

Лекция 5. Природа тел Солнечной системы



В зависимости от основных физических характеристик планетные тела подразделяются на следующие классы и группы:

Метеороиды – планетные тела с массой от 10^{-17} до 10^{22} кг, имеющие произвольную форму и однородное строение.

В отдельные группы метеороидов выделяют:

1. **Метеорные частицы** размерами свыше 10^{-7} м, входившие в состав протозвездной туманности, образовавшиеся при слипании мельчайших пылинок во время формирования протопланетного диска, при дроблении и распаде астероидов и комет, в результате выбросов частиц коренных пород крупных планетных тел при их столкновениях с астероидами и кометами и извержениях вулканов.

2. **Кометы** массами 10^{11} – 10^{17} кг, размерами $5 \cdot 10^2$ – $5 \cdot 10^4$ м и средней плотностью $0,8$ – $1,5$ г/см³, сформировавшиеся во внешних областях холодной зоны протопланетного облака и состоящие в основном из льда и замерзших газов (СО, СО₂ и др.) с примесью нелетучих веществ.

3. **Астероиды** (малые планеты) массами до $7 \cdot 10^{22}$ кг, размерами менее $2,5 \cdot 10^5$ м и средней плотностью 3 – $5,5$ г/см³, образовавшиеся при дроблении и распаде планетезималей на границе горячей и холодной зон протопланетного облака и состоящие из силикатных пород и соединений металлов.

4. **Кентавры** массами до 10^{17} – 10^{22} кг, размерами до 10^6 м и средней плотностью $1,5$ – 3 г/см³, состоящие из смеси льда, замерзших газов (СО, СО₂ и др.) и силикатных пород и представляющие собой группу метеороидов, промежуточную по своим характеристикам между астероидами и кометами. В Солнечной системы кентаврами является значительная часть транснептуновых объектов пояса Койпера, Хирон, Нессус и некоторые другие космические тела, ранее считавшиеся астероидами.

Форма и внутреннее строение более крупных объектов зависят от их массы: обусловленные ею сила тяжести, температура и давление в

недрах тел превышают «предел текучести» горных пород, и подобно тому как капля жидкости в невесомости становится круглой, планетные тела с массой свыше 10^{22} кг приобретают сферическую форму.

Планетные тела с массой 10^{22} – 10^{23} кг, обладающие сферической формой, но сравнительно однородным или слабодифференцированным внутренним строением, называются **планетоидами**. В число планетоидов Солнечной системы входят 4 самые крупные астероида – Церера, Паллада, Юнона и Веста, большинство крупных спутников планет и Плутон, а также крупнейшие объекты, входящие в «пояс Койпера» (Квавар и др.). В зависимости от плотности и химического состава выделяют:

- силикатные (луноподобные) планетоиды со средней плотностью 3 – $3,5$ г/см³, состоящие в основном из силикатных пород;
- силикатно-ледяные планетоиды со средней плотностью $1,5$ – 3 г/см³, состоящие на 20 – 90 % из водяного льда, окружающего ядро из силикатных пород;
- ледяные планетоиды со средней плотностью $0,8$ – $1,5$ г/см³, состоящие из водяного льда и замерзших газов (СО, СО₂ и др.) с примесью нелетучих веществ.

Планетоиды занимают промежуточное положение между классами метеороидов и планет.

Планеты – класс планетных тел с массами 10^{23} – 10^{27} кг, обладающих сферической формой и ярко выраженным дифференцированным внутренним строением. Планеты обладают собственной энергетикой, основанной на энергии гравитационного сжатия, распада радиоактивных элементов и других процессах. Энергия собственного излучения планет сравнима или даже превосходит по величине энергию, сообщаемую планете центральным светилом – звездой.

Планеты земной группы с массами 10^{23} – 10^{25} кг и средней плотностью вещества 4 – $5,5$ г/см³ образуются в горячей зоне протопланетного облака и состоят в основном из тяжелых химических элементов – соединений металлов, силикатов и т.д. Планетами земной группы Солнечной системы являются Меркурий, Венера, Земля и Марс.

Планеты-гиганты массами $5 \cdot 10^{25}$ – $2,5 \cdot 10^{27}$ кг и средней плотностью $0,7$ – $1,7$ г/см³ образуются, вероятно, в холодной зоне протопланетного облака и состоят в основном из водорода, гелия и легких химических соединений. Планетами-гигантами Солнечной системы являются Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун.

Большинство планет-гигантов, открытых в последние годы у ряда звезд (70 Девы, 51 Пегаса, HD 209458), получили название «горячих юпитеров». Близость к звезде обусловила существование у них обширных, раскаленных свыше температуры в 1000 К атмосфер. Проблема условий формирования и эволюции «горячих юпитеров» пока далека от решения.

Сотни гигантских «новорожденных» зародышей планет – планетезималей и планетгигантов, массой до $2,5 \cdot 10^{27}$ кг и температурой до 1700 К, обнаружено в районах звездообразования в плотных газопылевых туманностях. Они получили предварительное название «планетары» или «коричневые субкарлики».

Космические тела с массами около $2,5 \cdot 10^{27}$ - 10^{28} кг называются **коричневые карлики** и занимают промежуточное положение между планетными телами и звездами. Термоядерные реакции в их недрах либо не возникали, либо протекали очень короткое время, на завершающих стадиях формирования ядра. Коричневые карлики остывают десятки миллиардов лет. Ввиду своей низкой светимости они являются очень трудным объектом для астрономических наблюдений. Первые коричневые карлики были открыты в 1996 г.; в настоящее время ученым известно свыше 1000 объектов данного класса космических тел.

Планетные тела различных классов входят в состав планетных систем.

Планетные системы – связанные силами взаимного тяготения системы космических объектов, звезд и планетных тел, обладающие общностью происхождения и перемещающиеся в пространстве как единое целое.

Исходя из универсальности действия физических законов, следует предположить существование ряда закономерностей для всех планетных систем:

1. Основная масса планетной системы заключена в центральной звезде.
2. Расстояние между звездой и планетами, между планетными телами и их спутниками обуславливаются основными физико-химическими характеристиками, начальным распределением массы, масштабами и особенностями турбулентных движений вещества внутри протопланетного диска, возмущающими взаимодействиями формирующихся протопланет и описываются определенным законом.

3. Орбиты планетных тел и их спутников эллиптические и лежат в одной плоскости (за исключением орбит мелких метеороидов).

4. Почти все планетные тела вращаются вокруг своей оси и вращаются вокруг центральной звезды в направлении ее осевого вращения – направлении вращения протозвездного облака вследствие статистического осреднения момента импульса всех образовавшихся звезду и планетные тела частиц протозвездного облака.

Согласно современным теориям звездообразования около 30 % одиночных медленно вращающихся звезд спектральных классов F5 – M9 массой менее $10 M_{\odot}$ должны обладать планетными системами. Планетные системы должны быть у 30-50 % звезд Галактики – у $30-50 \cdot 10^9$ звезд! Они могут формироваться и вокруг звезд-компонент «широких» двойных и кратных систем. Однако в силу низкой собственной светимости и близости к своим центральным светилам планетные системы представляют очень трудный объект для астрономических наблюдений.

Поиск планетных систем осуществляется различными способами: о наличии планетных систем свидетельствуют периодические микросмещения линий в оптическом или даже радио- спектре звезды (метод лучевых скоростей), периодические микросмещения в движении данной звезды относительно других звезд (астрометрический метод) и микроколебания блеска звезды при прохождении планеты по ее диску.

Планеты чужих планетных систем получили общее название **внесолнечных (экзопланет)**. В настоящее время астрономы наблюдают планеты-гиганты из планетных систем некоторых близких звезд и вокруг некоторых пульсаров. К началу 2003 г. стало известно свыше 100 планетных систем у других звезд. Все они не похожи на Солнечную систему. Значительная часть экзопланет имеет сильно вытянутые эллиптические орбиты с эксцентриситетом до 0,5-0,6 (в Солнечной системе эксцентриситет планетных орбит не превышает 0,2). Часть планет-гигантов – «горячие юпитеры» – вращается по очень близким к звезде круговым орбитам. Открыта планетная система в тесной двойной звездной системе, состоящей из оранжевого и красного звезд-карликов в 1,5-2 а.е. друг от друга; планета-гигант вращается вокруг центра масс системы на расстоянии 5-7

а.е. Нейтронная звезда-пульсар PSR 1257+12 в созвездии Девы имеет 4 планеты; ничто земное не прожило бы и секунды в вечной тьме под потоками радиации, омывающими поверхности этих планет 160 раз в секунду.

Наиболее глубоко и подробно исследованной остается наша Солнечная планетная система.

Образование планетных систем и планетных тел происходит на завершающих стадиях образования звезд из остатков вещества космических газопылевых облаков (туманностей), обогащенных тяжелыми химическими элементами и сжимающихся под действием сил тяготения.

Газопылевой диск вокруг «новорожденной» звезды очень быстро «сплющивается» под действием сил гравитации и центробежной силы, направленных к наиболее плотной части диска в плоскости его вращения. Размеры пылевых частиц увеличиваются; их орбиты становятся почти круговыми. В диске возникают неоднородности: газопылевые утолщения (уплотнения) –

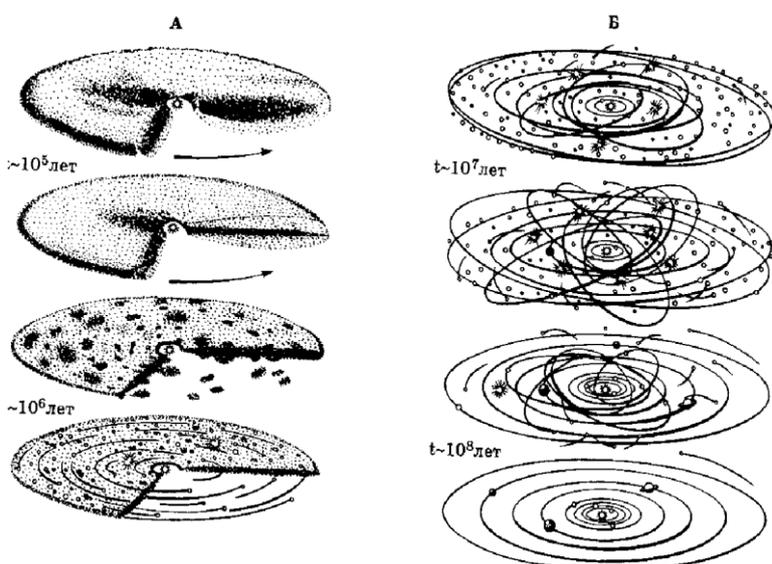


Рис. 68. Формирование планетной системы «кольца сжатия», распадающихся на все более мелкие.

Внутри колец формируются многочисленные газопылевые сгущения. Крупные частицы присоединяют к себе мелкие, возникают плотные километровые сгустки протопланетного вещества – *планетезимали*, медленно сжимающиеся под действием собственного тяготения. Распад газопылевого диска с образованием «колец сжатия» и последующим формированием планетезималей происходит быстрее, чем за 10^6 лет. На образование планетных тел затрачивается не более 10-20 % вещества протопланетного диска: основная масса космической пыли и газа рассеиваются в межзвездном пространстве.

При своем движении вокруг новорожденной звезды планетезимали создают в пространстве протопланетного диска спиральные волны

сжатия и «аккумулируют» (собирают) из него вещество. Их масса и размеры увеличиваются до полного истощения протопланетного диска, пока все вещество из окружающего пространства не выпадет на их поверхность. В результате быстрого распада массивных протопланетных дисков в течение нескольких миллионов лет формируется около десяти гигантских планетезималей размерами до 10000 км и множество более мелких. Планетезимали часто сталкиваются между собой. При небольшой взаимной скорости они объединяются («слипаются») в крупное тело, при высокой – разрушаются на мелкие фрагменты. Взаимные возмущения движения ведет к увеличению эксцентриситетов орбит: часть будущих планет начинает вращаться по сильно вытянутым эллиптическим орбитам, а остальные приобретает параболические или даже гиперболические орбиты и навсегда покидает планетную систему. Наибольшие шансы уцелеть у протопланет, вращающихся по круговым орбитам вблизи от молодой звезды.

Температура в центральной плоскости протопланетного диска уменьшается с удалением от звезды. Световое излучение и испускаемые звездой потоки элементарных частиц («звездный ветер») «выметают» вещество из ближайших окрестностей звезды, образуя «зону прозрачности». В первую очередь удаляются легкие химические элементы – водород и гелий, концентрация которых постепенно сдвигается к границам формирующейся планетной системы. В этой близкой к звезде «горячей» зоне планетообразования идут процессы формирования землеподобных планет, состоящих из соединений тяжелых химических элементов (силикатов, металлов). Процесс образования планет земной группы в «горячей зоне» протопланетного облака на расстоянии до 3 а.е. от Солнца занял около 100 миллионов лет.

При «аккумуляции» планетезималей механическая энергия падающего на них вещества превращается в тепловую: протопланетное тело разогревается, и при температуре свыше 1500 К в центре тел начинается выделение газов. Гравитационное сжатие увеличивает температуру в недрах тел до тысяч кельвин. Разогреву протопланет способствует мощная ударная бомбардировка: между их орбитами вращаются миллиарды мелких и мельчайших планетезималей и сгустков вещества. В недрах формирующихся протопланет начинаются процессы дифференциации (разделения) планетных оболочек и дегазации: тяжелые соединения опускаются вниз, к центру планеты, а легкие поднимаются вверх, к поверхности. Давление, плотность и температура

вещества близ центров планет значительно повышаются и вещество качественно изменяется: образуются оболочки планет – первичное ядро и мантия, в расплавленных недрах генерируется магнитное поле. Выделяющаяся при расслоении оболочек, гравитационном сжатии и распаде радиоактивных элементов энергия путем конвекции переносится к поверхности планет. Легкие вещества, всплывая на поверхность, образуют первичные кору, гидросферу и атмосферу планеты.

Образование планет-гигантов происходит вдали от звезды в «холодной зоне» протопланетного диска (за фронтом конденсации водяного льда). Водородно-гелиевых «снежинок» и водяного льда там в десятки раз больше, нежели пылинок. Поэтому в химическом составе планет-гигантов преобладают водород, гелий и легкие химические соединения.

В промежутке между «горячей» и «холодной» зонами протопланетного облака десятки тысячекилометровых и более мелких планетезималей активно взаимодействуют между собой. Их осколки, раздробленные, разрушенные остатки образуют пояс астероидов. В настоящее время в поясе астероидов Солнечной системы осталась лишь 1/2000 часть начального вещества.

Кометные ядра и кентавры образуются на дальних окраинах «холодной» зоны протопланетного облака из огромного числа мелких и мельчайших планетезималей.

Значительную часть кометных ядер в Солнечной системе была «выброшена» гравитационными возмущениями планет-гигантов на ее окраины и отчасти в межзвездное пространство. Так образовались пояс Койпера и окружающее Солнечную систему сферическое облако Хиллса и квазисферическое облако Оорта.

Устойчивость и почти круговая форма орбит большинства планет Солнечной системы, вероятно, обусловлены стабилизирующим влиянием тяготения Солнца и Юпитера.

В редких случаях протопланетные диски могут формироваться в двойных звездных системах, на заключительных стадиях существования одной из звезд, из вещества верхних слоев его атмосферы красного гиганта.

Формирующиеся протопланетные диски наблюдаются в инфракрасном диапазоне вокруг сотен молодых звезд. У Веги, α Лиры внутренний диаметр диска составляет 44 а.е. при внешнем диаметре 490

а.е.; некоторые данные указывают на существование по крайней мере одной уже сформировавшейся планеты-гиганта вдвое массивнее Юпитера на расстоянии 54 а.е. от звезды. У Фомальгаут, α Южной Рыбы на стадии формирования находится не менее 3 планетных тел, в том числе планета-гигант. Планеты сформировались также у звезд β Живописца и у ϵ Эридана.

Открыто несколько десятков гигантских планетезималей и планет-гигантов массой

$1,5-2,5 \cdot 10^{27}$ кг, самостоятельно сформировавшихся из сгустков вещества в недрах плотных протозвездных туманностей.

Звездный ветер и ударные волны близких «новорожденных» звезд-гигантов могут частично или полностью разрушать протопланетные диски. В областях массового звездообразования гибнет много формирующихся планетных систем.