

пределах изменяется температура на Солнце от его центра до фотосферы? **6.** Какими способами осуществляется перенос энергии из недр Солнца наружу? **7.** Чем объясняется наблюдаемая на Солнце грануляция? **8.** Какие проявления солнечной активности наблюдаются в различных слоях атмосферы Солнца? С чем связана основная причина этих явлений? **9.** Чем объясняется понижение температуры в области солнечных пятен? **10.** Какие явления на Земле связаны с солнечной активностью?



**УПРАЖНЕНИЕ 17** **1.** Можно ли заметить невооружённым глазом (через тёмный фильтр) на Солнце пятно размером с Землю, если глаз различает объекты, видимые размеры которых 2—3'? **2.** Какова вторая космическая скорость на уровне фотосферы Солнца? **3.** Какая мощность излучения приходится в среднем на 1 кг солнечного вещества?

## § 22. РАССТОЯНИЯ ДО ЗВЁЗД.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВЁЗД

Наше Солнце справедливо называют типичной звездой, но среди огромного многообразия мира звёзд есть немало таких, которые значительно отличаются от него по физическим характеристикам. Поэтому более полное представление о звёздах даёт такое определение:

**звезда — это пространственно обособленный, гравитационно связанный, непрозрачный для излучения космический объект, в котором в значительных масштабах происходили, происходят или будут происходить термоядерные реакции превращения водорода в гелий.**

Солнце существует уже несколько миллиардов лет и мало изменилось за это время, поскольку в его недрах всё ещё происходят термоядерные реакции, в результате которых из четырёх протонов (ядер водорода) образуется альфа-частица (ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов). Более массивные звёзды расходуют запасы водорода значительно быстрее (за десятки миллионов лет). После того как водород израсходован, начинаются реакции между ядрами гелия с образованием устойчивого изотопа углерода-12 и дру-

гие реакции, продуктами которых являются кислород и тяжёлые элементы (натрий, сера, магний и т. д.). Таким образом, в недрах звёзд образуются ядра многих химических элементов, вплоть до железа.

У наиболее массивных звёзд прекращение всех возможных термоядерных реакций сопровождается мощным взрывом, который наблюдается как вспышка сверхновой звезды.

Все элементы, которые входят в состав нашей планеты и всего живого на ней, образовались в результате термоядерных реакций, происходивших в звёздах, поэтому звёзды не только самые распространённые во Вселенной объекты, но и самые важные для понимания происходящих в ней явлений и процессов.

Именно термоядерные реакции являются характерной отличительной особенностью звёзд от планет. Поэтому современное определение планеты формулируется так:

**планета — небесное тело, обращающееся вокруг звезды или остатка звезды, достаточно массивное, чтобы приобрести сферическую форму под действием собственной гравитации, и своим воздействием удалившее малые тела с орбиты, близкой к собственной, но при этом в её недрах не происходят и никогда не происходили реакции термоядерного синтеза.**

## 1. Годичный параллакс и расстояния до звёзд

Мысли о том, что звёзды — это далёкие солнца, высказывались ещё в глубокой древности. Однако долгое время оставалось неясным, как далеко они находятся от Земли. Ещё Аристотель понимал, что если Земля движется, то, наблюдая положение какой-либо звезды из двух диаметрально противоположных точек земной орбиты, можно заметить, что направление на звезду изменится (рис. 5.12). Это кажущееся (параллактическое) смещение звезды будет служить мерой расстояния до неё: чем оно больше, тем ближе к нам расположена звезда. Но не только самому Аристотелю, но даже значительно позднее Копернику не удалось обнаружить это смещение. Только в конце первой половины XIX в., когда телескопы были оборудованы приспособлениями для точных угловых измерений, удалось измерить такое смещение у ближайших звёзд.

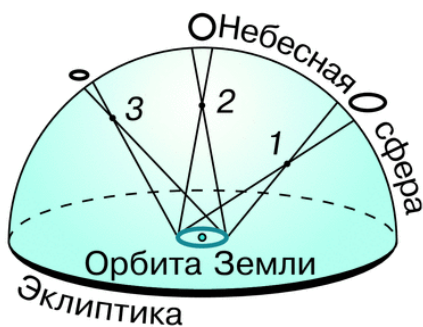


Рис. 5.12. Параллактическое смещение звезды

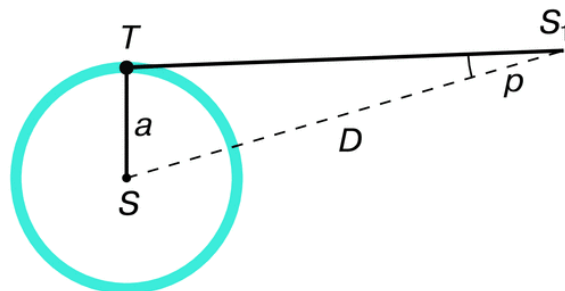


Рис. 5.13. Годичный параллакс звезды

Годичным параллаксом звезды  $p$  называется угол, под которым со звезды можно было бы видеть большую полуось земной орбиты (равную 1 а. е.), перпендикулярную направлению на звезду (рис. 5.13).

Расстояние до звезды

$$D = \frac{a}{\sin p},$$

где  $a$  — большая полуось земной орбиты. Заменяв синус малого угла величиной самого угла, выраженной в радианной мере, и приняв  $a = 1$  а. е., получим следующую формулу для вычисления расстояния до звезды в астрономических единицах:

$$D = \frac{206\,265''}{p}.$$

В 1837 г. впервые были осуществлены надёжные измерения годичного параллакса. Русский астроном **Василий Яковлевич Струве** (1793—1864) провёл эти измерения для ярчайшей звезды Северного полушария Веги ( $\alpha$  Лиры). Почти одновременно в других странах определили параллаксы ещё двух звёзд, одной из которых была  $\alpha$  Центавра. Эта звезда, которая с территории России не видна, оказалась ближайшей к нам. Даже у неё годичный параллакс составил всего  $0,75''$ . Под таким углом невооружённому глазу видна проволочка толщиной 1 мм с расстояния 280 м. Поэтому неудивительно, что столь малые угловые смещения так долго не могли заметить.

Расстояние до ближайшей звезды, параллакс которой  $p = 0,75''$ , составляет  $D = \frac{206\,265''}{0,75''} = 270\,000$  а. е. Единицами

для измерения столь значительных расстояний являются парсек и световой год.

*Парсек* — это такое расстояние, на котором параллакс звёзд равен  $1''$ . Отсюда и название этой единицы: пар — от слова «параллакс», сек — от слова «секунда». Расстояние в парсеках равно обратной величине годового параллакса. Например, поскольку параллакс  $\alpha$  Центавра равен  $0,75''$ , расстояние до неё равно  $1,3$  парсека.

*Световой год* — это такое расстояние, которое свет, распространяясь со скоростью  $300$  тыс. км/с, проходит за год. От ближайшей звезды свет идёт до Земли свыше четырёх лет, тогда как от Солнца около восьми минут, а от Луны немногим более одной секунды.

$1$  пк (парсек) =  $3,26$  светового года =  $206\,265$  а. е. =  $3 \cdot 10^{13}$  км.

К настоящему времени с помощью специального спутника «Гиппаркос» измерены годовые параллаксы более  $118$  тыс. звёзд с точностью  $0,001''$ .

Таким образом, теперь измерением годового параллакса можно надёжно определить расстояния до звёзд, удалённых от нас на  $1000$  пк, или  $3000$  св. лет. Расстояния до более далёких звёзд определяются другими методами.

## 2. Видимая и абсолютная звёздные величины.

### Светимость звёзд

После того как астрономы получили возможность определять расстояния до звёзд, выяснилось, что звёзды, находящиеся на одинаковом расстоянии, могут отличаться по видимой яркости (т. е. по блеску). Стало очевидно, что звёзды имеют различную *светимость*. Солнце кажется самым ярким объектом на небе только потому, что оно находится гораздо ближе всех остальных звёзд.

**Светимостью называется полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени.**

Она выражается в абсолютных единицах (ваттах) или в единицах светимости Солнца.

В астрономии принято сравнивать звёзды по светимости, рассчитывая их блеск (звёздную величину) для одного и того же стандартного расстояния —  $10$  пк.

**Видимая звёздная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии  $D_0 = 10$  пк, получила название абсолютной звёздной величины  $M$ .**

Рассмотрим, как можно определить абсолютную звёздную величину  $M$ , зная расстояние до звезды  $D$  (или параллакс —  $p$ ) и её видимую звёздную величину  $m$ . Напомним, что блеск двух источников, звёздные величины которых отличаются на единицу, отличается в 2,512 раза. Для звёзд, звёздные величины которых равны  $m_1$  и  $m_2$  соответственно, отношение их блесков  $I_1$  и  $I_2$  выражается соотношением:

$$I_1 : I_2 = 2,512^{m_2 - m_1}.$$

Для видимой и абсолютной звёздных величин одной и той же звезды отношение блесков будет выглядеть так:

$$I : I_0 = 2,512^{M - m},$$

где  $I_0$  — блеск этой звезды, если бы она находилась на расстоянии  $D_0 = 10$  пк.

В то же время известно, что блеск звезды меняется обратно пропорционально квадрату расстояния до неё. Поэтому

$$I : I_0 = D_0^2 : D^2.$$

Следовательно,

$$2,512^{M - m} = D_0^2 : D^2.$$

Логарифмируя это выражение, находим

$$0,4(M - m) = \lg 10^2 - \lg D^2,$$

или

$$M = m + 5 - 5 \lg D,$$

или

$$M = m + 5 + \lg p.$$

Абсолютная звёздная величина Солнца  $M_{\odot} = 5^m$ . Иначе говоря, с расстояния 10 пк наше Солнце выглядело бы как звезда пятой звёздной величины.

Зная абсолютную звёздную величину звезды  $M$ , легко вычислить её светимость  $L$ . Считая светимость Солнца  $L_{\odot} = 1$ , получаем:

$$L = 2,512^{5 - M},$$

или

$$\lg L = 0,4(5 - M).$$

По светимости (мощности излучения) звёзды значительно отличаются друг от друга: некоторые излучают энергию в сотни тысяч раз больше, чем Солнце, другие — в десятки тысяч раз меньше. Абсолютные звёздные величины звёзд наиболее высокой светимости (гигантов и сверхгигантов) достигают  $M = -9^m$ , а звёзды-карлики, обладающие наименьшей светимостью, имеют абсолютную звёздную величину  $M = +17^m$ .

### 3. Спектры, цвет и температура звёзд

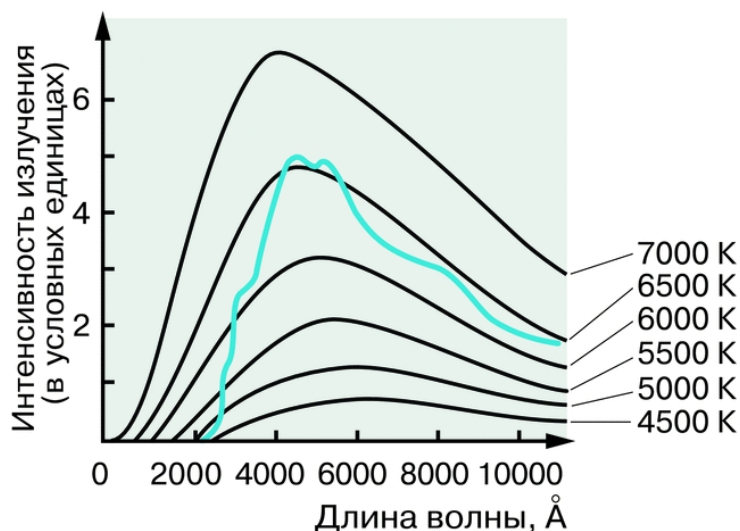
Всю информацию о звёздах можно получить только на основе исследования приходящего от них излучения. Наблюдая звёзды, можно заметить, что они имеют различный цвет. Хорошо известно, что цвет любого нагретого тела, в частности звезды, зависит от его температуры. Более полное представление об этой зависимости даёт изучение звёздных спектров. Для большинства звёзд это спектры поглощения, в которых на фоне непрерывного спектра наблюдаются тёмные линии.

Температуру наружных слоёв звезды, от которых приходит излучение, определяют по распределению энергии в непрерывном спектре (рис. 5.14), а также по интенсивности разных спектральных линий. Длина волны, на которую приходится максимум излучения, зависит от температуры излучающего тела. По мере увеличения температуры положение максимума смещается от красного к фиолетовому концу спектра. Количественно эта зависимость выражается законом Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,29}{T},$$

где  $\lambda_{\max}$  — длина волны (в см), на которую приходится максимум излучения, а  $T$  — абсолютная температура.

Рис. 5.14. Распределение энергии в непрерывном спектре Солнца и чёрного тела при различных температурах



Как оказалось, эта температура для различных типов звёзд заключена в пределах от 2500 до 50 000 К. Изменение температуры меняет состояние атомов и молекул в атмосферах звёзд, что отражается в их спектрах. По ряду характерных особенностей спектров звёзды разделены на спектральные классы, которые обозначены латинскими буквами и расположены в порядке, соответствующем убыванию температуры: O, B, A, F, G, K, M.

У наиболее холодных (красных) звёзд класса M в спектрах наблюдаются линии поглощения некоторых двухатомных молекул (например, оксидов титана, циркония и углерода). Примерами звёзд, температура которых около 3000 К, являются Антарес и Бетельгейзе.

В спектрах жёлтых звёзд класса G с температурой около 6000 К, к которым относится и Солнце, преобладают линии металлов: железа, натрия, кальция и т. д. По температуре, спектру и цвету сходна с Солнцем звезда Капелла.

Для спектров белых звёзд класса A, которые имеют температуру около 10 000 К (Вега, Денеб и Сириус), наиболее характерны линии водорода и множество слабых линий ионизованных металлов. В спектрах наиболее горячих звёзд появляются линии нейтрального и ионизованного гелия.

Различия звёздных спектров объясняются отнюдь не разнообразием их химического состава, а различием температуры и других физических условий в атмосферах звёзд. Изуче-

ние спектров показывает, что преобладают в составе звёздных атмосфер (и звёзд в целом) водород и гелий. На долю всех остальных химических элементов приходится не более нескольких процентов.

Измерение положения спектральных линий позволяет не только получить информацию о химическом составе звёзд, но и определить скорость их движения. Если источник излучения (звезда или любой другой объект) приближается к наблюдателю или удаляется от него со скоростью  $v$ , то наблюдатель будет регистрировать изменение длины волны принимаемого излучения. В случае уменьшения расстояния между наблюдателем и звездой длина волны уменьшается и соответствующая линия смещается к сине-фиолетовому концу спектра. При удалении звезды длина волны излучения увеличивается, а линия смещается в красную его часть. Это явление получило название *эффекта Доплера*, согласно которому зависимость разности длин волн от скорости источника по лучу зрения  $v$  и скорости света  $c$  выражается следующей формулой:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c},$$

где  $\lambda_0$  — длина волны спектральной линии для неподвижного источника, а  $\lambda$  — длина волны в спектре движущегося источника.

Эффект Доплера наблюдается в оптической и других областях спектра и широко используется в астрономии.

#### 4. Диаграмма «спектр — светимость»

Полученные данные о светимости и спектрах звёзд уже в начале XX в. были сопоставлены двумя астрономами — *Эйнаром Герцшпрунгом* (Голландия) и *Генри Расселлом* (США) — и представлены в виде диаграммы, которая получила название «диаграмма Герцшпрунга—Расселла». Если по горизонтальной оси отложены спектральные классы (температура) звёзд, а по вертикальной — их светимости (абсолютные звёздные величины), то каждой звезде будет соответствовать опре-



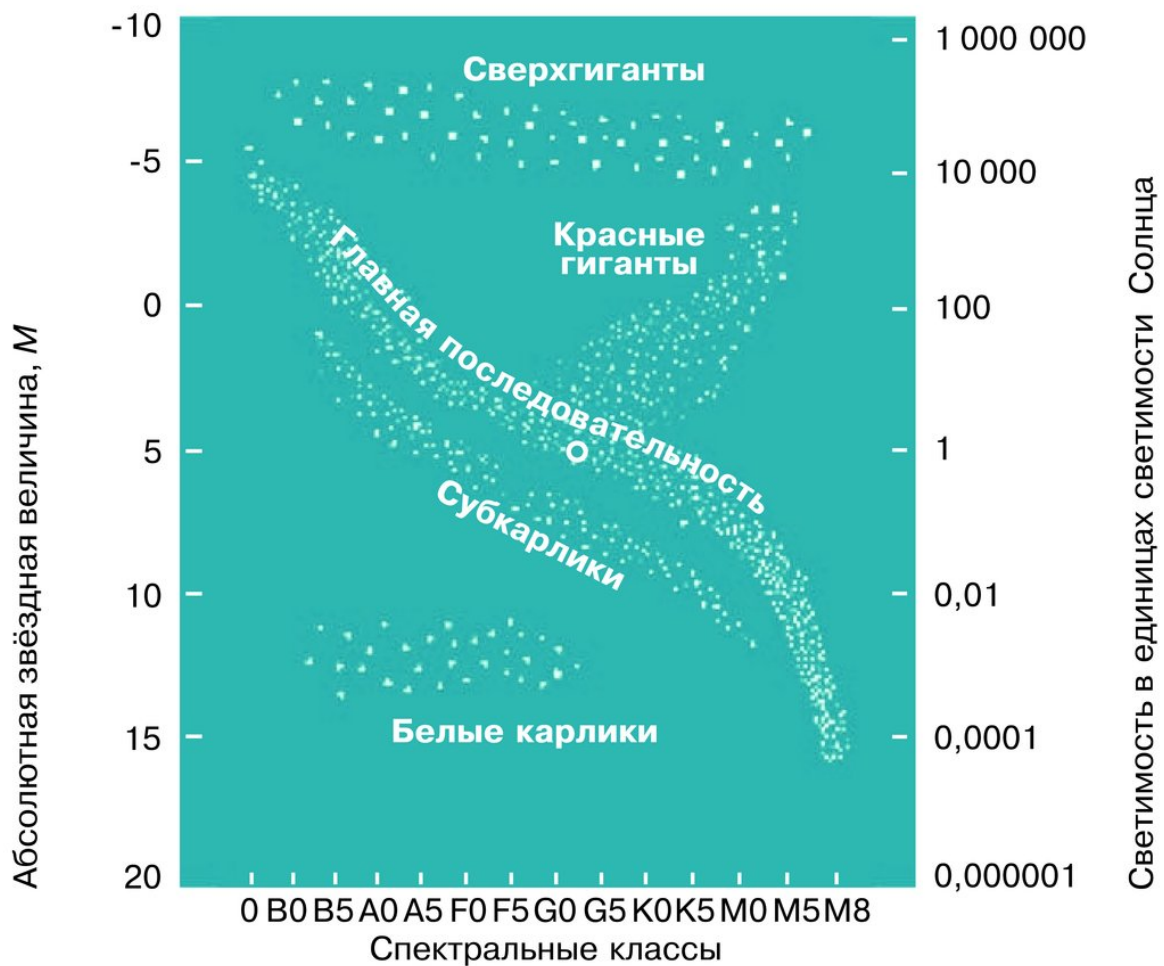


Рис. 5.15. Диаграмма «спектр — светимость»

делённая точка на этой диаграмме (рис. 5.15). В результате обнаруживается определённая закономерность в расположении звёзд на диаграмме — они не заполняют всё её поле, а образуют несколько групп, названных *последовательностями*. Наиболее многочисленной (примерно 90% всех звёзд) оказалась *главная последовательность*, к числу звёзд которой принадлежит наше Солнце (его положение отмечено на диаграмме кружочком). Звёзды этой последовательности отличаются друг от друга по светимости и температуре, и взаимосвязь этих характеристик соблюдается весьма строго: *самую высокую светимость имеют наиболее горячие звёзды, а по мере уменьшения температуры светимость падает*. Красные звёзды малой светимости получили название *красных карликов*. Вместе с тем на диаграмме существуют и другие последовательности, где подобная закономерность не соблюда-

ется. Особенно заметно это среди более холодных (красных) звёзд: помимо звёзд, принадлежащих главной последовательности и потому имеющих малую светимость, на диаграмме представлены звёзды высокой светимости, которая практически не меняется при изменении их температуры. Такие звёзды принадлежат двум последовательностям (*гиганты* и *сверхгиганты*), получившим эти названия вследствие своей светимости, которая значительно превосходит светимость Солнца. Особое место на диаграмме занимают горячие звёзды малой светимости — *белые карлики*.

Лишь к концу XX в., когда объём знаний о физических процессах, происходящих в звёздах, существенно увеличился и стали понятными пути их эволюции, удалось найти теоретическое обоснование тем эмпирическим закономерностям, которые отражает диаграмма «спектр — светимость».

#### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Какова светимость звезды  $\xi$  Скорпиона, если её звёздная величина  $3^m$ , а расстояние до неё 7500 св. лет?

**Дано:**

$$m = 3^m$$

$$D = 7500 \text{ св. лет}$$

$$L = ?$$

**Решение:**

$$\lg L = 0,4(5 - M).$$

$$M = m + 5 - 5 \lg D,$$

$$\text{где } D = 7500 : 3,26 = 2300 \text{ пк.}$$

$$\text{Тогда } M = 3 + 5 - 5 \lg 2300 = -8,8.$$

$$\lg L = 0,4 \cdot [5 - (-8,8)] = 5,52.$$

Отсюда  $L = 330\,000$ .

**Ответ:**  $L = 330\,000$ .



**ВОПРОСЫ** 1. Как определяют расстояния до звёзд? 2. От чего зависит цвет звезды? 3. В чём главная причина различия спектров звёзд? 4. От чего зависит светимость звезды?



**УПРАЖНЕНИЕ 18** 1. Во сколько раз Сириус ярче, чем Альдебаран; Солнце ярче, чем Сириус? 2. Одна звезда ярче другой в 16 раз. Чему равна разность их звёздных величин? 3. Параллакс Веги  $0,11''$ . Сколько времени идёт свет от неё до Земли?