



УДК 524
ББК 22.18

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА GRVOLSU ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСКОВЫХ ГРАВИТИРУЮЩИХ СИСТЕМ¹

Мухатов Данияр Сергеевич

Магистрант направления «Информатика и вычислительная техника»
Волгоградского государственного университета
mukhatov-daniyar@rambler.ru
Проспект Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Засов Анатолий Владимирович

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии
Московского государственного университета
zasov@sai.msu.ru
Университетский проспект, 13, 119234 г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Описана информационная система для моделирования кривых вращения дисковых гравитирующих систем, объемной и поверхностной плотностей компонент. Программа GRVolsU предназначена для построения круговой скорости в плоскости диска по параметрам, определяющим распределение гравитирующей плотности в балдже, дисковых компонентах и гало. Имеется возможность фитирования модельных зависимостей под наблюдаемые кривые вращения.

Ключевые слова: информационная система, модели дисковых галактик, кривые вращения, балдж, темное гало.

Введение

Для моделирования кривых вращения дисковых галактик в 1994 году А.Н. Бурлаком была создана программа Galaxies Rotation (GR), в которой реализованы наиболее востребованные функции для моделирования, но существенным недостатком программы является ее реализация на языке Pascal под операционной системой MS-DOS, что

создает большие трудности для ее использования на современной вычислительной технике и не допускает ее модификации. В работе описаны результаты разработки аналога GR, в котором реализованы все ее функции, а так же добавлены новые возможности для моделирования. Востребованность программы GR в научной работе связана с необходимостью построения кривой вращения и ее декомпозиции при построении моделей S-галактик [12; 15; 16]. Декомпозиция кривой вращения с использованием численного динамического моделирования N-тел [5; 10; 19] позволяет получить оценки темного гало [11; 20]. Свойства темного гало в существенной мере определяют динамические процессы в звездном [13], газовом дисках [9] и характеристики спиральной структуры [1]. Для линзовидных галактик (S0) особое значение приобретает корректный учет толщины диска [17; 18].

Данные наблюдений пока не позволяют сделать однозначный выбор в пользу той или иной модели темного гало, поэтому при построении модели кривой вращения важно иметь различные модели гало, не ограничиваясь только квазиизотермическим гало [5], реализованным в GR. В связи с обнаружением значительного числа звездных дисков с неэкспоненциальным профилем поверхностной яркости [7] возникает необходимость строить круговую скорость вращения $V_c(r)$ с учетом произвольного профиля плотности вещества в звездном диске посредством задания табличных функций.

1. Модели компонент

Круговая скорость зависит от баланса центробежной и гравитационных сил [5]

$$\frac{V^2(r)}{r} = -\frac{\partial\Phi(r, z=0)}{\partial r}, \quad (1)$$

где $\Phi(r, z)$ — суммарный осесимметричный гравитационный потенциал галактики, определяемый уравнением Пуассона

$$\Delta\Phi(r, z) = -4\pi G\rho(r, z), \quad (2)$$

где ρ — объемная плотность вещества, определяемая всеми основными компонентами: дисковыми, балджем и гало. Под декомпозицией круговой скорости понимается представление в виде суммы по всем компонентам:

$$V_c(r) = \sqrt{\sum_{i=1}^M V_{ci}^2(r)}. \quad (3)$$

Закон Кинга для плотности балджа $\rho_b(r) = \rho_{b0}/(1 + (r/b)^2)$ хорошо описывает наблюдаемые профили яркости балджей на малых расстояниях от центра $r \lesssim b$ [8]. На больших расстояниях яркость убывает быстрее, и закон Кинга нуждается в усечении, начиная с некоторого значения r_b^{\max} .

Закон Вокулера для распределения поверхностной яркости в центральной области был получен из наблюдений эллиптических галактик и балджей дисковых галактик [3]. В предположении пропорциональности поверхностной яркости величине поверхностной плотности вещества σ имеем $\sigma_b(r) = \sigma_{b0} \exp(-7.67(r/R_e)^{1/4})$, где σ_{b0} — центральная поверхностная плотность балджа, R_e — эффективный радиус, в котором содержится половина массы балджа.

В качестве законов усечения распределений плотности использовались: резкое усечение, линейное усечение, экспоненциальное усечение.

Реализованы следующие модели гало:

- Квазиизотермическая модель гало с поверхностной плотностью $\rho_h(r) = \rho_0 / (1 + (r/a)^2)$ [11].
- Модель гало Баркета $\rho_h(r) = \rho_0 / ((1 + r/a)(1 + (r/a)^2))$ [2].
- Модель гало Наварро-Френка-Уайта построена на основе данных космологических численных экспериментов $\rho_{NWF}(r) = \rho_0 / ((r/a)(1 + r/a)^2)$ [14].
- Модель экспоненциального темного гало $\rho_{DH}(r) = (M_{DH}) / (8\pi a^3 e) \cdot \exp(-r/a)$ [4].
- Логарифмический потенциал гало имеет вид $\Psi_h = v_h^2 \ln(r^2 + a^2)$.
- Модель Эйнасто $\rho_h(r) = \rho_0 \exp(-(2/n)((r/a)^n - 1))$.
- Профиль распределения плотности вдоль радиуса в модели Ларса Хернкуиста $\rho_h(r) = (M/2\pi)(a/r) / ((r+a)^3)$ [6].

Потенциал для заданной плотности рассчитывается на основе уравнения (2). Важной характеристикой является масса i -компоненты внутри радиуса: $M_i(r) = \int_{\xi < r} \rho_i(\xi, z) dV$.

Для дисковых компонент предусмотрены:

- Модель тонкого диска с поверхностной плотностью $\sigma(r) = \sigma_0 \exp(-r/r_d)$ и радиальной шкалой r_d .
- Модель толстого экспоненциального диска с распределением объемной плотности $\rho(r, z) = \rho_0 \exp(-r/r_d) \text{ch}^{-2}(z/h)$ с вертикальной шкалой h .
- Модель с произвольным распределением поверхностной плотности $\sigma_j = \sigma(r_j)$, $j = 1, \dots, m$.

К числу основных входных физических параметров относятся: a , b , r_b^{\max} , r_d , h , σ_0 , ρ_{i0} . Дополнительным набором параметров является совокупность величин, определяющих численные алгоритмы. В третий набор входят характеристики информационной системы, связанные с представлением результатов моделирования.

2. Информационная система

Для численного вычисления круговой скорости вращения $V_c(r)$ всей системы и отдельных компонент V_{ci} , объемной плотности вещества $\rho = \sum_i \rho_i$, поверхностной плотности вещества $\sigma = \sum_i \sigma_i$, масс компонент $M_i(r)$. Для физических величин в информационной системе принята следующая система единиц: $[r] = \text{кпк}$, $[\text{масса}] = M_\odot$, $[\text{скорость}] = \text{км/с}$, $[\text{пространственная шкала компоненты}] = \text{кпк}$, $[\text{объемная плотность}] = M_\odot / \text{пк}^3$, $[\text{поверхностная плотность}] = M_\odot / \text{пк}^2$.

На рисунке 1 представлена диаграмма вариантов использования, отображающая общее представление информационной системы GRVoISU. На рисунке 2 представлена общая блок-схема программы. Каждый блок программы имеет очень сложную внутреннюю структуру.



Рис. 1. UML диаграмма вариантов использования

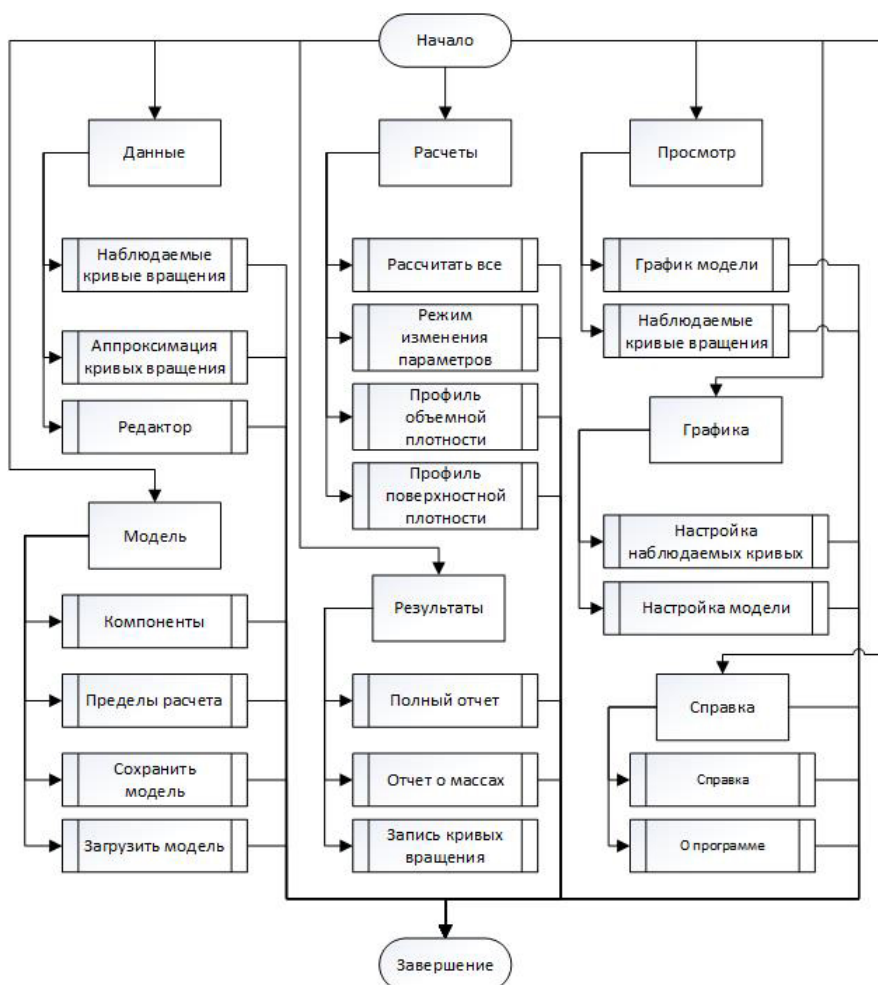


Рис. 2. Общая блок-схема

После открытия программы GRVoISU перед вами появляется рабочая область (рис. 3). Она представляет собой главное окно программы, вверху которой находится набор функций, которые предназначены для выполнения любых задач, связанных с моделированием.

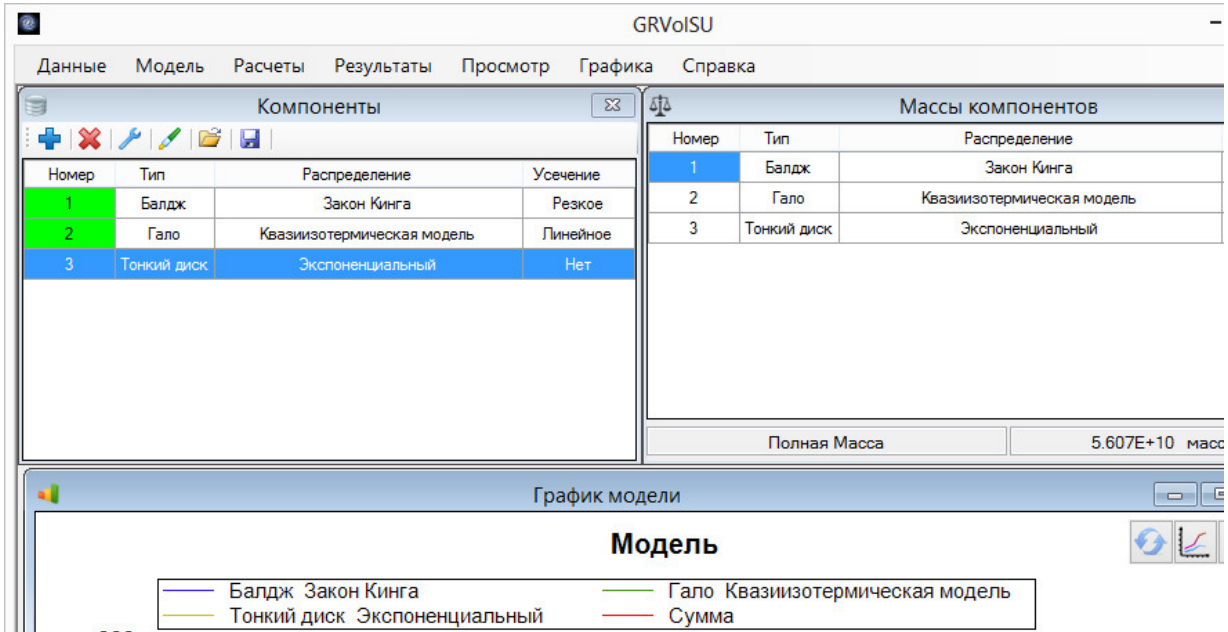


Рис. 3. Рабочая область

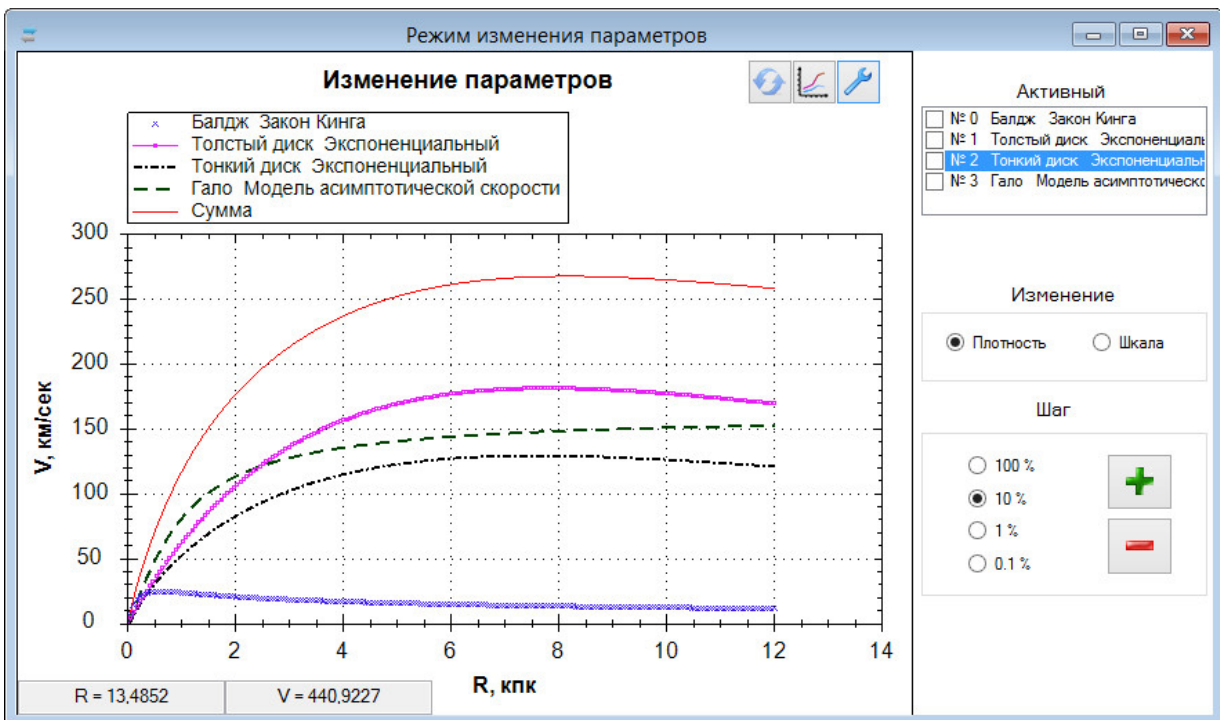


Рис. 4. Режим изменения параметров

Поле «данные» имеет три вложенных функции: наблюдаемые кривые вращения; аппроксимация кривых вращения; редактор. Поле «модель» имеет четыре вложенные функции: компоненты; пределы расчета; сохранить модель; загрузить модель. Функция создания нового компонента, представляет собой диалоговое окно, в котором пользователь, по выбору, определяет тип компонента, модель распределения вещества и закон усечения плотности. Функции загрузки и сохранения модели предназначены для сохранения и загрузки расчетной модели в отдельном файлом формата «.mod». Файл содержит все данные расчета: предел, количество точек, список компонент и их параметры, а так же графические настройки. Поле «расчет» имеет четыре вложенные функции: рассчитать все; режим изменения параметров; профиль объемной плотности; профиль поверхностной плотности.

Поле «результаты» имеет три вложенных функции: полный отчет; отчет о массах; запись кривых вращения. Поле «просмотр» имеет две вложенных функции: график модели; наблюдаемые кривые вращения.

Заключение

Для верификации было проведено сравнение результатов расчетов в системах GRVolSU и GR. Вычисления среднеквадратического отклонения показало для различных компонент различие между GRVolSU и GR порядка 1%. Использование объектно-ориентированного языка программирования C#, выполняемого в среде .NET Framework, предоставляет для исследователя современный программный продукт с развитым графическим интерфейсом и широким набором галактических компонент. В частности, система GR содержит 1 модель гало, а в GRVolSU реализовано 7 моделей гало. Важным свойством GRVolSU является открытая архитектура информационной системы, позволяющая расширять функционал.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 12-02-00685-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко, М. А. Полигональные структуры в газовых дисках: зависимость от числа Маха / М. А. Бутенко, С. А. Хоперсков // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 1, Математика. Физика. — 2011. — № 1 (14). — С. 81–85.
2. Burkert, A. The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies / A. Burkert // *Astrophysical Journal*. — 1995. — V. 447. — P. 25–28.
3. de Vaucoulers, G. On the distribution of mass and luminosity in elliptical galaxies / G. de Vaucoulers // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1953. — V. 113. — P. 134–161.
4. Fux, R. 3D self-consistent N-body barred models of the Milky Way. I. Stellar dynamics / R. Fux // *Astronomy and Astrophysics*. — 1997. — V. 327. — P. 983–1003.
5. Fridman, A. M. Physics of Galactic Disks / A. M. Fridman, A. V. Khoperskov. — Cambridge : Cambridge International Science Publishing, 2012. — 756 p.
6. Hernquist, L. An analytical model for spherical galaxies and bulges / L. Hernquist // *Astrophysical Journal*. — 1990. — V. 356. — P. 359–364.
7. Ilyina, M. A. Properties and structural features of early-type disk galaxies with multi-tier disks / M. A. Ilyina, O. K. Sil'chenko // *Astronomical & Astrophysical Transactions*. — 2012. — Issue 2. — P. 313–318.

8. King, I. R. The structure of star cluster. III. Some simple dynamical models / I. R. King // *Astrophysical Journal*. — 1966. — V. 71. — P. 64–79.
9. 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 Reports*. — 2012. — V. 56, № 1. — P. 19–31.
10. Khoperskov, A. V. High resolution simulations of unstable modes in a collisionless disc / A. V. Khoperskov, A. Just, V. I. Korchagin, M. A. Jalali // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — V. 473, № 1. — P. 31–40.
11. Khoperskov, A. V. Estimating the masses of the spherical and disk components of galaxies via numerical simulations / A. V. Khoperskov, A. V. Zasov, N. V. Tyurina // *Astronomy Reports*. — 2001. — V. 45, № 3. — P. 180–194.
12. Khoperskov, A. V. A Dynamical Model of the Galaxy / A. V. Khoperskov, N. V. Tyurina // *Astronomy Reports*. — 2003. — Issue 6, V. 47. — P. 443–457.
13. Khoperskov, A. V. Interaction between collisionless galactic discs and non-axisymmetric dark matter haloes / A. V. Khoperskov, S. A. Khoperskov, A. V. Zasov, D. V. Bizyaev, S. S. Khrapov // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Issue 2, V. 431. — P. 1230–1239.
14. Navarro, J. F. Universal Density Profile from Hierarchical Clustering / J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. A. White // *Astrophys. J.* — 1997. — V. 490. — P. 493–508.
15. Saburova, A. S. On the mass and density of the stellar disk of M33 / A. S. Saburova, A. V. Zasov // *Astronomy Letters*. — 2012. — Issue 3, V. 38. — P. 139–146.
16. Shatskiy, A. A. A new integral representation for reconstructing the density distribution of matter in the discs of spiral galaxies using the rotation velocity curve in it / A. A. Shatskiy, I. D. Novikov, O. K. Silchenko, J. Hansen, I. Yu. Katkov // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — Issue 4, V. 420. — P. 3071–3080.
17. Zasov, A. V. Kinematics and stellar disk modeling of lenticular galaxies / A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, I. Yu. Katkov, V. L. Afanasiev, S. S. Kaisin // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — Issue 4, V. 67. — P. 362–373.
18. Zasov, A. V. Gravitational stability and dynamical overheating of galactic stellar disks / A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, A. S. Saburova // *Astronomy Letters*. — 2011. — Issue 6, V. 37. — P. 374–384.
19. Zasov, A. V. Galaxy Halo Disk Mass Ratios Estimated from a Local Disk Stability Criterion / A. V. Zasov // *Soviet Astronomy Letters*. — 1985. — V. 11. — P. 307–310.
20. Zasov, A. V. Stellar Velocity Dispersion and Mass Estimation for Galactic Disks / A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, N. V. Tyurina // *Astronomy Letters*. — 2004. — V. 30. — P. 593–602.

REFERENCES

1. Butenko M.A., Khoperskov S.A. Poligonal'nye struktury v gazovykh diskakh: zavisimost' ot chisla Macha [Polygonal structures in gaseous disks: dependence on the Mach number]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 1, Matematika. Fizika* [Journal of Volgograd State University, series 1, Mathematics. Physics], 2011, no. 1 (14), pp. 81–85.
2. Burkert A. The Structure of Dark Matter Halos in Dwarf Galaxies. *Astrophysical Journal*, 1995, vol. 447, pp. 25–28.
3. de Vaucouleurs G. On the distribution of mass and luminosity in elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1953, vol. 113, pp. 134–161.
4. Fux R. 3D self-consistent N-body barred models of the Milky Way. I. Stellar dynamics. *Astronomy and Astrophysics*, 1997, vol. 327, pp. 983–1003.
5. Fridman A.M., Khoperskov A.V. *Physics of Galactic Disks*. Cambridge, Cambridge International Science Publishing, 2012. 756 p.

6. Hernquist L. An analytical model for spherical galaxies and bulges. *Astrophysical Journal*, 1990, vol. 356, pp. 359–364.
7. Ilyina M.A., Sil'chenko O.K. Properties and structural features of early-type disk galaxies with multi-tier disks. *Astronomical & Astrophysical Transactions*, 2012, issue 2, pp. 313–318.
8. King I.R. The structure of star cluster. III. Some simple dynamical models. *Astrophysical Journal*, 1966, vol. 71, pp. 64–79.
9. Khoperskov A.V., Eremin M.A., Khoperskov S.A., Butenko M.A., Morozov A.G. Dynamics of Gaseous Disks in a Non-axisymmetric Dark Halo. *Astronomy Reports*, 2012, vol. 56, no. 1, pp. 19–31.
10. Khoperskov A.V., Just A., Korchagin V.I., Jalali M.A. High resolution simulations of unstable modes in a collisionless disc. *Astronomy and Astrophysics*, 2007, vol. 473, no. 1, pp. 31–40.
11. Khoperskov A.V., Zasov A.V., Tyurina N.V. Estimating the masses of the spherical and disk components of galaxies via numerical simulations. *Astronomy Reports*, 2001, vol. 45, no. 3, pp. 180–194.
12. Khoperskov A.V., Tyurina N.V. A Dynamical Model of the Galaxy. *Astronomy Reports*, 2003, issue 6, vol. 47, pp. 443–457.
13. Khoperskov A.V., Khoperskov S.A., Zasov A.V., Bizyaev D.V., Khrapov S.S. Interaction between collisionless galactic discs and non-axisymmetric dark matter haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, issue 2, vol. 431, pp. 1230–1239.
14. Navarro J.F., Frenk C.S., White S.A. Universal Density Profile from Hierarchical Clustering. *Astrophys. J.*, 1997, vol. 490, pp. 493–508.
15. Saburova A.S., Zasov A.V. On the mass and density of the stellar disk of M33. *Astronomy Letters*, 2012, issue 3, vol. 38, pp. 139–146.
16. Shatskiy A.A., Novikov I.D., Silchenko O.K., Hansen J., Katkov I.Yu. A new integral representation for reconstructing the density distribution of matter in the discs of spiral galaxies using the rotation velocity curve in it. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, issue 4, vol. 420, pp. 3071–3080.
17. Zasov A.V., Khoperskov A.V., Katkov I.Yu., Afanasiev V.L., Kaisin S.S. Kinematics and stellar disk modeling of lenticular galaxies. *Astrophysical Bulletin*, 2012, issue 4, vol. 67, pp. 362–373.
18. Zasov A.V., Khoperskov A.V., Saburova A.S. Gravitational stability and dynamical overheating of galactic stellar disks. *Astronomy Letters*, 2011, issue 6, vol. 37, pp. 374–384.
19. Zasov A.V. Galaxy Halo Disk Mass Ratios Estimated from a Local Disk Stability Criterion. *Soviet Astronomy Letters*, 1985, vol. 11, pp. 307–310.
20. 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.

INFORMATION SYSTEM GRVOLSU FOR MODELING OF THE DISC GRAVITATING SYSTEMS

Mukhatov Daniyar Sergeevich

Master Student in “Informatics and Computer Engineering”
Volgograd State University
mukhatov-daniyar@rambler.ru
Prospekt Universitetskij, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Zasov Anatolij Vladimirovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor, Department of Astrophysics and Stellar Astronomy
Moscow State University
zasov@sai.msu.ru
Universitetskij prospekt, 13, 119234 Moscow, Russian Federation

Abstract. The rotation curves of disk components of the spiral galaxies is the source of important information about the dynamical properties of the galaxies. The rotation curve of the cold gaseous component allows to estimate the mass of the galaxy within a fixed radius.

It is possible to determine the individual masses of galactic components (bulge, disc, halo) using photometric observational data. It is obvious, that dark matter halo plays a crucial role in the dynamics of galaxies, however the determination of the dark halo mass is a very complicated problem of modern astrophysics. Decomposition of the circular velocity gives the minimal value of the halo mass within the optical radius of the galaxy in the case of the maximum disc model.

At recent, extended rotation curves were found for thousands of spiral galaxies. For this data different specialized information systems applied efficiently for the galactic components decomposition. We briefly describe a new information system for simulating the rotation curves of disc gravitating systems in context of reconstruction of the volume and surface densities of the components. The program GRVolsU allows to build the circular velocity in the disc plane basing on the parameters of the gravitating density distributions of bulge, disc components and the halo. It is also possible to fit the observational dependence of the rotation curves by multi-component theoretical models.

Results of the galactic rotation curve decomposition may depends as on the model of the central spherical stellar component and on the model of dark matter halo density distribution. Therefore, the information system contains the King and Vaucouleurs models for the bulge density distribution. There are a wide range of the halo models: quasi-isothermal, Barket, Navarro–Frenk–White, exponential, logarithmic, Einasto, Hernquist profiles for volume density. Exponential model of the thin disc and the thick disc model are also included in the system. The interface of information system and test results were described in manuscript. The program was written in C# in the environment .NET Framework.

Key words: information system, models of disk galaxies, rotation curves, bulge, dark halo.