

Строение и эволюция звезд

Н.Б. Железнов

Солнце. Справочные данные.

Масса Солнца – 1.9891×10^{30} кг.

Диаметр Солнца – 1 392 000 км = 109.12 диам. Земли.

Объем Солнца – 1.412×10^{18} км³ = 1 303 800 объемов Земли.

Среднее расстояние от Земли до Солнца - 149 957 870 +/- 2000 км
= 1 а.е. = 107.6 диам. Солнца = 23 455.04 экв. радиусов Земли

Видимый диаметр:

средний – 1919".26

наибольший (Земля в перигелии) – 1955".78

наименьший (Земля в афелии) – 1891".26

сплюснутость – 0".1

Средняя плотность – 1.408 г/см³

Плотность в центре – ок. 98 г/см³

Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца – 2.738×10^4 см/с²

Скорость освобождения на поверхности – 617.7 км/с

Вращение Солнца:

наклон оси вращения к эклиптике 82°45' 00"

северный конец оси вращения Солнца направлен в точку небесной сферы с координатами:

$\alpha = 19^{\text{h}}04^{\text{m}}$, $\delta = +64^{\circ}$ (между Полярной и Вегой).

линейная скорость точки солнечного экватора 2.025 км/с,

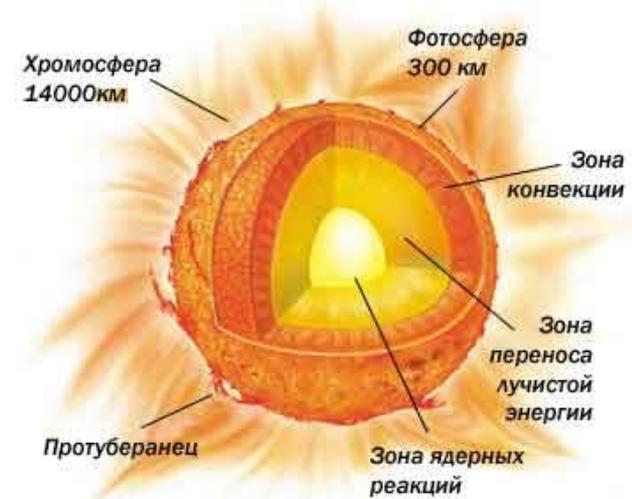
звездный период обращения точки экватора 25.380 сут,

синодический (видимый) период обращения точки экватора 27.275 сут,

Мощность солнечного излучения на границе земной атмосферы: 1.388 кВт/м²,

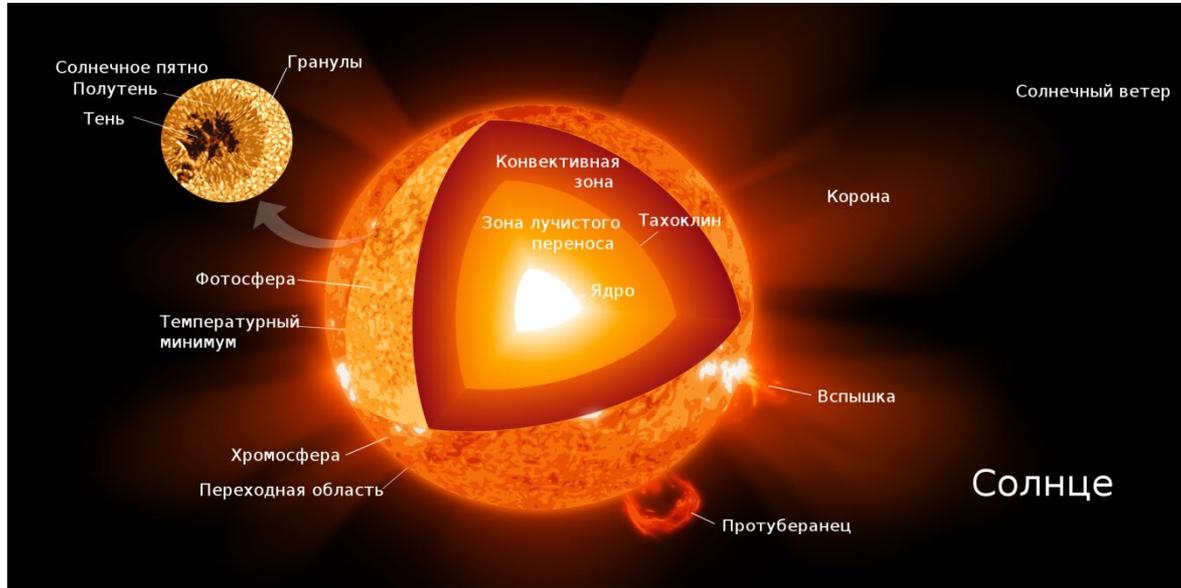
Светимость Солнца : $(3.88 \pm 0.03) \times 10^{26}$ Дж/с,

Эффективная температура поверхности: 5807 К +/- 29 К.

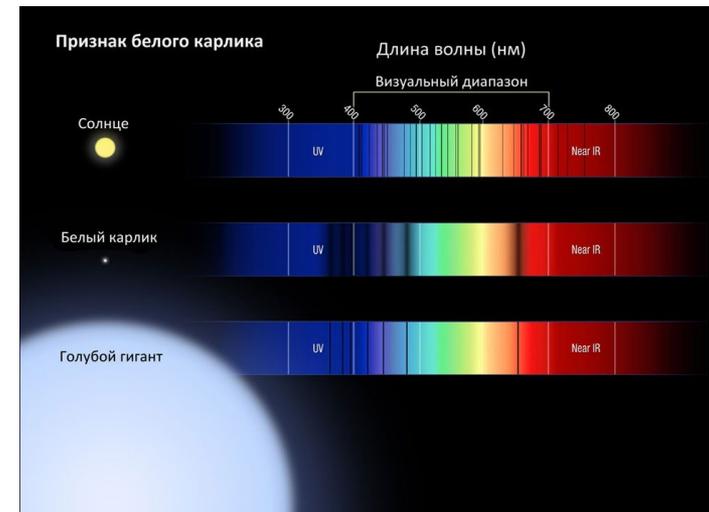
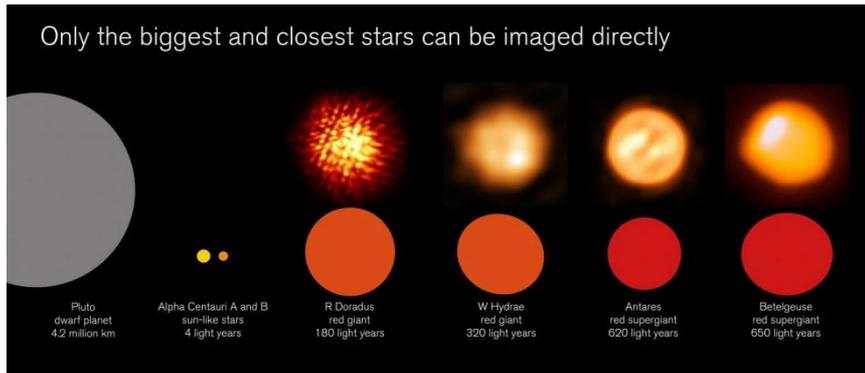


URL: http://znaniya-sila.narod.ru/solarsis/solar/solar_03.htm

Солнце, как звезда



Автор: File:Sun poster.svg: Kelvinsongderivative work: Rubin16 - Этот файл является производной работой от: Sun poster.svg;, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=94361178>

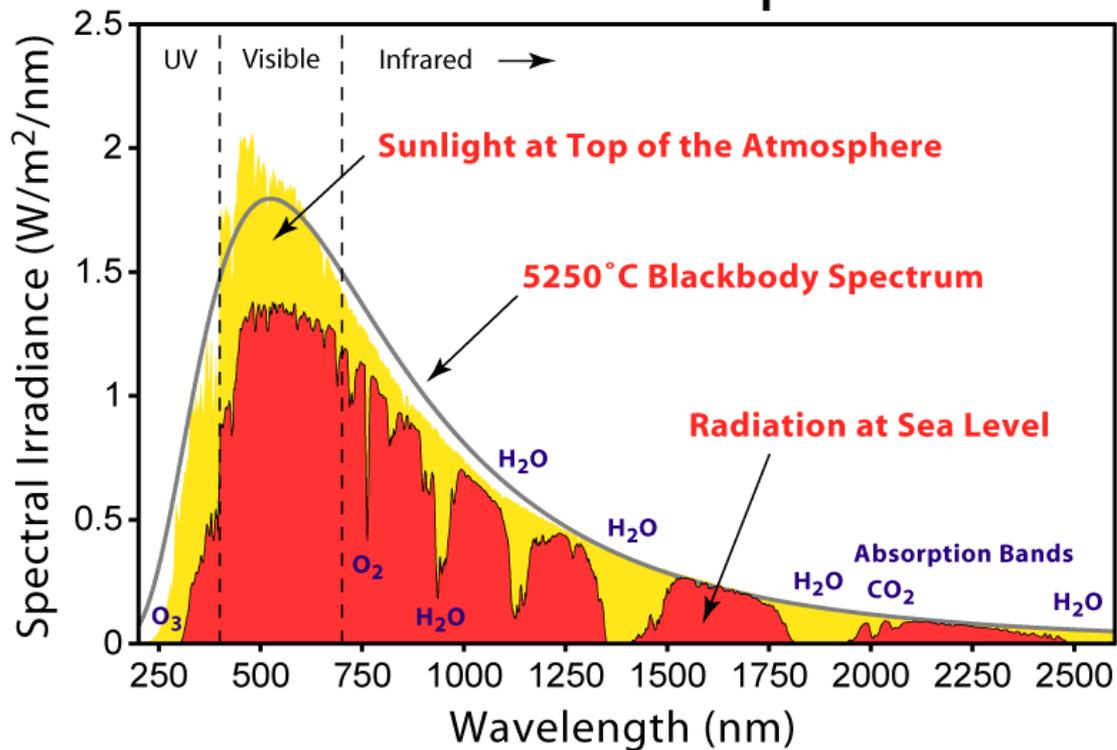


ESO/K. Ohnaka (Antares); Alma (ESO/NAOJ/NRAO)/E. O'Gorman/P. Kervella (Betelgeuse); ESO (R Doradus); Alma (ESO/NAOJ/NRAO)/W. Vlemmings (W Hydrae)

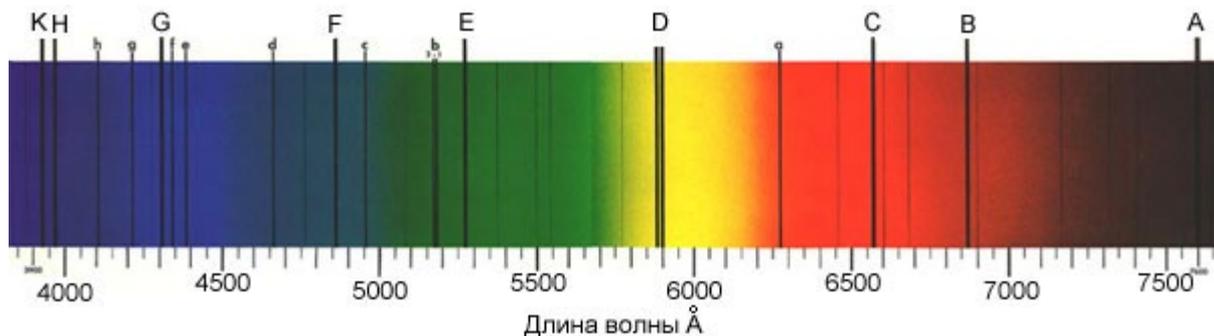
<https://scfh.ru/lecture/zvyezdnyy-svet/>

Спектр Солнца

Solar Radiation Spectrum



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png



Солнце –
«вторичная»
звезда

Линии Бальмера и Лаймана для водорода

Формула Ридберга

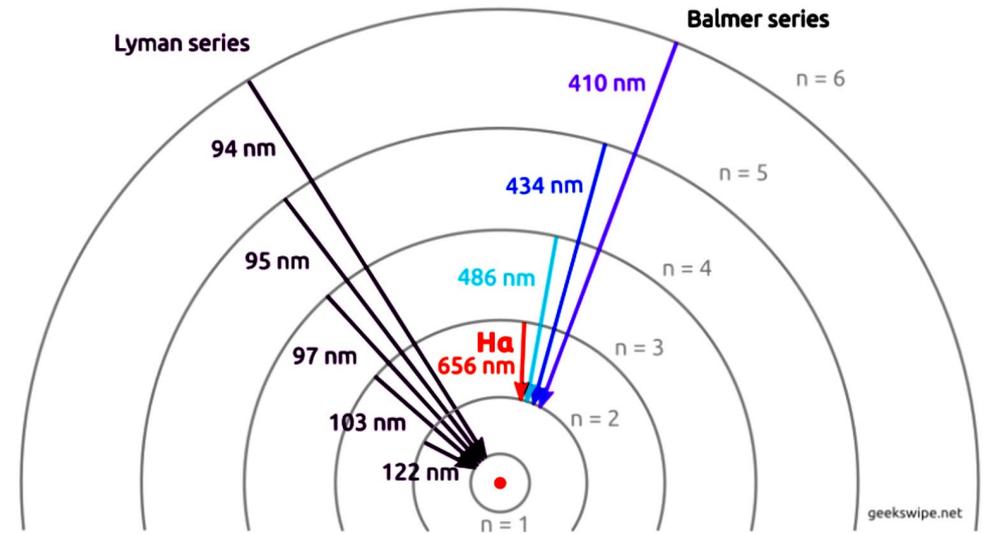
$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

λ — длина волны света в вакууме;

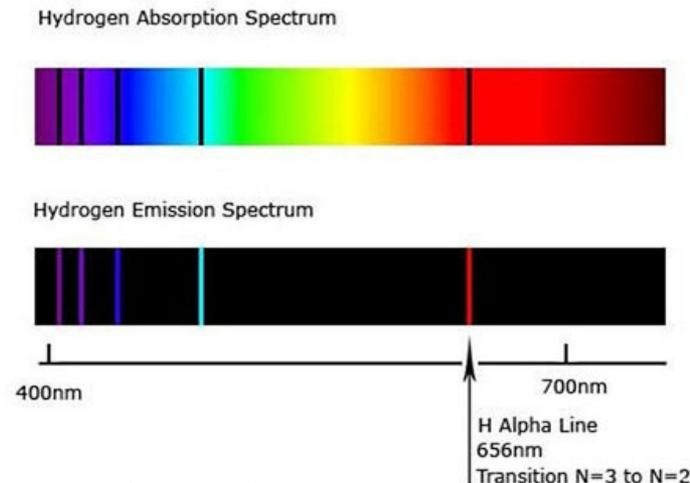
R — постоянная Ридберга для рассматриваемого химического элемента ($R_H \approx 109677.583407 \text{ см}^{-1}$);

Z — атомный номер, или число протонов в ядре атома данного элемента ($Z = 1$ для водорода);

n_1 и n_2 — целые числа, такие что $n_1 < n_2$.

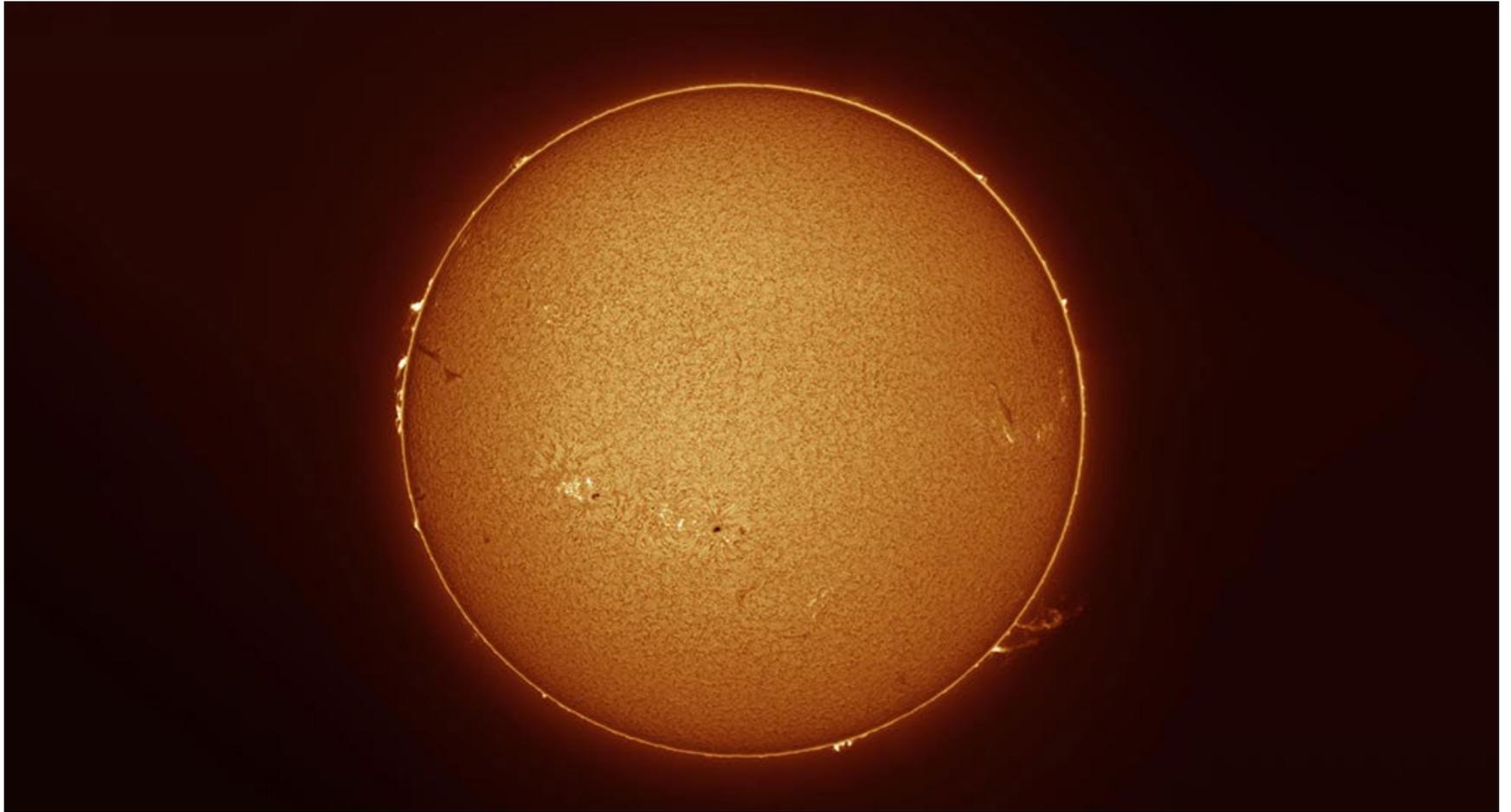


URL: <https://geekswipe.net/science/astronomy/hydrogen-alpha-explanation-and-applications/>



URL: <https://futurist.ru/articles/362>

Солнце в лучах H_{α}

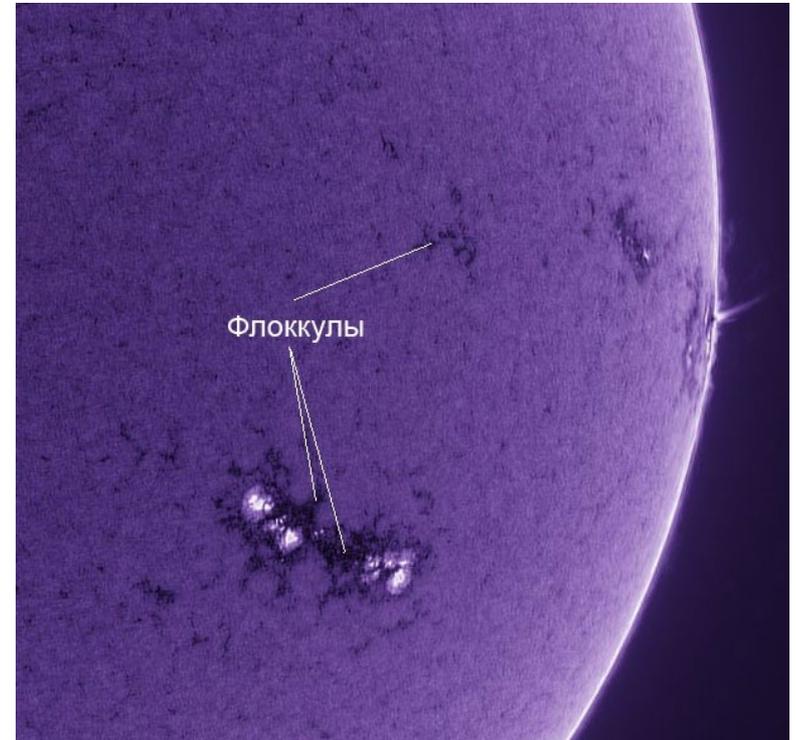
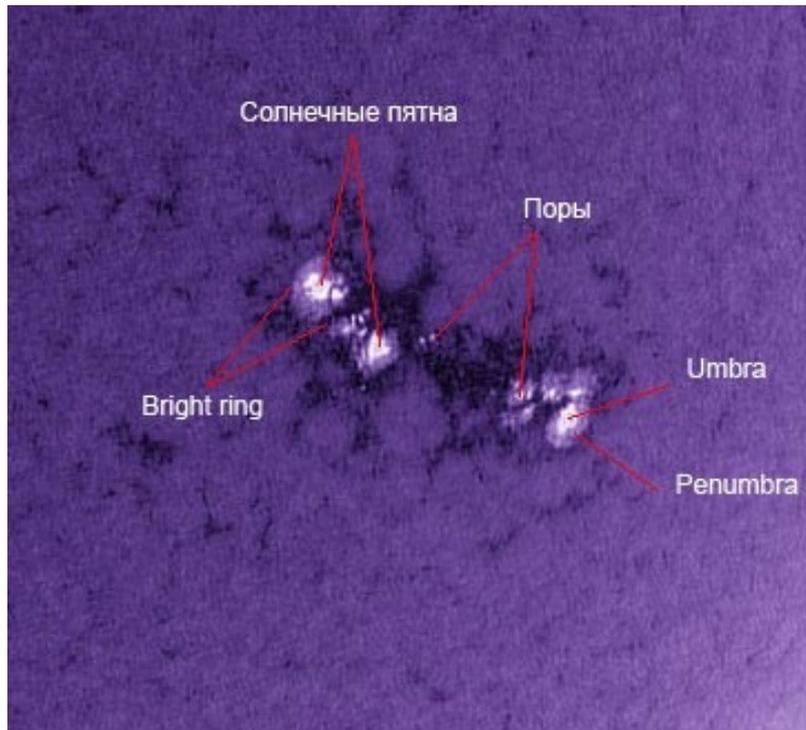


© David St. Louis | CC BY

URL: <https://www.flickr.com/photos/stargazerdave/>

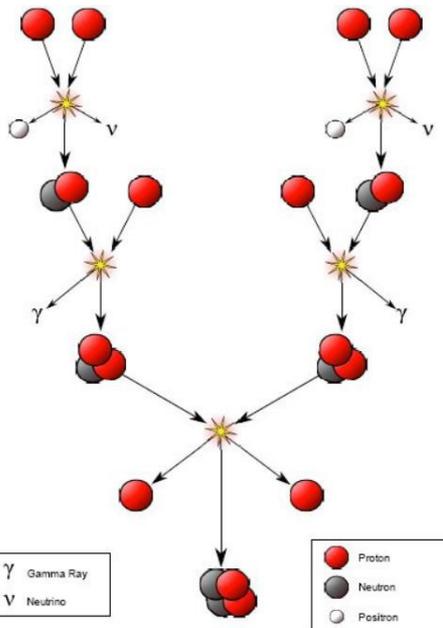
Линия Ca II К (3)

Снимки в K_1 почти такие же, как прямые фотосферные, снимки в K_3 заметно отличаются. Удастся выделить разные детали. На снимках в K_1 видны **факелы** на диске.

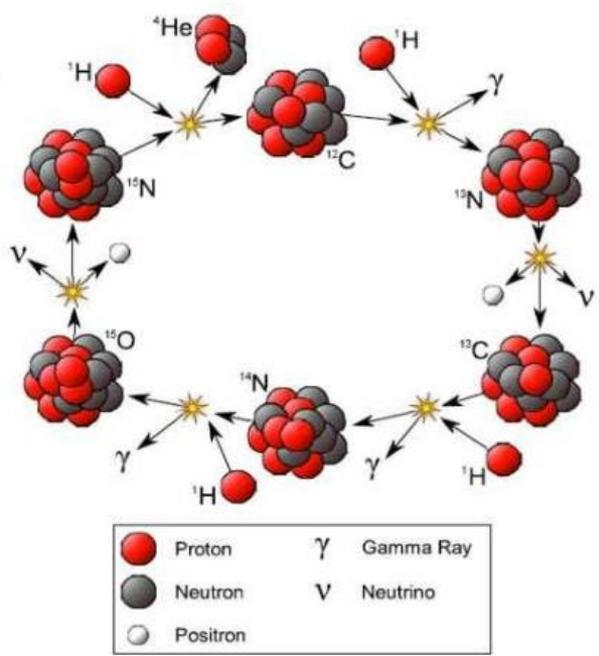


На снимках в K_2 факелы разрастаются в факельные поля, частично закрывающие **пятна** — это хромосферные факелы (природа та же, что и у фотосферных, но разный уровень). На гелиограммах видны гранулы размером $\sim 10''$, называемые **флоккулами** (иногда разбиваются на гранулы подобно фотосферным). На снимках в K_3 факельные поля совсем закрывают пятна и появляются **темные волокна**.

Протон-протонный цикл и CNO-цикл в ядре Солнца



- $p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e + 0.4 \text{ МэВ}$
- ${}^2\text{D} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5.49 \text{ МэВ}$
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p + 12.85 \text{ МэВ}$



Основной путь реакции CNO-цикла :

- ${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma + 1,95 \text{ МэВ} (1,3 \times 10^7 \text{ лет})$
- ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e + 1,37 \text{ МэВ} (7 \text{ минут})$
- ${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma + 7,54 \text{ МэВ} (2,7 \times 10^6 \text{ лет})$
- ${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma + 7,29 \text{ МэВ} (3,2 \times 10^8 \text{ лет})$
- ${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e + 2,76 \text{ МэВ} (82 \text{ секунды})$
- ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} + 4,96 \text{ МэВ} (1,12 \times 10^5 \text{ лет})$

Химический состав Солнца

Элемент	$\lg N$
H	12
He	11.3
Li	0.96
C	8.72
O	8.96

содержание лития характеризует молодость Солнца

Корона

Корону можно наблюдать во время затмения. Ее вид в максимуме и минимуме солнечной активности различен.

Корона имеет непрерывный спектр, а также показывает эмиссионные линии, которые ни на что не похожи. Фраунгоферова спектра нет, а имеются также очень широкие и неглубокие линии поглощения, которые трудно заметить.

Можно разделить спектр на части:

L-спектр — эмиссия в линиях на расстояниях до 9' от края диска;

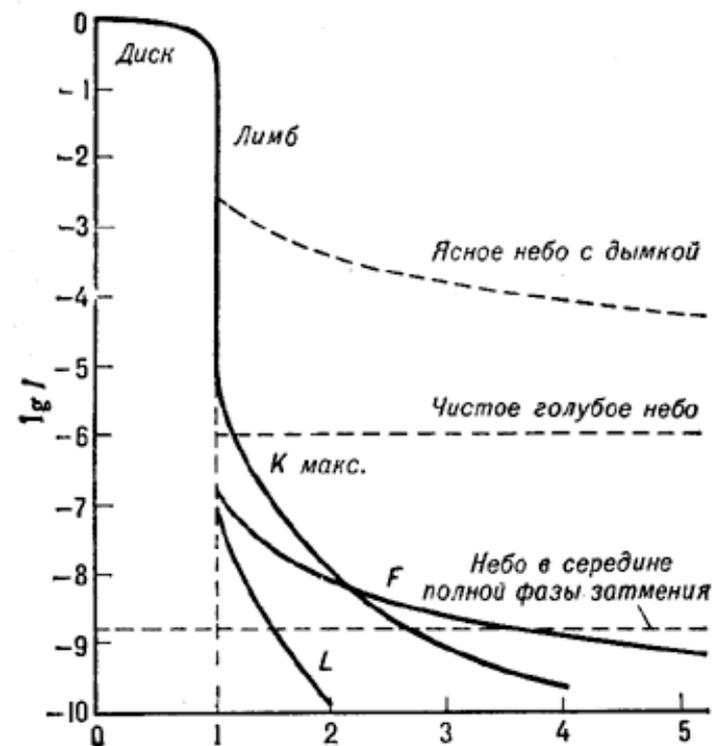
K-спектр — непрерывный спектр (от 0' до 20');

F-спектр — непрерывный спектр (от 3' до бесконечности, где переходит в зодиакальный свет)



©1999 F. Espenak - All rights reserved.

URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1167345>



Сравнение интенсивности излучения компонентов (K, L, F) солнечной короны с яркостью неба близ Солнца вне и во время затмения. По оси абсцисс отложено расстояние от Солнца в его радиусах по оси ординат - логарифмы интенсивности излучения в относительных единицах.

<http://www.astronet.ru/db/msg/1188668>

Магнитные поля

Расщепление линий спектра в пятне – это следствие *эффекта Зеемана*: если поле продольное, то образуется 2 компонента линии, смещенных от частоты линии ν_0 на $\pm \square$ с разной круговой поляризацией. Если поле поперечное, то на 3 компонента: крайние (на $\nu_0 \pm \square$) линейно поляризованы горизонтально, центральный – вертикально.

Сдвиг линий:

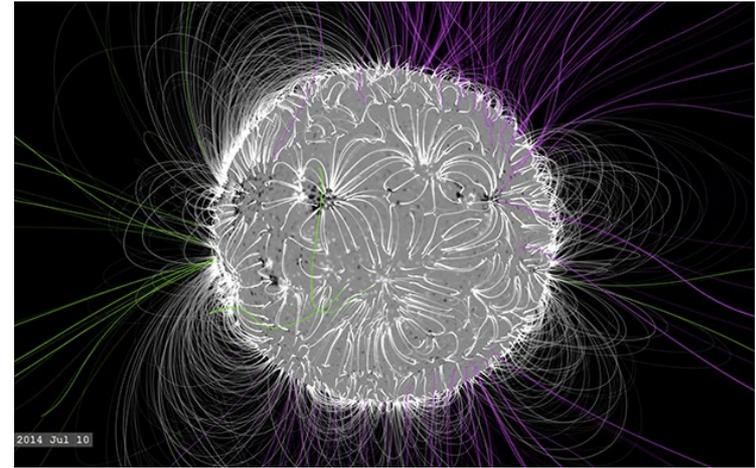
$$\Delta\lambda = CHg\lambda^2,$$

где напряженность H в Эрстедах, длина волны λ в см, $C = 4.7 \cdot 10^{-15}$, множитель g разный для различных линий.

Смещение (расщепление) солнечных линий составляет порядка 0.1 \AA .

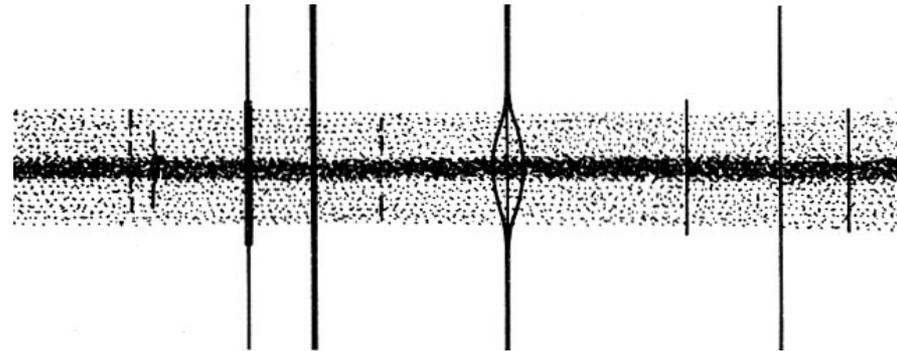
Для подобного анализа нужно брать:

- 1) узкие линии;
- 2) линии с большим g ;
- 3) красный участок спектра (поскольку $\Delta\lambda \sim \lambda^2$).



© NASA

<https://nplus1.ru/news/2016/02/05/solar-magnetic-field>



Длина волны, \AA	Элемент	$g\lambda^2$	$H_{\Delta\lambda} = 0.1 \text{ \AA}$
5250,218	FeI	83	1289
6173,348	FeI	95	1126
6302,508	FeI	100	1070

URL:

<http://12apr.su/books/item/f00/s00/z0000039/st026.shtml>

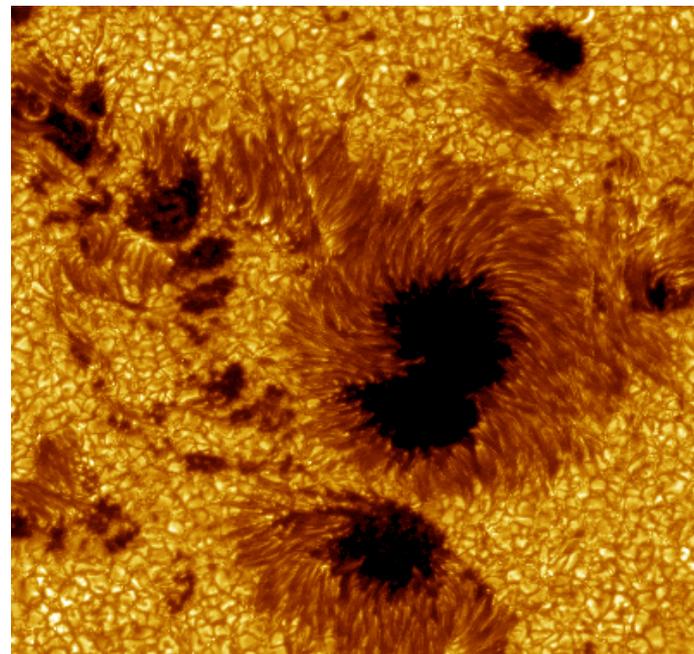
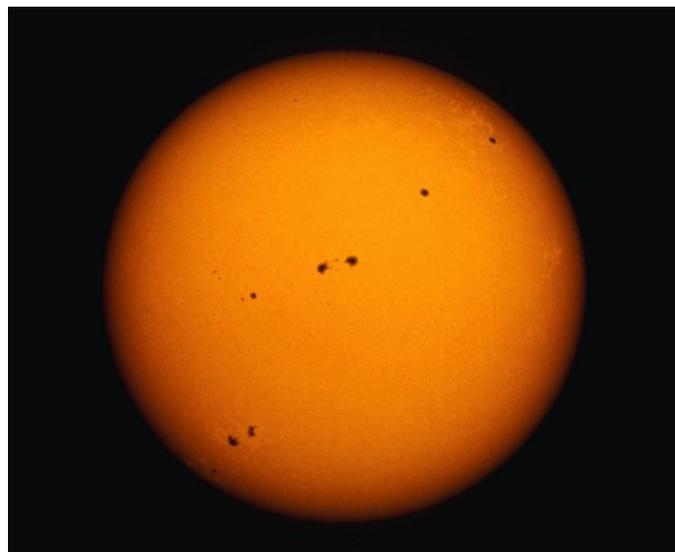
Солнечные пятна

Пятна появляются за 2-3 дня, мелкие живут примерно одну неделю, а крупные — несколько оборотов Солнца. Рекорд — полтора года.

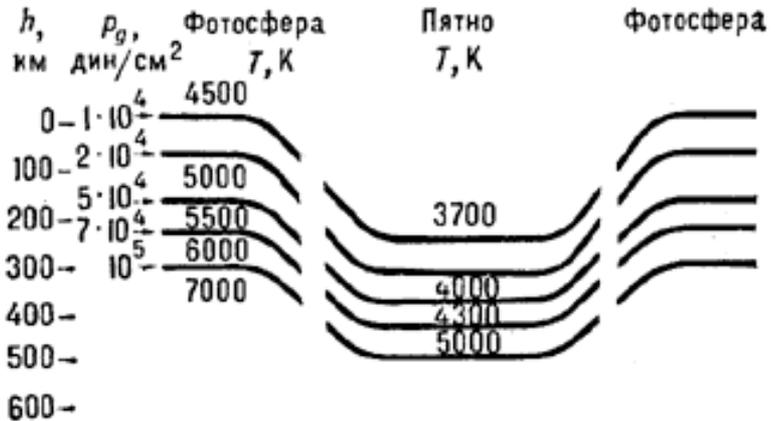
Эффект Вильсона (эффект воронки) показывают не все пятна. Пятна часто встречаются парами с несколько отличным собственным движением. Лучевые скорости говорят о втекании вещества со скоростью до 3 км/сек.

Магнитные поля у больших пятен достигают 5000 Э. В центре магнитные линии направлены вверх или вниз, к краям они наклоняются (загибаются). Сила поля тем больше, чем больше пятно. Однако, после его исчезновения магнитное поле часто остается, и при появлении пятна опять увеличивается, то есть пятна лишь способствуют выносу поля в активных областях, которые весьма устойчивы.

Пятна — порождение магнитных полей. Существование полей связано с неоднородностью вращения Солнца, что порождает циркуляционные потоки в конвективной зоне и вихри, которые выносятся на поверхность.

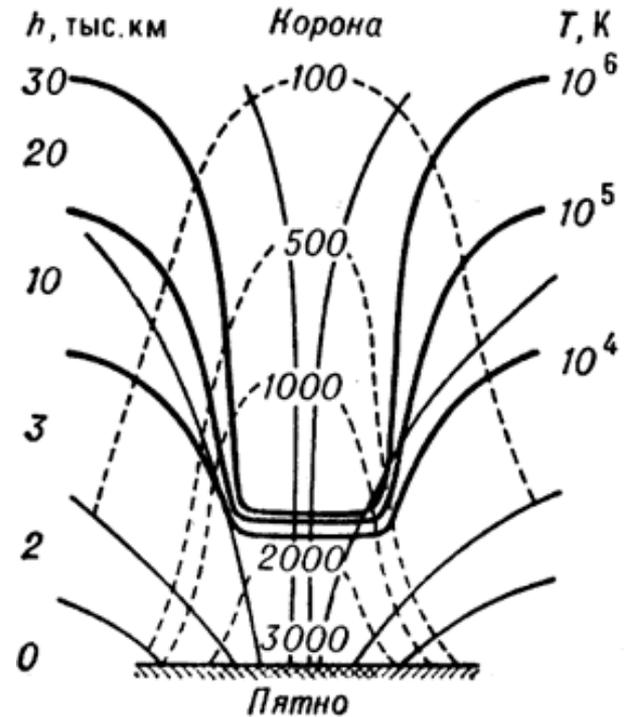


Солнечные пятна (2).



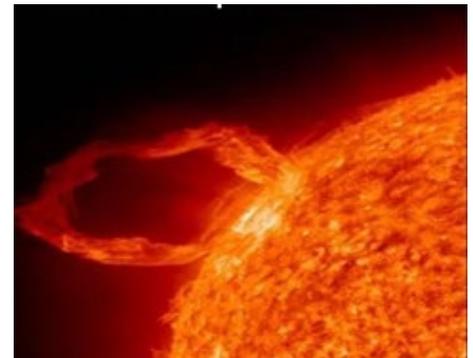
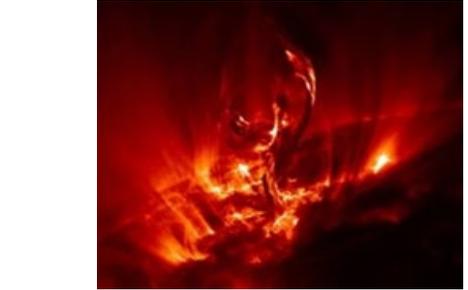
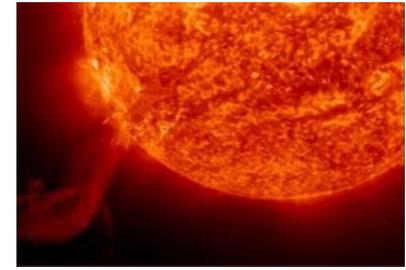
Модель пятна. Проведены линии равного давления p_g в фотосфере и пятне. Указано распределение температур в зависимости от глубины h .

Слабые поля, однако, не могут подавить конвекцию, а наоборот способствуют ей, подавляя мелкую турбулентность и уменьшая тем самым вязкость газа, что усиливает конвекцию. Потому пятна окружены факелами, и над ними есть флоккулы.



Строение солнечной атмосферы над пятном. Тонкие линии – силовые линии магнитного поля H , штриховые линии – линии равной напряженности H в Э, толстые линии – изотермы. Видно, что высокотемпературный корональный газ над пятном опускается до малых высот.

Протуберанцы



Спокойные протуберанцы. Вещество движется медленно. Форма меняется медленно. Время существования — недели и месяцы. Наблюдаются во всех гелиографических широтах. Возникают вблизи групп солнечных пятен, находящихся на поздних стадиях развития, или вдали от них. Кинетическая температура — 15000 К.

Активные протуберанцы. Потoki вещества движутся от протуберанца к фотосфере и от одного протуберанца к другому с довольно большой скоростью. Кинетическая температура — 25000 К. Многие спокойные протуберанцы становятся активными на время от десятков минут до нескольких суток, а затем исчезают или превращаются в эруптивные протуберанцы.

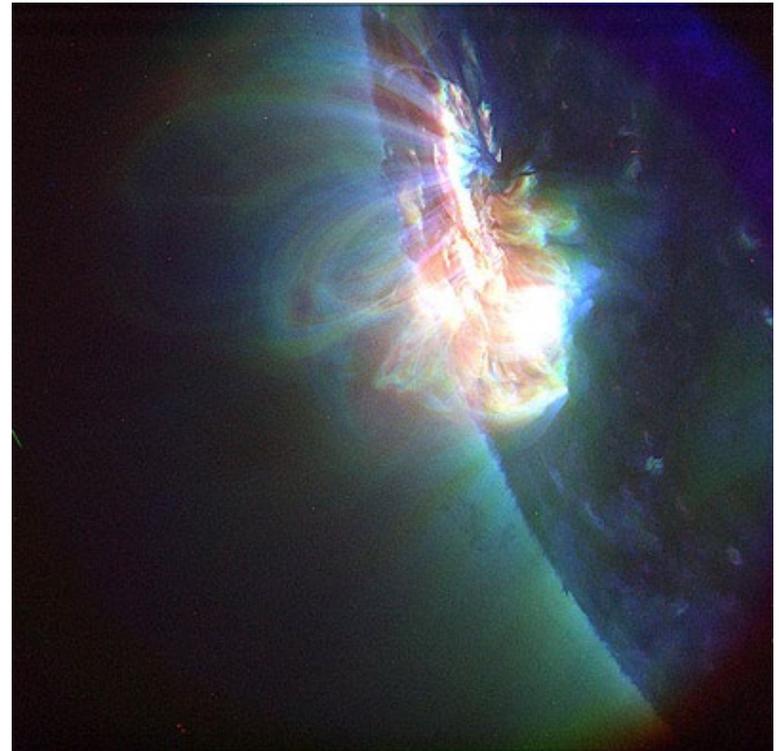
Эруптивные или изверженные протуберанцы. По внешнему виду напоминают громадные фонтаны. «Фонтаны» достигают высот до 1.7 млн км над поверхностью Солнца. Сгустки вещества движутся быстро, «извергаются» со скоростями в сотни км/с. Начертания изменяются довольно быстро. При увеличении высоты протуберанец слабеет и рассеивается. В некоторых протуберанцах наблюдались резкие изменения скорости движения отдельных сгустков. Эруптивные протуберанцы непродолжительны.

Корональные или петлеобразные протуберанцы. Возникают над хромосферой в виде небольших облаков. Со временем небольшие облака сливаются в одно большое облако. Большое облако испускает вниз (к хромосфере) отдельные потоки (струи) светящегося вещества. Существуют несколько часов.

Хромосферная вспышка

Усиление яркости факельных полей в хромосфере наблюдается в H_{α} и линиях Ca, а наиболее яркие вспышки видны и в интегральном свете (17 раз за 100 лет). Они появляются рядом с полутенью, где наблюдается разрыв магнитных полей (смена полярности). Спектр вспышки показывает множество эмиссионных линий, непрерывный спектр соответствует температуре в миллион градусов. Такой температуры достаточно для протекания термоядерных реакций.

Возникновение вспышки связано с появлением конвекции, которая в пятне запрещена. Время жизни примерно 3 часа, но бывает и до 7 часов у наиболее мощных. Ширина линии H_{α} достигает 15\AA (против 1\AA в обычное время). Во время слабых вспышек видна эмиссия на фоне поглощения. Высота от края диска составляет 7000-16000 км, т.е. вспышка входит в корону и оторвана от фотосферы. Часто вспышка сопровождается выбросом из пятна, около которого она находится. Это эруптивные протуберанцы.



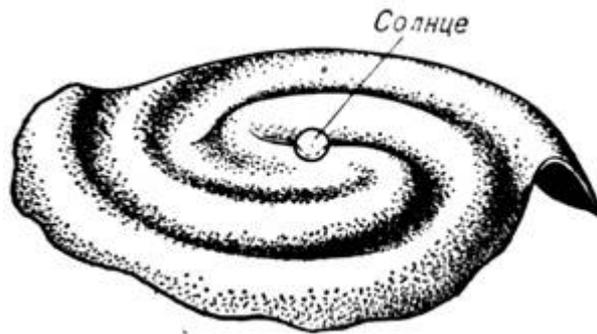
<http://www.astronet.ru/db/msg/1190782>

Связь между солнечными и земными явлениями

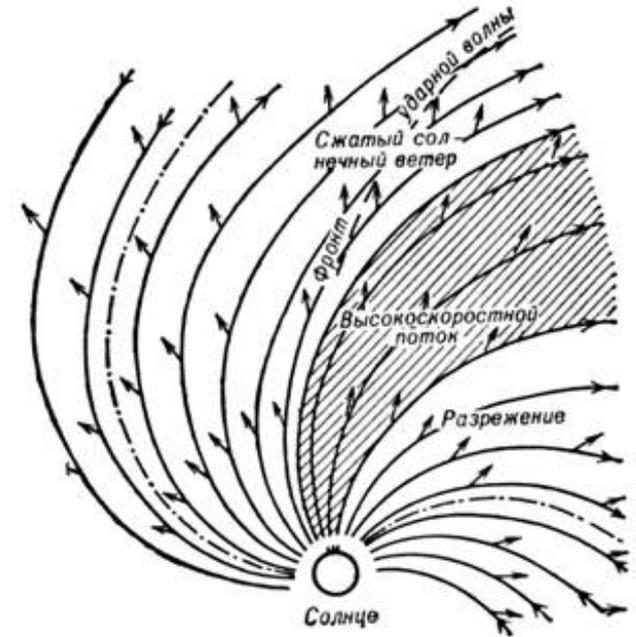
Корпускулярное излучение Солнца

На поверхность Земли изотропно прилетают частицы. Фактически это не первичные частицы, а результат взаимодействий их с частицами в верхних слоях земной атмосферы. У первичных частиц энергия $\sim 10^{19}$ эВ, их распределение тоже практически изотропно, но есть максимум со стороны Солнца. В 1942 году заметили увеличение потока частиц во время хромосферных вспышек. Например, после вспышки 13 мая 1959 года нейтронов было получено в 6 раз больше, а протонов — в 1000 раз.

Земля получает малую долю ($0.5 \cdot 10^{-9}$) энергию, излучаемой Солнцем, но многие явления на Земле зависят от этой энергии.



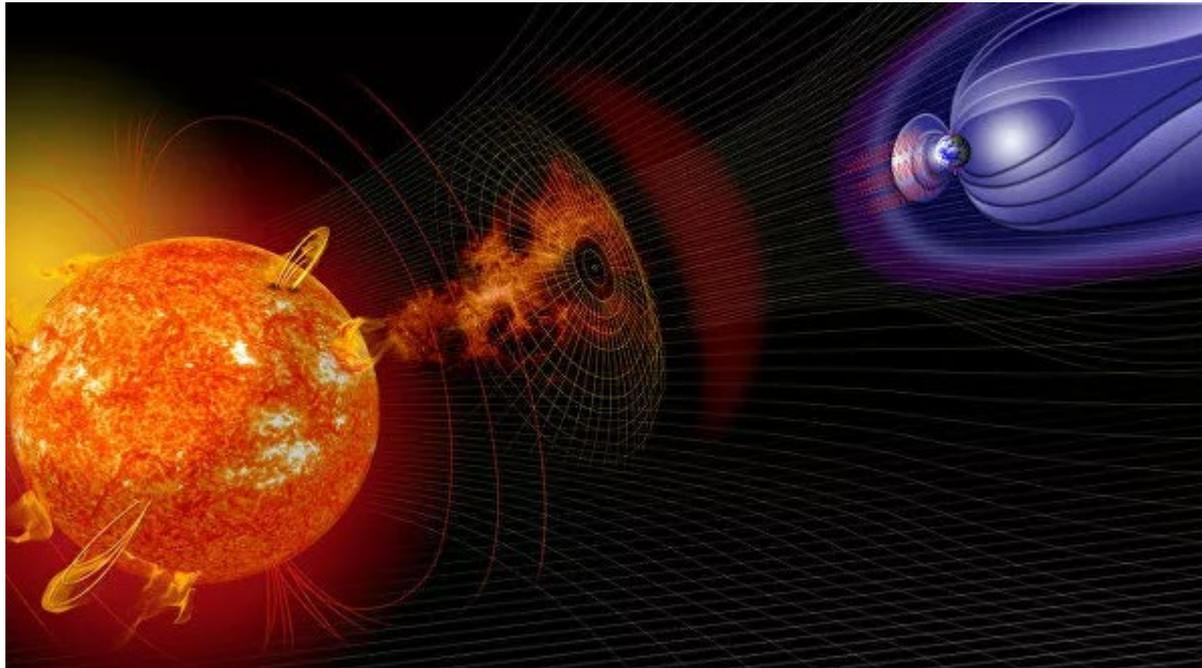
Форма гелиосферного токового слоя



Структура сектора межпланетного магнитного поля. Короткие стрелки показывают направление течения плазмы солнечного ветра, линии со стрелками — силовые линии магнитного поля, штрихпунктир — границы сектора (пересечение плоскости рисунка с токовым слоем)

Магнитные бури

На Земле часто бывают магнитные бури (и менее сильные магнитные возмущения), когда магнитная стрелка начинает сильно колебаться. Колебания начинаются внезапно и длятся несколько суток. Периоды таких явлений: 11 лет, 1 год и 27 дней. Заметим, что 27 дней — это период вращения Солнца (пятна возвращаются), 1 год — одно и то же положение Солнца по отношению к земному экватору, 11 лет — период солнечной активности. В марте и сентябре больше всего подобных колебаний, поскольку Земля напротив областей, более всего сдвинутых к северу и югу от солнечного экватора и там много пятен.



© NASA

URL: <https://ria.ru/20191120/1561158959.html>

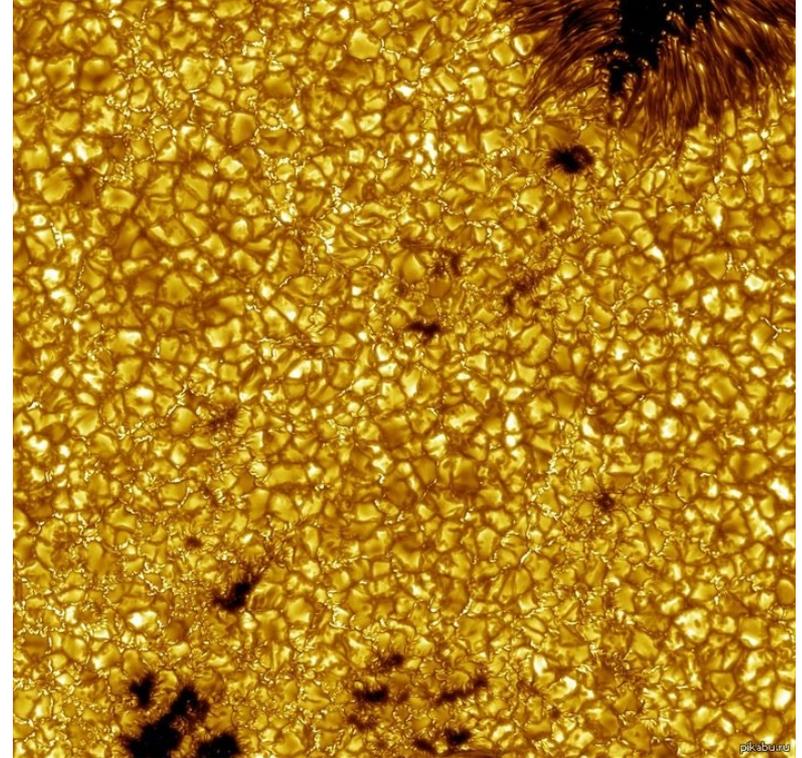
Полярные сияния

Периодичность этого явления: 11 лет и 1 год. Сильные полярные сияния появляются вместе с магнитными бурями. Визуально это полосы, дуги, лучи, располагающиеся вдоль магнитных силовых линий в местах наблюдения. Эти явления видны в основном в северных широтах, но сильные сияния видны даже на Кубе. Спектр полярных сияний сходен со спектром ночного неба и содержит в основном запрещенные линии [OI] $\lambda 5577$, 6300 \AA , и иногда встречаются другие запрещенные линии, образующиеся в верхних слоях земной атмосферы. Все эти линии видны обычно в спектре ночного неба, но в сияниях они усилены. Но есть и новая особенность — мощная линия H_{α} . Она сильна и смещена в фиолетовую сторону на 1-2 тыс. км/сек. Это светят протоны, выброшенные Солнцем и врывающиеся в атмосферу Земли.



Что пропустили? Грануляция фотосферы.

Грануляция – система постоянно возникающих, а затем (через несколько минут) исчезающих светлых ячеек (гранул) в фотосфере Солнца, разделённых узкими тёмными промежутками. Поскольку угловой размер гранул (~1") очень близок к предельному разрешению солнечных телескопов, установленных на поверхности Земли, грануляция наблюдается или в моменты наибольшего спокойствия атмосферы (разрешение до 0.5"), или с баллонов и спутников. Грануляция видна практически до самого края диска Солнца. Общее число гранул на диске $\sim 2 \cdot 10^6$. Гранулы образуются благодаря конвекции плазмы. Конвективные потоки формируют колонны конвекции, перемешивающие вещество в зоне конвекции. Гранулы являются видимыми вершинами таких отдельных колонн и образуют зернистую структуру фотосферы.



URL: https://pikabu.ru/story/poverkhnost_solntsa_1574221

Звёзды

диаграмма Герцшпрунга-Рассела

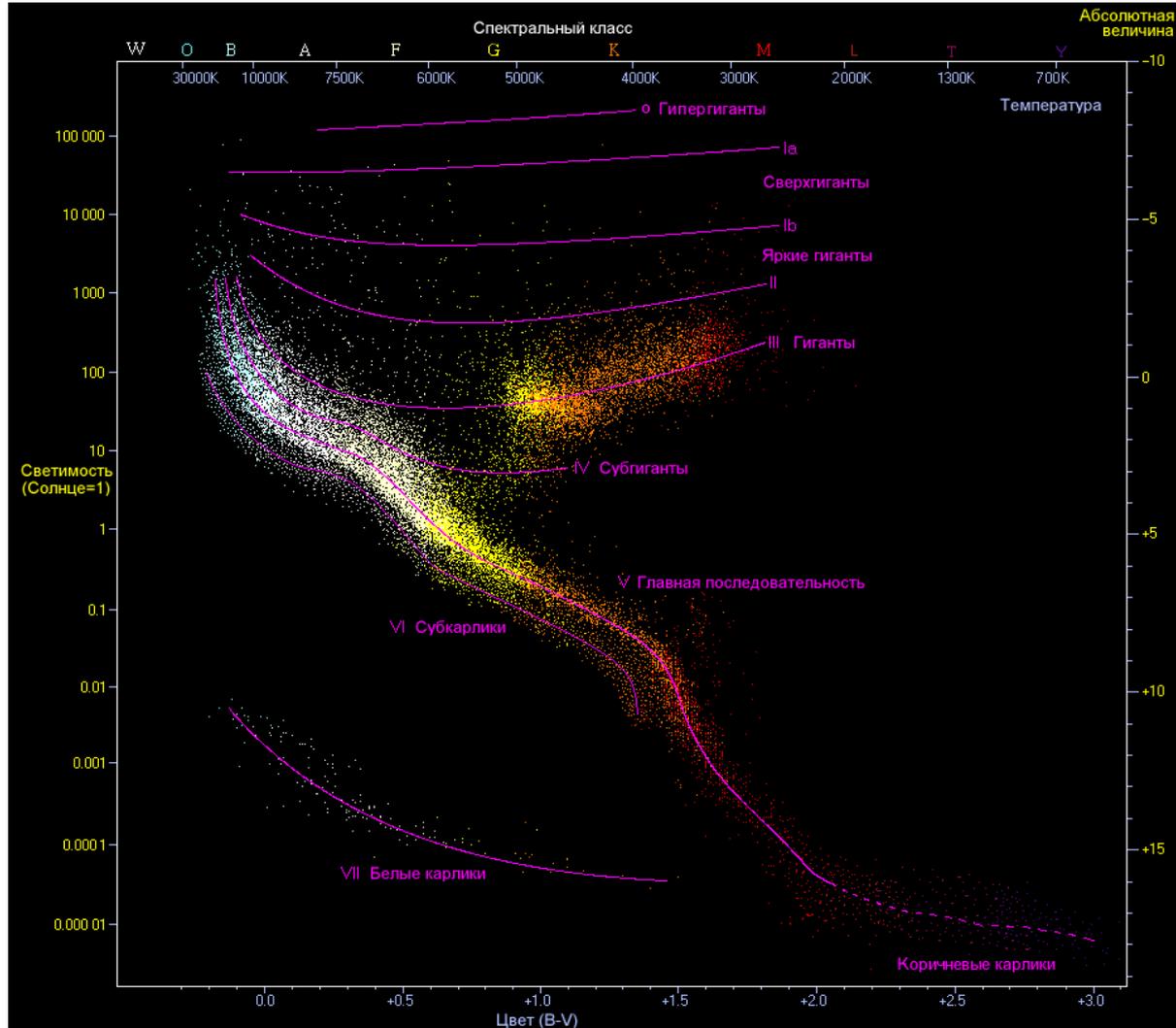
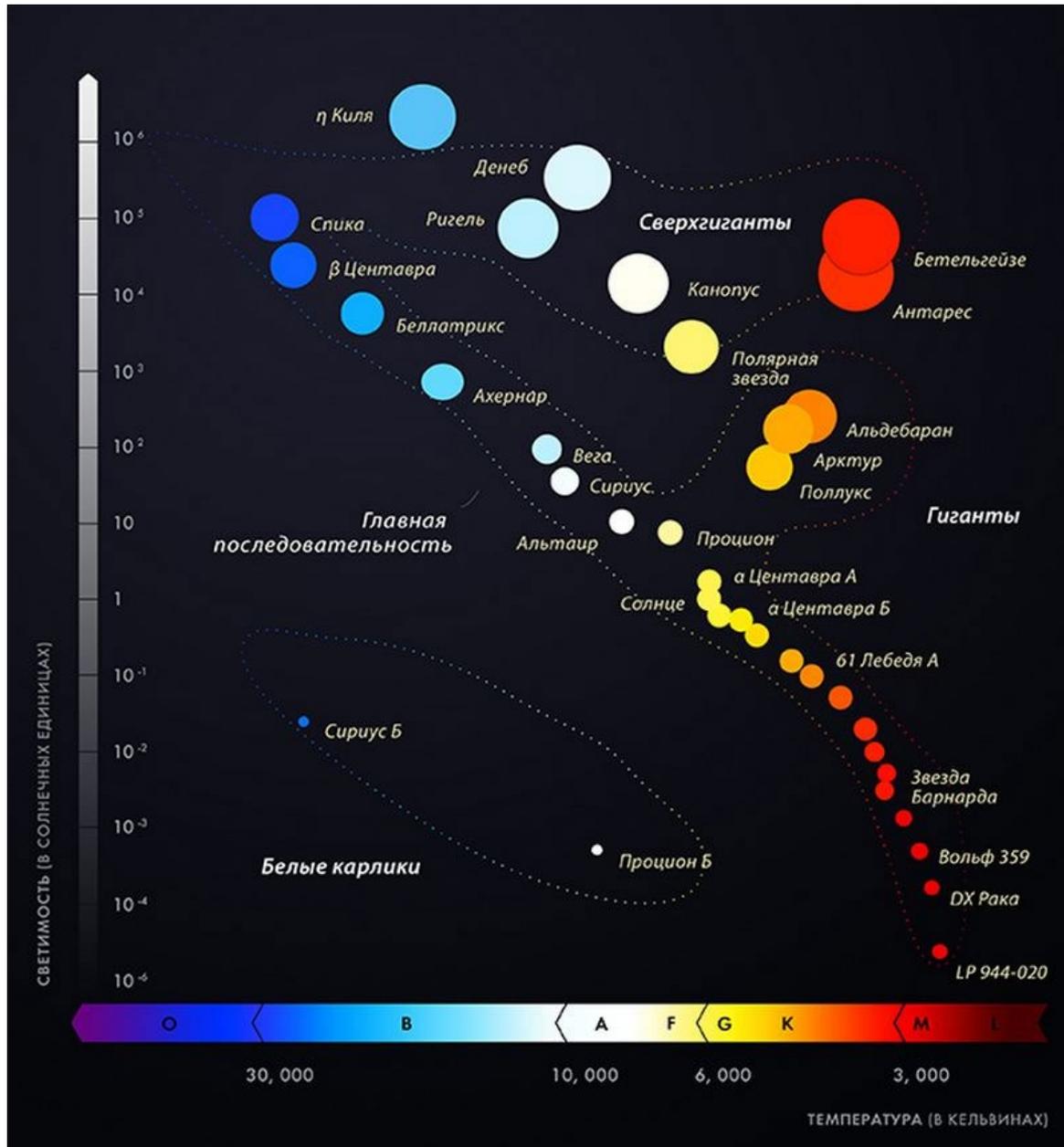


Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



Общие характеристики звезд

Блеск звезды.

Звездная величина m характеризует освещенность, создаваемую звездой на поверхности Земли или за границей ее атмосферы. Обычно используется вторая характеристика, поскольку атмосфера меняет прозрачность. Для точечных источников (большую часть звезд можно считать таковыми) эта освещенность $E = I/r^2$, где r — расстояние до звезды, I — интенсивность излучения звезды. По определению (формула Пакстона) $m = -2.5 \lg E + const$, где постоянная определяет нуль-пункт.

Ясно, что видимая звездная величина m не есть характеристика непосредственно звезды, поскольку зависит от расстояния до нее. Чтобы сравнивать звезды, мы должны, как бы, перенести их на одно расстояние. Поэтому второй необходимой характеристикой является расстояние m .

$$m - m_0 = -2.5 \lg \frac{E}{E_0}. \quad - \text{ формула Погсона.}$$

Изначально за 0^m был принят блеск Веги. Сейчас в полосе V системы UBV блеск Веги равен $+0.03^m$.

Абсолютная звёздная величина (M) — звёздная величина звезды на расстоянии 10 парсек от наблюдателя. Абсолютная звёздная величина, в отличие от видимой, позволяет сравнивать светимость разных звёзд, поскольку не зависит от расстояния до них.

Наблюдающаяся с Земли звёздная величина называется видимой (m). Применяется даже для величин, измеренных в ультрафиолетовом, инфракрасном или каком-либо другом не воспринимаемом глазом диапазоне излучения. Величина, измеренная в видимом диапазоне, называется *визуальной (V)*. Абсолютная болометрическая звёздная величина Солнца равна $+4.75^m$, в лучах V $+4.83^m$, а видимая звёздная величина составляет -26.7^m .

Общие характеристики звезд

Абсолютная звёздная величина (M) является основной характеристикой звезды.

Светимость звезды L , пропорциональна I , так что

$$-2.5 \lg \frac{L_*}{L_{\odot}} = M_* - M_{\odot}, \quad L = 10^{0.4(M_{\odot} - M_*)}.$$

Напомним, что $L = 4\pi R^2 H$, где $H = \sigma T_{\text{ef}}^4$ — поток излучения, а R — радиус звезды.

Некоторые яркие звёзды

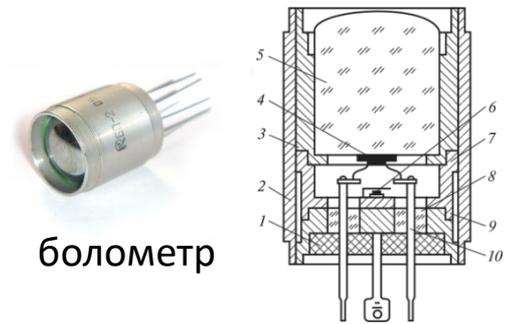
Название	Видимая визуальная звёздная величина, m	Абсолютная визуальная звёздная величина, M_v
Солнце	-26,72	+4,83
Сириус А	-1,5	+1,44
Канопус	-0,74	-5,71
Альфа Центавра А	+0,01	+4,38
Арктур	-0,05	-0,3
Вега	+0,03	+0,58
Ригель	+0,13	-7,8
Процион А	+0,34	+2,6
Бетельгейзе	+0,5	-5,47
Альдебаран	+0,86	-0,6
Антарес А	+0,9	-5,15
Поллукс	+1,14	+1,08
Денеб	+1,25	-8,38

* часть звёзд из списка являются переменными, так что их блеск может испытывать небольшие колебания



Денеб

Общие характеристики звезд



болометр

Блеск звезды. Спектральная зависимость.

Болометрическая звёздная величина показывает полную мощность излучения звезды (то есть мощность излучения на всех длинах волн). Для её измерения применяется болометр. Актуальность этой величины связана с тем, что некоторые звёзды (очень горячие и очень холодные) излучают преимущественно не в видимом диапазоне спектра.

В системе *UBV*:

Визуальная звёздная величина (V) — звёздная величина в фильтре *V*, максимум пропускания которого близок к максимуму чувствительности человеческого глаза (555 нм).

«*Синяя*» *звёздная величина (B)* характеризует яркость объекта в синей области спектра; максимум чувствительности на длине волны около 445 нм.

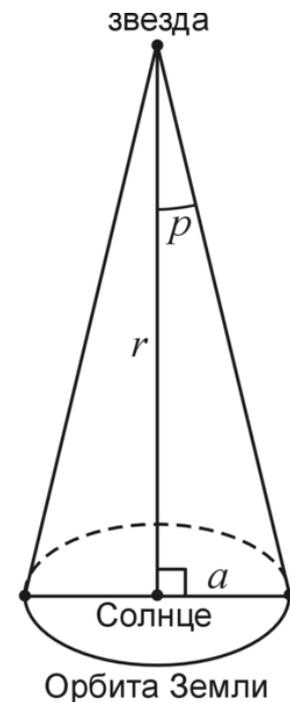
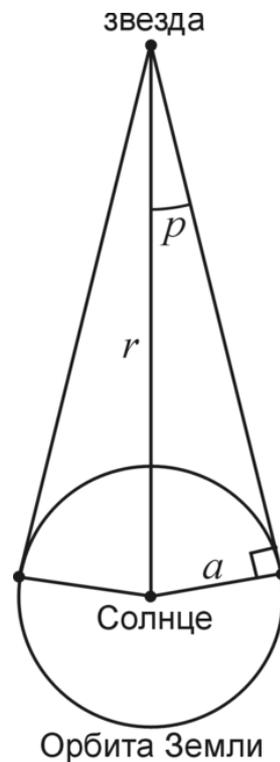
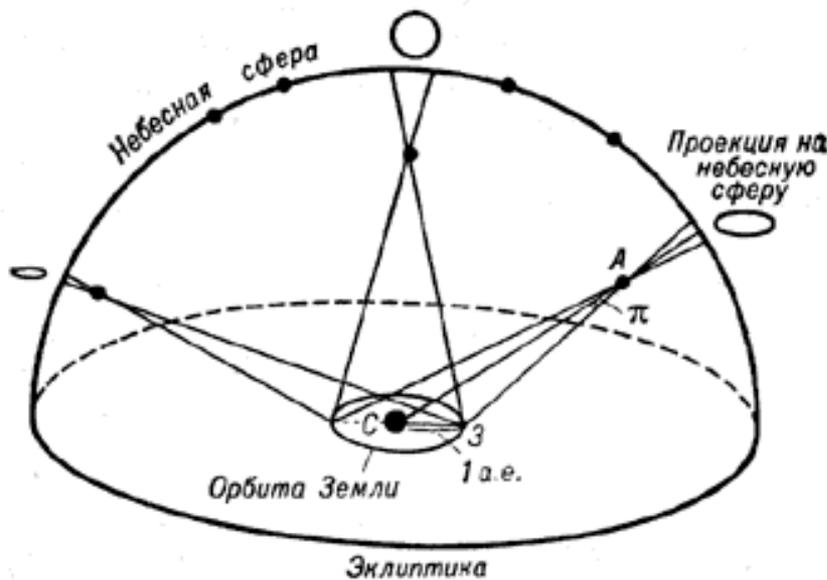
Ультрафиолетовая звёздная величина (U) имеет максимум в ультрафиолетовой области при длине волны около 350 нм.

Разности звёздных величин одного объекта в разных диапазонах (*U – B* и *B – V*) являются показателями цвета объекта: чем они больше, тем более красным является объект. Фотометрическая система *UBV* определена таким образом, чтобы показатели цвета звёзд спектрального класса *A0V* равнялись нулю.

Общие характеристики звезд

Расстояние.

Тригонометрический параллакс является мерой расстояния до звезды r . Он может быть определен прямо и косвенно. За единицу расстояния принято 10 пс (параллакс $\pi = 0.1''$)



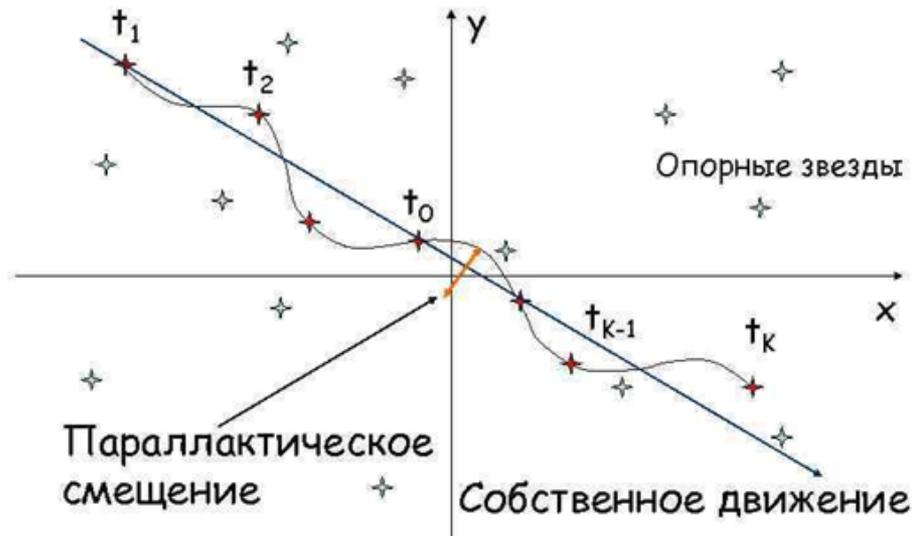
$$r = \frac{a}{\sin \pi} [\text{a. e.}] = \frac{1}{\pi''} [\text{пк}]$$

где a – большая полуось земной орбиты (1 а.е.)

Точность ($\sim 0.01''$) ограничивает применение областью до 100 пк. Внеатмосферные наблюдения позволяют изучать окрестности до 500 пк.

Общие характеристики звезд

Относительный метод измерения тригонометрических параллаксов



<https://present5.com/lekci-3-4-astrofizika-vvedenie-v-astrofiziku-1/>

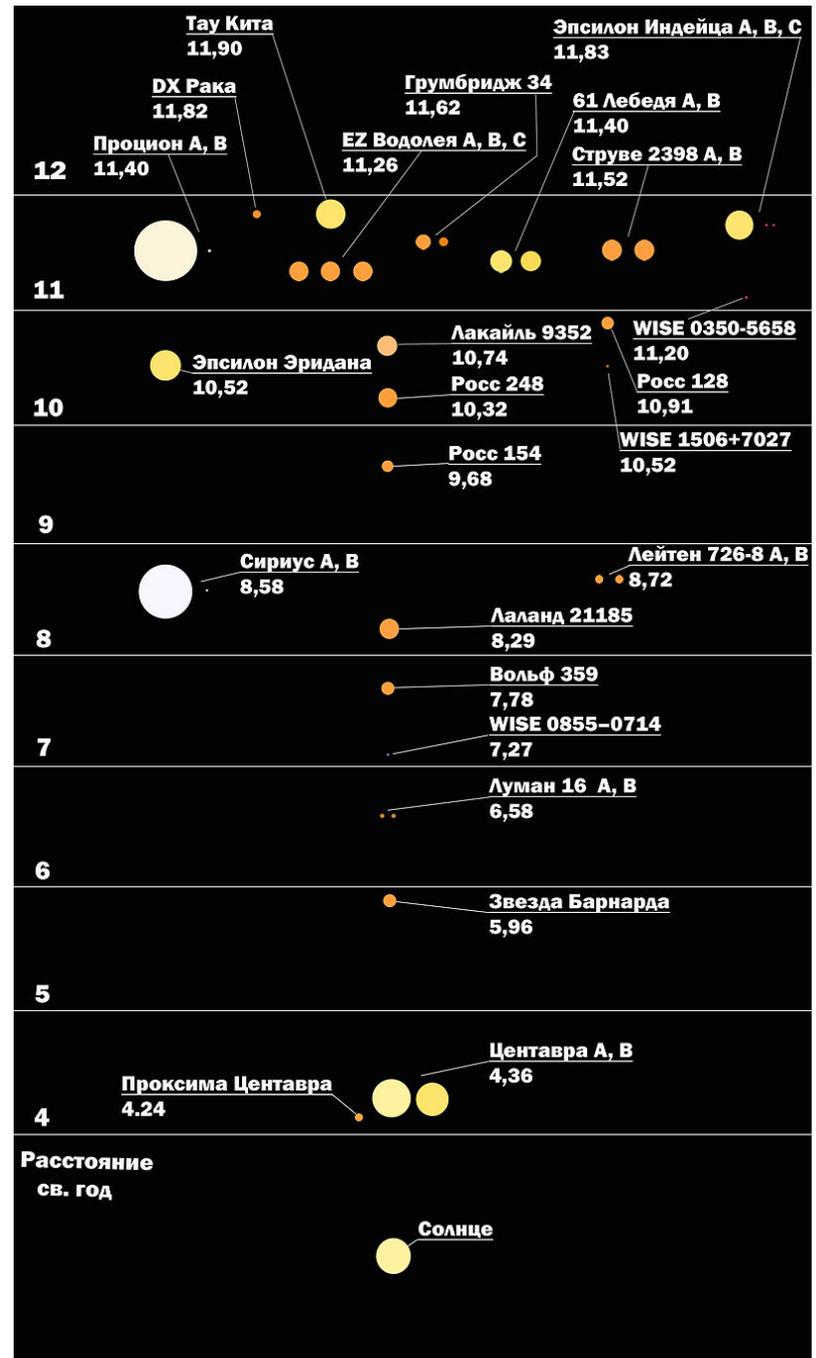
Звезда	Параллакс	Расстояние, пс
Проксима Центавра	0,762"	1,31
α Центавра	0,751"	1,33
Сириус	0,375"	2,66
Процион	0,288"	3,48

Ближайшие звёзды

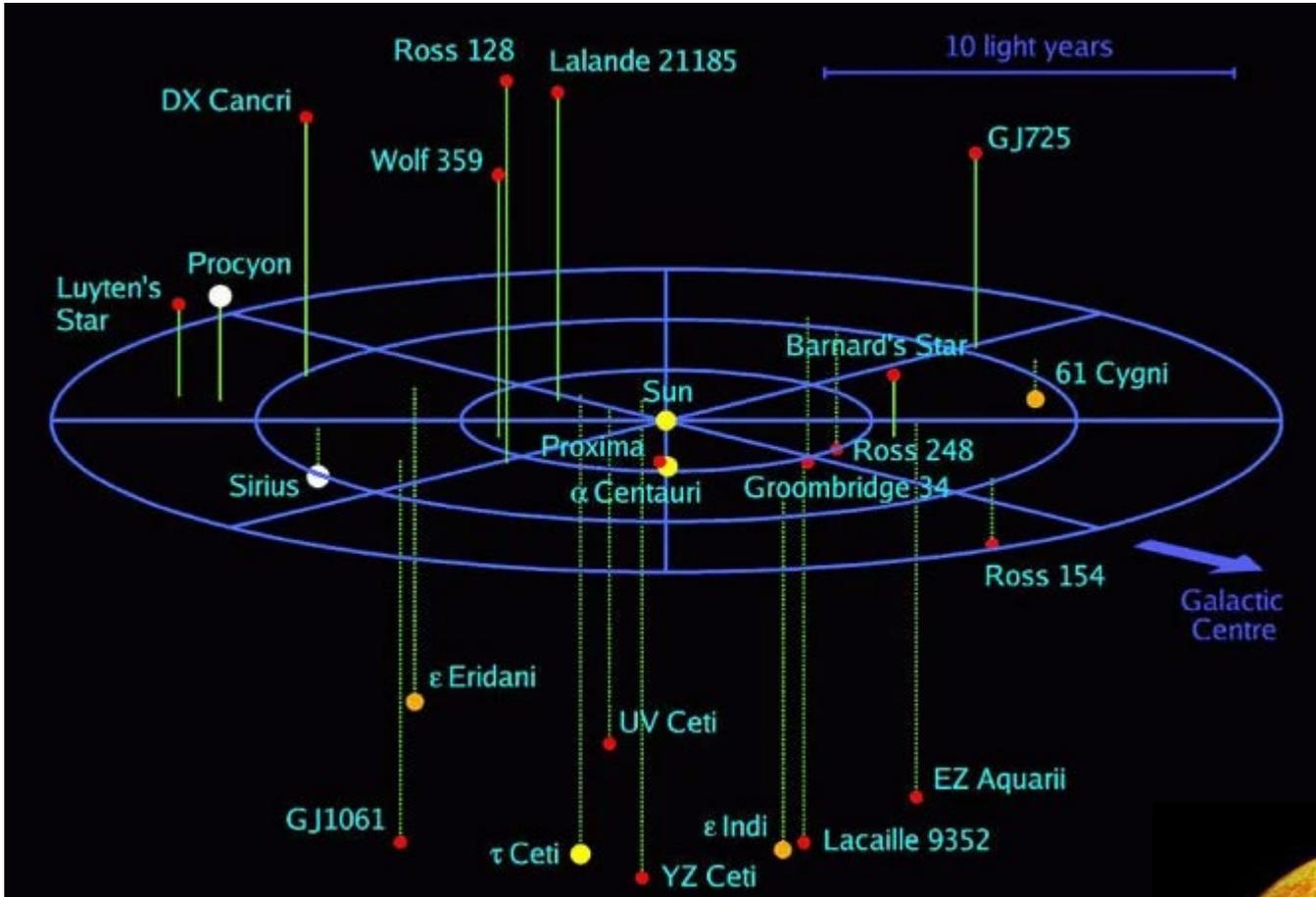
В радиусе 5 пк (16,308 св. года) от Земли, включая Солнце, в настоящее время известны 57 звёздных систем, которые могут находиться в пределах этого расстояния. Эти системы содержат в общей сложности 64 звезды и 13 коричневых карликов

По определению МАС один световой год равен 9 460 730 472 580 800 метрам ~ 9.4 трл км
63 241.077 а.е.
0.306601 пк

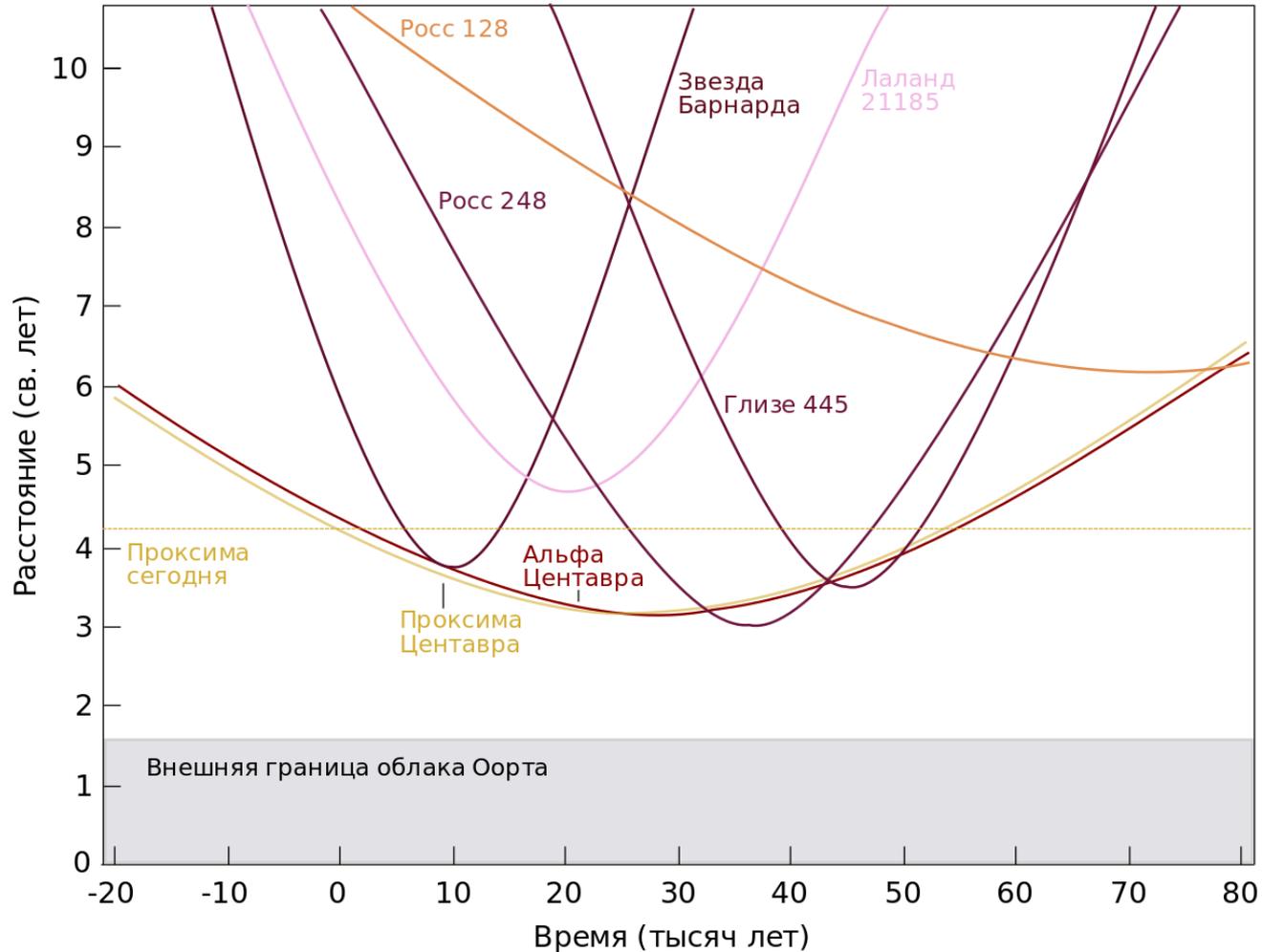
Т.е. 3 пк ~ 10 св. лет



Ближайшие звёзды



Ближайшие звёзды

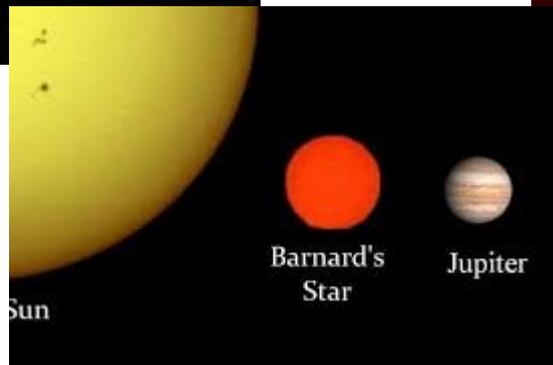
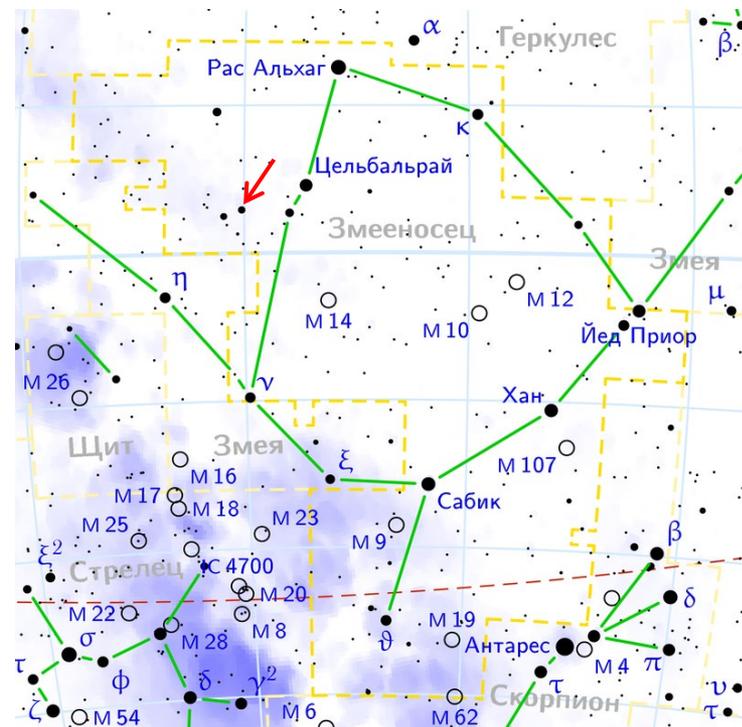


«Летящая» Барнарда

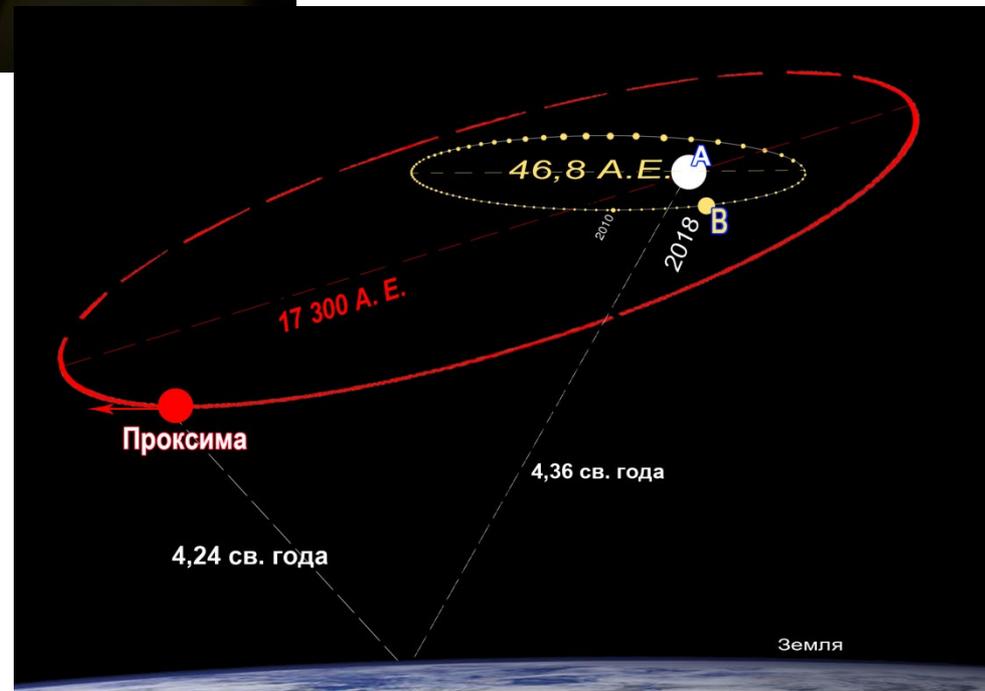
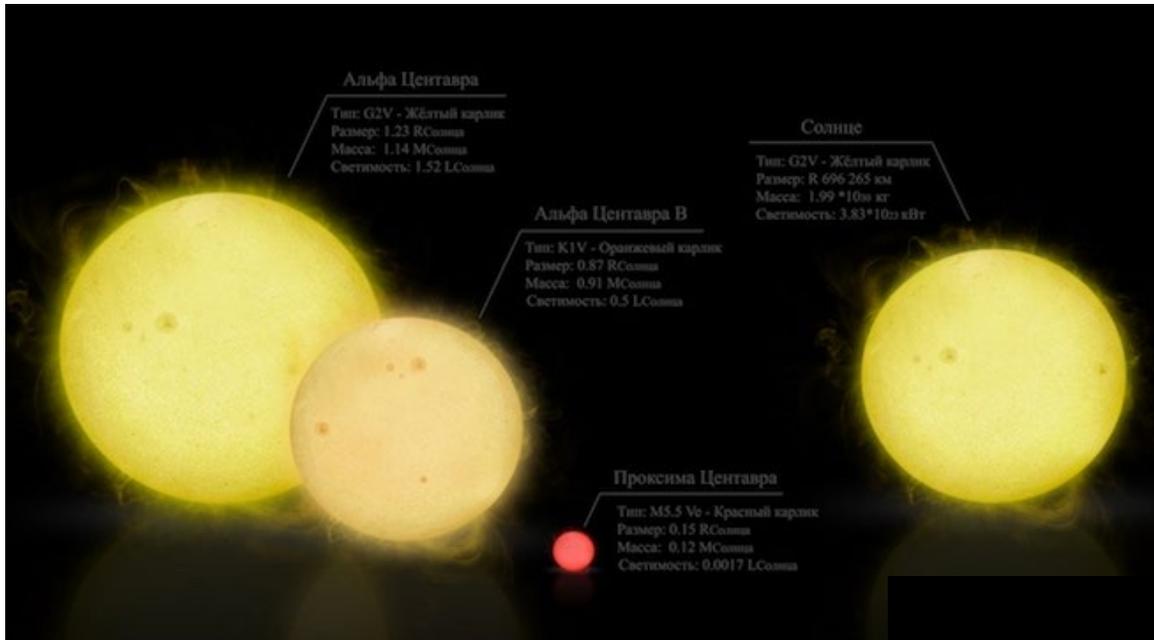
Звезда Барнарда — одиночная звезда в созвездии Змееносца. Находится на расстоянии 1.828 пк (5.96 светового года) от Солнца, то есть это одна из ближайших звезд к Солнечной системе (ближе только три звезды, составляющие систему Альфа Центавра).

Открыта в 1916 году Э. Э. Барнардом. Названа в его честь. Красный карлик спектрального класса M4.0V C, видимая звёздная величина — 9.57^m, светимость — 1/2300 солнечной. Масса звезды Барнарда оценивается в 17 % массы Солнца, а радиус в 15-20 % от радиуса Солнца.

Обладает самой большой скоростью углового перемещения по небесной сфере среди известных звёзд (10.358 угловой секунды в год). За 174 года звезда смещается по небесной сфере на 0.5° (видимые угловые размеры Солнца и Луны)

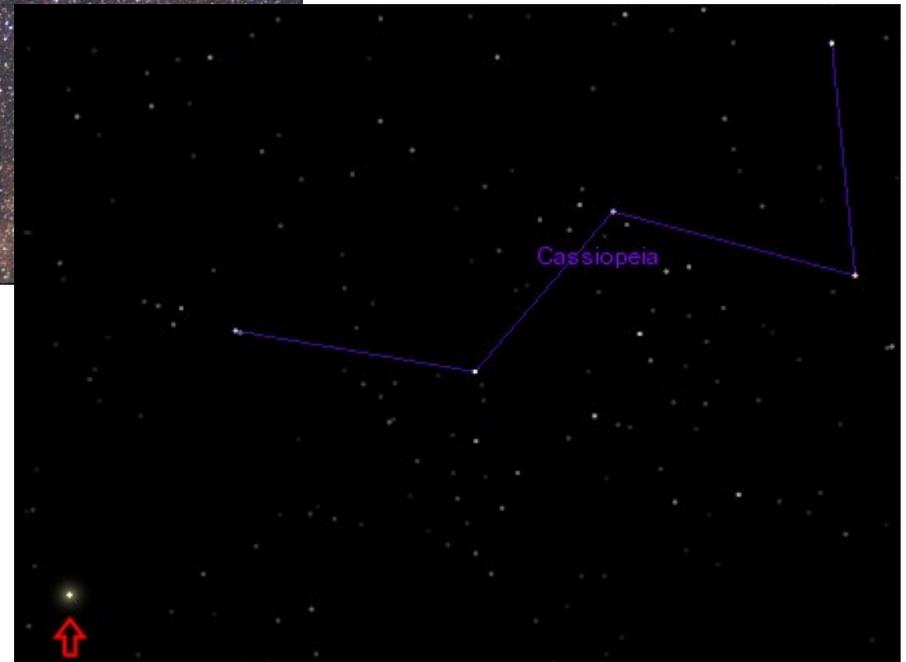
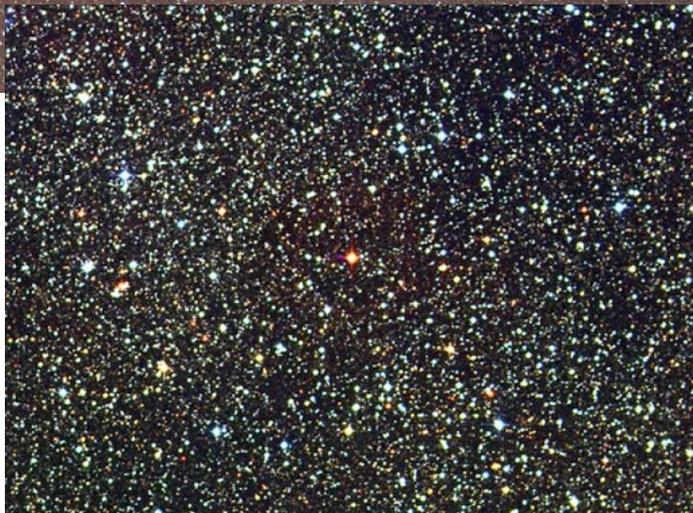
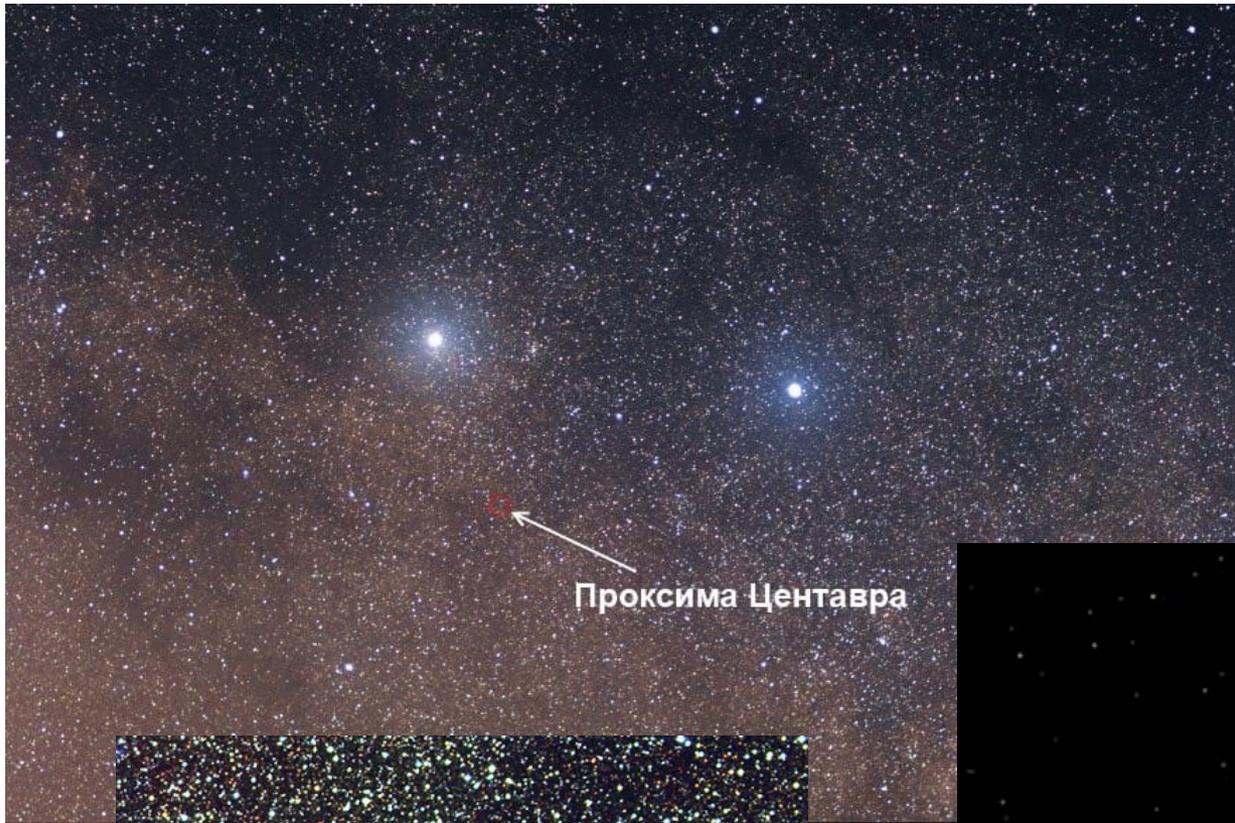


Система Альфа Центавра



https://www.iguides.ru/main/other/kak_astronomy_ishchut_prigodnye_dlya_zhizni_planety_v_sisteme_alfa_tsentavra/

Проксима Центавра

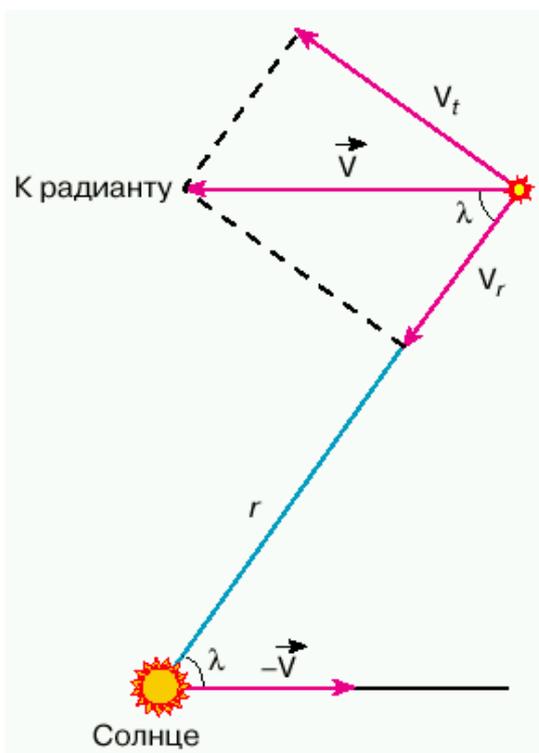


Общие характеристики звезд

Групповой параллакс для движущихся скоплений (Гиады). Точность практически такая же, как выше. Измеряют собственное движение звезд μ (угл. сек/год) и лучевые скорости V_r (км/с).

Параллакс равен:

$$\pi = 4.74 \frac{\mu}{V_r \tan \lambda}.$$



Общие характеристики звезд

Вековой параллакс – угловое смещение звезды (за год), обусловленное движением Солнечной системы и отнесенное к направлению, перпендикулярному этому движению. По движению Солнца в Галактике Гершель в 1783 г. сделал первое определение апекса.

Динамический параллакс для визуально двойных звезд.

По третьему закону Кеплера:

$$\frac{A^3}{p^2(M_1 + M_2)} = 1, \quad A = \frac{a''}{\pi''},$$



Наблюдения дают a'' и p . Для звезд типа Солнца $M_1 + M_2 \approx 2$, и тогда можно найти параллакс. **Это соотношение работает в обе стороны!**

Спектроскопический параллакс

Идея была высказана в 1911 г. и осуществлена Адамсом и Кальшуттером в 1914 г. Она состоит в том, что по спектральному классу находят абсолютную звездную величину M (по известной калибровке), а затем из соотношения $M = m + 5 + 5 \lg \pi$ и известной видимой величины m получают параллакс. При этом нужно иногда учитывать межзвездное поглощение.

Особые случаи

Для новых звезд при условии симметричности сброшенных оболочек определяют v_r (км/год) по лучевой скорости и изменение со временем (годы) a'' . Из условия $v_r = v_t$ получают параллакс (расстояние).

Общие характеристики звезд

Спектры звёзд

Чрезвычайно многообразны. Гарвардская классификация спектров звезд была проведена по виду абсорбционного спектра, но были догадки, что это не просто для установления порядка, а за этим есть физические основания. Были выбраны следующие признаки:

Класс А — хорошо видны
бальмеровские линии

Класс В — помимо бальмеровских,
есть линии гелия

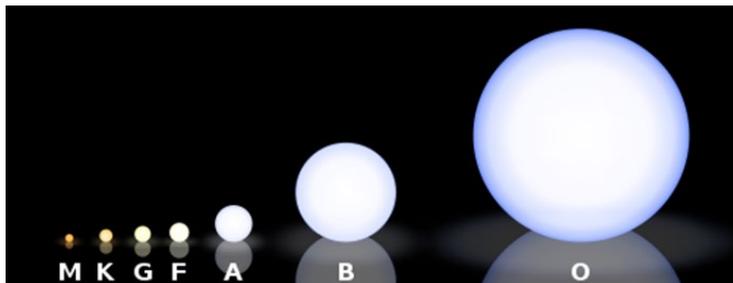
Класс F — помимо слабеющих
бальмеровских, линии H, K, CaII

Класс G — хорошо видна сильная
линия вблизи H_{γ}

Класс K — много линий нейтральных
металлов

Класс M — видны молекулярные
полосы

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



O — — B — — A — — F — — G — — K — — M K — — S K — — N — — R.

Общие характеристики звезд

Позднее поделили классы на подклассы. Например, B0, B1, ..., B8, причем между B0 и B1 вставили B0.5. При этом у B8 видна только бальмеровская серия, в сторону класса O появляются линии гелия, в частности у B5 есть линия HeI на 4026 А. У звезд класса O линии не нейтрального, а ионизованного гелия, например на 4200 А. У звезд класса A появляется слабая линия K CaII. К звездам класса F интенсивность линий кальция растет. У звезды F0 интенсивность линии K сравнивается с интенсивностью линии H_ε. При переходе к G0 бальмеровские линии ослабевают настолько, что видны только линии до H_ε, а также линии кальция (K) и ионизованных металлов. В спектрах класса K появляется большое число линий нейтральных атомов (например, CaI на 4227 А), а линии ионизованных ослабевают. Для классов S, M, C характерно появление молекулярных полос. Есть и пекулярные спектры, например класс Ap, где аномально сильны металлические линии.

Пекулярные спектры:

- а) белые карлики (линии с очень широкими крыльями или вообще может не быть линий)
- б) магнитные переменные звезды (линии редкоземельных элементов Y, Gd, Eu);
- в) субкарлики (дефицит металлов, избыточное УФ излучение).



Что еще почитать:

<http://www.astronet.ru/db/msg/1245721/lec.4.3.html>

Общие характеристики звезд

Дополнительные спектральные классы:

W или WR — звёзды Вольфа — Райе, очень тяжёлые яркие звёзды с температурой порядка 70000 К и интенсивными эмиссионными линиями в спектрах.

L — звёзды или коричневые карлики с температурой 1500—2000 К и соединениями металлов в атмосфере.

T — метановые коричневые карлики с температурой 700—1500 К.

Y — очень холодные (метано-аммиачные) коричневые карлики с температурой ниже 700 К.

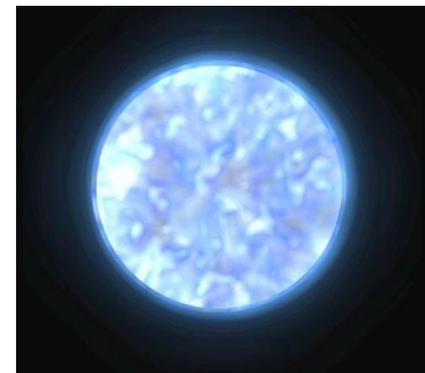
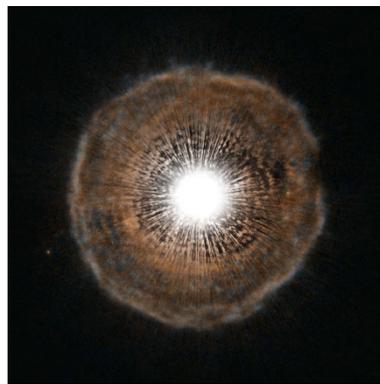
C — углеродные звёзды, гиганты с повышенным содержанием углерода. Ранее относились к классам R и N.

S — циркониевые звёзды

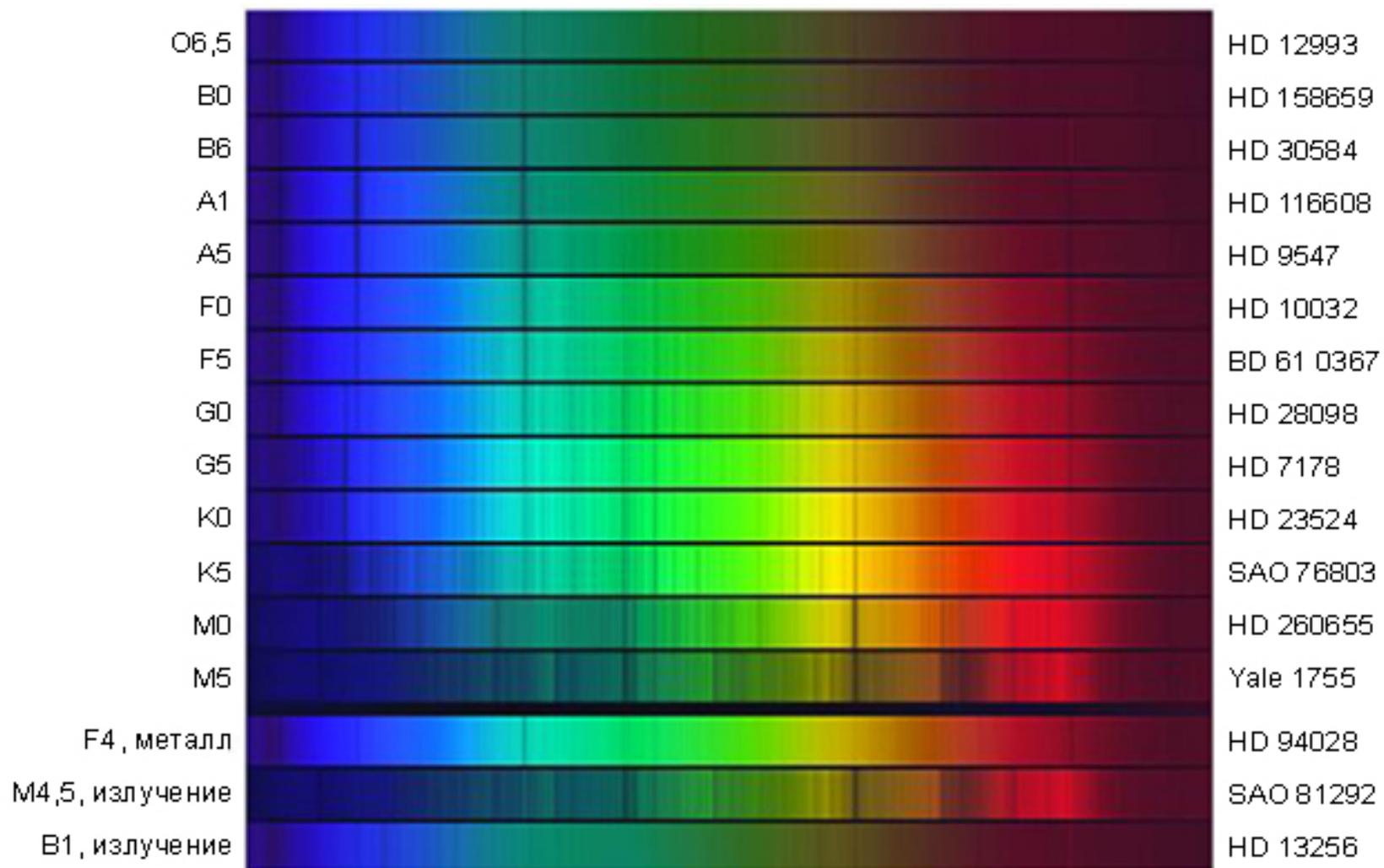
D — белые карлики

Q — новые звёзды

P — планетарные туманности



Общие характеристики звезд



Область звездообразования

Диаграмма Гершпрунга-Рассела показывает гигантский разброс светимостей звезд (около 8 порядков). Массы звезд также различаются, но разброс существенно слабее ($M < 100M_{\odot}$). Легко показать, что звезды, которые излучают очень сильно, не могут жить долго. Поэтому, звёзды O и B классов, которые мы наблюдаем, являются молодыми. Они обычно группируются в OB-ассоциации, которые обычно расширяются. Можно сделать вывод о том, что эти звезды рождаются вместе. По-видимому, образование звёзд всех масс происходит и в настоящее время. Предполагается, что области звездообразования находятся в молекулярных облаках.



Область звездообразования N11B в Большом Магеллановом Облаке

Автор: NASA/ESA and the Hubble Heritage Team (AURA/STScI)/HEIC - Spacetelescope, HubbleSite: gallery and release.,
Общественное достояние, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1194506>

Эволюция звезды. 1 этап

Межзвёздное облако. Параметры:

$d \sim 10^{14}$ - 10^{15} км (размер)

$n \sim 10^9$ см⁻³ (плотность)

$T \sim 10$ К

$M \sim 10^3 M_{\odot}$

$t \sim 2 \cdot 10^6$ лет (время перехода новый этап)

Для начала коллапса протяженного молекулярного облака нужен толчок. Если коллапс начался, то фрагментация облака неизбежна из-за гравитационной неустойчивости. Очевидно, должно происходить групповое рождение звезд из фрагментов



На этом изображении видны плотные сгустки темной межзвездной пыли, яркие звезды, которые сформировались за последние несколько миллионов лет, поля светящегося водорода, ионизованного этими звездами, и огромные петли из газа, сброшенного умирающими звездами.

Туманность NGC 3582

<http://www.astronet.ru/db/msg/1288937>

Эволюция звезды. 2 этап

Коллапсирующие фрагменты межзвездного облака. Параметры:

$d \sim 10^{12}$ км (размер)

$n \sim 10^{12}$ см⁻³ (плотность)

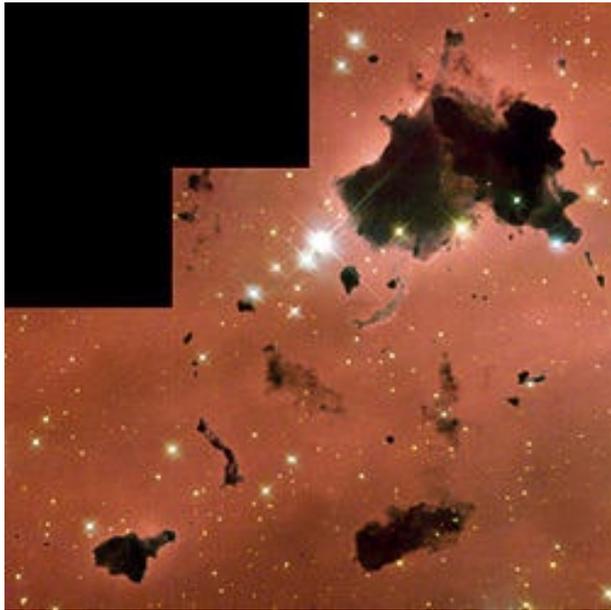
$T \sim 10$ К во внешних слоях

$T \sim 100$ К во внутренних слоях

$M \sim 10^3 M_{\odot}$

$t \sim 3 \cdot 10^4$ лет (время перехода новый этап)

Звезда типа Солнца образуется из фрагмента массой $2M_{\odot}$. На этом этапе размер еще в 100 раз больше, чем протяженность Солнечной системы. Температура та же, что и на 1-м этапе, поскольку вся выделяемая внутри энергия уносится излучением (например, молекул CO), т.к. облако для него прозрачно. Лишь в самом центре фрагмента $T \sim 100$ К. Фрагментация кончается, поскольку плотность возрастает



Глобулы в туманности IC 2944

Эволюция звезды. 3 этап

Центральная часть фрагмента становится протозвездой (масса центральной части растет, размер уменьшается). Параметры:

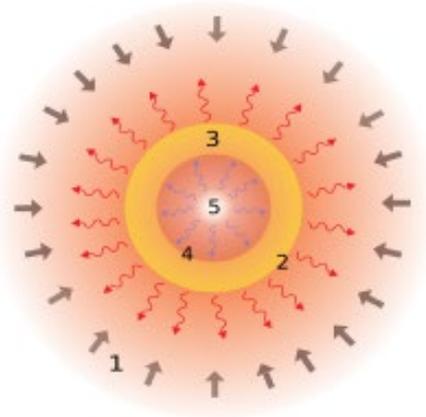
$d \sim 10^{10}$ км (размер)

$n \sim 10^{18}$ см⁻³ (плотность)

$T \sim 100$ К во внешних слоях

$T \sim 10^4$ К во внутренних слоях

$t \sim 10^5$ лет (время перехода на новый этап)



Структура протозвезды.

1 — свободно падающее вещество

2 — фотосфера, излучающая в инфракрасном диапазоне

3 — непрозрачная газопылевая оболочка

4 — фронт ударной волны

5 — гидростатически равновесное ядро.

Через несколько десятков тысяч лет фрагмент превращается в газовый шар размером с Солнечную систему (еще в 1000 раз больше Солнца). Температура в центре достигает 10^4 К, но на поверхности — лишь около 100 К, поскольку оттуда энергия уносится излучением. Плотность в центре сравнительно высока. Впервые фрагмент начинает напоминать звезду. Центральная часть фрагмента называется протозвездой. Негомологичное падение вещества у центру — чем плотнее объект тем интенсивнее. Масса растет, а радиус протозвезды убывает, поскольку давление еще не может скомпенсировать силу тяжести. После этой стадии можно ввести понятие поверхности протозвезды — фотосферы (внутри этой поверхности вещество оптически толстое для излучения)

Эволюция звезды. 4 этап

Фрагментация облака прекращается. У протозвезды образуется подобие фотосферы. Аккреция. Объекты можно поместить на диаграмму Гершпрунга—Рассела (светимость велика из-за больших размеров). Параметры:

$R \sim 10^8$ км (размер)

$n \sim 10^{24}$ см⁻³ (плотность)

$T \sim 10^3$ К во внешних слоях

$T \sim 10^6$ К во внутренних слоях

$t \sim 10^6$ лет

Эволюция протозвезды состоит в уменьшении размера, возрастании плотности и температуры (и в ядре, и в фотосфере). Через 10^5 лет первоначальный фрагмент достигает стадии 4. При этом в центре $T \sim 10^6$ К, что меньше, чем надо для возгорания ядерных реакций. Размер фрагмента порядка орбиты Меркурия. Аккреция вещества нагревает поверхность протозвезды до нескольких тысяч кельвинов. Теперь можно найти положение объекта на диаграмме Гершпрунга—Рассела. Это так называемая контракционная фаза или фаза Кельвина—Гельмгольца (излучение звезды за счет сжатия и аккреции вещества). Звезда еще не пришла в равновесие — хотя давление газа уже велико, но баланс с силой тяжести пока не полный. Тепло отводится с поверхности, и температура остается примерно постоянной, но сжатие продолжается и звезда движется вниз по диаграмме Гершпрунга—Рассела.



Эволюция звезды. 5 этап

Стадия Хаяши — падение вещества прекращается, может возникнуть звездный ветер (звезды типа Т Тельца)

Параметры:

$R \sim 10^7$ км (размер)

$n \sim 10^{28}$ см⁻³ (плотность)

$T \sim 4 \cdot 10^3$ К во внешних слоях

$T \sim 5 \cdot 10^6$ К в центре

$t \sim 10^7$ лет

Звезда еще в 10 раз больше, чем Солнце, ее светимость $10L_{\odot}$, температура ~ 4000 К. Хотя температура в центре достигает $5 \cdot 10^6$ К (газ полностью ионизован), этого не хватает для начала ядерных реакций.

Объекты на стадии Хаяши следует называть молодыми звездами или звездами на стадии приближения к главной последовательности

Диаграмма светимость-температура поверхности для звезд типа Т Тельца (точки) из области звездообразования в Туманности Ориона: сплошная толстая линия — начальная главная последовательность; сплошными тонкими линиями показаны треки протозвезд различной массы, значение которой в единицах M_{\odot} указано вблизи главной последовательности; штриховые линии — положение протозвезд с радиусами 1, 3 и 10 R_{\odot} .

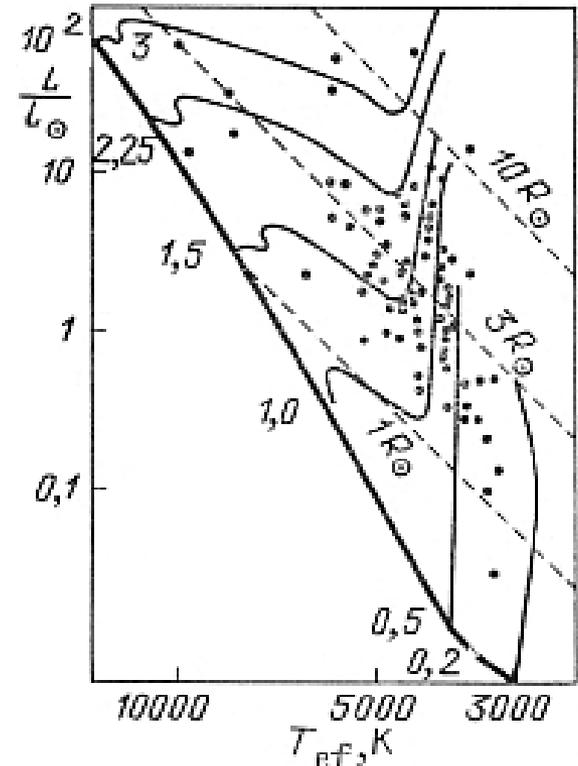
В.Г. Сурдин, С.А. Ламзин

Протозвёзды

Где, как и из чего формируются звёзды.

М. «Наука». 1992 .

<http://www.astronet.ru/db/msg/1190949/index.html>



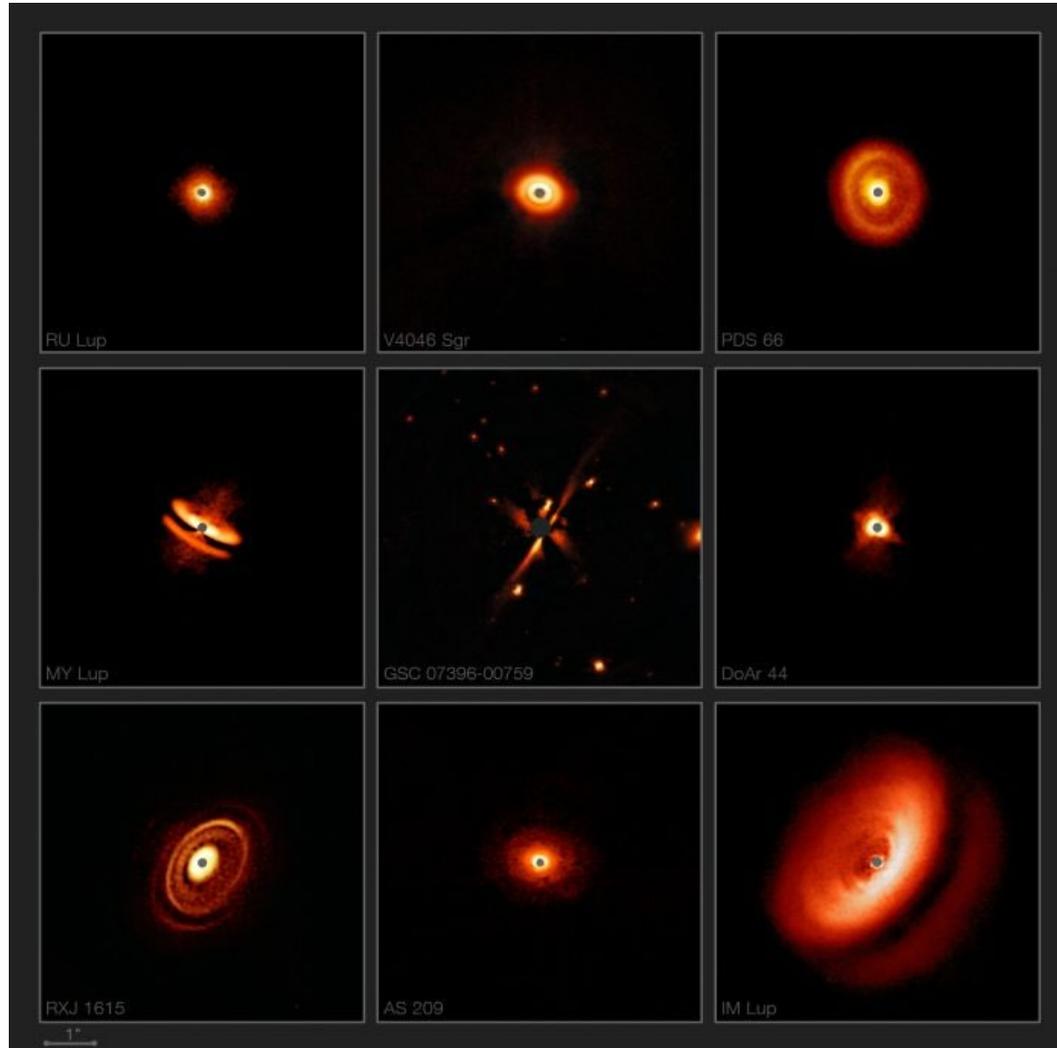
Звезды типа Т Тельца



Авторы и права: Т. Ректор (Университет Аляски в Анкоридже), Х. Швейкер, Обсерватория WIYN, Национальная оптическая астрономическая обсерватория, Ассоциация университетов для астрономических исследований, Национальный научный фонд
<http://www.astronet.ru/db/msg/1235715>

Звезду Т Тельца окружает желтое пылевое космическое облако, известное как переменная туманность Хинда (или NGC 1555/1554). Звезда и туманность находятся на расстоянии более 400 световых лет, на краю молекулярного облака. Их блеск сильно изменяется, однако не обязательно в одно и то же время, что добавляет таинственности этой вызывающей интерес области неба. В настоящее время общепризнано, что звезды типа Т Тельца – это молодые (возраст меньше нескольких миллионов лет), похожие на Солнце звезды, которые находятся на ранних стадиях формирования.

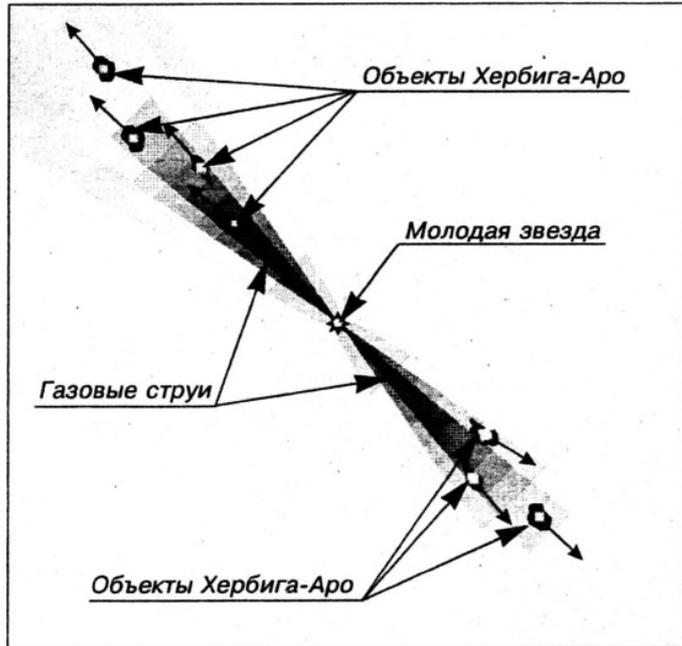
Звезды типа Т Тельца



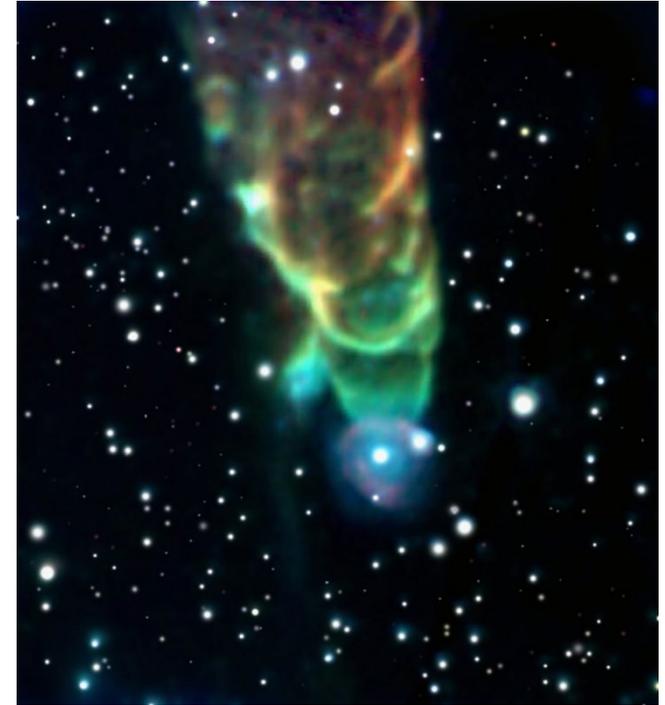
Пылевые диски вокруг местных звёзд, изображения получены с помощью прибора SPHERE на телескопе VLT. Источник: ESO/Н. Avenhaus et al./E. Sissa et al./DARTT-S and SHINE collaborations <https://www.theuniversetimes.ru/pribor-sphere-pokazal-zaxvatyvayushhuyu-kollekciyu-diskov-vokrug-molodyx-zvyozd.html>

Объекты Хербига-Аро

Маленькие (всего в несколько угловых секунд) туманности, являющиеся источниками коротковолнового и мазерного радиоизлучения, образуют небольшие компактные группы, разлетающиеся в противоположных направлениях.



Сегодня астрономы считают, что объекты Хербига-Аро — это не сгустки межзвездного газа, приобретшие свою форму и нагретые под действием звездного ветра со стороны молодой звезды, а наиболее яркие участки газовых струй, истекающие из самих молодых звезд.



На фото представлено изображение джета молодой звезды, полученное космическим аппаратом Спитцер. К наблюдателю обращен один из джетов с объектами Хербига-Аро. Выбрасывающая его звезда и джет с противоположного полюса находятся за картинной плоскостью. Спиральная структура — результат вращения звезды. Длина наблюдаемого джета — несколько световых лет, скорость выброса — порядка 100 км/с. Изображение джета получено в инфракрасном диапазоне, искусственные цвета соответствуют температуре: наибольшая — в синей области изображения, наименьшая — в красной. Разброс температуры джетов разных звезд достигает тысяч градусов.

Эволюция звезды. 6 этап

Рождение звезды (загораются ядерные реакции). Параметры:

$R \sim 10^6$ км (размер)

$n \sim 10^{31}$ см⁻³ (плотность)

$T \sim 4.5 \cdot 10^7$ К

$t \sim 3 \cdot 10^7$ лет



Темное облако Lupus 3 и связанные с ним молодые горячие звезды

<https://www.eso.org/public/russia/images/eso1303>

Звезда сжимается, ее радиус убывает до 10^6 км, а температура в центре возрастает до 10^7 К — начинаются термоядерные реакции горения водорода. За $4-5 \cdot 10^7$ лет звезда типа Солнца попадает на главную последовательность, где она живет около 10^{10} лет.

Процесс образования звезд больших масс идет намного быстрее. Для экстремально молодого скопления звезды больших масс достигают главной последовательности, в то время как звезды меньших масс не успевают даже образоваться — это можно видеть на диаграммах, наблюдаемых для различных скоплений.

Минимальная масса звезд определяется условием загорания термоядерных реакций. По-видимому, звезд с массой меньше $0.08 M_{\odot}$ нет.

Эволюция звезды. 7 этап

Звезда главной последовательности.
Параметры:

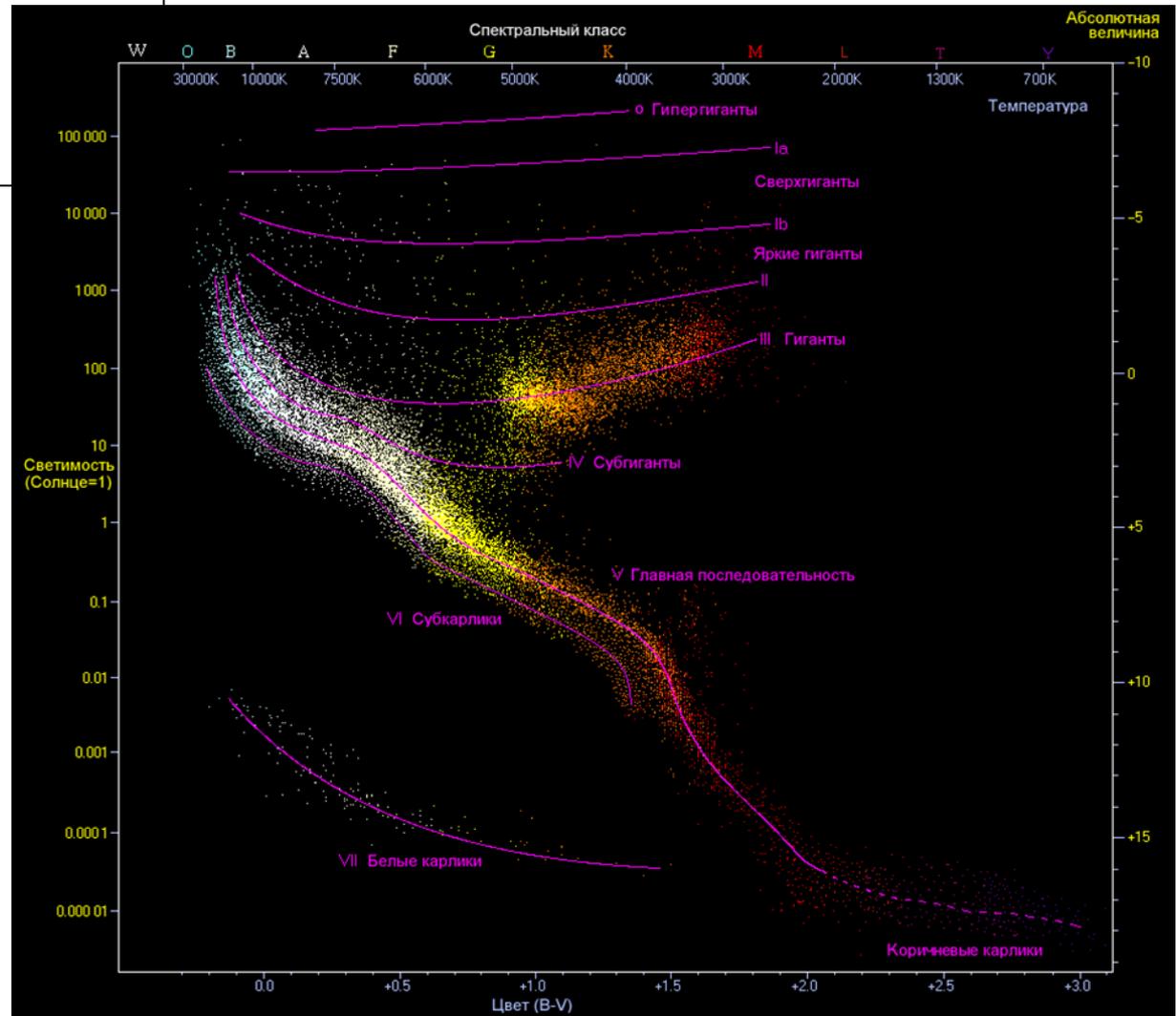
$R \sim 4.5 \cdot 10^6$ км (размер)

$n \sim 10^{31}$ см⁻³ (плотность)

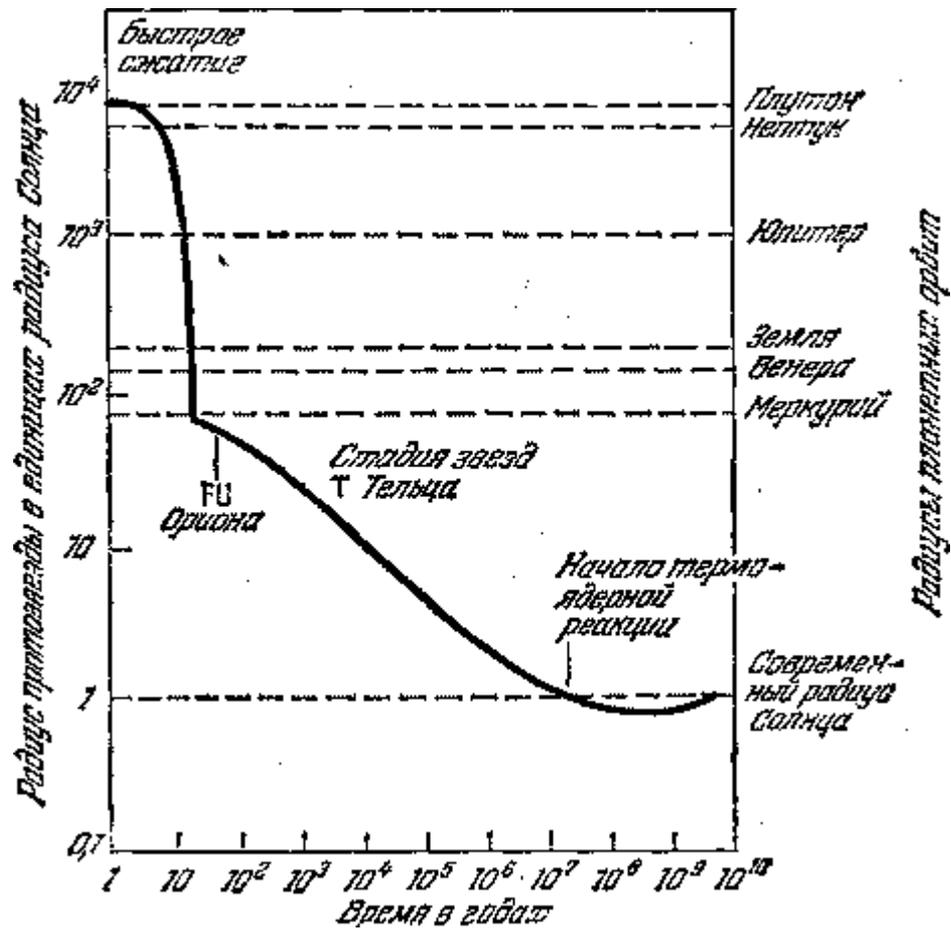
$T \sim 4.5 \cdot 10^7$ К

$t \sim 3 \cdot 10^{10}$ лет

Когда звезда на ГП, в ее ядре происходит горение водорода и образование гелия. Это длится около 10^{10} лет



Кратко по этапам 1-7



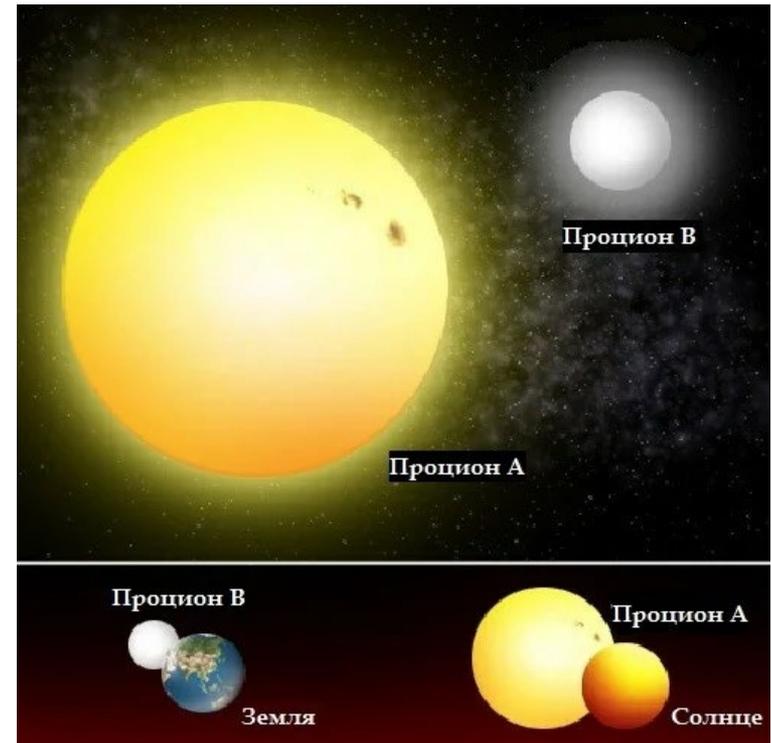
Шкловский Иосиф Самуилович
Звезды: их рождение, жизнь и смерть
[Издание третье, переработанное]
<https://fis.wikireading.ru/1777>

Эволюция звезды. 8 этап

Когда звезда на ГП, в ее ядре происходит горение водорода и образование гелия. Это длится около 10^{10} лет. После этого образуется почти чисто гелиевое ядро, и водород горит лишь во внешних частях ядра. Поскольку реакции в центре ядра не протекают (температура недостаточна для горения гелия), то давление уменьшается и ядро начинает сжиматься, наружные слои звезды увеличиваться в размерах, а их температура уменьшается (мы наблюдаем это на ветви субгигантов). При сжатии гелиевого ядра выделяется энергия, часть которой идет на увеличение температуры до уровня, когда загорается гелий.

Самый известный субгигант — Процион (α Малого Пса).

Солнце, когда достигнет стадии субгиганта, будет иметь светимость около $2,3 L_{\odot}$. На этой стадии Солнце проведёт около 700 миллионов лет, и к её окончанию оно охладится приблизительно до 4900 К и расширится до радиуса $2,3 R_{\odot}$, а светимость возрастёт до $2,7 L_{\odot}$.



Эволюция звезды. 9 и 10 этапы

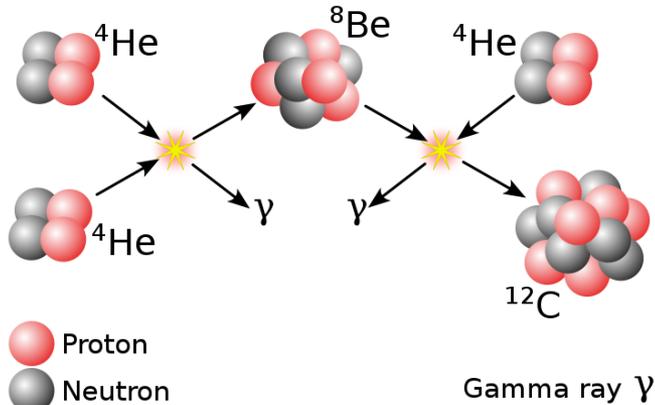
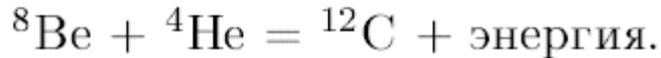
Когда начинает гореть гелий, радиус звезды сильно увеличивается.

Масса ядра, вероятно, составляет около четверти массы звезды.

Происходят реакции (тройной альфа процесс):



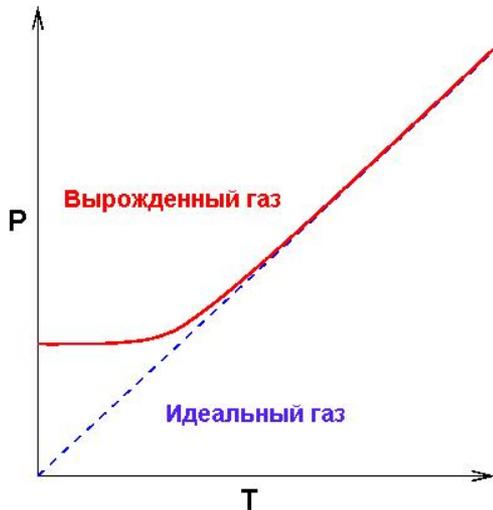
За 10^{-12} с Be распадается, но некоторые ядра успевают прореагировать:



1. Гелиевое ядро – вырожденный газ.
2. Тройной альфа процесс выделяет энергию – температура ядра растет. Давление не меняется, тройной альфа процесс усиливается, рост температуры ускоряется.
3. Вспышка

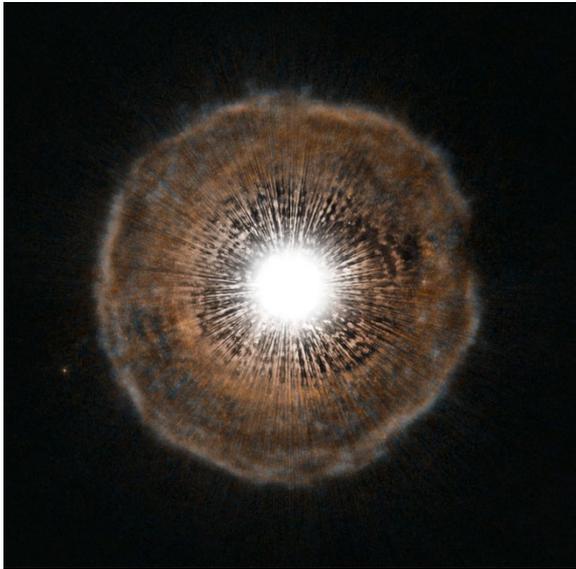
Гелиевая вспышка развивается в течение единиц минут (часов), и светимость ядра в пике вспышки достигает 10^{10} солнечных. После снятия вырождения ядро быстро расширяется, при этом выделившаяся тепловая энергия переходит в потенциальную энергию. В результате светимость звезды во время вспышки почти не меняется.

Звезда уходит немного вниз и влево на диаграмме Г-Р, на горизонтальную ветвь — в стабильное состояние спокойного горения гелия (10 этап).



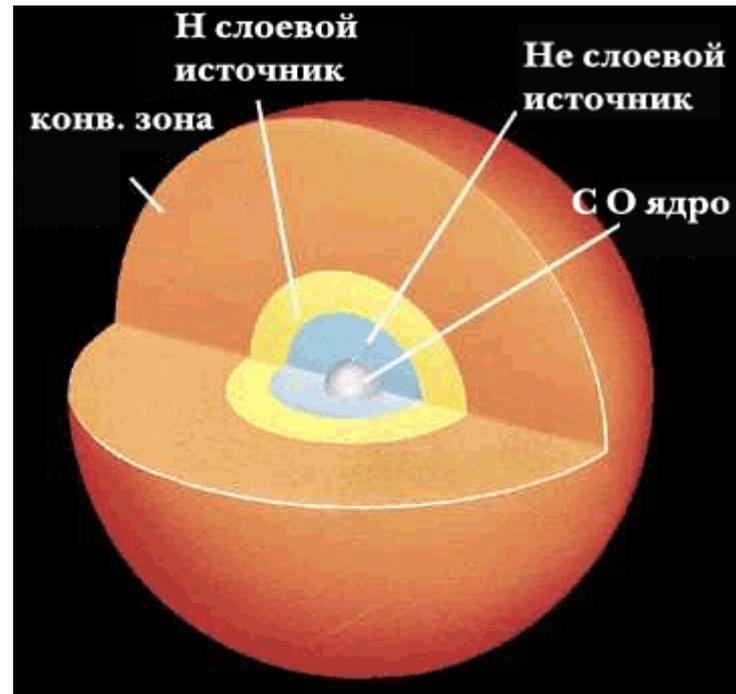
Эволюция звезды. 11 этап

По мере выгорания гелия в ядре оно начинает сжиматься, и звезда расширяется. Здесь мы имеем звезду с углеродным ядром и двумя слоевыми источниками. В результате звезда попадает на асимптотическую ветвь гигантов (сверхгиганты).



Углеродная звезда U Жирафа и ее газовая оболочка.
Снимок телескопа им. Хаббла

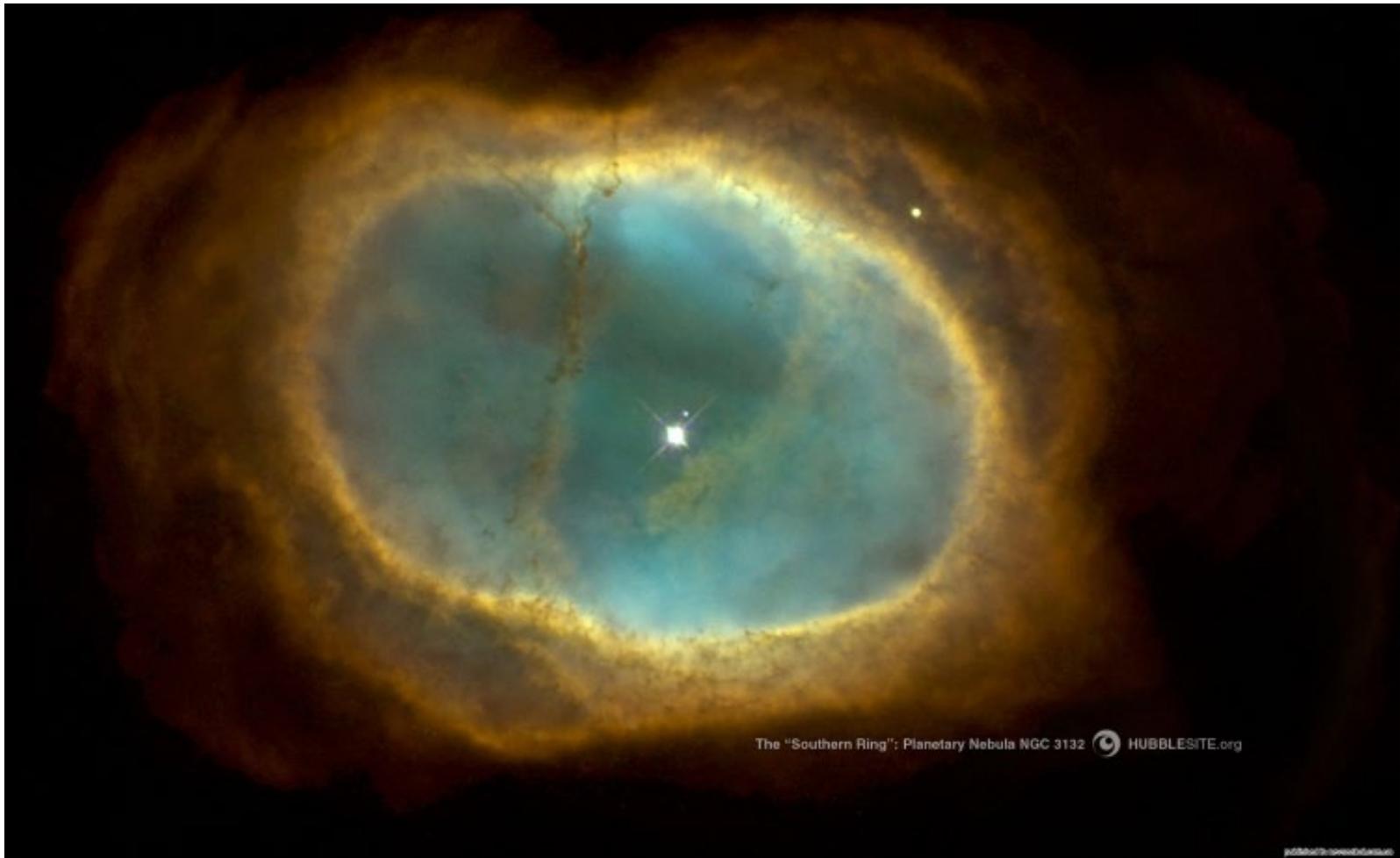
Сверхгигант на ранней асимптотической ветви



http://crydee.sai.msu.ru/~mir/Star_Life.site/Structure/Star_models/SuperGia/super_giant.htm

Эволюция звезды. 12 этап

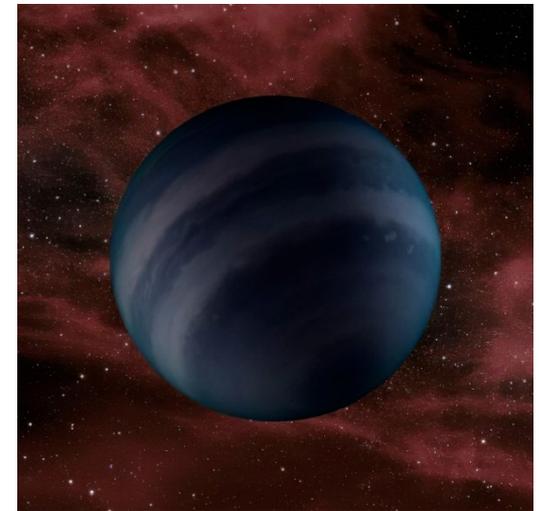
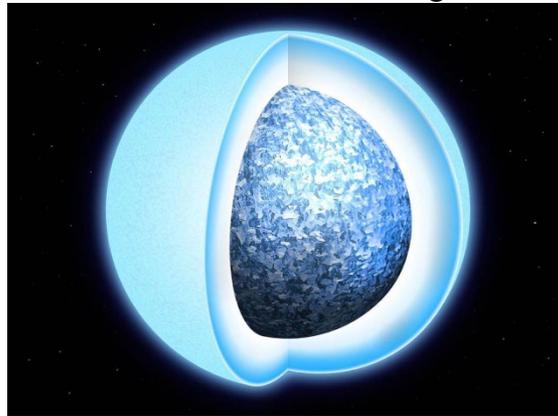
Далее ядерное топливо истощается, оболочка распухает, звездный ветер еще усиливается оболочка отрывается от звезды, обнажается углеродное ядро. Здесь оболочка видна в виде планетарной туманности (расширяется со скоростью несколько десятков км/с).



Эволюция звезды. 13 и 14 этапы

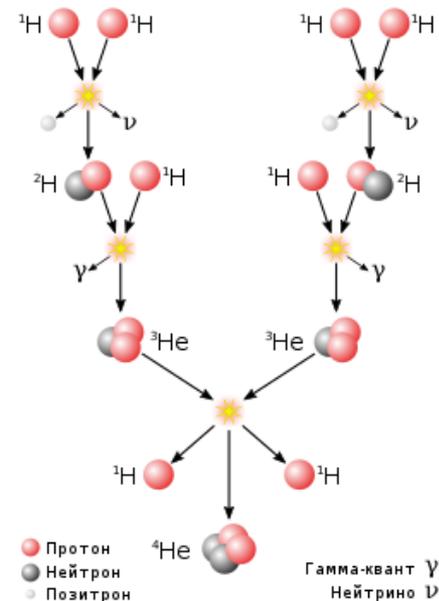
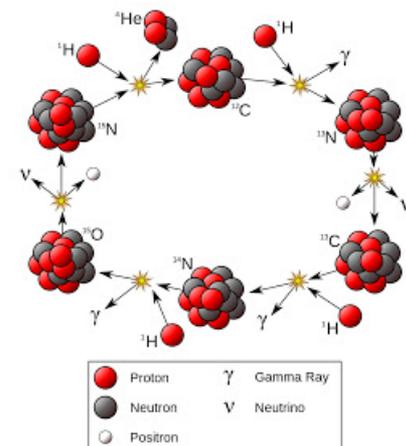
Углеродное ядро сжимается, его светимость постепенно уменьшается, звезда остывает. Мы имеем белый карлик (этап 13). Продолжая остывать, звезда превращается в черный карлик (этап 14).

Масса звезды в процессе эволюции уменьшается из-за звездного ветра, сброса оболочки и т.д. Белый карлик образуется лишь тогда, когда масса звезды невелика и ее остаток становится достаточно мал. Предельная масса белых карликов $1.4M_{\odot}$.

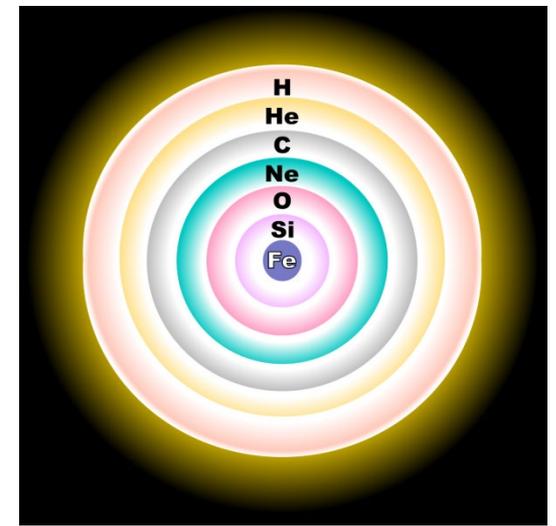
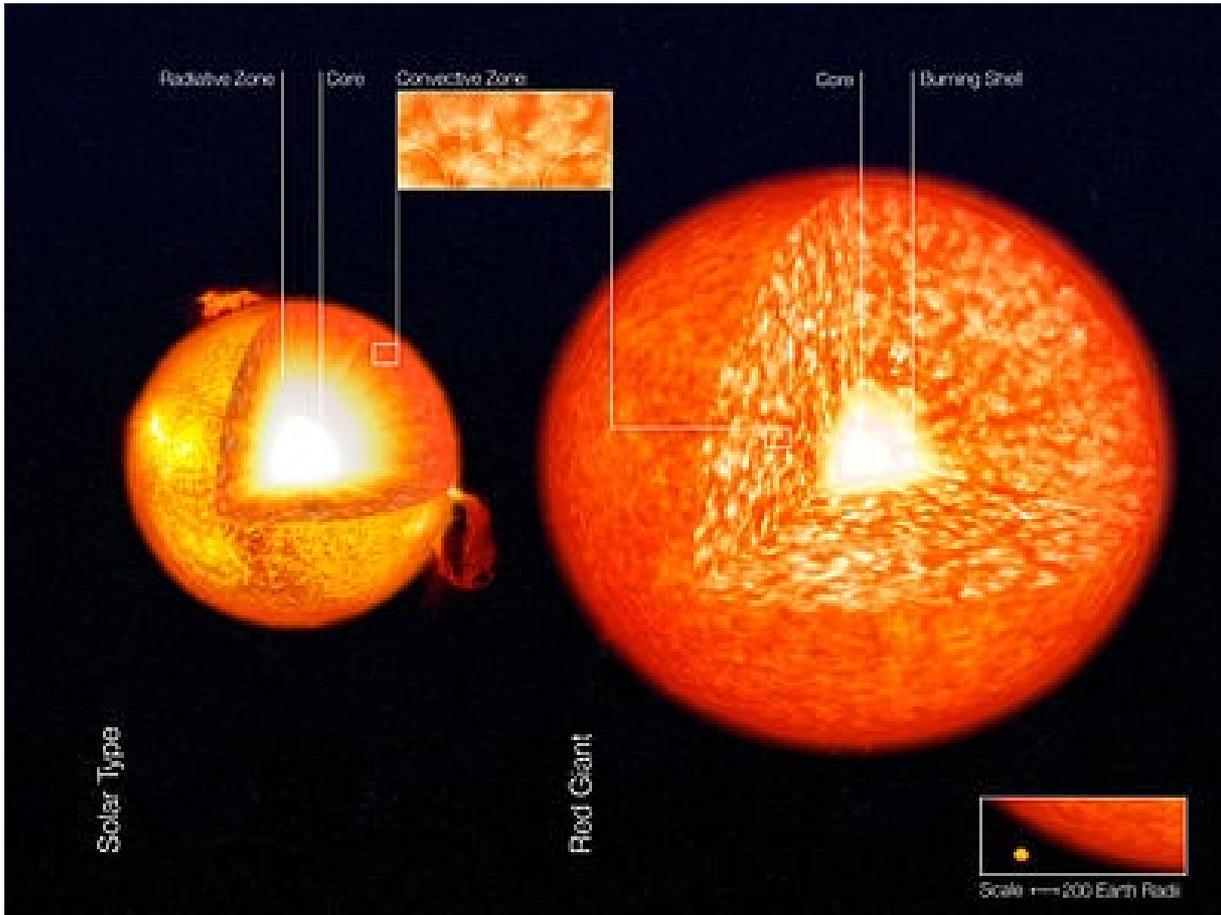


Эволюция звезд большей массы

Для звезд больших масс нет вырождения газа в ядре, и следовательно нет гелиевой вспышки, горение более равномерное. Достигается более высокая температура в центре звезды, и в результате происходит горение углерода, кислорода и т.д. и, в конечном итоге, образуется железное ядро. Заметим, что у еще более массивных звезд горение водорода происходит не путем р-р-цепочек, а в CNO-цикле, который, очевидно, более эффективен при высоких температурах. Дальнейшие ядерные реакции в железном ядре не идут, и внутренняя поддержка слоев уменьшается — гравитация преобладает над давлением, что делает ситуацию нестабильной. При температуре в таком ядре порядка 10^{10} К гамма-кванты расщепляют железо на более легкие элементы, и этот процесс фотодезинтеграции идет до тех пор, пока не остаются только протоны и нейтроны. Энергия, даваемая фотодезинтеграцией, частично поглощается в ядре, охлаждая его. Это уменьшает давления и коллапс ускоряется. С ростом плотности происходит нейтронизация вещества в реакциях: $p + e \rightarrow n + \text{нейтрино}$. Нейтрино уходят, а коллапс продолжается, пока не наступит нейтронное вырождение и плотность не достигнет 10^{17} - 10^{18} кг/м³. В этот момент возникает ударная волна, которая срывает оболочку звезды. Результат — взрыв сверхновой II типа.

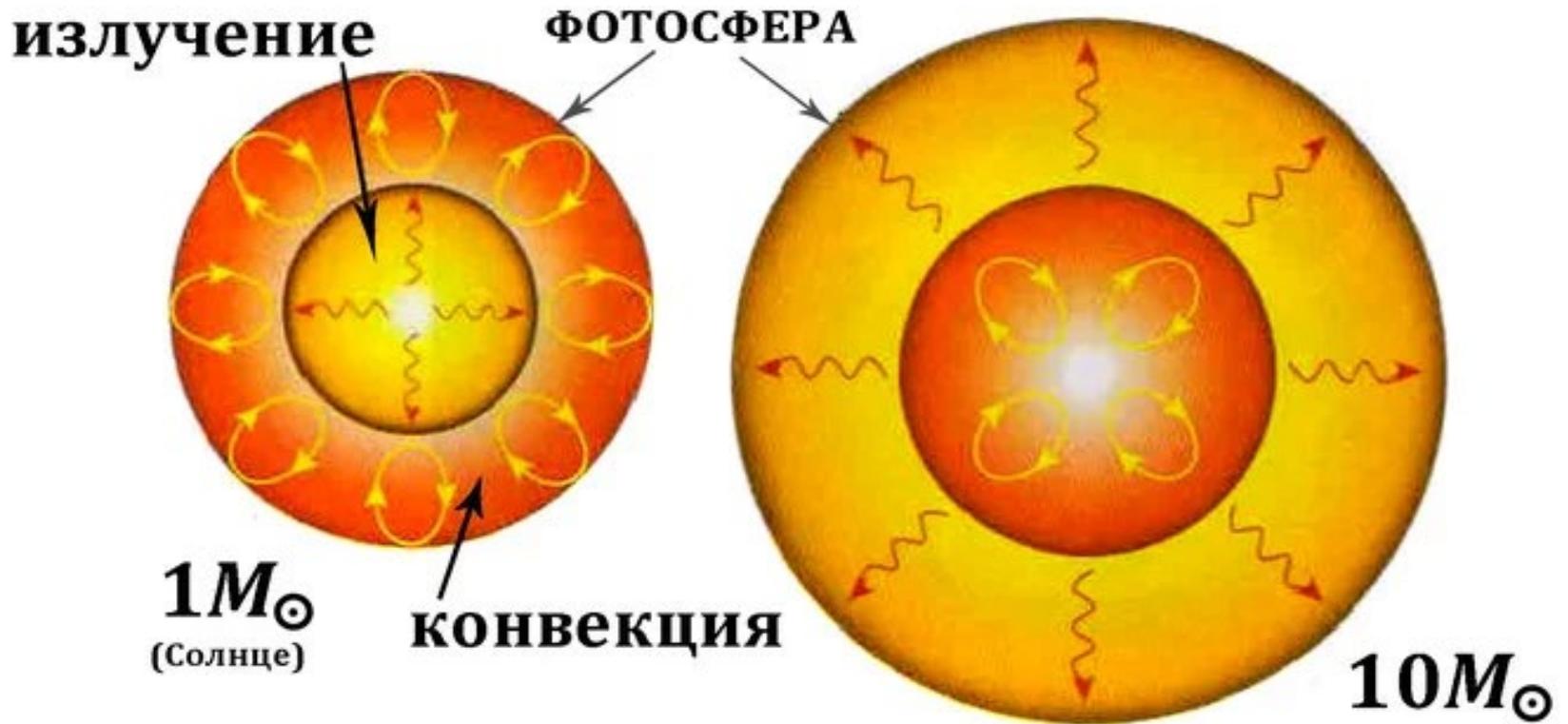


Сверхгиганты

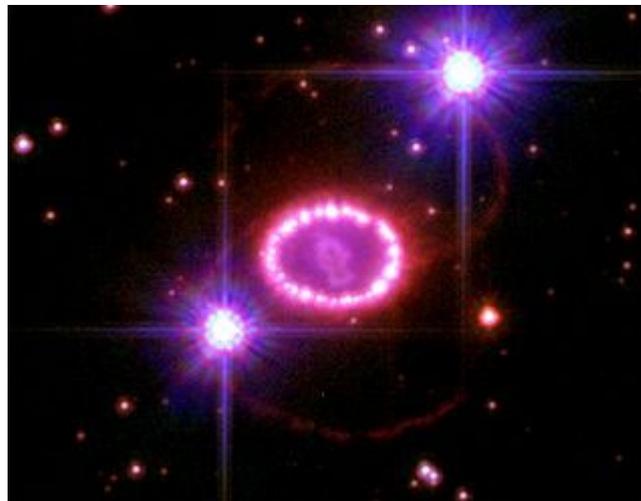
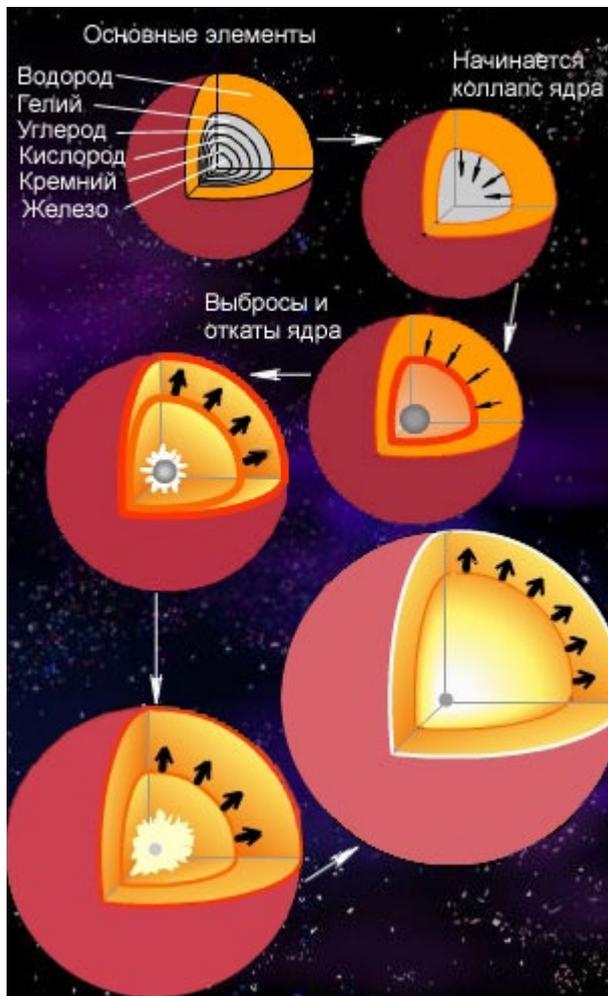


Химический состав
сверхгиганта в конце
эволюции

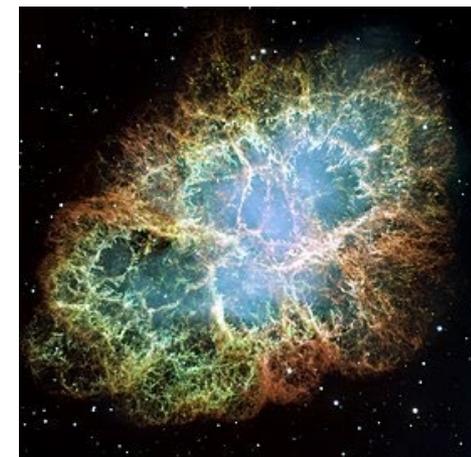
Строение звезд-гигантов



Сверхновая звезда II типа.

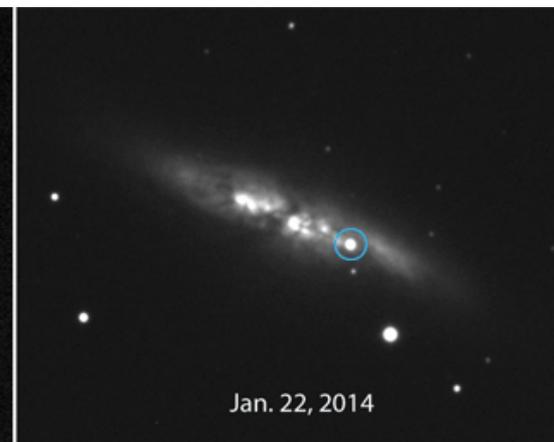
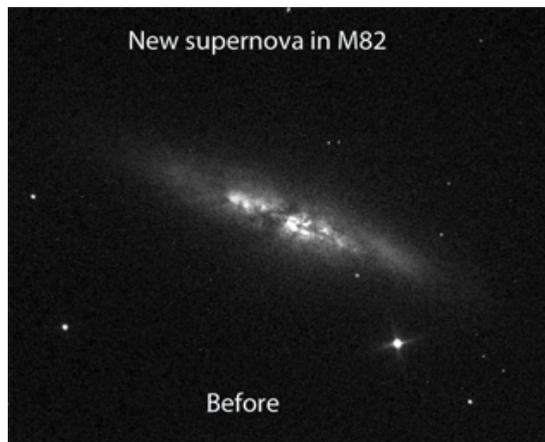


Расширяющийся остаток SN 1987A, сверхновой типа II-P в Большом Магеллановом Облаке. Изображение НАСА



Крабовидная туманность в созвездии Тельца, являющаяся остатком сверхновой SN 1054

<https://college.ru/astronomy/course/content/chapter6/section5/paragraph1/theory.html#.Ylpd33IR2Hs>

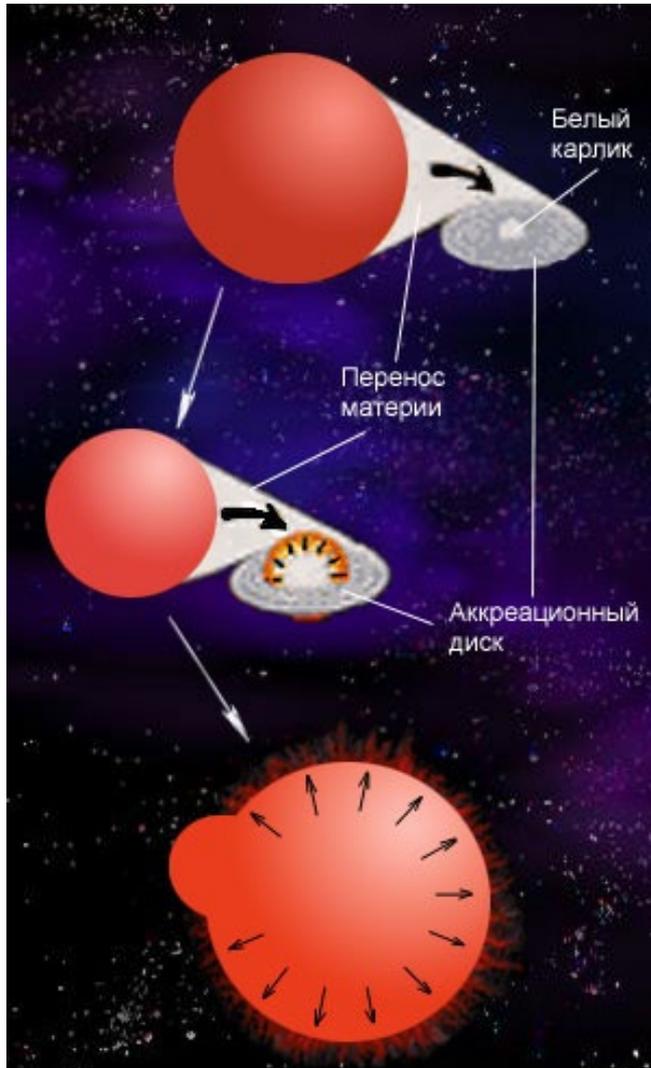


Сверхновая 1987а

Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке расположена там, где на старых фотографиях была лишь звездочка 12-й величины. Ее величина в максимуме достигла 2,9^м, что позволяло легко наблюдать сверхновую невооруженным глазом

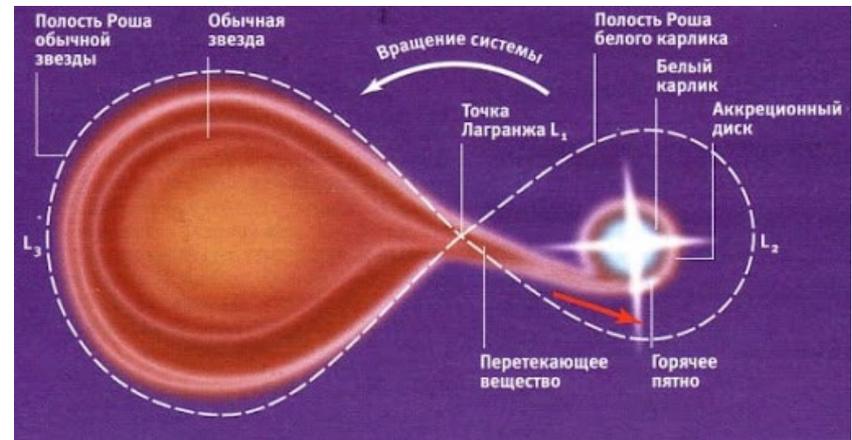


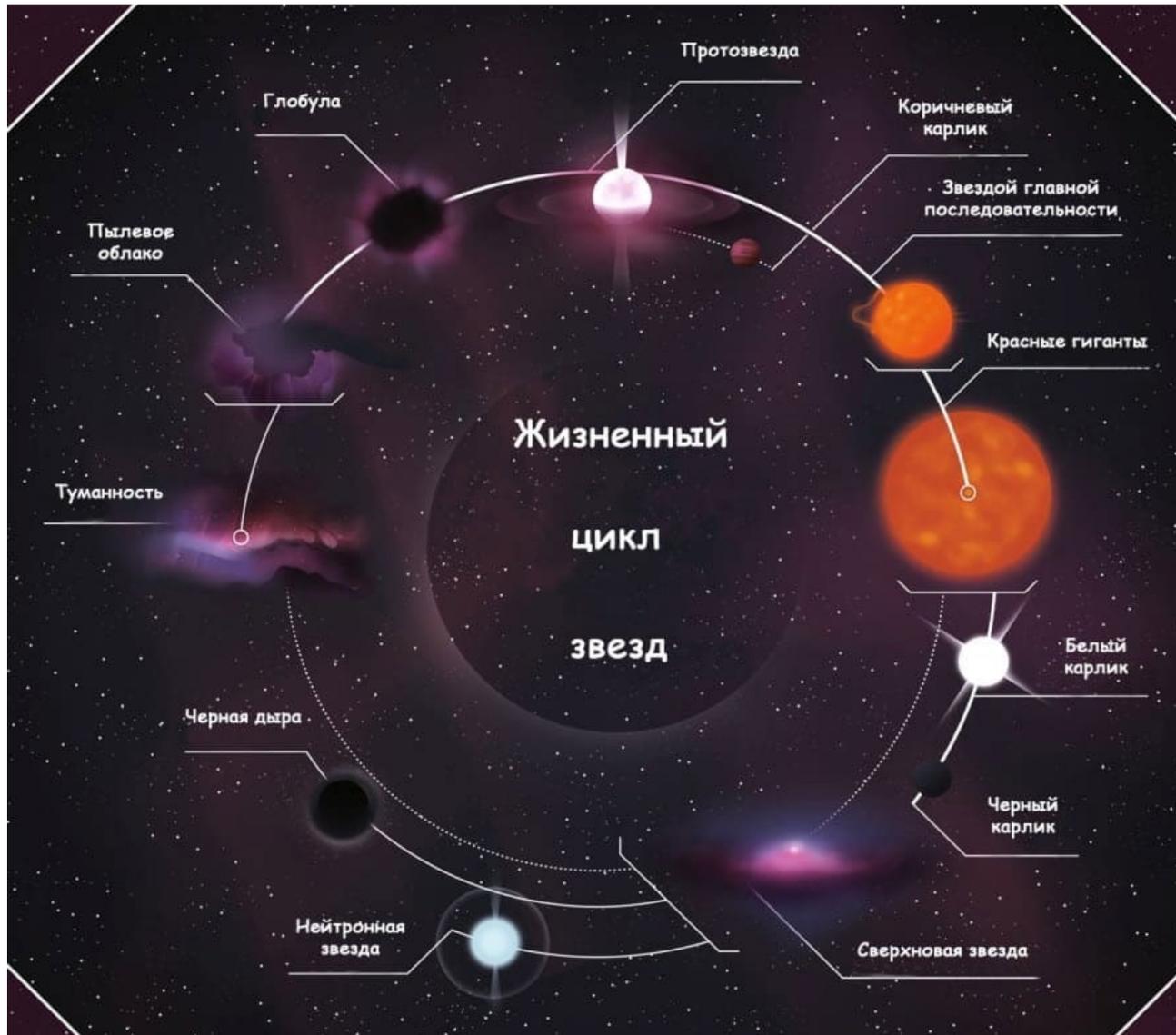
Сверхновая I типа



Особым случаем является эволюция звезд в тесных двойных системах. Если одна звезда, превращаясь в красного гиганта, заполняет полость Роша, то происходит перетекание ее вещества на другой компонент. Например, Алголь — двойная звезда, где один компонент гигант массой $0.8 M_{\odot}$, другой компонент — звезда главной последовательности массой $3M_{\odot}$.

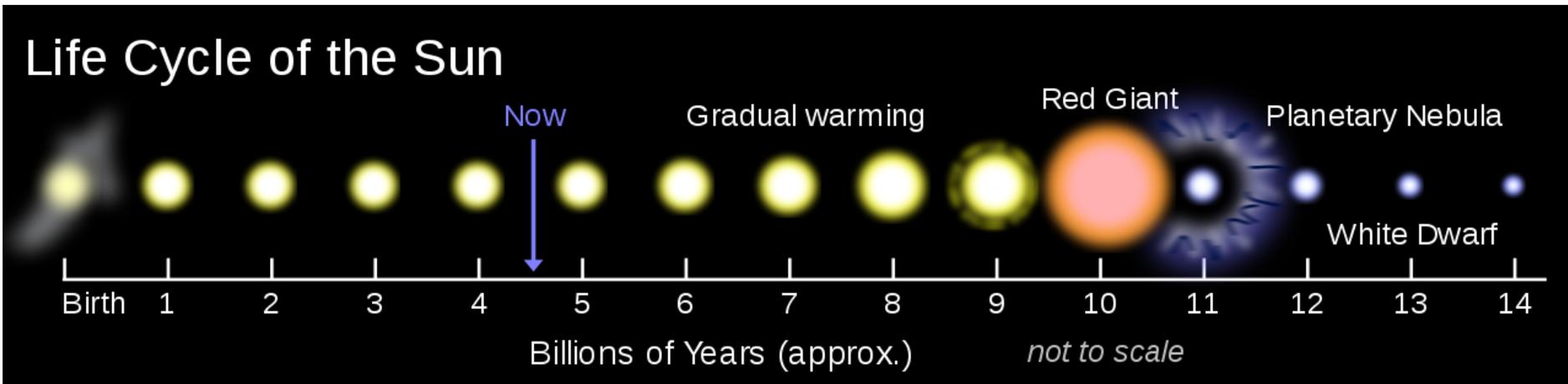
Поскольку компоненты скорее всего должны быть одного возраста, то более массивная звезда должна была бы больше проэволюционировать, чем менее массивная. Объяснение этому — перетекание вещества. Если оба компонента заполняют свои полости Роша, то получается контактная система. Наконец, при натекании массы на белый карлик свыше предела Чандрасекхара происходит коллапс, увеличение температуры, горение углерода по всей звезде и взрыв сверхновой типа.





<https://v-kosmose.com/zvezdyi-vselennoi/zhiznennyiy-tsikl-zvezdyi/>

Жизненный путь Солнца



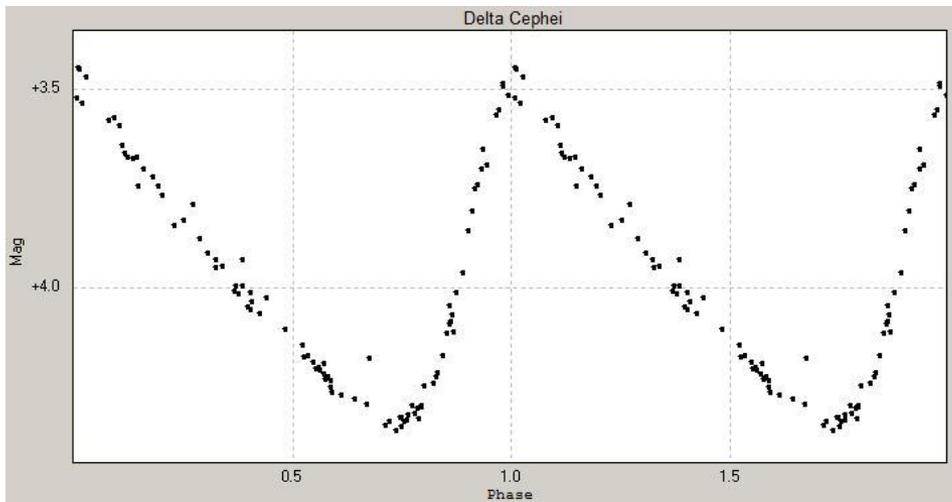
Цефеиды

Это звезды-гиганты, имеющие регулярные изменения блеска с очень хорошей периодичностью и небольшой амплитудой ($\sim 1^m$).

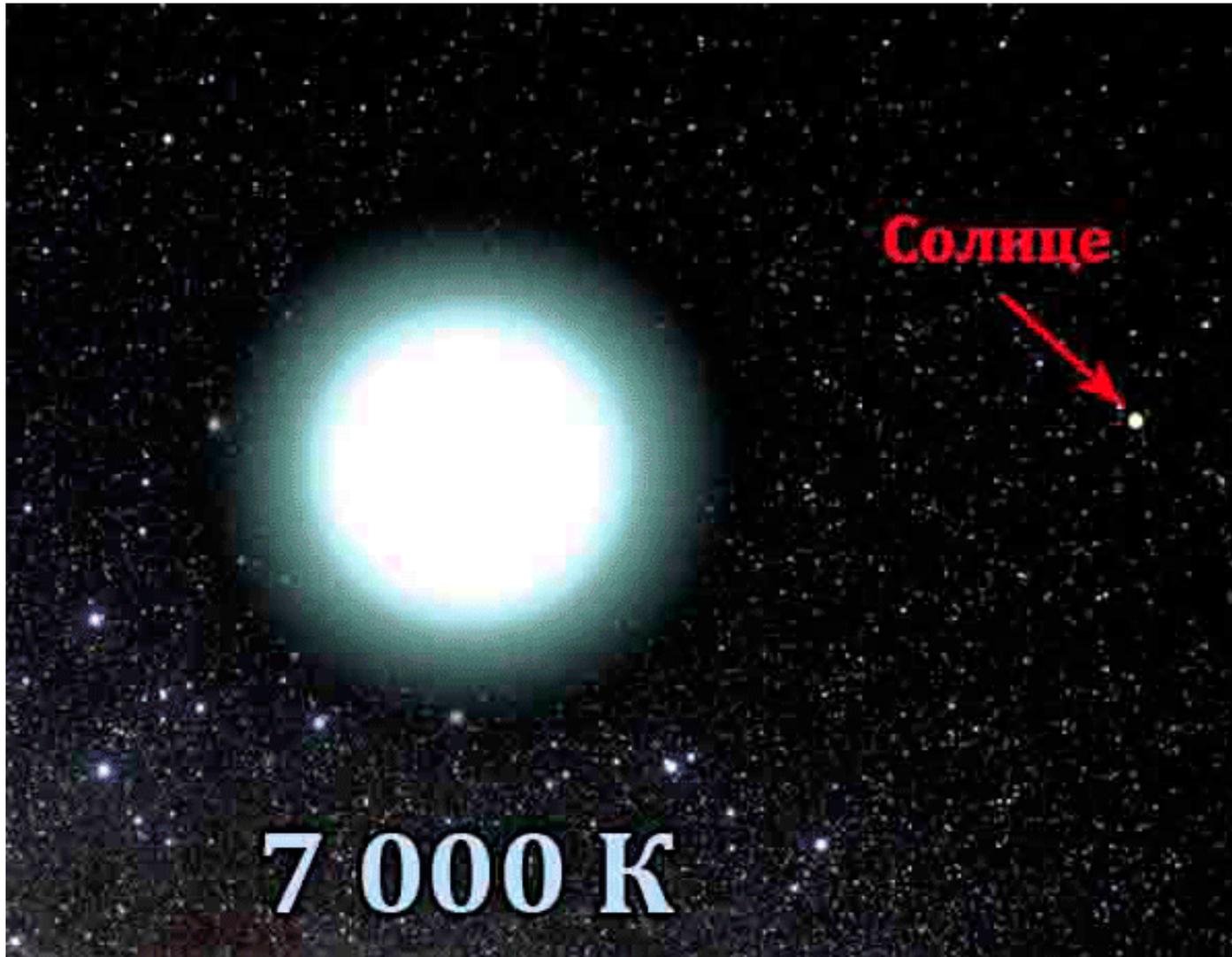
Наблюдаются 3 типа кривых блеска:

- звезды типа RR Lyr (период от 1 до 13 часов),
- классические цефеиды (период от 1 до 70 дней, пример — δ Cep),
- цефеиды сферической составляющей (период от 1 до 70 дней, пример — W Vir)

Классические цефеиды относятся к I-му типу звездного населения, остальные цефеиды ко II-му типу.

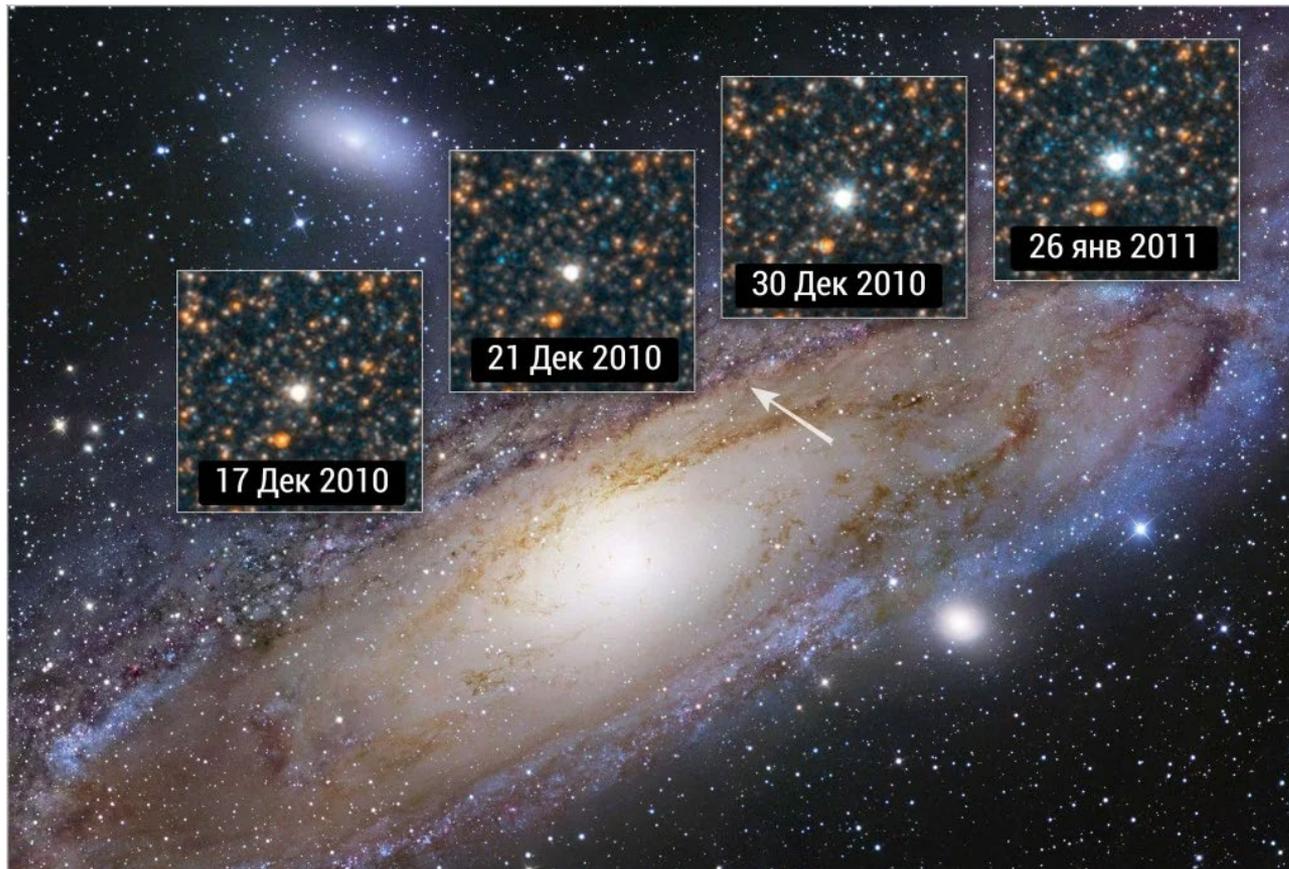


Солнце и пульсирующая звезда в масштабе



https://pikabu.ru/story/tsefeidyi__zvezdnyie_verstovyye_stolbyi_vselennoy_712443

Цефеиды – «маяки во Вселенной»



Изменение блеска звезды V1 в галактике M31
<https://spacegid.com/tsefeidy.html#ixzz5S6BfPtnp>

$$\langle M \rangle = \alpha \cdot \lg P + \beta$$

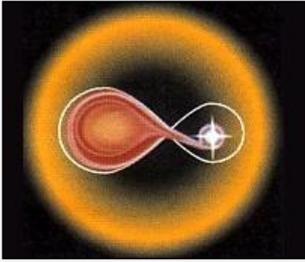
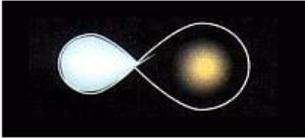
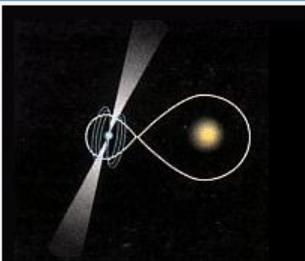
$$M = m + 5 - 5 \lg R$$

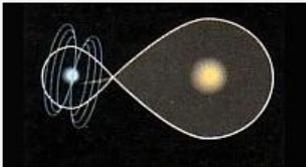
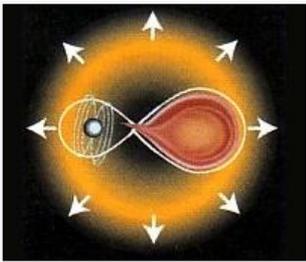
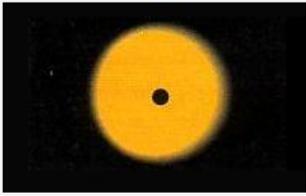
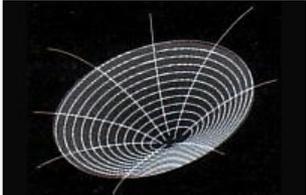
$$\lg R = 0.2 (\langle m \rangle - \langle M \rangle + 5)$$

A – межзвездное поглощение (покраснение)

$$\lg R = 0.2 (\langle m \rangle - A - \langle M \rangle + 5)$$

Пример эволюционного трека двойной звезды

ПРИМЕРЫ ЭВОЛЮЦИОННОГО ТРЕКА ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ			
0,0 млн. лет		M1 = 12,0 M2 = 9,0 R = 600	Пара молодых звезд массой 12 и 9 масс Солнца обращается вокруг друг друга на расстоянии около 600 радиусов Солнца (-400 миллионов километров)
18,6 млн. лет		M1 = 11,3 M2 = 8,8 R = 626	Прошло 18 миллионов лет, более массивная звезда стала красным гигантом и заполнила свою полость Роша. Вещество стекает с ее поверхности. Часть падает на вторую звезду, а большая часть образует общую газовую оболочку системы
18,51 млн. лет		M1 = 2,9 M2 = 9,4 R = 33	Всего за 10 тысяч лет красный гигант теряет 75% массы, превращаясь в горячую звезду типа Вольфа-Райе, а орбита двойной сжимается в 20 раз
18,51 млн. лет			Спустя полмиллиона лет звезда Вольфа-Райе, бывшее ядро красного гиганта, взрывается как сверхновая, выбрасывая в космос половину своей массы. Орбита при этом расширяется вдвое
18,51 млн. лет		M1 = 1,4 M2 = 9,4 R = 75	На месте сверхновой остается быстро вращающаяся горячая нейтронная звезда. Если в створе конусов, в которых выбрасываются энергичные частицы, окажется Земля, мы будем наблюдать короткопериодический радиопульсар

27,13 млн. лет		M1 = 1,4 M2 = 9,3 R = 76	Прошло 9 миллионов лет, нейтронная звезда остыла, ее вращение затормозилось, пульсар замолк, но тут вторая звезда раздувается, превращаясь в красный гигант
27,16 млн. лет		M1 = 1,4 M2 = 8,7 R = 38	Вновь начинается перетекание вещества, но лишь небольшая его часть падает на нейтронную звезду, в основном оно рассеивается в окружающем пространстве. За 30 тысяч лет звезды сближаются вдвое и...
27,17 млн. лет		M = 4,0	...нейтронная звезда оказывается в атмосфере продолжающего расширяться красного гиганта. Больше половины его вещества разбрасывается по окружающему пространству, а нейтронная звезда тормозится и проваливается в его центр — образуется объект Торна — Житков
27,27 млн. лет		M = 4,0	Примерно за юо тысяч лет большая часть вещества постепенно оседает на нейтронную звезду, и в итоге она становится черной дырой