

УДК 524.6.66

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ГЛОБАЛЬНОЙ
СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
ГАЛАКТИКАХ

В. И. КОРЧАГИН, Ю. Г. ШЕВЕЛЕВ

Поступила 26 октября 1981

Принята к печати 27 июля 1982

Численно исследован нестационарный нелинейный отклик, генерируемый в газовой плоской подсистеме спутником, вращающимся в плоскости галактического диска в направлении его вращения. Кроме черт, типичных для взаимодействующих галактик (мост и хвост, отходящий от спутника), в диске возбуждается асимметричная спиральная структура 20—30% амплитуды, сравнительно близко подходящая к центру галактики. Это подтверждает вывод Корменди и Нормана о том, что спутники взаимодействующих галактик являются одним из возможных механизмов генерации глобальных спиральных узоров.

1. *Введение.* В последнее время был выполнен ряд работ, в которых исследовалась связь динамических характеристик дисковых галактик с их морфологией [1—3]. В частности, изучение выборки спиральных галактик, проведенное Корменди [1] и Корменди и Норманом [2], привело к ряду важных результатов, которые не могут не приниматься во внимание в теории спиральной структуры. Как показали Корменди и Норман, далеко не во всех галактиках, которые обычно относят к классу спиральных, прослеживается глобальный спиральный узор: многие галактики имеют короткие обрывочные рукава (спирали типа NGC 2841 по классификации Корменди и Нормана). Глобальный спиральный узор наблюдается лишь в тех случаях, когда в центральных областях галактик есть перемычки или овальные искажения, либо галактики не являются изолированными [2]. Корреляция регулярности узора с близостью и светимостью спутников, а также тот факт, что спиральная структура в объектах типа M 51, NGC 7753, M 81 и т. д. значительно более регулярна, чем в изолированных галактиках со сходными крупномасштабными характеристиками, привели Корменди и Нормана к выводу, что спутники, наряду с перемычками, могут генерировать и поддерживать спиральные волны плотности. К аналогичным выводам пришли и Рубин, Форд и Тоннард [3], исследуя кривые вращения 21 Sc-галактики. В выборке галактик, используемой в [3], нет

объектов, которые удовлетворяли бы стандартной волновой теории (изолированные галактики с глобальными спиральными узорами без перемычек или спутников). Авторы [3] отмечают, что перемычки, овалы, спутники или обрывочные неглобальные узоры наблюдаются в большинстве случаев. К аналогичным выводам при исследовании морфологических и структурных особенностей ряда галактик со спутниками ранее пришел Пиддингтон [4]. Таким образом, в настоящее время, по-видимому, появились прямые наблюдательные подтверждения связи спиральных ветвей ряда галактик с их спутниками.

Гипотеза о приливной природе спиралей в галактиках со спутниками является, возможно, одной из наиболее ранних попыток объяснения спиральной структуры (см. для ссылок обзор [5]), однако она сколько-нибудь существенно не развивалась, исключая несколько численных экспериментов [6—8]. В этих экспериментах галактический диск моделировался системой несамогравитирующих точечных масс, вращающихся в поле центрального тела и возмущаемых близким пролетом спутника. Хотя в некоторых из моделей и отмечалось появление спиралей на периферии диска, авторы [6], например, пришли к выводу, что спиральная структура во внутренних областях таких галактик, как М 51, М 81 и т. д., имеет по-видимому, не связанную со спутником природу. Эта же точка зрения высказывалась и Лином в дискуссии после доклада на чтениях, посвященных Стремгрену [9]. Исходя из этих, по-видимому, недостаточно обоснованных соображений галактики М 51 и М 81 были выбраны в качестве основных объектов для детального сравнения теории волн плотности с наблюдениями. Наличие свободных параметров теории позволило добиться хорошего согласия с наблюдениями. Однако, по мнению Калнайса [10], такое сравнение может расцениваться скорее как иллюстрация теории волн плотности, а не ее наблюдательное подтверждение.

В работе [6] Томре и Томре высказали соображения, указывающие, что волны плотности во взаимодействующих галактиках могли быть вызваны внешним влиянием. Во-первых, как указали авторы [6], возникающее в диске приливное возмущение представляет собой медленно вращающееся асимметричное распределение массы, которое при учете самогравитации должно оказывать на центральные области галактики такое же гравитационное влияние, как и близко вращающийся спутник, т. е. генерировать спиральную волну. Второй момент связан с наличием радиального сноса возмущений с групповой скоростью от периферии к центру галактики. Таким образом, несмотря на сравнительную малочисленность спиральных галактик со спутниками среди всего класса спиральных галактик, гравитационное влияние спутников может являться важным механизмом генерации глобальных спиральных узоров.

В настоящей работе численно исследуется нестационарный нелинейный отклик, генерируемый в плоской подсистеме спутником, вращающимся в плоскости галактического диска в направлении вращения галактики. Как оказывается, кроме черт, типичных для взаимодействующих галактик (мост и хвост, отходящий от спутника), в диске возбуждается асимметричная спиральная структура 20—30% амплитуды, сравнительно близко подходящая к центру галактики.

2. *Модель и метод счета.* Поведение возмущений будем рассматривать в двухкомпонентной модели галактики, моделируя ее плоскую составляющую тонким дифференциально вращающимся газовым диском. Вращающаяся плоская составляющая удерживается в равновесии гравитационным полем сферической подсистемы. Самогравитация диска не учитывается, т. е. ее масса предполагается малой по сравнению с массой сферической подсистемы. Вращение диска дифференциально с кривой вращения, выбранной в виде:

$$V(r) = Cra^{-1/2}(a^2 + r^2)^{-3/4}, \quad (1)$$

где C и a — безразмерные константы, определяющие форму кривой вращения; r — безразмерный радиус. Поверхностная плотность диска в начальный момент времени неоднородна по радиусу. Распределение плотности показано на рис. 1, где также приведена невозмущенная кривая вращения.

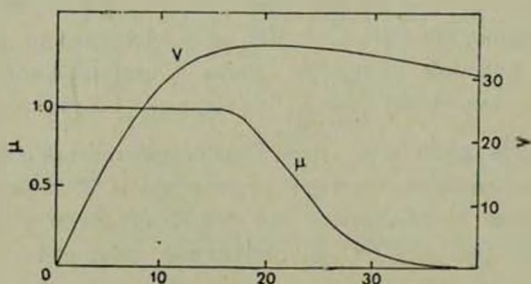


Рис. 1. Распределение невозмущенной поверхностной плотности и невозмущенной кривой вращения V в галактическом диске. Все величины приведены в безразмерном виде.

щения. Скорость звука в плоской подсистеме принималась в процессе счета постоянной. Поведение плоской подсистемы определялось численным решением системы уравнений гидродинамики в цилиндрической системе координат, вращающейся вместе со спутником. Все величины выражены в безразмерном виде через L — радиальный размер ячейки разбиения. μ_0 — поверхностная плотность плоской подсистемы в центральной обла-

сти, Ω_c — угловая скорость вращения спутника. Счет проводился по схеме типа «жидкость в ячейке» [11]. Счетная область разбивалась на 40 частей по радиусу и 60 частей по углу θ . Поверхностная плотность в граничных ячейках во время счета полагалась равной начальному значению, которое составляет $1.6 \cdot 10^{-3}$ от центральной плотности.

Возмущение в плоской подсистеме галактики создается гравитационным потенциалом спутника. Спутник моделировался как материальной точкой, так и однородным сферическим распределением радиуса $r=4$, с массой, составляющей 8.5% от полной массы галактики, находящимся на расстоянии $r=33$ от центра галактики. Вращение спутника выбрано в направлении вращения галактики в плоскости диска. Включение гравитационного поля спутника должно производиться «адиабатически» медленно, чтобы газ в диске успевал «подстраиваться» под меняющийся потенциал. В наших расчетах возмущающий потенциал спутника включался по линейному закону за 1 оборот спутника. При этом плоская подсистема успевает совершить приблизительно 3 оборота. Предварительные расчеты показали, что более длительное включение потенциала не меняет квазистационарной картины.

Если принять $L=1$ кпс; $\mu_0=40 M_\odot/\text{пс}^2$; $\Omega_c=8.5$ км/с кпс; то значениям параметров $C=800$ и $a=14.1$ соответствует масса галактики $M_{\text{гала}}=6.3 \cdot 10^{11} M_\odot$, масса спутника $M_{\text{сп}}=5.4 \cdot 10^{10} M_\odot$, масса плоской подсистемы $M_{\text{пл}}=3.5 \cdot 10^{10} M_\odot$. Значение невозмущенной вращательной скорости на $r=10$ кпс при этом равно 250 км/с. Вращение диска по закону (1) при $C=800$, $a=14.1$ сильно дифференциально: отношение угловой скорости диска в центральной области к угловой скорости спутника равно четырем. Безразмерная скорость звука принималась равной $\tilde{C}_s=3$. При характерной скорости $L \cdot \Omega_c = 8.5$ км/с скорость звука соответственно равна 25.5 км/с. Вращательная скорость диска в области $r>4$ кпс изменяется в пределах $100 \div 250$ км/с (см. рис. 1), т. е. движение вещества в диске сильно сверхзвуковое.

3. *Результаты.* Счет проводился в течение 2.7 оборотов спутника. К моменту времени $t=1T_c$ (T_c — период обращения спутника) устанавливается квазистационарная в системе спутника картина. В инерциальной системе координат возмущение представляет собой медленную волну, распространяющуюся по диску с быстрым дифференциальным вращением. На рис. 2 показаны положения максимумов возмущенной плотности в момент времени $t=1.93 T_c$. Из рисунка видно, что волновая картина может быть условно разделена на внутреннюю и внешнюю области. Во внутренней области ($r<15$) к первому обороту спутника развивается спираль-

ный узор 20—30% амплитуды, который при дальнейшем счете трансформируется в асимметричную двухрукавную спираль с коротким спиральным обрывком в IV квадранте. Во внешней области $r > 15$ распределение га-

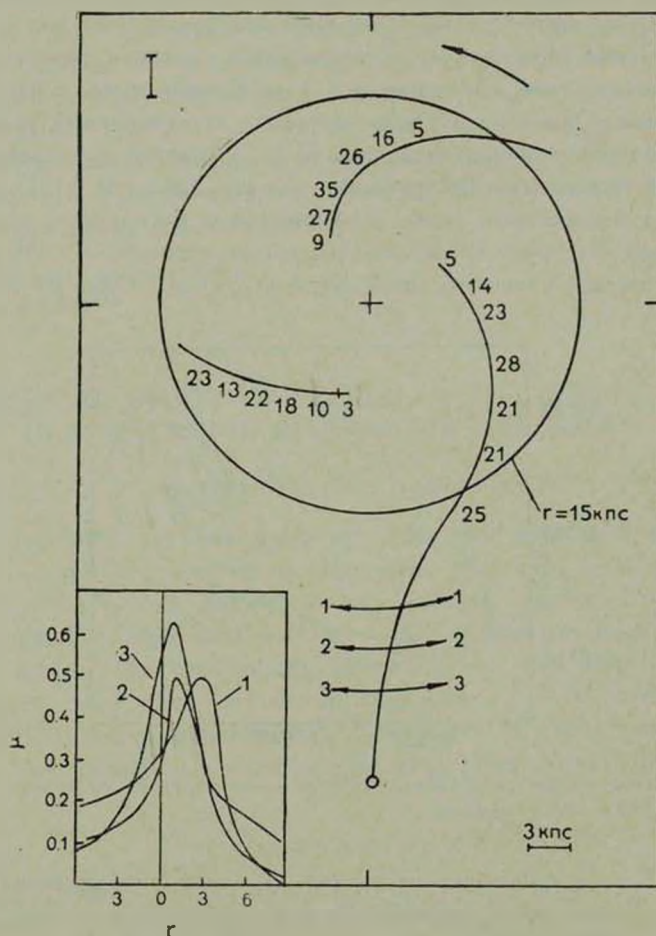


Рис. 2. На рисунке показаны положения максимумов возмущенной плотности в момент времени $t = 1.93 T_0$. Значения возмущений выражены в процентах по отношению к первоначальной плотности. Центр галактики и положение спутника отмечены на рисунке крестиком и кружком соответственно. Вращение газа против часовой стрелки. В левом нижнем углу приведены распределения плотности газа в «мосте» в сечениях 1, 2, 3, в зависимости от расстояния до линии, соединяющей центр галактики со спутником.

за сильно асимметрично. В процессе установления равновесия после включения внешнего возмущения происходит значительное перераспределение вещества в диске. В окрестности спутника концентрируется приблизительно

но 40% массы плоской подсистемы. Область моста, соединяющего галактику со спутником, включает около 13% массы невозмущенного диска. От спутника в сторону, противоположную вращению, тянется широкий шлейф, включающий, однако, небольшое количество вещества диска. Хотя настоящая работа и не ставит целью моделирование взаимодействия какой-либо реальной системы, представляется интересным сравнить характерные черты распределения газа, появляющиеся в численном счете, с наблюдательными данными. Одной из наиболее детально исследованных галактик является взаимодействующая галактика М 81. Недавние исследования этой системы, проведенные в Вестерборке ван-дер-Хюлстом [12], позволили выявить ряд неизвестных ранее особенностей в распределении нейтрального водорода (см. рис. 3). Во внутренней окрестности $r < 15$ кпс М 81 показывает хорошо развитую спиральную структуру. Одна из спиральных

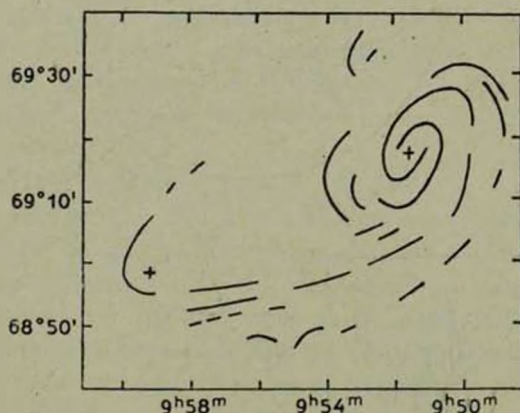


Рис. 3. Схематическое распределение нейтрального водорода во взаимодействующей системе NGC 3077 — М 81 работы [12].

ветвей М 81, продолжаясь, переходит в мост, соединяющий М 81 и NGC 3077. В восточной части галактики ван-дер-Хюлст отмечает наличие больших изолированных газовых масс, имеющих, по-видимому, приливное происхождение. Распределение нейтрального водорода во внешней области М 81 сильно асимметрично. При общей массе нейтрального водорода $1.4 \cdot 10^9 M_{\odot}$ значительная ее часть, $\sim 35\%$, сконцентрирована в окрестности спутника NGC 3077. Приблизительно такое же количество газа содержит мост, соединяющий обе галактики. Характерной особенностью наблюдаемого поля скоростей взаимодействующего комплекса являются продольный и поперечный градиенты лучевой скорости в перемычке, причем величина поперечного градиента скорости ~ 8 км/с · кпс оказывается

в два раза выше продольного градиента. Отметим, что в проведенном численном эксперименте также появляются продольный и поперечный градиенты скорости в мосте, причем отношение поперечного градиента к продольному с хорошей степенью точности постоянно вдоль моста и равно двум. Этот факт, а также сопоставление характерных черт в распределении нейтрального водорода взаимодействующего комплекса M 81 — NGC 3077 с распределением плотности на рис. 2 позволяет подтвердить вывод Корменди и Нормана [2, 3] о том, что во взаимодействующих галактиках с близкими спутниками глобальный спиральный узор, а также асимметричное распределение газа во внешних областях обязаны своим происхождением гравитационному влиянию спутника.

Ростовский-на-Дону государственный
университет

NUMERICAL STUDY OF GLOBAL SPIRAL STRUCTURE GENERATION IN INTERACTING GALAXIES

V. I. KORCHAGIN, YU. G. SHEVELEV

Time-dependend nonlinear response generated in a flat gaseous subsystem by a satellite rotating in the same direction as the galaxy is numerically investigated. Besides some features, typical for the interacting galaxies (bridge and satellite tail) assymetric spiral structure is excited within the disk about 20—30 % of the amplitude, being comparatively near the center of the galaxy. This confirms Kormendy's and Norman's conclusion that satellites of interacting galaxies are one of the possible mechanisms of generation of global spiral pattern.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Kormendy, Ap. J., 227, 714, 1979.
2. J. Kormendy, C. A. Norman, Ap. J., 233, 539, 1979.
3. V. C. Rubin, W. K. Ford, N. Thornnard, Ap. J., 238, 471, 1980.
4. J. H. Piddington, Astrophys. Space Sci., 59, 237, 1978.
5. A. Toomre, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 15, 437, 1977.
6. A. Toomre, J. Toomre, Ap. J., 178, 623, 1972.
7. T. M. Eneev, R. A. Sunyaev, N. N. Koslov, Astron. Astrophys., 22, 41, 1973.
8. M. Clutton-Brock, Astrophys. Spase Sci., 17, 292, 1972.
9. C. C. Lin, C. Yuan, Astron. Papers 'Dedicated to Bengt Strömgren, Publ. Copenhagen Univ., 1978, p. 369.
10. A. J. Kalnajs, in "Structure and Properties Nearby Galaxies", Dordrecht-Boston, 1978, p. 113.
11. R. A. Gentry, R. E. Martin, B. J. Daly., J. Comput. Phys, 1, 87, 1966.
12. J. M. van der Hulst, Astron. Astrophys., 75, 97, 1979.