диссертации, а так же коллективу Лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов и всем коллегам из САО РАН, оказавшим помощь при выполнении работы.

Литература

- [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.
- [25] Afanasiev, V. L. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope / V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev // Astronomy Letters. — 2005. — Vol. 31. — P. 194–204.
- [26] Afanasiev, V. L. Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects / V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev // Baltic Astronomy. — 2011. — Vol. 20. — P. 363–370.
- [27] Moiseev, A. V. Reduction of CCD observations made with a scanning Fabry-Perot interferometer. III. Wavelength scale refinement / A. V. Moiseev // Astrophysical Bulletin. — 2015. — Vol. 70, № 4. — P. 494–500.
- [28] PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. I. Design, Manufacture, and Performance / M. M. Roth, A. Kelz, T. Fechner et al. // PASP. — 2005. — Vol. 117. — P. 620–642.
- [29] The gas emission spectrum in a star-forming region in the BCD galaxy VII Zw 403 (UGC 6456) / V. P. Arkhipova, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, O. V. Egorov // Astronomy Reports. — 2007. — Vol. 51. — P. 871–881.
- [30] ULySS: a full spectrum fitting package / M. Koleva, P. Prugniel, A. Bouchard, Y. Wu // A&A. — 2009. — Vol. 501. — P. 1269–1279.
- [31] Markwardt, C. B. Non-linear Least-squares Fitting in IDL with MPFIT / C. B. Markwardt // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII / Ed. by D. A. Bohlender, D. Durand, P. Dowler. — Vol. 411 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2009. — P. 251.

- [32] Cardelli, J. A. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction / J. A. Cardelli, G. C. Clayton, J. S. Mathis // *ApJ*. — 1989. — Vol. 345. — P. 245.
- [33] Fitzpatrick, E. L. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction / E. L. Fitzpatrick // *PASP*. — 1999. — Vol. 111, № 755. — P. 63–75.
- [34] Moiseev, A. V. Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL): new tunable filter imager for Caucasian telescopes / A. V. Moiseev, A. E. Perepelitsyn, D. V. Oparin // *Experimental Astronomy* submitted, arXiv e-prints. — 2020. — P. arXiv:2005.14598.
- [35] Jones, D. H. Detection and measurement from narrow-band tunable filter scans / D. H. Jones, P. L. Shopbell, J. Bland-Hawthorn // *MNRAS*. — 2002. — Vol. 329, № 4. — P. 759–774.
- [36] Study on Atmospheric Optical Turbulence above Mount Shatdzhatzmaz in 2007-2013 / V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov et al. // *PASP*. — 2014. — Vol. 126, № 939. — P. 482.
- [37] Heckman, T. M. On the nature and implications of starburst-driven galactic superwinds / T. M. Heckman, L. Armus, G. K. Miley // *ApJS*. — 1990. — Vol. 74. — P. 833–868.
- [38] The Optical Structure of the Starburst Galaxy M82. I. Dynamics of the Disk and Inner-Wind / M. S. Westmoquette, L. J. Smith, J. S. Gallagher, III et al. // *ApJ*. — 2009. — Vol. 696. — P. 192–213.
- [39] Galactic Wind in the Nearby Starburst Galaxy NGC 253 Observed with the Kyoto3DII Fabry-Perot Mode / K. Matsubayashi, H. Sugai, T. Hattori et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — Vol. 701. — P. 1636–1643.

- [40] Westmoquette, M. S. Studying the galactic outflow in NGC 1569 / M. S. Westmoquette, L. J. Smith, J. S. Gallagher // MNRAS. — 2008. — Vol. 383. — P. 864–878.
- [41] Jet- and Wind-driven Ionized Outflows in the Superbubble and Star-forming Disk of NGC 3079 / G. Cecil, J. Bland-Hawthorn, S. Veilleux, A. V. Filippenko // The Astrophysical Journal. — 2001. — Vol. 555. — P. 338–355.
- [42] Melioli, C. Evolution of M82-like starburst winds revisited: 3D radiative cooling hydrodynamical simulations / C. Melioli, E. M. de Gouveia Dal Pino, F. G. Geraissate // MNRAS. — 2013. — Vol. 430. — P. 3235–3248.
- [43] Observational database for studies of nearby universe / E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, S. S. Kaisin // Astrophysical Bulletin. — 2012. — Vol. 67. — P. 115–122.
- [44] Kaisin, S. S. Canes Venatici I cloud of galaxies seen in the H α line / S. S. Kaisin, I. D. Karachentsev // A&A. — 2008. — Vol. 479. — P. 603–624.
- [45] Moiseev, A. Ionized gas outflow in the isolated S0 galaxy NGC 4460 / A. Moiseev, I. Karachentsev, S. Kaisin // MNRAS. — 2010. — Vol. 403. — P. 1849–1858.
- [46] Moiseev, A. V. Ionized gas rotation curves in nearby dwarf galaxies / A. V. Moiseev // Astrophysical Bulletin. — 2014. — Vol. 69. — P. 1–20.
- [47] Veilleux, S. Identification of Galactic Wind Candidates Using Excitation Maps: Tunable-Filter Discovery of a Shock-excited Wind in the Galaxy NGC 1482 / S. Veilleux, D. S. Rupke // The Astrophysical Journal. — 2002. — Vol. 565. — P. L63–L66.

- [48] A kinematic study of the irregular dwarf galaxy NGC 2366 using HI and H α observations / J. van Eymeren, M. Marcelin, B. Koribalski et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2009. — Vol. 493. — P. 511–524.
- [49] A kinematic study of the irregular dwarf galaxy NGC 4861 using H I and H α observations / J. van Eymeren, M. Marcelin, B. S. Koribalski et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2009. — Vol. 505. — P. 105–116.
- [50] Binney, J. Galactic dynamics / J. Binney, S. Tremaine. — 1987. — P. 85–90, 598–603.
- [51] Matthews, L. D. Optical Imaging and Spectroscopy of the Edge-on Sbc Galaxy UGC 10043: Evidence for a Galactic Wind and a Peculiar Triaxial Bulge / L. D. Matthews, R. de Grijs // *AJ*. — 2004. — Vol. 128. — P. 137–162.
- [52] Interpreting the ionization sequence in AGN emission-line spectra / C. T. Richardson, J. T. Allen, J. A. Baldwin et al. // *MNRAS*. — 2014. — Vol. 437. — P. 2376–2403.
- [53] Interpreting the ionization sequence in star-forming galaxy emission-line spectra / C. T. Richardson, J. T. Allen, J. A. Baldwin et al. // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 458. — P. 988–1012.
- [54] Photoionization in elliptical galaxies by old stars / L. Binette, C. G. Magris, G. Stasińska, A. G. Bruzual // *A&A*. — 1994. — Vol. 292. — P. 13–19.
- [55] Morisset, C. A self-consistent stellar and 3D nebular model of planetary nebula IC 418 / C. Morisset, L. Georgiev // *A&A*. — 2009. — Vol. 507. — P. 1517–1530.
- [56] The broad H α , [O III] line wings in stellar supercluster A of NGC 2363 and the turbulent mixing layer hypothesis / L. Binette, L. Drissen, L. Ubeda et al. // *A&A*. — 2009. — Vol. 500. — P. 817–826.

- [57] A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? / R. Cid Fernandes, G. Stasińska, A. Mateus, N. Vale Asari // MNRAS. — 2011. — Vol. 413. — P. 1687–1699.
- [58] The ionized gas in the CALIFA early-type galaxies. I. Mapping two representative cases: NGC 6762 and NGC 5966 / C. Kehrig, A. Monreal-Ibero, P. Papaderos et al. // A&A. — 2012. — Vol. 540. — P. A11.
- [59] The nature of LINER galaxies: Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes / R. Singh, G. van de Ven, K. Jahnke et al. // A&A. — 2013. — Vol. 558. — P. A43.
- [60] Veilleux, S. Spectral classification of emission-line galaxies / S. Veilleux, D. E. Osterbrock // ApJS. — 1987. — Vol. 63. — P. 295–310.
- [61] Nebular emission and the Lyman continuum photon escape fraction in CALIFA early-type galaxies / P. Papaderos, J. M. Gomes, J. M. Vílchez et al. // A&A. — 2013. — Vol. 555. — P. L1.
- [62] A characteristic oxygen abundance gradient in galaxy disks unveiled with CALIFA / S. F. Sánchez, F. F. Rosales-Ortega, J. Iglesias-Páramo et al. // A&A. — 2014. — Vol. 563. — P. A49.
- [63] NGC 839: Shocks in an M82-like Superwind / J. A. Rich, M. A. Dopita, L. J. Kewley, D. S. N. Rupke // ApJ. — 2010. — Vol. 721. — P. 505–517.
- [64] Imprints of galaxy evolution on H II regions. Memory of the past uncovered by the CALIFA survey / S. F. Sánchez, E. Pérez, F. F. Rosales-Ortega et al. // A&A. — 2015. — Vol. 574. — P. A47.
- [65] The MAPPINGS III Library of Fast Radiative Shock Models / M. G. Allen, B. A. Groves, M. A. Dopita et al. // ApJS. — 2008. — Vol. 178, № 1. — P. 20–55.

- [66] A Theoretical Recalibration of the Extragalactic H II Region Sequence / M. A. Dopita, L. J. Kewley, C. A. Heisler, R. S. Sutherland // *ApJ*. — 2000. — Vol. 542. — P. 224–234.
- [67] Starburst-AGN mixing - II. Optically selected active galaxies / R. L. Davies, L. J. Kewley, I.-T. Ho, M. A. Dopita // *MNRAS*. — 2014. — Vol. 444. — P. 3961–3974.
- [68] The Violent Interstellar Medium of NGC 604 / H. Yang, Y.-H. Chu, E. D. Skillman, R. Terlevich // *AJ*. — 1996. — Vol. 112. — P. 146.
- [69] Moiseev, A. V. What controls the ionized gas turbulent motions in dwarf galaxies? / A. V. Moiseev, A. V. Tikhonov, A. Klypin // *MNRAS*. — 2015. — Vol. 449. — P. 3568–3580.
- [70] Lehnert, M. D. Ionized Gas in the Halos of Edge-on Starburst Galaxies: Evidence for Supernova-driven Superwinds / M. D. Lehnert, T. M. Heckman // *ApJ*. — 1996. — Vol. 462. — P. 651.
- [71] Westmoquette, M. S. Ionized gas in the starburst core and halo of NGC 1140 / M. S. Westmoquette, J. S. Gallagher, L. de Poitiers // *MNRAS*. — 2010. — Vol. 403. — P. 1719–1728.
- [72] Dopita, M. A. Spectral Signatures of Fast Shocks. II. Optical Diagnostic Diagrams / M. A. Dopita, R. S. Sutherland // *ApJ*. — 1995. — Vol. 455. — P. 468.
- [73] Dopita, M. A. Spectral Signatures of Fast Shocks. I. Low-Density Model Grid / M. A. Dopita, R. S. Sutherland // *ApJS*. — 1996. — Vol. 102. — P. 161.
- [74] Modeling the Pan-Spectral Energy Distribution of Starburst Galaxies. I. The Role of ISM Pressure and the Molecular Cloud Dissipation Timescale / M. A. Dopita, B. A. Groves, J. Fischera et al. // *ApJ*. — 2005. — Vol. 619. — P. 755–778.

- [75] Sharp, R. G. Three-Dimensional Integral Field Observations of 10 Galactic Winds. I. Extended Phase (gsim10 Myr) of Mass/Energy Injection Before the Wind Blows / R. G. Sharp, J. Bland-Hawthorn // *ApJ*. — 2010. — Vol. 711. — P. 818–852.
- [76] Warm ionized gas in CALIFA early-type galaxies. 2D emission-line patterns and kinematics for 32 galaxies / J. M. Gomes, P. Papaderos, C. Kehrig et al. // *A&A*. — 2016. — Vol. 588. — P. A68.
- [77] Oparin, D. V. Galactic wind in NGC 4460: New observations / D. V. Oparin, A. V. Moiseev // *Astrophysical Bulletin*. — 2015. — Vol. 70. — P. 392–399.
- [78] Monreal-Ibero, A. LINER-like Extended Nebulae in ULIRGs: Shocks Generated by Merger-Induced Flows / A. Monreal-Ibero, S. Arribas, L. Colina // *ApJ*. — 2006. — Vol. 637. — P. 138–146.
- [79] VLT-VIMOS integral field spectroscopy of luminous and ultraluminous infrared galaxies. II. Evidence for shock ionization caused by tidal forces in the extra-nuclear regions of interacting and merging LIRGs / A. Monreal-Ibero, S. Arribas, L. Colina et al. // *A&A*. — 2010. — Vol. 517. — P. A28.
- [80] The multiphase starburst-driven galactic wind in NGC 5394 / P. Martín-Fernández, J. Jiménez-Vicente, A. Zurita et al. // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 461. — P. 6–21.
- [81] VLT-VIMOS integral field spectroscopy of luminous and ultraluminous infrared galaxies. II. Evidence for shock ionization caused by tidal forces in the extra-nuclear regions of interacting and merging LIRGs / A. Monreal-Ibero, S. Arribas, L. Colina et al. // *A&A*. — 2010. — Vol. 517. — P. A28.

- [82] Optical imaging for the Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies. Data release and notes on interacting galaxies / J. H. Knapen, S. Erroz-Ferrer, J. Roa et al. // *A&A*. — 2014. — Vol. 569. — P. A91.
- [83] Gil de Paz, A. Palomar/Las Campanas Imaging Atlas of Blue Compact Dwarf Galaxies. I. Images and Integrated Photometry / A. Gil de Paz, B. F. Madore, O. Pevunova // *ApJS*. — 2003. — Vol. 147. — P. 29–59.
- [84] Star formation driven galactic winds in UGC 10043 / C. López-Cobá, S. F. Sánchez, A. V. Moiseev et al. // *MNRAS*. — 2017. — Vol. 467. — P. 4951–4964.
- [85] PPAK Wide-field Integral Field Spectroscopy of NGC 628 - I. The largest spectroscopic mosaic on a single galaxy / S. F. Sánchez, F. F. Rosales-Ortega, R. C. Kennicutt et al. // *MNRAS*. — 2011. — Vol. 410. — P. 313–340.
- [86] Matthews, L. D. Optical Imaging and Spectroscopy of the Edge-on Sbc Galaxy UGC 10043: Evidence for a Galactic Wind and a Peculiar Triaxial Bulge / L. D. Matthews, R. de Grijs // *AJ*. — 2004. — Vol. 128. — P. 137–162.
- [87] Egorov, O. V. Gas and dust in the BCD galaxy VII Zw 403 (UGC 6456) / O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya // *Astrophysical Bulletin*. — 2011. — Vol. 66. — P. 293–303.
- [88] Structure and kinematics of the interstellar medium in the star-forming region in the BCD galaxy VII Zw 403 (UGC 6456) / T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, V. Y. Avdeev, O. V. Egorov // *Astronomy Letters*. — 2006. — Vol. 32. — P. 361–375.
- [89] Spectrophotometric Investigations of Blue Compact Dwarf Galaxies: Markarian 35 / L. M. Cairós, N. Caon, B. García-Lorenzo et al. // *ApJ*. — 2007. — Vol. 669. — P. 251–268.

- [90] Moiseev, A. V. Warped polar ring in the Arp 212 galaxy / A. V. Moiseev // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — Vol. 63. — P. 201–215.
- [91] The MUSE second-generation VLT instrument / R. Bacon, M. Accardo, L. Adjali et al. // *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*. — Vol. 7735 of *Proceedings of the SPIE*. — 2010. — P. 773508.
- [92] Krumholz, M. R. Is turbulence in the interstellar medium driven by feedback or gravity? An observational test / M. R. Krumholz, B. Burkhart // *MNRAS*. — 2016. — Vol. 458. — P. 1671–1677.
- [93] Observational database for studies of nearby universe / E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, S. S. Kaisin // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — Vol. 67, № 1. — P. 115–122.
- [94] Yun, M. S. A high-resolution image of atomic hydrogen in the M81 group of galaxies / M. S. Yun, P. T. P. Ho, K. Y. Lo // *Nature*. — 1994. — Vol. 372, № 6506. — P. 530–532.
- [95] A $5^{deg} \times 5^{deg}$ deep H I survey of the M81 group / A. Sorgho, T. Foster, C. Carignan, L. Chemin // *MNRAS*. — 2019. — Vol. 486, № 1. — P. 504–522.
- [96] A High-resolution Mosaic of the Neutral Hydrogen in the M81 Triplet / W. J. G. de Blok, F. Walter, A. M. N. Ferguson et al. // *ApJ*. — 2018. — Vol. 865, № 1. — P. 26.
- [97] Karachentsev, I. D. 'Garland' - an unusual object near NGC 3077. / I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, F. Boerngen // *MNRAS*. — 1985. — Vol. 217. — P. 731–734.
- [98] Tidal dwarfs in the M81 group: The second generation? / L. N. Makarova, E. K. Grebel, I. D. Karachentsev et al. // *A&A*. — 2002. — Vol. 396. — P. 473–487.

- [99] Karachentsev, I. D. A View of the M81 Galaxy Group via the H α Window / I. D. Karachentsev, S. S. Kaisin // AJ. — 2007. — Vol. 133. — P. 1883–1902.
- [100] Karachentsev, I. D. Updated Nearby Galaxy Catalog / I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, E. I. Kaisina // AJ. — 2013. — Vol. 145, № 4. — P. 101.
- [101] Martin, C. L. The impact of star formation on the interstellar medium in dwarf galaxies. II. the formation of galactic winds / C. L. Martin // The Astrophysical Journal. — 1998. — Vol. 506, № 1. — P. 222–252.
- [102] GHASP: an H α kinematic survey of spiral and irregular galaxies - VI. New H α data cubes for 108 galaxies / B. Epinat, P. Amram, M. Marcelin et al. // MNRAS. — 2008. — Vol. 388, № 2. — P. 500–550.
- [103] Ott, J. A Chandra X-ray survey of nearby dwarf starburst galaxies — II. Starburst properties and outflows / J. Ott, F. Walter, E. Brinks // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2005. — Vol. 358, № 4. — P. 1453–1471.
- [104] Storchi-Bergmann, T. Ultraviolet to Near-Infrared Spectral Distributions of Star-forming Galaxies: Metallicity and Age Effects / T. Storchi-Bergmann, D. Calzetti, A. L. Kinney // ApJ. — 1994. — Vol. 429. — P. 572.
- [105] 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.
- [106] Constraining Stellar Feedback: Shock-ionized Gas in Nearby Starburst Galaxies / S. Hong, D. Calzetti, I. Gallagher, John S. et al. // ApJ. — 2013. — Vol. 777, № 1. — P. 63.

- [107] The Ionized Gas in Local Starburst Galaxies: Global and Small-Scale Feedback from Star Formation / D. Calzetti, J. Harris, I. Gallagher, John S. et al. // *AJ*. — 2004. — Vol. 127, № 3. — P. 1405–1430.
- [108] Star formation driven galactic winds in UGC 10043 / C. López-Cobá, S. F. Sánchez, A. V. Moiseev et al. // *MNRAS*. — 2017. — Vol. 467, № 4. — P. 4951–4964.
- [109] Oparin, D. V. Diagnostics of Ionized Gas in Galaxies with the “BPT-Radial Velocity Dispersion” Relation / D. V. Oparin, A. V. Moiseev // *Astrophysical Bulletin*. — 2018. — Vol. 73, № 3. — P. 298–309.
- [110] The supergiant shell with triggered star formation in the dwarf irregular galaxy IC 2574: neutral and ionized gas kinematics / O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, G. V. Smirnov-Pinchukov // *MNRAS*. — 2014. — Vol. 444, № 1. — P. 376–391.
- [111] Star formation complexes in the ‘galaxy-sized’ supergiant shell of the galaxy HolmbergI / O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, G. V. Smirnov-Pinchukov // *MNRAS*. — 2018. — Vol. 478, № 3. — P. 3386–3409.
- [112] Lozinskaya, T. A. Detailed Kinematic Study of the Ionized and Neutral Gas in the Complex of Star Formation in the Galaxy IC 1613 / T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, N. Y. Podorvanyuk // *Astronomy Letters*. — 2003. — Vol. 29. — P. 77–90.
- [113] Egorov, O. V. A region of violent star formation in the Irr galaxy IC 10: Structure and kinematics of ionized and neutral gas / O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev // *Astronomy Reports*. — 2010. — Vol. 54. — P. 277–294.

- [114] Internal kinematics of giant H II regions in M101 with the Keck Cosmic Web Imager / F. Bresolin, L. Rizzi, I. T. Ho et al. // MNRAS. — 2020. — Vol. 495, № 4. — P. 4347–4365.
- [115] Pilyugin, L. S. Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties / L. S. Pilyugin, J. M. Vílchez, T. Contini // A&A. — 2004. — Vol. 425. — P. 849–869.
- [116] Kewley, L. J. Metallicity Calibrations and the Mass-Metallicity Relation for Star-forming Galaxies / L. J. Kewley, S. L. Ellison // ApJ. — 2008. — Vol. 681, № 2. — P. 1183–1204.
- [117] The O3N2 and N2 abundance indicators revisited: improved calibrations based on CALIFA and T_e -based literature data / R. A. Marino, F. F. Rosales-Ortega, S. F. Sánchez et al. // A&A. — 2013. — Vol. 559. — P. A114.
- [118] Pilyugin, L. S. New calibrations for abundance determinations in H II regions / L. S. Pilyugin, E. K. Grebel // MNRAS. — 2016. — Vol. 457, № 4. — P. 3678–3692.
- [119] Theoretical Modeling of Starburst Galaxies / L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland et al. // ApJ. — 2001. — Vol. 556, № 1. — P. 121–140.
- [120] The host galaxies of active galactic nuclei / G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti et al. // MNRAS. — 2003. — Vol. 346, № 4. — P. 1055–1077.
- [121] 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.
- [122] The Interacting Dwarf Galaxy NGC 3077: The Interplay of Atomic and Molecular Gas with Violent Star Formation / F. Walter, A. Weiss, C. Martin, N. Scoville // AJ. — 2002. — Vol. 123. — P. 225–237.

-
- [123] THINGS: The H I Nearby Galaxy Survey / F. Walter, E. Brinks, W. J. G. de Blok et al. // *AJ*. — 2008. — Vol. 136, № 6. — P. 2563–2647.
- [124] Systematic study of outflows in the Local Universe using CALIFA: I. Sample selection and main properties / C. López-Cobá, S. F. Sánchez, J. Bland - Hawthorn et al. // *MNRAS*. — 2019. — Vol. 482, № 3. — P. 4032–4056.