

УДК 524.5; 524.7-32/52

## ДИАГНОСТИКА ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА В ГАЛАКТИКАХ С ПОМОЩЬЮ СООТНОШЕНИЯ «ВРТ–ДИСПЕРСИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ»

© 2018 Д. В. Опарин<sup>1\*</sup>, А. В. Моисеев<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, 117997 Россия

Поступила в редакцию 30 марта 2018 года; принята в печать 28 июня 2018 года

Для изучения состояния газа в галактиках применяются диаграммы отношения потоков оптических эмиссионных линий, позволяющие разделить основные источники ионизации: молодые звезды в областях H II, активные галактические ядра, ударные волны. В промежуточных случаях, например, при смешении вкладов от излучения OB-звезд и ударных волн, возникает неопределенность в отождествлении, и вопрос о том, чем обусловлено наблюдаемое состояние диффузного ионизованного газа (DIG), в том числе на больших расстояниях от галактической плоскости, остается открытым. Помощь в решении дает добавление в классические диагностические диаграммы дополнительного параметра — дисперсии скоростей газа по лучу зрения. В данной работе мы анализируем наблюдательные данные для нескольких близких галактик: для UGC 10043 с галактическим ветром, для карликовых галактик с текущим звездообразованием VII Zw 403 и Mrk 35, для галактики с полярным кольцом Agr 212. Данные о дисперсии скоростей получены из наблюдений на 6-м телескопе САО РАН со сканирующим интерферометром Фабри–Перо, информация об отношении потоков основных эмиссионных линий взята из опубликованных результатов интегрально-полевой спектроскопии (обзор CALIFA и спектрограф MPFS). Мы показали, что наблюдается положительная корреляция между дисперсией лучевых скоростей и вкладом ударного возбуждения в ионизацию газа. В частности, при изучении Agr 212 наш подход позволил подтвердить предположение о прямом столкновении газовых облаков на наклонных орбитах с основным диском галактики.

Ключевые слова: галактики: межзвездная среда — галактики: кинематика и динамика — галактики: звездообразование

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Диаграммы отношения потоков оптических эмиссионных линий широко применяются для диагностики источников ионизации газа в галактиках. В классической работе Baldwin, Phillips и Terlevich [1] для разделения объектов с разными источниками ионизации была предложена двумерная диаграмма отношения потоков линий [O III]λ5007/Hβ и [N II]λ6583/Hα. Метод стал популярным благодаря использованию измерений ярких в оптическом диапазоне линий, близких по длинам волн, и, следовательно, со слабой зависимостью отношения их интенсивностей от межзвездного поглощения. Позже этот метод был расширен добавлением в качестве второго параметра отношений [S II]/Hα<sup>1</sup> и [O I]/Hα [2, 3]. Все перечисленные диаграммы часто в литературе

кратко называют в честь первых авторов метода «ВРТ-диаграммы.» С их помощью можно разделять области, где наибольший вклад в ионизацию газа вносят молодые массивные звёзды (далее — тип H II), и области доминирования жесткого ионизирующего излучения активного галактического ядра (AGN). В то же время на диаграммах смешиваются области, ионизованные ударными волнами, излучением звезд асимптотической ветви гигантов или ядер галактик типа LINER<sup>2</sup>. Были предложены различные варианты демаркационных линий [4, 5], но однозначно разделить вклад

<sup>1</sup>Здесь и далее для краткости, как это часто делается, мы будем обозначать поток в [O I]λ6300 как [O I], [O III]λ5007 как [O III], [N II]λ6583 как [N II] и [S II]λ6717+[S II]λ6731 как [S II].

<sup>2</sup>Low-Ionization Narrow Emission-line Region, ударная ионизация газа в которых может быть связана как со вспышкой звездообразования, так и со слабой активностью ядра

\*E-mail: doparin2@gmail.com

\*\*E-mail: moisav@gmail.com

ионизирующих источников с мягким спектром часто оказывается проблематично.

Добавление к классическим диагностическим диаграммам ещё одного параметра — дисперсии скоростей ионизованного газа по лучу зрения ( $\sigma$ ) — даёт возможность избавиться от неопределённости в тех случаях, когда рост  $\sigma$  указывает на увеличение турбулентных скоростей газа за фронтом ударной волны. Однако для уверенных оценок  $\sigma$  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  $\sigma$  рассматривалась лишь изредка и в основном для объектов с  $\sigma > 100\text{--}200 \text{ км с}^{-1}$ , таких, как галактики с мощным звездообразованием [4, 5]. 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.

В настоящее время идет продолжительная дискуссия об источниках ионизации этого диффузного газа (diffuse ionized gas, DIG) в галактиках, роль которых отводится старому звездному населению, утечке Лайман-квантов из областей H II, а также, возможно, ударным фронтам, вызванным процессами звездообразования [6, 7]. Наиболее эффективны при изучении протяжённых структур низкой яркости в галактиках методы панорамной, называемой также интегрально-полевой, или 3D, спектроскопии. Так, в недавней работе [8], 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 в разделе 6.2 цитируемой статьи отмечалось, что причиной наблюдаемого увеличения отношения потоков запрещенных и бальмеровских линий могут быть и ударные волны. Проверить это сложно, так как спектральное разрешение обзора MaNGA примерно в два раза ниже, чем требуется для того, чтобы увидеть эффекты умеренных ударных волн (со скоростью менее  $500 \text{ км с}^{-1}$ ) в наблюдаемой кинематике ионизованного газа. К сожалению, большинство имеющихся наблюдательных данных по спектрофотометрии и кинематике газа близких галактик получено со спектральным разрешением  $FWHM > 5 \text{ \AA}$ , что соответствует величинам более  $100 \text{ км с}^{-1}$  в терминах дисперсии лучевых скоростей или более  $230 \text{ км с}^{-1}$  в терминах  $FWHM$  в линии H $\alpha$ . Наблюдения с таким разрешением являются вынужденным компромиссом при изучении объектов низкой поверхностной яркости.

В обзоре галактик методом 3D-спектроскопии SAMI [5] на 3.9-м Англо-Австралийском телескопе построены диаграммы «отношение потоков линий—дисперсия скоростей» для галактик с активным звездообразованием. Была отмечена положительная корреляция  $\sigma$  ионизованного газа с характерными отношениями потоков эмиссионных линий, которая интерпретировалась как увеличение вклада ударных волн со скоростями около  $200\text{--}300 \text{ км с}^{-1}$ , сопровождающих вспышку звездообразования. Спектральное разрешение обзора SAMI выше, чем в MaNGA, и составляет  $R \approx 4500$ .

Существенным ограничением этих двух наиболее массовых на сегодняшний день обзоров галактик методом 3D-спектроскопии является довольно низкое пространственное разрешение (более 1 кпк). Это связано с тем, что поле зрения отдельных блоков IFU (integral field unit) невелико и составляет примерно  $15''$  в SAMI [9] и  $12''\text{--}32''$  в SDSS MaNGA [10]. В этих обзорах исследуются относительно далекие ( $z > 0.01$ ) галактики. В то же время наибольший вклад в движение межзвездной среды вследствие 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 при усреднении на масштабах в килопарсек и выше существенно «замываются.» Примеры уменьшения максимальной дисперсии скоростей ионизованного газа в карликовых галактиках при ухудшении пространственного разрешения приводятся в работе [11]. В статье [12] этот же эффект рассмотрен для результатов моделирования множественных вспышек сверхновых. Поэтому для наблюдательного изучения соотношения между состоянием ионизации газа и дисперсией его лучевых скоростей в галактиках без активного ядра и с умеренным темпом звездообразования требуются данные панорамной спектроскопии одновременно с достаточно высоким спектральным и пространственным разрешением.

В данной работе мы рассматриваем это соотношение для нескольких близких галактик, используя комбинацию двух спектральных техник с близким пространственным разрешением и достаточно большим полем зрения. Данные 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.

Чтобы показать связь между дисперсией скоростей и отношениями потоков эмиссионных ли-

ний, характеризующих состояние ионизации, в ходе работы мы используем различные способы: выделение цветом на ВРТ-диаграммах, графики « $\sigma$ —отношение потоков линий,» « $\sigma$ —расстояние от демаркационной линии HII/AGN.» В качестве общего названия рассматриваемых зависимостей мы используем термин «соотношение ВРТ— $\sigma$ .» 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  $\sigma$ . Более привычные двумерные графики, приводимые в нашей статье и в цитируемых выше работах, являются проекцией общего соотношения ВРТ— $\sigma$  на выбранную плоскость.

## 2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

### 2.1. Выборка галактик

Рассматриваемые в настоящей работе галактики входят в выборку объектов с данными о состоянии ионизованного газа, полученными двумя методами 3D-спектроскопии. При формировании выборки мы составили список близких галактики, 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]. Всего это около 60 объектов, наблюдавшихся в 2002–2015 гг., большая часть которых представлена в статье [13]. Для каждой из галактик списка мы проверили наличие в открытых источниках кубов, полученных методом интегрально-полевой спектроскопии. Для трех галактик: Agr 212, Mrk 35 и UGC 10043 такие данные были получены в рамках обзора CALIFA (the Calar-Alto Legacy Integral Field Area [14]). Использовался третий релиз данных CALIFA, спектры доступны на сайте проекта<sup>3</sup>. Отметим, что UGC 10043 наблюдалась на 6-м телескопе специально по заявке команды CALIFA. Результаты были представлены в нашей совместной статье [15] и во многом послужили стимулом для дальнейшего изучения соотношения ВРТ— $\sigma$ . 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 и представленный в работе [16].

В таблице 1 приведена краткая информация об изучаемых объектах (принятое расстояние  $D$  и

абсолютная звездная величина  $M_B$  на основе базы NED) и об используемых данных (наблюдательная аппаратура,  $\Delta\lambda$  — спектральный диапазон или выбранная линия,  $\delta\lambda$  — спектральное разрешение в терминах  $FWHM$ ,  $\theta''$  — угловое разрешение). На рис. 1 приведены изображения исследуемых галактик в фильтре  $r$  и в эмиссионной линии, а также поля дисперсии скоростей  $\sigma$  ионизованного газа, построенные по данным наблюдений со сканирующим ИФП. Здесь же показано поле зрения используемых спектрографов.

### 2.2. Спектры низкого разрешения

Для UGC 10043, Mrk 35 и Agr 212 использовались данные обзора CALIFA, проводившегося на 3.5-м телескопе обсерватории Calar Alto в режиме интегрально-полевой спектроскопии широкого поля PPAK [17] спектрографа PMAS [18]. 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 (grating V500,  $R \sim 850$ ). Обработанные данные представлены в виде кубов, экстраполированных с гексагональной сетки на квадратную с размером пространственного элемента (spaxel) в 1''.

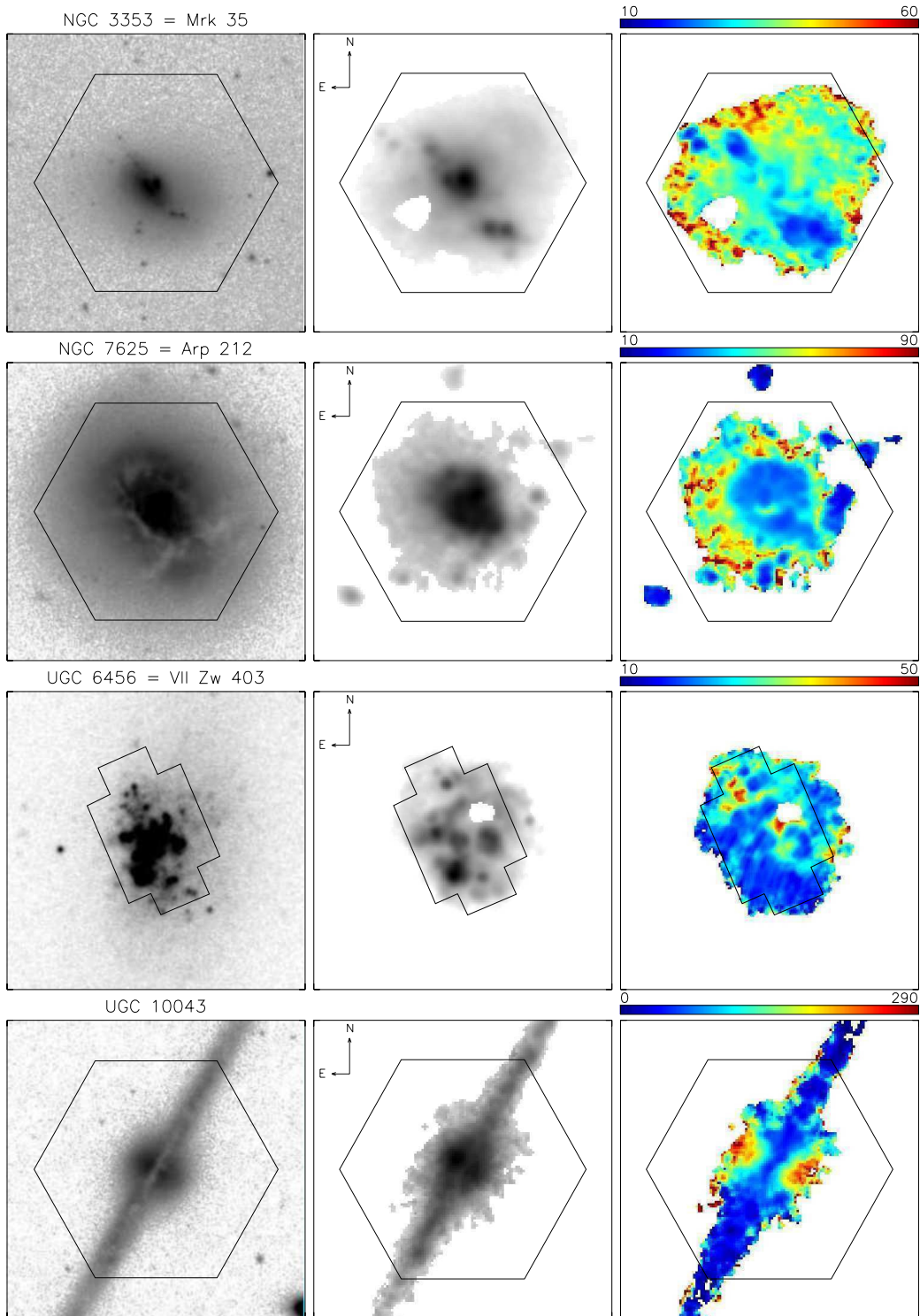
Галактика VII Zw 403 наблюдалась с мультизрачковым спектрографом MPFS [19] на БТА. Массив квадратных линз в сочетании со световолокнами обеспечивал поле зрения 16  $\times$  16 элементов с масштабом 1'' на линзу. Куб данных, представленный в работе [16], является мозаикой размером 49''  $\times$  31'' из семи полей MPFS. Спектральный диапазон составлял 4250–7200 Å, разрешение 8 Å.

Для анализа использовались кубы данных с биннингом (попиксельным суммированием) 2  $\times$  2 к масштабу 2'' на элемент (см. далее раздел 2.3). Аппроксимация линий в спектрах проводилась однокомпонентной функцией Гаусса. Отношения потоков линий измерялись только по спектрам, в которых для каждой эмиссионной линии отношение  $S/N > 2$ . Учитывался локальный уровень континуума вблизи каждой линии.

### 2.3. Кинематика ионизованного газа

Для построения карт дисперсии скоростей мы использовали данные архивных наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри—Перо, установленном в фокальных редуторах SCORPIO [20] и SCORPIO-2 [21] в первичном

<sup>3</sup><http://califa.caha.es/>



**Рис. 1.** Поля изучаемых галактик. Левый столбец — изображения в фильтре  $r$  обзора SDSS из [22], для UGC 6456 приведено изображение в фильтре  $R$  из [23]. Средний столбец — изображения в эмиссионной линии  $[N II]\lambda 6593$  (UGC 10043) или  $H\alpha$  (для остальных) по данным наблюдений с ИФП на БТА. Правый столбец — дисперсия скоростей ионизованного газа, шкала в  $\text{km s}^{-1}$ . Размер изображений  $90'' \times 90''$ . Показано расположение полей зрения интегральных полевых спектрографов: обзор CALIFA и мозаика MPFS (для UGC 6456). Поля дисперсии скоростей взяты из работ [13] и [15] (для UGC 10043) без исправления за тепловое уширение линий. (Цветная версия рисунков приводится в электронном варианте статьи).

**Таблица 1.** Характеристики изучаемых галактик и параметры их наблюдений различными методами

Галактика	$D$ , Мпк	$M_B$	Интегрально-полевая спектроскопия				Сканирующий ИФП		
			Прибор	$\Delta\lambda$ , Å	$\delta\lambda$ , Å	$\theta''$	$\Delta\lambda$	$\delta\lambda$ , Å	$\theta''$
UGC 10043	34.9	-17.6	РРАК	3750–7500	5–9	2.7	[N II]	1.7	1.5
VII Zw 403 (UGC 6456)	4.34	-13.87	MPFS	4250–7200	8	2.0	H $\alpha$	0.8	2.2
Mrk 35 (NGC 3353)	15.6	-17.75	РРАК	3750–7500	5–9	2.7	H $\alpha$	0.8	2.1
Argp 212 (NGC 7625)	23.5	-18.9	РРАК	3750–7500	5–9	2.7	H $\alpha$	0.8	2.7

фокусе 6-м телескопа БТА САО РАН. Эмиссионная линия (H $\alpha$  или [N II] $\lambda$ 6583) выделялась с помощью узкополосного фильтра шириной порядка 20 Å. UGC 10043 наблюдалась с интерферометром IFR186, обеспечивавшим спектральное разрешение  $FWHM = 1.7$  Å. При исследовании остальных галактик применялся IFR501 с разрешением  $FWHM = 0.8$  Å. В наблюдениях VII Zw 403 масштаб изображений составлял 0".56 px<sup>-1</sup> при поле зрения 4'.8, для остальных галактик соответственно 0".7 px<sup>-1</sup> 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 ранее (см. ссылки в разделе 3). Так как инструментальный контур интерферометра хорошо описывается профилем Лоренца, то наблюдаемые профили эмиссионных линий аппроксимировались функцией Фойгта — свёрткой профилей Гаусса и Лоренца [24]. Подразумевается, что исходный (без инструментального уширения) профиль эмиссионной линии удовлетворительно описывается одной гауссианой, что является хорошим приближением при наблюдениях областей H II, за исключением отдельных пекулярных случаев (расширяющиеся оболочки, окрестности звезд Вольфа–Райе и т.п. (см. [7, 11]). 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 [24].

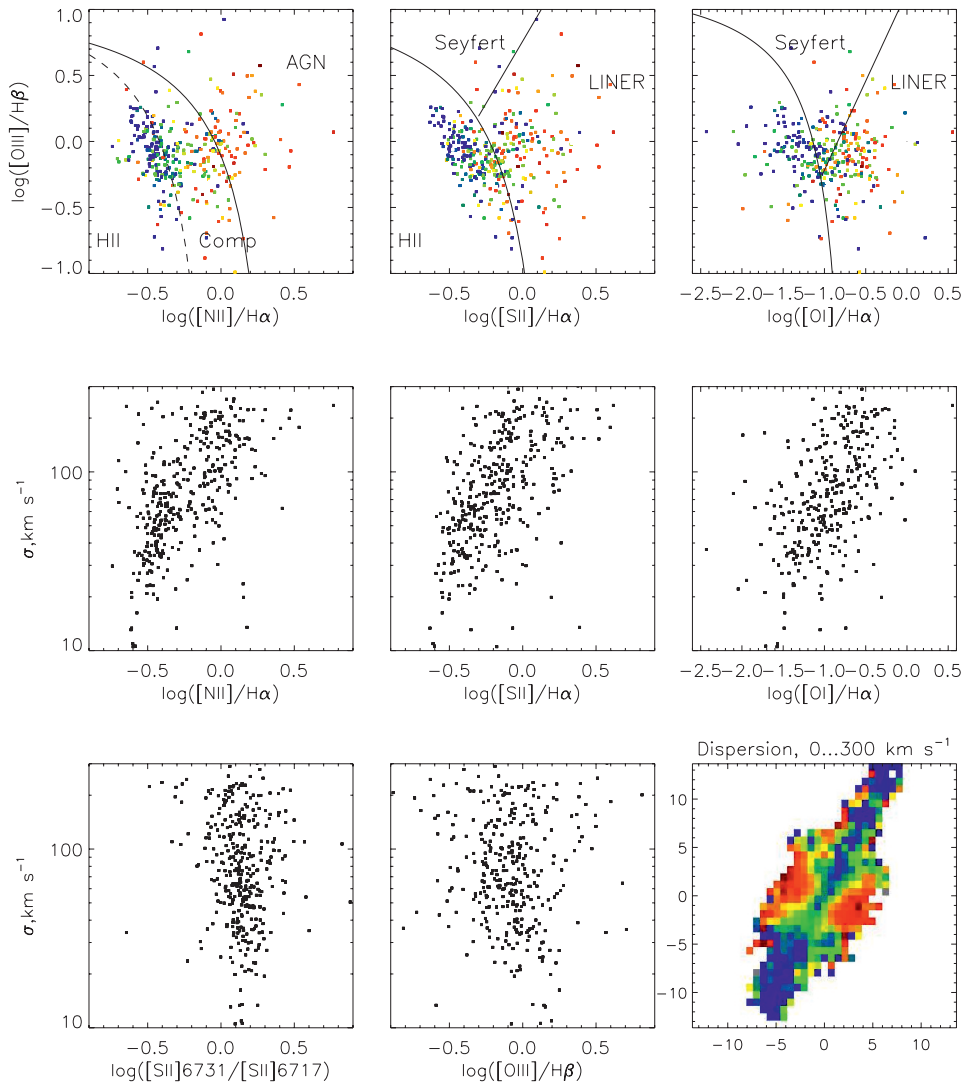
Карты  $\sigma$  на рис. 1 показаны с оригинальной дискретизацией изображений ИФП (0".6–0".7), которая несколько лучше, чем в используемых данных интегрально-полевой спектроскопии (1"/spaxel), при том, что само угловое разрешение  $\theta$  обоих наборов данных близко по значению (см. таблицу 1). Для 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 оптимального выделения эмиссионных линий в областях низкой поверхностной яркости мы выполнили попиксельное сложение (биннинг) 2 × 2 обоих совмещенных наборов данных. Эта процедура также уменьшила возможные ошибки от небольшого различия в угловом разрешении данных IFR и интегрально-полевой спектроскопии. Поэтому все представленные ниже измерения выполнены по кубам с размером элемента 2". После совмещения и биннинга в кубах ИФП мы выполняли процедуру построения карт  $\sigma$ . В следующем разделе приводятся эти карты, используемые для прямого попиксельного сравнения со спектрами низкого разрешения. Для выделения на картах  $\sigma$  точек с отношением  $S/N \geq 3$  применялось маскирование. Отметим, что, в отличие от работы [13], мы не исправляли карты дисперсии скоростей за тепловое уширение линий.

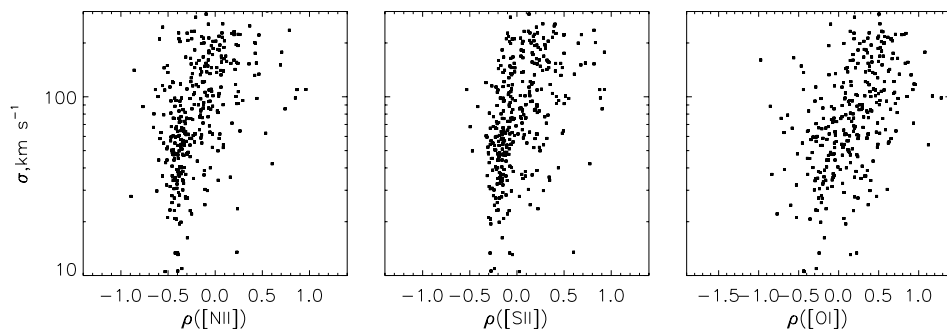
### 3. ДИАГРАММЫ VPT– $\sigma$

#### 3.1. Галактический ветер в UGC 10043

UGC 10043 — видимая с ребра спиральная галактика. Наблюдения в линиях H $\alpha$  и [N II], проведённые на HST [25], обнаружили признаки звездообразования в галактическом ядре, а также протяжённую эмиссионную структуру, которая перпендикулярна диску и является результатом воздействия галактического ветра. В работе [15] представлены диагностические диаграммы для центральной части галактики по данным обзора CALIFA. Часть точек на графике, относящихся к центральной области звездообразования, оказалась в области, характерной для фотоионизации молодыми звездами, в то время как другие попали в область, свойственную для ударного возбуждения. В рамках модели ударного возбуждения было наложено ограничение на скорость ветра — не более 400 км с<sup>-1</sup>. Анализ поля скоростей газа в линии [N II], построенного со сканирующим



**Рис. 2.** Верхний ряд: BPT-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 H II, объекты со смешанным (Comp) типом ионизации, активные сейфертовские галактики (Seyfert) и объекты типа LINER, взяты из работы [26]. Остальные графики — зависимость дисперсии скоростей от отношения потоков эмиссионных линий.



**Рис. 3.** UGC 10043. Зависимость  $\sigma$  от расстояния точки до демаркационной кривой на BPT-диаграмме, разделяющей H II-области и регионы с иными механизмами ионизации [3].

ИФП, позволил нам получить более жесткое ограничение на скорость галактического ветра — менее  $250 \text{ км с}^{-1}$  в согласии с моделью ударного возбуждения газа. В той же статье [15] было показано существование четкого соотношения  $\text{BPT}-\sigma$  в ветровой туманности UGC 10043.

На диагностических  $\text{BPT}$ -диаграммах, представленных на рис. 2 (верхний ряд), видно, что области с ударным возбуждением эмиссионных линий в ветровой туманности характеризуются более высокой дисперсией скоростей по сравнению с областями, где доминирует фотоионизация. При этом наблюдается положительная корреляция между отношениями потоков линий  $[\text{S II}]$  к  $\text{H}\alpha$ ,  $[\text{N II}]$  к  $\text{H}\alpha$ ,  $[\text{O I}]$  к  $\text{H}\alpha$  и  $\sigma$  (см. рис. 2). В то же время прослеживается отрицательная корреляция между отношением интенсивностей линий дублета серы ( $[\text{S II}]6731/[\text{S II}]6717$ ) и  $\sigma$ . Это означает, что более высокая дисперсия скоростей характерна для диффузного газа с меньшей электронной плотностью  $n_e$ .

Мы попробовали количественно охарактеризовать соотношение  $\text{BPT}-\sigma$ . Для каждой точки на диаграммах отношения потоков в линиях можно определить минимальное расстояние до кривой, ограничивающей область ионизации типа  $\text{N II}$  из работы [3] (в случае диаграммы  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha-[\text{O III}]/\text{H}\beta$  на наших рисунках это граница раздела областей  $\text{Comr}$  и  $\text{AGN}$ ). Это расстояние мы обозначили как  $\rho$  и определили его так, что отрицательные величины  $\rho$  соответствуют смещению точек от демаркационной линии в сторону, соответствующую фотоионизации молодыми звёздами, положительные — в сторону иных механизмов ионизации. Примеры соотношений с использованием этого параметра показаны на рис. 3. Для краткости и удобства чтения мы обозначили величину  $\rho$  для диаграмм  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha-[\text{O III}]/\text{H}\beta$  как  $\rho([\text{N II}])$ , для диаграмм  $[\text{S II}]/\text{H}\alpha-[\text{O III}]/\text{H}\beta$  — как  $\rho([\text{S II}])$  и для диаграмм  $[\text{O I}]/\text{H}\alpha-[\text{O III}]/\text{H}\beta$  — как  $\rho([\text{O I}])$ . Можно видеть, что во всех представленных случаях рост дисперсии скоростей по лучу зрения коррелирует с удалением на  $\text{BPT}$ -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 компактных ассоциаций  $\text{OB}$ -звёзд и связанные с ними расширяющиеся оболочки  $\text{N II}$ , погружённые в диффузный

ионизованный газ (см. [27] и ссылки там). Поля скоростей и дисперсии скоростей ионизованного газа в этой галактике ранее рассматривались в работах [11, 13, 28], где отмечалась достаточно спокойная кинематика газа с низким уровнем пекулярных скоростей. Величина  $\sigma$  лежит в диапазоне порядка  $15-40 \text{ км с}^{-1}$ . На  $\text{BPT}$ -диаграммах большинство точек располагается в области фотоионизации (см. рис. 4). Некоторое количество точек с более высокой дисперсией оказывается вблизи разделительной кривой. При этом расширяющиеся оболочки  $\text{N II}$ , связанные с яркими областями звездообразования, характеризуются меньшей величиной  $\sigma \sim 20 \text{ км с}^{-1}$ . Одна из областей с более высокой  $\sigma$  располагается между двумя такими оболочками. Другие расположены на периферии диска ионизованного газа [11]. На диаграммах «отношение линий—дисперсия скоростей» не заметно значимых корреляций (рис. 4). 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  $\text{N II}$ ). На это же указывает отсутствие заметной корреляции между  $\rho$  и  $\sigma$  на рис. 5.

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 [29]. Дисперсия лучевых скоростей ионизованного газа в галактике достигает порядка  $70 \text{ км с}^{-1}$ , тогда как в центральных областях она лежит в пределах  $20-35 \text{ км с}^{-1}$ . При этом наиболее высокая дисперсия лучевых скоростей наблюдается у газа, находящегося между тремя центральными областями звездообразования. В «рукавах» дисперсия оказывается несколько ниже по сравнению с центральными регионами и в целом не превышает  $20 \text{ км с}^{-1}$ . На  $\text{BPT}$ -диаграммах (см. рис. 6) точки, соответствующие областям текущего звездообразования, расположены в области фотоионизации. Внешние части галактики, характеризующиеся низкой поверхностной яркостью и высокой дисперсией лучевых скоростей, оказываются вблизи разделительных кривых, что позволяет предположить определённый вклад ударных волн в ионизацию газа этих регионов. Как и в UGC 10043, отношение интенсивностей линий серы на рис. 6 демонстрирует обратную зависимость. Диаграммы  $\sigma-\rho$  показывают положительную корреляцию между расстоянием до модельной кривой и дисперсией скоростей (рис. 7).

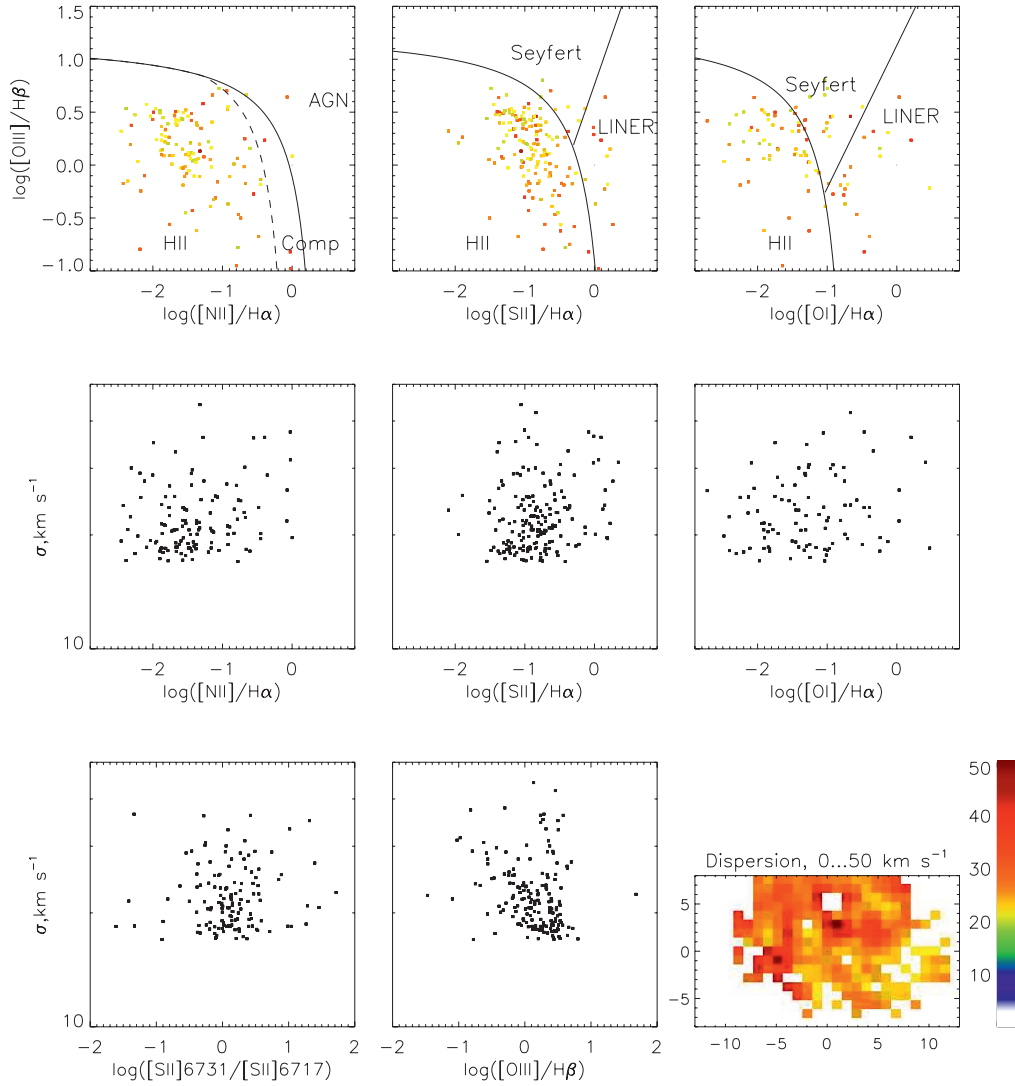


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для VII Zw 403.

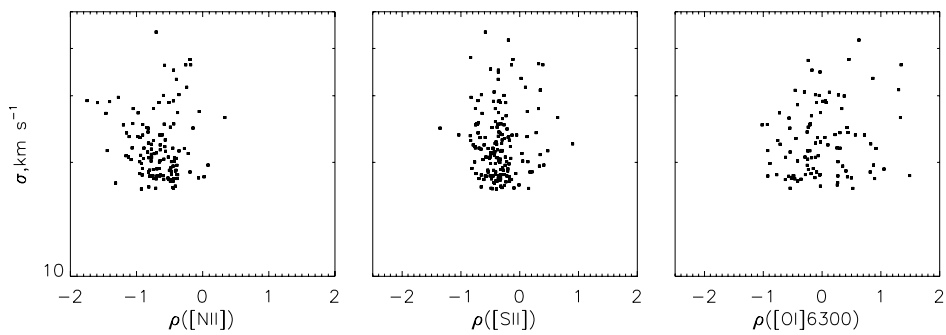


Рис. 5. Диаграммы, аналогичные рис. 3, для VII Zw 403.



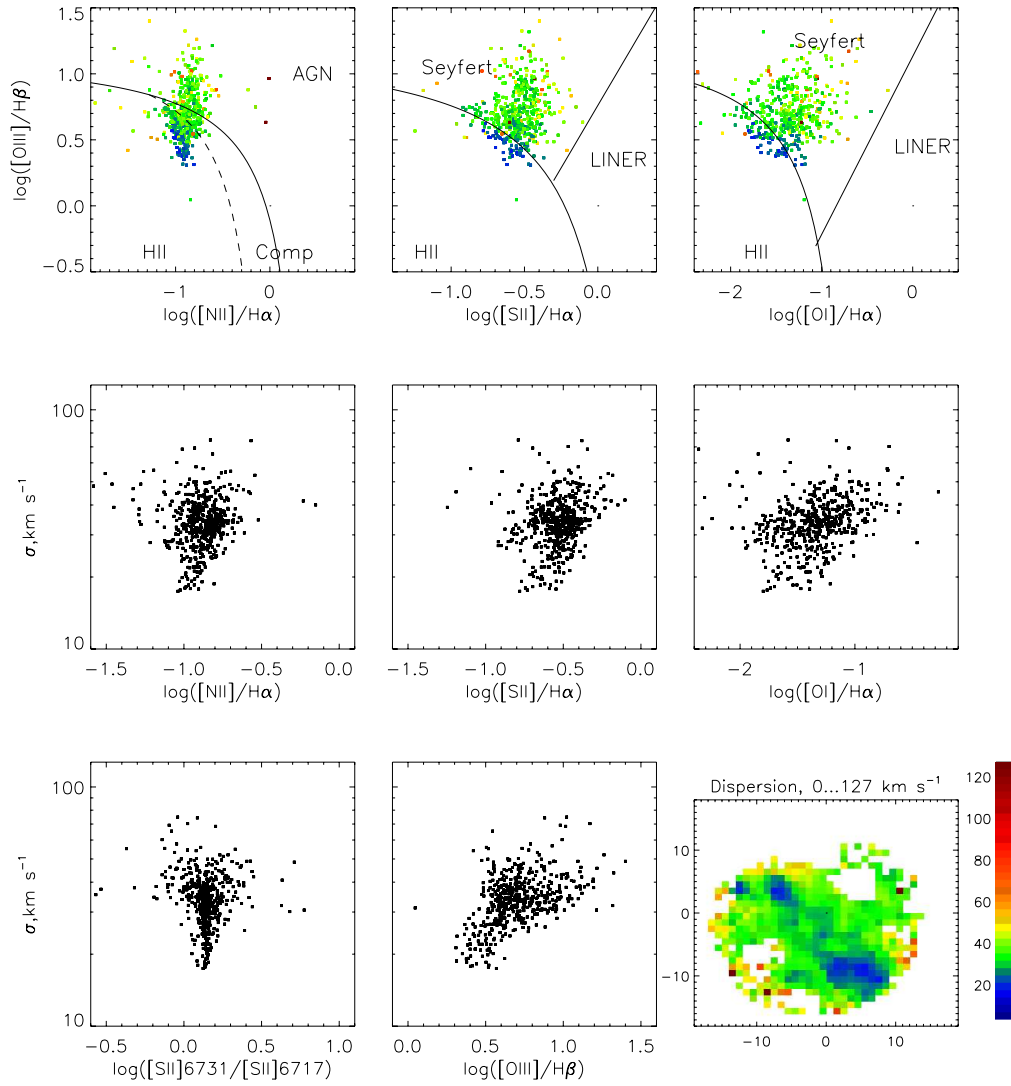


Рис. 6. То же, что на рис. 2, для Mrk 35.

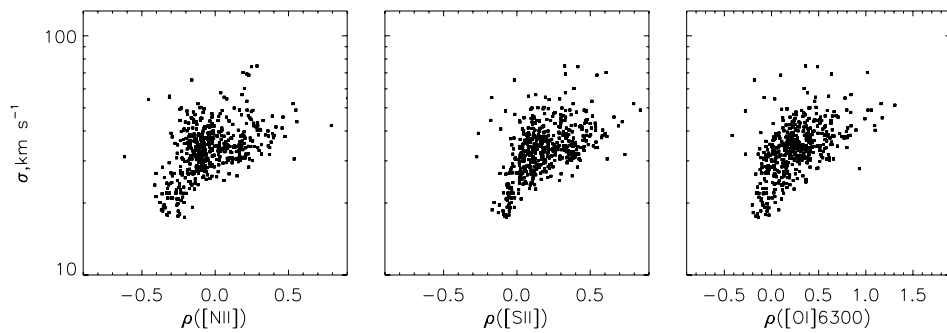


Рис. 7. Диаграммы, аналогичные рис. 3, для Mrk 35.

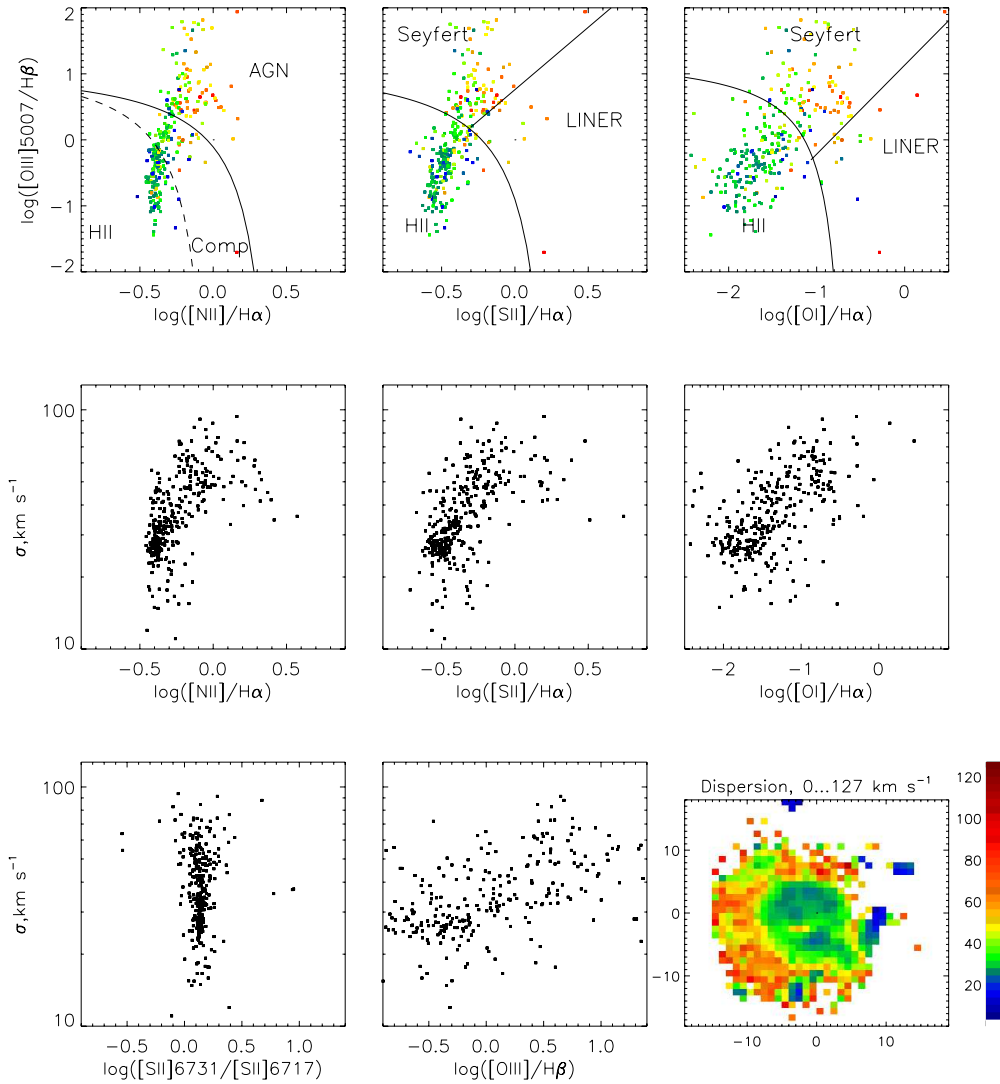


Рис. 8. То же, что на рис. 2, для Агр 212.

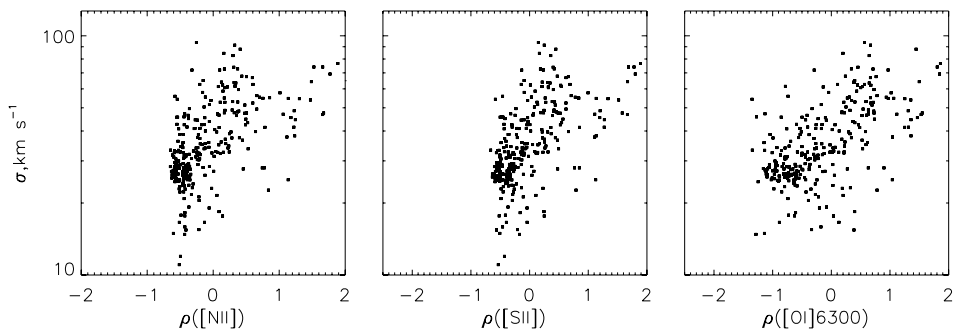


Рис. 9. Диаграммы, аналогичные рис. 3, для Агр 212.

### 3.3. *Агр 212 — галактика с полярным кольцом*

Агр 212 — пекулярная галактика, в которой обнаружены две кинематически различные вращающиеся газовые подсистемы: внутренний диск размером 3.5 кпк и внешние области Н II, орбиты которых располагаются под значительным углом к звёздному диску [30]. 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, индуцируя вспышку звездообразования. Именно здесь наблюдается наиболее высокая дисперсия лучевых скоростей, достигающая до 80–100 км с<sup>-1</sup> (см. рис. 8). При этом точки, относящиеся к этой зоне столкновения газовых подсистем, на ВРТ-диаграммах (рис. 8) 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  $\sigma$  и  $\rho$  для всех ВРТ-диаграмм (рис. 9). Важно отметить, что во всех трёх галактиках эта зависимость начинает прослеживаться для дисперсий скоростей свыше 30–40 км с<sup>-1</sup> и практически пропадает для меньших  $\sigma$ . Иными словами корреляция между  $\sigma$  и  $\rho$  проявляется себя при наличии ударного возбуждения в диффузном газе (DIG) и исчезает в областях Н II, характеризующихся низким уровнем турбулентных движений. Подтверждением этому также может служить отсутствие выраженных корреляций  $\sigma$ – $\rho$  в галактике VII Zw 403, где во всех точках  $\sigma < 40$  км с<sup>-1</sup>.

В отличие от UGC 10043 и Mrk 35, отношение интенсивностей линий серы в галактике Агр 212 не демонстрирует выраженной зависимости от  $\sigma$ , 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. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для наблюдательного изучения связи между турбулентными движениями ионизованного газа в близких галактиках и состоянием его ионизации требуются данные панорамой спектроскопии одновременно с большим полем зрения и достаточном высоким спектральным разрешением. А так

как необходимо наблюдать области низкой поверхностной яркости с угловым разрешением около 1", то нужен оптический телескоп большого ( $D > 3$ –5 м) диаметра. Все эти требования вместе пока реализованы, наверное, только в уникальном приборе MUSE на 8-м телескопе VLT [31].

Наша идея состоит в совместном использовании карт дисперсии скоростей ионизованного газа, полученных в наблюдениях со сканирующим ИФП, и панорамных данных 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 общо, — энергией, «впрыскиваемой» в межзвездную среду процессами звездообразования [13, 32]. Различные факторы влияют и 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. Добавление информации о кинематике газа позволяет говорить о том, что наблюдается галактический ветер. Для Агр 212 наш подход позволил подтвердить ранее высказанное в работе [30] предположение о прямом столкновении газовых облаков на наклонных орбитах с основным диском галактики, порождающем ударные фронты.

Таким образом, использование метода диаграмм ВРТ– $\sigma$  в дополнение к классическим методам диагностики по отношению интенсивностей спектральных линий помогает лучше понять причины ионизации межзвездной среды галактик в каждом конкретном случае. Единственная галактика, в которой мы не нашли корреляции между  $\sigma$  и характеристическими отношениями потоков линий (или параметром  $\rho$ ) — VII Zw 403. Темп текущего звездообразования здесь самый низкий в нашей выборке и составляет всего около 0.015  $M_{\odot}$  yr<sup>-1</sup> [28]. Видимо, по этой причине вклад ударных волн в ионизацию газа практически незаметен.

Дальнейшее расширение выборки исследуемых объектов мы планируем вести двумя путями. Первый — новые наблюдения галактик, для которых уже имеются данные обзора CALIFA, со сканирующим ИФП с высоким спектральным разрешением. Второй — построение изображений в эмиссии

онных линиях галактик, для которых у нас уже имеются карты дисперсии скоростей ионизованного газа. Здесь предполагается использовать фотометр с перестраиваемым узкополосным фильтром, первые наблюдения с которым уже проводятся нашей командой.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 17-12-01335 «Ионизованный газ в галактических дисках и за пределами оптического радиуса.» В статье использовались данные обзора Calar Alto Legacy Integral Field Area (CALIFA) survey (<http://califa.caha.es/>), основанного на наблюдениях Испано-германского астрономического центра (САНА) в Калар-Альто, совместно с Астрофизическим институтом Макса Планка и Астрофизическим институтом Андалузии (CSIC). В работе использовалась база данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED). Авторы благодарны Александрине Смирновой и рецензенту за конструктивные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
2. S. Veilleux and D. E. Osterbrock, *Astrophys. J. Suppl.* **63**, 295 (1987).
3. L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland, et al., *Astrophys. J.* **556**, 121 (2001).
4. A. Monreal-Ibero, S. Arribas, L. Colina, et al., *Astron. and Astrophys.* **517**, A28 (2010).
5. I.-T. Ho, L. J. Kewley, M. A. Dopita, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, 3894 (2014).
6. A. Jones, G. Kauffmann, R. D'Souza, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, A141 (2017).
7. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and Y. A. Shchekinov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464**, 1833 (2017).
8. K. Zhang, R. Yan, K. Bundy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466**, 3217 (2017).
9. S. M. Croom, J. S. Lawrence, J. Bland-Hawthorn, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421**, 872 (2012).
10. K. Bundy, M. A. Bershady, D. R. Law, et al., *Astrophys. J.* **798**, 7 (2015).
11. A. V. Moiseev and T. A. Lozinskaya, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423**, 1831 (2012).
12. E. O. Vasiliev, A. V. Moiseev, and Y. A. Shchekinov, *Baltic Astronomy* **24**, 213 (2015).
13. A. V. Moiseev, A. V. Tikhonov, and A. Klypin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 3568 (2015).
14. S. F. Sánchez, F. F. Rosales-Ortega, R. C. Kennicutt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **410**, 313 (2011).
15. C. López-Cobá, S. F. Sánchez, A. V. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 4951 (2017).
16. V. P. Arkhipova, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and O. V. Egorov, *Astronomy Reports* **51**, 871 (2007).
17. A. Kelz, M. A. W. Verheijen, M. M. Roth, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 129 (2006).
18. M. M. Roth, A. Kelz, T. Fechner, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **117**, 620 (2005).
19. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and A. V. Moiseev, in *Proc. Intern. Conf. on Stellar Dynamics: from Classic to Modern, St.-Petersburg, 2000*, Ed. by L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov (St.-Petersburg, 2001), p. 103.
20. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
21. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
22. J. H. Knapen, S. Erroz-Ferrer, J. Roa, et al., *Astron. and Astrophys.* **569**, A91 (2014).
23. A. Gil de Paz, B. F. Madore, and O. Pevunova, *Astrophys. J. Suppl.* **147**, 29 (2003).
24. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 181 (2008).
25. L. D. Matthews and R. de Grijs, *Astron. J.* **128**, 137 (2004).
26. L. J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, and T. Heckman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 961 (2006).
27. O. V. Egorov and T. A. Lozinskaya, *Astrophysical Bulletin* **66**, 293 (2011).
28. T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, V. Y. Avdeev, and O. V. Egorov, *Astronomy Letters* **32**, 361 (2006).
29. L. M. Cairós, N. Caon, B. García-Lorenzo, et al., *Astrophys. J.* **669**, 251 (2007).
30. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 201 (2008).
31. R. Bacon, M. Accardo, L. Adjali, et al., *Proc. SPIE* **7735**, 773508 (2010).
32. M. R. Krumholz and B. Burkhart, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458**, 1671 (2016).

**Diagnostic of Ionisation Gas in Galaxies Using BPT– $\sigma$  Relation****D. V. Oparin and A. V. Moiseev**

In order to study the state of gas in galaxies, diagrams of the relation of optical emission line fluxes are used allowing one to separate main ionization sources: young stars in the H II regions, active galactic nuclei, and shock waves. In the intermediate cases, for example, when the contributions of radiation from OB stars and from shock waves mix, identification becomes uncertain, and the issue remains unresolved on what determines the observed state of the diffuse ionized gas (DIG) including the one on large distances from the galactic plane. Adding of an extra parameter—the gas velocity dispersion in the line-of-sight—to classical diagnostic diagrams helps to find a solution. In the present paper, we analyze the observed data for several nearby galaxies: for UGC 10043 with the galactic wind, for the dwarf galaxies VII Zw 403 and Mrk 35 with star formation, for the galaxy Arp 212 with a polar ring. The data on the velocity dispersion are obtained at the 6-m SAO RAS telescope with the Fabry-Perot scanning interferometer, the information on the relation of main emission-line fluxes—from the published results of the integral-field spectroscopy (the CALIFA survey and the MPFS spectrograph). A positive correlation between the radial velocity dispersion and the contribution of shock excitation to gas ionization are observed. In particular, in studying Arp 212, our approach allowed us to confirm the assumption on a direct collision of gaseous clouds on the inclined orbits with the main disk of the galaxy.

Keywords: *galaxies: interstellar medium — galaxies: kinematics and dynamics — galaxies: star formation*