

## BINARIES AND THE SIGNIFICANCE OF THEIR OBSERVATION TO ASTRONOMY

A. A. KISELEV

*The history of the discovery and of the research of binaries is presented. It is shown that on the basis of investigation of binaries, one may determine the mass of the stars using only the Newtonian gravitational law. It is shown that the mass of a star in the vicinity of the Sun does not differ more than two times that of the Sun's mass, and satisfies the statistical relation of "mass – luminosity".*

*Кратко излагается история открытий и исследований двойных звезд. На примере визуально-двойных звезд показывается, как исследования этих звезд позволяют определить массы звезд, исходя только из закона тяготения Ньютона. Устанавливается, что массы звезд в окрестностях Солнца не отличаются от массы Солнца более чем в 2 раза и удовлетворяют статистической зависимости "масса – светимость".*

© Киселев А.А., 1996

## ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ И ЗНАЧЕНИЕ ИХ НАБЛЮДЕНИЙ В АСТРОНОМИИ

А. А. КИСЕЛЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет

### ВВЕДЕНИЕ

Двойными звездами в астрономии называют такие пары звезд, которые заметным образом выделяются на небе среди окружающих звезд фона близостью своих видимых положений. В качестве оценок близости видимых положений принимают следующие границы угловых расстояний между компонентами пары, зависящие от видимой звездной величины [1]:

$$\begin{array}{ll} m < 2,0 & r < 250'' \\ m < 4,0 & r < 100'' \\ m < 6,0 & r < 40'' \\ m < 8,0 & r < 16'' \end{array}$$

Здесь слева даны границы звездных величин компонент, справа — соответствующие предельные угловые расстояния между компонентами в единицах секунды дуги, до которых данная пара считается двойной звездой.

Среди двойных звезд различают физические и оптические пары. Физические пары представляют собой системы близко расположенных в пространстве звезд, связанных силами тяготения, обращающихся около общего центра тяжести по законам Кеплера. Оптические пары, наоборот, составляются из весьма далеких друг от друга в пространстве звезд, случайным образом проектирующихся на небесную сферу вблизи одного направления. Для астрономии такие пары не представляют интереса.

Физические двойные звезды представляют для астрономии как науки в целом фундаментальный интерес. Астрономы многих стран изучают эти звезды уже более двух веков, и интерес к ним не ослабевает. Этот интерес определяется тем, что именно изучение двойных звезд позволило однозначно установить единство закона всемирного тяготения Ньютона во Вселенной и получить, опираясь на наблюдения, фундаментальные знания о массах звезд, их светимости и эволюции. Как это удалось сделать, мы рассмотрим в следующих разделах.

### КАКИЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ ИЗУЧАЮТ АСТРОНОМЫ

Двойные звезды подразделяют в зависимости от способа их наблюдений на визуально-двойные,

фотометрические двойные, спектрально-двойные и спеклинтерферометрические двойные звезды.

### Визуально-двойные звезды

Визуально-двойные звезды представляют собой довольно широкие пары, хорошо различимые уже в телескоп умеренных размеров. Эти звезды в основном удовлетворяют условиям таблицы, приведенной во Введении. Наблюдения визуально-двойных звезд производятся либо визуально с помощью телескопов, снабженных микрометром, либо фотографически с помощью телескопов-астрографов. В результате наблюдений определяют взаимное угловое расстояние ( $r$ ) компонент двойной звезды  $AB$ , а также позиционный угол ( $s$ ) направления на небесной сфере дуги  $AB$  относительно круга склонений, проходящего через  $A$ . Эти данные по мере их накопления используются для построения дуги видимой орбиты звезды  $B$  относительно более яркой главной звезды  $A$ . Если наблюдения продолжаются достаточно долго (несколько десятков лет и более), можно проследить полное обращение звезды  $B$  относительно  $A$ . Типичными представителями визуально-двойных звезд могут служить звезды  $\gamma$  Девы ( $r=1'' - 6''$ , период обращения  $P=140$  лет) или известная близкая к Солнцу звезда 61 Лебедя ( $r=10'' - 35''$ ,  $P=350$  лет). К настоящему времени известно около 100 000 визуально-двойных звезд.

### Фотометрические двойные звезды

Фотометрические двойные звезды представляют собой очень тесные пары, обращающиеся с периодом от нескольких часов до нескольких дней по орбитам, радиус которых сравним с размерами самих звезд. Плоскости орбит этих звезд и луч зрения наблюдателя практически совмещаются. Эти звезды обнаруживаются явлениями затмений, когда одна из компонент проходит впереди или сзади другой относительно наблюдателя. Астроном замечает это явление как падение яркости наблюданной звезды, которое происходит регулярно с поразительной точностью. Таким образом, фотометрические двойные звезды являются затменно-переменными звездами, интенсивно наблюдаемыми астрономами наряду с другими переменными звездами. В результате наблюдений определяют кривую блеска переменной звезды, отражающую изменение яркости звезды со временем, то есть зависимость вида  $m(t)$ . Типичным представителем затменно-переменных звезд является звезда 2-й величины  $\beta$  Персея (Алголь), которая регулярно затмевается на 9 часов с периодом 2,86731 суток; падение блеска в минимуме у этой звезды составляет 2,3 звездной величины. К настоящему времени известно более 500 фотометрических двойных звезд.

### Спектрально-двойные звезды

Спектрально-двойные звезды, так же как и фотометрические двойные, представляют собой очень тесные пары, обращающиеся в плоскости, слабо наклоненной к направлению луча зрения наблюдателя. Спектрально-двойные звезды, как правило, не разрешаются на компоненты даже в самый сильный телескоп, однако легко обнаруживаются при спектроскопических наблюдениях лучевых скоростей. Оказалось, что линии в спектрах таких звезд регулярно смещаются или раздваиваются, что свидетельствует о том, что наблюдаемая звезда состоит из двух компонент, обращающихся с большой скоростью. В результате наблюдений определяют так называемую кривую лучевой скорости, характеризующую периодические колебания лучевой скорости одной из компонент, а также период этих колебаний и амплитуду. Типичным представителем спектрально-двойных звезд может служить звезда  $\zeta$  Большой Медведицы, у которой наблюдаются два спектра, период колебаний 10 дней, амплитуда около 50 км/с. Это первая исследованная спектрально-двойная звезда, открытая Э. Пиккерингом в 1888 году [2]. В настоящее время известно около 1500 спектрально-двойных звезд.

### Спеклинтерферометрические двойные звезды

Спеклинтерферометрические двойные звезды открыты сравнительно недавно, в 70-х годах [3], в результате применения современных гигантских телескопов для получения спекл-изображений некоторых ярких звезд. Анализ этих изображений с помощью современной электронной техники позволяет довести разрешающую силу телескопа до естественного предела, который определяется размерами дифракционного изображения звезды, что составляет приблизительно 0,02'' для телескопа с диаметром зеркала 6 м. Пионерами спеклинтерферометрических наблюдений двойных звезд являются Э. Мак Алистер в США и Ю.Ю. Балега в России. К настоящему времени методами спеклинтерферометрии измерено несколько сотен двойных звезд с разрешением  $r < 0,1''$ .

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

В этом очерке мы остановимся подробнее на исследованиях, связанных с наблюдениями визуально-двойных звезд, поскольку именно эти работы обнаруживают фундаментальное значение двойных звезд для астрономии.

Честь первооткрывателя двойных звезд бесспорно принадлежит английскому астроному Вильяму Гершелю (1738 – 1822) [3]. Мы знаем о Гершеле больше как об астрономе, самостоятельно строившем гигантские для того времени телескопы-рефлекторы, начавшем систематические исследования Млечного Пути и открывшем планету Уран. На-

блодения двойных звезд Гершель предпринял в 1770 – 1780 годах при попытке измерить звездные параллаксы, используя идею Галилея о возможности определить параллакс яркой звезды, составляющей оптическую пару со слабой. Однако уже первые наблюдения таких пар подтвердили догадку Гершеля, что многие из наблюдавшихся им пар – физические двойные звезды.

Перенаблюдения этих звезд через 20 лет показали относительные смещения компонент, похожие на орбитальное движение. К 1803 году Гершель опубликовал списки нескольких сотен двойных звезд и отметил среди них 50, у которых обнаружилось смещение компонент. В дальнейшем наблюдения двойных звезд продолжил сын Вильяма – Джон Гершель, перенесший свой телескоп в Южную Африку. В Европе планомерные наблюдения двойных звезд организовал В. Струве на обсерватории в Тарту. В 1824 году Струве применил для своих наблюдений телескоп-рефрактор с объективом Фраунгофера с диаметром  $D = 24$  см и фокусным расстоянием  $F = 410$  см ( $D/F = 24/410$ ) на экваториальной установке с часовым механизмом, который можно считать прототипом современных телескопов-рефракторов. Телескопы Гершелец были смонтированы на азимутальной установке и были очень неудобны в обращении. С новым инструментом В. Струве открыл 3134 звездные пары. Результаты наблюдений опубликованы в трех каталогах, из которых наибольшей известностью пользуется каталог "Stellarum duplicitum et multiplicitum mensurae micrometricae" (Двойные и кратные звезды, измеренные микрометрически), опубликованный в 1837 году. Этот каталог сохраняет свое значение и в наше время как первая эпоха взаимных положений компонент нескольких тысяч двойных звезд. Точность измерений В. Струве – на уровне лучших современных визуально-микрометрических наблюдений.

Преемником В. Струве стал его сын Отто Струве, продолживший наблюдения визуально-двойных звезд в Пулковской обсерватории с новым 15-дюймовым рефрактором (1840 год). В это же время систематические наблюдения двойных звезд в Европе, используя рефракторы средних размеров, производили Саут и Дэвис в Англии, Бессель в Германии, Медлер в Дерпте, Кайзер в Лейдене. В конце XIX века инициативу в исследованиях двойных звезд перехватили американские астрономы, применившие к наблюдениям новейшие рефракторы высшего класса с объективами Кларка: рефрактор обсерватории Дирборн с диаметром объектива  $D = 47$  см, рефрактор Вашингтонской морской обсерватории ( $D = 65$  см) и рефрактор Ликской обсерватории ( $D = 91$  см). Заслугой американских астрономов было то, что они не только наблюдали двойные звезды, но и собирали и систематизировали громадный наблюдательный материал по этим звездам. Эта работа воплощена в "Общем каталоге 13665 звезд" Бернхема (1906 год), охватывающем все известные

к тому времени наблюдения двойных звезд в зоне склонений от  $-30^\circ$  до Северного полюса. В новое время эта традиция продолжена американским астрономом Айткеном, создавшим "Новый общий каталог 17180 двойных звезд" (1934 год) и астрономами Ликской обсерватории Джейфферсоном и ван ден Босом, составившими "Индекс каталог 64247 двойных звезд" (1961 год). В новое время наблюдения визуально-двойных звезд продолжались во многих странах мира как прежними, визуальными, так и новыми, фотографическими и фотоэлектрическими, методами. После пионерских работ Херцшпрунга (1914 год) широкое распространение получили фотографические наблюдения двойных звезд с применением старых – визуальных рефракторов и фотографических пластинок, сенсибилизованных к визуальным лучам (орт- и панхром). Особенно интенсивно фотографические наблюдения двойных звезд производились на обсерваториях США Дирборн (Странд) и Вашингтон (Странд, Харингтон), в России эти наблюдения инициировались в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе Цейсса (Дейч) после второй мировой войны. Возрастающий интерес к наблюдениям двойных звезд непосредственно связан с теми новыми знаниями, которые стало возможным получать по мере накопления наблюдательных данных о двойных звездах.

## ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Непосредственные результаты продолжительных систематических наблюдений визуально-двойных звезд выражаются таблицами данных ( $t, r, s$ ), характеризующих для каждой звезды видимое орбитальное движение ее компонент. Анализируя эти данные, астрономы уже в XIX веке убедились, что видимое относительное движение компонент совершается по эллипсу и удовлетворяет закону площадей, то есть происходит в согласии с законами Кеплера, откуда следует, что обращение в системах двойных звезд подчиняется закону всемирного тяготения Ньютона, так как законы Кеплера, как доказал еще сам Ньютон, являются следствием единого закона тяготения. Этот вывод не был неожиданным для астрономов XIX века, которые уже убедились в правильности закона тяготения в процессе создания стройной теории движений планет Солнечной системы (небесной механики). Однако подтверждение действенности закона тяготения в звездном околосолнечном пространстве безусловно имело громадное научное и философское значение. Перед астрономами открылась реальная возможность "взвешивать" звезды, то есть определять их массы, опираясь только на закон Ньютона и наблюдения. Для решения поставленной задачи достаточно было определить из наблюдений период обращения двойной звезды  $P$  и большую полуось ее орбитального эллипса  $a$ . Далее следовало восполь-

зоваться третьим законом Кеплера в ньютоновском обобщении:

$$\frac{a^3}{P^2} = M_1 + M_2. \quad (1)$$

Здесь  $a$  – большая полуось истинной орбиты звезды  $B$  относительно звезды  $A$ , выраженная в астрономических единицах (а.е.),  $P$  – период обращения, выраженный в годах.  $M_1$  и  $M_2$  – массы компонент  $A$  и  $B$ , выраженные в единицах массы Солнца. Главная трудность на этом пути состоит, во-первых, в определении орбитальных элементов  $a$  и  $P$ , во-вторых, в определении расстояния до исследуемой звезды  $D$ , то есть ее параллакса  $p$ .

Первую трудность можно было преодолеть только после накопления рядов наблюдений, охватывающих минимум полпериода обращения звезды, то есть 50 – 100 лет для самых близких визуально-двойных звезд. Кроме того, необходимо было разработать эффективные методы определения истинной орбиты двойной звезды по ее проекции на небесной сфере. Подходящие методы – графические и аналитические – были предложены многими астрономами, например И. Энке (1830), М. Ковалевским (1873), Тиле–Инессом (1900), Цвирсом (1895), Данжоном (1938). Все эти методы позволяли довольно надежно определить элементы истинной орбиты визуально-двойной звезды, включая период обращения и большую полуось орбиты  $a$  (в единицах секунды дуги), однако только тех двойных звезд, период обращения которых не превышал 100 – 150 лет. Таких звезд оказалось немного. К 1850 году удалось определить только 20 орбит наиболее тесных двойных звезд с периодом обращения до 100 лет.

Темпы накопления орбит визуально-двойных звезд не возрастили до 70-х годов нашего века, несмотря на прогресс техники наблюдений и их массовости. Это не удивительно, так как большинство наблюдавшихся визуально или фотографически двойных звезд ( $r > 0,5''$ ) имеют периоды обращений от сотни до нескольких тысяч лет.

Вторая трудность на пути к определению масс звезд по формуле (1) преодолевается посредством измерений тригонометрических параллаксов исследуемых двойных звезд, либо между  $a$  (в астрономических единицах) в формуле (1) и  $a$  (в угловых секундах) имеет место простое соотношение

$$a \text{ [а.е.]} = a''/p'', \quad (2)$$

где  $a''$  и  $p''$  – большая полуось истинной орбиты двойной звезды и ее параллакс, выраженные в единицах секунды дуги.

Примечательно, однако, что до конца XIX века астрономы не научились определять тригонометрические параллаксы звезд с приемлемой точностью (то есть с ошибкой, меньшей  $0,010''$ ) и этот факт существенно повлиял на развитие звездной астроно-

мии. Только развитие астрофотографии, точнее ее специализации – фотографической астрометрии, обеспечило, наконец, приемлемую точность определения параллаксов из наблюдений. Заслуга в разработке фотографического метода определений параллаксов звезд принадлежит голландскому астроному Каптейну (1892 год), американскому астроному Шлезингеру (1910 год) и русскому – пулковскому астроному С.К. Костинскому (1930 год). В итоге этих исследований уже в середине нашего века тригонометрические параллаксы звезд стали определять со средней квадратической ошибкой  $\pm(0,005'' - 0,008'')$ , а позднее (1960 год), в связи с вводом в строй специального астрометрического рефлектора во Флагстафе (США) – ( $D = 150$  см,  $F = 18$  м) – с точностью до  $\pm(0,003'' - 0,004'')$ . Таким образом, к настоящему времени параллаксы звезд, находящихся на расстоянии до 20 парсек от Солнца ( $p > 0,040''$ ) могут определяться с относительной ошибкой порядка 10%, соответствующие ошибки определения суммы масс компонент возрастают в 3 раза, то есть до 30%, как это следует из формул (1) и (2). Для ближайших звезд, находящихся на расстоянии до 10 парсек ( $p > 0,100''$ ), ошибка в определении суммы масс составит не более 15%. От суммы масс компонент двойной звезды естественно было перейти к оценкам масс компонент. В отдельных случаях и эту задачу удалось решить, исходя только из законов механики и используя наблюдения лучевых скоростей.

Успехи, достигнутые астрономами в области определения орбит и параллаксов близких двойных звезд, позволили получить надежные оценки масс для нескольких десятков звезд и даже вывести некоторые статистические зависимости. Вот важнейшие результаты в этой области [4].

а) Массы всех исследованных звезд заключены в пределах от 0,07 до 20,0 массы Солнца.

б) Массы 90% звезд заключены в пределах от 0,4 до 2,0 массы Солнца.

в) Для звезд главной последовательности (статистическая общность звезд, к которой принадлежит Солнце) имеет место статистическая зависимость

$$L = KM^3; \quad (3)$$

здесь  $L$  – светимость звезды,  $M$  – масса,  $K$  – коэффициент пропорциональности.

г) Компоненты двойных звезд чаще бывают представлены звездами одной светимости и одного спектрального класса, но бывают и сильные различия. Есть веские основания считать, что компоненты двойной звезды сформировались одновременно и в дальнейшем эволюционировали параллельно, оставаясь в системе. Следовательно, если (3) справедливо, приходится заключить, что фактором, определяющим ход эволюции, было распределение первоначальной массы между компонентами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В окрестностях Солнца ( $D < 20$  парсек) более 3000 звезд, среди них около половины – двойные звезды всех типов, включая тесные спектральные и широкие визуальные. Есть все основания считать, что статистические закономерности, установленные с помощью двойных звезд в окрестностях Солнца, должны выполняться также и в Галактике в целом или в той ее части, где нет структурных особенностей. Важнейшие из этих данных следующие.

а) Массы звезд не могут быть ни слишком большие (например, больше массы Солнца в 100 раз), ни слишком малые (например, 1/100 солнечной).

б) Статистическая зависимость “масса – светимость”, по-видимому, имеет общую значимость и может различаться только незначительно для звезд, принадлежащих разным типам звездного населения.

в) Из а) и б), в частности, следует, что если обычные звезды сравнительно мало различаются по массе, то они же могут различаться по светимости в тысячу раз.

г) Масса звезды в момент ее формирования является важнейшим параметром, определяющим ее последующую эволюцию.

Данные выводы, сформулированные на основе большого опыта изучений двойных звезд, могут

рассматриваться как данные наблюдений и служить материалом для обобщений и развития теорий. Особенно ценны эти данные для создания теорий внутреннего строения звезд и теорий эволюции звезд. В этом и состоит главное значение наблюдений двойных звезд в астрономии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стремгрен Э., Стремгрен Б. Астрономия. М.: ОГИЗ, 1941.
2. Струве О., Линдс Б., Пилланс Э. Элементарная астрономия. М.: Наука, 1967.
3. Паннекук А. История астрономии. М.: Наука, 1966.
4. Кутю П. Наблюдения визуально-двойных звезд. М.: Мир, 1981.

\* \* \*

Алексей Алексеевич Киселев, доктор физико-математических наук, профессор кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета, ведущий научный сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН. Автор одной монографии и 90 других научных работ.