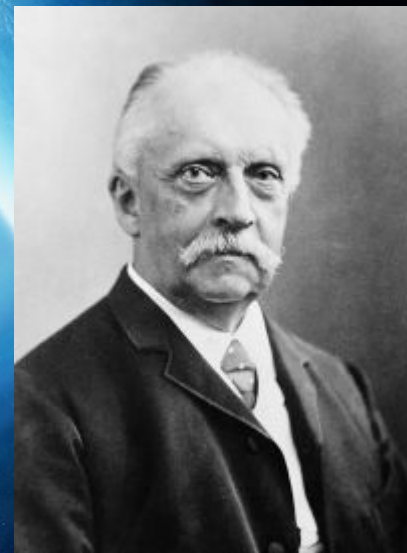


**ЗВЕЗДЫ**

# 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 падающего 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.

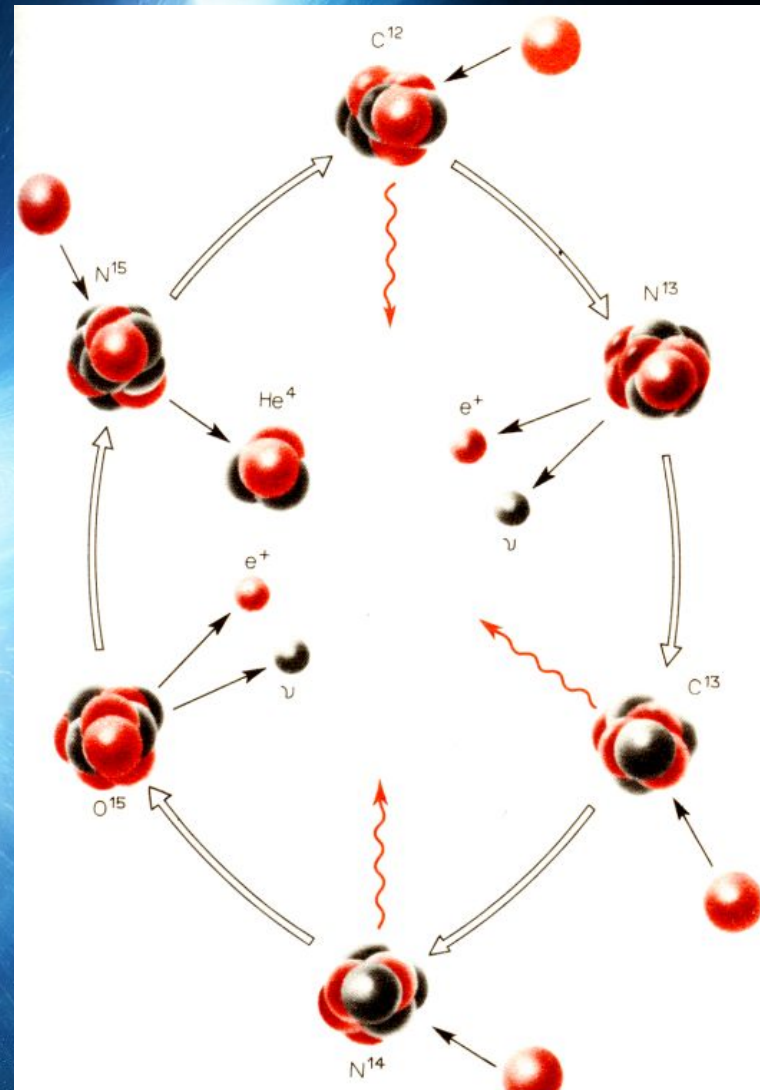
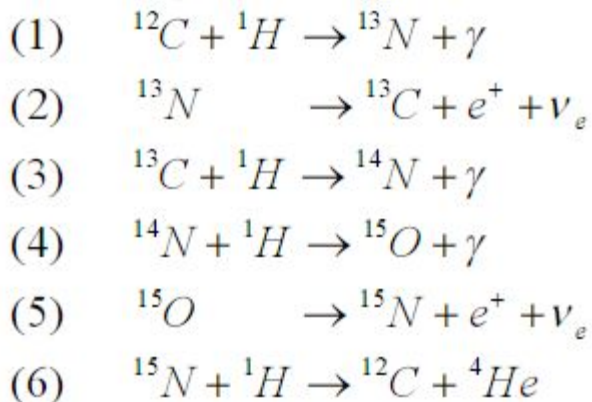


Герман Гельмгольц  
(1821-1894г.)

# Внутреннее строение звезд

## Источники энергии звезд

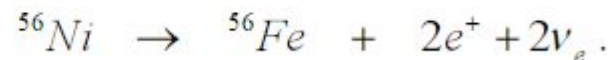
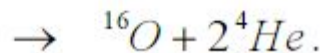
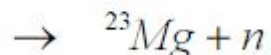
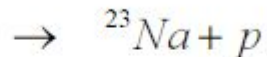
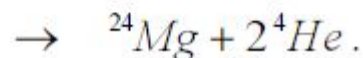
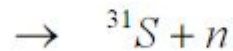
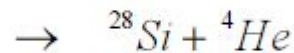
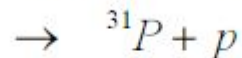
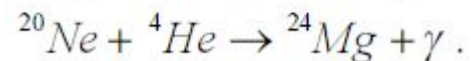
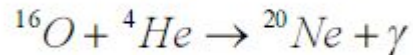
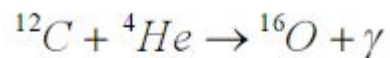
- При больших температурах и массах более 1,5 массы Солнца доминирует углеродный цикл (CNO). Реакция (4) самая медленная – для нее требуется около 1 млн. лет. При этом выделяется чуть меньше энергии, т.к. больше ее уносится нейтрино.
- Этот цикл в 1938г. Независимо разработали Ганс Бете и Карл Фридрих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

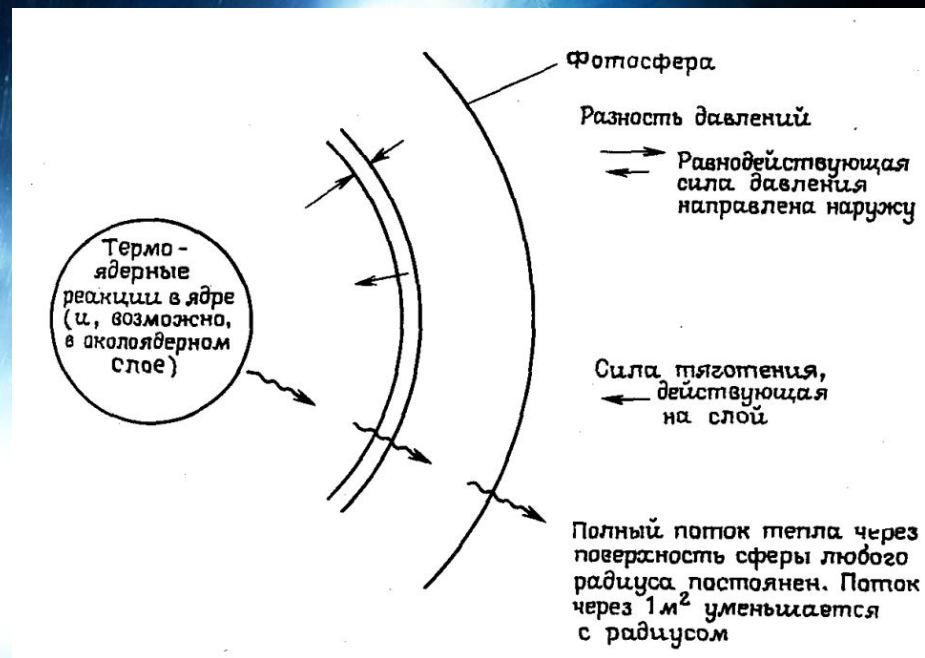
- В 1926г. была опубликована книга Артура Эддингтона «Внутреннее строение звезд», с которой, можно сказать, началось изучение внутреннего строения звезд.
- Эддингтон сделал предположение о равновесном состоянии звезд главной последовательности, т.е., о равенстве потока энергии, генерируемого в недрах 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,  $\rho$ -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

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

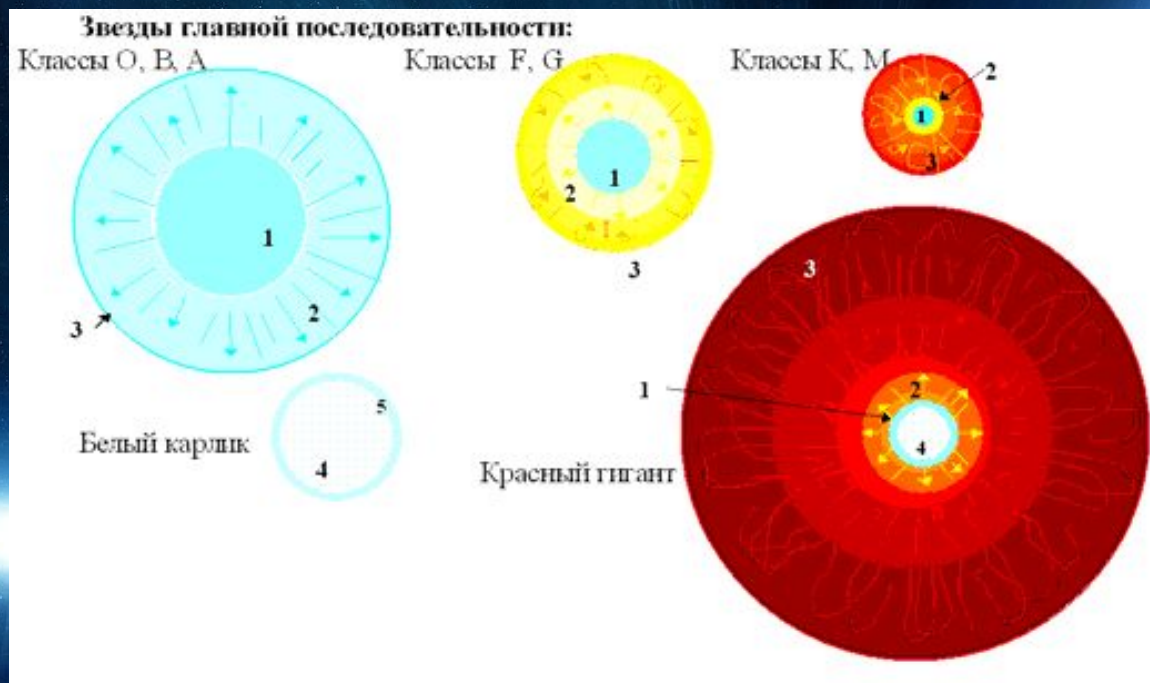
где  $L$ -светимость,  $\epsilon(r)$  – удельное энерговыделение ядерных реакций.

### 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.

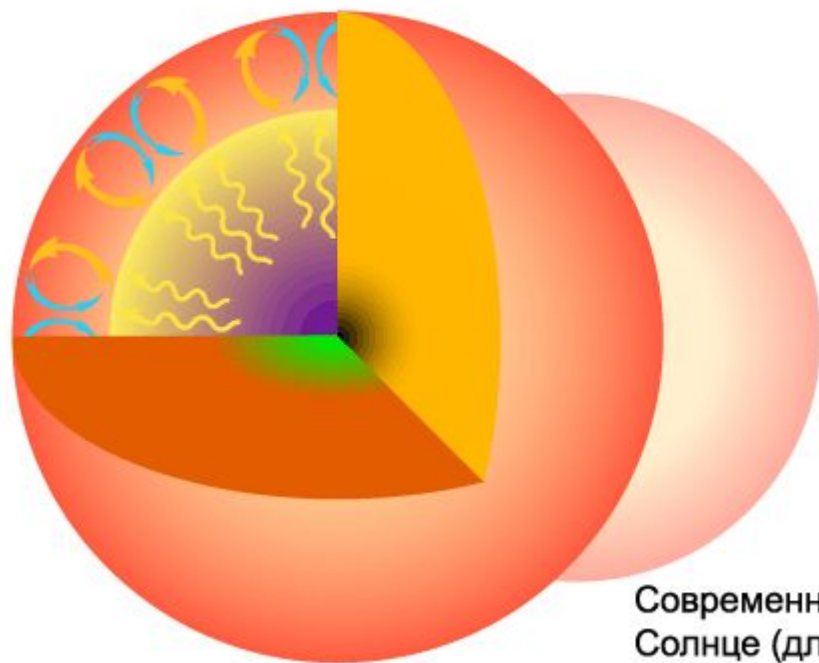


# Внутреннее строение звезд

## Строение звезд до солнечной массы

- Звезды с массой меньше  $0,3$  солнечной являются полностью конвективными, что связано с их низкими температурами и высокими значениями коэффициентам 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

$M/M_{\text{sun}}$	$L/L_{\text{sun}}$	$T_{\text{eff}}$	$R_*/R_{\text{sun}}$	$R_{\text{кз}}/R_*$
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

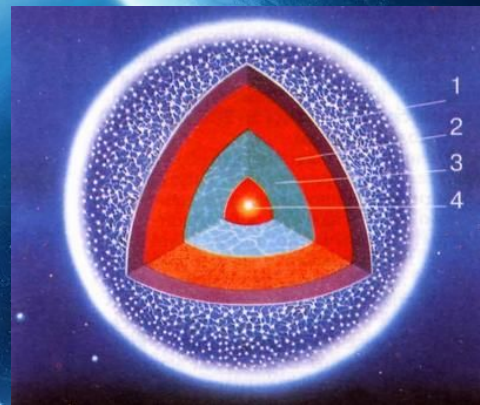
## Строение вырожденных звезд

- 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/см<sup>3</sup> 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/см<sup>3</sup>. 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.

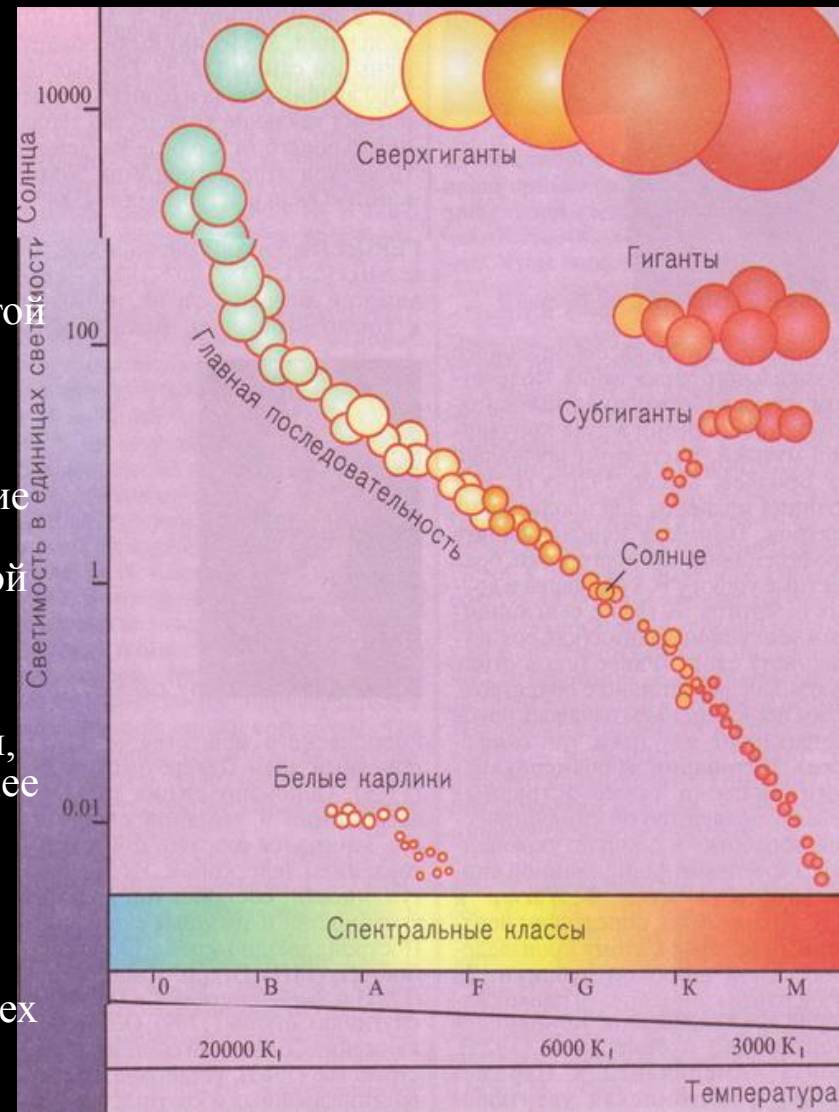


# Диаграмма «спектр — светимость»

В самом начале XX в. датский астроном Герцшпрунг и несколько позже американский астрофизик Рессел 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 — Рессела*

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 — Рессела 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

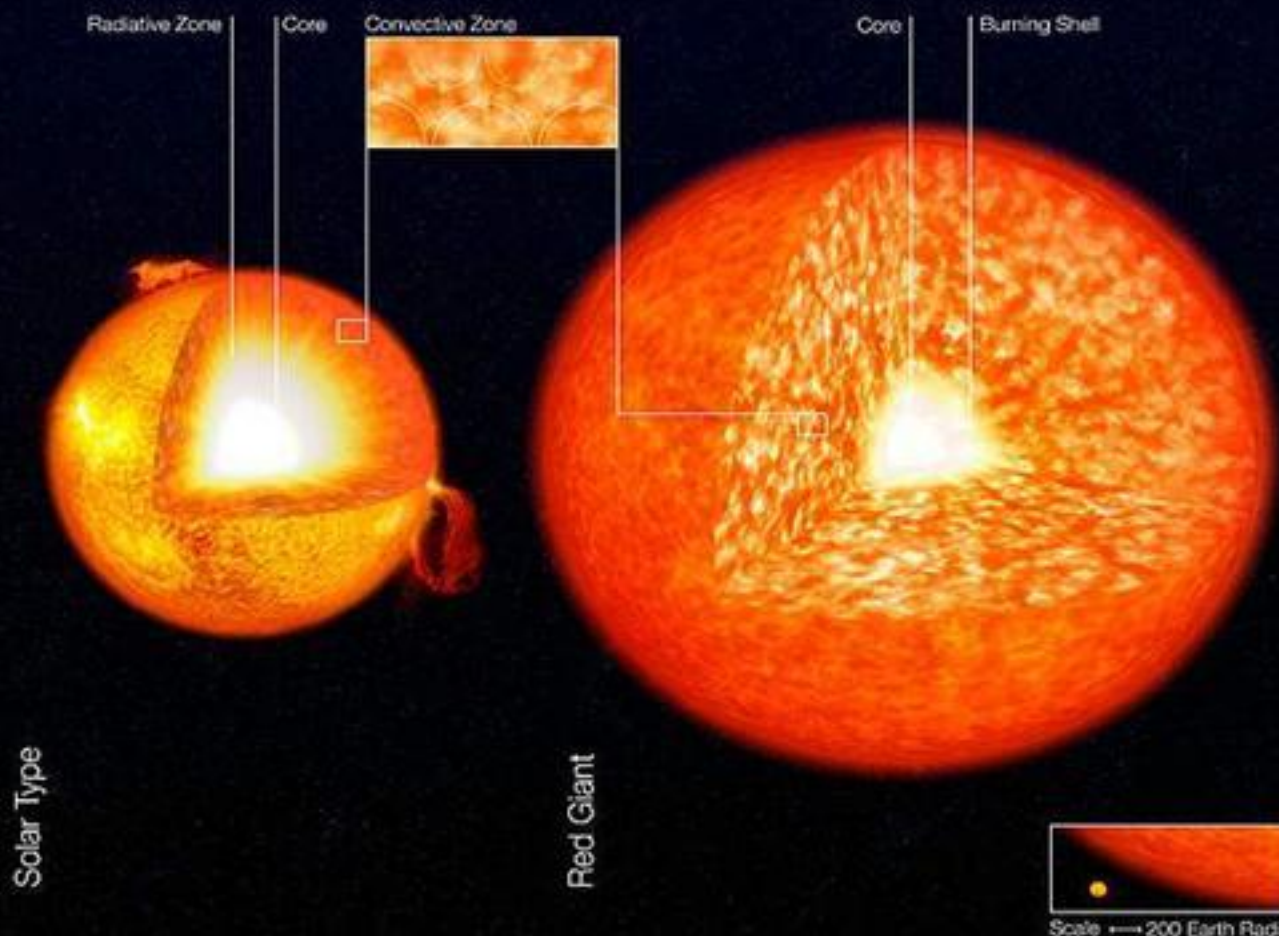
A cosmic background featuring a large red star in the center, a blue star to the right, and a planet with a reddish-orange surface in the upper right corner. The background is filled with numerous smaller stars and nebulae.

**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

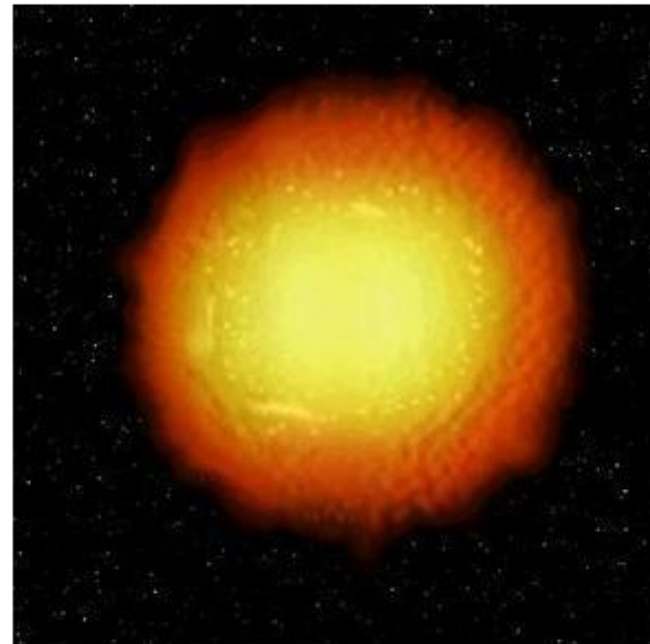
ЗВЕЗДЫ – ЭТО ОГРОМНЫЕ СГУСТКИ ПЛАМЕНИ, РАСКАЛЕННОГО ГАЗА И ПЛАЗМЫ. ОНИ ИЗЛУЧАЮТ СВЕТ И ТЕПЛО.

## 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	Kelut-1
T	"Коричневый карлик"	1 500	Интенсивные полосы поглощения воды, метана, молекулярного водорода	Gliese 229B

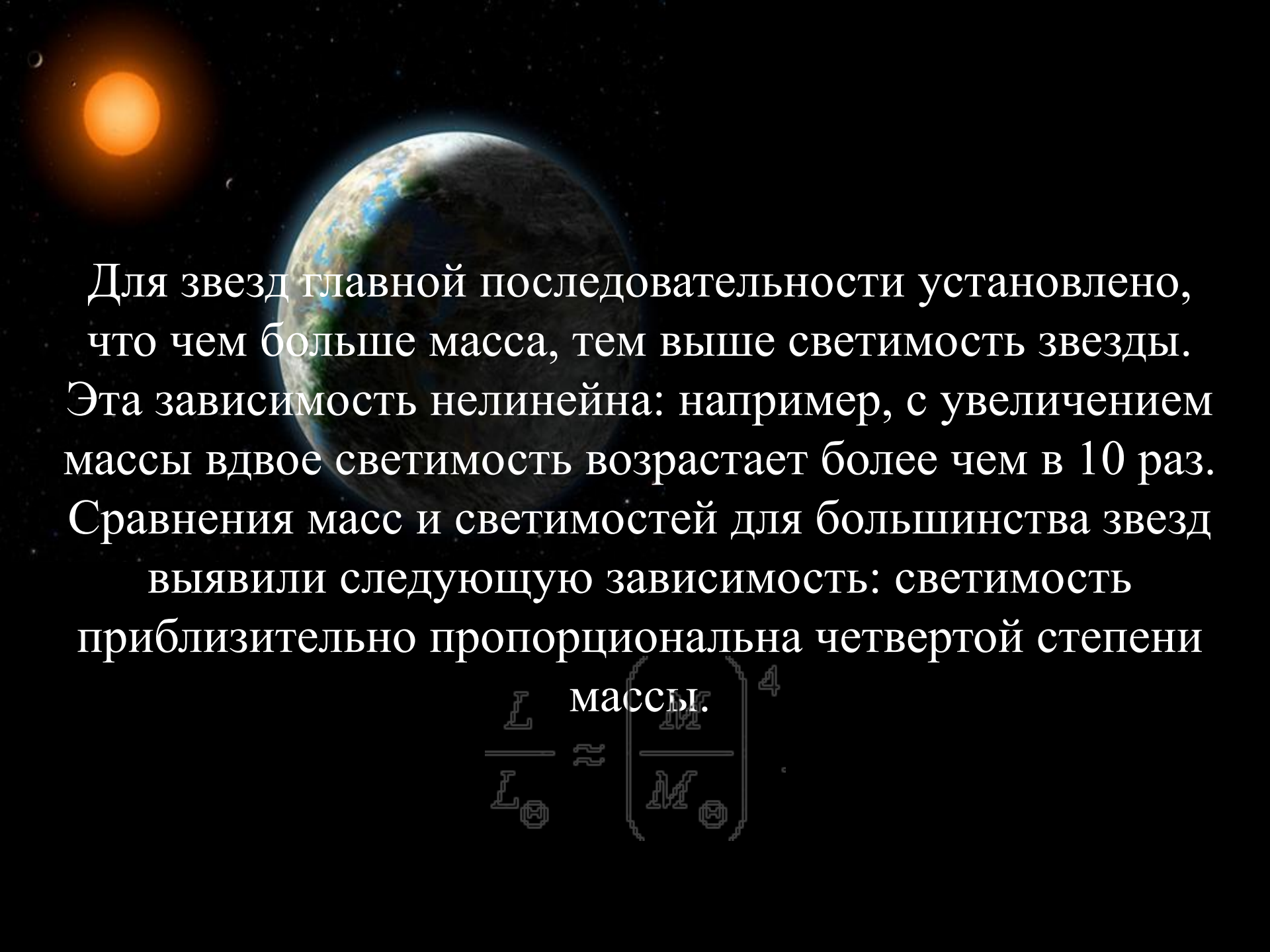
# Массы звезд

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.

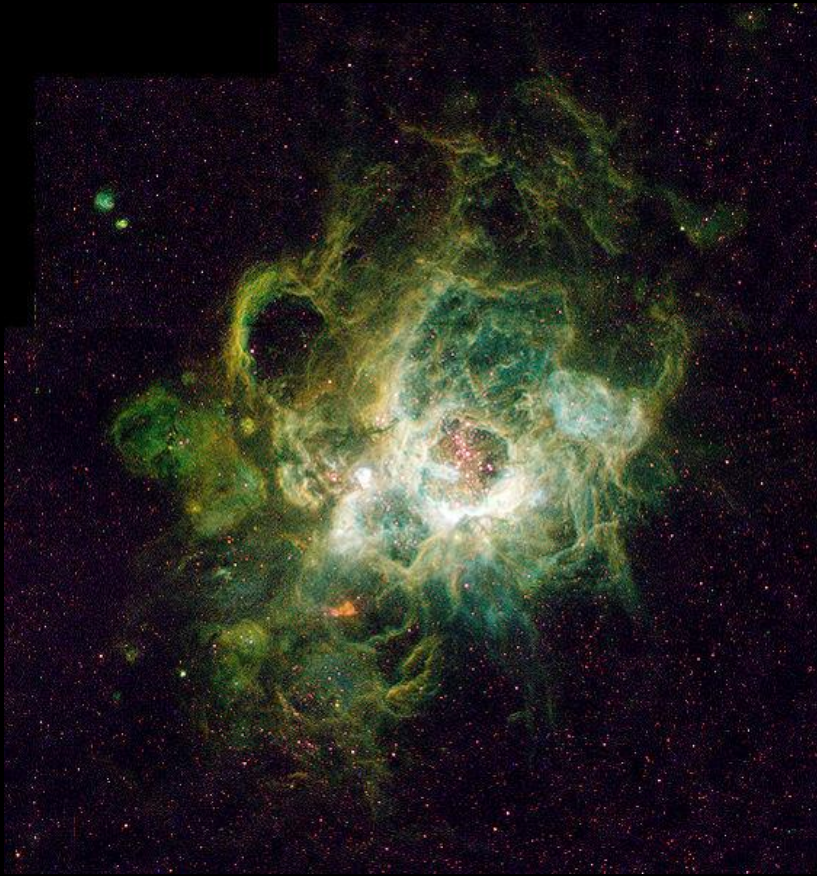


# Звездная эволюция.



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

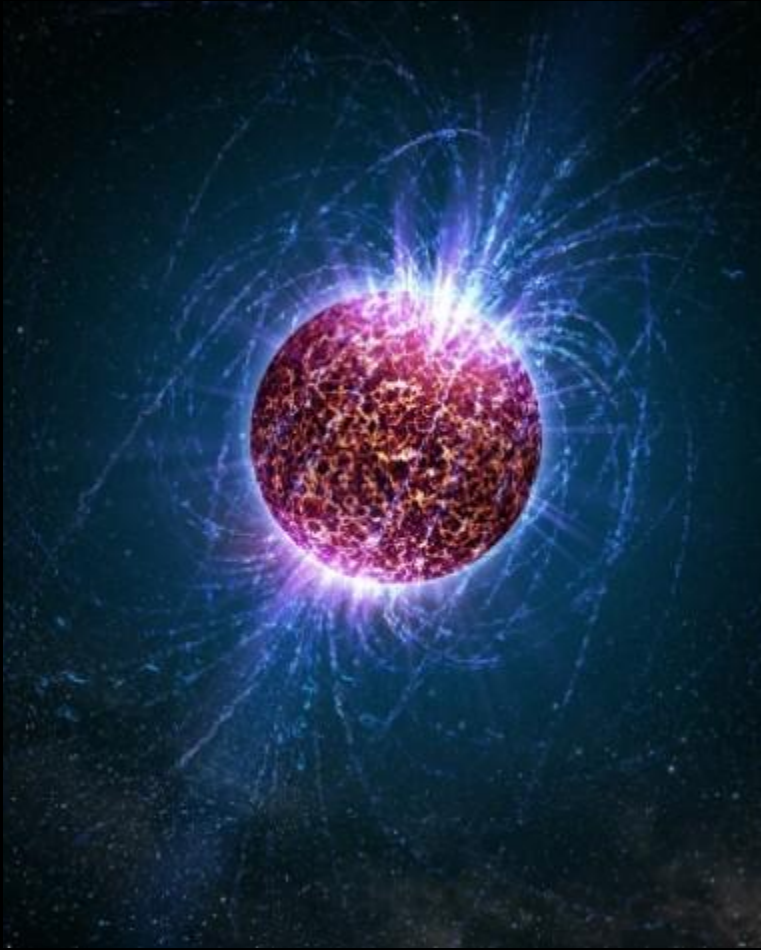
Если масса звезды невелика, то силы гравитации сравнительно слабы и сжатие звезды (гравитационный коллапс) прекращается. Она переходит в устойчивое состояние белого карлика. Если масса превышает критическое значение, сжатие продолжается. При очень высокой плотности электроны, соединяясь с протонами, 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.



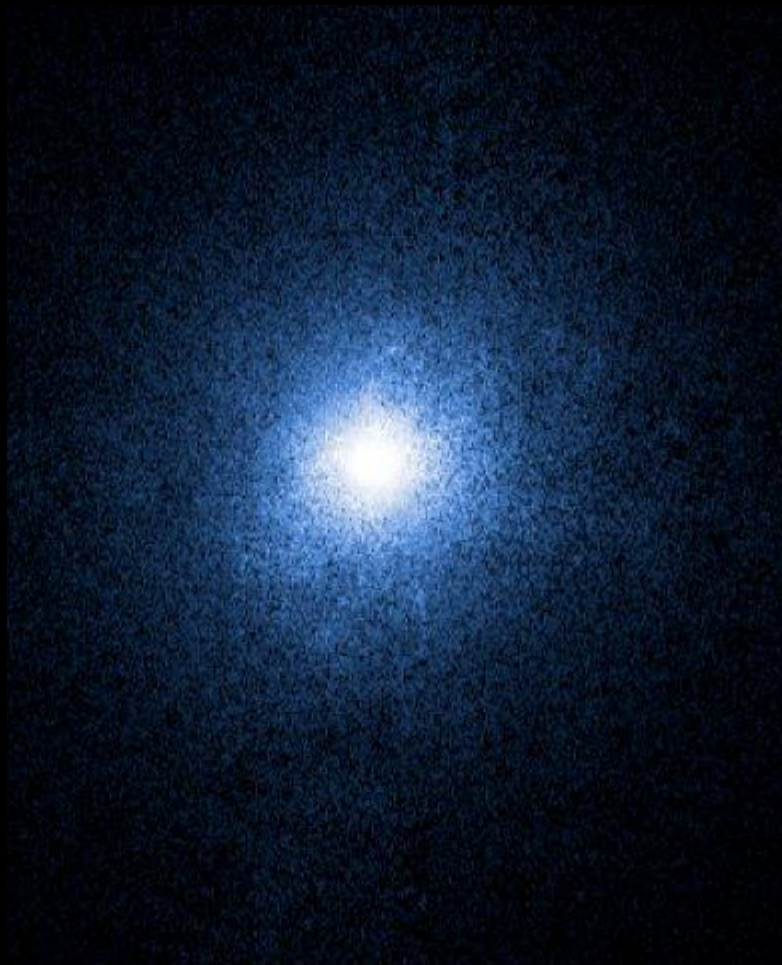
Нейтронная звезда - это конечное состояние эволюции звезд массой более десяти солнечных. Она представляет собой очень экзотический космический объект. Ее радиус - всего 10-20 км, а масса в 1,5-2 раза больше солнечной. Максимально возможная масса нейтронной звезды носит название предела Оппенгеймера-Волкова, 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



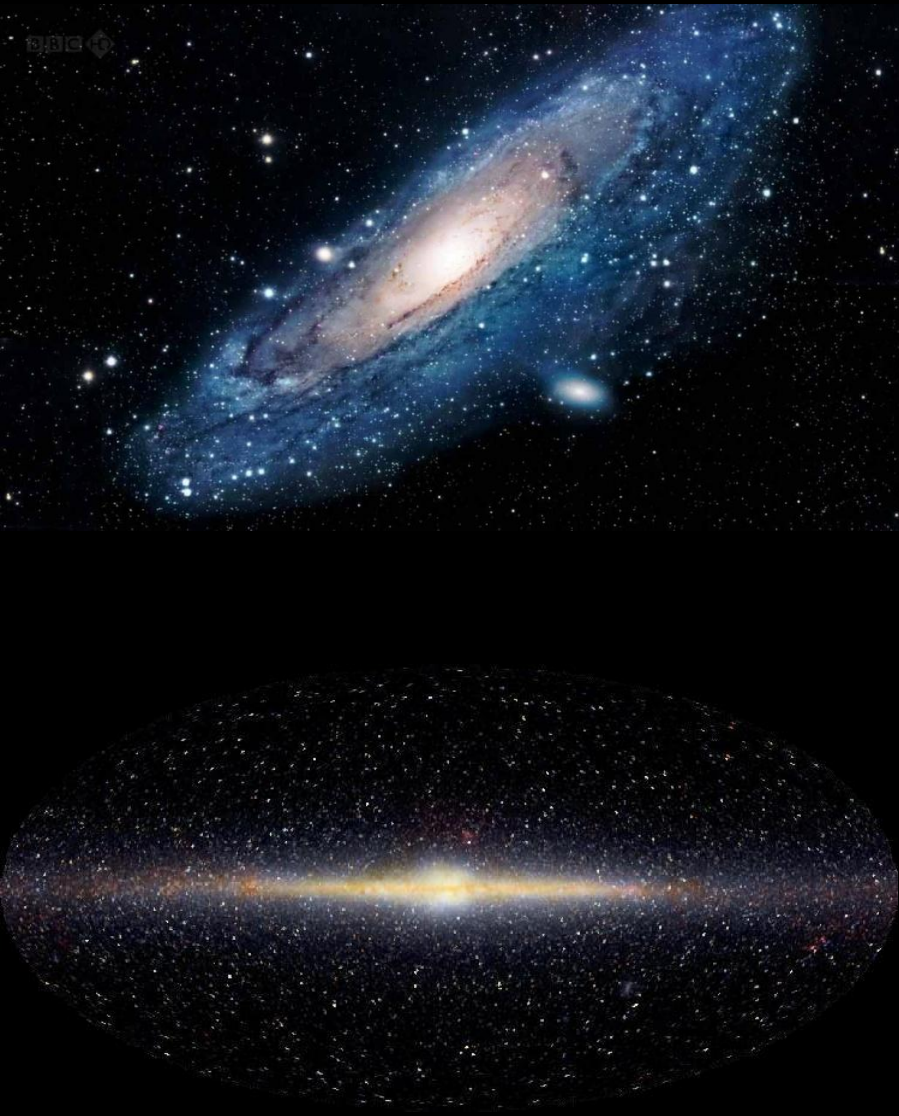
# Черные дыры.

**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).

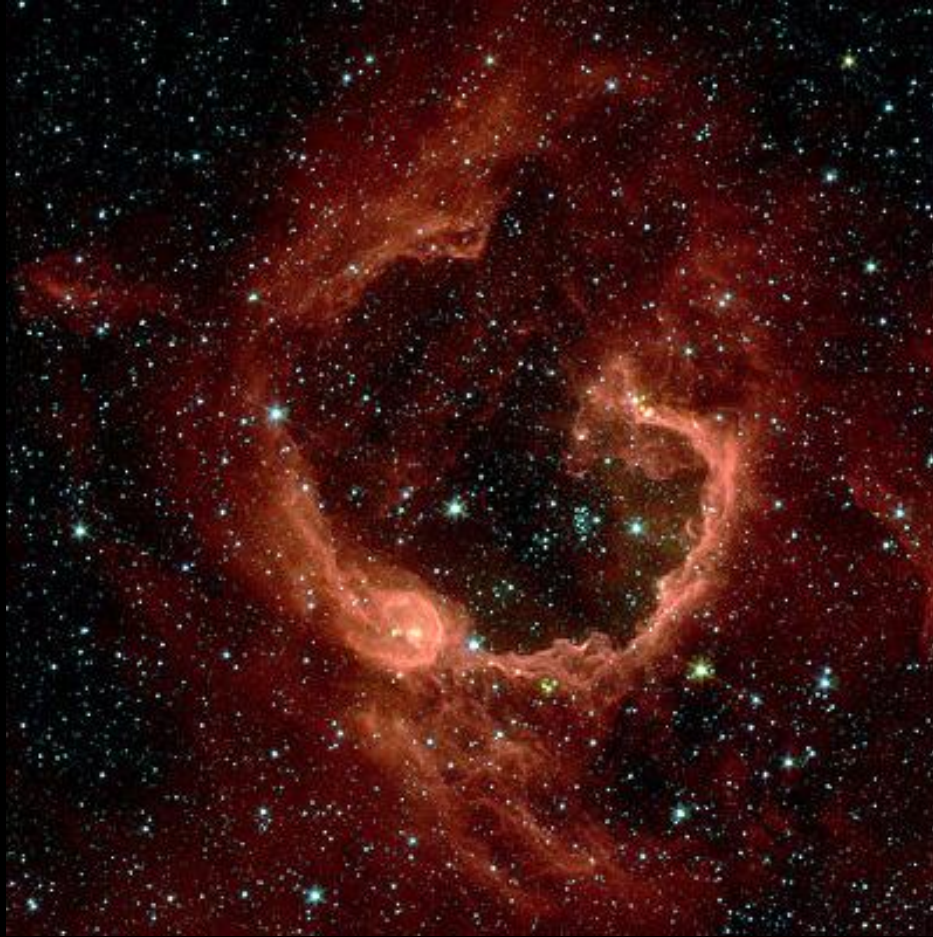
Граница этой области называется горизонтом событий, а её характерный размер - *гравитационным радиусом*. Поскольку черные дыры не светят, то единственный путь судить о них - это наблюдать воздействие их гравитационного поля на другие тела. Имеются косвенные доказательства существования черных дыр более 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.