ГЛАВА VI

ЭЛЕМЕНТЫ ДИНАМИКИ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Основную часть массы звездных систем составляет материя звезд. На долю всех остальных форм материи — пыли, газа, а также, вероятно, имеющихся холодных тел, подобных планетам и метеорам Солнечной системы, приходится несколько процентов общей массы галактик. Поэтому при изучении динамики звездных систем достаточно рассматривать только звезды, а другие формы материи можно не принимать во внимание.

Расстояния между звездами очень велики в сравнении с размерами звезд. Радиус Солнца равен $6{,}96 \cdot 10^5$ км, а расстояние от Солнца до ближайшей звезды α Центавра равно $4{,}07 \cdot 10^{13}$ км, т. е. приблизительно в $6 \cdot 10^7$ раз больше радиуса Солнца и во столько же примерно раз больше радиуса α Центавра, так как эта звезда по своим физическим характеристикам очень сходна с Солнцем. Поэтому, рассматривая звездную систему как систему отдельных (дискретных) тел — звезд, мы практически можем эти тела считать точечными.

Часто звездные системы сравнивают с газом, называют «звездным газом». Ведь и обычный газ состоит из отдельных молекул или атомов, отделенных друг от друга расстоянием. Однако, если производить такое сравнение, то нужно считать звездные системы очень разреженным газом. В самом деле, например, в окружающем нас воздухе молекулы азота, являющегося главной составной частью воздуха, имеют радиусы $3{,}3 \cdot 10^{-8}$ см, а расстояние между соседними молекулами в среднем составляют около $3{,}3 \cdot 10^{-7}$ см. Таким образом, расстояния между соседними молекулами в воздухе только приблизительно в 10 раз больше, чем радиусы молекул. Для того чтобы сделать отношение расстояний между соседними атомами к радиусу атомов таким же, как отношение расстояний между звездами в звездных системах к размерам звезд, нужно было бы расстояния между атомами воздуха увеличить в шесть миллионов раз. Плотность газа обратно пропорциональна кубу среднего расстояния между соседними атомами. Поэтому, сравнивая район Галактики в окрестностях Солнца с газом, мы должны считать этот газ в $\left(\frac{6\cdot10^7}{10}\right)^3 = 2{,}16\cdot10^{20}$ раз менее плотным, чем воздух в обычных условиях. Такой разреженный газ в настоящее время нельзя получить даже в вакуумных установках. Самая низкая достигнутая в лабораториях плотность газа приблизительно в 10^{16} раз меньше плотности воздуха в обычных условиях. Следовательно, «звездный газ» — это чрезвычайно разреженный «газ».

Другая особенность звездных систем — звездного газа — состоит в том, что это самогравитирующий газ. Это значит, что звездные системы сами создают то силовое поле, которое управляет движениями, происходящими в этих системах. И форма, которую принимает звездная система, определяется тем силовым полем, которое она сама создает. Этого нельзя сказать о том газе — воздухе, который нас окружает. Он находится в силовом поле, созданном главным образом Землей, а не им самим. В лабораторных условиях невозможно создать свободное самогравитирующее газовое облако, которое под действием своего собственного притяжения, не испытывая посторонних воздействий, приняло бы свойственную ему форму. Теоретически показано, что такое самогравитирующее газовое облако, если оно не вращается, примет форму шара, а если вращается — форму сжатого эллипсоида вращения. Мы можем наблюдать такие гигантские шары звездного газа, созданные природой, в виде шаровых звездных скоплений и эллиптических галактик E0. Посмотрите на фотографию шарового скопления ω Центавра (см. рис. 21). Под действием самотяготения, вызванного звездами, скопление приняло правильную шарообразную форму. Созерцание этой гигантской системы производит глубокое впечатление гармонии. Здесь не властвует случай, а действует непреложный закон. Звезды располагаются самым тесным образом в центре. По мере удаления от центра ряды их, подчиняясь некоторому закону, постепенно редеют и где-то, в не вполне определенном месте и дальше, чем это кажется глазу, скопление кончается. В этом космическом шаре звездного газа мы можем подсчитывать молекулы — звезды, подробно изучать его строение и производить сравнение результатов наблюдений с теорией.

Эллипсоиды звездного газа — это эллиптические галактики с различной степенью сжатия, от E1 до E7, а также еще более сильно сжатые спиральные галактики.

Динамика двойных звезд и двойных галактик

Самым простым случаем звездных движений является движение компонентов двойной звезды. Эта задача, называемая задачей двух тел, была изучена применительно к планетам Солнечной системы в первой половине 17-го в. Кеплером и теоретически полностью обоснована во второй половине того же века Ньютоном. Как и планеты около Солнца, один компонент (т. е. одна из звезд)

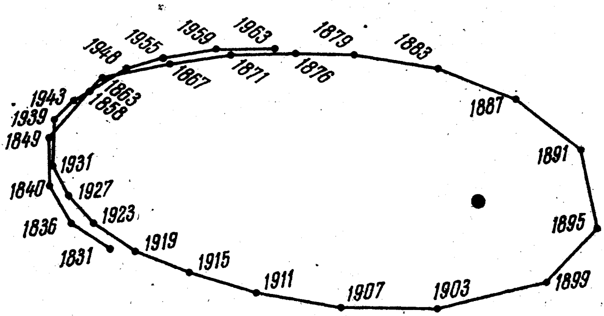

Рис. 111. Видимая относительная орбита двойной звезды 70 Змееносца.

двойной звезды движется около другого компонента по эллиптической орбите. Это подтверждается наблюдениями многих двойных звезд. Вот, например, как изменялось положение слабого компонента по отношению к яркому компоненту в двойной звезде 70 Змееносца за период с 1831 и по 1963 г. (рис. 111). Проставленные годы указывают момент наблюдения. Мы видим, что за 132 года один компонент прошел полный путь по эллиптической орбите вокруг другого компонента и еще часть этого пути. У двойных звезд с бо́льшими периодами обращения за время проводимых в астрономии наблюдений компоненты успели пройти только часть пути по орбите. Чем меньше эта часть, тем менее уверенно определяется орбита. Трудность задачи состоит еще в том, что наблюдаемый эллипс движения не есть истинный эллипс, а является проекцией последнего на небесную сферу. Проекция эллипса — всегда тоже эллипс. Нужно, используя дополнительные данные — скорость движения на различных участках видимого эллипса и положение главного компонента внутри видимого эллипса — по видимому эллипсу

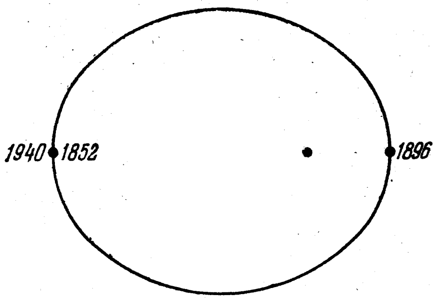

Рис. 112. Истинная относительная орбита двойной звезды 70 Змееносца.

восстановить истинный эллипс. Для этого разработано несколько методов. Вот, оказывается, как выглядит истинная орбита двойной звезды 70 Змееносца (рис. 112).

Когда получен истинный эллипс, то определяются его большая и малая полуоси a и b в условных единицах, а если известно расстояние до двойной звезды, то и в линейных единицах. Важное значение имеет определение большой полуоси. Согласно закону Кеплера сумма масс компонентов $\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2$, период обращения P и большая полуось орбиты a связаны соотношением

$$\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a^3}{P^2}. \qquad (31)$$

Здесь G — постоянная всемирного тяготения, равная $6{,}67 \cdot 10^{-8}$, если $\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2$ выражено в граммах, a — в сантиметрах, P — в секундах. Следовательно, зная период обращения и большую полуось, мы сразу находим сумму масс компонентов. Например, для двойной 70 Змееносца, истинная орбита которой изображена на рис. 112, большая полуось a равна $3{,}4 \cdot 10^9$ км, период — 89 годам, и суммарная масса оказывается равной $3{,}0 \cdot 10^{33}$ г, т. е. приблизительно 1,5 массы Солнца. Возможность определить массы звезд в двойных системах имеет огромное значение, так как это до сих пор единственный способ определения масс звезд. Все наши сведения о массах звезд основаны исключительно на изучении двойных звезд.

Но можно ли определить массу каждого компонента отдельно? Оказывается, можно сделать и это, если учесть, что движутся оба компонента двойной звезды. На рис. 111 мы рассматривали движение одного из компонентов по отношению к другому, т. е. условно считали один из компонентов неподвижным и получили так называемую относительную орбиту. На самом деле каждый из компонентов движется по своей эллиптической орбите вокруг общего центра инерции двойной звезды. Это можно обнаружить, опираясь на другие звезды, достаточно далекие, чтобы их можно было считать неподвижными. Тогда мы вместо одной относительной орбиты получили бы две абсолютные орбиты, показанные на рис. 113. Сравнение взаимных положений компонентов на орбитах рис. 113 показывает, что это соответствует одной относительной орбите рис. 112. Если теперь определить большие полуоси истинных абсолютных орбит a_1 и a_2, то легко найти отношение масс компонентов, так как они обратно пропорциональны большим полуосям:

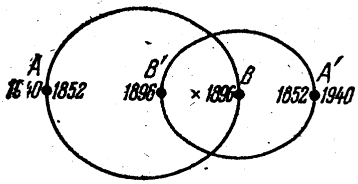

Рис. 113. Истинные абсолютные орбиты компонентов двойной звезды 70 Змееносца.

$$\frac{\mathfrak{M}_1}{\mathfrak{M}_2} = \frac{a_2}{a_1}. \tag{32}$$

Если же известна сумма масс (31) и их отношение (32), то, решив эти два уравнения с двумя незвестными, мы найдем массу каждого компонента двойной звезды. В 70 Змееносца первый компонент имеет массу 0,87, а второй — 0,63 массы Солнца.

Скорость движения v каждого компонента, например, первого, по своей абсолютной орбите, т. е. вокруг центра инерции, определяется из равенства

$$\frac{\mathfrak{M}_1 v_1^2}{2} - \frac{G\mathfrak{M}_1\mathfrak{M}_2}{R} = -\frac{G\mathfrak{M}_1\mathfrak{M}_2}{2a}. \tag{33}$$

В этом равенстве каждый член имеет важный физический смысл. Первый член левой части

$$\frac{\mathfrak{M}_1 v_1^2}{2} \tag{34}$$

называется кинетической энергией, т. е. энергией движения. Он пропорционален массе тела и квадрату его скорости. Может быть, это на первый взгляд кажется удивительным, но энергия движения пропорциональна не первой степени скорости, а второй. Пуля, летящая вдвое быстрее, при ударе о препятствие выделяет тепла больше не вдвое, а в четыре раза. Можно сказать, что вдвое быстрее летящий камень при ударе о тело нанесет повреждения в четыре раза бо́льшие. Если три автомобиля разогнались, первый до скорости 10 м/с, второй — до 20 м/с, и третий — до 40 м/с, а затем свободно с выключенными моторами въезжают в гору, то первый автомобиль остановится на высоте 5 м, второй — на высоте 20 м, а третий — на высоте 80 м. Мы видим, что энергия, характеризующая здесь способность подниматься вверх, преодолевать притяжение Земли, пропорциональна квадрату скорости.

Второй член левой части равенства

$$-\frac{G\mathfrak{M}_1\mathfrak{M}_2}{R} \tag{35}$$

называется потенциальной энергией тела. Если компонент находится на расстоянии R от центра инерции двойной звезды, то работа, которую нужно затратить, чтобы преодолеть силу взаимного притяжения компонентов и удалить компонент на бесконечность, т. е. окончательно разделить двойную звезду, равна как раз величине (35).

Величина

$$-\frac{G\mathfrak{M}_1\mathfrak{M}_2}{2a}, \tag{36}$$

стоящая в правой части равенства (33), во время движения компонентов двойной звезды не меняется, так как и постоянная тяготения G, и массы компонентов $\mathfrak{M}_1$ и $\mathfrak{M}_2$, и большая полуось орбиты a остаются во время движения компонентов неизменными. Следовательно, сумма кинетической и потенциальной энергий компонента не изменяется во время движения. Когда компонент приближается к центру инерции, расстояние R уменьшается и потенциальная энергия (35) по абсолютной величине возрастает, но нужно помнить, что она имеет знак минус. При приближении к центру инерции возрастает и скорость, так как сила тяготения разгоняет тело. При этом кинетическая энергия (34) возрастает ровно настолько, насколько возросла по абсолютной величине потенциальная энергия, так что с учетом знака потенциальной энергии сумма этих энергий остается во время движения неизменной. Наибольшая скорость, следовательно, достигается в точке, ближайшей к центру инерции,— в так называемом *периастрии* (точки B и B' рис. 113), а наименьшая скорость — в *апоастрии* (точки A и A').

Если рассматривать всё более вытянутые орбиты — эллипсы, то нужно считать, что в них полуось a становится все больше и, значит, член в правой части уравнения (33) все меньше. В предельном случае, когда мы считаем полуось a бесконечно большой, эллипс разрывается, превращается в параболу — уже в незамкнутую кривую. Каждый компонент двойной звезды, двигаясь по параболе, не будет совершать обращений вокруг центра инерции, а уйдет бесконечно далеко. Двойная система распадется. Так как при безграничном возрастании полуоси a выражение (35) стремится к нулю, при движении по параболе справедливо уравнение, получаемое из (33) после приравнивания его правой части нулю:

$$\frac{\mathfrak{M}_1 v_1^2}{2} - \frac{G\mathfrak{M}_1\mathfrak{M}_2}{R} = 0. \tag{37}$$

Таким образом, сравнивая (33) и (37), мы видим, что *для устойчивости двойной звезды необходимо, чтобы сумма кинетической и потенциальной энергий каждого компонента была отрицательной величиной.* Если эта сумма энергий оказывается равной нулю, то двойная звезда распадается. При положительности суммы кинетической и потенциальной энергий движение происходит по гиперболической орбите, которая незамкнута, следовательно, и в этом случае система распадается.

Если решить равенство (37) относительно скорости v_1, то получим

$$v_1 = \sqrt{\frac{2G\mathfrak{M}_2}{R}}, \tag{38}$$

что является значением скорости, достаточной для ухода компонента из системы. Эта скорость называется критической. Формулу (38) можно использовать для вычисления критической скорости на поверхности Земли, потому что движение какого-нибудь тела в поле Земли есть также задача двух тел. Если вместо $\mathfrak{M}_2$ подставить массу Земли $5{,}98 \cdot 10^{27}$ г, вместо R — радиус Земли $6{,}37 \cdot 10^8$ см, то найдем

$$v_1 = 1{,}12 \cdot 10^6 \text{ см/с} = 11{,}2 \text{ км/с}.$$

Эту скорость, необходимую для того, чтобы преодолеть притяжение Земли, уйти от нее, называют *второй космической скоростью.*

Теперь рассмотрим другой крайний случай. Пусть двойная звезда не только устойчива, но расстояние между компонентами во все время движения остается неизменным. Так будет, если орбиты звезд круговые. Тогда во все время движения $R = a$ и, сделав приведение подобных членов в равенстве (33), мы получим

$$\frac{\mathfrak{M}_1 v_1^2}{2} - \frac{1}{2}\frac{G\mathfrak{M}_1\mathfrak{M}_2}{R} = 0. \tag{39}$$

Таким образом, при движении по круговой орбите, т. е. при неизменности размеров двойной звезды, равна нулю сумма кинетической энергии и половины потенциальной энергии.

Решая уравнение (39), мы получим значение скорости при движении по круговой орбите

$$v_1 = \sqrt{\frac{G\mathfrak{M}_2}{R}}. \tag{40}$$

По формуле (40) можно, например, вычислить скорость, которую должен иметь при запуске искусственный спутник Земли, чтобы двигаться по круговой орбите (у поверхности Земли). Получим $v_1 = 7{,}91$ км/с. Эта скорость обычно называется *первой космической скоростью.* Сравнение с (38) показывает, что вторая космическая скорость (скорость, нужная для удаления на бесконечность) в $\sqrt{2}$ раз больше первой космической скорости.

В заключение этого параграфа мы хотим еще раз обратить внимание читателя на полученные нами два важных вывода, которые понадобятся в дальнейшем: 1) если сумма кинетической и потенциальной энергий компонента двойной звезды равна нулю или положительна, то двойная звезда распадается, 2) если движение компонента происходит по круговой орбите, т. е. если для двойной звезды характерна не только устойчивость, но и постоянство размера системы, то равна нулю сумма кинетической энергии и **половины** потенциальной энергии.

Двойные галактики

Если две звезды занимают на небе очень близкое друг к другу положение, то все-таки нельзя только на основании этого утверждать, что они образуют двойную систему. Может быть так, что две звезды находятся друг от друга очень далеко, между собой не связаны, но случайно направления на них оказались почти совпадающими, как могут для прохожего почти совпадать направления на уличный фонарь и на Луну. Такую пару звезд принято называть оптической парой. Только после того как в результате обычно многолетних наблюдений выяснится, что одна из звезд движется по орбите около другой, можно утверждать, что это не оптическая пара, что две звезды образуют физическую систему.

Как и звезды, галактики довольно часто встречаются в виде пар. Пример тесной пары галактик NGC 4567 и NGC 4568 приведен на рис. 114. Но для галактик гораздо труднее выяснить, является ли наблюдаемая пара физически двойной галактикой или это только оптическая пара. У двойной галактики движение одного компонента по орбите вокруг другого настолько медленно, что его невозможно заметить даже после многолетних наблюдений. Покажем это простым расчетом. Пусть физически двойная галактика находится от нас на сравнительно небольшом внегалактическом расстоянии 10 Мпс и наблюдаемое угловое расстояние между центрами компонентов составляет 20′. На расстоянии 10 Мпс угол 20′ соответствует приблизительно 50 кпс, следовательно, если массы галактик одинаковы, то расстояние каждого компонента до центра инерции двойной системы равно 25 кпс. Будем считать теперь для простоты, что орбита компонента круговая, а масса его равна массе нашей Галактики и составляет приблизительно 10^{44} г. Тогда по формуле (40) мы сосчитаем, что скорость орбитального движения равна приблизительно 100 км/с. Это, конечно, немалая скорость. Но на расстоянии 10 Мпс скорость в 100 км/с даст за год смещение, приблизительно равное 0″,000002. Значит, нужно ждать 5000 лет, чтобы смещение составило