



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2022.1.4>

УДК 524.5-7
ББК 22.66

Дата поступления статьи: 09.08.2021

Дата принятия статьи: 01.11.2021

ГАЗОПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ РУКАВОВ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК ¹

Виталий Владимирович Королев

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
теоретической физики и волновых процессов,
Волгоградский государственный университет
korolev.vv@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Илья Геннадьевич Коваленко

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры
теоретической физики и волновых процессов,
Волгоградский государственный университет
ilya.g.kovalenko@gmail.com
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Михаил Александрович Безбородов

Научный сотрудник,
Волгоградский государственный университет
mabezborodov@gmail.com
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Михаил Анатольевич Еремин

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
теоретической физики и волновых процессов,
Волгоградский государственный университет
ereminmikhail@gmail.com
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Валерий Викторович Савин

Кандидат философских наук, доцент кафедры фундаментальных дисциплин,
 Волжский филиал Национального исследовательского университета
 Московского энергетического института
 vvs-5@mail.ru
 просп. Ленина, 69, 404110 г. Волжский, Российская Федерация

Аннотация. Построена двумерная модель течения газопылевой межзвездной среды в окрестности спирального рукава галактики. Рассмотрено течение в вертикальной плоскости, поперечной к плоскости диска. Учтены эффекты неадиабатичности течения (объемные нагрев и охлаждение газа излучением). Баланс нагрева и охлаждения обеспечивает сосуществование двух фаз — холодных парсекового размера облаков атомарного водорода и теплого межоблачного газа. В рассмотрение включена полидисперсная пыль, представленная тремя фракциями частиц разных размеров и масс. Частицы пыли обладают конечной инерцией, их движения не повторяют в точности движение газа. Учтена турбулентность в диске и спиральном рукаве. Рассмотрены модели, в которых используются разные сочетания расположения источников турбулентности в диске и/или рукаве.

Основные результаты, полученные методами компьютерного гидродинамического моделирования, следующие:

- 1) Облака по мере прохождения через спиральный рукав претерпевают существенные трансформации. Значительная часть облаков абсорбируется в тонкий плотный облачный слой, протягивающийся в спиральном рукаве вдоль экваториальной плоскости в окрестности центра рукава и имеющий размер приблизительно в половину ширины рукава. Меньшая часть облаков проходит без разрушения или с частичным разрушением сквозь рукав, испытывая по ходу движения сильные деформации. Мелкомасштабная облачная компонента частично восстанавливается под действием турбулентности, возмущающей протяженный облачный слой внутри рукава и частично разрушающий его на отдельные фрагменты.
- 2) На задней по отношению к натекающему потоку газа стороне рукава формируется клинообразная галактическая ударная волна, присоединенная к заднему краю протяженного облачного слоя. Течение, ограниченное ударной волной, имеет характер струи, совершающей квазипериодические поперечные колебания. Причиной колебаний, по-видимому, является неустойчивость сдвигового течения, поскольку внутри струи вдоль потока и под небольшим углом к ударным фронтам формируются тангенциальные разрывы.
- 3) Пылевые частицы увлекаются турбулентными вихрями и выносятся на высоты 150–200 пк над плоскостью диска, что естественным образом объясняет существование хаотических волокнистых пылевых структур, протягивающихся над галактическим диском на высоты в несколько сотен парсек.
- 4) Пылинки по-разному распределены внутри вихрей. Пылинки размерами в 0,01–0,1 мкм легче кластеризуются, чем более крупные пылинки радиусом 1 мкм.

- 5) Турбулентность служит механизмом, позволяющим эффективно запирают пылевые частицы на передней стороне спирального рукава. Как показывает моделирование, пылевые прожилки отчетливее выражены на передней стороне рукава.

Ключевые слова: спиральные галактики, газопылевая межзвездная среда, сверхзвуковые течения, турбулентность, гидродинамика многофазных сред, полидисперсная пыль, гидродинамическое моделирование.

Введение

Несмотря на свое относительно малое массовое содержание ($\lesssim 1\%$ от массы газа), пыль выполняет роль одной из важнейших компонент в метаболизме галактик. Для того чтобы можно было утверждать, что взаимодействие пыли с окружающей межзвездной средой и звездами значимо на масштабах всей галактики, пыль, очевидно, должна быть распространенным в большей части объема галактики материалом. Действительно, в спиральных галактиках диаметр пылевого диска составляет половину или более диаметра видимого диска галактики.

Вариации в пространственном распределении пыли определяются как генезисом пыли (ее сконцентрированностью вблизи областей интенсивного звездообразования), так и динамическими особенностями течения межзвездного газа в галактике (турбулентной диффузией, переносом ударными волнами и т. п.).

В плоскости галактического диска распределение пыли обычно несет в себе отпечаток четко выраженных регулярных структур (выстраивание в протяженные полосы вдоль спиральных рукавов), на которые накладываются хаотические мелкомасштабные структуры (ответвления рукавов, шпурь). Характерное поведение пылевых прожилок в плоскости диска демонстрирует изображение галактики NGC 7329 [10] (рис. 1, верхний кадр).

Как более тяжелая фракция, пыль сосредоточена вблизи экваториальной плоскости галактики в более тонком слое, чем газовый диск. Однако наблюдения галактик, видимых с ребра, показывают, что пыль может протягиваться на достаточно большие высоты над плоскостью диска (в сотни пк), формируя хаотические волокнистые пылевые структуры. Характерным примером может служить галактика NGC 5866 [11] (рис. 1, изображение снизу), о которой, впрочем, до сих пор продолжаются споры, является ли она спиральной или линзовидной. Большая протяженность пылевого диска, его удаление на значительное расстояние от центра галактики свидетельствует, скорее, в пользу первого варианта.

Пыль часто рассматривается как подходящий трассер для визуализации особенностей течения межзвездного газа. Считается, что пылевые прожилки в спиральных рукавах очерчивают фронты галактических ударных волн [3; 20], однако, до сих пор нет однозначного мнения насчет того, как пылевые прожилки и ударные фронты пространственно скоррелированы между собой. Согласно ортодоксальной точке зрения, фронт галактической ударной волны располагается на передней по отношению к натекающему потоку стороне ямы [20], и скачок плотности сразу за фронтом инициирует волну звездообразования [5; 12], что влечет за собой интенсивное формирование пыли. Кроме

того, вследствие развития тепловой неустойчивости за фронтом должны формироваться молекулярные облака [7; 14; 22], в которых пыль абсорбируется. В данном сценарии пылевые полосы следуют сразу вниз по потоку за ударным фронтом.

Гидродинамическое моделирование газопылевых течений в спиральном рукаве показывает, однако, что предпочтительным является, скорее, либо концентрирование пыли в центре рукава на дне гравитационной ямы, которая формируется сгущением вещества в рукаве, либо на задней стороне ямы [1; 25]. Для того чтобы сохранить соответствие с представлением о том, что пылевые полосы следуют сразу за фронтом на передней стороне ямы, приходится вводить в модель дополнительные факторы, позволяющие удерживать пыль от сваливания в яму. В работах [25; 28] таким источником считается давление излучения, создаваемое родившимися за ударным фронтом молодыми яркими звездами.

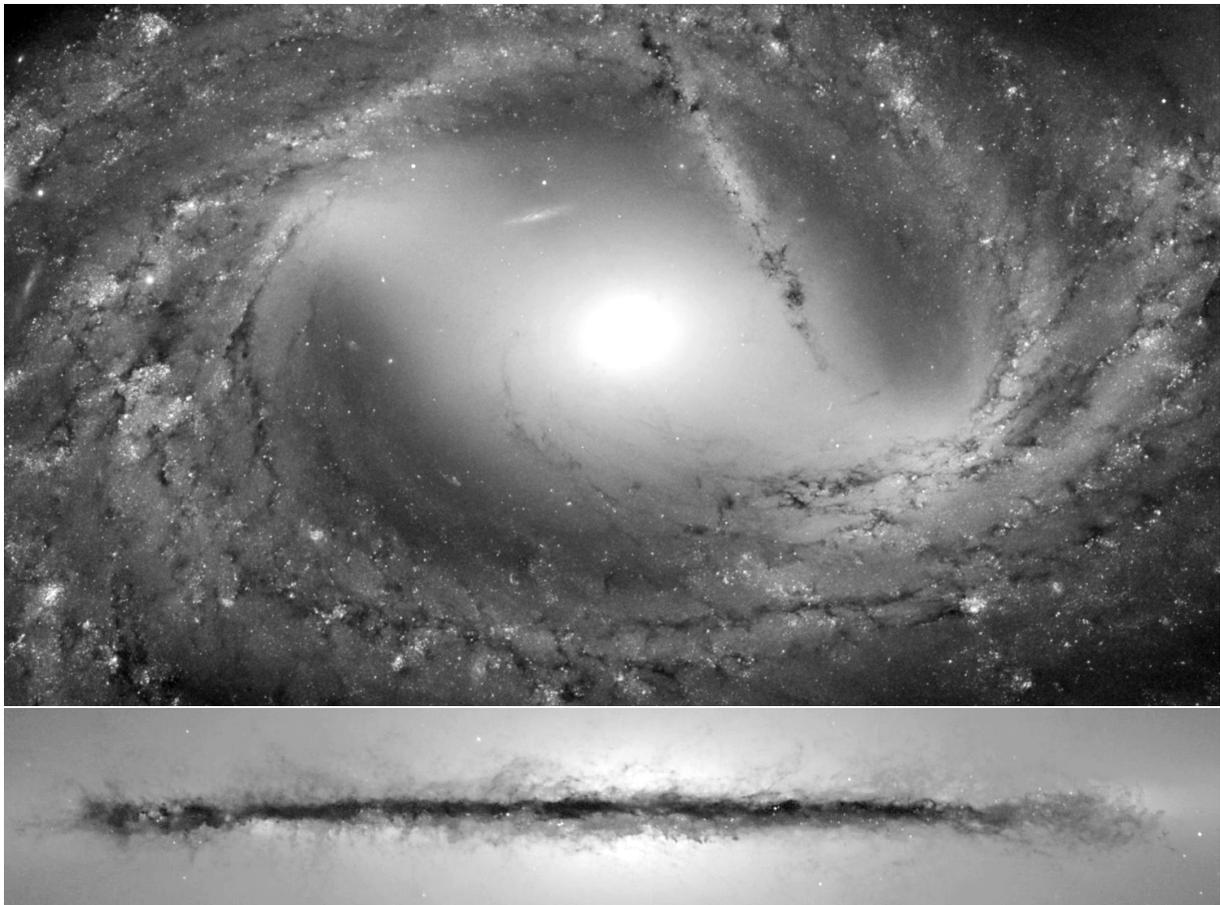


Рис. 1. Вверху — горизонтальная структура диска спиральной галактики NGC 7329, видимой плашмя [10]. Темные полосы, протягивающиеся вдоль рукавов, — пылевые прожилки. Внизу — вертикальная структура диска спиральной галактики NGC 5866, видимой с ребра [11]. Хорошо видны хаотические волокнистые пылевые структуры, простирающиеся высоко над диском галактики

Заметим, что до сих пор нет и четкого понимания относительно того, где должен располагаться ударный фронт. В одномерной модели галактической ударной волны [4; 15; 20], а также в двумерной модели, в которой рассматривается течение в плос-

кости диска [25], ударный фронт располагается строго на передней по отношению к натекающему потоку стороне ямы, и это его единственное устойчивое положение. Понятно, почему реализуется такое положение фронта, — в этих моделях гравитационная яма представляет собой препятствие для потока, которое потоку невозможно обойти.

Напротив, в трехмерной модели, или, хотя бы в двумерной, учитывающей конечную протяженность диска в вертикальном направлении [28], газ получает возможность обтекать яму, двигаясь над или под ней. В этом случае в зависимости от условий ударный фронт может располагаться как на передней, так и на задней стороне ямы.

Более того, выводы о наличии или отсутствии ударного фронта и его расположении в яме, вообще говоря, зависят от того, рассматривается адиабатическая модель течения или модель неадиабатическая, в которой учитываются существенные потери энергии газа на излучение или локальный разогрев газа вследствие процессов объемного нагрева. В одной из первых работ по неадиабатической модели [17] был обнаружен эффект сваливания вещества в центр гравитационной ямы, который авторы работы [17] назвали «аккреционной волной». В процессе формирования аккреционной волны ударная волна вообще не образуется.

В настоящей работе мы предлагаем двумерную модель течения газопылевой межзвездной среды с двухфазной газовой компонентой (холодные облака и теплый межоблачный газ) и полидисперсной пылью через спиральный рукав. Целью работы является выявление условий формирования галактической ударной волны, определение ее расположения в потоке и структуры, а также возможность теоретического объяснения существования волокнистых пылевых структур, простирающихся в направлении, перпендикулярном галактическому диску на значительные высоты в сотни парсек. Отметим, что формирование галактической ударной волны различных мелкомасштабных структур (волокон, шпуров) в межзвездном газе рассматривалось в работах [13; 21].

Мы рассматриваем настоящую статью как предварительную публикацию основных результатов, более подробно результаты будут освещены в статье в специализированном журнале астрофизической тематики.

1. Физическая модель газопылевой среды и численная реализация динамической модели

1.1. Основные положения модели

Мы рассматриваем фрагмент течения газа и пыли сквозь спиральный рукав в вертикальном (то есть в поперечном к плоскости диска) направлении.

Схематически картину течения в двумерной модели иллюстрирует рисунок 2.

Перечислим основные допущения, положенные в основу физической модели течения и ее компьютерной реализации.

- 1) Течение рассматривается в расчетной области, имеющей форму квадрата. Количество расчетных ячеек равно $N_x \times N_z$, где $N_x = N_z = 2048$. Сторона расчетной ячейки имеет размер 1 пк.
- 2) Движение газа считается происходящим в плоскости, эффектами кривизны течения пренебрегаем, что оправдано, поскольку рассматриваемая область меньше радиуса кривизны линии тока (порядка радиуса R , на котором расположен относительно центра галактики рассматриваемый фрагмент течения). Не учитывается

также сила Кориолиса и, соответственно, центробежная сила. Гравитационное поле задается как стационарное поле звезд и темной материи, что оправдано, поскольку масса газа и пыли в галактиках обычно составляет проценты от массы звезд и доли процента от массы темной материи. Магнитные поля не учитываются.

- 3) Несущая фаза — теплый межоблачный газ — считается столкновительным одноатомным идеальным газом. В расчетах показатель адиабаты газа γ брался равным $5/3$.
- 4) Течение газа рассматривается как неадиабатическое. Учитываются процессы охлаждения и нагрева излучением. Среда считается оптически тонкой. Функции объемного нагрева $\Gamma(T)$ и объемного охлаждения $\Lambda(T)$ берутся из работ [19; 23]. В силу слабой зависимости Γ от температуры величина Γ задается постоянной и равной $1,6 \cdot 10^{-25}$ эрг/с. Баланс нагрева и охлаждения обеспечивает в некотором диапазоне давлений механическое и тепловое равновесие разреженной и плотной фаз (межоблачный газ и, соответственно, облака).
- 5) Примесная фаза включает в себя холодные облака и пыль. Облака и межоблачный газ моделируются в одножидкостном приближении, то есть в каждой рассматриваемой расчетной ячейке в каждый данный момент времени содержится либо вещество одной фазы — межоблачного газа, либо другой — облака. Более того, понятие фазы размывается, если газ локально находится в состоянии, далеко от теплового равновесия, так что, в принципе, в ячейке может размещаться газ в любом состоянии, включая неустойчивое межфазное.
- 6) Пыль рассматривается как пассивная скалярная примесь. Динамика пылинок рассчитывается путем прямого численного моделирования методом частиц.
- 7) Учитывается влияние силы трения пылинок о газ, обратное влияние пыли на газ не учитывается. Трение задается как столкновительное. Пылинки считаются слабо заряженными, соответственно, кулоновским трением пренебрегается.
- 8) Пыль рассматривается как полидисперсная смесь трех различных фракций пылинок разных размеров. Радиусы крупных пылинок задаются равными $a = 1$ мкм, пылинки среднего размера имеют радиус $a = 0,1$ мкм, самые мелкие пылинки характеризуются радиусом $a = 0,01$ мкм.
- 9) Количество частиц для каждой фракции задается равным 10^6 . Количество пылинок в расчетной области остается неизменным в течение всего процесса моделирования. Для пыли задаются периодические граничные условия, то есть пересекающая правую границу пылинка переносится на левую границу с той же скоростью, и наоборот.
- 10) Для газа задаются квазипериодические граничные условия: скорость на входе в расчетную область (левая граница) задается фиксированной и равной $v_{x0} = 5c_{s0}$, где c_{s0} — скорость звука в межоблачном газе на входе в расчетную область. В то же время плотность и давление на левой и правой границах зациклены. На верхней и нижней границах используются свободные граничные условия.
- 11) Для создания возмущений, имитирующих турбулентность в межзвездной среде с заданным колмогоровским спектром, используются стохастические методы, описанные в работах [6; 9; 18].

12) Расчеты проводились с помощью оригинального распараллеленного гидродинамического кода [2], основанного на схеме типа MUSCL TVD [24; 26; 27].

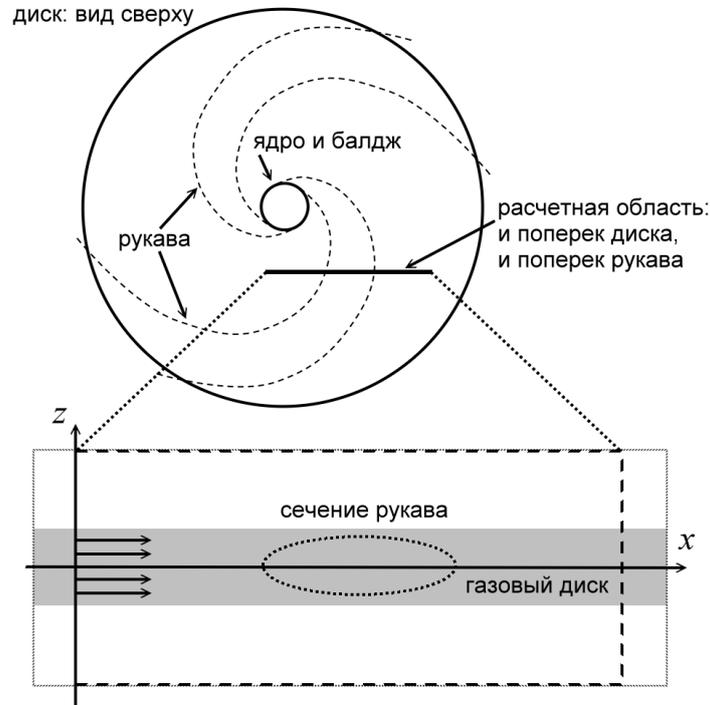


Рис. 2. Схематическая структура течения газа в плоскости диска спиральной галактики и фрагмент течения, рассматриваемый в модели. Моделируется поперечная к диску (вертикальная) структура течения

1.2. Основные уравнения

Течение межзвездного газа, как межоблачного, так и газа внутри облака, описывается следующими основными уравнениями газовой динамики вместе с уравнениями состояния идеального газа:

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

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla p - \rho \nabla \psi, \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot ([\rho E + p] \mathbf{v}) = \rho \frac{\partial \psi}{\partial t} + \Gamma \frac{\rho}{m_0} - \Lambda(T) \frac{\rho^2}{m_0^2}, \tag{3}$$

$$E = \frac{\mathbf{v}^2}{2} + \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \psi, \tag{4}$$

$$p = \frac{\rho k_B T}{m_0}. \tag{5}$$

Здесь \mathbf{v} — скорость; ρ — плотность; p — давление газа; T — температура; ψ — заданный внешний гравитационный потенциал; k_B — постоянная Больцмана; m_0 — масса атома водорода.

Уравнения движения каждой отдельной пылинки следующие:

$$\frac{d\mathbf{r}_d}{dt} = \mathbf{v}_d, \quad (6)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_d}{dt} = \mathbf{f}_d. \quad (7)$$

Здесь \mathbf{r}_d и \mathbf{v}_d — радиус-вектор и скорость частицы; \mathbf{f}_d — полная сила в расчете на единицу массы, действующая на частицу:

$$\mathbf{f}_d = -\nabla\psi + \mathbf{f}_{fr}. \quad (8)$$

Сила трения может быть представлена в виде [8]

$$\mathbf{f}_{fr} = \frac{na^2}{m_d} \Delta\mathbf{v} \sqrt{\frac{128\pi}{9} k_B T m_0 + \pi^2 m_0^2 (\Delta\mathbf{v})^2}, \quad (9)$$

где $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d$ — вектор относительной скорости пылинки в газе; $n = \rho/m_0$ — концентрация газа. Масса пылинки рассчитывается в соответствии с ее размером; плотность всех пылинок задавалась одинаковой и равной $\rho_d \approx 2,2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ [16].

Гравитационный потенциал в нашей модели включает в себя стационарный потенциал диска $\psi_d(z)$, однородный вдоль плоскости диска и переменный в вертикальном направлении, и потенциал рукава $\psi_s(x, z)$:

$$\psi(x, z) = \psi_d(z) + \psi_s(x, z), \quad (10)$$

где

$$\psi_d(z) = \begin{cases} \psi_{d0} \left(\frac{z}{h_d} \right)^2, & |z| \leq h_d; \\ \psi_{d0} \left[3 - 2 \exp \left(-\frac{|z-h_d|}{h_d} \right) \right], & |z| > h_d. \end{cases} \quad (11)$$

Мы полагаем, что возмущению плотности в спиральной волне легче распределяться вдоль экваториальной плоскости диска, чем в перпендикулярном ей вертикальном направлении, поскольку для утолщения рукава вдоль направления z газу и звездам приходится преодолевать действие силы тяжести со стороны гравитационного поля диска. Таким образом, эквипотенциалами рукава мы считаем сплюснутые в вертикальном направлении концентрические овалы, по форме близкие к эллипсам, с центром в точке ($x_0 = 1000 \text{ пк}$, $z_0 = 0$):

$$\Psi_s(x, z) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \psi_{s0} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi|x-x_0|}{D_0} \right) \right] \exp \left(-\frac{|z|}{H_0} \right), & |x - x_0| < D_0; \\ 0, & |x - x_0| \geq D_0. \end{cases} \quad (12)$$

1.3. Приготовление начального состояния

Приготовление начального состояния требует соблюдения мер предосторожности для того, чтобы сильные возмущения не привели к разболтке течения, что, в частности, может выражаться в появлении ударных волн, бегущих против течения и стремящихся выйти из расчетной области через входную (левую) границу. Разболтка может произойти, если задать начальное распределение, сильно отличающееся от равновесного.

С целью поддержания мгновенного состояния течения, близкого к равновесному, процедура приготовления начального состояния сводится к последовательности релаксаций, к промежуточным равновесным состояниям при адиабатически медленном включении возмущающих факторов (появление спирального рукава, включение процессов охлаждения, включение источников турбулентности и внесение в расчетную область плотных мелко-масштабных конденсаций – облаков).

Вначале течение задается как однородное вдоль оси x (спиральный рукав при этом отсутствует) и адиабатическое. Начальные распределения всех величин потока в вертикальном направлении задаются аналитически из условия гидростатического равновесия. Затем медленно, на протяжении промежутка времени $\Delta t_1 \sim 80$ млн лет, включаются и устанавливаются на полный режим источники объемного охлаждения. Соответственно, течение перестраивается, газовый диск сжимается по толщине. По истечении промежутка времени Δt_1 за время $\Delta t_2 \sim 160$ млн лет медленно выращивается гравитационная яма спирального рукава до установления предписанного значения глубины ψ_{0s} . По истечении этого второго промежутка времени в расчетную область через входную (левую) границу запускаются облака, а в соответствующих областях течения внутри расчетной области (в диске, в рукаве, или и в диске, и в рукаве, в зависимости от конкретной модели) включаются источники турбулентности. На этот третий предварительный этап приготовления состояния отводится промежуток времени $\Delta t_3 \sim 400$ млн лет. По истечении времени, равного сумме времен отдельных подготовительных этапов, $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$, начальное состояние считается приготовленным и этому начальному моменту времени сопоставляется значение $t = 0$. В целом можно считать, что в результате серии последовательных подготовительных операций состояние течения становится близким к динамическому равновесию.

Облака генерируются случайным образом так, что в единицу времени в среднем в расчетную область вносится одно и то же количество облаков. В продольном направлении облака распределены случайно и равномерно вдоль диска, а в вертикальном направлении — по гауссову закону с полушириной $h_d = 100$ пк, при этом размер каждого облака равен 1 пк (фактически начальный размер облака равен одной ячейке расчетной области). Заполнение облаками диска происходит так, чтобы в полосе между $-h_d$ и $+h_d$ доля объема облачной среды была равна $f_c = 0,1$. Генерация облаков производится ровно до того момента, как первое облако достигает правой границы расчетной области.

Пыль генерируется в расчетной области одновременно вместе с облаками. Начальные положения всех трех типов частиц, моделирующих пыль трех разных фракций, находятся внутри облаков и распределены равномерно по объему каждого облака; в межоблачном газе пылинки изначально отсутствуют.

1.4. Параметры моделей

Рассматривались четыре частные модели течения, отличающиеся только пространственным распределением источников турбулентности в диске и/или в спиральном рукаве.

1.4.1. Параметры, общие для всех моделей

Приводим основные параметры, одинаковые для всех четырех моделей в таблице.

Параметры, общие для всех моделей $D, A, DA, DA+$

Параметр	Пояснение
$L_0 = 1$ пк	характерный масштаб и шаг сетки
$n_0 = 0.1 \text{ см}^{-3}$	характерная концентрация межоблачного газа
$n_{c0} = 15 \text{ см}^{-3}$	характерная концентрация газа в облаках
$T_0 = 9000 \text{ К}$	характерная температура межоблачного газа
$T_{c0} = 60 \text{ К}$	характерная температура газа облаков
$\gamma = 5/3$	показатель адиабаты газа
$c_{s0} = (\gamma k_B T_0 / m_0)^{1/2} \approx$ $\approx 11 \text{ км/с}$	характерная скорость звука в межоблачном газе
$M_0 = v_{x0} / c_{s0} = 5$	число Маха во входном потоке
$t_0 = L_0 / c_{s0} \approx 86 \cdot 10^3 \text{ лет}$	характерное время
$2D_0 = 1$ кпк	ширина спирального рукава
$H_0 = h_d = 100$ пк	характерный масштаб высот диска и рукава
$\psi_{d0} = c_{s0}^2$	глубина потенциальной ямы диска
$\psi_{s0} = 12c_{s0}^2$	глубина потенциальной ямы спирального рукава
$\Delta E_s / \Delta E_c = 2$	соотношение энергий несжимаемой/сжимаемой компонент турбулентности
$[\Delta E / \Delta t]_{turb} = 10^{-28} \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{см}^3)$	скорость подкачки энергии турбулентности
$20 \leq \lambda \leq 100$ пк	масштабы возмущений (размеры турбулентных вихрей)

1.4.2. Отличия между моделями $D, A, DA, DA+$

В модели D (здесь $D = \text{disk}$) турбулентность генерируется в полосе вдоль оси так, что огибающая амплитуды возмущений имеет вид $A_{turb}(z) = \exp(-z^2/h_{turb}^2)$, где $h_{turb} = 20$ пк. Источник турбулентности в модели A (здесь $A = \text{arm}$) связан только со спиральным рукавом, и огибающая амплитуды возмущений имеет вид $A_{turb}(x, z) = \exp(-x^2/a_{turb}^2 - z^2/b_{turb}^2)$, где $a_{turb} = 250$ пк и $b_{turb} = 50$ пк. В моделях DA и $DA+$ источники возмущений в диске и рукаве комбинируются, и $A_{turb}(x, z) = \exp(-z^2/h_{turb}^2) + \exp(-(x - x_{turb})^2/a_{turb}^2 - z^2/b_{turb}^2)$. Координата x_{turb} определяет положение источника относительно центра рукава. В модели DA смещения нет ($x_{turb} = 0$ пк), а в $DA+$ источник смещен вдоль направления течения на $x_{turb} = 100$ пк.

2. Обсуждение результатов моделирования

Результаты численного моделирования приведены на рисунках 3–5.

Информативной является визуализация течения, представленная в распределении в вертикальной плоскости галактического диска локальных чисел Маха $M(x, z) = v(x, z)/c_s(x, z)$.

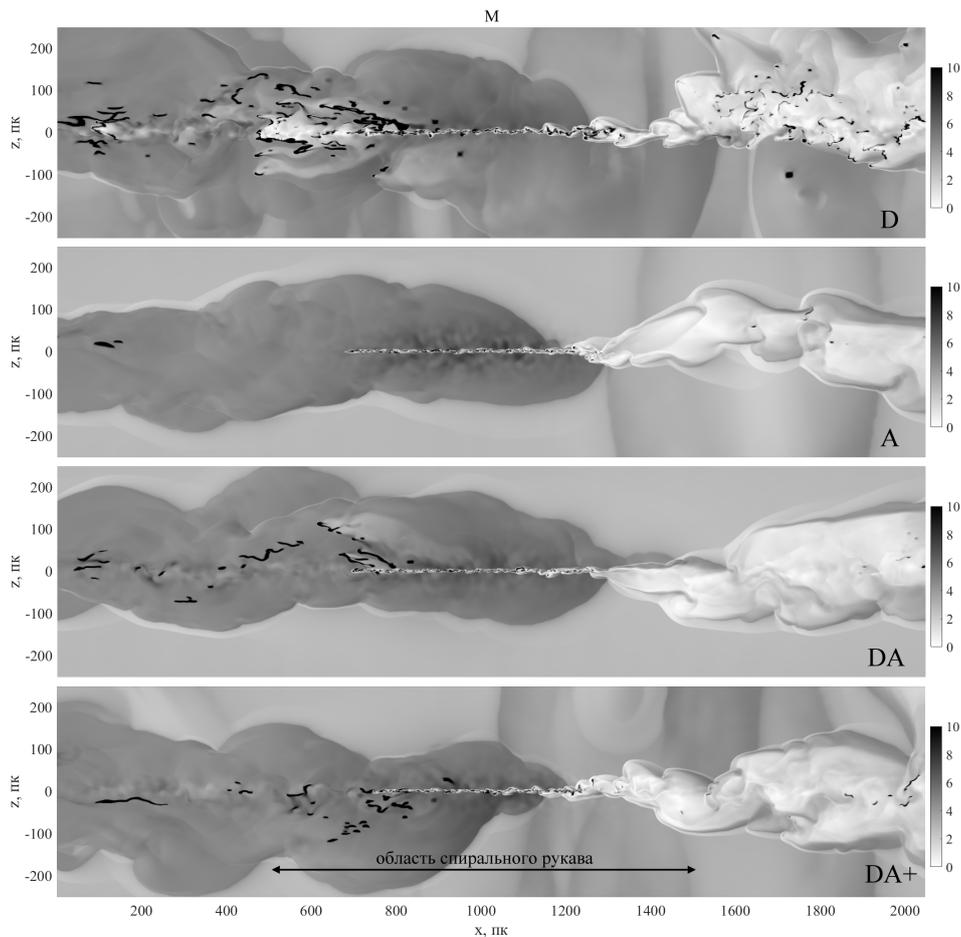


Рис. 3. Результат численного двумерного гидродинамического моделирования многофазного течения газопылевого вещества в диске спиральной галактики в окрестности спирального рукава: вертикальная структура течения для разных моделей для одного и того же момента времени, равного 1,25 полного периода движения вещества через расчетную область (эквивалентно 43,75 млн лет), отсчитываемого от условно принятого момента установления динамического равновесия при моделировании. Приведены распределения числа Маха.

Модель D — турбулентность равномерно распределена по всему диску, модель A — турбулентность сосредоточена только в спиральном рукаве, модель DA — турбулентность сосредоточена и в диске, и в спиральном рукаве, модель $DA+$ — турбулентность сосредоточена и в диске, и в спиральном рукаве, но в спиральном рукаве сдвинута на 100 пк вниз по потоку относительно рукава

На рисунке 3 можно легко идентифицировать плотные облака, которые выглядят как компактные темные пятна или прожилки; им соответствуют значения чисел Маха, равные или превышающие 10 (на рисунке 3 используется обрезание шкалы значений M сверху значением 10, то есть все ячейки, в которых $M(x, z) > 10$, изображаются так, как если бы M равнялось в точности 10). Причина разделения облаков и межоблачного газа по расцветке понятна. Облака движутся, по крайней мере, на начальном отрезке пути, со скоростями не слишком сильно отличающимися от скорости межоблачного газа. При этом характерные значения скорости звука в облаках в $\sim \sqrt{9000/60} \approx 12$ раз меньше, чем в межоблачном газе, поэтому облака на рисунке выглядят как тела, составленные из фрагментов (капель, струй) сверхскоростной (относительно центра галактики) сре-

ды. Однако относительно межоблачного газа их движения могут быть медленными и дозвуковыми.

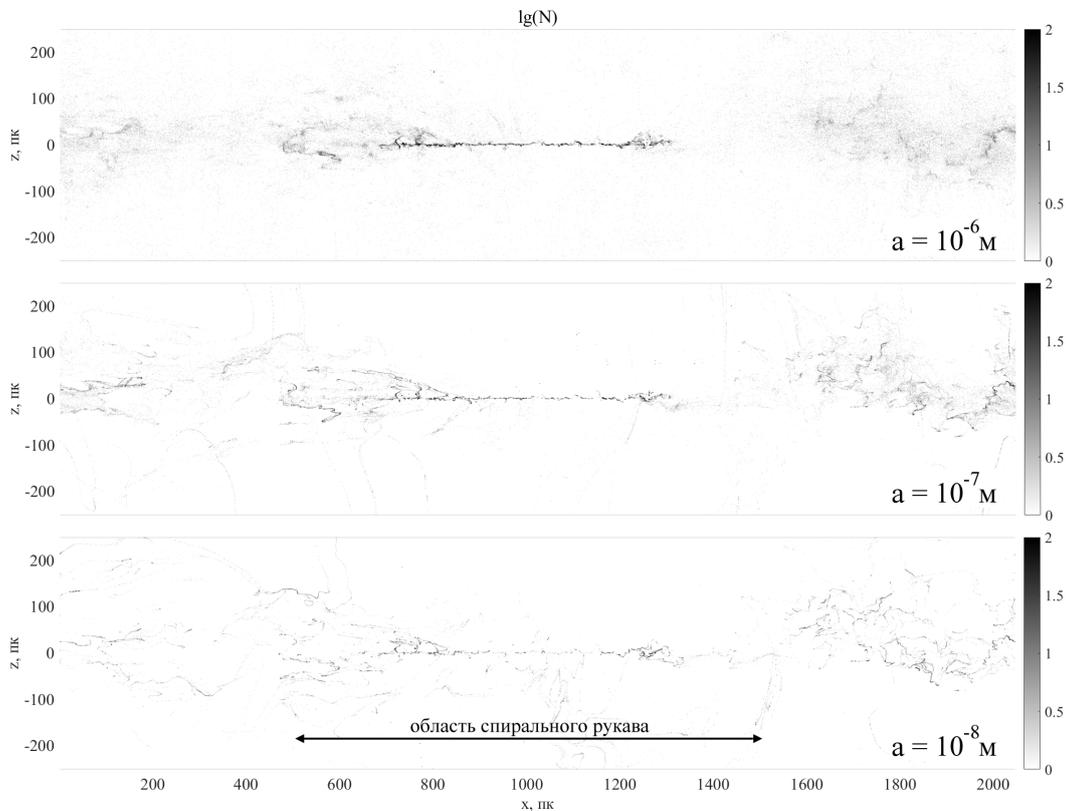


Рис. 4. Результат численного двумерного гидродинамического моделирования многофазного течения газопылевого вещества в диске спиральной галактики в окрестности спирального рукава: вертикальная структура течения. Распределения концентрации различных фракций пыли в модели D в тот же момент времени, что и на рисунке 3. В модели D турбулентность равномерно распределена по всему диску

Мы можем отметить следующую общую особенность для всех моделей. Облака по мере прохождения спирального рукава стремятся «упасть» на дно гравитационной ямы, концентрируясь в тонкий облачный слой, протягивающийся в экваториальной плоскости на дистанции в 500–600 пк (см. рис. 3). Очевидно, эта плоская структура, накапливающая вещество плотной фазы, является двумерным аналогом аккреционной волны [17]. Слой формируется быстро, за промежуток времени менее одного периода движения межзвездного газа сквозь рукав. По мере накопления облачным слоем массы, близкой к некоторой массе насыщения, дальнейший рост массы практически прекращается. По крайней мере, на протяжении пары периодов он не заметен. Очевидно, постоянному росту массы облачного слоя препятствует турбулентность, обеспечивающая постоянный отток вещества из слоя. Турбулентность наиболее эффективно, в смысле сохранения мелкомасштабной облачной компоненты, работает в тех случаях, когда она максимальна по интенсивности, а именно, когда присутствует и в диске, и в рукаве (модели DA и $DA+$). В модели A турбулентность, сосредоточенная только в рукаве, слишком слаба и не способна препятствовать абсорбции мелкомасштабных облаков облачным слоем в центре ямы.

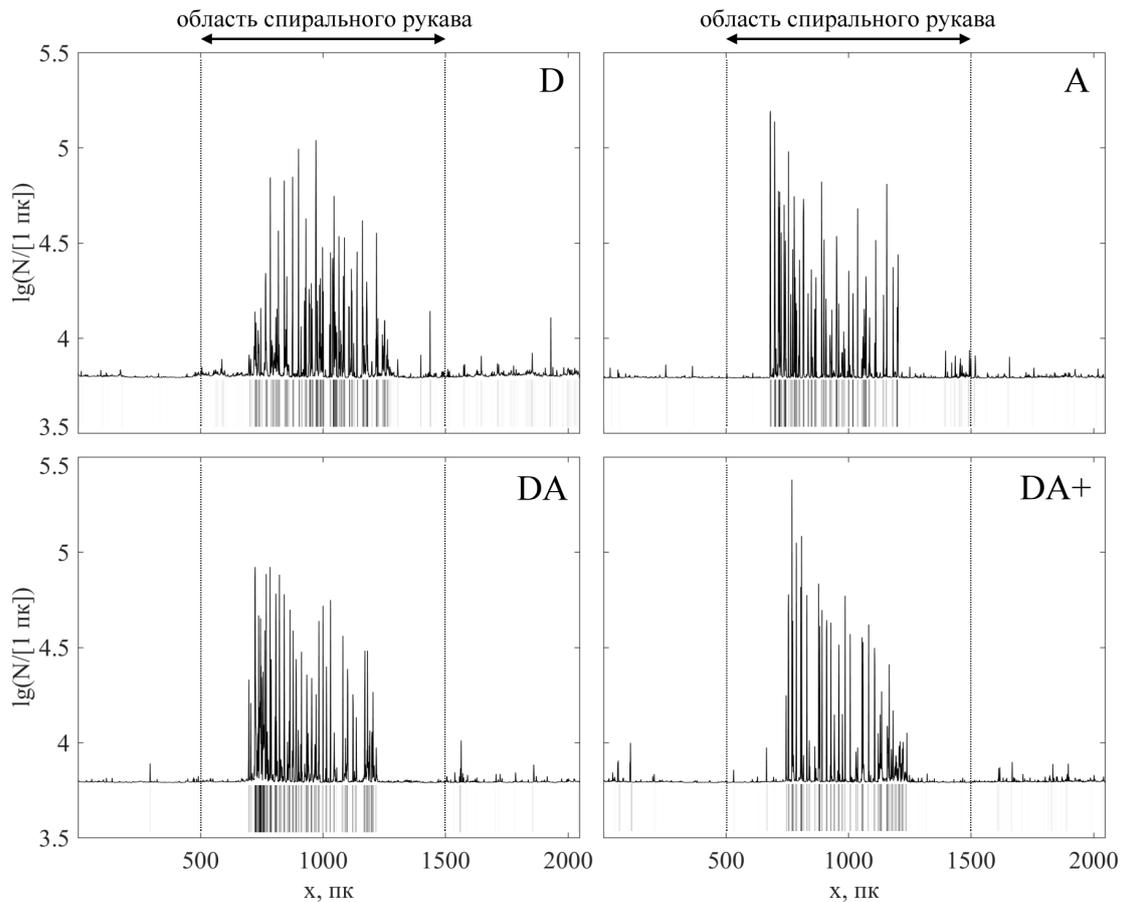


Рис. 5. Распределения колонковой концентрации пыли вдоль потока для разных моделей для того же момента времени, что и на рисунке 3. Модель D — турбулентность равномерно распределена по всему диску, модель A — турбулентность сосредоточена только в спиральном рукаве, модель DA — турбулентность сосредоточена и в диске, и в спиральном рукаве, модель $DA+$ — турбулентность сосредоточена и в диске, и в спиральном рукаве, но в спиральном рукаве сдвинута на 100 пк вниз по потоку относительно рукава. В нижней части каждого рисунка показано распределение светопропускания, переменного вдоль потока в рукаве вследствие пространственных вариаций пыли (см. формулу 14). Приведена развертка на горизонтальную плоскость (x, y) . Распределение показывает, в какой части рукава сосредоточены наиболее темные пылевые прожилки

Вещество вне облачного слоя обтекает слой со сверхзвуковой скоростью вплоть до выхода из гравитационной ямы. Далее вниз по потоку формируется клинообразная ударная волна, присоединенная к задней кромке облачного слоя (рис. 3). Течение, охватываемое ударной волной, имеет характер струи, совершающей квазипериодические колебания в поперечном к струе направлении. Причиной колебаний, по всей видимости, является сдвиговая гидродинамическая неустойчивость тангенциального разрыва. Сам разрыв расположен в области внутри струи на небольшом расстоянии от ударного фронта. Окаймляющие струю по обе ее стороны от плоскости диска ударные фронты можно различить на рисунке 3 как тонкие светлые линии на интерфейсе «струя — межоблачный газ». К этим светлым линиям изнутри струи примыкают области течения, выглядящие как тонкие слои темно-серого оттенка. Тангенциальным разрывам соответствуют границы этих темно-серых слоев с внутренней областью струи, показанной светло-серым или

белым цветом.

Вклад в колебания струи вносит и турбулентность. Однако видно, что колебания имеют место даже в модели A далеко за пределом спирального рукава, там, где источники турбулентности отсутствуют.

Во всех моделях без исключения ударная волна находится на задней стороне спирального рукава и это принципиальным образом отличает многомерную модель течения, учитывающую конечную толщину диска, от моделей галактической ударной волны одномерной [4; 15; 20] и модели двумерной, рассматривающей течение только в плоскости диска [25].

Распределение концентрации различных фракций пыли иллюстрирует рисунок 4. Можно констатировать, что крупные пылинки, как более инертные, слабее кластеризуются, чем пылинки меньших размеров. Вне зависимости от размера пылинки всех фракций увлекаются турбулентными вихревыми движениями на высоты $\sim 150\text{--}200$ пк. В результате формируются окаймляющие диск нерегулярные волокнистые пылевые структуры размерами в 1,5–2 полутолщины диска, и это блестящим образом согласуется с наблюдениями галактик, видимых с ребра (см. рис. 1).

Для определения расположения пылевых прожилок в рукаве мы рассчитываем колонковую концентрацию пыли, то есть концентрации, проинтегрированной вдоль вертикальной оси z . В численной модели это сводится к вычислению конечной суммы

$$N(x) = \sum_{j=1}^{N_z} n(x, z_j). \quad (13)$$

Распределение колонковой концентрации $N(x)$ пыли вдоль координаты x демонстрирует рисунок 5. Перепады значений колонковой концентрации внутри пылевой прожилки составляют от половины порядка до одного порядка в зависимости от модели. Это, на первый взгляд, может показаться не слишком заметным перепадом значений. Однако, если учесть, что светопропускание пылевого слоя в силу закона Бугера зависит от концентрации пыли экспоненциально, то можно ожидать перепадов значений коэффициента пропускания света через пылевые полосы более значительных.

Представим распределение степени черноты прожилок вдоль продольной координаты графически. Для грубой оценки будем считать, что толщина диска примерно одинакова вдоль линии тока и пыль по толщине диска распределена равномерно. Тогда интенсивность светопропускания определяет только коэффициент пропускания:

$$I(x) = \exp(-N(x)/\beta). \quad (14)$$

Нормировочный коэффициент β в (14), вообще говоря, неизвестен; он зависит от общего обилия пыли и от многих других факторов. Для определенности при визуализации распределения $I(x)$ мы присваиваем коэффициенту β значение 10^4 , что близко к среднему значению $N(x)$ на интервале $x \in [0, 2048]$ пк. Распределения $I(x)$ для всех четырех моделей представлены на рисунке 5 полосками, похожими на штрих-коды, в нижних частях встроженных рисунков. Видно, что прожилки тем темнее, чем больше в данной точке значение величины $I(x)$ и чем гуще расположены пики функции $N(x)$. В целом мы можем констатировать, что во всех моделях, за исключением той, в которой турбулентность генерируется только в рукаве, прожилки имеют тенденцию концентрироваться на передней стороне ямы. Таким образом, турбулентность служит значимым фактором для эффективного запираения пылинок на входе в спиральный рукав.

Выводы

В настоящей работе приведены результаты компьютерного динамического моделирования течения газопылевой межзвездной среды в окрестности спирального рукава галактики. Рассмотрено течение в вертикальной плоскости, поперечной к плоскости диска. Учтены эффекты неадиабатичности течения (объемные нагрев и охлаждение), которые обеспечивают сосуществование двух фаз — холодных облаков и теплого межоблачного газа. В рассмотрение включена полидисперсная пыль, представленная тремя фракциями частиц разных размеров и масс. Принято во внимание наличие турбулентности в диске и спиральном рукаве. Рассмотрены четыре модели, в которых используются разные сочетания расположения источников турбулентности в диске и/или рукаве.

Выводы, которые можно сделать по итогам моделирования, следующие:

- 1) Облака по мере прохождения через рукав испытывают существенные трансформации. Большая часть облаков абсорбируется в тонкий плотный облачный слой, простирающийся в спиральном рукаве вдоль экваториальной плоскости в окрестности центра рукава и имеющий размер приблизительно в половину ширины рукава. Остальная часть облаков проходит без или с частичным разрушением сквозь рукав, испытывая по ходу движения сильные деформации. Мелкомасштабная облачная компонента частично восстанавливается под действием турбулентности, возмущающей протяженный облачный слой внутри рукава и выбивающей из этого слоя отдельные фрагменты.
- 2) На задней по отношению к натекающему потоку газа стороне рукава формируется клинообразная галактическая ударная волна, присоединенная к заднему краю протяженного облачного слоя. Течение, ограниченное ударной волной, имеет характер струи, совершающей квазипериодические поперечные колебания. Причиной колебаний, по-видимому, является неустойчивость сдвигового течения, поскольку внутри струи вдоль потока и под небольшим углом к ударным фронтам формируются тангенциальные разрывы.
- 3) Пылевые частицы увлекаются турбулентными вихрями и выносятся на высоты 150–200 пк над плоскостью диска, что естественным образом объясняет существование хаотических волокнистых пылевых структур, вытягивающихся над галактическим диском на дистанции в несколько сотен парсек.
- 4) Пылинки по-разному распределены внутри вихрей. Пылинки размерами в 0,01–0,1 мкм легче кластеризуются, чем более крупные пылинки радиусом 1 мкм.
- 5) Турбулентность служит механизмом, эффективно запирающим пылевые частицы на передней стороне спирального рукава. Моделирование демонстрирует тот факт, что пылевые прожилки более отчетливо выражены на передней стороне рукава.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ Работа частично поддержана грантом РФФИ № 20-02-00913_а, а также грантом РФФИ и Администрации Волгоградской области, проект № 19-42-343005-р-мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безбородов, М. А. Распределение пыли за фронтом галактической ударной волны: одномерная модель / М. А. Безбородов, И. Г. Коваленко // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1, Математика. Физика. — 2013. — № 1 (18). — С. 117–128.
2. Еремин, М. А. Параллельный код для трехмерного моделирования процессов космической газодинамики / М. А. Еремин, В. Н. Любимов // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. — 2011. — № 2 (1). — С. 201–207.
3. Athanassoula, E. The existence and shapes of dust lanes in galactic bars / E. Athanassoula // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1992. — Vol. 259, № 2. — P. 345–364. — DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/259.2.345>.
4. Bogdan, T. J. One-dimensional periodic flows with a shock transition: application to the density wave theory of spiral structure / T. J. Bogdan // The Astrophysical Journal. — 1983. — Vol. 267. — P. 109–118. — DOI: <https://doi.org/10.1086/160848>.
5. Bonnell, I. A. Spiral arm triggering of star formation / I. A. Bonnell, C. L. Dobbs // School of Physics and Astronomy. — 2006. — Vol. 237. — P. 119–124.
6. Comparing the statistics of interstellar turbulence in simulations and observations. Solenoidal versus compressive turbulence forcing / C. Federrath, J. Roman-Duval, R. S. Klessen, W. Schmidt, M.-M. Mac Low // Astronomy & Astrophysics. — 2010. — Vol. 512. — Article ID: A81.
7. Dobbs, C. L. Spiral shocks and the formation of molecular clouds in a two-phase medium / C. L. Dobbs, I. A. Bonnell // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2007. — Vol. 376, № 4. — P. 1747–1756. — DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11552.x>.
8. Draine, B. T. Astrophysics of Dust in Cold Clouds. / B. T. Draine // The Cold Universe. — Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2004. — P. 213–225.
9. Dubinski, J. Turbulence in Molecular Clouds / J. Dubinski, R. Narayan, T. G Phillips // The Astrophysical Journal. — 1995. — Vol. 448. — P. 226–231.
10. Four Filter Fusion. — Electronic text data. — Mode of access: <https://esahubble.org/images/potw2149a/>. — Title from screen.
11. Full ACS Image of NGC 5866. — Electronic text data. — Mode of access: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2006/24/1933-Image.html>. — Title from screen.
12. Galactic Shocks in an Interstellar Medium with Two Stable Phases / F. H. Shu, V. Milione, W. Gebel, C. Yuan, D. W. Goldsmith, W. W. Roberts // The Astrophysical Journal. — 1972. — Vol. 173. — P. 557–592. — DOI: <https://doi.org/10.1086/151444>.
13. Kim, W.-T. Formation of Spiral-Arm Spurs and Bound Clouds in Vertically Stratified Galactic Gas Disks / W.-T. Kim, E. C. Ostriker // The Astrophysical Journal. — 2006. — Vol. 646, № 1. — P. 213–231. — DOI: <https://doi.org/10.1086/504677>.
14. Kim, C.-G. Galactic Spiral Shocks with Thermal Instability / C.-G. Kim, W.-T. Kim, E. C. Ostriker // The Astrophysical Journal. — 2008. — Vol. 681, № 2. — P. 1148–1162. — DOI: <https://doi.org/10.1086/588752>.
15. Kovalenko, I. G. On a Steady Gas Flow with a Shock Wave in a Potential Well / I. G. Kovalenko, V. V. Levy // Astronomy and Astrophysics. — 1992. — Vol. 264. — P. 406–414.
16. Krügel, E. The Physics of Interstellar Dust / E. Krügel. — Bristol, Philadelphia : Institute of Physics Publ., 2003. — xxiii, 559 p.
17. Largescale Flow of Interstellar Gas in Galactic Spiral Waves — Effects of Thermal Balance and Self-Gravitation / L. S. Marochnik, B. G. Berman, Iu. N. Mishurov, A. A. Suchkov // Astrophysics and Space Science. — 1972. — Vol. 89, № 1. — P. 177–199.
18. Mac Low, M.-M. The Energy Dissipation Rate of Supersonic, Magnetohydrodynamic Turbulence in Molecular Clouds / M.-M. Mac Low // Astrophysical Journal. — 1999. — Vol. 524 (1). — P. 169–178.
19. Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium in the Galaxy / M. G. Wolfire,

C. F. McKee, D. Hollenbach, A. G. G. M. Tielens // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Vol. 587, № 1. — P. 278–311. — DOI: <https://doi.org/10.1086/368016>.

20. Roberts, W. W. Large-scale shock formation in spiral galaxies and its implications on star formation / W. W. Roberts // *Astrophysical Journal*. — 1969. — Vol. 158. — P. 123–144.

21. Shetty, R. Global Modeling of Spur Formation in Spiral Galaxies / R. Shetty, E. C. Ostriker // *Astrophysical Journal*. — 2006. — Vol. 647, № 2. — P. 997–1017. — DOI: <https://doi.org/10.1086/505594>.

22. The ISM in spiral galaxies: can cooling in spiral shocks produce molecular clouds? / C. L. Dobbs, S. C. O. Glover, P. C. Clark, R. S. Klessen // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2008. — Vol. 389, № 3. — P. 1097–1110. — DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13646.x>.

23. The Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium / M. G. Wolfire, D. Hollenbach, C. F. McKee, A. G. G. M. Tielens, E. L. O. Bakes // *Astrophysical Journal*. — 1995. — Vol. 443, № 1. — P. 152–168. — DOI: <https://doi.org/10.1086/175510>.

24. Toro, E. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics / E. Toro. — Berlin : Springer, 1999. — 624 p.

25. Tricolor Technique for Visualization of Spatial Variations of Polydisperse Dust in Gas-Dust Flows / V. V. Korolev, M. A. Bezborodov, I. G. Kovalenko, A. M. Zankovich, M. A. Eremin // *Journal of Imaging*. — 2018. — Vol. 4 (5). — Article ID: 61. — DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging4050061>.

26. van Leer, B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme III. Upstream-Centered Finite Difference Schemes for Ideal Compressible Flow / B. van Leer // *J. Comput. Phys.* — 1977. — Vol. 23. — P. 263–275.

27. van Leer, B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme IV. New Approach to Numerical Convection / B. van Leer // *J. Comput. Phys.* — 1977. — Vol. 23. — P. 276–299.

28. Visualization of the Anisotropy of the Velocity Dispersion and Characteristics of the Multi-Velocity Continuum in the Regions of Multi-Stream Flows of Gas-Dust Media with Polydisperse Dust / M. A. Bezborodov, M. A. Eremin, V. V. Korolev, I. G. Kovalenko, E. V. Zhukova // *Journal of Imaging*. — 2020. — Vol. 6, № 9. — P. 1–19. — DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging6090098>.

REFERENCES

1. Bezborodov M.A., Kovalenko I.G. Raspreделение pyli za frontom galakticheskoy udarnoy volny: odnomernaya model [Post-Galactic-Shock Dust Distribution: One-Dimensional Model]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Matematika, Fizika* [Science Journal of Volgograd State University. Mathematics. Physics], 2013, no. 1 (18), pp. 117-128.

2. Eremin M.A., Lyubimov V.N. Parallelnyy kod dlya tryokhmernogo modelirovaniya protsessov kosmicheskoy gazodinamiki [Parallel Code for Three-Dimensional Modeling of Space Gas Dynamics Processes]. *Vestnik NNGU im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 2 (1), pp. 201-207.

3. Athanassoula E. The Existence and Shapes of Dust Lanes in Galactic Bars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1992, vol. 259, no. 2, pp. 345-364. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/259.2.345>.

4. Bogdan T.J. One-Dimensional Periodic Flows with a Shock Transition: Application to the Density Wave Theory of Spiral Structure. *The Astrophysical Journal*, 1983, vol. 267, pp. 109-118. DOI: <https://doi.org/10.1086/160848>.

5. Bonnell I.A., Dobbs C.L. Spiral Arm Triggering of Star Formation. *School of Physics and Astronomy*, 2006, vol. 237, pp. 119-124.

6. Federrath C., Roman-Duval J., Klessen R.S., Schmidt W., Mac Low M.-M. Comparing the Statistics of Interstellar Turbulence in Simulations and Observations. Solenoidal Versus Compressive Turbulence Forcing. *Astronomy & Astrophysics*, 2010, vol. 512, article ID: A81.

7. Dobbs C.L., Bonnell I.A. Spiral Shocks and the Formation of Molecular Clouds in a Two-Phase Medium. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, vol. 376, no. 4, pp. 1747-1756. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11552.x>.
8. Draine B.T. Astrophysics of Dust in Cold Clouds. *The Cold Universe*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2004, pp. 213-225.
9. Dubinski J., Narayan R., Phillips T.G. Turbulence in Molecular Clouds. *The Astrophysical Journal*, 1995, vol. 448, pp. 226-231.
10. *Four Filter Fusion*. URL: <https://esahubble.org/images/potw2149a/>.
11. *Full ACS Image of NGC 5866*. URL: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2006/24/1933-Image.html>.
12. Shu F.H., Milione V., Gebel W., Yuan C., Goldsmith D.W., Roberts W.W. Galactic Shocks in an Interstellar Medium with Two Stable Phases. *The Astrophysical Journal*, 1972, vol. 173, pp. 557-592. DOI: <https://doi.org/10.1086/151444>.
13. Kim W.-T., Ostriker E.C. Formation of Spiral-Arm Spurs and Bound Clouds in Vertically Stratified Galactic Gas Disks. *The Astrophysical Journal*, 2006, vol. 646, no. 1, pp. 213-231. DOI: <https://doi.org/10.1086/504677>.
14. Kim C.-G., Kim W.-T., Ostriker E.C. Galactic Spiral Shocks with Thermal Instability. *The Astrophysical Journal*, 2008, vol. 681, no. 2, pp. 1148-1162. DOI: <https://doi.org/10.1086/588752>.
15. Kovalenko I.G., Levy V.V. On a Steady Gas Flow with a Shock Wave in a Potential Well. *Astronomy and Astrophysics*, 1992, vol. 264, pp. 406-414.
16. Krügel E. *The Physics of Interstellar Dust*. Bristol, Philadelphia, Institute of Physics Publ., 2003. xxiii, 559 p.
17. Marochnik L.S., Berman B.G., Mishurov Iu.N., Suchkov A.A. Largescale Flow of Interstellar Gas in Galactic Spiral Waves — Effects of Thermal Balance and Self-Gravitation. *Astrophysics and Space Science*, 1972, vol. 89, no. 1, pp. 177-199.
18. Mac Low M.-M. The Energy Dissipation Rate of Supersonic, Magnetohydrodynamic Turbulence in Molecular Clouds. *Astrophysical Journal*, 1999, vol. 524 (1), pp. 169-178.
19. Wolfire M.G., McKee C.F., Hollenbach D., Tielens A.G.G.M. Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium in the Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 2003, vol. 587, no. 1, pp. 278-311. DOI: <https://doi.org/10.1086/368016>.
20. Roberts W.W. Large-Scale Shock Formation in Spiral Galaxies and Its Implications on Star Formation. *Astrophysical Journal*, 1969, vol. 158, pp. 123-144.
21. Shetty R., Ostriker E.C. Global Modeling of Spur Formation in Spiral Galaxies. *Astrophysical Journal*, 2006, vol. 647, no. 2, pp. 997-1017. DOI: <https://doi.org/10.1086/505594>.
22. Dobbs C.L., Glover S.C.O., Clark P.C., Klessen R.S. The ISM in Spiral Galaxies: Can Cooling in Spiral Shocks Produce Molecular Clouds? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, vol. 389, no. 3, pp. 1097-1110. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13646.x>.
23. Wolfire M.G., Hollenbach D., McKee C.F., Tielens A.G.G.M., Bakes E.L.O. The Neutral Atomic Phases of the Interstellar Medium. *Astrophysical Journal*, 1995, vol. 443, no. 1, pp. 152-168. DOI: <https://doi.org/10.1086/175510>.
24. Toro E. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Berlin, Springer, 1999. 624 p.
25. Korolev V.V., Bezborodov M.A., Kovalenko I.G., Zankovich A.M., Eremin M.A. Tricolor Technique for Visualization of Spatial Variations of Polydisperse Dust in Gas-Dust Flows. *Journal of Imaging*, 2018, vol. 4 (5), article ID: 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging4050061>.
26. van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme III. Upstream-Centered Finite Difference Schemes for Ideal Compressible Flow. *J. Comput. Phys.*, 1977, vol. 23, pp. 263-275.
27. van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme IV. New Approach to Numerical Convection. *J. Comput. Phys.*, 1977, vol. 23, pp. 276-299.
28. Bezborodov M.A., Eremin M.A., Korolev V.V., Kovalenko I.G., Zhukova E.V.

Visualization of the Anisotropy of the Velocity Dispersion and Characteristics of the Multi-Velocity Continuum in the Regions of Multi-Stream Flows of Gas-Dust Media with Polydisperse Dust. *Journal of Imaging*, 2020, vol. 6, no. 9, pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging6090098>.

GAS AND DUST STRUCTURES IN THE VICINITY OF THE ARMS OF SPIRAL GALAXIES

Vitaliy V. Korolev

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Theoretical Physics and Wave Processes,
Volgograd State University
korolev.vv@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Ilya G. Kovalenko

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Department of Theoretical Physics and Wave Processes,
Volgograd State University
ilya.g.kovalenko@gmail.com
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Mikhail A. Bezborodov

Researcher,
Volgograd State University
mabezborodov@gmail.com
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Mikhail A. Eremin

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Department of Theoretical Physics and Wave Processes,
Volgograd State University
ereminmikhail@gmail.com
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Valeriy V. Savin

Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, Department of Fundamental
Disciplines,
Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
vvs-5@mail.ru
Prosp. Lenina, 69, 404110 Volzhsky, Russian Federation

Abstract. A two-dimensional model of the flow of the gas-dust interstellar medium in the vicinity of the spiral arm of the galaxy is constructed. The flow in a vertical plane transverse to the disk plane is considered. The effects of nonadiabatic flow (volumetric heating and cooling of the gas by radiation) are

taken into account. The balance of heating and cooling ensures the coexistence of two phases, cold parsec-sized clouds of atomic hydrogen and warm intercloud gas. The consideration includes polydisperse dust, represented by three fractions of particles of different sizes and masses. Dust particles have finite inertia, their movements do not exactly repeat the movement of gas. Turbulence in the disk and in the spiral arm is also taken into account. Models are considered that use different combinations of the location of turbulence sources in the disk and/or in the arm. The main results obtained by the methods of computer hydrodynamic modeling are as follows.

- 1) Clouds undergo significant transformations as they pass through the spiral arm. A significant part of the clouds is absorbed into a thin dense cloud layer, which extends in a spiral arm along the equatorial plane in the vicinity of the center of the arm and has a size of approximately half the width of the arm. A smaller part of the clouds passes without destruction or with partial destruction through the sleeve, experiencing strong deformations along the way. The small-scale cloud component is partially restored under the action of turbulence, which perturbs the extended cloud layer inside the arm and partially destroys it into separate fragments.
- 2) A wedge-shaped galactic shock wave is formed on the rear side of the arm with respect to the incoming gas flow, attached to the rear edge of the extended cloud layer. A flow limited by a shock wave has the character of a jet that performs quasi-periodic transverse oscillations. The reason for the oscillations, apparently, is the instability of the shear flow, since tangential discontinuities are formed inside the jet along the flow and at a small angle to the shock fronts.
- 3) Dust particles are dragged by turbulent eddies and carried to heights of 150–200 pc above the disk plane, which naturally explains the existence of chaotic filamentous dust structures extending above the galactic disk to heights of several hundred parsecs.
- 4) The grains of dust are distributed differently inside the vortices. Dust grains with sizes of 0.01–0.1 μm cluster more easily than larger dust grains with a radius of 1 μm .
- 5) Turbulence serves as a mechanism to effectively trap dust particles on the front side of the spiral arm. Modeling shows that dust lanes are more pronounced on the front side of the arm.

Key words: spiral galaxies, gas-dust interstellar medium, supersonic flow, turbulence, hydrodynamics of multiphase media, polydisperse dust, hydrodynamic modeling.