

УДК 524.7–52

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ПЕКУЛЯРНЫХ ГАЛАКТИКАХ NGC 660, NGC 1512, NGC 4395 И NGC 4618

© 2020 К. И. Смирнова<sup>1\*</sup>, Д. З. Вибе<sup>2</sup>, А. В. Моисеев<sup>3</sup>, Г. И. Г. Йоша<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000 Россия

<sup>2</sup>Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия

<sup>3</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>4</sup>Южноафриканская радиоастрономическая обсерватория, Кейптаун, 7925 ЮАР

<sup>5</sup>Институт астрономии Аргеландер, Бонн, D-53121 Германия

Поступила в редакцию 18 февраля 2020 года; после доработки 12 мая 2020 года; принята к публикации 12 мая 2020 года

В работе исследованы области звездообразования (ОЗО) в пекулярных галактиках NGC 660, NGC 1512, NGC 4395 и NGC 4618. Рассматриваются соотношения между такими характеристиками областей звездообразования как потоки в ультрафиолетовом, ближнем и дальнем ИК-диапазонах, а также в линиях H $\alpha$  и H I, поверхностная яркость в этих диапазонах, разброс лучевых скоростей ионизованного и нейтрального водорода. Показано, что во всех рассмотренных галактиках потоки излучения ОЗО в инфракрасном диапазоне оказываются меньше, чем в «нормальных» 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 объясняется их компактными размерами. Эти различия указывают на то, что протекание процесса звездообразования зависит не только от морфологического типа галактики, но и от многих других факторов.

Ключевые слова: галактики: звездообразование

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные космические и наземные инструменты позволяют проводить пространственно разрешенные наблюдения межзвездного вещества во внегалактических областях звездообразования (ОЗО), что открывает возможности для исследования особенностей процесса формирования звезд в существенно более широком диапазоне параметров, чем это возможно в нашей Галактике. В частности, можно в деталях изучать звездообразование в тех галактиках, в которых рождение звезд подвержено значительному влиянию того или иного внешнего воздействия или даже стимулировано таким воздействием, например, во взаимодействующих системах.

Наблюдения показывают, что характеристики звездообразования в галактиках разных морфологических типов отличаются, и межзвездное вещество в них распределено по-разному: области звездообразования могут располагаться как хаотично, так и упорядочено. Особый интерес с этой

точки зрения представляют те галактики, в которых наблюдаются признаки недавнего стимулированного звездообразования, например, в результате приливного взаимодействия или слияния с другой галактикой. К числу таких объектов могут относиться так называемые галактики с полярными кольцами — довольно редкий класс объектов, подсистемы которых (диск и кольцо) вращаются в почти ортогональных плоскостях. В некоторых близких галактиках такого типа можно проследить различия между областями звездообразования и звездными скоплениями в кольце и в диске (Karataeva et al. 2004, Ordenes-Briceño et al. 2016). И хотя причины формирования полярных подсистем могут быть различными, и продолжают споры о природе полярных колец в конкретных галактиках (Bournaud and Combes 2003, Egorov and Moiseev 2019), в любом случае речь идет о захвате галактикой внешнего вещества с сильно отличным от диска моментом вращения.

В работах Smirnova et al. (2017a), Smirnova and Wiebe (2019) нами были рассмотрены различные соотношения между наблюдаемыми харак-

\*E-mail: Arashu@rambler.ru

теристиками «нормальных» галактик. Предметом данного исследования являются подобные соотношения для тех галактик, в истории которых были эпизоды, приведшие к некоторым особенностям в их современной морфологии и кинематике. Это исследование было начато нами в работе Smirnova et al. (2017c), посвященной изучению процессов звездообразования в кольце и диске галактики с полярным кольцом NGC 660. Нами были выявлены некоторые закономерности в параметрах излучения ОЗО кольца и диска в ближнем и среднем ИК-диапазонах. В частности, выяснилось, что инфракрасные потоки ОЗО в кольце и диске галактики отличаются на порядки величины.

К сожалению, нам не удалось найти хотя бы еще одну галактику с полярным кольцом для продолжения этого анализа, поскольку он требует, чтобы кольцо было достаточно протяженным, допускающим выделение как можно большего количества ОЗО, которые не сливались бы друг с другом при наблюдениях космическими ИК-обсерваториями Spitzer и Herschel с угловым разрешением  $2''$ – $12''$ . Иными словами необходимо, чтобы в галактике можно было провести фотометрию областей, по размеру соответствующих отдельным ОЗО или по крайней мере комплексу близких ОЗО. Кроме того, для выбранной галактики должно быть достаточное количество наблюдательных данных в других диапазонах. На сегодняшний день известно несколько сотен галактик с полярными кольцами, но все они слишком далеки. При этом лишь для части кандидатов, отобранных по их пекулярной морфологии, имеются уверенные кинематические подтверждения наличия полярных колец (Moiseev et al. 2011, Reshetnikov and Mosenkov 2019, Whitmore et al. 1990).

Поэтому у нас возникла идея дополнить анализ галактиками других типов. В работе Smirnova et al. (2017c) был сделан вывод о том, что различия в потоках ОЗО диска и кольца NGC 660 связаны с различиями в их возрастах, а именно: области кольца, в которых потоки в ближнем и среднем ИК на 1–2 порядка меньше, чем в ОЗО диска NGC 660 (а также в ОЗО «нормальных» высокометаллических галактик), являются более молодыми. Исходя из этого предположения, мы искали галактики, в которых в недавнем прошлом происходили динамические процессы, способные вызвать волну звездообразования. Такие 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. Руководствуясь перечисленными критериями, мы включили в рассмотрение взаимодействующую галактику NGC 1512, для которой

имеются данные не только в ближнем, но и в дальнем ИК-диапазонах.

Кроме того, мы обратили внимание на асимметричные (lopsided) галактики (Jog and Combes 2009). Численное моделирование показывает, что асимметрия может возникать при взаимодействии галактики с компаньоном (Yozin and Bekki 2014) или в результате взаимодействия двух карликовых галактик (Pardy et al. 2016), в результате чего диск галактики становится «скособоченным». Диск асимметрия в такой модели сохраняется в течение почти 2 млрд лет. Одной из разновидностей асимметричных галактик являются галактики со смещенным баром (Kruk et al. 2017), 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 (Odewahn 1991). Еще одной асимметричной галактикой с набором необходимых данных оказалась сейфертовская галактика NGC 4395 (Ho et al. 1995). Обе эти галактики относятся к типу SBm.

В предыдущей работе (Smirnova et al. 2017a) мы исследовали взаимосвязь между различными составляющими МЗС (атомарный и молекулярный водород, пылинки различных видов), которые непосредственно участвуют в процессе звездообразования, в одиннадцати галактиках, которые были разделены на две группы по металличности: высоко- и низкометаллические (металличность была взята из статьи Moustakas et al. 2010). В данной работе для сопоставления с нашими предыдущими результатами мы рассматриваем высокометаллическую галактику NGC 628. Далее она называется галактикой сравнения, тогда как галактики NGC 660, NGC 1512, NGC 4395 и NGC 4618 в совокупности мы называем новыми галактиками.

Для сопоставления поверхностных яркостей ОЗО в различных галактиках необходимо знать расстояния до них. Для однородности нами приняты оценки из каталога Cosmicflows-3<sup>1</sup> (Tully et al. 2016). Они приведены в Таблице 1 вместе с соответствующими угловыми масштабами. Также в таблице даны оценки звездной массы в рассматриваемых галактиках, выведенные из потоков на длинах волн 3.6 и 4.5 мкм (телескоп Spitzer) по методике, описанной в работе Eskew et al. (2012). Поскольку для нашего исследования достаточно знать примерные значения массы (см. Раздел 4), мы не пытались провести точную фотометрию. Однако наши оценки близки к значениям, которые были получены для NGC 628 и NGC 660 в работе Sorai et al. (2019) и для NGC 4395 и NGC 4618 в работе Yim and van der Hulst (2016). Кроме

<sup>1</sup><http://edd.ifa.hawaii.edu>

того, в Таблице 1 дана оценка полной скорости звездообразования, выведенная из потока на длине волны 24 мкм по калибровке, приведенной Calzetti (2013), для всех галактик, за исключением NGC 660, для которой данные на длине волны 24 мкм недоступны.

Металличность галактик NGC 660 и NGC 4618 была рассчитана с использованием калибровочных соотношений для определения содержания кислорода по  $R$ -калибровкам из работы Pilyugin and Grebel (2016):

$$\begin{aligned} R_2 &= I_{OII}\lambda 3727 + \lambda 3727/I_{H\beta}, \\ N_2 &= I_{NII}\lambda 6548 + \lambda 6584/I_{H\beta}, \\ S_2 &= I_{SII}\lambda 6717 + \lambda 6731/I_{H\beta}, \\ R_3 &= I_{OIII}\lambda 4959 + \lambda 5007/I_{H\beta}. \end{aligned} \quad (1)$$

Интенсивности линий для этих галактик были взяты в статье Moustakas and Kennicutt (2006).

В последнем столбце Таблицы 1 указана возможная принадлежность рассматриваемых галактик группам или скоплениям. Мнения разных авторов по отнесению галактик NGC 660 и NGC 628 к одной или к разным группам расходятся. Однако даже если обе эти галактики принадлежат к одной группе, пространственно они находятся далеко друг от друга, и эффекты окружения не должны быть велики.

## 2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

Мы использовали те же наборы данных наблюдений галактики NGC 660 в ближнем и среднем ИК-диапазонах, а также в линии  $H\alpha$ , что и Smirnova et al. (2017c). В настоящей статье кроме интегральной интенсивности линии  $H\alpha$  мы рассматриваем и сами спектры, чтобы оценить разброс скоростей ионизованного газа. Наблюдения выполнялись 22/23 декабря 2003 г. на 6-м телескопе SAO РАН с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо в составе многорежимного редуктора светосилы SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005). Ширина рабочего диапазона интерферометра составляла около  $1290 \text{ км с}^{-1}$  вокруг красномещенной эмиссионной линии  $H\alpha$ . Этот диапазон был равномерно заполнен 32 интерферограммами с длительностью экспозиций 240 с каждая. Результатом обработки, выполнявшейся с помощью пакета программ (Moiseev and Egorov 2008), являлся куб данных, где каждый пиксель размером  $0''.71$  в поле зрения  $6'.1 \times 6'.1$  содержит 32-канальный спектр. Спектральное разрешение составляло  $120 \text{ км с}^{-1}$ , а угловое разрешение —  $2''.9$ .

Источники данных для галактики NGC 628 приведены в работах Smirnova et al. (2017a), Smirnova and Wiebe (2019). В них 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 работе 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. 1. Разными цветами показаны области центральной части галактики и области на ее периферии (см. ниже).

Данные наблюдений в ближнем ИК-диапазоне для галактик NGC 1512, NGC 4395 и NGC 4618 (на длинах волн 3.6, 4.5, 8 и 24 мкм) были взяты из научного архива телескопа Spitzer. Для галактики NGC 660 наблюдения Spitzer на длине волны 24 мкм недоступны, поэтому вместо них мы использовали данные, полученные при помощи телескопа WISE. Данные наблюдений всех галактик в ультрафиолетовом диапазоне были загружены из архива телескопа GALEX. Для галактики NGC 1512 доступны также данные в дальнем ИК-диапазоне из обзора KINGFISH<sup>2</sup> (Kennicutt et al. 2011), выполненного на телескопе Herschel.

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 длинах волн 8 и 24 мкм, а также наблюдения галактики NGC 1512 на длинах волн 70 и 100 мкм, приводились к разрешению в фотометрической полосе на длине волны 22 мкм (порядка  $12''$ ). Для свертки использовались ядра из работы Aniano et al. (2011). Данные наблюдений галактики NGC 1512 на длине волны 160 мкм использовались в исходном виде, поскольку их угловое разрешение близко к угловому разрешению данных на длине волны 22 мкм.

Мы также располагаем данными в линии HI для галактики NGC 660. Она наблюдалась в  $L$ -диапазоне с помощью радиотелескопа Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) в течение трех эпох в декабре 2009 г. по 12 часов для каждой эпохи. Общая полоса пропускания составляла 10 МГц и была разделена на 1024 канала. В соответствии со стандартной практикой для WSRT в течение приблизительно 30 минут до

<sup>2</sup>[http://herschel.esac.esa.int/Science\\\_Archive.shtml](http://herschel.esac.esa.int/Science\_Archive.shtml)

Таблица 1. Характеристики исследуемых галактик

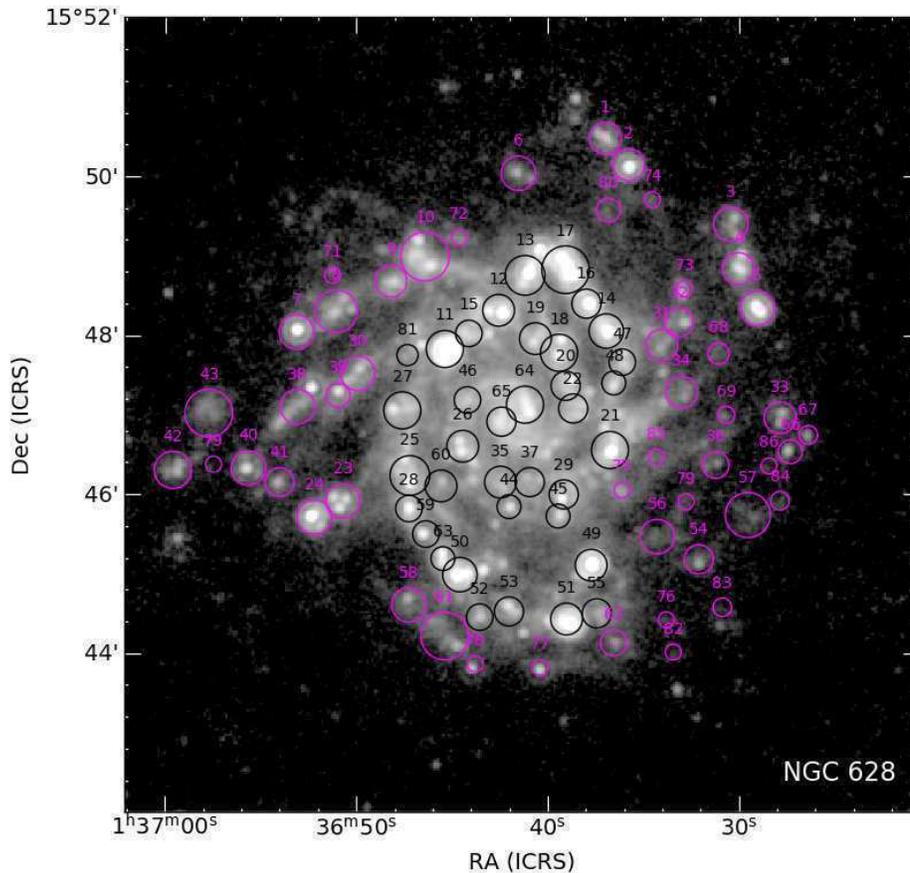
Галактика	Расстояние, Мпк	Угловой масштаб, пк/угл.сек.	12 + $\log(O/H)$	Морф. тип	$\lg(M_*/M_\odot)$	Скорость ЗО, $M_\odot/\text{год}$	Группа, скопление
NGC 660	13.55	66	8.89	SB(s)a pec	10.5		LGG 29 <sup>1</sup> , NGC 660 <sup>2</sup>
NGC 1512	12.25	60	8.56 <sup>3</sup>	SB(r)a; H II	10.2	0.4	LGG 108 <sup>1</sup> , NGC 1512 <sup>2</sup>
NGC 4395	4.76	23	8.33 <sup>4</sup>	SA(s)m; LINER Sy1.8	9.4	0.03	LGG 291 <sup>1</sup> , USGCU 480 <sup>5</sup>
NGC 4618	6.52	32	8.35	SB(rs)m; H II	9.7	0.05	LGG 290 <sup>1</sup>
NGC 628	9.77	47	8.45 <sup>3</sup>	SA(s)c; H II	10.4	1.0	LGG 29 <sup>1</sup> , NGC 628 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Garcia (1993)<sup>2</sup> Makarov and Karachentsev (2011)<sup>3</sup> Moustakas et al. (2010)<sup>4</sup> Roy et al. (1996)<sup>5</sup> Ramella et al. (2002)

и после наблюдения основного объекта наблюдались первичные калибраторы CTD 93 и 3C 147. Стандартная редукция данных выполнялась с помощью программного обеспечения Miriad (Sault et al. 1995). Проведя первичную кросс-калибровку коэффициентов усиления и полосы пропускания при помощи наблюдавшихся калибровочных источников, мы использовали итеративную процедуру самокалибровки для улучшения калибровки усиления в континууме: сначала было построено изображение в континууме с использованием однородного взвешивания данных, которое использовалось для последующей итеративной чистки методом CLEAN-компонентов (Clark 1980, Högbom 1974). После каждого проведения процедуры CLEAN мы определяли CLEAN-области, применяя к полученному изображению отсечку на некотором уровне, что позволяло выделять CLEAN-компоненты только внутри данных областей. Используя получившийся набор CLEAN-компонентов в качестве входной модели, мы применяли к данным процедуру самокалибровки и снова повторяли чистку изображения методом CLEAN. Процесс повторялся до достижения требуемого качества изображения (с постепенным уменьшением уровня отсечки). Полученные значения комплексных коэффициентов усиления в континууме затем переносились в оригинальный набор данных, и полученная модель вычиталась в

области  $UV$ . После дополнительного вычитания континуума  $uvlin$  в  $UV$ -области к данным применялось сглаживание Ханнинга. Куб данных создавался при помощи робастного взвешивания (Briggs 1995) и обрезания Из-за небольшого склонения NGC 660 проекции баз WSRT в направлении восток–запад были сильно укорочены, поэтому требовалось либо делать синтезированную диаграмму направленности симметричной, ухудшая тем самым угловое разрешение (однако проигрывая в чувствительности существенно меньше, чем для источников с большими склонениями), либо оставлять ее сильно вытянутой. Анализируемый здесь куб данных имел среднеквадратичный шум  $\sigma_{rms} = 0.68 \text{ mJy beam}^{-1}$  и разрешение  $64'' \times 12''$  ( $HPBW$ ). Данные наблюдений нейтрального водорода использованы без конволюции и без учета вытянутости диаграммы направленности. Проведенные нами предварительные вычисления показали, что это не меняет наших выводов.

Выделенные в новых галактиках области показаны на Рис. 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 работе Khramtsova et al. (2014). Фон во всех случаях оценивался по кольцу шириной шесть пикселей, окружающему исследуемую область. С учетом размера пикселя



**Рис. 1.** Области звездообразования галактики NGC 628: черные кружки — области из центральной части галактики, пурпурные — периферийные области. В качестве фона использовано изображение галактики на длине волны 24 мкм из научного архива телескопа Spitzer.

для ИК-изображений это означает, что кольцо для определения фона примерно в два раза шире самой апертуры. Такое широкое кольцо позволяет сгладить эффект соседних ярких областей и корректно учесть в апертуре именно диффузный фон.

В результате для всех галактик были оценены потоки излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах, а также в УФ-диапазоне. Потоки в полосах на длинах волн 8 мкм и 24 (22) мкм исправлялись за вклад звездного излучения. В работе Khrantsova et al. (2014) для исправленных потоков использовались обозначения  $F_8^{\text{afe}}$  и  $F_{24}^{\text{ns}}$ . Далее верхние индексы для простоты опущены, но сопоставление проводится именно со скорректированными потоками. Для галактики NGC 1512 оценивались также потоки на длинах волн 70, 100 и 160 мкм.

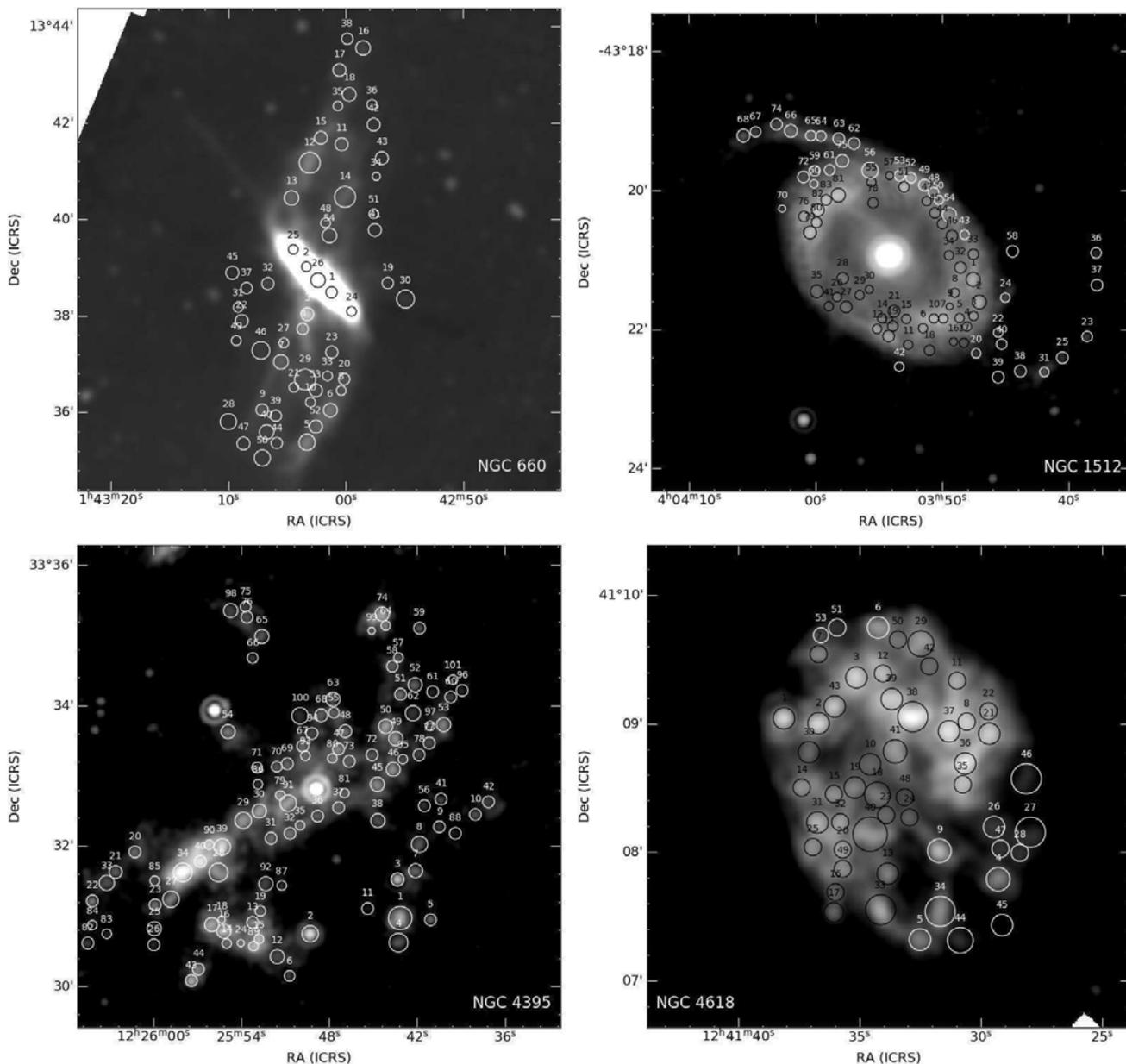
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Апертурная фотометрия

Основным объектом нашего исследования являются наблюдаемые свойства пыли и газа в об-

ластях звездообразования. Мы исходим из предположения, что источником излучения в ближнем ИК-диапазоне являются мелкие ароматические частицы (полициклические ароматические углеводороды, ПАУ), тогда как излучение на длине волны 24 (22) мкм генерируется более крупными горячими пылинками. В обоих случаях для генерации ИК-излучения необходим нагрев пылевой частицы ультрафиолетовым излучением, поэтому можно предположить, что области интенсивного излучения в ближнем и среднем ИК-диапазонах являются комплексами звездообразования.

Общая природа эмиссии на длинах волн 8 и 24 мкм подчеркивается диаграммой на Рис. 3. Видно, что положение ОЗО в NGC 628 и диска галактики NGC 660 на этой диаграмме отличается от положения ОЗО в галактиках NGC 1512, NGC 4395, NGC 4618, а также в кольце галактики NGC 660. В ОЗО новых галактик потоки на длинах волн 8 и 24 мкм также хорошо коррелируют друг с другом, однако их значения существенно ниже потоков в ОЗО «обычной» галактики высокой



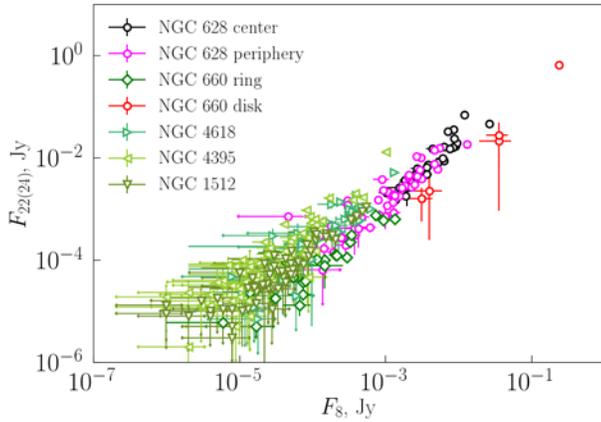
**Рис. 2.** Области звездообразования в галактиках, рассматриваемых в данной работе, на фоне карт излучения на длине волны 8 мкм, приведенных к разрешению телескопа WISE на длине волны 22 мкм.

металличности (особенно ее центральной части) и диска галактики NGC 660.

Поскольку для галактики NGC 1512 доступны также данные Herschel, мы можем посмотреть, как в ней соотносятся потоки в ближнем и дальнем ИК-диапазонах в сравнении с «обычными» галактиками. На Рис. 4 суммарный поток в дальнем ИК-диапазоне (сумма потоков на длинах волн 70, 100 и 160 мкм) сопоставляется с потоками на длинах волн 8 и 24 мкм. Очевидно, что ОЗО в галактике NGC 1512 и в дальнем ИК-диапазоне оказываются существенно тусклее, чем ОЗО в галактике сравнения (как центральные, так и пе-

риферийные), хотя в сопоставлении с потоками на длинах волн 8 и 24 мкм демонстрируют тот же тренд.

Прямая интерпретация Рис. 3 и 4 состоит в том, что инфракрасные потоки 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 делалось это на глаз, без использования какого-либо формального алгоритма (см. обсуждение в работе Smirnova et al. (2017b)), однако мы



**Рис. 3.** Соотношение потоков излучения на длинах волн 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.

старались подбирать размеры апертур так, чтобы они максимально соответствовали размеру выделяемой ОЗО. На Рис. 5а 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 этой величины. 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 части галактики, что может быть обусловлено селекцией.

Гистограмма на Рис. 5а в большей степени характеризует процесс выделения ОЗО, а не их физические характеристики. На Рис. 5б показано распределение ОЗО по линейным диаметрам, вычисленным для приведенных выше оценок расстояний, и здесь мы видим несколько иную картину. Самые большие ОЗО (более 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 (менее 700 пк). Сказанное выше об угловых размерах центральных и периферийных ОЗО в галактике 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. 6 сопоставляются поверхностные яркости (в  $\text{Ян пк}^{-2}$ ) исследуемых ОЗО на длинах волн 8 и 24 мкм отдельно для каждой галактики, исследуемой в данной работе. Поверхностные яркости трех ОЗО диска галактики NGC 660 на длине волны 8 мкм превышают поверхностные яркости всех остальных рассматриваемых ОЗО, однако это может быть связано с не вполне уверенным выделением ОЗО в данной 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 длинах волн 8 и 24 мкм, менее  $10^{-3}$   $\text{Ян пк}^{-2}$ , 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.

Низкая поверхностная яркость ИК-излучения ОЗО в NGC 1512 и в кольце NGC 660 может быть обусловлена как малым количеством источников (ароматических частиц), так и низкой интенсивностью ультрафиолетового излучения. Чтобы сопоставить эмиссию в инфракрасном и в ультрафиолетовом диапазонах, на Рис. 7 мы сравниваем результаты апертурной фотометрии данных из архивов наблюдений на телескопах Spitzer и GALEX. Представлены данные ультрафиолетовых наблюдений в фильтре *FUV* и излучения на длине волны 8 мкм (для потоков в полосах *NUV* и на длине волны 24 мкм результаты принципиально остаются теми же самыми).

Как и на Рис. 6, 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 ультрафиолетовой 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 в этой галактике и в ИК, и в УФ оказывается ниже, чем в NGC 628.

Возникает искушение связать наблюдаемые поверхностные яркости в ИК- и УФ-диапазонах,

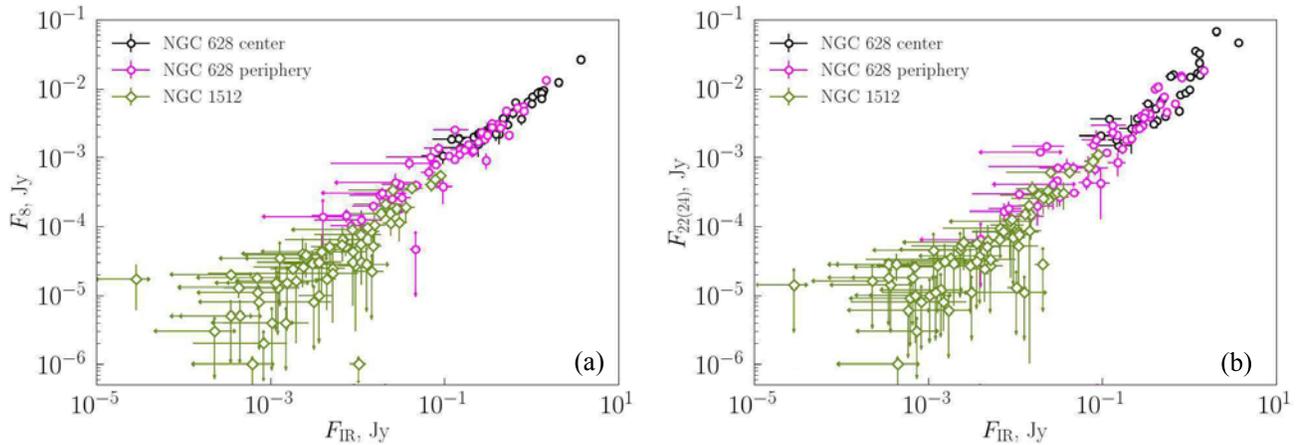


Рис. 4. Отношение потоков излучения на длинах волн 8 и 24 мкм и суммарного потока в дальнем ИК-диапазоне для ОЗО в галактиках NGC 1512 и NGC 628.

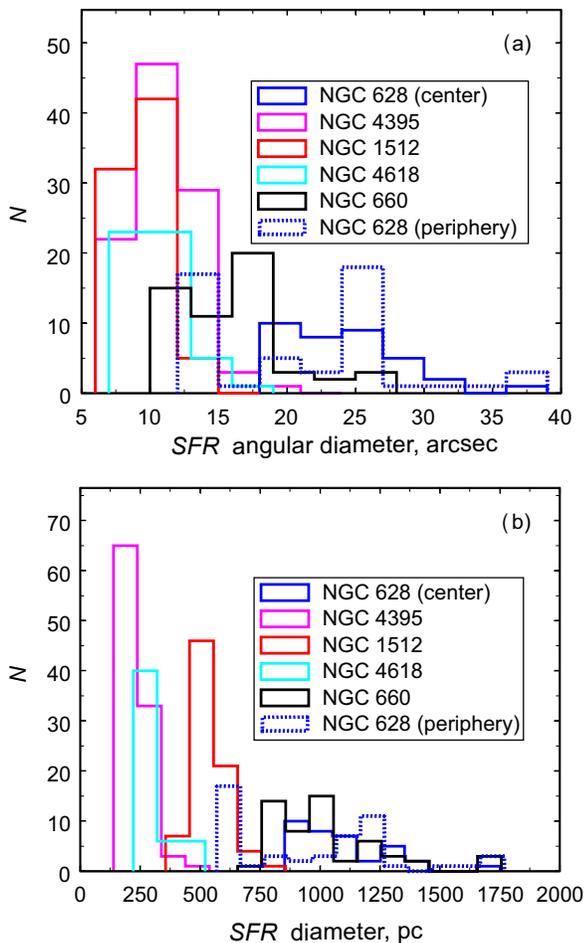


Рис. 5. Распределения исследуемых ОЗО по диаметрам апертур (а) и по линейным диаметрам (б).

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. 7 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 иллюстрирует Рис. 8, 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-, УФ-диапазонах 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, так же, как и в работе Smirnova et al. (2017a), нормируя поток в ИК-диапазоне на поток в линии  $H\text{I}$ . Результаты представлены на Рис. 9.

И на диаграмме для длины волны 8 мкм, и на диаграмме для длины волны 22 мкм ОЗО кольца NGC 660 как группа попадают на ту же (анти)корреляцию, что и ОЗО галактик, исследованных в работе Smirnova et al. (2017a): чем ярче область в линии  $H\text{I}$ , тем ниже ее относительная яркость в ИК-диапазоне. Smirnova et al. (2017a) предположили, что существование такой антикорреляции может быть обусловлено возрастом 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  $F_{8, 22}/F_{H\text{I}}$  и  $F_{H\text{I}}$  отсутствует. Низкие потоки в ИК-диапазоне наблюдаются как у ОЗО, богатых водородом, так и у ОЗО, бедных им.

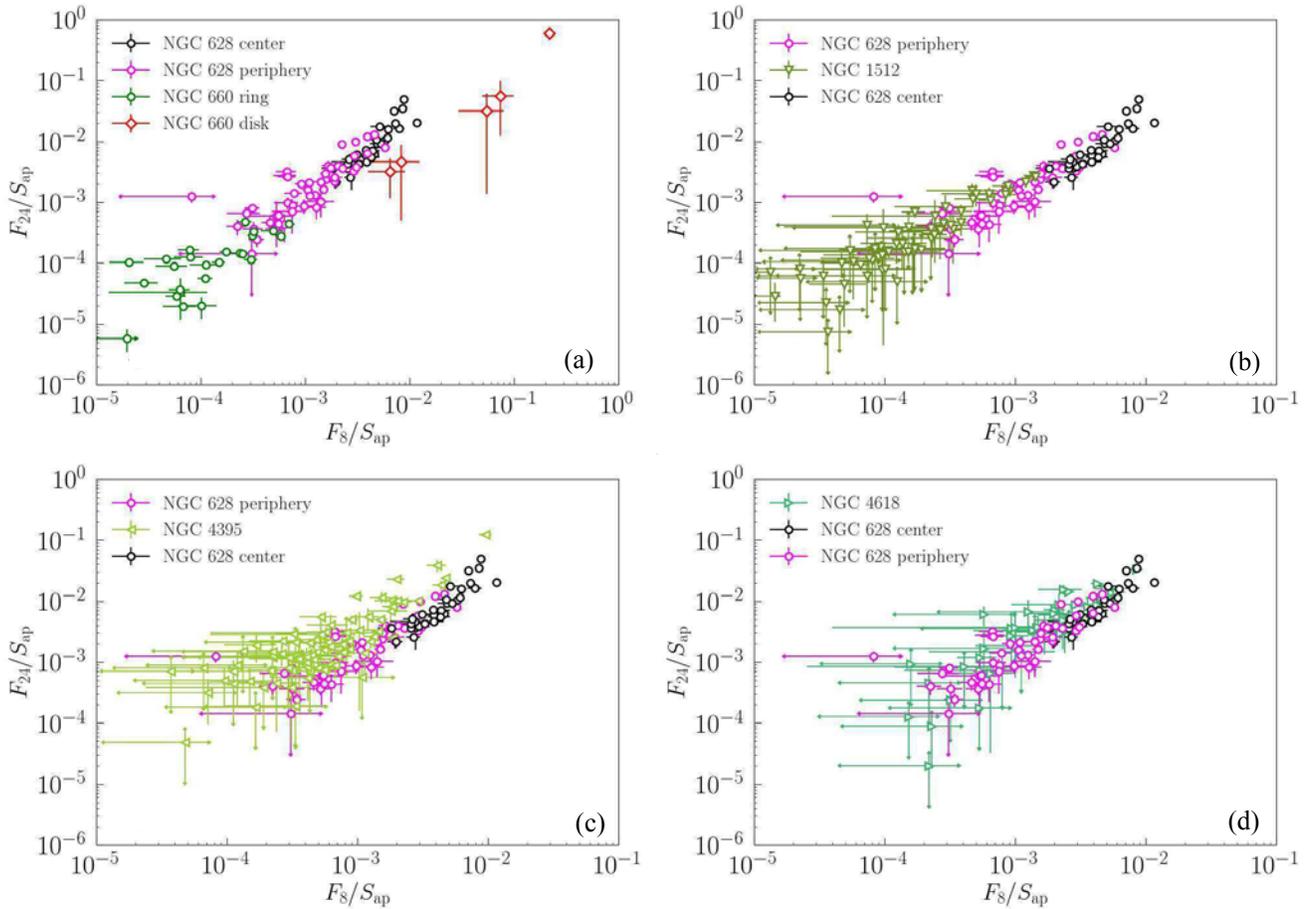


Рис. 6. Отношение поверхностной яркости излучения на длинах волн 8 мкм и 24 мкм для ОЗО из галактик, исследуемых в данной работе.

### 3.2. Кинематика

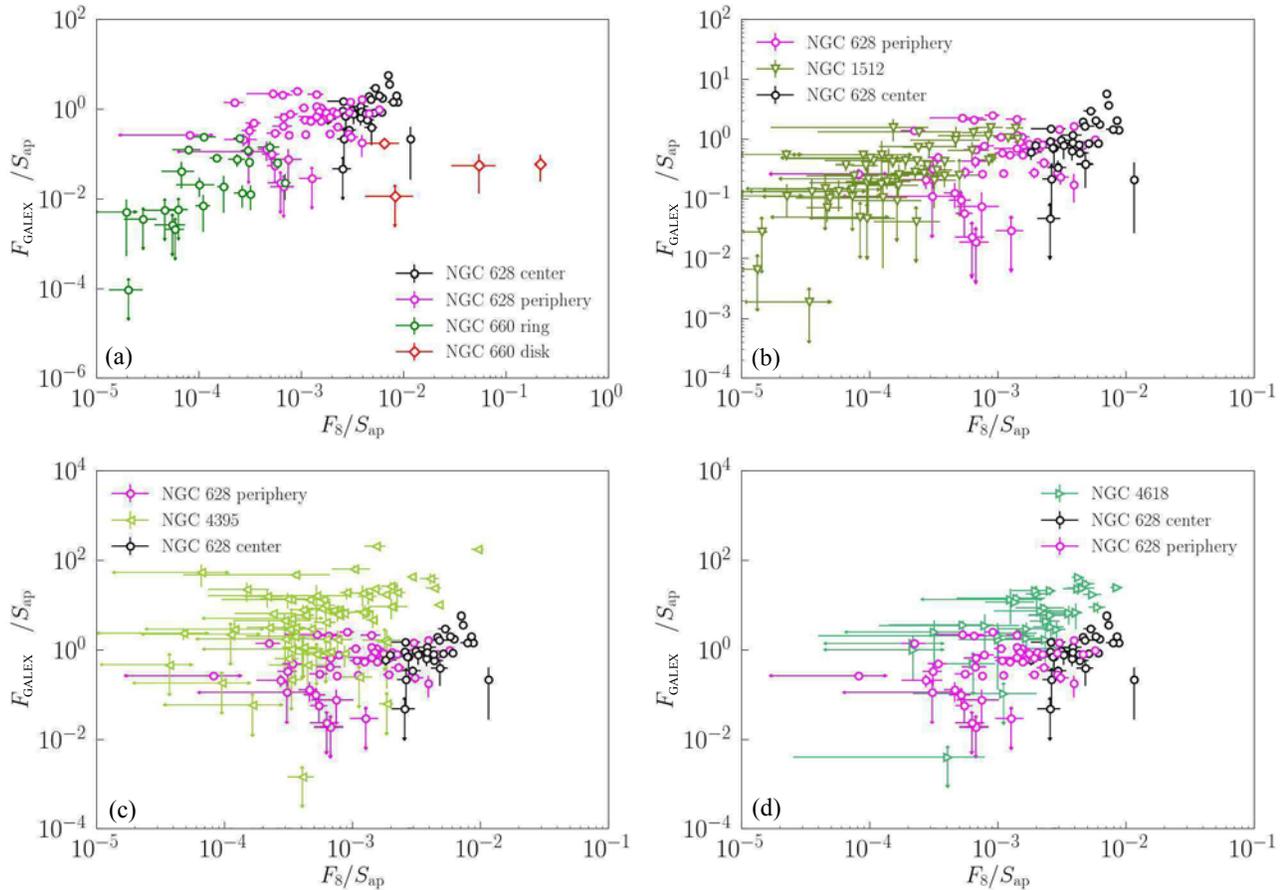
В работе Smirnova and Wiebe (2019) в качестве характеристики внутренних движений в ОЗО была введена величина разброса скоростей  $\Delta V$ , равная разнице скоростей крайних каналов в полном спектре, в которых сигнал превышает утроенное среднеквадратичное отклонение. Среднеквадратичное отклонение оценивалось по участку спектра, в котором нет сигнала от ОЗО. Из новых галактик эти данные доступны только для NGC 660. Также только для этой галактики имеются спектры в линии  $H\alpha$ . Для них описанная выше процедура оценки  $\Delta V$  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  $\Delta V$  оценивается как  $FWHM$  для вписанного профиля с вычитанием ширины инструментального профиля.

Для оценки вклада крупномасштабного поля скоростей мы предположили, что атомарный водород движется в диске и кольце так же, как и  $HII$ ,

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  $8-12 \text{ km s}^{-1}$ . В диске ее величина больше,  $30-60 \text{ km s}^{-1}$ , с максимальными значениями вблизи пересечений диска с кольцом. Во всех случаях оцененный вклад крупномасштабного поля скоростей оказывается существенно меньше величины  $\Delta V$  в той же апертуре, поэтому в дальнейшем анализе мы им пренебрегали. К сожалению, в отсутствие статистической интерпретации величины  $\Delta V$  неясна процедура вычитания из нее вклада крупномасштабного поля скоростей, что вносит в наши выводы некоторую неопределенность.

Значения  $\Delta V$  для  $H\alpha$  и  $HII$  для NGC 660 сравниваются на Рис. 10 и сопоставляются с соответствующими потоками на Рис. 11.

На Рис. 10 видно, что разбросы скоростей в ОЗО кольца NGC 660 в обеих линиях заключены в



**Рис. 7.** Соотношение поверхностных яркостей на длине волны 8 мкм и в УФ-диапазоне для ОЗО в галактиках, исследуемых в данной работе.

пределах от 100 до 200 км с<sup>-1</sup>, однако корреляция между ними отсутствует. Единственная область, в которой разброс скоростей в линии H $\alpha$  превышает 400 км с<sup>-1</sup>, 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 I имеет умеренное значение).

Соотношение между потоком и разбросом скоростей в спектре H $\alpha$  (Рис. 11а) 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 (Moiseev et al. 2015). А вот корреляция между разбросом скоростей в линиях H I и соответствующим потоком практически отсутствует (Рис. 11б).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Изначально мотивацией для этой работы послужило исследование галактики с полярным коль-

цом NGC 660, в ходе которого обнаружилось существенное различие свойств инфракрасного излучения в ОЗО диска и кольца этой галактики. Предположение о том, что это различие связано с разной природой звездообразования в двух подсистемах NGC 660, стало стимулом для данного исследования, в котором мы предполагали обнаружить подобные различия в других галактиках, в недавнем прошлом испытавших эпизод усиленного звездообразования в связи с каким-то внешним воздействием. Однако реальная картина оказалась сложнее.

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 «нормальной» 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

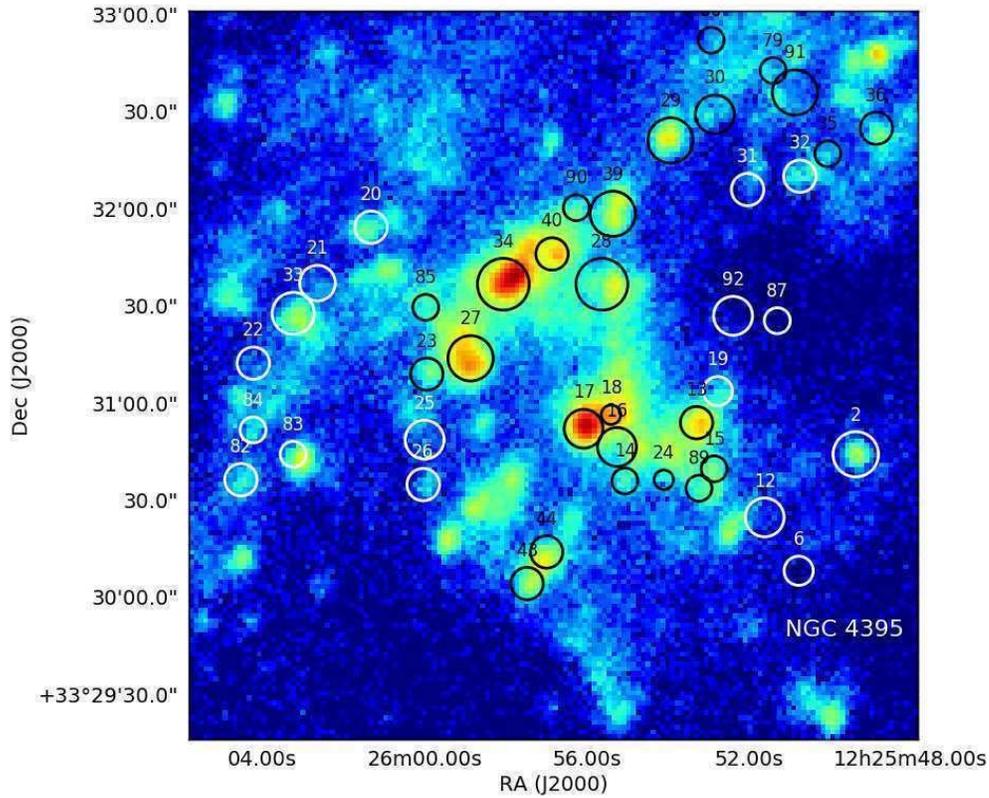


Рис. 8. Фрагмент изображения галактики NGC 4395 в УФ-диапазоне (GALEX *FUV*) с исследуемыми ОЗО.

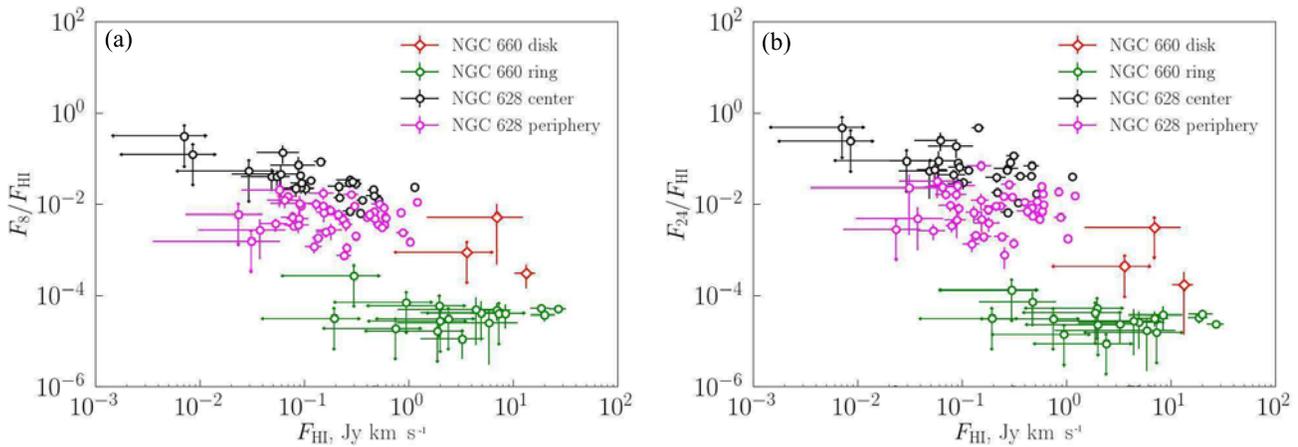


Рис. 9. Отношение потоков  $F_8/F_{\text{H I}}$  и  $F_{24}/F_{\text{H I}}$  для ОЗО в галактике NGC 660 и галактике сравнения как функция потока в линии нейтрального водорода.

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. Остановимся на них подробнее.

Галактика NGC 1512 представляет собой систему с двумя кольцами — внешним и внутри-

ядерным, — 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 Koribalski and López-Sánchez (2009) и Liu et al. (2010) соответственно. Koribalski and López-Sánchez (2009) показали, что атомарный водород простирается на рассто-

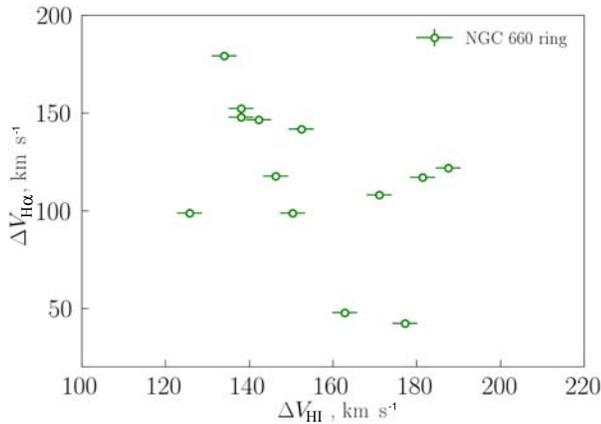


Рис. 10. Соотношение разбросов скоростей в линиях H $\alpha$  и H I.

яние, как минимум в четыре раза превышающее оптические размеры галактики ( $B_{25}$ ), и в значительной степени сосредоточен в двух спиральных рукавах (Arm 1 и Arm 2). Отдельные облака H I прослеживаются до расстояний порядка 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 López-Sánchez et al. (2015)). При этом Koribalski and López-Sánchez (2009) 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 длине волны 8 мкм мы не смогли выделить ни одной ОЗО во внешней области этой галактики. В работе Liu et al. (2010) 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 длине волны 8 мкм настолько низка, что излучение вообще не обнаруживается, хотя содержание H I там, как и в кольце NGC 660 (см. Рис. 9), 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 так же, как и кольцо NGC 660, не являются долгоживущими структурами, тогда как в асимметричных галактиках характерное время

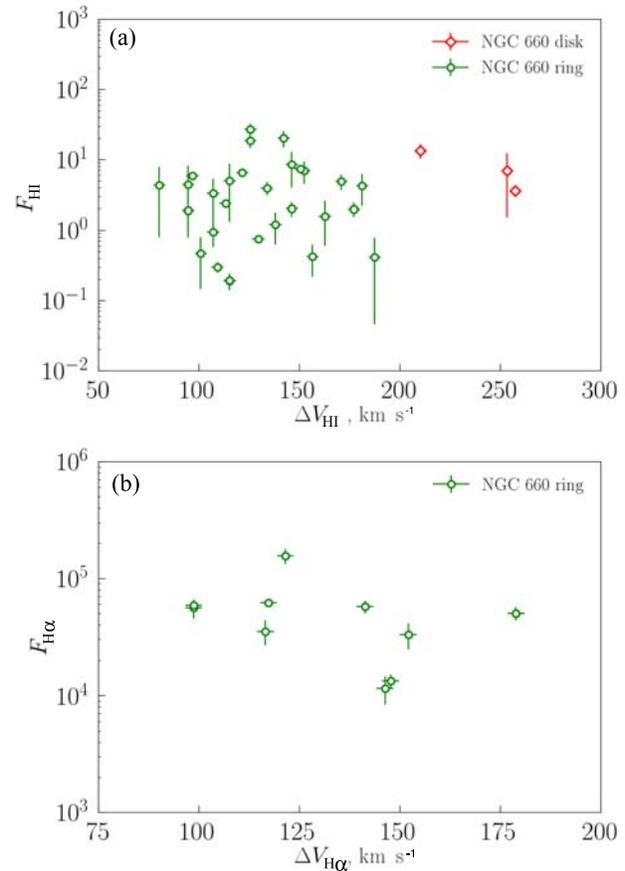


Рис. 11. Соотношение между разбросом скоростей и потоком излучения в ОЗО из галактики NGC 660: H I (a) и H $\alpha$  (b).

иницирования звездообразования может быть больше. Однако проблема возраста рассмотренных ОЗО требует отдельного исследования.

Общей чертой галактик NGC 4395 и NGC 4618 является их асимметричность. 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 (Zasov and Khoperskov 2002). Среди более распространенных объяснений значатся приливные взаимодействия с другими галактиками или асимметричный приток внешнего вещества (Jog and Combes 2009). 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.

Обе указанные выше причины асимметричности галактик могут вызвать усиление звездообразования, и мы действительно видим некоторые указания на это. Полная светимость NGC 4395 и NGC 4618 в среднем ИК-диапазоне указывает на то, что интегральный темп звездообразования в них на порядок или более уступает темпу звездообразования в галактиках NGC 628 и NGC 1512 (см. Таблицу 1), однако это отличие свидетельствует о меньших размерах NGC 4395 и NGC 4618: полная поверхностная яркость этих галактик на длине волны 24 мкм (по нашим оценкам) и в полосе *B* (по базе данных HyperLEDA) превышает аналогичные параметры галактик NGC 628 и NGC 1512. Иными словами, в двух асимметричных галактиках, рассматриваемых в данной статье, 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 (Jog and Combes 2009), в двух конкретных случаях (NGC 4395 и NGC 4618) мы видим заметные отличия и от взаимодействующих, и от «нормальных» 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 (Kaczmarek and Wilcots 2012). 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 Karataeva et al. (2004), авторы которой показали, что звездное население кольца лучше всего описывается изохронами с довольно низкой металличностью,  $Z = 0.008$ . Кроме того, в работе Alton et al. (2000) 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 ( $12 + \lg(O/H) \sim [8.1; 8.3]$ ). Благодаря наблюдениям в HI, представленным в обзоре<sup>3</sup> (Józsa 2010) ясно, 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 Pilyugin et al. (2004) дает для  $M_B(UGC 1195) = -17.67$  (согласно базе HyperLeda) величину  $12 + \lg(O/H) = 8.33$  в хорошем согласии с приведенной выше оценкой металличности полярного кольца NGC 660. При этом, как показывают в том числе и наши исследования (Smirnova et al. 2017a), отличия, связанные с металличностью, становятся существенными при значениях  $12 + \lg(O/H) < 8$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

<sup>3</sup><https://www.astron.nl/dailyimage/main.php?date=20100923>

1. 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.

2. В асимметричных галактиках NGC 4395 и NGC 4618 поверхностная яркость ОЗО в ИК-диапазоне не отличается от поверхностной яркости ОЗО в «нормальных» галактиках. Поверхностная яркость ОЗО в этих галактиках в УФ-диапазоне превышает аналогичную яркость ОЗО в галактиках сравнения. Однако физические размеры ОЗО в двух этих галактиках оказываются меньше размеров ОЗО и во взаимодействующих галактиках, и в галактике сравнения.

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  $HI$  от потока в ней не зависит.

Результаты проведенного исследования могут свидетельствовать о том, что параметры комплексов звездообразования различаются в галактиках с признаками недавнего взаимодействия, в галактиках с асимметричными дисками и в нормальных галактиках. Различия, наблюдаемые и в физических размерах, и в поверхностной яркости ОЗО, свидетельствуют о том, что протекание процесса звездообразования зависит от многих факторов, а не только от принадлежности галактики к тому или иному морфологическому типу.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента за замечания и комментарии, которые позволили глубже разобраться в представленных результатах, а также А. Алакоза и Д. Макарова за полезные обсуждения. Работа основана на использовании наблюдений Космического телескопа им. Спитцера, разработанного Лабораторией реактивного движения в Калифорнийском технологическом институте по контракту с NASA, Космической обсерватории им. Гершеля — инструментом, разработанным ESA при поддержке NASA, телескопа VLA, принадлежащего Национальной радиообсерватории США, являющейся объектом Национального научного фонда США и 6-м телескопа САО РАН, работающего при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской

Федерации (соглашение №05.619.21.0016, проект ID RFMEFI61919X0016). В работе использована база астрономических данных HYPERLEDA (<http://leda.univ-lyon1.fr>).

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-50063. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
2. P. B. Alton, D. P. Stockdale, S. M. Scarrott, and R. D. Wolstencroft, *Astron. and Astrophys.* **357**, 443 (2000).
3. G. Aniano, B. T. Draine, K. D. Gordon, and K. Sandstrom, *Proc. Astron. Soc. Pacific* **123**, 1218 (2011).
4. F. Bournaud and F. Combes, *Astron. and Astrophys.* **401**, 817 (2003).
5. D. S. Briggs, Ph.D. Thesis (The New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, 1995).
6. D. Calzetti, *Star Formation Rate Indicators* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2013).
7. B. G. Clark, *Astron. and Astrophys.* **89** (3), 377 (1980).
8. O. V. Egorov and A. V. Moiseev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486**, 4186 (2019).
9. M. Eskew, D. Zaritsky, and S. Meidt, *Astron. J.* **143** (6), 139 (2012).
10. A. M. Garcia, *VizieR Online Data Catalog* J/A+AS/100/47 (1993).
11. L. C. Ho, A. V. Filippenko, and W. L. Sargent, *Astrophys. J. Suppl.* **98**, 477 (1995).
12. J. A. Högbom, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **15**, 417 (1974).
13. C. J. Jog and F. Combes, *Physics Reports* **471** (2), 75 (2009).
14. I. G. Józsa, <https://www.astron.nl/dailyimage/main.php?date=20100923> (2010).
15. J. F. Kaczmarek and E. M. Wilcots, *Astron. J.* **144** (2), 67 (2012).
16. G. M. Karataeva, N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, et al., *Astron. and Astrophys.* **421**, 833 (2004).
17. R. C. Kennicutt, D. Calzetti, G. Aniano, et al., *Proc. Astron. Soc. Pacific* **123**, 1347 (2011).

18. M. S. Khramtsova, D. S. Wiebe, T. A. Lozinskaya, and O. V. Egorov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, 757 (2014).
19. B. S. Koribalski and Á. R. López-Sánchez, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400** (4), 1749 (2009).
20. S. J. Kruk, C. J. Lintott, B. D. Simmons, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **469**, 3363 (2017).
21. G. Liu, D. Calzetti, M. S. Yun, et al., *Astron. J.* **139** (3), 1190 (2010).
22. Á. R. López-Sánchez, T. Westmeier, C. Esteban, and B. S. Koribalski, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450** (4), 3381 (2015).
23. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412** (4), 2498 (2011).
24. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63** (2), 181 (2008).
25. A. V. Moiseev, K. I. Smirnova, A. A. Smirnova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418**, 244 (2011).
26. A. V. Moiseev, A. V. Tikhonov, and A. Klypin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449** (4), 3568 (2015).
27. J. Moustakas and R. C. Kennicutt, Jr., *Astrophys. J. Suppl.* **164** (1), 81 (2006).
28. J. Moustakas, R. C. Kennicutt, Jr., C. A. Tremonti, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **190**, 233 (2010).
29. S. C. Odewahn, *Astron. J.* **101**, 829 (1991).
30. Y. Ordenes-Briceño, I. Y. Georgiev, T. H. Puzia, et al., *Astron. and Astrophys.* **585**, A156 (2016).
31. S. A. Pardy, E. D'Onghia, E. Athanassoula, et al., *Astrophys. J.* **827** (2), 149 (2016).
32. L. S. Pilyugin and E. K. Grebel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457** (4), 3678 (2016).
33. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. Contini, *Astron. and Astrophys.* **425**, 849 (2004).
34. M. Ramella, M. J. Geller, A. Pisani, and L. N. da Costa, *Astron. J.* **123** (6), 2976 (2002).
35. V. P. Reshetnikov and A. V. Mosenkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483**, 1470 (2019).
36. J.-R. Roy, J. Belley, Y. Dutil, and P. Martin, *Astrophys. J.* **460**, 284 (1996).
37. R. J. Sault, P. J. Teuben, and M. C. H. Wright, *ASP Conf. Ser.*, **77**, 433 (1995).
38. K. I. Smirnova, M. S. Murga, D. S. Wiebe, and A. M. Sobolev, *Astronomy Reports* **61**, 646 (2017a).
39. K. I. Smirnova, S. Y. Parfenov, and D. S. Wiebe, *ASP Conf. Ser.* **510**, 102 (2017b).
40. K. I. Smirnova and D. S. Wiebe, *Astronomy Reports* **63** (6), 445 (2019).
41. K. I. Smirnova, D. S. Wiebe, and A. V. Moiseev, *Open Astronomy* **26**, 88 (2017c).
42. K. Sorai, N. Kuno, K. Muraoka, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **71**, S14 (2019).
43. R. B. Tully, H. M. Courtois, and J. G. Sorce, *Astron. J.* **152** (2), 50 (2016).
44. B. C. Whitmore, R. A. Lucas, D. B. McElroy, et al., *Astron. J.* **100**, 1489 (1990).
45. K. Yim and J. M. van der Hulst, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463** (2), 2092 (2016).
46. C. Yozin and K. Bekki, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439** (2), 1948 (2014).
47. A. V. Zasov and A. V. Khoperskov, *Astronomy Reports* **46** (3), 173 (2002).

## Study of Star-Forming Regions in the Peculiar Galaxies NGC 660, NGC 1512, NGC 4395, and NGC 4618

**K. I. Smirnova, D. Z. Vibe, A. V. Moiseev, and G. I. G. Józsa**

The star-forming regions (SFRs) in the peculiar galaxies NGC 660, NGC 1512, NGC 4395 and NGC 4618 are studied. The relationships between such characteristics of star-forming regions as UV, near- and far-IR fluxes, as well as in the H $\alpha$  and HI lines, surface brightness in these ranges, and the scatter of the radial velocities of ionized and neutral hydrogen are considered. It is shown that in all the galaxies considered, the IR fluxes from SFRs are less than in the normal galaxies, but for different reasons: in the galaxies with signs of recent interaction NGC 660 and NGC 1512, this is due to the low surface brightness of SFRs; in the lopsided galaxies NGC 4395 and NGC 4618, the low brightness of SFRs in the infrared range is due to their compact size. These differences indicate that the star formation process depends not only on the morphological type of a galaxy, but also on many other factors.

Keywords: *galaxies: star formation*