

Часть I СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ. КРАТКИЕ ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭВОЛЮЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Глава 1. Современная Солнечная система. Общие характеристики¹

В последние десятилетия представления о Солнечной системе (как и о Вселенной в целом) существенно усложнились. Это уже не просто система из восьми планет, вращающихся вокруг Солнца, и некоторого количества других тел, а намного более сложная система, включающая триллионы различных тел, находящихся между собой в непростом взаимодействии. Это конгломерат твердого вещества, нейтрального газа, плазмы, пыли, активных заряженных частиц и электромагнитных полей (Зеленый и др. 2009: 1121). И несомненно, представления об этой сложности будут расширяться по мере того, как перед нами будут открываться новые объекты и взаимосвязи. Эта бесконечность познания характерна для всех сфер человеческого интереса, но в области космологии и космогонии она сейчас так же интригующа и драматична, какой была в географии в период Великих географических открытий XVI–XVIII вв. В то время вместе с расширявшимися научными представлениями в ходу еще были идеи о великанах, гипотезы о великом южном материке и антиподах, фантастических морских обитателях и прочем, благодаря чему могли появляться такие книги, как «Путешествия Гулливера» Дж. Свифта, а также вымыслы путешественников и рапорты капитанов, открывающих несуществующие земли.

Больше всего поражает огромное расширение представлений о Солнечной системе в пространственном плане (особенно про-

¹ Эта глава с небольшими изменениями взята из (Гринин 2017). О многом из того, что здесь сказано, мы будем говорить подробнее в следующих главах. Но в качестве вводной данная глава не только уместна и полезна, но даже необходима, так как дает обобщенное представление о Солнечной системе на современном этапе.

явившее себя, когда в конце прошлого века началась лавина открытий в поясе Койпера)². Если наблюдаемые размеры планетной системы, заканчивая орбитой восьмой планеты – Нептуна, отдалены от Солнца на расстояние 4,5 млрд км (или 30 астрономических единиц [а. е.], то есть расстояний от Земли до Солнца), то уже пояс Койпера, который включает в себя сотни тысяч различных тел, увеличивает это расстояние практически вдвое, до 55 а. е. (Галанин 2012)³. Но это только видимая часть Солнечной системы, а основная ее часть – невидимая. Исследователи (Fernández 1997; Morbidelli 2005) полагают, что реальные размеры Солнечной системы достигают 1,2 светового года, или более 72 тыс. а. е. (вероятно, и более, поскольку гравитационная граница Солнечной системы определяется в 2 световых года)⁴. То есть размеры невидимой части более чем в 1000 раз больше видимой! Это своего рода *принцип айсберга*, часто встречающийся во всех областях сущего.

Можно выделить не менее пяти основных подсистем Солнечной системы по мере их удаления от центра: 1) Солнце; 2) внутреннюю часть, где расположены четыре планеты земной группы, включая три их спутника и пояс астероидов за орбитой Марса. Пояс состоит из большого количества различных тел, часть из которых получили название малых планет; 3) внешнюю часть, где расположены четыре планеты-гиганта (все имеют кольца) вместе с более чем 160 их спутниками; 4) пояс Койпера с несколькими карликовыми планетами, или плутоноидами (Плутон, Хаумеа, Макемаке, Эрида), и сотнями тысяч тел диаметром более 50 км; 5) облако (облака) Оорта с огромным количеством (триллионами) комет. Кроме того, в Солнечной системе присутствуют астероиды, их осколки, космическая пыль, межпланетная среда (Данилова, Кожевников 2008; см. также: Постнов, Засов 2005; Засов, Постнов 2011; Morbidelli 2011; Кусков и др. 2009).

² Впрочем, это совпало (и неслучайно) с революционной идеей о том, что собственно материя, которую мы представляли светлой, барионной, являет собой только небольшую часть всей материи Вселенной. А остальная ее часть – темная материя и темная энергия, нечто пока совершенно загадочное (см. об этом: Гринин 2013; см. также: Вибе 2003).

³ Открытый в 1930 г. Плутон, который ранее считался девятой планетой, имеет орбиту 40 а. е. и даже больше, поскольку она у него особая; указывают на его орбиту до 50 а. е. (Витязев, Печерникова 2010: 161; Галанин 2012).

⁴ Некоторые даже считают, что границы солнечных владений удалены от Солнца по меньшей мере на 135 000 а. е., или на 20 трлн км (Барина 2015).

Словом, перед нами весьма сложная система, причем ее сложность в нашем представлении будет только возрастать (об этом мы еще скажем в *Главе 3*). Не так давно, например, была предложена основанная на моделировании гипотеза о девятой планете Солнечной системы (помимо Плутона; см.: Vatygin, Brown 2016; Лемоник 2016; Одинцова 2017). Самое любопытное, что теоретически она может оказаться планетой, образованной «вовне», которая, однако, «зацепилась» на удаленной орбите у Солнца (Одинцова 2017) либо Солнце ее захватило (Лемоник 2016). В последние десятилетия идея захвата каких-либо космических тел (небольших галактик, скоплений звезд, планет, спутников и т. д.) стала достаточно популярной. Мы ее обсуждали (Гринин 2017: 168) в отношении *закона борьбы за ресурсы и жизненное пространство*, но этот очень интересный паттерн может быть рассмотрен и в целом ряде других аспектов.

Мы также можем представить структуру Солнечной системы как центр (Солнце) – ближняя полупериферия (небольшие планеты земной группы) – дальняя полупериферия (планеты-гиганты) – ближняя периферия (пояс Койпера) – дальняя периферия (облака Оорта), переходящая в вовсе неизвестные районы (сверхдальняя периферия). Ближняя периферия отделена от дальней так называемой гелиопаузой – областью, в которой солнечный ветер смешивается с межзвездным веществом; она считается началом межзвездной среды (расположена на расстоянии около 110–120 а. е. от Солнца; см. ниже). Далее (на расстоянии около 150 а. е.) находится так называемый рассеянный диск (о нем см. далее).

Такая *концентрическая структура систем (центр – полупериферия – периферия)* не редкость, ее можно наблюдать, например, в географическом распространении биологических видов⁵ или крупных политических образованиях, особенно в древних и средневековых империях, где из-за слабости коммуникации отдаленные территории были действительно дальней периферией. Еще не так

⁵ У ареалов многих видов различают его экологический центр (см., например: Шумилова 1979: 27) и соответственно полупериферию, а ближе к границам ареала – периферию. При этом из-за изменения климатических условий у границ ареала вид может удерживаться только в отдельных местах, проявляя большую избирательность (Там же). Дальняя периферия в отдельных случаях может быть расположена и за пределами основного ареала.

давно (в XVIII в.) от Петербурга до Камчатки можно было добраться по суше не быстрее, чем за три года.

Обратим внимание, что Солнечная система имеет ближнюю полупериферию в виде небольших планет, а дальнюю – в виде крупных планет. И, согласно современным данным, это нетипично для планетных систем. Дело в том, что среди экзопланет (то есть планет вне Солнечной системы) тела размером с Землю и тем более с Меркурием встречаются нечасто, а большинство экзопланет – это тела в несколько раз больше Земли. Мало того, у некоторых звезд ученые обнаружили так называемые «горячие юпитеры». Это огромные газовые гиганты, расположившиеся близко к своим звездам (Батыгин и др. 2016; Хауэлл 2015; см. также: Гринин 2017: гл. 7).

Расширение представления о размерах Солнечной системы еще более наглядно показывает, что планеты занимают ничтожную в пространственном отношении ее часть, примерно такую же, как редкие животные на бескрайних просторах полупустынь и пустынь. И все же они (как и представители фауны) являются наиболее интересными объектами.

Из восьми больших планет четыре образуют земную группу. Это самые близкие к Солнцу планеты: Меркурий, Венера, Земля и Марс. Они имеют твердую оболочку и медленно вращаются вокруг своей оси (а, например, громадный Юпитер совершает оборот вокруг своей оси меньше чем за 10 часов)⁶. Правда, в ранние периоды скорость вращения Земли вокруг своей оси была гораздо быстрее, но приливное трение Луны постепенно тормозило ее и будет тормозить в дальнейшем. Все меняется даже в мире планет и звезд.

Наибольшая из четырех планет земной группы – Земля. Эти планеты выделяют в отдельную группу, во-первых, по причине их размеров и массы (так как они в десятки раз меньше, чем планеты-гиганты), во-вторых, поскольку они имеют в основном минеральный, а не газовый состав. Они образованы преимущественно тяжелыми элементами, такими как кислород, кремний, железо, никель и др. В-третьих, эти планеты имеют сходство во внутреннем строе-

⁶ Но различия в этом плане огромные. Земля и Марс обращаются вокруг своей оси соответственно за 24 земных часа и 24 часа 37 минут, Меркурий – за 88 земных суток, тогда как Венера – и вовсе за 243 суток. То есть никакой ясной закономерности здесь нет, все очень индивидуально.

нии: у них есть железное (железоникелевое) *ядро*, нагретая пластичная *мантия*, состоящая из силикатных элементов, и твердый поверхностный слой – *кора*, образовавшаяся в результате выделения из мантии легких элементов. У всех, кроме Меркурия, есть относительно тонкая газовая атмосфера (наибольшая по плотности – у Венеры), которая удерживается притяжением планеты и вращается вместе с ней как единое целое. У планет земной группы нет колец и лишь немного (по сравнению с десятками у планет-гигантов) обращающихся вокруг них *спутников* (у Меркурия и Венеры спутников нет совсем, у Земли – один, у Марса – два, и то довольно странных [см. ниже]). Таким образом, *закон неравномерного распределения вещества* в процессе формирования планет Солнечной системы проявился исключительно ярко. Планеты-гиганты не только сами забрали львиную долю вещества, но и создали себе многочисленную свиту в виде десятков спутников и множества колец.

Планеты земной группы образуют внутреннюю область Солнечной системы. За орбитой Марса в дальней части внутренней области Солнечной системы (между 2,3 и 3,3 а. е. от Солнца) расположен Главный пояс астероидов – большая концентрация астероидов в сравнительно узком пространстве межпланетной среды между орбитами Марса и Юпитера. Существуют различные гипотезы относительно происхождения и судьбы этого пояса. Имеется красивая версия (сегодня малопопулярная), что это остатки разрушенной протопланеты (Маракушев и др. 2013: 135; Язев 2011: 175), которой автор данной гипотезы Генрих Ольберс дал поэтическое название – Фазтон. Другие считают, что астероиды никогда не были частью планеты. Это либо целая группа относительно крупных планетезималей (тел, из которых, как предполагают, складывались планеты), так сказать, оказавшихся лишними (Язев 2011: 175)⁷, либо несложившаяся планета, которой помешало гравитационное влияние Юпитера (Абрамова, Пшеничнер 2014: 16; Язев 2011: 174).

⁷ Есть мнения, что массы астероидов не хватило бы на полноценную планету. Общая масса всех астероидов, открытых и неоткрытых, по разным оценкам, не превышает величины от 0,01 до 0,1 массы Земли (Язев 2011: 165). Но при максимальной величине 0,1 массы Земли массы астероидов все же хватило бы на планету массой с Меркурий. Однако полагают, что большие различия в химическом составе астероидов также не позволяют считать их осколками одного небесного тела (Там же: 176).

Базовая на сегодня версия сводится к тому, что здесь планета так и не сформировалась, а многочисленные астероиды в большинстве своем сохранились с древних времен, когда вся Солнечная система напоминала нынешний Главный пояс астероидов (Язев 2011: 175).

Существование архаичных объектов с объектами, которые уже далеко продвинулись по пути эволюции, – характерная черта всех уровней последней. Во-первых, это показывает, что не все объекты способны к эволюции либо для нее не сложились необходимые условия (например, не произошло радикального изменения внешней среды). Во-вторых, увеличивается разнообразие объектов. В-третьих, могут складываться прочные взаимосвязи или даже симбиозы архаических и эволюционно продвинутых объектов. Наиболее распространены такие симбиозы в биологическом мире (например, в виде пищевых цепочек, системы «хозяин – паразит» или взаимодействия крупного организма и бактерий, подобных бифидо- и лактобактериям в пищеварительной системе), но могут наблюдаться и в космосе. Так, спутники Марса – Фобос и Деймос, – в отличие от Луны или крупных спутников Юпитера, не шарообразной, а неправильной формы. Они представляют собой, по сути, астероиды, захваченные гравитацией Марса, и должны либо упасть на эту планету в астрономически относительно короткое время, либо их разорвет гравитация Марса.

Но, конечно, полагать, что архаичный объект можно рассматривать как полностью подобный древнему объекту, не всегда верно. Во всяком случае, в социальных явлениях это вело к ряду ошибок⁸. В данном случае астероиды не во всем походят на древние планетезимали, из которых складывались планеты Солнечной системы, в них уже произошли некоторые процессы. Кроме того, само движение астероидов существенно упорядочилось под влиянием гравитации Юпитера и Марса.

Так или иначе, в поясе астероидов находится намного более 500 000 небесных тел (Там же: 158), включая и карликовую планету Цереру. Но оценки этого числа постоянно увеличиваются, причем очень быстро. Столь большое число объектов демонстрирует *паттерн распределения*, то, насколько количество мелких объек-

⁸ В частности, в отношении трактовки половых обычаев, родственных отношений, общинных коллективов и т. д.

тов превосходит количество крупных, и подтверждает предположение, что по распределению во Вселенной и на всех уровнях эволюции основную часть объектов составляют мелкие объекты, а крупные – лишь небольшую часть.

Пояс астероидов отделяет орбиту Марса от орбиты Юпитера и, соответственно, внутреннюю область Солнечной системы от ее внешней области, где расположены остальные планеты, сильно отличающиеся от планет земной группы по многим параметрам: от размеров до химического состава, от структуры до числа спутников и наличия колец.

Группу *планет-гигантов* также составляют четыре планеты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Это огромные газовые шары невысокой плотности, состоящие преимущественно из водорода и гелия (Кусков и др. 2009: 34), которые не имеют твердой поверхности, какая есть у планет земной группы. Они недаром называются гигантами, так как в совокупности охватывают более 99 % всей массы вещества, обращающегося вокруг Солнца, то есть каждая из них во много раз больше планет земной группы (Там же: 30). Самый маленький из гигантов, Уран, больше Земли почти в 15 раз, а самый большой, Юпитер, – в 300 раз. И при этом необходимо учесть, что Земля – самая крупная планета земной группы. Такое распределение (более 99 % массы Солнечной системы в Солнце, а 99 % оставшейся массы – в планетах-гигантах), возможно, неслучайно. В целом *концентрация основного количества вещества и энергии в немногих объектах* – очень распространенный случай, хотя при этом возможность перехода к новым уровням обычно не реализуется в самых крупных объектах.

Планеты-гиганты (особенно Юпитер и Сатурн) смогли удержать основную часть водорода и гелия первичного протосолнечного облака и протопланетного диска (см. об этом: Гринин 2017: гл. 6). Это произошло, возможно, благодаря их удаленности от Солнца и собственным большим массам, а возможно, действовали и другие причины. Так или иначе, они обладают необычайно мощными водородно-гелиевыми атмосферами. Недра этих планет очень горячи (до 20 и даже более тысяч градусов). Предполагается, что у них есть твердые ядра, состоящие из металлизированного водорода, но они составляют лишь малую часть массы каждой планеты (см. *Главу 3*). Среди планет-гигантов наиболее изучены состав

и строение Юпитера и Сатурна и их крупных спутников (Kuskov, Kronrod 2001; 2005; Sohl *et al.* 2003; Grasset, Pargamin 2005)⁹. Строение Урана и Нептуна существенно отличается от строения Юпитера и Сатурна, что связано с большей удаленностью первой пары планет от Солнца и обстоятельствами их формирования (о последнем см.: Гринин 2017: гл. 6). Уран и Нептун имеют в своем составе и в своих атмосферах такие элементы, как аммиак, метан, углекислота и др.¹⁰, правда, в основном в виде льдов. Их даже порой называют «ледяными гигантами» (см., например: Guillot 1999: 74). Так, на долю ледяной мантии Нептуна приходится 70 % всей массы планеты, причем основная ее часть – вода (Ксанфомалити 2012d: 262). Но, конечно, говоря о составе планет-гигантов, следует иметь в виду, что химический их состав, особенно ядер, все еще известен слишком мало, чтобы делать какие-то определенные выводы (Ramírez *et al.* 2011).

У планет-гигантов обнаружено множество спутников разных размеров (от 13 до 63 у каждой, всего более 160) и системы колец из пыли и льда. Самое крупное из колец – у Сатурна, его легко можно увидеть с Земли.

За орбитой последней планеты внешней области Солнечной системы – Нептуна – расположен, как уже было сказано выше, пояс Койпера (или Эджворта – Койпера) – большое скопление малых тел (транснептуновые объекты и так называемые кентавры, по принятому названию в международной классификации). Пояс, в свою очередь, делится на два пояса: «внутренний» (в пределах 36–40 а. е.) и «классический» (в пределах 43–60 а. е.). При этом если внутренний край транснептунового пояса определен орбитой Нептуна (30 а. е.), то внешний его край неизвестен. Внешняя граница определяется по сравнительно резкому уменьшению числа небесных тел на более удаленных от Солнца орбитах.

Таким образом, занептуновое пространство превышает пояс астероидов по протяженности в 20 раз. Суммарная масса его объектов также значительно превышает массу пояса астероидов, но оценки этого превышения сильно расходятся. Во всяком случае,

⁹ Помимо основных компонентов водорода и гелия в состав атмосфер планет-гигантов в малых количествах входят метан и аммиак, углеводороды (этан, ацетилен), а также другие соединения, в том числе содержащие фосфор и серу.

¹⁰ Метан в составе Урана может составлять почти 2,5 % (Ксанфомалити 2012c: 253).

эта масса сопоставима с массой Земли или несколько превосходит ее (см., например: Язев 2011: 298). Не исключено, что разнообразные объекты пояса Койпера или, по крайней мере, их часть – это остатки протопланетной туманности, из которой образовалась Солнечная система (Абрамова, Пшеничнер 2014: 16).

Таким образом, каждую группу сложившихся систем – планет – окружают остатки архаической материи, которая не смогла эволюционировать. Так в древности и Средние века сложившиеся государства и империи окружали племена, находящиеся еще на догосударственном уровне, и аналоговые государству, но недостаточно централизованные образования (см. об этом: Гринин 2010; 2011a). А наряду с новыми биологическими видами сохраняются древние архаические виды. Также, если говорить о *правиле вариативной трансформации вещества*, отмечалось, что при структурировании систем в процессе самоорганизации не вся материя может собираться в более упорядоченные системы, часть материала остается неоформленной, неорганизованной.

Разделение областей Солнечной системы связано и с распределением вещества по его составу. Более твердые элементы характерны для планет внутренней части Солнечной системы, легкие – для внешней. При этом в связи с низкими температурами за поясом астероидов, особенно за пределами Юпитера и Сатурна, – царство льдов. Поэтому водяной и другие виды льдов (метановый, аммиачный, углекислый и др.) оказываются главными составляющими внешних планет (Уран, Нептун; см. выше), спутников планет-гигантов: Европы, Ганимеда, Каллисто, Титана, Тритона и др. (Кусков и др. 2009: 20).

Стоит отметить, что число ледяных объектов в поясе Эджворта – Койпера возрастает, при этом карликовые планеты и астероиды почти целиком состоят из льдов и скальных обломков (кометы также состоят в основном из льдов). Но льды здесь разной природы: это замерзшие вода, аммиак, метан и другие летучие вещества (подробнее см.: Delsanti, Jewitt 2006).

Таким образом, каждая область Солнечной системы отличается и по составу тел. За поясом Койпера располагается удаленный регион Солнечной системы – рассеянный диск. Малых тел там немного, но их орбиты могут простираться до 150 а. е. от Солнца. Предполагают, что в рассеянном диске формируются короткопе-

риодические (с периодом обращения в десятки лет) кометы¹¹. Именно в рассеянном диске на расстоянии около 120 а. е. от Солнца (в четыре раза дальше Нептуна) находится уже упоминавшаяся гелиопауза – область, где солнечный ветер смешивается с межзвездным веществом. Эта область считается началом межзвездной среды. Но это еще не граница Солнечной системы, а только намек на нее.

Гелиопауза – это предел так называемой гелиосферы. Гелиосфера – огромный пузырь в пространстве, заполненный солнечным ветром – потоком заряженных частиц, постоянно выбрасываемых Солнцем во все стороны, скорость которых ослабевает с удалением от Солнца за счет встречного давления межзвездного газа. На определенном расстоянии скорость солнечного ветра резко падает и перестает быть сверхзвуковой. Область (практически поверхность), в которой это происходит, называется границей ударной волны. Далее идет область гелиосферы, в которой солнечный ветер движется с дозвуковой скоростью. Она заканчивается, когда ионы солнечного ветра тормозятся еще больше и практически останавливаются. Граница, на которой это осуществляется, называется гелиопаузой. Это окончательная граница гелиосферы, за которой начинается межзвездное пространство (Данилова, Кожевников 2008: 96–97). В декабре 2004 г. по показаниям магнитометра было зафиксировано пересечение «Вояджером-1» гелиосферной ударной волны на расстоянии 94 а. е. В 2007 г. «Вояджер-2» пересек (что зафиксировано) расстояние в 84 а. е. Объяснить разницу в 10 а. е. ученые пока не могут (Измоденов 2016: 16–19; см. подробнее: Он же 2007; Баранов и др. 2009). В 2012 г. «Вояджер-1», а в 2018 г. «Вояджер-2» вышли за пределы гелиопаузы, но чтобы реально выйти за пределы Солнечной системы, им потребуется много времени. Согласно данным НАСА, никто из нас не доживет до того момента, когда это бесспорно станет реальностью (Романова 2017).

Наконец, объект, о котором выше было сказано, – гипотетическое облако Оорта (Oort 1950). Разброс мнений по поводу его границ очень велик: от 2000–5000 а. е. до 50 000 а. е., 100 000 а. е. и даже больше – до 150 000 а. е. (Dones *et al.* 2004; Morbidelli 2011; Williams 2016; Кусков и др. 2009: 40). Считается, что облако Оорта является остатком исходного протопланетного диска (Абрамова, Пшеничнер 2014: 17; Dones *et al.* 2004). Предполагается, что объекты в этом облаке распределены в виде сферы вокруг Солнечной си-

¹¹ Источником короткопериодических комет с периодом вращения от нескольких лет до нескольких десятков лет, вероятно, является также транснептуновый пояс.

стемы (Данилова, Кожевников 2008: 96). Эта сферическая область предположительно является местом скопления астероидов с длинным периодом обращения, а также резервуаром, откуда к нам прилетают долгопериодические кометы. При этом число называемых комет выглядит фантастическим: по некоторым предположениям, в облаке Оорта содержатся несколько триллионов ядер комет (Кусков и др. 2009: 40), размеры которых превышают 1,3 км (Абрамова, Пшеничнер 2014: 17).

Таким образом, гипотетическое облако Оорта рассматривается большинством исследователей как древний резервуар ледяных кометных ядер, сформировавшихся на ранних стадиях образования Солнечной системы, который и в наше время продолжает поставлять кометы в ее внутренние области (Язев 2011: 332).

Очевидно, что основная часть Солнечной системы еще вовсе не исследована. Поэтому о ее границах можно говорить только весьма предположительно. Предельной границей Солнечной системы выступает линия, где гравитационное влияние Солнца перестает преобладать над гравитацией соседних звезд. Это расстояние порядка 125 000 а. е., то есть 2 световых года. И если до ближайшей к нам звезды Альфа Центавра 1,295 пк, или немногим более 4,2 светового года, или примерно 268 000 а. е., то гравитационная граница Солнечной системы лежит почти на полпути к Альфе Центавра. Но, конечно, провести границы звездных систем не так просто. Собственно, проведение границ везде оказывается крайне сложным. Небезынтересно, однако, что сама граница Солнечной системы имеет шарообразную форму. Это внешний край облака Оорта, которое также шарообразно. Граница эта весьма обширна. Таким образом, шарообразность как наиболее оптимальная форма далеко выходит за пределы только твердых крупных тел.