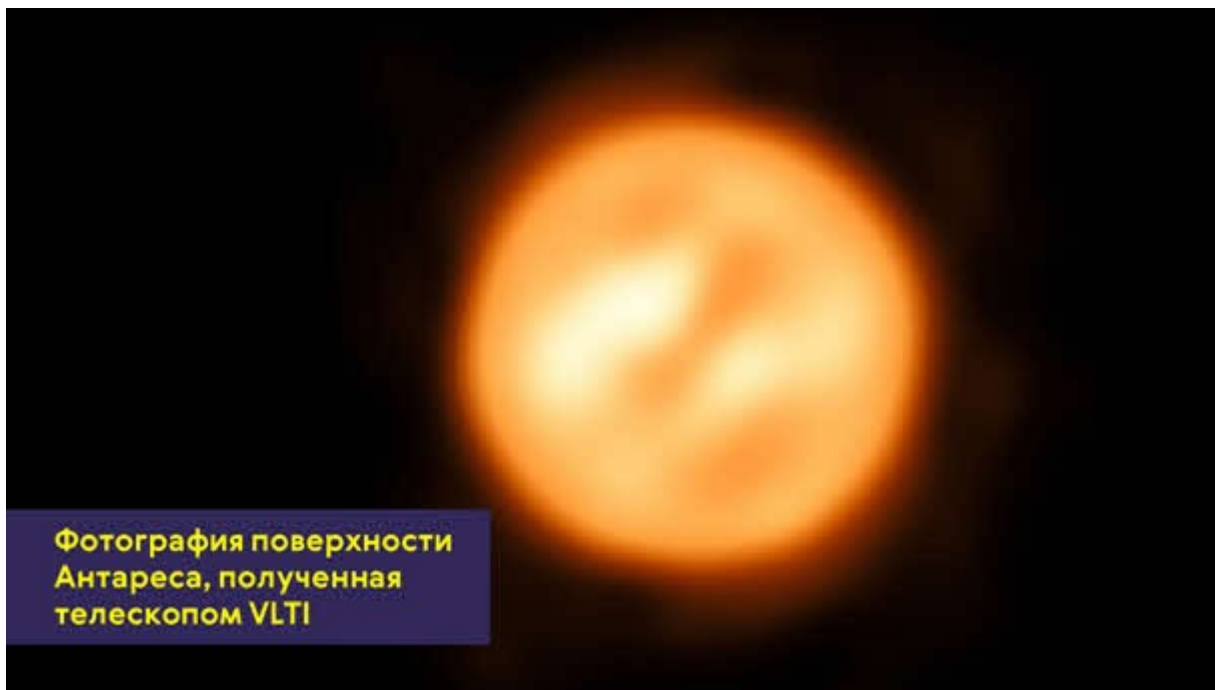


Конспект урока "Размеры и модели звёзд"

Обнаружение физических двойных звёзд, то есть систем близко расположенных в пространстве звёзд, связанных силами тяготения и обращающихся около общего центра масс, позволило оценить их массы, используя третий обобщённый закон Кеплера.

Однако оставался нерешённым вопрос об определении размеров звёзд. Дело в том, что все звёзды расположены так далеко от нас, что за редким исключением даже в самые мощные телескопы они видны как точки. Лишь не так давно для некоторых очень крупных звёзд удалось получить изображения их дисков. На некоторых фотографиях иногда удаётся рассмотреть и пятна.



Для близких звёзд определить их линейный радиус можно по известным угловому радиусу и расстоянию до неё (или её годовому параллаксу):

$$R = D \sin \rho''.$$

$$R = \frac{\rho''}{p''} \text{ а. е.}$$

Но в большинстве случаев линейные радиусы звёзд принято выражать в радиусах Солнца. Если учесть, что 1 а. е. в радиусах Солнца равна $149,6 \cdot 10^6 \text{ км} : 0,696 \cdot 10^6 \text{ км} = 215$, то получим формулу для определения линейных радиусов звёзд в радиусах Солнца:

$$R = 215 \frac{\rho''}{p''}.$$

Для примера давайте с вами определим размер ϵ Ориона, если её угловой диаметр равен $0,00072''$, а годичный параллакс — $0,0024''$.

ДАНО**РЕШЕНИЕ**

$$d = 0,00072''$$

$$p = 0,0024''$$

$$R = ?$$

$$\text{Линейный радиус звезды (в } R_{\odot}\text{): } R = 215 \frac{\rho''}{p''}.$$

$$\text{Угловой радиус звезды: } \rho'' = \frac{d''}{2}.$$

$$\text{Тогда } R = 215 \frac{d''}{2p''}.$$

$$R = 215 \frac{0,00072''}{2 \cdot 0,0024''} = 215 \cdot 0,15 \cong 32$$

**ε Ориона****ОТВЕТ:** радиус ε Ориона в 32 раза больше радиуса Солнца.

Мы рассмотрели самый простой способ определения размеров звёзд. Но в большинстве случаев радиусы далёких звёзд приходится рассчитывать на основе данных об их светимости и температуре. Светимость звезды определяется по той же формуле, по которой можно найти светимость нашего Солнца:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \text{ и } L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4.$$

Разделим первое уравнение на второе:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \frac{4\pi R^2 \sigma T^4}{4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4}.$$

И упростим его:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \frac{R^2 T^4}{R_{\odot}^2 T_{\odot}^4}.$$

Теперь примем, что радиус Солнца и его светимость равны единице, и перепишем предыдущее уравнение с учётом этих условий:

$$L = R^2 \frac{T^4}{T_{\odot}^4}.$$

Из полученного соотношения легко выразить линейный радиус звезды в линейных радиусах Солнца:

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

Давайте для примера рассчитаем радиус одной из самых больших из известных звёзд, если температура её фотосферы составляет порядка 3500 К, а светимость в 270 000 раз больше светимости Солнца. Для простоты расчётов примем, что температура фотосферы Солнца равна 6000 К.

ДАНО

$$T = 3500 \text{ К}$$

$$L = 2,7 \cdot 10^5 L_{\odot}$$

$$T_{\odot} = 6000 \text{ К}$$

$$R = ?$$

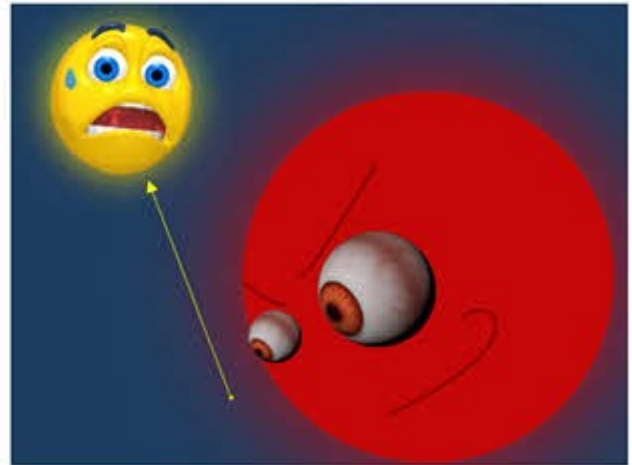
РЕШЕНИЕ

Линейный радиус звезды:

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

$$R = \sqrt{\frac{2,7 \cdot 10^5 L_{\odot}}{L_{\odot}} \cdot \frac{6000^2}{3500^2}} \cong$$

$$\cong 519,615 \cdot 2,938 \cong 1527$$

ОТВЕТ: радиус VY Большого Пса равен $1527 R_{\odot}$.

Чтобы понять, насколько она огромна, представьте, что если её разместить в центре Солнечной системы, то она закроет орбиту Сатурна. Свету, чтобы облететь один раз вокруг звезды, потребовалось бы около 8 часов. А сверхзвуковому самолёту при скорости в 4500 км/ч на это понадобилось бы около 220 лет.

Есть во Вселенной и маленькие звёзды. Так, размеры белых карликов сравнимы с размерами нашей планеты. А радиусы нейтронных звёзд достигают всего нескольких десятков километров. Например, у нейтронной звезды PSR J1614-2230, обнаруженной в 2006 году, радиус составляет всего 13 километров.



Но её масса в 1,97 раза больше массы Солнца. Давайте оценим плотность вещества этой звезды. Для простоты расчётов будем считать, что масса Солнца равна $2 \cdot 10^{30}$ килограммам.

ДАНО

$R = 13 \text{ км}$

$M = 2M_{\odot}$

$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

$\rho = ?$

РЕШЕНИЕ

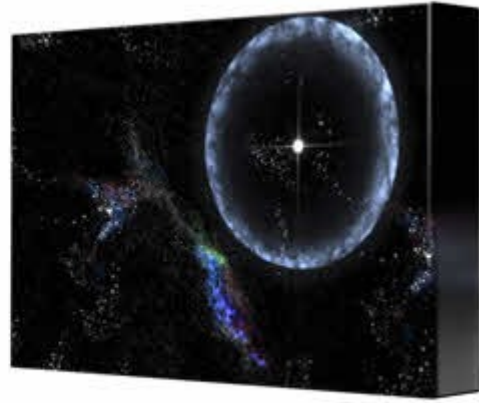
Плотность вещества звезды:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{3}{4} \cdot \frac{2M_{\odot}}{\pi R^3}$$

$$\text{Объём звезды: } V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$\rho = \frac{3}{4} \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{30}}{3,14 \cdot (13 \cdot 10^3)^3} =$$

$$= \frac{12 \cdot 10^{30}}{27\,594,32 \cdot 10^9} \cong 4,3 \cdot 10^{26} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

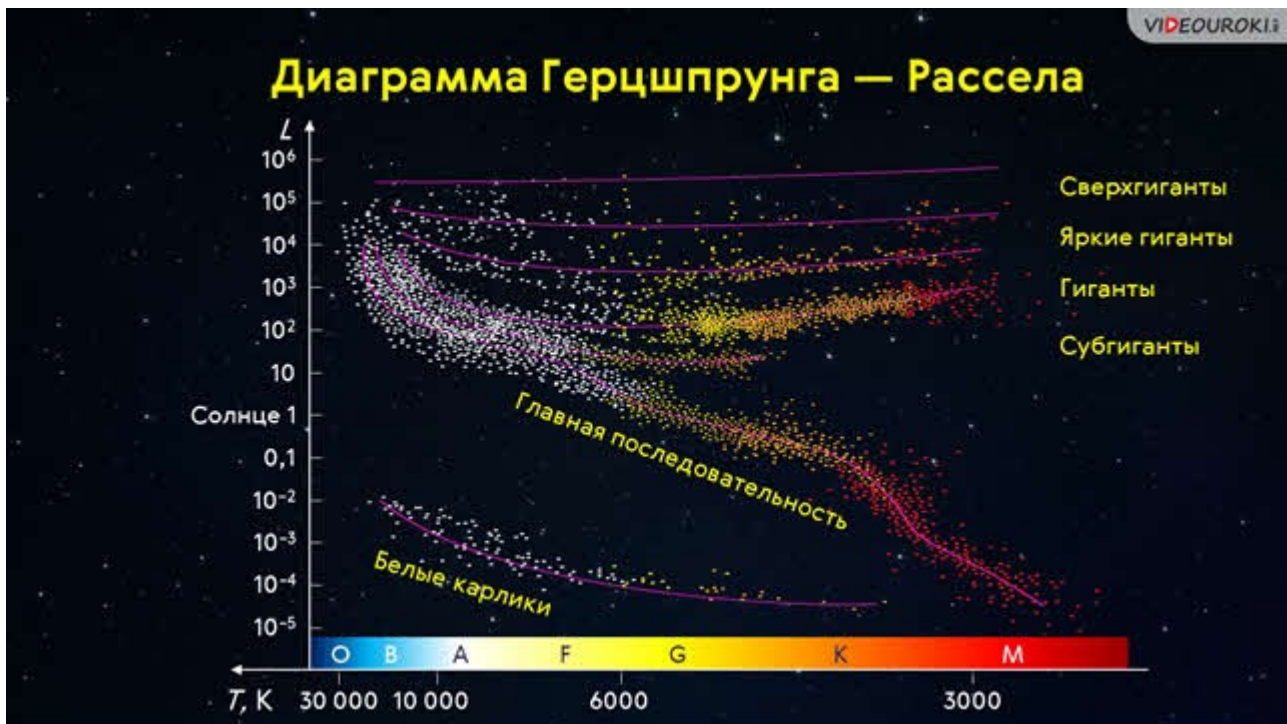


ОТВЕТ: плотность вещества нейтронной звезды PSR J1614-2230 составляет $4,3 \cdot 10^{26} \text{ кг/м}^3$.

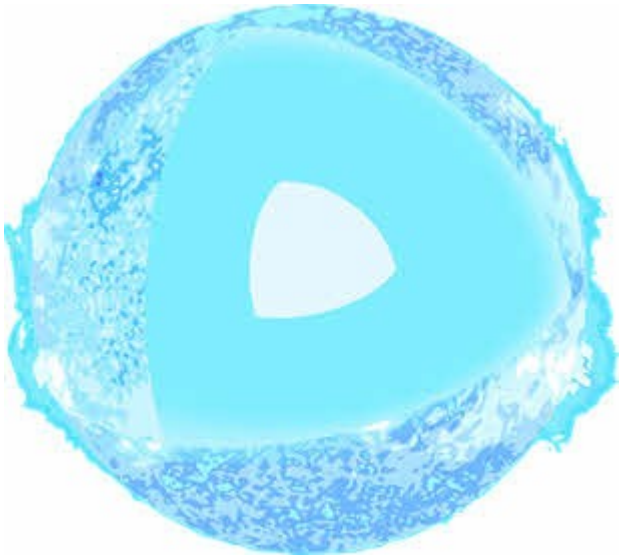
Для сравнения средняя плотность вещества в тяжёлых атомных ядрах составляет около $2,8 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$.

Расчёты средней плотности звёзд различных типов, проведённые на основе имеющихся данных об их массе и размерах, показывают, что она может значительно отличаться. Так, например, средняя плотность нашего гипергиганта из предыдущей задачи составляет всего около 10^{-5} кг/м^3 , то есть она примерно в 100 000 раз меньше плотности воздуха при нормальных условиях.

В зависимости от массы и размеров звёзды различаются по внутреннему строению, хотя все они имеют примерно одинаковый химический состав.

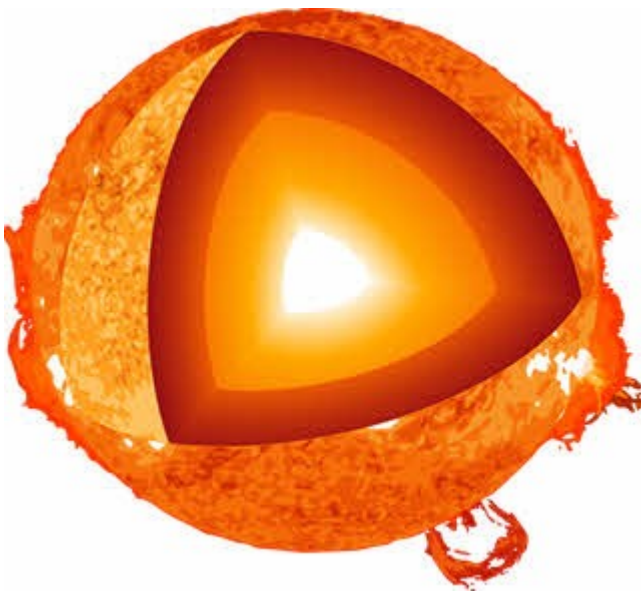


Итак, взглянем на диаграмму спектр — светимости. Как мы помним, в верхней части главной последовательности располагаются горячие массивные звёзды. Возьмём, к примеру, звезду, масса которой примерно в 10 раз больше массы Солнца, а светимость превышает солнечную в 3000 раз.



Расчёты показывают, что в центре такой звезды располагается конвективное ядро, размером примерно в 0,2 радиуса звезды. Оставшуюся же часть звезды занимает лучистая оболочка, где перенос энергии осуществляется посредством излучения. Такая звезда примерно на 90 % состоит из водорода и на 9 % из гелия. Согласитесь, что такая звезда устроена достаточно просто. А основным источником её энергии является углеродный цикл, в котором происходит превращение водорода в гелий под действием трёх катализаторов: углерода, азота и кислорода.

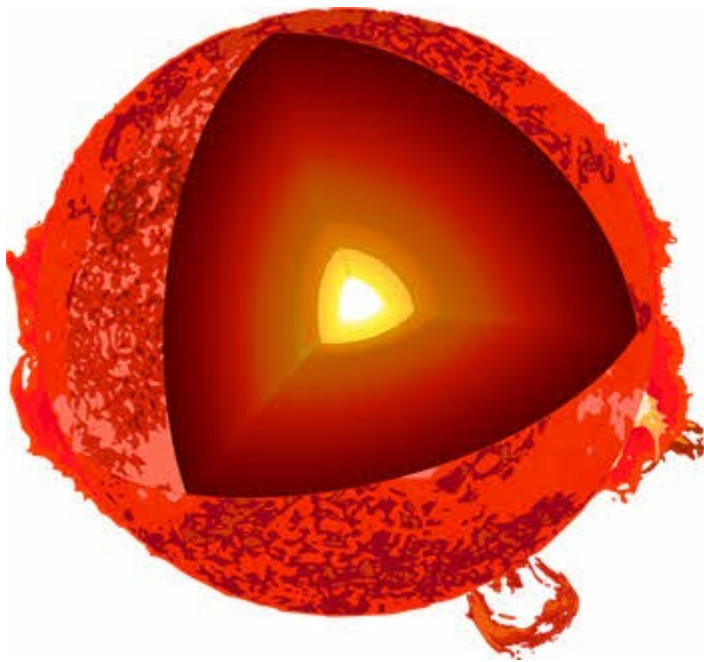
Посмотрим теперь, что представляют собой звезды, расположенные на нижней части главной последовательности.



Ну, во-первых, у этих звёзд нет конвективного ядра, но есть внешняя конвективная зона. Она начинается на расстоянии примерно в 0,65 полного радиуса звезды и продолжается практически до самой её поверхности. Источником энергии таких звёзд является известный нам протон-протонный цикл.

Переместимся в верхний правый угол диаграммы. Как мы помним, здесь располагаются очень массивные звёзды. Для примера рассмотрим гиганта, радиус которого примерно в 20

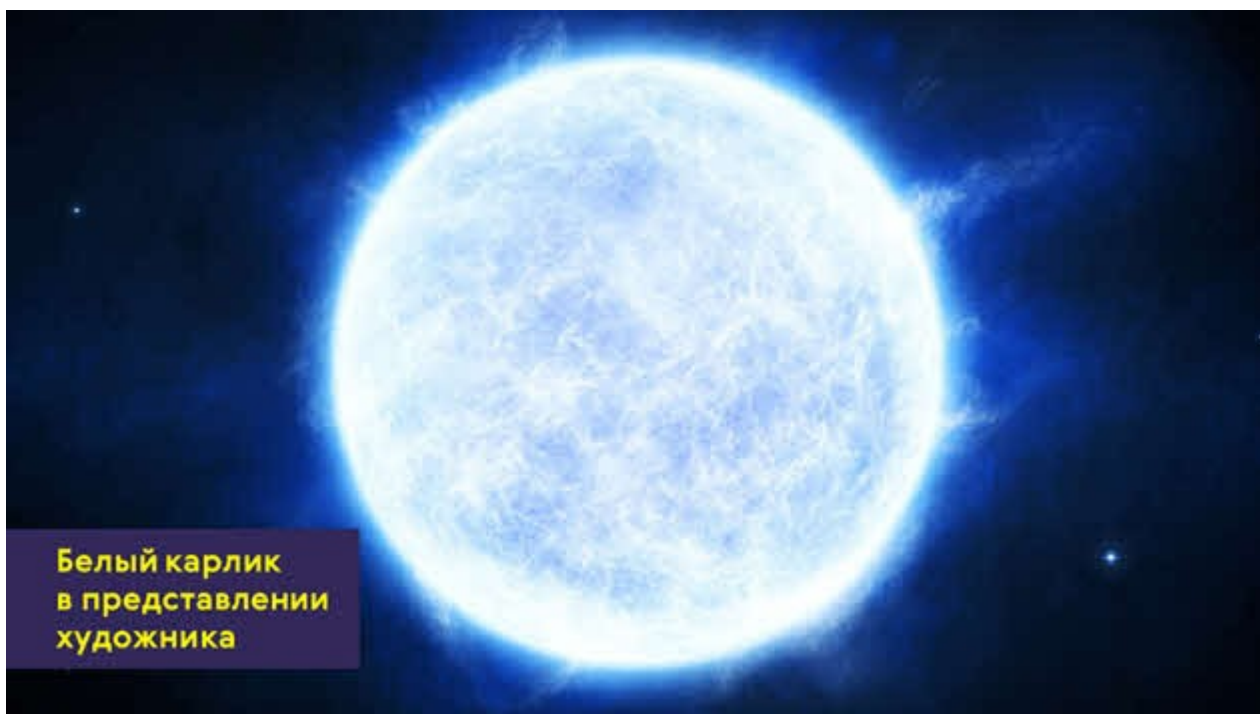
раз больше радиуса Солнца. Пусть масса гиганта лишь слегка превышает массу Солнца ($1,3M_{\odot}$), а его светимость будет больше светимости Солнца в 230 раз.



При расчётах структуры такой звезды выяснилась удивительная вещь: в центре звезды нет водорода, он весь выгорел. Там находится маленькое ядро ($0,001R$), почти целиком состоящее из гелия. Как следствие, в ядре таких звёзд термоядерные реакции не идут, а его температура остаётся постоянной. Поэтому ядро называется **изотермическим**. Его окружает тонкий энерговыделяющий слой, в котором происходят термоядерные реакции углеродного цикла. Далее идёт слой, в котором энергия переносится излучением. Его толщина составляет примерно $1/5$ радиуса звезды. А далее идут наружные слои гиганта, охваченные бурной конвекцией. Эти слои содержат около 70 % массы всей звезды. Но тогда мы приходим к удивительному выводу: маленькое ядро гиганта весит почти одну третью его часть. А чайная ложка вещества ядра весит почти тонну.

Возникает закономерный вопрос: неужели вещество ядра красного гиганта можно считать газом?

Ответ однозначен: «Да». Но газ этот особенный, и, чтобы объяснить все его свойства, мы должны рассмотреть строение белых карликов. Их светимость очень мала (иногда в тысячу раз меньше светимости Солнца). В то же время их масса сравнима с массой Солнца, а размеры — с размерами планет.



Это приводит к тому, что средняя плотность вещества белых карликов (10^5 — 10^9 г/см³), что почти в миллион раз выше плотности звёзд главной последовательности. Но что же это такое? Быть может, вещество белых карликов — это жидкость или твёрдое тело?

Нет. Плотность жидкости или твёрдого тела не может превышать 20 г/см³. При такой плотности атомы вещества уже предельно тесно расположены друг к другу. Из этого следует, что внутри белого карлика нет атомов! А вещество представляет собой очень плотный ионизированный газ, состоящий из атомных ядер и отдельных электронов. Такой газ называется **вырожденным электронным газом**. Его давление определяется только плотностью и не зависит от температуры. Снаружи белый карлик покрыт тонкой оболочкой идеального газа.

На одном из прошлых уроков мы с вами говорили о том, что в 1995 году были открыты коричневые карлики, являющиеся промежуточным звеном между звёздами и планетами. Они обладают слишком малой массой, что не обеспечивает температуры, необходимой для протекания термоядерных реакций в его недрах. Про них говорят, что они ещё не звёзды, но уже и не планеты.

Понять, как связаны между собой различные типы звёзд, как они возникают и как происходит их эволюция, оказалось возможным только на основе изучения всей совокупности звёзд, образующих огромные звёздные системы — **галактики**. Но о них мы с вами поговорим в одном из следующих уроков.