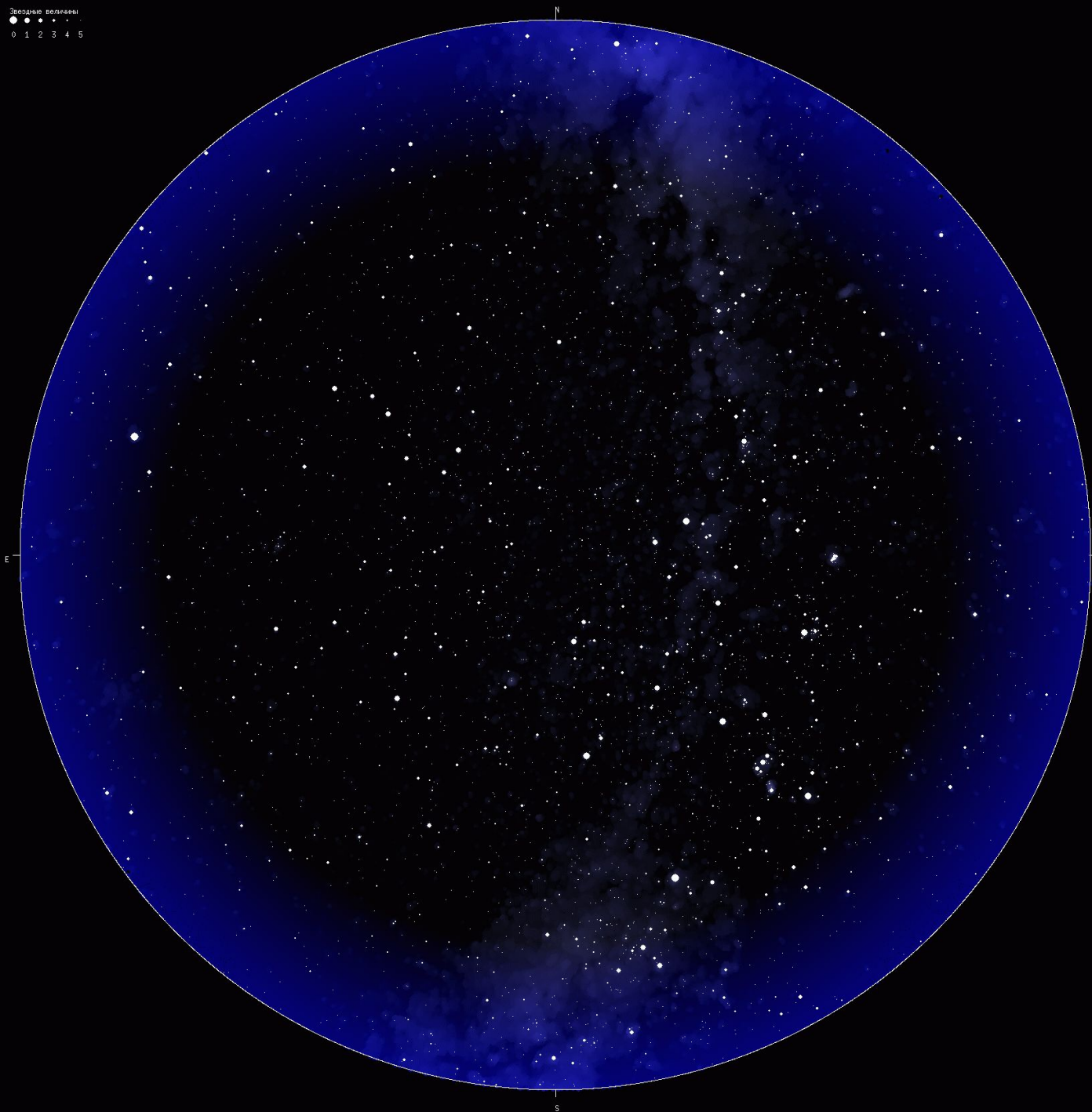


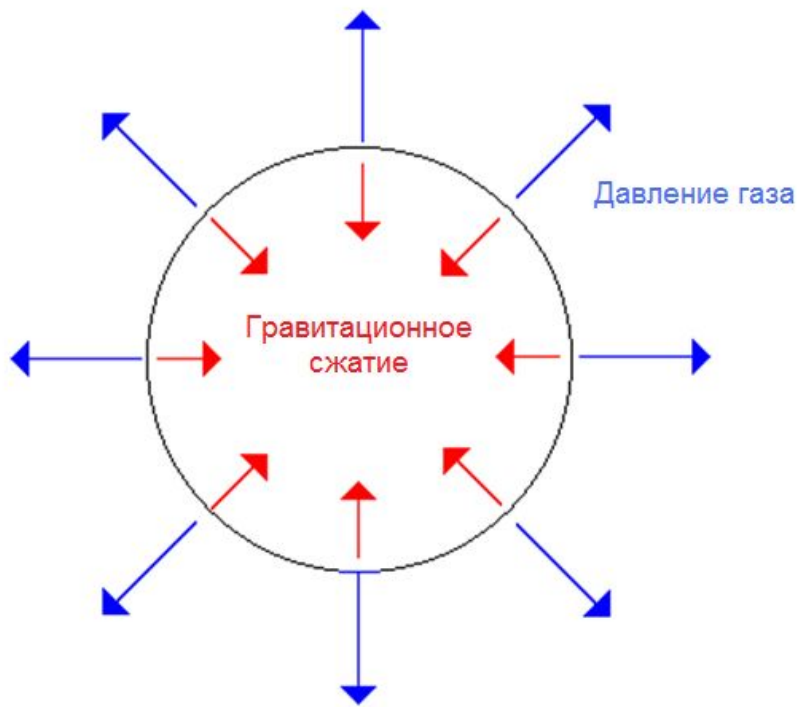
Звезды



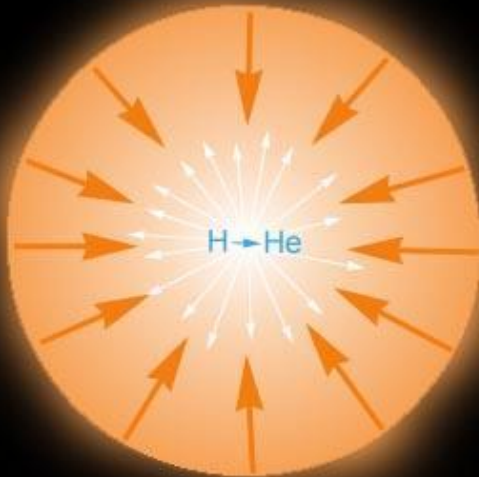
Звездное небо -  
Одесса, февраль,  
вечер

Звезда – небесное тело,  
излучающее энергию  
вследствие термоядерных  
реакций в ее недрах.

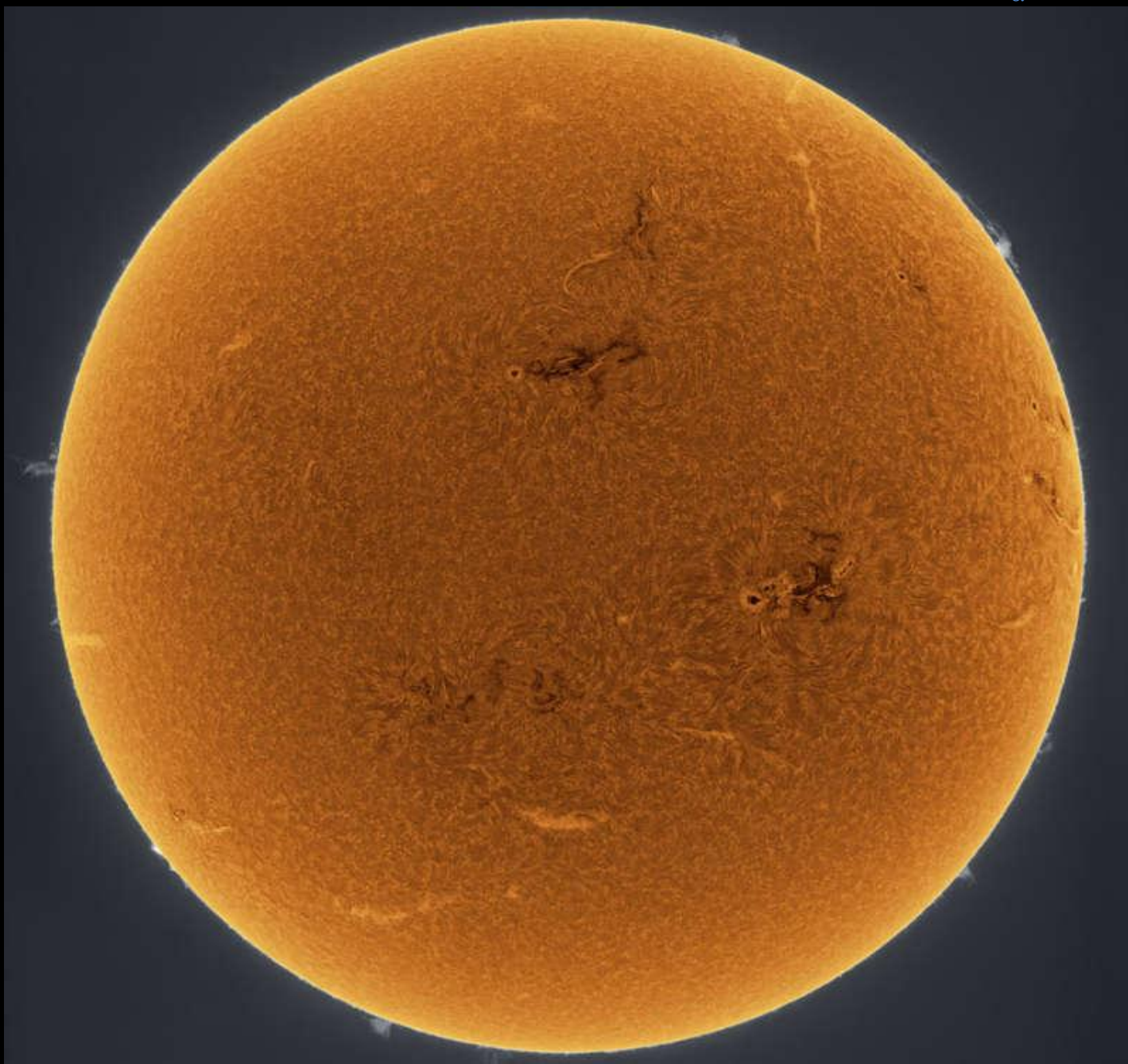




Звезда сохраняет равновесие, балансируя между гравитационным коллапсом и цепной ядерной реакцией. Звезда приобретает стабильные размеры и светимость, которые для звезды с массой, близкой к солнечной, не меняются в течение миллиардов лет, пока происходит сгорание водорода. Это самая длительная стадия в звездной эволюции.

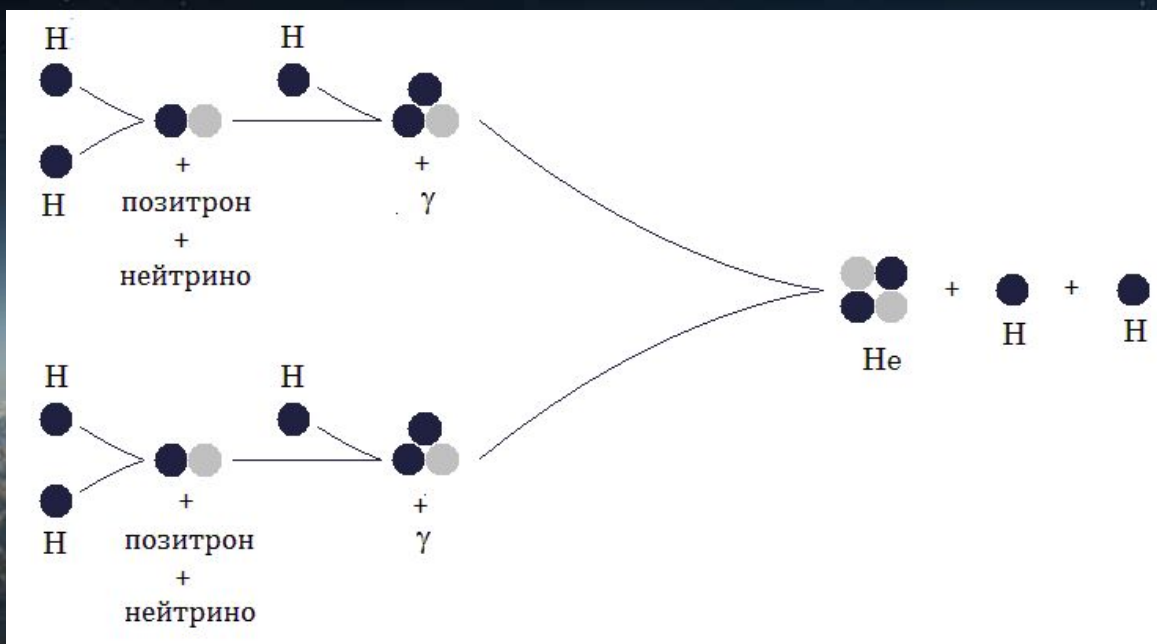


Солнце – ближайшая к нам звезда, фото в линии  $H_{\alpha}$ .



- молодая звезда пришла в стационарное состояние
- начался процесс выгорания водорода - основного звездного ядерного топлива
- сжатие практически не происходит, и запасы энергии больше не изменяются
- медленное изменение химического состава в ее центральных областях, обусловленное превращением водорода в гелий

В недрах Солнца температура около 10 млн. К.  
Термоядерные реакции протон-протонного (p-p) цикла



Чем массивнее звезда, тем больше она себя стремится сжать, тем сильнее разогревается ее центральная часть, тем быстрее и чаще проходят там ядерные реакции, тем больше энергии выделяется, тем более яркой кажется звезда.

самые высокие температуры соответствуют голубым звездам, самые низкие - красным



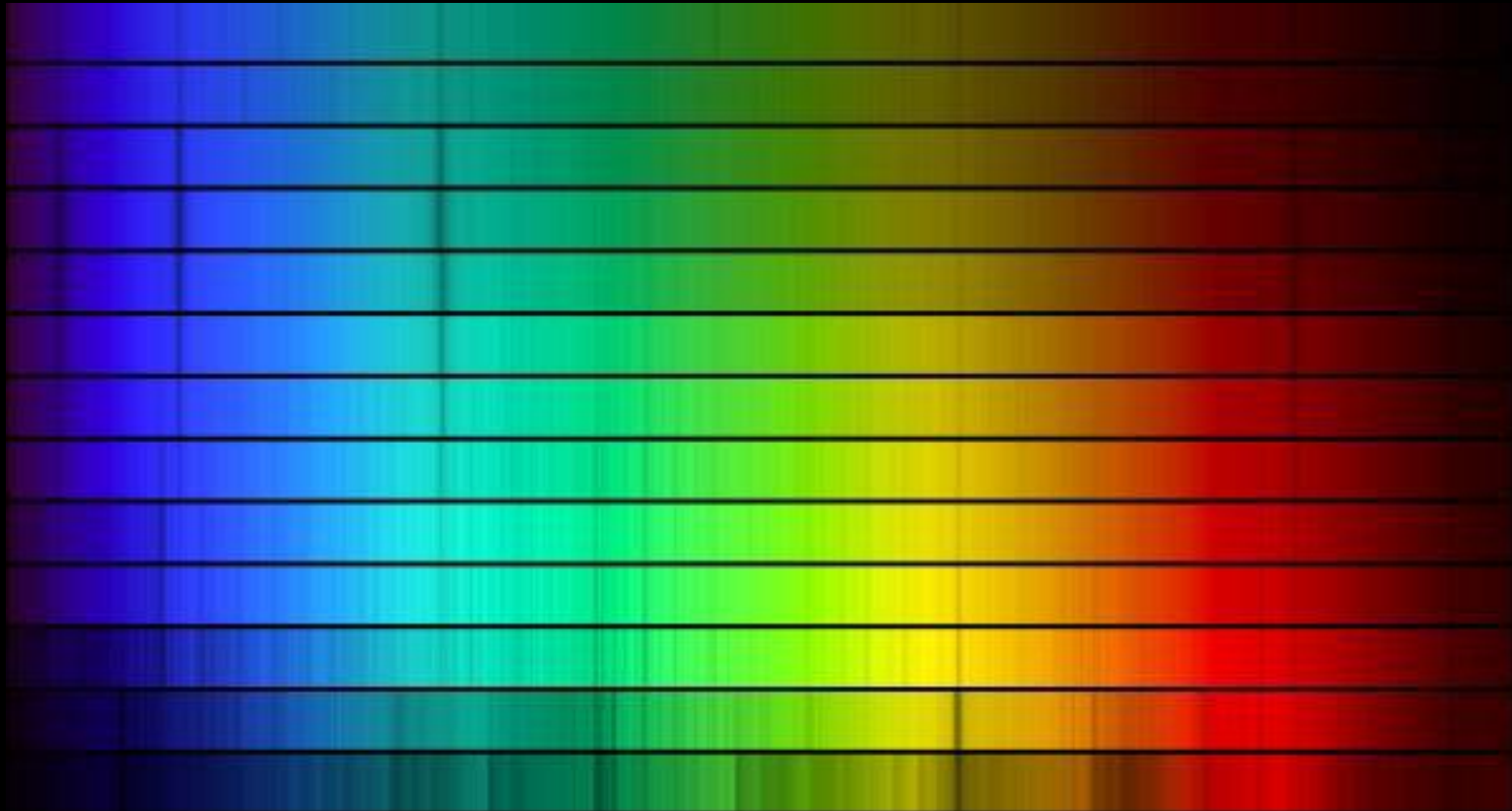
Изучение линий поглощения в звездных спектрах позволило объединить звезды в группы.

Такая спектральная классификация позволила упорядочить звезды по температуре их поверхностей. Спектральные классы в порядке уменьшения температуры поверхности:  
OBAFGKM.

Каждый спектральный класс делится на 10 подклассов от 0 до 9. 0-й подкласс наиболее горячий: O5, O6, O7, O8, O9, B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, A0, A1...

Цвет звезды зависит от температуры ее фотосферы (излучающего слоя) и определяется законом Вина. Это основной метод определения температуры поверхности звезды.

Как астрономы определяют химический состав холодных пылевых







Спектр Солнца (желтая звезда)



Спектр Сириуса (белая звезда)



Спектр водорода

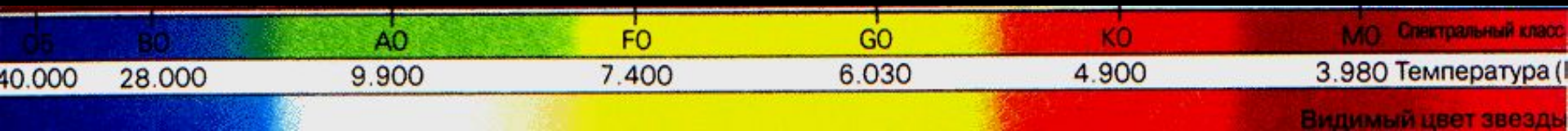


Спектр гелия

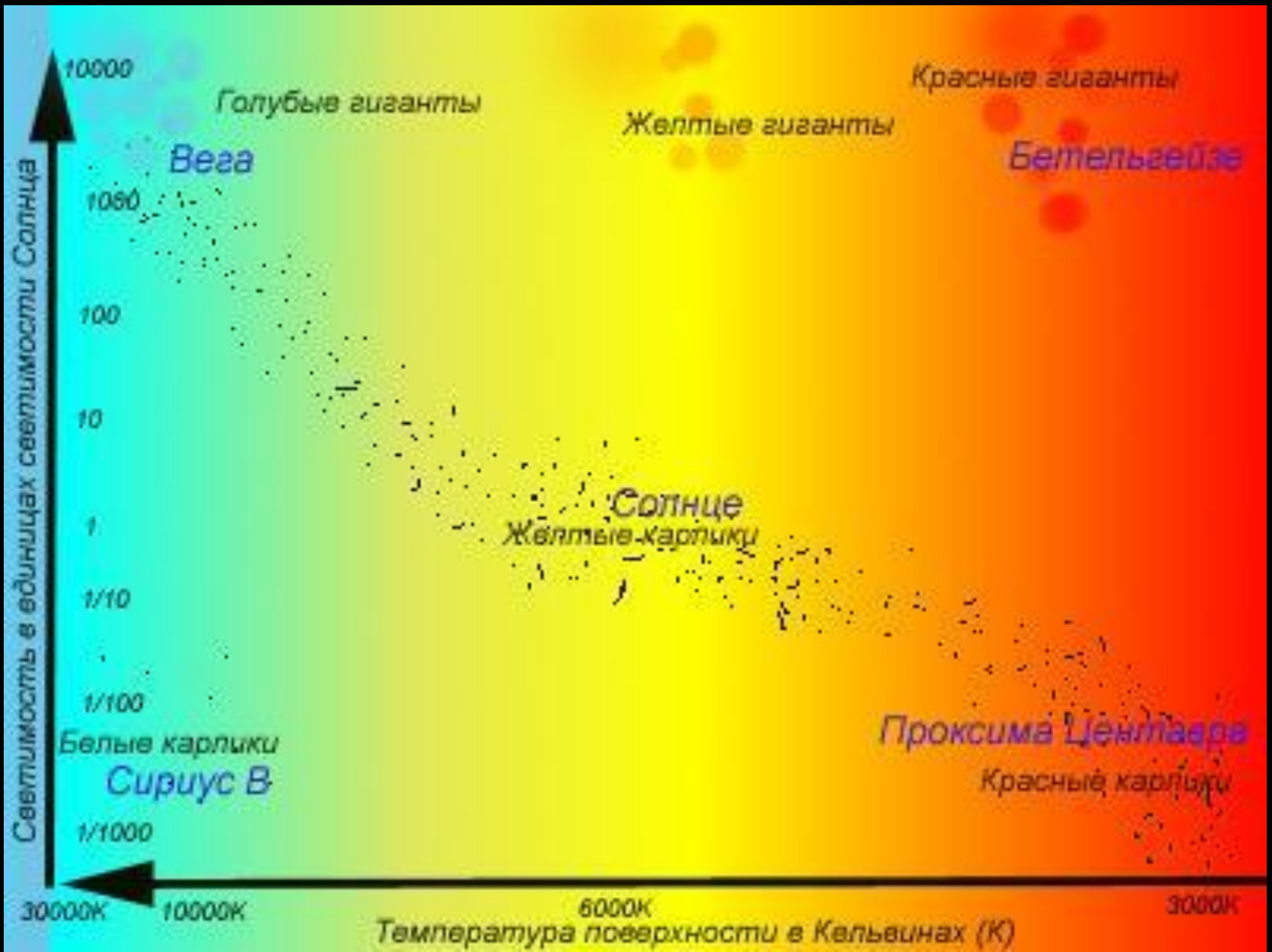
Класс	Цвет	Температура поверхности (К)	Основные линии поглощения
O	голубой	>25000	Линии ионизованного гелия, слабые линии серии Бальмера, линии многократно ионизованных атомов O, N, C
B	голубой	11000 – 25000	Линии нейтрального гелия, интенсивные линии водородной серии Бальмера
A	голубовато-белый	7000 – 11000	Очень интенсивные линии серии Бальмера
F	белый	6000 – 7500	Линии ионизованного кальция (CaII), интенсивные линии серии Бальмера
G	Желтый	5000 – 6000	Интенсивные линии CaII, слабые линии серии Бальмера, линии нейтральных металлов
K	красно-оранжевый	3500 – 5000	Слабые линии CaII, спектральные линии молекул
M	красный	<3500	Линии нейтральных элементов, интенсивные линии молекул

# Спектральные классы звезд

**O** **B** **A** **F** **G** **K** **M**



# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



## Связь массы и энергии.

В результате ядерных реакций источником энергии является превращение массы в энергию. 6 ядер водорода (протонов), вступающих в реакцию протон-протонного цикла обладают суммарной массой большей, чем ядро гелия и два ядра водорода на выходе р-р цикла. Масса взаимодействующих протонов:

$$6m_p = 6 \cdot (1.674 \cdot 10^{-27}) \text{ кг} = 10.044 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Продукты взаимодействия (2 протона и 1 ядро гелия) в сумме обладают массой:

$$2m_p + m_{\text{He}} = 2 \cdot (1.674 \cdot 10^{-27}) + 6.643 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 9.991 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Разность (дефект) масс  $0.053 \cdot 10^{-27}$  кг превращается в энергию в соответствии с формулой Эйнштейна  $E=mc^2$ . Это совсем небольшая энергия. Но умножив ее на  $10^{34}$  каждую секунду, получим огромную энергию, равную энергии излучения Солнца. Массы позитронов пренебрежимо малы.

В звездах более массивных, чем Солнце термоядерные реакции синтеза идут несколько иначе: при превращении водорода в гелий катализатором служит атом углерода. Такой процесс называется CNO циклом, поскольку углерод превращается в азот, он – в кислород, а кислород – снова в углерод с образованием гелия. Атом углерода участвует в следующих циклах. В итоге CNO цикла 4 ядра атома водорода превращаются в одно ядро атома гелия.

Время жизни звезд главной последовательности. С того момента, когда в ядре протозвезды водород вступает в термоядерный синтез, звезда выходит на главную последовательность. На главной последовательности («горение» водорода) звезда проводит большую часть своей жизни. По этой причине большинство звезд на небе относятся к звездам главной последовательности. На этом этапе своей жизни звезды спокойны, все изменения протекают медленно.

Продолжительность пребывания звезды на главной последовательности зависит от ее массы.

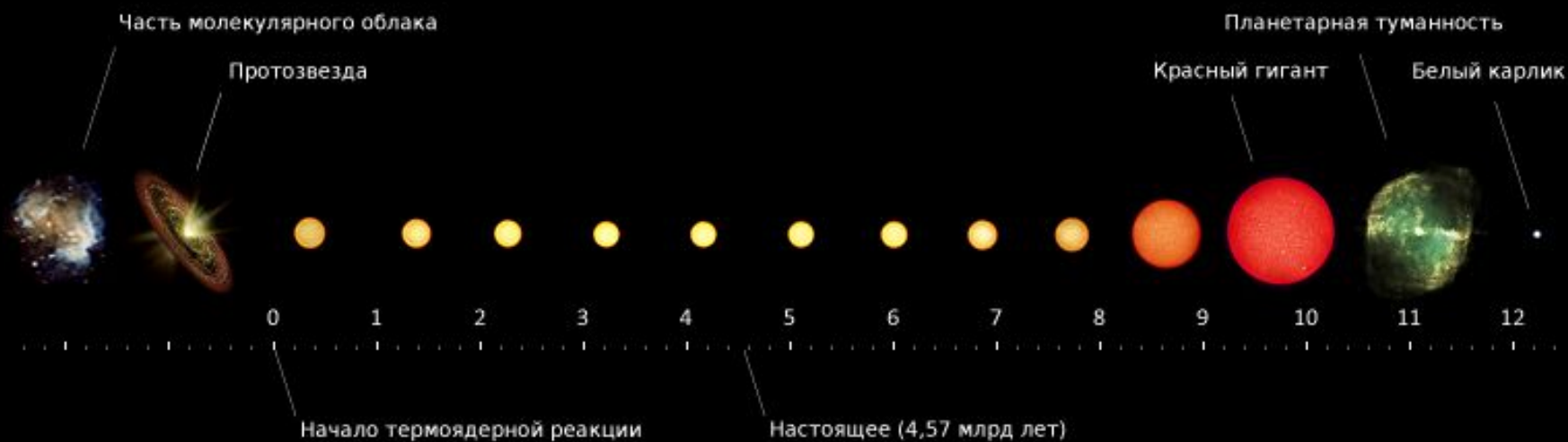
Массивные звезды горячи и быстро «стареют». Чем больше масса, тем больше тяготение, больше давление и температура внутри звезды. Это увеличивает интенсивность термоядерных реакций.

Существует зависимость между временем жизни на главной последовательности,  $t$ , и массой звезды,  $M$

$$\frac{t}{t_{\text{SUN}}} = \left( \frac{M}{M_{\text{SUN}}} \right)^{-2.5}$$

где  $t_{\text{SUN}}$  – время жизни Солнца на главной последовательности,  $M_{\text{SUN}}$  – масса Солнца. Время жизни Солнца на главной последовательности оценивается в 10 млрд. лет. Звезда в 10 раз массивнее Солнца будет оставаться на главной последовательности только 30 млн. лет. Звезда в 10 раз легче Солнца останется на главной последовательности в течение 3 триллионов лет (3000 млрд. лет).

Когда водород в недрах звезды исчерпывается, увеличиваются их радиусы. Однако температура поверхности изменяется незначительно. С ростом радиуса увеличивается и светимость, – пропорционально квадрату радиуса. Например, в течение следующих 5 млрд. лет, светимость Солнца увеличится на 60%.



## Жизненный цикл Солнца

Масштаб и цвета условны. Временная шкала в миллиардах лет (приблизительно)

## ПОЧЕМУ ЗВЕЗДЫ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮТ ?

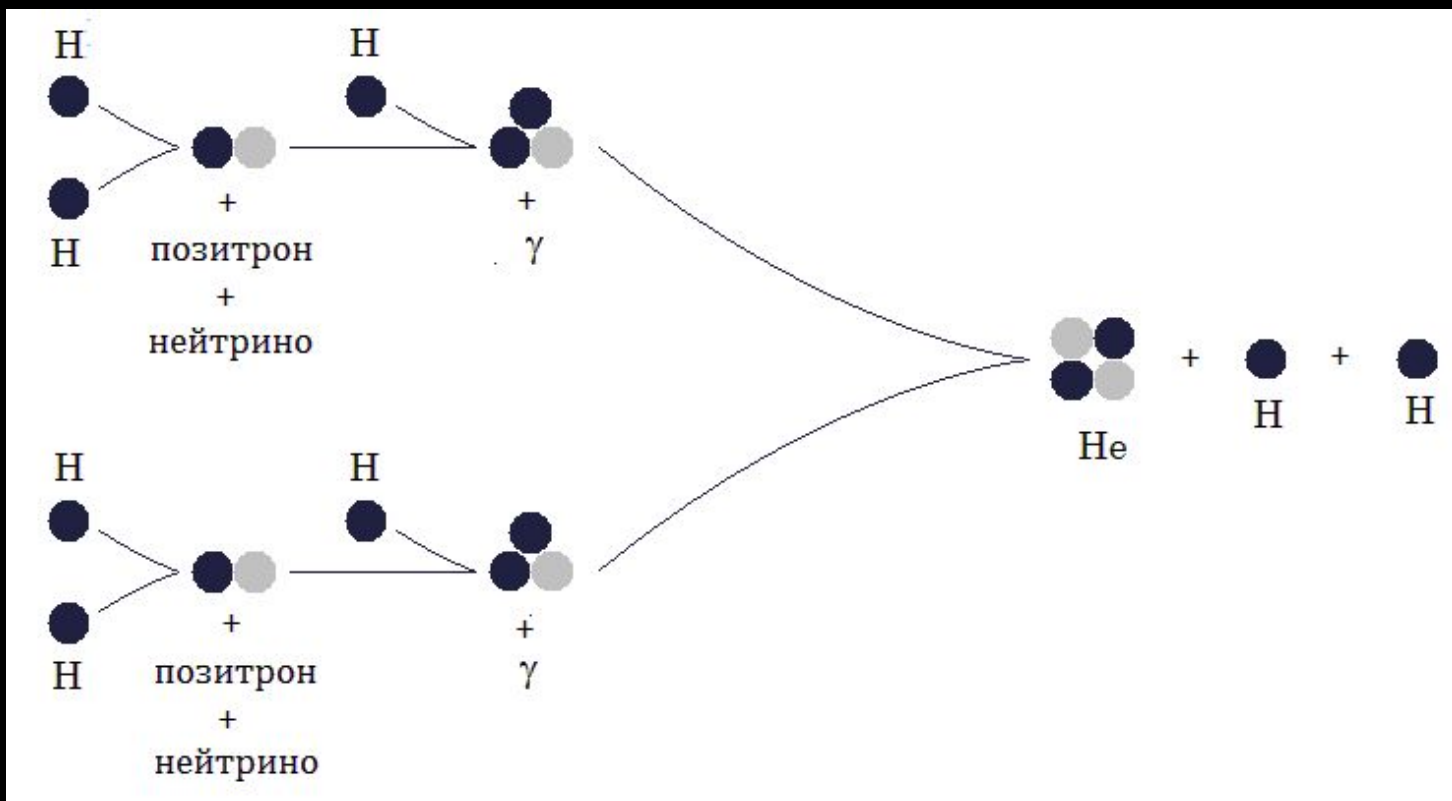
Звезды выделяют энергию, рождающуюся в термоядерных реакциях превращения более легких химических элементов в более тяжелые (например, водорода в гелий). Это ведет к изменению химического состава звездных ядер, изменению интенсивности энерговыделения, интенсивности излучения и изменению давления в недрах. Все эти изменения сказываются на видимых характеристиках звезд.

Выделение энергии в недрах звезд возможно тремя путями:

- водородный синтез,
- синтез тяжелых элементов.
- гравитационное сжатие.



Водородный синтез протекает при температурах  $\sim 10$  млн. К. При таких температурах положительно заряженные протоны (ядра атомов водорода) обладают достаточной энергией, чтобы преодолеть силы электростатического отталкивания двух одноименных зарядов. Начинаются термоядерные реакции протон-протонного (p-p) цикла.



## Синтез тяжелых элементов

Прочие элементы в ядре содержат несколько протонов, поэтому заряд ядра больше. Следовательно, для начала реакций термоядерного синтеза таких ядер потребуется большая температура и давление. Например:

- Гелиевый синтез. Гелий вступает в термоядерную реакцию с образованием углерода при температуре около 100 млн. К.
- Углеродный синтез. Углерод вступает в термоядерную реакцию при температуре от 500 млн. до 1 млрд. К.
- Железный синтез. Химические элементы с массами большими массы ядра железа, для своего синтеза не выделяют энергию, а наоборот, требуют затрат энергии. Иными словами, для протекания таких реакций нужен внешний источник энергии. По этой причине элементы тяжелее железа в недрах излучающих звезд не образуются. Тяжелые элементы синтезируются когда звезды заканчивают эволюционный путь и взрываются.

## Сжатие и коллапс

Гравитационная потенциальная энергия выделяется когда масса вещества сжимается в звезду. Суммарная средняя гравитационная энергия звезды может быть оценена

$$E_{\text{ГРАВ}} = \frac{GM^2}{R}$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса звезды,  $R$  – ее радиус. Например, если Солнце сожмется до размеров Земли, то выделится количество энергии равное энергии, излученной Солнцем за 3 млрд. лет. Процесс сжатия обычно происходит медленно, поскольку энергия, выделяющаяся во внутренних областях, препятствует гравитационному сжатию.

## Давление идеального газа

Недра звезд главной последовательности могут быть описаны законами идеального газа. В процессе эволюции температура и давление должны всегда быть в равновесии. Если давление растет, то температура должна расти и наоборот, если температура падает, давление тоже уменьшается. Например, рассмотрим момент, когда в ядре звезды истощается водород. С окончанием водородного «горючего» температура снижается, давление уменьшается, и ядро звезды сжимается под действием гравитационных сил. Поскольку ядро сжимается, давление возрастает и температура повышается. Если масса звезды велика, то рост температуры и давления может создать условия для вступления в реакции термоядерного синтеза ядер гелия. Когда начинаются такие реакции, температура растет, вслед за ней нарастает давление – внешние слои звезды расширяются. Изменение внутреннего давления из-за изменения химического состава существенно сказывается на внешнем виде звезды.

## Давление вырожденного газа

Когда ядро звезды становится чрезвычайно плотным, его поведение нельзя описывать законами идеального газа. Температура такой звезды может увеличиваться без увеличения давления. Это состояние вещества называется вырожденным газом. При высоких давлениях между электронами нарастают силы взаимного отталкивания. Это отталкивание нельзя описывать классическими законами электростатики, начинают сказываться законы квантовой механики. В этом случае электронное отталкивание порождает дополнительное давление, так называемое давление вырожденного газа, зависящее исключительно от внешнего давления, а не от температуры. Вырожденный газ может нагреваться, не расширяясь и охлаждаться, не сжимаясь.

Давление вырожденного газа может остановить сжатие, вызванное гравитационными силами, так же как и давление идеального газа, но с одним отличием: когда вещества больше, гравитационные силы звезды возрастают, но увеличение давления в вырожденном газе не так велико как в обычном веществе. Поэтому звезда сжимается. Звезда большей массы при вырождении вещества занимает меньший объем.

Электроны вырождаются при плотности  $\rho = 10^4$  кг/см<sup>3</sup>. Чтобы достигнуть такой плотности надо сжать здание до объема бутылки с газированной водой. Нейтроны вырождаются при плотности  $\rho = 10^{13}$  кг/см<sup>3</sup> = 10 млрд. тонн/см<sup>3</sup>. Такая плотность достигается, если сжать Землю в куб со стороной 200 м.

## Эволюция звезд на главной последовательности

Во время пребывания на ГП звезды находятся в гидростатическом и температурном равновесии, и существенно не изменяются. Звезда расходует водород в ядре, вместо него образуется гелий, играющий роль золы в звездном костре. Звезда может несколько изменить светимость (в 2 раза или около того), или диаметр (менее, чем в 2 раза).

## Эволюция после стадии ГП

Звезда покидает главную последовательность, когда исчерпывается водород в ее ядре и начинаются термоядерные реакции гелия. С этого момента звезду ждут впечатляющие изменения. Возможны два пути эволюции после схода с ГП. Все процессы определяются массой звезды.

## Эволюция после стадии ГП

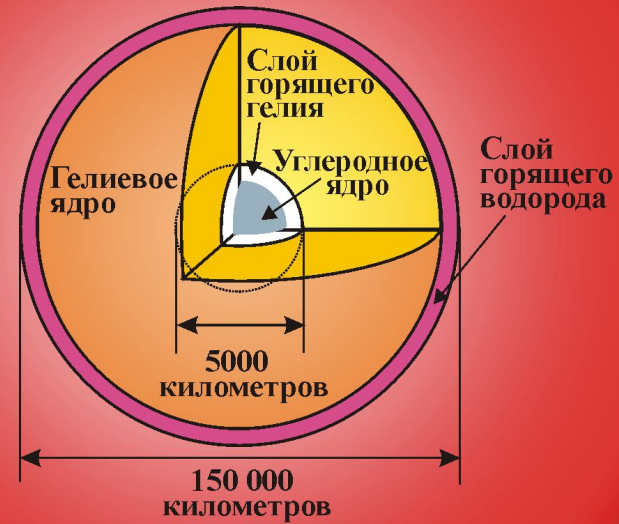
Звезды с массой меньше  $8 M_{\text{СОЛНЦА}}$  теряют свои наружные оболочки медленно. Водородные термоядерные реакции идут в расширяющейся вокруг ядра ее оболочке. Гелий опускается в ядро, увеличивая его массу и плотность. Водородная оболочка расширяется над ядром, в котором водород практически исчерпан. Наружные слои звезды, расширяясь, охлаждаются, - звезда становится красным гигантом и выходит на ветвь гигантов на диаграмме ГР.





# Красный гигант

Водородная оболочка,  
несколько миллионов километров



## Эволюция после стадии ГП

Внешние слои звезды подсвечиваются горячим ядром, ионизируются и отделяются от звезды.

Отделившиеся оболочки называют планетарными туманностями, но не потому что они имеют какое-либо отношение к планетам, а потому что в небольшие телескопы выглядят размытыми дисками.



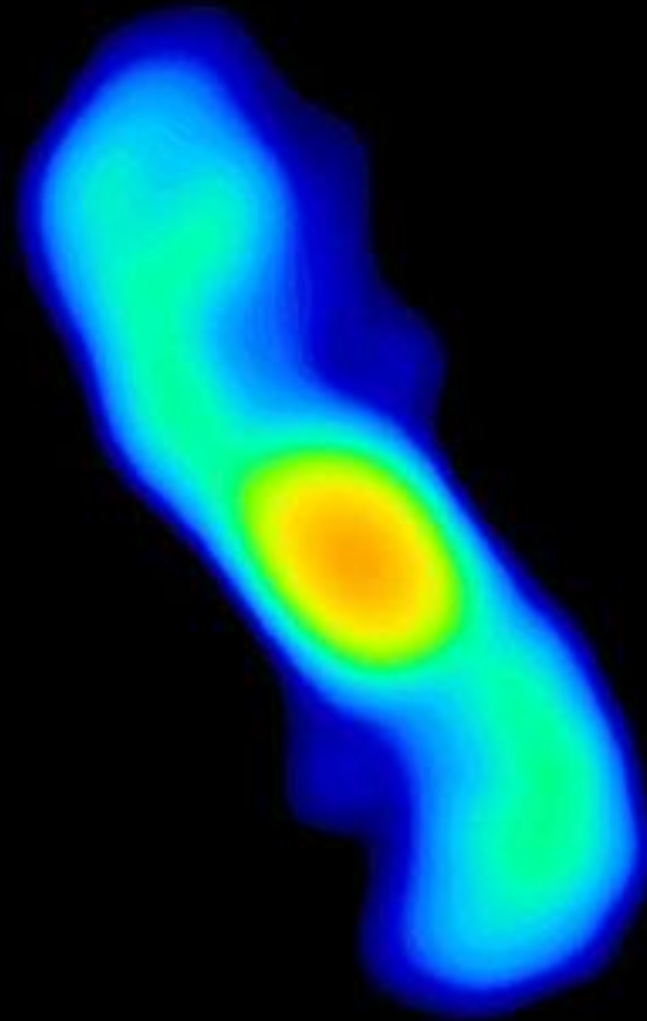
# Планетарная туманность Кольцо в Лире



Planetary Nebula NGC 3132



Звезда в созвездии Лисички на наших глазах превращается в  
планетарную туманность



Классическая планетарная туманность Кошачий глаз (NGC 6543), расположенная в 3 000 световых лет от Земли. Умиравшая звезда в центре туманности создала разлетающиеся концентрические оболочки из газа и пыли, сбрасывая часть своих внешних слоёв в результате нескольких последовательных колебаний поверхности. Формирование красивой, но более сложной структуры внутренних частей ещё до конца не изучено. Ширина туманности - более половины светового года.



Первый объект, говорящий о том, что произойдет с нашим Солнцем, был открыт в 1764 году. Это туманность Гантель или M27 — планетарная туманность, которая может получиться из Солнца, когда в его ядре закончится водород. Туманность M27 — одна из самых ярких планетарных туманностей на небе, её можно разглядеть в обычный бинокль в направлении на созвездие Лисички. Свет от туманности M27 летит до нас около 1000 лет. На этой фотографии разным цветом показано излучение водорода и кислорода.

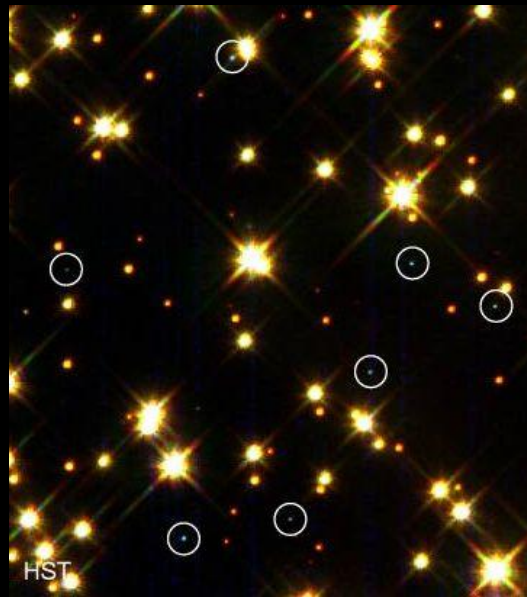


# Эволюция после стадии ГП

## Белые карлики

Сброшенная масса верхних слоев звезды обнажает ее горячее ядро. Оно состоит из углерода (продукта гелиевого синтеза) и гелия и выглядит голубым, излучая, главным образом, в ультрафиолетовых лучах. Это УФ излучение ионизует выброшенные пыль и газ, которые начинают от этого светиться. Газопылевая планетарная туманность окружает белый карлик.

Белый карлик это маленькая горячая звезда, масса которой не превышает  $1.4 M_{\text{СОЛНЦА}}$ . Звездные ядра с большей массой не останавливаются на стадии белого карлика и продолжают сжатие.





# Сириус

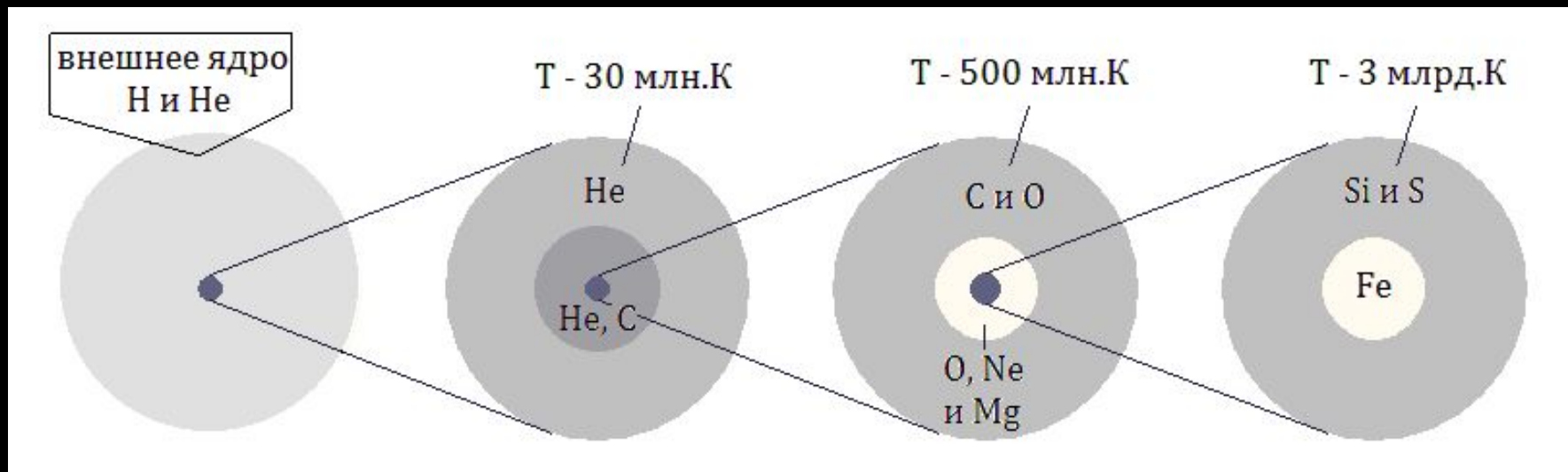


## Эволюция после стадии ГП

Звезды с массой больше  $8 M_{\text{СОЛНЦА}}$  сбрасывают наружные слои катастрофически, во вспышке сверхновой. Внешние слои таких звезд тоже подсвечиваются горячим ядром, тоже ионизируются, но скорости остатков сверхновых после взрыва весьма отличаются от скоростей в планетарной туманности. В общем случае, остатки сверхновой разлетаются с довольно большими скоростями, не образуя планетарную туманность.

## Сверхновые 2-го типа

Внутреннее строение проэволюционировавшей массивной звезды напоминает луковицу. Внешние слои состоят из остатков водорода. Глубже находится слой, в котором идет водородный синтез, глубже – слой гелиевого синтеза, глубже – углеродный, кислородный, неоновый, магниевый и кремниевый слои синтеза. В центральной части звезды – железное ядро. В этом ядре плотность, давление и температура достаточна для начала термоядерного синтеза на основе ядер железа. Но железо уникальный элемент. Это самый легкий элемент при синтезе которого, поглощается энергии больше, чем выделяется. Иными словами, для синтеза железа необходимо затратить энергии больше, чем выделится в результате реакции.



Как только начинается реакция синтеза железа, газ охлаждается, реакция протекает с поглощением энергии среды. С уменьшением температуры уменьшается и давление, – ядро начинает сжиматься. Сжатие (коллапс) ядра ведет к росту температуры до 10 млрд. К.

При достижении значения температуры 10 млрд. К, фотоны становятся настолько энергичными, что могут разрушать ядра атомов. Этот процесс называется фотодезинтеграцией. Все элементы в ядре – гелий, углерод, кислород, железо и другие – разрушаются. Несколько десятков млн. лет, в течение которых протекали реакции термоядерного синтеза, обращаются вспять менее чем за 1 секунду. Также как и термоядерный синтез железа, этот процесс поглощает энергию, – ядро сжимается еще больше.

К этому моменту ядро состоит только из протонов, нейтронов, электронов и фотонов. При сжатии ядра увеличивается и его плотность.

Когда плотность достигает  $10^6$  кг/см<sup>3</sup>, протоны и электроны начинают превращаться в нейтроны и нейтрино. Нейтрино легко покидают ядро звезды и уносят часть энергии в космос.

С исчезновением заряженных частиц ядро сжимается еще быстрее, до тех пор, пока плотность не превышает  $10^9$  кг/см<sup>3</sup>. При такой плотности нейтроны вырождаются и оказывают сопротивление гравитационному сжатию. Однако к этому времени компактное ядро наращивает темп выпадения на себя окружающего вещества, его плотность превышает плотность вырожденного газа до значений  $10^{11}$ - $10^{12}$  кг/см<sup>3</sup>.

Подобно мячу, отскакивающему от стены, вещество в ядре отражается от плотного вырожденного центра. Это отражение порождает ударные волны, движущиеся наружу с большой скоростью и разбрасывающие вещество звезды. Ударные волны выносят с собой вещество ядра в космос.

Иными словами, звезда взрывается.

Весь процесс от начала сжатия до отражения ударных волн длится менее 1 секунды. На протяжении нескольких суток сверхновая может излучать энергии больше, чем галактика, состоящая из миллиардов звезд.

При таком взрыве излучается энергия, равная всей излученной световой энергии Солнца за все время его существования. Еще в 100 раз больше энергии уносится нейтрино.



# Сверхновая после и до вспышки

Сверхновая в Большом Магеллановом Облаке  
вспыхнула в феврале 1987 г.



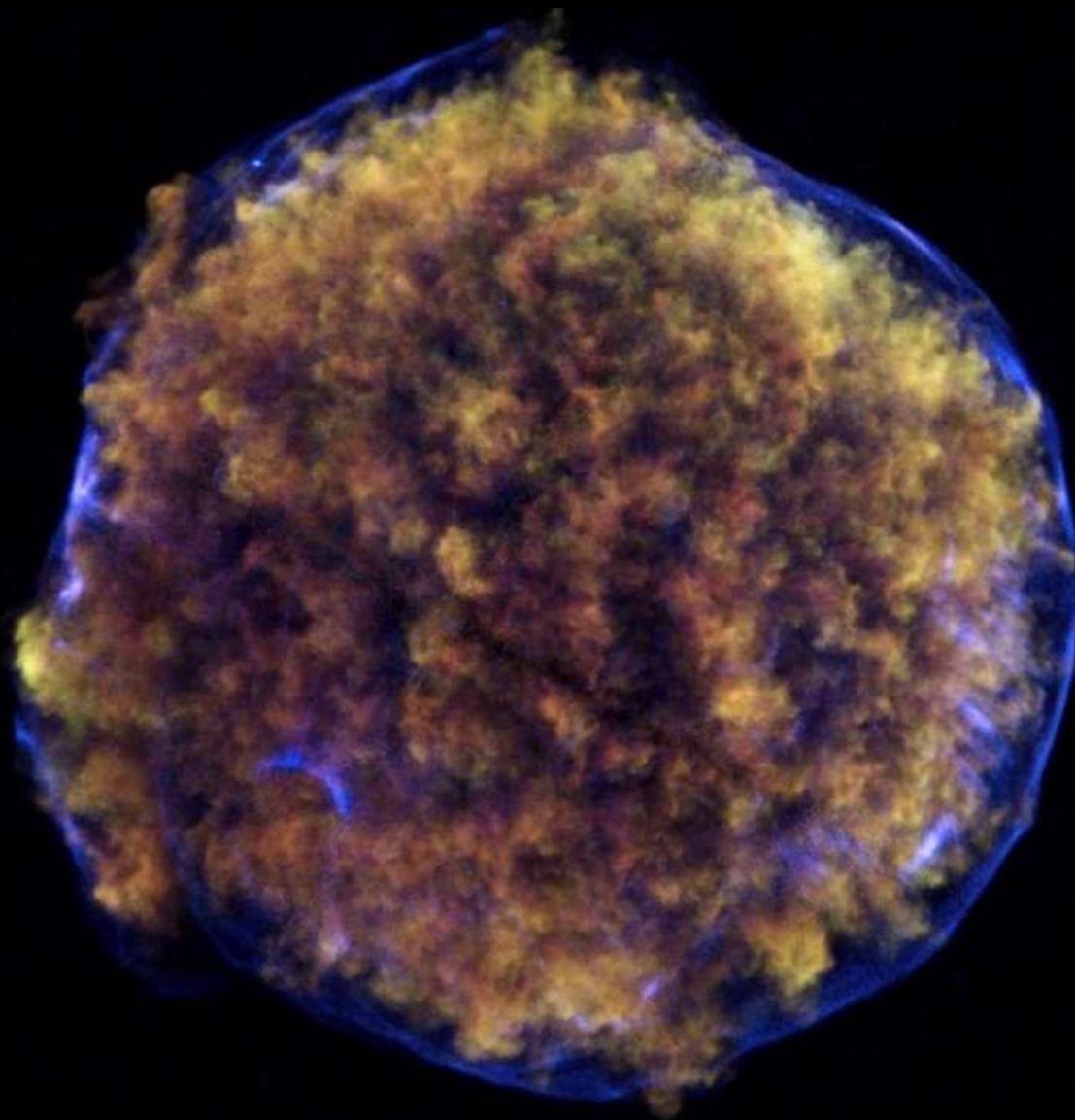
## Сверхновые 1-го типа

Эволюция двойных систем, в которых белый карлик притягивает внешние оболочки соседней звезды, принимая часть ее массы, может привести к запуску углеродного цикла и взрыву белого карлика как яркой сверхновой.

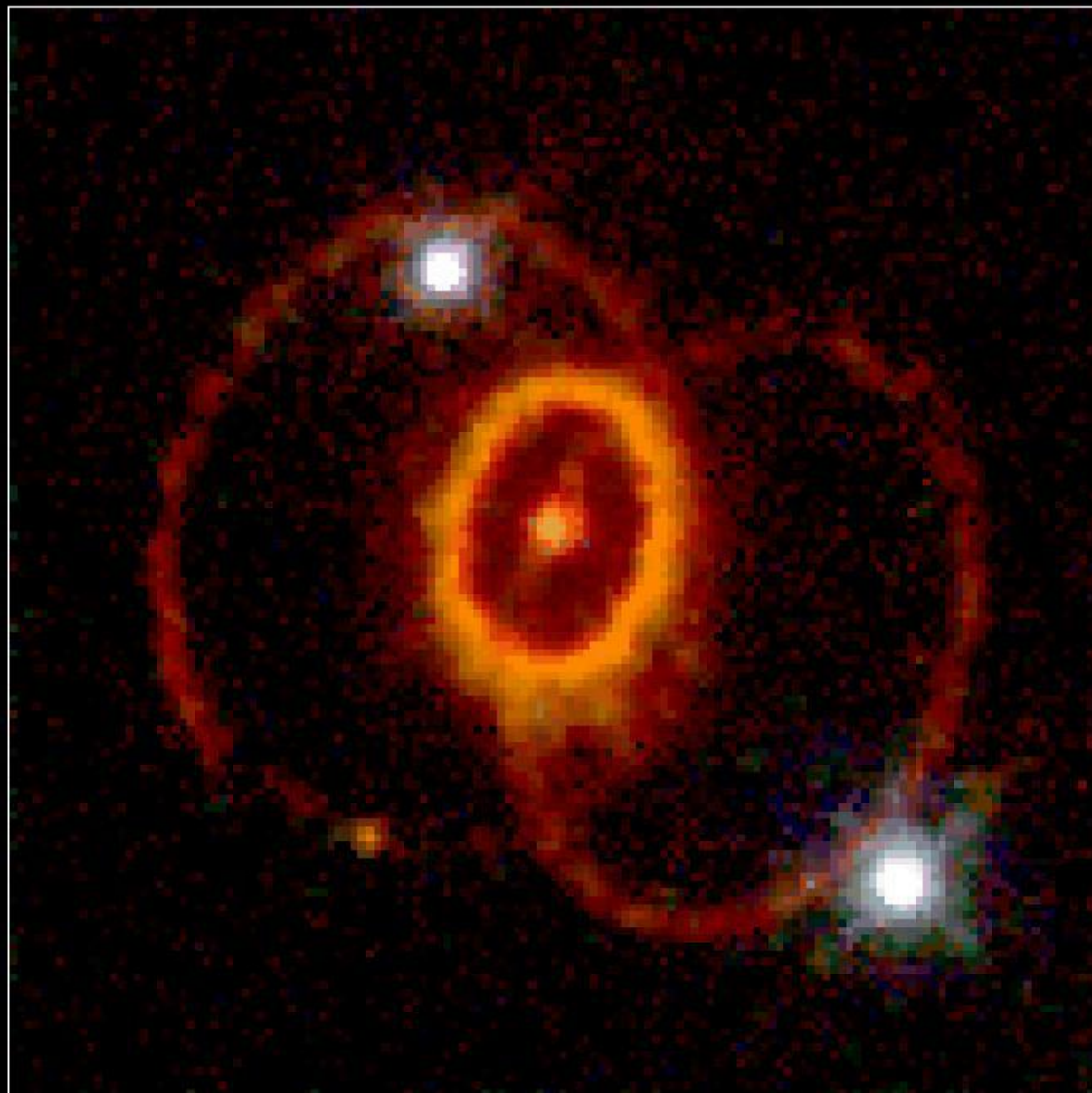




Вещество, выброшенное сверхновой, движется прочь от центра звезды. Образующаяся туманность называется остатком сверхновой.  
Остаток сверхновой Тихо Браге (XVI век)

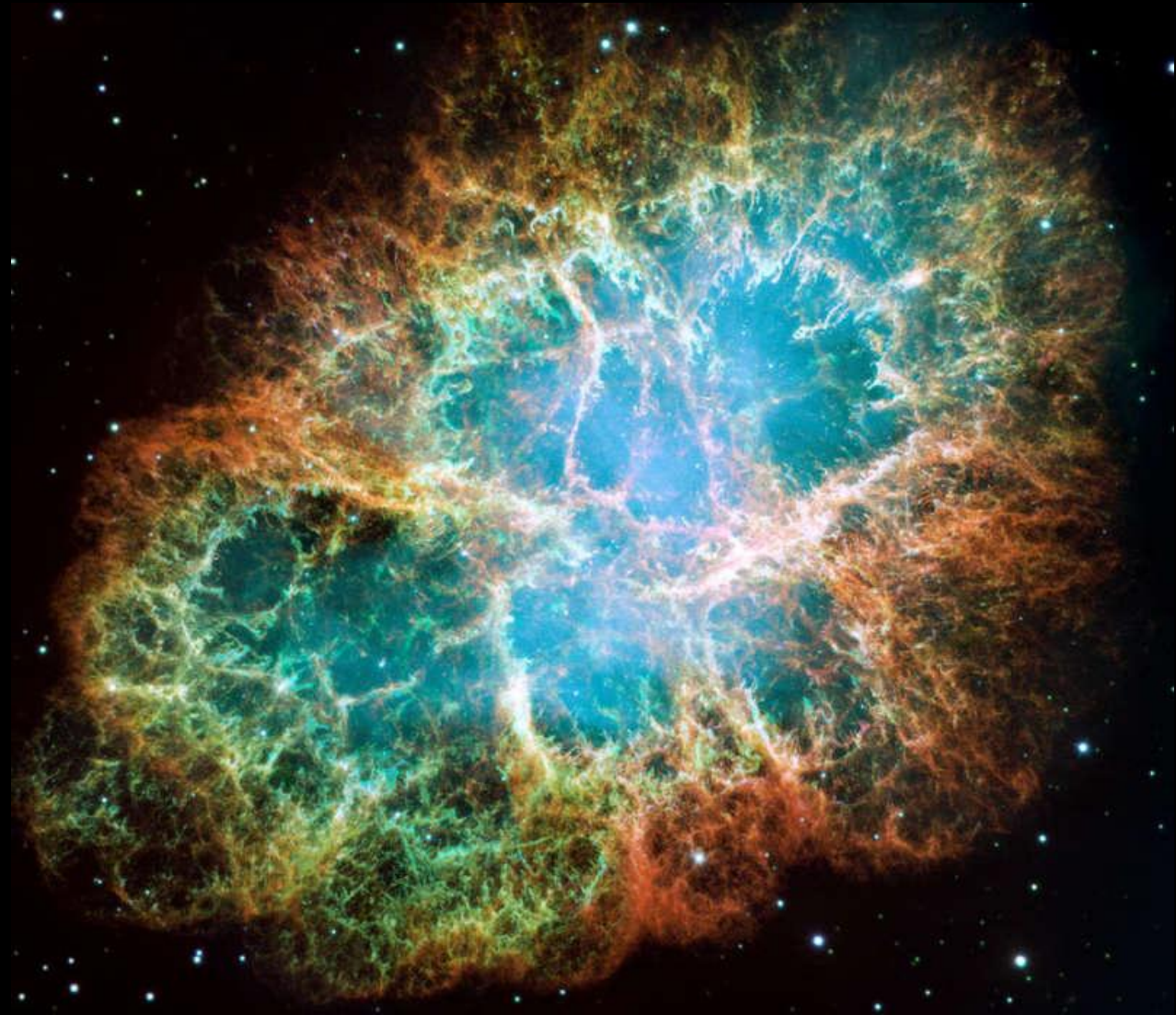


# Supernova 1987A Rings

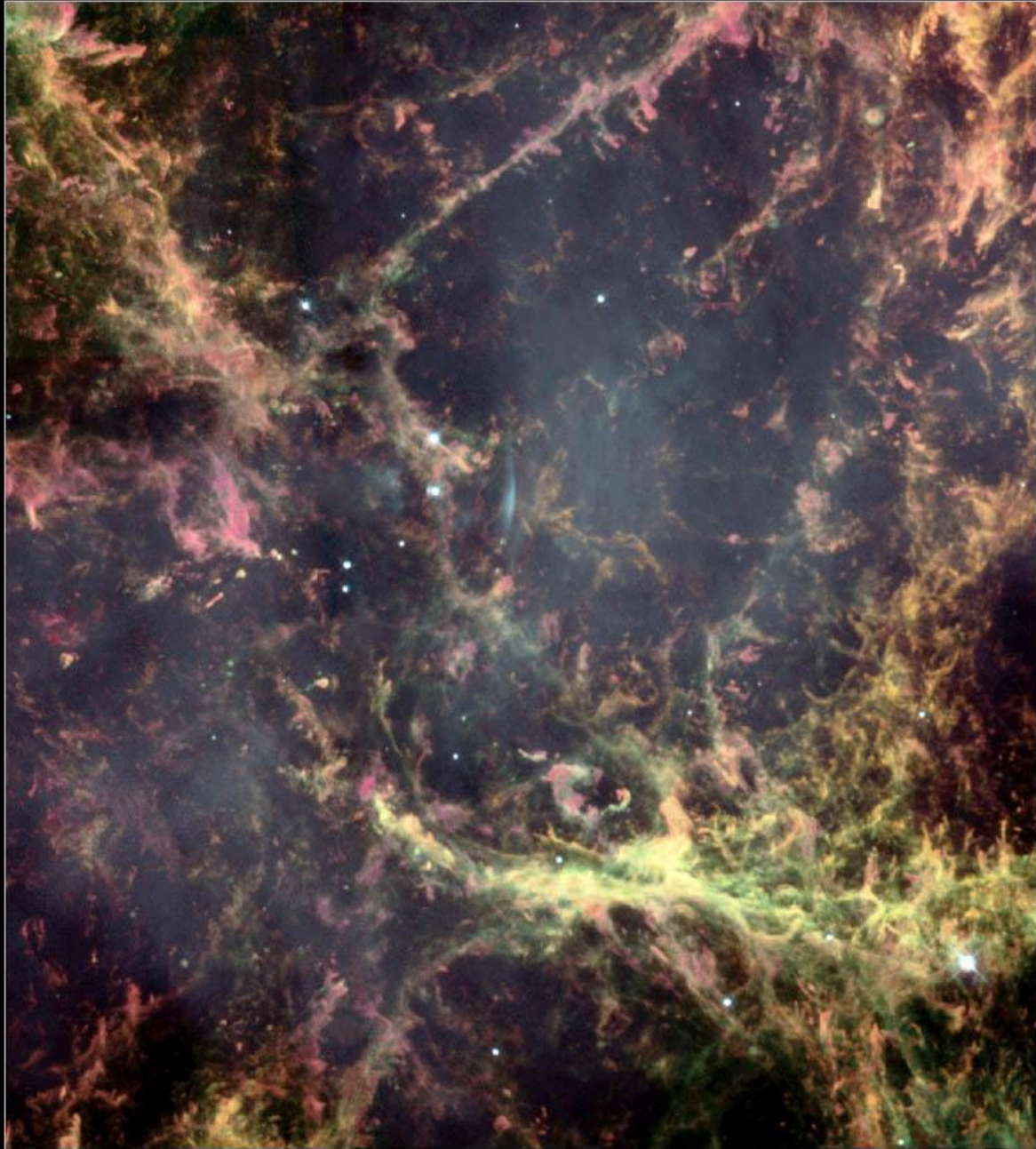


Hubble Space Telescope

Известная Крабовидная туманность образовалась при взрыве сверхновой, наблюдавшейся в 1054 году. Несколько месяцев эта сверхновая была настолько яркой, что ее можно было видеть днем. Поскольку расстояние до этой туманности около 1800 пс, то мы видим все то, что происходило 5400 лет назад. Допплеровское смещение линий в спектре туманности говорит о том, что она расширяется со скоростью несколько тысяч км/с.



# Crab Nebula



Туманность Вуаль в Лебеде –  
остаток сверхновой



## Из чего мы состоим?

К настоящему времени периодическая таблица Менделеева насчитывает 112 элементов. Из них - 91 естественного происхождения, найденных на Земле: 81 стабильных и 10 радиоактивных, распадающихся. Все тела, с которыми мы сталкиваемся каждый день состоят из этих 112 элементов.

В настоящее время во Вселенной наблюдается такая распространенность элементов:

1. Водород: 90%
2. Гелий: 9%
3. Li, Be, B: 0.000001%
4. C, N, O, F, Ne: 0.2%
5. Si–Mn: 0.01%
6. Fe–Ge: 0.01%
7. Элементы средней атомной массы:  $0.00000001\% = 1 \cdot 10^{-7} \%$
8. Тяжелые элементы:  $0.000000001\% = 1 \cdot 10^{-8} \%$

Существует 4 различных процесса, приводящих к образованию химических элементов. Каждый элемент синтезируется в результате сочетания этих процессов.

1. **Начальные элементы.** В самом начале во Вселенной существовали только атомы водорода и гелия. С течением времени Вселенная остывала, в ней создавались условия для синтеза более тяжелых элементов.
2. **Звездный нуклеосинтез.** (протон-протонный цикл, гелиевый цикл, углеродный цикл и т.д.) создал все легкие элементы до железа.
3. **Нейтронный захват (s-процесс).** Элементы тяжелее железа образовывались из железа в ходе процесса, названного нейтронным захватом. Ядра железа поглощают нейтроны. Это превращает их в тяжелые изотопы железа. Такие изотопы нестабильны, они распадаются, нейтроны превращаются в протоны, испуская электрон и нейтрино. Так появляется ядро атома нового элемента с зарядом, большим, чем у железа. Новое ядро снова захватывает нейтрон, становится тяжелее, и распадается с испусканием электрона и нейтрино. Такая последовательность превращений называется s-процессом (slow-медленный). Он протекает в обычных звездах и может синтезировать тяжелые элементы вплоть до висмута.
4. **Нейтронный захват (r-процесс).** Во время взрыва сверхновой разлетается множество высокоэнергичных нейтронов. На своем пути они бомбардируют ядра атомов. В свою очередь ядра могут захватывать по несколько нейтронов. При этом возможно образование элементов тяжелее висмута. Такие превращения называются r-процессом (rapid-быстрый).

## Почему мы уверены, что элементы образуются именно так?

1. Нейтронный захват и распад ядра хорошо изучены в лабораторных условиях. Результаты лабораторных экспериментов согласованы с моделями Вселенной, начиная с Большого Взрыва, и данными наблюдений.
2. Технеций-99 является непосредственным доказательством того, что тяжелые элементы образуются в звездах. Период полураспада этого элемента 200 000 лет, ничтожный срок по астрономическим меркам. Но мы наблюдаем этот элемент сегодня в атмосферах звезд, образовавшихся сотни миллионов и миллиарды лет назад. За это время технеций-99 полностью бы распался.
3. В спектрах сверхновых 1-го типа наблюдаются линии никеля-56 (период полураспада 55 суток) и много других короткоживущих изотопов, образующихся при взрыве и вскоре распадающихся.



## ВОПРОСЫ

1. Какие звезды относятся к главной последовательности?
2. Опишите как устанавливается температурное равновесие звезды. Основное условие протекания термоядерного синтеза.
3. Опишите как устанавливается гидростатическое равновесие звезды.
4. На чем основана спектральная классификация звезд?
5. Назовите спектральные классы звезд в порядке уменьшения их температуры.
6. От чего зависит цвет поверхности звезды?
7. Какое событие выводит звезду на главную последовательность?
8. Почему большинство звезд на небе относят к звездам главной последовательности?
9. Чем определяется продолжительность пребывания звезды на главной последовательности?
10. Сколько времени будет находиться на главной последовательности наше Солнце?
11. Из каких химических элементов состоят звезды?
12. Назовите источник энергии термоядерного синтеза.
13. Может ли водород превращаться в гелий не в протон-протонном цикле, а иначе?
14. Какие условия необходимы для протекания протон-протонного цикла?
15. Почему звезды эволюционируют?
16. Почему для синтеза элементов тяжелее гелия необходима более высокая температура?
17. Почему в недрах звезд не синтезируются элементы тяжелее железа?

18. Почему при сжатии масс выделяется энергия?
19. Как ведет себя температура идеального газа при повышении давления? При понижении?
20. Что происходит в ядре звезды после исчерпания водорода?
21. Что такое вырожденный газ? Чем его поведение отличается от поведения идеального газа?
22. Опишите поведение звезды на главной последовательности.
23. Когда звезды покидают главную последовательность?
24. Что происходит со звездой после того как она покинула главную последовательность?
25. Что происходит со звездой с массой меньше 8 масс Солнца после того как она покинула главную последовательность?
26. Как образуются планетарные туманности?
27. Что такое «белый карлик»?
28. Что происходит со звездой с массой больше 8 масс Солнца на финальных этапах ее эволюции?
29. Что такое сверхновая 2-го типа? Почему она вспыхивает?
30. Что такое сверхновая 1-го типа?
31. Что остается после взрыва сверхновой? Наблюдаются ли такие остатки?
32. Из каких элементов в основном состоит Вселенная?
33. Как образуются химические элементы? Опишите процессы их образования.
34. Есть ли подтверждения правильности теории образования химических элементов?