

УДК 524.7-42

ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ГАЛАКТИКИ: НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

В. П. РЕННЕТНИКОВ, П. Я. СОТНИКОВА

Поступила 12 октября 1992

Обзор состоит из следующих частей: 1. Введение. 2. Общая характеристика взаимодействующих галактик. 2.1. Признаки взаимодействия. 2.2. Распространенность взаимодействующих систем. 3. Интегральные характеристики взаимодействующих галактик. 3.2. Оптические, радио- и ИК- светимости, отношение масса - светимость. 3.3. Показатели цвета. 3.4. Глобальная фотометрическая структура. 3.5. Эмиссионные спектры. 3.6. Кинематика взаимодействующих галактик. 4. Звездообразование во взаимодействующих галактиках (наблюдения). 5. Наблюдательные свидетельства связи эффектов взаимодействия с активностью ядер галактик. 5.1. Сейфертовские галактики. 5.2. Квазары. 6. Моделирование процессов взаимодействия галактик. 6.1. Влияние приливов на структуру дисковых галактик. 6.2. Динамическое трение и слияние галактик. 6.3. Моделирование взаимодействия наблюдаемых систем. 7. Отклик газовой составляющей на приливное воздействие. 7.1. Выпадки звездообразования. 7.2. Ядерная активность. 7.3. О прохождении холодного газа в эллиптических галактиках. 8. Заключение.

1. *Введение.* За последние два десятилетия представления о галактиках как об "островных вселенных", медленно эволюционирующих практически в полной изоляции, существенно изменились. Гравитационное взаимодействие между галактиками, как оказалось, является одним из основных факторов их эволюции, способным изменять такие фундаментальные характеристики галактик, как морфологический тип, светимость, размер и распределение массы. С взаимодействием между галактиками оказались связаны также и два наиболее интригующих (и поэтому наиболее интенсивно изучаемых) процесса - звездообразование, а также активность ядер галактик.

В настоящем обзоре авторы стремились кратко суммировать основные наблюдательные и теоретические результаты, полученные за последние годы для взаимодействующих галактик (ВГ). Конечно, в рамках одной статьи невозможно охватить все вопросы, связанные с таким бурно развивающимся направлением, и поэтому многие проблемы обсуждены лишь кратко или вообще не рассмотрены. Для более детального ознакомления с интересующими вопросами авторы рекомендуют читателям обзоры [1-5].

2. Общая характеристика ВГ:

2.1. *Признаки взаимодействия.* Точного определения, по которому галактики относят к взаимодействующим, нет. В течение длительного времени в качестве основного критерия рассматривалось наличие разного рода морфологических неспециальностей. Например, В. А. Воронцов-Вельяминов давал следующие определения: "взаимодействующие галактики - это такие системы, где видны или подозреваются две или более галактики с искажениями формы, с хвостами, перемычками, в общем тумане, с перекосом пылевого слоя, или расположенные в виде цепочки" [6]. За прошедшие 20 лет число признаков взаимодействия значительно возросло. Совокупность этих признаков можно условно разбить на две группы: 1) признаки взаимодействия, происходящего в настоящее время, и 2) признаки взаимодействия, происходящего в относительно недавнем прошлом ($\sim 10^9$ лет назад).

К первой группе признаков, свидетельствующих о гравитационном взаимодействии нескольких галактик, помимо близости их лучевых скоростей и пространственных положений, относятся:

1) *Асимметрия распределения поверхностной яркости.* У спиральных галактик в составе взаимодействующих систем часто встречаются хвосты, перемычки, асимметрично усиленные спиральные ветви, искривленные плоскости диска, клочковатые оболочки. У эллиптических галактик - систематический поворот больших осей изюфот с удалением от ядра, их неконцептичность и искажение формы, наличие слабых хвостов, аморфных оболочек [7, 8]. (Примеры таких систем показаны на рис. 1).

2) *Неспециальность поля скоростей.* У спиральных галактик - некруговые движения газа (звезд) как в околоядерной области, так и

на периферии галактик [9, 10], повышенная центральная дисперсия скоростей звезд на единицу светимости галактики [11], наличие вращающихся под произвольным углом к плоскости галактики подсистем газа (примеры таких объектов приведены в [9, 12-14]). У эллиптических галактик - "U-образные" кривые вращения, рост дисперсии скоростей звезд к периферии галактик [15, 16].

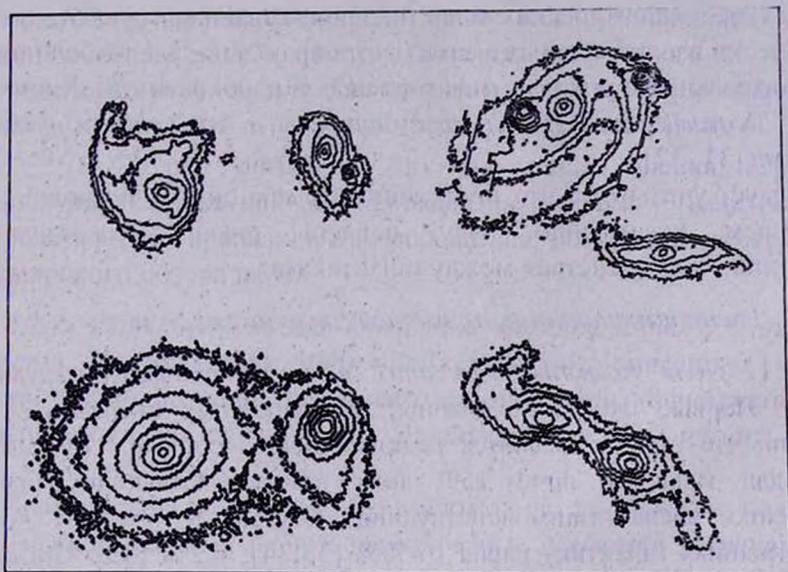


Рис. 1. Изофоты двойных взаимодействующих систем в цветной полосе R, полученные одним из авторов по наблюдениям на БГА (внешняя изофота соответствует поверхностной яркости $23^{m,5}/\square''$, шаг изофот $0.1^{m,75}$). В верхней части рисунка приведены изофоты систем Agr 273 и VV 527 (слева направо), в нижней - Agr 238 и NGC 1587/88.

3) *Необычные спектральные характеристики* - например, пекулярные показатели цвета, свидетельствующие о вспышках звездообразования.

Одиночные объекты также часто демонстрируют признаки недавнего взаимодействия или слияния с другой галактикой. К таким объектам относятся: *слившиеся галактики* - одиночные объекты с пекулярной морфологией, представляющие собой результат слияния двух галактик, чьи индивидуальные остатки в виде приливных хвостов,

рыбы и т. д. еще доступны наблюдениям [17]; *галактики с двойными и кратными ядрами* [18]; *эллиптические галактики с пылевыми полосами и эмиссионными линиями, с оболочечными структурами и рыбой* [19-24]; *галактики с полярными кольцами*, у которых в плоскости, близкой к меридиональной, вращается кольцо или диск, состоящий из газа, пыли и звезд [27]; *галактики с "двойным спином"*, демонстрирующие несоответствие кинематических осей звездной и газовой составляющих или, в случае эллиптических галактик, показывающие существование динамически изолированных ядер с осями вращения, расположенными под произвольными углами к экваториальной плоскости галактики [19, 28-30]; *"X-галактики"*, *галактики с "яшико-" и "арахисо-"образными балджами* [31, 32].

Следует учитывать, что приведенный выше список не полон, и в дальнейшем, несомненно, будут найдены новые наблюдательные проявления взаимодействия между галактиками.

2.2. Распространенность взаимодействующих систем.

2.2.1. Доля галактик, входящих в состав взаимодействующих систем.

Первые же исследования, посвященные статистике ВГ', показали, что они не являются редкими исключениями. По данным MCG для галактик ярче 15^m доля взаимодействующих систем (отношение числа взаимодействующих систем к полному числу рассмотренных галактик) равна (6-7)% [33,34], 6.2% [35]. Согласно [33] относительное число галактик с морфологическими признаками взаимодействия достигает 8%. Несколько меньшая доля ВГ' - 3% - была найдена для южного полушария [36].

Основная часть известных ВГ' входит в состав двойных систем. Так, среди 487 пар с $f=M/L < 100 f_{\odot}$ из каталога двойных галактик [37,38] морфологические признаки взаимодействия видны примерно у 60%. Если учесть, что в состав пар входит (10-12)% галактик поля, то, следовательно, в состав взаимодействующих двойных систем входит (6-7)% галактик. В [40] на основе изучения выборки слабых спиральных галактик найдено близкое значение - $(6 \pm 3)\%$, однако приведенная в этой же работе статистика встречаемости взаимодействующих пар в каталоге Шейн-Эйме дает значение $(14 \pm 2)\%$.

Часто встречаются ВГ' и в компактных группах. Около трети чисел компактных групп галактик имеют морфологические признаки

взаимодействия [41,42], около двух третей - кинематические [9]. Следовательно, примерно 0.5% галактик являются взаимодействующими в составе компактных групп.

В скоплениях галактик доля взаимодействующих систем сильно варьируется, однако в среднем остается близка к найденной для всех галактик в целом [33].

Обобщая приведенные выше данные разных авторов, можно сделать вывод, что в настоящую эпоху в сопоставимом объеме пространства (5-10)% всех галактик находится в составе взаимодействующих систем. (В прошлом частота взаимодействий и слияний могла быть выше: согласно [43] она растет с z как $(1+z)^{4\pm 2.5}$). Следует учитывать, что приведенная оценка, вероятно, является нижней, так как она основана на наличии у галактик лишь морфологических признаков взаимодействия, обнаружимых на картах Паломарского обзора неба.

2.2.2. Рапространенность признаков взаимодействия у одиночных объектов. Из примерно 5000 ярких галактик, описанных в New General Catalogue, лишь несколько десятков идентифицируются как вероятные остатки слияний [17]. Наиболее изученные из них - NGC 1326, NGC 5128, NGC 7252.

Краткие ядра по данным [18] имеют около 1% галактик поля.

Согласно [24,44], ряби и дугообразные оболочки встречаются у (10-50)% галактик типа E и S0. По крайней мере у (40-50)% E и S0 галактик имеются эмиссионные линии [45,46], у (15-24)% - радиоизлучение в линиях III [47,48], не менее, чем у 40% есть пыль [49]. Не менее, чем у трети эллиптических галактик в ядерных областях выделяются фотометрические изолированные подструктуры [26].

Примерно 5% галактик типа S0 имеют полярные кольца [27].

Около трети эллиптических галактик могут иметь кинематические свидетельства слияний в виде вращающихся под произвольным углом к плоскости галактик ядер [29,30].

(20-25)% спиральных и S0 галактик имеют ящикообразные башки [50,51].

Следовательно, более 20% одиночных галактик хранят следы произошедших в течение нескольких последних миллиардов лет взаимодействий и слияний с другими галактиками. Этот вывод

находится в согласии и с результатами численного моделирования: например, в [52] получено, что вне скопления и богатых групп (20-50)% галактик могут являться остатками слияний.

3. Интегральные характеристики ВГ.

3.1. Морфология ВГ.

3.1.1. *Морфологические типы.* Детальное исследование морфологического состава взаимодействующих систем не проводилось. С одной стороны, это связано со статистической неполнотой выборок ВГ и с отсутствием годных для классификации снимков большинства из них, с другой - со сложностью морфологической классификации объектов, имеющих некуляристую структуру. Наиболее полный материал имеется для двойных систем и для компактных групп (помним, что в их составе находится большая часть известных ВГ).

В табл. 1 представлено процентное содержание галактик разных морфологических типов для 286 взаимодействующих пар согласно [38], а также для галактик поля по [53].

Таблица 1

Морф. тип	ВГ	Галактики поля
E	21	8
S0	5	12
Sa	20	9
Sb	22	22
Sc	22	29
Sm/I	10	20

Как следует из данных этой таблицы, среди взаимодействующих пар чаще, чем среди одиночных галактик, встречаются эллиптические галактики и реже - галактики поздних типов. Спиральные галактики ранних подтипов (Sa-Sb), а также галактики с барами в составе двойных систем встречаются в 2 раза чаще, чем среди галактик поля [54,55]. Еще одна особенность морфологического состава двойных взаимодействующих систем - корреляция типов галактик, то есть значимый избыток случаев с одинаковыми морфологическими типами компонентов пар [38].

Основные особенности морфологического состава компактных групп сходны с установленными для взаимодействующих пар. Согласно [42,56], доля E и S0 галактик (~40%) в группах выше, чем среди галактик поля, и, как показано в [56], в группах также обнаруживается корреляция типов - галактики предпочитают объединяться в группы с галактиками близких морфологических типов.

3.1.2. *Морфология взаимодействия.* В [37] предложена простая морфологическая классификация типов взаимодействия галактик в парах (она подходит и для систем большей кратности). К типу L отнесены системы, члены которых имеют линейные приливные структуры - хвосты (l), перемычки (b) или их сочетание (bl) (по данным [36,38] такие структуры наблюдаются у примерно (1-2)% галактик поля). К типу A отнесены галактики, погруженные в общую оболочку - аморфную и симметричную (am) или неправильную ключковатую (sh). Тип D обозначает искажение спиральной структуры или формы одного (1) или обоих компонентов (2). В табл. 2 приведено распределение по морфологическим типам членов двойных взаимодействующих систем, имеющих различные типы взаимодействия [38]. Как видно из этой таблицы, распределение галактик по видам взаимодействия неравномерно: линейные структуры, искажения формы и ключковатые несимметричные оболочки характерны для спиральных галактик, аморфные симметричные "атмосферы" обычно наблюдается вокруг эллиптических галактик.

Таблица 2

Морф. тип	Тип взаимодействия						
	L(b)	L(l)	L(bl)	A(sh)	A(am)	D(2)	D(1)
E	10	10	10	23	91	2	13
S0	5	5	5	7	5	1	7
Sa	16	31	24	23	2	10	28
Sb	31	27	21	18	0	28	25
Sc	27	17	33	16	2	38	22
Sm/I	11	10	7	13	0	21	5

3.2. *Оптические, радио- и ИК- светимости, отношение масса - светимость.*

3.2.1. *Светимость В1*: Согласно [38,39,57,58] члены двойных систем имеют в полосе *B* по сравнению с одиночными галактиками избыток светимости примерно на $0.^m5 - 1.^m0$, причем он характерен для компонентов пар всех типов - SS, SE и EE [39]. Избыток абсолютно более ярких галактик среди членов двойных систем наглядно виден на рис. 2, где показаны функции оптической светимости галактик поля по [59,60] (непрерывные линии) и двойных галактик (квадраты - [39], треугольники - [57], кресты - [61]). (Отметим, что при $M_B < -22^m.5$ функции светимости галактик поля, двойных систем и сейфертовских галактик сближаются. Это означает, что среди наиболее ярких галактик значительную долю должны составлять активные галактики с физическими спутниками).

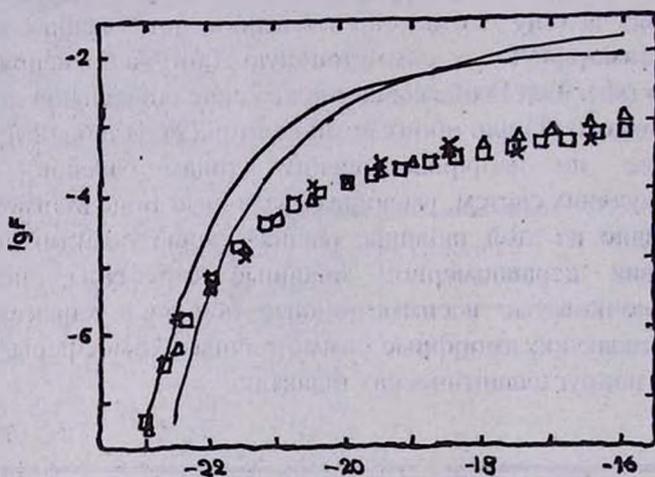


Рис. 2. Оптические функции светимости галактик поля и членов двойных систем ($H_0 = 75$ км/с/Мпк). Функции светимости из работ [57, 61] перенормированы в соответствии с [39].

Повышенная доля галактик с радионизлучением среди членов кратных систем была впервые отмечена в [62]. Дальнейшие исследования (см. [63-66] и ссылки там же) показали, что в парах галактик и во взаимодействующих системах радионеточки

встречаются чаще и характеризуются в среднем в 2 раза более высокой светимостью. Избыток радионизлучения наиболее сильно выражен в ядерных областях $B1'$ [66], но, по-видимому характерен и для дисков [65].

Одним из наиболее замечательных открытий, сделанных со спутника IRAS, явилось обнаружение нового класса галактик, светимости которых в инфракрасном диапазоне оказались сравнимыми с болометрическими светимостями квазаров. У настолько ярких в ИК-диапазоне галактик был найден значительный избыток близких спутников [67,68]. Дальнейшие исследования подтвердили существование избытка излучения у $B1'$ в ИК- и далеком ИК- (FIR) диапазонах [69-73,40]. По-видимому, не менее половины всех галактик с $L_{FIR} > 10^{11} L_{\odot}$ входят в состав взаимодействующих систем [39, 40, 74].

Детальному исследованию FIR-излучения галактик в парах посвящены работы [39] и [58]. В [39,58] показано, что избыток FIR-излучения (примерно в три раза) характерен для спиральных галактик в составе как SS, так и SE пар. Величина избытка зависит от наличия признаков взаимодействия в паре и от расстояния между компонентами: спиральные галактики во взаимодействующих парах, а также в составе наиболее тесных пар имеют в среднем большие FIR-светимости по сравнению с одиночными галактиками и с галактиками в широких парах без признаков взаимодействия [39,58,75].

3.2.2. *Отношение масса-светимость.* В [76] опубликована сводка индивидуальных отношений массы к светимости ($f = M/L_B$) для 209 компонентов пар. Около половины галактик из этого списка входят в состав пар с признаками взаимодействия. Медианные значения f для $B1'$ разных типов по данным [76] равны: E - 8.5, S0 - 7.4, Sa - 8.9, Sb - 5.0, Sc - 4.5 и Sm - 6.4. Эти оценки близки к средним значениям f для нормальных галактик тех же морфологических типов. В [9] определены величины f для 20 спиральных галактик в составе компактных групп и сделан вывод, что они (их средние значения - 6.2 (Sa), 6.6 (Sb), 2.1 (Sc)) несколько меньше (на 30 %), чем у нормальных спиральных галактик поля. Для членов ряда тесных взаимодействующих систем оценки f приведены в [77] (и ссылки там же).

Отношение орбитальной массы к светимости для двойных галактик с признаками взаимодействия зависит от типа взаимодействия. Согласно [38], средние отношения орбитальной массы к светимости равны: $L(b)$ - 8.5, $L(l)$ - 4.4, $L(bl)$ - 2.4, $L(sh)$ - 6.7, $L(am)$ - 9.1, $D(2)$ - 5.4, $D(1)$ - 12.0. Как отмечено в [38], в одних случаях причиной такой зависимости является различие морфологического состава пар с разными признаками взаимодействия (см. табл. 2), в других (например, $L(b)$ - $L(l)$ - $L(bl)$) она может отражать приращение членов пары в разных фазах движения по некруговой орбите.

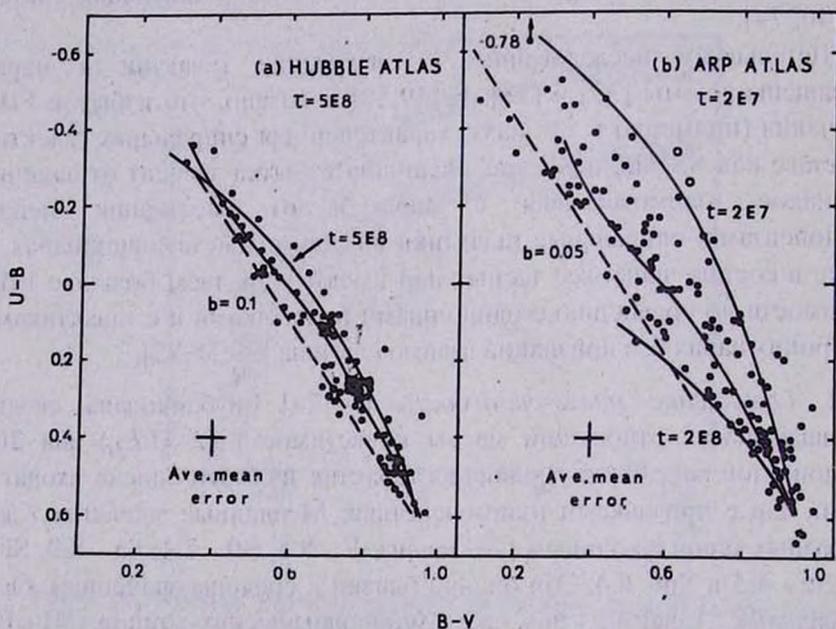


Рис. 3. Распределение показателей цвета нормальных галактик (а) и некулириных (б), среди которых преобладают члены взаимодействующих систем, согласно [81] (точки). Линиями показаны положения галактик на двухцветном диаграмме через различные промежутки времени (t - продолжительность вспышки, b - доля звезд, образовавшихся за время вспышки).

3.3. *Показатели цвета.* Результаты широкополосных фотоэлектрических наблюдений большого количества взаимодействующих систем опубликованы в [78-80].

Показатели цвета $B-I'$ были впервые подробно рассмотрены Ларсоном и Типели в [81], где показано, что цвета членов взаимодействующих систем располагаются на диаграмме $U - B - B - V$ со значительно большей дисперсией, чем цвета одиночных галактик - рис. 3. Члены двойных систем с признаками взаимодействия демонстрируют сильную корреляцию показателей цвета (эффект Холмберга), не сводимую к корреляции морфологических типов [82,83]. Этот эффект наблюдается в парах всех типов - SS, SI и EI. Различие в цвете у компонентов пар уменьшается при переходе от широких пар к тесным и при уменьшении разности лучевых скоростей [83]. Галактики ранних типов E и S0 в смешанных парах, а также спиральные галактики в SS парах являются несколько более голубыми по сравнению с одиночными галактиками тех же типов [78,83,84].

Первое систематическое исследование цветовых характеристик приливных структур было выполнено в [85]. В этой работе показано, что приливные структуры имеют в среднем более голубой цвет, чем сами галактики. Голубой цвет и ключковатая структура приливных особенностей свидетельствует об идущем в них звездообразовании [85].

3.4. *Глобальная фотометрическая структура.* До середины восьмидесятых годов исследования фотометрической структуры $B-I'$ носили эпизодический характер. Применение ПЗС-матриц привело в последние годы к быстрому росту данных о распределении поверхностной яркости и показателей цвета для этих объектов [7,74,85-88].

В [7] на основе ПЗС-фотометрии 9 пар эллиптических галактик с признаками взаимодействия сделано заключение, что главные (более яркие) компоненты пар имеют более проуженные профили яркости по сравнению с изолированными E галактиками, а спутники - усеченные.

В [89,86] исследовано распределение поверхностной яркости у нескольких слившихся галактик и показано, что, несмотря на некулярную структуру этих объектов, их усредненные

фотометрические профили хорошо описываются законом Вокулера ($I(r) \sim r^{-1/2}$).

В [90] рассмотрены глобальные фотометрические характеристики эллиптических галактик и балджей S0 галактик и показано, что при данной эффективной поверхностной яркости μ_e эффективные радиусы R_e тесных ВГ примерно на 30 % меньше радиусов одиночных галактик.

3.5. Эмиссионные спектры. Результаты спектральных наблюдений ВГ приведены в [91-96]. Согласно данным этих работ, среди членов взаимодействующих систем наблюдается избыток объектов с сильными эмиссионными линиями. Так, среди наблюдавшихся в [96] ВГ около 25% имеют $W_\lambda(\Pi_\alpha + \text{NII}) > 60 \text{ \AA}$, в то время как среди галактик поля такие объекты крайне редки. Медианное значение нормированной на площадь диска светимости в линии Π_α для выборки галактик с сильными морфологическими признаками взаимодействия в 2.5 раза превышает соответствующее значение для изолированных спиральных галактик [95]. Распределение Π_α -излучения по дискам галактик показывает преимущественную концентрацию к ядерной области [94,95]. Согласно [92,96,97], вероятно, существует зависимость между эмиссионными свойствами галактик в двойных системах и интегральными характеристиками пар - проекцией линейного расстояния и разностью лучевых скоростей. Компоненты взаимодействующих пар обнаруживают корреляцию спектральных типов [38] и эквивалентных ширины эмиссии $\Pi_\alpha + \text{NII}$ [96].

3.6. Кинематика ВГ. В последние годы был накоплен значительный материал по внутренней кинематике ВГ (см. например, [9,10,14,15,77,98] и ссылки там же).

Характерной чертой спиральных галактик в составе взаимодействующих систем является наличие у газа значительных отклонений от круговых скоростей в околоядерных областях и на периферии галактик. По-видимому, около 40% членов двойных систем [99] и две трети членов компактных групп [9] имеют некулировые кривые вращения. В [9] отмечены несколько более низкие значения максимальной скорости вращения для спиральных галактик в компактных группах по сравнению с галактиками поля тех же морфологических типов.

У эллиптических галактик во взаимодействующих системах часто встречаются аномальные "U-образные" кривые вращения и растущая к периферии дисперсия скоростей звезд [15,16].

В [11] рассмотрена зависимость Фабера - Джексона между светимостью и дисперсией скоростей звезд для E и S0 галактик в двойных системах и показано, что она отличается от зависимости для галактик поля: члены двойных систем обладают в среднем более высокой центральной дисперсией скоростей звезд на единицу светимости галактики. В [100] рассмотрена аналогичная зависимость для остатков недавнего слияния двух галактик и найдено, что она совпадает с соотношением $L - \sigma$ для нормальных эллиптических галактик.

4. *Звездообразование во взаимодействующих галактиках (наблюдения).* Наиболее часто в качестве индикаторов звездообразования исследуются следующие характеристики галактик [101]: оптические показатели цвета, эмиссионные спектры, ИК и радиоизлучение. Ниже мы кратко рассмотрим, к каким результатам привело использование этих индикаторов при исследовании звездообразования во взаимодействующих галактиках.

4.1. *Оптические показатели цвета.* Оптические показатели цвета чувствительны к вкладу в излучение достаточно старого звездного населения с возрастом $\sim 10^9$ лет и поэтому они слабо коррелируют с текущим темпом звездообразования. Однако именно оптические цвета дали первое указание на аномальный характер звездообразования во взаимодействующих галактиках. В [81] было показано, что ВГ характеризуются значительно большим, чем одиночные галактики, разбросом показателей цвета $U - B$ и $B - V$ на двухцветной диаграмме. Этот разброс можно объяснить, если предположить, что многие из галактик претерпевают вспышки звездообразования длительностью не менее $2 \cdot 10^7$ лет, в ходе которых значительная часть газа галактик преобразуется в звезды (см. рис. 3).

4.2. *Эмиссионные спектры.* Наиболее надежными индикаторами звездообразования считаются светимости галактик в рекомбинационных линиях водорода (например, в линии H_{α}),

поскольку они обусловлены вкладом короткоживущих, массивных ($>M_{\odot}$) звезд.

Π_{α} -обзоры двойных и взаимодействующих галактик были выполнены в работах [91,94-96]. Во всех работах, несмотря на различные использованные выборки, были найдены свидетельства аномально высокого темпа звездообразования во взаимодействующих галактиках. Скорость звездообразования (SFR) демонстрирует избыток, варьирующийся от примерно 30% для полных выборок двойных галактик до фактора порядка 2.5 для выборок галактик с сильными морфологическими признаками взаимодействия. Объекты с очень высокими значениями SFR редки даже в выборках сильно взаимодействующих галактик. Изучение распределения Π_{α} -излучения по дискам галактик выявило тенденцию к концентрации областей звездообразования вблизи ядер галактик [94,95].

4.3. Инфракрасное излучение. ИК-излучение галактик исследовано, преимущественно, в двух диапазонах: в 10 μm окне и в далекой ИК-области (FIR) - в диапазоне телескопа IRAS. В работах [70,71] было показано, что члены двойных систем и ВГ имеют по сравнению с одиночными галактиками систематически более высокие светимости в диапазоне 10 - 20 μm . Авторы [71] интерпретировали этот избыток как излучение пыли, нагреваемой образующимися молодыми звездами.

FIR-обзоры двойных и взаимодействующих галактик в зависимости от используемых при формировании выборки критериев можно условно разбить на две группы. В первой из них исследуются выборки ВГ с сильными морфологическими признаками взаимодействия [58,69,72,73], во второй сравниваются полные выборки двойных галактик, отобранных без учета их морфологии, и изолированных галактик [96,102]. В работах, где использовались полные выборки двойных галактик, было показано, что члены двойных систем демонстрируют по сравнению с изолированными галактиками умеренный (20-60)% избыток FIR-светимости (и, соответственно, такой же избыток SFR). Также было найдено, что в таких выборках крайне редки объекты с очень высокой FIR-светимостью. Сильно взаимодействующие системы показывают существенно больший избыток FIR-излучения (на фактор 2-3) и заметно большую долю

объектов с экстремально высокой светимостью. Самые высокие значения FIR-светимости (и, соответственно, SFR) встречаются только среди наиболее сильно взаимодействующих или среди сливающихся галактик.

Авторы [103,104], используя наблюдаемую интенсивность CO как меру содержания молекулярного водорода, пишут, что среднее значение отношения $L_{\text{ИК}}/M(\text{H}_2)$ для ВГ выше, чем для изолированных галактик. В [105] для выборки изолированных пар спиральных галактик найдена корреляция между $L_{\text{ИК}}/M(\text{H}_2)$ и величиной проекции взаимного расстояния (X), а также разности лучевых скоростей Δv членов пар: отношение $L_{\text{ИК}}/M(\text{H}_2)$ увеличивается с уменьшением X и Δv . Если ИК-светимость галактики принять за меру звездообразовательной активности, то, как подчеркивается в [106], это означает, что вспышки звездообразования во взаимодействующих системах связаны с увеличением скорости рождения звезд на единицу массы, а не с простым увеличением количества газа в данном объеме (например, за счет притока газа в центральные области). В [107] было показано, что, хотя отношение ИК-светимости к массе молекулярного водорода систематически выше у галактик, испытывающих более сильное приливное возмущение, у сливающихся галактик это отношение меньше, чем у просто взаимодействующих.

4.4. *Непрерывное радионизлучение.* Исследование непрерывного радионизлучения двойных и взаимодействующих галактик привело к результатам, близким к найденным по их эмиссионным спектрам и ИК-излучению. Как было отмечено ранее (см. раздел 3.2.1.), среди членов двойных и взаимодействующих галактик чаще, чем среди одиночных объектов, встречаются галактики с радионизлучением и они характеризуются, в среднем, большей светимостью. Избыток радионизлучения наиболее сильно выражен в ядерных областях, но, вероятно, характерен и для дисков галактик. Спектральный индекс и поверхностная яркость в радиодиапазоне свидетельствуют о петешовом происхождении излучения (возможно, в результате вспышек сверхновых). В некоторых случаях радионизлучение удается прямо связать с областями звездообразования. В нескольких близких галактиках были найдены компактные радионисточники, идентифицированные с остатками сверхновых [108,109]. По всей

видимости, поверхностная яркость галактик в сантиметровом диапазоне (по крайней мере, самые высокие значения поверхностной яркости) отражает темп всплеск сверхновых и, следовательно, SFR в соответствующем диапазоне звездных масс.

Приведенные выше соображения о природе избытка радионизлучения во взаимодействующих галактиках были подтверждены прямым сравнением частоты встречаемости сверхновых во взаимодействующих и изолированных галактиках [110]. Оказалось, что во взаимодействующих галактиках сверхновые обоих типов наблюдаются примерно в два раза чаще, чем в изолированных.

5. *Наблюдательные свидетельства связи эффектов взаимодействия с активностью ядер галактик.* Проблема связи между гравитационным взаимодействием и ядерной активностью галактик является одной из важнейших в современной внегалактической астрономии (см., например, обзоры [111,3,112]). В настоящем обзоре мы ограничимся обсуждением зависимости между взаимодействием и "классическими" проявлениями активности - феноменом сейфертовских галактик (SyG) и квазаров (QSO).

5.1. *Сейфертовские галактики.* Работы, посвященные исследованию связи сейфертовской активности с гравитационным взаимодействием с соседней галактикой, можно разбить на две группы: в первой изучается оптическая морфология и ближайшее окружение SyG, во второй сравнивается встречаемость сейфертовских ядер в выборках взаимодействующих и относительно изолированных галактик.

5.1.1. *Морфология и окружение SyG.* В большинстве работ, посвященных изучению структуры SyG, отмечена повышенная доля галактик с некуляриной морфологией [113-115,111]. Доля морфологически некуляриных SyG, по-видимому, увеличивается с ростом среднего z исследованной выборки: $>10\%$ [114], 30% [115] и $\sim 40\%$ [114]. Как отмечено в [3], это может означать, что связь между сейфертовской активностью и взаимодействием более сильно выражена для ярких SyG. В [111] получено, что среди SyG ранних типов доля объектов со следами возмущения выше, чем среди галактик поздних типов.

Первое систематическое рассмотрение окружения SyG было выполнено в работе [116]. На основе выборки из 161 галактики в [116] было показано, что сейфертовские галактики второго типа Sy2 почти в два раза чаще входят в изолированные пары галактик, чем объекты первого типа.

В работе [117] определялась доля SyG, обладающих близкими спутниками сравнимого размера. По выборке из 103 SyG в [117] было найдено, что 15% сейфертовских галактик имеют спутники с проекцией расстояния до главной галактики меньше трех ее диаметров, в то время как в контрольной выборке таких галактик оказалось лишь 3%. В [118] анализ работы [117] был пересмотрен и сделан вывод, что не менее 75% SyG имеют физические спутники в пределах нескольких сот килопарсек. Авторы [118] заключают, что приливное возмущение является основным механизмом сейфертовской активности.

С целью поиска возможной связи между приливым возмущением и характеристиками активности ядер в [119] была рассмотрена выборка из 194 SyG и показано, что, в среднем, нет статистически значимого различия между SyG со спутниками и без них. Лишь для SyG второго типа было найдено, что Sy2, имеющие спутники, показывают избытки (примерно в 5 раз) ИК и радионизлучения по сравнению с изолированными галактиками. Авторы интерпретировали эти избытки как следствие усиления процесса звездообразования, индуцированного приливым воздействием.

Пространственное окружение для 51 SyG сравнивается с окружением для 51 галактики контрольной выборки в [120]. В этой работе найдено, что 71% SyG имеют видимый спутник в пределах 10 диаметров главной галактики, в контрольной выборке таких объектов оказалось только 26%. Однако, поскольку в [120] не учтен вклад фоновых галактик, истинная доля галактик с физическими спутниками должна быть меньше в обеих выборках. В [120], так же, как и в [116], найдено, что Sy2 чаще, чем Sy1, обладают близкими спутниками.

В [121] для 53 SyG и 30 галактик контрольной выборки произведено сравнение средних плотностей галактик в пределах круга радиусом 1 Мпк и не обнаружено повышенной плотности ярких ($M_r < -18^m$) галактик в окрестностях SyG. Однако включение в

рассмотрение слабых галактик все же приводит к появлению у SyG избытка спутников по сравнению с галактиками контрольной выборки.

Расхождение результатов работ [119,120] и [121] связано, по-видимому, с небольшим объемом исследованных выборок SyG и, возможно, с небольшой величиной самого эффекта преобладания физических спутников у SyG по сравнению с галактиками поля.

5.1.2. Сейфертовские галактики во взаимодействующих системах. Изучению встречаемости SyG среди взаимодействующих систем посвящены работы [92-94].

В [92] на основе сравнения относительной доли SyG в контрольной выборке нормальных спиральных галактик, в полной выборке физических пар и в выборке сильно взаимодействующих галактик показано, что в двойных системах наблюдается небольшой (на уровне $\sim 2\sigma$) избыток SyG по сравнению с контрольной выборкой. Среди же сильно взаимодействующих галактик доли SyG примерно в 2 раза меньше, чем в контрольной выборке.

Противоположный результат был получен в [93]: согласно данным этой работы среди сильно взаимодействующих галактик наблюдается статистически значимый избыток SyG. Однако среди наиболее сильно взаимодействующих и поэтому морфологически наиболее некузирных систем, существует дефицит SyG (следует отметить, что в [93] не учтено, как это было сделано в [92], различие средних абсолютных светимостей галактик в контрольной выборке ВГ). В [94] также найден значимый дефицит SyG среди взаимодействующих систем.

Для согласования результатов работ [92-94], как подчеркивается в [3], можно предположить, что вероятность обнаружения сейфертовских ядер во взаимодействующих системах является, возможно, сложной функцией параметров взаимодействия и самих галактик. Возможно, также, что объем выборок из примерно 100 галактик недостаточен для однозначного решения вопроса о связи взаимодействия и сейфертовской активности.

5.2. Квазары. Рассмотрим результаты изучения окружения и морфологии близких ($z < 0.5$) квазаров. Согласно [122,123], у квазаров с сильным радиоизлучением имеется в 4 - 5 раз больше близких (< 100 кпк) спутников, чем у нормальных галактик. У радиослабых квазаров количество близких спутников примерно в

два раза превышает число спутников у галактик контрольной выборки. Значимость результатов работ [122,123], однако, не вполне ясна, поскольку эти результаты могут быть искажены так называемой зависимостью "морфология - плотность", согласно которой в областях высокой пространственной плотности галактик повышена доля галактик ранних типов. Поэтому для корректного сравнения встречаемости спутников у QSO и нормальных галактик требуется знание природы родительских галактик квазаров (например, если родительские галактики представляют собой гигантские эллиптические галактики, то в качестве контрольной выборки надо также рассматривать гигантские эллиптические галактики).

По данным [122] QSO преимущественно находятся в тесных группах галактик, что подтверждается относительно малым разбросом лучевых скоростей квазаров и спутников [124]. С ростом z ситуация, возможно, меняется и при $z > 0.5$ QSO часто наблюдаются в богатых скоплениях [125]. Анализ красных смещений галактик, видимых в окрестностях QSO, показал, что большинство близких (< 100 кпк) галактик являются физическими спутниками квазаров [124,126].

В обзорах, посвященных изучению морфологии родительских галактик квазаров, показано, что среди QSO доли галактик, описываемых как "возмущенные" или "взаимодействующие", очень велика: 30-40% [127], 35-55% [128]. В выборках QSO с сильным радиолучением таких галактик еще больше: ~50% [127], 77% [128], 70% [129], >68% [130]. (Следует учитывать, что результаты этих работ не с чем сравнивать, поскольку практически не изучена встречаемость морфологических некулириностей у нормальных галактик при тех же z).

Таким образом, современные данные приводят к выводу о существовании значимой связи между гравитационным взаимодействием и наиболее сильными проявлениями ядерной активности (QSO). Связь умеренно активных ядер (сейфертовских) со взаимодействием, по-видимому, значительно слабее: взаимодействие между галактиками является, возможно, существенным, но не основным механизмом, приводящим к активности таких ядер.

6. *Моделирование процессов взаимодействия галактик.* Многие морфологические некулириности галактик, а также особенности физических явлений в них принято относить за счет эффектов

гравитационного взаимодействия галактик - вывод, который усиленно подкрепляется результатами теоретических исследований и численных экспериментов. Столкновения галактик друг с другом вызывают в первую очередь приливы, сопровождающиеся структурными изменениями, следы которых должны наблюдаться миллиарды лет спустя. В динамически связанных системах из-за приливного трения галактик могут постепенно сливаться, что приводит к изменению типа галактик. Наконец, тесная связь между взаимодействием и различными проявлениями активности галактик также подтверждается результатами численного моделирования.

При моделировании процесса столкновения галактик приходится преодолевать те же проблемы, какие возникают при построении нестационарных моделей одиночных галактик. Аналитические решения бесстолкновительного уравнения Больцмана и уравнения Пуассона, описывающие эволюцию динамических свойств гравитирующей системы звезд (N -тел), возможно лишь при многих упрощающих предположениях, например, в линейном приближении. Нелинейное моделирование стало возможным благодаря широкому использованию в теоретических исследованиях современных быстродействующих компьютеров. В настоящее время ни один серьезный астрономический журнал не обходится без статьи, сообщающей о каких-либо результатах численного решения задачи N -тел. И хотя такой подход не может полностью заменить аналитические исследования, он существенным образом, помогает приблизиться к пониманию природы различных структурных особенностей галактик, а также некоторых физических явлений, таких, как, например, вспышки звездообразования.

Прекрасный обзор численных методов, применяемых при решении гравитационной задачи N -тел, начиная от так называемого полуограниченного подхода (галактика моделируется системой пробных частиц, движущихся в заданном потенциале) до наиболее мощного алгоритма "иерархического дерева" (включающего газодинамику с учетом тепловых процессов), дан Селвудом [131]. Эти методы в совокупности с мощностью современных вычислительных машин позволяют моделировать взаимодействие галактик, имитируя их N -телами, где $N=10^4-10^5$. Эволюцию таких систем можно проследить

на временной шкале в несколько миллиардов лет, игнорируя при этом эффекты нарпной релаксации, возникающие из-за недоучета реального числа звезд.

6.1. Влияние приливов на структуру дисковых галактик.

6.1.1. *Образование хвостов и перемычек.* Общепринятой причиной прорехождения сложной морфологии некоторых некуляриных галактик считается приливное возмущение со стороны близких соседей. Для проверки этого предположения было выполнено большое количество численных экспериментов, в которых моделировалось взаимодействие плоского диска, состоящего из пробных частиц, находящихся в гравитационном поле точечной массы, с пролетающей мимо него другой точечной массой (например, [132,133]). В результате расчетов получились удивительно похожие на образования, наблюдаемые у многих ВГ. Частицы, вырываемые из диска под действием приливов, часто образовывали мосты в направлении возмущающего тела и хвосты в противоположном направлении.

Наиболее нечерпывающим исследованием, использующим модель пробных частиц, до сих пор остается работа А. и Дж. Тумре [132]. Она выделяется из ряда аналогичных всесторонним изучением зависимости процесса образования приливных структур от параметров столкновения галактик. Было показано, что образования типа перемычек хорошо воспроизводятся при взаимодействии с маломассенной галактикой, а такие морфологические особенности, как хвосты, более отчетливо проявляются при столкновениях диска с галактикой сравнимой массы. Найдена сильная зависимость структурных изменений в диске от ориентации момента его осевого вращения по отношению к орбитальной. В том случае, когда моменты антипараллельны, эффекты взаимодействия не столь значительны, как при параллельной ориентации. Это объясняется тем, что для частиц, вращающихся в направлении, противоположном движению возмущающего тела, действие возмущения продолжается меньшее время. Вратья Тумре также построили модели четырех известных взаимодействующих систем: *Агп 295*, *NGC 4676* ("мышки"), *NGC 4038/4039* ("агпешны") и *NGC 5194/5195* (*М 51*). Для систем *М 51* и *NGC 4038/4039* удалось хорошо воспроизвести не только некуляриную форму объектов, но и

поле скоростей в них. Численные эксперименты по методике, аналогичной [132], были многократно повторены и дали совпадающие результаты (см., например, [133, 134]).

Значительный прогресс в изучении взаимодействия дисковых систем связан с использованием моделей галактик с корректно рассчитываемыми самосогласованными потенциалами [135-137]. Существенным продвижением в численных экспериментах по столкновению дисковых галактик является исследование Барнеа [138]. Барнеа, используя алгоритм "иерархического дерева", первым построил модели В1, в которых все динамические компоненты, участвующие во взаимодействии (балджи, диски и массивные "темные" гало), описываются как трехмерные системы N -тел ($N \sim 10^4$ на каждую галактику). При этом никаких ограничений на геометрию системы или пространственное распределение масс галактик не вводилось. Такой подход дает возможность создавать модели сталкивающихся галактик, близкие к реальным, и ответить на многие вопросы, неразрешенные в предшествующих исследованиях. Были повторены расчеты [132], моделировавшую систему NGC 4038/4039. Подтвердился вывод, сделанный в [132], что учет динамического трения и самогравитации исправит неправдоподобно большое расстояние между галактиками, получающееся в модели невзаимодействующих частей.

Расчеты столкновений галактик, не связанные с конкретными наблюдаемыми системами, помогли положительно ответить и на такой вопрос: может ли динамическое трение привести к слиянию галактик, состоящих из диска и гало, с образованием "двуххвостого" объекта типа NGC 7252. Учет "темного" гало, которое увеличивает эффективную скорость слияния галактик, оказался решающим фактором при образовании тонких динамически молодых хвостов и тесно взаимодействующих и в сливающихся галактиках. Что касается роли самогравитации, то она, в частности, проявляется в том, что при обратных прохождении галактик образуются гораздо более четкие хвосты, чем в экспериментах, проведенных в [132] (см. также [55]).

6.1.2. *Возбуждение спиральных волн плотности.* Природа спиральных ветвей галактик является одной из до конца не решенных и

потому притягивающих особенное внимание исследователей задач внегалактической астрономии. Существует множество обстоятельных обзоров наблюдательных данных и теоретических работ, посвященных указанной проблеме [139-144].

В наблюдательном плане спиральный узор в галактиках проявляется различным образом. В [145] дана следующая морфологическая классификация спиральных галактик: галактики с крупномасштабными (двухрукавными) спиральными ветвями (7-9%), с многорукавным, а также ветвящимся рисунком (37-60%) и, наконец, галактики с перегулярной мелкомасштабной структурой, часто объясняемой в рамках модели стохастического звездообразования (31-56%). Среди галактик типа SA и SB встречаемость соответствующих структур такова: (8-18)%, (54-63)%, (22-38)%. Интересно отметить, что наибольшие усилия потрачены теоретиками для объяснения наименее распространенной, но самой впечатляющей картины правильных двухрукавных спиралей, рассматриваемых обычно как квазистационарные волны плотности (моды).

Критическое осмысление работ, рассматривающих спиральные волны как моды собственных колебаний диска и объясняющих природу крупномасштабных рукавов в рамках гипотезы о квазистационарной спиральной структуре (QSSS-см. ссылки в [143] и [144]), привело с одной стороны к пониманию необходимости учета нелинейных эффектов, особенно в газовой составляющей галактик (ссылки в [142]), с другой же - открыло новое направление исследований, в которых спиральные волны плотности являются короткоживущими образованиями и требуют каких-либо источников для своего поддержания.

Тумре [146], показавший, что вследствие достаточно большой групповой скорости волновой пакет должен сползнуть в область ILR (коротковолновая мода) за время порядка 10^9 лет, предложил три возможных механизма возбуждения и поддержания волны: а) локальные неустойчивости; б) крупномасштабные несимметричные возмущения - бары; в) приливное воздействие со стороны других галактик [140]. Отметим, что численные эксперименты с одиночными дисками, стабилизированными массивным гало относительно роста возмущений, соответствующих крупномасштабной бар-моды, не воспроизводят спиральный узор, предсказываемый гипотезой QSSS.

Чуть ли не единственный случай правильной двухрукавной спиральной волны, существовавшей на протяжении многих оборотов диска, отмечен в [147] и связан с наличием Q -барьера (Q параметр Турме; $Q = \sigma_v k / \pi (\Sigma \Omega)$ где σ_v - дисперсия скоростей облаков, k - энциклическая частота, Σ - поверхностная плотность звезд) в центральных областях, присутствием значительного количества холодного газа (не менее 50% от массы диска) и, в конечном счете, с условием квазистационарной эволюции межзвездной среды. Спиральная структура в одиночных галактиках без баров, вероятно, может возбуждаться какими-либо неустойчивостями, такими, как, например, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (ссылки в [142]) или неустойчивость, связанная с "выемками" в функции распределения звезд по угловым моментам [148].

Аналитические исследования в линейном приближении [149] показали, что спутник на круговой орбите, вращающийся в том же направлении, что и диск, может поддерживать в нем крупномасштабную двухрукавную спиральную структуру. Турме [140], используя модель дифференциально вращающегося диска, продемонстрировал, как за счет внезапного малого внешнего возмущения (порядка 1% от галактоцентрической силы) в диске генерируется короткоживущий спиральный волновой узор, не связанный с начальными флуктуациями, усиливаемыми за счет так называемого механизма "swing-amplification" (из-за наличия ILR). Газодинамические расчеты [150-152], а также численные двумерные эксперименты в рамках задачи N -тел с прямыми пролетами маломассивного спутника ($N = 60\ 000$ [153], $N = 30\ 000-150\ 000$ [154]) подтвердили такую возможность. Решающими факторами при возбуждении двухрукавной спиральной волны плотности оказались самогравитация звездного диска и присутствие холодного компонента - газовых облаков, в котором волновой узор проявляется гораздо четче. Гидродинамические расчеты отклика газа на прохождение спутника [150-152], не принимающие во внимание самосогласованный потенциал, создаваемый звездами, давали амплитуду волны в газовом диске на уровне $< 20\%$ от невозмущенной плотности.

Спиральные волны, возбуждаемые в газовом компоненте дисковой галактики [153,154], существовали на протяжении

нескольких оборотов диска, пока разогрев облаков не замыкает волновой узор. Интересным результатом экспериментов [153] является эволюция угла закрутки спирали, имитирующая эволюцию галактики в направлении от более позднего Хаббловского типа к более раннему. Это подтверждает вывод [155] о том, что величина угла закрутки не является устойчивой характеристикой Хаббловского типа галактики.

Столкновения с галактикой, вращающейся в сторону, противоположную вращению диска, могут вызывать образование закручивающейся двухрукавной спирали и отстающей однорукавной. Образование последней связано с единственно возможным в этом случае резонансом Лиддблада [156]. Спиральный узор получается при взаимодействии спутника на орбите тех звезд, которые прецессируют с той же угловой скоростью, с какой движется спутник [157]. В отличие от случая отстающей двухрукавной спирали самогравитация звездного диска не играет большой роли в формировании однорукавного раскручивающегося узора. Практически тот же результат получается для диска, состоящего из не взаимодействующих между собой частиц [158,157]. Помимо аналитического исследования в [157] приведены результаты моделирования двумерной задачи $M=60\,000$ -тел. Погружением диска в массивное жесткое гало подавляется рост отстающей двухрукавной спирали, в результате чего в диске формировалась однорукавная лидирующая волна. Наличием у галактик невидимых гало больших масс можно, по-видимому, объяснить крайне редкую встречаемость раскручивающихся спиралей (см. список [159]).

В [160] отмечается, что спиральная волна в диске, не связанная с приливным возбуждением, взаимодействует со спутником нелинейным образом, что может приводить к временному увеличению или уменьшению ее амплитуды.

Отметим, наконец, что данные наблюдений говорят о значимой корреляции между наличием у галактики регулярной спиральной структуры и ее принадлежностью двойной или кратной системе [161,162]. И хотя существует определенный скептицизм в отношении универсальности механизма возбуждения крупномасштабного спирального узора действием спутника [141], статистические аргументы [154] в пользу частой встречаемости у таких галактик близких маломасштабных спутников, еще способных согласно

расчетам генерировать правильный спиральный узор, кажутся убедительными.

6.1.3. *Бароподобная неустойчивость.* Одним из наиболее ярких проявлений несесимметричной неустойчивости звездного диска является образование перемычки или бара. Строгий критерий развития бар-моды в диске пока не сформулирован. Существует эмпирическое соотношение между кинетической энергией вращения и гравитационной энергией, дающее условие (по-видимому, достаточное) устойчивости относительно образования бара в диске: $T_{\text{вращ}}/|W| \leq 0.14$ [163]. Для холодного диска, уравновешенного вращением, это отношение равно 0.5, для теплых дисков, устойчивых относительно мелкомасштабных осесимметричных возмущений [164], $T_{\text{вращ}}/|W| = 0.35$, и согласно численным экспериментам такие диски деформируются за один - два оборота, образуя крупномасштабную медленно вращающуюся внутри диска перемычку (см., например, [165],[166]). Динамическая эволюция такого бара, выражающаяся в его существенном утолщении и последующем образовании арахисоподобной структуры, происходит на временной шкале >5 оборотов диска [166,167]. Условие $T_{\text{вращ}}/|W| \leq 0.14$ обычно связывается с существованием сферически-симметричного невращающегося "горячего" гало с массой, не меньше массы, заключенной в диске [163]. Достаточно большая дисперсия скоростей звезд в центральных областях диска также является эффективным фактором, препятствующим развитию крупномасштабной бар-моды [168].

Бароподобная неустойчивость наряду с приливными возмущениями обычно обсуждается в связи с проблемой генерации спиральных волн плотности, а также физикой вспышек звездообразования. Влияние же близких пролетов на образование и эволюцию самих перемычек только в последнее время стало предметом детальных численных исследований [55,169].

В [55] приведены результаты двумерных расчетов столкновения точечной массы (прямое движение) с дисковой галактикой ($N=2 \cdot 10^4$), стабилизированной массивным жестким гало ($M_{\text{гало}} = 4M_{\text{диска}}$) относительно роста крупномасштабной бар-моды. Через промежуток времени порядка одного оборота внешнего края диска, после прохождения снопиком периферии, в диске развивалась

индуцированная бароподобная неустойчивость, названная в [170] "повой" и связанная с выстраиванием осей "радиальных" орбит [169]. Достаточное близкое прохождение галактики-спутника, обеспечивая критическую массу звезд с такими орбитами, является необходимым условием возбуждения "повой" бар-моды [170].

В отличие от стандартной бар-моды, развивающейся в изолированном диске в области вплоть до коротационного радиуса, в экспериментах [55] медленно вращающийся бар образуется в области твердотельного вращения (наиболее благоприятной для развития бароподобной неустойчивости указанного типа [171]), между двумя внутренними резонансами Липдблада. Параметры образующегося бара (его протяженность и скорость вращения) сильно зависят от структуры галактики. Для моделей с менее массивными или же более концентрированными к центру гало бароподобная неустойчивость развивается быстрее, и скорость образующегося бара оказывается большей. В этой связи, как отмечается в [55], интересно было бы связать характеристики перемишек Хаббловскими типами и (или) классами светимости галактик. Более массивный спутник, ускоряя развитие бар-моды, практически не влияет на скорость вращения бара, которая определяется динамической шкалой времени в области его образования. Таким образом, приливное возмущение является, по-видимому, лишь спусковым механизмом роста индуцированной бар-моды. Бар в экспериментах [55] не является постоянной структурой в диске. Он может временно исчезать, а затем снова возникать, но с уже меньшей амплитудой. В промежутке между появлениями бара галактика имеет аморфную структуру, напоминающую галактику типа NGC 3448 [172].

В [169] рассматривал диск, изначально неустойчивый относительно роста возмущений, соответствующих крупномасштабной бар-моды. В этой работе на основе двумерных численных экспериментов ($N = 35\ 900$) показано, что близкие прямые пролеты галактик в несколько раз ускоряют образование крупномасштабного бара. Формирование перемишки в случае изолированных и взаимодействующих галактик происходит по-разному. Прохождение спутника индуцирует во внешних частях диска отлетающие спирали, а волновой пакет, двигаясь к центру, возбуждает во внутренних областях бар-моду. В изолированном случае бар-мода развивается и

самоусиливается во внутренних областях внутри коротационного радиуса.

Трехмерные расчеты ($N = 17\ 821$) [169] показали, что в случае прямых пролетов взаимодействие может временно изменить амплитуду уже существующего бара, а также его скорости вращения. Если вблизи периферии спутник опережает бар, то вращающий момент, создаваемый приливной силой, положителен, и скорость вращения бара увеличивается, а его амплитуда уменьшается. Противоположная картина наблюдается в случае, когда спутник догоняет бар. При этом, поскольку несимметричная часть звездного потенциала меняется незначительно, приливное взаимодействие может изменять положение в диске резонансов Лиддблада. Прохождение спутника в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения диска, сказывается в основном на вертикальной структуре диска. Происходит его утолщение, особенно сильно заметное во внешних областях.

Приведенные результаты численных исследований [55,169] предсказывают повышенную встречаемость галактик с перемычками среди взаимодействующих систем по сравнению с галактиками поля. Это предсказание находится в хорошем согласии с наблюдениями: доля галактик SB ранних типов среди галактик поля - 32%, а среди двойных - 50% [54] (см. также исследование [55] встречаемости бароподобных галактик в Атласе некулирных галактик Арпа).

6.2. *Динамическое трение и слияние галактик.* Структурные изменения в галактиках при их взаимодействии сопровождаются потерей части орбитальной энергии вследствие приливного трения. Этот процесс является более общим случаем процесса динамического трения, впервые описанного Чандрасекаром [173] и заключающегося в уменьшении скорости движения пробной частицы, гравитационно взаимодействующей с частями поля. Как следствие - может происходить слияние галактик. В случае взаимодействия маломасштабного спутника с массивной галактикой спутник постепенно погружается в галактику. Задача о поглощении спутников важна, например, для понимания структуры и эволюции центральных эллиптических галактик скопления - cD-галактик (см., например, обзор [174]).

Почти десятилетний спор о том, является ли отклик массивной сферической галактики на погружение в нее небольшого спутника локальным (в этом случае принимаем приближенный подход Чандрасекара) и необходимо ли учитывать самосогласованный потенциал основной галактики, до сих пор не разрешен. В теоретическом исследовании [175], подкрепленном численным моделированием [176] (там же см. ссылки на результаты предшествующих численных экспериментов), показано, что формула Чандрасекара применима для описания торможения спутника лишь при больших расстояниях спутника от центра, либо в том случае, когда распределение вещества в основной галактике является самоподобным. Более точный учет самогравитации массивной галактики (принимая во внимание подвижность ее центра) приводит к увеличению времени погружения спутника в 2-3 раза по сравнению с тем, которое получается в задачах с несамосогласованным потенциалом, и составляет несколько миллиардов лет. Это является следствием существенно меньшей абсолютной величины вращающего момента (знак момента при этом отрицательный), создаваемого дипольной частью самосогласованного потенциала. Время погружения может быть еще больше, если галактика взаимодействует одновременно с несколькими спутниками. Заметим, однако, что появившееся совсем недавно численное исследование рассматриваемой задачи [177], в котором принимается во внимание самосогласованный потенциал основной галактики, а также деформация спутника и, следовательно, его способность поглощать часть орбитальной энергии, приводит к противоположному результату: уменьшению в несколько раз времени погружения по сравнению со случаем жесткого потенциала спутника. Указанные разногласия, по-видимому, будут разрешены в последующих исследованиях.

6.2.1. *Системы оболочек у эллиптических галактик.* Одним из наблюдательных свидетельств того, что слияния между галактиками не слишком редки, является существование систем оболочек, состоящих из звезд вокруг эллиптических галактик, обнаруживаемых примерно в 10% случаев (см. раздел 2.2.2.). Первым, кто связал эти два явления, был Швейцер [178]. Его предположение было подтверждено численными расчетами радиального проникновения маломассивного

дискового спутника в массивную эллиптическую галактику [179], хорошо описывающими на качественном уровне, как процесс "фазового закручивания" создает из обломков разрушающегося спутника такие симметричные структуры, какие наблюдаются у галактики NGC 1344 или, скажем, у NGC 3923 (см. рис. 4). Отметим, что галактика NGC 3923 является, пожалуй, наиболее впечатляющим примером галактики с оболочной структурой. Она имеет около 25 правильных концентрических оболочек, простирающихся на расстояние от 3 до 100 кпк. Правда, приведенный пример не является типичным, и обычно системы оболочек у эллиптических галактик имеют не столь правильные очертания (см. каталог [22]).

В [180] на основе моделирования взаимодействия двух галактик в широком диапазоне значений параметров столкновения и характеристик спутника (ограниченная задача трех тел) при учете динамического трения найдено условие образования оболочек вокруг массивной эллиптической галактики. Оно состоит в малости отношения фазового объема спутника к фазовому объему массивной галактики: спутник должен быть очень компактным или состоящие его звезды должны иметь небольшую дисперсию скоростей. В [179] и других аналогичных работах было высказано предположение, что по форме и кинематике оболочек можно определить потенциал эллиптических галактик (аналогично тому, как это делается для спиралей по кривым вращения). Однако, как показано в [180], геометрия оболочек зависит не только от формы потенциала основной галактики, но и в сильной степени определяется параметрами столкновения галактик, а также детальной структурой спутника, и разделить различные факторы, вносящие вклад в наблюдаемую морфологию не представляется возможным. Исключением является галактика NGC 3923, высокоупорядоченную морфологию которой трудно объяснить иначе как результатом радиального столкновения сферически-симметричных галактик [180, 181].

Главное ограничение большинства расчетов, аналогичных [180], состоит в том, что они не могли описать разрушение спутника массивной галактикой динамически согласованным образом.

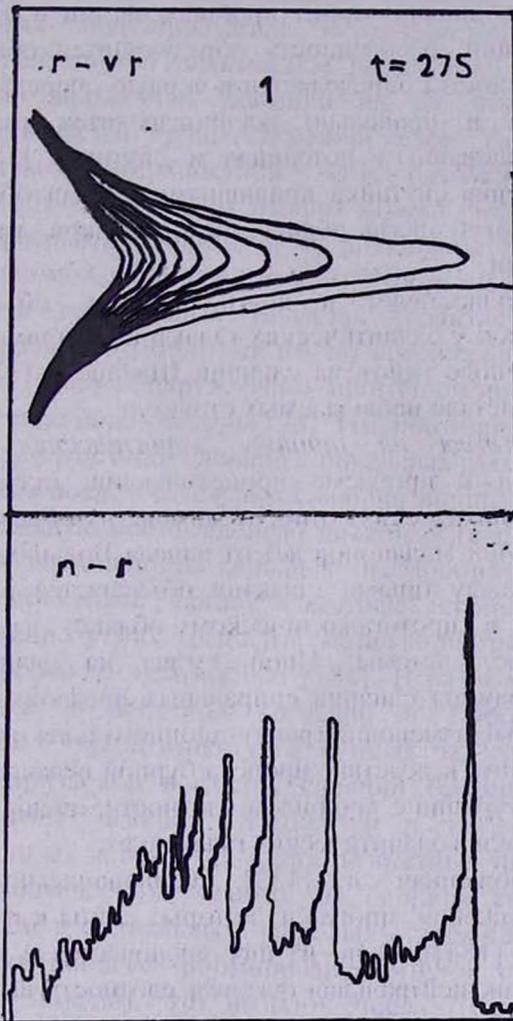


Рис. 4. Вверху - распределение звезд спутника в фазовом пространстве $r-vr$, где r - расстояние от центра основной галактики, а vr - радиальная скорость звезд; внизу - населенность (n) образующихся оболочек. Рисунок взят из работы [180].

Несмотря на то, что пространственное расположение оболочек легко понять путем простого анализа орбит пробных частиц в потенциале эллиптической галактики, населенность образующихся оболочек (а следовательно, и их яркость) определяется в первую очередь деталями разрушения спутника и правильно воспроизводится только при расчетах с самосогласованным потенциалом спутника [181]. Учет постепенного разрушения спутника приливными силами объясняет и большой разброс энергий связи обдираемых осколков, из которых формируются оболочки.

Отметим, что существуют и другие теории, объясняющие существование оболочек у эллиптических галактик (например, [182]), однако расчеты на основе гипотезы слияний Швейцера [178] лучше других воспроизводят детали наблюдаемых структур.

6.2.2. Новый взгляд на природу эллиптических галактик. Традиционный подход к проблеме происхождения галактик (как спиральных, так и эллиптических) относит момент их образования ко времени несколько сотен миллионов лет от начала Большого Взрыва. При этом разница между типами галактик объясняется разницей в начальных условиях в протогалактическом облаке, из которого формируются звездные системы. Иной взгляд на эллиптические галактики как на продукты слияния спиральных предложен в [132]. Дело в том, что быстрые изменения гравитационного поля при слиянии галактик могут приводить вследствие процесса бурной релаксации [183] к равновесной конфигурации с профилем плотности, очень близким к тому, какой наблюдается в эллиптических галактиках.

Гипотеза, предложенная в [132], первоначально вызвала многочисленные возражения, многие из которых связаны к настоящему времени (ср. [174] и [184]). Одно из них заключается в том, что в большинстве E-галактик центральная фазовая плотность выше, чем у спиральных галактик и, следовательно, в процессе слияния спиральных галактик часть энергии должна диссипировать [185]. Как показано на основе численных экспериментов ([138], [186], там же ссылки на предшествующие работы), основную роль в процессе поглощения части орбитальной энергии (в противном случае слиявшийся остаток

имеет слишком низкую дисперсию скоростей) играет темное гало. Роль гало также важна и при поглощении части углового момента.

Формирование эллиптических галактик в результате слияний спиральных подтверждается и результатами фотометрического изучения слившихся галактик (см. раздел 3.4.). К настоящему времени накоплено множество указаний на то, что класс эллиптических галактик является крайне неоднородным. Так, например, согласно результатам поверхностной ПЗС-фотометрии E-галактики в зависимости от формы их изофот можно разделить на две группы: яшккообразными изофотами и дисковыми. При этом существует корреляция между формой изофот и формой профиля поверхностной яркости в центральных областях галактик [187]. Галактики с яшккообразными изофотами имеют протяженные профили яркости, у них также часто обнаруживаются многочисленные фотометрические и динамические подструктуры [26]. Именно такие E-галактики являются кандидатами в остатки слияний спиральных галактик.

Модель последовательных слияний, привлекающая во внимание не только звездную составляющую дисковых галактик, но и газовую, а, значит, и возможность всплесков звездообразования при слияниях, хорошо объясняет такие известные свойства E-галактик, как существование у них градиента металличности и корреляции между металличностью и светимостью [184]. В рамках гипотезы о слияниях объясняется и найденная недавно в [188] корреляция между параметром "тонкой структуры" E-галактик, зависящим от наличия у галактик признаков недавних слияний (светящихся дуг, выбросов, яшккообразных изофот, X-структур и т.д.), и характеристиками абсорбционных линий в их ядрах. Известный факт, связанный с тем, что у эллиптических галактик на единицу светимости приходится больше, чем у спиральных, шаровых скоплений (ШС), объясняется, если учесть процесс формирования ШС в ходе слияния галактик [184,189]. Заметим, что избыток числа ШС у E-галактик можно получить и в сценарии захвата скоплений из пролетающих галактик [190].

6.3. *Моделирование взаимодействия наблюдаемых систем.* В отличие от двойных звезд, для которых знание параметров орбиты, получаемых из прямых наблюдений, дает ключ к определению их масс, аналогичная процедура "взвешивания" двойных галактик

применима лишь в статистическом смысле (при определенных предположениях о характере относительных орбит) [38]. Успехи в области численного моделирования взаимодействующих систем привели к новым методам определения масс галактик. Следы приливного возмущения, определяемые по детальной поверхностной фотометрии и спектроскопии, являются хорошими индикаторами динамических свойств галактик: масс, скоростей вращения, относительных орбит, продолжительности взаимодействия. Путем сравнения наблюдаемого искаженного приливами профиля яркости галактик и поля скоростей с результатами численных экспериментов по столкновению галактик можно моделировать напряженность гравитационного поля данной пары.

Наиболее детально этот подход в рамках ограниченной задачи трех тел разработан для динамически связанных пар эллиптических галактик [191, 192]. Он хорошо дополняет статистический метод [38] определения масс галактик в парах и приводит к аналогичным результатам относительно наличия скрытой массы. Так, например, для пары NGC 4672/4673 оценки отношения динамической массы галактик к суммарной светимости ($M/L = 7.0$) не требуют присутствия значительного количества невидимого вещества [192]. К сожалению, нет оценки того, насколько могут измениться результаты применения описанной методики при использовании самогравитирующих моделей.

Что касается дисковых галактик, то учет несогласованности их потенциалов не влечет значительных изменений в параметры модельных систем, наилучшим образом описывающих данные наблюдений (ср. результаты [132] и [138] для системы NGC 4038/4039, а также [132] и [160, 193] для M 51). Существенное различие получалось только в продолжительности взаимодействия. В то же время численные эксперименты с самогравитирующими дисками позволяют проверить некоторые предположения, касающиеся структуры взаимодействующих компонентов, в частности относительно существования невидимых гало у спиральных галактик. Так, например, морфологические особенности спиральной галактики M 51 [193] и галактики, входящей в систему AM 2208-251 [194], удается воспроизвести лишь в предположении о наличии гало с массой, не меньшей, чем масса, заключенная в диске.

Область возможных орбит и масс компонентов при поиске наилучшего согласия компьютерных картинок с видимой спиральной структурой обычно сужается предварительным анализом наблюдательных данных. Однако, как отмечается в [160], задача может сильно ослабнеть, если галактика имела спиральную структуру до столкновения. В этом случае результат эффекта воздействия прилива на спиральный узор будет сильно зависеть от относительной скорости спутника и узора. Таким образом, результат определения параметров орбиты взаимодействующих дисковых галактик может стать неоднозначным. Тем не менее, весьма интересной представляется работа по составлению обзора двумерных численных моделей взаимодействия дисковых галактик с пролетающим по параболической орбите спутником [195]. В этой работе параметры столкновения, массы компонентов, а также величины отношения массы диска варьируются в широких пределах. Такой обзор может быть весьма полезным для нахождения различных корреляций между такими наблюдаемыми особенностями галактик, как ядерная активность или наличие вспышки звездообразования и ненаблюдаемыми динамическими свойствами систем, характеризующими каждое столкновение.

7. *Отклик газовой составляющей на приливное воздействие.* В последние несколько лет в области изучения сталкивающихся и сливающихся галактик наблюдается все нарастающий интерес к процессам, в которых участвуют не только звезды, но и газ. Известно, что в газовой составляющей спиральных и неправильных галактик содержится значительная доля массы (до 20%). Однако сложность описания явлений в газе, возникающих при сверхзвуковых скоростях, до последнего времени препятствовали появлению обстоятельных теоретических работ, в которых бы наряду со звездной динамикой учитывалась и газодинамика. Ясно, что газ и звезды по-разному реагируют на приливное воздействие. Наиболее наглядно это различие проявляется в структурных образованиях, возникающих при гравитационном взаимодействии галактик. Если же принять во внимание физические процессы, идущие в газе, то приливное возмущение может привести к интересным наблюдательным явлениям:

вспышкам звездообразования, а также, к возбужденно ядерной активности и даже феномену квазара (см. разделы 4 и 5).

7.1. Вспышки звездообразования.

7.1.1. *Наблюдательные ограничения теоретических моделей.* В некоторых галактиках наблюдаемая интенсивность звездообразования настолько велика, что не может поддерживаться за счет имеющегося в системе газа в течение хаббловского времени. В этом случае говорят о вспышке звездообразования. Термин "вспышка звездообразования" появился в начале 70-х годов [196]. В [196] была дана количественная интерпретация наблюдений голубых карликовых галактик из каталога Цвикки, из которой следовало, что распределение галактик по плоскости ($U - B$, $B - V$) можно объяснить, предполагая непостоянный характер процесса звездообразования с периодами резкого увеличения скорости рождения звезд в масштабах, сравнимых с размерами галактик.

Наблюдаемое число галактик со вспышками звездообразования невелико, но поскольку продолжительность таких вспышек составляет несколько десятков миллионов лет [197], то из этого следует, что большинство галактик за время своей эволюции могли пройти (причем не один раз) через стадию вспышечной активности [198,106]. Этот вывод для нашей Галактики подтверждается, например, анализом возраста звезд в окрестности Солнца [199]. Феномен периодического усиления звездообразовательной активности в галактиках является, возможно, общим свойством как "нормальных", так и взаимодействующих систем [106]. Подробный обзор и анализ свидетельств связи между вспышечной активностью галактик, проявляющейся в различных диапазонах длины волны, и приливными возмущениями дан в разделе 4.

Конкретные физические процессы, посредством которых приливы активизируют звездообразование, понятны до сих пор плохо. Приведем здесь те из наблюдаемых особенностей, касающиеся вспышек звездообразования, которые необходимо воспроизвести в теоретических моделях, чтобы выяснить, за счет чего эти особенности появляются.

1. Лишь для систем с ярко выраженными признаками взаимодействия среднее значение скорости звездообразования,

основанное на данных о светимостях галактик в линии Π_{α} и ИК светимостях, существенно выше, чем для выборки изолированных галактик.

2. Галактики с экстремально высокими значениями светимости в линии Π_{α} (см. [2]) имеются только среди ВГ. В целом же дисперсия величины, характеризующей темп образования звезд во взаимодействующих галактиках, велика. У многих ВГ нет признаков усиления звездообразования [96,69]. Более того, существование большого разброса в цветах $B1'$ [81] свидетельствует о том, что в некоторых галактиках процессе образования звезд подавлен [197].

3. В большинстве случаев вспышки во взаимодействующих системах происходят в центральных областях галактик, но имеются случаи возбуждения высокой вспышечной активности во всем диске [70,94-96].

4. Вспышки звездообразования во взаимодействующих системах, по-видимому, связаны с ростом эффективности звездообразования, а не с простым увеличением количества газа в данном объеме (за счет, например, притока газа в центральные области) [106].

5. Продолжительность вспышки звездообразования, требуемой для объяснения большого разброса показателей цвета $B1'$, невелика и составляет примерно $2 \cdot 10^7$ лет [81, 2]. Этот же вывод следует и из анализа светимостей в линии Π_{α} для выборки взаимодействующих пар - продолжительность вспышки ($0.3 - 5 \cdot 10^7$ лет [96] (см. также [197, 200] и ссылки в этих работах). Приведенные значения примерно на порядок меньше времени приливного возмущения галактик и их трудно совместить с долей $B1'$, находящейся в состоянии вспышечной активности, а также с голубыми цветами приливных структур в тесных парах галактик [85]. Возможно, что пик вспышечной активности во взаимодействующих системах запаздывает по отношению к моменту наибольшего сближения галактик [197, 106], а с другой стороны, возможно, что начальная функция масс звезд, не используемая при анализе показателей цвета $B1'$, имеет вид, отличный от стандартно принимаемого [2].

7.1.2. *Теоретические модели.* Интенсивность звездообразования в галактиках зависит от многих факторов, в первую очередь от плотности межзвездного газа и тех процессов, которые приводят к ее

увеличению. Назовем некоторые из них: сжатие газа в спиральных рукавах, а также ударными волнами; сжатие давлением межгалактической среды [201]; сжатие таранным давлением межгалактического газа, а также аккреция этого газа на галактики (ссылки в [200]); слияния и приливное взаимодействие галактик, приводящие к падению газа в центральные области [118,202-209]. Что касается механизма распространения ионизирующего процесса рождения звезд, происходящего в масштабах порядка размеров молекулярных облаков, на области, сравнимые по протяженности со всей галактикой, то его природа ясна не вполне.

Число теоретических исследований, в которых моделируются вспышки звездообразования во взаимодействующих галактиках, можно пересчитать по пальцам. Подход, используемый в таких работах, в большинстве случаев основан на детальном расчете движения большого числа пробных частиц, под которыми подразумеваются молекулярные облака, в гравитационном поле сталкивающихся галактик. Поскольку основная доля машинного времени тратится на самосогласованный расчет гравитационного потенциала, создаваемого звездами, вследствие этого обычно принимается достаточно простая модель эволюции системы облаков в результате их столкновений. Скорость звездообразования а priori связывается либо с частотой столкновений молекулярных облаков [158,206-209], либо с локальной плотностью межзвездного газа [210].

В пионерской работе [158] приводятся результаты двумерных расчетов сближения дисковой галактики с точечной массой. Дисковая галактика моделировалась системой пробных частиц (звезды и газ), вращающихся в жестком сферически-симметричном гало. Учитывалась диссипация энергии при парных столкновениях облаков. Значение частоты столкновений облаков использовалось для вычисления изменений темпа образования ОВ-звезд за время взаимодействия галактик и соответствующего изменения цетров дисковой галактики. Найдено, что при пролетах с прямыми движениями темп звездообразования начинает увеличиваться сразу после момента наибольшего сближения галактик, достигая максимального значения через несколько сотен миллионов лет (ср. с п. 5 раздела 7.1.1.). При достаточно тесном взаимодействии галактик

скорость звездообразования, прямо пропорциональная числу столкновений облаков, возрастала на порядок, а сам процесс рождения ОВ-звезд локализовался в месте повышенной плотности газа - кольце, образованном облаками. В случае столкновений с так называемыми обратными движениями вспышка звездообразования не происходила.

Олсон и Кван [206,207] использовали модель самогравитирующих звездных дисков для проведения трехмерных расчетов взаимодействия двух галактик. Было принято более сложное правило столкновения газовых облаков. Учитывались процессы слияния облаков, а также их фрагментации как при столкновениях с большими скоростями, так и вследствие гравитационной неустойчивости облаков больших масс, образовавшихся в результате слияний. Проведенные расчеты подтвердили сделанный в [158] вывод о том, что приливное возмущение приводит к увеличению частоты столкновений облаков. Варьирование параметров столкновений галактик в широком интервале значений позволило проследить зависимость роста темпа столкновений облаков от силы приливного возмущения. Оказалось, что чем сильнее взаимодействие, тем более сконцентрированной к центру оказывается область, где облака сталкиваются чаще. При малом возмущении возрастает число сталкивающихся облаков во внешних областях галактики без заметного изменения темпа столкновений облаков в центральной части (см. п. 3 раздела 7.1.1). Основным результатом проведенных численных экспериментов заключается в следующем. Взаимодействие, увеличивая частоту столкновений облаков (иногда на три порядка), усиливает процесс разрушения облаков по сравнению с процессом их слияния, и различие оказывается тем более, чем сильнее возмущение. Возрастание в несколько раз числа массивных гравитационно неустойчивых облаков происходило лишь в экспериментах со слияниями галактик. Было сделано предположение о том, что вспышка звездообразования в диске, если она происходит в момент наибольшего сближения галактик, связана с резким ростом числа облаков, разрушающихся в результате столкновений. На основе этого предположения рассчитывалась величина SFR. В случае сливающихся галактик происходила две вспышки: в момент сближения галактик и в момент

слияния. Получены значения ИК-светимости, отнесенной к единице массы газа, которые согласуются с данными наблюдений.

Эволюция системы газовых облаков при слияниях галактик рассмотрена также в [209]. Найдено, что при слиянии звездных дисков газовые облака обеих галактик образуют структуры типа ступеней, вращающиеся друг вокруг друга по вытянутым орбитам. Частота столкновений облаков периодически возрастает примерно на порядок, когда газовые ступени сближаются на минимальное расстояние. Так же, как и в [158], темп образования звезд в галактиках напрямую связывается с частотой столкновений облаков. Большой разброс наблюдаемой скорости звездообразования в системах, находящихся в процессе слияния, в [209] объясняется рекуррентной вспышечной активностью (с периодом порядка 10^8 лет).

В [210] моделировался процесс столкновения двух дисковых галактик в рамках модифицированной ограниченной задачи трех тел. Проведенное исследование примечательно детальным изучением зависимости степени возбуждения звездообразовательной активности от параметров столкновения (30 моделей). Считается, что скорость звездообразования связана с локальной плотностью газа по закону типа закона Шмидта [211]. Показано, что в большинстве рассчитанных случаев взаимодействие не приводит к заметному увеличению темпа звездообразования. Более того, при тесных сближениях галактик сильные возмущения в плоскости, перпендикулярной диску, приводят к его утолщению и уменьшению плотности газа. В этих случаях процесс звездообразования оказывается подавленным в течение нескольких сотен миллионов лет (см. п. 2 раздела 7.1.1).

Совершенно иной подход к исследованию механизма возбуждения вспышек звездообразования в галактиках принят в [197] и [200]. В одностороннем приближении, при котором не принимаются во внимание пространственные вариации плотности газа, с помощью системы гидродинамических уравнений рассмотрена эволюция системы газовых облаков. Учет возможных источников и стоков массы и энергии позволил найти нелинейный режим поведения газа типа предельного цикла. Выход на предельный цикл происходит в том случае, когда среднее время парных столкновений облаков становится меньше времени, которое необходимо для образования звезд в

массивных гравитационно неустойчивых облаках. Происходит повторяющееся вспыхивание звездообразовательной активности, сопровождаемые длительными (в несколько сотен миллионов лет) периодами с нормальным темпом звездообразования. Поскольку частота столкновений облаков зависит от плотности газа, то отсюда делается вывод о существовании порогового значения плотности, необходимой для возбуждения режима вспышечной активности. Такой же вывод сделан и в [212] на основе детального исследования связи между темпом звездообразования в 15 спиральных галактиках и величиной отношения наблюдаемой поверхностной плотности газа к значению критической плотности, при которой газовый диск становится гравитационно неустойчивым. Вблизи порогового значения плотности газа зависимость SFR от плотности газа становится сильно нелинейной и не описывается законом Шмидта ($\sim \rho_{\text{газ}}^n$) с показателем $n = 1-2$. В дифференциально-вращающихся дисках значение пороговой плотности газа быстро возрастает к центру [212], и вспышка звездообразования может быть особенно сильной вблизи ядра. С этой точки зрения интересны механизмы, за счет которых в центральных областях ВГ достигается большая концентрация газа [202-209].

Звездообразование в галактиках при условии возрастающей со временем плотности газа в рамках подхода, развитого в [197], рассмотрено в [200]. В предлагаемой модели вспышечной активности в галактиках разрешается противоречие между продолжительностью стадии активного звездообразования и временем приливного взаимодействия (см. п. 5 раздела 7.1.1). Действительно, если скорость образования звезд в галактиках зависит от плотности газа линейно (или почти линейно), то характерное время вспышечной активности должно быть того же порядка, что и время нарастания плотности. Во всех численных экспериментах по столкновению галактик, в которых темп звездообразования связывался с плотностью газа (или частотой столкновения облаков), характерное время процесса интенсивного звездообразования оказывалось сравнимым с временем приливного взаимодействия ($5 \cdot 10^8$ лет) [158, 208, 206, 207]. В [197] и [200] вспышка рассматривается как нелинейный отклик системы газовых облаков на возмущение плотности, и ее продолжительность определяется только

характерным временем парного столкновения облаков (10^7 - 10^8 лет). Показано, что в случае возрастающей плотности необходимо учитывать дополнительный источник энергии, связанный с притоком газа [200]. За счет этой энергии увеличивается дисперсия скоростей газовых облаков, что ведет к их разрушению и уменьшению скорости звездообразования на время действия источника газа ("инкубационный период") - 10^8 - 10^9 лет (результат, противоположный, полученному в [206] и [207]). После "отключения" источника (например, после пролета спутника), приход системы газовых облаков в новое равновесное состояние сопровождается вспышкой звездообразования, вызванной резким увеличением числа массивных гравитационно неустойчивых облаков вследствие слияния более мелких. Причиной несоответствия результатов, полученных в [206] и [207], с тем, что перечисленными является, возможно, то, что в [206] и [207] не принималось во внимание диссипация энергии облаков при их столкновениях. Очевидно, что в этом случае процессе слияния облаков будет затруднен. С другой стороны, в [206] приводятся аргументы в пользу того, что описание системы облаков уравнениями движения жидкости [197], при котором средняя масса облака диктует темп звездообразования для всей системы, а средняя дисперсия скоростей определяет, какой процесс доминирует при столкновениях (слияния или разрушения), не является адекватным для систем облаков с широким спектром масс и относительных скоростей столкновения. Таким образом, физика явления вспышки звездообразования во взаимодействующих системах до сих пор остается не вполне выясненной.

7.1.3. *Звездообразование в приливных структурах.* В [213] не использовалось небесно-механическое приближение для расчета траекторий большого числа пробных частиц ($N=10^4$) в гравитационном поле сталкивающихся масс со сглаженными потенциалами. Это позволило детально проследить изменение концентрации частиц в образующихся приливных хвостах и перемычках. Расчеты помогли выявить те области (каустики), в которых пересекаются и заворачиваются орбиты пробных частиц. Предполагается, что в этих местах происходит сильное сжатие вещества, которое распространяется в виде волны по направлению к

внешним областям приливных хвостов. Спустя время порядка $8 \cdot 10^7$ лет после момента наибольшего сближения галактик плотность частиц в приливных хвостах, оставаясь до этого примерно постоянной, возрастала в 3-6 раз. Сам диск также сжимается, и образующиеся в нем звезды могут в дальнейшем перемещаться в область приливного хвоста. Предполагалось, что изменения плотности связаны со скоростью звездообразования по закону Шмидта. Проведенный анализ эволюции фотометрических свойств приливных деталей, аналогичный [81], показал, что увеличение плотности за счет приливного взаимодействия оказывается достаточным для объяснения голубых хвостов В1 вследствие вспышки звездообразования [85].

7.2. Ядерная активность. Активность в центральных областях галактик, отличная от вспышек звездообразования, обычно связывается с аккрецией вещества на центральный компактный объект, в частности на сверхмассивную черную дыру [214, 215]. Для описания явления ядерной активности используют модели одного из двух классов. К первому относятся модели с локальными источниками ядерного "топлива", в качестве которых рассматриваются плотные звездные скопления (трудности, связанные с поддержанием активности за счет такого источника, подробно обсуждаются в [216]). Во втором классе моделей наблюдаемый уровень ядерной активности обеспечивается межзвездным газом, приходящим из внешних областей дисковой галактики. В этом случае достаточно большая масса газа ($10^8 - 10^{10} M_{\odot}$) должна быть доставлена в область, где образуется аккреционный диск, размером 0.1 - 1 кпк за время существования источника активности. Показано, что вязкость в холодном газе вокруг черной дыры не приводит к необходимому темпу переноса вещества на расстояниях, больше нескольких парсек от центра [217]. Учет облачной структуры газа приводит к аналогичному результату.

Сейфертовские галактики и квазары часто имеют близких соседей или же демонстрируют признаки слияния (см. раздел 5). Эти факты указывают на то, что механизм потери газом углового момента и последующей доставки газа из диска в ядро может быть связан с приливным взаимодействием. Численные эксперименты по столкновению галактик могли ответить на вопрос, как информация о галактике, пролетающей на расстоянии в десятки килопарсек,

передается в центральные области (< 1 кпк). Основным фактором, способствующим падению вещества к центру, является самогравитация звездного диска [140,202,118,208]. Если принимается во внимание только действие приливов, то для сколь-нибудь значительных возмущений в газовом диске на масштабах порядка 1 кпк минимальное расстояние сближения галактик должно быть сравнимо с размером возмущаемой области [151]. Учет самогравитации в звездном диске, взаимодействующем с галактикой, пролетающей на расстоянии ~ 20 кпк, приводит к глобальной гравитационной неустойчивости диска, вызывающей падение вещества в центральные области [202,118].

В [218] в качестве механизма доставки в центр галактики "топлива" для черной дыры рассматриваются воздействие несимметричного гравитационного потенциала (бара) на диссипативную систему газовых облаков. Значительный поток газа в центральные области наблюдается только в случае медленно вращающегося бара (или в случае существования внутреннего резонанса Линдблада, приводящего к образованию самоподдерживающегося потока).

Численные эксперименты показали также, что крупномасштабное бароподобное искажение потенциала звездного диска может вызываться приливными возмущениями [202,118,55,208,205,169]. Газовые облака в таком потенциале внутри коротационного радиуса, обычно расположенного на периферии галактики, эффективно тормозятся, теряя угловой момент, и падают к центру. Газ, рассматриваемый как непрерывная сжимаемая среда, реагирует на бароподобное возмущение потенциала образованием двух крупномасштабных ударных волн, способствующих потере углового момента и формированию потока к центру галактики (например, [219]), в некоторых случаях порождающего периодическое поведение [220]. Трехмерные самоогласованные расчеты слияния галактик с маломассивным спутником [204] показали, что при погружении спутника с прямым движением действие приливных сил приводит к сжатию газа в центральных областях настолько, что в нем образуется ударная волна. Учет выветчивания и самогравитации приводит к

фрагментации газовой среды, а динамическое трение способствует падению фрагментов в область размером ~ 400 пк за время $4 \cdot 10^7$ лет.

Крупномасштабный бар, связанный с быстрым вращением звездного диска [163], способствует лишь собиранию газа в области ≤ 1 кпк и вряд ли обеспечивает подпитку газом самого ядра, ввиду слабости возмущений потенциала в околоядерной области [207,170]. Если же существует внутренний резонанс Линдблада, то вблизи него газ соберется в кольцо [221], что в дальнейшем может привести к вспышке звездообразования, а не к возбуждению активности ядра (см. [216]). Достаточные близкие пролеты, ускоряя развитие бар-моды в неустойчивом диске, могут временно уменьшить амплитуду бароподобного возмущения [169], и тем самым свести на нет роль бара в формировании газового потока к центру. Этот эффект, возможно, проявляется в меньшей встречаемости SyG среди тесно взаимодействующих систем по сравнению с галактиками поля [92,94].

В [216] предложен двухстадийный механизм возбуждения ядерной активности. За счет крупномасштабного звездного бара в центре галактики образуется газовый диск. Если доля газовой составляющей в галактике велика ($>10\%$), то масса газа, собираемая в центральном диске, оказывается достаточной, чтобы уже в нем возникла бароподобная неустойчивость. Это способствует дальнейшему падению газа до расстояний ~ 10 пк, на которых перенос углового момента начинает контролироваться действием турбулентной вязкости [222].

Согласно [208] фактором, направляющим газ в центральные области, является динамическое действие звездного бара, формирующегося в диске вследствие близкого пролета спутника [55]. Присутствие массивного гало заведомо подавляет стандартную крупномасштабную бар-моду, и в центральных областях системы развивалась неустойчивость относительно "новой" бар-моды [170]. Медленно вращающийся бар в экспериментах [208] (в некоторых случаях долгоживущий) образуется внутри области, радиус которой соответствует ILR. Этот бар способствует формированию газовых облаков к центру галактики. К такому типу баров могут принадлежать мини-бары, введенные в работе [223]. Найдено, что эффективность процесса аккреции сильно зависит от структуры галактики до стол-

кношения: пространственного распределения газа и формы кривой вращения. Приток газа к центру снижается, если внутренние области диска были бедны газом. Бар, образующийся в звездном диске с менее протяженной областью твердотельного вращения, вызывает более слабый радиальный поток газовых облаков. Центральные бары, в звездных дисках, направляющие газ к центру, образуются и при слиянии галактик равных масс с массивными гало [205].

Оссимметричные возмущения в центральном газовом диске также могут приводить к потере газом углового момента. В [203] рассмотрен маргинально устойчивый толстый диск из газовых облаков ($Q \sim 1 - 2$). Считалась, что облака остаются на круговых орбитах внутри области 1-2 кпк, а возмущения из-за приливов, проникая в эту область, приводят к возмущениям плотности газа. Вследствие увеличения частоты столкновений облаков и выветчивания в ударных волнах происходит быстрое уменьшение дисперсии скоростей облаков.

Параметр Q становится меньше единицы и диск выходит из устойчивого состояния. Предполагается, что гравитационная неустойчивость способствует возбуждению волн плотности различной длины, которые могут эффективно переносить угловой момент. Однако, для обеспечения необходимой скорости переноса вещества необходимо, чтобы масса газового диска составляла не менее 10% полной гравитирующей массы в центральной области.

7.3. О происхождении холодного газа в эллиптических галактиках. Воздействие приливов на поведение газа в спиральных галактиках проявляется двояким образом. В первом случае, рассмотренном выше, несимметричные возмущения гравитационного потенциала со стороны спутника или пролетающей галактики приводит к изменению орбит газовых облаков и увеличению частоты их столкновений, что, в конечном счете, усиливает процесс звездообразования в спиральных галактиках. Кроме того, неупругие столкновения облаков и их взаимодействие с баром вызывают потерю момента вращения газовых облаков, облегчая падение газа в центральную область галактики и, тем самым, обеспечивая подпитку источника активности ядра.

Возможен и другой эффект в поведении газа, связанный с динамическим взаимодействием галактик: образование газовых потоков от одной галактики к другой. В случае близких пролетов

галактик этот эффект в силу кратковременности приливного воздействия не должен быть значительным. Иная ситуация возникает в двойных системах, где постоянное возмущение, испытываемое галактикой от близкого соседа, может приводить к формированию стационарного газового потока от одного компонента системы к другому [224,225]. Следствием такого процесса является обогащение газом одной из галактик пары за счет другой. Наиболее "чистым" случаем с точки зрения указанного эффекта являются эллиптические галактики, имеющие в качестве соседа систему, богатую газом - спиральную галактику.

В настоящее время вывод о том, что общее количество нейтрального водорода в галактиках зависит от морфологического типа галактик и что эллиптические галактики в целом бедны газом, в значительной степени пересмотрен. Обнаружены E-галактики со значительным содержанием III ($M(\text{III})=10^7 - 10^9 M_{\odot}$). Данные наблюдений нейтрального водорода в эллиптических галактиках, имеющиеся к 1985 г., приведены в [47]. Выборка [47] включает 152 галактики ранних типов. Излучение в линии λ 21 см зарегистрировано в 19 галактиках, уверенно относимых к типу E. К настоящему времени нейтральный водород обнаружен примерно в 30 эллиптических галактиках [47,226]. О присутствии большого количества ($10^7 - 10^8 M_{\odot}$) газа в центральных областях E-галактик говорят и данные об ИК-излучении на волне λ 100 мкм, идущем, по-видимому, от межзвездной пыли [227].

Наличие больших масс нейтрального водорода в галактиках ранних типов связывают с различными факторами, в частности, с охлаждением горячего газа, образующего короны вокруг эллиптических галактик [228]. В то же время имеется ряд серьезных свидетельств, основанных на пространственном распределении газа и его кинематических характеристиках, в пользу внешнего происхождения нейтрального водорода в эллиптических галактиках (см. ссылки в [47] и [225]).

Галактики ранних типов с повышенным содержанием нейтрального водорода часто являются членами пар или кратных систем, включающих спиральные галактики, богатые газом [224]. Например, 15 объектов среди 19 E-галактик с зарегистрированным

излучением на волне λ 21 см из списка [47] в каталоге UGC отмечены как члены пар или группы. Эллиптические галактики, у которых обнаружено ИК-излучение пыли, во многих случаях имеют "яйцообразные" изофоты [21]. Это свидетельствует о том, что такие галактики являются либо продуктами слияния, либо испытывают приливное возмущение [187,26].

Подводя итог, можно сказать, что, по-видимому, холодный газ в галактиках ранних типов в разных случаях имеет различное происхождение и что один из возможных путей поступления нейтрального водорода в рассматриваемые системы - перетекание газа от соседних галактик за счет приливного взаимодействия.

В [229] предпринята попытка моделирования процесса формирования газового потока под действием постоянной возмущающей силы в двойной системе типа S-E. Расчеты проводились в рамках ограниченной задачи трех тел. Найденны условия, при которых формируется квазистационарный поток газовых облаков от спиральной галактики к эллиптической. В [229] отмечается, что число эллиптических галактик с эмиссионными спектрами в парах типа S-E возрастает почти в два раза при переходе от пар без признаков взаимодействия - 12% к взаимодействующим системам - 24%, а именно в таких парах имеются условия для перетекания газа [229]. Общее количество холодного газа, которое поступает в E-галактику за время эволюции двойной системы ($\sim 10^9$ лет), может достигать $10^8 - 10^9 M_{\odot}$. Интересно отметить, что газовые облака в эллиптической галактике образуют диск большой протяженности.

В разделе 3.3 отмечалось, что в двойных системах смешанного типа наблюдается корреляция между цветом одного компонента и цветом другого [83]: более голубые эллиптические галактики образуют пару с более голубой спиральной галактикой. Эта связь качественно объясняется тем, что в более голубых спиральных галактиках имеется большее количество газа, и, следовательно, большая его масса может поступить в эллиптическую галактику, обеспечивая в ней условия для звездообразования и более голубой цвет [224].

В [58] проанализированы результаты встречаемости пар галактик с FIR-излучением и показано, что гипотеза о возбуждении активности в ИК-диапазоне в E-галактиках, входящих в смешанные пары, за счет

газа, который может поставляться спиральной галактикой, не подтверждается. Более тонкий анализ, однако, показывает, что полученный результат, строго говоря, справедлив лишь для систем без заметных признаков взаимодействия. Для взаимодействующих пар рассуждения, аналогичные приведенным в [58] и приписывающие весь избыток излучения только спиральной галактике S-E паре, дают ожидаемую долю ИК-источников в чисто спиральных системах - 90%, что выше обнаруженной - 82%. По-видимому, это означает, что почти весь избыток излучения во взаимодействующих S-E парах приписывать только спиральному компоненту. Для выяснения вопроса о влиянии процесса перетекания газа на свойства эллиптических галактик в смешанных парах необходимы дальнейшие наблюдения этих объектов.

8. *Заключение.* Изучение взаимодействующих галактик является в настоящее время одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений внегалактической астрономии. За последние двадцать лет сделаны важные выводы о существенной роли столкновений и слияния галактик в формировании различных структурных и кинематических особенностей звездных систем. Гравитационное взаимодействие может быть важным этапом в жизни большинства нормальных галактик, и во многих случаях именно приливными эффектами, по-видимому, определяются такие явления, как вспышки звездообразования, а также активность ядер галактик. Ожидается, что дальнейший прогресс в этой области будет связан с накоплением и анализом данных о детальной структуре большого числа членов взаимодействующих систем, а также с построением более реалистичных моделей галактик, принимающих во внимание газодинамические эффекты.

Астрономический институт
Санкт-Петербургского университета
Специальная
астрофизическая обсерватория РАН

INTERACTING GALAXIES: OBSERVATIONAL AND THEORETICAL ASPECTS

V.P. RESHETNIKOV, N.YA. SOTNIKOVA

The review includes the following parts. 1. Introduction. 2. General description of interacting galaxies. 2.1. Signs of interaction. 2.2. Prevalence of interacting galaxies. 3. Global parameters of interacting galaxies. 3.1. Morphology of interacting galaxies. 3.2. Optical, radio- and IR - luminosities, mass to luminosity ratio. 3.3. Color indices. 3.4. Global photometrical structure. 3.5. Emission spectra. 3.6. Kinematics of interacting galaxies. 4. Star-formation in interacting galaxies (observations). 5. Observational evidences of the connection between the interactions and the nuclear activity of galaxies. 5.1. Seyfert galaxies. 5.2. Quasars. 6. Simulations of galaxy interactions. 6.1. The tides and the structure of disk galaxies. 6.2. Dynamical friction and merging. 6.3. Modeling of observational systems. 7. Gas response to the tides. 7.1. Star-formation bursts. 7.2. Nuclear activity. 7.3. On the origin of cold gas in ellipticals. 8. Conclusion.

ЛИТЕРАТУРА

1. *F. Schweizer*, in "Dynamics and Interactions of Galaxies", ed. R. Wielen, Springer-Verlag, Heidelberg, 1990, p. 60.
2. *R. Kennicutt*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 269.
3. *T. Heckman*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 359.
4. *B. Whitmore*, STScI Prepr., No 410, 1990.
5. *W.C. Keel*, in "Dynamics of Galaxies and Their Molecular Cloud Distributions", eds. F. Combes and F. Casoli, Netherlands, 1991, p. 243.
6. *Б.А. Воронцов-Вельяминов*, Вневлактическая астрономия. Наука, М., 1982, стр. 376.
7. *R. Madaesky*, Astrophys. Space Sci., 156, 223, 1989.
8. *Ph. Prugniel, E. Davoust*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 65.
9. *V.C. Rubin, D.A. Hunter, W.K. Ford*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 76, 153, 1991.
10. *V.P. Reshetnikov*, Astrophys. Space Sci., 191, 49, 1992.
11. *В.В. Демин*, Астрон. циркуляр, N1448, 3, 1986.
12. *F. Bertola, D. Bettoni*, Astrophys. J., 329, 102, 1988.
13. *В.П. Решетников, О.К. Сильченко*, Астрофизика, 33, 157, 1990.

14. *S. Consideri, E. Davoust*, *Astron. Astrophys.*, 252, 56, 1991.
15. *K.D. Borne, J.G. Hoessel*, *Astrophys. J.*, 330, 51, 1988.
16. *R. Madejsky, R. Bender, C. Mollenhoff*, *Astron. Astrophys.*, 242, 58, 1991.
17. *F. Schweizer*, in "Internal Kinematics and Dynamics of Galaxies", ed. I. Athanassoula, Reidel, 1983, p. 319.
18. *А.Р. Петрухан, К.А. Саякин, Э.Е. Хачикян*, *Астрофизика*, 14, 69, 1978.
19. *F. Bertola, L.M. Buson, W.W. Zeilinger*, *Nature*, 335, 705, 1988.
20. *K. Ebner, S. Djorgovski, M. Davis*, *Astron. J.*, 95, 422, 1988.
21. *D.A. Forbes*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 249, 779, 1991.
22. *D.F. Malin, D. Carter*, *Astrophys. J.*, 274, 534, 1983.
23. *D. Carter, J.L. Prieur, A. Wilkinson, W.B. Sparks, D.F. Malin*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 235, 813, 1988.
24. *P. Seitzer, F. Schweizer*, in "Dynamics and Interactions of Galaxies", ed. T. Wielen, Springer-Verlag, 1990, p. 270.
25. *M. Balcells*, *Astrophys. J. Lett.*, 249, L9, 1991.
26. *J.-L. Nieto, R. Bender, J. Arnaud, P. Surma*, *Astron. Astrophys.*, 244, L25, 1991.
27. *B.C. Whitmore, R.A. Lucas, D.B. McElroy, T.Y. Steiman-Cameron, P.B. Sackett, R.P. Olling*, *Astron. J.*, 100, 1489, 1990.
28. *D. Bettoni, G. Galletta, T. Oosterloo*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 248, 544, 1991.
29. *R. Jędrzejewski, P.L. Schechter*, *Astrophys. J. Lett.*, 330, L87, 1988.
30. *R. Bender*, *Astron. Astrophys.*, 202, L5, 1988.
31. *B.C. Whitmore, M. Bell*, *Astrophys. J.*, 324, 741, 1988.
32. *M. Shaw, R.-J. Dettmar, A. Barterdress*, *Astron. Astrophys.*, 240, 36, 1990.
33. *А.В. Зисон*, *Астрофизика*, 4, 427, 1968.
34. *Н.Д. Караченен*, *Астрофизика*, 4, 433, 1968.
35. *В.А. Досталь*, *Астрон. ж.*, 56, 247, 1979.
36. *И. Арп, В.Е. Мадорэ*, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.*, 18, 234, 1977.
37. *Н.Д. Караченен*, *Сообщ. Сочет. астрофиз. общ. АН СССР*, 7, 3, 1972.
38. *Н.Д. Караченен*, *Двойные галактики*, Наука, М., 1987.
39. *S. Xu, J.M. Sulentic*, *Astrophys. J.*, 374, 407, 1991.
40. *A. Lawrence, M. Rowan-Robinson, K. Leech, D.H. P. Jones, J.V. Wall*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 240, 329, 1989.
41. *P. Hickson*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 77.
42. *A.N. Tikhonov*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 105.
43. *S.E. Zepf, D.C. Koo*, *Astrophys. J.* 337, 34, 1989.
44. *F. Schweizer, P. Seitzer*, *Astrophys. J.*, 328, 88, 1988.
45. *N. Caldwell*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 96, 287, 1984.
46. *M.M. Phillips, C.R. Jenkins, M.A. Dopita, E.M. Sadler, L. Binette*, *Astron. J.*, 91, 1062, 1986.
47. *G.R. Knapp, E.L. Turner, P.E. Cunniffé*, *Astron. J.*, 90, 454, 1985.
48. *M. Wardle, G.R. Knapp*, *Astron. J.*, 91, 23, 1986.

49. *W.W. Zeilinger, F. Bertola, G. Galletta*, in "Dusty objects in the Universe", eds. E. Bussololetti, A.A. Vittone; Kluwer Academic Publ., 1990, p. 227.
50. *R. Dettmar*, in "The World of Galaxies", eds. H.G. Corwin, L. Bottinelli, Springer, New York, 1989, p. 229.
51. *M.A. Shaw*, in "The World of Galaxies", eds. H.G. Corwin, L. Bottinelli, Springer, New York, 1989, p. 235.
52. *J.C. Charlton, E.E. Salpeter*, *Astrophys. J.*, 375, 517, 1991.
53. *G.R. Gisler*, *Astron. J.*, 85, 623, 1980.
54. *D.M. Elmegreen, B.G. Elmegreen, A.D. Bellin*, *Astrophys. J.*, 364, 415, 1990.
55. *M. Noguchi*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 228, 635, 1987.
56. *P. Hickson, E. Kindl, J.P. Huchra*, *Astrophys. J.*, 331, 64, 1988.
57. *S.D.M. White, F. Valdes*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 190, 55, 1980.
58. *J.W. Sulentic*, *Astron. J.*, 98, 2066, 1989.
59. *M. Davis, J. Huchra*, *Astrophys. J.*, 254, 437, 1982.
60. *G. Efsthathiou, R.S. Ellis, B.A. Peterson*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 232, 431, 1988.
61. *М.А. Аракелян*, *Астрофизика*, 19, 673, 1983.
62. *H. Tovmassian*, *Australian J. Phys.*, 29, 231, 1968.
63. *J.T. Stocke*, *Astron. J.*, 83, 348, 1978.
64. *J.T. Stocke, W.G. Till, M.A. Kallan-Kassim*, *Astron. J.*, 83, 322, 1978.
65. *J.J. Condon, M.A. Condon, G. Gisler, J.J. Puschell*, *Astrophys. J.*, 252, 102, 1982.
66. *E. Hummel, J.M. van der Hulst, R.C. Kennicutt, W.C. Keel*, *Astron. Astrophys.*, 236, 333, 1990.
67. *B.T. Soifer et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, 278, L71, 1984.
68. *D.A. Allen, P.F. Roche, R.P. Norris*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 213, 67, 1985.
69. *R.D. Joseph, W.P.S. Meikle, N.A. Robertson, G.S. Wright*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 209, 111, 1984.
70. *C.J. Lonsdale, S.E. Persson, K. Matthews*, *Astrophys. J.*, 287, 95, 1984.
71. *R.M. Cutri, C.W. McAlary*, *Astrophys. J.*, 296, 90, 1985.
72. *C.M. Telesco, R.D. Wolstencroft, C. Done*, *Astrophys. J.*, 329, 174, 1988.
73. *H.A. Bushouse, S.A. Lamb, M.W. Werner*, *Astrophys. J.*, 335, 74, 1988.
74. *U. Klans, H. Elsasser*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 90, 33, 1991.
75. *B. Jones, W.A. Stein*, *Astron. J.*, 98, 1557, 1989.
76. *И.И. Карацещен*, *Астроф. ж.*, 62, 417, 1985.
77. *В.И. Архипова, А.В. Зисон, Р.Н. Покоча, О.К. Сильченко*, *Астроф. ж.*, 64, 1161, 1987.
78. *A. Ardeberg, N. Bergvall*, *Astron. Astrophys.*, 61, 493, 1977.
79. *В.И. Архипова, М.В. Савельева*, *Труды ГАИИИ*, 54, 33, 1984.
80. *L. Johansson, N. Bergvall*, *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 86, 167, 1990.
81. *R.B. Larson, B.M. Tinsley*, *Astrophys. J.*, 219, 46, 1978.
82. *E. Holmberg*, *Medd. Lunds. Astron. Obs.* 136, 103, 1958.
83. *В.В. Демин, А.В. Зисон, Э.А. Дубай, А.И. Томон*, *Астроф. ж.*, 61, 625, 1984.
84. *N. Sharp, B. Jones*, *Nature*, 283, 275, 1980.
85. *J.M. Schombert, J.F. Wallin, C. Struck-Marcell*, *Astron. J.*, 99, 497, 1990.
86. *G.S. Wright, P.A. James, R.D. Joseph, I.S. McEen*, *Nature*, 344, 417, 1990.

87. H.A. Bushouse, M.W. Werner, *Astrophys. J.*, 359, 72, 1990.
88. E.P. Smith, P. Hintzen, *Astron. J.*, 101, 410, 1991.
89. F. Schweizer, *Astrophys. J.*, 252, 455, 1982.
90. V.P. Reshetnikov, in "Galactic Bulges", IAU Symp. N 153 Abstracts, 1992.
91. В.А. Дюканин, *Астрофизика*, 18, 201, 1982.
92. W.C. Keel, R.C. Kennicutt, E. Hummel, J.M. van der Hulst, *Astron. J.*, 90, 708, 1985.
93. O. Dahari, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 57, 643, 1985.
94. H.A. Bushouse, *Astron. J.*, 91, 255, 1986.
95. H.A. Bushouse, *Astrophys. J.*, 320, 49, 1987.
96. R.C. Kennicutt, W.C. Keel, J.M. van der Hulst, E. Hummel, K.A. Roettinger, *Astron. J.*, 93, 1011, 1987.
97. W.G. Tilly, *Astrophys. J.*, 288, 65, 1985.
98. P. Amram, M. Marcelin, J. Boulesteix, E. Le Courer, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 81, 59, 1989.
99. W.C. Keel, *BAAAS*, 23, No 4, 1459, 1991.
100. G.Lake, A. Dressler, *Astrophys. J.*, 310, 605, 1986.
101. W.C. Keel, in "Dynamics of Galaxies and Their Molecular Cloud Distributions", eds. F. Combes and F. Casoli, Springer, 1991, p. 243.
102. M.P. Hynes, T. Herter, *Astron. J.*, 96, 504, 1988.
103. J.S. Young, F.P. Schloerb, J.D. Kenney, S.D. Lord, *Astrophys. J.*, 304, 443, 1986.
104. J.S. Young, J.D. Kenney, L. Tacconi, M.J. Claussen, Y.L. Huang, L. Tacconi-Garman, S. Xie, F.P. Schloerb, *Astrophys. J. Lett.*, 311, L17, 1986.
105. F. Combes, Ph. Prugniel, R. Rampuzzo, J.W. Sulentic, in "Galaxy environments and the large scale structure of the universe" eds. G. Giuricin, F. Mardirossian, M. Mezzetti, International Workshop Abstracts, SISSA, Trieste, 1991.
106. J.M. Scalo, *Publ. Astron. Inst. Czechosl. Acad. Sci.*, 69, 101, 1987.
107. P.M. Solomon, L.J. Sage, *Astrophys. J.*, 334, 613, 1988.
108. P.P. Kronberg, P. Biermann, F.R. Schwab, *Astrophys. J.*, 291, 693, 1985.
109. L. Noreau, P.P. Kronberg, *Astron. J.*, 93, 1045, 1987.
110. М.А. Смирнов, Д.Ю. Черток, *Письма в Астроф. ж.*, 7, 154, 1982.
111. K.J. Fricke, W. Kollatschny, in "Active Galactic Nuclei", eds. D.E. Osterbrock and J.S. Miller, Dordrecht, 1989, p. 425.
112. A. Stoetgen, in "Dynamics and Interactions of Galaxies", ed. R. Wielen, Springer-Verlag, 1990, p. 421.
113. T.F. Adams, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 33, 19, 1977.
114. P. Wehinger, S. Wyckoff, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 181, 211, 1977.
115. J.W. MueKenty, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 72, 231, 1990.
116. А.Р. Петрякин, *Астрофизика*, 18, 548, 1982.
117. O. Dahari, *Astron. J.*, 89, 966, 1984.
118. G.G. Byrd, G. Sundelius, M. Valtonen, *Astron. Astrophys.*, 171, 16, 1987.
119. O. Dahari, M. DeRobertis, *Astrophys. J.*, 331, 727, 1988.
120. J.W. MueKenty, *Astrophys. J.*, 343, 125, 1989.
121. T. Fuentes-Williams, J. Stoetze, *Astron. J.*, 96, 1235, 1988.
122. H. Yee, R. Green, *Astrophys. J.*, 280, 79, 1984.

123. *E. Smith, T. Heckman*, in "Dynamics and Interactions of Galaxies", ed. R. Wielen, Springer-Verlag, 1990, p. 464.
124. *T.M. Heckman, G.D. Bothun, B. Balick, E. Smith*, *Astron. J.*, 89, 958, 1984.
125. *H. Yee, R. Green*, *Astrophys. J.*, 319, 28, 1987.
126. *A. Stockton*, *Astrophys. J.*, 223, 747, 1978.
127. *J. Hutchings, D. Crampton, B. Campbell*, *Astrophys. J.*, 280, 41, 1984.
128. *E. Smith, T. Heckman, G. Bothun, W. Romanishin, B. Balick*, *Astrophys. J.*, 306, 64, 1986.
129. *J. Hutchings*, *Astrophys. J.*, 320, 522, 1987.
130. *J. Hutchings, T. Janson, S. Neff*, *Astrophys. J.*, 342, 660, 1989.
131. *J.A. Sellwood*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 25, 151, 1987.
132. *A. Toomre, J. Toomre*, *Astrophys. J.*, 178, 623, 1972.
133. *T.M. Енесу, N.N. Kozlov, R.A. Sunyaev*, *Astron. Astrophys.*, 22, 41, 1973.
134. *Л.А. Королюковская, Ю.И. Королюковский*, *Изв. САО*, 16, 116, 1982.
135. *O.E. Gerhard*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 197, 179, 1981.
136. *R. Ferozli, S.L. Shapiro*, *Astrophys. J.*, 243, 32, 1981.
137. *J. Negroponte, S.D.M. White*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 205, 1009, 1983.
138. *J. Barnes*, *Astrophys. J.*, 331, 699, 1988.
139. *A. Toomre*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 15, 437, 1977.
140. *A. Toomre*, in "The Structure and Evolution of Normal Galaxies", eds. M. Fall and D. Linden-Bell, Cambridge University Press, 1981, p. 111.
141. *E. Athanassouli*, *Physics Reports*, 114, 319, 1984.
142. *А.М. Фришман*, *Астроном. ж.*, 63, 884, 1986.
143. *G. Bertin, C.C. Lin, S.A. Lowe, R.P. Thurstans*, *Astrophys. J.*, 338, 78, 1989.
144. *Ю.И. Ефремов, В.Н. Корчугин, Л.С. Марошкин, А.А. Сучков*, *Успехи физ. наук*, 157, 599, 1989.
145. *B. Elmegreen*, in "Galactic Models", *Ann. New York Acad. Sci.*, 596, 40, 1990.
146. *A. Toomre*, *Astrophys. J.*, 158, 899, 1969.
147. *M. Thomasson, B. Elmegreen, K.J. Donner, B. Sundelius*, *Astrophys. J. Lett.*, 356, 19, 1991.
148. *J.A. Sellwood, F.D. Kahn*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 250, 278, 1991.
149. *P. Goldreich, S.D. Tremaine*, *Astrophys. J.*, 233, 857, 1979.
150. *S.A. Sorensen*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 212, 723, 1985.
151. *V. Icke*, *Astron. Astrophys.*, 144, 115, 1985.
152. *В.Н. Корчугин, Е.А. Летуева, И.А. Прохоренко*, *Астроном. ж.*, 65, 868, 1988.
153. *B. Sundelius, M. Thomasson, M.J. Valtonen, G.G. Byrd*, *Astron. Astrophys.*, 174, 67, 1987.
154. *G.G. Byrd, S. Howard*, *Astron. J.*, 103, 1089, 1992.
155. *R.C. Kennicutt*, *Astron. J.*, 86, 1847, 1981.
156. *E. Athanassouli*, *Astron. Astrophys.*, 69, 395, 1978.
157. *M. Thomasson, K.J. Donner, B. Sundelius, G.G. Byrd, T.-Y. Hung, M.J. Valtonen*, *Astron. Astrophys.*, 211, 25, 1989.
158. *M. Noguchi, S. Ishibashi*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 219, 305, 1986.
159. *И.И. Паник*, *Письма в Астроном. ж.*, 11, 3, 1985.

160. *E. Athanassoula*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 505.
161. *J. Kormendy, C.N. Norman*, *Astrophys. J.*, 223, 539, 1979.
162. *D.M. Elmegreen, B.G. Elmegreen*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 201, 1021, 1982.
163. *J.P. Ostriker, P.J.E. Peebles*, *Astrophys. J.*, 186, 467, 1973.
164. *A. Toomre*, *Astrophys. J.*, 139, 1217, 1964.
165. *F. Hohl*, *Astron. J.*, 83, 768, 1978.
166. *F. Combes, R.H. Sanders*, *Astron. Astrophys.*, 96, 164, 1981.
167. *F. Combes, F. Debbasch, D. Friedli, D. Pfenniger*, *Astron. Astrophys.*, 233, 82, 1990.
168. *E. Athanassoula, J.A. Sellwood*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 221, 213, 1986.
169. *M. Gerin, F. Combes, E. Athanassoula*, *Astron. Astrophys.*, 230, 37, 1990.
170. *В.И. Павлушенко*, *Письма в Астроф. ж.*, 17, 887, 1991.
171. *D. Lynden-Bell*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 187, 101, 1979.
172. *M. Noguchi*, *Astron. Astrophys.*, 201, 37, 1988.
173. *S. Chandrasekhar*, *Astrophys. J.*, 97, 255, 1943.
174. *S. Tremaine*, in "The Structure and Evolution of Normal Galaxies", eds. M. Fall and D. Lynden-Bell, Cambridge University Press, 1981, p. 67.
175. *M. D. Weinberg*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 239, 549, 1989.
176. *L. Hernquist, M. D. Weinberg*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 238, 407, 1989.
177. *Ph. Prugniel, F. Combes*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 543.
178. *F. Schweizer*, *Astrophys. J.*, 237, 303, 1980.
179. *P.J. Quinn*, *Astrophys. J.*, 279, 596, 1984.
180. *L. Hernquist, P.J. Quinn*, *Astrophys. J.*, 331, 682, 1988.
181. *J. Heisler, S.D.M. White*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 243, 199, 1990.
182. *Б.Н. Гуртык, В.А. Кривош*, *Астрофизика*, 27, 571, 1987.
183. *D. Lynden-Bell*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 136, 101, 1967.
184. *R. Larson*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 102, 709, 1990.
185. *J. Kormendy*, *Astrophys. J. Lett.*, 342, L63, 1989.
186. *J. Barnes*, *Nature*, 344, 379, 1990.
187. *J.L. Nieto, R. Bender, P. Surma*, *Astron. Astrophys.*, 244, L37, 1991.
188. *F. Schweizer, P. Seitzer, S.M. Faber, D. Burstein, C.M.D. Ore, J.Y. Gonzalez*, *Astrophys. J. Lett.*, 364, L33, 1990.
189. *K.M. Ashman, S.E. Zepf*, *BAAS*, 23, No 2, 1991.
190. *В. Девон*, *Астроф. ж.*, 68, 244, 1991.
191. *K. Borne*, *Astrophys. J.*, 330, 38, 1988.
192. *K. Borne*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 537.
193. *S. Howard, G.G. Byrd*, *Astron. J.*, 99, 1798, 1990.
194. *G.G. Byrd, M. Klaric*, *Astron. J.*, 99, 1461, 1990.
195. *G.G. Byrd, W. Keel, S. Howard*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 565.

196. *I. Searle, W.L.W. Sargent, W.G. Bagnuolo*, *Astrophys. J.*, 179, 427, 1973.
197. *C. Struck-Marcell, J. Scalo*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 64, 39, 1987.
198. *V. Balzano*, *Astrophys. J.*, 268, 602, 1983.
199. *D.C. Barry*, *Astrophys. J.*, 334, 436, 1988.
200. *E.C. Vazquez, J.M. Scalo*, *Astrophys. J.*, 343, 644, 1989.
201. *А.В. Засов*, *Письма в Астрофиз. ж.*, 13, 757, 1987.
202. *G.G. Byrd, M.J. Valtonen, B. Sundelius, L. Valtuoni*, *Astron. Astrophys.*, 166, 75, 1986.
203. *D.N. Lin, J.E. Pringle, M.J. Rees*, *Astrophys. J.*, 328, 103, 1988.
204. *L. Hernquist*, *Nature*, 340, 687, 1989.
205. *J. Barnes, L. Hernquist*, *Astrophys. J. Lett.*, 370, L65, 1991.
206. *K.M. Olson, J. Kwan*, *Astrophys. J.*, 349, 480, 1990.
207. *K.M. Olson, J. Kwan*, *Astrophys. J.*, 361, 426, 1990.
208. *M. Noguchi*, *Astron. Astrophys.*, 203, 259, 1988.
209. *M. Noguchi*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 251, 360, 1991.
210. *J.C. Mihos, D.O. Richstone, G.D. Bothum*, *Astrophys. J.*, 377, 72, 1991.
211. *K. Schmidt*, *Astrophys. J.*, 129, 243, 1959.
212. *R.C. Kennicutt*, *Astrophys. J.*, 344, 685, 1989.
213. *J.F. Wallin*, *Astron. J.*, 100, 1477, 1990.
214. *D. Lynden-Bell*, *Nature*, 223, 690, 1969.
215. *M.J. Rees*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 22, 471, 1984.
216. *I. Shlosman, M.C. Begelman, J. Frank*, *Nature*, 345, 679, 1990.
217. *I. Shlosman, M.C. Begelman*, *Astrophys. J.*, 341, 685, 1989.
218. *S.M. Simkin, H.J. Su, M.P. Schwarz*, *Astrophys. J.*, 237, 404, 1980.
219. *E. Athanassoula*, in "Plasma Astrophysics", Proc. Joint Varenna-Abastumani Int. School and Workshop, eds. T.D. Guyenne, and J.J. Hunt, European Space Agency, 1989, p. 341.
220. *В.И. Афанасьев, В.В. Лему, А.Г. Моржон*, *Препр. ВНИИУ*, 6, 1989.
221. *F. Combes*, in "Galactic and Extragalactic Star Formation, Proc NATO Adv. Study Instit.", eds. P.E. Pudritz, and M. Fish, Dordrecht, 1988, p. 475.
222. *N.J. Shakura, R.A. Sunyaev*, *Astron. Astrophys.*, 24, 337, 1973.
223. *В.И. Афанасьев, А.Н. Шаповалова*, *Астрофизика*, 17, 403, 1981.
224. *М.А. Смирнов, Б.В. Комберг*, *Астрофизика*, 16, 431, 1980.
225. *N. Yu. Sotnikova*, in "Paired and Interacting Galaxies", Proc. IAU Coll. N 124, eds. J.W. Sulentic, W.C. Keel, C.M. Telesco, NASA-CP 3098, 1990, p. 717.
226. *M.S. Roberts, D.E. Hogg, J.N. Bregman, W.R. Forman, C. Jones*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 75, 751, 1991.
227. *M. Juri, D.-W. Kim, G.R. Knapp, P. Guhathakurta*, *Astrophys. J. Lett.*, 312, L11, 1987.
228. *J.N. Bregman, M.S. Roberts, R. Giovannelli*, in "Cooling Flows in Clusters and Galaxies", Proc. NATO Adv. Res. Workshop, Cambridge, 1988, p. 373.
229. *Н.Я. Сотникова*, *Астрофизика*, 28, 495, 1988.