

1. Определение расстояний до звезд методом годичного параллакса.
2. Учение Гиппарха о звездных величинах.
3. Исследования астрономического спутника «Гиппарх».

3.2. Физическая природа звезд

Цвет, температура, химический состав и спектральные классы звезд. Каждая звезда — гигантский раскаленный плазменный шар, который излучает в космическое пространство все виды электромагнитных волн. Даже рассматривая небо невооруженным глазом, можно заметить различный цвет звезд. Это происходит потому, что максимум излучения звезд приходится на различные длины волн. Самые горячие звезды имеют голубоватый цвет и температуру фотосферы — 30 000...60 000 К. Температура самых холодных звезд — менее 2 000 К и их цвет — красноватый (табл. 3.2). Такие звезды доступны для наблюдений только в инфракрасном диапазоне электромагнитных волн.

Таблица 3.2. Цвет, температура и спектральный класс звезд

Цвет	Температура фотосферы, К	Спектральный класс	Типичные представители
Голубой	30 000 ... 60 000	O	Минтака
Бело-голубой	10 000 ... 30 000	B	Спика, Ригель
Белый	7 500 ... 10 000	A	Сириус, Вега, Денеб
Желто-белый	6 000 ... 7 500	F	Процион, Канопус
Желтый	5 000 ... 6 000	G	Солнце, Капелла
Оранжевый	3 500 ... 5 000	K	Альдебаран, Арктур
Красный	2 000 ... 3 500	M	Антарес, Бетельгейзе

Изучение химического состава звезд возможно по спектрам поглощения. Подобно спектру нашего Солнца непрерывные спектры звезд пересекают темные линии, которые соответствуют спектрам излучения определенных веществ. Анализируя спектральные полосы, удалось определить химический состав видимых нам звезд. Оказалось, что в ат-

мосфере звезд, как и Солнца, преобладают два элемента: водород и гелий. На долю остальных элементов приходится не более нескольких процентов. При невысоких температурах в атмосферах звезд могут существовать нейтральные атомы и простейшие молекулы: C_2 , CN_2 (циан), оксиды титана, циркония, углерода и др. В спектрах горячих звезд преобладают ионизированные атомы.



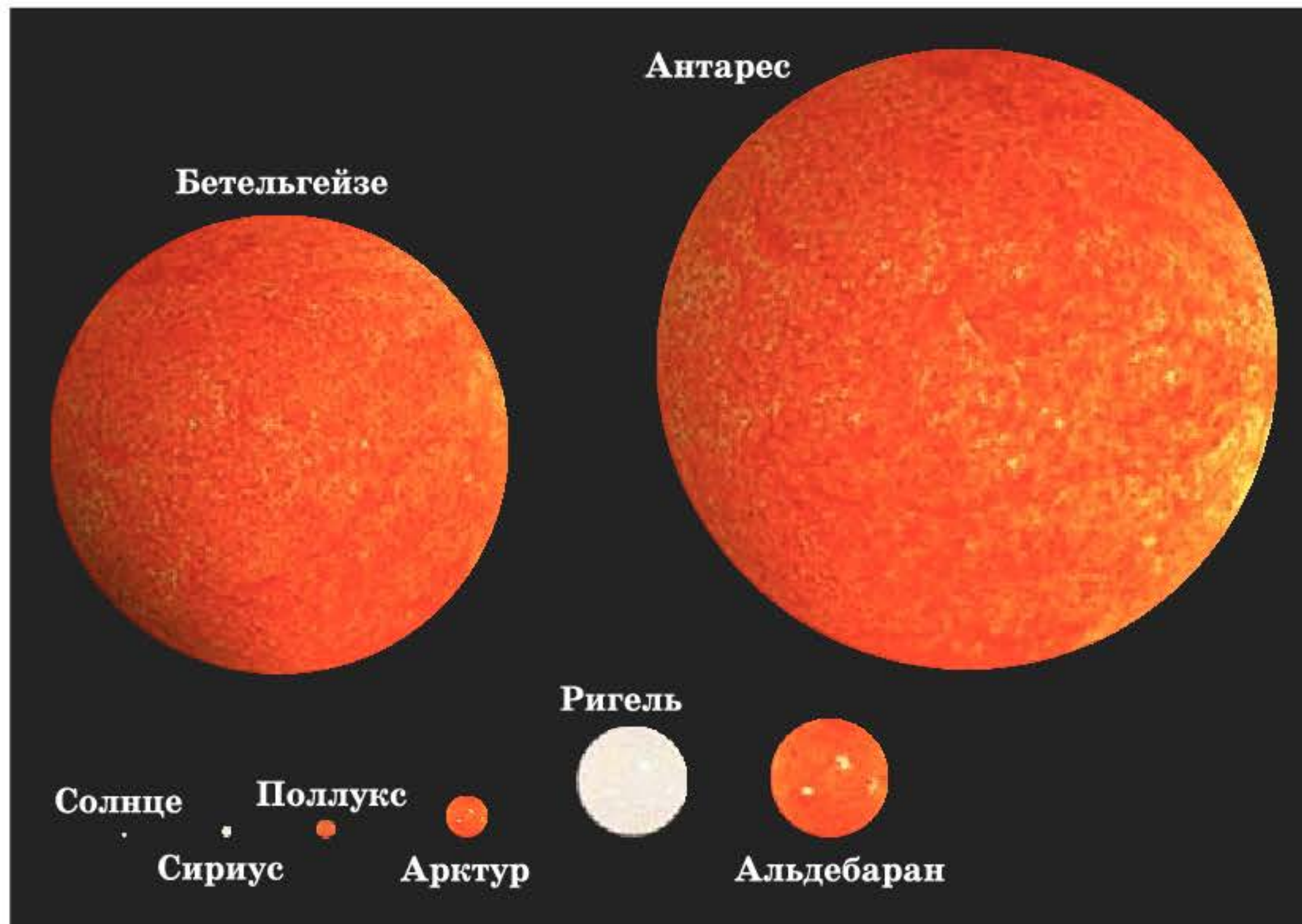
Температура и цвет звезды взаимосвязаны. Звезды бывают разного цвета: от красного до белого и голубого. Красный — это самый «холодный» цвет звезд, который указывает, что ее температура менее 3500 К. Желтовато-белые звезды, подобные нашему Солнцу, имеют в среднем температуру 6000 К. Самые горячие звезды — голубые, с температурой порядка 60 000 К.

Сходные между собой по спектру звезды объединяют в семь основных спектральных классов: O, B, A, F, G, K, M (см. табл. 3.2). Каждый спектральный класс подразделяется еще на десять подклассов. Например, наше Солнце относится к классу G2. Как видно из таблицы, самые горячие звезды — классов O, B, A, самые холодные — K и M.

Благодаря развитию средств наблюдения в последние десятилетия удалось обнаружить нетипичные звезды, для них пришлось ввести дополнительные спектральные классы:

- W — очень тяжелые яркие звезды с температурой порядка 70 000 К (звезды Вольфа — Райе);
- L — коричневые карлики с температурой 1500 ... 2000 К и соединениями металлов в атмосфере;
- T — метановые коричневые карлики с температурой 700 ... 1 500 К;
- Y — очень холодные (метано-аммиачные) коричневые карлики с температурой ниже 700 К;
- C — углеродные звезды-гиганты с повышенным содержанием углерода;
- S — циркониевые звезды;
- Q — новые звезды;
- P — планетарные туманности.

Светимость звезд. Для характеристики общей мощности излучаемой звездой энергии используется понятие *«светимость звезд»*. Эта важнейшая характеристика определяется с помощью закона Стефана — Больцмана, согласно которому она прямо пропорциональна квадрату радиуса звезды и четвертой степени температуры ее фотосферы. Светимость звезды связана с ее абсолютной звездной величиной и при

Сравнение
размеров звезд**Рис. 3.3**

необходимости легко вычисляется. У большинства звезд светимость сравнима или меньше светимости Солнца. Однако есть и такие звезды, светимость которых в сотни или даже тысячи раз больше. Например, у звезды Альдебаран (α Тельца) светимость в 160 раз превышает солнечную, а у Ригеля (β Ориона) — в 80 000 раз!

Радиус, масса и средняя плотность звезд. По своим размерам звезды также сильно отличаются друг от друга. Если радиус превышает радиус Солнца в сотни раз, звезды называют *сверхгигантами*. Например, Антарес (α Скорпиона) имеет радиус в 750 раз больше солнечного. *Гигантами* называют звезды, которые по радиусу превышают Солнце в десятки раз, например Поллукс (β Близнецов) (рис. 3.3). Наше Солнце и звезды с меньшими размерами относят к *карликам*, среди которых есть звезды меньше Луны.



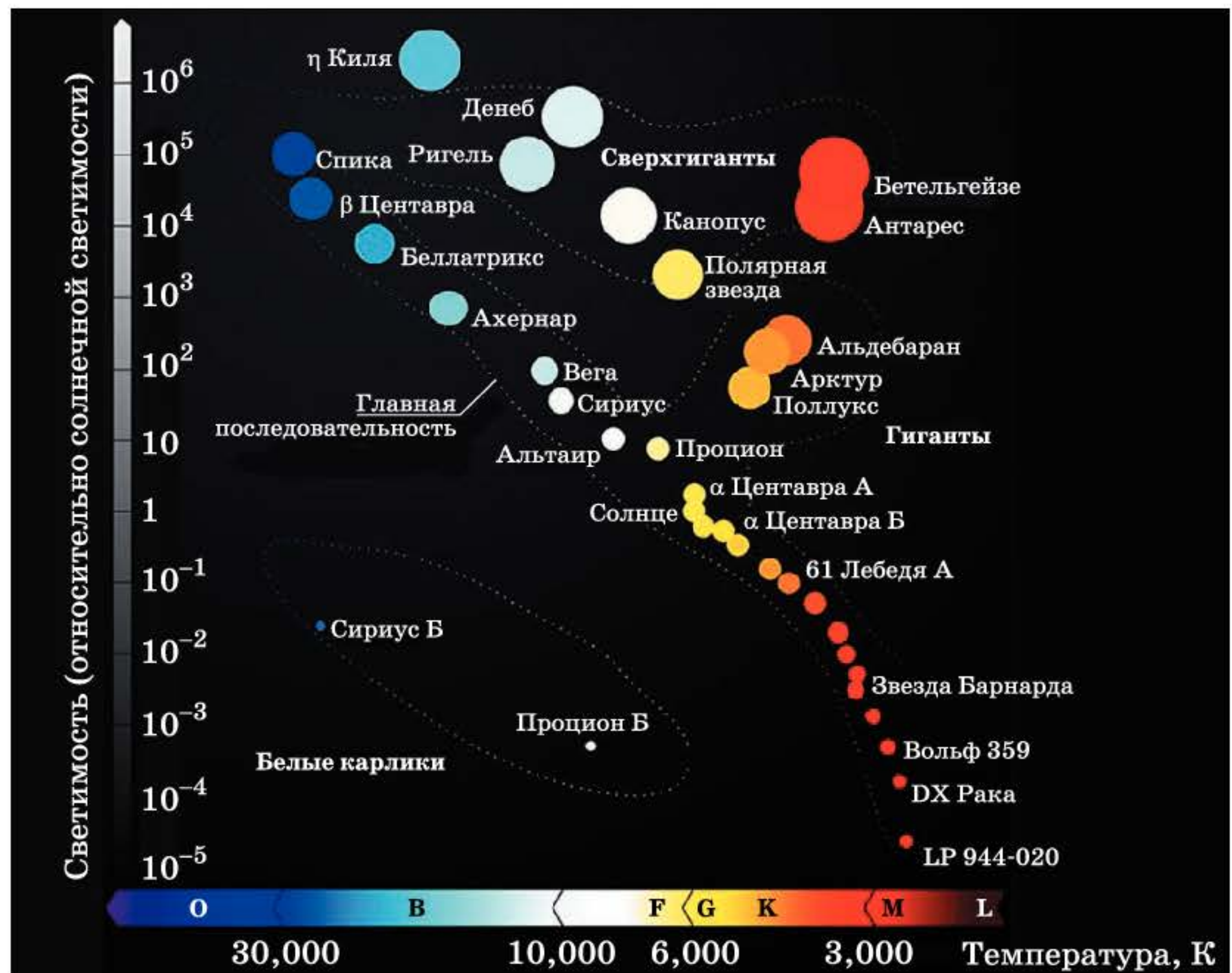
Масса определяет температуру звезды: чем больше масса, тем больше должно быть ядро звезды, а значит, тем больше выделяется энергии в результате термоядерной реакции внутри этого ядра. Следовательно, больше энергии достигнет поверхности звезды и увеличит ее температуру. Однако есть интересное исключение из этого правила — красные гиганты. Обычный красный гигант может просуществовать все фазы своей жизни в виде белой звезды, имея массу, сопоставимую с Солнцем. Но ближе к концу своей жизни красный гигант становится ярче, поэтому он выглядит неестественно коричневым.

Массы звезд находятся в более узких пределах — от 6 % массы Солнца до нескольких десятков солнечных масс. Это объясняется тем, что у гигантов и сверхгигантов очень мала средняя плотность. Например, плотность супергиганта Бетельгейзе (α Ориона) — 10^{-3} кг/м³. Плотность желтого карлика нашего Солнца — 1400 кг/м³, что в миллион раз больше. Самые плотные звезды имеют небольшие размеры. Плотность небольших звезд белых карликов достигает огромных значений $10^{10} \dots 10^{11}$ кг/м³. Попробуйте представить, что 1 см³ вещества такой звезды имеет массу 100 тонн.

Диаграмма «спектр—светимость». В 1910 г. астрономами Эйнаром Герцшпрунгом (Дания) и Генри Расселом (США), независимо друг от друга, была обнаружена связь между спектрами звезд и их светимостями. Полученную ими зависимость назвали *диаграммой Герцшпрунга—Рассела* (рис. 3.4). По горизонтальной оси диаграммы отложены спектральные классы (или температуры звезд), по вертикальной — их светимости (за 1 принята светимость Солнца). Каждой звезде соответствует определенная точка. Точки группируются в нескольких областях — последовательностях. Около 90 % звезд находятся вблизи диагонали — *главной последовательности*. Их светимость обусловлена термоядерными реакциями превращения водорода

Рис. 3.4

Диаграмма Герцшпрунга—Рассела



в гелий. Кроме этого, вверху выделяются области гигантов и сверхгигантов, в которых происходит горение гелия и более тяжелых элементов. В левой нижней части диаграммы расположена область белых карликов, звезд, находящихся на заключительной стадии своей эволюции.

Звезды проводят большую часть своей жизни в области главной последовательности. Срок такого стабильного существования непосредственно зависит от положения в диаграмме. Чем выше и левее звезда, тем она ярче и горячее, поэтому в ней быстрее выгорает водород. Время жизни менее яркой звезды, располагающейся ниже по диаграмме, больше, эти звезды могут существовать десятки миллиардов лет.

Солнце находится примерно посередине главной последовательности, первые 5 млрд лет его жизни уже прошли, но примерно столько же лет еще впереди. После этого у Солнца, как и у других небольших звезд, выгорит водород, энергии станет меньше и силы тяготения будут сильнее сжимать ядро звезды. Из-за этого в ядре звезды начнутся термоядерные реакции, связанные со слиянием гелия, звезда расширится в десятки раз. Какое-то время ее светимость будет сильнее, а затем звезда остынет до красного цвета. Наше Солнце превратится в красного гиганта, покинув главную последовательность диаграммы Герцшпрунга—Рассела, перейдя в область гигантов. Когда в его недрах закончится гелий, гравитация сожмет ядро в маленькую плотную звезду, белого карлика, который будет постепенно остывать, располагаясь внизу диаграммы, в области белых карликов.

Звезд покрупнее ждет куда более интересная судьба. Гелия в них достаточно, чтобы продолжать термоядерную реакцию. После сгорания гелия в реакцию вступит углерод, затем — магний. Рано или поздно звезда достигнет критической массы, после которой взорвется, превращаясь в сверхновую. Казалось бы, звезды, имеющие большее количество водорода для горения, должны расходовать его дольше, но это не так, потому что они используют свои ресурсы быстрее. Поэтому более массивные звезды живут меньше.

Резюме. Звезды имеют различные физические характеристики: температуру, светимость, массу, размер, плотность. Схожие по виду излучения звезды объединены в спектральные классы. Между различными физическими характеристиками существует связь, например между спектром и светимостью. Диаграмма Герцшпрунга—Рассела используется для классификации звезд и соответствует современным представлениям о звездной эволюции.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как связаны между собой цвет и температура звезд?
2. Что такое спектральные классы?
3. К каким спектральным классам относятся самые горячие и самые холодные звезды?
4. Что такое светимость?
5. Назовите диапазоны звездных масс, радиусов и плотностей.
6. Определите, в каких созвездиях находятся звезды, перечисленные в табл. 3.2. Найдите их на звездной карте
7. Что называют диаграммой Герцшпрунга — Рассела?
8. Какие области выделяют на диаграмме?
9. В какой области находится наибольшее количество звезд?
10. В каком месте диаграммы располагается наше Солнце?
11. Покажите по диаграмме Герцшпрунга — Рассела жизненный путь Солнца.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

В Интернете найдите диаграмму Герцшпрунга — Рассела, построенную по данным измерений параметров 41 704 ближайших звезд, проведенных с помощью аппаратуры, установленной на спутнике «Гиппарх», и сравните ее с диаграммой, представленной в учебнике. Укажите отличия.

ТЕМЫ ДОКЛАДОВ

1. Особенности звезд одного из спектральных классов (по выбору).
2. Особенности звезд новых спектральных классов.
3. Жизнь и смерть звезд главной последовательности.
4. Жизнь и смерть массивных звезд.

3.3. Виды звезд

Желтые карлики. Наблюдаемые звезды принято разделять на несколько видов.

Желтый карлик — тип небольших звезд главной последовательности диаграммы Герцшпрунга — Рассела, имеющих массу от 0,8 до 1,2 массы Солнца и температуру поверхности — 5 000 ... 6 000 К. Время жизни желтого карлика составляет в среднем 10 млрд лет.

Красные гиганты. *Красный гигант* — это крупная звезда красноватого или оранжевого цвета. Образование этих звезд возможно как на стадии звездообразования, так и на поздних стадиях эволюции звезд после выгорания во-

дорода в их недрах. Когда запасы водорода подходят к концу, гелий начинает преобразовываться в другие элементы. При этом происходит повышение внутренней температуры ядра, что приводит к расширению и остыванию внешней поверхности звезды, благодаря чему звезда приобретает красный цвет.



Крупнейшая известная звезда UY Щита — звезда (гипергигант) в созвездии Щита. Она находится на расстоянии 2900 пк от Солнца. По оценкам ученых, радиус UY Щита равен 1708 радиусам Солнца, диаметр — 2,4 млрд км (15,9 а. е.).

Звезда гигант имеет сравнительно низкую температуру поверхности, от 3 000 до 5 000 К, огромный радиус, достигающий 800 солнечных, и за счет таких больших размеров — огромную светимость. Максимум излучения приходится на красную и инфракрасную области спектра, потому их и называют красными гигантами.

Размеры красных гигантов в сотни раз больше размеров обычных звезд. Крупнейшие из гигантов могут превратиться в красных супергигантов. Красный гигант выбрасывает внешние слои газа, образуя тем самым планетарные туманности (рис. 3.5), а ядро сжимается в маленький, плотный белый карлик.



Красным сверхгигантом является Бетельгейзе в созвездии Ориона. Эта звезда в 20 раз превышает массу Солнца и при этом в 1 000 раз его больше.



Рис. 3.5

Ближайшая планетарная туманность (650 световых лет), расположенная в созвездии Водолея

Белые карлики. *Белый карлик* — это ядро обычной звезды с массой, не превышающей 1,4 солнечной массы, после того, как она проходит стадию красного гиганта. Большинство звезд завершает свою эволюцию превращением в белых карликов. Звезда уменьшается в размере в сотни раз, обретая огромную плотность. По размеру белый карлик становится меньше Земли, но массу его можно сравнить с массой Солнца. Температура молодых белых карликов достигает 100 000 К и более, однако достаточно быстро падает за счет излучения с поверхности. Из-за отсутствия водорода термоядерная реакция в ядре таких звезд не происходит. Они сияют за счет своей оставшейся энергии, но со временем она заканчивается, и звезда остывает, превращаясь в черного карлика.



Самый большой белый карлик располагается в центре планетарной туманности M27 (NGC 6853), которая больше известна как туманность Гантель. Она находится в созвездии Лисички, на расстоянии около 1360 световых лет от нас. Ее центральная звезда больше, чем любой другой известный белый карлик.

Красные карлики. *Красный карлик* — маленькая и относительно холодная звезда главной последовательности. Эти звезды являются самыми распространенными объектами звездного типа во Вселенной. Масса красных карликов не превышает трети солнечной массы (нижний предел массы — 0,08 солнечной), температура поверхности достигает 3 500 К. Звезды этого типа испускают очень мало света, иногда в 10 000 раз меньше Солнца. Ближайшая к Солнцу звезда Проксима Центавра — красный карлик.

Низкая светимость не позволяет увидеть ни один из красных карликов с Земли. Из-за низкой скорости сгорания водорода красные карлики имеют очень большую продолжительность жизни — от десятков миллиардов до десятков триллионов лет (красный карлик с массой 0,1 массы Солнца будет гореть 10 трлн лет). В красных карликах невозможны термоядерные реакции с участием гелия, поэтому они не могут превратиться в красные гиганты. Со временем они постепенно сжимаются и всё больше нагреваются, пока не израсходуют весь запас водородного топлива.

Коричневые карлики. Если в процессе формирования молодой звезды (протозвезды) ее масса составляет лишь 1/10 массы Солнца, ее сияние будет недолгим, после чего она быстро гаснет. После нее остается *коричневый карлик*, который представляет собой массивный газовый

шар, слишком большой, чтобы быть планетой, и слишком маленький, чтобы стать звездой. Он меньше Солнца, но в несколько раз больше Юпитера. Температура коричневых карликов лежит в промежутке от 300 до 3 000 К. Коричневые карлики на протяжении своей жизни постоянно остывают, при этом чем крупнее карлик, тем медленнее он остывает.



Небесное тело является звездой только тогда, когда в ее недрах протекает термоядерный синтез, т.е. горение водорода. Необходимая температура для «старта» — 3 000 000 К. Достигается она сжатием под воздействием гравитации: сжимаясь, увеличивается плотность газового шара. Выше плотность — выше температура. Когда плотность достигает своего предела, происходит воспламенение водорода, т.е. термоядерный синтез.

Черные карлики. *Черные карлики* — остывшие белые карлики, которые представляют собой конечную стадию эволюции белых карликов. Масса черного карлика, подобно массе белого карлика, не более 1,4 массы Солнца.

Сверхновые звезды. *Сверхновыми* становятся звезды, масса которых в 8—10 раз превышает солнечную. Ядра таких звезд, исчерпав водород, переходят к термоядерным реакциям с участием гелия. Исчерпав гелий, ядро переходит к синтезу все более тяжелых элементов. В конечной стадии своей эволюции такая звезда превращается в «слоеный» сверхгигант. В каждом слое происходит свой тип термоядерного синтеза.

Когда топливо для термоядерных реакций заканчивается (заключительный этап сопровождается синтезом железа), звезда взрывается, при этом ее светимость за несколько дней может возрасти в сотни миллионов раз. Взрыв сопровождается выбросом значительной массы вещества из внешней оболочки звезды в межзвездное пространство (рис. 3.6).

Из оставшейся части вещества ядра взорвавшейся звезды, как правило, образуется компактный объект — *нейтронная звезда*, если масса звезды до взрыва составляла более 8 солнечных масс, либо черная дыра — при массе звезды свыше 20 солнечных масс.

Расширяющаяся с огромной скоростью (примерно 2000 ... 3000 км/с) внешняя оболочка содержит продукты термоядерного синтеза, происходившего на протяжении



Рис. 3.6

Светящаяся туманность — остаток взрыва сверхновой звезды

всей жизни звезды. Именно благодаря взрывам сверхновых звезд происходит насыщение межзвездной среды тяжелыми элементами. В этой среде впоследствии рождаются новые звезды, планеты и наша углеродная форма жизни.



В древности, когда на небе внезапно загоралась яркая звезда, люди предполагали, что возникла новая звезда, родившаяся в этот момент. Теперь известно, что на самом деле звезда в этот момент не рождается, а взрываясь, умирает, завершая свой жизненный цикл. Однако название таких звезд осталось прежним — сверхновые звезды.

Нейтронные звезды. *Нейтронная звезда* — это звезда, сжатие ядра в которой не прекращается до тех пор, пока протоны, захватывая электроны, не превратятся в нейтроны.

Масса нейтронной звезды больше солнечной в 1,4—3 раза, при этом ее диаметр составляет 10...20 км. Плотность таких звезд чрезвычайно высока, она близка к плотности атомного ядра: 1 см³ будет весить примерно 100 000 000 т! Сила тяжести на поверхности нейтронной звезды примерно в 100 млрд раз выше, чем на Земле. Благодаря наличию магнитного поля и быстрому вращению

звезды происходит направленное излучение электромагнитных волн в различных диапазонах. На Земле фиксируют импульсы излучения различных нейтронных звезд с периодом от нескольких секунд до нескольких миллисекунд.

Черные дыры. *Черная дыра* является конечным этапом эволюции массивных звезд при условии, что масса остатков звезды более 3 солнечных масс. Когда объект такой массы сжимается до размеров нескольких километров, поле тяготения оказывается настолько сильным, что вторая космическая скорость, необходимая для того, чтобы преодолеть притяжение звезды, становится больше скорости

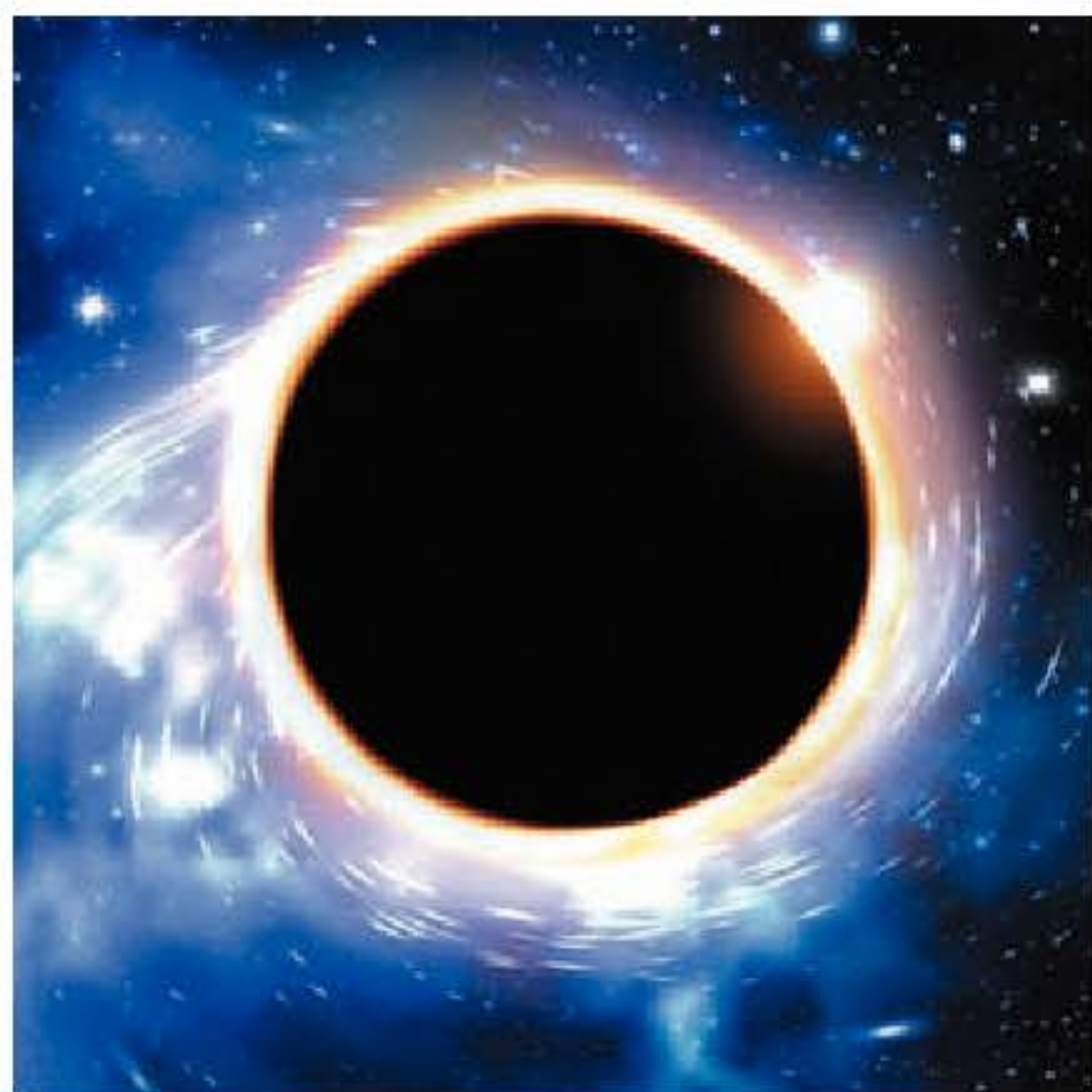


Рис. 3.7

Черная дыра
(в представлении
художника)

света. Вблизи звезды никакие объекты, движущиеся со скоростью света, не способны преодолеть силы ее притяжения, в том числе и сам свет. Граница, из которой не могут вырваться объекты даже со скоростью света, называется *горизонтом событий*. Никто не знает наверняка, как выглядит черная дыра, но скорее всего, что вещество, летящее к ее

поверхности, разгоняется и разогревается и, перед тем как нырнуть за горизонт событий, должно светиться. Поэтому выглядеть она будет не как круглый черный диск, а как сияющий ореолом объект (рис. 3.7).



Чтобы Земля стала черной дырой, ее надо сжать до размеров горошины. Для превращения Солнца в черную дыру его нужно уменьшить до 3 км.

Резюме. Современные астрономы знакомы со многими видами звезд. Приведенный перечень не исчерпывает всего возможного многообразия звезд во Вселенной. Среди перечисленных конечными стадиями эволюции звезд различной массы являются белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды звезд вы знаете?
2. Какие звезды называют желтыми карликами?
3. Дайте определение белым карликам.
4. Расскажите о красных карликах.
5. Что вы знаете о коричневых карликах?
6. Какие звезды называют красными гигантами?
7. Расскажите о сверхновых звездах.
8. Что такое нейтронная звезда?
9. Какие звезды называют черными дырами?
10. Почему Солнце не может вспыхнуть, как сверхновая звезда?
11. Что такое горизонт событий?

ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Составьте сравнительную таблицу нейтронных звезд и черных дыр и заполните ее.

ТЕМЫ ДОКЛАДОВ

1. Описание жизни коричневых карликов.
2. Планетарные туманности и остатки сверхновых звезд, запечатленные на фотографиях звездного неба.
3. История исследования нейтронных звезд.
4. История открытия черных дыр.
5. Удивительные свойства пространства-времени вблизи черных дыр.