



УДК 524.62

ББК 22.632

## ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССЫ ГАЛО ГАЛАКТИКИ ПО НОВЫМ ДАННЫМ О КИНЕМАТИКЕ МАЗЕРОВ<sup>1</sup>

**Бутенко Мария Анатольевна**

Старший преподаватель кафедры информационных систем  
и компьютерного моделирования

Волгоградского государственного университета

butenkoma@gmail.com, infomod@volsu.ru

просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Хоперсков Александр Валентинович**

Доктор физико-математических наук,

профессор кафедры информационных систем и компьютерного моделирования

Волгоградского государственного университета

ka@infomod.ru, infomod@volsu.ru

просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Данные наблюдений о кинематике мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами приводят к пересмотру количественных параметров кривой вращения нашей Галактики. В частности, в окрестности Солнца скорость вращения  $V$ , по-видимому, превышает 250 км/с для расстояния до центра Галактики  $R = 8-8.5$  кпк. Выбор значений  $V$  и  $R$  влияет на результат декомпозиции гравитационного потенциала на основные подсистемы, в частности, возникает задача уточнения масс основных галактических компонент – дисковой и темного гало. Помимо кинематики мазеров использовались данные о параметрах балджа и бара, вертикальной структуре звездного диска. В рамках динамической модели  $N$  тел в предположении, что звездный диск находится вблизи границы гравитационной устойчивости, получены новые оценки массы темного гало на разных расстояниях от галактического центра внутри радиуса 12 кпк.

**Ключевые слова:** Галактика, Млечный путь, кривая вращения, мазеры, моделирование  $N$  тел.

**Введение. Данные наблюдений по мазерам**

Исследование галактических параметров, особенно кривой вращения Галактики, имеет большое значение в решении ряда проблем, таких как оценки массы Галактики и ее компонент, определение распределения материи, объяснение кинематики и структурных особенностей Галактики и ее подсистем, и т. д. Наши представления о структуре и физике Галактики меняются по мере уточнения фотометрических и кинематических данных, получаемых из наблюдений [1]. Опубликовано довольно большое число работ, в которых определяется радиальная зависимость скорости вращения динамически холодной компоненты [7; 8; 14; 16; 17]. Разные подсистемы Галактики имеют разную скорость вращения [4].

Мазеры с измеренными тригонометрическими параллаксами, прямая видимость скоростей и собственных движений [15] представляют особый интерес. В настоящее время измерение параллаксов со средней погрешностью в несколько процентов выполнены с радиоинтерферометров для 28 мазеров в различных областях активного звездообразования. Эти мазеры связаны с 25 областями активного звездообразования и находятся в диапазоне расстояний от центра Галактики  $3 < R < 14$  кпк. Их кинематика отражает свойства самой молодой части галактического диска, так как эти мазеры связаны с очень молодыми ( $< 100$  лет) звездами ОВ. Данные наблюдений о кинематике мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами приводят к пересмотру количественных параметров кривой вращения нашей Галактики (рис. 1) [5; 6; 15]. Для определения параметров вращения Галактики в работе [5] были использованы первые три члена ряда Тейлора угловой скорости вращения на галактоцентрическом расстоянии от Солнца,  $R_0 = 8$  кпк. Из полученных данных в окрестности Солнца (расстояния до центра Галактики  $R = 8-8.5$  кпк) скорость вращения вещества Галактики превышает 250 км/с.

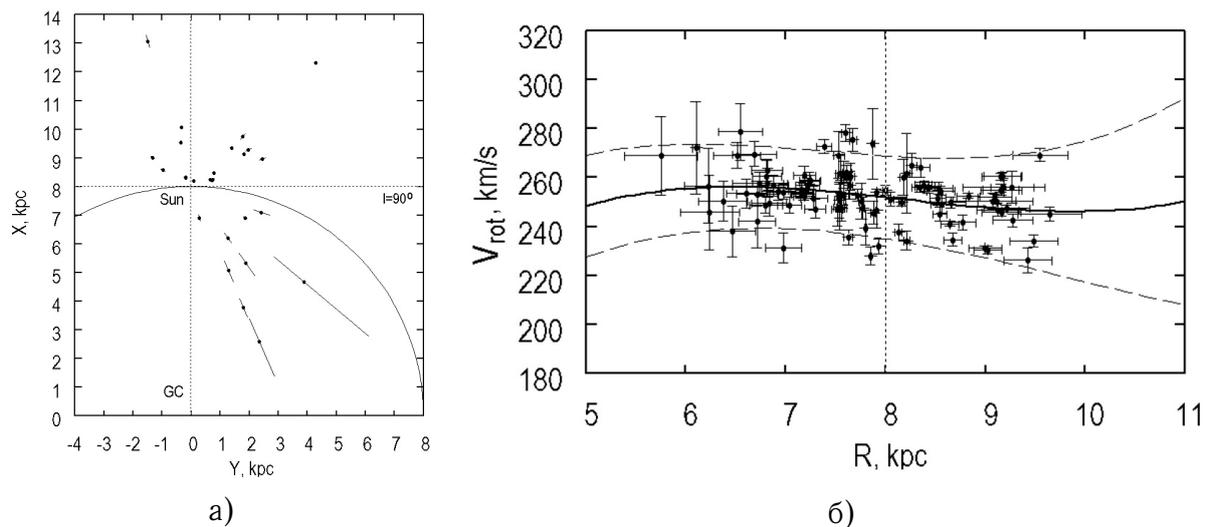


Рис. 1: а) координаты мазеров в плоскости XY Галактики. Пунктирными линиями указаны местоположения Солнца и Галактического центра (GC) (из работы [5]); б) кривая вращения Галактики (сплошная линия). Вертикальная линия показывает положение радиуса, на котором находится Солнце. Пунктирные линии указывают на  $1\sigma$  доверительных интервалов (из работы [6])

### 1. Динамическое моделирование

При исследовании была построена динамическая модель Галактики, в ее основе лежит численное интегрирование уравнений движения для  $N$  гравитационно взаимодействующих частиц. Результаты динамического моделирования конкретных дисковых галактик, согласующиеся с фотометрическими и кинематическими данными наблюдений, указывают на необходимость учета внутри оптического радиуса звездной компоненты  $R$  темного гало с массой  $M_h$ , которая в 1–4 раза превышает массу дисковой компоненты  $M_d$  [9; 13; 18]. Рассматривалась эволюция дисковой подсистемы в гравитационном поле. В отличие от работы [10], ограничимся случаем сферических компонент с распределением объемной плотности:

$$\rho_s = \sum_m \frac{\rho_{0m}}{(1 + (r^2 + z^2)/a_m^2)^n}, \quad (1)$$

где индексы  $m = b, h$  относятся соответственно к балджу и гало,  $n = 1$  для квазиизотермического гало и  $n = 3/2$  для балджа (закон Кинга),  $\rho_{0m}$  — центральная плотность соответствующей компоненты, параметры  $a_m$  определяют радиальную шкалу для балджа и гало. В качестве подсистемы у балджа будем выделять ядро, плотность в котором также определяется законом (1) со шкалой  $a_n$ . Распределение плотности для балджа по закону (1) ограничено радиусом  $r < (r_b)_{max}$ . В области  $r > (r_b)_{max}$  закон (1) экспоненциально усекается, поэтому масса балджа  $M_b$  конечна, а масса гало  $M_h(r)$  увеличивается с ростом радиуса. В случае экспоненциального профиля поверхностной плотности  $\sigma = \sigma_0 \exp(-r/L)$  для массы диска имеем  $M_d = 2\pi L^2 \sigma_0$ , причем примерно 95% массы диска сосредоточено внутри  $r < 4L$ . Относительная масса гало рассчитывается внутри определенного радиуса  $\mu(r) = M_h(r)/M_d$ .

В начальный момент времени задается осесимметричный профиль поверхностной плотности  $\sigma(r)$ . Распределение объемной плотности в диске  $\rho(r, z)$  в вертикальном направлении определяется условием равновесия системы. Вертикальный профиль плотности получаем в результате решения уравнения [2; 9]:

$$\frac{d^2\rho}{dz^2} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} \right)^2 + \frac{1}{c_z^2} \frac{dc_z}{dz} \frac{d\rho}{dz} + \frac{4\pi G}{c_z^2} \rho(\rho + \rho_s) - \frac{\rho}{rc_z^2} \frac{dV_c^2}{dr}, \quad (2)$$

с учетом условий  $\frac{d\rho(0)}{dz} = 0$ ,  $\int_{-\infty}^{\infty} \rho(r, z) dz = 0$  для заданных распределений поверхностной плотности  $\sigma(r)$ , дисперсии вертикальных скоростей звезд  $c_z(r, z)$ , плотности вещества в сфероидальной компоненте  $\rho_s(r, z)$  и круговой скорости вращения  $V_c(r)$ , которая определяется гравитационным потенциалом  $\Phi$

$$V_c = \sqrt{r \partial \Phi / \partial r}.$$

В случае  $dc_z/dz = 0$ ,  $\rho_s = 0$ ,  $V_c = const$  решением уравнения (2) является

$$\rho(z) = \frac{\sigma}{2z_0} \operatorname{ch}^{-2}(z/z_0) \quad (3)$$

с характерной вертикальной шкалой  $z_0 = \sqrt{c_z^2/2\pi G\rho(0)} = c_z^2/\pi G\sigma$ .

Начальное состояние диска задается равновесным в радиальном и вертикальном направлении, но слабо гравитационно неустойчивым: принимается  $Q_T = c_r/c_T < 1$  в области  $L \leq r \leq 2L$  ( $c_T = 3.36G\sigma/\kappa$ ,  $\kappa = 2\Omega\sqrt{1 + rd\Omega/(2\Omega dr)}$  – эпициклическая частота). В процессе развития неустойчивости происходит увеличение дисперсии скоростей, что говорит о разогреве системы. Задавая в качестве начального состояния  $Q_T \gtrsim 1$ , производится поиск минимально необходимого значения дисперсии радиальных скоростей для гравитационной устойчивости диска.

Гравитационная сила от частиц диска рассчитывается методом TREEcode [3]. Число частиц в моделях  $N \geq 10^5$ .

## 2. Результаты моделирования

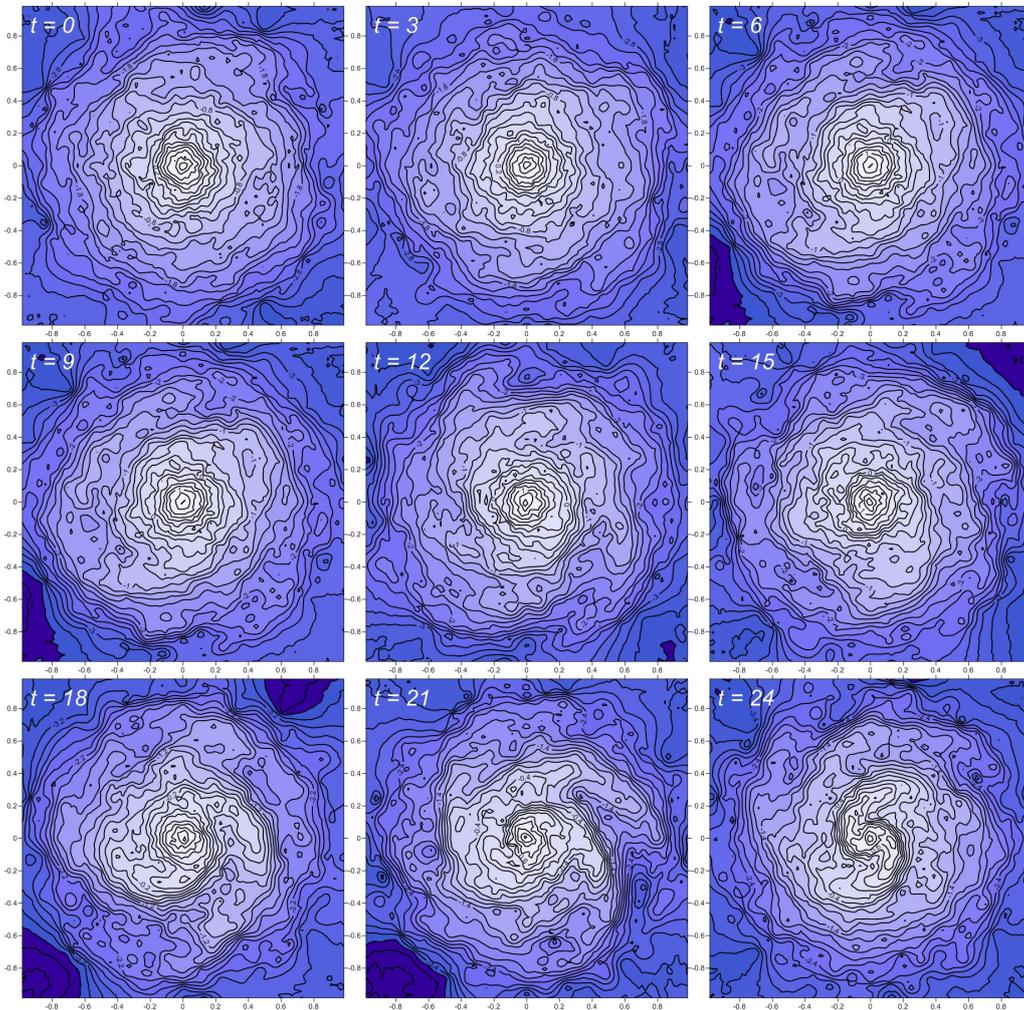


Рис. 2. Логарифм поверхностной плотности  $\ln(\sigma(r, \phi))$  в различные моменты времени  $t$

В гравитационно неустойчивом диске происходит формирование спиральных возмущений, которые на нелинейной стадии способны разогревать звездный диск, увеличивая дисперсии скоростей звезд. Рождение спиральных волн звездной плотности может приводить к образованию сложных структур в газовой подсистеме [12].

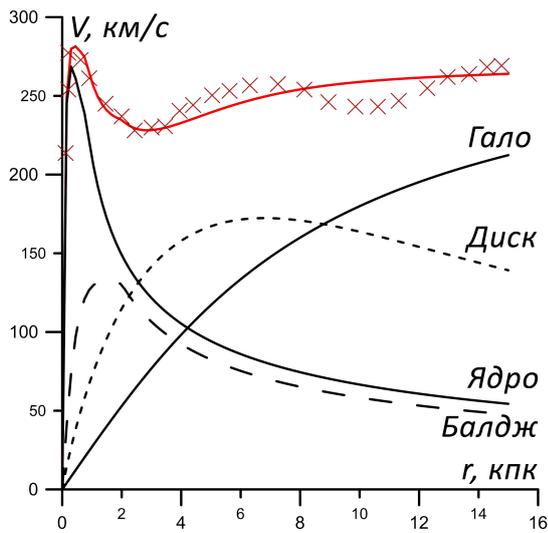


Рис. 3. Кривая вращения диска и компоненты ее составляющие

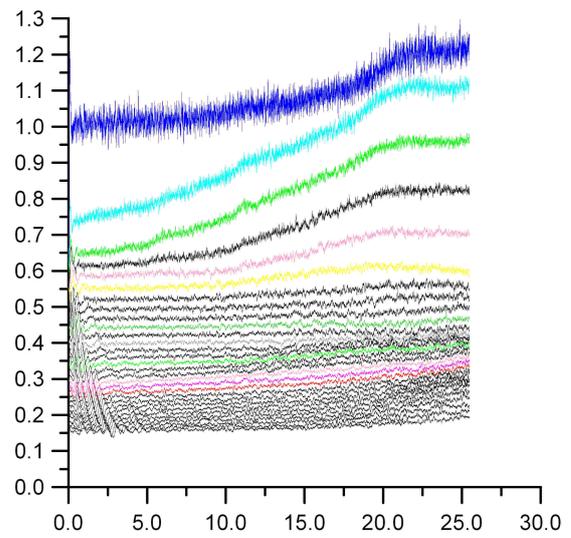


Рис. 4. Зависимость дисперсии радиальных скоростей  $c_r$  от времени  $t$  на различных радиусах  $r$  диска

На рисунке 2 в различные моменты времени  $t$  показан логарифм поверхностной плотности  $\ln(\sigma(r, \phi))$  в звездном диске. Из рисунка видно, что в процессе эволюции системы в диске начинают формироваться спиральные рукава.

На рисунке 3 приведена модельная кривая вращения (верхняя сплошная линия), разложенная по компонентам (черные линии), крестиками обозначена наблюдаемая кривая вращения из работы [16], поднятая пропорционально таким образом, чтобы в окрестности Солнца выполнялось равенство скорости вращения по данным наблюдений мазеров  $V = 257$  км/с [5; 6]. На следующем рисунке 4 изображены радиальные дисперсии скоростей  $c_r$  в зависимости от времени  $t$ , полученные в результате динамического моделирования. Верхние линии соответствуют центральным областям, вниз идет движение по радиусу к периферии с некоторым шагом. Из построенной зависимости виден значительный разогрев в области звездного диска, особенно в центральных его областях.

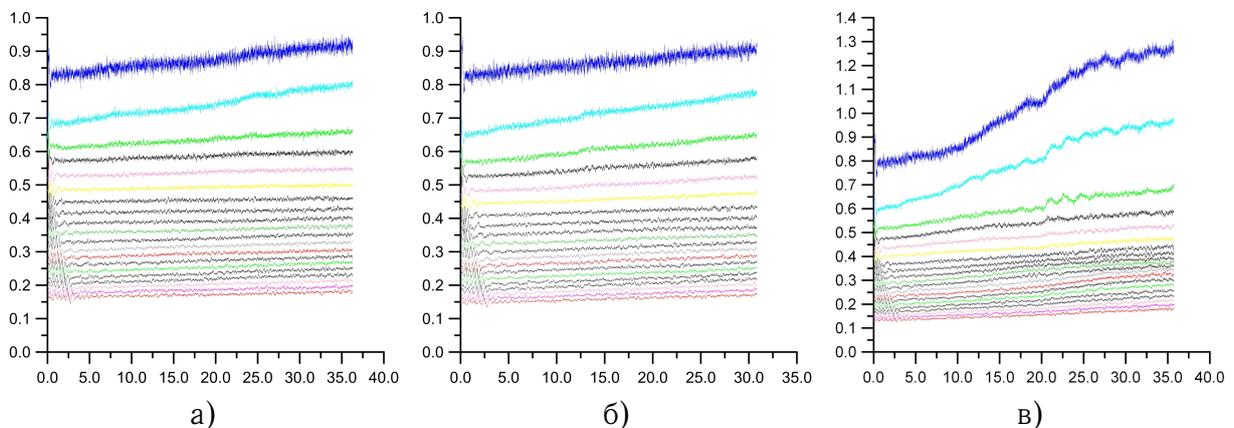


Рис. 5. Зависимость дисперсии радиальных скоростей  $c_r$  от времени  $t$  на различных радиусах  $r$  диска для различных начальных значений дисперсии: а)  $c_{r0} = 104$  км/с; б)  $c_{r0} = 96$  км/с; в)  $c_{r0} = 86$  км/с

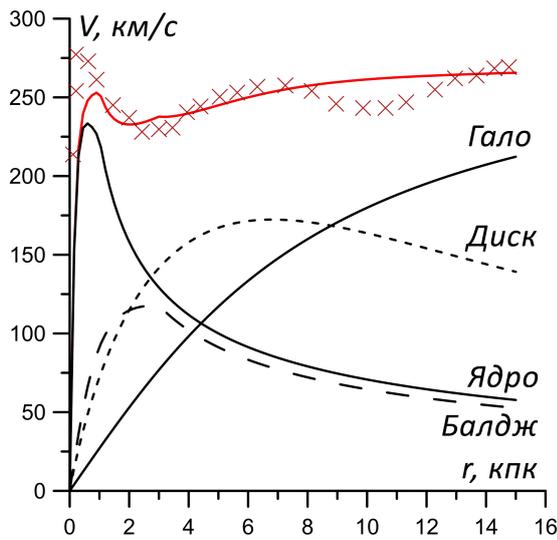


Рис. 6. Сравнение круговой скорости вращения Галактики с наблюдаемой скоростью вращения газового диска.

Приведен вклад от различных компонент

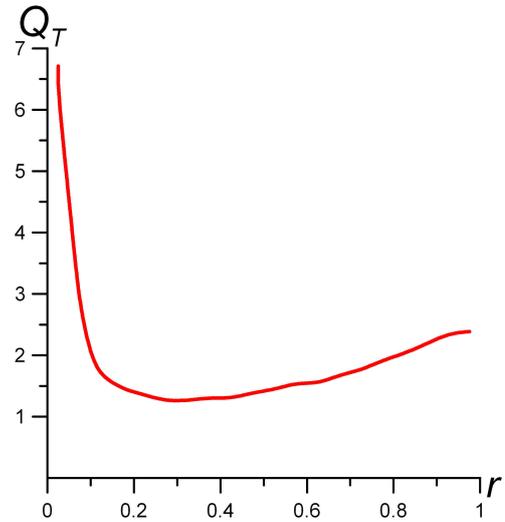


Рис. 7. Зависимость параметра Тоомре  $Q_T$  от радиуса диска  $r$

В работе варьировался начальный радиальный профиль дисперсий радиальных скоростей, который в модели задавался следующим законом:

$$c_r(r) = c_{r0} \exp \left\{ -\frac{r}{L_r} \right\}, \quad (4)$$

где  $c_{r0}$  — значение дисперсии радиальных скоростей в центре диска; шкала дисперсии  $L_r$  выбиралась таким образом, чтобы значение модельной дисперсии на расстоянии 8 кпк соответствовало наблюдаемому значению 38 км/с. Таким образом был построен звездный диск на границе гравитационной устойчивости (рис. 5).

На рисунке 6 изображена модельная кривая вращения, скорость вращения вещества газа в центральной области относительно кривой на предыдущем рисунке 3 снижена приблизительно на 15–20 %. Приведем также на рисунке 7 зависимость построенного в базовой модели параметра Тоомре  $Q_T$  от радиуса Галактики  $r$ .

Таблица 1

**Сравнение параметров диска на границе гравитационной устойчивости**

Параметр	Скорость вращения $V_{\odot} = 220$ км/с	Скорость вращения $V_{\odot} = 257$ км/с
$M_h$	$7.04 \times 10^{10} M_{\odot}$	$10.6 \times 10^{10} M_{\odot}$
$a_h$	6.3 кпк	6.3 кпк
$V_{*\odot}$	195 кпк/с	250 кпк/с
$L$	3 кпк	3 кпк
$M_d$	$\leq 4.4 \times 10^{10} M_{\odot}$	$\leq 5.07 \times 10^{10} M_{\odot}$
$c_{r\odot}$	38 кпк/с	38 кпк/с
$z_0$	0.5 кпк	0.42 кпк
$\sigma_{\odot}$	$58 M_{\odot} / \text{пк}^2$	$66 M_{\odot} / \text{пк}^2$
$M_b$	$\leq 1.2 \times 10^{10} M_{\odot}$	$\leq 2.1 \times 10^{10} M_{\odot}$
$a_b$	0.2 кпк	0.2 кпк

Из рисунка 5 видно, что уменьшение центральной дисперсии приводит к развитию неустойчивости и центральная часть диска начинает сильно разогреваться. Будем считать модель, приведенную на рисунке 5а, находящейся на границе устойчивости, поскольку небольшое изменение параметра дисперсии приводит к разогреву диска. Оценим физические параметры для полученной базовой модели и сравним их с полученными ранее в работе [11]. Результаты приведены в таблице 1.

Здесь  $M_h$  — масса темного гало;  $a_h$  — шкала гало (в работе не варьировалась);  $V_{\star\odot}$  — азимутальная скорость вращения на расстоянии  $R = 8-8.5$  кпк, где находится Солнце;  $L$  — шкала звездного диска;  $M_d$  — масса звездного диска;  $c_{r\odot}$  — дисперсия радиальных скоростей на солнечном радиусе диска;  $z_0$  — вертикальная шкала звездного диска;  $\sigma_{\odot}$  — поверхностная плотность на солнечном радиусе;  $M_b$  — масса балджа;  $a_b$  — шкала балджа.

Согласие с наблюдаемыми распределениями дисперсий скоростей звезд получается в моделях со значениями поверхностной плотности в окрестности Солнца  $66M_{\odot}/\text{пк}^2$ , полная масса диска при этом не превышает  $5 \times 10^{10}M_{\odot}$ . Внутри радиуса  $r < 12$  кпк относительная масса гало составляет  $\mu(r) = M_h(r)/M_d = 2$ , что превышает значение, полученное в работе [11], где коэффициент  $\mu = 1.6$ .

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-02-00685.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман, А. М. Физика галактических дисков / А. М. Фридман, А. В. Хоперсков. — М. : Физматлит, 2011. — 645 с.
2. Bahcall, J. N. Prominent spiral arms in the gaseous outer galaxy disks / J. N. Bahcall // *Astrophys. J.* — 1984. — Vol. 276. — P. 156–168.
3. Barnes, J. E. Error analysis of a tree code / J. E. Barnes, P. Hut // *J. Suppl. Ser.* — 1989. — Vol. 70. — P. 389–417.
4. Beers, T. C. Kinematics of metal-poor stars in the galaxy / T. C. Beers, J. Sommer-Larsen // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1995. — Vol. 96. — P. 175–221.
5. Bobylev, V. V. Galactic parameters from masers with trigonometric parallaxes / V. V. Bobylev, A. T. Bajkova // *MNRAS.* — 2010. — Issue 3. — Vol. 408. — P. 1788–1795.
6. Bobylev, V. V. Galactic Kinematics from OB3 Stars with Distances Determined from Interstellar Ca II Lines / V. V. Bobylev, A. T. Bajkova // *Astronomy Letters.* — 2011. — Vol. 37, № 8. — P. 526–535.
7. Brand, J. The Velocity Field of the Outer Galaxy / J. Brand, L. Blitz // *Astron. and Astrophys.* — 1993. — Vol. 275. — P. 67–90.
8. Clemens, D. P. Massachusetts-Stony Brook Galactic plane CO survey – The Galactic disk rotation curve / D. P. Clemens // *Astrophys. J.* — 1985. — Vol. 295. — P. 422–428.
9. Khoperskov, A. V. Numerical modelling of the vertical structure and dark halo parameters / A. V. Khoperskov, D. Bizyaev, N. Tiurina, M. A. Butenko // *Astronomische Nachrichten.* — 2010. — Vol. 331, № 7. — P. 731–745.
10. Khoperskov, A. V. Dynamics of Gaseous Disks in a Non-axisymmetric Dark Halo / A. V. Khoperskov, M. A. Eremin, S. A. Khoperskov, M. A. Butenko, A. G. Morozov // *Astronomy Letters.* — 2012. — Vol. 56, № 1. — P. 16–28.
11. Khoperskov, A. V. A Dynamical Model of the Galaxy / A. V. Khoperskov, N. V. Tyurina // *Astronomy Reports.* — 2003. — Issue 6. — Vol. 47. — P. 443–457.

12. Khoperskov, S. A. Polygonal Structures in a Gaseous Disk Numerical Simulations / S. A. Khoperskov, A. V. Khoperskov, M. A. Eremin, M. A. Butenko // *Astronomy Letters*. — 2011. — Vol. 37, № 8. — P. 563–575.
13. Khoperskov, A. V. Minimum Velocity Dispersion in Stable Stellar Disks. Numerical Simulations / A. V. Khoperskov, A. V. Zasov, N. V. Tyurina // *Astronomy Reports*. — 2003. — Issue 5. — Vol. 47. — P. 357–376.
14. Lewis, J. R. Kinematics and chemical properties of the old disk of the Galaxy / J. R. Lewis, K. C. Freeman // *Astrophys. J.* — 1989. — Vol. 97. — P. 139–162.
15. Reid, M. J. Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. VI. Galactic Structure, Fundamental Parameters, and Noncircular Motions / M. J. Reid, K. M. Menten, X. W. Zheng, A. Brunthaler, L. Moscadelli, Y. Xu, B. Zhang, M. Sato, M. Honma, T. Hirota, K. Hachisuka, Y. K. Choi, G. A. Moellenbrock, A. Bartkiewicz // *APJ*. — 2009. — Issue 1. — Vol. 700. — P. 137–148.
16. Sofue, Y. The Most Completely Sampled Rotation Curves for Galaxies / Y. Sofue // *Astrophys. J.* — 1996. — Vol. 458. — P. 120–131.
17. Sofue, Y. Central Rotation Curves of Spiral Galaxies / Y. Sofue, Y. Tutui, M. Honma, A. Tomita, T. Takamiya, J. Koda, Y. Takeda // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 523. — P. 136–146.
18. Zasov, A. V. Stellar Velocity Dispersion and Mass Estimation for Galactic Disks / A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, N. V. Tyurina // *Astronomy Letters*. — 2004. — Vol. 30. — P. 593–602.

### **REFERENCES**

1. Fridman A.M., Khoperskov A.V. *Fizika galakticheskikh diskov* [Physics of galactic disks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 645 p.
2. Bahcall J.N. Prominent spiral arms in the gaseous outer galaxy disks. *Astrophys. J.*, 1984, vol. 276, pp. 156–168.
3. Barnes J.E., Hut P. Error analysis of a tree code. *J. Suppl. Ser.*, 1989, vol. 70, pp. 389–417.
4. Beers T.C., Sommer-Larsen J. Kinematics of metal-poor stars in the galaxy. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1995, vol. 96, pp. 175–221.
5. Bobylev V.V., Bajkova A.T. Galactic parameters from masers with trigonometric parallaxes. *MNRAS*, 2010, issue 3, vol. 408, pp. 1788–1795.
6. Bobylev V.V., Bajkova A.T. Galactic Kinematics from OB3 Stars with Distances Determined from Interstellar Ca II Lines. *Astronomy Letters*, 2011, vol. 37, no. 8, pp. 526–535.
7. Brand J., Blitz L. The Velocity Field of the Outer Galaxy. *Astron. and Astrophys.*, 1993, vol. 275, pp. 67–90.
8. Clemens D.P. Massachusetts-Stony Brook Galactic plane CO survey – The Galactic disk rotation curve. *Astrophys. J.*, 1985, vol. 295, pp. 422–428.
9. Khoperskov A.V., Bizyaev D., Tyurina N., Butenko M.A. Numerical modelling of the vertical structure and dark halo parameters. *Astronomische Nachrichten*, 2010, vol. 331, no. 7, pp. 731–745.
10. Khoperskov A.V., Eremin M.A., Khoperskov S.A., Butenko M.A., Morozov A.G. Dynamics of Gaseous Disks in a Non-axisymmetric Dark Halo. *Astronomy Letters*, 2012, vol. 56, no. 1, pp. 16–28.
11. Khoperskov A.V., Tyurina N.V. A Dynamical Model of the Galaxy. *Astronomy Reports*, 2003, issue 6, vol. 47, pp. 443–457.
12. Khoperskov S.A., Khoperskov A.V., Eremin M.A., Butenko M.A. Polygonal Structures in a Gaseous Disk Numerical Simulations. *Astronomy Letters*, 2011, vol. 37, no. 8, pp. 563–575.
13. Khoperskov A.V., Zasov A.V., Tyurina N.V. Minimum Velocity Dispersion in Stable Stellar Disks. Numerical Simulations. *Astronomy Reports*, 2003, issue 5, vol. 47, pp. 357–376.
14. Lewis J.R., Freeman K.C. Kinematics and chemical properties of the old disk of the Galaxy. *Astrophys. J.*, 1989, vol. 97, pp. 139–162.

15. Reid M.J., Menten K.M., Zheng X.W., Brunthaler A., Moscadelli L., Xu Y., Zhang B., Sato M., Honma M., Hirota T., Hachisuka K., Choi Y.K., Moellenbrock G.A., Bartkiewicz A. Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. VI. Galactic Structure, Fundamental Parameters, and Noncircular Motions. *APJ*, 2009, issue 1, vol. 700, pp. 137–148.
16. Sofue Y. The Most Completely Sampled Rotation Curves for Galaxies. *Astrophys. J.*, 1996, vol. 458, pp. 120–131.
17. Sofue Y., Tutui Y., Honma M., Tomita A., Takamiya T., Koda J., Takeda Y. Central Rotation Curves of Spiral Galaxies. *Astrophys. J.*, 1999, vol. 523, pp. 136–146.
18. Zasov A.V., Khoperskov A.V., Tyurina N.V. Stellar Velocity Dispersion and Mass Estimation for Galactic Disks. *Astronomy Letters*, 2004, vol. 30, pp. 593–602.

## DYNAMIC MODELING FOR ESTIMATING THE GALACTIC MASS HALO ACCORDING TO NEW DATA OF THE MASERS KINEMATICS

**Butenko Maria Anatolievna**

Lecturer, Department of Information System and Computer Modeling  
Volgograd State University  
butenkoma@gmail.com, infomod@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Khoperskov Alexander Valentinovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor, Department of Information System and Computer Modeling  
Volgograd State University  
ka@infomod.ru, infomod@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** Observational data on the kinematics of the masers with measured trigonometric parallaxes lead to a revision of the quantitative parameters of our Galaxy rotation curve. In particular, the rotation velocity  $V$  near of the Sun, apparently, more than 250 km/s for the distance to the galactic center  $R = 8–8.5$  kpc. The choice of velocity  $V$  and radius  $R$  values influences on decomposition of gravitational potential on the main subsystems' result. In particular, there is a problem of specification of the main galactic components' masses — disk and dark halo. The masers kinematics data of the bulge and bar parameters, and vertical structure of the stellar disk were also used. The series of the Galaxys dynamical models are constructed assuming that the entire disk is near the gravitational-stability limit. On the basis of these models have been new estimates of the dark halo mass at different distances from the galaxy center within the radius of 12 kpc.

Estimate mass values obtained with observational data of masers give the following results. Inside radius  $r < 12$  kpc relative mass of the halo is  $\mu(r) = M_h(r)/M_d = 2$ , which is 25% higher than the previously obtained value of the coefficient  $\mu = 1.6$ . Accordingly the observed distributions of dispersions stars velocities obtained in models with the values of the surface density in the solar neighborhood  $66M_\odot/\text{pc}^2$ , the total mass of a disk thus doesn't exceed  $\times 10^{10}$  of  $M_\odot$ .

**Key words:** Galaxy, Milky Way, rotation curve, masers,  $N$ -body simulation.