

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ВЕСТНИК
АКАДЕМИИ НАУК
СССР

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

7

МОСКВА · 1974

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЛАКТИК

Кандидат физико-математических наук
Н. Н. КОЗЛОВ,

доктор физико-математических наук
Р. А. СЮНЯЕВ,

член-корреспондент АН СССР
Т. М. ЭНЕЕВ

Уже давно внимание астрономов привлекают удивительные особенности структуры некоторых галактик, отчетливо проявляющиеся на фотографиях последних. У ряда галактик, в общем-то ничем более не выделяющихся среди множества подобных объектов, встречаются образования типа «хвостов», часто довольно протяженные, тонкие и четко выделенные вплоть до расстояний в несколько радиусов основной части галактики. Между галактиками, близко расположенными друг к другу, иногда наблюдаются перемычки — «мосты», как бы связывающие их между собой (рис. 1). Следует отметить, что среди галактик с «хвостами» встречаются любопытные парные сочетания, когда «хвосты» (в отличие от случая с перемычками — «мостами») направлены в противоположные стороны. Парные сочетания галактик — обоих типов — стали называть взаимодействующими галактиками (как увидим далее, не без оснований). К числу других аномальных характеристик структуры можно отнести также отклонения от плоскости диска галактики. Подобные отклонения заметны в нашей Галактике и в галактике М-33.

Напомним в связи с этим, что большинство наблюдаемых галактик имеет более или менее регулярную структуру. По особенностям своего строения они могут быть разбиты на два основных класса — эллиптические и спиральные. Последний класс наиболее многочислен и включает до 70% галактик от общего числа наблюдаемых. Как показывает само название класса, принадлежащая к нему галактика имеет спиральные рукава — спиралевидные сгущения вещества (газа и звезд). На рис. 2 показана типичная спиральная галактика М-51 из созвездия Гончих Псов. Галактика эта видима в плане, так сказать, «сплошмя».

При всех отличиях разных типов спиральных галактик все они обладают четко очерченными общими элементами структуры. Это — центральная осесимметричная область, в которой сосредоточена основная часть массы галактики (для удобства будем называть ее ядром), и периферийная область, которая, несмотря на свои значительные (по сравнению с центральной) размеры, содержит небольшую часть общей массы. Вещество периферической области благодаря вращению собрано в сравнительно

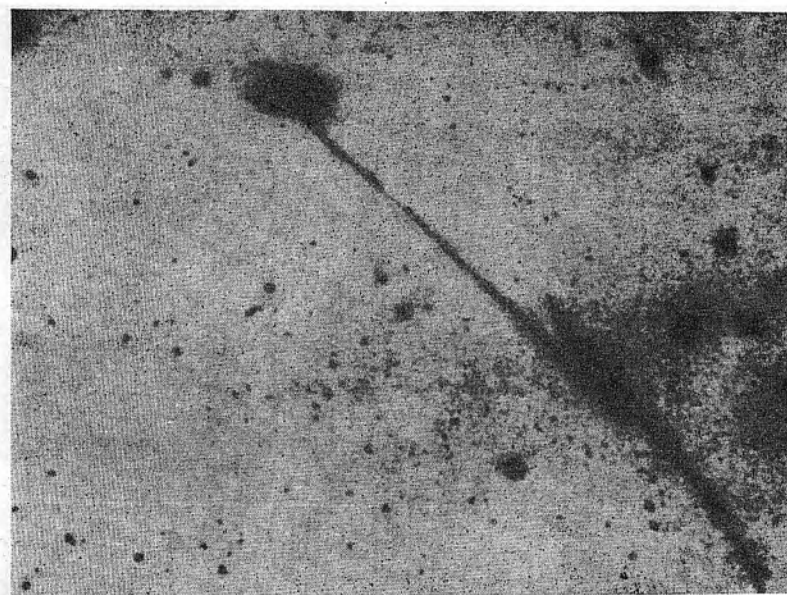


Рис. 1. Система галактик VV 34 в Рыбах

тонком диске с более или менее развитыми спиральными структурами. Это особенно хорошо видно на рис. 3, где показана одна из типичных спиральных галактик, наблюдаемая с Земли сбоку, с «ребра».

Что касается эллиптических галактик, то их структура более однородна и они представляют собой по форме более или менее сжатый эллипсоид вращения.

К настоящему времени накопился обширный фотографический экспериментальный материал, содержащий тысячи снимков галактик разных классов. Тщательный анализ этих снимков, проводившийся различными исследователями, позволил выделить среди массы спиральных и эллиптических галактик значительное число взаимодействующих. Б. А. Воронцов-Вельяминовым издан атлас взаимодействующих галактик¹, составленный в основном по фотографиям Паломарского атласа. В этих атласах можно найти много примеров (см. рис. 1), иллюстрирующих эффективность взаимодействия и указывающих на важность детального исследования проблемы.

Сразу после обнаружения взаимодействующих галактик был выдвинут ряд гипотез, пытавшихся объяснить механизм деформации их структур. Среди этих гипотез, часть из которых носит весьма умозраительный характер, серьезного внимания, на наш взгляд, заслуживает гипотеза, пропагандировавшаяся еще Дж. Джинсом в начале нынешнего века и объясняющая появление аномальных деталей у галактик приливными эффектами — действием мощных гравитационных сил в межгалактическом пространстве. Источником таких сил могут быть объекты различной

¹ Б. А. Воронцов-Вельяминов. Атлас и каталог 356 взаимодействующих галактик. Изд-во МГУ, 1959.

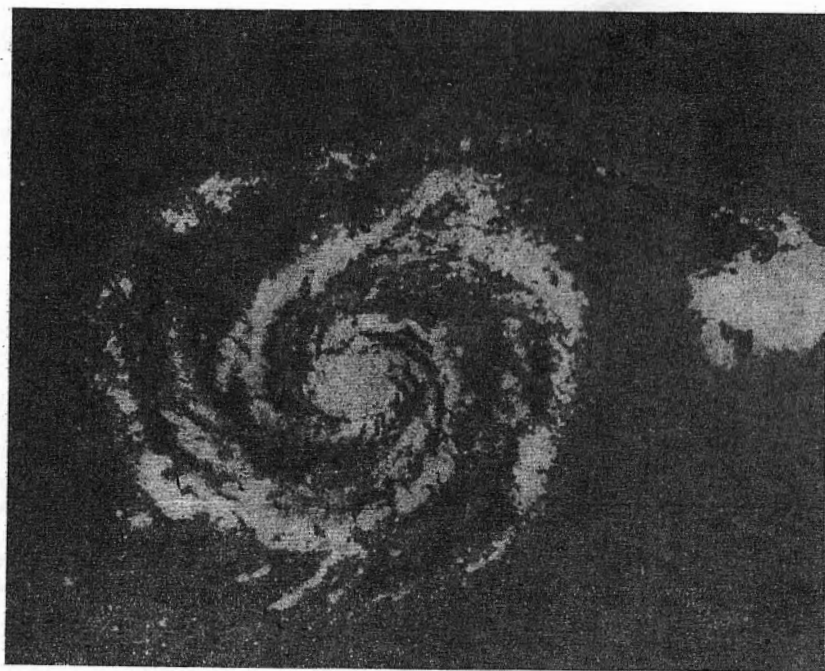


Рис. 2. Спиральная галактика M-51 и ее спутник NGC 5195

природы, например соседние галактики (известно, что плотность распределения галактик в видимой части Вселенной относительно велика — в скоплениях галактик средние расстояния между ними всего на порядок превышают размеры самих галактик). Это могут быть также невидимые тела, например «мертвые», т. е. подвергшиеся гравитационному коллапсу, квазары и далеко проэволюционировавшие галактики, в которых звезды исчерпали запасы ядерной энергии. Своеобразие таких «невидимых» объектов заключается в том, что их невозможно наблюдать с помощью оптических или радиоастрономических инструментов. Существование их может быть, однако, обнаружено опосредствованным путем, например, при наблюдении возмущенного состояния галактик, мимо которых прошли эти объекты.

В 1971—1972 гг. в Институте прикладной математики Академии наук СССР была проведена работа по изучению воздействия больших масс вещества на динамику развития галактических структур². Особенность

² Н. Н. Козлов, Р. А. Сюняев, Т. М. Энеев. Препринт Института прикладной математики АН СССР, 1971; Н. Н. Козлов, Р. А. Сюняев, Т. М. Энеев. «Докл. АН СССР», 1972, т. 204, № 3, стр. 579—582; Т. М. Энеев, Н. Н. Козлов, Р. А. Сюняев. «Astronomy and Astrophysics», January, 1973, vol. 22, No. 1, p. 41—60. Подобные работы проводились ранее в Швеции (P. Lindblad. «Stockholm Observatory Annals», 1960, vol. XXI, p. 56—58), ФРГ (J. Pflaiderer. «Zeitschrift für Astrophysik», August, 1963, vol. 58, No. 1, p. 12—22), ведутся в настоящее время в Массачусетском технологическом институте в США (A. Toomre, J. Toomre. «The Astrophysical Journal», December, 1972, vol. 178, p. 623—666).

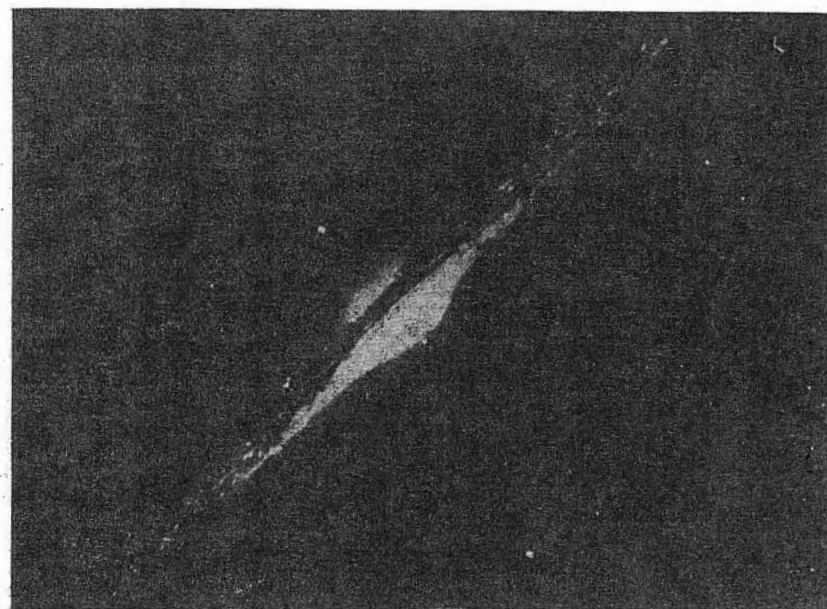


Рис. 3. Спиральная галактика NGC 4565 в Волосах Вероники

этих исследований состояла в том, что основные их результаты были получены путем моделирования процессов гравитационного взаимодействия вещества на цифровой вычислительной машине с последующим отображением обнаруженных закономерностей на экране дисплея ЦВМ. В работе было применено численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, описывающей движение гравитирующего вещества и служащей таким образом математической моделью изучаемого явления.

Математическое моделирование галактик дело, в общем случае, весьма сложное, поскольку галактика — это система, состоящая из разнородных элементов: газа, пыли, звезд. Математическая модель галактики должна достаточно хорошо отражать существенные для изучаемой проблемы особенности реальных галактик. Вместе с тем эта модель должна быть и достаточно проста — в ней должны отсутствовать детали, мало существенные и могущие затемнить основные эффекты гравитационного взаимодействия тел.

При построении математической модели галактики были приняты во внимание те характерные особенности в их строении (для спиральных галактик), о которых говорилось выше, в первую очередь сосредоточенность основной массы вещества в центральной части галактики. Соответственно указанным особенностям математическая модель галактики была представлена в виде структуры, имеющей две разнородные компоненты, — центральную сферически симметричную часть, в которой сосредоточена вся масса галактики, и периферическую дискообразную, состоящую из точек-спутников исчезающе малой массы. В исходном (невозмущенном) состоянии галактики точки-спутники двигались в одну сторону по круговым орбитам вокруг центральной части. Распределение вещества предпо-

лагалось локально однородным, с плотностью, спадающей при удалении от ядра. Наличие спиральной структуры в невозмущенной другими массивными телами галактике игнорировалось. Модель возмущающего тела была весьма проста и представляла собой более или менее компактную структуру со сферически симметричным распределением масс.

Рассматриваемая проблема в данной модели свелась, главным образом к n -ограниченным задачам трех тел, где n — число точек-спутников. Как известно, решение такой задачи не может быть получено в явном виде. Поэтому для исследования эволюции структуры возмущенной галактики было использовано численное интегрирование дифференциальных уравнений движения точек-спутников. Численное интегрирование проводилось одновременно для 1000 точек-спутников, подвергавшихся гравитационному воздействию ядра галактики и возмущающего тела. Так как с самого начала рассматривалась трехмерная задача, то для определения траекторий точек-спутников необходимо было интегрировать численным методом систему дифференциальных уравнений 6000-го порядка (говоря точнее, нужно было получить 1000 решений системы уравнений 6-го порядка, поскольку в данном случае исходная система уравнений 6000-го порядка распадается на 1000 систем 6-го порядка). Найденные таким образом для отдельных моментов времени положения точек-спутников в пространстве в изометрической проекции отображались на экране дисплея ЦВМ.

Численные эксперименты были проведены в первую очередь для четырех наиболее характерных вариантов пролета массивного тела относительно диска галактики: *перпендикулярно ее плоскости, над плоскостью, в плоскости против направления вращения галактики и, наконец, в плоскости в направлении ее вращения*. Были рассмотрены также некоторые промежуточные варианты.

Численный эксперимент позволил выявить основные эффекты, вызванные приливным взаимодействием галактик. Необходимо отметить, что характерные особенности галактических структур, исследованных в численных экспериментах, могут быть выявлены также при качественном анализе возмущающих сил, действующих в данной задаче. В процессе численного эксперимента проводилась киносъемка с экрана дисплея ЦВМ результатов массовых расчетов. Полученный кинофильм дал возможность детально проследить развитие структур галактики вследствие гравитационных возмущений. Фрагменты кинофильма приведены на рис. 4–7, где представлено несколько кадров каждого из фрагментов, состоящих в действительности из нескольких тысяч кадров. На первом кадре каждого фрагмента показано направление начального вращения галактики, а также направление движения возмущающего тела по орбите, которая выделена пунктирной линией. Безусловно, важнейшим эффектом, обнаруженным в процессе исследования, является образование спиральных ветвей, причем спиралей специфических — сильно выраженных на далекой периферии галактики и относительно слабых в ее центральных областях. Этот факт, возможно, позволит отличить спиральные ветви, возникшие при приливном взаимодействии, от спиралей, являющихся свойством самой галактики как скопления гравитирующих точек. Последние, наиболее ярко выражены в центральных областях галактик.

Спирали образуются во всех рассмотренных вариантах, т. е. они должны образовываться при любом близком пролете массивного тела. Однако в четвертом варианте (движение в плоскости диска против направления его вращения) сильно выражен лишь один рукав (см. рис. 7 слева). В этом варианте сначала, до появления спиралей, формируется выпуклость, направленная в сторону, где приливное действие пролетающего

тела было максимальным. На последующих стадиях спираль эволюционирует в образование типа «хвоста», причем этот «хвост» будет повернут в сторону от пролетевшего возмущающего тела. Естественно, если оба взаимодействующих тела будут представлять собой галактики, плоскости дисков которых компланарны, и двигаться, как это принято в четвертом варианте, то у этих галактик на определенном этапе эволюции после пролета появятся «хвосты», направленные в противоположные стороны. Подобного рода парные сочетания галактик, как уже было отмечено ранее, действительно наблюдаются на некоторых фотографиях.

Отметим далее, что во втором варианте пролета наряду с двумя четко оформленными спиральными рукавами виден также третий, слабо выраженный спиральный рукав (см. рис. 5 слева).

Укажем, наконец, что приливное взаимодействие должно приводить к формированию спиральных рукавов, или подобных им волн плотности, и на периферии эллиптических галактик. Интересно, что слабо выраженные спиральные рукава обнаружены на периферии эллиптической галактики NGC 205 — спутника известной галактики M 31 — Туманность Андромеды.

Перейдем теперь к описанию отдельных эпизодов кинофильма, соответствующих разным вариантам пролета.

Первый эпизод (см. рис. 4 слева) соответствует первому варианту, рассматриваемому в проекции на плоскость невозмущенной галактики. Возмущающее тело с массой, равной массе галактики, пролетает перпендикулярно ее плоскости с гиперболической (в данном случае удвоенной параболической) скоростью на расстоянии 40 *кпс* от центра галактики. Масса галактики составляет при этом 10^{11} масс Солнца. Ее радиус принят равным 36 *кпс*. (Заметим, что нейтральный водород в галактике M 31 наблюдается до 30 *кпс*; приведенное значение массы равно среднему значению масс наблюдаемых галактик, исключая карликовые системы.) Эти значения размеров и масс приведены для большей наглядности. Естественно, все характеристические параметры задачи могут быть легко пересчитаны на другие значения, при сохранении принятых соотношений между ними. В данном случае период обращения частицы по орбите радиуса 36 *кпс* составляет 2 млрд лет. На этом и всех других рисунках время T приводится в миллиардах лет, причем момент $T = 0$ соответствует всюду моменту наибольшего сближения возмущающего тела с галактическим ядром.

Возмущающее воздействие пролетающего тела приводит прежде всего к образованию двух четко выраженных спиральных рукавов у галактики. Кроме того, для ряда частиц оно оказывается настолько сильным, что одна часть их выбрасывается из сферы притяжения галактики, другая же, вследствие сильного торможения, весьма быстро меняет направление движения и обрушивается на центральные области галактики и даже на ее ядро. Траектории движения этих частиц из кругов превращаются в сильно вытянутые эллипсы.

Второй эпизод (см. рис. 4 справа) также соответствует первому варианту пролета, однако галактика рассматривается при этом сбоку — под углом 15° к плоскости невозмущенного диска. Здесь, как и в первом эпизоде, четко различаются два спиральных рукава, но одновременно обнаруживаются новые важные детали возмущенной структуры галактики, которые не были видны в предыдущем эпизоде. Речь идет об искажении первоначальной невозмущенной плоскости диска галактики, которое делает возмущенную структуру галактики существенно пространственной. Это хорошо видно на ряде кадров эпизода, где один из спиральных рукавов явно отклоняется от плоскости диска.

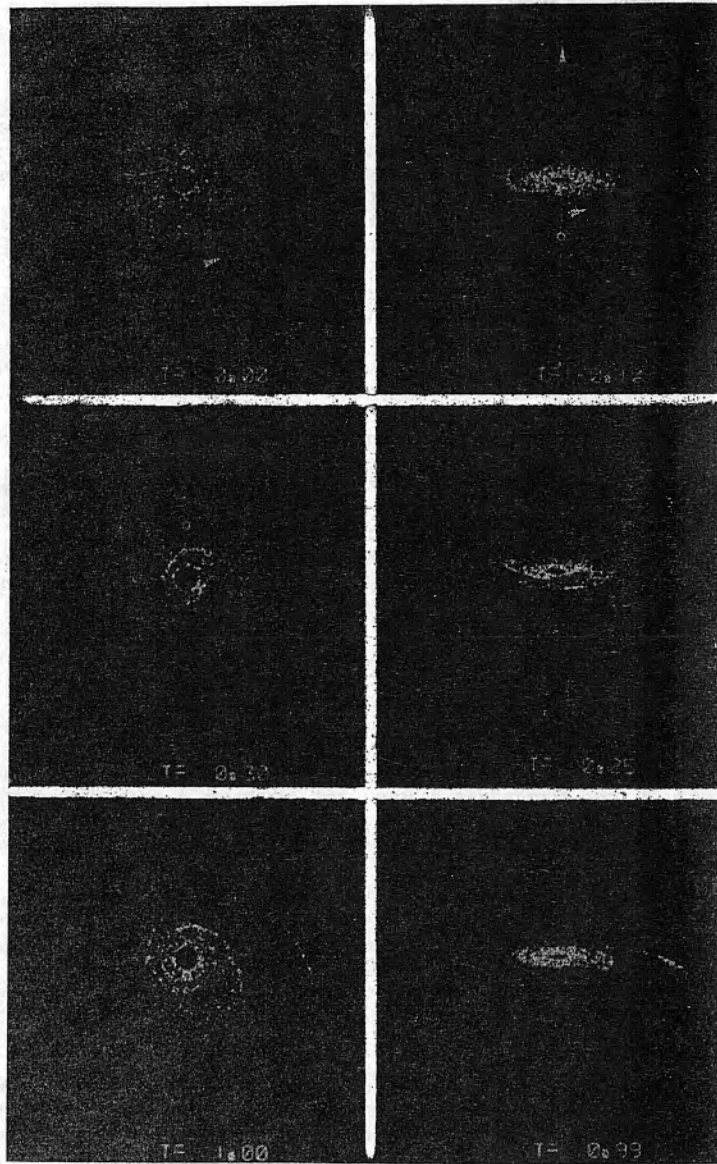


Рис. 4. Эволюция спиральной галактики при пролете возмущающего тела перпендикулярно плоскости начального вращения
 Слева — проекция на плоскость невозмущенной галактики, справа — вид под углом 15° к плоскости невозмущенной галактики

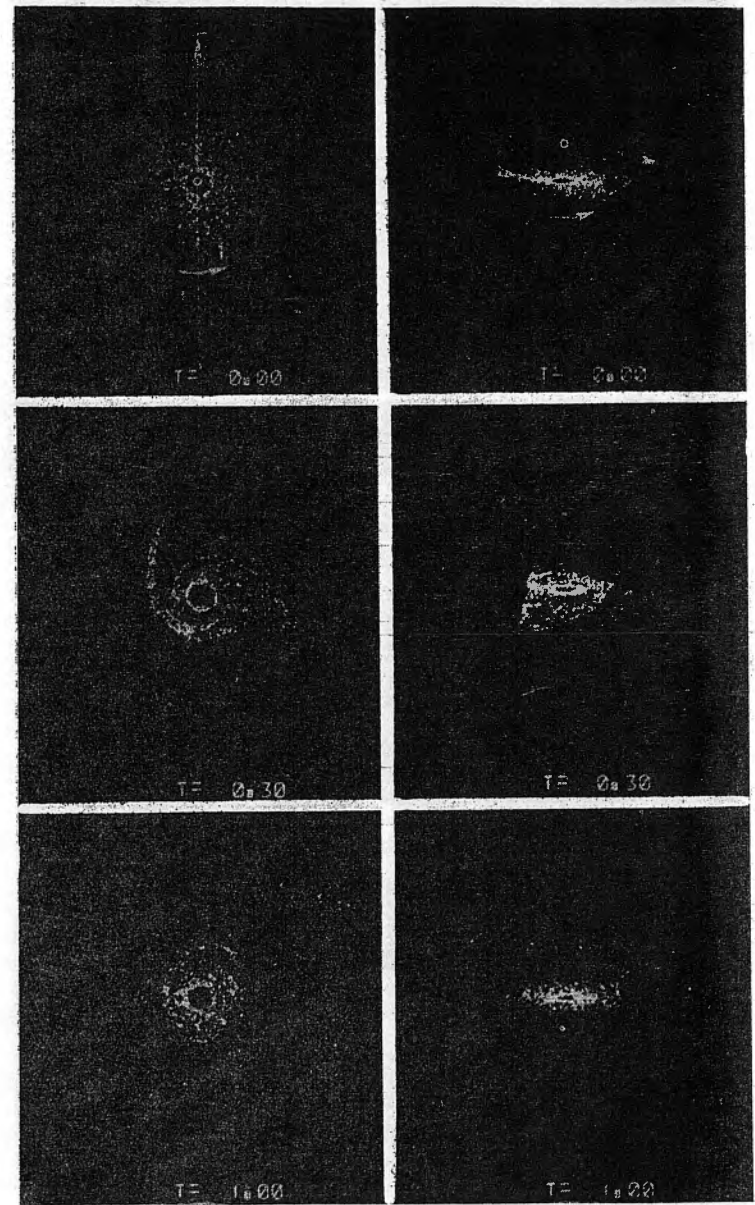


Рис. 5. Эволюция спиральной галактики при пролете возмущающего тела над плоскостью диска
 Слева — проекция на плоскость невозмущенной галактики, справа — вид под углом 15° к плоскости невозмущенной галактики

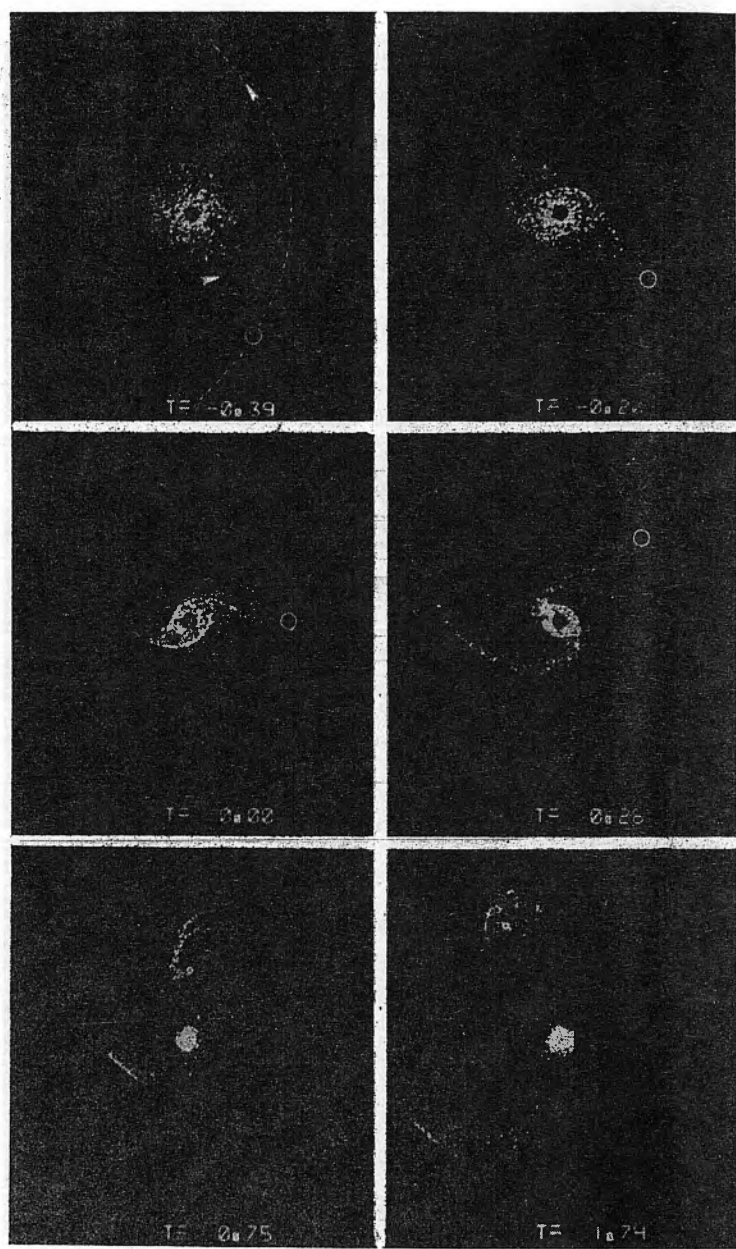


Рис. 6. Эволюция спиральной галактики при пролете возмущающего тела большой массы в плоскости диска в направлении начального вращения. При $T_1 = 0,75$ и $T = 1,74$ масштаб изображения вдвое меньше первоначального

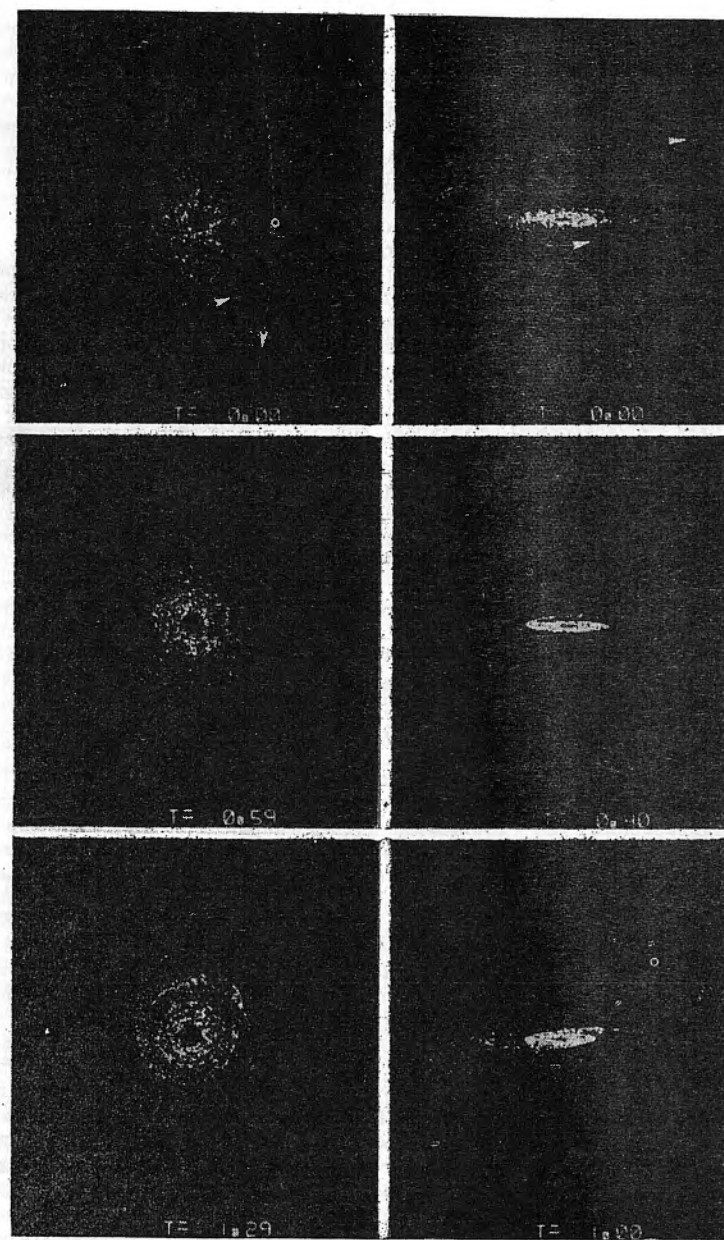


Рис. 7. Слева — эволюция спиральной галактики при пролете возмущающего тела в плоскости диска против направления начального вращения, справа — эволюция спиральной галактики при пролете возмущающего тела под углом 30° к плоскости диска. Перигеум орбиты отклонен на 30° от ее узла. Луч зрения наблюдателя составляет 10° к плоскости галактики

Третий и четвертый эпизоды соответствуют второму варианту пролета, причем сначала рассматривается эволюция галактики в проекции на плоскость ее невозмущенного диска, а затем под углом 15° к этой же плоскости (см. рис. 5). Размеры галактики, ее масса и масса возмущающего тела такие же, как и в первом варианте, однако скорость возмущающего тела и минимальное расстояние, на котором оно проходит от галактики, имеют другие значения: скорость возмущающего тела примерно в полтора раза больше параболической, а минимальное расстояние от центра галактики составляет 20 *кпс*.

Как и в первом варианте, здесь образуются спиральные рукава, причем, что отмечалось ранее, в этом случае их будет уже три (см. рис. 5 слева). Однако наиболее интересной особенностью данного варианта является глубокая пространственная эволюция структуры галактики — значительно более сильная, чем в первом варианте. Эта эволюция хорошо прослеживается в кадрах четвертого эпизода кинофильма (см. рис. 5 справа). Интересно отметить, что через период времени, превышающий период оборота внешних частей галактики, в двух противоположных секторах диска появляются неравные по амплитуде отклонения соответственно вверх и вниз от плоскости диска. Эти отклонения по своей форме в какой-то мере похожи на отклонения, наблюдаемые в нашей Галактике и в галактике М-33. Сильно возмущенные орбиты частиц могут пересекать плоскость невозмущенного диска как в его центральной маловозмущенной части, так и на периферии. Звезды и газ, попадая на такие орбиты, будут вести себя по-разному. Звезды после удаления возмущающего тела будут продолжать двигаться вокруг ядра по медленно оскулирующим кеплеровским орбитам. Для газа диск является «черной поверхностью». Из-за неупругости взаимодействия с газовой средой в диске газ, находящийся на возмущенной орбите, не может проходить из верхней полу-плоскости в нижнюю, и наоборот. Его движение будет имитировать падение вещества на плоскость диска. Такое явление наблюдается, например, в нашей Галактике.

Пятый эпизод (см. рис. 6) соответствует третьему варианту пролета. Возмущающее тело движется здесь в плоскости диска галактики, в направлении его вращения. Здесь характеристические параметры задачи существенно отличаются от параметров предыдущих вариантов. Возмущающее тело в данном случае имеет массу в четыре раза большую, чем у галактики, мимо которой она пролетает. При этом возмущающее тело пролетает с параболической скоростью на минимальном расстоянии от галактики, вдвое превышающем ее радиус. Наиболее интересной особенностью рассматриваемого варианта является захват вещества галактики возмущающим телом. Захватывается при этом пятая часть вещества галактики. Столь значительный захват, несмотря на относительную дальность пролета, объясняется двумя факторами — сравнительной медленностью пролета (параболическая скорость) и большой массой возмущающего тела. Следует, однако, отметить, что первый фактор играет здесь главную роль. При параболической (или близкой к ней) скорости всегда можно подобрать такое минимальное расстояние пролета, при котором будет иметь место более или менее значительный захват вещества, даже при небольшой массе возмущающего тела. Мертвый квазар, или какой-либо другой массивный компактный объект, пролетевший мимо галактики и захвативший часть ее вещества, может таким путем образовать новое скопление звезд и газа — новую галактику.

Другая интересная особенность варианта — наличие в нем некоторых промежуточных состояний в эволюции галактики и захваченного возмущающим телом вещества, при которых захваченное вещество, уже доста-

точно четко оформившееся в отдельное скопление звезд и газа, связано с галактикой перемычкой — «мостом» (см. кадры рис. 6 для $T=0$ и $T=0,26$). Не исключено, что в данном случае мы имеем дело с одним из возможных механизмов образования реальных перемычек — «мостов», наблюдающихся на некоторых фотографиях.

Шестой эпизод (см. рис. 7 слева) соответствует четвертому варианту пролета. Возмущающее тело движется здесь в плоскости, совпадающей с плоскостью диска галактики, в направлении против его вращения. Как уже было отмечено ранее, четко выражен и достаточно устойчив в данном случае один спиральный рукав (второй имеет незначительные размеры и быстро распадается). В процессе своей эволюции этот рукав в конце концов принимает форму, весьма напоминающую те выступы — «хвосты», которые наблюдаются на некоторых фотографиях галактик.

Наконец, седьмой, заключительный эпизод кинофильма, соответствует одному из промежуточных вариантов пролета (см. рис. 7 справа). Плоскость орбиты возмущающего тела наклонена к плоскости диска галактики на 30° . Перигентр орбиты отклонен на 30° от ее узла и находится на расстоянии двух радиусов от центра галактики. Возмущающее тело движется по параболической траектории и имеет массу, равную массе галактики.

Этот вариант по характеру эволюции галактики во многом напоминает третий вариант. Здесь также наблюдается образование спиральных рукавов и захват вещества. Однако эволюция структуры галактики в данном случае носит существенно пространственный характер. Наиболее ярко это проявилось в характеристиках вновь образовавшегося скопления звезд и газа. Захваченные возмущающим телом частицы движутся вокруг него примерно в одной плоскости, которая перпендикулярна плоскости диска невозмущенной галактики (последнее обстоятельство — наиболее интересная особенность данного варианта). Вместе с тем, как и в предыдущем варианте, имеют место любопытные конфигурации промежуточных состояний галактики и захваченного вещества, при которых галактики связаны между собой перемычкой — «мостом».

Подводя итог проделанной работе, можно сказать, что математическое моделирование процессов гравитационного взаимодействия галактик позволило обнаружить эффекты, которые действительно напоминают некоторые структуры на фотографиях реальных галактик. Пока еще рано утверждать, что именно эти механизмы служат причиной появления «хвостов» и «мостов» между галактиками. Однако уже сейчас ясно, что гравитационное взаимодействие может быть мощным фактором, влияющим на динамику развития галактических структур. Можно надеяться, что дальнейшие исследования позволят установить истинные масштабы этого влияния и его подлинную роль в эволюции галактик.