

# Образование и эволюция звезд и планет

# Состав звезд

- Большинство звезд состоит в основном из водорода (60...90%) и гелия (10...40%) и тяжелых элементов (0.1...3%). Такие звезды называются **звездами населения 1**.
- Тяжелые элементы образуются при вспышках т.н. **НОВЫХ** звезд или при взрывах **сверхновых**.
- Наше Солнце с 74% водорода, 24% гелия и 2% тяжелых элементов - звезда населения 1.
- **Звезды населения 2** образуются в основном из первичного водорода и гелия и содержат очень мало тяжелых элементов.

# Термоядерные реакции

- Процесс конденсации межзвездной пыли сопровождается освобождением энергии частиц и соответствующим увеличением температуры. При температурах  $\sim 10^7$  К и плотности  $100 \text{ г/см}^3$  начинаются термоядерные реакции.
- **Протон-протонная цепочка** (выделяется  $\sim 27$  МэВ).
  - $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$
  - $d + p \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$
  - ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + p + p$
  - Является основным источником энергии Солнца (ежесекундно выделяется  $\sim 4 \cdot 10^{26}$  Вт).

# Термоядерные реакции

- Если в звезде имеется некоторое количество углерода, то может осуществляться еще одна цепочка реакций, в результате чего также происходит превращение четырех ядер водорода в гелий, а углерод служит катализатором - **углеродно-азотным циклом**. Такие звезды более массивные и яркие - Сириус, одна из самых ярких звезд Северного полушария.
- Термоядерные реакции, протекающие внутри звезд, сопровождаются испусканием  $\gamma$ -квантов (ЭМ излучение), которые оказывают радиационное давление. Когда давление, обусловленное гравитацией, уравновешивается радиационным давлением, сжатие звезды прекращается.

# Характеристики звезд

## Собственная

### светимость и цвет.

Звезду можно изобразить точкой, которая движется по мере жизни и угасания звезды. Более массивные оказываются более горячими и яркими, а менее массивные – холодными и тусклыми. Для стабильных звезд диаграмма светимость-цвет образует

т.н. **главную**

**последовательность.**

112

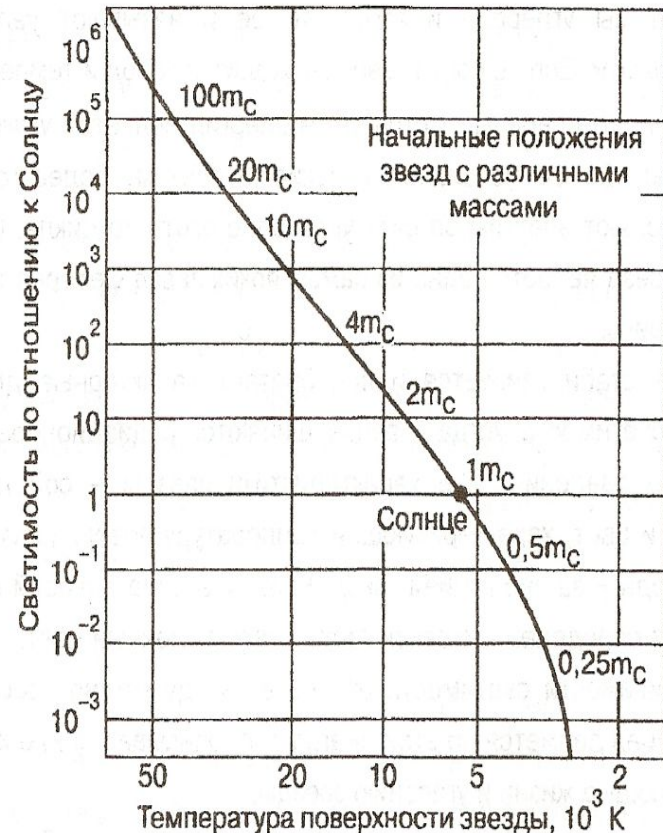


Рис. 16. Главная последовательность звезд населения I, к которым относится Солнце (масса Солнца обозначена  $m_{\odot}$ )

# Эволюция звезд

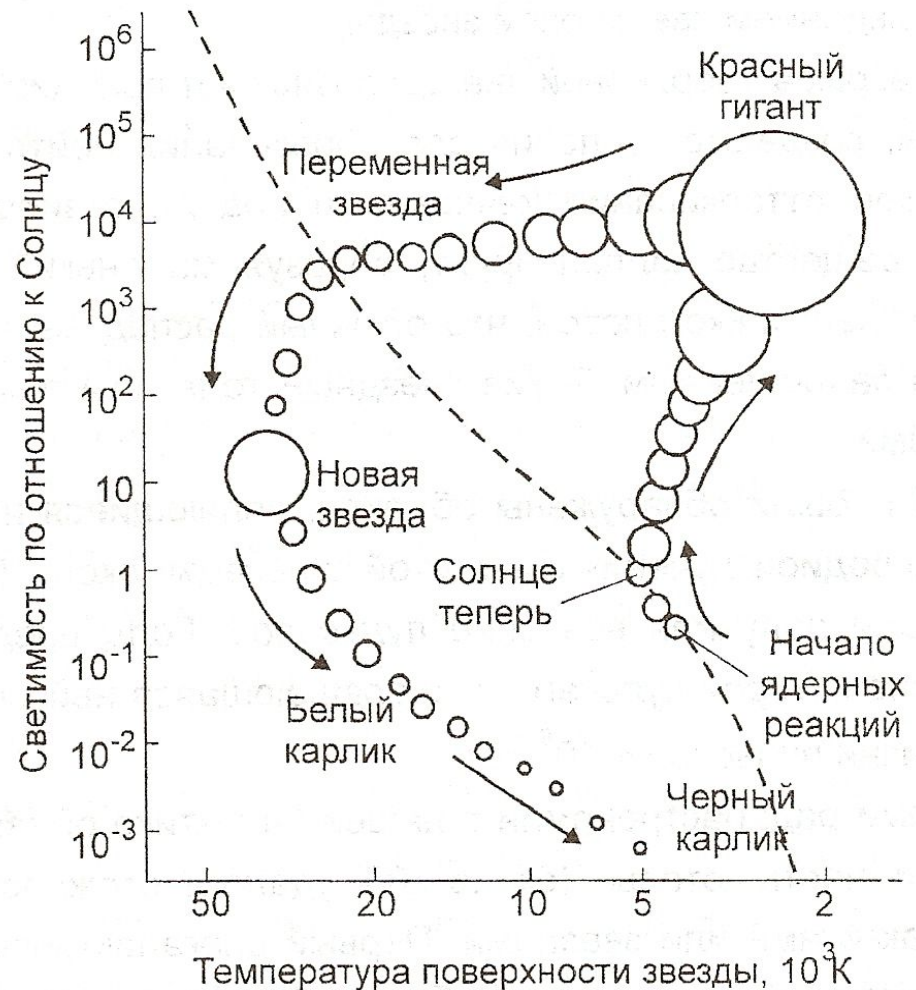
- По мере уменьшения количества водорода внутри звезды она сжимается. Это приводит к **увеличению температуры и началу выгорания гелия.**
- При превращении гелия в углерод выделяется большое количество энергии, что приводит к **увеличению радиационного давления. Внешние слои звезды расширяются.**
- **Температура падает, излучаемый свет становится более красным,** и звезда смещается вправо от главной последовательности. Этот процесс расширения идет до тех пор, пока диаметр звезды не увеличится в 200-300 раз, и звезда становится **красным гигантом.**

# Эволюция звезд

- Эволюция нашего **Солнца** к стадии **красного гиганта** приведет к тому, что оно сначала сожжет Землю из-за огромного количества выделившейся энергии, а затем в результате расширения поглотит ее останки. По расчетам астрономов до этого момента пройдет около **5 млрд лет**.
- Время пребывания обычной звезды в стадии красного гиганта составляет около  $10^7$  лет. Достигнув на этой стадии максимальных размеров, звезда быстро смещается влево на диаграмме светимость-цвет. В этот период у большинства звезд нарушается равновесие, и они начинают пульсировать, изменяя свою светимость. Далее эволюция идет в зависимости от массы звезды.

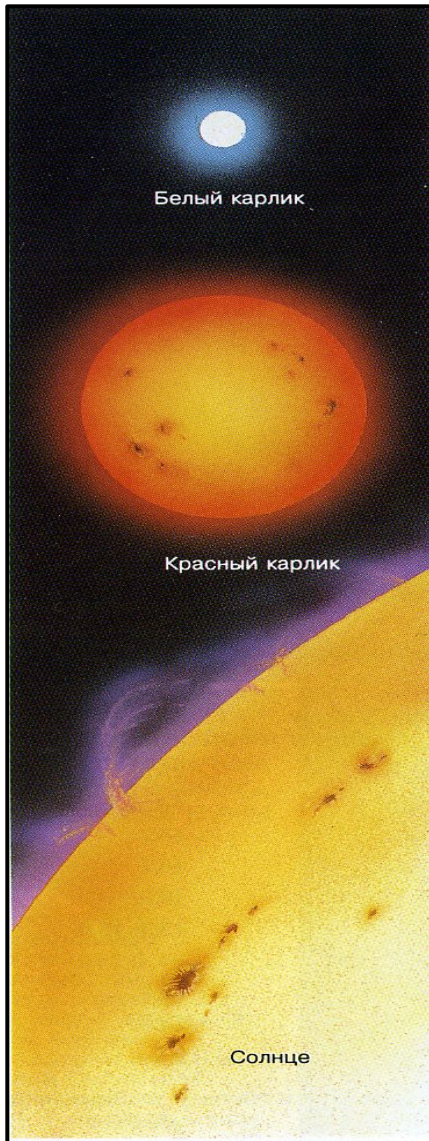
# Эволюция звезд

Если масса меньше 1.4 солнечной массы, то израсходовав ядерное топливо, звезда охлаждается и в конце концов угасает. При этом она проходит через стадию неустойчивости, во время которой происходит периодическое возрастание светимости. Резкое возрастание светимости фиксируется как рождение **НОВОЙ ЗВЕЗДЫ**. Далее стадия «новой» звезды переходит в стадию **БЕЛОГО КАРЛИКА**, затем, после дальнейшего охлаждения – в стадию **КРАСНОГО КАРЛИКА**, и наконец – в **ЧЕРНОГО КАРЛИКА**.





# Эволюция звезд



Размер  
Солнца в  
сравнении  
с  
размерами  
красного  
и белого  
карликов



Размер  
Солнца в  
сравнении  
с  
размерами  
красного и  
белого  
гигантов

# Эволюция звезд

- Эволюция звезды, масса которой больше 1.4 массы Солнца, кончается эффектным взрывом, и это считается рождением **сверхновой звезды**.
- После взрыва сверхновой возникают высокие давления и температуры, создаются условия для образования нейтронов.
- Поскольку для нейтроном электростатическое отталкивание отсутствует, под действием тяготения нейтронное вещество коллапсирует, образуя маленький сверхплотный шар. Плотность в нем столь велика, что распад нейтрона оказывается запрещенным. Такие звездные тела называются **нейтронными звездами**.

# Рождение сверхновой

Сверхновая 1987А  
в Большом  
Магеллановом  
Облаке  
расположена там,  
где на старых  
фотографиях была  
лишь звёздочка  
12-ой величины.



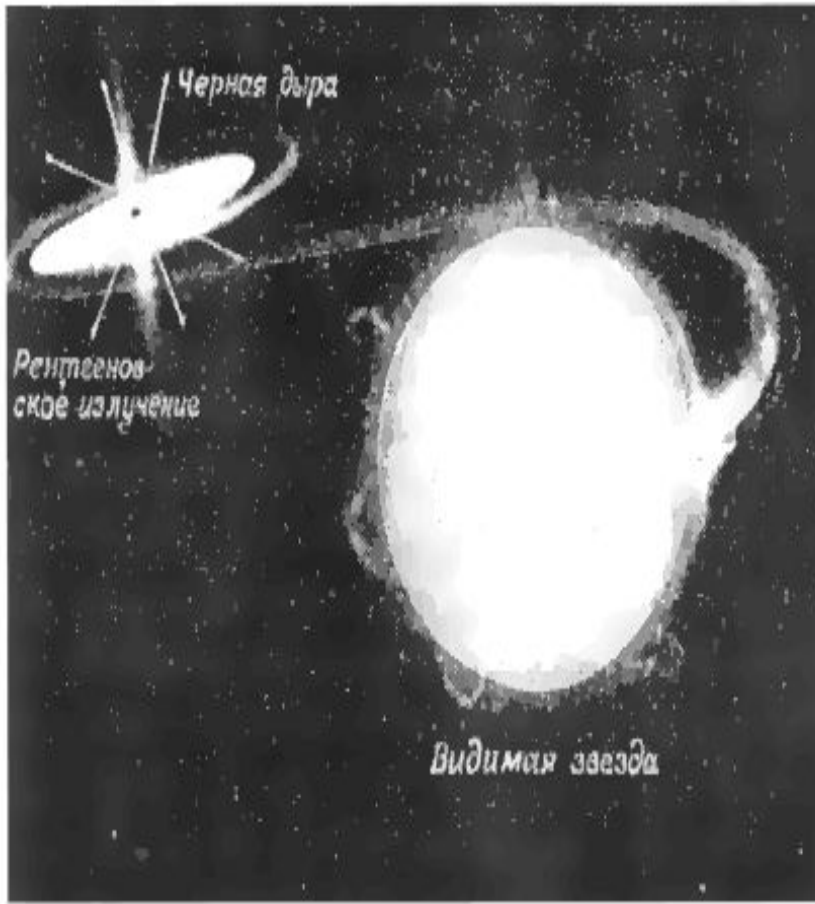
# Эволюция звезд

- В 1968 г. были обнаружены объекты, являющиеся источником переменного радиоизлучения с частотой пульсации около 1 Гц. Они получили название **пульсаров**. Голд предложил модель, согласно которой пульсар – это вращающаяся нейтронная звезда. Время жизни пульсара  $\sim 10^8$  лет.
- В начале 60-х годов были обнаружены радиоисточники, связанные с объектами голубого цвета, напоминающими звезды. Их называли квазизвездами, или **квазарами**. Происхождение и строение квазаров в настоящее время неясно. Установлено, что для них характерно сильное красное смещение, следовательно можно предположить, что квазары – наиболее удаленные и быстро движущиеся объекты во вселенной.

# Эволюция звезд

- До 90% вещества Вселенной - «скрытая» масса.
- Американский физик Уиллер в 1969 г. предложил термин **черная дыра** для космического объекта со скрытой массой.
- ЧД возникает в результате сжатия космического объекта, если его масса превышает массу Солнца в три раза. Звезда превращается в ЧД с радиусом примерно 3 км.
- Никакой природный объект не может выйти за пределы ЧД. У нее такое большое гравитационное поле, что даже ЭМ излучение не может ее покинуть.

# Эволюция звезд



- Видимая звезда обращается вокруг своего невидимого партнера. Некоторые из таких систем, например Лебедь X-1, являются еще и мощными источниками рентгеновского излучения.
- С поверхности видимой звезды "сдувается" вещество, которое падает на вторую, невидимую звезду, вращаясь по спирали и, сильно разогреваясь, испускает рентгеновское излучение.

# Эволюция звезд

- Существование ЧД можно описать в рамках ОТО, позволяющей для любого объекта, имеющего массу, рассчитать т.н. **гравитационный радиус**, или радиус сферы Шварцшильда.
- ЧД искривляет пространство и тормозит время. На расстоянии гравитационного радиуса время полностью останавливается с точки зрения удаленного наблюдателя.
- В 1975 г. С.Хокинг показал, что гравитационное поле вблизи поверхности ЧД рождает из вакуума пары частиц, одна из которых захватывается ЧД, а другая улетает в окружающее пространство, т.е. ЧД постепенно рассеивается в космическом пространстве - **круговорот материи во Вселенной.**

# Эволюция Солнечной системы

Солнечная система включает в себя:

- центральное тело (Солнце),
- группу ближайших к нему планет (Меркурий, Венера, Земля, Марс),
- астероидный пояс из десятков тысяч более удаленных мелких планет (астероидов),
- группу внешних планет (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун),
- Плутон, который недавно был признан не планетой, а астероидом,
- около 90 спутников планет, неопределенного числа комет и межзвездную среду в виде плазмы, космической пыли, ЭМ излучения и потоков элементарных частиц.





# Эволюция Солнечной системы

- Наше **Солнце**- типичная звезда-карлик ( $d=1391$  тыс км,  $M=1.989 \cdot 10^{30}$  кг) спектрального класса G-2 ( $T=5800$  К,  $L=3.88 \cdot 10^{26}$  Вт)– светящийся газовый шар, не имеющий четкой границы, плотность его убывает постепенно, но благодаря фотосфере создается иллюзия, что Солнце имеет поверхность.
- Источник солнечной энергии – термоядерные реакции. Энергия из недр переносится излучением, а в тонком внешнем слое – конвекцией.
- С конвективным движением связано существование т.н. **солнечных пятен**. Регулярные наблюдения за пятнами на Солнце ведутся с 1610 г. – изобретения телескопа.

# Эволюция Солнечной системы

- Известны 11-летние циклы солнечной активности. Периоды высокой и низкой солнечной активности совпадают с изменением земного климата. За весь охваченный исследованиями период **Солнце никогда не было таким активным, как за последние 60 лет.**
- Большая часть светового потока Солнца испускается фотосферой в виде **ЭМ излучения** видимого и инфракрасного диапазона. Над фотосферой расположена **корона Солнца** – самая нестабильная оболочка Солнца. Горячая плазма, истекающая из короны, формирует **солнечный ветер** – поток ионов (90% - протоны, 4% - альфа-частицы) и электронов. Скорость солнечного ветра 800-900 км/с. Солнечный ветер и магнитное поле заполняют собой всю солнечную систему. Земля и другие планеты находятся фактически в короне Солнца.

# Солнце

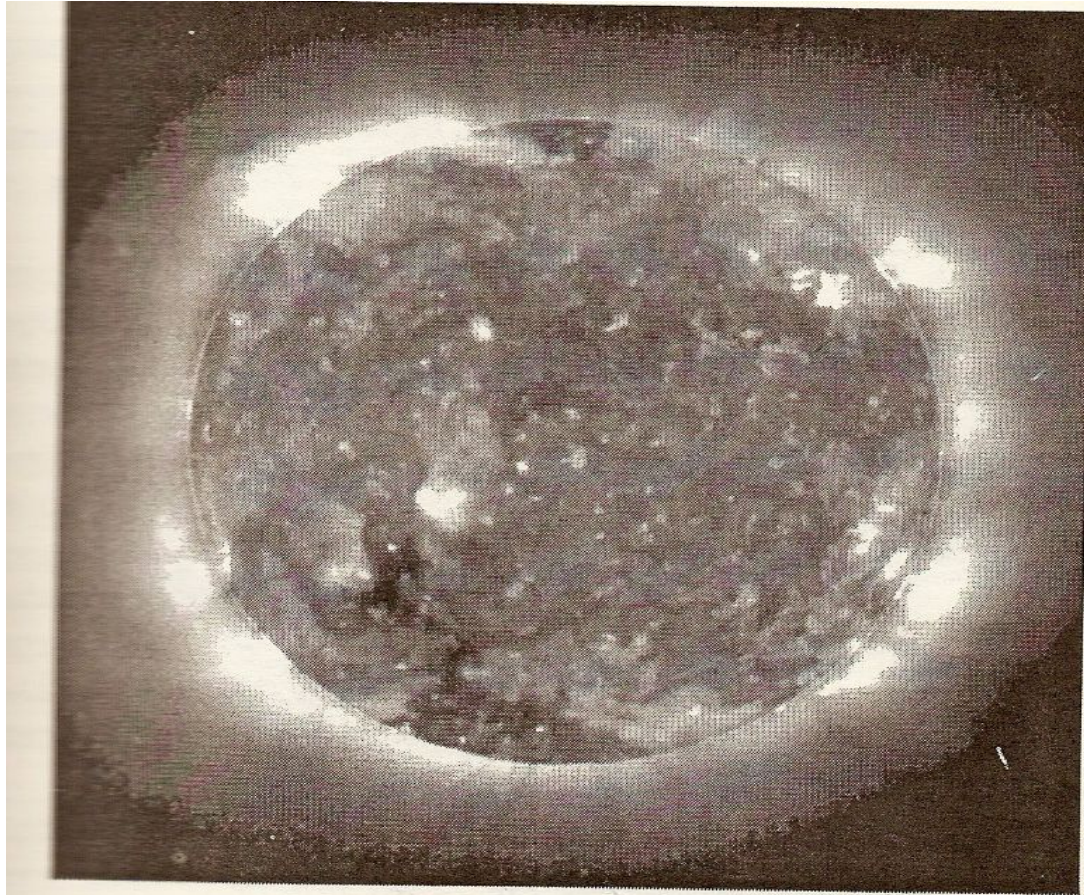
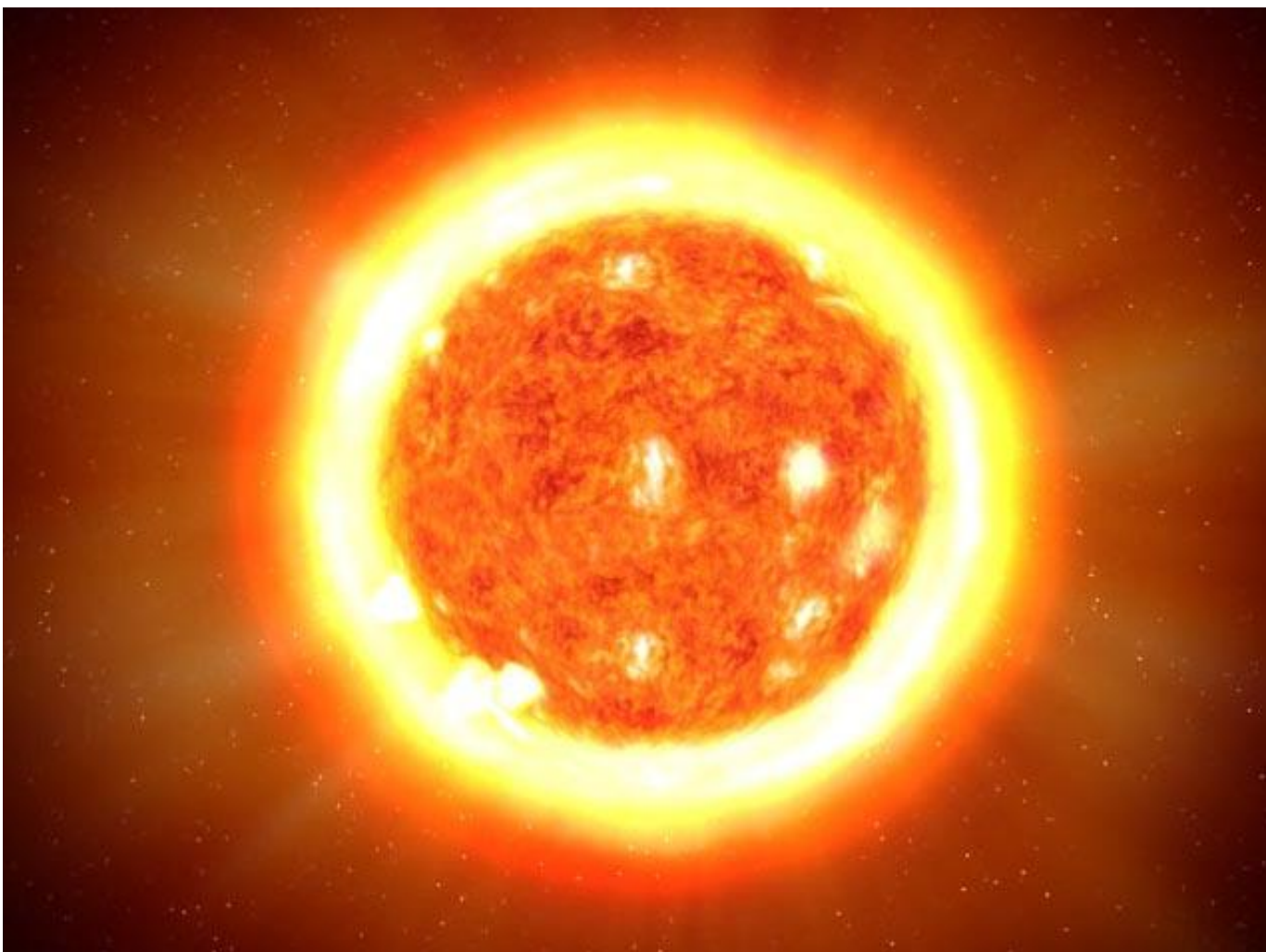


Рис. П2.9. Изображение Солнца, полученное в ультрафиолетовом излучении западноевропейским космическим телескопом SOHO EIT 5 марта 1998 г. Темные области — корональные дыры

# Солнце



# Эволюция Солнечной системы

- Суммарная масса планет составляет примерно  $1/743$  массы Солнца.
- Орбиты планет лежат примерно в одной плоскости. Все планеты кроме Венеры вращаются с запада на восток, Венера вращается в противоположном направлении.
- Планеты заметно отличаются по составу: гигантские внешние планеты содержат больше водорода, гелия, воды, метана, внутренние – больше тяжелых элементов. Как правило, по мере удаления от Солнца содержание компонент убывает по ряду: Fe, Ni  $\square$  O, Si, Mg  $\square$  H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>.
- Состав метеоритов отражает состав остальных тел Солнечной системы. В метеоритах обнаружено около 100 различных минералов, 80 из них встречается на Земле. Преобладают каменные метеориты.

# Эволюция Солнечной системы

- Наличие в составе тел Солнечной системы, помимо **водорода и гелия, тяжелых элементов** свидетельствует о том, что протопланетная среда возникла в результате **взрыва сверхновой**.
- Первичная туманность участвует в общем вращении с Галактикой. При определенных условиях вращения, фрагменты первичной туманности могут сжиматься до образования одиночных устойчивых звезд типа Солнца.
- В процессе эволюции каждой такой звезды вокруг нее формируется газопылевой диск. За примерно  $10^6$  лет центр диска превращается в относительно медленно вращающееся Солнце с массой  $\sim 2 \cdot 10^{30}$  кг, а быстро вращающаяся внешняя часть диска позднее превращается в систему планет, их спутников и астероидов с общей массой  $\sim 0.1$  массы Солнца.
- Близость состава тел солнечной системы, движение этих тел по схожим орбитам указывает на общность формирования всей Солнечной системы.

# Эволюция Солнечной системы

- **Астероиды и кометы** представляют собой остатки роя допланетных тел. Крупнейшие **астероиды** ( $> 100$  км) образовались еще до образования планет, а мелкие и средние образовались при столкновении и разрушении крупных. Происхождение **комет** связано с влиянием ближайших звезд на наиболее удаленные малые тела планетной системы, что еще больше смещало эти тела и вытягивало их орбиты.
- Система спутников планет образовалась примерно по той же схеме, что и планетная система в целом. Исключение составляют спутники, вращающиеся в противоположном направлении. Таких спутников крайне мало, они есть только у Юпитера, Сатурна и Нептуна. Их происхождение связано с захватом планетами пролетавших рядом малых небесных тел.
- Земля каждые сутки захватывает примерно 260 000 т метеоритного вещества.

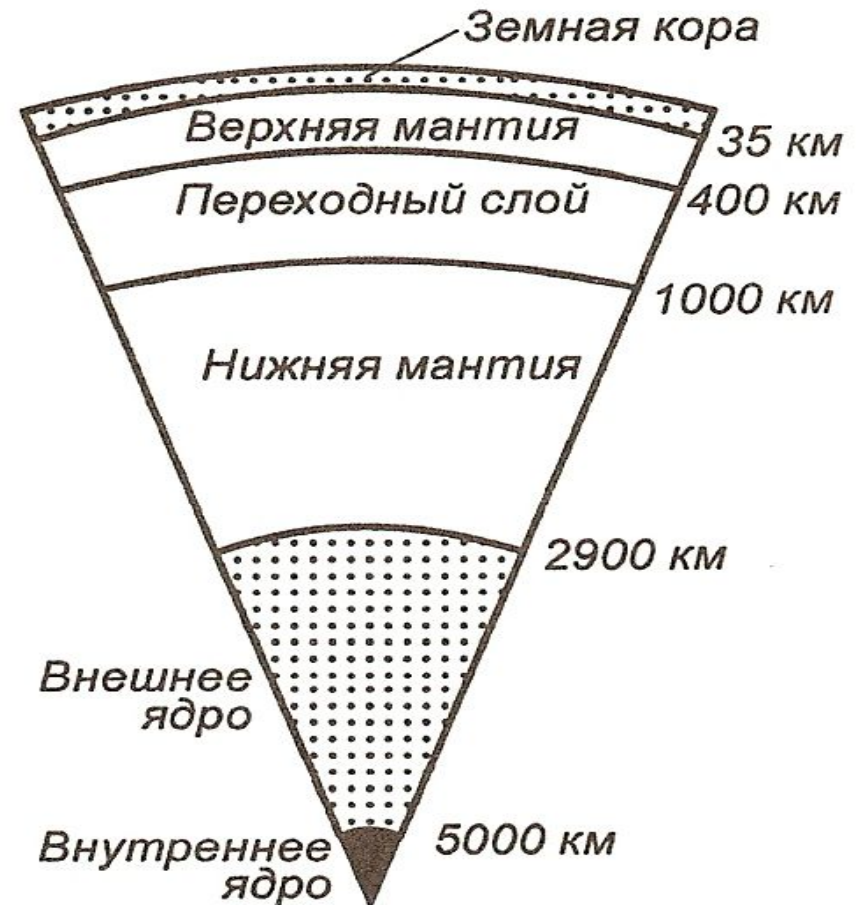


# Эволюция Земли

( $M=6 \cdot 10^{24}$  кг,  $R=6.37$  тыс км)

## Модель земных недр:

- Твердая земная кора толщиной 30-60 км на континентах и 3-17 км в океанах;
- Мантия, достигающая глубины 3000 км;
- Ядро земли, внешняя часть которого жидкая (до глубины 5000 км), а внутренняя часть радиусом  $\sim 1500$  км – предположительно твердая.



# Эволюция Земли

- В эволюции формы Земли основную роль играла сферическая симметрия гравитационного поля. Из-за вращения и других причин Земля не является точной сферой, а ближе к **эллипсоиду вращения**.
- В ранний период образования протопланеты сперва конденсировались **тяжелые частицы**, образуя ядро, а затем на него оседали более легкие конденсаты в виде **силикатов**, постепенно образуя **мантию** планеты.
- Жидкая фаза в недрах Земли присутствует до сих пор, что подтверждается выбросами лавы при извержении вулканов.

# Эволюция Земли

- Земная кора вместе с подстилающим ее слоем мантии образует **литосферу**. Литосфера «плавает» на верхнем слое мантии, называемом **астеносферой**.
- Подстилающие земную кору слои пластичны и подвижны. В этих слоях имеют место горизонтальных и вертикальные перемещения вещества мантии, приводящие к разломам в земной коре, ее делению на фрагменты, к их взаимному перемещению и погружению в мантию. Такие фрагменты называются **литосферными плитами**. По линиям разломов имеет место вулканическая активность.

# Эволюция Земли

На всех этапах эволюции Земли происходила дегазация твердого и жидкого материала, в результате чего возникла **первичная атмосфера**. Из нее конденсировалась вода – возникла **гидросфера**.

Атмосферу можно разделить на несколько слоев:

- **Тропосфера** (высота 8-17 км) обеспечивает круговорот воды в природе;
- **Стратосфера** (до 55 км) содержит повышенную концентрацию озона, защищающего все живое от действия ультрафиолетовых лучей;
- **Ионосфера** (выше 55 км) защищает от космического излучения и отражает радиоволны, обеспечивая глобальную радиосвязь.

# Эволюция Земли

- Первичная атмосфера была обогащена углекислым газом. Глобальное изменение атмосферы наступило около 2 млрд лет назад и связано с фотосинтезирующей деятельностью растений. В результате атмосфера обогатилась кислородом и стабилизировалась по составу, что в сочетании с прочими благоприятными условиями обеспечило возможность возникновения и развития разнообразных форм жизни на Земле.
- Для жизни наиболее важна та часть Земли, в которой обитают живые существа, т.е. **биосфера**. Она включает в себя все живое, гидросферу, те области литосферы и атмосферы, в которых обнаруживается жизнь.

# Эволюция Земли

**Источником нагрева Земли являлись:**

- солнечное излучение,
- гравитационное сжатие,
- распад радиоактивных изотопов,
- удары захватываемых Землей космических тел.

Последние источники были особенно важны на ранних стадиях формирования Земли. Наиболее мощным и распределенным по всему объему планеты было выделение энергии радиоактивного распада короткоживущих радиоактивных изотопов, почти исчезнувших к настоящему времени.

- Солнечное излучение нагревает только тонкий поверхностный слой планеты.

# Солнечно-земные связи

После вспышки на Солнце:

- через 8 минут – ЭМ излучение;
- начиная с 10.5 минут – солнечные космические лучи;
- через 1-2 суток ударная волна магнитного поля – магнитная буря.

Последствия:

- Ионизация верхних слоев атмосферы, разрушение озонового слоя, ухудшение радиосвязи, радиационная опасность.
- А.Л.Чижевский в 1915 г. обратил внимание на циклическую связь между некоторыми эпидемиями и образованием солнечных пятен.
- Влияние на процессы в биосфере Земли (динамика популяции животных, эпидемии, эпизоотии, количество сердечно-сосудистых кризов и т.д.)

# Солнечно-земные связи





# Эволюция Солнечной системы

- На примере образования Солнечной системы видно, как **в сложной открытой материальной системе** из вещества в элементарной форме и хаотизированном состоянии **самопроизвольно возникает упорядоченная сложная многоуровневая система** космических макротел, в которой при определенных условиях возникла еще более сложная самоорганизующаяся и самоподдерживающаяся система – живая материя.