

УДК 524.7-54

Т. А. Шумакова¹, П. П. Берцик^{1, 2}

¹ Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27
aphina@mao.kiev.ua

² Astronomisches Rechen-Institut (ARI)
Monchhof str. 12-14, D-69120 Heidelberg, Germany
berczik@ari.uni-heidelberg.de

Эволюция радиального градиента содержания тяжелых элементов в диске массивной галактики в процессе ее слияния с карликовой галактикой

Исследуются изменения радиального градиента химического содержания тяжелых элементов в диске массивной галактики вследствие ее взаимодействия (слияния) с маломассивным спутником (карликовой галактикой) с пониженным содержанием тяжелых элементов. Разработана специальная компьютерная программа динамического моделирования слияния галактик методом N тел, включающая также и процессы вязкого столкновения частиц. Дискосая галактика и ее карликовый спутник в начальный момент времени описываются равновесными конфигурациями соответственно пламмер-кузьминовского и пламмеровского распределений частиц. В таком виде частицы описывают целые гравитационно связанные области смеси газа и звезд. Для первого приближения мы опускаем рассмотрение процессов звездообразования и связанного с ними обогащения тяжелыми элементами отдельных модельных частиц. Мы также пренебрегаем возможным обменом массой (и химическими элементами) между частицами. Радиальный градиент содержания тяжелых элементов в дисковой галактике после столкновения с карликовой галактикой мы определяем по набору частиц как диска (балджа), так и частиц из карликового спутника. Показано, что по сравнению с процессом динамической эволюции изолированной дисковой галактики в случае слияния с карликовой галактикой (для одного и того же значения диссипативного коэффициента) в диске более значительным образом изменяется (уменьшается значительно быстрее) радиальный градиент химического содержания тяжелых элементов. Примерно такое же уменьшение радиального градиента содержания тяжелых элементов для случая изолированной дисковой галактики можно получить, увеличив в полтора раза значение диссипативного коэффициента. Также в процессе взаимодействия (слияния) химически бедной карликовой галактики с дисковой галактикой в наших моделях наблюдается отчетливое понижение химического содержания тяжелых элементов в диске в том месте, где находится

карликовая галактика. При наших модельных параметрах данное понижение размывается в течение примерно 6 млрд лет после столкновения. Полученные модельные результаты могут свидетельствовать о том, что компактная область с пониженным содержанием тяжелых элементов, отчетливо наблюдаемая в дисковой галактике NGC 2903, могла возникнуть вследствие поглощения карликовой галактики менее чем 6 млрд лет назад.

ЕВОЛЮЦІЯ РАДІАЛЬНОГО ГРАДІЄНТА ВМІСТУ ВАЖКИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ДИСКУ МАСИВНОЇ ГАЛАКТИКИ У ПРОЦЕСІ ЇЇ ЗЛИТТЯ З КАРЛИКОВОЮ ГАЛАКТИКОЮ, Шумакова Т. О., Берцик П. П. — Досліджуються зміни радіального градієнта вмісту важких елементів в диску масивної галактики внаслідок її злиття з карликовою галактикою із зниженим вмістом важких елементів. Розроблено спеціальну комп'ютерну програму динамічного моделювання злиття галактик методом N тіл, що включає в себе також і процеси в'язкого зіткнення частинок. Дискова галактика та її карликовий супутник у початковий момент часу описуються рівноважними конфігураціями відповідно пламмер-кузьмінівського та пламмерівського розподілів частинок. В такому вигляді частинки описують цілі гравітаційно зв'язані області суміші газу і зірок. Для першого наближення ми нехтуємо процесами зоретворення і пов'язаного з ними збагачення важкими елементами окремих модельних частинок. Ми також нехтуємо можливим обміном масою (і хімічними елементами) між частинками. Радіальний градієнт хімічного вмісту важких елементів у дисковій галактиці після зіткнення ми визначаємо за набором частинок як диска (балджа), так і частинок із карликового супутника. Показано, що у порівнянні з процесом динамічної еволюції ізольованої дискової галактики у випадку злиття з карликовою галактикою (для одного і того ж значення дисипативного коефіцієнта) в диску більш значним чином змінюється (зменшується значно швидше) радіальний градієнт хімічного вмісту важких елементів. Приблизно таке саме зменшення радіального градієнта вмісту важких елементів для випадку ізольованої дискової галактики можна отримати, збільшивши у півтора рази значення дисипативного коефіцієнта. Також у процесі взаємодії (злиття) хімічно бідної карликової галактики з дисковою галактикою в наших моделях ми спостерігаємо чітке зменшення хімічного вмісту важких елементів в диску в тому місці, де перебуває карликова галактика. При наших модельних параметрах це зменшення розвивається протягом 6 млрд років після зіткнення. Отримані модельні результати можуть свідчити про те, що компактна область із малим вмістом важких елементів, яку чітко видно у дисковій галактиці NGC 2903, могла виникнути внаслідок поглинання карликової галактики менш ніж 6 млрд років тому.

CHEMICAL RADIAL GRADIENT EVOLUTION IN THE DISK OF A MASSIVE GALAXY DUE TO ITS MINOR MERGER WITH A DWARF GALAXY, by Shumakova T. A., Berczik P. P. — We investigated chemical radial gradient changes in a massive galaxy disk owing to its interaction (encountering) with a low-mass satellite with lowered heavy elements abundance. To consider this problem, a special computer program for dynamical simulation of galaxies mergers through the N -body method was developed. This N -body algorithm realization also includes the processes of viscosity particle collisions. The disk galaxy and its dwarf satellite are described at the initial moment as balanced configurations of the Plummer-Kuzmin and Plummer particle distributions, respectively. We also included the conception of heavy elements abundance in particles (Z) in N -body dynamical model. In such form

particles (bodies) describe the whole gravitationally combined regions of gas and stars mixture. As the first approximation, we do not consider the star formation processes and the heavy elements enrichment of individual modelled particles which is related to them. We also neglect possible mass exchanges (and chemical elements exchanges) between particles. We determine the radial gradient of heavy elements abundance in galactic disk after the collision over the set of dynamical particles mixture from both disk (bulge) particles and dwarf satellite particles. As a result of our simulations we derived that in comparison with dynamical evolution process of isolated disk galaxy, in the case of its encounter with a dwarf galaxy (for the same value of dissipative parameter) the radial gradient of heavy elements abundance in galaxy disk feels stronger changes (decreases more considerably). Much the same chemical radial gradient decreasing for isolated disk galaxy model can be obtained by increasing the dissipative parameter value in one and a half times. Also, in the process of dwarf and disk galaxies encounter in our model we observe a distinct lowering of chemical heavy elements abundance in the disk at the place of dwarf galaxy position. With our modelled parameters this lowering diffuses during about 6 billions of years after the encounter. We compared our results with observational data for the NGC 2903 disk galaxy. In this galaxy the compact area with lowered heavy elements abundance is clearly defined. Thus, it may be concluded that the dwarf galaxy absorption at this object has happened less than 6 billion years ago.

ВВЕДЕНИЕ

Как космологические модели, так и детальные наблюдения свидетельствуют о существенном влиянии слияний галактик на их эволюцию. Причем для эволюции галактик играют важную роль не только слияния массивных галактик друг с другом, но и поглощения массивными галактиками меньших — своих спутников. Поглощения галактиками маломассивных спутников происходят довольно часто, и их следствия замечены даже в нашей Галактике: Магелланов поток, молодые шаровые скопления в гало Галактики, карликовая галактика в Стрельце и т. д. [16, 23].

В процессе взаимодействия за счет гравитации и динамического трения в гало массивной дисковой галактики карликовая галактика постепенно приближается по спирали к ее центру и падает на плоскость диска галактики. Совершая орбитальные движения вокруг дисковой галактики, спутник постепенно разрушается. Вырванные из спутника приливным воздействием, отдельные его части могут распространяться вдоль всего его орбитального пути, формируя таким образом светящееся гало галактики [16, 24]. При слиянии больших галактик примерно равных масс динамическое трение настолько эффективно, что галактики сливаются уже после немногих оборотов. При поглощении галактиками маломассивных спутников (отношение масс 10 и более) орбитальный распад спутника происходит довольно долго. Спутник может полностью разрушиться приливными воздействиями галактики, находясь еще в ее гало, либо упасть на плоскость диска и оставаться на ней еще достаточно долгое время, пока полностью не разрушится.

Взаимодействия более массивных галактик с меньшими играют важную роль не только для эволюции меньших галактик, но и для эволюции массивных галактик. Орбитальные движения спутника возбуждают в дисковой галактике целый ряд неустойчивостей [1, 14, 18]. В результате такого поглощения может изменяться форма, структура и даже химический состав диска галактики. Если карликовая галактика является достаточно плотной и массивной, то она может успеть достигнуть центральных областей диска

массивной галактики, и таким образом, ее аккреция на дисковую галактику может сделать больше, чем просто сформировать звездное гало галактики. В работе [25] с помощью численного моделирования было показано, что в результате прохождения спутника сквозь диск галактики звезды диска могут рассеиваться, сбиваясь со своих орбит, и таким образом нагревать и утолщать звездный диск. Поскольку спутник благодаря динамическому трению падает на плоскость диска галактики, то в результате сохранения общего углового момента диск может искривиться и изменить угол своего наклона. В диске галактики могут образоваться сильно закрученные спиральные рукава и перемычка. Через спирали и перемычку межзвездный газ может быть доставлен к ядру галактики, стимулируя повышение скорости звездообразования как в диске, так и в ядре [14]. Таким образом, поглощения массивными дисковыми галактиками своих спутников могут оказывать значительное влияние на химическую и динамическую эволюцию дисков галактик.

В данной работе путем построения численной модели мы получили эволюцию радиального распределения содержания тяжелых элементов в диске массивной галактики и исследовали влияние поглощения массивной дисковой галактикой карликовой галактики с более низким содержанием тяжелых элементов на эволюцию распределения тяжелых элементов в диске.

МОДЕЛЬ N ТЕЛ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК С УЧЕТОМ ВЯЗКИХ СТОЛКНОВЕНИЙ

Для моделирования эволюции сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик мы используем метод N тел с учетом вязких столкновений между частицами. В используемом нами методе среда галактики разбивается на отдельные самогравитирующие фрагменты, включающие в себя как звезды, так и газ. Вместе эти фрагменты создают эффект сплошной среды. Каждая из частиц представляется сферой Пламмера, которая имеет гладкий профиль плотности [21]:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{[1 + (r/r_0)^2]^{5/2}},$$

$$m_{\text{tot}} = \frac{4}{3} \pi \rho_0 r_0^3,$$

$$m(r) = \frac{m_{\text{tot}}}{[1 + (r/r_0)^2]^{3/2}},$$

где m_{tot} , ρ_0 и r_0 — характерные масса, плотность и радиус сферы Пламмера.

Гравитационное взаимодействие пламмеровских частиц описывается законом

$$\mathbf{f}_{ij} = - \frac{G m_i m_j}{(r_{ij}^2 + \varepsilon^2)^{3/2}} \mathbf{r}_{ij},$$

где G — гравитационная постоянная, m_i и m_j — массы i -й и j -й частиц, $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ — расстояние между частицами i и j . Параметр ε здесь вводится для ослабления взаимодействия при достаточно малом расстоянии между частицами, чтобы сила взаимодействия частиц не стремилась к бесконечности при $r \rightarrow 0$ (для случаев соприкосновения частиц).

Чтобы описать взаимодействие газовых составляющих самогравитирующих фрагментов (N тел) в нашей модели мы вводим неупругие столкновения между частицами [6, 7]. Если частицы движутся в направлении одна к

другой, перекрывают друг друга, и с момента предыдущей встречи прошло достаточное количество времени, то считаем, что эти частицы находятся в процессе вязкого столкновения. В результате такого столкновения частицы проходят одна сквозь другую, и за счет вязкости теряется часть их общей кинетической энергии — часть ее переходит во внутреннюю энергию частиц. Для того чтобы описать такое уменьшение кинетической энергии, мы изменяем после столкновения скорости и направления движения частиц следующим образом: уменьшаем радиальную составляющую взаимной скорости частиц на некоторый диссипативный коэффициент, а тангенциальную оставляем неизменной [8—10]:

$$\mathbf{V}'_i = \mathbf{V}_i - k \mathbf{V}_{ij \parallel (r_{ij})} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|}.$$

Здесь \mathbf{V}_i и \mathbf{V}'_i — скорости i -й частицы до столкновения и после столкновения, \mathbf{r}_{ij} — радиус-вектор между частицами i и j , $|\mathbf{r}_{ij}|$ — модуль их взаимного расстояния, $\mathbf{V}_{ij \parallel (r_{ij})}$ — радиальная составляющая взаимной скорости частиц i и j , k — диссипативный коэффициент вязких столкновений между частицами i и j , который и определяет потери энергии частиц за счет вязкости.

Таким образом, задача сводится к решению системы следующих дифференциальных уравнений:

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

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

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи мы используем наш модифицированный N-body код, который учитывает процессы, связанные с вязкими столкновениями частиц (<http://www.mao.kiev.ua/staff/berczik/>). Массивную дисковую галактику мы моделируем как совокупность отдельных ее составляющих (балджа, диска и гало), задавая отдельно для каждой из них характерные начальные параметры. Для того чтобы проследить эволюцию дисковой галактики в процессе ее слияния с карликовым спутником, мы в начальный момент времени в ее гало помещаем спутник, фиксируя его начальное положение относительно центра галактики (x_0, y_0, z_0) и скорость его вращения вокруг галактики (V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}). В данной работе мы рассмотрели случай взаимодействия (слияния) галактик, когда карликовый спутник совершает орбитальные движения вокруг массивной дисковой галактики в направлении, совпадающем с направлением вращения самой галактики.

В соответствии с полученными в работе [21] выражениями для гравитационного потенциала и распределения плотности вещества в галактиках мы описываем в начальный момент времени дисковую и карликовую галактики равновесными конфигурациями соответственно пламмер-кузьминского и пламмеровского распределений частиц:

$$\Phi(R, z) = \frac{-GM}{(R^2 + [a + (b^2 + z^2)^{1/2}]^2)^{1/2}},$$

$$\rho(R, z) = \frac{b^{2M}}{4\pi} \frac{aR^2 + (a + 3(z^2 + b^2)^{1/2})(a + (z^2 + b^2)^{1/2})^2}{(R^2 + (a + (z^2 + b^2)^{1/2})^2)^{5/2}(z^2 + b^2)^{3/2}},$$

где R и z — соответственно расстояние от центра и высота рассматриваемой системы, M — масса системы, a и b — коэффициенты, определяющие соответственно протяженность системы и ее толщину.

Составляющие галактики (диск, балдж), а также спутник галактики согласно Пламмеру представляем набором N самогравитирующих частиц. Значения масс всех N частиц соответственно для каждой из составляющих принимаем одинаковыми и равными отношению полной массы компонента к количеству частиц в нем: $m = M/N$. Радиусы всех частиц компонента также считаем равными.

В начальный момент времени случайным образом располагаем N частиц внутри каждого из компонентов модели (диск, балдж, спутник), объемы которых ограничены кубами с координатами $x_{\text{lim}}, y_{\text{lim}}, z_{\text{lim}}$. Фиксируем начальные положения и скорости каждой из частиц.

В наш модифицированный N-body код мы также включили понятие общего содержания тяжелых элементов Z соответственно в балдже, диске и спутнике массивной галактики. В начальный момент времени каждой частице мы присваиваем определенное значение содержания тяжелых элементов. Приняв равномерное распределение содержания тяжелых элементов по балджу и по спутнику галактики, присваиваем частицам балджа и спутника начальные значения содержания в них тяжелых элементов, равные отношению общего содержания тяжелых элементов в балдже (и соответственно в спутнике) к общему количеству частиц в балдже (спутнике) Z/N . Для частиц диска галактики мы принимаем экспоненциальное распределение тяжелых элементов по диску, которое наилучшим образом согласуется с данными наблюдений о содержании тяжелых элементов в дисках спиральных галактик [27]:

$$Z = Z_0 \exp\left(-\frac{r}{Z_{\text{sc1}}}\right).$$

При первом приближении мы не рассматриваем процессы звездообразования и связанного с ними обогащения тяжелыми элементами отдельных модельных частиц. Для упрощения задачи также не учитываем возможный обмен массой (и химическими элементами) между частицами. Радиальный градиент химического содержания тяжелых элементов в дисковой галактике после столкновения с карликовой галактикой мы определяем по набору частиц диска, балджа, а также частиц из карликового спутника.

Начальные параметры для балджа, диска, гало и спутника галактики приведены в таблице.

Все вычисления мы проводили в системных единицах, выбрав следующие значения массы и радиуса для нормирования: $M_{\text{H}} = 10^{10} M_{\odot}$, $R_{\text{H}} = 25$ кпк.

Для выбранных величин получаем следующее значение единицы времени (в системных единицах):

$$T_0 = \frac{R}{\sqrt{GM_{\text{H}}/R_{\text{H}}}} = 590 \text{ млн лет.}$$

Интегрирование системы дифференциальных уравнений мы проводим от начального момента времени $t = 0$ (в системных единицах) до момента времени $t = 10$ (5.9 млрд лет) с переменным временным шагом ($dt_{\text{min}} = 10^{-5}$ и $dt_{\text{max}} = 0.01$) в соответствии со следующей схемой. В начальный момент времени t_1 состояние системы описывается положениями частиц r_1 и

Начальные параметры для балджа, диска, гало и спутника дисковой галактики

Параметр	Балдж	Диск	Гало	Спутник
N	2000	10000	0	2000
$M(M_{\text{sol}})$	$5 \cdot 10^9$	10^{10}	10^{11}	10^9
a , кпк	0.0	5.0	0.0	0.0
b , кпк	0.5	0.25	5.0	0.5
ε , кпк	0.1	0.1	0.1	0.1
Z	0.04	$Z_0 = 0.05, Z_{\text{scI}} = 10.0$ (кпк)		—
x_{lim} , кпк	3.0	20.0	20.0	3.0
y_{lim} , кпк	3.0	20.0	20.0	3.0
z_{lim} , кпк	3.0	3.0	20.0	3.0
x_0 , кпк	—	—	—	0.0
y_0 , кпк	—	—	—	15.0
z_0 , кпк	—	—	—	5.0
V_{x0} , км/с	—	—	—	-200.0
V_{y0} , км/с	—	—	—	0.0
V_{z0} , км/с	—	—	—	0.0

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 [4, 5]:

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

Для определения гравитационной силы между частицами в наших расчетах мы использовали системы компьютеров GRAPE5/GRAPE6 (<http://grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp/grape/>) [13, 17, 19], специализированные для задачи интегрирования гравитирующих систем N тел. Система GRAPE состоит из двух основных компонентов: главного процессора и процессора GRAPE. Главный процессор выполняет все вычисления, кроме вычислений силы. Главный процессор посылает положения и массы частиц на процессор GRAPE, и процессор GRAPE вычисляет значение силы, которая действует на каждую частицу.

Также для повышения скорости компьютерных расчетов мы использовали алгоритм поиска ближайших соседей частицы, описанный в работах [15, 22].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения поставленной задачи мы провели ряд вычислений (с учетом и без учета вязких столкновений, со спутником и без него). Чтобы убедиться в том, что наш алгоритм достаточно адекватен, и что конфигурация с выбранными параметрами динамически устойчивая, мы сначала рассмотрели эволюцию изолированной дисковой галактики без учета вязких столкновений.

Рис. 1 демонстрирует эволюцию изолированной дисковой галактики без учета вязких столкновений в проекциях на плоскости XY и YZ в моменты времени $t = 0$ и 10. Как видно, конфигурация не распадается. В процессе

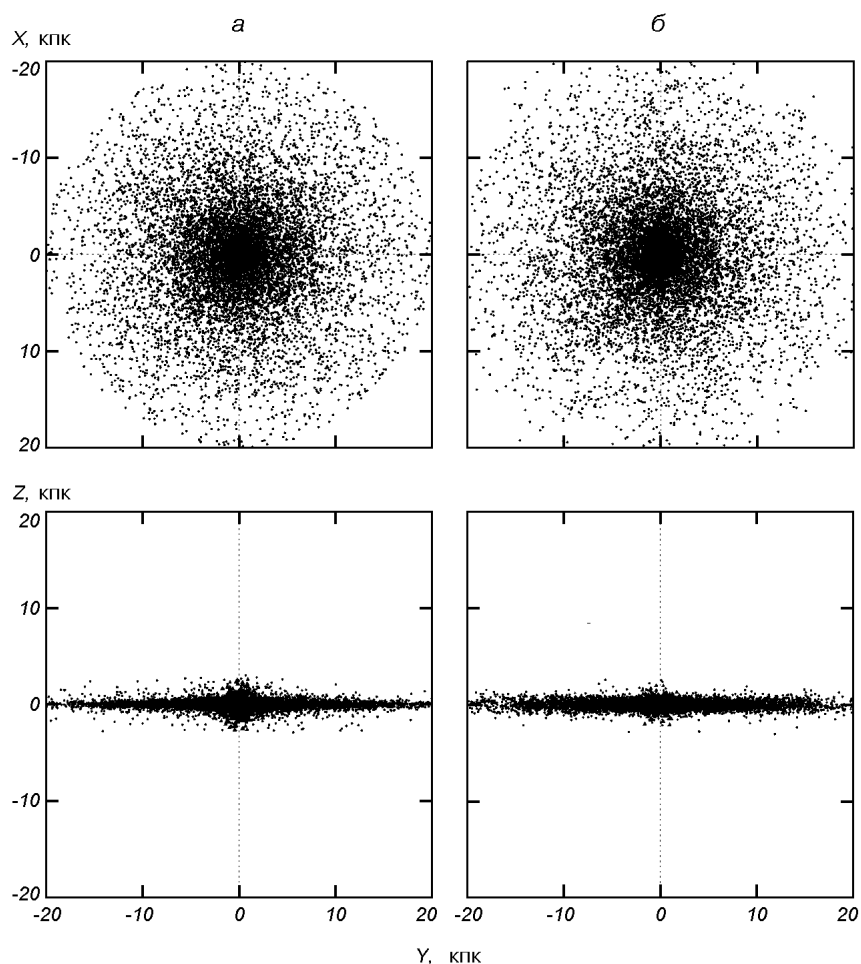


Рис. 1. Эволюция изолированной дисковой галактики (без спутника) без учета вязких столкновений между частицами ($1 - k = 0$) в проекциях на плоскости XY и YZ : a — для начального момента времени $t = 0$, b — конечного момента $t = 10$ (5.9 млрд лет)

эволюции балдж вместо сферической формы приобретает несколько сплюснутую, эллиптическую форму. При этом диск галактики незначительным образом утолщается. Структура и форма галактики за выбранный период времени остается практически неизменной. В этом смысле конфигурация галактики является динамически устойчивой.

Соответствующие этой эволюции изолированной дисковой галактики изменения со временем энергии системы (кинетической E_K , внутренней потенциальной E_{PI} , внешней самогравитирующей энергии гало галактики E_{PE} и полной механической энергии E_T), а также момента вращения системы (L_X , L_Y , L_Z), и соответствующие им потери (в системных единицах) изображены на рис. 2. Поскольку мы задали вращение только вокруг оси z , то проекции момента вращения на оси x и y равны нулю: $L_X = L_Y = 0$. Видно, что при отсутствии столкновений между частицами полная механическая энергия системы и момент вращения сохраняются с достаточно хорошей точностью, что говорит о том, что наш алгоритм работает хорошо для поставленной задачи.

Радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов в диске изолированной массивной галактики (модель без спутника) без учета вязких столкновений на разные моменты времени $t = 0, 2, 4, 6$,

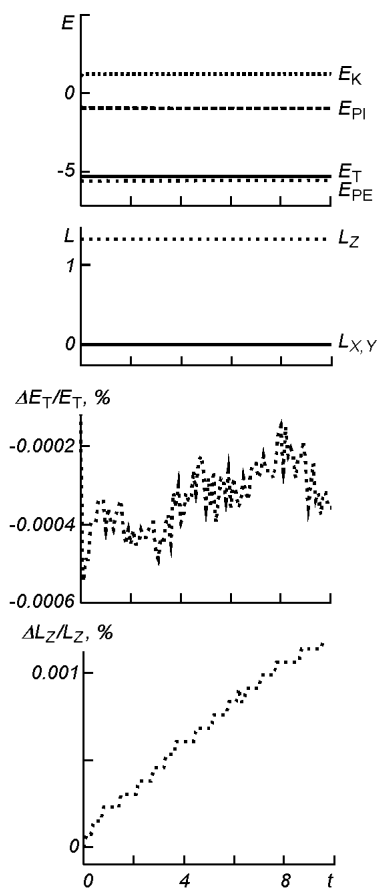


Рис. 2. Изменение со временем энергии (E) и момента вращения (L) системы для модели изолированной дисковой галактики без учета вязких столкновений между частицами ($1 - k = 0$) и соответствующие им потери энергии ($\Delta E/E$) и момента вращения ($\Delta L/L$)

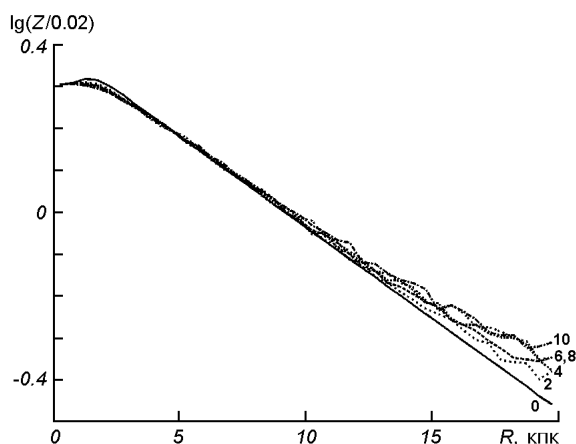


Рис. 3. Радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов (по отношению к солнечному $Z_{\odot} = 0.02$) в диске для модели изолированной галактики без учета вязких столкновений между частицами ($1 - k = 0$) на моменты времени $t = 0, 2, 4, 6, 8, 10$ (цифры у кривых)

8, 10 представлено на рис. 3. Радиальный градиент содержания тяжелых элементов в диске рассчитываем как отношение суммы масс всех тяжелых элементов в частицах к полной сумме масс частиц в данном галактоцентрическом цилиндре толщиной 0.5 кпк. (Содержание тяжелых элементов взято по отношению к солнечному содержанию тяжелых элементов $Z_{\odot} = 0.02$). Для данной модели галактики существенных изменений в распределении тяжелых элементов по ее диску в радиальном направлении не происходит. Система является динамически устойчивой в радиальном направлении.

Рассмотрим эволюцию изолированной дисковой галактики (без спутника) с учетом вязких столкновений для значения диссипативного коэффициента $1 - k = 0.10$.

Эволюция изолированной дисковой галактики для данного значения диссипативного коэффициента в проекциях на плоскости XY и YZ приведена на рис. 4. Верхний ряд соответствует начальному моменту времени $t = 0$, а нижний ряд — конечному $t = 10$. Здесь уже видно, что балдж исчезает и диск галактики заметным образом утолщается.

На рис. 5 показано, как изменяется с течением времени энергия системы и момент вращения в модели изолированной дисковой галактики со значением диссипативного коэффициента $1 - k = 0.10$. С учетом вязких столкновений между частицами полная механическая энергия системы не сохраняется.

На рис. 6, а представлено радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов в диске массивной изолированной галактики (отношение суммы масс всех тяжелых элементов в частицах к полной

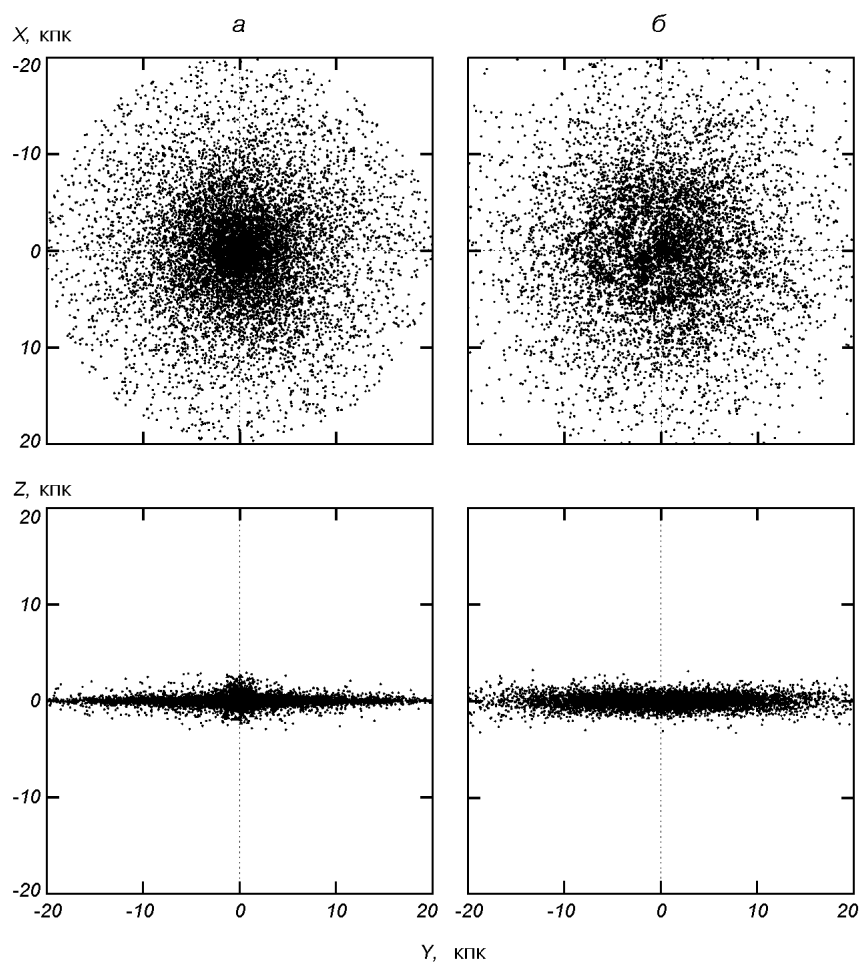


Рис. 4. Эволюция изолированной дисковой галактики с учетом вязких столкновений (значение диссипативного коэффициента $1 - k = 0.10$) в проекциях на плоскости XY и YZ : a — для начального момента времени $t = 0$, b — конечного момента $t = 10$

сумме масс частиц в данном галактоцентрическом цилиндре толщиной 0.5 кпк) для значения диссипативного коэффициента $1 - k = 0.10$ соответственно на разные моменты времени $t = 0, 2, 4, 6, 8, 10$. С учетом вязких столкновений радиальный градиент относительного содержания тяжелых элементов в процессе эволюции галактики испытывает существенные изменения. За счет динамического перемешивания частиц по радиусу в центральных областях относительное содержание тяжелых элементов уменьшается, а на периферии — увеличивается. Перемешивание частиц приводит к тому, что средний радиальный градиент по диску относительного содержания тяжелых элементов уменьшается. Учитывать подобные процессы перемешивания очень важно для взаимодействующих галактик и галактик с перемычкой, в которых активно идут процессы звездообразования [14]. В модели изолированной дисковой галактики с большим значением диссипативного коэффициента $1 - k = 0.15$ (рис. 6, б), радиальный градиент уменьшается значительно быстрее. Таким образом, задавая различные значения диссипативного коэффициента, мы можем получить различные темпы перемешивания частиц и соответственно различные скорости уменьшения радиального градиента содержания тяжелых элементов в дисках галактик.

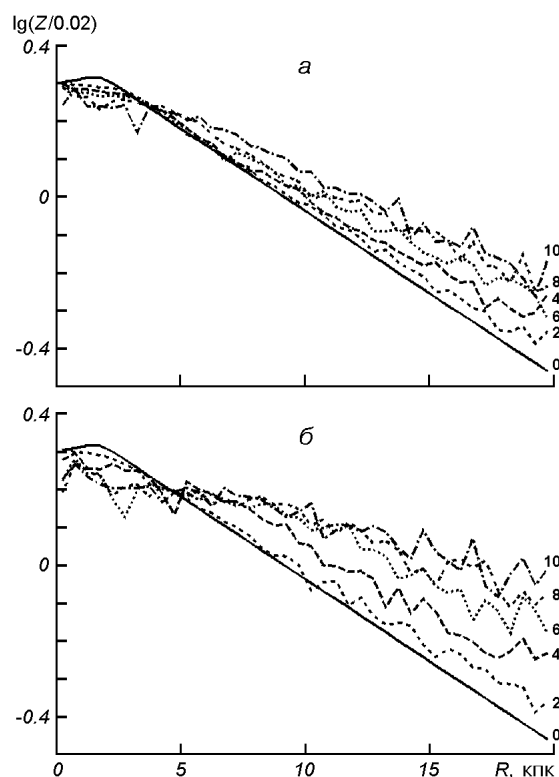
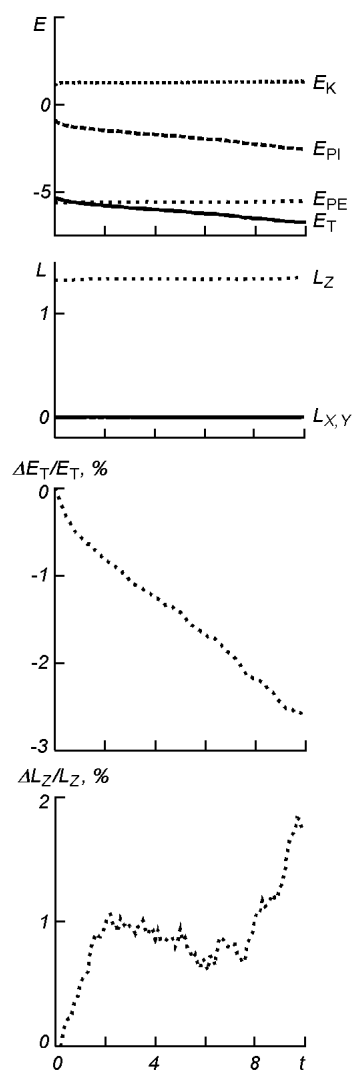


Рис. 5. Изменение со временем энергии системы и момента вращения (E , L) для модели изолированной дисковой галактики со значением диссипативного коэффициента $1 - k = 0.10$ и соответствующие им потери энергии и момента вращения ($\Delta E/E$, $\Delta L/L$)

Рис. 6. Радиальные распределения относительного содержания тяжелых элементов в диске изолированной галактики для значений диссипативного коэффициента $1 - k = 0.10$ (а), 0.15 (б) на моменты времени $t = 0, 2, 4, 6, 8, 10$

Теперь рассмотрим эволюцию дисковой галактики с учетом вязких столкновений ($1 - k = 0.10$) в процессе ее взаимодействия (слияния) с карликовой галактикой с пониженным содержанием тяжелых элементов.

Эволюция сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик для данного значения диссипативного коэффициента ($1 - k = 0.10$) соответственно на разные моменты времени показана на рис. 7. Верхние два ряда соответствуют проекциям на ось XU , а нижние два ряда — на ось YZ . В начальный момент времени карликовая галактика находится в гало дисковой галактики на высоте z_0 от плоскости ее диска. Под действием гравитационного притяжения карликовая галактика начинает совершать вокруг дисковой галактики орбитальные движения под определенным углом к плоскости ее диска, пересекая эту плоскость вначале на далеком расстоянии от центра галактики. Такие орбитальные движения спутника вокруг дисковой галактики приводят к образованию спирального узора. За счет гравитации и динамического трения в гало радиус орбиты спутника галактики постепенно уменьшается, и спутник со временем проходит через диск галактики на все более близком расстоянии от ее центра. В начальные моменты времени спутник несколько раз проходит

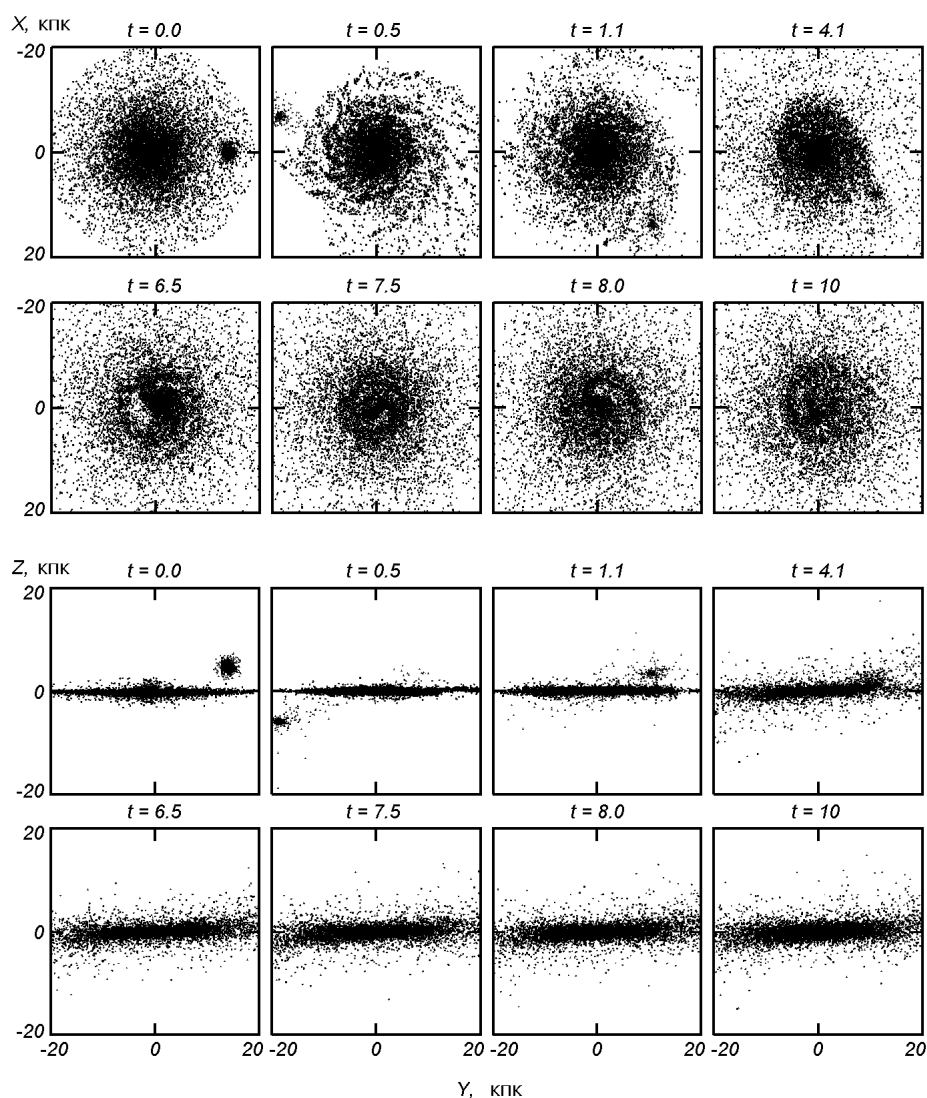


Рис. 7. Эволюция дисковой галактики с учетом вязких столкновений ($1 - k = 0.10$) в процессе ее слияния с карликовой галактикой с пониженным содержанием тяжелых элементов. Верхние два ряда соответствуют проекциям на плоскость XY , а нижние два ряда — на плоскость YZ

через диск галактики, снова возвращаясь в гало, а примерно после $t = 3$ карликовая галактика уже не выходит из диска, продолжая вращаться вокруг центра галактики уже в плоскости диска. При этом в конечные моменты времени в диске галактики образуются спирали, которые очень сильно закручиваются, практически образуя кольцо вокруг ядра ($t = 6.5$), и на месте балджа образуется перемычка ($t = 7.5$), либо ветвь, соединяющая кольцо с ядром ($t = 10$).

В ходе орбитальных движений спутника вокруг диска галактики за счет ее приливных воздействий из спутника вырываются отдельные его части, которые также начинают двигаться по орбитам вокруг дисковой галактики. Вначале они образуют некий хвост от спутника, затем распространяются по всему гало, постепенно приближаются к плоскости диска галактики, выпадают на диск и перемешиваются с его веществом. На рис. 8 изображено относительное распределение выпавшей на диск галактики массы карлико-

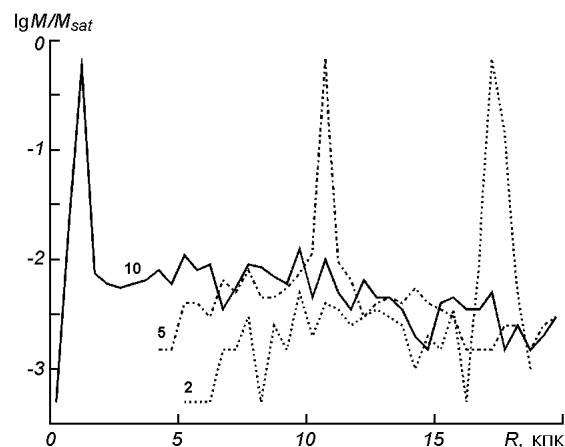


Рис. 8. Относительное распределение массы выпавшего на диск галактики вещества карликового спутника вдоль радиуса диска на моменты времени $t = 2, 5, 10$

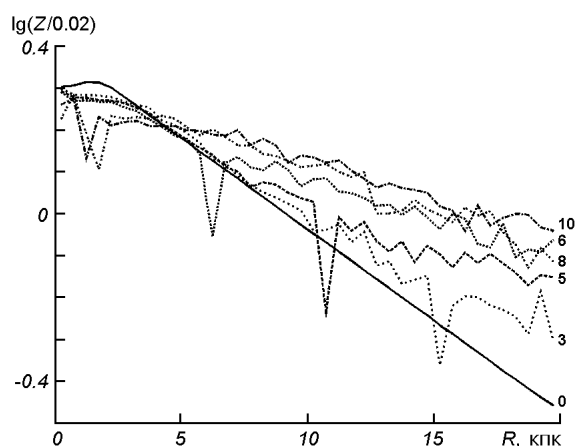


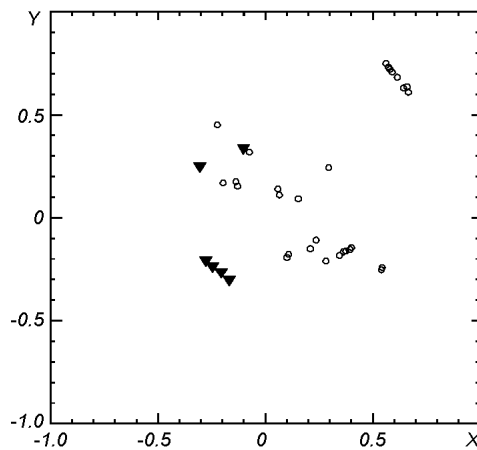
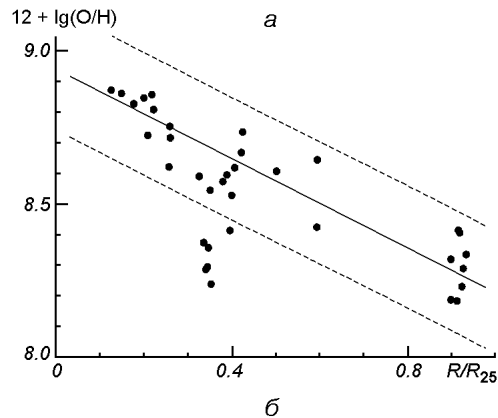
Рис. 9. Радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов в диске галактики в процессе ее слияния с карликовой галактикой с более низким содержанием тяжелых элементов для значения диссипативного коэффициента $1 - k = 0.10$ на моменты времени $t = 0, 3, 5, 6, 8, 10$

вого спутника вдоль диска в разные моменты времени. Видно, что карликовая галактика во все моменты времени является достаточно компактным образованием. Даже на поздних стадиях моделирования основная доля массы спутника находится в сгустке размером около 1-2 кпк. На конечный момент времени ($t = 10.0$) мы видим, что примерно 60 % материала карликовой галактики сосредоточено в компактном объекте, который уже почти находится в центре галактики, а значит, примерно 40 % массы карликовой галактики распределено по всему диску.

Радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов в диске массивной галактики при ее слиянии с карликовой галактикой с более низким содержанием тяжелых элементов на разные моменты времени $t = 0, 3, 5, 6, 8, 10$ изображено на рис. 9 ($1 - k = 0.10$). По сравнению с процессом динамической эволюции изолированной дисковой галактики (рис. 6, а) в случае слияния с карликовой галактикой (при том же значении диссипативного коэффициента) в диске более значительным образом изменяется (уменьшается значительно быстрее) радиальный градиент химического содержания тяжелых элементов. Такое уменьшение радиального градиента содержания тяжелых элементов для случая изолированной дисковой галактики можно получить, увеличив примерно в полтора раза значение диссипативного коэффициента (рис. 6, б).

В процессе слияния химически бедного карлика с дисковой галактикой в наших моделях мы также наблюдаем отчетливое понижение химического содержания тяжелых элементов в диске в том месте, где находится большая часть массы карликовой галактики (около 0.2 dex). При наших модельных

Рис. 10. Полученное в работе [2] радиальное распределение содержания кислорода в областях Н II для дисковой галактики NGC 2903 (а) и соответствующие положения этих областей Н II на плоскости диска данной галактики (б). Треугольниками обозначены области, в которых отклонения от среднего уровня содержания кислорода наибольшие ($\Delta(O/H) < -0.2$ dex)



параметрах данное понижение размывается в течение примерно 6 млрд лет после столкновения.

Подобная компактная область с пониженным содержанием кислорода в дисковой галактике NGC 2903 была обнаружена в работе [2]. На рис. 10 представлено радиальное распределение содержания кислорода в областях Н II и соответствующие положения этих областей Н II на плоскости диска галактики. Так как в данной галактике все еще отчетливо видна компактная область с пониженным содержанием тяжелых элементов, то мы можем сделать вывод, что поглощение карликовой галактики в данном объекте произошло менее чем 6 млрд лет назад.

В работах [3, 11, 12, 26] галактика NGC 2903 классифицируется как активная спиральная галактика с перемычкой и кольцом. Возможно наличие кольца, перемычки и активность данной галактики связаны с поглощением карликовой галактики. Но этот факт еще требует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

Мы исследовали изменения радиального градиента содержания тяжелых элементов в диске массивной галактики вследствие ее слияния с маломассивной карликовой галактикой с пониженным содержанием тяжелых элементов. Для рассмотрения данной задачи была разработана специальная компьютерная программа динамического моделирования слияний галактик методом N тел, которая включает в себя процессы вязкого столкновения частиц (тел, самогравитирующих фрагментов).

В динамическую модель N тел мы также включили понятие содержания Z тяжелых элементов в частицах. В нашей модели частицы описывают целые гравитационно связанные области смеси газа и звезд. В первом приближении мы не рассматривали процессы звездообразования и связанного с ними обогащения тяжелыми элементами отдельных модельных частиц. Мы также пренебрегали возможным обменом массой (и химическими элементами) между частицами. Радиальный градиент химического содержания тяжелых элементов в дисковой галактике после столкновения с

карликовой галактикой мы определяли по набору частиц как диска, балджа, так и частиц из карликового спутника.

Путем ввода вязких столкновений между частицами в модели N тел мы получили перераспределение частиц по диску галактики в процессе ее эволюции. Динамическое перемешивание частиц приводит к тому, что средний радиальный градиент по диску галактики относительного содержания тяжелых элементов уменьшается. Причем чем больше значение диссипативного коэффициента, тем быстрее уменьшается радиальный градиент. Задавая различные значения диссипативного коэффициента, мы можем получить различные темпы перемешивания частиц и соответственно различные скорости уменьшения радиального градиента химического содержания тяжелых элементов в дисках галактик.

В наших модельных расчетах карликовая галактика во все моменты времени является достаточно компактным образованием. Даже на поздних стадиях моделирования основная доля массы спутника находится в сгустке размером около 1-2 кпк. На конечный момент времени ($t = 10.0$) примерно 60 % вещества карликовой галактики сосредоточено в компактном объекте, который уже почти находится в центре галактики, остальные 40 % массы карликовой галактики распределены по всему диску.

В результате наших расчетов мы получили, что по сравнению с процессом динамической эволюции изолированной дисковой галактики в случае слияния с карликовой галактикой (для одного и того же значения диссипативного коэффициента) в диске более значительным образом изменяется (уменьшается значительно быстрее) радиальный градиент химического содержания тяжелых элементов. Примерно такое же уменьшение радиального градиента содержания тяжелых элементов для случая изолированной (без спутника) дисковой галактики можно получить, увеличив в полтора раза значение диссипативного коэффициента.

Также в процессе взаимодействия (слияния) химически бедной карликовой галактики с дисковой галактикой в наших моделях мы наблюдаем отчетливое понижение химического содержания тяжелых элементов в диске в том месте, где находится большая часть массы карликовой галактики (около 0.2 dex). При наших модельных параметрах данное понижение размывается в течение примерно 6 млрд лет после столкновения. Полученные модельные результаты мы сравнили с данными наблюдений для дисковой галактики NGC 2903. В данной галактике отчетливо видна компактная область с пониженным содержанием тяжелых элементов. Таким образом, мы можем сделать вывод, что поглощение карликовой галактики в данном объекте произошло менее чем 6 млрд лет назад.

Авторы благодарят за поддержку Украинский государственный фонд фундаментальных исследований за предоставление гранта 02.07.00132. П. Берцик благодарен за поддержку Немецкому научному фонду (DFG) SFB-439 (sub-project B11). Работу П. Берцика также поддержали следующие гранты: NNG04GJ48G от NASA, AST-0420920 от NSF и HST-AR-09519.01-A от STScI.

Вычисления были проведены с помощью системы Mitaka Underground Vineyard (MUV) GRAPE в Национальной астрономической обсерватории Японии (НАОЯ). Авторы особо благодарны коллеге Наохито Накасато (Computational Astrophysics Group, RIKEN) за его продолжительную помощь и поддержку в использовании компьютерного оборудования НАОЯ GRAPE.

Авторы благодарны Л. С. Пилюгину за ценные комментарии и замечания.

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.—Р. 599—629.
2. *Шкварун Р. В., Пилюгин Л. С.* Распределение содержания кислорода в дисках восьми спиральных галактик // *Кинематика и физика небес. тел.*—2004.—20, № 1.—С. 68—75.
3. *Alonso-Herrero A., Ryder S. D., Knapen J. H.* Nuclear star formation in the hotspot galaxy NGC 2903 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—322, N 4.—P. 757—769.
4. *Berczik P.* Chemo-dynamical SPH code for evolution of star forming disk galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1999.—348, N 2.—P. 371—380.
5. *Berczik P.* Chemo-dynamical evolution of disk galaxies, smoothed particles hydrodynamics approach // *Astrophys. and Space Sci.*—1999.—265, N 1/4.—P. 473—477.
6. *Berczik P., Hensler G., Theis Ch., Spurzem R.* Chemodynamical modeling of galaxy formation and Evolution // *Astrophys. and Space Sci.*—2002.—281, N 1.—P. 297—300.
7. *Berczik P., Hensler G., Theis Ch., Spurzem R.* A Multi-Phase Chemo-Dynamical SPH code for galaxy evolution. Testing the code. // *Astrophys. and Space Sci.*—2003.—284, N 2.—P. 865—868.
8. *Berczik P., Kravchuk S. G.* Galaxy as dynamical system with accreting cold gas halo // *Кинематика и физика небес. тел.*—1997.—13, N 2.—P. 32—38.
9. *Berczik P., Kravchuk S. G.* On the Galaxy baryonic halo // *Astron. and Astrophys. Trans.*—1997.—14.—P. 61—64.
10. *Berczik P., Kravchuk S. G.* Dissipative N-body code for galactic evolution. // *Astron. and Astrophys. Trans.*—2000.—18, N 6.—P. 829—838.
11. *Blaha C., Johnson K., Wyder T.* Spectroscopic observations of hot SPOT galaxies // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1994.—26, N 2.—P. 876.
12. *Dosaj A.* Morphology of the barred spiral galaxy 2903 // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1998.—30.—P. 915.
13. *Ebisuzaki T., Makino J., Fukushige T., et al.* GRAPE project: an overview // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1993.—45, N 3.—P. 269—278.
14. *Hernquist L., Mihos J. Ch.* Excitation of activity in galaxies by minor mergers // *Astrophys J.*—1995.—448, N 1.—P. 41—63.
15. *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. Suppl. Ser.*—1989.—71.—P. 871—893.
16. *Johnston K. V., Spergel D. N., Hernquist L.* The disruption of the Sagittarius dwarf galaxy // *Astrophys J.*—1995.—451, N 2.—P. 598—606.
17. *Kawai A., Fukushige T., Makino J., Taiji M.* GRAPE-5: a special-purpose computer for N-Body Simulations // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—2000.—52, N 4.—P. 659—676.
18. *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.
19. *Makino J., Funato Yo.* The GRAPE software system // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1993.—45, N 3.—P. 279—288.
20. *Mihos J. Ch., Hernquist L.* Triggering of starbursts in galaxies by minor mergers // *Astrophys. J. Lett.*—1994.—425, N 1.—P. L13—L16.
21. *Miyamoto M., Nagai R.* Three-dimensional models for the distribution of mas in galaxies // *Publ. Astron. Soc. Jap.*—1975.—27, N 4.—P. 533—543.
22. *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. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1986.—Vol. 267.—P. 184.*
23. *Putman M. E., Staveley-Smith L., Freeman K. C., et al.* The magellanic stream, high-velocity clouds, and the sculptor group // *Astrophys. J.*—2003.—586, N 1.—P. 170—194.
24. *Searle L., Zinn R.* Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo // *Astrophys. J.*—1978.—225, N 2.—P. 357—379.
25. *Walker I. R., Mihos J. Ch., Hernquist L.* Quantifying the fragility of galactic disks in minor mergers // *Astrophys J.*—1996.—460, N 1.—P. 121—135.
26. *Watson A. M., Tripp T. M., Gallagher J. S.* Off-center star formation in the nuclear starburst galaxy NGC 2903 // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1994.—26, N 2.—P. 877.
27. *Zaritsky D.* The radial distribution of oxygen in disk galaxies // *Astrophys. J. Lett.*—1992.—390, N 2.—P. L73—L76.

Поступила в редакцию 13.08.04