## Тема урока № 13 :  Расстояние до звезд и способы его определения

[Для сравнительно близких звезд](https://college.ru/astronomy/course/content/chapterr/section2/paragraph6/theory.html), удаленных на расстояние, не превышающие нескольких десятков парсек, расстояние определяется по параллаксу способом, известным уже двести лет. При этом измеряют ничтожно малые угловые смещения звезд при их наблюдении с разных точек земной орбиты, то есть в разное время года.

Параллаксы даже самых близких звезд меньше 1". С понятием параллакса связано название одной из основных единиц в астрономии – ***парсек***. Парсек – это расстояние до воображаемой звезды, годичный параллакс которой равен 1":

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | https://college.ru/astronomy/course/content/javagifs/63230101939428-1.gif | |

где *R* – расстояние в парсеках, *p* – годичный параллакс в секундах.

1 парсек = 3,26 светового года = 206 265 астрономических единиц = 3,083•1015 м.

|  |
| --- |
|  |
|  |

Метод параллакса является на данный момент наиболее точным способом определения расстояний до звезд, однако он не применим к звездам, отстоящим от нас на расстояние больше, чем 300 пк. Слишком малые смещения положения звезд надо измерять – меньше одной сотой доли секунды дуги!

Расстояние до звезды можно получить и другим путем, например, по наблюдениям периода [цефеид](https://college.ru/astronomy/course/content/chapter6/section3/paragraph2/theory.html).

Расстояние до звезд можно оценить методом ***спектрального параллакса***. График зависимости отношения интенсивности определенных пар спектральных линий от абсолютной звездной величины звезд строится по интенсивности линий в спектрах тех звезд, расстояние до которых надежно определено. Поэтому по спектральным линиям можно оценить светимость звезды, а затем найти расстояние до нее.

***Пространственные скорости звезд и движение Солнечной системы.***

|  |  |
| --- | --- |
|  | Если известно собственное движение звезды m в секундах дуги за год (см. ; 91) и  расстояние до нее r в парсеках, то не трудно вычислить проекцию пространственной  скорости звезды на картинную плоскость. Эта проекция называется тангенциальной  скоростью Vt и вычисляется по формуле        (12.3)    Чтобы найти пространственную скорость V звезды, необхо&shy;димо знать ее лучевую  скорость Vr , которая определяется по доплеровскому смещению линий в спектре  звезды (; 107). По&shy;скольку Vr и Vt взаимно перпендикулярны, пространственная  скорость звезды равна        (12.4)    Знание собственных движений и лучевых скоростей звезд позволяет судить о  движениях звезд относительно Солнца, ко&shy;торое вместе с окружающими его планетами  также движется в пространстве. Поэтому наблюдаемые движения звезд складываются  из двух частей, из которых одна является следствием движения Солнца, а другая -  индивидуальным движением звезды.  Чтобы судить о движениях звезд, следует найти скорость движения Солнца и  исключить ее из наблюдае&shy;мых скоростей движения звезд.      Определим величину и направле&shy;ние скорости Солнца в пространстве. Та точка на  небесной сфере, к кото&shy;рой направлен вектор скорости Солнца, называется  солнечным апексом, а противоположная ей точка - антиапексом. Чтобы пояснить  прин&shy;цип, на основании которого находят положение солнечного апек&shy;са,  предположим, что все звезды, кроме Солнца, неподвижны. В этом случае наблюдаемые  собственные движения и лучевые скорости звезд будут вызваны только перемещением  Солнца, происходящим со скоростью VЅ ( 224). Рассмотрим какую-нибудь звезду  S, направление на которую составляет угол q с вектором VЅ. Поскольку мы  предположили, что все звезды не&shy;подвижны, то кажущееся относительно Солнца  движение звез&shy;ды S должно иметь скорость, равную по величине и противопо&shy;ложную  по направлению скорости Солнца, т.е. - VЅ. Эта ка&shy;жущаяся скорость имеет две  составляющие: одну - вдоль луча зрения, соответствующую лучевой скорости звезды        Vr = VЅcos q,(12.5)    и другую, - лежащую в картинной плоскости, соответствующую собственному движению   звезды,        Vt = VЅ sin q.(12.6)    Учитывая зависимость величины этих проекций от угла q, получим, что вследствие  движения Солнца в пространстве лу&shy;чевые скорости всех звезд, находящихся в  направлении движе&shy;ния Солнца, должны казаться меньше действительных на величину  VЅ. У звезд, находящихся в противоположном направле&shy;нии, наоборот, скорости  должны казаться больше на ту же ве&shy;личину. Лучевые скорости звезд, находящихся в  направлении, перпендикулярном к направлению движения Солнца, не изме&shy;няются.  Зато у них будут собственные движения, направленные к антиапексу и по величине  равные углу, под которым с рас&shy;стояния звезды виден вектор VЅ. По мере  приближения к апек&shy;су и антиапексу величина этого собственного движения  умень&shy;шается пропорционально sin q, вплоть до нуля.  В целом создается впечатление, что все звезды как бы убе&shy;гают в направлении к  антиапексу.  Таким образом, в случае, когда движется только Солнце, величину и направление  скорости его движения можно найти двумя способами: 1) измерив лучевые скорости  звезд, на&shy;ходящихся в разных направлениях, найти то направление, где лучевая  скорость имеет наибольшее отрицательное значение; в этом направлении и находится  апекс; скорость движения Солн&shy;ца в направлении апекса равна найденной  максимальной луче&shy;вой скорости; 2) измерив собственные движения звезд, найти на  небесной сфере общую точку, к которой все они направлены: противоположная ей  точка будет апексом; для определения величины скорости Солнца надо сначала  перевести угловое пе&shy;ремещение в линейную скорость, для чего необходимо выбрать  звезду с известным расстоянием, а затем найти VЅ по формуле (12.6).  Если теперь допустить, что не только Солнце, но и все дру&shy;гие звезды имеют  индивидуальные движения, то задача услож&shy;нится. Однако, рассматривая в данной  области неба большое количество звезд, можно считать, что в среднем  индивидуаль&shy;ные их движения должны скомпенсировать друг друга. Поэтому средние  значения собственных движений и лучевых скоростей для большого числа звезд  должны обнаруживать те же законо&shy;мерности, что и отдельные звезды в только что  рассмотренном случае движения одного только Солнца.  Описанным методом установлено, что апекс Солнечной си&shy;стемы находится в  созвездии Геркулеса и имеет прямое вос&shy;хождение a = 270ё и склонение d = +30ё. В  этом направлении Солнце движется со скоростью около 20 км/сек. |

**Тема урока № 14: ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЗВЕЗД**

Вы уже знаете, что звезды — это далекие солнца, по­этому, изучая природу звезд, мы будем сравнивать их физи­ческие характеристики с физическими характеристиками Солнца.

**1. Цвет и температура**звезд. Во время наблюдений звездного неба вы могли заметить, что *цвет звезд различен.*Подобно тому как по цвету раскаленного металла можно су­дить о его температуре, так цвет звезды свидетельствует о температуре ее фотосферы. Вы знаете, что между макси­мальной длиной волны излучения и температурой суще­ствует определенная зависимость (29). У различных звезд максимум излучения приходится на разные длины волн. Например, наше *Солнце*— *желтая звезда.*Такого же цвета *Капелла,*температура которой около 6000 К. Звезды, имеющие температуру 3500—4000 К, *красноватого цветка (Альдебаран).*Температура *красных звезд (Бетельгейзе)*примерно 3000 К. Самые холодные из известных в настоящее время звезд, имеют температуру менее 2000 К.  Такие звезды до­ступны наблюдениям в инфракрасной части спектра.

Известно много звезд более горячих, чем Солнце. К ним относятся, например, *белые звезды (Спика, Сириус, Вега).*Их температура порядка 104—2•104 К. Реже встречаются *го­лубовато-белые,*температура фотосферы которых 3•104— 5•104 К. В недрах звезд температура не менее 107К.

**2. Спектры и химический состав звезд.** Важнейшие све­дения о природе звезд астрономы получают, расшифровывая их спектры. Спектры большинства звезд, как и спектр Солнца, представляют собой *спектры поглощения:*на фоне непрерывного спектра видны темные линии.

Сходные между собой спектры звезд сгруппированы в семь основных *спектральных классов.*Они обозначаются прописными буквами латинского алфавита:

О — В — A — F — G — К — М

и располагаются в такой последовательности, что при пере­ходе слева направо цвет звезды меняется от близкого к го­лубому (класс О), белому (класс А), желтому (класс G), красному (класс М). Следовательно, в этом же направлении от класса к классу происходит убывание температуры звезд. Таким образом, последовательность спектральных клас­сов отражает различие цвета и температуры звезд. Внутри каждого класса существует разделение еще на десять под­классов. Например, спектральный класс F имеет такие под­классы:

F0 — F1 — F2 — F3 — F4 — F5 — F6 — F7 — F8 — F9.

Солнце относится к спектральному классу G2.

В основном атмосферы звезд имеют сходный химический состав: самыми распространенными элементами в них, как и на Солнце, оказались *водород*и *гелий. Разнообразие звезд­ных спектров объясняется, прежде всего тем, что звезды имеют разную температуру.*От температуры зависит физи­ческое состояние, в котором находятся атомы вещества в звездных атмосферах, и вид спектра. При невысоких темпе­ратурах (красные звезды) в атмосферах звезд могут суще­ствовать нейтральные атомы и даже простейшие молеку­лярные соединения (С2,CN, TiO, ZrO и др.). В атмо­сферах очень горячих звезд преобладают ионизованные атомы.

Кроме температуры, вид спектра звезды определяется давлением и плотностью газа ее фотосферы, наличием маг­нитного поля, особенностями химического состава.

**3. Светимости звезд.** Звезды, как и Солнце, излучают энергию в диапазоне всех длин волн электромагнитных колебаний. Вы знаете, что светимость (*L*) характери­зует общую мощность излучения звезды и представляет одну из важнейших ее характеристик. Светимость пропорци­ональна площади поверхности (фотосферы) звезды (или ква­драту радиуса *R)*и четвертой степени эффективной темпера­туры фотосферы (*Т*) (см. формулы 26, 27), т. е.

http://astro.murclass.ru/Levitan/formuls/45.gif(45)

Формула, связывающая абсолютные звездные величины и светимости звезд, аналогична известному вам соотноше­нию между блеском звезды и ее видимой звездной величи­ной (39), т. е.

http://astro.murclass.ru/Levitan/formuls/46.gif(46)

где *Ll*и *L2* — светимости двух звезд, а М, и М2 - их абсолютные звездные величины.

Если в качестве одной из звезд выбрать Солнце, то

http://astro.murclass.ru/Levitan/formuls/46_1.gif(46')

где буквы без индексов относятся к любой звезде, а со значком http://astro.murclass.ru/Levitan/text/images/24_htm_eqn30361.gif — к Солнцу.

Принимая светимость Солнца за единицу (http://astro.murclass.ru/Levitan/text/images/24_htm_eqn30502.gif), получим:

http://astro.murclass.ru/Levitan/formuls/46_2.gif

или

http://astro.murclass.ru/Levitan/formuls/47.gif(47)

По формуле (47) можно вычислить светимость любой звезды, у которой известна абсолютная звездная величина.

**4. Радиусы звезд.** Используя самую современную тех­нику астрономических   наблюдений, удалось в настоящее время непосредственно измерить угловые диаметры (а по ним, зная расстояние, и линейные размеры) лишь несколь­ких звезд. В основном астрономы определяют радиусы звезд другими методами. Один из них дает формула (45). Если известна светимость *L*и эффективная температура *Т*звезды, то, используя формулу (45), можно вычислить *радиус звезды R, ее объем*и *площадь фотосферы.*

Определив радиусы многих звезд, астрономы убедились в том, что существуют звезды, размеры которых резко отличаются от размеров Солнца. Наибольшие размеры у сверхгигантов. Их радиусы в сотни раз превосходят радиус Солнца. Например, радиус звезды *w*Цефея при­мерно в 1200 раз превосходит солнечный. Звезды, радиусы которых в десятки раз превосходят радиус Солнца, назы­ваются гигантами. Звезды, по размерам близкие к Солнцу или меньшие, чем Солнце, относятся к карликам. Сре­ди карликов есть звезды, которые меньше Земли или да­же Луны. Открыты звезды и еще меньших размеров (см. [§ 26](http://astro.murclass.ru/Levitan/text/26.htm)).

**5. Массы звезд.***Масса звезды*— *одна из важнейших ее характеристик.*Массы звезд различны.  Однако,  в отличие от светимостей и размеров, массы звезд заключены в срав­нительно узких пределах: самые массивные звезды обычно лишь в десятки раз   превосходят Солнце, а наименьшие массы звезд порядка http://astro.murclass.ru/Levitan/text/images/24_htm_eqn31343.gif. Основной метод определения масс звезд дает исследование двойных звезд ([§ 26](http://astro.murclass.ru/Levitan/text/26.htm)); обнаружена зависимость между  *светимостью и  массой звезды*([§ 25](http://astro.murclass.ru/Levitan/text/25.htm)).

**6. Средние плотности звезд.** Так как размеры звезд раз­личаются значительно больше, чем их массы, то и средние плотности звезд сильно отличаются друг от друга. У ги­гантов и сверхгигантов плотность очень мала. Например, плотность Бетельгейзе около 10-3 кг/м3. Вместе с тем су­ществуют чрезвычайно плотные звезды. К ним относятся небольшие по размерам белые карлики (их цвет об­условлен высокой температурой). Например, плотность бе­лого карлика Сириус В более 4•107 кг/м3. В настоящее время известны значительно более плотные белые карлики (1010—1011 кг/м3). Огромные плотности белых карликов объясняются особыми свойствами вещества этих звезд, кото­рое представляет собой атомные ядра и оторванные от них электроны. Расстояния между атомными ядрами в веществе белых карликов должны быть в десятки и даже сотни раз меньше, чем в обычных твердых и жидких телах, с кото­рыми мы встречаемся в земных условиях. Агрегатное состо­яние, в котором находится это вещество, нельзя назвать ни жидким, ни твердым, так как атомы белых карликов разру­шены. Мало похоже это вещество на газ или плазму. И все-таки его принято считать «газом», учитывая, что рас­стояние между частицами даже в плотных белых карликах во много раз больше, чем сами ядра атомов или электроны.

**СВЯЗЬ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗВЕЗД**

**1. Диаграмма «спектр**— **светимость». В**начале нынеш­него века голландский астроном *Э. Герцшпрунг*(1873—1967) и американский астроном *Г. Рассел*(1877—1957) независимо друг от друга обнаружили, что существует связь между спектрами звезд и их светимостями. Эта зависимость, полу­ченная  путем  сопоставления  данных  наблюдений,  представлена диаграммой (рис. 83): по горизонтальной оси отложены *спектральные классы*(или *температуры) звезд,*а по вер­тикальной — *светимости*(или *абсолютные звездные вели­чины звезд).*

|  |
| --- |
| http://astro.murclass.ru/Levitan/img/83.bmp |
| **Рис. 83. Диаграмма «спектр-светимость».** |

Каждойзвезде соответствует точка диаграммы, получив­шей название диаграммы «спектр — светимость» или диаграммы Герцшпрунга — Рассела (Г — Р). Если бы спектральные классы и светимости звезд оказались незави­симыми физическими характеристиками, то в расположении точек на диаграмме не было бы закономерностей. Но точки на диаграмме группируются в пределах нескольких обла­стей, названных последовательностями. Подав­ляющее большинство звезд принадлежит *главной последова­тельности,*простирающейся от горячих сверхгигантов до хо­лодных красных карликов. Рассматривая главную последова­тельность, можно заметить, что, чем горячее относящиеся к ней звезды, тем большую светимость они имеют. Об­особленно от главной   последовательности  в  разных  частях диаграммы сгруппированы *гиганты,  сверхгиганты*и*белые карлики.*

Диаграмма «спектр — светимость» показывает, что звез­ды данного спектрального класса не могут иметь произволь­ную светимость и, наоборот, звезды с определенной свети­мостью не могут иметь любую температуру. Диаграмма «спектр — светимость» отражает важную *закономерность в мире звезд,*основываясь на которой астрономы исследуют эволюцию звезд ([§ 31](http://astro.murclass.ru/Levitan/text/31.htm)).

|  |
| --- |
| http://astro.murclass.ru/Levitan/img/84.gif |
| **Рис. 84. Диаграмма «масса-светимость».** |

**2.Соотношение «масса — светимость».**Существует связь между массой звезды и ее светимостью. Наглядное представление об этом дает диаграмма (рис. 84), по одной оси кото­рой отложены *массы звезд,*а по другой — их *светимости*(или *абсолютные звездные величины).*Из диаграммы видно, что, чем больше масса звезды, тем больше ее светимость. Светимость пропорциональна примерно четвертой степени массы звезды *(L~m4).*

**3\*. Вращение звезд различных спектральных классов.**Вы знаете, что наше Солнце вращается вокруг оси, причем его вращение легко обнаружить по перемещению деталей фотосферы (например, пятен). Рассмотреть какие-либо де­тали хотя бы на ближайших звездах почти невозможно даже в самые крупные современные телескопы. Однако, ана­лизируя спектры звезд, удалось на основе эффекта Доплера доказать, что звезды тоже вращаются вокруг осей, и опреде­лить   скорости вращения. Некоторые звезды (преимущественно относящиеся к спектральным классам О и В) враща­ются с очень большой скоростью, достигающей на экваторе 200—400км/с, т. е. в 100—200раз быстрее Солнца.

**Тема урока № 15: Двойные звезды**

Ученые утверждают, что двойные звезды составляют примерно половину всех звезд нашей галактики. Двойная звезда представляет собой систему, состоящую из двух объектов (звезд), связанных между собой гравитационными силами. Обе звезды, входящие в систему, вращаются вокруг общего центра их масс. Расстояния между звездами могу отличаться, равно как и масса этих звезд, а также их размеры. Обе звезды, входящие в гравитационную систему, могут иметь, как схожие, так и отличительные характеристики. Например, звезда А может иметь большую массу или размер, чем звезда В.

Двойные звезды помечают латинскими буквами традиционно. Обычно буквой «А» помечают более яркого и массивного компаньона. Буквой «В» — менее яркую и массивную звезду.

Ярким примером системы двойной звезды выступает ближайшая к нам звездная система – [Альфа Центавра](http://spacegid.com/zvezda-alfa-tsentavra-soyuz-tryoh.html) А и В. Она представляет собой целостную систему из двух звезд. Сама же Альфа Центавра состоит из трех компонентов. Если взглянуть на эту звезду, не прибегая к помощи различных оптических приборов, невооруженным глазом она будет визуально восприниматься, как одна звезда. Если посмотреть на нее через телескоп, то мы отчетливо увидим два, а то и три компонента этой системы. В качестве других примеров двойных звезд можно привести систему Бета Лиры, систему Бета Персея (Алголь), [Сириус](http://spacegid.com/sirius-samaya-yarkaya-zvezda-na-nochnom-nebe.html) и другие звезды.

**Происхождение и эволюция двойных звезд**

Происхождение и эволюция двойных звезд происходит, в принципе, по тому же сценарию, что и у обычных звезд. Однако есть некоторые нюансы, которые отличают происхождение и эволюцию двойных систем от происхождения и эволюции одиночных светил.

Эволюция тесной двойной системы в представлении художника

Как и одинарные звезды, двойные системы образуются под влиянием гравитационных сил из газопылевого облака. В современной астрономии существует три наиболее популярных теории образования двойных звезд. Первая из них связывает образование двойных систем с разделением на раннем этапе общего ядра протооблака, которое послужило материалом для возникновения двойной системы. Вторая теория связана с фрагментацией протозвездного диска, в результате чего могут появиться не только двойные, но и многократные системы звезд. Происходит фрагментация протозвездного диска на более позднем этапе, чем фрагментация ядра. Последняя теория гласит, что образование двойных звезд возможно путем динамических физико-химических процессов внутри протооблака, которое служит материалом для образования звезд.

**Введение.***Переменные звезды*— это звезды, блеск ко­торых изменяется. У одних переменных звезд *блеск изменя­ется периодически,*у других наблюдается *беспорядочное из­менение блеска.*К периодическим переменным звездам отно­сятся, например,   затменные переменные звезды, которые, как вы знаете, представляют собой двойные  системы. Од­нако, в отличие от них, известны десятки тысяч одиночных звезд, блеск которых меняется вследствие происходящих на них физических процессов.  Такие звезды называются *физи­ческими переменными.*Их открытие  и исследование позали, что многообразие звезд проявляется не только в том, что  звезды  отличаются  друг  от  друга массами, размерами, температурами, светимостями и спектрами, но и в том, что некоторые из этих физических характеристик не *остаются неизменными*у одних и тех же звезд.

**2.Цефеиды.***Цефеиды*— *это   весьма  распространенный и очень важный  тип физических переменных звезд.*Им присущи особенности звезды δ Цефея. Чем же замечательна эта звезда? Рассмотрим рисунок 86. На нем изображена *кривая блеска δ*Цефея, т. е. той звезды, которая стала «ро­доначальницей» цефеид. Из графика видно, что блеск δ Цефея  непрерывно изменяется с *периодом*5,4д и амплитудой *1т.*Блеск  возрастает быстрее,  чем  ослабевает после макси­мума. Форма  кривой все время  в точности повторяется. Значит, δ Цефея — *периодическая переменная звезда.*Суще­ствуют цефеиды с меньшими периодами (до нескольких ча­сов) и большими (до нескольких десятков суток).

Исследование спектров цефеид показывает, что вблизи максимума блеска фотосферы этих звезд приближаются к нам с наибольшей скоростью, а вблизи минимума — с наибольшей скоростью  удаляются  от  нас.  Это  следует  из  ана­лиза смещений линий в спектрах цефеид на основе эффекта Доплера.

С движением фотосферы звезды, а значит, и с измене­нием ее размеров мы встречаемся впервые. В самом деле, у Солнца и других подобных ему звезд размеры практически не меняются. Следовательно, в отличие от таких *стационарных звезд,*цефеиды — нестационарные звезды. *Цефеиды*— *это пульсирующие звезды, которые периодически раздува­ются и сжимаются.*В процессе пульсации цефеиды изменя­ется и температура ее фотосферы. Самую высокую темпера­туру звезда имеет в максимуме блеска.

Междупериодом пульсации долгопериодических цефеид и светимостью этих звезд существует зависимость, получив­шая название «период — светимость» (рис. 87). Если из наблюдений известен период изменения блеска це­феиды, то, пользуясь зависимостью «период — светимость», можно определить ее абсолютную звездную величину, а тогда по формуле (41) легко вычислить расстояние до цефе­иды, зная из наблюдений ее видимую звездную величину. Так как цефеиды относятся к звездам-гигантам и сверхги­гантам (т. е. тем, которые имеют огромные размеры и све­тимости), то они видны с больших расстояний. Обнаружи­вая цефеиды в далеких звездных системах, можно опреде­лять расстояние до этих систем.

Цефеиды не принадлежат к числу редко встречающихся звезд. Вероятно, многие звезды на протяжении своей жизни некоторое время бывают цефеидами. Поэтому изучение це­феид важно для понимания эволюции звезд.

**3\*. Другие физические переменные звезды.**Цефеиды — это лишь один из многочисленных типов физических пере­менных звезд. Первая переменная звезда была открыта в 1596 г. в созвездии Кита (Мира Кита, или Удивительная Кита). Это не цефеида. Ее колебания блеска происходят с периодом около 350д, причем блеск в максимуме достигает 3*m*, а в минимуме 9*т*(рис. 88). Впоследствии было открыто много других   *долгопериодических звезд*типа Миры Кита. Преимущественно это «холодные» звезды-гиганты спектраль­ного класса М. Изменение блеска таких звезд, по-видимому, связано с пульсацией и периодическими извержениями го­рячих газов из недр звезды в более высокие слои атмо­сферы.

Далеко не у всех физических переменных звезд наблю­даются *периодические изменения.*Известно множество звезд, которые относятся к *полуправильным*или даже *неправиль­ным переменным.*У таких звезд трудно или вообще невоз­можно заметить закономерность в изменении блеска.

**4. Новые и сверхновые звезды.** Мы уже видели, что, в отличие от Солнца и других стационарных звезд, у физиче­ских переменных звезд изменяются размеры, температура фотосферы, светимость. Среди различных видов нестационар­ных звезд особый интерес представляют новые и сверхновые звезды. На самом деле это не вновь по­явившиеся звезды, а ранее существовавшие, которые при­влекли к себе внимание резким возрастанием блеска.

При *вспышках новых звезд*блеск возрастает в тысячи и миллионы раз за время от нескольких суток до нескольких месяцев. Известны звезды, которые повторно вспыхивали как новые. Согласно современным данным, новые звезды обычно входят в состав двойных систем, а вспышки одной из звезд происходят в результате обмена веществом между звездами, образующими двойную систему. Например, в си­стеме «белый карлик — обычная звезда (малой светимости)» взрывы, вызывающие явление новой звезды, могут возни­кать при падении газа с обычной звезды на белый карлик.

Еще более грандиозны *вспышки сверхновых звезд,*блеск которых внезапно возрастает примерно на 19*m*! В максиму­ме блеска излучающая поверхность звезды приближается к наблюдателю со скоростью в несколько тысяч километ­ров в секунду. Картина вспышки сверхновых звезд свиде­тельствует о том, что *сверхновые*— *это взрывающиеся звезды.*

При взрывах сверхновых в течение нескольких суток выделяется огромная энергия — порядка 1041 Дж. Такие ко­лоссальные взрывы происходят на заключительных этапах эволюции звезд, масса которых в несколько раз больше массы Солнца ([§ 31](http://astro.murclass.ru/Levitan/text/31.htm)).

В максимуме блеска одна сверхновая звезда может све­тить ярче миллиарда звезд, подобных нашему Солнцу. При наиболее мощных взрывах некоторых сверхновых звезд мо­жет выбрасываться вещество со скоростью 5000—7000 км/с, масса которого достигает нескольких солнечных масс. *Остатки оболочек,*сброшенных сверхновыми звездами, видны долгое время как расширяющиеся газовые туманно­сти (см. [§ 28](http://astro.murclass.ru/Levitan/text/28.htm)). Обнаружены не только остатки оболочек сверхновых звезд, но и то, что осталось от центральной части некогда взорвавшейся звезды. Такими «звездными остатками» оказа­лись удивительные источники радиоизлучения, которые по­лучили название пульсаров. Первые пульсары были открыты в 1967 г.

У некоторых пульсаров поразительно стабильна частота повторения импульсов радиоизлучения: импульсы повторя­ются через строго одинаковые промежутки времени, изме­ренные с точностью, превышающей 10-9 с! Открытые пуль­сары находятся от нас на расстояниях, не превышающих сотни парсек. Предполагается, что *пульсары*— *это быстровращающиеся сверхплотные звезды, радиусы которых около 10 км, а массы близки к массе Солнца.*Такие звезды со­стоят из плотно упакованных нейтронов и называются нейтронными. Лишь часть времени своего существо­вания нейтронные звезды проявляют себя как пульсары.

Вспышки сверхновых звезд относятся к редким явле­ниям. За последнее тысячелетие в нашей звездной системе наблюдалось всего лишь несколько вспышек сверхновых. Из них наиболее достоверно установлены следующие три: вспышка1054 г. в созвездии Тельца, в1572 г. — в созвез­дии Кассиопеи, в1604 г. — в созвездии Змееносца. Первая из этих сверхновых описана как «звезда-гостья» китайскими и японскими астрономами, вторая — Тихо Браге, а третью наблюдал Иоганн Кеплер. Блеск сверхновых1054 г. и1572 г. превосходил блеск Венеры, и эти звезды были видны днем. Со времени изобретения телескопа (1609 г.)в нашей звездной системе не наблюдалось ни одной сверхно­вой звезды (возможно, что некоторые вспышки остались не­замеченными). Когда же появилась возможность исследовать другие звездные системы, в них стали часто открывать но­вые и сверхновые звезды.

23 февраля 1987 г. сверхновая звезда вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке (созвездие Золотой Рыбы) — самом большом спутнике нашей Галактики (рис. 89). Впервые после 1604г. сверхновую звезду можно было видеть даже невооруженным глазом. До вспышки на месте сверхновой находилась звезда 12-й звездной вели­чины. Максимального блеска 4*m* звезда достигла в начале марта, а затем стала медленно угасать. Ученым, наблюдав­шим сверхновую с помощью телескопов крупнейших назем­ных обсерваторий, орбитальной обсерватории «Астрон» и рентгеновских телескопов на модуле «Квант» орбитальной станции «Мир», удалось впервые проследить весь процесс вспышки. Наблюдения проводились в разных диапазонах спектра, включая видимый оптический диапазон, ультрафи­олетовый, рентгеновский и радиодиапазоны. В научной печати появлялись сенсационные сообщения о регистрации *нейтринного*и, возможно, *гравитационного*излучения от взорвавшейся звезды. Были уточнены и обогащены новыми результатами модели строения звезды в фазе, предшествую­щей взрыву.

Расстояние до сверхновой (СН 1987 А) — не менее 160 тыс. св. лет (50 кпк). Поэтому на самом деле звезда вспыхнула не в1987 г., а на 160 тыс. лет раньше! Если бы вспышка произошла на расстоянии 10 пк от нас, то сверхно­вая освещала бы Землю лучше, чем Луна в полнолуние.

**Тема урока № 16: Наша Галактика. Другие галактики. Метагалактика**

Понятие «галактика» в современном языке обозначает огромную звездную систему. Происходит оно от греческого слова «молоко, молочный» и было введено в обиход для обозначения нашей звездной системы. Она, как известно, видится нам как тянущаяся через все небо светлая полоса с молочным оттенком и названная поэтому «Млечный Путь». Именно в Млечном Пути сосредоточено подавляющее число звезд нашей Галактики, вот почему часто говорят: наша Галактика -- это Млечный Путь. Число звезд в ней - более 200 миллиардов, т.е. порядка триллиона (1012). Она имеет форму диска с утолщением в центре.

Диаметр самого диска, т.е. диаметр нашей Галактики равен приблизительно 1021м -100 тыс световых лет, масса Галактики ~ 1042 кг. Рукава Галактики имеют спиральную форму, т.е. расходятся по спиралям от ядра. В одном из рукавов на расстоянии около 3ґ1020 м от ядра находится Солнце, расположенное вблизи плоскости симметрии. Самые многочисленные звезды в нашей Галактике -- это ***карлики*** (массой примерно в 10 раз меньше массы Солнца). Кроме одиночных звезд и их спутников (планет), есть ***двойные звезды*** и целые звездные скопления, движущиеся как единое целое (например, звездное скопление Плеяды). Их открыто в настоящее время более 1000. Шаровые скопления содержат красные и желтые ***звезды-гиганты*** и ***сверхгиганты.*** Кроме этого, в галактике есть туманности, состоящие в основном из газа и пыли. Межзвездное пространство заполнено разреженным межзвездным газом. Галактика вращается вокруг своего центра. Линейная скорость движения Солнца вокруг центра Галактики равна 250 км/с. Полный оборот по своей орбите Солнце делает примерно за 200 миллионов лет (2 \* 108 лет). Этот период называется ***галактическим годом***.

В начале 20-го в. было доказано, что кроме нашей Галактики существуют и другие, также состоящие из миллиардов звезд. В совокупности они образуют нашу вселенную, или Метагалактику. Одна из ближайших к нам галактик -- Туманность Андромеды -- находится от нас на расстоянии, примерно 2,5 \* 1022 м, - приблизительно 2.5 миллиона световых лет, ее диаметр равен 1.3 диаметра Млечного Пути, а масса практически равна массе нашей Галактики. По внешнему виду все галактики делятся на 3 основных типа: ***эллиптические, спиральные и неправильные***.

В 1963 г. во Вселенной были открыты квазизвездные, т.е. звездоподобные источники сильного радиоизлучения. Их назвали **квазарами.** Это - весьма удаленные от нас объекты Вселенной, расстояние до них порядка 1025 - 1026 м. Они находятся на периферии видимой Вселенной. К настоящему времени их насчитывается более тысячи. Квазары излучают огромное количество энергии. Так, квазизвездный объект размером с Солнечную систему может излучать в 10 раз больше энергии, чем Млечный Путь - наша галактика. По современным представлениям квазары - это активные ядра далеких галактик или сами эти галактики, которые мы видим "сбоку". Галактики образуют группы, группы образуют систему, крупные системы называются **скоплениями: они состоят из сотен и тысяч галактик.**

**Метагалактика** (от [*мета...*](https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/075/823.htm) и [*Галактика*](https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/008/092.htm))*,* совокупность звёздных систем ([*галактик*](https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/008/093.htm))*,* частью которой является всё множество (около 1 млрд.) галактик, доступных современным телескопам. Наша Галактика, или система Млечного Пути, — одна из звёздных систем, входящих в состав М. Иногда М. неудачно называется Большой Вселенной. С возрастанием мощи телескопов становится доступной для наблюдений всё большая область М. (некоторые авторы называют М. только эту, доступную для наблюдений область).

  Возможности конкретного исследования М. открылись после того, как в 20-х гг. 20 в. при помощи наибольших тогда телескопов удалось доказать, что многие из известных ранее светлых туманностей, звёздная природа которых долгое время оставалась под сомнением, являются в действительности гигантскими звёздными системами, подобными нашей Галактике (см. [*Внегалактическая астрономия*](https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/005/645.htm))*.*

Детальные исследования внегалактических объектов привели к открытию галактик разных типов, в частности радиогалактик, квазаров и др. В пространстве между галактиками находятся отдельные звёзды, а также межгалактический газ, космические лучи, электромагнитное излучение; внутри скоплений галактик, по-видимому, иногда содержится и космическая пыль (см. [*Межгалактическая среда*](https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/074/932.htm))*.*

Средняя плотность вещества в известной нам части М. оценивается различными авторами от 10-31 до 10-30 *г/см3.*Наблюдаются, однако, значительные местные неоднородности, иногда крупного масштаба, связанные с наличием структурных образований внутри М. Многие галактики составляют группировки различной степени сложности — двойные и более сложные кратные системы; скопления, включающие десятки, сотни и тысячи галактик; облака, содержащие десятки тысяч (и более) галактик. Так, например, наша Галактика и около полутора десятков ближайших к ней галактик являются членами небольшого скопления, т. н. [*местной группы галактик*](https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/075/788.htm)*.* Последняя, по-видимому, входит в состав гигантского облака, в центральном ядре которого находится скопление, содержащее несколько тысяч галактик и видимое в созвездиях Девы и Волос Вероники на расстоянии около 12—14 *млн. пс* (около 40 млн. световых лет) от нас. О размерах, форме и строении М. в целом пока ничего не известно. Распределение галактик в масштабе всей известной части М. не обнаруживает систематического падения плотности в каком-либо направлении, что могло бы указывать на приближение к границам М. Отсутствие такого падения плотности может свидетельствовать об относительно малых размерах известной нам области по сравнению с размерами М. Каковы бы ни были эти размеры, М. нужно рассматривать как огромную, но конечную совокупность галактик, обладающую в течение длительного времени определёнными особенностями строения и движения. К таким особенностям может относиться и взаимное удаление галактик, охватывающее всю М. или её часть. Т. о., М. представляет собой конечное и преходящее структурное образование в вечной и бесконечной Вселенной, содержащей, в частности, бесчисленное множество галактик.

**Тема урока №17: Происхождение и эволюция звезд**

Сейчас твердо установлено, что звезды и звездные скопления имеют разный возраст,

от величины порядка 1010 лет (шаровые звездные скопления) до 106 лет для самых

молодых (рассеянные звездные скопления и звездные ассоциации). Мы будем подробно

говорить об этом ниже. Многие исследователи предполагают, что звезды образуются

из диффузной межзвездной среды. В пользу этого говорит положение молодых звезд в

пространстве - они сконцентрированы в спиральных ветвях галактик, там же, где и

межзвездная газопылевая материя. Диффузная среда удерживается в спиральных

ветвях галактическим магнитным полем. Звезды этим слабым полем удерживаться не

могут. Поэтому более старые звезды меньше связаны со спиралями. Молодые звезды

образуют часто комплексы, такие, как комплекс Ориона, в который входит несколько

тысяч молодых звезд. В комплексах наряду со звездами содержится большое

количество газа и пыли. Газ в этих комплексах быстро расширяется, а это значит,

что раньше он представлял собой более плотную массу.

Сам процесс формирования звезд из диффузной среды остается пока не вполне ясным.

Если в некотором объеме, заполненном газом и пылью, масса диффузной материи по

каким-то причинам превзойдет определенную критическую величину, то материя в

этом объеме начнет сжиматься под действием сил тяготения. Это явление называется

гравитационной конденсацией. Величина критической массы зависит от плотности,

температуры и среднего молекулярного веса. Расчеты показывают, что необходимые

условия могут создаться лишь в исключительных случаях, когда плотность диффузной

материи становится достаточно большой. Такие условия могут возникать в

результате случайных флуктуаций, однако не исключено, что увеличение плотности

может происходить и в результате некоторых регулярных процессов. Наиболее

плотными областями диффузной материи являются, по-видимому, глобулы и "слоновые

хоботы" - темные компактные, непрозрачные образования, наблюдаемые на фоне

светлых туманностей.

 Глобулы имеют вид круглых пятнышек, "слоновые хоботы" -

узких полосок, которые вклиниваются в светлую материю ( 243). Глобулы и

"слоновые хоботы" являются наиболее вероятными предками звезд, хотя прямыми

доказательствами этого мы не располагаем. В качестве косвенного подтверждения

могут рассматриваться кометообразные туманности. Эти туманности выглядят подобно

конусу кометного хвоста. В голове такой туманности обычно находится звезда типа

Т Тельца - молодая сжимающаяся звезда. Возникает мысль, что звезда образовалась

внутри туманности. В то же время сама туманность напоминает по форме и

расположению "слоновые хоботы".

Очень многое в процессе звездообразования остается не ясным. Не все

исследователи соглашаются, например, с тем, что звезды образуются из диффузной

межзвездной материи. Советский астроном акад. В. А. Амбарцумян считает, что

звезды образуются в результате расширения плотных тел неизвестной природы,

которые непосредственно не наблюдаются. Мы будем придерживаться в дальнейшем

более общепринятой гипотезы образования звезд из межзвездной диффузной среды. .

Итак, пусть по каким-то причинам облако межзвездной материи достигло критической

массы и начался процесс гравитационной конденсации. Пылевые частицы и газовые

молекулы падают к центру облака, потенциальная энергия гравитации переходит в

кинетическую, а кинетическая энергия в результате столкновений - в тепло. Облако

нагревается и вследствие увеличения температуры возрастает его излучение. Оно

превращается в протозвезду (звезда в начальной стадии развития). Судя по тому,

что молодые звезды наблюдаются группами, можно думать, что в начале процесса

гравитационной конденсации облако межзвездной материи разбивается на несколько

частей и одновременно образуется несколько протозвезд.

Полный поток энергии, излучаемой протозвездой, определяется, как можно показать,

обычным законом масса - светимость, но размеры протозвезды значительно больше.

Поэтому температура ее поверхности много меньше, чем у обычной звезды такой же

массы, и на диаграмме спектр - светимость протозвезды должны располагаться

справа от главной последовательности. По мере сжатия протозвезды температура ее

увеличивается, и она перемещается по диаграмме Герцшпрунга - Рессела сначала

вниз, потом влево, почти параллельно оси абсцисс. Когда температура в недрах

звезды достигает нескольких миллионов градусов, начинаются термоядерные реакции.

Сначала "выгорает" дейтерий, а затем литий, бериллий и бор. Сжатие в результате

выделения дополнительной энергии замедляется, но не прекращается совсем, так как

эти элементы быстро оказываются израсходованными. Когда температура повышается

еще больше, начинают действовать протон-протонные реакции (для звезд с массой,

меньшей 1,5 MЅ) или углеродно-азотный цикл (для звезд с большей массой). Эти

реакции могут поддерживаться длительное время, сжатие прекращается и протозвезда

превращается в обычную звезду главной последовательности. Давление внутри звезды

уравновешивает притяжение, и она оказывается в устойчивом состоянии.

Время гравитационного сжатия сравнительно невелико. Оно зависит от массы

протозвезды. Чем больше масса, тем быстрее протекает процесс гравитационной

конденсации. Протозвезды, имеющие такую же массу, как Солнце, сжимаются за 108

лет. Время гравитационного сжатия для звезд разных классов приведено в табл. 16.

Так как сжатие происходит быстро, наблюдать звезды в этой первой наиболее ранней

стадии эволюции трудно. Предполагается, что в этой стадии находятся неправильные

переменные звезды типа Т Тельца. Известно несколько рассеянных

звездных скоплений, состоящих из звезд классов О и В и переменных типа Т Тельца.

На 244 показана диаграмма "показатель цвета - звездная величина" для

звездного скопления NGC 6530. Линия, идущая приблизительно по диагонали,

отмечает положение главной последовательности. Звезды, имеющие показатель цвета

(В - V) > 0, - это, главным образом, переменные типа Т Тельца. Они расположены

справа от главной последовательности как раз там, где должны находиться

сжимающиеся звезды. По-видимому, звезды скопления NGC 6530 образовались примерно

107 лет назад. Более массивные члены скоплений (О и В звезды) уже успели перейти

на главную последовательность, менее массивные - еще находятся в фазе

гравитационной конденсации. Звезды типа Т Тельца еще не пришли в состояние

равновесия, и этим, вероятно, объясняется типичный для них неправильный характер

изменения блеска. Эти звезды связаны с пылевыми туманностями, которые являются

остатками первоначальных скоплений диффузной материи.

Находясь на главной последовательности, звезды длительное время излучают энергию

благодаря термоядерным реакциям, почти не испытывая каких-либо внешних

изменений: радиус, светимость и масса остаются почти постоянными. Положение

звезды на главной последовательности определяется ее массой. Ниже главной

последовательности на диаграмме спектр - светимость проходит последовательность

ярких субкарликов. Они отличаются от звезд главной последовательности химическим

составом: содержание тяжелых элементов в субкарликах в несколько десятков раз

меньше. Причина этого отличия, связанная с тем, что субкарлики являются звездами

сферической составляющей, будет объяснена ниже.

В результате термоядерных реакций, протекающих в недрах звезды, происходит

постепенная переработка водорода в гелий, или, как говорят, "выгорание"

водорода. Время пребывания на главной последовательности зависит от скорости

термоядерных реакций, а скорость реакций-от температуры. Чем больше масса

звезды, тем выше должна быть температура в ее недрах, чтобы газовое давление

могло уравновесить вес вышележащих слоев. Поэтому ядерные реакции в более

массивных звездах идут быстрее и время пребывания на главной последовательности

для них меньше, так как быстрее расходуется энергия. В табл. 16 дано время

пребывания на главной последовательности, вычисленное для звезд разных

спектральных классов. Из таблицы видно, что звезды В0 остаются на главной

последовательности менее 107 лет, в то время как для Солнца и звезд более

поздних спектральных классов период пребывания на главной последовательности

превышает 1010 лет.

Ядерные реакции идут только в центральной части звезды. В этой области

(конвективное ядро звезды) вещество все время перемешивается. При выгорании

водорода радиус и масса конвективного ядра уменьшаются. Расчеты показывают, что

звезда при этом перемещается по диаграмме спектр - светимость вправо. Более

массивные звезды перемещаются быстрее, и в результате верхний конец главной

последовательности постепенно отклоняется вправо. На 245 показано, как с

течением времени изменяется вид главной последовательности для некоторой группы

одновременно образовавшихся звезд.

Когда весь водород в ядре звезды превратится в гелий, вторая стадия эволюции

(стадия главной последовательности) заканчивается. Реакции превращения водорода

в гелий продолжают идти только на внешней границе ядра. Расчеты показывают, что

при этом ядро сжимается, плотность и температура в центральной части звезды

возрастают, увеличивается светимость и радиус звезды. Звезда сходит с главной

последовательности и становится красным гигантом, вступая в третью стадию

эволюции.

Все, о чем говорилось выше, представляет собой результаты теоретических работ по

внутреннему строению звезд. Эти результаты можно проверить, сопоставляя их с

диаграммами спектр - светимость для звездных скоплений. Можно полагать, что

звезды одного и того же скопления образовались совместно и имеют одинаковый

возраст, иначе трудно было бы объяснить само существование скоплений. На

246 приведены диаграммы цвет - светимость для 11 звездных скоплений. Два из них,

М3 и М 92, шаровые. Мы видим, что главные последовательности отклоняются вправо

и вверх у разных скоплений по-разному. Понятно, что чем больше отклонение, тем

старше должно быть скопление. С помощью этих диаграмм можно легко выяснить,

какое скопление образовалось раньше, какое позже, и определить приблизительно их

возраст. Можно воспользоваться для этого, например, табл. 16, находя по

диаграммам цвет - светимость типы звезд, которые ушли с главной

последовательности. Скопление NGC 2362 самое молодое из всех, его возраст

несколько десятков миллионов лет. У шаровых скоплений главная последовательность

едва намечается. Верхняя часть отсутствует из-за того, что соответствующие

звезды уже прошли вторую стадию эволюции, а нижняя - из-за невозможности

наблюдения слабых звезд (на самом деле главная последовательность, по-видимому,

продолжается вниз). Зато у шаровых и старых рассеянных скоплений хорошо

представлена ветвь красных гигантов. Это означает, что большинство наблюдаемых

звезд этих скоплений находится в третьей стадии эволюции.

Ветвь красных гигантов для звезд рассеянных скоплений идет ниже, чем для звезд

шаровых скоплений, а главная последовательность, наоборот, выше. Теоретически

это можно объяснить более низким содержанием тяжелых элементов в звездах шаровых

скоплений. И действительно, наблюдения показывают, что в звездах сферической

подсистемы, к которой принадлежат шаровые скопления, относительное обилие

тяжелых элементов меньше, чем в звездах плоской подсистемы. Таким образом,

наблюдения удовлетворительно согласуются с теоретическими представлениями об

эволюции звезд и подтверждают их. Тем самым получает наблюдательную проверку и

теория внутреннего строения звезд, на которой эти представления основаны.

Предполагается, что в стадии красного гиганта (или сверхгиганта) в плотном ядре

звезды в течение некоторого времени может идти реакция превращения гелия в

углерод. Для этого температура в центральных частях звезды должна достигать 1.5

&times; 108 ёK. Расчеты показывают, что такие звезды должны располагаться на диаграмме

цвет - светимость слева от главной ветви красных гигантов. На диаграмме

скопления М 3 (см. 246) от обычной последовательности красных гигантов

отходит влево дополнительная ветвь, которая, по-видимому, образуется такими

звездами. Когда гелиевая реакция внутри ядра и водородные реакции на его границе

исчерпывают себя, третья стадия эволюции (стадия красного гиганта) приходит к

концу. Протяженная оболочка гиганта при этом расширяется, ее наружные слои не

могут удерживаться силой тяготения и начинают отделяться. Звезда теряет

вещество, и масса ее уменьшается. Наблюдения показывают, что у красных гигантов

и сверхгигантов действительно иногда имеет место истечение вещества из

атмосферы. В этом случае процесс происходит медленно. Однако при некоторых

условиях, точно пока не выясненных, звезда может быстро выбросить существенную

часть массы, и процесс будет иметь характер взрыва, катастрофы. Такого рода

взрывы мы наблюдаем при вспышках сверхновых звезд.

При медленном истечении вещества из красных гигантов, по-видимому, образуются

планетарные туманности. Когда протяженная оболочка гиганта рассеется, остается

только ее центральное ядро, полностью лишенное водорода. В случае звезд с

массой, не превосходящей солнечную в 2-3 раза, вещество ядра находится в

вырожденном состоянии, так же как и вещество белых карликов. Поэтому кажется

очень вероятным, что белые карлики и являются четвертым и последним этапом

эволюции таких звезд, следующим за стадией красного гиганта. И в самом деле, в

старых звездных скоплениях имеется некоторое количество белых карликов, а в

молодых они отсутствуют. В белых карликах, как мы знаем, ядерные реакции не

идут. Белые карлики светят за счет запаса тепловой энергии, накопленной в

прошлом, и постепенно остывают, превращаясь в ненаблюдаемых "черных" карликов.

Белые карлики - это остывающие, умирающие звезды. Звезды, превосходящие Солнце

по массе в несколько раз, уже не могут переходить в фазу белого карлика, потому

что их гелиевые ядра не находятся в вырожденном состоянии. Предполагается, что в

этом случае третий этап эволюции кончается образованием нейтронной звезды и

взрывом сверхновой.

Итак, мы имеем сейчас возможность проследить в общих чертах эволюцию звезд, от

плотного облака газа и пыли к сжимающейся протозвезде, затем через обычную

звезду главной последовательности к красному гиганту и, наконец, - к белому

карлику. В этой картине еще много неясного, многое еще подлежит уточнению,

однако в главных чертах она представляется достаточно обоснованной.

Мы рассматривали выше, как меняется в процессе эволюции звезд их масса, радиус,

светимость, температура, и ничего не упомянули о такой важной характеристике,

как вращение. Известно, что звезды спектральных классов О, В, А вращаются очень

быстро - экваториальная скорость вращения у них, как правило, превышает 100

км/сек. Скорости вращения звезд класса F в среднем меньше 100 км/сек, а звезды

более холодные, чем F, вращаются настолько медленно, что доплеровское расширение

линий слишком мало и скорость вращения нельзя измерить. Верхний предел скорости

вращения звезд классов G, К, М, принадлежащих к главной последовательности,

составляет несколько десятков км/сек, но на самом деле вращение может быть

гораздо медленнее. Например, у Солнца, типичной звезды класса G, скорость

вращения точек экватора составляет всего лишь около 2 км/сек.

Из наблюдений диффузных туманностей следует, что отдельные сгустки вещества

движутся в них друг относительно друга со скоростями порядка 1 км/сек. Поэтому

первичная туманность, из которой образуется звезда всегда должна иметь некоторый

начальный момент количества движения. Расчет показывает, что если бы этот момент

количества движения сохранялся, то звезды не могли бы образоваться, так как

туманность, сжимаясь, увеличивала бы скорость вращения и разорвалась бы задолго

до этого. Очевидно, что момент количества движения должен каким-то образом

удаляться из туманности. Конденсирующаяся туманность связана с окружающей менее

плотной средой магнитным полем, и так как межзвездная материя "приклеена" к

магнитным силовым линиям, то вращение конденсирующейся туманности передается

окружающей среде и туманность теряет момент количества движения. Подробное

рассмотрение этого процесса показывает, что передача момента количества движения

прекращается, когда плотность протозвезды становится достаточно высокой, и

окончательно сконденсировавшаяся звезда должна иметь экваториальную скорость в

несколько сотен километров в секунду, независимо от ее массы. Для горячих звезд

наблюдения дают как раз такую скорость вращения. У холодных же звезд скорость

вращения гораздо меньше.

Так, в Солнечной системе 98% момента количества движения принадлежит планетам и

только 2% Солнцу. Солнце вращалось бы с экваториальной скоростью около 100

км/сек, если бы ему принадлежал весь момент количества движения Солнечной

системы. Естественно возникает мысль, что медленное вращение холодных звезд

может быть объяснено наличием у них планетных систем, аналогичных Солнечной

системе. Если это так, то число планетных систем в Галактике очень велико.

**Происхождение планет**

Согласно современным представлениям, планеты и другие тела образовались в газово-пылевом протопланетном облаке, вращавшемся вокруг Солнца. Это облако должно было иметь форму диска. В последнее десятилетие газово-пылевые диски открыты у многих молодых звезд типа Т Тельца и у некоторых звезд главной последовательности (Земля и Вселенная, 1995, № 6). Массы дисков варьируют от одной тысячной до одной-двух десятых массы звезды, а размеры - от нескольких десятков до сотен астрономических единиц. Ранее, 50 лет назад, образ допланетного диска мог быть воссоздан лишь на основе данных о нашей собственной планетной системе, большие планеты которой принято делить на две группы: земного типа, состоящие из твердых каменистых пород, и газо-жидкие планеты-гиганты. Уже тогда было ясно, что диск не мог быть только пылевым и в его составе должны были преобладать водород и гелий, поскольку именно они доминируют на Юпитере и Сатурне. Все остальные элементы и соединения могли находиться в конденсированной (твердой) фазе и входить в состав твердых частиц и тел, в зависимости от температуры, которая, главным образом, определялась расстоянием от Солнца. Минимальная масса диска была оценена в 0.01 М¤ (если добавить к фактической массе планет 0.0013 его массы недостающие легкие газы), но, с учетом выброса значительной части твердых тел с периферии, масса диска могла достигать 0.05 - 0.1 М¤.

Исследования эволюции допланетного диска, организованные О.Ю. Шмидтом в Объединенном институте физики Земли, носящем сегодня его имя, на 10 - 15 лет опередили подобные исследования на Западе и в Японии. Шаг за шагом прослежены основные этапы превращения диска в систему планет. Было показано, что в диске не могли долго поддерживаться крупномасштабные турбулентные движения, в нем вследствие оседания пыли к центральной плоскости должен был образоваться пылевой субдиск. Найден критерий гравитационной неустойчивости для дисков конечной толщины с кеплеровским вращением, позволивший оценить первичные сгущения, на которые субдиск мог распасться. Затем исследовано взаимодействие этих сгущений, их уплотнение и превращение в рой твердых тел, который, согласно первоначальному замыслу О.Ю. Шмидта, и стал исходным материалом для планет. Время образования роя - относительно короткое, порядка 10 тыс. лет.

Весьма важно было определить хаотические скорости твердых тел (планетезималей), накладывавшиеся на их упорядоченное кеплеровское движение вокруг Солнца, т.е. дисперсию скоростей. Выяснилось, что скорости определялись гравитационными возмущениями от крупнейших планетезималей, которые играли важнейшую роль в построении планет. Закономерности распределения масс (либо размеров) планетезималей выведены из известных уравнений коагуляции Смолуховского с учетом гравитации тел и их дроблений при столкновениях. Оказалось, что с увеличением размеров количество тел убывает по степенному закону (например, десятикилометровых тел в 1000 раз больше, чем стокилометровых, а число километровых тел - в 1000 раз больше чем десятикилометровых), и при этом основная масса вещества сосредоточивается в нескольких наиболее крупных телах. Подобные закономерности прослеживаются для кратеров на поверхности Луны и других тел, а также у астероидов главного пояса. Крупнейшие тела - потенциальные зародыши планет. Они постепенно вычерпывали остальные планетезимали, а самые крупные могли захватывать также газ, если он еще присутствовал в диске. Как считал О.Ю. Шмидт, происходило осреднение наклонов и эксцентриситетов орбит отдельных тел и вырабатывались почти круговые орбиты планет, лежащие в одной плоскости. Процесс роста планет - длительный, для планет земной группы - порядка 108 лет, а для наиболее удаленных планет - Урана и Нептуна - 109 лет. Время роста пропорционально периоду обращения планеты вокруг Солнца и обратно пропорционально поверхностной плотности питающих тел и гравитационному сечению растущей планеты. Поверхностная плотность в диске равна массе вещества вертикального столба над единицей поверхности диска. Гравитационное сечение означает способность планеты фокусировать орбиты сближающихся с нею тел. При большой массе планеты и небольших скоростях тел гравитационное сечение может многократно превышать геометрическое сечение.

Схематическое изображение образования планет из газопылевого диска было дано Б. Ю. Левиным еще в 1964 г. (на основании работ О. Ю. Шмидта, Л.Э. Гуревича и А.И. Лебединского, Б.Ю. Левина, В.С. Сафронова, Е.Л. Рускол) и стало как бы визитной карточкой группы О.Ю. Шмидта. Эти рисунки помещены на обложку сборника переводов статей О.Ю. Шмидта и его сотрудников, изданного в 1995 г. Американским Институтом физики в Нью-Йорке. Естественно, что за истекшие годы многие этапы эволюции, которые представлялись вначале лишь в качественном виде, изучены количественно благодаря разработке компьютерных моделей (с 70-х гг. на Западе, а позднее - и в нашей стране). В целом сценарий подтвердился.

Интересной особенностью сценария оказалась возможность обгоняющего роста основного зародыша планеты, на которую еще в 1969г. указывал В.С. Сафронов. Этот тип аккумуляции, "runaway growth" (слово введено Дж. Везериллом по аналогии с "runaway inflation", т.е. галопирующая инфляция) способен сократить время роста планеты. Некоторые ученые пытались с его помощью получить меньшее значение для времени роста Земли, оцененное В.С. Сафроновым в 108 лет по уточненной им формуле О.Ю. Шмидта еще в 1954 г. Однако анализ сценария обгоняющего роста ("runaway"), сделанный Дж. Везериллом и В.С. Сафроновым, выяснил границы его применимости: только начальный этап, пока масса зародыша меньше общей массы остальных питающих тел. В целом же время роста определяется заключительной стадией упорядоченного роста, когда все тела увеличиваются сообразно своим гравитационным сечениям. Оценка длительности роста (98% массы Земли за 108 лет) сохранилась, она подтверждается и динамическими расчетами, и данными изотопной геохимии. Рост Земли и других планет земной группы происходил в основном уже при отсутствии газовой части допланетного облака, на что указывает состав этих планет. Атмосферы и гидросферы должны были выделиться на них при дегазации и дефлюидизации первоначально твердых планетезималей, в том числе и ледяных, забрасываемых с периферии Солнечной системы возмущениями планет-гигантов.

По величине углов наклонов осей вращения планет к оси эклиптики оценены размеры крупнейших тел, падавших на планеты в процессе роста. Для Земли достаточно падения тел в одну тысячную долю ее массы, для Урана - тела с массой равной массе Земли. Позднее сотрудниками ОИФЗ А.В. Витязевым и Г.В. Печерниковой предел массы для крупнейших тел, падавших на Землю, был увеличен до одной сотой массы Земли, т.е. примерно до массы Луны.

Важнейшей задачей планетной космогонии О.Ю. Шмидт считал изучение начального состояния Земли и планет на основе данных о способе их образования. Известно, что не только О.Ю. Шмидт, но и В.И. Вернадский, Г.К. Юри, И.С. Шкловский, В.В. Белоусов, А.С. Монин и другие выдающиеся ученые полностью отвергали представление об образовании Земли из раскаленного газового сгустка. Земля не могла быть также расплавленной жидкой "каплей". По идее О. Ю. Шмидта, Земля формировалась из твердых холодных тел и вначале была холодной. Сейчас, после проделанных расчетов начальной температуры Земли, можно сказать, что наша планета никогда не была полностью расплавленной, а ее недра стали горячими уже в процессе роста. Наибольший вклад в первоначальный нагрев Земли давали удары крупнейших допланетных тел, энергия которых не полностью излучалась поверхностью, а частично накапливалась на глубине гигантских ударных кратеров в сотни и даже тысячи километров. Эти удары, кроме того, создавали первичные неоднородности в строении верхней мантии Земли. Дополнительными источниками разогрева Земли служили тепло радиоактивных источников и сжатие недр под давлением вышележащих слоев. К концу аккумуляции в верхней мантии Земли уже должны были находиться разогретые очаги с температурой порядка 1500 К, в которых происходило плавление силикатных пород и шел процесс сегрегации железа в земное ядро. При этом поверхность Земли никогда не разогревалась выше 350 К.

Решающим тестом для теории образования планет служит объяснение происхождения планет-гигантов Юпитера и Сатурна, заключающих в себе 92 % массы всей планетной системы и состоящих в основном из водорода и гелия. Планеты должны были поглотить газы из допланетного диска до того, как ультрафиолетовое и корпускулярное излучение Солнца рассеяло их в пространстве, т.е. за время порядка 107 лет. Наиболее скорый способ - это распад газового диска на сгустки вследствие гравитационной неустойчивости и последующее сжатие этих сгустков в планеты. Но тогда масса диска должна была бы достигать по крайней мере 30% массы Солнца и одновременно должны были бы появиться десятки "юпитеров", имеющих первичный космический состав, идентичный с составом Солнца. Не исключено, что в системах других звезд с более массивными дисками планеты-гиганты могли возникнуть в один этап, путем гравитационной неустойчивости в газовой среде со своими сценариями дальнейшего развития. Так, несколько условных "юпитеров" должны оказывать взаимные гравитационные возмущения, приводящие к образованию планет с большими эксцентриситетами орбит. Орбиты могут пересекаться и способствовать слиянию "юпитеров" в еще более крупные тела. Возможно, что у некоторых звезд наблюдаются именно такие планеты-гиганты на довольно близких к звездам и вытянутых орбитах. Будущие исследования покажут, какова природа этих тел, получивших название "экзопланеты".

Между тем в Солнечной системе существует лишь один Юпитер, в составе которого доля тяжелых элементов в несколько раз превышает их долю в Солнце, и один Сатурн, у которого примесь тяжелых элементов еще в несколько раз выше. У наиболее удаленных планет, Урана и Нептуна, совсем мало газов (лишь оболочки, содержащие около 10 % массы планет). Орбиты всех четырех планет-гигантов весьма близки к круговым, с закономерно увеличивающимися расстояниями. Такое строение и расположение планет-гигантов совместимо лишь с их образованием в два этапа: сначала аккумуляция ядер планет из конденсируемых элементов, по типу аккумуляции планет земной группы, а затем присоединение (аккреция) газа в той пропорции, в которой это было возможно в постепенно диссипирующем газовом диске.

Образование Юпитера на орбите, удаленной от Солнца на 5.2 а.е., обусловлено физико-химическими условиями в допланетном диске. Приблизительно на этом расстоянии находился фронт конденсации водяного льда. Известно, что все тела, обращающиеся внутри орбиты Юпитера, либо безводны, либо содержат мало воды, но крупнейшие спутники Юпитера Ганимед и Каллисто наполовину состоят из воды, и по мере удаления от Солнца вода становится главной составной частью тел. Она преобладает на спутниках Сатурна, на Уране и Нептуне и их спутниках, а также в ядрах комет. Именно за счет конденсации льдов воды и других летучих веществ рост планетезималей в районе Юпитера мог опередить рост таковых в более близкой к Солнцу зоне астероидов. Возмущения со стороны Юпитера и крупных тел из его зоны питания могли воспрепятствовать аккумуляции "нормальной" планеты в зоне астероидов, так что ускоренный рост Юпитера (107 лет) подкрепляется еще одним аргументом. Из двух основных этапов роста планет-гигантов более длительный - аккумуляция ядер из конденсируемых элементов. Ядра должны достичь массы по крайней мере в 10 МЕ (10 масс Земли), чтобы началась эффективная аккреция газов. Процесс аккреции идет на порядки быстрее, пока поступает газ. Численное моделирование начальных стадий формирования Юпитера и Сатурна с учетом этапа обгоняющего роста их ядер, выполненное шестью американскими исследователями в 1996 г. (Дж. Поллак, О.Хубицкий, П.Боденхеймер, Дж. Лиссауэр, М.Подолак, Ю,Гринцвайг), укладывается в требуемый интервал времени. В этой работе предполагалось, что зона роста Юпитера замкнута и в ней обращается один зародыш с массой примерно 0.1 МЕ и множество одинаковых планетезималей радиусами 100 км, которые питают зародыш, а сами не растут; их хаотические скорости остаются малыми. При этом эффективное гравитационное сечение зародыша оказывается в тысячи раз больше его геометрического сечения, что и обеспечивает ускоренный рост. Принимая, что поверхностная плотность конденсируемых веществ (Z) в области Юпитера была равна 10 г/ см2, а в области Сатурна - 3 г/cм2, и что плотность газов водорода и гелия (XY) была в 70 раз выше в обеих зонах, Поллак и соавторы нашли, что зародыш Юпитера вырастает до 10 МЕ за 6 ґ 105 лет, затем следует стадия медленной аккреции газа, и ядро вместе с оболочкой достигают 20 МЕ за 8 ґ 106 лет, когда аккреция становится быстрой. То же у Сатурна достигается за 107 лет. После этого удельное содержание водорода и гелия начинает резко возрастать, и на этом работа американских ученых завершается, потому что расчеты газовой аккреции на этом этапе требуют иной численной модели. Итальянские планетологи А. Корадини и Дж. Маньи проделали многие варианты таких расчетов и показали, что Юпитер и Сатурн по достижении их ядрами критической массы аккрецируют весь доступный газ за 104 - 106 лет. Схемы численного моделирования неизбежно упрощены, поэтому В.С. Сафроновым и автором настоящей статьи была проанализирована применимость сценария обгоняющего роста ("runaway") и сделаны аналитические оценки для роста ядер планет путем аккреции.

Оказалось, что темп "runaway" замедляется примерно в два раза уже на первом этапе роста ядра Юпитера до массы 10 МЕ, который занимает немногим более 106 лет. Это связано в основном с ростом дисперсии скоростей планетезималей вследствие гравитационных возмущений, вызванных растущим зародышем. Гравитационное сечение Юпитера уменьшается, но все еще остается много большим, чем его геометрическое сечение. Рост ядра до критической массы (условно 20 МЕ) укладывается в срок 107 лет. За это время хаотические скорости планетезималей достигают 2 - 3 км/c, так что планетезимали в перигелиях залетают в зону астероидов. Будучи крупнее тел астероидного пояса, залетевшие тела либо "выметают" последние, либо возмущают их движения, увеличивая дисперсию скоростей и тем самым замедляя или прекращая рост астероидов. Именно таким представляется сейчас влияние Юпитера, не позволившее образоваться единой планете вместо многих тысяч малых планет. О том, что пояс астероидов - несформировавшаяся планета, еще в 1954 г. писал О.Ю. Шмидт, но конкретный механизм, с помощью которого Юпитер помешал ее росту, тогда еще не был раскрыт.

Аккреция газов водорода и гелия на ядро обеспечила быстрый дальнейший рост Юпитера до его современной массы 318 МЕ. Численные расчеты подтверждаются приближенным аналитическим выражением, в котором учитывается убыль газа как за счет его диссипации под воздействием солнечного ультрафиолетового и корпускулярного излучений, так и за счет вычерпывания зародышем планеты. Ближайшая к орбите часть зоны вычерпывается быстро, за 103 - 104 лет, более отдаленные порции газа поступают медленнее. В зависимости от степени турбулизации газа твердыми планетезималями он перетекает к растущей планете и поглощается ею за 104 - 106 лет.

Разумеется, при дальнейшем росте Юпитера пространственный разброс планетезималей его зоны увеличивается. Многие из них покидают Солнечную систему, часть попадает в облако комет Оорта, простирающееся до 200 тыс. а.е. Поэтому зону Юпитера нельзя считать замкнутой, как в численной модели в работе Поллака с соавторами. Принятые этими авторами значения поверхностной плотности соответствуют полной массе допланетного диска около 0.03 М¤. С учетом потери части твердых тел из зоны планет-гигантов (включая Уран и Нептун), начальная масса диска могла составлять 0.05 - 0.1 М¤. Даже в этом случае Уран и в особенности Нептун росли медленнее других планет, за время порядка 109 лет. За орбитой Нептуна могли также вырасти Плутон и тела пояса Койпера, с радиусами до 1000 км, обращающиеся по почти круговым орбитам на расстоянии около 45 а.е. от Солнца. Под действием возмущений всех планет-гигантов многие ледяные планетезимали выбрасывались на очень большие расстояния, образуя резервуары будущих комет. Оценки показали, что самым активным "выбрасывателем" тел в облако Оорта был Нептун, тогда как возмущения Юпитера наиболее эффективны в выбрасывании тел за пределы Солнечной системы.

**Тема урока № 18: Происхождение естественных спутников планет**

В настоящее время открыто более 90 спутников планет. В эпоху О.Ю. Шмидта их было известно в три раза меньше. В 3-м издании его "Четырех лекций о теории происхождения Земли" (1957 г.) высказана общая идея о происхождении спутников:

*"При образовании планет, в процессе сближения частиц с крупными зародышами планет, некоторые из частиц, сталкиваясь, настолько теряли скорость, что выпадали из общего роя и начинали обращаться вокруг планеты. Таким образом, около планетного зародыша образуется сгущение - рой частиц, обращающихся около него по эллиптическим орбитам. Эти частицы также сталкиваются, изменяют свои орбиты. В уменьшенном масштабе в этих роях будут происходить те же процессы, что и при образовании планет. Большинство частиц упадет на планету (присоединится к ней), часть же их будет образовывать околопланетный рой и объединяться в самостоятельные зародыши - будущие спутники планет… При осреднении орбит частиц, образующих спутник, последний приобретает симметричную, т.е. близкую к круговой, орбиту, лежащую в плоскости экватора планеты".*

Модель образования Луны, разработанную на основании этой идеи, стали позднее называть моделью коаккреции (на Западе "accretion" обозначает и "аккумуляция" и "аккреция", тогда как в русскоязычных работах "аккреция" обычно обозначает присоединение газовой среды, а "аккумуляция" - объединение твердых тел). Эта модель может быть применима к планетам земного типа, но она не исчерпывает всех разновидностей образования спутников. Так, у планет-гигантов на стадии аккреции газа должны образовываться не околопланетные рои, а аккреционные газопылевые диски. В поясе астероидов, где процессы аккумуляции давно сменились разрушительными столкновениями, образование спутников возможно лишь путем фрагментации более крупных родительских тел. Наконец, для системы Земля - Луна в последние два десятилетия рассматривается катастрофическое происхождение как альтернатива коаккреции. Ниже мы кратко обрисуем эти разновидности на примере Луны, галилеевых спутников Юпитера и астероидной пары Ида - Дактил.

Освоение Луны во второй половине ХХ в. позволило изучить ее внутреннее строение, состав, возраст многих участков поверхности, их геологию, а также приливную историю лунной орбиты. К сожалению, не удалось выработать единое мнение о происхождении Луны. Была отвергнута гипотеза Дарвина об отрыве Луны от быстровращающейся Земли, отпала гипотеза о захвате готовой Луны. Есть общее представление, что Луна образовалась в околоземном диске, но по поводу возникновения диска существуют две крайние версии.

В одной из них, согласно идее О.Ю. Шмидта, предполагается постепенное пополнение диска (роя) допланетным веществом, сопутствующее росту Земли, т.е. коаккреция. Модель разработана в ОИФЗ и позднее развита группой американских ученых из Аризонского университета и Института планетных наук в г. Тусоне, США. Показано, что в околоземной рой могло быть захвачено достаточно вещества для аккумуляции Луны, если во время роста Земли плотность частиц в ее непосредственной близости в несколько раз превышала плотность "фона" допланетных частиц. Массивный спутник с прямым направлением обращения вокруг Земли мог образоваться на расстоянии в 3 - 4 раза меньшем, чем современное расстояние до Луны, что вполне согласуется с ее последующим приливным отодвиганием. Главное отличие химического состава Луны от Земли - низкое содержание железа в Луне (6-10% по сравнению с 35% в Земле) - объясняется преимущественным захватом в околоземный рой наиболее мелкой фракции допланетных частиц, которые чаще сталкиваются друг с другом. При столкновениях сильнее дробятся каменистые породы, и мелкая пыль обогащается силикатами по отношению к железу. Одновременно теряются за счет испарения летучие и полулетучие компоненты, которыми, как известно, Луна обеднена. По определению Тусоновской группы, околоземный рой работает как "композиционный фильтр", и таким образом решается проблема различий химического состава Луны и Земли.

Сторонники катастрофического происхождения околоземного диска предполагают, что этот диск образовался при столкновении Земли с крупным допланетным телом, в 1,5 - 2 раза более массивным, чем Марс, - мегаимпакте. При надлежаще направленном касательном соударении выброшенный диск обладает и большой массой и достаточным угловым моментом для формирования в нем Луны. Решение проблемы химического состава Луны авторы гипотезы мегаимпакта видят в том, что и Земля и ударившее тело уже успели расслоиться на ядро и мантию Их железные ядра остались в Земле, затем объединились в одно ядро, а диск образовался из силикатных мантий. Необходимо сказать, что, как бы решая проблемы Луны в один прием, мегаимпакт сам создает проблемы. Так, энергия мегаимпакта при столкновении ударника с Землей со скоростью 14 - 15 км/c составляет более 1039 эрг. Этого достаточно, чтобы расплавить большую часть Земли, а также испарить какую-то ее часть. Образуется горячая силикатно-магниевая атмосфера, и Земля в течение 10 - 100 лет светит как коричневый карлик - звезда с температурой фотосферы 2000 К. Необходим критический анализ возможности такого этапа в ранней истории Земли. Гипотеза мегаимпакта не объясняет почти круговой характер орбиты Земли. Ее эксцентриситет в настоящее время равен 0,017, что согласуется с участием в аккумуляции Земли крупных тел вплоть до лунной массы, но не марсианской. Подсчет В.С. Сафронова и А.М. Фридмана показал, что при мегаимпакте эксцентриситет орбиты Земли был бы в 5 - 10 раз больше. Наконец, гипотеза мегаимпакта придумана специально для Луны, хотя, по мнению Д. Стивенсона, наилучшим "кандидатом" на такое происхождение служит система Урана с его спутниками. Не исключено, что сильный наклон оси Урана к оси эклиптики вызван ударом тела с массой, сравнимой с массой Земли, и следствием такого удара могло быть образование диска в одной плоскости с экватором Урана. Идентичность химического состава Урана и его спутников могла бы стать подтверждением этой идеи, но достоверных данных об этом пока нет.

Гипотеза коаккреции носит более универсальный характер. Спутники должны были появиться у всех четырех планет земной группы. Исчезновение спутников Венеры и Меркурия объясняется тем, что вращение этих планет сильно замедлено солнечными приливами, и их спутники, испытывая приливное воздействие своих планет, должны были приблизиться к ним и выпасть на поверхность. Особое место, которое занимает Луна среди спутников по величине ее орбитального углового момента, - также результат приливной эволюции. В прошлом Луна находилась в несколько раз ближе к Земле, а Земля вращалась быстрее, чем сейчас, так что соотношение моментов в системе Земля - Луна было иным. Луна на много порядков массивнее, чем спутники Марса. Масса Марса равна всего 0.1 МЕ, но модель коаккреции как раз предсказывает сильную нелинейную зависимость массы спутников от массы планеты. Наконец, газопылевые аккреционные диски вокруг растущих планет-гигантов можно считать аналогами околопланетных роев, состоящих из двух компонентов.

Систему спутников Юпитера часто сравнивают с миниатюрной Солнечной системой. Регулярный характер орбит галилеевых спутников и четырех малых спутников, обращающихся вблизи Юпитера, говорят об их образовании из газопылевого диска, хотя спутники не содержат легких газов. Их состав варьирует от безводного каменистого у Ио и малых спутников к каменистой Европе с ее ледяным покрытием в десятую долю массы и к смешанному составу Ганимеда и Каллисто, у которых примерно поровну льда и силикатов. Еще по наземным наблюдениям было известно закономерное убывание плотности спутников с расстоянием от Юпитера, и это правильно понималось как результат прогревания зоны спутников его излучением. Ранний Юпитер уподоблялся маленькому Солнцу. Космические исследования укрепили эту точку зрения, дав точные определения плотностей и химического состава спутников. В сочетании с моментами инерции эти данные позволяют сегодня уже строить вполне реальные многослойные модели внутреннего строения галилеевых спутников! Прообраз газопылевого диска Юпитера приходится создавать теоретически, на основании данных о массах спутников и в предположении о единстве состава диска и Юпитера, опираясь при этом на существующие модели аккреционных дисков у молодых звезд и Солнца. Масса диска могла достигать 10 МЕ, с учетом водорода и гелия; значительная часть этой массы выпала на Юпитер и рассеялась в пространство. Прямое вращение диска обусловливалось угловым моментом, которым обладал объем газа, забираемый из допланетного облака. Эта величина невелика, поскольку радиус диска в несколько десятков раз меньше размера гравитационной сферы Юпитера. Вещество спутников - это последние порции вещества, захваченного в диск, на заключительной стадии аккреции Юпитера, когда его фотосфера была еще горячей, до 1000 К. Одновременно с аккумуляцией спутников шла термическая диссипация газов из диска, для чего также было необходимо тепло от Юпитера. Происхождение маленьких нерегулярных спутников Юпитера, обращающихся далеко за пределами галилеевой системы, никак не связано с газово-пылевым диском. По предположению, это захваченные при взаимных столкновениях небольшие астероиды или их фрагменты.

В главном поясе астероидов давно уже известны семейства, т.е. группы астероидов, хотя и разбросанные в пространстве пояса, но имеющие одинаковые элементы орбит: большую полуось, эксцентриситет, наклонение. Есть все основания предполагать, что члены семейства образовались при фрагментации одного родительского тела при его столкновении с другим астероидом. Удивительно, что у некоторых астероидов обнаружились спутники (Земля и Вселенная, 2001, № 3). Первой зафиксированной парой оказались астероид 243 Ида и его спутник, названный впоследствии Дактил. Их снимки получены с помощью космического аппарата "Галилео" в 1993 г. на пути к Юпитеру. Ида имеет неправильную форму с наибольшим диаметром 56 км, она быстро вращается (период 4,65 ч). Астероид сильно кратерирован, что говорит о большом возрасте. Диаметр спутника - около 1,5 км. Оба принадлежат семейству Коронид, насчитывающему более 50 членов. Размер родительского тела оценивается в 90 км. На возможность существования спутников у астероидов в свое время указывал С. Вайденшиллинг. Если разрушительное столкновение происходит со скоростью 0,5 - 1,0 км/c, то образующиеся фрагменты могут быть крупными и разлетаться со скоростями в десятки м/c. Лабораторные эксперименты показали, что фрагменты, как правило, вращаются. Астероидная пара - это двойной фрагмент. Для удержания спутника необходимо, чтобы его относительная скорость была мала. Подсчет показал, что орбитальная скорость спутника Иды должна быть около 6 м/c, а уже при 10 м/c пара должна была бы разорваться. В поясе астероидов так мала пространственная плотность тел и низка вероятность возмущений, что долговременное существование пар вполне возможно. Тела оказывают приливное воздействие друг на друга, но из-за малости масс астероидов эти приливы чрезвычайно малы. Время приливной эволюции астероидных пар измеряется миллиардами лет.