

SDSS-IV MaNGA: ИСТОЧНИКИ ИОНИЗАЦИИ ДИФФУЗНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА БОЛЬШИХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ВЫСОТАХ

© 2023 г. В. К. Постникова^{1,2*}, Д. В. Бизяев^{1,3}

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия

³Обсерватория Апаچی Поинт, Университет штата Нью Мексико, Нью Мексико, США

Поступила в редакцию 24.02.2023 г.

После доработки 27.04.2023 г.; принята к публикации 27.04.2023 г.

Мы исследуем источники ионизации диффузного газа на различных галактических высотах в различных по звездной массе, светимости в $H\alpha$ и удельному темпу звездообразования галактиках. Для этого мы привлекаем данные релиза DR16 обзора SDSS-IV MaNGA и теоретические модели фотоионизации и ударной ионизации базы данных 3MdB. Наша итоговая выборка содержит 239 галактик, наблюдаемых точно с ребра, что делает результаты статистически значимыми и позволяет с помощью процедуры сложения спектров исследовать даже большие галактические высоты. С помощью диагностических диаграмм мы показываем, что для галактик всех исследуемых типов поведение диффузного ионизованного газа адекватно описывается моделями фотоионизации молодыми OB-звездами и горячими проэволюционировавшими маломассивными звездами. Однако в галактиках с большими звездными массами или с пассивным звездообразованием ударные волны также могут вносить свой вклад в ионизацию. Для галактик всех исследуемых типов мы получаем, что поток излучения от OB-звезд и ионизационный параметр с высотой уменьшаются, а относительный вклад горячих проэволюционировавших маломассивных звезд в ионизацию увеличивается. При этом наибольшая разница вклада данных источников в ионизацию газовой среды наблюдается между галактиками с различными удельными темпами звездообразования и с различными звездными массами: проэволюционировавшие маломассивные звезды являются основным источником ионизации газа в галактиках с пассивным звездообразованием (и с большими звездными массами), тогда как в галактиках с активным звездообразованием (и с меньшими звездными массами) OB-звезды являются определяющим фактором ионизации диффузной газовой среды.

Ключевые слова: галактики, диффузный ионизованный газ, оптическая спектроскопия, моделирование.

DOI: 10.31857/S0320010823040046, EDN: CVEMBT

ВВЕДЕНИЕ

Работа Хойла и Эллис (1963) положила начало исследованию диффузной ионизованной газовой среды (DIG — diffuse ionized gas) в Галактике, что в дальнейшем привело к ее обнаружению как в плоскости, так и на существенных высотах Галактики (Рейнольдс и др., 1973). Позже диффузный ионизованный газ удалось обнаружить и в других галактиках (Деттмар, 1990; Рэнд и др., 1990). Более того, он является доминирующей фазой на расстояниях порядка килопарсека над плоскостью диска (Рейнольдс, 1991). До недавнего времени

движение нейтрального (Свотерс и др., 1997; Мараско и др., 2019) и ионизованного (Рэнд, 2000) газа было довольно хорошо изучено только для нескольких близких галактик. Прогресс массивных спектральных обзоров внегалактических объектов в последние годы позволил также изучить кинематику ионизованного газа внутри и вокруг галактик местной Вселенной для статистически значимых выборок (Бизяев и др., 2017, 2022; Леви и др., 2019).

В то же время источники ионизации газа на больших высотах (далее eDIG — extra-planar diffuse ionized gas) до сих пор исследованы плохо как для нашей, так и для других галактик. С одной стороны, потока ионизирующего излучения от OB-

*Электронный адрес: vraeranaz@gmail.com

звезд в галактической плоскости хватает для объяснения ионизации газа в галактиках с заметным звездообразованием (Хаффнер и др., 2009; Флорес-Фахардо и др., 2011). С другой стороны, отношения интенсивностей запрещенных линий на больших высотах в отдельных галактиках требуют привлечения проэволюционировавших звезд в качестве основных источников ионизации газа (Флорес-Фахардо и др., 2011; Жанг и др., 2017; Джонс и др., 2017). Ионизация ударными волнами также рассматривалась как возможный сценарий для объяснения излучения eDIG (Коллинз, Рэнд, 2001).

Крупный релиз данных DR16 (Data Release 16, Ахумада и др., 2020) спектрального обзора MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory, Банди и др., 2015) проекта SDSS-IV (Sloan Digital Sky Survey, Йорк и др., 2000; Блантон и др., 2017) Survey, Йорк и др., 2000; Блантон и др., 2017) DR16 (Data Release 16, Ахумада и др., 2020) позволяет сформировать большую выборку объектов, в которых eDIG удобно наблюдать. Благодаря большому числу галактик, с помощью сложения спектров мы можем исследовать эмиссионные линии от eDIG на экстремальных высотах над плоскостью галактики — до десятка килопарсек. Уточнение результатов с использованием моделирования и новой выборки галактик, основанной на одном из последних релизов данных MaNGA, является основной задачей данного исследования.

В следующем разделе мы описываем используемые данные MaNGA, их анализ и обработку. Затем мы представляем применяемые в работе диагностические диаграммы, а также данные моделирования. Далее мы сообщаем результаты нашей работы, после чего производим их обсуждение. Заключительный раздел содержит основные этапы проделанной работы и выводы из нее. В данной статье мы принимаем постоянную Хаббла равной 70 км/с/Мпк .

ДАННЫЕ SDSS-IV MaNGA

Спектры MaNGA

Для исследования выборки галактик мы используем данные релиза DR16 спектрального обзора MaNGA проекта SDSS-IV.

Обзор MaNGA выполнен на 2.5-м Слоановском телескопе (Ганн и др., 2006) обсерватории Апачи-Пойнт и обладает спектральным разрешением $R \sim 2000$ на длинах волн λ в интервале $3600\text{--}10\,300 \text{ \AA}$ (Сми и др., 2013). Для обзора было отобрано около 10 000 галактик таким образом, чтобы выборка обладала близким к равномерному спектром звездных масс и медианным красным смещением $z \approx 0.03$ (Уэйк и др., 2017).

Наиболее важное преимущество MaNGA состоит в том, что данный обзор предоставляет пространственно-разрешенную спектроскопическую картину. Это обеспечивается двумя волоконными спектрографами (Сми и др., 2013), оснащенными IFU (Integral Field Unit, Дрори и др., 2015) — модулями, состоящими из множества плотно упакованных волокон, для формирования индивидуальных спектров различных частей одного и того же объекта. Диаметр проекции каждого такого волокна на небесную сферу ~ 2 угл. сек, при этом, так как по техническим причинам волокна делаются круглыми в сечении и не могут прилегать друг к другу без зазоров, коэффициент покрытия волокнами (filling factor) площади IFU составляет $\approx 56\%$. Для обеспечения полного покрытия площади IFU наблюдения проводятся с применением пространственного дизеринга по трем точкам с последующим восстановлением изображения (Лоу и др., 2015).

Конвейерная обработка спектров MaNGA, переводящая низкоуровневые продукты (спектры в каждой точке) в высокоуровневые (восстановленные карты астрофизических величин, покрывающие галактику без зазоров), происходит в два этапа. Первый этап — конвейерная редукция данных, DRP (Data Reduction Pipeline, Лоу и др., 2016), в результате которой из сырых данных получают откалиброванные спектроскопические кубы, приведенные к однородному пространственному разрешению в 2.5 угл. сек и положенные на двумерную сетку с шагом 0.5 угл. сек. Точность спектрофотометрической калибровки потоков не хуже 5% по всему спектральному диапазону (Ян и др., 2016а,б). Второй этап — конвейерный анализ данных, DAP (Data Analysis Pipeline, Уэстфолл и др., 2019), использующий процедуру разделения эмиссионных и абсорбционных спектров с последующим восстановлением темпа звездообразования с помощью метода pPXF (Penalized Pixel-Fitting, Каппеллари и Эмселлем, 2004; Каппеллари, 2017), в результате которого получают глобальные параметры галактик, двумерные карты распределений различных астрофизических величин, а также кубы сложенных наблюдаемых (binned spectrum) и модельных спектров (best-fitting model spectrum).

Из обширных данных, предоставляемых обзором MaNGA, мы используем пространственно разрешенные спектры эмиссионных линий, полученные в результате вычитания модельного спектра континуума из наблюдаемого спектра галактик, двумерные карты интенсивностей эмиссионных линий и скоростей газа, а также полученные по результатам DAP и SDSS-фотометрии глобальные параметры галактик.

Процедура маскирования для выбранных галактик

Для исключения влияния нежелательных пространственных пикселей (так называемых спакселей) для каждой галактики выборки мы применяем спаксельную маску. С ее помощью в спектроскопических кубах остаются только спектры спакселей, обладающих следующими характеристиками:

- в рамках конвейерной обработки данных MaNGA для данного спакселя успешно проведено моделирование эмиссионного спектра, т.е. при моделировании эмиссионного спектра данный спаксель не был отмечен как нежелательный для дальнейшего использования;
- в рамках конвейерной обработки данных MaNGA для данного спакселя успешно проведено определение скорости газа по эмиссионным линиям, т.е. при расчете скорости газа по эмиссионным линиям данный спаксель не был отмечен как нежелательный для дальнейшего использования;
- отношение сигнала к шуму в линии $H\alpha$ для данного спакселя ≥ 3.0 ;
- модуль скорости газа для данного спакселя относительно центра соответствующей ему галактики ≤ 350 км/с.

Анализ выборки

Первоначальный отбор галактик, наблюдаемых с ребра, проводится на основании визуального просмотра композитных цветных изображений SDSS. Как показывает опыт создания большого каталога подобных объектов (Бизяев и др., 2014), а также выборки галактик с большим наклоном по обзору MaNGA (Бизяев и др., 2017), проекция пылевой полосы на центральную область галактики свидетельствует о том, что наклон плоскости галактики к лучу зрения $\geq 85^\circ$, что подтверждается расчетами (Бизяев и Кайсин, 2004; Мосенков и др., 2015). Большой наклон обеспечивает уверенность в том, что мы можем изучать газ на больших расстояниях от плоскости, без существенного наложения его на яркие области звездообразования в плоскости галактик. Выборка, сформированная на основании визуального просмотра, содержит 258 галактик, видимых с ребра.

Однако после просмотра глазом изображений галактик выборки вместе с картами излучения в линии $H\alpha$, картами эквивалентных ширин $EW(H\alpha)$, а также картами полей скоростей газа в линии $H\alpha$ и звезд выявляется необходимость в отсеивании некоторых галактик. Так, например, наша

выборка содержит несколько объектов, в которых газ и звезды вращаются в ортогональных плоскостях, что напоминает галактики с полярными кольцами (см., например, Моисеев и др., 2011). Будучи интересными объектами, данные галактики не позволяют изучать eDIG методом, применяемым в данной статье. В результате мы исключаем из выборки 32 галактики, имеющие как минимум одну из следующих проблем:

- вращение газа под большим углом к плоскости вращения звезд;
- несоответствие используемых фотометрических параметров галактики фактически наблюдаемой картине, например, когда при просмотре изображения галактики становится ясно, что определенный для нее эффективный радиус R_{eff} завышен в несколько раз;
- отсеивание маской подавляющего числа спакселей галактики, что не позволяет спектрам оставшихся спакселей данной галактики дать статистически значимый вклад в сложенные спектры.

Итоговая выборка содержит 239 галактик, мозаика которых представлена на рис. 1.

Процедура сложения спектров и определение потоков в эмиссионных линиях

Так как в поле нашего интереса попадают области, расположенные на больших высотах над дисками галактик, отношение сигнала к шуму в эмиссионных линиях таких спакселей в индивидуальных галактиках оказывается недостаточным для анализа спектров. С целью улучшения отношения сигнала к шуму мы проводим процедуру сложения многих спектров областей, относительно близких по своим физическим условиям. Для выделения таких областей всю оставшуюся выборку мы разделяем на приблизительно равные группы (так называемые бины) с близкими значениями некоторых физических величин (т.е. проводим процедуру бинирования). Чтобы исследовать состояние диффузного ионизованного газа в галактиках различных типов, а также на различных высотах над дисками галактик, в качестве таких физических величин мы выбираем:

- интегральную звездную массу галактики M_s , взятую из каталога NASA-Sloan atlas (см. <http://nsatlas.org>);

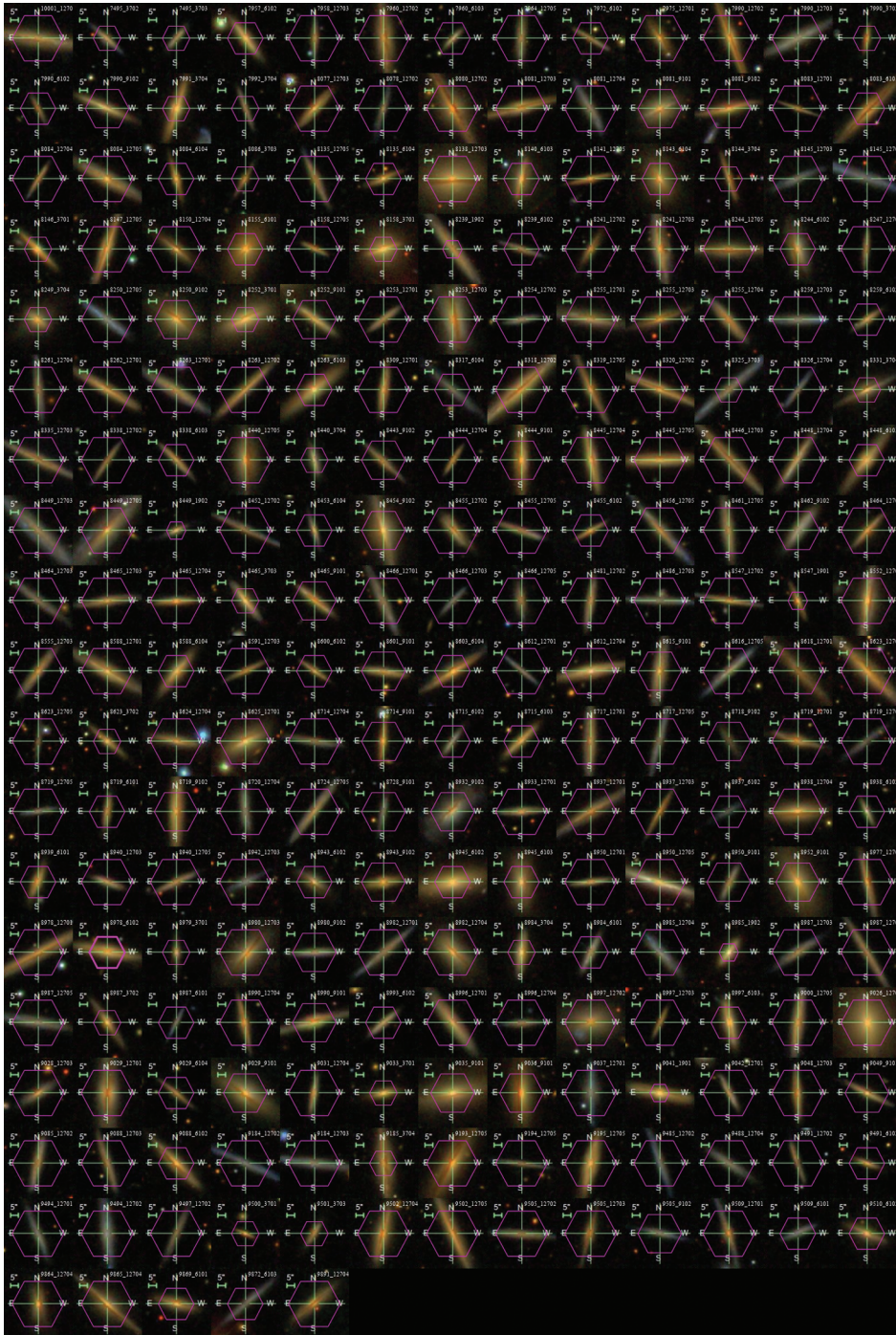


Рис. 1. Мозаика изображений 239 галактик итоговой выборки. На изображения галактик из SDSS наложены шестиугольные пурпурные рамки, обозначающие положения IFU.

- нескорректированную за поглощение оценку светимости галактики $L_{H\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ в линии $H\alpha$ в пределах одного R_{eff} в фотометрической полосе r , в силу прямой пропорциональности используемую нами как индикатор темпа звездообразования SFR (star formation rate), также взятую из NASA-Sloan atlas;
- удельный темп звездообразования галактики $sSFR$ (specific star formation rate), оцениваемый нами следующим образом: $sSFR =$

$= L_{\text{H}\alpha - R_{\text{eff}}(r)} / 10^{41.27} / M_s$, где показатель степени взят в соответствии с Кенникутт и Эванс (2012), Мёрфи и др. (2011), Хао и др. (2011);

- видимую нормированную высоту z/z_0 каждого спакселя галактики над плоскостью диска, приведенную к вертикальной экспоненциальной шкале высот $z_0 = 0.596 \times R_{\text{eff}} \times b/a$, где: R_{eff} — эффективный радиус, b/a — отношение малой и большой полуосей эллипса; оба параметра также берутся из NASA-Sloan atlas, в котором они определялись по фотометрии в полосе r моделированием поверхностной яркости с помощью параметризации по методу Петросяна.

Оптимальную схему бинирования (т.е. количество бинов и положение их границ) мы выбираем таким образом, чтобы одновременно в каждый бин по одному из параметров галактик и в каждый бин по высоте давали вклад не менее 10% галактик выборки. После этого мы складываем внутри каждого из бинов предварительно исправленные за скорость относительно наблюдателя эмиссионные спектры. Для сложных спектров замечаем, что в пределах $\pm 7.5 \text{ \AA}$ от центра каждой интересующей нас эмиссионной линии не наблюдается других линий. Более того, оказывается, что в рамках DAP континуум вычтен настолько хорошо, что дополнительная процедура вычитания континуума не требуется. Поэтому вычисление потока в эмиссионных линиях мы осуществляем простым сложением интенсивностей в пределах $\pm 7.5 \text{ \AA}$ от центра каждой интересующей линии. После чего мы корректируем интенсивности в эмиссионных линиях за поглощение на основании бальмеровского декремента. Так как DAP предоставляет не только значения потока в каждом спакселе и спектральном элементе, но и ошибки потоков, мы также производим расчет ошибок для интенсивностей суммарных потоков в линиях в каждом бине с помощью стандартного метода распространения ошибок.

Таким образом, для 239 галактик итоговой выборки мы последовательно выполняем бинирование в рамках оптимальной схемы по каждому из трех интегральных параметров галактик (этот этап пропускается при рассмотрении случая разбиения только по галактическим высотам), бинирование в рамках оптимальной схемы по галактическим высотам, исправление спектров за скорость относительно наблюдателя, побиновое сложение спектров, расчет интенсивностей в эмиссионных линиях, корректировку полученных интенсивностей за поглощение, а также вычисление ошибок. Пример реализации бинирования по высотам для одной из галактик выборки приведен на рис. 2.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Диагностические диаграммы

В данной работе сопоставление экспериментальных данных с теоретическими моделями мы производим с помощью диагностических диаграмм, строящихся на основании относительных интенсивностей эмиссионных линий и позволяющих эффективно дифференцировать различные по своим физическим условиям области галактик. Широкое применение такого рода диаграмм началось после работы Болдуина и др. (1981), в которой продемонстрированы двумерные классификационные схемы, пришедшие на замену одномерным, и показаны наиболее выгодные для четкой дифференциации интересующих областей соотношения линий. Вейю и Остерброк (1987) рассмотрели соотношения линий, впоследствии ставшие классическими для так называемых BPT-диаграмм. Для объяснения и уточнения полученной классификации Допита и др. (2000) применили теоретические модели, описывающие состояние газовой среды.

Важной частью диагностических диаграмм являются демаркационные линии — определенные теоретическими и эмпирическими методами границы, разделяющие среды с различными механизмами ионизации. Уравнения для наиболее востребованных на данный момент демаркационных линий можно найти в работах Кьюли и др. (2001), Кьюли и др. (2006), Кауффманн и др. (2003). Более комплексный подход к проведению демаркационных линий с использованием газовой динамики рассмотрен в работе Лоу и др. (2021).

Прежде чем сопоставлять данные с помощью диагностических диаграмм, необходимо выбрать, какие именно диаграммы будут рассмотрены, т.е. какие соотношения линий будут представлены по осям. Данные MaNGA открывают широкие возможности для анализа всевозможных комбинаций отношений линий на диагностических диаграммах, тем не менее, в данной работе мы ограничиваемся тремя видами традиционных BPT-диаграмм:

- $\lg([\text{O III}]\lambda 5007) / \text{H}\beta$ vs. $\lg([\text{N II}]\lambda 6584) / \text{H}\alpha$;
- $\lg([\text{O III}]\lambda 5007) / \text{H}\beta$ vs. $\lg([\text{S II}]\lambda \lambda 6716, 6731) / \text{H}\alpha$;
- $\lg([\text{O III}]\lambda 5007) / \text{H}\beta$ vs. $\lg([\text{O I}]\lambda 6300) / \text{H}\alpha$.

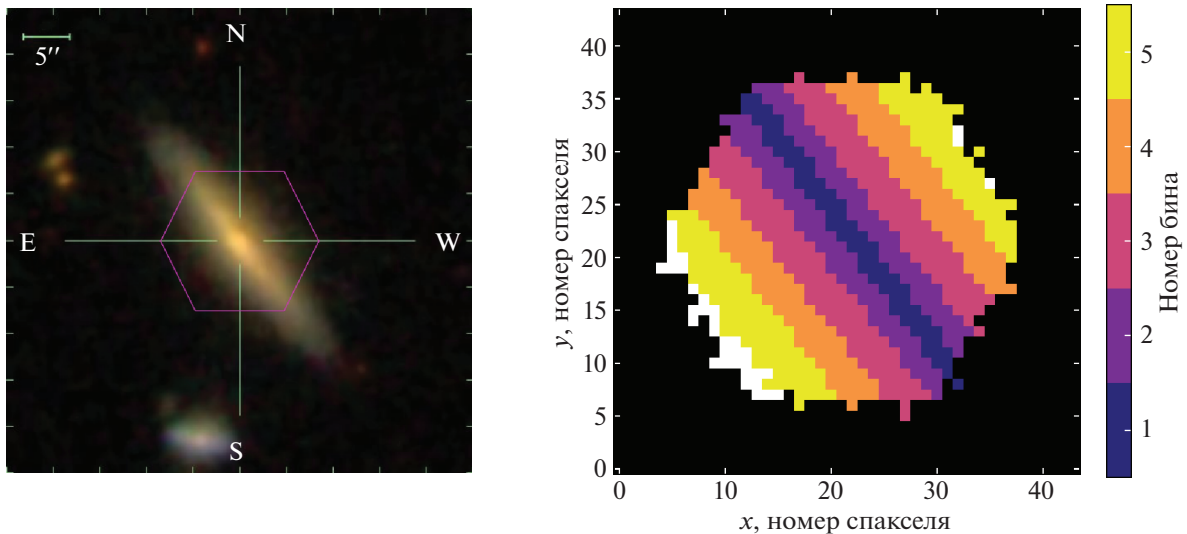


Рис. 2. Изображение одной из галактик выборки (слева) с границами IFU (пурпурный шестиугольник) и соответствующая карта бинов по высотам над плоскостью диска (справа) с учетом (белой) спаксельной маски.

Теоретические модели 3MdB

Теоретические модели, полученные численными методами для различных случаев ионизации газовой среды, широко востребованы среди исследователей межзвездной среды. К сожалению, публикуется лишь малая часть таких моделей, а собственноручный подсчет оказывается достаточно трудоемким. Для решения данной проблемы была создана база данных 3MdB (the Mexican Million Models dataBase, Мориссет и др., 2015; Алари, Мориссет, 2019), содержащая уже рассчитанные модели, доступ к которым осуществляется через протокол MySQL. Такой подход к организации данных помогает сэкономить большое количество времени и вычислительных ресурсов исследователям, занимающимся сопоставлением теоретических моделей с данными наблюдений.

В данный момент 3MdB состоит из двух частей.

- База данных 3MdB-p фотоионизационных моделей (Мориссет и др., 2015), рассчитанных с помощью кода Cloudy (Ферланд и др., 1998) версии C13 (Ферланд и др., 2013). Среди различных проектов фотоионизационных моделей содержится проект “DIG_HR” — модели, рассчитанные для описания DIG, в том числе eDIG, в предположении, что источником ионизации являются взятые в различных соотношениях поля излучения OB-звезд и многочисленных в толстых дисках и звездных гало горячих маломассивных проэволюционировавших звезд (HOLMES — HOt Low-Mass Evolved Stars). Такой выбор источников ионизации основан на исследовании хорошо известной галактики NGC 891, видимой с ребра

(Флорес-Фахардо и др., 2011). Однако предположение о том, что ионизация DIG описывается комбинацией только указанных двух источников (OB-звезды и HOLMES), может не сработать в общем случае DIG или в частном случае какого-то определенного класса галактик — проверка этого предположения является одной из задач представленного исследования.

- База данных 3MdB-s моделей ударной ионизации (Алари и Мориссет, 2019), рассчитанных с помощью кода MAPPINGS (Бинетт и др., 1985) версии V (Сазерленд и др., 2018). Наиболее приближенными по физическим условиям к контексту рассматриваемой задачи являются модели “Allen08” — пересчитанные с учетом новых возможностей модели, представленные в работе Аллена и др. (2008). Гипотеза о механизмах ионизации DIG, проверяемая в данной работе, заключается в том, что одним из источников ионизации DIG, наравне с OB-звездами и HOLMES, может быть ударная ионизация, причем вклад различных механизмов может зависеть и от высоты над плоскостью галактики, и от параметров галактики.

Фотоионизационные модели “DIG_HR”

Для фотоионизационных моделей “DIG_HR”, которые, по задумке авторов базы данных 3MdB-p, описывают поведение диффузного ионизованного газа, свободными являются четыре параметра.

1. Поток излучения от OB-звезд Φ_{OB} , фотонов/с/см². Может варьироваться в пределах $\lg \Phi_{OB} = (3.5 \div 7.5)$ с шагом 0.25 dex.
2. Ионизационный параметр $U = \Phi_{total}/n_e/c$, где $\Phi_{total} = \Phi_{OB} + \Phi_{HOLMES}$, n_e — электронная плотность, а c — скорость света. Может варьироваться в пределах $\lg U = (-4.0 \div -3.0)$ с шагом 0.1 dex.
3. Металличность газа O/H , равная отношению числа атомов кислорода к числу атомов водорода. Может варьироваться в пределах $\Delta O/H = (-1.0 \div 0.6)$ с шагом 0.1 dex, где $\Delta O/H + 8.69 = 12.00 + \lg O/H$.
4. Обогащенность газа азотом N/O , равная отношению числа атомов азота к числу атомов кислорода. Может варьироваться в пределах $\lg N/O = (-1.4 \div -0.2)$ с шагом 0.1 dex.
3. Магнитное поле B , мкГс. Мы варьируем его в пределах $B = (1 \div 10)$ мкГс — ограничение диапазона магнитных полей связано с тем фактом, что в плоскости нашей и других галактик наблюдается магнитное поле в районе $B \simeq 10$ мкГс, при этом с отходом от плоскости B падает, и на нескольких кпк над плоскостью уже наблюдается на уровне $B \simeq 5$ мкГс. В модели с $n = 0.1$ см⁻³ в рассматриваемых интервалах магнитных полей включены случаи $B = (1.0, 1.26, 1.58, 2.0, 3.16, 4.0, 5.0, 10.0)$ мкГс, в модели с $n = 0.01$ см⁻³ включены случаи магнитных полей величиной $B = (1.0, 10.0)$ мкГс.
4. Скорость распространения ударного фронта (shock velocity) v , км/с. Ограничения не накладываются, и для сетки с $n = 0.1$ см⁻³ мы варьируем параметр в допустимых моделью пределах $v = (100 \div 1000)$ км/с, а для сетки с $n = 0.01$ см⁻³ — в пределах $v = (200 \div 1000)$ км/с с шагом 25 км/с для обоих случаев.

Важно заметить, что поток от HOLMES фиксирован для всех моделей на значении $\Phi_{HOLMES} = 8.4 \times 10^4$ фотонов/с/см². Также содержание тяжелых элементов, помимо N, фиксировано относительно O на солнечных значениях, за исключением Mg, Si и Fe, для которых содержание уменьшено на 1 dex по отношению к солнечному значению.

Модели ударной ионизации “Allen08”

Аналогичным образом мы рассматриваем модели ударной ионизации 3MdB-s. Для моделей “Allen08”, интересующих нас в контексте данной задачи, свободными являются также четыре параметра.

1. Концентрация вещества до столкновения с ударной волной (preshock density) n , см⁻³. Мы останавливаемся на двух значениях, реалистичных для нашего случая: $n = 0.1$ см⁻³ и $n = 0.01$ см⁻³.
2. Обогащенность газа. Мы рассматриваем солнечное обилие тяжелых элементов. К сожалению, представленные в базе данных модели с меньшими металличностями, характерными для Большого и Малого Магеллановых облаков, не рассчитаны для случая адекватных для DIG плотностей. Возможное поведение моделей требуемых плотностей с уменьшением содержания тяжелых элементов анализируется ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование оптимальности выбранной схемы бинирования

С помощью оптимальной схемы бинирования мы достигли равномерного статически значимого заполнения галактиками бинов по параметрам галактик и по галактическим высотам. В отсутствие разбиения по параметрам галактик в наиболее высоко располагающийся над плоскостью диска бин дают вклад около 30% галактик выборки. При разбиении по параметрам галактик, в каждый из наиболее высоких бинов дают вклад около 10% галактик выборки. Полученное разбиение устойчиво относительно числа галактик в выборке, числа бинов по высотам, а также границ бинов по высотам.

Сложенные галактики на диагностических диаграммах

Далее мы рассматриваем, как различные по высоте над диском области галактик с различными значениями интегральных параметров (M_s , $L_{H\alpha-R_{eff}(r)}$ и sSFR) ложатся в рамках БПТ-диаграмм на сетки фотоионизационных и ударных моделей. Отметим, что мы зафиксировали различные значения металличности газа $\Delta O/H$ и обилия азота $\lg N/O$ у фотоионизационных моделей для различных галактик — такое варьирование обогащенности среды обсуждается далее. Иллюстрация полученной картины представлена на рис. 3–5.

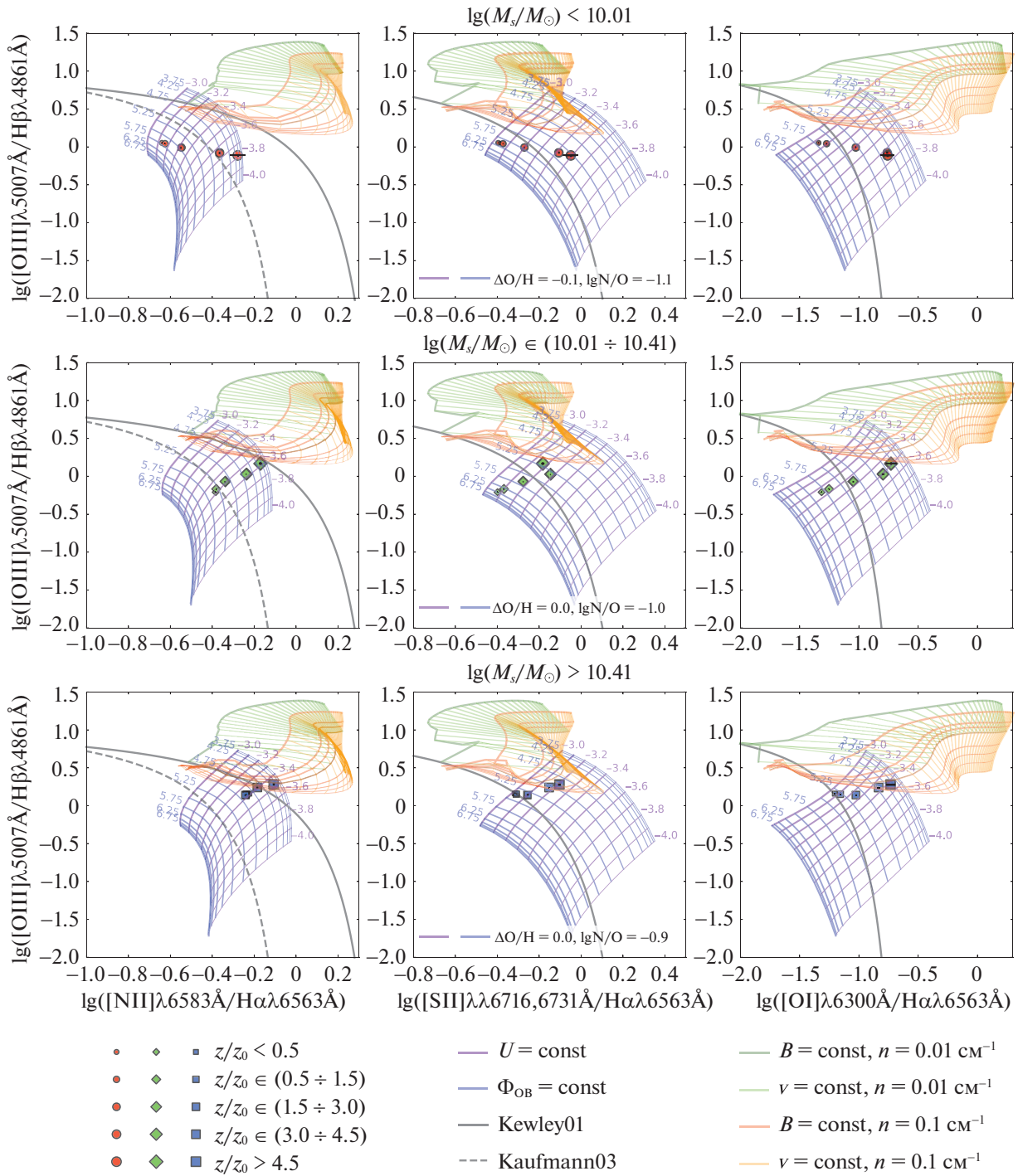


Рис. 3. БПТ-диаграммы для различных по высоте над диском областей галактик, различных по значениям M_s , вместе с моделями фотоионизации и ударной ионизации, а также демаркационными линиями, приведенными для сравнения с предыдущими работами. Чем больше размер маркера, тем больше галактическая высота соответствующей области. Красный цвет/круглая форма маркера соответствует наименьшему значению M_s галактик, зеленый цвет/форма ромба — средней M_s , синий цвет/квадратная форма — наибольшей M_s . Фотоионизационным моделям соответствуют синие сетки, моделям ударной ионизации — красные и зеленые. Чем больше толщина линии сетки, тем больше значение соответствующего параметра. В контексте данного исследования нас интересует положение ударных моделей относительно моделей фотоионизации, но не интересуют конкретные значения параметров на сетках ударных моделей, поэтому соответствующие значения на диаграммах не приводятся.

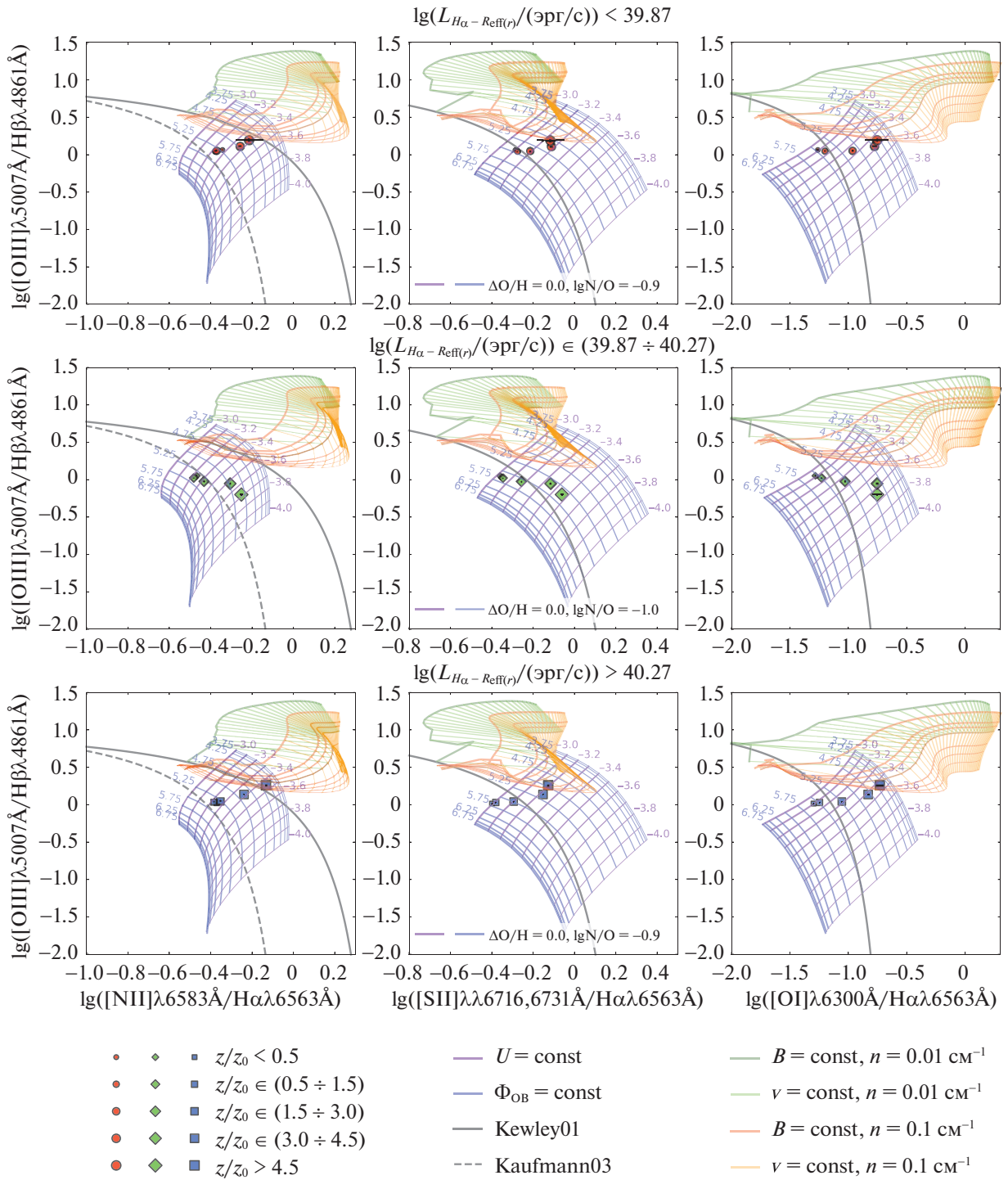


Рис. 4. БПТ-диаграммы для различных по высоте над диском областей галактик, различных по значениям $L_{H\alpha - R_{\text{eff}}(r)}$, вместе с моделями фотоионизации и ударной ионизации, а также демаркационными линиями. Обозначения такие же, как на рис. 3.

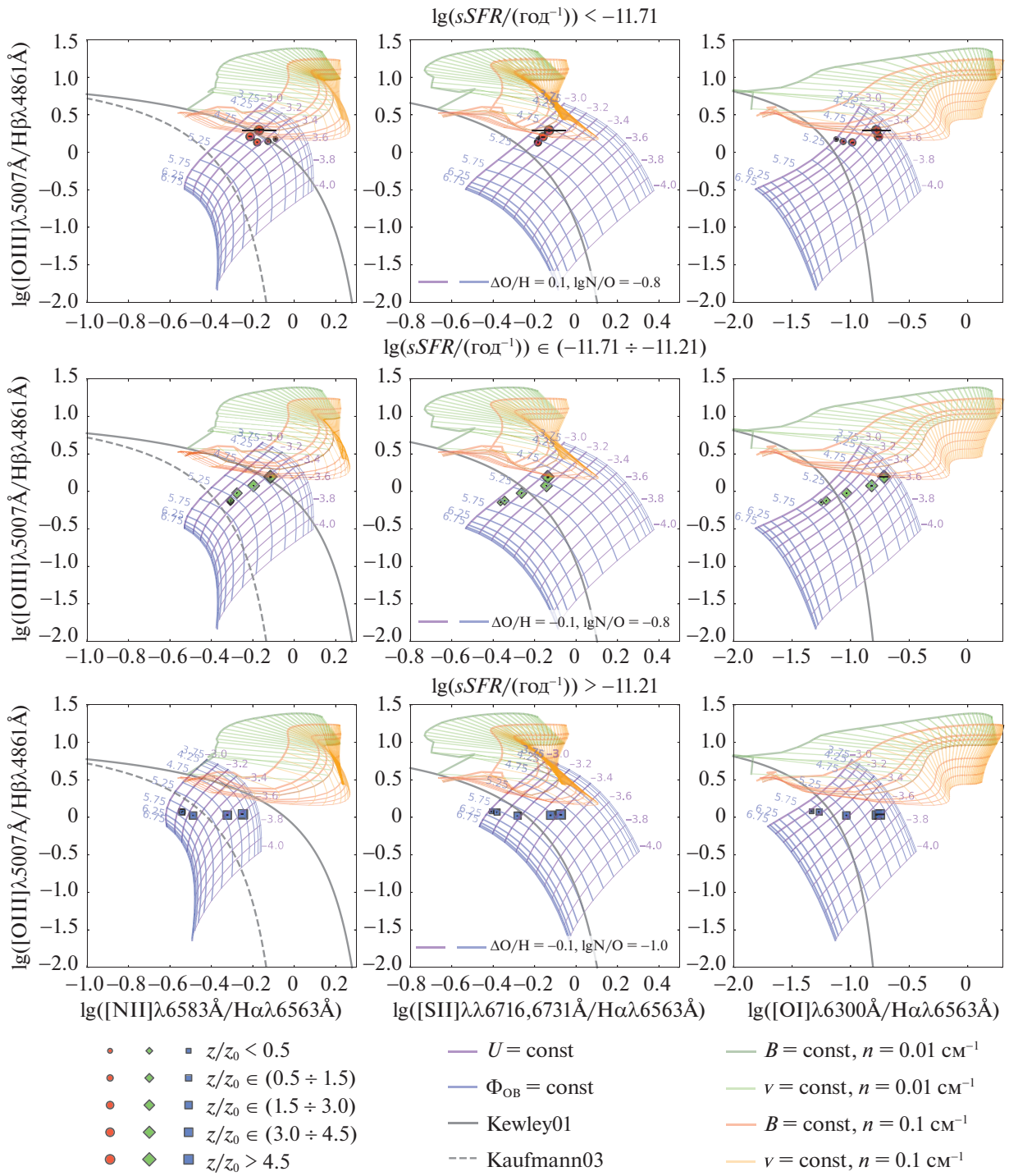


Рис. 5. БПТ-диаграммы для различных по высоте над диском областей галактик, различных по значениям sSFR, вместе с моделями фотоионизации и ударной ионизации, а также демаркационными линиями. Обозначения такие же, как на рис. 3.

Полученные зависимости

Из рис. 3–5 следует, что несмотря на то, что области на больших высотах в галактиках с промежуточными или большими M_s , а также с низ-

кими или высокими $L_{\text{H}\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ и с низкими или промежуточными sSFR ложатся на пересечение фотоионизационных моделей с моделями ударной ионизации, для объяснения поведения диффузного

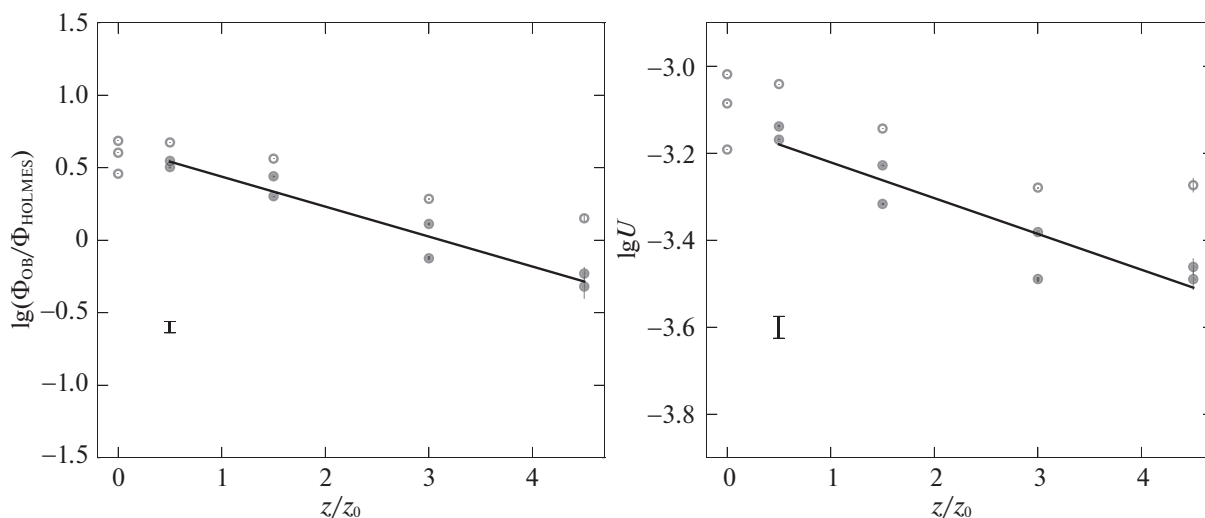


Рис. 6. Общий случай разбиения всех галактик на области различных высот без каких-либо дополнительных разбиений: наблюдаемое изменение отношения потоков от OB-звезд и HOLMES (слева) и ионизационного параметра (справа) с галактической высотой для всех галактик выборки по данным каждой из ВРТ-диаграмм (закрашенные и пустые маркеры) и линейная регрессия полученных зависимостей (линия и бар, показывающий характерный размер коридора ошибок в одно стандартное отклонение). Точки, обозначенные пустыми маркерами, в регрессии не участвуют (см. объяснение выше в тексте).

ионизованного газа на любых высотах в галактиках любого типа достаточно только фотоионизационных моделей. При этом положение области на фотоионизационной сетке на ВРТ-диаграмме позволяет однозначно определить значение потока от OB-звезд, а также значение ионизационного параметра — для этого мы проделываем процедуру интерполяции. Таким образом, мы находим, как отношение потоков от OB-звезд и HOLMES, а также ионизационный параметр меняются с высотой в различных галактиках согласно фотоионизационным моделям, пренебрегая возможным вкладом ударных волн (Флорес-Фахардо и др., 2011).

В простейшем случае, который мы рассматриваем, разбиение галактик проводится на области различных высот, пока что без разделения по другим галактическим параметрам. Предварительно мы оцениваем, как меняется O/N с высотой, используя фотоионизационные модели для областей III (Допита и др., 2016), и выясняем, что в пределах погрешности ± 0.1 dex изменением O/N с высотой можно пренебречь. Результаты интерполяции показывают, что наилучшая согласованность значений, извлекаемых с помощью различных ВРТ-диаграмм, получается при $\Delta O/N = 0.0$ и $\lg N/O = -0.9$, что соответствует солнечной обогатенности газа. Модели не позволяют варьировать обогатенность среды серой S, поэтому значения, извлеченные из ВРТ-диаграммы, куда входит интенсивность в линии серы S, получают смещенны-

ми. Исходя из этого, для регрессии мы используем значения, извлеченные из ВРТ-диаграмм, куда входят только интенсивности в линиях водорода H, азота N и кислорода O. Более того, так как в плоскости диска поглощение особенно сильное, и его эффекты не могут быть полностью учтены, мы исключаем из регрессии точки, соответствующие наиболее низкой галактической высоте. Получаемые зависимости представлены на рис. 6.

Следующим шагом в направлении усложнения модели мы рассматриваем разбиение галактик как по областям различных высот, так и по различным значениям какого-либо из трех интегральных параметров галактик: M_s , $L_{H\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ или sSFR. Предварительно мы также оцениваем, как меняется O/N с высотой в галактиках каждого из рассматриваемых типов, используя фотоионизационные модели для областей III (Допита и др., 2016). Аналогично мы получаем, что в пределах погрешности ± 0.1 dex для галактик всех рассматриваемых типов изменением O/N с высотой можно пренебречь. Тогда в процессе интерполяции мы находим $\Delta O/N$ и $\lg N/O$, при которых получается наилучшая согласованность значений, извлекаемых с помощью различных ВРТ-диаграмм, но уже индивидуальные для каждого типа галактик. Так, например, оптимальные значения $\Delta O/N$ и $\lg N/O$ для галактик с различными звездными массами M_s (рис. 3) хорошо коррелируют с ожидаемыми в рамках известных зависимостей O/N — M_s (см.,

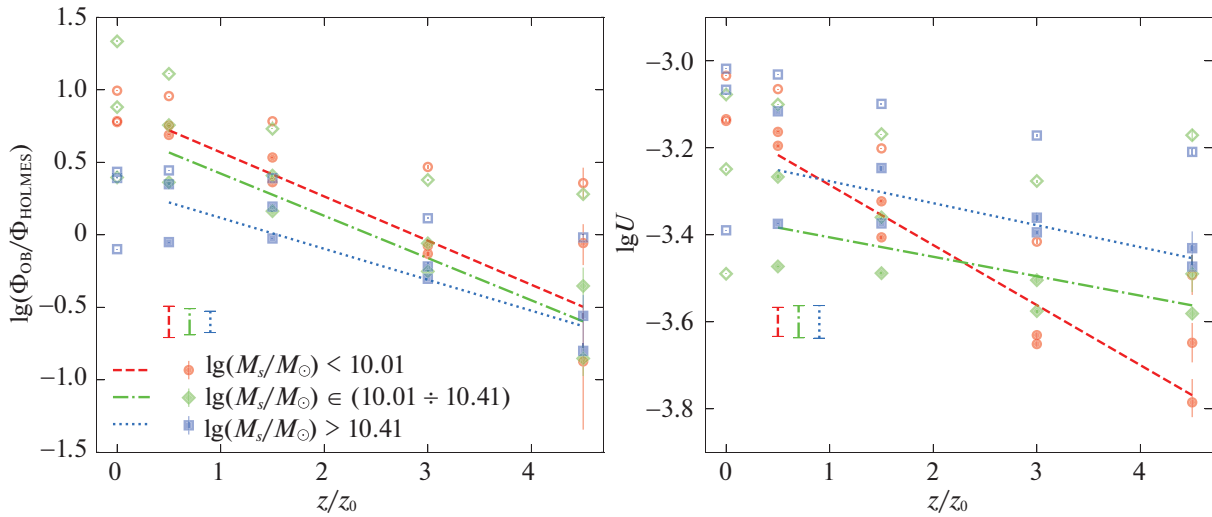


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для случая дополнительного разбиения галактик по различным звездным массам M_s . Красный цвет/круглая форма маркера/пунктирная линия соответствует наименьшему значению M_s галактик, зеленый цвет/форма ромба/штрихпунктирная линия — средней M_s , синий цвет/квадратная форма маркера/линия из точек — наибольшей M_s .

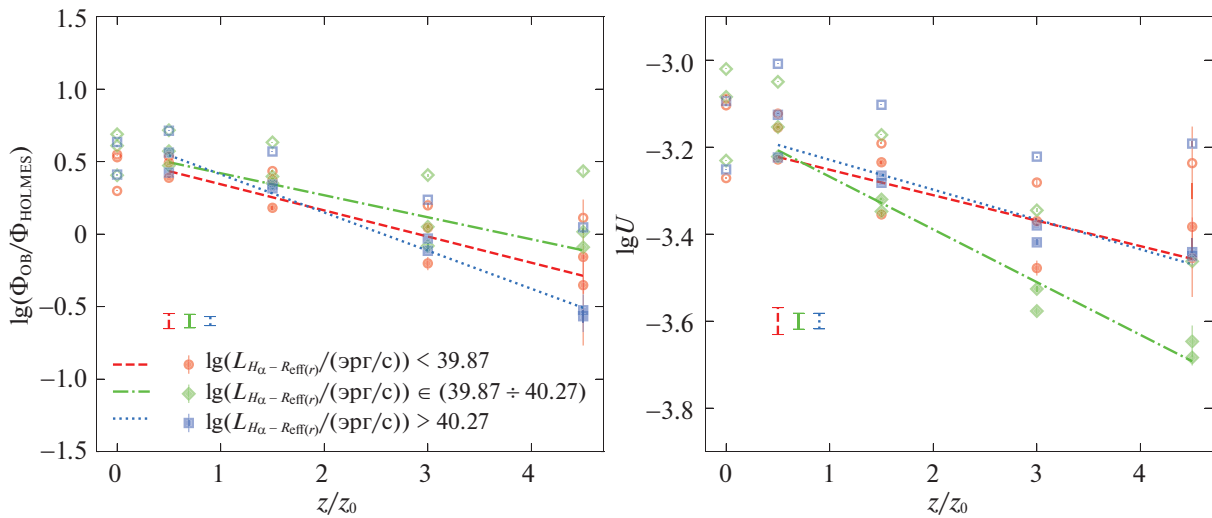


Рис. 8. То же, что на рис. 7, но для разбиения галактик по различным светимостям $L_{H\alpha - R_{\text{eff}}(r)}$ в линии $H\alpha$ в пределах одного R_{eff} в фотометрической полосе r .

например, Тремонти и др., 2004; Эндрюс, Мартини, 2013; Курти и др., 2017) и $N/O - M_s$ (Перес-Монтеро, Контини, 2009; Эндрюс, Мартини, 2013; Мастерс и др., 2016), а также $N/O - O/H$ (Эндрюс, Мартини, 2013). Аналогично мы проводим регрессию, используя значения, извлеченные из ВРТ-диаграмм, куда входят только интенсивности в линиях водорода H , азота N и кислорода O , и исключаем из регрессии точки, соответствующие

наиболее низкой галактической высоте. Получаемые зависимости представлены на рис. 7–9.

ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем сделать вывод о значимости вклада ударных волн в ионизацию диффузного газа, мы оцениваем, как изменилось бы положение ударных сеток на рис. 3–5 в случае металличностей более

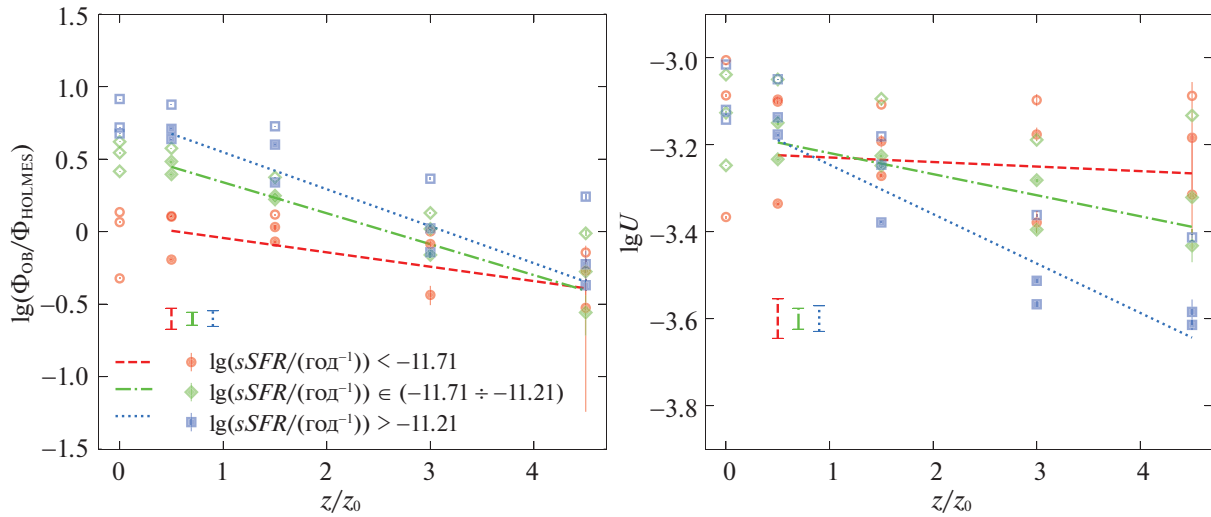


Рис. 9. То же, что на рис. 7, но для разбиения галактик по различным удельным темпам звездообразования sSFR.

низких, чем солнечных, что характерно для областей, расположенных высоко над диском галактики. Напомним, что, к сожалению, для представленных в базе данных 3MdB-s моделей с металличностями, характерными для Малого и Большого Магеллановых Облаков (т.е. меньшими, чем в окрестностях Солнца), минимальная концентрация частиц составляет $n = 1 \text{ см}^{-3}$, что на порядок превышает характерное для диффузной ионизованной среды значение. Для решения данной проблемы мы рассматриваем направление тренда ударных моделей при уменьшении металличности газа для случая $n = 1 \text{ см}^{-3}$ (предполагая, что поведение ударных моделей меньших плотностей будет аналогичным) в следующем порядке: (1) удвоенное по сравнению с солнечным обилие тяжелых элементов, (2) обилие элементов, характерное для Солнца, (3) субсолнечное обилие элементов, характерное для Большого Магелланова Облака, (4) субсолнечное обилие элементов, характерное для Малого Магелланова Облака. Построения показывают, что с уменьшением металличности сетки моделей сдвигаются в направлении справа налево почти параллельно горизонтальным осям рассматриваемых ВРТ-диаграмм. В таком случае, если данный тренд сохранится и для меньших значений концентрации, то изменение положения сеток ударных моделей на рис. 3–5 для среды с меньшей металличностью не повлияет на последующие выводы, так как качественная картина расположения различных областей галактик относительно теоретических моделей останется прежней.

В таком случае в целом мы наблюдаем согласие поведения диффузного ионизованного газа с ожидаемым поведением для качественной модели

ионизации двумя типами источников, в которой и горячие ОБ-звезды, и HOLMES вносят свой вклад в ионизацию. При этом только горячие звезды не могут объяснить всю наблюдаемую картину, поэтому привлечение HOLMES является необходимою. Тем не менее стоит отметить систематическое стремление областей на больших высотах (особенно для $z > 4.5 z_0$) у галактик с высокими или промежуточными M_s (рис. 3), а также с высокими или низкими $L_{\text{H}\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ (рис. 4) и с промежуточными или (что наиболее характерно) низкими sSFR (рис. 5) к участкам на ВРТ-диаграммах, где фотоионизационные модели перекрываются с моделями ударной ионизации. Такое поведение может свидетельствовать о вкладе и ударных волн в ионизацию диффузного газа на больших высотах в галактиках таких типов.

Напомним, что предположение только о двух источниках ионизации диффузного газа (ОБ-звезды и HOLMES) и создание в базе данных 3MdB-p фотоионизационных моделей “DIG_HR” основаны на исследовании Флореса-Фахардо и др. (2011), в рамках которого изучалась галактика NGC 891 на высотах вплоть до 4 кпк. Если бы NGC 891 рассматривалась в нашей работе среди прочих галактик выборки и в том же диапазоне высот, то ее положение, согласно Караченцеву и др. (2013), Рэнду и др. (1990), Шоу и Гилмору (1989), соответствовало бы бину с наибольшими значениями M_s , бину с наибольшими значениями $L_{\text{H}\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ и бину с промежуточными значениями sSFR, а высоты покрывались бы вплоть до $(3 \div 4) z_0$. Для сравнения, положение Млечного Пути, согласно Макмиллану (2017), Ликий и Ньюману (2015), Робитайю и Уитни (2010),

также соответствовало бы бину с наибольшими значениями M_s , бину с наибольшими значениями $L_{H\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ и бину с промежуточными значениями sSFR. Предположение Флореса-Фахардо и др. (2011) о том, что различные по высоте области NGC 891 охватываются на BPT-диаграммах только фотоионизационными моделями, не противоречит рис. 3–5. Соответственно, предположение о механизмах ионизации диффузного газа OB-звездами и HOLMES, основанное на исследовании единственной галактики NGC 891, оказывается верным для большинства галактик и для большого диапазона высот, но не учитывает возможного вклада ударной ионизации, проявляющего себя, во-первых, при наибольшем удалении от плоскости галактики и, во-вторых, при переходе к галактикам с большой звездной массой или к галактикам с низкими удельными темпами звездообразования. В дальнейшем обсуждении мы опускаем возможное влияние ударных волн и рассматриваем поведение DIG как результат действия только двух источников ионизации.

В общем случае (рис. 6) для галактик любого типа с увеличением высоты над плоскостью диска мы наблюдаем тенденцию к уменьшению потока излучения от OB-звезд и, соответственно, увеличение относительного вклада в ионизацию диффузного газа потока от HOLMES. При этом на малых галактических высотах поток от OB-звезд преобладает над потоком от HOLMES в 3–5 раз, а на больших высотах, напротив, поток от HOLMES преобладает в 2–3 раза над потоком от OB-звезд. Также с увеличением высоты мы наблюдаем тенденцию к уменьшению ионизационного параметра. С учетом разделения галактик на группы по различным интегральным параметрам, описанные выше тренды сохраняются для всех видов галактик (с точностью до численных значений).

В случае рассмотрения галактик с различными звездными массами M_s (рис. 3, 7) на любых галактических высотах с увеличением M_s мы наблюдаем уменьшение потока от OB-звезд. Для галактик с наименьшими M_s с увеличением высоты мы наблюдаем наиболее быстрый спад ионизационного параметра. На фиксированных больших высотах с увеличением M_s наблюдается рост ионизационного параметра.

В случае разделения галактик по различным светимостям $L_{H\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ (рис. 4, 8), на фиксированных малых галактических высотах с увеличением $L_{H\alpha-R_{\text{eff}}(r)}$ наблюдается рост потока от OB-звезд, хотя с ростом высоты данный тренд размывается.

В случае рассмотрения галактик с различными активностями звездообразования sSFR (рис. 5, 9) для разных бинов по sSFR мы наблюдаем наиболее явное различие между вкладами двух источников

в ионизацию газовой среды. На любых галактических высотах с увеличением sSFR наблюдается рост потока от OB-звезд. Более того, для галактик с большими sSFR почти на всех рассматриваемых галактических высотах поток от OB-звезд оказывается больше потока от HOLMES. Также для галактик с большими sSFR виден наиболее быстрый спад ионизационного параметра с высотой. В галактиках с низкими sSFR почти на всех рассматриваемых галактических высотах поток от OB-звезд оказывается меньше потока от HOLMES и мало меняется с высотой, как и ионизационный параметр.

Данная работа является логическим продолжением статьи Джонс и др. (2017). Выводы, сделанные в этой статье на основании анализа значительно меньшей выборки галактик, находятся в согласии с нашими. Так, мы отмечаем систематический рост интенсивности сильных запрещенных линий по отношению к бальмеровским линиям в газе с высотой над плоскостью галактик. Также мы подтверждаем догадку Джонс и др. о том, что свойства диффузного ионизованного газа варьируются в зависимости от интегральных свойств галактик, таких как звездная масса и удельный темп звездообразования.

Мы также отмечаем согласие наших выводов с работами Бельфиоре и др. (2016) и Жанга и др. (2017), где сделан вывод о важности HOLMES в процессе ионизации диффузной газовой среды. К сожалению, сравнить результаты этих работ с нашими затруднительно, так как выборка галактик, использованных Жангом и др. (2017), позволяет исследовать преимущественно газ на низких галактических высотах. Необходимость учета HOLMES для объяснения отношения интенсивности эмиссионных линий в ионизованном газе является существенным дополнением к предположению об OB-звездах как о единственном основном источнике ионизации газа в большинстве галактик, сделанному в обзоре Хаффнера и др. (2009).

Многообещающие выводы были сделаны Ласердой и др. (2018) на основании исследований DIG в галактиках, панорамная спектроскопия которых получена в ходе обзора CALIFA. Авторы данной работы предложили использовать эквивалентную ширину линии $H\alpha$ в качестве индикатора режима ионизации газа и отличия DIG от HII областей. Скромная выборка галактик с ребра, показанных в работе, свидетельствует о том, что газ вне плоскости галактик также находится в режиме DIG. Заметим, что в подходе, используемом в нашей работе, получение надежных оценок эквивалентных ширин затруднено. В отличие от потока в линии $H\alpha$, который надежно измеряется в наших сложных спектрах даже на больших высотах, уровень звездного континуума не прослеживается

столь же уверенно. Поэтому мы оставляем прямое сравнение с нашими результатами до следующей работы.

В конце мы хотели бы указать на ограничения нашего подхода к исследованию состояния газа и источников его ионизации на больших галактических высотах. Процедура сложения спектров позволяет существенно увеличить расстояние, до которого прослеживается eDIG. Однако в сложении участвуют достаточно разнородные галактики. Ограниченное пространственное разрешение MaNGA, как, впрочем, и большинства современных инструментов, использующихся для панорамной спектроскопии галактик, не позволяет разрешить eDIG на уровне размеров возможных областей III. Поэтому мы экстраполируем наше представление о более-менее гладком пространственном распределении плотности в газе на больших галактических высотах, полученное из изучения нашей Галактики. Заметим, что мы не разделяем галактики по возможным преобладающим механизмам ионизации газа, например, по наличию признаков активного ядра. Также мы не рассматриваем дополнительное радиальное разбиение галактик на бины, что помогло бы исследовать, может ли мощный центральный источник быть одной из причин ионизации газа. Мы также указываем на неоптимальное использование эффективного радиуса галактик для определения вертикальной шкалы галактических дисков. В этом случае мы могли бы использовать результаты фотометрической декомпозиции для определения структурных параметров дисков и балджей, что позволило бы уменьшить неопределенности, связанные с использованием галактик с большими балджами. Однако в данной работе мы предпочли тот же метод определения вертикальной шкалы галактик, что и Джонс и др. (2017), для более прямого сравнения результатов между работами. Перечисленные возможные пути улучшения анализа eDIG мы выносим за рамки данной статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Представленная работа посвящена изучению механизмов ионизации диффузного газа на различных высотах в галактиках различных типов. Ключевая особенность данного исследования заключается в том, что благодаря одному из последних релизов DR16 обзора MaNGA мы смогли использовать крупную выборку из 239 галактик, наблюдаемых с ребра, что позволило извлечь из данных интенсивности различных эмиссионных линий даже на больших высотах с помощью процедуры сложения спектров.

Мы сравнили полученные интенсивности в линиях эмиссионного спектра газа с результатами моделирования, взятыми из базы данных 3MdB, для случаев фотоионизации OB-звездами и HOLMES, а также для случая ионизации ударными волнами. Сравнение производилось с помощью трех классических BPT-диаграмм.

Выявлено, что качественная модель ионизации двумя типами источников: горячими OB-звездами и HOLMES, — адекватно описывает наблюдаемое поведение диффузного ионизованного газа. Тем не менее ударные волны могут потребоваться для лучшего объяснения поведения диффузного ионизованного газа на больших высотах (особенно для $z > 4.5 z_0$) в галактиках с высокими или промежуточными звездными массами, а также с высокими или низкими светимостями в $H\alpha$ и с промежуточными или (что наиболее характерно) низкими удельными темпами звездообразования. Источником ударных волн может служить взаимодействие галактического газа с околосгалактической средой (см., например, Славин и др., 1993), что также может влиять на кинематику газа на больших галактических высотах (Бизяев и др., 2022).

Для галактик всех исследуемых типов мы произвели интерполяцию данных к фотоионизационным сеткам для исследования изменения с высотой потока от OB-звезд и ионизационного параметра и выявили следующие характерные тренды.

- Для галактик любого типа (рис. 6) с увеличением высоты над плоскостью диска наблюдаются уменьшение потока излучения от OB-звезд и увеличение относительного вклада в ионизацию газа потока от HOLMES, а также уменьшение ионизационного параметра.
- На любых галактических высотах с увеличением звездной массы (рис. 3, 7) видны спад потока от OB-звезд и рост относительного вклада потока от HOLMES. Также с увеличением звездной массы галактики видно уменьшение скорости спада ионизационного параметра с высотой. На фиксированных больших галактических высотах с увеличением звездной массы наблюдается рост ионизационного параметра.
- На фиксированных малых галактических высотах с увеличением светимости в $H\alpha$ галактики (рис. 4, 8) наблюдаются рост потока от OB-звезд и спад относительного вклада потока от HOLMES, с ростом высоты данный тренд размывается.

- Наибольшая по сравнению с предыдущими случаями разница вклада рассматриваемых источников в ионизацию газовой среды отмечается для галактик с различными удельными темпами звездообразования (рис. 5, 9). С увеличением активности звездообразования видны рост потока от ОБ-звезд и спад относительного вклада потока от HOLMES, а также увеличение скорости спада ионизационного параметра с высотой. Более того, для галактик с активным звездообразованием почти на всех рассматриваемых галактических высотах поток от ОБ-звезд больше потока от HOLMES, а в галактиках с пассивным звездообразованием — наоборот, меньше и мало меняется с высотой, как и ионизационный параметр.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 22-12-00080). Информация о гранте доступна по адресу: rscf.ru/project/22-12-00080/.

Авторы также благодарят анонимного рецензента за конструктивные замечания, улучшившие данную работу.

В настоящей работе используются данные проекта SDSS-IV MaNGA, доступные по адресу: www.sdss.org/dr16/data_access/. Финансирование SDSS-IV предоставлено Фондом Альфреда П. Слоана, Управлением науки Министерства энергетики США и учреждениями-участниками коллаборации. SDSS признателен за поддержку и ресурсы Центру высокопроизводительных вычислений Университета Юты. Веб-сайт SDSS: www.sdss4.org.

SDSS-IV управляется Консорциумом астрофизических исследований учреждений — участников коллаборации SDSS, включающую Бразильскую группу, Научный институт Карнеги, Университет Карнеги-Меллона, Чилийскую группу, Французскую группу, Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, Канарский институт астрофизики, Университет Джона Хопкинса, Институт физики и математики Вселенной им. Кавли (IPMU)/Токийский университет, Корейскую группу, Национальную лабораторию Лоуренса в Беркли, Потсдамский институт астрофизики им. Лейбница (AIP), Институт астрономии Макса Планка (MPIA Heidelberg), Институт астрофизики Макса Планка (MPA Garching), Институт внеземной физики Макса Планка (MPE), Национальные астрономические обсерватории Китая, Государственный университет Нью-Мексико,

Нью-Йоркский университет, Университет Нотр-Дам, Национальную Обсерваторию/МСТИ, Университет штата Огайо, Университет штата Пенсильвания, Шанхайскую астрономическую обсерваторию, Группу Соединенного Королевства, Национальный автономный университет Мексики, Университет Аризоны, Университет Колорадо в Боулдере, Оксфордский университет, Портсмутский университет, Университет Юты, Университет Вирджинии, Вашингтонский университет, Университет Висконсина, Университет Вандербильта и Йельский университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алари, Мориссет (A. Alarie and C. Morisset), *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* **55**, 377 (2019).
2. Аллен и др. (M.G. Allen, B.A. Groves, M.A. Dopita, R.S. Sutherland, and L.J. Kewley), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **178**, 20 (2008).
3. Ахумада и др. (R. Ahumada, C. Allende Prieto, A. Almeida, F. Anders, S.F. Anderson, B.H. Andrews, B. Anguiano, R. Arcodia, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **249**, 3 (2020).
4. Банди и др. (K. Bundy, M.A. Bershady, D.R. Law, R. Yan, N. Drory, N. MacDonald, D.A. Wake, B. Cherinka, et al.), *Astrophys. J.* **798**, 7 (2015).
5. Бельфиоре и др. (F. Belfiore, R. Maiolino, C. Maraston, E. Emsellem, M.A. Bershady, K.L. Masters, R. Yan, D. Bizyaev, et al.), *MNRAS* **461**, 3111 (2016).
6. Бизяев, Кайсин (D. Bizyaev and S. Kajsin), *Astrophys. J.* **613**, 886 (2004).
7. Бизяев и др. (D.V. Bizyaev, S.J. Kautsch, A.V. Mosenkov, V.P. Reshetnikov, N.Ya. Sotnikova, N.V. Yablokova, and R.W. Hillyer), *Astrophys. J.* **787**, 24 (2014).
8. Бизяев и др. (D. Bizyaev, R.A.M. Walterbos, P. Yoachim, R.A. Riffel, J.G. Fernández-Trincado, K. Pan, A.M. Diamond-Stanic, A. Jones, et al.), *Astrophys. J.* **839**, 87 (2017).
9. Бизяев и др. (D. Bizyaev, R.A.M. Walterbos, Y.-M. Chen, N. Drory, R.R. Lane, J.R. Brownstein, and R.A. Riffel), *MNRAS* **515**, 1598 (2022).
10. Бинетт и др. (L. Binette, M.A. Dopita, and I.R. Tuohy), *Astrophys. J.* **297**, 476 (1985).
11. Блантон и др. (M.R. Blanton, M.A. Bershady, B. Abolfathi, F.D. Albareti, C. Allende Prieto, A. Almeida, J. Alonso-García, F. Anders, et al.), *Astron. J.* **154**, 28 (2017).
12. Болдуин и др. (J.A. Baldwin, M.M. Phillips, and R. Terlevich), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
13. Вейю, Остерброк (S. Veilleux and D.E. Osterbrock), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **63**, 295 (1987).
14. Ганн и др. (J.E. Gunn, W.A. Siegmund, E.J. Mannery, R.E. Owen, C.L. Hull, R.F. Leger, L.N. Carey, G.R. Knapp, et al.), *Astron. J.* **131**, 2332 (2006).
15. Деттмар (R.-J. Dettmar), *Astron. Astrophys.* **232**, L15 (1990).

16. Джонс и др. (A. Jones, G. Kauffmann, R. D'Souza, D. Bizyaev, D. Law, L. Haffner, Y. Bahé, B. Andrews, et al.), *Astron. Astrophys.* **599**, A141 (2017).
17. Допита и др. (M.A. Dopita, L.J. Kewley, C.A. Heisler, and R.S. Sutherland), *Astrophys. J.* **542**, 224 (2000).
18. Допита и др. (M.A. Dopita, L.J. Kewley, R.S. Sutherland, C.A. Heisler, and D.C. Nicholls), *Astrophys. Space Sci.* **361**, 61 (2016).
19. Дрори и др. (N. Drory, N. MacDonald, M.A. Bershady, K. Bundy, J. Gunn, D.R. Law, M. Smith, R. Stoll, et al.), *Astron. J.* **149**, 77 (2015).
20. Жанг и др. (K. Zhang, R. Yan, K. Bundy, M. Bershady, L.M. Haffner, R. Walterbos, R. Maiolino, et al.), *MNRAS* **466**, 3217 (2017).
21. Йорк и др. (D.G. York, J. Adelman, J.E. Anderson, S.F. Anderson, J. Annis, N.A. Bahcall, J.A. Bakken, R. Barkhouser, et al.), *Astron. J.* **120**, 1579 (2000).
22. Каппеллари (M. Cappellari), *MNRAS* **466**, 798 (2017).
23. Каппеллари, Эмселлем (M. Cappellari and E. Emsellem), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **116**, 138 (2004).
24. Караченцев и др. (I.D. Karachentsev, D.I. Makarov, and E.I. Kaisina), *Astron. J.* **145**, 101 (2013).
25. Кауффманн и др. (G. Kauffmann, T.M. Heckman, C. Tremonti, J. Brinchmann, S. Charlot, S.D.M. White, S.E. Ridgway, J. Brinkmann, et al.), *MNRAS* **346**, 1055 (2003).
26. Кенникутт, Эванс (R.C. Kennicutt and N.J. Evans), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **50**, 531 (2012).
27. Коллинз, Рэнд (J.A. Collins and R.J. Rand), *Gas and Galaxy Evolution*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Proceed.* **240** (Ed. J.E. Hibbard, M. Rupen, and J.H. van Gorkom, San Francisco: Astron. Soc. Pacific, 2001), p. 392.
28. Курти и др. (M. Curti, G. Cresci, F. Mannucci, A. Marconi, R. Maiolino, and S. Esposito), *MNRAS* **465**, 1384 (2017).
29. Кьюли и др. (L.J. Kewley, M.A. Dopita, R.S. Sutherland, C.A. Heisler, and J. Trevena), *Astrophys. J.* **556**, 121 (2001).
30. Кьюли и др. (L.J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, and T. Heckman), *MNRAS* **372**, 961 (2006).
31. Ласерда и др. (E.A.D. Lacerda, R. Cid Fernandes, G.S. Couto, G. Stasińska, R. García-Benito, N. Vale Asari, E. Pérez, R.M. González Delgado, et al.), *MNRAS* **474**, 3727 (2018).
32. Леви и др. (R.C. Levy, A.D. Bolatto, S.F. Sánchez, L. Blitz, D. Colombo, V. Kalinova, C. López-Cobá, E.C. Ostriker, et al.), *Astrophys. J.* **882**, 84 (2019).
33. Ликия, Ньюман (T.C. Licquia and J.A. Newman), *Astrophys. J.* **806**, 96 (2015).
34. Лоу и др. (D.R. Law, R. Yan, M.A. Bershady, K. Bundy, B. Cherinka, N. Drory, N. MacDonald, J.R. Sánchez-Gallego, et al.), *Astron. J.* **150**, 19 (2015).
35. Лоу и др. (D.R. Law, B. Cherinka, R. Yan, B.H. Andrews, M.A. Bershady, D. Bizyaev, G.A. Blanc, M.R. Blanton, et al.), *Astron. J.* **152**, 83 (2016).
36. Лоу и др. (D.R. Law, X. Ji, F. Belli, M.A. Bershady, M. Cappellari, K.B. Westfall, R. Yan, D. Bizyaev, et al.), *Astrophys. J.* **915**, 35 (2021).
37. Макмиллан (P.J. McMillan), *MNRAS* **465**, 76 (2017).
38. Мараско и др. (A. Marasco, F. Fraternali, and G. Heald), *Astron. Astrophys.* **631**, 50 (2019).
39. Мастерс и др. (D. Masters, A. Faisst, and P. Capak), *Astrophys. J.* **828**, 18 (2016).
40. Мёрфи и др. (E.J. Murphy, J.J. Condon, E. Schinnerer, R.C. Kennicutt, D. Calzetti, L. Armus, G. Helou, J.L. Turner, et al.), *Astrophys. J.* **737**, 67 (2011).
41. Моисеев и др. (A.V. Moiseev, K.I. Smirnova, A.A. Smirnova, and V.P. Reshetnikov) *MNRAS* **418**, 244 (2011).
42. Мориссет и др. (C. Morisset, G. Delgado-Inglada, and N. Flores-Fajardo), *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* **51**, 103 (2015).
43. Мосенков и др. (A.V. Mosenkov, N.Ya. Sotnikova, V.P. Reshetnikov, D.V. Bizyaev, and S.J. Kautsch), *MNRAS* **451**, 2376 (2015).
44. Перес-Монтеро, Контини (E. Pérez-Montero and T. Contini), *MNRAS* **398**, 949 (2009).
45. Рейнольдс и др. (R.J. Reynolds, F. Scherb, and F.L. Roesler), *Astrophys. J.* **185**, 869 (1973).
46. Рейнольдс (R.J. Reynolds), *The Interstellar Disk-Halo Connection in Galaxies*, *IAU Symp.* **144** (Ed. H. Bloemen, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1991), p. 67.
47. Робитай, Уитни (T.P. Robitaille and B.A. Whitney), *Astrophys. J.* **710**, L11 (2010).
48. Рэнд (R.J. Rand), *Astrophys. J.* **537**, L13 (2000).
49. Рэнд и др. (R.J. Rand, S.R. Kulkarni, and J.J. Hester), *Astrophys. J.* **352**, L1 (1990).
50. Сазерленд и др. (R. Sutherland, M. Dopita, L. Binette, and B. Groves), "MAPPINGS V: Astrophysical plasma modeling code", *Astrophysics Source Code Library ascl:1807.005* (2018).
51. Свотерс и др. (R.A. Swaters, R. Sancisi, and J.M. van der Hulst), *Astrophys. J.* **491**, 140 (1997).
52. Славин и др. (J.D. Slavin, J.M. Shull, and M.C. Begelman) *Astrophys. J.* **407**, 83 (1993).
53. Сми и др. (S.A. Smee, J.E. Gunn, A. Uomoto, N. Roe, D. Schlegel, C.M. Rockosi, M.A. Carr, F. Leger, et al.), *Astron. J.* **146**, 32 (2013).
54. Тремонтти и др. (C.A. Tremonti, T.M. Heckman, G. Kauffmann, J. Brinchmann, S. Charlot, S.D.M. White, M. Seibert, E.W. Peng, et al.), *Astrophys. J.* **613**, 898 (2004).
55. Уэйк и др. (D.A. Wake, K. Bundy, A.M. Diamond-Stanic, R. Yan, M.R. Blanton, M.A. Bershady, J.R. Sánchez-Gallego, N. Drory, et al.), *Astron. J.* **154**, 86 (2017).
56. Уэстфолл и др. (K.B. Westfall, M. Cappellari, M.A. Bershady, K. Bundy, F. Belli, X. Ji, D.R. Law, A. Schaefer, et al.), *Astron. J.* **158**, 231 (2019).
57. Ферланд и др. (G.J. Ferland, K.T. Korista, D.A. Verner, J.W. Ferguson, J.B. Kingdon, and E.M. Verner), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 761 (1998).

58. Ферланд и др. (G.J. Ferland, R.L. Porter, P.A.M. van Hoof, R.J.R. Williams, N.P. Abel, M.L. Lykins, G. Shaw, W.J. Henney, and P.C. Stancil), *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* **49**, 137 (2013).
59. Флорес-Фахардо и др. (N. Flores-Fajardo, C. Morisset, G. Stasińska, and L. Binette), *MNRAS* **415**, 2182 (2011).
60. Хао и др. (C.-N. Hao, R.C. Kennicutt, B.D. Johnson, D. Calzetti, D.A. Dale, and J. Moustakas), *Astrophys. J.* **741**, 124 (2011).
61. Хаффнер и др. (L.M. Haffner, R.-J. Dettmar, J.E. Beckman, K. Wood, J.D. Slavin, C. Giammanco, G.J. Madsen, A. Zurita, and R.J. Reynolds), *Rev. Modern Phys.* **81**, 969 (2009).
62. Хойл, Эллис (F. Hoyle and G.R. Ellis), *Aust. J. Phys.* **16**, 1 (1963).
63. Шоу, Гилмор (M.A. Shaw and G. Gilmore), *MNRAS* **237**, 903 (1989).
64. Эндрюс, Мартини (B.H. Andrews and P. Martini), *Astrophys. J.* **765**, 140 (2013).
65. Ян и др. (R. Yan, K. Bundy, D.R. Law, M.A. Bershady, B. Andrews, B. Cherinka, A.M. Diamond-Stanic, N. Drory, et al.), *Astron. J.* **152**, 197 (2016).
66. Ян и др. (R. Yan, C. Tremonti, M.A. Bershady, D.R. Law, D.J. Schlegel, K. Bundy, N. Drory, N. MacDonald, et al.), *Astron. J.* **151**, 8 (2016).