



DOI: <https://doi.org/10.15688/mpcm.jvolsu.2017.6.7>

УДК 524.5-7

ББК 22.66-67

СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ ДИСКОВ ГАЛАКТИК

Виталий Владимирович Королев

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

Денис Олегович Боченков

Магистрант института математики и информационных технологий,
Волгоградский государственный университет
den.6131995@mail.com
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Павел Павлович Марченко

Магистрант института математики и информационных технологий,
Волгоградский государственный университет
ravelfargry31@mail.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. На основе стохастических методов проведено численное моделирование квазиравновесного турбулентного газового диска галактики, находящегося в тепловом и динамическом равновесии в поле тяготения звездного диска. Совокупное воздействие на межзвездную среду (МЗС) физических механизмов, ответственных за генерацию турбулентности, моделировалось с помощью спектральной версии форсинга, то есть путем создания возмущений поля скоростей с заданными спектральными характеристиками. Влияние возмущений поля скоростей на динамику межзвездного газа исследовалось в рамках численных экспериментов при разных параметрах генерации, в частности, в зависимости от пространственных масштабов и интенсивности накачки. Установлено, что при использовании данного подхода в газовом диске формируется квазистабильная вертикальная структура, которая качественно и количественно хорошо согласуется с наблюдениями МЗС в дисках спиральных галактик.

Ключевые слова: галактики, межзвездная среда, галактический диск, газовая динамика, численные методы.

Введение

Межзвездное пространство в дисковых галактиках содержит разреженную газопылевую среду, образующую дисковую подсистему. При этом объемная плотность вещества (звезд и газа) максимальна в плоскости их симметрии ($z = 0$), а по мере удаления от этой плоскости плотность убывает в среднем примерно как $\exp(-z^2/h^2)$, где h – полутолщина звездного или газового диска. В большинстве плоских галактик значение величины h лежит в интервале 0,2–0,5 кпк и слабо зависит от расстояния до центра галактики [4].

Межзвездная среда галактик включает несколько отличающихся друг от друга, но взаимосвязанных компонент: облака молекулярного водорода H_2 , диффузные облака нейтрального водорода $H\text{ I}$, межоблачный газ $H\text{ I}$, корональный газ [1]. Эти компоненты МЗС различаются плотностью, температурой, степенью ионизации, массой и долей занимаемого ими объема. Диффузные облака $H\text{ I}$ – это холодная фаза общепринятой многофазной модели МЗС [6; 12]. Их концентрация составляет 10–40 см^{-3} , а температура $\sim 10^2$ К. Межоблачный газ со средней концентрацией $\sim 0,1 \text{ см}^{-3}$ и температурами до 10^4 К является второй, теплой фазой МЗС [6; 12]. Молекулярные облака имеют температуры менее 10^2 К, а концентрация вещества может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$ в их ядрах. Размер гигантских молекулярных облаков составляет 20–30 пк при массе $\sim 10^4$ – $10^5 M_\odot$ [14]. Области коронального газа представляют собой горячие, разреженные каверны в межзвездной среде, образованные вспышками сверхновых, или зоны $H\text{ II}$, выдуваемые звездным ветром и излучением ОВ-звезд. Каверны достигают размеров ~ 100 пк и имеют характерные времена жизни $\sim 10^7$ лет, температура вещества в областях коронального газа составляет $\sim 10^6$ К при концентрациях менее 10^{-3} см^{-3} [3; 12]. Области $H\text{ II}$ меньше по размерам (10–50 пк), характеризуются температурами $\sim 10^4$ К и поддерживаются в течение всего жизненного цикла звезд, с которыми они связаны [3; 15].

Как показывают наблюдения, движение межзвездной среды в Галактике является турбулентным. Пульсации и вихри в поле скоростей прослеживаются на масштабах от размеров толщины диска до размеров диффузных облаков ~ 1 пк, облака также являются турбулентными [7; 10]. Турбулентность в межзвездной среде связана с целым комплексом факторов, действующих на разных временах и масштабах. Например, сверхновые поставляют наибольшее количество энергии ($\sim 10^{51}$ эрг) и охватывают значительные объемы пространства ($\sim 10^6$ пк³), но их вспышки являются относительно редкими событиями – в среднем 1 раз в 50–100 лет на галактику [3]. С другой стороны, источники излучения и звездного ветра распределены в галактических дисках относительно равномерно и являются механизмами долгого действия (миллионы лет), так что в целом их воздействие оказывается сравнимым со сверхновыми. Очевидно, учесть вклад даже наиболее существенных источников непосредственно довольно сложно, поэтому при моделировании турбулентности в диске необходимо использовать эвристические подходы [5]. Целью данной работы является построение квазиравновесной модели галактического диска, в котором поддерживается турбулентное движение газа. Такая модель может использоваться в качестве основы для исследования динамических процессов, протекающих в галактических дисках, например, для моделирования движения газа в окрестности спиральных рукавов, образования галактических ударных волн, исследования дисковых неустойчивостей и т. п.

1. Постановка задачи

1.1. Основные уравнения

При моделировании газового диска галактики МЗС рассматривалась в приближении идеального одноатомного газа в сочетании с моделью наиболее существенных тепловых процессов, включающей радиативные нагрев и охлаждение МЗС [1], также учитывалось влияние гравитационного поля звездного диска [4]. Тепловые процессы обуславливают мелкомасштабную (в сравнении с толщиной диска) облачную структуру, а с гравитацией связан крупномасштабный гради-

ент концентрации газового диска в вертикальном z -направлении. Динамика такой среды может быть описана следующей системой уравнений [2]:

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

$$\frac{\partial (\rho v_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v_k \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x_k} + \rho f_k, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho E + p) \vec{v}) = \rho \vec{v} \vec{f} + \Gamma n - \Lambda n^2, \quad (3)$$

$$E = \varepsilon + \frac{v^2}{2}, \quad (4)$$

$$p = \rho \varepsilon (\gamma - 1) = nk_B T. \quad (5)$$

Здесь ρ – плотность газа; n – концентрация; T – температура; p – давление; E – плотность полной энергии; ε – плотность тепловой энергии; \vec{v} – скорость; $v_k = \{v_x, v_y, v_z\}$ – компоненты скорости; Λ и Γ – функции объемного охлаждения и нагрева соответственно; k_B – постоянная Больцмана; $\gamma = 5/3$ – показатель адиабаты.

1.2. Форсинг

Скорости газа в МЗС варьируются в весьма широком диапазоне значений при дисперсии ~ 10 км/с и скорости звука ~ 10 км/с, то есть турбулентность в газовом диске следует считать сверхзвуковой и сжимаемой [7; 10; 13]. Согласно теории, энергия от источников, поддерживающих турбулентность, поступает в наиболее крупномасштабные возмущения, затем постепенно перераспределяется по каскаду все более мелких вихрей и в дальнейшем рассеивается благодаря диссипации. Природа хаотических вариаций скорости в межзвездной среде до конца не ясна. В принципе, они могут быть вызваны действием целого ряда физических механизмов: самогравитацией, магнитными полями, развитием тепловых и динамических неустойчивостей, взаимодействием газа с излучением и др. [7; 10; 13]. На практике, в частности, при численном моделировании, непосредственно их совместное влияние учесть сложно. Однако имеются стохастические методы (они известны под общим названием «форсинг» – от англ. *forcing*), позволяющие сформировать турбулентное течение с требуемыми параметрами. Первый тип методов основан на моделировании некоторого силового поля, создающего хаотические возмущения в поле скоростей. Второй подход подразумевает генерацию турбулентного поля скоростей по его спектральным характеристикам.

Использованный в нашей работе метод генерации турбулентности является версией спектрального метода, предложенного в работе [5]. Пусть задан темп накачки энергии $[dE/dt]_{\text{turb}}$ в поле возмущений скоростей. Тогда за время Δt в расчетную область поступает энергия $\Delta E = \Delta t [dE/dt]_{\text{turb}}$. Представим скорость газа в виде заданного начального распределения \vec{v}_0 и турбулентной добавки $\Delta \vec{v}$, которую необходимо вычислить:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \Delta \vec{v}, \quad (6)$$

$$E = \frac{1}{2} \int_{(s)} \rho (\vec{v} + \Delta \vec{v})^2 dS = E_0 + \Delta E, \quad (7)$$

где E_0 – начальное значение кинетической энергии, определяемое выражением:

$$E_0 = \frac{1}{2} \int_{(s)} \rho \vec{v}_0^2 dS, \quad (8)$$

а ΔE – добавка:

$$\Delta E = \int_{(s)} \rho (\vec{v}_0 \Delta \vec{v} + \frac{1}{2} \Delta \vec{v}^2) dS. \quad (9)$$

Поле возмущений скоростей $\Delta \vec{v}$ может быть представлено в виде комбинации несжимаемой $\Delta \vec{v}_s$ и сжимаемой $\Delta \vec{v}_c$ компонент с энергиями ΔE_s и ΔE_c соответственно

$$\Delta \vec{v} = \Delta \vec{v}_s + \Delta \vec{v}_c, \quad (10)$$

$$\Delta E = \Delta E_s + \Delta E_c. \quad (11)$$

Для рассмотрения моделей с разными типами турбулентности (чисто несжимаемая, чисто сжимаемая или смешанная) доли компонент ΔE_s и ΔE_c в энергии ΔE можно варьировать, введя параметр $\xi \in [0,1]$ так, что $\Delta E_c = \xi \Delta E$ и $\Delta E_s = (1-\xi) \Delta E$. Поскольку для несжимаемой (соленоидальной) компоненты должно выполняться условие бездивергентности

$$\text{div}(\Delta \vec{v}_s) = 0, \quad (12)$$

ее можно выразить через векторный потенциал \vec{A} :

$$\Delta \vec{v}_s = \text{rot} \vec{A}. \quad (13)$$

Аналогично, сжимаемая компонента может быть вычислена через скалярный потенциал φ :

$$\text{rot}(\Delta \vec{v}_s) = 0, \quad (14)$$

$$\Delta \vec{v}_c = \text{grad} \varphi. \quad (15)$$

Согласно теории турбулентности энергетический спектр поля скоростей может быть задан в виде степенной зависимости вида

$$\langle |v_k|^2 \rangle \propto k^\alpha, \quad (16)$$

где k – волновое число, а параметр α определяет наклон спектра и зависит от типа турбулентности и размерности задачи [7; 8]. В частности, из соображений размерности в трехмерном случае для несжимаемой турбулентности $\alpha_s = -11/3$, а для сжимаемой $\alpha_c = -3,74$ [7; 8]. Для вычисления потенциалов вначале случайным образом генерируются компоненты действительной и мнимой частей спектров A_k и φ_k в пространстве волновых чисел $k = \{k_x, k_y\}$. При этом амплитуда спектров определяется случайной генерацией в некотором диапазоне волновых чисел $k_{\min} < k < k_{\max}$, а фаза спектров выбирается согласно равномерному распределению в интервале от 0 до 2π . Затем вычисляются Фурье-образы сжимаемой и несжимаемой компонент поля скоростей:

$$\vec{v}_{s,k} = i\vec{k} \times \vec{A}_k, \quad (17)$$

$$\vec{v}_{c,k} = i\vec{k} \cdot \varphi_k. \quad (18)$$

После производится обратное преобразование Фурье, восстанавливающее обе компоненты. Для согласования полученных компонент с темпом накачки энергии выполним нормировку вида:

$$\Delta \vec{v} = a \Delta \vec{v}_s + b \Delta \vec{v}_c, \quad (19)$$

где a и b – нормировочные коэффициенты. После подстановки получаем следующие выражения:

$$\Delta E = \Delta E_s + \Delta E_c + ab \int_{(s)} \Delta \vec{v}_s \Delta \vec{v}_c dS, \quad (20)$$

$$\Delta E_S = a \int_{(s)} \rho \bar{v}_0 \Delta \bar{v}_S dS + a^2 \int_{(s)} \frac{1}{2} \rho \Delta \bar{v}_S^2 dv, \quad (21)$$

$$\Delta E_C = b \int_{(s)} \rho \bar{v}_0 \Delta \bar{v}_C dS + b^2 \int_{(s)} \frac{1}{2} \rho \Delta \bar{v}_C^2 dv. \quad (22)$$

Последние два соотношения являются квадратными уравнениями относительно нормировочных коэффициентов a и b , которые необходимо решить последовательно. Затем поле возмущений скоростей вычисляется по формуле (19).

1.3. Начальные условия и параметры задачи

Звездный диск галактики создает гравитационное поле, потенциал ψ_{star} которого на высотах до 500 пк над плоскостью симметрии диска ($z = 0$) близок к квадратичному по z [11]. Нами рассматривались локальные модели вертикальной структуры газового диска в его поперечных сечениях с размерами ~ 250 пк вдали от ядра, спиральных ветвей и периферии галактики, поэтому при таких условиях для потенциала звездного диска можно принять, что $\psi_{star}(z) \sim z^2$. Тогда сила гравитации будет вычисляться как производная потенциала по z -координате:

$$f_z(z) = -\frac{d\psi_{star}}{dz}. \quad (23)$$

Находясь в таком поле в стационарном состоянии, газ также примет форму диска со спадающим по z профилем плотности и характерной полутолщиной $h = 100$ пк. Если пренебречь радиативными процессами, то равновесие газового диска в поле звездного определяется только гидростатическим равновесием в направлении, перпендикулярном плоскости диска, так что

$$\frac{dp}{dz} = \rho f_z(z). \quad (24)$$

Если дополнить это уравнение уравнением состояния (5), решение полученной системы будет иметь вид:

$$\rho(z) = \rho_0 \exp\left(-\frac{z^2}{h^2}\right). \quad (25)$$

Здесь ρ_0 – константа интегрирования, имеющая смысл плотности газа при $z = 0$.

Реальный газовый диск является минимум двухфазной системой, и построение его модели требует учета радиативных процессов. До высот порядка 50 пк диск содержит облака H I с размерами 1–3 пк и молекулярные облака, которые могут иметь размеры в несколько десятков парсек. Облака и разреженная фаза, их окружающая, предположительно находятся как в динамическом равновесии, так и в тепловом, что обуславливается балансом процессов нагрева и охлаждения:

$$n\Lambda(T) = \Gamma. \quad (26)$$

Начальное состояние для дальнейшего моделирования строится как комбинация «теплого» диска (формула (25)) и спадающего по z распределения облаков, образующих «холодный» диск. Причем в рассматриваемом случае не требуется добиваться детального равновесия, так как после включения источника возмущений диск будет перестроен к новому равновесию. Добавление облаков обеспечивает изначально правильный баланс масс теплой и холодной фаз среды. Управляющим параметром здесь является фактор объемного заполнения среды облаками, который показывает, какая доля объема диска занята облачной средой. В нашей модели он был принят равным $f_V = 0,05$, что близко к среднему значению по диску Галактики [1]. Начальное распределение облаков по координате z гауссово с характерной полушириной, равной полутолщи-

не газового диска h , радиусы облаков одинаковы и равны 1 пк, газ в них имеет концентрацию $\sim 15 \text{ см}^{-3}$ при температуре $\sim 60 \text{ К}$. Приведем значения остальных параметров задачи:

$L_0 = 1 \text{ пк}$ – характерный масштаб облаков;

$T_0 = 9000 \text{ К}$ – характерная температура межоблачного газа;

$c_{s0} = (\gamma k_B T_0 / m_0)^{1/2} \approx 11 \text{ км/с}$ – характерная скорость звука в межоблачном газе, m_0 – масса атома водорода;

$n_0 = \rho_0 / m_0 = 0,1 \text{ см}^{-3}$ – характерная концентрация межоблачного газа;

$t_0 = L_0 / c_{s0} \approx 8,6 \cdot 10^4 \text{ лет}$ – характерное время.

В расчетах использовалась функция охлаждения $\Lambda(T)$, отвечающая химическому составу МЗС с солнечной металличностью, а функция нагрева была принята равной постоянной $\Gamma = 1,7 \cdot 10^{-25} \text{ эрг/с}$ [20]. Параметр $[dE/dt]_{\text{turb}}$, управляющий темпом накачки энергии через форсинг, подбирался так, чтобы гарантировать энергетический баланс задачи: при расчетах за один временной шаг для изменения полной энергии газа в расчетной области должно быть $\Delta E = 0$. Эмпирически было подобрано значение $[dE/dt]_{\text{turb}} = 4 \cdot 10^{-18} \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^3)$, близкое к оценкам, сделанным по астрономическим наблюдениям [3; 7].

2. Численное моделирование и обсуждение результатов

Исследуемая задача была рассмотрена в рамках двумерного приближения, то есть в плоскости вертикального (вдоль z) разреза галактического диска. Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных (1–5) производилось численно. Для расчетов был использован параллельный код для астрофизического моделирования, основанный на явной MUSCL-TVD схеме 2-го порядка точности по времени и 3-го по пространству [2; 9; 16–19].

Расчетная область представляла собой квадрат со стороной $L = 256 \text{ пк}$. Так как диск можно считать симметричным относительно средней плоскости, задача для экономии ресурсов рассматривалась в области над диском при $z > 0$ (рис. 1). Расчетная сетка была задана так, чтобы число ячеек было кратно степени 2 – это необходимо для модуля форсинга, генерирующего вихревые возмущения с использованием быстрого преобразования Фурье. Приведенные результаты были получены на сетке с шагом 1 пк, что достаточно для пространственного разрешения формирующихся в диске сгущений газа.

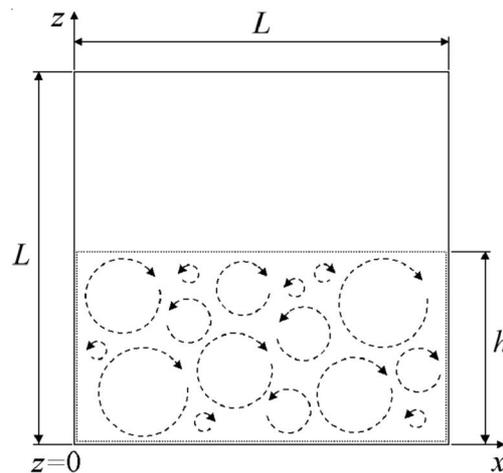


Рис. 1. Схема расчетной области: пунктиром выделена область, в которой генерируются возмущения

При моделировании были рассмотрены три типа моделей, отличающихся масштабами генерации турбулентности λ : 1) с вихрями крупных масштабов $4 < \lambda/L < 8$; 2) с вихрями средних масштабов $8 < \lambda/L < 12$; 3) модель с вихрями мелких масштабов $12 < \lambda/L < 16$. Генерация возмущений происходила внутри области в виде горизонтальной полосы $0 < z < 100 \text{ пк}$.

Граничные условия были заданы следующим образом. На нижней границе были заданы условия непротекания, что обеспечивает правильное поведение решения вблизи плоскости симметрии диска (с которой эта граница совпадает). Верхней границе было сопоставлено условие свободного протекания. На левой и правой границах заданы периодические граничные условия, то есть вытекающий через левую границу поток газа этими граничными условиями переводится на правую границу с теми же параметрами, но в режиме втекания.

Характерный вид полученных при моделировании распределений концентрации и температуры газа показаны на рисунке 2. В результате воздействия турбулентных пульсаций первоначальный газовый диск перестраивается, причем новая структура зависит от масштабов генерируемых возмущений. В частности, холодная фаза распределена прожилками толщиной ~ 5 пк с компактными узлами. Это выглядит как сетчатая структура, размеры ячеек которой коррелируют с максимальным масштабом генерации турбулентности в конкретной модели. Если рассматриваются крупномасштабные возмущения (модель 1, $4 < \lambda/L < 8$), то размеры ячеек составляют 40–60 пк, а в модели с мелкомасштабными вихрями (модель 3, $12 < \lambda/L < 16$) размер ячеек порядка 20–25 пк. Компактные сгущения располагаются преимущественно вблизи нижней границы, что характерно для наблюдаемых в галактиках облаков, концентрирующихся вдоль средней плоскости галактических дисков. Плотность газа в этих сгущениях $\sim 10^2 \text{ см}^{-3}$ при температурах $\sim 10^2 \text{ К}$, что также хорошо согласуется с наблюдениями диффузных облаков H I [14].

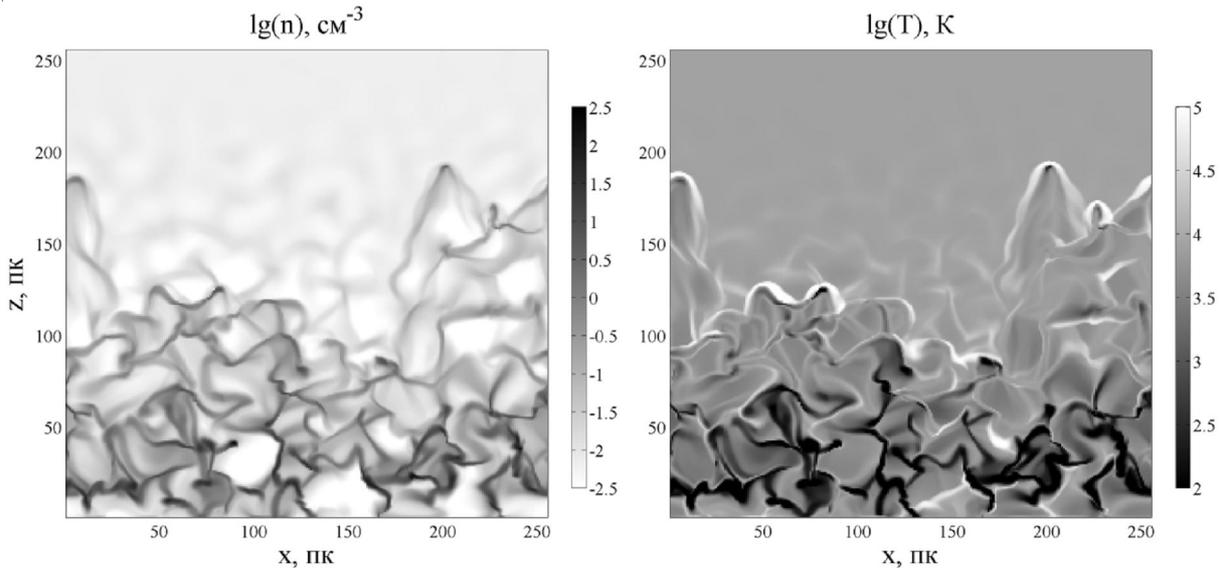


Рис. 2. Пространственные распределения концентрации и температуры в газовом диске в модели с масштабами возмущений $8 < \lambda/L < 12$ при $t = 8,1$ млн лет

Для анализа вертикальной структуры диска необходимо усреднить параметры газа вдоль x , то есть для некоторой физической величины $f(x, z)$ (это может быть температура, плотность, давление и др.) надо выполнить следующую процедуру:

$$\bar{f}(z) = \frac{1}{2} \int_0^L f(x, z) dx. \quad (27)$$

На рисунке 3 приведены усредненные согласно (27) распределения плотности и температуры для рассматриваемых моделей в три различных момента времени (приблизительно 2,7, 5,4 и 8,1 млн лет). В рассматриваемый интервал времени до ~ 10 млн лет профиль диска меняется слабо во всех моделях. В частности, концентрация вещества имеет гауссов профиль с шириной 100–150 пк, на который накладываются вариации, связанные с упомянутыми выше облакоподоб-

ными сгущениями. На высотах $z > 200$ пк распределения обеих величин выходят на постоянные значения с малыми возмущениями. Только в модели с мелкомасштабными вихрями (модель 1, $12 < \lambda/L < 16$) диск оказывается несколько компактнее, и вариации величин практически исчезают уже на высоте ~ 130 пк. Таким образом, в рассматриваемых случаях вертикальная структура диска в среднем остается динамически устойчивой (рис. 4).

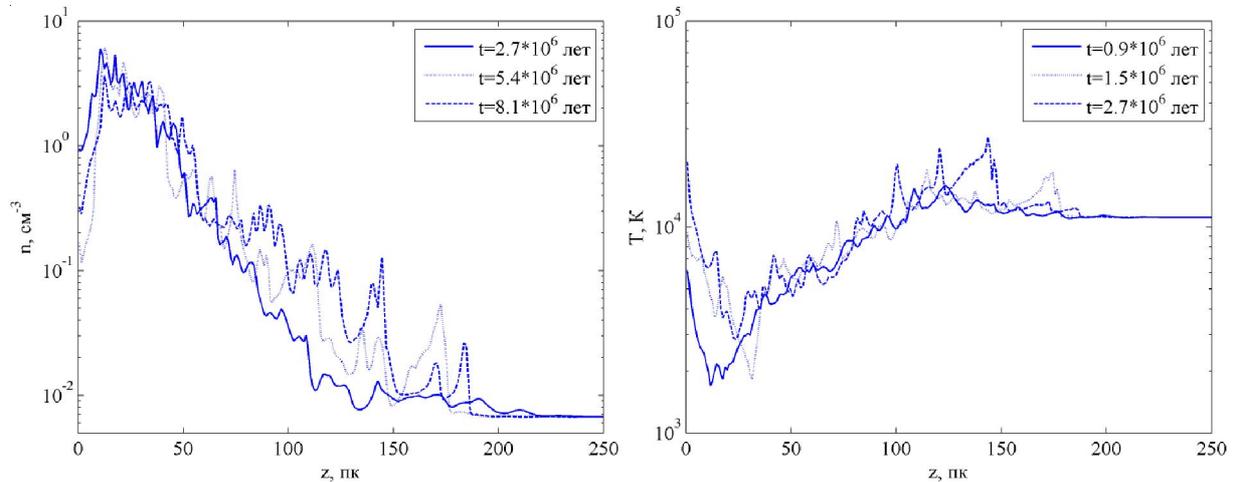


Рис. 3. Вертикальная структура газового диска: усредненные распределения концентрации и температуры в диске в разные моменты времени (2,7, 5,4 и 8,1 млн лет) для модели 2 ($8 < \lambda/L < 12$)

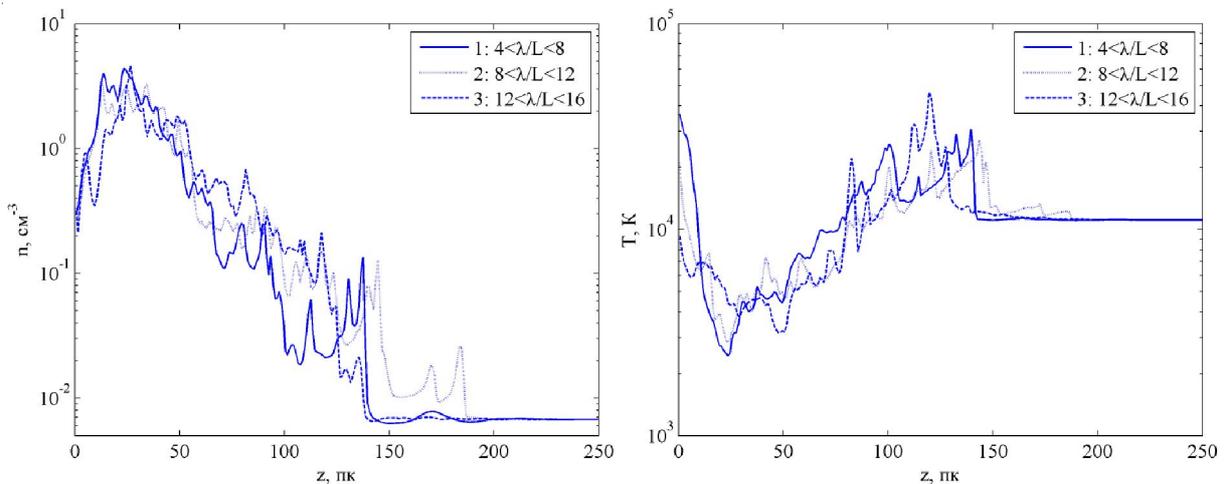


Рис. 4. Вертикальная структура газового диска: сравнение усредненных распределений концентрации и температуры в диске при $t = 8,1$ млн лет для моделей 1–3

В заключение сформулируем основные результаты нашей работы:

1. Разработана физическая модель квазиравновесного турбулентного газового диска галактики, находящегося в тепловом и динамическом равновесии в поле тяготения звездного диска.
2. Проведено численное моделирование вертикальной структуры галактического диска при генерации турбулентности в трех диапазонах размеров возмущений λ – на крупных масштабах $4 < \lambda/L < 8$, средних $8 < \lambda/L < 12$ и мелких $12 < \lambda/L < 16$.
3. Получаемая при моделировании вертикальная структура диска обладает близкими к распределениям параметров, наблюдаемым в дисках спиральных галактик, и остается стабильной на временах $\sim 10^7$ лет, что достаточно для исследования процессов, имеющих сопоставимую или меньшую продолжительность, например, для моделирования расширения остатков сверхновых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарев, Н. Г. Основы физики межзвездной среды / Н. Г. Бочкарев. – М. : Либроком, 2010. – 352 с.
2. Куликовский, А. Г. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов, А. Ю. Семенов. – М. : Физматлит, 2001. – 608 с.
3. Лозинская, Т. А. Сверхновые звезды и звездный ветер. Взаимодействие с газом Галактики / Т. А. Лозинская. – М. : Наука, 1986. – 304 с.
4. Морозов, А. Г. Физика дисков / А. Г. Морозов, А. В. Хоперсков. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2005. – 422 с.
5. Dubinski, J. Turbulence in Molecular Clouds / J. Dubinski, R. Narayan, T.G. Phillips // *The Astrophysical Journal*. – 1995. – Vol. 448. – P. 226–231.
6. Cox, D. P. The Three-Phase Interstellar Medium Revisited / D. P. Cox // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*. – 2005. – Vol. 43, iss. 1. – P. 337–385.
7. Elmegreen, B. G. Interstellar Turbulence I: Observations and Processes / B. G. Elmegreen, J. Scalo // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*. – 2004. – Vol. 42, iss. 1. – P. 211–273.
8. Fleck, R. C., Jr. Scaling Relations for the Turbulent, Non-Self-gravitating, Neutral Component of the Interstellar Medium / R. C., Jr. Fleck // *The Astrophysical Journal*. – 1996. – Vol. 458. – P. 739–741.
9. Harten, A. On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes / A. Harten // *SIAMJ. Numer. Anal.* – 1978. – Vol. 1. – P. 1–23.
10. Heyer, M. H. The Universality of Turbulence in Galactic Molecular Clouds / M. H. Heyer, C. M. Brunt // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol. 615, iss. 1. – P. L45–L48.
11. Kuijken, K. The mass distribution in the galactic disc. I – A technique to determine the integral surface mass density of the disc near the sun / K. Kuijken, G. Gilmore // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1989. – Vol. 239. – P. 571–603.
12. McKee, C. F. A theory of the interstellar medium: three components regulated by supernova explosions in an inhomogeneous substrate / C. F. McKee, J. P. Ostriker // *Astrophysical J.* – 1977. – Vol. 218. – P. 148–169.
13. Scalo, J. Interstellar Turbulence II: Implications and Effects / J. Scalo, B.G. Elmegreen // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*. – 2004. – Vol. 42, iss. 1. – P. 275–316.
14. Snow, T. P. Diffuse Atomic and Molecular Clouds / T. P. Snow, B. J. McCall // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*. – 2006. – Vol. 44, iss. 1. – P. 367–414.
15. Spitzer, L. Theories of the hot interstellar gas / L. Spitzer // *Annual review of astronomy and astrophysics*. – 1990. – Vol. 28. – P. 71–101.
16. Toro, E. F. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics / E. F. Toro. – Berlin : Springer, 1999. – 721 p.
17. 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.
18. 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.
19. Van Leer, B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme V. A Second Order Sequel to Godunov's Method / B. Van Leer // *J. Comput. Phys.* – 1979. – Vol. 32. – P. 101–136.
20. Wolfire, M. G. The neutral atomic phases of the interstellar medium / M. G. Wolfire, E. L. Bakes // *The Astrophysical Journal*. – 1995. – Vol. 443. – P. 152–168.

REFERENCES

1. Bochkarev N.G. *Osnovy fiziki mezhzvezdnoy sredy* [Fundamentals of Physics of the Interstellar Medium]. Moscow, Librokom Publ., 2010. 352 p.
2. Kulikovskiy A.G., Pogorelov N.V., Semenov A.Yu. *Matematicheskie voprosy chislennogo resheniya giperbolicheskikh sistem uravneniy* [Mathematical Problems of Numerical Solution of Hyperbolic Systems of Equations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 608 p.
3. Lozinskaya T.A. *Sverkhnovye zvezdy i zvezdnyy veter. Vzaimodeystvie s gazom Galaktiki* [supernovae and a Stellar Wind. Interaction with the Gas of the Galaxy]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 304 p.
4. Morozov A.G., Khoperskov A.V. *Fizika diskov* [Physics of Disks]. Volgograd, Izd-vo VolGU, 2005. 422 p.
5. Dubinskiy J., Narayan R., Phillips T.G. Turbulence in Molecular Clouds. *The Astrophysical Journal*, 1995, vol. 448, pp. 226–231.

6. Cox D.P. The Three-Phase Interstellar Medium Revisited. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 2005, vol. 43, iss. 1, pp. 337-385.
7. Elmegreen B.G., Scalo J. Interstellar Turbulence I: Observations and Processes. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 2004, vol. 42, iss. 1, pp. 211-273.
8. Fleck R.C., Jr. Scaling Relations for the Turbulent, Non-Self-gravitating, Neutral Component of the Interstellar Medium. *The Astrophysical Journal*, 1996, vol. 458, pp. 739-741.
9. Harten A. On a class of high resolution total-variation-stable finite-difference schemes. *SIAMJ. Numer. Anal.*, 1978, vol. 1, pp. 1-23.
10. Heyer M.H., Brunt C.M. The Universality of Turbulence in Galactic Molecular Clouds. *The Astrophysical Journal*, 2004, vol. 615, iss. 1, pp. L45-L48.
11. Kuijken K., Gilmore G. The mass distribution in the galactic disc. I - A technique to determine the integral surface mass density of the disc near the sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1989, vol. 239, pp. 571-603.
12. McKee C.F., Ostriker J.P. A theory of the interstellar medium: three components regulated by supernova explosions in an inhomogeneous substrate. *Astrophysical J.*, 1977, vol. 218, pp. 148-169.
13. Scalo J., Elmegreen B.G. Interstellar Turbulence II: Implications and Effects. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 2004, vol. 42, iss. 1, pp. 275-316.
14. Snow T.P., McCall B.J. Diffuse Atomic and Molecular Clouds. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 2006, vol. 44, iss. 1, pp. 367-414.
15. Spitzer L. Theories of the hot interstellar gas. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 1990, vol. 28, pp. 71-101.
16. Toro E.F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Berlin, Springer, 1999. 721 p.
17. 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.
18. Van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme IV. New Approach to Numerical Convection. *J. Comput. Phys.*, 1977, vol. 23, pp. 276-299.
19. Van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme V. A Second Order Sequel to Godunov's Method. *J. Comput. Phys.*, 1979, vol. 32, pp. 101-136.
20. Wolfire M.G., Bakes E.L. The neutral atomic phases of the interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 1995, vol. 443, pp. 152-168.

STOCHASTIC MODELS OF THE VERTICAL STRUCTURE OF TURBULENT GASEOUS DISKS OF GALAXIES

Vitaliy Vladimirovich Korolev

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

Mikhail Anatolyevich Eremin

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

Denis Olegovich Bochenkov

Master Student, Institute of Mathematics and Information Technologies,
Volgograd State University
den.6131995@mail.com
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Pavel Pavlovich Marchenko

Master Student, Institute of Mathematics and Information Technologies,
Volgograd State University
pavelfarcry31@mail.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. On the basis of stochastic methods, a numerical simulation of the quasi-equilibrium turbulent gas disk of a galaxy located in thermal and dynamic equilibrium in the field of gravity of the stellar disk is carried out. The cumulative effect on the interstellar medium (ISM) of the physical mechanisms responsible for the generation of turbulence was modeled using the spectral version of forcing, that is, by creating perturbations of the velocity field with given spectral characteristics. The influence of velocity field perturbations on the dynamics of interstellar gas was investigated in the framework of numerical experiments with different input parameters, in particular, depending on the spatial scales and pump intensity. It is established that using this approach provokes the formation of a quasi-stable vertical structure in the gas disk, which is conformed qualitatively and quantitatively with observations of ISM in the disks of spiral galaxies.

Key words: galaxies, interstellar medium, galactic disk, gas dynamics, numerical methods.