

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА»
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ, АСТРОМЕТРИИ И ГРАВИМЕТРИИ

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА
**НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛАКТИК
С РАССОГЛАСОВАНИЕМ ДВИЖЕНИЙ ГАЗА И ЗВЕЗД.**

Выполнила студентка 633 группы
Брюхарева Татьяна Сергеевна

Научные руководители:
в. н. с. ГАИШ МГУ, в. н. с. САО РАН
д. ф.м. н. А. В. Моисеев
в. н. с. ГАИШ МГУ
к. ф.м. н. В. Н. Семенцов

Допущена к защите
Зав. кафедрой

Москва, 2018

Содержание

1	Введение	3
2	Обзор проблемы	5
3	Наблюдения	10
4	Первичная обработка данных	13
5	Протяженность газовой компоненты	19
6	Состояние ионизации	21
7	Выводы	22
8	Заключение	25

1 Введение

Термин «Multi-spin Galaxies» был впервые введен Верой Рубин. Ее работа, изданная в 1994 году под таким названием, была посвящена обзору галактик со «сложностями» (complexity) в кинематике звезд и газа: противовращением внешних газовых дисков, наклоном центральной области галактики к плоскости основного диска, изгибами и пр [1]. Самые красивые представители «мультиспиновых» галактик — галактики с полярными кольцами — представляют собой системы, в которых есть структуры из газа, пыли и звезд, вращающиеся ортогонально основной плоскости галактики. В русскоязычной литературе общий класс галактик со сложной кинематикой обозначается термином «галактики с некомпланарными структурами».

Сложную кинематику галактик не объяснить простыми эволюционными моделями без учета взаимодействия с окружением. Для объяснения многих аспектов эволюции галактик необходим учет аккреции газа из внешних источников [2]. Численные модели показывают, что типичная массивная галактика набирает до 60% барионного вещества в результате аккреции газа [3]. Однако обнаружить следы такого механизма достаточно сложно: существует множество факторов, ускоряющих перемешивание аккрецированного газа с внутренним газом галактики.

Наличие в галактике некомпланарной структуры является надежным признаком произошедшего внешнего события, принесшего вещество с иным орбитальным моментом. Вопрос об источнике этого вещества является актуальной проблемой внегалактической астрономии.

Лишь недавно стали проводиться массовые обзоры галактик методами панорамной спектроскопии ([4], [5], [6]). Такие обзоры облегчают поиски объектов с некомпланарными структурами, позволяют расширить наши представления о

их разнообразия. В рамках крупнейшего из ныне запущенных обзоров — SDSS—MaNGA — планируется получить спектральные данные для 10000 галактик [7]. По предварительным оценкам, примерно в 500 из них ожидается обнаружить сильные рассогласования в полях скоростей газа и звезд [8].

Для дипломной работы отобраны 15 галактик из первого релиза MaNGA, в полях скоростей которых обнаружено рассогласование плоскостей вращения газовой и звездной компоненты внутри нескольких центральных килопарсек, охватываемых полем обзора MaNGA [8]. Но мы предполагаем, что ионизованный газ тянется существенно дальше. Для проверки этого предположения проведены дополнительные наблюдения на 6-м телескопе БТА САО РАН методами длиннощелевой спектроскопии с несколько большим полем зрения.

В дипломной работе представлены результаты детального изучения кинематики и состояния ионизации кинематически выделенных газовых структур в выбранных галактиках. Целью исследования является выявление статистических закономерностей протяженности газовой подсистемы и выяснение механизмов, отвечающих за ионизацию внешних частей дисковой компоненты.

Дипломная работа состоит из восьми частей. В первой части — введении — обсуждается актуальность проблемы, цели и задачи исследования, научная новизна полученных результатов. Во второй части представлен обзор литературы по исследуемой тематике, обосновывается выбор объектов и используемых методов. В третьем и четвертом разделе дана информация по наблюдениям и методам обработки полученных данных для исследуемой выборки. Пятый и шестой разделы посвящены соответственно анализу кинематики и состояния ионизации газовой компоненты исследуемых галактик. В седьмом разделе приведены обобщенные результаты исследования. Заключение о проделанной работе и дальнейшие перспективы исследования приведены в восьмом разделе.

2 Обзор проблемы

Структура из газа, пыли и звезд, вращающаяся вокруг центра галактики в плоскости, перпендикулярной основному диску, называется полярным кольцом. Первой обнаруженной и подтвержденной галактикой с полярным кольцом (ГПК) была NGC 2685 [9]. В ней и подобных ей галактиках присутствует две крупномасштабные системы, вращающиеся в почти ортогональных плоскостях.

Большинство кандидатов в ГПК обнаруживается по их необычному внешнему виду, затем кинематика проверяется спектральными наблюдениями. Существует два каталога ГПК: PRC (Polar-Ring Catalog, [10]) и SPRC (Sloan-based Polar Ring Catalog, [11]). Они включают в себя 157 и 275 объектов, соответственно. В основном это кандидаты в ГПК — галактики, морфология которых предполагает наличие полярной структуры, — и кандидаты, уже подтвержденные спектральными наблюдениями.

Следует отметить, что предположить наличие полярной структуры в галактике по ее внешнему виду можно только при удачном взаимном расположении ее компонент на картинной плоскости. Проще всего обнаружить полярное кольцо в галактике, у которой диск виден с ребра, в то время как у галактики, развернутой диском «плашмя», кольцо более вероятно примут за перемычку или пылевую полосу, а значит, такая ГПК останется неузнанной из-за своей «неудачной» ориентации. Так проявляется наблюдательная селекция, по оценкам снижающая наблюдаемую встречаемость феномена примерно в 10 раз по сравнению с реальной [10].

Как быть с полярными структурами, которым «не повезло» с расположением в картинной плоскости или с поверхностной яркостью? Их тоже можно обнаружить, и иногда это происходит случайно. Так, исследуя распределение интенсивностей линий ионизованного газа в галактиках с затухающим звездо-

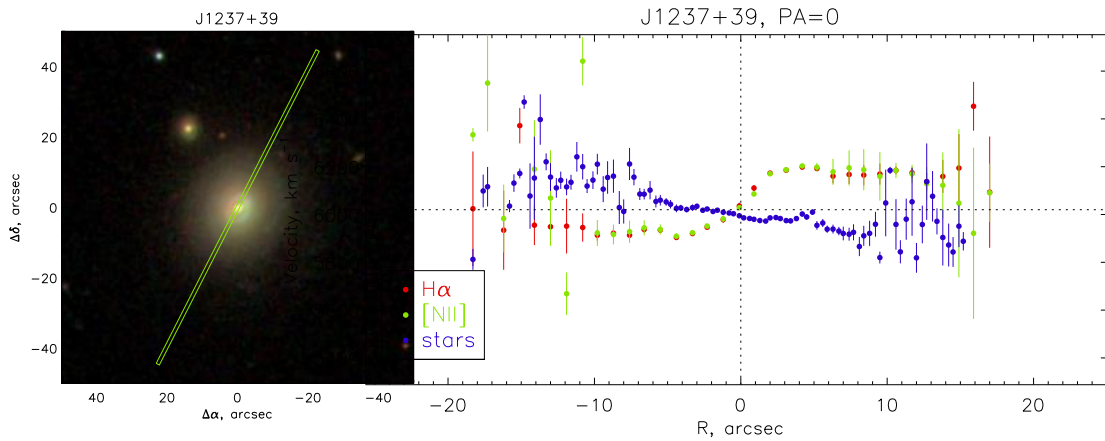


Рис. 1: Галактика со случайно обнаруженным рассогласованием лучевых скоростей звездной и газовой компоненты: изображение (SDSS) и кривая лучевых скоростей (по данным длиннощелевой спектроскопии, выполненной на 6-м телескопе CAO РАН с помощью фокального редуктора SCORPIO-2).

образованием из статьи [12], в одной из них мы обнаружили противовращение газовой и звездной компоненты. На рисунке 1 дано изображение этой галактики, взятое из обзора SDSS с нанесенным изображением положения щели спектрографа при наблюдениях на БТА, и кривая лучевых скоростей звездной компоненты и ионизованного газа в линиях H_{α} и $[NII] \lambda 6584$.

ГПК — одно из множества возможных последствий взаимодействий и слияний между галактиками. Наличие в галактике структур, обладающих отличным угловым моментом по отношению к звездному диску, указывает на то, что эти структуры образовались из внешнего вещества, которое ранее не принадлежало самой галактике и было приобретено в процессе взаимодействия, слияний с другими галактиками или в процессе внешней аккреции вещества. Вид конечного продукта, наличие кинематически выделенных подсистем и их устойчивость зависит от условий их приобретения: углового момента падающего вещества, характеристик взаимодействующих галактик, их взаимного расположения. Поиск галактик с рассогласованной кинематикой (в частности, ГПК) и достоверные оценки встречаемости таких объектов необходимы для понимания процессов,

сопровождающих эволюцию галактик. Необходимы методы, не подверженные «избирательности» в обнаружении некомпланарных структур.

Обнаружение галактик с рассогласованной кинематикой значительно упростилось с появлением массовых обзоров галактик методом 3D-спектроскопии (панорамной спектроскопии). Этот метод позволяет получать пространственно разрешенные спектральные данные в двумерном поле, в отличие от длиннощелевой спектроскопии, где пространственное разрешение спектров возможно только по направлению, перпендикулярному щели. Данные, полученные методом 3D-спектроскопии, помимо двух пространственных координат имеют третью, обеспечивающую спектральное разрешение каждого пространственного элемента. Такая конфигурация данных и определила название метода. Анализ спектра излучения каждого пространственного элемента на картинной плоскости дает возможность отделить вклад разных источников излучения и определить их лучевую скорость.

Получаемые в рамках обзоров методом 3D-спектроскопии карты лучевых скоростей газа и звезд для большого числа галактик (в некоторых обзорах — до нескольких тысяч объектов) позволяют делать статистические выводы о времени жизни и распространенности некомпланарных газовых структур, независимо от их внешнего вида, что нивелирует наблюдательную селекцию. Так, по данным обзора галактик раннего типа SAURON-ATLAS^{3D} изучена распространенность внутренних полярных дисков — полярных структур, расположенных вблизи центра, с характерным радиусом менее 1.5 кпк. Обнаружилось, что внутренние полярные диски встречаются в 10% близких линзовидных галактик [13].

Крупнейшим обзором методом панорамной спектроскопии является SDSS-MaNGA (Mapping Nearby Galaxies in APO [7]), запущенный в 2014 году. В полевом спектрографе (IFU, Integral-Field Unit), используемом для этого обзора, в качестве пространственных элементов выступают пучки оптоволокон, для ми-

нимизации зазоров выстроенные шестиугольником. В первом релизе этого проекта опубликованы данные для 1390 галактик. Всего в рамках проекта планируется получить панорамную спектроскопию для 10000 галактик на небольших красных смещениях $0,01 < z < 0,02$, независимо от морфологического типа. Рабочая область IFU этого обзора рассчитана таким образом, чтобы полностью захватить оптический радиус галактики на данных красных смещениях: обзор предполагает охват области до $12 \div 37''$ вокруг ядра. Этого достаточно, чтобы обнаружить рассогласование на расстояниях в несколько килопарсек вокруг ядра.

Объекты из первого релиза с обнаруженным сильным рассогласованием в полях скоростей газа и звезд изучены в работе [8]. Для исследования было отобрано 66 галактик. Отмечена тенденция формирования таких галактик преимущественно в разреженном окружении. По их оценкам, в обзоре MaNGA ожидается ~ 500 галактик с «неправильной» кинематикой. Авторами представлена следующая классификация, основанная на соотношении скорости звездообразования ($M_{\odot}/\text{год}$) и массы звездной компоненты в массах Солнца (SFR и M_* соответственно, величины взяты из [14]):

SF – Starforming, с текущим звездообразованием –

$$\log SFR > 0.86 \times \log M_* - 9.29;$$

QS – Quiescent, с затухающим звездообразованием –

$$\log SFR < \log M_* - 14.65;$$

GV – Green Valley, «галактики зеленой долины» – промежуточные значения между SF и QS.

В работе отмечено различие свойств галактик различных групп: для SF характерна более высокая металличность газовой компоненты по сравнению с галактиками, отнесенными к GV и QS. Предложены сценарии формирования таких структур. Так, SF-галактики, предположительно, образуются в резуль-

тате аккреции галактикой-реципиентом газа с карликовой галактики, богатой газом, или аккреции холодного газа из первичных космических филаментов; в процессе перемешивания аккрецированного газа и внутреннего газа в галактике газ теряет вращательный момент и приток газа ускоряется, провоцируя активное звездообразование в центре. Что касается GV- и QS-галактик, их происхождение они объясняют взаимодействием галактик, бедных газом, со спутниками меньшей массы. Это объясняет отличия металличностей газа в SF, GV и QS галактиках.

В дипломной работе рассмотрены 15 объектов из выборки Jin+2016, в которых взаимное расположение плоскостей газовой и звездной компоненты близко к ортогональному (полярные структуры). Согласно описанной выше классификации, в полученной выборке 8 QS, 4 GV и 3 SF галактик. Целью исследования является изучение непосредственно газовой подсистемы с внешним происхождением. Данные по кинематике газа с высоким пространственным разрешением позволят определить протяженность некомпланарных структур. Анализ отношений интенсивностей эмиссионных линий и построение диагностических диаграмм поможет выявить причины ионизации газа на различных расстояниях от ядра, отделить области звездообразования от областей ударной ионизации.

3 Наблюдения

Рабочее поле обзора MaNGA ограничено и в большинстве случаев сопоставимо с размерами звездного диска, поэтому данные этого обзора не подходят для выполнения поставленной цели. Наблюдения выборки исследуемых галактик проводились на 6-метровом телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН в 2017-2018 гг в рамках наблюдательных программ, посвященных исследованию некомпланарных газовых структур в галактиках (рук. А.В.Моисеев). Спектральные данные получены с помощью фокальных редукторов SCORPIO [15] и SCORPIO-2 [16]. В Таблице 1 приведен журнал наблюдений, где для каждой галактики выборки указан прибор, масштаб и спектральный диапазон полученных данных, а также даты наблюдений, суммарные экспозиции, позиционный угол щели и среднее качество атмосферы во время наблюдений. Наблюдения проводились в длиннощелевом режиме с щелью размером $6' \times 1''$, так, что щель была ориентирована вдоль оси максимальной амплитуды вращения газовой компоненты.

На рисунке 2 представлены изображения исследуемых галактик, взятые из обзора SDSS. Нанесенные контуры – границы поля IFU MaNGA (желтым) и положение щели при наблюдениях на БТА (зеленым).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Название	Прибор	РА	Дата	T_{exp}	D/d''	Спектр.	seeing
		[deg]			[кпк/'']	диапазон	[FWHM]
GV-3	SCORPIO-2	135	2017/13/12	7200.00	0.6	3600-7070 Å	1''.4
GV-11	SCORPIO-2	75	2017/20/02	3000.00	0.57	3600-7070 Å	1''.5
GV-25	SCORPIO-2	39	2017/27/02	4800.00	0.58	3600-7070 Å	3''.2
GV-33	SCORPIO-2	40	2018/10/02	7200.00	0.92	3600-7070 Å	2''.8
QS-22	SCORPIO-2	145	2017/14/12	4800.00	0.55	3600-7070 Å	1''.6
QS-28	SCORPIO-2	325	2017/12/12	7200.00	0.56	3600-7070 Å	1''.6
QS-15	SCORPIO	4	2017/16/08	5400.00	0.57	3100-7300 Å	1''.6
QS-12	SCORPIO-2	92	2017/21/02	3600.00	0.62	3600-7070 Å	3''.6
QS-14	SCORPIO	306	2017/16/08	6000.00	0.57	3100-7300 Å	1''.6
QS-18	SCORPIO-2	315	2017/03/02	2400.00	0.62	3600-7070 Å	1''.7
QS-26	SCORPIO-2	15	2017/21/02	6000.00	1.28	3600-7070 Å	2''.7
QS-48	SCORPIO-2	35	2018/10/02	8400.00	0.8	3600-7070 Å	1''.7
SF-31	SCORPIO-2	30	2017/12/12	6000.00	0.5	3600-7070 Å	1''.6
SF-22	SCORPIO	280	2017/16/08	6300.00	0.4	3100-7300 Å	1''.8
SF-32	SCORPIO-2	55	2017/27/02	2400.00	0.49	3600-7070 Å	3''.5

Таблица 1: Журнал наблюдений.

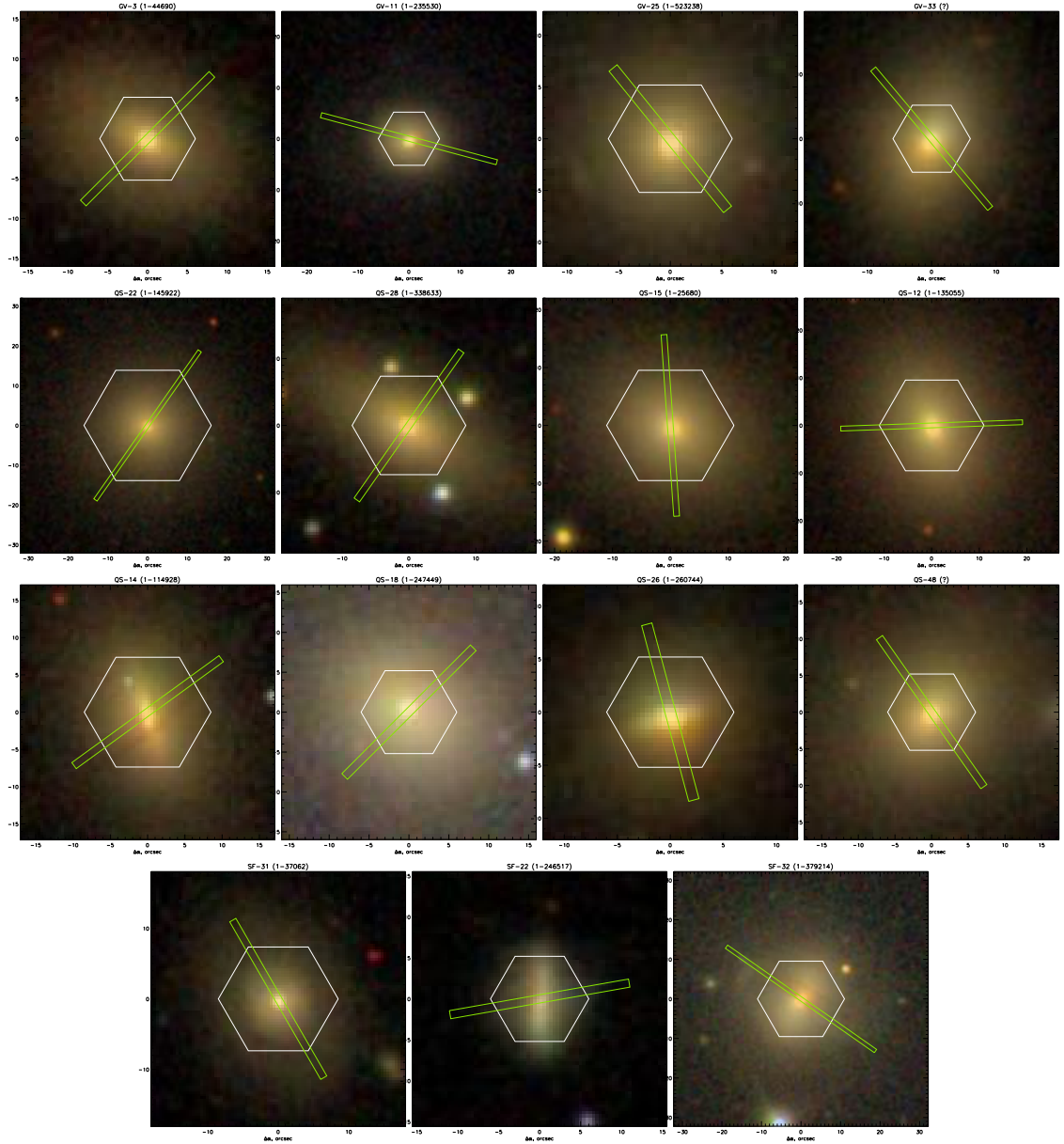


Рис. 2: Изображения галактик выборки из обзора SDSS. Желтый шестиугольник – поле IFU MaNGA, зеленый прямоугольник – контур положения щели спектрографа при наблюдениях на БТА.

4 Первичная обработка данных

Обработка «сырых» данных была проведена с помощью программного пакета long, написанного А. В. Моисеевым в среде IDL, и заключалась в поэтапном выполнении следующих шагов:

- учет тока смещения путем вычитания усредненных кадров с нулевой экспозицией (bias);
- удаление космических частиц и сложение экспозиций;
- учет неравномерной засветки и неоднородной чувствительности ПЗС-матрицы по кадрам плоского поля (flat);
- линейаризация спектров с помощью кадров гелий-неон-аргоновой калибровочной лампы;
- вычитание спектра ночного неба;
- перерасчет инструментальных потоков в абсолютные с использованием DQE, построенной по спектрам спектрофотометрических звезд-стандартов.

Построение модели звездного населения выполнялось помощью программного пакета ULySS [17]. ULySS (University of Lyon Spectroscopic analysis Software) представляет собой программный пакет с открытым исходным кодом, написанный на языке GDL / IDL для анализа астрономических данных. ULySS используется для изучения звездных популяций галактик и звездных скоплений и атмосферных параметров звезд.

Процедура определения параметров звездного населения заключается в нелинейной минимизации χ^2 между наблюдаемым спектром и моделью. Модель представляет собой спектр линейной комбинации нескольких компонент с различной эволюционной историей, свернутый с распределением скоростей звезд

по лучу зрения (LOSVD) и умноженный на континуум, аппроксимированный полиномом.

Для данной работы использованы синтетические спектры звездного населения, рассчитанные эволюционным кодом `Pegase.HR` для простой однокомпонентной модели (SSP – Simple Stellar Population).

Синтезированный спектр абсорбций звездной компоненты вычитался из спектра галактики, и полученный эмиссионный спектр ионизованного газа аппроксимировался гауссовским профилем. Дальнейший анализ, предполагающий вычисление потоков в линиях и доплеровского смещения, выполнялся для сглаженных гауссовских линий. В большинстве случаев на этом этапе применялось бинирование для повышения сигнала на больших расстояниях от центра. В разных галактиках оно составляло от 3 до 6 пикселей. Критерием наличия линии было принято отношение $S/N = 3$ в каждом бине.

Основные результаты представлены в графиках на рисунках 3–6. Верхняя рамка — кривая лучевых скоростей ионизованного газа в линии H_α , [NIII] $\lambda 6584$, средняя — отношение интенсивностей линий $\lg \frac{[NII]\lambda 6584}{H_\alpha}$, нижняя — распределение яркости в газовой компоненте и континууме 6400–6500 Å). По оси абсцисс отмечено расстояние от центра галактики в секундах дуги. Пунктирной вертикальной линией показаны границы поля обзора MaNGA. Галактики расположены в соответствии с классификацией, принятой в статье [8]: на рисунке 3 представлены GV-галактики (green valley), галактики QS (quiescent) — на рисунках 4 и 5, на рисунке 6 галактики SF (star-forming).

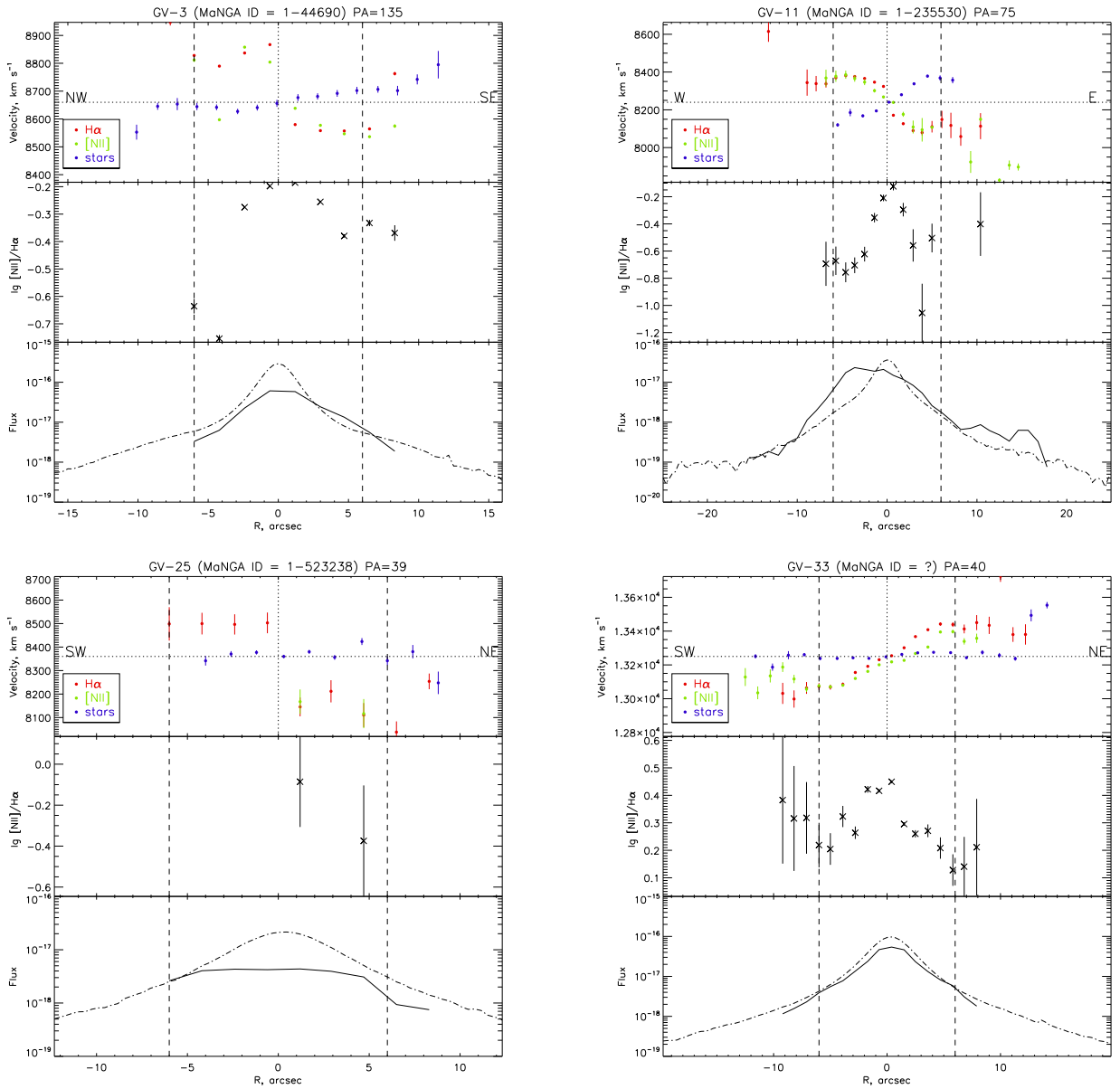


Рис. 3: Результаты для галактик GV-3, GV-11, GV-25 и GV-33. Верхний график: кривые лучевых скоростей звездной компоненты (синий) и ионизованного газа в линиях $H\alpha$ (красный) и $[NII]\lambda 6584$ (зеленый). Нижний график: отношение линий $A = \lg \frac{[NII]\lambda 6584}{H\alpha}$. Пунктиром отмечены границы поля обзора MaNGA.

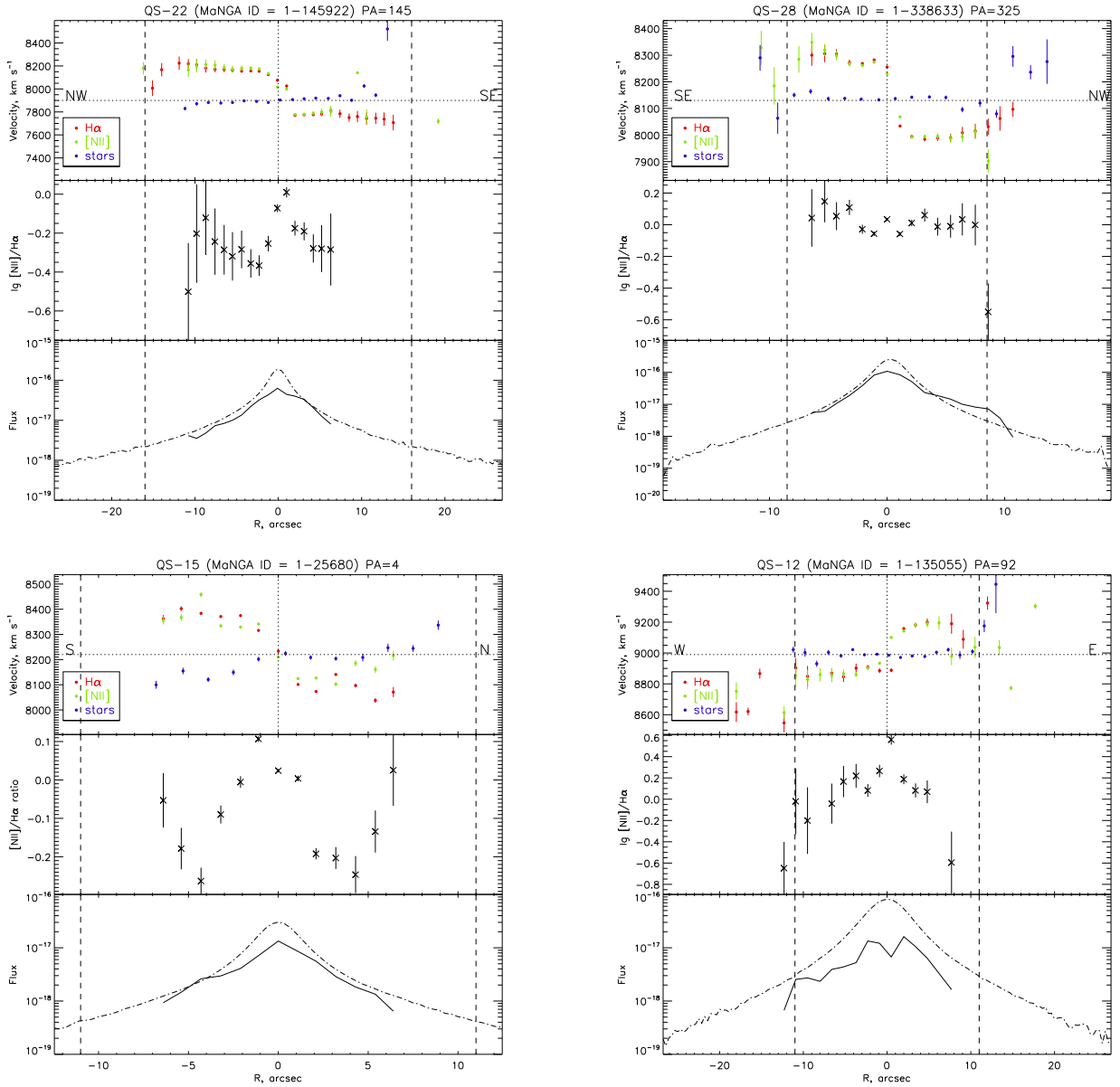


Рис. 4: Результаты для галактик QS-22, QS-28, QS-15 и QS-12. Верхний график: кривые лучевых скоростей звездной компоненты (синий) и ионизованного газа в линиях $H\alpha$ (красный) и $[NII]\lambda 6584$ (зеленый). Нижний график: отношение линий $A = \lg \frac{[NII]\lambda 6584}{H\alpha}$. Пунктиром отмечены границы поля обзора MaNGA.

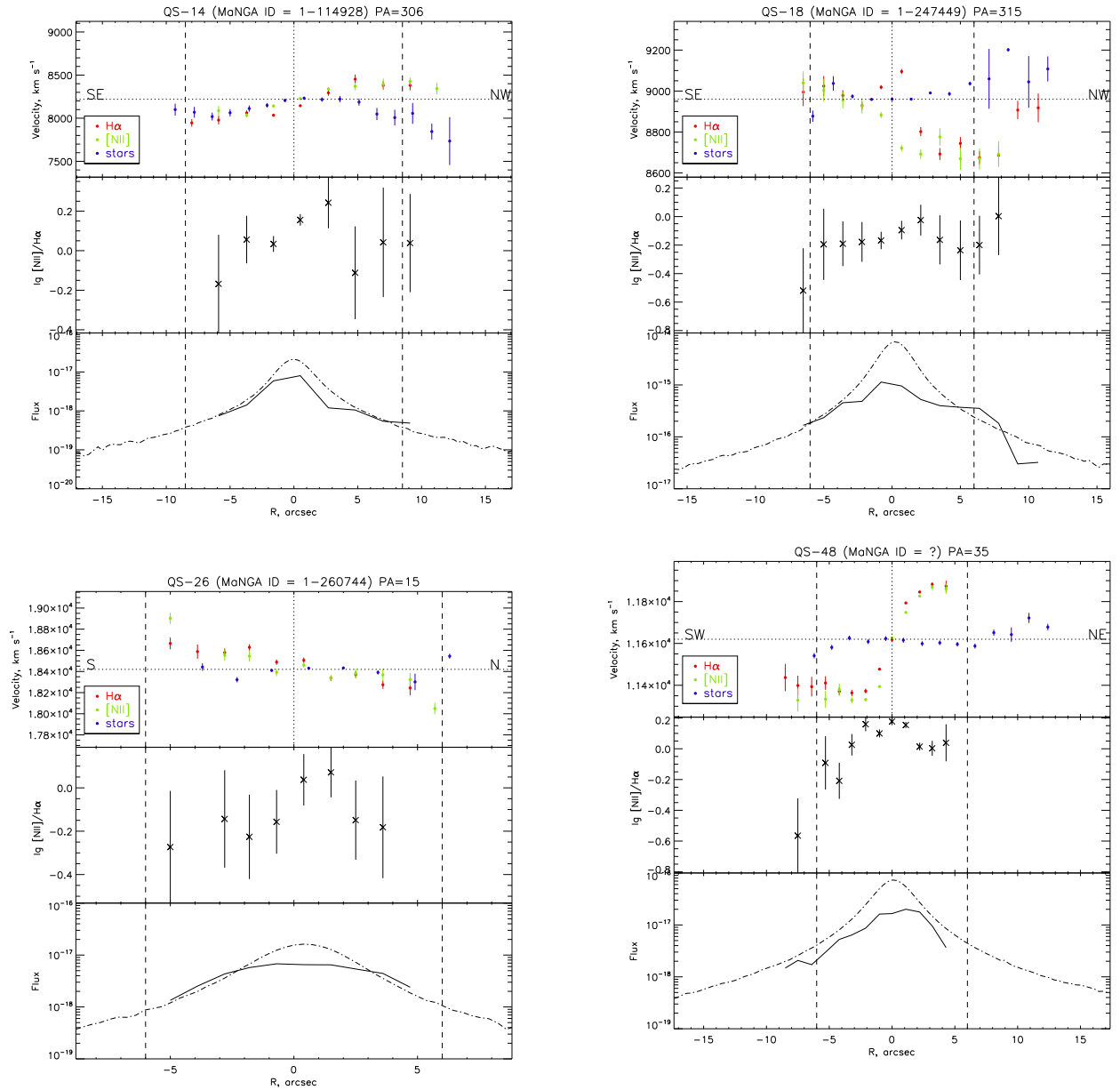


Рис. 5: Результаты для галактик QS-14, QS-18, QS-26 и QS-48. Верхний график: кривые лучевых скоростей звездной компоненты (синий) и ионизованного газа в линиях $H\alpha$ (красный) и $[NII]\lambda 6584$ (зеленый). Нижний график: отношение линий $\lg \frac{A=[NII]\lambda 6584}{H\alpha}$. Пунктиром отмечены границы поля обзора MaNGA.

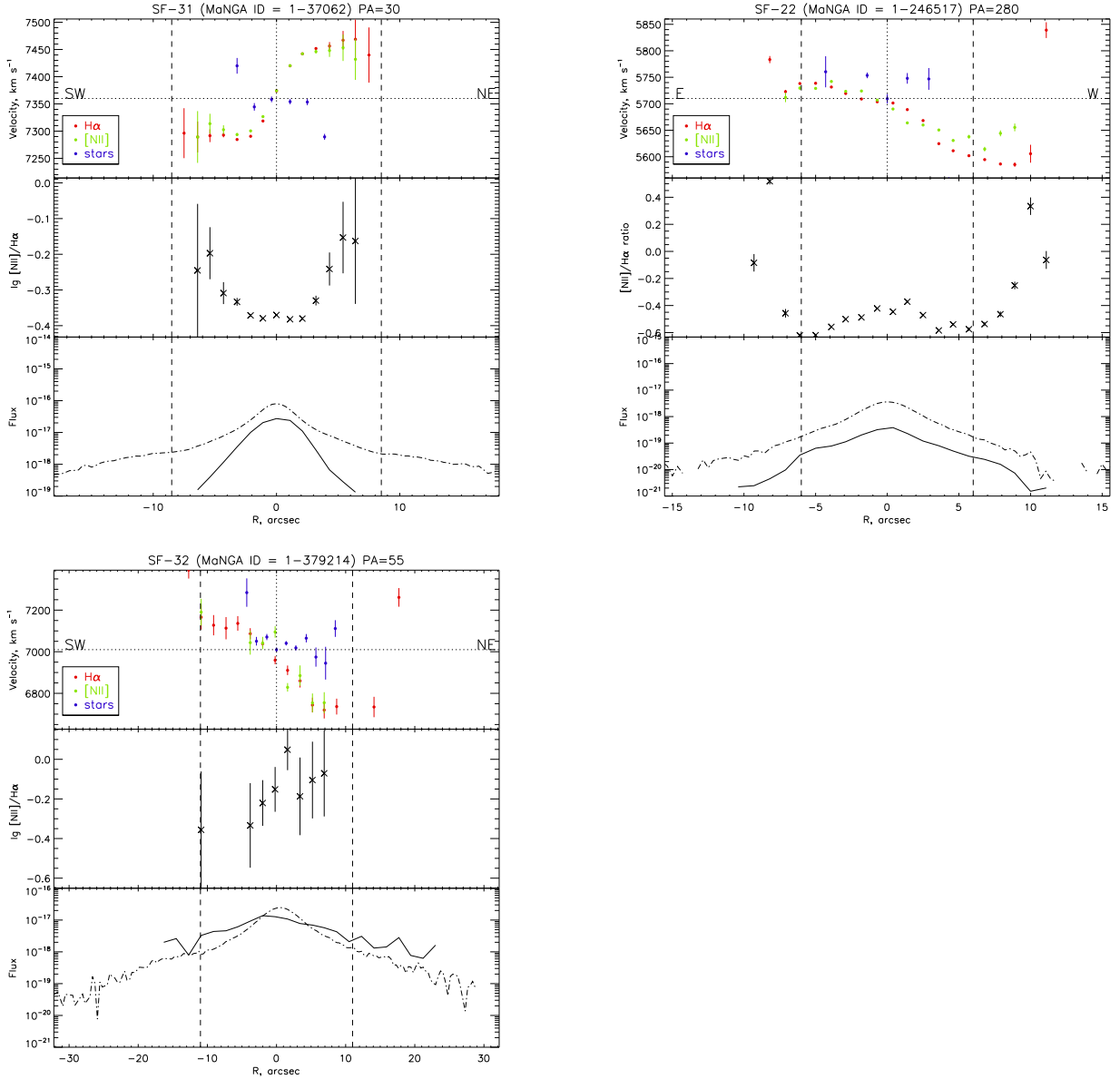


Рис. 6: Результаты для галактик SF-31, SF-22 и SF-32. Верхний график: кривые лучевых скоростей звездной компоненты (синий) и ионизованного газа в линиях $H\alpha$ (красный) и $[NII]\lambda 6584$ (зеленый). Нижний график: отношение линий $A = \lg \frac{[NII]\lambda 6584}{H\alpha}$. Пунктиром отмечены границы поля обзора MaNGA.

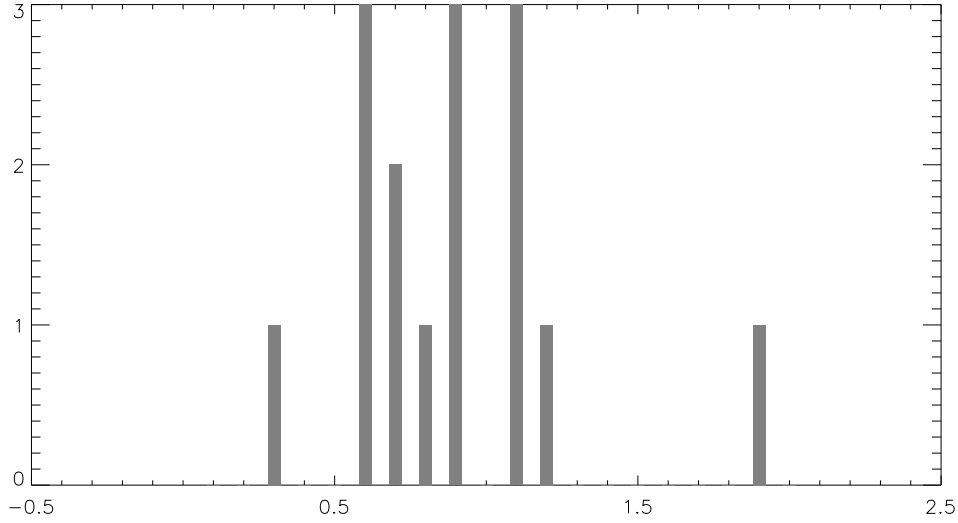


Рис. 7: Гистограмма распределения величины $B = \frac{r_{gas}}{r_*}$

5 Протяженность газовой компоненты

На верхних графиках рисунков 3–6 изображены кривые лучевых скоростей звездной компоненты и газовой, в линиях [NII] и H_α . Анализ протяженности газовой компоненты основан на информации о потоках именно в этих двух линиях, поскольку во всех изученных галактиках они имеют наибольшую протяженность по сравнению с остальными эмиссионными линиями. По оси ординат отложена лучевая скорость в км/с, пунктиром — принятая системная скорость центра).

Ионизованный газ за пределами поля MaNGA обнаружен в двух из четырех галактиках типа GV (GV-11, GV-33), в четырех из восьми QS-галактик (QS-28, QS-14, QS-18, QS-26), в одной SF-галактике из трех (SF-22).

Галактика QS-48 (рис. 5) имеет заметно асимметричную протяженность: эмиссионные линии со стороны SW в диске наблюдаются почти вдвое дальше, чем в противоположной от центра части. Это может объясняться асимметричной вытянутостью полярного кольца, либо процессами, происходящими за его

пределами. В остальных галактиках протяженность газовой компоненты по разные стороны от ядра вдоль наблюдаемого разреза одинакова.

В галактиках GV-3 и QS-28 форма кривой лучевых скоростей несимметрична, что может быть наблюдательным проявлением изогнутости диска.

В галактиках GV-33, GV-11, SF-22 проявляется рассогласование скоростей в линиях водорода и азота. Масштаб таких рассогласований невелик — до $5''$ и может свидетельствовать о мелкомасштабных процессах за пределами газового диска.

На нижних графиках сплошной линией показано распределение поверхностной яркости в линии H_α и штрихпунктирной — распределение яркости в континууме, полученное суммированием спектра галактики по λ на участке 6400-6500 Å. По оси ординат в логарифмической шкале отложены абсолютные потоки (в $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{sec}/\text{Å}$).

Для оценки относительной протяженности газовой компоненты полученные распределения яркости были аппроксимированы экспоненциальным законом:

$$I = I_0 e^{-\nu r/r_0},$$

что является приближением закона Серсика для дисковых галактик [18]. Далее сравнивались величины r_0 для газовой составляющей и континуума (r_{gas} и r_* , соответственно). На рисунке 7 изображена гистограмма распределения величины $B = \frac{r_{gas}}{r_*}$, округленной до 1/10. Видно, что для рассматриваемых галактик характерно отношение газовой и звездной компоненты, близкое к 1, то есть протяженность некомпланарной газовой структуры сопоставима с размером звездной компоненты.

6 Состояние ионизации

Для диагностики механизмов возбуждения ионизованного газа традиционно применяются диаграммы Болдвина-Филлипса-Терлевича ([19], далее ВРТ-диаграммы) отношений эмиссионных линий $[NII]/H_\alpha$ против $[OIII]/H_\beta$, позволяющие разделить основные источники ионизации: молодые звезды в областях HII, активные галактические ядра, ударные волны. Построение такой диаграммы для внешних частей галактик данной выборки довольно затруднительно: во всех рассматриваемых галактиках хотя бы одна линия из синей части спектра ($[OIII]$ и/или H_β) недостаточно яркая или имеет малую протяженность по сравнению с остальными линиями.

В работе [20] показано, что классификация механизмов ионизации также возможна только по двум линиям, $[NII] \lambda 6584$ и H_α . Предлагаются следующие критерии:

$A \leq -0.4$ — области звездообразования,

$-0.4 < A \leq -0.2$ — смешанные процессы,

$A > -0.2$ — ударная ионизация и AGN.

Здесь $A = \lg[NII]\lambda 6584/H_\alpha$. Такой «одномерный вариант» ВРТ-диаграммы в нашем случае является единственным доступным способом анализа механизмов возбуждения ионизованного газа на больших расстояниях от ядра.

Распределение величины A вдоль рассматриваемых разрезов галактик изображено на рисунках 3–6 в средних рамках. В некоторых галактиках наблюдается положительный градиент величины A , что указывает на усиление вклада ударных процессов в ионизацию газовой компоненты на периферии. Механизм возникновения ударных волн описан Вакаматсу в работе [21]. В газе, движущемся на полярных орбитах, могут возбуждаться ударные волны при пересечении потенциальной ямы в плоскости звездного диска. Это явление похоже

на возбуждение ударных волн при прохождении газа через области повышенной плотности вещества в спиральных рукавах галактик.

Ионизация фотоизлучением молодых звезд наблюдается в диске галактик SF-22, GV-11, в остальных галактиках либо преобладает ударная ионизация, либо промежуточные значения величины A , указывающие на наличие и ударных механизмов, и фотоионизации.

В некоторых галактиках величина A увеличивается к центру. К сожалению, используемый метод классификации областей ионизованного газа не позволяет различить возможные последствия нетеплового излучения ядра галактики — LINER или AGN.

7 Выводы

Выполнен анализ выборки из пятнадцати галактик с некомпланарной газовой структурой, отобранных по результатам первого релиза обзора SDSS MaNGA. Проведена первичная обработка наблюдательных данных, полученных методом длиннощелевой спектроскопии на 6-м телескопе САО РАН. Для каждой галактики построены кривые лучевых скоростей газовой и звездной компоненты, оценено отношение протяженности газовой компоненты к звездной — в большинстве галактик оно близко к 1. Проведена оценка механизмов, вызывающих ионизацию газа на большом отдалении от ядра — в 9 галактиках из 15 рассмотренных наблюдается усиление воздействия ударных процессов на состояние ионизации газа к периферии газового диска: в 2/4 GV галактиках, в 4/8 QS-галактиках и 2/3 SF-галактиках. Механизм ионизации газа ударными волнами описан в работе [21] и подтверждается исследованиями других ГПК, например, NGC 7743 [22]. В некоторых галактиках возможен также вклад фотоионизации молодыми звездами.

Кривые распределения лучевых скоростей (верхние графики на рис. 3 – 6) наглядно отображают протяженность некомпланарной структуры в каждой галактике. Ионизованный газ за пределами поля обзора MaNGA обнаружен в восьми галактиках: в четырех из восьми рассмотренных QS галактиках, в одной SF галактике из трех, во всех GV галактиках (4 в выборке). Немногочисленность выборки не позволяет делать каких-либо уверенных выводов о корреляции между используемой классификацией и наличием далеко простирающегося диска ионизованного газа.

Исследование было направлено на внешние части газовых дисков, чтобы оценить состояние газа, не переработанного внутренним звездообразованием. Планировалось также провести анализ химического состава, но это оказалось довольно затруднительным с использованием имеющихся наблюдательных данных: большинство линий, используемых для анализа химического состава, слишком слабые (линии синей части спектра: [OII] λ 3727, [OIII] λ 4363, [OIII] λ 4959,5007, H β) или не попали в спектральный диапазон наблюдений ([OII] λ 7325). Попытка оценки обилия кислорода в рамках этой работы была проведена для галактики SF-22. Набор протяженных эмиссионных линий позволил сделать грубые оценки обилия кислорода отдельно для центральной части галактики ($|r| < 5$) и для двух внешних, NE и SW ($5 < |r| < 7 \div 10$). Для улучшения отношения сигнал/шум потоки линий были просуммированы в указанных пределах, затем обилие кислорода вычислялось по формуле, приведенной в работе [23]:

$$Z = 12 + \log(O/H) = \frac{R_{23} + 106.4 + 106.8P - 3.40P^2}{17.72 + 6.60P + 6.95P^2 - 0.302R_{23}},$$

$$R_{23} = \frac{I_{[OII]\lambda 3727+\lambda 3729} + I_{[OIII]\lambda 4959+\lambda 5007}}{I_{H\beta}}, P = \frac{I_{[OIII]\lambda 4959+\lambda 5007}}{I_{[OII]\lambda 3727+\lambda 3729} + I_{[OIII]\lambda 4959+\lambda 5007}}$$

Полученные значения: $Z = 8.32 \pm 0.03$ для центральной части, $Z = 8.1 \pm 0.6$

и $Z = 8.7 \pm 1.2$ для внешних частей (SW и NE). Если сравнивать с солнечным обилием кислорода $Z = 8.69 \pm 0.05$, взятого из работы [24], то средняя металличность газа в центральной части и во внешней части со стороны SW оказывается меньше солнечной даже в пределах погрешности. Но для оценки возможных внешних источников газа, следует все же найти способ уменьшить погрешность получаемых величин. Если учесть, что для получения величин, данных выше, для внешних областей суммировались потоки спектров протяженностью до $5''$, то, строго говоря, такая грубая оценка не имеет физического смысла. Для такого исследования необходимо очень аккуратно подойти к выбору метода оценки химического состава, чтобы минимизировать погрешность полученных данных, плюс эмиссионные линии должны быть ярче, чтобы получать надежные данные по распределению энергии.

8 Заключение

Дипломная работа посвящена изучению распределения и состояния ионизации газовых компонент галактик, имеющих внешнее происхождение. Основным результатом данной работы является оценка протяженности некомпланарной газовой компоненты в галактиках выборки, а также механизмов возбуждения ионизованного газа на больших расстояниях от центра.

Возможны несколько вариантов дальнейшей работы в этом направлении. Во-первых, можно попытаться максимально расширить данные по галактикам исследуемой здесь выборки:

- найти способ определить обилия металлов — это позволит сделать выводы о происхождении газа в некомпланарной структуре,
- оценить угол наклона между диском вещества внешнего происхождения и основной плоскостью галактики, чтобы понять, устойчива ли такая структура, и оценить ее возраст в случае неустойчивости.
- построить ВРТ-диаграммы для более точной диагностики механизмов возбуждения ионизованного газа.

Во-вторых, расширяя выборку, можно делать статистические заключения о распространенности некомпланарных газовых структур.

Важным результатом этой работы является то, что полярные структуры в исследуемых галактиках оказались соизмеримыми со звездными дисками. Из этого можно сделать вывод: поскольку поле IFU MaNGA рассчитано таким образом, чтобы целиком наблюдать звездный диск, то для изучения газовой компоненты данных обзора MaNGA также может быть достаточно.

Список литературы

- [1] V. C. Rubin. Multi-spin galaxies. *AJ*, 108:456–467, August 1994.
- [2] Kauffmann G. et al. COLD GASS, an IRAM legacy survey of molecular gas in massive galaxies - III. Comparison with semi-analytic models of galaxy formation. *MNRAS*, 422:997–1006, May 2012.
- [3] Sales L. V. et al. The origin of discs and spheroids in simulated galaxies. *MNRAS*, 423:1544–1555, June 2012.
- [4] Cappellari M. et al. The ATLAS^{3D} project - I. A volume-limited sample of 260 nearby early-type galaxies: science goals and selection criteria. *MNRAS*, 413:813–836, May 2011.
- [5] Sánchez S. F. et al. CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation. *A&A*, 538:A8, February 2012.
- [6] Konstantopoulos I. et al. The SAMI IFU Galaxy Survey. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #221*, volume 221 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 215.01, January 2013.
- [7] Bundy K. et al. Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *ApJ*, 798:7, January 2015.
- [8] Jin Y. et al. SDSS-IV MaNGA: properties of galaxies with kinematically decoupled stellar and gaseous components. *MNRAS*, 463:913–926, November 2016.
- [9] P. L. Schechter and J. E. Gunn. NGC 2685 - Spindle or pancake? *AJ*, 83:1360–1362, November 1978.

- [10] Whitmore B. C. et al. New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies. *AJ*, 100:1489–1522, November 1990.
- [11] Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., and Reshetnikov V. P. A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS*, 418:244–257, November 2011.
- [12] O. I. Wong, K. Schawinski, G. I. G. Józsa, C. M. Urry, C. J. Lintott, B. D. Simmons, S. Kaviraj, and K. L. Masters. Misalignment between cold gas and stellar components in early-type galaxies. *MNRAS*, 447:3311–3321, March 2015.
- [13] Silchenko Olga K. Stellar nuclei and inner polar disks in lenticular galaxies. *The Astronomical Journal*, 152(3):73, 2016.
- [14] Chang Y.-Y. et al. Stellar Masses and Star Formation Rates for 1M Galaxies from SDSS+WISE. *ApJS*, 219:8, July 2015.
- [15] V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope. *Astronomy Letters*, 31:194–204, March 2005.
- [16] V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev. Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects. *Baltic Astronomy*, 20:363–370, August 2011.
- [17] M. Koleva, P. Prugniel, A. Bouchard, and Y. Wu. ULySS: a full spectrum fitting package. *A&A*, 501:1269–1279, July 2009.
- [18] J. L. Sersic. *Atlas de Galaxias Australes*. 1968.
- [19] J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *PASP*, 93:5–19, February 1981.

- [20] Stasińska G. et al. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - III. How to distinguish AGN hosts. *MNRAS*, 371:972–982, September 2006.
- [21] K.-I. Wakamatsu. Structure of polar ring galaxies - Shock waves in the gas of polar rings. *AJ*, 105:1745–1752, May 1993.
- [22] I. Y. Katkov, A. V. Moiseev, and O. K. Sil’chenko. Stars and Ionized Gas in the S0 Galaxy NGC 7743: An Inclined Large-scale Gaseous Disk. *ApJ*, 740:83, October 2011.
- [23] Pilyugin L. S. and Trinh X. Thuan. Oxygen abundance determination in h ii regions: The strong line intensities-abundance calibration revisited. *The Astrophysical Journal*, 631(1):231, 2005.
- [24] M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott. The Chemical Composition of the Sun. *ARA&A*, 47:481–522, September 2009.