

Плазма в космосе

Лекция №6

Эволюция звёзд

Анненков Владимир, с.н.с. лаб. 9-1

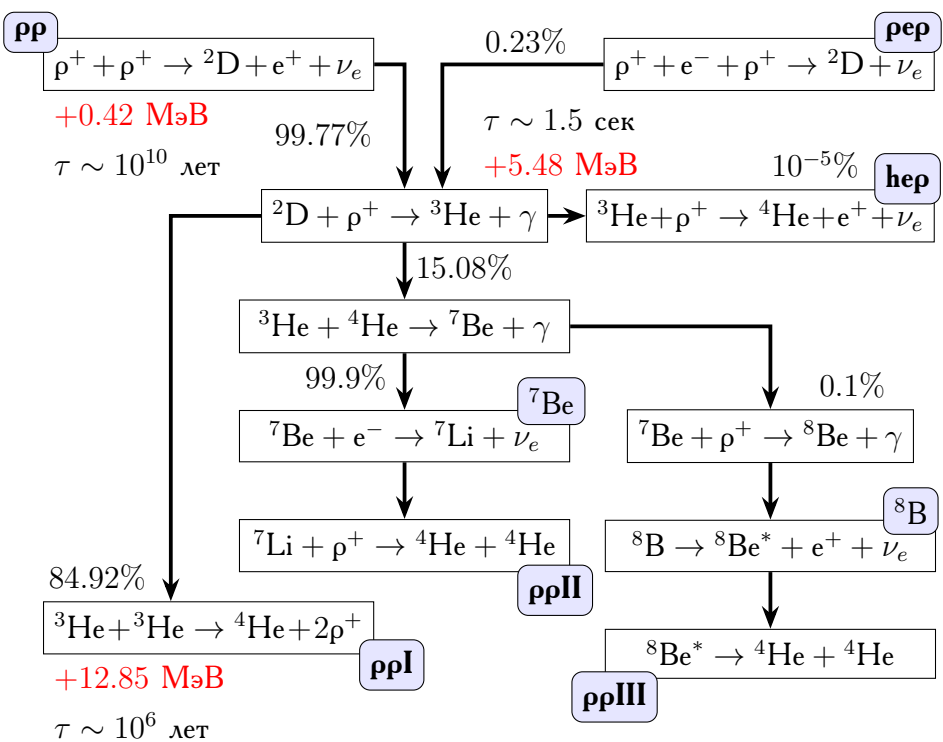
14 октября 2021



Содержание лекции

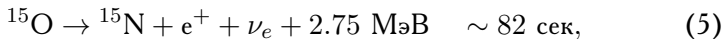
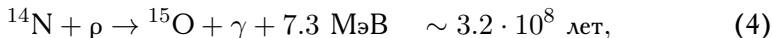
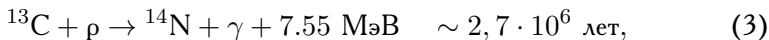
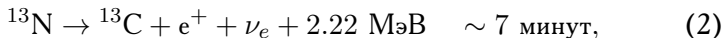
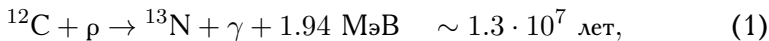
- 1 Ядерные реакции в звездах
- 2 Классификация звёзд
 - Классификация по химическому составу
 - Спектральная классификация
 - Непрерывный спектр
 - Диаграмма Герштруда-Рассела
 - Соотношения M-L и M-R для звезд главной последовательности
- 3 Коричневые карлики ($M < 0.08M_{\odot}$)
- 4 Красные карлики ($M = 0.08 \div 0.5M_{\odot}$)

Ядерные реакции в звездах



CNO-цикл

В звездах массивнее Солнца переработка водорода в гелий осуществляется преимущественно в цепочке реакций, называемых циклом CNO. Он начинает доминировать при температуре $\approx 17 \cdot 10^6$ К. В этой цепочке реакций ядро углерода выступает в роли катализатора, т. е., в конечном счете, в CNO-цикле, как и в pp-цикле $4p \rightarrow {}^4\text{He}$:



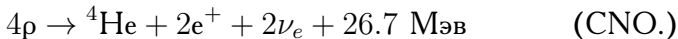
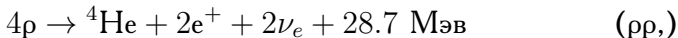
Как и в pp-цикле, ключевыми реакциями, определяющими скорость всей цепочки, являются реакции 2 и 5, которые идут по каналу слабого взаимодействия с испусканием нейтрино.

CNO-цикл

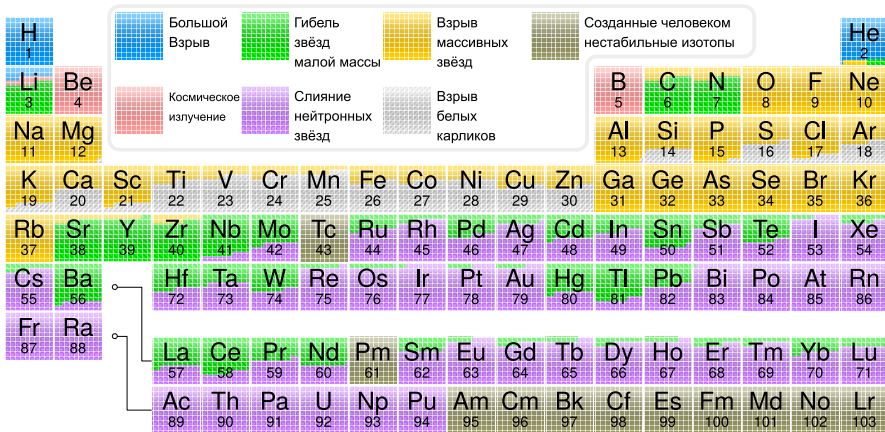
- Энерговыведение на единицу массы чрезвычайно сильно зависит от температуры:

$$\epsilon[\text{эрг}/(\text{г} \cdot \text{с})] \sim \rho T^{16\dots 18}.$$

- Суммарное энерговыведение в обоих циклах примерно одинаково:



Происхождение элементов



Классификация звёзд

Классификация по химическому составу

- Химический состав звезд (главным образом, содержание металлов) определяет коэффициент поглощения вещества звезды, что сказывается на всех ее параметрах:
 - радиусе;
 - центральной температуре;
 - скорости протекания ядерных реакций.
- По своему химсоставу звезды делятся на два больших класса (населения).

Классификация по химическому составу

- К населению **I типа** относят звезды с хим. составом, близким к солнечному (на долю элементов тяжелее гелия приходится около 2% по массе).

Это звезды дисковой составляющей нашей и других спиральных галактик, например, звезды, входящие в состав молодых рассеянных скоплений.

- К населению **II типа** относятся звезды бедные тяжелыми элементами (содержание элементов тяжелее гелия не превышает нескольких десятых долей процента по массе).

Это старые маломассивные звезды (как красные карлики, так и красные гиганты), расположенные в сферической составляющей нашей и других спиральных галактик, например, входящие в состав старых шаровых скоплений.

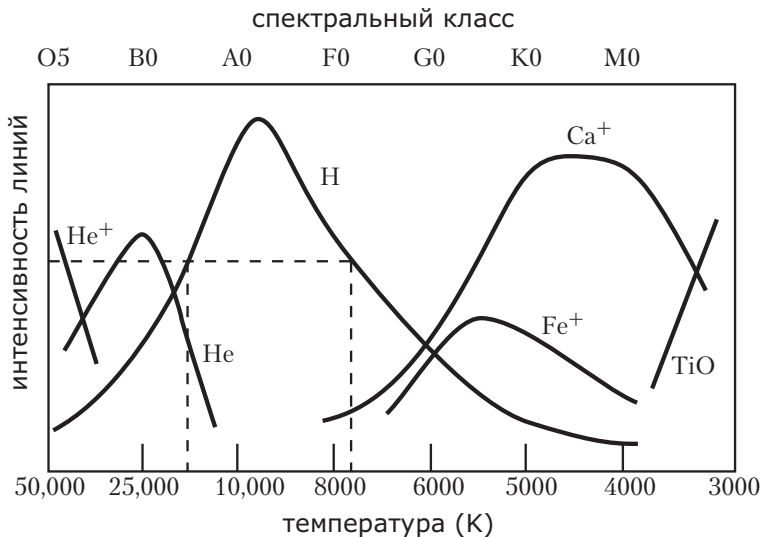
Классификация по химическому составу

- Газ, из которого образуются звезды населения I, частично является продуктом эволюции звезд населения I и II, и поэтому более обогащен тяжелыми химическими элементами, возникшими при ядерной эволюции звезд предыдущих поколений и в предшествующих вспышках сверхновых.
- Наше Солнце принадлежит к населению I типа.
- Существование звезд, состоящих целиком из первичного вещества, не прошедшего ядерной переработки (**население III**), является предметом научного поиска.
- Пока известно лишь несколько звезд небольшой массы, находящихся в гало нашей Галактики, которые практически полностью лишены тяжелых элементов.

Спектральная классификация

- Химический состав звезд определяется по их спектрам.
- Спектр выходящего излучения из атмосферы звезды зависит от физического состояния плазмы и ее химического состава (через коэффициенты излучения и поглощения) и параметров звезды – ее массы и радиуса (через ускорение свободного падения в атмосфере).
- По своим спектральным свойствам звезды подразделяются на спектральные классы, обозначаемые буквами O, B, A, F, G, K, M (основные спектральные классы) и L, T (для коричневых карликов) в порядке убывания эффективной температуры.
- Внутри класса звёзды делятся на подклассы от 0 (самые горячие) до 9 (самые холодные). Солнце имеет спектральный класс G2 и эффективную температуру фотосферы 5780 К

Спектральная классификация



Относительные интенсивности (эквивалентные ширины) линий поглощения различных элементов в зависимости от эффективной температуры (спектрального класса) звезды.

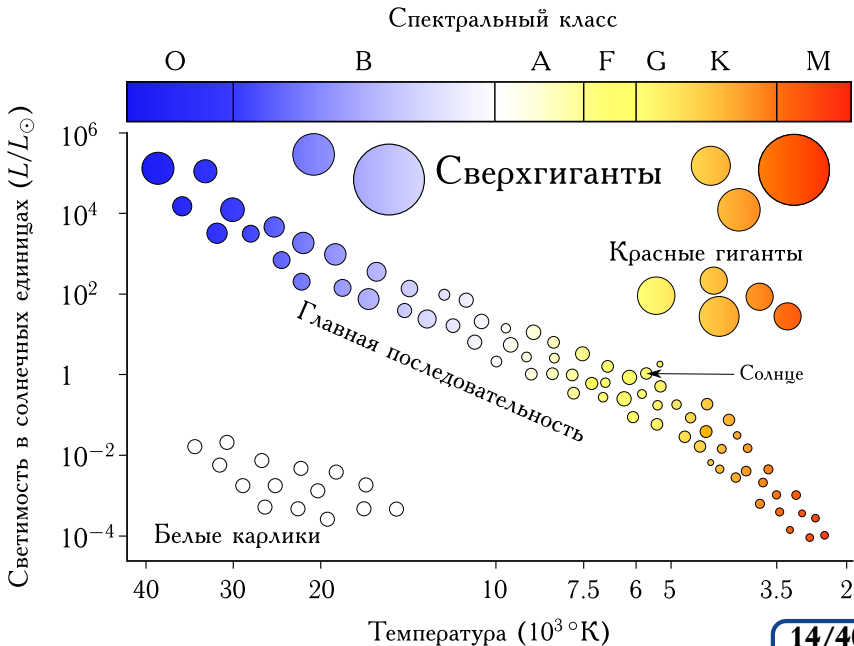
Непрерывный спектр

- Рассмотрим, какие процессы ответственны за формирование непрерывного спектра в звездах различных спектральных классов.
- Непрерывный спектр (континуум) формируется в фотосфере.
- Излучаемая энергия черпается за счет энергии теплового движения атомов.
- Форма непрерывного спектра определяется механизмами излучения (и поглощения) в фотосфере, а они, в свою очередь, зависят от температуры вещества и излучения.
- Рассмотрим механизмы поглощения света (механизмы излучения обусловлены обратными процессами).
- Поскольку речь идет о непрерывном спектре, все они относятся к свободно-свободным и связанно-свободным переходам.

Непрерывный спектр

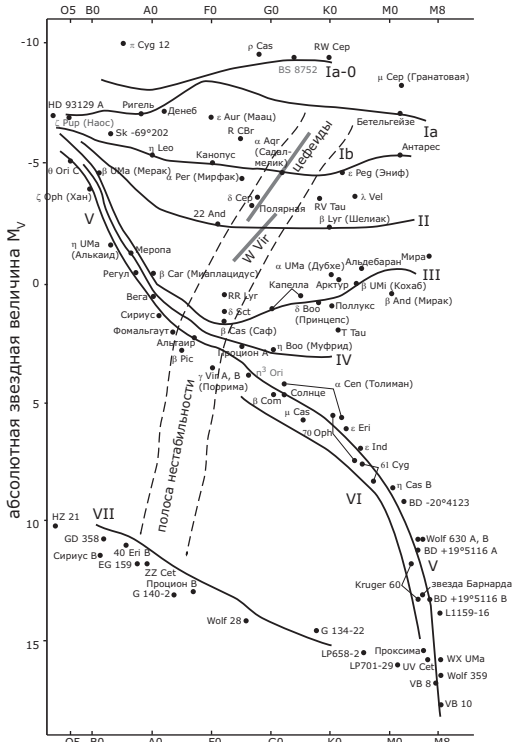
- **Горячие звезды (O, B).** Доминируют свободно-свободные переходы в ионизованной среде, а также ионизация HeII (в наиболее горячих звездах) и HeI.
- **Звезды класса A.** Ионизация HII (в видимой области – со 2-го и 3-го уровней).
- **Звезды класса F, G.** Ионизация отрицательных ионов водорода, ионизация металлов. Свободные электроны присутствуют в основном за счет ионизации металлов (т. н. «элементы-доноры»).
- **Холодные звезды класса K, M.** Ионизация отрицательных ионов водорода, диссоциация молекул. Сливающиеся молекулярные полосы.
- **Коричневые карлики класса L, T.** Коричневые карлики – тела первоначальной массой $13 < M < 75$ масс Юпитера, структура которых определяется давлением вырожденного электронного газа. Их масса недостаточна для загорания водорода в ядре, поэтому, строго говоря, звездами коричневые карлики не являются, а представляют собой промежуточный класс объектов между звездами и планетами.

Диаграмма Герштруда-Рассела



Мнемоника

- Для запоминания основной последовательности гарвардской классификации существуют мнемонические формулы:
- на английском языке: **Oh Be A Fine Girl, Kiss Me Right Now Sweetheart**, а также множество других вариантов.
- на русском языке: **Один Бритый Англичанин Финики Жевал Как Морковь**;



Классы светимости звёзд:

- 0 – гипергиганты
- Ia, Ib – ветви сверхгигантов
- II, III – ветви гигантов
- IV – ветвь субгигантов
- V – главная последовательность
- VI – ветвь субкарликов
- VII – белые карлики

Соотношение M-L

- Наблюдения двойных звезд позволяют оценивать массы компонентов, что дает возможность установить эмпирическую зависимость между массой и светимостью.
- Оказалось, что для звезд главной последовательности полная (болومترическая) светимость $L \sim M^3$ для звезд с массой Солнца и выше, и $L \sim M^{4.5}$ для $M < M_{\odot}$.
- Эти зависимости были теоретически объяснены английским астрофизиком А. С. Эддингтоном в 1926 г.

Соотношение M-L

- Обратимся к уравнению лучистой теплопроводности:

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4a_r c} \frac{\kappa \rho}{T^3} \frac{L(r)}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

которое показывает, что фотонная светимость звезды определяется непрозрачностью ее оболочки.

- Для порядковых оценок заменим производные по радиусу делением на радиус: $d/dr \rightarrow 1/R$, а температуру звезды заменим ее характерным значением $T \rightarrow T_c$, где $T_c \sim \mu GM/RR$ (теорема вириала).
- Тогда, опуская постоянные (кроме постоянной тяготения), получаем:

$$L \sim \frac{\mu^4 G^4}{\kappa} M^3, \quad (2)$$

где κ – коэффициент непрозрачности.

Соотношение M-L

- Таким образом, если непрозрачность слабо зависит от параметров среды (а это действительно так в горячей плазме, когда основной вклад в поглощение вносит рассеяние на свободных электронах), то $L \sim M^3$, что и наблюдается в массивных звездах.
- Для крамерсовского закона непрозрачности (свободное поглощение (поглощение света во время ионизации связанного электрона) или свободно-свободное поглощение (поглощение света при рассеянии свободного иона, также называемое тормозным излучением))

$$\kappa_{ff} \simeq 7 \cdot 10^{22} (\text{см}^2/\text{г}) \frac{\rho}{T^{7/2}}, \quad (3)$$

характерного для более низких температур (у звезд с массой порядка солнечной и меньше), получится более крутая зависимость светимости от массы, что также подтверждается наблюдениями ($L \sim M_n$, $n \approx 4 \div 5$).

Ограничение на G

- Светимость в (2) сильно зависит от постоянной тяготения: $L \sim G^4$.
- Этот факт может быть использован для получения ограничений на некоторые физические теории, в которых постоянная тяготения изменяется со временем.
- Если бы G изменялась со временем, то при прочих равных условиях изменялась бы светимость Солнца.
- Само существование мирового океана в течение миллиардов лет на Земле (необходимое условие для органической жизни) ограничивает вариации средней температуры Земли в пределах ± 30 К, т. е. $\Delta T/T_{\text{З}} \lesssim 0.1$.
- Поскольку $T_{\text{З}} \sim L_{\odot}^{1/4}$, то из самого факта наличия жизни на Земле немедленно получаем $\Delta G/G \lesssim 0.1$ за 10^9 лет, то есть $(dG/dt)/G < 10^{-10}$ лет $^{-1}$.

Соотношение M-R

- Воспользуемся (2) и учтём, что светимость звезды связана с генерацией энергии в термоядерных реакциях. Она имеет вид:

$$L \sim \varepsilon M \sim \rho T^{Ze} M,$$

где $Ze \equiv d(\log \varepsilon)/d(\log T)$ – показатель степенной зависимости энерговыделения на единицу массы от температуры, $Ze \sim 4 \div 8$ для протон-протонного цикла и ~ 15 для CNO-цикла.

- Приравнявая это выражение к светимости по (2) и подставляя $\rho \sim M/R^3$ в вириальное соотношение $T_c \sim M/R$, получаем

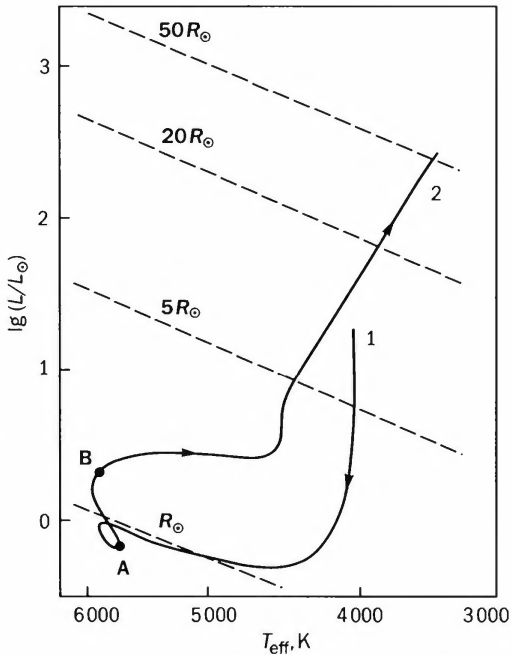
$$R \sim M^{\alpha_R}, \quad (4)$$

где $\alpha_R = (Ze - 1)/(Ze + 3)$.

- Чем больше масса звезды на главной последовательности, тем больше ее радиус и светимость и выше эффективная температура.
- Именно поэтому более массивные звезды ранних спектральных классов (O, B, A, F) лежат левее и выше Солнца на диаграмме ГР (цвет–светимость), так как цвет (спектральный класс) звезды определяется ее эффективной температурой.

Смысл расположения звёзд на диаграмме ГР

- Место звезды зависит от ее массы, возраста и химического состава. В ходе эволюции звезды изменяется химический состав ее недр, перераспределяется плотность, меняется тип ядерных реакций. Это вызывает у звезды внешние перемены: меняются ее **радиус**, **светимость** и **температура** поверхности – звезда перемещается по диаграмме вдоль своего эволюционного трека.
- Казалось бы, изменения трех параметров — радиуса, светимости и температуры – можно проследить только на трехмерной диаграмме, но это не так.
- Используя связь между L , R и T_{eff} , можно на двумерной диаграмме, демонстрирующей параметры L и T_{eff} , изобразить и параметр R , например линиями, соответствующими разным радиусам, по которым легко проследить эволюцию размера звезды.



- Эволюционный трек звезды с массой $1M_{\odot}$.
- Кривая **1** – сжатие на стадии протозвезды; на начальном этапе она окутана пылевой оболочкой и в оптическом диапазоне не видна;
- Кривая **2** – расширение на стадии красного гиганта. **В** точке **А** в ядре звезды начинаются реакции горения водорода; в точке **В** горение перемещается в слой над ядром, а само гелиевое ядро начинает сжиматься.
- Между точками **А** и **В** звезда проводит 80% своей жизни.

Возраст звезд

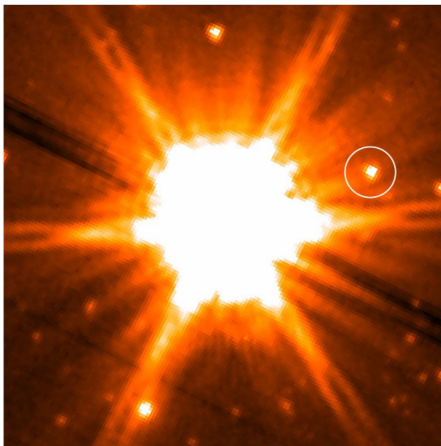
- Возраст звёзд оценивается из теории звёздной эволюции, чаще всего по положению на диаграмме ГР, поскольку оно меняется в течение жизни звезды.
- В нашей Галактике, как и в других галактиках, наблюдаются звезды самых различных возрастов – от находящихся ещё на стадии образования до старых звёзд с возрастом 10–14 млрд. лет.
- Возраст старых звёзд из-за их медленной эволюции оценивается с большой ошибкой (несколько млрд. лет).
- Возраст Солнца считается равным примерно 5 млрд. лет.

Возраст звезд

- Масса, химический состав и возраст определяют положение звезды на диаграмме ГР, а, следовательно, и такие характеристики звезд как эффективная температура T_{eff} и размер R .
- Размер одиночных звезд оценивается либо по закону Стефана-Больцмана ($L = 4\pi R^2 \sigma B T_{eff}^4$, где L – болометрическая светимость звезды), либо на основании прямых интерферометрических измерений угловых размеров (только для близких звезд).
- Для некоторых звезд удастся оценить размер по анализу интерференционной картины изменения по тока при их затмении диском Луны. В затменных двойных системах размер компонентов может быть определен по форме кривой блеска.

Коричневые карлики ($M < 0.08M_{\odot}$)

Коричневые карлики

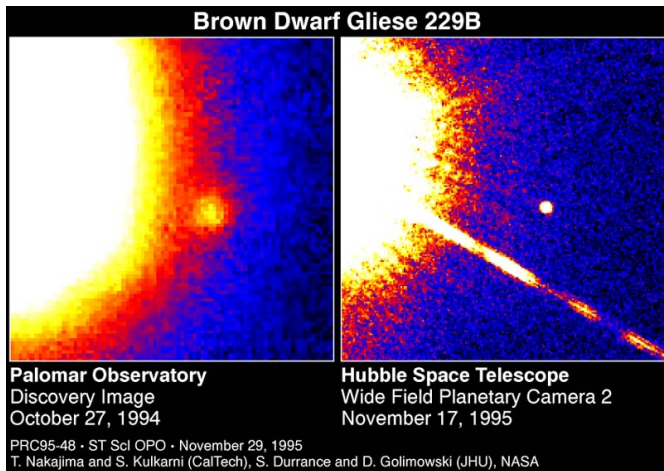


Метановый коричневый карлик *54 Рыб В* в двойной системе с оранжевым карликом *54 Рыб А* (спектральный класс $K0V$).

Масса порядка 50 масс Юпитера, температура поверхности варьируется в пределах $500 \div 600$ °С.

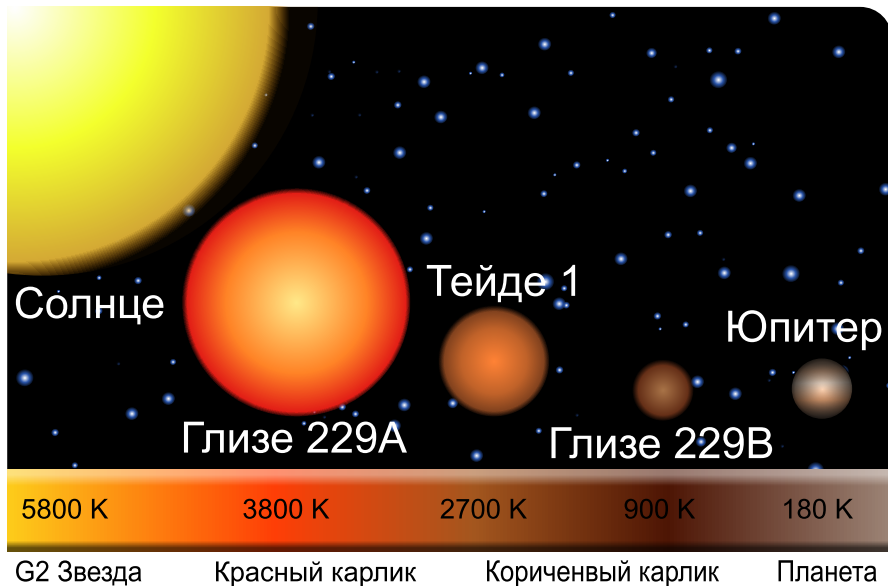
Его возраст составляет $1 \div 10$ миллиардов лет.

Коричневые карлики

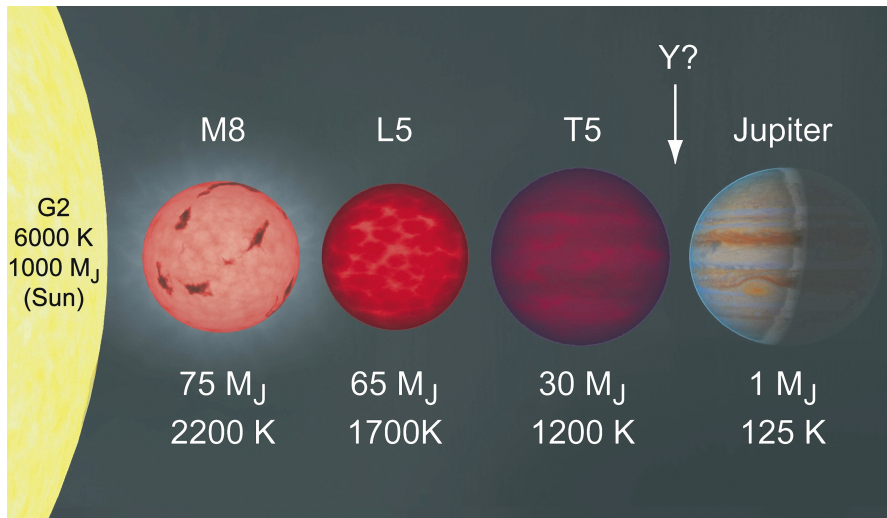


Коричневый карлик *Gliese 229B*, вращающийся вокруг звезды *Gliese 229* и имеющий массу от 20 до 75 масс Юпитера.

Коричневые карлики



Коричневые карлики. Спектр



Для коричневых карликов были выделены специальные спектральные классы: L и T.

Коричневые карлики. Спектральные классы

○ **Спектральный класс M**

Коричневые карлики с близкой массой к красным карликам на ранних стадиях после формирования могут иметь спектральный класс M6.5 или тусклее. Имеются полосы поглощения таких соединений, как оксид титана (II) и оксид ванадия (II).

○ **Спектральный класс L**

В красном оптическом спектре линии оксидов титана и ванадия всё ещё сильны, но также есть сильные линии гидридов металлов, например FeH, CrH, MgH, CaH, а также линии щелочных металлов и йода.

○ **Спектральный класс T**

Доминируют линии метана, а также наблюдаются спектры щелочных металлов – натрия и калия.

○ **Спектральный класс Y**

Коричневые карлики. Спектральный класс Y

- Ультра-холодные коричневые карлики ($T < 400 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Находится на расстоянии около 47 св. лет (14 парсек) от Солнца.
- Относится к спектральному классу Y2. Температура $250 \div 400^\circ\text{K}$ ($-23 \div +127 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Является одним из ближайших соседей Солнечной системы.
- Был обнаружен космическим телескопом WISE.



WISE 1828+2650 – коричневый карлик в созвездии Лиры.

Коричневые карлики. Отличия от звёзд

- Коричневые карлики, в отличие от звёзд с малой массой, содержат **литий**.
- Поскольку в отличие от звёзд они не имеют достаточную температуру для зажигания термоядерной реакции с его участием.
- За долгое время своего существования коричневые карлики успевают накопить в своей атмосфере заметное количество **метана**.
- Коричневые карлики **остывают и тускнеют постепенно** на протяжении **всего** своего жизненного цикла. Достаточно старые карлики становятся слишком тусклыми, чтобы считаться звёздами.

Коричневые карлики. Отличия от планет

- Радиусы коричневых карликов различаются всего на 10–15% для всего диапазона масс.
- Многие коричневые карлики не способны поддерживать термоядерные реакции.
 - Лёгкие (до $20 M_J$) – слишком холодны, и в них невозможны даже реакции с участием дейтерия.
 - Более тяжёлые могут поддерживать реакции с дейтерием и литием на протяжении 10 миллионов лет.
 - В самых тяжёлых коричневых карликах (массой $> 70 M_J$) могут временно происходить возгорание водорода на протяжении от 1 до 10 миллиардов лет.
- Все коричневые карлики имеют приблизительно одинаковый радиус и объём. Поэтому объект с массой более $10 M_J$ скорее всего не является планетой.
- Некоторые коричневые карлики излучают в рентгеновском диапазоне. Все «тёплые» карлики излучают в красном и инфракрасном диапазонах, пока не остынут до температуры, сопоставимой с планетарной (до $1000 \text{ }^\circ\text{K}$).

Коричневые карлики

Тип объекта	Масса (M_{\odot})	Термоядерный синтез		Наличие	
		H→He	D→He	Li	D
Красные карлики	0.1 ÷ 0.075	Длительный	Непродолжительный	Нет	Нет
Коричневые карлики	0.075 ÷ 0.065	Непродолжительный	Непродолжительный	Есть	Нет
Коричневые карлики	0.065 ÷ 0.013	Нет	Непродолжительный	Есть	Нет
Планеты	< 0.013	Нет	Нет	Есть	Есть

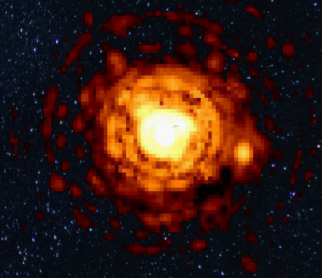
Коричневые карлики

- В марте 2017 года был обнаружен самый массивный ($M > 90M_J$) из известных коричневых карликов – SDSS J0104+1535.
- Он также является коричневым карликом с самой низкой металличностью. Карлик на 99.99% состоит из водорода и гелия, что делает его примерно в 250 раз чище Солнца.
- Возраст SDSS J0104+1535 составляет около 10 миллиардов лет, то есть это очень старый объект, сформировавшимся почти одновременно с самой Галактикой.



Красные карлики ($M = 0.08 \div 0.5M_{\odot}$)

Красные карлики

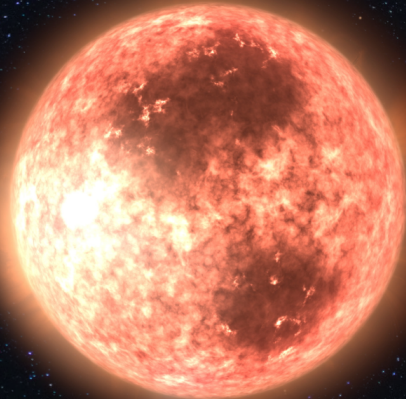


Gliese 623b

PR94-54 - ST ScI CPO - December 1996 - C. Barbieri (U. Padua), NASA/ESA

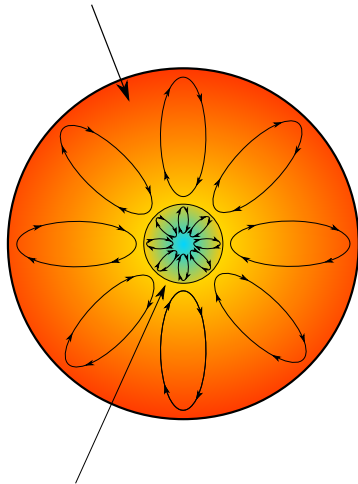
HST · FOC

12/20/94 zgl



Красные карлики

- В звёздах с массой $M = 0.08 \div 0.5M_{\odot}$ возможно горение водорода в ядре (pp-цикл). **Конвективная оболочка**
- Малая масса приводит к низкой температуре. T_{eff} от примерно 2300 до 3800 градусов.
- Из-за низкой температура термоядерные реакции идут медленно, а гелий не горит вовсе.
- Относительно высокая плотность и низкая температура приводя к высокой непрозрачности вещества для излучения.
- Перенос энергии осуществляется посредством конвекции во всём объёме звезды.
- За счёт конвекции гелий из ядра непрерывно выносится наружу, а водород наоборот.
- Из-за этого горение водорода идёт очень долго (больше возраста Вселенной).



Красные карлики

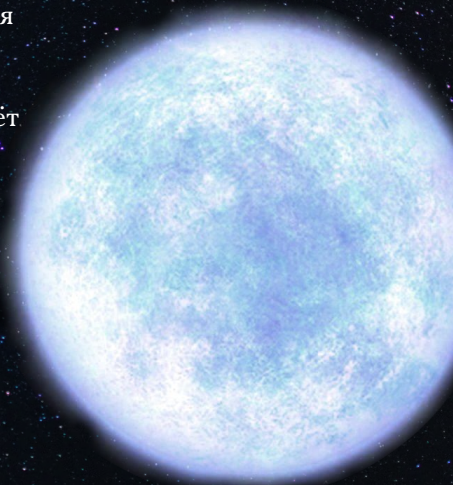
- Наблюдается неожиданно малое число КК без металлов.
- Исходя из теории БВ можно было бы ожидать наличие большого числа КК сотворённых из первичной материи (водород и гелий).
- Предполагается, что ранняя протозвезда с малой массой, лишённая металлов, не в состоянии «зажечься» и вынуждена оставаться газовым облаком до тех пор, пока не получит больше материи.

Красные карлики

- Наблюдается неожиданно малое число КК без металлов.
- Исходя из теории БВ можно было бы ожидать наличие большого числа КК сотворённых из первичной материи (водород и гелий).
- Предполагается, что ранняя протозвезда с малой массой, лишённая металлов, не в состоянии «зажечься» и вынуждена оставаться газовым облаком до тех пор, пока не получит больше материи.
- Большая длительность жизни КК благоприятна для развития сложной жизни на их планетах.
- Однако такие планеты должны располагаться очень близко к звезде, что может привести к тому, что планета всегда будет обращена к звезде одной стороной.
- Тогда на одной стороне будет очень жарко, а на другой очень холодно. В результате – сильные ветра.

Голубые карлики

- Сжигая водород звезда находится на Главной Последовательности.
- По мере выгорания водорода идёт рост энерговыделения.
- Будучи химически однородными из-за конвекции и имея изначально низкую температуру фотосферы, красные карлики не увеличивают свой радиус, а увеличивают температуру поверхности.
- Звезда становится голубым карликом.



Белые карлики

- В определённый момент водород заканчивается, а температура недостаточна для зажигания гелия.
- Ядерные реакции затухают, давление падает и звезда начинает сжиматься, превращаясь в гелиевый белый карлик.
- Ни один красный карлик ещё не могу успеть дойти до этой стадии.

