

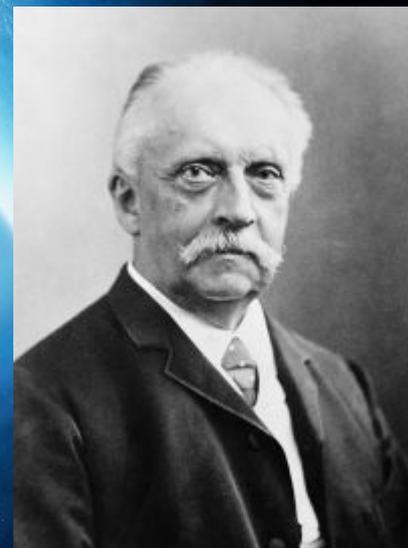


ЗВЕЗДЫ

Внутреннее строение звезд

Источники энергии звезд

- Если бы Солнце состояло из каменного угля и источником его энергии было горение, то для поддержания нынешнего уровня излучения энергии Солнце бы полностью сгорело за 5000 лет. Но Солнце светит уже миллиарды лет!
- Вопрос об источниках энергии звезд был затронут еще Ньютоном. Он предполагал, что звезды восполняют запас энергии за счет падающих комет.
- В 1845г. нем. Физик Роберт Мейер (1814-1878) попытался доказать, что Солнце светит за счет энергии на него межзвездного вещества.
- 1954г. Герман Гельмгольц высказал предположение, что Солнце излучает часть энергии, освобождающейся при его медленном сжатии. Из простых расчетов можно узнать, что Солнце полностью исчезло бы за 23 млн. лет, а это слишком мало. Кстати, этот источник энергии в принципе имеет место до выхода звезд на главную последовательность.

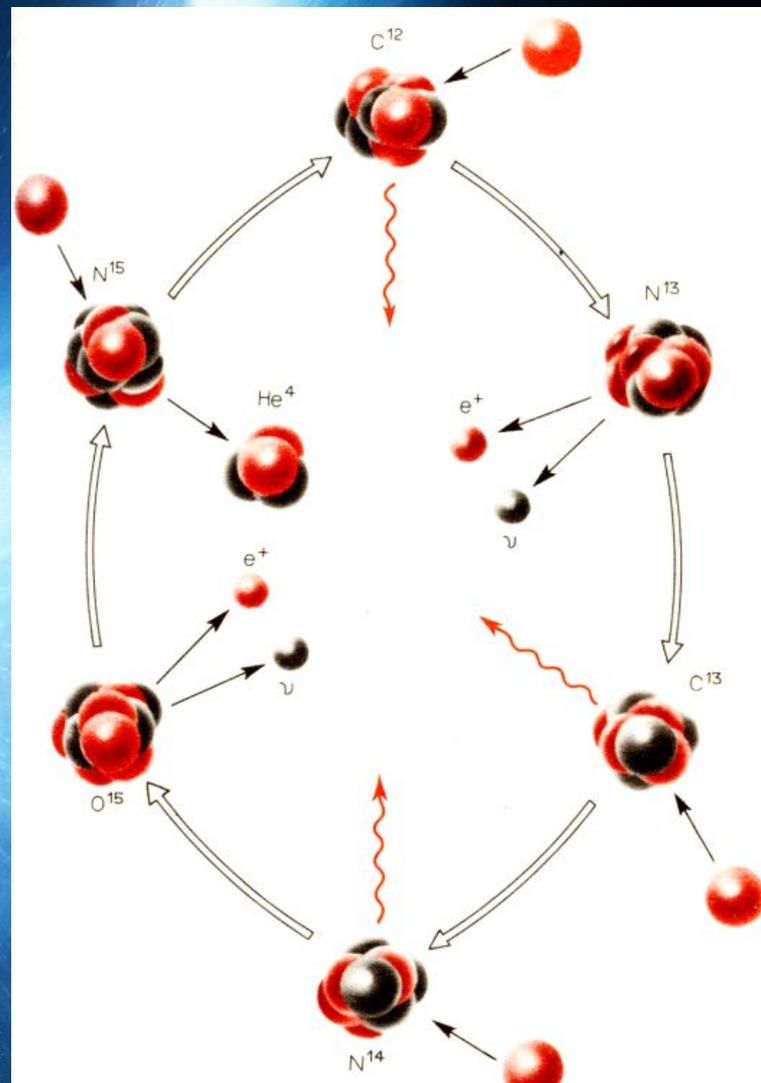
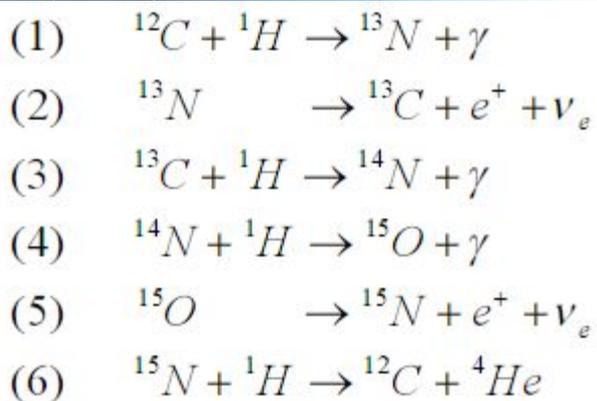


Герман Гельмгольц
(1821-1894г.)

Внутреннее строение звезд

Источники энергии звезд

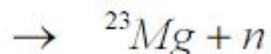
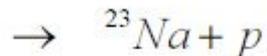
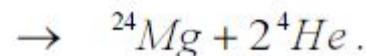
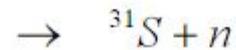
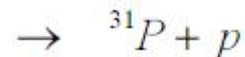
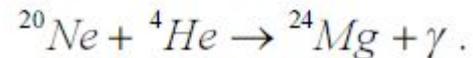
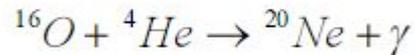
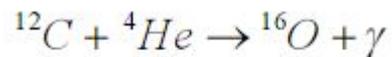
- При больших температурах и массах более 1,5 массы Солнца доминирует углеродный цикл (CNO). Реакция (4) самая медленная – для нее требуется около 1 млн. лет. При этом выделяется чуть меньше энергии, т.к. больше ее уносится нейтрино.
- Этот цикл в 1938г. Независимо разработали Ганс Бете и Карл Фридрих фон Вейцзекер.



Внутреннее строение звезд

Источники энергии звезд

- Когда горение гелия в недрах звезд заканчивается, при более высоких температурах становятся возможными другие реакции, в которых синтезируются более тяжелые элементы, вплоть до железа и никеля. Это α-реакции, углеродное горение, кислородное горение, кремниевое горение...



- Таким образом, Солнце и планеты образовались из «пепла» давно вспыхнувших сверхновых звезд.

Внутреннее строение звезд

Модели строения звезд

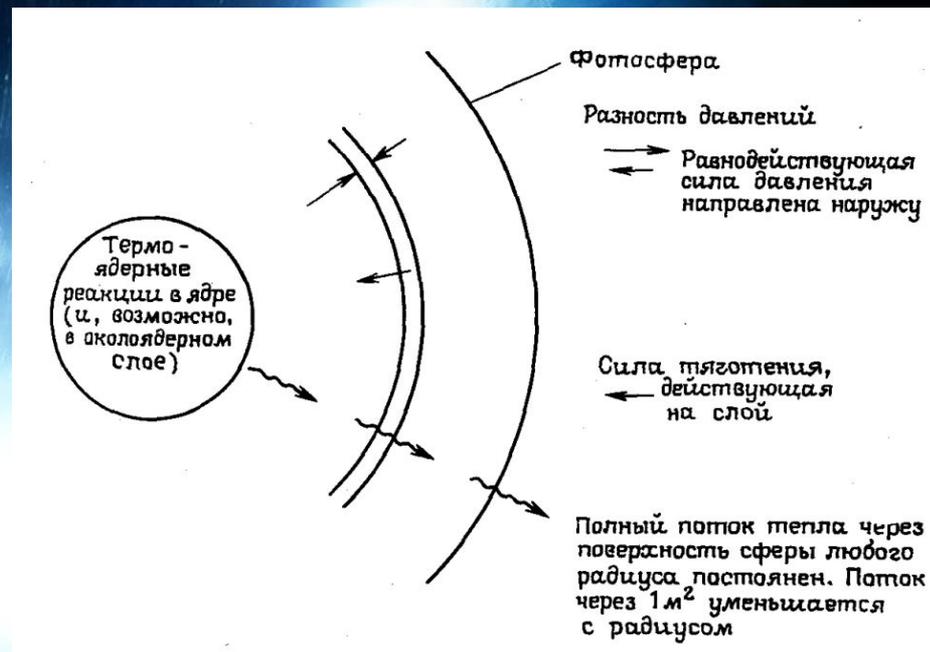
- В 1926г. была опубликована книга Артура Эддингтона «Внутреннее строение звезд», с которой, можно сказать, началось изучение внутреннего строения звезд.
- Эддингтон сделал предположение о равновесном состоянии звезд главной последовательности, т.е., о равенстве потока энергии, генерируемого в недрах звезды, и энергии, излучаемой с ее поверхности.
- Эддингтон не представлял источник энергии, но совершенно правильно помещал источник в самую горячую часть звезды – ее центр и предположил, что большое время диффузии энергии (миллионы лет) будет выравнивать все изменения, кроме тех, что проявляются вблизи поверхности.



Внутреннее строение звезд

Модели строения звезд

- Равновесие налагает на звезду жесткие ограничения, т.е., придя в состояние равновесия, звезда будет иметь строго определенное строение. В каждой точке звезды должен соблюдаться баланс сил гравитации, теплового давления, давления излучения и др. Также градиент температуры должен быть таким, чтобы тепловой поток наружу строго соответствовал наблюдаемому потоку излучения с поверхности.
- Все эти условия можно записать в виде математических уравнений (не менее 7), решение которых возможно только численными методами.



Внутреннее строение звезд

Модели строения звезд

Механическое (гидростатическое) равновесие

Сила, обусловленная разностью давлений, направленная от центра, должна быть равна силе тяготения.

$$dP/dr = -\rho M(r)G/r^2,$$

где P -давление, ρ -плотность, $M(r)$ – масса в пределах сферы радиуса r .

Энергетическое равновесие

Прирост светимости за счет источников энергии, содержащихся в слое толщиной dr на расстоянии от центра r , вычисляется по формуле

$$dL/dr = 4\pi r^2 \rho \epsilon(r),$$

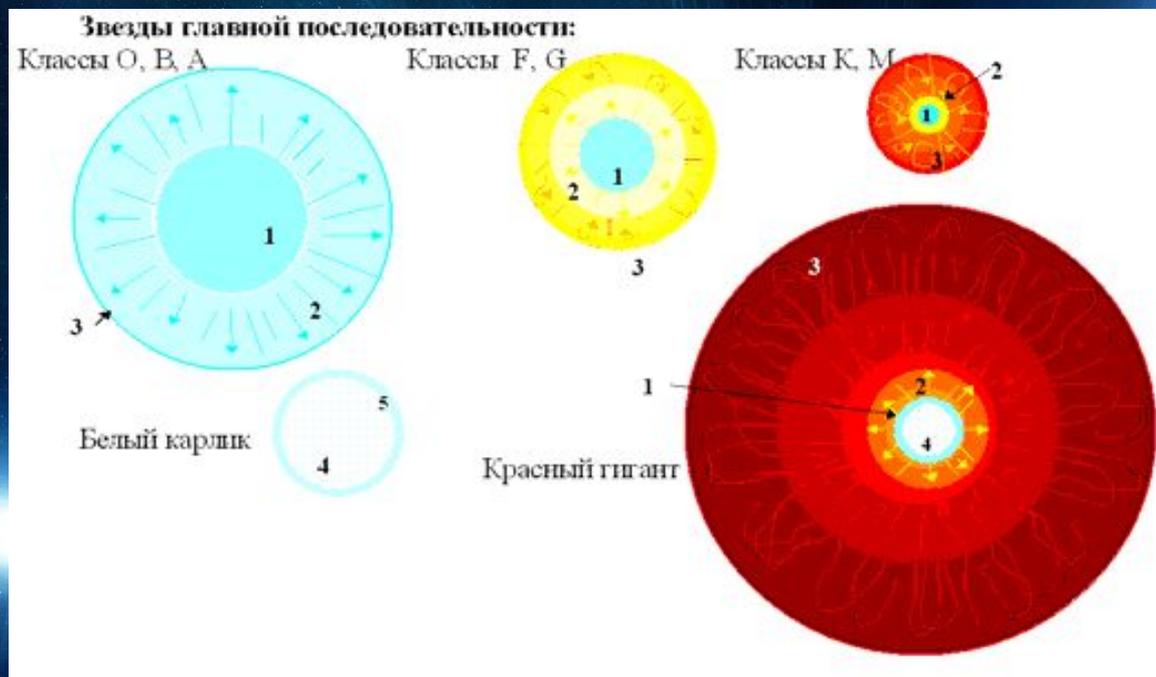
где L -светимость, $\epsilon(r)$ – удельное энерговыделение ядерных реакций.

Тепловое равновесие

Разность температур на внутренних и внешних границах слоя должна быть постоянна, причем, внутренние слои должны быть горячее.

Внутреннее строение звезд

Внутреннее строение звезд



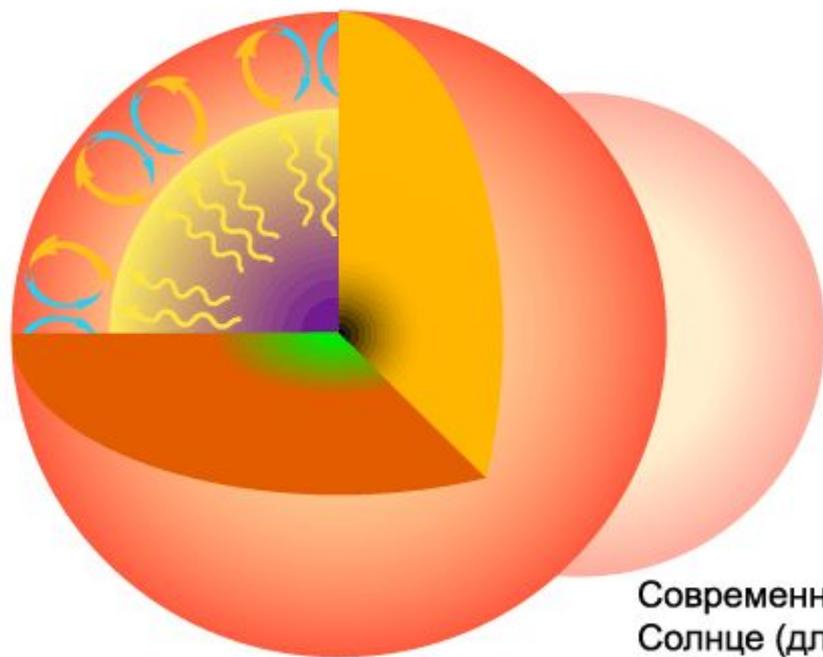
1. Ядро звезды (зона термоядерных реакций).
2. Зона лучистого переноса выделяющейся в ядре энергии внешним слоям звезды.
3. Зона конвекции (конвективного перемешивания вещества).
4. Гелиевое изотермическое ядро из вырожденного электронного газа.
5. Оболочка из идеального газа.

Внутреннее строение звезд

Строение звезд до солнечной массы

- Звезды с массой меньше $0,3$ солнечной являются полностью конвективными, что связано с их низкими температурами и высокими значениями коэффициента поглощения.
- Звезды солнечной массы в ядре осуществляется лучистый перенос, тогда как во внешних слоях – конвективный.
- Причем, масса конвективной оболочки быстро уменьшается при движении вверх по главной последовательности.

Солнце в конце главной последовательности



Современное Солнце (для сравнения)

Внутреннее строение звезд

Конвективные зоны в звездах ГП

M/M_{sun}	L/L_{sun}	T_{eff}	R_*/R_{sun}	$R_{\text{кз}}/R_*$
0.5	0.0456	3956	0.457	0.56 (оболочка)
1	1	5770	1	0.71 (оболочка)
1.25	2.19	6250	1.27	0.06 (ядро) 0.92 (оболочка)
5	500	16500	2.75	0.16 (ядро)
50	316000	45500	9.34	0.4 (ядро)
50	316000	45500	9.34	0.4 (ядро)

Внутреннее строение звезд

Строение вырожденных звезд

- Давление в белых карликах достигает сотен килограммов на кубический сантиметр, а у пульсаров – на несколько порядков выше.
- При таких плотностях поведение резко отличается от поведения идеального газа. Перестает действовать газовый закон Менделеева-Клапейрона – давление уже не зависит от температуры, а определяется только плотностью. Это состояние вырожденного вещества.
- Поведение вырожденного газа, состоящего из электронов, протонов и нейтронов, подчиняется квантовым законам, в частности, принципу запрета Паули. Он утверждает, что в одном и том же состоянии не может находиться больше двух частиц, причем их спины направлены противоположно.
- У белых карликов число этих возможных состояний ограничено, сила тяжести пытается втиснуть электроны в уже занятые места. При этом возникает специфическая сила противодействия давлению. При этом, $p \sim \rho^{5/3}$.
- При этом, электроны имеют высокие скорости движения, а вырожденный газ имеет высокую прозрачность вследствие занятости всех возможных энергетических уровней и невозможности процесса поглощения-переизлучения.

Внутреннее строение звезд

Строение нейтронной звезды

- При плотностях выше 10^{10} г/см³ происходит процесс нейтронизации вещества, реакции $p + e \rightarrow n + \nu$
- В 1934г Фрицем Цвикки и Вальтером Баарде теоретически было предсказано существование нейтронных звезд, равновесие которых поддерживается давлением нейтронного газа.
- Масса нейтронной звезды не может быть меньше $0,1M_{\odot}$ и больше $3M_{\odot}$. Плотность в центре нейтронной звезды достигает значений 10^{15} г/см³. Температура в недрах такой звезды измеряется сотнями миллионов градусов. Размеры нейтронных звезд не превышают десятков км. Магнитное поле на поверхности нейтронных звезд (в млн. раз больше земного) является источником радиоизлучения.
- На поверхности нейтронной звезды вещество должно обладать свойствами твердого тела, т.е., нейтронные звезды окружены твердой корой толщиной несколько сотен метров.

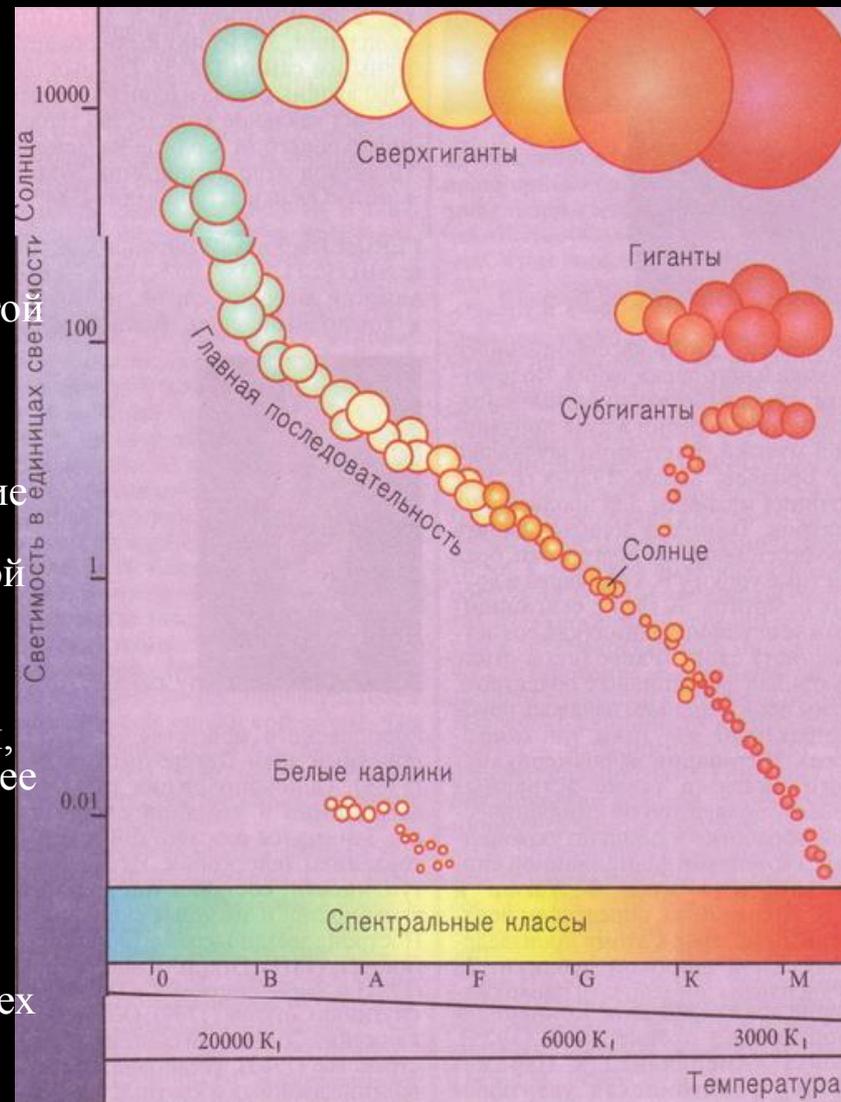


Диаграмма «спектр — светимость»

В самом начале XX в. датский астроном Герцшпрунг и несколько позже американский астрофизик Рассел установили существование зависимости между видом спектра (т.е. температурой) и светимостью звезд. Эта зависимость иллюстрируется графиком, по одной оси которого откладывается спектральный класс, а по другой — абсолютная звездная величина. Такой график называется *диаграммой спектр — светимость* или *диаграммой Герцшпрунга — Рассела*

В верхней части диаграммы находятся звезды, обладающие наибольшей светимостью (*гиганты* и *сверхгиганты*) Звезды в нижней половине диаграммы обладают низкой светимостью и называются *карликами*. Наиболее богатую звездами диагональ, идущую слева вниз направо, называют *главной последовательностью*. Вдоль нее расположены звезды, начиная от самых горячих (в верхней части) до наиболее холодных (в нижней).

Как видно в целом звезды распределяются на диаграмме Герцшпрунга — Рассела весьма неравномерно, что соответствует существованию определенной зависимости между светимостями и температурами всех звезд. Наиболее четко это выражено для звезд главной последовательности.



Главная последовательность

Главная последовательность — область на диаграмме *Герцшпрунга — Рессела*, содержащая звёзды, источником энергии которых является термоядерная реакция синтеза гелия из водорода. К звездам главной последовательности относится наше Солнце. Плотности звезд главной последовательности сравнимы с солнечной плотностью



Солнце

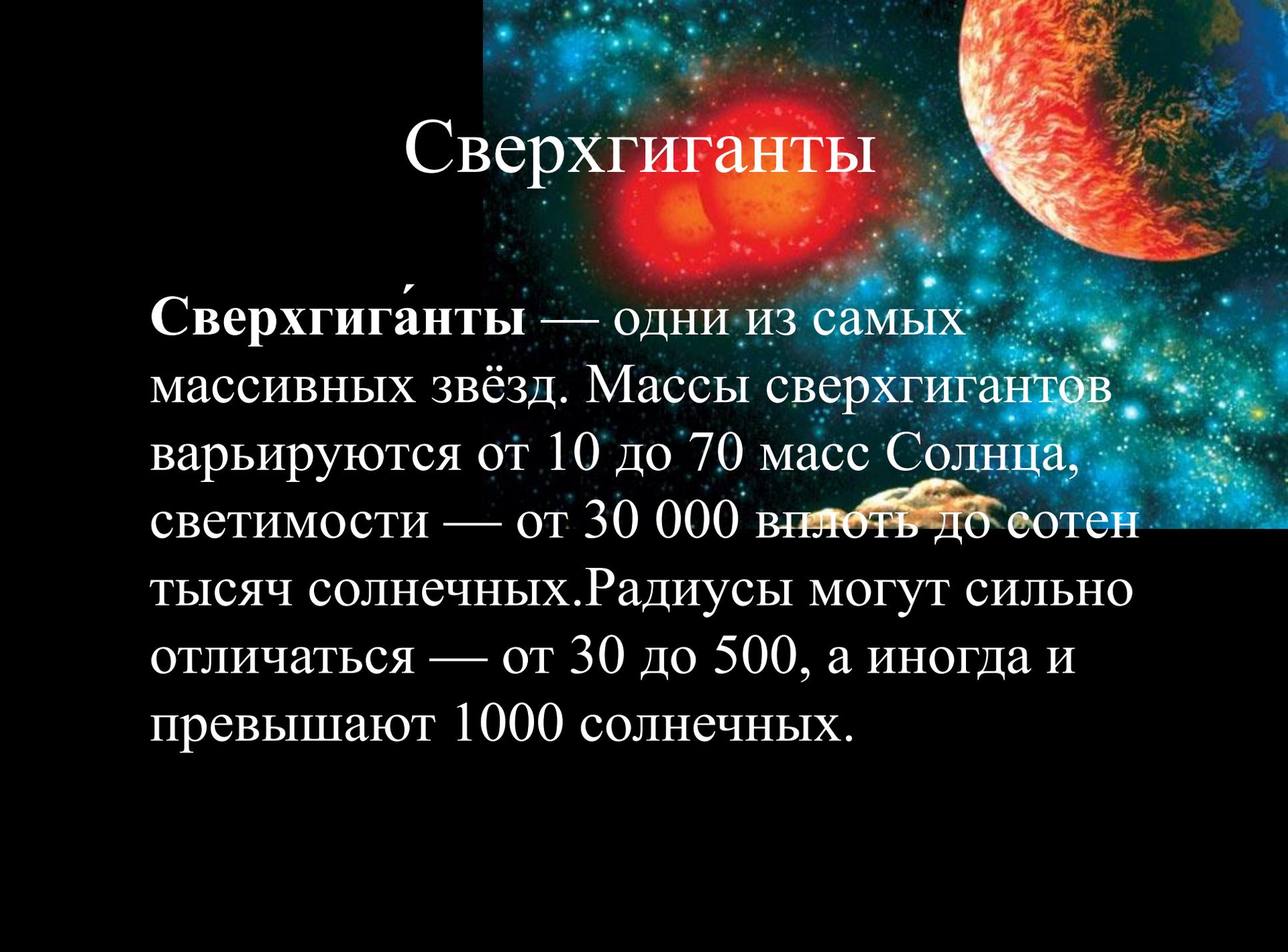
Красные гиганты

Красный сверхгигант
Бетельгейзе

К этой группе в основном относятся звезды с радиусами, в десятки раз превышающими солнечный радиус.



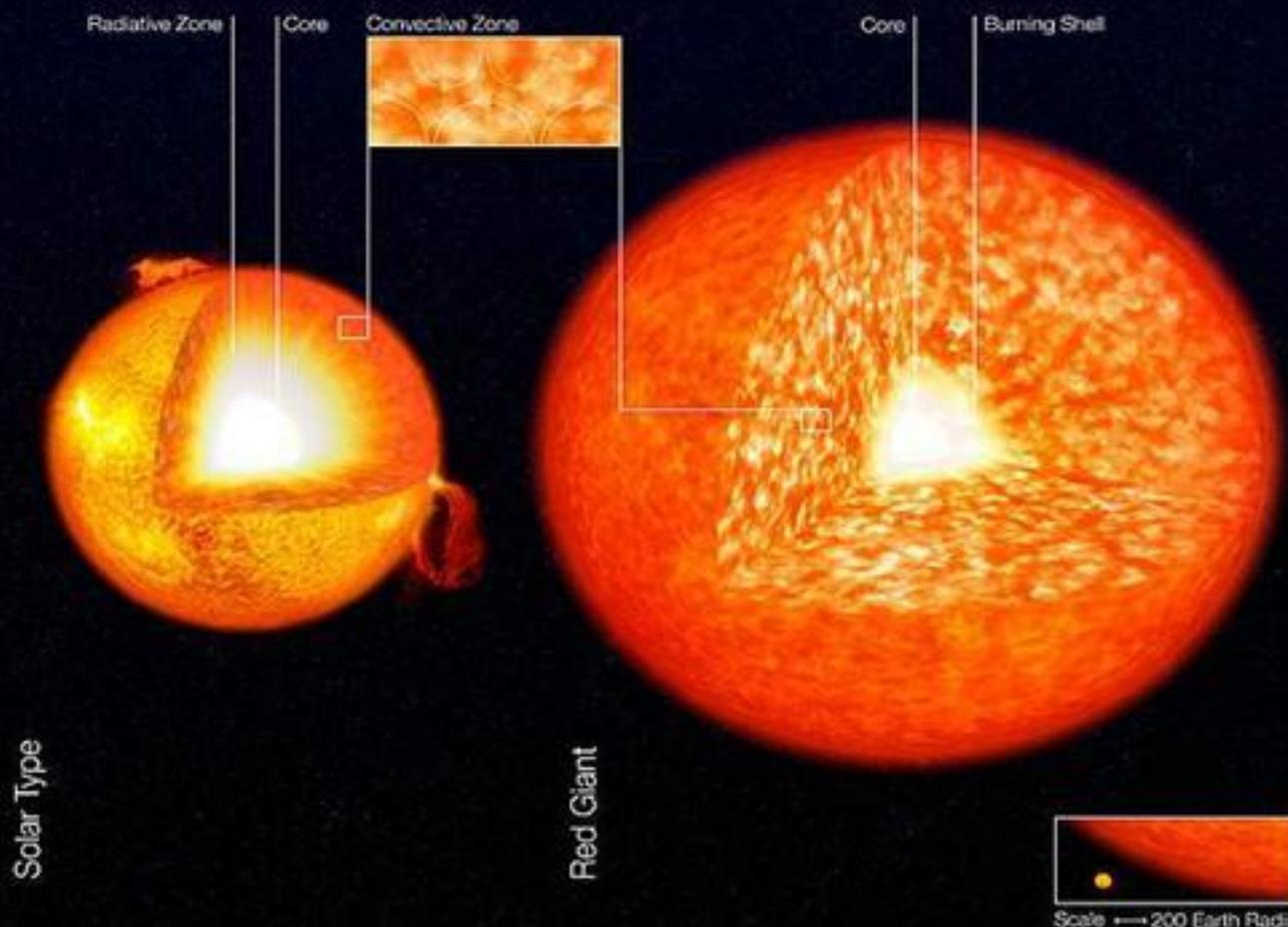
Сверхгиганты

The background of the slide is a vibrant cosmic scene. It features a large, bright red star in the upper center, a smaller blue star to its right, and a large, detailed planet with orange and red clouds on the right side. The background is filled with numerous smaller stars and nebulae in shades of blue and green.

Сверхгиганты — одни из самых массивных звёзд. Массы сверхгигантов варьируются от 10 до 70 масс Солнца, светимости — от 30 000 вплоть до сотен тысяч солнечных. Радиусы могут сильно отличаться — от 30 до 500, а иногда и превышают 1000 солнечных.

Гиганты и сверхгиганты

- когда водород полностью выгорает, звезда уходит с главной последовательности в область **ГИГАНТОВ** или при больших массах - **сверхгигантов**



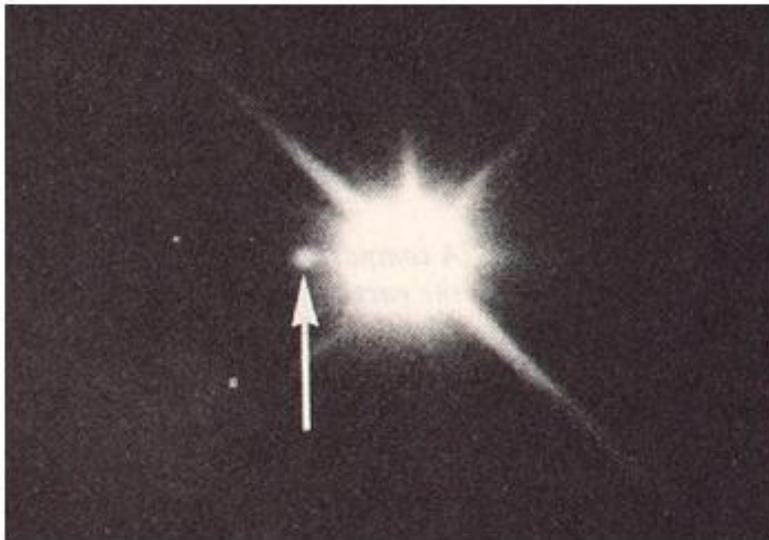
Белые карлики

Эта группа звезд в основном белого цвета, лишённые собственных источников термоядерной энергии. Белые карлики представляют собой компактные звёзды с массами, сравнимыми с массой Солнца, но с радиусами меньшими солнечной. По численности белые карлики составляют, по разным оценкам, 3—10% звёздного населения нашей Галактики.

ЗВЕЗДЫ

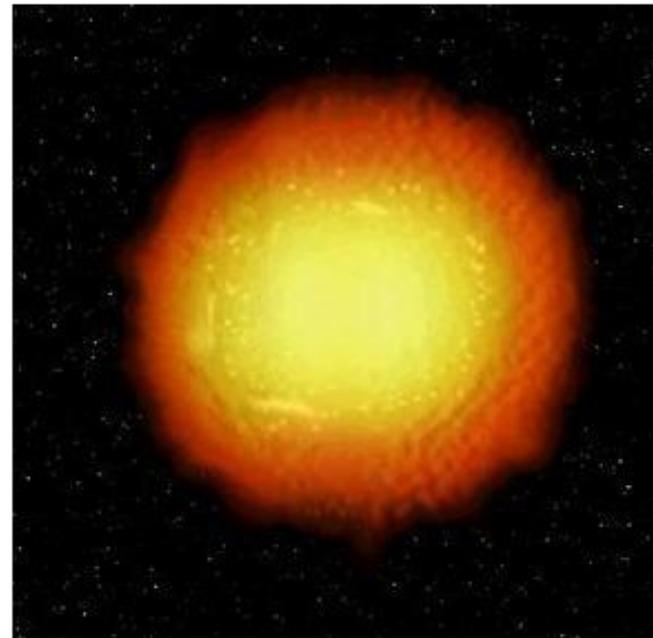
ЗВЕЗДЫ – ЭТО ОГРОМНЫЕ СГУСТКИ ПЛАМЕНИ, РАСКАЛЕННОГО ГАЗА И ПЛАЗМЫ. ОНИ ИЗЛУЧАЮТ СВЕТ И ТЕПЛО.

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ



Звезда Сириус и Белый Карлик
рядом с ней.

КРАСНЫЕ ГИГАНТЫ



Спектральная классификация ЗВЕЗД

Спектральный класс	Цвет	Температура, К	Особенности спектра	Типичные звезды
W	Голубой	80 000	Излучения в линиях гелия, азота, кислорода	γ Парусов
O	Голубой	40 000	Интенсивные линии ионизированного гелия, линий металлов нет	Минтака
B	Голубовато-белый	20 000	Линии нейтрального гелия. Слабые линии H и K ионизованного кальция	Слика
A	Белый	10 000	Линии водорода достигают наибольшей интенсивности. Видны линии H и K ионизованного кальция, слабые линии металлов	Сириус, Вега
F	Желтоватый	7 000	Ионизированные металлы. Линии водорода ослабевают	Процион, Канопус
G	Желтый	6 000	Нейтральные металлы, интенсивные линии ионизованного кальция K и H	Солнце, Капелла
K	Оранжевый	4 500	Линий водорода почти нет. Присутствуют слабые полосы окиси титана. Многочисленные линии металлов	Арктур, Альдебаран
M	Красный	3 000	Сильные полосы окиси титана и других молекулярных соединений	Антарес, Бетельгейзе
L	Темно-красный	2 000	Сильные полосы SrH, рубидия, цезия	Kelu-1
T	"Коричневый карлик"	1 500	Интенсивные полосы поглощения воды, метана, молекулярного водорода	Gliese 229B

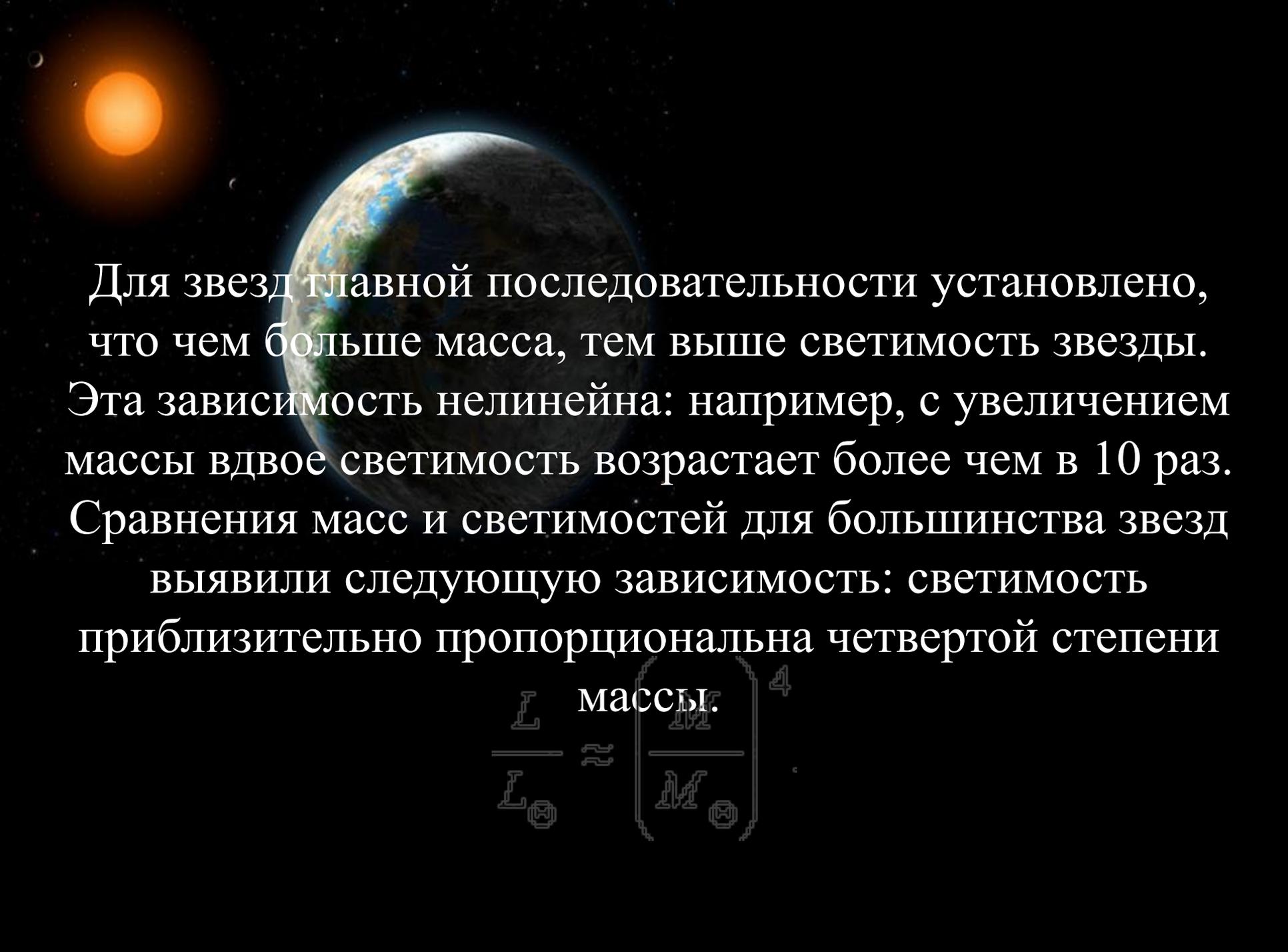
Массы звезд

Масса звезды – едва ли не самая важная ее характеристика. Масса определяет весь жизненный путь звезды.

Массу можно оценить для звезд, входящих в двойные звездные системы, если известны большая полуось орбиты a и период обращения T . В этом случае массы определяются из третьего закона Кеплера, который может быть записан в следующем виде:

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G}{a} \cdot \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}$$

здесь M_1 и M_2 – массы компонент системы, G – гравитационная постоянная



Для звезд главной последовательности установлено, что чем больше масса, тем выше светимость звезды. Эта зависимость нелинейна: например, с увеличением массы вдвое светимость возрастает более чем в 10 раз. Сравнения масс и светимостей для большинства звезд выявили следующую зависимость: светимость приблизительно пропорциональна четвертой степени

$$\frac{L}{L_{\odot}} \approx \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^4$$

массы.

Источники энергии Солнца и звезд.

Источник энергии Солнца - термоядерные реакции. Ядерные реакции с протонами для космоса - вещь обычная, так как водород - самый распространенный элемент во всей Вселенной. Таким образом, протоны не представляют дефицита, а роль ускорителей в космосе играют, в частности, недра звезд. Температура там столь велика, что часть протонов приобретает вполне достаточные для начала ядерных реакций скорости. Такие реакции, где для «активирования» протонов используется температура, называются *термоядерными*.



Солнце, по современным данным, существует уже около 5 млрд лет, так что ему ещё жить и жить!

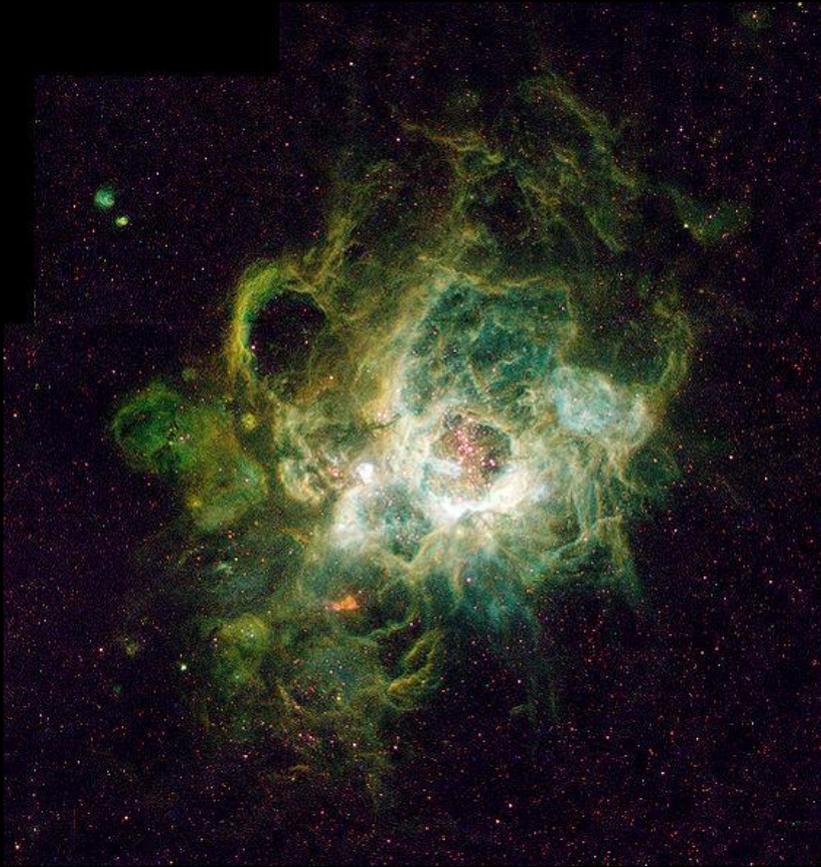
Определение спектров, цвета, температуры, светимости и масс звезд позволили классифицировать их по спектральным классом и светимостью звезд, а так же связь между их массой и светимостью.

Звездная эволюция.



Имеется большое количество аргументов, что звёзды образуются путём конденсации межзвёздной среды. Путём наблюдений удалось определить что звёзды возникали в разное время и возникают по сей день. Главной проблемой в эволюции звёзд является вопрос о возникновении их энергии, благодаря которой они светятся и излучают огромное количество энергии. Ранее выдвигалось много теорий, которые были призваны выявить источники энергии звёзд. Считали, что непрерывным источником звёздной энергии является непрерывное сжатие.

Звездная эволюция.



Этот источник конечно хорош, но не может поддерживать соответствующее излучение в течении долгого времени. В середине XX века был найден ответ на этот вопрос. Источником излучения является термоядерные реакции синтеза. В результате этих реакций водород превращается в гелий, а освобождающаяся энергия проходит сквозь недра Земли, трансформируется и излучается в мировое пространство. Астрономы не могут наблюдать жизнь одной звезды от начала до конца, потому что даже самые короткоживущие звезды существуют миллионы лет - дольше жизни всего человечества.



Изменение со временем физических характеристик и химического состава звезд, т.е. звездную эволюцию, астрономы изучают основе сопоставления характеристик множества звезд, находящихся на разных на стадиях эволюции. Физические закономерности, связывающие наблюдаемые характеристики звезд, отражаются на диаграмме цвет-светимость - диаграмме Герцшпрунга - Расселла, на которой звезды образуют отдельные группировки - последовательности: главную последовательность звезд, последовательности сверхгигантов, ярких и слабых гигантов, субгигантов, субкарликов и белых карликов.



Большую часть своей жизни любая звезда находится на так называемой главной последовательности диаграммы цвет-светимость. Все остальные стадии эволюции звезды до образования компактного остатка занимают не более 10% от этого времени. Именно поэтому большинство звезд, наблюдаемых в нашей Галактике, - скромные красные карлики с массой Солнца или меньше. Главная последовательность включает в себя около 90% всех наблюдаемых звезд. Срок жизни звезды и то, во что она превращается в конце жизненного пути, полностью определяется ее массой.



Звезды с массой больше солнечной живут гораздо меньше Солнца, а время жизни самых массивных звезд - всего миллионы лет. Для подавляющего большинства звезд время жизни - около 15 млрд. лет. После того как звезда исчерпает свои источники энергии она начинает остывать и сжиматься. Конечным продуктом эволюции звезд являются компактные массивные объекты, плотность которых во много раз больше, чем у обычных звезд. Звезды разной массы приходят в итоге к одному из трех состояний: белые карлики, нейтронные звезды или черные дыры.



darkness-lit.su

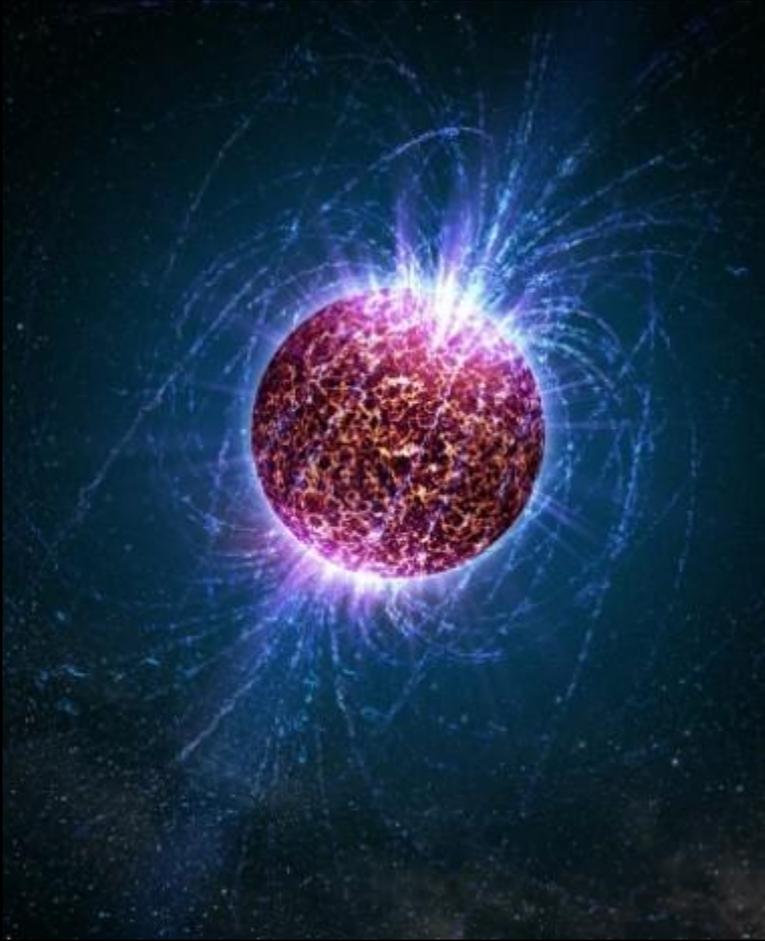
Если масса звезды невелика, то силы гравитации сравнительно слабы и сжатие звезды (гравитационный коллапс) прекращается. Она переходит в устойчивое состояние белого карлика. Если масса превышает критическое значение, сжатие продолжается. При очень высокой плотности электроны, соединяясь с протонами, образуют нейтроны. Вскоре уже почти вся звезда состоит из одних нейтронов и имеет такую громадную плотность, что огромная звездная масса сосредоточивается в очень небольшом шаре радиусом несколько километров и сжатие останавливается - образуется нейтронная звезда. Если же масса звезды будет настолько велика, что даже образование нейтронной звезды не остановит гравитационного коллапса, то конечным этапом эволюции звезды будет черная дыра.

Белые карлики.



Белые карлики - конечная стадия звездной эволюции после исчерпания термоядерных источников энергии звезд средней и малой массы. Они представляют собой очень плотные горячие звезды малых размеров из вырожденного газа. Ядерные реакции внутри белого карлика не идут, а свечение происходит за счет медленного остывания. Масса белых карликов не может превышать некоторого значения - это так называемый предел Чандрасекара, равны примерно 1,4 массы Солнца. Солнце в будущем - это белый карлик.

Нейтронные звезды.

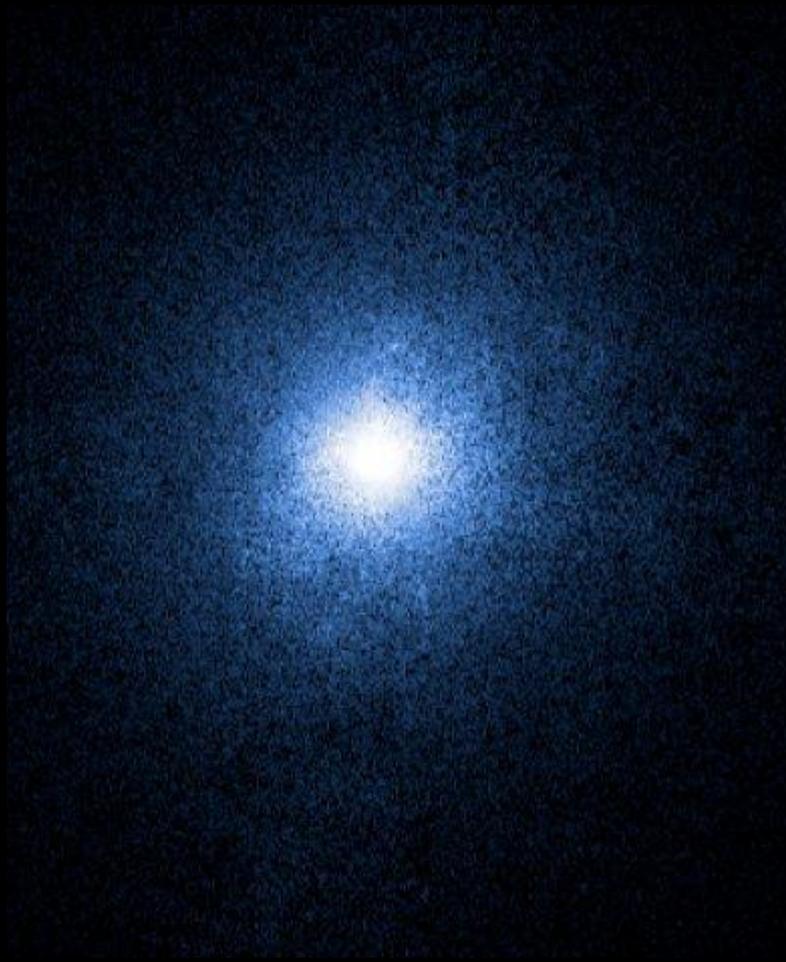


Нейтронная звезда - это конечное состояние эволюции звезд массой более десяти солнечных. Она представляет собой очень экзотический космический объект. Ее радиус - всего 10-20 км, а масса в 1,5-2 раза больше солнечной. Максимально возможная масса нейтронной звезды носит название предела Оппенгеймера-Волкова, который в любом случае не больше трех масс Солнца. Если масса нейтронной звезды превосходит это предельное значение, никакое давление вещества не может противодействовать силам гравитации звезда становится неустойчивой и быстро коллапсирует

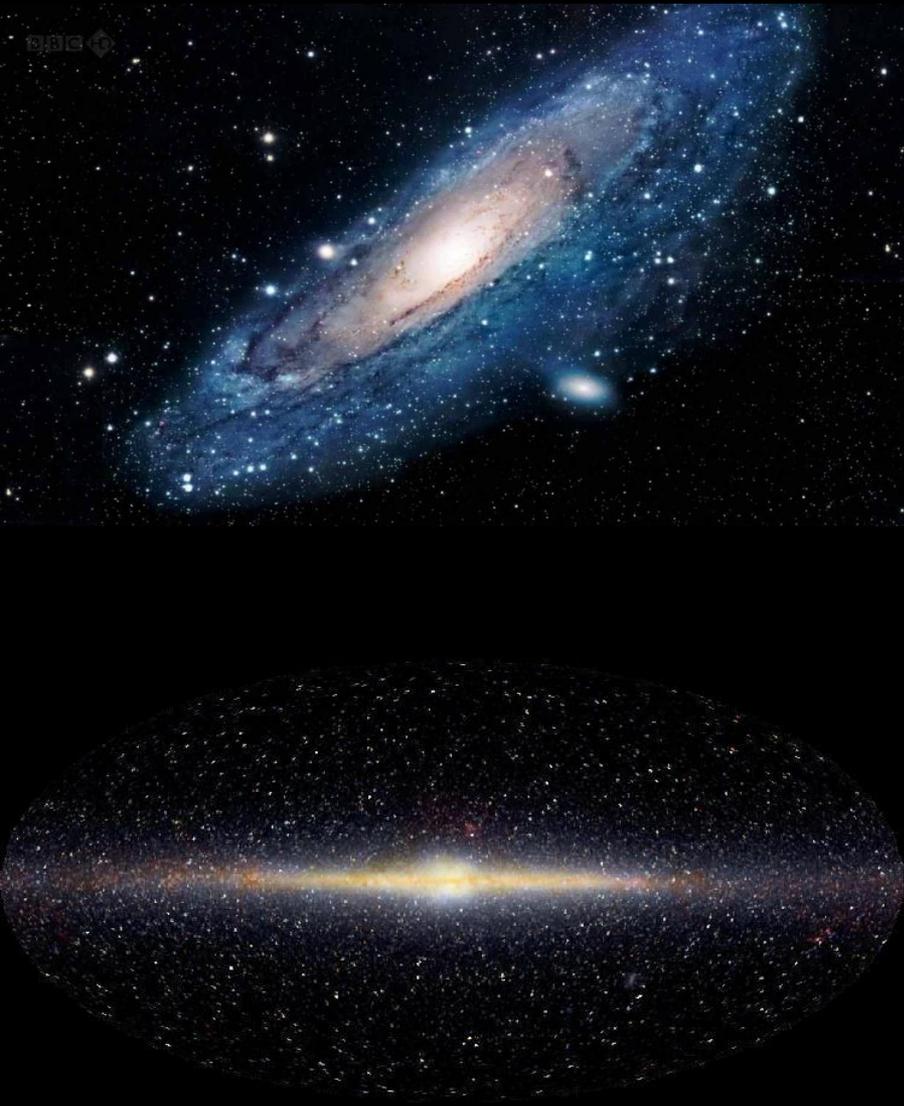
Черные дыры.

Чёрная дыра́ - область в пространстве-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть её не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света (в том числе и кванты самого света).

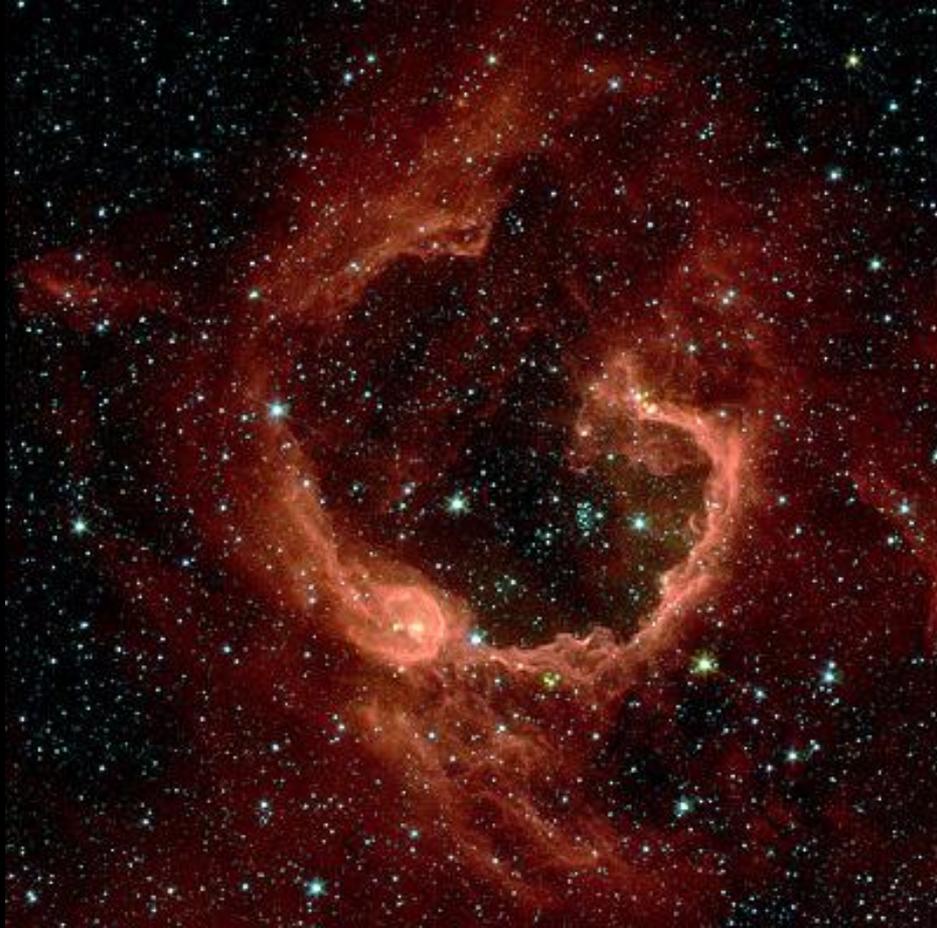
Граница этой области называется горизонтом событий, а её характерный размер - *гравитационным радиусом*. Поскольку черные дыры не светят, то единственный путь судить о них - это наблюдать воздействие их гравитационного поля на другие тела. Имеются косвенные доказательства существования черных дыр более чем в 10 тесных двойных рентгеновских звездах. Один из наиболее вероятных кандидатов в черные дыры - это ярчайший источник рентгеновских лучей в созвездии Лебедя - Лебедь X-1



Наша галактика - млечный путь.

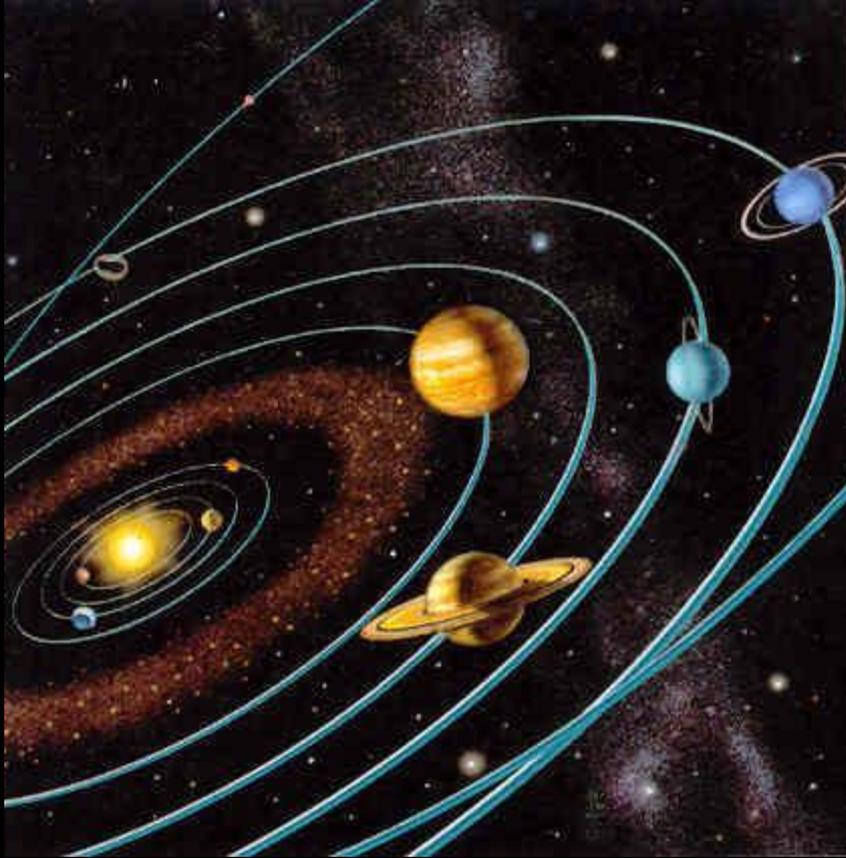


Наша Галактика - звездная система, в которую погружена Солнечная система, называется Млечный Путь. Млечный Путь - грандиозное скопление звезд, видимое на небе как светлая туманная полоса. На древнегреческом языке слово "галактикос" означает "молочный", "млечный", поэтому Млечный Путь и похожие на него звездные системы называют галактиками. В нашей Галактике - Млечном Пути - более 200 млрд. звезд самой разной светимости и цвета. Окрестности Солнца - это объем Галактики, в котором доступными современной астрономии средствами можно наблюдать и изучать звезды разных типов. Как показывает практика, это "шар", который содержит около 1,5 тысяч звезд.



Наши предки объединили все звезды в группы - созвездия. Созвездия не являются физическими группировками звезд, связанных между собой общими свойствами. Созвездия - это участки звездного неба. Звезды в созвездиях объединены нашими предками для того, чтобы было легче ориентироваться в звездном небе, т.е. на основании случайного совпадения их положений на небе. Все небо разделено на 88 созвездий, которые носят имена мифических героев, животных предметов и др. Скопления звезд - это их группы с общими физическими свойствами. Этим скопления отличаются от созвездий, которые являются результатом случайного совпадения положений звезд на небе.

История солнечной системы.



В основе современной космогонии - гипотеза о происхождении Солнца и планет из единого холодного газопылевого облака - гипотеза И.Канта и П.Лапласа. Она получила развитие в трудах О.Ю.Шмидта, О.Хойла и др и утвердилась в современной космогонии. Почти до конца 80-х годов нашего века раннюю историю нашей планетной системы приходилось "воссоздавать" лишь на основе данных о ней самой. И только к 90-м годам стали доступны для наблюдений невидимые ранее объекты - газопылевые диски, вращающиеся вокруг некоторых молодых звезд, сходных с Солнцем.

Солнечная система.

Солнечная система состоит из 8 планет: Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.
Самая большая планета - Юпитер. Ее масса равна 318 массам Земли.
Самая маленькая планета - Меркурий. Земля весит столько же, сколько 18 Меркуриев.
Ночью температура на Меркурии падает до -100 градусов, днем поднимается до $+350$ градусов.



Плуто́н до недавнего времени был самой маленькой планетой Солнечной системы.
Земля весит столько же, сколько 478 Плутонов.
В 2006 году было решено перестать считать Плуто́н классической планетой. За Плутоном удалось обнаружить новую планету, которая была в полтора раза больше Плутона.