



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 211–217

УДК 524

Моделирование химической эволюции сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик

Т.А. Шумакова, П.П. Берцик

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

В данной работе мы смоделировали эволюцию сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик, используя наш вязкостный алгоритм. Мы исследовали изменения в химическом составе дисковой галактики при поглощении ею карликовой галактики с более низким содержанием тяжелых элементов и получили, что присутствие спутника в гало галактики и его поглощение приводит к образованию на графике радиального распределения тяжелых элементов компактной области с пониженным содержанием тяжелых элементов. Это говорит о том, что согласно с данными о распределении тяжелых элементов в дисковой галактике можно выявить присутствие спутника в ней. После поглощения меняется структура диска галактики и его химический состав, галактика становится более богатой на содержание тяжелых элементов. Полученные результаты мы сравнили с наблюдательными данными для дисковой галактики NGC 2903 и выяснили, что в NGC 2903 наблюдаются проявления поглощения галактикой карликовой галактики.

МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІЧНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ СКЛАДНОЇ ГРАВІТУЮЧОЇ СИСТЕМИ ДИСКОВОЇ І КАРЛИКОВОЇ ГАЛАКТИК, Шумакова Т.О., Берцик П.П. — В даній роботі ми змоделивали еволюцію складної гравітуючої системи дискової і карликової галактик, використавши наш в'язкісний алгоритм. Ми дослідили зміни в хімічному складі дискової галактики при поглинанні нею карликової галактики з більш низьким вмістом важких елементів і отримали, що присутність супутника в гало дискової галактики та його поглинання призводить до утворення на графіку радіального розподілу важких елементів компактної області із пониженим вмістом важких елементів. Це говорить про те, що згідно з даними про розподіл важких елементів в дисковій галактиці можна виявити присутність супутника в ній. Після поглинання змінюється структура диска галактики та його хімічний склад, галактика стає більш багатію на вміст важких елементів. Отримані результати ми порівняли із спостережними даними для дискової галактики NGC 2903 і з'ясували, що в NGC 2903 спостерігаються прояви поглинання галактикою карликової галактики.

NUMERICAL SIMULATIONS OF THE CHEMICAL EVOLUTION OF COMPLEX GRAVITATING DISK AND DWARF GALAXIES SYSTEM, by Shumakova T.A., Berczik P.P. — In this work we have simulated the evolution of disk and dwarf galaxies gravitating system, using our viscosity algorithm. We investigated changes in disk galaxy chemical abundance due to minor merger of dwarf galaxy with lower abundance of heavy elements. We have found, that presence of a dwarf galaxy in the halo of disk galaxy and its minor merger give in result the formation of the compact area with the lowered abundance of heavy elements on the schedule of heavy elements radial distribution. This result says that it is the possibility to find the satellite in disk galaxy owing to its radial distribution. After the merger the galaxy disk structure and its chemical abundance change, the galaxy becomes richer on the maintenance of heavy elements. We have compared the received results with the observational data for disk galaxy NGC 2903 and have found, that in NGC 2903 the manifestations of a dwarf galaxy minor merger are observed.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все более и более популярными становятся исследования явлений столкновения галактик и поглощения более массивными галактиками меньших. Как космологические модели, так и детальные наблюдения выдвигают вперед идею о существенном влиянии поглощений на эволюцию галактик. Предполагается, что поглощение массивной дисковой галактикой меньшей — своего спутника должно произойти хотя бы один раз на протяжении ее жизни. Поглощение более массивной галактикой своих спутников играет важную роль не только для эволюции меньших

галактик, но и для эволюции массивной галактики. Детальные исследования эффектов поглощения массивными дисковыми галактиками своих спутников были проведены в работах [3, 6, 8, 10, 12, 16]. Двигаясь по орбите вокруг массивной дисковой галактики, карликовая галактика за счет динамического трения в гало галактики приближается по спирали к ее центру. Такие движения спутника по орбите вокруг дисковой галактики возбуждают в ней формирование спирального узора [1, 10]. Причем за счет приливных воздействий из спутника вырываются отдельные части, которые начинают активно взаимодействовать с отдельными частями дисковой галактики до тех пор, пока спутник не упадет в ее центр и полностью не перемешается с ее веществом. Такое перемешивание частей спутника с веществом дисковой галактики меняет структуру диска галактики и вызывает в ней процессы активного звездообразования, в результате меняя ее химический состав.

Целью нашей работы было смоделировать эволюцию сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик и исследовать изменения в химическом составе дисковой галактики при поглощении ею карликовой галактики с более низким содержанием тяжелых элементов.

2. МОДЕЛЬ N ТЕЛ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ С УЧЕТОМ ВЯЗКОСТИ

В данной работе для моделирования эволюции сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик мы используем метод N тел. Среда галактик разбивается на отдельные гравитирующие сегменты (частицы или тела), включающие в себя как звезды, так и межзвездное вещество. Вместе эти сегменты создают эффект сплошной среды. Каждая частица представляется маленькой сферой Плумера, которая имеет гладкий профиль плотности:

$$\begin{aligned}\rho(r) &= \frac{\rho_0}{(1 + (r/r_0)^2)^{5/2}} \\ m_{\text{tot}} &= \frac{4}{3}\pi\rho_0 r_0^3 \\ m(r) &= \frac{m_{\text{tot}}}{(1 + (r/r_0)^2)^{3/2}}\end{aligned}$$

где m_{tot} , ρ_0 и r_0 — соответственно характерная масса, плотность и радиус сферы Плумера.

Гравитационная сила взаимодействия между частицами по Плумеру определяется следующим образом:

$$\vec{f}_{ij} = -\frac{Gm_i m_j}{(r_{ij}^2 + \varepsilon^2)^{3/2}} \vec{r}_{ij}$$

где G — гравитационная постоянная, m_i и m_j — массы i -той и j -той частиц соответственно, $r_{ij} = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ — расстояние между частицами i и j . Здесь параметр ε вводится для ослабления взаимодействия при достаточно малом расстоянии между частицами.

Задача сводится к решению системы следующих дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{V}_i, \quad \frac{d\vec{V}_i}{dt} = \vec{a}_i, \quad \vec{a}_i = \sum_{j=0, j \neq i}^{N-1} \frac{-Gm_i m_j}{(r_{ij}^2 + \varepsilon^2)^{3/2}} \vec{r}_{ij}$$

где \vec{r}_i — радиус-вектор i -й частицы из центра сферы, \vec{V}_i — скорость i -й частицы, \vec{a}_i — гравитационное ускорение i -й частицы.

Однако среда звездных систем не состоит исключительно из звезд, которые строго взаимодействуют по гравитационному закону. В галактиках в огромном пространстве между звездами протекает множество разнообразных физических процессов. Энергия, которая вырабатывается в звездах, поглощается и переизлучается межзвездным веществом; вещество, обогащенное тяжелыми элементами, выбрасывается из звезд, перемешивается с окружающим ее газом и конденсируется, формируя звезды нового поколения. Таким образом, простая модель N тел не в состоянии описать все процессы, которые происходят в звездных системах. Чтобы приблизить использованную модель N тел к реальным звездным системам, мы вводим вязкость межзвездной среды как уменьшение полной механической энергии системы при столкновениях между частицами — телами

в задаче N тел.

Для описания потерь энергии моделируем неупругие столкновения частиц друг с другом. Если частицы движутся в направлении одна к другой и перекрывают одна другую, то считаем, что эти частицы сталкиваются и проходят одна сквозь другую. При этом за счет вязкости энергия этих частиц не сохраняется — часть ее переходит во внутреннюю энергию частиц. Чтобы описать такое уменьшение энергии, мы меняем после столкновения частиц их скорости и направления движения следующим образом: уменьшаем радиальную компоненту скорости частиц на некоторый диссипативный коэффициент, а тангенциальную компоненту оставляем неизменной.

$$\vec{V}'_i = \vec{V}_i - \text{coef}_{\text{coll}} \vec{V}_{ij||}(r_{ij}) \frac{\vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}|}$$

\vec{V}_i — скорость i -й частицы до столкновения, \vec{V}'_i — ее скорость после столкновения, \vec{r}_{ij} — радиус-вектор между частицами i и j , $|\vec{r}_{ij}|$ — модуль их взаимного расстояния, $\vec{V}_{ij||}(r_{ij})$ — радиальная компонента взаимной скорости частиц i и j ; $\text{coef}_{\text{coll}}$ — диссипативный коэффициент столкновений между этими частицами, который и определяет потери энергии частиц за счет вязкости.

3. НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования изменений химического состава дисковой галактики при поглощении ею своего спутника мы моделируем дисковую галактику с химическим градиентом в ее диске и в ее гало размещаем карликовую галактику с более низким содержанием тяжелых элементов, и рассматриваем дальнейшую эволюцию такой системы.

Для решения поставленной задачи мы используем программу N тел с некоторыми параметрами вязкости (<http://www.mao.kiev.ua/staff/berczik/n-body/ber-nb-003.html>).

Среда системы представляем набором N гравитирующих частиц (согласно Плумера), масса которых определяется как отношение полной массы к количеству частиц $m = M/N$. Значение сглаживающего радиуса принимаем $\varepsilon = 0.1$ кпс. В начальный момент времени случайным образом располагаем N частиц внутри сферы, которая ограничена кубом с координатами x_{lim} , y_{lim} , z_{lim} . Массы и радиусы всех частиц считаем одинаковыми.

В работе [13] были получены выражения для гравитационного потенциала и распределения плотности вещества галактики:

$$\Phi(R, z) = \frac{-GM}{\sqrt{R^2 + (a + \sqrt{b^2 + z^2})^2}}$$

$$\rho(R, z) = \frac{b^2 M}{4\pi} \frac{aR^2 + (a + 3\sqrt{z^2 + b^2})(a + \sqrt{z^2 + b^2})^2}{(R^2 + (a + \sqrt{z^2 + b^2})^2)^{5/2} (z^2 + b^2)^{3/2}}$$

Согласно данной работе, мы задаем для гало дисковой галактики определенный потенциал и определенное распределение плотности вещества задаем для гало, диска, балджа и спутника галактики.

Также устанавливаем содержание тяжелых элементов Z соответственно для балджа, диска и для спутника галактики, причем для диска галактики задаем экспоненциальный градиент распределения тяжелых элементов, который наилучшим образом согласуется с наблюдательными данными о содержании тяжелых элементов в дисках спиральных галактик [18]:

$$Z = Z_0 \exp\left(-\frac{r}{Z_{\text{scale}}}\right)$$

Спутник галактики размещаем в ее гало, задавая его координаты относительно центра галактики x_0 , y_0 , z_0 и скорость его вращения вокруг галактики, противоположную за направлением скорости вращения самой галактики (V_{x0} , V_{y0} , V_{z0} — компоненты скорости вращения спутника вокруг галактики). Установленные параметры для балджа, диска, гало и спутника галактики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Входные данные для балджа, диска, гало и спутника дисковой галактики

	Балдж	Диск	Гало	Спутник
N	2000	10000	0	2000
$M(M_{sol})$	$5.0 \cdot 10^9$	$1.0 \cdot 10^{10}$	$1.0 \cdot 10^{11}$	$1.0 \cdot 10^9$
a (кпс)	0.0	5.0	0.0	0.0
b (кпс)	0.5	0.25	5.0	0.5
ε (кпс)	0.1	0.1	0.1	0.1
Z	0.04	$Z_0 = 0.05, Z_{scale} = 10.0$ (кпс)	–	0.008
x_{lim} (кпс)	3.0	20.0	20.0	3.0
y_{lim} (кпс)	3.0	20.0	20.0	3.0
z_{lim} (кпс)	3.0	3.0	20.0	3.0
x_0 (кпс)	–	–	–	0.0
y_0 (кпс)	–	–	–	15.0
z_0 (кпс)	–	–	–	5.0
V_{x0} (км/с)	–	–	–	-200.0
V_{y0} (км/с)	–	–	–	0.0
V_{z0} (км/с)	–	–	–	0.0

Чтобы упростить вычисления, все величины приводим к системным единицам, выбрав следующие величины массы и радиуса для нормирования: $M_{norm} = 10^{10} M_{sol}$, $R_{norm} = 25$ кпс.

Для выбранных величин получаем следующее значение времени в системных единицах:

$$T_0 = \frac{R}{\sqrt{\frac{GM_{norm}}{R_{norm}}}} = 590 \text{ миллионов лет.}$$

Интегрирование системы дифференциальных уравнений мы проводим от начального момента времени $t = 0.0$ (в системных единицах) до момента времени $t = 10.0$ (5.9 миллиардов лет) с переменным временным шагом ($dt_{min} = 1.0 \cdot 10^{-5}$ и $dt_{max} = 1.0 \cdot 10^{-2}$) в соответствии со следующей схемой. В начальный момент времени t_i состояние системы описывается положениями частиц r_i и скоростями V_i . Цикл временного шага dt пересчитывает эти величины, и для следующего временного шага $t_{i+1} = t_i + dt$ параметры частиц определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} a_i &= a(r_i) \\ r_{i+1} &= r_i + V_i dt + \frac{a_i dt^2}{2} \\ a_{i+1} &= a(r_{i+1}) \\ V_{i+1} &= V_i + \frac{a_i + a_{i+1}}{2} dt \end{aligned}$$

Для определения гравитационной силы между частицами в наших расчетах мы используем системы компьютеров GRAPE5/GRAPE6 (<http://grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp/grape/>) [4, 5, 9, 11], специализированные для временного интегрирования гравитирующих систем N тел.

Для повышения скорости компьютерных расчетов мы использовали алгоритм поиска ближайших соседей частицы [7, 14].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения поставленной задачи мы провели ряд расчетов эволюции дисковой галактики, без спутника и со спутником, без учета вязкости и для разных значений диссипативного коэффициента.

Радиальное распределение тяжелых элементов для модели дисковой галактики без спутника и без учета вязкости соответственно в разные моменты времени $t = 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$ представлено на рис. 1а (содержание тяжелых элементов взято по отношению к солнечному содержанию.) Для данной модели галактики существенных изменений в ее химическом составе не происходит, распределение тяжелых элементов остается практически неизменным.

С учетом вязкости содержание тяжелых элементов в галактике со временем повышается (рис. 1b) за счет постепенного перемещения частиц балджа в диск галактики и их перемешивания с частицами диска. Такое моделированное перемешивание частиц неким образом отображает перемешивание выброшенного из звезд газа, обогащенного тяжелыми элементами, с межзвездным газом, в результате чего газ конденсируется и образует звезды нового поколения с более высоким содержанием тяжелых элементов. Происходит химическая эволюция галактики. Таким образом, наша вязкостная модель эволюции галактики иллюстрирует химическую эволюцию диска галактики. Учитывать подобные процессы перемешивания межзвездного вещества очень важно для взаимодействующих галактик и галактик с перемычкой, в которых активно идут процессы звездообразования [18].

Эволюция дисковой галактики со спутником для значения диссипативного коэффициента $1 - \text{coef}_{\text{coll}} = 0.10$ на разные моменты времени показана на рис. 2. Верхние два ряда соответствуют проекции на ось XU , а нижние два ряда — на ось YZ . Двигаясь по орбите вокруг массивной дисковой галактики, карликовая галактика за счет динамического трения в гало галактики приближается по спирали к центру галактики. Такие движения спутника по орбите вокруг дисковой галактики возбуждают в ней формирование спирального узора. Причем за счет приливных воздействий из спутника вырываются отдельные частички, которые сначала образуют некоторый хвост от спутника и вращаются в гало галактики под определенным углом вокруг ее диска, а потом, постепенно приближаясь к диску, начинают перемешиваться с частичками диска галактики. Это происходит до тех пор, пока спутник не упадет в центр (или возле центра) галактики и полностью не перемешается с веществом дисковой галактики. Такое перемешивание частей спутника с веществом дисковой галактики меняет структуру диска галактики и вызывает в ней процессы активного звездообразования, в результате меняя ее химический состав. На рис. 2 можно видеть, что поглощение спутника дисковой галактикой приводит к образованию спиралей, которые очень сильно закручиваются, практически образуя кольцо вокруг ядра, и на месте балджа галактики образуется перемычка ($t = 7.5$) или ветвь, соединяющая кольцо с ядром ($t = 10.0$).

Радиальное распределение содержания тяжелых элементов для дисковой галактики при поглощении ею своего спутника соответственно в разные моменты времени $t = 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$ изображено на рис. 3 (значение диссипативного коэффициента $1 - \text{coef}_{\text{coll}} = 0.10$). Спутник, проецируясь на диск галактики, образует на графике радиального распределения тяжелых элементов некоторую выемку (компактную область содержания тяжелых элементов, находящуюся значительно ниже уровня диска галактики). Данная выемка соответствует положению спутника в гало галактики, и ее перемещение соответствует перемещению спутника. Спутник приближается к центру галактики и падает на галактику, возле ее центра. На рис. 4 показано радиальное распределение содержания кислорода в дисковой галактике NGC 2903, полученное в работе [2]. Для этой галактики в ее радиальном распределении наблюдается определенная выемка, похожая на ту, что мы получили в своих расчетах. Это говорит о том, что в гало этой галактики может находиться карликовая галактика с более низким уровнем содержания тяжелых элементов. Причем, сравнивая рис. 3 и рис. 4 можно сделать вывод, что эта карликовая галактика вероятно уже упала возле центра дисковой галактики, и ее остатки сейчас активно перемешиваются с центральными областями галактики, вызывая в ней очаги звездообразования. Положение выемки на рис. 4 соответствует положению выемки нашей модели (рис. 2) около момента времени $t = 7.5$ (4 миллиарда лет).

При приближении спутника к центру галактики из него вырываются частички и начинают активно взаимодействовать с частицами диска галактики, что соответствует активным процессам звездообразования в реальной галактике. Это приводит к повышению уровня содержания тяжелых элементов. Галактика становится богатой на содержание тяжелых элементов. В работе [15] говорится, что галактика NGC 2903 богата на содержание тяжелых элементов, что подтверждает возможность поглощения галактикой карликовой галактики. Таким образом, можно говорить, что в NGC 2903 наблюдаются проявления поглощения галактикой своего спутника.

5. ВЫВОДЫ

В данной работе мы смоделировали эволюцию сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик, используя наш вязкостный алгоритм (<http://www.mao.kiev.ua/staff/berczik/n-body/ber-nb-003.html>).

Мы исследовали изменения в химическом составе дисковой галактики при поглощении нею карликовой галактики с более низким содержанием тяжелых элементов и получили, что присутствие спутника в гало дисковой галактики и его поглощение приводит к образованию на графике радиального распределения тяжелых элементов компактной области с пониженным содержанием тяжелых элементов. Данная область соответствует положению спутника в гало галактики, и ее перемещение соответствует перемещению спутника к центру галактики. Это говорит о том, что согласно с данными о распределении тяжелых элементов в дисковой галактике можно выявить в ней наличие спутника.

При приближении спутника к центру галактики из него вырываются отдельные части и начинают активно взаимодействовать с веществом диска галактики, что соответствует активным процессам звездообразования в реальной галактике. Это приводит к повышению уровня содержания тяжелых элементов. Диск галактики становится более богатым на содержание тяжелых элементов.

Полученные результаты мы сравнили с наблюдательными данными для дисковой галактики NGC 2903 и выяснили, что в ней наблюдаются проявления поглощения галактикой карликовой галактики.

1. *Ефремов Ю.Н., Корчагин В.И., Марочник Л.С., Сучков А.А.* Современные представления о природе спиральной структуры галактик // *Успехи физ. наук.* — 1989. — **157**, № 4. — С. 599–629.
2. *Шкварун Р.В., Пиллогин Л.С.* Распределение содержания кислорода в дисках восьми спиральных галактик // *Кин. и физ. неб. тел.* — 2004. — **20**, № 1. — С. 68–75.
3. *Bertschik M., Burkert A.* Minor Mergers of Galaxies: Theory and Observations // *Astrophys. and Space Science.* — 2002. — **281**, Issue 1. — P. 405–406.
4. *Ebisuzaki T., Makino J., Fukushige T., Taiji M., Sugimoto D., Ito T., Okumura S.K.* GRAPE Project: an Overview // *Publ. of the Astron. Soc. of Japan.* — 1993. — **45**. — P. 269–278.
5. *Fukushige T., Taiji M., Makino J., Ebisuzaki T., Sugimoto D.* A Highly Parallelized Special-Purpose Computer for Many-Body Simulations with an Arbitrary Central Force: MD-GRAPE // *Astrophys. J.* — 1996. — **468**. — P. 51.
6. *Hernquist L., Mihos J.Ch.* Excitation of activity in galaxies by minor mergers // *Astrophys. J.* — 1995. — **448**. — P. 41–63.
7. *Jernigan J.G., Porter D.H.* A tree code with logarithmic reduction of force terms, hierarchical regularization of all variables, and explicit accuracy controls // *Astrophys. J. Supplement Series.* — 1989. — **71**. — P. 871–893.
8. *Johnston K.V., Spergel D.N., Hernquist L.* The disruption of the Sagittarius dwarf galaxy // *Astrophys. J.* — 1995. — **451**. — P. 598–606.
9. *Kawai A., Fukushige T., Makino J., Taiji M.* GRAPE-5: A Special-Purpose Computer for N-Body Simulations // *Publ. of the Astron. Soc. of Japan.* — 2000. — **52**. — P. 659–676.
10. *Kleinschmidt L., Theis Ch., Hensler G., Schwarzkopf U.* Heating of Spirals due to Minor Mergers // *Abstracts of Contributed Talks and Posters presented at the Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft, Goettingen.* — 1999. — 15.
11. *Makino J., Funato Yo.* The GRAPE Software System // *Publ. of the Astron. Soc. of Japan.* — 1993. — **45**. — P. 279–288.
12. *Mihos J.Ch., Hernquist L.* Triggering of starbursts in galaxies by minor mergers // *Astrophys. J., Part 2 — Letters.* — 1994. — **425**, № 1. — P. L13–L16.
13. *Miyamoto M., Nagai R.* Three-Dimensional Models for the Distribution of Mas in Galaxies // *Publ. Astron. Soc. Japan.* — 1975. — **27**. — P. 533–543.

14. *Press W.H.* Techniques and Tricks for N-Body Computation // The Use of Supercomputers in Stellar Dynamics, Proceedings of a Workshop Held at the Institute for Advanced Study, Princeton / Lecture Notes in Physics / edited by P.Hut and S.McMillan. — Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1986. — 267. — P.184.
15. *Smith D.A., Calzetti D., Harris J., Gallagher J.S. III, Conselice C.J.* Nuclear Star Clusters in the Starburst Galaxy NGC 2903 // Bulletin of the Amer. Astron. Soc. — 2002. — 1998. — **34**. — P.1294.
16. *Walker I.R., Mihos J.Ch., Hernquist L.* Quantifying the fragility of galactic disks in minor mergers // Astrophys. J. — 1996. — **460**. — P.121–135.
17. *Watson A.M., Tripp T.M., Gallagher J.S.* Off-Center Star Formation in The Nuclear Starburst Galaxy NGC 2903 // Bulletin of the Amer. Astron. Soc. — 1994. — **26**. — P.877.
18. *Zaritsky D.* The radial distribution of oxygen in disk galaxies // Astrophys. J., Part 2 — Letters. — 1992. — **390**, № 2. — P.L73–L76.

Поступила в редакцию 16.10.2004