

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЛИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЛАКТИК

А. А. Коровяковская, Ю. П. Коровяковский

Приведены результаты численного моделирования приливных явлений во внешних частях галактик при их сближениях. На основе проведенных расчетов объясняются многие наблюдаемые формы взаимодействующих галактик, демонстрируется принципиальная возможность определения взаимной ориентации векторов углового вращения взаимодействующих галактик. Критически рассматриваются основные допущения, сделанные при математической формулировке проблем взаимодействия.

The results of digital simulation of tidal phenomena in the outer parts of galaxies when they come close to each other are presented. On the basis of the calculations made many observed forms of interacting galaxies are explained. The principle possibility for determination of reciprocal orientation of angular rotation vectors of interacting galaxies is demonstrated. The main assumptions made during enunciation of the interaction problem are critically considered.

Введение. Моделирование процесса взаимодействия галактик стало возможным после появления ЭВМ с достаточно высокой производительностью. Решением этой проблемы занимались многие авторы [1—7]. В большинстве модельных расчетов допускалось существенное упрощение задачи: взаимодействующие галактики рассматривались в рамках ограниченной модели, в которой два гравитационных центра — «ядра» галактик, содержащие основную массу, пролетают на небольшом расстоянии по гиперболическим или параболическим траекториям. Вокруг каждого из ядер в начале взаимодействия по круговым орбитам вращаются пробные частицы, отождествляемые со скоплениями либо звезд, либо газовых облаков, гравитационно друг с другом не взаимодействующих.

Если моделируются не слишком близкие пролеты, то такая модель, с одной стороны, корректно описывает приливные явления во внешних частях галактик, масса которых незначительна по сравнению с суммарной массой галактики, а с другой стороны, открывает возможность выполнения моделирования на ЭВМ среднего класса.

Учет самогравитации пробных частиц делает задачу самосогласованной, но вынуждает использовать ЭВМ с рекордной производительностью и большим объемом оперативной памяти. Более того, для получения в рамках самосогласованной задачи наблюдаемой спиральной структуры приходится искусственно вводить слишком большие начальные дисперсии скоростей звезд [8], либо погружать галактику в мощное сферическое гало населения 2-го типа с большой (до 80%) долей массы галактики [9]. Следует отметить, что моделирование процесса взаимодействия галактик в рамках ограниченной задачи является также хорошим приближением, если в качестве пробных частиц рассматривать облака газа [10]. Исследуя приливные возмущения газа, можно использовать их в качестве индикатора искажения формы взаимодействующих галактик, тем более что наблюдательные данные свидетельствуют о газовой природе мостов и перемычек у некоторых взаимодействующих галактик (VV 34, VV 245) [11].

Если рассматривать приливные явления в первоначально невозмущенном диске, имеющем конечную толщину d , то упрощенная формулировка проблемы взаимодействия галактик в известной мере удовлетворяет критерию, определяющему условия пренебрежения коллективными явлениями в диске, которые,

как отмечено в [12], могут играть существенную роль. Согласно оценке [12], коллективными явлениями в диске можно пренебречь, если выполняется условие

$$M_0/m_0 \geq 2R/d, \quad (1)$$

где M_0 — масса центральной области галактики; m_0 — суммарная масса пробных частиц; R и d — радиус и толщина диска соответственно. При величине $d=(0.1 \div 0.2)R$ для выполнения условия (1) необходимо, чтобы суммарная масса пробных частиц была в 10—20 раз меньше массы центрального тела. По крайней мере на периферии диска соотношение (1) выполняется с достаточной точностью.

Следует отметить, что моделирование процесса взаимодействия галактик в рамках ограниченной задачи показало возможность объяснения многих наблюдаемых форм взаимодействующих галактик. Особенно показательны в этом отношении работы [5], хотя при численном моделировании они, как и [4], рассчитывали траектории движения небольшого количества пробных частиц ($N=125 \div 150$). Более детально приливные явления промоделированы Н. Н. Козловым и соавторами [3]; в их работе число пробных частиц принималось равным 800 и 2000.

В работе [7] моделировалось приливное взаимодействие нашей Галактики и Большого Магелланова Облака. Модель при определенных параметрах взаимодействия показала хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых в радиодиапазоне искажений формы нашей Галактики.

Искажения формы галактики при выбросах масс из ядра исследовались в [13].

Привлечение методов машинного моделирования при морфологическом и спектрофотометрическом изучении таких сложных и неординарных объектов, которыми являются взаимодействующие галактики, как показали многочисленные исследования, существенно облегчает процесс изучения этих галактик, позволяет получить физические параметры, которые невозможно получить другими методами. Однако для объяснения той или иной морфологической особенности какой-либо взаимодействующей галактики часто необходимо просчитать значительное количество вариантов, как правило, с такими начальными условиями, с которыми ранее другие авторы расчеты не проводили.

Для морфологического изучения взаимодействующих галактик, экспериментальная часть которого проводится на 6-м телескопе БТА, авторы реализовали математическую модель, разработанную в [3], описывающую приливное взаимодействие галактик. На первом этапе мы выбрали упрощенную формулировку проблемы. Основные результаты, полученные в рамках этой модели, описаны в настоящей статье.

В будущем на более мощных ЭВМ авторы планируют реализовать модель приливного взаимодействия галактик в более строгой постановке.

1. Модель галактики. Основные уравнения. Согласно классическим работам К. Ф. Огородникова [14], звездное население галактики можно разбить на две качественно различные зоны: внутреннюю, более плотную, где звездная система ведет себя, как непрерывная среда, и внешнюю зону, где звездная система существенно дискретна.

Легко показать, что при наблюдаемых значениях пространственной плотности звезд во внешней зоне длина свободного пробега звезды существенно больше характерных размеров галактики, так что взаимодействием между отдельными звездами можно пренебречь. Звезды, входящие в состав внешней зоны, двигаются под действием «регулярной силы» (по терминологии [14]), обусловленной притяжением всей звездной системы по регулярным траекториям, которые чрезвычайно редко подвергаются возмущению со стороны близко пролетающих звезд. Так, для случая «сильного» сближения, при котором первоначальное направление движения звезд изменяется на угол $\sim 13^\circ$ [14], промежуток времени между двумя последовательными сближениями составляет $\sim 6.2 \cdot 10^{12}$ лет, т. е. почти на 2 порядка превышает возраст Вселенной.

При моделировании приливных явлений при не слишком близких проходах взаимодействующих галактик приливному возмущению будут под-

вержены в основном лишь внешние области галактик, содержащие небольшую долю суммарной массы; центральная часть галактики будет мало подвержена приливным возмущениям. При этих условиях звезды внешней зоны можно рассматривать как систему не взаимодействующих друг с другом материальных точек, вращающихся вокруг общего центра массы по кеплеровским орбитам, параметры которых для каждой пробной точки можно определить, решая ограниченную задачу трех тел: пробной точки и двух гравитационных центров — внутренних областей взаимодействующих галактик, потенциал которых с некоторой точностью можно считать постоянным.

В рамках данного приближения математическая формулировка задачи позволяет существенное упрощение и делает возможным решение задачи на ЭВМ среднего класса.

При моделировании процесса взаимодействия галактик нами, как и в [3], была принята следующая модель галактики: в начальный момент времени (в который возмущающее тело находится далеко и его действием можно пренебречь) в плоскости XOY вокруг гравитационного центра, помещенного в начале координат, по круговым орбитам против часовой стрелки (если смотреть со стороны оси z) вращаются M материальных точек. Радиус первой орбиты равен a_0 , радиус j -й орбиты задается соотношением $a_j = a_0 + j\Delta a$, где Δa — расстояние между соседними орбитами ($j=0, 1, 2, \dots, m$). Величина m определяет число орбит. На j -й круговой орбите равномерно расположены k материальных точек. Невозмущенные уравнения движения i -й точки, расположенной на j -й орбите, могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}x_j^i &= a_j \cos [\omega_j (t - t_0) + \Delta\varphi (i - 1)]; \\y_j^i &= a_j \sin [\omega_j (t - t_0) + \Delta\varphi (i - 1)]; \\z_j^i &= \dot{z}_j^i = 0; \\x_j^i &= -\omega_j y_j^i; \\y_j^i &= \omega_j x_j^i,\end{aligned}\quad (2)$$

где $i=1, 2, \dots, k$; $j=0, 1, 2, \dots, m-1$; $\Delta\varphi = 2\pi/k$; ω_j — угловая скорость вращения i -й точки, которая выражается через радиус j -й орбиты окружности и массу центрального тела \mathfrak{M}_0 посредством следующего соотношения [15]:

$$\omega_j = \sqrt{G\mathfrak{M}_0/a_j^3},$$

(G — универсальная гравитационная постоянная).

Величины k и m принимались равными 50 и 16 соответственно. Возмущаемое тело аппроксимируется материальной точкой, масса которой равна \mathfrak{M}_1 . Закон движения точки \mathfrak{M}_1 задается.

При этих допущениях уравнения движения какой-либо пробной точки $M_i(x_i, y_i, z_i)$ под действием сил тяготения гравитационных центров \mathfrak{M}_0 и \mathfrak{M}_1 в заданной системе координат XYZ могут быть записаны в виде [15]:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_i &= -G\mathfrak{M}_0 x_i / r_i^3 + G\mathfrak{M}_1 ((x' - x_i) / \Delta_i^3 - x' / r'^3); \\ \ddot{y}_i &= -G\mathfrak{M}_0 y_i / r_i^3 + G\mathfrak{M}_1 ((y' - y_i) / \Delta_i^3 - y' / r'^3); \\ \ddot{z}_i &= -G\mathfrak{M}_0 z_i / r_i^3 + G\mathfrak{M}_1 ((z' - z_i) / \Delta_i^3 - z' / r'^3),\end{aligned}\quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}r_i &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}; \\ \Delta_i &= \sqrt{(x_i - x')^2 + (y_i - y')^2 + (z_i - z')^2}; \\ r' &= \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}; \\ i &= 1, 2, \dots, M.\end{aligned}\quad (4)$$

Уравнения движения возмущаемой точки $\mathfrak{M}_1(x', y', z')$ суть:

$$\begin{aligned}\ddot{x}' &= -G(\mathfrak{M}_0 + \mathfrak{M}_1) x' / r'^3; \\ \ddot{y}' &= -G(\mathfrak{M}_0 + \mathfrak{M}_1) y' / r'^3; \\ \ddot{z}' &= -G(\mathfrak{M}_0 + \mathfrak{M}_1) z' / r'^3.\end{aligned}\quad (5)$$

Для перехода к безразмерным величинам мы использовали следующие единицы: в качестве единицы длины был выбран радиус галактики R_0 , в качестве единицы времени использовалась величина $(GM_0/R_0^3)^{-1/2}$, единица скорости однозначно определяется единицей длины и единицей времени.

Так, например, для типичных значений $M_0 = 10^{11} M_\odot$ и для величины $R_0 = 20$ кпс единица безразмерного времени соответствует $1.331 \cdot 10^8$ лет, а единица безразмерной скорости соответствует величине 147 км/с.

Если в систему уравнений (3—5) ввести безразмерные единицы длины R_0 и времени и с помощью соотношений, определяющих компоненты скорости i -й точки перейти от системы дифференциальных уравнений 2-го порядка к системе 1-го порядка, то можно после тривиальных преобразований получить уравнения движения возмущенного движения i -й точки в виде:

$$\begin{aligned} dy_4^i/d\tau &= -y_4^i/r_{ik}^3 + \mu((y_7 - y_4^i)/g_{ik} - y_7/r); \\ dy_5^i/d\tau &= -y_5^i/r_{ik}^3 + \mu((y_8 - y_5^i)/g_{ik} - y_8/r); \\ dy_6^i/d\tau &= -y_6^i/r_{ik}^3 + \mu((y_9 - y_6^i)/g_{ik} - y_9/r); \\ dy_{10}^i/d\tau &= -(1 + \mu)y_7/r; \\ dy_{11}^i/d\tau &= -(1 + \mu)y_8/r; \\ dy_{12}^i/d\tau &= -(1 + \mu)y_9/r; \\ dy_4^i/d\tau &= y_4^i; \\ dy_5^i/d\tau &= y_5^i; \\ dy_6^i/d\tau &= y_6^i; \\ dy_7^i/d\tau &= y_{10}^i; \\ dy_8^i/d\tau &= y_{11}^i; \\ dy_9^i/d\tau &= y_{12}^i. \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \mu &= M_1/M_0; \quad r_{ik} = \sqrt{(y_4^i)^2 + (y_5^i)^2 + (y_6^i)^2}; \quad \tau = t(GM_0/R_0^3)^{1/2}; \\ g_{ik} &= [(y_4^i - y_7)^2 + (y_5^i - y_8)^2 + (y_6^i - y_9)^2]^{3/2}; \\ r &= (y_7^2 + y_8^2 + y_9^2)^{3/2}, \quad i = 1, 2, \dots, M. \end{aligned}$$

При расчетах мы принимали M равным 800. При этих значениях M нам необходимо было интегрировать систему $6 \cdot 800 + 6$ дифференциальных уравнений первого порядка. Очевидно, что без применения ЭВМ с достаточно высокими параметрами решение этой задачи невозможно, так как M ограниченных задач 3 тел не имеют известных интегралов.

2. Начальные условия. Специфика расчетов. Для интегрирования системы (6) необходимо задать соответствующие начальные условия, определяющие первоначальное положение и скорость i -й пробной точки, и начальное положение и скорость возмущающего тела M_1 .

Алгоритм вычисления был построен, как и в [3]. В момент времени τ_0 задавались координаты (x_0, y_0, z_0) и величины компонент скорости (v_x^0, v_y^0, v_z^0) возмущающего тела, которые однозначно определяли тип пролетной траектории, перигентрическое расстояние и величину скорости возмущающего тела в перигентре. Координаты (x_0, y_0, z_0) задавались, исходя из условия, что гравитационное воздействие возмущающего тела на траектории пробных частиц в начальный момент пренебрежимо мало, так чтобы движение пробных частиц было невозмущенным и описывалось уравнениями (2).

Начальные условия для каждой i -й точки рассчитывались на момент времени $|\tau_0|$ по формулам (2). Интегрирование системы (6) производилось модифицированным методом Рунте—Кутта четвертого порядка [16], погрешность которого при шаге интегрирования h составляет $\sim \rho(\xi)h^4$, где $\rho(\xi)$ — главный член погрешности. Значение величины шага интегрирования выбиралось равным 0.01—0.025 о. е. в зависимости от типа пролетной траектории и обеспечивало точность интегрирования не меньше 1%.

В момент $\tau=0$ возмущающая галактика проходила перигентр и начинала удаляться от возмущаемой галактики. Интегрирование системы (6) мы продолжали до момента времени $\tau = |\tau_0|$, считая, что можно с этого времени воз-

мушениями от пролетающей галактики пренебречь и рассчитывать движение i -й точки по формулам невозмущенного кеплеровского движения, параметры которого определялись для каждой i -й точки на момент $\tau = |\tau_0|$ по соответствующим формулам [15].

Расчет траекторий невозмущенного движения i -й точки мы продолжали до момента времени, равного 2—3 величинам $|\tau_0|$. Описанная процедура позволила существенно сократить машинное время при моделировании приливных явлений на ЭВМ, так как при расчете траектории движения i -й точки по формулам невозмущенного движения нет необходимости проводить интегрирование довольно сложной системы дифференциальных уравнений (6).

Из-за ограниченного объема памяти ЭВМ М-222, на которой производились все расчеты, мы организовали вычислительный процесс следующим образом. Мы условились запоминать массивы координат и скоростей всех i -х точек в моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k1}$ при интегрировании системы (6) и в моменты $\tau_{k1}, \tau_{k1+1}, \dots, \tau_{k1+k2}$ при вычислении координат и скоростей i -й точки по формулам невозмущенного движения. Так как для запоминания координат и компонентов скорости каждой точки необходимо 6 ячеек оперативной памяти, то нетрудно подсчитать, что за один раз в оперативном буфере емкостью 4096 слов, который был размещен в МОЗУ-2 ЭВМ М-222, мы можем разместить информацию о положениях и скоростях l различных пробных точек; величину l нетрудно подсчитать по формуле

$$l = E((4096/6 - k1)/(k1 + k2)) - 1, \quad (7)$$

где E — целая часть числа.

Совокупность координат точек M , рассчитанных на какой-либо фиксированный момент τ_i , мы для краткости изложения назовем кадром.

После заполнения оперативного буфера результатами расчетов мы переписывали его содержимое в долговременный буфер, который был организован на магнитной ленте, а оперативный буфер освобождался для очередной порции информации.

Легко понять, что при общем числе пробных точек M эту процедуру необходимо повторить $n+1$ раз, где $n = E(M/l)$, в $(n+1)$ -й раз оперативный буфер может заполниться не полностью.

Описанная выше организация вычислительного процесса позволяла проводить моделирование приливного взаимодействия галактик для любого числа пробных точек M , делала возможным прекращение счета после очередного заполнения оперативного буфера, обеспечивала минимальные потери машинного времени при аварии в вычислительном процессе.

Единственным недостатком такой организации вычислений является необходимость «распаковки» и формирования кадров, содержащих координаты всех точек в какой-либо момент τ_i , поскольку информация о положениях и скоростях этих точек оказывается «размазанной» по всем зонам долговременного буфера на магнитной ленте.

Операция формирования кадров выполнялась после окончания расчетов с помощью сервисных программ, обеспечивающих считывание зон, сортировку данных, компоновку кадра и запись этого кадра на магнитную ленту.

Описанные алгоритмы были запрограммированы на алгоритмическом языке «АЛГОЛ 60» и оттранслированы с помощью транслятора ТА-1М. Как уже отмечалось, число пробных точек в наших расчетах принималось равным 800. С одной стороны, выбранное число пробных точек существенно увеличивало подробности расчетов по сравнению с [4, 5], а с другой — требовало приемлемых промежутков машинного времени, которые в зависимости от типа пробной траектории составляли 10—100 ч.

При выполнении машинного моделирования процесса взаимодействия галактик с числом пробных частиц M , равным 800, необходимо иметь в распоряжении аппаратные и математические средства для быстрой визуализации расчетов. В ВЦ САО были разработаны для этих целей средства визуализации расчетов как на базе рулонных и планшетных графопостроителей, работаю-

щих в режиме off-line, так и на базе универсального графического дисплея УГД-43, работающего в режиме on-line на линии связи с ЭВМ М-222 [17].

Обычно при моделировании мы выводили на экран 30—40 кадров, демонстрирующих историю развития приливных возмущений в диске галактики.

Нами были созданы также программные средства, которые позволяли визуализировать на дисплее пространственные картинки в различных проекциях.

При просмотре кадров на дисплее мы имели возможность документирования результатов расчетов на киноплёнку кинокамерой.

С помощью этой аппаратуры был снят фильм, который наглядно демонстрировал развитие возмущений во времени.

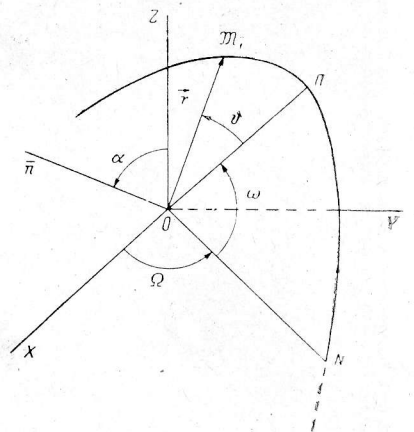


Рис. 1. Кеплеровские элементы орбиты возмущающего тела.

N — восходящий узел орбиты; Π — перигириум орбиты; Ωr — положение возмущающей точки; r — ее радиус-вектор; α — наклон орбиты; Ω — долгота восходящего узла; ω — долгота перигириума; φ — истинная аномалия.

3. Результаты расчетов и сравнение с наблюдениями. Для описания типа пролетной траектории мы использовали кеплеровские элементы орбиты возмущающего тела, смысл которых ясен из рис. 1.

Всего было рассчитано около 40 различных вариантов взаимодействия, в которых варьировались: наклонение плоскости орбиты возмущающего тела α ($\alpha=0, 45, 180^\circ$), соотношение масс главной \mathcal{M}_0 и возмущающей \mathcal{M}_1 галактик μ ($\mu=0.5, 1.0, 2.0$), величина перигирического расстояния q ($q=0.9, 1.111, 1.5, 1.7, 2.0, 3.0$ о. е.), величина перигирической скорости v_{Π} ($v_{\Pi}=v_{\text{пар}}, 2v_{\text{пар}}, 6v_{\text{пар}}$; $v_{\text{пар}}$ — параболическая скорость), величина долготы восходящего узла орбиты Ω ($\Omega=0, 90^\circ$) и величина долготы перигириума ω ($\omega=0, 90^\circ$). Во всех вариантах приливные возмущения рассчитывались во внешней зоне галактики, при величине $a_0=0.2$ о. е. В таблице приведены численные значения параметров взаимодействия, для которых проводилось моделирование, и указаны соответствующие номера рисунков, на которых изображены результаты расчетов.

Следует отметить, что на рис. 2—7 изображено развитие возмущений в теле основной галактики в проекции на плоскость XOY . Естественно, в тех вариан-

Номер рисунка	Соотношение масс $\mu = \mathcal{M}_1/\mathcal{M}_0$	Угол наклона орбиты α	Эксцентриситет орбиты e	Долгота восходящего узла Ω	Долгота перигириума ω	Перигирические		Моменты времени τ_i , о. е., соответствующие кадрам				
						расстояние q , о. е.	скорость v_{Π} , о. е.	1	2	3	4	5
2, а	2.0	90°	7.0	90°	0°	1.111	4.648	0.4	0.6	1.2	2.0	3.2
2, б	1.0	90	1.0	90	0	1.5	1.897	0.5	2.0	3.5	7.5	12.0
2, в	1.0	0	2.0	0	0	0.9	1.897	0.25	0.05	0.15	0.35	0.55
3, а	1.0	90	3.0	90	0	0.9	1.897	0.25	0.05	0.15	0.35	0.55
3, б	0.5	90	3.0	90	0	0.9	1.897	0.15	0.35	0.45	0.55	1.05
3, в	1.0	90	7.0	90	0	1.111	3.794	0.70	1.4	1.85	2.5	4.00
4, а	1.0	45	3.0	0	90	0.9	1.897	0.75	0.55	0.15	0.05	0.35
4, б	1.0	60	3.0	0	90	0.9	1.897	0.15	0.15	0.35	0.55	4.55
4, в	1.0	45	7.0	0	90	1.111	3.794	0.8	1.1	1.4	1.6	4.0
5, а	1.0	90	7.0	0	90	1.111	3.794	0.8	1.1	1.75	2.5	4.0
5, б	2.0	90	7.0	0	90	1.111	4.648	0.6	0.9	1.3	2.0	3.5
5, в	1.0	90	1.0	0	90	1.5	1.633	1.0	2.0	4.5	6.0	8.0
6, а	1.0	135	7.0	0	90	1.111	3.794	1.1	1.3	1.5	1.6	1.85
6, б	2.0	135	7.0	0	90	1.111	4.648	0.9	1.3	1.6	2.0	3.2
7, а	2.0	45	7.0	0	90	1.111	4.648	0.2	0.5	0.8	1.7	3.5
7, б	1.0	45	1.0	0	90	1.5	1.633	0.5	1.5	2.5	8.85	22.0

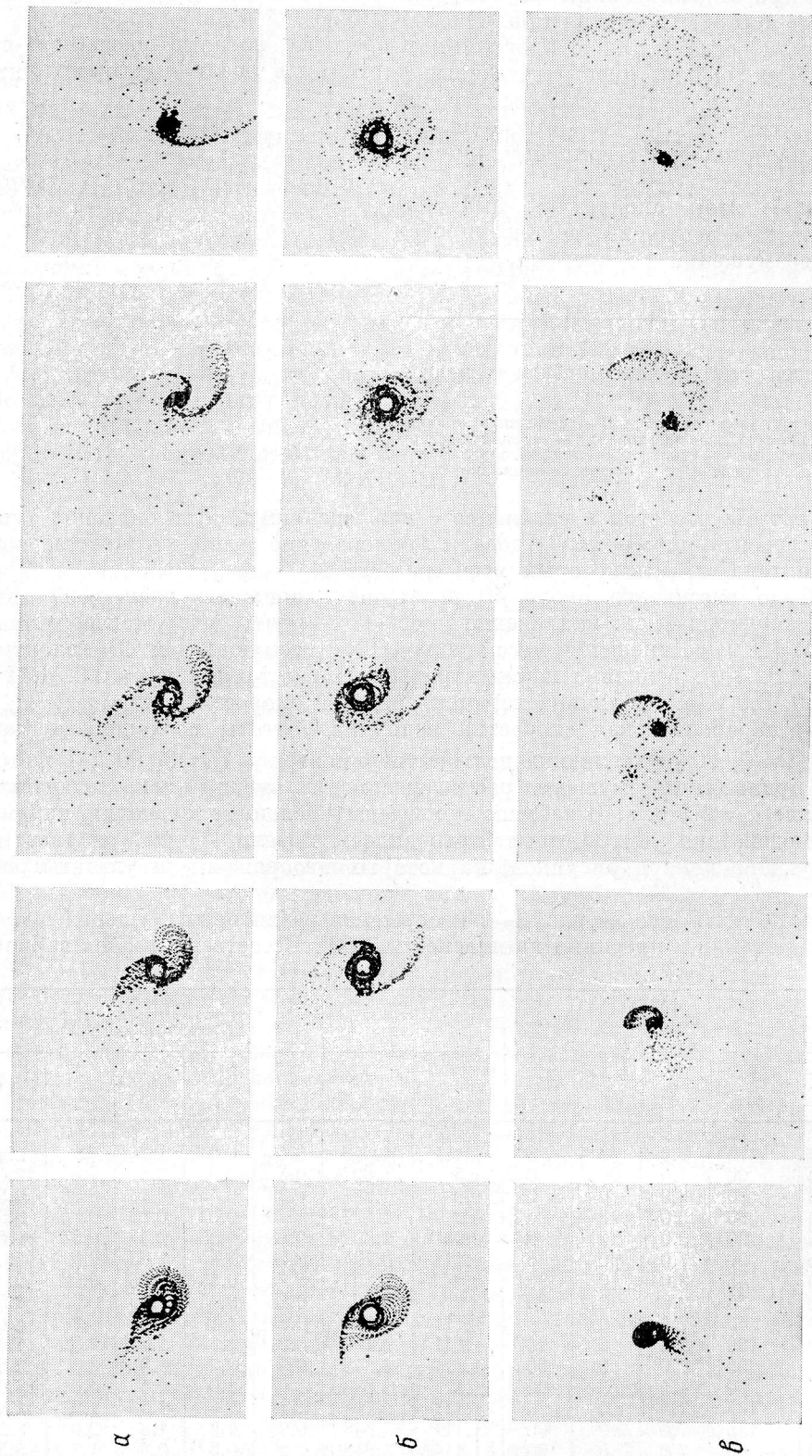


Рис. 2. Развитие приливных возмущений в теле основной галактики.

Параметры взаимодействия приведены в таблице. Ось X направлена вниз, ось Y — влево; а — на конечной стадии взаимодействия образуется почти прямолинейный хвост, второй спиральный рукав к этому времени полностью диссипирует; б — образуется два семейства спиральных образований: — внешнее двухрукавное и внутреннее многорукавное; в — от основной галактики отрывается и уходит вместе со спутником значительная доля вещества.

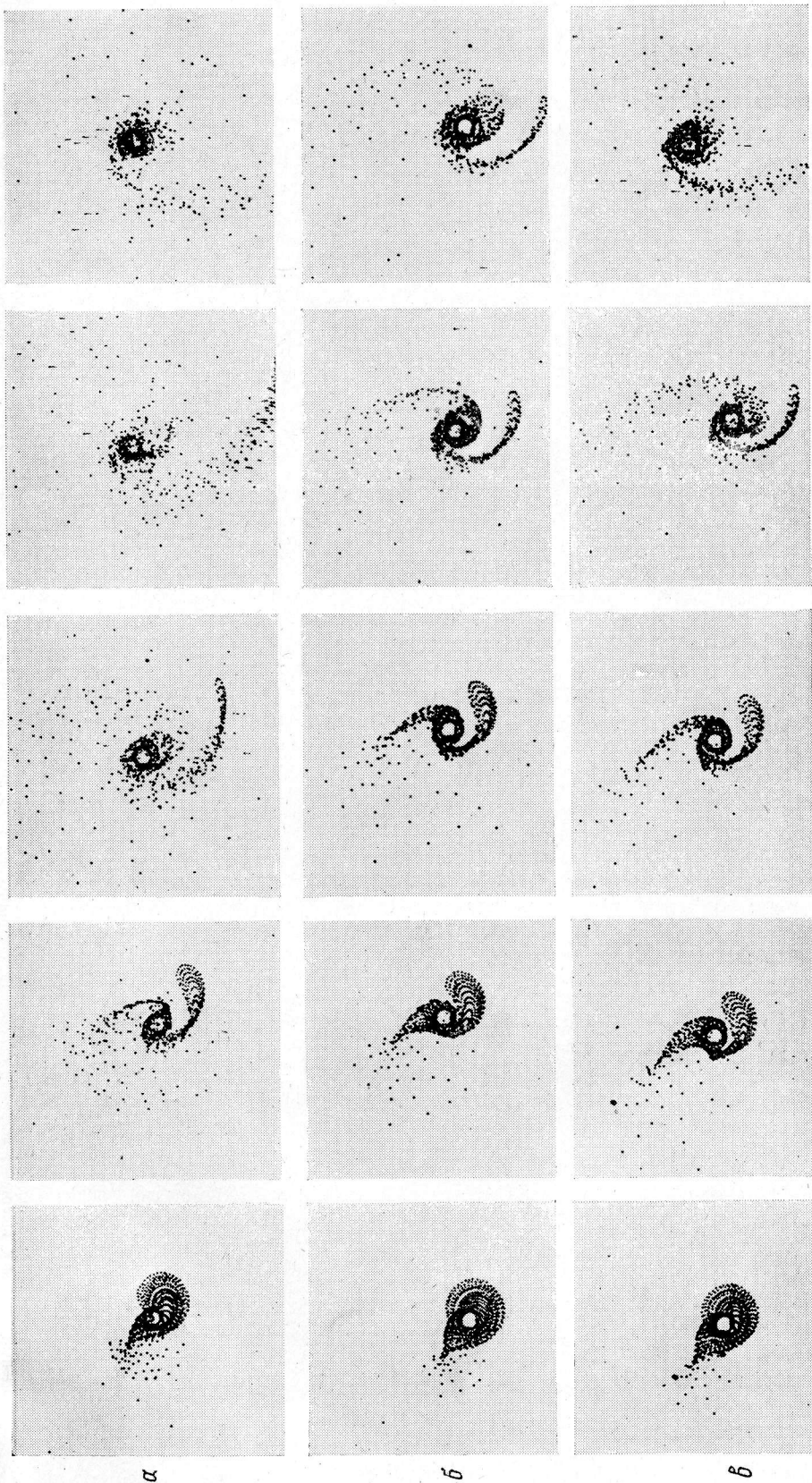


Рис. 3. Пролет в плоскости, перпендикулярной к картинной.
а — в конечной стадии взаимодействия внутренняя и внешняя спиральные структуры диссипируют, в центральной области возникает тело стохастической формы; *б* — образуется баролоподобная структура в центре, заметно различие в скорости распада «верхнего» и «нижнего» спиральных рукавов; *в* — тестовый вариант взаимодействия с теми же параметрами взаимодействия, что и в [3].

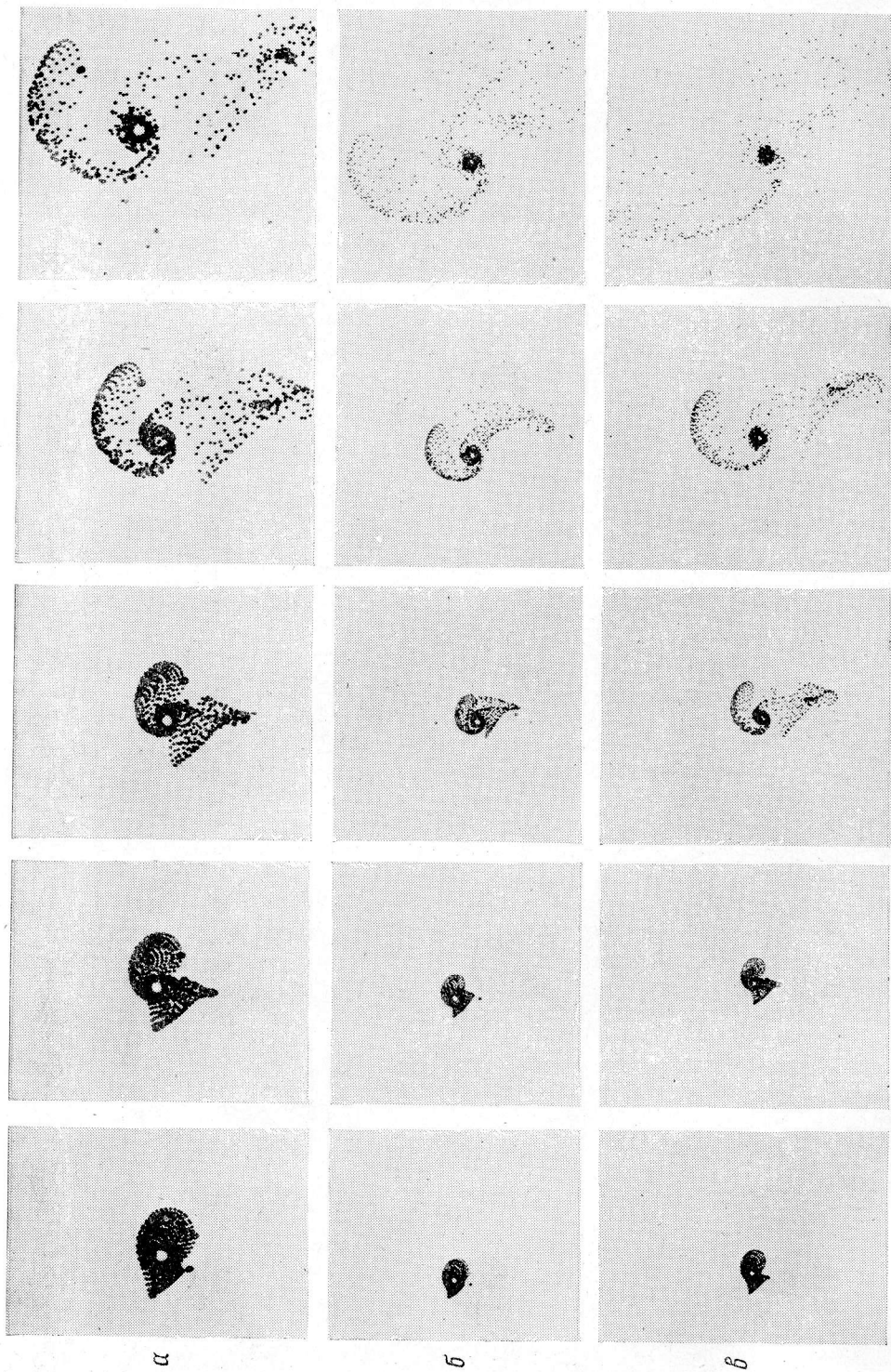


Рис. 4. Пролет спутника в плоскости, наклонной к картинной на угол 45° (а и б) и 60° (е).
 а — пролиженный спиральный рукав, образующийся в начале взаимодействия, эволюционирует в тонкий прямолинейный хвост; б — одновременно со спиральным рукавом возникает широкая перемычка, соединяющая галактики, как и в случае а; в — более далекий по сравнению со случаем а вариант взаимодействия; как и в предыдущих вариантах отрывается и уходит вместе со спутником существенная доля массы.

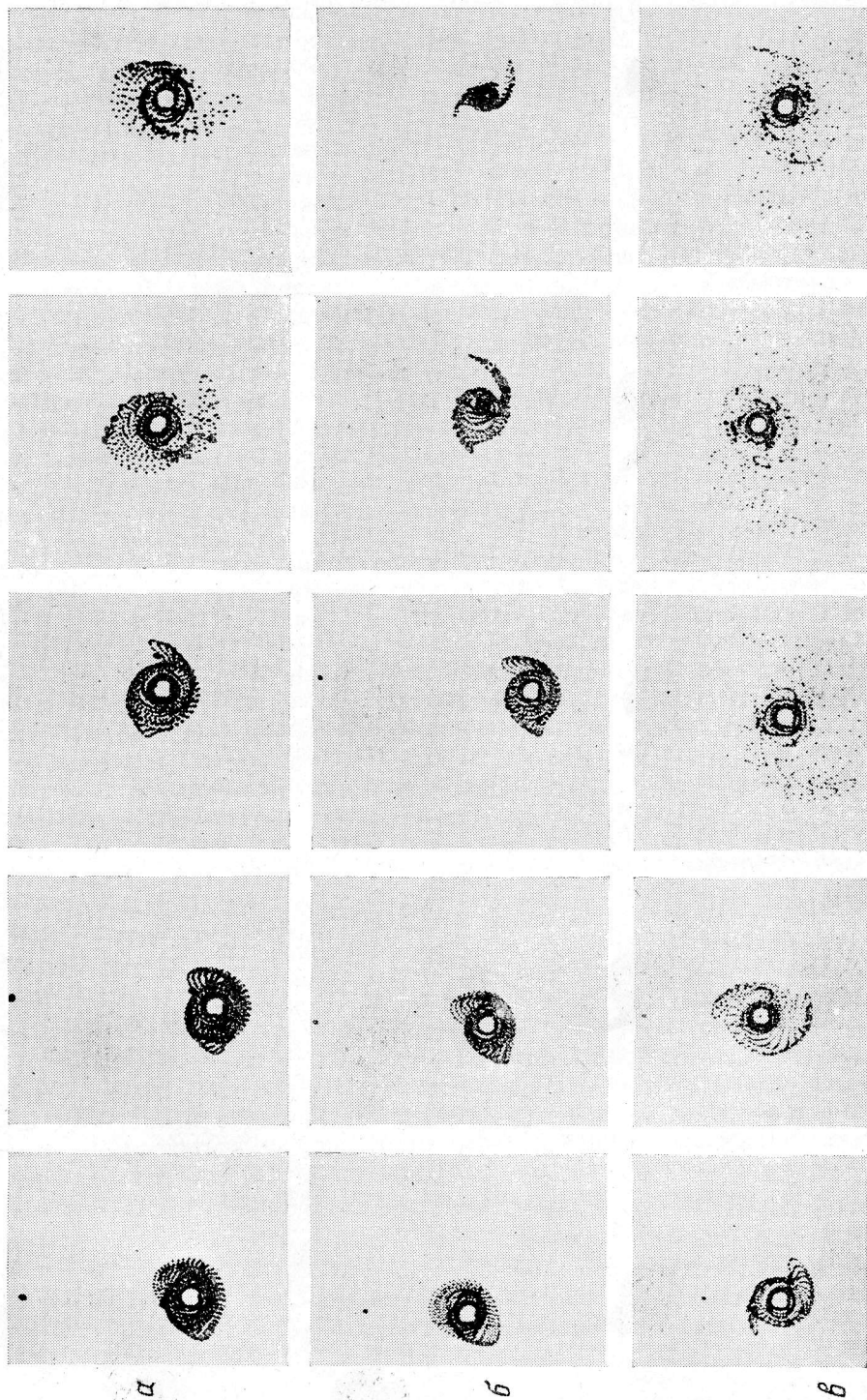
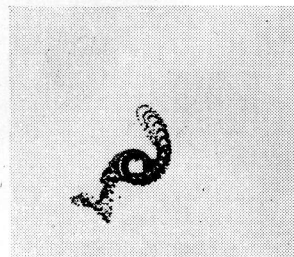
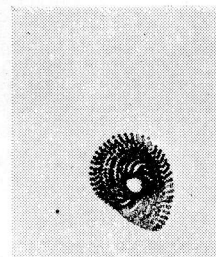
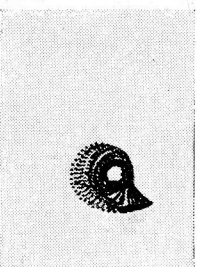
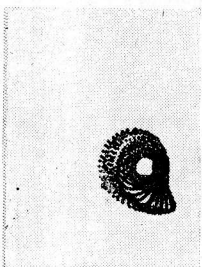
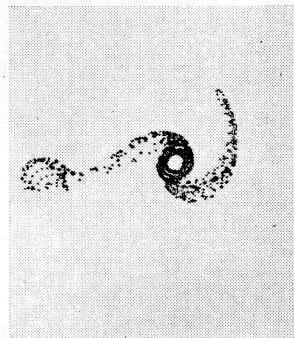
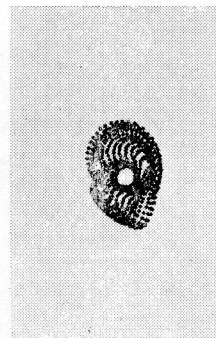
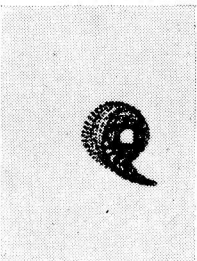
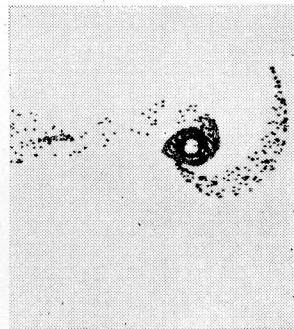
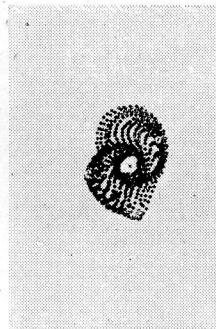
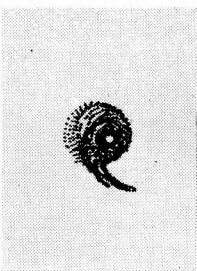
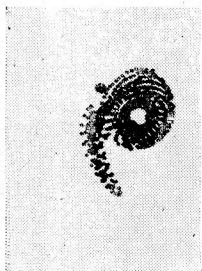
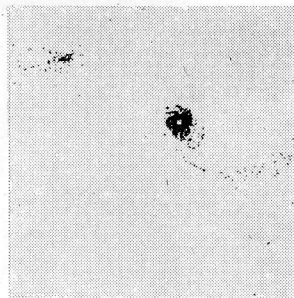
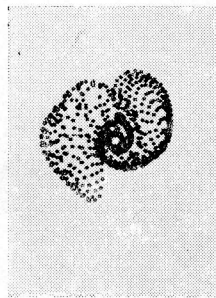
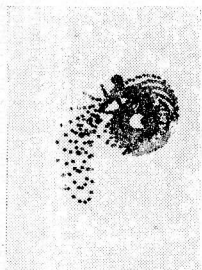
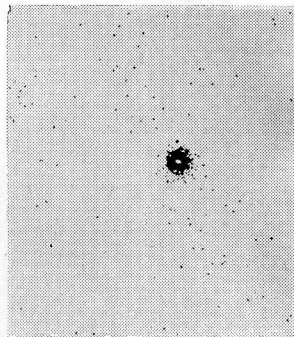
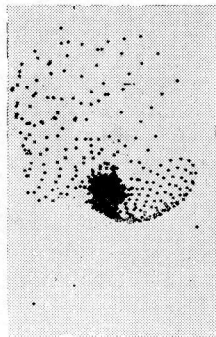
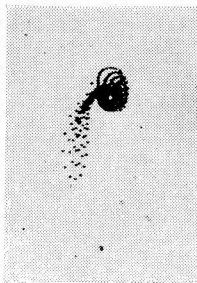
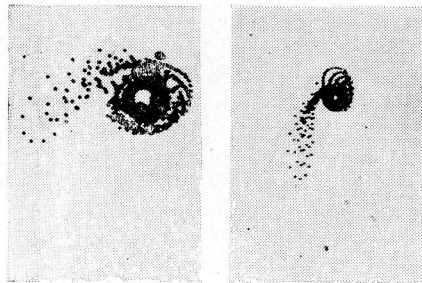


Рис. 5. Пролет в плоскости, перпендикулярной к каргинной.

а — приливные возмущения выражены слабо, образуются лишь зачаток спирали; б — случай более мощного возмущения, возникает хорошо выраженный спиральный рукав и на противоположной стороне конусообразный выступ; в — при медленном пролете в начале взаимодействия образуются четко выраженные внешние спирали, из баролодбной структуры развиваются внутренние спирали.



a

b

a

b

тах, в которых моделировались пролеты возмущающей галактики под углом к плоскости основной галактики, приливные искажения «выходили» из плоскости, в которой находится диск возмущаемой галактики.

На рис. 8, а приведены пространственные изображения приливных возмущений при тех же значениях параметров задачи, что и в случае, представленном на рис. 7, б. Кадры, расположенные по горизонтали, соответствуют моментам $\tau=0.20, 1.5, 3.0$ и 5.0 о. е., а на кадрах по вертикали изображен вид приливных возмущений в различных проекциях. Каким образом задавались направления координатных осей, изображено в последнем столбце. Видно, как сильно изменяется форма возмущенной галактики в зависимости от направления, с которого она рассматривается.

На рис. 8 представлены пространственные изображения приливных возмущений, «плоская» картина которых приведена на рис. 2, б, в моменты $\tau=1.0, 2.0, 3.5$ и 6.0 о. е. Хорошо заметно искажение плоскости основной галактики; образовавшаяся спиральная структура располагается под углом 45° к плоскости первоначального движения пробных частиц.

Результаты моделирования далеких ($q=3.0$ о. е.) и «быстрых» ($v_{\text{п}}=6v_{\text{пар}}$) пролетов показали, что приливные возмущения в этих случаях слабы, искажения формы первоначального диска имеют форму чечевицы, спиральные рукава, мосты и перемиčky не образуются.

В случае близких ($q=1 \div 1.5$ о. е.) и медленных ($v_{\text{п}}=v_{\text{пар}}$) пролетов почти всегда образуются спиральные рукава, причем, как правило, один из них развит сильнее и в нем сосредоточено большее количество вещества. Время жизни рукавов также различно. Сравнение результатов численного моделирования приливных взаимодействий галактик с большим количеством снимков, полученных на БТА и содержащихся в атласах [18, 19], показало, что многие наблюдаемые формы взаимодействующих галактик можно объяснить, подбирая соответствующие параметры взаимодействия.

В реальных условиях возмущающая галактика, как и основная, имеет конечные размеры. Некоторые авторы проводили расчеты приливных возмущений, окружая и возмущающую галактику облаком пробных частиц [10].

Можно показать, что «с точки зрения» пробных частиц возмущающей галактики M_2 их приливные возмущения будут такими же, как и в теле основной галактики, в том случае, если массы галактик равны и векторы их угловых скоростей вращения параллельны и направлены в одну сторону (рис. 9). В этом случае для определения приливного искажения тела спутника достаточно провести расчет приливных возмущений в теле основной галактики и развернуть картину на 180° относительно центра масс в плоскости основного тела. На рис. 10 приведены примеры подобных расчетов приливных явлений в теле основной галактики и спутника в различные фазы взаимодействия. Пролет осуществлялся по параболическим траекториям, соотношение масс принималось равным $\mu=1.0$, ориентации векторов угловых скоростей и начальные радиусы галактик были одинаковы. Перигалактическое расстояние задавалось равным $q=1.5$ о. е.

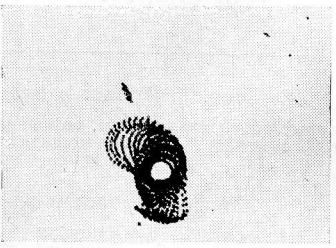
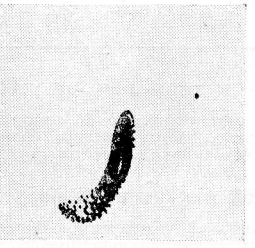
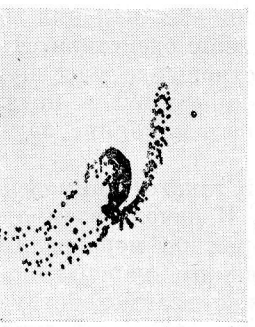
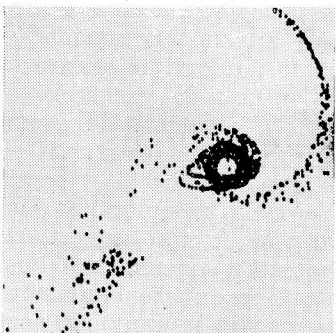
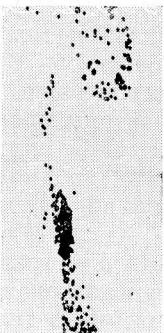
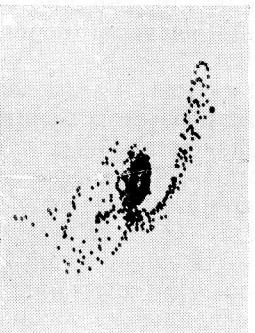
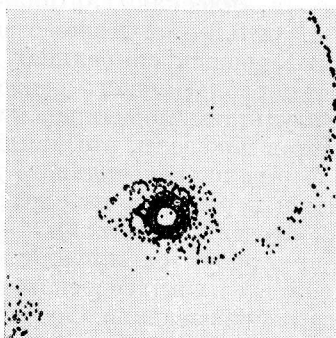
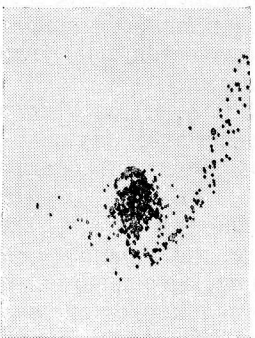
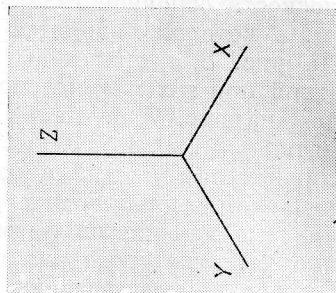
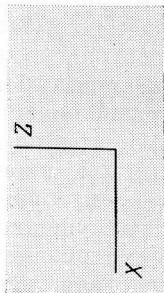
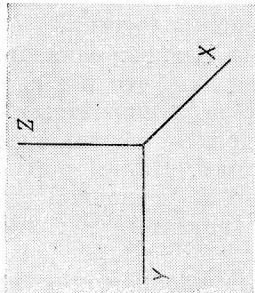
Следует отметить, что характерной чертой такого взаимодействия является симметричная форма приливных искажений. В начале взаимодействия галактики соединены широкой перемичкой, которая по мере взаимного удаления может распадаться на две тонкие изолированные перемиčky, идущие почти параллельно друг другу. Вероятно, в случае взаимодействующих галактик Арп 241 (рис. 11) реализуется подобный тип взаимодействия.

Рис. 6. Пролет в плоскости, наклоненной к картинной на угол 135° .

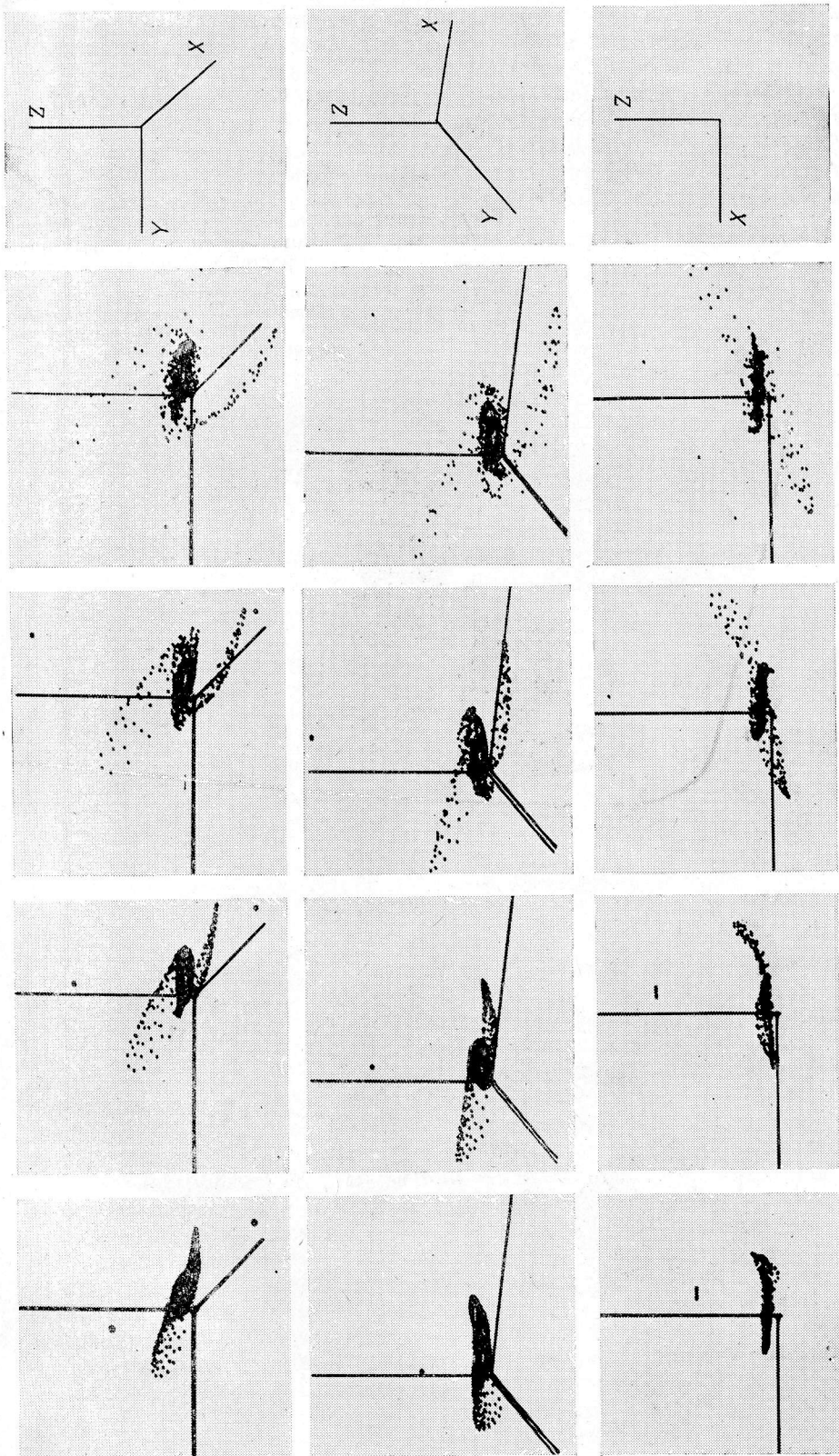
а — конусообразный выступ, направленный в сторону от возмущающего тела, эволюционирует в одну-единственную спираль; б — более мощное, чем в предыдущем случае, взаимодействие, форма «хвостика» менее размыта, в конечной стадии образуется тело кометообразной формы.

Рис. 7. Пролет в плоскости, наклоненной к картинной на угол 45° .

а — почти симметричные спирали эволюционируют: верхняя — в протяженное облако точек, нижняя — в размытый выброс; б — образуется перемичка и спиральный рукав, захваченное спутником вещество уходит с ним, образуя вокруг него хорошо выраженную спиральную структуру (рис. 6).



D



б

Рис. 8. Пространственное изображение приливных возмущений в теле основной галактики. Кадры по горизонтали представляют развитие возмущений во времени, кадры по вертикали — вид возмущений в различных проекциях. Параметры взаимодействия описаны в тексте.

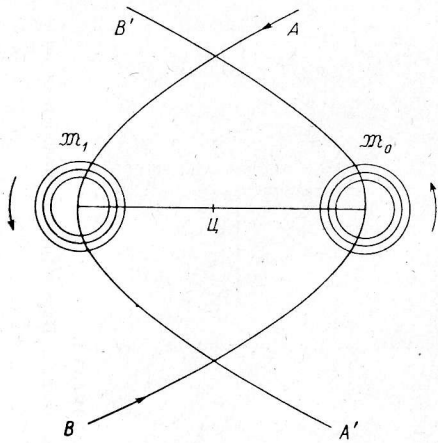


Рис. 9. Схема пролета галактик M_0 и M_1 в случае одинаковой ориентации векторов угловых скоростей.

ζ — центр системы; AA' — траектория галактики M_1 ; BB' — траектория галактики M_0 . Стрелками показано направление вращения пробных частиц, окружающих центры M_0 и M_1 .

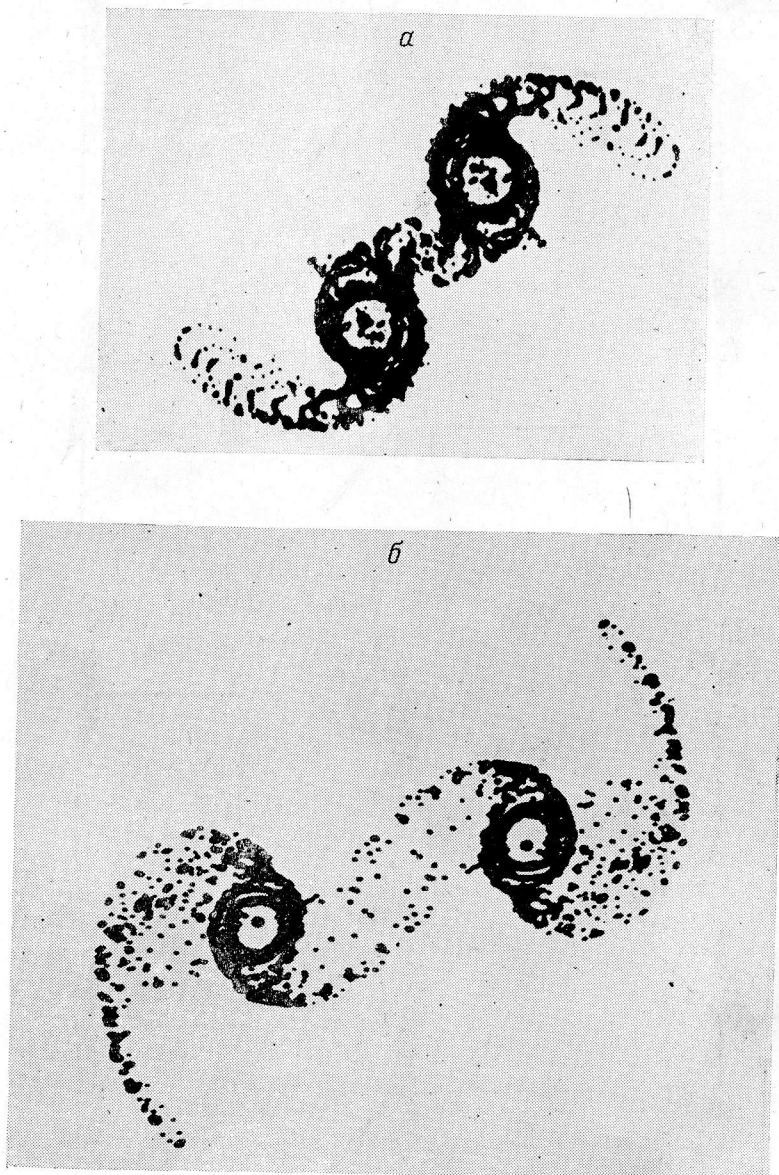


Рис. 10. Приливные возмущения в теле основной галактики и спутника в случае одинаковой ориентации векторов угловых скоростей.

Стадии взаимодействия; a — начальная, $б$ — промежуточная.

На рис. 12 приведен прямой снимок галактики VV9, на котором отчетливо видна далеко простирающаяся спираль явно приливной природы. Спутник и основная галактика соединены широким мостом вещества. При величине красного смещения галактики VV9, равной 4110—4200 км/с [21], и значении постоянной Хаббла $H=75$ км/(с·Мпс), длина приливного спирального рукава составляет величину, равную примерно 45 кпс (ср. с размером приливного рукава на рис. 4, б, равного $\sim 4-5R_0$). В галактике VV9 мы, вероятно, также наблюдаем взаимодействие основного тела и спутника, пролетающего в плоскости, почти совпадающей с картинной (разность лучевых скоростей компонен-



Рис. 11. Прямая фотография Арпа [19] взаимодействующих галактик Арп 241, у которых, вероятно, векторы угловых скоростей имеют одинаковую ориентацию.

тов мала $\Delta v \approx 0 \div -90$ км/с); векторы их угловых скоростей, вероятно, направлены в одну сторону.

В том случае, если векторы угловых скоростей у взаимодействующих галактик направлены в противоположные стороны, искажения формы возмущающей галактики будут иметь вид, отличный от приливных искажений основной галактики, так как с «точки зрения» пробных частиц, обращающихся вокруг основной галактики, возмущающее тело движется в ту же сторону, в которую направлено орбитальное движение пробных частиц. С «точки зрения» же пробных частиц, обращающихся вокруг возмущающей галактики, основное тело движется в направлении, противоположном их орбитальному движению, приливное возмущение каждой точки в этом случае будет длиться меньшее время и искажения формы тела возмущающей галактики будут менее сильными.

Ясно, что для определения приливных искажений в теле возмущающей галактики в этом случае необходимо компоновать кадры различных вариантов, например кадры, подобные изображенным на рис. 2 и 6. Если провести описанную процедуру компоновки, то получающиеся конфигурации приливных искажений похожи на взаимодействие галактики типа «телефон» (VV19, рис. 13): в теле основной галактики приливные возмущения сильно развиты, заметен хорошо выраженный спиральный рукав (например, рис. 2, второй кадр), центры галактик соединены конусообразным мостом вещества; приливные возмущения в теле спутника развиты слабо, из тела спутника выходит слабо изогнутый отросток, как на рис. 6, а, третий кадр. В галактике VV 674 (рис. 14)

мы, вероятно, также наблюдаем случай противоположной ориентации векторов угловых скоростей компонентов.

Проведенные модельные расчеты позволяют с некоторой вероятностью определять взаимную ориентацию векторов угловых скоростей галактик по их изображениям.

В некоторых случаях при изучении морфологии взаимодействующих галактик (при отсутствии информации о величине лучевых скоростей компонентов) возникает вопрос, не обусловлена ли наблюдаемая картина эффектами проекции.

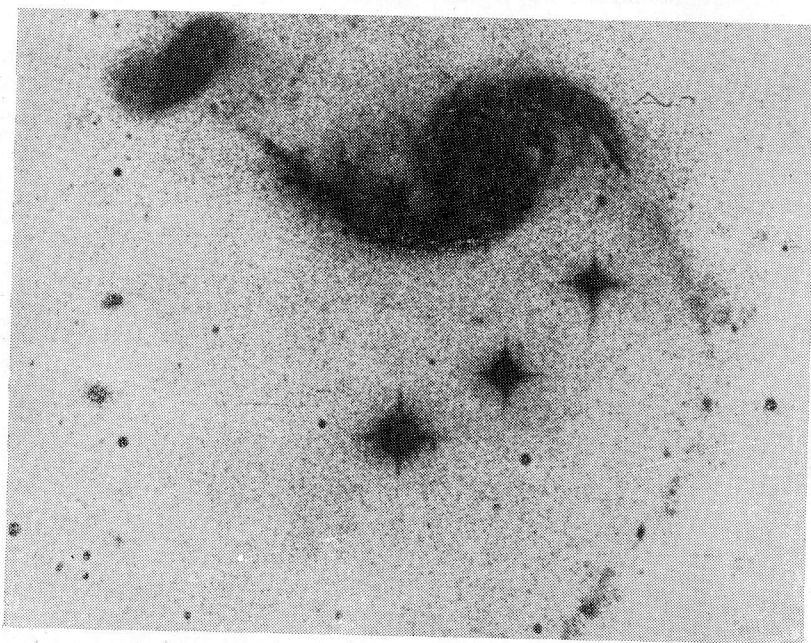


Рис. 12. Пример приливной спирали в галактике VV9 (снимок Арпа).

Расчеты показывают, что неплохим критерием физического родства наблюдаемой пары или группы галактик может служить усиление одного из двух спиральных рукавов в компонентах.

Многообразие наблюдаемых форм взаимодействующих галактик, как показывает просмотр пространственных изображений модельных расчетов, вероятно, объясняется эффектами проекции и различным «возрастом» приливных возмущений.

Заключение. Изучение большого количества крупномасштабных фотографий взаимодействующих галактик, полученных на БТА, машинные эксперименты по моделированию приливных взаимодействий галактик позволили установить, что определяющим критерием физического родства близко расположенных на небесной сфере галактик, если экспериментатор не имеет спектров этих объектов, может служить наличие в них асимметричных спиральных структур, хвостов, перемычек, искажения плоскости симметрии.

Варьируя параметры взаимодействия в машинных экспериментах, можно объяснить большинство наблюдаемых форм взаимодействующих галактик, что, вероятно, указывает на преобладающую роль в механизме взаимодействия обычной ньютоновской гравитации. С точки зрения приливного взаимодействия могут быть объяснены двойные перемычки, конусы, противохвосты и многие другие экзотические детали, наблюдаемые в реальных системах и привлекающие критиками приливной теории в качестве доказательств невозможности объяснения этих явлений приливными взаимодействиями.

Следует отметить, что лучшее согласие результатов машинного эксперимента с наблюдаемыми формами взаимодействующих галактик достигается при медленных пролетах (параболических и эллиптических).

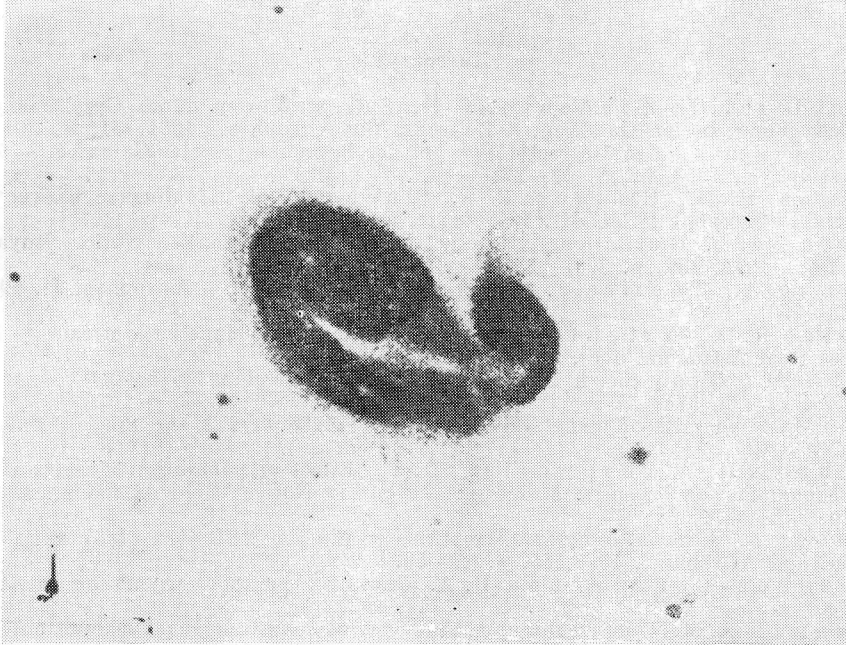


Рис. 13. Снимок Арпа взаимодействующей галактики VV19, в которой, вероятно, векторы угловых скоростей компонент имеют противоположную ориентацию.

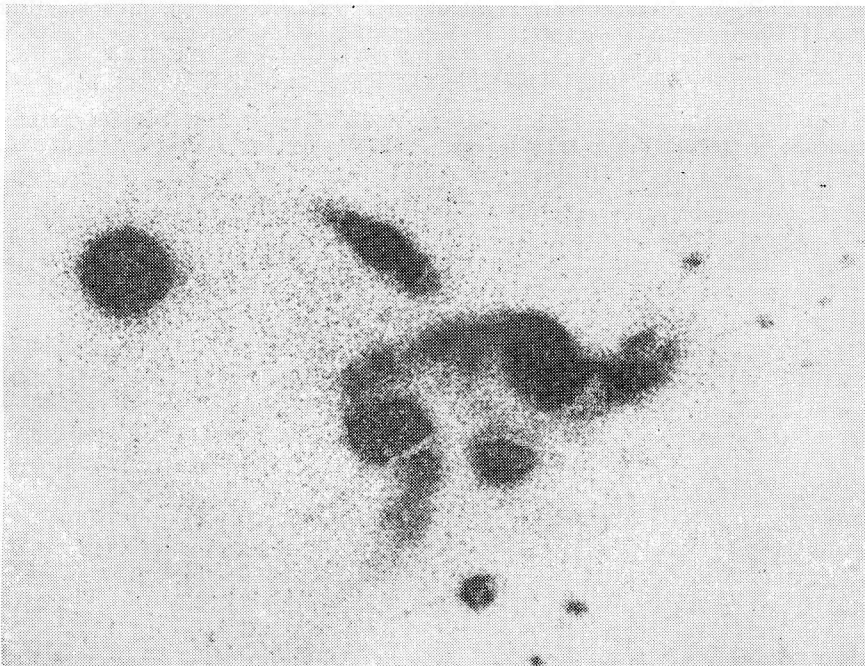


Рис. 14. Снимок Арпа взаимодействующей галактики VV 674, в которой векторы угловых скоростей компонент имеют противоположную ориентацию.

В заключение авторы выражают благодарность И. М. Копылову и В. Г. Горбачкову за обсуждение основных результатов статьи и Ю. В. Сухареву за большую помощь, оказанную им при ее оформлении.

Литература

1. P f l e i d e r e r J., S i e d e n t o p f H. Spiralstrukturen durch Gezeiteneffekte bei der Begegnung zweier Galaxien. — Zeitschr. für Astrophys., 1961, 51, S. 201—205.
2. P f l e i d e r e r J. Gravitationseffekte bei der Begegnung zweier Galaxien. — Zeitschr. für Astrophys., 1963, 58, S. 12—22.
3. К о з л о в Н. Н., С ю н я е в Р. А., Э н е е в Т. М. Приливное взаимодействие галактик. Препринт ИПМ. М., 1971. 57 с.
4. W r i g h t A. E. Gravitationally interacting galaxies. — Monthly Notices Royal Astronom. Soc., 1972, 157, p. 309—333.
5. Т о о м р е А., Т о о м р е J. Galactic bridges and tails. — Astrophys. J., 1972, 178, p. 623—666.
6. D a v i e s R. D., W r i g h t A. E. A tidal origin for the Magellanic stream. — Monthly Notices Royal Astronom. Soc., 1977, 180, p. 71—88.
7. S p i g h t L., G r a y z e c h E. Warping of the galactic plane by the LMC. — Astrophys. J., 1977, 213, p. 374—377.
8. H o h l F. Dynamics of plane stellar system. — Astrophysics and Space Science, 1971, 14, p. 91—109.
9. H o c k n e y R. W., B r o w n i n g D. R. Effect of population II stars and three-dimensional motion on spiral structure. — Monthly Notices Royal Astronom. Soc., 1974, 167, p. 351—357.
10. C o m b e s F. A model of tidal interactions within the NGC 4631 group of galaxies. — Astron. and Astrophys., 1978, 65, p. 47—55.
11. В о р о н ц о в - В е л ь я м и н о в Б. А. Внегалактическая астрономия. М., «Наука», 1972.
12. Ф р и д м а н А. М. О критерии применимости численных моделей взаимодействующих галактик. — Письма в АЖ, 1978, 4, № 5, с. 207—209.
13. C l a i r e m i d i S., C l a i r e m i d i J. Ejections of massive objects from the center of a stellar disk. — Astrophysics and Space Science, 1980, 70, p. 153—160.
14. О г о р о д н и к о в К. Ф. Динамика звездных систем. М., Физматгиз, 1958.
15. Д у б о ш и н Г. Н. Небесная механика. М., «Наука», 1968.
16. К р ы л о в В. И. Вычислительные методы высшей математики. Минск, «Вышэйшая школа», 1975.
17. К о р о в я к о в с к а я А. А., М е р е ж и н а Л. С., Х о р у н ж а я Н. П., Ш е р г и н В. С. Обслуживающая дисплейная система. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1980, 12, с. 169—174.
18. V o r o n t s o v - V e l y a m i n o v B. A. Atlas of interacting galaxies, Part II and the concept of fragmentation of galaxies. — Astronomy and Astrophysics Suppl., 1977, 28, p. 1—117.
19. A g r H. Atlas of peculiar galaxies. — Astrophys. J. Suppl., 1966, 14, N 123, p. 1—20.
20. A g r H. Companion galaxies on the ends of spiral arms. — Astronomy and Astrophysics, 1970, 3, p. 418—435.

Поступила в редакцию 01.12.80