

УДК: 524.726—856—87

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛНОВОГО УЗОРА В ГАЛАКТИЧЕСКОМ  
ДИСКЕ СПУТНИКОМ С ОБРАТНЫМ ВРАЩЕНИЕМ

В. И. КОРЧАГИН, Н. А. ПРОХОВНИК

Поступила 18 октября 1984

Принята к печати 8 мая 1985

Численно смоделирован процесс генерации спирального узора в галактическом диске под действием гравитационного поля спутника, вращающегося в обратном направлении. Спутник генерирует лидирующую одорукавную спираль, вращающуюся вместе с ним. Амплитуда плотности в спиральном рукаве составляет  $\leq 1\%$  для отношений  $M_S/M_G \frac{1}{3} \div \frac{1}{2}$ .

Появившиеся в последнее время работы убедительно показали, что морфология спиральных ветвей дисковых галактик связана с близкими спутниками или перемычками. Так, например, анализ выборки спиральных галактик, проведенный Корменди и Норманом [1], показал, что глобальные спиральные узоры наблюдаются в большинстве случаев, когда в центральных областях галактик видны перемычки, либо галактики не являются изолированными. Большая регулярность спиральных ветвей в системах M 51, NGC 7753, M 81 по сравнению с изолированными галактиками со сходными характеристиками привела Корменди и Нормана к выводу, что спутники могут генерировать и поддерживать спиральные узоры. К аналогичным выводам приходят Рубин и др. [2]. Авторы работы [2] отмечают, что перемычки, овалы или спутники наблюдаются во многих системах с глобальными узорами. Работа Элмегринов [3] также подтвердила, что протяженность, непрерывность и симметрия спиральных рукавов в галактиках зависят от присутствия перемычки или близких спутников. Дополнительным свидетельством, подтверждающим важную роль перемычек и близких спутников в генерации глобальных спиральных узоров, является корреляция радиосветимости спиральных ветвей с существованием глобального узора в галактиках [4]. Интенсивное радиоизлучение спиральных ветвей наблюдается в большинстве систем, в которых хорошо прослеживаются протяженные спиральные ветви. Напро-

тив, в галактиках, обладающих множеством обрывочных «филаментарных» спиральных рукавов, не наблюдается заметного радиоизлучения спиральных ветвей.

Генерация спиральных ветвей гравитационным влиянием близких спутников исследовалась ранее в ряде работ (см. обзоры [5, 6]). Результаты исследований показали, что вращающийся спутник способен возбуждать и поддерживать спиральный узор и вызывает появление черт (мост и «хвост», отходящие от спутника), типичных для взаимодействующих галактик [7].

В настоящей работе проведено численное моделирование эволюции диска под действием спутника, вращающегося в плоскости диска в направлении, противоположном его вращению. Выполненный в последнее время Фурье-анализ наблюдаемой спиральной структуры в дисках галактик обнаружил, что в реальных системах часто наблюдаются лидирующие однорукавные моды, а также их сосуществование с двухрукавными и многорукавными модами [8]. Взаимодействие спутника с обратным вращением с диском представляет интерес как возможный механизм генерации лидирующих однорукавных спиралей.

Генерация спиральной волны в галактическом диске спутником с обратным вращением исследовалась в работе [9]. Из-за сложности задачи аналитическое рассмотрение здесь было проведено в линейном приближении для степенного распределения угловой скорости и плотности диска в окрестности внутреннего линдбладовского резонанса. Численное моделирование позволяет исследовать генерацию волнового узора во всей области ограниченного диска для более реалистических кривой вращения и распределения плотности в нем.

Динамика возмущений исследовалась в двухкомпонентной модели галактики. Ее плоская звездно-газовая составляющая моделировалась тонким дифференциально вращающимся газовым диском, удерживаемым в равновесии гравитационным полем сферической подсистемы. Самогравитация диска в равновесии не учитывалась, т. е. предполагалась малость ее массы по сравнению с массой сферической подсистемы. Распределение поверхностной плотности в диске и невозмущенная кривая вращения представлены на рис. 1. Уравнение состояния газа предполагалось изотермическим. При сделанных предположениях поведение плоской подсистемы описывается системой уравнений гидродинамики, записанной в цилиндрических координатах в системе, вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$  центральной области диска:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\mu r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\mu v_\theta)}{\partial \theta} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{du_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} = - \frac{\partial (\Phi_d(r) + \Phi_s(\bar{r}, t))}{\partial r} - \frac{c_s^2}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial r} + 2u_\theta \Omega + r \Omega^2, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} = \\ = - \frac{1}{r} \frac{\partial (\Phi_d(r) + \Phi_s(\bar{r}, t))}{\partial \theta} - \frac{c_s^2}{\mu r} \frac{\partial \mu}{\partial \theta} - 2u_r \Omega. \end{aligned} \quad (3)$$

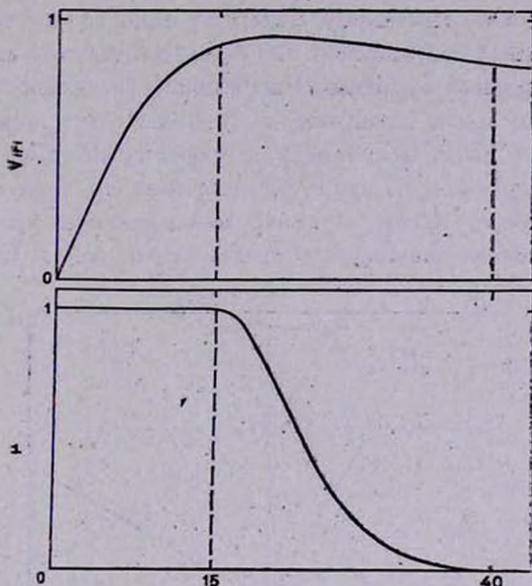


Рис. 1. Распределение невозмущенной плотности диска и его кривая вращения в безразмерных единицах при  $C = 200$ ,  $a = 14.1$ .

Здесь  $\mu$ ,  $u_r$ ,  $u_\theta$  — поверхностная плотность, радиальная и азимутальная компоненты скорости,  $c_s$  — скорость звука плоской подсистемы,  $\Phi_d(r)$  — осесимметричный потенциал сферической подсистемы, определяемый через вращательную скорость плоской подсистемы:

$$v(r) = C \cdot \left[ \frac{r^2}{a^2} (a^2 + r^2)^{-3/2} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

$C$ ,  $a$  — константы, определяющие форму кривой вращения. Система уравнений (1) — (3) записана в безразмерном виде, где за масштабы обезразмеривания приняты  $\frac{1}{\Omega}$ , невозмущенная плотность диска  $\mu_0$  и радиальный размер ячейки разбиения  $L$ .

Двумерный счет проводился по схеме типа «жидкость в ячейке» [10]. Счетная область разбивалась на 40 частей по радиусу и 60 частей по углу  $\theta$ . Поверхностная плотность в граничных ячейках во время счета полагалась равной начальному значению  $\sim 10^{-3}$  от центральной области.

Возмущение плоской подсистемы вызывалось потенциалом спутника, вращающегося в плоскости диска в направлении, противоположном его вращению. Спутник моделировался однородным сферическим распределением радиуса  $R = 4$ , помещенным на расстоянии  $r = 33$  и  $r = 60$  от центра галактики. Включение гравитационного потенциала спутника проводилось адиабатически по линейному закону за один оборот системы отсчета. Пробный численный счет показал, что более длительное включение не меняет квазистационарной картины. В выбранной системе отсчета положение спутника меняется, и его положение в процессе счета пересчитывалось на каждом временном шаге. Безразмерная скорость звука во всех вариантах счета полагалась равной 1.5, т. е. течение газа во всей счетной области сильно сверхзвуковое. Если принять максимальную вращательную скорость 200 км/с, соответствующая скорость звука равна 15 км/с.

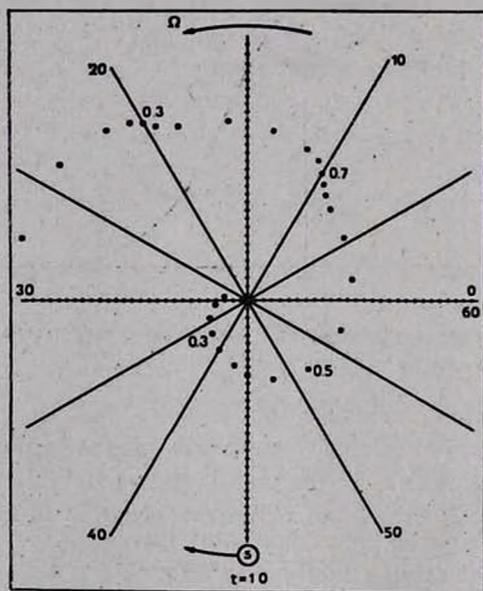


Рис. 2а. Точками обозначены положения максимумов возмущенной плотности в диске в момент времени  $t = 1$ , при значениях безразмерных параметров  $C = 200$ ,  $\alpha = 14.1$ ,  $c_s = 1.5$ . Время измеряется в оборотах диска. Амплитуда возмущения дана в процентах по отношению к невозмущенной плотности. Спутник находится на расстоянии  $r = 33$  от центра диска. Отношение масс  $M_S/M_G$  равно 1/3.

Результаты численного счета показывают, что спутник, вращающийся в направлении, противоположном вращению диска, генерирует однорукавную лидирующую спиральную волну. В инерциальной системе волна медленно распространяется по быстро вращающемуся диску с фазовой скоростью, равной угловой скорости спутника. Амплитуда возникающего спирального узора мала. При массе спутника, составляющей приблизительно  $1/3$  массы галактики, амплитуда спиральной волны  $\Delta\mu/\mu$  меньше  $0.5\%$ , т. е. механизм генерации неэффективен. Если масса спутника составляет  $1/3 \div 1/2$  от массы галактики, возникающий спиральный узор имеет амплитуду, порядка  $0.5 \div 1\%$ . Квазистационарный спиральный узор в процессе счета прослеживался на протяжении примерно трех оборотов. На рисунках 2а, б показаны положения максимумов возмущенной плотности в

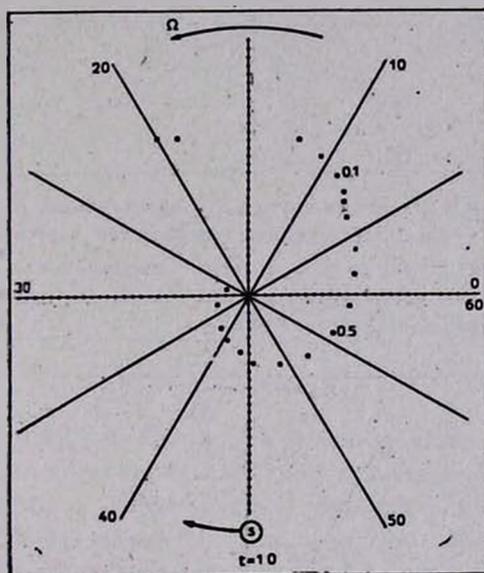


Рис. 2б. То же самое, что и на рис. 2а при  $M_S/M_G=1/2$ .

моменты времени  $t = 1$  для отношений масс спутника и галактики  $1/3$  и  $1/2$  соответственно. В обоих вариантах отношение угловых скоростей центральной области диска и спутника равно четырем. На рисунках 3а, б, с в различные моменты времени,  $t = 1.2, 1.6, 2.0$  соответственно, показан волновой узор, вызванный гравитационным влиянием спутника, удаленного на расстояние  $r = 60$  от центра. Угловая скорость спутника составляет десятую часть от угловой скорости диска. Из рисунков 3а, б, с видно, что возникшие однорукавные спирали качественно не отличаются от спиралей, возбуждаемых близким спутником, расположенным на расстоянии  $r = 33$  от центра диска, однако их амплитуда меньше.

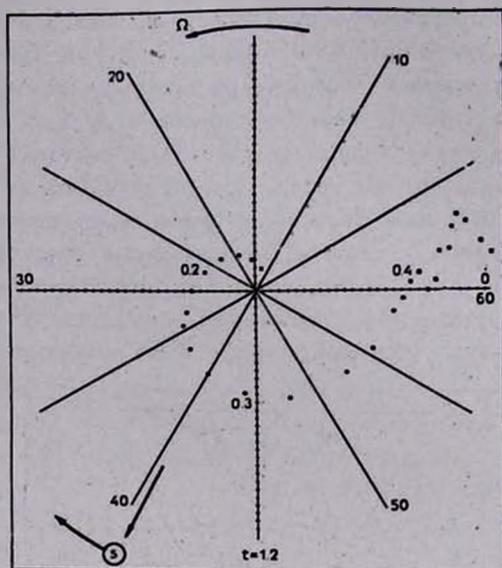


Рис. 3а. Изображены положения спутника и образованной им вращающейся однорукавной лидирующей спирали. Возмущение генерируется удаленным спутником, находящимся на расстоянии  $r = 60$  от центра диска. Отношение масс  $M_S/M_G = 1/2$ . Параметры диска аналогичны предыдущему случаю. Амплитуда приведена в процентах по отношению к невозмущенной плотности  $t = 1.2$ .

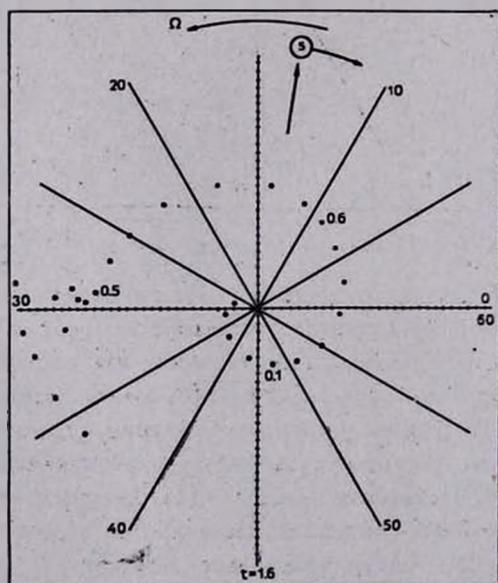


Рис. 3б. То же самое, что и на рис. 3а при  $t = 1.6$ .

Таким образом, спутник с обратным вращением может возбуждать волновой узор, если масса спутника не слишком мала по сравнению с массой галактики. Амплитуда возникающего спирального узора  $\lesssim 1\%$ . Это, по-видимому, меньше наблюдаемых вариаций плотности в ветвях спираль-

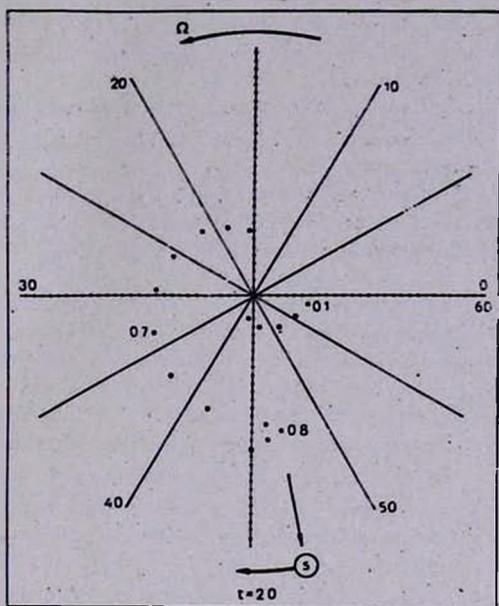


Рис. 3с. То же самое, что и на рис. 3а при  $t = 2.0$ .

ных галактик. Поэтому рассмотренный механизм может представлять интерес при интерпретации спиральных узоров в некоторых галактиках как «затравочный», когда возникающая лидирующая спиральная волна усиливается при линейном взаимодействии с другими модами [11], или при нелинейном распаде спиральной волны большой амплитуды [12]:

Ростовский государственный  
университет

## THE GENERATION OF WAVE PATTERN IN GALACTIC DISK BY AN ORBITING RETROGRADE COMPANION

V. I. KORCHAGIN, N. A. PROKHOVNIK

The spiral pattern in gaseous disk caused by orbiting retrograde companion is numerically simulated. The companion generates the leading one-armed spiral corotating with it. The density amplitude in spiral arm is  $\lesssim 1\%$  for mass ratio  $M_s/M_G \sim 1/3 \div 1/2$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. *J. Kormandy, C. A. Norman*, *Ap. J.*, 233, 539, 1979.
2. *V. C. Rubin, W. K. Ford, N. Thornnard*, *Ap. J.*, 233, 471, 1980.
3. *B. G. Elmegreen, D. M. Elmegreen*, *M. N. RAS*, 201, 1021, 1982.
4. *В. И. Корчагин*, *Астрон. цирку.*, № 1221, 1982.
5. *A. Toomre*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 15, 437, 1977.
6. *A. Toomre*, *Structure and Evolution of Galaxies*. eds. S. M. Fall, D. Lynden-Bell, Cambridge, 1981, p. 111.
7. *В. И. Корчагин, Ю. Г. Шевелев*, *Астрофизика*, 18, 589, 1982.
8. *S. Constatore, E. Athanassoula*, *IAU Symp. N 100*, 1983, p. 155.
9. *E. Athanassoula*, *Astron. Astrophys.*, 69, 335, 1978.
10. *R. A. Gentry, R. E. Martin, B. J. Daly*, *J. Comput. Phys.*, 1, 87, 1966.
11. *J. Haas, G. Bertin, C. C. Lin*, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 79, 3908, 1982.
12. *В. И. Корчагин, П. И. Корчагин*, *Письма АЖ*, 10, 14, 1984.