

УДК 524.7-54

ИЗМЕНЕНИЯ В ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ ДИСКОВОЙ ГАЛАКТИКИ ПРИ СЛИЯНИИ С ХИМИЧЕСКИ БЕДНОЙ КАРЛИКОВОЙ ГАЛАКТИКОЙ

Т.А. Шумакова, П.П. Берцик

CHANGES IN DISK GALAXY CHEMICAL ABUNDANCE DUE TO MINOR MERGER WITH DWARF GALAXY WITH LOW HEAVY ELEMENTS ABUNDANCE

T.A. Shumakova, P.P. Berczik

В данной работе путем построения численной модели было получено, что в результате слияния массивной дисковой галактики с химически бедной карликовой галактикой диск массивной галактики становится более богатым на содержание тяжелых элементов. Также в наших моделях мы наблюдаем отчетливое понижение химического содержания тяжелых элементов в диске в том месте, где находится карликовая галактика. Полученные результаты мы сравнили с данными наблюдений для дисковой галактики NGC 2903 и выяснили, что в ней наблюдаются проявления подобного поглощения карликовой галактики. На основании полученных нами результатов мы можем сказать, что менее 6 миллиардов лет тому назад дисковой галактикой NGC 2903 была захвачена и поглощена карликовая галактика с низким содержанием металлов.

In this work by means of numerical modelling it was shown that in result of minor merger of massive disk galaxy and dwarf galaxy with low heavy elements abundance the disk of massive galaxy becomes richer on the maintenance of heavy elements. Also in our model we observe a distinct lowering of chemical heavy elements abundance in the disk at the place of dwarf galaxy position. We have compared the received results with the observational data for disk galaxy NGC 2903 and have found, that in this galaxy the manifestations of such minor merger are observed. On the basis of our results we can say that less than 6 billions of years ago disk galaxy NGC 2903 caught and absorbed dwarf galaxy with low heavy elements abundance.

Введение

Как космологические модели, так и детальные наблюдения выдвигают на первый план идею 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 галактик – своих спутников. Поглощения галактиками маломассивных спутников происходят довольно часто, и их следствия могут быть замечены даже в нашей Галактике: Магелланов поток, молодые шаровые скопления в гало Галактики, карликовая галактика в Стрельце и т.д. [23].

Орбитальные движения спутника возбуждают в дисковой галактике целый ряд неустойчивостей. В диске галактики могут образоваться сильно закрученные спиральные рукава и перемычка. Через спирали и бар межзвездный газ может двигаться к ядру галактики, стимулируя повышение скорости звездообразования как в диске, так и в ядре [14]. В результате такого поглощения меняется структура, форма и химический состав диска галактики.

В данной работе путем построения численной модели мы исследовали влияние поглощения массивной дисковой галактикой карликовой галактики с низким содержанием металлов на эволюцию радиального распределения содержания тяжелых элементов по диску.

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 (телами). В используемом нами методе среда галактик разбивается на отдельные самогравитирующие фрагменты (частицы либо тела), включающие в себя как звезды, так и газ. Каждая из частиц представляется сферой Пламмера [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 – соответственно масса, плотность и радиус сферы Пламмера.

Поведение таких частиц описываем через гравитационное взаимодействие

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

где G – гравитационная постоянная, m_i и m_j – массы i -ой и j -ой частиц соответственно, $r_{ij} = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ – расстояние между частицами i и j . Параметр ϵ вводится для ослабления взаимодействия при достаточно малом расстоянии между частицами (для случаев соприкосновения частиц).

Чтобы описать взаимодействие газовых составляющих самогравитирующих фрагментов (N тел) в нашей модели мы вводим неупругие вязкие столкновения между частицами [9]. Для описания потерь полной механической энергии в результате вязких столкновений, мы меняем после столкновения скорости и направления движения частиц следующим образом: уменьшаем радиальную компоненту скорости частиц на некоторый диссипативный коэффициент, а тангенциальную компоненту оставляем неизменной [8].

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

где \vec{V}_i – скорость i -ой частицы до столкновения, \vec{V}_i' – скорость i -ой частицы после столкновения, $\vec{V}_{ij|(r_{ij})}$ – радиальная компонента взаимной скорости частиц i и j , $coef_{coll}$ – диссипативный коэффициент столкновений между частицами i и j , который и определяет потери энергии частиц за счет вязкости.

Задача сводится к решению системы следующих дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{V}_i, \quad \frac{d\vec{V}_i}{dt} = \vec{a}_i,$$

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

где \vec{r}_i , \vec{V}_i , \vec{a}_i – соответственно радиус-вектор i -й частицы, ее скорость и гравитационное ускорение.

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/>).

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-кузьминовского и пламмеровского распределений частиц:

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

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

где R и z – соответственно расстояние от центра и высота системы, M – масса системы, a и b – коэффициенты, определяющие ее форму.

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 задаем экспоненциальное распределение тяжелых элементов по диску, которое наилучшим образом согласуется с данными наблюдений [27]:

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

В качестве первого приближения мы не рассматриваем процессы звездообразования и связанного с ними обогащения тяжелыми элементами. Для упрощения задачи также не учитываем возможный обмен массой (и химическими элементами) между частицами. Радиальный градиент химического содержания

тяжелых элементов в диске галактики мы определяем по набору частиц диска, балджа и спутника.

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 [7]:

$$a_i = a(r_i), \quad r_{i+1} = r_i + V_i dt + \frac{a_i dt^2}{2},$$

$$a_{i+1} = a(r_{i+1}),$$

$$V_{i+1} = V_i + \frac{a_i + a_{i+1}}{2} dt.$$

Для определения гравитационной силы между частицами в наших расчетах мы использовали специализированные системы компьютеров GRAPE5/GRAPE6 [17] для задачи интегрирования гравитирующих систем N тел.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлено радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов в диске массивной изолированной галактики (отношение суммы масс всех тяжелых элементов в частицах к полной сумме масс частиц в данном галактоцентрическом цилиндре толщиной 0.5 кпс) для значения диссипативного коэффициента $1 - coef_{coll} = 0.10$ соответственно на разные моменты времени. 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 баром, в которых активно идут процессы звездообразования [14].

Эволюция сложной гравитирующей системы дисковой и карликовой галактик для данного значения диссипативного коэффициента соответственно на разные моменты времени показана на рис. 2. Совершая орбитальные движения вокруг дисковой галактики, спутник за счет гравитации и динамического трения в гало по спирали приближается к ее центру, постепенно при этом разрушаясь. В начальные моменты времени спутник несколько раз проходит через диск галактики, снова возвращаясь в гало, и уже где-то после $t = 3.0$ карликовая галактика уже не выходит из диска, продолжая вращаться вокруг центра галактики уже в плоскости диска. При этом в диске галактики образуются спирали, которые в конечные моменты времени очень сильно закручиваются, практически образуя кольцо вокруг ядра ($t = 6.5$), а на месте балджа образуется перемычка ($t = 7.5$).

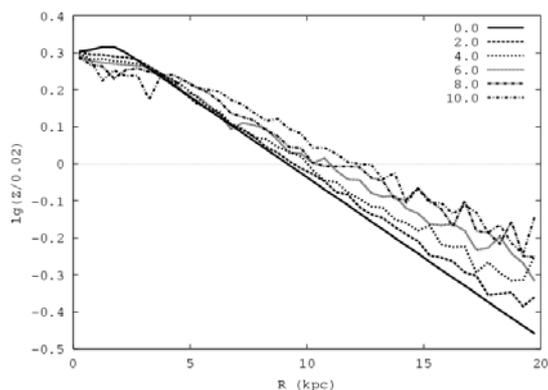


Рис. 1. Радиальные распределения относительного содержания тяжелых элементов в диске изолированной галактики (по отношению к солнечному $Z = 0.02$) для значения диссипативного коэффициента $1 - coef_{coll} = 0.10$ соответственно на разные моменты времени $t = 0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0$.

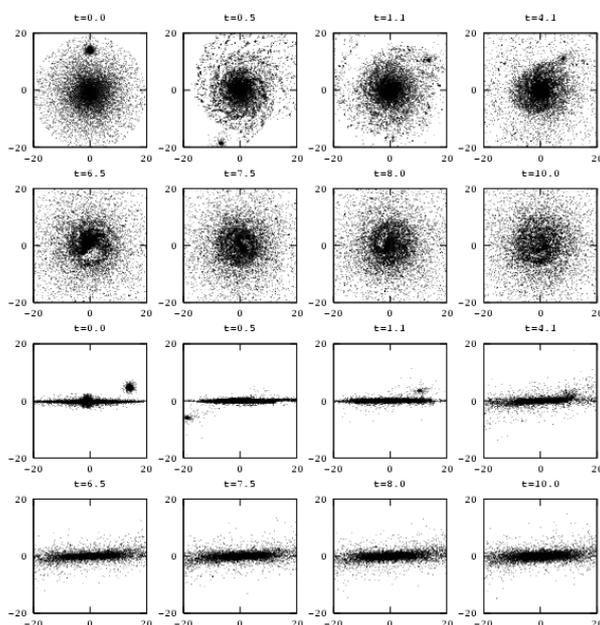


Рис. 2. Эволюция дисковой галактики в процессе ее взаимодействия (слияния) с карликовой галактикой с низким содержанием тяжелых элементов. Верхние два ряда соответствуют проекциям на плоскость XY , а нижние два ряда – на плоскость YZ ($1 - coef_{coll} = 0.10$)

Радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов в диске массивной галактики при ее слиянии с карликовой галактикой с низким содержанием металлов соответственно на разные моменты времени изображено на рис. 3. По сравнению с процессом динамической эволюции изолированной дисковой галактики (рис. 1) в случае слияния с карликовой галактикой (при том же значении диссипативного коэффициента) в диске радиальный градиент химического содержания тяжелых элементов уменьшается значительно быстрее.

В процессе взаимодействия (слияния) химически бедного карлика с дисковой галактикой в наших моделях мы также наблюдаем отчетливое понижение химического содержания тяжелых элементов в

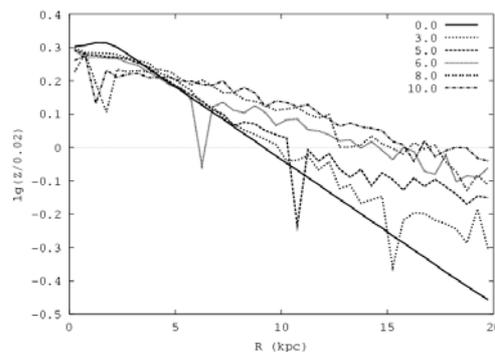


Рис. 3. Радиальное распределение относительного содержания тяжелых элементов в диске галактики в процессе ее слияния с карликовой галактикой с более низким содержанием тяжелых элементов соответственно на разные моменты времени $t = 0.0, 3.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0$ ($1 - coef_{coll} = 0.10$).

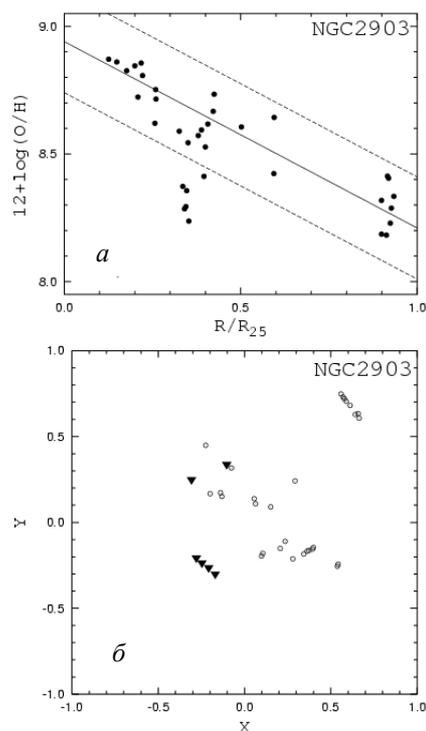


Рис. 4. Полученное в работе [2] радиальное распределение содержания кислорода в НII-областях для дисковой галактики NGC 2903 (а) и соответствующие положения этих НII-областей на плоскости диска данной галактики (б) (треугольниками обозначены области, в которых отклонение от среднего уровня содержания кислорода $< -0.2dex$).

диске в том месте, где находится большая часть массы карликовой галактики. Величина понижения содержания тяжелых элементов в диске галактики за счет упавшего спутника составляет около $0.2dex$. При наших модельных параметрах данное понижение размывается в течение примерно 6 миллиардов лет после столкновения.

Наличие подобной компактной области с пониженным содержанием тяжелых элементов для дисковой галактики NGC 2903 было найдено в работе [2]. На рис. 4 представлено полученное авторами этой работы радиальное распределение содержания

кислорода в НII-областях для дисковой галактики NGC 2903 и соответствующие положения этих НII-областей на плоскости ее диска. Поскольку 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 6 миллиардов лет назад.

Выводы

В данной работе мы исследовали изменения радиального градиента содержания тяжелых элементов в диске массивной галактики вследствие ее слияния с химически бедной карликовой галактикой. Для рассмотрения данной задачи была разработана специальная компьютерная программа динамического моделирования слияний галактик методом N тел.

Путем ввода вязких столкновений между частицами (телами) в модели N тел мы получили уменьшение среднего радиального градиента относительного содержания тяжелых элементов в диске галактики.

В результате наших расчетов мы получили, что по сравнению с процессом динамической эволюции изолированной дисковой галактики в случае слияния с карликовой галактикой в диске значительно быстрее уменьшается радиальный градиент содержания тяжелых элементов.

В процессе слияния химически бедной карликовой галактики 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. 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, на основе полученных нами расчетов мы можем сделать вывод, что менее 6 миллиардов лет тому назад дисковой галактикой NGC 2903 была захвачена и поглощена карликовая галактика с низким содержанием тяжелых элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкварун Р.В., Пилюгин Л.С. Распределение содержания кислорода в дисках восьми спиральных галактик // Кин. и физ. неб. тел. 2004. Т. 20, № 1. С. 68–75.
2. Berzic P. Chemodynamical evolution of disk galaxies, smoothed particles hydrodynamics approach // *Ap&SS*. 1999. 265. P. 473–477.
3. Berzic P., Kravchuk S.G. Dissipative N-body code for galaxy evolution // *A&ApTr*. 2000. 18. P. 831–840.
4. Berzic P., Hensler G., Theis Ch., Spurzem R. Chemodynamical modeling of galaxy formation and evolution // *Ap&SS*. 2002. 281. P. 297–300.
5. Hernquist L., Mihos J. Ch. Excitation of activity in galaxies by minor mergers // *Astrophys J*. 1995. 448. P. 41–63.
6. 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.
7. Miyamoto M., Nagai R. Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 1975. 27. P. 533–543.
8. 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. Issue 1. P. 170–194.
9. Zaritsky D. The radial distribution of oxygen in disk galaxies // *Astrophys. J.*, Part 2. Letters. 1992. V. 390, N. 2. P. L73–L76.

Главная астрономическая обсерватория национальной академии наук Украины, Киев