



Рис. 8.3. Распределение масс экзопланет (в единицах массы Юпитера). Данные на май 2006 г. (J. Schneider and C. Dedicu).

ограничена временем наблюдений (порядка 10 лет). Заметный дефицит «тяжелых» планет-гигантов называется проблемой «пустыни коричневых карликов» — отсутствие коричневых карликов с масса-ми 7–80 M_J вокруг звезд на расстояниях ближе 3 а. е., в то время как они часто наблюдаются одиночными.

В) Многие орбиты планет имеют значительный эксцентриситет (среднее значение $\langle e \rangle = 0.25$).

Г) Планеты чаще встречаются вокруг звезд с повышенным содержанием металлов по сравнению с Солнцем. Около 30% изученных FGK-звезд с повышенным содержанием металлов имеют планеты, в то время как среди звезд с пониженным содержанием металлов планеты встречаются лишь в 3% случаев.

8.4. Образование планет и их систем

8.4.1. Протопланетные диски

Из-за наличия момента импульса газового облака, процесс звездообразования должен сопровождаться появлением дискообразных оболочек вокруг родившихся звезд. В отличие от экзопланет, протопланетные диски гораздо легче наблюдать — их размеры достигают 1000 а. е., а суммарная площадь частиц, составляющих протопланет-

ный диск, на много порядков больше площади поверхности планет. Пылинки в диске излучают сами и отражают свет звезды и поэтому могут наблюдаться современными телескопами с больших расстояний. Время их жизни оценивается в 10^6 – $3 \cdot 10^7$ лет. Наиболее интенсивно такие диски излучают в ИК и миллиметровом диапазоне (2 мкм–1 мм). Излучение характеризуется протяженным спектром, поскольку различные области диска имеют широкий интервал температур от ~ 1000 К вблизи звезды до ~ 30 К на периферии. Примером протопланетных дисков может служить диск вокруг звезды β Живописца, открытый космической ИК-обсерваторией IRAS. Внутренние области диска обеднены диффузной материей (газом, пылью), в диске наблюдаются признаки кометообразных структур, предположительно связанных с протопланетными телами.

Большинство протопланетных дисков наблюдается вокруг молодых звезд типа Т Тельца, находящихся в областях звездообразования. Спектральные измерения указывают на вращение газа в дисках. Диски уже найдены вокруг более чем 100 звезд главной последовательности на расстояниях до 50 пк от Солнца.

8.4.2. Образование планет Солнечной системы

Согласно общепринятой теории образования планет Солнечной системы, основы которой были заложены О. Ю. Шмидтом, В. С. Сафроновым, П. Гольдрайхом и др., формирование планет происходит в газопылевых дисках и проходит через несколько стадий, отличающихся разным характером взаимодействия частиц.

Сначала пылевые частицы оседают в толстом слое в плоскости протопланетного диска и слипаются при столкновениях, образуя макроскопические объекты с размером 0.01–10 м, которые вращаются вокруг центральной звезды по близким орбитам (подобно кольцам Сатурна). На следующей стадии с длительностью 10^4 – 10^5 лет столкновения приводят к образованию небольших тел — планетезималей с размером порядка нескольких км. Гравитационное взаимодействие между планетезималиями ведет к группировке их орбит вблизи дискретных значений. На следующей фазе этого процесса столкновения частично разрушают планетезималии, но вызывают рост наиболее крупных из них, формируя таким образом отдельные зародыши планет внутри газопылевого диска. В Солнечной системе в области планет земной группы масса отдельных зародышей должна была быть $\sim 10^{23}$ кг, и еще большей — в области планет-гигантов.

Дальнейшая эволюция (столкновения между планетезималиями, фрагментация, аккреция) приводит к постепенному росту протопланет. Необходимое время для роста до массы Луны составляет не менее 10^5 лет. Рост массы до земных значений занимает около 10^8 лет и сопровождается динамическим «разбрасыванием» планетезималей и малых фрагментов из области формирования планет.

Во внешних областях протосолнечной системы твердые зародыши могли нарастить массу до $10\text{--}30 M_E$, после чего они стали аккрецировать газ (H, He), благодаря возросшей гравитации. Так образовались планеты-гиганты — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (модель аккреции на твердое ядро, Поллак 1984). В аккреционной модели планеты-гиганты могут формироваться только достаточно далеко от Солнца: ближе к звезде из-за более высокой температуры льдинки (из воды, метана, аммиака и других летучих соединений) не образуются, и аккреция газа не эффективна.

Существует и альтернативная модель, согласно которой начальная стадия формирования планет-гигантов была связана с развитием гравитационной неустойчивости в холодном протопланетном диске.

Формирование планет завершается «выметанием» газа и пыли из области между орбитами планет. Детали этого процесса зависят от (неизвестной) вязкости протопланетного диска, поэтому решающие факторы, определяющие окончательную массу планеты, до сих пор не ясны. Современная теория образования планет Солнечной системы не дает четкого предсказания относительно размеров их орбит, однако все же предсказывает характерное соотношение между ними: радиусы орбит возрастают примерно логарифмически.

Планетезимали, которые так и не успели слиться в большие тела, а также фрагменты столкновений протопланет, наблюдаются в Солнечной системе как кометы и метеороиды. Метеороиды являются космическими «камнями» (состав — комбинация железных и магниевых силикатов, а также металлического железа) размером до нескольких сотен метров, имеют случайные орбиты. Кометы, напротив, являются большими комками «грязного снега» из замерзшей воды, углекислоты и пылинок, их размеры достигают нескольких километров. В Солнечной системе кометы составляют два больших семейства. Первое семейство — это кометы из пояса Койпера, который простирается от орбиты Нептуна (> 50 а. е.) до $100\text{--}1000$ а. е. и, по-видимому, представляет собой «остатки» протопланетного дис-

ка. Второе семейство — это кометы из облака Оорта. Считается, что оно содержит $\sim 10^{12}$ комет с различными наклонениями орбит к плоскости Солнечной системы и простирается до нескольких десятков или даже тысяч а. е. Полная масса облака Оорта, однако, не превышает нескольких масс Земли ($\sim 10^{-5} M_{\odot}$). Облако Оорта образовалось на ранних стадиях формирования Солнечной системы из планетезималей, выброшенных с периферии Солнечной системы при гравитационных столкновениях с большими планетами. Еще большее количество комет (планетезималей) должно было навсегда покинуть Солнечную систему.

На заключительных этапах образования планет оставшиеся фрагменты часто сталкивались с планетами, как свидетельствуют многочисленные кратеры на поверхности планет земной группы, на Луне и на спутниках других планет. Не исключено, что сама Луна является «осколком» мощного столкновения большого фрагмента с прото-землей. Даже в настоящее время изредка происходят столкновения астероидов и комет с планетами. Последствия сильного столкновения могут носить характер природной катастрофы. Предполагается, что в прошлом столкновения Земли с астероидами размером более 1 км приводили к известным в палеонтологии периодам массового вымирания биологических видов (последнее из них произошло примерно 65 млн. лет назад).

Обрисованная выше схема происхождения Солнечной системы основана на результатах самых разных исследований, включающих: анализ орбитальных движений планет и их устойчивость; измерения масс и периодов вращения планет, их спутников и колец; анализ химического и изотопного состава атмосфер планет; определение возрастов небесных тел радиоизотопным методом; статистический анализ кратеров; изучение метеоритов и комет, и т. д.

К нерешенным проблемам относятся механизмы перераспределения момента импульса в Солнечной системе, протяженность формирования планет-гигантов, проблема наклона оси вращения Солнца (на 7°) относительно средней плоскости орбит планет и т. д.

8.4.3. Образование гигантских экзопланет

Предполагается, что как и в Солнечной системе, планеты-гиганты вокруг других звезд образовались в результате аккреции газа на ядра из твердых пород и льда, которые сформировались в результате слипания пылинок в протопланетном диске.

Планеты-гиганты, вероятно, образуются на расстояниях больше 3 а. е. от звезды, где их приливные полости Роша, из которых они могут аккрецировать вещество, достаточно велики и заключают много газа. Однако как следует из наблюдений, у многих звезд планеты-гиганты с массой в несколько масс Юпитера наблюдаются на расстояниях ближе 0.1 а. е. Из этого можно заключить, что такие планеты мигрировали из более далеких областей диска в процессе эволюции протопланетного облака. Миграция планет внутрь диска может происходить по двум причинам — из-за обмена момента импульса с диском или из-за увлечения газом, аккрецирующим на центральную звезду в вязком протопланетном диске.

Происхождение больших эксцентриситетов экзопланет-гигантов (значительно больших, чем в Солнечной системе, где эксцентриситет орбиты Юпитера на 5 а. е. всего 0.048) до сих пор окончательно не выяснено. Действительно, взаимодействие планеты с газопылевым диском должно было бы всегда приводить к уменьшению эксцентриситета. По-видимому, рост эксцентриситета орбит экзопланет происходит уже после завершения основной фазы аккреции газа из-за динамических взаимодействий планет, часто находящихся на резонансных орбитах. Эксцентриситеты планет с полуосями орбит менее 0.1 а. е. малы, что говорит об эффективности механизма потери энергии, приводящего к «округлению» орбит, по-видимому связанного с приливным взаимодействием планеты со звездой.