



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2021.3.7>

УДК 524.7-8
ББК 22.193

Дата поступления статьи: 03.06.2021
Дата принятия статьи: 30.07.2021



**ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ
НЕОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕМНОГО ГАЛО
НА МОРФОЛОГИЮ ВНЕШНЕГО СПИРАЛЬНОГО УЗОРА
ГАЛАКТИК**

Мария Анатольевна Бутенко

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
maria_butenko@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0307-6129>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Ираида Владимировна Беликова

Студент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
i.beliko@yandex.ru, infomod@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Светлана Сергеевна Хохлова

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
svetlana.khokhlova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4121-7228>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Николай Михайлович Кузьмин

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
nikolay.kuzmin@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4074-0970>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Геннадий Сергеевич Иванченко

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
genaivanchenko@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9276-1381>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Анастасия Валерьевна Тен

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных систем и компьютерного моделирования,
Волгоградский государственный университет
ten.anastasia@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1806-5270>
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования газового галактического диска, вращающегося во внешнем неосесимметричном потенциале темного гало. Рассмотрены различные распределения вещества в темном гало, которые в модели определяются функциональной зависимостью параметра неосесимметрии от радиуса галактики. Проведено исследование влияния формы неосесимметричного гало на морфологию формирующейся спиральной структуры далеко за пределами оптического радиуса диска.

Ключевые слова: гидродинамика, физика галактик, внешняя спиральная структура, темное гало, численное моделирование.

Введение

Объяснение механизма формирования протяженного глобального спирального узора галактики далеко за пределами ее оптического радиуса R_{out} представляет серьезную проблему, при этом внешний спиральный узор может быть выявлен по распределению газовой составляющей HI и/или в ультрафиолете. Например, у галактики NGC 1512, согласно данным GALEX, размеры внешних рукавов в несколько раз больше оптического радиуса галактики. В случае массивной изолированной галактики Local void NGC 6946 [10] (левая панель на рисунке 1) внешние рукава простираются далеко за

пределы ее оптического радиуса, появление подобной спиральной структуры на периферии галактики сложно объяснить только влиянием окружения. Внешние рукава для NGC 6946 хорошо видны на ее HI-карте [11] (правая панель на рисунке 1). Подобная картина наблюдается также в галактиках NGC 289, NGC 4151, NGC 4736, NGC 5055, NGC 6744, NGC 5236, NGC 7793 и др. [4; 6; 11; 21].

Следует отметить, что формирование протяженных внешних рукавов в газовой компоненте галактики невозможно объяснить просто спиральной волной звездной плотности или наличием бара. Кроме того, гравитационная неустойчивость газа также не может существенно повлиять на возникновение глобального спирального узора на периферии, поскольку плотность газа в этой части галактики достаточно мала. Возможной гипотезой, объясняющей появление спиральных рукавов в газе далеко за пределами оптического радиуса, является влияние неосесимметричного темного гало, на долю которого может приходиться более половины гравитирующей массы галактики.



Рис. 1. На левой панели представлено цветное композитное оптическое изображение Digitized Sky Survey галактики NGC 6946. На правой панели показана глубокая HI-карта галактики NGC 6946 в том же масштабе, что и оптическое изображение [11]

В областях с достаточно высокой плотностью газа (центр и внутренняя часть галактики) динамика газового диска определяется звездными подсистемами: балджем, баром и спиральной структурой звездной компоненты диска. В то же время на периферии галактики развитие гравитационной неустойчивости в масштабах более 10 кпк невозможно из-за слишком низкой плотности газа в этой области. Как представляется, за формирование спирального узора в этой области может быть ответственен некий внешний механизм. Кроме того, здесь же должны работать некоторые специфические механизмы, приводящие к сжатию и фрагментации газа на периферии, которые обеспечивали бы звездообразование за пределами R_{out} в локальных областях размерами 1–3 кпк.

Распределение барионного вещества внутри оптического радиуса, скорее всего, слабо влияет на газ на периферии галактик. При этом кривая вращения на расстояниях

$r > R_{out}$ выходит на плато, что может означать наличие значительной ненаблюдаемой массы, которую обычно связывают с темным гало. Основной гипотезой, на данный момент, является существование несферических трехосных эллипсоидальных гало темной материи, внутри которых и формировались галактики на этапе космологического расширения Вселенной. Взаимодействие темного и барионного вещества в дальнейшем могло приводить к изменению формы таких гало и профилей плотности в них [17]. Но результаты современных наблюдений нашей Галактики и близких галактик ($z \ll 1$) указывают на то, что пространственное распределение массы темных гало сохраняет триаксиальный характер, возможно, за исключением некоторых самых центральных областей ($r \ll R_{out}$).

В современных исследованиях рассматриваются различные гипотезы формирования спиральных рукавов за пределами оптического диска. Например, в работах [15; 16] с помощью нелинейного численного гидродинамического моделирования исследовано распространение во внешнем газовом диске крупномасштабных спиральных волн, которые возбуждаются внутри оптического диска. Было показано, что проникающие в газ через внешний резонанс Линдблада волны плотности могут образовывать относительно регулярные спиральные структуры за пределами оптического звездного диска, при этом с увеличением радиуса амплитуда таких структур быстро увеличивается. Упомянем также работу [22], в которой было рассмотрено формирование многорукавных спиралей (результаты наблюдений показывают, что существуют галактики, у которых есть два рукава в центре и три или более — на периферии), за которое может быть ответственно быстрое охлаждение газа, приводящее к образованию гигантских молекулярных облаков. Отметим также гипотезу о влиянии на формирование внешних спиральных структур динамического взаимодействия неосесимметричного гало и газового галактического диска [1; 8]. Рассмотренный в указанных работах механизм позволил воспроизвести формирование внешнего спирального узора в галактиках.

В настоящей работе проведено детальное исследование влияния параметров модели газового галактического диска [1; 8] на морфологию формирующегося в неосесимметричном потенциале темного гало глобального спирального узора за пределами оптического радиуса.

1. Математическая и численная модель

В основе нашей модели лежит полная система уравнений гидродинамики для идеального газа. Газовый галактический диск был помещен во внешний потенциал

$$\Psi_{ext} = \Psi_{halo} + \Psi_{bulge} + \Psi_{disk}, \quad (1)$$

где Ψ_{ext} — полный внешний гравитационный потенциал, связанный с темным гало Ψ_{halo} , звездным балджем Ψ_{bulge} и звездным диском Ψ_{disk} . Для вычисления потенциала Ψ_{halo} использовалась модель квазиизотермического триаксиального темного гало:

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

где $\xi^2 = \frac{x^2}{a_x^2} + \frac{y^2}{a_y^2} + \frac{z^2}{a_z^2}$, и a_x, a_y, a_z — характерные масштабы вдоль соответствующих осей.

Отметим, что такой потенциал обеспечивает выход кривой вращения на плато на периферии диска. Кроме того, профиль плотности для такого потенциала не имеет особенности в виде каспа в центральной части.

В работе [9] спиральная структура в газовом галактическом диске формируется под влиянием неосесимметричного темного гало. В настоящей работе мы исследуем прежде всего динамику далекой периферии галактики в рамках модели неосесимметричного темного гало.

В случае центральносимметричного гало $a = a_x = a_y = a_z$ модель (2) превращается в квазиизотермическое гало, удовлетворяющее следующему распределению плотности:

$$\varrho(r) = \frac{\varrho_{h0}}{1 + (r/a)^2}. \quad (3)$$

Данное распределение позволяет поддерживать постоянную скорость вращения на больших расстояниях от центра галактики $r \gg a$, где кривая вращения имеет плато, соответствующее зависимости из работы [8].

Потенциал звездного балджа Ψ_{bulge} описывается в рамках модели балджа Кинга с обрезанием на расстоянии r_b^{\max} :

$$\Psi_{bulge} = \frac{M_b}{rC_b} \ln \left[\frac{r}{r_b} + \left(1 + \left(\frac{r}{r_b} \right)^2 \right) \right], \quad (4)$$

где

$$C_b = \ln \left(r_b^{\max}/r_b + \sqrt{1 + (r_b^{\max}/r_b)^2} \right) - (r_b^{\max}/r_b) / \left(\sqrt{1 + (r_b^{\max}/r_b)^2} \right),$$

и параметры $r_b^{\max} = 0,2$ кпк, $r_b = 0,8$ кпк, $M_b \approx 0,2M_d$.

Для звездного диска было взято экспоненциальное распределение поверхностной плотности с соответствующим потенциалом диска [7]. Нагрев и охлаждение учитывались на основе подхода, представленного в работе [12]. Эффективность модели нагрева-охлаждения продемонстрирована в работе [13] при моделировании гигантских молекулярных облаков в Галактике.

Параметры нашей базовой модели соответствуют физическим параметрам Галактики, указанным в работе [14]. Функция распределения поверхностной плотности задается так, чтобы на периферии диска за пределами R_{out} было достаточно много газа и обрезается на расстоянии трех оптических радиусов $R_{out} = 12$ кпк.

Численное моделирование газового диска выполнено с помощью TVD-варианта схемы MUSCL [23], являющейся расширением метода Годунова на второй порядок аппроксимации по времени и третий по пространству. Потоки физических величин через границы расчетных ячеек вычислялись с помощью метода HLLC, модифицированного для возможности расчета на границе с вакуумом [2]. Для реконструкции распределения газодинамических параметров внутри расчетных ячеек были использованы простые переменные [4]. Эффекты самогравитации рассчитывались методом TreeCode [5].

Численные эксперименты проводились на цилиндрической сетке: $N_r = 500$ ячеек по радиусу, $N_\phi = 180$ ячеек по азимуту. Размер расчетной области R_{\max} составлял 3 оптических радиуса R_{out} , что соответствует $R_{\max} = 36$ кпк (единица радиуса равна 1 кпк, единица скорости равна 40 км/с). Для проверки отсутствия влияния размера расчетной сетки на результаты моделирования некоторые расчеты были повторно выполнены на более крупной и более мелкой сетках.

2. Результаты моделирования

Ранее в работе [1] зависимость параметра неосесимметрии гало от радиуса $\varepsilon(r)$ рассматривалась как один из факторов, влияющих на формирование спирального узора. В этой работе мы рассмотрели влияние формы триаксиального темного гало на морфологию формирующегося спирального узора более подробно. Особый интерес представляли спирали, формирующиеся далеко за пределами оптического радиуса на периферии галактического диска. В работе [8] было показано, что наличие неосесимметрии в распределении вещества темного гало является эффективным механизмом формирования таких спиральных структур.

Нами проведены серии численных экспериментов, учитывающие два предельных случая. В случае, когда неосесимметричность темного вещества сконцентрирована в центре, функция $\varepsilon(r)$ рассчитывалась следующим образом:

$$\varepsilon(r) = A - B \operatorname{th}((r - R_{out})/L_e). \quad (5)$$

При концентрации неосесимметрии темного гало на периферии диска функция $\varepsilon(r)$ принимает вид

$$\varepsilon(r) = A - B \operatorname{th}((r - R_{out})/L_e) \operatorname{th}(-R_{out}/L_e), \quad (6)$$

где R_{out} — оптический радиус диска; $A = (\varepsilon_{\min} + \varepsilon_{\max})/2$ и $B = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2$. Параметры ε_{\min} и ε_{\max} , а также L_e , определяющий ширину переходной зоны между двумя предельными значениями параметра неосесимметрии, являются теми характеристиками модели, влияние которых мы исследуем в представленной работе.

На рисунке 2 приведены функциональные зависимости значения параметра неосесимметрии темного газа ε от радиуса диска r .

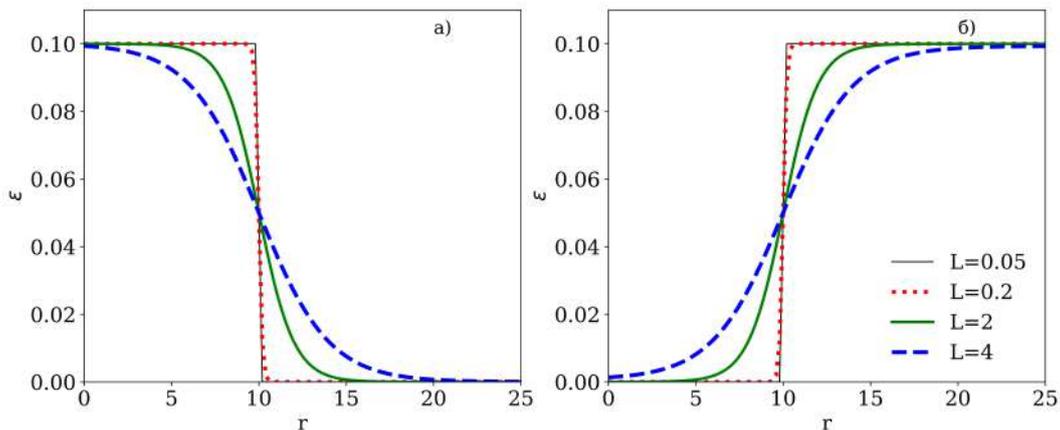


Рис. 2. Функции распределения $\varepsilon(r)$, соответствующие разным сериям численных экспериментов: а) неосесимметричность темного вещества сконцентрирована в центре (5); б) на периферии, в центре гало осесимметрично (6). L_e — параметр, показывающий ширину переходной зоны от максимального к минимальному значению параметра ε

На рисунке 3 представлены результаты моделирования динамики газового галактического диска для функции $\varepsilon(r)$, соответствующей распределению, приведенному на

рисунке 2а). Показатель неосесимметрии имеет максимальное значение $\varepsilon_{\max} = 0,1$ в центральной области и снижается до нуля за пределами оптического радиуса. Видно, что внешняя спираль при таких условиях не формируется, что косвенно указывает на эффективность предложенного в работе [8] механизма генерации спиральной структуры за пределами оптического радиуса.

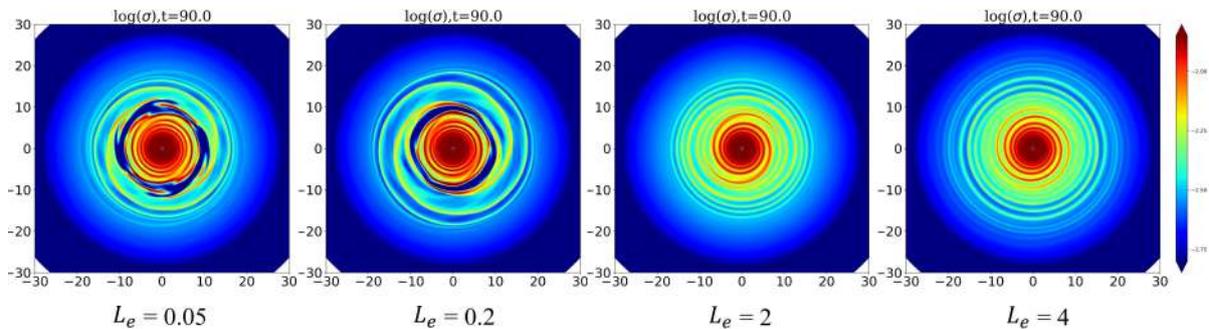


Рис. 3. Распределения логарифма поверхностной плотности $\lg(\sigma)$ в момент времени $t = 90$, что соответствует трем периодам вращения, для различных значений параметра L_e

Используя при моделировании для описания формы неосесимметрии темного гало функцию (5), приведенную на рисунке 2б), мы получаем протяженную и долгоживущую спиральную структуру за пределами оптического радиуса диска. Из рисунка 4 видно, что ширина переходной области между двумя значениями параметра неосесимметрии, которая определяется параметром L_e , влияет на морфологию формирующегося спирального узора только в центральной области. При почти скачкообразном переходе от одного значения ε к другому мы наблюдаем сильные возмущения в переходной области.

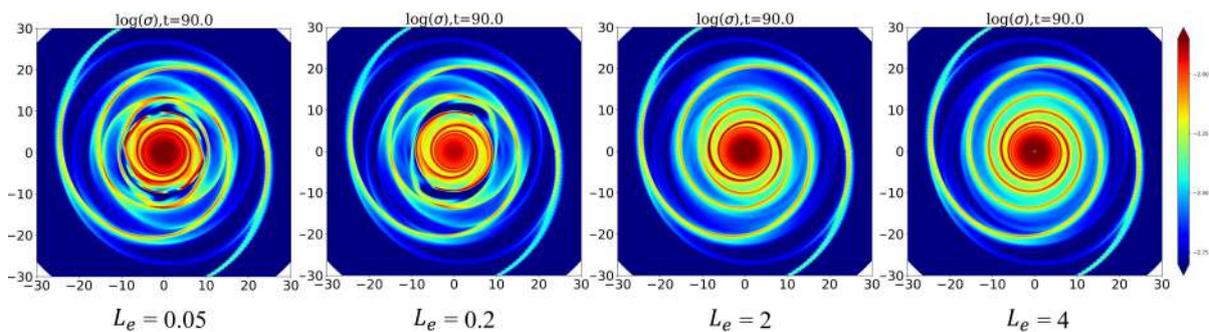


Рис. 4. Распределения логарифма поверхностной плотности $\lg(\sigma)$ в момент $t = 90$ для различных значений параметра L_e

Были проведены серии численных экспериментов, в которых исследовалось влияние максимального значения параметра ε в функциональной зависимости (6). Из результатов моделирования, приведенных на рисунке 5, видно, что максимальное значение параметра ε оказывает существенное влияние на морфологию генерируемого спирального узора за пределами оптического радиуса. В частности, можно отметить влияние на угол закрутки спиральных рукавов, который увеличивается с ростом значения параметра ε_{\max} .

Среди прочего по полученным результатам моделирования газового галактического

диска рассмотрена его динамика при различных значениях параметров расчетной сетки. На основе сравнения результатов моделирования на трех видах сетки от крупной к мелкой $N_r = 300, N_\varphi = 90; N_r = 500, N_\varphi = 180; N_r = 1500, N_\varphi = 360$ сделан вывод о том, что уменьшение размеров ячеек расчетной сетки позволяет выявить динамику более мелкомасштабных структур. На крупномасштабную структуру спирального узора на периферии диска размеры расчетной сетки влияния не оказывают.

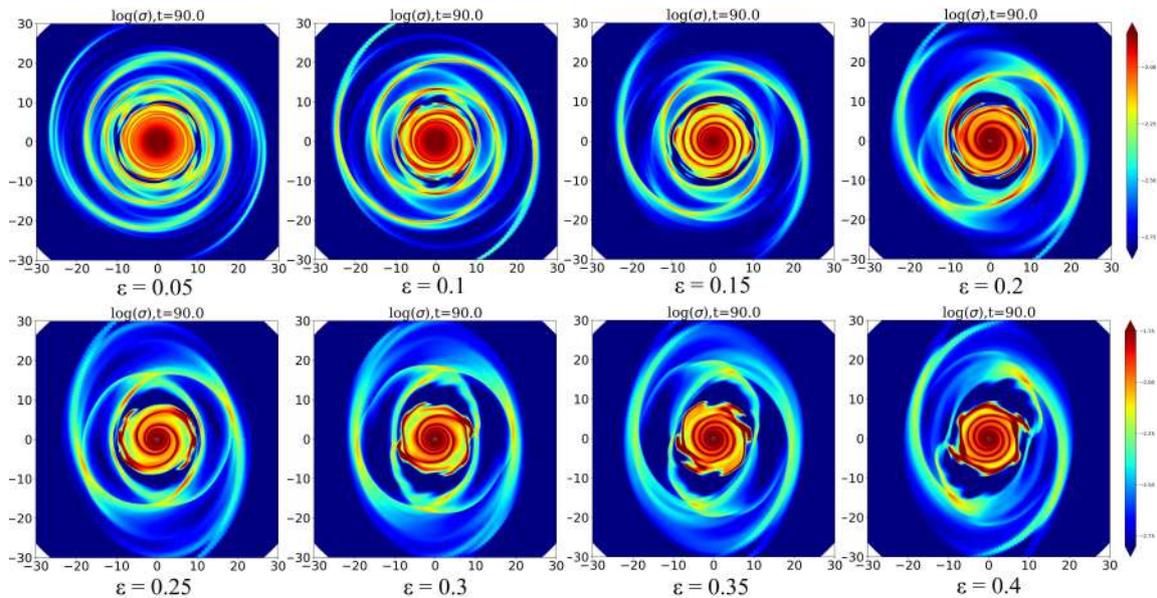


Рис. 5. Распределения логарифма поверхностной плотности $\lg(\sigma)$ в момент времени $t = 90$. Каждое изображение соответствует разному максимальному значению параметра неосесимметрии за пределами оптического радиуса: $\epsilon_{\max} = 0, 05; 0, 1; 0, 15; 0, 2$ (первая строка); $\epsilon_{\max} = 0, 25; 0, 3; 0, 35; 0, 4$ (вторая строка). Все результаты соответствуют $L_e = 0, 05$

Заключение

Проведены серии численных газодинамических расчетов с целью выявления влияния формы неосесимметрии потенциала темного гало на морфологию и динамику формирующейся спиральной структуры. При распределении темного вещества таким образом, что в пределах оптического радиуса ярко выражена неосесимметрия, а на периферии гало симметрично, мы не наблюдаем формирования глобального спирального узора на периферии галактического диска, то есть предложенный в работах [1; 8] механизм генерации внешних спиральных структур не работает. Совершенно другую картину мы наблюдаем при гало, симметричном в центре и неосесимметричном за пределами оптического радиуса. В этом случае результаты моделирования подтверждают эффективность механизма, генерирующего внешний спиральный узор за счет динамического взаимодействия протяженного галактического газового диска с неосесимметричным (в общем случае триаксиальным) темным гало.

Результаты нашего моделирования показывают, что особенности распределения темной материи влияют на морфологию образующихся спиральных структур. Особое значение для спирального узора имеет максимальная величина параметра неосесиммет-

рии ϵ за пределами оптического радиуса диска, так как она влияет на угол закрутки формирующегося глобального спирального узора. Глобальные спирали генерируются даже при небольших значениях параметра ϵ , соответствующих 5 %, на периферии диска. Увеличение максимального значения величины параметра неосесимметрии приводит к существенным изменениям угла закрутки спирали, при этом прослеживается формирование замкнутых структур в средней области диска. Варьирование параметра L_e , определяющего ширину области перехода между максимальным и минимальным значениями параметра неосесимметрии темного гало ϵ , не оказывает существенного влияния на спиральный узор на периферии диска, формируя мелкомасштабные структуры в переходной области.

Отметим также, что большая часть приведенных здесь результатов получена для самогравитирующей модели галактического газового диска, при этом параметры модели таковы, что эффекты самогравитации не существенны. Нами также проведено несколько расчетов, в которых масса газовой компоненты была увеличена, что привело к проявлению эффектов самогравитации и формированию флокулентной структуры, что уже было показано ранее в работе [8]. При наличии достаточно большой массы газа в этой области самогравитация не только не может служить механизмом генерации спиральной волны плотности, но и мешает формированию этой волны за счет взаимодействия с триаксиальным гало.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко, М. А. Численное моделирование внешних газовых спиралей в галактиках / М. А. Бутенко, С. А. Хоперсков, А. В. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2012. — № 1 (16). — С. 49–56.
2. 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.
3. A mass-dependent density profile for dark matter haloes including the influence of galaxy formation / A. Di Cintio, C. B. Brook, A. A. Dutton, A. V. Macciò, G. S. Stinson, A. Knebe // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Vol. 441. — P. 2986–2995.
4. A Search for Extended Ultraviolet Disk (XUV-Disk) Galaxies in the Local Universe / D. A. Thilker, L. Bianchi, G. Meurer, A. Gil de Paz, S. Boissier, B. F. Madore, A. Boselli, A. M. N. Ferguson, J. C. Muñoz-Mateos, G. J. Madsen, S. Hameed, R. A. Overzier, K. Forster, P. G. Friedman, D. C. Martin, P. Morrissey, S. G. Neff, D. Schiminovich, M. Seibert, T. Small, T. K. Wyder, J. Donas, T. M. Heckman, Y.-W. Lee, B. Milliard, R. M. Rich, A. S. Szalay, B. Y. Welsh, S. K. Yi // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2007. — Vol. 173. — P. 538–571.
5. Barnes, J. A hierarchical $O(N \log N)$ force-calculation algorithm / J. Barnes, P. Hut // Nature. — 1986. — Vol. 324. — P. 446–449.
6. Bertin, G. Prominent spiral arms in the gaseous outer galaxy disks / G. Bertin, N. C. Amorisco // Astronomy and Astrophysics. — 2010. — Vol. 512. — Article ID: A17.
7. Binney, J. Galactic Dynamics / J. Binney, S. Tremaine. — Princeton, NJ : Princeton University Press, 1987. — 747 p.
8. Butenko, M. Galactic spiral pattern beyond the optical size induced by the triaxial dark halo / M. Butenko, A. Khoperskov, S. Khoperskov // Baltic Astronomy. — 2015. — Vol. 24. — P. 119–125.

9. Dynamics of Gaseous Disks in a Non-axisymmetric Dark Halo / A. V. Khoperskov, M. A. Eremin, S. A. Khoperskov, M. A. Butenko, A. G. Morozov // *Astronomy Reports*. — 2012. — Vol. 56, iss. 1. — P. 16–28. — DOI: 10.1134/S1063772912010039.
10. Efremov, Y. N. Imaging and spectroscopic observations of a strange elliptical bubble in the northern arm of the spiral galaxy NGC 6946 / Y. N. Efremov, A. V. Moiseev // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — Vol. 461. — P. 2993–3000.
11. HI holes and high-velocity clouds in the spiral galaxy NGC6946 / R. Boomsma, T. A. Oosterloo, F. Fraternali, J. M. van der Hulst, R. Sancisi // *Astronomy and Astrophysics*. — 2008. — Vol. 490. — P. 555–570.
12. Hollenbach, D. Molecule formation and infrared emission in fast interstellar shocks. III — Results for J shocks in molecular clouds / D. Hollenbach, C. F. McKee // *Astrophysical Journal*. — 1989. — Vol. 342. — P. 306–307.
13. Interaction between collisionless galactic discs and non-axisymmetric dark matter haloes / A. V. Khoperskov, S. A. Khoperskov, A. V. Zasov, D. V. Bizyaev, S. S. Khrapov // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Vol. 431. — P. 1230–1239.
14. Khoperskov, A. V. A Dynamical Model of the Galaxy / A. V. Khoperskov, N. V. Tyurina // *Astronomy Reports*. — 2003. — Vol. 47. — P. 443–457.
15. Khoperskov, S. A. Spiral Density Waves in the Outer Galactic Gaseous Discs / S. A. Khoperskov, G. Bertin // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 451. — P. 2889–2899.
16. Khoperskov, S. A. Spiral Patterns Beyond the Optical Radius: Numerical Simulations and Synthetic HI Observations / S. A. Khoperskov, G. Bertin // *Formation and Evolution of Galaxy Outskirts*. — 2017. — Vol. 321. — P. 81–83.
17. Khoperskov, S. A. Interaction of the dark-matter cusp with the baryonic component in disk galaxies / S. A. Khoperskov, B. M. Shustov, A. V. Khoperskov // *Astronomy Reports*. — 2012. — Vol. 56. — P. 664–671.
18. Koribalski, B. S. Gas dynamics and star formation in the galaxy pair NGC1512/1510 / B. S. Koribalski, Á. R. López-Sánchez // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Vol. 400. — P. 1749–1767.
19. Non-axisymmetric Structure in the Satellite Dwarf Galaxy NGC 2976: Implications for its Dark/Bright Mass Distribution and Evolution / O. Valenzuela, H. Hernandez-Toledo, M. Cano, I. Puerari, R. Buta, B. Pichardo, R. Groess // *The Astronomical Journal*. — 2014. — Vol. 147. — P. 27–28.
20. Numerical code for multi-component galaxies: from N-body to chemistry and magnetic fields / S. A. Khoperskov, E. O. Vasiliev, A. V. Khoperskov, V. N. Lubimov // *Journal of Physics Conference Series*. — 2014. — Vol. 510. — Article ID: 012011.
21. Outer-disk Populations in NGC 7793: Evidence for Stellar Radial Migration / D. J. Radburn-Smith, R. Roškar, V. P. Debattista, J. J. Dalcanton, D. Streich, R. S. de Jong, M. Vlajić, B. W. Holwerda, C. W. Purcell, A. E. Dolphin, D. B. Zucker // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — Vol. 753. — P. 138.
22. Spiegel, L. Multiarm spirals on the periphery of disc galaxies / L. Spiegel, E. Polyachenko // *Open Astronomy*. — 2018. — Vol. 27. — P. 70–74.
23. Van Leer, B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method / B. Van Leer // *Journal of Computational Physics*. — 1979. — Vol. 32. — P. 101–136.

REFERENCES

1. Butenko M.A., Khoperskov S.A., Khoperskov A.V. Chislennoe modelirovanie vneshnikh gazovykh spiraley v galaktikakh [The Numerical Simulation of External Gas Spirals]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika. Fizika* [The Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2012, no. 1 (16), pp. 49–56.

2. Eremin M.A., Khoperskov A.V., Khoperskov S.A. Konechno-obyemnaya skhema integrirovaniya uravneniy gidrodinamiki [Finite-Volume Scheme for Integrating the Equations of Hydrodynamics]. *Izvestiya VolgGTU, Aktualnye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki*, 2010, vol. 13, pp. 24-27.
3. Di Cintio A., Brook C.B., Dutton A.A., Macciò A.V., Stinson G.S., Knebe A. A Mass-Dependent Density Profile for Dark Matter Haloes Including the Influence of Galaxy Formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, vol. 441, pp. 2986-2995.
4. Thilker D.A., Bianchi L., Meurer G., Gil de Paz A., Boissier S., Madore B.F., Boselli A., Ferguson A.M.N., Muñoz-Mateos J.C., Madsen G.J., Hameed S., Overzier R.A., Forster K., Friedman P.G., Martin D.C., Morrissey P., Neff S.G., Schiminovich D., Seibert M., Small T., Wyder T.K., Donas J., Heckman T.M., Lee Y.-W., Milliard B., Rich R.M., Szalay A.S., Welsh B.Y., Yi S.K. A Search for Extended Ultraviolet Disk (XUV-Disk) Galaxies in the Local Universe. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2007, vol. 173, pp. 538-571.
5. Barnes J., Hut P. A Hierarchical O(N Log N) Force-Calculation Algorithm. *Nature*, 1986, vol. 324, pp. 446-449.
6. Bertin G., Amorisco N.C. Prominent Spiral Arms in the Gaseous Outer Galaxy Disks. *Astronomy and Astrophysics*, 2010, vol. 512, article ID: A17.
7. Binney J., Tremaine S. *Galactic Dynamics*. Princeton, NJ, Princeton University Press, 1987. 747 p.
8. Butenko M., Khoperskov A., Khoperskov S. Galactic Spiral Pattern Beyond the Optical Size Induced by the Triaxial Dark Halo. *Baltic Astronomy*, 2015, vol. 24, pp. 119-125.
9. Khoperskov A.V., Eremin M.A., Khoperskov S.A., Butenko M.A., Morozov A.G. Dynamics of Gaseous Disks in a Non-Axisymmetric Dark Halo. *Astronomy Reports*, 2012, vol. 56, iss. 1, pp. 16-28. DOI: 10.1134/S1063772912010039.
10. Efremov Y.N., Moiseev A.V. Imaging and Spectroscopic Observations of a Strange Elliptical Bubble in the Northern Arm of the Spiral Galaxy NGC 6946. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, vol. 461, pp. 2993-3000.
11. Boomsma R., Oosterloo T.A., Fraternali F., van der Hulst J.M., Sancisi R. HI Holes and High-Velocity Clouds in the Spiral Galaxy NGC6946. *Astronomy and Astrophysics*, 2008, vol. 490, pp. 555-570.
12. Hollenbach D., McKee C.F. Molecule Formation and Infrared Emission in Fast Interstellar Shocks. III — Results for J Shocks in Molecular Clouds. *Astrophysical Journal*, 1989, vol. 342, pp. 306-307.
13. Khoperskov A.V., Khoperskov S.A., Zasov A.V., Bizyaev D.V., Khrapov S.S. Interaction Between Collisionless Galactic Discs and Non-Axisymmetric Dark Matter Haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, vol. 431, pp. 1230-1239.
14. Khoperskov A.V., Tyurina N.V. A Dynamical Model of the Galaxy. *Astronomy Reports*, 2003, vol. 47, pp. 443-457.
15. Khoperskov S.A., Bertin G. Spiral Density Waves in the Outer Galactic Gaseous Discs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 451, pp. 2889-2899.
16. Khoperskov S.A., Bertin G. Spiral Patterns Beyond the Optical Radius: Numerical Simulations and Synthetic HI Observations. *Formation and Evolution of Galaxy Outskirts*, 2017, vol. 321, pp. 81-83.
17. Khoperskov S.A., Shustov B.M., Khoperskov A.V. Interaction of the Dark-Matter Cusp with the Baryonic Component in Disk Galaxies. *Astronomy Reports*, 2012, vol. 56, pp. 664-671.
18. Koribalski B.S., López-Sánchez Á.R. Gas Dynamics and Star Formation in the Galaxy Pair NGC1512/1510. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, vol. 400, pp. 1749-1767.
19. Valenzuela O., Hernandez-Toledo H., Cano M., Puerari I., Buta R., Pichardo B., Groess R. Non-Axisymmetric Structure in the Satellite Dwarf Galaxy NGC 2976: Implications for Its Dark/Bright Mass Distribution and Evolution. *The Astronomical Journal*, 2014, vol. 147, pp. 27-28.
20. Khoperskov S.A., Vasiliev E.O., Khoperskov A.V., Lubimov V.N. Numerical Code for Multi-Component Galaxies: From N-Body to Chemistry and Magnetic Fields. *Journal of Physics Conference Series*, 2014, vol. 510, article ID: 012011.

21. Radburn-Smith D.J., Roškar R., Debattista V.P., Dalcanton J.J., Streich D., de Jong R.S., Vlajić M., Holwerda B.W., Purcell C.W., Dolphin A.E., Zucker D.B. Outer-Disk Populations in NGC 7793: Evidence for Stellar Radial Migration. *The Astrophysical Journal*, 2012, vol. 753, pp. 138.

22. Spiegel L., Polyachenko E. Multiarm Spirals on the Periphery of Disc Galaxies. *Open Astronomy*, 2018, vol. 27, pp. 70-74.

23. Van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. V. A Second-Order Sequel to Godunov's Method. *Journal of Computational Physics*, 1979, vol. 32, pp. 101-136.

INFLUENCE OF THE NONAXISYMMETRIC DARK HALO SHAPE ON GALAXIES OUTER SPIRAL PATTERN MORPHOLOGY

Maria A. Butenko

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
maria_butenko@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0307-6129>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Iraida V. Belikova

Student, Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
i.beliko@yandex.ru, infomod@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Svetlana S. Khokhlova

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
svetlana.khokhlova@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4121-7228>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Nikolay M. Kuzmin

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
nikolay.kuzmin@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4074-0970>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Gennadiy S. Ivanchenko

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
genaivanchenko@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9276-1381>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Anastasiya V. Ten

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Information Systems and Computer Modeling,
Volgograd State University
ten.anastasia@volsu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1806-5270>
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. The results of numerical simulations of a gaseous galactic disk rotating in an external nonaxisymmetric potential of a dark halo are presented in the article. Analysis of two models of a nonaxisymmetric dark halo, in which a gaseous galactic disk rotates, has been carried out. In the first case, the halo is nonaxisymmetric within the optical radius of the disk, where the bulk of the visible matter of the galaxy is located, including the stellar disk. The model is ineffective for the external long-lived spiral structure formation in the disk periphery due to the nonaxisymmetry of dark halo. In the second series of calculations, we have employed the model with a symmetric halo inside the optical radius and a nonaxisymmetric one outside of it. The results of the simulations confirm that nonaxisymmetry in the halo matter distribution is effectively generating the global spiral pattern at the periphery of the galaxy. One may observe such spiral structures in some galaxies, mainly in the ultraviolet range. Analysis of various model parameters has showed that the value of parameter ε is the primary characteristic affecting the morphology of the forming spiral pattern. This value determines the degree of nonaxisymmetry of the halo. The L_e parameter introduced in this work and responsible for the formation of small-scale structures in the transition region does not significantly affect the disk periphery. Moreover, the larger the value of L_e , the smoother spirals are formed. As it has shown in this work the size of the computational grid does not significantly influence the simulation results, revealing only small-scale structures which are not the subject of current work.

Key words: hydrodynamics, physics of galaxies, outer spiral structure, dark halo, numerical simulation.