



УДК 524.7-8  
ББК 22.193

## ПОЛИГОНАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ГАЗОВЫХ ДИСКАХ: ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ЧИСЛА МАХА

*М.А. Бутенко, С.А. Хоперсков*

В работе описаны результаты численного гидродинамического моделирования эволюции газового диска, который находится во внешнем неосесимметричном потенциале галактики с учетом спиральной структуры в звездной подсистеме. В зависимости от числа Маха в диске изучены условия формирования полигональных спиральных узоров в газовой компоненте. Расчеты проведены на основе TVD-метода с использованием параллельных технологий.

**Ключевые слова:** гидродинамика, численное моделирование, ударные волны, физика галактик, спиральная структура.

### 1. Полигональные структуры в галактиках

Около 10 лет назад А.Д. Чернин с коллегами начали активно искать спиральные галактики, содержащие так называемые вереницы по терминологии Б.А. Воронцова-Вельяминова. Речь идет о последовательности достаточно протяженных почти прямых отрезков, образующих спиральный узор многих галактик, который, следуя [4], будем называть полигональной структурой.

Дополнительно к каталогу из 200 галактик с вереницами, опубликованному в работе [3], нами было выделено еще 102 спиральные галактики, у которых на изображениях прослеживаются достаточно типичные фрагменты полигональных структур (см. рис. 1). При построении новой выборки использовались данные LEDA, NED, SDSS [8], GALEX, Galaxy Zoo, 2MASS.

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

В литературе обсуждается механизм генерации полигональных структур, связанный с неустойчивостью фронта ударной волны [5]. В данной статье приведены результаты численных расчетов динамики газового диска, в котором на определенном этапе эволюции наблюдается формирование транзитных полигональных спиральных узоров.

© Основное внимание уделено влиянию числа Маха на динамику диска.

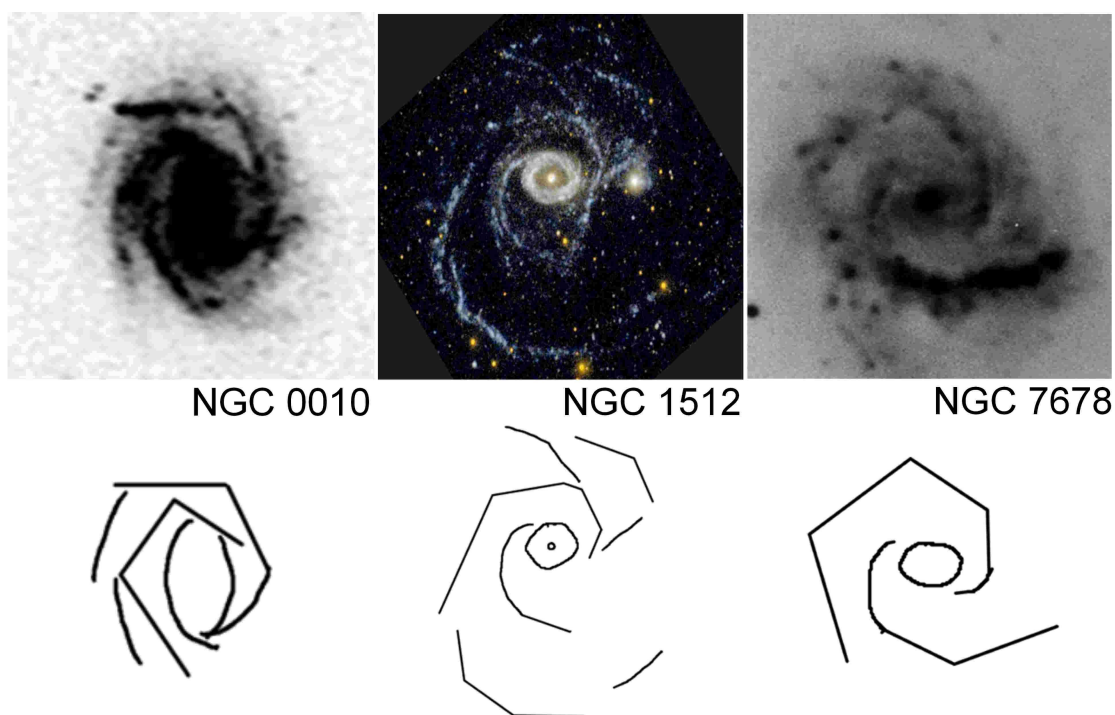


Рис. 1. Изображения галактик NGC 10, NGC 1512, NGC 7678 (вверху) с выделенными вереницами (внизу)

## 2. Результаты численных расчетов

В основе рассматриваемой модели лежит система уравнений газовой динамики:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p - \rho \nabla \Psi, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ([E + p] \mathbf{u}) = -\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \Psi, \quad (3)$$

где  $\rho$  — объемная плотность газа;  $p$  — давление;  $\mathbf{u} = \{u, v, w\}$  — вектор скорости газа;  $\Psi$  — внешний гравитационный потенциал. Объемная энергия и внутренняя удельная энергия определяются соответственно выражениями:  $E = \rho \left( e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right)$ ,  $e = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}$ .

Внешний потенциал представим в виде суммы двух частей: осесимметричной  $\Psi_0$ , которая обусловлена гало и осесимметричным распределением вещества в звездном диске, и неосесимметричной, связанной с волной плотности в звездном диске [2]. Для потенциала с учетом двухрукавной спирали примем:

$$\Psi(r, \varphi, z) = \Psi_0(r, z) \cdot [1 + \varepsilon_0 \Psi_1(\xi_s) \cos \Theta_p], \quad \Psi_1 = \frac{\xi_s^2}{(1 + \xi_s^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где

$$\xi_s = \sqrt{(r/b)^2 + (z/h_*)^2}, \quad \Theta_p = 2 \left[ \varphi - \varphi_p(r_0) + \Omega_p t - \frac{\ln(r/r_0)}{\text{tg } i} \right], \quad (5)$$

$b, h_*$  — характерные радиальная и вертикальная шкалы соответственно;  $i$  — угол закрутки спиралей;  $\Omega_p$  — угловая скорость вращения спирального узора;  $\varepsilon_0$  — характеризует глубину потенциальной ямы спиральной волны плотности. Будем считать, что в пределах оптического радиуса относительная масса темного гало в  $1,5 \div 3$  раза превышает массу дисковой подсистемы (звезды + газ) [7; 10]. В качестве модели темного гало выберем модель квазиизотермического гало [2].

Численный метод интегрирования уравнений (1)–(3) основан на подходе TVD с учетом особенностей, описанных в работе [1]. Данный подход является эффективным для описания существенно нестационарных течений, в которых формируется сложная система ударных волн [6].

К числу основных параметров численных моделей относятся амплитуда  $\varepsilon_0$ , отвечающая за глубину спиральной потенциальной ямы, угол закрутки спиралей  $i$ , скорость вращения спирального узора  $\Omega_p$ , скорость звука  $c_s \simeq \sqrt{K}$  в области плато кривой вращения. Для характеристики начальной температуры в диске введем эффективное число Маха  $M = V_{\max}/c_s^{\max}$ . Число ячеек по радиальной координате бралось  $N_r = 2400$ , а по азимуту  $N_\varphi = 1440$ . Угловая скорость спирального узора  $\Omega_p = 0,5$ , что дает положение радиуса коротации  $r_c \simeq 4$ .

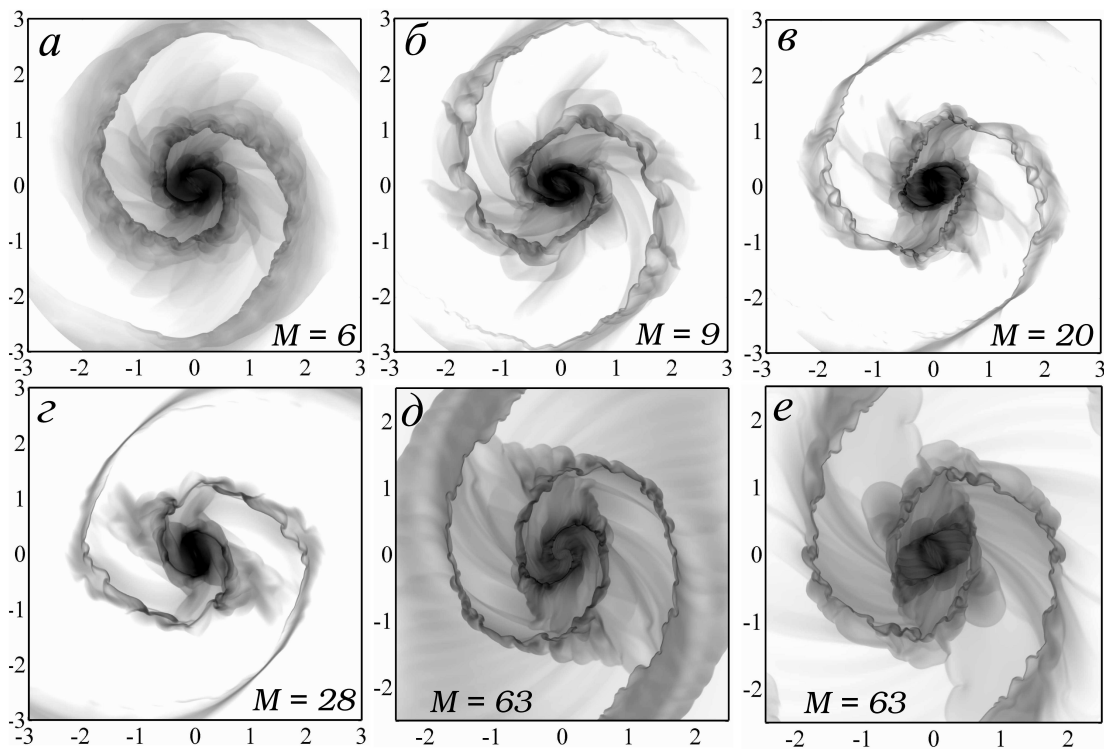


Рис. 2. Распределения поверхностной плотности в газовом диске на стадии образования полигонального спирального узора при различных значениях числа Маха  $M$ . В случае  $M = 63$  показаны решения для двух различных моментов времени

На рисунке 2 показаны типичные результаты моделирования газового диска на стадии, когда возникают полигональные структуры при различных значениях параметра  $M$ . Во всех случаях считалось  $\varepsilon_0 = 0,1$ . Если принять, что скорость звука  $c_s \simeq 10$  км/с, то случай  $M = 6$  соответствует максимальной скорости вращения галактики  $V_{\max} \simeq 60$  км/с. Другой предельный случай  $M = 63$  даже для далекой периферии диска с  $c_s \simeq 5$  км/с приводит к оценке  $V_{\max} \simeq 300$  км/с. Таким образом, рассмотренный

ряд значений  $M$  полностью покрывает данные о кинематике реальных галактик [2].

### 3. Обсуждение

Имеется систематическое влияние числа Маха  $M$  на свойства полигональных структур. Наихудшие условия для генерации верениц наблюдаются при малых числах Маха  $M \lesssim 6$ . Это связано с ухудшением условий для развития гофрировочной неустойчивости фронта ударной волны [9] в медленно вращающемся диске. Последнее, в свою очередь, осложняет возможность выхода ударной волны из гравитационной ямы волны звездной плотности, что необходимо для образования протяженного спрямленного участка газового узора. Если принять  $c_s \sim 10\text{--}15$  км/с, то для  $M = 6$  имеем  $V_{\max} \simeq 60\text{--}90$  км/с. Отметим, что по данным наблюдений [3] среди медленно вращающихся галактик вереницы встречаются крайне редко.

При прочих равных условиях более быстрое вращение диска (значения числа  $M \simeq 30$ ) способствует формированию ярко выраженных полигональных структур (см. рис. 2*з*). Однако при дальнейшем увеличении числа Маха до  $M \sim 60$  имеется определенный эффект ослабления механизма генерации верениц (см. рис. 2*д, е*), что требует дополнительных исследований.

Авторы благодарят проф. А.Д. Чернина за полезные обсуждения. Численные расчеты проводились на суперкомпьютере «СКИФ» при поддержке проф. А.В. Засова. Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (П1248).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин, М. А. Конечно-объемная схема интегрирования уравнений гидродинамики / М. А. Еремин, А. В. Хоперсков, С. А. Хоперсков // Изв. ВолгГТУ. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики. — 2010. — Т. 13. — С. 24–27.
2. Морозов, А. Г. Физика дисков / А. Г. Морозов, А. В. Хоперсков. — Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2005. — 423 с.
3. Chernin, A. D. Galaxies with Rows / A. D. Chernin, A. S. Kravtsova, A. V. Zasov, V. P. Arkhipova // Astronomy Reports. — 2001. — V. 45. — P. 841–853.
4. Chernin, A. D. Polygonal arms and hexagonal rings: Morphology and physical interpretation / A. D. Chernin, A. V. Zasov, V. P. Arkhipova, A. S. Kravtsova // Astroph. Trans. — 2001. — V. 20. — P. 139–146.
5. Chernin, A. D. Global Irregularities of Spiral Patterns in Galaxies: Manifestation of hydrodynamic Instabilities? / A. D. Chernin, V. V. Korolev, V. V. Kovalenko // Astroph. and Space Science Library. — 2006. — V. 337. — P. 321–328.
6. Khoperskov, A. V. Dissipative-Acoustic Instability in Accretion Disks at a Nonlinear Stage / A. V. Khoperskov, S. S. Khrapov, E. A. Nedugova // Astronomy Letters. — 2003. — V. 29. — P. 246–257.
7. Khoperskov, A. Numerical modelling of the vertical structure and dark halo parameters in disc galaxies / A. Khoperskov, D. Bizyaev, N. Tiurina, M. Butenko // Astronomische Nachrichten. — 2010. — V. 331. — P. 731–745.
8. Pohlen, M. The structure of galactic disks. Studying late-type spiral galaxies using SDSS / M. Pohlen, I. Trujillo // Astron. Astrophys. — 2006. — V. 454. — P. 759–772.

9. Wada, K. Instabilities of Spiral Shocks. II. A Quasi-Steady State in the Multiphase Inhomogeneous ISM / K. Wada // *Astrophys. J.* — 2008. — V. 675. — P. 188–193.
10. Zasov, A. V. Stellar Velocity Dispersion and Mass Estimation for Galactic / A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, N. V. Tyurina // *Astronomy Letters.* — 2004. — V. 30. — P. 593–602.

### POLYGONAL STRUCTURES IN GASEOUS DISKS: DEPENDENCE ON THE MACH NUMBER

*M.A. Butenko, S.A. Khoperskov*

In this work discuss the results of numerical simulations of the evolution of the gaseous disk, which is submerged in an external nonaxisymmetric potential of galaxy taking into account the spiral structure in the stellar subsystem. Conditions for the formation of polygonal spiral patterns in the gas component were studied depending the Mach number of the disk. The calculations are performed based on the TVD-method using parallel technologies.

**Key words:** *hydrodynamics, numerical simulation, shocks, physics of galaxies, spiral structure.*