

524.7-856

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИРОДЕ
СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГАЛАКТИК**

**Ю. Н. Ефремов, В. И. Корчагин, Л. С. Марочник,
А. А. Сучков**

(ГАИШ (МГУ), Ростовский государственный университет, ИКИ АН СССР, Москва)

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	599
2. Теории спиральной структуры	601
2.1. Теория дискретных мод. 2.2. Генерация спиральных волн перемычкой или спутником. 2.3. Стохастическое звездообразование. 2.4. Другие модели происхождения спиральной структуры.	
3. Галактические ударные волны и газодинамика с фазовыми переходами	614
3.1. Физика межзвездного газа. 3.2. Ударная волна, аккреционная волна, трехфазное течение. 3.3. Галактические ударные волны.	
4. Проблема спиральной структуры с точки зрения наблюдений	620
4.1. Классификация галактик по степени регулярности спирального узора. 4.2. Проявления спиральных волн. 4.3. Наблюдения, относящиеся к механизмам генерации спиральных волн.	
5. Заключение	627
Список литературы	627

1. Введение. В 1974 г. двое из нас опубликовали в «УФН» статью под похожим названием¹. За полтора десятилетия, прошедшие со времени опубликования статьи, проблема не потеряла своей актуальности, хотя «горячие точки», конечно, изменили свою «географию». Суть вопроса состоит в следующем: приблизительно 80 % галактик высокой светимости относятся к спиральным (рис. 1). Большинство спиральных галактик вращается дифференциально, т. е. угловая скорость их вращения есть функция галактоцентрического расстояния, следовательно, любое гравитационно не связанное структурное образование должно быстро размываться дифференциальным вращением галактики. Поэтому теория должна объяснить в первую очередь две вещи: 1) почему дисковые галактики, как правило, имеют симметричный спиральный узор, простирающийся от центральных областей до периферии системы; 2) почему этот узор существует на протяжении многих оборотов галактики несмотря на то, что дифференциальное вращение системы, казалось бы, должно его «растянуть» всего за два-три оборота диска. Эта проблема уже давно была прекрасно сформулирована Оортом². «В системах с сильным дифференциальным вращением, каковое наблюдается во всех спиральных галактиках без перемычек, спиральные черты совершенно естественны. Любая структурная неоднородность, вероятно, закрутится, образуя часть спирали. Но не это явление мы должны рассматривать, — писал Оорт. — Мы должны объяснить спиральную структуру, охватывающую всю галактику от ее ядра до самой внешней части и состоящую из двух рукавов, выходящих из двух диаметрально противоположных точек. Хотя эта структура часто бывает безнадежно иррегулярна и клочковата, общая картина крупномасштабного явления может быть прослежена во многих галактиках».

Последние полтора десятка лет добавили к указанным выше вопросам по крайней мере еще четыре фундаментальных факта, которые также должны

объяснить теория: существование спиральной структуры поля скоростей звезд и газа; существование спиральных ветвей, образованных не только молодыми, но и старыми звездами диска; градиент возраста объектов поперек

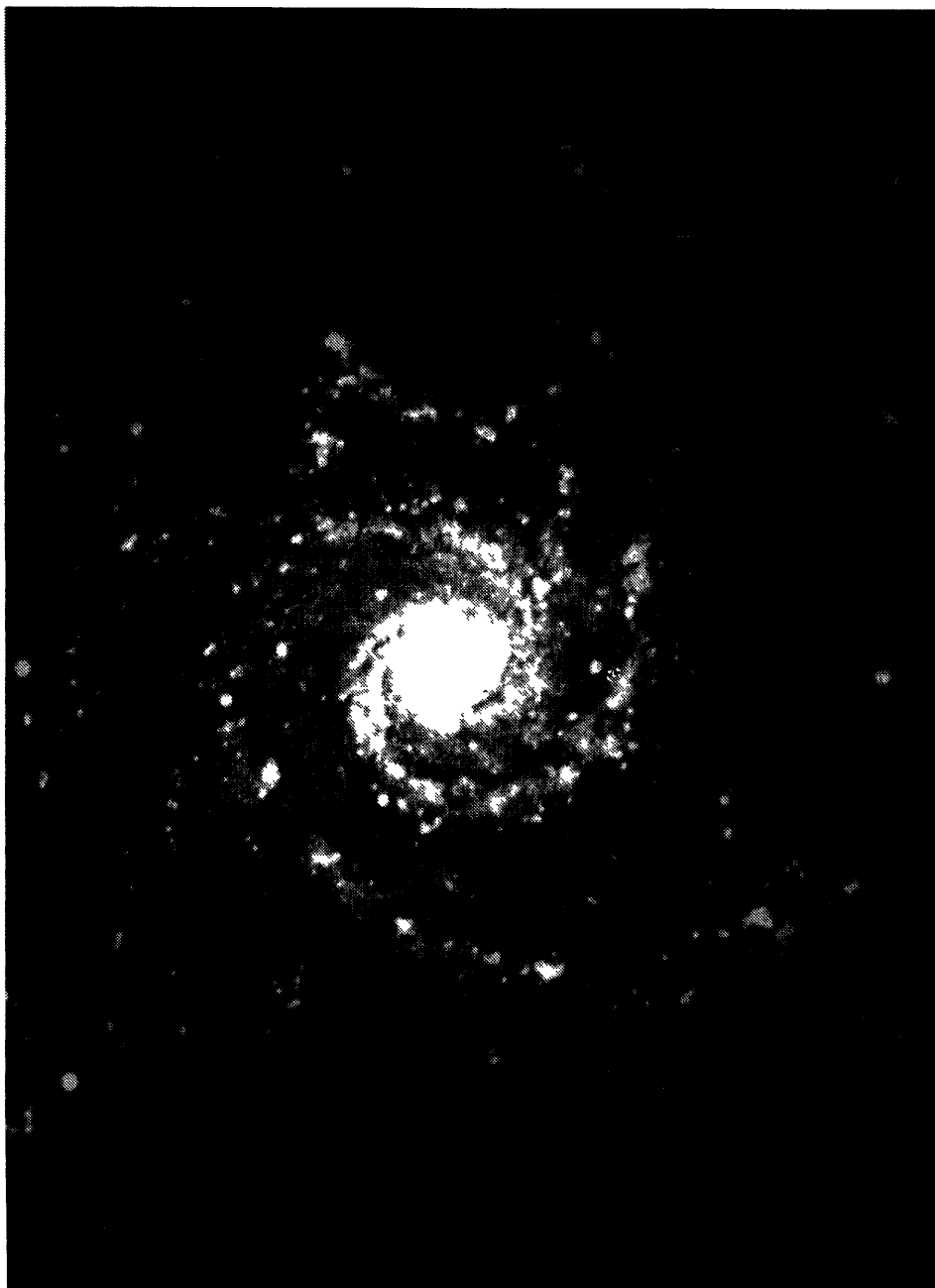


Рис. 1. Спиральная галактика NGC 628 с резко выраженными регулярными спиральными рукавами. (Снимок получен Н. А. Тихоновым на 6-м телескопе САО АН СССР)

спиральных рукавов; существование узкой зоны сильно сжатого газа и пыли вдоль внутренней кромки спиральных ветвей (см. ³).

Имеются серьезные основания думать, что видимые спирали в нормальных галактиках есть спиральные волны плотности, которые вращаются с постоянной угловой скоростью вокруг центра системы. Идея волн плотно-

сти позволила объяснить все шесть приведенных выше фактов, связанных с дисковыми галактиками и свойствами их спиральной структуры. Более того, последние четыре на самом деле были предсказаны теорией волн плотности, и лишь затем были действительно обнаружены наблюдениями. В астрофизике не очень много теорий, которые обладали бы столь мощной предсказательной силой! Сколько альтернативных теорий спиральной структуры ни появлялось в последние годы (некоторые из них кратко освещены в последнем разделе этой главы), ни одна не смогла описать во всем объеме указанные факты, и, тем более, предсказать какие-то принципиально новые обстоятельства (во всяком случае, такие, которые подтвердились бы наблюдениями).

Еще одно важное свойство волновой теории спиральной структуры, отличающее ее от других теорий,— она дает возможность предсказать геометрию спирального узора данной галактики, если известны ее параметры. Это, в свою очередь, позволяет количественно сравнивать предсказания теории с наблюдениями. Такого рода исследования были успешно выполнены как для нашей Галактики, так и для ряда других спиральных галактик. С единой точки зрения волновая теория объясняет не только существование регулярного спирального узора, но и концентрацию в рукавах очагов звездообразования.

Теория волн во вращающихся звездных дисках реальных галактик сложна из-за необходимости учета большого количества разнообразных физических факторов. Свойства волн в равной мере здесь определяются эффектами неоднородности и дисперсии. Поскольку система ограничена, то принципиальными оказываются граничные условия. Отдельной большой проблемой является сильно нелинейное поведение межзвездного газа в гравитационном поле звездных волн плотности.

Данный обзор посвящен современному состоянию проблемы спиральной структуры галактик. Основное внимание в нем уделяется ортодоксальной теории волн плотности, так как остальные появившиеся в последние годы гипотезы сталкиваются с трудностями в интерпретации тех или иных наблюдательных данных.

2. Теории спиральной структуры. Впервые идея о волнах звездной плотности как механизме формирования спиральных ветвей галактик была высказана Линдбладом ⁴.

Первый шаг в современной теории связывают с работой Лина и Шу ⁵. В ней была показана возможность существования спиральных волн, получено дисперсионное соотношение, которое позволяет по известным параметрам галактики и известной фазовой скорости волны воспроизвести геометрию спирального узора. Были указаны особенности свойств волн, обусловленные неоднородностью системы (линдбладовские резонансы, коротация).

Однако мало показать, что волны могут существовать. Чтобы понять и описать спиральную структуру, нужно знать, как эти волны возбуждаются и поддерживаются в течение длительного времени, как они ведут себя в условиях сильно неоднородной и ограниченной системы. И хотя эта задача до сих пор до конца не решена, прорыв в этом направлении был осуществлен в конце 70-х годов. Речь идет о теории дискретных спиральных мод, в которой, пусть для частного, но достаточно реалистичного случая данная задача была решена практически в полном объеме. Теория высветила чрезвычайно сложные и интересные обстоятельства, с которыми связаны спиральные волны в звездных дисках галактик. Например, оказалось, что угловая скорость вращения спирального узора Ω_p и направление закручивания спиральных ветвей (оба параметра в этой теории определяются) связаны с характером неоднородности системы и поведением волны на границе диска. Чтобы яснее увидеть возможности волновой теории и трудности, которые здесь возникают в силу сложности системы, рассмотрим подробнее теорию дискретных мод.

2.1. Теория дискретных мод. Теория была построена как в гидродинамическом приближении, так и на основе кинетического уравнения для звезд диска. В гидродинамической модели было развито асимптотическое приближение для нахождения дискретного спектра спиральных волн⁶⁻⁸. В работах⁹⁻¹⁰ неустойчивые спиральные моды исследовались численным интегрированием системы динамических уравнений без использования асимптотического приближения. В звездном диске асимптотическая теория дискретных спиральных мод была развита в¹¹. Идея о дискретности спектра волн плотности в звездных дисках и условия их «квантования» впервые были сформулированы в¹² (см. также⁵).

В качестве основного состояния системы в работах⁶⁻¹¹ рассматривается двухкомпонентная модель, включающая «активный» звездный или газовый диск и динамически «неактивное» сфероидальное гало, которое дает определяющий вклад в гравитационное поле системы. Такая модель впервые была

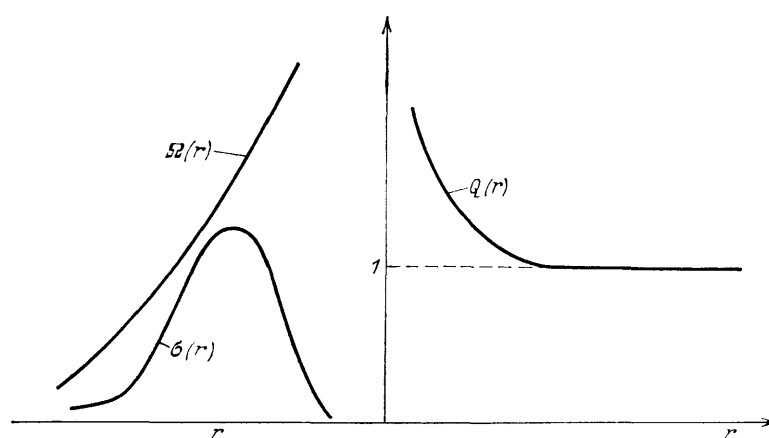


Рис. 2. Типичное распределение вращательной скорости $\Omega(r)$, поверхностной плотности $\sigma(r)$ и дисперсии $Q(r)$ в классах моделей, рассмотренных в работах⁶⁻¹¹

предложена в работе¹², в которой было показано, что только учет существования динамически различающихся звездных подсистем, наблюдаемых в реальных галактиках, приводит к волнам плотности со свойствами, соответствующими наблюдательным данным.

Активный диск характеризуется поверхностной плотностью $\sigma(r)$, дисперсией скоростей звезд $c(r)$ и скоростью вращения $v(r) = \Omega(r)r$. Важными параметрами являются эпициклическая частота

$$\kappa^2(r) = 4\Omega^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{d \ln \Omega}{d \ln r} \right), \quad (1)$$

характерная длина $\lambda^* = \pi G \sigma / \kappa^2$ и безразмерная дисперсия скоростей звезд $Q = c / \kappa \lambda^*$. На рис. 2 представлено типичное распределение угловой скорости, поверхностной плотности и дисперсии скоростей, измеряемой безразмерным параметром Q в моделях плоских подсистем галактик, обсуждаемых в работах⁶⁻¹¹.

Рассмотрим малые возмущения плотности, потенциала и скоростей равновесной модели, выбирая их в виде

$$f_1(r) \exp [i(\omega t - m\theta)]; \quad (2)$$

здесь r, θ — полярные координаты, m — число рукавов, ω — частота волн, которая может быть представлена в виде

$$\omega = m\Omega_p - i\gamma.$$

Если $f_1(r)$ можно представить в виде

$$f_1(r) = \tilde{f}_1(r) \exp\left(i \int k(r) dr\right), \quad (3)$$

то возмущения имеют вид спиралей, форма которых в фиксированный момент времени определяется выражением

$$m(\theta - \theta_0) = \int_{r_0}^r k(r) dr. \quad (4)$$

Можно показать, что в гидродинамическом приближении возмущения описываются дифференциальным уравнением 2-го порядка, получающимся из линеаризованных динамических уравнений и уравнения Пуассона в приближении сильно «закрученных» спиралей ⁶⁻⁸:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \hat{K}^2 u = 0, \quad (5)$$

где

$$\hat{K}^2 = (\lambda^* Q)^{-2} \left(\frac{1}{Q^2} - s + v^2 \right).$$

Функция u связана с возмущением поверхностной плотности следующим соотношением:

$$\sigma_1 = \sigma \left[\frac{\chi^2 (1 - v^2)}{\sigma r c^4} \right]^{1/2} u \exp\left(-i \int k_0 dr\right), \quad (6)$$

где

$$k_0 = \frac{\pi G \sigma}{c^2}, \quad v = \frac{1}{\chi} (\omega - m\Omega).$$

Безразмерная частота v имеет простой смысл: $\text{Re } v$ — это частота, с которой вещество галактики, двигаясь с угловой скоростью Ω , попадает в рукава спирального узора, вращающегося с угловой скоростью Ω_p .

При выводе уравнения (5) был развит метод ¹⁵ приближенного решения уравнения Пуассона, позволяющий корректно рассматривать спиральные волны не малой закрутки, вплоть до углов наклона $i \sim 45^\circ$. В более общем случае вместо (5) мы имеем более сложное уравнение с сингулярными коэффициентами, обращающимися в бесконечность в точках $r = r_1$ (внутренний линдбладовский резонанс, $v = -1$) и $r = r_2$ (внешний линдбладовский резонанс, $v = +1$).

Уравнение (5) описывает поведение решений вдали от линдбладовских резонансов. Это достигается выбором довольно частной модели, в которой индекс устойчивости Q равен 1 во всем диске, в том числе и в окрестности коротации, и лишь в центральных областях Q быстро нарастает (предположительно за счет вклада звезд балджа; см. рис. 2). Такое поведение равновесных параметров диска приводит к тому, что коэффициент \hat{K} уравнения (5) обращается в нуль в двух точках: вдали от центра в коротационном резонансе r_c и в центральных областях диска (но не достигая внутреннего линдбладовского резонанса) в точке r_i , в которой $Q = (1 - v^2)^{-1/2}$. В точке $r = r_i$ коэффициент \hat{K} меняет знак, поэтому можно ставить граничное условие, заключающееся в экспоненциальном убывании волны в области $r < r_i$. Если предположить, что достаточно далеко от точки $r = r_c$ происходит затухание волны, то в качестве второго граничного условия можно выбрать условие излучения на бесконечности. Именно в такой постановке была решена задача о спиральных волнах в теории дискретных мод.

В работах ⁶⁻¹¹ условие излучения вдали от коротационного резонанса формулируется для отстающих спиральных волн. В каком-то смысле это

фактически постулирует, что спиральные волны переносят угловой момент и энергию из центра на периферию системы. Однако не исключены и другие граничные условия.

Непрерывное излучение спиральных волн в ограниченном галактическом диске возможно только в том случае, если волны поглощаются на периферии галактики. Поэтому важную роль в физическом обосновании модели дискретных мод должен играть внешний линдбладовский резонанс, который, по выражению Лина и Бертина¹⁴, «помогает возбуждать дискретные моды», поглощая приходящие из центральных областей волны резонансным взаимодействием со звездами, аналогично затуханию Ландау в плазме. Но если внешний линдбладовский резонанс отсутствует или в его окрестности плотность резонансных звезд настолько мала, что они не могут обеспечить отвод всей поступающей энергии волны, то обоснование условия излучения становится более трудным делом. Следует также отметить, что при достаточно длительном взаимодействии волны с резонансными звездами в окрестности внешнего линдбладовского резонанса можно ожидать нелинейного насыщения при взаимодействии приходящей волны со звездами: поглотив достаточное количество энергии волны, звезды выходят из резонанса. В этих случаях следует ожидать, по-видимому, иных физических условий на границе. Эти принципиальные вопросы в настоящее время остаются вне поля зрения теории дискретных мод.

Сшивка решений уравнения (5) в области $r < r_i$ и $r > r_c$ приводит к условиям на собственные частоты дискретных спиральных мод:

$$\int_{r_i}^{r_c} K(v) dr = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi + \frac{1}{4} i \ln 2 \quad (n = 0, 1 \dots). \quad (7)$$

Мнимая часть частоты в дисперсионном уравнении (7) определяет инкремент неустойчивости:

$$\gamma = \frac{1}{4\tau} \ln 2,$$

где

$$\tau = \int_{r_i}^{r_c} \frac{dr}{|\partial\omega/\partial k|}.$$

Считается, что из набора спиральных мод (7) в галактиках реализуется наиболее быстродействующая мода, для которой максимальна величина γ . Она объясняет правильную двухрукавную (при $m = 2$) структуру. Суперпозиция нескольких мод дает возможность объяснить более сложную структуру, например с ветвлением спиральных рукавов, и т. д. Расчеты показывают⁶⁻¹⁰, что нормальные спиральные ветви типа наблюдающихся в галактиках Sa появляются, когда модель галактики включает массивный балдж с высокой дисперсией скоростей, а плотность «активного» диска падает к центральным областям. Когда модель галактики представляет собой дифференциально вращающийся диск без ядерного балджа или гало, неустойчивые дискретные моды имеют черты, присущие спиральным галактикам с перемычкой (типа SB). В этом случае в окрестности центра структура может быть представлена как суперпозиция лидирующей и отстающей спиральных волн¹⁰. За коротационным резонансом спиральная волна является отстающей. Таким образом, варьируя основные параметры модели — распределение по радиусу плотности и дисперсии скоростей, а также кривую вращения, можно объяснить спиральную структуру галактик разных морфологических типов. Это относится даже к таким сложным системам, в которых видны независимые спиральные ветви внутреннего и внешнего ярусов (NGC 5364, NGC 210,

NGC 4314). Так, если размеры балджа в галактике особенно велики, то вне его неустойчивостью генерируется обычная отстающая спираль, а дисковая компонента внутри балджа при достаточно большой массе может создать полностью независимый узор.

Не будем, однако, забывать, что теория дискретных мод скорее лишь демонстрирует возможности волновой теории, а не дает полного описания физической ситуации. Она построена для достаточно специфической модели галактики, в ней есть проблемы с граничными условиями и т. д. Поэтому в следующем разделе мы рассмотрим другой подход к проблеме спиральных волн.

2.2. Генерация спиральных волн перемычкой и спутником. Распределение массы, а следовательно, и гравитационного поля в центральных областях спиральных галактик часто является неосесимметричным. Ярче всего это демонстрируют галактики типа SB с их мощной, сильно вытянутой перемычкой в центре. Но даже у нормальных спиральных галактик обнаруживается овальность центральной части их балджа (сфероида). Вероятно, такой овал есть у всех галактик с достаточно правильной спиральной структурой¹⁵. Надо, кстати, отметить, что перемычку (бар) галактик типа SB было бы неправильно рассматривать как гипертрофированно вытянутый балдж. Большая скорость вращения перемычек обусловлена сильной концентрацией молодых звезд высокой светимости в этой области, а вовсе не сильной концентрацией массы. Отклонение от осевой симметрии в распределении массы здесь гораздо слабее, чем в распределении яркости. Вытянутый же ядерный балдж — это реальная эллипсоидальность всего центрального тела галактики. Это показывают наблюдения в инфракрасном диапазоне¹⁵.

Очевидно, что гравитационное поле вращающейся перемычки или овала будет возмущать основное осесимметричное состояние всего диска и возбуждать в нем волну. Этот эффект в настоящее время рассматривается большинством авторов как наиболее вероятный механизм генерации спиральной структуры. В галактиках со спутниками спиральные волны могут возбуждаться аналогичным образом приливным воздействием спутника. Фундаментальный же наблюдательный факт состоит в том, что регулярная спиральная структура встречается практически только в тех случаях, когда в центре есть перемычка или овал, а также когда у галактики есть спутник^{15–18}.

В проблеме генерации спиральной структуры баром или неосесимметричным балджем можно выделить три момента: происхождение самой перемычки; реакция газового или звездного диска на ее гравитационное поле; установление волны плотности и влияние спирального гравитационного потенциала. На самом деле генерация структуры представляет собой единый динамический процесс, и лишь трудности его описания, а также желание разобраться в деталях физических явлений заставляют нас делить его на отдельные фрагменты.

2.2.1. Бар-неустойчивость диска. Один из наиболее плодотворных методов изучения динамики звездных систем связан с численным интегрированием уравнений движения большого числа частиц ($N \sim 10^5$), взаимодействующих посредством гравитации. Уже первые численные эксперименты такого рода, в которых изучались двумерные звездные диски^{19–21}, привели к неожиданному результату: довольно быстро диски превращались в вытянутые овалы или эллипсоиды, похожие на вытянутые эллиптические галактики или на перемычки галактик типа SB. Та же картина обнаружилась и в трехмерном случае²². Таким образом, вращающийся диск, в котором гравитационное притяжение уравновешено круговыми (или почти круговыми) движениями звезд, оказывается неустойчивым по отношению к образованию бара. Бар-неустойчивость не возникала в двух случаях. Во-первых, когда кинетическая энергия системы заключена в основном в peculiar скоростях

звезд, а не во вращении (т. е. когда велики некруговые движения). Во-вторых, когда есть другая подсистема, дающая основной вклад в общее гравитационное поле. Такой подсистемой в галактике может быть гало или массивный балдж. Острайкер и Пибл²³, суммировав результаты многих численных экспериментов, нашли, что диск устойчив, если отношение кинетической энергии вращения к потенциальной энергии системы достаточно мало $E_{\text{rot}}/|U| < 0,14$. Прямые эксперименты с двухкомпонентными системами (гало + диск) показали, что превращение диска в эллипсоид не происходит лишь тогда, когда на долю гало приходится более 60% массы системы, причем в этом случае в системе возникает спиральная структура²⁴.

Сейчас мало сомнений в том, что звездные диски спиральных галактик существуют благодаря массивным гало, которые подавляют бар-неустойчивость. Кстати, видимой массы гало обычно недостаточно для стабилизации диска. Поэтому считается, что в значительной степени гало образовано «скрытой» массой. Лишь в центральной части таких систем осесимметричная конфигурация неустойчива, и здесь возникает эллипсоидальная конфигурация звезд—овал или перемычка. Она и генерирует спиральную волну в диске. Любопытно, что скорость вращения перемычки заметно меньше скорости диска в центральной области²². Поскольку скорость вращения спирального волнового узора совпадает со скоростью перемычки, то расстояние, на котором скорости узора и диска сравниваются (точка коротации), находится достаточно далеко от центра, но перемычка может простирается и до коротации^{25, 26}.

2.2.2. Генерация спиральной структуры перемычкой или центральным овалом. Уже первые аналитические расчеты линейной реакции газового диска на поле перемычки^{27, 28} позволили сделать вывод, что она может приводить к образованию спиральной структуры. Более детальные результаты были получены путем численного интегрирования двумерных нелинейных уравнений гидродинамики, которые описывают изотермический, дифференциально вращающийся тонкий диск, удерживаемый в равновесии балансом вращения и гравитации. Приближение изотермического уравнения состояния используется потому, что время лучистого охлаждения газа обычно значительно меньше времени характерных динамических процессов. Однако в ряде случаев необходим более реалистичный учет происходящих в газе тепловых процессов (см. п. 3).

Численные расчеты показали, что при включении поля перемычки исходное осесимметричное состояние такой системы возмущается, и в ней возникает волна. Она имеет вид отстающих спиральных ветвей, причем волновой узор вращается вокруг центра с угловой скоростью перемычки^{29, 30} (рис. 3). Эта волна не является самосогласованной, поскольку собственная гравитация возмущений плотности газа не учитывается. Но, как было показано позднее, учет самогравитации принципиально не меняет картину³¹.

Отмеченные расчеты позволяют непосредственно судить о поведении газовой компоненты диска галактик, но не только об этом. Двумерные движения в плоскости вращающегося звездного диска в известном приближении также можно описывать газодинамическими уравнениями. Как впервые было показано в³² (а затем в других работах^{33, 34}), в плоскости, перпендикулярной оси вращения системы, кинетическое описание «звездного газа» может быть заменено уравнениями бесстолкновительной звездной гидродинамики, аналогично гидродинамическому описанию Чу, Гольдбергера и Лоу³⁵ для бесстолкновительной плазмы в магнитном поле.

Это дает возможность распространить результаты газодинамических расчетов на звездную компоненту. Разумеется, конкретные свойства волн в звездном и газовом диске будут различны из-за различия уравнений состояния, дисперсионных свойств в резонансных точках и т. д. Но вывод о возбуждении волн, которые образуют спиральную структуру с отстающими ветвями, вращающимися со скоростью перемычки, является, очевидно,

общим. Это непосредственно подтвердила работа³⁶, в которой исследовалась реакция не газа, а $\sim 10^4$ отдельных взаимодействующих частиц— «звезд» на медленно нарастающее поле перемычки. Как и ожидалось, в диске возникало долгоживущее спиральное уплотнение, вращающееся твердотельно вокруг центра с такой же, как у перемычки, угловой скоростью. Амплитуда этой



Рис. 3. Вид спирального узора, инициированного баром (по расчетам в работе²⁹)

волны оказывается сравнительно небольшой. Это понятно, поскольку эффективный показатель адиабаты «звездного газа» равен $\gamma = 2$, в то время как для газа показатель адиабаты обычно принимается равным $\gamma = 1$.

Интересно отметить, что отстающие ветви не обязаны своим происхождением дифференциальности вращения диска. Точно так же они возникают и в твердотельно вращающихся дисках³⁷. В целом же конкретная геометрия волнового узора и его мощность зависят от характеристик перемычки, кривой вращения диска и т. д. Варьируя только скорости вращения диска и перемычки, можно получить чуть ли не все морфологические типы спиральных узоров (рис. 4, 5), включая кольцевые структуры³⁸.

Важную роль в морфологии спирального узора играет область коротации. Как показано в³⁹, резонансное поведение возбуждаемых гармоник

в области коротации приводит к тому, что отклик на потенциал перемычки в окрестности коротации имеет вид кольца. Этот результат был подтвержден в более поздних расчетах^{38, 40}.

Численное интегрирование уравнений газодинамики позволило обнаружить интересные эффекты в центральной области системы, где перемычка вращается медленнее быстровращающегося газового диска. Один из них — предсказанное еще в 60-х годах⁴¹ сильное сжатие газа на передней кромке перемычки. Похоже, мы действительно наблюдаем в галактиках такой

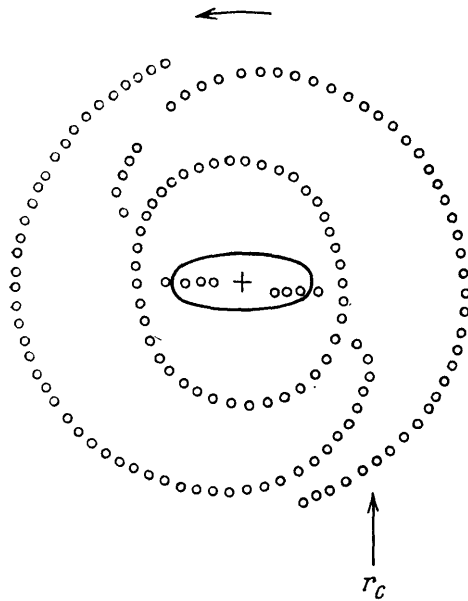


Рис. 4. Вид спирального узора, возбужденного перемычкой в дифференциально вращающемся диске³⁸. В окрестности коротации возбуждается кольцевая структура. Положение коротации показано стрелкой

можно, свидетельствует лишь о несовершенстве теории дискретных мод.) Появление спиральных мод как отклика на неосесимметричное вращающееся гравитационное поле представляется физически совершенно естественным. Это в сочетании с большой универсальностью позволяет считать его одним из наиболее надежно установленных механизмов генерации спиральных ветвей галактик.

2.2.3. Возбуждение спиральных волн спутниками галактик. Столь же физически очевидна возможность генерации волн в галактике приливным воздействием ее спутника. Основные результаты, связанные с этим механизмом, также были получены путем численного интегрирования нелинейных уравнений газодинамики. Расчеты для достаточно реалистических моделей галактик показали, что как при близком пролете⁴³, так и при периодическом движении по замкнутой орбите⁴⁴ спутник генерирует в диске спиральный узор. Удивительно хорошо воспроизводятся основные черты наблюдаемой картины распределения газа и поля скоростей во втором случае. В диске галактики образуются открытые спирали, одна из которых переходит в «мост», соединяющий галактику с ее спутником. Часть массы газа захватывается спутником, и от него тянется газовый шлейф — «хвост» и т. д. В первом же случае⁴³ возникает двухрукавный узор, который живет на протяжении примерно 10 оборотов диска, и, постепенно закручиваясь, исчезает.

Любопытно отметить следующее. В работе¹⁴ было высказано предположение, что вращающийся вокруг галактики спутник не сможет эффективно

эффект. Он проявляется узкой полосой пыли, тянущейся вдоль передних кромок перемычки и нередко переходящий с концов перемычки на заднюю кромку спиральных ветвей (см. рис. 5). Напомним, что в галактиках пыль связана с газом, и пылевые полосы указывают на области сильного сжатия газа. При этом, как и в результатах расчетов, область сжатия не совсем параллельна оси перемычки: вдали от центра она прилегает к перемычке ближе^{38, 42}.

Таким образом, центральные овалы и перемычки способны объяснить не только генерацию спиральной структуры, но и происхождение ряда важных структурных особенностей в газовой компоненте галактик. Как генератор спиральных волн, перемычка имеет очевидные преимущества перед механизмом неустойчивости в теории дискретных глобальных мод. Здесь нет трудностей с граничными условиями, ясна картина нелинейной стадии. (Впрочем, это, воз-

генерировать спиральную структуру из-за существенного различия временных масштабов галактики и системы галактика — спутник. На самом деле это, вероятно, не так. В работе ⁴⁵ исследовалась генерация спутником, вращающимся по вытянутой долгопериодической орбите. Оказалось, что и в этом случае возникает спиральный узор; он медленно вращается, «отслеживая» движение спутника-генератора.

В заключение сделаем замечание общего характера. Как подчеркивали Лин и Бертин ¹⁴, механизм генерации спиральных ветвей гравитационным

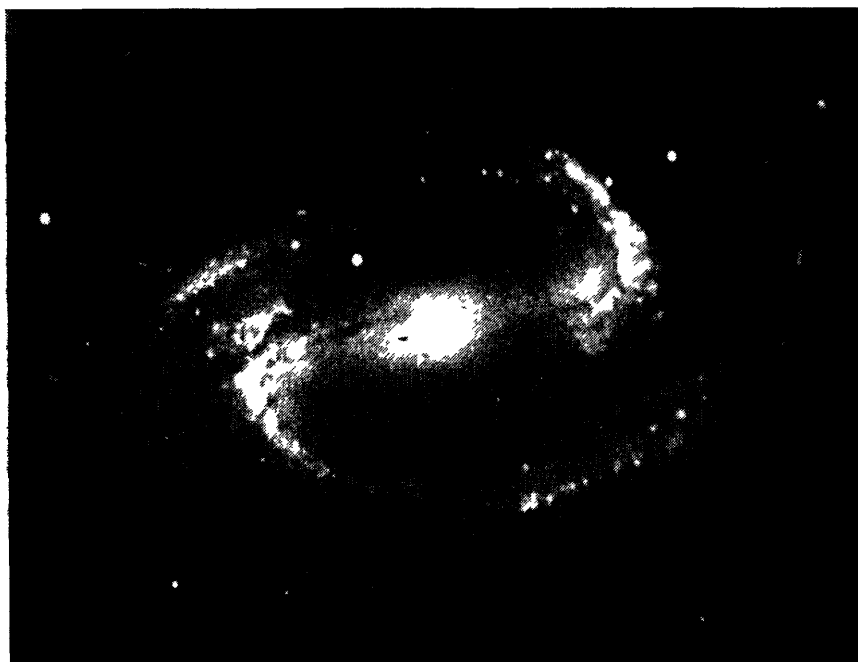


Рис. 5 Спиральная галактика с баром (перемычкой) — NGC 1300

нолем перемычек или спутников в каком-то смысле смыкается с подходом, основанным на внутренней динамике дискретных спиральных мод. Если галактический диск находится в условиях, исключающих сильные неустойчивости, и возможны лишь слаборастущие или затухающие моды, гравитационное поле спутника или перемычки усиливает некоторые из них и поддерживает в течение длительного времени. Однако расчеты, демонстрирующие механизм отбора дискретных спиральных мод, до сих пор проведены не были.

2.3. Стохастическое звездообразование. С конца 70-х годов была проведена серия работ, в которых спиральная структура рассматривалась как результат действия дифференциального вращения галактики на случайно разбросанные по диску протяженные области звездообразования ^{46–48}. Дифференциальное вращение закручивает эти области в спиральные сегменты, и в целом создается видимая картина спиральной завихренности в системе. Разумеется, эта картина непостоянна и нерегулярна, т. е. она не может объяснить правильную симметричную двухрукавную структуру галактик типа M51. Но есть немало систем, где регулярной структуры и в самом деле не видно, а впечатление спиральности возникает от многочисленных обрывков, фрагментов спиральных ветвей (фрагментарная или флоккулентная спиральная структура; см. раздел 4).

Идея эта, конечно, в целом не нова. Такой механизм генерации спиралей в конкретном виде разработали, например, Голдрейх и Линден-Белл ⁴⁹.

Новый момент состоял в том, что в рамках вполне определенной картины звездообразования («индуцированное», распространяющееся звездообразование, стохастически возникающее в разных частях галактики) удалось численно проследить эволюцию областей звездообразования в дифференциально вращающемся диске и воспроизвести получающиеся при этом картины. Несомненно, они производят большое впечатление (рис. 6). Это, конечно же, привлекло большое внимание к работам по образованию спиральной структуры в результате стохастического звездообразования.

Очевидно, что возможности обсуждаемой идеи довольно ограничены. В ее рамках нельзя объяснить такие фундаментальные факты, как существование галактической ударной волны на внутренней кромке спиральных

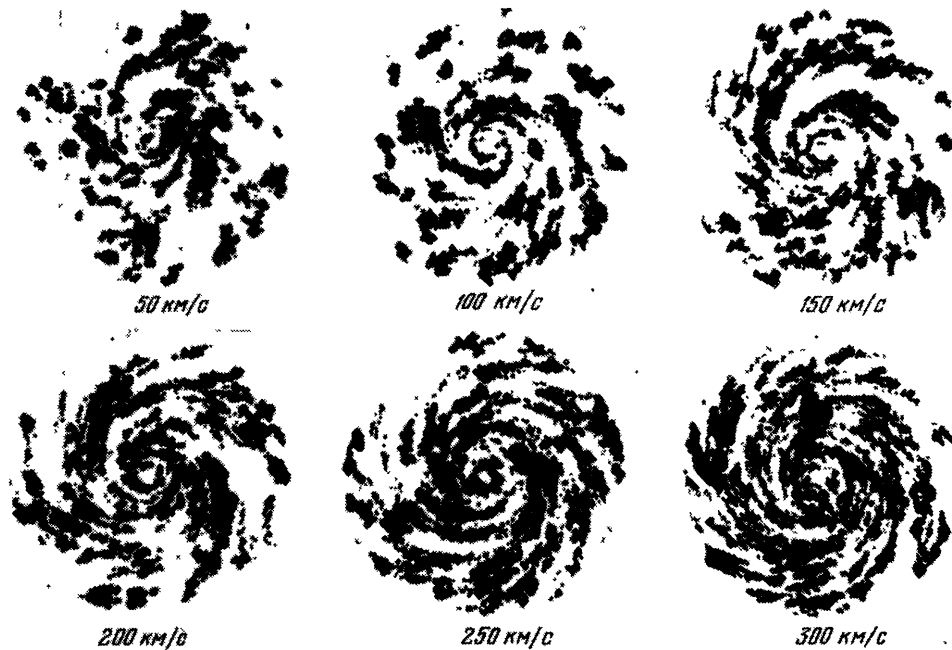


Рис. 6. Модели спиральной структуры, возникающей при самораспространяющемся стохастическом звездообразовании и плоской кривой вращения со скоростями (в км/с), указанными на рис. (Из работы Сейдена и Герола ⁵⁰, 1979)

ветвей, градиент возрастов звезд поперек спиральных ветвей, спиральное поле скоростей звезд в диске. Тем не менее эффекты стохастического звездообразования безусловно действуют в галактиках. Это прекрасно видно на примере иррегулярных галактик, например в Большом Магеллановом облаке, и при наличии дифференциального вращения они, безусловно, придают элемент спиральности пространственному распределению ярких областей, связанных со звездообразованием. Если области звездообразования упорядочены в пространстве каким-то внешним фактором, то может возникнуть даже правильная двухрукавная спираль. В работе ⁵⁰ в качестве такого фактора рассматривается плоскость «гипергалактики» (или полярного кольца), в месте пересечения которой с диском галактики формируются области звездообразования.

Возможность формирования той или иной структуры в распределении ярких областей звездообразования сильно связана с характером самого процесса звездообразования. Он может распространяться в Галактике как волна и может быть самоподдерживающимся ⁵¹⁻⁵³. Это интересное свойство объясняется воздействием уже имеющихся звезд на межзвездную среду, из

которой рождаются новые звезды. Так, целый ряд факторов может инициировать звездообразование: ударные волны от вспышек сверхновых, взаимодействующие с межзвездными облаками⁵⁴, ионизационные фронты вокруг массивных ОВ-звезд⁵⁵, звездный ветер на различных стадиях эволюции звезд⁵⁶. С другой стороны, вспышки сверхновых, прогревая и турбулизируя межзвездную среду, могут подавлять звездообразование^{57, 58}. В звездно-газовой подсистеме галактики, таким образом, действуют различные нелинейные обратные связи, которые, в принципе, могут привести к спонтанной пространственно-временной самоорганизации в галактике. Подобные примеры хорошо известны в биологии, гидродинамике и химии⁵⁹.

Герола и Сейден⁴⁸ численно промоделировали процесс распространения звездообразования в галактическом диске следующим образом. Диск был разбит на элементарные ячейки, содержащие газ в «активной» фазе, т. е. способный к звездообразованию, и в неактивной. Ячейки вращаются вокруг центра диска по закону, характерному для реальных галактик: скорость быстро возрастает от центра по закону твердотельного вращения и остается постоянной в остальной части диска. В начале счета приблизительно в 1 % ячеек помещаются «молодые звездные скопления», которые с вероятностью P_{eff} «индуцируют» рождение звезд в соседних ячейках. Предполагалось, что вероятность образования звезд зависит от количества «активного» газа в ячейке:

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{st}} D_a^n \quad (8)$$

Учитывается, что в области, где недавно произошло звездообразование, вещество в течение некоторого времени не может рождать новые звезды. Это моделируется введением времени восстановления τ , в течение которого газ в ячейке из неактивной фазы переходит в активную. Кроме индуцированного звездообразования, учитывается спонтанное рождение звезд, но с вероятностью примерно в 100 раз меньшей.

Результаты вычислений показали, что в системе появляется спиральная структура, в большинстве случаев многоруканная, очерченная самыми молодыми звездами (см. рис. 6). Она образована фрагментами спиральных ветвей, причем отдельные фрагменты закручиваются и исчезают, но им на смену появляются другие, так что спиральный узор, оказывается, существует все время счета.

Глобальные спиральные узоры галактик обусловлены, несомненно, спиральной волной плотности. Однако параллельно может действовать стохастическое звездообразование, внося свой вклад в наблюдаемую картину. Совместный эффект двух механизмов звездообразования — стохастического и связанного с волной — исследовали Герола и Сейден⁶⁰. В своей теории они ввели новый параметр P_{sdw} , описывающий дополнительную вероятность рождения звезд в спиральной волне плотности. Если эффективность рождения молодых звездных группировок в волне велика, то спиральный узор хорошо очерчен, а ветвления и вторичные детали глобального узора, вызванные самораспространяющимся звездообразованием, выглядят весьма реалистичными.

Вопрос о взаимодействии спиральной волны плотности и стохастического звездообразования исследовали в более сложной модели Робертс и Хаусман⁶¹. Они рассмотрели динамику гигантских молекулярных облаков и молодых звезд, движущихся по баллистическим орбитам в поле спиральной волны плотности и осесимметричного потенциала галактики. Часть звезд в конце своей эволюции вспыхивает как «сверхновые». В облаке может начаться процесс звездообразования либо под действием столкновения с другим облаком, либо в результате воздействия оболочки близко вспыхнувшей сверхновой. Оказалось, что в такой системе возникает спиральный узор, не слишком правильный, как и в реальных галактиках, хорошо очерченный молодыми звездами и облаками

Интересной является возможность когерентных осцилляции темпа звездообразования, которые могут иметь отношение к вспышкам звездообразования в галактиках и к возникновению пространственно-временного упорядочения звездообразования. Осцилляции обнаружались как в численных экспериментах^{47, 48}, так и в аналитических моделях с индуцированным рождением звезд⁶². Переход к колебаниям звездообразования в экспериментах Сейдена, Шулмана и Фейтцингера⁴⁷ зависит от времени восстановления τ , в течение которого газ из неактивной фазы переходит в активную: они проявляются только при достаточно большом значении τ .

Вообще возникновение осцилляции темпа звездообразования можно рассматривать как проявление неустойчивости системы. Как показано в работах^{62, 63}, подобная неустойчивость может возникнуть также в трех компонентной системе, состоящей из атомарного газа, молекулярных облаков и массивных звезд, и приводит к режиму нелинейных периодических колебаний. Потеря устойчивости системой связана со сложным характером образования молекулярного водорода из атомарной фазы, когда темп образования молекул нелинейно зависит от массы уже имеющегося вещества в молекулярной форме.



Рис. 7. Пример двухрукавного спирального узора, возникающего при моделировании осциллирующей моды звездообразования (⁴⁷ 1982). Представлена светимость звезд в полосе V

Интересно, что одновременно с незатухающими колебаниями темпа звездообразования в моделях Геролы и Зейдена наблюдались наиболее гладкие и хорошо очерченные спиральные узоры, похожие на узоры галактик с двухрукавной структурой (рис. 7). Потеря устойчивости динамического равновесия в нелинейной системе звезды-облака позволяет интерпретировать

появление в численных экспериментах правильной спиральной структуры как пример пространственной самоорганизации, так что нелинейная самоорганизация в принципе может быть механизмом создания крупномасштабных спиральных узоров в галактиках. Однако совсем иной вопрос — действительно ли этот механизм ответственен за образование такой структуры в галактиках. Эффективность спонтанного звездообразования, как показывают некоторые данные, может быть существенно выше, чем индуцированного. Вызывает сомнение сама возможность распространения звездообразования от комплекса к комплексу по пространству с малой плотностью газа. Растягивание дифференциальным вращением достаточно больших молодых звездных комплексов дает картину фрагментарного спирального узора и без привлечения индуцированного звездообразования^{64,65,111}.

2.4. Другие модели происхождения спиральной структуры. В ряде работ (см., например,⁶⁶) предложено рассматривать спиральную структуру как результат развития неустойчивости типа Кельвина — Гельмгольца в газовом диске галактики. Такие неустойчивости возникают в жидкостях со слоисто-неоднородными потоками. Предполагается, что в галактиках необходимая неоднородность течения газа создается в некоторой области вблизи центра, где с удалением от центра скорость вращения быстро уменьшается на достаточно большую величину. С наблюдательной точки зрения в этом подходе есть несколько проблем. В частности, характерные вариации плотности звездного диска галактик, связанные со спиралью, составляют 20—40 %. Ясно, что даже сильно нелинейные возмущения в газовой подсистеме не могут в такой степени перераспределить вещество звездного диска, обладающего большой дисперсией скоростей

и подавляющей частью массы (масса звездного диска обычно на порядок и более превышает массу газа). Кенникут и Эдгар⁶⁷ на примере галактик NGC 7743 и NGC 495, в которых вообще нет газа, но которые, тем не менее, имеют спиральную структуру с правильными и гладкими ветвями, наглядно демонстрируют, что спиральная структура обусловлена звездами, а не газом (рис. 8). Данные¹¹¹ о NGC 2566, вопреки⁶⁶, согласуются с теорией⁵.

Особая разновидность спиральной структуры у некоторых галактик, вероятно, связана с извержением газа из центра системы. Примером является

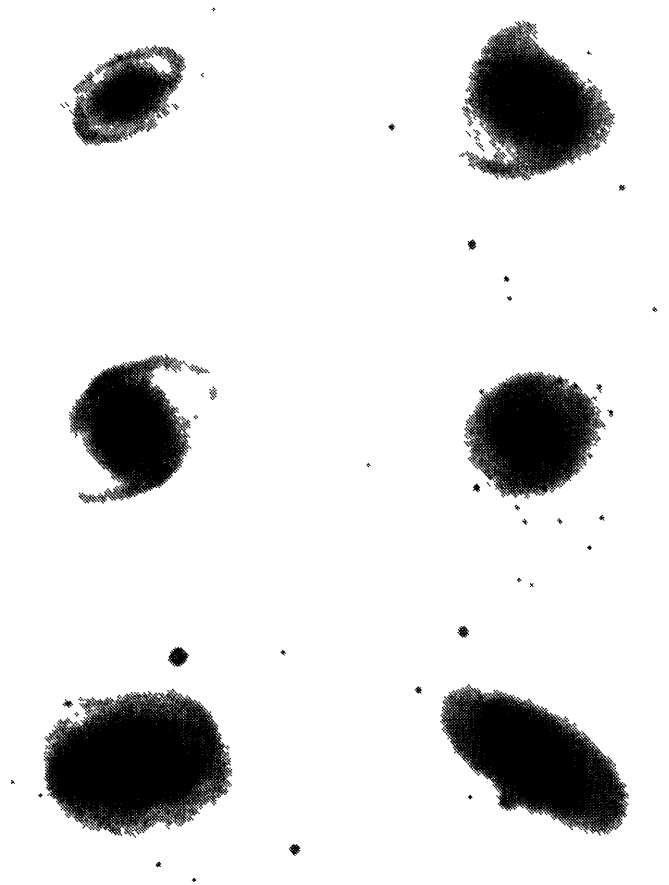


Рис. 8 Галактики с гладкими спиральными рукавами, состоящими из старых звезд. (Из работы Сэндидж¹¹², 1983)

галактика NGC 4258, которую исследовали Ван-дер-Круйт, Оорт и Мэтьюсон⁶⁸. Радиообзор этой галактики выявил две мощные газовые спиральные ветви, которые смещены почти на 90° относительно спиралей, видимых в оптическом диапазоне, т. е. обычных звездных ветвей. Газ в ветвях движется со значительной скоростью наружу. Это говорит о том, что он был выброшен сравнительно недавно из ядра галактики. В работе⁶⁸ предложен механизм, согласно которому такие ветви образуются при извержении газовых облаков с общей массой порядка $10^8 M_\odot$ из ядра галактики. Авторы⁶⁸ полагают, что и обычные ветви возникают подобным образом. Однако, как отмечалось в⁴, масса газовых рукавов столь мала, что она заведомо не

может объяснить наблюдаемые звездные ветви. Есть и другие возражения против этой идеи, но мы не будем их обсуждать, поскольку сама идея представляет сейчас лишь исторический интерес.

3. Галактические ударные волны и газодинамика с фазовыми переходами.

3.1. Физика межзвездного газа. С физической точки зрения, пожалуй, наиболее увлекательные аспекты волновой теории спиральной структуры связаны с совершенно необычной газодинамикой межзвездной среды. Не менее увлекательны они и с астрономической точки зрения, поскольку с ними связаны самые эффективные проявления спиральных волн: процессы, которые разыгрываются при движении межзвездного газа в гравитационных полях спиральных волн, ответственны, в конечном счете, за чрезвычайно высокую светимость спиральных ветвей, за сильное синхротронное радиоизлучение и гамма-излучение спиральных рукавов, за облачную структуру межзвездной среды и т. д.

Чем необычна газодинамика межзвездной среды? Ответ лежит в особенностях происходящих в ней тепловых процессов: определяющую роль в ее динамике играют объемные потери тепла (лучистое охлаждение) и объемный нагрев внешними источниками (космическими лучами).

Механизм охлаждения связан в первую очередь с возбуждением атомов, ионов и молекул газа при неупругих столкновениях со свободными тепловыми электронами. При переходе в основное, невозбужденное состояние излучаются электромагнитные кванты, а поскольку межзвездный газ оптически



Рис. 9. Функция охлаждения межзвездной среды. Указаны процессы, которые дают основной вклад в охлаждение в том или ином диапазоне температур

прозрачен, то тепловая энергия в конечном итоге уносится излучением из системы. Скорость этого процесса пропорциональна частоте парных столкновений, следовательно, квадрату плотности числа частиц n^2 . Его эффективность зависит от температуры, степени ионизации и химического состава. Межзвездный газ в Галактике состоит примерно на 98 % из водорода и гелия, и на 2 % — из всех остальных элементов таблицы Менделеева. Он ионизируется космическими лучами и рентгеновским излучением, и потому в нем всегда есть свободные электроны. В этих условиях при температурах вплоть до 10^4 К основную роль в охлаждении играет возбуждение электронным ударом уровней тонкой структуры углерода, кремния, железа, а также колебательных и вращательных уровней молекулы H_2 (если водород находится в молекулярной форме). Начиная с температуры $T \approx 10^4$ К основной процесс связан с возбуждением атома водорода, и доминирующим становится «охлаждение на квантах Ly_α ». При температурах порядка $2 \cdot 10^4$ – 10^6 К большой вклад и в охлаждение дают кислород, азот и другие элементы, а при $T \approx 4 \cdot 10^7$ доминируют тормозные потери при кулоновских столкновениях. Все это обуславливает сложную структуру эффективности охлаждения как функции температуры. Эту функцию, $\Lambda(T)$, часто называют функцией охлаждения (рис. 9).

Нагрев газа происходит следующим образом. Протоны космических лучей ($E \sim 1$ Мэв) выбивают электроны из атомов водорода, передавая им часть своей энергии, $\Delta E \sim 50$ эв. При упругих столкновениях с нейтральными атомами эти электроны термализуются, передавая атомам избыток энергии. В результате внутренняя энергия газа увеличивается. Скорость этого процесса, очевидно, пропорциональна плотности газа n , а его эффективность Γ зависит от интенсивности космических лучей. Изменение плотности внутренней энергии вследствие процессов охлаждения и нагрева в межзвездном газе описывается уравнением

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (nkT) = \Gamma n - \Lambda n^2.$$

В стационарном состоянии, когда $\Lambda n^2 = \Gamma n$, получается связь между плотностью n и температурой T , которую можно, очевидно, преобразовать в соотношение между плотностью и давлением $P = nkT$. Эту зависимость $P = P(n)$, определяемую видом функции $\Lambda(T)$ и величиной Γ , можно назвать уравнением состояния межзвездного газа. Как видно из рис. 10, зависимость $P(n)$ немонотонна, и существует область значений параметров, в которой одному и тому же давлению соответствуют три значения плотности. Поэтому в равновесной межзвездной среде при одинаковом давлении могут, в принципе, реализоваться три разных состояния газа, которые называют фазами межзвездной среды (зависимость $P(n)$ на рис. 10 очень похожа на кривую равновесия фаз жидкость — пар, описываемую уравнением Ван-дер-Ваальса).

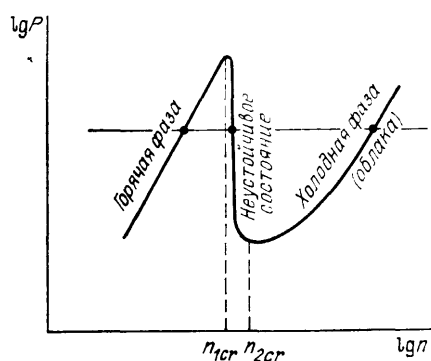


Рис. 10. Связь между давлением и плотностью в стационарной межзвездной среде, нагреваемой космическими лучами и охлаждающейся излучением

Промежуточная фаза, где $\partial P / \partial n < 0$, неустойчива, поэтому, на самом деле реализоваться могут только две крайние фазы: горячая ($T > T_{1cr}$) и холодная ($T > T_{2cr}$). И они действительно наблюдаются в Галактике в виде холодных плотных облаков и горячего разреженного межзвездного газа.

Параметры межзвездного газа в спиральных галактиках — по-видимому, не случайно — очень часто лежат в окрестности немонотонной части кривой равновесия $P(n)$. Именно это обстоятельство приводит к весьма нетривиальной газодинамике.

Во многих динамических процессах в межзвездной среде характерные времена охлаждения, $t_c \sim kT / \Lambda n$, и нагрева, $t_h \sim kT / \Gamma$, существенно меньше характерных динамических времен. В этих случаях значения P и n будут не слишком сильно отличаться от равновесных. Представим себе, что при прохождении волны сжатия плотность некоторого элемента массы газа в горячей фазе увеличивается до значения $n = n_{1cr}$, соответствующего максимуму кривой равновесия. Дальнейшее сжатие приводит к резкому падению температуры и давления. В результате плотность начинает катастрофически расти и будет увеличиваться до тех пор, пока давление в этом элементе массы и в окружающей горячей среде не выравняется. В новом состоянии плотность и температура соответствуют устойчивой холодной фазе и примерно на два порядка отличаются от плотности и температуры окружающей горячей фазы. Так, первоначально слабонеоднородное течение газа может переходить в состояние с сильными разрывами. По существу, происходит образование структуры, образование многофазной среды со скачками пара-

метров на границе фаз. Именно это отличает динамику межзвездного газа от «классической» газодинамики.

Характер возможных типов течений, типов разрывов и структур в межзвездной среде чрезвычайно разнообразен; с целым рядом таких «неклассических» течений мы сталкиваемся при анализе движения газа в гравитационных полях спиральных волн.

3.2. Ударная волна, аккреционная волна, трехфазное течение. В спиральной галактике газ движется под действием гравитационного поля Φ , которое складывается из регулярного осесимметричного поля всей системы Φ_G и поля спиральных волн Φ_s . Если $\Phi_s = 0$, то возможно чисто круговое движение с угловой скоростью $\Omega = \Omega(R)$, так что $\Omega^2(R)R = \partial\Phi_G/\partial R$, где R — расстояние от центра системы.

Предположим, что на состояние с круговым движением газа накладывается спиральное возмущение гравитационного потенциала Φ_s , вращающееся с угловой скоростью Ω_p , которое приводит к дополнительным движениям в основном в плоскости диска.

Течение газа исследовалось численно в работах^{69–72} с использованием параметров, характерных для нашей Галактики. И уже в довольно упрощенной постановке задачи были обнаружены крайне необычные с точки зрения «классической» газодинамики решения.

3.2.1. Галактическая ударная волна. Фазовые переходы. Когда начальное однородное состояние соответствует горячей фазе (оно изображено на рис. 11

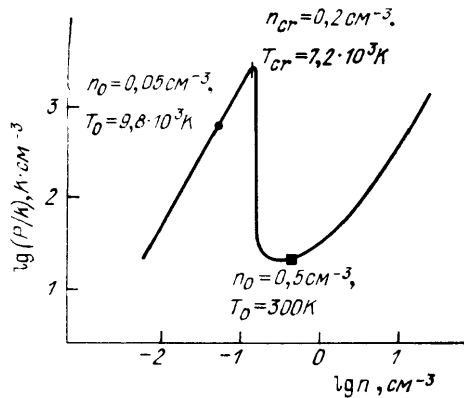


Рис. 11. Зависимость давления межзвездной среды от плотности при скорости первичной ионизации $\xi = 10^{-16} \text{ с}^{-1}$. Кругом отмечены параметры начального состояния, с которого начинается развитие течения, приведенного на рис. 12, квадратиком — на рис. 14. Указаны критические параметры

кружком на кривой равновесия фаз), то при включении спирального поля Φ_s возникает следующая картина (рис. 12). В системе координат, вращающейся со скоростью Ω_p (в ней спиральное поле покоится), при сверхзвуковом течении газа через потенциальную яму в области перед минимумом ямы начинает формироваться скачок плотности, на котором нормальная компонента скорости терпит разрыв. Возникает ударная волна, неподвижная относительно поля Φ_s , которую и называют галактической ударной волной. Далее возможны две ситуации. Во-первых, возможен случай, когда устанавливается стационарное течение, при котором амплитуда ударной волны, как и весь профиль течения, не меняется со временем. Этот случай реализуется тогда, когда плотность на фронте ударной волны не достигает критического значения $n = n_{cr}$ (см. рис. 11). Если же сжатие в волне столь велико, что плотность доходит до уровня $n = n_{cr}$, то происходит следующее. При дальнейшем сжатии на фронте волны в некотором элементе объема газа резко падает температура и растет плотность. Через некоторое время этот элемент в виде плотного холодного облака выносится как целое из области фронта (в данном расчете, разумеется, облако одномерно). Плотность на фронте падает ниже критического уровня, затем постепенно нарастает.

тает вновь, и процесс повторяется. В результате фронт волны действует как «механизм», непрерывно производящий холодные облака межзвездного газа, создающий двухфазную среду. Этот случай приведен на рис. 13.

Любопытно, что вынос облаков холодной фазы из области фронта связан с криволинейностью движения, с действием силы Кориолиса. Решение задачи при тех же параметрах, но в прямолинейной геометрии, показало, что

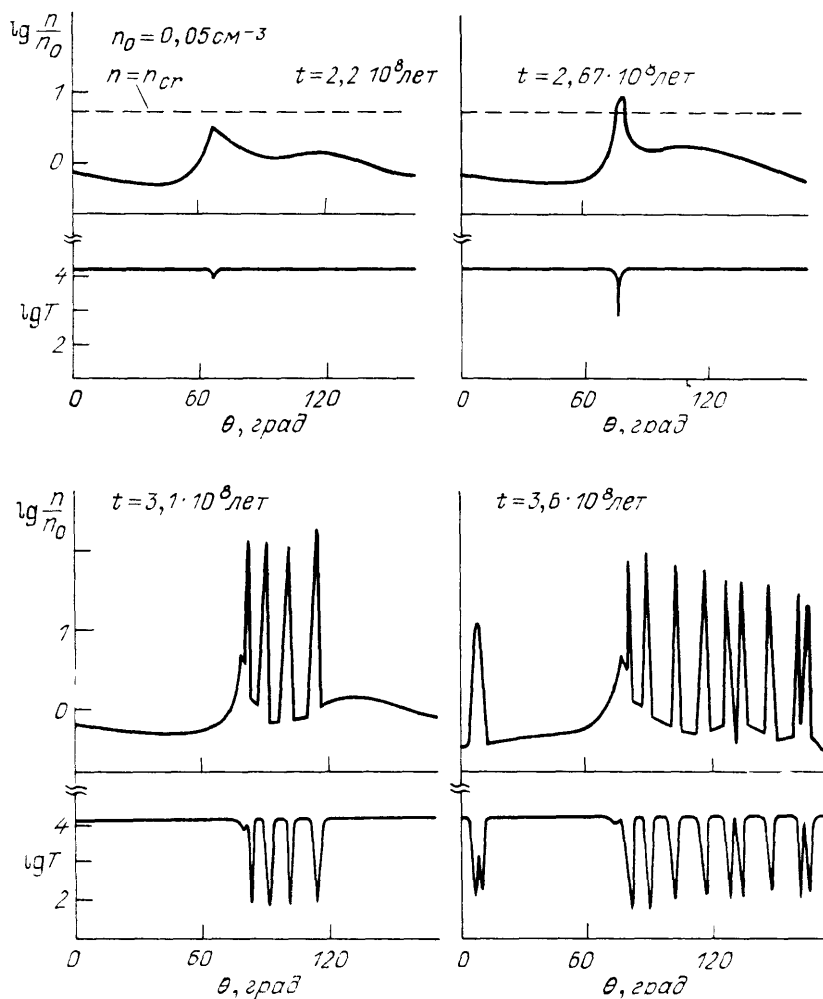


Рис. 12. Образование галактической ударной волны и облаков газа на фронте. Для разных моментов времени приведены профили плотности и температуры в зависимости от галактоцентрического угла для случая двухрукавной спирали. Положение центра спирального рукава соответствует $\theta = 90^\circ$, положение между рукавами соответствует углам $\theta = 0^\circ$ и 180° . Размеры облаков (пики на профиле плотности) приведены в масштабе. Штриховой линией показано начальное состояние

в области фронта идет неограниченный рост плотности без выноса элементов холодного вещества наружу⁷².

3.2.2. *Аккреционная волна.* Совершенно другая картина возникает при тех же параметрах, но при начальном сочетании, соответствующем холодной фазе (на рис. 12 оно обозначено квадратиком). В этом случае в центре потенциальной ямы φ_s возникает волна необычайно высокой амплитуды ($n/n_0 \sim 100$). В узкой области фронта волны на длительное время задерживаются большие массы газа, скорость газа падает до чрезвычайно низких значений, причем есть случаи, когда скорость за фронтом вообще меняет знак и газ с обеих сторон течет в область фронта. Этот тип течения газа, обнаруженный в работе⁷¹, был назван аккреционной волной.

3.2.3. *Трехфазное течение.* Расчет этого же варианта, но с величиной $R = 100$ кпк вместо $R = 5$ кпк, обнаружил еще один тип движения в газе; он был назван трехфазным течением⁷¹. Изменение R наиболее существенно отражается на невозмущенной скорости газа относительно спирального потенциала: она сильно уменьшается и становится сравнимой с начальной скоростью звука (в предыдущем случае она была примерно в шесть раз выше скорости звука). Это обстоятельство радикально меняет характер движения газа по сравнению с предыдущим случаем: вместо аккреционной волны здесь развивается течение, названное в работе⁷¹ трехфазным. Его особенностью является следующее. Вблизи центра потенциальной ямы плотность газа вначале плавно увеличивается примерно в два раза. Вдали от него она приблизительно во столько же раз уменьшается, но здесь это уменьшение сопровождается переходом плотности от $n > n_{2cr}$ к $n < n_{1cr}$. При $n < n_{1cr}$ газ очень быстро нагревается до температур $T > T_{1cr}$.

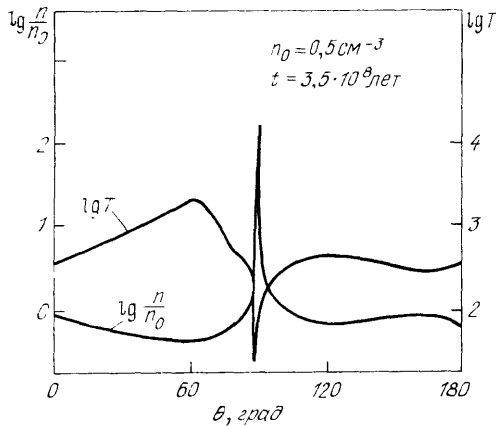


Рис. 13. Аккреционная волна. Начальное состояние показано штрихпунктиром. За время $t \approx 3 \cdot 10^8$ лет волна становится квазистационарной

В результате возникает обширная область, в которой плотность лишь в два раза меньше начальной, тогда как температура возрастает на полтора порядка по сравнению с начальной. По сути, возникают две фазы с резким скачком температуры на границе; плотность на границе раздела фаз непрерывна и вообще меняется в пространстве мало.

Очевидно, на границе фаз возникает скачок давления. Далее он сжимает прилегающие к границе слои практически начальной холодной фазы, в результате формируется узкая область сильно сжатого, холодного газа (холодное облако). Скачок температуры на этой границе увеличивается, но скачок давления уменьшается за счет формирования скачка плотности. Теперь уже имеются три сильно различающихся состояния, три «фазы» со скачками параметров на границах. Во-первых, фаза, где параметры близки к начальным. Во-вторых, фаза с высокой температурой ($T \sim 10^4 \text{ К}$) и довольно высокой плотностью (на ее границе — большой скачок давления). В-третьих, фаза, в которой при практически начальной температуре плотность почти на порядок выше начальной (на границе — скачок плотности и давления) (рис. 14).

Горячая фаза находится вблизи верхней критической точки, поэтому колебания плотности в ней, обусловленные динамическими процессами, приводят, в свою очередь, к фазовым переходам. Те элементы объема, в которых плотность оказывается выше критической, быстро охлаждаются, образуя новые облака холодной фазы.

В заключение заметим, что структурные элементы, возникающие при течении межзвездного газа в поле спиральной волны, можно разделить на два типа. Во-первых, это сильно нелинейные волны, например, галактическая ударная волна и аккреционная волна. Здесь характерные области изменения параметров (скажем, фронт ударной волны) движутся по газу, каждый элемент массы газа входит в такую область и выходит из нее. Во-вторых, это области разных фаз, связанные с данными элементами газа и движущиеся вместе с ними (облака холодной фазы, межоблачный газ). В наших примерах к ним относятся «облака», рождающиеся на фронте ударной волны.

3.3. Галактические ударные волны. Области сильно сжатого межзвездного газа, тонкой полосой тянущиеся вдоль спиральных рукавов, отчетливо обнаруживаются во многих галактиках. Совершенно естественная и, по существу, единственная интерпретация состоит в том, что наблюдаются галактические ударные волны как области повышенной плотности газа и пыли, и поэтому существование таких областей рассматривается как однозначное указание на то, что спиральная структура обусловлена

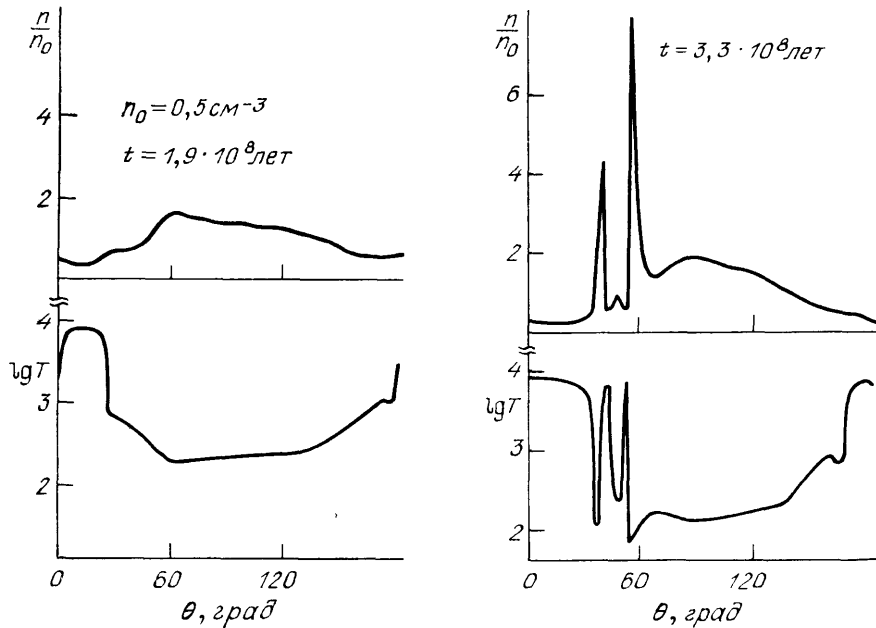


Рис. 14. Развитие трехфазного течения. За время $t = 2 \cdot 10^8$ лет возникает третья фаза — холодные облака, с плотностью, много меньшей плотности начальной холодной фазы

волной гравитационного потенциала, идущей по газовому диску галактики. Ничего подобного, очевидно, нельзя ожидать, если считать, что явление спиральной структуры обусловлено негравитационными или неволновыми процессами, предлагаемыми в качестве альтернативы теории спиральных волн (см. раздел 2).

Галактические ударные волны во внешних галактиках особенно ярко обнаруживаются в двух явлениях. Первое — это узкая полоса пыли, которая тянется иногда на несколько килопарсеков (см. рис. 1), обычно по внутренней кромке вдоль спиральной ветви. На фотографиях галактик она видна как черная полоса на ярком фоне ветви, причем ее ширина во много раз меньше ширины самой ветви. Пылевая полоса является оптическим индикатором области высокой плотности газа, поскольку газ при движении увлекает пыль с собой^{79,83}.

Второе — узкая область вдоль спиральных ветвей оказалась сильным источником синхротронного излучения. Связь с ударной волной здесь следующая. В ударной волне вместе с газом сжимается вмороженное в него магнитное поле. С магнитным полем сжимаются и космические лучи, одновременно увеличивается их энергия. Все эти факторы приводят к мощному усилению синхротронного излучения, возникающего при движении релятивистских электронов космических лучей в магнитных полях галактик.

В нашей Галактике ударная волна также была обнаружена по усилению синхротронного излучения из области спиральных рукавов (см., например, ⁷³). Оно проявляется пиками в распределении интенсивности излучения по галактической долготе: пики обнаружались в тех направлениях, где на

луче зрения находится значительная часть спиральных рукавов (касательные к спирали направления).

Еще один эффект — аналогичные пики в долготном распределении интенсивности гамма-излучения. Гамма-излучение в Галактике возникает, в частности, при столкновениях протонов космических лучей с межзвездным водородом. Столкновения рождают π^0 -мезоны, распад которых дает гамма-кванты. Очевидно, интенсивность потока таких квантов опять же будет выше в направлениях, где луч зрения идет вдоль области большой плотности газа и космических лучей. Анализ долготного распределения показал, что пики интенсивности можно объяснить, если в данных направлениях плотность газа раз в десять выше средней плотности (см., например, ⁷⁴).

В настоящее время данные о галактических ударных волнах столь многочисленны и убедительны, что рассмотрение вопросов природы, происхождения и поддержания спиральной структуры без их учета может представлять лишь абстрактно-теоретический интерес, не имеющий отношения к природе астрономического явления, называемого «спиральная структура галактик».

4. Проблема спиральной структуры с точки зрения наблюдений.

4.1. Классификация галактик по степени регулярности спирального узора. Спиральная структура галактик и строение самих рукавов внешне столь разнообразны, что а priori нет оснований распространять закономерности, полученные по отдельным,

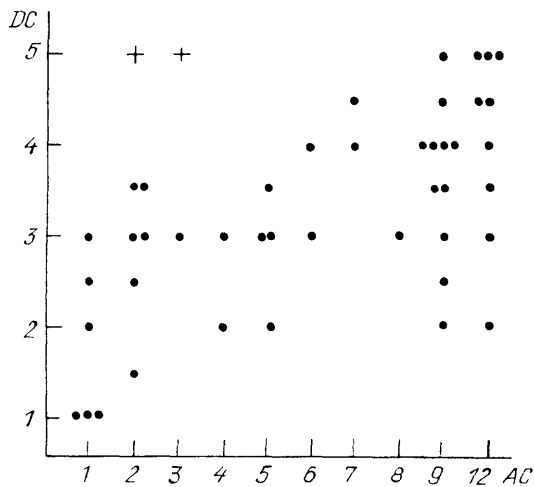


Рис. 15. Корреляция между пылевым классом (DC) галактик и классом рукавов (AC). Уклоняются NGC 3646 и NGC 4736 (отмечены крестиками)

даже очень хорошо изученным системам на весь класс спиральных галактик. Однако в последние годы становится все более популярна точка зрения, согласно которой спиральная структура сводится к двум основным типам. Первый тип характеризуется регулярными, симметричными относительно центра рукавами, которые прослеживаются на протяжении полного оборота или более. Второй тип — «фрагментарный» спиральный узор — представляют галактики со множеством обрывков спиральных рукавов, разбросанных по диску галактики, и не выстроенных вдоль общей спиральной линии. Впервые наличие двух типов спиральных ветвей было отмечено Сендиджем ⁷⁵, который

выделил в Хаббловском атласе галактик ряд систем, подобных NGC 2841, с ярко выраженными фрагментарными рукавами. Позднее структурность ветвей исследовалась Корменди и Норманом ¹⁶, Элмегрином и Элмегрин ^{18, 77}. Авторы работы ⁷⁷ разбили спиральные галактики на 12 классов по характеру их рукавов. Принадлежность галактик к первым классам означает преобладание несимметричных фрагментарных спиральных узоров. К последним классам относятся системы, у которых доминируют две длинные симметричные ветви. Эта классификация удобна во многих отношениях, поскольку, обсуждая теперь детали спиральной структуры, достаточно указать лишь класс спиральных рукавов. Впрочем, следует отметить, что она нуждается в уточнении и привнесении количественных критериев. За основу может

быть принята, например, угловая длина наибольших фрагментов рукавов, подобно тому как длина пылевых полос вдоль спиральных ветвей служит основой классификации галактик «по классу пыли»⁷⁸. Поскольку пылевые полосы всегда сопровождают спиральные рукава (а иногда во внутренних областях галактик являются главным их проявлением), то пылевые классы должны коррелировать с классами рукавов. Рис. 15 показывает, что такая корреляция действительно имеет место. Данные об областях HII в двух галактиках, выпадающих из корреляционной зависимости (NGC 3646



Рис. 16. Спиральная галактика NGC 2976 с фрагментарным спиральным узором (AC 3)

и NGC 4736), показывают, что пылевой класс является более точным индикатором степени регулярности спирального узора, поскольку распределение областей HII указывает на правильную спиральную структуру этих галактик¹¹¹.

Деление спиральных галактик на регулярные (см. рис. 1) и фрагментарные (рис. 16), по-видимому, отражает существенно разную природу рукавов. Спиральные ветви регулярных галактик — это охватывающая всю галактику спиральная волна повышенной плотности звезд и газа⁵. Природа фрагментарных ветвей (см. рис. 16) может быть связана со стохастическим звездообразованием в сочетании с дифференциальным галактическим вращением^{46–48}. Как уже отмечалось в разделе 2.3, эти механизмы не являются взаимоисключающими. Скорее, они действуют одновременно, обуславливая сложную структуру спиральных ветвей (рис. 17). Родившиеся в спиральной волне звезды могут стимулировать дальнейшее звездообразование и появление вторичных фрагментарных рукавов. В то же время вторичные детали спиральных ветвей, придающие структуре фрагментарный вид, могут иметь и волновую природу; они могут быть обусловлены эффектами бифуркации, нелинейного взаимодействия волн и т. д.⁸⁰.

4.2. Проявления спиральных волн. Как уже отмечалось, волновая теория предсказала три ранее неизвестных эффекта общегалактического масштаба: галактическую ударную волну, спиральное возмущение поля скоростей звезд и газа, градиент возрастов звезд поперек спиральных рукавов. Все они подтвердились последующими исследованиями разных галактик, что привело к широкому признанию волновой теории спиральной структуры.

4.2.1. *Газ, пыль, синхротронное и гамма-излучение.* В галактиках с регулярными спиральными узорами наблюдаются длинные пылевые полосы, расположенные, как правило, вдоль внутренних краев звездных рукавов^{75, 81}, причем чем регулярнее звездные рукава, тем длиннее и непрерывнее полосы пыли. В спиральных рукавах также концентрируется атомарный и молекулярный водород. В близких галактиках, таких как туманность Андромеды,

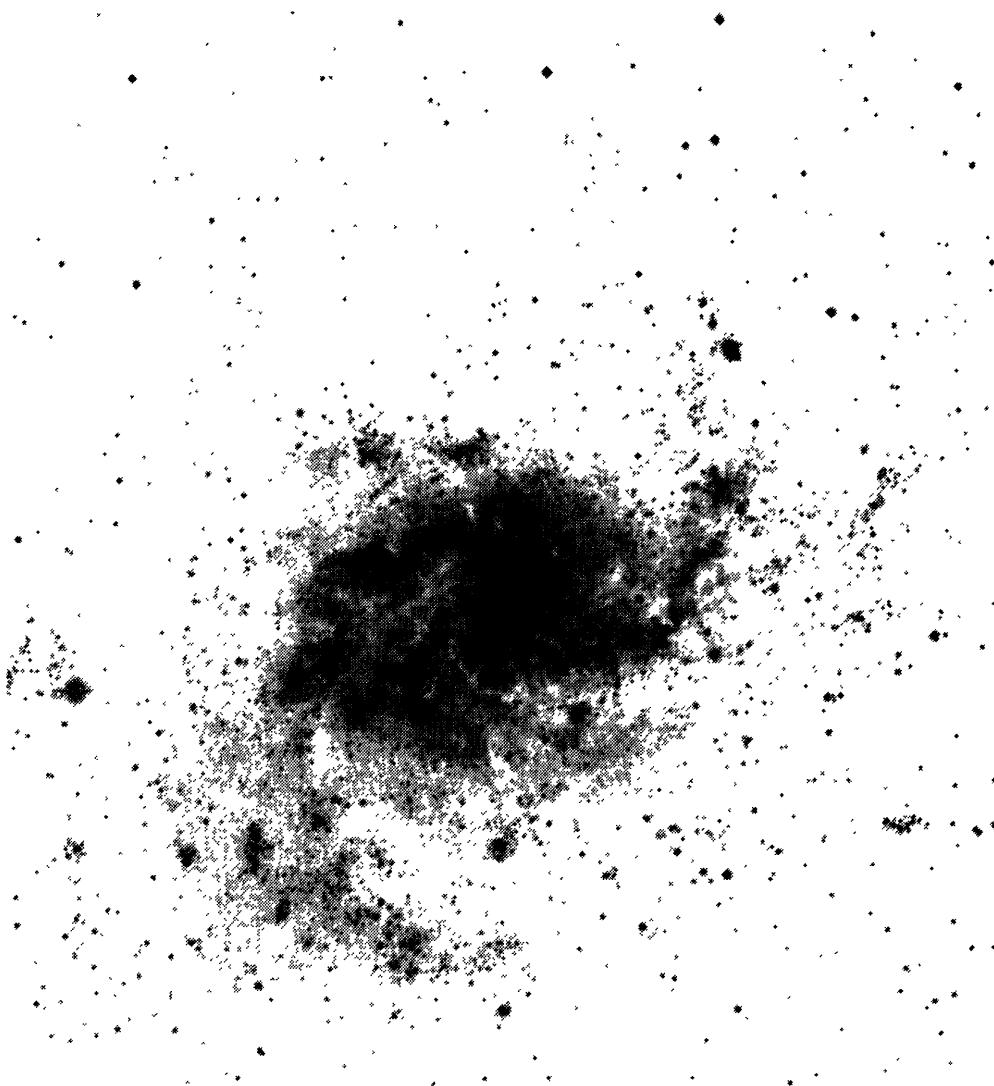


Рис. 17. Спиральная галактика в Треугольнике (M33), соединяющая признаки регулярного и фрагментарного спирального узора (АС 5)

хорошо видно, что максимум плотности водорода достигается именно в пылевых полосах перед звездным рукавом^{82, 83}. Все эти свойства распределения газа и пыли обусловлены галактической ударной волной, возникающей в газе, периодически попадающем в потенциальные ямы волны. Яркое подтверждение крупномасштабного сжатия газа в спиральных волнах было получено при исследовании непрерывного радиоизлучения галактики M51⁸⁴. Усиление синхротронного радиоизлучения при сжатии газа связано с вмерзненностью межзвездного магнитного поля и космических лучей и было обнаружено в виде ярких спиральных гребней на карте радиоизлучения M51.

Увеличение плотности газа и космических лучей в галактической ударной волне приводит также к усилению гамма-излучения из спиральных ветвей. По данным о гамма-излучении нашей Галактики удается построить детальную картину ее спиральной структуры, причем эти данные указывают, что гамма-излучение связано именно с галактической ударной волной⁷⁴.

Свидетельством крупномасштабного сжатия в спиральных волнах является корреляция радиосветимости ветвей спиральных галактик с типом спирального узора⁸⁵. В галактиках с регулярными узорами наблюдается сильное радиоизлучение от спиральных ветвей, тогда как в галактиках с фрагментарным узором ветви в радиодиапазоне заметно не излучают.

4.2.2. *Отклонение от круговых движений.* Волновая теория не только объясняет спиральное распределение плотности звезд и газа, но и предсказывает спиральное поле скоростей, которое должно накладываться на общее круговое движение в диске. Такие систематические отклонения от чисто кругового движения звезд и газа действительно были найдены. Сейчас они известны по данным, полученным из наблюдений нейтрального, ионизованного и молекулярного водорода в туманности Андромеды^{83, 86, 87}, по наблюдениям молекулярного водорода в M51^{79, 88}, по данным для H I в галактике M81^{89, 90}; они обнаружены недавно по H I в галактике NGC 6946⁹¹.

Отклонения скорости от круговых движений обнаружены по звездам высокой светимости и в нашей Галактике^{92, 93}, что, кстати, является одним из оснований относить ее к числу систем с регулярной спиральной структурой. Геометрия поля скоростей оказалась совпадающей с геометрией спиральных ветвей, известных уже давно по данным оптических и радионаблюдений. Наряду с геометрией поля была определена также амплитуда спиральной компоненты скорости. В сумме эти характеристики позволяют вычислить важнейшие параметры спиральной волны в нашей Галактике: амплитуды плотности и гравитационного потенциала, а также скорость вращения спирального узора Ω_p , которая совпала со значением, предсказанным в работе¹, $\Omega_p \approx 23 \text{ км/с} \cdot \text{кпс}$.

4.2.3. *Градиент возраста поперек спиральных рукавов.* Обнаружение градиента возраста молодых звезд поперек спиральных рукавов является прямым свидетельством существования глобальных спиральных волн плотности и триггерной природы звездообразования в спиральных рукавах. При этом надо иметь в виду, что ряд процессов в спиральных ветвях смазывает картину градиента возрастов. Например, родившиеся под действием спиральной волны звезды затем сами стимулируют звездообразование. При этом распределение звезд в пространстве по возрастам изменяется и градиент возрастов поперек рукава становится менее заметным. Это может быть одной из причин слабой выраженности или даже отсутствия градиента возрастов в ряде случаев, отмеченных в работах^{94–96}. Тем не менее градиент возрастов был найден как в нашей Галактике в рукаве Стрельца — Киля^{97, 98}, так и в туманности Андромеды в рукаве S4⁹⁹.

В других галактиках обнаружить его намного труднее из-за влияния поглощения света, недостаточного пространственного разрешения и других причин. Как в рукаве Киля, так и в рукаве S4 мы сталкиваемся со случаем интенсивного звездообразования, и на вторичное звездообразование, по-видимому, остается мало газа. В рукаве S4 туманности Андромеды на это есть непосредственное указание — рекордно высокая плотность газа (H I и H II) перед внутренним краем звездного рукава и отсутствие ярких областей H II далее 200 пс от этого края⁹⁹. В целом поперечную структуру рукава можно объяснить наличием звезд, родившихся как из уже существующих облаков, так и из облаков, родившихся в волне¹¹¹ (рис. 18).

Вопреки замечанию Траата¹⁰⁰, асимметрию звездного рукава S4 нельзя объяснить только поглощением света в газо-пылевой полосе перед его внутренним краем: эта полоса, как видно из рис. 18, в 2–3 раза уже звездного рукава, и, кроме того, из многих данных следует, что в связанных со спираль-

ными рукавами пылевых полосах еще отсутствует звездообразование. В целом, отчетливое расслоение областей Н I и Н II поперек рукава наблюдается именно в тех случаях, когда перед краем рукава имеется плотная и непрерывная пылевая полоса, свидетельствующая о высокой степени сжатия газа

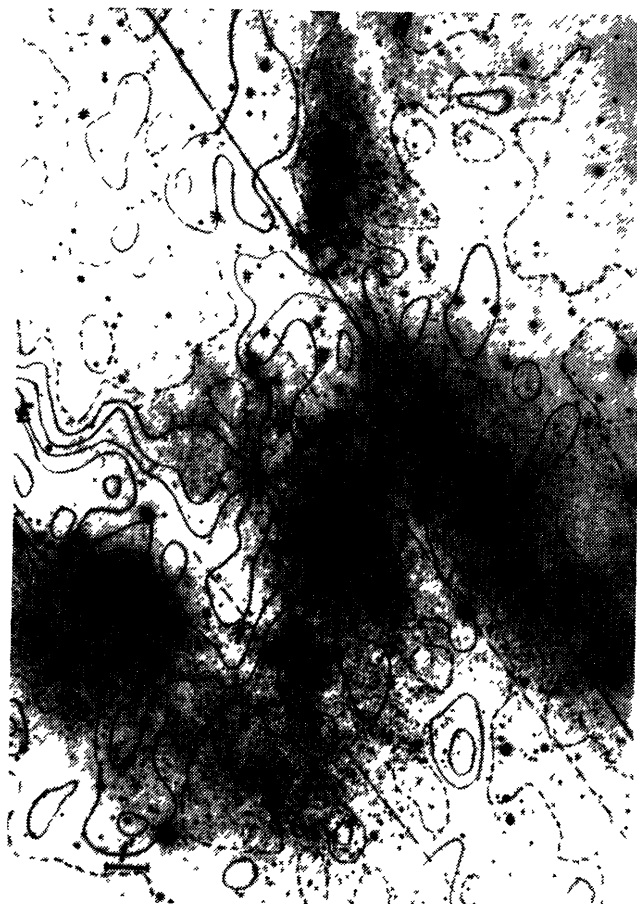


Рис 18 Участок спирального рукава S4 в Туманности Андромеды (M31). Показаны изоденсы Н I, крестики — наиболее яркие области Н II. Между двумя штриховыми линиями на рисунке наиболее молодые звезды концентрируются у внутреннего (левого) края рукава, области Н II находятся на его границе, и период цефеид возрастает к тому же краю, т. е. возраст их убывает

в галактической ударной волне и высоком темпе звездообразования, инициированного ею. Для рукава S4 в M31 это объясняется его аномально большим для M31 углом закрутки^{99,111}.

4.2.4. *Другие проявления спиральных волн.* В последнее время получены новые данные, подтверждающие, что регулярные спиральные узоры галактик обусловлены волнами плотности. В работе¹⁰¹ была проведена поверхностная фотометрия 34 галактик в синих лучах (В) и в ближней инфракрасной области 8250 Å (I) и было показано, что при переходе к инфракрасному диапазону спиральные рукава в галактиках с регулярной структурой остаются резко выраженными, но становятся более гладкими и непрерывными, в то время как в галактиках с фрагментарной структурой глобальный узор не проявляется и в ИК диапазоне. Это означает, что лишь в регулярных спиральных рукавах повышена плотность старых звезд. Из отношения яркости рукавов в диапазонах В и I в работе¹⁰¹ было найдено, что плотность старых звезд в регулярных рукавах бывает значительно (на 40–60 %) выше, чем

в среднем по диску. Это исключает возможность объяснения происхождения регулярных спиральных ветвей в результате закручивания областей звездообразования вращением галактики и говорит о том, что регулярные спиральные рукава в галактиках отражают волновые процессы, включающие звезды старых подсистем. Фрагментарные рукава, как считают авторы¹⁰¹, являются областями распространяющегося звездообразования, растянутыми в обрывки спиралей дифференциальным вращением галактического диска. По их оценке, возраст этих рукавов не превышает $3 \cdot 10^8$ лет.

Другим подтверждением волновой природы глобальных спиральных узоров является результат Лорда и Янга¹⁰². Они нашли, что в галактике M51 отношение интенсивностей излучения в линии H_α и линии 2,6 мм молекулы CO в межрукавном пространстве в два раза ниже, чем в рукавах. Это свидетельствует, вопреки¹⁰³, о повышенной эффективности звездообразования в спиральной волне плотности: на единицу массы газа в форме молекулярного водорода здесь рождается в два раза больше звезд (напомним, что в межзвездной среде количество окиси углерода CO пропорционально количеству молекулярного водорода H_2). Об этом говорят и данные⁷⁹.

Образование гигантских газовых комплексов сильно облегчается в спиральных волнах плотности, где больше плотность газа и меньше дифференциальность вращения¹⁰³. Эти сверхоблака HI порождают затем гигантские звездные комплексы^{76, 103, 104}, которые в галактиках с регулярной спиральной структурой концентрируются в рукавах. Можно предположить, что более близкое к твердотельному вращение галактик, в которых наблюдается фрагментарная спиральная структура, делает возможным образование слабо связанных гравитационно звездных комплексов и без волны плотности; эти комплексы затем достаточно медленно растягиваются во фрагменты спиральных рукавов¹¹¹.

4.3. Наблюдения, относящиеся к механизмам генерации спиральных волн.

4.3.1. *Генерация полей перемычек и спутников.* Имеющиеся данные говорят о том, что в галактиках с регулярной структурой, как правило, а возможно, и обязательно, либо имеются отклонения от осевой симметрии в центральных областях, либо у них есть близкие спутники, гравитационный потенциал которых вызывает появление волн плотности в диске из газа и звезд. К такому выводу по данным о 54 галактиках давно уже пришли Корменди и Норман¹⁶, и на гораздо большем материале он был подтвержден в работах^{18, 77}. В^{18, 77} было показано, что не менее 70 % галактик с регулярными спиральными узорами либо находятся в плотных группах, либо имеют перемычку или спутник. Последние исследования показывают, что и те галактики, в которых перемычка на обычных снимках не видна, имеют в своих центральных областях отклонения от круговой симметрии, достаточные для возбуждения спиральных волн плотности. Изучая в ближнем инфракрасном диапазоне ($\lambda = 0,8$ мкм) центральные области 11 спиральных галактик, Зарицки и Ло¹⁵ нашли, что все 11 галактик обладают эллиптическими ядерными балджами. В результате они пришли к выводу, что это явление должно быть широко распространено. Овальный гравитационный потенциал, по заключению этих авторов, может объяснить некруговые движения газа в центральных областях галактик и генерировать спиральные волны плотности. Напомним, что и в нашей Галактике, и в туманности Андромеды имеются значительные отклонения от круговой симметрии близ центра; особенно ярко они выражены в IC 342 (см.¹¹¹).

4.3.2. *Стохастическое звездообразование и спиральная структура галактик.* Если молодые звезды стимулируют образование следующих поколений звезд, то, как говорилось выше, дифференциальное вращение галактического диска будет растягивать области распространяющегося звездообразования в обрывки спиральных рукавов. Распространяющееся звездообразование

может быть связано и с другими процессами, например с ударной волной, идущей от границы столкновения газовых облаков. Таким образом, распространяющееся звездообразование может быть эффективным механизмом генерации спиральных ветвей фрагментарных галактик.

Существование распространяющегося звездообразования находит много подтверждений. Так, еще Блаау¹⁰⁵ показал, что в звездных ассоциациях звезды организованы в упорядоченные в пространстве подгруппы различных возрастов. Позднее было найдено мною областей как в нашей, так и в других

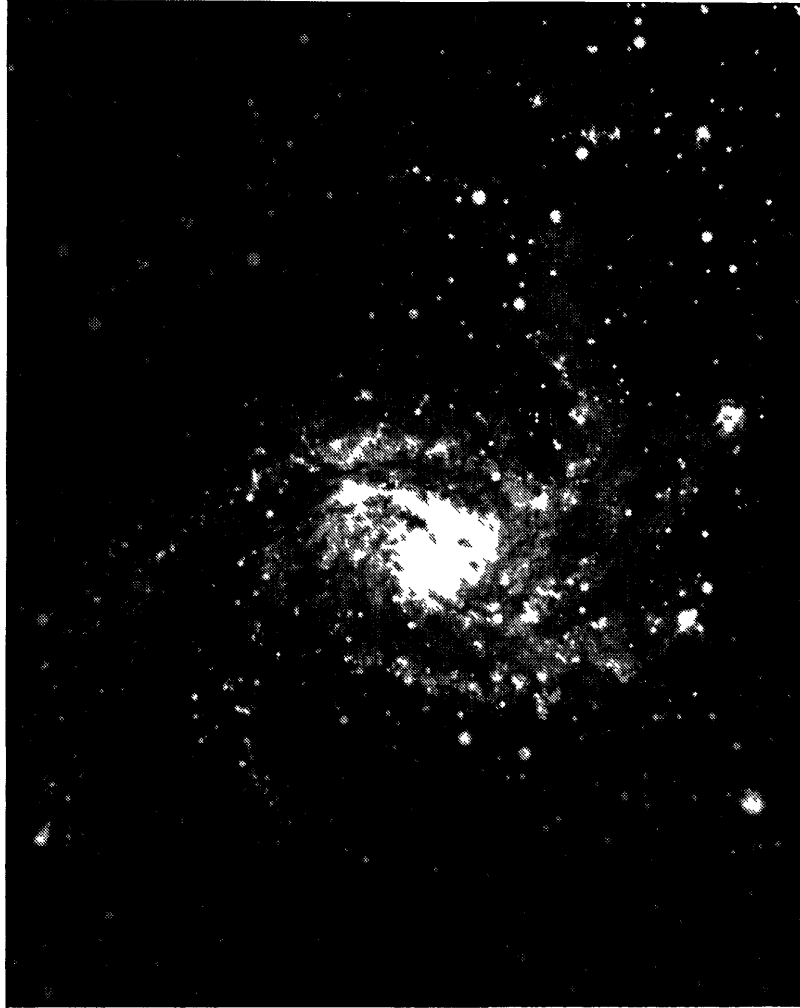


Рис. 19. Спиральная галактика NGC 6946, отличающаяся активным звездообразованием, результатом чего были вспышки пяти сверхновых. Класс рукавов 9. (Снимок получен И. Д. Караченцевым на 6-м телескопе)

галактиках, где происходит последовательное рождение звезд. К ним относятся комплексы S156, S157, S158, S159¹⁰⁶ и комплекс W51 в рукаве Стрельца¹⁰⁷, в которых III области явно упорядочены в пространстве по возрастам. Одним из ярких примеров индуцированного звездообразования является «созвездие» молодых звезд Шепли III в Большом Магеллановом Облаке. В нем наблюдается волна звездообразования, распространяющаяся со скоростью ~ 36 км/с¹⁰⁸.

Однако имеются данные о том, что для образования массивных звезд достаточна плотность $\text{HI} > 10^{21}$ атом/см² и нет необходимости во внешнем триггере^{109,111}.

Следует подчеркнуть, что природа фрагментарных рукавов не может пока считаться надежно установленной. Эти рукава имеются и в некоторых галактиках, обладающих, по данным Зарицки и Ло¹⁵, неосесимметричным ядерным балджем, так что их волновая природа не может быть исключена. Рукава волновой и сдвиговой природы могут сосуществовать, и тогда результирующая картина спирального узора будет иметь сложный характер (рис. 19). В целом же пока нет достаточно убедительных наблюдательных фактов — таких, как в случае волновой теории, которые говорили бы в пользу образования фрагментарных спиралей в результате распространяющегося звездообразования.

5. Заключение. Четверть века существования теории волн плотности Лина и Шу доказали ее чрезвычайную плодотворность. Она стимулировала массу теоретических и наблюдательных работ, которые привели к формированию качественно новых представлений о физических процессах в звездных системах. Блестяще подтвердились ее предсказания для галактик с регулярной спиральной структурой. Важнейшие из них — галактические ударные волны и связанные с ними синхротронное и гамма-излучение, спиральность поля скоростей звезд, градиент возраста поперек спиральных ветвей — из предсказаний перешли в разряд наблюдательных фактов, значительно расширивших «банк» фундаментальных свойств спиральных галактик. В итоге, несмотря на существующие в теории проблемы, с трудом поддающиеся усилиям теоретиков, гравитационная теория волн плотности остается вне конкуренции среди альтернативных подходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ¹ Марочник Л. С., Сучков А. А.//УФН. 1974. Т. 112. С. 275.
- ² Oort J.//Interstellar Matter in Galaxies/Ed, by L. Woltier.— New York: Benjamin 1962.
- ³ Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика.— М.: Наука, 1984.
- ⁴ Lindblad B.//Stockholm Obs. Ann. 1963. V. 22. P. 3.
- ⁵ Lin C. C., Shu F.H.//Astrophys. J. 1964. V. 140. P. 646.
- ⁶ Lin C. C., Lau Y. Y.//SIAM J. App. Math. 1975. V. 29. P. 352.
- ⁷ Nishimoto T.//Stud. App. Math. 1979. V. 60. P. 11.
- ⁸ Lau Y. Y., Bertin G.//Astrophys. J. 1978. V. 226. P. 508.
- ⁹ Pannatoni R. F., Lau Y. Y.//Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1979. V. 76. P. 4.
- ¹⁰ Haas J., Bertin G., Lin C. C.//Ibidem. 1982. V. 79. P. 3908.
- ¹¹ Bertin G., Mark W. K.//Astron. and Astrophys. 1978. V. 64. P. 389.
- ¹² Марочник Л. С., Сучков А. А.//Астрон. ж. 1969. Т. 46. С. 319.
- ¹³ Bertin G.//Phys. Rep. 1980. V. 61. P. 3.
- ¹⁴ Lin C. C., Bertin G.//Adv. App. Mech. 1984. V. 24. P. 155.
- ¹⁵ Zaritsky D., Lo K. Y.//Astrophys. J. 1986. V. 300. P. 66.
- ¹⁶ Kormendy J., Norman C. N.//Ibidem. 1979. V. 223. P. 539.
- ¹⁷ Rubin V. C., Ford W. K., Thonnard N.//Ibidem. 1980. V. 238. P. 47.
- ¹⁸ Elmegreen D. M., Elmegreen B. G.//Ibidem. 1983. V. 267. P. 31.
- ¹⁹ Miller R. H., Prendergast K. H., Quirk W. J.//Ibidem. 1970. V. 161. P. 903.
- ²⁰ Дзюба Б. М., Якубов В. Б.//Астрон. ж. 1970. Т. 47. С. 3.
- ²¹ Hohl F.//Astrophys. J. 1971. V. 168. P. 343.
- ²² Miller R. H., Smith B. F.//Ibidem. 1979. V. 227. P. 407. 785.
- ²³ Ostriker J. P., Peebles P. J. E.//Ibidem. 1973. V. 186. P. 467.
- ²⁴ Hohl F.//Astron. J. 1976. V. 81. P. 30.
- ²⁵ Contopoulos G.//Astron. and Astrophys. 1980. V. 96. P. 164.
- ²⁶ Sellwood J. A.//Ibidem. 1981. V. 99. P. 362.
- ²⁷ Feldman S. I., Lin C. C.//Stud. App. Math. 1973. V. 52. P. 1.
- ²⁸ Корчагин В. И., Марочник Л. С.//Астрон. цирк. 1973. № 700; Астрон. ж. 1975. Т. 52. С. 700.

- ²⁹ Sanders R. H., Huntley J. M.//Astrophys. J. 1976. V. 209. P. 53.
- ³⁰ Sorensen S. A., Matsuda T., Fujimoto M.//Astrophys. and Space Sci. 1976. V. 43. P. 491.
- ³¹ Bergman R. H., Pollard D. J., Hockney R. W.//Astron. and Astrophys. 1979. V. 78. P. 133.
- ³² Марочник Л. С.//Астрон. ж. 1964. Т. 41. С. 264.
- ³³ Kato S.//Publ. Astron. Soc. Japan. 1970. V. 22. P. 285.
- ³⁴ Hunter C.//Astrophys. J. 1979. V. 227. P. 73.
- ³⁵ Chew G. F., Goldberger M. L., Low F. E.//Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1956. V. 236. P. 112.
- ³⁶ Thielheim K. O., Wolff H.//Mon. Not. RAS 1982. V. 199. P. 151.
- ³⁷ Корчагин В. И., Шевелев Ю. Г.//Астрофизика. 1980. Т. 16. С. 757.
- ³⁸ Корчагин В. И., Шевелев Ю. Г.//Ibidem. 1981. Т. 17. С. 455.
- ³⁹ Корчагин В. И.//Астрон. ж. 1976. Т. 53. С.
- ⁴⁰ Schwarz M. P.//Proc. ASA. 1984. V. 5. P. 4.
- ⁴¹ Prendergast K. H.//. IAU Symposium No. 38.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1970.— P. 303.
- ⁴² Schwarz M. P.//МОП. Not. RAS. 1985. V. 212. P. 677.
- ⁴³ Sorensen S. A.//Ibidem. 1985. V. 212. P. 723.
- ⁴⁴ Корчагин В. И., Шевелев Ю. Г.//Астрофизика. 1982. Т. 18. С. 589.
- ⁴⁵ Корчагин В. И., Лангуева Е. А., Проховник Н. А.//Астрон. цирк. 1987. № 1482; Астрон. ж. 1988.
- ⁴⁶ Gerola H., Seiden P. E.//Astrophys. J. 1978. V. 223. P. 129.
- ⁴⁷ Seiden P. E., Schulman L. S., Feitzinger J. V.//Ibidem. 1982. V. 253. P. 91.
- ⁴⁸ Seiden P. E., Gerola H.//Fundam. Cosmic Phys. 1982. V. 7. P. 241.
- ⁴⁹ Goldreich P., Lynden-Bell D.//Mon. Not. RAS. 1965. V. 130. P. 97.
- ⁵⁰ Янисте Я. А., Саар Э. М.//Письма Астрон. ж. 1977. Т. 3. С. 9.
- ⁵¹ Щекинов Ю. А.//Ibidem. 1987. Т. 13. С. 862.
- ⁵² Корчагин В. И., Кроль В. А., Рябцев А. Д. Препринт ИТФ-87-91Р.— Киев, 1987.
- ⁵³ Kolesnik I. G., Silich S. A. Preprint ITP-87-59E.— Kiev, 1987.
- ⁵⁴ Orik E.//Irish. Astron. J. 1953. V. 2. P. 219.
- ⁵⁵ Lada G. J., Blitz L., Elmegreen B. G.//Protostars and Planets/Ed. by T. Gehrels.— Tucson: Univ. Arizona Press, 1978.— P. 341.
- ⁵⁶ Norman C., Silk J.//Astrophys. J. 1980. V. 238. P. 158.
- ⁵⁷ Goldreich P., Lynden-Bell D.//Mon. Not. RAS 1965. V. 130. P. 125.
- ⁵⁸ Сучков А. А., Щекинов Ю. А.//Астрон. ж. 1979. Т. 56. С. 1179.
- ⁵⁹ Хакен Г. Синергетика.—М.: Мир, 1980.
- ⁶⁰ Gerola H., Seiden P. E. Photometry, Kinematics and Dynamics of Galaxies/Ed. by D. S. Evans.—Austin, Texas Press, 1979.—P. 475.
- ⁶¹ Roberts W. W., Hausman M. A.//Astrophys. J. 1984. V. 277. P. 744.
- ⁶² Korchagin V. I., Korchagin P. I., Ryabtsev A. D.//Astrophys. and Space Sci. 1988.
- ⁶³ Bodifée G., de Loore C.//Astron. and Astrophys. 1985. V. 142. P. 297.
- ⁶⁴ Waller W. H., Clemens D. P., Sanders D. B., Scoville N. Z.//Astrophys. J. 1987. V. 314. P. 397.
- ⁶⁵ Smith G., Elmegreen B. G., Elmegreen D. M.//Mon. Not. RAS. 1984. V. 210. P. 399.
- ⁶⁶ Фридман А. М.//Астрон. ж. 1986. Т. 63. С. 884.
- ⁶⁷ Kennicutt R. C., Jr., Edgar B. K.//Astrophys. J. 1986. V. 300. P. 132.
- ⁶⁸ Van der Kruit, Oort J. H., Mathewson D. S.//Astron. and Astrophys. 1972. V. 21. P. 169.
- ⁶⁹ Tubbs A. D.//Astrophys. J. 1980. V. 239. P. 892.
- ⁷⁰ Берман В. Г., Марочник Л. С., Мишуров Ю. Н., Сучков А. А. Препринт ИКИ АН СССР № 717.—Москва, 1982.
- ⁷¹ Margochnik L. S., Bergman V. G., Mishurov Yu. N., Suchkov A. A.//Astrophys. and Space Sci. 1983. V. 89. P. 177.
- ⁷² Берман В. Г., Марочник Л. С., Мишуров Ю. Н., Сучков А. А., Тимонин П. Н.//Астрон. ж. 1986. Т. 63. С. 31.
- ⁷³ Phillips S., Kearsey S., Osborne J. L., Haslam C. G. T., Stoffel H.//Astron. and Astrophys. 1981. V. 98. P. 286.
- ⁷⁴ Корчагин В. И., Корчагин П. И., Сучков А. А.//Астрон. ж. 1983. Т. 60. С. 478.
- ⁷⁵ Sandage A.//Hubble Atlas of Galaxies.— Washington: The Carnegie Institution of Washington, 1961.

- ⁷⁶ Elmegreen B. G., Elmegreen D. M.//*Mon. Not. RAS.* 1983. V. 203. P. 31.
- ⁷⁷ Elmegreen B. G., Elmegreen D. M.//*Astrophys. J.* 1987. V. 314. P. 3.
- ⁷⁸ Lynds B. T.//*Astrophys. J.* 1980. V. 238. P. 17.
- ⁷⁹ Vogel S. N., Kulkarni S. R., Scoville//*Nature.* 1988. V. 334. P. 402.
- ⁸⁰ Мишуров Ю. Н., Сучков А. А.//*Астрон. ж.* 1976. Т. 53. С. 206.
Чурилов С. М., Шухман И. Г.//*Ibidem.* 1981. Т. 58. С. 260.
Корчагин В. И., Корчагин П. И.//*Письма Астрон. ж.* 1984. Т. 10. С. 14.
- ⁸¹ Lynds B. T.//*Astrophys. J. Suppl.* 1974. V. 28. P. 391.
- ⁸² Unwin S. C.//*Mon. Not. RAS.* 1980. V. 190. P. 551.
- ⁸³ Nakano M., Ichikawa T., Tanaka Y. D., Nakai N., Sofue Y.,
//*Proc. Astron. Soc. Japan.* 1987. V. 39. P. 57.
- ⁸⁴ Mathewson D. S., van der Kruit P. S., Brown W. N.//*Astron. and
Astrophys.* 1972. V. 17. P. 468.
- ⁸⁵ Корчагин В. И.//*Астрон. цирк.* 1982. № 1221.
- ⁸⁶ Brinks E., Shane W. W.//*Astron. and Astrophys. Suppl.* 1984. V. 55. P. 179.
- ⁸⁷ Deharveng J. M., Pellet A.//*Astron. and Astrophys.* 1975. V. 38. P. 15.
- ⁸⁸ Rydbeck G., Hjammarson A., Rydbeck O. E. H.// *Ibidem.* 1985. V. 144.
P. 282.
- ⁸⁹ Rots A. H., Shane W. W.//*Ibidem.* 1975. V. 45. P. 25.
- ⁹⁰ Visser H. C. D.//*Ibidem.* 1980. V. 88. P. 159.
- ⁹¹ Tassoni L. I., Young J. S.//*Astrophys. J.* 1986. V. 308. P. 600.
- ⁹² Мишуров Ю. Н., Павловская Е. Д., Сучков А. А.//*Астрон. ж.* 1979.
Т. 56. С. 268.
- ⁹³ Humphreys R. M.//*Astrophys. J.* 1970. V. 75. P. 602; *Astron. and Astrophys.*
1972. V. 20. P. 29.
- ⁹⁴ Schweitzer F.//*Astrophys. J. Suppl.* 1976. V. 31. P. 313.
- ⁹⁵ Talbot J. R., Jensen E. B., Dufour R. J.//*Astrophys. J.* 1979. V. 229. P.
91.
- ⁹⁶ Guidoni U., Messi R., Natali G.//*Astron. and Astrophys.* 1981. V. 96. P.
215.
- ⁹⁷ Павловская Е. Д., Сучков А. А.//*Астрон. ж.* 1984. Т. 61.
- ⁹⁸ Бердников Л. Н.//*Письма Астрон. ж.* 1987. Т. 13. С. 10.
- ⁹⁹ Ефремов Ю. Н.//*Ibidem.* 1985. Т. И. С. 69.
- ¹⁰⁰ Траат П.//*Тарту публ.* 1986. Т. 51. С. 181.
- ¹⁰¹ Elmegreen B. G., Elmegreen D. M.//*Astrophys. J. Suppl.* 1984. V. 54.
P. 127.
- ¹⁰² Lord S., Strom S. E., Young J. S. *Star Formation in Galaxies*/Ed. by
C. Person.— 1987.— P. 303.
- ¹⁰³ Elmegreen B. G.//*IAU Symp. No. 115.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1987.—*
P. 457.
- ¹⁰⁴ Ефремов Ю. Н.//*Вестн. АН СССР.* 1984. № 12. С. 56.
- ¹⁰⁵ Blaauw A.//*Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 1964. V. 2. P. 313.
- ¹⁰⁶ Ho P. T. P., Haschick A. D., Israel F. P.//*Astrophys. J.* 1981. V. 243. P. 526.
- ¹⁰⁷ Lightfoot J. F., Cudlip W., Furniss I., Glencross W. M., Jen-
nings R. E., King K. J., Poulter G.//*Mon. Not. RAS.* 1983. V. 205. P. 653.
- ¹⁰⁸ Dopita M. A., Mathewson D. S., Ford V. L.//*Astrophys. J.* 1985. V. 297.
P. 599.
- ¹⁰⁹ Skillman E. D.//*Bull. Am. Astron. Soc.* 1986. V. 18. P. 691.
- ¹¹⁰ Beckman J. E., Bransgrove S. G., Phillips J. P.//*Astron. and Astro-
phys.* 1986. V. 157. P. 49.
- ¹¹¹ Ефремов Ю. Н. *Очаги звездообразования в галактиках.*—М.: Наука, 1989.
- ¹¹² Sandage A.//*IAU Symposium No. 100.— Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1983.—*
P. 367.