

Образование звезд из протозвездного газопылевого облака сопровождается формированием холодных планет, которые отражают свет центральной звезды. За последнее десятилетие было обнаружено свыше 200 планет и целый ряд планетных систем вокруг других звезд, и число это быстро увеличивается.

В этом разделе мы рассмотрим основные методы обнаружения планет вокруг других звезд и важнейшие закономерности внесолнечных планет и планетных систем. Начнем с краткого описания нашей Солнечной системы.

### 8.1. Солнечная планетная система

Солнечная система является единственной детально исследованной планетной системой, хотя и остается неизвестным, насколько ее свойства типичны для планетных систем у других звезд.

Основная масса вещества, окружающего Солнце, заключена в планетах. Крупнейшие из них (в порядке возрастания расстояния до Солнца): Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. До 2006 г. к числу больших планет относили также Плутон. Открытый в 1930 г., он считался самой далекой от Солнца планетой (большая полуось орбиты равна 39.5 а. е.). Однако из-за эллиптичности орбиты он иногда бывает ближе к Солнцу и Земле, чем Нептун (последний раз это имело место в конце XX века). С открытием у Плутона спутника выяснилось, что Плутон имеет неожиданно маленькую массу, значительно меньшую, чем масса любой другой пла-

неты — примерно в 6 раз меньше, чем даже масса Луны. Позднее, в конце XX и начале XXI веков, за орбитой Нептуна было открыто много мелких тел, получивших название *транснептуновых объектов* (ТНО). В некоторых случаях их орбиты сильно вытянуты, так что они уходят на сотни а. е. от Солнца. Самые крупные из них оказались сопоставимы с Плутоном по размеру (сотни километров) и массе. Поэтому на Генеральной Ассамблее Международного Астрономического Союза в августе 2006 г. было принято решение отнести Плутон и несколько других тел сходного размера (прежде всего, к ним относятся крупнейший астероид Церера, находящийся между орбитами Марса и Юпитера, и далекий ТНО UB313 или Эрида) в отдельную категорию карликовых планет. Их диаметры составляют около 1000 км. Как и большие планеты, они имеют сфероидальную форму поверхности, свидетельствующую о решающей роли гравитации в установлении равновесной фигуры. Важно, что в отличие от карликовых планет, вблизи орбит больших планет отсутствуют тела, сопоставимые с ними по массе. Это следствие того, что когда в процессе формирования планета приобретает достаточно большую массу, ее гравитационное поле «рассеивает» орбиты близко подходящих к ней более мелких тел.

Помимо восьми больших и нескольких карликовых планет в состав Солнечной системы входят *малые тела*: *спутники планет, астероиды и кометы*.

Известны многие десятки тысяч астероидов. Их размеры невелики: лишь около 30 астероидов достигают в диаметре 200 км. В основном, известные астероиды находятся между орбитами Марса и Юпитера, где они образуют так называемый *главный пояс астероидов*. Примерно вдесятеро дальше, за орбитой Нептуна, располагается второй, более широкий и разреженный пояс астероидов, называемый *поясом Койпера* (размер больших полуосей орбит — 35–56 а. е.). Эти тела, состоящие в основном из льда, относятся к наиболее близким к Солнцу транснептуновым объектам. Некоторые ТНО могут удаляться от Солнца на огромные расстояния.

Кометы представляют собой твердые и непрочные образования из водяного льда и других сконденсировавшихся газов с примесью пыли. Основное количество комет также относится к ТНО, хотя существуют и короткопериодические кометы со сравнительно небольшими размерами орбит. Большая часть комет существует миллиарды лет далеко от Солнца и планет, фактически в межзвездном

Таблица 8.1. Некоторые физические характеристики восьми планет, Плутона и Луны (большинство данных — по книге I. de Pater, J. J. Lissauer, Planetary sciences, Cambridge Univ. Press, 2005)

объект (1)	a (2)	M (3)	$\rho$ (4)	$V_{esc}$ (5)	$T_{eff}$ (6)	$B_0$ (7)	$P$ (8)	состав (9)	H (10)
Меркурий	0.387	3.30	5.4	4.4	100-725	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-15}$	O,Na	13-95
Венера	0.723	48.7	5.2	10.4	733	—	92	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	16
Земля	1.00	59.74	5.5	11.2	288	0.31	1.0	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	8.5
Марс	1.52	6.42	3.9	5.0	215	—	$6 \cdot 10^{-3}$	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	10
Юпитер	5.20	18986	1.33	59.5	124	4.3	—	H <sub>2</sub> , He	18
Сатурн	9.54	5685	0.69	35.5	95	0.22	—	H <sub>2</sub> , He	35
Уран	19.19	868.3	1.32	21.3	59	0.14	—	H <sub>2</sub> , He	20
Нептун	30.07	1024.3	1.64	23.5	59	0.14	—	H <sub>2</sub> , He	19
Плутон	39.48	0.13	2	4	$\approx 45$	—	$< 10^{-5}$	N ?	33
Луна	1.00	0.735	3.34	2.38	277	—	$3 \cdot 10^{-15}$	He, Ar	65

Колонки: (1) — название объекта,  
 (2) — среднее расстояние от Солнца, а. е.;  
 (3) — масса,  $10^{23}$  кг;  
 (4) — средняя плотность, г/см<sup>3</sup>;  
 (5) — скорость убегания  $\sqrt{2GM/R}$ , км/с;  
 (6) — средняя температура поверхности (для планет земной группы и Плутона) и эффективная температура (для планет-гигантов), для Меркурия отражена суточная и сезонная вариации, К;  
 (7) — магнитная индукция на магнитном экваторе, гаусс;  
 (8) — давление у поверхности, бар;  
 (9) — основные газы, составляющие атмосферу;  
 (10) — высота атмосферы вблизи поверхности, соответствующая падению плотности в  $e$  раз, км.

пространстве — в гигантском по размеру (до  $10^5$  а. е.) так называемом облаке Оорта, которое окружает Солнечную систему. И только небольшая часть комет в силу случайных гравитационных возмущений попадает во внутреннюю область Солнечной системы, где по мере приближения к Солнцу у них развивается газопылевой «хвост», и они быстро разрушаются. По современным представлениям, кометы — это рыхлые тела, возникшие в околосолнечной среде еще до образования массивных планет.

Солнечная система обладает рядом важных закономерностей. Перечислим некоторые из них.

1. Подавляющая часть полной массы Солнечной системы принадлежит Солнцу, т. е. центральному телу. На долю планет и остальных тел приходится чуть более 0.1%. Но при этом суммарный момент импульса планет примерно в 50 раз больше, чем у Солнца. Уже одно это говорит о том, что планеты никогда не были частью Солнца, а возникли из вещества с более высоким удельным моментом импульса.
2. Все планеты обращаются вокруг Солнца в одну сторону. При этом орбиты планет и многих астероидов близки к окружностям и лежат почти в одной плоскости. Это следствие того, что планеты возникли из вещества газо-пылевого протопланетного диска, вращавшегося вокруг Солнца. Наибольшим наклоном к эклиптике (равно как и наибольшей вытянутостью) обладают орбиты Плутона ( $17^\circ$ ) и Меркурия ( $7^\circ$ ). Осевое вращение планет отличается значительно большим разнообразием. Так, из восьми больших планет две вращаются в направлении, противоположном орбитальному движению (Венера, Уран), причем Уран — почти на боку. Последнее относится и к Плутону. Это указывает на то, что при формировании планет путем объединения мелких тел со своими моментами импульса большую роль играли случайные процессы.
3. По размерам, массе и общему строению большие планеты делятся на две группы: планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс), расположенные внутри главного пояса астероидов, и планеты-гиганты — вне его (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун). Планеты земной группы значительно меньше гигантов по массе и размерам. Они обладают большей средней плотностью вещества, сравнительно медленным вращением и малым числом спутников. Планеты-гиганты в десятки и сотни раз массивнее. Они не имеют жидких или твердых каменных поверхностей под облачным слоем. В основном планеты-гиганты состоят из водорода и гелия; доля всех других элементов в них значительно меньше, чем у планет земной группы. Мелкие тела, обращающиеся вокруг планет-гигантов в их экваториальной плоскости, образуют системы тонких колец. Наиболее яркими и протяженными кольцами обладает Сатурн.

Возраст Солнечной системы определен на основании лабораторного изотопного анализа земных скальных пород, а также метеоритов и доставленных на Землю космическими аппаратами образцов лунного грунта. Считается, что все планеты сформировались приблизительно в одно и то же время: 4.5–5 млрд. лет тому назад, то есть их формирование шло вслед за формированием Солнца.

Из-за того, что внутренняя область протопланетного диска сильнее нагревалась Солнцем, плотность, температура и химический состав протопланетного вещества были различными во внешних, далеких от Солнца, и внутренних, близких к нему, частях диска. Это и привело к сильному различию между более близкими и более далекими от Солнца планетами. В Солнечной системе нет похожих друг на друга планет, любая обладает специфическими особенностями. Так, основная особенность Земли заключается в наличии большого количества жидкой воды на поверхности и высоком содержании кислорода в атмосфере — эти условия сделали возможными развитие и поддержание высокоорганизованной жизни.

Исследование физических свойств планет и других тел Солнечной системы проводится теми же астрофизическими методами, что и звезд или межзвездной среды: с помощью спектральных и фотометрических измерений в самых различных областях спектра — от радио до гамма. Лишь два метода являются специфическими. Это радиолокация планет, а также непосредственный анализ атмосферы или вещества на поверхности с помощью космических аппаратов, работающих вблизи планеты (астероида, кометы) или на его поверхности. К этому надо добавить также возможность исследования отдельных областей планет, особенностей их поверхностей или облачного покрова, что для планет земной группы и спутников планет позволяет использовать те же подходы, какие используются в геологии и физике атмосферы для исследования Земли. Так, изучение атмосфер Венеры и Марса, проведенные наземными и космическими методами, позволили не только оценить их химический состав, но и рассчитать вертикальные профили плотности и температуры на различных широтах, исследовать оптические свойства аэрозолей, образующих облака, изучить течения в атмосферах, а также суточные и годичные вариации свойств атмосфер.

Свойства каждой планеты зависят от трех важнейших параметров: массы, расстояния от Солнца и химического состава. Масса определяет силу тяжести на поверхности планеты, от массы, тем-

пературы и химического состава зависит плотность атмосферы и скорость ее испарения в окружающее пространство. Расстояние от Солнца отражается прежде всего на температуре планеты и ее химическом составе, а, следовательно, от того, в каком состоянии находится вещество на поверхности или в атмосфере. Температура также зависит от плотности и состава атмосферы. Наличие атмосферы может как сглаживать суточные температурные вариации (Венера), так и препятствовать нагреву, отражая значительную часть излучения Солнца (Земля), или, наоборот, удерживая тепло, благодаря парниковому эффекту (Венера).

Все планеты и крупные спутники обладают атмосферой, но ее плотность может быть слишком мала для прямых измерений. Даже если тело полностью лишит атмосферу, разреженная среда «восстановится» благодаря непрерывной бомбардировке поверхности ионами солнечного ветра или микрометеоритами, реже — вследствие столкновений с кометами. Другими источниками атмосферы могут быть медленное высвобождение газов из твердых пород и вулканическая деятельность (Ио, спутник Юпитера) или гейзеры (Тритон, спутник Сатурна).

Небольшая доля частиц в разреженной атмосфере всегда имеет скорость, сопоставимую со скоростью убегания (вследствие теплового движения частиц, диссоциации молекул или ионизации газов). По этой причине все планеты медленно теряют свои атмосферы, так что тела малых масс практически их лишены. В первую очередь теряются легкие газы, поэтому в настоящее время они сохранились в большом количестве только у планет-гигантов.

Внутреннее строение планет рассчитывается путем создания соответствующих моделей, учитывающих плотность планеты, ее состав и физические свойства пород или газов при очень больших давлениях. Планеты земной группы должны содержать железные или железо-никелевые ядра. В планетах-гигантах водород на большой глубине переходит в металлизированное состояние, а в самом ядре можно ожидать чудовищно сжатые расплавы тяжелых пород.

Хотя источником энергии планетных тел является прежде всего поглощаемое ими солнечное излучение, у них есть и свои источники тепла. Для больших планет внутренние источники энергии сопоставимы с энергией, получаемой от Солнца. Вероятнее всего, они связаны с процессом медленного сжатия. Для спутников Юпитера Ио и Европы мощным источником нагрева является действие при-

ливных сил со стороны большой планеты. Другими источниками нагрева планет могут быть радиоактивный распад элементов с большим временем полураспада  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  (для планет земной группы), а в случае спутников Юпитера — еще и нагрев электрическими токами, которые индуцируются при их движении в магнитном поле планеты. Для Юпитера, Сатурна и Нептуна наличие несолнечных источников (прежде всего, гравитационных) приводит к заметно более высокой температуре атмосферы, чем ожидалось бы только от нагрева Солнцем. В прошлом, на этапе формирования планет, большую роль в тепловом балансе, по-видимому, играла энергия, выделяющаяся при падении мелких тел, непрерывно бомбардировавших молодые планеты.

Планеты не только отражают свет Солнца. Как нагретые тела, они имеют собственное излучение, энергия которого заключена, в основном, в средней и далекой ИК области (5–50 мкм). У планет с сильным магнитным полем регистрируется также слабое излучение в радиодиапазоне (синхротронное излучение). Основной поток радиоволн от Земли имеет искусственное происхождение.

Интенсивность теплового излучения планеты характеризуется эффективной температурой  $T_{eff}$ , определяемой уравнением теплового баланса:

$$4\pi\sigma T_{eff}^4 R^2 = \pi R^2 [(1 - A)F_0 + F_{int}] ,$$

здесь  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $R$  — радиус планеты,  $(1 - A)$  — доля солнечной энергии, поглощаемой планетой,  $F_0$  — поток излучения от Солнца в подсолнечной точке,  $F_{int}$  — член, учитывающий вклад внутренних источников тепла (существенен лишь для планет-гигантов). Поскольку  $R$  входит в обе части уравнения, итоговая оценка  $T_{eff}$  не зависит от радиуса планеты. Очевидно, что средняя температура на освещенной стороне планеты больше, а на ночной — меньше, чем  $T_{eff}$ .

Важной характеристикой планет является магнитное поле. Оно обнаружено у всех планет кроме Венеры и Марса (у Меркурия — крайне слабо). Само наличие магнитного поля связывают с конвективными потоками проводящего вещества в недрах планеты. Наличие поля меняет характер взаимодействия планеты с потоками ионизованного газа, непрерывно идущими от Солнца — солнечным ветром. В случае тел без магнитного поля (например, Луны) частицы солнечного ветра непосредственно бьют по поверхности и застре-

вают в ней. Если у планеты существует магнитное поле, оно взаимодействует с электропроводящей плазмой солнечного ветра, и, отклоняя частицы, не пропускает их внутрь магнитосферы — полости, «контролируемой» магнитным полем планеты. Со стороны Солнца поток ветра сжимает магнитное поле до установления примерно равновесия между давлением набегающего потока со скоростью  $v$  и давлением магнитного поля:  $\rho v^2 \approx B^2/8\pi$ . На том расстоянии от планеты, где достигается это равенство (для Земли — это 10–15 радиусов планеты), взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем вызывает ударную волну в потоке солнечного ветра, тормозящую летящие частицы. Поток частиц становится дозвуковым, и он «обтекает» магнитосферу как препятствие, образуя длинный магнитный хвост планеты. Самое сильное магнитное поле наблюдается на Юпитере ( $\sim 10$  Гс — более чем на порядок сильнее земного); поток солнечного ветра оно останавливает на расстоянии около 40 радиусов планеты.

Часть энергичных солнечных частиц (протоны, электроны) захватывается магнитным полем планеты, образуя радиационные пояса вокруг нее. Небольшая доля быстрых заряженных частиц, двигаясь вдоль линий магнитной индукции, теряет энергию в верхних слоях атмосферы, влетая в нее в области магнитных полюсов. Этот процесс возбуждает атомы и вызывает свечение атмосферных газов (полярные сияния). Такие сияния наблюдаются на Земле, Юпитере и Сатурне.

Основной силой, управляющей движением тел Солнечной системы, является гравитация. Но для малых тел существенны и негравитационные взаимодействия. Так, для пылинок микронных размеров в межпланетном пространстве главной силой является отталкивающая сила давления солнечного света:

$$F_{rad} \approx \frac{L_{\odot} S}{4\pi c D^2} \cdot Q,$$

где  $D$  — расстояние до Солнца,  $S$  — эффективная площадь сечения пылинки, а  $Q$  — коэффициент, учитывающий ее отражательную способность ( $Q = 1$  для абсолютно черного тела и  $Q = 2$  для зеркального отражения). Очевидно, что отношение гравитационной силы притяжения и силы отталкивания не меняется с расстоянием  $D$ , и те пылинки, для которых давление света преобладает, выметаются из Солнечной системы.



Для более крупных тел (миллиметровых и сантиметровых размеров) существенной может оказаться тормозящая сила, связанная с так называемым эффектом Пойнтинга–Робертсона. Он заключается в том, что тело,двигающееся по орбите с азимутальной скоростью  $v_\varphi$ , медленно теряет свой орбитальный момент импульса  $mv_\varphi D$ , поглощая и изотропно переизлучая солнечный свет. Природа этого эффекта становится очевидной, если рассматривать процесс поглощения света в системе отсчета, движущейся вместе с телом по круговой орбите со скоростью  $v$ . Из-за конечности скорости света в этой системе отсчета направление на источник света — Солнце — изменится на угол порядка  $v/c$  (абберация света). Поэтому импульсы входящих фотонов будут содержать компоненту

$$p_1 \approx \frac{h\nu}{c} \cdot \frac{v}{c},$$

направленную противоположно вектору скорости тела. Вследствие этого, при поглощении света возникает сила торможения  $dp_1/dt$ , которая приводит к тому, что мелкие тела начинают двигаться по спирали, постепенно приближаясь к Солнцу. В целом, действие негравитационных сил приводит к тому, что за несколько сотен тысяч лет пылевое содержание межпланетной среды должно обновляться (по-видимому, это обновление происходит в результате разрушения мелких астероидов и комет).

Действия как гравитационных, так и негравитационных сил прекрасно иллюстрируют процессы, наблюдаемые в кометах. Их хвосты всегда направлены в сторону, противоположную Солнцу. Силы светового давления, действующие на мелкие пылинки, выброшенные ядром кометы, частично или полностью компенсируют силу солнечной гравитации. В результате этого пылинки движутся от Солнца (относительно кометы), образуется искривленный пылевой хвост.

Газы кометы, интенсивно выделяющиеся в результате нагрева ядра и выбрасываемые из ядра по всем направлениям, образуют хвост по иной причине. Из-за прозрачности разреженного газа силы отталкивания света на него почти не действуют. Но газы ионизируются солнечным УФ излучением, что приводит к появлению вокруг ядра кометы электропроводящей среды. Эта разреженная среда начинает взаимодействовать со слабым (несколько десятков микрогаусс) магнитным полем солнечного ветра, «обдувающим» комету. Линии индукции поля деформируются, возникает магнитное давле-



ние порядка  $B^2/8\pi$ , приложенное к кометной плазме. В итоге газ кометы образует гигантский плазменный хвост ничтожной плотности, не совпадающий с пылевым, длина которого может измеряться десятками миллионов километров.

Другая негравитационная сила, действующая на комету в целом, которая может медленно изменять параметры ее орбиты — это реактивная сила, связанная с неизотропным выбросом вещества ядром кометы при его нагреве или разрушении. Эта сила может также изменять скорость вращения ядер комет.

Таким образом, изучение Солнечной системы позволяет исследовать комплекс сложных физических явлений, приводящих к медленной эволюции как планет, так более мелких тел в околозвездном пространстве.

## 8.2. Методы обнаружения планет вокруг звезд

**А) Динамический метод.** Основан на измерении периодических вариаций лучевой скорости звезды по доплеровскому смещению линий в ее спектре при движении вокруг центра масс планетной системы. Это исторически первый (1995 г., система 51 Peg) и наиболее продуктивный метод обнаружения планет вокруг звезд.

Рассмотрим планету массой  $M_p$  на круговой орбите вокруг центральной звезды массой  $M_*$ . Период обращения планеты  $P = 2\pi/\omega$ , полуось орбиты  $a$ , наклонение орбиты  $i$ . Расстояние планеты до центра масс  $a_p = aM_*/(M_p + M_*)$ , а звезды —  $a_* = aM_p/(M_p + M_*)$ . Амплитуда лучевой скорости звезды, связанная с ее движением вокруг центра масс, равна

$$K_r = \omega \cdot a_* \sin i \approx (GM_*\omega)^{1/3} \left( \frac{M_p}{M_*} \right) \sin i, \quad (8.1)$$

здесь мы воспользовались условием  $M_* \gg M_p$  и выразили полуось орбиты через период с помощью 3-го закона Кеплера. Измерение положений большого числа линий поглощения в оптических спектрах звезд поздних классов (ГКМ) позволяет выявлять их вариации с точностью до  $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-8}$ , т. е. измерять изменения лучевых скоростей звезд до нескольких метров в секунду (!) Из приведенной выше формулы следует, что измерение вариаций лучевых скоростей звезд с точностью до 1 м/с позволит выявлять наличие вокруг звезд типа