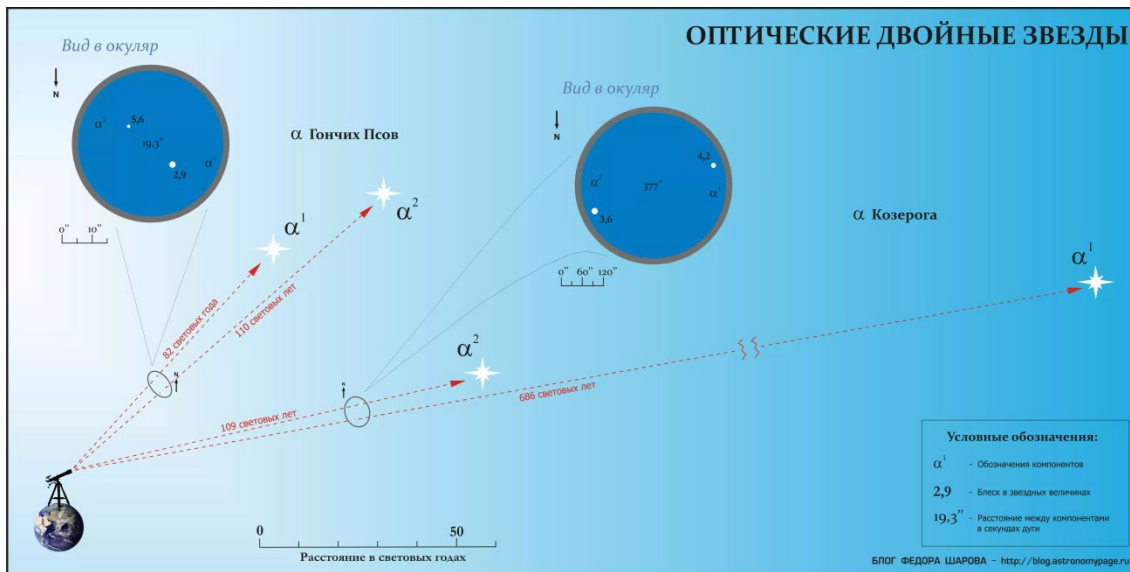




**§ 21 МАССЫ И РАЗМЕРЫ ЗВЁЗД**

# Двойные звёзды. Определение массы звёзд

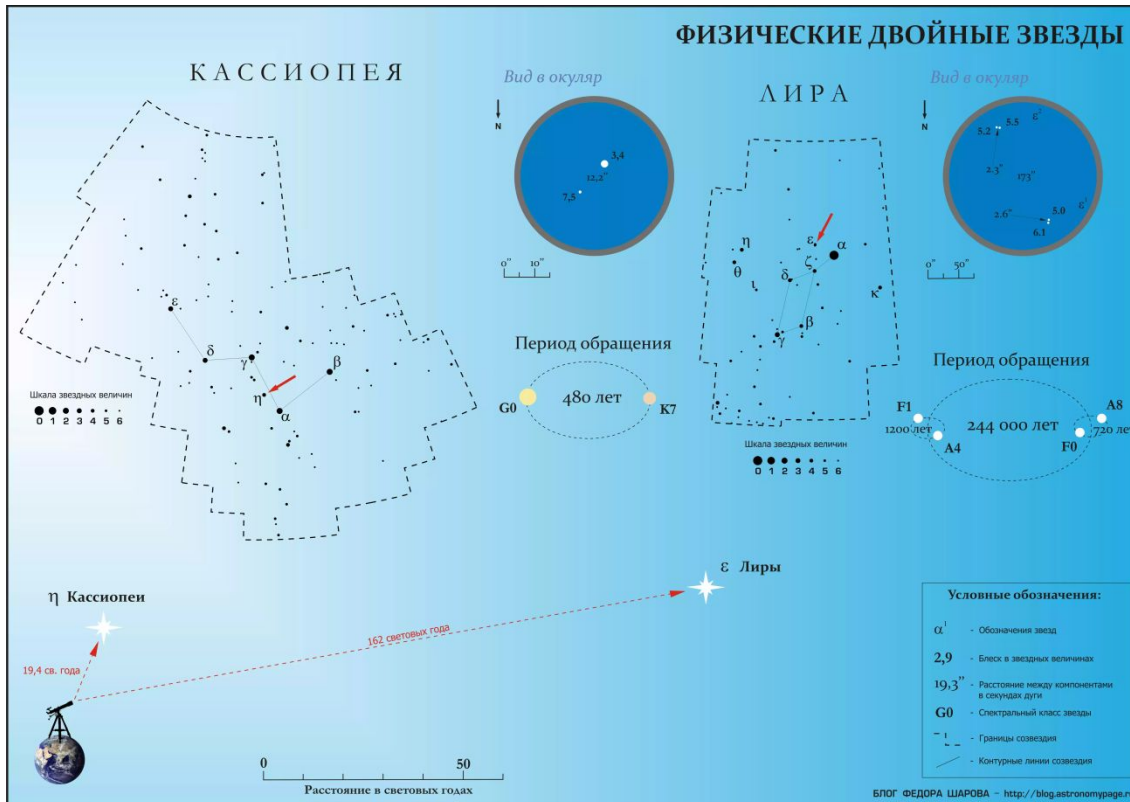
## ОПТИЧЕСКИЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ



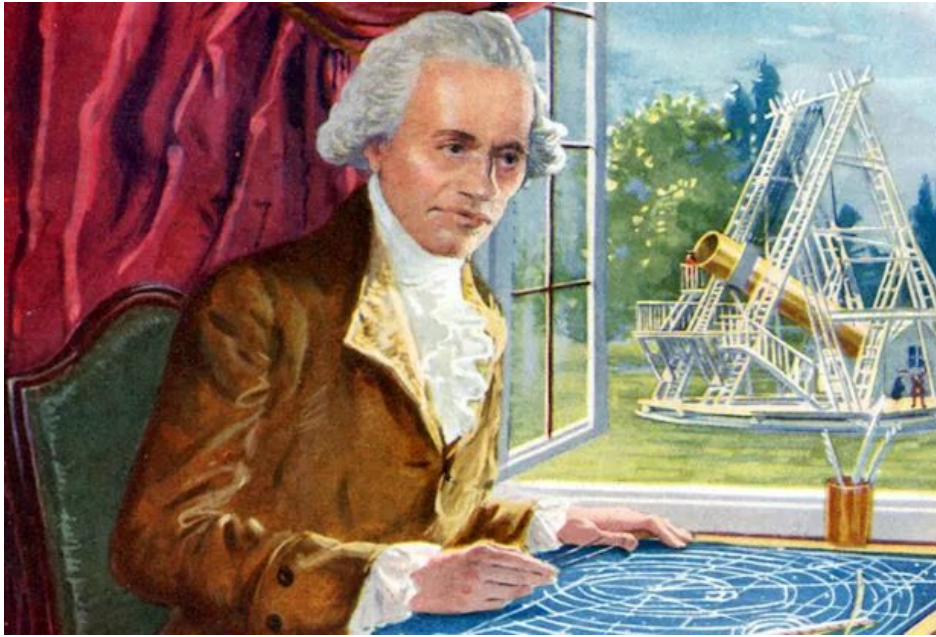
Среди звезд, которые видны на небе рядом, различают **оптические двойные** и **физические двойные звезды**.

В первом случае такие две звезды хотя и видны вблизи, но находятся в пространстве далеко друг от друга.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ



Если же в результате наблюдений выясняется, что они образуют единую систему и обращаются вокруг общего центра масс под действием взаимного тяготения, то их называют **физическими двойными звездами**.



Первым, кто доказал, что **физические двойные звезды** действительно существуют, был известный английский астроном **Вильям Гершель** (1738–1822).



Множество двойных звезд открыл и исследовал **В. Я. Струве**.

В настоящее время известно уже более 70 тыс. этих объектов.

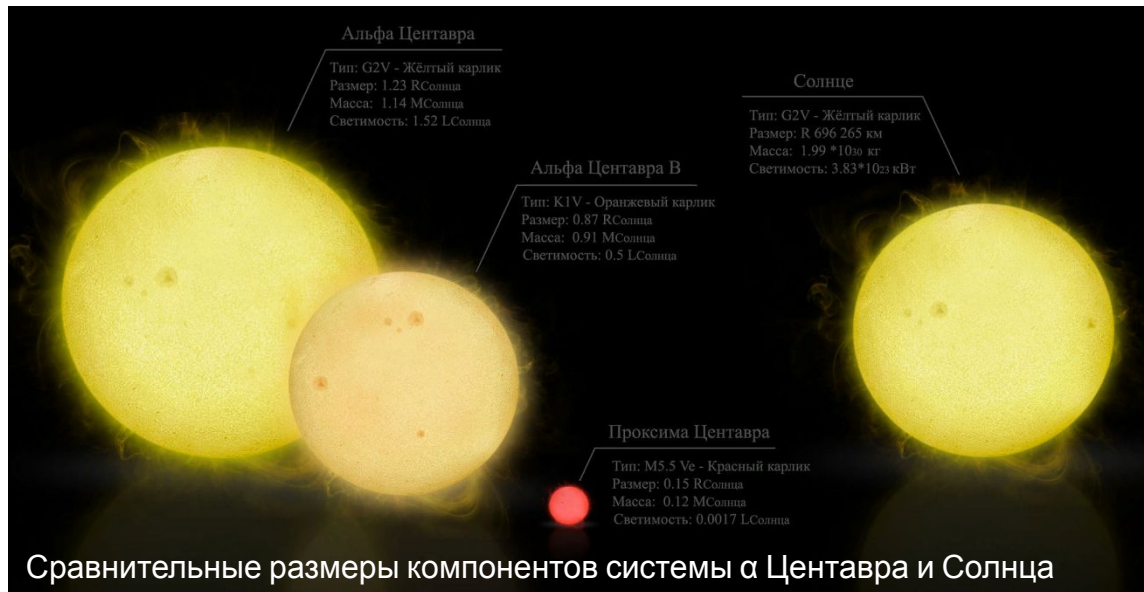
Василий Яковлевич (Фридрих Георг Вильгельм) Струве (1793—1864) выдающийся астроном, член Петербургской академии наук, первый директор Пулковской обсерватории, член-учредитель Русского географического общества



Тройная звезда HD 188753

Когда число звезд в системе, связанной взаимным тяготением, оказывается более двух, то их называют **кратными**.

В настоящее время считается, что большинство звезд (более 70%) образуют системы большей или меньшей кратности.



Сравнительные размеры компонентов системы  $\alpha$  Центавра и Солнца

**$\alpha$  Центавра** является тройной звездой, одна из которых расположена ближе всего к нам и получила название **Проксима** (в переводе с греческого – *ближайшая*).

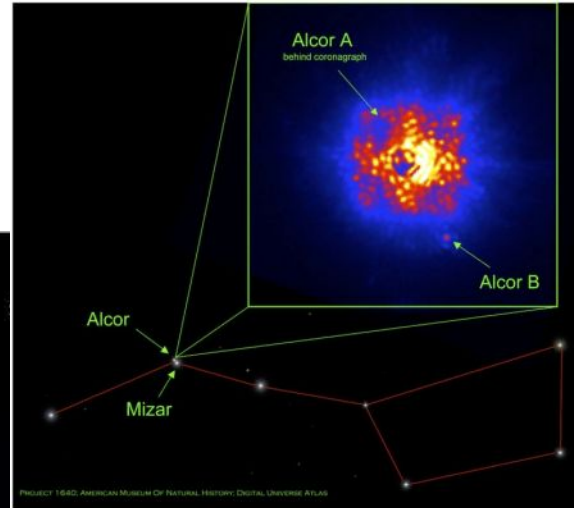
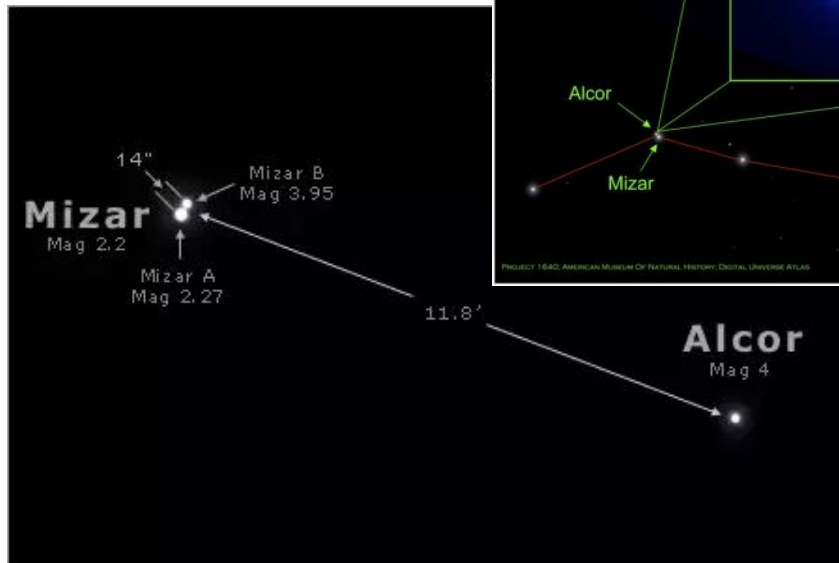


Редким примером двойной звезды, оба компонента которой различимы даже невооруженным глазом, являются **Мицар** и **Алькор** в созвездии Большой Медведицы.

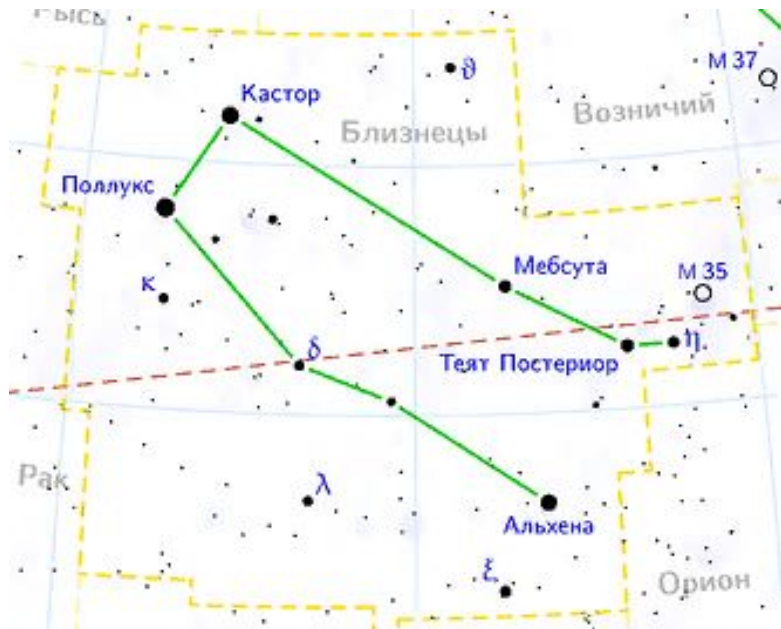
Среди ярчайших звезд также были обнаружены двойные: Сириус, Капелла, Кастор и др.

Более того, оказалось, что во многих случаях каждая из звезд такой пары сама состоит из нескольких звезд.

Так, Мицар и Капелла имеют в своем составе четыре компонента, а Кастор – шесть.



Люди с хорошим зрением видят рядом с Мицаром звезду Алькор. Название в переводе с арабского означает забытая или незначительная. Способность видеть Алькор — традиционный способ проверки зрения.

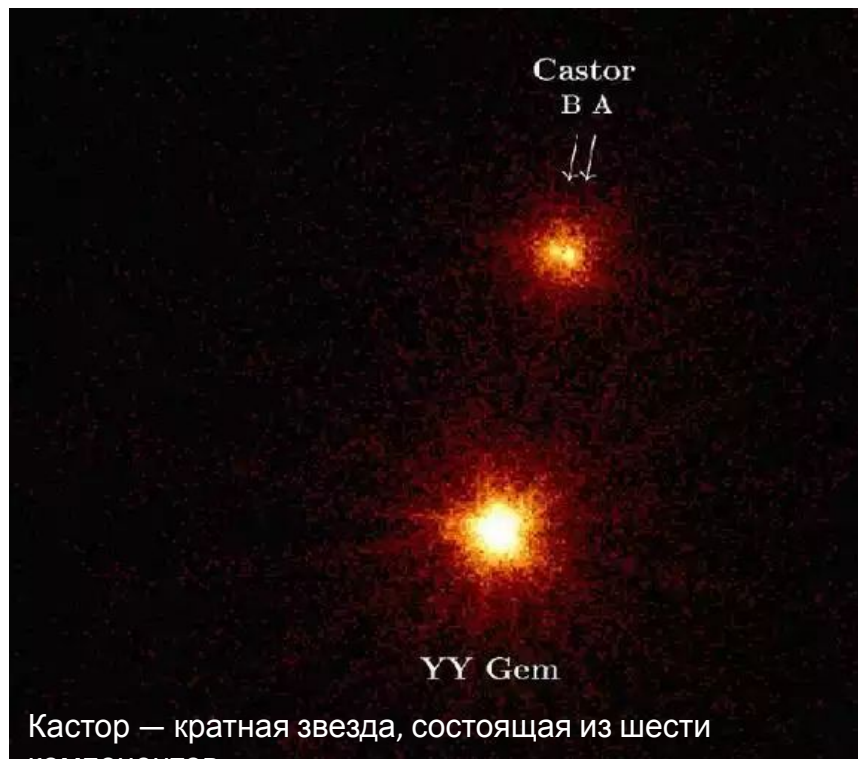


**Кáстор** – вторая по яркости звезда созвездия Близнецов, одна из ярчайших звёзд неба.

Кастор – первая двойная звезда, у которой ещё Вильям Гершель в 1804 году обнаружил явное орбитальное движение.

Тусклая переменная звезда 9-й звёздной величины **ΥΥ Близнецов** физически связана с Кастором.

Каждый из компонентов является **спектрально-двойной звездой**.



Кастор — кратная звезда, состоящая из шести

Примерный вид двойной системы Сириуса, иллюстрация NASA



Периоды обращения двойных звезд вокруг общего центра масс обычно бывают от нескольких лет до нескольких десятков лет (в редких случаях превышают 100 лет).

Их орбиты сравнимы по размерам с орбитами планет-гигантов.

Большинство спектрально-двойных звезд имеют периоды обращения порядка нескольких суток, располагаясь друг от друга на расстоянии 5–7 млн км.

Самый короткий из известных периодов составляет всего 2,6 ч.

Сириус — двойная звезда, самая яркая звезда ночного неба, которая входит в созвездие Большого Пса. Видимая звёздная величина Сириуса равна  $-1,46^m$ . Сириус в 20 раз ярче Солнца и в два раза массивнее его.

Звезда находится примерно в 8,6 световых годах от Солнца и является одной из ближайших к нам звезд.



Несмотря на многочисленность двойных звезд, достаточно надежно определены орбиты лишь примерно для сотни из них.

При известном расстоянии до этих систем использование третьего закона Кеплера позволяет определить их массу.

Сравнивая движение спутника звезды с движением Земли вокруг Солнца, можно написать:

$$\frac{m_1+m_2}{A^3} T_1^2 = \frac{M_1+M_2}{a^3} T_2^2,$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – массы компонентов звездной пары;  $M_1$  и  $M_2$  – массы Солнца и Земли;  
 $T_1$  – период обращения звезд;  $T_2$  – период обращения Земли;  
 $A$  – большая полуось орбиты двойной звезды;  $a$  – большая полуось земной орбиты.

Приняв период обращения Земли и величину большой полуоси ее орбиты равными 1 и пренебрегая массой Земли по сравнению с массой Солнца, получим, что в массах Солнца:

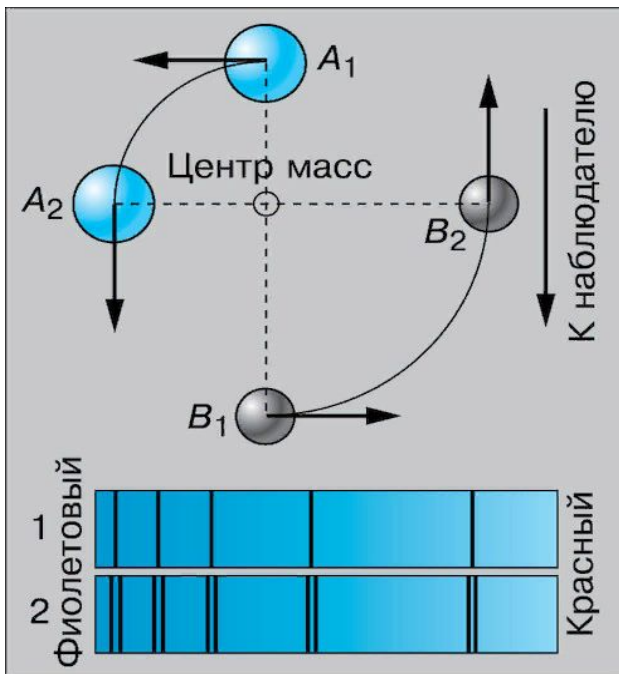
$$m_1 + m_2 = \frac{A^3}{T_1^2}$$

Чтобы определить массу каждой звезды, надо изучить движение каждой из них и вычислить их расстояния  $A_1$  и  $A_2$  ( $A = A_1 + A_2$ ) от общего центра масс.

Тогда мы получим второе уравнение:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

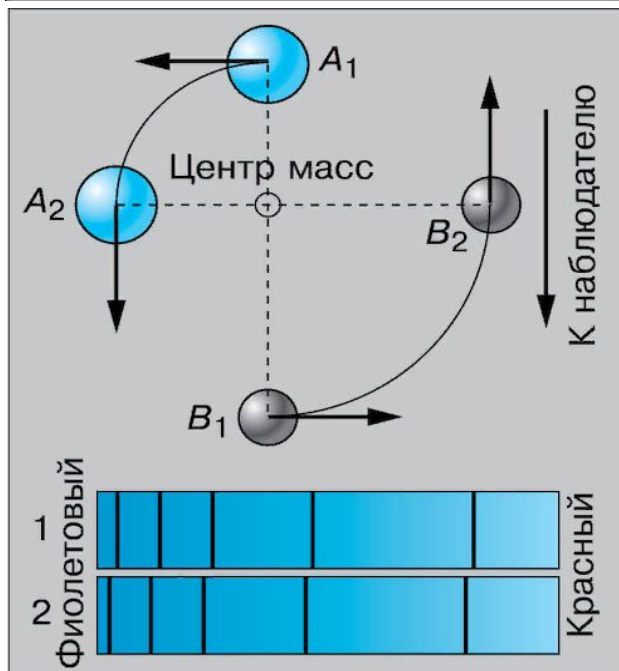
Решая систему двух уравнений, можно вычислить массу каждой звезды.



У спектрально-двойных звезд наблюдается **смещение** (или **раздвоение**) **линий в спектре**, которое происходит вследствие эффекта Доплера.

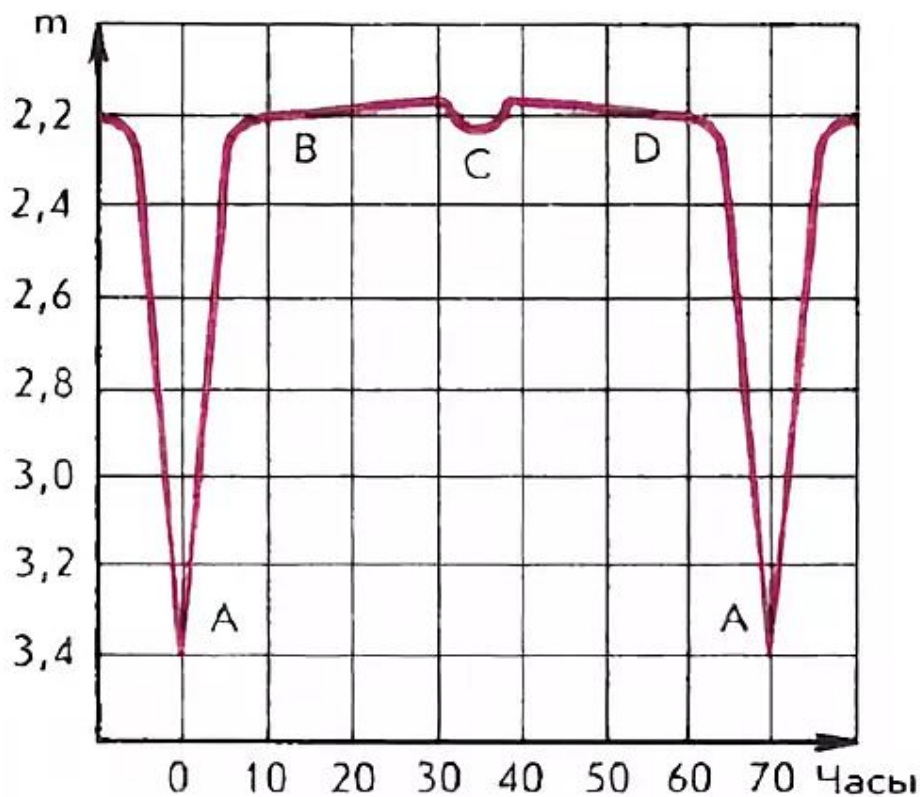
Смещение меняется с периодом, равным периоду обращения пары.

Если яркости и спектры звезд, составляющих пару, сходны, то в спектре наблюдается **периодическое раздвоение линий**.



Если одна из звезд настолько слаба, что ее линии не видны, то будет наблюдаться **периодическое смещение линий более яркой звезды**.

Раздвоение линий в спектре двойной звезды

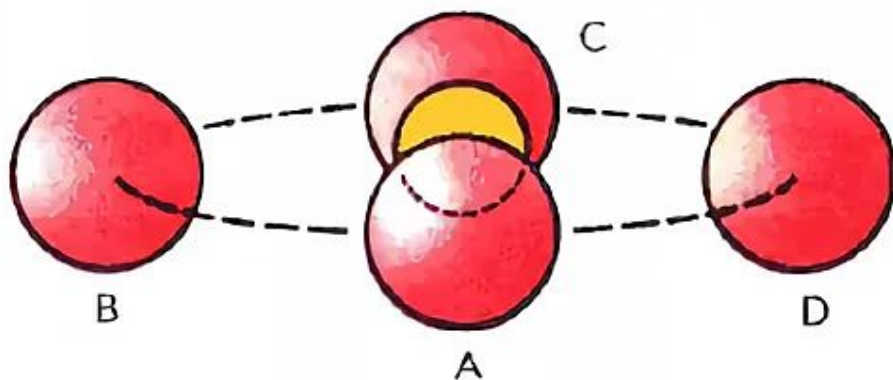


Для наблюдателя, который находится в плоскости орбиты спектрально-двойной звезды, ее компоненты будут поочередно загроаживать, «затмевать» друга друга.

Такие звезды называют **затменно-двойными** или алголями – по названию наиболее известной звезды этого типа  $\beta$  Персея.

Ее арабское название «эль гуль» (дьявол) постепенно превратилось в Алголь.

Возможно, что еще древние арабы заметили странное поведение этой звезды: в течение 2 суток 11 часов ее яркость остается постоянной, но затем за 5 часов она ослабевает от 2,3 до 3,5 звездной величины, а за следующие 5 часов ее прежняя яркость восстанавливается.



Так художник представляет себе систему  $\epsilon$  Возничего (вид плашмя (малое наклонение)).



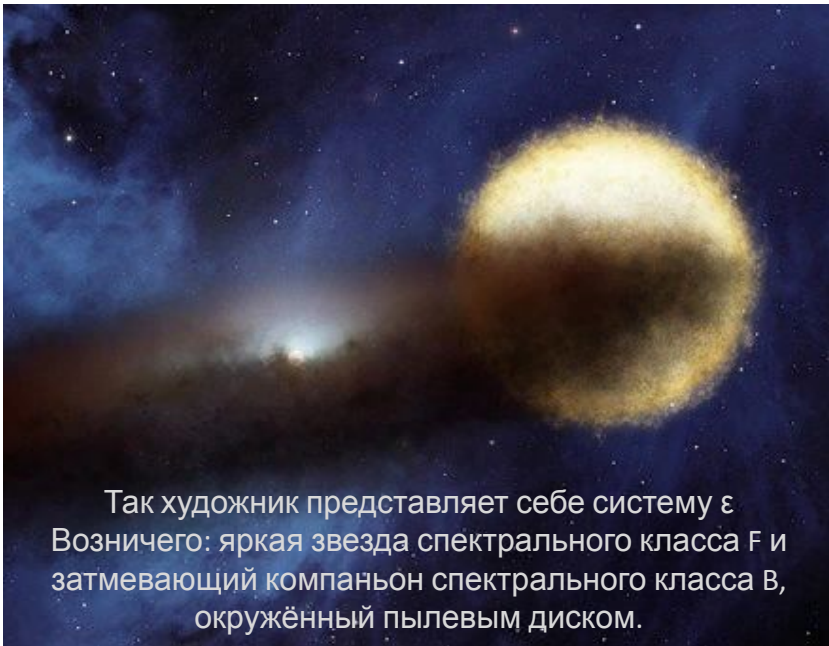
В настоящее время известно более 5 тыс. **затменно-двойных звезд**.

Их изучение позволяет определить не только характеристики орбиты, но также получить некоторые сведения о самих звездах.

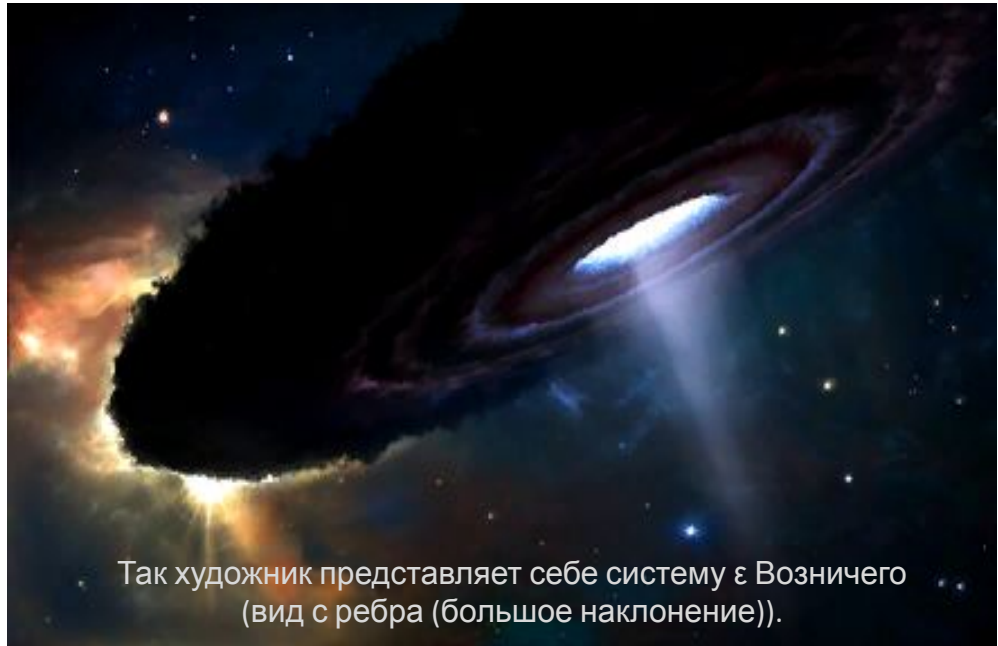
Продолжительность затмения дает возможность судить о размерах звезды.

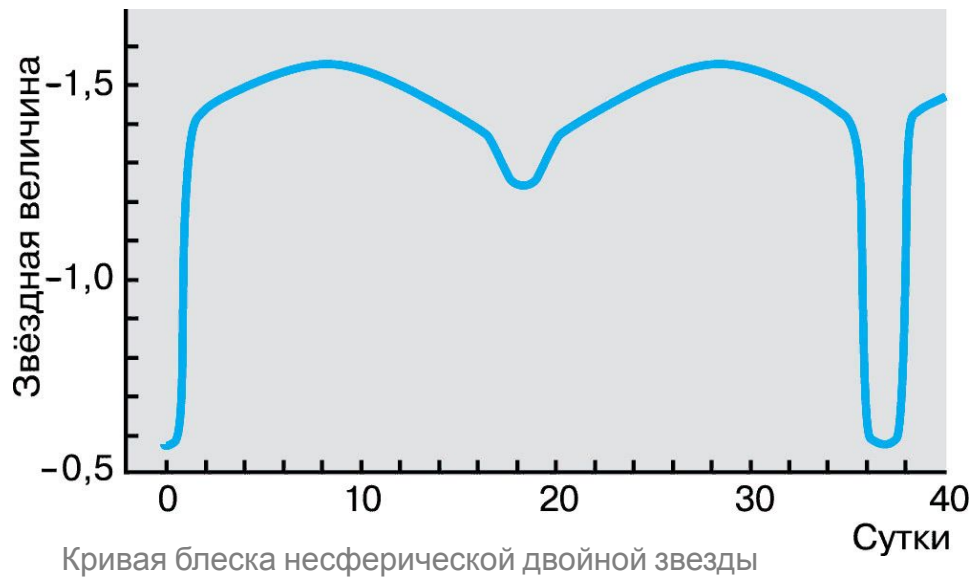
Рекордсменом здесь является  **$\epsilon$  Возничего**, в системе которой при периоде 27 лет затмение продолжается 2 года.

Так художник представляет себе систему  $\epsilon$  Возничего: яркая звезда спектрального класса F и затмевающий компаньон спектрального класса B, окружённый пылевым диском.



Так художник представляет себе систему  $\epsilon$  Возничего (вид с ребра (большое наклонение)).





Форма кривой блеска некоторых звезд свидетельствует о том, что их форма существенно отличается от сферической.



Близкое расположение компонентов приводит к тому, что газы из атмосферы одной звезды перетекают на другую. Иногда эти процессы принимают катастрофический характер, и наблюдается вспышка **новой звезды**.

Определение масс звезд на основе исследований двойных звезд показало, что они заключены в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца.

При этом большинство из них имеют массу от 0,3 до 3 масс Солнца.

Очень большие массы встречаются крайне редко.



Методы изучения спектрально-двойных и затменно- переменных звезд в настоящее время используются также для поиска планет, обращающихся вокруг других звезд (экзопланет).

К концу 2009 г. было подтверждено открытие около 400 экзопланет, которые составили 340 планетных систем. В их числе было 42 системы, содержавшие не менее двух планет, а одна – не менее 5. Большинство этих планет оказались газовыми гигантами типа Юпитера и Сатурна.



Усилия ученых направлены на поиски планет, которые по своим размерам и массе похожи на Землю и находятся недалеко от звезд, что обеспечило бы на поверхности планеты условия, необходимые для существования жизни.

С этой целью в 2009 году был запущен КА «Кеплер».

Он мог одновременно наблюдать более чем 100 тыс. звёзд в небольшой области неба между созвездиями Лебедя и Лиры.

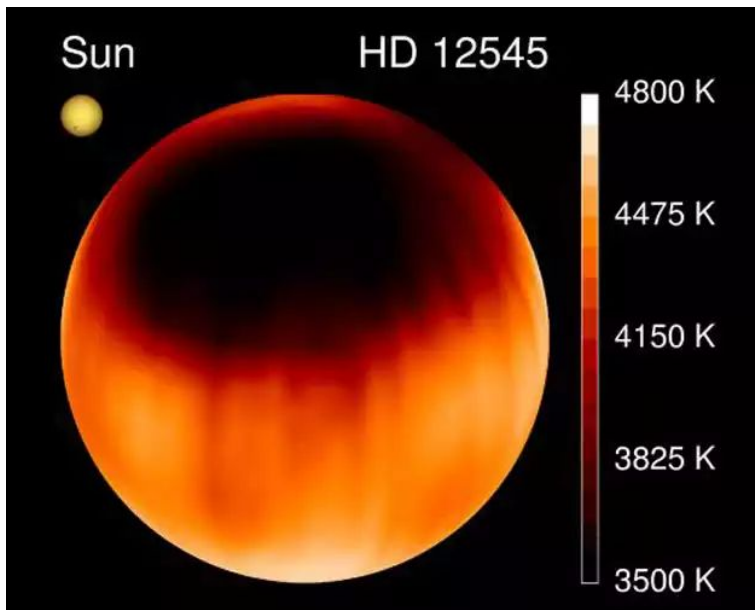


По состоянию на июль 2015 года подтверждена природа более 1000 планет из около 4700 кандидатов, открытых телескопом.

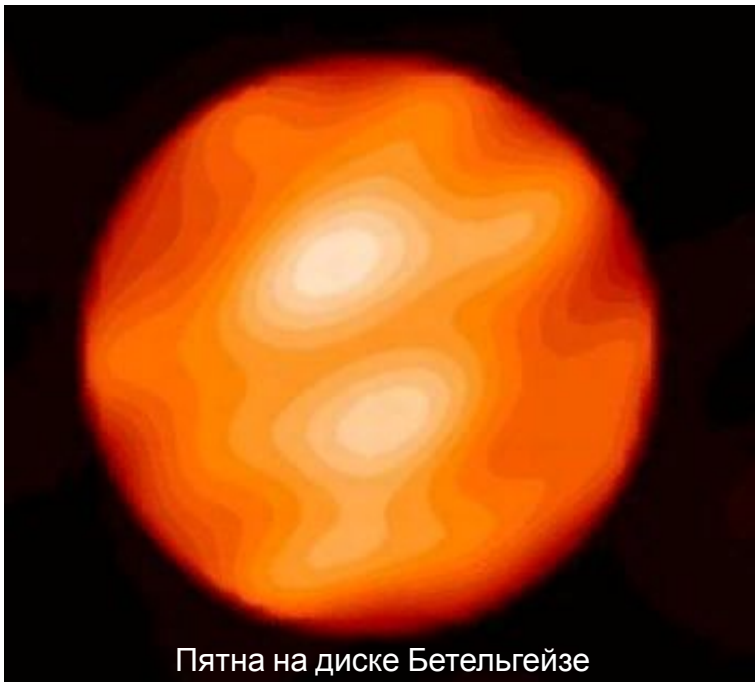
Среди всех кандидатов 49 % имеют размеры меньше, чем 2 размера Земли.



Размеры звёзд.  
Плотность их вещества



Гигантское пятно на звезде HD 12545  
в созвездии Треугольника



Пятна на диске Бетельгейзе

Звезды расположены так далеко от нас, что за редким исключением они даже в самые мощные телескопы видны как точки.

Лишь в последние годы для некоторых самых крупных из них удалось получить изображение в виде диска, на котором обнаруживаются пятна.

Бетельгейзе является красным сверхгигантом в созвездии Ориона на расстоянии около 650 световых лет от Земли.

Бетельгейзе - огромная звезда. Если ее поместить в центре нашей Солнечной системы, то она бы простиралась до орбиты Юпитера.

В 600 раз больше, чем наше Солнце, она излучает примерно в 100 000 раз больше энергии.

В возрасте всего несколько миллионов лет Бетельгейзе уже приближается к концу своей жизни и вскоре взорвется как сверхновая. Когда это произойдет, сверхновую можно будет видеть даже

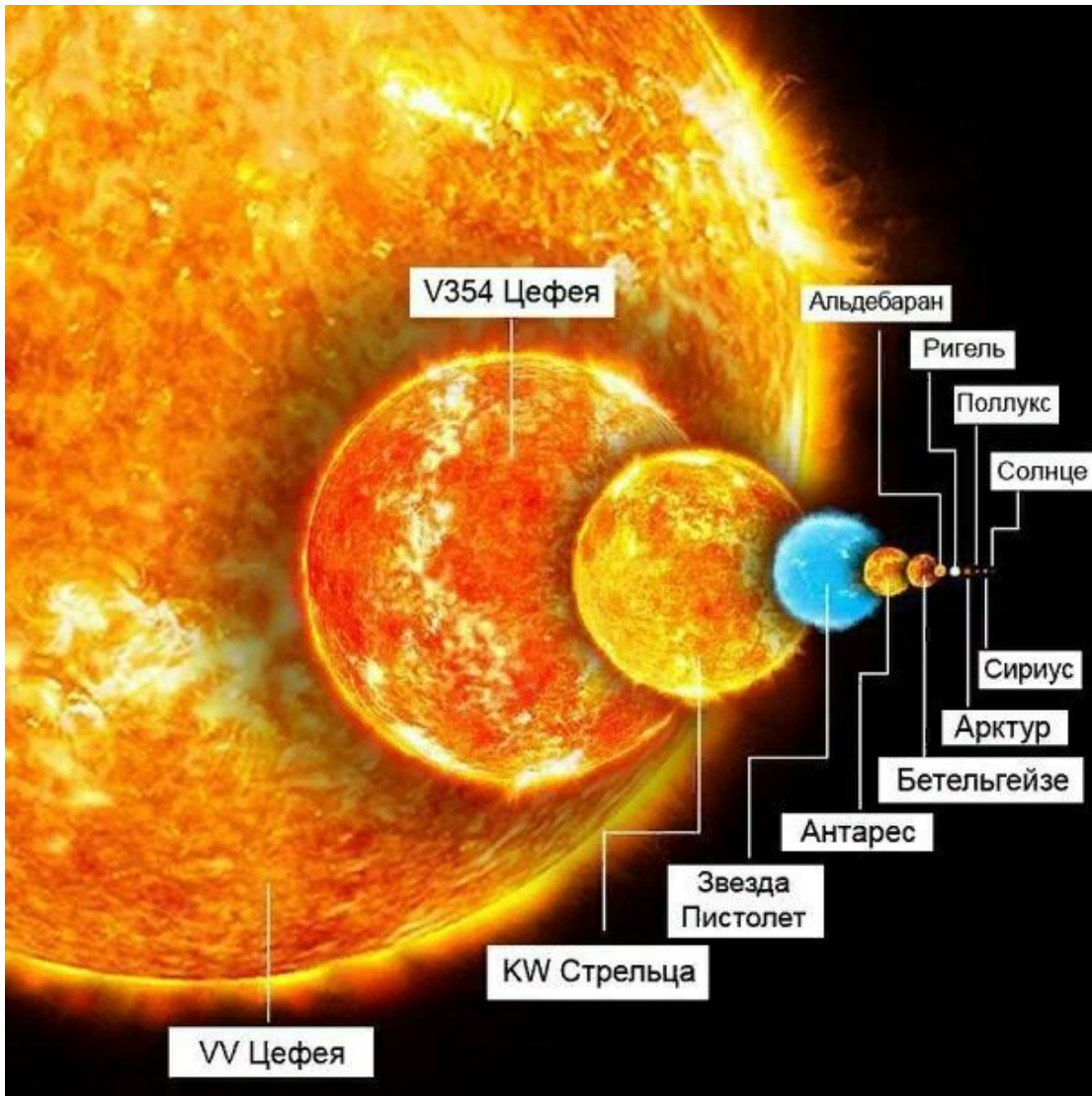
В большинстве случаев размеры звезд приходится рассчитывать на основе данных об их светимости и температуре. Светимость звезды рассчитывается по той же формуле, что и светимость Солнца:  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$

Отношение светимостей звезды и Солнца будет равно:  $\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4$

Приняв, что  $R_{\odot} = 1$  и  $L_{\odot} = 1$ , получаем выражение для вычисления радиуса звезды (в радиусах Солнца)

$$R = \sqrt{L} \frac{T_{\odot}^2}{T^2}$$



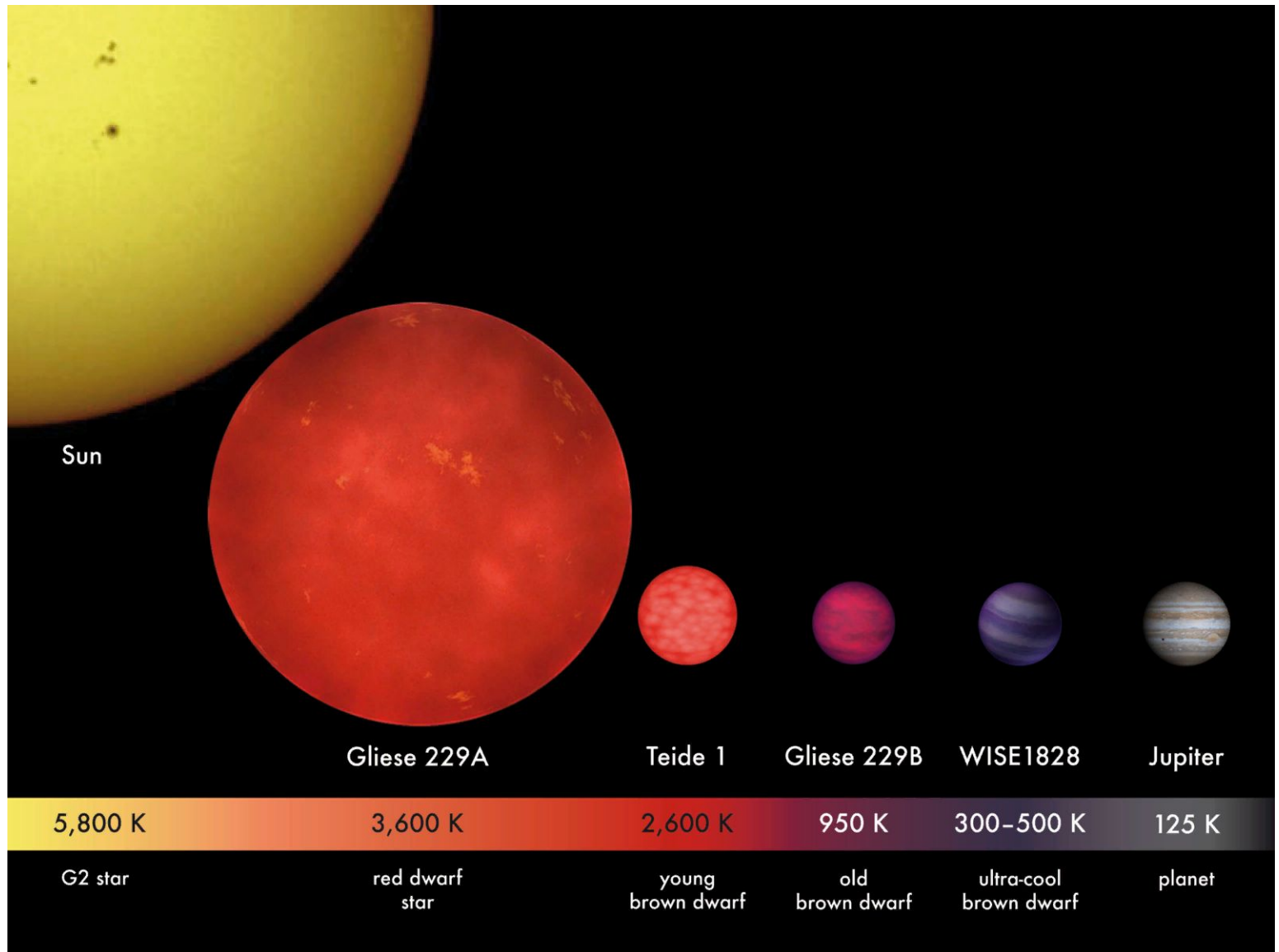


Звезды самой большой светимости (**сверхгиганты**) действительно оказались очень большими. Красные сверхгиганты Антарес и Бетельгейзе в сотни раз больше Солнца по диаметру.

Красный гипергигант VV Цефея А спектрального класса M2 — вторая по размеру в нашей галактике (после гипергиганта VY Большого Пса).

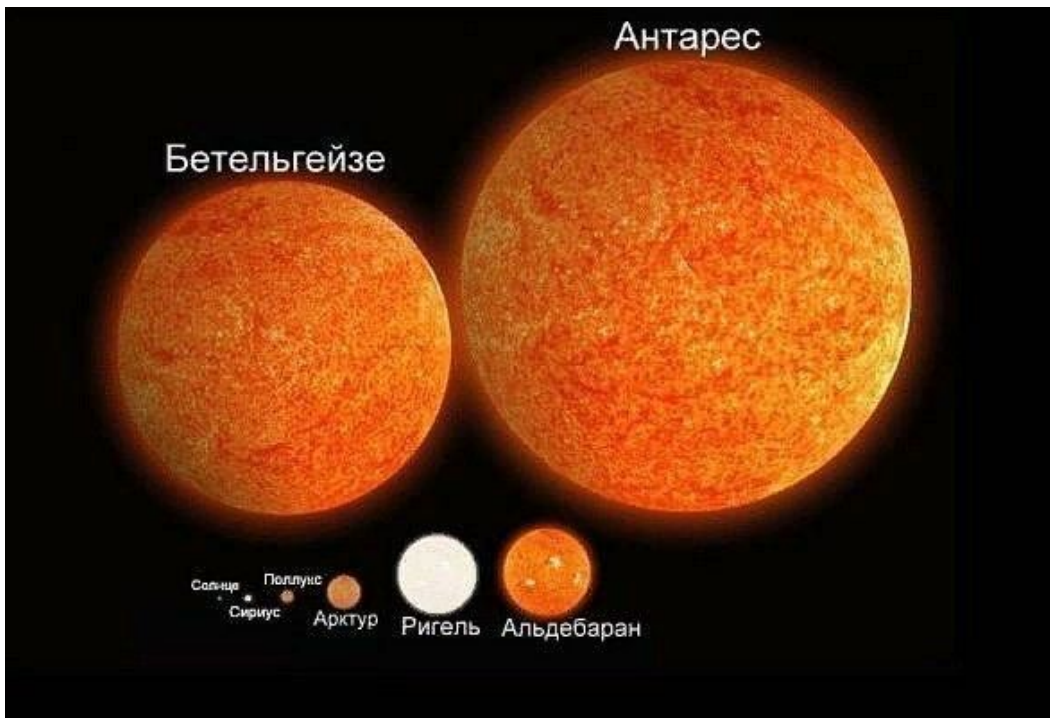
Радиус звезды приблизительно равен 730800000 км или 1050 радиусам Солнца, а светимость — в 275 000—575 000 раз больше.

Диаметр **красных карликов**, относящихся к главной последовательности, в несколько раз меньше солнечного.



Самыми маленькими звездами являются **белые карлики**, диаметр которых несколько тысяч километров.





Расчеты **средней плотности** звезд различных типов, проведенные на основе имеющихся данных об их массе и размерах, показывают, что она может значительно отличаться от средней плотности Солнца.

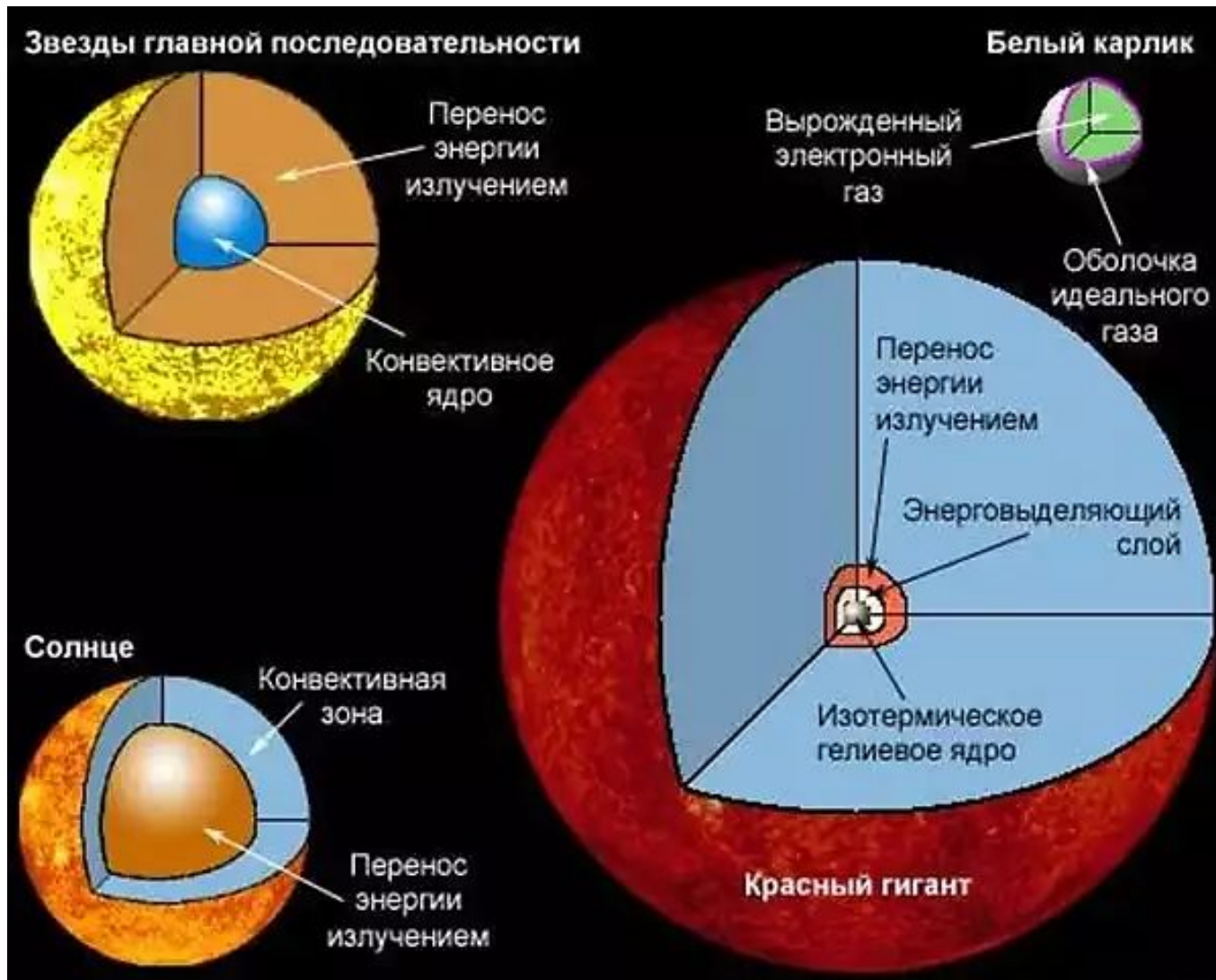
Средняя плотность некоторых сверхгигантов составляет всего  $10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>, что в 1000 раз меньше плотности воздуха при нормальных условиях.

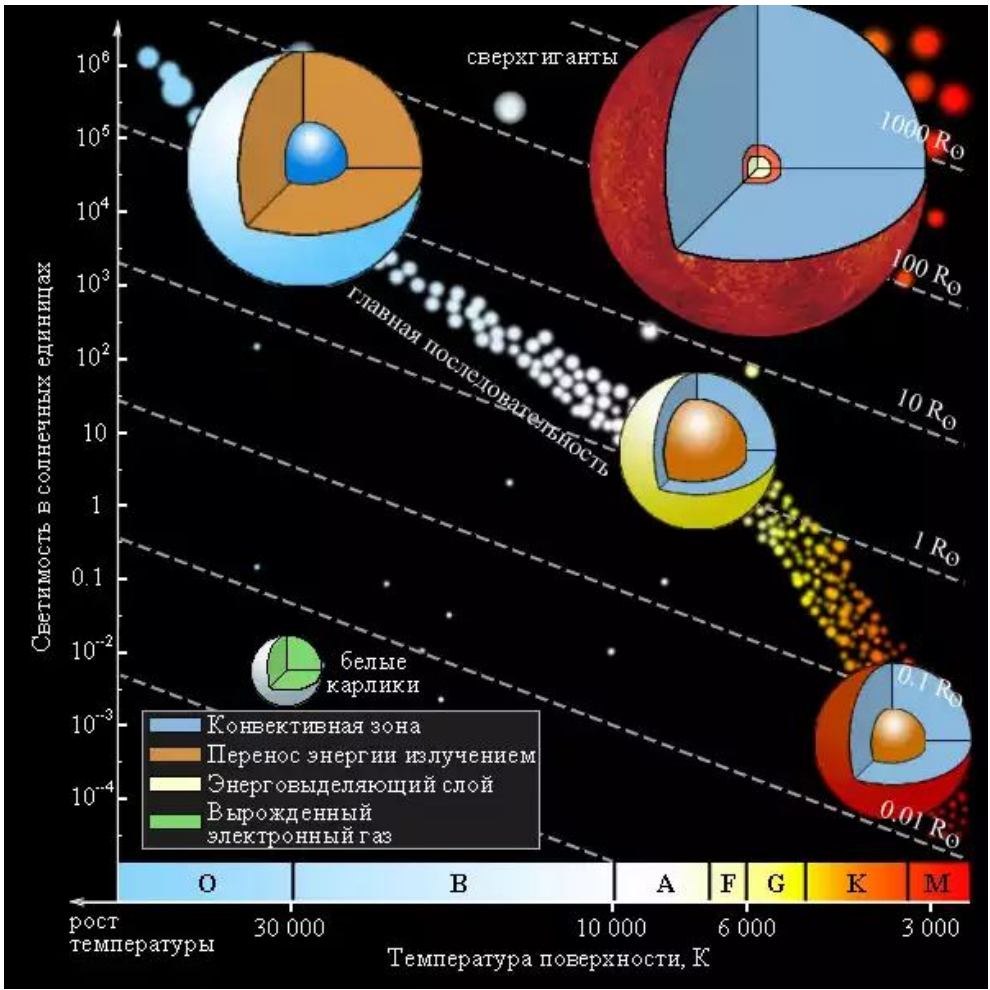
Другой крайностью является плотность белых карликов – около  $10^9$  кг/м<sup>3</sup>.

# Модели звёзд



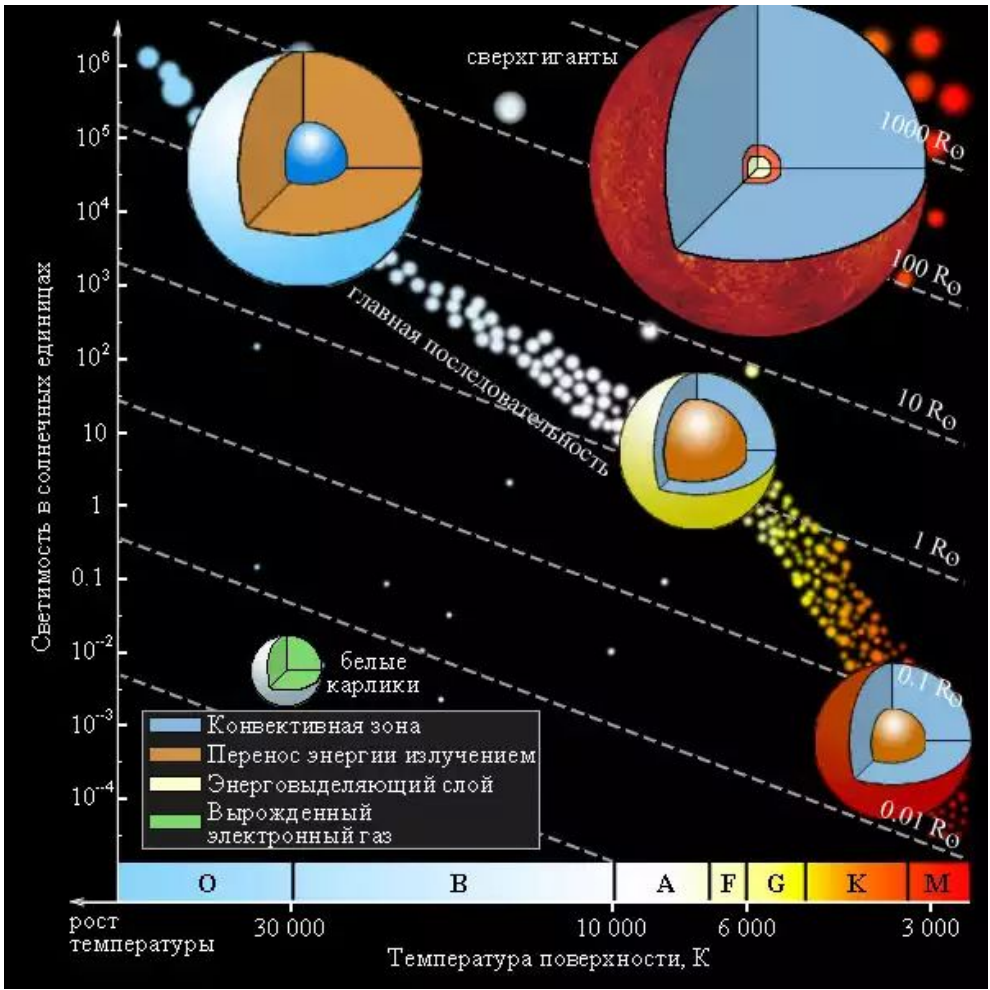
В зависимости от массы и размеров звезды различаются по внутреннему строению, хотя все имеют примерно одинаковый химический состав (95–98% их массы составляют водород и гелий).





**Звезды главной последовательности**, температура которых такая же, как у Солнца, или ниже, похожи на него по внутреннему строению.

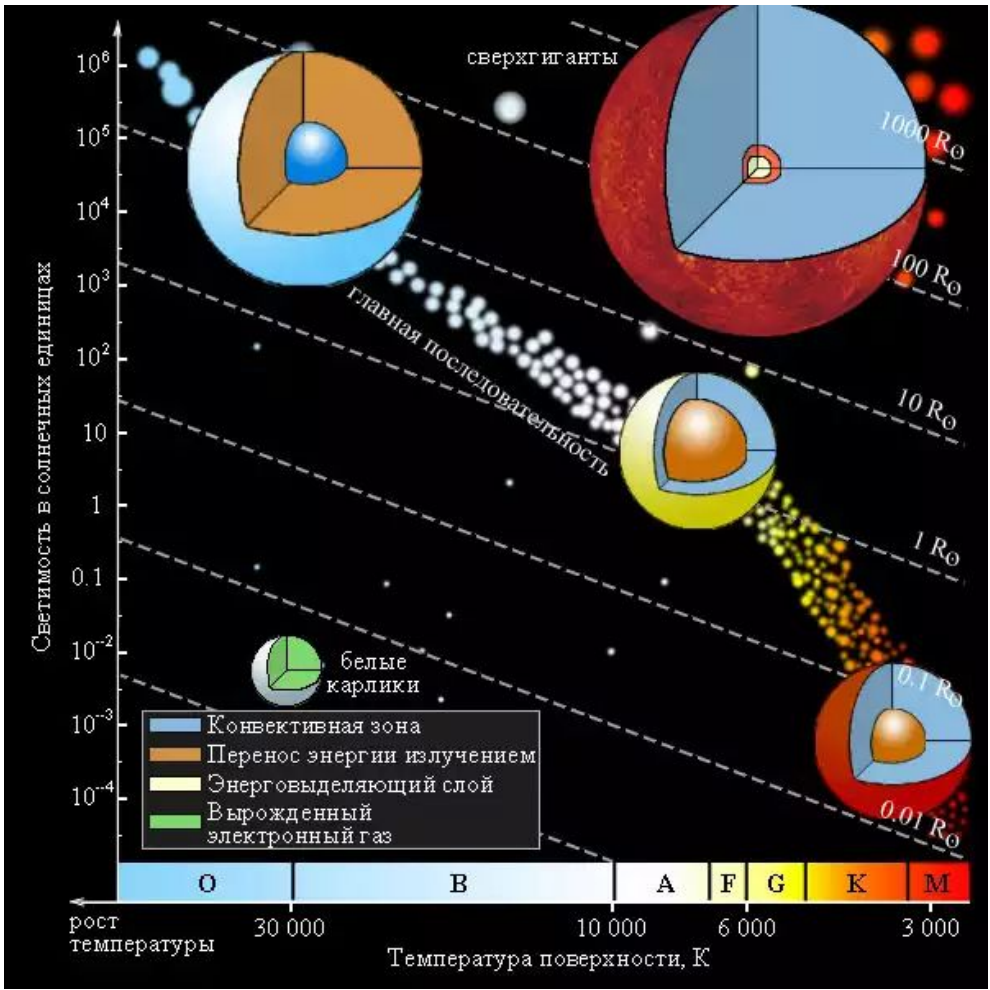
Среди множества звезд этого типа есть и такие, которые по многим своим характеристикам являются «двойниками» Солнца. Наиболее яркой из них является  $\beta$  Гончих Псов. У более горячих звезд главной последовательности внешняя конвективная зона отсутствует. В этих звездах конвекция происходит в ядре протяженностью до 1/4 их радиуса, окруженном лучистой оболочкой.



**Гиганты** и **сверхгиганты** имеют очень маленькое ядро (его радиус около 0,001 доли радиуса звезды).

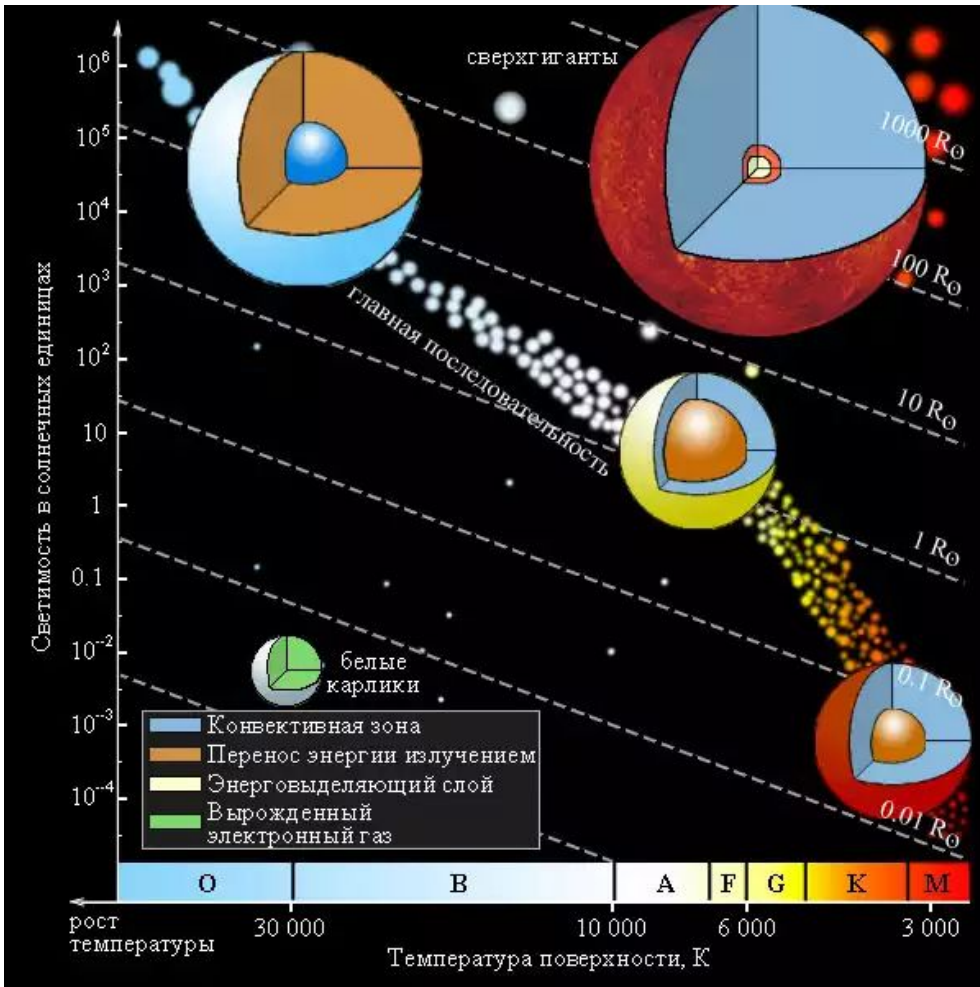
Термоядерные реакции происходят в окружающем его тонком слое; далее на протяжении около 0,1 радиуса звезды происходит передача энергии излучением.

Практически весь остальной объем (9/10 радиуса) составляет протяженная конвективная зона.



**Белые карлики** состоят из вырожденного газа, давление которого определяется лишь его плотностью и не зависит от температуры.

Равновесие такой «экзотической» звезды, масса которой равна солнечной, наступает лишь тогда, когда она сожмется до размеров, примерно равных размерам Земли. Внутри белого карлика температура достигает 10 млн К и практически не меняется; только в тонкой оболочке из «обычного» вещества она резко падает до 10 000 К.



**Коричневые карлики** обладают слишком малой массой, что не обеспечивает температуры, необходимой для протекания термоядерной реакции превращения водорода в гелий.

Гравитационное сжатие их массы достаточно лишь для того, чтобы достигнутая температура обеспечила в течение короткого (по космическим меркам) времени превращение дейтерия (тяжелого изотопа водорода) в гелий.

Масса коричневых карликов составляет всего лишь 0,01–0,07 массы Солнца. Про них можно сказать, что они еще не звезды, но уже не планеты.