



УДК 524.7-8  
ББК 22.193

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ ГАЗОВЫХ СПИРАЛЕЙ В ГАЛАКТИКАХ<sup>1</sup>

*М.А. Бутенко, С.А. Хоперсков, А.В. Хоперсков*

В работе предложен физический механизм, отвечающий за формирование наблюдаемых структур в газовой компоненте на далекой периферии дисковых галактик. Современные данные наблюдений указывают на наличие протяженных спиральных структур на расстояниях в несколько раз превышающих оптический радиус дисков от центра галактик. Наиболее ярко такие образования отмечаются в ультрафиолетовом диапазоне и в оптических наблюдениях с долгой экспозицией. С помощью многомерного динамического моделирования галактических газовых дисков было показано, что универсальным механизмом формирования таких внешних спиралей может быть взаимодействие неосесимметричного распределения скрытой массы с веществом диска.

**Ключевые слова:** гидродинамика, численное моделирование, физика галактик, спиральная структура, темное вещество.

### 1. Данные наблюдений. Постановка задачи

В последние годы у ряда галактик в УФ-диапазоне были обнаружены очень протяженные спиральные узоры далеко за пределами оптического радиуса  $R_{opt}$ , внутри которого находится основная масса звезд диска. Исключая взаимодействующие галактики и галактики в плотном окружении, где внешние структуры могут быть обусловлены приливными эффектами, возникает проблема объяснения наблюдаемых структур. Наблюдения космической обсерватории GALEX позволяют восстановить протяженные внешние спирали до расстояний  $r \sim (3 \div 4)R_{opt}$  в галактике NGC 1512 (рис. 1). Подобные структуры наблюдаются также в дисковых галактиках NGC 2915, NGC 5055, NGC 6744, NGC 6946, NGC 5236 [4–6; 9].

Основной трудностью при интерпретации внешних спиралей является их удаленность от центра галактик, где велико влияние бара, балджа и внутренней спиральной структуры в звездной компоненте галактик. Поскольку плотность окружающего галактику газа является недостаточной для развития гравитационной неустойчивости

на больших масштабах  $\sim 10$  кпк, то необходимо привлечение внешнего механизма генерации структур в нем. При этом тот факт, что в локальных областях (1–3 кпк) за оптическим радиусом идут процессы звездообразования, позволяет утверждать наличие механизма, приводящего к сжатию и фрагментации газа. Периферия галактик оказывается нечувствительной к особенностям распределения барионного вещества внутри оптического радиуса галактик, однако постоянство кривой вращения на расстояниях  $r > R_{opt}$  указывает на наличие значительной гравитирующей массы, в основном темного гало. Общепринятой является концепция об образовании несферических, а в общем случае трехосных, гало темной материи, внутри которых в процессе космологического расширения Вселенной формировались галактики. Взаимодействие темного вещества с барионным в процессе галактической эволюции приводит к трансформации формы гало и профиля плотности в нем, однако современные наблюдения близких галактик ( $z \ll 1$ ) и Галактики утверждают о сохранении триаксиального характера распределения массы в гало, за исключением самых центральных областей ( $r \ll R_{opt}$ ). Таким образом, реалистичной представляется гипотеза о том, что образование внешних структур может происходить за счет динамического взаимодействия неосесимметричного, в галактической плоскости, гало с протяженным газовым диском галактик.

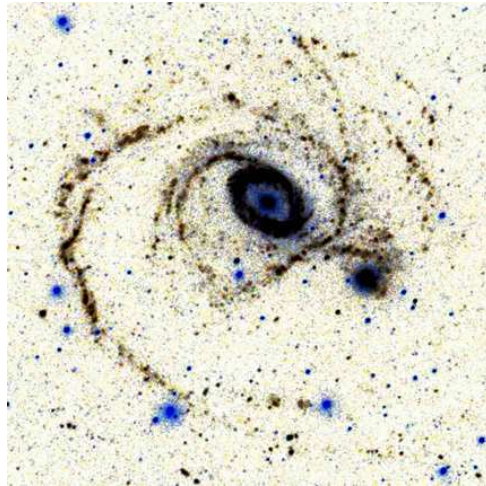


Рис. 1. NGC 1512 по данным GALEX

## 2. Математическая модель

Численные эксперименты по динамике галактического газового диска во внешнем гравитационном потенциале основаны на решении эволюционных уравнений газовой динамики в цилиндрической системе координат:

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

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

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

где  $\rho$  — объемная плотность газа;  $p$  — давление газа;  $\mathbf{u} = \{u, v, w\}$  — вектор скорости газа;  $\Psi$  — внешний гравитационный потенциал;  $E$  — объемная энергия;  $e$  — удельная

внутренняя энергия газа. Система газодинамических уравнений замыкается уравнением состояния газа:  $E = \varrho \left( e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right)$ ,  $e = \frac{p}{\varrho(\gamma - 1)}$ , где  $\gamma$  — показатель адиабаты.

Внешний гравитационный потенциал выберем в виде квазиизотермического темного гало, воспроизводящим постоянство кривой вращения на периферии диска [2]. Поскольку профиль плотности квазиизотермического гало не имеет особенностей в виде центрального кэпа, то сферически симметричный потенциал однозначно обобщается на случай трехосного гало [3]:

$$\Psi_h(x, y, z) = 4\pi G \varrho_{h0} a^2 \cdot \left\{ \ln(\xi) + \frac{\arctg(\xi)}{\xi} + \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \xi^2}{\xi^2} \right\}, \quad (4)$$

где  $\xi = \sqrt{\frac{x^2}{a_x^2} + \frac{y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_z^2}}$ ;  $a_x, a_y, a_z$  — характерные масштабы вдоль соответствующих осей. В случае центральносимметричного гало  $a = a_x = a_y = a_z$  имеем из (4) модель квазиизотермического гало с распределением плотности

$$\varrho(r) = \frac{\varrho_{h0}}{1 + (r/a)^2}, \quad (5)$$

которое обеспечивает постоянство скорости вращения на больших расстояниях  $r \gg a$ , где кривая вращения  $V(r)$  имеет плато [2].

Поскольку мы будем рассматривать тонкие галактические газовые диски, то вид распределения плотности в гало поперек диска не вносит существенного вклада в динамику газа. Таким образом, параметром, регулирующим форму гало, является амплитуда неосесимметрии в плоскости галактики  $\varepsilon = 1 - a_x/a_y$ . Далее для всех численных экспериментов значение  $\varepsilon$  выбиралось равным 0.1 в области  $r > R_{opt} = 1$ . На рисунке 2а приведены радиальные распределения параметра  $\varepsilon$  внутри  $R_{opt}$ , использованные в расчетах. Уменьшение значения  $\varepsilon(r)$  в области  $r < R_{opt}$  учитывает эффект сфероизации в распределении вещества темного гало в результате взаимодействия гало с диском галактики. Нами построена серия моделей с различными значениями радиальной шкалы гало  $a_h = 0.02, 0.05, 0.1$ , позволяющими учесть переход от галактик ранних морфологических типов (с массивным балджем) к галактикам поздних морфологических типов (рис. 2б). Будем также рассматривать медленное вращающееся темное гало с постоянной угловой скоростью  $\Omega_h$ .

### 3. Численный метод

Для численного интегрирования уравнений газодинамики (1)–(3) использовался TVD-вариант схемы MUSCL с учетом особенностей, описанных в работе [1]. Данный подход является эффективным для описания существенно нестационарных течений, в которых формируется сложная система взаимодействующих ударных волн [7]. Численная схема относится к схемам типа Годунова второго порядка точности по времени и третьего порядка по пространству. Для вычисления потоков физических величин через границы ячеек использовался модифицированный метод HLLC, который позволяет сквозным образом моделировать ударные волны, контактные и тангенциальные разрывы. Построение схемы второго порядка точности по времени достигается использованием схемы предиктор — корректор совместно с условием неубывания полной вариации численного решения (TVD-условие). Третий порядок аппроксимации по пространству в областях гладкого течения обеспечивается применением процедуры MUSCL [8].

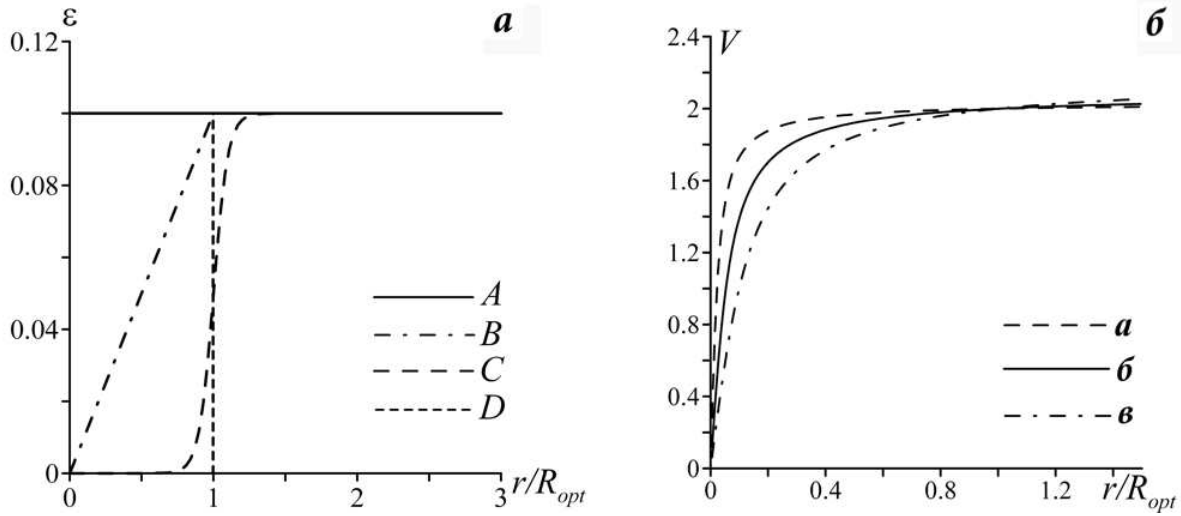


Рис. 2: а) различные модели зависимости  $\varepsilon(r)$ :  $A - \varepsilon = \varepsilon_0 = 0,1$ ;  $B - \varepsilon = \varepsilon_0 r/R_{opt}$ ;  $C - \varepsilon = a + b \operatorname{th} \frac{r-R_{opt}}{L_\varepsilon}$ ;  $D - \varepsilon = \varepsilon_0$ , при  $r \geq R_{opt}$ , где  $L_\varepsilon$ ,  $a$  и  $b$  — некоторые коэффициенты. Звездный диск расположен в пределах радиуса  $R_{opt} = 1$ ; б) зависимость  $V(r)$  для параметра гало  $a_h$ , равного  $a - 0,02$ ;  $б - 0,05$ ;  $в - 0,1$

#### 4. Результаты моделирования

Начальные равновесные профили плотности и скорости газа восстанавливались с учетом симметричного распределения темной материи ( $\varepsilon = 0$ ). На рисунке 3а приведен пример зависимостей скорости вращения газа  $V(r)$ , поверхностной плотности газа  $\sigma(r)$  и угловой частоты вращения газа  $\Omega(r)$ . На рисунке 3б показан радиальный профиль параметра Тоомре  $Q_T(r) = \frac{c_s(r)\kappa(r)}{\pi G\sigma(r)}$ , где  $\kappa(r)$  — эпициклическая частота;  $c_s(r)$  — адиабатическая скорость звука;  $G = 1$  — гравитационная постоянная. Несмотря на то что в численных расчетах не учитывалась самогравитация газа, оценка значения параметра  $Q_T$  позволяет говорить о возможности развития гравитационной неустойчивости.

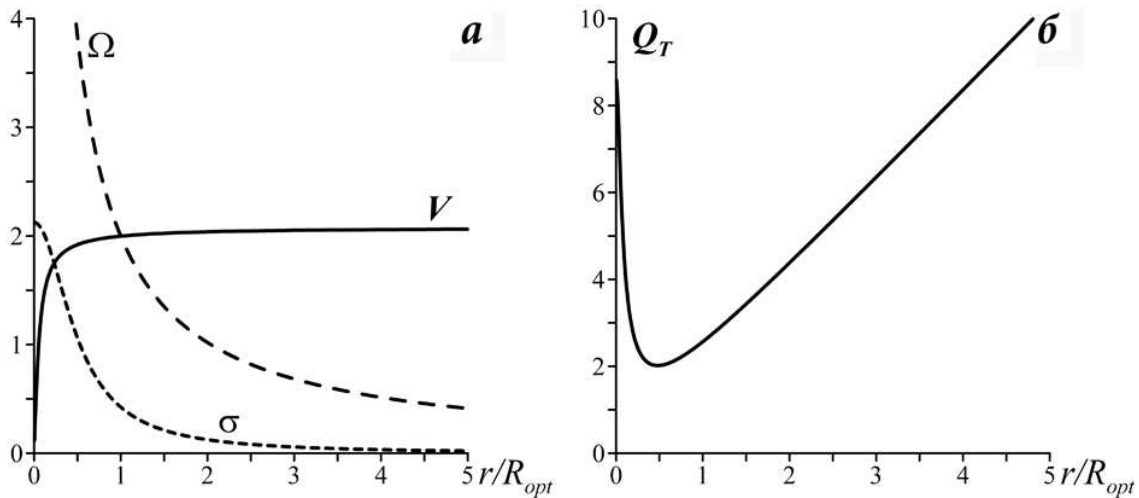


Рис. 3: а) начальное распределение параметров модели; б) зависимость параметра Тоомре  $Q_T$  от радиуса  $r$

В качестве начальных радиальных осесимметричных профилей параметров выбираем равновесные распределения для случая  $\varepsilon = 0$ . При расчетах значение параметра неосесимметрии адиабатически увеличивалось до выбранного в конкретной модели распределения (см. рис. 2а). На рисунке 3а приведены зависимости скорости вращения газа  $V$ , поверхностной плотности газа  $\sigma$ , угловой частоты вращения  $\Omega$ . На рисунке 3б показана зависимость параметра Тоомре  $Q_T = \frac{c_s \kappa}{\pi G \sigma}$  от радиуса  $r$ . Условие  $Q_T > 2$  указывает на горячий гравитационно устойчивый диск. Причем сильное увеличение  $Q_T$  за пределами оптического радиуса  $R_{opt} = 1$  не допускает гравитационную неустойчивость в качестве механизма генерации спирального узора.

На рисунке 4 приведена временная эволюция радиального профиля поверхностной плотности газа в поле неосесимметричного гало в модели А (см. рис. 2а). Хорошо заметно формирование плотных участков в газе, причем конечная амплитуда плотности практически не зависит от расстояния до центра, несмотря на начальный резко спадающий закон распределения плотности газа. Эти уплотнения ассоциируются со спиральными волнами за пределами оптического радиуса  $R_{opt} = 1$  (рис. 5).

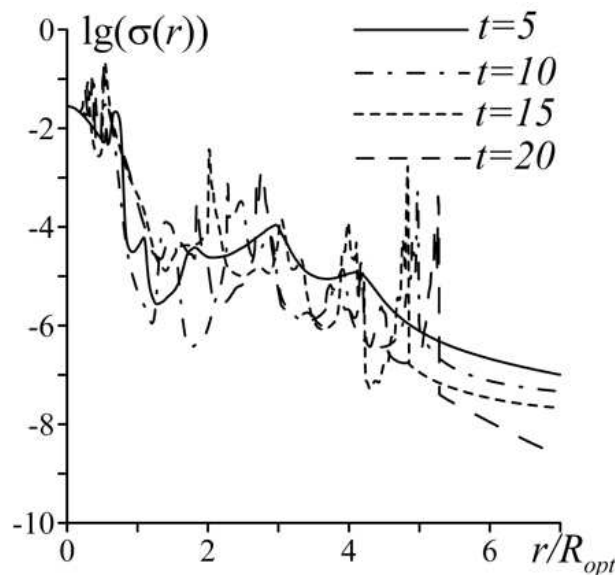


Рис. 4. Распределение  $\lg \sigma(r)$  вдоль луча  $\varphi = 0$  в различные моменты времени  $t$

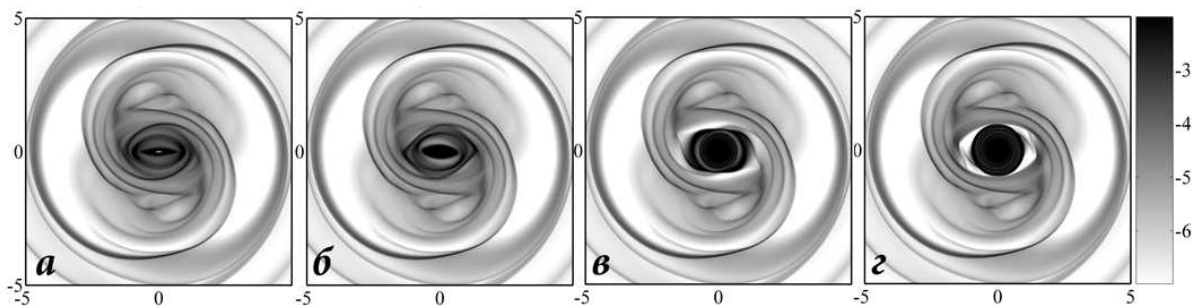


Рис. 5. Распределение логарифма поверхностной плотности  $\sigma(r, \varphi)$  для различных моделей параметра  $\varepsilon(r)$  см. на рисунке 2а модели А, В, С, D

Общей чертой расчетов с различными  $\varepsilon(r)$  является тугозакрученный спиральный узор на периферии галактического диска. При этом вариации радиального распределения неосесимметрии потенциала гало оказываются ответственны за изменение морфологии в центральной области внутри оптического радиуса.

На рисунке 6 приведены результаты серии численных экспериментов для различных значений параметра гало  $a_h$ . Изменение формы кривой вращения  $V(r)$  в небольших диапазонах практически не влияет на амплитуду и внешний вид спиральных ветвей.

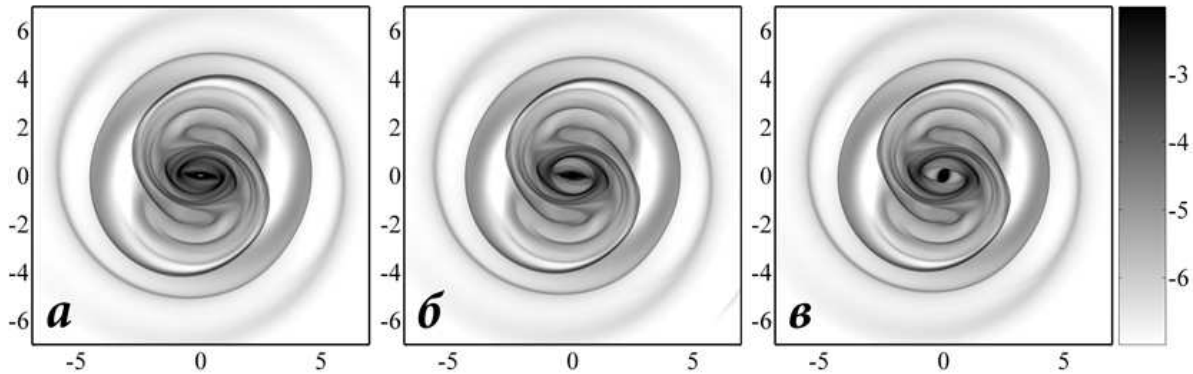


Рис. 6. Распределение логарифма поверхностной плотности  $\sigma(r, \varphi)$  для различных значений параметра гало: а)  $a_h = 0, 1$ ; б)  $a_h = 0, 05$ ; в)  $a_h = 0, 02$

Наиболее интересным оказалось изменение структуры спиральных течений при варьировании скорости вращения темного гало, определяющее положение коротационного радиуса:  $R_{cor} = V(R_{cor})/\Omega_h$  (рис. 7). При более медленном вращении гало формируются открытые спиральные структуры с углом закрутки  $\sim 20\text{--}30^\circ$  во внешней области, при этом заметна сильная зависимость угла закрутки спиралей от положения до центра галактики. С увеличением скорости вращения гало угол закрутки уменьшается и при положении коротации в области оптического радиуса спирали практически замыкаются в кольцо.

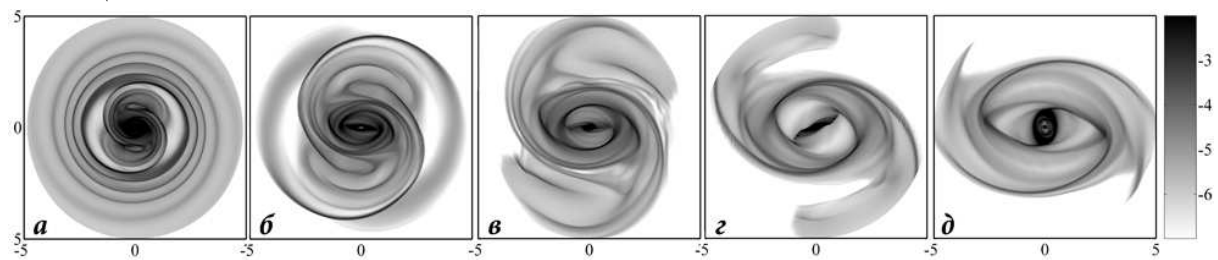


Рис. 7. Распределение логарифма поверхностной плотности  $\sigma(r, \varphi)$  при радиусе коротации: а)  $R_{cor} = 1$ ; б)  $R_{cor} = 2$ ; в)  $R_{cor} = 3$ ; г)  $R_{cor} = 4$ ; д)  $R_{cor} = 5$

Стоит, однако, отметить, что вариации положения радиуса коротации за пределами оптического радиуса  $R_{cor} = 1\text{--}5$  соответствуют медленному вращению гало относительно вращения вещества галактики, а также характерных скоростей вращения баров и внутренних спиральных структур. Так, например, угловая скорость вращения бара в Галактике оценивается в диапазоне  $50\text{--}70$  км/с/кпк, для спиральной структуры  $23\text{--}40$  км/с/кпк, тогда при совпадении радиуса коротации с оптическим радиусом  $R_{cor} = R_{opt} = 20$  кпк получаем оценку  $\Omega_h \approx 10$  км/с/кпк.

### Заключение

Проведенные численные газодинамические расчеты позволяют утверждать о наличии эффективного механизма генерации внешних спиральных структур за счет динамического взаимодействия протяженного галактического газового диска с неосесимметричным (в общем случае триаксиальным) темным гало. Мы показали, что вариации параметров вращения галактики и особенностей распределения темной материи влияют на морфологию образующихся спиральных структур. Отметим следующие характерные свойства:

1. Имеется ярко выраженное влияние скорости вращения гало на морфологию образующихся спиральных волн, в частности с увеличением скорости вращения уменьшается угол закрутки спиралей.
2. Характер распределения темного вещества внутри оптического радиуса не оказывает ощутимого влияния на морфологию внешней газовой спиральной структуры.

Общей чертой экспериментов с учетом неосесимметричности гало является развитие крупномасштабной двухрукавной спиральной структуры, в том числе за пределами оптического радиуса галактического диска. Формирование многорукавных, транзитных узоров, очевидно, можно продемонстрировать с учетом эволюционной и мелкомасштабной внутренней структуры гало, состоящего из многочисленных субгало темной материи.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 11-02-12247-офи-м-2011, №12-02-00685-а), гранта Президента РФ (№ НШ-3602.2012.2), ФЦП (тема «Физика и химия межзвездной среды: связь с эволюцией галактик и их непосредственным окружением»). С.А. Хоперсков выражает благодарность некоммерческому фонду «Династия». Авторы также благодарят А.В. Засова за многочисленные обсуждения. Численные расчеты проводились на суперкомпьютерах «Ломоносов» и «Чебышев» (НИВЦ МГУ) при поддержке А.В. Засова и Н.В. Тюриной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин, М. А. Конечно-объемная схема интегрирования уравнений гидродинамики / М. А. Еремин, А. В. Хоперсков, С. А. Хоперсков // Известия ВолгГТУ, Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики. — 2010. — Т. 13. — С. 24–27.
2. Фридман, А. М. Физика галактических дисков / А. М. Фридман, А. В. Хоперсков. — М. : Физматлит, 2011. — 640 с.
3. Хоперсков, А. В. Динамика газового диска в неосесимметричном темном гало / А. В. Хоперсков, М. А. Еремин, С. А. Хоперсков, М. А. Бутенко // Астрономический журнал. — 2012. — Т. 89, № 1. — С. 19–31.
4. Bertin, G. Prominent spiral arms in the gaseous outer galaxy disks / G. Bertin, N. C. Amorisco // A&A. — 2009. — V. 512. — P. 17–22.
5. Bigiel, F. Tightly Correlated H I and FUV Emission in the Outskirts of M83 / F. Bigiel, A. Leroy, M. Seibert [et al.] // ApJ. — 2010. — V. 720. — P. 31–35.

6. Boomsma, R. HI holes and high-velocity clouds in the spiral galaxy NGC6946 / R. Boomsma, T. A. Oosterloo, F. Fraternali, J. M. van der Hulst, and R. Sancisi // *A&A*. — 2008. — V. 490. — P. 555–570.
7. 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.
8. Leer, B. van Towards the ultimate conservative difference scheme V: a second order sequel to Godunov' method / B. van Leer // *J. of Comput. Phys.* — 1979. — V. 32. — P. 101–136.
9. Thilker, D. A. A Search for Extended Ultraviolet Disk (XUV-Disk) Galaxies in the Local Universe / D. A. Thilker, L. Bianchi, G. Meurer [et al.] // *ApJS*. — 2007. — V. 173. — P. 538–571.

## THE NUMERICAL SIMULATION OF EXTERNAL GAS SPIRALS

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

We consider the physical mechanism that can explain the nature of the observed spiral patterns on the periphery of galaxies outside the optical radius, according to *HI* and ultraviolet range. The generator of spiral structures in the gas outside the stellar disk can be nonaxisymmetric halo. The numerical gas-dynamic experiments have shown that nonaxisymmetric dark halo may be an efficient generator of spiral structures in the gas outside the stellar disk.

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