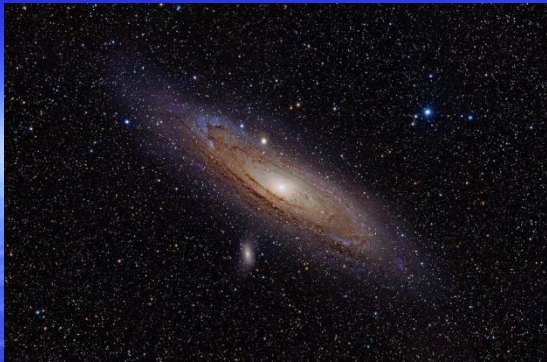
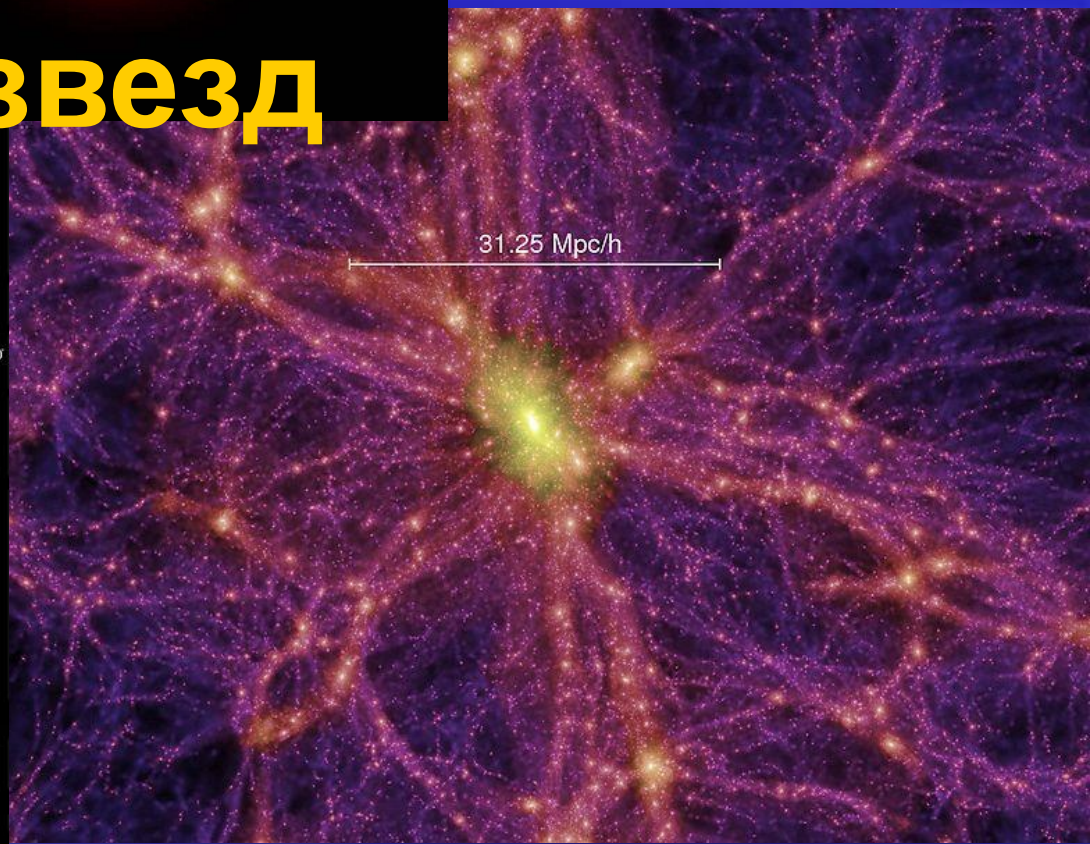
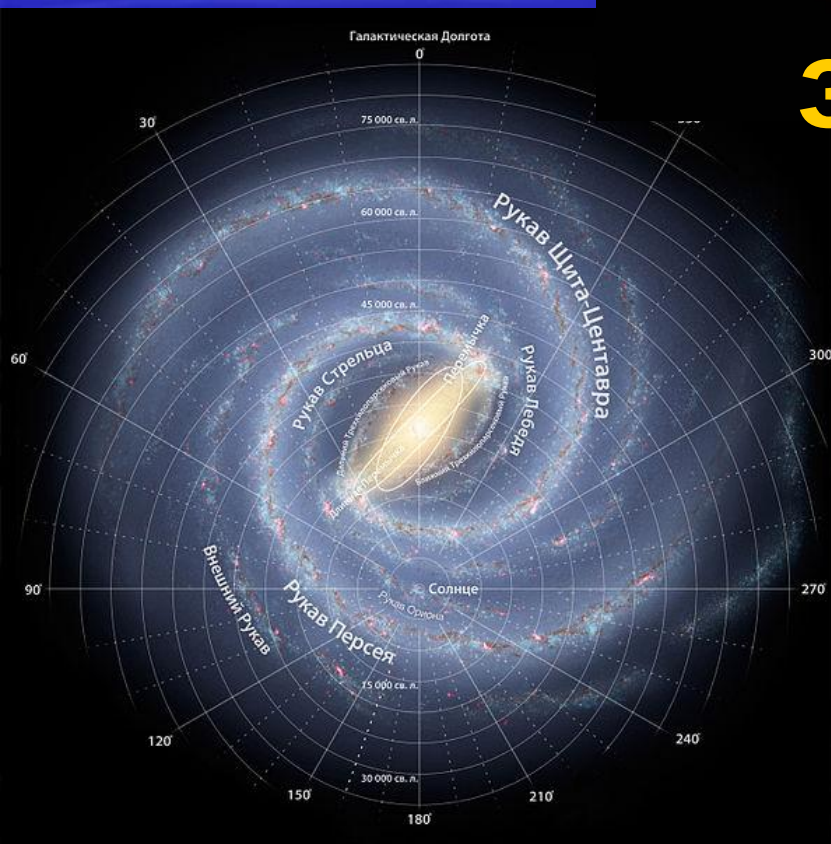
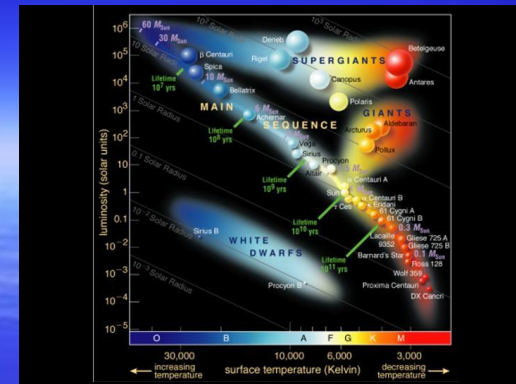




Строение и эволюция звезд



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

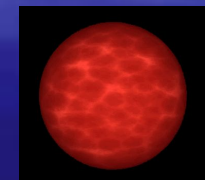
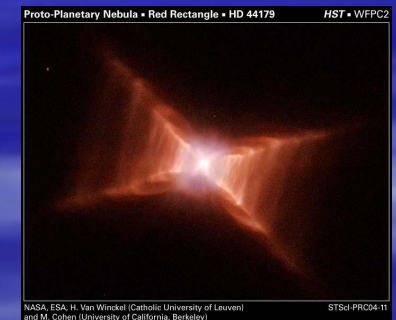
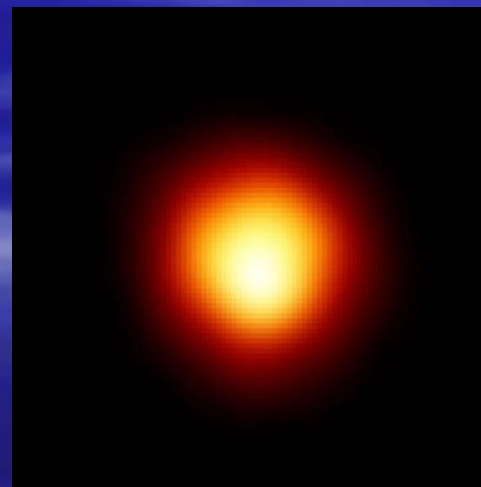
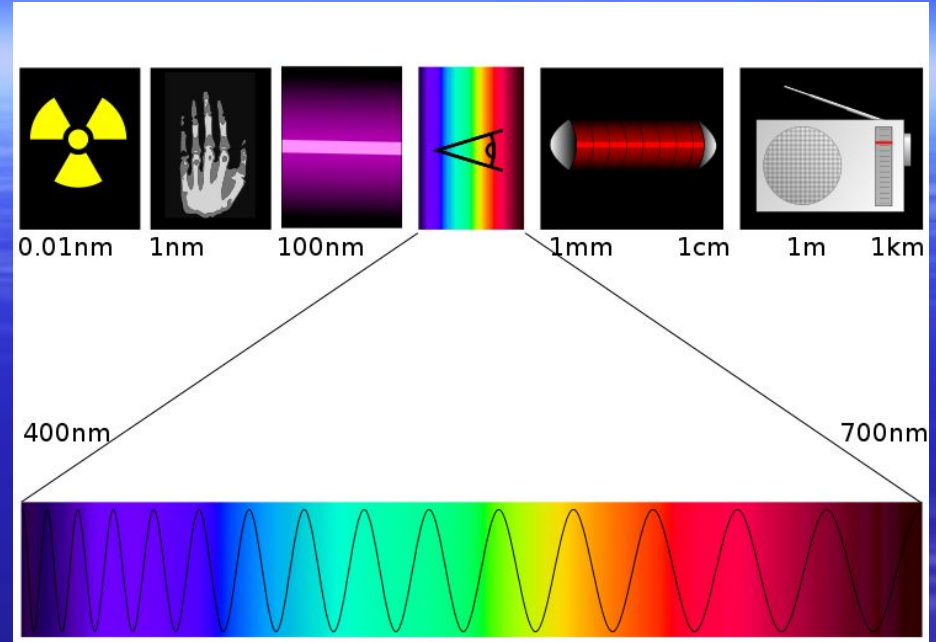
Видимое (оптическое) излучение

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.



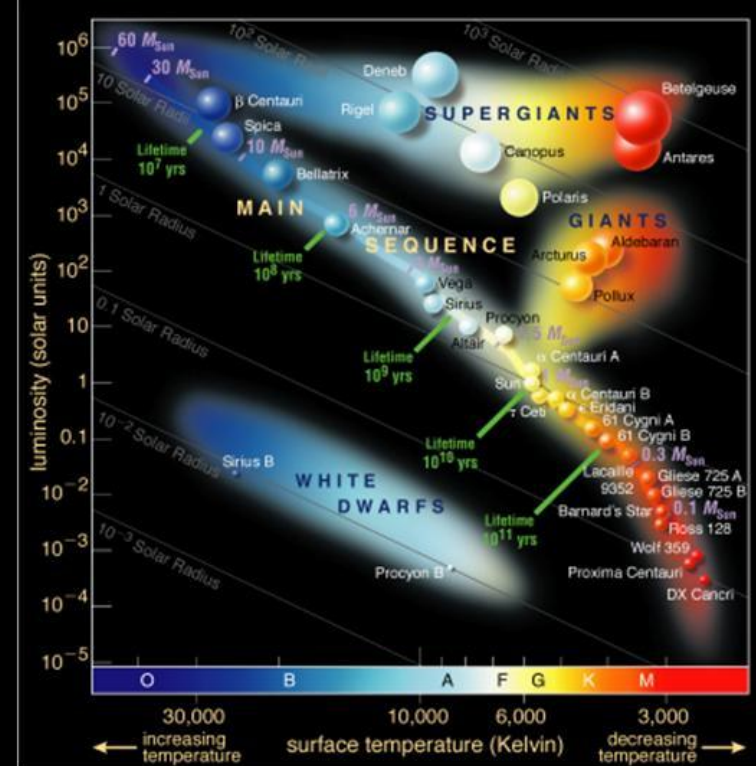
**«Фабрики» по производству звезд —
молекулярные облака**

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**

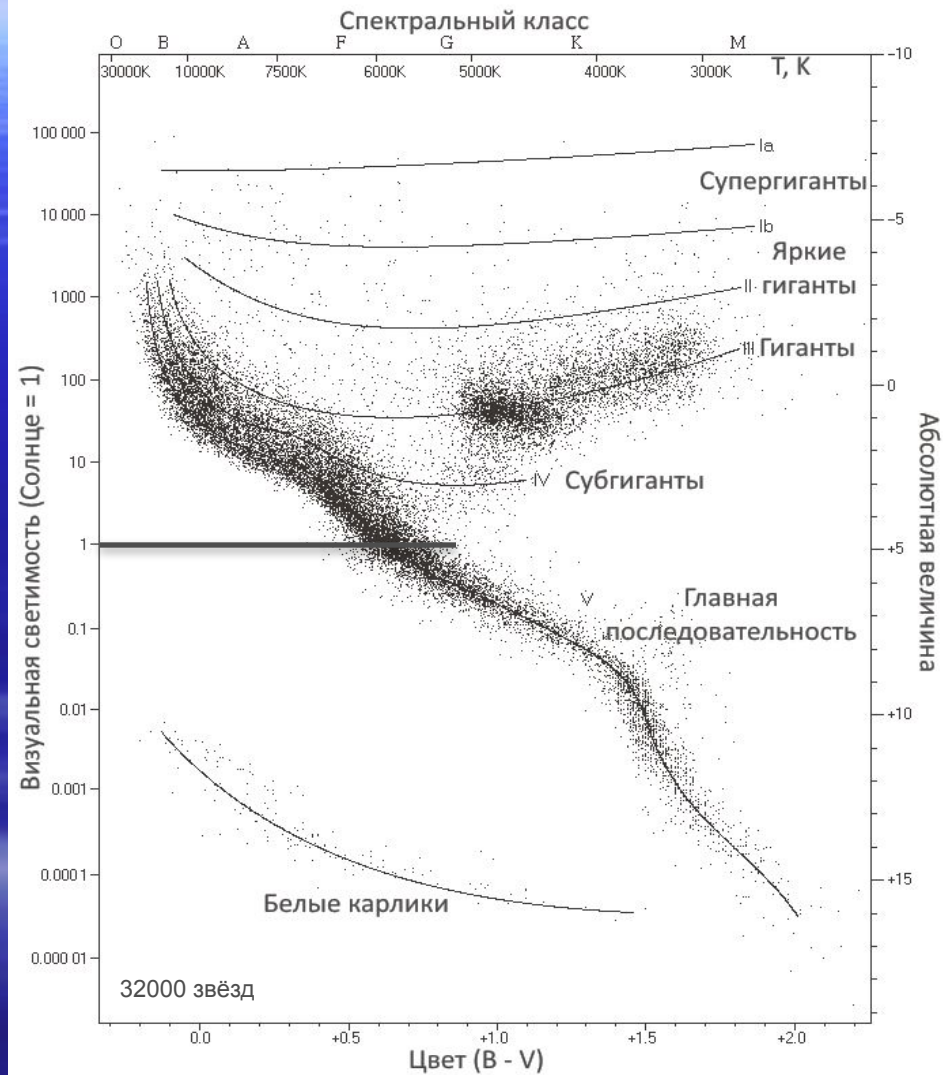
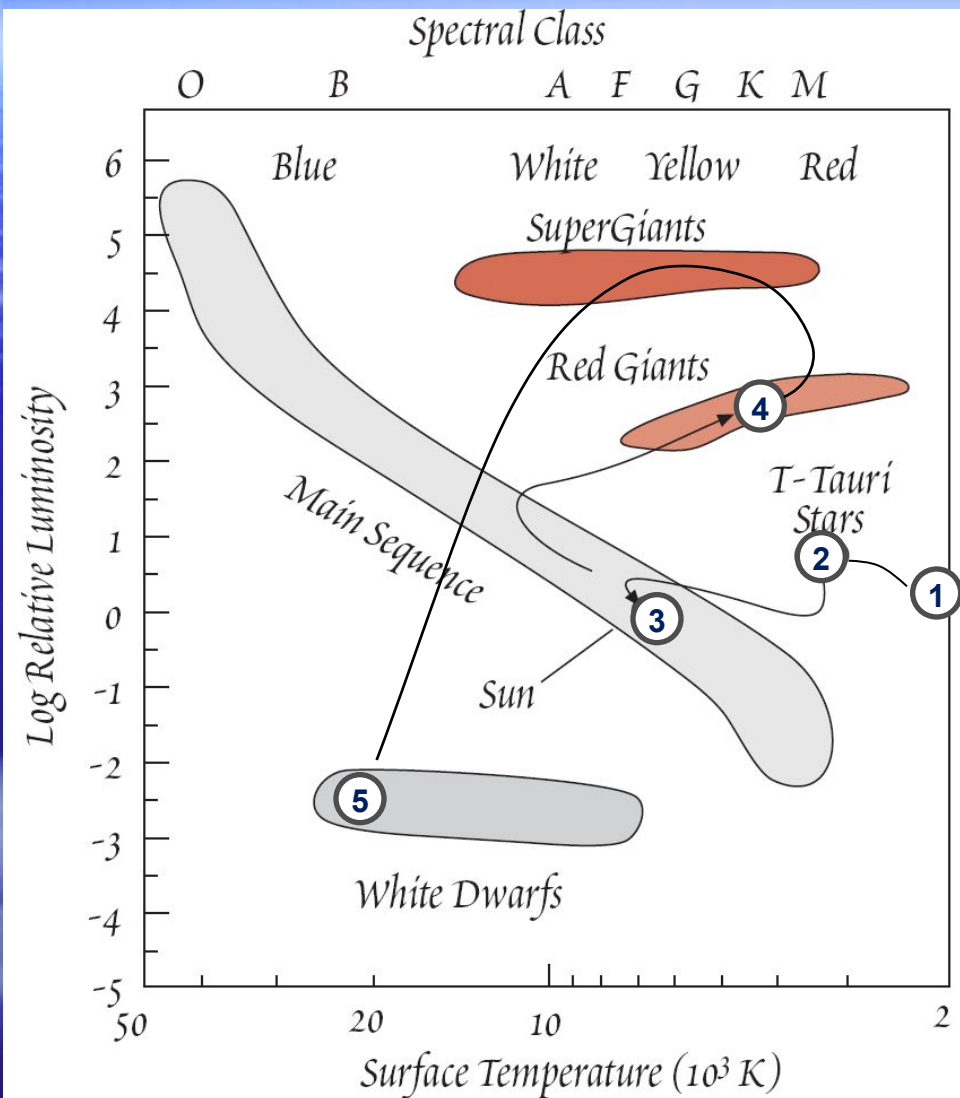
■ Диаграмма Герцшпрунга — Рассела

светимость(относительно Солнца)



температура поверхности (градусы, K)

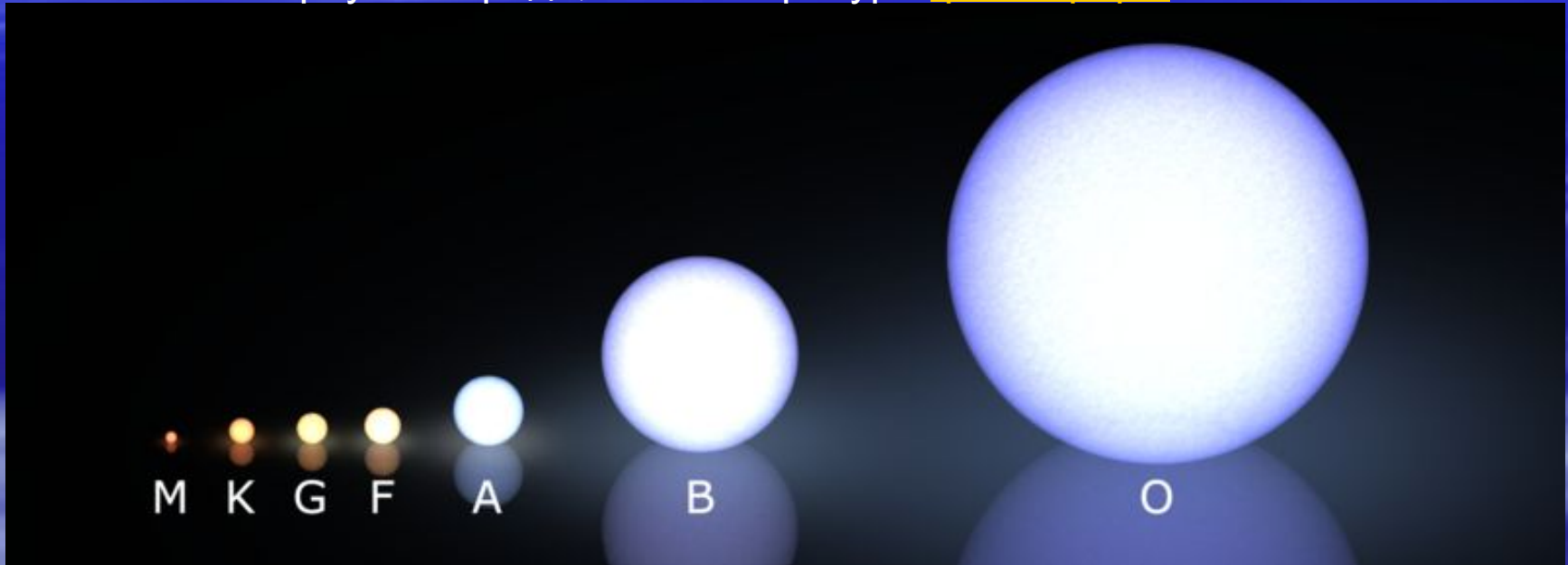
Диаграмма Герцшпрунга и Рассела (светимость— температура поверхности)



Hertzsprung-Russell diagram

Спектральная классификация Моргана-Кинана

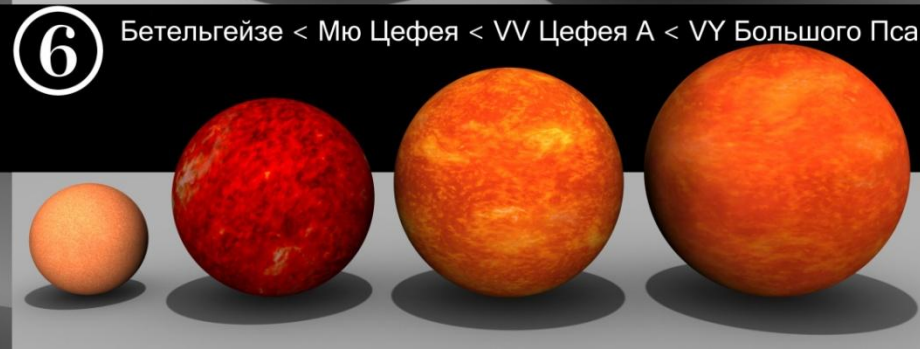
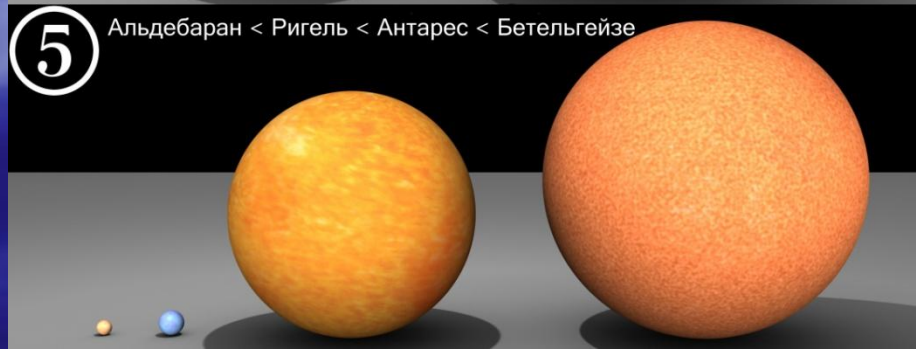
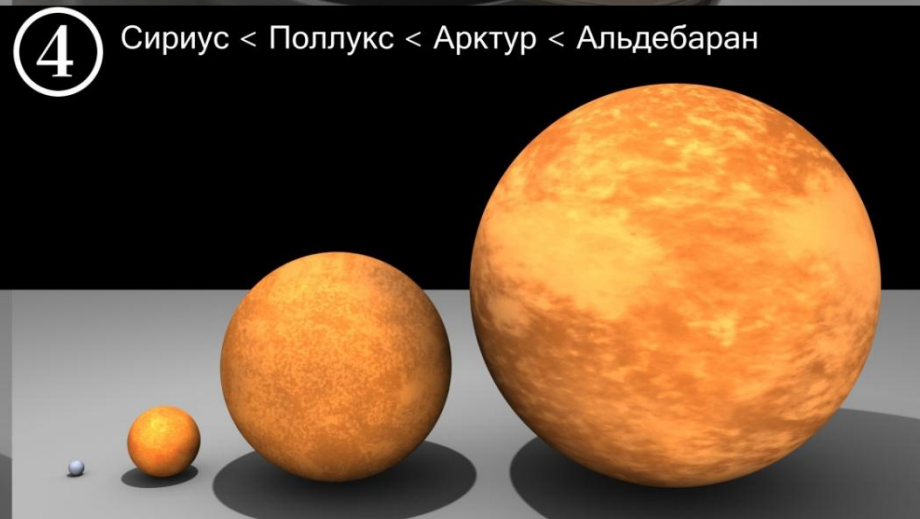
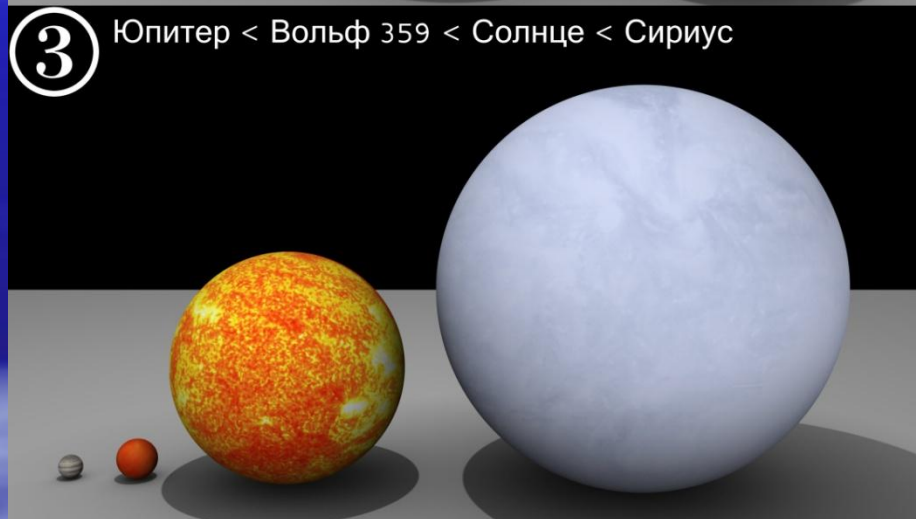
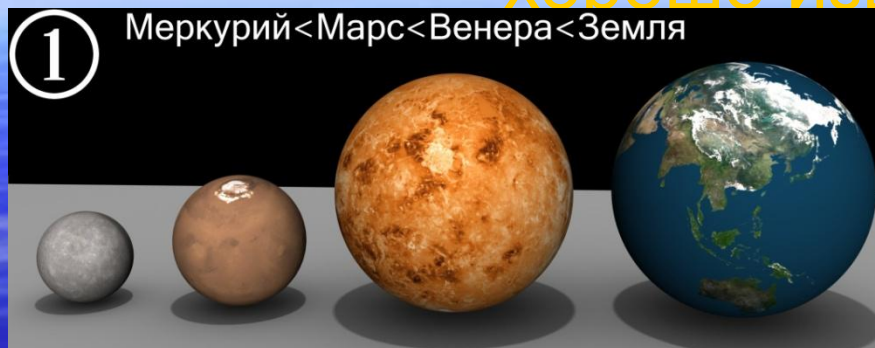
Классификация звёзд Классификация звёзд по спектру излучения, в первую очередь, по температуре фотосферы



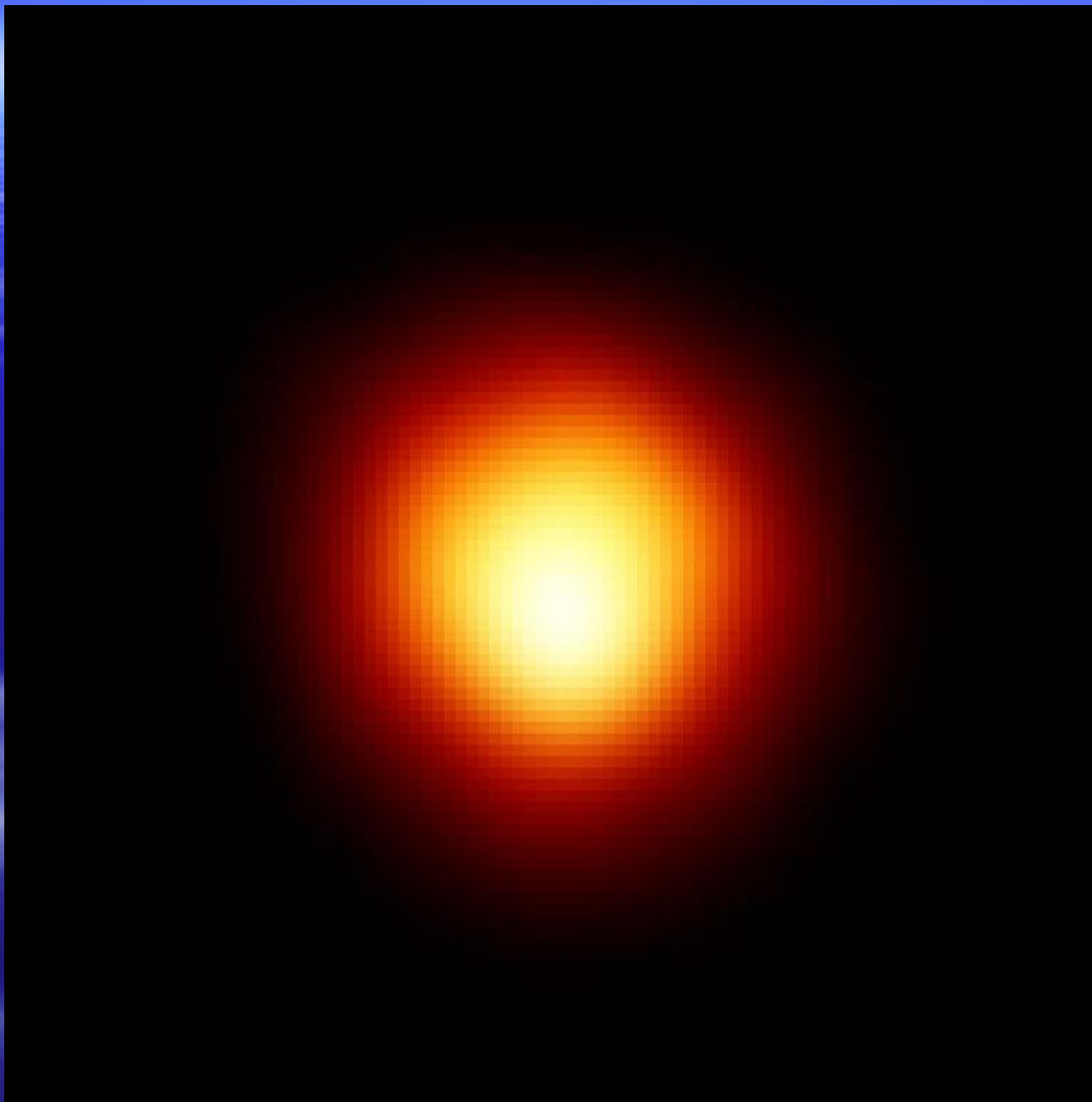
От карликов к гигантам

Современная (гарвардская) спектральная классификация звёзд, разработанная 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



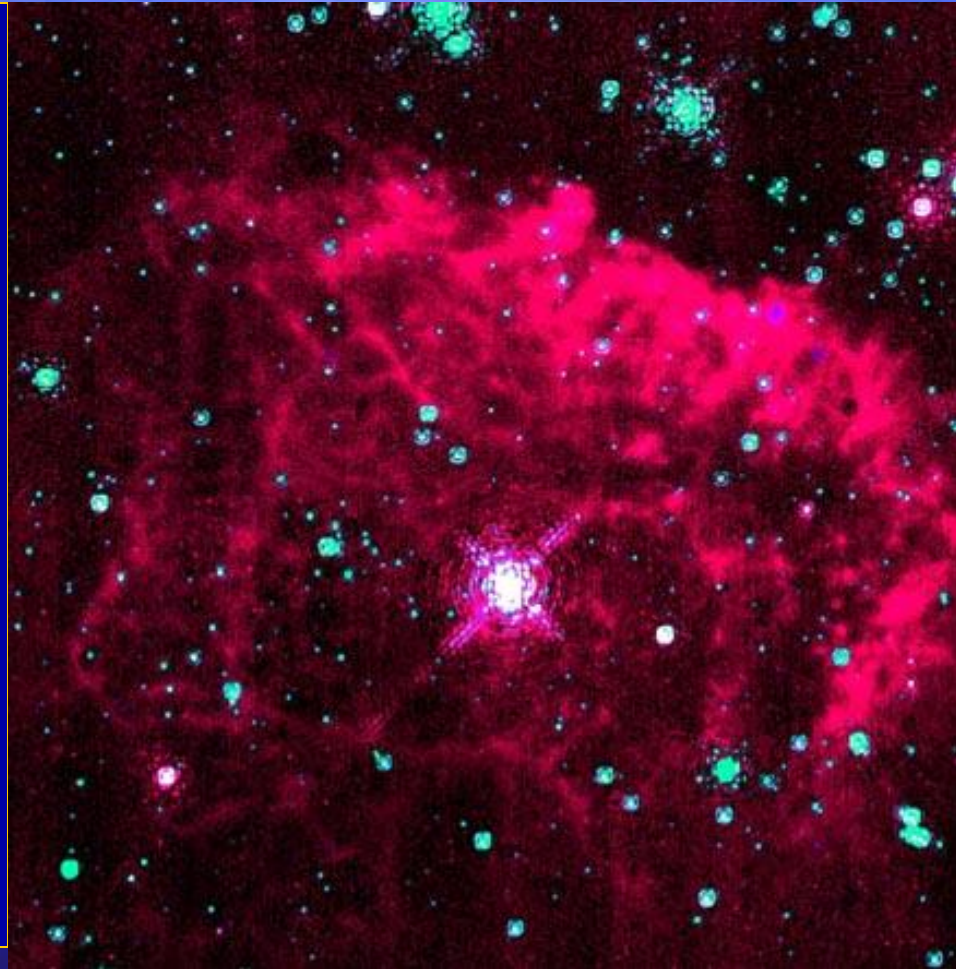
БетельгейзеБетельгейзе. фотография сделана с телескопа Хаббл



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→

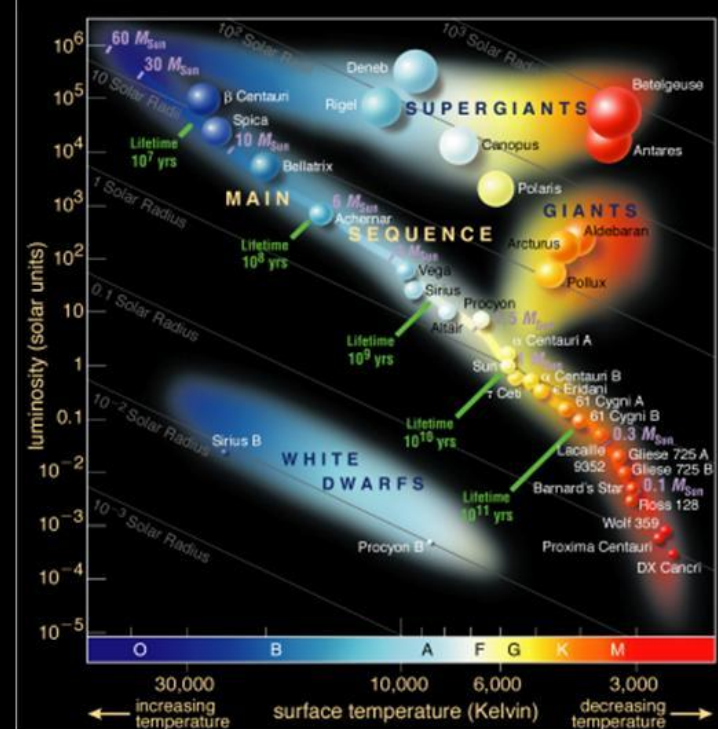


Звездная эволюция

- 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

светимость (относительно Солнца)



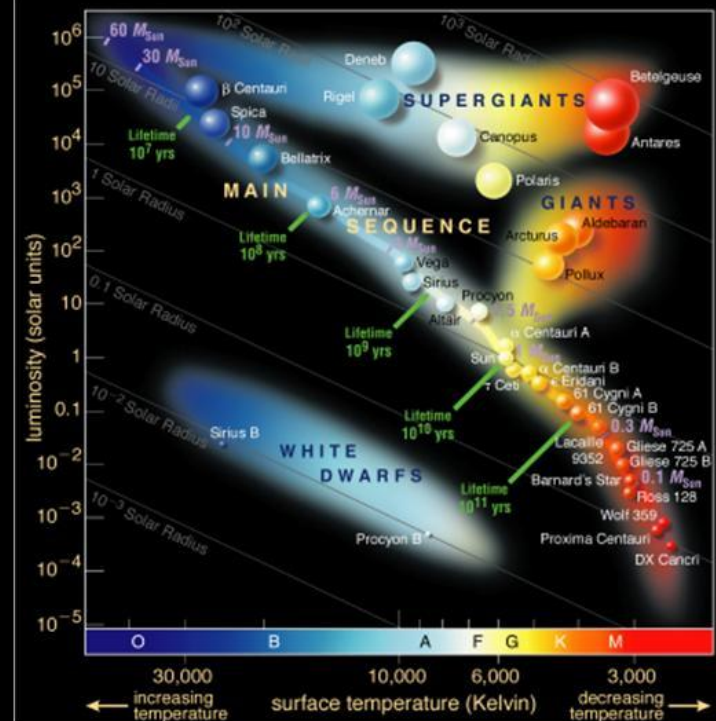
температура поверхности (градусы, К)

Звездная эволюция

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

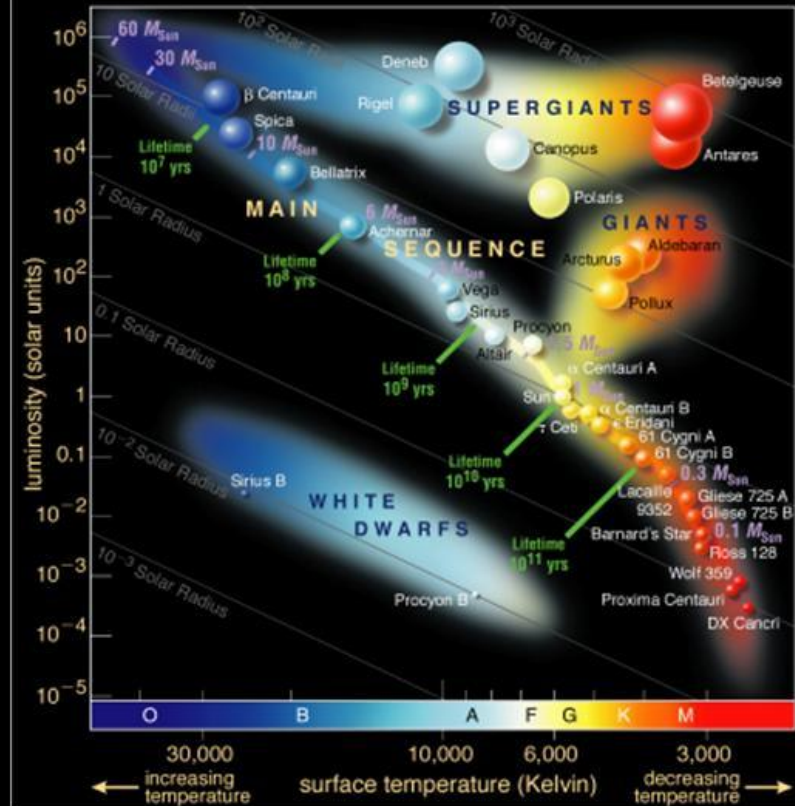
3) После этого сжатие прекращается.

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

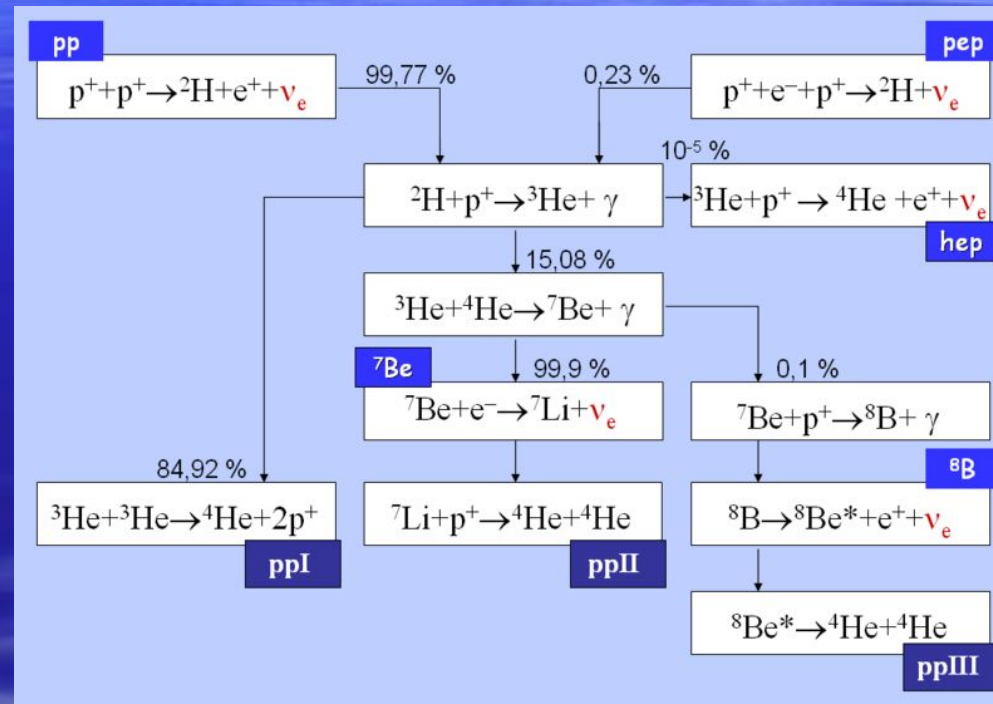
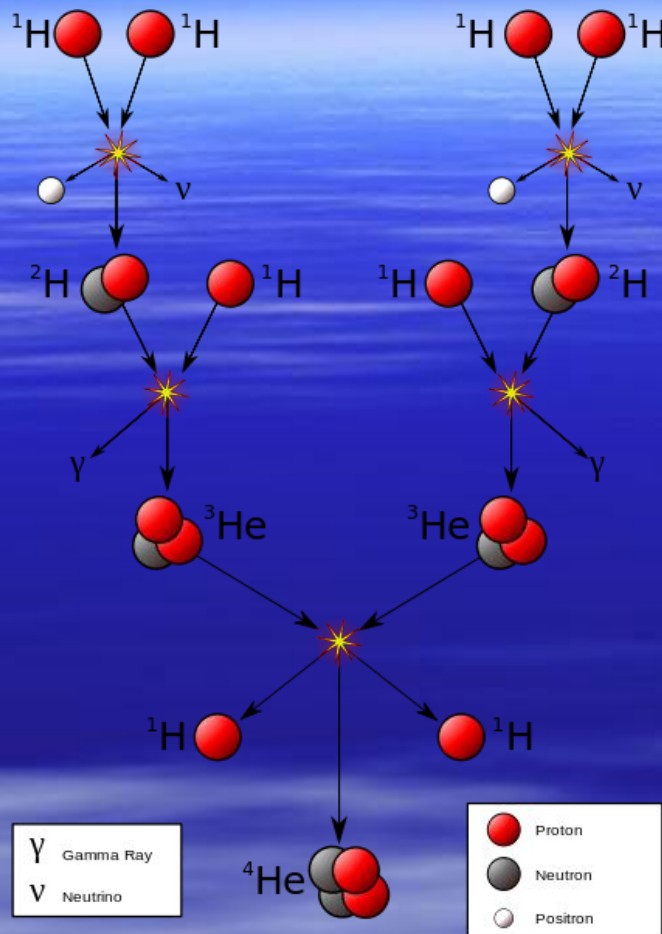


Звездная эволюция

- **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



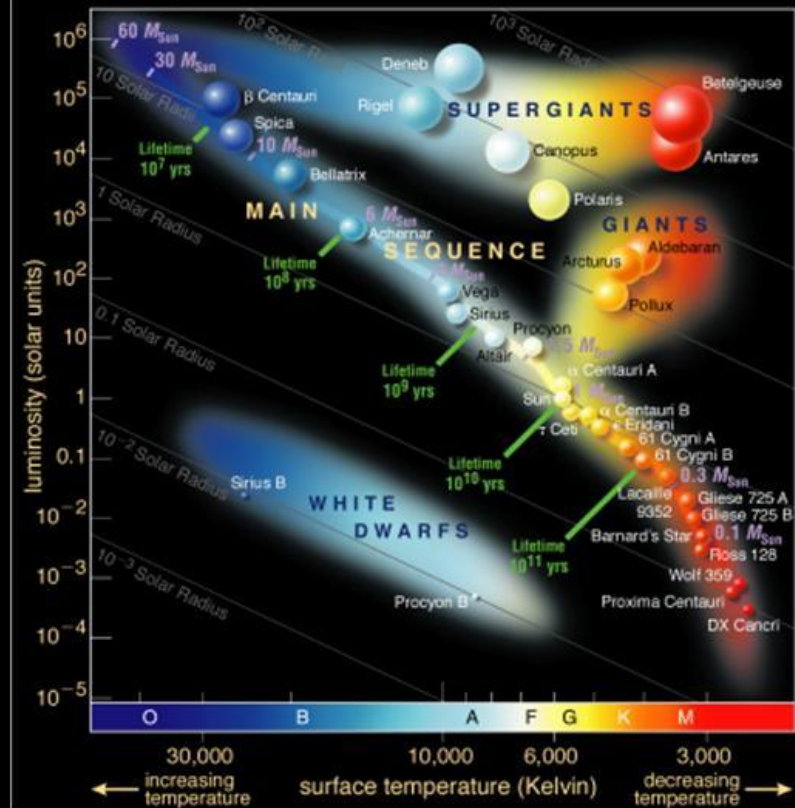
Ветвь ppI – доминирует при температурах от 10 до 14 млн. градусов



Протон-протонный цикл -
совокупность термоядерных реакций.
Водород превращается в гелий
превращается в гелий в звёздах,
находящихся 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

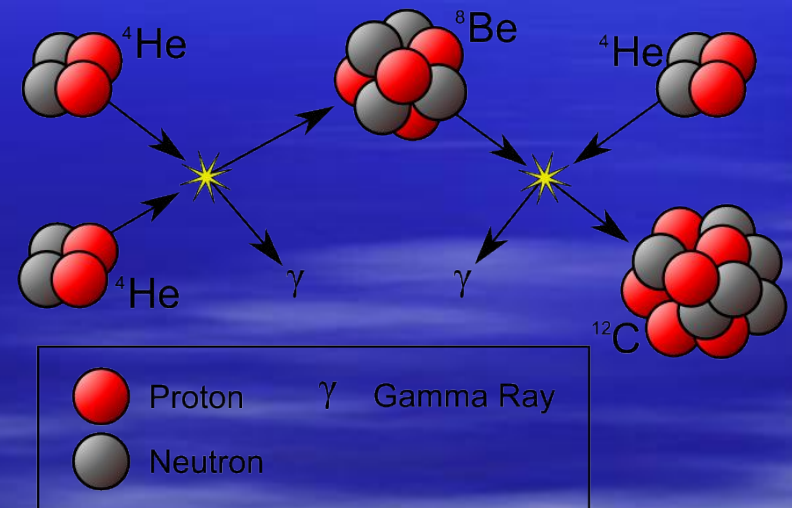
Ядро звезды сжимается до тех пор, пока температура
в его центре не достигнет ~ 100 млн. град.

Кельвина

1 этап – образование
нестабильного ядра бериллия-8



2 этап - образование ядра
углерода-12

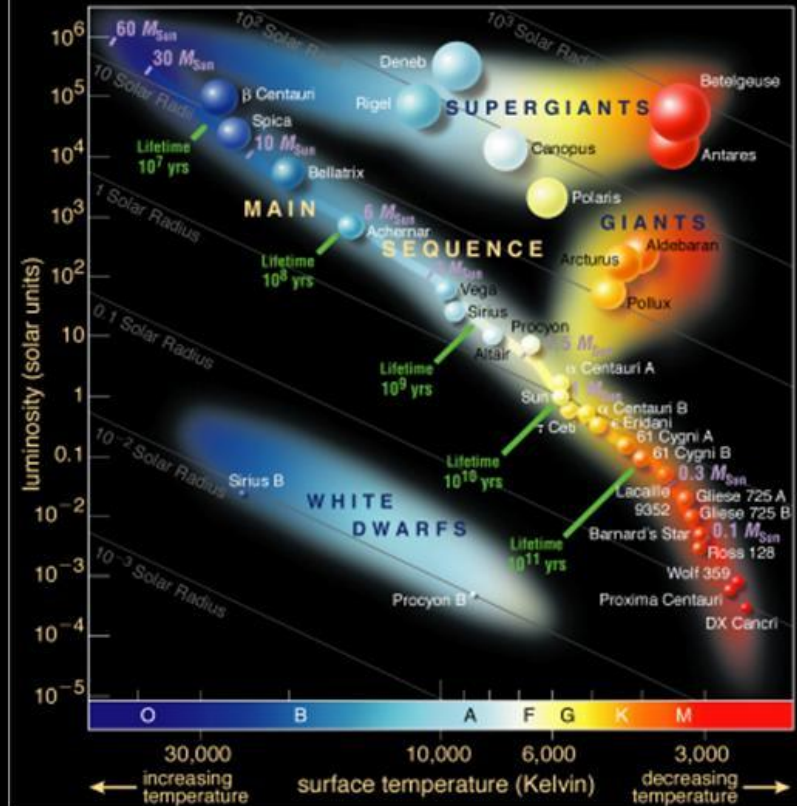


Тройная гелиевая реакция (тройной альфа-процесс)

Звездная эволюция

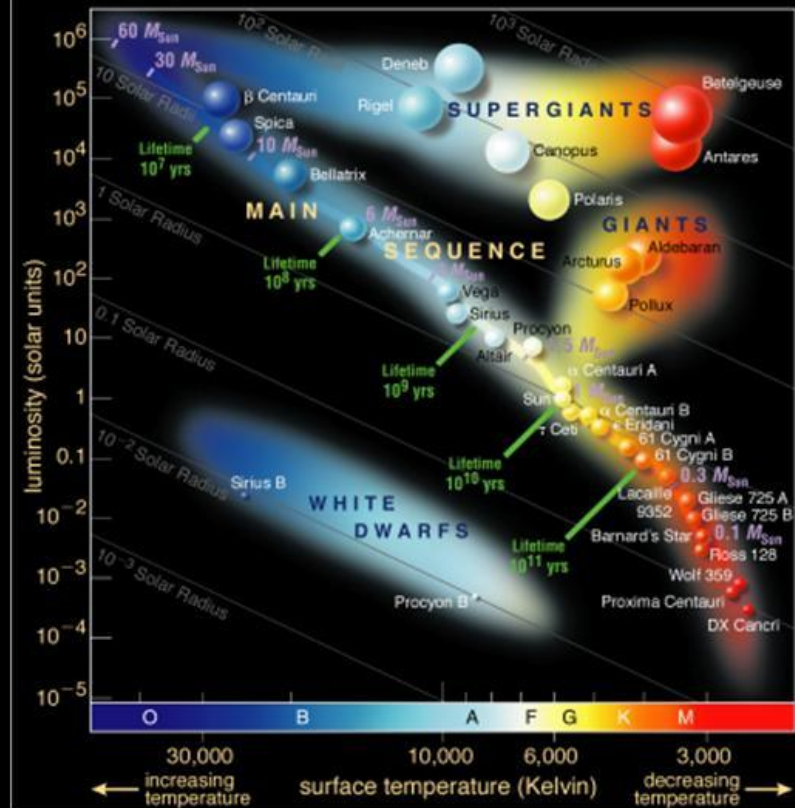
5) Когда масса гелиевого ядра становится значительной, оно не выдерживает собственного веса и начинает сжиматься;

- 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 невозможен

Группа Период		IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	термоядерный синтез становится невозможен										
1	1	<u>H</u>																2	<u>He</u>
2	3	<u>Li</u>	4										5	6	7	8	9	10	<u>Ne</u>
			<u>Be</u>										<u>B</u>	<u>C</u>	<u>N</u>	<u>O</u>	<u>F</u>		
3	11	<u>Na</u>	12										13	14	15	16	17	18	<u>Ar</u>
			<u>Mg</u>										<u>Al</u>	<u>Si</u>	<u>P</u>	<u>S</u>	<u>Cl</u>		
4	19	<u>K</u>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
			<u>Ca</u>	<u>Sc</u>	<u>Ti</u>	<u>V</u>	<u>Cr</u>	<u>Mn</u>	<u>Fe</u>	<u>Co</u>	<u>Ni</u>	<u>Cu</u>	<u>Zn</u>	<u>Ga</u>	<u>Ge</u>	<u>As</u>	<u>Se</u>	<u>Br</u>	<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 вырывающимися из ядра нейтронами; захватывает их.
- Создается набор элементов тяжелее Fe вплоть до урана (92)

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

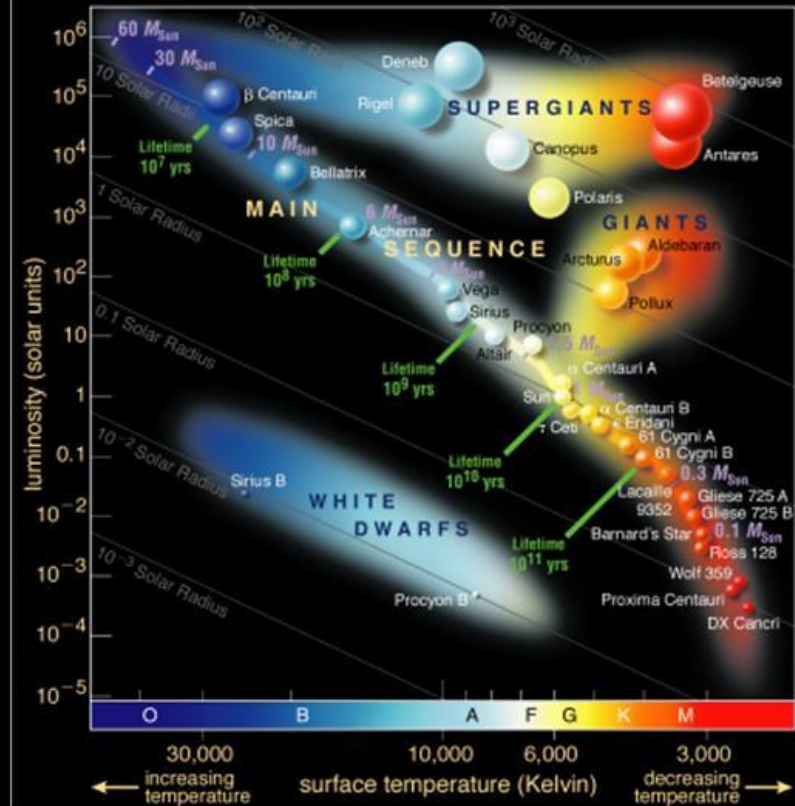
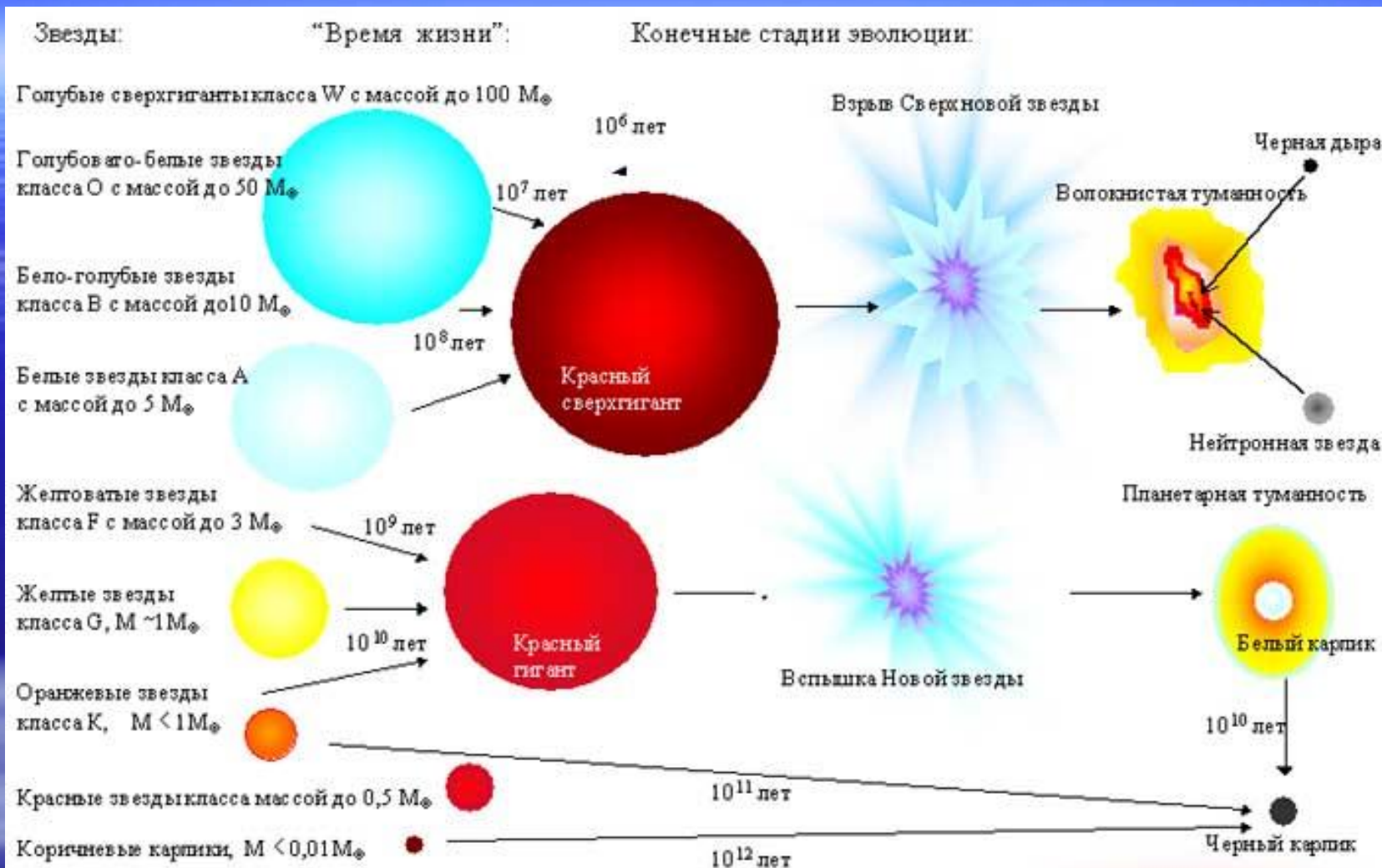


Схема эволюции одиночных звёзд

малые массы		умеренные массы		массивные звёзды	
0.08Msun<M*<0.5Msun		0.5Msun<M*<8Msun		8Msun<M*<60-100Msun	
горение водорода в ядре					
гелиевые белые карлики	спокойное горение гелия в ядре				
	C, O белый карлик	вырожденное CO ядро		невырожденное CO ядро	
		углеродная детонация		горение углерода в ядре. CO в Fe	
		горение углерода в ядре: C в O, Ne, Si, Fe, Ni...			
		O, 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 "ворует", притягивает, вещество соседки, при этом ее масса и температура увеличивается, возрастает интенсивность протекания термоядерных реакций и звезда быстрее проходит свой путь развития.



Эволюция звезд

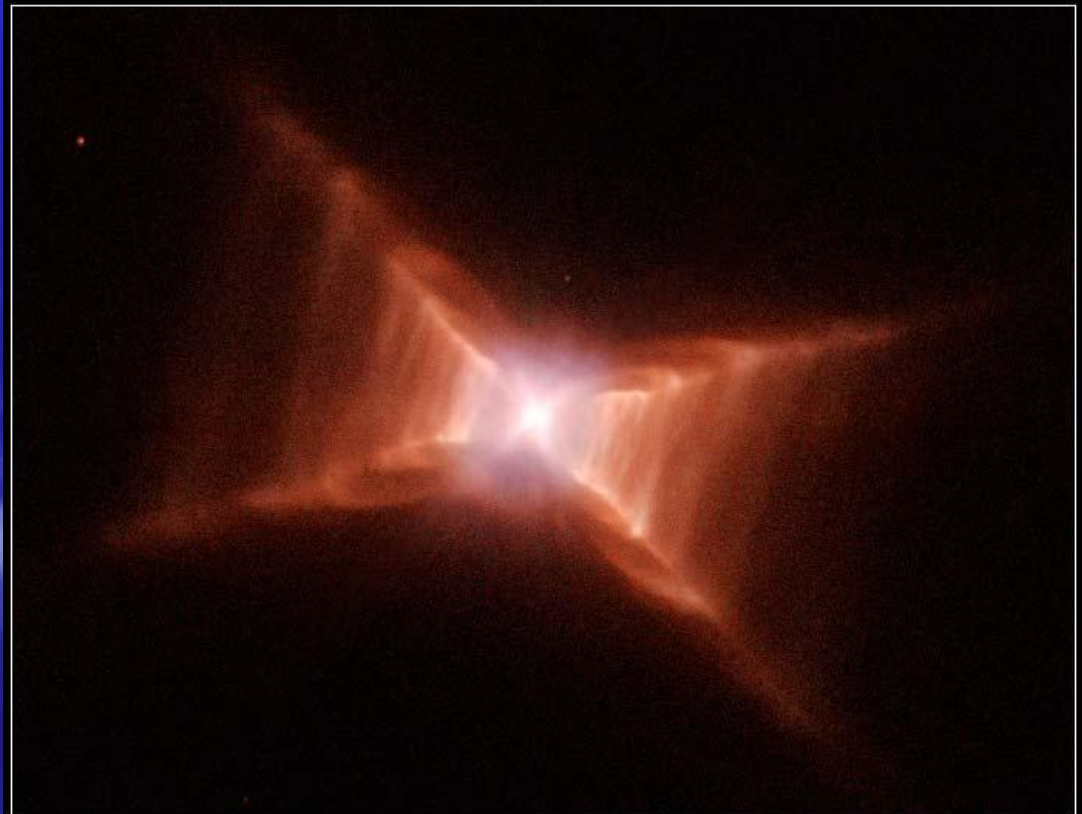
- Протопланетарная туманность [HD 44179](#): асимметричный выброс газопылевой материи красным гигантом.

Красный гигант

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

Proto-Planetary Nebula ■ Red Rectangle ■ HD 44179

HST ■ WFPC2



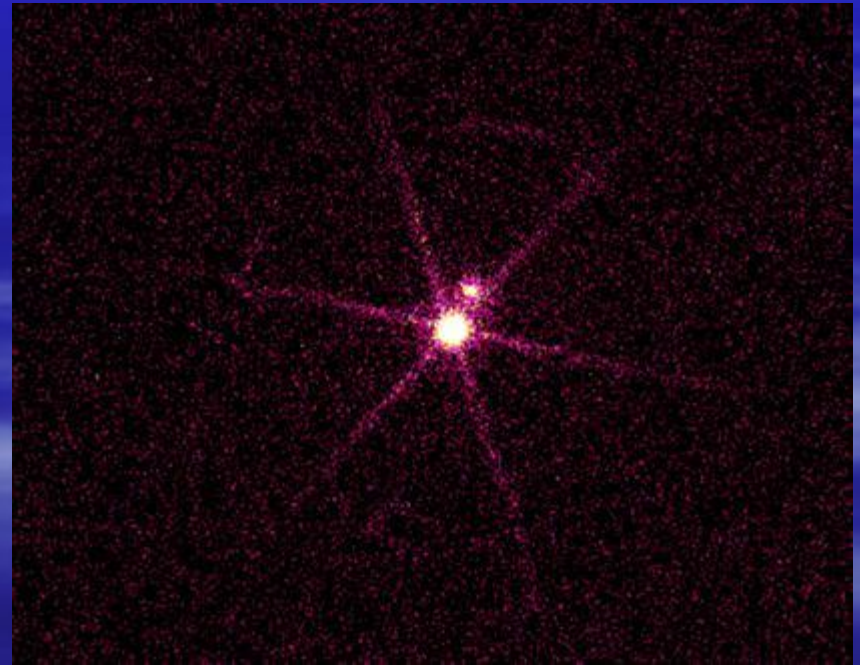
NASA, ESA, H. Van Winckel (Catholic University of Leuven)
and M. Cohen (University of California, Berkeley)

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

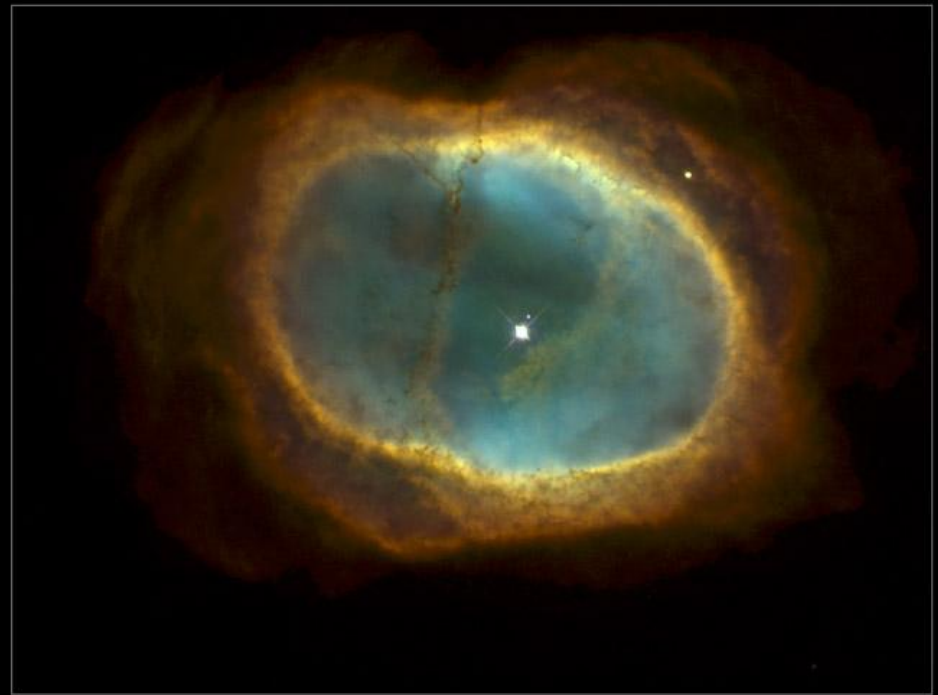


Эволюция звезд

- «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

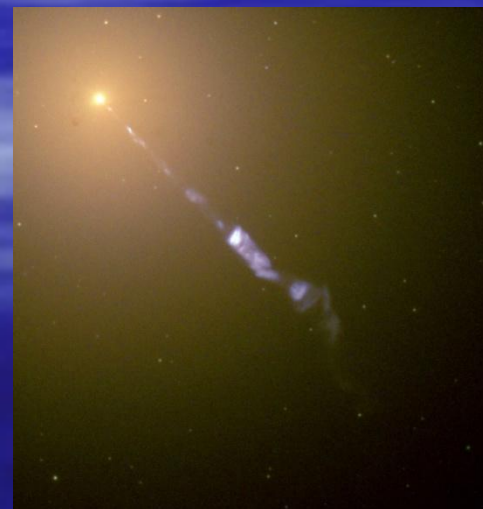


Hubble
Heritage

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

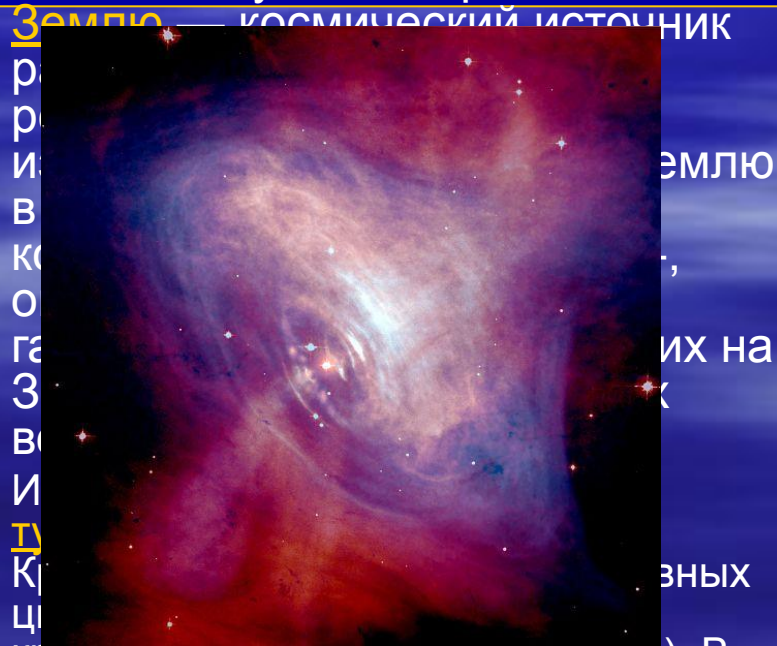
- Если же масса звезды настолько велика, что даже образование нейтронной звезды не сдержит гравитационного коллапса, то конечный этап ее эволюции – космический провал **черной дыры**.



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



Эволюция звезд

- **Сверхновые звезды** — звёзды, заканчивающие свою эволюцию в катастрофическом взрывном процессе.
- Термином «сверхновые» были названы звёзды, 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 звёзды.
- Крабовидная туманность Крабовидная туманность как остаток сверхновой Крабовидная туманность как остаток сверхновой SN 1054 →



Эволюция звезд

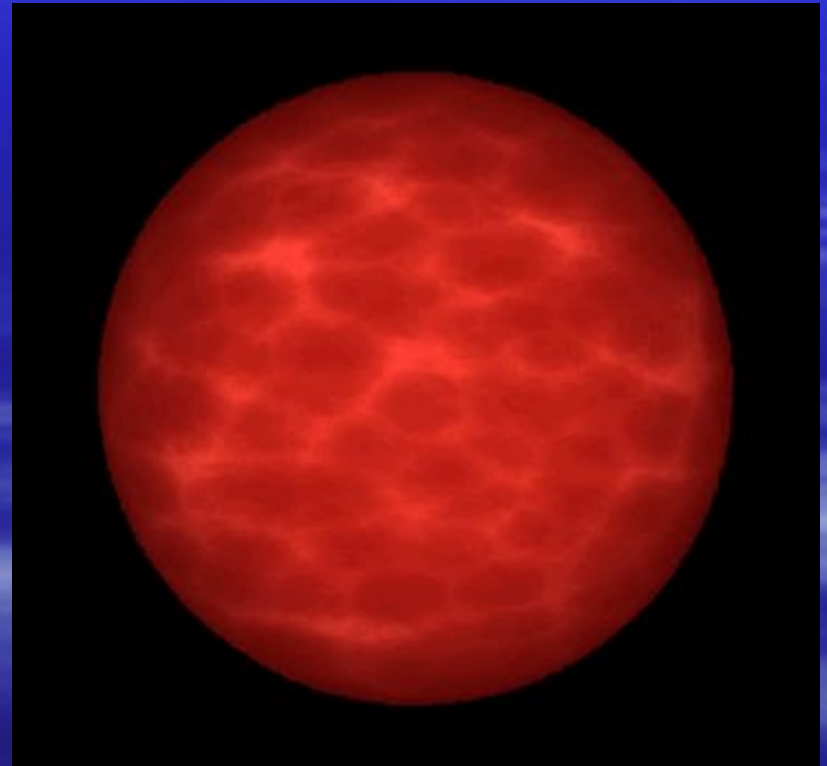
- Сверхновая [SN 1994D](#) в галактике [NGC 4526](#) (яркая точка в нижнем левом углу)
- Взрывы сверхновых образуют сверхплотные нейтронные звезды.



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.

