

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 звездная
астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: **Соболев Андрей Михайлович**,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Научный консультант: **Вибе Дмитрий Зигфридович**,
доктор физико-математических наук, профессор
РАН

Официальные оппоненты: **Гусев Александр Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела внегалактической астрономии Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова

Щекинов Юрий Андреевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник отдела теоретический астрофизики и космологии Астрономического центра Физического Института им. П.Н. Лебедева

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук**, п. Нижний Архыз.

Защита состоится 29 сентября 2022г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д.48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан 5 августа 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.280.01, к.ф.-м.н.



Н. В. Чупина

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 галак-

тике. Исключением являются исследования галактик Местной Группы — Магеллановых Облаков [3], МЗ1 [12], МЗЗ [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 $\text{H}\alpha$, 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 [29]. Объекты, входящие в каталог, были разделены на несколько групп, по аналогии с каталогом Вайтмо: лучшие

¹<https://www.galaxyzoo.org/>

²<http://www.sdss.org/>

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 характерна 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, наблюдается 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 [30].

Методология и методы исследования

В работе для получения некоторых результатов для выделенных областей звездообразования была использована процедура апертурной фотометрии с вычитанием фона. Процедура фотометрии и оценка погрешностей измерений описаны в работе [31]. Фон во всех случаях оценивался по кольцу шириной шесть пикселей, окружающему исследуемую область. Данные фотометрии в непрерывном спектре были использованы для определения параметров пыли и поля излучения при помощи модели Дрейна и Ли [26], откуда мы так же использовали библиотеку для подгонки ИК-спектров. Полученные результаты были проанализированы с помощью авторского программного обеспечения.

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 $\text{H}\alpha$.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов исследования областей звездообразования в различных диапазонах подтверждается их сравнением с опубликованными результатами других авторов и обсуждением полученных результатов на конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация результатов

Все основные результаты диссертации были представлены на российских и зарубежных конференциях и семинарах в качестве устных и стендовых докладов:

- 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.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Объем работы: 107 страниц, 29 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 129 наименований. По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 4 входит в перечень ВАК.

Содержание работы

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 пекулярных 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 протяженные кольца, диаметр которых превышает диаметр галактики в четыре и более раз.

В **Заключении** суммируются основные результаты работы.

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.

В2. 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.

В3. 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.

В4. 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, 2020. – С. 212.

Благодарности

Диссертантка выражает признательность руководителям Д. З. Вибе и А. М. Соболеву, благодарит своих коллег и соавторов, в особенности А. В. Моисеева, С. Ю. Парфёнова за помощь в работе и плодотворное сотрудничество.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

1. *Bolatto Alberto D., Wolfire Mark and Leroy Adam K.* The CO-to-H₂ Conversion Factor // ARA&A. — 2013. — Vol. 51. — 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. — 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. — P. 58. 1306.2913.
 13. *Tosaki Tomoka, Kuno Nario, Onodera Sachiko 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. and Pavlyuchenkov Y. N.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes // MNRAS. — 2013. — Vol. 431. — P. 2006–2016. 1302.4837.
 15. *Bocchio Marco, Jones Anthony P., Slavin Jonathan D.* A re-evaluation of dust processing in supernova shock waves // A&A— 2014. — Vol. 507. — A32.

16. *Slavin J. D., Dwek E. and 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 Yu. N.* Regular chains of star formation complexes in spiral arms of NGC 628 // *MNRAS*. — 2013. — Vol. 434. — P. 313–324. 1306.1731.
18. *Gusev A. S., Egorov O. V. and Sakhibov F.* Parameters of the brightest star formation regions in the two principal spiral arms of NGC 628 // *MNRAS*. — 2014. — Vol. 437. — P. 1337–1351. 1310.3690.
19. *Gusev Alexander S.* Hierarchy and size distribution function of star formation regions in the spiral galaxy NGC 628 // *MNRAS*. — 2014. — Vol. 442. — 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. — P. 3334–3355. 1601.07470.
21. *Kennicutt Jr., R. C., Armus L., Bendo G. et al.* SINGS: The SIRTf Nearby Galaxies Survey // *PASP*. — 2003. — Vol. 115. — P. 928–952.
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. and Calzetti, D. and Aniano, G. and Appleton, P. and Armus, L. and Beirão, P. and Bolatto, A. D. and Brandl, B. and Crocker, A. and Croxall, K. and Dale, D. A. and Meyer, J. D. and Draine, B. T. and Engelbracht, C. W. and Galametz, M. and Gordon, K. D. and Groves, B. and Hao, C.-N. and Helou, G. and Hinz, J. and Hunt, L. K. and Johnson, B. and Koda, J. and Krause, O. and Leroy, A. K. and Li, Y. and Meidt, S. and Montiel, E. and Murphy, E. J. and Rahman, N. and Rix, H.-W. and Roussel, H. and Sandstrom, K. and Sauvage, M. and Schinnerer, E. and Skibba, R. and Smith, J. D. T. and Srinivasan, S. and Vigroux, L. and Walter, F. and Wilson, C. D. and Wolfire, M. and Zibetti, S.* 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. and 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.* — 2001. — Vol. 230. — 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. *Moiseev Alexei V., Smirnova Ksenia I., Smirnova Aleksandrina A. and Reshetnikov Vladimir P.* A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey // *MNRAS.* — 2011. — Vol. 418. — P. 244–257. 1107.1966
 30. *Draine B. T. and Li A.* PHANGS-ALMA: Arcsecond CO(2-1) Imaging of Nearby Star-forming Galaxies // *ApJS.* — 2021. — Vol. 257. — P. 43. 2104.07739
 31. *Khramtsova M. S., Wiebe D. S., Lozinskaya T. A. and 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