



УТВЕРЖДАЮ

Директор САО РАН

В.В. Власюк

«21» сентября 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Диссертация «Изучение воздействия звездообразования на ионизованный газ в галактиках», представляемая на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия выполнена в лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Опарин Дмитрий Владимирович работал в САО РАН в должностях стажера-исследователя, лаборанта-исследователя, младшего научного сотрудника.

В 2014 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» по специальности «Астрономия» и ему присвоена квалификация АСТРОНОМ.

В период подготовки диссертации соискатель обучался по программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре САО РАН по направлению 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия, а в 2019 году успешно окончил ее.

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Моисеев Алексей Валерьевич работает в лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов САО РАН в должности ведущего научного сотрудника.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Работа посвящена изучению воздействия процессов звездообразования на межзвездную среду.

На текущий момент в астрофизике существует понимание критической роли звездообразования в эволюции галактик. Излучение ОВ-звёзд, взрывы сверхновых и звёздный ветер разогревают газ, формируют как упорядоченные, так и хаотичные истечения. Часть газа покидает галактику, оказывая влияние на межгалактическую среду. Часть, охлаждаясь, возвращается обратно, способствуя новым виткам звездообразования. Таким образом, учёт взаимного влияния необходим как при изучении структуры отдельных галактик, так и космологической эволюции в целом.

Изучение данного вопроса потребовало использования значительного количества источников наблюдательных данных. Поэтому в работе представлено описание методов наблюдений, применявшихся для получения материала. Рассматриваются наблюдения со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП), проводившиеся на фокальных редукторах SCORPIO и SCORPIO-2 в первичном фокусе 6-м телескопа БТА САО РАН. Описываются наблюдения в режиме длиннощелевой спектроскопии на фокальном редукторе SCORPIO-2 в первичном фокусе 6-м телескопа БТА САО РАН, а так же в режиме панорамной спектроскопии — на мультиспектральных спектрографах MPFS 6-м телескопа БТА САО РАН и PPAK 3.5-м телескопа обсерватории Calar-Alto. Излагаются основные принципы работы узкополосного фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGA на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, приёмы

наблюдений и редукации данных.

Галактический ветер (ГВ) – одно из наиболее выразительных и масштабных проявлений воздействия звездообразования на межзвездную и даже межгалактическую среду. Хотя феномен галактических истечений хорошо известен, детальное изучение эмиссионных туманностей, порождённых его воздействием, с достаточно высоким пространственным разрешением, выполнено лишь для немногих близких галактик. Поэтому многие вопросы — в частности, относящиеся к галактическим ветрам в карликовых галактиках — оставались открытыми. Для выработки приёмов исследования подобных объектов была выбрана изолированная карликовая галактика NGC 4460 с центральным галактическим фонтаном. На основе кинематических карт, полученных методом панорамной спектроскопии со сканирующим ИФП, выполнены оценки основных характеристик ветровой структуры, таких, как скорости истечения, масса выметенного вещества, возраст ветровой туманности. Далее аналогичное исследование проводилось для галактики UGC 10043. Показано, что скорости выброса вещества из центральной области звездообразования достигают 250 км/с.

Следующим шагом в работе стала разработка методов исследования состояния ионизованного газа в карликовых галактиках. Одним из широко известных способов анализа источников ионизации газа являются ВРТ-диаграммы (диаграмма соотношения потоков эмиссионных линий). Данный метод базируется на отношениях потоков близких оптических эмиссионных линий – как бальмеровских, так и запрещённых. Однако с помощью ВРТ-диаграмм трудно диагностировать такие источники ионизации газа, как ударные волны, излучение звезд асимптотической ветви гигантов или ядер галактик типа LINER. Учёт при 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 отношения потоков линий, характеризующих ударную ионизацию, от σ изучалась преимущественно для объектов с $\sigma > 100 - 200$ км/с. Для изучения объектов, где дисперсия лучевых скоростей находится на уровне нескольких десятков км/с, в диссертации разработан метод, где данные панорамной спектроскопии используются для получения информации об отношении потоков эмиссионных линий, а σ получается по наблюдениям со сканирующим ИФП, имеющем лучшее спектральное разрешение. Применимость данного метода проверялась на примере исследования четырёх галактик с различными морфологией и историей звездообразования. Диаграммы отношений линий строились по наблюдательным данным мультиспектральных спектрографов MPFS и PPAK. В ряде случаев обнаруживается положительная корреляция между дисперсией лучевых скоростей и вкладом ударного возбуждения в ионизацию газа. Оценки кинематических параметров галактического ветра, ранее полученные для галактики UGC 10043, согласуются с оценками скоростей ударных волн в газе (достигающими 300-400 км/с), проведённых для этой ветровой структуры методом ВРТ- σ . Также применение данного метода позволило подтвердить предположение о прямом столкновении газовых облаков на наклонных орбитах с основным газовым диском в галактике Arp 212.

По сравнению с классическими методами панорамной спектроскопии, используемыми при изучении состояния ионизации газа по отношениям потоков в эмиссионных линиях, узкополосная фотометрия обеспечивает лучшую пространственную дискретизацию и в несколько раз большее поле зрения. Поэтому для построения диаграмм ВРТ- σ в протяжённых объектах с низкой поверхностной яркостью и сложной морфологией в диссертации предложено применять картирование с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGA. Для проверки эффективности данного метода исследовалась галактика NGC 3077 из группы M 81. Здесь отношения потоков в эмиссионных линиях изучались как по фотометрическим данным, так и по наблюдениям в режиме длиннощелевой спектроскопии — результаты, полученные

обоими методами, хорошо согласуются между собой. Обнаружены отдельные кинематические компоненты, связанные с выбросами газа и падением вещества на галактику. Таким образом, показано, что выработан новый гибкий инструмент для исследования состояния ионизованного газа в карликовых галактик.

Научная новизна работы заключается в реализации метода диагностики состояния межзвездной среды галактик на основе совместного использования данных о кинематике ионизованного газа, полученных с помощью сканирующего ИФП на 6-м телескопе БТА, и данных о потоках в эмиссионных линиях, полученных методами 3D-спектроскопии на 6-м телескопе БТА и 3.5-м телескопе обсерватории Calar-Alto, или узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Впервые с помощью данного метода изучены источники ионизации в нескольких близких галактиках с умеренным темпом звездообразования (менее $0.5M_{\text{sun}}$ в год). Показано, что в ряде случаев наблюдается положительная корреляция между дисперсией лучевых скоростей и вкладом ударного возбуждения в ионизацию газа.

Научная и практическая значимость работы состоит в обнаружении в ряде галактик с умеренным звездообразованием четкой связи между параметрами ионизации газа и его дисперсией лучевых скоростей. Данная зависимость 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. Представленный в диссертации метод, сочетающий анализ наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо и узкополосной фотометрии с перестраиваемым фильтром, позволяет решать задачи по исследованию состояния ионизации протяженных эмиссионных объектов (в том числе и объектов с низкой поверхностной 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. Полученные в диссертации параметры галактических ветров могут использоваться для численного моделирования процессов звездообразования в галактиках, а также накладывают ограничения на уже существующие модели потери газа галактиками.

Личный вклад автора заключается в получении наблюдательного материала на 2.5 м телескопе КГО ГАИШ МГУ, обработке и анализе наблюдательных данных (включая архивные данные 6-м телескопа БТА), обсуждении результатов с соавторами, методической работе с наблюдательной аппаратурой.

Все результаты, выносимые на защиту, аргументированы и подробно изложены в 7 статьях соискателя, опубликованных в рецензируемых журналах списка ВАК. Представленные результаты и выводы обсуждались на международных и всероссийских конференциях, а также на семинарах CAO РАН.

По докладу автора на Ученом совете CAO РАН были заданы вопросы, на которые докладчик исчерпывающе ответил.

В выступлениях Ключкова В. Г. и Макаров Д. И. порекомендовали переработать формулировки в положениях, выносимых на защиту, и представить диссертацию к защите. Панчук В. Е. высоко оценил представленную работу, отметил ее высокий уровень и положительно отозвался об авторе работы. Моисеев А.В. отметил четкость и настойчивость в работе Опарина Д.В. Он также сказал о важности того, что представлена самостоятельная работа. Подчернул, что Опарин Д.В. - квалифицированный наблюдатель как на телескопах CAO РАН, так и на телескопе КГО ГАИШ МГУ. Поддержал мнение, что диссертация Опарина Д.В. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Ученый совет пришел к заключению, что представляемая диссертация является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, паспорту научной специальности, а соискатель заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Изучение воздействия звездообразования на ионизованный газ в галактиках» Опарина Дмитрия Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании Ученого совета САО РАН 14 сентября 2020 года.
Присутствовало на заседании 18 членов Ученого совета.
Результаты голосования: "за" – единогласно, протокол №387 от 14 сентября 2020 г.

Председатель Ученого совета,
директор САО РАН,
кандидат физ.-мат. наук

Ученый секретарь САО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



/Власюк В.В./

/Кайсина Е.И./