

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина».

На правах рукописи



Смирнова Ксения Ильдаровна

**Области звездообразования
в спиральных и иррегулярных галактиках и в галактиках
с особенностями морфологии**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Соболев А.М.
Научный консультант:
д.ф.-м.н. Вибе Д.З.

Екатеринбург – 2022

Оглавление

Введение	4
1 Области звездообразования в изолированных галактиках	16
1.1 Введение	16
1.2 Данные наблюдений и их обработка	20
1.2.1 Исключение областей	28
1.2.2 Металличность	29
1.3 Результаты	29
1.3.1 Наблюдаемые потоки	31
1.3.2 Производные параметры	33
1.4 Обсуждение	38
1.5 Выводы	42
1.6 Положения, выносимые на защиту	42
2 Области звездообразования в пекулярных галактиках	45
2.1 Введение	45
2.2 Данные наблюдений и их обработка	48
2.3 Результаты	51
2.3.1 Кинематика	63
2.4 Обсуждение	65
2.5 Выводы	70
2.6 Положения, выносимые на защиту	71
3 Галактики с полярными кольцами: перспективные объекты для исследования особых режимов звездообразования	73
3.1 Введение	73
3.1.1 Формирование ГПК	75
3.2 Предварительная выборка для каталога ГПК	76
3.3 Параметры каталога ГПК	76

3.4	Расчет основных структурных параметров	77
3.4.1	Отбор кандидатов	77
3.4.2	Анализ выборки GalaxyZoo	78
3.4.3	Линейные размеры	86
3.5	Выводы	89
3.6	Положения, выносимые на защиту	89
	Заключение	92
	Список библиографических ссылок	94

Введение

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Звездообразование (ЗО) является ключевым элементом эволюции Вселенной. В этом процессе участвуют все компоненты межзвездной среды (МЗС), каждый из которых в той или иной степени определяет особенности протекания ЗО. Наиболее важными компонентами межзвездного вещества являются атомарный и молекулярный газ, а также пыль. От их содержания в значительной степени зависит темп ЗО, однако оценки содержания газа и пыли, а также их связь друг с другом и со скоростью звездообразования на сегодняшний день все еще недостаточно определены. Одной из причин этой неопределенности является невозможность прямых наблюдений молекулы H_2 — основной составляющей газа в плотных межзвездных облаках. Молекулярный газ наблюдается, в основном, косвенно, при помощи различных индикаторов, в первую очередь вращательных линий молекулы CO . Коэффициент перехода между CO и H_2 определен лишь приблизительно и может значительно варьироваться от объекта к объекту [1], поэтому погрешность в оценке количества молекулярного газа (и, как следствие, газа в целом) зачастую весьма велика [2]. Эта проблема возникает при исследовании ЗО и МЗС как в нашей, так и в других галактиках.

Еще одним индикатором наличия плотного (молекулярного) газа является излучение пыли, однако и в этом случае мы сталкиваемся с неопределенностями, которые связаны как с пространственными вариациями свойств пыли, так и с их эволюцией в процессе звездообразования. Для хотя бы частичного устранения этих неопределенностей необходимо проводить и анализировать наблюдения различных индикаторов газа и пыли в широком наборе объектов и в широком диапазоне физических условий, как в нашей Галактике, так и за ее пределами.

Существует большое количество работ по изучению соотношений между количеством пыли и газа в близких галактиках [3–6], между количеством газа/пыли и активностью ЗО [7,8], между металличностью и активностью ЗО [9,10]. В большинстве подобных работ оценки соотношений компонент МЗС получены для галактик в целом или на больших масштабах [11], но не для отдельных областей звездообразования (ОЗО) в галактике. Исключением являются исследования галактик Местной Группы — Магеллановых Облаков [3], М31 [12], М33 [13]. Однако, как было отмечено в работе [14], оценки соотношений компонент МЗС именно в отдельных ОЗО могут, например, играть важную роль в исследованиях процессов разрушения пылинок. Теоретическому моделированию процесса разрушения пыли посвящено множество работ (см. например [15,16]). Исследования, представленные в диссертации, дополняют базу для сравнения результатов моделирования с данными наблюдений, в частности, в ближнем, среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне, где излучение пыли, в том числе, частиц полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), наиболее интенсивно.

Можно также отметить работы по исследованию фотометрических и спектральных параметров ОЗО в галактиках различных морфологических типов [17–20], но в них большее внимание уделяется анализу ультрафиолетового и оптического диапазонов, а также линии $H\alpha$, тогда как наша работа в значительной степени опирается на ИК-данные.

Основной целью диссертации является исследование различных компонентов МЗС во внегалактических комплексах звездообразования (КЗО) с одновременным использованием и данных наблюдений излучения пылинок различных размеров, и данных наблюдений молекулярного и атомарного газа. Мы рассматриваем как спиральные и иррегулярные галактики, типичные для своих морфологических типов (их мы, возможно, не совсем корректно, называем изолированными галактиками), так и галактики с различными особенностями морфологии — полярные кольца, смещенные бары и пр. Важными источниками наблюдательных данных в ИК диапазоне, использованными в диссертации, являются обзоры, полученные на космических инструментах: SINGS [21] (ближняя и средняя ИК-области, длины волн 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 и 24 мкм, космический телескоп им. Спитцера), WISE [22] (ближняя и средняя ИК-области, длины волн 3.4, 4.6, 12 и 22 мкм), а также KINGFISH [23] (далекая ИК-область, длины волн 70, 100 и 160 мкм, космический телескоп им. Гершеля). Данные наблюдений газа брались нами из обзоров HERACLES [24] и THINGS [25]. Мы

измерили интенсивность излучения и оценили массу пыли, атомарного и молекулярного газа в комплексах ЗО более чем в 15 изолированных галактиках на основе архивных наблюдательных данных с современных телескопов. Данные оценки помогут уточнить соотношения между важными компонентами МЗС на локальном уровне в галактиках различных морфологических типов. Для ряда галактик по ИК-данным были определены параметры пыли и поля излучения при помощи модели Дрейна и Ли [26]. В рамках этой модели поле излучения в комплексе описывается безразмерным коэффициентом U , выражающим среднюю интенсивность поля излучения в единицах поля в солнечной окрестности. Предполагается, что доля $1 - \gamma$ всей пыли подвергается воздействию «минимального» поля излучения U_{\min} , а оставшаяся доля пыли γ находится в окрестностях массивных звезд и освещается усиленным полем УФ-излучения.

Помимо изолированных спиральных и иррегулярных галактик, в данной работе также исследованы галактики с особенностями морфологии. Полученные для них соотношения компонент МЗС впервые сравнены с таковыми для изолированных галактик. В частности, мы рассмотрели галактику с полярным кольцом (ГПК) NGC 660. Такие галактики немногочисленны и примечательны тем, что включают в себя две вращающиеся структуры — кольцо и диск, — располагающиеся почти ортогонально друг к другу и имеющие общий центр. Различные исследования показывают, что возраст диска может отличаться от возраста кольца [27]. Мы изучили возможные отличия в соотношениях компонент МЗС в ОЗО диска и кольца NGC 660, которые также могут быть связаны с различиями в возрасте.

В дальнейшем развитии подобных исследований важную роль играет увеличение числа известных ГПК. Первым каталогом кандидатов в такие объекты был каталог PRC, составленный в 1990 году [28]. Создание этого каталога породило волну исследований этих галактик во всех возможных диапазонах, но как правило новых кандидатов в ГПК почти никто не искал. В 2011 году А.В. Моисеев предложил провести поиск новых ГПК, используя ресурс GalaxyZoo¹. В результате работы онлайн-форума, где волонтеры искали объекты, похожие на ГПК, было выделено около сотни объектов. Эти объекты помогли разработать критерии поиска ГПК, и по этим критериям, используя обзор SDSS², мы создали каталог с 275 новыми кандидатами в ГПК. Объекты, входящие в каталог, были разделены на несколько групп, по аналогии с каталогом Вайтмо:

¹<https://www.galaxyzoo.org/>

²<http://www.sdss.org/>

лучшие кандидаты; хорошие кандидаты, включая возможные случайные проекции; родственные объекты, сильно изогнутые диски; кольца, близкие к положению «плашмя». В диссертационной работе для галактик из группы лучших кандидатов были определены структурные параметры: угол наклона структур кольца и диска галактики друг к другу, диаметр кольцевой структуры, отношение диаметров кольца и основной галактики. Эта информация необходима, чтобы разобраться, какой механизм привел к образованию ГПК в каждом конкретном случае, а также решить вопрос об устойчивости полярных структур. Кроме рассмотрения протяженных полярных колец, которые можно называть внешними, мы также сравниваем их с более компактными внутренними полярными дисками или кольцами (ВПД). Эти объекты представляют собой небольшие (диаметр 1 кпк) полярные или наклонные звездно-газовые диски на фоне яркого балджа. ВПД вращаются вокруг центра основной галактики. Нами показано, что по величине отношения радиуса кольца к радиусу основной галактики внешние кольца и ВПД формируют непрерывную последовательность.

Цели и задачи исследования

Основные задачи исследования таковы:

- 1) Создать выборку галактик, данные для которых одновременно содержатся в обзорах THINGS, KINGFISH, SINGS и HERACLES. В отобранных галактиках выделить области звездообразования по ИК-данным.
- 2) Выделить ОЗО в диске и кольце галактики с полярным кольцом NGC 660.
- 3) Оценить потоки излучения ОЗО в различных спектральных диапазонах, используя метод апертурной фотометрии, и определить параметры пыли (долю полициклических ароматических углеводородов в общей массе пыли, общую массу пыли) и УФ поля излучения.
- 4) Выявить статистические закономерности между потоками излучения в рассматриваемых диапазонах в выделенных областях звездообразования.
- 5) Определить структурные параметры галактик с полярными кольцами из группы «лучших кандидатов» каталога кандидатов в галактики с полярными кольцами, составленного при участии соискателя.

Положения, выносимые на защиту по результатам диссертационной работы

- 1) Поток излучения внегалактических областей звездообразования в линии CO(2–1) практически не коррелирует с параметрами поля ультрафиолетового излучения в этих областях. Потоки излучения в ИК-полосах на 8 мкм (F_8) и 24 мкм (F_{24}) растут как при повышении минимального уровня интенсивности ультрафиолетового излучения в ОЗО, так и при повышении доли пыли, освещенной полем с повышенной интенсивностью в окрестностях массивных звезд. Эта корреляция может отражать как более яркое излучение горячих пылинок в среде с большей интенсивностью УФ-излучения, так и эволюционное уменьшение потока, происходящее одновременно с понижением интенсивности излучения. Отношение потоков F_8/F_{24} демонстрирует антикорреляцию с параметрами, характеризующими интенсивность поля излучения в ОЗО. Если считать, что это отношение характеризует содержание в ОЗО ароматических пылинок, обнаруженная антикорреляция может свидетельствовать об их разрушении в интенсивном поле УФ-излучения.
- 2) Потоки излучения внегалактических областей звездообразования в ближнем (8 мкм), среднем (24 мкм) и дальнем (70, 100 и 160 мкм) инфракрасных диапазонах коррелируют между собой, что указывает на общую природу излучения в этих диапазонах: вероятно, это излучение порождается, главным образом, горячей пылью в окрестностях молодых звезд. При одном и том же потоке в дальнем ИК-диапазоне эмиссия на 8 мкм оказывается слабее в ОЗО с малой металличностью, чем в ОЗО с высокой металличностью. Это подтверждает известную корреляцию металличности и содержания ПАУ, которые считаются основным источником излучения на 8 мкм. Соотношение потоков в дальнем ИК-диапазоне и на 24 мкм от металличности не зависит.
- 3) Выявлены существенные различия между наблюдаемыми характеристиками ИК-поля излучения ОЗО диска и кольца галактики NGC 660. ОЗО диска по своим эмиссионным характеристикам аналогичны ОЗО в дисках изолированных спиральных галактик. ОЗО кольца компактнее и содержат меньше пыли, то есть характеризуются более слабым излучением в среднем и ближнем инфракрасном диапазоне. Для ОЗО кольца также ха-

рактерна низкая светимость в УФ-диапазоне и линии $H\alpha$. Все эти факты указывают на молодость ОЗО кольца относительно ОЗО диска.

- 4) В галактиках с признаками недавнего взаимодействия NGC 660 и NGC 1512 поверхностная яркость комплексов звездообразования в ИК-диапазонах оказывается существенно ниже, чем в галактике NGC 628, выбранной в качестве галактики сравнения. Это свидетельствует, что ОЗО в двух этих галактиках менее богаты пылевыми частицами, светящими в ближнем и среднем ИК-диапазоне, а в галактике NGC 1512 и в дальнем ИК-диапазоне. При этом в периферийной области NGC 1512 ОЗО, излучающие в ближнем ИК-диапазоне, не наблюдаются. Для ОЗО в NGC 660 и NGC 1512 также характерны более низкие светимости в $H\alpha$ и УФ-диапазоне, что в целом может указывать на относительную молодость исследуемых ОЗО в двух этих галактиках.
- 5) В асимметричных галактиках NGC 4395 и NGC 4618 поверхностная яркость ОЗО в ИК-диапазоне не отличается от поверхностной яркости ОЗО в галактиках с обычной морфологией. Поверхностная яркость ОЗО из этих галактик в УФ-диапазоне превышает аналогичную яркость ОЗО в галактиках с обычной морфологией. Однако физические размеры ОЗО в двух этих галактиках оказываются меньше размеров ОЗО и во взаимодействующих галактиках, и в галактике сравнения. Это говорит о том, что звездообразование в двух этих галактиках происходит несколько более интенсивно, чем в других рассмотренных галактиках.
- 6) Из каталогов SPRC и PRC отобрано 78 наиболее достоверно идентифицированных объектов. Для них определены структурные параметры: угол наклона структур кольца и диска галактики друг к другу, диаметр кольцевой структуры, отношение диаметров кольца и основной галактики. Показано, что большая часть внешних кольцевых структур в составленной выборке имеет угол наклона к диску, превышающий 70° , то есть они действительно являются полярными. Только у двух из 78 объектов отношения размеров внешнего полярного кольца и околоядерного (внутреннего) полярного диска лежат в диапазоне от 0.4 до 0.7. Дефицит полярных структур такого размера вызван тем, что полярные/наклонные орбиты при таких размерах перестают быть стабильными. У крупных колец, диаметр которых в четыре и более раза превышает диаметр диска, наблюда-

ется отклонение от полярной плоскости более чем на 15° , что связано с развитием изгибной неустойчивости при уменьшении плотности темного гало.

Научная новизна результатов

- 1) Впервые проведена апертурная фотометрия в таком широком диапазоне длин волн для большого количества внегалактических комплексов звездообразования.
- 2) Проведен расчет большого числа структурных параметров ГПК.
- 3) Исследованы отличия в соотношениях компонент МЗС в ОЗО диска и кольца галактики с полярным кольцом.

Практическая значимость

- 1) Созданный каталог новых кандидатов в ГПК закладывает основу для новых исследований и наблюдений. Увеличение числа данных наблюдений важно для уточнения статистических распределений таких параметров, как, например, угол наклона колец или масса темного гало.
- 2) Знание структурных параметров ГПК, таких как относительный размер кольца и наклон кольца к плоскости центрального диска, позволит уточнить механизмы образования конкретных ГПК, а также внесет ясность в устойчивость полярных структур.
- 3) Обобщенные данные апертурной фотометрии в различных диапазонах упростят статистическую обработку данных для других исследователей.
- 4) Обнаруженная в данной работе корреляция между содержанием ПАУ и металличностью на масштабе отдельных областей звездообразования может стать важным инструментом для изучения эволюции ПАУ в галактиках в зависимости не только от возраста и химического состава, но и от физических условий, которые могут отличаться для различных ОЗО в пределах одной той же галактики.
- 5) Разработанные в диссертации методы анализа наблюдений ОЗО могут использоваться при работе с новыми обзорами, в частности, с обзором PHANGS [29].

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

A1. **Smirnova K.I.**, Moiseev A. V. Are polar rings indeed polar? // Astrophysical Bulletin – 2013. – Vol. 68, 4. – P. 371-380.

A2. **Smirnova K.I.**, Murga, M. S., Wiebe, D. S., Sobolev, A. M. Relation between the parameters of dust and of molecular and atomic gas in extragalactic star-forming regions // Astronomy Reports – 2017. – vol.61, 8. – P. 646–662 doi:10.1134/S1063772917070083.

A3. **Smirnova K.I.**, Wiebe, D. S., and Moiseev, A. V. Star-forming complexes in the polar ring galaxy NGC660 // Open Astronomy – 2017. – vol. 26, 1. – P. 88–92. doi:10.1515/astro-2017-0022.

A4. **Smirnova K.I.**, Wiebe, D. S., Moiseev, A. V., and Jozsa, G. I. G. Study of Star-Forming Regions in the Peculiar Galaxies NGC 660, NGC 1512, NGC 4395, and NGC 4618 // Astrophysical Bulletin – 2020. – vol. 75, 3 – P. 234–246. doi:10.1134/S199034132003013X.

Другие публикации автора по теме диссертации

B1. **Смирнова К.И.**, Моисеев А.В. Новые кандидаты в галактики с полярными кольцами // Физика Космоса: Тр. 40-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 31 янв. – 4 февр. 2011 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2011. – С. 331.

B2. **Смирнова К.И.**, Моисеев А.В. Новый каталог галактик с полярными кольцами // Физика Космоса: Тр. 41-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. – 3 февр. 2012 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 229.

B3. **Смирнова К.И.**, Моисеев А.В. Исследование морфологии кандидатов в галактики с полярными кольцами // Физика Космоса: Тр. 42-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. – 1 февр. 2013 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 146.

B4. **Смирнова К.И.**, Мурга М. С., Вибе Д. З., Соболев А. М. Связь молекулярного и атомарного водорода с параметрами пыли во внегалактических

ком-плексах // Физика Космоса: Тр. 44-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2 – 6 февр. 2015 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – С. 198.

В5. **Смирнова К.И.**, Мурга М. С., Вибе Д. З., Соболев А. М. Выявление связи между параметрами межзвездной среды // Физика Космоса: Тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1 – 5 февр. 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – С. 231.

В6. **Смирнова К.И.**, Вибе Д. З. Выделение областей звездообразования в галактиках со смещенными барами // Физика Космоса: Тр. 47-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 29 янв. – 2 февр. 2018 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – С. 232.

В7. **Смирнова К.И.**, Вибе Д. З. Кинематика газа и параметры пыли в дисковых галактиках // Физика Космоса: Тр. 48-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. – 1 февр. 2019 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – С. 200.

В8. **Смирнова К.И.**, Вибе Д. З. Исследование областей звездообразования в галактиках NGC 1512, NGC 4618, NGC 4395 и NGC 628 // Физика Космоса: Тр. 49-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 27 – 31 янв. 2020 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – С. 212.

Личный вклад автора в совместные работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях [A1, A2, A3, A4] в журналах, рекомендованных ВАК. Все публикации, лежащие в основе работы, написаны в соавторстве, причем вклад диссертанта в работы является равным или определяющим. Автор наряду со всеми соавторами участвовал в постановке задачи, обсуждении результатов и формулировании выводов.

Автор диссертации лично провел следующие работы:

- В работе [A1] автор провел расчеты всех структурных параметров у 78 кандидатов в ГПК.
- В работе [A2] автор выполнил отбор галактик, архивные данные для которых имеются во всех рассматриваемых спектральных диапазонах, выделил ОЗО для исследования, получил потоки излучения во всех исследуемых диапазонах, провел работу по поиску параметров пыли и поля излучения, получил все нужные для анализа параметры.

- В работе [A3] автор выполнил поиск подходящей для исследования галактики, выделил подходящие для исследования области, провел измерения наблюдаемых потоков излучения, используя метод апертурной фотометрии.
- В работе [A4] автор выполнил поиск подходящих объектов, провел апертурную фотометрию, получил потоки в исследуемых диапазонах, а также провел расчет разброса скоростей в линиях $\text{H}\beta$ и $\text{H}\alpha$.

Апробация результатов

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 1) 41-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 30 января – 03 февраля 2012 г., Екатеринбург.
- 2) 42-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 28 января – 01 февраля 2013 г., Екатеринбург.
- 3) 44-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 02 – 06 февраля 2015 г., Екатеринбург.
- 4) Conference «Multi-Spin Galaxies», 30th September – 3rd October 2013, Naples, Italy.
- 5) Двадцать первая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, 26 марта – 02 апреля 2015, Омск.
- 6) 45-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 01 – 05 февраля 2016 г., Екатеринбург.
- 7) 46-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 30 января – 03 февраля 2017 г., Екатеринбург.
- 8) Конференция «Современная звездная астрономия», 14 июня – 16 июня 2017 г., Екатеринбург.
- 9) 48-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 28 янв. – 1 февр. 2019 г., Екатеринбург.

- 10) 49-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 27 – 31 янв. 2020 г., Екатеринбург.

Содержание

Во **Введении** представлена общая характеристика диссертационной работы и ее актуальность.

Глава 1 посвящена исследованию взаимосвязи между атомарным, молекулярным водородом и пылинками различных размеров во внегалактических областях звездообразования по данным наблюдений инфракрасных космических телескопов «Спитцер» и «Гершель» (излучение пыли), Very Large Array (излучение атомарного водорода) и IRAM (излучение CO). Исходная выборка состоит примерно из 300 областей звездообразования в 11 близких галактиках. Галактики были разделены на две группы по металличности: высокая металличность и низкая металличность. При помощи апертурной фотометрии были получены потоки в восьми инфракрасных диапазонах (3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 24, 70, 100 и 160 мкм), в линии атомарного водорода 21 см и линии CO (2–1). Методом спектральной подгонки были определены параметры пыли в областях звездообразования: общая масса пыли, доля ПАУ и др. Сопоставление наблюдаемых потоков показало, что связи между атомарным, молекулярным водородом и пылью различны в областях с низкой и высокой металличностью. Области с низкой металличностью содержат больше атомарного газа, но меньше молекулярного газа и пыли, в том числе ПАУ. Отношение потоков на 8 и 24 мкм, характеризующее содержание ПАУ, уменьшается с увеличением интенсивности звездного излучения, что, возможно, свидетельствует об эволюционных вариациях содержания ПАУ. Результаты подтверждают, что вклад излучения 24 мкм в общую ИК-светимость внегалактических областей звездообразования не зависит от металличности.

В **Главе 2** представлено исследование областей звездообразования (ОЗО) в peculiar галактиках NGC 660, NGC 1512, NGC 4395 и NGC 4618. Рассмотрены взаимосвязи между такими характеристиками ОЗО, как потоки в УФ, ближнем и дальнем ИК, а также в линиях H α и H β , поверхностной яркостью в этих диапазонах и разбросом лучевых скоростей ионизированного и нейтрального водорода. Показано, что во всех рассмотренных галактиках ИК-потоки от ОЗО меньше, чем в изолированных галактиках, но по разным причинам: в галактиках с признаками недавнего взаимодействия NGC 660 и NGC 1512 это

связано с низкой поверхностной яркостью ОЗО; в асимметричных галактиках NGC 4395 и NGC 4618 низкая яркость ОЗО в инфракрасном диапазоне обусловлена их небольшими размерами. Эти различия свидетельствуют, что процесс звездообразования зависит не только от морфологического типа галактики, но и от многих других факторов.

В **Главе 3** описывается определение структурных параметров 78 ГПК, из которых 72 галактики входят в каталог SPRC А.В. Моисеева и др., и еще шесть — в каталог PRC. В приближении эллиптической формы изофот у всех галактик были измерены большая и малая полуось диска основной галактики и кольца. Это позволило определить угол наклона кольца к диску галактики, диаметр кольцевой структуры, отношение диаметров кольца и основной галактики. Показано, что большая часть рассмотренных галактик имеет почти полярную ориентацию кольца, то есть угол между кольцом и диском галактики превышает 70° . У половины галактик отличие угла наклона кольца от 90° не превышает 5° . Почти все кольца галактик выборки по размеру меньше 40 кпк, при среднем диаметре около 20 кпк. Только две галактики из выборки имеют вытянутые кольца, диаметр которых превышает диаметр галактики в четыре и более раз.

В **Заключении** суммируются основные результаты работы.

Глава 1

Области звездообразования в изолированных галактиках

1.1 Введение

Звездообразование (ЗО) представляет собой сложное сочетание явлений, объединяющее множество различных физических факторов. Формирование звезд происходит в регионах с высокой плотностью межзвездного вещества, которые зачастую содержат скопления молодых массивных звезд, ионизирующих окружающий газ. Уже давно отмечено, что фундаментальной единицей звездообразования в галактиках являются так называемые *комплексы звездообразования* (КЗО) [30–32]. Изначально они отслеживались по распределению цефеид, и их возрасты оценивались в десятки миллионов лет. Предшественниками КЗО на более ранних эволюционных стадиях могут быть ОВ-ассоциации и сверхассоциации [33], зачастую еще сохраняющие связь с атомарным и молекулярным газом [13, 34, 35]. В спиральных галактиках звездообразование в значительной степени происходит в спиральных рукавах. В иррегулярных галактиках пространственное распределение областей звездообразования может быть хаотичным. Протекание процесса звездообразования во многом определяется химическим составом среды, так как от него, например, зависят скорости нагрева и охлаждения газа. В данной главе рассматриваются соотношения между параметрами областей (комплексов) звездообразования в изолированных спиральных и иррегулярных галактиках. Основные результаты, представленные в главе, опубликованы в работе [A2].

Атомарный и молекулярный газ, а также пыль являются основными компонентами межзвездной среды (МЗС), участвующими в процессе звездообразования. В качестве индикатора атомарного газа используется излучение нейтрального водорода на длине волны 21 см. Молекулярный водород в условиях, характерных для ОЗО, практически не излучает, поэтому о распределении молекулярного газа приходится судить по наблюдениям других молекул, в первую очередь, оксида углерода (СО). Источником информации о различных компонентах пыли являются наблюдения непрерывного спектра с длинами волн от нескольких микрон до миллиметра, а также наблюдения спектральных эмиссионных полос в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. Современные наземные и космические инструменты позволяют проводить пространственно разрешенные наблюдения перечисленных индикаторов во внегалактических ОЗО, что позволяет проследить связь между различными компонентами МЗС и характеристиками звездообразования в более широком диапазоне физических условий (например, металличностей), чем это доступно в нашей Галактике.

Взаимосвязям между различными компонентами МЗС посвящено значительное количество исследований. Они развиваются по нескольким направлениям. В частности, сопоставление индикаторов содержания атомарного и молекулярного газа с индикаторами темпа звездообразования (например, с различными эмиссионными линиями или инфракрасным излучением пыли) позволяет исследовать зависимость скорости звездообразования (СЗО) от поверхностной плотности газа, от степени его молекуляризации и пр. (см. напр. [8, 36]). Сравнение данных об эмиссии молекулярного газа и пыли используется для оценки возможных вариаций в так называемом «Х-факторе» [?], применяемом для преобразования интегральной интенсивности эмиссионной линии СО в лучевую концентрацию молекул H_2 .

Сравнение свойств излучения на длине волны 8 мкм с параметрами излучения в линиях СО, проведенное в работе [37], показало, что на больших пространственных масштабах излучение молекулярного газа коррелирует с излучением мелких пылинок, а именно макромолекул полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) (в частности, их радиальные профили имеют статистически одинаковую шкалу длины), но на меньших масштабах эта корреляция ослабевает. Подобные закономерности интересны для изучения, так как позволяют пролить свет на происхождение так называемого «СО-темного» молекулярного газа, т.е. газа, в котором нет или мало молекул СО, хотя водород уже преимущественно перешел в молекулярную форму. В этом случае индикатором на-

личия молекулярных сгустков может быть излучение пыли. Однако при этом возникает необходимость в другом конверсионном факторе (отношение масс пыли и газа), который позволял бы оценивать количество молекулярного водорода по интенсивности теплового излучения пылинок различных видов (см. напр. [9, 38, 39]).

В данной работе связь между различными газовыми и пылевыми компонентами МЗС рассматривается не с позиций исследования процессов звездообразования, но с позиции эволюции пыли. В настоящее время распространено представление о том, что глобальная эволюция пыли в галактиках в значительной степени обусловлена процессами, происходящими в молекулярных облаках и областях звездообразования. Важным вкладом в исследование этих процессов является установление взаимосвязи между свойствами различных населений пыли в ОЗО и в МЗС в целом.

Предполагается, что разнообразие свойств космических пылинок может быть представлено следующими основными видами населений — крупными пылинками (радиус $> 100 \text{ \AA}$), очень мелкими пылинками (ОМП, very small grains, VSG, с радиусом несколько десятков ангстрем) и ПАУ (их радиус составляет около 10 \AA) [40]. По современным представлениям, крупные пылинки (как силикатные, так и углистые) относительно холодны и потому излучают, главным образом, в континууме дальнего ИК-, субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов (длина волны более 70 мкм). Стохастический нагрев очень мелких пылинок (преимущественно углистых) приводит к генерации излучения в среднем ИК-диапазоне (порядка $20\text{--}30 \text{ мкм}$). Наконец, эмиссионные полосы в ближнем ИК-диапазоне (от 3 до 20 мкм) связывают с наличием в МЗС мелких углистых частиц с количеством атомов углерода порядка 1000 и менее, со значительным содержанием ароматических соединений. Эти частицы обычно называют ПАУ, хотя в действительности они, вероятно, имеют более сложную структуру [41]. С учетом доступных наблюдений излучение ПАУ во внегалактических ОЗО обычно характеризуют с помощью данных в полосе 8 мкм прибора IRAC Космического телескопа им. Спитцера [42]. Для описания излучения ОМП используют полосу 24 мкм прибора MIPS того же телескопа [43]. Излучение более крупных частиц на длинах волн выше 70 мкм Детектировали или детектируют на приборах PACS [44] и SPIRE [45] Космической обсерватории им. Гершеля [46], а также на наземных телескопах субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов.

Ранее подобные исследования проводились либо для галактик в целом, либо в пространственно разрешенных исследованиях для отдельных «пикселей». В частности, сравнивая эмиссию пылинок на длинах волн 8 и 24 мкм, авторы работы [47] показали, что большинство ПАУ находится в диффузной среде вместе с пылинками, которые излучают на 160 мкм. В связи с этим был сделан вывод, что отношение потоков на 8 мкм и 160 мкм является показателем интенсивности межзвездного поля излучения, которое нагревает диффузную пыль в галактиках. Помимо этого было сделано интересное заключение о том, что ПАУ можно использовать как индикатор распределения диффузной пыли в галактиках, а также что ПАУ не следует использовать (а если использовать, то аккуратно) в качестве индикатора ЗО.

Поскольку нас интересуют различные аспекты эволюции пылевых частиц, мы предпочли рассмотреть не общую межзвездную среду в галактиках, а конкретные области звездообразования, в которых можно ожидать наиболее существенных изменений в свойствах пылинок. Мотивацией для проведения данного исследования стала работа Храмцовой и др. [48], в которой было показано, что изменение относительного содержания пылинок различных видов со временем во внегалактических областях звездообразования имеет различный характер в зависимости от металличности ОЗО.

В связи с тем, что разрешение изображений, используемых в работе, достаточно низкое (12", см. ниже), изучаемые нами объекты имеют пространственный масштаб порядка 500 пк. Хотя этот масштаб соответствует упомянутым выше комплексам когерентного звездообразования, в некоторых случаях мы, вероятно, определяем параметры не комплексов, а групп близких друг к другу индивидуальных ОЗО с характерными размерами порядка 100 пк, не разрешимых на ИК-изображениях (хотя не исключено, что некоторые из них являются реальными комплексами ЗО). Поэтому в состав наших объектов могут входить несколько ОЗО с разными характеристиками (возраст, масса и т.д.), и то, что мы наблюдаем, представляет собой суммарное излучение всех ОЗО, попавших в апертуру.

В данной работе мы не имеем возможности учесть различия в возрасте объектов, поэтому в число исследуемых ОЗО могут одновременно входить как ОЗО, в которых звездообразование началось недавно, так и ОЗО, в которых оно близко к завершению. Следует однако отметить, что в исследованиях [48, 49] разброс возрастов ОЗО, выделенных сходным образом, оказался не столь велик, от 3 до 8 млн. лет.

Основное внимание мы уделяем не возрасту, а металличности ОЗО, которая не должна сильно варьироваться в группе близких областей, так как пространственные масштабы ее изменения намного больше. Реальная внутренняя структура объектов может быть крайне сложной, включая полости, создаваемые взрывами сверхновых или звездным ветром, волокна, плотные сгустки, перемежающиеся с разреженной средой, однако наша задача — получить соотношения между интегральными характеристиками газа и пыли, независимо от того, как они пространственно распределены внутри объектов.

1.2 Данные наблюдений и их обработка

В этой главе рассматриваются галактики, одновременно включенные в наблюдательные обзоры THINGS¹ [25] (линия атомарного водорода HI на длине волны 21 см, телескоп Karl G. Jansky Very Large Array (VLA)), KINGFISH² [23] (далекая ИК-область, длины волн 70, 100 и 160 мкм, космический телескоп им. Гершеля), SINGS³ [21] (ближняя и средняя ИК-области, длины волн — 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 и 24 мкм, космический телескоп им. Спитцера) и HERACLES [24]⁴ (линия CO (2–1), телескоп IRAM).

Конкретно для исследования были отобраны ОЗО из 11 галактик: Holmberg II, IC 2574, DDO 154, NGC 628, NGC 925, NGC 2976, NGC 3351, NGC 3627, NGC 4736, NGC 5055, NGC 6946. Они относятся к разным морфологическим типам, что ведет к различиям в их характеристиках: металличности, темпе звездообразования и т.д. В табл. 1.1 мы приводим информацию по рассмотренным галактикам, а именно: экваториальные координаты центра галактик (взяты из работы [50]), расстояние (с указанием источника), морфологический тип (взяты из работы [50]), металличность (взяты средние для галактик значения из работы [51], полученные с использованием калибровки PT05) и количество выбранных нами областей. В скобках приведено количество областей, для которых удалось провести подгонку спектров для нахождения параметров пыли (см. далее). Диаметр областей составляет не менее 12'', что соответствует наилучшему разрешению среди используемых нами изображений (на длине волны 160 мкм, телескоп им. Гершеля). Мы выделяли области, визуально различимые

¹<http://www.mpia.de/THINGS/Data.html>

²http://herschel.esac.esa.int/Science_Archive.shtml

³<http://sings.stsci.edu>

⁴http://www.cv.nrao.edu/~aleroy/heracles_data/

хотя бы в одном из диапазонов: 8 мкм, 24 мкм, 160 мкм, 21 см и CO (2–1). Большинство областей так или иначе проявляют себя на всех изображениях, однако встречаются области, которые излучают только в одном диапазоне. Чтобы максимально уменьшить влияние эффекта селекции, мы включали такие области в нашу выборку. Всего нами было выделено около 300 областей.

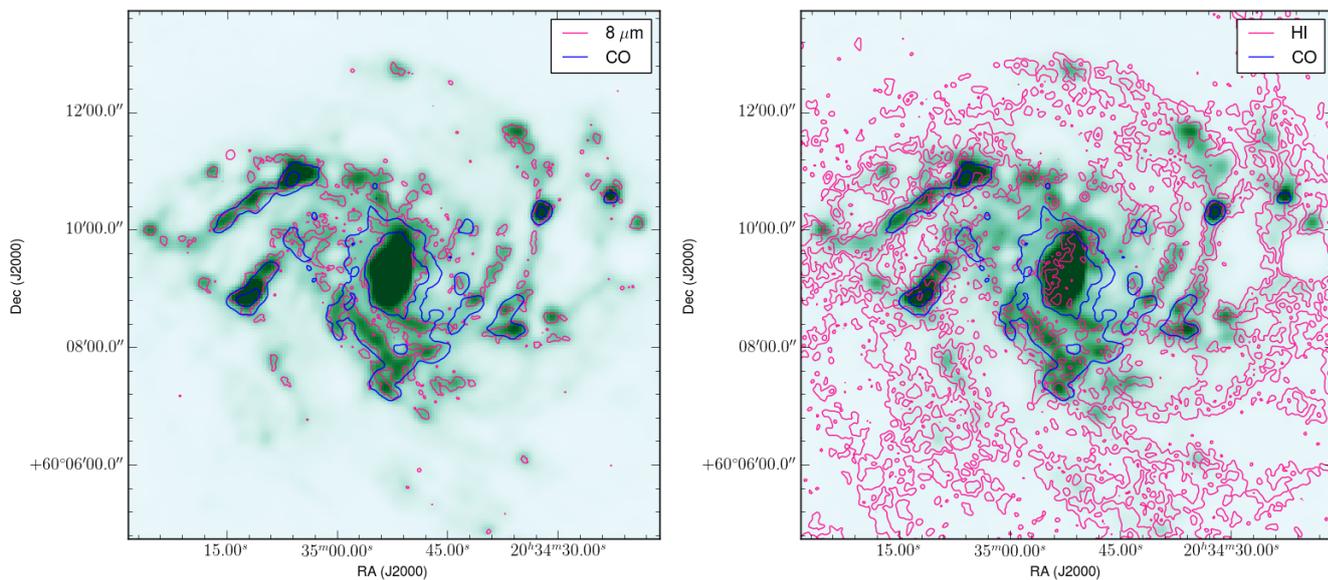


Рисунок 1.1: Изображения галактики NGC 6946 на длине волны 160 мкм, на которые контурами нанесены изофоты в полосе на длине волны 8 мкм красным цветом (слева), в линии CO синим цветом (на обоих рисунках) и в линии HI красным цветом (справа).

Таблица 1.1: Данные исследованных галактик

Название галактики	α	δ	Расстояние, Мпк	Морфологический тип	$12 + \log(O/H)$	Число областей
NGC 628	24.1739458	15.7836619	9.0 [39]	SA(s)c	8.45	56 (65)
NGC 925	36.8203333	33.5791667	9.0 [40]	SAB(s)d	8.34	30 (43)
Ho II	124.770750	70.720028	3.3 [40]	Im	7.72	7 (12)
NGC 2976	146.814417	67.916389	3.6 [41]	SAc pec	8.36	5 (7)
IC 2574	157.097833	68.412139	3.8 [41]	SAB(s)m	7.85	11 (16)
NGC 3351	160.990417	11.703806	10.1 [42]	SB(r)b	8.71	13 (23)
NGC 3627	170.0623508	12.9915378	9.9 [43]	SAB(s)b	8.34	11 (13)
NGC 4736	192.721088	41.120458	5.0 [41]	(R)SA(r)ab	8.44	10 (14)
DDO 154	193.521875	27.149639	4.1 [44]	IB(s)m	7.54	2 (2)
NGC 5055	198.955542	42.029278	8.2 [45]	SA(rs)bc	8.65	23 (28)
NGC 6946	308.7180150	60.1539150	5.6 [39]	SAB(rs)cd	8.47	46 (54)

В качестве примера на рис. 1.1 слева показано изображение галактики NGC 6946 на длине волны 160 мкм, на которое дополнительно нанесены изофоты в полосе 8 мкм и в линии CO. Справа приведено то же изображение на длине волны 160 мкм с изофотами в линиях HI и CO. Видно, что области с эмиссией на 160 мкм практически всегда совпадают с областями эмиссии на 8 мкм, тогда как эмиссия в линиях CO соответствует только наиболее крупным и ярким ОЗО. Если нанести на карту изофоту CO с более низким значением, мы увидим, что молекулы CO также присутствуют практически везде, где наблюдается пыль, однако для CO отсутствуют такие же четкие контуры, как для пыли, то есть молекулы CO распределены по галактике более диффузно, чем пыль. Атомарный газ в отличие от пыли и молекулярного газа практически повсеместен. Он также наиболее заметен в спиральных рукавах, но необязательно ассоциирован с ОЗО; кроме того, в значительном количестве присутствует на периферии галактики. Такая картина вполне ожидаема: концентрация молекулярного газа должна быть повышена преимущественно в ОЗО, тогда как диапазон условий существования атомарного водорода значительно шире, поэтому он может находиться как внутри ОЗО (окружать зоны ионизованного водорода), так и отдельно от них. Тем не менее, несмотря на существующее пространственное разделение атомарного и молекулярного водорода, а также пыли, рассматриваемые нами области достаточно велики, чтобы внутри них мы учитывали все три компонента и могли проводить их сопоставление.

На рис. 1.2 мы иллюстрируем долю объектов, попадающих в нашу выборку по наличию эмиссии в тех или иных полосах. Мы считаем, что объект излучает в полосе, если отношение сигнала к шуму для соответствующего потока превышает 2. Более чем у половины объектов эмиссия имеется во всех рассмотренных полосах. Чуть более 20% объектов не излучают в линии CO (при заданном ограничении по потоку). Возможно, в этих ОЗО молекулярный газ уже исчерпан, или его осталось недостаточно для яркой эмиссии. Около 4% объектов не имеют эмиссии в линии HI. Такие области, по всей видимости, содержат преимущественно молекулярный и ионизованный водород, тогда как атомарного водорода там очень мало. Вероятно, это плотные молекулярные облака, однако, судя по тому, что в них наблюдается горячая пыль, звезды в них уже сформировались. Примерно в 3% объектов не наблюдается излучения на 8 и 24 мкм, то есть излучения горячей мелкой пыли и ПАУ. Такие ОЗО могут быть как старыми, в которых мелкая пыль по большей части разрушена, так и молодыми, в которых еще не появилось достаточно звезд, нагревающих

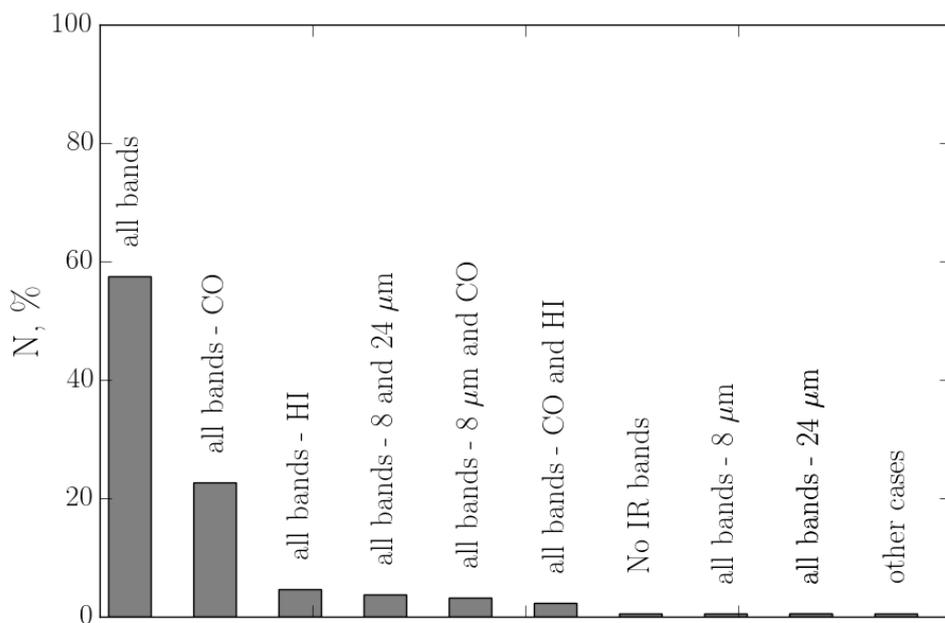


Рисунок 1.2: Количество объектов относительно полного объема выборки в процентах, удовлетворяющих разным условиям, например объекты, для которых есть эмиссия ($> 2\sigma$) во всех рассмотренных диапазонах, объекты, у которых эмиссия не наблюдается только в линии CO, и т.д.

пыль. Примерно в 2% объектов не наблюдается излучения на 8 мкм и в линии CO. Предположительно в таких объектах ПАУ и молекулы CO разрушены ультрафиолетовым излучением.

В выборке также встречаются единичные объекты, в которых, например, нет излучения одновременно в линиях HI и CO, или нет излучения пыли, но, поскольку мы не ставим задачи классификации объектов в выборке, индивидуально эти объекты рассматриваться не будут. Стоит отметить, что такие объекты так или иначе отклоняются от «нормы» (которой мы считаем наличие излучения во всех полосах) и потому могут частично сказываться на наших результатах, выбиваясь из получаемых соотношений.

Изображения на разных длинах волн изначально получены с различными угловыми разрешениями. Для приведения всех инфракрасных изображений к общему угловому разрешению, равному разрешению изображений на 160 мкм, проводилась процедура свертки, ядро которой бралось из работы [52]. Также все ИК-изображения и изображения в линии CO были приведены к одинаковому размеру пикселя, равному $2.85''$ (размер пикселя для изображений на длине волны 160 мкм). Наконец, все инфракрасные изображения были конвертированы к

единой единице интенсивности Ян/пиксель. После предварительной подготовки наблюдательного материала проводилась апертурная фотометрия выбранных областей с вычитанием фона. Процедура фотометрии и оценка погрешностей измерений описаны в работе [48]. Фон во всех случаях оценивался по кольцу шириной шесть пикселей, окружающему исследуемую область. С учетом размера пикселя для ИК-изображений это означает, что кольцо фона примерно в два раза шире самой апертуры. Такое широкое кольцо позволяет сгладить эффект соседних ярких областей и более корректно учесть в апертуре именно диффузный фон.

Далее в работе значительное внимание будет уделено эмиссии ПАУ и ОМП на длинах волн 8 и 24 мкм, соответственно. Однако значительная доля излучения на этих длинах волн генерируется звездами. Кроме того, в полосу на 24 мкм попадает излучение не только ОМП, но и более крупной пыли. Чтобы выявить излучение только ПАУ на 8 мкм (F_8^{afe}) и только ОМП на 24 мкм (F_{24}^{ns}), мы применяем методику оценки звездного вклада и вклада крупной пыли на 8 мкм, описанную в работе [53].

Результаты апертурной фотометрии для одной из галактик, Holmberg II, приведены в табл. 1.2. Аналогичные данные для остальных галактик доступны в электронной форме <https://disk.yandex.ru/i/0PBoCA3V0MYqхw>. В табл. 1.2 содержится информация о положении ОЗО, размере апертуры, потоках излучения на всех рассмотренных длинах волн. Для полос на 8 мкм и 24 мкм мы приводим как полные измеренные потоки F_8 и F_{24} , так и скорректированные — F_8^{afe} и F_{24}^{ns} . Далее в работе для краткости под F_8 и F_{24} мы будем подразумевать скорректированные потоки.

Таблица 1.2: Фотометрические результаты для галактики Holmberg II

n	α	δ	R	$F_{3.6} \pm \Delta F_{3.6}$ mJy	$F_{4.5} \pm \Delta F_{4.5}$ mJy	$F_{5.8} \pm \Delta F_{5.8}$ mJy	$F_8 \pm \Delta F_8$ mJy	$F_8^{\text{ate}} \pm \Delta F_8^{\text{ate}}$ mJy	$F_{24} \pm \Delta F_{24}$ mJy	$F_{24}^{\text{ns}} \pm \Delta F_{24}^{\text{ns}}$ mJy	$F_{70} \pm \Delta F_{70}$ mJy	$F_{100} \pm \Delta F_{100}$ mJy	$F_{160} \pm \Delta F_{160}$ mJy	$F_{\text{CO}} \pm \Delta F_{\text{CO}}$ Jy · km/s	$F_{\text{HI}} \pm \Delta F_{\text{HI}}$ Jy · km/s
1	124.70748	70.746922	12"	0.19 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.44 ± 0.03	0.64 ± 0.05	0.41 ± 0.04	9.32 ± 0.52	9.25 ± 0.52	74.51 ± 3.31	70.92 ± 4.36	34.32 ± 2.50	0.00 ± 0.03	1.69 ± 0.06
2	124.72882	70.719817	12"	0.21 ± 0.06	0.14 ± 0.05	0.15 ± 0.04	0.06 ± 0.01	0.00 ± 0.03	0.98 ± 0.23	0.90 ± 0.23	3.93 ± 4.62	5.21 ± 7.64	6.14 ± 6.61	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.08
3	124.72882	70.716097	12"	0.25 ± 0.05	0.20 ± 0.03	0.21 ± 0.04	0.13 ± 0.01	0.00 ± 0.02	2.04 ± 0.16	1.95 ± 0.16	26.30 ± 3.88	38.92 ± 6.38	34.51 ± 4.47	0.02 ± 0.03	0.40 ± 0.08
4	124.73447	70.710631	12"	0.07 ± 0.05	0.05 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.10 ± 0.01	0.04 ± 0.03	1.12 ± 0.16	1.09 ± 0.16	28.48 ± 4.14	41.16 ± 4.47	20.00 ± 5.38	0.00 ± 0.03	1.98 ± 0.26
5	124.75129	70.717389	12"	0.13 ± 0.04	0.09 ± 0.03	0.12 ± 0.04	0.20 ± 0.02	0.11 ± 0.03	0.78 ± 0.20	0.77 ± 0.20	20.69 ± 2.64	32.01 ± 4.53	35.03 ± 3.78	0.01 ± 0.03	0.59 ± 0.22
6	124.76345	70.717172	12"	0.14 ± 0.04	0.09 ± 0.03	0.15 ± 0.04	0.12 ± 0.03	0.03 ± 0.03	0.82 ± 0.12	0.77 ± 0.12	10.65 ± 3.40	18.63 ± 4.74	16.94 ± 5.22	0.06 ± 0.03	0.55 ± 0.17
7	124.84857	70.716375	12"	0.23 ± 0.12	0.16 ± 0.07	0.18 ± 0.08	0.06 ± 0.02	-0.06 ± 0.05	0.81 ± 0.80	0.73 ± 0.81	3.74 ± 8.82	6.73 ± 12.05	6.50 ± 5.92	0.00 ± 0.04	0.51 ± 0.23
8	124.84639	70.698353	12"	0.13 ± 0.16	0.07 ± 0.10	0.09 ± 0.10	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.07	0.09 ± 0.21	0.04 ± 0.22	0.60 ± 5.23	0.00 ± 3.86	0.00 ± 2.46	0.00 ± 0.03	0.00 ± 0.14
9	124.86434	70.699719	12"	0.06 ± 0.13	0.03 ± 0.10	0.09 ± 0.08	0.12 ± 0.02	0.07 ± 0.06	2.37 ± 0.23	2.35 ± 0.23	33.36 ± 4.23	15.89 ± 4.14	11.48 ± 2.51	0.04 ± 0.03	0.40 ± 0.16
10	124.8654	70.705728	12"	0.57 ± 0.28	0.36 ± 0.18	0.32 ± 0.16	0.14 ± 0.04	0.00 ± 0.13	1.13 ± 0.43	0.94 ± 0.44	25.51 ± 6.29	21.90 ± 6.82	6.31 ± 4.50	0.00 ± 0.03	0.00 ± 0.16
11	124.87076	70.716944	12"	0.28 ± 0.05	0.35 ± 0.04	0.87 ± 0.05	1.16 ± 0.07	0.75 ± 0.07	23.41 ± 1.55	23.31 ± 1.55	91.40 ± 10.27	65.29 ± 14.20	29.30 ± 7.20	0.01 ± 0.03	0.21 ± 0.19
12	124.80287	70.718733	12"	0.77 ± 0.42	1.89 ± 0.20	4.36 ± 0.31	6.03 ± 0.24	4.00 ± 0.30	22.02 ± 1.35	21.76 ± 1.35	139.42 ± 8.75	130.92 ± 8.73	85.69 ± 6.37	0.04 ± 0.02	0.48 ± 0.06

Таблица 1.3: Параметры пыли и газа в галактике Holmberg II

n	$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	$q_{\text{PAH}} \pm \Delta q_{\text{PAH}}, \%$	$U_{\text{min}} \pm \Delta U_{\text{min}}$	$\gamma \pm \Delta \gamma \times 10^{-3}$	$M_{\text{dust}} \pm \Delta M_{\text{dust}}, M_{\odot}$	$\Omega \pm \Delta \Omega$
1	7.72	0.41 ± 0.00	24.69 ± 0.13	51.34 ± 0.42	30.61 ± 0.14	30.24 ± 0.17
3	7.72	0.45 ± 0.00	4.48 ± 1.13	11.91 ± 1.31	64.51 ± 19.01	23.25 ± 2.12
4	7.72	0.42 ± 0.00	17.92 ± 3.87	0.23 ± 1.22	21.05 ± 4.48	4.84 ± 1.65
5	7.72	0.72 ± 0.10	2.86 ± 0.65	7.64 ± 2.72	106.10 ± 21.16	17.38 ± 2.59
6	7.72	0.46 ± 0.00	2.93 ± 2.62	24.94 ± 3.93	49.94 ± 34.45	19.40 ± 2.53
11	7.72	0.47 ± 0.00	24.69 ± 0.12	116.10 ± 0.69	27.06 ± 0.13	53.92 ± 0.43
12	7.72	2.71 ± 0.12	16.96 ± 2.79	95.68 ± 8.80	83.68 ± 10.87	301.80 ± 23.47

Данные фотометрии в непрерывном спектре были использованы для определения параметров пыли и поля излучения при помощи модели Дрейна и Ли [26]. В ней предполагается, что пыль массой M_{dust} , в которой долю q_{PAU} составляют ПАУ, нагревается полем излучения, интенсивность которого U заключена в пределах от U_{min} до U_{max} . При этом массовая доля $(1 - \gamma)$ пыли освещается только полем с интенсивностью U_{min} , а массовая доля γ освещается полем, интенсивность которого распределена в указанных пределах по степенному закону с показателем α , так что

$$\frac{dM_{\text{dust}}}{dU} = (1 - \gamma)M_{\text{dust}}\delta(U - U_{\text{min}}) + \gamma M_{\text{dust}} \frac{\alpha - 1}{U_{\text{min}}^{1-\alpha} - U_{\text{max}}^{1-\alpha}} U^{-\alpha}. \quad (1.1)$$

Следуя работе [54], мы зафиксировали для параметров U_{max} и α значения 10^6 и 2, соответственно. Формула (1.1) может использоваться для вычисления модельного спектра излучения пыли в исследуемом объекте. Вписывая модельный спектр в данные апертурной фотометрии, мы оценивали для каждой ОЗО следующие параметры: массовую долю ПАУ q_{PAU} , полную массу пыли M_{dust} , минимальную интенсивность поля излучения U_{min} и долю объема области с повышенным полем излучения γ , а также параметр Ω , который характеризует звездный вклад в ближней ИК-области. Все интенсивности даны в единицах среднего поля излучения в окрестности Солнца [55].

Для подгонки использовалась библиотека спектров, подготовленная авторами [26], в которой массовая доля ПАУ q_{PAU} ограничена значениями 0.5–4.8%, а величина U_{min} — значениями 0.1–25. Процедура подгонки производилась с помощью минимизации величины χ^2 методом Левенберга-Марквардта, где χ^2 представляет собой сумму квадратов разностей между наблюдательными, $F_{\nu,\text{band}}^{\text{obs}}$, и теоретическими, $F_{\nu,\text{band}}^{\text{model}}$, значениями потоков в каждой из ИК-полос с учетом погрешностей наблюдений ($\Delta F_{\text{band}}^{\text{obs}}$):

$$\chi^2 = \sum_{\text{band}} \frac{(F_{\nu,\text{band}}^{\text{obs}} - F_{\nu,\text{band}}^{\text{model}})^2}{(\Delta F_{\text{band}}^{\text{obs}})^2}. \quad (1.2)$$

На рис. 1.3 показаны примеры подгонки спектров двух ОЗО — один с хорошей подгонкой, второй — с неудачной подгонкой. Горизонтальными сплошными линиями показаны ширины фотометрических полос приборов IRAC, MIPS и PACS. Области, спектры которых нам не удалось удовлетворительно описать, были исключены из дальнейшего рассмотрения. Обычно это связано с тем, что поток в каком-либо диапазоне оказывается нефизично низким. Эти случаи отдельно рассматриваются в следующем подразделе.

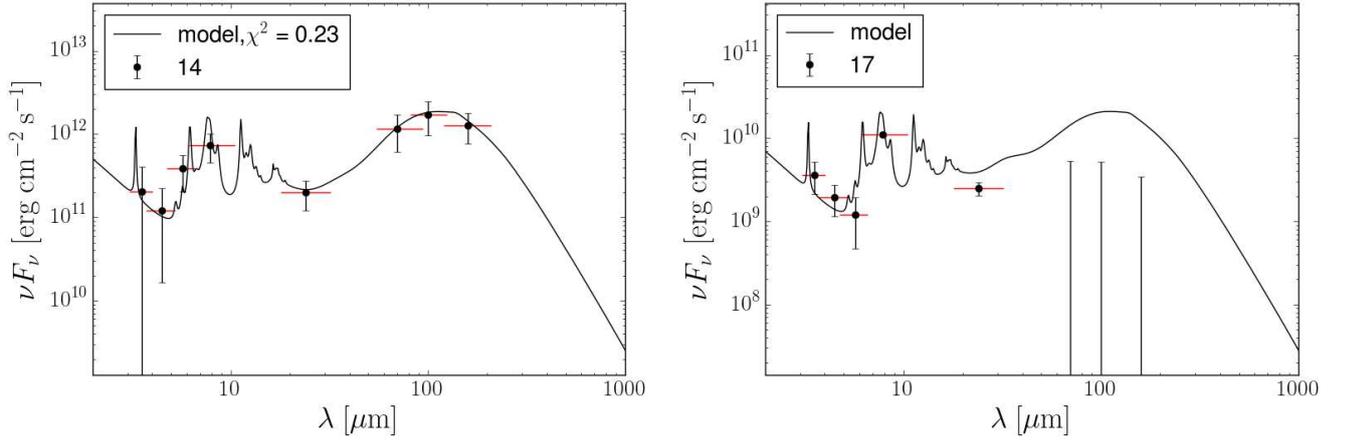


Рисунок 1.3: Примеры спектров с удачной подгонкой (слева; область 14 из галактики NGC 5055) и неудачной подгонкой (справа; область 17 из галактики IC 2574).

1.2.1 Исключение областей

Как уже говорилось, изначально мы выбирали для анализа области, различные хотя бы в одном из рассмотренных диапазонов. Однако для проведения подгонки необходимы области, которые обладали бы значимыми потоками во всех инфракрасных полосах. Поэтому некоторые области из подгонки нам пришлось исключить. В последнем столбце табл. 1.1 количество ОЗО перед скобками приводится без учета исключенных областей и областей, для которых не удалось провести подгонку спектра.

NGC 6946. В этой галактике исключены восемь областей, у пяти из которых потоки имелись не во всех ИК-полосах. В трех остальных результаты подгонки получились нефизичными, поскольку в апертуру попадало излучение соседних областей.

NGC 5055. Исключены пять областей. Две из них были выделены по эмиссии CO, но лишены излучения в ИК-диапазоне. В трех остальных результаты подгонки получились нефизичными, поскольку в апертуру попадало излучение соседних областей.

NGC 4736. Исключены четыре области. В двух из них излучение было зарегистрировано не на всех длинах волн, рассмотренных в работе. Остальные две имеют сложную структуру (к тому же различающуюся в различных ИК-полосах), из-за чего в апертуру попадало излучение соседних областей.

NGC 3627. Исключены две области из-за отсутствия излучения в полосе 24 мкм.

NGC 3351. Исключены десять областей. Шесть областей исключены из-за отсутствия излучения в одной или нескольких ИК-полосах. В трех исключенных областях из этих шести присутствует только излучение CO.

NGC 2976. Исключены две области, имеющие нечеткую структуру, из-за чего в апертуру попало излучение соседних областей.

NGC 925. Исключены тринадцать областей. В семи из них поток присутствовал не во всех рассмотренных ИК-полосах.

NGC 628. Исключены девять областей, четыре из них из-за нечеткой структуры.

Но II. Исключены пять областей из-за отсутствия излучения в одной или нескольких полосах.

IC 2574. Исключены пять областей с нечеткой структурой.

1.2.2 Металличность

В данной главе металличности областей в спиральных галактиках вычислялись приближенно с использованием радиальных градиентов металличности, взятых из работы [51]. В этой работе собраны спектроскопические данные из различных источников, и использовались два универсальных метода для оценки металличности: теоретическое соотношение, представленное в работе [56], и эмпирически полученное соотношение из работы [57]. Последнее мы и взяли для своих расчетов. Для иррегулярных галактик для каждой области берется среднее значение по галактике. Разброс значений металличности в иррегулярных галактиках небольшой, поэтому мы не сильно уменьшаем точность наших результатов, к тому же в работе основное внимание уделяется различию свойств высокометалличных ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 7.9$) и низкометалличных ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 7.9$) областей, тогда как сами точные значения металличностей нас не интересуют. Металличность выступает лишь как критерий, по которому мы относим область к одной из двух групп.

1.3 Результаты

Мы исходим из предположения, что содержание различных компонентов МЗС в ОЗО не является независимым, и потому в определенных нами параметрах должны наблюдаться различные корреляции. При этом мы рассматриваем как наблюдательные параметры (F_8 , F_{24} , F_{70} , F_{160} , F_{CO} и F_{HI}), так и производ-

ные параметры, определенные при помощи подгонки спектральных распределений энергии (M_{dust} , $q_{\text{РАН}}$, U_{min} и γ). На всех описанных далее рисунках указан коэффициент ранговой корреляции Спирмена r_s . Нужно помнить, что производные параметры сами по себе являются, по сути, функциями измеренных потоков излучения в ИК-диапазоне.

Мы отдельно представляем на рисунках и обсуждаем результаты для ОЗО высокой (high metallicity, НМ) и низкой (low metallicity, ЛМ) металличности. На рис. 1.4 показано, как соотносятся с металличностью потоки рассмотренных областей в линиях атомарного водорода и СО. На этих и всех последующих рисунках интервалы ошибок иллюстрируются при помощи стрелок, если погрешность выходит за пределы рисунка. Видно, что по величине металличности галактики разделяются на две обособленные группы (далее на рисунках они обозначаются как ЛМ и НМ). Внутри каждой из групп корреляции между $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ и потоками нет, однако на рис. 1.4а ОЗО в галактиках низкой металличности сдвинуты вправо относительно ОЗО в галактиках высокой металличности. Иными словами, в галактиках низкой металличности выделенные области в среднем оказываются более яркими в линии атомарного водорода. Это может объясняться двумя причинами. Во-первых, если предположить, что масса атомарного водорода во всех выделенных ОЗО примерно одинакова, области в малометаллических галактиках могут быть действительно *ярче*, например, из-за более высокой температуры. Во-вторых, в малометаллических галактиках мы могли предпочтительно выделить более *массивные* области. В маломассивных областях при низкой металличности содержание пыли и СО может оказаться настолько незначительным, что они не проявились на использованных нами картах.

Во втором случае логично ожидать, что нижняя граница потока в излучении СО будет одинаковой в галактиках обеих групп. На самом деле это не так, что видно из рис. 1.4б: в галактиках низкой металличности минимальный поток из выделенных областей в линии СО в несколько раз ниже минимального потока ОЗО в галактиках высокой металличности. Если мы в среднем выделили во всех галактиках области с сопоставимыми значениями полной массы, в галактиках низкой металличности области действительно должны быть менее яркими в линии СО.

Следует отметить, что в рассмотренных нами галактиках нет перекрытия металличностей, т.е. у нас нет возможности сопоставлять ОЗО относительно

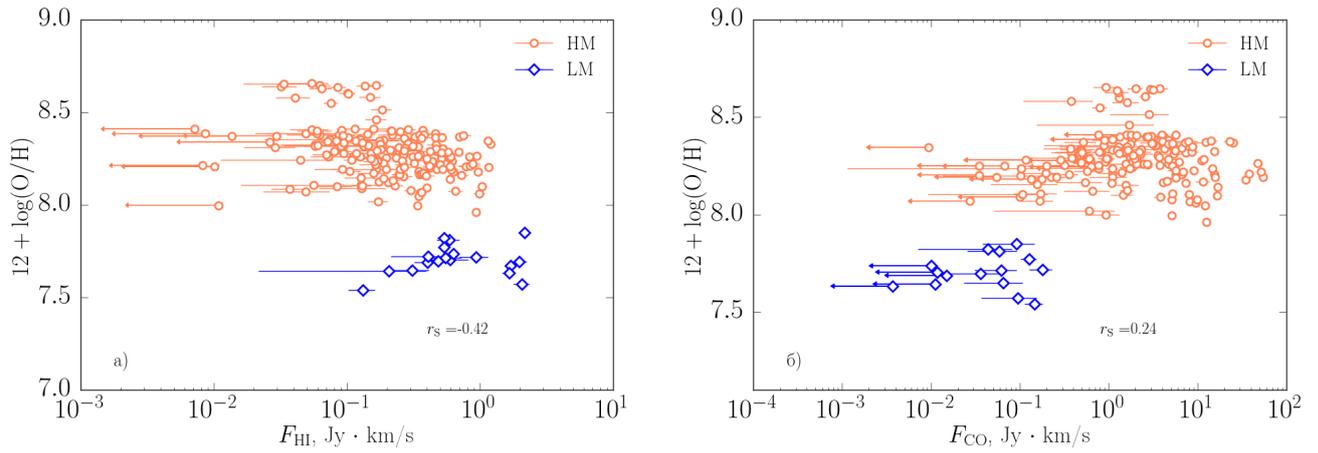


Рисунок 1.4: Соотношение между потоками излучения в линиях атомарного водорода (слева) и линиях CO (справа) с металличностью ОЗО. Стрелками здесь и далее отмечены интервалы ошибок, выходящие за пределы рисунка.

низкой металличности из более металличных галактик с ОЗО относительно высокой металличности из малометалличных галактик.

1.3.1 Наблюдаемые потоки

Рассмотрим сначала корреляции потоков излучения в различных диапазонах. На рис. 1.5 показано, как потоки в полосах 8 и 24 мкм соотносятся с полным излучением в дальнем ИК-диапазоне (здесь и далее $F_{\text{IR}} = F_{70} + F_{100} + F_{160}$). Корреляция присутствует на обеих диаграммах, однако на рис. 1.5а она различается в галактиках разной металличности, в том смысле, что одной и той же светимости в дальнем ИК-диапазоне в галактиках низкой металличности соответствует меньшее значение потока на 8 мкм, чем в галактиках высокой металличности. Эта закономерность выражает известный факт относительно ослабления излучения ПАУ в малометалличных галактиках и ОЗО. Поток на 24 мкм одинаково коррелирует с F_{IR} в ОЗО любых металличностей, что подтверждает вывод [14] о том, что вклад излучения на 24 мкм в общую ИК-светимость не зависит от металличности.

На рис. 1.6 показано, как потоки на 8 и 24 мкм коррелируют с потоком излучения в линии CO (2–1). В обоих случаях корреляция весьма значительная, однако и в этом случае наблюдается различие для потоков на длинах волн 8 и 24 мкм. На рис. 1.6а точки, соответствующие ОЗО разных металличностей, лежат примерно вдоль одной линии, указывая на единую корреляцию F_8 и F_{CO}

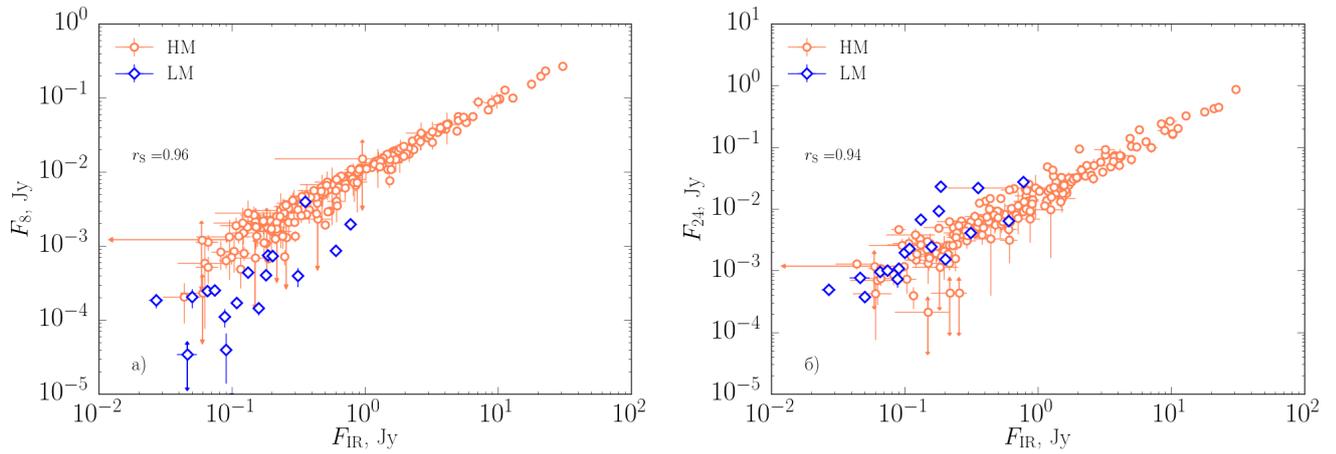


Рисунок 1.5: Соотношение полного потока излучения в дальнем ИК-диапазоне с потоками излучения в полосах 8 мкм (слева) и 24 мкм (справа).

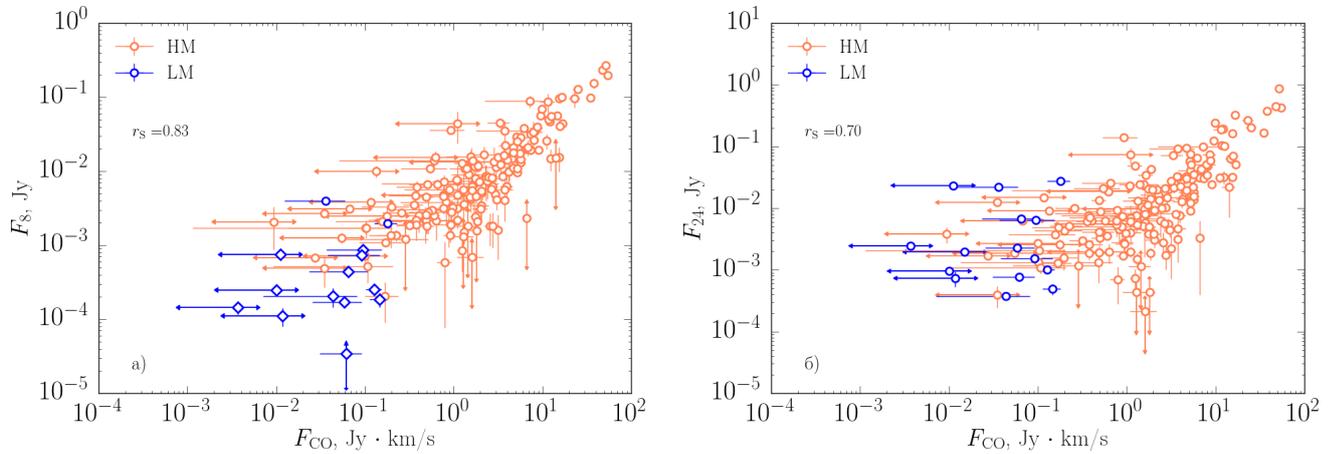


Рисунок 1.6: Соотношение потока излучения в линии СО с потоками излучения в полосах 8 мкм (слева) и 24 мкм (справа).

в ОЗО как низкой, так и высокой металличности. В этом отношении эмиссия СО оказывается родственной эмиссии на 8 мкм. Корреляция потока в линии СО с потоком в полосе 24 мкм также имеется, однако точки для ОЗО низких металличностей на рис. 1.6б сдвинуты влево относительно ОЗО высоких металличностей, то есть при низкой металличности конкретное значение потока на 24 мкм соответствует меньшему потоку в линии СО, чем в ОЗО высокой металличности.

С потоком в линии атомарного водорода не коррелирует поток ни в одном из других рассмотренных диапазонов. В качестве примера на рис. 1.7 поток эмиссии НI сопоставляется с потоками на 8 и 24 мкм (верхний ряд диаграмм). Некоторая корреляция просматривается в ОЗО высокой металличности, в том смысле, что и на 8 мкм, и на 24 мкм ярче светят области, у которых велика све-

тимостью на 21 см. Далее, на диаграмме для 8 мкм ОЗО низкой металличности не смешиваются с ОЗО высокой металличности, то есть между ними существует четкая граница. Такой четкой границы нет на диаграмме для 24 мкм. Здесь ОЗО низкой металличности, во-первых, перекрываются с ОЗО высокой металличности, во-вторых, возможно, демонстрируют ту же корреляцию, что и ОЗО высокой металличности, то есть яркость эмиссии на 24 мкм растет с яркостью линии 21 см в ОЗО обеих групп металличностей. Это еще раз подчеркивает меньшую зависимость от металличности параметров излучения на 24 мкм.

В среднем ряду рис. 1.7 с потоком в линии НІ сравниваются отношения потоков $F_8/F_{\text{НІ}}$ и $F_{24}/F_{\text{НІ}}$, и здесь картина выглядит более определенной. В обоих случаях видна антикорреляция нормированного потока в ИК-полосах с потоком излучения атомарного водорода: чем больше поток на 21 см, тем меньше относительный вклад ИК-полос. Разница между ОЗО различных металличностей может быть отражением отмеченного ранее тренда: в галактиках низкой металличности по каким-то причинам были отобраны области, более яркие в НІ (хотя яркость в излучении НІ не была главным критерием отбора). Однако теперь корреляция видна и внутри групп ОЗО разных металличностей. Она указывает, что излучение на 8 мкм и на 24 мкм относительно более ярко в областях с меньшим потоком в линии 21 см. Это может быть эффектом возраста (продвинутости звездообразования): к тому времени, когда в ОЗО создаются условия для генерации излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах, атомарного водорода в них остается мало. Диаграммы в нижнем ряду рис. 1.7 для полного ИК-потока (F_{IR}) и СО выглядят аналогично, что также может быть объяснено с позиций возраста: чем больше в ОЗО молекулярного газа и пыли, тем меньше в ней НІ. Возможное влияние возраста на наблюдаемые потоки затрудняет интерпретацию данных: фактически, возраст является дополнительным параметром, оценить который по имеющимся данным мы не можем.

1.3.2 Производные параметры

В этом подразделе мы рассмотрим соотношения между наблюдаемыми параметрами ОЗО и их параметрами, оцененными путем подгонки инфракрасных спектров. К производным параметрам относятся M_{dust} — массы пыли в ОЗО, U_{min} — минимальная интенсивность поля излучения и γ — массовая доля пыли, освещенная полем излучения с интенсивностью выше U_{min} . Можно предположить, что величина U_{min} характеризует общее количество звезд в ОЗО, а ве-

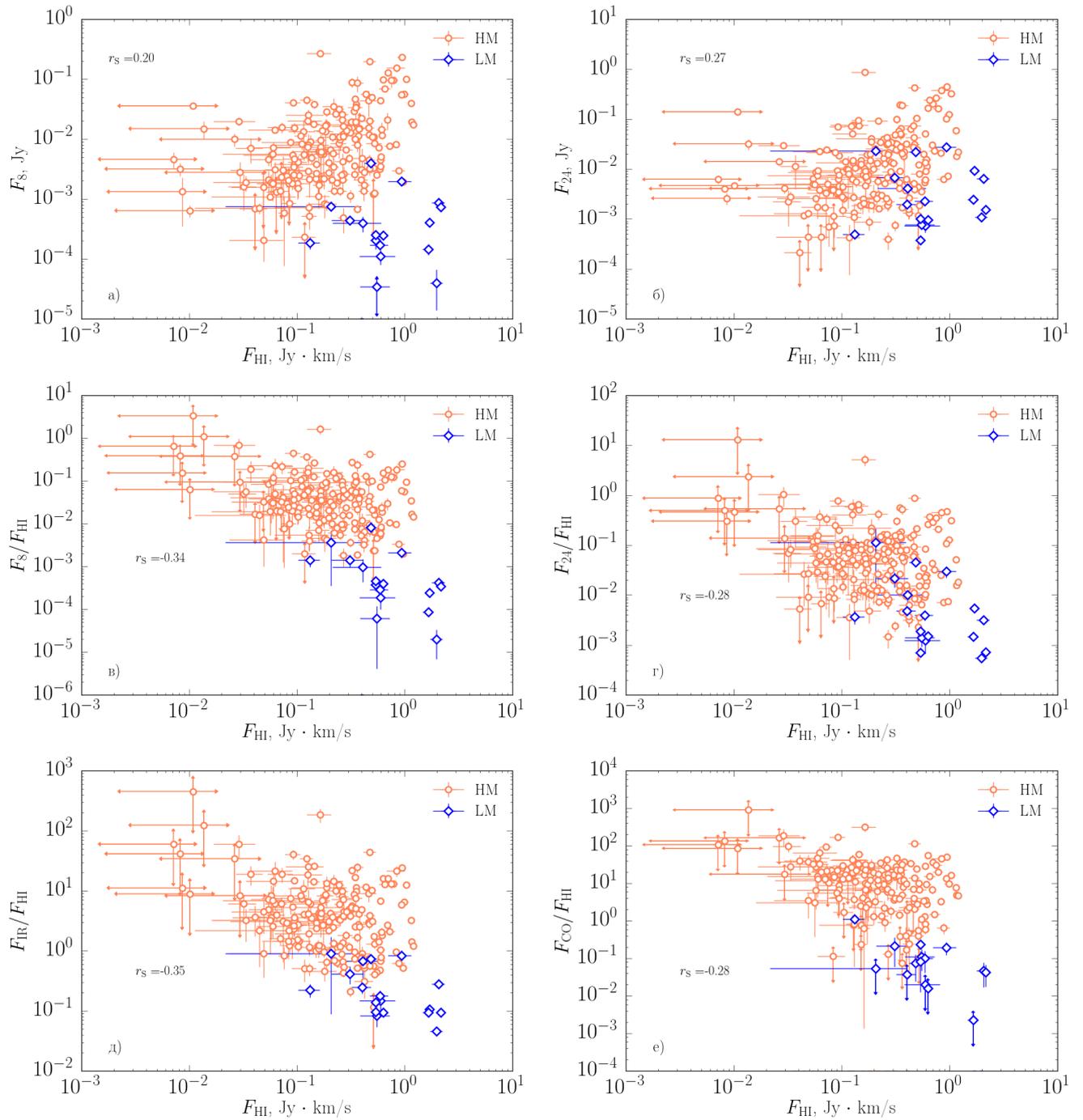


Рисунок 1.7: Соотношение между потоками излучения в полосах 8 мкм (слева сверху), 24 мкм (справа сверху) и потоком излучения в линии HI. В среднем ряду показано, как соотносятся с потоком в линии HI отношения потоков F_8/F_{HI} и F_{24}/F_{HI} , в нижнем ряду — отношения потоков $F_{\text{IR}}/F_{\text{HI}}$ и $F_{\text{CO}}/F_{\text{HI}}$.

личина γ — массу пыли, попадающей в непосредственные окрестности звезд и потому освещенной более интенсивным и, возможно, более жестким полем излучения. Кроме того, мы представляем оценки масс молекулярного и атомарного

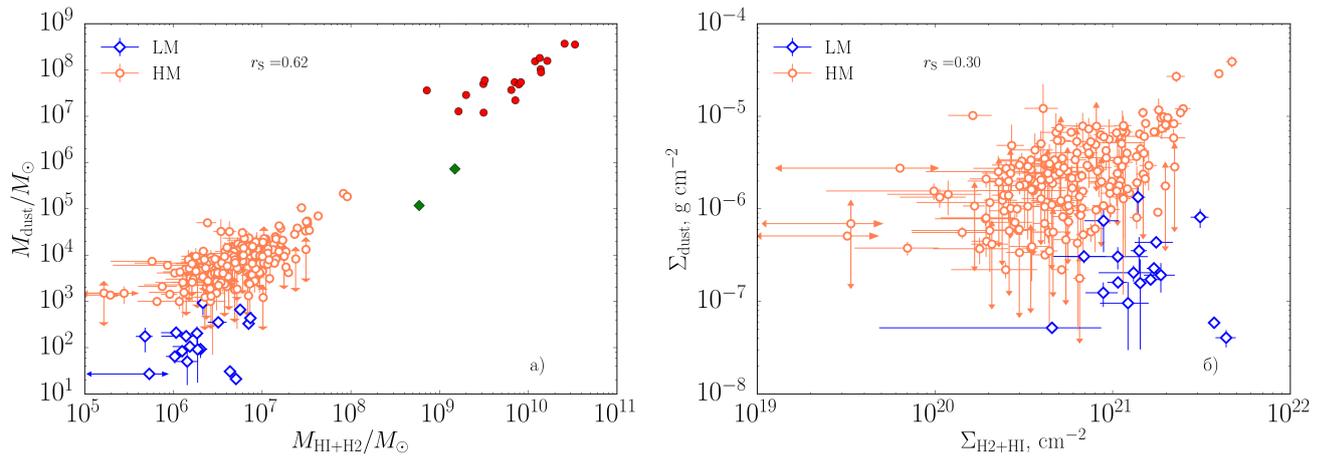


Рисунок 1.8: Соотношение между массами (слева) и поверхностными плотностями (справа) газа и пыли. Красными и зелеными символами на левой диаграмме отмечены полные массы газа и пыли в галактиках, соответственно, высокой и низкой металличности по данным из работы [54].

газа, M_{HI} и M_{H_2} , соответственно. Для оценки M_{HI} использовалась формула (3) из работы [25], для оценки M_{H_2} использовались формулы (3) и (4) из работы [6].

Полученные нами оценки масс и поверхностных плотностей газа и пыли сопоставляются на рис. 1.8. В качестве проверки на рис. 1.8а мы также показываем значения полных масс газа и пыли в галактиках из обзора SINGS [54]. Красными символами показаны галактики высокой металличности (в рамках нашего разделения), зелеными символами — галактики низкой металличности. Очевидно, что наши результаты согласуются с результатами из работы [54]: в каждой группе ОЗО по металличности масса пыли примерно пропорциональна массе газа, но точки для ОЗО низкой металличности в среднем лежат ниже точек для ОЗО высокой металличности.

На рис. 1.8б сравниваются средние поверхностные плотности газа и пыли в рассмотренных ОЗО. Здесь картина менее определенная. В ОЗО высокой металличности просматривается слабая корреляция между Σ_{dust} и $\Sigma_{\text{HI}+\text{H}_2}$. Точки для ОЗО низких металличностей в среднем лежат ниже и правее, отражая, во-первых, пониженное содержание пыли в них, а во-вторых, тот факт, что ОЗО низкой металличности в нашей выборке оказались более компактными, чем ОЗО высокой металличности.

На рис. 1.9а сопоставляются массы молекулярного и атомарного водорода. Видно, что корреляции между разными состояниями водородного газа нет. На рис. 1.9б показано, как масса пыли соотносится с массой молекулярного водорода (масса пыли получена по результатам подгонки ИК-спектров), а на

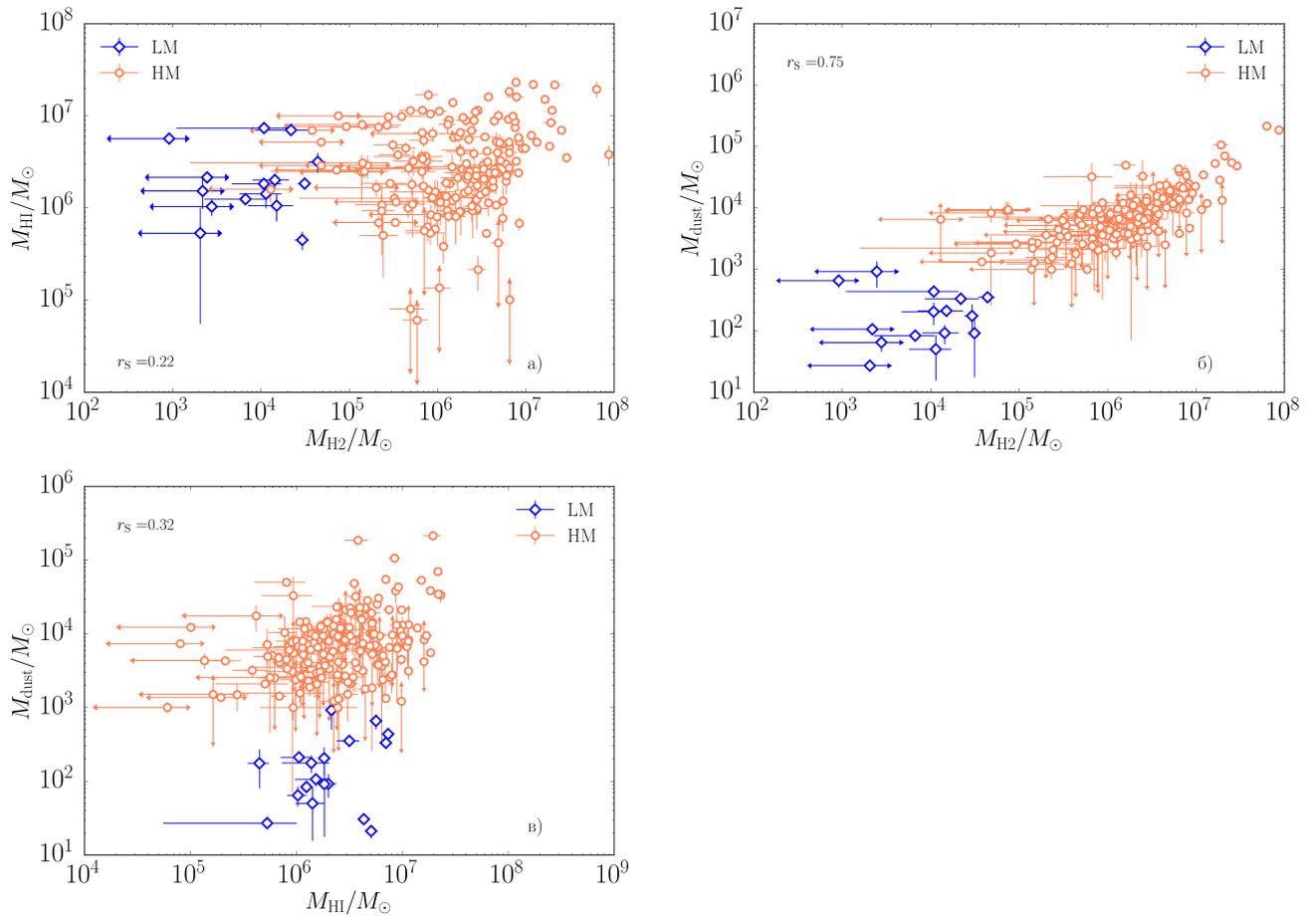


Рисунок 1.9: Соотношения между массами молекулярного и атомарного водорода (а), массами молекулярного водорода и пыли (б) и атомарного водорода и пыли (в).

рис. 1.9в — с массой атомарного водорода. В первом случае корреляция присутствует с коэффициентом Спирмена, равным 0.75, при этом точки, соответствующие низкометаллическим областям продолжают корреляцию для высокометаллических областей. Во втором случае практически отсутствует корреляция между массой пыли и массой атомарного водорода. Массы пыли для низко- и высокометаллических областей при тех же значениях M_{HI} различаются на 1–2 порядка.

Результаты подгонки ИК-спектров позволяют сопоставить различные параметры эмиссии ОЗО с параметрами поля излучения в них. На рис. 1.10 показано, как с параметрами U_{min} и γ соотносятся излучение молекул СО и отношение потоков излучения горячей пыли на длинах волн 8 и 24 мкм. Потоки излучения нормированы на поток излучения ОЗО в линии HI.

Вопрос нормировки заслуживает отдельного комментария. Возможно, логичнее было бы нормировать потоки на производные параметры — массу пыли

или массу H_2 . Однако в использованной калибровке масса молекулярного водорода представляет собой, фактически, нормированный поток в линии CO (с поправкой на расстояние), поэтому сравнивать ее с F_{CO} не имеет смысла. Можно ожидать, что масса пыли не зависит от параметров поля излучения, однако в наших результатах она оказывается антикоррелированной с параметром U_{min} . Эта антикорреляция (уже отмечавшаяся в работе [49]) может быть как артефактом подгонки, так и реальным физическим эффектом, например, отражающим разрушение пыли в ОЗО с сильным полем излучения. Поэтому для нормировки мы выбрали поток в линии HI, который не коррелирует с параметрами поля излучения. Недостаток этой нормировки состоит в том, что она вносит в данные дополнительный разброс. Следует также помнить о возможных неучтенных возрастных эффектах, упоминавшихся выше.

Нормированный поток излучения в линии CO с параметрами поля излучения практически не коррелирует; точки ОЗО малой металличности лежат ниже точек ОЗО высокой металличности, отражая зависимость содержания CO от Z . Потоки в полосах 8 и 24 мкм растут с увеличением как U_{min} , так и γ . В целом, корреляция величины F_8/F_{HI} с параметрами поля излучения довольно слабая, однако картина становится более сложной, если рассматривать отдельно ОЗО разных групп металличностей. С параметром γ лучше коррелируют инфракрасные потоки ОЗО малых металличностей: для них $r_S(F_8/F_{\text{HI}}, \gamma) = 0.55$, тогда как для ОЗО высоких металличностей $r_S(F_8/F_{\text{HI}}, \gamma) = 0.26$. Коэффициент Спирмена для корреляции между F_{24}/F_{HI} и γ равен 0.81 для ОЗО малых металличностей и 0.49 для ОЗО высоких металличностей. Корреляция F_8/F_{HI} с параметром U_{min} , напротив, более заметна для ОЗО высокой металличности (r_S для низкой и высокой металличности равен 0.15 и 0.50, соответственно). Корреляция нормированного потока F_{24}/F_{HI} с величиной U_{min} от металличности практически не зависит (r_S для низкой и высокой металличности равен 0.50 и 0.63, соответственно).

На рис. 1.10ж,з показано, как соотносится с параметрами поля излучения отношение потоков F_8/F_{24} . И при высокой, и при низкой металличностях наблюдается их антикорреляция: чем сильнее поле излучения, тем ниже величина этого отношения. Отношение потоков сильнее коррелирует с параметром γ при высокой металличности ($r_S(F_8/F_{24}, \gamma) = -0.80$). При малой металличности аналогичный коэффициент корреляции равен -0.30 . С параметром U_{min} отношение потоков антикоррелирует примерно одинаково (r_S для низкой и высокой металличности равен -0.58 и -0.54 , соответственно).

1.4 Обсуждение

В данной главе рассмотрены характеристики излучения и оцененные на их основе физические параметры внегалактических областей звездообразования. Рассмотренные объекты довольно протяженны: типичный линейный размер составляет около 500 пк, несколько ОЗО имеют размеры порядка 800 пк (наблюдаемые ОЗО в нашей Галактике имеют размер порядка 100 пк). В галактиках низкой металличности выделенные ОЗО оказались более компактными, с типичным размером около 200 пк. Соответственно, имеется и различие по массе. В галактиках высокой металличности массы молекулярного водорода в рассмотренных ОЗО заключены в пределах от $10^5 M_{\odot}$ до $10^8 M_{\odot}$, в галактиках низкой металличности — от $10^3 M_{\odot}$ до нескольких единиц на $10^4 M_{\odot}$.

Масса атомарного водорода практически не коррелирует с массой молекулярного водорода. В ОЗО высоких металличностей массы HI и H₂ сравнимы между собой. В ОЗО малых металличностей относительная масса молекулярного газа существенно ниже: она составляет примерно 1% от массы HI. Здесь следует отметить следующее. Массу H₂ мы оценивали по потоку излучения в линии CO в предположении, что величина конверсионного фактора («X-фактора») не зависит от металличности. Между тем, существует ряд исследований, показывающих, что в галактиках низкой металличности газ CO является плохим индикатором молекулярного газа [58–60]. Если допустить, что X-фактор линейно зависит от металличности (что приближенно согласуется с наблюдаемыми зависимостями), полученные нами оценки M_{H_2} в ОЗО малой металличности занижены примерно на порядок величины (что соответствует различию в металличностях между выборками LM и HM). Однако и в этом случае различие в степени молекуляризации газа ОЗО низких и высоких металличностей оказывается существенным (см. также рис. 1.7e).

Масса пыли коррелирует с массой молекулярного водорода: во всех рассмотренных ОЗО масса пыли составляет примерно 1% от массы молекулярного газа (см. рис. 1.9б). Учитывая распределение пылинок по размеру (например, [61]), можно сделать вывод о том, что основную массу пыли составляют крупные пылинки. Их температура не так высока, как температура мелких пылинок, и именно они связаны с плотным холодным молекулярным газом. Однако с атомарным газом масса пыли не коррелирует, то есть наблюдаемая пыль не связана с диффузной средой.

При этом масса пыли коррелирует с суммарной массой молекулярного и атомарного газа, согласуясь с трендом, основанным на наблюдениях галактик [54], что видно по рис. 1.8. Заметен сдвиг в сторону уменьшения массы пыли при тех же значениях массы газа в областях с низкой металличностью. Заниженное значение отношения массы пыли к массе газа (D/G) в галактиках с низкой металличностью широко обсуждается в литературе ([9, 54, 62] и др.). По всей видимости, металличность не является единственным фактором, от которого зависит это значение, и для объяснения необходимо рассматривать совокупность различных параметров галактики (темпы звездообразования, звездная масса, морфологический тип, поле излучения), а также эволюционную картину для пыли и газа [63], включая динамические движения [62]. Значение D/G также варьируется и внутри галактик в зависимости от плотности, температуры и других параметров среды [5]. Однако мы рассматриваем, в среднем, пространственно неразрешенные однотипные ОЗО, поэтому основным фактором, влияющим на D/G в нашей выборке, является металличность, точнее, различия в эволюции пыли и газа в низко- и высокометаллической среде (например, различия в темпах разрушения, образования и роста пылинок).

Значения U_{\min} в ОЗО из нашей выборки варьируются примерно от 0.1 до 30. Поскольку мы рассматриваем области с преобладанием молодых массивных звезд, логично ожидать, что значения U_{\min} будут, в основном, высокими. Действительно, в большинстве изученных ОЗО $U_{\min} > 1$. Следует помнить, что величина U_{\min} нормирована на поле излучения в солнечной окрестности нашей Галактики; в других галактиках средняя интенсивность диффузного излучения может быть несколько иной. Интересно, что интенсивность поля излучения оказывается примерно одинаковой в ОЗО из обеих групп металличностей, возможно, с незначительным преобладанием более высоких значений U_{\min} в ОЗО низкой металличности. Интересно также, что в наших данных величина U_{\min} не показывает заметной корреляции ни с массой ОЗО (например, с M_{HI}), ни с их размером. Значения γ охватывают более широкий диапазон: от 10^{-4} до ~ 0.2 , также без очевидной связи с металличностью и другими глобальными параметрами ОЗО. Наблюдаемый разброс значений U_{\min} и γ может быть связан с различиями в возрасте ОЗО.

Поскольку как свечение ПАУ, так и свечение ОМП связано с переизлучением энергии поглощенных УФ-фотонов, можно ожидать, что относительные потоки F_8/F_{HI} и F_{24}/F_{HI} будут коррелировать с параметрами поля излучения. Однако эта корреляция может возникать по разным причинам. Например, рост потока

с увеличением интенсивности поля излучения может отражать более яркую эмиссию пылинок в более интенсивном (или более жестком) поле излучения в ОЗО. С другой стороны, положительная корреляция потоков с U_{\min} и γ может быть следствием того, что и интенсивность ИК-излучения, и интенсивность звездного излучения в той или иной степени убывают с возрастом ОЗО — ИК-излучение слабеет из-за разрушения пылинок, а параметры U_{\min} и γ убывают из-за эффектов звездной эволюции.

В нашей выборке отношение потоков F_8/F_{HI} заметно коррелирует только с U_{\min} , что означает связь эмиссии на 8 мкм с диффузным полем излучения от всех звезд ОЗО. Это заключение согласуется с выводом авторов [47], которые также нашли, что излучение ПАУ скорее ассоциируется с диффузной средой, чем с окрестностями молодых горячих звезд, вклад которых характеризуется параметром γ . Возможно, это связано с разрушением ПАУ вблизи таких звезд. Иными словами, разрушение ПАУ может «размывать» корреляцию эмиссии ПАУ с долей объема ОЗО, в которой звездное излучение имеет более высокую интенсивность, чем U_{\min} . Корреляция нормированных потоков с параметром γ становится более заметной, если рассматривать только объекты низкой металличности (см. рис. 1.10г,е). Это указывает на многопараметричность задачи — нельзя выделить четкую корреляцию с каким-либо одним параметром; на наблюдаемое излучение ПАУ в разной степени могут влиять они все.

Излучение мелких горячих пылинок (F_{24}) приходит преимущественно из окрестностей молодых звезд. Вероятно, разрушение таких частиц менее эффективно, чем разрушение ПАУ, поэтому их излучение в равной степени коррелирует как с минимальной интенсивностью поля U_{\min} , так и с относительным вкладом повышенного поля излучения γ .

Для оценки вклада ароматических частиц в полную массу пыли используется параметр $q_{\text{РАН}}$. Нам не удалось оценить его для большинства ОЗО из нашей выборки, поскольку его значение, по-видимому, часто находится либо выше, либо ниже предельных значений в наборе синтетических спектров, представленном авторами модели [26]. Поэтому о вкладе ароматических частиц мы можем судить только по отношению потоков F_8/F_{24} . Это отношение уменьшается более чем на порядок с ростом U_{\min} и γ , вероятно, отражая разрушение мелких ароматических пылинок излучением в ОЗО.

Потоки излучения горячих пылинок на длинах волн 8 и 24 мкм хорошо коррелируют с потоками излучения в линии СО, причем большее сходство наблюдается между потоками F_8 и $F_{\text{СО}}$. Аналогичный результат был получен

для Малого Магелланова Облака в работе [64]. Это может означать, что эволюционная история молекул СО и частиц ПАУ в ОЗО схожа. Возможно, они одновременно и одинаково эффективно разрушаются ультрафиолетовым излучением молодых звезд. Но вероятен и вариант, что такая картина наблюдается вследствие схожести условий формирования ПАУ и молекул СО. Например, возможно, что образование молекул ПАУ происходит в плотных молекулярных облаках [65], и мы преимущественно наблюдаем в ОЗО ароматические частицы, сформированные *in situ*, тогда как ПАУ, синтезированные в звездах, были разрушены при распространении в МЗС, например, ударными волнами от взрывов сверхновых.

Отдельно стоит обсудить фактическое отсутствие корреляции параметров поля звездного излучения с эмиссией в линии СО (2–1). Параметр γ характеризует поле вблизи горячих массивных звезд, но излучение СО приходит из большего объема, поэтому отсутствие связи между эмиссией СО и γ вполне ожидаемо. Однако наши данные указывают, что излучение СО также не коррелирует и с минимальной интенсивностью поля (U_{\min}), преимущественный вклад в которое дает все население молодых звезд в ОЗО. Теоретически, можно было бы ожидать ослабления эмиссии в линии СО (2–1) с увеличением U_{\min} , поскольку в более интенсивном поле излучения будет эффективнее происходить разрушение СО, что должно отразиться на наблюдаемых соотношениях. Кроме того, индикатором плотного молекулярного газа в ОЗО, нагретого совокупным излучением молодых звезд, будет, скорее, линия СО (3–2) [66], а не линия СО (2–1), интенсивность которой должна ослабевать с ростом температуры. Тем не менее, практически никакой корреляции между излучением СО и полем излучения мы не обнаруживаем. Впрочем, нужно учитывать, что на отношение потоков в линиях СО и НІ, которое мы рассматриваем, могут влиять иные эволюционные эффекты.

Более детальная интерпретация полученных данных затруднена, как минимум, тремя обстоятельствами. Во-первых, большинство рассмотренных ОЗО имеют достаточно большой размер (порядка 0.5 кпк) и, к тому же, не всегда хорошо отделяются друг от друга. Во-вторых, в нашей выборке отсутствуют ОЗО с промежуточными значениями металличности, из-за чего мы, фактически, имеем дело не с непрерывным рядом металличностей, а с двумя группами. В-третьих, при анализе данных была бы весьма полезна информация о возрасте, которая для ОЗО из нашей выборки отсутствует в литературе. Наконец, задача, которую мы пытаемся решить в данной работе — выявить возможные

корреляции для потоков излучения на разных длинах волн — многопараметрическая. Одновременно на одно и то же значение потока могут влиять несколько факторов. Для разделения влияния этих факторов необходима более обширная выборка объектов и данные о других параметрах (возраст, жесткость поля излучения и др.). Тем не менее, представленные нами закономерности способны послужить базой для численного моделирования, которое позволит прояснить особенности эволюции различных компонентов газа и пыли во внегалактических областях звездообразования.

1.5 Выводы

В главе рассмотрена связь излучения молекул CO, атомарного водорода, а также пыли в диапазоне от 8 до 160 мкм. Используются архивные данные примерно о трехстах областях звездообразования из 11 галактик в диапазоне металличностей ($12 + \log(\text{O}/\text{H})$) от 7.54 до 8.71. Данные об инфракрасном излучении пыли использованы для определения массы пыли, а также параметров поля излучения в исследованных ОЗО. На основе полученных результатов сделаны следующие выводы:

- 1) ОЗО низкой металличности относительно богаче атомарным водородом, чем ОЗО высокой металличности. В ОЗО высокой металличности доля молекулярного газа сопоставима с долей атомарного газа, тогда как в ОЗО низкой металличности доля молекулярного газа на порядок и более (в зависимости от метода оценки массы молекулярного газа) меньше атомарного и может составлять менее 10%.
- 2) Во всех рассмотренных ОЗО масса пыли составляет примерно 1% от массы молекулярного газа. Масса пыли коррелирует также с суммарной массой атомарного и молекулярного газа, согласуясь с трендом, выявленным для галактик в целом. Масса и поверхностная плотность пыли в ОЗО низкой металличности значительно меньше, чем в ОЗО высокой металличности при тех же значениях полной массы газа.

1.6 Положения, выносимые на защиту

- 1) Поток излучения внегалактических областей звездообразования в линии CO(2-1) практически не коррелирует с параметрами поля ультрафиоле-

тового излучения в этих областях. Потоки излучения в ИК-полосах на 8 мкм (F_8) и 24 мкм (F_{24}) растут как при повышении минимального уровня интенсивности ультрафиолетового излучения в ОЗО, так и при повышении доли пыли, освещенной полем с повышенной интенсивностью в окрестностях массивных звезд. Эта корреляция может отражать как более яркое излучение горячих пылинок в среде с большей интенсивностью УФ-излучения, так и эволюционное уменьшение потока, происходящее одновременно с понижением интенсивности излучения. Отношение потоков F_8/F_{24} демонстрирует антикорреляцию с параметрами, характеризующими интенсивность поля излучения в ОЗО. Если считать, что это отношение характеризует содержание в ОЗО ароматических пылинок, обнаруженная антикорреляция может свидетельствовать об их разрушении в интенсивном поле УФ-излучения.

- 2) Потоки излучения внегалактических областей звездообразования в ближнем (8 мкм), среднем (24 мкм) и дальнем (70, 100 и 160 мкм) инфракрасных диапазонах коррелируют между собой, что указывает на общую природу излучения в этих диапазонах: вероятно, это излучение порождается, главным образом, горячей пылью в окрестностях молодых звезд. При одном и том же потоке в дальнем ИК-диапазоне эмиссия на 8 мкм оказывается слабее в ОЗО с малой металличностью, чем в ОЗО с высокой металличностью. Это подтверждает известную корреляцию металличности и содержания ПАУ, которые считаются основным источником излучения на 8 мкм. Соотношение потоков в дальнем ИК-диапазоне и на 24 мкм от металличности не зависит.

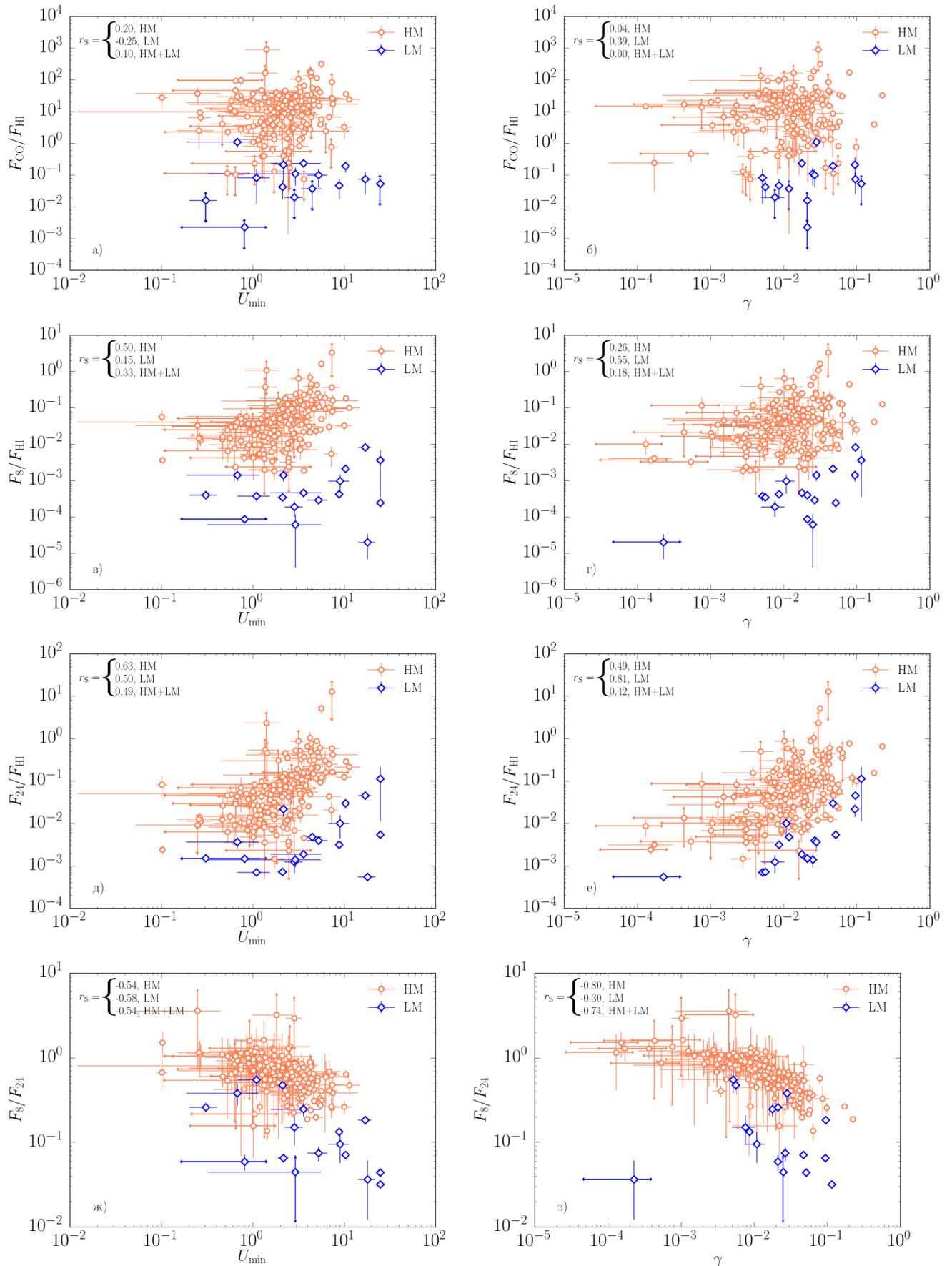


Рисунок 1.10: Соотношение параметров U_{\min} и γ с потоками в линии СО и в полосах 8 и 24 мкм, нормированными на поток излучения в линии НІ, а также с отношением потоков излучения на длинах волн 8 и 24 мкм.

Глава 2

Области звездообразования в пекулярных галактиках

2.1 Введение

Наблюдения показывают, что характеристики звездообразования в галактиках различных морфологических типов различаются. В предыдущей главе нами были рассмотрены различные соотношения между наблюдаемыми характеристиками изолированных галактик. В данной главе мы рассматриваем подобные соотношения для галактик, в истории которых были эпизоды, приведшие к некоторым особенностям в их современной морфологии и кинематике. Результаты, представленные в этой главе, опубликованы в работах [A3],[A4].

Особый интерес с этой точки зрения представляют так называемые галактики с полярными кольцами — довольно редкий класс объектов, подсистемы которых (диск и кольцо) вращаются почти в ортогональных плоскостях. В этих галактиках можно проследить различия в областях звездообразования, которые недавно сформировались в кольце, и ОЗО, образовавшимися в диске в «обычном» режиме. Для подобного исследования необходима галактика с протяженным полярным кольцом, в котором можно было бы выделить как можно больше областей звездообразования. Также галактика должна находиться не очень далеко, чтобы выделенные области не сливались друг с другом. Иными словами, необходимо, чтобы в галактике можно было провести фотометрию как можно большего количества ОЗО, которые не сливались бы друг с другом при наблюдениях на космических ИК-обсерваториях «Спитцер» и «Гершель» с угловым разрешением $2 - 12''$.

На сегодняшний день известно около пятисот галактик с полярными кольцами, большинство из которых представлены в каталогах Вайтмо [28] и Моисеева и др. [67] (см. Главу 3), но только для единиц из них имеется обширный набор наблюдательных данных в различных диапазонах. Этому критерию отвечают три галактики с полярными кольцами: NGC 2685, NGC 4650A и NGC 660. Кольцо в галактике NGC 2685 расположено так, что разделить излучение, идущее от кольца и от диска галактики, невозможно. Кольца галактик NGC 4650A и NGC 660 имеют протяженную структуру, что позволяет разделить области из диска и из кольца, но галактика NGC 4650A слишком далека (расстояние до нее составляет порядка 46 Мпк [68]), и отдельные ОЗО в ней сливаются друг с другом. Таким образом, единственной галактикой, подходящей для решения нашей задачи, оказалась NGC 660 (расстояние 13 Мпк [69]), содержащаяся в обзоре [28] под номером С-13.

Первые фотометрические и спектрометрические исследования этой галактики были представлены в 1976 году [70]. Подтверждение того, что галактика NGC 660 является именно галактикой с полярным кольцом, было получено сначала по наблюдениям линии H α [71], а спустя два года и по линии CO в работе [72].

К сожалению, мы не смогли найти еще хотя бы одну галактику с полярным кольцом для проведения подобного анализа (подробнее см. в Главе 3). Поэтому мы включили в исследование другие галактики, в которых в недавнем прошлом происходили динамические процессы, способные вызвать волну звездообразования. Нужные галактики должны находиться на небольшом расстоянии (не больше 15 Мпк), чтобы в них можно было разрешать отдельные ОЗО, и, желательно, иметь ориентацию «плашмя», чтобы упростить выделение ОЗО и сократить количество перекрывающихся областей на луче зрения.

Исходя из этих соображений, мы включили в рассмотрение взаимодействующую галактику NGC 1512, для которой имеются данные не только в ближнем ИК, но и в дальнем ИК диапазоне. Кроме того, мы обратили внимание на асимметричные (lopsided) галактики [73]. Численное моделирование показывает, что асимметрия может появляться в результате взаимодействия галактики с компаньоном [74] или в результате взаимодействия двух карликовых галактик [75], в результате чего диск галактики становится «скособоченным». Дискосая асимметрия в такой модели сохраняется в течение почти 2 млрд. лет. Одной из разновидностей асимметричных галактик являются галактики со смещенным баром [76], в которых положение бара не совпадает с фотометрическим

центром диска галактики. К сожалению, среди галактик со смещенным баром нашим критериям удовлетворяет только галактика NGC 4618 [77]. Еще одной асимметричной галактикой с набором необходимых данных оказалась сейфертовская галактика NGC 4395 [78]. Две последние галактики относятся к типу SBm.

В предыдущей главе мы исследовали взаимосвязь между различными составляющими МЗС (атомарный и молекулярный водород, пылинки различных видов), которые непосредственно участвуют в процессе звездообразования. В данной главе для сопоставления с результатами предыдущей главы мы рассматриваем высокометаллическую галактику NGC 628. Далее она называется галактикой сравнения, тогда как галактики NGC 660, NGC 1512, NGC 4395 и NGC 4618 мы коллективно называем новыми галактиками.

Для сопоставления поверхностных яркостей ОЗО из различных галактик необходимо знать расстояния до них. Для однородности нами приняты оценки из каталога Cosmicflows-3¹ [79]. Они приведены в табл. 2.1 вместе с соответствующими угловыми масштабами. Также в табл. 2.1 приводятся оценки звездной массы в рассматриваемых галактиках, выведенные из потоков на длинах волн 3.6 и 4.5 мкм (телескоп «Спитцер») по методике, описанной в работе [80]. Поскольку для нашего исследования достаточно знать примерные значения массы, мы не пытались провести точную фотометрию. Однако наши оценки близки к значениям, которые были получены для NGC 628 и NGC 660 в работе [81] и для NGC 4395 и NGC 4618 в работе [82]. Кроме того, в таблице приведена оценка полной скорости звездообразования, выведенная из потока на длине волны 24 мкм по калибровке, приведенной в [83], для всех галактик, за исключением NGC 660, для которой данные на 24 мкм недоступны.

Металличность галактик NGC 660 и NGC 4618 была рассчитана с использованием калибровочных соотношений для определения содержания кислорода по R-калибровкам из [84]

$$\begin{aligned}
 R_2 &= I_{OII} \lambda 3727 + \lambda 3727 / I_{H\beta}, \\
 N_2 &= I_{NII} \lambda 6548 + \lambda 6584 / I_{H\beta}, \\
 S_2 &= I_{SII} \lambda 6717 + \lambda 6731 / I_{H\beta}, \\
 R_3 &= I_{OIII} \lambda 4959 + \lambda 5007 / I_{H\beta}.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Интенсивности линий для этих галактик были взяты в статье [85].

¹<http://edd.ifa.hawaii.edu>

В последнем столбце табл. 2.1 указана возможная принадлежность рассматриваемых галактик к группам или скоплениям. У разных авторов есть некоторая неоднозначность по отнесению галактик NGC 660 и NGC 628 к одной или к разным группам. Однако даже если две этих галактики принадлежат одной группе, пространственно они находятся далеко друг от друга, и эффекты окружения не должны быть велики.

2.2 Данные наблюдений и их обработка

В этой главе для галактики NGC 660 мы рассматриваем как интегральную интенсивность линии $H\alpha$, так и спектры в этой линии, чтобы оценить разброс скоростей ионизованного газа. Наблюдения выполнялись А.В. Моисеевым 22/23 декабря 2003 г. на 6-м телескопе САО РАН с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо в составе многорежимного редуктора светосилы SCORPIO [86]. Также для этой галактики мы использовали наблюдения в линии $H\text{I}$ на Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT), любезно предоставленные Г. Йошей (Department of Physics and Electronics, Rhodes University, South Africa). Данные наблюдений нейтрального водорода использованы без конволюции и без учета вытянутости диаграммы направленности. Проведенные нами оценки показали, что это не меняет наших выводов. Источники данных для галактики NGC 628 приведены в предыдущей главе и работе [87]. Там мы накладывали ограничение на размер исследуемых областей (не менее $12''$) из-за использования данных наблюдений в линии CO . В результате в галактике NGC 628 нами было выбрано 65 ОЗО, ярких в ИК. В данной главе мы не рассматриваем излучение CO , и кроме того для сравнения с рассматриваемыми системами нам необходимы более тусклые в ИК области. Поэтому мы дополнительно выделили в галактике NGC 628 еще 19 областей. Весь набор рассматриваемых областей показан на рис. 2.1. Разными цветами показаны области центральной области галактики и области на ее периферии (см. ниже).

Таблица 2.1: Характеристики исследуемых галактик.

Галактика	Расстояние, Мпк	Угловой масштаб, пк/arcsec	$12 +$ $\lg(O/H)$	Морф. тип	$\lg(M_*/M_\odot)$	Скорость 3σ , $M_\odot/\text{год}$	Группа, скопление
NGC 660	13.55	66	8.89	SB(s)a pec	10.5		LGG29 [88], NGC 660 [89]
NGC 1512	12.25	60	8.56 [51]	SB(r)a; HII	10.2	0.4	LGG108 [88], NGC 1512 [89]
NGC 4395	4.76	23	8.33 [90]	SA(s)m; LINER Sy1.8	9.4	0.03	LGG291 [88], USGCU480 [91]
NGC 4618	6.52	32	8.35	SB(rs)m; HII	9.7	0.05	LGG290 [88]
NGC 628	9.77	47	8.45 [51]	SA(s)c; HII	10.4	1.0	LGG29 [88], NGC 628 [89]

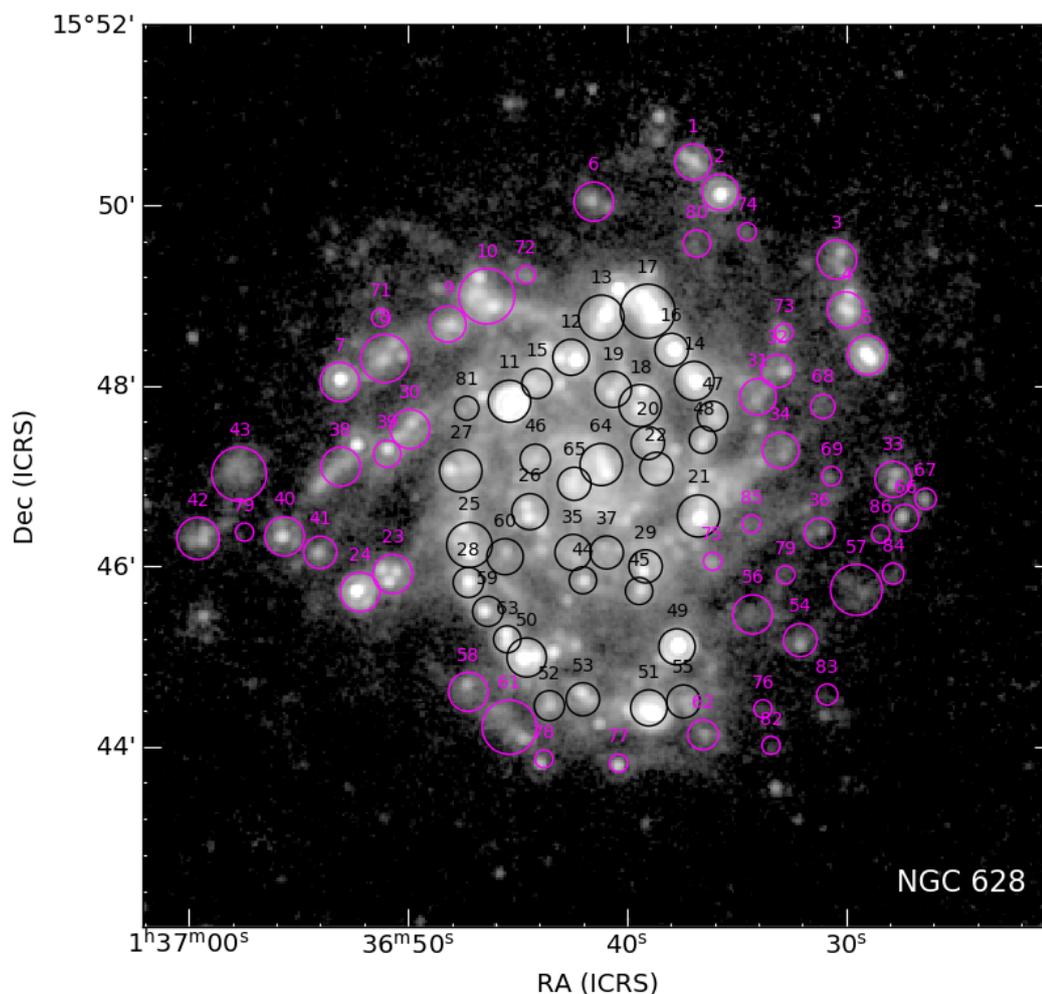


Рисунок 2.1: Области звездообразования в галактике NGC 628: черные — области из центральной части галактики, пурпурные — периферийные области. В качестве фона использовано изображение галактики на длине волны 24 мкм, загруженное из научного архива телескопа «Спитцер».

Данные наблюдений в ближнем ИК диапазоне для галактик NGC 1512, NGC 4395 и NGC 4618 (3.6, 4.5, 8 и 24 мкм) были загружены из научного архива телескопа «Спитцер». Для галактики NGC 660 наблюдения «Спитцер» на 24 мкм недоступны, поэтому вместо них мы использовали данные на 22 мкм, полученные при помощи телескопа WISE² [22]. При представлении результатов в среднем ИК-диапазоне мы будем использовать обозначение «22,24». Данные наблюдений всех галактик в ультрафиолетовом диапазоне были загружены из архива телескопа GALEX³ [92]. Для галактики NGC 1512 доступны также

²<http://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/>

³<http://galex.stsci.edu/GalexView/>

данные в дальнем ИК-диапазоне из обзора KINGFISH⁴ [23], выполненного на телескопе «Гершель».

Используемые наблюдательные данные было необходимо (по возможности) привести к одному угловому разрешению. В ближнем и среднем ИК диапазонах наихудшим угловым разрешением обладают данные наблюдений NGC 660 на телескопе WISE на длине волны 22 мкм, поэтому наблюдения всех галактик на 8 и 24 мкм, а также наблюдения галактики NGC 1512 на длинах волн 70 и 100 мкм, приводились к разрешению в фотометрической полосе 22 мкм ($\sim 12''$). Для свертки использовались ядра из работы [52]. Данные наблюдений галактики NGC 1512 на длине волны 160 мкм использовались в исходном виде, поскольку их угловое разрешение близко к угловому разрешению данных на 22 мкм.

Выделенные области в новых галактиках показаны на рис. 2.2. После подготовки наблюдательного материала и выделения исследуемых областей мы провели их апертурную фотометрию с вычитанием фона. Процедура фотометрии и оценка погрешностей измерений описаны в предыдущей главе и в [48].

В результате для всех галактик были оценены потоки излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах, а также в УФ-диапазоне. Потоки в полосах на 8 мкм и 24 (22) мкм исправлялись за вклад звездного излучения. В работе [48] для исправленных потоков использовались обозначения F_8^{afe} и F_{24}^{ns} . Далее верхние индексы для простоты опущены, но, как и в предыдущей главе, сопоставление проводится именно со скорректированными потоками. Для галактики NGC 1512 оценивались также потоки на 70, 100 и 160 мкм.

Области для апертурной фотометрии в галактике NGC 660 выделялись как в диске галактики, так и в кольце. В кольце нам удалось выделить 49 областей (рис. 2.3). Выделить области в диске галактики оказалось сложнее. Диск галактики относится к позднему типу и имеет спиральную структуру [93, 94]. В идеале, следовало бы выделять области ЗО по спиральям, но из-за ориентации диска (он виден почти с ребра) это было невозможно сделать. Поэтому в диске нам удалось выделить только самые массивные области.

2.3 Результаты

В данной главе мы уделяем особое внимание исследованиям свойств пыли и газа в областях звездообразования в пекулярных галактиках. Мы исходили из

⁴http://herschel.esac.esa.int/Science_Archive.shtml

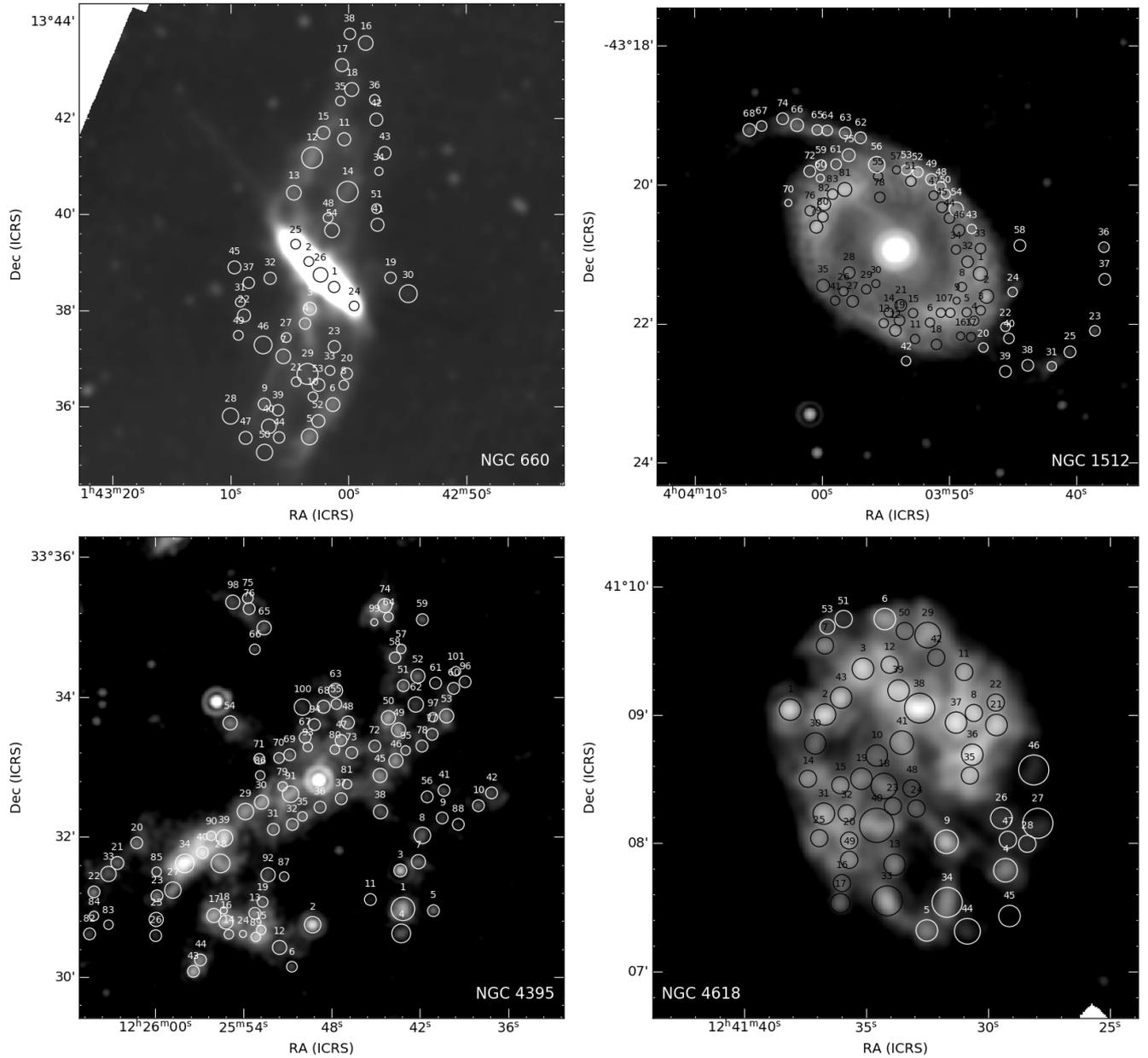


Рисунок 2.2: Области звездообразования в галактиках, рассматриваемых в этой главе, на фоне карт излучения на длине волны 8 мкм, приведенных к разрешению телескопа WISE на длине волны 22 мкм.

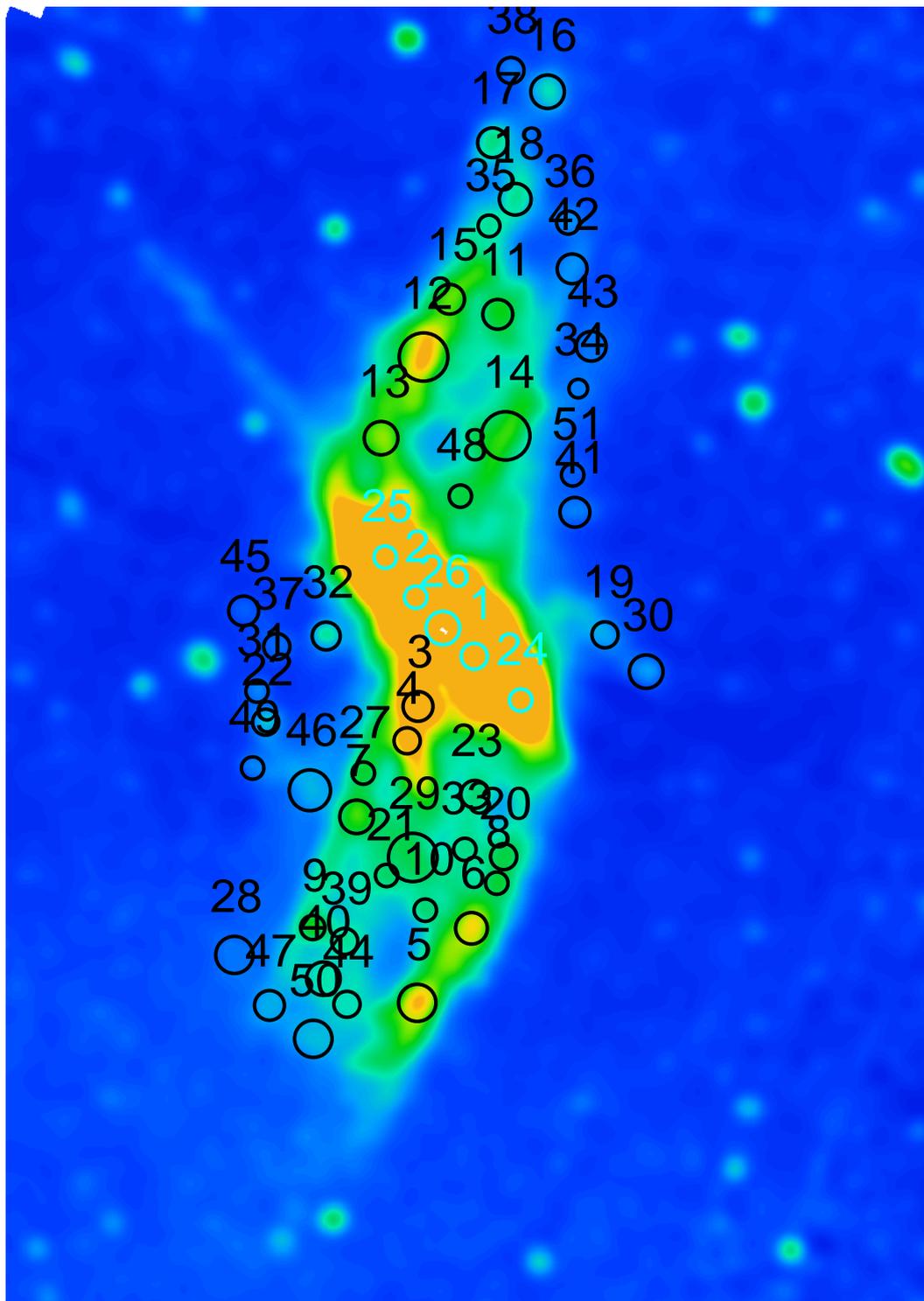


Рисунок 2.3: Изображение NGC 660 на длине волны 8 мкм. Черными кружками отмечены области звездообразования в кольце, голубыми — ОЗО диска.

предположения, что источником излучения в ближнем ИК-диапазоне являются мелкие ароматические частицы (ПАУ), тогда как излучение на длине волны 22 (24) мкм генерируется более крупными горячими пылинками. В обоих случаях

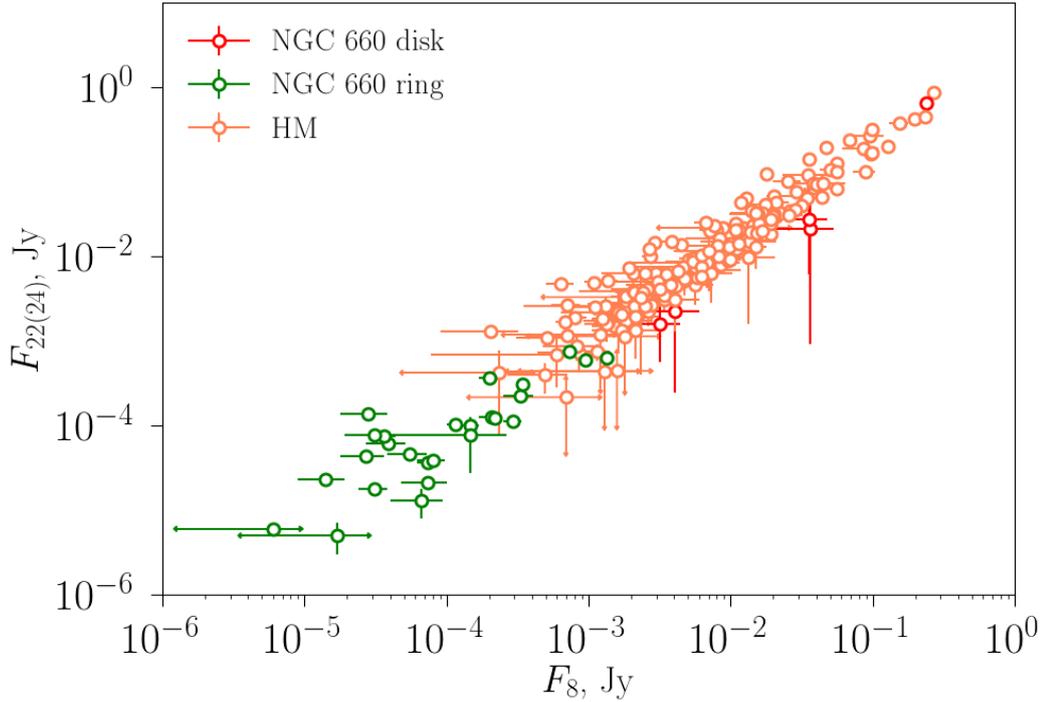


Рисунок 2.4: Сопоставление потоков от ОЗО в галактике NGC 660 на длинах волн 8 мкм и 22 мкм. Для сравнения показаны также потоки на 8 и 24 мкм для внегалактических ОЗО высокой металличности, исследованных в Главе 1.

для генерации ИК-излучения необходим нагрев пылевой частицы ультрафиолетовым излучением, поэтому можно предположить, что области интенсивного излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах являются областями звездообразования.

Мы начнем описание результатов с галактики с полярным кольцом NGC 660. Общая природа эмиссии на 8 и 22 мкм в этой галактике подчеркивается диаграммой на рис. 2.4. На этом рисунке показаны потоки от ОЗО на длинах волн 8 и 24 мкм. Оранжевыми кружками показаны ОЗО в галактиках высокой металличности. Видно, что ОЗО из диска галактики NGC 660 (красные кружки) попадают в ту же область диаграммы, что ОЗО высокой металличности из других галактик. ОЗО из кольца NGC 660 (зеленые кружки) занимают на диаграмме другое положение: они демонстрируют ту же корреляцию двух потоков, что и другие ОЗО высокой металличности, но занимают область существенно более низких потоков как на 8 мкм, так и на 22 мкм.

Низкая яркость ИК-излучения ОЗО в кольце может вызываться как малым количеством источников (ароматических частиц), так и малой интенсивностью ультрафиолетового излучения. Чтобы сопоставить эмиссию в ИК-диапазоне и в

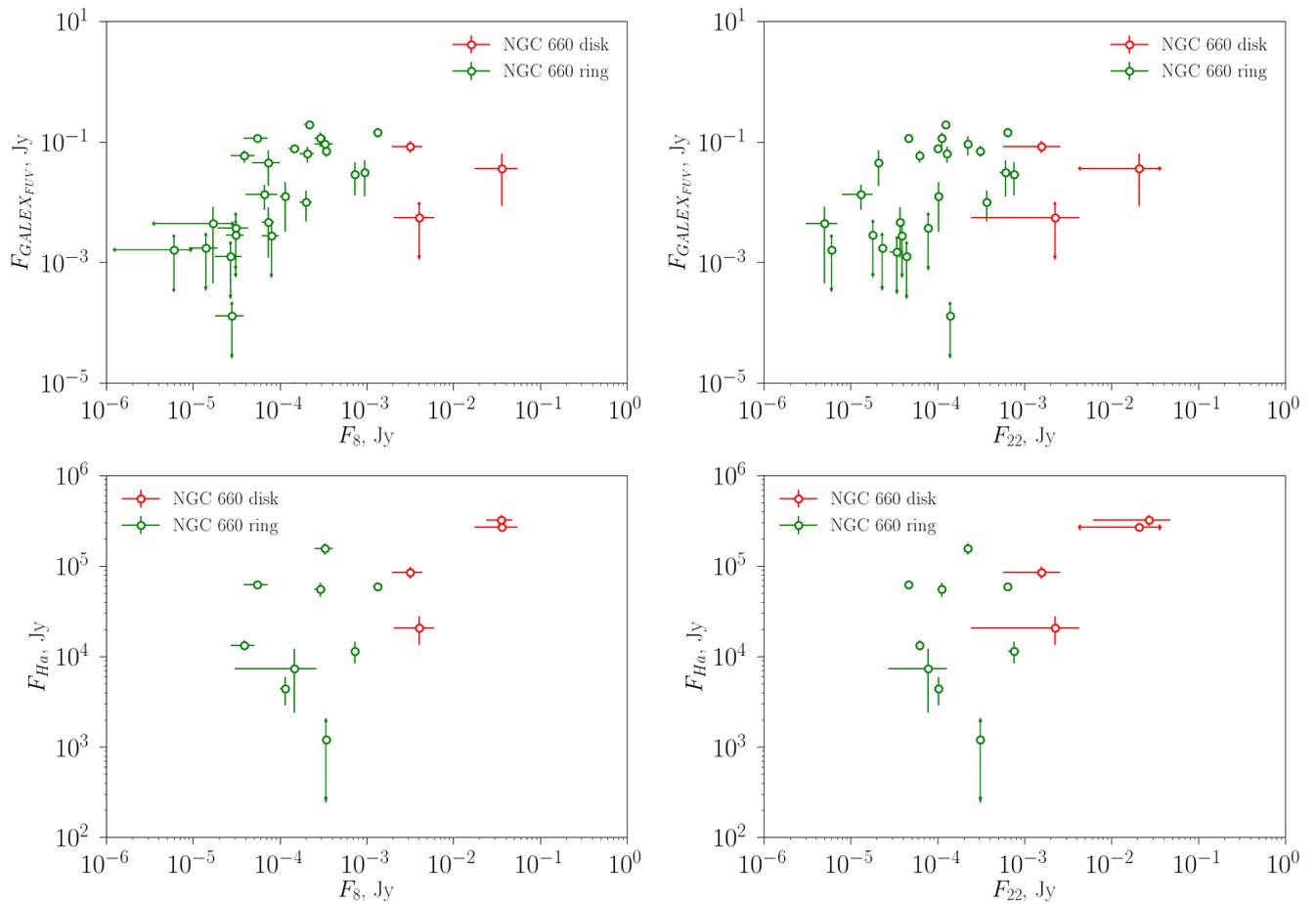


Рисунок 2.5: Сравнение результатов апертурной фотометрии ОЗО в галактике NGC 660 в инфракрасном излучении на длинах волн 8 и 22 мкм, в ультрафиолетовом излучении в диапазоне FUV (верхний ряд) и в излучении в линии $H\alpha$ (нижний ряд).

УФ-диапазоне, на рис. 2.5 мы сравниваем результаты апертурной фотометрии для наблюдений на телескопах «Спитцер» и GALEX. В верхнем ряду результаты ультрафиолетовых наблюдений сравниваются с излучением на длине волны 8 и 22 мкм. Очевидно, что интенсивность ароматических полос в кольце хорошо коррелирует с ультрафиолетовой эмиссией. С излучением из ОЗО диска ситуация менее ясная: поток удалось уверенно определить только в трех областях из пяти; в остальных он не отличается от фона. Эти точки лежат на диаграмме отдельно от точек, соответствующих ОЗО кольца: при почти на порядок большем потоке на 8 мкм, чем в кольце, для ОЗО диска характерны сопоставимые или даже более низкие УФ-потоки. Корреляция потока 22 мкм с УФ-излучением также видна, хотя и слабее. И снова мы видим на порядок более высокий поток 22 мкм в ОЗО диска в сочетании с умеренной УФ-светимостью.

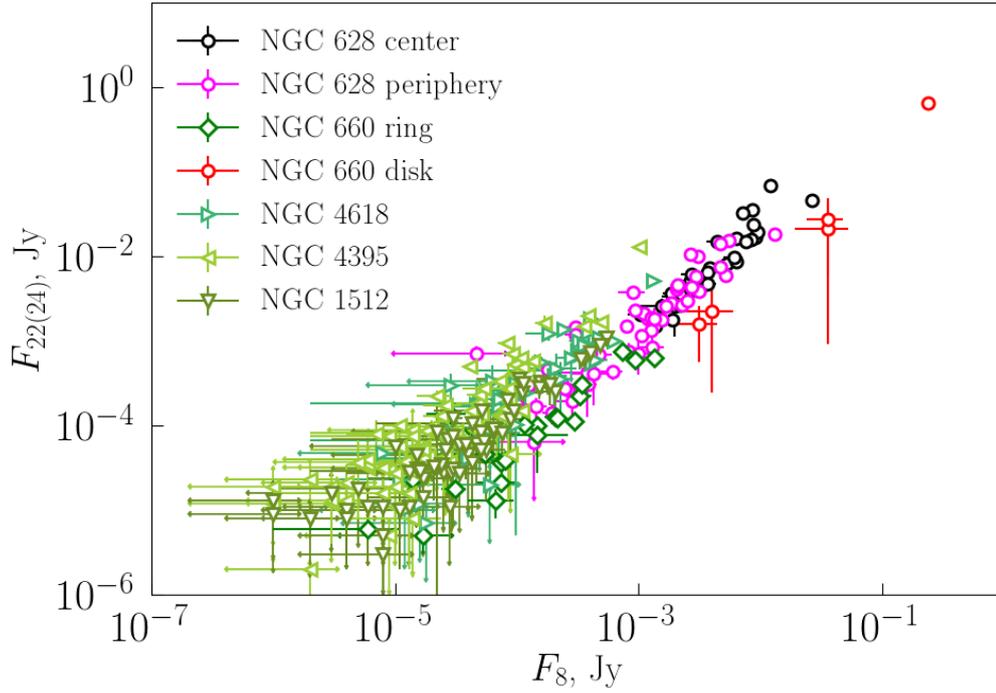


Рисунок 2.6: Соотношение потоков излучения на 8 мкм и 24 (22) мкм для ОЗО в рассматриваемых галактиках NGC 1512, NGC 4395, NGC 4618, NGC 660 (кольцо и диск выделены разными символами) и в галактике сравнения NGC 628.

Схожая картина наблюдается и для излучения в линии $H\alpha$, что иллюстрируется нижним рядом диаграмм на рис. 2.5. И в этом случае видна довольно сильная корреляция потока на 8 мкм и потока в линии $H\alpha$. Точки диска и точки кольца лежат на диаграмме отдельно друг от друга, причем при меньшем ИК-потоке ОЗО кольца характеризуются сопоставимым потоком в линии $H\alpha$.

На рис. 2.6 видно, что положение ОЗО из галактики сравнения NGC 628 и диска галактики NGC 660 на диаграмме «8 мкм – 22 (24) мкм» отличается от положения ОЗО из галактик NGC 1512, NGC 4395, NGC 4618, а также из кольца галактики NGC 660. В ОЗО из новых галактик потоки на 8 и 24 мкм также хорошо коррелируют друг с другом, однако их значения существенно ниже потоков в ОЗО из галактики сравнения (особенно ее центральной части) и диска галактики NGC 660.

Поскольку для галактики NGC 1512 доступны также данные телескопа «Гершель», мы можем посмотреть, как в ней соотносятся потоки в ближнем и дальнем ИК-диапазонах в сравнении с изолированными галактиками. На рис. 2.7 суммарный поток в дальнем ИК-диапазоне (сумма потоков на длинах волн 70, 100 и 160 мкм) сопоставляется с потоками на 8 и 24 мкм. Очевидно, что ОЗО из галактики NGC 1512 и в дальнем ИК диапазоне оказываются су-

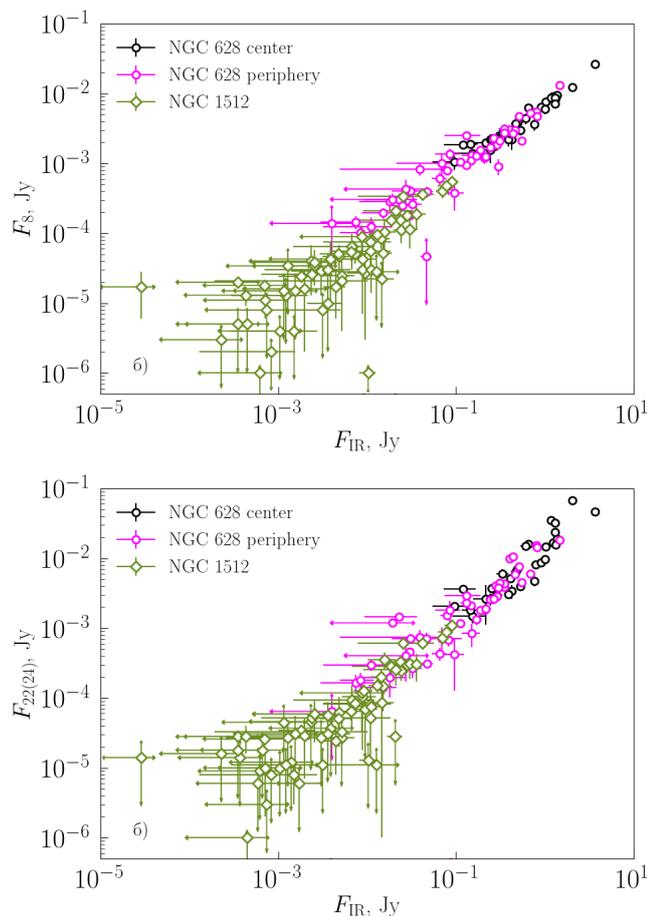


Рисунок 2.7: Отношение потоков излучения на 8 и 24 мкм и суммарного потока в дальнем ИК диапазоне для ОЗО в галактиках NGC 1512 и NGC 628.

щественно тусклее, чем ОЗО в галактике сравнения (как центральные, так и периферийные), хотя в сопоставлении с потоками на 8 и 24 мкм демонстрируют тот же тренд.

Прямая интерпретация рис. 2.6 и 2.7 состоит в том, что инфракрасные потоки от ОЗО в новых галактиках оказываются систематически ниже, чем аналогичные потоки от ОЗО в галактике сравнения. Однако это может быть отчасти связано с тем, что в разных галактиках мы выделяли ОЗО различных размеров. Следует отметить, что во всех случаях ОЗО выделялись на глаз, без использования какого-либо формального алгоритма (см. обсуждение в [95]), однако мы старались подбирать размеры апертур так, чтобы они максимально соответствовали размеру выделяемой ОЗО. На рис. 2.8а показаны гистограммы диаметров апертур для рассматриваемых галактик. Очевидно, что в новых галактиках мы систематически выбирали более компактные ОЗО, чем в галактике сравнения. В NGC 628 значительная часть ОЗО имеет диаметр больше $20''$, тогда как в новых галактиках диаметр ОЗО оказывается, как правило,

существенно меньше этого значения. Отметим, что как в центре, так и на периферии галактики NGC 628 мы в среднем выделяли области одного и того же размера, если не считать некоторого избытка небольших областей во внешней области галактики, что может быть обусловлено селекцией.

Гистограмма на рис. 2.8а в большей степени характеризует процесс выделения ОЗО, а не их физические характеристики. На рис. 2.8б показано распределение ОЗО по линейным диаметрам, вычисленным для приведенных выше оценок расстояний, и здесь мы видим несколько иную картину. Самые большие ОЗО ($\gtrsim 1$ кпк) наблюдаются в галактиках NGC 628 и NGC 660 (как в диске, так и в кольце), тогда как во взаимодействующих галактиках размеры ОЗО существенно меньше ($\lesssim 700$ пк). Сказанное выше об угловых размерах центральных и периферийных ОЗО из галактики NGC 628, очевидно, справедливо и в отношении их линейных размеров. Нужно уточнить, что практически полное отсутствие в NGC 628 идентифицированных ОЗО, по размерам сопоставимых с ОЗО в галактиках NGC 4395 и NGC 4618, может оказаться эффектом селекции. На расстоянии NGC 628 диаметр ОЗО около 250 пк соответствует диаметру апертуры $5''$. На используемых снимках мы могли упустить столь небольшие объекты. Поэтому мы можем утверждать лишь, что *средний* размер ОЗО в NGC 628 превосходит средний размер ОЗО в NGC 1512, NGC 4395 и NGC 4618.

Еще один параметр, по которому можно сравнить рассматриваемые системы, это поверхностная яркость. На рис. 2.9 сопоставляются поверхностные яркости (в $\text{Ян}/\text{пк}^2$) исследуемых ОЗО на длинах волн 8 и 24 мкм отдельно для каждой галактики, исследуемой в данной главе. Поверхностные яркости трех ОЗО диска галактики NGC 660 на 8 мкм превышают поверхностные яркости всех остальных рассматриваемых ОЗО, однако это может быть связано с не вполне уверенным выделением ОЗО в этой подсистеме. Еще две ОЗО диска NGC 660 по поверхностным яркостям не отличаются от ОЗО в галактике сравнения. В отличие от них ОЗО кольца NGC 660 обладают существенно более низкой поверхностной яркостью на 8 и 24 мкм, $\leq 10^{-3} \text{ Ян}/\text{пк}^2$, чем ОЗО центра и периферии NGC 628. Такие же низкие значения $F_8/S_{\text{ар}}$ и $F_{24}/S_{\text{ар}}$ мы наблюдаем в галактике NGC 1512. В отличие от двух этих систем, ОЗО в галактиках NGC 4395 и NGC 4618 по поверхностной яркости практически не отличаются от ОЗО из галактики сравнения.

Как говорилось выше, низкая поверхностная яркость ИК-излучения ОЗО в NGC 1512 и в кольце NGC 660 может вызываться как малым количеством

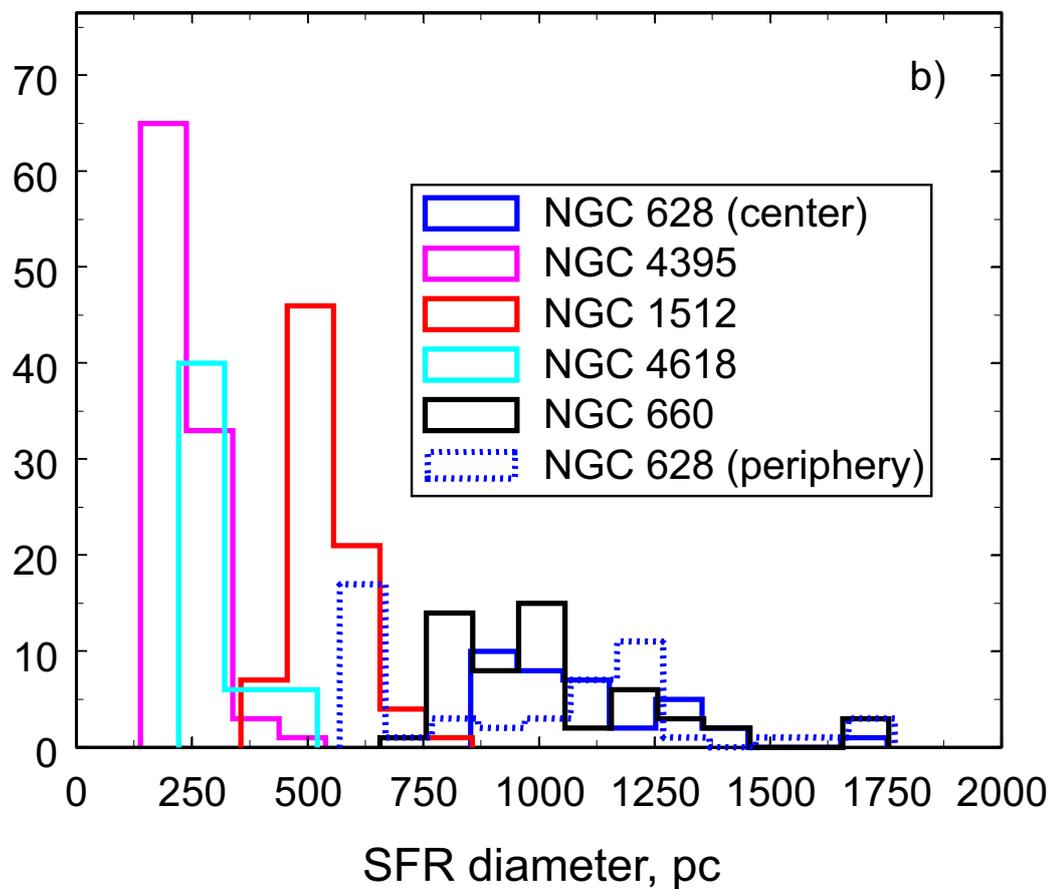
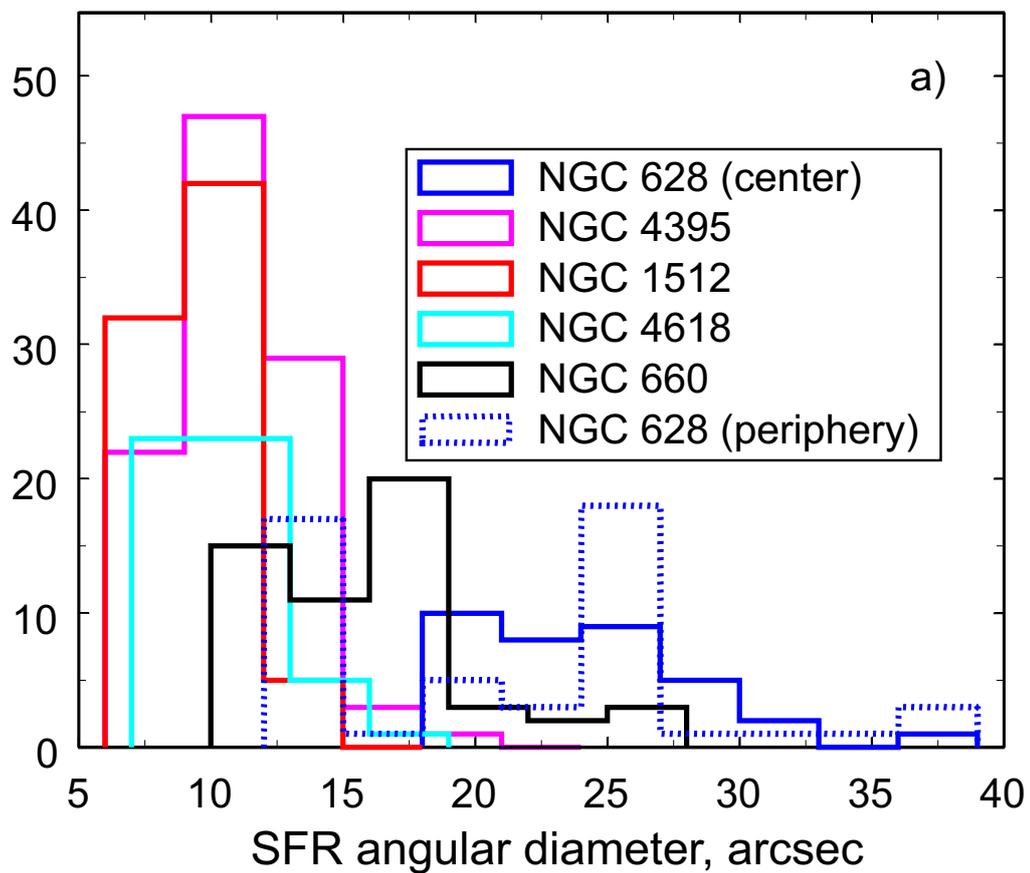


Рисунок 2.8: Распределения исследуемых ОЗО по диаметрам апертур (а) и по линейным диаметрам (б).

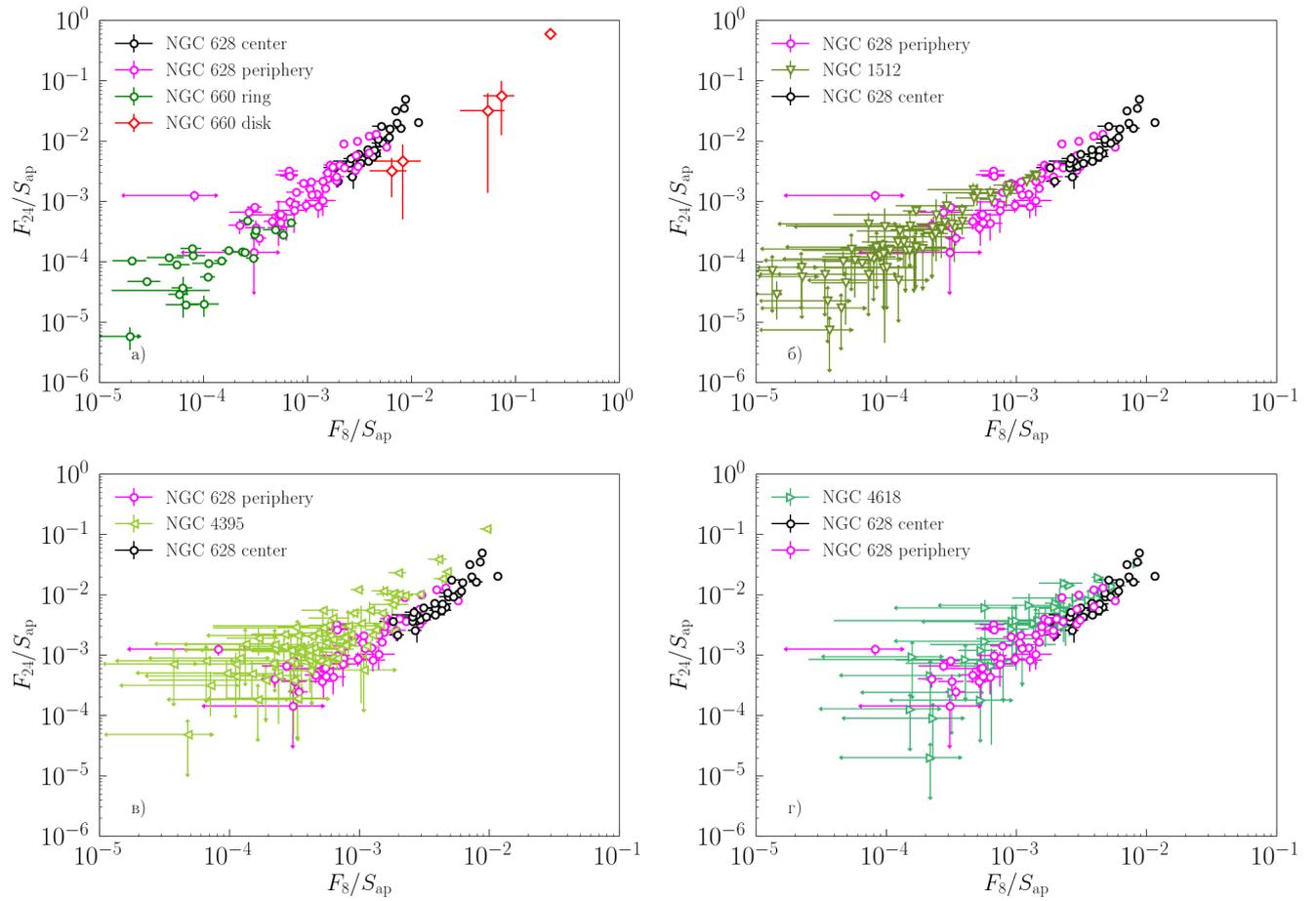


Рисунок 2.9: Отношение поверхностной яркости излучения на 8 мкм и 24 мкм для ОЗО из галактик, исследуемых в данной работе.

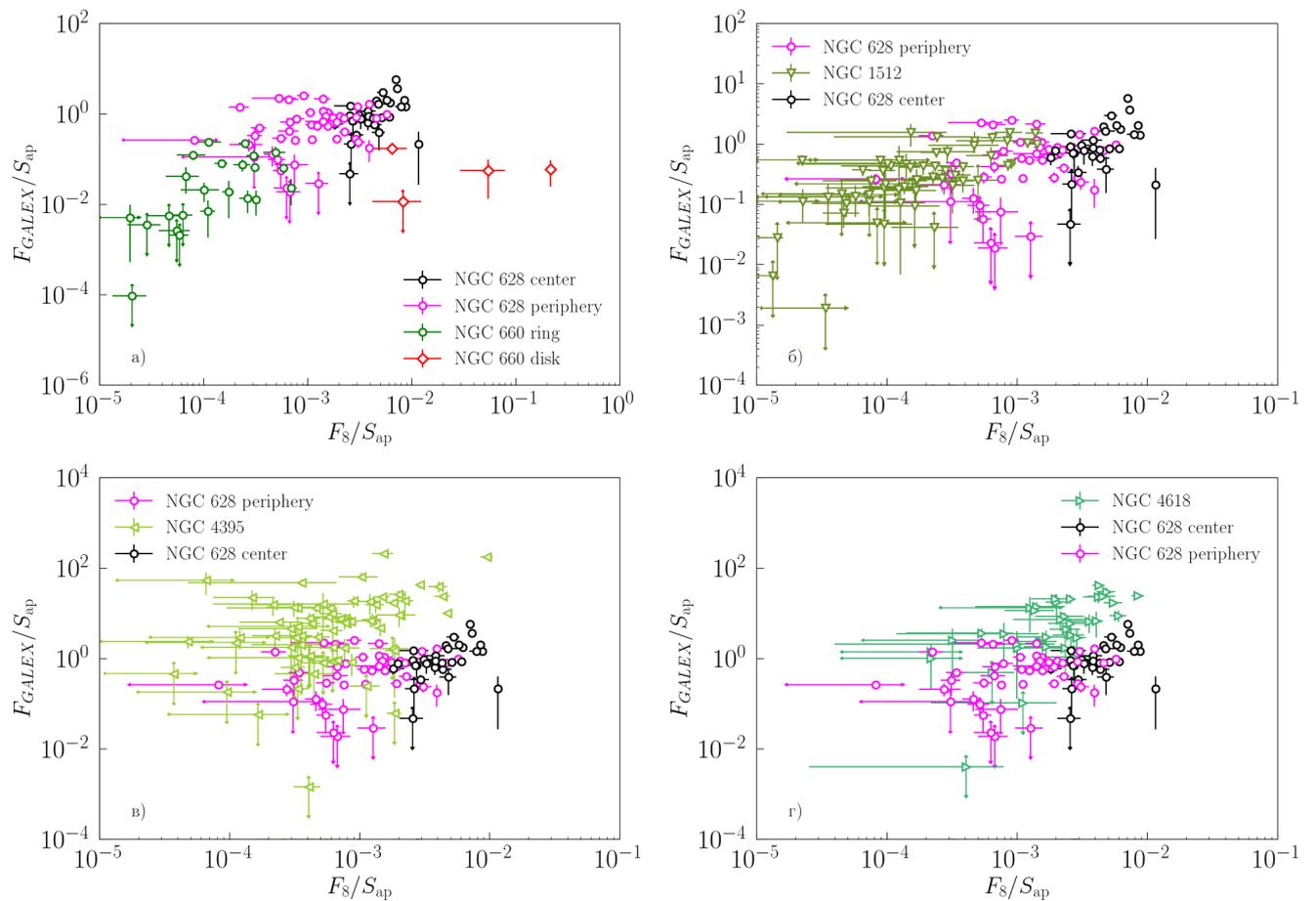


Рисунок 2.10: Соотношение поверхностных яркостей на 8 мкм и в УФ диапазоне для ОЗО в галактиках, исследуемых в данной работе.

источников (ароматических частиц), так и низкой интенсивностью ультрафиолетового излучения. Чтобы сопоставить эмиссию в ИК-диапазоне и в УФ-диапазоне, на рис. 2.10 мы сравниваем результаты апертурной фотометрии для результатов наблюдений на телескопах «Спитцер» и GALEX. Представлены данные ультрафиолетовых наблюдений в фильтре FUV и излучения на длине волны 8 мкм (для потоков в полосах NUV и 24 мкм результаты принципиально остаются теми же самыми).

Как и на рис. 2.9, мы видим существенное различие между галактиками NGC 660 и NGC 1512 с одной стороны и галактиками NGC 4395 и NGC 4618 с другой стороны. Очевидно, что интенсивность ароматических полос в кольце NGC 660 и в NGC 1512 хорошо коррелирует с эмиссией в фильтре FUV. В кольце NGC 660 УФ поток из ОЗО оказывается существенно ниже, чем в галактике сравнения. ОЗО в NGC 1512 несколько перекрываются с ОЗО в NGC 628, однако в среднем поверхностная яркость ОЗО из этой галактики и в ИК, и в УФ оказывается ниже, чем в NGC 628.

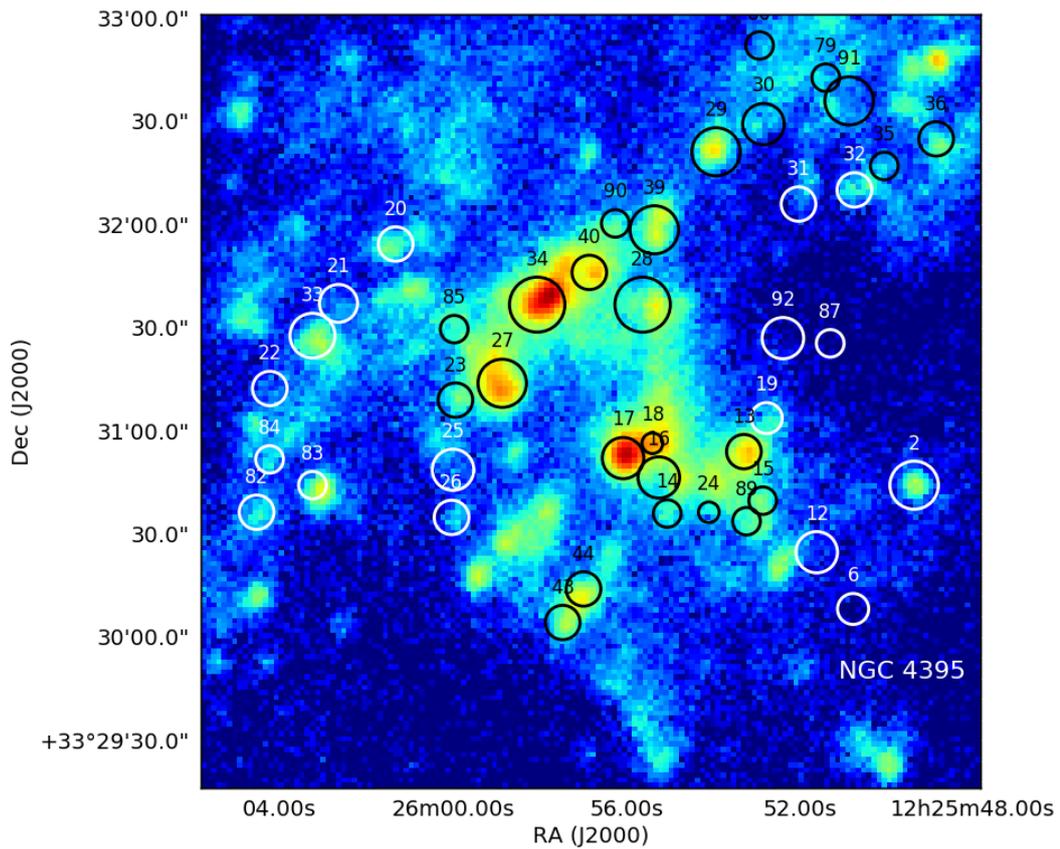


Рисунок 2.11: Фрагмент изображения галактики NGC 4395 в УФ диапазоне (GALEX FUV) с исследуемыми ОЗО.

Возникает искушение связать наблюдаемые поверхностные яркости в ИК и УФ диапазонах, однако нужно учитывать, что, во-первых, в галактиках NGC 4395 и NGC 4618 мы наблюдаем иную картину, а именно существенный сдвиг положений ОЗО на рис. 2.10 вверх вдоль оси Y, что означает более высокую поверхностную яркость в фильтре FUV при той же поверхностной яркости в полосе 8 мкм. Во-вторых, поскольку УФ диапазон при выделении ОЗО не учитывался, в некоторых выделенных нами областях заметного УФ излучения нет совсем, что иллюстрируется на рис. 2.11, где положения ОЗО в галактике NGC 4395 отмечены на ее изображениях в УФ диапазоне. Видно, что с некоторыми ОЗО эмиссия в УФ диапазоне не связана или значительно смещена относительно них (например, ОЗО 6, 31, 87, 92).

Излучение в ближнем ИК-диапазоне, УФ-излучение и излучение в линии $H\alpha$ связаны с активным звездообразованием. Благодаря наличию данных о наблюдениях нейтрального водорода в галактике NGC 660, у нас есть возможность соотнести эмиссию в ИК-диапазоне с эмиссией в линии на длине волны 21 см,

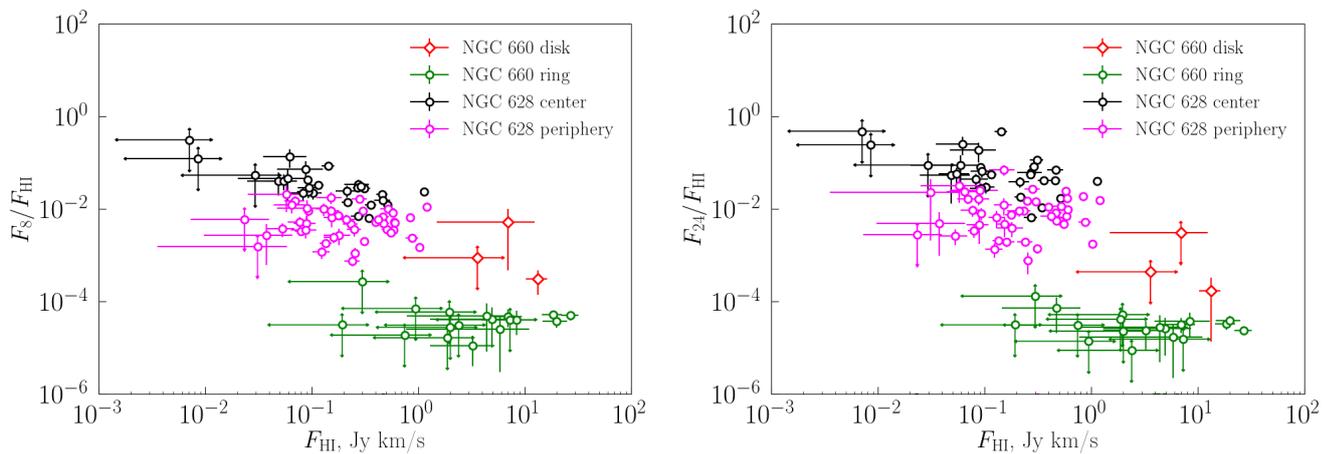


Рисунок 2.12: Отношение потоков F_8/F_{HI} и F_{24}/F_{HI} для ОЗО в галактике NGC 660 и галактике сравнения как функция потока в линии нейтрального водорода.

как и в предыдущей главе, нормируя поток в ИК-диапазоне на поток в линии HI. Результаты представлены на рис. 2.12.

И на диаграмме для 8 мкм, и на диаграмме для 22 мкм ОЗО кольца NGC 660 как группа попадают на ту же (анти)корреляцию, что и ОЗО галактик, исследованных в предыдущей главе: чем ярче область в линии HI, тем ниже ее относительная яркость в ИК-диапазоне. Это также может быть эффектом возраста, в том смысле, что нейтральным водородом особенно богаты молодые области, в которых еще не сложились условия для генерации интенсивного инфракрасного излучения. Однако внутри этих областей какая-либо корреляция $F_{8,22}/F_{\text{HI}}$ и F_{HI} отсутствует. Низким потоком в ИК-диапазоне обладают как ОЗО, богатые водородом, так и ОЗО, бедные им.

2.3.1 Кинематика

В качестве характеристики внутренних движений в ОЗО мы используем величину разброса скоростей ΔV , равную разнице скоростей крайних каналов в полном спектре, в которых сигнал превышает утроенное среднеквадратичное отклонение. Среднеквадратичное отклонение оценивалось по участку спектра, в котором нет сигнала от ОЗО. Из новых галактик эти данные доступны только для NGC 660. Также только для этой галактики доступны спектры в линии $\text{H}\alpha$. Для них описанная выше процедура оценки ΔV не работает, и мы использовали более традиционный подход, определяя ширину линии при помощи вписывания гауссианы в те спектры, в которых доминирует одна линия. В этом случае ΔV

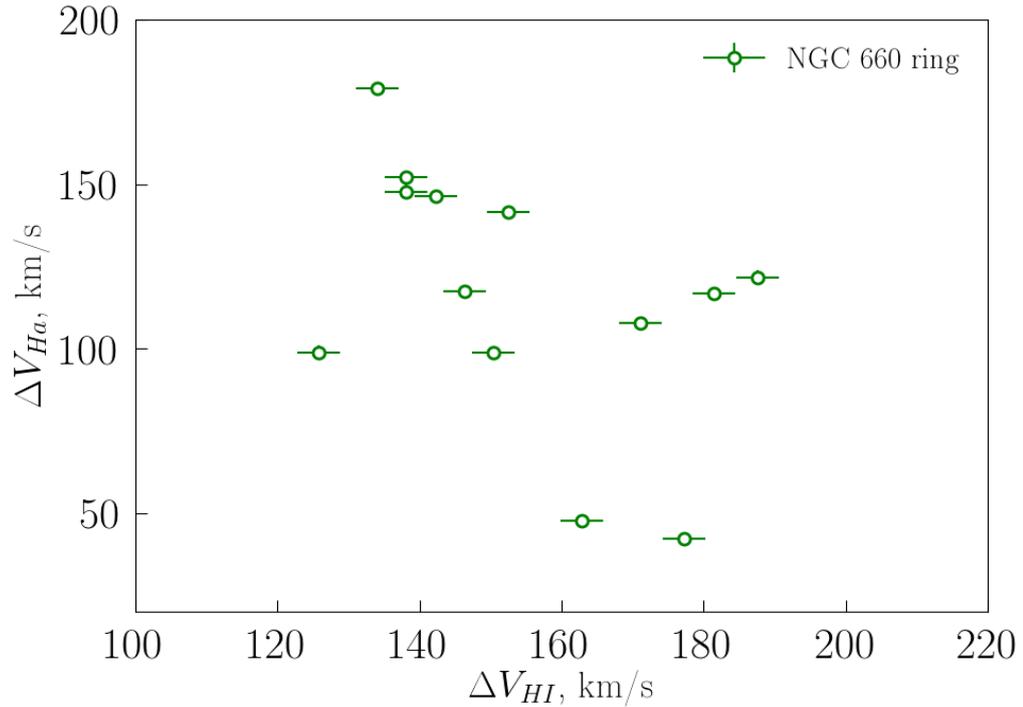


Рисунок 2.13: Соотношение разбросов скоростей в линиях $H\alpha$ и HI.

оценивается как FWHM для вписанного профиля с вычитанием ширины инструментального профиля.

Для оценки вклада крупномасштабного поля скоростей (beam smearing) мы предположили, что атомарный водород движется в диске и кольце так же, как и HI, т.е. демонстрирует практически регулярное вращение. По сглаженному полю скоростей $H\alpha$ анализировалось распределение скоростей в пикселях, попавших в вытянутую диаграмму направленности наблюдений WSRT, и вычислялась дисперсия этих скоростей в наших апертурах. Как и ожидалось, во внешних областях кольца поправка мала и составляет 8–12 км/с. В диске ее величина больше, 30–60 км/с, с максимальными значениями вблизи пересечений диска с кольцом. Во всех случаях оцененный вклад крупномасштабного поля скоростей оказывается существенно меньше величины ΔV в той же апертуре, поэтому в дальнейшем анализе мы им пренебрегали. К сожалению, в отсутствие статистической интерпретации величины ΔV неясна процедура вычитания из нее вклада крупномасштабного поля скоростей, что вносит в наши выводы некоторую неопределенность.

Значения ΔV для $H\alpha$ и HI для NGC 660 сравниваются на рис. 2.13 и сопоставляются с соответствующими потоками на рис. 2.14.

На рис. 2.13 видно, что разбросы скоростей в ОЗО кольца NGC 660 в обеих линиях заключены в пределах от 100 до 200 км/с, однако корреляция между

ними отсутствует. Единственная область, в которой разброс скоростей в линии $H\alpha$ превышает 400 км/с, характеризуется двухпиковым профилем. С учетом ее большого размера это может означать, что в апертуру попало две области (интересно при этом, что разброс скоростей в линии $H\beta$ имеет умеренное значение).

Соотношение потока с разбросом скоростей в спектре $H\alpha$ (рис. 2.14, сверху) демонстрирует известную корреляцию: рост потока сопровождается увеличением разброса скоростей, что может указывать на связь между разбросом скоростей и массой, хотя природа этой корреляции остается предметом дискуссий [96]. Корреляция между разбросом скоростей в линии $H\beta$ и соответствующим потоком практически отсутствует (рис. 2.14, внизу).

2.4 Обсуждение

Наш анализ показывает, что ОЗО в диске и в кольце NGC 660, по-видимому, имеют разные свойства. ОЗО диска по своим эмиссионным характеристикам аналогичны ОЗО в «нормальных» дисках, рассмотренных в предыдущей главе. В то же время ОЗО кольца более компактны и имеют существенно более слабое излучение в инфракрасном диапазоне. Можно возразить, что это эффект отбора, поскольку в кольце (которое является менее густонаселенной средой) мы можем видеть меньшие и более тусклые области, чем в типичном галактическом диске. Это важное соображение, которое заслуживает дальнейшего изучения. Однако отметим, что даже у карлика неправильной формы Холмберг II, где ОЗО достаточно изолированы друг от друга, они крупнее и ярче, чем ОЗО в кольце NGC 660 (см. предыдущую главу).

ОЗО кольца в NGC 660 также кажутся менее яркими в $H\alpha$. Неясна ситуация с УФ-излучением. ОЗО диска и кольца действительно перекрываются в том смысле, что ОЗО кольца, яркие в ультрафиолетовом диапазоне, сравнимы по светимости с ОЗО диска или даже превосходят их. Это может быть связано с эффектом непрозрачности. Если предположить, что области, более яркие в инфракрасном диапазоне, богаче пылью, то они должны быть более непрозрачными в УФ-диапазоне, так что в их УФ-светимости есть определенный эффект насыщения, но это предположение нуждается в проверке на большем количестве ОЗО. Мы также можем видеть этот эффект в $H\alpha$, где существует разница между излучением ОЗО диска и излучением ОЗО кольца, но эта разница гораздо менее заметна, чем в инфракрасном диапазоне.

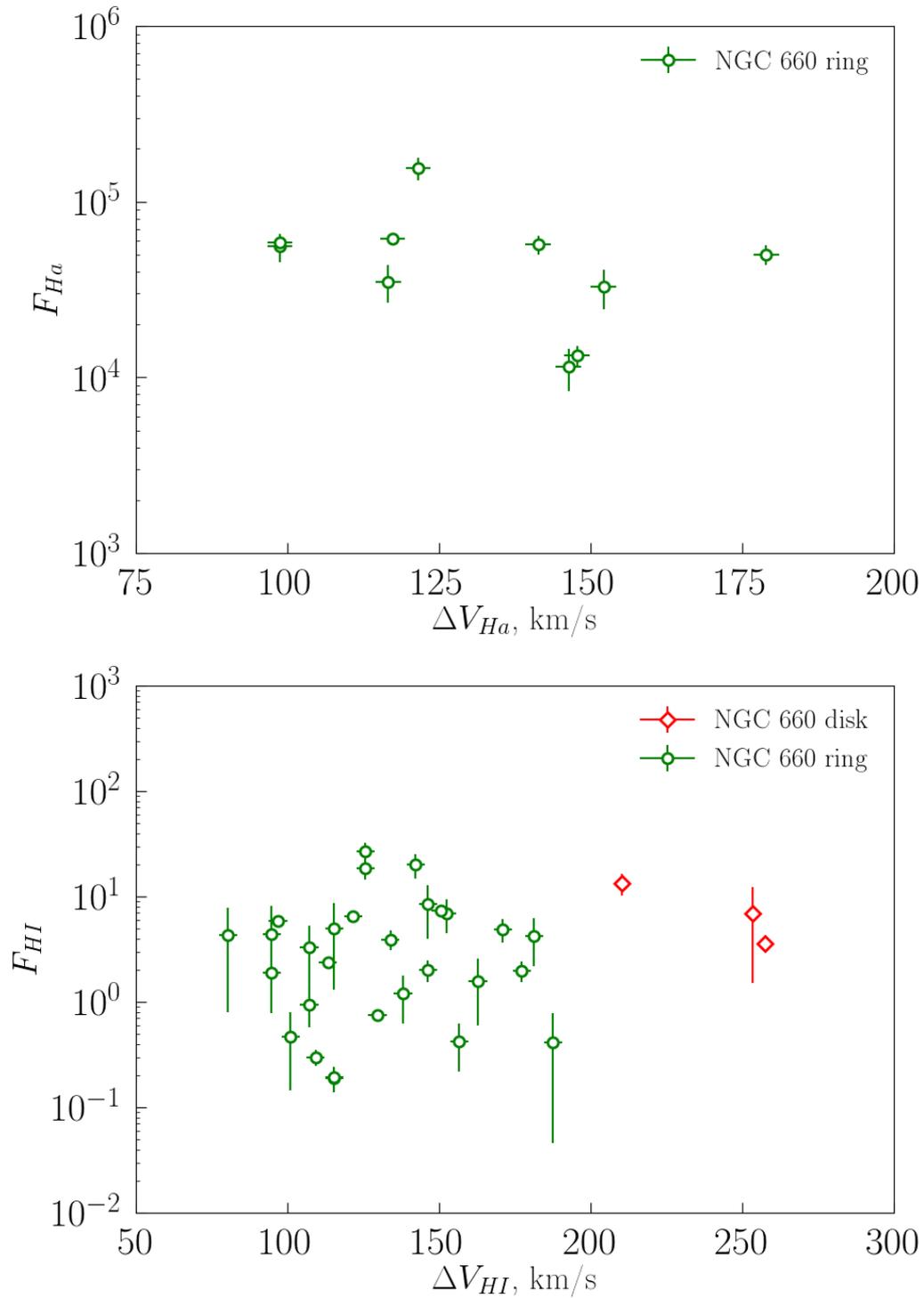


Рисунок 2.14: Соотношение между разбросом скоростей и потоком излучения в КЗО из галактики NGC 660: H α (вверху) и HI (внизу).

В целом мы заключаем, что ОЗО в кольце NGC 660 тусклее, чем ОЗО диска, и содержат меньше пыли. По крайней мере, они менее богаты теми пылевыми частицами, которые излучают в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Для них также характерны более низкие светимости в Н α и УФ, что может свидетельствовать об их относительной молодости.

В галактике NGC 660 обнаружилось существенное различие свойств инфракрасного излучения в ОЗО диска и кольца. Предположение о том, что это различие связано с различной природой звездообразования в двух подсистемах NGC 660, стало стимулом для дальнейшего развития исследования, в котором мы предполагали обнаружить подобные различия, но уже в других галактиках, у которых был эпизод усиленного звездообразования в связи с каким-то внешним воздействием.

Прямое сравнение ИК потоков действительно показывает, что во всех новых галактиках ОЗО оказываются более тусклыми, чем ОЗО в галактике сравнения. Однако причины этого различны. ОЗО в кольце NGC 660 по физическим размерам сопоставимы с ОЗО в галактике NGC 628 и с ОЗО в диске NGC 660, и их небольшой ИК поток связан с низкой поверхностной яркостью. ОЗО в галактиках NGC 4395 и NGC 4618 по поверхностной яркости подобны ОЗО в галактике NGC 628, и их низкие потоки связаны с меньшими физическими размерами. Наконец, ОЗО в галактике NGC 1512 свойственны и небольшие размеры, и низкие поверхностные яркости. Эти различия, очевидно, должны быть связаны с эволюционными различиями между рассматриваемыми галактиками. Рассмотрим их подробнее.

Галактика NGC 1512 представляет собой систему с двумя кольцами — внешним и внутриядерным, — морфология которой в значительной степени определяется взаимодействием с близкой карликовой галактикой NGC 1510. Распределение газа и пыли в системе NGC 1512/NGC 1510 рассматривалось в работах [97] и [98], соответственно. В работе [97] было показано, что атомарный водород простирается на расстояние, как минимум в 4 раза превышающее оптические размеры галактики (B_{25}), и в значительной степени сосредоточен в двух спиральных рукавах (Arm 1 и Arm 2). Отдельные облака HI прослеживаются до расстояний $\sim 30'$ (для принятого нами расстояния это соответствует 100 кпк). Примерно до таких же расстояний видны и пятна УФ излучения, вероятно, отслеживающие положение областей звездообразования (их более детальный анализ представлен в работе [99]). При этом авторы [97] отмечают, что во внешней области диска NGC 1512 эмиссия на длине волны 8 мкм не обнаруживается,

что согласуется с нашими результатами — по картам излучения на 8 мкм мы не смогли выделить ни одной ОЗО во внешней области этой галактики. В работе [98] внешние области NGC 1512 также не рассматривались. Таким образом, между галактиками NGC 660 и NGC 1512 действительно имеется сходство: ОЗО в кольце NGC 660 и в NGC 1512 отличаются пониженной поверхностной яркостью на длине волны 8 мкм. Причем на периферии NGC 1512, подверженной приливному воздействию NGC 1510, поверхностная яркость на 8 мкм настолько низка, что излучение вообще не обнаруживается, хотя содержание HI там, как и в кольце NGC 660 (см. рис. 2.12), высоко. Таким образом, общей характеристикой галактик NGC 660 и NGC 1512 можно считать наличие подсистем (кольцо NGC 660, внешние спиральные рукава NGC 1512), характеризующихся значительным содержанием атомарного водорода, наличием источников УФ излучения и низкой поверхностной яркостью на длине волны 8 мкм.

Следует отметить, что приливные структуры в NGC 1512, как и кольцо NGC 660, не являются долгоживущими структурами, тогда как в асимметричных галактиках характерное время инициирования звездообразования может быть больше. Однако проблема возраста рассмотренных ОЗО требует отдельного исследования.

Общей чертой галактик NGC 4395 и NGC 4618 является их асимметричность (lopsidedness). Однозначного ответа на вопрос о природе асимметричной структуры дисковых галактик нет. Численные расчеты показывают, что в некоторых случаях такая асимметрия может возникать в ходе динамической эволюции диска в галактиках с перемычками [100].

Среди более распространенных объяснений значатся приливные взаимодействия с другими галактиками или асимметричный приток внешнего вещества [73]. Возникает искушение связать отмеченные выше особенности NGC 4395 и NGC 4618 с их асимметричностью. Однако они отличаются от других галактик, рассмотренных в данной статье, еще (как минимум) тремя параметрами — расстоянием, массой и темпом звездообразования, причем различия в массе и темпе звездообразования могут быть взаимосвязаны.

Близкое расположение NGC 4395 и NGC 4618 могло привести к тому, что в этих галактиках из-за лучшего пространственного разрешения мы выделили ОЗО меньшего размера. Действительно, в галактике NGC 4395 можно указать несколько групп ОЗО, которые при худшем разрешении были бы идентифицированы нами как одна более крупная ОЗО. Однако таких групп немного, и общую картину распределения ОЗО по размерам они бы не изменили. Кроме

того, относительно небольшой физический размер характерен также для ОЗО в галактике NGC 1512, расположенной значительно дальше. Выше мы уже отмечали возможные эффекты селекции при выделении областей в NGC 628, но и с их учетом основной вывод остается прежним: средний размер ОЗО в NGC 4395 и NGC 4618 уступает среднему размеру ОЗО в других галактиках.

Оба указанных выше объяснения асимметричности галактик могут вызывать усиление звездообразования, и мы действительно видим некоторые указания на это. Полная светимость NGC 4395 и NGC 4618 в среднем ИК диапазоне указывает, что интегральный темп звездообразования в них на порядок или более уступает темпу звездообразования в галактиках NGC 628 и NGC 1512 (табл. 2.1), однако это отличие отражает меньшие размеры NGC 4395 и NGC 4618: полная поверхностная яркость этих галактик на длине волны 24 мкм (по нашим оценкам) и в полосе В (по базе данных HyperLEDA) превышает аналогичные параметры галактик NGC 628 и NGC 1512. Иными словами, в двух асимметричных галактиках, рассматриваемых в данной главе, звездообразование действительно происходит несколько более интенсивно, чем в остальных галактиках. Кроме того, ОЗО в NGC 4395 и NGC 4618 отличаются более высокой поверхностной яркостью в УФ диапазоне, чем ОЗО в галактике сравнения, имеющих такую же яркость в ближнем ИК диапазоне. Таким образом, хотя асимметричность дисковых галактик является довольно распространенным свойством [73], в двух конкретных случаях (NGC 4395 и NGC 4618) мы видим заметные отличия и от взаимодействующих, и от изолированных галактик. Следует отметить, что галактика NGC 4395 является изолированной, а галактика NGC 4618, хотя и рассматривается обычно в паре с галактикой NGC 4625, возможно, также не является взаимодействующей [101]. Очевидно, что взаимодействие не является единственной причиной образования ОЗО с незначительным потоком в ИК диапазоне.

Следует отметить, что если в галактике NGC 628 отдельно рассматривать ОЗО в центре и на периферии, на приведенных выше диаграммах видны различия и между ними: центральные ОЗО демонстрируют более высокие светимости и поверхностные яркости в ближнем ИК-диапазоне, чем периферийные ОЗО, однако отмеченные выше отличия между рассматриваемыми галактиками и галактикой NGC 628 оказываются существенно большими, чем отличия между центральными и периферийными ОЗО в NGC 628. В УФ диапазоне, а также в излучении нейтрального водорода систематических отличий между центральными и периферийными ОЗО в NGC 628 нет.

Металличности всех рассматриваемых галактик близки, так что мы не можем ожидать каких-либо значимых отличий, связанных с химическим составом. Несколько особняком стоит в этом отношении галактика NGC 660. Ее металличность (как и другие интегральные характеристики) относится, главным образом, к диску. Определений химического состава кольца мы в литературе не нашли, за исключением работы [102], авторы которой показали, что звездное население кольца лучше всего описывается изохронами с довольно низкой металличностью, $Z = 0.008$. Кроме того, в работе [103] было оценено отношение масс пыли и газа в кольце NGC 660. Оказалось, что его величина в 2–3 раза ниже, чем в солнечной окрестности. Если считать, что это отношение является мерой металличности, то оно также указывает на содержание тяжелых элементов всего в несколько раз ниже солнечного ($12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \sim 8.1 \div 8.3$). Наблюдения в H α , представленные в обзоре [104], указывают, что кольцо в NGC 660 образовалось в результате захвата газа от дисковой довольно массивной карликовой иррегулярной галактики UGC 1195. Прямые измерения металличности этой галактики в литературе отсутствуют, но использование соотношения «металличность-светимость» из работы [105] дает для $M_B(\text{UGC 1195}) = -17.67$ (согласно базе HyperLeda) величину $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.33$ в хорошем согласии с приведенной выше оценкой металличности полярного кольца NGC 660.

При этом, как показывают в том числе и наши исследования, представленные в Главе 1, отличия, связанные с металличностью, становятся существенными при значениях $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8$.

2.5 Выводы

В работе рассмотрены параметры ОЗО в нескольких галактиках и возможные соотношения между этими параметрами. На основе полученных результатов сделаны следующие выводы:

- 1) Размеры ОЗО рассматриваемых галактик демонстрируют широкий разброс. Самые большие ОЗО ($\gtrsim 1$ кпк) наблюдаются в галактиках NGC 628 и NGC 660 (как в диске, так и в кольце), тогда как у NGC 4618, NGC 4395, NGC 1512 размеры ОЗО меньше ($\lesssim 900$ пк), а самые небольшие (около 150 пк) — NGC 4395.
- 2) ОЗО кольца NGC 660 также кажутся менее яркими в H α . Неясна ситуация с УФ-излучением. Дисковые ОЗО и кольцевые ОЗО действительно

перекрываются в том смысле, что ОЗО кольца, яркие в УФ-диапазоне, сравнимы (или даже превосходят) по светимости ОЗО диска. Это может быть связано с эффектом непрозрачности.

- 3) В ОЗО кольца галактики NGC 660 поток излучения атомарного водорода на длине волны 21 см сопоставим или превышает поток в ОЗО из галактики сравнения (при существенно более низких ИК потоках). Разброс скоростей в линии $H\alpha$ растет с увеличением потока в этой линии; разброс скоростей в линии $H\text{I}$ от потока в этой линии не зависит.

Результаты, представленные в этой главе, могут быть признаком того, что параметры комплексов звездообразования различаются в галактиках с признаками недавнего взаимодействия, в галактиках с асимметричными дисками и в обычных галактиках. Различия, наблюдаемые и в физических размерах, и в поверхностной яркости ОЗО, свидетельствуют, что протекание процесса звездообразования зависит от многих факторов, а не только от принадлежности галактики к тому или иному морфологическому типу.

2.6 Положения, выносимые на защиту

- 1) Выявлены существенные различия между наблюдаемыми характеристиками ИК-поля излучения ОЗО диска и кольца галактики NGC 660. ОЗО диска по своим эмиссионным характеристикам аналогичны ОЗО в дисках изолированных спиральных галактик. ОЗО кольца компактнее и содержат меньше пыли, то есть характеризуются более слабым излучением в среднем и ближнем инфракрасном диапазоне. Для ОЗО кольца также характерна низкая светимость в УФ-диапазоне и линии $H\alpha$. Все эти факты указывают на молодость ОЗО кольца относительно ОЗО диска.
- 2) В галактиках с признаками недавнего взаимодействия NGC 660 и NGC 1512 поверхностная яркость комплексов звездообразования в ИК диапазонах оказывается существенно ниже, чем в галактике NGC 628, выбранной в качестве галактики сравнения. Это свидетельствует, что ОЗО в двух этих галактиках менее богаты пылевыми частицами, светящими в ближнем и среднем ИК-диапазоне, а в галактике NGC 1512 и в дальнем ИК диапазоне. При этом в периферийной области NGC 1512 ОЗО, излучающие в ближнем ИК диапазоне, не наблюдаются. Для ОЗО в NGC 660

и NGC 1512 также характерны более низкие светимости в $H\alpha$ и УФ-диапазоне, что в целом может указывать на относительную молодость исследуемых ОЗО в двух этих галактиках.

- 3) В асимметричных галактиках NGC 4395 и NGC 4618 поверхностная яркость ОЗО в ИК диапазоне не отличается от поверхностной яркости ОЗО в галактиках с обычной морфологией. Поверхностная яркость ОЗО из этих галактик в УФ диапазоне превышает аналогичную яркость ОЗО в галактиках с обычной морфологией. Однако физические размеры ОЗО в двух этих галактиках оказываются меньше размеров ОЗО и во взаимодействующих галактиках, и в галактике сравнения. Это говорит о том, что звездообразование в двух этих галактиках происходит несколько более интенсивно, чем в других рассмотренных галактиках.

Глава 3

Галактики с полярными кольцами: перспективные объекты для исследования особых режимов звздообразования

3.1 Введение

В предыдущей главе мы рассмотрели галактику с полярным кольцом NGC 660, которая оказалась несколько необычной с точки зрения свойств ОЗО. В этой главе мы рассматриваем возможность расширения выборки подобных объектов, пригодных для детального анализа. Результаты, представленные в этой главе, опубликованы в работе [A1].

На сегодняшний день мы знаем много галактик с полярными кольцами, но до 1950-х гг. о них не было известно вовсе. Все началось в 1959 г., когда супруги Бербиджи составили первое морфологическое описание галактики NGC 2685 [106]. Они заметили в ней необычную спиральную структуру, обвивающую центральную часть галактики и имеющую ось симметрии вдоль большой оси галактики. Еще одной особенностью является слабое внешнее эллиптическое гало, ясно видимое на фотографиях Паломарского обзора, ориентированное так же, как и центральная часть галактики. Лишь спектральные наблю-

дения середины 1970-х гг. однозначно показали, что главное тело NGC 2685 вращается в плоскости диска, а система волокон вращается перпендикулярно телу центральной галактики. На еще больших расстояниях газовый диск, в котором находятся волокна, изгибается и «укладывается» в основную плоскость галактики.

Самой знаменитой галактикой с полярным кольцом является NGC 4650A. Впервые эта галактика была описана аргентинским астрономом Серсиком в 1967 г. [107]. На снимках NGC 4650A выглядит состоящей из двух компонентов: центрального компонента (очень напоминающего обычную линзовидную галактику) и деформированного внешнего кольца из областей III. Проекция этих двух компонентов на небо лежат почти перпендикулярно друг другу. В 1984 г. группой авторов [108] были проведены измерения вращения центрального компонента, и найдено, что отношение скорости вращения в кольце к центральной дисперсии скоростей превышает единицу, что в широком диапазоне параметров совместимо с предположением о сплюснутом внутреннем сфероиде. В ходе этих исследований была доказана принадлежность 4650A к ГПК [108].

Самым первым собранием информации о ГПК является каталог Polar Rings Catalog, или PRC, созданный в 1990 г. Вайтмо и др. [28]. Он был разделен на четыре части и содержал 157 объектов. Из них только шесть были кинематически подтверждены и вошли в тип А. В тип В на основе морфологии было включено 27 хороших кандидатов. Остальные кандидаты вошли в типы С и D: возможные кандидаты (категория С) и возможно связанные объекты (категория D).

После опубликования каталога началось его тщательное исследование. За 20 лет его существования ГПК были признаны около 25 объектов, из которых есть несколько объектов типа С. Самой известной из них стала галактика С 13, или NGC 660. Спустя чуть больше 20 лет был создан новый каталог SPRC [67], в который входило 275 объектов. Позже выяснилось, что SPRC 198 и SPRC 102 — один и тот же объект [109], поэтому оригинальных объектов осталось 274. В данной главе рассматривается этап создания каталога ГПК [67], и делается расчет структурных параметров 78 объектов, из которых 72 входят в каталог SPRC (в том числе 70 — в группу «лучшие кандидаты» этого каталога) и еще шесть входят в каталог PRC. Большая часть исследуемых объектов является кинематически-подтвержденными ГПК [67, 110].

3.1.1 Формирование ГПК

В настоящий момент предложено несколько сценариев образования ГПК. Все они так или иначе связаны с взаимодействием центральной галактики и ее окружения [111]. Одним из сценариев является слияние двух дисковых галактик, происходящее на относительно небольших взаимных скоростях [111]. Этот сценарий объясняет формирование полярных колец вокруг ранее существовавшей галактики и объясняет различную морфологию полярных колец. Пример моделирования слияния показан на рис. 6 из работы [111]. Там мы видим, как массивная галактика, входя в зону повышенной концентрации звезд и газа, под действием гравитационных сил начинает «наматывать» на себя вещество, образуя полярное кольцо.

Радиус образующегося полярного кольца зависит в основном от исходного радиального распределения газа и в меньшей степени от других параметров. Для формирования очень больших колец ($R > 10$ кпк) требуется, чтобы галактика-«жертва» содержала газ вне своего звездного диска. Бекки [112] объяснил формирование больших колец, как в NGC 4650A, низкими скоростями столкновения (приблизительно 30 км/с), при которых диск «жертвы» не разрушается, но такие относительные скорости очень редки.

Расчеты показывают [111], что большая часть (около 3/4) полярных колец скорее всего образуется в результате аккреции большой галактикой вещества из богатого газом спутника, имеющего соответствующее направление орбитального момента. Для этого требуются достаточно специфические начальные условия (см. рис. 7 из [111]). Разумеется, сам захват газа может происходить при любой ориентации орбиты спутника-«донора». Но если образующееся при этом газовое кольцо будет иметь небольшой угол относительно звездного диска галактики, то через несколько оборотов под действием гравитации диска кольцо за счет прецессии упадет в плоскость галактики. В то же время расчеты показывают, что полярная (т. е. почти перпендикулярная) взаимная ориентации диска и кольца является устойчивой, т. е. кольцо будет оставаться стабильным в течение многих оборотов.

3.2 Предварительная выборка для каталога ГПК

Цифровой обзор неба SDSS покрывает заметную часть небесной полусферы (1/4 для DataRelease 7). В нем имеются оптические изображения миллионов галактик. К сожалению, до сих пор отсутствуют методы для точной автоматической классификации изображений галактик по морфологическим типам. Но имеется возможность воспользоваться результатами проекта GalaxyZoo, в рамках которого сотни тысяч добровольцев по всему миру выполняют предварительную классификацию галактик SDSS. Разумеется, они не занимаются специально поиском галактик с полярными кольцами, но многие выразительные примеры выносятся ими на форум кольцевых галактик. Большинство галактик, приведенных на форуме, относятся к столкновительным кольцам или кольцам на резонансах баров. Среди этих галактик мы отобрали кандидаты в ГПК, используя следующие критерии:

- 1) Наличие на изображении двух примерно ортогональных дисков (после учета их наклона к лучу зрения).
- 2) Совпадение фотометрических центров подсистем с точностью до $1 - 2''$.
- 3) Видимый диаметр галактики не менее $10''$, что обеспечивает возможность отождествления деталей структуры.

После отбора подходящих галактик из полученного списка были удалены все уже известные системы, входящие в каталог Вайтмо [28]. Из оставшихся галактик был сформирован предварительный список, который был визуально разделен на 2 группы: те, которые точно имеют полярное кольцо, и те, что вызывают некоторые сомнения.

Анализ предварительного списка позволил уточнить критерии для оценки большого массива данных, входящих в SDSS, описанные в диссертации А.В. Моисеева¹.

3.3 Параметры каталога ГПК

В GalaxyZoo были представлены результаты простой морфологической классификации почти 900 тысяч галактик, выполненной волонтерами для

¹https://www.sao.ru/hq/moisav/Manuscript2_compact.pdf

SDSS, где они давали множество независимых оценок для одной и той же галактики. В классификации галактики использовались следующие простые типы: EL — эллиптическая; CW/ACW — спиральная (с разным направлением закрутки); Edge — спиральная, видимая с ребра; MG — взаимодействующая система; DK — непонятный тип. В ходе голосования за ту или иную галактику ее морфологический тип определялся большинством голосов. Этот способ помогает оценить вероятность того, что определенная галактика принадлежит к тому или иному морфологическому типу.

Это позволило разработать дополнительные критерии отбора галактик, схожих (в рамках представленных типов) с уже известными кандидатами в ГПК, и этим сильно сократить число изображений для дальнейшего просмотра. Более подробно процедура отбора кандидатов в ГПК представлена в докторской диссертации А.В. Моисеева.

В итоговый список кандидатов в ГПК вошло 275 галактик. Таким образом, удалось в три раза увеличить первоначальный список, основанный на анализе форума кольцевых галактик GalaxyZoo. По аналогии с PRC список был назван SPRC (Sloan-based Polar Rings Catalog). Каталог был условно разбит на четыре группы:

- 1) лучшие кандидаты (70);
- 2) хорошие кандидаты (115);
- 3) родственные объекты (53);
- 4) кольца, ориентированные плашмя (37).

3.4 Расчет основных структурных параметров

3.4.1 Отбор кандидатов

Для изучения статистики параметров ГПК важно иметь максимально однородный исходный материал. В нашу выборку лучших кандидатов вошли 70 галактик SPRC, максимально похожих на классические ГПК. К ним мы добавили две галактики, отнесенные к «кольцам, ориентированным плашмя»: SPRC 241, SPRC 260, для которых уже получено кинематическое подтверждение принадлежности к ГПК [113]. Также мы включили в выборку объекты из каталога PRC, для которых, с одной стороны, имеются кинематические подтверждения

принадлежности к ГПК, а с другой есть снимки SDSS/DR8. Таких галактик оказалось всего шесть. Итого, в выборку вошло 78 галактик, красные смещения которых находятся в интервале $z = 0.003 - 0.17$. Важно, что анализируемые снимки имеют сходную глубину по поверхностной яркости, так как использовался единый источник — изображения SDSS.

3.4.2 Анализ выборки GalaxyZoo

Для выделения структуры низкой поверхностной яркости в кольце и галактике мы суммировали изображения в пяти фильтрах SDSS (u, r, i, z, g). Поскольку изображения ГПК отличаются сложной формой, то применение стандартных автоматических алгоритмов подгонки формы изофот оказывается проблематичным. Поэтому мы вручную описывали эллипсами внешние изофоты центрального диска и полярного кольца, используя средства программы SAOImage DS9 (см. примеры на рис. 3.1). Центр эллипсов фиксировался на ядре галактики. Измеряемые параметры: большая (a) и малая (b) полуоси эллипсов и позиционный угол большой оси PA. Мы пробовали таким же способом описывать и внутренние границы полярных колец, но уверенный результат получен менее чем для десятка галактик, поэтому анализ этих измерений не проводился. Для объекта SPRC 33 (NGC 4262), представляющего собой линзовидную галактику, окруженную широким газовым кольцом, в котором присутствует лишь небольшое количество звезд, заметных в основном в УФ-диапазоне, параметры кольца и галактики брались из работы [114].

Для определения угла наклона изучаемых структур к лучу зрения (i) использовалась классическая формула оценки наклона сплюснутого сфероида по видимому отношению его осей в проекции на небесную сферу:

$$\cos^2 i = \frac{(b/a)^2 - q_0^2}{1 - q_0^2}, \quad (3.1)$$

где собственная сплюснутость сфероида для центральных галактик принималась равной $q_0 = 0.20$ [115], а полярные структуры мы считали плоскими: $q_0 = 0$. Зная для двух плоскостей только PA и значение i , вычисленное по формуле 3.1, мы не можем однозначно определить угол между ними. Необходима дополнительная информация о том, какая сторона диска и кольца находится ближе или дальше к наблюдателю. Это возможно понять по распределению пылевых прожилок на изображении галактики, но в подавляющем большинстве изучаемых объектов угловой размер прожилок слишком мал по сравнению с

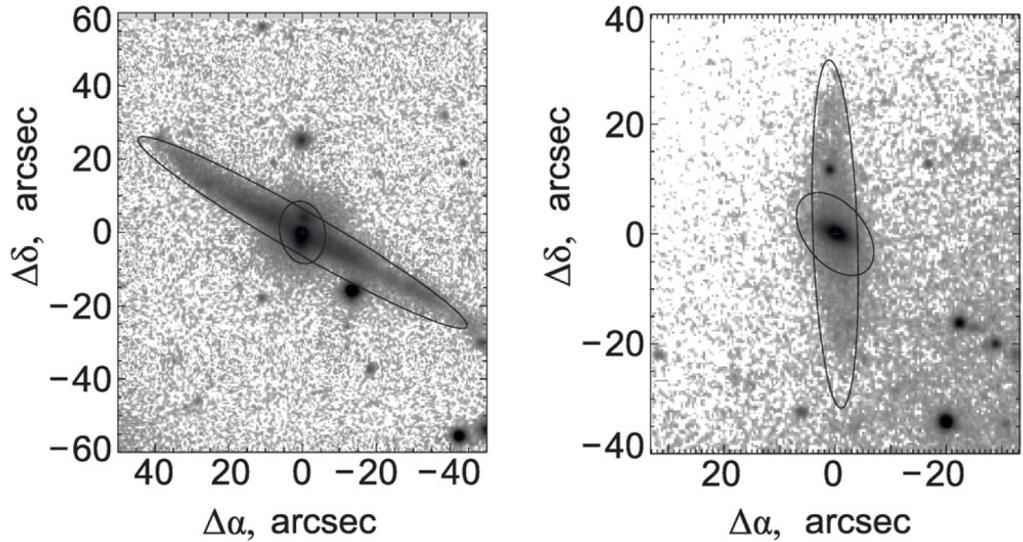


Рисунок 3.1: Изображение галактик SPRC 42 (слева) и SPRC 50 (справа) — сумма пяти фильтров из SDSS в логарифмической шкале интенсивностей. Эллипсами показаны принятые ориентации внешних областей диска и полярной структуры.

разрешением снимков SDSS. Поэтому, если невозможно определить, как именно диск и кольцо ориентированы относительно наблюдателя, то в общем случае, имеется два решения для возможного угла между компонентами кольца и галактики [116], далее обозначенных как δ_1 и δ_2 :

$$\cos \delta_{1,2} = \cos(PA_0 - PA_1) \sin i_0 \sin i_1 + \cos i_0 \cos i_1. \quad (3.2)$$

Здесь PA_0 — позиционный угол центральной галактики, PA_1 — позиционный угол полярного кольца, i_0 — угол наклона галактики к лучу зрения, i_1 — угол наклона полярного кольца к лучу зрения.

Результаты вычисления параметров галактик приведены в табл. 3.1. Здесь представлены малая и большая полуоси эллипса и позиционный угол большой оси PA для центральной галактики (столбцы 2–4) и для полярного кольца (столбцы 5–7), в столбце 8 представлено красное смещение галактик. Далее показаны (столбцы 9–10) возможные значения углов между внешним кольцом и диском (если не известна ориентация). Завершают таблицу внешние диаметры колец, нормированные на оптический диаметр галактики $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$.

Таблица 3.1: Параметры галактик

Название галактики	Внутренняя структура		Полярное кольцо			z	δ_1 , deg	δ_2 , deg	$d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$
	a, arcsec	b, arcsec	PA, deg	a, arcsec	b, arcsec				
SPRC1	7.2	3.6	92	5.6	2.4	10	71	84	0.78
SPRC2	10.7	7.5	17	19.8	5.9	85	62	86	1.85
SPRC3	5.7	2.8	325	12.1	2.9	66	86	74	2.1
SPRC4	9.1	3.7	122	9.5	4.0	27	85	77	1.04
SPRC5	4.0	3.20	220	8.7	2.0	106	86	65	2.2
SPRC6	4.8	3.2	29	6.1	2.8	149	87	50	1.28
SPRC7	4.2	3.2	150	17.8	9.5	50	72	60	4.28
SPRC8	5.2	2.8	130	7.6	2.40	27	88	69	1.46
SPRC9	5.7	1.9	10	5.5	1.4	94	80	88	0.97
SPRC10	5.7	1.8	320	6.90	1	40	78	82	1.21
SPRC11	6.7	3.2	125	10.4	3.5	30	85	77	1.56
SPRC12	4	2.3	135	6.3	2	37	86	73	1.6
SPRC13	8.3	3.2	15	13.1	2.4	97	79	86	1.57
SPRC14	8.7	5.2	130	17.8	5.9	35	83	75	2.05
SPRC15	9.9	4.4	144	11.9	4	22	71	53	1.2
SPRC16	5.5	2.5	119	10.7	2.4	48	67	78	1.93
SPRC17	10	4.4	100	7.60	2.4	10	82	82	0.76
SPRC18	4.2	2.8	45	5.5	2.6	150	82	61	1.33
SPRC19	4.8	2.4	109	5.9	1.8	12	87	75	1.25
SPRC20	5.1	4	0	17	1.6	97	89	81	3.34
SPRC21	3.6	2.2	9	4.8	2	99	75	75	1.33

Таблица 3.1: Продолжение

Название галактики	Внутренняя структура		Полярное кольцо			z	δ_1 , deg	δ_2 , deg	$d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$
	a, arcsec	b, arcsec	PA, deg	a, arcsec	b, arcsec				
SPRC22	3.4	2.6	70	7.30	2	335	81	75	2.18
SPRC23	9.9	6.7	65	13.10	5.2	4	53	85	1.32
SPRC24	8.3	7.1	80	17.80	5.7	340	79	68	2.14
SPRC25	3.6	2	89	7.9	1.6	4	79	88	2.22
SPRC26	3.8	2.4	177	6.7	1.2	99	74	86	1.79
SPRC27	5.9	2.7	125	14.3	2.2	30	89	81	2.40
SPRC28	6	3.2	60	5.4	2	320	87	70	0.90
SPRC29	5.6	4	0	7.9	2	116	82	61	1.43
SPRC30	3.8	2.2	30	3.8	1.6	130	84	68	1.00
SPRC31	7.2	5.2	105	14	2.4	358	85	71	1.94
SPRC32	5.3	3	5	4.8	1.3	103	88	75	0.89
SPRC33	5.5	4.7	0	12.0	5.0	25	37	85	2.18
SPRC34	5.3	3	343	9.9	1.6	73	85	85	1.85
SPRC35	5.3	1.7	115	9.1	1.3	15	82	78	1.70
SPRC36	5.9	2.4	15	4.4	1.6	115	88	73	0.73
SPRC37	4.4	2.4	134	6.3	2	39	84	76	1.45
SPRC38	11.1	4.8	115	15.8	5.9	12	87	70	1.43
SPRC39	7.1	4	115	15.8	3.6	50	62	76	2.22
SPRC40	47.5	13.1	105	26.9	5.9	57	46	53	0.57
SPRC41	9.3	3.8	342	9.1	2.6	100	71	58	0.98
SPRC42	8.5	6.1	10	51.5	5.6	60	58	67	6.04

Таблица 3.1: Продолжение

Название галактики	Внутренняя структура		Полярное кольцо			z	δ_1 , deg	δ_2 , deg	$d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$
	a, arcsec	b, arcsec	PA, deg	a, arcsec	b, arcsec				
SPRC43	4.8	3.2	10	7.5	1.8	67	56	75	1.58
SPRC44	5.9	2.4	49	5.2	2.6	320	79	80	0.87
SPRC45	4.8	4	0	8.8	2.4	85	74	79	1.83
SPRC46	4.9	2	72	4.8	1.6	7	60	75	0.96
SPRC47	31.7	5.6	110	27.7	7.1	360	70	70	0.88
SPRC48	8.7	5.2	23	13.9	3.6	123	89	73	1.59
SPRC49	9.9	5.9	310	15.8	6.9	43	77	73	1.60
SPRC50	8.7	5.3	40	31.7	4	2	45	56	3.64
SPRC51	4.2	2	7	6.7	2.8	90	73	85	1.62
SPRC52	21.6	4.6	80	15.8	4	146	65	67	0.73
SPRC53	5.1	2.2	312	4	1.8	48	85	74	0.78
SPRC54	5.3	4.3	45	14.6	2.2	334	71	85	2.74
SPRC55	4.8	3.6	0	13.9	1.5	85	82	88	2.92
SPRC56	13.2	11.6	120	16	5.6	338	86	48	1.21
SPRC57	3.6	2.6	145	5.2	1.8	27	86	56	1.45
SPRC58	7.6	7.2	103	24	3.2	332	85	70	3.16
SPRC59	4.5	3.5	70	12.3	2.6	343	78	82	2.73
SPRC60	3.4	3.2	135	9.9	2.4	55	73	80	2.94
SPRC61	8.4	5.2	49	12	2.4	320	82	83	1.43
SPRC62	2.6	2.4	45	5.2	1.7	45	48	86	2.00
SPRC63	2.4	1.8	130	4.3	1.4	60	62	88	1.79

Таблица 3.1: Продолжение

Название галактики	Внутренняя структура		Полярное кольцо			z	δ_1 , deg	δ_2 , deg	$d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$
	a, arcsec	b, arcsec	PA, deg	a, arcsec	b, arcsec				
SPRC64	3.1	2.2	350	5.2	1.6	101	87	62	1.67
SPRC65	11.9	2.6	92	9.9	3.2	310	44	39	0.83
SPRC66	8.8	4.4	33	9.2	2.8	117	76	86	1.05
SPRC67	18.6	4.4	113	25.7	3.2	347	55	53	1.38
SPRC68	15.8	4.8	30	7.9	4.8	115	78	86	0.50
SPRC69	5.9	3.6	135	14.7	2.8	32	85	73	2.47
SPRC70	5.2	2.4	100	9.1	3	13	79	84	1.77
SPRC241	13.9	6.7	9	27.7	15.8	110	83	66	2.00
SPRC260	16.6	7.9	82	27.7	15.8	15	57	87	1.67
PRCA3	60	32	38	46	18	110	63	87	0.77
PRCA4	14.3	7.9	133	43.6	4.4	53	78	84	3.05
PRCA6	15.8	7.9	125	49.5	7.9	17	78	69	3.13
PRCB9	15.8	10.7	5	21.4	5.9	69	60	82	1.35
PRCB17	26	10	135	32	6	24	74	66	1.23
PRCC13	122.8	39.2	40	277.2	59.4	352	46	54	2.26

На рис. 3.2 показаны распределения угла между внешним кольцом и диском для нашей выборки. На верхнюю гистограмму нанесены значения всех возможных углов δ , посчитанных по формуле 3.2. Несмотря на неопределенность оценок δ , внешние кольцевые структуры в большинстве оказываются ориентированы близко к полярной плоскости: $\delta \geq 70^\circ$. То есть, несмотря на то, что мы при отборе галактик не требовали строгой ортогональности дисков, полярная конфигурация в ГПК встречается значительно чаще, чем наклонная. Это согласуется с теоретическими работами, показывающими, что в случае осесимметричного (но несферического) или трехосного распределения гравитационного потенциала именно орбиты в полярной плоскости являются стабильными. В то же время орбиты в плоскости, заметно отличающейся от полярной, оказываются неустойчивыми: звездное кольцо разрушается под действием дифференциальной прецессии [117], а газовое кольцо достаточно быстро (за несколько оборотов) оседает в одну из выделенных плоскостей центральной галактики (см., к примеру, [118]). Разумеется, время жизни и сам характер эволюции наклонного кольца зависит от формы распределения потенциала (см. [119], [120] и ссылки в этих работах). Если в согласии с указанными теоретическими расчетами принять, что из двух возможных значений δ_1 и δ_2 наиболее вероятным является угол, более близкий к 90° , то распределение углов наклона колец к диску примет вид, показанный на рис. 3.2 снизу. Пик распределения становится заметно более узким, так что для 95% всех объектов выборки $\delta > 70^\circ$. Необходимо отметить два важных момента:

- 1) Даже при «оптимистичном» допущении о реализации только больших углов, все равно 6% выборки (пять объектов) составляют галактики с умеренно наклоненными структурами: $\delta = 40 - 55^\circ$. Возможно, что они не являются стабильными, и мы просто застали их в процессе разрушения (оседания в плоскость диска). Ответ может дать подробное моделирование характеристик конкретно этих галактик.
- 2) Точно полярная ориентация (в пределах 5° от плоскости, ортогональной диску) наблюдается только в 50% случаев (39 галактиках).

Разумеется, следует помнить, что расчет углов наклона по формуле 3.1 подразумевает, что полярные структуры плоские и круглые. В то же время есть ряд указаний на то, что, во-первых, полярные кольца должны иметь слабую внутреннюю эллиптичность [121], а, во-вторых, структуры, уходящие от полярной

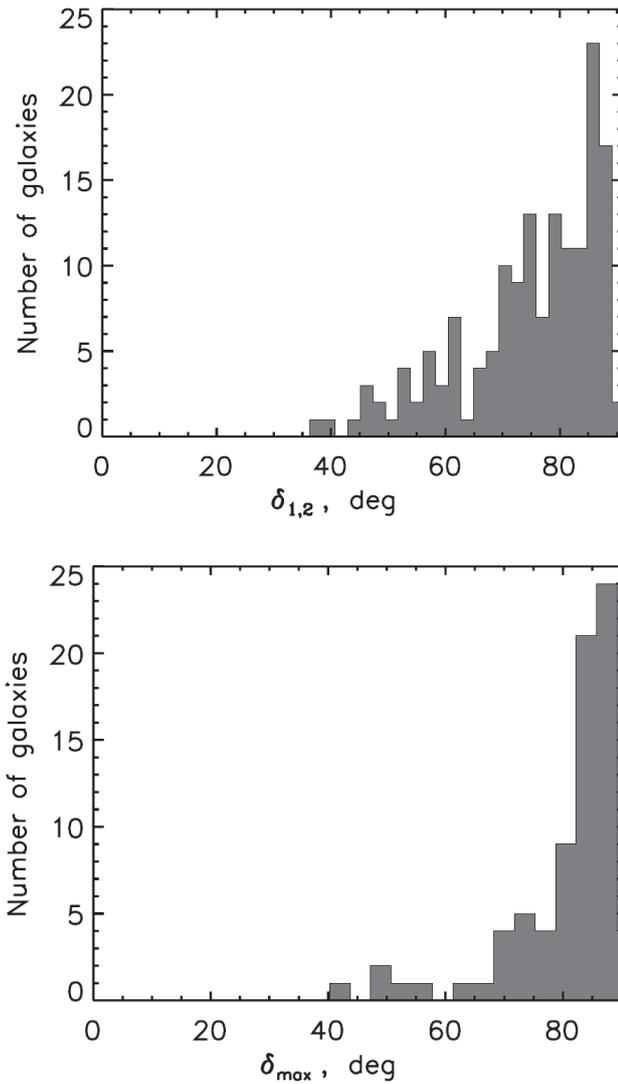


Рисунок 3.2: Распределение углов наклона полярной структуры к плоскости галактики. Сверху — все возможные решения по формуле 3.2. Снизу — взяты только максимальные величины углов $\delta_{1,2}$.

плоскости, должны изгибаться [117]. Так что приписывать им единый угол наклона не всегда корректно. Тем не менее, мы считаем, что отмеченные выше статистические закономерности должны объясняться в рамках теоретических расчетов.

В целом, приведенные распределения по углу δ похожи на рис. 3 из более ранней работы Вайтмо [122], где автор также делает вывод о том, что наблюдаемое распределение угла наклона кольца к диску объясняется предпочтительностью именно полярной пространственной ориентации. В то же время, анализируя в несколько раз большую выборку ГПК, мы не можем согласиться с выводом [122] о том, что отсутствие колец с умеренным наклоном (в наших терминах это $\delta < 55^\circ$) объясняется исключительно эффектом селекции. С одной стороны, действительно, при визуальном поиске кандидатов в ГПК больше внимания привлекают объекты, в которых оба компонента видны под большим углом к лучу зрения: среднее значение угла i_0 в нашей выборке составляет 56° . Полярные структуры видны под еще большим углом: среднее значение i_1 равно 70° , при том, что только для восьми колец $i_1 < 60^\circ$. Однако, даже если отбирать только объекты, видимые с ребра, то из 3.2 для $i_0 \approx i_1 \approx 90^\circ$ получаем $\cos \delta \approx \cos(PA_0 - PA_1)$. Так что умеренно наклоненные кольца выделялись бы соответствующей разницей позиционных углов. Поэтому эффект селекции не может сделать наблюдаемые распределения δ более плоскими, чем показано на рис. 3.2.

3.4.3 Линейные размеры

Расчет линейных диаметров проводился для $H_0 = 71$ км/с/Мпк по известным красным смещениям галактик, приведенным в табл. 3.1 (8 столбец). Рис. 3.3 показывает гистограмму распределения внешних диаметров колец. Хотя разброс их величин довольно велик, почти все кольца меньше 40 кпк при среднем диаметре около 20 кпк. Важно отметить, что поскольку измерения проводились по оптическим снимкам, то речь идет только о звездных полярных структурах. В нейтральном газе размер внешних структур может оказаться заметно больше, при этом наклон к плоскости диска может меняться. Так, в галактике PRC A3 (NGC 2685) распределение HI согласуется со звездным полярным кольцом во внутренних областях, но на больших радиусах изгибается так, что вновь укладывается в плоскость основной галактики [123].

Из общего распределения заметно выделяется объект SPRC 50, изображение которого приведено на рис. 3.1. Здесь центральная галактика окружена гигантским диском низкой поверхностной яркости. Спектр ядра этой галактики в SDSS DR7 показывает абсорбционные особенности, характерные для галактики раннего типа с красным смещением $z = 0.078$, что соответствует масштабу 1.5 кпк/arcsec. Если полярный диск не является результатом случайной проекции, то его диаметр достигает 90 кпк. Это сравнимо с размерами наиболее протяженных галактических дисков, известных на данный момент, таких как прототип галактик низкой поверхностной яркости Malin 1 (диаметр 90 кпк, согласно [124]) или кольцевая галактика UGC 7069 (115 кпк, согласно [125]). Само существование таких гигантских полярных структур является серьезным вызовом теориям формирования галактик, если, конечно, спектральные наблюдения подтвердят, что SPRC 50 — не случайная проекция, а реальная ГПК.

На рис. 3.3 справа показано распределение внешних диаметров колец, нормированных на оптический диаметр галактики: $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}$. Отметим, что внешние границы областей низкой яркости измеряемые по методике, описанной в этой главе примерно соответствуют традиционному критерию размера диска по уровню 25 звездной величины с квадратной секунды дуги (D_{25}). Для большинства галактик диаметр кольца не превышает трех-четырех диаметров диска при средней величине $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \approx 1.7$. В этом распределении есть галактика с необычно большим относительным размером кольца — SPRC 42. Ее изображение приведено на рис. 3.1 справа. Здесь диаметр видимого с ребра полярного компонента со слегка изогнутыми внешними частями составляет около 47 кпк. Столь протяженную структуру, окружающую относительно небольшую линзовидную галактику, правильнее именовать «полярным диском».

В 22% выборки (17 галактик) $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \leq 1$. Здесь вся яркая часть полярного кольца вращается, пересекая диск центральной галактики. Понятно, что пространственная плотность звезд мала и прямые столкновения звездных компонентов не происходят. Но если в полярном кольце присутствует газ, то в нем при прохождении через гравитационную яму звездного диска могут формироваться ударные волны. Если в диске есть собственный газ, то возможно и прямое столкновение газовых потоков. К сожалению, в литературе практически отсутствуют теоретические рассуждения этого процесса, за исключением статьи [126]. Возможно, что именно такая картина — ударная ионизация газа на наклонных орбитах — наблюдается в NGC 7743. Это линзовидная галактика,

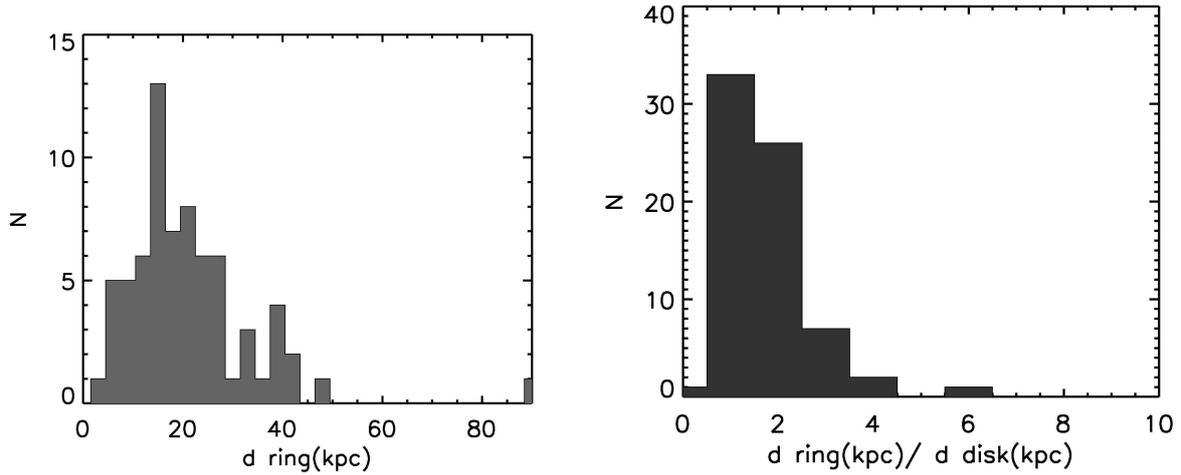


Рисунок 3.3: Распределения внешних диаметров полярных структур. Слева — линейный размер в кпк. Из общего распределения выделяется гигантское кольцо SPRC 50 диаметром около 90 кпк. Справа — диаметр колец нормирован на размер диска центральной галактики.

в которой весь ионизованный газ на $r = 1.5 - 5.4$ кпк находится в плоскости, наклоненной на 34° или 77° относительно звездного диска [127].

Интересно сравнить эти распределения с аналогичными для внутренних полярных колец и дисков, наблюдаемых в околядерных областях ряда близких галактик. Внутренние полярные диски/кольца (ВПД) представляют собой звездно-газовые диски, погруженные в балдж и почти ортогональные к плоскости основной галактики. Формирование таких структур связано с внешней аккрецией вещества. Частота встречаемости ВПД выше, чем у внешних полярных колец. Например, в близких галактиках S0 частота достигает 10% [128], что намного превышает частоту крупномасштабных полярных колец. На рис. 3.4 к уже рассмотренным распределениям диаметров и относительных диаметров внешних полярных структур добавлены данные о 47 галактиках с подтвержденными внутренними полярными структурами из статьи [129]. Для внутренних полярных структур диаметр диска галактики принимался равным диаметру (D_{25}), взятому из базы данных NED. Видно, что диаметры внутренних и внешних полярных структур образуют непрерывную последовательность — от сотни парсек до десятков килопарсек. По величине нормированного диаметра обе выборки соприкасаются на $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \approx 0.5$, так что галактика NGC 5014 (SPRC 40) входит в оба списка — внутренних структур и в каталог SPRC. В то же время обращает на себя внимание относительный дефицит полярных струк-

тур «промежуточного размера» ($d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} \approx 0.4 - 0.7$). Из выборки SDSS сюда попадает всего две галактики: SPRC 40 и SPRC 68.

Скорее всего, такое бимодальное распределение относительных размеров полярных структур связано с тем, что во всех рассматриваемых случаях стабильность полярных орбит обеспечивается сфероидальным или трехосным гравитационным потенциалом. Но если для устойчивости крупномасштабных структур важен гравитационный потенциал темного гало, то для внутренних колец и дисков доминирующую роль играет балдж (в том числе — трехосный) или центральная перемычка — бар. В промежуточной зоне радиальных масштабов форма потенциала заметно отличается от сфероидальной/трехосной, так как здесь заметную роль играет плоский звездный диск. Поэтому полярные/наклонные орбиты перестают быть стабильными. Упомянутые в предыдущем разделе удары при пересечении диска веществом на полярных орбитах — проявление этого же эффекта. Видимо не случайно, что в SPRC 40 «полярная» структура промежуточного размера сильно наклонена к галактическому диску и, возможно, нестационарна.

На рис. 3.5 показано распределение точек в плоскости ($d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}}, \delta$). Действительно, хотя разброс наблюдаемых величин довольно велик, видно, что отклонение от полярной плоскости $\delta = 90^\circ$ чаще наблюдается для колец, пересекающих центральный диск: $d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} < 1$. Наблюдается также уход от полярной плоскости ($\delta < 75^\circ$) для наиболее крупных колец ($d_{\text{ring}}/d_{\text{disk}} > 4$), что, видимо, связано с развитием изгибной неустойчивости при уменьшении плотности гало.

3.5 Выводы

В этой главе рассмотрена выборка из 78 наиболее надежных кандидатов в ГПК, представленных в обзоре SDSS, часть из которых уже имеют кинематические подтверждения.

3.6 Положения, выносимые на защиту

Из каталогов SPRC и PRC отобрано 78 наиболее достоверно идентифицированных объектов. Для них определены структурные параметры: угол наклона структур кольца и диска галактики друг к другу, диаметр кольцевой структуры, отношение диаметров кольца и основной галактики. Показано, что большая

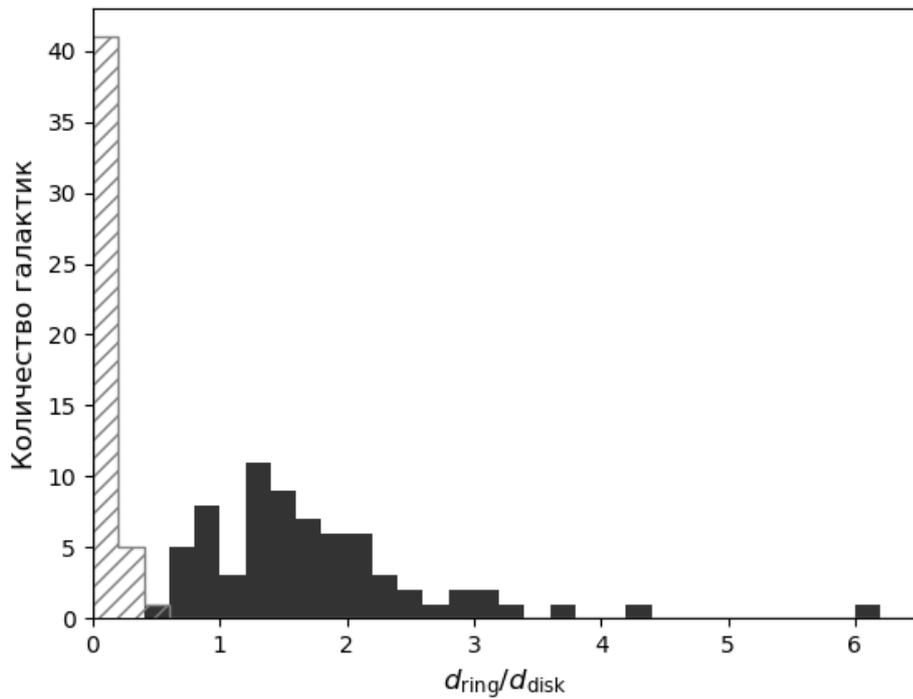
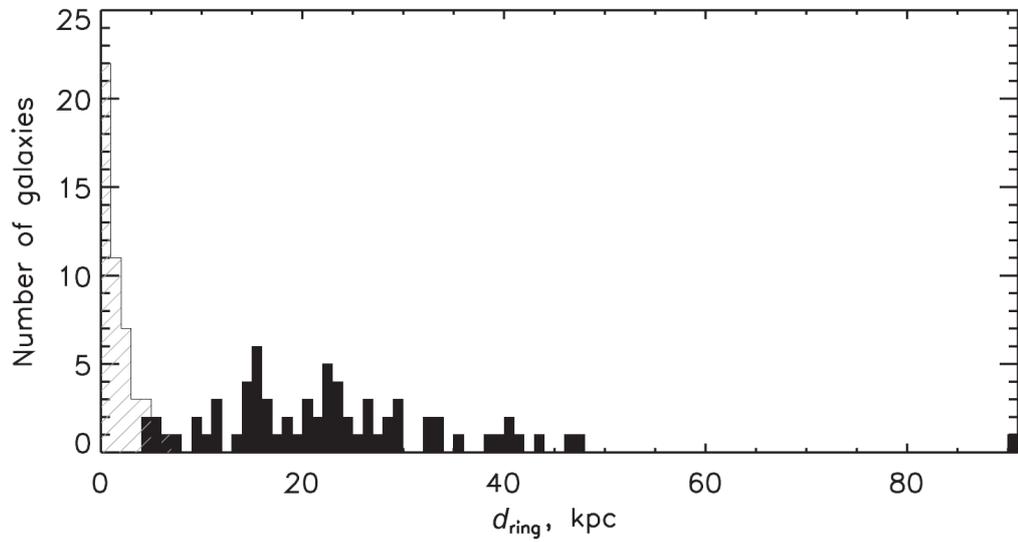


Рисунок 3.4: Распределения полярных структур по диаметрам. Вверху — линейные размеры, внизу — нормировка на диаметр центрального диска. Черным на рисунке обозначены внешние структуры, штриховкой — ВПД из статьи [129]

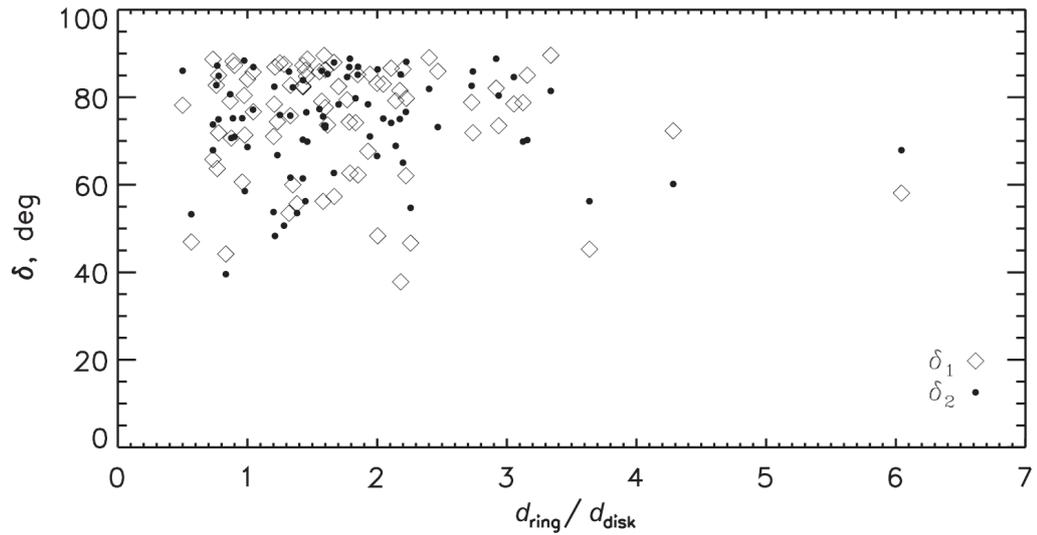


Рисунок 3.5: Зависимость углов наклона от диаметра внешних полярных структур, нормированного на размер галактики. Разными символами обозначены углы δ_1 и δ_2 .

часть внешних кольцевых структур в составленной выборке имеет угол наклона к диску, превышающий 70° , то есть они действительно являются полярными. Только у двух из 78 объектов отношения размеров внешнего полярного кольца и околоядерного (внутреннего) полярного диска лежат в диапазоне от 0.4 до 0.7. Дефицит полярных структур такого размера вызван тем, что полярные/наклонные орбиты при таких размерах перестают быть стабильными. У крупных колец, диаметр которых в четыре и более раза превышает диаметр диска, наблюдается отклонение от полярной плоскости более чем на 15° , что связано с развитием изгибной неустойчивости при уменьшении плотности темного гало.

Заключение

Основные результаты проведенных исследований таковы:

- 1) Потоки излучения в ближнем (8 мкм), среднем (24 мкм) и дальнем (70, 100 и 160 мкм) инфракрасных диапазонах хорошо коррелируют между собой, что указывает на общую природу излучения в этих диапазонах: вероятно, все это излучение порождается, главным образом, горячей пылью в окрестностях молодых звезд. При одном и том же потоке в дальнем ИК-диапазоне эмиссия на 8 мкм оказывается слабее в ОЗО малой металличности, подтверждая известную корреляцию металличности и содержания ПАУ (которые считаются основным источником излучения на 8 мкм). Параметры излучения на 24 мкм от металличности не зависят.
- 2) Поток излучения в линии СО практически не коррелирует с параметрами поля излучения в ОЗО. Потоки в ИК-полосах на 8 и 24 мкм растут как при повышении минимального уровня интенсивности УФ-излучения в ОЗО, так и при повышении доли пыли, освещенной полем с интенсивностью выше этого уровня. Эта корреляция может отражать как более интенсивное излучение горячих пылинок в среде с большим количеством возбуждающих квантов, так и эволюционное уменьшение потока, происходящее одновременно с понижением интенсивности излучения. Отношение потоков F_8/F_{24} демонстрирует антикорреляцию с параметрами, характеризующими интенсивность поля излучения в ОЗО. Если считать, что это отношение характеризует содержание в ОЗО ароматических пылинок, обнаруженная нами антикорреляция может свидетельствовать об их разрушении в интенсивном поле излучения.
- 3) Из каталогов PRC и SPRC отобраны 78 наиболее надежных кандидатов (часть из которых уже имеют кинематические подтверждения), и для них были посчитаны основные структурные параметры. Показано, что боль-

шинство внешних структур действительно полярные, т.е. наклонены на угол более 70° к плоскости центральной галактики.

- 4) ОЗО в диске и в кольце NGC 660, по-видимому, имеют совершенно разные свойства. ОЗО диска по своим эмиссионным характеристикам аналогичны ОЗО в изолированных спиральных и иррегулярных галактиках. В то же время ОЗО кольца более компактны и имеют существенно более слабое излучение в инфракрасном диапазоне. Можно предположить, что это эффект отбора, поскольку в кольце (которое является менее густонаселенной средой) мы можем видеть меньшие и более тусклые области, чем в типичном галактическом диске.
- 5) В галактиках с признаками недавнего взаимодействия NGC 660 и NGC 1512 поверхностная яркость комплексов звездообразования в УФ и ИК диапазонах оказывается существенно ниже, чем в галактике сравнения. При этом в периферийной области NGC 1512 ОЗО, излучающие в ближнем ИК диапазоне, вовсе отсутствуют.

Результаты диссертационной работы могут быть применены для дальнейшего исследования процессов ЗО, в частности, они расширят базу для сопоставления результатов моделирования с данными наблюдений в ИК-диапазоне. Перспективы дальнейшего развития темы диссертационного исследования связаны с продолжающимся улучшением наблюдательной техники, ростом числа наблюдательных данных и их все более детальное разрешение. Что может помочь с исследованием ОЗО в более далеких галактиках. Развитие темы может быть продолжено по ряду направлений: исследование ОЗО в галактиках с полярными кольцами, расширение выборки галактик с особенностями морфологии, оценка возраста в рассматриваемых ОЗО.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность:

- Научному руководителю за поддержку.
- Вибе Д.З. за неоценимую помощь в научной деятельности, подготовке к диссертации и докладам на научных конференциях. А также написании статей [A2], [A3] и [A4].
- Сотрудникам Коуровской астрономической обсерватории и преподавателям Кафедры астрономии, геодезии, экологии и МОК за поддержку, обучение и ценные научные дискуссии.
- Мурге М.С. за помощь в написании статьи [A2].
- Моисееву А.В. за помощь в написании статей [A1], [A3] и [A4].
- Моисееву А.В., Jozsa G.I.G. за предоставление данных наблюдений галактики NGC 660.

Список библиографических ССЫЛОК

1. *Bolatto A. D., Wolfire M., Leroy A. K.* The CO-to-H₂ Conversion Factor // ARA&A. — 2013. — Vol. 51, № 1. — P. 207–268. 1301.3498.
2. *Madden S. C., Poglitsch A., Geis N. et al.* [C II] 158 Micron Observations of IC 10: Evidence for Hidden Molecular Hydrogen in Irregular Galaxies // ApJ. — 1997. — Vol. 483, № 1. — P. 200–209.
3. *Bernard J.-P., Reach W. T., Paradis D. et al.* Spitzer Survey of the Large Magellanic Cloud, Surveying the Agents of a Galaxy's Evolution (sage). IV. Dust Properties in the Interstellar Medium // AJ. — 2008. — Vol. 136. — P. 919–945.
4. *Roman-Duval J., Israel F. P., Bolatto A. et al.* Dust/gas correlations from Herschel observations // A&A. — 2010. — Vol. 518. — P. L74. 1005.2537.
5. *Roman-Duval J., Gordon K. D., Meixner M. et al.* Dust and Gas in the Magellanic Clouds from the HERITAGE Herschel Key Project. II. Gas-to-dust Ratio Variations across Interstellar Medium Phases // ApJ. — 2014. — Vol. 797. — P. 86. 1411.4552.
6. *Tan B.-K., Leech J., Rigopoulou D. et al.* The James Clerk Maxwell Telescope Nearby Galaxies Legacy Survey - IX. ¹²CO J = 32 observations of NGC 2976 and NGC 3351 // MNRAS. — 2013. — Vol. 436. — P. 921–933. 1308.6209.
7. *Calzetti D., Kennicutt R. C., Engelbracht C. W. et al.* The Calibration of Mid-Infrared Star Formation Rate Indicators // ApJ. — 2007. — Vol. 666. — P. 870–895. 0705.3377.

8. *Leroy A. K., Walter F., Brinks E. et al.* The Star Formation Efficiency in Nearby Galaxies: Measuring Where Gas Forms Stars Effectively // *Astron. J.* — 2008. — Vol. 136. — P. 2782–2845. 0810.2556.
9. *Rémy-Ruyer A., Madden S. C., Galliano F. et al.* Gas-to-dust mass ratios in local galaxies over a 2 dex metallicity range // *A&A.* — 2014. — Vol. 563. — P. A31. 1312.3442.
10. *Zhukovska S.* Dust origin in late-type dwarf galaxies: ISM growth vs. type II supernovae // *A&A.* — 2014. — Vol. 562. — P. A76. 1401.1675.
11. *Sandstrom K. M., Leroy A. K., Walter F. et al.* The CO-to-H₂ Conversion Factor and Dust-to-gas Ratio on Kiloparsec Scales in Nearby Galaxies // *ApJ.* — 2013. — Vol. 777. — P. 5. 1212.1208.
12. *Kirk J. M., Gear W. K., Fritz J. et al.* The Herschel Exploitation of Local Galaxy Andromeda (HELGA). VI. The Distribution and Properties of Molecular Cloud Associations in M31 // *ApJ.* — 2015. — Vol. 798, № 1. — P. 58. 1306.2913.
13. *Tosaki T., Kuno N., Onodera R., Sachiko Miura et al.* NRO M33 All-Disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC). I. H I to H₂ Transition // *PASJ.* — 2011. — Vol. 63. — P. 1171–1179. 1106.4115.
14. *Khramtsova M. S., Wiebe D. S., Boley P. A., Pavlyuchenkov Y. N.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes // *MNRAS.* — 2013. — Vol. 431. — P. 2006–2016. 1302.4837.
15. *Bocchio M., Jones A. P., Slavin J. D.* A re-evaluation of dust processing in supernova shock waves // *A&A.* — 2014. — Vol. 570. — P. A32.
16. *Slavin J. D., Dwek E., Jones A. P.* Destruction of Interstellar Dust in Evolving Supernova Remnant Shock Waves // *ApJ.* — 2015. — Vol. 803. — P. 7. 1502.00929.
17. *Gusev A. S., Efremov Y. N.* Regular chains of star formation complexes in spiral arms of NGC 628 // *MNRAS.* — 2013. — Vol. 434, № 1. — P. 313–324. 1306.1731.

18. *Gusev A. S., Egorov O. V., Sakhibov F.* Parameters of the brightest star formation regions in the two principal spiral arms of NGC 628 // MNRAS. — 2014. — Vol. 437, № 2. — P. 1337–1351. 1310.3690.
19. *Gusev A. S.* Hierarchy and size distribution function of star formation regions in the spiral galaxy NGC 628 // MNRAS. — 2014. — Vol. 442, № 4. — P. 3711–3721. 1406.0661.
20. *Gusev A. S., Sakhibov F., Piskunov A. E. et al.* A spectral and photometric study of 102 star-forming regions in seven spiral galaxies // MNRAS. — 2016. — Vol. 457, № 3. — P. 3334–3355. 1601.07470.
21. *Kennicutt R. C., Jr., Armus L., Bendo G. et al.* SINGS: The SIRTf Nearby Galaxies Survey // PASP. — 2003. — Vol. 115. — P. 928–952. astro-ph/0305437.
22. *Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K. et al.* The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // Astron. J. — 2010. — Vol. 140. — P. 1868–1881. 1008.0031.
23. *Kennicutt R. C., Calzetti D., Aniano G. et al.* KINGFISH – Key Insights on Nearby Galaxies: A Far-Infrared Survey with Herschel: Survey Description and Image Atlas // PASP. — 2011. — Vol. 123. — P. 1347–1369. 1111.4438.
24. *Leroy A. K., Walter F., Bigiel F. et al.* Heracles: The HERA CO Line Extragalactic Survey // Astron. J. — 2009. — Vol. 137. — P. 4670–4696. 0905.4742.
25. *Walter F., Brinks E., de Blok W. J. G. et al.* THINGS: The H I Nearby Galaxy Survey // Astron. J. — 2008. — Vol. 136. — P. 2563–2647. 0810.2125.
26. *Draine B. T., Li A.* Infrared Emission from Interstellar Dust. IV. The Silicate-Graphite-PAH Model in the Post-Spitzer Era // ApJ. — 2007. — Vol. 657. — P. 810–837. astro-ph/0608003.
27. *Iodice E., De Lucia G., Arnaboldi M. et al.* The Puzzle of the Polar Structure in NGC 4650A // Galaxy Disks and Disk Galaxies / Ed. by J. G. Funes, E. M. Corsini: Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — Vol. 230. — 2001. — P. 445–446.

28. *Whitmore B. C., Lucas R. A., McElroy D. B. et al.* New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies // *AJ*. — 1990. — Vol. 100. — P. 1489–1522.
29. *Leroy A. K., Schinnerer E., Hughes A. et al.* PHANGS-ALMA: Arcsecond CO(2-1) Imaging of Nearby Star-forming Galaxies // *ApJS*. — 2021. — Vol. 257, № 2. — P. 43. 2104.07739.
30. *Efremov Y. N.* Star complexes // *Soviet Astronomy Letters*. — 1978. — Vol. 4. — P. 66–69.
31. *Efremov Y. N.* Star Complexes and Associations: Fundamental and Elementary Cells of Star Formation // *AJ*. — 1995. — Vol. 110. — P. 2757.
32. *Elmegreen D. M., Salzer J. J.* Star-forming Complexes in a Sample of Spiral and Irregular Galaxies // *AJ*. — 1999. — Vol. 117, № 2. — P. 764–777.
33. *Wright N. J.* OB Associations and their origins // *New Astronomy Reviews*. — 2020. — Vol. 90. — P. 101549. 2011.09483.
34. *Schinnerer E., Meidt S. E., Pety J. et al.* The PdBI Arcsecond Whirlpool Survey (PAWS). I. A Cloud-scale/Multi-wavelength View of the Interstellar Medium in a Grand-design Spiral Galaxy // *ApJ*. — 2013. — Vol. 779, № 1. — P. 42. 1304.1801.
35. *Kruijssen J. M. D., Schrubba A., Chevance M. et al.* Fast and inefficient star formation due to short-lived molecular clouds and rapid feedback // *Nature*. — 2019. — Vol. 569, № 7757. — P. 519–522. 1905.08801.
36. *Wu R., Madden S. C., Galliano F. et al.* Spatially resolved physical conditions of molecular gas and potential star formation tracers in M 83, revealed by the Herschel SPIRE FTS // *A&A*. — 2015. — Vol. 575. — P. A88. 1412.1880.
37. *Bendo G. J., Wilson C. D., Warren B. E. et al.* The JCMT Nearby Galaxies Legacy Survey - III. Comparisons of cold dust, polycyclic aromatic hydrocarbons, molecular gas and atomic gas in NGC 2403 // *MNRAS*. — 2010. — Vol. 402. — P. 1409–1425. 0911.3369.
38. *Eales S., Smith M. W. L., Auld R. et al.* Can Dust Emission be Used to Estimate the Mass of the Interstellar Medium in Galaxies. A Pilot Project

- with the Herschel Reference Survey // ApJ. — 2012. — Vol. 761. — P. 168. 1202.0547.
39. *Groves B. A., Schinnerer E., Leroy A. et al.* Dust Continuum Emission as a Tracer of Gas Mass in Galaxies // ApJ. — 2015. — Vol. 799. — P. 96. 1411.2975.
 40. *Compiègne M., Verstraete L., Jones A. et al.* The global dust SED: tracing the nature and evolution of dust with DustEM // A&A. — 2011. — Vol. 525. — P. A103. 1010.2769.
 41. *Jones A. P.* Variations on a theme - the evolution of hydrocarbon solids. I. Compositional and spectral modelling - the eRCN and DG models // A&A. — 2012. — Vol. 540. — P. A1. 1511.01673.
 42. *Fazio G. G., Hora J. L., Allen L. E. et al.* The Infrared Array Camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope // ApJS. — 2004. — Vol. 154, № 1. — P. 10–17. astro-ph/0405616.
 43. *Rieke G. H., Young E. T., Engelbracht C. W. et al.* The Multiband Imaging Photometer for Spitzer (MIPS) // ApJS. — 2004. — Vol. 154, № 1. — P. 25–29.
 44. *Poglitsch A., Waelkens C., Geis N. et al.* The Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) on the Herschel Space Observatory // A&A. — 2010. — Vol. 518. — P. L2. 1005.1487.
 45. *Griffin M. J., Abergel A., Abreu A. et al.* The Herschel-SPIRE instrument and its in-flight performance // A&A. — 2010. — Vol. 518. — P. L3. 1005.5123.
 46. *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // A&A. — 2010. — Vol. 518. — P. L1. 1005.5331.
 47. *Bendo G. J., Draine B. T., Engelbracht C. W. et al.* The relations among 8, 24 and 160 μm dust emission within nearby spiral galaxies // MNRAS. — 2008. — Vol. 389. — P. 629–650. 0806.2758.
 48. *Khramtsova M. S., Wiebe D. S., Lozinskaya T. A., Egorov O. V.* Optical and infrared emission of H II complexes as a clue to the PAH life cycle // MNRAS. — 2014. — Vol. 444. — P. 757–775. 1407.8307.

49. *Wiebe D. S., Khramtsova M. S., Egorov O. V., Lozinskaya T. A.* Dust evolution in the dwarf galaxy Holmberg II // *Astronomy Letters*. — 2014. — Vol. 40. — P. 278–290. 1407.3065.
50. *de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H. G., Jr. et al.* Book-Review - Third Reference Catalogue of Bright Galaxies // *Sky & Telescope*. — 1991. — Vol. 82. — P. 621.
51. *Moustakas J., Kennicutt R. C., Jr., Tremonti C. A. et al.* Optical Spectroscopy and Nebular Oxygen Abundances of the Spitzer/SINGS Galaxies // *ApJS*. — 2010. — Vol. 190. — P. 233–266. 1007.4547.
52. *Aniano G., Draine B. T., Gordon K. D., Sandstrom K.* Common-Resolution Convolution Kernels for Space- and Ground-Based Telescopes // *PASP*. — 2011. — Vol. 123. — P. 1218–1236. 1106.5065.
53. *Marble A. R., Engelbracht C. W., van Zee L. et al.* An Aromatic Inventory of the Local Volume // *ApJ*. — 2010. — Vol. 715. — P. 506–540. 1004.1441.
54. *Draine B. T., Dale D. A., Bendo G. et al.* Dust Masses, PAH Abundances, and Starlight Intensities in the SINGS Galaxy Sample // *ApJ*. — 2007. — Vol. 663. — P. 866–894. astro-ph/0703213.
55. *Mathis J. S., Mezger P. G., Panagia N.* Interstellar radiation field and dust temperatures in the diffuse interstellar matter and in giant molecular clouds // *A&A*. — 1983. — Vol. 128. — P. 212–229.
56. *Kobulnicky H. A., Kewley L. J.* Metallicities of $0.3 < z < 1.0$ Galaxies in the GOODS-North Field // *ApJ*. — 2004. — Vol. 617, № 1. — P. 240–261. astro-ph/0408128.
57. *Pilyugin L. S., Thuan T. X.* Oxygen Abundance Determination in H II Regions: The Strong Line Intensities-Abundance Calibration Revisited // *ApJ*. — 2005. — Vol. 631. — P. 231–243.
58. *Wolfire M. G., McKee C. F., Hollenbach D., Tielens A. G. G. M.* Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium in the Galaxy // *ApJ*. — 2003. — Vol. 587. — P. 278–311. astro-ph/0207098.

59. *Amorín R., Muñoz-Tuñón C., Aguerri J. A. L., Planesas P.* Molecular gas in low-metallicity starburst galaxies: Scaling relations and the CO-to-H₂ conversion factor // *A&A.* — 2016. — Vol. 588. — P. A23. 1512.06153.
60. *Feldmann R., Gnedin N. Y., Kravtsov A. V.* The X-factor in Galaxies. I. Dependence on Environment and Scale // *ApJ.* — 2012. — Vol. 747. — P. 124. 1112.1732.
61. *Weingartner J. C., Draine B. T.* Dust Grain-Size Distributions and Extinction in the Milky Way, Large Magellanic Cloud, and Small Magellanic Cloud // *ApJ.* — 2001. — Vol. 548. — P. 296–309. astro-ph/0008146.
62. *Feldmann R.* The equilibrium view on dust and metals in galaxies: Galactic outflows drive low dust-to-metal ratios in dwarf galaxies // *MNRAS.* — 2015. — Vol. 449. — P. 3274–3292. 1412.2755.
63. *Rémy-Ruyer A., Madden S. C., Galliano F. et al.* Linking dust emission to fundamental properties in galaxies: the low-metallicity picture // *A&A.* — 2015. — Vol. 582. — P. A121. 1507.05432.
64. *Sandstrom K. M., Bolatto A. D., Draine B. T. et al.* The Spitzer Survey of the Small Magellanic Cloud (S³MC): Insights into the Life Cycle of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons // *ApJ.* — 2010. — Vol. 715. — P. 701–723. 1003.4516.
65. *Greenberg J. M., Gillette J. S., Muñoz Caro G. M. et al.* Ultraviolet Photoprocessing of Interstellar Dust Mantles as a Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Other Conjugated Molecules // *ApJ.* — 2000. — Vol. 531. — P. L71–L73.
66. *Bourne N., Dunne L., Bendo G. J. et al.* Herschel-ATLAS: correlations between dust and gas in local submm-selected galaxies // *MNRAS.* — 2013. — Vol. 436. — P. 479–502. 1308.4406.
67. *Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., Reshetnikov V. P.* A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey // *MNRAS.* — 2011. — Vol. 418, № 1. — P. 244–257. 1107.1966.
68. *Tully R. B.* Nearby galaxies catalog. — 1988.
69. *Tully R. B., Courtois H. M., Dolphin A. E. et al.* Cosmicflows-2: The Data // *Astron. J.* — 2013. — Vol. 146. — P. 86. 1307.7213.

70. *Benvenuti P., Capaccioli M., Dodorico S.* Optical investigation of the spiral galaxy NGC 660 // *A&A.* — 1976. — Vol. 53. — P. 141–148.
71. *Gottesman S. T., Mahon M. E.* H I observations of the peculiar galaxy NGC 660 // *NASA Conference Publication* / Ed. by J. W. Sulentic, W. C. Keel, C. M. Telesco: *NASA Conference Publication.* — Vol. 3098. — 1990.
72. *Combes F., Braine J., Casoli F. et al.* Molecular clouds in a polar ring // *Astron. and Astrophys.* — 1992. — Vol. 259. — P. L65–L68.
73. *Jog C. J., Combes F.* Lopsided spiral galaxies // *Physics Reports.* — 2009. — Vol. 471, № 2. — P. 75–111. 0811.1101.
74. *Yozin C., Bekki K.* Tidal-induced lopsidedness in Magellanic-type galaxies // *MNRAS.* — 2014. — Vol. 439, № 2. — P. 1948–1958. 1401.3055.
75. *Pardy S. A., D’Onghia E., Athanassoula E. et al.* Tidally Induced Offset Disks in Magellanic Spiral Galaxies // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 827, № 2. — P. 149. 1602.07689.
76. *Kruk S. J., Lintott C. J., Simmons B. D. et al.* Galaxy Zoo: finding offset discs and bars in SDSS galaxies // *MNRAS.* — 2017. — Vol. 469. — P. 3363–3373. 1705.00007.
77. *Odewahn S. C.* Properties of the Magellanic-Type Spirals. I. Surface Photometry of NGC 4618 and NGC 4625 // *AJ.* — 1991. — Vol. 101. — P. 829.
78. *Ho L. C., Filippenko A. V., Sargent W. L.* A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. II. an Optical Spectral Atlas of the Nuclei of Nearby Galaxies // *ApJS.* — 1995. — Vol. 98. — P. 477.
79. *Tully R. B., Courtois H. M., Sorce J. G.* Cosmicflows-3 // *Astron. J.* — 2016. — Vol. 152, № 2. — P. 50. 1605.01765.
80. *Eskew M., Zaritsky D., Meidt S.* Converting from 3.6 and 4.5 μm Fluxes to Stellar Mass // *AJ.* — 2012. — Vol. 143, № 6. — P. 139. 1204.0524.
81. *Sorai K., Kuno N., Muraoka K. et al.* CO multi-line imaging of nearby galaxies (COMING). IV. Overview of the project // *PASJ.* — 2019. — Vol. 71. — P. S14. 1910.03863.

82. *Yim K., van der Hulst J. M.* Star formation and gas accretion in nearby galaxies // MNRAS. — 2016. — Vol. 463, № 2. — P. 2092–2108. 1608.06735.
83. *Calzetti D.* Star Formation Rate Indicators // Secular Evolution of Galaxies / Ed. by J. Falcón-Barroso, J. H. Knapen. — 2013. — P. 419.
84. *Pilyugin L. S., Grebel E. K.* New calibrations for abundance determinations in H II regions // MNRAS. — 2016. — Vol. 457, № 4. — P. 3678–3692. 1601.08217.
85. *Moustakas J., Kennicutt J., Robert C.* An Integrated Spectrophotometric Survey of Nearby Star-forming Galaxies // ApJS. — 2006. — Vol. 164, № 1. — P. 81–98. astro-ph/0511729.
86. *Afanasiev V. L., Moiseev A. V.* The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // Astronomy Letters. — 2005. — Vol. 31. — P. 194–204. arXiv:astro-ph/0502095.
87. *Smirnova K. I., Wiebe D. S.* Studies of Star-forming Complexes in the Galaxies NGC 628, NGC 2976, and NGC 3351 // Astronomy Reports. — 2019. — Vol. 63, № 6. — P. 445–459. 1908.03756.
88. *Garcia A. M.* VizieR Online Data Catalog: Lyon Groups of Galaxies (Garcia 1993) // VizieR Online Data Catalog. — 1993. — P. J/A+AS/100/47.
89. *Makarov D., Karachentsev I.* Galaxy groups and clouds in the local ($z \sim 0.01$) Universe // MNRAS. — 2011. — Vol. 412, № 4. — P. 2498–2520. 1011.6277.
90. *Roy J.-R., Belley J., Dutil Y., Martin P.* The O/H Distribution in the Low-Mass Galaxies NGC 2366 and NGC 4395 // ApJ. — 1996. — Vol. 460. — P. 284.
91. *Ramella M., Geller M. J., Pisani A., da Costa L. N.* The UZC-SSRS2 Group Catalog // AJ. — 2002. — Vol. 123, № 6. — P. 2976–2984. astro-ph/0202326.
92. *Martin D. C., Fanson J., Schiminovich D. et al.* The Galaxy Evolution Explorer: A Space Ultraviolet Survey Mission // ApJ. — 2005. — Vol. 619. — P. L1–L6. astro-ph/0411302.
93. *van Driel W., Combes F., Casoli F. et al.* Polar Ring Spiral Galaxy NGC 660 // aj. — 1995. — Vol. 109. — P. 942.

94. *van Driel W., Combes F.* Dark matter in the polar ring spiral galaxy NGC 660 // Dark and Visible Matter in Galaxies and Cosmological Implications / Ed. by M. Persic, P. Salucci: Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — Vol. 117. — 1997. — P. 133.
95. *Smirnova K. I., Parfenov S. Y., Wiebe D. S.* On Automatic Identification of Star Forming Regions in Infrared and Radio Images of Dwarf Galaxies // Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2017, p.102 / Ed. by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin. — 2017. — Vol. 510. — P. 102.
96. *Moiseev A. V., Tikhonov A. V., Klypin A.* What controls the ionized gas turbulent motions in dwarf galaxies? // MNRAS. — 2015. — Vol. 449, № 4. — P. 3568–3580. 1405.5731.
97. *Koribalski B. S., López-Sánchez Á. R.* Gas dynamics and star formation in the galaxy pair NGC1512/1510 // MNRAS. — 2009. — Vol. 400, № 4. — P. 1749–1767. 0908.4128.
98. *Liu G., Calzetti D., Yun M. S. et al.* An Investigation of the Dust Content in the Galaxy Pair NGC 1512/1510 from Near-Infrared to Millimeter Wavelengths // AJ. — 2010. — Vol. 139, № 3. — P. 1190–1198. 1001.1764.
99. *López-Sánchez Á. R., Westmeier T., Esteban C., Koribalski B. S.* Ionized gas in the XUV disc of the NGC 1512/1510 system // MNRAS. — 2015. — Vol. 450, № 4. — P. 3381–3409.
100. *Zasov A. V., Khoperskov A. V.* Does the LMC Possess a Dark Bulge? // Astronomy Reports. — 2002. — Vol. 46, № 3. — P. 173–181.
101. *Kaczmarek J. F., Wilcots E. M.* High-resolution H I Distributions and Multi-wavelength Analyses of Magellanic Spirals NGC 4618 and NGC 4625 // AJ. — 2012. — Vol. 144, № 2. — P. 67. 1206.4104.
102. *Karataeva G. M., Tikhonov N. A., Galazutdinova O. A. et al.* The stellar content of the ring in NGC 660 // A&A. — 2004. — Vol. 421. — P. 833–837. astro-ph/0404286.

103. *Alton P. B., Stockdale D. P., Scarrott S. M., Wolstencroft R. D.* Polarimetric imaging of the polar ring galaxy NGC 660 - evidence for dust outside the stellar disk // *A&A.* — 2000. — Vol. 357. — P. 443–450.
104. *Jozsa I. G.* Witnessing the formation of a warp // *ASTRON.* — 2010.
105. *Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Contini T.* Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties // *A&A.* — 2004. — Vol. 425. — P. 849–869. [astro-ph/0407014](#).
106. *Burbidge E. M., Burbidge G. R.* Three Unusual so Galaxies. // *ApJ.* — 1959. — Vol. 130. — P. 20.
107. *Sérsic J. L.* Southern Peculiar Galaxies III // *ZAp.* — 1967. — Vol. 67. — P. 306.
108. *Schechter P. L., Ulrich M. H., Boksenberg A.* NGC 4650A : the rotation of the diffuse stellar component. // *ApJ.* — 1984. — Vol. 277. — P. 526–531.
109. *Smirnov D. V., Reshetnikov V. P.* Active Galactic Nuclei among Polar-Ring Galaxies // *Astronomy Letters.* — 2020. — Vol. 46, № 8. — P. 501–508. 2010.03349.
110. *Egorov O. V., Moiseev A. V.* Metallicity and ionization state of the gas in polar-ring galaxies // *MNRAS.* — 2019. — Vol. 486. — P. 4186–4197. 1904.02513.
111. *Bournaud F., Combes F.* Formation of polar ring galaxies // *A&A.* — 2003. — Vol. 401. — P. 817–833. [astro-ph/0301391](#).
112. *Bekki K.* Formation of a Polar Ring Galaxy in a Galaxy Merger // *ApJ.* — 1998. — Vol. 499, № 2. — P. 635–649. [astro-ph/9804220](#).
113. *Khoperskov S., Moiseev A., Khoperskov A.* Polar rings dynamics in the triaxial dark matter halo // *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi.* — 2013. — Vol. 25. — P. 51. 1211.1307.
114. *Khoperskov S. A., Moiseev A. V., Khoperskov A. V., Saburova A. S.* To be or not to be oblate: the shape of the dark matter halo in polar ring galaxies // *MNRAS.* — 2014. — Vol. 441, № 3. — P. 2650–2662.
115. *Hubble E. P.* Extragalactic nebulae. // *ApJ.* — 1926. — Vol. 64. — P. 321–369.

116. *Moiseev A. V.* Warped polar ring in the Arp 212 galaxy // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — Vol. 63, № 3. — P. 201–215. 0808.1696.
117. *Sparke L. S.* Are polar rings self-gravitating ? // *MNRAS*. — 1986. — Vol. 219. — P. 657–670.
118. *Habe A., Ikeuchi S.* Gasdynamical calculations of preferred planes in prolate and triaxial galaxies. I - Case of no figure rotation // *ApJ*. — 1985. — Vol. 289. — P. 540–555.
119. *Peletier R. F., Christodoulou D. M.* A Photometrical and Dynamical Study of the Helix Galaxy NGC 2685 // *AJ*. — 1993. — Vol. 105. — P. 1378.
120. *Ideta M., Hozumi S., Tsuchiya T., Takizawa M.* Time evolution of galactic warps in prolate haloes // *MNRAS*. — 2000. — Vol. 311, № 4. — P. 733–740. astro-ph/9910030.
121. *Iodice E., Arnaboldi M., Bournaud F. et al.* Polar Ring Galaxies and the Tully-Fisher Relation: Implications for the Dark Halo Shape // *ApJ*. — 2003. — Vol. 585, № 2. — P. 730–738. astro-ph/0211281.
122. *Whitmore B. C.* A Few Statistics from the Catalog of Polar-Ring Galaxies // *Warped Disks and Inclined Rings around Galaxies*. — 1991. — P. 60.
123. *Józsa G. I. G., Oosterloo T. A., Morganti R. et al.* Kinematic modeling of disk galaxies. III. The warped “Spindle” NGC 2685 // *A&A*. — 2009. — Vol. 494, № 2. — P. 489–508. 0810.3025.
124. *Bothun G. D., Impey C. D., Malin D. F., Mould J. R.* Discovery of a Huge Low-Surface-Brightness Galaxy: A Proto-Disk Galaxy at Low Redshift? // *AJ*. — 1987. — Vol. 94. — P. 23.
125. *Ghosh K. K., Mapelli M.* UGC 7069: the largest ring galaxy // *MNRAS*. — 2008. — Vol. 386, № 1. — P. L38–L42. 0802.1270.
126. *Wakamatsu K.-I.* Structure of Polar Ring Galaxies: Shock Waves in the Gas of Polar Rings // *AJ*. — 1993. — Vol. 105. — P. 1745.
127. *Katkov I. Y., Moiseev A. V., Sil’chenko O. K.* Stars and Ionized Gas in the S0 Galaxy NGC 7743: An Inclined Large-scale Gaseous Disk // *ApJ*. — 2011. — Vol. 740, № 2. — P. 83. 1106.5323.

128. *Sil'chenko O. K.* Stellar Nuclei and Inner Polar Disks in Lenticular Galaxies // *AJ.* — 2016. — Vol. 152, № 3. — P. 73. 1609.02222.
129. *Moiseev A. V.* Inner polar rings and disks: Observed properties // *Astrophysical Bulletin.* — 2012. — Vol. 67, № 2. — P. 147–159. 1204.4437.