

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 17

НОЯБРЬ, 1981

ВЫПУСК 4

УДК 524.7

ОДНОРОДНАЯ ВЫБОРКА ДВОЙНЫХ ГАЛАКТИК. III. ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ И СТРУКТУРЫ

И. Д. КАРАЧЕНЦЕВ

Поступила 21 августа 1980

Принята к печати 27 мая 1981

Рассмотрен метод определения типа орбитальных движений в парах галактик по зависимости средней разности лучевых скоростей компонентов от проекции их взаимного линейного расстояния. Применение его к 361 паре подтвердило полученный ранее [3] вывод о преобладании круговых орбит у двойных галактик. Сделано сравнение основных параметров двойных галактик, разделенных по морфологическому типу галактик, а также по типу взаимодействия компонентов. Пары с эллиптическими галактиками отличаются меньшим взаимным расстоянием, но имеют среднее отношение орбитальной массы к светимости такое же, как и SS-пары. Тип взаимодействия в парах мало зависит от светимости компонентов, но коррелирует с морфологическим типом галактик. Отсутствие заметных различий кинематических характеристик у пар с разным типом взаимодействия служит косвенным подтверждением круговых движений в парах. Приведено распределение 361 пары по суммарной светимости и взаимному расстоянию компонентов. Рассмотрены различные эффекты наблюдательной селекции на этой диаграмме. Отмечено, что при космологическом параметре торможения $q_0 < 1.5$ орбитальные периоды всех пар не превышают возраста Вселенной. Для контактных пар наблюдается положительная корреляция светимости со взаимным расстоянием галактик. В рамках гипотезы о частом слиянии галактик трудно объяснить наблюдаемую высокую среднюю светимость двойных галактик, а также малую распространенность изолированных галактик поля.

1. *Введение.* Изучение достаточно большой и однородной совокупности двойных галактик с измеренными лучевыми скоростями компонентов [1] позволяет получить сведения об условиях образования этих систем и особенностях движения, взаимодействия и эволюции галактик в парах.

Непрерывным этапом такой программы является анализ эффектов избирательности, обусловленных фотометрическим пределом выборки, ис-

пользованием критерия изолированности пары галактик и присутствием в выборке ложных пар. Рассмотрению данных вопросов была посвящена первая статья этого цикла [2]. После исключения случайных (оптических) пар и неизолированных псевдопар (ярчайших членов систем галактик), в нашей выборке сохранилась 361 пара с оценками отношения орбитальной массы к светимости $f < 100$ в солнечных единицах.

Для этих пар было получено [3] распределение по величине истинного отношения массы к светимости, которое имеет вид бѐта-распределения со средним 10.4 и максимумом на $f = 5.1$. Такие значения хорошо соответствуют оценкам f по кривым вращения галактик и не требуют гипотезы о наличии избыточных скрытых масс вещества вокруг двойных галактик.

Распределение пар по оценкам орбитальной массы зависит как от функции истинных масс, так и от факторов проекции, а через них — от типа движения компонентов. Выполненный в [3] анализ распределения оценок массы позволил сделать вывод, что в парах реализуются преимущественно круговые орбитальные движения. Ниже мы рассмотрим проблему типа движений в парах в ином методическом аспекте.

2. *Взаимные скорости, расстояния и тип движения.* При замкнутых орбитальных движениях, относительные пространственные скорости галактик, V , и взаимные пространственные расстояния, r , связаны законом сохранения энергии. Поэтому для некоторого ансамбля пар измеряемые величины: модуль разности лучевых скоростей компонентов, y , и проекция их линейного расстояния в картинной плоскости, X , будут взаимно зависимыми случайными величинами. Стохастический характер связи между y и X определяется преобладающим типом движений в парах. Это дает принципиальную возможность установить тип орбитальных движений, используя регрессии $\langle y|X \rangle$ или $\langle X|y \rangle$. Данная задача была рассмотрена в [4, 5]. Здесь мы применим метод регрессий к изучаемой выборке из 361 пары галактик.

Для строго круговых движений точечных масс справедливы следующие равенства:

$$\begin{aligned} y &= (\gamma \mathfrak{M}/r)^{1/2} \cdot \sin i \cdot \cos \Omega, \\ X &= r (1 - \sin^2 i \cdot \sin^2 \Omega)^{1/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где γ — постоянная тяготения, \mathfrak{M} — суммарная масса компонентов, а i и Ω — углы ориентации пары относительно наблюдателя. При изотропной ориентации орбит в пространстве случайные величины i и Ω имеют плотности распределения

$$\begin{aligned} p_i |i| &= \sin i, & [0 \leq i \leq \pi/2] \\ p_\Omega \{\Omega\} &= 2/\pi, & [0 \leq \Omega \leq \pi/2] \end{aligned} \quad (2)$$

Опираясь на условие взаимной независимости величин r , i , Ω , легко получить выражение для искомой регрессии

$$\langle y | X \rangle = (2/\pi) \cdot \gamma^{1/2} \cdot \langle \mathfrak{R}^{1/2} \rangle \cdot X^2 \cdot p_x^{-1} \{X\} \int_x^\infty p_r \{r\} \cdot r^{-4} (r^2 - X^2)^{-1/2} dr, \quad (3)$$

где плотности распределения $p_x \{X\}$ и $p_r \{r\}$ связаны уравнением Абеля.

Для другого крайнего случая движения — радиальных осцилляций с амплитудой a имеем равенства

$$\begin{aligned} Y &= (2\gamma \mathfrak{R}/a)^{1/2} \cdot (1/z - 1)^{1/2} \cdot \cos \theta, \\ X &= az \sin \theta, \end{aligned} \quad (4)$$

где угол ориентации пары, θ , и фаза осцилляции, z , имеют плотности распределения

$$\begin{aligned} p_\theta \{\theta\} &= \sin \theta, & [0 \leq \theta < \pi/2] \\ p_z \{z\} &= (2/\pi) \cdot (1/z - 1)^{-1/2}, & [0 \leq z \leq 1] \end{aligned} \quad (5)$$

определяемые изотропностью пространственной ориентации пар и стационарностью ансамбля пар относительно фазы осцилляций. Аналитическое выражение для регрессии $\langle y | X \rangle$ получается при радиальных движениях весьма громоздким.

Исходный наблюдательный материал представлен на рис. 1. Чтобы сделать равноценными данные о взаимных скоростях у гигантских и у карликовых галактик, будем использовать нормированную разность скоростей:

$$y_L = y \cdot (L/10^{10} L_\odot)^{-1/2}, \quad (6)$$

где L — суммарная светимость пары при постоянной Хаббла $H = 75$ км/с · Мпс. Распределение 361 пары по L и X изображено точками. Вставка к рисунку представляет распределение широких пар. Кружками отмечены ложные пары с $f > 100$. Пунктирная кривая соответствует значению $f = 100$.

Случайные оптические пары имеют, как правило, большие разности скоростей, $y_L > 700$ км/с. Они расположены за пределами верхней границы рис. 1. Неизолированные двойки из членов систем галактик (псевдопары) заполняют на $\{y_L, X\}$ провал между истинными и оптическими парами. Обоснование этому было дано в [3]. Отсутствие четкого разграничения между истинными и ложными парами оказывает систематическое влияние на вид регрессии $\langle y | X \rangle$ и тем самым накладывает предел на точность определения типа орбитальных движений у двойных галактик.

В идеальном случае, когда все пары имеют одинаковые диаметры орбит r или одинаковые амплитуды осцилляций a , наблюдаемые величины y_L и X были бы тесно коррелированными, и нахождение типа движений представляло бы простую задачу. Реальное распределение пар по взаимным расстояниям характеризуется значительной дисперсией и асимметрией. Вследствие этого различия в виде регрессии $\langle y_L | X \rangle$ из-за типа движений существенно нивелируются.

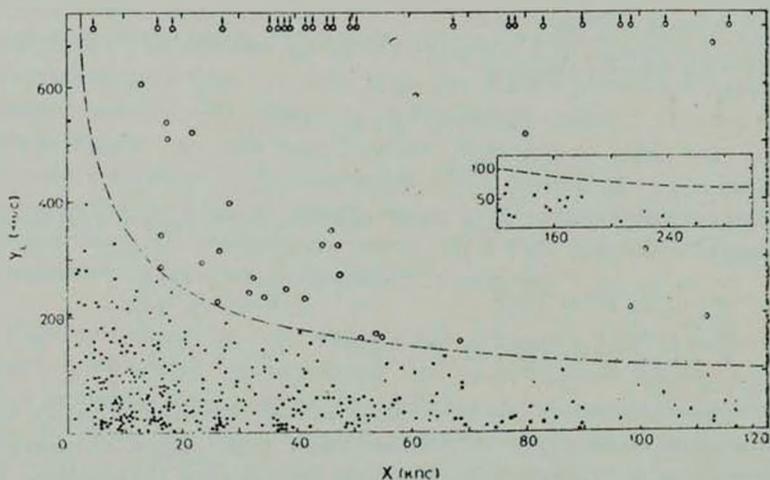


Рис. 1. Распределение 361 пары галактик (точки) по проекции взаимного расстояния компонентов, X , и модулю разности лучевых скоростей, y_L , нормированному на светимость $10^{10} L_{\odot}$ при $H = 75$ км/с·Мпс. Пунктирная кривая соответствует отношению массы к светимости $f = 100$. Ложные пары с $f > 100$ отмечены кружками. Вставка изображает распределение широких пар в тех же величинах.

Определение теоретических регрессий для круговых и радиальных движений выполнялось нами в несколько этапов: а) были вычислены « k »-ые моменты распределения пар по проекции линейных расстояний, $\langle X^k \rangle$; б) из соотношений

$$\langle r^k \rangle = 2^{-k} \frac{\Gamma(k+2)}{[\Gamma(k/2+1)]^2} \langle X^k \rangle, \quad (7)$$

$$\langle a^k \rangle = 2^{-k-1} \frac{(2k+2)!! \Gamma(k+2)}{(2k+1)!! [\Gamma(k/2+1)]^2} \langle X^k \rangle, \quad k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

где $\Gamma(m)$ означает гамма-функцию, найдены моменты распределения пар по диаметрам круговых орбит, $p_r\{r\}$, или амплитудам осцилляций, $p_a\{a\}$; в) используя значения моментов и диаграммы Пирсона,

получены аналитические представления для распределений $p_r\{r\}$ и $p_a\{a\}$, которые имеют вид бэта-функций; г) основываясь на выражениях (1), (2), (4), (5) и взаимной независимости случайных переменных $\{r, i, \Omega\}$ или $\{a, \theta, z\}$, осуществлено моделирование наблюдаемых величин y и X методом случайных испытаний. Всего для каждого типа движений было сделано по 9000 испытаний.

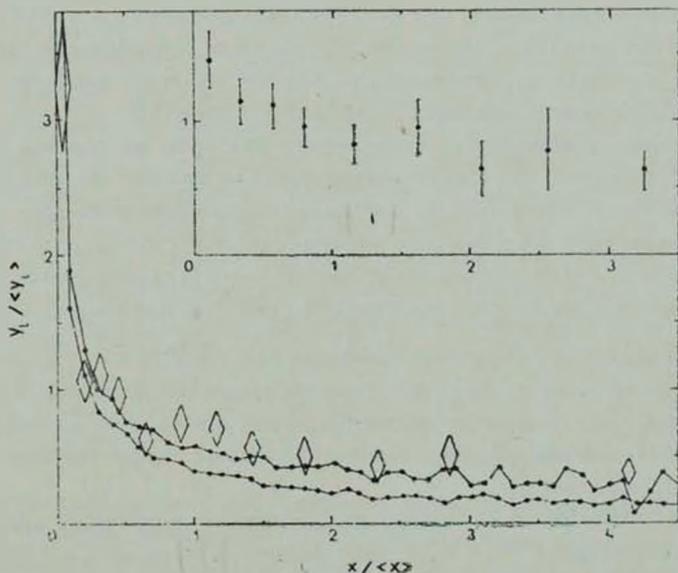


Рис. 2. Зависимость среднего модуля разности лучевых скоростей от расстояния между компонентами в единицах среднего для всей выборки. Ромбиками обозначены наблюдаемые значения для 361 пары. Высота ромбиков соответствует стандартной ошибке среднего. Верхняя и нижняя ломаные линии обозначают регрессии, соответственно, для строго круговых и строго радиальных движений компонентов пары. На вставке в тех же единицах показана зависимость $y_L(X)$ для моделированных пар с хаотическим типом движения компонентов; тенденция к уменьшению $\langle y_L \rangle$ для широких моделированных пар обусловлена эффектами селекции, которые описаны в тексте.

Результаты построения регрессионных зависимостей приведены на рис. 2. Точки, соединенные ломаной линией, обозначают средние значения модуля разности скоростей с шагом аргумента 0.1, дисперсия точек дает представление о точности регрессии, убывающей при больших X из-за малой представительности выборки на хвосте распределения. В области $X > 0.1 \langle X \rangle$ регрессия для круговых движений имеет систематически большие значения, чем для радиальных. Различия в $\langle y_L | X \rangle$ для двух крайних типов движений не столь велики, как это можно было бы

ожидать априори. Поэтому мы не моделировали вид регрессии для промежуточных случаев движений с эксцентриситетом орбит $0 < e < 1$.

Наблюдательные данные для 361 пары изображены на рис. 2 ромбиками, высота которых соответствует стандартному отклонению среднего. При вычислении средних $\langle y_L | X \rangle$ были учтены ошибки измерения разности лучевых скоростей. Их влияние на вид регрессии оказывается весьма заметным для наиболее широких пар. Сравнение наблюдаемых данных с расчетами показывает, что орбитальные движения в парах близки к круговым. Этот результат согласуется с выводом предыдущей статьи [3], полученным из анализа распределения той же выборки двойных галактик по оценкам орбитальной массы (т. е. произведению $y^2 X$).

Необходимо отметить, что существуют факторы, на первый взгляд не очевидные, которые систематическим образом влияют на вид регрессии $\langle y_L | X \rangle$. Имея контрольную выборку моделированных пар, отобранных с помощью того же критерия изолированности, что и реальные пары, мы вычислили для них регрессию $\langle y_L | X \rangle$. Принципы моделирования были описаны в [3]. Важно подчеркнуть, что у контрольной выборки не задавалась какая-либо коррелированность векторов \vec{V} и \vec{r} , т. е. моделирование воспроизводило случай хаотических движений в парах. Тем не менее, и для выборки моделированных пар (вставка на рис. 2) наблюдается тенденция уменьшения средней разности лучевых скоростей при переходе от тесных пар к широким.

Дополнительный анализ позволил вскрыть три причины этого эффекта. Во-первых, условие $f < 100$ не исключает ложных пар в выборке полностью. Среди членов систем галактик, удовлетворяющих критерию изолированности относительно ближайших соседей, самыми тесными «парами» оказываются члены скоплений, где ожидаемая разность лучевых скоростей галактик составляет ~ 1000 км/с; в широкие ложные пары попадают преимущественно члены рассеянных групп с малой дисперсией скоростей. Во-вторых, ограничение выборки по $f < 100$ накладывает условие на произведение $y_L^2 X$ (см. рис. 1); в сочетании с наличием ложных пар это ограничение дает небольшой эффект в регрессии $\langle y_L | X \rangle$. Наконец, применение критерия изолированности способствует отсеву широких истинных пар, состоящих из карликовых галактик. В результате светимости и взаимные расстояния в парах оказываются коррелированными, что при переходе $y \rightarrow y_L$ (см. (6)) отражается на регрессии.

3. *Морфологические типы и средние отношения массы к светимости.* Из общих представлений об условиях образования двойных галактик можно ожидать некоторых различий в средних признаках пар в зависимости от структурного типа галактик. В табл. 1 приведены основные параметры двойных галактик, сгруппированных по морфологическому типу их членов.

В первых строках таблицы указаны средние: модуля разности лучевых скоростей, проекции расстояния между компонентами, интегральной светимости пары, линейного диаметра большого и малого компонентов и отношения орбитальной массы к светимости с поправкой за ошибки измерения скоростей. Две последние строки содержат данные об относительном числе исключенных из каждой выборки ложных пар (с $f > 100$) и числе объектов с эмиссионными спектрами.

Таблица 1

Параметры	Все	EE	ES	SS
Число пар	361	39	83	239
$\langle Y \rangle$, км/с	122 ± 5	205 ± 27	127 ± 10	106 ± 5
$\langle X \rangle$, Кпс	38 ± 2	23 ± 4	41 ± 5	39 ± 3
$\langle L \rangle$, $10^{10} L_{\odot}$	4.5 ± 0.2	5.3 ± 0.5	4.5 ± 0.4	4.3 ± 0.3
$\langle D_{\text{мах}} \rangle$, Кпс	25.9 ± 0.6	26.6 ± 2.0	26.7 ± 1.2	25.5 ± 0.8
$\langle D_{\text{мин}} \rangle$, Кпс	18.2 ± 0.5	20.3 ± 1.7	18.5 ± 0.8	17.8 ± 0.6
$\langle f_c \rangle$, f_{\odot}	10.3 ± 1.0	11.2 ± 1.7	11.5 ± 2.6	9.7 ± 1.1
$q_{\text{ложн}}$, %	15	17	13	15
$q_{\text{эмисс}}$, %	76	20	65	50

Сопоставление средних параметров у выборок с разными структурными типами галактик показывает отсутствие значимых различий по светимостям, размерам и отношению орбитальной массы к светимости между эллиптическими и спиральными галактиками. Как известно, в литературе встречались утверждения [6, 7], что орбитальные массы эллиптических галактик в несколько раз (по Пейджу [8] — в десятки раз) превосходят массы спиральных галактик. С другой стороны, последние данные [9], показывают, что по внутренним движениям оценки f у E- и S-галактик практически одинаковы и составляют $f \approx 5 \div 10$. Количественное согласие определений f у E- и S-галактик, выполненных существенно разными методами, является весьма примечательным. Причину прежних расхождений в массах следует, вероятно, отнести за счет нерепрезентативности рассматривавшихся выборок и засоренности их ложными парами.

При одинаковых в среднем светимостях и массах пары с EE- и SS-компонентами обнаруживают отчетливую стратификацию по взаимным расстояниям и скоростям. Эллиптические галактики чаще встречаются среди тесных пар, их взаимные расстояния в два раза меньше, а относительные скорости — в два раза больше, чем у спиральных галактик. Это находится в соответствии с общей закономерностью [10], что степень пространственной концентрации у E-галактик выше, чем у спиральных (сегрегация по

типам в скоплениях и группах). Одним из механизмов этой сегрегации может быть медленное ($t \geq 2 \cdot 10^9$ лет) формирование газового диска и плоской звездной подсистемы у галактик, которое в тесных парах тормозится гравитационным влиянием близкого соседа [10].

Из данных последней строки таблицы следует, что три четверти исследованных двойных галактик обладают эмиссионными особенностями. Как и следовало ожидать, эмиссии гораздо реже встречаются у эллиптических галактик (20%), чем у спиральных (90%). Сравнение этих величин с аналогичными для галактик поля и членов скоплений дает важные указания на процессы притока и потери газа в галактиках.

С точностью до определения морфологического типа*, E-галактики в EE- и ES-парах имеют одинаковые интегральные характеристики. Однако процент эмиссий у E-галактик в смешанных парах значительно выше (44%), чем в EE-системах. Смешанные пары с эмиссионными E-галактиками имеют среднее взаимное расстояние компонентов (24 ± 3) кпс, тогда как у ES-пар с эллиптическими галактиками без эмиссий среднее взаимное расстояние в два раза больше, (53 ± 9) кпс. Аналогичный эффект возрастания относительного числа эмиссий с уменьшением X наблюдается также для EE-пар. Эти закономерности указывают на происходящий обмен газом в тесных парах галактик.

4. *Типы взаимодействия в парах.* Более половины двойных галактик обнаруживают признаки взаимодействия. Для их классификации мы использовали в каталоге [11] следующую схему: «LIN» — у галактик имеются линейные структуры в виде перемычки (br), хвоста (ta), или их сочетания (br + ta), «АТМ» — члены пары находятся в общей атмосфере, которая выглядит аморфной, симметричной (am) или клочковатой (sh); «DIS» — один или оба компонента пары проявляют признаки искажения общей формы или спиральной структуры. Эта классификация является аддитивной и в первом приближении не зависит от расстояния до пары и ее ориентации относительно луча зрения.

Основные параметры двойных галактик, разделенных по типам взаимодействия, представлены в табл. 2. Обозначения в ней те же, что и в табл. 1. Последняя строка указывает относительное число спиральных галактик. Анализ этих данных позволяет сделать следующие заключения:

1) Вид взаимодействия в паре определенно коррелирует с морфологическим типом компонентов. Так, аморфные оболочки образуются почти исключительно вокруг эллиптических галактик, а наличие перемычек, клочковатой оболочки или искажений формы компонентов характерны для

* По оценке Стоке [12] ошибка классификации галактик в каталоге [11] составляет 7%.

спиральных галактик. По-видимому, эти различия обусловлены разным типом движений звезд плоской и сферической составляющих галактик, что может быть проверено моделированием приливных взаимодействий. Детальные измерения цвета хвостов, перемычек и оболочек в парах также могут дать указания на то, какая подсистема звезд в галактиках участвует в формировании тех или иных приливных образований.

Таблица 2

Параметры	LIN br	LIN ta	LIN br + ta	ATM am	ATM sh	DIS 2	DIS 1	Невзаимодействующие
Число пар	35	25	20	20	39	39	57	125
$\langle Y \rangle$, км/с	119 ±17	97 ±15	80 ±12	204 ±30	164 ±25	91 ±12	146 ±12	107 ±8
$\langle X \rangle$, Кпс	19 ±3	20 ±5	23 ±3	15 ±2	12 ±2	26 ±4	37 ±3	65 ±3
$\langle L \rangle$, $10^{10} L_{\odot}$	4.1 ±0.7	4.6 ±0.9	4.7 ±0.8	5.9 ±0.8	4.0 ±0.6	3.8 ±0.8	4.2 ±0.4	4.8 ±0.4
$\langle D_{\text{max}} \rangle$, Кпс	22.6 ±2.6	20.9 ±2.1	24.6 ±2.7	28.3 ±2.9	19.4 ±1.6	23.3 ±1.8	29.1 ±1.6	29.1 ±1.1
$\langle D_{\text{min}} \rangle$, Кпс	14.9 ±1.6	16.0 ±1.5	18.9 ±2.2	22.2 ±2.2	13.8 ±1.1	15.6 ±1.3	18.3 ±1.3	21.1 ±0.8
$\langle f_c \rangle$, f_{\odot}	8.2 ±2.2	6.5 ±2.4	4.4 ±2.4	10.4 ±2.5	8.1 ±1.7	6.6 ±2.5	14.5 ±2.8	12.3 ±1.8
$q_{\text{ложн}}$, %	3	0	0	9	0	2	17	27
$q_{\text{эмисс}}$, %	94	79	85	10	78	97	75	74
$q_{\text{н}}$, %	89	66	82	7	73	99	80	81

2) Тип взаимодействия в парах мало зависит от светимости компонентов. В каждом типе взаимодействия можно встретить и гигантские, и карликовые галактики. Однако аморфные атмосферы более характерны для эллиптических галактик высокой светимости. Случаи искажения структуры одного компонента чаще наблюдаются у более яркой галактики пары, при этом поверхностная яркость искаженного яркого члена пары оказывается заметно ниже средней. По-видимому, разреженная периферия яркого компонента легче искажается приливым влиянием соседней галактики.

3) Как и следовало ожидать, относительное число взаимодействующих пар уменьшается с ростом расстояния между компонентами. Каждый тип взаимодействия имеет свою характерную линейную шкалу (например, общая атмосфера наблюдается только у контактных пар). При $X > 100$ кпс случаи взаимодействия в парах крайне редки.

4) Относительное число галактик с эмиссиями не одинаково у разных типов взаимодействия. Сравнение двух последних строк табл. 2 показы-

вает, что основной причиной этого является различие в морфологическом составе пар. Однако после его учета видна тенденция к избытку эмиссий у галактик в тесных парах с сильными признаками взаимодействия.

5) Если бы двойные галактики двигались по очень вытянутым орбитам, то можно было бы ожидать зависимости вида приливного взаимодействия от фазы относительного движения (к примеру, появления хвостов у галактик после прохождения ими точки минимального сближения). При этом средние кинематические характеристики пар, $\langle y \rangle$, $\langle X \rangle$, $\langle f_c \rangle$, зависели бы от типа взаимодействия. Таких различий данные табл. 2 не обнаруживают, что служит косвенным подтверждением полученного выше вывода о близких к круговым движениях в парах. Наблюдаемые разности в $\langle y \rangle$ и $\langle X \rangle$ объясняются сегрегацией двойных галактик по морфологическим типам.

Отметим, что среднее отношение массы к светимости выше всего у не-взаимодействующих систем и пар, где искажения формы видны только у одного компонента. Для этих выборок процент ложных пар оказывается самым большим. Полагая, что различия в $\langle f_c \rangle$ целиком обусловлены наличием в выборках остаточного числа ложных пар, мы получаем уточненное асимптотическое значение $\langle f_c \rangle = 6.5$ при $q_{\text{ложн}} \rightarrow 0$.

В [3] приводились различные независимые аргументы, которые обосновывали исключение двойных галактик с оценками $f > 100$ как ложных пар, т. е. оптических систем или членов группы и скоплений. Однако в табл. 2 обозначено, что по условию $f > 100$ были исключены из выборки также некоторые взаимодействующие пары. Не возникает ли здесь явного противоречия? Чтобы ответить на этот вопрос, мы приводим в табл. 3 сводку всех 15 взаимодействующих пар с оценками $f > 100$. В первом столбце указан номер пары по каталогу [11], во втором — тип взаимодействия, в третьем — обозначение системы по атласу Арпа [13] или Воронцова-Вельяминова [14], в последнем — модуль разности лучевых скоростей. В примечаниях к таблице даны комментарии с учетом повторного просмотра пар на Паломарских картах и измерения лучевых скоростей. Обращает на себя внимание слабая выраженность признаков взаимодействия у этих пар. Из 15 пар 12 проявляют искажения формы только у одного компонента, а такие особенности структуры на периферии галактик могут объясняться влиянием межгалактической среды или случайным отклонением спиральных узлов от плоскости симметрии. Только в четырех случаях признаки взаимодействия были отмечены Арпом и Воронцовым-Вельяминовым. В двух из них причиной пекулярности является компактный спутник, а не другой компонент пары. Таким образом, данные табл. 3 не дают неоспоримых указаний на физическую связь между двойными галактиками с большими относительными скоростями.

Таблица 3

№	Взаимодействие	Грп. VV	У км/с
110	DIS-1		573
152	DIS-1		1592
164	DIS-1		2570
183	LIN-br		4241
202	DIS-1	Арп 307	690
242	DIS-1		634
299	DIS-1		899
338	DIS-1		4972
351	DIS-1		129
356	DIS-1		515
396	DIS-1	VV 317	483
427	DIS-2	Арп 274, VV 458	1184
515	DIS-1		420
586	DIS-1	Арп 46, VV 314	1548
599	ATM-am		2618

Примечания к таблице

110. «а»-компонент — пекулярная радиогалактика с искаженной спиральной структурой и пылевыми полосами. Для выяснения природы пекулярности необходим снимок центральной части.
152. У «b» несимметричное расположение спиральных узлов.
164. На «b» проектируется звезда.
183. Классификация как взаимодействующей ошибочна.
202. Асимметрия спирального узора. По Арпу взаимодействие сомнительно.
242. У «а» северная сторона большой оси изогнута. Возможный член скопления в Б. Медведице. Искажение межгалактической среды?
299. Классификация как взаимодействующей ошибочна. Члены скопления.
338. «а» — член скопления Девы; несимметричной спиральной структурой напоминает М 101.
351. Члены скопления Девы, у «b» слабые возмущения на периферии.
356. Члены скопления Девы, у «b» искривление плоскости на периферии.
396. У «b» несимметричная перемычка.
427. У «b» спиральная структура возмущена восточным спутником.
515. Классификация как взаимодействующей ошибочна.
586. «а» взаимодействует с компактным спутником, имеющим близкую лучевую скорость.
599. Существование аморфной атмосферы вокруг компонентов весьма сомнительно.

5. Признаки динамической эволюции двойных галактик. Согласно модельным расчетам на ЭВМ, выполненным Тумре [15], Уайтом [16] и другими авторами, контактные пары галактик должны быстро сливаться в еди-

ную звездную систему из-за динамического трения. После сближения на расстояние порядка суммы диаметров, члены пары успевают совершить всего несколько затухающих осцилляций, что для типичной пары составляет время $\leq 1 \cdot 10^{10}$ лет. Острайкер и Тернер [17] обратили внимание на возможность наблюдательной проверки эффекта динамического трения по зависимости между светимостью и взаимным расстоянием двойных галактик. Среди сверхтесных пар массивным галактикам потребуется самое малое время для слияния в одиночную. Поэтому следует ожидать дефицита в числе ярких пар при малых взаимных расстояниях компонентов. Изучая зависимость $L(X)$ по 56 парам Тернера, Уайт и Валдерс [18] и Острайкер и Тернер [17] не пришли к единому мнению о том, проявляется ли эффект динамического трения у двойных галактик. Для корректного анализа этого эффекта необходима более представительная выборка галактик, а также учет различных селекций в наблюдательных данных.

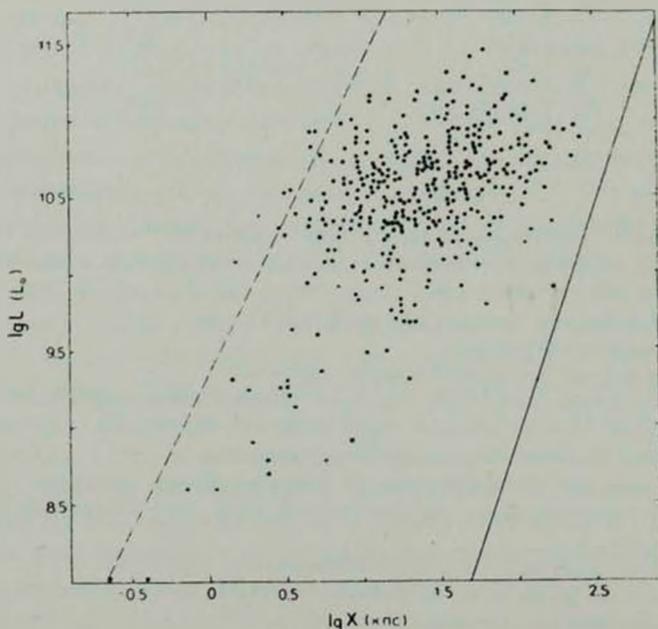


Рис. 3. Распределение 361 пары по проекции взаимного расстояния и суммарной светимости компонентов в логарифмической шкале. Сплошная линия соответствует орбитальному периоду пары, равному H^{-1} . Пунктирная прямая $L \sim X^2$ обозначает область плохой видимости сверхтесных пар ($x = 0.23$).

На рис. 3 мы приводим распределение 361 пары по значениям суммарной светимости, L , и проекции взаимного расстояния компонентов, X . В области $X < 30$ кпс, т. е. для контактных пар, наблюдается положительная

корреляция между L и X . Рассмотрим, какие эффекты могут влиять на это распределение.

а) Для физических пар следует ожидать, что период их орбитального движения не превышает космологического времени $T \leq H^{-1}$, где H — постоянная Хаббла. При значении параметра торможения $q_0 = 0$ это условие имеет вид

$$\mathfrak{M} > \tau^{-1} 4\pi^2 H^2 r^3, \quad (9)$$

где \mathfrak{M} — суммарная масса пары, а r — пространственное расстояние между компонентами. Линия космологического возраста пар изображена на рис. 3 сплошной прямой, для перехода от \mathfrak{M} к L принято значение $f=10$. Как видим, все без исключения пары имеют орбитальные периоды меньше космологического. Средний их период составляет $(1 \div 2) \cdot 10^{-2} \cdot H^{-1}$, однако дисперсия периодов довольно велика*. Легко показать, что расположение точек (пар) относительно линии космологического возраста не зависит от принятой величины постоянной Хаббла. С другой стороны, их расстояние до прямой определяется величиной q_0 , что дает принципиально новую возможность оценить q_0 по характеристике ансамбля пар. С учетом фактора проекции, получаем из данных рис. 3 следующее ограничение $q_0 \lesssim 1.5$.

б) Выше мы отмечали существование двух типов селекции, приводящих к коррелированности величин L и X .

Первый из них связан с выделением пар по критерию изолированности относительно соседних в проекции галактик. Среди широких пар карликовые галактики в отличие от гигантских имеют меньше шансов удовлетворить критерию, что обуславливает рост средней светимости пары с увеличением X .

Второй вид избирательности состоит в том, что ложные пары (члены групп и скоплений) исключались из выборки условием $f > 100$. Широкая «пара», образованная ярчайшими членами группы, может иметь $f < 100$ и оказаться в выборке, тогда как карликовые члены группы (при тех же значениях y и X) будут из выборки исключены. Количественный эффект обоих типов селекции на коррелированность $\{L, X\}$ был определен по моделированным парам. Для тесных пар ($X < 30$ кпс) роль селекции оказывается небольшой.

в) Существует еще один вид избирательности на диаграмме, который обусловлен трудностью обнаружения на Паломарских картах сверхтесных пар. Острайкер и Тернер [17] ошибочно полагали, что раздельная видимость компонентов тесной пары определяется условием $X > 5$ кпс. Для проверки этого предположения мы использовали 17 случаев «конфуза» в

* Близкий к критическому период имеет пара № 589.

каталоге [11], когда за пару галактик были приняты одиночные галактики с выделяющимися сгущениями (ассоциациями) или галактики с проектирующимися на их центральную часть звездами. У этих случаев конфуза угловые расстояния между «компонентами» заключены в интервале $0.17 + 0.32$ со средним 0.23 , тогда как линейные расстояния представлены в диапазоне $(0.7 - 10.3)$ кпс. Очевидно, что в качестве граничной видимости тесных пар следует принять условие $x' = \text{const}$, что соответствует зависимости $L/X^2 = \text{const}$. На рис. 3 область $x \leq 0.23$ отделена пунктирной прямой.

Как видим, граница различения тесных пар обрезает некоторую часть двойных галактик. Чтобы определить относительное число теряемых тесных пар, необходима специальная программа их поиска на негативах Паломарского атласа.

Рассмотрение совместного действия факторов а), б), в) показывает, что они не способны целиком объяснить наблюдаемую коррелированность L и X у двойных галактик. Помимо предположения о быстрой эволюции из-за динамического трения, альтернативной причиной коррелированности L и X могут быть начальные условия образования галактик.

В линейном приближении распределение пар на рис. 3 представляется зависимостью

$$\lg L \sim (1.3 \pm 0.3) \lg X. \quad (10)$$

Естественно ожидать, что в процессе образования пар на ранней стадии космологического расширения, более широкие пары захватывали большую часть массы, чем тесные. Коэффициент (1.3 ± 0.3) в зависимости (10) указывает на то, что формирование двойных галактик происходило преимущественно в одномерных и плоских структурах (волокнах и блинах). Разумеется, картина образования галактик была весьма сложной и многоступенчатой [19]. Использование наблюдаемых свойств двойных галактик может способствовать ее детализации.

На рис. 4 зависимость средней светимости пары от расстояния между компонентами представлена в линейной шкале. Ромбиками обозначены средние для реальных пар, крестиками — для моделированных. Вертикальный размер значков соответствует стандартной ошибке среднего. Данные рис. 4 позволяют сформулировать следующие заключения.

1) С точностью до слабого тренда из-за избирательности критерия изолированности средняя светимость двойных галактик при $X > 30$ кпс остается постоянной и составляет весьма большую величину, $\langle L \rangle = 6 \cdot 10^{10} L_{\odot}$.

2) У контактных пар ($X < 30$ кпс) средняя светимость круто падает с уменьшением взаимного расстояния компонентов. Этот завал частично

объясняется пропуском сверхтесных пар, условия видимости которых на Паломарских картах неблагоприятны для их обнаружения. Однако из расположения пар на рис. 3 относительно «зоны конфуза» видно, что при $X > 10$ кпс данный вид селекции уже невелик.

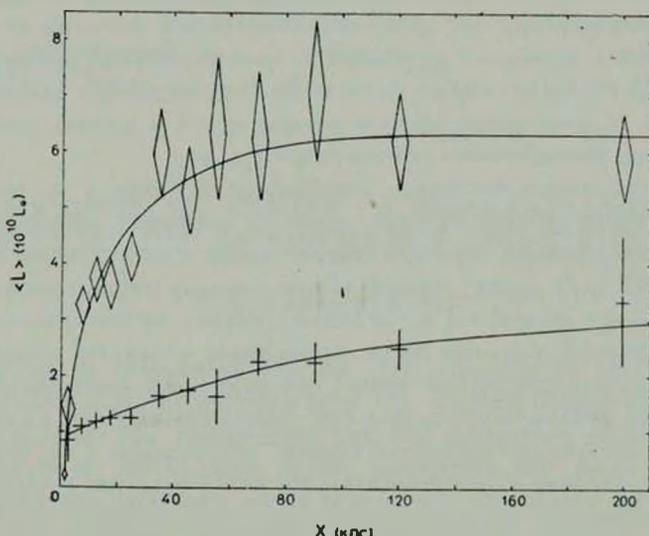


Рис. 4. Зависимость средней светимости пары от проекции расстояния между компонентами. Ромбиками обозначены светимости реальных пар, крестиками — моделированных, удовлетворяющих тому же критерию изолированности. Высота ромбиков и крестов соответствует стандартной ошибке среднего. Для моделированных пар зависимость $\langle L/X \rangle$ целиком обусловлена эффектами селекции.

3) Остаточный эффект возрастания $L(X)$ на $0 < X < 30$ кпс может объясняться как динамическим трением галактик, так и начальными условиями их образования. Важно подчеркнуть, что линейная шкала эффекта соответствует диаметру средней галактики. В случае существования вокруг пар протяженных (≥ 100 кпс) гало увеличение $\langle L|X \rangle$ прослеживалось бы до больших расстояний.

6. *Заключение.* Выполненный в данной и предыдущей [3] статьях анализ орбитальных движений в парах показывает, что двойные галактики движутся по орбитам, близким к круговым. Орбитальный момент вращения пары в среднем превосходит сумму моментов вращения ее компонентов. Принимая во внимание распространенность двойных галактик ($\delta \simeq 0.15$ от числа галактик в единице объема [2]), мы получаем, что орбитальный момент пар является важной космологической величиной, отражающей начальные условия образования систем галактик.

Движения двойных галактик по орбитам с малым эксцентриситетом должны приводить к определенным устойчивым формам взаимодействия компонентов: хвостам, перемычкам, оболочкам. Как показывают данные табл. 2, наблюдается зависимость вида взаимодействия от морфологического типа компонентов пары (типа звездного населения и его кинематики). Можно надеяться, что детальное комплексное изучение особенностей взаимодействия в парах в сочетании с моделированием приливных явлений на ЭВМ позволит создать полную картину процессов взаимодействия, в частности, количественно оценить потерю массы и вращательного момента у галактик, интенсивность обмена газом и т. д.

Как показывают численные эксперименты Уайта и других авторов, шкала эволюции двойных галактик из-за их взаимного динамического трения получается весьма короткой. Малое время слияния пары галактик в одну ($\leq 10^9$ лет) ставит острый вопрос: почему наблюдается так много тесных двойных систем, не испытавших слияния за космологическое время? По-видимому, слиянию были подвержены в первую очередь пары с большими эксцентриситетами орбит, что позволяло компонентам испытывать быстрое динамическое трение при тесных сближениях. Если в настоящую эпоху сохранили свое существование только пары с круговыми орбитами, то в начальные эпохи относительное число галактик в парах, δ , должно было составлять $0.15 < \delta < 1.0$. При таком обилии пары галактик могли явиться существенным фактором, ускорявшим темп динамической эволюции галактик и систем галактик в ранние эпохи.

По данным рис. 3 и 4 у тесных (контактных) пар наблюдается положительная корреляция между светимостью и взаимным расстоянием компонентов, которая не сводится только к эффектам селекции. Эта зависимость допускает двоякое объяснение: а) она является следствием продолжающегося процесса слияния двойных галактик или б) отражением начальных условий формирования двойных систем. Делая выбор между двумя возможными интерпретациями, следует учитывать также следующее важное обстоятельство. Пары галактик (особенно широкие) имеют светимости в среднем в три раза более высокие, чем одиночные галактики. Если этому способствовали условия образования галактик (на широкую изолированную пару расходовалась большая протогалактическая масса), то следовало бы ожидать обилия сверхгигантских галактик также среди изолированных галактик поля. Однако по данным [20] этого не наблюдается. Если же высокая светимость компонентов пары обусловлена частым слиянием галактик, то среднее число слияний должно было составить $n \geq 3$. Но и здесь возникает явная трудность. Наряду с парами, должно наблюдаться большое число изолированных галактик, представляющих финальную стадию процесса слияния. Однако, согласно [21], распространенность изолированных галактик в единице объема не превышает 3—5%. К тому же

среди них преобладают плоские спиральные системы [22], тогда как слияние приводит к «сферизации» галактик.

Возможно, отмеченные трудности удастся преодолеть, рассматривая более сложные процессы на стадии формирования галактик с учетом реальной иерархии систем галактик разного масштаба.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

HOMOGENEOUS SAMPLE OF BINARY GALAXIES. III. PECULIARITIES OF KINEMATICS AND STRUCTURE

I. D. KARACHENTSEV

A method is considered for the determination of the type of orbital motions in pairs of galaxies from the relation between radial velocity difference for the components and the projection of their mutual linear separation. Application of the method to 361 pairs of galaxies has confirmed the inference made previously (3) of the prevalence of circular orbits in binary galaxies. A comparison is made of the principal parameters of double galaxies divided according to the morphological types of galaxies and also to the types of interaction between the components. Pairs with elliptical galaxies differ by their smaller mutual distances; however, their mass-to-luminosity ratio is the same as that in the SS-pairs. The type of interaction in pairs depends little on the luminosity of components but it correlates with the morphological type of galaxies. The absence of appreciable differences of kinematic characteristics in pairs with different types of interaction is an indirect confirmation of the circular motions in pairs. The distribution of 361 pairs according to the integral luminosity and mutual distance of components is presented. Different effects of observational selection are considered on the diagram. It is pointed out that with the cosmological deceleration parameter $q_0 \lesssim 1.5$ orbital periods of all the pairs do not exceed the age of the Universe. A positive correlation of luminosity with separation occurs for contact pairs. Within the hypothesis on frequent merging of galaxies it is difficult to explain the high mean luminosity of binary galaxies and also the poor abundance of isolated field galaxies.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Караченцев, *Астрофизика*, 16, 217, 1980.
2. И. Д. Караченцев, *Астрофизика*, 17, 249, 1981.
3. И. Д. Караченцев, *Астрофизика*, 17, 429, 1981.
4. И. Д. Караченцев, *Астрон. ж.*, 47, 509, 1970.
5. P. D. Noerdlinger, *Ap. J.*, 197, 545, 1975.
6. D. C. Jenner, *Ap. J.*, 191, 55, 1974.
7. E. L. Turner, *Ap. J.*, 208, 304, 1976.
8. T. Page, *Proc. Fourth Berkeley Symp. Math. Stat. and Prob.*, Univ. of California Press, 277, 1961.
9. S. M. Faber, J. S. Gallagher, *Masses and Mass-to-Light Ratios of Galaxies*, in *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 17, 1979 (in press).
10. A. Dressler, *Ap. J.*, 236, 351, 1980.
11. И. Д. Караченцев, *Сообщ. CAO АН СССР*, 7, 3, 1972.
12. J. T. Stocke, W. G. Tifft, M. A. Kaftan-Kasim, *A. J.*, 83, 322, 1978.
13. H. Arp, *Ap. J.*, Suppl. ser., 1, 3, 1966.
14. B. A. Vorontsov-Velyaminov, *Atlas and Catalogue of Interacting Galaxies*, Moscow State Univ., Moscow, 1959.
15. A. Toomre, J. Toomre, *Ap. J.*, 178, 623, 1972.
16. S. D. White, *M. N. R. A. S.*, 184, 185, 1978.
17. J. P. Ostriker, E. L. Turner, *Ap. J.*, 234, 785, 1979.
18. S. D. White, F. Valders, *M. N. R. A. S.*, 190, 55, 1980.
19. S. M. Fall, *Nature*, 281, No 5728, 200, 1980.
20. В. Е. Караченцева, И. Д. Караченцев, *Астрофизика*, 15, 589, 1979.
21. В. Е. Караченцева, *Астрон. ж.*, 57, 1153, 1980.
22. И. Д. Караченцев, В. Е. Караченцева, *Астрон. ж.*, 51, 724, 1974.