

## 14. Эволюция звезд

### 14.1. Рождение звезды

Звезды рождаются из межзвездного газа – разреженной смеси водорода, гелия и небольшого количества других элементов, – заполняющего пространство между уже существующими звездами Галактики. В своем естественном состоянии эта смесь слишком разрежена для того, чтобы образовать плотные газовые шары звезд. Но межзвездная среда подвергается воздействию различных видов ударных волн, что приводит к сжатию газа в более плотные облака, в которых и происходит зарождение звезд.

Известно два вида ударных волн. Спиральная форма Галактики, такая, как у нашего Млечного Пути, обусловлена гравитацией, то есть притяжением, и эта структура вращается со скоростью, отличной от скорости вращения галактического газа. Таким образом, по мере вращения спирали происходит постоянный процесс скопления газа на новых участках. Кроме того, быстро движущиеся газы взорвавшейся звезды (сверхновой) могут «захватить» разреженный газ и сжать его в плотные облака. Эти облака называют «молекулярными», так как в них имеется значительное количество молекул окиси углерода и спирта.

В центре молекулярного облака плотность газа настолько высока, что собственные гравитационные силы увлекают его к центру, но турбулентность не позволяет всему газу устремляться к центру, и облако распадается на отдельные фрагменты, каждый из которых может начать сжиматься до образования звезды.

Таким образом:

1. Жизнь каждой звезды начинается с конденсации (сжатия) газа и пыли, рассеянных в пространстве.
2. Как только начинают действовать гравитационные силы, зародыш звезды начинает сжиматься.
3. По мере сжатия температура вблизи центра будущей звезды растет, пока не станет достаточной для запуска ядерных реакций.
4. Объект превращается в настоящую звезду, излучающую огромные количества энергии.

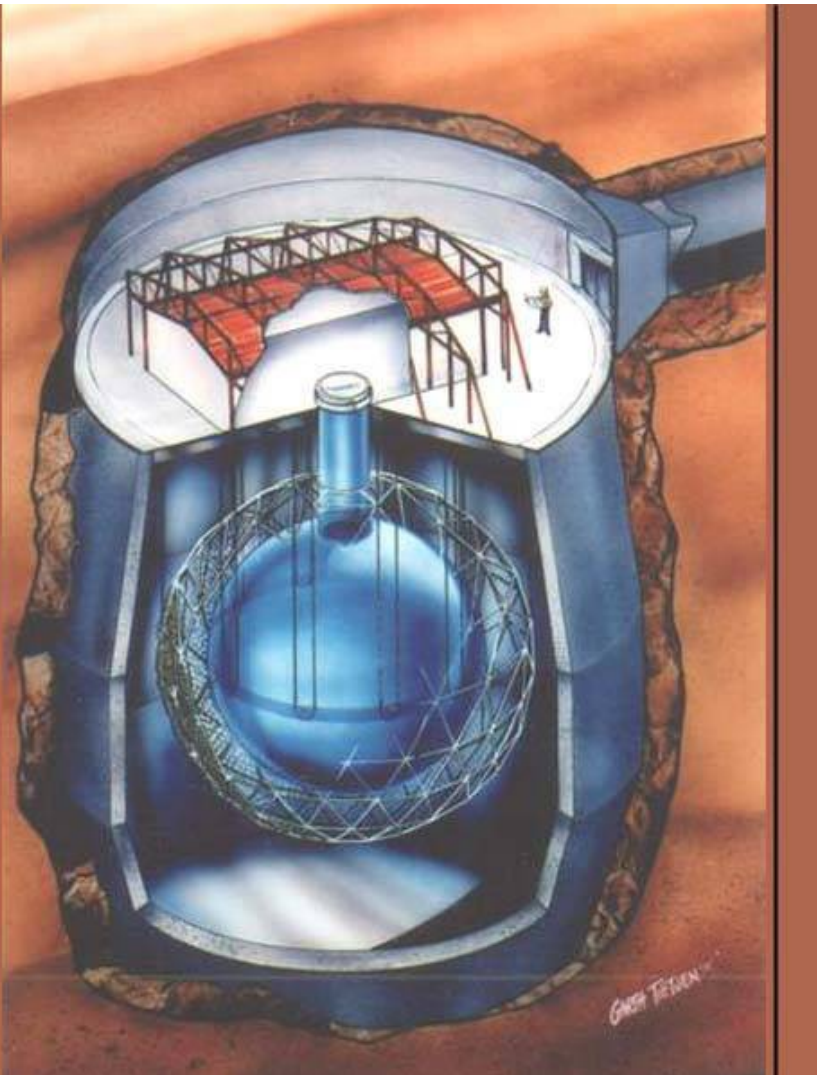
В недрах звезд действуют природные термоядерные реакторы, синтезирующие химические элементы. Протекание этих реакций в недрах Солнца сегодня прямо регистрируется на Земле (а точнее – под землей) нейтринными детекторами (см. рис.). Установлено также, сколько времени живут звезды и как заканчивается их жизнь: чем массивнее звезда, тем ярче она светит и быстрее сжигает свое ядерное горючее. Если звезды типа Солнца живут около 10 миллиардов лет, то гиганты, которые в 10 раз массивнее, полностью сгорают всего за 25 миллионов лет. А вот карлики с массой в половину солнечной должны жить почти 100 миллиардов лет – много больше нынешнего возраста Вселенной.

Садберийская нейтринная обсерватория (г. Садбери, провинция Онтарио, Канада). 1000 тонн тяжелой воды ( $D_2O$ ) в прозрачном акриловом (плексигласовом) шаре диаметром 12 м, окруженном 9600 ФЭУ на геодезической сфере, диаметром 18 м, погруженной в резервуар с чистой водой на глубине 2 км.

В 2002 г. здесь решена проблема солнечного нейтрино – зарегистрированы все три типа нейтрино ( $\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$ ) в таком общем количестве, сколько  $\nu_e$  должно рождаться на Солнце

Тем самым доказано, что:

- модель Солнца верна
- нейтрино имеет массу покоя
- происходят осцилляции нейтрино



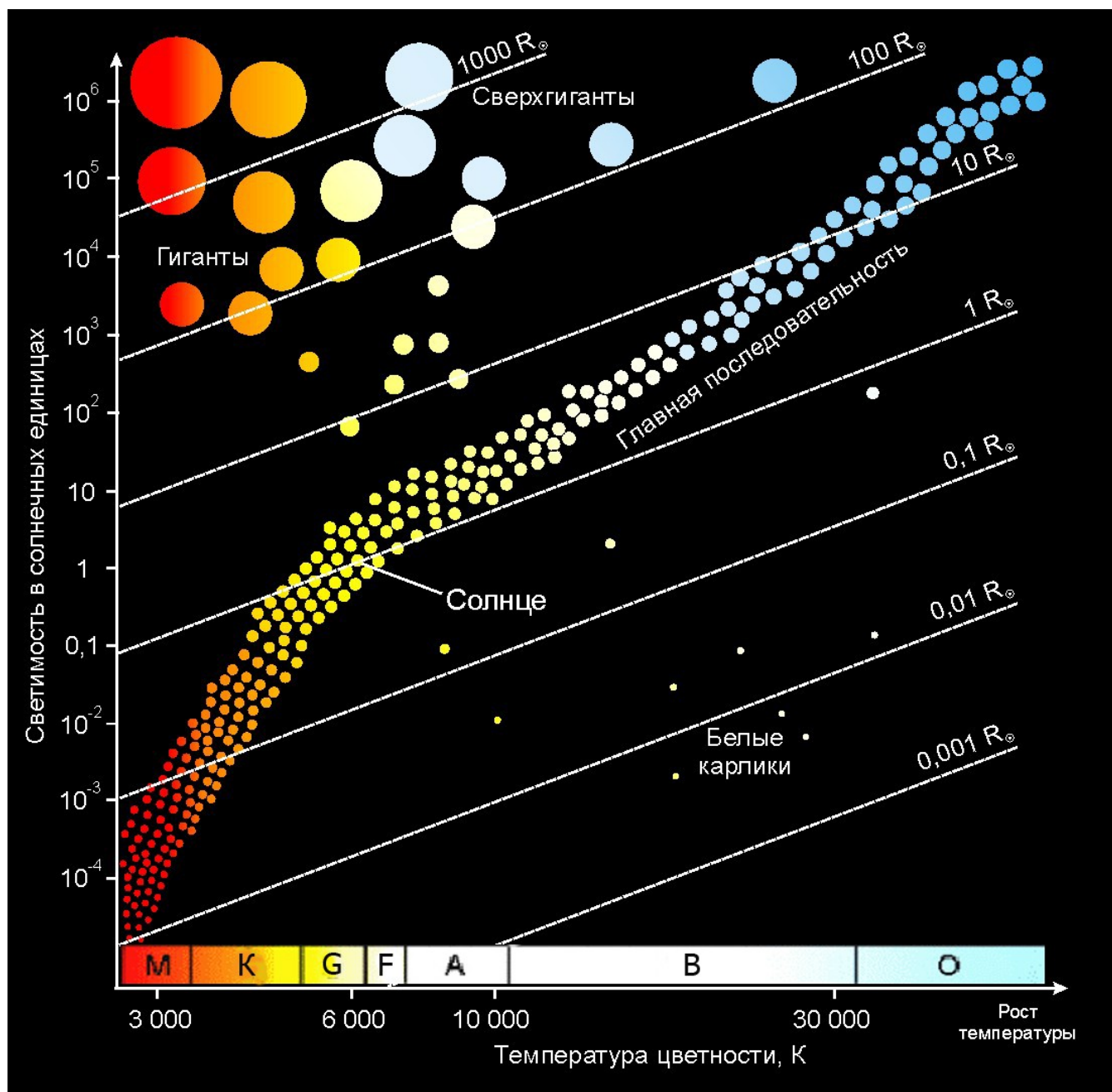
В конце жизни звезда обычно сбрасывает с себя верхний слой вещества. Массивные светила делают это взрывным образом, становясь сверхновыми, а маломассивные – спокойно, окутывая себя медленно расширяющейся планетарной туманностью. Но в любом случае в конце эволюции от звезды остаются разлетающееся газовое облако и плотный компактный объект – белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра.

## 14.2. Главная последовательность

Ядерные реакции в недрах звезд начинаются при температуре примерно  $10\,000\,000^\circ\text{C}$ , при этом происходит превращение водорода в гелий. Высвобождающаяся энергия «просачивается» наружу и излучается поверхностью звезды.

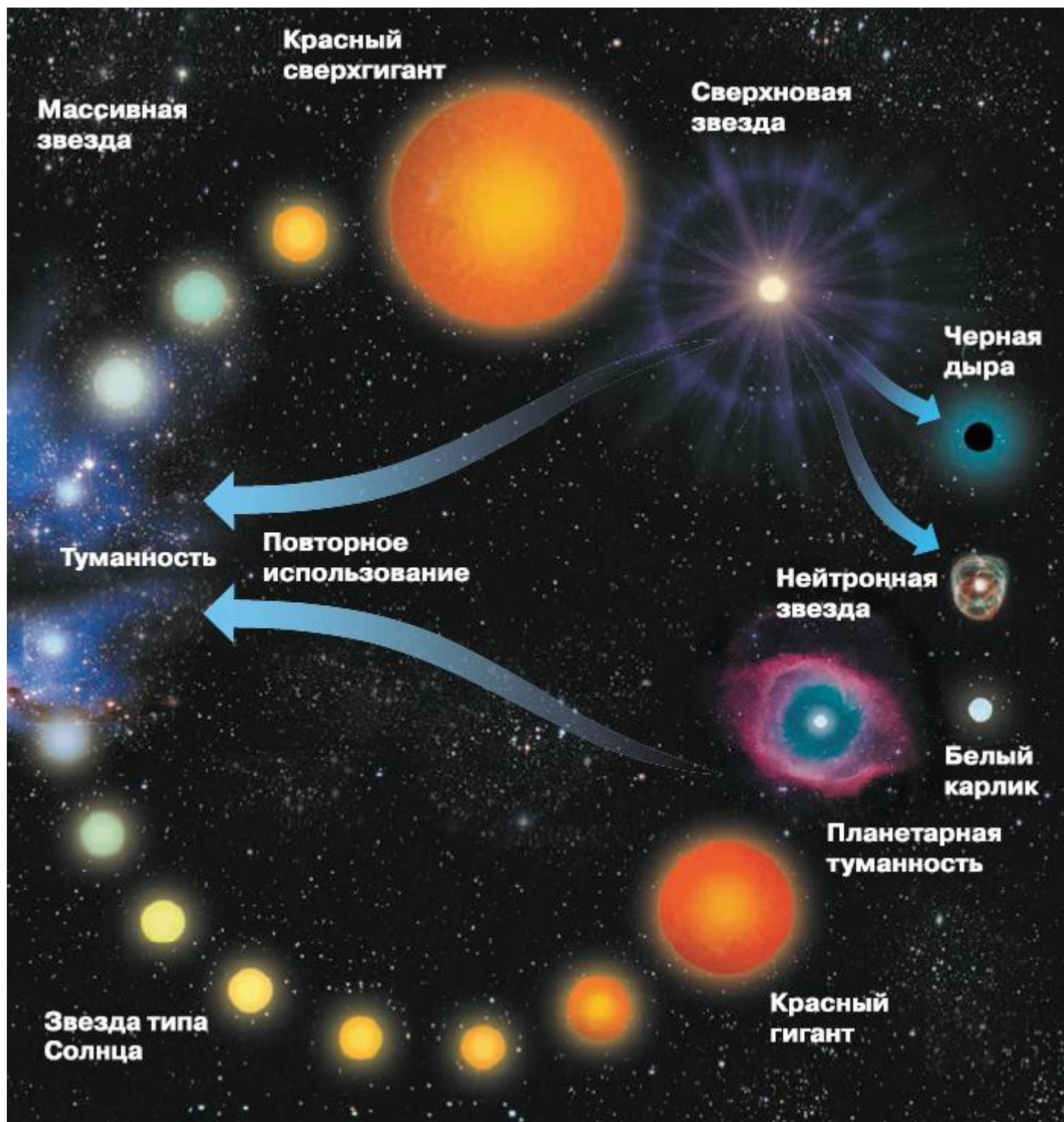
Между выделением энергии и гравитацией устанавливается настолько устойчивое равновесие, что на протяжении миллионов лет и более звезда практически не меняется. Этот период «выгорания водорода» называется «главной последовательностью» и фактически представляет собой самую продолжительную стадию в жизни звезды, ~90 % времени ее эволюции. Главную последовательность проходят все звезды независимо от массы.

На диаграмме **Герцшпрунга–Рассела** (см. рис.) главная последовательность – это область, содержащая звезды, источником энергии которых является термоядерная реакция синтеза гелия из водорода. Она расположена в окрестностях диагонали и проходит из верхнего правого угла (высокие светимости, ранние спектральные классы) в левый нижний угол (низкие светимости, поздние спектральные классы) диаграммы. Звезды главной последовательности имеют одинаковый источник энергии, поэтому их светимость и температура (спектральный класс) определяются их массой. В связи с этим начало правой части главной последовательности представлено голубыми звездами с массами ~50 солнечных, конец левой – красными карликами с массами ~0,08 солнечных.



Выгорание водорода в центральных областях звезды приводит к образованию изотермического гелиевого ядра, переходу к стадии красного гиганта и уходу звезды с главной последовательности. Относительно краткая эволюция красных гигантов приводит, в зависимости от их массы, к образованию белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр (см. рис.).

Участок главной последовательности звездных скоплений является индикатором их возраста. Так как темпы эволюции звезд пропорциональны их массе, то для скоплений существует «правая» точка обрыва главной последовательности в области высоких светимостей и ранних спектральных классов, зависящая от возраста скопления, поскольку звезды с массой, превышающий некий предел, заданный возрастом скопления, «ушли» с главной последовательности на ветвь красных гигантов.



Более яркие массивные звезды намного быстрее исчерпывают свои топливные запасы, то есть водород, и достигают окончания фазы главной последовательности всего за несколько миллионов лет. В менее массивных звездах, типа Солнца, этот процесс может продолжаться более 10 млрд лет. Возраст Солнца около 5 млрд лет. Все звезды главной последовательности, имеющие одинаковую массу, характеризуются примерно одинаковой светимостью, температурой поверхности и видимым цветом, все эти показатели взаимосвязаны. Чем массивнее звезда главной последовательности, тем она горячее и ярче, а чем ее масса меньше, тем звезда холоднее и тусклее. Типичными звездами главной последовательности являются Солнце и Сириус, но Сириус в два раза тяжелее Солнца, поэтому он в 20 раз ярче, а температура его поверхности составляет 10 000°C, тогда как на поверхности Солнца – лишь 5500°C.

### 14.3. Красные гиганты

После выгорания водорода в недрах звезды остается образовавшийся в результате ядерных реакций гелий. Падение внутреннего давления приводит к сжатию ядра под действием притяжения. Ядро коллапсирует (коллапс – гравитационное сжатие), а наружные слои звезды расширяются до размера, в сотни раз превышающего первоначальный. Внутреннее излучение уже не может нагревать внешние слои, как прежде, и поэтому температура падает примерно до 3000°C, а цвет вместо белого, как у Сириуса, или желтого, как у Солнца, становится тускло-красным. Раздувшаяся красноватая звезда превратилась в красного гиганта (см. рис). Полагают, что на стадии красного гиганта (примерно через 5 млрд. лет) наше Солнце увеличится настолько, что заполнит орбиту Меркурия.



fedoroff.net 2015

Наружные газовые слои красного гиганта удерживаются очень слабо и начинают пульсировать, а это приводит к изменению блеска звезды с периодичностью около одного года. Более массивные звезды расширяются до еще больших размеров – это сверхгиганты. В некоторых из таких звезд наружные слои пульсируют с очень стабильным периодом, длительность которого зависит от массы звезды, а значит, и от ее яркости. Такие переменные звезды – цефеиды – крайне важны для определения расстояний во Вселенной.

#### 14.4. Белые карлики



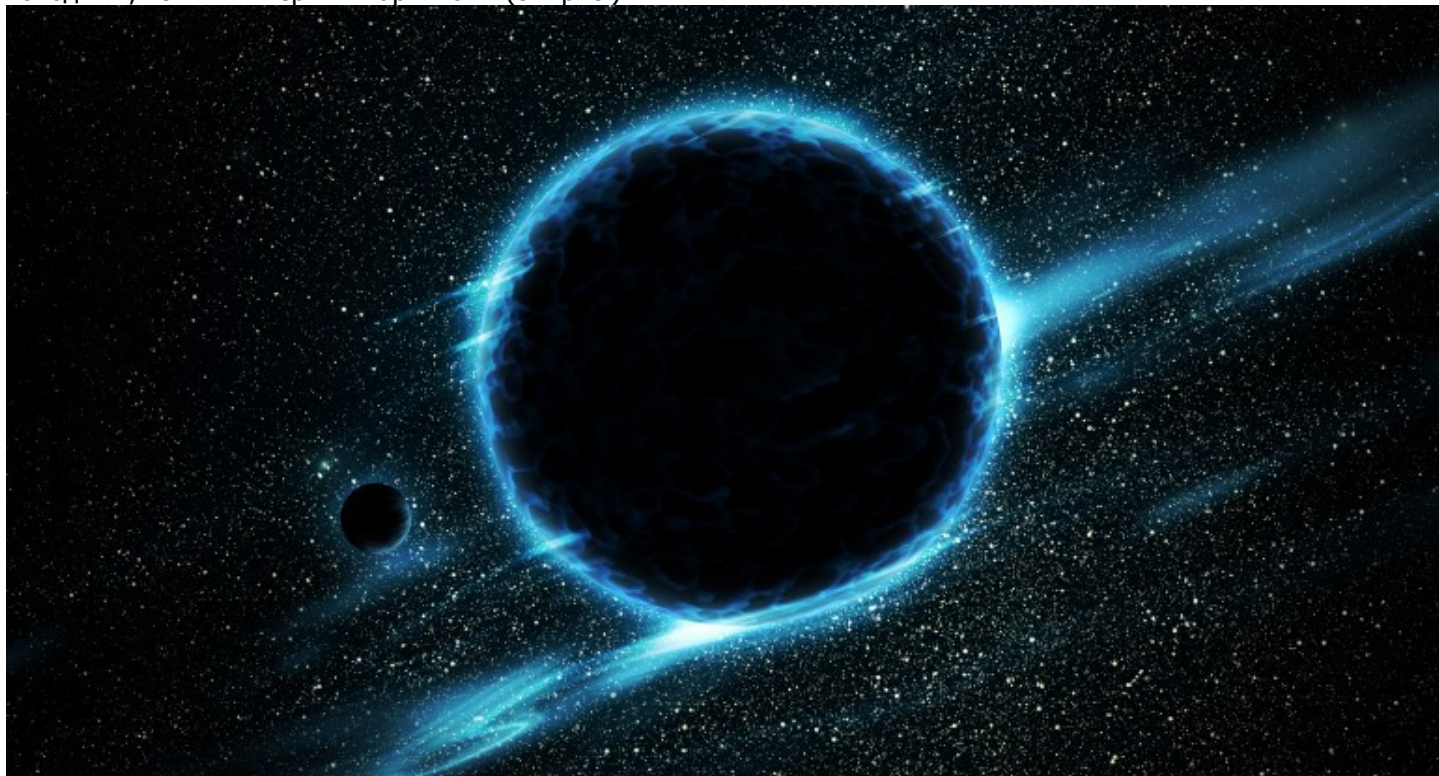
После завершения фазы красного гиганта окончательная судьба звезды зависит от ее массы. Если звезда похожа на Солнце, то через некоторое время она теряет наружные слои, доставшиеся ей после фазы красного гиганта, которые уходят в пространство в виде светящегося кольца. От звезды остается ядро в виде очень компактного малого объекта – белого карлика (см. рис. выше). Он имеет массу, примерно равную массе Солнца, но размеры его не больше Земли (см. рис.).



Главная отличительная черта внутреннего строения белых карликов – гигантские, по сравнению с нормальными звездами, плотности. Из-за громадной плотности газ в недрах белых карликов находится в необычном состоянии

– вырожденном. Свойства такого вырожденного газа совсем не похожи на свойства обычных газов. Его давление, например, практически не зависит от температуры.

Белый карлик не имеет источников энергии, в нем не протекают ядерные реакции, но он еще сохраняет тепло, доставшееся ему от звезды. Со временем тепло уходит в пространство, и белый карлик заканчивает эволюцию холодным, темным «черным карликом» (см. рис.).



#### 14.5. Сверхновые и нейтронные звезды

Массивные звезды иначе заканчивают свой путь. В конце фазы красного гиганта ядерные реакции, происходящие вблизи центра звезды, выходят из-под контроля. Звезда взрывается, образуя сверхновую. Во время этого грандиозного взрыва звезда короткое время светится подобно миллиарду Солнц, в то время как наружные слои газа уносятся взрывом, создавая мощную ударную волну при встрече с космическими объектами (см. рис.).



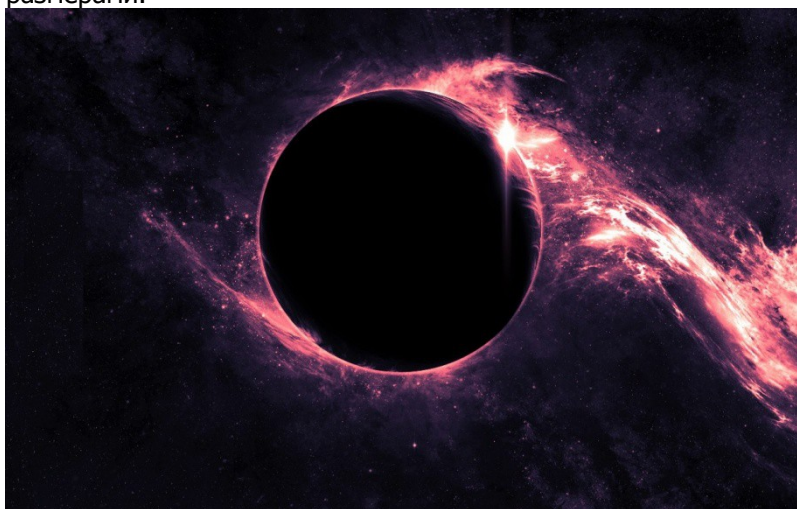
Одновременно происходит коллапс ядра звезды, оно сжимается до тех пор, пока не достигает примерно 20 км в диаметре. Во время коллапса электроны, соединяясь с протонами, образуют нейтроны. Когда все нейтроны оказываются «упакованными», сжатие прекращается – это еще один вид вырожденной материи, но главную роль здесь играют нейтроны, а не электроны, как в белых карликах. Типичная нейтронная звезда по массе немного

больше Солнца, а ее малые размеры говорят о необычной плотности: булавочная головка из вещества нейтронной звезды весила бы миллион тонн (см. рис.).



#### 14.6. Черные дыры

Очень массивные звезды эволюционируют по-другому. Дело в том, что массы белого карлика и нейтронной звезды имеют свой предел – соответственно 1,4 и 3 солнечных масс. При взрыве коллапсирующее ядро очень массивной звезды может превысить эти пределы, и тогда сжатие звезды невозможно ограничить никакими размерами.



По мере сжатия на поверхности звезды растет сила гравитации, и когда звезда сожмется до нескольких километров в поперечнике, сила тяжести достигает такой величины, при которой ничто, даже свет, не может покинуть ее поверхности. Звезда превращается в черную дыру (см. рис. выше).

Для того чтобы преодолеть тяготение и вырваться из черной дыры, потребовалась бы скорость, большая световой. Согласно теории относительности, никакое тело не может развить скорость, большую, чем скорость света. Вот почему из черной дыры ничто не может вылететь, не может поступать наружу никакая информация. После того как любые тела, любое вещество или излучение упадут под действием тяготения в черную дыру, наблюдатель никогда не узнает, что произошло с ними в дальнейшем. Вблизи черных дыр, как утверждают ученые, должны резко изменяться свойства пространства и времени. Наиболее сильно эффекты, возникающие при падении в поле черной дыры окружающего вещества, проявляются тогда, когда черная дыра входит в состав двойной звездной системы, в которой одна звезда – яркий гигант, а второй компонент – черная дыра. В этом случае газ из оболочки звезды-гиганта течет к черной дыре, закручивается вокруг нее, образуя диск (см. рис.).



Слои газа в диске трутся друг о друга, по спиральным орбитам медленно приближаются к черной дыре и, в конце концов, падают в нее. Но еще до этого падения у границы черной дыры газ разогревается трением до температуры в миллионы градусов и излучает в рентгеновском диапазоне. По этому излучению астрономы пытаются обнаружить черные дыры в двойных звездных системах. Возможно, что очень массивные черные дыры возникают в центрах компактных звездных скоплений, в центрах галактик и квазаров. Не исключено также, что черные дыры могли возникнуть в далеком прошлом, в самом начале расширения Вселенной. В этом случае возможно образование и очень маленьких черных дыр с массой гораздо меньшей, чем масса небесных тел. Этот вывод особенно интересен потому, что вблизи таких маленьких черных дыр поле тяготения может вызывать специфические квантовые процессы «рождения» частиц из вакуума. С помощью потока этих рождающихся частиц можно обнаружить маленькие черные дыры во Вселенной. Квантовые процессы рождения частиц приводят к медленному уменьшению массы черных дыр, к их «испарению».

### Вопросы

1. Из чего рождаются звёзды?
2. Что приводит к сжатию газа в более плотные облака, в которых и происходит зарождение звезд?
3. Опишите два вида ударных волн.
4. Из каких четырёх этапов состоит процесс рождения звезды?
5. Что происходит в недрах звёзд?
6. Как связана масса звезды с продолжительностью её жизни?
7. Как заканчивается жизнь звезды?
8. При каких температурах происходит ядерная реакция в недрах звёзд, и какие превращения химических элементов происходят при этом?



9. Что называется «главной последовательностью» и благодаря какому устойчивому равновесию она поддерживается?
10. Что представляет собой «главная последовательность» на диаграмме Герцшпрунга–Рассела?
11. К чему приводит выгорание водорода в центральных областях звезды?
15. Чем и как характеризуется место Солнца в «главной последовательности»?
16. Коротко охарактеризуйте красные гиганты?
17. Как возникают белые карлики и что они собой представляют?
18. Коротко охарактеризуйте сверхновые и нейтронные звезды.
19. Как образуются «чёрные дыры»?
20. Коротко охарактеризуйте физические свойства «чёрных дыр».