



УДК 524.5
ББК 22.6

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ В НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ. РОЛЬ ТЕМНОГО ГАЛО

А.В. Хоперсков, Е.О. Васильев, С.А. Хоперсков, А.М. Соболев, М.А. Еремин

Построена численная газодинамическая модель галактического газового диска с учетом спирального узора звездной компоненты Галактики с целью изучения механизмов формирования гигантских молекулярных облаков. Проведено сравнение мелкомасштабных газовых структур с данными наблюдений. Ставится вопрос о возможности влияния параметров, определяющих свойства темного гало, на характерные особенности гигантских молекулярных облаков.

Ключевые слова: газодинамика, межзвездная среда, численное моделирование, темное вещество, химико-динамические модели.

Свойства гигантских молекулярных облаков

Данные наблюдений о гигантских молекулярных облаках (ГМО) нашей Галактики демонстрируют различие свойств ГМО в спиральных рукавах Ориона, Персея, Киля и Внешнего (см. рис. 1). Наблюдения за газопылевыми комплексами (ГПК) показывают [7], что эти объекты концентрируются к спиральным рукавам Галактики, при этом свойства комплексов существенно зависят от местоположения в Галактике [5; 9; 10].

Для компьютерного моделирования газовой компоненты Галактики была реализована нелинейная конечно-объемная численная схема TVD MUSCL в декартовой системе координат [14]. TVD-метод достаточно эффективен для описания системы взаимодействующих ударных волн [3]. Алгоритм был обобщен для описания переноса двух химически-взаимодействующих газовых компонент H_1 и H_2 . Уравнение Пуассона для самогравитации в газе решалось с использованием метода TreeCode. Для детального описания процесса формирования шпуров в окрестности спиральных рукавов Галактики и структур типа ГМО численные эксперименты проводились с высоким пространственным разрешением до 3 пк. Численный алгоритм был адаптирован для расчетов на ЭВМ с массивно-параллельной архитектурой (стандарты OpenMP и MPI). Выбор параметров осесимметричных подсистем (диска, балджа, гало) обеспечивает радиальный профиль наблюдаемой кривой вращения Галактики (см. рис. 2) [11]. В трехмерной модели толщина звездного диска обеспечивает вертикальную устойчивость звездной системы [12]. Вопросы моделирования столкновения мелкомасштабных облаков рассматриваются в [1].

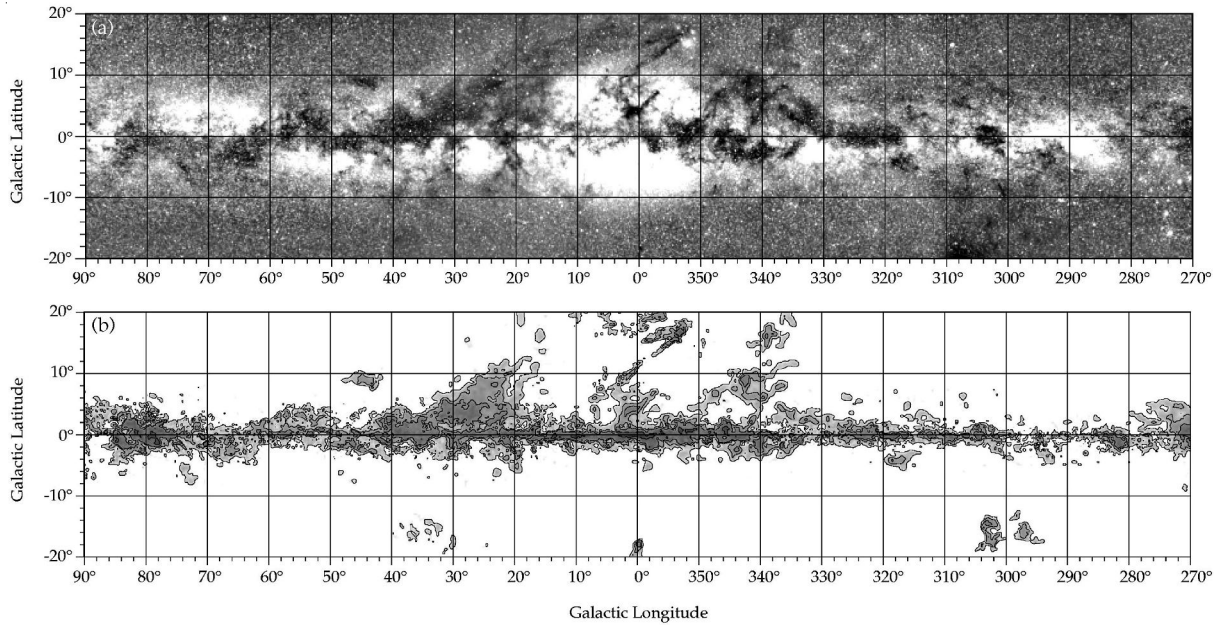


Рис. 1. Оптическое изображение части Галактики (*сверху*). Наблюдаемое распределение газа в Галактике в радиодиапазоне, включающее разброс по скоростям ± 10 км/с (*внизу*) [5]

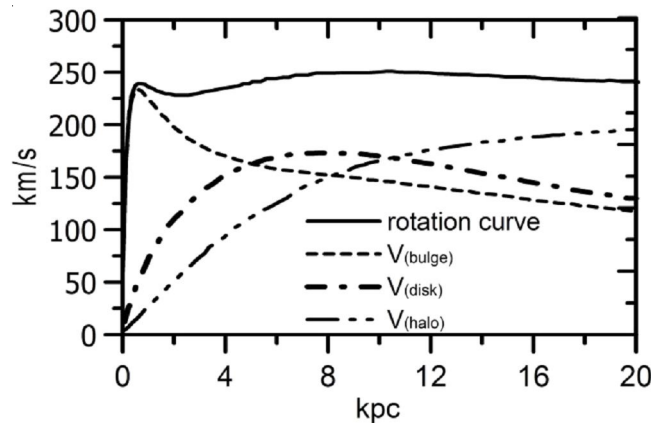


Рис. 2. Декомпозиция кривой вращения в численной модели

Включение в химико-динамическую модель потенциала бара и спиральных рукавов звездного диска позволяет воспроизводить основные морфологические особенности распределения поверхностной плотности газа в Галактике. Модель охлаждения отвечает стандартному химическому составу в окрестности Солнца [8].

Численные эксперименты указывают на слабую зависимость функции нагрева от температуры, и в наших моделях она принята постоянной $1,6 \times 10^{-25}$ эрг/с [18]. В расчетах использовались модели охлаждения межзвездной среды для фиксированного химического состава [18]. Кривые охлаждения включают эффекты охлаждения на различных элементах [17]. В расчетах принимались значения металличности $Z = 1,0 \times Z_\odot$ и $Z = 0,1 \times Z_\odot$ (Z_\odot – металличность в окрестности Солнца), для которых кривые охлаждения могут отличаться в пределах 1–2 порядков.

Для описания взаимных превращений атомарного и молекулярного водорода, необходимо в течение всего расчета в каждой расчетной ячейке решать уравнение химической кинетики для концентрации молекулярного водорода

$$\frac{dn(H_2)}{dt} = R_{gr}(T) \cdot n(H) \cdot n - (\zeta_{cr} + \zeta_{diss} N(H_2), A_V) \cdot n(H_2),$$

где $n = n(H) + 2n(H_2)$;
 $n(H)$, $n(H_2)$ – концентрации атомарного и молекулярного водорода;
 $N(H_2)$ – лучевая концентрация H_2 .

Молекулярный водород в существенных количествах образуется на поверхности пыли. Если считать, что газовая и пылевые компоненты равномерно перемешаны на масштабах ~ 3 пк, то есть количество пыли пропорционально концентрации газа, тогда рождение H_2 определяется выражением

$$R_{gr}(T) \times n(H) \times n,$$

где $R_{gr}(T) = 2,2 \times 10^{-18} S\sqrt{T}$ см³/с;
 $S = 0,3$ – эффективность образования H_2 на пыли [4].

Разрушение молекулярного водорода происходит за счет взаимодействия с космическими лучами. Для константы диссоциации принято $\zeta_{cr} = 6 \times 10^{-18}$ с⁻¹. Основным механизмом разрушения H_2 является фотодиссоциация ультрафиолетовым излучением от звезд типа В0:

$$\zeta_{diss}(N(H_2), A_V) = \zeta_{diss}(0) f_{shield}(N(H_2)) f_{dust},$$

где $f_{shield}(N(H_2))$ – функция самоэкранировки H_2 ;
 f_{dust} – экранирование излучения пылью;
 $\zeta_{diss}(0) = 4,17 \times 10^{-11}$ с⁻¹ – уровень фотодиссоциации в отсутствие экранирования [6].

Результаты численного моделирования ГМО

В численных расчетах на начальных этапах происходит формирование системы ударных волн при сверхзвуковом протекании вещества через спиральный потенциал звездного диска (см. рис. 3). Далее на характерных временах $150 - 200 \times 10^6$ лет развивается неустойчивость фронта ударной волны под действием тепловых процессов и самогравитации. На этом этапе происходит резкое увеличение молекулярного водорода из-за охлаждения и уплотнения газа в областях ударных волн. На нелинейной стадии эти процессы приводят к образованию большого количества долгоживущих (10^7 лет) облаков с размерами $50-500$ пк. В дальнейшем количество H_2 перестает увеличиваться, устанавливается квазистационарное состояние.

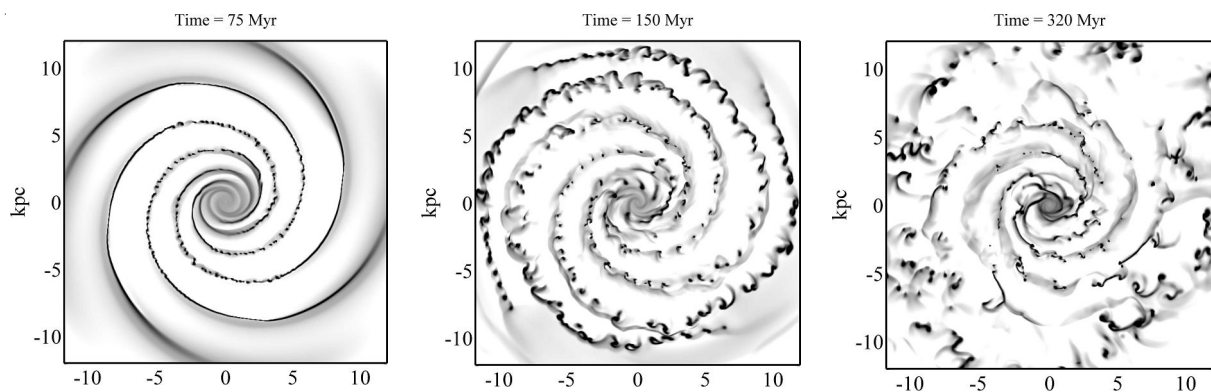


Рис. 3. Эволюция модели галактического газового диска с образованием развитой облачной структуры

В численных расчетах хорошо выделяются цепочки газовых комплексов вдоль спиральных рукавов. В их плотных частях температура составляет $20-200$ К. При этом дисперсии турбулентных скоростей для таких образований порядка $3-7$ км/с. Параметры полученных структур оказываются близкими к данным наблюдений за гигантскими молекулярными облаками и их окружением. На рисунке 4 показан отдельный фрагмент газового диска с молекулярными облаками, которые демонстрируют типичную пространственную структуру. Поле скоростей (см. рис. 4),

построенное в неинерциальной системе координат, вращающейся вместе с веществом диска, указывает на сложную структуру течений в облаках и их окружении.

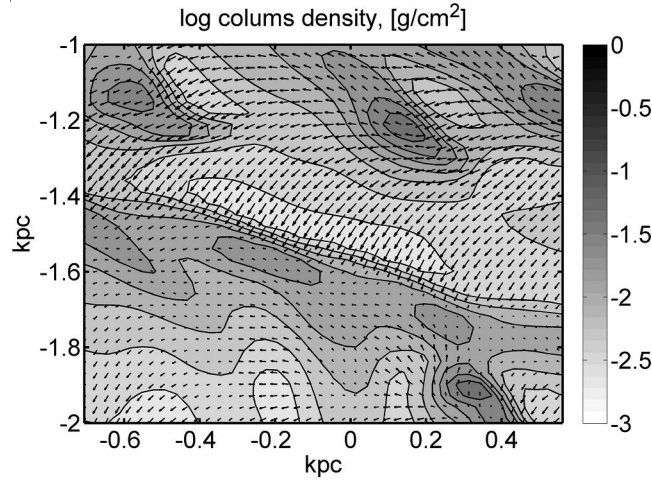


Рис. 4. Участок газового диска, на котором представлено скопление молекулярных облаков. Также показана сложная структура течений в их окрестности

Анализируя фазовую диаграмму для газовой компоненты галактики, можно выделить некоторые особенности в распределении термодинамических параметров газа. Распределению соответствует несколько устойчивых состояний среды с температурами 10^4 , 10^2 и 10^1 . При промежуточных температурах газ находится в неустойчивых состояниях. При $T = 10^4$ К и $T = 10^1$ К в основном имеются плотные облака газа с концентрациями $n = 300 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ преимущественно из молекулярного газа. Отметим также, что концентрация холодного молекулярного газа достигает наибольших значений вдоль спиральных рукавов, между которыми в основном располагается «теплый» атомарный водород.

Результаты моделирования с различной относительной массой темного гало $\mu = M_{\text{halo}} / M_{\text{disk}}$ указывают на возможность влияния величины m на темп молекуляризации. На этапах начального формирования ударных волн и последующего развития неустойчивости содержание H_2 во всех моделях оказывается близким. На поздних этапах после формирования развитой облачной структуры появляются различия. В моделях с более массивным темным гало относительное содержание $\text{N}(\text{H}_2) / \text{N}(\text{H})$ в целом уменьшается (см. рис. 5).

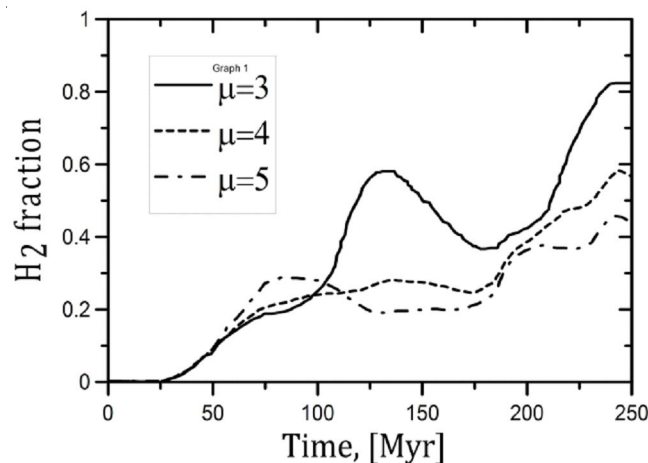


Рис. 5. Обилие молекулярного водорода в моделях с различной относительной массой темного гало

Диаграмма «лучевая скорость – галактическая долгота» на рисунке 6 построена для положения Солнца на расстоянии $r = 8$ кпк. Во внешней части модели Галактики (галактические долготы от

30 до 330 °) различаются газовые комплексы, сходные с наблюдаемыми структурам в Местном рукаве [17], Внешнем рукаве и спиральном рукаве Персея Млечного Пути. В этих областях можно различить отдельные молекулярные облака. Результаты трехмерных численных расчетов (пространственное разрешение $700 \times 700 \times 100$) с учетом самогравитации качественно совпадают с двумерными моделями. Изучены особенности вертикальной структуры диска. Во внешних частях диска и над плоскостью диска температура достигает 10^3 К, при этом плотность вещества мала и в таких условиях молекуляризация практически не происходит. Диаграмма «лучевая скорость – галактическая долгота» на рисунке 6 построена для положения Солнца на расстоянии $r = 8$ кпк. Во внешней части модели Галактики (галактические долготы от 30 до 330 °) различаются газовые комплексы, сходные с наблюдаемыми структурам в Местном рукаве [17], Внешнем рукаве и спиральном рукаве Персея Млечного Пути. В этих областях можно различить отдельные молекулярные облака. Результаты трехмерных численных расчетов (пространственное разрешение $700 \times 700 \times 100$) с учетом самогравитации качественно совпадают с двумерными моделями. Изучены особенности вертикальной структуры диска. Во внешних частях диска и над плоскостью диска температура достигает 10^3 К, при этом плотность вещества мала и в таких условиях молекуляризация практически не происходит.

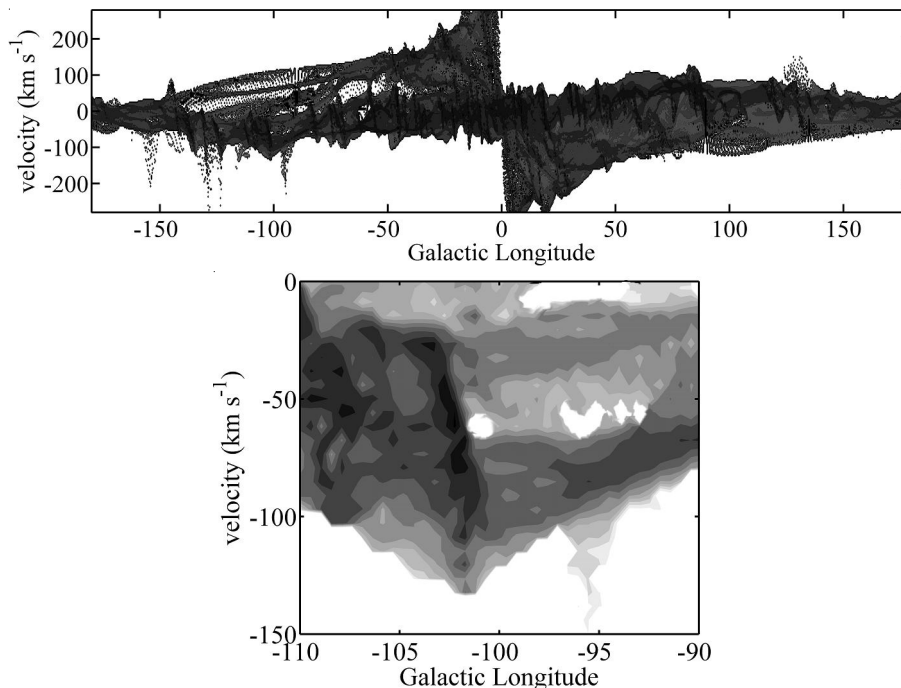


Рис. 6. Диаграмма «лучевая скорость – галактическая долгота», построенная по результатам численных расчетов. Благодаря высокому пространственному разрешению на рисунке снизу можно различить отдельные облака с характерными дисперсиями скоростей 3–5 км/с

Таким образом, диск из атомарного водорода простирается заметно дальше в вертикальном и радиальном направлениях, чем компонента H_2 .

Заключение

1. На основе численной схемы TVD MUSCL реализован комплекс программ, позволяющий рассчитывать динамику газовых подсистем с учетом самогравитации, нагрева-охлаждения, взаимного превращения атомарного и молекулярного водорода.
2. Проведены химико-динамические расчеты эволюции модели газового диска Галактики.
3. Показана возможность формирования структур типа гигантских молекулярных облаков в окрестности спиральных рукавов со значениями параметров, которые оказываются близкими к данным наблюдений.

4. Используя распределение молекулярного водорода в моделях, была построена диаграмма «лучевая скорость – галактическая долгота», которая отражает существенные особенности структур в Местном рукаве, Внешнем рукаве и спиральном рукаве Персея Млечного Пути.

5. Сделаны оценки влияния величины интегральной темной массы гало на темп молекуляризации и морфологию ГМО в численных экспериментах.

Авторы выражают благодарность А.В. Засову и Н.В. Тюриной (отдел Внегалактической астрономии ГАИШ МГУ) в организации численных расчетов на суперкомпьютере СКИФ МГУ «ЧЕБЫШЕВ» научно-исследовательского вычислительного центра МГУ (<http://parallel.ru/cluster/>). Работа поддержана ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (П1248) и некоммерческим фондом «Династия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремин, М. А. Трехмерный параллельный код для моделирования процессов в межзвездной среде / М. А. Еремин, В. Н. Любимов // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6. – С. 21–23.
2. Фридман, А. М. Физика галактических дисков / А. М. Фридман, А. В. Хоперсков. – М. : Физматлит, 2011. – 640 с.
3. Хоперсков, А. В. Диссипативно-акустическая неустойчивость в аккреционных дисках на нелинейной стадии / А. В. Хоперсков, С. С. Храпов, Е. А. Недугова // Письма в Астрон. журн. – 2003. – Т. 29, № 4. – С. 288–299.
4. Cazaux, S. H₂ Formation on Grain Surfaces / S. Cazaux, A. G. G. M. Tielens // *Astroph. J.* – 2004. – V. 604. – P. 222–237.
5. Dame, T. / T. Dame, D. Hartmann, P. Thaddeus // *Astrophys. J.* – 2001. – V. 547. – P. 792–813.
6. Draine, B. T. / B. T. Draine, F. Bertoldi // *ApJ.* – 1996. – V. 468. – P. 269–289.
7. Efremov, Yu. N. On the chains of star complexes and superclouds in spiral arms / Yu. N. Efremov // *MNRAS.* – 2010. – V. 405. – P. 1531–1543.
8. Gerritsen, J. P. E. / J. P. E. Gerritsen, V. Icke // *A&A.* – 1997. – V. 325. – P. 972–986.
9. Gibson, S. J. // S. J. Gibson, A. R. Taylor, J. M. Stil [et al.] // *Proc. IAUS.* – 2007. – V. 237. – P. 363–367.
10. Kalberla, P. M. W. / P. M. W. Kalberla, J. Kerp // *Ann. Review Astron. & Astroph.* – 2009. – V. 47. – P. 27–61.
11. Khoperskov, A. V. / A. V. Khoperskov, N. V. Tyurina // *Astronomy Reports.* – 2003. – V. 47. – P. 443–457.
12. Khoperskov, A. Numerical modelling of the vertical structure and dark halo parameters in disc galaxies / A. Khoperskov, D. Bizyaev, N. Tyurina, M. Butenko // *Astronomische Nachrichten.* – 2010. – V. 331. – P. 731–745.
13. Kirsanova, M. S. / M. S. Kirsanova, D. S. Wiebe, A. M. Sobolev // *Astronomy Reports.* – 2009. – V. 53. – P. 611–633.
14. van Leer, B. // *J. Comp. Phys.* – 1979. – V. 32. – P. 101–136.
15. McKee, C. F. *The Origin of Stars and Planetary Systems* / C. F. McKee. – Kluwer, 1999. – P. 29–60.
16. Pavlyuchenkov, Ya. N. Determining the parameters of massive protostellar clouds via radiative transfer modeling / Ya. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe, A. M. Fateeva, T. S. Vasyunina // *Astronomy Reports.* – 2011. – V. 55. – P. 1–12.
17. Roman-Duval, J. / J. Roman-Duval, J. M. Jackson, M. Heyer [et al.]. – Mode of access: arXiv:1010.2798v1. – 2010.
18. Spaans, M. / M. Spaans, C. Norman // *ApJ.* – 1997. – V. 483. – P. 87–97.
19. Wada, K. / K. Wada, C. Norman // *ApJ.* – 2001. – V. 547. – P. 172–186.

MODEL FOR THE FORMATION OF MOLECULAR CLOUDS IN OUR GALAXY. THE ROLE OF DARK HALO

A. V. Khoperskov, E. O. Vasiliev, S. A. Khoperskov, A. M. Sobolev, M. A. Eremin

Numerical gasdynamic model of the galactic gaseous disk taking into account the spiral pattern of the galaxy stellar component is built. The main objective is to study the mechanisms of formation of giant molecular clouds. Comparison of small-scale gaseous structures with observations made. We pose the question of possible influence of the parameters of the dark halo in the characteristic features of giant molecular clouds.

Key words: *gas dynamics, interstellar medium, numerical simulation, dark matter, chemical-dynamical models.*