

Спектр



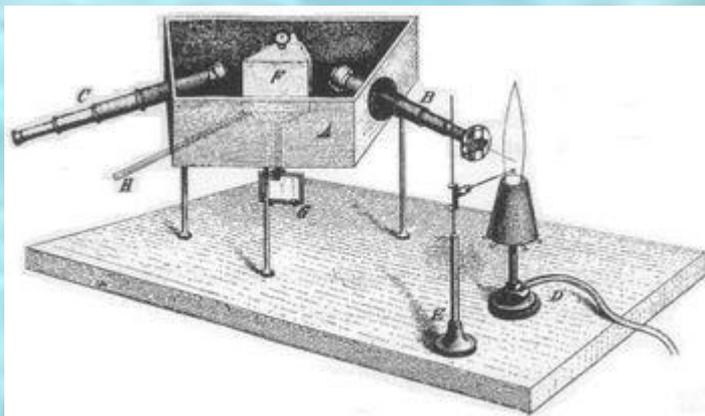
- $\lambda = 380 \div 470$ нм – фиолетовый, синий;
- $\lambda = 470 \div 500$ нм – сине-зеленый;
- $\lambda = 500 \div 560$ нм – зеленый;
- $\lambda = 560 \div 590$ нм – желто-оранжевый
- $\lambda = 590 \div 760$ нм – красный.

Распределение цветов в спектре = **К О Ж З Г С Ф**

Запомнить, например: *Как Однажды Жак Звонарь Городской Сломал Фонарь.*

В 1665г **Исаак Ньютон** (1643-1727) получил спектры солнечного излучения и объяснил их природу, показав, что цвет есть собственное свойство света.

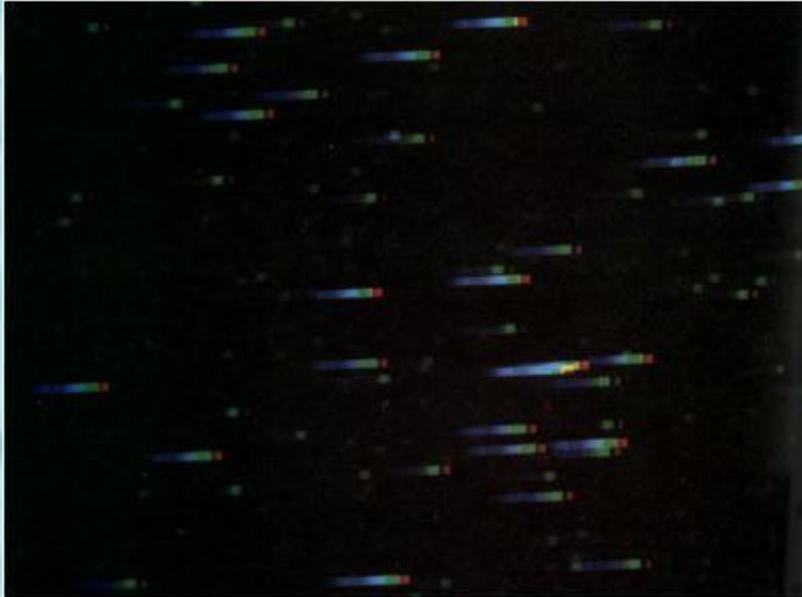
В 1814г **Йозеф фон ФРАУНГОФЕР** (1787-1826, Германия) обнаружил, обозначил и к 1817г подробно описал 754 линии в солнечном спектре (названы его именем), создав в 1814г прибор для наблюдения спектров - спектроскоп.



Спектроскоп Кирхгофа-Бунзена

В 1859г **Г.Р.Кирхгоф** (1824-1887, Германия) и **Р.В. Бунзен** (1811-1899, Германия) открыли спектральный анализ: *газы поглощают те же длины волн, которые излучают в нагретом состоянии.* У звезд на фоне сплошных спектров наблюдаются темные (фраунгоферовы) линии – это спектры поглощения.

Спектры звезд

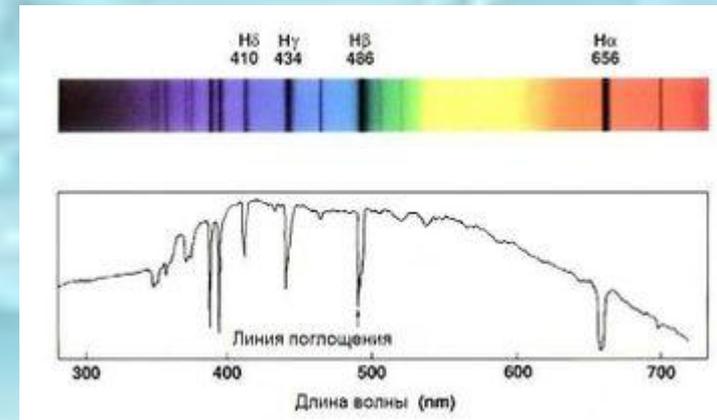


Уильям ХЕГГИНС (1824-1910, Англия) астроном, *первым применив спектрограф, начал спектроскопию звезд*. В 1863г показал, что спектры Солнца и звезд имеют много общего и что их наблюдаемое излучение испускается горячим веществом и проходит через вышележащие слои более холодных поглощающих газов.

Спектрограмма рассеянного скопления «Гиады».

Спектры звезд – это их паспорт с описанием всех звездных закономерностей. По спектру звезды можно узнать ее светимость, расстояние до звезды, температуру, размер, химический состав ее атмосферы, скорость вращения вокруг оси, особенности движения вокруг общего центра тяжести.

Изучение звездных спектров – это фундамент современной астрофизики.



Комбинированный спектр излучения звезды. Сверху «естественное» (видимое в спектроscope), снизу — зависимость интенсивности от длины волны.

Цвет звезд



Подобно драгоценным камням звезды рассеянного скопления NGC 290 переливаются различными красками. Фото КТ им. Хаббла, апрель 2006г.

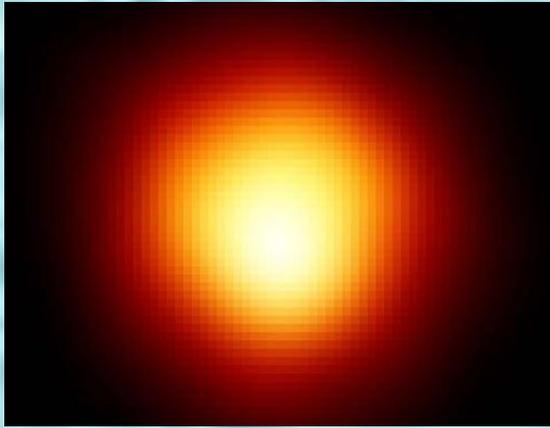
Во время наблюдений звездного неба могли заметить, что цвет (свойство света вызывать определенное зрительное ощущение) звезд различен. Цвет и спектр звезд связан с их температурой. Свет разных длин волн возбуждает разные цветовые ощущения. Глаз чувствителен к длине волны, несущей максимальную энергию

$$\lambda_{\text{max}} = b/T \quad (\text{закон Вина, 1896г.})$$

В 1903—1907гг. **Эйнар Герцшпрунг** (1873-1967, Дания) первым определяет цвета сотен ярких звезд.

Звезды имеют самые разные цвета. У Арктура желто-оранжевый оттенок, Ригель бело-голубой, Антарес ярко-красный. Доминирующий цвет в спектре звезды зависит от температуры ее поверхности. Газовая оболочка звезды ведет себя почти как идеальный излучатель (абсолютно черное тело) и вполне подчиняется классическим законам излучения **М.Планка** (1858—1947), **Й.Стефана** (1835—1893) и **В.Вина** (1864—1928), связывающим температуру тела и характер его излучения. Закон Планка описывает распределение энергии в спектре тела и указывает, что с ростом температуры повышается полный поток излучения, а максимум в спектре сдвигается в сторону коротких волн.

Температура звезд



Бетельгейзе (снимок телескопа им.Хаббла). В таких холодных звездах с $T=3000\text{K}$ преобладают излучения в красной области спектра. В спектрах таких звезд много линий металлов и молекул.

Температура звезд непосредственно связана с цветом и спектром. Первое измерение температуры звезд произведено в 1909г германским астрономом **Юлиус Шейнер** (1858-1913), проведя абсолютную фотометрию 109 звезд.

Температура определяется по спектрам с помощью закона Вина

$$\lambda_{\max} \cdot T = b, \text{ где } b = 0,289782 \cdot 10^7 \text{ \AA} \cdot \text{K} - \text{постоянная Вина.}$$

Большинство звезд имеют температуры
 $2500\text{K} < T < 50000\text{K}$

Звезда **HD 93129A** (созв. Корма) самая горячая – $T = 220000 \text{ K}$!

Самые холодные - **Гранатовая звезда** (т Цефея), **Мира** (о Кита) – $T = 2300\text{K}$
е Возничего A - 1600 K .

Спектральная классификация

В 1866г **Анжело Секки** (1818-1878, Италия) дал первую спектральную классическую звезд по цвету: **Белые, Желтоватые, Красные.**

Гарвардская спектральная классификация впервые была представлена в *Каталоге звездных спектров Генри Дрэпера* (1837-1882, США), подготовленного под руководством **Э. Пикеринга** (1846–1919) к 1884г. Все спектры были расставлены по интенсивности линий (позже в температурной последовательности) и обозначены буквами в алфавитном порядке от горячих к холодным звездам: O B A F G K M. К 1924г окончательно была установлена **Энн Кэннон** (1863-1941, США) и издана каталогом в 9 томов на 225330 звезд- каталог HD.

ГАРВАРДСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ		
Спектральный класс	Эффективная температура, К	Цвет
O	30000–60000	Голубой
B	10000–30000	Бело-голубой
A	7500–10000	Белый
F	6000–7500	Желто-белый
G	5000–6000	Желтый
K	3500–5000	Оранжевый
M	2000–3500	Красный

Современная спектральная классификация

Дополнительными классами R, N и S обозначены спектры, похожие на K и M, но с иным химическим составом. Между каждыми двумя классами введены подклассы, обозначенные цифрами от 0 до 9. Например, спектр типа A5 находится посередине между A0 и F0.

Дополнительными буквами иногда отмечают особенности звезд: «d» – карлик, «D» – белый карлик, «r» – пекулярный (необычный) спектр.

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

Наиболее точную спектральную классификацию представляет система МК, созданная У.Морганом и Ф.Кинаном в Йеркской обсерватории в 1943г, где спектры расставлены как по температуре, так и по светимости звезд. Были дополнительно введены классы светимости, отмеченные римскими цифрами: Ia, Ib, II, III, IV, V и VI, соответственно указывающие на размеры звезд.

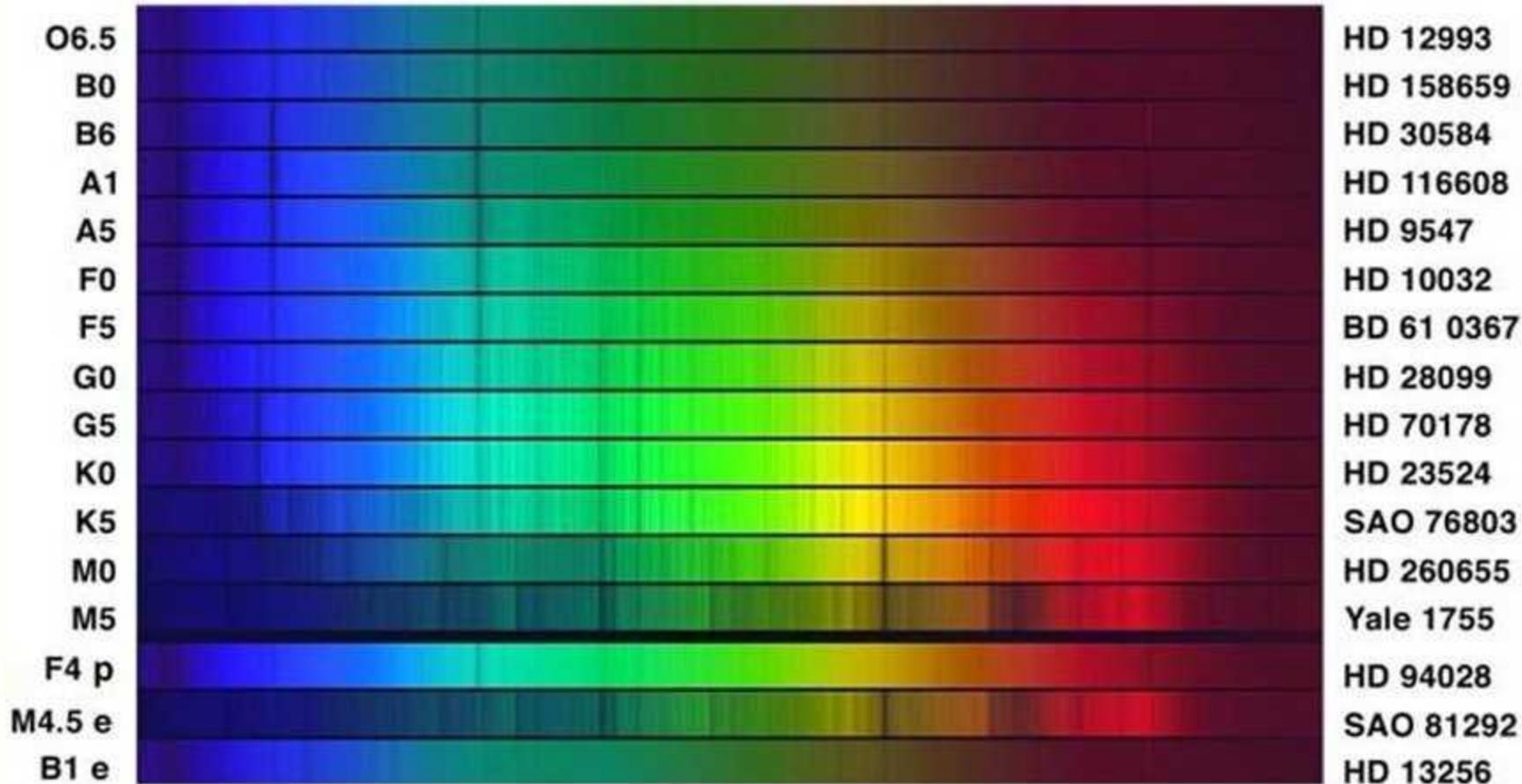
Наше Солнце относится к спектральному классу **G2 V**

Спектры звезд

Спектральный
класс

Спектры звезд

Обозначение
звезды



e - эмиссионные линии в спектре

p - пекулярный спектр (здесь: малометаллический)

Светимость звезд



Рассеянное скопление «Плеяды» содержит много горячих и ярких звезд, которые были сформированы в одно и то же время из газопылевого облака. Голубая дымка, сопутствующая «Плеядам», - рассеянная пыль, отражающая свет звезд.

$$L_{\odot} = 3,846 \cdot 10^{26} \text{Вт/с}$$

Звезда	Сириус	Канопус	Арктур	Вега
Светимость	22 L_{\odot}	4 700 L_{\odot}	107 L_{\odot}	50 L_{\odot}

Светимость звезд:
 $1,3 \cdot 10^{-5} L_{\odot} < L < 5 \cdot 10^5 L_{\odot}$

Одни звезды светят ярче, другие - слабее. **Светимость** – мощность излучения звезды – полная энергия, излучаемая звездой в 1 секунду. [Дж/с=Вт] Звезды излучают энергию во всем диапазоне длин волн

В 1856г **Норман Погсон** (1829-1891, Англия) устанавливает формулу для светимостей через абсолютные M звездные величины (т.е. с расстояния в 10 пк). $L_1/L_2 = 2,512^{M_2 - M_1}$.

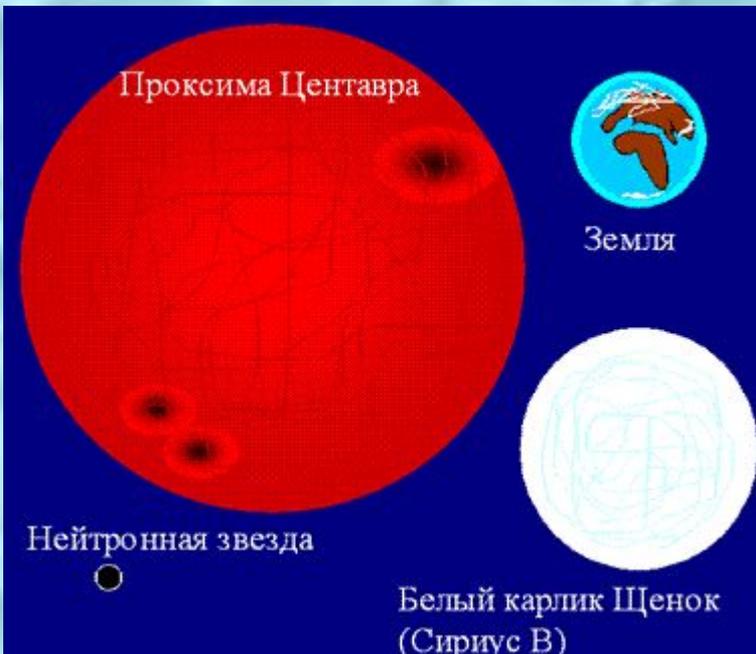
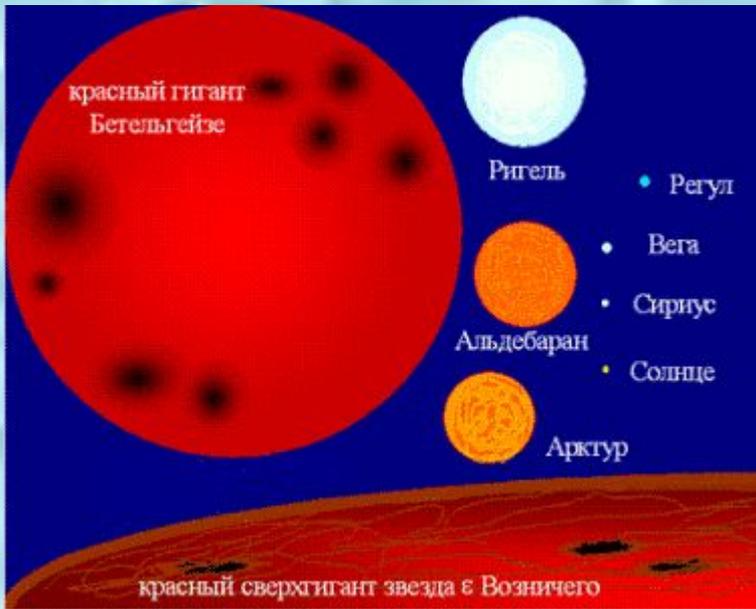
Сравнивая звезду с Солнцем, получим

$$L/L_{\odot} = 2,512^{M_{\odot} - M}, \text{ или } \lg L = 0,4 (M_{\odot} - M)$$

Большую светимость имеют звезды-гиганты, меньшую - звезды-карлики.

Наибольшей светимостью обладает голубой сверхгигант - звезда Пистолет (созв. Стрельца - 10000000 L_{\odot} ! Светимость красного карлика Проксимы Центавра около 0,000055 L_{\odot} .

Размеры звезд



Звезды за редчайшим исключением наблюдаются как точечные источники света. Даже в самые большие телескопы нельзя увидеть их диски.

Определяют:

1) Непосредственным измерением углового диаметра звезды (для ярких $\geq 2,5^m$, близких звезд, >50 измерено) с помощью интерферометра Майкельсона. Впервые 3 декабря 1920г измерен угловой диаметр звезды Бетельгейзе (α Ориона) = **А. Майкельсон** (1852-1931, США) и **Ф. Пиз** (1881-1938, США).

2) Через светимость звезды $L=4\pi R^2\sigma T^4$ в сравнении с Солнцем.

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L}{L_{\odot}} \left(\frac{6000}{T}\right)^4}$$

По своим размерам, звезды делятся с 1953 года на:

- | | |
|--|---------------------|
| Сверхгиганты (I) | Яркие гиганты (II) |
| Гиганты (III) | Субгиганты (IV) |
| Карлики главной последовательности (V) | |
| Субкарлики (VI) | Белые карлики (VII) |

Названия карлики, гиганты и сверхгиганты ввел Генри Рессел в 1913г, а открыл их в 1905г Эйнар Герцшпрунг, введя название "белый карлик".

Размеры звезд $10 \text{ км} < R < 1000 R_{\odot}$,
 $R_{\odot} = 6,959 \times 10^5 \text{ км}$, т.е. $D \approx 1,4 \text{ млн. км}$

Например: Красный гигант Гранатовая звезда α Цфея имеет диаметр 1,6 млрд.км; Звезды Лейтена и Вольф-475 меньше Земли, а нейтронные звезды 10 - 15 км.

Масса звезд

Одна из важнейших характеристик звезд, указывающая на ее эволюцию -
определение жизненного пути звезды.

Способы определения:

1. Зависимость масса-светимость $L \approx m^{3,9}$
2. 3-й уточненный закон Кеплера в физически двойные системах

$$\frac{T_1^2 \cdot (M_1 + m_1)}{T_2^2 \cdot (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

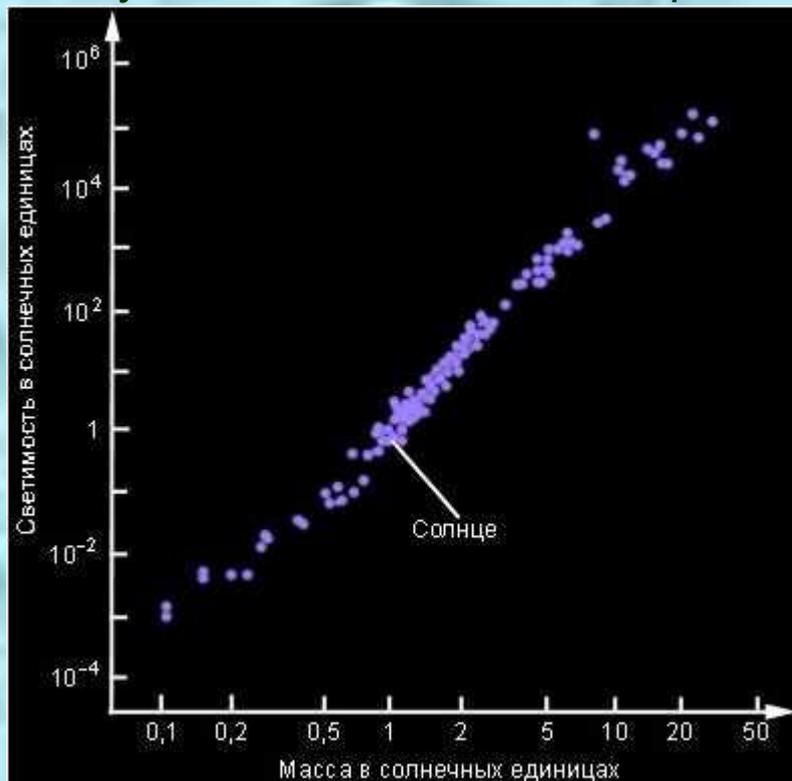


Диаграмма «масса-светимость»

Самые легкие звезды находятся
в двойных системах:

Ross 614 компоненты имеют массы 0,11 и 0,07 M_{\odot} ,
Wolf 424 массы компонентов 0,059 и 0,051 M_{\odot} ,
LHS 1047 меньший компаньон весит 0,055 M_{\odot} .
Обнаружены "коричневые карлики" с 0,04 - 0,02 M_{\odot} .

Фото КТ им. "Хаббла". Звезда
Pismis 24-1 в центре туманности
NGC 6357 в 8000 св.г. в созвездии
Скорпиона – это три звёзды с
массами порядка 70 солнечных.
Здесь же звезда Pismis 24-17
имеет массу в 100 M_{\odot} .
На один гигант с массой в 65 M_{\odot}
приходится 18000 звёзд, по
размерам близких к Солнцу.



Теоретически масса звезд $0,005M_{\odot} < M < 150M_{\odot}$ ($M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30}$ кг)

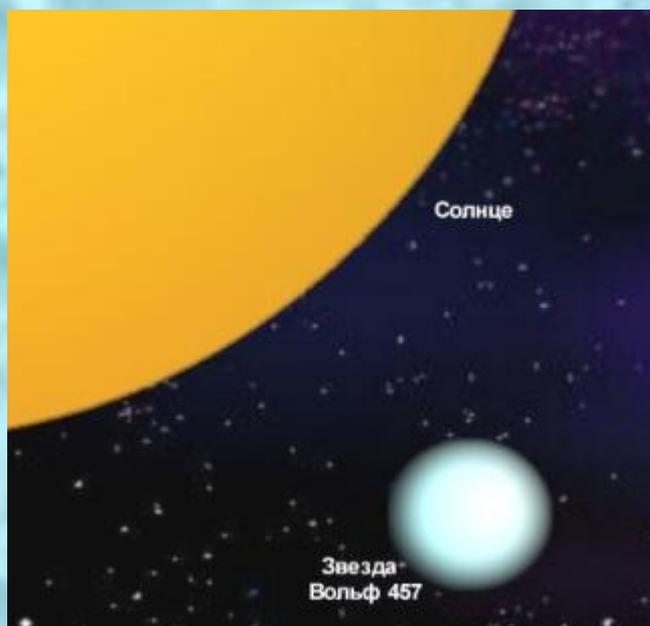
Плотность звезд

находится $\rho = M/V = M/(4/3\pi R^3)$

Хотя массы звезд имеют меньший разброс, но размеры значительно отличаются, поэтому и плотности их сильно различаются. Чем больше размер звезды, тем меньше плотность.



Самая маленькая плотность у сверхгигантов:
Антарес (α Скорпиона) $R=750R_{\odot}$, $M=19M_{\odot}$, $\rho=6,4 \cdot 10^{-5} \text{кг/м}^3$
Бетельгейзе (α Ориона) $R=800 R_{\odot}$, $M=17M_{\odot}$, $\rho=3,9 \cdot 10^{-5} \text{кг/м}^3$.



Очень большие плотности имеют белые карлики:
Сириус В, $R=0,02 R_{\odot}$, $M=M_{\odot}$, $\rho=1,78 \cdot 10^8 \text{кг/м}^3$,
но еще больше плотность нейтронных звезд.

Средние плотности звезд изменяются в интервале
от 10^{-6}г/см^3 до 10^{14}г/см^3 - в 10^{20} раз!

Химический состав

Химический состав звезды отражает влияние факторов: природы межзвездной среды и тех ядерных реакций, которые развиваются в звезде в течение ее жизни. Начальный состав звезды близок к составу межзвездной материи из которой возникла звезда.



Остатки сверхновой NGC 6995 - это горячий светящийся газ, образовавшийся после взрыва звезды 20-30 тысяч лет назад. Подобные взрывы активно обогащали пространство тяжелыми элементами из которых впоследствии образовывались планеты и звезды следующего поколения

Химический состав определяется по спектру (интенсивности фраунгоферовых линий), зависящего также от температуры, давления и плотности фотосферы, наличием магнитного поля. Звезды состоят из тех же химических элементов, которые известны на Земле, но в основном из водорода и гелия (95-98% массы) и других ионизированных атомов, а у холодных звезд в атмосфере присутствуют нейтральные атомы и даже молекулы.

По мере повышения температуры состав частиц, способных существовать в атмосфере звезды, упрощается. Спектральный анализ звёзд классов O, B, A (T от 50 000 до 10 000⁰C) показывает в их атмосферах линии ионизированных водорода, гелия и ионы металлов, в классе K (5000⁰C) обнаруживаются уже радикалы, а в классе M (3800⁰C) - молекулы оксидов.

Близлежащие звезды

Обозначение		Спектр. класс	Звёздная величина		Светимость	Темп, К	Радиус	Масса	Парал.
Звёздная система	Звезда		вид.	абс.					
Солнце		G2V	-26,58	4,84	1	5780	1,0	1	
α Центавра	Проксима	M5.5Ve	11,05	15,53	0,000055	2900	0,145	0,12	0,772"
	Центавр А	G2V	-0,01	4,38	1,56	5790	1,227	0,907	0,747"
	Центавр В	K0V	1,33	5,71	0,453	5260	0,865	1,095	
Звезда Барнарда (β Змееносца)		M4.0Ve	9,54	13,22	0,000449	3200	0,161	0,166	0,547"
Вольф 359 (CN Льва)		M6.0V	13,53	16,55	0,000019		0,15	0,092	0,419"
Лаланд 21185 (Б.Медведица)		M5.5e	7,50	10,44	0,00555	3500		0,448	0,393"
Сириус (α Большого Пса)	Сириус А	A1V	-1,46	1,47	23,55	10400	1,7-1,9	2,14	0,380"
	Сириус В	DA2	8,68	11,34	0,00207	8000	0,92	1,03	
Luyten 726-8	UV Кита	M5.5e	13,02	15,40	0,000042	2800	0,14	0,102	0,374"
	BL Кита	M6.0e	12,52	15,85	0,000068	2800	0,14	0,109	
Росс 154 (V1216 Стрельца)		M3.5Ve	10,6	13,07	0,000417		0,24	0,171	0,337"
Росс 248 (HN Андромеды)		M5.5Ve	12,29	14,79	0,000108		0,17	0,121	0,316"
ε Эридана		K2V	3,73	6,19	0,305	5100	0,84	0,850	0,310"
Лакайль 9352 (CD-36°15693)		M1.5Ve		9,75			0,52	0,529	0,304"
Росс 128 (FI Девы)		M4.0Vn		13,51	0,00054		0,16	0,156	0,299"

Звёзды, которые нельзя увидеть невооружённым глазом, помечены серым цветом

Сравнительные характеристики звезд

По спектральным классам

S_p	M_b	M/M_\odot	L/L_\odot	R/R_\odot	$T_{эф}, K$	$t_m, лет$
O5	- 10,1 ^m	60	790000	14	44000	3×10^6
B0	- 7,1 ^m	16	52000	7,4	30000	10^7
B5	- 2,7 ^m	7	830	3,9	15400	3×10^7
A0	+ 0,3 ^m	3	54	2,4	12500	2×10^8
A5	+ 1,7 ^m	2	14	1,7	8200	6×10^8
F0	+2,6 ^m	1,8	6,5	1,5	7200	2×10^9
F5	+ 3,4 ^m	1,5	3,2	1,4	6400	3×10^8
G0	+ 4,2 ^m	1,05	1,5	1,1	6000	5×10^8
G5	+ 4,9 ^m	0,92	0,8	0,92	5800	$1,2 \times 10^{10}$
K0	+ 5,6 ^m	0,78	0,4	0,85	5200	$1,5 \times 10^{10}$
K5	+ 6,7 ^m	0,69	0,15	0,72	4400	2×10^{10}
M0	+ 7,4 ^m	0,51	0,08	0,60	3800	5×10^{10}
M5	+ 9,6 ^m	0,2	0,01	0,27	3200	2×10^{11}
M8	+ 11,9 ^m	0,1	0,001	0,11	2600	10^{12}

Сравнительные характеристики звезд по размерам

Классы звезд	Массы M_{\odot}	Размеры R_{\odot}	Плотность $г/см^3$	Светимость L_{\odot}	Время жизни, лет	% общего числа звезд
Ярчайшие сверхгиганты	до 100	10^3-10^4	$<0,000001$	$>10^5$	10^5	$<0,000001$
Сверхгиганты	50–100	10^2-10^3	0,000001	10^4-10^5	10^6	0,001
Яркие гиганты	10–100	> 100	0,00001	> 1000	10^7	0,01
Нормальные гиганты	до 50	> 10	0,0001	> 100	10^7-10^8	0,1 - 1
Субгиганты	до 10	до 10	0,001	до 100	10^8-10^9	
Нормальные звезды	0,005-5	0,1-5	0,1-10	0,0001-10	10^9-10^{11}	до 90
- белые	до 5	3–5	0,1	10	10^9	
- желтые	1	1	1,5	1	10^{10}	
- красные	0,005	0,1	10	0,0001	$10^{11}-10^{13}$	
Белые карлики	0,01–1,5	до 0,007	10^3	0,0001	до 10^{17}	до 10
Нейтронные звезды	1,5–3 (до 10)	8–15 км (до 50 км)	$10^{13}-10^{14}$	0,000001	до 10^{19}	0,01-0,001