

Н. Н. КОЗЛОВ, Р. А. СЮНЯЕВ,
член-корреспондент АН СССР Т. М. ЭНЕЕВ

ПРИЛИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЛАКТИК

Приливные эффекты, возникающие при взаимодействии галактик, стали объектом детальных теоретических исследований сразу же после обнаружения значительных отклонений в распределении нейтрального водорода на периферии нашей Галактики от плоскости галактического диска (¹⁻³): в одном секторе край диска приподнят примерно на 1 кпс над его плоскостью, а в противоположном — опущен; отклонения достигают 5—7% от радиуса диска. Столь сильные искажения распределения нейтрального водорода могли, например, возникнуть при близком ($r < 20$ кпс) недавнем ($t \sim 5 \cdot 10^8$ лет) пролете Большого Магелланова Облака (⁴).

К настоящему времени изучено распределение нейтрального водорода более чем в десяти внешних галактиках: нейтральный водород удается уверенно наблюдать на далекой периферии галактик, удаленной от их центров на 20—30 кпс, что намного превышает размеры, доступные для детальных оптических наблюдений. При этом можно считать близкими пролеты массивных тел на расстояниях в 30—50 кпс от центров галактик, практически не отражающиеся на форме и распределении скоростей центральных (наблюдаемых оптическими инструментами) областей галактик.

В связи с этим закономерно проведение динамического анализа характера возмущений, возникающих при близком пролете галактик одна около другой. Такой анализ можно провести, используя методы прикладной небесной механики. Ниже приведены результаты исследования для упрощенной модели галактики.

Предполагается, что на периферии галактики вещество (из-за наличия вращения) собрано в тонкий диск. Так как основная масса любой галактики сосредоточена в ее центральной области с $r < 10$ кпс, движение вещества на далекой периферии $r > 10$ —12 кпс можно рассматривать как кеплеровское вокруг центра масс, совпадающего с галактическим ядром (в дальнейшем просто ядро). В этой ситуации можно пренебречь собственным тяготением вещества, находящегося на периферии галактик, и рассматривать его движение как результат гравитационного взаимодействия как с ядром, так и пролетающим мимо массивным телом, учитывая первоначальное вращение вокруг ядра.

Распределение вещества предполагается локально однородным с плотностью, уменьшающейся с удалением от ядра. Наличие спиральной структуры в невозмущенной приливыми силами галактике игнорируется.

В рассматриваемой модели периферийной области галактик правомочна замена непрерывной газовой среды с вкрапленными в нее звездами на систему материальных точек-спутников, двигавшихся первоначально в одной и той же плоскости и в одну и ту же сторону по кеплеровским орбитам в поле тяготения ядра и возмущаемых при близком проле-

те массивного тела, движущегося по гиперболической траектории относительно ядра. Предполагается, что ядро имеет сферически симметричное распределение вещества и радиус, меньший радиуса исследуемых орбит. Подобные расчеты проводились и ранее (^{5, 6}), однако с меньшим количеством точек-спутников и, кроме того, были специально посвящены либо исследованию взаимодействия нашей Галактики с Магеллановыми Облаками (^{7, 8}), либо частному случаю пролета массивного тела в плоскости галактики.

В приводимых ниже расчетах рассмотрены характерные варианты пролета массивного тела относительно диска галактики. Для выявления специфических эффектов принято, что масса пролетающего тела равна массе ядра, и исследованы близкие пролеты возмущающего тела. Так как данные расчетов приводятся для ряда орбит, находящихся на различных расстояниях от ядра, на приводимых рис. 1, 2 содержится информация и о слабо возмущенной области. Возможно, что сравнение данных расчетов с искажениями формы галактик, наблюдаемых как в линии $\lambda = 21$ см, так и в оптическом диапазоне, позволит прояснить причину этих искажений. Интересуясь в первую очередь выявлением характерных эффектов, возникающих при приливном взаимодействии галактик, мы отдаем себе отчет в том, что в некоторых вариантах близких (на расстояниях, меньших удвоенного радиуса последних орбит) пролетов более существенным может оказаться неупругое взаимодействие газа в сталкивающихся галактиках (⁹). Тем не менее варианты близкого пролета имеют смысл при рассмотрении вопроса о приливном взаимодействии галактик с квазарами, «черными» и «белыми» дырами и прочими компактными объектами, плотность которых во Вселенной может быть достаточно велика и нуждается в выяснении. Напомним, что, например, плотность квазаров, когда-либо светившихся во Вселенной, примерно равна плотности наблюдаемых галактик (¹⁰).

Рассматриваемый вопрос сводится к n гиперболическим ограниченным задачам трех тел, где n — число точек-спутников. Такая задача не имеет известных первых интегралов (¹¹). Численный эксперимент проводился на ЭВМ БЭСМ-4 с применением графикопостроителя. Были рассчитаны наиболее характерные варианты пролета массивного тела относительно галактики: 1) перпендикулярно ее плоскости, $n = 800$; 2000; 2) над плоскостью, $n = 800$; 3) в плоскости, в направлении вращения вещества галактики, $n = 800$; 4) в плоскости, против направления ее вращения, $n = 800$. Для определенности принималось, что массы галактики и пролетающего тела равны $M = 10^{11} M_{\odot}$, точки-спутники распределены вокруг ядра на орбитах с $6 \text{ кпс} < r < 36 \text{ кпс}$ (предел, до которого наблюдается нейтральный водород в галактике М-31 — Туманность Андромеды). Возмущающее тело пролетает по гиперболической траектории; минимальное расстояние от ядра равно 40 кпс, относительная скорость на этом расстоянии $v = 2v_{\text{пар}} = 4 \sqrt{GM/r} \simeq 415 \text{ км/сек}$. Численный эксперимент, подтвердив качественный анализ вопроса (¹²), позволил выявить основные эффекты, характерные для приливного взаимодействия галактик.

Возмущение поля скоростей. Для оптических наблюдений важнейшим является вывод об искажении формы галактик. При наблюдениях в линии $\lambda = 21$ см не менее интересны искажения поля скоростей, так как эти наблюдения весьма чувствительны к доплеровскому изменению частоты линии. Искажения поля скоростей появляются раньше изменений формы — они отражают динамику процесса: наличие больших возмущений скорости при малых искажениях формы галактики говорит о недавнем пролете. Возмущения скорости различны в разных вариантах пролета. Важно появление компоненты скорости, направленной перпендикулярно плоскости диска, в первом и втором вариантах пролета.

Возникновение спиральных ветвей. Важнейшим эффектом (отмеченным ранее для частного случая 3-го варианта пролета (⁵, ¹³)) является образование спиральных ветвей, причем спиралей специфических — сильно выраженных на далекой периферии галактик и практически исчезающих в центральных областях. Этот факт, возможно, позволит отличить спиральные ветви, возникшие при приливном взаимодействии, от спиралей, являющихся свойством самой галактики как скопления гравитирующих точек. Последние, напротив, ярко выражены в центральных областях галактик.

Приливные спирали сравнительно недолговечны, время их жизни не превышает нескольких периодов обращения галактики. Однако из-за кеплеровского характера движения вещества на периферии галактик периоды обращения точек-спутников быстро увеличиваются с удалением от ядра. Спирала образуются во всех рассмотренных вариантах пролета, т. е. они должны образовываться при любом близком пролете массивного тела. В 4-м варианте пролета — движение в плоскости диска против направления его вращения — ярко выражен лишь один рукав; причем сначала формируется выпуклость направления в сторону, где было максимум приливное действие пролетающего тела. Укажем также, что приливное взаимодействие должно приводить к формированию спиральных рукавов, или подобных им волн плотности, и на периферии эллиптических галактик.

Искажение плоскости. В первом и втором вариантах пролета происходит существенное искажение плоскости диска. Через время, превышающее период оборота, в двух противоположных секторах диска должны наблюдаться неравные по амплитуде отклонения соответственно вверх и вниз от плоскости диска. На более ранних стадиях отклонения значительны лишь в одном из секторов. Частые близкие пролеты массивных тел должны размывать периферийные области диска по z -координате. Так как звезды медленно релаксируют к плоскости, это должно приводить к появлению в спиральных галактиках сложной структуры: чем старше звезды, тем более эллиптическими должны быть их орбиты.

Выброс частиц. В первом, третьем и четвертом вариантах пролета наблюдается выброс значительной части вещества с периферийных орбит: до 12% из зоны с $16 < r < 36$ кпс в третьем варианте. В четвертом варианте интересно поведение ряда точек-спутников, меняющих в ходе взаимодействия с возмущающим телом свои орбиты с круговых сначала на гиперболические, а затем на эллиптические.

Падение вещества на плоскость галактики. Сильно возмущенные орбиты пересекают плоскость диска в его центральной невозмущенной части. Звезды и газ, попадая на такие орбиты, будут вести себя по-разному. На движении звезд будет сказываться собственное тяготение диска, меняющее их орбиты. Для газа диск, кроме того, является «черной поверхностью»: из-за неупругости взаимодействия с газовой средой в диске газ, находящийся на возмущенной орбите, не может проходить из верхней полуплоскости в нижнюю и наоборот. Его движение будет имитировать падение вещества на плоскость диска (явление, наблюдаемое в нашей Галактике).

Проявление обсуждаемых эффектов зависит от расстояния пролета (прицельного параметра), относительных скоростей и массы возмущающего тела. Так, например, значительный выброс частиц в третьем варианте явно связан с большим временем взаимодействия диска с возмущающим телом. В четвертом варианте пролета при движении возмущающего тела против направления вращения диска это время мало, мало и число точек, выброшенных с гиперболической скоростью. Поэтому очевидно, что уменьшение отношения относительной скорости ядра к возмущающего тела к параболической должно вести к усилению этого (а также и

всех других) эффектов. Их проявление сильно зависит от прицельного параметра и слабее от соотношения масс.

Авторы выражают признательность акад. Я. Б. Зельдовичу за обсуждение постановки задачи и В. С. Ильиной за большую помощь в проведении численных расчетов и построении графиков.

Институт прикладной математики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
17 I 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ B. F. Burke, *Astronom. J.*, **62**, 90 (1957). ² F. J. Kerr, *Astronom. J.*, **62**, 93 (1957). ³ Т. А. Лозинская, Н. С. Кардашев, *Астрон. журн.*, **40**, 209 (1963). ⁴ C. Hunter, A. Toomre, *Astrophys. J.*, **155**, 747 (1969). ⁵ J. Pfleiderer, H. Siedentopf, *Zs. Astrophys.*, **51**, 201 (1961). ⁶ Н. Ташпулатов, *Астрон. журн.*, **47**, 267 (1970). ⁷ E. S. Avner, I. R. King, *Astronom. J.*, **72**, 650 (1967). ⁸ G. Elwert, D. Hablick, *Zs. Astrophys.*, **61**, 273 (1965). ⁹ Г. М. Идлис, *Астрон. журн.*, **36**, 700 (1959). ¹⁰ Б. В. Комберг, Р. А. Сюняев, *Астрон. журн.*, **48**, 235 (1971). ¹¹ Г. Н. Дубошин, *Небесная механика, Основные задачи и методы*, «Наука», 1968. ¹² Н. Н. Козлов, Р. А. Сюняев, Т. М. Эпеев, *Препринт Инст. прикл. матем. АН СССР*, 1971. ¹³ A. Toomre, *Astrophys. J.*, **158**, 899 (1969).