

Эволюция звёзд

Оглавление

Газопылевое облако.....	1
Протозвезда.....	2
Молодые звезды главной последовательности.....	3
Эволюция лёгких звёзд.....	3
Эволюция звёзд солнечной массы	4
Эволюция массивных звёзд.....	8

Газопылевое облако

Межзвёздное пространство не является пустым. Оно заполнено не только электромагнитными и гравитационными полями, но и веществом: молекулярными облаками, газом и пылью. Существуют области пространства, где плотность вещества многократно превышает средние значения. В таких областях создаются благоприятные условия для процессов звёздообразования. Например, такие процессы бурно протекают в газопылевом облаке «Столпы Творения» в туманности Орла.



Газопылевое облако «Столпы Творения»

Протозвезда

Плотность газопылевого облака неоднородна. Области с большей плотностью имеют тенденцию к сжатию. Со временем в облаке образуется ядро достаточно большое и плотное, чтобы поддерживать своё гидростатическое равновесие – так появляется протозвезда. Поглощая вещество газопылевого облака, протозвезда увеличивает свою массу и температуру. Со временем ядро протозвезды становится достаточно горячим для протекания термоядерных реакций. Но ещё миллионы лет протозвезда основную долю энергии будет выделять за счёт гравитационного сжатия.



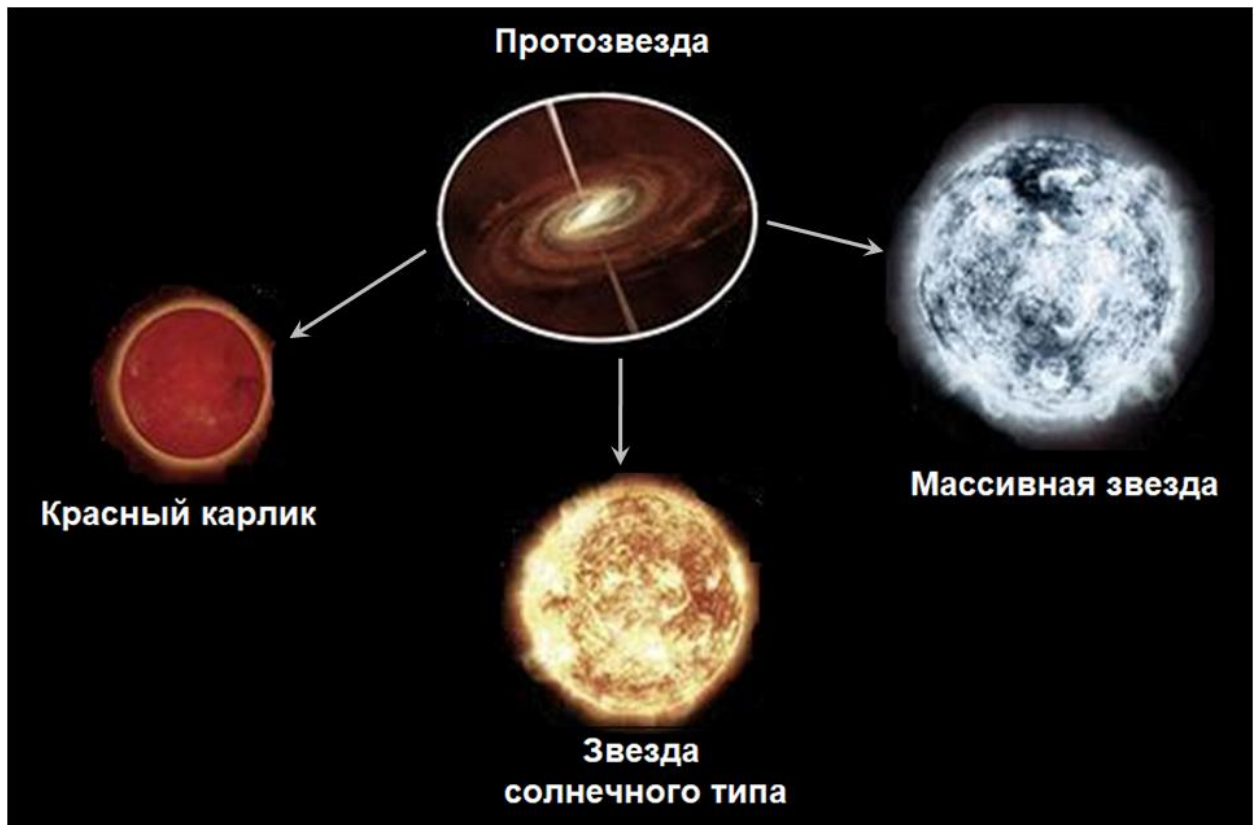
Поглощение (аккреция) вещества протозвездой L1527

При сжатии растёт плотность и температура протозвезды, что приводит к более интенсивному протеканию в её ядре термоядерных реакций. Со временем именно они начинают вносить основной вклад в энерговыделение: протозвезда становится молодой звездой главной последовательности. Её дальнейшая эволюция будет зависеть от массы, металличности, вращательного момента и наличия звезды-компаньона.

Молодые звезды главной последовательности

На диаграмме Герцшпрунга – Рассела молодые звёзды находятся на главной последовательности. Основным фактором эволюции звезды является её масса. Рассмотрим варианты эволюции для:

- лёгких звёзд (красные карлики);
- звёзд солнечной массы (оранжевые карлики, жёлтые карлики);
- тяжёлых звёзд (массивные молодые звёзды спектральных классов О и В).



Эволюция лёгких звёзд

Не каждая протозвезда становится звездой. Некоторые протозвёзды не набирают массу, достаточную для запуска термоядерного синтеза. А самые лёгкие молодые звёзды – это *красные карлики*. Это звёзды главной последовательности спектральных классов М или К и массами 0,08 – 0,5 $M_{\odot}$. Благодаря своей малой массе и большому времени жизни на главной последовательности (10^{10} – 10^{13} лет), эти звёзды являются самыми распространёнными во Вселенной.



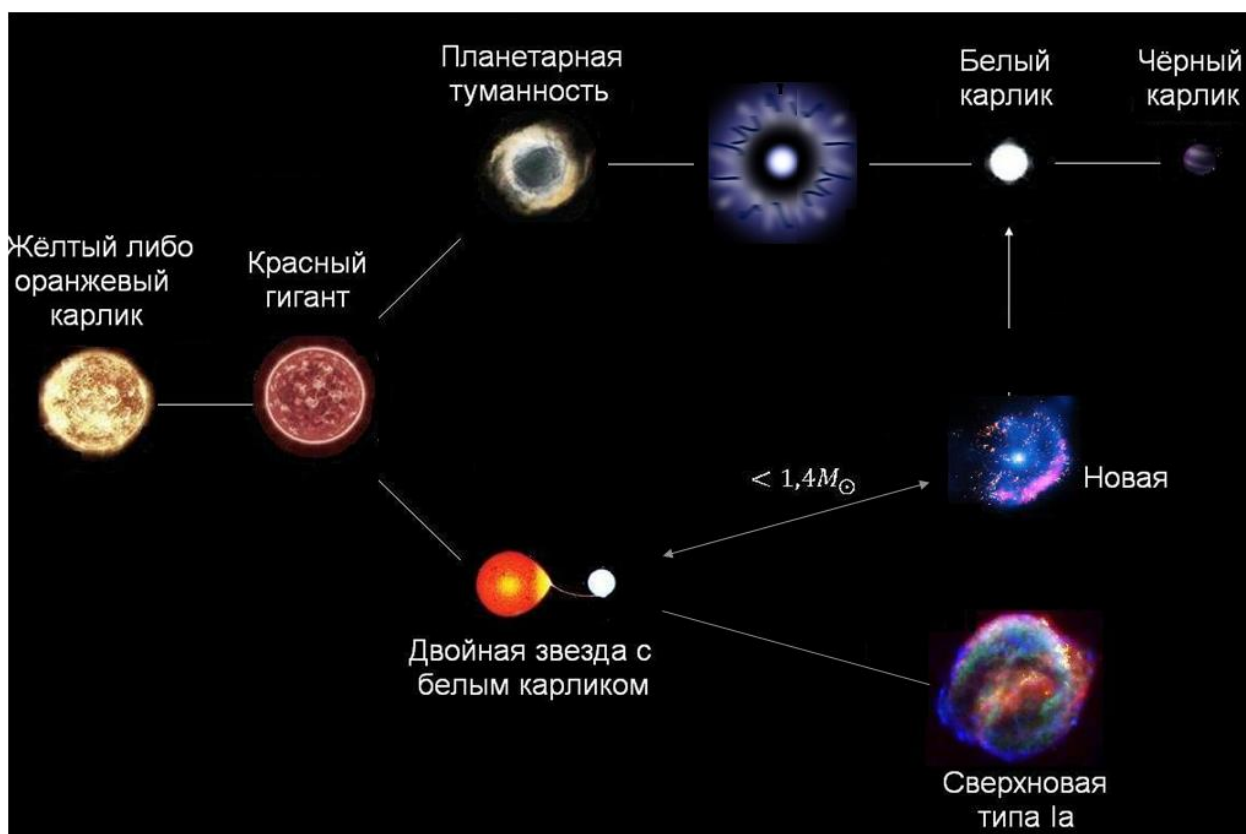
Теоретически, со временем такие звёзды должны эволюционировать в *голубые карлики*, а те – в *белые* и *чёрные карлики*. Но время существования Вселенной ещё слишком мало, чтобы это можно было наблюдать. На диаграмме Герцшпрунга – Рассела красные карлики ещё не начали сходиться с главной последовательности.

Эволюция звёзд солнечной массы

Более тяжёлыми молодыми звёздами являются *оранжевые* и *жёлтые карлики*. Их эволюционный путь идентичен, но оранжевые карлики имеют меньшую массу и ещё не начали сходиться с главной последовательности.

Оранжевый карлик – это звезда главной последовательности спектрального класса K и массой $0,5 - 0,8 M_{\odot}$. Существование на главной последовательности – несколько десятков миллиардов лет.

Жёлтый карлик – это звезда главной последовательности спектрального класса G и массой $0,8 - 1,2 M_{\odot}$. Существование на главной последовательности – около десяти миллиардов лет.

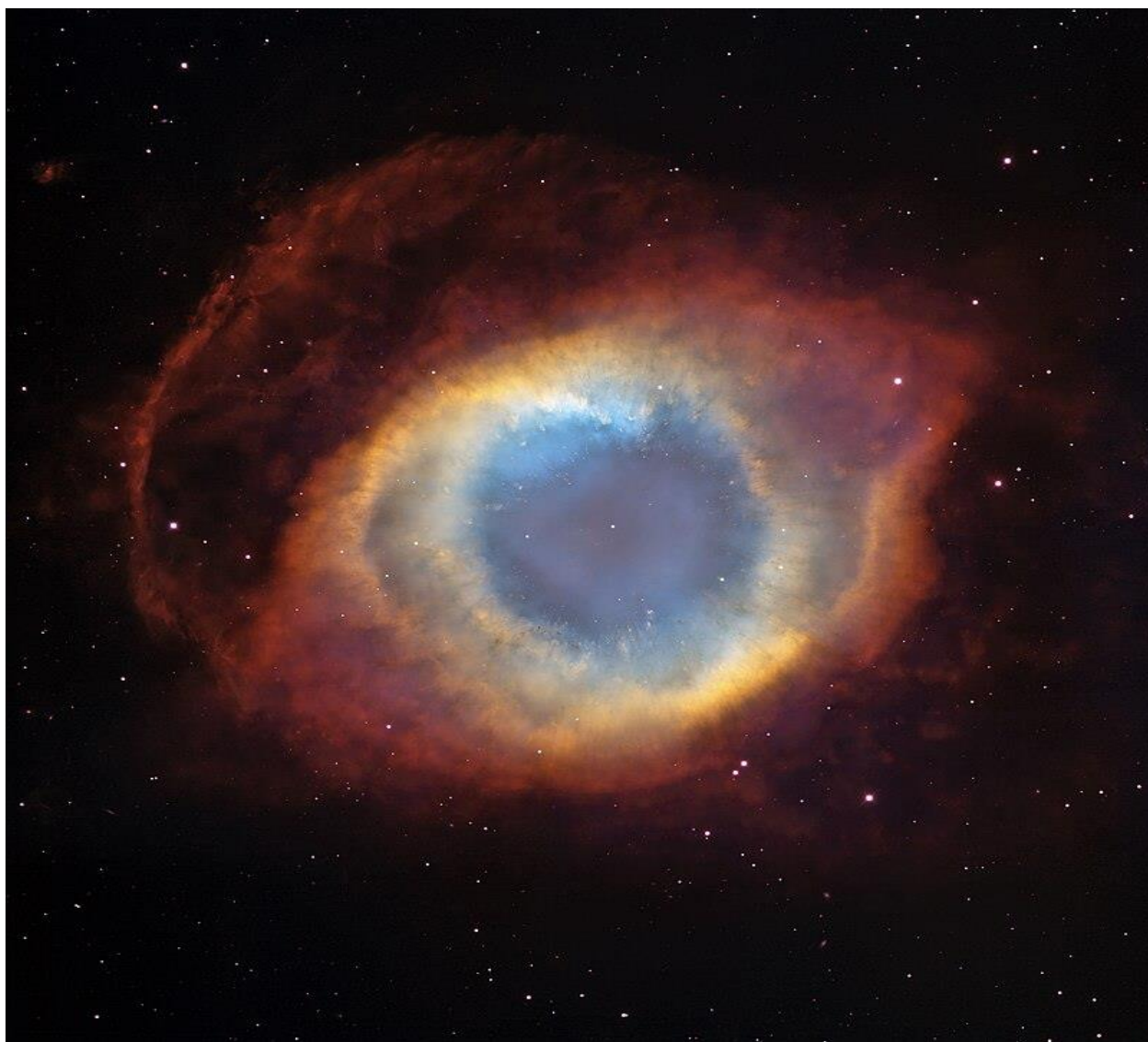


В ядрах этих звёзд идёт термоядерный синтез гелия за счёт протон-протонного цикла. Когда запасы водорода в ядре исчерпываются, термоядерный синтез в нём прекращается. Ядро начинает сжиматься под действием гравитации, а внешние слои звезды охлаждаются и расширяются. Звезда сходится с главной последовательности и становится *субгигантом*. Синтез гелия начинает происходить в слое вещества вокруг ядра субгиганта, но теперь за счёт CNO-

цикла. Это приводит к развитию протяжённой конвективной оболочки: звезда начинает быстро увеличивать свой размер и светимость. Субгигант становится *красным гигантом*.

Масса ядра красного гиганта растёт за счёт гелия, полученного в CNO-цикле. Но ядро продолжает сжиматься под действием гравитации и нагреваться. При достижении необходимых температур, в ядре снова запускается термоядерный синтез. Но теперь в синтезе участвует не водород, а гелий за счёт тройного альфа-процесса.

По аналогии с водородом ядерное горение гелия в ядре со временем прекращается. У звезды начинается стадия тепловых пульсаций. Изменение размеров и плотности приводят к гелиевым вспышкам в различных слоях звезды. Вспышки, в свою очередь, снова вызывают изменения размеров и плотности и т.д. За счёт вспышек звезда начинает активно сбрасывать свои внешние слои, образуя вокруг себя туманность. Со временем от звезды остаётся только её небольшое горячее ядро – *белый карлик*.



Туманность Улитка – результат сброса красным гигантом своей внешней оболочки

Белые карлики – это небольшие, но очень плотные и горячие звёзды, в которых уже не протекают термоядерные реакции. Время остывания таких звёзд может на много порядков превышать возраст Вселенной. Но теоретически, остывая, белые карлики со временем перестанут излучать в видимом диапазоне и станут *чёрными карликами*.

Мы проследили эволюцию одиночной звезды солнечной массы. Но большинство звёзд, в отличие от Солнца, являются двойными либо тройными. Звёзды-компаньоны всегда отличаются по массе. Поэтому к тому времени, когда одна звезда вступила в стадию красного гиганта, другая уже может быть белым карликом.

Красный гигант может разрастись до такой степени, что его поверхность окажется относительно недалеко от звезды-компаньона. Тогда начинается аккреция – перетекание водорода с внешних слоёв красного гиганта на поверхность белого карлика.



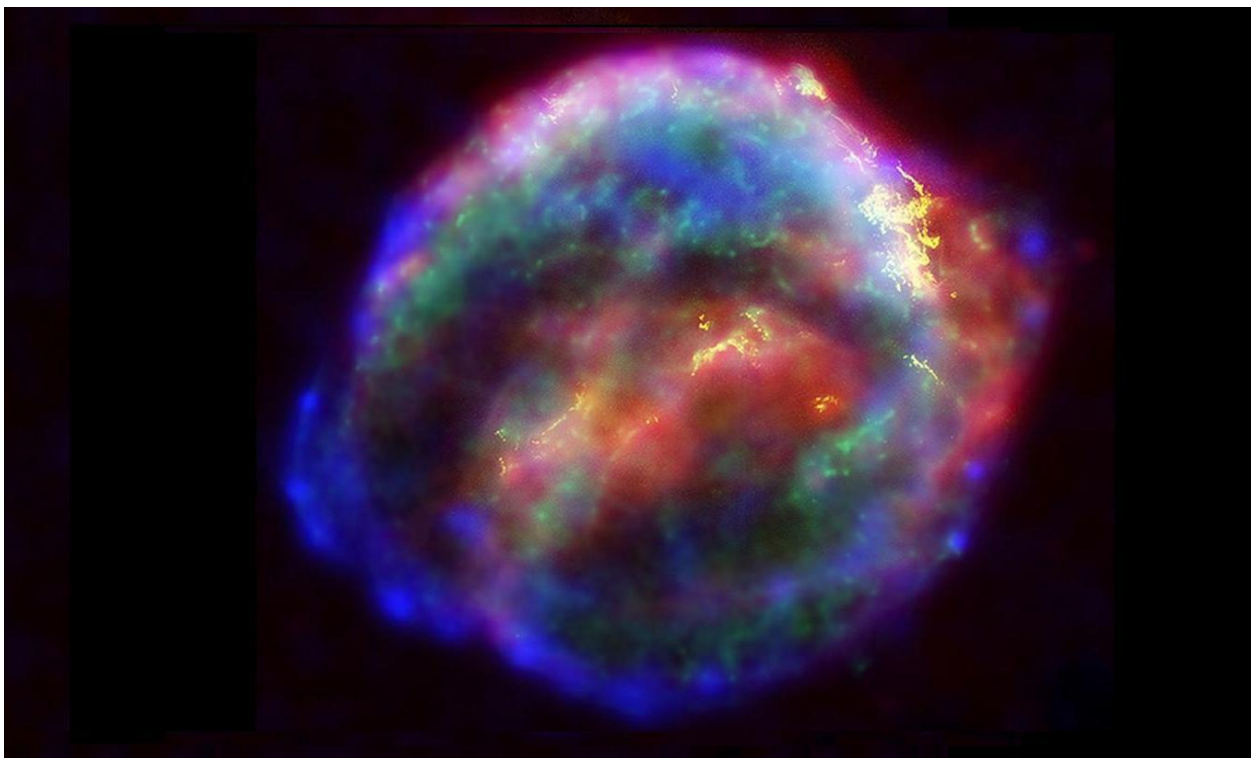
Белый карлик – очень горячая звезда. При попадании водорода на её поверхность происходит мощная термоядерная вспышка, светимость звезды резко возрастает.

Если масса белого карлика много меньше $1,4 M_{\odot}$, то такая вспышка не приводит к разрушению звезды и довольно быстро затухает. Раньше считалась, что на небе возникла новая звезда. Поэтому такая вспышка получала название «*новая*». По мере перетекания водорода на белый карлик вспышки новых могут проходить многократно. Со временем красный гигант сбросит все свои внешние слои и сам станет белым карликом.



Новая GK Persei 1901

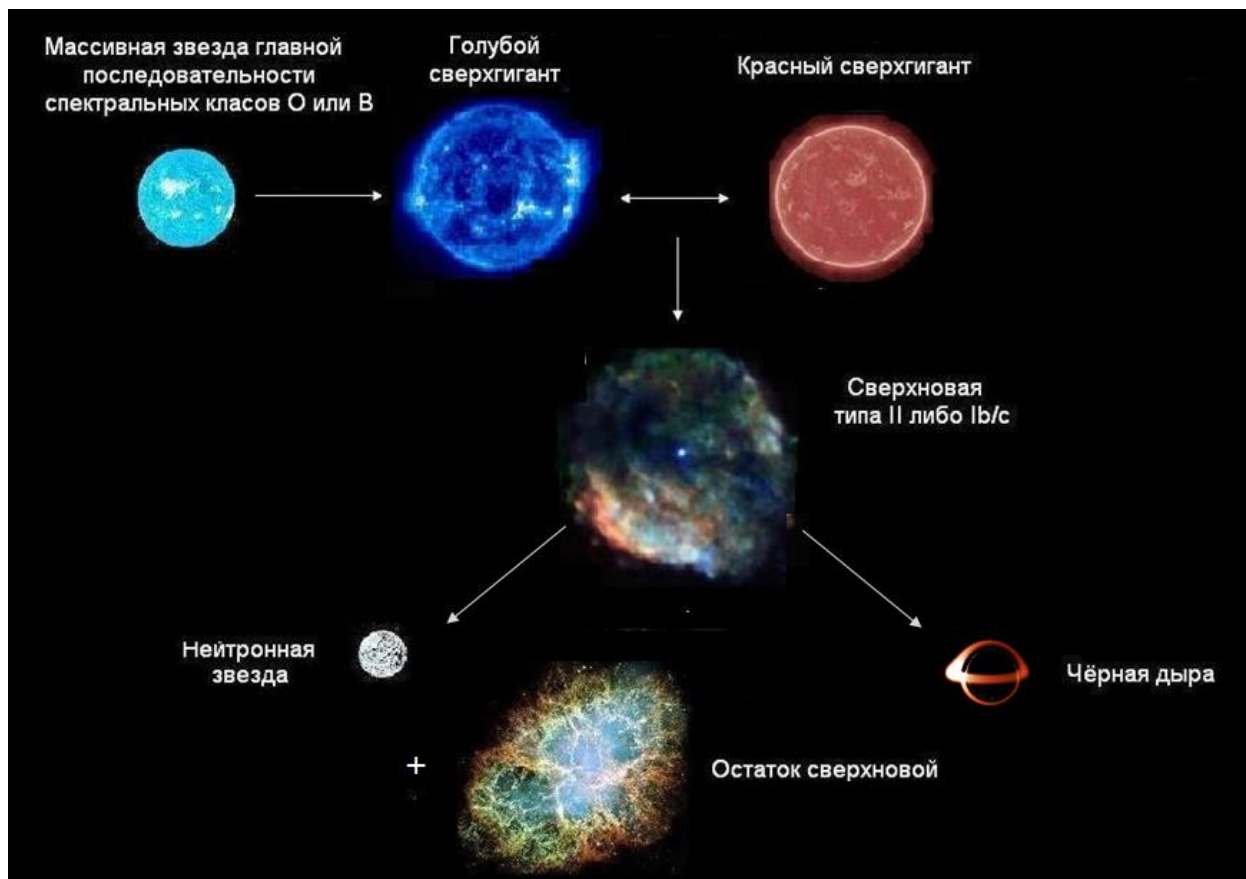
Если масса белого карлика близка $1,4 M_{\odot}$, то вспышка будет гораздо более мощной. Такую вспышку называют уже не новой, а *сверхновой* типа Ia: это термоядерный взрыв, в результате которого белый карлик исчезает, а его вещество рассеивается.



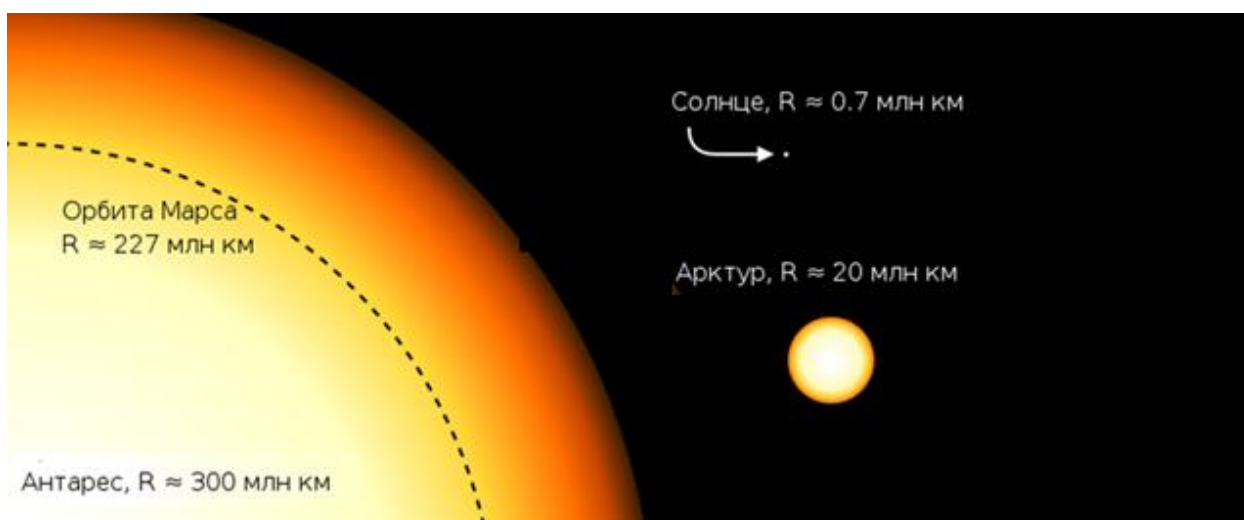
SN 1601 Кеплера (сверхновая типа Ia)

Эволюция массивных звёзд

Молодые звёзды, чья масса превышает $8 M_{\odot}$, относятся к спектральным классам О и В. Время их существования на главной последовательности невелико – это десятки миллионов лет. После выгорания в ядре водорода они сходят с главной последовательности в область *сверхгигантов*.



Сверхгиганты в процессе своей эволюции могут неоднократно менять спектр, двигаться от синего цвета через белый и жёлтый к красному и обратно.

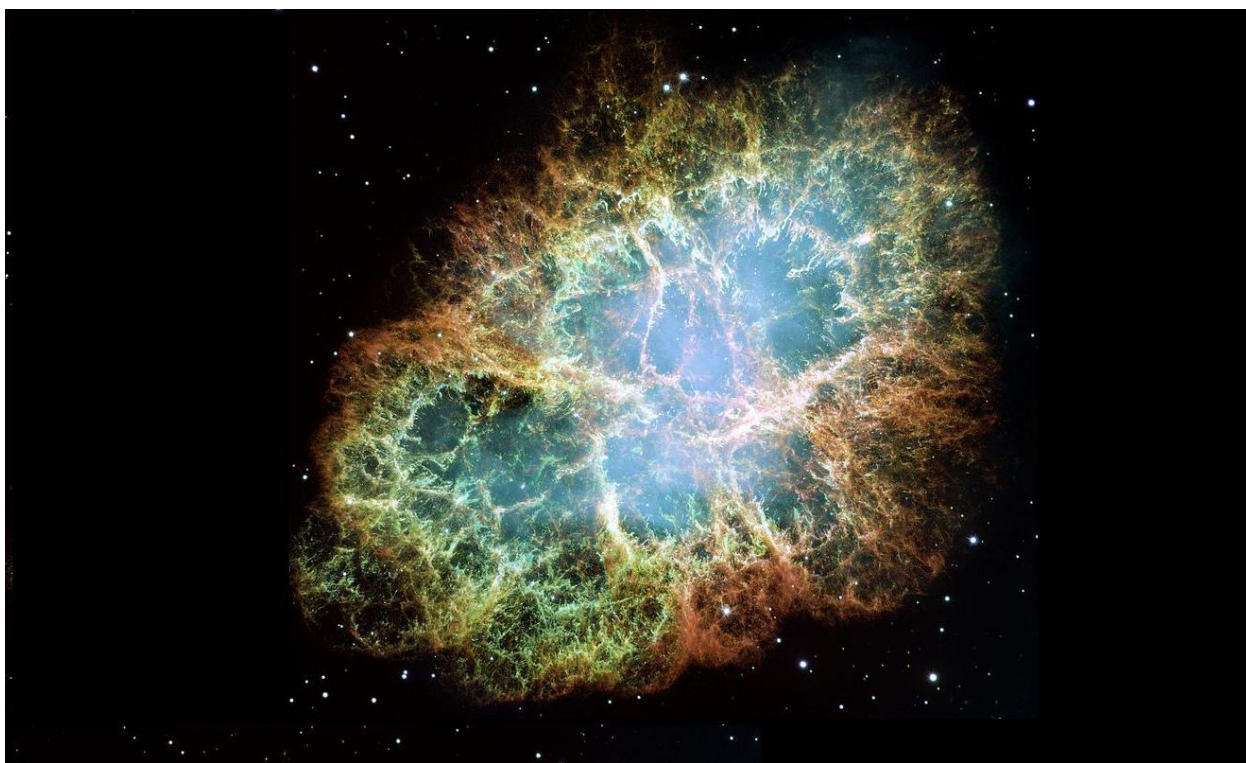


Солнце (жёлтый карлик), Арктур (красный гигант) и Антарес (красный сверхгигант)

Эти звёзды действительно огромны не только по сравнению с карликами, но и по сравнению с гигантами. Самые яркие сверхгиганты относятся к категории *гипергигантов*.

В зависимости от массы, водород в ядрах сверхгигантов выгорает за миллион или несколько десятков миллионов лет. После этого в ядре массивной звезды начинается последовательное ядерное горение гелия, углерода, неона, кислорода, кремния. Термоядерный синтез на более тяжелых элементах уже идёт с поглощением, а не выделением энергии. Поэтому после истощения кремния ядро сверхгиганта больше не может удерживать своё гравитационное сжатие за счёт излучения. Происходит гравитационный коллапс – быстрое сжатие ядра. Плотность ядра увеличивается, происходит нейтронизация вещества, после чего оно становится несжимаемым. Оболочка звезды по инерции сжатия сталкивается с ядром и возникает мощнейшая ударная волна – происходит грандиозная вспышка *сверхновой* типа II либо Ib/c. Такая вспышка по яркости соперничает со светом целой галактики.

Под действием ударной волны внешние слои звезды разлетаются в пространство в качестве *остатка сверхновой*.



Крабовидная туманность – остаток сверхновой SN 1054

Бывшее ядро становится *нейтронной звездой*. Если масса звезды достаточно велика, то гравитационный коллапс продолжается и после нейтронизации, и на месте ядра сверхгиганта образуется *чёрная дыра*.