

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....9

Введение

Слепцы и планеты.....11

Первая часть

ПЫЛЬ НА ФАБРИЧНОМ ПОЛУ

Глава 1

Фабрика за работой..... 33

Глава 2

Небывалая стройка..... 49

Глава 3

Вся проблема в газе.....69

Глава 4

Воздух и море..... 85

Вторая часть

ОПАСНЫЕ ПЛАНЕТЫ

Глава 5

Планета, которой не может быть..... 113

Глава 6

Мы — отклонение от нормы..... 134

Глава 7

Вода, алмазы, лава — неведомые рецепты
планетообразования..... 168

Глава 8	
Миры вокруг мертвых звезд	203
Глава 9	
Системы с двумя солнцами	234
Глава 10	
Место преступления — планетная система	272
Глава 11	
Блуждающие планеты	300

Третья часть

БЛАГОУСТРОЕННЫЕ ПЛАНЕТЫ

Глава 12	
Условия для жизни	325
Глава 13	
Поиски второй Земли	344
Глава 14	
Инопланетные пейзажи	365
Глава 15	
За пределами зоны жизни	398
Глава 16	
Фабрика лун	421
Глава 17	
Поиски жизни	437
Словарь терминов	450
Дополнительная литература	455
Благодарности	470
Предметно-именной указатель	473

ПРЕДИСЛОВИЕ

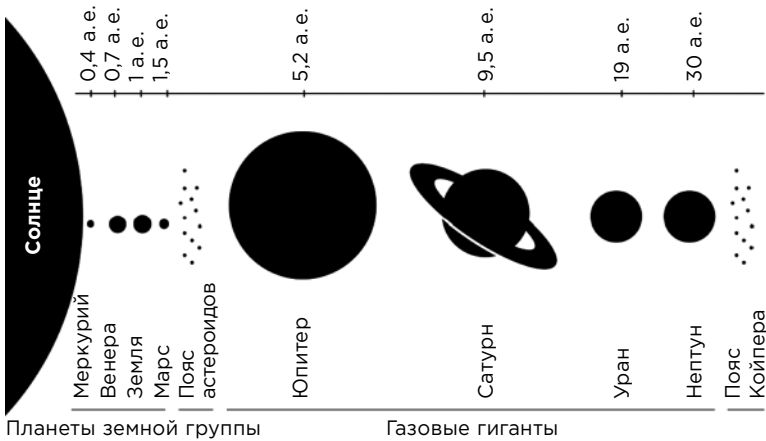


Рис. 1. Наша Солнечная система. Астрономические единицы (а.е.) используются для сравнения гигантских расстояний между планетами. 1 а.е. равна расстоянию от Земли до Солнца. (Из-за громадной разницы в размерах между планетами земной группы и газовыми гигантами представленный на рисунке масштаб не соответствует реальному.)

В начале 1990-х гг. нам были известны восемь планет:

- Меркурий,
- Венера,
- Земля,
- Марс,
- Юпитер,
- Сатурн,
- Уран,
- Нептун.

Еще мы знали о планетах-карликах — Церере (в поясе астероидов) и Плуtone (в поясе Койпера).

Первые четыре являются планетами земной группы — у них твердая поверхность и тонкая атмосфера. Следующие четыре представляют собой газовые гиганты с массой в 15–300 раз больше Земли и атмосферой в тысячи километров толщиной.

Но это были далеко не все миры за пределами нашей планеты.

ВВЕДЕНИЕ

СЛЕПЦЫ И ПЛАНЕТЫ

Шесть мудрецов из Индостана,
Любовь к познанию питая,
Отправились к слону
(хоть были все слепыми),
Чтобы свои теории проверить*.

Джон Годфри Сакс. Слепцы и слон
(по мотивам индийской притчи)

В Индии есть притча о шести слепцах, пытавшихся представить себе, как выглядит слон. Они решили ощупать неведомого зверя со всех сторон. Первому досталось гладкое ухо. Второй держался за бивень. Третий сжимал тонкий хвост. Четвертый коснулся хобота. Пятый обхватил ногу. Последний прижал ладони к широкому боку. Договориться о том, как на самом деле выглядит слон, они не смогли. Все закончилось горячим спором — ведь каждый из них узнал лишь часть правды.



«Что могло бы заставить вас вышвырнуть мою книгу в окно?»

* Пер. с англ.: Земских В. Изучение слона. Из Джона Годфри Сакса. — *Прим. пер.*

Лучи холодного зимнего солнца струились сквозь стекло как раз одного такого окна на третьем этаже физического факультета Вашингтонского университета, откуда открывался изумительный вид на затянутую легкой дымкой панораму Сиэтла. Мне было не до того: я представляла себе, как истерзанный экземпляр моей книги мокнет в луже.

В кресле напротив меня сидел пышнобородый Том Куинн, астрофизик, потративший не одно десятилетие на моделирование процессов формирования планет. В течение последних десяти минут я испытывала его терпение, нудно перебирая возможные темы для будущего опуса, публикацией которого надеялась изменить мир. И вот мы подошли к моменту истины: мне захотелось узнать, есть ли что-то такое, что могло бы заставить специалиста в области планетологии признать книгу о других мирах полной ахинеей? Я ожидала, что Куинн начнет загибать пальцы на руках, перечисляя темы, которые обязательно нужно осветить. В самом начале его списка наверняка будут горячие юпитеры — уже обнаруженные планеты, которые обращаются вокруг звезд, похожих на нашу собственную. После их открытия все известные теории образования планет отправились в мусорную корзину. За горячими юпитерами, наверное, последуют загадочные суперземли, отличающиеся размерами от всего, что обращается вокруг Солнца. Что это вообще такое — миниатюрные газовые планеты с удушливыми атмосферами или планеты из твердых скальных пород, но только куда более массивные, чем Земля?

Пожалуй, потом Куинн упомянет планеты, которые, подобно вымышленной родной планете Люка Скайуокера, обращаются вокруг двух звезд-близнецов, или, наоборот,

вспомнит о планетах без звезды. Еще есть планеты, траектории движения которых настолько вытянуты, что смена сезонов на них подобна прыжку из домны в морозильник; планеты, где солнце никогда не заходит; планеты, вся поверхность которых покрыта водой или расплавленной лавой. Или же Куинн мог бы сказать, что следующим большим прорывом станет открытие планет наподобие Земли — с изрезанными береговыми линиями, давшими приют причудливым формам жизни.

Куинн ничего не стал перечислять. Он решил не ходить вокруг да около.

«Наши знания о планетообразовании далеки от полноты, — сказал он. — Мы пока видели лишь крохотную часть всего, что есть в космосе. Если вы станете преподносить наши знания как исчерпывающее описание того, что существует на самом деле, ваша книга точно полетит в окно».

Куинн хотел сказать, что планеты с их тайнами остаются для нас не меньшей загадкой, чем слон для слепцов. Мириады миров в космосе — незримое существо, которое мы силимся познать по доступным нам сейчас небольшим кусочкам.

Звездный радар

Если бы в 1968 г. Мишель Майор не выбрался из ледяной расщелины, в которую он случайно угодил в горах, честь открытия первой планеты, обращающейся вокруг другого солнца, досталась бы кому-то еще.

Тяга к приключениям была у Майора в крови. Он родился в 1942 г. в Лозанне на берегах Женевского озера в семье любителей активного времяпрепровождения.

Со временем детское увлечение переросло в страсть к опасным видам спорта — спуску на лыжах с горных вершин и скалолазанию. Нет ничего удивительного, что в 26 лет он оказался на волосок от гибели, сорвавшись с обледеневшего края утеса. Не исключено, что одержимость Майора движением звезд объясняется как раз этой любовью к высокогорью.

Докторская диссертация, над которой он работал в Женевском университете, была посвящена выявлению незначительных отклонений в траектории звезд, вызванных гравитационным воздействием спиральных рукавов Галактики. Это исследование было невозможно без сверхточного измерения скоростей звезд, и Майор непрерывно работал над усовершенствованием методов проведения таких измерений. Ему удавалось фиксировать все малозаметные изменения в движении звезд, даже самые незначительные их колебания стали доступны для наблюдения. Речь шла о колебаниях, вызванных объектом, который был несравнимо меньше самой звезды, — о легчайших толчках, исходящих от невидимой планеты.

Главное препятствие при поиске планет — то, что звезды такие большие и яркие. Даже от поверхности Юпитера — самой массивной планеты в нашей Солнечной системе — отражается всего лишь одна миллиардная попадающего на нее солнечного света. Это очень затрудняет процесс обнаружения планет, вращающихся вокруг другой звезды, свет от которой кажется крошечной точкой в небе. Однако, согласно методике Майора, астрономы и не должны пытаться разглядеть саму планету. Вместо этого следует измерять колебания звезды при обращении планеты вокруг нее.

Когда заходит речь об орбитах, мы обычно представляем себе, как объект меньшего размера движется вокруг более массивного стационарного тела, например как Земля движется вокруг Солнца или как Луна движется вокруг Земли. На самом деле тела притягиваются друг к другу, а потому они оба находятся в движении. Такая пара обращается вокруг своего *центра масс* — точки в пространстве, в которой силы притяжения двух тел уравнивают друг друга.

Чтобы наглядно представить себе, как именно это происходит, возьмем карандаш, прикрепим к его концам по ластику и попробуем удержать его на пальце. Если вес ластиков одинаков, точка равновесия будет располагаться точно посередине карандаша. Тот же самый принцип работает и в том случае, когда две звезды одинаковой массы образуют двойную звездную систему. Звезды-двойники вращаются вокруг точки, располагающейся на полпути между ними. В том случае, когда ластики имеют разную массу, точка равновесия смещается к ластику, который тяжелее. Масса Харона, гигантского спутника Плутона, равна почти 12% массы этой планеты-карлика. Центр их масс находится на расстоянии приблизительно 1000 км над поверхностью Плутона и чуть меньше 17 000 км от поверхности Харона. Поэтому Харон движется по большей окружности, а Плутон — по меньшей, так как оба они вращаются вокруг этой точки равновесия*. Масса Луны равна 1% массы Земли, поэтому центр тяжести этих двух тел находится на глубине приблизительно 1700 км от поверхности Земли. Земля

* В 2015 г. запущенный NASA космический аппарат «Новые горизонты» запечатлел движение Плутона и Харона по их орбитам. Захватывающий анимационный ролик на сайте NASA наглядно демонстрирует, как именно это происходит.

движется по орбите вокруг него, но, учитывая, что наша планета перемещается вокруг точки, расположенной внутри нее самой, ее вращения больше походят на покачивания.

В случае со звездой и планетой разница между массами настолько огромна, что центр массы оказывается в непосредственной близости от физического центра звезды. При этом планета движется по большой окружности, описывая почти правильный круг вокруг звезды, тогда как орбита звезды представляет собой едва заметные колебания.

В конце 1994 г. ученику Майора Дидье Кело удалось зафиксировать такое колебание при наблюдениях в телескоп. Объектом, незначительные перемещения которого зафиксировал исследователь, оказалась звезда из созвездия Пегас, находящаяся на расстоянии 51 светового года от Солнца. Это означало существование *экзопланеты*, то есть планеты за пределами нашей Солнечной системы.

Чтоб понять механизм обнаружения столь незначительного колебания, представьте себе, что вы слышите приближающийся звук сирены машины скорой помощи. Чем ближе машина, тем меньше расстояние между вами и сиреной. Звуковые волны сжимаются, их длина уменьшается, а звук сирены становится выше. При удалении машины длина звуковых волн увеличивается, а высота звука падает. Это явление называют эффектом Доплера.

То же самое происходит и со светом звезды. Когда при обращении по орбите вокруг планеты звезда движется по направлению к Земле, исходящие от нее световые волны сжимаются, их длина уменьшается, а цвет смещается к голубой части спектра. Когда звезда движется назад, удаляясь от Земли, световые волны становятся длиннее и приобретают красный оттенок. По мере движения планеты

и звезды по орбите вокруг общего центра масс свет звезды меняется, смещаясь то к голубой части спектра, то к красной, в соответствии с ее колебательными движениями.

Еще один способ решения той же проблемы связан с частицами света. Представьте, что звезда — это человек, который бросает в вас световые шары с постоянной частотой. Если звезда движется к вам, расстояние между вами сокращается, а значит, частота с которой шары долетают до вас, увеличивается. Это как раз то уменьшение длины волн, благодаря которому свет приобретает голубой оттенок, а звук сирены становится выше. Когда звезда удаляется, расстояние увеличивается, а значит, шарам требуется

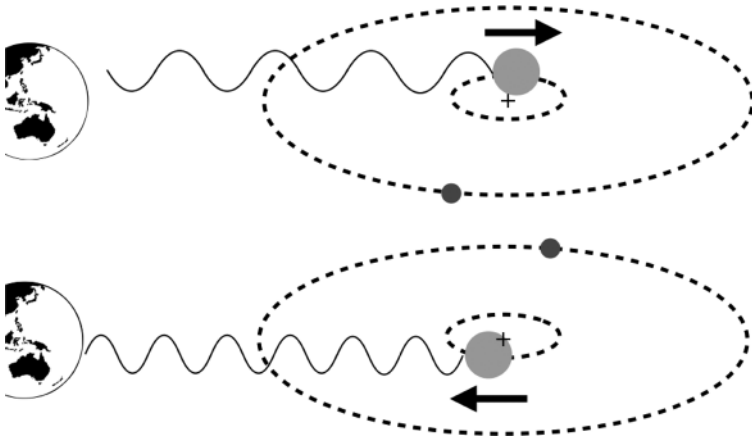


Рис. 2. Поиск планет с помощью измерения лучевых скоростей звезд. Взаимное притяжение планеты и звезды заставляет их совершать движение. Когда звезда удаляется от Земли (изображение вверху), исходящие от нее световые волны становятся длиннее и приобретают красный оттенок. При движении звезды в обратном направлении, к Земле, световые волны сжимаются, и в них становится больше голубого. Изменение скорости звезды свидетельствует о существовании невидимой нам планеты

больше времени, чтобы преодолеть его. При этом длина волн увеличивается, а свет приобретает красный оттенок.

Измерение этого сдвига в длине волн позволяет отследить изменения в движении звезды в момент колебания при сближении с Землей и удалении от нее. Скорость движения по направлению к нам называют лучевой скоростью звезды. Отсюда название метода обнаружения планет — метод лучевых скоростей. Иногда его еще называют методом Доплера.

Майор и Кело использовали данные о продолжительности колебаний звезды в обоих направлениях для расчета длины орбиты планеты и далее делали вывод о том, насколько далеко планета находится от звезды. При этом амплитуда колебаний звезды позволила оценить массу планеты: чем больше звезда отклонялась от своей орбиты, тем дальше была точка равновесия, то есть центр масс, а значит, тем тяжелее была планета.

Стоит упомянуть, что масса планеты, полученная методом измерения лучевой скорости звезды, — это всегда минимальное возможное значение. Причина в том, что световые волны становятся короче или длиннее только при движении непосредственно к нам или от нас. Любые колебания звезды, направленные не в нашу сторону, проходят незамеченными.

Можно провести аналогию с наблюдением за движением наполненного горячим воздухом шара по его тени. Тень показывает нам, что шар движется параллельно земле, но мы не понимаем, поднимается он или опускается. Если бы по движению тени вы захотели вычислить, сколько горючего ушло на полет шара, то, скорее всего, полученный результат был бы слишком мал, ведь в нем не учитывалось бы топливо, затраченное на набор высоты.

Соответственно, если планета и звезда движутся по орбитам, имеющим определенный угол наклона по отношению к Земле, только лишь часть колебаний звезды будет обращена к нам и поддастся обнаружению. Поэтому оценка исходящей от планеты силы будет заниженной, а вычисленная таким способом масса будет меньше фактической.

Майор и Кело проводили свои наблюдения с помощью телескопа в обсерватории Верхнего Прованса на юге Франции. К концу 1994 г. им удалось провести 12 измерений лучевой скорости звезды ζ в созвездии Пегас. Они поняли, что имеют дело с чем-то исключительным, но потом осторожность взяла верх. Предшествующие попытки отыскать столь крошечный объект, как планета, ни к чему хорошему не привели, из-за чего за исследованиями в этой области закрепилась дурная слава. На протяжении полувека то там, то тут появлялись ложные сообщения, которые не подтверждались при более тщательном анализе. Была ли это действительно планета или то, что они наблюдали, окажется всего лишь результатом незначительных периодически повторяющихся изменений в атмосфере звезды при ее вращении?

Была и другая проблема. Когда они пытались рассчитать минимальную массу и период обращения планеты по орбите, у них получалась какая-то бессмыслица.

Предполагаемая планета была размером по меньшей мере в половину Юпитера, то есть приблизительно в 150 раз больше Земли. Такая громада должна была быть газовым гигантом, похожим на четыре планеты Солнечной системы — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Предполагают, что у них есть твердое ядро, но большая часть их объема приходится на атмосферу толщиной в тысячи километров. Все наши газовые планеты находятся

на дальних окраинах Солнечной системы, а во всех моделях образования планет такое расположение рассматривалось в качестве универсального. Для формирования газового гиганта требуется много вещества. Вблизи звезды, где под действием высокой температуры значительная часть потенциальных твердых частиц улетучивается, его просто нет. Поэтому газовые гиганты всегда находятся на значительном удалении от звезды. Однако расстояние между наблюдавшейся Майором и Кело новой планетой и звездой было совсем небольшим. Более того, планета располагалась намного ближе к звезде 51 Пегаса, чем Меркурий — к нашему Солнцу. Год на ней продолжался всего четверо суток. Должно быть, исследователи допустили ошибку.

Майор и Кело решили не торопиться и продолжили наблюдать за звездой 51 Пегаса. В июле 1995 г. они провели еще восемь измерений. Проанализировав полученные данные, ученые наконец убедились, что были правы. Несмотря на все нестыковки, это действительно была планета.

В том же году Майор отправился на конференцию, которая должна была пройти 6 октября во Флоренции. Он поздно подал заявку на участие и потому должен был выступить с пятиминутным докладом в рамках дискуссии за круглым столом. Еще до начала заседания среди участников начали распространяться слухи о теме доклада Майора. Организаторы решили увеличить время его выступления до 45 минут.

Получив слово, Майор объявил об открытии первой внесолнечной планеты по колебательному движению солнцеподобной звезды. Своим докладом он положил начало настоящей лавине исследований, приведших к открытию десятков новых миров.



Далекая горячая планета Майора получила условное обозначение «51 Пегаса b», состоящее из имени звезды 51 в созвездии Пегас и строчной буквы. Дело в том, что строчной буквой *a* теперь принято обозначать саму звезду. Поэтому первая планета, открытая в той или иной планетной системе, получает букву *b*. Ее собратья в той же планетной системе будут обозначаться буквами *c*, *d*, *e* и так далее. Если звезда является частью двойной системы, в которой две похожие звезды обращаются по орбитам вокруг общего центра масс, то для их обозначения используются прописные буквы *A* и *B*.

У названия звезды могут быть совершенно разные источники, выбор которых определяется совсем не благозвучием. «51 Пегаса» — это 51-я звезда в созвездии Пегас. Также звезды называют по астрономическим каталогам, в которых они числятся. Например, Глизе 1214 — 1214-я звезда из каталога Глизе (*Gliese*), а *BD+20594* — звезда из каталога «Боннское обозрение» (*Bonner Durchmusterung*). Как мы увидим позже, многие звезды с обращающимися вокруг них планетами получают имена в честь инструмента, с помощью которого они были обнаружены, или исследования, благодаря которому это стало возможно.

Конечно, никто никогда всерьез не ставил под сомнение существование планет, обращающихся вокруг других звезд. Однако именно с открытием планеты 51 Пегаса *b* мы получили возможность находить эти далекие миры и быть уверенными, что это не какая-то ошибка. В 1999 г. было сделано еще одно открытие, которое ознаменовало начало эпохи массового обнаружения новых планет.

Силуэт Венеры

За зданием факультета астрофизики Оксфордского университета закрепилась сомнительная репутация одного из самых уродливых в исторической части города. Однако тем, кто собрался на его крыше 8 июня 2004 г., не было никакого дела до брутальной бетонной архитектуры. Их интересовало кое-что другое: все взгляды были прикованы к импровизированному экрану, на который через камеру-обскуру проецировалось изображение Солнца. Сразу после полудня на размытом фоне появился и начал движение темный силуэт. Это была планета Венера, проходившая по диску Солнца впервые с 1882 г.

Транзит, т. е. прохождение, наблюдается, когда небесное тело проходит между Землей (или другой точкой наблюдения) и более крупным объектом, закрывая собой небольшую его часть. Самым ярким примером такого явления может служить полное солнечное затмение, при котором Луна на короткое время полностью закрывает свет Солнца. Несмотря на то что диаметр Венеры почти в 3,5 раза больше диаметра Луны, из-за более удаленного положения она блокирует лишь около 0,1% света Солнца. При столь незначительном снижении светимости увидеть транзит Венеры можно, только вооружившись специальным оборудованием. До 1639 г. никто эти транзиты не замечал.

Немецкий астроном Иоганн Кеплер пытался, но так и не сумел предсказать транзит Венеры, уйдя из жизни за шесть лет до него. Наибольшую известность ему принесли доказательство движения планет по эллиптическим, а не круговым орбитам и открытие трех законов движения планет. Еще одним результатом его скрупулезных наблюдений за характером движения планет Солнечной

системы стали первые расчеты времени прохождения Венеры по диску Солнца.

Редкость таких транзитов объясняется тем, что в ходе них Солнце, Венера и Земля должны расположиться на одной линии, что случается нечасто. Транзиты Венеры происходят парами с интервалом более века. По расчетам Кеплера, в 1639 г. Венера должна была быть максимально близка к тому, чтобы пересечь поверхность Солнца. Его выводы пересмотрел британский астроном Джереми Хоррокс, который не только понял, что транзит Венеры состоится, но и впервые наблюдал и зафиксировал это явление вместе со своим другом Уильямом Крабтри. Как это ни парадоксально, Хоррокс, который использовал для получения четкого изображения Солнца телескоп, технически был оснащен лучше наблюдателей, собравшихся на крыше здания отделения астрофизики в Оксфорде 365 лет спустя.

Прохождение Венеры по диску нашего Солнца — действительно редкое явление. Но на самом деле на ночном небе происходит бесчисленное количество планетных транзитов. Впрочем, обнаружить их совсем не просто — для этого нужно зафиксировать вызванные планетой «мерцания» в точке звездного света величиной с укол булавки.



История изучения экзопланет, как позже поведаст мне за кружкой пива австралийский планетолог Стивен Кейн, делится на две части — до открытия HD 209458 b и после него.

HD 209458 b — очередная планета размером с Юпитер, которая располагается недалеко от своей звезды, совершая оборот по орбите всего за трое с половиной суток. Ее неуклюжее название является примером следования

правилам астрономической номенклатуры: HD представляет собой сокращение названия каталога Генри Дрейпера (*Henry Draper*), а 209458 — порядковый номер звезды в этом каталоге. Как и 51 Пегаса b, HD 209458 располагается в созвездии Пегаса, но в три раза дальше от нас, на расстоянии 150 световых лет. Впервые планета была обнаружена методом лучевых скоростей, позволившим зафиксировать колебания ее звезды. Однако наличие столь крупной планеты в непосредственной близости от звезды означало высокую вероятность того, что она совершит транзит, который можно будет наблюдать. Решив воспользоваться этой заманчивой возможностью, две группы исследователей начали вести наблюдения за светом от HD 209458.

Увидеть четко очерченный силуэт планеты, проходящей по диску звезды, находящейся дальше нашего Солнца, невозможно. Все, что мы видим, — это небольшое снижение яркости света (астрономы говорят: блеска) звезды, которое

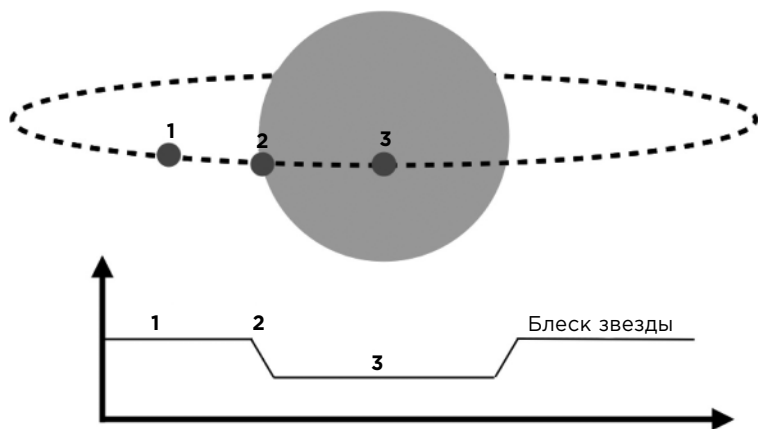


Рис. 3. Поиск планет с помощью транзитного метода. При прохождении по диску звезды планета блокирует часть света, что приводит к падению блеска звезды

можно сравнить с мерцанием. Такое затемнение является крайне незначительным. Даже для HD 209458 b, газового гиганта размером с Юпитер, падение блеска составляет всего лишь порядка 1–2%. Для планеты размером с Землю эта величина опускается ниже одной сотой процента.

Несмотря на эти затруднения, обе группы, обратившие внимание на HD 209458, зафиксировали характерное уменьшение блеска звезды, продолжавшееся пару часов. Полученные ими результаты были одновременно опубликованы в одном и том же выпуске *The Astrophysical Journal* в декабре 1999 г. Наблюдавшиеся падения блеска звезды точно соответствовали периодическим изменениям положения звезды, определяемым с помощью метода лучевых скоростей. Так была обнаружена первая транзитная экзопланета.

Новый метод обнаружения планет получил название транзитного, так как был основан на обнаружении прохождения планеты по диску звезды: в отличие от метода лучевых скоростей, при котором оценивается масса планеты, в транзитном методе учитывается ее радиус. Более значительное падение блеска звезды соответствует более крупной планете. В результате HD 209458 b стала первой экзопланетой, размер которой удалось определить.

Помимо размера планеты данный метод также позволяет узнать ориентацию орбиты. Зная время прохождения планеты по диску звезды (продолжительность падения яркости) и время обращения вокруг звезды (промежуток между падениями яркости), можно прочертить траекторию планеты. Это позволяет исключить характерную для метода лучевых скоростей погрешность при измерении массы. Таким образом, комбинируя методы, можно получить точные значения массы и радиуса новой планеты.

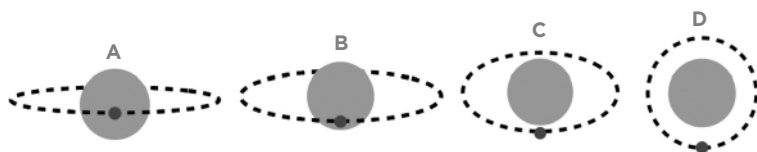


Рис. 4. Роль угла между плоскостью орбиты планеты и направлением на наблюдателя. Планеты на орбитах С и D не проходят по диску звезды при наблюдении с Земли, а значит, не могут быть обнаружены с помощью транзитного метода. Планеты на орбитах А, В и С потенциально могут быть выявлены с помощью метода лучевых скоростей. Масса планеты на орбите А, ориентированной ребром к Земле, полученная путем измерений, будет равна ее фактической массе. Расчетные массы планет на орбитах В и С будут меньше фактических, так как движение планеты и звезды лишь частично направлено к Земле. Если для обнаружения планеты на орбитах А и В использовать как транзитный метод, так и метод измерения лучевых скоростей, можно определить ее среднюю плотность, измерив массу и радиус. Планету на орбите D нельзя обнаружить ни одним из этих методов. В этом случае требуется использовать другой метод, такой, например, как прямое наблюдение

Масса и радиус — это не просто физические характеристики планеты. Вместе они позволяют оценить ее среднюю плотность, а это уже шаг к пониманию того, что она из себя представляет.

Каменная планета, существенную часть поверхности которой занимает суша, то есть такая, как Земля, имеет высокую плотность — $5,51 \text{ г/см}^3$. При этом железное ядро Земли значительно плотнее этого значения, а плотность вещества у поверхности меньше. Поэтому указанное выше значение плотности является усредненным показателем для всех составляющих планеты.

Что касается гиганта вроде Юпитера, то, учитывая, что большую часть этой планеты составляет водород, его впечатляющей массе соответствует еще более впечатляющий

радиус. В силу этого средняя плотность планеты очень мала и составляет всего лишь $1,33 \text{ г/см}^3$.

В случае с HD 209458 b результаты измерения этих характеристик оказались не менее удивительными, чем удивительная близость орбиты планеты к звезде. Оказалось, что при массе, составляющей две трети Юпитера, экзопланета больше его на треть, и ее плотность составляет всего лишь $0,37 \text{ г/см}^3$. Этот юпитероподобный газовый гигант явно раздут.

Измерение колебаний лучевой скорости и падения яркости при транзите — далеко не простая задача. Одни планеты не проходят по диску своей звезды, другие — не создают настолько сильных колебаний, чтобы их можно было отличить от собственных изменений в скорости движения звезды. Тем не менее появление методов изучения строения экзопланет стало огромным шагом вперед — шагом, которого было достаточно для того, чтобы положить начало куда более масштабному проекту по исследованию экзопланет.



Ранним утром 7 марта 2009 г. со стартовой площадки на базе ВВС США на мысе Канаверал во Флориде отправилась в космос ракета-носитель. На ее борту находился первый космический телескоп, предназначенный для поиска планет.

Телескоп назвали в честь Иоганна Кеплера, астронома, проделавшего кропотливую работу по вычислению параметров движения планет в нашей Солнечной системе. В знак уважения к вкладу Кеплера в прогнозирование транзитов ближайших к нам планет его именем был

назван аппарат, предназначенный для наблюдения за транзитом тысяч планет.

Оказавшись в космосе, телескоп «Кеплер» выполнил маневр, в результате которого оказался на орбите, позволяющей ему следовать за Землей вокруг Солнца. Наконец 7 апреля был сброшен пылезащитный слой, и на «Кеплер» впервые попал свет. Благодаря зеркалу диаметром 1,4 м, направленному на богатый звездами участок нашей Галактики в районе созвездий Лебедь и Лира, «Кеплер» был способен наблюдать более чем за 100 000 звезд одновременно.

Для обнаружения проходящих по диску звезды экзопланет космический телескоп использовал транзитный метод, фиксируя падения яркости звезд. Находясь за пределами рассеивающей свет атмосферы Земли, «Кеплер» имел намного большую чувствительность к малейшим колебаниям света звезд, чем любой телескоп на поверхности нашей планеты.

Проект имел грандиозный успех. На состоявшемся в январе 2015 г. зимнем заседании Американского астрономического общества команда проекта «Кеплер» объявила о 1000-м подтверждении открытия планеты. И это не считая свыше 4000 кандидатов в планеты, существование которых вызывало сомнения и нуждалось в подтверждении в ходе дальнейших наблюдений. Официальной целью миссии считался поиск землеподобных планет, но истинное значение работы телескопа «Кеплер» заключается в демонстрации колоссального разнообразия и многочисленности планет в нашем галактическом окружении. За 20 лет мы перешли от теорий, в которых все аспекты процесса формирования планет описываются исключительно на материале одной-единственной Солнечной системы, к теориям,

основанным на сопоставлении более чем 500 различных планетных систем.

Оптимальным объектом для применения как транзитного метода, так и метода лучевых скоростей являются крупные планеты, обращающиеся по близким к звездам орбитам. Такие планеты блокируют больше всего света, чаще всего проходят по диску звезды и достаточно массивны, чтобы вызвать поддающиеся фиксации колебания светила. Вследствие этого мы знаем куда больше об объектах с короткими орбитами, чем о тех, что находятся на задворках планетных систем.

Разумеется, арсенал методов поиска внесолнечных планет не исчерпывается указанными двумя. Однако именно они являются наиболее продуктивными. Сейчас, когда я пишу эти строки, насчитывают 3439 подтвержденных внесолнечных планет. Причем 334 из них были обнаружены по крайней мере одним из двух методов*. Эта книга — история тех самых 3439 планет. В ней рассказывается о том, как из частичек пыли формируются миры, разнообразие которых намного богаче самых причудливых фантазий Голливуда. Как минимум в одном из таких миров развилась разумная форма жизни, способная задаться вопросом о происхождении всего ее окружающего. Впрочем, этой форме жизни не стоит забывать: ответы, которая она найдет здесь, не являются окончательными.

Точка еще не поставлена.

* Эта цифра наверняка уже устарела. С актуальными данными о числе открытых экзопланет можно ознакомиться на сайте NASA: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

ПЕРВАЯ ЧАСТЬ

**ПЫЛЬ
НА ФАБРИЧНОМ ПОЛУ**



ГЛАВА 1

ФАБРИКА ЗА РАБОТОЙ

В час пополуночи 8 февраля 1969 г. небо над штатом Чиуауа на севере Мексики озарилось светом огненного шара.

«Все вокруг залило светом — можно было разглядеть муравья на полу, — рассказывал впоследствии корреспонденту *The Washington Post* редактор местной газеты Гильермо Асунсоло. — Сияние было такое, что приходилось закрывать глаза».

Пылающая глыба с шумом разрезала атмосферу, пока не взорвалась над деревней Пуэблито-де-Альенде, разлетевшись на множество осколков по территории площадью 250 кв. км. Увидев такое зрелище, любой бы ужаснулся приближающемуся концу света. Но на самом деле обьятый огнем объект был не предвестником нашей смерти, а свидетелем нашего рождения.

Твердые тела, проникающие в атмосферу Земли из космоса, называют метеороидами. Контакт с атмосферой земли губителен для куска горной породы, поскольку воздух оказывает куда большее сопротивление его полету, чем вакуум в космосе. Когда метеороид врезается в атмосферу, воздух быстро сжимается, что приводит к резкому повышению температуры. Окружающий космического пришельца воздух вспыхивает, превращая песчинки в «падающие звезды» — метеоры, а редкие глыбы большого размера — в огненные шары, болиды. Вероятность полного выгорания в таких экстремальных условиях весьма

велика, поэтому большинство метеороидов до поверхности Земли никогда не долетает. Те, которым все-таки удастся пережить все трудности опасного путешествия, в награду за стойкость переходят в категорию метеоритов.

Эффектный вход в атмосферу метеорита Альенде (названного так в честь деревни, над которой он взорвался) не мог пройти незамеченным. В район падения метеорита сразу же нагрянули ученые, к поискам обломков привлекли местных жителей и школьников. Группа полевых исследователей из Смитсоновского института в Вашингтоне за несколько недель после падения собрала около 150 кг метеоритного материала и передала его 37 лабораториям в 13 странах. Всего было собрано более 2 т материала самого разного веса — от крошечных фрагментов весом 1 г до громадной 110-килограммовой глыбы. Исходя из столь значительного объема находок можно было сделать вывод, что перед взрывом метеор был размером с автомашину. В результате активной работы по сбору осколков Альенде и их передачи ученым он заслужил звание «самого тщательно обследованного метеорита в истории». Однако повышенный интерес к нему объяснялся не только его аномально большим размером.

Все начало 1969 г. сотрудники научных лабораторий по всей Америке находились в состоянии напряженного ожидания — экипаж «Аполлона-11» должен был вот-вот доставить образцы лунных пород, собранные во время исторической высадки на Луне. И тут прямо у них под носом в Землю врывается еще один осколок горной породы из космоса. Когда извлеченные с места падения куски метеорита Альенде были исследованы с помощью лабораторного оборудования, которое к тому моменту уже было подготовлено к анализу внеземного материала и только

ждало своего часа, обнаружилось, что это был не какой-нибудь там заурядный космический булыжник. Нет, вещество с белыми точками, из которого он состоял, оказалось углистым хондритом, то есть Альенде относился к редкому классу метеоритов, на который приходится менее 5% всех падений. Этот класс состоит из самых первых объектов, из которых формировалась Солнечная система, а метеорит Альенде остается самым крупным представителем этого класса из всех когда-либо найденных на Земле.

Уникальность углистого хондрита в его древнем происхождении: когда вы держите его в руках, вы как будто смотрите на детскую фотографию самого дальнего предка. Эта горная порода сформировалась в самом начале истории нашей планеты. Но, в отличие от Земли, ей не удалось набрать достаточную массу для того, чтобы вырасти в самостоятельную планету. С помощью этого снимка, на котором в физической форме запечатлено самое начало нашего собственного существования, мы можем с большой точностью определить момент рождения нашего планетного окружения.



Как показывает лабораторный анализ, в метеоритах содержатся элементы, которые являются радиоактивными: атомы в них могут спонтанно превращаться в атомы другого элемента. Этот радиоактивный распад носит случайный характер, а значит, точно сказать, когда конкретный атом изменит свое состояние, невозможно. Однако есть значительное число атомов, изучая которые ученые могут с определенной долей уверенности определить время, которое требуется для того, чтобы половина из них распалась.

Этот отрезок времени называют *периодом полураспада* элемента. То есть, если мы сможем узнать, какая часть радиоактивного элемента распалась, мы получим своего рода часы, с помощью которых мы сможем рассчитать, сколько времени прошло.

Одним из таких радиоактивных элементов, содержащихся в метеоритах, является рубидий-87 (обозначаемый как ^{87}Rb). Цифра 87 указывает на массу атомного ядра рубидия — центральной его части, состоящей из положительно заряженных частиц под названием «протоны» и частиц под названием «нейтроны», которые имеют ту же массу, что и протоны, но при этом не обладают электрическим зарядом. Когда атом ^{87}Rb распадается, один из его нейтронов становится протоном в ходе процесса, получившего название *бета-распад*. Результатом является атом стронция-87 (^{87}Sr), ядро которого имеет ту же массу, что и ^{87}Rb , но при этом в нем на один протон больше и на один нейтрон меньше.

Период, за который половина атомов ^{87}Rb распадается в ^{87}Sr , составляет 49,23 млрд лет. Он отлично подходит для оценки временных рамок образования планет. Если бы период полураспада был очень коротким (скажем, несколько лет), тогда атомы ^{87}Rb исчезли бы задолго до того момента, когда изучаемый осколок горной породы достиг поверхности Земли. С другой стороны, существенно большая продолжительность этого отрезка времени означала бы отсутствие такого количества атомов ^{87}Sr , которого было бы достаточно для проведения измерений. Поэтому достаточного уровня точности измерений методом радиоактивного датирования можно достичь в тех случаях, когда измеряемый период времени находится в промежутке от одной десятой периода полураспада до 10 периодов полураспада.

Измеряя текущее количество атомов ^{87}Rb в метеорите и количество атомов ^{87}Sr , образовавшихся в результате распада рубидия, ученые могут рассчитать, какая часть атомов распалась с момента формирования метеорита. Затем, зная период полураспада ^{87}Rb , они могут определить, сколько времени прошло с момента образования горной породы.

В случае с углистым хондритом, таким, например, как метеорит Альенде, полученный описанным способом возраст указывает на самое начало истории нашей планеты. Он равен 4 560 000 000 годам.

Планетообразующий диск

Благодаря метеориту Альенде мы знаем, когда зародилась наша планета. Но что именно тогда она из себя представляла, остается для нас загадкой. Углистый хондрит вряд ли можно сравнить с четкой фамильной фотографией, на которой видны лица всех предков. Скорее он похож на размытое селфи дальнего кузена с датой в виде наспех нацарапанных закорючек в нижнем углу. Не имея более четкого представления об условиях, в которых началось формирование нашей планеты, мы не сможем понять, есть ли у нас шанс найти второй такой мир.

И пусть с семейным фотографом нам не повезло, у нас все же есть один достоверный факт об эпохе, когда мы родились: 4,56 млрд лет назад наше Солнце появилось на свет. Оказывается, связи всего лишь с одним-единственным событием — завершившимся незадолго до того формированием нашей звезды — достаточно, чтобы понять, как образуется планета.

Если мы углубимся в прошлое еще на несколько миллионов лет, взяв за точку отсчета момент образования