

УДК 524.7-8

ПОЛИГОНАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ГАЗОВОМ ДИСКЕ: ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

© 2011 г. С. А. Хоперсков*, А. В. Хоперсков**, М. А. Еремин, М. А. Бутенко

Волгоградский государственный университет

Поступила в редакцию 01.02.2011 г.

Представлены результаты численного моделирования газового диска в потенциале спиральной волны плотности звездной компоненты. Изучены условия, при которых происходит формирование выпрямленных сегментов спиральных рукавов (верениц) в газовой компоненте. Данные особенности спиральной структуры были выделены в серии работ А.Д. Чернина с соавторами. Газодинамические расчеты проведены для широкого набора параметров модели: угла закрутки спирального узора, амплитуды спиральной волны плотности звездной компоненты, скорости вращения диска, температуры газовой компоненты. Проведено сравнение результатов расчетов в моделях 2D- и 3D-дисков. Показано, что вереницы в численных экспериментах являются существенно нестационарным феноменом. Статистический анализ распределения геометрических параметров спиральных узоров с вереницами у наблюдаемых галактик и у построенных гидродинамических моделей демонстрирует хорошее согласие. В частности, численные эксперименты и наблюдения галактик для средних значений углов между прямыми сегментами дают $\langle\alpha\rangle \simeq 120^\circ$.

Ключевые слова: численная газодинамика, ударные волны, спиральная структура галактик.

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДАЕМЫХ СПИРАЛЬНЫХ УЗОРОВ

Геометрическая форма спиральных структур

Гладкие правильные спиральные рукава у галактик типа “grand design” встречаются крайне редко. Как правило, глобальный спиральный узор характеризуется большим числом различных неоднородностей на мелких и средних пространственных масштабах, отметим шпурсы или отроги (sprurs) (Элмигрин, 1980; Чакрабарти и др., 2003; Шетти, Острайкер, 2006; Мураока и др., 2009), оперения (feathers) (Доббс, Боннел, 2006; Ла Вигн и др., 2006), ветвления и утолщения ветвей, квазипериодические комплексы вдоль рукавов (Ефремов, Чернин, 2003; Ефремов, 2009). Интересно, что мелкомасштабная неоднородность вдоль азимутального угла ярко проявляется и у кольцеобразных структур, как в случае NGC 7742, NGC 7217 (Сильченко, Моисеев, 2006). Более крупномасштабной особенностью спирального узора являются так называемые вереницы или полигональные структуры (ПС), под которыми будем понимать последовательности достаточно протяженных почти прямых отрезков, образующих спиральный узор

многих галактик (Уоллэ и др., 1997; Полен, Труджилло, 2006). На такие объекты впервые обратил внимание Б.А. Воронцов-Вельяминов, назвав их вереницами (rows) (Воронцов-Вельяминов, 1964, 1977). В ряде работ А.Д. Чернин с коллегами подробно рассмотрели свойства ПС для близких галактик (Чернин, 1998, 1999а; Чернин и др., 2000, 2001а) и нашей Галактики (Чернин, 1999б). Имеются указания на наличие спрямленных фрагментов спиральной структуры у М31 (Ефремов, 2001, 2009, 2010). Возможно, сходную природу имеет так называемая “гексоганальная” форма у некоторых внутренних кольцеобразных структур галактик (Чернин и др., 2001б).

Полигональные структуры обнаруживаются не только в оптическом диапазоне по скоплениям молодых звезд, но и по распределениям межзвездного газа HI, пыли, синхротронного излучения, УФ и линии H α . Между тем спиральные рукава, образованные старыми звездами, выглядят более гладкими по изображениям галактик в инфракрасном диапазоне. На рис. 1 схематично показаны выделенные нами ПС для ряда наблюдаемых объектов дополнительно к каталогу Чернина и др. (2001а).

Отметим наиболее характерные особенности полигональных структур по данным наблюдений (см. цитированные выше работы Чернина, 1998, 1999а,б; Чернина и др. 2000, 2001а):

* Электронный адрес: shoperskov@gmail.com

** Электронный адрес: khoperskov@volsu.ru

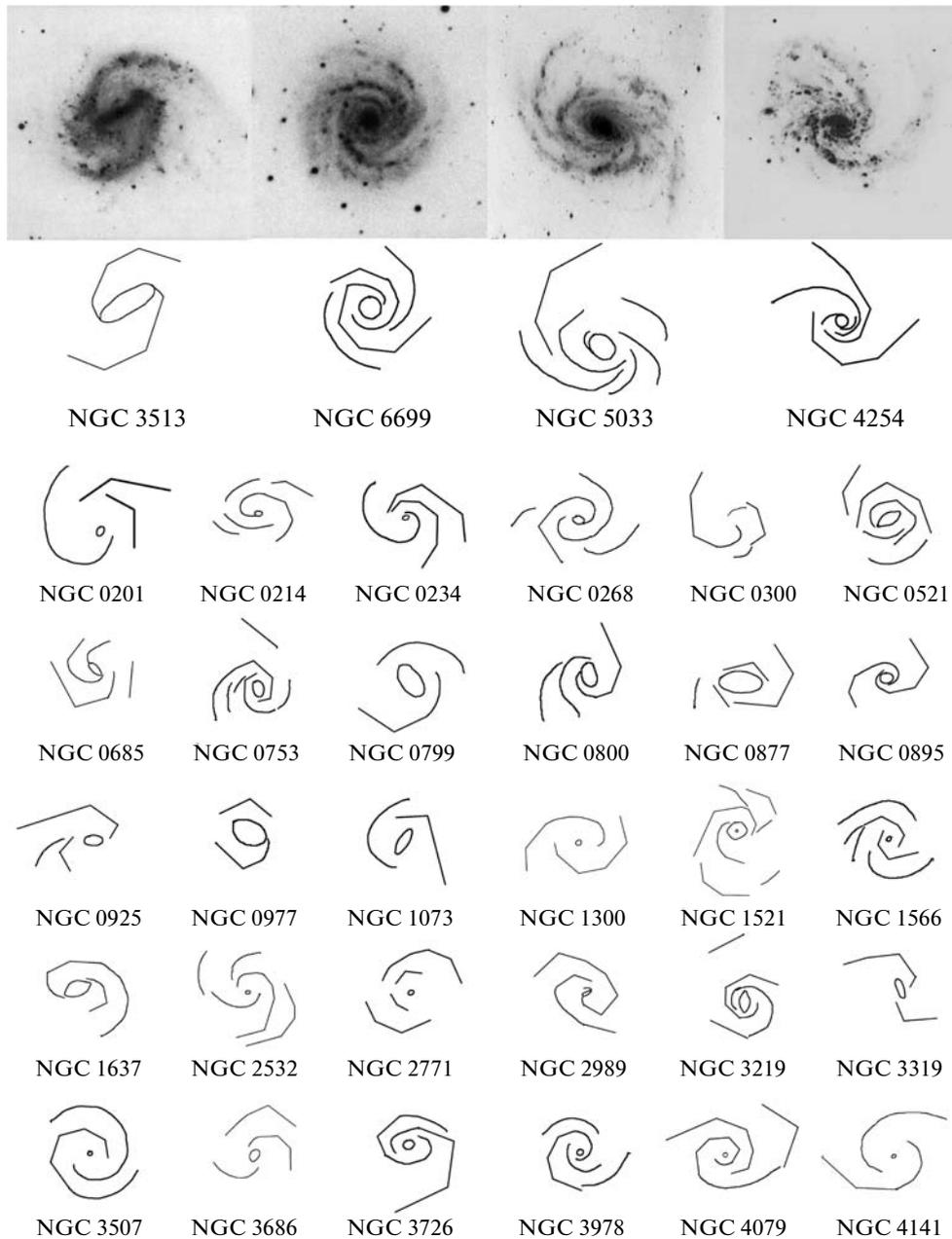


Рис. 1. Новые примеры схематического изображения галактик с ПС дополнительно к данным работы Чернина и др. (2001a).

1. Для выборки ближайших галактик, построенной Черниным и др. (2001a), число объектов с ПС превышает 200, что составляет около 5–10% от общего числа галактик с глобальной спиральной структурой.

2. Среднее значение угла между соседними прямыми сегментами по данным наблюдений равно $\langle \alpha \rangle \simeq 120^\circ$ (Чернин и др., 2000). Разброс величин лежит в пределах $100^\circ \lesssim \alpha \lesssim 145^\circ$ (Чернин и др., 2001a). Длина таких сегментов ℓ в среднем растет

прямо пропорционально расстоянию d до центра галактики (Чернин, 1999a; Чернин и др., 2001a).

3. ПС имеются как в SB-галактиках, так и в системах без центральной перемычки, но преимущественно у объектов более позднего типа (Sbc, Scd).

4. Относительное содержание газа значительно $M_{\text{HI}}/L \simeq 0.15\text{--}0.4$ (M_{HI}/L — отношение массы к светимости в солнечных единицах), но возможны исключения, например у галактики NGC 4548 всего $M_{\text{HI}}/L \simeq 0.04$ (Чернин и др., 2000).

5. Оценки скорости вращения для рассмотренных галактик не очень надежны, поскольку диски имеют ориентацию, близкую к “плашмя”, но в целом максимальные значения скорости вращения (в области плато) превышают 150 км/с.

6. Среди объектов с ПС наблюдается повышенная доля взаимодействующих галактик. Причем случаи с наиболее длинными вереницами ($\ell \gtrsim 8$ кпк) встречаются преимущественно у взаимодействующих галактик. В то время как более короткие вереницы ($\ell \lesssim 5$ кпк) в $\simeq 4$ раза чаще наблюдаются у галактик без видимых проявлений взаимодействия.

7. Число верениц, выделяемых у различных объектов, лежит в пределах $n_{\text{row}} = 1-9$, и среднее число в выборке составляет три вереницы.

8. Вереницы (изломы и прямолинейные отрезки) можно выделить у некоторых галактик с кольцами — такие системы в работе Чернина и др. (2001в) названы гексагональными структурами (например, NGC 7020, NGC 4429, NGC 3351, NGC 6782, NGC 6935, UGC 12646, ESO 325-28) (см. также работу Бута, Комбэ (1996)).

Помимо галактик с большим числом прямолинейных фрагментов спиралей для обоих спиральных ветвей, у ряда галактик можно выделить изломы только у одной из ветвей галактики (см. галактики NGC 4548 и NGC 7137, Чернин и др., 2000).

Предложено несколько физических механизмов, способных объяснить образование выпрямленных сегментов спиральных рукавов галактик. Согласно гипотезе, предложенной в работе (Контупоулоус, Гросбол, 1986), наличие ПС связано с влиянием областей резонанса в динамике звездного населения. В работах Чернина (1999а), Чернина и др. (2000) предложен альтернативный механизм формирования полигоналей, в соответствии с которым выпрямленные сегменты спиралей возникают в результате развития неустойчивости фронта галактической ударной волны (УВ), которая приводит к его фрагментации на плоские участки. Действительно, в работе Чернина и др. (2006) в рамках двумерных гидродинамических расчетов невращающегося газа было показано, что при протекании газа через искривленную потенциальную яму фронт плоской УВ в случае косога натекания разбивается на отдельные фрагменты, и имеет место эффект выхода УВ из потенциальной ямы.

Таким образом, наблюдаемое спрямление сегментов спиралей в галактиках может иметь гидродинамическую природу. Тем не менее целый ряд физически важных факторов остался за рамками численных расчетов, описанных в статье Чернина и др. (2006), где главным недостатком представляется вывод, полученный в моделях без вращения, что

фронт УВ располагается на входе потока в потенциальную яму звездной волны плотности. Данные наблюдений указывают на положение характерных пылевых полос, которые связывают с УВ, противоположное по сравнению с результатом Чернина и др. (2006). Особенно наглядно это проявляется в галактиках с баром, когда радиус коротации располагается вблизи концов звездной перемычки (см. изображения NGC 1097, NGC 1300, NGC 1365). Внутри бара пылевая полоса находится на передней кромке, а в спиральных за пределами бара — на задней кромке.

Галактики с баром

По традиции спиральный узор в SB-галактиках связывают с неосесимметричным возмущением центральной звездной перемычкой (бар или овал). До последнего времени в предположении о *стационарности системы* считалось, что кинематика спиральной структуры определяется вращением твердотельно вращающегося с угловой скоростью Ω_{bar} бара. Если радиус коротации бара r_c^{bar} находится вблизи его концов, то вблизи находится и коротация спиралей $r_c^{\text{spir}} \simeq r_c^{\text{bar}}$. Тем самым, угловая скорость твердотельного вращения спирального узора Ω_{spir} везде больше скорости вращения диска $\Omega(r) = V(r)/r < \Omega_{\text{spir}}$. Обсудим отдельно вопрос о ПС в галактиках с центральным баром/овалом, основываясь на выборке галактик OSUBGS, для которой в ряде работ (Паутианен и др., 2008; Бута, Жанг, 2009) определены положения радиусов коротации r_c . Характерной особенностью проведенного в работе Бута, Жанг (2009) анализа является наличие более чем у 60% галактик внешнего коротационного радиуса r_c , который находится за пределами видимой спиральной структуры $\mathcal{R} = r_c/r_{\text{bar}} \gtrsim 2$. Это указывает на медленное вращение по крайней мере внешних спиральных рукавов $\Omega_{\text{spir}} < \Omega(r) = V/r$.

Оценки положения относительного радиуса коротации $\mathcal{R} = r_c/r_{\text{bar}}$ для 38 SB-галактик из выборки OSUBGS в работе Паутианен и др. (2008) показывают, что у заметной части галактик величина $\mathcal{R} = r_c/r_{\text{bar}}$ заметно превосходит единицу. Выделим NGC 0289, NGC 0578, NGC 1187, NGC 3726, NGC 4051, NGC 4995, NGC 6384, у которых $\mathcal{R} = r_c/r_{\text{bar}} = 1.8-3.4$. Известны и другие примеры такого рода объектов: $\mathcal{R}_{\text{NGC 3081}} = 2.2$ (Бута, Посел, 1998), $\mathcal{R}_{\text{NGC 0925}} = 3.1$ (Элмигрин и др., 1998). По результатам работ Жанг, Бута (2007, 2010) можно выделить галактики NGC 5194, NGC 5247, NGC 4321, NGC 4622, NGC 1073, у которых внешний радиус коротации располагается вне спиральной структуры или на ее периферии.

Анализ изображений галактик OSUBGS с $\mathcal{R} \gtrsim 2$ из перечисленных выше работ показывает, что у NGC 1187, NGC 1385, NGC 3513, NGC 3686, NGC 4145, NGC 4902, NGC 5194, NGC 5334, NGC 7418 имеются вереницы. Наличие нескольких радиусов коротации является одним из доводов, указывающих на необходимость смены распространенной точки зрения на неизменность морфологического типа и стационарность спирального узора, в крайнем случае очень медленного изменения параметров спиралей, в пользу более быстрых трансформаций с характерными временами порядка периода обращения.

Одновременное существование нескольких радиусов коротации, что указывает на нестационарную динамику, возможно, имеет место и в нашей Галактике (Герхард, 2010, и ссылки там). В работе Герхарда (2010) вновь обращается внимание на старое противоречие между быстро вращающимся баром с угловой скоростью $\Omega_{\text{бар}} \sim 59$ км/с/кпк и медленным вращением спирального узора в окрестности Солнца $\Omega_{\text{сп}} \simeq 25$ км/с/кпк, что свидетельствует об отсутствии динамической связи между центральным баром и спиральной структурой, во всяком случае на периферии нашей Галактики.

Укажем на еще один подход к определению радиуса коротации, связанный с предполагаемым наличием корреляции между особенностью радиального распределения металличности $Z(r)$ в галактическом диске (локальный минимум и плато) и положением радиуса коротации, что вытекает, в частности, из химико-динамических моделей эволюции галактик (Мишуров и др., 2002). В случае нашей Галактики дополнительно к частоте быстрого вращающегося бара профиль $Z(r)$ указывает на величину радиуса коротации $r_c \sim R_{\odot}$ и частоту спирального узора порядка $\Omega_{\text{сп}} \sim 25\text{--}35$ км/с/кпк (Мишуров и др., 2002; Ачарова и др., 2010). О близости радиуса коротации к положению солнечной орбиты в Галактике свидетельствуют данные наблюдений за рассеянными звездными скоплениями с учетом их возраста $r_c/R_{\odot} = 1.06 \pm 0.08$ (Диас, Лепин, 2005). Такой подход позволяет по данным наблюдений определить положение радиуса коротации на периферии звездного диска, например для IC 0167 $r_c/R_{\text{opt}} = 0.83$, $r_c/R_{\text{opt}}^{\text{NGC } 1042} = 0.65$, $r_c/R_{\text{opt}}^{\text{NGC } 6907} = 1.0$ (Скарано и др., 2011). Причем все три галактики относятся к позднему типу с баром, на концах которого находится радиус коротации. Отметим также, что подходы Скарано и др. (2011) и Бута, Жанг (2009) дают для NGC 1042 близкие значения $r_c/R_{\text{opt}}^{\text{NGC } 1042} = 0.65$ и 0.6 соответственно. На положение радиуса коротации $r_c = 240''$ вблизи оптического радиуса $R_{\text{opt}} = 270''$

для NGC 2997 указывают наблюдения молодых объектов в окрестности спирального рукава (Гросбол, Доттори, 2009), причем у этой галактики можно видеть ярко выраженную систему верениц.

Особенностью ряда галактик с баром являются вереницы, начинающиеся непосредственно от конца бара, которые образуют кольцеобразную спираль, которая уходит к другому концу перемычки. Типичными представителями являются NGC 1097, NGC 2523, NGC 4902. В численных моделях N -тел на транзиентной стадии формирования бара и спиралей можно увидеть отдельные выпрямленные сегменты рукавов (Бута, Комбэ, 1996).

Отметим также теоретические модели спиральной структуры, указывающие на периферийное положение радиуса коротации (Контопоулуос, Гросбол, 1986). Такие модели, основанные на резонансе 4/1, позволяют описывать наблюдаемые особенности спиральных галактик (Патсис и др., 1997). В качестве другого примера можно указать на динамику галактического диска в неосимметричном массивном темном гало (Хоперсков и др., 2007). В таких моделях происходит генерация медленно вращающейся двухрукавной спиральной волны, у которой коротация располагается во внешней области диска. Вывод о наличии радиуса коротации на периферии спирального узора у заметного числа галактик является существенным для полученных в данной работе результатов численного моделирования, поскольку наиболее просто спрямление галактической УВ происходит в случае медленного вращения спирального узора, когда коротация располагается на периферии диска.

Выборка галактик с вереницами

Дополнительно к каталогу из 200 галактик с вереницами, опубликованному в работе Чернина и др. (2001а), мы выделили еще 102 спиральные галактики, у которых на изображениях прослеживаются достаточно типичные фрагменты ПС (см. рис. 1). При построении выборки использовались данные LEDA, NED, Полен, Труджилло (2006), SDSS.

У ряда галактик вереницы удается выделять даже по старым звездам (например, по данным 2MASS): NGC 2523, NGC 5653. Такие объекты редки, но у них полигональность обнаруживается по нескольким компонентам.

Целью данной работы является исследование возможности генерации ПС в газовых дисках спиральных галактик при учете следующих факторов:

1) гравитационного потенциала радиально неоднородной спиральной волны плотности звездного диска;

- 2) твердотельного вращения спиральной структуры звездного диска;
- 3) дифференциальности вращения газа;
- 4) радиальной неоднородности параметров газового диска;
- 5) вертикальных движений газа.

Перечисленные факторы являются новыми по сравнению с исследованием Чернина и др. (2006), и они позволяют воспроизвести наиболее существенные наблюдаемые морфологические особенности верениц в спиральных узорах ряда галактик.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Течение газа во внешнем потенциале звездного диска и темного гало описывается уравнениями классической газовой динамики. Будем предполагать, что газ является идеальным и политропным с показателем адиабаты, близким к единице, $1 < \gamma < 1.1$, что обеспечивает эффективный учет охлаждения в рамках однокомпонентной модели. Эффектами самогравитации газа пренебрегаем. Тогда систему уравнений газовой динамики можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varrho}{\partial t} + \nabla \cdot (\varrho \mathbf{u}) &= 0, \\ \frac{\partial \varrho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\varrho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) &= -\nabla p - \varrho \nabla \Psi, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ([E + p]\mathbf{u}) &= -\varrho \mathbf{u} \cdot \nabla \Psi, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϱ — объемная плотность газа, p — давление, $\mathbf{u} = \{u, v, w\}$ — вектор скорости газа, Ψ — внешний гравитационный потенциал. Объемная энергия и внутренняя удельная энергия определяются соответственно выражениями

$$E = \varrho \left(e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right), \quad e = \frac{p}{\varrho(\gamma - 1)}.$$

Следуя работам Вада, Кода (2001), Кокса, Гомеза (2002), Шетти, Остройкер (2006) внешний потенциал представим в виде суммы двух частей: осесимметричной Ψ_0 , которая обусловлена гало и осесимметричным распределением вещества в звездном диске, и неосесимметричной, связанной с волной плотности в звездном диске. Тогда потенциал удобно записать в форме

$$\Psi(r, \varphi, z) = \Psi_0(r, z)[1 + \varepsilon_0 \Psi_1(\xi_s) \cos \Theta_p], \quad (2)$$

$$\Psi_1 = \frac{\xi_s^2}{(1 + \xi_s^2)^{3/2}},$$

где

$$\begin{aligned} \xi_s &= \sqrt{(r/b)^2 + (z/h_*)^2}, \\ \Theta_p &= m \left[\varphi - \varphi_p(r_0) + \Omega_p t - \frac{\ln(r/r_0)}{\text{tgi}} \right], \end{aligned}$$

b, h_* — характерные радиальная и вертикальная шкалы соответственно, m — количество спиралей, i — угол закрутки спиралей, Ω_p — угловая скорость вращения спирального узора, ε_0 характеризует глубину потенциальной ямы спиральной волны плотности. В расчетах были приняты безразмерные значения: $b = 1, h_* = 0.1, r_0 = 0.9$. Для экспоненциальной шкалы осесимметричного звездного диска с радиальным профилем поверхностной плотности $\sigma_* \propto \exp(-r/L_*)$ считалось $L_* = 0.5$. Таким образом, оптический радиус модели галактики составляет $R_{\text{opt}} \simeq 4L_* = 2$. При таком выборе безразмерных параметров период обращения диска на радиусе R_{opt} составляет $\tau(r = 2) \simeq 6$. Потенциал квазиизотермического гало обеспечивает кривую типа “плато” на больших расстояниях от центра диска. Будем считать, что в пределах оптического радиуса относительная масса темного гало в 1.5–3 раза превышает массу дисковой подсистемы (звезды + газ) (Засов и др., 2004; Хоперсков и др., 2010).

Система уравнений (1) интегрировалась численно в системе координат, вращающейся со скоростью спирального узора Ω_p . Для компьютерного моделирования газовых дисков нами была реализована конечно-объемная численная TVD MUSCL схема (Ван Лиир, 1979; Хатен, 1983) второго порядка по времени и третьего по пространству в декартовой, полярной и цилиндрической системах координат. TVD-метод является эффективным для описания существенно нестационарного течения, в котором формируется система мелкомасштабных УВ (Хоперсков и др., 2003). Размер вычислительной области в двумерных моделях достигал 15×15 в декартовой системе координат, а в полярной системе координат внешняя граница располагалась на радиусе $r_{\text{max}} = 7$. Для исключения численных граничных эффектов в фиктивных ячейках расчетной области в течение всего времени расчета значения параметров газа полагались равными аналитическим, либо предполагалось, что газовый диск погружен в вакуум. Для использования последнего варианта нами был разработан и реализован подход, позволяющий в численных моделях рассчитывать эволюцию границы “вещество–вакуум” (Еремин и др., 2010).

В начальный момент времени предполагалось, что поверхностная плотность газа имеет степенной вид:

$$\sigma(r, t = 0) = \frac{1}{[1 + (r/L_\sigma)^2]^{5/2}},$$

где $L_\sigma \simeq 1-2$ — пространственный масштаб, и выполняется условие изэнтропичности:

$$\begin{aligned} p(r, z, t = 0) &= K \varrho^\gamma(r, z, t = 0), \\ K &= \text{const.} \end{aligned}$$

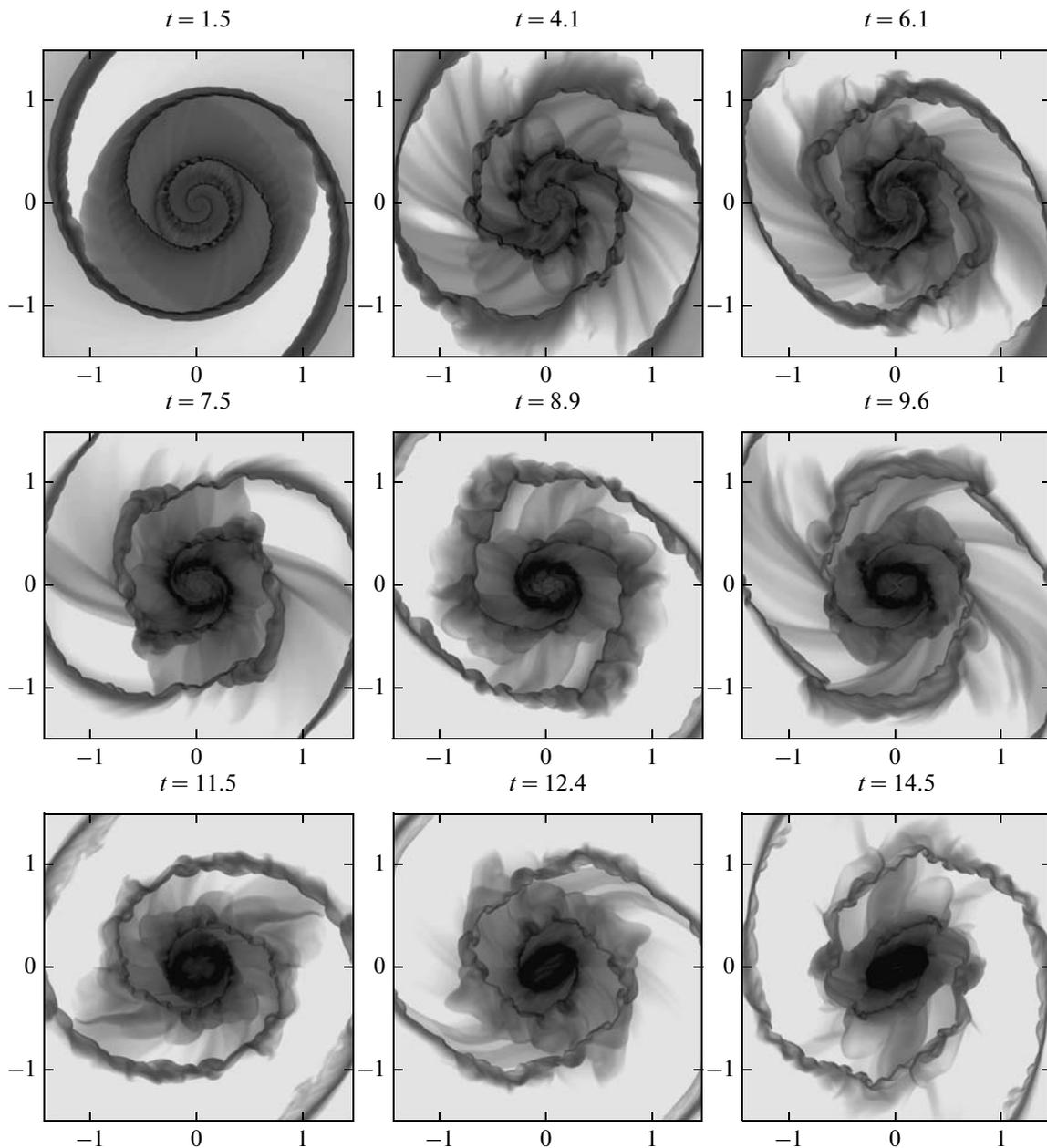


Рис. 2. Эволюция газового диска в модели с $i = 15^\circ$, $\varepsilon_0 = 0.15$. Логарифм поверхностной плотности в различные моменты времени t .

Радиальные профили параметров течения в экваториальной плоскости $z = 0$ определялись из условия осесимметричности и равновесности газового диска для случая $\varepsilon_0 = 0$. Для трехмерных моделей предполагалось, что диск в начальный момент времени также находится в состоянии гидростатического равновесия в вертикальном направлении.

Численные сетки определяются числом ячеек в радиальном N_r , азимутальном N_φ и вертикальном N_z направлениях. Для 2D-расчетов использовалось несколько групп моделей: $N_r = 500\text{--}3200$, $N_\varphi = 360\text{--}1080$. В 3D-расчетах параметры чис-

ленной сетки характеризуются значениями $N_r = 1000$, $N_\varphi = 360$, $N_z = 400$. В лучших моделях в приложении к типичной галактике с $R_{\text{opt}} = 10$ кпк соответствующее пространственное разрешение достигает ~ 10 пк, угловое разрешение по азимуту $\Delta\varphi = (1/3)^\circ$.

Основными параметрами численных моделей являются амплитуда ε_0 , отвечающая за глубину спиральной потенциальной ямы, угол закрутки спиралей i , скорость вращения спирального узора Ω_p , скорость звука $c_s \simeq \sqrt{K}$ в области плато

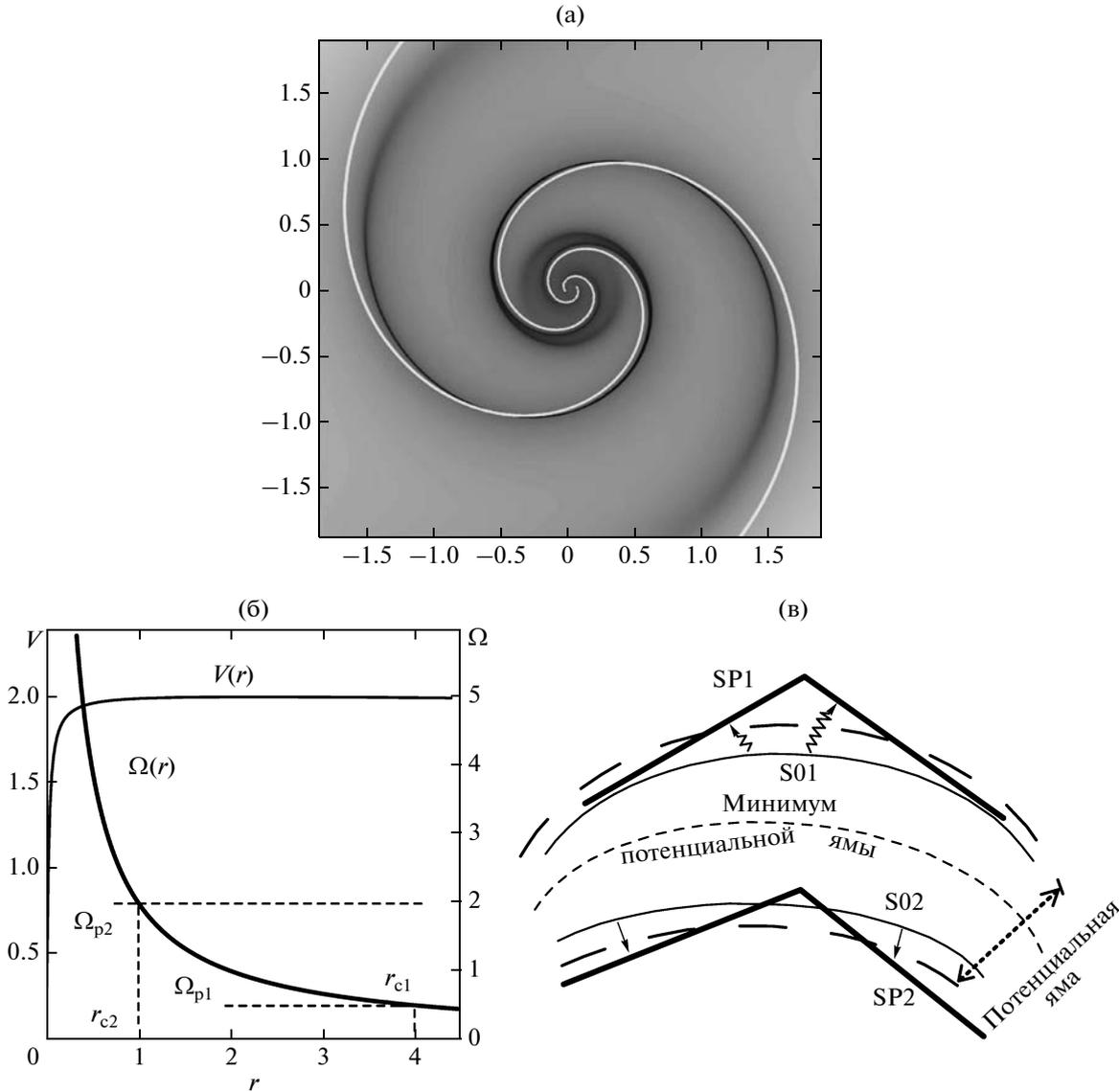


Рис. 3. (а) — Положение УВ (наиболее темный цвет) в потенциальной яме спиральной волны плотности (белая линия определяет положение минимума потенциальной ямы для потенциала (2)). Радиус коротации $r_c = 1$. (б) — Радиальные зависимости скорости вращения $V(r)$ и угловой скорости $\Omega(r)$ для газа. Для угловой скорости Ω_{p1} коротация находится на периферии диска ($r_c = 4$). Случай Ω_{p2} и r_{c2} соответствует рис. 3а. (в) — Схема расположений УВ в потенциальной яме спиральной волны плотности.

кривой вращения. Для характеристики начальной температуры в диске удобно использовать эффективное число Маха $M_0 = V_{\max}/c_s^{\max}$.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Результаты численного моделирования позволяют выделить несколько стадий эволюции газового диска, в процессе которой наблюдается формирование ПС (рис. 2).

На первой стадии происходит формирование гладких спиральных УВ на одном из склонов потенциальной ямы: внутри радиуса коротации (рис. 3) эти УВ расположены на передней по отношению к натекающему газу кромке спиральной потенциальной ямы (линия S01 на рис. 3в), создаваемой звездными волнам плотности, за пределами радиуса коротации УВ находятся на задней кромке потенциальной ямы (линия S02).

На второй стадии из-за гофрировочной неустойчивости УВ происходит достаточно быстрое раз-

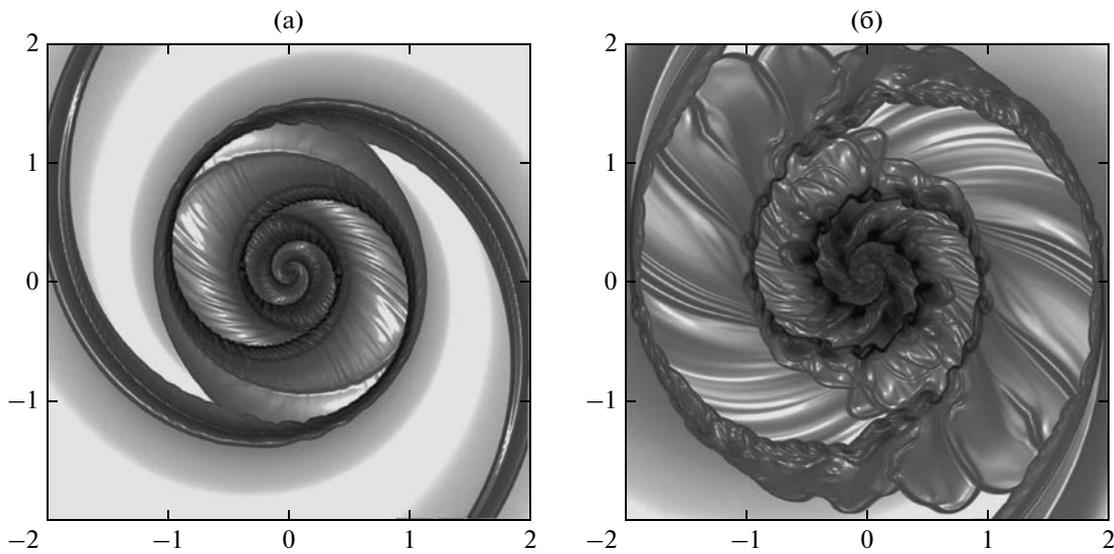


Рис. 4. Модель с $\varepsilon_0 = 0.15$, $M_0 = 30$, $i = 15^\circ$, $r_c = 4$. (а) — Начальная стадия развития гофрировочной неустойчивости. (б) — Стадия развитых шпуров. Для визуализации используется специальный метод: изображена поверхность функции $z = \sigma(x, y)$ при наличии подсветки, что усиливает контрастность.

вите мелкомасштабных возмущений, приводящих к появлению шпуров (рис. 4). Мелкомасштабные нерегулярные особенности на рис. 2 хорошо прослеживаются начиная с $t = 1.5$. Данная стадия при определенных параметрах может отсутствовать. На рис. 4б хорошо видны узлы плотности, из последовательности которых состоит нелинейная волна и “рыбьи плавники”, отходящие от спиральной волны под углом, близким к 90° . Формирование шпуров у спирального узора (классическими примерами являются галактики М 51 и М 81) в результате развития нелинейной стадии гофрировочной неустойчивости рассматривалось в работах Вада, Кода (2001), Вада (2008). Отметим, что формирование мелкомасштабной структуры спиралей оказывается также возможным в МГД-моделях (Шетти, Острайкер, 2006), в результате развития гравитационной неустойчивости (Шетти, Острайкер, 2008), при учете тепловых эффектов (Доббс, Боннел, 2006; Ким и др., 2008).

На третьей стадии наблюдается эффект выхода спиральной УВ из потенциальной ямы и при определенных условиях, о которых речь пойдет ниже, возникает выпрямление сегментов УВ, приводящее к образованию полигоналей (верениц) в газовом диске (см. рис. 2, 3в, 5). Такие прямые фрагменты в целом повторяют геометрию спиральной волны плотности звездной компоненты, которая определяется несимметричной частью потенциала (2). Особенностью эволюции спиральной структуры в газе представляется ее нестационарный характер — вереницы не образуют стационарной кар-

тины, которую дополнительно усложняет система шпуров, свойства которых меняются на коротких временах по сравнению с периодом обращения диска.

Выход УВ из потенциальной ямы в построенных моделях оказывается возможным только в случае, когда УВ находится на внешнем склоне ямы (см. S01 на рис. 3в) — происходит переход в положение SP1. С внутреннего склона потенциальной ямы переход УВ S02 к полигональной геометрии SP2 оказывается невозможным. Первая ситуация (S01 → SP1) соответствует внешнему радиусу коротации r_{c1} (см. рис. 3б), а вторая — быстрому вращению спирального узора с r_{c2} . Таким образом, в рамках обсуждаемой здесь чисто гидродинамической модели необходимым условием возникновения ПС является положение радиуса коротации на периферии диска.

Описанный результат отличается от вывода работы Чернина и др. (2006), в которой реализуется вариант SP2 (см. рис. 3в). Причина различия связана с рассмотрением только плоского потока в статье Чернина и др. (2006) без учета вращения диска, радиальных неоднородностей спирального потенциала и плотности газа, дифференциальности вращения. Учет последних факторов кардинально меняет положение фронта УВ в потенциальной яме. В плоской задаче УВ находится на входе сверхзвукового потока в потенциальную яму. В реалистичной модели вращающегося газового диска и спиральной волны звездной плотности УВ находится на выходе из ямы.

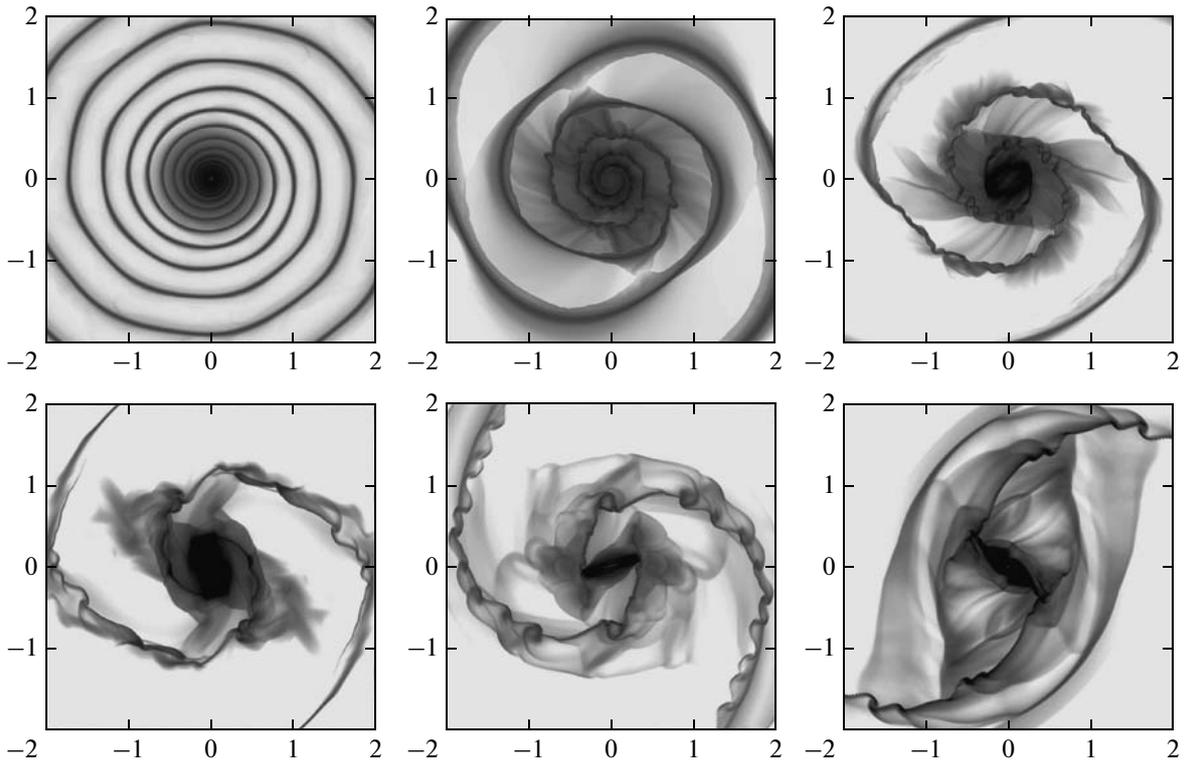


Рис. 5. ПС в моделях с $\varepsilon_0 = 0.1$, $M_0 = 30$, $r_c = 4$ при различных значениях угла закрутки $i = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ (верхний ряд); $i = 20^\circ, 30^\circ, 50^\circ$ (нижний ряд).

Нами построена серия моделей с различными значениями угла закрутки спиралей i (см. рис. 5). При любых значениях i в численных экспериментах можно выделить промежутки времени с ярко выраженными вереницами даже для небольшой амплитуды волны звездной плотности $\varepsilon_0 = 0.1$. Причем при малых углах закрутки (см. случай $i = 5^\circ$ на рис. 5) формирование ПС не сопровождается развитием гофрировочной неустойчивости.

Амплитуда спиральной волны плотности звезд ε_0 существенно влияет на особенности формирования спиральной структуры в газовой подсистеме (рис. 6). Значение амплитуды спиральной волны звездной плотности сложным образом влияет на эффективность генерации ПС. С одной стороны, амплитуда волны в газе усиливается с ростом ε_0 . С другой стороны, из неглубокой потенциальной ямы УВ проще выйти, что необходимо для образования выпрямленных участков возмущений. Как видим, первый фактор играет более важную роль для формирования ПС. В более глубокой яме (при больших ε_0) получаем более ярко выраженные изломы фронта волны в газовой компоненте. При малой амплитуде $\varepsilon_0 \lesssim 0.01$ вереницы в наших расчетах не образуются (см. рис. 6).

Характерной особенностью построенных численных моделей является транзитный характер ПС. Их параметры (положение изломов, длина верениц, угол между ними и даже их число) изменяются со временем. ПС, возникнув после выхода УВ из потенциальной ямы, начинает ослабляться, почти исчезая, затем вереницы воссоздаются заново. В случае более глубокой потенциальной ямы вереницы живут на протяжении более длительных промежутков времени. Возникновение ПС обусловлено физикой УВ в спиральной гравитационной яме, которые начинают эволюционировать в результате развития сдвиговой неустойчивости.

Построенные модели не являются самосогласованными, поскольку обратное влияние газа на геометрию спирального узора в звездной компоненте не принимается во внимание. В случае такого учета следует ожидать усиление транзитного характера ПС.

Трехмерное моделирование в цилиндрической системе координат на сетке с разрешением $\Delta r \times \Delta \varphi \times \Delta z = 0.01 \times 1^\circ \times 0.01$ в целом подтверждает результаты двумерных моделей (рис. 7). Так же происходит формирование транзитных ПС.

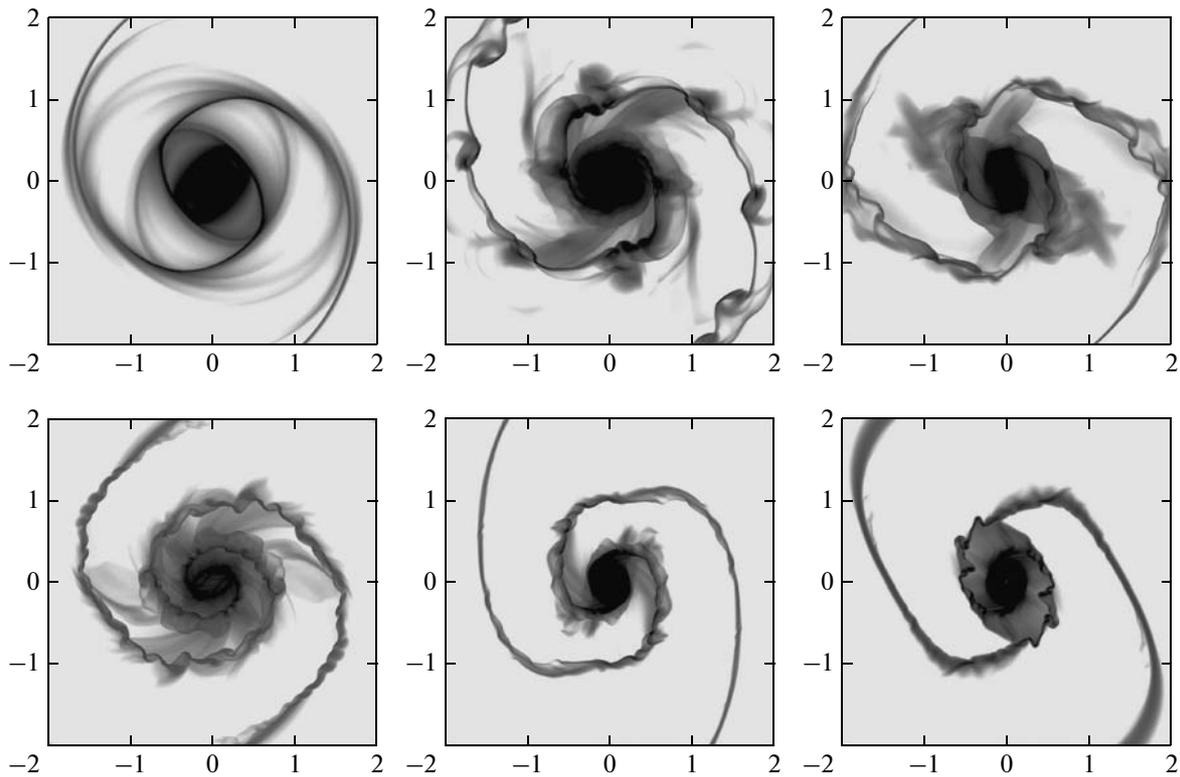


Рис. 6. Модели с $i = 20^\circ$, $M_0 = 30$, $r_c = 4$ при различных значениях $\varepsilon_0 = 0.01, 0.05, 0.1$ (верхний ряд); $\varepsilon_0 = 0.15, 0.2, 0.3$ (нижний ряд).

ПАРАМЕТРЫ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Образование выпрямленных сегментов спиральных УВ зависит от значений параметров модели. Обсудим характер такого влияния.

Во-первых, количество полигоналей зависит от угла закрутки спирали. При малых углах закрутки $i = 5^\circ - 20^\circ$ число выпрямленных сегментов велико (обычно пять—семь и более). В случае больших углов закрутки $i \geq 50^\circ$ число изломов уменьшается до одного—двух.

Во-вторых, образованию ПС наилучшим образом способствует медленное вращение спирального узора, при котором радиус коротации находится на периферии диска (см. рис. 3). При выполнении $r_c = V(r_c)/\Omega_p \lesssim L_\sigma$ вереницы не наблюдаются.

В-третьих, на эволюцию газового диска сильно влияет глубина спиральной потенциальной ямы ε_0 . При малых значениях амплитуды возмущений $\varepsilon_0 \lesssim 0.03$ гофрировочная неустойчивость не развивается, тем не менее спрямление фронта спиральной УВ оказывается возможным. В моделях с большими значениями глубины потенциальной ямы $\varepsilon \geq 0.25$ в газовом диске образуются почти стационарные ПС. При этом наблюдается не только

эффект выхода УВ из потенциальной ямы, но и расщепление спиральной УВ на две (иногда более) ветви.

В рассмотренных моделях вереницы всегда располагаются на внешней кромке потенциальной ямы — впереди по отношению к минимуму гравитационного потенциала волны звездной плотности, при условии, что радиус коротации r_c лежит на периферии диска. Причем, в этом случае увеличение радиуса коротации от $r_c = 4$ (рис. 8а) до $r_c = 20$ (рис. 8б) сохраняет возможность образования верениц.

Отметим влияние числа Маха M_0 на свойства ПС. При прочих равных условиях быстрое вращение диска (большие значения числа M_0) способствует формированию ПС. При эффективных числах Маха $M_0 \lesssim 10$ условия для развития гофрировочной неустойчивости ухудшаются, что в свою очередь осложняет возможность выхода УВ из гравитационной ямы волны звездной плотности, что необходимо для образования протяженного спрямленного участка газового узора. Если принять $c_s \sim 10 - 15$ км/с, то для $M_0 = 10$ имеем $V_{\max} \simeq 100 - 150$ км/с. Отметим, что среди медленно вращающихся галактик вереницы встречаются крайне редко.

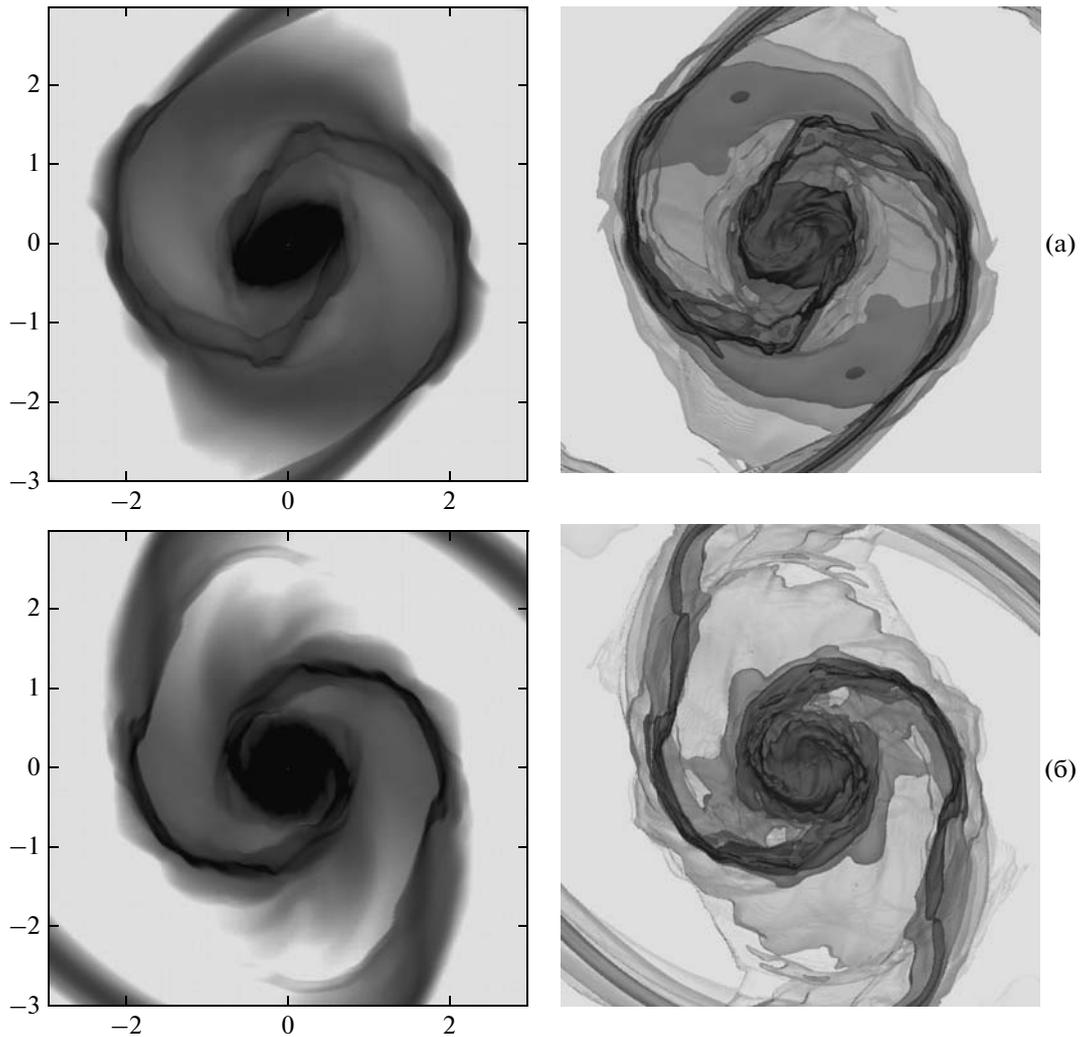


Рис. 7. Структура трехмерного газового диска при наличии верениц в два различных момента времени (а, б): слева — поверхностная плотность, справа — изоповерхности логарифма объемной плотности.

На рис. 9 приведены параметры ПС по результатам более чем 40 численных экспериментов в сравнении с данными наблюдений 200 галактик (Чернин и др., 2001а). Для каждого эксперимента выбиралось несколько моментов времени с развитой системой верениц. Общее число измерений составило 450. Вверху изображены гистограммы числа выпрямленных сегментов спиральных рукавов N_g от угла между соседними сегментами α . Как видим, максимум в распределении приходится на угол 120° , что полностью согласуется с данными наблюдений. Количество пар верениц с $\alpha = 120^\circ \pm \pm 2.5^\circ$ в численных экспериментах составило 30% от общего числа.

Зависимость размера выпрямленного сегмента спирали от галактоцентрического расстояния имеет линейный характер, но угол наклона прямой оказывается несколько отличным от значения, полу-

ченного по результатам обработки данных наблюдений в работе Чернина и др. (2000). Это различие может быть обусловлено тем, что мы использовали куб моделей с равномерным шагом по параметрам i, ε_0, M_0 , в то время как выборка галактик заведомо не покрывает равномерно сетку параметров (i, ε_0, M_0) . С другой стороны, мы не рассматривали спиральные узоры с числом рукавов $m > 2$, а в выборке галактик на долю многорукавных узоров приходится значительная часть от общего числа объектов с вереницами.

Существенно, что рассмотренный здесь механизм образования ПС является чисто гидродинамическим, и связан с неустойчивым положением фронта УВ в спиральной потенциальной яме.

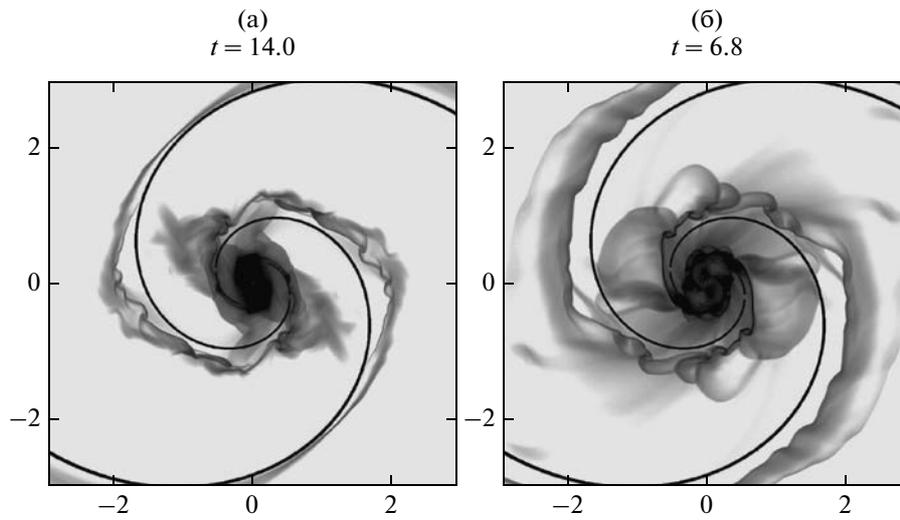


Рис. 8. Положение ПС относительно минимума потенциальной ямы от спирального рукава звездной компоненты (сплошные линии). Модели с $\mathcal{M}_0 = 30$, $i = 20^\circ$, $\varepsilon_0 = 0.1$, $\Omega_p = 0.5$ (а), $\Omega_p = 0.1$ (б).

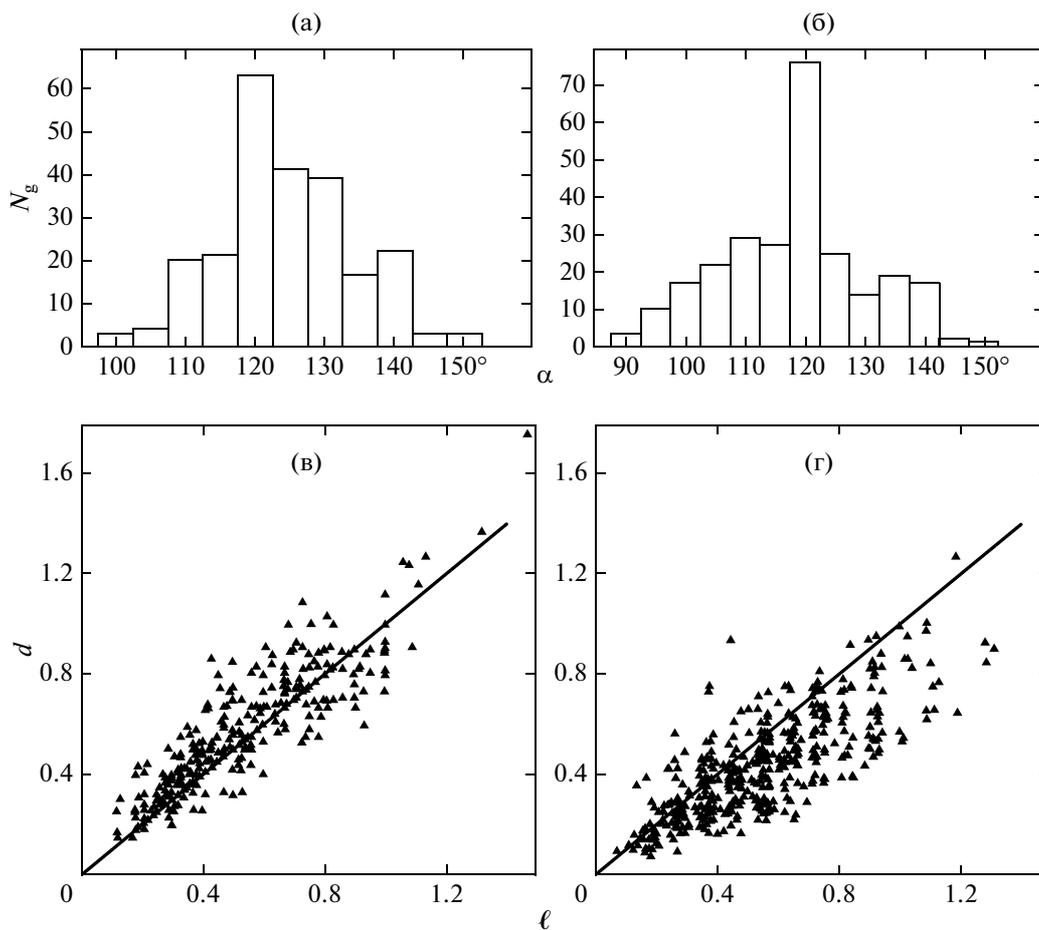


Рис. 9. Результаты статистической обработки данных наблюдений для выборки галактик (Чернин и др., 2001а) (а, в) и для серии численных экспериментов в различные моменты времени на стадии с развитой системой верениц (б), (г): (а), (б) — гистограммы числа выпрямленных сегментов от угла между ними α ; (в), (г) — зависимость длины выпрямленного сегмента l от расстояния до центра диска d . Сплошная линия: $d = al + b$, полученная в работе Чернина и др. (2001а).

ВЫВОДЫ

В заключение сформулируем основные результаты нашей работы:

1. Показана возможность образования ПС в газовой компоненте в простой гидродинамической модели в результате неустойчивого положения фронта УВ в спиральной волне звездной плотности. Для генерации указанных особенностей необходимы численные модели с высоким пространственным и временным разрешением.

2. Показана возможность формирования ПС для углов закрутки спирального узора $5^\circ - 50^\circ$.

3. В численных моделях, как правило, система верениц имеет существенно нестационарный характер.

4. Характерное время формирования выпрямленных сегментов не превосходит периода обращения периферии звездного диска.

5. ПС возникают в моделях с медленным вращением спирального узора, когда радиус коротации находится на периферии диска.

6. Результаты моделирования ПС в двух- и трехмерных моделях газовых дисков хорошо согласуются между собой.

7. Геометрические свойства верениц в моделях хорошо согласуются с результатами обработки наблюдаемых спиральных узоров. В частности, преимущественный угол между прямыми сегментами равен $\alpha \simeq 120^\circ$.

Отметим, что увеличение доли галактик с ПС среди взаимодействующих обусловлено, по видимому, тем, что внешнее гравитационное воздействие облегчает выход галактической УВ из потенциальной ямы звездного рукава, облегчая спрямление УВ.

Авторы благодарят А.В. Засова, В.И. Корчагина, А.Д. Чернина за полезные обсуждения. Численные расчеты проводились на суперкомпьютере СКИФ МГУ “Чебышев” при поддержке А.В. Засова и Н.В. Тюриной. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 10-07-97017-Поволжье), ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (П1248).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ачарова и др. (I.A. Acharova, J.R.D. Lepine, Yu.N. Mishurov, et al.), MNRAS **402**, 1149 (2010).
2. Бута, Жанг (R.J. Buta and X. Zhang), Astrophys. J. Suppl. Ser. **182**, 559 (2009).
3. Бута, Комбэ (R. Buta and F. Combes), Fund. Cosmic Phys. **17**, 95 (1996).
4. Бута, Посел (R. Buta and G.V. Purcell), Astron. J. **115**, 484 (1998).
5. Вада (K. Wada), Astrophys. J. **675**, 188 (2008).
6. Вада, Кода (K. Wada and J. Koda), Publ. Astron. Soc. Japan **53**, 1163 (2001).
7. Ван Лиир (B. van Leer), J. Comput. Phys. **32**, 101 (1979).
8. Воронцов-Вельяминов Б.А., Астрон. журн. **41**, 814 (1964).
9. Воронцов-Вельяминов Б.А., *Внегалактическая астрономия* (М.: Наука, 1977).
10. Герхард (O. Gerhard), arXiv1003.2489 (2010).
11. Гросбол, Доттори (P. Grosbol and H. Dottori), Astron. Astrophys. **499**, 21 (2009).
12. Диас, Лепин (W.S. Dias and J.R.D. Lepine), Astrophys. J. **629**, 825 (2005).
13. Доббс, Боннел (C.L. Dobbs and I.A. Bonnell), MNRAS **367**, 873 (2006).
14. Еремин М.А., Хоперсков А.В., Хоперсков С.А., Изв. ВолГТУ, Актуал. пробл. управления, вычисл. техники и информатики **13**, 24 (2010).
15. Ефремов Ю.Н., Письма в Астрон. журн. **35**, 563 (2009).
16. Ефремов (Yu.N. Efremov), MNRAS **405**, 1531 (2010).
17. Ефремов (Yu.N. Efremov), Astron. Astroph. Trans. **20**, 115 (2001).
18. Ефремов Ю.Н., Чернин А.Д., Успехи физ. наук **173**, 3 (2003).
19. Жанг, Бута (X. Zhang and R.J. Buta), Astron. J. **133**, 2584 (2007).
20. Жанг, Бута (X. Zhang and R.J. Buta), arXiv:1012.0277 (2010).
21. Засов А.В., Хоперсков А.В., Тюрина Н.В., Письма в Астрон. журн. **30**, 653 (2004).
22. Ким и др. (Ch.-G. Kim, W.-T. Kim, and E.C. Ostriker), Astrophys. J. **681**, 1148 (2008).
23. Кокс, Гомез (D.P. Cox and G.C. Gomez), Astrophys. J. Suppl. Ser. **142**, 261 (2002).
24. Контопулуос, Гросбол (G. Contopoulos and P. Grosbol), Astron. Astrophys. **155**, 11 (1986).
25. Ла Вигн и др. (M.A. La Vigne, S.N. Vogel, and E.C. Ostriker), Astrophys. J. **650**, 818 (2006).
26. LEDA, HyperLeda, <http://leda.univ-lyon1.fr/>
27. Мишуров и др. (Yu.N. Mishurov, J.R.D. Lepine, and I. A. Acharova), Astrophys. J. Lett. **571**, 113 (2002).
28. Мураока и др. (K. Muraoka, K. Kohno, T. Tosaki, et al.), Astrophys. J. **706**, 1213 (2009).
29. NED, NASA-IPAC Extragalactic Database — NED, <http://ned.ipac.caltech.edu/>
30. Патсис и др. (P.A. Patsis, P. Grosbol, and N. Hiotelis), Astron. Astrophys. **323**, 762 (1997).
31. Полен, Труджилло (M. Pohlen and I. Trujillo), Astron. Astrophys. **454**, 759 (2006).
32. Раутианен и др. (P. Rautiainen, H. Salo, and E. Laurikainen), MNRAS **388**, 1803 (2008).
33. SDSS, NGC Galaxies in the SDSS Data Release 2 (DR2), <http://www.sdss.org/dr2/>
34. Сильченко, Моисеев (O.K. Silchenko and A.V. Moiseev), Astronom. J. **131**, 1336 (2006).
35. Скарано и др. (S. Scarano, J. Lepine, and M. Marcon-Uchida), MNRAS (in press) arXiv:1012.5794 (2011).

36. Уоллэ и др. (W.H. Waller, R.C. Bohlin, R.H. Cornett, et al.), *Astrophys. J.* **481**, 169 (1997).
37. Хатен (A. Harten), *J. Comput. Phys.* **49**, 357 (1983).
38. Хоперсков А.В., Еремин М.А., Бутенко М.А., Храпов С.С., *Вестн. Волгоградского гос. ун-та. Сер. 1: Математика. Физика.* **11**, 105 (2007).
39. Хоперсков А.В., Храпов С.С., Недугова Е.А., *Письма в Астрон. журн.* **29**, 288 (2003).
40. Хоперсков и др. (A. Khoperskov, D. Bizyaev, N. Tiugina, et al.), *Astron. Nach.* **331**, 731 (2010).
41. Чакрабартти и др. (S. Chakrabarti, G. Laughlin, and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **596**, 220 (2003).
42. Чернин (A. D. Chernin), *Astrophys. J.* **41**, 399 (1998).
43. Чернин (A. D. Chernin), *MNRAS* **308**, 321 (1999a).
44. Чернин А.Д., *Письма в Астрон. журн.* **25**, 684 (1999б).
45. Чернин А.Д., Засов А.В., Архипова В.П., Кравцова А.С., *Письма в Астрон. журн.* **26**, 342 (2000).
46. Чернин А.Д., Кравцова А.С., Засов А.В., Архипова В.П., *Астрон. журн.* **78**, 963 (2001a).
47. Чернин и др. (A.D. Chernin, A.V. Zasov, V.P. Arkhipova, et al.), *ASP Conf. Ser.* **230**, 147 (2001б).
48. Чернин и др. (A.D. Chernin, A.V. Zasov, V.P. Arkhipova, et al.), *Astron. Astrophys. Trans.* **20**, 139 (2001в).
49. Чернин и др. (A.D. Chernin, V.V. Korolev, and V.V. Kovalenko), *Astrophys. Space Sci. Lib.* **337**, 321 (2006).
50. Шетти, Острайкер (R. Shetty and E.C. Ostriker), *Astrophys. J.* **647**, 997 (2006).
51. Шетти, Острайкер (R. Shetty and E.C. Ostriker), *Astrophys. J.* **684**, 978 (2008).
52. Элмигрин (B.G. Elmegreen), *Astrophys. J.* **242**, 528 (1980).
53. Элмигрин и др. (B.G. Elmegreen, E. Wilcots, and D.J. Pisano), *Astrophys. J. Lett.* **494**, 37 (1998).