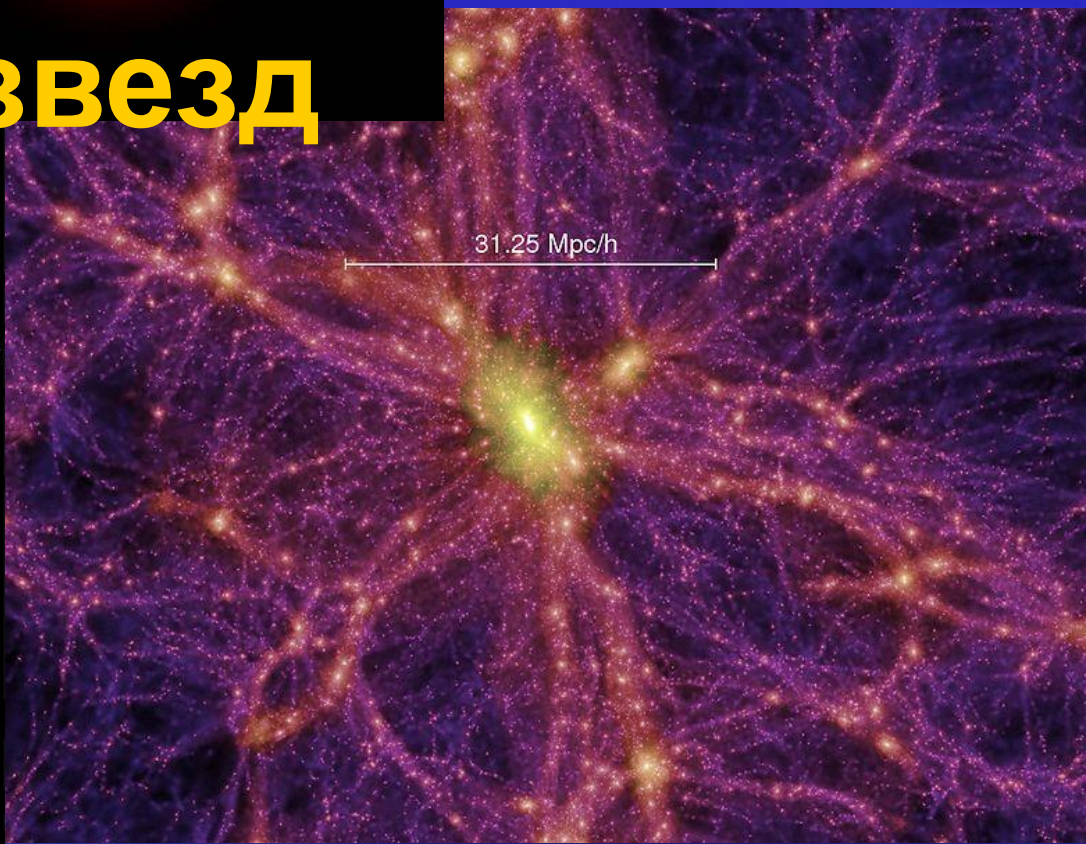
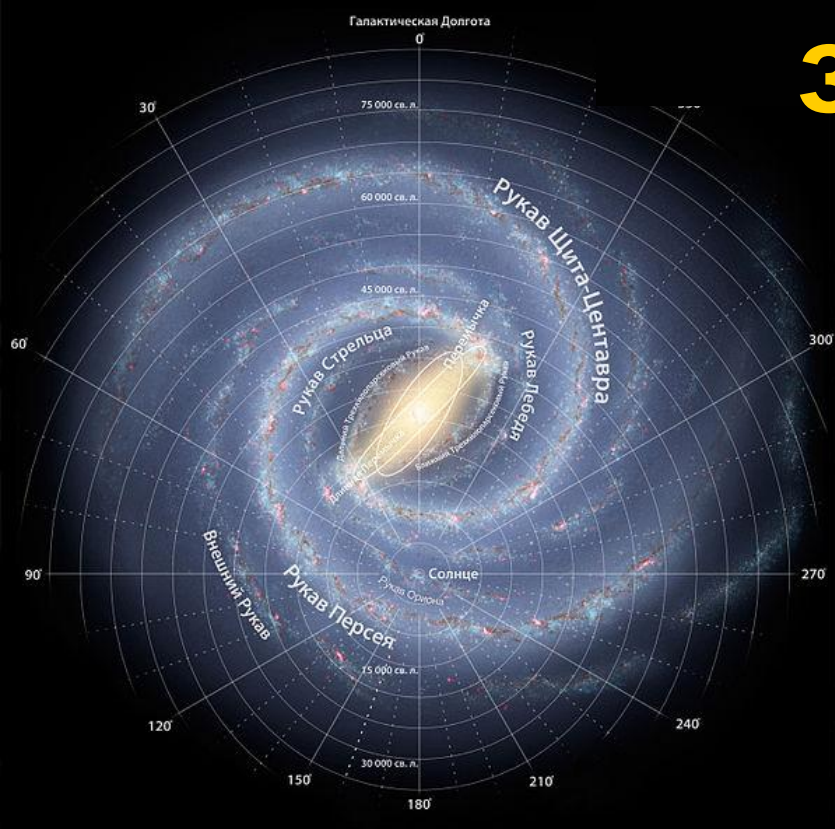


Строение и эволюция звезд



Название диапазона Длины волн, λ

Радиоволны

Сверхдлинные Сверхдлинные
более 10 **км**

Длинные 10 км — 1 км

Средние Средние 1 км — 100 **м**

Короткие 100 м — 10 м

Ультракороткие 10 м — 1 мм

Инфракрасное излучение

1 мм — 780 **нм**

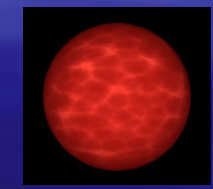
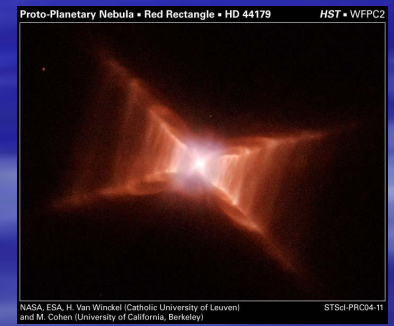
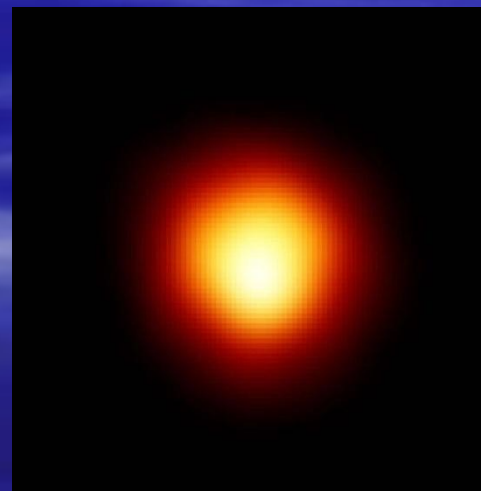
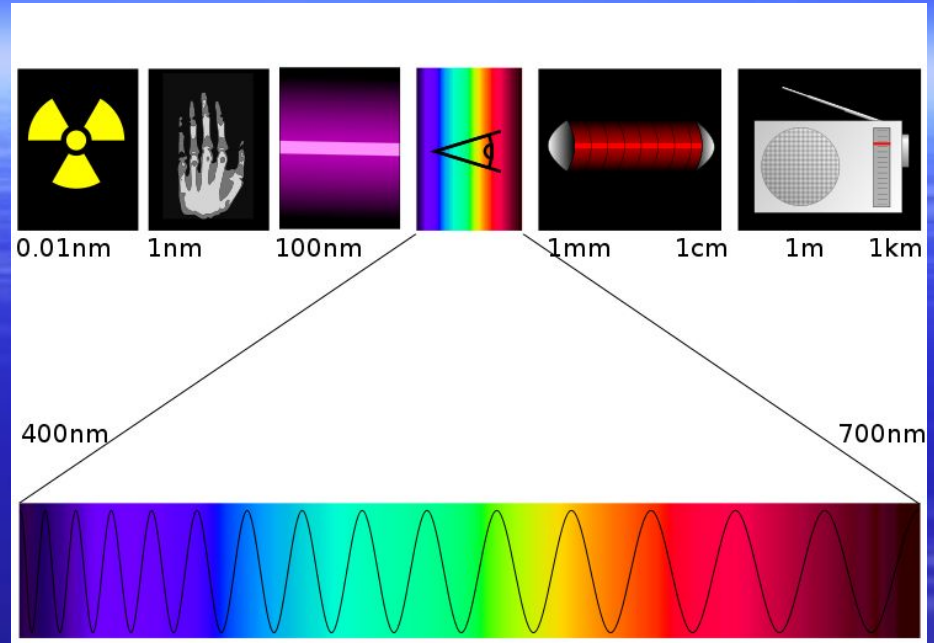
Видимое (оптическое) излучение

780—380 нм

Ультрафиолетовое 380 — 10 нм

Рентгеновские 10 — 5×10^{-3} нм

Гамма менее 5×10^{-3} нм



Большой взрыв -13,7 млрд.лет

Время после Большого взрыва, лет	Событие	Время от сегодняшнего момента, лет
400 тыс.	Космическое микроволновое реликтовое излучение	~13,7 млрд.
380 тыс.-150 млн.	Темные века (Вселенная непрозрачна для света)	13,55 млрд.
400 млн.	Первые звезды	12,7 млрд.
1 млрд.	Первые галактики	
8,7 млрд.	Формирование Солнечной системы	4,6 млрд.

Звездная эволюция

- Массы только что произведенных звезд – от сотен долей до сотни масс Солнца.
- Примерно половина звезд образуются **одиночными**.
Остальные образуют **двойные, тройные** и более сложные системы.



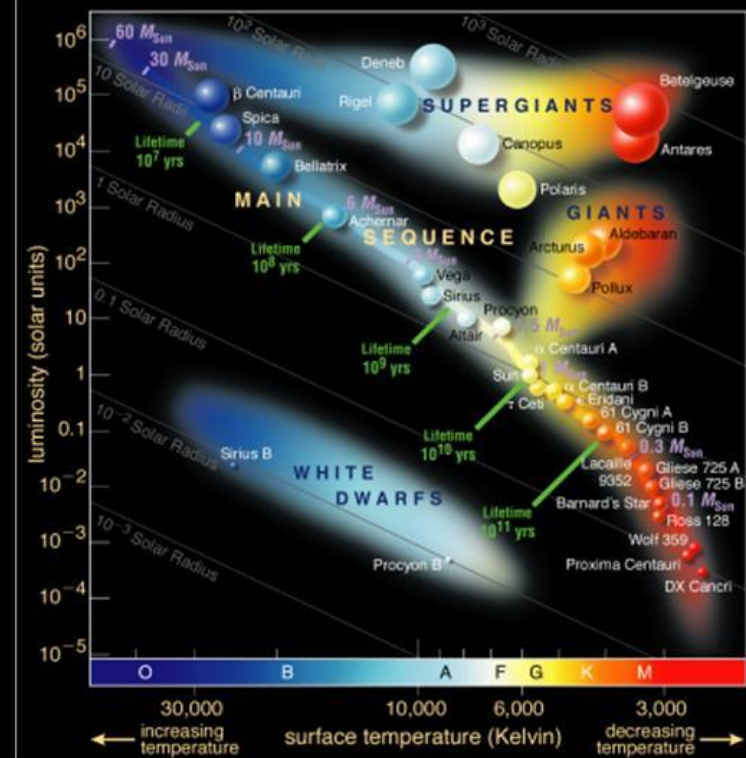
**«Фабрики» по производству звезд –
молекулярные облака**

Звездная эволюция

- Эволюцию физико-химических характеристик звезд астрономы изучают на основе **зависимости их светимости от цвета** (зависит от температуры)
- Составлена астрономами Герцшпрунгом и Расселом в начале XX века
- На диаграмме звезды группируются в **последовательности**:
 - **главную** (проходит через середину диаграммы),
 - **сверхгигантов**,
 - **ярких и слабых гигантов**,
 - **субгигантов**,
 - **субкарликов** и **белых карликов**

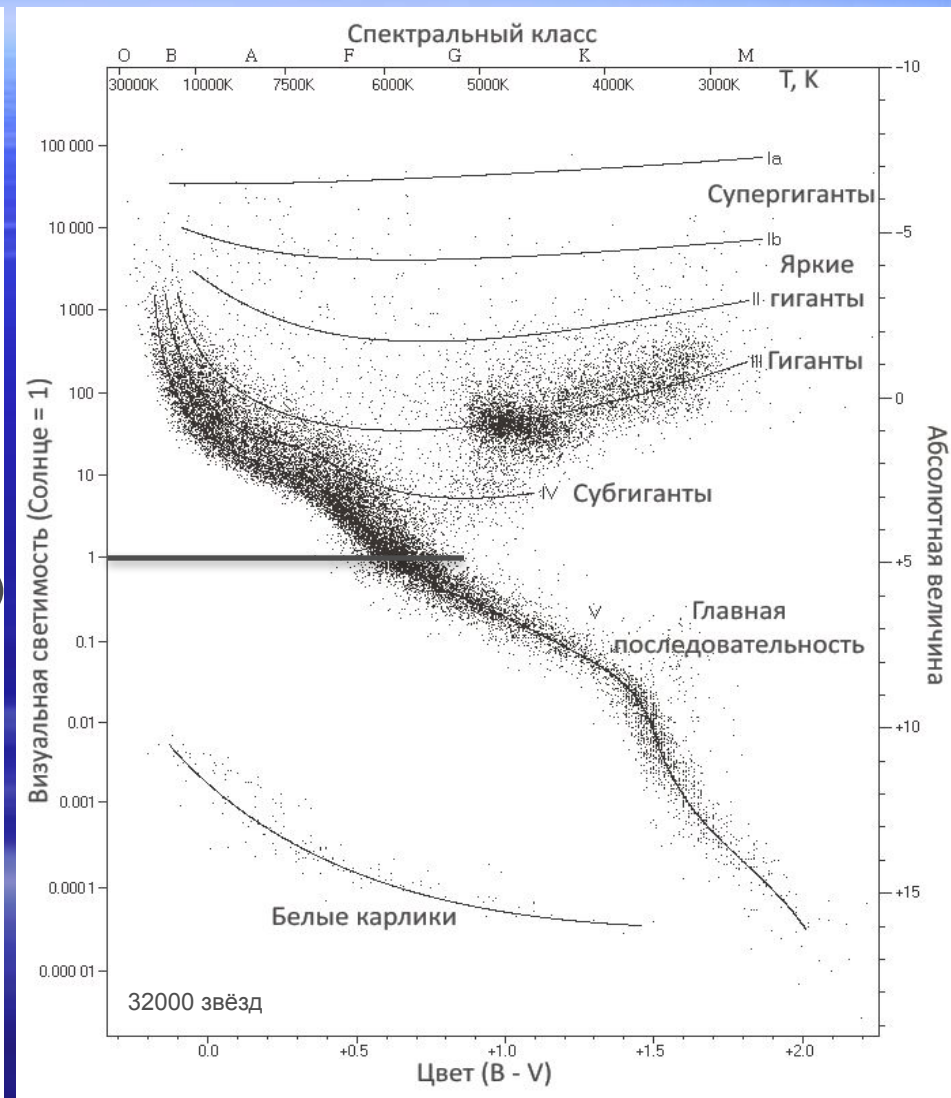
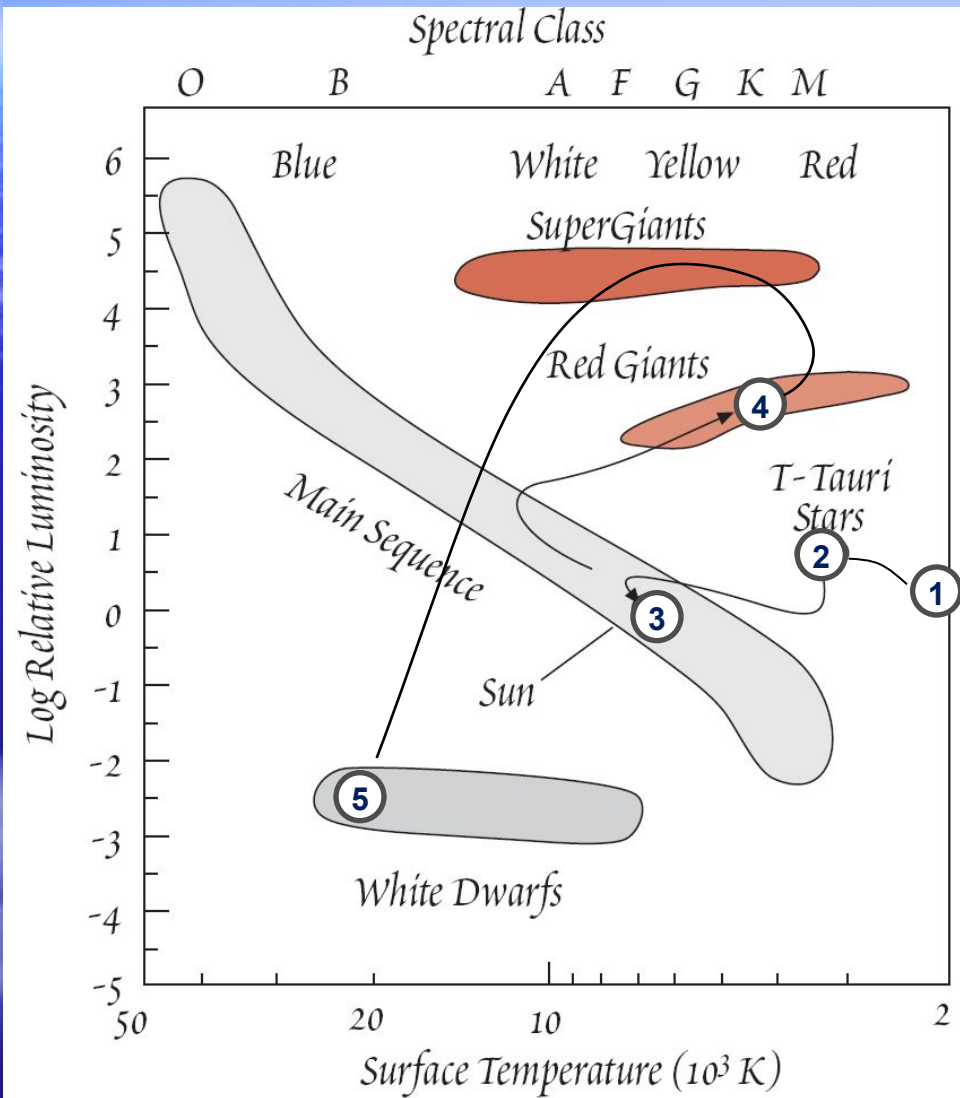
■ Диаграмма Герцшпрунга — Рассела

СВЕТИМОСТЬ (ОТНОСИТЕЛЬНО СОЛНЦА)



температура поверхности (градусы, K)

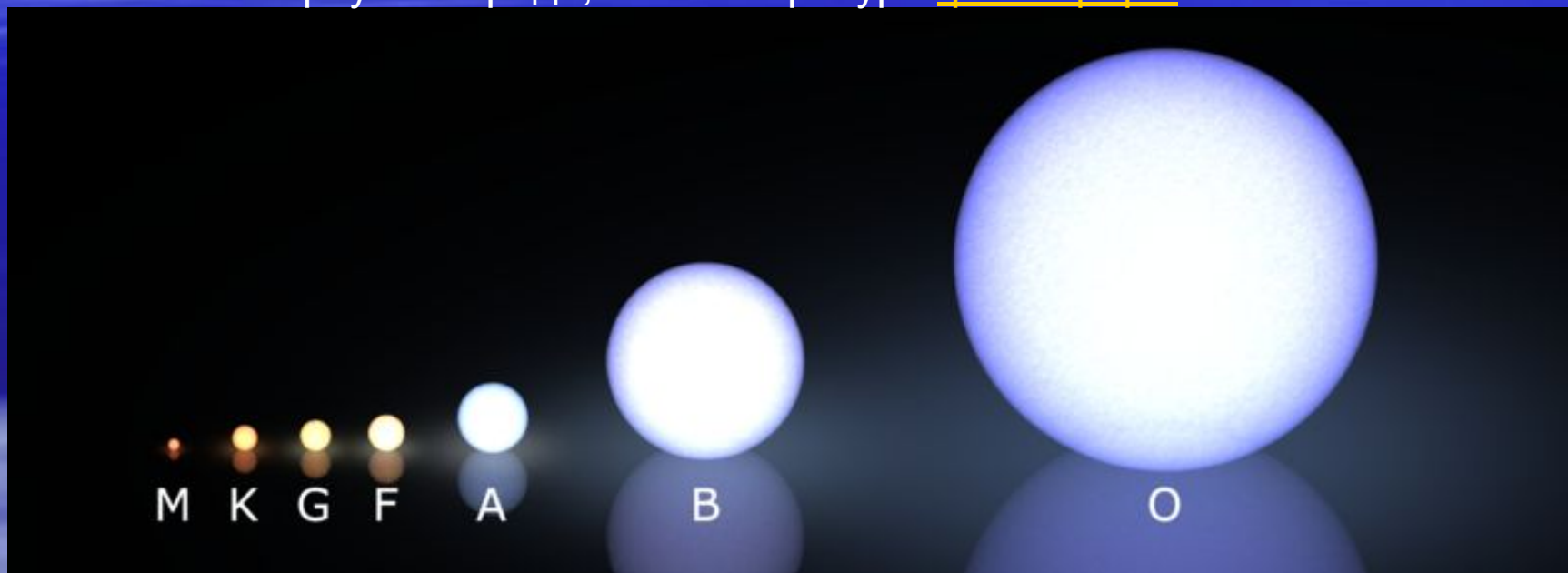
Диаграмма Герцшпрунга и Рассела (светимость— температура поверхности)



Hertzsprung-Russell diagram

Спектральная классификация Моргана-Кинана

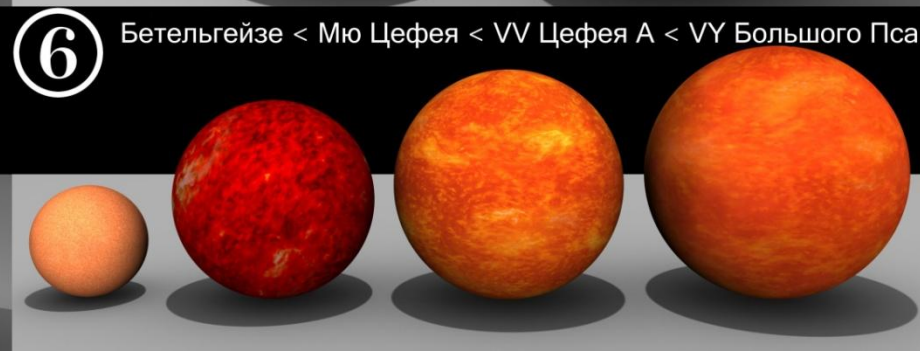
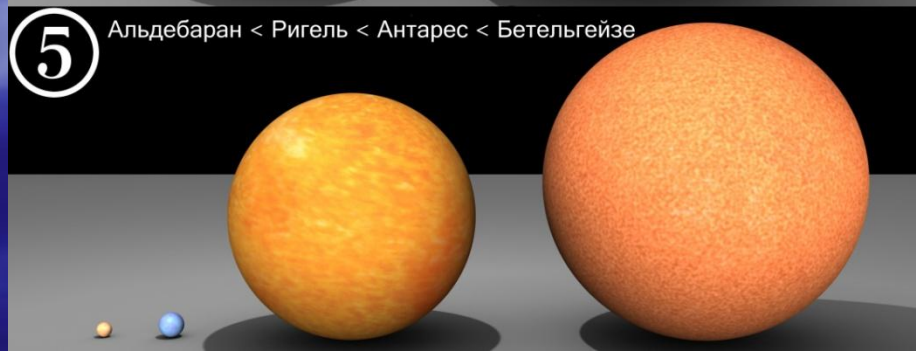
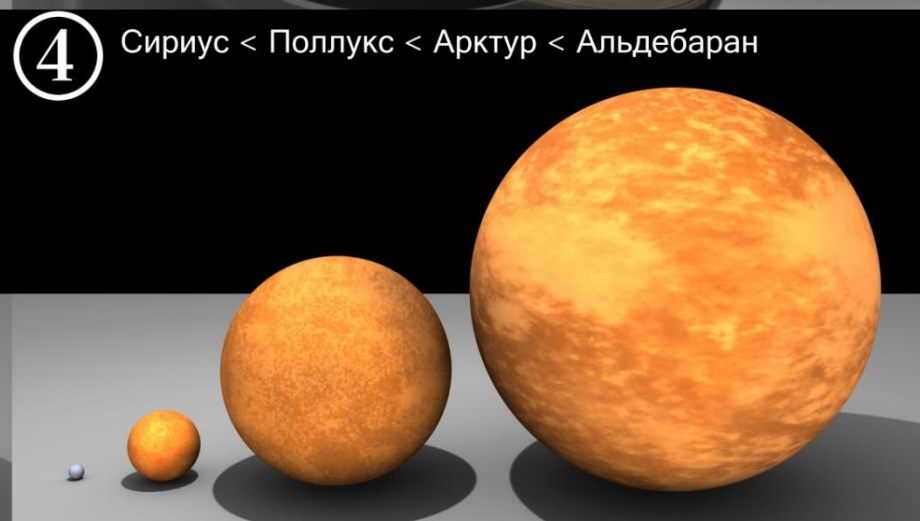
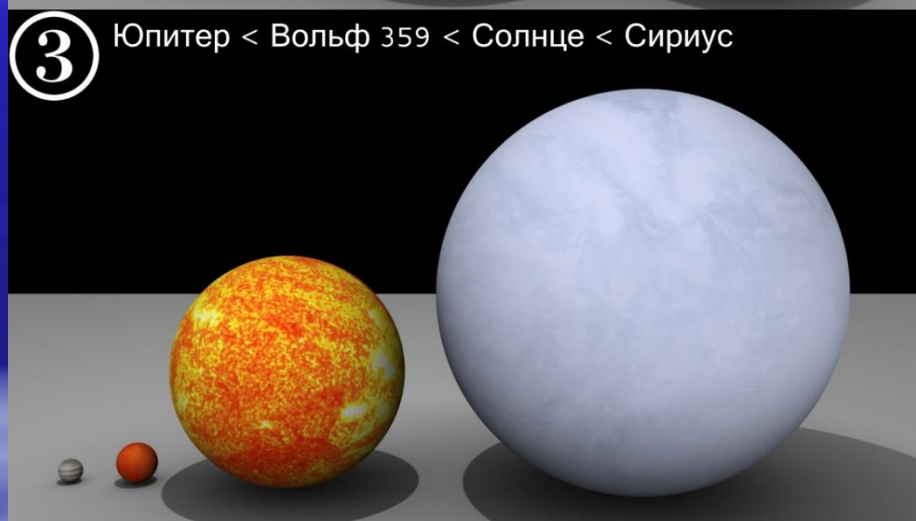
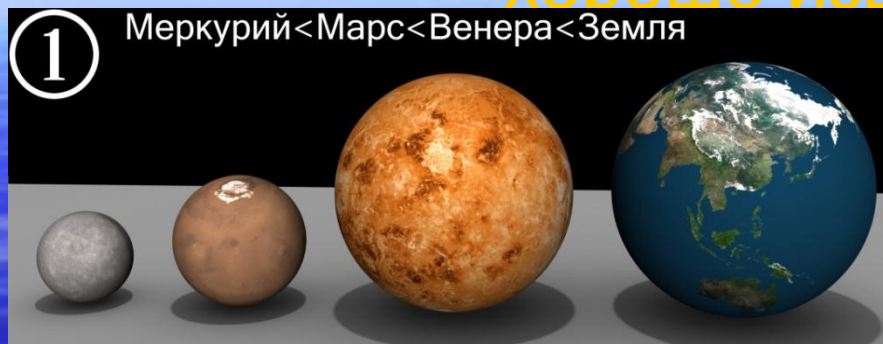
Классификация звёзд Классификация звёзд по спектру излучения, в первую очередь, по температуре фотосферы



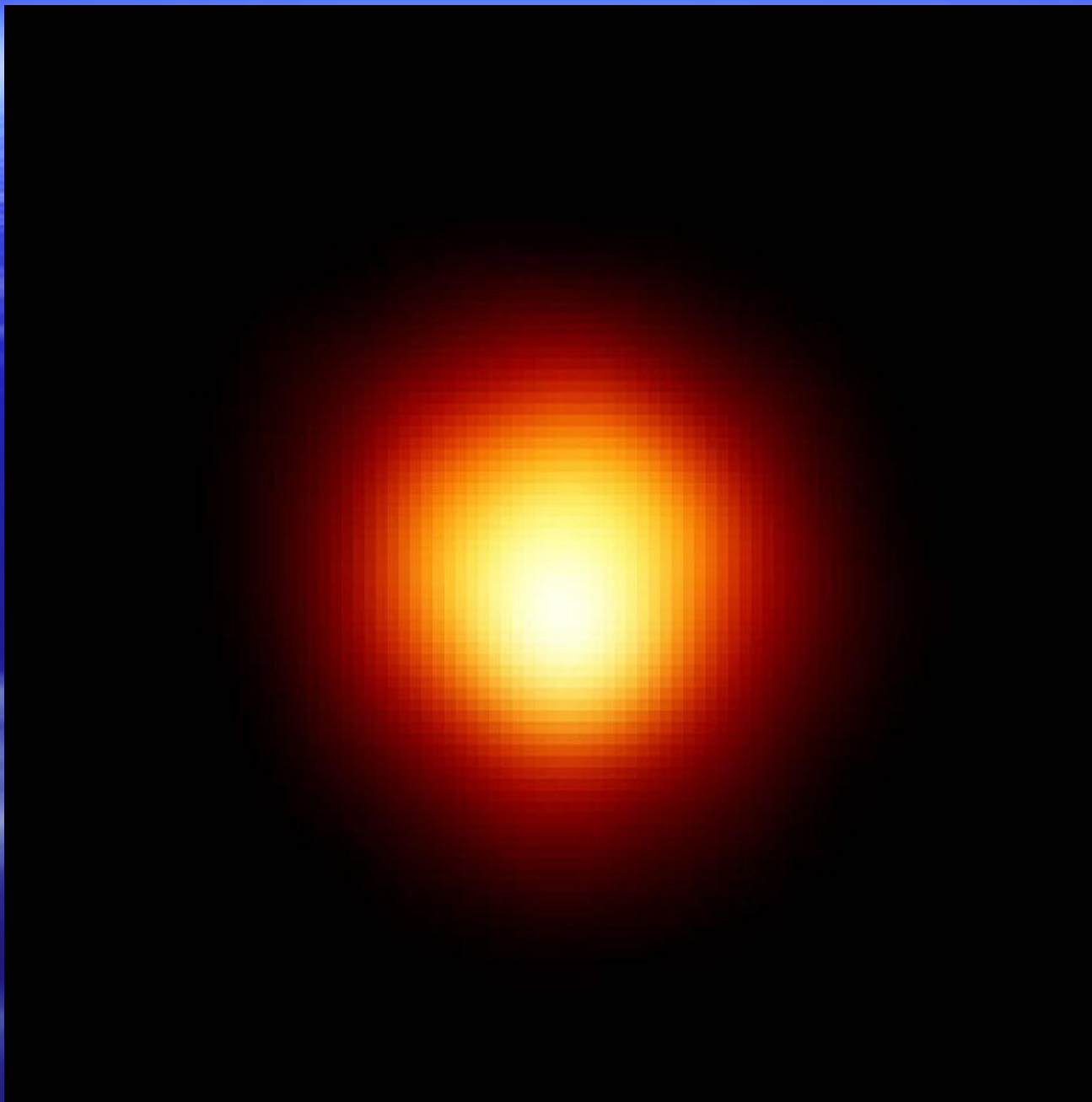
От карликов к гигантам

Современная (гарвардская) спектральная классификация звёзд, разработана в Гарвардской обсерватории разработана в Гарвардской обсерватории в 1890 разработана в Гарвардской обсерватории в 1890—1924 годах

Соотношение размеров планет Соотношение размеров планет Солнечной системы и некоторых ХОРОШО ИЗВЕСТНЫХ ЗВЁЗД



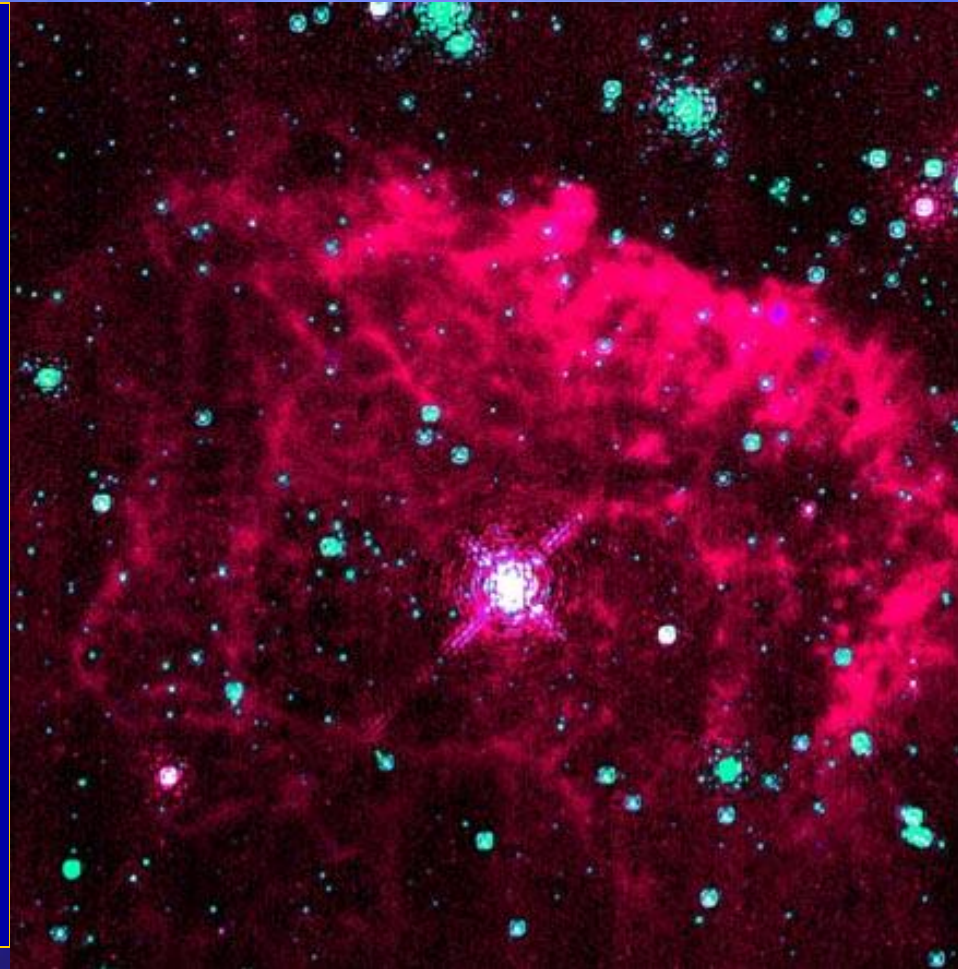
Бетельгейзе Бетельгейзе. фотография сделана с телескопа Хаббл



Звездная эволюция

- 1) Звезда начинает свою жизнь как холодное разреженное **облако межзвёздного газа**, сжимающееся под действием собственного тяготения.
 - **Протозвёзды** — плотные фрагменты молекулярного газопылевого облака, в которых внутренний разогрев еще не достиг границ начала термоядерных реакций, превращающих их в полноценные звезды.

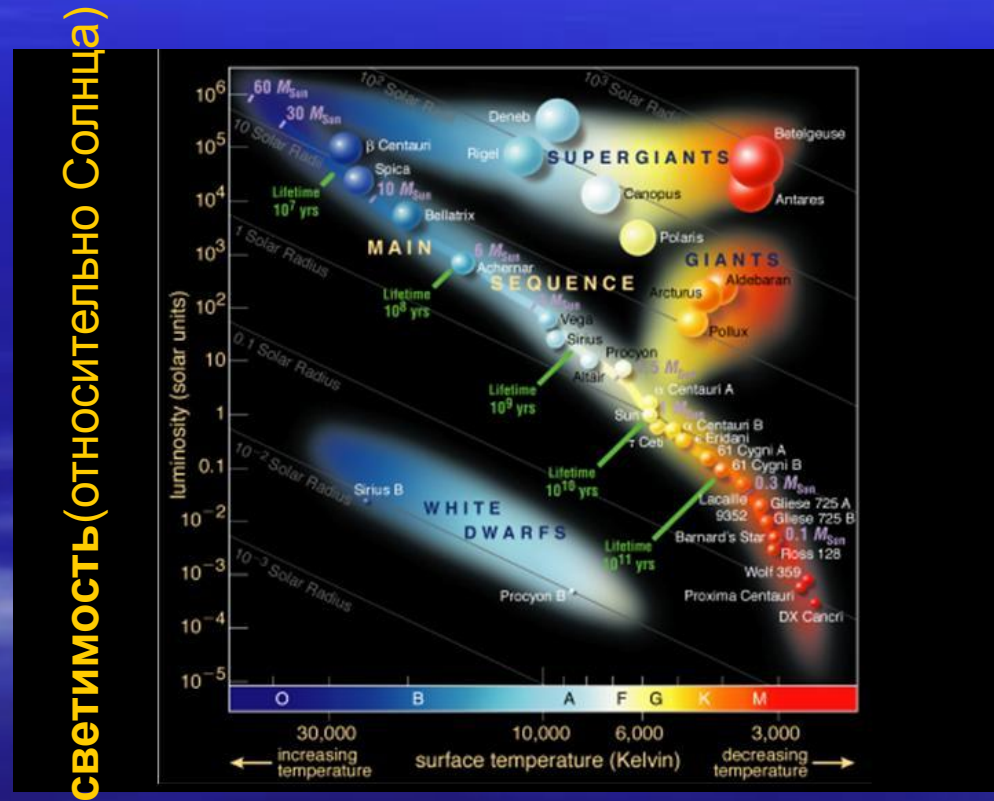
Протозвезда →



Звездная эволюция

- Диаграмма Герцшпрунга — Рассела (диаграмма цвет — звездная величина)

- 2) При сжатии **облака межзвёздного газа** энергия гравитации переходит в тепло → температура газовой глобулы ↑
- Когда температура в ядре достигает нескольких млн. Кельвинов, начинаются реакции **термоядерного синтеза** → лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые ядра



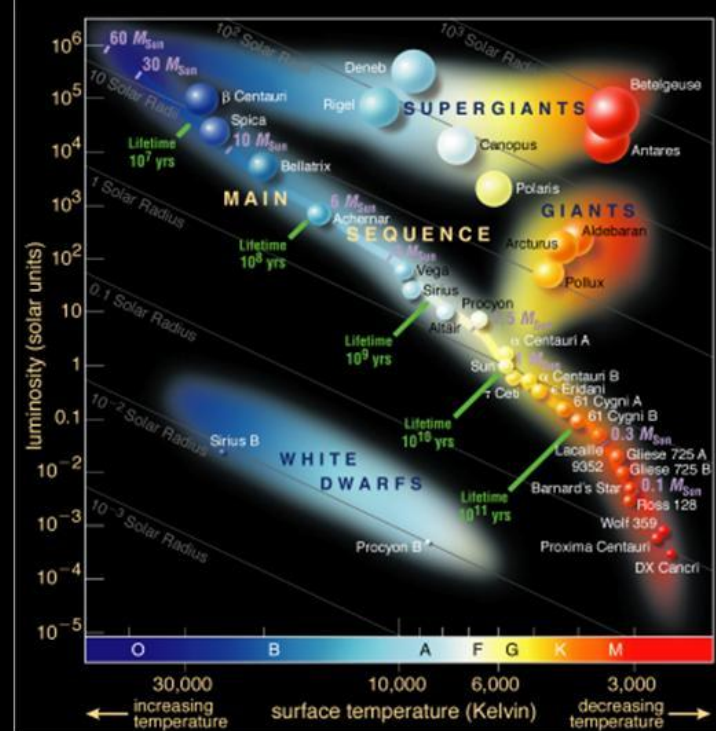
температура поверхности (градусы, К)

Звездная эволюция

- Диаграмма Герцшпрунга — Рассела (диаграмма цвет — звездная величина)

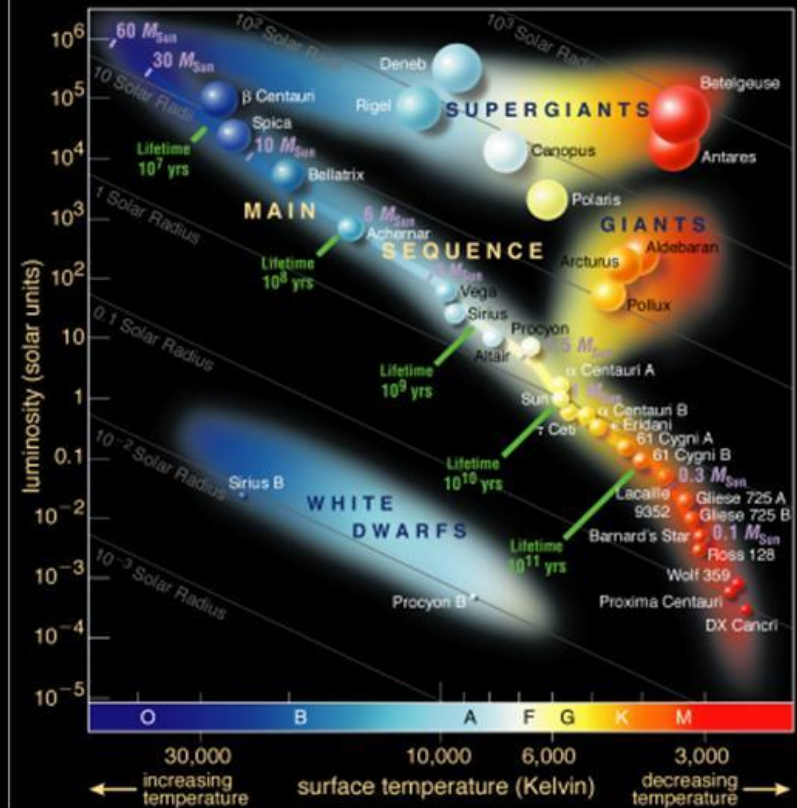
3) После этого сжатие прекращается.

- В таком состоянии звезда пребывает **большую часть своей жизни** — главная последовательность
- Пребывает до тех пор, пока не закончатся запасы топлива в её ядре

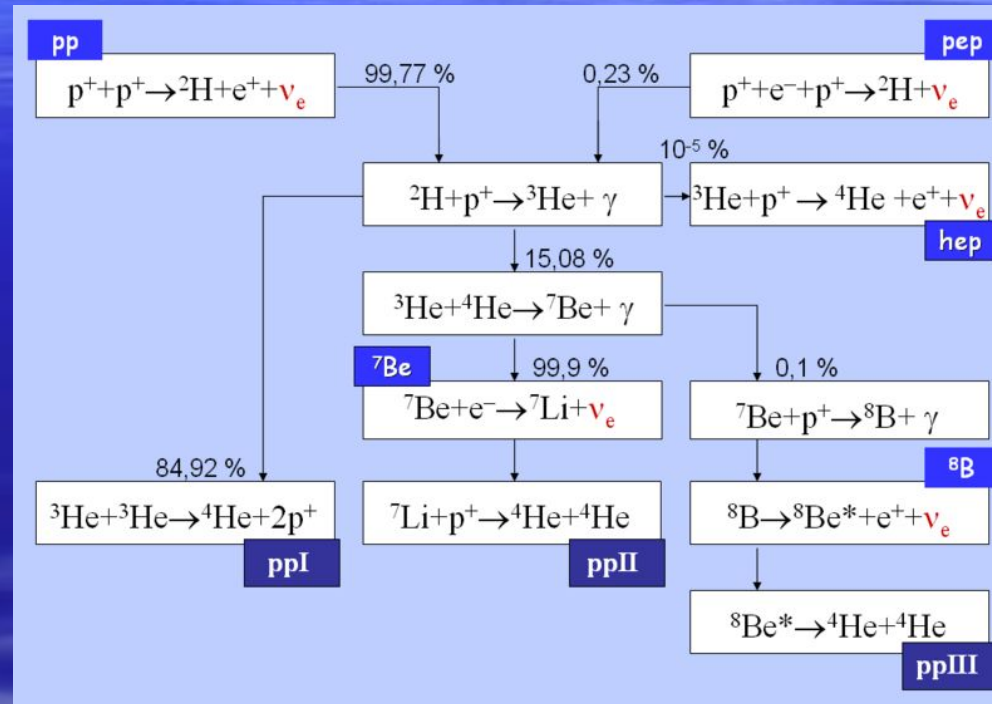
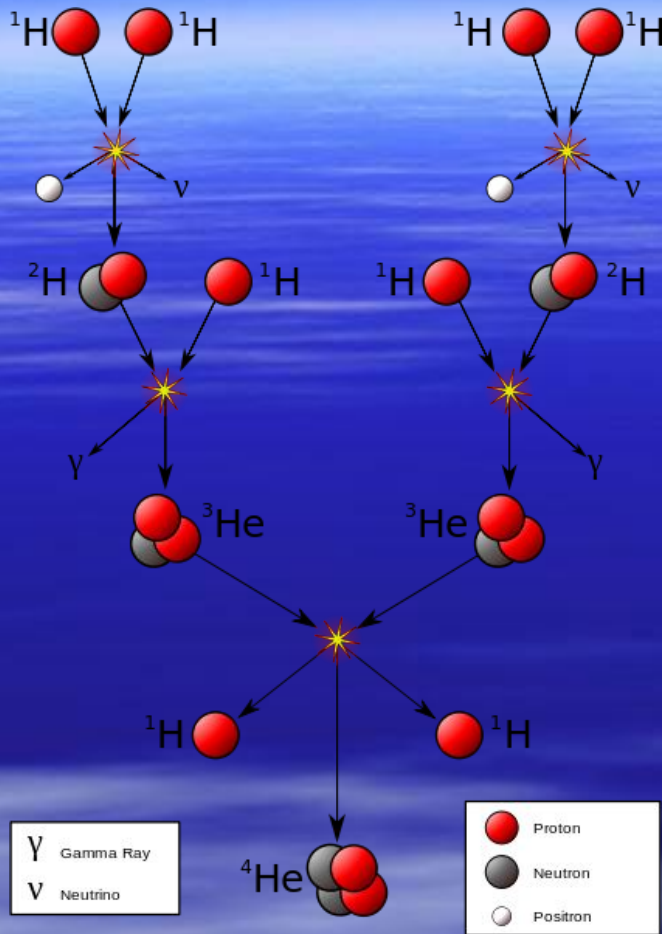


Звездная эволюция

- **Главная последовательность** — область на диаграмме Герцшпрунга — Рассела, содержащая **звёзды** — область на диаграмме Герцшпрунга — Рассела, содержащая звёзды, источником **энергии** — область на диаграмме Герцшпрунга — Рассела, содержащая звёзды, источником энергии которых является **термоядерная реакция** — область на диаграмме Герцшпрунга — Рассела, содержащая звёзды, источником энергии которых является



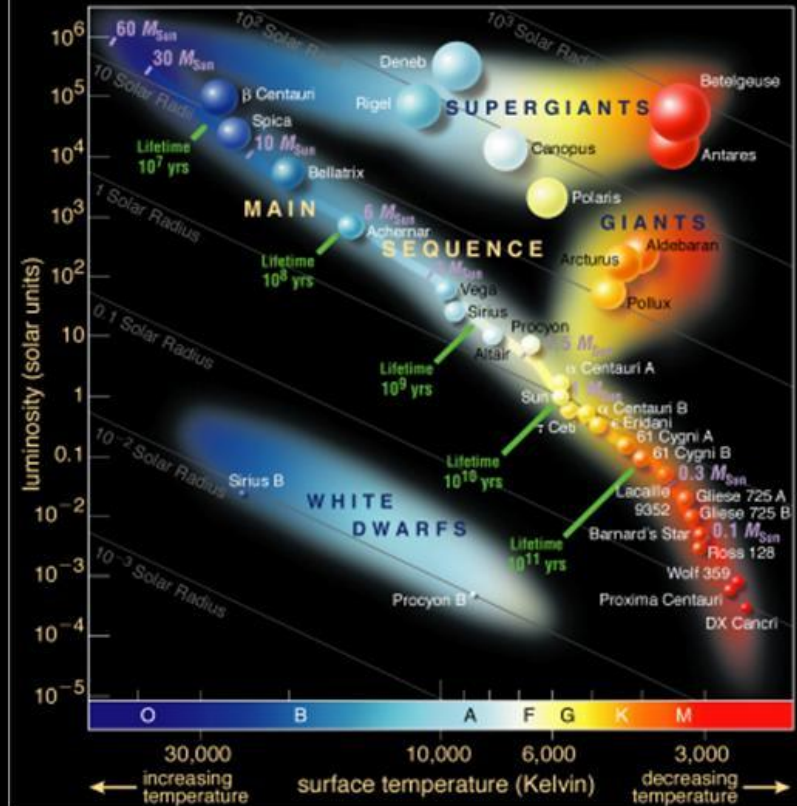
Ветвь ppI – доминирует при температурах от 10 до 14 млн. градусов



Протон-протонный цикл - совокупность термоядерных реакций.
Водород превращается в гелий
 Водород превращается в гелий в звёздах,
 находящиеся на главной звездной последовательности

Звездная эволюция

4) Выгорание водорода в центральных областях звезды приводит к образованию изотермического гелиевого ядра и переходу к стадии красного гиганта



У звезд начинает заканчиваться водород → образуется
гелиевое ядро

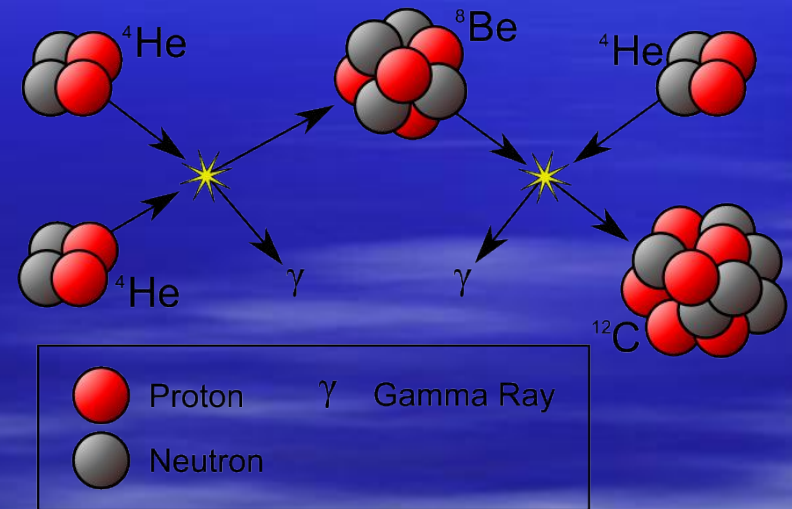
Ядро звезды сжимается до тех пор, пока температура
в его центре не достигнет ~ 100 млн. град.

Кельвина

1 этап – образование
нестабильного ядра бериллия-8



2 этап- образование ядра
углерода-12

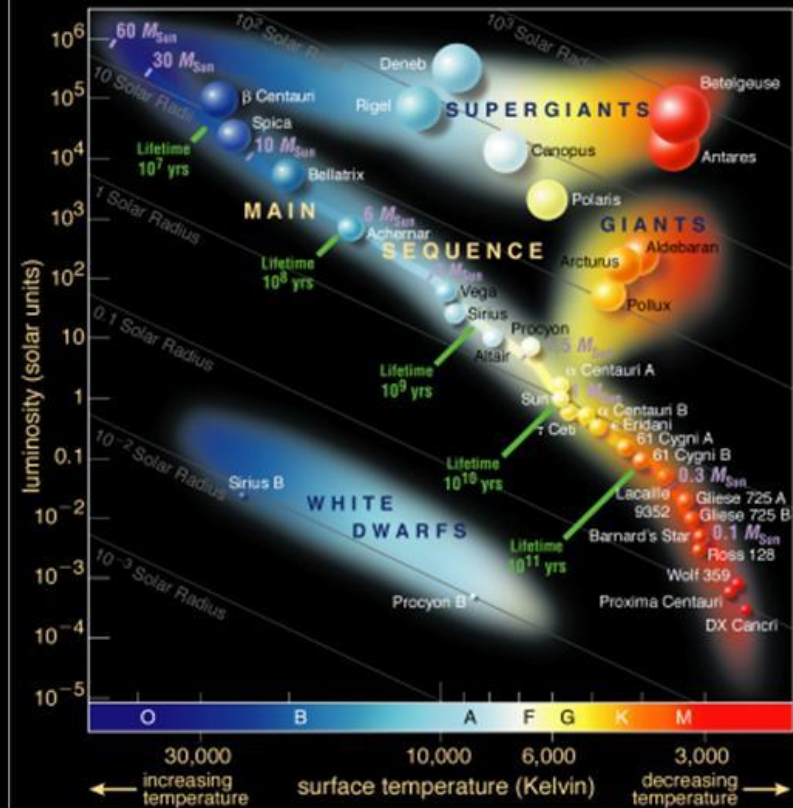


Тройная гелиевая реакция (тройной альфа-процесс)

Звездная эволюция

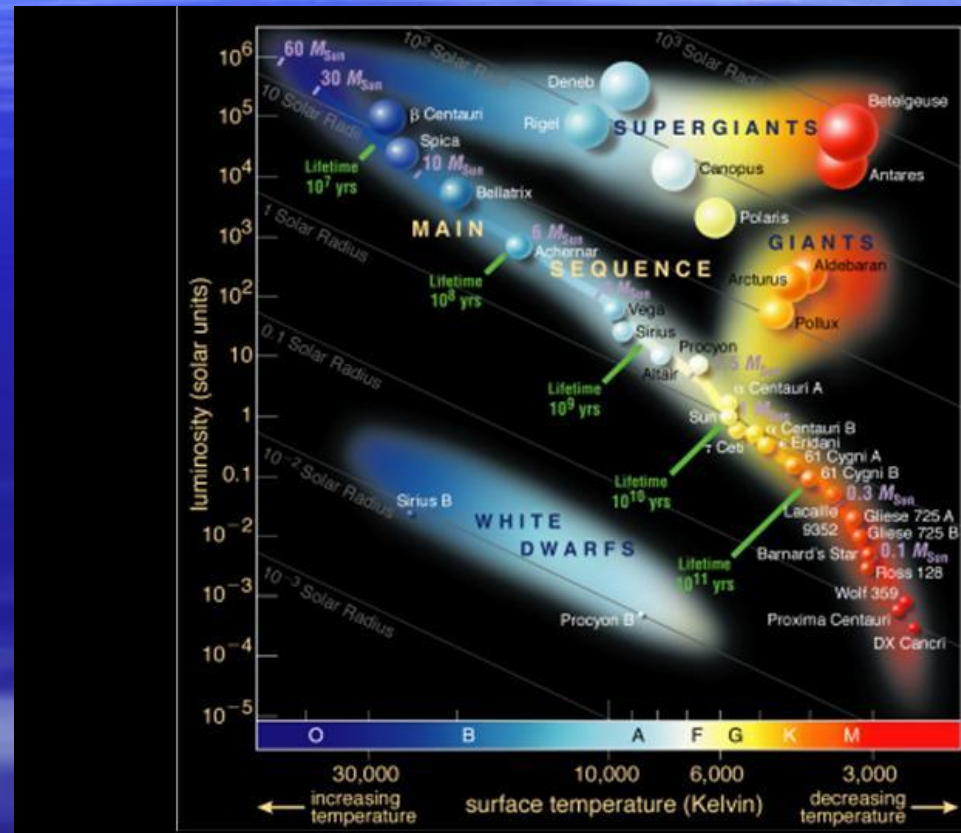
5) Когда масса гелиевого ядра становится значительной, оно не выдерживает собственного веса и начинает сжиматься;

- возрастающая при этом температура стимулирует термоядерное превращение гелия в более тяжёлые элементы



Звездная эволюция

- Вскоре после гелиевой вспышки Вскоре после гелиевой вспышки «загораются» углерод Вскоре после гелиевой вспышки «загораются» углерод и кислород
- Размер атмосферы звезды увеличивается ещё больше
- Она начинает интенсивно терять газ в виде разлетающихся потоков звёздного ветра



Возникновение химических элементов

Если звезда достаточно массивна:
термоядерное превращение гелия в более тяжёлые элементы

- гелий — в углерод,
- углерод — в кислород,
- кислород — в кремний,
- Кремний — в железо

На этом этапе дальнейший термоядерный синтез становится невозможным

Группа Период	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B											
1	1 <u>H</u>																	2 <u>He</u>
2	3 <u>Li</u>	4 <u>Be</u>										5 <u>B</u>	6 <u>C</u>	7 <u>N</u>	8 <u>O</u>	9 <u>F</u>	10 <u>Ne</u>	
3	11 <u>Na</u>	12 <u>Mg</u>										13 <u>Al</u>	14 <u>Si</u>	15 <u>P</u>	16 <u>S</u>	17 <u>Cl</u>	18 <u>Ar</u>	
4	19 <u>K</u>	20 <u>Ca</u>	21 <u>Sc</u>	22 <u>Ti</u>	23 <u>V</u>	24 <u>Cr</u>	25 <u>Mn</u>	26 <u>Fe</u>	27 <u>Co</u>	28 <u>Ni</u>	29 <u>Cu</u>	30 <u>Zn</u>	31 <u>Ga</u>	32 <u>Ge</u>	33 <u>As</u>	34 <u>Se</u>	35 <u>Br</u>	36 <u>Kr</u>

Возникновение химических элементов

- Звезда с $M > 5 M_{\text{солнечных}}$ → стадия красного сверхгиганта → термоядерные реакции от He до Fe
- Коллапс железного ядра → взрыв сверхновой звезды

VIII B

- Разлетающаяся материя бомбардируется вырываемыми из ядра нейтронами; захватывает их.
- Создается набор элементов тяжелее Fe вплоть до урана (92)

1	1 <u>H</u>																	2 <u>He</u>
2	3 <u>Li</u>	4 <u>Be</u>											5 <u>B</u>	6 <u>C</u>	7 <u>N</u>	8 <u>O</u>	9 <u>F</u>	10 <u>Ne</u>
3	11 <u>Na</u>	12 <u>Mg</u>											13 <u>Al</u>	14 <u>Si</u>	15 <u>P</u>	16 <u>S</u>	17 <u>Cl</u>	18 <u>Ar</u>
4	19 <u>K</u>	20 <u>Ca</u>	21 <u>Sc</u>	22 <u>Ti</u>	23 <u>V</u>	24 <u>Cr</u>	25 <u>Mn</u>	26 <u>Fe</u>	27 <u>Co</u>	28 <u>Ni</u>	29 <u>Cu</u>	30 <u>Zn</u>	31 <u>Ga</u>	32 <u>Ge</u>	33 <u>As</u>	34 <u>Se</u>	35 <u>Br</u>	36 <u>Kr</u>
5	37 <u>Rb</u>	38 <u>Sr</u>	39 <u>Y</u>	40 <u>Zr</u>	41 <u>Nb</u>	42 <u>Mo</u>	43 <u>Tc</u>	44 <u>Ru</u>	45 <u>Rh</u>	46 <u>Pd</u>	47 <u>Ag</u>	48 <u>Cd</u>	49 <u>In</u>	50 <u>Sn</u>	51 <u>Sb</u>	52 <u>Te</u>	53 <u>I</u>	54 <u>Xe</u>
6	55 <u>Cs</u>	56 <u>Ba</u>	*	72 <u>Hf</u>	73 <u>Ta</u>	74 <u>W</u>	75 <u>Re</u>	76 <u>Os</u>	77 <u>Ir</u>	78 <u>Pt</u>	79 <u>Au</u>	80 <u>Hg</u>	81 <u>Tl</u>	82 <u>Pb</u>	83 <u>Bi</u>	84 <u>Po</u>	85 <u>At</u>	86 <u>Rn</u>
7	87 <u>Fr</u>	88 <u>Ra</u>	**	104 <u>Rf</u>	105 <u>Db</u>	106 <u>Sg</u>	107 <u>Bh</u>	108 <u>Hs</u>	109 <u>Mt</u>	110 <u>Ds</u>	111 <u>Rg</u>	112 <u>Cn</u>	113 <u>Uut</u>	114 <u>Uu</u> q	115 <u>Uu</u> p	116 <u>Uu</u> h	117 <u>Uus</u>	118 <u>Uu</u> o

Звездная эволюция

6) Относительно краткая эволюция **красных гигантов** приводит, в зависимости от их массы, к образованию:

- 1 - белых карликов
- 2 - нейтронных звёзд
- 2 - нейтронных звёзд
- 3 - чёрных дыр

- В двух последних случаях завершение эволюции звёзд сопровождается катастрофическими событиями — вспышками **сверхновых**

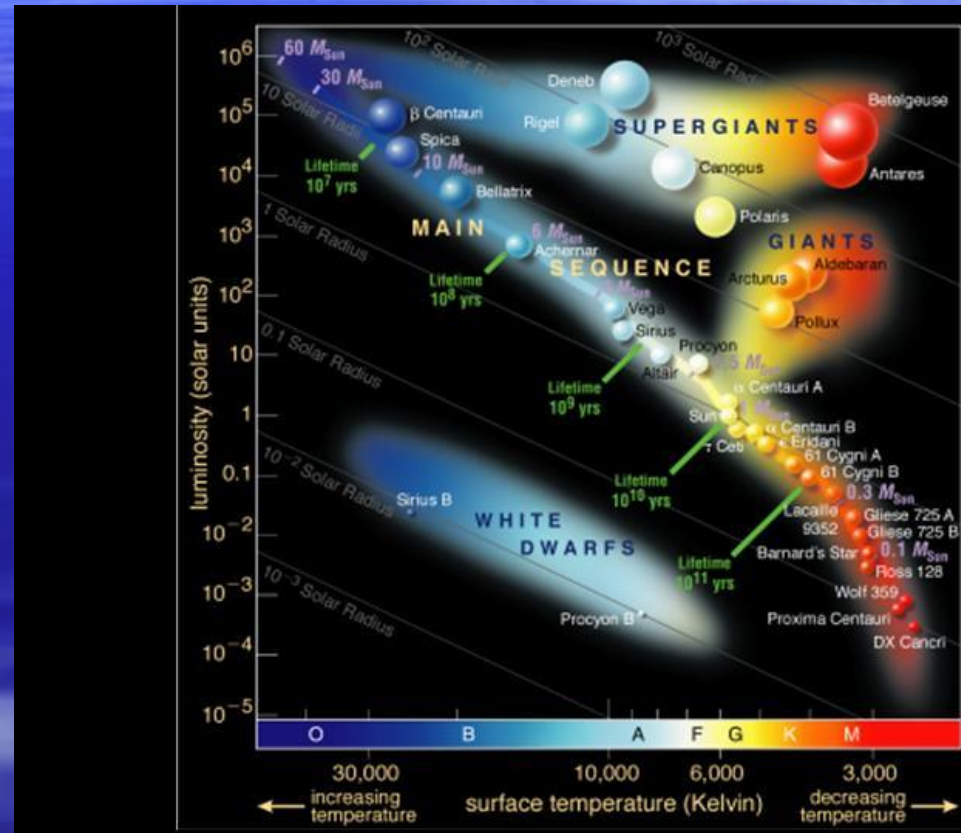
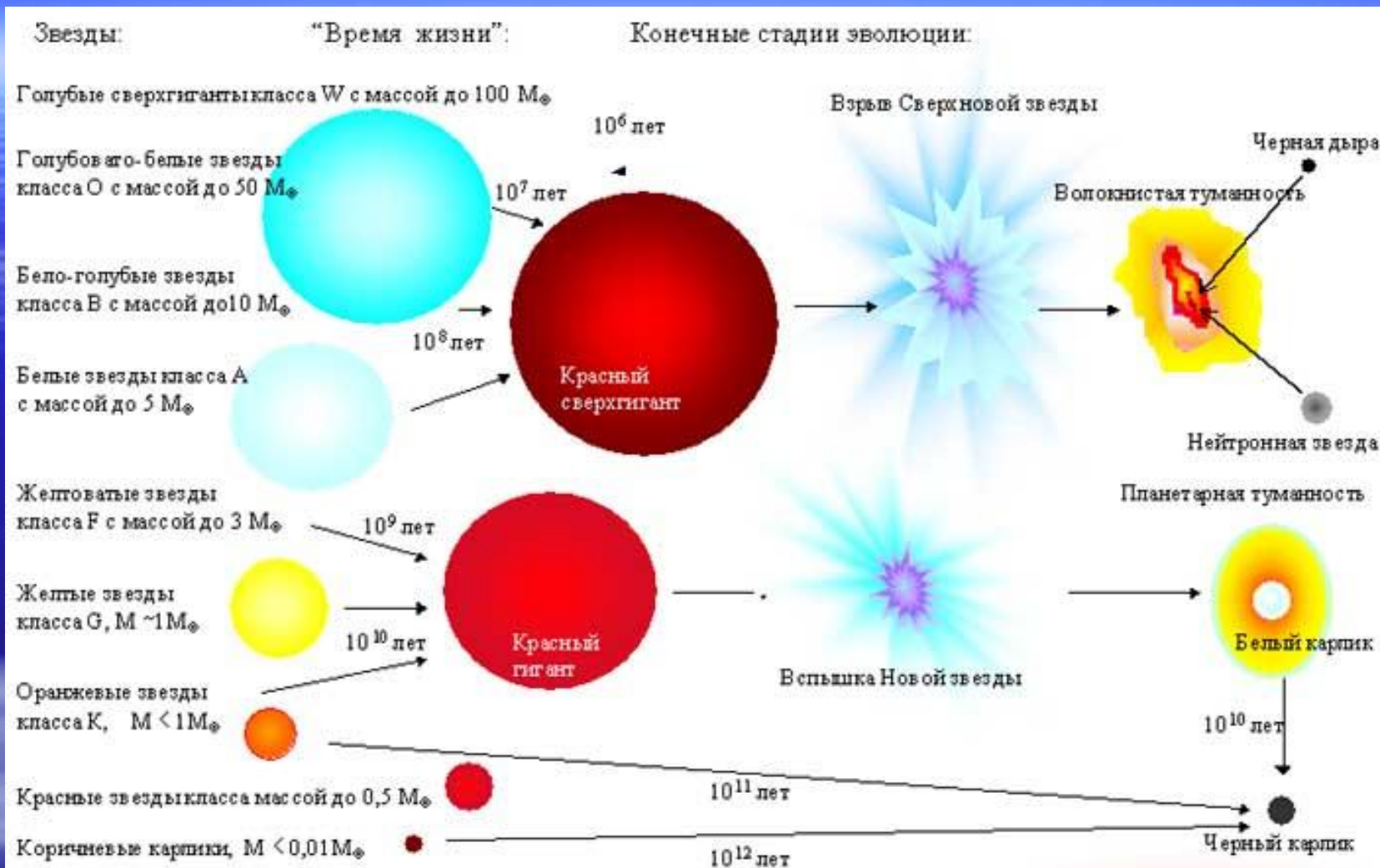


Схема эволюции одиночных звёзд

малые массы		умеренные массы		массивные звёзды	
$0.08M_{\text{sun}} < M^* < 0.5M_{\text{sun}}$		$0.5M_{\text{sun}} < M^* < 8M_{\text{sun}}$		$8M_{\text{sun}} < M^* < 60-100M_{\text{sun}}$	
горение водорода в ядре					
гелиевые белые карлики	спокойное горение гелия в ядре				
	С, О белый карлик	вырожденное СО ядро		невырожденное СО ядро	
		углеродная детонация		горение углерода в ядре. СО в Fe	
		горение углерода в ядре: С в О, Ne, Si, Fe, Ni...			
		О, Ne, Mg... белый карлик или нейтронная звезда		чёрная дыра	

Эволюция звезд



Эволюция двойных звезд носит сложный характер, определяемый массой звезд и расстоянием между ними.

Один из возможных случаев: звезда с большей массой “взрывает”, притягивает, в вещество соседки, при этом ее масса и температура увеличивается, возрастает интенсивность протекания гермоядерных реакций и звезда быстрее проходит свой путь развития



Эволюция звезд

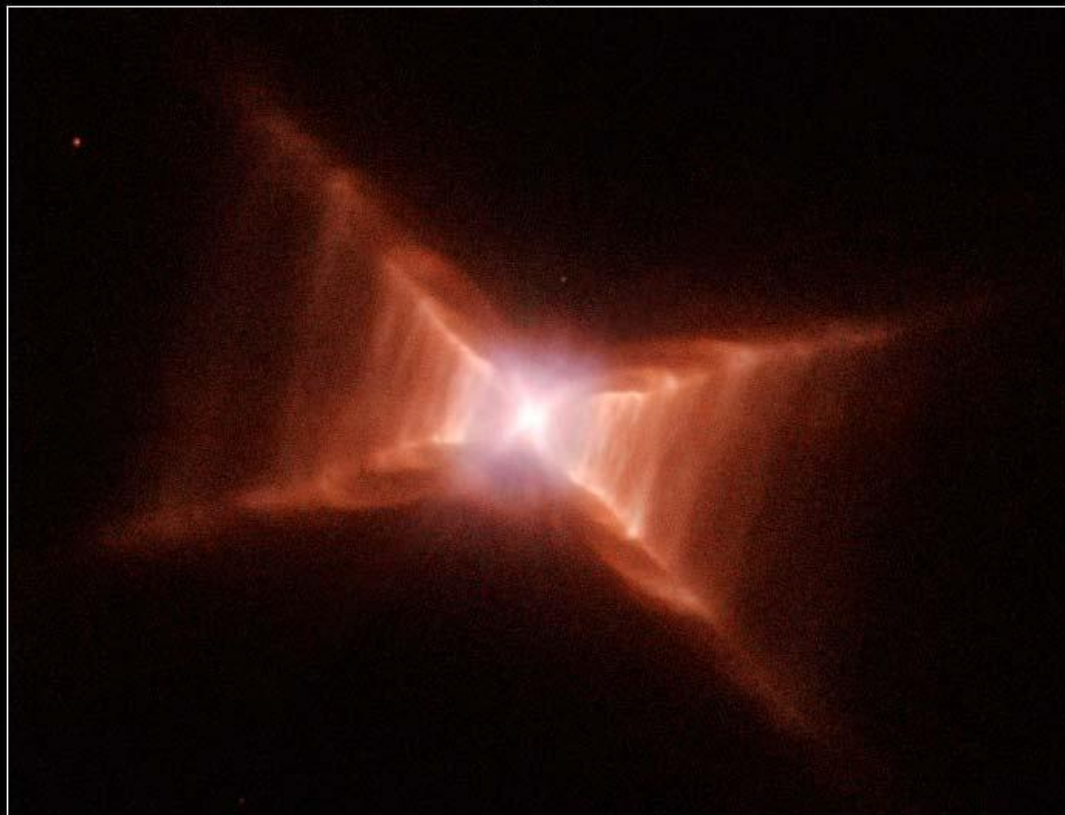
- Протопланетарная туманность [HD 44179](#): асимметричный выброс газопылевой материи красным гигантом.

Красный гигант

- Красные гиганты и сверхгиганты — звёзды с довольно низкой эффективной температурой (3000 — 5000 К), однако с огромной светимостью.
- Максимум излучения приходится на инфракрасный диапазон.

Proto-Planetary Nebula ▪ Red Rectangle ▪ HD 44179

HST ▪ WFPC2



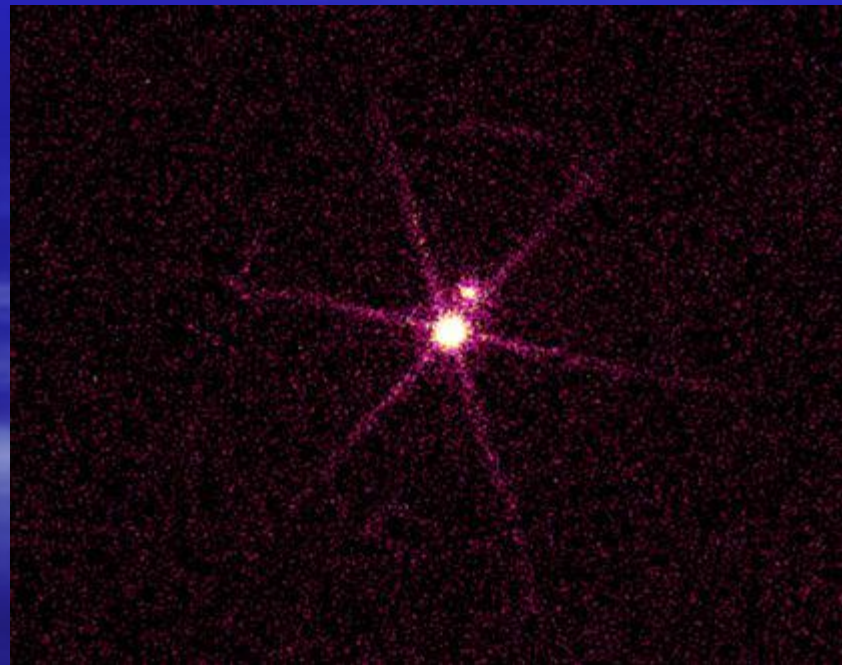
NASA, ESA, H. Van Winckel (Catholic University of Leuven)
and M. Cohen (University of California, Berkeley)

STScI-PRC04-11

Эволюция звезд

- **Белый карлик – очень плотные горячие тела малых размеров**
- Подавляющее большинство звёзд, и Солнце в том числе, заканчивают так свою эволюцию.
- Размер звезды ↓ в сотню раз, а плотность становится в миллион раз > плотности воды.
- Она лишена источников энергии и, постепенно остывая, становится тёмной и невидимой.

- Снимок Сириуса в мягком рентгеновском диапазоне. Яркий компонент — белый карлик Сириус Б, тусклый — Сириус А

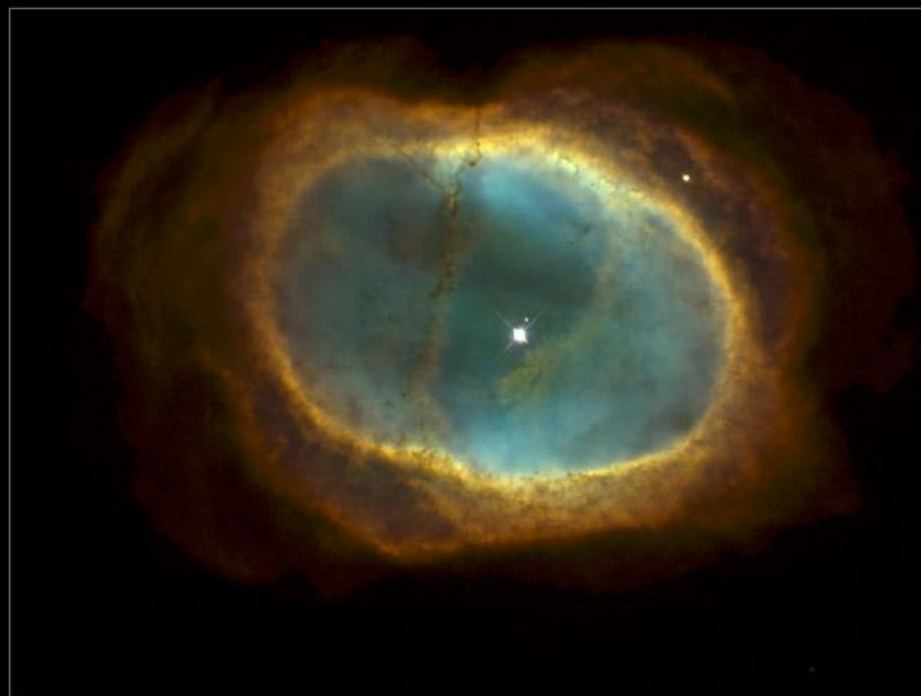


Эволюция звезд

- «Душа, отлетевшая от умершего светила» - планетарная туманность. Кисея туманности, рассеявшись по вселенскому простору, поможет в образовании новой звезды.
- В самом центре планетарной туманности остается небольшая жемчужина мертвого белого карлика, знаменующая конец жизненного пути звезды.

- Планетарная туманность Планетарная туманность NGC 3132: в центре двойная звезда — аналог Сириуса.
- в непосредственной близости от Сириуса находится белый карлик

Planetary Nebula NGC 3132

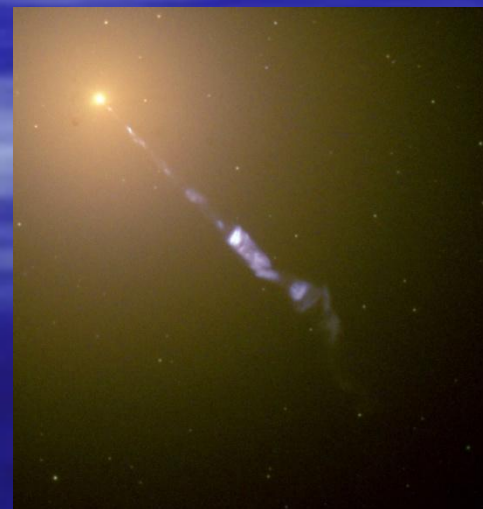


Hubble
Heritage

Эволюция звезд

- Если M звезды $>$ критического предела, то гравитационное сжатие продолжается.
- Сорванные колоссальным давлением электроны «впечатываются» в протоны, образуя нейтроны.
- Постепенно **вся звезда** в основном будет состоять **из нейтронов**.
- Имеют гигантскую плотность при радиусе всего в несколько км., близкую к плотности атомного ядра

- Если же масса звезды настолько велика, что даже образование нейтронной звезды не сдержит гравитационного коллапса, то конечный этап ее эволюции – космический провал **черной дыры**.

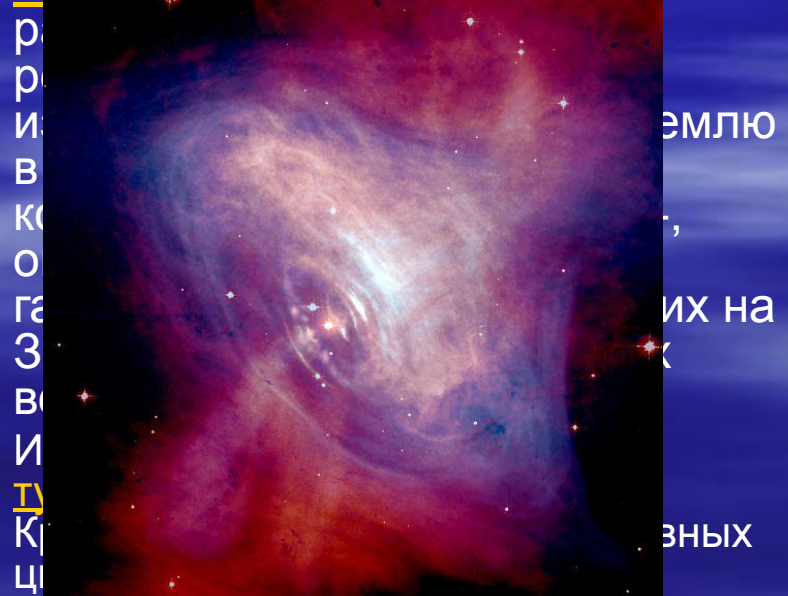


Эволюция звезд

- **Нейтронная звезда**
- Первые нейтронные звезды были открыты в виде **радиопульсаров** (источников периодических радиоимпульсов) и **рентгеновских источников** в тесные двойных звездных системах.
- Насчитывается неск.тыс.таких компактных объектов, большинство из них — именно **радиопульсары**, остальные — рентгеновские **гамма-источники**.
- Радиоизлучение пульсаров определяется **сильнейшим магнитным полем и сверхбыстрым вращением** шарообразной, примерно равной солнечной массы диаметром всего в несколько км.
- Нейтронные звезды со сверхсильным магнитным полем - **магнетары**

- **Пульсар** — **космический** — космический источник **радио-** — космический источник радио-, **оптического** — космический источник радио-, оптического, **рентгеновского** — космический источник радио-, оптического, рентгеновского, **гамма-** — космический источник радио-, оптического, рентгеновского, гамма- излучений, приходящих на

Землю, космический источник



- И **ту** Кр... зных

Эволюция звезд

- **Сверхновые звезды** — звезды, заканчивающие свою эволюцию в катастрофическом взрывном процессе.
- Термином «сверхновые» были названы звезды, которые вспыхивали гораздо (на порядки) сильнее так называемых «**новых звезд**».
- На самом деле, ни те, ни другие физически новыми не являются, всегда вспыхивают уже существующие звезды.
- Крабовидная туманность Крабовидная туманность как остаток сверхновой Крабовидная туманность как остаток сверхновой SN 1054 →



Эволюция звезд

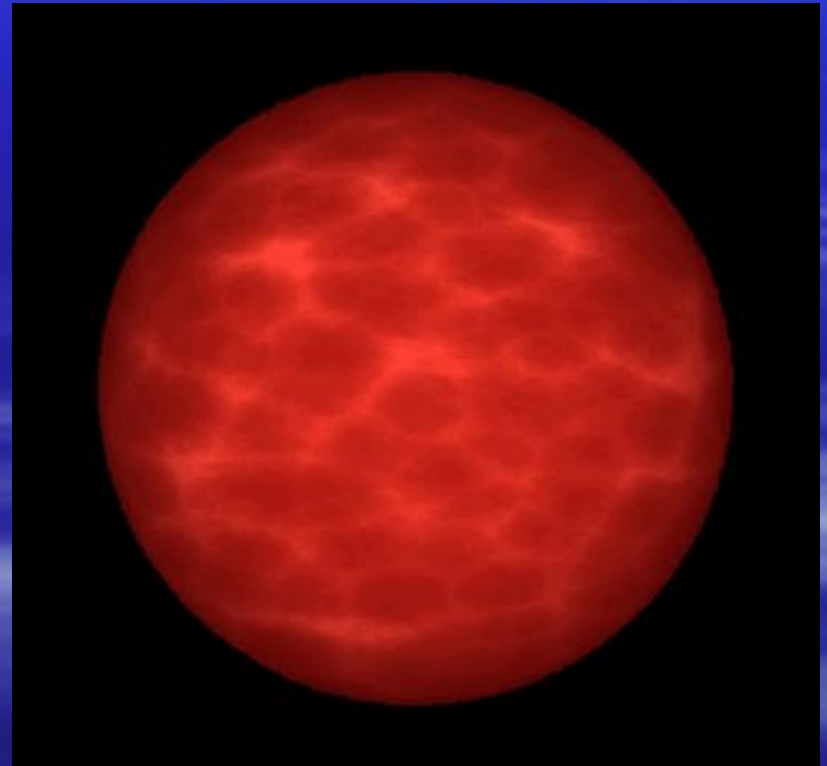
- Сверхновая [SN 1994D](#) в галактике [NGC 4526](#) (яркая точка в нижнем левом углу)
- Взрывы сверхновых образуют сверхплотные нейтронные звезды.



Эволюция звезд

- Вернемся к моменту рождения звезды.
- Если ее $<$ некоей критической, при которой начинается термоядерный синтез водорода в гелий, то звезда никогда не засияет.
- На ее месте возникнет массивное тело **коричневого или бурого карлика**.

- Художественное изображение L-карлика.



Человек и звезды

- Самые первые звезды, возникшие во Вселенной, содержали одни легкие газы -водород и гелий.
- Последующие поколения добавили в свои тела долю тяжелых элементов, унаследованных от звезд первого поколения.
- Все элементы, составляющие человеческое тело - от легких газов до тяжелых элементов – образуются в звездах.

