
СОЛНЦЕ И ЗВЕЗДЫ

Что такое звезды? Поверхностный взгляд найдет сходство между звездами и планетами. Ведь и планеты при наблюдении простым глазом видны как светящиеся точки различной яркости. Однако уже за несколько тысячелетий до нас внимательные наблюдатели неба — пастухи и земледельцы, мореплаватели и участники караванных переходов — приходили к убеждению, что звезды и планеты — различные по своей природе явления. Планеты, так же как Луна и Солнце, изменяют свое положение на небе, перемещаются из одного созвездия в другое и за год успевают пройти значительный путь, а звезды неподвижны одна относительно другой. Даже глубокие старики видят очертания созвездий совершенно такими же, какими они их видели в детстве.

Сходство в характере и скорости перемещений Солнца, Луны и планет привело наблюдателей древности к смелой и правильной мысли, что эти тела вместе с Землей образуют обособленную систему тел. Исследование этой системы, проходившее в борьбе между научной мыслью и религиозным догматом, завершилось торжеством учения Коперника. Определилось, что особым телом этой Солнечной системы является Солнце. Оно занимает центральное положение и выделяется своими размерами и массой, превосходя во много раз все остальные тела системы, вместе взятые. Солнце — единственное тело системы, состоящее из раскаленного газа и излучающее огромное количество энергии в пространство. Планеты тоже излучают энергию, но это лишь отраженная от их холодной поверхности ослабленная энергия излучения Солнца.

Звезды не могут принадлежать к Солнечной системе. Если бы они были примерно на таком же расстоянии, как и планеты, то невозможно было бы найти объяснение их видимой неподвижности. Естественнее считать, что

звезды тоже движутся в пространстве, но они так далеки от нас, что видимые перемещения их ничтожны. Создастся иллюзия неподвижности звезд. Но если звезды так далеки, то при видимой яркости, сравнимой с видимой яркостью планет, они должны излучать во много раз мощнее, чем планеты. Такой ход рассуждений приводил к мысли, что звезды — это тела, по своей природе сходные с Солнцем. Эту мысль отстаивал Джордано Бруно. Но окончательно вопрос разрешился после двух открытий. Первое сделал Галлей в 1718 г. Он сравнил наблюдаемые им положения ярких звезд с положениями этих же звезд, определенными древнегреческими астрономами. Оказалось, что за прошедшие почти 2000 лет Сириус сместился приблизительно на полградуса, а Арктур — на целый градус. Хотя древнегреческие астрономы определяли положения звезд не очень точно, смещения оказались слишком большими, чтобы их можно было отнести за счет ошибок наблюдений, и Галлей пришел к выводу, что он обнаружил действительное перемещение звезд на небесной сфере. Естественно было считать, что перемещение в течение двух тысяч лет происходило равномерно; тогда получается, что за год Сириус смещается приблизительно на одну секунду дуги ($1''$), а Арктур приблизительно на две секунды дуги ($2''$). Это очень медленное перемещение и неудивительно, что его трудно было обнаружить.

Теперь уместно провести следующее рассуждение: Земля за год совершает полный оборот по орбите вокруг Солнца, в результате чего мы наблюдаем видимое движение Солнца по небесной сфере, которое составляет 360° в год. Если предположить, что Сириус движется в пространстве поперек луча зрения примерно с такой же скоростью, с какой Земля движется вокруг Солнца, то из этого должно следовать, что Сириус находится во столько же раз дальше Солнца, во сколько раз 360° больше $1''$, т. е. приблизительно в миллион раз. Но если увеличить расстояние до Солнца в миллион раз, то его блеск станет даже меньше блеска Сириуса. Значит, нужно полагать, что Сириус излучает в пространство не меньше, а скорее несколько больше световой энергии, чем Солнце. Это очень важный аргумент, подтверждающий общность природы звезд и Солнца.

Еще более сильным оказался другой аргумент. В 1824 г. Фраунгофер произвел первые наблюдения спектров звезд.

В 1864 г. Секки, проделав подробное исследование спектров звезд, пришел к выводу, что звезды, как и Солнце, состоят из газа, имеющего высокую температуру, а также, что спектры всех звезд могут быть распределены на несколько классов и спектр Солнца принадлежит одному из этих классов. Из этого следует, что свет звезд имеет ту же природу, что и свет Солнца.

Таким образом, Солнце — одна из звезд. Это очень близкая к нам звезда, с которой Земля физически связана, вокруг которой она движется.

Но звезд огромное множество, они имеют различный блеск, различный цвет, различный спектр. Звезды движутся, они излучают огромное количество энергии в пространство и поэтому, теряя эту энергию, не могут не изменяться: они должны проходить какой-то путь эволюции. Перед астрономией открылось обширное поле исследования. Важность его определялась тем, что, судя по соотношению массы Солнца и массы планет в Солнечной системе, звездная форма материи является основной формой материи во Вселенной. Значение исследований звезд чрезвычайно велико также для успешного изучения природы самого Солнца, сыгравшего решающую роль в возникновении жизни на Земле и играющего столь же важную роль в поддержании этой жизни в наше время.

И наконец, встал новый вопрос: связаны ли как-нибудь между собой звезды? Влияют ли они каким-нибудь образом друг на друга? Не образуют ли звезды в свою очередь обособленной системы, эволюционирующей по каким-то своим законам?

Области астрономии, которые развились в ходе исследования этих вопросов, получили название астрофизики и звездной астрономии.

Определение расстояний до звезд

Рассуждение, которое было проведено, чтобы как-то оценить возможное расстояние до Сириуса, содержало предположение, что Сириус движется поперек луча зрения со скоростью, близкой к скорости движения Земли по ее орбите. Очевидно, что это предположение мало обосновано и полученное при его помощи расстояние до Сириуса может сильно отличаться от действительного. Необходимо найти более надежную основу для определения расстояний до звезд. Такой основой служит видимое

В 1864 г. Секки, проделав подробное исследование спектров звезд, пришел к выводу, что звезды, как и Солнце, состоят из газа, имеющего высокую температуру, а также, что спектры всех звезд могут быть распределены на несколько классов и спектр Солнца принадлежит одному из этих классов. Из этого следует, что свет звезд имеет ту же природу, что и свет Солнца.

Таким образом, Солнце — одна из звезд. Это очень близкая к нам звезда, с которой Земля физически связана, вокруг которой она движется.

Но звезд огромное множество, они имеют различный блеск, различный цвет, различный спектр. Звезды движутся, они излучают огромное количество энергии в пространство и поэтому, теряя эту энергию, не могут не изменяться: они должны проходить какой-то путь эволюции. Перед астрономией открылось обширное поле исследования. Важность его определялась тем, что, судя по соотношению массы Солнца и массы планет в Солнечной системе, звездная форма материи является основной формой материи во Вселенной. Значение исследований звезд чрезвычайно велико также для успешного изучения природы самого Солнца, сыгравшего решающую роль в возникновении жизни на Земле и играющего столь же важную роль в поддержании этой жизни в наше время.

И наконец, встал новый вопрос: связаны ли как-нибудь между собой звезды? Влияют ли они каким-нибудь образом друг на друга? Не образуют ли звезды в свою очередь обособленной системы, эволюционирующей по каким-то своим законам?

Области астрономии, которые развились в ходе исследования этих вопросов, получили название астрофизики и звездной астрономии.

Определение расстояний до звезд

Рассуждение, которое было проведено, чтобы как-то оценить возможное расстояние до Сириуса, содержало предположение, что Сириус движется поперек луча зрения со скоростью, близкой к скорости движения Земли по ее орбите. Очевидно, что это предположение мало обосновано и полученное при его помощи расстояние до Сириуса может сильно отличаться от действительного. Необходимо найти более надежную основу для определения расстояний до звезд. Такой основой служит видимое

смещение звезд в результате движения Земли вокруг Солнца.

Читатель, вероятно, помнит об одном открытии, сделанном им еще в детстве: если попеременно закрывать и открывать то один, то другой глаз, то наблюдаемые предметы видимым образом смещаются друг относительно друга, совершая как бы скачки вправо и влево. Особенно сильно смещаются близкие предметы, например, поднесенный к лицу палец. Это явление объясняется

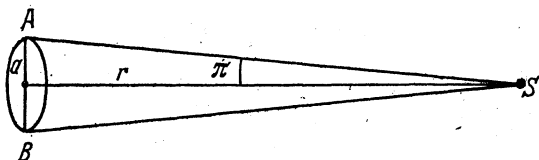


Рис. 1. Определение расстояния до звезды.

тем, что, попеременно закрывая и открывая глаза, мы наблюдаем из двух разных точек, разделенных расстоянием между зрачками. Аналогичное явление — видимое смещение звезд на небе — происходит из-за того, что Земля движется вокруг Солнца и мы в разное время года наблюдаем звездное небо из разных точек пространства. Как показывает рис. 1, направления AS и BS, по которым наблюдается звезда S из двух противоположных точек орбиты Земли, составляют угол, на который и смещается видимым образом звезда. Если обозначить через π половину этого угла, то из прямоугольного треугольника Земля — Солнце — звезда следует равенство

$$r = \frac{a}{\sin \pi}, \quad (1)$$

где r — расстояние от Земли до звезды, a — радиус земной орбиты. Величина радиуса земной орбиты называется астрономической единицей и составляет 149,6 млн. км.

Угол π , называемый годичным параллаксом звезды, равен половине ее видимого смещения за год. Как показывает рис. 1, под этим углом был бы виден наблюдаемый со звезды радиус земной орбиты. Если угол π измерен, то расстояние до звезды легко вычисляется по формуле (1).

Звезды так далеки, что даже у ближайших из них параллакс меньше секунды дуги. Поэтому измерение параллаксов звезд является весьма тонкой работой. Надо

еще учесть, что положение звезд изменяется также вследствие их движения относительно Солнца. Но движение звезды относительно Солнца является поступательным движением, а параллактическое смещение есть колебательное движение, поэтому эти два вида движения удается разделить.

Расстояние до звезды, параллакс которой был бы равен точно $1''$, принято в звездной астрономии за единицу длины. Эта единица длины называется парсеком (от сокращения слов «параллакс» и «секунда»). Иначе можно сказать, что парсек — это такое расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в $1''$. Так как $\sin 1'' = \frac{1}{206\,265}$, то из формулы (1) получаем:

$$r = 1 \text{ пс} = \frac{a}{\sin 1''} = 206\,265 a,$$

т. е. парсек равен 206 265 радиусам земной орбиты, или, в пересчете на километры, $3,08 \cdot 10^{13}$ км. Путь, равный парсеку, световой луч проходит за 3,26 года. Так как расстояние, проходимое светом за год, называется световым годом, то парсек равен 3,26 светового года. Очевидно, что если параллакс звезды в n раз меньше секунды, то расстояние до звезды равно n парсекам. Таким образом, расстояние до звезды в парсеках мы получим, если разделим единицу на параллакс звезды, выраженный в секундах дуги.

Первое надежное определение расстояния до звезды было сделано Бесселем, измерившим в 1838 г. параллакс звезды 61 Лебеда.

В табл. 1 приводится список двадцати ближайших к нам звезд.

К настоящему времени параллаксы измерены более чем у семи тысяч звезд. Число измеренных параллаксов не очень велико потому, что у далеких звезд параллаксы настолько малы, что их невозможно измерить. Для определения расстояний до далеких звезд и иных удаленных объектов применяются другие методы определения расстояний. Но все эти методы используют расстояния до близких звезд, полученные при помощи тригонометрических параллаксов. Поэтому метод тригонометрических параллаксов является основным методом определения расстояний во Вселенной.

При изучении Вселенной наблюдают тела и системы настолько удаленные, что даже огромнейшая единица

длины, парсек, оказывается слишком малой, чтобы удобно выражать расстояния. Тогда вводят в употребление единицу длины в тысячу раз большую — килопарсек (кпс) и в миллион раз большую — Мегaparсек (Мпс).

Т а б л и ц а 1. Двадцать ближайших звезд

№ п. п.	Название звезды	Парал- лакс в се- кундах пути	Расстоя- ние, пс	Видимая звездная величина, <i>m</i>	Абсолют- ная звезд- ная вели- чина, <i>M</i>	Спект- ральный класс
1	Солнце	—	1/206265	-26,7	+ 4,9	G2
2	Проксима Центавра	0,762	1,31	+11,3	+15,7	M
3	α Центавра А	0,756	1,32	+ 0,3	+ 4,7	G4
4	α Центавра В	0,756	1,32	+ 1,7	+ 6,1	K1
5	Звезда Барнарда	0,543	1,84	+ 9,5	+13,1	M5
6	Лаланд 21185	0,407	2,46	+10,7	+13,7	M2
7	Вольф 359	0,403	2,48	+13,5	+16,5	M8
8	+36°2147	0,388	2,58	+ 7,5	+10,4	M2
9	Сириус	0,376	2,66	- 1,5	+ 1,4	A1
10	Спутник Сириуса	0,376	2,66	+ 8,5	+11,4	A5
11	Росс 154	0,350	2,86	+10,5	+13,2	M5
12	Росс 248	0,334	2,99	+12,2	+14,7	M6
13	Лейтен 7896	0,328	3,05	+12,3	+14,9	M6
14	ϵ Эридана	0,303	3,30	+ 3,8	+ 6,2	K2
15	Процион	0,297	3,37	+ 0,5	+ 2,8	G4
16	Спутник Проциона	0,297	3,37	+10,8	+13,1	
17	61 Лебеда	0,296	3,38	+ 5,4	+ 7,7	K3
18	Спутник 61 Лебеда	0,296	3,38	+ 6,1	+ 8,4	K5
19	τ Кита	0,294	3,40	+ 3,7	+ 6,0	G5
20	ϵ Индейца	0,288	3,47	+4,7	+ 7,0	K5

Видимые звездные величины

При наблюдении звездного неба в черте освещенного огнями города можно видеть только небольшое число ярких звезд. Совсем другим кажется звездное небо в местности, где нет ярких огней, особенно в безлунную ночь. Наряду с яркими глаз видит менее яркие звезды и множество совсем слабых.

Это различие блеска звезд подчеркивает самую замечательную особенность звездного неба — его глубину. Но если поэт при виде бездонного звездного неба ищет возвышенных сравнений, то обязанность ученого, заметив различие в блеске звезд, разработать методику оценки блеска и применить эту методику к возможно большому числу звезд.

длины, парсек, оказывается слишком малой, чтобы удобно выражать расстояния. Тогда вводят в употребление единицу длины в тысячу раз большую — килопарсек (кпс) и в миллион раз большую — Мегaparсек (Мпс).

Т а б л и ц а 1. Двадцать ближайших звезд

№ п. п.	Название звезды	Парал- лакс в се- кундах пути	Расстоя- ние, пс	Видимая звездная величина, <i>m</i>	Абсолют- ная звезд- ная вели- чина, <i>M</i>	Спект- ральный класс
1	Солнце	—	1/206265	-26,7	+ 4,9	G2
2	Проксима Центавра	0,762	1,31	+11,3	+15,7	M
3	α Центавра А	0,756	1,32	+ 0,3	+ 4,7	G4
4	α Центавра В	0,756	1,32	+ 1,7	+ 6,1	K1
5	Звезда Барнарда	0,543	1,84	+ 9,5	+13,1	M5
6	Лаланд 21185	0,407	2,46	+10,7	+13,7	M2
7	Вольф 359	0,403	2,48	+13,5	+16,5	M8
8	+36°2147	0,388	2,58	+ 7,5	+10,4	M2
9	Сириус	0,376	2,66	- 1,5	+ 1,4	A1
10	Спутник Сириуса	0,376	2,66	+ 8,5	+11,4	A5
11	Росс 154	0,350	2,86	+10,5	+13,2	M5
12	Росс 248	0,334	2,99	+12,2	+14,7	M6
13	Лейтен 7896	0,328	3,05	+12,3	+14,9	M6
14	ϵ Эридана	0,303	3,30	+ 3,8	+ 6,2	K2
15	Процион	0,297	3,37	+ 0,5	+ 2,8	G4
16	Спутник Проциона	0,297	3,37	+10,8	+13,1	
17	61 Лебеда	0,296	3,38	+ 5,4	+ 7,7	K3
18	Спутник 61 Лебеда	0,296	3,38	+ 6,1	+ 8,4	K5
19	τ Кита	0,294	3,40	+ 3,7	+ 6,0	G5
20	ϵ Индейца	0,288	3,47	+4,7	+ 7,0	K5

Видимые звездные величины

При наблюдении звездного неба в черте освещенного огнями города можно видеть только небольшое число ярких звезд. Совсем другим кажется звездное небо в местности, где нет ярких огней, особенно в безлунную ночь. Наряду с яркими глаз видит менее яркие звезды и множество совсем слабых.

Это различие блеска звезд подчеркивает самую замечательную особенность звездного неба — его глубину. Но если поэт при виде бездонного звездного неба ищет возвышенных сравнений, то обязанность ученого, заметив различие в блеске звезд, разработать методику оценки блеска и применить эту методику к возможно большому числу звезд.

Световым потоком I звезды называется количество энергии излучения звезды, падающего в единицу времени на единицу поверхности, перпендикулярной к лучу зрения. Для наблюдателя, находящегося на Земле, световой поток ярчайшей звезды земного неба Сириуса в 750 раз больше светового потока звезды 61 Лебеда (семнадцатой из ближайших к нам звезд), едва различаемой невооруженным глазом, в 33 000 раз больше светового потока звезды Барнарда (пятой в списке ближайших звезд), которую можно наблюдать в полевой бинокль, и в 10^{10} раз больше светового потока тех очень слабых звезд, фотографические изображения которых получают при длительных экспозициях на современных гигантских телескопах. С другой стороны, световой поток Солнца в $2 \cdot 10^{10}$ раз больше светового потока Сириуса. Столь большое различие в световых потоках звезд делает неудобным использование этой величины. Вместо нее употребляют так называемую видимую звездную величину m , которая связана со световым потоком I соотношением

$$m = -2,5 \lg I + C. \quad (2)$$

Здесь C — некоторая постоянная, выбранная так, чтобы видимые звездные величины соответствовали шкале древнегреческого астронома Гиппарха, который во 2-м веке до нашей эры впервые разделил звезды на шесть величин в зависимости от их блеска. Разделение на звездные величины Гиппарх производил на глаз, причем так, чтобы звезды 1-й величины казались настолько ярче звезд 2-й величины, насколько те кажутся ярче звезд 3-й величины и т. д. Гиппарху было неизвестно свойство человеческого глаза воспринимать геометрические отношения яркости как арифметические. Человеческий глаз так устроен, что если в люстре последовательно зажигается 1, 3, 9, 27, 81... т. е. в каждый следующий раз в три раза больше одинаковых лампочек, то нам кажется, что освещенность в комнате все время увеличивается на одну и ту же величину. Если же зажигать последовательно 1, 3, 5, 7, 9 и т. д. лампочек, то глазу кажется, что прибавка в освещенности комнаты все время уменьшается. Это свойство не только зрения, но и других органов чувств, выработалось в процессе эволюции, чтобы, с одной стороны, воспринимать слабые раздражения и, следовательно, обеспечить нужную реакцию организма на эти раздражения, а с другой стороны, чтобы смягчить влияние сильных

раздражений и тем самым оберегать организм от их травмирующего действия.

Формула (2) как раз обладает тем свойством, что если световой поток I изменяется в геометрическом отношении, то видимая звездная величина m изменяется в арифметическом отношении, а именно, увеличению светового потока в 100 раз соответствует уменьшение видимой звездной величины m ровно на пять единиц. Уменьшение же видимой звездной величины на одну единицу означает увеличение светового потока приблизительно в 2,512 раза.

На практике видимые звездные величины определяют при помощи специального прибора — фотометра, в котором наряду с наблюдаемой звездой видна искусственная «звезда» — освещенный металлический шарик или иное приспособление. При помощи специального устройства изменяют блеск шарика до тех пор, пока он не станет равным блеску звезды, и затем по отсчету на шкале определяют видимую звездную величину. Эта шкала рассчитывается при помощи формулы (2).

В настоящее время обычно используют фотографический метод, основанный на том, что изображения звезд на фотографической пластинке получаются в виде кружков тем большего радиуса и тем более плотными, чем больше световой поток звезды. Интенсивность химических процессов, происходящих в эмульсии фотографической пластинки и вызывающих ее почернение, пропорциональна количеству падающего на нее света. Измеряя почернения, вызванные на пластинке светом звезд, можно определять их видимые звездные величины. Соответствующая шкала перехода тоже основана на формуле (2).

Наиболее точным методом определения звездных величин является получивший широкое распространение за последние 10—20 лет фотоэлектрический метод. На полупроводниковый катод фотоэлемента падает собранный телескопом свет звезды. Кванты света выбивают из катода электроны, которые электрическим полем фотоэлемента направляются к аноду, в результате чего возникает электрический ток. Сила тока пропорциональна числу вылетающих электронов, а число последних пропорционально потоку излучения звезды. Измеряя силу возникающего тока, определяют звездную величину светила. Как видно из табл. 1, для оценки звездных величин используются не только целые, но и дробные числа.

Согласно предложению Гиппарха, назвавшего самые яркие звезды звездами первой величины, чем больше блеск звезды, тем меньше ее видимая звездная величина. Это правило выполняется в формуле (2) благодаря минусу перед первым членом правой части. Таким образом, из 20 ближайших звезд самый слабый блеск имеет звезда Вольф 359 (видимая звездная величина равна +13,5), а наибольшим блеском обладает Сириус, звездная величина которого даже отрицательна: -1,6. Видимая звездная величина Солнца -26,7, а Луны в полнолунии -12,5.

Светимости и абсолютные звездные величины

Сравнение 4-го и 5-го столбцов табл. 1 показывает, что различие видимых звездных величин не может быть объяснено одним различием расстояний звезд. Например, Сириус вдвое дальше, чем α Центавра, а его видимая звездная величина меньше, т. е. блеск больше.

Очевидно, это должно объясняться тем, что Сириус излучает больше световой энергии в пространство, чем α Центавра.

Количество световой энергии, излучаемой звездой в единицу времени, называется ее светимостью. Световой поток звезды зависит от ее расстояния до наблюдателя. Светимость же звезды от положения наблюдателя не зависит. Это — одна из важнейших физических характеристик звезды. Светимость Солнца равна приблизительно $4 \cdot 10^{26}$ джоулей в секунду (Дж/с). Чтобы как-то представить себе значение этой величины, укажем, что выработанная человечеством энергия всех видов меньше одной тысячной доли энергии, излучаемой Солнцем за секунду.

На Землю падает приблизительно одна двухмиллиардная доля всего излучения, посылаемого Солнцем в пространство. Так как все виды энергии — уголь, нефть, газ, энергия движения рек, энергия ветра и т. д., кроме атомной энергии, которой пока выработано немного, являются переработанной энергией солнечного света, то легко считать, что человечество за время своего существования использовало всего только энергию солнечного излучения, падающего на Землю приблизительно за месяц.

Можно найти соотношение, связывающее светимость L звезды и ее световой поток I на расстоянии r . Окружим звезду сферой радиуса r . Поверхность этой сферы