ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Из астрономических наблюдений известно, что не менее половины всех звезд входит в двойные и кратные системы. С точки зрения образования звезд из-за гравитационной неустойчивости в холодных молекулярных облаках этот факт вполне естественен, поскольку строго сферически-симметричная ситуация является идеализацией из-за наличия вращения, магнитных полей, неоднородностей плотности и т. д., и сжатие протозвездных облаков часто приводит к одновременному образованию нескольких центров конденсации.

7.1. Определение масс двойных звезд. Функция масс

Наблюдение движения звезд в двойной системе во многих случаях позволяет определить массы компонентов. Будем считать звезды точками, движущимися по кеплеровским орбитам вокруг центра масс системы. В отличие от классической задачи определения планетных орбит в солнечной системе, орбиту двойной звезды определяют семь[1], а не шесть элементов[2], так как в первом случае масса Солнца много больше массы планет и его движением вокруг общего центра масс можно пренебречь. В качестве параметров орбит двойной системы можно взять: массы компонентов M_1, M_2, сумму больших полуосей орбит компонентов относительно центра масс системы $a_1 + a_2 = a$, эксцентриситет орбиты e, наклонение орбиты к лучу

[1]Движение двух тел в пространстве задается $2 \cdot 6 = 12$ значениями координат и скоростей. Какие связи в двойной системе нужно учесть, чтобы получить 7 величин?

[2]Для тел солнечной системы — три угла, фиксирующие плоскость орбиты в пространстве, угол, характеризующий направление от Солнца на перигелий, большая полуось, эксцентриситет.

зрения i (так что при $i = 90^o$ орбита видна с ребра), позиционный угол восходящего узла орбиты T_a и угол, характеризующий положение периастра ω (долгота периастра). Орбитальный период обращения связан с массами компонентов и большой полуосью относительной орбиты $a = a_1 + a_2$ третьим законом Кеплера

$$P = 2\pi \left[\frac{a^3}{G(M_1 + M_2)}\right]^{1/2}. \tag{7.1}$$

Если звезды видны по отдельности (т. н. визуально-двойные системы), то наблюдения позволяют восстановить орбиты каждой из них и оценить их массу. Однако, часто о двойственности системы можно судить по наличию одной или двух систем линий в суммарном спектре, которые периодически смещаются из-за эффекта Доплера при движении компонентов вокруг общего центра масс (спектрально-двойные звезды).

С помощью спектроскопических наблюдений по эффекту Доплера измеряются лучевые скорости одной или обеих звезд в зависимости от орбитальной фазы и таким образом получаются *кривые лучевых скоростей* $V_{r_1}(t)$ и $V_{r_2}(t)$ (см. рис. 7.1).

Рассмотрим связь между амплитудой лучевых скоростей звезд и их относительными массами на примере двойной системы, в которой звезды обращаются вокруг общего центра масс по круговым орбитам. Из условия неподвижности центра масс системы имеем:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{M_2}{M_1},$$

откуда

$$\frac{a}{a_1} = \frac{M_1 + M_2}{M_2}.$$

Выразим амплитуду изменения лучевой скорости V_r любой звезды (пусть это будет V_{r1}) через радиусы орбит и орбитальную скорость движения V_{o1} этой звезды:

$$V_{r1} = V_{o1} \sin i = \frac{2\pi}{P} a_1 \sin i = \frac{2\pi}{P} \frac{M_2}{M_1 + M_2} a \sin i.$$

Таким образом, одновременное измерение V_{r1} и V_{r2} позволяет определить отношение масс компонентов $M_2/M_1 = a_1/a_2 = V_{r1}/V_{r2}$. Однако остается неопределенность в наклонении орбиты i — амплитуды кривых лучевых скоростей могут быть одинаковыми для разных орбит, наклоненных под разными углами.

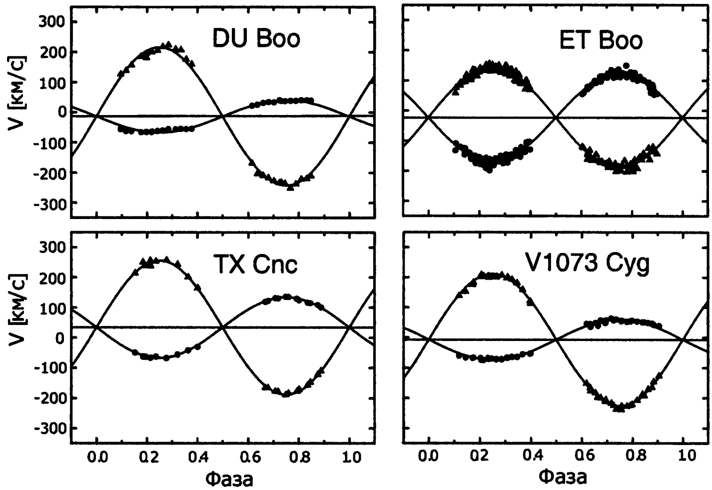

Рис. 7.1. Примеры кривых лучевых скоростей компонентов тесных двойных систем. Сплошные синусоиды — подгонка наблюдений круговыми орбитами. Горизонтальные прямые соответствуют лучевой скорости движения центра масс. По работе T. Pribulla et al. 2006.

Подставляя a из (7.1) в полученное выше уравнение, запишем:

$$V_{r1}^3 = \frac{2\pi G}{P}\frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2}.$$

Функция

$$f(M_2) = \frac{PV_{r1}^3}{2\pi G} \tag{7.2}$$

называется *функцией масс* звезды с массой M_2. Она объединяет непосредственно измеряемые величины и V_{r1}, относящиеся к одной из звезд, с массой второй звезды:

$$f(M_2) = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2}\,. \tag{7.3}$$

Можно показать, что если орбиты звезд представляют собой не круги, а эллипсы с эксцентриситетом e, то в выражении для функции масс (7.2) орбитальный период P должен быть умножен на фактор $(1 - e^2)^{3/2}$.

Разделив $f(M_2)$ на M_2, получаем:

$$\frac{f(M_2)}{M_2} = \frac{M_2^2}{(M_1 + M_2)^2} \sin^3 i \leq 1.$$

Таким образом, функция масс звезды в двойной системе представляет собой нижний предел ее массы. Поэтому оценка функции масс по наблюдениям одного компонента двойной системы позволяет получить ограничение на массу второго компонента. Подобная ситуация имеет место при наблюдении тесных двойных систем, где обычная звезда составляет пару с компактным компонентом, излучение которого принимается только в рентгеновском диапазоне. Например, функция масс некоторых рентгеновских двойных систем — кандидатов в черные дыры — оказывается свыше 3 масс Солнца (абсолютный верхний предел массы нейтронных звезд в рамках общей теории относительности). Это служит важнейшим указанием на то, что компактная звезда в этих системах не может быть нейтронной звездой и, по-видимому, является черной дырой.

Подчеркнем в заключение этого параграфа, что измерение кеплеровских орбит в спектроскопических двойных системах по кривым лучевых скоростей не позволяет определить все параметры двойной системы, поскольку неизвестен угол наклона орбиты к лучу зрения. Однако задача может быть решена для релятивистских тесных двойных систем из двух нейтронных звезд, по крайней мере одна из которых видна как радиопульсар. В этом случае детальный анализ времен прихода импульсов позволяет с использованием релятивистских эффектов найти все орбитальные параметры двойной системы (см. главу 10).

7.2. Особенности эволюции звезд в ТДС

Эволюция звезд в двойных системах отличается от эволюции одиночных звезд, если приливное влияние соседнего компонента существенно. Действительно, приливное ускорение, создаваемое возмущающей массой M_2 на поверхности звезды с массой M_1 и радиусом R с расстояния l примерно равно $|a_t| \sim R \cdot \frac{d}{dl}\left(\frac{GM_2}{l^2}\right) = \frac{2GM_2R}{l^3}$. На малых расстояниях $l \lesssim R \cdot (2M_2/M_1)^{1/3}$, определяемых из условия $a_t \sim g = GM_1/R^2$, приливные силы существенно искажают форму поверхности звезды M_1 и приводят к появлению нового явления, отсутствующего у одиночных звезд или у компонентов широких звездных пар — перетеканию вещества с одной звезды на вторую.