

УДК 524.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКАХ NGC 628, NGC 2976 И NGC 3351

© 2019 г. К. И. Смирнова<sup>1\*</sup>, Д. З. Вибе<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия<sup>2</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 16.11.2018 г.; после доработки 27.01.2019 г.; принята к публикации 29.01.2019 г.

В работе анализируются параметры излучения межзвездного вещества в комплексах звездообразования в высокометаллических галактиках NGC 628, NGC 2976, NGC 3351, принадлежащих к разным морфологическим типам. Рассмотрена связь излучения в линии H $\alpha$  с излучением в линиях CO и HI, а также с излучением пыли в ИК-диапазоне. Показано, что потоки и поверхностные яркости в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах хорошо коррелируют с эмиссией в H $\alpha$ . С ней также коррелирует и излучение в линии HI, тогда как корреляция излучения в линиях CO и H $\alpha$  существенно более слабая. Отношение потоков на 8 и 24 мкм падает с увеличением потока в линии H $\alpha$ , что может быть обусловлено как изменениями свойств пылевого ансамбля (снижением массовой доли полициклических ароматических углеводородов), так и изменением условий возбуждения. Анализ кинематики линий CO показал, что поток в линии CO растет с увеличением разброса скоростей  $\Delta V$  при значениях  $\Delta V \lesssim 70$  км/с. Приводятся предварительные свидетельства в пользу существования комплексов звездообразования с большими значениями  $\Delta V$ , в которых рост разброса скоростей сопровождается уменьшением светимости комплекса в линии CO.

DOI: 10.1134/S0004629919060045

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Звездообразование — один из ключевых процессов во Вселенной, обеспечивающий постепенный переход газа в компактные остатки с (условно) неограниченным временем жизни (вырожденные карлики, нейтронные звезды, черные дыры, планеты). Его исследования всегда привлекали к себе значительный интерес, но в настоящее время возможности для изучения звездообразования (ЗО) существенно расширились благодаря наблюдениям процесса рождения звезд в галактиках, параметры которых существенно отличаются от параметров Млечного Пути. Изучение внегалактических областей и комплексов ЗО позволяет, во-первых, выявлять различные индикаторы темпа ЗО, во-вторых, устанавливать наличие связей между темпом ЗО и различными параметрами межзвездной среды (МЗС) в галактиках как в глобальном масштабе (для галактики в целом), так и на меньших пространственных масштабах.

На практике наиболее прямым способом определения темпа ЗО является подсчет количества звезд и (или) молодых звездных объектов в различных возрастных интервалах [1–3]. Однако этот

метод требователен к качеству и объему наблюдательных данных, и потому его применение ограничено нашей Галактикой или ближайшими к ней системами. В остальных случаях приходится полагаться на косвенные индикаторы темпа ЗО. Представление о *среднем* темпе ЗО за время порядка миллиарда лет можно получить из многоцветной фотометрии, однако для оценки текущего (“мгновенного”) темпа ЗО необходимы более детальные данные.

Индикаторы ЗО обычно прямо или косвенно связаны с ультрафиолетовым излучением массивных звезд с наименьшим временем жизни [4]. Это могут быть, например, наблюдения ультрафиолетового (УФ) континуума или наблюдения линии H $\alpha$  (в предположении, что УФ-излучение массивных звезд перерабатывается в эмиссию H $\alpha$  в зонах и комплексах ионизованного водорода). Однако в этом случае мы сталкиваемся с проблемой пыли, которая поглощает и часть УФ-излучения, и часть излучения H $\alpha$ , что может сделать выводы о ЗО менее надежными, особенно для галактик на больших красных смещениях. Альтернативой могут быть наблюдения инфракрасного (ИК) и субмиллиметрового излучения пыли, нагреваемой коротковолновым излучением молодых звезд, однако в этом случае возникает противоположная

\*E-mail: Arashu@rambler.ru

\*\*E-mail: dwiebe@inasan.ru

проблема: пыль поглощается и переизлучается не все излучение молодых звезд, причем конкретное соотношение между темпом ЗО и светимостью в ИК-диапазоне может зависеть от металличности галактики, особенностей распределения пыли и пр. Кроме того, может оказаться существенным вклад в нагрев пыли проэволюционировавших звездных населений. При использовании в качестве индикатора ЗО эмиссионных полос полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) возникают дополнительные сложности, связанные с тем, что в областях ЗО содержание ПАУ может зависеть от времени [5, 6].

Для обеспечения хорошей точности желательно использовать несколько показателей, компенсирующих недостатки друг друга. Пример сравнительного анализа различных индикаторов ЗО приводится в работе [7]. Ее авторы сопоставили значения темпа ЗО в галактике NGC 5253, оцененного по радиорекомбинационной линии  $H\alpha_{30}$  (можно считать, что эти оценки в наименьшей степени подвержены различным помехам), со значениями, выведенными из других традиционных индикаторов. Выяснилось, что различные оценки темпа ЗО существенно расходятся друг с другом. Авторы высказали предположение, что это связано с низкой металличностью галактики и с тем, что в ней по каким-то причинам пыль нагрета до более высокой температуры, чем в сравнимых системах “обычной” металличности.

Другим недавним примером сопоставления оценок темпа ЗО, полученных по различным индикаторам, может служить работа [8]. Ее авторы использовали для определения плотности темпа ЗО два индикатора — линию  $H\alpha$  и излучение в дальнем УФ диапазоне, — причем в их выборку попало значительное количество карликовых галактик. Оказалось, что отношение исследуемых потоков в различных галактиках выборки обнаруживает как существенный разброс, так и систематические вариации. Это означает, что для конкретной галактики оценки темпа ЗО по данным наблюдений в линии  $H\alpha$  и УФ-диапазоне могут существенно различаться, хотя это различие практически исчезает при вычислении глобальной плотности темпа ЗО в местной Вселенной.

В целом очевидно, что использование одного индикатора ЗО может привести к существенно неверным оценкам скорости этого процесса [9]. С другой стороны, различия в темпах ЗО, оцененных с использованием различных индикаторов, могут быть указанием на важные различия в параметрах этого процесса в различных условиях, например, на различные свойства начальной функции масс в области массивных звезд (именно они в большинстве случаев ответственны за действие того или иного индикатора). Поэтому необходимы сравнительные

исследования большего количества индикаторов темпа ЗО и в целом физического состояния МЗС, которые охватывали бы системы в широком диапазоне металличностей.

В нашей предыдущей работе [10] мы рассмотрели комплексы ЗО (КЗО) в 11 галактиках, включенных в ряд обзоров, в том числе THINGS [11] (линия  $H\text{I}$  на длине волны 21 см), KINGFISH [12] (наблюдения в дальнем инфракрасном диапазоне на 70, 100 и 160 мкм на космическом телескопе “Herschel”), SINGS [13] (наблюдения в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне на длинах волн 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 и 24 мкм с использованием космического телескопа “Spitzer”) и HERACLES [14] (наблюдения линии CO (2–1) с использованием 30-м телескопа IRAM). Нами была исследована связь между различными компонентами МЗС в индивидуальных КЗО. Инфракрасные данные использовались для оценки общей массы пыли ( $M$ ), массовой доли полициклических ароматических углеводородов ( $q_{\text{PAH}}$ ) и средней интенсивности поля излучения  $U_{\text{min}}$  с использованием модели [15]. В данной работе мы отдельно исследуем три галактики из выборки [10], для которых доступны однородные архивные данные наблюдений в линии  $H\alpha$ . Именно этот оптический диапазон будет подробно рассмотрен в этой статье и сопоставлен с данными, полученными в работе [10].

Немаловажную роль в оценке и понимании распределения того или иного компонента МЗС, а также стабильности галактических газовых дисков играет дисперсия скоростей газа. Для ее измерения используются, как правило, результаты наблюдений в линиях атомарного водорода 21 см и молекулы CO, причем из-за большей доступности данных в линии 21 см исследования ее дисперсии более распространены. На сегодняшний день есть несколько работ, в которых сравниваются дисперсии скоростей в двух этих линиях. Например, в работе [16] сопоставляются дисперсии скоростей атомарного и молекулярного газа в 12 спиральных галактиках. Авторы приходят к выводу, что эти дисперсии сравнимы между собой на масштабе порядка нескольких кпк. Этот вывод противоречит картине, в которой толщина молекулярного диска существенно (в разы) уступает толщине атомарного диска, и может объясняться наличием толстого диска молекулярного газа, сравнимого с диском нейтрального водорода. Толстый молекулярный диск в галактике M51 был обнаружен в работе [17] по данным наблюдений линии CO(1–0), позволившим впервые построить широкомасштабное распределение молекулярного газа с разрешением 40 пк.

Подобный вывод о наличии в галактиках молекулярного газа с большой дисперсией скоростей

был сделан и в работе [18]. В ней показано, что дисперсия молекулярного газа примерно в полтора раза уступает дисперсии атомарного газа в регионах высокой яркости эмиссии CO, однако ширина линий CO повышается при переходе к молекулярному газу пониженной яркости. Авторы пришли к заключению, что дисковые галактики содержат не только тонкий диск с высокой плотностью CO и относительно низкими скоростями, но и более слабый высокоскоростной диффузный компонент молекулярного диска.

В данной работе мы дополним анализ инфракрасного излучения внегалактических КЗО и их излучения в линии  $H\alpha$  рассмотрением дисперсии скоростей в линиях CO. В отличие от работы [18] мы рассмотрим не только комплексы с ярким излучением CO, но и другие КЗО, которые являются заметными источниками инфракрасного излучения и (или) излучения  $H\alpha$ , но могут не являться яркими источниками линии оксида углерода.

Выбранные галактики относятся к разным морфологическим типам. Галактика NGC 3351 является кольцевой галактикой с баром; разными авторами отмечается молодость КЗО в ней (например, [19, 20]). Галактика NGC 2976 является карликовой галактикой, в которой присутствуют как равномерно распределенные старые населения, так и молодые КЗО в области диска галактики радиусом около 3 кпк [21]. Для этой галактики характерна тенденция увеличения возраста звезд с галактоцентрическим расстоянием. NGC 628 — классический представитель спиральных галактик. Она развернута почти плашмя, и это позволило нам выделить в ней наибольшее количество комплексов. Эта галактика интересна тем, что в ее длинном рукаве наблюдается однородное распределение звездных комплексов, а в коротком — нет [22]. Эта особенность еще не имеет единственного объяснения, но она является “изюминкой”, казалось бы, обычной спиральной галактики. Звездное население NGC 628, в основном, старое, однако есть небольшие “островки” не так давно образованных КЗО. В статье [23] на рис. 7 представлены двумерные карты распределения звезд по возрастам, построенные по данным об их массах и светимостях.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Мы использовали следующие архивные наблюдения. Данные в ближнем и среднем ИК диапазонах (длины волн 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 и 24 мкм) взяты из обзора SINGS<sup>1</sup> [13], выполненного на космическом телескопе “Spitzer”. Данные в дальнем ИК-диапазоне (70, 100 и 160 мкм) взяты из обзора

KINGFISH<sup>2</sup> [12], проведенного на космическом телескопе “Herschel”. Результаты наблюдений в линии 21 см взяты из обзора THINGS<sup>3</sup> [11]. Наблюдения в линии CO (2–1) (индикатор молекулярного водорода) взяты из результатов обзора HERACLES<sup>4</sup> [14]. Изображения галактик в линии  $H\alpha$  были получены на 2.3-метровом телескопе BOK в обсерватории Steward [24]. Данные наблюдений на телескопе GALEX [25] получены из архива MAST<sup>5</sup>.

Поскольку мы используем данные, полученные на разных телескопах с различным угловым разрешением, в работе [10] мы приводили все имеющиеся данные к разрешению дальнего ИК (160 мкм), используя процедуру свертки и ядра, представленные в [26]. Поскольку в этой работе мы собираемся пользоваться некоторыми результатами работы [10], наблюдательные данные в линии  $H\alpha$  мы также привели к разрешению, соответствующему наблюдениям на 160 мкм (12”). Регионы, для которых мы проводили апертурную фотометрию, были выбраны в работе [10] так, чтобы в регионе наблюдалось бы излучение хотя бы в одном из рассмотренных там диапазонов. Получилось следующее распределение комплексов по галактикам: NGC628 — 65 объектов, NGC 2976 — 7 объектов, NGC3351 — 23 объекта. Используемые апертуры для каждой галактики показаны на рис. 1. Из результатов наблюдений на 8 и 24 мкм вычитался звездный фон. Дальнейшие результаты, как и в работе [10], приводятся для скорректированных потоков на 8 и 24 мкм. Для вычисления площадей апертур использовались следующие оценки расстояний [27]: 9.77 Мпк для галактики NGC 628, 3.63 Мпк для галактики NGC 2976 и 10.57 Мпк для галактики NGC 3351.

Кубы данных наблюдений в линии CO были взяты из обзора HERACLES. Для каждого комплекса строился спектр, и для его участков, свободных от линий CO, вычислялось среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ . За величину разброса скоростей  $\Delta V$  в данном КЗО принималась разница скоростей между крайними точками спектра, в которых интенсивность линии превышает  $3\sigma$ . Если в спектре КЗО не было интенсивностей выше  $3\sigma$ , объект исключался из рассмотрения. Также отбрасывались КЗО, у которых величина  $\Delta V$  превышает половину глобального разброса скоростей в данной галактике. Этим наша работа отличается от исследования [18], в котором дисперсия скоростей определялась путем

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

<sup>3</sup> <http://www.mpia.de/THINGS/Data.html>

<sup>4</sup> [http://www.cv.nrao.edu/leroy/heracles\\_data/](http://www.cv.nrao.edu/leroy/heracles_data/)

<sup>5</sup> <http://archive.stsci.edu>

<sup>1</sup> <http://sings.stsci.edu>

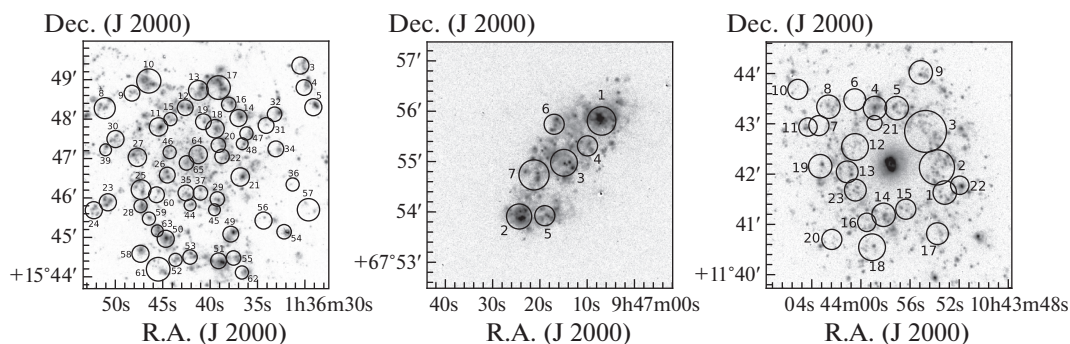


Рис. 1. Изображения галактик NGC 628, NGC 2976 и NGC 3351 в линии  $H\alpha$  с наложенными апертурами.

вписывания гауссиан в спектры. Мы рассматриваем не только комплексы с выраженной одно- или двухпиковой эмиссией CO, но и комплексы слабой эмиссии, в которых выделить один или два пика не всегда бывает возможно, поэтому нам приходится прибегать к описанной выше упрощенной процедуре. Очевидно, что с математической точки зрения величина  $\Delta V$  не является дисперсией, поэтому далее мы будем называть ее разбросом скоростей.

Наблюдаемые параметры исследуемых КЗО, определенные в данной работе, суммируются в табл. 1.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ АПЕРТУРНОЙ ФОТОМЕТРИИ

Одна из основных задач нашей работы состоит в том, чтобы проанализировать взаимосвязи (или их отсутствие) между доступными данными наблюдений в линии  $H\alpha$  и различными параметрами излучения КЗО в трех галактиках, включая те, что могут использоваться в качестве индикаторов темпа ЗО. Поэтому прежде всего мы рассмотрим корреляции с использованием этих данных. На приведенных далее графиках комплексы из разных галактик обозначены цветами: коралловый — NGC 628, синий — NGC 2976, зеленый — NGC 3351.

#### 3.1. Эмиссия КЗО в линии $H\alpha$

На верхних панелях рис. 2 показано соотношение потоков в линии  $H\alpha$  и в фильтрах NUV и FUV космического телескопа GALEX. Здесь и далее поток в линии  $H\alpha$  дан в произвольных единицах. Очевидно, что УФ-излучение и излучение  $H\alpha$  хорошо согласуются между собой. Корреляция наблюдается также между потоком в линии  $H\alpha$  и излучением в диапазонах, наблюдавшихся при помощи телескопа “Spitzer”, — 8 мкм и 24 мкм (рис. 2), средние панели). Излучение в этих полосах предположительно связано с частицами полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и пылинками, поглощающими фотоны УФ-диапазона

в окрестностях зон ионизованного водорода. Поэтому неудивительно, что излучение  $H\alpha$  хорошо коррелирует не только с УФ-излучением, но и с излучением в среднем ИК-диапазоне. Отметим, что динамический диапазон, охватываемый доступными данными, достаточно широк, около трех порядков во всех рассмотренных фотометрических полосах. Потоки в КЗО галактики NGC 3351, как правило, на порядок уступают средним значениям соответствующих потоков в двух других галактиках.

На диаграммах  $F_8 - F_{H\alpha}$  и  $F_{24} - F_{H\alpha}$  из общего тренда выпадают комплексы 20 и 21 в галактике NGC 3351 с наименьшими значениями потоков  $H\alpha$ . Их особое положение особенно хорошо заметно на нижних панелях рис. 2, где вместо потоков соотносятся поверхностные яркости, то есть потоки, разделенные на площадь апертуры в кв. кпк. Поверхностная яркость двух этих комплексов на 24 мкм заметно превышает ожидаемое значение для наблюдаемой в них незначительной эмиссии  $H\alpha$ . При этом их пространственное положение в галактике не является каким-либо образом выделенным (см. рис. 1).

Данные, показанные на рис. 2, свидетельствуют лишь о том, что потоки излучения КЗО в различных диапазонах коррелируют между собой. Более информативным может оказаться сопоставление отношений потоков. На рис. 3 показано, как отношение инфракрасных потоков  $F_8/F_{24}$  соотносится с потоком в линии  $H\alpha$  (слева сверху) и с поверхностной яркостью в этой линии (справа сверху). Как было показано в работе [28], отношение потоков на длинах волн 8 и 24 мкм может использоваться в качестве меры относительного содержания ПАУ. На рис. 3 слева мы видим антикорреляцию отношения  $F_8/F_{24}$  и потока в линии  $H\alpha$ . Это вполне ожидаемо, если предположить, что большая интенсивность УФ-излучения способствует более эффективному разрушению ПАУ. На правой панели рис. 3 показана подобная же антикорреляция  $F_8/F_{24}$  и поверхностной яркости линии  $H\alpha$ .

Таблица 1. Параметры МЗС галактик: NGC628, NGC2976, NGC3351

$n$	$\alpha, \text{h} : \text{m} : \text{s}$	$\delta, ^\circ : ' : ''$	$F_{H\alpha} \pm \Delta F_{H\alpha},$ $\times 10^3, \text{ произв. ед.}$	$\Delta V, \text{ km/s}$	$FUV \pm \Delta FUV, \text{ Jy}$	$NUV \pm \Delta NUV, \text{ Jy}$
NGC 628						
1	1:36:37.090	+15:50:26.34		16	$0.90 \pm 0.07$	$2.74 \pm 0.24$
2	1:36:35.856	+15:50:06.39		11	$1.44 \pm 0.07$	$4.86 \pm 0.22$
3	1:36:30.524	+15:49:21.48	$187 \pm 23.3701$	290	$1.26 \pm 0.07$	$4.36 \pm 0.14$
4	1:36:30.129	+15:48:47.99	$212 \pm 22.4715$	24	$0.86 \pm 0.06$	$2.70 \pm 0.20$
5	1:36:29.143	+15:48:18.06	$565 \pm 3.5541$	25	$0.93 \pm 0.02$	$3.30 \pm 0.09$
6	1:36:41.632	+15:49:59.98		176	$1.36 \pm 0.05$	$4.21 \pm 0.17$
7	1:36:53.233	+15:48:00.97		248	$0.94 \pm 0.03$	$3.25 \pm 0.10$
8	1:36:51.160	+15:48:16.65	$229 \pm 33.7759$	32	$0.49 \pm 0.10$	$1.40 \pm 0.34$
9	1:36:48.297	+15:48:39.46	$93 \pm 3.80732$	27	$0.24 \pm 0.06$	$0.69 \pm 0.17$
10	1:36:46.520	+15:48:57.99	$903 \pm 31.9822$	27	$2.22 \pm 0.22$	$7.83 \pm 0.63$
11	1:36:45.483	+15:47:48.16	$938 \pm 12.1357$	52	$1.96 \pm 0.07$	$7.01 \pm 0.26$
12	1:36:42.669	+15:48:17.38	$593 \pm 28.1535$	26	$1.77 \pm 0.14$	$6.19 \pm 0.46$
13	1:36:41.287	+15:48:43.74	$724 \pm 49.2591$	47	$3.21 \pm 0.18$	$11.25 \pm 0.66$
14	1:36:37.041	+15:48:01.70	$617 \pm 38.3297$	41	$1.70 \pm 0.23$	$5.62 \pm 0.90$
15	1:36:44.224	+15:47:59.92	$67 \pm 10.7034$	26	$0.00 \pm 0.08$	$0.00 \pm 0.32$
16	1:36:38.078	+15:48:22.36	$284 \pm 28.2597$	33	$0.71 \pm 0.12$	$2.60 \pm 0.42$
17	1:36:39.164	+15:48:48.01	$1016 \pm 54.5668$	52	$0.48 \pm 0.42$	$3.04 \pm 1.50$
18	1:36:39.510	+15:47:45.31	$354 \pm 69.9486$	28	$1.58 \pm 0.13$	$6.60 \pm 0.50$
19	1:36:40.744	+15:47:56.00	$98 \pm 10.7071$	28	$0.34 \pm 0.10$	$1.45 \pm 0.45$
20	1:36:39.164	+15:47:20.37	$306 \pm 21.6343$	31	$1.27 \pm 0.18$	$5.37 \pm 0.81$
21	1:36:36.845	+15:46:31.92	$448 \pm 29.824$	34	$1.16 \pm 0.16$	$4.45 \pm 0.70$
22	1:36:38.769	+15:47:03.27	$214 \pm 29.9166$	62	$0.77 \pm 0.14$	$3.23 \pm 0.50$
23	1:36:50.813	+15:45:53.44	$428 \pm 9.01318$	21	$1.95 \pm 0.09$	$6.70 \pm 0.24$
24	1:36:52.293	+15:45:41.32	$169 \pm 5.24907$	70	$0.20 \pm 0.10$	$0.48 \pm 0.32$
25	1:36:47.308	+15:46:12.68	$229 \pm 89.8089$	30	$0.61 \pm 0.36$	$2.71 \pm 1.13$
26	1:36:44.544	+15:46:34.78	$272 \pm 21.4885$	34	$0.64 \pm 0.20$	$3.41 \pm 0.86$
27	1:36:47.704	+15:47:01.85	$375 \pm 48.2966$	37	$2.64 \pm 0.19$	$9.04 \pm 0.80$
28	1:36:47.358	+15:45:47.75	$368 \pm 29.9521$	30	$2.07 \pm 0.11$	$7.83 \pm 0.50$
29	1:36:39.263	+15:45:58.44	$89 \pm 37.8401$	26	$0.81 \pm 0.18$	$2.91 \pm 0.80$
30	1:36:50.024	+15:47:29.63	$156 \pm 22.769$	23	$0.48 \pm 0.09$	$1.68 \pm 0.35$
31	1:36:34.129	+15:47:50.29	$16 \pm 5.81848$	19	$0.03 \pm 0.18$	$0.24 \pm 0.63$
32	1:36:33.240	+15:48:07.39	$271 \pm 28.5313$	16	$1.80 \pm 0.15$	$5.60 \pm 0.54$
33	1:36:27.959	+15:46:55.41			$0.59 \pm 0.06$	$1.68 \pm 0.25$
34	1:36:33.093	+15:47:14.67	$92 \pm 7.69848$	16	$0.54 \pm 0.05$	$1.81 \pm 0.18$
35	1:36:42.570	+15:46:07.70	$128 \pm 10.0479$	31	$0.48 \pm 0.16$	$1.92 \pm 0.63$
36	1:36:31.316	+15:46:20.51	$7 \pm 3.64619$		$0.01 \pm 0.03$	$0.00 \pm 0.10$

Таблица 1. Продолжение

$n$	$\alpha, \text{h} : \text{m} : \text{s}$	$\delta, ^\circ : ' : ''$	$F_{H\alpha} \pm \Delta F_{H\alpha},$ $\times 10^3, \text{ произв. ед.}$	$\Delta V, \text{ km/s}$	$FUV \pm \Delta FUV, \text{ Jy}$	$NUV \pm \Delta NUV, \text{ Jy}$
37	1:36:41.040	+15:46:07.69	$72 \pm 6.41732$	29	$0.00 \pm 0.12$	$0.00 \pm 0.44$
38	1:36:53.183	+15:47:04.68		25	$0.33 \pm 0.07$	$1.23 \pm 0.27$
39	1:36:51.061	+15:47:13.24	$151 \pm 9.22133$	23	$0.34 \pm 0.05$	$1.24 \pm 0.16$
40	1:36:55.749	+15:46:18.36		11	$0.97 \pm 0.16$	$2.85 \pm 0.50$
41	1:36:54.120	+15:46:07.68		24	$0.61 \pm 0.03$	$1.94 \pm 0.08$
42	1:36:59.698	+15:46:16.92			$2.87 \pm 0.04$	$8.89 \pm 0.21$
43	1:36:57.823	+15:46:59.68		14	$5.67 \pm 0.13$	$18.81 \pm 0.39$
44	1:36:42.126	+15:45:49.18	$104 \pm 5.56547$	20	$0.34 \pm 0.09$	$1.41 \pm 0.34$
45	1:36:39.560	+15:45:42.05	$216 \pm 12.9907$	21	$0.40 \pm 0.18$	$1.58 \pm 0.76$
46	1:36:44.298	+15:47:09.69	$112 \pm 15.7076$	28	$0.55 \pm 0.12$	$2.36 \pm 0.49$
47	1:36:36.203	+15:47:38.18	$107 \pm 24.5269$	39	$0.54 \pm 0.22$	$1.97 \pm 0.77$
48	1:36:36.647	+15:47:22.51	$123 \pm 7.79262$	27	$0.49 \pm 0.12$	$1.53 \pm 0.47$
49	1:36:37.832	+15:45:05.00	$743 \pm 14.4736$	21	$2.03 \pm 0.21$	$7.39 \pm 0.84$
50	1:36:44.693	+15:44:57.88	$900 \pm 37.7778$	24	$4.36 \pm 0.12$	$15.85 \pm 0.51$
51	1:36:39.115	+15:44:24.39	$1310 \pm 34.1412$	39	$5.77 \pm 0.37$	$19.48 \pm 1.53$
52	1:36:43.656	+15:44:25.81	$134 \pm 7.23015$	12	$0.49 \pm 0.10$	$1.43 \pm 0.31$
53	1:36:42.126	+15:44:30.09	$194 \pm 13.0194$	22	$0.04 \pm 0.13$	$0.05 \pm 0.43$
54	1:36:32.206	+15:45:08.55	$1966 \pm 4.65563$		$0.09 \pm 0.04$	$0.67 \pm 0.13$
55	1:36:37.536	+15:44:28.66	$164 \pm 31.4937$	18	$0.69 \pm 0.16$	$2.23 \pm 0.52$
56	1:36:34.377	+15:45:25.66	$14 \pm 9.68352$		$0.11 \pm 0.05$	$0.45 \pm 0.19$
57	1:36:29.639	+15:45:42.03	$46 \pm 3.24483$	12	$0.53 \pm 0.04$	$1.78 \pm 0.15$
58	1:36:47.357	+15:44:35.07	$240 \pm 15.8578$		$1.28 \pm 0.09$	$4.22 \pm 0.26$
59	1:36:46.469	+15:45:28.51	$109 \pm 3.71401$	24	$0.15 \pm 0.16$	$0.69 \pm 0.54$
60	1:36:45.680	+15:46:04.85	$57 \pm 3.87639$	27	$0.00 \pm 0.15$	$0.00 \pm 0.55$
61	1:36:45.482	+15:44:11.57	$185 \pm 7.35399$	123	$0.62 \pm 0.09$	$2.30 \pm 0.33$
62	1:36:36.648	+15:44:06.58	$139 \pm 18.1227$		$1.58 \pm 0.11$	$5.52 \pm 0.41$
63	1:36:45.582	+15:45:09.98	$280 \pm 20.166$	20	$0.94 \pm 0.15$	$3.61 \pm 0.49$
64	1:36:41.287	+15:47:06.13	$244 \pm 22.0885$	43	$0.79 \pm 0.13$	$3.93 \pm 0.82$
65	1:36:42.521	+15:46:53.30	$151 \pm 36.3368$	40	$0.68 \pm 0.10$	$5.92 \pm 1.30$
NGC 2976						
1	9:47:07.445	+67:55:51.86	$1695 \pm 60.21$	63	$3.88 \pm 0.22$	$17.05 \pm 0.83$
2	9:47:24.622	+67:53:56.41	$1082 \pm 27.73$	38	$2.45 \pm 0.40$	$12.83 \pm 0.78$
3	9:47:15.281	+67:55:01.27	$289 \pm 25.78$	58	$1.90 \pm 0.54$	$8.65 \pm 1.70$
4	9:47:10.354	+67:55:21.94	$60 \pm 9.78$	30	$0.24 \pm 0.24$	$0.00 \pm 0.80$
5	9:47:19.193	+67:53:57.85	$135 \pm 23.13$	33	$1.65 \pm 0.68$	$5.53 \pm 1.90$
6	9:47:17.484	+67:55:47.01	$164 \pm 5.77$	37	$0.43 \pm 0.18$	$3.46 \pm 0.59$
7	9:47:21.598	+67:54:46.30	$137 \pm 48.28$	56	$1.67 \pm 0.43$	$6.00 \pm 1.58$

Таблица 1. Окончание

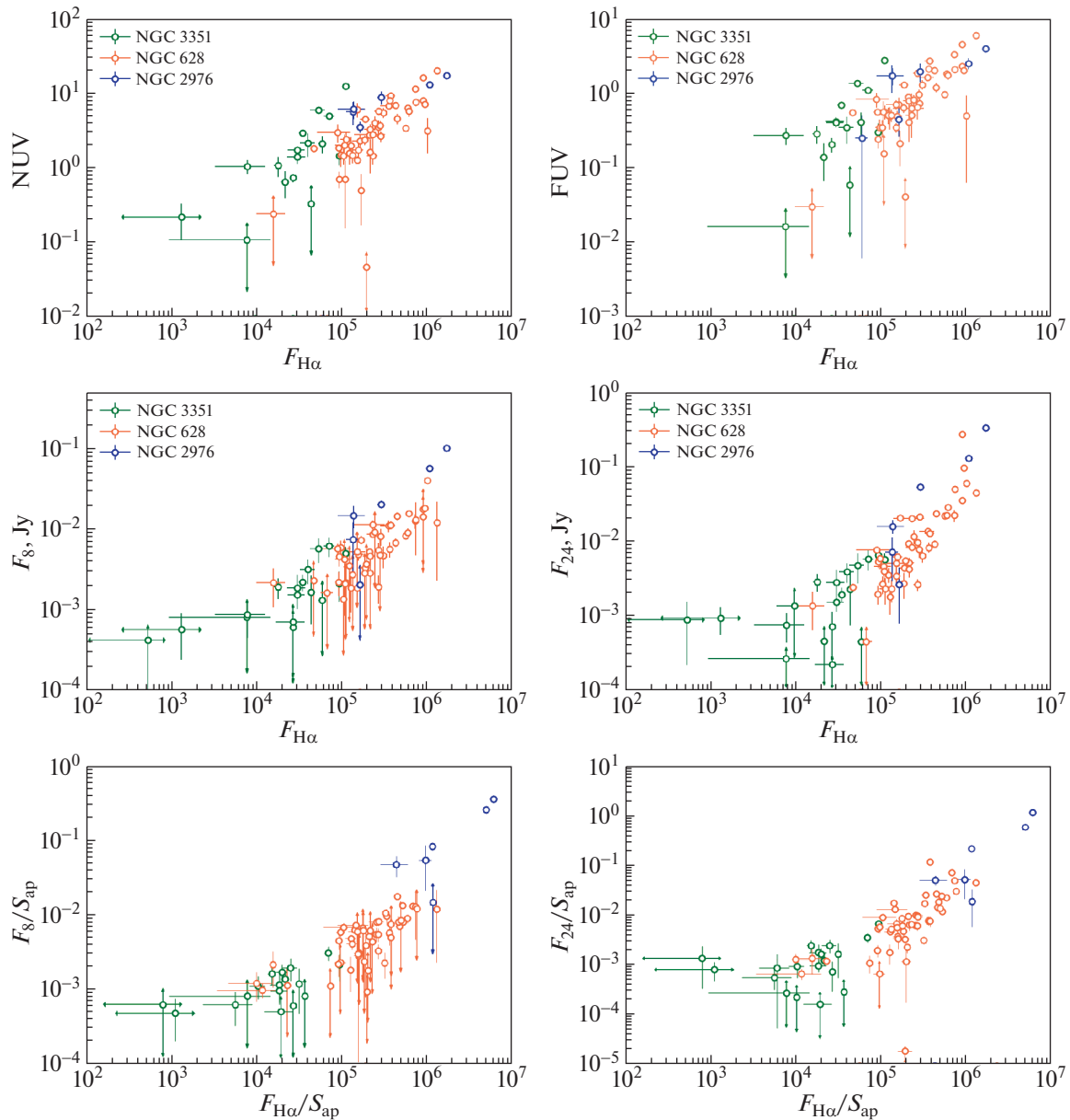
$n$	$\alpha, \text{h} : \text{m} : \text{s}$	$\delta, ^\circ : ' : ''$	$F_{H\alpha} \pm \Delta F_{H\alpha},$ $\times 10^3, \text{ произв. ед.}$	$\Delta V, \text{ km/s}$	$FUV \pm \Delta FUV, \text{ Jy}$	$NUV \pm \Delta NUV, \text{ Jy}$
NGC 3351						
1	10:43:53.263	+11:41:40.69	$30 \pm 7.07$	50	$0.40 \pm 0.06$	$1.36 \pm 0.25$
2	10:43:53.926	+11:42:10.62	$71 \pm 9.83$	74	$1.07 \pm 0.09$	$4.88 \pm 0.39$
3	10:43:54.888	+11:42:53.37	$53 \pm 10.61$	58	$1.33 \pm 0.13$	$5.80 \pm 0.50$
4	10:43:59.033	+11:43:20.52	$111 \pm 8.38$	26	$2.69 \pm 0.08$	$12.12 \pm 0.40$
5	10:43:57.262	+11:43:20.70	$40 \pm 7.94$	38	$0.34 \pm 0.13$	$2.09 \pm 0.72$
6	10:44:00.686	+11:43:30.20		32	$0.00 \pm 0.06$	$0.00 \pm 0.36$
7	10:44:03.581	+11:42:58.70		16	$0.00 \pm 0.05$	$0.00 \pm 0.17$
8	10:44:02.822	+11:43:21.35	$34 \pm 3.45$	223	$0.67 \pm 0.03$	$2.86 \pm 0.14$
9	10:43:55.337	+11:44:03.80	$30 \pm 6.75$	30	$0.39 \pm 0.03$	$1.69 \pm 0.18$
10	10:44:05.335	+11:43:41.54		93	$0.01 \pm 0.04$	$0.07 \pm 0.16$
11	10:44:04.469	+11:42:56.80	$27 \pm 1.48$	30	$0.20 \pm 0.04$	$0.72 \pm 0.10$
12	10:44:00.619	+11:42:33.70		65	$0.00 \pm 0.19$	$0.31 \pm 0.97$
13	10:44:01.229	+11:42:03.91	$44 \pm 3.51$	78	$0.06 \pm 0.14$	$0.32 \pm 0.62$
14	10:43:58.224	+11:41:13.20	$59 \pm 5.38$	28	$0.40 \pm 0.13$	$2.05 \pm 0.54$
15	10:43:56.419	+11:41:20.24	$18 \pm 1.94$	22	$0.28 \pm 0.08$	$1.04 \pm 0.32$
16	10:43:59.585	+11:41:03.98	$8 \pm 6.74$	33	$0.02 \pm 0.07$	$0.10 \pm 0.26$
17	10:43:53.818	+11:40:51.54	$8 \pm 4.56$	24	$0.26 \pm 0.07$	$1.02 \pm 0.21$
18	10:43:59.131	+11:40:34.30	$21 \pm 2.22$	22	$0.13 \pm 0.07$	$0.63 \pm 0.24$
19	10:44:03.432	+11:42:10.24	$10 \pm 3.71$	173	$0.00 \pm 0.15$	$0.00 \pm 0.58$
20	10:44:02.414	+11:40:43.00	$1 \pm 1.70$	14	$0.00 \pm 0.04$	$0.21 \pm 0.11$
21	10:43:59.052	+11:43:02.63	$1 \pm 1.03$	73	$0.00 \pm 0.16$	$0.00 \pm 0.60$
22	10:43:52.049	+11:41:49.62	$93 \pm 7.55$	14	$0.29 \pm 0.10$	$1.40 \pm 0.36$
23	10:44:00.550	+11:41:42.28	$27 \pm 9.86$	107	$0.00 \pm 0.11$	$0.00 \pm 0.51$

Причины этой антикорреляции проясняются на нижних панелях рис. 3, где поверхностная яркость в линии  $H\alpha$  сопоставляется с отношением потоков на 8 и 24 мкм к полному потоку в дальнем ИК-диапазоне ( $F_{IR} = F_{70} + F_{100} + F_{160}$ ). Отношение  $F_8/F_{IR}$  от поверхностной яркости  $H\alpha$  практически не зависит. С отношением  $F_{24}/F_{IR}$  ситуация более сложная. Если рассматривать всю совокупность КЗО, можно сказать, что наблюдается слабая корреляция этого отношения с поверхностной яркостью  $H\alpha$ : чем ярче излучение  $H\alpha$ , тем больший относительный вклад в ИК-излучение вносит средний ИК-диапазон. Однако, если бы мы рассматривали отдельно только КЗО в галактике NGC 3351, то пришли бы к иному выводу. В целом можно сказать, что антикорреляция отношения потоков

$F_8/F_{24}$  и эмиссии  $H\alpha$  в большей степени зависит от поведения ИК-излучения на 24 мкм, чем от излучения на 8 мкм.

На верхних панелях рис. 3 выделяются те же два комплекса в галактике NGC 3351, что и на рис. 2. Совокупность данных указывает, что эти КЗО аномально ярки в полосе 24 мкм для наблюдаемого в них низкого потока в линии  $H\alpha$  и в УФ-полосах телескопа GALEX. Ни в процедуре выделения этих комплексов, ни в их положении в галактике нет ничего необычного, поэтому выявление причин их отличия от остальных КЗО в нашей выборке требует дополнительного исследования.

На рис. 4 показаны соотношения индикаторов наличия межзвездного газа: потоков в линиях  $H\alpha$ ,  $H\text{I}$  и  $\text{CO}$ . В верхнем ряду соотносятся сами потоки,



**Рис. 2.** Соотношение между потоками в линии  $H\alpha$  и потоками в фильтрах NUV (слева сверху) и FUV (справа сверху) космического телескопа GALEX, а также в полосах 8 мкм (слева посередине) и 24 мкм (справа посередине) космического телескопа “Spitzer”. Графики в нижней строке аналогичны графикам в средней строке, за исключением того, что на них сопоставляются не потоки, а поверхностные яркости. Комплексы из разных галактик обозначены цветами: коралловый — NGC 628, синий — NGC 2976, зеленый — NGC 3351.

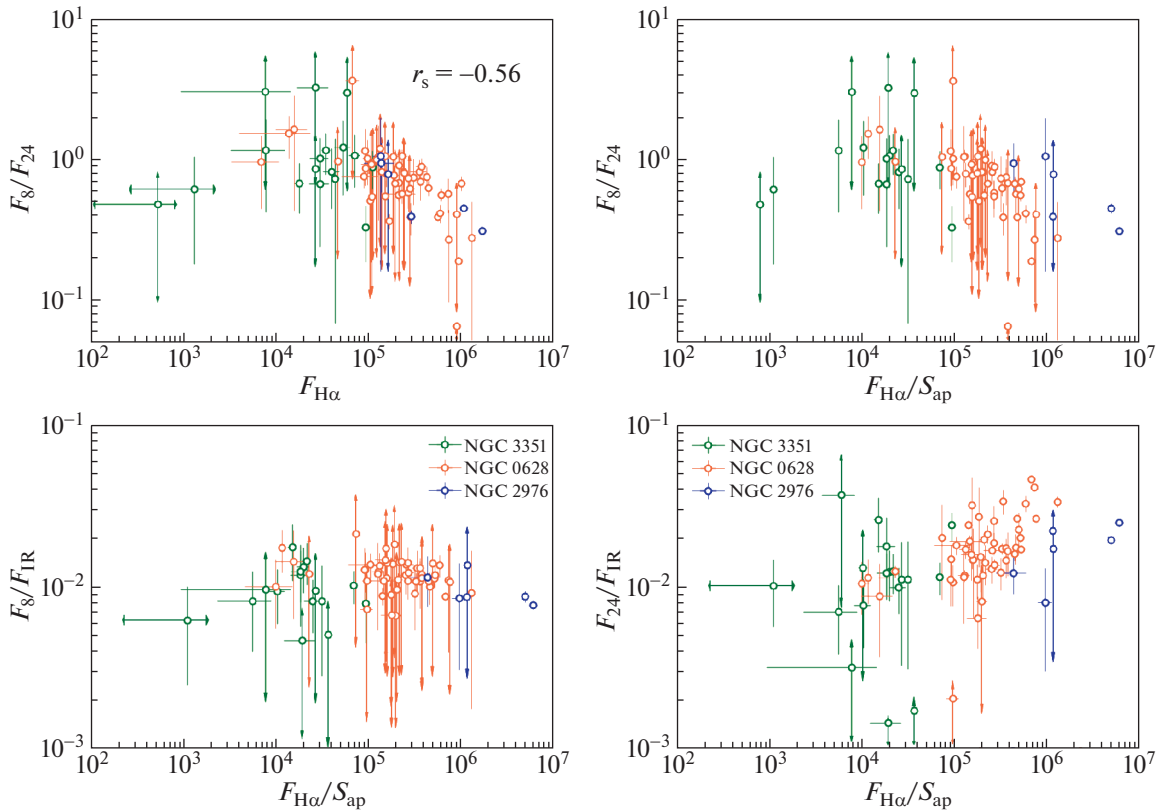
в нижнем — поверхностные яркости. Из графиков с данными о линии CO исключены два комплекса (56 и 59) в галактике NGC 628 с аномально низким содержанием молекулярного газа. На всех четырех диаграммах выделяются комплексы в галактике NGC 3351, отстоящие далеко от основного распределения точек. Хотя комплексы с низкой эмиссией в линиях  $H\alpha$  и HI и выделяются из общего списка КЗО, они в среднем следуют общему тренду. С двумя комплексами, выделяющимися на диаграммах для линии CO, ситуация иная: это те же КЗО

пониженной эмиссии в линии  $H\alpha$ , что упоминались ранее; при этом поток и поверхностная яркость линии CO в них такие же, как и в других рассматриваемых КЗО.

### 3.2. Кинематика CO

Наиболее известным свойством кинематики межзвездного газа является так называемое соотношение Ларсона, связывающее дисперсию





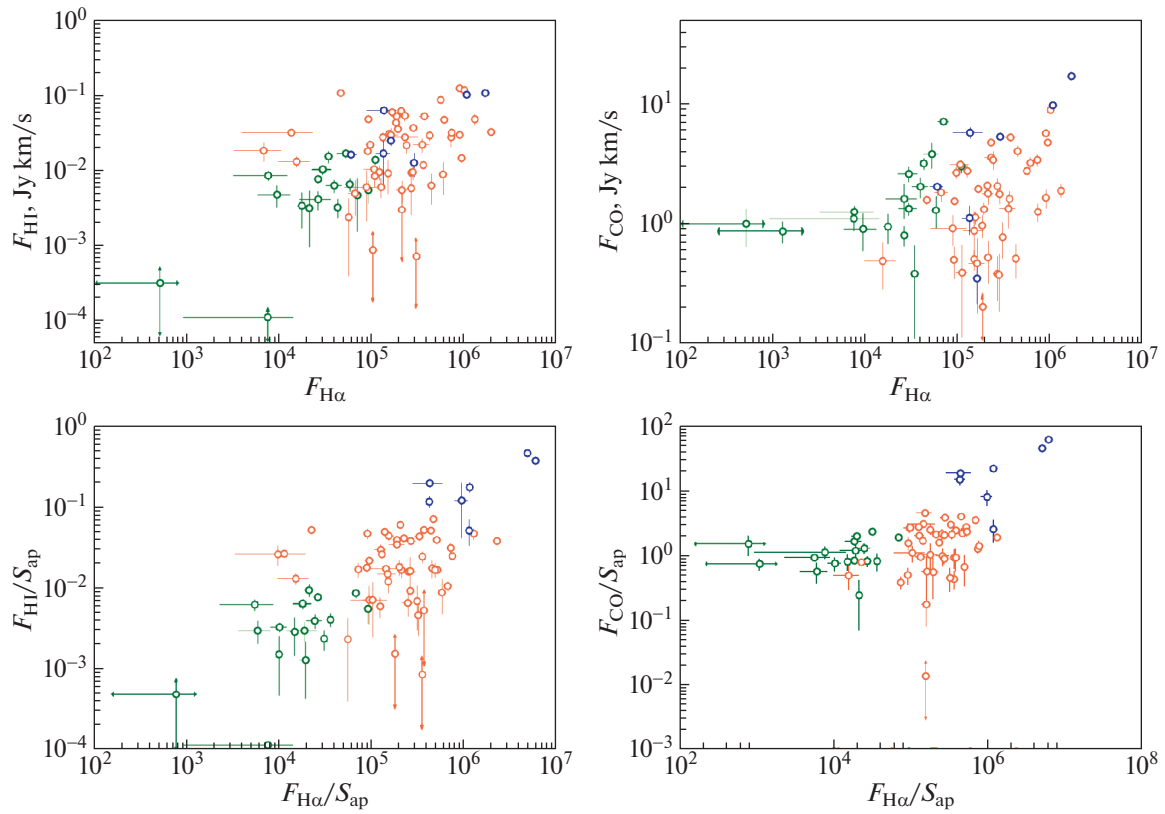
**Рис. 3.** В верхнем ряду показано отношение потоков на длинах волн 8 и 24 мкм как функция потока в линии  $H\alpha$  (слева) и поверхностной яркости эмиссии в линии  $H\alpha$  (справа). В нижнем ряду поверхностная яркость в линии  $H\alpha$  сопоставляется с отношением потоков на 8 мкм (справа) и 24 мкм (слева) к полному потоку в дальнем ИК-диапазоне.

скоростей (ширину молекулярных линий) с пространственным масштабом [29]. В нашем случае рассматриваемые пространственные масштабы очень велики и близки к пределу предполагаемых размеров комплексов звездообразования (см., например, [30]). Поэтому в нашей выборке имеются как КЗО, в которых излучение CO наблюдается в виде одной линии, так и КЗО, в которых наблюдается несколько отдельных линий CO. Поэтому, как уже было сказано, мы говорим не о дисперсии скоростей, а о разбросе скоростей  $\Delta V$ . В силу отсутствия формальной процедуры мы не можем точно оценить погрешность определения  $\Delta V$ , однако можно считать, что погрешность сопоставима с самой величиной  $\Delta V$  для КЗО с низким потоком  $F_{CO}$  и для КЗО, в которых величина  $\Delta V$  сравнима с полным рассмотренным интервалом скоростей.

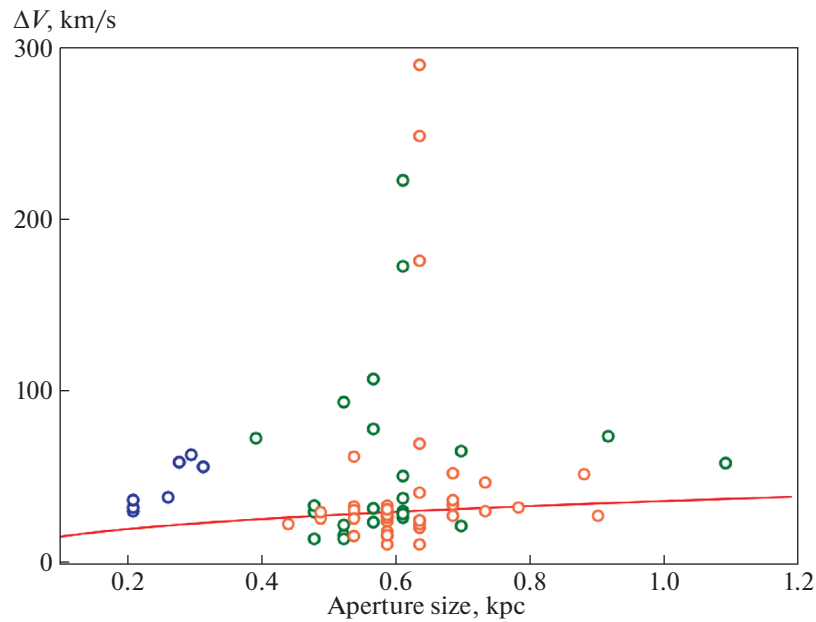
На рис. 5 приводится соотношение между размером КЗО и разбросом скоростей в нем. Прямой линией показано соотношение Ларсона из работы [29]. Мы видим, что в нашей выборке этим соотношением описывается скорее нижняя огибающая полученных точек. При этом в некоторых КЗО  $\Delta V$  существенно превышает предсказания

“классического” соотношения: это комплексы 3, 6 и 7 из галактики NGC 628 и комплексы 8 и 19 из галактики NGC 3351. Все эти комплексы находятся на периферии соответствующих галактик, однако их положение и большие значения  $\Delta V$  вряд ли связаны между собой, так как у других периферийных КЗО разбросы скоростей существенно ниже. В качестве примера на рис. 6 мы показываем профили линии CO для областей 3–5 из галактики NGC 628. Все три комплекса находятся в одном и том же регионе на периферии галактики, однако профили излучения CO в них весьма различны. В комплексах 4 и 5 наблюдается одна интенсивная линия с  $\Delta V = 24–25$  км/с, тогда как в комплексе 3 излучение CO состоит из нескольких линий, значительно выделяющихся над фоном и разделенных интервалом скоростей почти 300 км/с.

На рис. 7 показано соотношение между разбросом скоростей  $\Delta V$  и потоком излучения в линии CO. На ней можно выделить две группы КЗО. В объектах с  $\Delta V \lesssim 70$  км/с наблюдается рост потока в линии CO с увеличением  $\Delta V$ . В объектах с большими значениями разброса скоростей с увеличением  $\Delta V$  поток в линии CO падает. Можно предположить, что в первой группе мы имеем дело с



**Рис. 4.** Соотношение между потоками в линии  $H\alpha$  и потоками в линии  $HII$  (слева сверху) и  $CO$  (справа сверху). Графики в нижней строке аналогичны графикам в верхней строке, за исключением того, что на них сопоставляются не потоки, а поверхностные яркости.



**Рис. 5.** Соотношение разброса скоростей и размера апертуры.

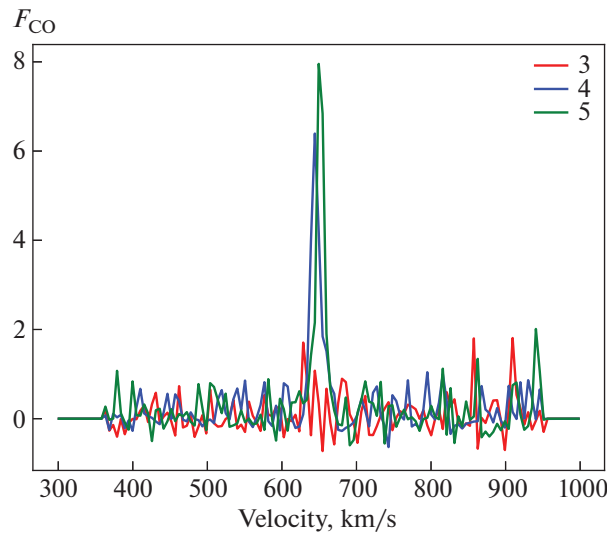


Рис. 6. Профили линий CO в комплексах 3, 4 и 5 из галактики NGC 628.

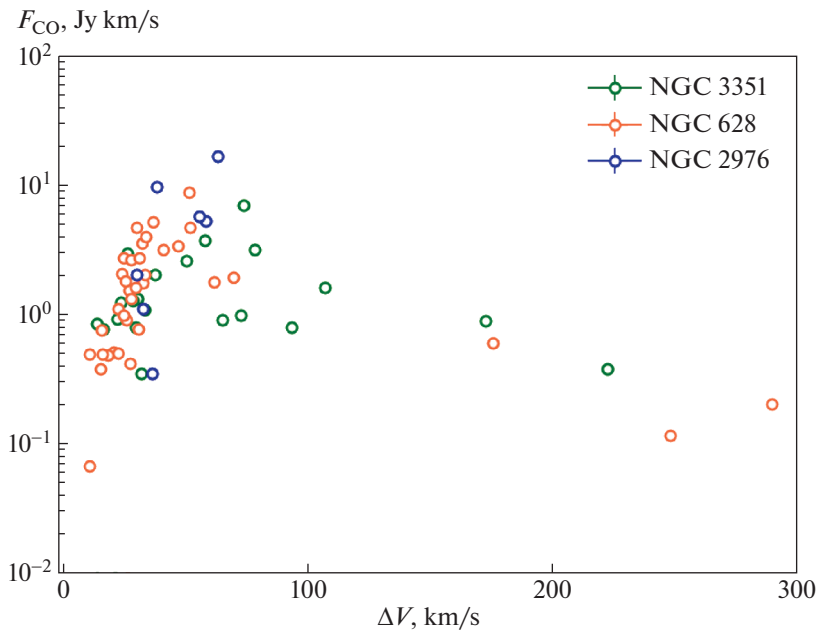


Рис. 7. Соотношение между разбросом скоростей и потоком в линии CO.

молекулярным газом, который в значительной степени остается невозмущенным процессами звездообразования. В этом случае можно ожидать роста  $F_{\text{CO}}$  с увеличением  $\Delta V$ , поскольку поток в линии CO можно считать мерой массы КЗО. Падение потока CO с ростом  $\Delta V$  во второй группе может быть связано с тем, что в нее входят КЗО, газ которых уже существенно возмущен процессами звездообразования.

Подобное поведение демонстрируют и потоки ИК-излучения. На рис. 8 показано, как соотно-

сятся с разбросом скоростей поверхностные яркости излучения на 8, 24 и 160 мкм. Здесь мы также видим две группы КЗО: в первой группе (с  $\Delta V \lesssim 70$  км/с) поверхностные яркости растут с увеличением разброса скоростей; во второй группе (с большими значениями  $\Delta V$ ) разброс скоростей велик, а поверхностные яркости малы.

В качестве дополнительного теста мы отобрали области, в которых излучение CO характеризуется одним пиком, и аппроксимировали этот пик гауссианой, чтобы найти величину ширины линии FWHM

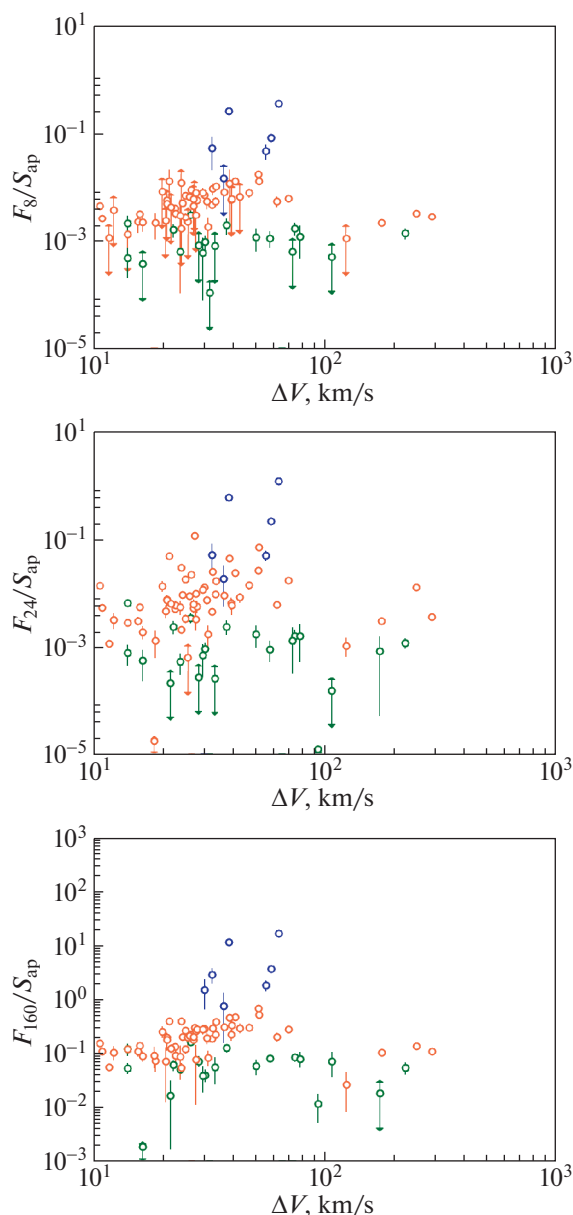


Рис. 8. Соотношение между разбросом скоростей и поверхностными яркостями в инфракрасном диапазоне.

(или дисперсию скоростей). Сравнение найденных ширин линий с введенным нами разбросом скоростей показало, что в случае с единственным пиком СО значения FWHM и  $\Delta V$  хорошо согласуются друг с другом. На рис. 9 найденная ширина линии сопоставляется с размером апертуры КЗО. Кривой показано соотношение Ларсона, которое, как видно, хорошо согласуется с параметрами КЗО.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время одним из основных направлений исследования межзвездной среды стало детальное моделирование галактических и внегалак-

тических молекулярных облаков и областей звездообразования, в том числе, в галактиках на больших красных смещениях, с учетом эффектов обратной связи (см., например, [31–33]). Это позволяет исследовать особенности эволюции молекулярного газа и процессов формирования звезд в широком диапазоне условий, в различных окружениях, в галактиках различных морфологических типов и пр. С наблюдательной точки зрения критерием адекватности теоретических моделей становятся различные соотношения между пространственными масштабами, кинематическими характеристиками и другими свойствами изучаемых объектов. Для нас исходной мотивацией проведения таких исследований стало также выделение факторов, которые могут оказывать существенное влияние на эволюцию ансамбля пылевых частиц в областях звездообразования. Мы можем ожидать, что на начальных этапах эволюции КЗО таким фактором будет ультрафиолетовое излучение массивных звезд, тогда как на более поздних этапах более важным фактором станет разрушение пылинок ударными волнами от вспышек сверхновых.

Для проверки этих предположений, а также для общей оценки взаимосвязей между различными параметрами КЗО в данной работе мы рассмотрели потоки излучения КЗО в различных диапазонах и попытались найти взаимосвязи между ними. При этом мы рассмотрели не только сами потоки, величина которых может быть связана с массами рассматриваемых комплексов, но и поверхностную яркость — поток на единицу физической площади апертуры в  $\text{пк}^2$ . Поскольку фактически КЗО является трехмерным образованием, его поверхностная яркость также может быть связана с массой (хотя и в меньшей степени, чем поток) — за счет протяженности комплекса вдоль луча зрения.

Потоки излучения, так или иначе связанного с наличием массивных горячих звезд, хорошо коррелируют друг с другом. В частности, корреляция наблюдается между потоком в линии  $\text{H}\alpha$  и потоками в фотометрических полосах FUV и NUV телескопа GALEX, а также между соответствующими поверхностными яркостями. Поскольку излучение на 8 и 24  $\mu\text{м}$  предположительно принадлежит макромолекулам и очень мелким пылинкам, нагрев которых вызывается поглощением одиночных фотонов ультрафиолетового диапазона, излучение в этих диапазонах также хорошо коррелирует с потоками и поверхностными яркостями в линии  $\text{H}\alpha$  и в УФ-полосах FUV и NUV.

Хотя и поток излучения на 8  $\mu\text{м}$ , и поток излучения на 24  $\mu\text{м}$  коррелируют с потоком в линии  $\text{H}\alpha$ , характер этой корреляции различен, что подчеркивается антикорреляцией потока в линии

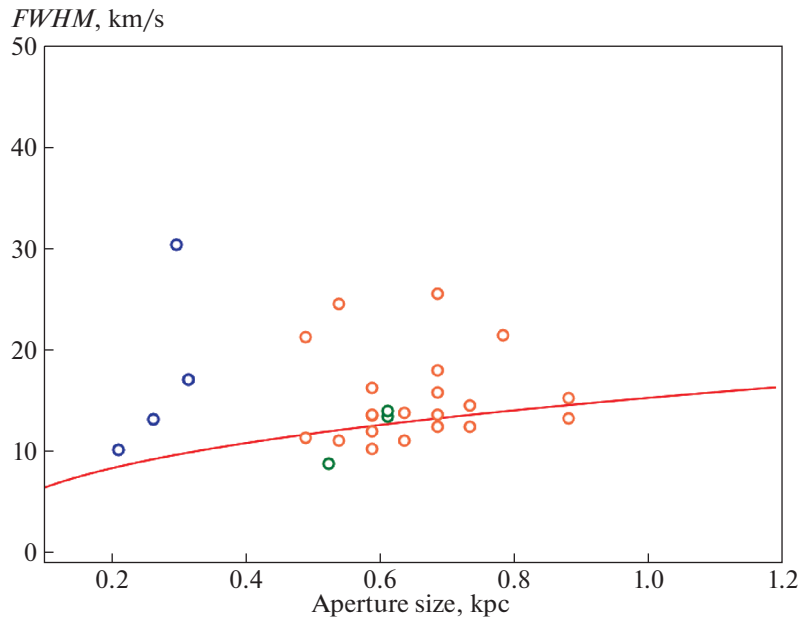


Рис. 9. Соотношение между дисперсией скоростей и размером апертуры.

$\text{H}\alpha$  и отношения потоков  $F_8/F_{24}$ . Для примерного выявления причин такого поведения мы воспользуемся расчетами [15]. В рамках этой модели одной из характеристик поля излучения, обуславливающего нагрев пылинок, является параметр  $U_{\min}$ , представляющий собой среднюю интенсивность излучения в КЗО в единицах поля излучения солнечной окрестности. В отсутствие эволюционных эффектов, то есть при условии неизменности характеристик ансамбля пылинок, отношение потоков  $F_8/F_{24}$  практически не зависит от  $U_{\min}$  (в рассматриваемых пределах значений этого параметра). Кроме того, в модели [15] увеличение  $U_{\min}$  ведет к незначительному росту отношений  $F_8/F_{\text{IR}}$  и  $F_{24}/F_{\text{IR}}$ .

Это, очевидно, не то, что мы видим в наблюдениях (величина  $U_{\min}$ , определенная в [10], хорошо коррелирует с потоком  $F_{\text{H}\alpha}$ , так что эти величины взаимозаменяемы). Во-первых, величина  $F_8/F_{24}$  существенно падает с ростом  $F_{\text{H}\alpha}$  и  $U_{\min}$ . Во-вторых, величина  $F_{24}/F_{\text{IR}}$  с увеличением  $F_{\text{H}\alpha}$  и  $U_{\min}$  возрастает существенно быстрее, чем предсказывает модель [15]. Отсутствие наблюдаемой зависимости  $F_8/F_{\text{IR}}$  от  $F_{\text{H}\alpha}$  не противоречит ее слабому модельному росту при увеличении  $U_{\min}$ .

Эти расхождения можно пытаться объяснить, дополнив модель эволюционными эффектами. Например, падение величины  $F_8/F_{24}$  с повышением интенсивности поля излучения можно было бы объяснить разрушением макромолекул ПАУ. Действительно, в рамках модели [15] наблюдаемое

снижение отношения потоков  $F_8/F_{24}$  можно приписать уменьшению массовой доли ПАУ  $q_{\text{PAU}}$  с 4.6% до 0.5%. Однако такое падение  $q_{\text{PAU}}$  должно приводить к еще более существенному падению отношения потоков  $F_8/F_{\text{IR}}$ , чего в действительности не наблюдается.

Другое объяснение может быть связано с еще одним параметром модели [15] — массовой долей  $\gamma$  пыли, которая освещается полем с интенсивностью выше  $U_{\min}$ . Фактически,  $\gamma$  определяет долю пыли, которая находится в непосредственных окрестностях звезд, являющихся источниками ионизирующего излучения. Модель [15] предсказывает, что увеличение величины  $\gamma$  при фиксированном  $U_{\min}$  приводит к снижению отношения  $F_8/F_{24}$  и к существенному росту отношения  $F_{24}/F_{\text{IR}}$  при почти постоянном отношении  $F_8/F_{\text{IR}}$ . С одной стороны, это поведение соответствует наблюдаемому, с другой стороны, это соответствие не следует переоценивать. Значения  $U_{\min}$  и  $\gamma$ , выведенные из наблюдений в работе [10], получены в результате подгонки спектров и потому, по сути, являются функциями наблюдаемых инфракрасных потоков.

Оцененные нами значения  $\Delta V$  значительно превышают величины дисперсии скоростей, полученные в других подобных работах. Например, в работе [18] максимальные значения дисперсии скоростей CO не превышают 40 км/с. Подобные значения для ионизованного газа получены в работе [34]. Ширины линий CO до 50 км/с отмечены в работе [35]. Однако это связано с тем, что авторы этих работ предпочтительно работают

либо с объектами, которые являются относительно яркими источниками эмиссии CO или H $\alpha$ , либо на существенно меньших пространственных масштабах (как в [35]). Используемый нами метод выделения КЗО по нескольким диапазонам позволяет выделять комплексы, которые не являются яркими источниками эмиссии CO или H $\alpha$  и при этом демонстрируют значительный внутренний разброс скоростей, превышающий 100 км/с.

Эти значения не представляются совершенно невозможными. Конечно, нельзя ожидать таких скоростей (как, впрочем, и скоростей порядка 50 км/с) в молекулярном газе КЗО, если единственным фактором обратной связи являются зоны ионизованного водорода. Однако такие скорости могут встречаться в тех случаях, когда в комплексе уже начались вспышки сверхновых. И хотя прямых наблюдений подобных скоростей нет, косвенные указания на их возможность имеются. Например, наблюдаемое разрушение пылинок при взаимодействии остатков сверхновых с молекулярными облаками [36–38] предполагает наличие ударных волн со скоростями, превышающими 100 км/с [39, 40]. Скорости выше 100 км/с наблюдаются и в численных расчетах расширения остатков сверхновых в облачной среде (см., напр., [41]).

Используемый нами параметр  $\Delta V$ , безусловно, является существенно хуже определенным, чем дисперсия скоростей при вписывании гауссианы в наблюдаемый профиль. Эта неопределенность усиливается тем, что на этапе, когда эмиссию CO в исследуемом КЗО уже нельзя описать единственным профилем, интенсивность этой эмиссии ослабевает, и выделять индивидуальные пики становится сложнее. Однако, с другой стороны, это усиливает интерес к кинематике газа на том этапе эволюции КЗО, когда, предположительно, становятся важными эффекты обратной связи (feedback), разрушающие исходную молекулярную структуру комплекса. Мы полагаем, что в этом отношении наши результаты представляют интерес, подчеркивая необходимость дальнейших исследований в этом направлении, хотя и не позволяют пока сделать определенные выводы. Они указывают, что взаимосвязи  $\Delta V$  с другими параметрами межзвездного вещества и индикаторами звездообразования могут оказаться сложными, и потому их изучение требует как расширения списка исследуемых галактик и КЗО в них, так и анализа других линий, в первую очередь HI и H $\alpha$ . Их предварительная интерпретация может свидетельствовать, что помимо очевидной корреляции  $\Delta V$  и светимости в линии CO, в основе которой может лежать масса объекта (см., например, [42]), существует и другой режим, в котором увеличение  $\Delta V$  связано с уменьшением

светимости и который может иметь эволюционную природу. Эти режимы заслуживают отдельного изучения.

## 5. ВЫВОДЫ

Основные выводы работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Наблюдается корреляция потока и поверхностной яркости комплексов звездообразования в линии H $\alpha$  с аналогичными параметрами излучения в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.
2. Отношение потоков излучения комплексов звездообразования в фотометрических полосах на 8 и 24 мкм убывает с увеличением потока H $\alpha$ . Это связано, скорее всего, с более существенным ростом потока на длине волны 24 мкм.
3. Анализ причин изменения отношения потоков  $F_8/F_{24}$  показывает, что это изменение может быть связано не только с эволюционными причинами (изменением массовой доли ПАУ), но и с изменениями условий возбуждения соответствующего излучения.
4. Анализ данных о кинематике молекулярного газа в комплексах звездообразования показывает, что связь светимости CO и разброса скоростей неоднозначна. Предварительные результаты указывают, что при значениях разброса  $\Delta V \lesssim 70$  км/с светимость и  $\Delta V$  коррелируют друг с другом, тогда как при больших значениях разброса скоростей рост  $\Delta V$  сопровождается уменьшением светимости, однако эти результаты нуждаются в дальнейшей проверке в силу неопределенностей, связанных с оценкой параметра  $\Delta V$ .

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

К.И. Смирнова благодарит программу 211 правительства Российской Федерации, соглашение № 02.А03.21.0006, а также Министерство науки (основная часть государственного задания, РК № АААА-А17-117030310283-7). Д.З. Вибе благодарит Программу фундаментальных исследований РАН 12 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной”.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту за важные замечания, а также полезные правки по улучшению качества рукописи. Работа основана на использовании наблюдений космического телескопа “Spitzer”, разработанного Лабораторией реактивного движения в Калифорнийском технологическом институте по контракту с NASA, космической обсерватории “Herschel” — инструмента, разработанного ESA при поддержке NASA, телескопа VLA, принадлежащего Национальной радиообсерватории США, являющейся объектом Национального научного фонда США, 30-м телескопа института IRAM.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. C. Kennicutt, Jr., *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **36**, 189 (1998), astro-ph/9807187.
2. H. J. Rocha-Pinto, J. Scalo, W. J. Maciel, and C. Flynn, *Astron. and Astrophys.* **358**, 869 (2000), astro-ph/0001383.
3. T. P. Robitaille and B. A. Whitney, *Astrophys. J.* **710**, L11 (2010), 1001.3672
4. D. Calzetti, *Secular Evolution of Galaxies* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013), p. 419.
5. D. S. Wiebe, M. S. Khramtsova, O. V. Egorov, and T. A. Lozinskaya, *Astronomy Letters* **40**, 278 (2014), 1407.3065.
6. M. S. Khramtsova, D. S. Wiebe, T. A. Lozinskaya, and O. V. Egorov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **444**, 757 (2014), 1407.8307.
7. G. J. Bendo, R. E. Miura, D. Espada, K. Nakanishi, R. J. Beswick, M. J. D’Cruze, C. Dickinson, and G. A. Fuller, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **472**, 1239 (2017), 1707.06184.
8. F. M. Audcent-Ross, G. R. Meurer, O. I. Wong, Z. Zheng, D. Hanish, M. A. Zwaan, J. Bland-Hawthorn, A. Elagali, M. Meyer, M. E. Putman, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **480**, 119 (2018), 1806.05875.
9. D. Calzetti, S.-Y. Wu, S. Hong, R. C. Kennicutt, J. C. Lee, D. A. Dale, C. W. Engelbracht, L. van Zee, B. T. Draine, C.-N. Hao, et al., *Astrophys. J.* **714**, 1256 (2010), 1003.0961.
10. K. I. Smirnova, M. S. Murga, D. S. Wiebe, and A. M. Sobolev, *Astronomy Reports* **61**, 646 (2017).
11. F. Walter, E. Brinks, W. J. G. de Blok, F. Bigiel, R. C. Kennicutt, Jr., M. D. Thornley, and A. Leroy, *Astron. J.* **136**, 2563-2647 (2008), 0810.2125.
12. R. C. Kennicutt, D. Calzetti, G. Aniano, P. Appleton, L. Armus, P. Beirão, A. D. Bolatto, B. Brandl, A. Crocker, K. Croxall, et al., *Proc. Astron. Soc. Pacif.* **123**, 1347 (2011), 1111.4438.
13. R. C. Kennicutt, Jr., L. Armus, G. Bendo, D. Calzetti, D. A. Dale, B. T. Draine, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, A. D. Grauer, G. Helou, et al., *Proc. Astron. Soc. Pacif.* **115**, 928 (2003), astro-ph/0305437.
14. A. K. Leroy, F. Walter, F. Bigiel, A. Usero, A. Weiss, E. Brinks, W. J. G. de Blok, R. C. Kennicutt, K.-F. Schuster, C. Kramer, et al., *Astron. J.* **137**, 4670 (2009), 0905.4742.
15. B. T. Draine and A. Li, *Astrophys. J.* **657**, 810 (2007), astro-ph/0608003.
16. A. Caldú-Primo, A. Schrubba, F. Walter, A. Leroy, K. Sandstrom, W. J. G. de Blok, R. Ianjamasimanana, and K. M. Mogotsi, *Astron. J.* **146**, 150 (2013), 1309.6324.
17. J. Pety, E. Schinnerer, A. K. Leroy, A. Hughes, S. E. Meidt, D. Colombo, G. Dumas, S. Garcia-Burillo, K. F. Schuster, C. Kramer, et al., *Astrophys. J.* **779**, 43 (2013), 1304.1396.
18. K. M. Mogotsi, W. J. G. de Blok, A. Caldú-Primo, F. Walter, R. Ianjamasimanana, and A. K. Leroy, *Astron. J.* **151**, 15 (2016), 1511.06006.
19. D. A. Swartz, M. Yukita, A. F. Tennant, R. Soria, and K. K. Ghosh, *Astrophys. J.* **647**, 1030 (2006).
20. D. M. Elmegreen, F. R. Chromey, M. Santos, and D. Marshall, *Astron. J.* **114**, 1850 (1997).
21. B. F. Williams, J. J. Dalcanton, A. Stilp, K. M. Gilbert, R. Roškar, A. C. Seth, D. Weisz, A. Dolphin, S. M. Gogarten, E. Skillman, et al., *Astrophys. J.* **709**, 135 (2010), 0911.4121.
22. A. S. Gusev and Y. N. Efremov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **434**, 313 (2013), 1306.1731.
23. P. Sánchez-Blázquez, F. Rosales-Ortega, A. Diaz, and S. F. Sánchez, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **437**, 1534 (2014), 1310.4804.
24. R. C. Kennicutt, Jr., J. C. Lee, J. G. Funes, S. J., S. Sakai, and S. Akiyama, *Astrophys. J. Sup. Ser.* **178**, 247 (2008), 0807.2035.
25. D. C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, P. Morrissey, P. G. Friedman, T. A. Barlow, T. Conrow, R. Grange, P. N. Jelinsky, B. Milliard, et al., *Astrophys. J. Lett.* **619**, L1 (2005), astro-ph/0411302.
26. G. Aniano, B. T. Draine, K. D. Gordon, and K. Sandstrom, *Proc. Astron. Soc. Pacif.* **123**, 1218 (2011), 1106.5065.
27. R. B. Tully, H. M. Courtois, and J. G. Sorce, *Astron. J.* **152**, 50 (2016).
28. M. S. Khramtsova, D. S. Wiebe, P. A. Boley, and Y. N. Pavlyuchenkov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **431**, 2006 (2013), 1302.4837.
29. R. B. Larson, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **194**, 809 (1981).
30. A. S. Gusev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **442**, 3711 (2014), 1406.0661.
31. Q. Li, J. C. Tan, D. Christie, T. G. Bisbas, and B. Wu, *Proc. Astron. Soc. Jap.* **70**, S56 (2018), 1706.03764.

32. M. R. Krumholz, B. Burkhart, J. C. Forbes, and R. M. Crocker, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **477**, 2716 (2018), 1706.00106.
33. J.-G. Kim, W.-T. Kim, and E. C. Ostriker, *Astrophys. J.* **859**, 68 (2018), 1804.04664.
34. A. V. Moiseev, A. V. Tikhonov, and A. Klypin, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **449**, 3568 (2015), 1405.5731.
35. D. A. Frail and G. F. Mitchell, *Astrophys. J.* **508**, 690 (1998), astro-ph/9807011.
36. R. G. Arendt, E. Dwek, W. P. Blair, P. Ghavamian, U. Hwang, K. S. Long, R. Petre, J. Rho, and P. F. Winkler, *Astrophys. J.* **725**, 585 (2010).
37. A. Tappe, J. Rho, and W. T. Reach, *Astrophys. J.* **653**, 267 (2006), astro-ph/0609133.
38. A. Tappe, J. Rho, C. Boersma, and E. R. Micelotta, *Astrophys. J.* **754**, 132 (2012).
39. E. R. Micelotta, A. P. Jones, and A. G. G. M. Tielens, *Astron. and Astrophys.* **510**, A36 (2010), 0910.2461.
40. M. S. Murga, S. A. Khoperskov, and D. S. Wiebe, *Astronomy Reports* **60**, 669 (2016), 1612.00420.
41. J. D. Slavin, R. K. Smith, A. Foster, H. D. Winter, J. C. Raymond, P. O. Slane, and H. Yamaguchi, *Astrophys. J.* **846**, 77 (2017), 1708.02646.
42. J. Melnick, E. Telles, V. Bordalo, R. Chávez, D. Fernández-Arenas, E. Terlevich, R. Terlevich, F. Bresolin, M. Plionis, and S. Basilakos, *Astron. and Astrophys.* **599**, A76 (2017), 1612.01974.