

ВСПЫШКА ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В ГАЛАКТИКАХ. СВОЙСТВА В ИНФРАКРАСНОМ И РАДИО ДИАПАЗОНАХ

Р.А.КАНДАЛЯН

Поступила 29 февраля 1996

Принята к печати 25 марта 1996

Приведен обзор радио и инфракрасных свойств вспышки звездообразования в галактиках. Он охватывает нормальные галактики и галактики со вспышкой звездообразования.

1. *Введение.* В настоящем обзоре мы рассмотрим свойства вспышки звездообразования (starburst) в галактиках. Основное внимание будет уделено свойствам вспышки звездообразования в инфракрасном и радио диапазонах. Наш обзор посвящен нормальным галактикам, галактикам со вспышкой звездообразования и частично тем активным галактикам, в которых активное звездообразование играет значительную роль в эволюции этих объектов. Квазары, радиогалактики и объекты типа BL Lac нами не будут обсуждаться, так как их свойства в основном обусловлены активностью ядра галактики. Мы не будем рассматривать также компактные голубые карликовые галактики, поскольку их некоторые свойства (содержание молекулярного водорода, инфракрасное излучение и т. п.) существенно отличаются от других галактик. Мы попытаемся выяснить роль вспышки звездообразования в галактиках. Каким образом складывается связь между инфракрасным и радионизлучениями? Вспышка звездообразования и морфология галактик. Содержание и свойства молекулярного газа в галактиках. Вот примерный перечень тех вопросов, которые будут нами обсуждаться.

Существенный прогресс в этом направлении был достигнут после запуска Инфракрасного Астрономического Спутника (IRAS), который в течение почти 10 месяцев провел обзор неба в далекой инфракрасной области спектра на волнах 12, 25, 60 и 100 мкм.

Настоящий обзор следует рассматривать как дополнение к существующим обзорам [1 - 10]. В первых трех обзорах рассмотрены инфракрасные свойства галактик. Последующие обзоры посвящены радиосвойствам галактик в непрерывном спектре и в линиях молекул. Ввиду важности вопроса звездообразования в галактиках, нам кажется целесообразным и полезным обсудить инфракрасные и радио характеристики галактик совместно.

В тексте приняты следующие сокращения и обозначения для наиболее часто встречающихся понятий (в скобках указаны также общепринятые английские варианты этих сокращений). (IR) - инфракрасный; (FIR) - далекий инфракрасный; (NIR) - близкий инфракрасный; (MIR) - средний инфракрасный; ГВЗ(Starburst Galaxies) - галактики со вспышкой звездообразования; БМО(LMC) - Большое Магелланово Облако; РСДБ(VLBI) - радиointерферометр со сверхдлинной базой; $f_{12}, f_{25}, f_{60}, f_{100}$ - IR потоки на волнах 12, 25, 60 и 100 мкм соответственно; L_{OH} - светимость в линии молекулы OH; L_{FIR} - светимость в FIR области; L_R - светимость в радиоконтинууме; J, H, K, L - звездные величины на волнах 1.3, 1.6, 2.2 и 3.6 мкм соответственно; m - звездная величина в видимых лучах; M_H, M_{H_2} - массы атомарного и молекулярного водорода соответственно; T - температура; λ - длина волны. Когда приводятся численные значения светимости, размера или расстояния, то постоянная Хаббла принята равной $75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Обзор состоит из 4 разделов. Раздел 2 представляет IR особенности нормальных и ГВЗ. Третий раздел посвящен мощным (luminous) и сверхмощным (ultraluminous) IR галактикам. Четвертый раздел представляет свойства газа в галактиках со вспышкой звездообразования. В последнем разделе мы рассматриваем особенности взаимосвязи между IR и радио в этих галактиках. Под нормальными галактиками мы подразумеваем объекты, FIR- светимость которых меньше $10^{10} L_{\odot}$, а у ГВЗ FIR - светимость находится в интервале $10^{10} - 10^{13} L_{\odot}$, из них объекты со светимостью $10^{11} L_{\odot} < L_{FIR} < 10^{12} L_{\odot}$ называются мощными, а объекты с $L_{FIR} > 10^{12} L_{\odot}$ - сверхмощными.

2. *Нормальные галактики и ГВЗ в IR диапазоне.* Инфракрасное излучение галактик состоит из нескольких компонентов. Вклад того или иного компонента может варьировать в зависимости от типа галактики. В нормальных галактиках и ГВЗ излучение в FIR области часто можно объяснить присутствием двух компонентов: излучением диска галактики с температурой пыли 30 К и излучением пыли с температурой

80 К в центральной части галактики [11]. Исследование FIR цветов галактик показывает, что у большинства цветовая температура в диапазоне от 60 до 100 мкм (отношение интенсивностей на волнах 60 и 100 мкм, f_{60}/f_{100}) растет с уменьшением цветовой температуры от 12 до 25 мкм (f_{12}/f_{25}). В случае нормальных галактик и ГВЗ эту зависимость Хеллоу [12] объясняет с помощью двухкомпонентной модели излучения. Первый компонент характеризует области активного звездообразования с высокой цветовой температурой на волнах 60, 100 мкм и низкой цветовой температурой - на 12, 25 мкм. Второй компонент характеризует диффузное излучение (ширрусь) галактики, которое имеет высокую цветовую температуру на 12, 25 мкм и низкую цветовую температуру на 60, 100 мкм. Относительный вклад этих компонентов и определяет инфракрасные особенности объекта. В этой модели в качестве частиц пыли принимаются молекулы полициклического ароматического гидрокарбона (polycyclic aromatic hydrocarbon: PAH), которые имеют очень маленькие размеры (несколько Ангстрем). Некоторые авторы (см., например, [13]) показали, что такие частицы, кратковременно нагретые до температуры 1000 К, могут вносить существенный вклад в ИК излучение в диапазоне от 1 до 20 мкм.

В работе [14] была построена функция светимости (ФС) нормальных галактик в FIR области. Анализ ФС дал ряд интересных и неожиданных результатов. В частности, 1) ФС нормальных галактик на волнах 12, 25, 60 и 100 мкм имеют одинаковые формы, и интегральный спектр излучения хорошо согласуется с двухкомпонентной моделью IR излучения. Этот результат был также получен в работе [15]; 2) FIR излучение не коррелирует с морфологической последовательностью Хаббла S0 - Sm; 3) Спиральные галактики с перемычкой и галактики с кольцевой структурой в центральной части являются более слабыми источниками FIR излучения, чем обычные спиральные галактики. Этот результат является неожиданным, так как известно, что в спиральных галактиках высокой светимости процессы звездообразования наиболее бурно происходят в области перемычки (см., например, [16]) и, как следствие, у этих галактик FIR излучение является более сильным, чем у галактик без перемычки. Полученный в [14] результат авторы объясняют тем, что в спиральных галактиках с низкой FIR светимостью перемычки и кольцевые структуры могут уменьшать или пространственно сдерживать пыль, что и приводит к уменьшению эффективности переизлучения пылью оптических и UV фотонов в IR диапазон. Совершенно противоположный результат был

получен в [17], (а именно, спиральные галактики ранних типов с перемишкой являются более сильными источниками FIR излучения, чем галактики без перемишки) (см., также, [18]). Согласно [17] отношение f_{12}/f_{25} является индикатором наличия перемишки в галактиках. Это отношение меньше у галактик с перемишкой, чем у галактик без нее.

Авторы работы [19], анализируя данные в FIR области и H_α лучах для 124 спиральных галактик, пришли к выводу, что система массивных звезд ($>6M_\odot$) спектральных классов O или B может быть ответственной как за H_α излучение, так и за FIR излучение. Так, например, одна звезда типа O5 с массой $40M_\odot$ может обеспечить наблюдаемые H_α и FIR излучения. Иными словами, одна такая звезда способна одновременно ионизировать водородный газ и нагреть околосредную пыль. В этом случае нет необходимости привлекать двухкомпонентную модель для объяснения FIR излучения спиральных галактик. Инфракрасные цвета f_{12}/f_{25} и f_{60}/f_{100} тесно коррелируют также с IR светимостью галактик, в то время как f_{25}/f_{60} не зависит от светимости [19, 20]. IR цвет f_{12}/f_{25} уменьшается с увеличением светимости, а f_{60}/f_{100} , наоборот, положительно коррелирует со светимостью. В рамках двухтемпературной модели пыли последняя зависимость показывает, что с увеличением IR светимости увеличивается вклад "теплой" компоненты (80 K) пыли в интегральное излучение. Уменьшение f_{12}/f_{25} с увеличением светимости может быть связано либо с увеличением температуры пыли, либо тем, что в галактиках с низкой светимостью вклад излучения пыли на волне 12 мкм растет [20].

Большинство галактик, исследованных с помощью IRAS, показывают "нормальный" IR спектр, а именно, $f_{12} < f_{25} < f_{60} < f_{100}$. До сих пор галактики с необычным IR спектром мало исследовались, хотя изучение таких галактик может привести к интересным результатам [23, 24]. Ниже мы рассмотрим свойства галактик, которые имеют необычный IR спектр в диапазоне 12-25 мкм, а именно галактики с $f_{12} > f_{25}$ (23). Галактики с максимумом IR спектра на 60 мкм, которые в основном представляют активные галактики, рассмотрены в [24].

Как было сказано выше, плотность потока в FIR области растет при переходе от коротких волн в длинноволновую область (от 12 до 100 мкм для обзора IRAS). Поэтому для большинства галактик плотность потока на 12 мкм не была измерена, и в каталоге IRAS приведены лишь верхние пределы плотностей потоков. Недавно Раш и др. [25] опубликовали список 893 галактик, для которых были измерены потоки галактик

на 12 мкм, на основе каталога Слабых Источников IRAS (Faint Source Catalog IRAS). Новый каталог на 12 мкм является статистически полным выше 0.3 Ян. Примерно 20% этой выборки составляют галактики с активными ядрами, а остальные являются нормальными галактиками (в основном спиральными). Поэтому этот каталог дает хорошую возможность для более детального исследования спиральных галактик в FIR области.

В [23] были исследованы галактики, которые удовлетворяют следующим условиям: $f_{12} > 0.3$ Ян и $f_{12} > f_{25}$. Полное число галактик, удовлетворяющих этим условиям, составляет 103. Из них 88 являются нормальными галактиками (85%), 15 - активными галактиками (15%). Анализ данных спиральных галактик с $f_{12} > f_{25}$ показывает ряд интересных результатов. В частности, у этих галактик не наблюдаются известные корреляции: $(f_{12}/f_{25}$ и $f_{60}/f_{100})$, $(f_{12}/f_{25}$ и $L_{FIR})$, $(f_{60}/f_{100}$ и $L_{FIR})$. По IR и болометрической светимости эти галактики занимают нижнее положение среди нормальных галактик. Они уступают обычным нормальным галактикам также по радиосветимости и по содержанию HI. Содержание HI тесно коррелирует с f_{12}/f_{25} , f_{12}/f_{60} , f_{12}/f_{100} для галактик с $f_{12} > f_{25}$ и указанные корреляции отсутствуют для выборки галактик с $f_{12} < f_{25}$ (выборка сравнения). Каковы возможные причины, формирующие IR спектр галактик с $f_{12} > f_{25}$? Согласно [26], в нормальных галактиках существенный вклад на 12 мкм могут вносить оболочки звезд поздних спектральных классов, звезды OH/IR и молодые планетарные туманности, так как их интегральный спектр имеет вид $f_{12} > f_{25}$. Расчеты [27] показали, что основными источниками излучения на волне 25 мкм являются маленькие пылинки (10-150А). По-видимому, в галактиках с $f_{12} > f_{25}$ имеется недостаток таких частиц, как в случае галактики M31 [28]. Другой возможный механизм, объясняющий этот спектр, связан с излучением частиц РАН.

Нормальные галактики в NIR области характеризуются цветовыми характеристиками звезд поздних спектральных классов, а именно, $J-K-0.7$, $H-K-0.3$ и $K-L-0.3$. Для большинства нормальных галактик, особенно в ядерной области, основная часть NIR излучения исходит от фотосферы холодных звезд. Некоторые типы спиральных галактик показывают также NIR излучение других компонентов (излучение горячей пыли, фотосферное излучение горячих звезд, нетепловое излучение ядра галактики и др.). Роль этих компонентов подробно обсуждена в обзоре Телеско [2]. Каким образом можно разделять различные компоненты NIR излучения галактик с помощью $JHKL$ фотометрических данных? Подробно этот вопрос рассмотрен в работах [29,30]. В частности, область

активного ядра галактики имеет более красный *JHK* цвет, чем нормальные галактики. Активное звездообразование вносит существенный вклад в *K* и *L* области спектра. Галактики с характеристиками LINER имеют более высокую NIR светимость центральной области, чем нормальные галактики и ГВЗ.

Среди спокойных спиральных галактик наиболее детально была исследована M31. Пространственное распределение IR излучения в этой галактике похоже на распределение излучения в видимых лучах. Вокруг ядра на расстоянии примерно 10 кпк в IR лучах доминирует кольцеобразный компонент, совпадающий с OB звездами и HII областями. Интегральный IR спектр этой галактики похож на спектр Галактического пирруса. Если M31 является примером спокойной спиральной галактики раннего типа (Sb), то M33 - представитель спокойной спиральной галактики позднего типа (Sc). Примерно 60% IR излучения в M33 исходит от дискретных HII областей. Другая часть IR излучения обусловлена диффузным компонентом [31]. Теперь перейдем к обсуждению ГВЗ более подробно, так как выше мы в основном обсуждали нормальные галактики.

Выражение ГВЗ ввели Видман и др. [32], чтобы указать на интенсивность звездообразования в галактике. В дальнейшем исследования показали, что, действительно, существует класс галактик, глобальные свойства которых, в основном, определяются интенсивностью и частотой звездообразования в них, и они по интегральным характеристикам занимают промежуточное положение между спокойными и активными галактиками. Поэтому термин ГВЗ является довольно удачным для выделения подобных галактик. Результаты оптических наблюдений более 200 IRAS галактик приведены в работах [33-35], в которых довольно подробно обсуждаются также механизмы и источники возбуждения спектральных линий.

Галактика M82 является наиболее ярким представителем ГВЗ. Ввиду ее относительной близости она была исследована сравнительно детально в широком диапазоне спектра. M82 - аморфная галактика, показывающая интенсивное звездообразование в центральной области. Наблюдения галактики с высоким разрешением дали интересные результаты. Излучение на 2 мкм исходит от гигантских звезд поздних классов [36], радиоконтинуум на 6 см обусловлен синхротронным излучением сверхновых звезд [37], а на 3 мм имеет тепловую природу [38]. На частоте 5 ГГц были обнаружены более 40 остатков сверхновых звезд [37], которые расположены внутри IR - хребта, что указывает на высокую интенсивность звездообразования в центральной части галактики. Волькер и др. [39] картографировали

центральную часть M82 в линиях CO, CSO и SO. Они показали, что чем выше эффективность звездообразования в отдельном молекулярном облаке, тем меньше размеры облака. NIR наблюдения [40] обнаружили перемичку с размером 1 кпк. Согласно [41] в M82 и NGC253 наблюдается выброс газа вдоль малых осей этих галактик. В M82 скорость расширения выброса составляет 600 км/с, а размер - 2 кпк. Авторы предполагают, что выброс газа является результатом взаимодействия горячего ветра, исходящего из галактики, с внешней средой. IR наблюдения ГВЗ с промежуточной светимостью ($10^{10} L_{\odot} < L_{IR} < 10^{11} L_{\odot}$), к которым относится M82, показали, что они имеют примерно одинаковый вид распределения энергии [42], что позволяет по цветовой температуре ГВЗ различить спокойные и активные галактики. В частности, у ГВЗ $\lg(f_{60}/f_{100}) > -0.4$, а у активных галактик $\lg(f_{25}/f_{60}) > -0.7$ и спектр в диапазоне (60, 100 мкм) более плоский, чем у ГЕЗ. Для отбора ГВЗ часто используется отношение L_{IR}/L_{*} , которое в зависимости от типа галактики меняется от 1 до 100. Это отношение хорошо коррелирует со светимостью галактики на 60 мкм, что позволяет довольно эффективно обнаруживать галактики с активным звездообразованием по данным от IRAS [43]. Важной характеристикой ГВЗ также является отношение f_{60}/f_{100} , которое определяет долю теплового компонента излучения в FIR области. Так, например, существует положительная корреляция между f_{60}/f_{100} и L_{IR} [20]. Согласно [11], ГВЗ отличаются от нормальных галактик тем, что в центральной области ГВЗ происходит интенсивное звездообразование и в FIR области вклад от теплового компонента излучения существенно выше, чем в нормальных галактиках. Разными авторами предпринимались попытки моделировать ГВЗ (см., например, [44-47]). Белфорт и др. [44] использовали фотометрическую модель для оценки силы вспышки звездообразования (отношение массы звезд образовавшихся во время вспышки звездообразования к массе звезд спокойной галактики). Хю, Де Зотти [45] рассмотрели двухтемпературную модель пыли для объяснения FIR излучения нормальных галактик и ГВЗ. Согласно этой модели FIR излучение галактик исходит от протяженных НП областей (теплый компонент) и от холодной пыли, переизлучающей межзвездный радиационный фон. Согласно [45] практически все излучение на 12 мкм обусловлено РАН молекулами, а на 25 мкм доминируют большие, теплые частицы. На 100 мкм доминируют большие, холодные частицы, а на 60 мкм доминируют как теплые, так и холодные частицы. В рамках этой модели отношение ($R_{w/c}$) светимостей теплового и холодного компонентов зависит от f_{60}/f_{100} . Для интервала

$-0.6 < \lg(f_{60}/f_{100}) < 0$ хорошим приближением для $R_{w/c}$ является:

$$\lg R_{w/c} = 1.2sh ((\lg(f_{60}/f_{100}) + 0.25)/0.5). \quad (1)$$

В частности, для близких спиральных галактик $R_{w/c} = 0.43$, а для ГВЗ из списков Маркаряна $R_{w/c} = 1$. В работе [46] рассмотрены эволюционно-синтезные методы моделирования вспышек звездообразования в галактиках. В этих моделях используются эволюционные треки металличности звезд и рассматриваются очень короткие вспышки звездообразования ($< 2 \cdot 10^7$ лет), после чего наступает фаза непрерывного звездообразования. В рамках этих моделей Мас-Хесс [47] исследовал хорошо известную корреляцию между радио и IR излучениями (см. §5).

IR свойства ГВЗ в зависимости от морфологических типов галактик исследовались в работах ([14,15,17,30,49-56], ссылки в них). Результаты этих исследований довольно противоречивы. В частности, Де Йонг и др. [49] показали, что спиральные галактики поздних типов более часто показывают FIR излучение, чем галактики ранних типов. Холодный компонент FIR излучения растет вдоль последовательности Хаббла [50]. С другой стороны, согласно [14,15,54,55], процент обнаружения FIR источников у спиральных галактик не зависит от морфологического типа галактики. В то же время S0-S0/a и Sd-Sm галактики редко ассоциируются с источниками, светимость которых на 60 мкм больше $10^9 L_{\odot}$ [15]. Авторы работы [57] нашли, что в ярких спиральных галактиках с $m < 12$ только 4% Sa - Sab галактик являются FIR источниками со светимостью выше $10^{10} L_{\odot}$. На основе этих результатов они заключили, что в Sa - Sab галактиках образование массивных звезд происходит относительно реже, чем в поздних типах. В противоположность этому, Деверо, Янг [15] считают, что в Sa-Sab и Sb-Scd галактиках частота и эффективность образования массивных звезд одинаковы. Кроме этого, расчеты [15,19] показывают, что FIR излучение спиральных галактик со светимостью больше $10^9 L_{\odot}$ является однокомпонентным и обусловлено излучением OB звезд. Согласно [17,50,51,55,58] спиральные галактики с перемычкой чаще являются FIR источниками, чем спиральные без перемычки. Исследования галактик Маркаряна показали [55], что E - SO/a и спиральные галактики имеют одинаковую частоту встречаемости FIR источников. Кроме этого, в иррегулярных и компактных галактиках Маркаряна нагрев пыли происходит молодыми, горячими звездами, и IR излучение исходит от всей галактики. В ранних спиральных галактиках Маркаряна с перемычкой молодые звезды и пыль в основном сосредоточены в

области перемычки. В поздних спиральных молодых звезды и пыль находятся как в области перемычки, так и в области спиральных рукавов. Напп и др. [53], Марстон [59] также получили, что линзовидные и эллиптические галактики довольно часто показывают FIR излучение (45% и 68% соответственно).

Исследования спиральных галактик на волне 10 мкм показали (см. [56], там же ссылки на другие работы), что ранние спирали являются более мощными IR источниками, чем поздние спирали. В ранних спиральных IR излучение является более локализованным (особенно в спиральных с перемычкой), чем в поздних спиральных (см. также [21]). Согласно исследованиям этих авторов в ГВЗ присутствие перемычки в Sb, Sbc, и Sc галактиках приводит к увеличению излучения на 10 мкм и оно является более компактным, чем в тех же галактиках без перемычки. Наличие перемычки часто приводит к образованию кольцевых структур (см., например, [60]), а также к увеличению радиоизлучения центрального компонента спиральных галактик (см., например, [58, 61-63]). Между тем эффект перемычки не был обнаружен в FIR области спектра [30]. Таким образом видно, что результаты исследования связи морфология - IR излучение довольно противоречивы. Это обстоятельство, во-первых, обусловлено тем, что в подобных исследованиях использовались разные выборки галактик и, во-вторых, не всегда статистически корректно проведен анализ данных. На наш взгляд, более правдоподобным является тот результат, что в спиральных галактиках IR свойства галактик не зависят от морфологической последовательности Хаббла, иными словами, она не отражает эволюционную последовательность активности звездообразования галактик (см., [15]). Что касается эффекта перемычки, то вероятно, что в спокойных галактиках наличие перемычки приводит к ослаблению IR и радио излучения [14, 23], а в галактиках с активным звездообразованием, наоборот, оно приводит к усилению IR и радио излучения [55,56,58,61].

Как показало детальное морфологическое исследование галактик с высоким разрешением, темп и мощность звездообразования (следовательно, и IR и радио излучения) сильно зависят от того, является ли галактика изолированной, с сложной структурой (кратные ядра, сливающиеся галактики - mergers), или же входит во взаимодействующую систему (см., например, [64-72]). В частности, в выборках галактик, составленных из IR обзоров доля взаимодействующих систем растет с увеличением светимости [29,70,73,74]. Результаты исследований [29] показали, что во

взаимодействующих галактиках примерно половина представляет собой системы, в которых обе галактики являются IR активными (т.е., $K-L > 0.5$ или $L_{IR}/L_* > 1.34$), другая половина состоит из пар, в которых только один компонент является IR активным. Лоуренс и др. [73] показали, что в среднем 15% галактик независимо от светимости могут быть взаимодействующими галактиками. Избыток взаимодействующих галактик, доля которых растет с увеличением светимости, составляет от 15% до 35%. Таким образом, большая часть ГВЗ с высокой светимостью не входит во взаимодействующие системы. Поэтому авторы указанной работы считают, что во взаимодействующих и изолированных галактиках действуют различные механизмы возбуждения звездообразования. В работе [75] авторы проводят детальное исследование этого вопроса. Было показано, что спектроскопически взаимодействующие и изолированные ГВЗ объекты не отличаются друг от друга. Другой интересный результат этих исследований это существование класса галактик, как, например, IRAS 14575+3256, 13442+2321, 14202+2615, которые не входят во взаимодействующие системы и не показывают активность ядра, хотя их светимость больше $10^{12} L_\odot$. Для понимания причин вспышки звездообразования авторы предполагают, что в этих галактиках существуют два разных типа облака. Один из облаков представляет область недавнего звездообразования с $A_V \sim 20$, а другое - область звездообразования диска галактики с $A_V \sim 1$.

Во взаимодействующих галактиках процент пар, оба компонента которых являются спиральными галактиками, выше, чем пар спирально-эллиптическая или спираль-иррегулярная [72]. IR светимости и цвета взаимодействующих и изолированных галактик находятся в одних и тех же пределах, однако, распределение этих параметров для двух групп галактик существенно отличается друг от друга. Взаимодействующие галактики, соответственно, 2.5 и 10 раз ярче по светимости и поверхностной яркости, чем изолированные галактики [72]. Кил, ван Соест [69] исследовали 516 ГВЗ объекты из списков Маржаряна. Они показали, что примерно 36% этих объектов являются кратными галактиками. Исследование этих авторов также показало, что кратные и изолированные маржаряновские галактики не отличаются друг от друга по темпу и эффективности звездообразования.

Усиление эффективности звездообразования во взаимодействующих галактиках зависит от относительного расстояния между компонентами системы. Так, например, в двойных галактиках, относительное расстояние которых составляет 50 кпк и больше, эффективность звездообразования

примерно такая же, что и в изолированных галактиках [76]. Уменьшение относительного расстояния между компонентами приводит к увеличению эффективности звездообразования (см., например, [64,77,78]). Мазарелла и др. [64] исследовали маркарянские галактики с кратными ядрами [79]. Они показали, что в этих системах эффективность вспышки звездообразования выше, чем в других, оптически отобранных взаимодействующих системах и изолированных галактиках, даже в том случае, когда галактики с активными ядрами исключались из анализа. Однако они уступают сверхмощным IR галактикам ($>10^{12}L_{\odot}$). Согласно [64] в галактиках Маркаряна с кратными ядрами вклад теплового компонента ($T=40$ К) составляет примерно 55%, а в сверхмощных IR галактиках $T=50$ К и его вклад 80%. На рис. 1, который заимствован из работы [64], приведена зависимость f_{12}/f_{25} от f_{60}/f_{100} с использованием модели, предложенной в [5]. Непрерывные линии показывают интенсивности теплового компонента межзвездного радиационного фона, рассчитанные согласно модели, значения которых от 20 до 160 раз больше, чем значение интенсивности локального поля. Пунктирные линии соответ-

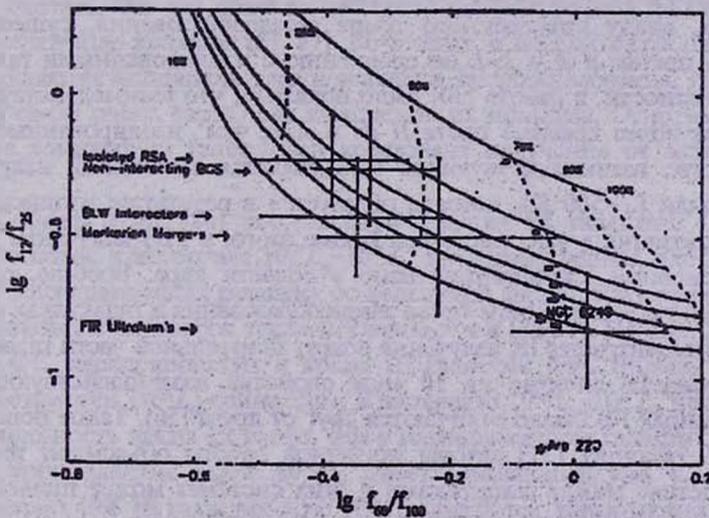


Рис. 1. Зависимость f_{12}/f_{25} и f_{60}/f_{100} для четырех выборок галактик: изолированные галактики (RSA) из [80]; не взаимодействующие галактики (non-interacting BGS) из списка ярких IRAS галактик [22]; взаимодействующие (BLW interactors) [77]; галактики Маркаряна с кратными (или сближающимися) ядрами (Markarian mergers) [64]; сверхмощные (FIR ultraluminous) IR галактики [81].

вуют расчетам модели, при значениях отношения интенсивностей теплого и холодного компонентов меняющиеся от 10% до 100%. На рис. 1 указаны расположения изолированных галактик из [80]; невзаимодействующих галактик из списка ярких IRAS галактик [22]; взаимодействующие галактики, отобранные по морфологическим признакам в оптических лучах [77]; галактики Маркаряна с кратными ядрами [64] и сверхмощные IR галактики [81]. Наиболее известные галактики с активным звездообразованием NGC 6240 и Ayr 220 также указаны на этой диаграмме. Видно, что относительный вклад излучения теплового компонента, обусловленного активностью звездообразования, возрастает от 35% для изолированных галактик до 80% для сверхмощных IR галактик. Следует ожидать, что число галактик с кратными ядрами должно увеличиваться, если их поиск проводить на радиоволнах, так как они свободно проходят через толстый слой пыли, чего нельзя сказать о видимых лучах. Так, например, недавно Норрис и Форбс [82] у галактики NGC 3256 обнаружили второе ядро, не заметное в видимых лучах.

Эффект гравитационного взаимодействия спиральных галактик в NIR и MIR областях исследовался в ряде работ ([30,56,83], там же ссылки на другие работы). Эти исследования показали, что в взаимодействующих галактиках, ввиду повышенного темпа звездообразования, существуют избытки в цветах *H-K* и *K-L* по сравнению с изолированными галактиками. В частности, в работе [30] было показано, что взаимодействующие ГВЗ имеют более красные цвета *H-K* и *K-L*, чем изолированные ГВЗ. Это свойство взаимодействующих ГВЗ является следствием излучения горячей пыли ($T \sim 500$ K), которая образуется в результате интенсивного звездообразования в этих системах. Кроме этого, в ГВЗ излучение на 2.2 мкм, в основном, сконцентрировано в области ядра. Вообще, следует отметить, что с увеличением темпа звездообразования в галактиках увеличивается концентрация IR излучения вокруг центральной части галактики. В MIR области спектра на 10 мкм свойства взаимодействующих и изолированных ГВЗ мало отличаются друг от друга [56]. Такое поведение взаимодействующих ГВЗ авторы указанной работы объясняют тем, что взаимодействие между галактиками в этих системах может приводить к увеличению темпа звездообразования, однако в этом случае область звездообразования занимает большую площадь и тем самым уменьшается поверхностная яркость центральной части галактик на 10 мкм.

Недавно Лич и др. [70] исследовали выборку из 43 мощных и

сверхмощных IR галактик. Согласно [70] примерно 67% выборки составляют взаимодействующие или сливающиеся галактики. Остальные (33%) галактики не показывают признаков взаимодействия. Если в случае взаимодействующих галактик вспышка звездообразования предположительно является следствием гравитационного взаимодействия между компонентами пар, то в случае галактик без признаков взаимодействия, причины, приводящие к активности звездообразования, неизвестны. Примерно тот же результат был получен в [84]. Однако, согласно [85], более 90% сверхмощных IR галактик показывают признаки взаимодействия.

3. *Мощные и сверхмощные ИК галактики.* До запуска IRAS было известно всего лишь несколько галактик, ярких в IR диапазоне. IRAS обзор обнаружил, что существует большое количество галактик, основное излучение которых наблюдается в FIR области спектра. Более того, согласно [86], галактики с $L_{\text{IR}} > 10^{11} L_{\odot}$ доминируют в локальной Вселенной ($z < 0.1$) среди объектов, болометрическая светимость которых выше указанного предела. Их пространственная плотность выше, чем плотность оптических квазаров. Исследование мощных и сверхмощных объектов является весьма важным по ряду причин. Во-первых, есть основания считать, что эти объекты являются промежуточной фазой эволюции от галактик до квазаров [81, 87]. Во-вторых, в этих объектах одновременно проявляются активность ядра и вспышки звездообразования. Исследование этой связи очень важно для выяснения их природы. Отметим, что в них часто доминирует нетепловой компонент излучения от активного ядра [81].

Сойфер и др. [86] построили ФС ярких IR галактик. Согласно их результатам, в интервале $10^{10} L_{\odot} - 10^{11} L_{\odot}$ пространственная плотность ярких IR и маркаряндовских галактик со вспышкой звездообразования примерно одинакова. Этот вопрос также исследовался в [88, 89]. На рис. 2 приведены FIR ФС маркаряндовских и ярких IR галактик [89]. Видно, что обе ФС до светимости $10^{9.5} L_{\odot}$ одинаковы. В интервале $10^{9.5} L_{\odot} - 10^{11} L_{\odot}$ пространственная плотность ярких IR выше, чем у маркаряндовских галактик. Поведение ФС этих галактик выше $10^{11} L_{\odot}$ имеет одинаковый вид. Согласно [89], примерно 40% IR галактик ярче $10^{10.5} L_{\odot}$ являются галактиками Маркаряна.

Многочастотные наблюдения сверхмощных IR галактик выявили ряд интересных результатов [68, 70, 81, 87, 90]. Спектроскопические исследования показывают, что их ядра часто имеют особенности ядер сейфертовских галактик. Сверхмощные IR галактики имеют морфологические peculiar-

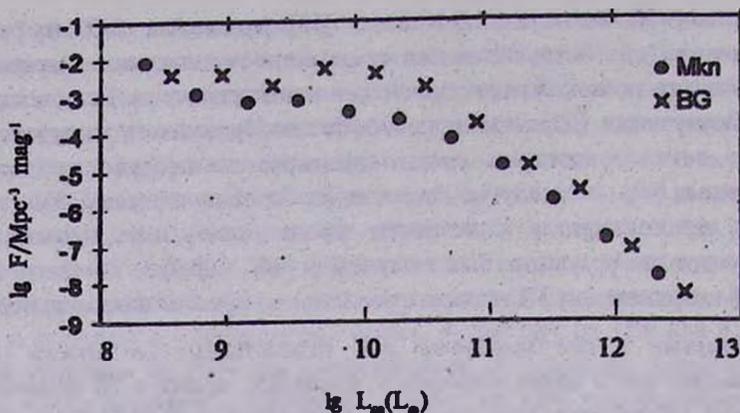


Рис. 2. Функции FIR светимостей маркьяновских [89] и ярких IR галактик [86].

ности (кратные ядра, сливающиеся и взаимодействующие системы, одиночные и двойные хвосты и т.д.). Мелник, Мирабел [68] установили, что в этих галактиках расстояние между кратными ядрами или сливающимися галактиками порядка 10 кпк. Они предполагают, что подобная структура в сверхмощных IR галактиках является необходимым условием для возникновения сверхвысышек звездообразования. Детальное морфологическое исследование также показало, что в хвостах сверхмощных IR галактик наблюдаются цепочки голубых образований, светимость которых близка к светимости голубых карликовых галактик. Так, например, в системе "Сверхантенна" (IRAS 19254-7245) на расстоянии 200 кпк от ядра была обнаружена такая цепочка [90]. Наличие подобных образований в сверхмощных IR галактиках позволило предположить, что взаимодействие галактик (или их ядер) помимо возбуждения звездообразования в центральной части системы, может быть также причиной выброса голубых карликовых галактик в межгалактическое пространство [91]. Высокая светимость и повышенное содержание газа и пыли (до $6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$) в этих галактиках позволили предположить [81], что они представляют начальную фазу эволюции квазаров, когда они окутаны толстым слоем пыли. Со временем, под воздействием лучевого давления и сверхновых звезд, оболочка пыли постепенно становится прозрачной для видимых лучей и эти объекты наблюдаются как оптические квазары (см., также [92]). Санлерс и др. [81] исследовали распределение энергии этих объектов от оптики до 100 мкм. Анализ этих данных, а также степень компактности

излучения на 10 мкм показывают, что примерно 90% излучения исходит от активного ядра, и только 10% - от областей звездообразования. В случае мощных IR галактик вклад ядра составляет 30%, а от областей звездообразования 70% (см., также [33, 35]). Вейлло и др. [35] на основе оптических спектров ярких IR галактик обнаружили, что в этих галактиках наблюдаются выбросы газа. В качестве возможного источника энергии в сверхмощных IR галактиках Кондон и др. [93] предлагают модель интенсивного звездообразования (super starburst) в центральной части галактики. К этому вопросу мы вернемся в разделе 5.

4. *Молекулярный газ в ярких IR галактиках.* В процессе активного звездообразования наблюдается повышенное содержание молекулярного газа. Поэтому для понимания процессов звездообразования необходимо иметь представление о распределении и содержании молекулярного газа в галактиках, его отношении к атомарному газу. Основным компонентом молекулярного газа в галактиках является молекула водорода. Однако непосредственное наблюдение H_2 затруднено тем, что ее главные переходы излучают в IR и UV областях и не доступны наблюдениям с Земли. Поэтому для оценки содержания H_2 используют наблюдения молекулы CO ($J=1-0$, $\lambda=2.6$ мм) (см., например, обзор [4], там же ссылки на другие работы).

В последние годы были опубликованы обзоры, посвященные свойствам газа в галактиках. Так, например, Янг, Сквилл [4] провели обзор теоретических и наблюдательных работ исследования молекулы CO, которая является индикатором газа менее плотных областей ($<1000 \text{ см}^{-3}$), так как имеет небольшой электрический дипольный момент и возбуждается при низких плотностях. Хенкел и др. [9] уделили основное внимание исследованиям тех молекул, которые являются индикаторами плотных ($>10^4 \text{ см}^{-3}$) областей (HCN, CS, CH_3OH , OH, H_2O и др.). Обзоры [6-10] посвящены мегамазерным источникам, которые отражают наиболее ранние стадии звездообразования в галактиках. Поэтому в настоящем разделе мы вкратце остановимся только на некоторых свойствах газа в IR ярких галактиках, которые отражают процессы звездообразования в них.

В галактиках масса молекулярного водорода меняется в широком диапазоне, от $10^7 M_\odot$ для нормальных галактик до $5 \cdot 10^{10} M_\odot$ для сверхмощных IR галактик. В предыдущем разделе было отмечено, что в мощных и сверхмощных IR галактиках активное звездообразование в основном

протекает в центральной части галактики. Поэтому IR излучение в этих галактиках сосредоточено в центральной части (< 1 кпк) (см. также [94]). Наблюдения этих же галактик в линии молекулы CO с высоким разрешением показали, что молекулярный газ чаще сконцентрирован в центральной области с размером 1-3 кпк, чем равномерно распределен по диску галактики [95-101]. В частности, у прототипа сверхмощных IR галактик *Agr 220* примерно 50% CO газа с массой $10^{10} M_{\odot}$ сосредоточено в области с радиусом 315 пк [98]. В спиральных галактиках с перемычкой молекулярный газ в основном распределен вдоль перемычки [102]. В галактике NGC 3351 перемычка молекулярного газа ориентирована перпендикулярно к оптической перемычке [103]. Есть основание предположить, что в галактиках с $L_{FIR} > 10^{10} L_{\odot}$ молекулярная перемычка является распространенным образованием. Таким образом, IR и молекулярное излучения в IR галактиках исходят из одинаковых областей. На это указывает также тот факт, что IR и CO излучения сильно коррелируют друг с другом в широком диапазоне светимостей [104-109]. Между тем в ярких IR галактиках содержание атомарного водорода не коррелирует с IR излучением (см., например, [110,111]), хотя в галактиках с низкой светимостью ($< 10^{10} L_{\odot}$) наблюдается определенная связь между L_{FIR} и M_{HI} [23,103]. Отсутствие связи между L_{FIR} и M_{HI} в ярких IR галактиках обусловлено тем, что в этих объектах нейтральный водород связан с холодным компонентом FIR излучения ($T < 30$ K), к которому IRAS мало чувствителен. Кроме этого, в центральных областях этих галактик происходит трансформация HI в H_2 и поэтому наблюдается дефицит содержания HI [89,112-114]. Янг, Кнезек [112] из анализа данных наблюдений CO [115] и HI для 142 спиральных галактик нашли, что отношение масс молекулярного и атомарного водорода (M_{H_2}/M_{HI}) зависит от морфологического типа, оно уменьшается при переходе от S0-Sa к Sd-Sm галактикам. Среднее значение M_{H_2}/M_{HI} составляет 4.0 для S0-Sa галактик и 0.2 для галактик Sd-Sm. Если подобное поведение отношения M_{H_2}/M_{HI} отражает факт трансформации атомарного водорода в молекулярный, то следует заключить, что она протекает более эффективно в ранних спиральных, чем в поздних. В [89] было получено, что в изолированных маржариновских галактиках не наблюдается дефицит атомарного водорода, и в этих галактиках содержание HI примерно в 2 раза больше, чем в маржариновских галактиках со сложной структурой. В случае последних объектов наблюдается дефицит содержания HI, и содержание молекулярного водорода примерно в 2 раза больше, чем у изолированных галактик

Маркаряна. В среднем, в маркаряновских галактиках примерно 70% HI может быть трансформировано в H_2 . Интерферометрические наблюдения в линии HI у некоторых галактик показали, что поверхностная плотность HI растет при переходе от S0-Sa к Sc-Sd галактикам [116], что подтверждает поведение M_{H_2}/M_{HI} от морфологического типа. Тассони, Янг [117] исследовали радиальное изменение M_{H_2}/M_{HI} в галактике NGC 6946. Было получено, что это отношение уменьшается с ростом расстояния от центра галактики.

Отношение L_{FIR}/M_{H_2} часто используется в качестве оценки эффективности звездообразования. Это отношение в галактиках локальной Вселенной меняется от $4L_\odot/M_\odot$ (наша Галактика) до $200L_\odot/M_\odot$ (Маркарян 231). Исследования показали, что эффективность звездообразования не зависит от морфологии галактик [104,112,118,119], но тесно связана со структурой (кратные ядра, сливающиеся галактики) и окружением галактики (двойные, взаимодействующие галактики и т.п.) [81,105,106,109,118,120]. Эти исследования показали, что в сильно взаимодействующих галактиках L_{FIR}/M_{H_2} на порядок выше, чем в изолированных галактиках. Примером сильно взаимодействующей (или сливающейся) галактики является система NGC 4038 и NGC 4039, которая известна под названием "Антенна". В ее компонентах наблюдается повышенное содержание H_2 , что является следствием активного звездообразования в них.

Сопоставление масс молекулярного водорода и пыли в ярких IR галактиках показало, что, во-первых, содержание H_2 тесно коррелирует с тепловым компонентом излучения пыли и, во-вторых, массы H_2 и пыли связаны линейно [104,106]. В этих галактиках эффективность звездообразования сильно зависит от температуры пыли: $(L_{FIR}/M_{H_2} \sim T_d^{5.6})$ [106]. Следует отметить, что отношение массы молекулярного водорода к массе пыли в ярких галактиках достигает 600, что примерно в 4 раза больше, чем в Галактике. Если к молекулярной массе прибавить еще массу атомарного водорода, то отношение масс газа и пыли составит примерно 1000.

Выше было отмечено, что CO позволяет исследовать менее плотные слои газа в галактиках. Молекулы HCN, CS, SO [9] позволяют исследовать более плотный газ в галактиках, который непосредственно связан с образованием OB звезд. К сожалению число галактик, в которых были обнаружены эти молекулы, невелико (около двух десятков), так как они являются менее обильными, чем CO (см., например, [121-125]). Наблюдения показали, что степень конденсации плотного газа вокруг ядра галактики выше, чем степень конденсации менее плотного газа

[126-129]. В частности, согласно [129], в галактиках NGC 253 и M82 отношение HCN/CO и HCO^+/CO уменьшается с ростом расстояния от центра. Тот же результат был получен на основании наблюдений молекул CN, CS [130]. В работе [124] было показано, что HCN и HCO^+ излучения слабо коррелируют с CO излучением нормальных галактик. Между тем у сейфертовских галактик и ГВЗ HCO^+ излучение тесно связано с CO и синхротронным радиоизлучением. Эти результаты указывают на то, что свойства плотного газа (обилие, температура возбуждения) меняются от галактики к галактике. Так, например, температура возбуждения в галактиках M 82 и IC 342 порядка 10 K, а в галактике NGC 253 она в 2 раза больше. Плотность газа в этих галактиках составляет $5 \cdot 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$, а размеры отдельных конденсаций, вероятно, меньше 50 пк. Исследования плотного газа в сверхмощных IR галактиках дали интересные и неожиданные результаты [125,131,132]. Наблюдения в линии HCN обнаружили, что в этих галактиках существует огромная масса плотного газа, $3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ в Mkn 231, что примерно в 300 раз больше, чем в Галактике, и сосредоточена в пределах 500 пк. Интерферометрические наблюдения галактики Agr 220 с разрешением $2''$ [132] показали, что область излучения HCN имеет такой же размер. Масса плотного газа в сверхмощных IR галактиках сравнима с массой менее плотного газа, определенной из CO наблюдений. Отношение светимостей в FIR и HCN одинаково в сверхмощных IR и нормальных галактиках. Это показывает, что масса плотного газа не зависит от IR светимости и структуры галактики [125].

В конце этого раздела мы рассмотрим основные результаты исследований галактик с мегамазерным излучением.

До сих пор мазерное излучение у галактик обнаружено в линиях молекул OH, H_2O , CN и H_2CO (см., например, обзоры [6-10]). Из перечисленных молекул радикал гидроксила (OH, $\lambda=18 \text{ см}$) исследовался сравнительно более полно. Разными авторами в общей сложности было обнаружено около 50 галактик с мегамазерным излучением OH (они получили название "мегамазеры" потому, что их изотропная светимость в миллион и более раз больше, чем светимость типичных сильных OH мазеров нашей Галактики) ([133-139], ссылки же в них). Галактика Agr 220 была первой галактикой, у которой было обнаружено мегамазерное излучение OH [140]. Недавно, Баан и др. [141] у галактики IRAS 14070+0525 обнаружили гигамазерное излучение OH. Существование гигамазеров было обосновано в работах [8, 142]. Основные особенности мегамазеров OH таковы:

а) Галактики с мегамазерным излучением богаты молекулярным газом ($M_{H_2} \sim 5 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^{10} M_\odot$) и имеют высокую IR светимость ($L_{FIR} \sim 10^{11} - 10^{13} L_\odot$). Область мазерного излучения имеет размер < 1 пк, а плотность молекулярного газа составляет $> 10^5 \text{ см}^{-3}$.

б) Мегамазерные галактики показывают активность ядра и высокий темп звездообразования в ядерной области. Вообще для возникновения мегамазерного излучения ОН наличие в галактике одновременно интенсивного звездообразования и активности ядра (с сильным радиоконтинуумом) является необходимыми условиями. Поэтому исследование этих объектов может пролить свет на связь активность ядра-звездообразование в центре галактики.

в) Эти галактики имеют крутой IR спектр в диапазоне 12 - 25 мкм ($f_{25}/f_{12} > 4.2$) и пологий спектр в диапазоне 60-100 мкм ($f_{100}/f_{60} < 1.4$). Кроме этого, изотропная ОН светимость пропорциональна квадрату FIR светимости (см. ниже).

г) Профили линии ОН часто показывают широкие крылья, смещенные в голубую сторону от пика на частоте 1667 МГц, что свидетельствует о наличии выбросов газа из ядерной области галактики. Наблюдения мегамазерных галактик показали, что плотности потоков радиоизлучения (континуум) и в линии ОН примерно одинаковы. С другой стороны, хотя число наблюдений с высоким разрешением ($\ll 1''$) невелико (всего 4

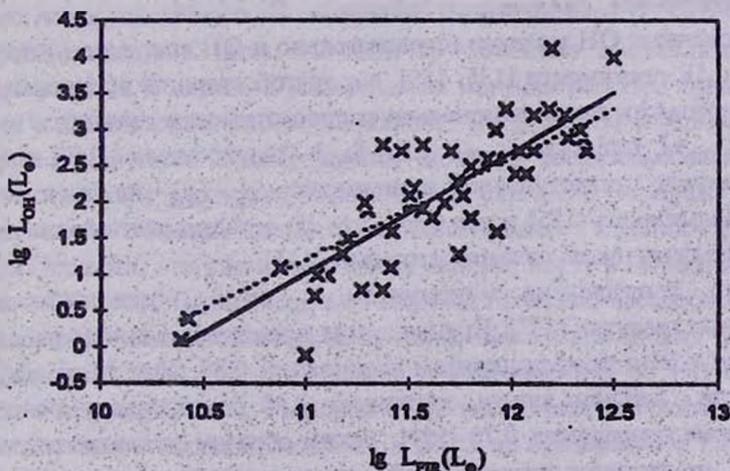


Рис. 3. Зависимость между L_{OH} и L_{FIR} для 49 ОН мегамазерных галактик [157]. Прямая линия представляет линию регрессии с наклоном 1.66, а пунктирная (наклон 1.38) - линию регрессии после учета эффекта Малмквиста.

галактики: Ayr 220, Mkn 273, III Zw 35, IRAS 17208-0014) [143-149], они показывают, что излучающее облако OH наложено на источник радиоконтинуума. Эти факты указывают на то, что в мегамазерных источниках осуществляется слабое усиление излучения радиоконтинуума ядра в ненасыщенном режиме [143]. Инверсия уровней молекулы OH происходит под воздействием мощного IR излучения галактики [6,9, 151-153]. Мегамазерное излучение OH методом РСДБ исследовалось только у Ayr 220 [146, 150]. Согласно работе [150] основное излучение исходит из области с размером <10 пк, а максимум линии излучает область с размером <1 пк. Примерно 70% интегрального излучения линии исходит от области <10 пк, т.е. мазерное облако занимает объем $<10^3$ пк³. Оценки показали, что мегамазер в Ayr 220 накачивается компактным (<30 пк) и теплым ($T >150$ К) IR источником, окруженным холодной пылью с размером >100 пк, а эффективность накачки >0.01 . Высокий процент эффективности накачки свидетельствует о том, что в Ayr 220 основное излучение OH исходит от компактного ядра, а не от протяженной области звездообразования вокруг ядра [150]. Мартен и др. [154] показали, что оптическая толщина линии OH уменьшается с увеличением ширины линии и увеличивается с ростом IR светимости. Таким образом, при фиксированном значении IR светимости с уменьшением ширины линии OH светимость растет. Теперь перейдем к обсуждению связи $L_{OH} \sim L_{IR}^2$ [133,151]. Эта связь в рамках ненасыщенного мазерного излучения интерпретируется следующим образом: С одной стороны, число инвертированных OH молекул (следовательно и OH светимость) пропорционально IR светимости [135, 153], а с другой стороны предполагается, что IR светимость пропорциональна радиосветимости галактики в континууме ($L_{IR} \sim L_R$), и тогда $L_{OH} \sim L_{IR} \cdot L_R \sim L_{IR}^2$. Однако анализ [157] показал, что при выводе статистической зависимости $L_{OH} \sim L_{IR}^2$ не были учтены эффект Малмквиста [155] и тот факт, что IR и радио светимости необязательно должны быть связаны линейно [156].

На рис. 3 приведена зависимость L_{OH} от L_{IR} для выборки 49 мегамазерных галактик [157]. Прямая линия представляет линию регрессии с наклоном 1.66 и коэффициентом корреляции 0.85. При учете эффекта Малмквиста наклон линии составляет 1.38 (пунктирная линия), а коэффициент корреляции 0.70 [157]. Таким образом зависимость между L_{OH} и L_{IR} не является квадратичной, как принималось раньше. В [157] также исследовалась связь между L_{IR} и L_R для этой выборки мегамазеров. Из 49 объектов для 35 галактик известны данные наблюдений с

разрешением $<5''$ в радиоконтинууме (в основном из VLA наблюдений). Анализ этих данных показал, что IR и радио светимости центральных компонент связаны соотношением $L_R - L_{FR}^{0.9}$ (коэффициент корреляции 0.85) [157]. С другой стороны, согласно (см., например, [93,156,158,159]) IR - радио связь в различных частях галактики различна. Эта связь намного сильнее в ядерной области галактики, чем в области диска. Однако, в ядерной области, в масштабе миллисекунды дуги, согласно [158] эта связь вовсе отсутствует. Лонсдейл и др. [158] опубликовали результаты РСДБ наблюдений 31 галактики с мощным IR излучением. Из этого списка 13 объектов являются также мегамазерными галактиками. Оценки [157] показали, что для 13 галактик на самом деле корреляция между IR и радио светимостями существует ($L_R - L_{FR}^{0.6}$, коэффициент корреляции 0.6), а для остальных 18 галактик без ОН излучения эта связь действительно отсутствует. Таким образом, складывается следующая картина: во-первых, связь между L_{OH} и L_{FR} не является квадратичной и, во-вторых, нельзя принимать, что L_R и L_{FR} всегда связаны линейно. При обсуждении связи L_R и L_{FR} в мегамазерных галактиках необходимо, чтобы эти величины относились к той области, где происходит мазерное излучение. Вышеизложенные вопросы о мегамазерных галактиках более подробно рассмотрены в [157]. Теперь рассмотрим мазерное излучение других молекул, которые были обнаружены в галактиках.

По нашим данным, к настоящему моменту известны 18 галактик, у которых обнаружено мазерное излучение водяного пара (H_2O , $\lambda=1.35$ см) ([160-162], ссылки в них). Из них 10 объектов составляют группу мегамазерных H_2O галактик (списки этих мегамазеров H_2O приведены в [161,162]). В некоторых близких галактиках (M33, БМО) мазерное излучение H_2O обнаружено в направлении областей звездообразования. Эти мазеры по своим характеристикам очень близки к мазерам, которые встречаются в областях звездообразования нашей Галактики [163]. По всей вероятности, эти внегалактические мазеры, как и в Галактике, встречаются в ОВ-ассоциациях, которые являются очагами звездообразования и локальные области звездообразования находятся в них [163,164]. Наблюдения в БМО были проведены в направлениях 80 НП областей, но было обнаружено всего 4 мазерных H_2O источника, что свидетельствует о низкой частоте звездообразования в БМО по сравнению с Галактикой [160]. Мегамазеры H_2O в отличие от мазеров в близких галактиках, наблюдаются в ядерной области галактики. Характерной особенностью мегамазеров H_2O является широкий интервал их лучевых скоростей (до

700 км/с), высокая светимость и компактность области излучения (<1 пк). Мегамазеры H_2O наблюдаются преимущественно в активных галактиках и среди них высок процент Сейфертовских галактик 2-го типа [162]. Иногда мегамазеры H_2O показывают лучевые скорости, отличные (до 300 км/с) от скорости материнской галактики, как, например, в NGC 3079, NGC 4258, NGC 1068, Mkn 1210. Мегамазеры H_2O пространственно не совпадают с областями излучения OH мазеров. Согласно Хасчик, Баан [165] мегамазер в галактике NGC 4258 показывает быструю переменность излучения. На основе переменности излучения они предположили, что мазерное усиление в NGC 4258 является ненасыщенным. Недавно, Накаи и др. [166] сообщили об обнаружении переменных, высокоскоростных компонентов мазерного излучения у этой галактики. Эти компоненты смещены от главного компонента на ± 1000 км/с. Компонент, смещенный в красную сторону, показывает переменность излучения и лучевой скорости. РСДБ наблюдения показали, что этот компонент смещен от главного компонента примерно на 1.6 пк. Авторы предполагают, что главный компонент излучает в ненасыщенном режиме, а компонент, смещенный в красную сторону, излучает в насыщенном режиме. Возникновение этих компонентов в NGC 4258 авторы связывают с рассеянием излучения главного компонента в плотной плазме.

Мегамазер радиолинии формальдегида (H_2CO , $\lambda=6.2$ см) является индикатором среды со средней плотностью молекулярного водорода ($n_{H_2} \sim 10^2-10^5$ см $^{-3}$). Это излучение пока надежно обнаружено у 8 галактик (список приведен в [167], и ссылки в ней). У 9 галактик формальдегид обнаружено в поглощении. Некоторые галактики, как, например, NGC 253 и NGC 3079 показывают как излучение, так и поглощение H_2CO . Обычно эмиссия H_2CO и OH показывают сходные свойства. Ненасыщенный мазер с низким усилением хорошо объясняет излучение этой молекулы [167, 168].

Мазерное излучение CN на волне 9.1 см обнаружено у 9 галактик (см., например, [154]). Вопросы качества мазера CN обсуждались в [153]. Структуры вращательных уровней CN и OH очень похожи. Однако излучение CN возбуждается в среде с относительно меньшей плотностью, чем излучение OH. По всей вероятности молекулы OH, H_2CO и CN возбуждаются в разных слоях того же облака.

5. IR - радио связь в галактиках. Радионизлучение галактики состоит из двух компонентов: теплого и нетеплого. Нетепловой

компонент обусловлен синхротронным излучением, а тепловой компонент представляет свободно-свободное излучение от областей ионизированного водорода. Вклад этих компонент в интегральное излучение зависит от частоты и типа галактики. Так, например, тепловой компонент растет с частотой, в то время как нетепловой компонент слабеет. В спокойных галактиках тепловой компонент практически отсутствует и радиоизлучение характеризуется синхротронным излучением. В ГВЗ тепловой компонент растет, особенно на высоких частотах (>10 ГГц). В ряде работ предпринимались попытки разделить тепловой и нетепловой компоненты радиоизлучения галактик (см., например, [169-172]). Связь между IR и радио излучениями галактик исследовалась во многих работах (см., например, [48,93,158,170,172-180]). Было установлено, что IR - радио связь является универсальной зависимостью. Она наблюдается от нормальных до активных галактик и покрывает широкий диапазон светимостей ($\sim 10^5$). Часто наблюдается линейная связь между ними. Возникает естественный вопрос: почему эта связь универсальна и какие процессы ответственны за ее существование? Так как связь $L_{\text{IR}}-L_{\text{радио}}$ существует также для нормальных галактик, где активность ядра невелика то естественно, что не ядро галактики играет главную роль в существовании этой связи. Хотя это не означает, что в активных галактиках ядро не влияет на эту связь, однако этот вопрос мало исследован. Процесс звездообразования протекает во всех галактиках, вследствие чего возникают тепловое и нетепловое излучения. Поэтому, многие справедливо считают, что корреляция между IR (тепловое излучение) и радио (тепловое+нетепловое) излучениями является следствием звездообразования в галактиках. Предполагается, что во время звездообразования помимо ионизирующего излучения возникает также поток космических лучей. Ионизированный газ излучает тепловое радиоизлучение, а электроны космических лучей, взаимодействуя с магнитным полем, излучают синхротронное радиоизлучение. В ряде работ показано, что во время звездообразования массивная звезда ($>8M_{\odot}$) может вспыхнуть как сверхновая звезда II или Ib типов. Звезда с массой $5-8M_{\odot}$ в конце своей жизни также может вспыхнуть как сверхновая звезда (см., например, [177,181]). Биерман [181] и Улвестад [182] показали, что светимость нетеплового радиоизлучения пропорциональна частоте вспышек сверхновой. Таким образом, нетепловое радиоизлучение зависит от частоты звездообразования массивных звезд ($>5M_{\odot}$). С другой стороны эти же звезды являются причиной возникновения теплового IR и радио излучений. Поэтому в галактиках

мы наблюдаем тесную линейную связь между IR и радио излучениями, и причиной этой зависимости является звездообразование. Другой важной задачей является выяснение причин, которые иногда приводят к отклонению указанной зависимости от линейной [183]. К нелинейности могут приводить те компоненты IR и радио излучений, которые не являются следствием звездообразования в галактике. В частности, если холодный компонент IR излучения связан с пылью, нагретой старыми звездами, то его вклад в L_{IR} приводит к увеличению наклона (>1) между L_R-L_{IR} [184,185]. Часть космических лучей может покинуть галактику посредством диффузии и не будет участвовать в указанной корреляции [186,187]. Эти эффекты могут проявляться, в основном, в галактиках с низкой светимостью. Кондон и др. [93] показали, что учет этих факторов не может привести к линеаризации зависимости L_R-L_{IR} . Поэтому они предложили эмпирический метод линеаризации, считая, что, во-первых, массивные звезды ($>8M_{\odot}$) могут внести существенный вклад в холодный компонент IR излучения [19,188], во-вторых, менее массивные звезды могут быть причиной существования диффузного IR излучения, где уровень радиоизлучения невелик [177]. Вопрос линеаризации исследовался также в [48,172,177,178]. Хю и др. [177] рассматривали связь L_R-L_{IR} в рамках колориметрической модели, предполагая, что частота ускорения электронов космических лучей пропорциональна частоте вспышек сверхновых звезд. Средняя продолжительность жизни этих электронов $<10^4$ лет и они теряют свою энергию посредством обратного Комптон-эффекта и синхротронного излучения. В этой схеме радиосветимость слабо зависит от магнитного поля ($B^{0.07}$). Также принимается, что массивные звезды ($>5M_{\odot}$, возраст $\sim 10^4$) ответственны за наблюдаемую корреляцию, а звезды с массой $<5M_{\odot}$, возраста $3 \cdot 10^9$ лет не вносят существенный вклад в радио и IR излучения. Именно вклад звезд с массой $<5M_{\odot}$ является основной причиной нелинейной зависимости между нормализованными к массе галактики светимостями $L_R/M-(L_{IR}/M)^{1.45}$. Таким образом, согласно Хю и др. [177] нелинейность между IR и радио излучениями возникает вследствие того, что разные галактики имеют разные "истории" звездообразования (star formation history - отношение числа старых звезд к числу молодых звезд). Хю и др. [178] показали, что звезды с промежуточной массой ($5-20M_{\odot}$) могут вносить существенный вклад в нетепловое радиоизлучение и в холодный компонент IR излучения. Согласно их оценке в спиральных галактиках имеет место следующая связь между радио и IR излучениями: теплый компонент IR излучения

коррелирует с тепловым радиоизлучением, а холодный компонент IR излучения тесно коррелирует с нетепловым радиоизлучением галактики. Следует отметить, что последняя связь является более тесной, чем первая. Согласно [172], связь - тепловое радиоизлучение - FIR излучение галактик имеет наклон 0.97, а связь синхротронное радиоизлучение - FIR излучение имеет наклон 1.33. Они также получили, что на высоких светимостях доминирует синхротронное радиоизлучение, а на низких - тепловое радиоизлучение. В результате этого на высоких частотах (15 ГГц) связь L_R-L_{FIR} является линейной, а на низких частотах (408 МГц) эта связь нелинейна (наклон ~ 1.15). Вообще, наблюдения показывают, что на высоких частотах, где вклад теплового радиокомпонента излучения выше, чем синхротронного, наклон зависимости L_R-L_{FIR} близок к единице, а на низких частотах этот наклон больше единицы (1.1-1.3), так как на этих частотах вклад синхротронного радиоизлучения больше, чем теплового радиокомпонента. Нелинейность зависимости L_R-L_{FIR} для синхротронного излучения объясняется тем, что хотя число электронов в космических лучах может быть зависимым от частоты звездообразования, другие физические характеристики синхротронного излучения (магнитное поле, возраст электронов) могут быть нелинейно связаны с частотой звездообразования [172]. Анализ наблюдательных данных показал, что связь L_R-L_{FIR} не зависит от морфологического типа галактики, а также от наличия перемишки [189]. В галактиках с высокой светимостью, где вклад активного ядра существенный, связь L_R-L_{FIR} может быть нелинейной, однако этот вопрос практически не исследован. Недавно Сопп, Александер [190] исследовали IR - радио связь для активных галактик. Было показано, что в радиоспокойных активных галактиках эта связь такая же, как в нормальных и ГВЗ. Поэтому они предполагали, что IR и радио излучение в таких активных галактиках обусловлено вспышкой звездообразования в материнской галактике, а не активностью ядра. Этот вопрос более подробно исследован в [191]. В частности, используя модель непрерывного звездообразования, авторы [192] получили, что вспышка звездообразования вполне может объяснить IR - радио связь в радиоспокойных активных галактиках с $5.3 < \lg(L_{FIR}/L_R) < 6.6$ без привлечения активного ядра. Эта связь мало зависит от начальной функции массы и предельных значений масс во время звездообразования (см. также [170]). Однако чистая модель вспышки звездообразования не в состоянии объяснить IR - радио связь для тех радиоспокойных активных галактик, которые имеют $4.5 < \lg(L_{FIR}/L_R) < 5.3$. В этом случае радиоизлучение галактики обусловлено

активным ядром. Вспышка звездообразования также не в состоянии объяснить IR - радио связь в радиомощных активных галактиках (радиогалактики, радиоактивные квазары). В этих системах доминирующую роль играет активное ядро. Перес-Олея, Колина [192] предложили более полную эволюционную модель сверхвспышки звездообразования [93] в галактиках. Согласно этой модели в околоядерной области галактики вследствие мгновенной вспышки звездообразования образуется скопление звезд с массой $5 \cdot 10^5 M_{\odot}$ (компактная или сверхвспышка звездообразования [93]). В дальнейшем наложение отдельных мгновенных вспышек приводит к непрерывной вспышке звездообразования. В рамках этой модели, первые 6 млн лет вспышки, когда звезды еще не достигли главной последовательности, вся энергия скопления ионизирует газ. Поэтому в этот период доминирует тепловое радиоизлучение (спектральный индекс 0.1). Далее звезды с массой $> 8 M_{\odot}$ начинают вспыхивать как сверхновые II типа и этот процесс продолжается около 40 млн лет. В этот период доминирует нетепловое радиоизлучение (спектральный индекс (0.5-0.7)).

В ряде работ было показано, что в мощных IR галактиках отношение L_{FIR}/L_R не зависит от IR светимости [156, 189]. Между тем, согласно [156], радиосветимость центрального компонента мощных ИК галактик обратно пропорциональна L_{FIR}/L_R . В рамках модели [191] эти зависимости можно легко объяснить. А именно, радио и IR излучения обусловлены компактной вспышкой звездообразования. С уменьшением отношения L_{FIR}/L_R увеличивается вклад ядра, что приводит к увеличению радиосветимости, в то время как IR светимость остается неизменной. Иначе говоря, вероятно, активное ядро в мощных и сверхмощных IR галактиках на FIR излучение не влияет и последнее полностью обусловлено вспышкой звездообразования. Это предположение согласуется с результатами исследований IR спектров активных галактик (см., например, [193] и ссылки в ней). Согласно этим исследованиям, в активных галактиках ядро вносит определенный вклад в NIR и MIR областях, а в FIR области вспышка звездообразования определяет это излучение.

6. Заключение. Наш обзор, конечно, не может претендовать на полноту в обсуждении IR и радио свойств галактик со вспышкой звездообразования. Мы пытались выделить лишь основные особенности и свойства этих галактик и высказать некоторые предположения. Иногда мы констатировали факты, которые пока не нашли объяснения.

Достижения последних лет в области радио и инфракрасной астрономии расширили наши знания в вопросах звездообразования в

галактиках. Однако многие вопросы остаются неразрешенными. В частности, влияет ли активность ядра на звездообразование и каким образом. Каковы механизмы звездообразования в центральной части и в диске галактики, особенности компонентов газа, их связь и пространственное распределение в областях звездообразования.

Дальнейшее увеличение чувствительности приемной аппаратуры и пространственного разрешения систем телескопов продвинут наши знания еще дальше. Поэтому, на наш взгляд, очередной прогресс в изучении областей звездообразования в галактиках следует ожидать после осуществления проектов Инфракрасная Космическая Обсерватория (Infrared Space Observatory, находится на орбите с 17 ноября 1995г. и первые научные результаты будут доступны в 1996г.) и Радиоастрон (Radioastron, 1997г.). Обнаружение новых и более слабых IR источников следует ожидать после осуществления проекта DENIS (Deep Near-Infrared Survey, 1996г.).

Автор выражает благодарность сотрудникам Бюраканской обсерватории А.Т. Каллоглян, Г.А. Арутюнян и Т.Ю. Магакину за полезные замечания.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория, Армения

STARBURST IN THE GALAXIES. THE PROPERTIES IN THE INFRARED AND RADIO BANDS

R.A.KANDALIAN

The review of infrared and radio properties of starburst in the galaxies is presented. It includes normal and starburst galaxies.

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.T.Soffer, J.R.Houck, G.Neugebauer*, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, **25**,187,1987.
2. *C.M.Telesco*, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, **26**, 343, 1988.
3. *C.M.Telesco*, IV Canary Island Winter School of Astrophys., eds. A. Mampaso, M.Prieto, F.Sanchez, Cambridge, 1993, 175.
4. *J.S.Young, N.Z.Scoville*, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, **29**, 581, 1991.
5. *J.J.Condon*, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.*, **30**, 575, 1992.
6. *В.В.Бурдюжка*, *Успехи Физ. Наук*, **155**, 703, 1988.
7. *R.J.Cohen*, *Rep.Prog.Phys.*, **52**, 881, 1989.
8. *W.A.Baan*, in *Skylines: Proc. 3d Haystack Conf.*, eds. A.D.Haschick, P.T.P. Ho (ASP Conf. Ser., **16**), 1991, 45.
9. *C.Henkel, W.A.Baan, R.Mauersberger*, *Astron.Astrophys.Rev.*, **3**, 47, 1991.
10. *M.Elitzur*, *Astrophys. Space Sci. Library*, **170**, 308, 1992.
11. *K.Sekiguchi*, *Astrophys.J.*, **316**, 145, 1987.
12. *G.Helou*, *Astrophys.J.*, **311**, L33, 1986.
13. *F.X.Desert*, in "Light on Dark Matter", ed. F.P. Israel, Dordrecht, Reidel, 1986, 213.
14. *T.Isobe, E.D.Feigelson*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, **79**, 197, 1992.
15. *N.A.Devereux, J.S.Young*, *Astrophys.J.*, **371**,515, 1991.
16. *D.Friedli, L.Martinet*, *Astron.Astrophys.*, **277**, 27, 1993.
17. *T.G.Hawarden, C.M.Mountain, S.K.Leggett, P.J.Puxley*, *Mon.Notic.Roy. Astron.Soc.*, **221**, 41, 1986.
18. *P.N.Appleton, C.Struck-Marcell*, *Astrophys.J.*, **312**, 566, 1987.
19. *N.A.Devereux, J.S.Young*, *Astrophys. J.*, **350**, L25, 1990.
20. *B.J. Smith, S.G.Kleinmann, J.P.Huchra, F.J.Low*, *Astrophys.J.*, **318**,161,1987.
21. *D.P.Carico, D.B.Sanders, B.T.Soffer, J.H.Elias, K.Matthews, G.Neugebauer*, *Astron.J.*, **95**, 356, 1988.
22. *B.T.Soffer, L.Boehmer, G.Neugebauer, D.B.Sanders*, *Astron.J.*, **98**,766,1989.
23. *Р.А.Кандалян*, *Астрофизика*, **38**, 405, 1995.
24. *J.P.Vader, J.A.Fragel, D.M.Terndrup, C.A. Heisler*, *Astron.J.*, **106**,1743, 1993.
25. *B.Rush, M.A.Malkan, L.Spinoglio*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, **89**, 1, 1993.
26. *M.Rowan-Robinson, T.Chester*, in "Light on Dark Matter", ed. F.P.Israel, Dordrecht, Reidel, 1986, 421.
27. *F.A.Desert, F.Boulanger, J.L.Puget*, *Astron.Astrophys.*, **273**, 215, 1990.
28. *C.Xu, G.Helou*, *Astrophys.J.*, **426**, 109, 1994.
29. *D.Lutz*, *Astron.Astrophys.*, **259**, 462, 1992.
30. *G.Giuricin, A.Biviano, M.Girardi, F.Mardirossian, M.Mezzetti*,

Astron.Astrophys., 275, 390, 1993.

31. *W.L.Rice, F.Boulanger, F.Viallefond, B.T.Soifer, W.L.Freedman, Astrophys.J.*, 358, 418, 1990.
32. *D.W.Weedman, F.R.Feldman, V.A.Balzano, L.W.Ramsey, R.A.Sramek, C.-C.Wu, Astrophys.J.*, 248, 105, 1981.
33. *S.Veilleux, Rev.Mex.Astron.Astrof.*, 27, 65, 1993.
34. *D.-C.Kim, D.B.Sanders, S.Veilleux, J.M.Mazzarella, B.T.Soifer, Astrophys. J.Suppl. Ser.*, 98, 1995.
35. *S.Veilleux, D.-C.Kim, D.B.Sanders, J.M.Mazzarella, B.T.Soifer, Astrophys.J. Suppl. Ser.*, 98, 1995.
36. *R.D.Dietz, J.Smith, J.A.Hackwell, R.D.Gehrz, G.L.Grasdalen, Astron.J.*, 91, 758, 1986.
37. *P.P.Kronberg, P.Biermann, F.R.Schwab, Astrophys.J.*, 291, 693, 1985.
38. *J.Carlstrom, PhD Thesis, Univ. Calif., Berkeley, 1988.*
39. *C.E.Walker, F.N.Bash, Z.N.Martin, T.G.Phillips, Rev.Mex.Astron.Astrof.*, 27, 203, 1993.
40. *C.M.Telesco, H.Campins, M.Joy, K.Dietz, R.Decher, Astrophys.J.*, 369, 135, 1991.
41. *P.L.Shopbell, J.Bland-Hawthorn, Rev.Mex.Astron.Astrof.*, 27, 191, 1993.
42. *P.F.Roche, D.K.Aitken, C.H.Smith, M.J.Ward, Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 248, 606, 1991.
43. *E.D.Feigelson, T.Isobe, D.W.Weedman, Astrophys.J.*, 319, L51, 1987.
44. *P.Belfort, R.Mochkovitch, M.Dennefeld, Astron.Astrophys.*, 176, 1, 1987.
45. *C.Xu, G. De Zotti, Astron.Astrophys.*, 225, 12, 1989.
46. *P.Arnault, D.Kunth, M.Schild, Astron.Astrophys.*, 224, 73, 1989.
47. *J.M.Mas-Hesse, D.Kunth, Astron.Astrophys.Suppl.Ser.*, 88, 399, 1991.
48. *J.M.Mas-Hesse, Astron.Astrophys.*, 253, 49, 1992.
49. *T.De Jong, P.E.Clegg, B.T.Soifer, M.Rowan-Robinson, H.J.Habing, J.R.Houck, H.H.Aumann, E.Raimond, Astrophys.J.*, 278, L67, 1984.
50. *J.L.Dressel, Astrophys.J.*, 329, L69, 1988.
51. *N.A.Devereux, E.E.Becklin, N.Scoville, Astrophys.J.*, 312, 529, 1987.
52. *S.K.Leggett, P.W.J.L.Brand, C.M.Mountain, Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 228, 11p, 1987.
53. *G.R.Knapp, P.Guhathakurta, D.-W.Kim, M.Jura, Astrophys.J.Suppl.Ser.*, 70, 329, 1989.
54. *G.D.Bothun, C.J.Lonsdale, W.Rice, Astrophys.J.*, 341, 129, 1989.
55. *Р.А.Кандалян, А.П.Петросян, Астрофизика*, 30, 324, 1989.
56. *G.Giuricin, L.Tamburini, F.Mardirossian, M.Mezzetti, P.Monaco, Astrophys.J.*, 427, 202, 1994.
57. *S.M.Pompea, G.H.Rieke, Astrophys.J.*, 342, 250, 1989.

58. *P.J.Puxley, P.W.J.L.Brand, T.J.T.Moore, C.M.Mountain, N.Nakai, T.Yamashita*, *Astrophys.J.*, 345, 163, 1989.
59. *A.P.Marston*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 231, 333, 1988.
60. *D.A.Forbes, R.P.Norris, G.M.Williger, R.C.Smith*, *Astron.J.*, 107, 985, 1994.
61. *А.Т.Каллозян, Р.А.Кандалян*, *Астрофизика*, 24, 47, 1986.
62. *G.Giuricin, G.Bertotti, F.Mardirossian*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 247, 444, 1990.
63. *E.E.Hummel, J.M. van der Hulst, R.C.Kennicutt, W.C.Keel*, *Astron.Astrophys.*, 236, 333, 1990.
64. *J.M.Mazzarella, G.D.Bothun, T.A.Borason*, *Astron.J.*, 101, 2034, 1991.
65. *J.B.Hutchings, S.G.Neff*, *Astron.J.*, 101, 434, 1991.
66. *C.Xu, J.W.Sulentic*, *Astrophys.J.*, 374, 407, 1991.
67. *U.Klaas, H.Elsasser*, *Astron.Astrophys.Suppl.Ser.*, 90, 33, 1991.
68. *J.Melnick, I.F.Mirabel*, *Astron.Astrophys.*, 231, L19, 1990.
69. *W.C.Keel, E.T.M. van Soest*, *Astron.Astrophys.Suppl.Ser.*, 94, 553, 1992.
70. *K.J.Leech, M.Rowan-Robinson, A.Lawrence, J.D.Hughes*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 267, 253, 1994.
71. *J.M.Mazzarella, T.A.Borason*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, 85, 27, 1993.
72. *J.A.Surace, J.M.Mazzarella, B.T.Soifer, A.E.Wehrle*, *Astron.J.*, 105, 864, 1993.
73. *A.Lawrence, M.Rowan-Robinson, K.J.Leech, D.H.P.Jones, J.V.Wall*, *Mon. Notic.Roy.Astron.Soc.*, 240, 329, 1989.
74. *U.Klaas*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, 157, 245, 1989.
75. *K.J.Leech, M.V.Penston, R.Terlevich, A.Lawrence, M.Rowan-Robinson, J.Crawford*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 240, 349, 1989.
76. *M.P.Haynes, T.Herter*, *Astron.J.*, 96, 504, 1988.
77. *H.A.Bushouse, S.A.Lamb, M.W.Werner*, *Astrophys.J.*, 335, 74, 1988.
78. *C.M.Telesco, R.D.Wolstencroft, C.Done*, *Astrophys.J.*, 329, 174, 1988.
79. *А.Р.Петросян, К.А.Саакян, Э.Е.Хачикян*, *Астрофизика*, 14, 59, 1978.
80. *R.C.Kennicutt, W.C.Keel*, *Astrophys.J.*; 272, 54, 1983.
81. *D.B.Sanders, B.T.Soifer, J.H.Elias, B.F.Madore, K.Matthews, G.Neugebauer, N.Z.Scoville*, *Astrophys.J.*, 325, 74, 1988.
82. *R.P.Norris, D.A.Forbes*, *Astrophys.J.*, 446, 594, 1995.
83. *H.A.Bushouse, S.A.Standford*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, 79, 213, 1992.
84. *Z.Zhenlong, X.Xiaoyang, D.Zugan, S.Hongjun*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 252, 593, 1991.
85. *D.L.Clements, W.J.Sutherland, R.G.McMahon, W.Saunders*, *Mon.Notic.Roy. Astron.Soc.*, 279, 477, 1996.
86. *B.T.Soifer, D.B.Sanders, B.F.Madore, G.Neugebauer, G.E.Danielson, J.H.Elias, C.J.Lonsdale, W.L.Rice*, *Astrophys.J.*, 320, 238, 1987.

87. *D.B.Sanders, B.T.Soifer, J.H.Elias, G.Neugebauer, K.Matthews*, *Astrophys.J.*, 328, L35, 1988.
88. *C.Xu, G. De Zittu, A.Franceschini, L.Danese*, *Astron.Astrophys.*, 196,59,1988.
89. *R.A.Kandalian, J.-M.Martin, L.Bottinelli, L.Gouguenheim*, *Astrofizika*, 38, 636, 1995.
90. *I.F.Mirabel, D.Lutz, J.Maza*, *Astron.Astrophys.*, 243, 367, 1991.
91. *I.F.Mirabel*, *Messenger*, No. 63, 64, 1991.
92. *S.R.Majewski, M.Hereld, D.C.Koo, G.D.Illngworth, T.M.Heckman*, *Astrophys.J.*, 402, 125, 1993.
93. *J.J.Condon, Z.-P.Huang, Q.E.Yin, T.X.Thuan*, *Astrophys.J.*, 378, 65, 1991.
94. *Z.Wang, G.Helou*, *Astrophys.J.*, 398, L33, 1992.
95. *A.Sargent, N.Scoville*, *Astrophys.J.*, 366, L1, 1991.
96. *M.Meixner, R.Puchalsky, L.Blitz, M.Wright, T.M.Heckman*, *Astrophys.J.*, 354, 158, 1990.
97. *S.Ishizuki, R.Kawabe, T.Ishiguro, S.K.Okumura, K.-I.Morita, Y.Chikada, T.Kaqua*, *Nature*, 344, 224, 1990.
98. *N.Z.Scoville, A.I.Sargent, D.B.Sanders, B.T.Soifer*, *Astrophys.J.*, 366, L5, 1991.
99. *P.Planesas, I.F.Mirabel, D.B.Sanders*, *Astrophys.J.*, 370, 172, 1991.
100. *D.B.Sanders, N.Z.Scoville, A.I.Sargent, B.T.Soifer*, *Astrophys.J.*, 324, L55, 1988.
101. *M.S. Yun, N.Z. Scoville*, *Astrophys. J.*, 451, L 45, 1995.
102. *B.Canzian, L.G.Mundy, N.Z.Scoville*, *Astrophys.J.*, 333, 157, 1988.
103. *N.Devereux, J.D.P.Kenney, J.S.Young*, *Astron.J.*, 103, 784, 1992.
104. *J.S.Young, S.Xie, J.D.P.Kenney, W.L.Price*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, 70, 699, 1989.
105. *C.G.Tinney, N.Z.Scoville, D.B.Sanders, B.T.Soifer*, *Astrophys.J.*, 362, 473, 1990.
106. *D.B.Sanders, N.Z.Scoville, B.T.Soifer*, *Astrophys.J.*, 370, 158, 1991.
107. *R.Chini, E.Krugel, H.Sieppe*, *Astron.Astrophys.*, 255, 87, 1992.
108. *I.F.Mirabel, R.S.Booth, G.Garay, L.E.B.Johansson, D.B.Sanders*, *Astron. Astrophys.*, 236, 327, 1990.
109. *F.Combes, P.Prugniel, R.Rampazzo, J.W.Sulentic*, *Astron.Astrophys.*, 281, 725, 1994.
110. *I.F.Mirabel, D.B.Sanders*, *Astrophys.J.*, 335, 104, 1988.
111. *R.A.Kandalian, J.-M.Martin, L.Bottinelli, L.Gouguenheim*, 1996, in preparation.
112. *J.S.Young, P.M.Knezek*, *Astrophys.J.*, 347, L55, 1989.
113. *J.-M.Martin, L.Bottinelli, M.Dennefeld, L.Gouguenheim*, *Astron.Astrophys.*, 245, 393, 1991.
114. *I.F.Mirabel, D.B.Sanders*, *Astrophys.J.*, 340, L53, 1989.

115. *J.S.Young, S.Xie, L.Tacconi, et al.*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, 98, 368, 1995.
116. *J.Kenney, J.Young*, *Astrophys.J.*, 344, 171, 1989.
117. *L.Tacconi, J.Young*, *Astrophys.J.*, 308, 600, 1986.
118. *P.M.Solomon, L.Sage*, *Astrophys.J.*, 334, 613, 1988.
119. *T.Wiklind, C.Henkel*, *Astron.Astrophys.*, 225, 1, 1989.
120. *D.B.Sanders, J.S.Young, N.Z.Scoville, B.T.Soffer, G.E.Danielson*, *Astrophys.J.*, 312, L5, 1987.
121. *R.Mauersberger, C.Henkel, T.L.Wilson, J.Harju*, *Astron.Astrophys.*, 226, L5, 1989.
122. *L.J.Sage, S.N.Shore, P.M.Solomon*, *Astrophys.J.*, 351, 422, 1990.
123. *Nguyen - Q- Rieu, C.Henkel, J.M.Jackson, R.Mauersberger*, *Astron. Astrophys.*, 241; L33, 1991.
124. *Nguyen - Q- Rieu, J.M.Jackson, C.Henkel, Truong - Bach, R.Mauersberger*, *Astrophys.J.*, 399, 521, 1992.
125. *P.M.Solomon, D.Downes, S.J.E.Radford*, *Astrophys.J.*, 387, L55, 1992.
126. *P.T.P.Ho, R.N.Martin, J.L.Turner, J.M.Jackson*, *Astrophys.J.*, 355, L19, 1990.
127. *N.Nakai, M.Hayashi, T.Handa, Y.Sofue, T.Hasegawa*, *Publ.Astron.Soc. Japan*, 39, 685, 1987.
128. *W.A.Baan, C.Henkel, P.Schilke, R.Mauersberger, R.Gusten*, *Astrophys.J.*, 353, 132, 1990.
129. *Nguyen - Q- Rieu, N.Nakai, J.M.Jackson*, *Astron.Astrophys.*, 220, 57, 1989.
130. *R.Mauersberger, C.Henkel*, *Astron.Astrophys.*, 245, 457, 1991.
131. *P.M.Solomon, S.J.E.Radford, D.Downes*, *Astrophys.J.*, 348, L53, 1990.
132. *S.J.E.Radford, P.M.Solomon, D.Downes*, *Astrophys.J.*, 368, L15, 1991.
133. *J.-M.Martin, L.Bottinelli, M.Dennefeld, L.Gouguenheim, A.M.Le Squeren*, *Astron.Astrophys.*, 201, L13, 1988.
134. *R.P.Norris, F.F.Gardner, J.B.Whiteoak*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 237, 673, 1989.
135. *J.-M.Martin, L.Bottinelli, M.Dennefeld, L.Gouguenheim, A.M.Le Squeren, G.Paturel, C.R.Acad.Sci., Paris, T.308, Ser. II, 287, 1989.*
136. *L.Staveley-Smith, D.A.Allen, J.M.Chapman, R.P.Norris, J.B.Whiteoak*, *Nature*, 337, 625, 1989.
137. *I.Kazes, W.A.Baan*, *Astron.Astrophys.*, 248, L15, 1991.
138. *L.Staveley-Smith, R.P.Norris, J.M.Chapman, D.A.Allen, J.B.Whiteoak, A.L.Roy*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 258, 725, 1992.
139. *W.A.Baan, A.Haschick, C.Henkel*, *Astron.J.*, 103, 728, 1992.
140. *W.A.Baan, P.A.D.Wood, A.D.Haschick*, *Astrophys.J.*, 260, L49, 1982.
141. *W.A.Baan, J.Rhoads, K.Fisher, D.A.Aitschuler, A.Haschick*, *Astrophys.J.*,

396, L99, 1992.

142. *V.Burdyuzha, B.Komberg*, *Astron.Astrophys.*, 234, 40, 1990.
143. *W.A.Baan, A.D.Haschick*, *Astrophys.J.*, 279, 541, 1984.
144. *R.P.Norris, W.A.Baan, A.D.Haschick, P.J.Diamond, R.S.Booth*, *Mon.Notic. Roy.Astron.Soc.*, 213, 821, 1985.
145. *J.T.Schmeltz, W.A.Baan, A.D.Haschick*, *Astrophys.J.*, 321, 225, 1987.
146. *P.J.Diamond, R.P.Norris, W.A.Baan, R.S.Booth*, *Astrophys.J.*, 340, L49, 1989.
147. *J.-M.Martin, L.Bottinelli, M.Dennefeld, L.Gouguenheim, A.M.Le Squeren*, *Astron.Astrophys.*, 208, 39, 1989.
148. *W.A.Baan, A.D.Hasch'ck*, *Astrophys.J.*, 364, 65, 1990.
149. *J.M.Chapman, L.Starveley-Smith, D.J.Axon, S.W.Unger, R.J.Cohen, A.Pedlar, R.D.Davies*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 244, 281, 1990.
150. *C.J.Lonsdale, P.J.Diamond, H.E.Smith, C.J.Lonsdale*, *Nature*, 370, 117, 1994.
151. *W.A.Baan*, *Astrophys.J.*, 338, 804, 1989.
152. *C.Henkel, T.L.Wilson*, *Astron.Astrophys.*, 229, 431, 1990.
153. *V.V.Burdyuzha, K.A.Vikulov*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 244, 86, 1990.
154. *J.-M.Martin, L.Bottinelli, L.Gouguenheim, A.M.Le Squeren, E.Gerard, M.Dennefeld*, *Annales de Phys., Colloq. No.3, Suppl.*, 16, 49, 1991.
155. *F.Verter*, *Astrophys.J.*, 402, 141, 1993.
156. *Р.А.Кандалян*, *Астрофизика*, 37, 383, 1994.
157. *Р.А.Кандалян*, *Астрофизика*, 1996, в печати.
158. *C.J.Lonsdale, H.E.Smith, C.J.Lonsdale*, *Astrophys.J.*, 405, L9, 1993.
159. *T. Crawford, J. Marr, B. Partridge, M. Strauss*, *Astrophys.J.*, 460, 225, 1996.
160. *J.B.Whiteoak, F.F.Gardner*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 222, 513, 1986.
161. *M.J.Claussen, K.Y.Lo*, *Astrophys.J.*, 303, 592, 1986.
162. *J.A.Braatz, A.S.Wilson, C.Henkel*, *Astrophys.J.*, 437, L99, 1994.
163. *В.А. Амбарцумян, Р.А.Кандалян*, *Астрофизика*, 30, 455, 1989.
164. *L.V.Mirzoyan*, in "Star Forming Regions", *IAU Symp. No. 115*, eds. M.Peimbert, J.Jugaku, Dordrecht, Reidel, 1987.
165. *A.D.Haschick, W.A.Baan*, *Astrophys.J.*, 355, L23, 1990.
166. *N.Nakai, M.Inoue, M.Miyoshi*, *NRO Rep. No. 318*, 1992.
167. *W.A.Baan, A.D.Haschick, R.Uglesich*, *Astrophys.J.*, 415, 140, 1993.
168. *W.A.Baan, C.Henkel, P.Schilke, R.Mauersberger, R.Gusten*, *Astrophys.J.*, 353, 132, 1990.
169. *J.J.Condon, Q.F.Yin*, *Astrophys.J.*, 357, 97, 1990.
170. *T.N.Rengarajan, K.V.K.Iyengar*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 242, 74, 1990.
171. *W. van Driel, A.C. van den Broek, T. De Jong*, *Astron.Astrophys.Suppl.Ser.*,

- 90, 55, 1991.
172. *R.Price, N.Duric*, *Astrophys.J.*, 401, 81, 1992.
 173. *J.J.Condon, M.L.Anderson, G.Helou*, *Astrophys.J.*, 376, 95, 1991.
 174. *P.C.Stine*, *Astrophys.J. Suppl.Ser.*, 81, 49, 1992.
 175. *G.Helou, M.D.Bicay*, *Astrophys.J.*, 415, 93, 1993.
 176. *C.J.Lonsdale, H.E.Smith, C.J.Lonsdale*, *Astrophys.J.*, 438, 632, 1995.
 177. *C.Xu, U.Lisenfeld, H.J.Volk, E.Wunderlich*, *Astron.Astrophys.*, 282, 19, 1994.
 178. *C.Xu, U.Lisenfeld, H.J.Volk*, *Astron.Astrophys.*, 285, 19, 1994.
 179. *M.Marx, E.Krugel, U.Klein, R.Wielebinski*, *Astron.Astrophys.*, 281, 718, 1994.
 180. *M.D.Bicay, G.Kojoian, J.Seal, D.F.Dickinson, M.A.Malkan*, *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, 98, 369, 1995.
 181. *P.Biermann*, *Astron.Astrophys.*, 53, 295, 1976.
 182. *J.S.Ulvestad*, *Astrophys.J.*, 259, 96, 1982.
 183. *E.Wunderlich, U.Klein*, *Astron.Astrophys.*, 206, 47, 1988.
 184. *A.J.Fitt, P.Alexander, M.J.Cox*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 233, 907, 1988.
 185. *N.A.Devereux, S.A.Eales*, *Astrophys.J.*, 340, 708, 1989.
 186. *X.Chi, A.W.Woffendale*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 245, 101, 1990.
 187. *M.D.Bicay, G.Helou*, *Astrophys.J.*, 362, 59, 1990.
 188. *C.Xu*, *Astrophys.J.*, 365, L47, 1990.
 189. *S.W.Unger, R.D.Wolstencroft, A.Pedlar, A.Savage, R.G.Clowes, S.K.Leggett, Q.A.Parker*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 236, 425, 1989.
 190. *H.M.Sopp, P.Alexander*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 251, 14, 1991.
 191. *L.Colina, D.Perez-Olea*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 277, 845, 1995.
 192. *D.Perez-Olea, L.Colina*, *Mon.Notic.Roy.Astron.Soc.*, 277, 857, 1995.
 193. *L.K.Hunt*, *Astrophys.J.*, 370, 511, 1991.