

УДК: 524.38—54

УСЛОВИЯ И ХАРАКТЕР ПЕРЕТЕКАНИЯ ВЕЩЕСТВА
В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ ГАЛАКТИК ТИПА S—E

Н. Я. СОТНИКОВА

Поступила 30 июля 1987

Принята к печати 20 августа 1987

В рамках ограниченной круговой задачи трех тел численно моделировался процесс перетекания газа из спиральной галактики в эллиптическую. Выяснилось, что возможность потери газа спиральной галактикой сильно зависит от соотношения между направлением ее осевого вращения и орбитального движения галактик двойной системы. В случае, когда эти движения направлены в разные стороны, перетекания газа не происходит. Кроме того, существенным параметром задачи является размер диска спиральной галактики. Согласно проведенным расчетам темп поступления газа в эллиптическую галактику для среднестатистической пары S—E с признаками взаимодействия из каталога И. Д. Караченцева составляет $\sim 0.2 M_{\odot}$ в год. Этого значения вполне достаточно для того, чтобы объяснить повышенное содержание нейтрального водорода ($\sim 10^4 M_{\odot}$) в ряде галактик раннего типа. Расчеты также показали, что за время одного-двух оборотов диска спиральной галактики происходит сильное искажение его формы в результате приливного взаимодействия. Этот факт следует учитывать при определении индивидуальных масс спиральных галактик, входящих в двойные системы, по кривым вращения.

1. Введение. В физике двойных галактик, как и в физике двойных звезд, очень важным является процесс обмена веществом между компонентами системы. Изучение этого процесса является тем более актуальным, что в последние годы получила довольно широкое распространение та точка зрения, что характер распределения и количество газа в галактиках раннего типа, а также разного рода активность галактик (вспышки звездообразования, сейфертовская активность, феномен радиогалактики) связаны с приливным влиянием соседней галактики или даже непосредственно с поступлением в них газа из галактики, расположенной вблизи активной (см., например, [1]).

В последнее время все больше появляется теоретических подтверждений подобных идей. Однако почти во всех теоретических работах рассматривается лишь приливное влияние близко пролетающей галактики на процессы звездообразования и активность ядер галактик [2—4]. Что касается двойных и взаимодействующих галактик, то, несмотря на широкий интерес к

ним, возникший со времени опубликования в 1972 г. И. Д. Караченцевым «Каталота изолированных пар галактик северного неба» [5], имеющийся богатый и разнообразный наблюдательный материал до сих пор очень мало использован в теоретических работах. Вопрос же об обмене веществом в двойных системах и возможных последствиях такого обмена, хотя и стоит давно [1], практически не исследован.

Одна из первых, самых простых попыток формализовать этот процесс была сделана В. В. Деминым и М. В. Сажиным в 1985 г. [6, 7]. Была введена аналогия между эволюцией двойных галактик и эволюцией двойных звезд. На основе данных И. Д. Караченцева о двойных галактиках для среднестатистических систем в рамках модели Роша построены критические эквипотенциальные поверхности и показано, что в системах, имеющих признаки взаимодействия, размеры галактик существенно превосходят размеры критической поверхности (по крайней мере для системы типа Е—Е, для которых модель Роша представляется наиболее оправданной), а это, как известно из физики двойных звезд, является условием активной потери вещества компонентами системы. Аналогичная задача с использованием более богатого статистического материала решалась в ЛГУ И. Л. Маслик в 1983 г. в курсовой работе, оставшейся неопубликованной.

Необходимо, однако, иметь в виду, что дисперсия размеров галактик и проекций расстояния между ними велика и сравнима с самими средними величинами. Учитывая это обстоятельство, нужно с осторожностью делать заключение о том, заполняет галактика свою полость Роша или нет.

В работе [7] на основе распределения гравитационного потенциала в системе двух неподвижных галактик со сферически-симметричным распределением вещества вычислены скорости, необходимые для перелета точечной массы с поверхности галактик к точке L_1 . Скорости, исправленные за фактор проекции, для приведенных в статье [7] трех моделей Е—Е систем без признаков взаимодействия получаются достаточно большими и составляют 300—400 км/с.

Поскольку, говоря о перетекании вещества, обычно подразумевают газ и, более того, газовые облака, то трудно придумать механизм, придающий облакам такую скорость.

К сожалению, на основе указанных исследований нельзя ничего сказать о характере перетекания вещества в двойных галактиках, а также о количестве перетекающего вещества. В целом вопрос о возможности обмена газом остается открытым.

Чтобы ответить на все эти вопросы, необходимо решить уравнение движения вещества в гравитационном поле системы двух галактик. При этом нужно дать обоснование выбору начальной скорости движения вещества.

Вопрос о том, в какой форме может происходить обмен веществом в двойных галактиках (в форме звезд или в виде газа) рассмотрен в работе

[8]. Найдены параметры газового облака, а также условия в окологалактической среде, при которых возможно течение в виде облаков. Если считать, что газ в основном состоит из облаков, то при решении задачи об обмене веществом в двойных галактиках нет принципиальной разницы между ними и звездами. И то, и другое можно рассматривать как пробные частицы пренебрежимо малой массы (по сравнению с массой галактики). Тем не менее, интерес представляет именно перетекание газа, поэтому речь в дальнейшем пойдет о газе.

2. *Перетекание вещества с галактики типа Sp на E-галактику в рамках ограниченной круговой задачи трех тел.* Вопрос о характере перетекания газа с одной галактики на другую, а также о количестве перетекающего вещества можно исследовать в рамках ограниченной задачи трех тел. Отличие от звезд состоит, главным образом, в том, что галактики нельзя считать точечными массами, и, строго говоря, необходимо рассчитывать самосогласованный потенциал галактик, что сделать имеющимися средствами вычислительной техники очень сложно. В силу этого приходится все же считать потенциал галактик постоянным во времени, но отличным от точечного.

Рассматриваются S—E-системы, то есть галактика богатая газом и галактика, в которой газа мало. Распределение гравитационного потенциала в диске спиральной галактики, там где находятся газовые облака, выбирается таким, чтобы оно соответствовало плоской кривой вращения, вплоть до расстояния, равного радиусу галактики R_1 . Область, где кривая вращения отлична от плоской ($r < R_0 \ll R_1$), не рассматривается. На расстоянии $r > R_1$ закон вращения считается кеплеровским. Если предположить, что распределение гравитационного потенциала, дающего такую кривую вращения, является сферически-симметричным, то круговую скорость вращения $v_\varphi = \text{const}$ можно выразить через радиус R_1 и полную массу M_1 внутри R_1 следующим образом:

$$v_\varphi = \sqrt{\frac{GM_1}{R_1}}. \quad (1)$$

Пробные частицы-облака, кроме систематической скорости вращения v_φ , имеют еще и небольшую случайную скорость с произвольным направлением $v_{\text{двсл}} \ll v_\varphi$. Их сумма и есть начальная скорость движения газового облака.

Обе галактики вращаются вокруг центра масс по круговым орбитам [9] с угловой скоростью ω . Потенциал эллиптической галактики считается точечным, тем не менее вводится понятие радиуса E-галактики R_2 . Считается, что, если газовое облако попадает в область внутри R_2 , то оно уже

принадлежит эллиптической галактике. Диск расположен в плоскости орбитального движения галактик.

Для удобства вводится следующая система отсчета. Центр системы отсчета расположен в центре спиральной галактики, ось абсцисс направлена вдоль линии, соединяющей центры обеих галактик. Сама система вращается с угловой скоростью ω вокруг некой неподвижной.

Уравнения, описывающие движение пробной частицы, записываются в безразмерном виде. В качестве единицы длины выбрано расстояние между центрами галактик, единицы времени — величина, обратная угловой скорости обращения галактик по круговым орбитам $1/\omega$.

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{d\tau^2} = 2 \frac{dy}{d\tau} + x - \frac{q}{1+q} - \frac{1}{1+q} F_x + \frac{q}{1+q} \frac{1-x}{r_2^3}, \\ \frac{d^2y}{d\tau^2} = -2 \frac{dx}{d\tau} + y - \frac{1}{1+q} F_y - \frac{q}{1+q} \frac{y}{r_2^3}, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$q = \frac{\mathfrak{M}_2}{\mathfrak{M}_1} = \frac{\mathfrak{M}_E}{\mathfrak{M}_{Sp}},$$

$$F_x = \frac{x}{R_1 r_1^2} \quad r_1 \leq R_1, \quad F_x = \frac{x}{r_1^3} \quad r_1 > R_1,$$

$$F_y = \frac{y}{R_1 r_1^2} \quad r_1 \leq R_1, \quad F_y = \frac{y}{r_1^3} \quad r > R_1,$$

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2},$$

$$r_2 = \sqrt{(1-x)^2 + y^2}.$$

Начальная скорость $\vec{V}_0$ в безразмерном виде:

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_\varphi + \vec{V}_{\text{дисп}}, \quad (3)$$

где $\vec{V}_\varphi$ — безразмерная круговая скорость вращения пробной частицы, $\vec{V}_{\text{дисп}}$ — небольшая случайная добавка к систематической скорости вращения:

$$\begin{cases} V_{\varphi x} = -V_\varphi \sin \varphi \\ V_{\varphi y} = V_\varphi \cos \varphi, \end{cases}$$

$$V_\varphi = \pm \frac{1}{\sqrt{(1+q)R_1}} - r_{1,0}, \quad (4)$$

$$|\vec{V}_{\text{дисп}}| = \alpha V_\varphi, \quad \alpha \ll 1.$$

Знаки «+» и «-» в выражении для V_φ соответствуют прямым и обратным движениям, то есть случаю, когда вращение диска направлено в ту же сторону, что и орбитальное движение, и случаю, когда диск и галактики вращаются в разные стороны; φ — угол между радиус-вектором начального положения пробной частицы $r_{1,0}$ и линией, соединяющей центры галактик.

Распределение поверхностной плотности в диске выбирается соответствующим экспоненциальному закону:

$$\sigma(r) \propto e^{-r/r_0}, \quad (5)$$

r_0 — параметр модели. Для удобства вычислений считается $r_0 = R_1$. Получающиеся результаты можно пересчитать для других значений параметра r_0 . Внешние области диска, откуда происходит истечение газа, моделируются 576 точками, распределенными по закону (5).

Наиболее подробно были рассчитаны следующие варианты:

$$R_1 = 0.20, \quad \alpha = 0, 0.03, 0.05,$$

$$q = 0.5, \quad R_1 = 0.30, 0.35, 0.40 \quad (R_{\text{кр}} = 0.44),$$

$$q = 1.0, \quad R_1 = 0.20, 0.30, 0.35 \quad (R_{\text{кр}} = 0.37),$$

$$q = 2.0, \quad R_1 = 0.20, 0.25, 0.30 \quad (R_{\text{кр}} = 0.31).$$

Для сравнения в скобках приведены минимальные расстояния до критической поверхности Роша от центра спиральной галактики в плоскости диска. Величина α , характеризующая значение случайной скорости $v_{\text{дисп}}$, выбирается такой, чтобы соответствовать наблюдаемой дисперсии скоростей газовых облаков (5—10 км/с). При этом темп ухода облаков оказывается слабо зависящим от α . В случае звезд следовало бы выбрать $\alpha = 0.1 - 0.2$ ($v_{\text{дисп}} \simeq 50$ км/с), но тогда трудно отделить влияние динамических приливов на характер движения вещества в двойной системе от влияния добавочной скорости.

В основном рассчитывались прямые движения. Промежуток времени, на котором рассматривалась эволюция системы облаков, не превышал 1—2-х оборотов Sp-галактики, что соответствует $t_{\text{пр}} = 3 \cdot 10^8$ лет. На большем промежутке времени рассматривать движение газовых облаков не имеет смысла, иначе необходимо задавать самосогласованную модель системы облаков, учитывая их возникновение и разрушение. Это замечание не относится к звездам, и за системой звезд можно следить в течение десятка оборотов диска. При этом можно рассматривать модели с меньшими радиусами.

3. *Результаты численного интегрирования.* Некоторые из результатов численного интегрирования системы (2) с начальной скоростью движения

газового облака (3), (4) представлены на рис. 1—3. Полученные результаты можно охарактеризовать следующим образом:

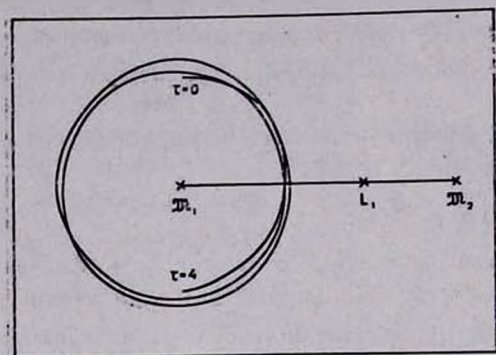


Рис. 1. Случай обратных движений. Траектория движения газового облака. $q = 0.5$, $R_1 = 0.40$, $V_{\text{дисп}} = 0$.

1. За время одного-двух оборотов спиральной галактики перелет точечной массы возможен лишь при прямых движениях. При обратных движениях, вплоть до времен порядка 5 оборотов спиральной галактики, не происходит существенного отклонения движения облаков от первоначального кругового (рис. 1).

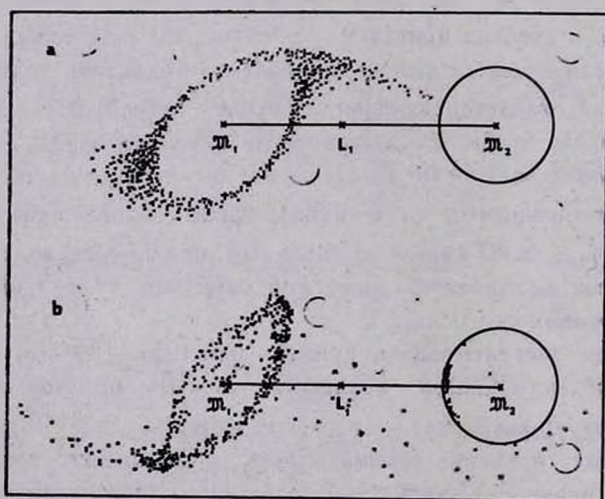
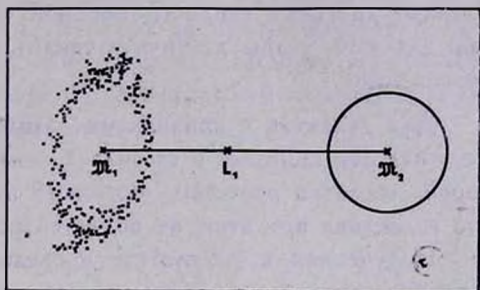


Рис. 2. Эволюция газового потока за время одного оборота спиральной галактики. $q = 2$, $R_1 = 0.30$, $\alpha = 0.03$; а) $\tau = 1$, б) $\tau = 2$.

2. Для эффективного истечения газа из спиральной галактики за время одного-двух ее оборотов, необходимо, чтобы ее размеры были достаточно близки к радиусу критической поверхности Роша, построенной для то-

чечных масс, а именно, должны отличаться от него не больше, чем на 10%. При этом звезды могут «уходить» из спиральной галактики и в том случае, если её размеры меньше указанных. Правда, времена «раскачки» в этом случае будут существенно больше.

Рис. 3. Искажение формы газового диска за время одного оборота спиральной галактики. Истечения газа не происходит (ср. с рис. 2b). $q = 2$, $R_1 = 0.25$, $\alpha = 0.05$, $\tau = 2$.



3. Часть вещества падает в центральные области самой спиральной галактики.

4. Не все потерянное вещество попадает на эллиптическую галактику: $\sim 20\%$ остается в окологалактической области.

5. Количество газа, попадающего на вторую галактику за время одного оборота спиральной галактики, составляет примерно 0.5% от всего газа, имеющегося в диске.

Для количественных оценок темпа поступления вещества в эллиптическую галактику необходимо задать параметры системы, тем более, что количество перетекающего вещества сильно зависит от этих параметров.

Среднее расстояние между галактиками, входящими в S—E-пары, на основе данных каталога И. Д. Караченцева ~ 34 кпк (взаимодействующие системы). Средняя масса Sp-галактик, входящих в эти системы, $(2-3) \cdot 10^{11} M_{\odot}$. Если считать, что масса газа составляет $\sim 10\%$ массы звезд, то темп поступления газа будет $0.1-0.6 M_{\odot}/\text{год}$ в самом эффективном из рассчитанных вариантов ($r_0 = R_1$). Более реальная оценка дает примерно в три раза меньшую мощность перетекания ($R_1/r_0 = 3$).

6. Из приведенных рисунков видно, что имеется сильное искажение диска галактики и отклонение движений газовых облаков от первоначальных круговых даже в том случае, если не происходит истечения газа (рис. 3).

4. Сравнение с наблюдениями. Сопоставление построенной модели перетекания вещества с наблюдательными данными можно сделать следующим образом. Можно разделить галактики, входящие в S—E системы на две группы: с признаками взаимодействия и без таковых. Затем для каж-

дой группы найти среднестатистические характеристики: радиусы S_p -галактик, расстояние между галактиками, отношение масс. Для галактик без признаков взаимодействия отношение среднего радиуса S_p -галактики к среднему расстоянию между галактиками равно $\bar{R}_1/\bar{X} = 0.17$. Это значение соответствует таким из рассматриваемых моделей, в которых первоначальные круговые скорости пробной частицы меньше скорости, необходимой для того, чтобы достичь точки L_1 , и истечение вещества в этом случае невозможно.

Для галактик с признаками взаимодействия $\bar{R}_1/\bar{X} = 0.40$, а эта величина как раз попадает в ту область значений безразмерного радиуса, в которой, согласно расчетам, возможно истечение вещества, несмотря на то, что галактика при этом не обязательно заполняет свою полость Роша.

Полученная в результате проведенных расчетов величина темпа поступления газа в эллиптическую галактику может объяснить некоторые наблюдательные факты. Статистический анализ [10] показал, что данные наблюдений Е и S_0 -галактик в линии 21 см согласуются с бимодальным распределением этих систем по содержанию нейтрального водорода: большинство наблюдаемых галактик раннего типа вовсе не имеют или содержат очень мало газа [11, 12] ($M_{HI}/M_{gal} < 10^{-4}$ или $M_{HI}/L_B < 10^{-2}$), в то время как другие необычайно богаты газом [13, 14]. Это, например NGC 1052, NGC 3226, NGC 4278 и другие подобные Е и S_0 -системы. Примерно 10% всех эллиптических галактик, исследованных на содержание HI, имеют газ с массой порядка 10^5 — $10^9 M_\odot$ [13]. Иногда этот газ собран в центральной области галактики, а иногда в протяженном диске, как, например, в галактике NGC 5173, в которой масса нейтрального водорода оценивается в $1.2 \cdot 10^9 M_\odot$ [15]. Среднее значение массы газа в подобных системах $M_{HI} = 10^8 M_\odot$ ($M_{HI}/L_B = 0.06$) [13]. Замечено, что такие галактики почти всегда являются членами группы или пары, в состав которой входит поздняя спираль, богатая газом [1]. Полученной в результате расчетов приливного взаимодействия галактик в тесных парах величины темпа поступления газа в Е-галактику ($0.2 M_\odot/\text{год}$) вполне достаточно, чтобы объяснить повышенное содержание газа в подобных системах.

Другой из полученных результатов — искажение структуры диска — также можно сравнивать с наблюдениями. По предварительным данным, которые предполагается опубликовать, распределение сжатий спиральных галактик, входящих в S —Е-системы, сильно отличается от распределения сжатий проекций бесконечно тонкого круглого диска на картинную плоскость (при условии равномерного угла между лучом зрения и плоскостью диска). Это распределение скорее соответствует распределению проекций эллипсов, а именно такая структура плоской составляющей га-

лактики и получается при расчетах. Хотя подробного сопоставления и не делалось, приведенный факт может повлиять на оценки индивидуальных масс Sr -галактик, входящих в двойные системы, сделанные на основе измеренных кривых вращения [16, 17]. В какую сторону при этом изменятся индивидуальные массы галактик, еще предстоит выяснить.

В заключение автор выражает благодарность В. Г. Горбацкому за постоянное обсуждение работы и Д. А. Вернеру за предоставление неопубликованных данных каталога И. Д. Караченцева. Особую признательность автор выражает К. Н. Артемьеву, без огромной помощи которого не были бы произведены численные расчеты.

Ленинградский государственный
университет

CONDITIONS AND CHARACTER OF GAS FLOW IN S—E BINARY SYSTEMS OF GALAXIES

N. YA. SOTNIKOVA

The gas flow from spiral to elliptical galaxy is investigated numerically in terms of the circular restricted three-body problem. It has been shown that the possibility of gas outflow from the spiral galaxy strongly depends on the relation between the direction of disk rotation and relative orbital motion. In the case of retrograde movements gas flow does not take place. Another essential parameter is the size of spiral galaxy. The rate of gas flow to the elliptical galaxy for the typical S—E pair with signs of interaction from I. D. Karachentsev's catalogue is $0.2 M_{\odot}$ per year. It is sufficient to explain the high content of neutral hydrogen ($\sim 10^8 M_{\odot}$) in some early type galaxies. The numerical results show that in the course of one or two revolutions of the spiral galaxy, a strong distortion of disk takes place because of tidal interaction. One should take into account this fact when determining the individual masses of spiral galaxies in binary systems from the rotation curve.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Комберг, Ин-т космич. исслед. АН СССР, Препр., № 539, 1979.
2. M. Noguchi, S. Ishibashi, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 219, 305, 1986.
3. G. G. Byrd, M. J. Valtonen, B. Sandelins, L. Valtaoja, Astron. and Astrophys., 166, 75, 1986.
4. G. G. Byrd, B. Sandelins, M. J. Valtonen, Astron. and Astrophys., 171, 16, 1987.
5. И. Д. Караченцев, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, 7, 3, 1972.

6. В. В. Демин, М. В. Сажин, Вестн. МГУ. Физ., астрон., 26, № 2, 100, 1985.
7. В. В. Демин, М. В. Сажин, Вестн. МГУ, Физ., астрон., 23, № 3, 74, 1985.
8. Н. Я. Сотникова, Астрофизика, 25, 139, 1986.
9. И. Д. Караченцев, Астрофизика, 17, 249, 1981.
10. R. H. Sanders, *Astrophys. J.*, 242, 931, 1980.
11. G. R. Knapp, F. J. Kerr, *Astron. J.*, 79, 667, 1974.
12. W. K. Huchtmeier, G. A. Tammann, H. J. Wenzler, *Astron. and Astrophys.*, 42, 205, 1975.
13. G. R. Knapp, E. L. Turner, P. E. Cunntiffe, *Astron. J.*, 90, 454, 1985.
14. M. Wardle, G. R. Knapp, *Astron. J.*, 91, 23, 1986.
15. G. R. Knapp, E. Raimond, *Astron. and Astrophys.*, 138, 77, 1984.
16. И. Д. Караченцев, В. А. Минева, Письма в Астрон. ж., 10, № 8, 563, 1984.
17. В. А. Минева, Астрофизика, 26, 335, 1987.