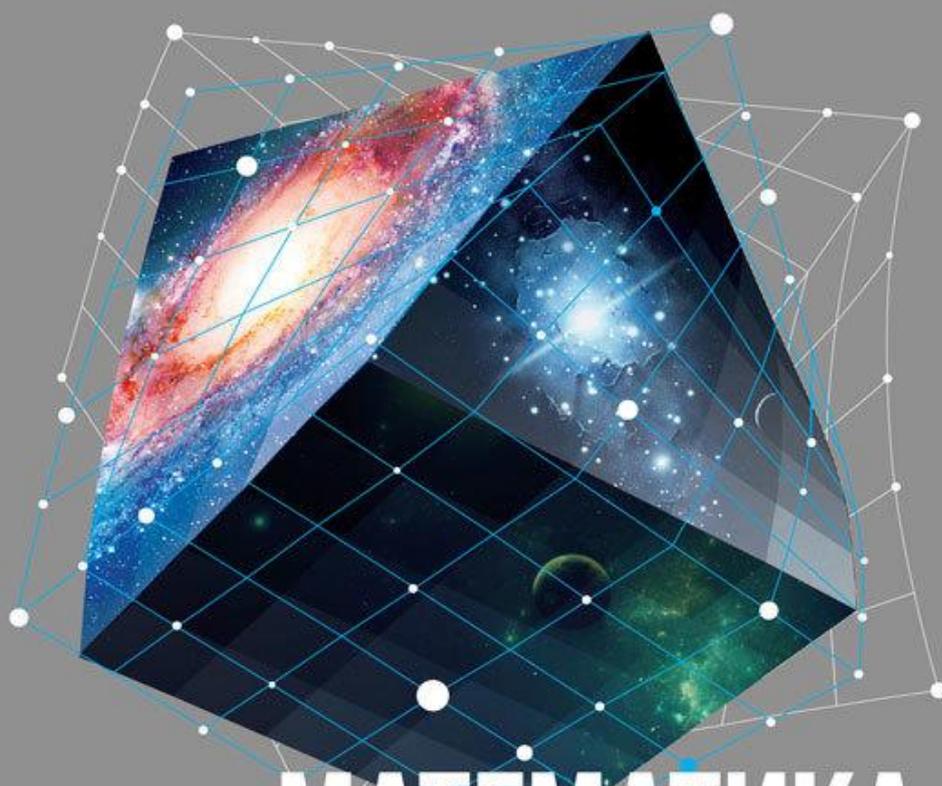


Иэн Стюарт  
Математика космоса: Как современная наука  
расшифровывает Вселенную

Иэн Стюарт



# МАТЕМАТИКА КОСМОСА

КАК  
СОВРЕМЕННАЯ НАУКА  
РАСШИФРОВЫВАЕТ  
ВСЕЛЕННУЮ

  
ТРАЕКТОРИЯ

  
АЛЬФА ФИКШН

Текст предоставлен правообладателем

«Математика космоса: Как современная наука расшифровывает Вселенную / Иэн Стюарт»:

Альпина нон-фикшн; Москва; 2018

ISBN 978-5-9614-5228-0

### **Аннотация**

*Как математические модели объясняют космос? Иэн Стюарт, лауреат нескольких премий за популяризацию науки, представляет захватывающее руководство по механике космоса в пределах от нашей Солнечной системы и до всей Вселенной. Он описывает архитектуру пространства и времени, темную материю и темную энергию, рассказывает, как сформировались галактики и почему взрываются звезды, как все началось и чем все это может закончиться. Он обсуждает параллельные вселенные, проблему тонкой настройки космоса, которая позволяет жить в нем, какие формы может принимать внеземная жизнь и с какой вероятностью наша земная может быть сметена ударом астероида.*

*«Математика космоса» – это волнующий и захватывающий математический квест на деталях внутреннего мира астрономии и космологии.*

*Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория».*

## **Иэн Стюарт Математика космоса: Как современная наука расшифровывает Вселенную**

Иэн Стюарт

# МАТЕМАТИКА КОСМОСА

КАК  
СОВРЕМЕННАЯ НАУКА  
РАСШИФРОВЫВАЕТ  
ВСЕЛЕННУЮ



ТРАЕКТОРИЯ



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва  
2018

Переводчик *Н. Лисова*  
Научный редактор *А. Засов*  
Редактор *И. Лисов*  
Руководитель проекта *А. Тарасова*  
Дизайнер обложки *С. Хозин*

Корректоры *Е. Аксенова, И. Панкова*  
Компьютерная верстка *М. Поташкин*

© Joat Enterprises, 2016

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

**Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжного).**



Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» ([www.traektoriafdn.ru](http://www.traektoriafdn.ru)) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества. В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

*Все права защищены. Произведение предназначено исключительно для частного использования. Никакая часть электронного экземпляра данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, для публичного или коллективного использования без письменного разрешения владельца авторских прав. За нарушение авторских прав законодательством предусмотрена выплата компенсации правообладателя в размере до 5 млн. рублей (ст. 49 ЗОАП), а также уголовная ответственность в виде лишения свободы на срок до 6 лет (ст. 146 УК РФ).*

\*\*\*

## Пролог

*«Проще простого, я сам это вычислил».*

*Ответ, данный Исааком Ньютоном Эдмунду Галлею на вопрос о том, как из закона обратной квадратичной зависимости для силы притяжения следует, что орбита планеты представляет собой эллипс.*

**Прочитировано в книге «Великие математики» Герберта Уэстрена Тернбулла**

12 ноября 2014 года разумный инопланетянин, наблюдающий откуда-нибудь издалека Солнечную систему, стал бы свидетелем загадочного события. В течение нескольких месяцев до этого крохотный аппарат следовал за одной кометой на ее пути вокруг Солнца и был при этом пассивен и тих. Внезапно аппарат проснулся и выплюнул из себя еще более крохотный аппаратик. Тот опустился на угольно-черную поверхность ядра кометы, ударился об нее... и отскочил. Когда малыш наконец успокоился, оказалось, что он лежит на боку у самого подножия скалы.

Инопланетянин, поняв из происходящего, что посадка прошла не по запланированному сценарию, наверное, не слишком бы впечатлился, но на самом деле инженеры, стоявшие за двумя аппаратами, добились беспрецедентного успеха – посадили космический зонд на ядро кометы. Аппарат покрупнее назывался Rosetta, поменьше – Philae, а комета называлась 67P или кометой Чурюмова – Герасименко, по именам первооткрывателей. Эта программа была реализована Европейским космическим агентством, причем только сам полет продолжался более 10 лет. Несмотря на «отскок» при посадке, Philae достиг большей части научных целей и отправил на Землю важнейшие данные. Rosetta продолжала действовать по программе. Зачем садиться на комету? Кометы очень интересны сами по себе, и все, что нам удастся о них выяснить, станет полезным прибавлением в копилку фундаментальной науки. На более практическом уровне можно отметить, что иногда в своем движении кометы приближаются к Земле, а любое столкновение вызвало бы громадные разрушения, так что было бы благоразумно выяснить заранее, из чего они сделаны. Орбиту твердого тела можно изменить при помощи ракеты или ядерного заряда, но мягкое губчатое тело при этом может рассыпаться, только усугубив проблему. Однако существует и третья причина. Материал комет восходит ко временам формирования Солнечной системы, так что эти тела могут снабдить нас полезными сведениями о том, как возник окружающий нас мир. Астрономы считают, что кометные ядра представляют собой «грязные снежки» – лед, покрытый тонким слоем пыли. Philae сумел подтвердить эту гипотезу для кометы 67P, прежде чем его батареи разрядились и аппарат замолчал. Если Земля сформировалась на своем нынешнем месте, на том же расстоянии от Солнца, то воды на ней больше, чем должно было бы быть. Откуда взялась лишняя вода? Одна из привлекательных гипотез связана с бомбардировкой миллионами комет в период формирования Солнечной системы. Принесенный ими лед растаял, и родились океаны. Поразительно, но существует способ проверить эту теорию. Вода состоит из водорода и кислорода. Водород встречается в трех различных атомных формах, известных как изотопы; все они содержат одинаковое число протонов и электронов (по одному того и другого), но различаются по числу нейтронов. В обычном водороде нейтронов нет, в дейтерии он один, в тритии их два. Если океаны Земли обязаны своим возникновением кометам, то соотношение этих изотопов в океанах и в земной коре, породы которой тоже содержат в своем химическом составе большое количество воды, должно соответствовать их соотношению в кометах.



Ядро кометы 67P напоминает резинового утенка.  
Фотография КА Rosetta (ЕКА)

Анализ данных Philae показывает, что 67P имеет в своем составе (по сравнению с Землей) много большую долю дейтерия. Конечно, для уверенности потребуются дополнительные данные с других комет, но уже сейчас кометная теория происхождения океанов начинает выглядеть шатко. Астероиды более подходящие кандидаты на эту роль.

\* \* \*

Проект Rosetta лишь один пример того, как растут возможности человечества по отправке в космос автоматических аппаратов, предназначенных как для научных исследований, так и для повседневного использования. Эти новые технологии подстегивают наши научные амбиции. На сегодняшний день земные космические зонды посетили – и прислали нам оттуда фотографии – все планеты Солнечной системы и некоторые из менее крупных ее тел. Процесс в этой области развивался стремительно. Американские астронавты высадились на Луне в 1969 году. Межпланетная станция Pioneer 10, запущенная в 1972-м, посетила Юпитер и продолжила свой путь за пределы Солнечной системы. Pioneer 11 был запущен следом за ним, в 1973 году, и прошел также вблизи Сатурна. В 1977 году Voyager 1 и Voyager 2 отправились исследовать эти миры и еще более отдаленные планеты Уран и Нептун. Другие межпланетные станции, запущенные разными странами или группами стран, посетили Меркурий, Венеру и Марс. Некоторые аппараты даже приземлялись на Венере и Марсе и отправляли домой ценную информацию. В 2015 году, когда я пишу эту книгу, пять орбитальных зондов<sup>1</sup> и два поверхностных аппарата<sup>2</sup> исследуют Марс, Cassini находится на

<sup>1</sup> Mars Odyssey, MRO и MAVEN (США), Mars Express (ЕКА), Mars Orbiter Mission (Индия).

<sup>2</sup> Роверы NASA Opportunity и Curiosity. Ровер Spirit перестал функционировать в 2011 году.

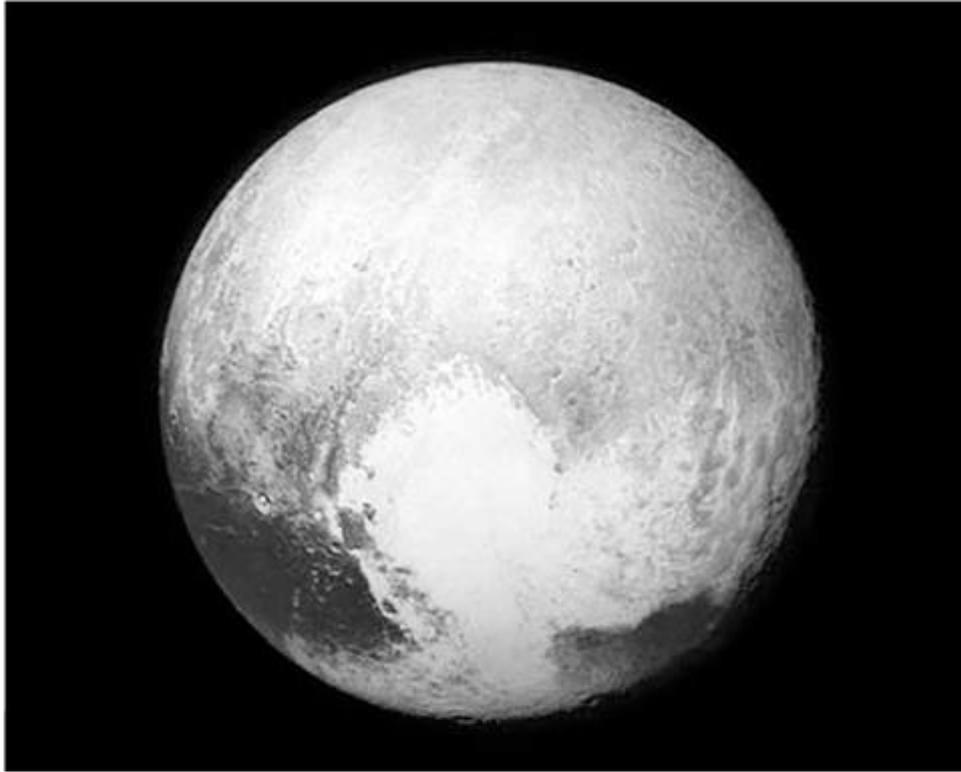
орбите вокруг Сатурна, станция Dawn обращается вокруг Цереры – бывшего астероида, не так давно произведенного в карликовые планеты, а станция New Horizons только что просвистела мимо Плутона и прислала нам поразительные снимки самой знаменитой карликовой планеты Солнечной системы. Данные этого аппарата помогут нам раскрыть тайны этого загадочного небесного тела и его пяти лун. Уже установлено, что Плутон чуть-чуть больше Эриды – самой дальней карликовой планеты, ранее считавшейся наиболее крупной из них. Плутон переквалифицировали в карликовую планету, чтобы не присваивать Эриде статуса полноценной планеты. А теперь мы обнаруживаем, что можно было не беспокоиться.

Кроме того, мы начинаем исследовать менее крупные, но не менее интересные тела: спутники планет, астероиды и кометы. Может быть, это еще не «Звездный путь», но последний фронтير постепенно приоткрывается.

Космические исследования – это фундаментальная наука, и хотя большинству из нас новые открытия, связанные с планетами, представляются очень интересными, есть люди, которые предпочли бы, чтобы уплаченные ими в казну налоги использовались с более приземленными целями. Если говорить о повседневной жизни, то наша способность создавать точные математические модели тел, взаимодействующих посредством гравитации, дала миру целый ряд технических чудес, работа которых основана на искусственных спутниках Земли: спутниковое телевидение, международная телефонная связь, метеорологические спутники, спутники слежения за магнитными бурями на Солнце, спутники, ведущие постоянный мониторинг окружающей среды и картирование Земли – вплоть до автомобильных систем спутниковой навигации с использованием Глобальной навигационной системы GPS<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> И ее аналогов в России, Европе и Китае. – *Прим. ред.*



14 июля 2015 года космический аппарат NASA New Horizons («Новые горизонты») прислал на Землю эту историческую фотографию Плутона — первое изображение, на котором можно ясно разглядеть черты этой карликовой планеты

Предыдущим поколениям подобные достижения показались бы поразительными. Даже в 1930-е годы большинство людей было уверено, что человеку никогда не побывать на Луне. (И сегодня найдется немало довольно наивных поклонников теории заговора, считающих, что нога человеческая на Луну и не ступала, но давайте не будем затрагивать эту тему, а то вы меня не остановите.) Тогда шли горячие споры даже о принципиальной *возможности* космических полетов<sup>4</sup>. Некоторые настаивали, что ракеты не будут работать в космосе, потому что «там не от чего отталкиваться», забывая о третьем законе движения Ньютона – о том, что каждое действие порождает равное по величине и противоположное по направлению противодействие<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> «Эта глупая идея стрелять в Луну – пример того абсурда, до которого порочная специализация может довести ученых. Чтобы вырваться из земного притяжения, снаряду нужна скорость 7 миль в секунду. Тепловая энергия при такой скорости равна 15 180 калорий [на грамм]. Исходя из этого, такое предприятие представляется фундаментально невозможным» – Александер Бикертон, профессор химии, 1926 год

«Я дерзну сказать, что путешествие на Луну силами человека не произойдет никогда, несмотря ни на какие научные достижения» – Ли де Форест, изобретатель электронной лампы, 1957 год.

«Нет никакой надежды реализовать фантастическую идею достичь Луны, потому что барьеры, связанные с необходимостью освобождения от притяжения Земли, непреодолимы» – Форест Моултон, астроном, 1932 год.

<sup>5</sup> В редакционной статье 1920 года газета The New York Times писала: «Профессор Годдард... не знает отношения между действием и противодействием и не понимает необходимости иметь что-нибудь получше вакуума, от чего можно было бы оттолкнуться».

Третий закон Ньютона гласит, что каждому действию соответствует равное и противоположно направленное противодействие. Противодействие следует из закона сохранения импульса, и никакой среды, от которой нужно было бы отталкиваться, не требуется. Такая среда только затрудняла бы движение, а не способствовала ему. Справедливости ради отметим, что в 1969 году, когда астронавты Apollo 11 были уже на пути к Луне,

Серьезные ученые упорно настаивали, что идея с ракетой ни за что не сработает, потому что, для того чтобы поднять ракету в воздух, нужно много топлива, затем нужно еще топливо, чтобы поднять топливо, затем еще топливо, чтобы поднять уже это... притом что еще на рисунке в китайском манускрипте XIV века «Холунцзин» («Описание огненного дракона») его автор Юй Цзяо изобразил огненного дракона, или многоступенчатую ракету. В этом китайском морском оружии при помощи сбрасываемых ускорителей запускалась верхняя ступень в форме головы дракона, заряженной огненными стрелами, которые выстреливались из нее через рот. Конрад Хаас произвел первый европейский эксперимент с многоступенчатыми ракетами в 1551 году. Пионеры ракетостроения XX века указывали, что первая ступень многоступенчатой ракеты сможет поднять вторую ступень вместе с ее топливом, если весь лишний вес уже отработанной первой ступени будет *отброшен*. Константин Циолковский опубликовал подробные и реалистичные расчеты на тему исследования Солнечной системы в 1911 году.

Итак, мы добрались до Луны, несмотря на все возражения скептиков, добрались при помощи тех самых идей, которые они даже не рассматривали из-за своей зашоренности. На данный момент мы исследовали только ближайшую к нам область пространства, совершенно незначительную по сравнению с неоглядными далями Вселенной. Мы все еще не высадились ни на одной планете, и даже ближайšie звезды пока представляются нам совершенно недостижимыми. При существующих технологиях потребовались бы сотни лет, чтобы туда добраться, даже если бы нам удалось построить надежный межзвездный корабль. Но мы уже начали свой путь.

\* \* \*

Все эти достижения в освоении и использовании космоса обеспечены не только хитроумными техническими разработками, но и длинной серией научных открытий, которая тянется в прошлое по крайней мере на три тысячи лет и восходит к древнему Вавилону. Центральное место среди этих достижений занимает математика. Конечно, инженерное дело тоже играет жизненно важную роль, и без открытий во многих других научных областях мы не смогли бы ни получить необходимые материалы, ни собрать из них работающий космический зонд, но я сосредоточусь на том, как математика способствует расширению наших знаний о Вселенной.

С древнейших времен история исследования космоса и история математики идут рука об руку. Без математики мы не смогли бы понять Солнце, Луну, планеты, звезды и огромное множество самых разных объектов, которые все вместе и образуют космос – Вселенную во всем ее великолепии. На протяжении тысяч лет математика является для нас самым эффективным средством понимания, записи и предсказания космических событий. Более того, в некоторых культурах, как, например, в Древней Индии около 500 года нашей эры, математика считалась подразделом астрономии. И наоборот, астрономические явления уже более трех тысяч лет влияют на развитие математики, вдохновляя ученых на все – от предсказания затмений в древнем Вавилоне до дифференциального исчисления, теории хаоса и кривизны пространства-времени.

Первоначальной основной астрономической задачей математики была запись наблюдений и проведение полезных вычислений, связанных с такими явлениями, как солнечные затмения, когда Луна на время закрывает Солнце, или лунные затмения, когда Луна на время заходит в тень Земли. Размышляя о геометрии Солнечной системы, пионеры астрономии догадались, что Земля обращается вокруг Солнца, хотя для земного наблюдателя все выглядит наоборот. Древние сумели также соединить наблюдения с геометрией с целью оценить размер Земли и расстояния до Луны и до Солнца.

Более глубокие астрономические выводы начали появляться около 1600 года, когда Иоганн Кеплер открыл в орбитах планет три математические закономерности – три «закона». В 1679 году Исаак Ньютон заново интерпретировал законы Кеплера и сформулировал грандиозную теорию, описывающую не только движение планет Солнечной системы, но и движение *любой* системы небесных тел. Это была теория всемирного тяготения Ньютона – одно из центральных открытий, изложенных в его эпохальном трактате «Математические начала натуральной философии» (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*). Закон всемирного тяготения описывает, как каждое тело во Вселенной притягивает любое другое тело. Совместив теорию тяготения с другими математическими законами о движении тел, исследовать которые начал Галилей столетием раньше, Ньютон смог объяснить и предсказать множество небесных явлений. В более общем плане: он изменил наши представления о природном мире и произвел научную революцию, которая продолжает прокладывать нам путь и сегодня. Ньютон показал, что природные явления (часто) управляются математическими закономерностями и что, разобравшись в этих закономерностях, мы сможем лучше понять природу. Во времена Ньютона математические законы объясняли происходящее в небесах, но не имели сколько-нибудь существенных практических применений, за исключением, пожалуй, навигации.

\* \* \*

Все изменилось, когда в 1957 году СССР запустил на низкую околоземную орбиту первый спутник, дав тем самым стартовый сигнал и положив начало космической гонке. Если вы смотрите футбол по спутниковому телевидению, или оперу, или комедии, или научно-популярные фильмы, то вы пожинаете реальные плоды Ньютоновых озарений. Первоначально успехи Ньютона привели к тому, что ученые начали рассматривать Вселенную как часовой механизм, в котором все тела волшебным образом следуют по путям, проложенным для них на заре творения. Считалось, к примеру, что Солнечная система была создана практически в нынешнем своем состоянии и с самого начала времен те же планеты двигались по тем же почти круговым орбитам. Правда, все немного колебалось; прогресс в измерениях периода по астрономическим наблюдениям говорил об этом совершенно ясно. При этом бытовало мнение, что ничего никогда не менялось сколько-нибудь значительно, не меняется и меняться не будет во веки веков. В европейской религии представлялось немислимым, что самое совершенное творение Бога – Вселенная – в прошлом могло быть иным. Такое механистическое представление о регулярном и предсказуемом космосе господствовало на протяжении трех сотен лет. Но теперь оно уже ушло в прошлое. Недавние достижения в математике, такие как теория хаоса, в сочетании с мощными современными компьютерами, способными щелкать нужные числа с беспрецедентной скоростью, как орешки, сильно изменили наши представления о космосе. «Часовая» модель Солнечной системы по-прежнему применима на коротких промежутках времени, а в астрономии и миллион лет обычно считается коротким промежутком. Но зато теперь выяснилось, что наше космическое хозяйство – это место, где миры и прежде мигрировали с одной орбиты на другую и впредь будут этим заниматься. Да, встречаются очень долгие периоды спокойного поведения, но время от времени они сменяются взрывами бешеной активности. Непреложные законы, породившие в свое время представление о часовом механизме Вселенной, способны вызывать и внезапные перемены, и в высшей степени эксцентричное поведение небесных тел. Сценарии, которые сегодня рассматривают астрономы, часто весьма драматичны. В период формирования Солнечной системы, к примеру, целые миры сталкивались между собой с апокалиптическими последствиями. Когда-нибудь, в отдаленном будущем, это, вероятно, произойдет снова: существует небольшой шанс на то, что одна из двух планет – или Меркурий, или Венера – обречена, но мы не знаем, какая именно. Возможно, они обречены обе, а быть может, они могут и нас прихватить с собой. Одно такое столкновение, вероятно,

привело к возникновению Луны. Звучит как сюжет из научной фантастики, правда? Так и есть... Но это фантастика наилучшего сорта, «твердая» научная фантастика, где за пределы современной науки, как правило, выходит только фантастическая идея, которая и дает толчок развитию сюжета. Помимо этого, нет никакой фантастической идеи, а есть только неожиданное математическое открытие.

Математика сформировала наши представления о космосе на всех масштабах, идет ли речь о происхождении и движении Луны, о движениях и форме планет и сопровождающих их спутников, о хитросплетениях астероидов, комет и объектов пояса Койпера или о тяжеловесном небесном танце всей Солнечной системы в целом. Математика подсказывает нам, как взаимодействие с Юпитером может выбросить астероид в направлении Марса, а оттуда – к Земле; почему кольца есть не только у Сатурна; как его кольца сформировались и почему ведут себя так, как ведут, почему в них образуются косички, рябь и странные вращающиеся «спицы». Она показала также, как кольца планеты могут выплевывать из себя небольшие спутники-луны, по одному за раз.

Так часовой механизм уступил место фейерверку.

\* \* \*

С космической точки зрения наша Солнечная система всего лишь незначительная горстка камней – одна из многих квадриллионов таких же. Если рассматривать Вселенную на большем масштабе, то окажется, что математика играет в ней еще более важную роль. Эксперименты на этом уровне редко оказываются возможными, а прямые наблюдения затруднены, так что выводы нам приходится делать в основном по косвенным признакам. Люди, настроенные против науки, часто указывают на эту особенность как на определенного рода слабость. На самом же деле одной из самых сильных сторон науки является ее способность делать выводы о тех вещах, которые мы не можем непосредственно наблюдать, по тем, которые мы наблюдать можем. Существование атомов было точно установлено задолго до того, как новые хитроумные микроскопы позволили нам их увидеть, но даже здесь «видение» зависит от целой серии логических умозаключений о том, как формируются интересующие нас изображения.

Математика – мощный механизм умозаключений, позволяющий нам выводить *следствия* из альтернативных гипотез при помощи логических рассуждений и выводов. В сочетании с ядерной физикой, которая сама по себе очень математична, она помогает объяснить динамику звезд, включая и многообразие их типов, и различия в химическом и ядерном составе, и закрученные магнитные поля, и темные солнечные пятна. Математика позволяет понять стремление звезд объединяться в огромные галактики, разделенные еще более огромными промежутками пустоты, и объясняет, почему галактики обладают такими любопытными формами. Она рассказывает нам, почему галактики объединяются в скопления галактик, разделенные еще более огромными промежутками.

Существует еще более крупный масштаб, соответствующий Вселенной как целому. Это владения космологии. Здесь источником рационального вдохновения для человечества служит почти исключительно математика. Мы можем наблюдать некоторые свойства Вселенной, но мы, безусловно, не можем ставить эксперименты со Вселенной как с целым. Математика помогает нам интерпретировать наблюдения и позволяет сравнивать альтернативные теории по принципу «А что, если...?». Но даже здесь путь начинался ближе к дому. На смену Ньютоновой физике пришла общая теория относительности Альберта Эйнштейна, в которой силу гравитационного притяжения заменила кривизна пространства-времени. Древние геометры и философы одобрили бы такой подход: динамику удалось свести к геометрии. Эйнштейн успел увидеть подтверждение своих теорий: в одном случае он обосновал известное, но непонятное ранее изменение орбиты Меркурия, а в другом дал верный прогноз искривления луча света вблизи Солнца, которое удалось пронаблюдать во время солнечного затмения 1919 года. Но он не мог знать, что его теория

приведет к открытию самых, наверное, причудливых объектов во всей Вселенной: черных дыр, настолько массивных<sup>6</sup>, что даже свет не может убежать из их гравитационной ловушки. Он определенно не сумел разглядеть еще одно потенциальное следствие своей теории – Большой взрыв. Это предположение о том, что Вселенная возникла из одной точки в какой-то момент в отдаленном прошлом, около 13,8 миллиарда лет назад, по современным оценкам, в процессе, напоминающем гигантский взрыв. Но взорвалось при этом само пространство-время, а не что-то другое в пространстве-времени. Первым свидетельством в пользу данной теории стало открытие расширения Вселенной Эдвином Хабблом. Обрати все процессы назад во времени – и увидишь, как все схлопнется в точку, а теперь запусти время заново в обычном направлении, чтобы вновь оказаться здесь и сейчас.

Эйнштейн сетовал на то, что мог бы предсказать это, если бы до конца верил своим собственным уравнениям. Вот почему мы можем уверенно говорить о том, что ничего подобного он не ожидал.

В науке новые ответы открывают новые загадки. Одна из крупнейших загадок нашего времени – темная материя, или скрытая масса: совершенно новый тип вещества, без которого не получается примирить результаты наблюдений вращения галактик с нашими представлениями о гравитации. Однако все попытки отыскать-таки темную материю пока ни к чему не приводят. Более того, получается, что в первоначальную теорию Большого взрыва необходимо внести еще два дополнения, без которых осмыслить космос не удастся. Одно из этих дополнений – инфляция, то есть эффект, позволивший ранней Вселенной вырасти в невероятное число раз за поистине крохотный промежуток времени. Без инфляции не получается объяснить, почему вещество распределено в современной Вселенной почти, но все же не совсем однородно. Другое дополнение – темная энергия, то есть загадочная сила, заставляющая Вселенную расширяться все быстрее.

Большинство космологов признают Большой взрыв, но только при условии, что в котел теории добавляются еще три ингредиента – скрытая масса, инфляция и темная энергия. Однако, как мы увидим, каждый из этих *dei ex machina* – волшебных средств разрешения противоречий – приносит с собой целую кучу собственных тревожных проблем. Современная космология уже не кажется такой надежной, какой представлялась всего десятилетие назад, и не исключено, что в скором времени нас ждет революция.

\* \* \*

Закон всемирного тяготения Ньютона не был первой математической закономерностью, которую удалось разглядеть в небесах, но он как бы кристаллизовал весь подход, не говоря уже о том, что позволил продвинуться гораздо дальше, чем удавалось прежде. Это главная тема «Математики космоса», ключевое открытие, лежащее в основе книги. Или немного подробнее: в движении и структуре как небесных, так и земных тел, от мельчайших пылевых частиц до Вселенной в целом существуют математические закономерности. Понимание этих закономерностей позволяет нам не только объяснять космос, но и исследовать и осваивать космос, использовать его, а также защищаться от него.

Можно сказать, что величайшим прорывом стало само понимание того, что закономерности *существуют*. После этого вы уже знаете, что нужно искать, и, хотя установить точные ответы может оказаться непросто, решение задач становится делом техники. Для этого часто приходится изобретать совершенно новые математические идеи и концепции – я не утверждаю, что это просто или очевидно. Это долгая игра, она продолжается и сегодня. Подход, который впервые применил Ньютон, положил начало стандартной процедуре. Как только новейшее открытие вылупляется из своей скорлупы, математики начинают размышлять, нельзя ли при помощи аналогичных идей решать другие задачи. Стремление к

---

<sup>6</sup> Имеется в виду – для своего размера. – *Прим. ред.*

обобщению всего и вся имеет глубочайшие корни в математической душе. Бесплезно обвинять в этом Николя Бурбаки<sup>7</sup> и «новую математику»: эта традиция восходит еще к Евклиду и Пифагору. Из этого стремления родилась математическая физика. Современники Ньютона, в основном в континентальной Европе, применили эти принципы, которые дотянулись до космоса, к объяснению природы, тепла, звука, света, упругости, а позже еще электричества и магнетизма. И стало еще более очевидно:

В природе действуют законы.  
 Это математические законы.  
 Мы можем их найти.  
 Мы можем их использовать.

Разумеется, все было не так просто.

## 1. Притяжение на расстоянии

*Макавити, Макавити, таинственный Макавити!  
 Законы наши соблюдать его вы не заставите.  
 Презрел он тяготения всемирного закон.*  
 Томас Стернс Элиот «Учебник Старого Опоссума по котоведению» (Перевод С. Я. Маршака)

### Почему предметы падают вниз?

Некоторые не падают. Среди них, очевидно, и Макавити. А также Солнце, Луна и почти все, что есть «там, на небесах». Хотя иногда с неба падают камни, и динозавры, к своему несчастью, убедились в этом. Здесь, на Земле, если уж вы хотите немного попридираться, летают насекомые, птицы и летучие мыши, но они не могут держаться в воздухе вечно. А все остальное неизменно падает – если, конечно, что-то не удерживает его вверху. Но те штуки, которые в небесах, ничто там не удерживает – и все же они не падают.

Кажется, что там, на небесах, все совершенно иначе, чем здесь, на земле.

Потребовалось озарение гения, чтобы понять, что земные объекты падают на Землю под действием той же самой причины, которая удерживает небесные объекты наверху. Ньютон, как широко известно, сравнил падающее яблоко с Луной и понял, что Луна остается наверху, потому что она, в отличие от яблока, движется еще и *вбок*<sup>8</sup>. На самом деле Луна непрерывно

---

<sup>7</sup> Николя Бурбаки – коллективный псевдоним группы математиков переменного состава (преимущественно французов), образованной в 1935 году и написавшей большую серию книг, в которой авторы попытались заново сформулировать математику на общей и абстрактной основе. Эта работа принесла большую пользу в изучении математики, потому что унифицировала предмет, выделила базовые концепции и привела строгие доказательства. При этом аналогичная философия, получившая название «новая математика» и широко применяющаяся в преподавании школьной математики, не добилась особого успеха и оказалась по меньшей мере противоречивой.

<sup>8</sup> В 1726 году Ньютон провел вечер в Лондоне за ужином с Уильямом Стакли. В документе, сохранившемся в архивах Королевского общества и изложенном старинным вычурным слогом, Стакли писал: «После обеда, поскольку погода стояла теплая, мы вышли в сад и сели пить чай в тени какой-то яблони; только я и он. В ходе беседы он, помимо прочего, рассказал мне, что ситуация в точности похожа на ту, в которой он был, когда мысль о гравитации впервые пришла ему в голову. Почему яблоко всегда падает перпендикулярно земле, подумал он... Почему не в сторону и не вверх, а всегда стремится к центру Земли? Очевидно, причина состоит в том, что Земля притягивает его. Вещество должно обладать какой-то притягивающей силой. И сумма притягивающей силы вещества Земли должна находиться в центре Земли, а не где-нибудь сбоку. Итак, падает ли яблоко перпендикулярно или по направлению к центру? Если вещество таким образом притягивает вещество, то это должно происходить пропорционально количеству. Следовательно, яблоко притягивает

падает, но поверхность Земли уходит от нее с той же скоростью. Так что Луна может падать вечно, но при этом раз за разом огибать Землю, так никогда на нее и не упав.

Настоящая разница заключается не в том, что яблоки падают, а Луны – нет. Разница в том, что яблоки не движутся вбок достаточно быстро, чтобы пролететь мимо Земли.

Ньютон был математиком (а также физиком, химиком и мистиком), так что он немного посчитал, чтобы подтвердить свою радикальную мысль. Вычислил силы, которые должны действовать на яблоко и на Луну, чтобы те двигались по своим разным маршрутам. С учетом различия в массах этих объектов силы оказались одинаковыми. Это убедило Ньютона в том, что Земля, должно быть, притягивает к себе и яблоко, и Луну. Было естественно предположить, что притяжение того же типа действует в любой паре объектов: хоть земных, хоть небесных. Ньютон выразил эти силы притяжения математическим уравнением, сформулировав закон природы.

Одно из замечательных следствий из этого закона состоит в том, что не только Земля притягивает яблоко: яблоко тоже притягивает Землю. И Луну, и все остальные объекты во Вселенной. Но действие яблока на Землю слишком мало, чтобы его можно было измерить, в отличие от действия Земли на яблоко.

Это открытие стало гигантским успехом, глубоким и отчетливым связующим звеном между математикой и миром природы. У него есть и еще одно важное следствие, которое легко пропустить среди математических терминов и деталей: невзирая на внешнее несходство, «там, на небесах» в некоторых жизненно важных отношениях все обстоит точно так же, как «здесь, на земле». Законы там и там действуют одинаковые. Различается только контекст их приложения.

Мы называем загадочную Ньютонову силу гравитацией или тяготением. Мы умеем рассчитывать ее действие с величайшей точностью. И мы по-прежнему не понимаем ее.

\* \* \*

Долгое время нам казалось, что мы ее понимаем. Около 350 года до нашей эры греческий философ Аристотель дал простое объяснение тому, что все предметы падают вниз: они просто стремятся к своему естественному местоположению.

Чтобы избежать в рассуждениях замкнутого круга, он объяснил также, что значит «естественный». Аристотель полагал, что все на свете состоит из четырех базовых элементов: земли, воды, воздуха и огня. Естественное местоположение земли и воды находится в центре Вселенной, который, разумеется, совпадает с центром Земли. Это доказывалось тем, что Земля не движется: мы живем на ней и, конечно, заметили бы, если бы она двигалась. Поскольку земля тяжелее воды (она ведь тонет, верно?), самые нижние уровни заняты землей и представляют собой шар. Далее идет сферическая оболочка из воды, затем – тоже сферическая оболочка из воздуха (воздух легче воды: пузырьки воздуха всплывают). Выше воздуха, но ниже небесной сферы, несущей на себе Луну, располагается царство огня. Все остальные тела имеют тенденцию подниматься или падать в зависимости от соотношения в них этих четырех элементов.

Эта теория привела Аристотеля к утверждению о том, что скорость падающего тела пропорциональна его весу (перья падают медленнее, чем камни) и обратно пропорциональна плотности окружающей среды (камни быстрее падают в воздухе, чем в воде). Достигнув своего естественного местоположения, тело остается там и двигается лишь при приложении некоторой силы.

---

Землю, точно так же, как Земля притягивает яблоко».

Другие источники тоже подтверждают, что Ньютон рассказывал эту историю, но все это, разумеется, не доказывает ее истинности. Ньютон мог специально ее придумать, чтобы проще было объяснять его идеи. Говорят, что яблоня, с которой упало пресловутое яблоко, сохранилась до сего дня – это яблоня сорта Flower of Kent в усадьбе Вулсторп-мэнор.

Как теория эта точка зрения не так уж плоха. В частности, она вполне соответствует повседневному опыту. Сейчас, когда я пишу эту книгу, на моем столе лежит первое издание романа «Трипланетие» (Triplanetary), который цитируется в эпиграфе ко второй главе. Если я не буду его трогать, то книга останется на месте и будет спокойно лежать. Если я приложу силу – скажем, толкну эту книгу, – то она сдвинется на несколько сантиметров, замедляясь по ходу движения, и остановится.

Аристотель прав.

Так все и выглядело на протяжении почти двух тысяч лет. Аристотелева физика, несмотря на множество возражений, в целом принималась практически всеми интеллектуалами до конца XVI столетия. Исключением был арабский ученый аль-Хасан ибн аль-Хайсам (Альхазен), который в XI веке выступал против воззрений Аристотеля из геометрических соображений. Но даже сегодня Аристотелева физика точнее отвечает нашим интуитивным представлениям, чем пришедшие ей на смену идеи Галилея и Ньютона.

С современной точки зрения в теории Аристотеля есть несколько крупных пробелов. Один из них – вес. *Почему* перо легче камня? Еще один пробел – трение. Предположим, я положил бы мой экземпляр «Трипланетия» на лед катка и дал ему такой же толчок. Что произошло бы? Книга уехала бы дальше – и еще дальше, если бы я приладил к ней коньки. Трение заставляет тело двигаться медленнее в вязкой – клейкой – среде. Трение в повседневной жизни встречается на каждом шагу, и именно поэтому Аристотелева физика лучше отвечает нашим интуитивным представлениям, чем Галилеева и Ньютонова физика. В процессе эволюции наш мозг выработал внутреннюю модель движения, в которую уже встроено трение.

Сегодня мы знаем, что тело падает на Землю потому, что притягивается земным тяготением. Но что такое тяготение? Ньютон считал тяготение силой, но не объяснял, откуда эта сила берется и как возникает. Она просто *есть*. Она действует на расстоянии без всяких посредников. Как это происходит, он тоже не объясняет; она просто *действует*. Эйнштейн заменил силу кривизной пространства-времени, сделав «действие на расстоянии» излишним, и записал в виде уравнений, как на эту кривизну влияет распределение вещества в пространстве, но и он не объяснил, *почему* кривизна ведет себя таким образом.

Человек научился рассчитывать некоторые аспекты космоса, к примеру вычислять времена затмений, за тысячи лет до того, как кто-либо понял, что гравитация существует. Но после того как роль гравитации была раскрыта, наши возможности в области космических вычислений многократно выросли. Третьей книге своих «Начал», в которой описывались законы движения и гравитации, Ньютон дал подзаголовок «О системе мира». Это было всего лишь небольшое преувеличение. Сила тяготения и то, как тела реагируют на силы, лежит в основе большинства космических вычислений. Поэтому, прежде чем мы перейдем к новейшим открытиям и поговорим, к примеру, о начале Вселенной или о том, как планеты, обладающие кольцами, порождают новые луны, нам полезно будет разобраться в некоторых базовых представлениях, связанных с гравитацией.

\* \* \*

До изобретения уличного освещения Луна и звезды были так же хорошо знакомы большинству людей, как и близлежащие реки, деревья и горы. Когда заходило Солнце, появлялись звезды. Луна двигалась в собственном ритме и по собственному расписанию, иногда она появлялась в небесах среди бела дня и выглядела как бледный призрак, но по ночам светила намного ярче. Тем не менее закономерности в ее движении тоже присутствовали. Всякий, кто наблюдал бы Луну хотя бы между делом на протяжении нескольких месяцев, скоро заметил бы, что она следует регулярному ритму и каждые 29 дней меняет форму с тонкого полумесяца до полного диска и обратно. Кроме того, она заметно сдвигается от ночи к ночи, проходя по небу одним и тем же повторяющимся из раза в раз замкнутым маршрутом.

У звезд также есть собственный ритм. Один раз в сутки они обходят вокруг некоторой фиксированной точки в небесах, как будто они нарисованы на внутренней стороне медленно вращающейся чаши. В книге «Бытие» говорится о небесной тверди; в переводе с еврейского «твердь» означает «чаша».

Если наблюдать небо на протяжении нескольких месяцев, становится очевидным также, что пять звезд, включая некоторые из самых ярких на небе, не вращаются подобно большинству «фиксированных», или неподвижных, звезд. Они не закреплены на чаше, а медленно ползут по ней. Греки связывали эти блуждающие световые точки с Гермесом (посланцем богов), Афродитой (богиней любви), Аресом (богом войны), Зевсом (царем всех богов) и Кроносом (богом земледелия). Соответствующие римские божества дали им их нынешние названия: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. Греки назвали эти блуждающие звезды *planetes*, то есть «странники», отсюда произошло современное слово «планеты». Сегодня мы знаем еще три планеты: это сама Земля, Уран и Нептун. Пути планет на небе выглядели странно и казались непредсказуемыми. Некоторые из них двигались относительно быстро, другие медленнее. Некоторые даже возвращались по своим следам и за несколько месяцев описывали на небе замкнутую петлю.

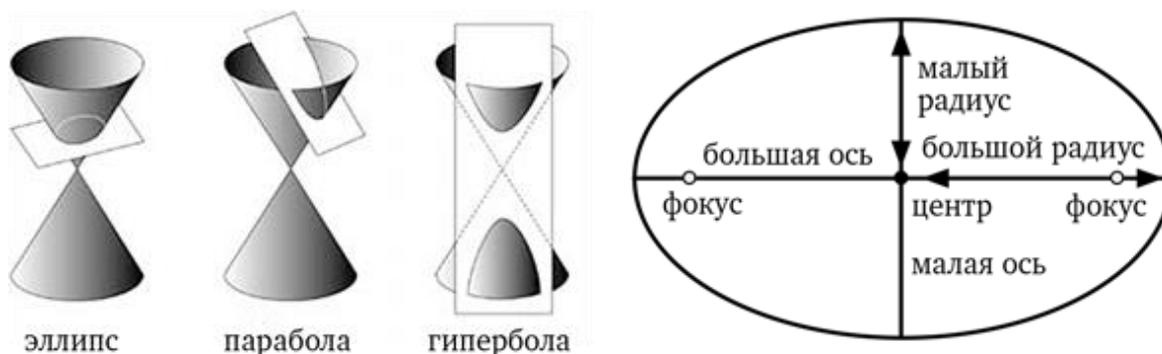
В большинстве своем люди просто принимали окружающую их действительность такой, какая она есть, точно так же, как принимали существование рек, деревьев и гор и считали небесные огоньки небесными огоньками. Но некоторые задавали вопросы: что представляют собой эти огоньки? Откуда они на небе? Как и почему они движутся? Почему одни огоньки движутся по правилам, а другие их нарушают?

Шумеры и вавилоняне собрали основные наблюдательные данные. Они записывали их на глиняных табличках так называемой клинописью – особыми знаками, напоминающими по форме клин. Среди найденных археологами вавилонских табличек имеются звездные каталоги, где записано положение звезд на небе; они датируются приблизительно 1200 годом до нашей эры, но, вероятно, являются копиями еще более ранних шумерских табличек. Греческие философы и геометры, продолжавшие дело шумеров и вавилонян, лучше своих предшественников сознавали необходимость логики, доказательств и теории. Они во всем искали закономерности; последователи пифагорейского культа довели этот принцип до крайности: они верили, что Вселенной правят числа. Сегодня большинство ученых согласились бы с ними, но не в деталях.

Наибольшее влияние на астрономическое мышление позднейших поколений оказал Клавдий Птолемей – греческий геометр, астроном и географ. Его самая ранняя работа известна как «Альмагест» – по арабскому сокращению оригинального названия, которое сперва звучало как «Математическое собрание», затем превратилось в «Великое собрание», а затем в просто в *al-majisti* – «величайшее». В «Альмагесте» была представлена законченная теория планетарного движения, основанная на наиболее совершенных, по мнению греков, геометрических фигурах – окружностях и сферах.

На самом деле планеты движутся не по окружностям. Это заявление не удивило бы вавилонян, потому что движение по окружностям не соответствовало их таблицам. Греки пошли дальше и задались вопросом: а что же им соответствует? Ответ Птолемея был таков: сочетания окружностей, поддерживаемых сферами. Внутренняя сфера – «деферент» – строится вокруг Земли, которая и является ее центром. Ось второй сферы – «эпицикла» – закреплена слегка внутри первой. Каждая пара сфер самостоятельна и не связана с остальными. Идея сама по себе не новая. Два столетия ранее Аристотель, опираясь на еще более ранние идеи того же рода, предложил сложную систему из 55 концентрических сфер, в которой ось каждой сферы закреплена на ближайшей к ней внутренней сфере. В модификации Птолемея сфер было меньше, да и система работала точнее, но по-прежнему оставалась довольно сложной. И обе системы заставляли думать о том, существуют ли все эти сферы в реальности, или являются просто удобной выдумкой, или на самом деле происходит что-то совершенно иное.

Следующую тысячу лет, а то и больше, Европа все свое внимание посвящала вопросам теологическим и философским, а представления о мире природы черпала в основном из трудов Аристотеля, созданных примерно за 350 лет до Рождества Христова. Вселенная считалась геоцентрической, и все в ней вращалось вокруг неподвижной Земли. Факел исследований в астрономии и математике переместился в арабский мир, в Индию и Китай. Однако с зарей итальянского Возрождения этот факел вновь был передан в Европу. После этого ведущие роли в развитии астрономического знания сыграли три гиганта науки: Галилей, Кеплер и Ньютон, а группа поддержки у них была поистине громадной. Галилей знаменит тем, что усовершенствовал телескоп и обнаружил с его помощью, что на Солнце есть пятна, у Юпитера есть (по крайней мере) четыре луны, Венера проходит такие же фазы, как Луна, а Сатурн выглядит как-то странно – позже странности его внешнего вида получили объяснения в виде системы колец. Полученные данные заставили его отвергнуть геоцентрическую теорию и принять соперничающую с ней гелиоцентрическую теорию Николая Коперника, в которой планеты и Земля вращаются вокруг Солнца; из-за этого у Галилея возникли проблемы с римско-католической церковью. Но он также сделал на первый взгляд более скромное, но в конечном итоге более важное открытие: открыл математическую закономерность в движении таких объектов, как пушечные ядра. Здесь, на Земле, свободно движущееся тело либо ускоряется (при падении), либо замедляется (при подъеме) на величину, одинаковую за фиксированный, *небольшой* отрезок времени. Короче говоря, ускорение тела постоянно. Поскольку точных часов в его распоряжении не было, Галилей наблюдал эти эффекты, катая шары по слегка наклонным желобам. Еще одна ключевая фигура того времени – Кеплер. Его учитель и начальник Тихо Браге в свое время провел очень точные измерения положения Марса. После смерти Тихо Кеплер унаследовал не только его положение придворного астронома при императоре Священной Римской империи Рудольфе II, но и продолжил наблюдения и занялся вычислением точной формы орбиты Марса. После 50 неудачных попыток он рассчитал, что орбита имеет форму эллипса, то есть овала, напоминающего слегка сплюснутую окружность. При этом Солнце находится в особой точке этого эллипса – в его фокусе. Древнегреческие геометры знали эллипсы и определяли их как сечение конуса плоскостью. В зависимости от наклона плоскости относительно оси конуса «конические сечения» включают в себя окружности, эллипсы, параболы и гиперболы. Когда планета движется по эллипсу, расстояние от нее до Солнца меняется. Приближаясь к Солнцу, планета ускоряется; удаляясь от Солнца, замедляется. Немного удивительно, что все эти эффекты в сумме умудряются создать орбиту в точности одинаковую по форме с обеих сторон. Кеплер этого не ожидал, и его долгое время преследовала мысль, что эллипс в ответе, должно быть, получился по ошибке.



Слева: конические сечения.

Справа: основные характеристики эллипса

Форма и размер эллипса определяются двумя длинами: длиной большой оси, представляющей собой самый длинный отрезок прямой, соединяющий две точки на эллипсе, и длиной малой оси, которая перпендикулярна большой. Окружность – это разновидность эллипса, для которой две указанные длины равны; в этом случае они обе равны диаметру окружности. В астрономии радиус считается более удобной мерой. Так, радиус круговой орбиты равен расстоянию от планеты до Солнца и соответствующие величины для эллипса называют большим радиусом и малым радиусом. К этим же величинам относятся более громоздкие термины «большая полуось» и «малая полуось», поскольку они представляют собой половинки большой и малой оси. Менее интуитивно понятна, но очень важна еще одна характеристика эллипса: его эксцентриситет – это количественное отражение формы эллипса, того, насколько он длинный и тонкий. Эксцентриситет окружности равен нулю, а для фиксированной длины большой полуоси он стремится к единице, по мере того как длина малой полуоси стремится к нулю<sup>9</sup>.

Размер и форму эллиптической орбиты можно охарактеризовать двумя числами. Как правило, выбирают большую полуось и эксцентриситет. Малую полуось можно вычислить исходя из этих двух параметров. Большая полуось орбиты Земли составляет 149,6 миллиона километров, ее эксцентриситет равен 0,0167; при этом малая полуось равняется 149,58 миллиона километров, так что орбита очень близка к круговой, на что указывает и малый эксцентриситет. Плоскость земной орбиты имеет особое название – эклиптика.

Пространственное положение любой другой эллиптической орбиты вокруг Солнца можно охарактеризовать тремя дополнительными числами; все три – угловые величины. Одна из этих величин представляет собой наклон орбитальной плоскости к плоскости эклиптики. Вторая величина, по существу, дает направление большой оси орбиты в этой плоскости. Третья дает направление прямой, по которой пересекаются эти две плоскости. Наконец, нам нужно знать, где именно на орбите в данный момент располагается планета, для чего потребуется еще один угол. Таким образом, для того, чтобы определить орбиту планеты и ее положение на этой орбите, нам требуется два числа и четыре угла – шесть *орбитальных элементов*. Главной целью ранней астрономии было вычислить орбитальные элементы каждой планеты и каждого астероида, которые удалось обнаружить. Имея эти числа, можно предсказывать будущее положение объекта, по крайней мере до тех пор, пока совместное воздействие других тел не приведет к существенному возмущению орбиты.

Со временем Кеплер смог сформулировать набор из трех элегантных математических закономерностей, которые в настоящее время называются законами планетарного движения. Первый из них гласит, что орбита любой планеты представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Вторым – что отрезок прямой, соединяющий Солнце с планетой, за равные промежутки времени замечает равные площади. А третий говорит нам, что квадрат периода обращения пропорционален кубу расстояния.

\* \* \*

Ньютон переформулировал наблюдения Галилея о свободно движущихся телах в виде трех законов движения. Первый из них утверждает, что тело, если на него не действует никакая сила, продолжает двигаться по прямой с постоянной скоростью. Вторым гласит, что ускорение любого тела равняется действующей на него силе, отнесенной к массе тела. Третий говорит о том, что всякое действие порождает равное по величине и противоположное по направлению противодействие. В 1687 году Ньютон переформулировал и планетарные законы Кеплера, предложив общее правило, согласно которому движутся

---

<sup>9</sup> Если большая полуось эллипса равна  $a$ , а малая  $b$ , то его фокус располагается на расстоянии  $f = \sqrt{a^2 - b^2}$  от центра. Эксцентриситет эллипса равен  $e = f/a = \sqrt{1 - b^2/a^2}$ .

небесные тела, – закон всемирного тяготения, математическую формулу для силы, с которой произвольное тело притягивает любое другое тело.

В действительности он *вывел* свою формулу силы из законов Кеплера, сделав одно допущение: Солнце притягивает к себе планеты с силой, всегда направленной к его центру. Исходя из этого допущения, Ньютон доказал, что сила эта обратно пропорциональна квадрату расстояния. Таким замысловатым образом математики выражают ту мысль, что, к примеру, умножение массы любого из тел на три утраивает также и действующую силу, а вот умножение на три расстояния между объектами снижает силу притяжения между ними до  $1/9$  первоначального значения. Ньютон доказал также обратное утверждение: из «закона обратных квадратов» следуют три закона Кеплера.

Слава открывателя закона всемирного тяготения справедливо досталась Ньютону, но идея, по существу, была неоригинальна. Кеплер вывел нечто подобное по аналогии со светом, но он полагал, что гравитация толкает планеты в их движении по орбитам. Исмаэль Буйо (подписывавшийся также латинизированным именем Буллиальд) был с ним не согласен; он утверждал, что сила притяжения должна быть обратно пропорциональна квадрату расстояния. Роберт Гук в лекции, прочитанной в Королевском обществе в 1666 году, сказал, что все тела движутся прямолинейно, если на них не действует сила, все тела тяготеют друг к другу и что сила гравитационного притяжения убывает с расстоянием по формуле, которую «я, признаю, еще не установил». В 1679 году Гук пришел к выводу о том, что сила тяготения изменяется с расстоянием по обратно-квадратичному закону, и написал об этом Ньютону. Так что Гук, конечно, был уязвлен, когда обнаружил в точности то же самое в Ньютоновых «Началах», несмотря на то что Ньютон в книге выразил ему благодарность наряду с Галлеем и Кристофером Реном.

Гук, правда, признал, что только Ньютон сумел определить, что замкнутые орбиты имеют форму эллипса. Ньютон знал, что обратно-квадратичная зависимость допускает также параболические и гиперболические орбиты, но эти кривые не являются замкнутыми, так что движение по ним не повторяется периодически. Орбиты такого рода также находят применение в астрономии, в основном там, где речь идет о кометах.

Закон Ньютона превосходил законы Кеплера благодаря одной дополнительной черте, которая была предсказанием, а не теоремой. Ньютон понял, что, поскольку Земля притягивает Луну, разумно предположить, что и Луна, в свою очередь, притягивает Землю. Земля и Луна, как два сельских танцора, держась за руки, кружатся в бесконечном танце. Каждый танцор чувствует, с какой силой партнер тянет его за руки. Каждый танцор удерживается на месте посредством этой силы: если разжать руки, танцоры, кружась, унесутся по залу в разные стороны. Однако Земля намного массивнее Луны, так что процесс напоминает танец толстяка с маленьким ребенком. При этом кажется, что толстяк кружится на месте, а ребенок носится вокруг него кругами. Но посмотрите внимательно, и вы увидите, что толстяк тоже описывает круги: его ноги движутся по небольшому кругу, а центр, вокруг которого он вращается, расположен немного ближе к ребенку, чем должно было бы быть, если бы он вращался один.

Такие рассуждения привели Ньютона к предположению о том, что *каждое* тело во Вселенной притягивает к себе все остальные тела. Законы Кеплера приложимы только к двум телам – Солнцу и планете. Закон Ньютона применим к любой системе тел в принципе, поскольку он дает как величину, так и направление *всех возникающих в системе сил*. При подстановке в законы движения комбинация всех этих сил определяет ускорение каждого тела и, следовательно, его скорость и положение в любой момент времени. Провозглашение универсального закона гравитации стало эпохальным событием в истории науки – событием, которое позволило прояснить скрытый математический механизм, обеспечивающий существование Вселенной.

Ньютоновы законы движения и гравитации положили начало долговременному союзу между астрономией и математикой – союзу, которому мы обязаны значительной частью того, что знаем сегодня о космосе. Но даже если вы поняли, что представляют собой эти законы, то это не значит, что вы сможете напрямую применить их к решению конкретных задач. Сила тяготения, к примеру, нелинейна – этот технический термин означает, в сущности, что вы не можете решать уравнения движения при помощи красивых формул. И при помощи некрасивых, кстати говоря, тоже.

Математики постньютоновской эпохи обходили это препятствие двумя способами: либо разбирали совершенно искусственные (хотя и очень интересные) задачи, такие, например, как взаимодействие трех одинаковых масс, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, либо искали приближенные решения более реалистичных задач. Второй подход более практичен, но следует отметить, что немало полезных идей удалось извлечь именно из первого подхода, несмотря на всю его искусственность.

На протяжении долгого времени научным наследникам Ньютона приходилось производить все вычисления вручную – и во многих случаях это была поистине героическая задача. Яркий пример такого рода – Шарль-Эжен Делоне, который в 1846 году начал вычислять приближенную формулу движения Луны. На это у него ушло более двадцати лет, а результаты пришлось публиковать в двух томах. В каждом из этих томов более 900 страниц, и весь второй том занимает собственно формула. В конце XX века результат Делоне удалось проверить с применением компьютерной алгебры (программных систем, способных манипулировать не только числами, но и формулами). Было выявлено всего две небольшие ошибки, одна из которых является следствием другой; суммарный эффект от обеих ошибок пренебрежимо мал.

Законы движения и гравитации – это законы особого рода, законы, выражаемые так называемыми дифференциальными уравнениями. Такие уравнения задают скорость, с которой те или иные величины изменяются с течением времени. Скорость – это быстрота изменения положения тела; ускорение – это быстрота изменения скорости. Знание скорости, с которой в настоящее время изменяется та или иная величина, позволяет вам спроецировать эту величину в будущее. Если машина едет со скоростью 10 метров в секунду, то через секунду она сдвинется на 10 метров. Однако для того, чтобы считать таким способом, нужно, чтобы скорость была постоянной. Если же машина ускоряется, то за секунду она отъедет от вас более чем на 10 метров. Чтобы обойти эту проблему, в дифференциальных уравнениях указывается мгновенная быстрота изменения. По существу, они работают с очень короткими промежутками времени, так что быстроту изменения на этом промежутке можно считать постоянной. На самом деле математикам потребовалось несколько столетий, чтобы довести эту идею до полной логической строгости, поскольку никакой конечный интервал времени нельзя считать мгновенным, если он не равен нулю, а за нулевой интервал времени ничто не меняется.

Компьютеры произвели в этом деле настоящую методологическую революцию. Вместо расчета приближенных формул движения, а затем подстановки чисел в эти формулы теперь можно с самого начала работать с числами. Предположим, вы хотите предсказать, где некоторая система тел – скажем, спутники Юпитера – будет находиться через сто лет. Начните с первоначальных позиций и параметров движения Юпитера, его спутников и всех остальных тел, которые могут иметь значение, – в данном случае это Солнце и Сатурн. Затем, постепенно, один крошечный временной шаг за другим, вычисляйте, как изменяются числа, описывающие *все* задействованные тела. Повторяйте это действие до тех пор, пока не дойдете до временной отметки сто лет. Стоп. Человек, проводящий вычисления при помощи карандаша и бумаги, не смог бы воспользоваться этим методом для расчета сколько-нибудь реалистичной задачи. На это потребовалось бы несколько жизней. Однако при наличии быстрого компьютера метод становится вполне реализуемым, а современные компьютеры очень и очень быстры.

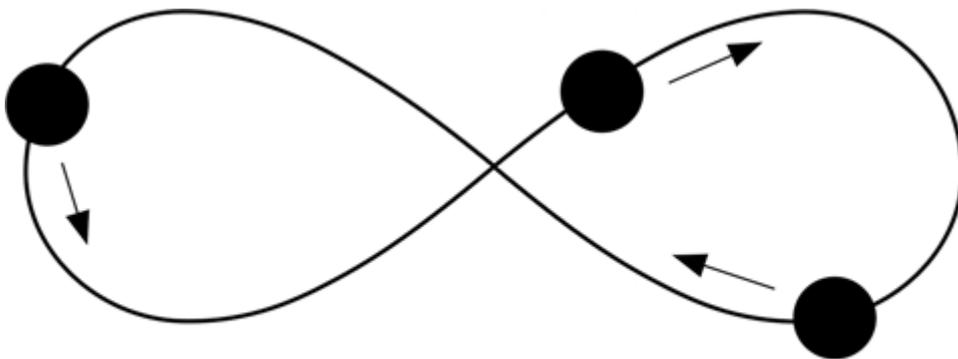
Откровенно говоря, все не *настолько* просто. Притом что ошибка на каждом шаге (вызванная тем, что мы считаем быстроту изменений постоянной, хотя на самом деле она успевает немного измениться) очень мала, шагов вам придется сделать ужасно много. При многократных операциях с маленькой ошибкой на каждом шагу результирующая ошибка не обязательно получится маленькой, но тщательно продуманные методы позволяют удерживать ошибки под контролем. Именно на это нацелена целая область математики, известная как численный анализ. Удобно называть такие методы «моделированием», что отражает принципиальную роль в них компьютера. Важно понимать, что невозможно решить задачу, просто «засунув ее в компьютер». Кто-то должен запрограммировать машину, задать ей математические правила, которые обеспечат близость вычислительных результатов к реальности.

Правила, о которых идет речь, настолько точны, что астрономы могут предсказывать затмения Солнца и Луны с точностью до секунды, а положение планеты с точностью до нескольких километров на сотни лет вперед. Подобные «предсказательные» расчеты можно проводить и *назад* во времени, чтобы можно было точно определить, когда и где произошли известные нам по историческим хроникам затмения. Эти данные используются, к примеру, для датирования наблюдений, сделанных тысячи лет назад китайскими астрономами.

\* \* \*

Даже сегодня математики и физики продолжают открывать новые неожиданные следствия из закона всемирного тяготения Ньютона. В 1993 году Крис Мур при помощи численных методов показал, что три тела с идентичными массами могут вечно гоняться друг за другом по одной и той же орбите в форме восьмерки, а в 2000-м Карлес Симо также численно показал, что эта орбита стабильна с точностью, возможно, до медленного дрейфа. В 2001 году Ален Ченсинер и Ричард Монтгомери привели строгое доказательство существования такой орбиты на основе принципа наименьшего действия – фундаментальной теоремы классической механики. Симо открыл множество подобных «хореографий», в которых несколько тел одинаковой массы преследуют друг друга, двигаясь все время по одному и тому же (сложному) пути.

Орбита в форме восьмерки для трех тел, судя по всему, сохраняет стабильность и при слегка различных массах тел, что открывает небольшую вероятность того, что где-то во Вселенной три реальные звезды могут вести себя таким замечательным образом. Согласно оценкам Дугласа Хегги, по одной такой тройной системе может приходиться на каждую галактику, а уж вероятность существования во Вселенной хотя бы одной такой системы довольно значительна.



Орбита для трех тел в форме восьмерки

Все эти орбиты существуют на плоскости, но есть уже и новый трехмерный вариант. В 2015 году Юджин Окс догадался, что необычные орбиты электронов в «ридберговских квазимолекулах», возможно, тоже существуют по законам Ньютоновой гравитации. Он

показал, что в системах двойных звезд могут существовать планеты, двигающиеся от одной звезды к другой и обратно по спиральной орбите, обвивающей соединяющую эти звезды линию. В середине витки спирали лежат свободнее, к звездам на концах – плотнее.

Представьте себе, что вы протягиваете между звездами пружинку игрушку-слинки, растянутую посередине и свернутую в петли на концах. Для звезд с разными массами пружинка должна сужаться от одного конца к другому, как конус. Подобные орбиты могут быть стабильными, даже если звезды движутся не по окружностям.

Коллапсирующие газовые облака порождают плоские орбиты, поэтому образование планет на описанных выше орбитах маловероятно. Но планета (или астероид), оказавшаяся в результате возмущения на сильно наклоненной орбите, может в редких случаях быть захвачена двойной звездой и в результате оказаться на спиральной орбите между ними. Некоторые данные указывают на то, что Kepler-16b – планета, обращающаяся вокруг одной далекой звезды, – может относиться к этой редкой категории.

\* \* \*

Следует отметить, что один из аспектов закона всемирного тяготения немало беспокоил великого автора; по существу, он беспокоил автора закона сильнее, чем большинство его последователей. Как известно, закон описывает силу, с которой одно тело действует на другое, но ничего не говорит о том, *как* эта сила работает. Закон просто постулирует загадочное «дальнодействие». Когда Солнце притягивает Землю, Земля каким-то образом должна «знать», как далеко она находится от Солнца. Если бы, к примеру, оба объекта соединяла какая-то эластичная веревочка, то эта веревочка могла бы передавать воздействие; тогда величину силы определяли бы физические характеристики связи. Но между Солнцем и Землей нет никакой материальной связи, одно только пустое пространство. Как же Солнце узнает, с какой силой надо тянуть Землю, и как Земля узнает, с какой силой ее тянут?<sup>10</sup> С практической точки зрения мы можем применять закон всемирного тяготения, не тревожась о том, посредством какого физического механизма сила передается от одного тела другому. Вообще говоря, все именно этим и занимаются. Однако некоторые ученые обладают отчетливой философской жилкой; самый яркий пример – Альберт Эйнштейн. Его специальная теория относительности, опубликованная в 1905 году, изменила представления физиков о пространстве, времени и веществе. Расширение этой теории в 1915 году до общей теории относительности изменило также их представления о гравитации – и, как бы между прочим, разрешило щекотливый вопрос о том, как сила может действовать на расстоянии. Для этого общая теория относительности, собственно говоря, избавилась от силы. Эйнштейн вывел специальную теорию относительности из одного-единственного фундаментального принципа: скорость света<sup>11</sup> остается неизменной, даже если наблюдатель сам движется с постоянной скоростью. В Ньютоновой механике, если вы находитесь в открытом автомобиле и бросаете вперед по ходу движения мяч, то скорость мяча, измеренная неподвижным наблюдателем на обочине, будет равна скорости мяча по отношению к автомобилю *плюс* скорость автомобиля. Аналогично, если вы будете светить фонарем вперед по направлению движения, то скорость света, измеренная человеком на обочине, должна, по идее, равняться обычной скорости света *плюс* скорость автомобиля.

---

<sup>10</sup> Вот как писал об этом сам Ньютон в письме к Ричарду Бентли, написанном в 1692 или 1693 году: «Непостижимо, что неодушевленная Материя может, без Посредничества чего-то еще, что не является материальным, оказывать влияние и действовать на другую материю без обоюдного Контакта... То, что одно тело может действовать на другое на расстоянии через Вакуум, вообще без какого бы то ни было Посредничества... для меня настолько Абсурдно, что я убежден: ни один Человек, имеющий в философских Вопросах компетентные Способности мышления, никогда с этим не согласится».

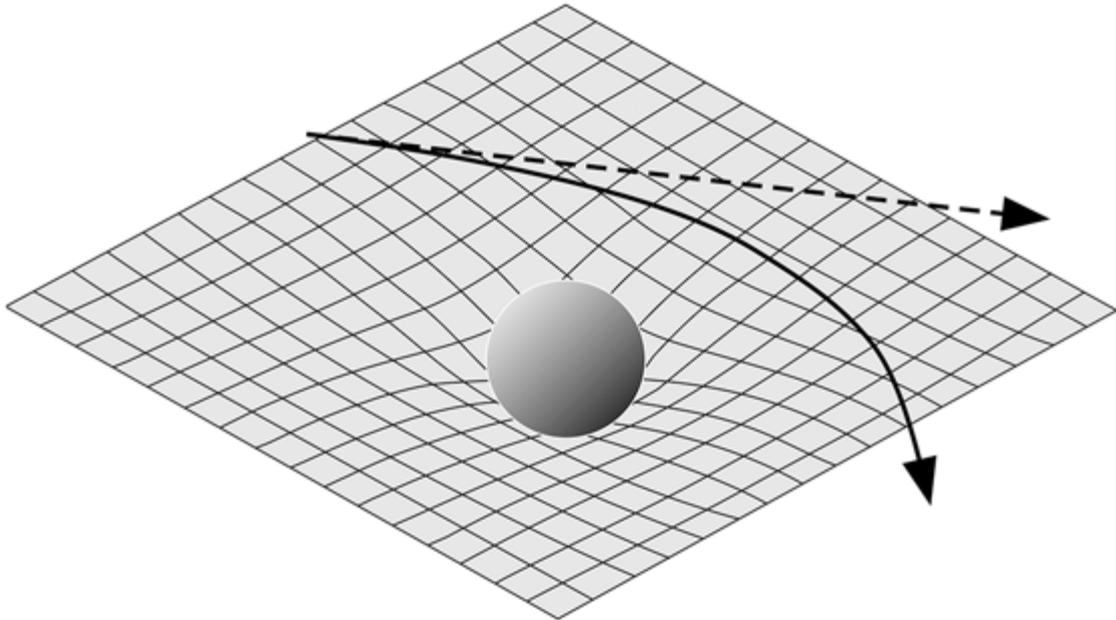
<sup>11</sup> В вакууме. – *Прим. ред.*

Экспериментальные данные и кое-какие мысленные эксперименты убедили Эйнштейна, что со светом все иначе. Наблюдаемая скорость света *одинакова* как для человека, светящего фонарем вперед, так и для человека на обочине. Логические следствия из этого принципа, который, как мне всегда казалось, следовало бы назвать принципом *безотносительности*, поражают воображение. Ничто не может двигаться быстрее света<sup>12</sup>. По мере того как тело приближается к скорости света, оно сжимается в направлении движения, его масса увеличивается, а время для него течет все более медленно. При скорости, равной скорости света, – если бы такое было возможно – тело стало бы бесконечно тонким и бесконечно тяжелым, а время для него остановилось бы. Масса и энергия связаны между собой: энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света. Наконец, события, которые один наблюдатель видит происходящими одновременно, могут оказаться неодновременными для другого наблюдателя, который движется с постоянной скоростью относительно первого. В Ньютоновой механике никаких таких странностей нет. Пространство есть пространство, а время есть время, и вместе им не сойтись. В специальной теории относительности пространство и время до некоторой степени взаимозаменяемы, причем степень этой взаимозаменяемости ограничивается скоростью света. Вместе пространство и время образуют единый пространственно-временной континуум. Несмотря на странные предсказания, специальная теория относительности получила признание как наиболее точная теория пространства и времени из всех, какие у нас имеются. Большая часть наиболее парадоксальных эффектов в ней проявляется лишь тогда, когда объекты движутся очень быстро; вот почему мы не замечаем их в повседневной жизни. Самый очевидный недостающий ингредиент в этой теории – тяготение. Эйнштейн много лет пытался встроить силу тяготения в теорию относительности; отчасти его подталкивала к этому известная аномалия в орбите Меркурия<sup>13</sup>. Конечным результатом этих попыток стала общая теория относительности, распространившая выводы специальной теории относительности с «плоского» пространственно-временного континуума на «искривленное». Мы можем приблизительно представить себе, о чем идет речь, если сократим пространство до двух измерений вместо трех. При этом пространство станет плоскостью, а специальная теория относительности будет описывать движение частиц на этой плоскости. В отсутствие гравитации они движутся по прямым линиям. Как указывал Евклид, прямая есть кратчайшее расстояние между двумя точками. Чтобы ввести в картину гравитацию, поместим на плоскость звезду. Частицы теперь уже не будут двигаться по прямым линиям; вместо этого они начнут огибать звезду по криволинейным траекториям, таким как эллипсы. В Ньютоновой физике эти траектории искривлены потому, что некая сила отклоняет частицу с прямого пути. В общей теории относительности аналогичный эффект достигается искривлением пространства-времени. Предположим, что звезда искажает форму плоскости, создавая в ней круглую впадину – «гравитационный колодец» со звездой на дне, и будем считать, что частицы всегда движутся по кратчайшему пути, называемому геодезической линией. Поскольку пространственно-временной континуум искривлен, кратчайшим расстоянием в нем перестает быть прямая. К примеру, частица может угодить во впадину и начать описывать круги по стенке на постоянной высоте, как планета на замкнутой орбите.

---

<sup>12</sup> Это некоторое упрощение. Запрещено не движение быстрее света, как таковое, запрещен переход через скорость света. Никакой объект из тех, что в настоящий момент движутся медленнее света, не может ускориться так, чтобы двигаться быстрее света; а если вдруг что-то в настоящий момент движется быстрее света, то это что-то не сможет замедлиться и стать медленнее света. Подобные частицы называются тахионами, и на данный момент их существование носит чисто гипотетический характер.

<sup>13</sup> В письме к своему другу Конраду Хабихту, датированном 1907 годом, Эйнштейн писал, что думает о «релятивистской теории гравитационного закона, при помощи которой я надеюсь объяснить до сих пор необъяснимое вековое изменение движения перигелия Меркурия». Первые серьезные попытки такого рода были начаты им в 1911 году.



Влияние кривизны / гравитации на частицу,  
пролетающую мимо звезды или планеты

Вместо гипотетической силы, которая заставляет траекторию частицы отклоняться от прямой линии, Эйнштейн ввел пространство-время, которое *уже* искривлено и кривизна которого влияет на траекторию движущейся частицы. И не надо никакого дальнего действия: пространство-время искривлено потому, что именно так влияют на него звезды, а все тела, движущиеся по орбитам, реагируют на кривизну поблизости. То, что мы и Ньютон называем тяготением и представляем себе в виде силы, на самом деле является кривизной пространства-времени.

Эйнштейн записал математические формулы – уравнения поля Эйнштейна, или просто уравнения Эйнштейна<sup>14</sup>, которые описывают, как кривизна влияет на движение масс и как распределение масс влияет на кривизну. В отсутствие какой бы то ни было массы эти формулы сводятся к специальной теории относительности. Так что все необычные эффекты, такие как замедление времени, присутствуют и в общей теории относительности. В самом деле, гравитация может *вызвать* замедление времени даже для неподвижного объекта. Как правило, такие парадоксальные эффекты слабы, но в крайних обстоятельствах поведение, предсказанное теорией относительности (любой из них), значительно отличается от Ньютоновой физики.

Вы думаете, что все это звучит безумно? Поначалу многие так думали. Но сегодня всякий, кто в поездках пользуется спутниковой навигацией, полагается на специальную и общую теории относительности. Расчеты, которые сообщают вам, что вы находитесь на окраине Бристолья и движетесь на юг по дороге М32, основаны на навигационных сигналах спутников на околоземных орбитах. Процессор в вашем гаджете, вычисляющий ваше положение, должен исправлять полученные со спутников данные, чтобы учесть два эффекта: скорость движения спутника и его положение в гравитационном колодце Земли<sup>15</sup>. Первая поправка

<sup>14</sup> В наше время мы соединяем уравнения Эйнштейна в единое тензорное уравнение (из десяти компонент – симметричный четырехмерный тензор), но обычным названием остаются «уравнения поля».

<sup>15</sup> Хуже того, скорость хода «бортовых часов» – ультрастабильного генератора частоты навигационного спутника – преднамеренно смещена относительно идеальной примерно на половину миллиардной доли, чтобы получить идеальную синхронизацию с неподвижными часами на поверхности Земли. – *Прим. ред.*

задействует специальную теорию относительности, вторая – общую. Без них прибор спутниковой навигации всего за несколько дней забросил бы вас в середину Атлантического океана.

\* \* \*

Общая теория относительности показывает, что Ньютонова физика не является истинной и точной «системой мира», каковой ее считал сам Ньютон (и почти все остальные ученые до XX века). Однако это открытие не означало конца Ньютоновой физики. Более того, сегодня она используется намного шире и в куда более практических целях, чем во времена Ньютона. Ньютонова физика проще, чем теория относительности, – как говорится, «сойдет для сельской местности», да и для любой другой тоже. Различия между двумя теориями становятся очевидны в основном при рассмотрении всевозможных экзотических явлений, таких как черные дыры. Астрономы и разработчики космической техники, работающие в основном на правительства или организации вроде NASA или ЕКА, до сих пор используют Ньютонову механику почти для всех расчетов. Есть, правда, несколько исключений, где время требует очень осторожного отношения. По ходу рассказа мы будем снова и снова сталкиваться с действием закона всемирного тяготения Ньютона. И не случайно: этот закон – одно из величайших научных открытий в истории человечества, его значение трудно переоценить.

Однако, когда дело доходит до космологии – исследования Вселенной в целом и в первую очередь ее происхождения, мы должны отставить Ньютонову физику в сторону. Здесь она уже не в состоянии объяснить ключевые наблюдательные результаты. Вместо нее нужно задействовать общую теорию относительности, которой умело ассистирует квантовая механика. Но даже этим двум великим теориям, судя по всему, требуется дополнительная помощь.

## 2. Коллапс Солнечной туманности

*Около двух миллиардов лет назад или около того две галактики столкнулись – или, скорее, началось их взаимопроникновение... Примерно в то же время – плюс-минус, как считается, те же 10 % – практически все солнца обеих галактик обзавелись планетами.*

**Эдвард Смит. Трипланетие**

«Трипланетие» — первый роман знаменитой серии научно-фантастических романов Эдварда Смита «Ленсманы», и его зачин отражает теорию происхождения планетных систем, популярную в 1948 году, в момент написания романа. Даже сегодня такое начало научно-фантастического произведения производило бы сильное впечатление; в то время от него просто захватывало дух. Сами романы представляют собой ранние примеры «широкоформатно-барочной» космической оперы — космического сражения между силами добра (которые представляет Аризия) и зла (Эддора), описанию которого и посвящены все шесть книг серии. Несмотря на «картонные» характеры действующих лиц и банальный сюжет, действие захватывает, к тому же в то время просто не было книг, которые сравнились бы с «Трипланетием» по масштабности.

Сегодня мы уже не считаем, что для создания планет необходимо столкновение галактик, хотя астрономы по-прежнему рассматривают его как один из четырех основных сценариев формирования звезд. Текущая теория формирования Солнечной системы и многих других планетных систем отличается от описанной в эпиграфе, но не уступает ей по масштабности и увлекательности. Выглядит она приблизительно так.

Четыре с половиной миллиарда лет назад [16] облако газообразного водорода поперечником 600 триллионов километров начало медленно разделяться на куски. Каждый такой кусок сконденсировался в звезду, а один из них — Солнечная туманность — сформировал Солнце вместе со всей его системой из восьми планет, пяти (на данный момент) карликовых планет и тысяч астероидов и комет. Третий камень от Солнца в этой системе и есть наш общий дом: Земля.

В отличие от литературного варианта это описание может даже оказаться верным. Рассмотрим доказательства.

\*\*\*

Идея о том, что и Солнце, и планеты сконденсировались из огромного газового облака, появилась очень рано и долгое время была преобладающей научной теорией происхождения Солнечной системы. Когда в этой теории выявились проблемы, она почти на 250 лет вышла из моды, но в настоящий момент благодаря новым идеям и новым данным получила новую жизнь.

Рене Декарт известен больше своей философией — «Я мыслю, следовательно, существую» — и математическими достижениями, в первую очередь координатной геометрией, при помощи которой можно перевести геометрию на язык алгебры и наоборот. Но в его время философией называли многие области интеллектуальной деятельности, включая и физику, которая именовалась натуральной философией. В книге *Le Monde* («Мир», 1664 год [17]) Декарт разобрал в том числе и вопрос происхождения Солнечной системы. Он утверждал, что первоначально Вселенная была бесформенным скоплением частиц, совершающих круговые движения, подобно водоворотам. Один необычайно крупный вихрь закрутился еще более плотно и в конечном итоге уплотнился, сформировав Солнце, а из более мелких вихрей, окружавших его, сформировались планеты.

Эта теория разом объясняла два принципиально важных факта: почему наша Солнечная система содержит множество отдельных тел и почему все планеты в ней обращаются вокруг Солнца в одном направлении. Декартова теория водоворотов не согласуется с тем, что мы сегодня знаем о гравитации, но до появления закона всемирного тяготения оставалось еще два десятка лет. В 1734 году Эмануэль Сведенборг заменил вращающиеся водовороты Декарта огромным облаком газа и пыли. В 1755-м философ Иммануил Кант благословил эту идею, а в 1796 году математик Пьер-Симон де Лаплас сформулировал ее независимо и заново.

Любая теория происхождения Солнечной системы обязательно должна объяснять два ключевых наблюдения. Очевидное наблюдение состоит в том, что вещество в системе собралось в отдельные дискретные тела: Солнце, планеты и т.д. Более тонкое наблюдение касается величины, известной как угловой момент, или момент импульса; появилось оно в результате математического исследования глубоких следствий из законов движения Ньютона.

Чтобы понять, что такое момент импульса, можно привлечь родственную концепцию импульса, которая проще для понимания. Импульс определяет способность любого тела двигаться с постоянной скоростью по прямой в отсутствие действующих на него сил, как гласит первый закон движения Ньютона. Англоязычные спортивные комментаторы часто используют этот термин метафорически: «Да, вот теперь она набрала импульс» (по-русски это звучит хуже, хотя и понятно). Статистический анализ совершенно не подтверждает предположение о том, что после серии хороших результатов новые результаты тоже будут хорошими; комментаторы объясняют неудачу своей метафоры (задним числом) тем, что импульс, мол, опять был потерян. В механике — математике движущихся тел и систем — импульс имеет очень конкретный смысл, и одно из свойств этого понятия состоит в том, что потерять его невозможно. Можно лишь передать его какому-то другому объекту.

Представьте себе движущийся мяч. Его скорость говорит нам, насколько быстро он движется: скажем, 80 километров в час. Механика сосредоточивается на более важной величине — той же скорости, но в векторном варианте; она сообщает нам не только, как быстро движется объект, но и в каком направлении он движется. Если идеально упругий мяч стукнется в стенку под прямым углом и отскочит, то по величине его скорость останется неизменной, а вот направление ее поменяется на обратное. Импульс мяча равен его массе, умноженной на скорость, так что импульс тоже характеристика векторная и имеет величину и направление. Если два тела — легкое и тяжелое — движутся с одинаковой скоростью в одном и том же направлении, то у

тяжелого тела импульс больше, чем у легкого. Физически это означает, что, если вы хотите изменить характер движения тела, вам потребуются приложить большую силу. Вы можете без труда отбить мячик для пинг-понга, летящий со скоростью 50 километров в час, но никому в здравом уме не придет в голову попробовать проделать то же с грузовиком.

Математики и физики любят иметь дело с импульсом, потому что в отличие от скорости при изменении системы тел во времени он сохраняется. То есть величина и направление суммарного импульса системы остаются такими же, какими были в начальный момент.

Возможно, это звучит невероятно. Если мяч ударяется в стену и отскакивает от нее, его импульс меняет направление, то есть не остается неизменным — не сохраняется. Но стена (гораздо более массивная, чем мяч) тоже чуть-чуть отскакивает — и отскакивает в противоположную сторону. После этого в игру вступают другие факторы, такие как остальная часть стены, к тому же я приберег в рукаве козырь, который поможет мне выбраться из тупика: закон сохранения работает только тогда, когда нет никаких внешних сил, то есть без постороннего вмешательства. Именно так тело может приобрести импульс в самом начале: оно получает толчок откуда-то извне.

Момент импульса выглядит аналогично, но применим к телам, которые движутся не по прямой, а вращаются. Определить момент импульса даже для единственной частицы — дело непростое, но он, как и импульс, зависит и от массы частицы, и от величины и направления ее скорости. Основная новая черта — то, что момент импульса зависит также от оси вращения, то есть линии, вокруг которой частицы, как считается, вращаются. Представьте себе вращающийся волчок. Он вращается вокруг линии, проходящей через его середину, так что каждая частица вещества в нем вращается вокруг этой оси. Момент импульса частицы относительно этой оси равен скорости ее вращения, умноженной на ее массу. Но направление, на которое указывает момент импульса, соответствует направлению вдоль оси вращения, то есть под прямым углом к плоскости, где вращается частица. Момент импульса всего волчка целиком, опять же взятый относительно оси, получается сложением моментов импульса всех составляющих его частиц с учетом направления, если это необходимо.

Упрощая, [18] можно сказать, что величина суммарного момента импульса вращающейся системы говорит нам о том, насколько мощным вращением обладает эта система, а его направление — о том, вокруг какой оси происходит вращение. Момент импульса сохраняется в любой системе тел, на которые не действуют никакие внешние вращающие силы (на научном сленге это звучит так: отсутствует крутящий момент).

\*\*\*

Этот полезный факт непосредственно отражается на коллапсе газового облака, что в чем-то хорошо, в чем-то плохо.

Хорошее следствие состоит в том, что после некоторой первоначальной неразберихи молекулы газа начинают вращаться преимущественно в одной плоскости. Первоначально каждая молекула обладает определенным моментом импульса относительно центра тяжести облака. В отличие от волчка газовое облако не имеет жесткой структуры, поэтому скорости и направления движения молекул в нем, вероятно, меняются в широких пределах. Вряд ли все эти величины точно компенсируют друг друга, так что первоначально облако обладает ненулевым суммарным моментом импульса. Из этого следует, что суммарный момент импульса системы обладает каким-то вполне конкретным направлением и имеет вполне конкретную величину. Закон сохранения гласит, что, поскольку газовое облако развивается под действием гравитации, его суммарный момент импульса не меняется. Следовательно, направление оси остается постоянным, жестко зафиксированным в момент формирования облака. И величина момента импульса — общее количество вращения, если так можно выразиться, — тоже остается постоянной. Что в этой системе может меняться, так это распределение газовых молекул. Каждая молекула газа гравитационно притягивает все остальные молекулы, и первоначально хаотичное шарообразное газовое облако стягивается и образует плоский диск, вращающийся вокруг оси, как тарелка на шесте в цирке.

Это хорошая новость для теории Солнечной туманности, потому что все планеты Солнечной системы имеют орбиты, лежащие очень близко к одной и той же плоскости — эклиптике, — и обращаются вокруг Солнца в одном направлении. Именно поэтому астрономы в давние времена

догадались, что и Солнце, и планеты сконденсировались из газового облака после того, как это облако сжалось с образованием протопланетного диска.

К несчастью, для этой «небулярной гипотезы» есть и плохие новости: 99% момента импульса Солнечной системы сосредоточено в планетах, тогда как на долю Солнца приходится лишь 1%. Хотя Солнце содержит в себе практически всю массу Солнечной системы, вращается оно довольно медленно, а его частицы располагаются относительно близко к центральной оси. Планеты, хотя уступают Солнцу по массе, находятся гораздо дальше и движутся гораздо быстрее — и потому берут на себя почти весь момент импульса.

Однако подробные теоретические расчеты показывают, что коллапсирующее газовое облако так себя не ведет. Солнце поглощает большую часть вещества в облаке, включая и то, что располагалось намного дальше от центра. Поэтому логично было бы ожидать, что центральное светило поглотит и львиную долю момента импульса... чего, как несложно заметить, оно в данном случае не сделало. Тем не менее нынешнее распределение момента импульса, при котором на планеты приходится львиная его доля, прекрасно согласуется с динамикой Солнечной системы. Она работает и работает уже миллиарды лет. Вообще динамика, как таковая, не представляет собой никакой логической проблемы: проблема только в том, с чего это все началось.

\*\*\*

Из этой дилеммы был быстро найден один потенциальный выход. Предположим, что Солнцесформировалось первым. Тогда оно действительно поглотило почти весь момент импульса газового облака — ведь оно поглотило и почти весь составлявший его газ. А позже оно могло приобрести и планеты, захватив сгустки вещества, пролетавшие поблизости. Если их траектория пролегла достаточно далеко от Солнца и двигались они с подходящей скоростью для захвата, в результате вполне могут получиться 99%, которые мы наблюдаем сейчас.

Основная проблема этого сценария в том, что захватить планету очень сложно. Любая потенциальная планета, которая подлетит достаточно близко, будет ускоряться по мере приближения к Солнцу. Если при этом она умудрится не упасть на Солнце, то, обогнув его, будет вышвырнута прочь. А поскольку сложен захват даже одной планеты, то что же говорить о восьми?

«Возможно, — рассуждал граф Бюффон в 1749 году, — какая-нибудь комета врезалась в Солнце и выплеснула из него достаточно материала для возникновения планет». «Нет, — ответил Лаплас в 1796 году, — планеты, сформировавшиеся таким образом, со временем обязательно упадут обратно на Солнце». Чтобы показать это, достаточно провести примерно те же рассуждения, которые ставят под сомнение вариант захвата, только наоборот. Захватить планету сложно, потому что то, что прилетает сверху, должно улететь обратно вверх (если, конечно, не врежется в Солнце и не будет им поглощено). Выплеснуть часть светила сложно, потому что то, что взлетает вверх, должно упасть. В любом случае мы сегодня знаем (в отличие от них тогда), что кометы слишком легковесны, чтобы выплеснуть из Солнца «каплю» размером с планету, да и материал у Солнца неподходящий.

В 1917 году Джеймс Джинс предложил приливную теорию: некая блуждающая звезда прошла мимо Солнца и «высосала» из него часть вещества в виде длинной тонкой сигары. Потом эта сигара, изначально нестабильная, распалась на отдельные комки, которые превратились в планеты. Опять же, Солнце имеет неподходящий состав; более того, для такого сценария необходимо чрезвычайно маловероятное событие, почти столкновение, и к тому же оно не позволяет придать внешним планетам достаточно большой момент импульса, чтобы они не упали обратно. Были предложены десятки теорий — все разные, но все представляющие собой вариации на сходную тему. Каждая из них согласуется с одними фактами и испытывает трудности в объяснении других.

К 1978 году дискредитированная, казалось бы, небулярная модель вновь вошла в моду. Эндрю Прентис предложил вполне правдоподобное решение проблемы момента импульса — помните, у Солнца он слишком мал, у планет — слишком велик. Нам требуется какой-то способ, который отменил бы сохранение момента импульса и позволил системе что-то получать или отдавать. Прентис предположил, что возле центра газового диска концентрируются частицы пыли и трение между ними замедляет вращение только что сконденсировавшегося Солнца.

Виктор Сафронов высказал аналогичные идеи примерно в то же время, и его книга [19] на эту тему привела к тому, что модель «коллапсирующего диска», в которой Солнце и планеты (и много чего еще) сконденсировались из единственного массивного газового облака, раздерганного на множество кусков разных размеров собственной гравитацией с участием трения, получила широкое признание.

Эта теория имеет то достоинство, что она объясняет, почему внутренние планеты (Меркурий, Венера, Земля, Марс) в основном каменные, тогда как внешние (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) — газовой-ледяные гиганты. Дело в том, что более легкие элементы в протопланетном диске должны были концентрироваться дальше от центра, чем тяжелые, хотя и со значительным турбулентным перемешиванием. Наиболее распространенная теория образования планет-гигантов состоит в том, что сначала у них сформировалось скальное ядро, а затем его гравитация привлекла водород, гелий и некоторое количество водяного пара плюс относительно небольшое количество других веществ. Однако воспроизвести такой сценарий при помощи существующих моделей формирования планет пока не получается.

В 2015 году Гарольд Левисон, Катерина Кретке и Мартин Дункан провели компьютерное моделирование, воспроизводящее альтернативный вариант: ядра медленно аккумулировались из мелких камней или «валунов» — кусков каменного вещества размером до метра в поперечнике. В теории этот процесс способен построить ядро, в 10 раз превосходящее по массе Землю, за несколько тысяч лет. Предыдущие модели выявили в этом сценарии другую проблему: он порождает сотни планет размером с Землю. Теперь же удалось показать, что этой проблемы можно избежать, если предположить, что валуны возникают достаточно медленно, чтобы успеть провзаимодействовать между собой на гравитационном уровне. Тогда более крупные валуны выталкивают остальные за пределы диска. Моделирование с разными параметрами часто давало «на выходе» от одного до четырех газовых гигантов на расстоянии 5–15 а.е. от Солнца, что соответствует нынешней структуре Солнечной системы. Одна астрономическая единица (а.е.) равна расстоянию от Земли до Солнца; измерять относительно небольшие космические расстояния такими наглядными единицами часто бывает удобно.

Хороший способ проверить небулярную модель — выяснить, идут ли где-нибудь в космосе аналогичные процессы. В 2014 году астрономы сделали замечательный снимок молодой звезды HL Тельца, расположенной на расстоянии 450 световых лет в указанном созвездии. Эта звезда окружена яркими концентрическими кругами газа, которые чередуются с темными кольцами. Темные кольца почти наверняка образованы зарождающимися планетами, выметающими или собирающими на себя пыль и газ. Было бы трудно найти более яркое подтверждение теории.

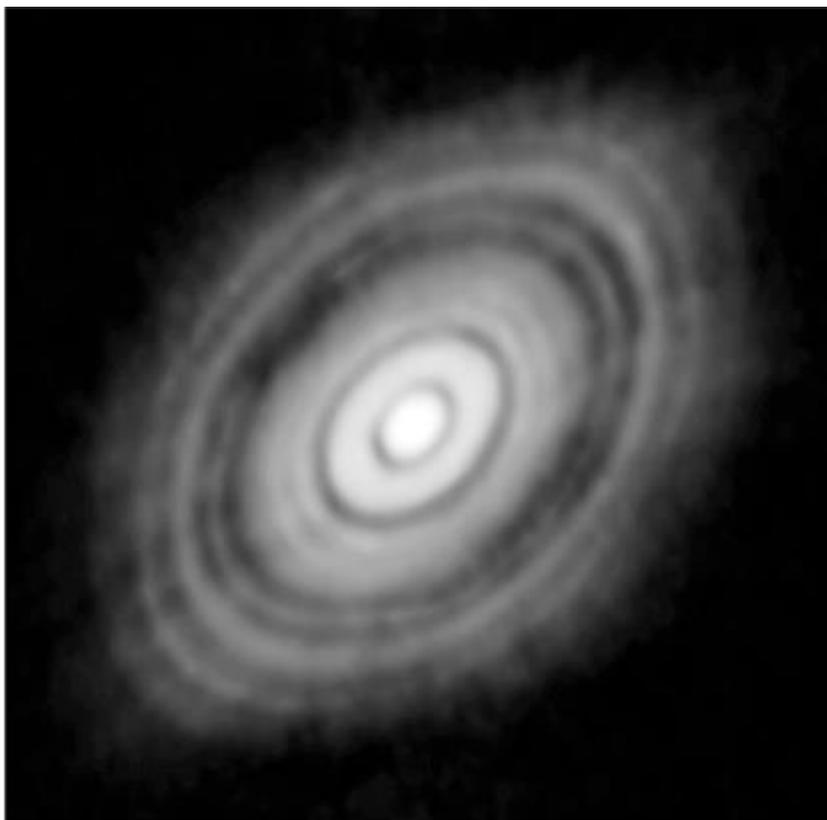


Фото HL Тельца, на котором видны концентрические круги пыли и промежутки между ними, получено при помощи комплекса телескопов миллиметрового диапазона ALMA в пустыне Атакама

Нетрудно поверить, что гравитация может заставить какие-то вещи собраться в комок, но как и за счет чего она может разбросать их? Попробуем представить себе это на уровне интуиции. Вновь заверю вас, что серьезные математические выкладки, которых мы не будем здесь приводить, в целом подтверждают это. Начнем со слипания.

Газ, молекулы которого гравитационно притягивают друг друга, сильно отличается от обычного нашего представления о газах. Если наполнить газом комнату, он очень быстро распределится по всему объему так, чтобы всюду иметь одинаковую плотность. Вы не найдете в своей гостиной случайных карманов, где воздуха почему-то нет. Причина в том, что молекулы воздуха летают вокруг повсюду, сталкиваются и отлетают случайным образом и очень быстро заполняют все доступное пространство. Такое поведение зафиксировано в знаменитом втором законе термодинамики, традиционная интерпретация которого гласит, что газ стремится к наибольшему беспорядку. «Беспорядок» в данном контексте относится к тому, что все должно быть как следует перемешано; это означает, что ни в одной области плотность газа не должна быть выше, чем в любой другой.

На мой взгляд, эта концепция, формально известная как энтропия, слишком скользкая, чтобы ее можно было обозначить одним простым словом, таким как «беспорядок», — хотя бы потому, что словосочетание «равномерно перемешанный», мне кажется, указывает скорее на упорядоченное состояние. Но пока я хочу лишь обозначить традиционную границу. На самом деле в математической формулировке вообще не упоминается ни порядок, ни беспорядок, но она слишком формальна и сложна, чтобы обсуждать ее здесь.

То, что верно для комнаты, верно, конечно, и для большой комнаты. Так почему бы нам не взять комнату размером с целую Вселенную? Более того, почему не рассмотреть саму Вселенную? Ведь ясно, что второй закон термодинамики требует, чтобы весь газ во Вселенной распределился равномерно по всему ее объему, образовав что-то вроде разреженного тумана.

Если бы это было так, то для человечества это было бы очень плохой новостью, поскольку мы с вами состоим не из разреженного тумана. Мы довольно плотные, с этим не поспоришь, и живем на довольно большом комке вещества, которое обращается по орбите вокруг еще более

крупного комка — такого крупного, что он поддерживает энергетические ядерные реакции, порождая тепло и свет. Неудивительно, что те, у кого не лежит сердце к обычным научным описаниям происхождения человечества, часто привлекают второй закон термодинамики, чтобы «доказать», что мы не могли бы существовать, если бы некое гиперразумное существо намеренно не сотворило нас и не организовало Вселенную в соответствии с нашими запросами.

Однако термодинамическая модель газа в комнате не годится для построения модели поведения Солнечной туманности — или Вселенной в целом. В ней рассматриваются не те типы взаимодействия. Термодинамика предполагает, что молекулы замечают друг друга только при столкновениях; в этом случае они отскакивают друг от друга. Столкновения носят абсолютно упругий характер (это значит, что энергия при столкновении не теряется), так что молекулы продолжают летать и сталкиваться вечно. Формально можно сказать, что силы, управляющие взаимодействием молекул в термодинамической модели газа, — это силы отталкивания с малым радиусом действия.

Представьте себе вечеринку, где всем гостям завязывают глаза и затыкают уши, так что узнать о присутствии в зале кого-то еще можно только одним способом: наткнувшись на него. Вообразите себе также, что все присутствующие чрезвычайно необщительны, поэтому любые двое, случайно столкнувшись, спешат сразу же оттолкнуться и разойтись. Скорее всего, после некоторого начального периода многочисленных столкновений и шатания по залу гости распределятся по нему довольно равномерно. Распределение не будет абсолютно равномерным все время, поскольку иногда гости будут случайно сближаться и даже сталкиваться, но в среднем они будут распределены по залу. Так ведет себя термодинамический газ, в котором в роли гостей выступает гигантское число молекул.

Газовое облако в космосе — явление более сложное. При столкновении молекулы по-прежнему разлетаются, но в облаке присутствует и другая сила — гравитация. Термодинамика не учитывает гравитацию, потому что в этом контексте ее действие пренебрежимо мало. Но в космологии гравитация — доминантный игрок, потому что газа в пространстве очень-очень много. Термодинамика помогает ему сохранять газообразность, но именно гравитация определяет, что делает газ в крупных масштабах. Гравитация — это сила притяжения с большим радиусом действия; она представляет собой почти точную противоположность упругим столкновениям. Говоря о «большом радиусе действия», мы имеем в виду, что тела гравитационно взаимодействуют между собой, даже если далеко разнесены в пространстве. Тяготение Луны (и в меньшей степени Солнца) поднимает приливы в земных океанах — а ведь до Луны от нас почти 400 000 километров. «Притяжение» — это просто: взаимодействующие тела под действием этой силы движутся по направлению друг к другу.

Это похоже на вечеринку, где каждый видит всех остальных в зале — в любом его уголке, но чем дальше, тем менее отчетливо, а увидев, кидается к ним. Вряд ли стоит удивляться тому, что массагравитационно взаимодействующего газа естественным образом собирается в комки. В очень маленьких областях в газе доминирует термодинамическая модель, но в более крупном масштабе тенденция к образованию комков берет верх над динамикой.

Если мы пытаемся понять, что будет происходить с гипотетической Солнечной туманностью в масштабе солнечных систем или планет, нам придется учитывать гравитационную силу притяжения дальнего действия. Отталкивание ближнего действия при столкновении молекул, возможно, скажет нам что-нибудь о состоянии небольшой области в атмосфере планеты, но ничего не сообщит о самой планете. Мало того, эта сила обманет нас, заставив подумать, что планета вообще не должна была сформироваться.

Скучивание — неизбежное следствие гравитации, а равномерное распределение нет.

\*\*\*

Поскольку под действием силы тяготения вещество собирается в сгустки, непонятно, как может эта же самая сила разорвать молекулярное облако на части. Эти утверждения кажутся противоречивыми.

Ответ состоит в том, что одновременно в массе газа может возникнуть несколько конкурирующих сгустков. При математическом обосновании того, что газовое облако в конечном итоге соберется в плоский вращающийся диск, мы для начала считаем, что заполненная газом область имеет приблизительно сферическую форму, может быть, слегка

вытянутую, как мяч для регби, но никак не в виде, скажем, гантели. Однако в большом облаке газа обязательно возникнут случайно расположенные локальные области, в которых вещество окажется чуть плотнее, чем в остальных местах. Каждая такая область выступает в роли центра притяжения, поскольку постепенно притягивает дополнительное вещество из окружающих областей и обретает все более мощную гравитационную силу. Возникающий в результате сгусток газа сначала имеет довольно строгую сферическую форму, а затем коллапсирует во вращающийся диск.

Однако в достаточно большом газовом облаке может сформироваться несколько таких центров. Несмотря на то что гравитация обладает большим радиусом действия, с увеличением расстояния между телами ее сила ослабевает. Поэтому молекулы притягиваются к ближайшему центру. Вокруг каждого такого центра формируется область, в которой доминирует именно его гравитационное притяжение. Если на вечеринке присутствуют двое очень популярных гостей и они находятся в противоположных концах зала, то собравшиеся в зале разделятся на две группы. Таким же образом газовое облако организуется в трехмерную лоскутную структуру из притягивающих центров, и эти области разрывают облако вдоль общих границ. На практике процесс выглядит немного более сложно, и быстрые молекулы могут уходить из-под влияния ближайшего центра и оказываться в конечном итоге в другом сгустке, но, если не вдаваться в подробности, следует ожидать именно такого поведения. Каждый центр сжимается и образует звезду, а из каких-то остатков вокруг звезды могут сформироваться планеты и другие более мелкие тела.

Именно так первоначально однородное газовое облако конденсируется в целую серию отдельных, относительно изолированных звездных систем. Каждая звездная система соответствует одному из плотных центров. Но даже при таком сценарии процесс не всегда протекает одинаково. Если две звезды располагаются достаточно близко друг к другу или случайно в какой-то момент сближаются, то в конечном итоге может оказаться, что они обращаются вокруг общего центра масс. Тогда они образуют двойную звезду. На самом деле могут возникать и системы из трех и более звезд, связанных на расстоянии взаимной гравитацией.

Таких множественных звездных систем, особенно двойных, очень много во Вселенной. Так, ближайшая к Солнцу звезда Проксима Центавра располагается совсем недалеко (по астрономическим меркам) от двойной звезды под общим названием  $\alpha$  Центавра, отдельные звезды которой называются  $\alpha$  Центавра А и В. Представляется вероятным, что Проксима тоже обращается вокруг них обеих, но один оборот по такой орбите, вероятно, занимает полмиллиона лет.

Расстояние между компонентами А и В сравнимо с расстоянием от Юпитера до Солнца и колеблется от 11 до 36 а.е. Напротив, расстояние от Проксимы как до А, так и до В составляет около 15 000 а.е., то есть примерно в тысячу раз больше. Таким образом, по обратно-квадратичному закону тяготения А и В действуют на Проксиму с силой в миллион раз меньшей, чем друг на друга. Достаточно ли этого, чтобы удерживать Проксиму на стабильной орбите вокруг них обеих, чувствительно зависит от того, что еще располагается рядом, то есть достаточно близко, чтобы вырвать ее из слабой хватки А и В. В любом случае мы с вами этого не увидим.

\*\*\*

В ранней истории Солнечной системы, вероятно, случались периоды лихорадочной активности. Свидетельством тому служит громадное число кратеров на большинстве ее тел, особенно на Луне, Меркурии, Марсе и различных спутниках; эти следы наглядно показывают, что крупные тела подвергались бомбардировке бесчисленными малыми телами. Относительный возраст получившихся кратеров можно оценить статистически, поскольку более молодые кратеры частично разрушают старые, когда перекрываются с ними, а большинство наблюдаемых кратеров во всех этих мирах возникли чрезвычайно давно. Иногда, правда, возникают и новые кратеры, но в большинстве своем очень небольшие.

Серьезную проблему представляет собой задача восстановления последовательности событий, сформировавших Солнечную систему. В 1980-е годы изобретение мощных компьютеров, а также эффективных и точных вычислительных методов позволило провести

подробное математическое моделирование коллапсирующих газовых облаков. Эта задача требует тщательного подхода и некоторых ухищрений, поскольку грубые численные методы не в состоянии учесть физические ограничения, такие, к примеру, как закон сохранения энергии. Если из-за особенностей математической модели энергия будет медленно убывать, то это будет выглядеть как своеобразное трение; вместо следования по замкнутой орбите планета будет медленно опускаться по спирали все ближе к Солнцу. Сохраняться должны и другие величины, к примеру, момент импульса. Методы, позволяющие избежать такой опасности, появились совсем недавно. Самые точные из них известны как методы симплектического интегрирования и название свое получили по одному из формальных методов преобразования уравнений механики; в этих методах все значимые физические величины сохраняются в точности. Тщательное и точное моделирование раскрывает правдоподобные и весьма драматичные механизмы формирования планет, хорошо соответствующие наблюдениям. Если верить современным теориям, Солнечная система на раннем этапе своего развития была далеко не такой спокойной и уравновешенной, какой мы ее видим сегодня.

Прежде астрономы думали, что Солнечная система, как только образовалась, стала очень стабильной. Планеты грузно перемещались по заданным орбитам, и вокруг практически ничего не менялось; выходило, в общем, что пожилая система, которую мы видим сегодня, очень похожа на саму себя в юности. Этим представлениям конец! Сегодня считается, что такие крупные миры, как газовые гиганты Юпитер и Сатурн и ледяные гиганты Уран и Нептун, первоначально появившиеся за «ледяной линией», где замерзает вода, впоследствии устроили между собой гравитационное перетягивание каната и поменяли позиции. Этот процесс оказал влияние, во многих случаях очень резкое, и на все остальные тела Солнечной системы.

Математические модели, а также другие многочисленные свидетельства из ядерной физики, астрофизики, химии и многих других отраслей науки привели к формированию нынешней картины: планеты сформировались не в виде единичных комков, а в результате хаотического процесса аккреции. Первые 100 000 лет медленно растущие «планетезимали» собирали в пространстве газ и пыль и создавали в туманности кольца, расчищая промежутки между ними. Каждый промежуток был усеян миллионами этих крохотных тел. В этот момент вещество, которое могли бы собирать планетезимали, закончилось, но их самих было так много, что они то и дело сталкивались. Иногда после столкновения тела вновь разлетались, но иногда слипались и образовывали новое, более крупное тело. Такие тела побеждали и становились все крупнее и крупнее; планета строилась, собирая вещество кусочек за кусочком.

На этом раннем этапе гиганты в Солнечной системе располагались ближе друг к другу, чем сегодня, а во внешних областях кишели миллионы крохотных планетезималей. Сегодня планеты-гиганты располагаются в следующем порядке от Солнца: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. Но в одном из вероятных сценариев первоначально порядок был иным: Юпитер, Нептун, Уран, Сатурн. Когда Солнечной системе было примерно 600 миллионов лет, уютное гнездышко распалось. Орбитальные периоды медленно менялись, и в какой-то момент Юпитер и Сатурн попали в резонанс 2:1 — «год» Юпитера стал ровно вдвое короче «года» Сатурна. Резонанс возникает, когда два периода обращения или вращения дают в отношении простую дробь, в данном случае это  $1/2$ [20]. Резонансы оказывают сильное влияние на небесную динамику, поскольку тела на резонансных орбитах раз за разом точно выстраиваются в одну и ту же линию, и позже я еще буду говорить об этом. Это не позволяет возмущениям «усредниться и сойти на нет» на большом промежутке времени. Резонанс, о котором идет речь, вытолкнул Нептун и Уран вовне; при этом Нептун обошел Уран.

Такое перераспределение крупных тел Солнечной системы потревожило планетезимали и заставило их смещаться в сторону Солнца. Разразился настоящий ад, когда планеты начали играть планетезималиями в небесный пинг-понг. Гигантские планеты отодвинулись от Солнца, а планетезимали, напротив, приблизились к нему. В конечном итоге планетезимали встречались с Юпитером, громадная масса которого оказалась решающей. Некоторые из них в результате такой встречи были вообще выброшены из Солнечной системы, а остальные отправились на вытянутые тонкие орбиты, уходящие от Солнца на громадное расстояние. После этого все в основном успокоилось, но Луна, Меркурий и Марс по сей день несут на себе шрамы, появившиеся в результате того хаоса[21]. При этом тела всех форм, размеров и составов разбросало далеко во все стороны.

В основном успокоилось. Но вовсе не прекратилось. В 2008 году Константин Батыгин и Грегори Лофлин смоделировали будущее Солнечной системы на 20 миллиардов лет, и первоначальные результаты не выявили никаких серьезных нестабильностей. Уточняя численный метод поиска потенциальных нестабильностей и по-крупному меняя орбиту по крайней мере одной планеты, они обнаружили вариант возможного будущего, в котором Меркурий падает на Солнце примерно через 1,26 миллиарда лет, и другой вариант, в котором хаотичные метания Меркурия выбрасывают Марс из Солнечной системы через 822 миллиона лет; после этого еще через 40 миллионов лет происходит столкновение между Меркурием и Венерой. Земля продолжает величаво следовать по своему маршруту, никак не реагируя на эти драматические события.

В первых моделях использовались в основном усредненные уравнения, которые не годятся для просчета столкновений, а релятивистские эффекты попросту отбрасывались. В 2009 году Жак Ласкар и Микаэль Гастино смоделировали ближайшие пять миллиардов лет Солнечной системы с использованием метода, позволявшего обойти эти проблемы, но результаты получились примерно те же. Поскольку крохотная разница в начальных условиях может в долгосрочной динамической перспективе дать огромный эффект, они смоделировали 2500 наборов орбит, каждый из которых начинался в пределах наблюдательной ошибки от современных данных. Примерно в 25 случаях возникли условия, близкие к резонансу; они резко увеличивают эксцентриситет орбиты Меркурия, что приводит либо к падению его на Солнце, либо к столкновению с Венерой, либо к близкой их встрече, что радикально поменяет орбиты как Венеры, так и Меркурия. В одном случае орбита Меркурия со временем вновь стала менее эксцентричной, и в результате где-то за 3,3 миллиарда лет дестабилизировала все четыре внутренние планеты. В этом случае Земля может столкнуться с Меркурием, Венерой или Марсом, и вновь возникает небольшой шанс, что Марс будет навсегда выброшен за пределы Солнечной системы.



## Непостоянная Луна

Влияние Луны. Она, как видно,  
Не в меру близко подошла к Земле  
И сводит всех с ума.  
Уильям Шекспир. «Отелло»

### У НАС НЕОБЫЧАЙНО БОЛЬШАЯ ЛУНА

Ее диаметр составляет чуть больше четверти диаметра Земли, и это намного больше, чем у большинства других лун. Наша Луна настолько велика, что систему Земля — Луна иногда даже называют двойной планетой. (Немного терминологии: Земля — центральное тело, Луна — спутник. Если подняться на уровень выше, получится, что Солнце — центральное тело Солнечной системы, а планеты — его спутники.) У Меркурия и Венеры спутников нет, а у Марса — планеты, наиболее похожей на Землю, — есть два крохотных спутника. У Юпитера — крупнейшей планеты Солнечной системы — 67 известных спутников, но 51 из них имеет размер менее 10 километров в поперечнике. Даже крупнейший спутник Юпитера Ганимед по размеру составляет менее 1/30 самого Юпитера. Из всех планет Солнечной системы наиболее обилён спутниками Сатурн — у него более 150 лун и мини-лун да еще гигантская сложная система колец в придачу. Но крупнейшая луна Сатурна Титан в 20 раз меньше своего центрального тела. У Урана 27 известных спутников, но крупнейший из них — Титания — составляет менее 1600

километров в поперечнике. Единственная крупная луна Нептуна — Тритон — составляет по размеру примерно 1/20 своей планеты; в дополнение к нему астрономы обнаружили у Нептуна 13 очень маленьких лун. Среди миров Солнечной системы только Плутон обогнал нас в этом плане: у него четыре крохотных спутника, зато пятый — Харон — всего в половину меньше своего центрального тела.

Система Земля — Луна необычна еще в одном отношении: у нее непомерно велик момент импульса. Динамически у нее больше «вращения», чем могло бы быть. У Луны есть и другие сюрпризы, и в надлежащее время мы поговорим о них. Исключительная природа Луны добавляет весомости естественному вопросу: откуда у Земли такой спутник?

Теория, лучше всего отвечающая нынешним данным, выглядит весьма эффектно: это гипотеза гигантского столкновения. В давние времена, на раннем этапе формирования, наша родная планета была примерно на 10% меньше, чем сейчас, пока в нее не врезалось тело размером с Марс; при столкновении тело расплескало вокруг громадное количество вещества — в основном расплавленного камня в виде капель и шариков самых разных размеров, многие из которых, когда камень начал остывать, слились воедино. Часть прилетевшего тела соединилась с Землей, которая при этом увеличилась. Часть стала Луной. Остальное рассеялось по всей Солнечной системе.

Математическое моделирование поддерживает сценарий ударного формирования Луны, тогда как в остальные теории нынешние данные вписываются менее удачно. Но в последние годы ударная гипотеза, по крайней мере в оригинальной своей форме, начала сталкиваться с серьезными проблемами. Не исключено, что истинный сценарий происхождения Луны еще только ждет своего исследователя.

\*\*\*

Простейшая теория состоит в том, что Луна, как и все остальное, собралась из газопылевого облака через механизм аккреции в период формирования Солнечной системы. Тогда здесь было полно обломков и комков самого разного размера. Когда все начало потихоньку успокаиваться, крупные куски стали расти; они притягивали к себе более мелкие куски, и те после столкновения прилипали к ним. Так формировались планеты, так формировались астероиды, так формировались кометы, так формировались и луны. Так что и наша Луна, вероятно, сформировалась именно так.

Однако если так, то получается, что она формировалась где угодно, только не на нынешней своей орбите. Все портит момент импульса: его слишком много. Еще одна проблема — состав Луны. Когда происходила конденсация Солнечной туманности, разные элементы концентрировались преимущественно на разных расстояниях от центра. То, что потяжелее, держалось поближе к Солнцу, тогда как более легкие элементы давления излучения относило дальше, на край облачного диска. Именно поэтому внутренние планеты состоят из каменных пород и имеют железо-никелевое ядро, а внешние представляют собой в основном газ и лед, то есть тот же газ, но охлажденный до замерзания. Если Земля и Луна сформировались примерно на одном расстоянии от Солнца и примерно в одно время, то в их составе должны присутствовать сходные породы в сходных пропорциях. Но железное ядро Луны намного меньше земного. Мало того, доля железа в составе Земли в восемь раз превышает его долю на Луне.

В XIX веке сын Чарльза Дарвина Джордж предложил другую теорию: на начальном этапе Земля, еще расплавленная, вращалась так быстро, что часть ее оторвалась под действием центробежной силы. Он просчитал ситуацию с использованием Ньютоновой механики и предсказал, что Луна должна постепенно удаляться от Земли — это оказалось правдой. Такое событие, разумеется, оставило бы на Земле глубокий шрам, и очевидный кандидат на эту роль имелся: Тихий океан. Однако сегодня мы знаем, что лунные породы намного старше пород океанической коры Тихого океана. Это исключает бассейн Тихого океана из числа кандидатов, но не опровергает в принципе дарвиновской теории центробежного отделения.

Предлагалось множество и других сценариев, в том числе достаточно диких. Может быть, природный ядерный реактор (а нам известно, кстати говоря, что по крайней мере один такой реактор действительно существовал [221]) вошел в критический режим, взорвался и выбросил с Земли вещество для создания Луны. Если этот реактор располагался вблизи границы между мантией и ядром и неподалеку от экватора, то значительное количество горных пород Земли

оказалось бы на экваториальной орбите. Или, возможно, у Земли когда-то было две луны, которые затем столкнулись. Или мы украли луну у Венеры; заодно эта теория изящно объясняет, почему у Венеры нет спутника. Правда, она не объясняет, почему, если теория верна, его первоначально не было у Земли.

Менее эффективный альтернативный вариант заключается в том, что Земля и Луна сформировались отдельно, но позже Луна приблизилась к Земле настолько, что была захвачена ее гравитацией. В пользу этой теории говорят несколько вещей. Луна имеет правильный размер и находится на разумной орбите. Более того, теория захвата объясняет, почему Луна и Земля синхронизированы (имеет место приливной захват) в своем вращении взаимным гравитационным притяжением, так что Луна обращена к Земле всегда одной и той же стороной. Луна немного вихляется на орбите (в терминологии астрономов это явление называется либрацией), но при приливном захвате это нормально.

Основная проблема здесь в том, что, хотя на первый взгляд гравитационный захват представляется разумным вариантом (в конце концов тела притягиваются друг к другу), на самом деле это довольно необычный сценарий. Движение небесных тел происходит практически без трения, в принципе трение там присутствует, хотя бы за счет солнечного ветра, но его динамические эффекты очень слабы, так что энергия сохраняется. Поэтому (кинетической) энергии, которую «падающее» тело набирает по мере приближения к другому телу за счет их гравитационного взаимодействия, бывает достаточно, чтобы это тело вновь вышло из-под действия тяготения. Как правило, два тела сближаются, стремительно оборачиваются друг вокруг друга и разлетаются вновь.

Или сталкиваются.

Очевидно, Земля и Луна не сделали ни того ни другого.

Эту проблему можно обойти. Можно предположить, что ранняя Земля обладала громадной объемной атмосферой, которая замедлила Луну, когда та приблизилась, и при этом ничего не разрушила. Прецедент имеется: спутник Нептуна Тритон исключителен не только своим размером в сравнении с остальными лунами этой планеты, но и «обратным» направлением движения — он обращается вокруг своей планеты в сторону, противоположную той, в которую движется большинство тел Солнечной системы, в том числе все планеты. Астрономы считают, что Тритон был захвачен Нептуном. Первоначально Тритон был объектом пояса Койпера — так называется рой небольших тел, располагающихся на орбитах за Нептуном. Вероятно, их с Плутоном связывает общее происхождение. Если это так, то захваты все же случаются.

Еще одно наблюдение дополнительно ограничивает спектр возможных вариантов. Хотя общее геологическое строение Земли и Луны сильно различается, детальное строение поверхностных пород Луны замечательно напоминает строение пород земной мантии. (Мантия лежит между континентальной корой и железным ядром.) У элементов есть изотопы, почти идентичные химически, но отличающиеся друг от друга количеством и составом частиц, образующих атомное ядро. Так, у самого распространенного изотопа кислорода — кислорода-16 — в ядре восемь протонов и восемь нейтронов. У кислорода-17 там присутствует один дополнительный нейтрон, у кислорода-18 — два. При образовании горных пород кислород посредством химических реакций включается в минералы. Образцы лунного грунта, привезенные на Землю астронавтами Apollo, имеют то же соотношение разных изотопов кислорода, что и породы земной мантии.

В 2012 году Рэндалл Паниелло с сотрудниками проанализировал содержание изотопов цинка в лунном веществе и обнаружил, что хотя цинка вообще там меньше, чем на Земле, но доля тяжелых изотопов цинка выше. Исследователи пришли к выводу, что Луна потеряла цинк через испарение. В 2013 году группа под руководством Альберто Саала сообщила, что атомы водорода, включенные в лунное вулканическое стекло и оливин, имеют изотопный состав, очень близкий к составу земной воды. Если бы Земля и Луна первоначально формировались отдельно, то вряд ли изотопный состав в них получился настолько похожий.

Простейшее объяснение состоит в том, что эти два тела имеют общее происхождение, несмотря на различия в строении ядра. Однако есть и альтернативное объяснение: возможно, сформировались они отдельно и состав при формировании имели разный, но позже перемешались.

Рассмотрим данные, которые нуждаются в объяснении. Система Земля — Луна обладает необычно большим моментом импульса. На Земле намного больше железа, чем на Луне, но при этом лунная поверхность по изотопному составу очень похожа на земную мантию. Луна необычно велика и приливно замкнута на свое центральное тело — Землю. Любая жизнеспособная теория, чтобы быть хоть сколько-то правдоподобной, должна объяснить эти наблюдения или по крайней мере не должна им противоречить. Однако ни одна из простых теорий этого не делает. Вспомним принцип Шерлока Холмса, давно уже превратившийся в клише: «Если отбросить все невозможное, то, что останется, и будет ответом, каким бы невероятным он ни казался». И простейшим объяснением, которое соответствует всем нашим данным, будет то, которое до второй половины XX века астрономы отвергли бы просто потому, что оно выглядит слишком невероятным. А именно: что Земля столкнулась с каким-то другим телом, настолько массивным, что столкновение расплавало оба тела. При этом некоторая часть расплавленных пород выплеснулась в пространство и образовала Луну, а то, что смешалось с Землей, внесло существенный вклад в ее мантию.

Гипотеза гигантского столкновения в ее предпочитаемой нынче инкарнации датируется 1984 годом. Тело, с которым столкнулась Земля, даже имеет конкретное название: Тейя. Единорог, правда, тоже имеет название, но не существует. Если Тейя когда-то существовала, то какие-то следы этого могли сохраниться только на Луне и в глубинах Земли, так что придется обходиться косвенными данными.

Идеи редко бывают по-настоящему оригинальными, вот и эта восходит по крайней мере к Реджинальду Дали. В свое время он возражал Дарвину с его теорией разрушения по той причине, что если посчитать аккуратно, то нынешняя орбита Луны при моделировании назад во времени не приводится точно к Земле. При столкновении, утверждал Дали, получилось бы намного лучше. Главной очевидной проблемой на тот момент был вопрос: столкновение с чем? В те дни астрономы и математики считали, что планеты сформировались практически на своих нынешних орбитах. Но по мере того как компьютеры набирали мощь и ученые получали возможность разбираться в следствиях Ньютоновой математики при более реалистичных условиях, становилось ясно, что Солнечная система на ранних этапах своего существования все время менялась, причем достаточно резко. В 1975 году Уильям Хартманн и Дональд Дэвис провели расчеты, по которым после формирования планет в системе осталось еще несколько свободных тел меньшего размера. Возможно, эти тела были захвачены и стали лунами, а возможно, столкнулись с чем-то — друг с другом или с какой-нибудь планетой. Вот при таком столкновении, утверждали исследователи, и могла образоваться Луна, что согласуется со многими ее свойствами.

В 1976 году Элестер Кэмерон и Уильям Уорд предположили, что с Землей столкнулась другая планета размером с Марс и часть вещества при этом выплеснулась одной гигантской каплей и образовала Луну. Разные ингредиенты вели бы себя по-разному под действием мощных сил и тепла, порожденных столкновением. Силикатные породы (на обоих телах) испарились бы, но железное ядро Земли и любое металлическое ядро, если бы врезавшееся тело им обладало, остались бы на месте. В результате железа в составе Луны оказалось бы много меньше, чем в составе Земли, а вот поверхностные породы Луны и мантия Земли, сконденсировавшиеся обратно из испарившихся силикатов, оказались бы очень похожи по составу.

В 1980-е годы Кэмерон провел с разными коллегами компьютерное моделирование последствий такого столкновения; моделирование показало, что лучше всего современным данным и наблюдениям соответствует столкновение Земли с телом размером с Марс — Тейей. Поначалу казалось, что Тейя могла просто выплеснуть в пространство часть земной мантии, внося при этом очень небольшую часть собственного материала в породы, из которых образовалась Луна. Это объяснило бы близкое сходство двух типов пород. В самом деле, близость по составу поверхностных пород Луны и пород мантии Земли рассматривалась как сильный довод в пользу гипотезы ударного формирования Луны.

Астрономы в большинстве своем принимали эту идею до самого последнего времени. Тейя врезалась в первозданную Землю почти сразу (по космологическим меркам) после формирования Солнечной системы, между 4,50 и 4,45 миллиарда лет назад. Два мира

столкнулись не лоб в лоб, а под углом приблизительно  $45^\circ$ . Столкновение было сравнительно медленным (опять же по космологическим меркам) и проходило на скорости около четырех километров в секунду. Расчеты показывают, что если бы у Тейи было железное ядро, то оно смешалось бы с основной массой Земли. Будучи тяжелее мантийных пород, все это должно было погрузиться в глубину и объединиться с ядром Земли; не забывайте, что все породы на этой стадии были расплавлены. Это объясняет, почему в составе Земли намного больше железа, чем в составе Луны. Примерно пятая часть мантии Тейи и большое количество земных силикатных пород было выброшено в пространство. Половина выброшенного оказалась в конце концов на околоземной орбите и собралась воедино, образовав Луну. Вторая половина вышла из-под действия тяготения Земли и оказалась на орбите вокруг Солнца. Большая часть этого вещества осталась на орбитах, близких к земной, поэтому со временем столкнулась либо с Землей, либо со свежесформированной Луной. Многие лунные кратеры возникли в результате именно этих вторичных столкновений. Однако на Земле эрозия и другие процессы стерли следы большинства подобных кратеров.

Столкновение с Тейей добавило Земле массы и значительно увеличило ее момент импульса: настолько, что она стала вращаться вокруг своей оси каждые пять часов. Слегка сплюснутая форма Земли, сжатая у полюсов, развивала приливные силы, которые постепенно сориентировали орбиту Луны вдоль земного экватора и стабилизировали ее там.

Измерения показывают, что кора Луны на той стороне, что сейчас обращена от Земли, толще. Считается, что некоторая часть выплеснутого вещества на орбите Земли первоначально не попала в собираемую Луну. Вместо этого в так называемой «точке Лагранжа», то есть на той же орбите, что Луна, но на  $60^\circ$  впереди нее (см. главу 5), собралась вторая луна, поменьше. Через 10 миллионов лет, поскольку оба тела медленно дрейфовали прочь от Земли, эта точка стала нестабильной, и меньшая луна столкнулась с большей. При этом ее вещество распределилось по дальней стороне Луны, сделав кору толще.

\*\*\*

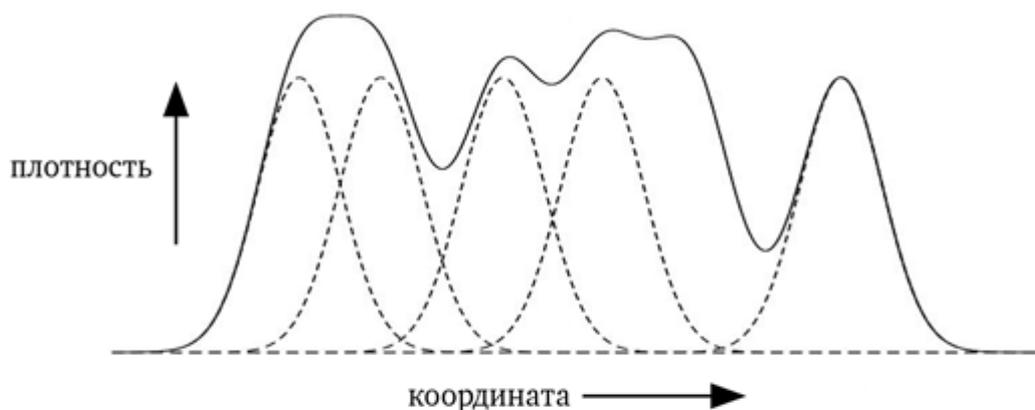
Я часто использую слова «моделирование» и «расчет», но вы должны понимать, что невозможно ничего посчитать, если не знаешь, что именно и как нужно вычислить, и невозможно ничего смоделировать, просто «послав это в компьютер». Кто-то должен спланировать вычисления до мельчайших подробностей; кто-то должен написать программу, которая скажет компьютеру, что и как считать. Эти задачи редко бывают прямолинейными и, как правило, не решаются легко.

Моделирование космического столкновения — ужасающе сложная вычислительная задача. Вещество сталкивающихся тел может быть твердым, жидким или газообразным, а к каждому из этих случаев применимы разные физические правила, требующие разных математических формулировок. В столкновении задействованы по крайней мере четыре типа вещества — это кора и мантия для Тейи и то же для Земли. Породы, в каком бы состоянии они ни были, могут дробиться на куски и сталкиваться. Их движение определяется «условиями свободного края»; это означает, что жидкостная динамика имеет место не в замкнутой области пространства с фиксированными стенами. Напротив, жидкость сама «решает», где пройдет ее граница, и ее местоположение меняется по мере того, как жидкость движется. Разбираться со свободным краем — и теоретически, и вычислительно — намного сложнее, чем с фиксированным. Наконец, при столкновении действуют гравитационные — а значит, нелинейные — силы. То есть вместо того, чтобы меняться пропорционально расстоянию, они меняются по обратно-квадратичному закону. Не секрет, что нелинейные уравнения решать намного сложнее, чем линейные.

Традиционные математические методы, основанные на ручных расчетах, никак не в состоянии решить даже упрощенные варианты этой задачи. Быстрые компьютеры с большими объемами памяти аппроксимируют задачу при помощи численных методов, а затем проводят множество вычислений методом «грубой силы», чтобы получить приближенный ответ. В большинстве моделей сталкивающиеся тела рассматриваются как капли липкой жидкости, способные как разбиваться на более мелкие капли, так и сливаться в более крупные. Первоначальные капли имеют размеры планет; капли, на которые они дробятся, меньше, но только по сравнению с планетами. На самом деле они по-прежнему довольно велики.

Стандартная модель динамики жидкости восходит к XVIII веку, к Леонарду Эйлеру и Даниилу Бернулли. Она формулирует физические законы течения жидкости в виде уравнения в частных производных, описывающего, как скорость жидкости в каждой точке пространства изменяется со временем в ответ на действующие силы. Такие уравнения не решаются в формульном виде, за исключением простейших случаев, но разработаны очень точные вычислительные методы их решения. Серьезный вопрос здесь — природа модели, которая в принципе требует исследовать скорость жидкости в каждой точке некоторой области пространства. Однако даже компьютеры не в состоянии произвести бесконечное число расчетов, поэтому мы «дискретизируем» уравнение: аппроксимируем его связанным уравнением, в котором задействовано лишь конечное число точек. В простейшем методе в качестве репрезентативной выборки для всего объема жидкости используются узлы некоторой решетки, в которых и отслеживается динамика изменения скорости. При достаточно частой решетке аппроксимация получается неплохая.

К несчастью, такой подход не слишком годится для сталкивающихся капель, потому что при разбивании капли поле скорости получает разрывы. На помощь приходит хитроумный вариант метода решетки. Он работает даже тогда, когда капли разбиваются на более мелкие или, наоборот, объединяются в более крупные. Этот метод, известный как гидродинамика сглаженных частиц, разбивает жидкость на соседние «частицы» — крохотные области. Но вместо того, чтобы использовать фиксированную решетку, мы следуем за частицами и следим, как они отзываются на действующие силы. Если соседние частицы движутся примерно с одинаковой скоростью и в одном направлении, они находятся в одной капле и останутся в ней. Но если соседние частицы направляются в совершенно разных направлениях или имеют существенно разные скорости, то капля разбивается на более мелкие.



**Представление плотности жидкости (сплошная линия) в виде суммы маленьких нечетких капель (пунктирных колоколовидных кривых)**

Математика добивается такого эффекта, «сглаживая» каждую частицу и превращая ее в своего рода мягкий пушистый шарик (называется это сферической перекрывающейся керн-функцией), а затем накладывая эти шарики друг на друга. Каждый шарик может быть представлен своей центральной точкой, и нам необходимо рассчитать, как эти точки движутся с ходом времени. Математики называют уравнение такого рода задачей  $n$  тел, где  $n$  — число точек, или, что то же самое, число пушистых шариков.

\*\*\*

Все это очень хорошо, но задача  $n$  тел трудна. Кеплер исследовал задачу двух тел — орбиту Марса — и сделал вывод о том, что она представляет собой эллипс. Ньютон доказал математически, что когда два тела движутся под воздействием гравитации, убывающей по обратно-квадратичному закону, то оба они движутся по эллипсам вокруг общего центра масс. Но попытавшись разобраться в задаче трех тел — в базовом случае это Солнце, Земля и Луна, — математики XVIII—XIX веков обнаружили, что это далеко не такая аккуратная и упорядоченная задача. Даже громоздкая формула Делоне представляет собой всего лишь аппроксимацию. На самом деле орбиты тел в этой задаче, как правило, хаотичны — очень и очень нерегулярны — и

никакими красивыми формулами или классическими геометрическими кривыми не описываются. Подробнее о хаосе можно прочитать в главе 9.

Чтобы реалистично смоделировать планетарное столкновение, число пушистых шариков должно быть велико — скажем, тысяча, а еще лучше миллион. Компьютеры умеют оперировать большими числами, но здесь  $n$  говорит не о суммах, которые появляются в вычислениях;  $n$  характеризует сложность сумм. А мы здесь сталкиваемся с «проклятием размерности», где размерность системы равна количеству чисел, необходимых для ее описания.

Предположим, мы используем миллион шариков. Чтобы определить состояние каждого шарика, требуется шесть чисел: три для координат в пространстве, еще три для компонент скорости. Это шесть миллионов чисел — только для того, чтобы определить состояние системы в произвольный момент. Мы хотим воспользоваться законами механики и гравитации, чтобы предсказать будущее движение системы. Эти законы представляют собой дифференциальные уравнения, определяющие состояние системы на крохотный шаг вперед, в будущее, при известном текущем состоянии. При маленьком шаге по времени — пусть это будет, скажем, секунда — результат получится очень близким к реальному состоянию системы в будущем. Так что теперь нам придется вычислить сумму для шести миллионов чисел. Точнее говоря, нам придется получить шесть миллионов сумм для шести миллионов чисел — по одному суммированию на каждое число, необходимое для описания будущего состояния. Так что сложность наших расчетов составит шесть миллионов, умноженные на шесть миллионов, а это 36 триллионов. И посчитав все это, мы узнаем лишь, каким будет следующее состояние, через секунду после нынешнего. Повторив расчет еще раз, мы узнаем, что произойдет через две секунды, и т.д. Чтобы выяснить, что произойдет через тысячу лет, нам нужно просчитать период примерно в 30 миллиардов секунд, и сложность расчетов при этом составит 30 миллиардов, умноженные на 26 триллионов — около  $10^{24}$ , или один септиллион.

И это еще не самое худшее. Хотя каждый отдельный шаг, возможно, является хорошей аппроксимацией, шагов так много, что даже самая крохотная ошибка может значительно вырасти; кроме того, объемные вычисления занимают много времени. Если бы компьютер мог рассчитывать один шаг в секунду, то есть работал бы «в реальном времени», на расчеты потребовалось бы не меньше тысячи лет. Только суперкомпьютер способен хотя бы приблизиться к таким параметрам вычислений. Единственный выход — найти другой, более хитрый способ проводить вычисления. На ранних этапах столкновения действительно может потребоваться короткий шаг по времени — скажем, одна секунда, — потому что возникнет страшная путаница и все будет очень сложно. Позже шаг по времени можно сделать более длинным, результат, вероятно, останется приемлемым. Более того, как только две точки разойдутся на достаточно большое расстояние, сила взаимодействия между ними станет настолько маленькой, что ею, скорее всего, можно вообще пренебречь. Наконец, именно здесь можно получить наибольший выигрыш — весь расчет можно упростить, организовав его более хитроумным способом.

При первых попытках моделирования вводились дополнительные упрощения. Вместо того чтобы проводить вычисления для трехмерного пространства, задачу сводили к двум измерениям, а для этого предполагали, что все происходит в плоскости орбиты Земли. В этом варианте сталкиваются два круглых, а не два шарообразных тела. Такое упрощение дает два преимущества. Шесть миллионов превращаются всего лишь в четыре миллиона (по четыре числа на один пушистый шарик). Еще лучше, что вам уже не нужно миллиона шариков; возможно, 10 000 будет достаточно. Теперь вместо шести миллионов у вас будет 40 000, а сложность снизится с 36 триллионов до 1,6 миллиарда.

Да, и еще одно...

Мало провести расчет один раз. Мы не знаем ни массы прилетевшего тела, ни его скорости, ни направления, с которого оно подлетает к Земле. Каждый вариант требует нового расчета. Именно это сильнее всего ограничивало исследователей в ранних попытках, поскольку компьютеры тогда считали намного медленнее. Время на суперкомпьютере тоже стоило дорого, так что исследовательских грантов хватало лишь на небольшое число прогонов. Вследствие этого исследователь должен был многое угадывать, причем с самого начала, на основании здравого смысла и простейших рассуждений, что называется, «на пальцах» (к примеру, «может

ли это предположение дать нам верное значение результирующего момента импульса?»). После этого оставалось только надеяться.

Тем не менее пионеры моделирования сумели преодолеть все препятствия. Они сумели найти работающий сценарий. Более поздние работы его уточнили. Вопрос происхождения Луны был решен.

\*\*\*

Или нет?

Моделирование теории ударного формирования Луны включает в себя две основные фазы: моделирование непосредственно столкновения и образования диска обломков и последующая аккреция части этого диска с образованием компактной глыбы, зародыша Луны. До 1996 года исследователи ограничивали свои расчеты первой фазой, а основным применяемым методом была гидродинамика сглаженных частиц. Робин Кануп и Эрик Асфауг в 2001 году констатировали, что этот метод «хорошо подходит для сильно деформируемых систем, развивающихся в пределах пустого по большей части пространства», а значит, это именно то, что нам нужно для этой части задачи.

Поскольку процесс моделирования объемов и сложен, исследователи ограничились просчетом того, что происходило непосредственно после столкновения. Результаты моделирования зависят от множества факторов: массы и скорости прилетевшего тела, угла, под которым это тело врывается в Землю, скорости вращения Земли, которая несколько миллиардов лет назад вполне могла отличаться от сегодняшней. Практические ограничения, связанные с просчетом задачи  $n$  тел, приводили к тому, что поначалу многие альтернативные варианты оставались неисследованными. Чтобы держать расчеты хоть в каких-то рамках, первые модели приходилось делать двумерными. Тогда основной задачей было найти случаи, в которых прилетевшее тело выбивало в пространство большое количество вещества земной мантии. В наиболее убедительном примере Земля сталкивалась с телом размером с Марс, поэтому именно этот вариант стал основным претендентом.

Во всех моделях ударного происхождения Луны была одна общая черта: столкновение порождало на орбите вокруг Земли громадный диск обломков. Обычно динамика этого диска моделировалась лишь на несколько оборотов; этого было достаточно, чтобы показать, что значительная часть этих обломков оставалась на орбите, а не падала обратно на Землю и не улетала в открытый космос. Считалось, что многие составляющие диска обломков со временем должны объединиться и образовать крупное тело и что это тело должно в будущем стать Луной; на самом деле никто не проверял это предположение, поскольку дальнейшее отслеживание множества частиц на орбите было слишком дорогостоящим и затратным по времени.

В некоторых из последующих работ негласно предполагалось, что основные параметры — масса прилетевшего тела и т.п. — уже достоверно установлены в первых работах; поэтому исследователи сосредоточивались не на поиске новых, альтернативных вариантов, а на просчете дополнительных подробностей. Первая работа стала как бы господствующей точкой зрения, и некоторые из принятых в ней предположений перестали подвергаться сомнению. Первые признаки проблем появились достаточно скоро. Все сценарии, дававшие более или менее правдоподобное совпадение с наблюдаемыми данными, требовали, чтобы пришлое тело задело Землю вскользь, а не столкнулось с ней лоб в лоб; из этого следовало, что тело это не могло находиться в орбитальной плоскости Земли. Двумерная модель неадекватна, и только полноценное трехмерное моделирование может дать нужный результат. К счастью, мощность суперкомпьютеров растет быстро, и вскоре появилась возможность анализировать столкновение в трехмерных моделях, конечно, при достаточных затратах времени и денег.

Однако большинство этих доработанных моделей показало, что Луна должна содержать значительное количество пород ударяющего тела и намного меньше пород мантии Земли. Первоначальное простое объяснение сходства между лунными породами и породами земной мантии в значительной мере потеряло убедительность; оно, казалось, требовало, чтобы изначально мантия Тейи была очень похожа на мантию Земли. Тем не менее некоторые астрономы продолжали утверждать, что именно так, скорее всего, и обстояло дело, как будто забыв, что сходство по составу между Землей и Луной было одной из тех загадок, которую новая

теория и должна была по идее объяснить. Если для Луны такое сходство представлялось странным, то почему для Тейи оно должно было быть приемлемым?

Частичный ответ на этот вопрос имеется: возможно, Тейя и Земля первоначально сформировались на примерно одинаковом расстоянии от Солнца. Возражения, высказанные ранее для Луны, здесь не имеют силы. Здесь нет вопроса с моментом импульса, потому что мы понятия не имеем, как вели себя после столкновения другие обломки Тейи. При этом разумно предположить, что тела, сформировавшиеся в Солнечной туманности в схожих локациях, имеют схожий состав. Однако по-прежнему трудно объяснить, почему Земля и Тейя существовали врозь так долго, что обе успели стать полноправными планетами, а потом вдруг столкнулись. Нельзя сказать, что это совершенно невозможно, но все же такая ситуация представляется маловероятной.

Более правдоподобной кажется другая теория, не налагающая никаких предварительных условий на состав Тейи. Предположим, что силикатные породы, после того как они испарились, но прежде, чем начали собираться в одно целое, были как следует перемешаны. Тогда и Земля, и Луна получили бы некоторое количество пород сходного состава. Расчеты показывают, что эта идея работает только в том случае, если испаренные породы находятся в газообразном состоянии примерно сто лет, образуя своего рода общую атмосферу, распределенную по общей орбите Тейи и Земли. Математические исследования, призванные определить степень динамической правдоподобности этой теории, продолжаются.

Как бы то ни было, но первоначальная идея о том, что ударяющее тело выплеснуло в пространство хороший кусок мантии Земли, но само не внесло особого вклада в состав будущей Луны, была бы куда более убедительной. Так что астрономы продолжили поиск альтернатив, основанных на совсем других предположениях, но по-прежнему предусматривающих столкновение. В 2012 году Андреас Ройфер с коллегами проанализировали вариант с быстрым налетающим телом, намного превосходящим по размеру Марс и задевающим Землю вскользь, а не сталкивающимся с ней лоб в лоб. При этом вещество налетающего тела почти не расплескивается, с моментом импульса все получается как надо, а состав земной мантии и Луны оказывается даже более близким, чем считалось ранее. Заново проведенный командой Чжан Цзюньцзюня анализ привезенного «Аполлонами» лунного грунта показал, что соотношение изотопов титана-50 и титана-47 в нем совпадает с их соотношением на Земле с точностью до четырех миллионов долей.

Исследовались и другие варианты. Матья Кук с сотрудниками показали, что правильный состав лунных пород и момент импульса могли возникнуть в результате столкновения с телом меньшего размера, если до этого Земля вращалась намного быстрее, чем сейчас. Вращение влияет на количество выплеснутого вещества и на то, из какого тела это вещество выбивается. После столкновения вращение Земли могло замедлиться под действием гравитационных сил Солнца и Луны. В то же время Кануп обнаружил убедительные модели, в которых Земля вращалась лишь чуть быстрее, чем сегодня, но столкнувшееся с ней тело значительно превосходило размерами Марс. Или, может быть, два тела размерами в пять раз больше Марса сначала столкнулись, затем столкнулись еще раз, образовав большой диск обломков, а затем постепенно сформировали Землю и Луну. Или...

\*\*\*

Или, возможно, верна первоначальная ударная теория, и Тейя действительно имела сходный с Землей состав, и это вовсе не было случайным совпадением.

В 2004 году Кануп показал, что наиболее достоверный тип Тейи должен был иметь массу примерно в шесть раз меньшую, чем у Земли, и 4/5 вещества получившейся Луны должны были прийти именно с Тейи. Подразумевается, что исходный химический состав Тейи должен был быть столь же близок к составу Земли, как и состав сегодняшней Луны. Это представляется очень маловероятным: тела Солнечной системы существенно отличаются друг от друга, так почему Тейя не должна отличаться? Как мы уже видели, один из возможных ответов состоит в том, что Земля и Тейя сформировались в сходных условиях — на примерно одинаковом расстоянии от Солнца, где они собрали на себя одно и то же вещество. Более того, нахождение их на близких орбитах повышает вероятность столкновения.

Но могли ли в принципе два крупных тела сформироваться на одной и той же орбите? Разве одно из них не должно было бы победить, собрав на себя большую часть доступного вещества? Об этом можно спорить бесконечно... а можно посчитать. В 2015 году Алессандра Матробуано-Баттисти с сотрудниками при помощи методов расчета системы  $n$  тел просчитали 40 моделей последних стадий планетарной аккреции. К этому моменту Юпитер и Сатурн должны были уже полностью сформироваться, всосав в себя большую часть газа и пыли, и теперь планетезимали и «планетарные зародыши» покрупнее собираются вместе, чтобы образовать по-настоящему крупные тела. Каждый прогон начинался с 85–90 планетарных зародышей и 1000–2000 планетезималей, образующих диск на расстояниях от 0,5 до 4,5 а.е. Орбиты Юпитера и Сатурна слегка наклонены к этому диску, причем угол наклона при каждой попытке брался разный.

В большинстве прогонов за 100–200 миллионов лет, по мере объединения зародышей и планетезималей, формировались три-четыре внутренние каменные планеты. Моделирование позволило проследить за зоной сбора каждой формирующейся планеты, то есть за областью, из которой поглощались ее компоненты. Исходя из предположения о том, что химический состав солнечного диска определяется в основном расстоянием от Солнца, то есть что тела на равноудаленных от Солнца орбитах должны иметь сходный состав, мы можем сравнить химический состав сталкивающихся тел. Исследователи сосредоточились на том, как каждая из трех или четырех уцелевших планет соотносится по составу с последним столкнувшимся с ней телом. Проследив процесс назад во времени по зонам сбора каждого из тел, можно получить распределения вероятностей для составляющих их элементов. Затем при помощи статистических методов определяют, насколько похожи эти распределения. Налетающее тело и планета имеют одинаковый в основном состав примерно в одном из шести прогонов. Принимая во внимание, что какая-то часть протопланеты также замешивается в Луну, эта доля удваивается примерно до одного прогона из трех. Короче говоря: имеется примерно один шанс из трех, что Тейя имела бы тот же химический состав, что и Земля. Это очень небольшая вероятность, так что, несмотря на все тревоги, сходство химического состава земной мантии и поверхностных пород Луны на самом деле не противоречит оригинальной ударной теории.

В настоящий момент перед нами богатый (даже слишком богатый) выбор из нескольких различных ударных теорий, каждая из которых хорошо согласуется с основными известными данными. Которая из них верна, если таковая имеется, пока неясно. Но, если мы хотим получить непротиворечивый вариант и по химическому составу, и по моменту импульса, без крупного налетающего тела, похоже, не обойтись.



## Космос как часовой механизм

Но должен ли был Господь-Архитектор оставить это пространство пустым? Вовсе нет.

Иоганн Тициус в книге «Созерцание природы» Шарля Бонне

«Начала» Ньютона заявили и утвердили ценность математики как пути к пониманию космоса. В результате в сознании ученых сложился притягательный образ механистичной Вселенной, где Солнце и планеты были созданы сразу в их нынешней конфигурации. Планеты раз за разом огибали Солнце по примерно круговым орбитам, аккуратно и красиво распределенным в пространстве так, чтобы они ни в коем случае не столкнулись друг с другом — и даже не сблизились. Хотя все в этой системе слегка пошатывалось — ведь тяготение каждой планеты действовало на все остальные, ничего в ней особенно не менялось. Такой взгляд на Вселенную наглядно воплотило в себе симпатичное устройство, получившее название оррери

(планетарий), — настольная машинка, в которой крохотные планеты на спицах без остановки двигались вокруг центрального Солнца под действием часового механизма. Природа тоже представлялась такой гигантской механической моделью, движущей силой в которой служила гравитация.

Математически настроенные астрономы, конечно, понимали, что не все в природе так просто. Орбиты представляют собой не точные окружности и даже лежат не строго в одной плоскости, а некоторые из отклонений были весьма значительны. В частности, две крупнейшие планеты Солнечной системы — Юпитер и Сатурн — непрерывно заняты каким-то долгосрочным перетягиванием гравитационного каната; они стягивают друг друга то вперед с обычного места на орбите, то назад, снова и снова. Лаплас объяснил это явление около 1785 года. Орбиты двух гигантов близки к резонансу 5:2, то есть за то время, пока Сатурн дважды обойдет вокруг Солнца, Юпитер успевает обойти вокруг него пять раз. Если описывать положение планеты на орбите как угол<sup>[23]</sup>, то разность

$$2 \times \text{угол для Юпитера} — 5 \times \text{угол для Сатурна}$$

близка к нулю, но, как объяснил Лаплас, все же не равна нулю в точности. Вместо этого она медленно меняется, проходя полный круг каждый 900 лет. Этот эффект получил название «великое неравенство».

Лаплас доказал, что это взаимодействие не приводит к значительным изменениям эксцентриситета или наклона орбиты той или иной планеты. Вполне объяснимо, что после такого результата ощущение общей стабильности нынешней расстановки планет в системе только усилилось. Можно было полагать, что в будущем планеты будут еще очень долго двигаться приблизительно так же, как сейчас, и в прошлом всегда все было так же.

Но нет! Чем больше мы узнаем о Солнечной системе, тем меньше она походит на механические часы и все больше на какую-то невероятную структуру, которая по большей части ведет себя хорошо, но иногда как будто сходит с ума. Что интересно, эти резкие выверты не бросают ни тени сомнения на закон всемирного тяготения Ньютона; напротив, они являются его следствиями. Закон математически строг и точен — сама простота. А вот события, к которым он приводит, простыми назвать никак нельзя.

\*\*\*

Чтобы разобраться в происхождении Солнечной системы, необходимо объяснить, откуда она взялась и как организованы ее разнокалиберные тела. На первый взгляд они образуют совершенно эклектический набор — каждый мир уникален, и различия всегда перевешивают черты сходства. Меркурий — это горячий камень, совершающий три оборота вокруг своей оси каждые два оборота вокруг светила; это резонанс 3:2 между вращением и обращением. Венера — кислотный ад, вся поверхность которого несколько сотен миллионов лет назад сформировалась заново. На Земле есть океаны, кислород и жизнь. Марс — замерзшая пустыня с кратерами и каньонами. Юпитер — гигантский шар разноцветных газов, образующих красивые декоративные полосы. Сатурн похож на Юпитер, но менее драматичен, зато в порядке компенсации обладает великолепными кольцами. Уран — смирный ледяной гигант, который вращается не в ту сторону. Нептун — еще один ледяной гигант с кольцевыми вихрями, скорость ветра в которых превышает 2000 километров в час.

Однако один соблазнительный намек на упорядоченность в этой системе все же имеется. Орбитальные расстояния шести классических планет, измеренные в астрономических единицах, составляют:

Меркурий	0,39
Венера	0,72
Земля	1,00
Марс	1,52
Юпитер	5,20
Сатурн	9,54

Представленные числа не кажутся регулярными, и поначалу трудно разглядеть в них закономерность, даже если она имеется. Но в 1766 году Иоганн Тициус заметил в этих числах кое-что интересное и описал это в своем переводе «Созерцания природы» Шарля Бонне.

«Раздели расстояние от Солнца до Сатурна на 100 частей; тогда Меркурий отделяют от Солнца четыре такие части, Венеру  $4 + 3 = 7$  таких частей, Землю  $4 + 6 = 10$  частей, Марс  $4 + 12 = 16$ . Но заметьте, что от Марса к Юпитеру наблюдается отклонение от этой столь точной прогрессии. После Марса следует расстояние  $4 + 24 = 28$  частей, но до сих пор там не было замечено никакой планеты... После этого для нас пока не исследованного пространства возникает сфера влияния Юпитера на расстоянии  $4 + 48 = 52$  части и Сатурна на расстоянии  $4 + 96 = 100$  частей».

Иоганн Боде упоминал эту же численную закономерность в 1772 году в своей книге «Руководство к познанию звездного неба» (*Anleitung zur Kenntniss des Gestirnten Himmels*); в более поздних изданиях он ссылался при этом на Тициуса. Тем не менее эту закономерность часто называли законом Боде. Сейчас, правда, в обиход вошло более подходящее название — закон Тициуса — Боде.

Это чисто эмпирическое правило объединяет планетарные расстояния в (почти) геометрическую последовательность. В первоначальном своем виде она представляла собой последовательность 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192, в которой каждое число, начиная с третьего, вдвое больше предшествующего; затем к каждому члену этой последовательности добавляли 4 и получали: 4, 7, 10, 16, 28, 52, 100. Однако полезно привести эти числа к современным единицам измерения (а.е.), разделив их все на 10. Получим: 0,4; 0,7; 1,0; 1,6; 2,8; 5,2; 10,0. Эти числа на удивление хорошо соответствуют расстояниям до планет, за исключением пропуска на месте 2,8. Тициус считал, что знает, что должно находиться в этом месте. Та часть его ремарки, которую я заменил многоточием, выглядит так:

«Но должен ли был Господь-Архитектор оставить это место пустым? Вовсе нет. Давайте же считать, что это место, несомненно, принадлежит не открытым пока спутникам Марса; давайте также добавим, что Юпитер, возможно, еще имеет вокруг себя более мелкие спутники, не наблюдавшиеся пока ни в один телескоп».

Мы сегодня понимаем, что спутники Марса должны обнаруживаться поблизости от Марса, как спутники Юпитера — возле Юпитера, так что Тициус в некоторых отношениях угодил в молоко, но предположение о том, что в этом пробеле должно присутствовать какое-то тело, попало в самую точку. Однако до 1781 года, когда был открыт Уран, никто не принимал это предположение всерьез, а ведь Уран тоже вписался в последовательность. Предсказанное расстояние составляет 19,6 а.е.; реальное — 19,2.

Вдохновившись этим успехом, астрономы начали искать не замеченную прежде планету, которая обращалась бы вокруг Солнца на расстоянии, приблизительно равном 2,8 радиуса орбиты Земли. В 1801 году Джузеппе Пиацци нашел одну такую планету — по иронии судьбы, совсем незадолго до начала систематических поисков. Его планета получила название Церера, и ее историю мы продолжим в главе 5. Она была меньше Марса и намного меньше Юпитера, но она была, и была в нужном месте.

Как будто чтобы скомпенсировать скромный размер, Церера оказалась там не одинока. Вскоре на сходных дистанциях от Солнца было обнаружено еще три тела — Паллада, Юнона и Веста. Это были первые четыре астероида — они же малые планеты, — и за ними последовало еще много. Около 200 из них имеют размер более километра в поперечнике, известно также более 150 000 астероидов размером по крайней мере 100 метров в поперечнике [24]; считается,

что число еще более мелких астероидов измеряется миллионами. Они образуют знаменитый пояс астероидов — плоскую кольцеобразную область между орбитами Марса и Юпитера.

Мелкие тела имеются и в других местах Солнечной системы, но первые несколько открытий добавили весомости мнению Боде о том, что планеты распределены в ней регулярно. Последовавшее открытие Нептуна было мотивировано возмущениями в орбите Урана, а не законом Тициуса — Боде. Но закон предсказывал расстояние 38,8 а.е., что более или менее соответствует реальному расстоянию — где-то между 29,8 и 30,3. Попадание, конечно, не слишком точное, но приемлемое. Затем настала очередь Плутона: теоретическое расстояние 77,2; реальное — от 29,7 до 48,9. Вот и все, закон Тициуса — Бодеперестал действовать.

Другие типичные черты планетарных орбит тоже оказались неуниверсальными. Плутон, скажем, очень странная планета. Его орбита обладает высоким эксцентриситетом и наклонена на чудовищные  $17^\circ$  к эклиптике. Иногда Плутон даже заходит внутрь орбиты Нептуна. Все эти нестандартные черты недавно привели к тому, что Плутон был разжалован из настоящих планет в карликовые. В качестве частичной компенсации Церера тоже стала карликовой планетой, а не просто астероидом (или малой планетой)[25].

Несмотря на все успехи и неудачи, закон Тициуса — Боде ставит перед нами важные вопросы: имеет ли распределение планет какое-то математическое обоснование? Или они могли в принципе расположиться вокруг Солнца любым желаемым образом, на любых расстояниях? Что представляет собой этот закон — совпадение, проявление какой-то неизвестной закономерности или то и другое одновременно?

\*\*\*

В качестве первого шага переформулируем закон Тициуса — Боде в более общий и слегка модифицированный вид. В оригинальной форме этот закон имеет аномалию: в качестве первого члена последовательности в нем используется 0. В полноценной геометрической прогрессии на этом месте должно было бы стоять 1,5. Хотя при таком выборе расстояние до Меркурия становится 0,55 (что менее точно), вся наша игра с расстояниями имеет чисто эмпирический и приближенный характер, так что, пожалуй, разумнее будет сохранить математическую аккуратность и использовать 1,5. Теперь закон можно выразить простой формулой: расстояние от Солнца до n-й планеты в астрономических единицах равно

$$d = 0,075 \times 2^n + 0,4.$$

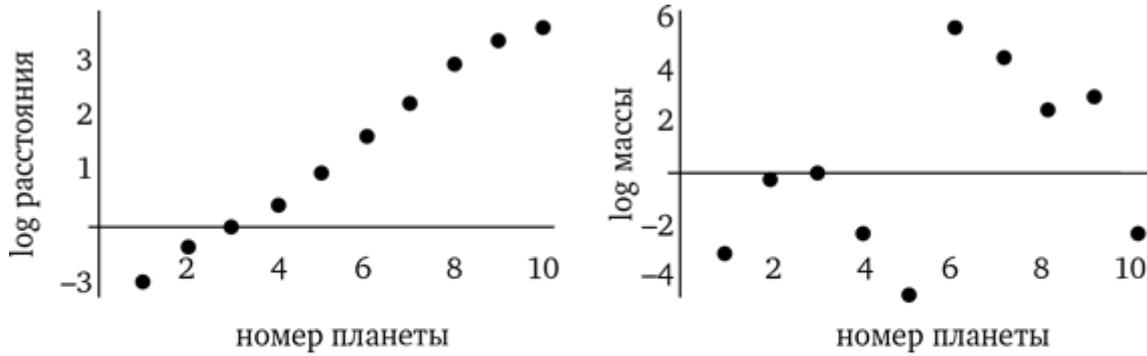
Теперь следует провести несколько вычислений. По большому счету 0,4 а.е. для отдаленных планет не играет особой роли, поэтому отбросим этот член и получим  $d = 0,075 \times 2^n$ . Это уже center степенного закона, который в общем виде записывается как  $d = ab^n$ , где a и b — константы.

Прологарифмируем уравнение:

$$\log d = \log a + n \log b.$$

Если интерпретировать n и  $\log d$  как координаты, получим уравнение прямой с наклоном  $\log b$ , пересекающей вертикальную ось в точке  $\log a$ . Таким образом, чтобы распознать степенную зависимость, нужно построить график зависимости  $\log d$  от n в логарифмическом масштабе по обеим осям. Если результат окажется близок к прямой, все в порядке. Мало того, мы можем проделать то же самое не только для расстояния d, но и для других величин, таких как период обращения вокруг звезды или масса.

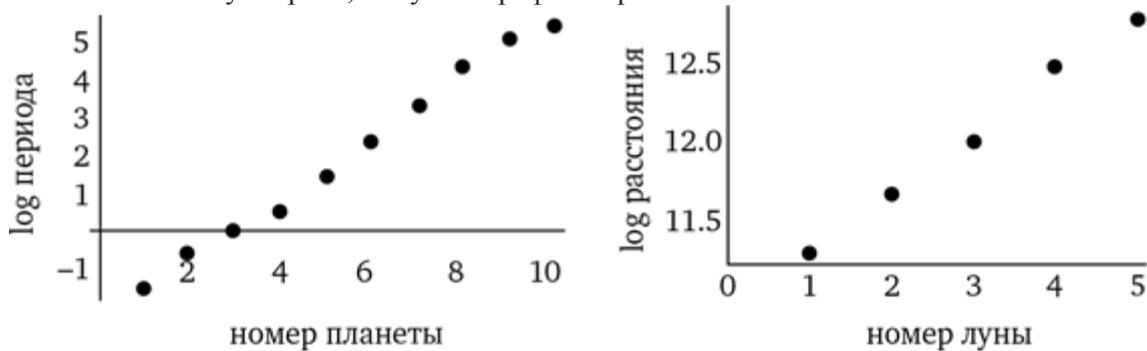
Если попытаться проделать это для расстояний от Солнца до планет, включая Цереру и Плутон, то получится график на рисунке слева. Он близок к прямой, как и следовало бы ожидать по закону Тициуса — Боде. А как насчет их масс (смотрим на рисунок справа)? На этот раз полулогарифмический график выглядит совершенно иначе. Ничего похожего на прямую или какую бы то ни было другую четкую зависимость.



*Слева:* график расстояний до планет в полулогарифмическом масштабе близок к прямой.

*Справа:* график масс планет в полулогарифмическом масштабе не похож на прямую

А орбитальный период? Вновь чистая прямая (смотри следующий график слева). Однако это не удивительно, поскольку третий закон Кеплера соотносит период с расстоянием таким образом, что степенная зависимость сохраняется. Попробуем расширить поле исследования и проверим пять основных лун Урана; получим график справа. Вновь степенная зависимость.



*Слева:* полулогарифмический график планетарных периодов близок к прямой.

*Справа:* полулогарифмический график расстояний от лун Урана до планеты близок к прямой

\*\*\*

Совпадение или что-то более глубокое? Мнения астрономов разделились. В лучшем случае наблюдается тенденция к степенной зависимости в расстояниях. При этом зависимость не универсальна.

Здесь вполне возможно какое-то рациональное объяснение. Наиболее вероятное начинается с идеи о том, что в динамике случайной системы планет принципиально важную роль играют резонансы — случаи, когда орбитальные периоды двух планет дают в отношении простую дробь. К примеру, один из периодов может составлять  $3/5$  от другого, это резонанс  $5:3$ <sup>[26]</sup>. Не обращая внимания на остальные тела, эти две планеты будут то и дело — через правильные интервалы — выстраиваться вдоль радиальной прямой, связывающей их со звездой, потому что пять оборотов одной планеты вокруг звезды в точности соответствуют трем оборотам другой планеты. За долгий период времени возникающие при этом небольшие возмущения орбит будут накапливаться, так что планеты будут склонны менять свои орбиты. В то же время для периодов, отношение которых не дает простой дроби, возмущения, как правило, компенсируются, поскольку в таких системах нет преимущественного направления, вдоль которого могла бы действовать связывающая две планеты сила тяготения.

И это не просто неопределенное предположение: оно подтверждается детальными расчетами и обширной математической теорией. В первом приближении орбита небесного тела

представляет собой эллипс. На следующем уровне аппроксимации наблюдается прецессия эллипса: его большая ось медленно поворачивается в пространстве. Еще более точная аппроксимация показывает, что доминирующие члены в  $\text{centerx}$  движения небесных тел возникают от вековых (секулярных) резонансов — более общего типа резонансных отношений между периодами, с которыми прецессируют орбиты нескольких тел.

Как именно движутся тела, находящиеся в резонансе друг с другом, зависит от отношения периодов, а также от их координат и скоростей, но часто результатом бывает очищение подобных орбит. Компьютерное моделирование показывает, что случайным образом распределенные вокруг звезды планеты склонны занимать позиции, отношения между которыми примерно похожи на закон Тициуса — Боде, а промежуточные позиции вычищаются резонансами. Но все это достаточно неопределенно и расплывчато.

В Солнечной системе есть несколько «миниатюрных» подсистем, роль которых играют планеты-гиганты со своими лунами. Орбитальные периоды трех крупнейших спутников Юпитера — Ио, Европы и Ганимеда — относятся друг к другу как 1:2:4, то есть каждый последующий из них вдвое больше предыдущего (см. главу 7). Четвертый спутник этой группы — Каллисто — имеет период немного меньший, чем удвоенный период Ганимеда. Согласно третьему закону Кеплера, орбитальные радиусы тел связаны аналогичным отношением, только множитель 2 следует заменить той же двойкой в степени  $2/3$ , что дает нам коэффициент 1,58. То есть орбитальный радиус каждого спутника должен быть примерно в 1,58 раза больше орбитального радиуса предыдущего спутника. Это тот случай, когда резонанс не расчищает, а стабилизирует орбиты, и отношение расстояний здесь 1,58 вместо 2 по закону Тициуса — Боде. Тем не менее расстояния тоже подчиняются степенному закону. Сказанное можно отнести также к лунам Сатурна и Урана, как указал Стенли Дермотт в 1960-е [27]. Такое распределение спутников называют законом Дермотта.

Расстояния, связанные степенным законом, представляют собой более общую закономерность, в которую входит и хорошая аппроксимация закона Тициуса — Боде. В 1994 году Беранжер Дюбрьоль и Франсуа Гране, применив два общих принципа, вывели степенной закон распределения расстояний для типичных коллапсирующих солнечных туманностей. Оба принципа основаны на симметрии. Облако обладает осевой симметрией; кроме того, распределение вещества в нем примерно одинаково на всех масштабах измерения — это масштабная симметрия. Осевая симметрия динамически обоснована, потому что асимметричное облако непременно либо разорвется, либо станет со временем более симметричным. Масштабная симметрия типична для важных процессов, влияющих, по мнению ученых, на формирование планет, таких как турбулентные потоки внутри солнечной туманности.

Сегодня мы в состоянии выглянуть за пределы нашей Солнечной системы. А там такое начинается! Орбиты известных экзопланет — планет у других звезд — расположены на самых разных расстояниях, в большинстве своем совершенно непохожих на те, что мы наблюдаем у себя в Солнечной системе. С другой стороны, известные экзопланеты всего лишь непредставительная выборка из множества всех существующих планет; часто мы видим у звезды только одну планету, хотя там, вероятно, присутствуют и другие. К тому же методы, имеющиеся у нас на данный момент, обнаруживают прежде всего крупные планеты, обращающиеся близко к своему центральному телу.

До тех пор пока мы не получим полные планы планетных систем множества звезд, мы не сможем по-настоящему понять, что представляют собой экзопланетные системы. Однако в 2013 году Тимоти Бовэ и Чарльз Лайнуивер, рассмотрев 69 экзопланетных систем, в которых достоверно имеется не менее четырех планет, выяснили, что 66 из них подчиняются степенным законам. Исследователи попытались также при помощи полученных степенных зависимостей осторожно предсказать «недостающие» планеты, то есть повторить в экосистемах историю с Церерой. Из 97 планет, предсказанных таким образом, пока удалось обнаружить лишь пять. Даже с учетом сложностей, связанных с обнаружением небольших планет, результат не оправдал надежд.

Все это достаточно неопределенно, поэтому внимание ученых переместилось на другие принципы, которые могли бы объяснить, как устроены планетные системы. Эти принципы опираются на тонкие особенности нелинейной динамики и не являются совсем уж эмпирическими. Однако числовой характер этих закономерностей менее очевиден. В частности,

Майкл Делниц математически показал, что поле тяготения Юпитера, судя по всему, организовало все остальные планеты в единую взаимосвязанную систему, соединенную природными «трубками». Эти трубки, которые можно распознать только при помощи их математических характеристик, представляют собой естественные низкоэнергетические пути между разными мирами. Эту идею и связанные с ней вопросы мы обсудим в главе 10, куда они впишутся более естественно.

\*\*\*

Был ли он совпадением или нет, но закон Тициуса — Боде вдохновил ученых на некоторые важные открытия.

Как известно, невооруженным глазом с Земли можно увидеть только пять классических планет: Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн. Плюс Земля, если вы хотите проявить дотошность, но от нее в данный конкретный момент можно увидеть лишь маленький кусочек. С изобретением телескопа астрономы получили возможность наблюдать звезды, слишком слабые для невооруженного глаза, а также другие небесные объекты, такие как кометы, туманности и спутники. Астрономы работали на пределе тогдашних технических возможностей, и зачастую им проще было обнаружить на небе какой-то новый объект, чем понять, что он собой представляет.

Именно с этой проблемой столкнулся Уильям Гершель в 1781 году, когда направил телескоп, сооруженный в саду его дома в Бате, на созвездие Тельца и заметил слабую точку света возле звезды ζТельца; поначалу он подумал, что это либо «какая-то туманная звезда, либо, возможно, комета». Четырьмя ночами позже он записал в дневнике, что «выяснил, что это комета, ибо она изменила свое положение». Примерно пять недель спустя, докладывая о своем открытии Королевскому обществу, он все еще описывал это явление как комету. Если рассматривать звезду через линзы с разным увеличением, она остается точкой даже при самом большом увеличении, но этот новый объект при большем увеличении, казалось, увеличивался — «как это делают планеты», заметил астроном. Но это же можно сказать и о кометах, и Гершель был убежден, что открыл новую комету.

По мере поступления новой информации некоторые астрономы, в том числе Королевский астроном Невил Маскелайн, Андерс Лексель и Боде, начали сомневаться и попросили уточнить природу нового объекта. К 1783 году астрономы сошлись во мнении, что это планета, и решили, что ей необходимо название. Когда-то король Георг III назначил Гершелю содержание в 200 фунтов в год при условии, что тот переедет поближе к Виндзорскому замку, чтобы королевская семья имела возможность смотреть в его телескопы. Гершель, желавший отблагодарить монарха, хотел назвать новую планету *Georgium Sidus* — «Звезда Георга». Боде предложил название *Uranus* — латинский вариант записи имени греческого небесного бога Урана. И это название победило, несмотря на то что Уран — единственная планета, названная в честь греческого божества, а не римского.

Лаплас рассчитал орбиту Урана в 1783 году. Оказалось, что период обращения этой планеты составляет 84 года, а среднее расстояние от Солнца примерно равно 19 а.е., или 3 миллиарда километров. Орбита Урана, хотя и близка к круговой, обладает большим эксцентриситетом, чем орбита любой другой известной планеты, ее радиус варьируется от 18 до 20 а.е. Через несколько лет, с появлением более совершенных телескопов, появилась возможность измерить период вращения планеты вокруг оси, который составил 17 часов 14 минут, и выяснить, что вращается она не в том же направлении, что все остальные, а в противоположном. Ось вращения Урана наклонена больше чем на 90° и почти лежит в плоскости эклиптики Солнечной системы, вместо того чтобы быть к ней приблизительно перпендикулярной. В результате на Уране наблюдается крайняя форма полярного дня: на каждом из полюсов планеты 42 земных года длится день и 42 года — ночь, причем когда один полюс погружен во тьму, на другом светит солнце.

Очевидно, в Уране есть что-то странное. С другой стороны, его орбита точно укладывается в закон Тициуса — Боде.

Когда орбита новой планеты была установлена и появилась возможность связать с ней давние наблюдения, стало ясно, что этот далекий мир астрономам случалось наблюдать и раньше, но его всегда ошибочно принимали за звезду или комету. На самом деле Уран едва-едва виден человеку с хорошим зрением; вероятно, он числился в качестве «звезды» еще в каталоге Гиппарха в 128

году до нашей эры и позже в Птолемеевом «Альмагесте». Джон Флемстид шесть раз наблюдал Уран в 1690 году и считал звездой; он даже присвоил ей регулярное обозначение 34 Тельца. Пьер Лемонье наблюдал его 12 раз между 1750 и 1769 годами. Хотя Уран — планета, движется он так медленно, что изменение его положения на небе нелегко заметить.

\*\*\*

До этого момента роль математики в исследовании Солнечной системы была в основном описательной; математика позволяла свести длинную серию наблюдений к простой эллиптической орбите. Единственным предсказанием, которое делалось на основе математики, тогда было предсказание положения планеты на небе в определенные моменты времени в будущем. Но время шло, данные о наблюдениях накапливались, и Уран все более и более оказывался не там, где надо. Ученик Лапласа Алексис Бувар провел множество высокоточных наблюдений Юпитера, Сатурна и Урана, а также открыл восемь комет. Его таблицы движения Юпитера и Сатурна оказались очень точными, а вот Уран стабильно уходил от предсказанных для него точек. Бувар предположил, что орбиту Урана, возможно, возмущает какая-то еще более отдаленная планета.

Под «возмущением» здесь подразумевается просто воздействие. Если бы было можно выразить это действие математически как зависимость от параметров орбиты предполагаемой новой планеты, то удалось бы обратным ходом определить и саму эту орбиту. Тогда астрономы знали бы, куда смотреть, и если бы предсказание оправдалось, то они смогли бы обнаружить ту самую новую планету. Главная загвоздка при таком подходе состоит в том, что на движение Урана существенно влияют Солнце, Юпитер и Сатурн. Остальными телами Солнечной системы, пожалуй, можно пренебречь, но и без того разбираться придется по крайней мере с пятью телами. Точные формулы неизвестны даже для системы из трех тел; с пятью все намного сложнее.

К счастью, математики того времени успели уже придумать хитроумный способ обойти эти сложности. Математически возмущение — это новый эффект, изменяющий решения уравнений этой системы. К примеру, движение маятника под действием гравитации в вакууме имеет элегантное решение: маятник совершает одни и те же колебательные движения раз за разом, до бесконечности. Однако, если в системе присутствует сопротивление воздуха, уравнение движения изменяется, чтобы включить в себя эту дополнительную силу сопротивления. Для модели маятника эта сила — возмущение, она разрушает периодические колебания. В воздухе, в отличие от вакуума, колебания затухают, и маятник со временем останавливается.

Возмущения приводят к более сложным уравнениям, решать которые, как правило, труднее. Но иногда можно использовать само возмущение, чтобы понять, как меняются решения. Для этого мы записываем уравнения для разности между невозмущенным и возмущенным решениями. Если возмущение невелико, мы можем вывести приближенные формулы для искомой разности, отбросив при этом те члены уравнений, которые намного меньше возмущения. Этот прием упрощает уравнения в достаточной мере, чтобы их можно было решить в явном виде. Полученное в результате решение не является точным, но зачастую достаточно хорошо для практических целей.

Если бы Уран был единственной планетой в системе, его орбита представляла бы собой идеальный эллипс. Однако на эту идеальную орбиту оказывают возмущающее действие Юпитер, Сатурн и все остальные известные нам тела Солнечной системы. Совместное действие их гравитационных полей изменяет орбиту Урана, и это изменение может быть описано как медленная вариация орбитальных элементов Уранова эллипса. С большой точностью можно сказать, что Уран всегда движется по какому-то эллипсу, но во всякий новый момент это немного другой эллипс. Возмущения медленно изменяют его форму и наклонение.

Таким способом можно было вычислить, как должен двигаться Уран с учетом действия всех существенных возмущающих тел. Но наблюдения показывали, что на самом деле Уран не придерживается предсказанной таким образом орбиты. Вместо этого он постепенно отклоняется от нее, и эти отклонения можно измерить. Поэтому мы добавляем гипотетическое возмущение со стороны неизвестной планеты X, рассчитываем новую возмущенную орбиту, требуем, чтобы она совпадала с наблюдаемой орбитой, и вычисляем орбитальные элементы планеты X.

В 1843 году Джон Адамс продемонстрировал высший вычислительный пилотаж и рассчитал орбитальные элементы гипотетического нового мира. К 1845-му Урбен Леверье независимо от него провел собственные аналогичные вычисления. Адамс направил свои предсказания Джорджу Эйри, тогдашнему королевскому астроному Британии, с просьбой поискать на небе предсказанную планету. Эйри встревожили некоторые аспекты расчетов Адамса — напрасно, как выяснилось позже, — но Адамс не смог рассеять его сомнений, так что ничего сделано не было. В 1846 году Леверье опубликовал собственное предсказание, тоже не вызвавшее особого интереса, — до тех пор, пока Эйри не заметил, что результаты обоих математиков очень похожи. Он поручил директору Кембриджской обсерватории Джеймсу Чаллису провести поиск новой планеты, но Чаллису не удалось ничего обнаружить.

Вскоре после этого, однако, Иоганн Галле разглядел слабую светящуюся точку примерно в градусе от предсказания Леверье и в  $12^\circ$  от предсказания Адамса. Позже Чаллис обнаружил, что и сам дважды наблюдал новую планету, но у него не оказалось под рукой новейшей звездной карты, да и вообще он отличался некоторой небрежностью и не заметил своего открытия. Точка Галле оказалась еще одной планетой, которую позже назвали Нептуном. Открытие этой планеты стало крупным успехом небесной механики. Теперь математика не только помогала фиксировать орбиты существующих планет, но и являла людям новые миры.

\*\*\*

Теперь Солнечная система могла похвастать уже восемью планетами и стремительно растущим числом «малых планет», или астероидов (см. главу 5). Но еще до открытия Нептуна некоторые астрономы, среди них Бувар и Петер Ганзен, были убеждены, что одного-единственного нового тела недостаточно, чтобы объяснить аномалии в движении Урана. Вместо этого они были убеждены, что наблюдаемые неувязки говорят о присутствии двух новых планет. На протяжении следующих 90 лет эта идея то и дело мелькала в научных дискуссиях.

В 1894 году Персиваль Лоуэлл основал обсерваторию в городке Флагстафф в штате Аризона, а через 12 лет, решив раз и навсегда разобраться с аномалиями орбиты Урана, он начал реализацию проекта, названного им «Планета X». Здесь X — математическое неизвестное, а не римская цифра (тем более что порядковым номером очередной планеты был бы IX). Лоуэлл несколько подпортил собственную научную репутацию тем, что продвигал идею «каналов» на Марсе, и теперь хотел восстановить свое реноме: для этого идеально подошла бы новая планета. Он воспользовался математическими методами, чтобы предсказать, где должен находиться этот гипотетический мир, а затем провел систематический поиск, но безрезультатно. В 1914–1916 годах Лоуэлл повторил свою попытку, но снова ничего не обнаружил.

Тем временем директор обсерватории Гарвардского колледжа Эдвард Пикеринг опубликовал собственное предсказание на этот счет: он предположил существование планеты O на расстоянии 52 а.е. от Солнца. Но к тому моменту британский астроном Филип Коуэлл объявил все эти поиски пустой и сумасбродной идеей: он считал, что предполагаемые аномалии в движении Урана можно объяснить иными способами.

В 1916 году Лоуэлл умер. Юридический спор между его вдовой и обсерваторией прервал всякую работу по поиску планеты X до 1925 года, когда брат Лоуэлла Джордж оплатил сооружение нового телескопа. Клайду Томбо поручили фотографировать определенные области ночного неба дважды с интервалом в две недели. Некое оптическое устройство использовалось, чтобы сравнить два изображения, и все объекты, изменившие свое положение за это время, начинали мигать, привлекая внимание исследователя. Чтобы устранить всякие сомнения, он делал еще и третий снимок. В начале 1930 года, когда Томбо исследовал область в Близнецах, на снимке возникла мерцающая точка. Она отстояла от точки, указанной Лоуэллом, не более чем на  $6^\circ$ ; похоже было, что его предсказание подтвердилось. Когда необычный объект был идентифицирован как новая планета, проверка архивов показала, что в 1915 году он уже попал на фотографии, но не был распознан.

Этот новый мир назвали Плутоном, причем две первые буквы названия представляли собой инициалы Персиваля Лоуэлла.

Со временем стало понятно, что Плутон намного меньше, чем ожидалось; его масса в 10 раз меньше массы Земли. Из этого следует, что его присутствием на самом деле невозможно объяснить те аномалии, которые заставили Лоуэлла и других астрономов предсказать его

существование. Когда в 1978 году данные о малой массе Плутона получили подтверждение, кое-кто из астрономов решил возобновить поиски планеты X; эти ученые предполагали, что Плутон всего лишь ложный след, а настоящая массивная планета, должно быть, по-прежнему скрывается «где-то там». Однако, когда Майлз Стэндиш, воспользовавшись данными пролета аппарата Voyager 2 мимо Нептуна в 1989 году, уточнил массу Нептуна, аномалии орбиты Урана попросту испарились. Предсказание Лоуэлла оказалось всего лишь удачным совпадением.

Плутон — очень необычный мир. Его орбита наклонена к эклиптике на  $17^\circ$  и настолько вытянута, что иногда Плутон подходит к Солнцу ближе, чем Нептун. Однако столкнуться эти два тела никак не могут по двум причинам. Одна из причин — угол между орбитальными плоскостями: их орбиты пересекаются только на прямой, которая является общей для обеих плоскостей, и оба мира должны оказаться в одной и той же точке этой прямой в один и тот же момент. Вот здесь-то и вступает в игру вторая причина. Плутон и Нептун находятся в резонансе 2:3 друг с другом. Это значит, что оба тела каждые два оборота Плутона и три — Нептуна (то есть каждые 495 лет) повторяют, по существу, одни и те же движения. Раз уж они не столкнулись в прошлом, не столкнутся и в будущем — по крайней мере до тех пор, пока какая-нибудь крупномасштабная реорганизация других тел Солнечной системы не потревожит их уютные и довольно близкие отношения.

\*\*\*

Астрономы продолжали исследовать внешние области Солнечной системы в поисках новых тел. Они выяснили, что у Плутона имеется сравнительно большая луна — Харон, но больше за пределами орбиты Нептуна не удавалось ничего обнаружить до 1992 года, когда было зарегистрировано небольшое тело, обозначенное как (15760) 1992 QB1 [28]. Оно было настолько незначительным, что так и не получило с тех пор другого названия (высказывалось предложение назвать его «Смайли», но оно было отвергнуто, поскольку это название уже получил один из традиционных астероидов). Оказалось, однако, что это тело — первое из целой стаи занептунных объектов (TNO, Trans-Neptunian Objects), которых известно на сегодняшний день более 1500. Среди них имеется несколько более крупных тел, уступающих все же по размерам Плутону: самый крупный среди них объект — Эрида, затем идут Макемаке, Хаумея и 2007 OR10.

Все эти объекты слишком легковесны и далеки, чтобы их можно было предсказать по гравитационному воздействию на другие тела, поэтому находят их при внимательном просмотре фотоизображений. Но есть кое-какие достойные внимания математические особенности того, как на них воздействуют другие тела. Между 30 и 55 а.е. лежит так называемый «пояс Койпера», объекты которого в большинстве своем располагаются на примерно круговых орбитах вблизи эклиптики. Орбиты некоторых из этих TNO находятся в резонансе с орбитой Нептуна. Те объекты, резонанс которых составляет 2:3, называют плутино, поскольку в их число входит и Плутон. Те, что состоят с Нептуном в резонансе 1:2, то есть период обращения которых вдвое больше периода Нептуна, называют тутино. Остальные — классические объекты пояса Койпера, или кюбивано [29]; они также обращаются по приблизительно круговым орбитам, но не испытывают значительных возмущений со стороны Нептуна. Дальше, за поясом Койпера, располагается так называемый рассеянный диск. Здесь астероидоподобные тела движутся по вытянутым орбитам, часто наклоненным к эклиптике под большим углом. Именно к этой категории относятся Эрида и Седна.

По мере того как обнаруживались все новые и новые TNO, некоторые астрономы начали склоняться к мнению, что нелогично называть планетой Плутон, но не называть Эриду, которая, как они считали, даже чуть превосходит его размером. По иронии судьбы, поздние фотографии с аппарата New Horizons показали, что Эрида все-таки чуть меньше Плутона [30]. Но если дать статус планет остальным крупным занептунным объектам, то некоторые из них окажутся меньше, чем астероид (или малая планета) Церера. После долгих и горячих дебатов Международный астрономический союз низвел Плутон до статуса карликовой планеты и уравнил с ним в правах Цереру, Хаумею, Макемаке и Эриду. Новые определения терминов «планета» и «карликовая планета» были тщательно подогнаны под известные небесные тела, так чтобы все они попадали в нужные категории. Однако до сих пор до конца неясно, соответствуют ли на самом деле этому определению Хаумея, Макемаке и Эрида. Кроме того, есть подозрение,

что в поясе Койпера имеется еще несколько сотен таких же карликовых планет, а в рассеянном диске их насчитывается до 10 000.

\*\*\*

Когда какой-то новый научный прием срабатывает и приводит к успеху, разумно бывает попробовать его на других аналогичных задачах. Трюк с возмущением орбиты блестяще сработал в случае с Нептуном — существование и местоположение планеты были предсказаны точно. В случае с Плутоном он тоже, на первый взгляд, работал блестяще, но лишь до тех пор, пока астрономы не поняли, что Плутон слишком мал, чтобы вызвать те аномалии, при помощи которых его предсказали.

Этот прием потерпел удручающую неудачу в поисках планеты под названием Вулкан. Речь не выдуманной планете из «Звездного пути», родине мистера Спока, которая, если верить писателю-фантасту Джеймсу Бlishу, обращается вокруг звезды 40 Эридана А. Нет, это выдуманная планета, обращающаяся вокруг неприметной и довольно обычной звезды, известной писателям-фантастам как Сол. Или, более привычно, Солнце. Вулкан преподает нам несколько полезных уроков о науке — не только сообщает очевидный факт о том, что ошибки случаются, но и учит, что осознание прошлых ошибок может уберечь нас от их повторения. Его предсказание связано с введением положений теории относительности в физику Ньютона с целью ее улучшения. Но, как говорится, об этом позже.

Нептун был открыт благодаря аномалиям в орбите Урана. Вулкан был призван объяснить аномалии в орбите Меркурия — и предложил его не кто иной, как Леверье, в работе, вышедшей еще до открытия Нептуна. В 1840 году директор Парижской обсерватории Франсуа Араго решил применить закон всемирного тяготения Ньютона к орбите Меркурия и попросил Леверье провести необходимые расчеты. Теоретические данные можно было проверить во время прохождения Меркурия по диску Солнца — так называемого транзита; можно было очень точно засечь моменты начала и окончания транзита Меркурия. Событие это должно было состояться в 1843 году, и незадолго до него Леверье завершил свои расчеты, дав возможность предсказать соответствующие моменты времени. К его изумлению, наблюдения разошлись с теорией. Леверье вернулся к чертежной доске и подготовил более точную модель движения планеты, основанную на многочисленных наблюдениях и 14 транзитах. В результате к 1859 году он выявил и опубликовал небольшой, но загадочный аспект движения Меркурия, объяснивший его первоначальную ошибку.

Точка, в которой орбитальный эллипс Меркурия подходит ближе всего к Солнцу, известна как перигелий (peri — близкий, helios — Солнце) и представляет собой четко определенную характеристику орбиты. Со временем перигелий Меркурия медленно вращается относительно далеких («неподвижных») звезд. В сущности, вся орбита целиком медленно поворачивается, оставляя Солнце в своем фокусе; для этого существует специальный термин — прецессия. Математическая закономерность, известная как теорема Ньютона о вращении орбиты<sup>[31]</sup>, предсказывает этот эффект как результат возмущений орбиты со стороны других планет. Однако, когда Леверье подставил в эту теорему результаты наблюдений, числа, получившиеся в результате, чуть-чуть не совпали с реальными. Теория Ньютона предсказывала, что перигелий Меркурия должен смещаться в результате прецессии на 532" (угловые секунды) за каждые сто лет; однако по результатам наблюдений прецессия составила 575". Что-то вызывало дополнительные 43" прецессии за столетие. Леверье предположил, что за это отвечает какая-то неизвестная планета, обращающаяся ближе к Солнцу, чем Меркурий; он назвал эту планету Вулканом — в честь древнеримского бога огня.

Понятно было, что сияние Солнца затмевает любой свет, отражаемый настолько близкой к светилу планетой, так что единственный реальный способ увидеть Вулкан — поймать его на транзите, во время которого он должен быть виден на диске Солнца как крохотная темная точка. Вскоре астроном-любитель Эдмон Лескарбо объявил, что действительно видел такую точку, причем это не могло быть солнечное пятно, потому что двигалось оно с неправильной скоростью. В 1860 году Леверье объявил об открытии Вулкана и был удостоен за это ордена Почетного легиона.

К несчастью для Леверье и Лескарбо, оказалось, что в тот же период времени Солнце наблюдал еще один астроном — Эммануэль Лиэ. Он пользовался более качественным

оборудованием, чем Лескарбо, и работал по поручению бразильского правительства, но при этом не видел ничего подобного. На кону оказалась его репутация, он категорически отрицал, что транзит действительно имел место. Разгорелись жаркие и путаные споры. Леверье умер в 1877 году, по-прежнему веря, что открыл еще одну новую планету. Без поддержки Леверье теория Вулкана потеряла темп, и вскоре астрономы пришли к единому мнению: Лескарбо ошибся. Предсказание Леверье осталось неподтвержденным, и среди астрономов возобладал скепсис. Окончательно интерес к Вулкану пропал в 1915 году, когда Эйнштейн, воспользовавшись своей новой теорией — общей теорией относительности, рассчитал дополнительную прецессию перигелия Меркурия, равную  $42,98''$ , без привлечения каких бы то ни было новых планет. Теория относительности тем самым получила подтверждение, а Вулкан был сдан в архив.

Мы и сегодня не можем быть до конца уверены, что между Меркурием и Солнцем нет неизвестных нам тел, хотя, если такое тело существует, оно должно быть очень небольшим. Генри Куртен, заново проанализировав фотографии солнечного затмения 1970 года, заявил, что обнаружил на них по крайней мере семь таких тел. Их орбиты было невозможно определить, и заявления Куртена остались неподтвержденными. Но поиск вулканоидов, как называют такие тела, продолжается[32].



## Небесная полиция

У динозавров не было космической программы, в результате их нет здесь и они не могут обсуждать эту проблему. Мы здесь, и у нас есть возможность что-то с этим сделать. Я не хочу, чтобы люди стали позором Галактики: имели возможность отразить астероид, но не сделали этого и в результате вымерли.

Нил Де Грасс Тайсон. «Космические хроники»

Преследуемая целой флотилией межзвездных военных кораблей, стреляющих испепеляющими молниями чистой энергии, небольшая группа храбрых борцов за свободу ищет укрытия в поясе астероидов; их кораблик дико мечется в плотном потоке крутящихся валунов размером с Манхэттен, которые то и дело врезаются друг в друга. Крейсера преследуют их, испаря небольшие камни лучами своих лазеров и получая в борт целый дождь небольших осколков. Хитрым маневром уходящий от погони кораблик закладывает петлю, ложится на обратный курс и ныряет в глубокий туннель в центре случайно подвернувшегося кратера. Но приключения героев только начинаются...

Захватывающее кинематографическое зрелище.

И к тому же полная чепуха. Нет, я говорю не о флотилии военных кораблей, не о молниях энергетических зарядов и не о галактических повстанцах. Я даже не имею в виду чудовищного червя, притаившегося в конце туннеля. Все это может когда-нибудь произойти. Я имею в виду бурный поток крутящихся камней. Этого не может быть никогда.

Мне кажется, все дело здесь в неудачной метафоре. Пояс.

\*\*\*

Когда-то давно в Солнечной системе, как ее тогда понимали, не было пояса. Вместо него был загадочный пропуск. Согласно закону Тициуса — Боде, между Марсом и Юпитером, по идее, должна была бы находиться планета, но планеты там нет. Если бы она была там когда-нибудь, древние ее непременно заметили бы и связали с ней еще кого-нибудь из своих богов.

Уран, когда он был открыт, так аккуратно вписался в математическое правило закона Тициуса — Боде, что астрономы с новым энтузиазмом принялись искать что-нибудь в

промежутке между Марсом и Юпитером, надеясь заполнить и его. Как мы видели в предыдущей главе, им это удалось. Барон Франц Ксавер фон Цах в 1800 году основал Объединенное астрономическое общество (*Vereinigte Astronomische Gesellschaft*), в которое вошло 25 человек — среди них Маскелайн, Шарль Мессье, Уильям Гершель и Генрих Ольберс. Поскольку свою деятельность эта группа посвятила в основном упорядочению непослушной Солнечной системы, ее окрестили Небесной полицией (*Himmelspolizei*). Каждому наблюдателю был выделен 15-градусный сектор эклиптики и поставлена задача поиска в этой области недостающей планеты.

Как часто бывает, весь этот систематический и организованный подход перевесила удача, выпавшая на долю астронома, не вошедшего в круг избранных, — Джузеппе Пиацци, профессора астрономии в Университете Палермо на Сицилии. Он не занимался поисками планеты; он искал звезду, «87-й номер в каталоге господина Лакайля». В самом начале 1801 года возле искомой звезды он заметил еще одну световую точку, на которую в существующих звездных каталогах не нашлось никакой информации. Продолжая наблюдать за непрошеным гостем, Пиацци обнаружил, что эта светящаяся точка движется. Открытый им объект находился в точности там, где закон Тициуса — Боде предписывал искать недостающую планету. Пиацци назвал новое небесное тело Церерой — в честь римской богини плодородия, которая считалась также покровительницей Сицилии. Поначалу он думал, что открыл новую комету, но объекту не доставало характерного хвоста. «Мне несколько раз приходило в голову, что это могло бы оказаться что-то получше, чем комета», — писал он, имея в виду, естественно, планету.

По планетарным масштабам Церера довольно мала, и астрономы чуть не потеряли ее снова. Информации об ее орбите было очень мало, и, прежде чем астрономы успели провести дополнительные измерения, движение Земли привело направление на новое тело слишком близко к Солнцу, так что его слабый свет потерялся в сиянии светила. Ожидалось, что новооткрытое тело вновь появится на небосводе через несколько месяцев, но наблюдений было так мало, что было совершенно неясно, где его следует искать. Не желая начинать поиски заново, астрономы попросили у научного сообщества более надежное предсказание. На призыв ответил сравнительно малоизвестный тогда публике Карл Фридрих Гаусс. Он придумал новый способ вычисления орбиты по трем и более наблюдениям, известный сегодня как метод Гаусса. Когда Церера дисциплинированно появилась всего в полуградусе от предсказанной им позиции, Гаусс приобрел прочную репутацию великого математика. В 1807 году он был назначен профессором астрономии и директором обсерватории в Гёттингенском университете, где и проработал до конца жизни.

Чтобы предсказать, где должна будет появиться Церера, Гаусс придумал несколько весьма действенных численных приемов аппроксимации. Среди них был и некий вариант алгоритма, который мы сегодня называем быстрым преобразованием Фурье; его заново открыли в 1965 году Джеймс Кули и Джон Тьюки. Идеи Гаусса на эту тему были обнаружены среди неопубликованных бумаг и появились на свет уже после смерти ученого в его собрании сочинений. Он рассматривал этот метод как форму тригонометрической интерполяции, при которой новые точки вставляются между существующими (измеренными) точками на графике таким образом, чтобы получалась гладкая кривая. Сегодня этот — один из важнейших — алгоритм обработки сигналов используется в медицинских сканерах и цифровых камерах. Такова сила математики и то, что физик Юджин Вигнер назвал ее «чрезмерной эффективностью» [33].

Развивая свой успех, Гаусс разработал универсальную теорию движения небольших астероидов под возмущающим действием больших планет и опубликовал ее в 1809 году в работе *Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solem Ambientum* («Теория движения небесных тел, движущихся в конических сечениях вокруг Солнца»). В этой работе Гаусс отточил и улучшил статистический метод, предложенный Лежандром в 1805 году и известный нам сейчас как метод наименьших квадратов. Он объявил также: ему первому еще в 1795 году пришла в голову эта идея, но (что очень типично для Гаусса) он не стал ее публиковать. Этот метод используется для получения более точных величин по серии измерений, в каждом из которых присутствует случайная ошибка. В простейшей своей форме этот метод выбирает величину, минимизирующую суммарную ошибку. Более хитроумные варианты используются для построения прямой, которая наилучшим образом согласуется с имеющимися данными о

зависимости между двумя переменными, или решают аналогичные вопросы для многих переменных. Статистика пользуется такими методами ежедневно.

\*\*\*

Когда орбитальные элементы Цереры оказались у астрономов в кармане, так что теперь ее можно было найти в любой момент по требованию, оказалось, что она не одинока. Другие аналогичные тела сходных размеров или мельче имели очень похожие орбиты. Чем лучше был телескоп, тем больше этих объектов можно было увидеть и тем меньше они становились.

Позднее, в том же 1801 году, один из членов Небесной полиции Ольберс заметил такое тело и назвал его Палладой. Практически сразу после этого он выдвинул остроумную гипотезу, объяснявшую отсутствие на этой орбите одной большой планеты и присутствие двух (или больше) маленьких. Ольберс предположил, что большая планета на этой орбите действительно когда-то была, но разрушилась в результате столкновения с кометой или вулканического взрыва. Некоторое время эта гипотеза казалась правдоподобной — ведь на орбите обнаруживалось все больше ее «фрагментов»: Юнона (1804), Веста (1807), Астрея (1845), Геба, Ирида и Флора (1847), Метида (1848), Гигея (1849), Партенопа, Виктория и Эгерия (1850) и т.д.

Весту иногда, в благоприятных наблюдательных условиях, можно увидеть невооруженным глазом. Древние в принципе вполне могли ее открыть.

Традиционно каждая планета в астрономии имеет свой собственный символ, так что первоначально каждому из новооткрытых тел также присваивали какой-нибудь мудреный символ. Но поток новых тел нарастал; система оказалась слишком громоздкой для такого их количества, и ее заменили более прозаическими, из которых уже развился наш нынешний вариант — в его основе лежит число, указывающее на очередность открытия, название или временное обозначение и дата обнаружения (к примеру, 10 Гигея 1849[34]).

В достаточно мощный телескоп любая настоящая планета видна, как диск. Эти же объекты были настолько малы, что выглядели точками, как звезды. В 1802 году Гершель предложил для них общее рабочее название:

«Они так сильно напоминают маленькие звездочки, что почти неотличимы от них. Если я возьму и назову их по этому их звездоподобному (asteroidal) виду астероидами, оставив однако за собой свободу изменить это название, если найдется какое-то другое, лучше выражающее их природу».

Некоторое время многие астрономы продолжали называть эти тела планетами или малыми планетами, но со временем название «астероид» победило.

Теория Ольберса не выдержала испытание временем. Химический состав астероидов не соответствует предположению о том, что все они были когда-то фрагментами одного крупного тела, да и общая их масса слишком мала. Более вероятно, что это космические обломки на месте потенциальной планеты, которая не смогла сформироваться из-за слишком больших возмущений со стороны Юпитера. Столкновения между планетезималями в этой области случались чаще, чем где бы то ни было, и разбивали комки быстрее, чем они могли собраться в одно целое. Причиной этого стало перемещение Юпитера ближе к Солнцу, упоминавшееся в главе 1.

Проблемой, в общем-то, был не Юпитер, как таковой, а резонансные орбиты. Как уже говорилось, резонанс возникает, когда отношение периода обращения одного тела на своей орбите к периоду обращения второго тела — в данном случае Юпитера — представляет собой простую дробь. Тогда оба тела движутся в цикле, после которого оказываются точно в тех же позициях относительно друг друга, в каких находились на старте. И это происходит раз за разом, вызывая серьезные возмущения. Если отношение периодов не составляет простую дробь, подобные эффекты смазываются. Что именно происходит на резонансных орбитах, зависит от конкретного значения дроби, но основных вариантов два: либо вокруг этой орбиты возникнет более плотная концентрация астероидов, чем в других местах, либо их все вообще «выметает» с этой орбиты.

Если бы Юпитер все время оставался на своей орбите, этот процесс со временем успокоился бы: астероиды ушли бы с нестабильных резонансных орбит и сконцентрировались возле стабильных. Но если бы Юпитер двинулся с места — а астрономы в настоящее время считают, что так и было, — резонансные зоны должны были пройти через весь пояс астероидов, вызвав там настоящий хаос. Прежде чем какое-то тело успевало пристроиться на стабильной

резонансной орбите, она переставала быть резонансной и теряла стабильность — и вновь начинался беспорядок. Таким образом, перемещение Юпитера сдернуло астероиды с орбит, сделало их движение беспорядочным и многократно повысило вероятность столкновений.

Существование внутренних планет свидетельствует о том, что планетезимали собирались в одно целое внутри орбит планет-гигантов, и подразумевает, что когда-то планетезималей было очень и очень много. Если в системе имеется несколько гигантов, они с большой вероятностью будут тревожить друг друга, как это делали Юпитер и Сатурн, и взаимные возмущения будут менять их орбиты; изменение орбит обязательно подразумевает перемещение резонансных зон и, соответственно, разрушение любых планетезималей, расположенных непосредственно внутри орбиты ближайшего к светилу гиганта. Короче говоря, наличие внутренних планет и двух или более гигантов почти наверняка подразумевает и наличие астероидов.

\*\*\*

То есть пояса.

Насколько я могу определить, никому в точности не известно, кто первым использовал термин «пояс астероидов», но он точно был уже в ходу к 1850 году, когда Элиза Отте в переводе на английский язык той части книги Александра фон Гумбольдта «Космос», где рассказывается о метеоритных дождях, заметила, что некоторые из них «вероятно, формируют часть пояса астероидов, пересекающую орбиту Земли». «Руководство к познанию небес» Роберта Манна (1852) гласит: «Орбиты астероидов размещены в широком поясе пространства». Так и есть. На рисунке показано распределение главных астероидов вместе с орбитами планет до Юпитера включительно. Доминирует на этой картине громадное размытое кольцо, составленное из тысяч астероидов. Я вернусь к семейству Хильды, «троянцам» и «ахейцам» позже.



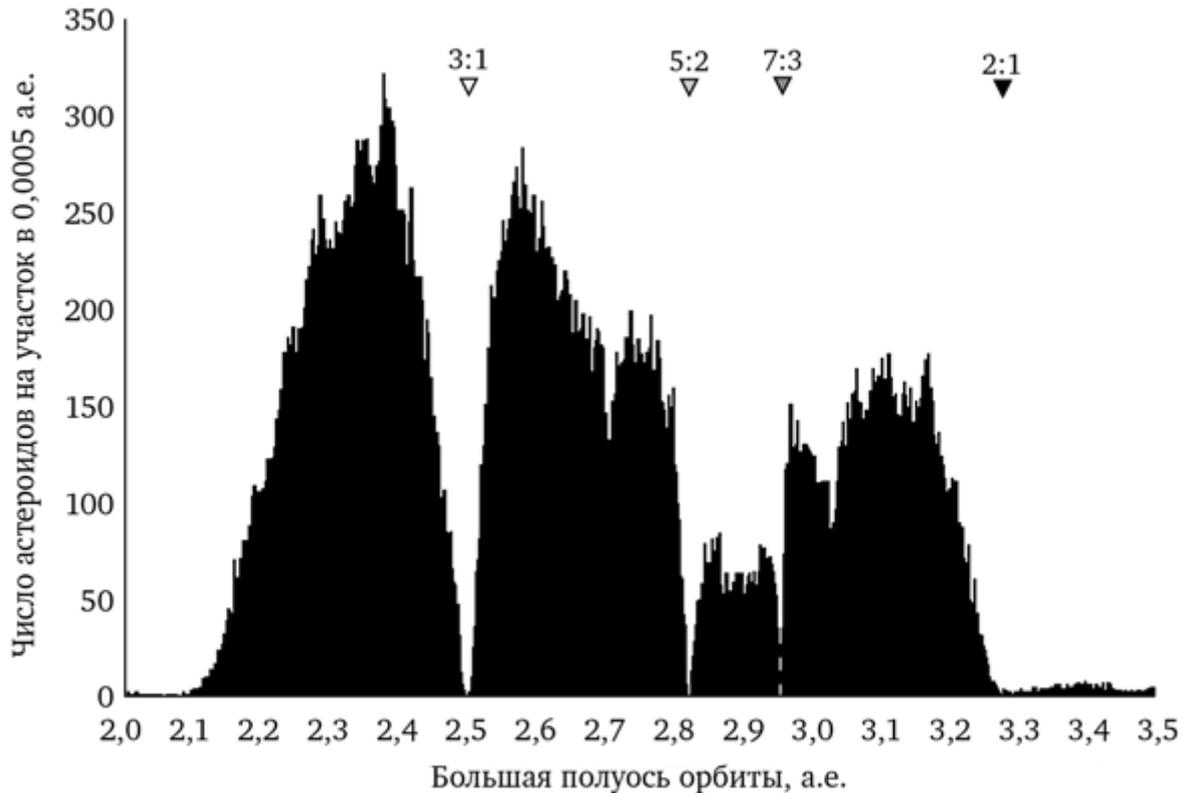
Поиск закономерностей в массиве данных чем-то сродни магическому искусству, но математические техники несколько облегчают задачу. Один из фундаментальных принципов такого поиска гласит, что разные способы численного или графического представления данных способны выявить разные их свойства.

Приведенная иллюстрация позволяет предположить, что в пределах основного пояса астероиды распределены достаточно однородно. Кольцо точек кажется примерно одинаково плотным везде, без пробелов или сгущений. Но опять же, и эта картина вводит зрителя в заблуждение. Ее масштаб не позволяет показать подробности; к тому же, и это даже важнее, на ней показаны текущие положения астероидов. Чтобы увидеть интересную структуру — помимо двух скоплений, подписанных как «трояницы» и «ахейцы», к которым мы еще вернемся, — необходимо взглянуть на расстояния. На самом деле главная характеристика здесь — период обращения [36], но он непосредственно связан с расстоянием через третий закон Кеплера.

В 1866 году астроном-любитель по имени Дэниел Кирквуд обратил внимание на прорехи в поясе астероидов. Точнее говоря, он заметил, что астероиды редко занимают орбиты, лежащие на определенных расстояниях от Солнца, если измерять их большей полуосью орбитального эллипса. На рисунке показан современный расширенный график числа астероидов в зависимости от расстояния в основной части пояса, на расстояниях от 2 до 3,5 а.е. от Солнца. Три резких провала, в которых число астероидов падает до нуля, очевидны. Еще один провал имеется возле 3,3 а.е., но он не настолько очевиден, потому что это уже окраина астероидного пояса и тел там значительно меньше. Эти провалы получили название люков или щелей Кирквуда.

Люки Кирквуда не видны на предыдущем рисунке по двум причинам. Во-первых, точки, изображающие астероиды, намного больше реального размера астероидов в масштабе рисунка, а во-вторых, «щели» наблюдаются на расстояниях, а не в конкретных местах. Каждый астероид движется по эллиптической орбите, и расстояние от него до Солнца постоянно меняется. Так что астероиды проходят через щели; они просто не остаются в них надолго. Большие оси орбитальных эллипсов ориентированы очень по-разному. Эти эффекты делают прорехи (щели) в поясе астероидов настолько размытыми, что увидеть их на рисунке невозможно. Однако постройте гистограмму для расстояний — и они тут же проявятся.

## Распределение тел в Главном поясе астероидов (люки Кирквуда)



### Люки Кирквуда в поясе астероидов

#### и связанные с ними резонансы с Юпитером

Кирквуд правильно предположил, что замеченные им щели созданы мощным гравитационным полем Юпитера. Оно оказывает влияние на каждый астероид пояса, но между резонансными и нерезонансными орбитами существует значительная разница. Очень глубокий провал слева на графике соответствует орбитальному расстоянию, на котором астероид находится с Юпитером в резонансе 3:1, то есть совершает три оборота вокруг Солнца на один оборот Юпитера. Периодическое повторение одних и тех же взаимных позиций усиливает долговременные эффекты тяготения Юпитера.

В данном случае резонансы расчищают соответствующие области пояса. Орбиты астероидов, находящихся в резонансе с Юпитером, становятся более вытянутыми и хаотичными до такой степени, что начинают пересекать орбиты внутренних планет, в первую очередь Марса. Происходящие иногда сближения с Марсом еще сильнее изменяют их орбиты, выбрасывая такие астероиды в случайных направлениях. По мере того как этот эффект заставляет уходить все больше астероидов из зоны возле резонансной орбиты, там и возникает люк.

Основные люки (в скобках указаны соответствующие резонансы) располагаются на расстояниях 2,06 а.е. (4:1); 2,50 а.е. (3:1); 2,82 а.е. (5:2); 2,95 а.е. (7:3) и 3,27 а.е. (2:1). Существуют более слабые, или узкие, щели на расстояниях 1,90 а.е. (9:2); 2,25 а.е. (7:2); 2,33 а.е. (10:3); 2,71 а.е. (8:3); 3,03 а.е. (9:4); 3,08 а.е. (11:5); 3,47 а.е. (11:6) и 3,7 а.е. (5:3). Таким образом, именно резонансы управляют распределением больших полуосей орбит астероидов.

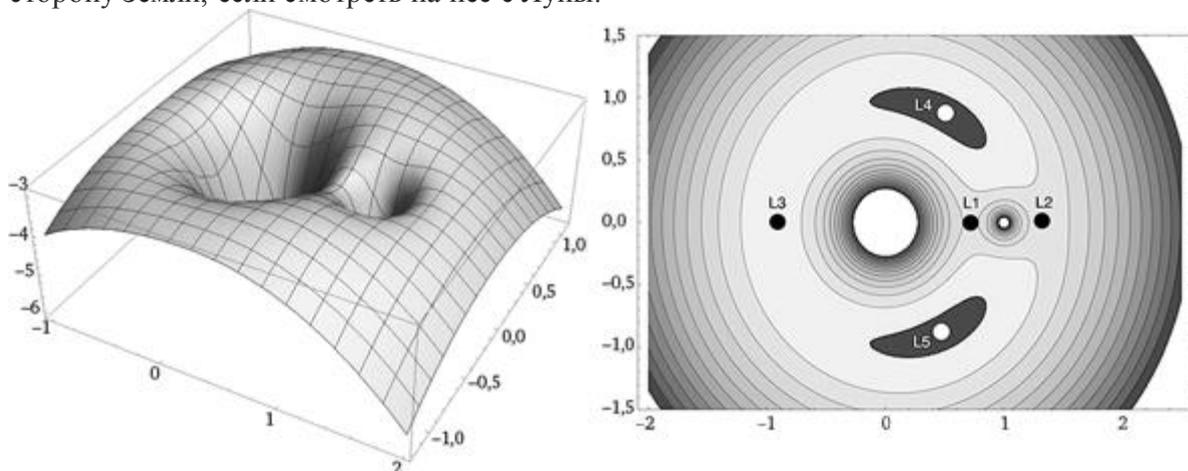
Помимо люков, в поясе астероидов имеются уплотнения, известные как группы или кластеры. Опять же, речь, как правило, идет о скоплениях астероидов вблизи некоторого орбитального расстояния, а не об их реальных группах в каких-то конкретных местах. Однако далее мы рассмотрим два настоящих кластера — это ахейцы (греки) и троянцы. Иногда резонансы приводят к образованию не щелей, а скоплений, и зависит это от тех чисел, которыми выражается резонанс, и некоторых других факторов.

\*\*\*

Несмотря на то что в общем случае задача трех тел — описать, как движутся три точечные массы под действием гравитации Ньютона, — чрезвычайно тяжело решается математически, кое-какие полезные результаты можно получить, сосредоточившись на особых случаях. Важнейший среди них — это задача «двух с половиной тел», математическая шутка с серьезным смыслом. В этой задаче два тела обладают ненулевыми массами, а третье настолько мало, что его массой можно попросту пренебречь. Примером такой задачи может служить пылинка в поле тяготения Земли и Луны. Основная идея модели заключается в том, что пылинка реагирует на гравитационное воздействие Земли и Луны, но сама она настолько легка, что, по существу, никак не влияет ни на одно, ни на второе тело. Закон всемирного тяготения Ньютона говорит нам, что пылинка все же оказывает влияние, хоть и очень слабое, но влияние это так мало, что при моделировании его можно просто проигнорировать. На практике такой подход работает и с более крупным телом, таким как космический аппарат, небольшая луна или астероид, если промежуток времени, о котором идет речь, достаточно мал, чтобы исключить существенные хаотические эффекты.

В этой модели возможно еще одно упрощение: можно считать, что два крупных тела движутся по круговым орбитам. Это позволяет нам перевести всю задачу во вращающуюся систему отсчета, по отношению к которой большие тела неподвижны и лежат на фиксированной плоскости. Представьте себе большую поворотную площадку. Теперь закрепим Землю и Луну на площадке таким образом, чтобы соединяющая их прямая проходила через центральный шарнир, а сами они располагались от него по разные стороны. Масса Земли примерно в 80 раз превышает массу Луны; если мы поместим Луну в 80 раз дальше от шарнира, чем Землю, то общий центр масс этих двух тел как раз совпадет с шарниром. Далее, если вращать площадку вместе с закрепленными на ней Землей и Луной с правильной скоростью, то планеты будут двигаться по круговым орбитам в полном соответствии с законом всемирного тяготения. При этом в системе координат, связанной с поворотной площадкой, оба тела останутся неподвижны, но будут испытывать на себе эффект вращения в виде «центробежной силы». Это не настоящая физическая сила: она возникает потому, что тела приклеены к площадке и не могут двигаться по прямой. Однако центробежная сила точно так же влияет на динамику тел во вращающейся системе координат, как это делала бы настоящая сила. Ее часто называют «фиктивной силой», несмотря на то, что действие она оказывает самое настоящее.

В 1765 году Эйлер доказал, что в такой модели можно добиться, чтобы все три тела двигались по круговым орбитам в соответствии с законом всемирного тяготения, приклеив пылинку на той же самой прямой, что и два других тела. В этой точке гравитационные силы со стороны Земли и Луны в точности компенсируются центробежной силой, которую испытывает пылинка. Мало того, Эйлер нашел три такие точки. Одна из них (в настоящее время мы называем ее  $L_1$ ) лежит между Землей и Луной.  $L_2$  располагается за Луной, если смотреть на нее с Земли;  $L_3$  лежит по ту сторону Земли, если смотреть на нее с Луны.



Гравитационный ландшафт в задаче двух с половиной тел во вращающейся системе отсчета. Слева: поверхность. Справа: линии равной энергии

В обозначениях этих точек используется буква L, а не E, как можно было ожидать, потому что в 1772 году Лагранж нашел еще две возможные локации для пылинки. Они лежат не на линии Земля — Луна, а в вершинах двух равносторонних треугольников, двумя другими углами которых являются Земля и Луна. В этих точках пылинка остается неподвижной относительно Земли и Луны. Точка Лагранжа L4 располагается на 60° впереди Луны, а L5 — на 60° позади. Лагранж доказал, что для любых двух тел существует ровно пять таких точек.

Радиусы орбит, соответствующих точкам L4 и L5, в общем случае отличаются от радиусов орбит двух других тел. Однако если одно из этих тел много массивнее другого (к примеру, если это Солнце, а другое тело — планета), то общий центр масс и более массивное тело почти совпадают. В этом случае орбиты, соответствующие L4 и L5, почти совпадают с орбитой менее массивного тела.

Геометрию точек Лагранжа можно вывести из выражений для энергии пылинки. Энергия эта состоит из кинетической (пылинка вращается вместе с поворотной площадкой) и потенциальной (связанной с гравитационным притяжением Земли и Луны) составляющих. На рисунке полная энергия пылинки показана двумя способами: в виде изогнутой поверхности, высота которой представляет полную энергию, и в виде системы горизонталей — кривых, во всех точках которых энергия постоянна. Поверхность можно рассматривать как некий гравитационный ландшафт. Пылинка может двигаться по этому ландшафту, но до тех пор, пока на нее не подействует какая-нибудь дополнительная сила, закон сохранения энергии требует, чтобы она оставалась на одной горизонтали. В общем, она может двигаться вбок по склону холма, но не вниз и не вверх.

Если «линия» горизонталей представляет собой одну-единственную точку, пылинка будет находиться в равновесии — она останется в той точке поворотной площадки, куда вы ее поместите. Существует пять таких точек, на рисунке с горизонталями они обозначены как L1 — L5. В точках L1, L2 и L3 энергетическая поверхность имеет форму седла: в одних направлениях она уходит вниз, в других — вверх. Точки L4 и L5, напротив, располагаются на вершинах энергетического ландшафта. Важная разница между одними и другими точками состоит в том, что вершины (и локальные впадины, которых здесь нет) окружены небольшими замкнутыми горизонталями, очень близкими к собственно верхушке пика. В седловинах не так: горизонталей вблизи любой точки уходят прочь, и хотя, возможно, когда-нибудь где-нибудь замыкаются, но делают это не сразу и далеко не рядом.

Если пылинку чуть сдвинуть с точки Лагранжа, она окажется на одной из ближайших к ней горизонталей и будет по ней двигаться. В случае седловидной поверхности любая такая горизонталь уведет объект далеко от первоначальной позиции. К примеру, если пылинка, находясь в точке L2, чуть сдвинется вправо, она попадет на громадную замкнутую горизонталь, которая уведет ее далеко-далеко, вокруг Земли, за точку L3 на дальней стороне планеты. Поэтому можно сказать, что равновесие в точке на седловидной поверхности может быть только неустойчивым: первоначальное небольшое возмущение затем многократно увеличивается. На вершинах и во впадинах равновесие устойчиво: ближайшие к ним горизонталей замкнуты и целиком располагаются вблизи точки равновесия. Небольшое первоначальное возмущение небольшим и останется. Тем не менее сдвинутая пылинка уже не находится в равновесии: ее реальное движение складывается из небольших колебаний по замкнутому контуру и общего вращения поворотной площадки. Подобные орбиты называют орбитами-головастиками. Главное, что о них можно сказать, это то, что пылинка остается вблизи пика.

(Я здесь немного схитрил, поскольку на рисунке показаны положения объектов, но не их скорости. Отклонения по скорости усложняют реальную орбиту, но вывод об устойчивости равновесия остается верным. См. главу 9.)

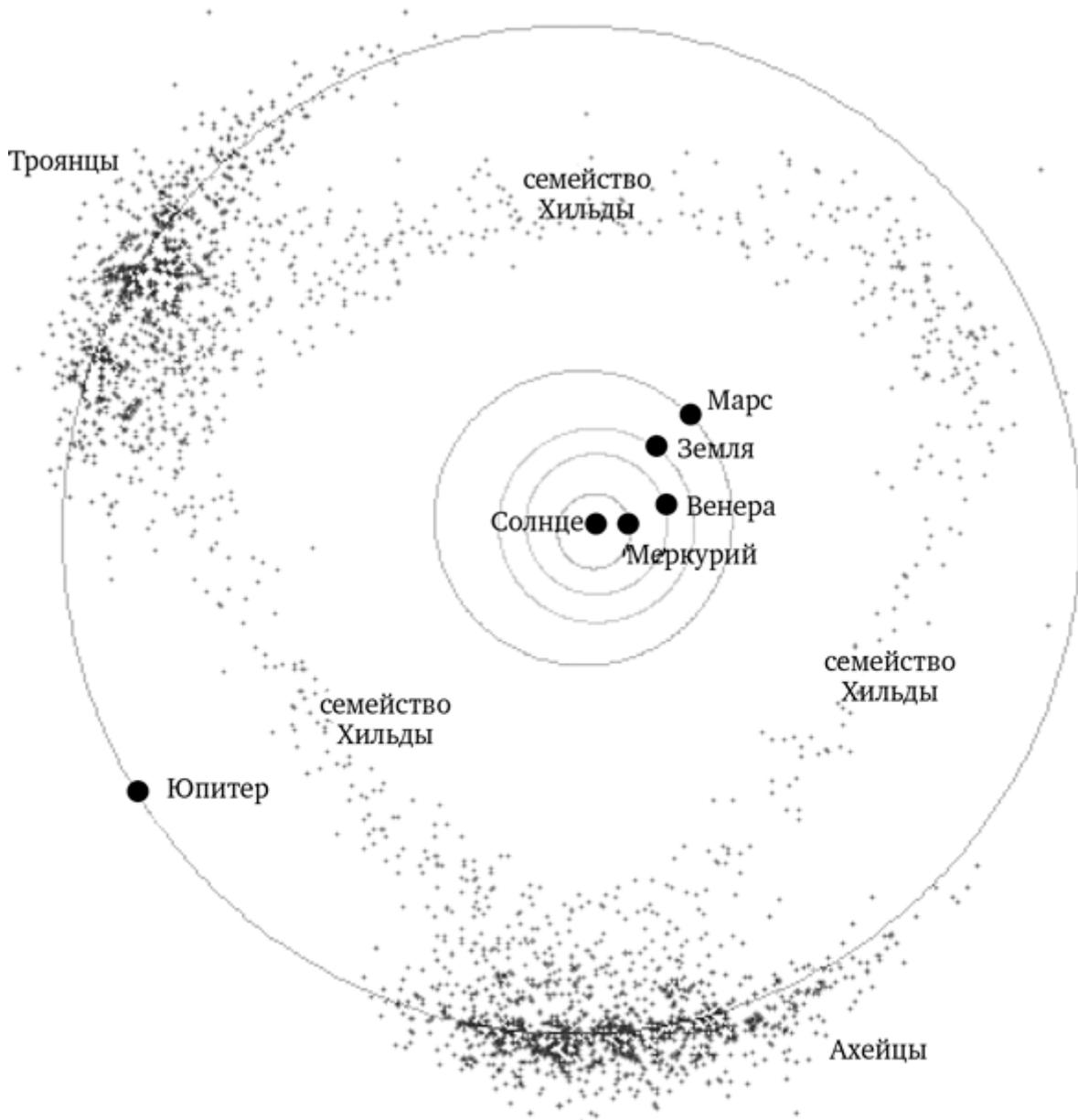
Точки Лагранжа — это те особенности гравитационного ландшафта, которые можно с выгодой использовать при планировании космических полетов. В 1980-е годы наблюдался всплеск интереса к космическим колониям — гигантским искусственным обиталищам, где люди могли бы жить и, пользуясь солнечным светом как источником энергии, выращивать для себя пищу. В частности, они могли бы жить на внутренней стороне пустотелого цилиндра, если бы тот вращался вокруг своей оси, создавая тем самым искусственную гравитацию при помощи центробежной силы. Точка Лагранжа — привлекательное место для строительства такого

космического дома, поскольку здесь любое тело пребывает в равновесии. Даже в седловине, в одной из точек неустойчивого равновесия —  $L_1$ ,  $L_2$  или  $L_3$ , — достаточно будет небольших импульсов от включаемых изредка ракетных двигателей, чтобы удержать сооружение на месте и не дать ему уйти. Пиковые точки —  $L_4$  и  $L_5$  — подходят еще лучше; там не нужна вообще никакая коррекция.

\*\*\*

Природа тоже знает о существовании точек Лагранжа, в том смысле, что существуют вполне реальные конфигурации, достаточно близкие к тем, что рассматривали теоретически Эйлер и Лагранж, так что их результаты должны работать. При этом в реальных примерах нередко нарушаются некоторые технические требования модели; к примеру, пылинке не обязательно находиться в одной плоскости с двумя остальными телами. Основные свойства точек Лагранжа относительно устойчивы и действуют для всего хотя бы отдаленно похожего на идеализированную модель.

Самый зрелищный пример — Юпитер, у которого имеются собственные «космические колонии»; речь идет об астероидах, известных под условными названиями троянцев и ахейцев. Рисунок сделан в конкретный момент времени во вращающейся системе координат, которая поворачивается вместе с движущимся по орбите Юпитером. Первый астероид группы троянцев — 588 Ахилл — обнаружил в 1906 году Макс Вольф. По состоянию на 2014 год было известно 3898 ахейцев и 2049 троянцев. Считается, что всего существует около миллиона троянцев и ахейцев более километра в поперечнике. Названия эти астероиды получают традиционные: Иоганн Пализа, вычисливший орбитальные элементы для множества астероидов, предложил называть эти тела в честь участников Троянской войны. Почти все ахейцы располагаются возле точки  $L_4$ , а большинство троянцев — возле точки  $L_5$ . Однако по какому-то капризу истории грек Патрокл оказался среди троянцев, а троянец Гектор со всех сторон окружен ахейцами. Хотя на картинке эти тела образуют относительно небольшие кластеры, астрономы считают, что по количеству их примерно столько же, сколько обычных астероидов.



Астероиды-троянцы и астероиды-ахейцы образуют тесные группы. Семейство Хильды образует размытый равносторонний треугольник, два угла которого приходятся на точки  $L_4$  и  $L_5$

Ахейцы движутся приблизительно по той же орбите, что и Юпитер, но на  $60^\circ$  опережая его; троянцы, напротив, на  $60^\circ$  отстают. Как объяснялось в предыдущем разделе, их орбиты не идентичны орбите Юпитера, хотя и близки к ней. Более того, аппроксимация их круговыми орбитами на той же плоскости нереалистична — орбиты многих таких астероидов наклонены к эклиптике под различными углами, вплоть до  $40^\circ$ . Кластеры сохраняют единство потому, что точки  $L_4$  и  $L_5$  в модели системы «двух с половиной» тел являются точками устойчивого равновесия, а большая масса Юпитера делает их достаточно стабильными в динамике реальной системы множества тел, поскольку возмущения со стороны внешних тел — преимущественно Сатурна — относительно малы. Однако в долговременной перспективе как один, так и другой кластер могут терять или приобретать отдельные астероиды.

По сходным причинам можно ожидать присутствия собственных троянцев (для общности терминологии юпитерианские ахейцы тоже считаются почетными троянцами) и у других планет. Так, у Венеры имеется временный троянец — 2013 ND15. У Земли есть более постоянный 2010 ТК7 в ее точке  $L_4$ . Марс может похвастать пятью троянцами, Уран — одним, а у Нептуна их по крайней мере 12, но, вероятно, их существует больше, чем у Юпитера, возможно, даже в 10 раз.

А как дела у Сатурна? Троянских астероидов у него не найдено, зато имеется две пары троянских спутников — единственных в своем роде. Спутник Сатурна Тетис (Тетия) имеет два собственных троянских спутника, Телесто и Калипсо. Еще два троянских спутника — Елена и Полидевк — есть и у другой луны Сатурна — Дионы.

Юпитерианские троянцы тесно связаны еще с одной интереснейшей группой астероидов — семейством Хильды. Эти объекты состоят в резонансе 3:2 с Юпитером, а во вращающейся системе отсчета располагаются в области, по форме примерно напоминающей равносторонний треугольник с вершинами в L4, L5 и в той точке орбиты Юпитера, что диаметрально противоположна самой планете. Астероиды семейства Хильды медленно «циркулируют» по орбите относительно троянцев и Юпитера. В отличие от большинства астероидов, эти тела имеют вытянутые орбиты. Фред Франклин предполагает, что их нынешние орбиты дополнительно свидетельствуют о том, что первоначально Юпитерсформировался примерно на 10% дальше от Солнца и лишь позже мигрировал ближе к центральному телу. Астероиды с круговыми орбитами на этом расстоянии либо были бы вычищены оттуда при движении Юпитера к Солнцу, либо изменили бы свои орбиты на более вытянутые.



## Планета, поглотившая своих детей

Звезда Сатурн не одиночная, но составлена из трех, которые почти касаются друг друга, никогда не меняются и не сдвигаются по отношению друг к другу и выстроены в ряд вдоль зодиака, причем средняя из них втрое крупнее боковых, и располагаются они так: oOo.

Галилео Галилей. Письмо Козимо Медичи, 30 июля 1610 года

Когда Галилей впервые направил свой телескоп на Сатурн и зарисовал увиденное, получилось примерно следующее:

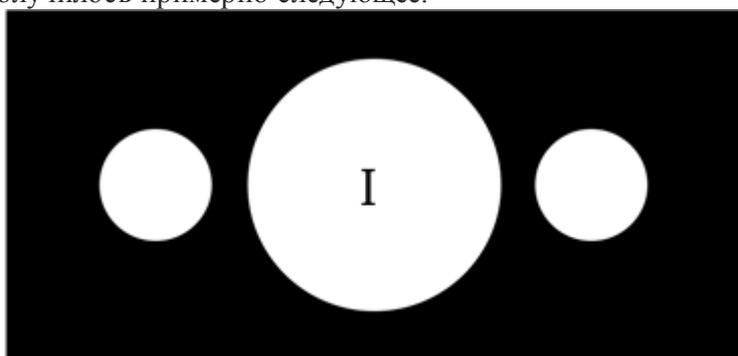


Рисунок Сатурна, сделанный Галилеем в 1610 году

По рисунку ясно видно, почему Галилей в радостном письме к своему покровителю Козимо де Медичи описал увиденное как oOo. Он послал новость о своем открытии Кеплеру, но, как часто бывало в те времена, записал ее в форме анаграммы: smaismrmilmeroetaalumibunenugttauriras. Если бы кто-нибудь позже совершил то же открытие, то Галилей смог бы отстоять свой приоритет, расшифровав эту запись как фразу на латыни «Altissimum planetam tergeminum observavi» — «Высочайшую планету тройною наблюдал».

К несчастью, Кеплер умудрился расшифровать послание Галилея иначе: «Salve umbistineum geminatum Martia proles», то есть «Привет вам, близнецы, Марса порождение». Это означало, что у Марса имеется две луны. Кеплер ранее предсказал это на основании того, что у Юпитера

четыре луны, а у Земли — одна, так что между ними должны быть две луны, поскольку числа 1, 2, 4 образуют геометрическую прогрессию. Из этого следовало также, что у Сатурна, по всей видимости, должно быть восемь спутников. И пол-луны у Венеры? Иногда способность Кеплера всюду находить закономерности выглядела несколько натужно и давала странные результаты. Но мне, пожалуй, не следовало бы пренебрежительно отзываться об этом предсказании — ведь у Марса, как ни странно, действительно две луны, Фобос и Деймос.

В 1616 году, вновь взглянув на Сатурн вооруженным глазом, Галилей понял, что прежний рудиментарный телескоп обманул его, показав размытое невнятное изображение, которое он интерпретировал как тройной диск. Но и более качественный инструмент не сделал изображение менее загадочным. Галилей написал, что Сатурн, кажется, имеет... уши.

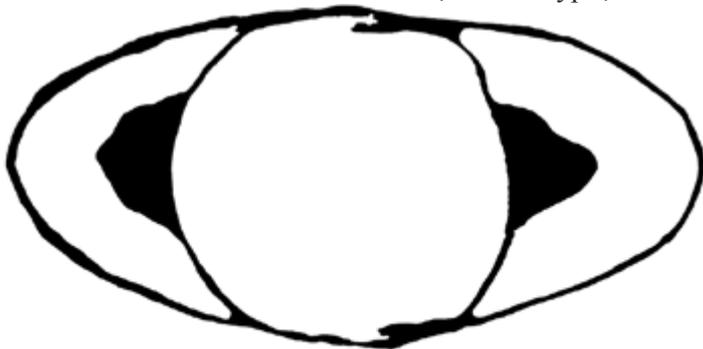


Рисунок Сатурна, сделанный Галилеем в 1616 году

Еще через несколько лет, взглянув на Сатурн еще раз, он увидел, что уши, или луны, или еще что-то, чем бы это ни было, — пропали! Наполовину в шутку Галилей поинтересовался, не съел ли Сатурн своих детей. Это была неявная отсылка к довольно мрачному греческому мифу, в котором титан Кронос, опасавшийся, что кто-то из его детей когда-нибудь свергнет его, съедал их всех сразу после появления на свет. Римским эквивалентом Кроноса как раз и был Сатурн.

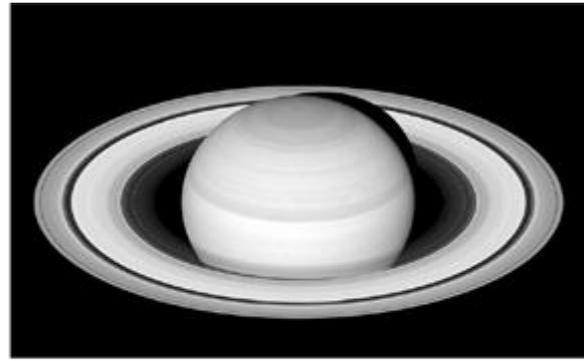
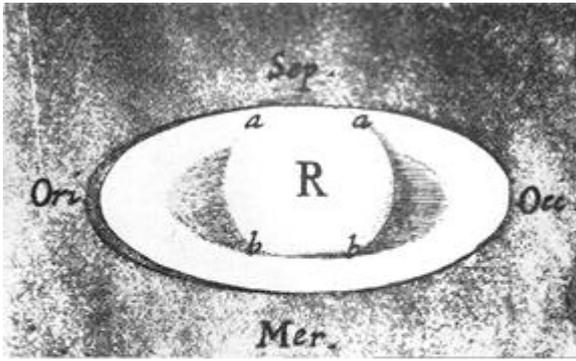
Когда уши появились вновь, Галилей удивился еще сильнее.

Конечно, сегодня мы знаем, что в реальности стояло за наблюдениями Галилея. Сатурн окружен гигантской системой круглых колец. Кольца эти наклонены к эклиптике, так что на некоторых этапах движения Сатурна вокруг Солнца мы видим их фронтально, и тогда кольца кажутся больше планеты, как на рисунке с «ушами». В другие моменты мы видим кольца с ребра и они вообще исчезают — если, конечно, не взять телескоп намного лучше, чем был у Галилея.

Одного этого факта достаточно, чтобы понять: кольца очень тонки по сравнению с планетой, но сегодня мы знаем, что они не просто тонки, а очень-очень тонки; их толщина составляет всего 20 метров[37]. А вот диаметр колец составляет 360 000 километров. Если бы кольца Сатурна по толщине соответствовали пицце, то размером она была бы со Швейцарией. Галилей ничего об этом не знал, но при этом прекрасно понимал, что Сатурн — планета странная, загадочная и совершенно не похожая на остальные планеты.

\*\*\*

У Христиана Гюйгенса телескоп был получше, и в 1655 году он написал, что Сатурн «окружен тонким плоским кольцом, нигде к нему не примыкающим и наклоненным к эклиптике». Гук сумел рассмотреть даже тени — как от тела планеты на кольце, так и от кольца на теле планеты; тени помогли ему прояснить вопрос с трехмерной геометрией системы, поскольку показали, какая часть находится впереди, а какая позади.



Слева: рисунок Сатурна, сделанный Гуком в 1666 году; отмечены тени.

Справа: на современном изображении хорошо видно деление

Кассини — заметная темная щель в кольцах

Являются ли кольца Сатурна твердыми, как поля шляпы, или состоят из мириадов крохотных камешков или льдинок? Если они твердые, то из какого материала сделаны? Если нет, то почему кольца кажутся жесткими, а их форма не меняется?

Ответы на эти и другие вопросы приходили постепенно и были результатом как наблюдений, так и математических расчетов.

Первые наблюдатели видели единственное широкое кольцо. Однако в 1675 году Джованни Кассини сумел провести более качественные наблюдения, выявившие несколько кольцевых щелей, разделяющих кольцо в целом на серию более узких концентрических колец. Самая заметная «прореха» известна теперь как деление, или щель, Кассини. Внутреннее по отношению к ней кольцо называется кольцом В, внешнее — кольцом А. Кассини знал также о более слабом кольце С, располагающемся внутри кольца В. Эти открытия усугубили загадочность объекта, но они же проложили путь к будущему решению этой загадки.

Лаплас в 1787 году указал, что у широкого твердого кольца непременно возникла бы серьезная динамическая проблема. Третий закон Кеплера гласит, что, чем дальше располагается тело от центра планеты, тем медленнее оно обращается вокруг нее. Но внутренний и внешний края твердого кольца вращаются с одинаковой угловой скоростью. Значит, либо внешний край кольца вращается слишком быстро, либо внутренний — слишком медленно, либо то и другое одновременно. Такое несоответствие порождает напряжения в материале кольца, и оно непременно развалится на части под их действием, если только не состоит из необычайно прочного вещества. Лаплас предложил элегантное решение этой проблемы: он предположил, что кольца составлены из большого количества очень узких колечек, вложенных одно в другое. Каждое колечко твердое, но скорости вращения у них снижаются по мере увеличения радиуса. Это позволяло аккуратно обойти проблему внутренних напряжений в материале, поскольку внутренний и внешний края узкого кольца должны вращаться почти с одинаковой скоростью.

Решение элегантное, но ошибочное. В 1859 году специалист по математической физике Джеймс Клерк Максвелл доказал, что вращающееся твердое колечко нестабильно. Лаплас своей гипотезой решил проблему краев, вращающихся с разными скоростями; соответствующие напряжения описывались как силы сдвига, подобные тем, которые возникают между картами в колоде, когда вы, не разбирая, сдвигаете ее часть. Но в игру могли вступить и другие напряжения — к примеру, аналогичные сгибанию колоды карт. Максвелл доказал, что у твердого колечка любые, даже крохотные, возмущения вызванные внешними причинами, разрастаются, заставляя кольцо изгибаться и идти рябью, и что кольцо при этом ломается, как сухая макаронина ломается при любой попытке ее согнуть.

Максвелл сделал вывод, что кольца Сатурна должны состоять из бесчисленных крохотных объектов, каждый из которых независимо от остальных движется по окружности с той скоростью, которая математически соответствует действующей на него силе притяжения. (Не так давно выявились некоторые проблемы, связанные с подобной упрощенной моделью: см. главу 18. Как это скажется на моделях строения колец, пока неясно. Я отложу пока дальнейшее обсуждение этого вопроса и изложу традиционную точку зрения.)

Поскольку все в космосе движется кругами, общая схема обладает вращательной симметрией — и, соответственно, скорость частицы зависит только от расстояния до центра. Если считать массу вещества в кольце пренебрежимо малой по сравнению с массой Сатурна (а сегодня точно известно, что это соответствует действительности), то третий закон Кеплера приводит нас к простой формуле. Скорость частицы кольца в километрах в секунду составляет 29,4, деленные на корень квадратный из ее орбитального радиуса, выраженного в радиусах Сатурна.

В качестве альтернативного варианта кольца могли бы быть жидкими. Но в 1874 году Софья Ковалевская — одна из величайших женщин-математиков — показала, что жидкое кольцо тоже было бы нестабильным.

К 1895 году к математическим рассуждениям добавился вердикт астрономов-наблюдателей, который гласил: кольца Сатурна составлены из громадного количества небольших объектов. Дальнейшие наблюдения позволили различить в составе колец несколько новых, еще более слабых подколец, которые астрономы с большой изобретательностью назвали D, E, F и G. И поскольку называли их в порядке обнаружения, то в пространстве они располагаются, если считать от планеты наружу, в порядке DCBAFGE. Не настолько запутанно, как в анаграмме Галилея, но уже близко.

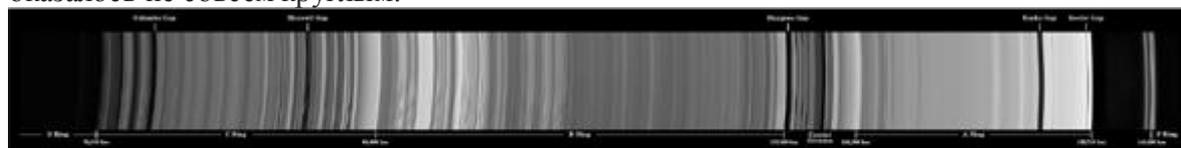
\*\*\*

Ни одна военная диспозиция не сохраняется при столкновении с противником. Ни одна астрономическая теория не выдерживает столкновения с более качественными наблюдениями.

В 1977 году NASA отправило два космических зонда Voyager 1 и Voyager 2 в Большой тур к планетам. Планеты Солнечной системы тогда удачно выстроились в линию, так что можно было заглянуть к внешним планетам по очереди. Voyager 1 побывал у Юпитера и Сатурна; Voyager 2 пролетел также мимо Урана и Нептуна. После этого «Вояджеры» продолжили полет, направляясь прочь из системы, в межзвездное пространство, определяемое как область за гелиопаузой, где стихает солнечный ветер. Термин «межзвездное» здесь означает, что Солнце больше не оказывает сколько-нибудь существенного влияния, за исключением довольно слабого гравитационного притяжения. Voyager 1 добрался до этой переходной зоны в 2012 году, а Voyager 2, как ожидается, сделает это в 2016 году<sup>[38]</sup>. Оба аппарата продолжают слать на Землю научные данные. Безусловно, это самые успешные космические экспедиции в истории.

В конце 1980 года представления человечества о Сатурне изменились навсегда — за шесть недель до максимального сближения с планетой Voyager 1 начал присылать фотографии ее колец. Снимки невиданной до той поры подробности позволили разглядеть сотни, если не тысячи, отдельных колец, расположенных очень близко друг к другу, как бороздки на старой грампластинке. Само по себе это было не особенно удивительно (в точности такими кольца представлял себе Лаплас!), но на снимках обнаружились и другие черты, неожиданные и поначалу поставившие ученых в тупик. Многие теоретики ожидали, что основные детали системы колец будут состоять в резонансе с самыми внутренними (известными) спутниками планеты, но оказалось, что в среднем никаких резонансов нет. Деление Кассини также оказалось не пустым; внутри его имеется по крайней мере четыре тонких кольца.

Ричард Террайл — один из ученых, работавших с полученными изображениями, — заметил кое-что совершенно неожиданное: темные тени, похожие на размытые спицы колеса, которые к тому же вращались. Никто до него не видел в кольцах ничего, что нарушало бы кольцевую симметрию. А тщательный анализ радиусов колец выявил еще одну загадку: одно из колец оказалось не совсем круглым.



Изображения (слева направо) колец Сатурна D, C, B, A и F, снятые в 2007 году зондом Кассини

Voyager 2, запущенный раньше Voyager 1, но двигавшийся медленнее, чтобы получить возможность проследовать дальше, к Урану и Нептуну, подтвердил эти находки, когда прошел

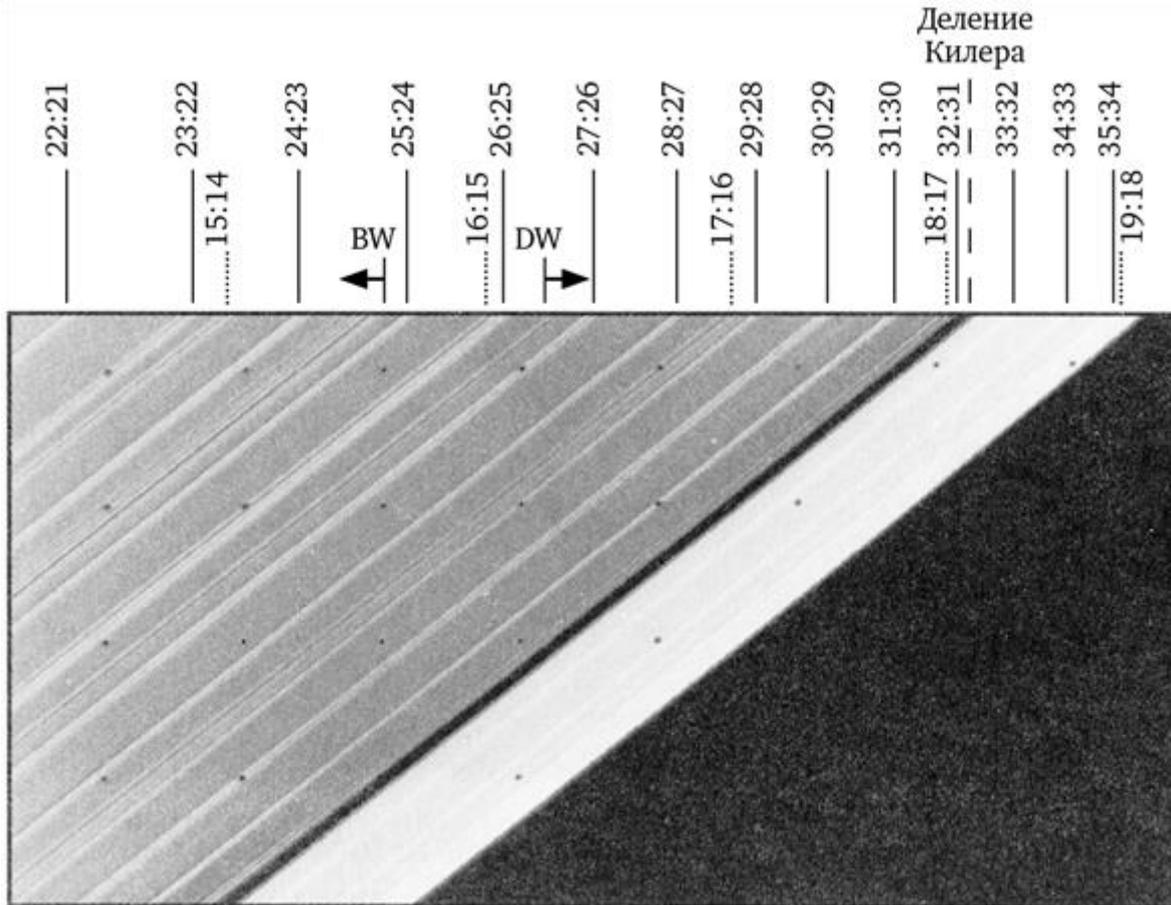
мимо Сатурна девять месяцев спустя. Но с притоком новой информации появились и новые загадки. Некоторые кольца выглядели так, будто заплетены в косичку; у некоторых были видны странные петли; нашлись также неполные кольца, которые состояли из нескольких дуг, разделенных промежутками. Кроме того, внутри колец были замечены неизвестные ранее спутники Сатурна. До пролетов «вояджеров» земные астрономы знали девять лун Сатурна [39], но вскоре после пролетов их число выросло до тридцати с лишним. Сегодня их насчитывается 62 плюс сотня или даже больше крохотных спутничков, обитающих в кольцах. Из всего этого множества 53 спутника на сегодняшний день имеют официальные названия. Зонд Cassini, находящийся на орбите вокруг Сатурна, обеспечивает земным астрономам непрерывный приток данных о планете, ее кольцах и лунах [40].

Некоторые особенности колец Сатурна объясняются присутствием поблизости его лун. Основное гравитационное воздействие на частицы колец оказывает сам Сатурн. Далее по степени значительности воздействия идет тяготение разных его лун, в особенности ближайших. Так что хотя особенности колец, кажется, не связаны с резонансами с основными спутниками планеты, можно ожидать, что они окажутся связаны с менее крупными, зато более близкими спутниками. Это математическое предсказание очень наглядно подтвердилось тонкой структурой внешней области кольца А. Буквально каждая особенность здесь наблюдается на расстоянии, соответствующем какому-нибудь резонансу с лунами Пандорой и Прометеем, лежащими по разные стороны от близлежащего кольца F, — к этой взаимосвязи мы еще вернемся. В интересующих нас резонансах обычно фигурируют, по математическим соображениям, два соседних целых числа — к примеру, 28:27.

На диаграмме показана внешняя граница кольца А, а наклонные белые линии — это области, где плотность частиц больше средней. Вертикальные линии указывают соответствующие этим линиям резонансы: пунктирные линии отмечают резонансы с Пандорой, сплошные — с Прометеем. По существу, мы видим, что все заметные линии соответствуют резонансным орбитам. Также на рисунке показано расположение спиральной волны изгиба (BW) и спиральной волны плотности (DW), соответствующих резонансу 8:5 еще с одной луной Сатурна — Миной.

\*\*\*

Кольцо F очень узкое, и это ставит астрономов в тупик, поскольку узкие кольца, если они не подвержены внешним влияниям, нестабильны и должны, по идее, медленно расширяться. Ученые пытались это объяснить с привлечением Пандоры и Прометея, но некоторые черты по-прежнему остаются непонятными.



Внешняя часть кольца А; показаны особенности, связанные с резонансами с Пандорой (пунктирные линии) и Прометеем (сплошные линии). Решетка из точек наложена в процессе построения изображения.

Эта проблема впервые проявилась в связи с другой планетой, Ураном. Долгое время Сатурн был единственной планетой Солнечной системы (или любой другой, вообще говоря), у которой была известна система колец. Но в 1977 году Джеймс Эллиот, Эдвард Данхэм и Джессика Минк проводили наблюдения на воздушной Обсерватории имени Койпера — транспортном самолете, оборудованном телескопом и другой наблюдательной аппаратурой. Их целью было узнать побольше об атмосфере Урана.

Когда планета движется по орбите, она иногда проходит перед какой-нибудь звездой, заслоняя собой часть ее света[41]; такое событие называется покрытием звезды. Измеряя видимый поток света от звезды, когда она постепенно тускнеет, а затем вновь обретает яркость, астрономы получают информацию об атмосфере планеты. Для этого анализируются кривые блеска звезды, описывающие, как изменяется количество излучаемого ею света разных длин волн. В 1977 году было предсказано покрытие звезды SAO 158687 Ураном; именно это событие Эллиот, Данхэм и Минк планировали наблюдать.

Данная методика наблюдений дает информацию не только об атмосфере планеты, но и о любых объектах, находящихся на ее орбите, если им случится тоже затенить звезду. Полученная исследователями кривая блеска показала серию из пяти крохотных провалов еще до основного события, в ходе которого блеск звезды сильно снизился, и соответствующую серию провалов после того, как Уран прошел по звезде. Одно такое снижение блеска может быть вызвано просто крохотным спутником планеты, но для этого спутник должен оказаться точно в нужном месте в нужное время — причем дважды. Кольцо же в любом случае пройдет по звезде, и никаких случайных совпадений не потребуется, чтобы это событие отразилось на кривой блеска. Так что наиболее разумным объяснением полученных данных было такое: у Урана имеется пять очень тонких и тусклых колец.

Сблизившись с Ураном, «Вояджеры» подтвердили эту теорию, непосредственно зафиксировав наличие у планеты колец. (На сегодня их известно 13.) Они обнаружили также, что ширина этих колец не превышает 10 километров. Такая ширина представляется чрезвычайно малой, поскольку, как уже говорилось, узкое кольцо должно быть нестабильным и медленно расширяться с течением времени. Разобравшись в механизмах, заставляющих узкое кольцо расширяться, мы можем оценить вероятное время жизни узкого кольца. Оказывается, кольца Урана не должны продержаться в таком виде более 2500 лет. Возможно, эти кольца сформировались менее 2500 лет назад, но одновременное или очень близкое по времени образование сразу девяти колец представляется маловероятным. Альтернативная гипотеза состоит в том, что какой-то другой фактор стабилизирует кольца и не позволяет им расширяться. В 1979 году Петер Голдрайх и Скотт Тремейн предложили замечательный механизм получения именно такого эффекта: это спутники-пастухи.

Представьте себе, что узкое кольцо, о котором идет речь, располагается (случайно) слегка внутри орбиты небольшого спутника. По третьему закону Кеплера этот спутник обращается вокруг планеты чуть медленнее, чем внешний край кольца. Расчеты показывают, что это делает эллиптическую орбиту частицы кольца чуть менее вытянутой (более округлой), так что максимальное расстояние, на которое частица удаляется от планеты, чуть уменьшается. Выглядит это так, будто спутник отталкивает кольцо, но на самом деле такой эффект дает действие гравитационных сил, замедляющих частицы кольца.

Все это очень хорошо, но такой спутник дезорганизует и остальную часть кольца, в особенности его внутренний край. Решение: добавить еще одну луну, на этот раз непосредственно внутри кольца. Она будет аналогичным образом влиять на его внутреннюю кромку, но теперь луна движется чуть быстрее кольца и потому стремится разогнать его частицы до более высокой скорости. Разогнавшись, они отодвигаются от планеты — а выглядит это опять же так, будто луна отталкивает от себя кольцо.

Если же узкое кольцо зажато между двумя небольшими лунами, эти эффекты суммируются, и кольцо как бы зажимается между орбитами спутников. Это компенсирует любые другие тенденции, которые в противном случае, вызвали бы его расширение. Такие луны называют спутниками-пастухами, потому что они сдерживают и направляют кольцо, как пастух направляет свою отару. Возможно, термин «спутники-овчарки» подошел бы лучше, но глагол «пасти» достаточно точно описывает то, чем занимаются эти луны. Более детальный анализ показывает, что на той части кольца, которая следует за внутренней луной и обгоняет внешнюю, появляется своеобразная рябь, которая вскоре затухает из-за столкновений между частицами кольца.

Когда Voyager 2 добрался до Урана, один из его снимков показал, что кольцо  $\epsilon$  Урана аккуратно вписано между орбитами двух его лун — Офелии и Корделии. (Кольца Урана обозначаются строчными греческими буквами, и  $\epsilon$  — это буква эпсилон.) Теория Голдрайха и Тремейна подтвердилась. Резонансы здесь тоже задействованы. Внешний край кольца  $\epsilon$  соответствует резонансу 14:13 с Офелией, а внутренний — резонансу 24:25 с Корделией.

Кольцо F Сатурна аналогичным образом расположено между орбитами Пандоры и Прометея; считается, что это второй пример спутников-пастухов. Однако в данном случае ситуация осложняется тем, что кольцо F удивительно динамично. На изображениях, полученных с Voyager 1 в ноябре 1980 года, на кольце F видны какие-то сгущения, петли и даже сегмент с перевитыми «пряжами», похожий на длинную косичку. А в августе 1981 года, когда мимо планеты проходил Voyager 2, почти ничего этого уже не было видно, наблюдалась только одна «косичка». В настоящее время считается, что остальные особенности исчезли между двумя сближениями, что подразумевает, что кольцо F способно изменить форму всего за несколько месяцев.

Предполагается, что эти преходящие динамические эффекты также вызываются действием Пандоры и Прометея. Волны, порожденные тесным сближением лун, не затухают полностью, и следы от них остаются до следующего прохода спутника. Это делает динамику кольца более сложной, и это означает также, что аккуратное объяснение, согласно которому узкое кольцо удерживают на месте спутники-пастухи, является слишком упрощенным. Более того, орбита Прометея хаотична из-за резонанса 121:118 с Пандорой, но только Прометей вносит свой вклад в сдерживание кольца F. Так что, хотя теория спутников-пастухов объясняет в какой-то степени узость кольца F, это далеко не конец истории.

Можно еще добавить, что внутренний и внешний края кольца F не соответствуют резонансам. Мало того, самые сильные резонансы около кольца F связаны с двумя совершенно другими лунами — Янусом и Эпиметием. У этих лун есть собственные странности в поведении: они соорбитальны. Буквально этот термин должен означать, что они «делят одну орбиту», и в каком-то смысле так и обстоит дело. Большую часть времени орбита одного из этих спутников на несколько километров больше, чем орбита другого. Внутренний спутник, поскольку он движется быстрее, столкнулся бы с внешним, если бы каждый из них оставался на своей эллиптической орбите. Однако они взаимодействуют между собой и меняются местами. Это происходит каждые четыре года. Вот почему я обозначил их как «внутренний» и «внешний», а который из них который, зависит от конкретного момента времени [42].

Подобные регулярные перестановки категорически не похожи на аккуратные эллипсы, которые рисовал Кеплер. Дело в том, что эллипсы — естественные орбиты в динамике системы двух тел. Когда на сцене появляется третье тело, орбиты меняют форму. В данном случае большую часть времени воздействие третьего тела достаточно невелико, чтобы его можно было игнорировать, так что каждая луна движется довольно точно по эллипсу, как если бы другой луны на той же орбите не было. Но когда луны сближаются, такая аппроксимация перестает отражать реальную картину. Спутники взаимодействуют и — в данном случае — меняются местами, так что каждый из них попадает на орбиту, где раньше находился второй. В определенном смысле истинная орбита каждого спутника может быть описана как два эллипса, сменяющие один другой, с короткой переходной траекторией между ними. Оба спутника обращаются по таким орбитам, основанным на одних и тех же двух эллипсах. А переход они совершают одновременно в противоположных направлениях.

\*\*\*

Кольца Сатурна известны со времен Галилея, несмотря на то, что сам он не знал в точности, что они собой представляют. Кольца Урана попали в поле зрения астрономов в 1979 году. Мы сегодня знаем, что Юпитер и Нептун также обладают очень тусклыми системами колец. И даже спутник Сатурна Рея, возможно, имеет собственную очень разреженную систему колец.

Более того, в 2009 году Дуглас Хэмилтон и Майкл Скрутски обнаружили, что у Сатурна есть поистине гигантское, но очень тусклое кольцо намного больше тех, что видели Галилей и «Вояджеры». Предшественники не заметили это кольцо отчасти потому, что видимым оно является только в инфракрасном свете. Его внутренний край отстоит примерно на шесть миллионов километров от планеты, а внешний удален от нее на 18 миллионов километров. В пределах кольца обращается спутник Сатурна Феба, и очень может быть, что именно этому спутнику кольцо обязано своим существованием. Это очень разреженное кольцо состоит из льда и пыли; не исключено, что оно может помочь исследователям разобраться в давней загадке — темной стороне Япета. Известно, что одна половина спутника Япет заметно ярче другой — этот факт ставил астрономов в тупик примерно с 1700 года, когда Кассини первым обратил на него внимание. Теперь кажется вероятным, что Япет собирает на себя темное вещество гигантского кольца.

В 2015 году Мэтью Кенворти и Эрик Мамаек объявили, что у далекой экзопланеты, обращающейся вокруг звезды J1407, имеется система колец, по сравнению с которой система Сатурна кажется бледной и совершенно незначительной, даже принимая во внимание обнаруженное недавно внешнее кольцо. Эти кольца, подобно кольцам Урана, открыты в результате анализа флуктуаций на кривой блеска (кстати говоря, это основной метод обнаружения экзопланет, см. главу 13). Когда планета проходит по диску звезды (транзит), свет звезды несколько тускнеет. В данном случае ослабление блеска звезды повторялось на протяжении двух месяцев, но каждое событие (затмение) было довольно коротким. Из этого был сделан вывод, что линию зрения от этой звезды к Земле, должно быть, пересекла какая-то экзопланета с многочисленными кольцами. В наилучшей модели получилась система из 37 колец, радиус которой составляет 0,6 а.е. (90 миллионов километров). Сама экзопланета пока не обнаружена, но считается, что она примерно в 10–40 раз массивнее Юпитера. Чистый промежуток в системе колец проще всего объяснить присутствием экзолуны, размер которой также можно оценить.

В 2014 году еще одна система колец была обнаружена в Солнечной системе в совершенно невероятном месте: вокруг астероида (10199) Харикло — малого тела, принадлежащего к типу так называемых кентавров[43]. Это тело обращается между Сатурном и Ураном и является крупнейшим известным кентавром. Его кольца проявили себя двумя легкими снижениями яркости в серии наблюдений, в которых Харикло заслонял собой (на астрономическом жаргоне — покрывал) различные звезды. Относительное положение этих впадинок на графике близко все к тому же эллипсу с Харикло возле центра; предполагается присутствие двух близких колец на почти круговых орбитах, плоскость которых видна нам под углом. Одно из колец имеет радиус 391 километр и ширину около семи километров; затем идет девятикилометровый промежуток до второго кольца радиусом 405 километров.

Поскольку уже понятно, что системы колец в космосе встречаются, их существование не может быть простой случайностью. Но как же формируются кольца? Существует три основные теории. Они могли сформироваться из первоначального газового диска одновременно с планетой; они могут оказаться остатками луны, разбитой при столкновении; они могут быть остатками луны, подошедшей к планете ближе предела Роша, на котором приливные силы превышают прочность камня, и разрушенной ими.

Поймать систему колец в стадии формирования шансов мало, хотя открытие Кенворти и Мамаека показывает, что это в принципе возможно, но при этом мы получим в лучшем случае мгновенный снимок. Весь процесс занимает не одну тысячу лет, и наблюдать его целиком никаких жизней не хватит. Зато мы можем проанализировать гипотетические сценарии математически, сделать предсказания и сравнить их с результатами наблюдений. Этот процесс чем-то напоминает поиски окаменелостей в небесах. Каждая «окаменелость» рассказывает нам о том, что происходило в прошлом, но для интерпретации этих данных необходима гипотеза. А чтобы разобраться в следствиях из этой гипотезы, вам потребуются математическое моделирование, умозаключения или, что еще лучше, теоремы.



## Звезды Козимо Медичи

Поскольку я, как первооткрыватель, должен назвать эти новые планеты, я желаю, в подражание великим мудрецам, поместившим среди звезд самых замечательных героев того времени, посвятить их светлейшему герцогу (Козимо II де Медичи, великому герцогу Тосканскому).

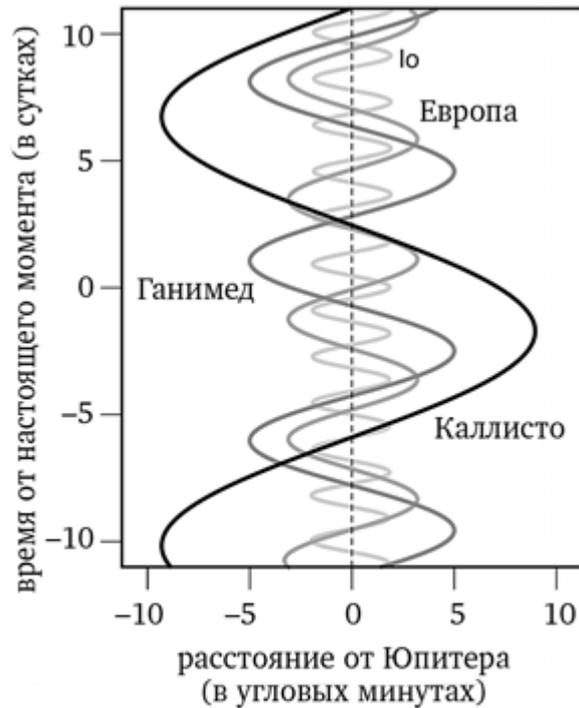
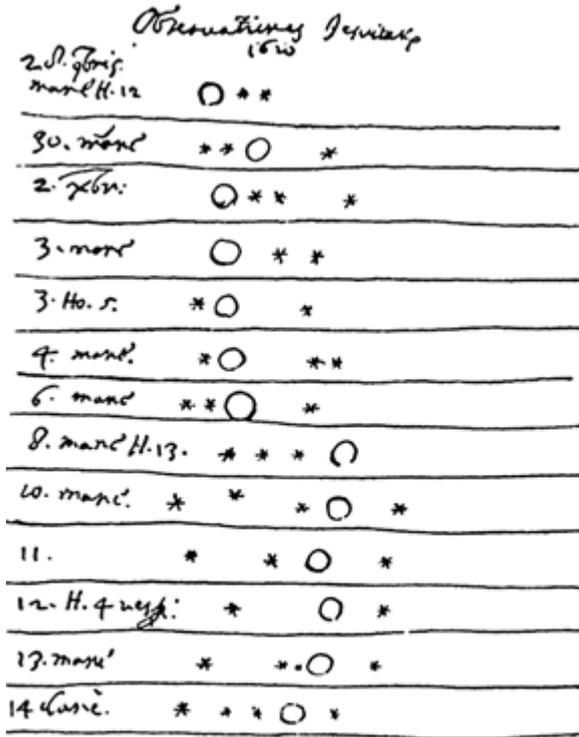
Галилео Галилей. «Sidereus Nuncius»

Взглянув в первый раз на Юпитер в свой новый телескоп, Галилей заметил на орбите вокруг планеты четыре крохотные искорки; получалось, что у Юпитера есть собственные луны. Это можно было считать прямым доказательством ошибочности геоцентрической теории. Галилей зарисовал взаимное расположение спутников Юпитера в своей тетради. Более детальные наблюдения можно связать в цепочку и построить график видимого движения светлых точек. Сделав это, мы получим красивые синусоидальные кривые. Известно, что естественный способ получения синусоидальной кривой состоит в том, чтобы наблюдать равномерное круговое движение с ребра. Поэтому Галилей сделал вывод, что звезды Козимо Медичи ходят кругами вокруг Юпитера в плоскости эклиптики.

Усовершенствованные телескопы помогли астрономам установить, что спутники есть у большинства планет Солнечной системы. Единственные исключения — Меркурий и Венера. У нас один спутник, у Марса — два, у Юпитера их по крайней мере 67, у Сатурна — по меньшей мере 62 плюс сотни мини-лун, у Урана — 27 и у Нептуна — 14. Да, у Плутона 5 спутников. Сами

спутники варьируются от небольших камней неправильной формы до почти сферических эллипсоидов, достаточно больших, чтобы их можно было считать небольшими планетами. Поверхности спутников составляют в основном камень, лед, сера и замерзший метан.

Крохотные луны Марса Фобос и Деймос стремительно носятся по марсианскому небу, а Фобос обращается так близко к планете, что проходит над наблюдателем в направлении, противоположном движению Деймоса. Оба тела имеют неправильную форму и, вероятно, являются захваченными астероидами, или, возможно, они были одним захваченным астероидом в форме утенка, как ядро кометы 67P, представляющей собой два тела, которые мягко сошлись и слиплись между собой. Если это так, то захваченный Марсом астероид вновь распался на составные части под действием гравитации планеты: тогда Фобос — это одна половинка астероида, а Деймос — другая.



Слева: зарисовки спутников Юпитера Галилеем.

Справа: видимые с Земли положения спутников Юпитера образуют синусоидальные кривые

Некоторые луны представляются совершенно мертвыми; другие активны. Спутник Сатурна Энцелад выпускает из себя мощные струи ледяных гейзеров высотой 500 километров. Спутник Юпитера Ио может похвалиться покрытой серой поверхностью и по крайней мере двумя активными вулканами — Локи и Пеле, выплевывающими сернистые соединения. Должно быть, там имеются громадные подповерхностные резервуары жидкой серы, а энергия для ее разогрева, вероятно, выделяется при гравитационном сжатии спутника Юпитером. Спутник Сатурна Титан имеет метановую атмосферу, гораздо более плотную, чем, по идее, должен иметь. Спутник Нептуна Тритон обращается вокруг планеты не в ту сторону, и это указывает на то, что он был захвачен. Он очень медленно приближается по спирали к планете, и через 3,6 миллиарда лет развалится, достигнув предела Роша — расстояния, внутри которого луны разваливаются на куски под действием гравитационных напряжений.

Спутники больших планет часто состоят в резонансе. Так, период обращения Европы вдвое превосходит период Ио, а период Ганимеда вдвое превосходит период Европы и, следовательно, вчетверо превосходит период Ио. Резонансы порождаются динамикой тел, подчиняющихся закону всемирного тяготения Ньютона. Планеты с системами колец медленно собирают луны на границе колец, а затем выплевывают их одну за другой, как капли воды падают из крана. В этом процессе имеются математические закономерности.

Многие свидетельства, в том числе и математические, указывают на то, что на некоторых ледяных лунах есть подземные океаны, согреваемые приливными силами. По крайней мере в одном таком океане больше воды, чем во всех земных океанах, вместе взятых. Наличие жидкой воды делает эти луны потенциальными местами простейших земледобных форм жизни (см. главу 13). А необычный химический состав Титана делает его потенциальным местом простейших форм жизни, совершенно не похожих на земные.



Астероид Ида (слева) и его спутник Дактиль (справа).

Снимок сделан камерой КА Galileo по пути к Юпитеру

По крайней мере один астероид имеет собственную крошечную луну — это Ида, вокруг которой обращается миниатюрный Дактиль. Мир лун завораживает; это идеальная площадка для гравитационного моделирования и всевозможных научных рассуждений. И все это восходит к Галилею и звездам Козимо Медичи.

\*\*\*

В 1612 году Галилей, определив орбитальные периоды звезд Медичи, предположил, что достаточно точные таблицы их движения обеспечат моряков небесными часами и помогут разрешить навигационную проблему определения долготы. В то время мореходы умели определять широту места, наблюдая Солнце (хотя до точных инструментов вроде секстана было еще далеко), но долготу могли оценивать только по счислению пути, то есть методом очень приблизительного подсчета. Основной практической проблемой было проведение наблюдений с палубы качающегося на волнах судна, и Галилей работал над двумя устройствами для стабилизации телескопа. Метод Галилея использовался на суше, но не на море. А проблему долготы, как известно, решил Джон Харрисон при помощи серии точнейших хронометров, за что и получил в 1773 году призовые деньги.

Спутники Юпитера стали для астрономов настоящей небесной лабораторией, впервые позволив наблюдать со стороны систему из нескольких тел. Ученые составляли таблицы движения этих тел, пытались это движение объяснить и предсказывать теоретически. Один из способов получить точные измерения — пронаблюдать транзит луны по диску планеты, потому что начало и конец транзита — четко определенные события. Затмения, когда луна, наоборот, заходит за планету, определяются не хуже. Джованни Годиерна отметил это в 1656 году, а примерно десятилетием позже Кассини начал длинную серию систематических наблюдений, в ходе которых отмечал также и другие совпадения, к примеру, соединения, при которых две луны выстраиваются в одну линию. К собственному удивлению, он обнаружил, что времена транзитов не согласуются с движением лун по правильным повторяющимся орбитам.

Датский астроном Оле Рёмер подхватил идею Галилея об определении долготы, и в 1671 году вместе с Жаном Пикаром провел наблюдения 140 затмений Ио в Ураниборге под Копенгагеном; в это же время Кассини наблюдал их в Париже. Сравнив временные отметки, астрономы вычислили разницу долгот двух обсерваторий. Кассини тогда уже обратил внимание на

некоторые странности в наблюдениях и размышлял, не возникают ли они из-за того, что скорость света конечна. Рёмер свел воедино все наблюдения и выяснил, что очередные затмения наступали немного раньше, когда Земля находилась ближе к Юпитеру, и позднее, когда она находилась от него дальше. В 1676 году он сделал в Академии наук сообщение о причине этого явления: «Судя по всему, свету требуется около 10–11 минут, [чтобы пройти] расстояние, равное радиусу земной орбиты». Озвученное число основывалось на тщательных геометрических построениях, но наблюдения были не слишком точными; современное значение для этого интервала — 8 минут 19 секунд. Рёмер не опубликовал свои результаты в виде формальной научной работы, но его лекцию изложил — причем плохо — какой-то неизвестный репортер. Ученое сообщество приняло идею, согласно которой свет имеет конечную скорость, только в 1727 году.

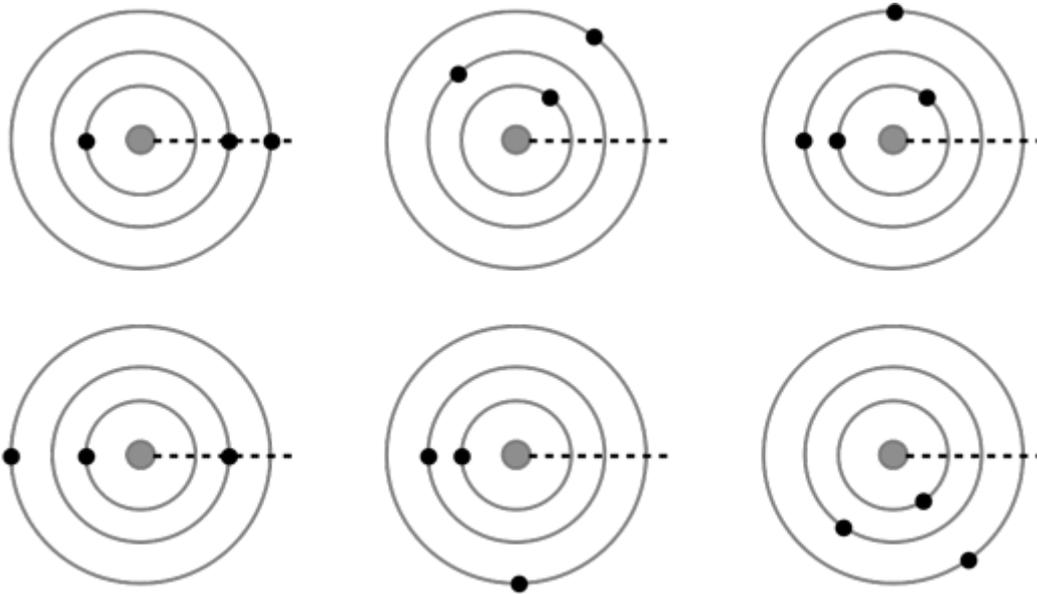
Несмотря на все нерегулярности, Кассини ни разу не удалось наблюдать соединение сразу трех внутренних спутников (Ио, Европы и Ганимеда), когда все они одновременно выстраиваются в линию, совпадающую с лучом зрения; следовательно, что-то, вероятно, не позволяет им это сделать. Орбитальные периоды этих спутников соотносятся друг с другом приблизительно как 1:2:4, и в 1743 году Пер Варгентин, директор Стокгольмской обсерватории, показал, что это соотношение становится поразительно точным, если интерпретировать его заново, на этот раз корректно. Измеряя положение спутников как угол относительно некоторого фиксированного радиуса, он открыл следующую замечательную связь:

$$\text{угол для Ио} — 3 \times \text{угол для Европы} + 2 \times \text{угол для Ганимеда} = 180^\circ.$$

Согласно его наблюдениям, это уравнение выполняется почти точно на длительных периодах времени, несмотря на нерегулярности орбит трех этих лун. Для соединения всех трех спутников нужно, чтобы все три угла были равны, но если это так, то в левой части приведенного уравнения мы получим  $0^\circ$ , а не  $180^\circ$ . Получается, что тройное соединение невозможно до тех пор, пока выполняется данное соотношение. Варгентин утверждал, что этого не произойдет еще по крайней мере 1,3 млн лет.

Из этого уравнения следует также, что соединения трех лун происходят в определенной повторяющейся последовательности:

Европа и Ганимед,  
 Ио и Ганимед,  
 Ио и Европа,  
 Ио и Ганимед,  
 Ио и Европа,  
 Ио и Ганимед.



Последовательные соединения трех внутренних спутников Юпитера:

Ио, Европы и Ганимеда (считая от планеты наружу)

Лаплас решил, что формула Варгента не может быть простым совпадением и для такого соотношения должна быть конкретная динамическая причина. В 1784 году он вывел эту формулу из закона всемирного тяготения Ньютона. Из его вычислений следует, что на длительных интервалах времени комбинация соответствующих углов не остается равной в точности  $180^\circ$ ; вместо этого наблюдается либрация — медленные колебания вокруг этой величины в обе стороны меньше чем на  $1^\circ$ . Это, конечно, достаточно мало, чтобы не допустить тройного соединения. Лаплас предсказал, что период этих колебаний должен составлять 2270 суток. Наблюдаемое значение на сегодняшний день — 2071 сутки — совсем неплохо. В его честь данное соотношение между тремя углами назвали резонансом Лапласа. Успех Лапласа стал весомым подтверждением закона Ньютона.

Мы сегодня знаем, почему во времена транзита наблюдается нерегулярность. Тяготение Юпитера вызывает прецессию приближенно эллиптических орбит его спутников (аналогично прецессии орбиты Меркурия вокруг Солнца), так что положение периевия — ближайшей к Юпитеру точки орбиты — изменяется довольно быстро. В формуле резонанса Лапласа прецессии компенсируют друг друга, но на индивидуальные транзиты влияют сильно.

Резонансом Лапласа называется любое подобное соотношение углов. Так, звезда Gliese 876 имеет систему экзопланет, первая из которых была обнаружена в 1998 году. В настоящее время известны четыре планеты, и три из них — Глизе 876с, Глизе 876b и Глизе 876e — имеют орбитальные периоды, равные 30,008; 61,116 и 124,26 суток, что подозрительно близко к соотношению 1:2:4. В 2010 году Эухенио Ривера с коллегами показали, что в данном случае наблюдается соотношение:

$$\text{угол для } 876\text{с} - 3 \times \text{угол для } 876\text{b} + 2 \times \text{угол для } 876\text{e} = 0^\circ,$$

но сумма при колебаниях вокруг  $0^\circ$  отклоняется на целых  $40^\circ$ , то есть либрация здесь гораздо сильнее. В данном случае тройное соединение возможно, а почти соединение, близкое к тройному, происходит на каждом обороте внешней планеты. Моделирование показывает, что колебания вокруг  $0^\circ$  должны быть хаотичны, а период их составляет приблизительно 10 лет.

Три луны Плутона — Никта, Стикс и Гидра — тоже демонстрируют лапласоподобный резонанс, но здесь среднее соотношение периодов составляет 18:22:33, а среднее отношение орбит — 11:9:6. Уравнение здесь выглядит так:

$$3 \times \text{угол для Стикса} - 5 \times \text{угол для Никты} + 2 \times \text{угол для Гидры} = 180^\circ.$$

Тройное соединение здесь невозможно по тем же соображениям, по каким оно невозможно для юпитерианских лун. На каждые два соединения Стикс/Никта приходится пять соединений Стикс/Гидра и три соединения Никта/Гидра.

\*\*\*

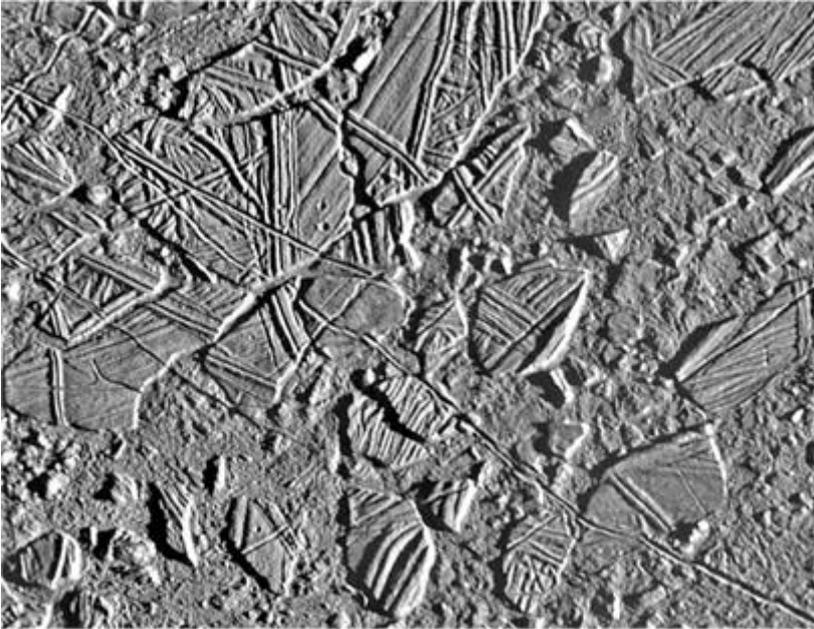
И Европа, и Ганимед, и Каллисто имеют ледяную поверхность. Есть несколько независимых доказательств того, что на всех трех спутниках подо льдом имеется жидкий водяной океан. Первой луной, на которой ученые заподозрили существование такого океана, стала Европа. Конечно, для того чтобы расплавить лед, нужен какой-то источник тепла. Приливные силы Юпитера то и дело стискивают Европу, а резонансные отношения с Ио и Ганимедом не дают ей ускользнуть от этого давления, сменив орбиту. Сжатие разогревает ядро спутника, и расчеты показывают, что выделяющегося при этом тепла достаточно, чтобы растопить большое количество льда. Поскольку поверхность спутника состоит из твердого льда, жидкая вода должна находиться глубже; вероятно, она образует толстую сферическую прослойку.

Дополнительным подтверждением этой гипотезы можно считать тот факт, что поверхность спутника испещрена трещинами, а вот кратеров на ней очень мало. Наиболее вероятное объяснение — лед образует толстый слой, плавающий поверх океана. Сильное магнитное поле Юпитера индуцирует магнитное поле и на Европе, но более слабое, и математический анализ характеристик магнитного поля Европы, измеренных орбитальным аппаратом Galileo, позволяет предположить, что подо льдом Европы должна располагаться значительная масса проводящего вещества. Самый правдоподобный вариант в данном случае, с учетом всех данных, — соленая вода.

На поверхности Европы наблюдается несколько областей «хаотического рельефа», где лед имеет очень беспорядочную и нерегулярную структуру. Одна из таких областей — Хаос Конамара (Коннемара), состоящий, кажется, из одних только бесконечных ледяных торосов, которые неоднократно ломались и двигались. Еще есть хаосы Арран, Муриас, Нарбет и Ратмор. Аналогичные формации возникают на Земле в многолетних плавучих льдах, когда устанавливается оттепель. В 2011 году группа под руководством Бритни Шмидт объяснила, что хаотичный ландшафт образуется, когда слой льда, лежащий над линзой жидкой воды, обрушивается вниз. Эти подледные озера, очевидно, находятся ближе к поверхности, чем сам океан, возможно, на глубине всего трех километров. Подобная впадина на Европе, получившая название Пятно Тера, имеет под собой озеро, воды в котором не меньше, чем в Великих Североамериканских озерах.

Линзовидные озера Европы располагаются ближе к поверхности, чем основной океан. По лучшим современным оценкам, внешний слой льда на Европе, если оставить в стороне такие озера, составляет в толщину около 10–30 километров, а глубина океана равна примерно 100 километров. Если это так, то по объему океан Европы вдвое превосходит все земные океаны, вместе взятые.

На основании аналогичных данных можно предположить, что на Ганимеде и Каллисто тоже есть подповерхностные океаны. На Ганимеде внешний слой льда толще, около 150 километров, а глубина океана под ним такая же — около 100 километров. На Каллисто океан, вероятно, лежит на той же глубине подо льдом, а глубина океана составляет 50–200 километров. Все эти оценки предположительны, и различия в химическом составе — к примеру, присутствие аммиака — изменили бы их весьма значительно.



### Хаос Конамара на Европе

Спутник Сатурна Энцелад — очень холодный мир, средняя температура на его поверхности составляет 75 К (примерно минус 200 °С). Казалось бы, не стоит ожидать от такого спутника особой активности; астрономы и не ожидали, пока Кассини не открыл, что Энцелад испускает громадные гейзеры ледяных частиц, водяного пара и хлорида натрия (поваренной соли) высотой сотни километров. Часть вещества при этом просто улетает в пространство; считается, что это и есть основной источник вещества кольца E вокруг Сатурна, содержащего 6% хлорида натрия. Остальное падает обратно на поверхность Энцелада. Самое правдоподобное объяснение этого явления — соленый подземный океан — было подтверждено в 2015 году путем математического анализа собранных за семь лет данных о крохотных колебаниях в ориентации этой луны (специальный термин: либрация), измеренных при отслеживании точного положения ее кратеров. Энцелад покачивается из стороны в сторону на угол  $0,12^\circ$ . Это слишком много, чтобы соответствовать модели с жесткой связью между ядром Энцелада и его ледяной поверхностью, и указывает на существование скорее глобального океана, чем локального полярного моря. Лед над ним, вероятно, имеет толщину 30–40 километров, а сам океан — глубину 10 километров, то есть больше, чем в среднем у океанов Земли.

\*\*\*

Среди всех спутников Сатурна семь лун обращаются вокруг своей планеты сразу же за краем внешнего из ее основных колец, кольца A. Это очень маленькие спутники, и плотность у них тоже чрезвычайно низкая, что позволяет предположить наличие внутренних полостей. Некоторые из них по форме напоминают летающие тарелки, а некоторые отличаются гладкой лоскутной поверхностью. Это Пан, Дафнис, Атлас, Прометей, Пандора, Янус и Эпиметий.

В 2010 году Себастьян Шарно, Жюльен Сальмон и Орельен Крида проанализировали, как могло развиваться кольцо с учетом гипотетических «пробных тел» на его границе, и сделали вывод, что эти луны были сформированы из материала, находящегося за пределом Роша, и «выплюнуты» кольцом. Предел Роша обычно определяют как расстояние, внутри которого луны разваливаются на части под действием гравитационных напряжений, но можно подойти и с другой стороны: это расстояние, за пределами которого кольца становятся нестабильными, если их стабильность не обеспечивается другими механизмами, такими, к примеру, как спутники-пастухи. У Сатурна предел Роша ( $140\,000 \pm 2000$  километров) располагается сразу за краем кольца A (136 775 километров). Пан и Дафнис находятся чуть ближе предела Роша, остальные пять — чуть дальше.

Астрономы давно подозревали, что между кольцами и этими лунами должна существовать какая-то связь — слишком уж близки их радиусы. Кольцо A имеет очень резкую границу, обусловленную резонансом 7:6 с Янусом, который не дает большей части вещества кольца еще

отдалиться от планеты. Этот резонанс можно охарактеризовать как временный; кольца «выталкиваются» Янус наружу, а сами для начала сдвигаются чуть внутрь, чтобы момент импульса системы не изменился. По мере того как Янус уходит все дальше, кольца получают возможность вновь распространиться наружу, выйдя за предел Роша.

Анализ подтверждает эту точку зрения и показывает, что некоторая часть вещества кольца может временно выталкиваться за предел Роша в результате вязкого растекания — примерно как растекается и становится тоньше капля сиропа на кухонном столе. Метод исследования совмещает аналитическую модель пробных тел с численным гидродинамическим моделированием колец. В результате продолжительного вязкого растекания кольца выплевывают наружу ряд крохотных мини-спутников, орбиты которых очень близки друг другу и почти совпадают. Расчеты показывают, что эти спутнички собраны из ледяных частиц кольца, слегка удерживаемых вместе собственной гравитацией; это объясняет и низкую плотность таких мини-спутников, и их причудливую форму.

Кроме того, эти результаты пролили свет на давний вопрос о возрасте колец. По одной из теорий кольца сформировались из коллапсирующей Солнечной туманности приблизительно в то же время, что и сам Сатурн. Однако, к примеру, такой мини-луне, как Янус, потребовалось бы не более сотни миллионов лет, чтобы переместиться от кольца А на нынешнюю орбиту (и это подталкивает нас к альтернативной теории: как кольца, так и мини-луны появились одновременно, после того как какой-то более крупный спутник прошел предел Роша и распался, и произошло это где-то около 10 миллионов лет назад). Моделирование ограничивает возможное время этого события интервалом от 1 до 10 миллионов лет назад. Авторы утверждают: «Кольца Сатурна, подобные протопланетному диску в миниатюре, являются, возможно, последним местом в Солнечной системе, где не так давно (около 106–107 лет назад) происходила аккреция».



## Верхом на комете

Можно смело сказать, что стоит рыболову, сидящему на поверхности Солнца, закинуть удочку в космическое пространство, он непременно выловит одну из комет.

Жюль Верн. «Верхом на комете» (Гектор Сервардак)

«В день смерти нищих не горят кометы, лишь смерть царей огнем вещает небо», — говорит Кальпурния во второй сцене второго акта шекспировского «Юлия Цезаря», предрекая кончину Цезаря. Из пяти упоминаний комет у Шекспира три отражают древнее поверье о том, что кометы — предвестники катастроф.

Эти странные и загадочные объекты появляются в ночном небе неожиданно, волоча за собой яркий изогнутый хвост, проходят медленно по усыпанному звездами небосклону и вновь исчезают. Эти необъявленные и незванные гости никак не вписываются, кажется, в нормальный порядок небесных событий. А значит, в те времена, когда никто не мог сказать точно, что это такое, а священники и шаманы во всем искали способ усилить свое влияние, естественно было принимать кометы за посланцев богов. При этом общее мнение склонялось к тому, что послание носит угрожающий характер. Вокруг хватало природных катастроф, и, если человек хотел в это поверить, ему нетрудно было найти тому убедительное подтверждение. Комета Макнота, появившаяся в 2007 году, стала самой яркой за 40 лет. Очевидно, она предвещала финансовый кризис 2007–2008 годов. Видите? Это совсем несложно.



Большая комета, 1577 год, над Прагой. Гравюра Иржи Дашитского

Жрецы и священники утверждали, что им открыт смысл послания, принесенного кометой, но ни они, ни философы не могли сказать, где «живут» кометы и что они собой представляют. Что это — небесные тела, как звезды и планеты? Или это метеорологические явления, как облака? Внешне они немного напоминают облака; они размыты по краям, а не резко очерчены, как звезды и планеты. Но движутся они скорее как планеты, если забыть о том, что появляются внезапно и исчезают неизвестно куда. В конечном итоге эти споры были разрешены при помощи научных данных. Астроном Тихо Браге, оценив при помощи точных измерений расстояние до Большой кометы 1577 года, наглядно продемонстрировал, что она находится дальше от Земли, чем Луна. А поскольку облака закрывают Луну, а не наоборот, кометы, очевидно, следовало отнести к небесным объектам.

\*\*\*

К 1705 году Эдмунд Галлей пошел еще дальше, показав, что по крайней мере одна из комет появляется на ночном небе регулярно. Кометы похожи на планеты: они обращаются по орбитам вокруг Солнца. Они пропадают из виду, когда уходят слишком далеко, и появляются вновь, когда подходят достаточно близко. Почему они отращивают хвосты, а потом вновь их теряют? Галлей не мог уверенно назвать причину, но считал, что это как-то связано с их близостью к Солнцу.

Проникновение в тайны комет, совершенное Галлеем, стало одним из первых крупных открытий в астрономии на базе математических закономерностей, которые открыл Кеплер и заново интерпретировал и обобщил Ньютон. Поскольку планеты движутся по эллипсам, рассуждал Галлей, то почему кометы не могут делать то же самое? Если так, то их движение должно быть периодическим и одна и та же комета должна раз за разом появляться на земных небесах через равные промежутки времени. Закон всемирного тяготения Ньютона позволял немного подправить это утверждение: движение должно быть почтипериодическим, но гравитационное притяжение других планет, особенно таких гигантов, как Юпитер и Сатурн, может ускорить или задержать возвращение кометы.

Чтобы проверить эту теорию, Галлей углубился в туманные архивные записи о появлении комет на небе. До изобретения Галилеем телескопа на Земле можно было наблюдать только кометы, видимые невооруженным глазом. Некоторые из них были необычайно яркими и

обладали внушительными хвостами. Одну такую комету видел Петер Апиан в 1531 году; другую наблюдал Кеплер в 1607 году; аналогичная комета появлялась и при жизни Галлея, в 1682 году. Промежутки между этими датами составляют 76 и 75 лет. Может быть, все три раза на небе появлялось одно и то же тело? Галлей был убежден в этом и предсказал, что эта комета вновь вернется к Земле в 1758 году.

Он оказался прав, хотя и на грани фола. На Рождество в названном году немецкий астроном-любитель Иоганн Палич заметил в небе слабое размытое пятнышко, которое вскоре обзавелось характерным хвостом. К тому моменту трое французских математиков — Алексис Клеро, Жозеф Лаланд и Николь-Рейн Лепот — провели более тщательный расчет и перенесли предсказанную Галлеем дату наибольшего приближения кометы к Солнцу на 13 апреля. На самом деле это произошло на месяц раньше; как оказалось, возмущения со стороны Юпитера и Сатурна задержали комету на 618 суток.

Галлей умер прежде, чем появилась возможность проверить его предсказание. То, что мы сегодня называем кометой Галлея (комета была названа в его честь в 1759 году), стало первым, помимо планет, телом Солнечной системы, для которого удалось точно установить, что оно обращается вокруг Солнца. Сравнив старые записи с современными расчетами прошлой орбиты этой кометы, ее появления можно проследить до 240 года до нашей эры, когда ее видели в Китае. Следующее ее появление в 164 году до нашей эры было отмечено на вавилонской глиняной табличке. Китайцы видели эту комету снова в 87 году до нашей эры, в 12 году до нашей эры, в 66 году, в 141 году и т.д. Предсказанное Галлеем возвращение кометы было одним из первых по-настоящему новых астрономических предсказаний, основанных на математической теории небесной динамики.

\*\*\*

Кометы не просто мудреная астрономическая загадка. Во введении я упоминал одну масштабную теорию с участием комет: последние несколько десятилетий именно с их помощью ученые предпочитают объяснять появление на Земле океанов. Кометы состоят в основном из льда; хвост образуется, когда комета подходит к Солнцу достаточно близко, чтобы лед в ней «сублимировался», то есть превращался непосредственно из льда в пар. Согласно убедительным косвенным свидетельствам, в ранние эпохи развития Земли с ней столкнулось множество комет; если это так, то их лед должен был растаять и собраться во впадины, образовав океаны. Кроме того, вода должна была встроиться в молекулярную структуру геологических пород земной коры, в которых ее достаточно много.

Жизнь на Земле полностью зависит от воды, так что знания о кометах потенциально способны рассказать нам немало важного и о нас самих. В стихотворении «Эссе о человеке» (1734 год) Александра Поупа есть памятная строчка: «Чтобы по-настоящему изучить человечество, нужно изучать Человека» (в русском переводе — «На самого себя направь ты взгляд»). Однако, не вдаваясь в духовные и этические наставления поэмы, заметим, что любое исследование человечества должно охватывать также контексты бытия людей, а не только самих людей. А контекст — это вся Вселенная, поэтому, что бы ни говорил Поуп, изучение человечества означает изучение всего.

Сегодня в астрономические каталоги включено 5253 кометы. Они подразделяются на два основных типа: долгопериодические с периодом 200 лет и более, чьи орбиты уходят далеко за пределы Солнечной системы, короткопериодические, которые держатся ближе к Солнцу и часто имеют более округлые, хотя и эллиптические, орбиты. Комета Галлея с ее 75-летним периодом относится к категории короткопериодических. Существуют кометы с гиперболическими орбитами: гипербола — еще одно коническое сечение, известное еще древнегреческим геометрам. В отличие от эллипса гипербола — незамкнутая кривая. Тело, следующее по такой орбите, появляется из далекого далека, пронесется мимо Солнца и, если умудрится не столкнуться с ним, уносится обратно в космос, чтобы никогда больше не появляться в наших краях.

Гиперболическая форма орбиты говорит о том, что эти кометы прилетают к Солнцу из межзвездного пространства, но астрономы сегодня считают, что большинство из них, если не все, летали когда-то по очень далеким замкнутым орбитам, пока влияние Юпитера не нарушило порядок их движения. Различие между эллиптической и гиперболической орбитами связано с

энергией тела. При энергии ниже критического значения орбита представляет собой замкнутый эллипс, но если энергия выше — это уже гипербола. При критическом значении энергии орбита является параболой. Комета на очень вытянутой эллиптической орбите, если на нее окажет возмущающее действие Юпитер, приобретает дополнительную энергию, и ее может оказаться достаточно, чтобы превысить критическое значение. Близкая встреча с какой-нибудь внешней планетой может добавить комете еще больше энергии (эффект пращи): комета отнимает у планеты часть энергии, но планета настолько массивна, что даже не замечает этого. Так эллиптическая изначально орбита кометы может стать гиперболой.

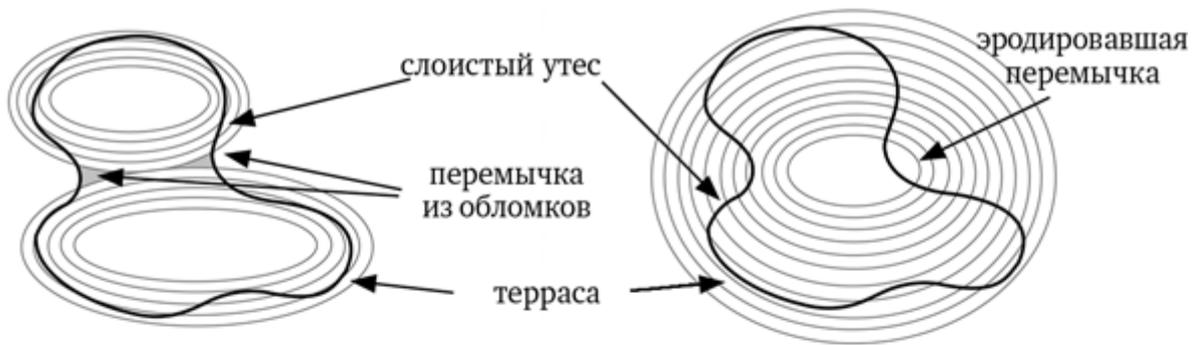
Параболическая орбита маловероятна, поскольку энергия тела при этом должна быть точно равна критической. Но именно поэтому параболу часто используют в качестве первого шага к расчету орбитальных элементов кометы. Парабола близка и к эллипсу, и к гиперболе.

Это вновь возвращает нас к короткопериодической комете, попавшей в заголовки новостей и получившей название 67P / Чурюмова — Герасименко в честь ее первооткрывателей Клима Чурюмова и Светланы Герасименко. Эта комета облетает Солнце каждые шесть с половиной лет. Ничем не примечательное до той поры кометное существование 67P, кружащей вокруг Солнца и испускающей при приближении к нему струи нагретого водяного пара, попало в поле зрения астрономов, и на встречу с ней был выслан космический аппарат Rosetta[44]. Приблизившись, Rosetta выяснила, что 67P похожа на космического резинового утенка: это два округлых комка, соединенных узенькой шейкой. Поначалу никто не мог сказать, образовалась ли такая форма при медленном соединении двух округлых тел или же это одно тело, разъеденное эрозией в области шейки.

В конце 2015 года этот вопрос был разрешен при помощи хитроумной математической обработки подробных снимков кометы. На первый взгляд ландшафт 67P кажется нерегулярным и хаотичным, состоящим из случайным образом чередующихся острых скал и плоских впадин, но на самом деле детальная картина поверхности позволяет нам судить о происхождении тела кометы. Представьте, что вы берете луковицу, срезаете с нее произвольные ломтики и отрубаете куски. На месте тонких ломтиков, срезанных параллельно поверхности, останутся плоские площадки, но в более глубоких разрезах будут видны стопки отдельных слоев. Плоские впадины на комете напоминают срезанные ломтики, а на ее скалах и в других областях зачастую видна слоистая структура льда. К примеру, серия слоев видна сверху и в середине справа на фото, расположенном в Предисловии к этой книге; видны там также многочисленные плоские области.

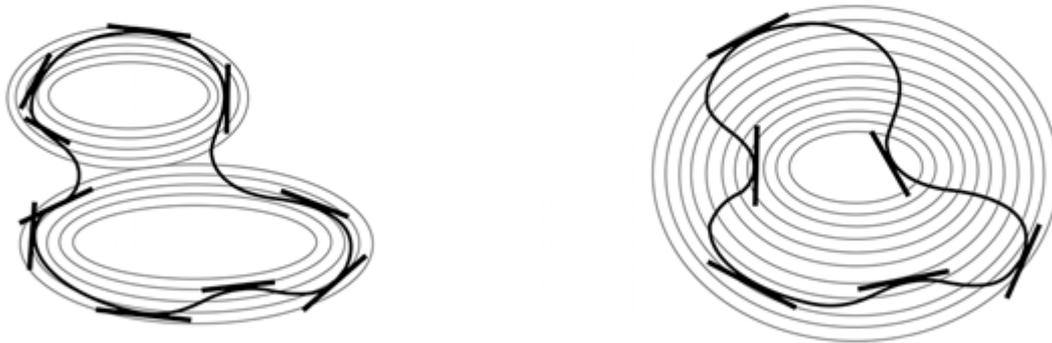
Астрономы считают, что, когда кометы только появились в ранней Солнечной системе, они росли путем аккреции, так что на них постепенно откладывался лед, слой за слоем, примерно как листья на луковице. Мы можем задаться вопросом, соответствуют ли геологические формации, видимые на фотографиях 67P, этой теории, и если да, то использовать геологию, чтобы реконструировать историю кометы.

Маттео Массирони с сотрудниками выполнили эту работу в 2015 году. Полученный ими результат хорошо согласуется с теорией о том, что форма утенка возникла в результате мягкого столкновения. Базовая идея состоит в том, что историю кометы можно вывести из геометрии ее ледяных слоев. При тщательном визуальном анализе изображений исследователи склонялись к теории двух тел, но, помимо рассматривания фотографий, команда Массирони провела также тщательный математический анализ с использованием трехмерной геометрии, статистики и математических моделей гравитационного поля кометы. Начав с математического представления наблюдаемой формы кометной поверхности, ученые для начала выяснили положение и ориентацию 103 плоскостей, каждая из которых наилучшим образом соответствовала какой-нибудь геологической особенности, связанной с наблюдаемыми слоями, такой как терраса (плоская область) или куэста (один из типов гребней). Они обнаружили, что эти плоскости хорошо согласуются между собой на каждом сегменте, но не сходятся на перемычке, где соединяются сегменты. Это указывает на то, что каждый сегмент при формировании собирал на себя, как на луковицу, слои, прежде чем сегменты сблизилась и соединились.



Два конкурирующих сценария возникновения структуры 67P.

*Слева:* теория столкновения. *Справа:* теория эрозии



Схематическая иллюстрация наилучших аппроксимирующих плоскостей для террас и куэст. *Слева:* теория столкновения.

*Справа:* теория эрозии. Реальные расчеты проводились в трех измерениях с использованием статистической оценки наилучшего соответствия и включали 103 плоскости

Когда слои формируются, они, как правило, примерно перпендикулярны местному направлению гравитации — по смыслу это означает, что вещество, откладываясь на тело, падает вниз. Поэтому для дальнейшего подтверждения команда просчитала гравитационное поле кометы по каждой из двух гипотез и использовала статистические методы, чтобы показать, что расположение слоев лучше соответствует модели столкновения.

Ядро 67P, хотя и состоит в основном из льда, черно как ночь и испещрено тысячами камней. Зонд Philae совершил сложную и, как оказалось, лишь временную посадку на голове утенка. Посадка прошла не так, как планировалось. В состав оборудования Philae входил небольшой ракетный двигатель, шурупы-ледобуры с винтовой резьбой, гарпуны и солнечная панель. План был такой: аккуратно посадить аппарат, запустить двигатель, чтобы он прижал Philae к поверхности кометы, зацепиться гарпунами, чтобы удержать аппарат на месте после выключения двигателя, вернуть ледобуры в ядро кометы для надежности, а затем воспользоваться солнечной панелью, чтобы зарядиться энергией. Но человек предполагает, а Бог располагает... Ракетный двигатель не запустился, гарпуны не зацепились, костыли не вернулись, зонд отпрыгнул и летел вдоль поверхности еще пару часов, а когда наконец упал, солнечная панель оказалась в глубокой тени, где практически невозможно было подзарядиться от солнечного света.

Несмотря на «идеальное приземление на три точки — два колена и нос», Philae выполнил почти все свои научные задачи и отослал на Землю ценные данные. Ученые надеялись, что ближе к Солнцу, когда света станет больше, зонд может «проснуться» от своего электронного сна и еще немного поработать. Через несколько месяцев Philae действительно ненадолго проснулся и восстановил контакт с ЕКА, но связь была вновь потеряна, вероятно, потому, что зонд повредила повысившаяся активность ядра.

Пока энергия в аккумуляторах еще была, Philae успел подтвердить, что поверхность планеты состоит из льда, покрытого слоем черной пыли. Как уже упоминалось, он также прислал данные о том, что в составе кометного льда дейтерия больше, чем в воде земных океанов, что поставило под сомнение теорию о том, что вода в океаны принесена в основном кометами в период формирования Солнечной системы.

Хитроумная работа с данными, которые аппарат все же сумел передать, дала и еще кое-какую полезную информацию. К примеру, математический анализ того, как сжимались посадочные стойки Philae, показывает, что местами ядро 67P покрыто твердой коркой, а местами имеет более мягкую поверхность. Среди изображений, сделанных Rosetta, есть фотография трех отметин в том месте, где зонд в первый раз сел на комету, и отметки эти достаточно глубоки, чтобы понять, что грунт в этом месте относительно мягкий. Бортовой молоток Philae не смог пробить лед в том месте, где аппарат оказался в конце концов, так что там грунт твердый. С другой стороны, тело 67P очень пористое: три четверти его объема составляет пустое пространство.

Кроме того, Philae прислал интереснейшие данные о химическом составе: обнаружены несколько простых органических (основанных на углероде, это не указывает на присутствие жизни) соединений и одно более сложное — полиоксиметилен, образованный, вероятно, из более простой молекулы формальдегида под действием солнечных лучей. Астрономы были поражены одним из химических открытий Rosetta — большим количеством молекул кислорода в газовом облаке, окружающем комету. Они были так удивлены, что поначалу решили, что произошла ошибка. В традиционных теориях происхождения Солнечной системы кислород должен был бы нагреться и вследствие этого прореагировать с другими элементами с образованием таких соединений, как углекислый газ, и, соответственно, не должен был бы присутствовать в свободной форме. Должно быть, Солнечная система на раннем этапе была менее бурным местом, чем считалось ранее, и позволяла медленно формироваться зернам твердого кислорода, не заставляя кислород вступать в соединения.

Это не противоречит более драматичным событиям, происходившим, как считается, в период формирования Солнечной системы, — миграции планет и столкновению планетезималей, но позволяет предположить, что подобные события, должно быть, происходили относительно редко и перемежались периодами медленного мягкого роста.

\*\*\*

Откуда прилетают кометы?

Долгопериодические кометы не могут бесконечно болтаться на своих нынешних орбитах. Проходя сквозь Солнечную систему, они всегда рискуют испытать столкновение или тесное сближение, которое забросит их далеко в пространство — туда, откуда не возвращаются. Возможно, вероятность столкновения и невелика, но за миллионы оборотов шансы на то, что избежать подобных катастроф не удастся, накапливаются. Более того, кометы деградируют, теряя часть массы всякий раз, когда они огибают Солнце, и выбрасывают в пространство струи сублимированного льда. А стоит комете пробыть у Солнца чуть дольше, и она попросту растает.

В 1932 году Эрнст Эпик предложил выход: где-то далеко, в окраинных областях Солнечной системы, должен существовать громадный резервуар ледяных планетезималей, из которого запас комет постоянно пополняется. Ян Оорт независимо высказал ту же идею в 1950 году. Время от времени одно из этих ледяных тел срывается с места — возможно, в результате сближения с другим телом или просто из-за хаотических гравитационных пертурбаций. После этого тело меняет орбиту и проваливается внутрь системы по направлению к Солнцу, нагревается и приобретает характерный вид хвостатой запятой. Оорт исследовал этот механизм в мельчайших математических деталях, и теперь в его честь мы называем этот источник облаком Оорта. (Как уже объяснялось ранее, название не следует принимать буквально. Это очень разреженное облако.)

Считается, что облако Оорта занимает обширную область вокруг Солнца на расстояниях между приблизительно 5000 а.е. и 50 000 а.е. (от 0,08 до 0,79 световых года). Внутренняя его часть, до 20 000 а.е., представляет собой тор, ориентированный примерно вдоль эклиптики; внешнее гало — это сферическая оболочка. Во внешнем гало обитают триллионы тел от километра и больше в поперечнике; внутреннее облако содержит их в сотню раз больше. Полная

масса облака Оорта примерно в пять раз превышает массу Земли. Эту структуру пока никто не наблюдал: ее существование выведено из теоретических расчетов.

Моделирование и другие данные позволяют предположить, что облако Оорта возникло в тот период, когда местный протопланетный диск начал коллапсировать в Солнечную систему. Мы уже обсуждали данные, свидетельствующие о том, что возникшие тогда планетезимали первоначально располагались ближе к Солнцу, и лишь затем влияние планет-гигантов выбросило их во внешние области системы. Облако Оорта могло остаться со времен ранней Солнечной системы, сформировавшись из тех остатков, которые никуда не попали. Или, в альтернативном варианте, оно могло возникнуть в результате конкуренции Солнца и близлежащих звезд, пытавшихся притянуть к себе вещество, которое всегда находилось очень далеко от них, вблизи границ, где тяготение двух звезд уравнивается. Или, как предположили в 2010 году Гарольд Левисон с сотрудниками, Солнце утащило «плохо летавшие» обломки из протопланетных дисков скопления, включавшего 200 или около того близлежащих звезд.

Если верна теория выталкивания, первоначальные орбиты тел облака Оорта представляли собой очень вытянутые, тонкие эллипсы. Однако, поскольку тела эти в основном и сейчас остаются в облаке, их орбиты должны были стать гораздо более округлыми, почти круговыми. Считается, что причиной скругления орбит было взаимодействие с соседними звездами и галактические приливные силы — суммарное гравитационное действие Галактики.

\*\*\*

Короткопериодические кометы отличаются от долгопериодических; считается, что и происхождение у них иное — пояс Койпера и рассеянный диск.

После открытия Плутона, когда выяснилось, что он очень мал, многие астрономы задались вопросом: не есть ли это новая Церера, то есть первое обнаруженное тело огромного нового пояса, в котором их тысячи? Одним из таких астрономов — не первым — был Кеннет Эджуорт, предположивший в 1943 году, что в момент формирования внешней части Солнечной системы за Нептуном из первичного газового облака плотность вещества там оказалась недостаточной для образования крупных планет. Кроме того, он видел в этих телах потенциальный источник комет.

В 1951 году Джерард Койпер предположил, что в этой области еще на ранних стадиях формирования Солнечной системы мог собраться диск из небольших тел; но он считал (как многие тогда), что Плутон по размеру примерно равен Земле и потому должен был взбаламутить этот диск и разбросать его содержимое в разные стороны. Когда же выяснилось, что такой диск все же существует, Койпер удостоился сомнительной чести: астрономическую область назвали его именем потому, что он не предсказал ее существования.

В этой области было обнаружено множество отдельных тел, мы уже встречались с ними и называли занептунными объектами. Фактором, окончательно решившим вопрос о существовании пояса Койпера, стали опять же кометы. В 1980 году Хулио Фернандес провел статистическое исследование короткопериодических комет. Их слишком много, чтобы все они могли приходить из облака Оорта. Из каждых 600 комет, вылетающих из облака Оорта, 599 остались бы долгопериодическими кометами, и только одна, захваченная какой-нибудь планетой-гигантом, перешла бы на короткопериодическую орбиту. Возможно, предположил Фернандес, где-то между 35 и 50 а.е. от Солнца существует иной резервуар ледяных тел. Серия моделей, реализованная Мартином Дунканом, Томом Куинном и Скоттом Тремейном в 1988 году, решительно подтвердила его идеи; эти ученые также отметили, что короткопериодические кометы держатся возле эклиптики, в то время как долгопериодические приходят практически с любого направления. В общем, это предположение было принято вместе с именем «пояс Койпера». Некоторые астрономы предпочитают называть его «пояс Эджуорта — Койпера», а некоторые не считают возможным приписать честь открытия ни одному ни другому.

Происхождение пояса Койпера не слишком понятно. Моделирование раннего периода существования Солнечной системы указывает на уже упоминавшийся сценарий, по которому четыре планеты-гиганта первоначально сформировались в другом порядке (считая от Солнца) и не там, где они находятся в настоящее время, а затем мигрировали, раскидывая планетезимали на все четыре стороны. Большую часть первичного пояса Койпера унесло прочь, но примерно одно

тело из сотни осталось на месте. Подобно внутренней области облака Оорта, пояс Койпера представляет собой размытый тор.

Вещество распределено в поясе Койпера неравномерно; как и в поясе астероидов, на его распределение серьезно влияют резонансы, на этот раз с Нептуном. Где-то около 50 а.е. проходит так называемый барьер Койпера, где число тел внезапно и резко падает. Это явление пока не получило объяснения, хотя Патрик Лякава предполагает, что оно может быть результатом действия не обнаруженного пока крупного тела — настоящей планеты X.

Рассеянный диск — еще более загадочный и плохо изученный объект. Он слегка заходит в область пояса Койпера, но простирается дальше, примерно до 100 а.е., и сильно наклонен по отношению к эклиптике. Тела рассеянного диска имеют сильно вытянутые орбиты и часто отклоняются во внутреннюю часть Солнечной системы. Там они обитают какое-то время в роли кентавров, пока их орбита вновь не переменится и они не превратятся в короткопериодические кометы. Кентавры — это тела, орбиты которых пересекают эклиптику в промежутке между орбитами Юпитера и Нептуна; они остаются на таких орбитах всего по несколько миллионов лет. Всего существует, вероятно, около 45 000 таких тел больше километра в поперечнике. Большинство короткопериодических комет, вероятно, происходит из рассеянного диска, а не из пояса Койпера.

\*\*\*

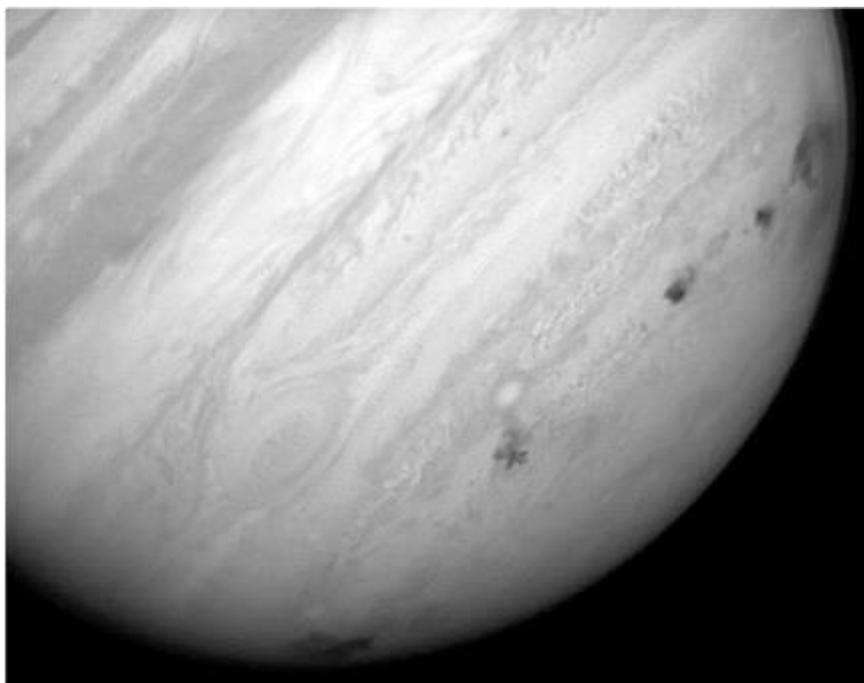
В 1993 году Кэролин и Юджин Шумейкер и Дэвид Леви открыли новую комету, которая получила название кометы Шумейкеров — Леви 9. Эта необычная комета была к тому времени захвачена Юпитером и находилась на орбите вокруг этой гигантской планеты. Комета Шумейкеров — Леви 9 была необычна в двух отношениях. Во-первых, это была единственная известная нам комета, обращающаяся вокруг планеты, а во-вторых, она, как выяснилось, уже распалась на части.



### Комета Шумейкеров — Леви 9, снятая 17 мая 1994 года

Причина этого выявилась при моделировании орбиты объекта назад во времени. Расчет показал, что в 1992 году комета должна была на какое-то время зайти внутрь юпитерианского предела Роша. Именно тогда приливные гравитационные силы разломали ядро кометы, породив цепочку из примерно 20 фрагментов. Комета была захвачена Юпитером примерно в 1960–1970 годах, и это тесное сближение с планетой сделало ее орбиту вытянутой и узкой.

Моделирование орбиты вперед по времени позволило предсказать, что при следующем прохождении перицентра, в июле 1994 года, она столкнется с Юпитером. Никогда прежде астрономам не удавалось впрямую наблюдать небесное столкновение, поэтому известие об этом вызвало нешуточный ажиотаж. Столкновение должно было взбаламутить атмосферу Юпитера и дать ученым возможность побольше узнать о более глубоких ее слоях, обычно скрытых облачным покровом. Столкновение, случившееся в назначенный срок, оказалось даже более драматичным, чем ожидали ученые, и оставило на лице планеты цепочку гигантских шрамов, которые, медленно заплывая, оставались видны на протяжении нескольких месяцев. Всего был зарегистрирован двадцать один удар; при самом мощном из них выделилось в 600 раз больше энергии, чем выделилось бы при одновременном взрыве всех ядерных вооружений на Земле.



Темные точки — места падения некоторых фрагментов кометы

### Шумейкеров — Леви 9

Падение кометы рассказало ученым о Юпитере много нового. Одно из открытий состояло в том, что Юпитер играет в Солнечной системе роль небесного пылесоса. Возможно, комета Шумейкеров — Леви 9 — единственная комета, которую земные астрономы наблюдали на орбите вокруг Юпитера, но, судя по нынешним орбитам комет, по крайней мере пять из них в прошлом тоже должны были на нее попасть. Все подобные захваты носят временный характер: либо такую комету вновь перехватывает Солнце, либо она рано или поздно с чем-то сталкивается. Тринадцать цепочек кратеров на Каллисто и три на Ганимедесвидетельствуют, что захваченная Юпитером комета не всегда сталкивается с ним самим. Все вместе указывает на то, что Юпитер выметает из Солнечной системы кометы и другой космический мусор, захватывая блуждающие тела, а затем и сталкиваясь с ними. По нашим меркам, такие события редки, но в космическом масштабе они происходят часто: комета 1–2 километров в поперечнике падает на Юпитер примерно раз в 6000 лет, а более мелкие кометы — еще чаще.

Данное свойство Юпитера помогает защитить внутренние планеты от кометной и астероидной опасности. Это заставило Питера Уорда и Дональда Браунли предположить в книге «Уникальная Земля», что наличие крупной планеты, такой как Юпитер, делает внутренние миры системы более пригодными для жизни. К несчастью для этой соблазнительной гипотезы, Юпитер также сбивает с пути истинного астероиды главного пояса, после чего они могут столкнуться с какой-то из внутренних планет. Если бы Юпитер был чуть меньше, его присутствие оказалось бы вредоносным для жизни на Земле. Тот Юпитер, который существует в действительности, судя по всему, не обеспечивает для земной жизни никаких особых преимуществ. Впрочем, «Уникальная Земля» противоречива в своей оценке столкновений: Юпитер превозносится в книге как наш спаситель от комет и в то же время положительно оценивается его способность срывать с орбит астероиды как способ лишний раз перетряхнуть экосистемы и тем самым подстегнуть эволюцию.

Комета Шумейкеров — Леви 9 сумела донести до многих американских конгрессменов чудовищную разрушительную силу кометного удара. Самый большой след этого столкновения на Юпитере по размеру сравним с Землей. Мы никак не смогли бы защитить себя от столкновения такого масштаба при помощи нынешних технологий или всего того, что у нас может появиться в обозримом будущем, но эта история обратила взгляды политиков на возможность менее масштабных столкновений, будь то с кометой или с астероидом, где нам, возможно, удалось бы предотвратить катастрофу, если бы мы позаботились о том, чтобы вовремя заметить опасность и принять меры. Конгресс тут же поручил NASA каталогизировать

все сближающиеся с Землей астероиды более километра в поперечнике. На данный момент их обнаружено 872 штуки, из которых 153 потенциально могут представлять для нас опасность. Согласно текущим оценкам, существует, но пока не обнаружено еще штук 70 подобных объектов.



## Хаос в космосе

Это в высшей степени неправильно.

«Аэроплан II: Продолжение»

У Плутона пять спутников. Харон — спутник округлый и необычно большой для такого центрального тела, тогда как Никта, Гидра, Кербер и Стикс — крохотные комки неправильной формы. Харон и Плутон синхронизированы таким образом, что всегда повернуты друг к другу одной и той же стороной. Для остальных спутников это неверно. 2015 год. Космический телескоп имени Хаббла зарегистрировал нерегулярные изменения отражения света от Никты и Гидры. Воспользовавшись математической моделью вращающихся тел, астрономы сделали вывод, что эти две луны, должно быть, кувыркаются в полете, причем кувыркаются не аккуратно и регулярно, а хаотически.

В математике прилагательное «хаотичный» — это не просто модное слово, означающее «беспорядочный и непредсказуемый». Оно обозначает детерминистский хаос, то есть нерегулярное на вид движение, совершаемое тем не менее по вполне регулярным правилам. Вероятно, это звучит парадоксально, но такое сочетание часто бывает неизбежным. Хаос выглядит — а в некоторых отношениях и является — случайным, но проистекает из тех же математических законов, которым подчиняется регулярное, предсказуемое поведение, такое как ежедневный восход Солнца.

Дальнейшие измерения, проведенные телескопом Хаббла, указывали на то, что Стикс и Кербер тоже вращаются хаотично. Одной из задач межпланетного аппарата New Horizons во время визита к Плутону была проверка этой теории. Данные с этого зонда должны были передаваться на Землю на протяжении 16 месяцев, и в настоящий момент, когда я это пишу, они еще не поступили полностью [45].

Кувыркающиеся луны Плутона — сенсация в области хаотичной динамики в космосе, но вообще-то астрономы знают много примеров космического хаоса, начиная с едва заметных подробностей движения крохотных лун и заканчивая долгосрочным будущим Солнечной системы. Спутник Сатурна Гиперион тоже хаотично кувыркается — это первый спутник планеты, который удалось застать за дурным поведением. Ось Земли наклонена на достаточно стабильные  $23,4^\circ$ , что обеспечивает нам регулярную смену времен года, но уже у Марса наклон оси меняется хаотично. Меркурий и Венера прежде тоже этим страдали, но вызванные Солнцем приливные явления их стабилизировали.

Существует связь между хаосом и люком Кирквуда 3:1 в поясе астероидов. Юпитер расчищает от астероидов эту область, разбрасывая их, хотя бы они этого или нет, по всей Солнечной системе. Некоторые из них пересекают орбиту Марса, который, в свою очередь, способен перенаправить их практически в любом направлении. Возможно, именно поэтому динозавры встретили свой конец. Троянские астероиды Юпитера, вероятно, были захвачены им вследствие хаотической динамики. Хаотическая динамика даже подсказала астрономам способ оценить возраст целого семейства астероидов.

Так что Солнечная система совсем не похожа на гигантский часовой механизм; скорее она играет со своими планетами в рулетку. Первый намек на это обнаружили в 1988 году Джерри

Сассман и Джек Уиздом; они открыли, что орбитальные элементы Плутона беспорядочно изменяются вследствие гравитационных сил, действующих на него со стороны других планет. Годом позже Уиздом и Ласкар показали, что орбита Земли также хаотична, хотя и в меньшей степени: сама орбита особенно не меняется, а вот положение Земли на ней непредсказуемо в долгосрочной перспективе — скажем, через 100 млн лет.

Сассман и Уиздом показали также, что, если бы не было внутренних планет, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун тоже вели бы себя хаотично в долгосрочной перспективе. Эти внешние планеты оказывают значительное влияние на все остальные планеты, что делает их главным источником хаоса в Солнечной системе. Однако хаос не ограничивается исключительно нашим небесным домом. Расчеты показывают, что многие экзопланеты у далеких звезд, вероятно, движутся по хаотическим орбитам. Существует и астрофизический хаос: светимость некоторых звезд изменяется хаотически. Движение звезд в галактиках тоже вполне может быть хаотичным, хотя астрономы при моделировании и рисуют им обычно круговые орбиты (см. главу 12).

Хаос, судя по всему, правит космосом. Тем не менее астрономы обнаружили, что чаще всего основной причиной хаоса являются резонансные орбиты, простые числовые закономерности — такие как люк Кирквуда с его резонансом 3:1. В то же время хаос порождает закономерности — примером тому, вполне возможно, служат спирали галактик, как мы это увидим в главе 12.

Порядок порождает хаос, а хаос порождает порядок.

\*\*\*

У систем, основанных на случайности, нет памяти. Если вы бросите игральную кость дважды, результат первого броска ничего не скажет вам о том, что произойдет при втором. Может, выпадет то же число, а может, и нет. Не верьте тому, кто попытается убедить вас, что если в данной серии бросков давно не выпадала шестерка, то некий «закон средних чисел» делает ее выпадение более вероятным. Такого закона не существует. Действительно, в долговременном плане доля шестерок в бросках правильной игровой кости должна быть очень близка к  $1/6$ , но это происходит потому, что любые нарушения тонут в большом количестве новых бросков, а не потому, что кость вдруг решает подправить результат и свести его к теоретически предсказанному среднему значению[46].

Хаотические системы, напротив, обладают своеобразной кратковременной памятью. То, чем они занимаются в настоящий момент, намекает на то, что они будут делать через некоторое небольшое время. Забавно, но если бы игральные кости были хаотичны, то невыпадение шестерки на протяжении долгого времени означало бы, что она, вероятно, не выпадет в ближайшее время[47]. В поведении хаотических систем присутствует множество приблизительных повторений, поэтому прошлое может служить разумным — хотя далеко не гарантированным — ориентиром для оценки ближайшего будущего.

Длительность периода времени, для которого подобные предсказания имеют смысл, называется горизонтом предсказуемости (есть специальный термин: время Ляпунова). Чем точнее вы знаете текущее состояние хаотической динамической системы, тем длиннее становится горизонт предсказуемости, но горизонт отдалается намного медленнее, чем растет точность измерений. Какими бы точными они ни были, малейшая ошибка в оценке нынешнего состояния со временем возрастет настолько, что собьет всякое предсказание. Метеоролог Эдвард Лоренц открыл эту закономерность на простой погодной модели, но то же самое верно и в отношении сложных погодных моделей, используемых в настоящее время синоптиками. Движение атмосферы подчиняется вполне конкретным математическим правилам, в которых нет места случайности, тем не менее все мы знаем, какими ненадежными становятся прогнозы погоды всего через несколько дней.

Это и есть знаменитый (и зачастую понимаемый неверно) эффект бабочки Лоренца: взмах крыла бабочки может месяцем позже вызвать ураган где-то на другом конце света[48].

Если вы считаете, что это звучит неправдоподобно, я вас не виню. Это соответствует истине, но только в очень специфическом смысле. Главным потенциальным источником непонимания здесь служит слово «вызвать». Трудно понять, как из крохотного количества энергии, заключенного во взмахе крыла, может родиться громадная энергия урагана. Ответ заключается в том, что ничего подобного на самом деле не происходит. Энергия урагана не исходит из взмаха

крыла: она поступает из других источников и перераспределяется, когда крыло взаимодействует с остальной, неизменной в других отношениях погодной системой.

После взмаха крыла мы не получаем в точности ту же погоду, что и до взмаха, но с лишним ураганом. Нет, меняется весь рисунок погоды по всему миру. Поначалу изменение невелико, но оно растет — не в смысле энергии, но в смысле отличия от того, что было бы, не взмахни бабочка крылом. И эти отличия стремительно становятся большими и непредсказуемыми. Если бы бабочка взмахнула крыльями на две секунды позже, она могла вместо этого «вызвать» торнадо на Филиппинах, скомпенсированный буранами по всей Сибири. Или месяц устойчивой погоды в Сахаре, если на то пошло.

Математики называют этот эффект «чувствительность к начальным условиям». В хаотической системе входные сигналы, очень слабо различающиеся между собой, вызывают результаты, отличающиеся очень сильно. Этот эффект вполне реален и очень часто встречается. Именно поэтому, в частности, тесто так тщательно замешивают. Каждый раз, когда тесто растягивают, соседние крупинки муки расходятся. Затем, когда тесто складывают и сминают, чтобы не дать ему убежать из опары, крупинки, прежде находившиеся далеко, могут оказаться рядом (а могут и не оказаться). Местное растягивание в сочетании со складыванием создает хаос.

Это не просто метафора, это описание на обычном бытовом языке фундаментального математического механизма, порождающего хаотическую динамику. С математической точки зрения атмосфера Земли похожа на тесто. Физические законы, управляющие погодой, локально «растягивают» атмосферу, но она не уходит никуда с планеты, так что ей приходится «накладываться» на себя. Следовательно, если бы мы могли прогнать динамику погоды на Земле дважды с той единственной разницей, что бабочка в начальный момент взмахнула крыльями — или не взмахнула, — то результирующие варианты разошлись бы экспоненциально. Погода, конечно, не перестала бы быть погодой, но она стала бы другой.

На самом деле мы не в состоянии прогнать реальную погоду дважды с разными начальными условиями, но именно так делаются прогнозы с использованием моделей, отражающих подлинную атмосферную физику. Крохотные изменения в числах, представляющих текущее состояние погоды, при подстановке в уравнения, предсказывающие ее будущее состояние, приводят к масштабным изменениям прогноза. К примеру, область высокого давления над Лондоном в одном прогоне модели может смениться областью низкого давления в другом. Современный способ обойти при прогнозировании этот неприятный эффект состоит в многократном моделировании погоды с небольшими случайными изменениями начальных условий и использовании результатов для количественной оценки вероятности различных прогнозов. Именно это означают слова «грозы с вероятностью 20%».

На практике невозможно вызвать конкретный ураган при помощи специально выдрессированной бабочки, потому что предсказание результата, вызванного взмахом ее крыльев, ограничено тем же горизонтом предсказуемости. Тем не менее в другом контексте, скажем, в связи с сердцебиением, подобного рода «хаотическое управление» может обеспечить эффективный путь к желаемому динамическому поведению. В главе 10 мы приведем несколько астрономических примеров этого в контексте космических проектов.

\*\*\*

Я вас не убедил? Недавнее открытие, касающееся раннего периода существования Солнечной системы, ярко высветило этот вопрос. Представим себе, что некая инопланетная сверхдержава способна была бы прогнать процесс образования Солнечной системы из первичного газового облака заново из того же самого начального состояния, но с добавлением одной-единственной лишней молекулы газа. Насколько иной в этом случае была бы сегодняшняя Солнечная система?

Хочется предположить, что она не слишком сильно отличалась бы от реальной. Но не забывайте про эффект бабочки. Математики доказали, что движение молекул в газе происходит хаотично, поэтому вряд ли стоило бы удивляться, если бы это оказалось верным и в отношении коллапсирующих газовых облаков, хотя детали процессов формально и различаются. Чтобы выяснить это, Фолькер Хоффман и его сотрудники смоделировали динамику газового диска на той стадии, когда в нем содержится 2000 планетезималей; исследователи хотели проследить, как столкновения заставляют эти тела собираться в планеты. Они сравнили результат с развитием моделей, в которых присутствовало два газовых гиганта с двумя различными вариантами для их

орбит. Для каждого из трех сценариев моделирование было проведено десятков раз с чуть разными начальными условиями. На каждый прогон модели ушел примерно месяц работы суперкомпьютера.

Выяснилось, что столкновения планетезималей, как и ожидалось, носят хаотичный характер. Эффект бабочки проявляется очень драматично: стоит изменить начальное положение одной-единственной планетезимали всего на 1 мм, и получается совершенно другая планетная система. Экстраполируя этот результат, Хоффман считает, что добавлением единственной молекулы газа к точной модели нарождающейся Солнечной системы (будь такое возможно) вы могли бы изменить результат так сильно, что Земля не сформировалась бы.

Вот вам и часовой механизм.

Прежде чем углубиться в рассуждения о том, насколько невероятным при этом становится наше собственное существование, и привлекать к этому вопросу божественную руку провидения, стоит принять во внимание еще один аспект этих расчетов. Хотя каждый прогон модели приводит к возникновению планет разных размеров на разных орбитах, все солнечные системы, рождающиеся в заданном сценарии, очень похожи между собой. Без газовых гигантов мы получаем около 11 каменных миров, уступающих в большинстве своем по размерам Земле. Добавляем газовые гиганты — это более реалистичная модель — и получаем четыре каменные планеты с массами от половинки земной до чуть больше массы нашей планеты. Это очень близко к тому, что есть на самом деле. Эффект бабочки меняет орбитальные элементы, но общая структура системы получается примерно одинаковой.

То же самое происходит и в погодных моделях. Взмах крылышек... и на земном шаре устанавливается совсем не такая погода, какой она была бы без этого взмаха, — но это все равно погода. Землю не заливают внезапно жидким азотом, и буран из гигантских лягушек тоже не налетает. Так что, хотя наша Солнечная система, скорее всего, не возникла бы в точности в нынешней своей форме, если бы первоначальное газовое облако было чуть-чуть иным, на ее месте непременно возникло бы что-то очень похожее. Так что шансов на появление живых организмов, вероятно, было бы не меньше.

Иногда горизонт предсказуемости может быть использован для оценки возраста хаотической системы небесных тел, поскольку именно от него зависит, как быстро система распадется и разбредется в разные стороны. В качестве примера можно назвать семейства астероидов. Их выделяют потому, что члены семейств обладают очень схожими орбитальными элементами. Считается, что каждое такое семейство возникло в результате распада в какой-то момент в прошлом одного более крупного тела. В 1994 году Андреа Милани и Паоло Фаринелла воспользовались этим методом, чтобы определить, что возраст семейства астероида Веритас не превышает 50 млн лет. Семейство это представляет собой компактный кластер астероидов, связанных с астероидом 490 Веритас и расположенных ближе к внешнему краю основного пояса с внутренней стороны от резонансной орбиты 2:1 с Юпитером. Их расчеты показывают, что два астероида этого семейства имеют сильно хаотические орбиты, созданные временным резонансом 21:10 с Юпитером. Горизонт предсказуемости указывает на то, что эти два астероида не должны были бы оставаться на близких орбитах более 50 млн лет, в то время как другие данные свидетельствуют о том, что оба они изначально являются членами семейства Веритас.

\*\*\*

Первым, кто догадался о существовании детерминистского хаоса и сумел хотя бы предположить, почему он возникает, был великий математик Анри Пуанкаре. В то время он работал над задачей, на которую король Норвегии и Швеции Оскар II объявил математический конкурс и пообещал приз. Требовалось найти решение задачи  $n$  тел для ньютоновой гравитации. В правилах конкурса точно указывалось, какого рода требуется решение. Просили найти не формулу вроде Кеплерова эллипса, поскольку все уже были убеждены, что ничего подобного не существует, а «представление координат каждой точки в виде [бесконечного] ряда от какой-либо переменной, которая является некоторой известной функцией времени и для всех значений которой ряд сходится равномерно».

Пуанкаре выяснил, что решить эту задачу в общем и целом невозможно даже для трех тел при очень ограниченных начальных условиях. Чтобы доказать это, он продемонстрировал, что орбиты могут быть, как мы сказали бы сегодня, «хаотичными».

Обобщенная задача для произвольного числа тел оказалась не по зубам даже Пуанкаре. Он взял  $n = 3$ . На самом деле он работал над тем, что я в главе 5 назвал задачей двух с половиной тел. Два тела — это, скажем, планета и одна из ее лун; за половинку считается пылинка, настолько легкая, что, хотя сама она откликается на гравитационные поля двух других тел, на них она не оказывает абсолютно никакого влияния. Из этой модели получается чудесная комбинация из совершенно регулярной (как в задаче двух тел) динамики двух массивных тел и в высшей степени непредсказуемого поведения пылинки. Как ни странно, именно регулярное поведение массивных тел делает поведение пылинки совершенно безумным.

Слово «хаос» создает у читателя впечатление, что орбиты трех или более тел являются случайными, бесструктурными, непредсказуемыми и не подчиняются никаким законам. На самом деле пылинка кружится по гладким кривым, близким к дугам эллипсов, но форма эллипса при этом постоянно меняется без всякой видимой закономерности. Пуанкаре наткнулся на возможность хаоса, когда размышлял о динамике пылинки на орбите, близкой к периодической. Он ожидал обнаружить какую-то сложную комбинацию периодических движений с разными периодами, примерно как если бы космический аппарат облетал Луну, облетал Землю и облетал Солнце — все за разные периоды времени. Однако, как уже обозначено в правилах конкурса, ответ ожидался в виде «ряда», в котором присутствует не всего лишь три, а бесконечное множество периодических движений.

Пуанкаре нашел такой ряд. Но как же тогда появляется хаос? Не оттого, что тут присутствует ряд, а из-за порочности всей идеи. В правилах говорилось, что ряд должен сходиться. Это формальное математическое требование, необходимое для того, чтобы бесконечная сумма имела смысл. По существу, сумма ряда по мере включения в нее новых членов должна подходить все ближе и ближе к какому-то конкретному числу. Пуанкаре всегда тщательно искал подводные камни; он понял, что его ряд не сходится. Поначалу он, казалось, подходил все ближе к какому-то конкретному числу, но потом сумма вдруг начинала расходиться от этого числа все дальше и дальше. Такое поведение характерно для «асимптотических» рядов. Иногда асимптотический ряд может быть полезен для практических целей, но здесь он намекал на то, что на пути к получению подлинного решения стоит какое-то препятствие.

Чтобы понять, что это за препятствие, Пуанкаре отказался от формул и рядов и обратился к геометрии. Он рассматривал одновременно положение в пространстве и скорость, так что горизонталы на рисунке в 5 главе на самом деле представляли собой не кривые, а трехмерные объекты. Это вызывало дополнительные сложности. Размышляя о геометрическом размещении всех возможных орбит, близких к конкретной периодической орбите, Пуанкаре понял, что многие орбиты здесь должны быть очень запутанными и непредсказуемыми. Причина заключается в особой паре кривых, полностью определяющих, как близлежащие орбиты ведут себя по отношению к периодической: приближаются к ней или удаляются от нее. Если эти кривые пересекаются друг с другом в какой-то точке, то из фундаментальных математических свойств динамики (единственность решений дифференциальных уравнений при заданных начальных условиях) следует, что они должны пересекаться в бесконечном числе точек, образуя запутанную сеть. Вскоре после этого в журнале *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Celeste* («Новые методы небесной механики») Пуанкаре так описал эту геометрию:

«Своего рода шпалеры, ткань, плетенка в виде бесконечно плотной сетки; каждая из двух кривых не должна пересекать самое себя, но должна накладываться на себя очень сложным образом, так чтобы перекрещиваться со всеми ячейками ткани бесконечное число раз. Поражает сложность этой картины, которую не буду даже пытаться изобразить».

Сегодня мы называем эту картину гомоклиническим плетением. Не обращайте внимания на «гомоклиническое» (этим специальным термином обозначается фазовая траектория, которая присоединяет к себе точку равновесия), сосредоточьтесь лучше на «плетении», в данном случае это слово более красноречиво. Рисунок ниже объясняет геометрию этого явления при помощи простой аналогии.

По иронии судьбы Пуанкаре едва не упустил возможность сделать это эпохальное открытие. Просматривая документы Института Миттаг-Леффлера в Осло, историк математики Джун Бэрроу-Грин обнаружила, что опубликованный вариант работы Пуанкаре, ставший победителем конкурса, не совпадает с вариантом той же работы, поданным на конкурс. Уже после того, как приз был присужден, а официальные материалы конкурса напечатаны, но еще не разосланы,

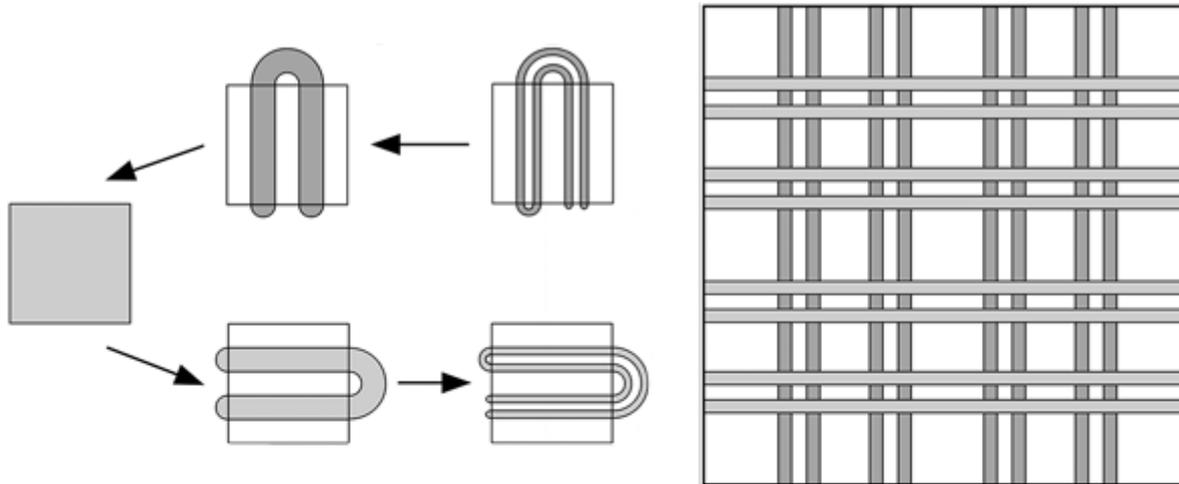
Пуанкаре обнаружил в своей работе ошибку — он упустил из виду хаотические орбиты. Он отозвал свою работу и заплатил за то, чтобы в официальной публикации его работа была по-тихому заменена пересмотренной версией.

\*\*\*

Потребовалось немало времени, чтобы идеи Пуанкаре получили признание. Следующий прорыв произошел в 1913 году, когда Джордж Биркгоф доказал так называемую «последнюю геометрическую теорему» — недоказанное предположение, из которого Пуанкаре вывел существование, в подходящих для того условиях, периодических орбит. Мы сегодня называем этот результат теоремой Пуанкаре — Биркгофа о неподвижной точке.

Математики и другие ученые до конца осознали существование хаоса лет 50 назад. Следуя по стопам Биркгофа, Стивен Смейл провел глубокое исследование геометрии гомоклинического плетения; он встретил ту же проблему в другой области динамики, что и побудило его заинтересоваться этим вопросом. Он придумал динамическую систему со сходной геометрией, которую намного проще анализировать; эта система получила известность как подкова Смейла. Она начинается с квадрата, который растягивается в длинный тонкий прямоугольник и загибается в форме подковы, а затем накладывается на первоначальный квадрат. Повторение этой процедуры раз за разом очень напоминает замес теста и порождает те же хаотические последствия. Геометрия подковы позволяет строго доказать, что такая система хаотична и что в некоторых отношениях она ведет себя как случайная последовательность бросков монетки, несмотря на свою полную детерминированность.

По мере того как проявлялись масштабы и богатство хаотической динамики, растущий ажиотаж в научной среде разбудил интерес к хаосу в средствах массовой информации, которые окрестили все это предприятие «теорией хаоса». На самом же деле хаотическая динамика всего лишь часть, хотя, бесспорно, значительная и захватывающе интересная часть, еще более важной области математики, известной как нелинейная динамика.



*Слева: подкова Смейла.*

Квадрат раз за разом складывают, создавая таким образом серию горизонтальных полос. Если пустить время назад и начать все разворачивать, они превращаются в аналогичные вертикальные полосы. Когда два набора полос накладываются друг на друга, получаем гомоклиническое плетение. Динамика, полученная за счет многократного складывания, заставляет точки прыгать по плетению случайным на первый взгляд образом. Полное плетение содержит бесконечное число линий

\*\*\*

Странное поведение спутников Плутона — всего лишь один пример хаоса в космосе. В 2015 году Марк Шоултер и Дуглас Хэмилтон опубликовали математический анализ, подводящий теоретическую базу под загадочные наблюдения лун Плутона, выполненные телескопом Hubble. Идея в том, что Плутон и Харон действуют как доминирующие тела в анализе Пуанкаре, а остальные, намного более мелкие луны ведут себя отчасти как пресловутые пылинки. Однако, поскольку это все же не точечные тела, а луны в форме мяча для регби или, возможно, даже картофелины, их безумие проявляется хаотическим кувырканием. Их орбиты, как и положение на этих орбитах в произвольный момент времени, также хаотичны, а значит, предсказываются только статистически. Еще менее предсказуема ориентация каждой луны.

Луны Плутона не были первыми объектами, замеченными за кувырканием. Эта честь принадлежит спутнику Сатурна Гипериону, и первоначально он считался единственной в своем роде кувыркающей лунной. В 1984 году Гиперион привлек к себе внимание Уиздома, Стэнтон Пила и Франсуа Миньяра. Следует заметить, что почти все спутники планет в Солнечной системе относятся к двум категориям. Вращение луны, относящейся к первой категории, подверглось сильному влиянию приливного взаимодействия с центральным телом — планетой, так что такие луны всегда обращены к планете одной и той же стороной; иначе говорят, что они находятся с планетой в спин-орбитальном резонансе 1:1, то есть вращаются с ней синхронно. Луны второй категории очень слабо взаимодействуют с планетой и по-прежнему вращаются примерно так же, как делали это сразу после формирования. Гиперион и Япет — исключения: согласно теории, они должны со временем потерять большую часть своего изначального момента и синхронизовать вращение с орбитальным движением, но ненадолго — примерно на миллиард лет.

Несмотря на это, Япет уже вращается синхронно. Один Гиперион, казалось, делает что-то более интересное. Оставался, однако, вопрос: что именно?

Уиздом и его коллеги сравнили данные по Гипериону с теоретическим критерием хаоса — условием наложения резонансов. Результат показал, что орбитальное движение Гипериона должно хаотически взаимодействовать с его вращением, и это предсказание подтвердилось при численном решении уравнений движения. Хаос в динамике Гипериона проявляется главным образом в непредсказуемом кувыркании. Сама орбита так дико не меняется. Примерно так катится по полю мяч для регби, в целом почти прямо, но переваливаясь при этом непредсказуемо с одного конца на другой.

В 1984 году единственной известной лунной Плутона был Харон, открытый в 1978 году, и никто не мог измерить скорость его вращения. Остальные четыре спутника были открыты с 2005 по 2012 год. Все пять спутников втиснуты в необычайно маленькое пространство, и считается, что первоначально все они были частями одного более крупного тела, которое столкнулось с Плутоном на ранней стадии формирования Солнечной системы — этакая миниатюрная версия теории ударного формирования нашей собственной Луны. Харон большой, округлый и к тому же синхронизирован с Плутоном, то есть обращен к нему всегда одной и той же стороной, как Луна к Земле. Однако, в отличие от Земли, Плутон тоже всегда обращен к своему спутнику одной и той же стороной. Такая синхронизация и округлая форма не позволяют Харону хаотически кувыркаться. Остальные четыре луны малы и имеют неправильную форму; в настоящее время известно, что они, подобно Гипериону, хаотически кувыркаются.

Нумерология Плутона не ограничивается резонансом 1:1. С хорошим приближением Стикс, Никта, Кербер и Гидра состоят с Хароном в орбитальных резонансах 1:3, 1:4, 1:5 и 1:6; это означает, что их периоды приблизительно в 3, 4, 5 и 6 раз превосходят период Харона. Однако это лишь средние цифры. Их реальные орбитальные периоды заметно варьируются от одного оборота к другому.

Да, с учетом всего сказанного картина по астрономическим меркам выглядит очень упорядоченно. Поскольку порядок может порождать хаос, они часто встречаются одновременно в одной и той же системе: она может быть упорядоченной в одних отношениях и хаотичной в других.

\*\*\*

Две ведущие исследовательские группы, работающие над изучением хаоса и долговременной динамики Солнечной системы, возглавляют Уиздом и Ласкар. В 1993 году практически

одновременно — с недельным разрывом — обе группы опубликовали работы с описанием нового космического контекста для хаоса: наклона осей вращения планет.

В главе 1 мы видели, что твердое тело вращается вокруг оси — прямой линии, проходящей сквозь тело и неподвижной в данный момент. Ось вращения может сдвигаться со временем, но на небольших периодах времени ее можно считать неподвижной. Так что тело вращается, как волчок, а ось выполняет роль центрального веретена. Планеты, будучи почти шарообразными объектами, вращаются с весьма постоянной скоростью вокруг оси, которая, кажется, совершенно не меняется на протяжении целых столетий. В частности, угол между осью и плоскостью эклиптики, технически известный как наклон оси, остается постоянным. У Земли он составляет  $23,4^\circ$ .

Однако внешность бывает обманчива. Около 160 года до нашей эры Гиппарх открыл эффект, известный как предварение равноденствий, или прецессия. Птолемей в «Альмагесте» утверждает, что Гиппарх наблюдал положение на ночном небе звезды Спика ( $\alpha$  Девы) и других звезд. Два его предшественника делали то же самое: Аристилл около 280 года до нашей эры и Тимохарис около 300 года до нашей эры. Сравнивая данные, Птолемей сделал вывод, что Спика, наблюдаемая в осеннее равноденствие — в то время, когда день и ночь имеют равную продолжительность, — сместилась на  $2^\circ$ . Из этого он заключил, что равноденствия смещаются вдоль зодиака со скоростью примерно  $1^\circ$  за столетие и со временем (через 36 000 лет), обойдя круг, вернутся в ту же точку, откуда начали.

Мы сегодня знаем, что Птолемей был прав, и знаем почему. Вращающиеся тела прецессируют — ось их вращения постепенно меняет направление, по мере того как ее кончик медленно описывает окружность. Крутящиеся волчки часто ведут себя так же. Математика еще со времен Лагранжа рассматривает прецессию как типичную динамику тела, обладающего симметрией определенного типа (имеющего две одинаковые оси инерции). По форме планеты близки к эллипсоидам вращения и, соответственно, удовлетворяют этому условию. Для оси Земли период прецессии составляет 25 772 года — значительно меньше, чем по оценке Птолемея. Прецессия меняет для нас вид звездного неба. В настоящий момент Полярная звезда в созвездии Малой Медведицы стоит практически точно на оси и потому кажется неподвижной на небосклоне, в то время как остальные звезды как будто ходят вокруг нее по кругу. На самом деле вращается, конечно, Земля. Но в Древнем Египте, 5000 лет назад, Полярная звезда тоже описывала круг, а неподвижна вместо нее была тусклая звездочка Батн аль-Тубан ( $\phi$  Дракона). Я выбрал эту дату потому, что только от случая зависит, найдется возле полюса яркая звезда или нет, и чаще всего такой звезды там не оказывается.

При прецессии наклонение оси планеты не меняется. Времена года на ней медленно смещаются, но настолько медленно, что заметить это способен был только Гиппарх, да и то только при помощи нескольких предыдущих поколений. Любое заданное место на планете испытывает примерно те же сезонные колебания, что и раньше, но их начало и конец очень медленно смещаются. Если же прецессия оси планеты находится в резонансе с периодом изменения какого-либо переменного орбитального элемента, наклонение оси может меняться. Обе группы исследователей проанализировали динамику планеты и просчитали, какой эффект это дает.

Расчеты Уиздома показывают, что наклонение оси Марса меняется хаотически в диапазоне от  $11^\circ$  до  $49^\circ$ . Оно способно измениться на  $20^\circ$  примерно за 100 000 лет и приблизительно с той же скоростью хаотически колеблется в аналогичном интервале. Девять миллионов лет назад наклонение оси варьировалось от  $30^\circ$  до  $47^\circ$ , и это продолжалось до тех пор, пока 4 млн лет назад не произошел относительно резкий переход к интервалу от  $15^\circ$  до  $35^\circ$ . Вычисления проведены с учетом эффектов общей теории относительности, которые в данной конкретной задаче играют существенную роль. Без них модель не приводит к этому переходу. Причиной перехода является — вы уже догадались — прохождение через спин-орбитальный резонанс.

Группа Ласкара использовала другую модель, без релятивистских эффектов, но с более точным представлением динамики, и рассматривала более протяженный временной интервал. По Марсу группа получила примерно те же результаты, что и группа Уиздома; помимо этого, они обнаружили, что на более протяженных временных интервалах наклонение оси Марса варьируется от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ , то есть в еще более широком диапазоне.

Группа Ласкара исследовала также Меркурий, Венеру и Землю. В настоящее время Меркурий вращается очень медленно, совершая один оборот за 58 дней, а вокруг Солнца обходит за 88 дней — это спин-орбитальный резонанс 3:2. Причиной, вероятно, является приливное взаимодействие с Солнцем, которое и замедлило постепенно первоначальное быстрое вращение. Группа Ласкара вычислила, что первоначально Меркурий совершал один оборот вокруг своей оси за 19 часов. Прежде чем планета достигла своего нынешнего состояния, наклонение ее орбиты менялось от 0 до 100°, проходя большую часть этого интервала примерно за миллион лет. Были, в частности, времена, когда его полюс был обращен непосредственно к Солнцу.

Венера представляет загадку для астрономов, потому что, согласно принятым договоренностям об измерении углов для вращающихся тел, ее наклонение составляет 177° — по существу, она вращается вниз головой. Это заставляет ее вращаться очень медленно (период 243 дня) в противоположную по сравнению с остальными планетами сторону. Объяснения такому «ретроградному» движению пока нет, но в 1980-е годы считалось, что Венера так крутится изначально — с момента формирования Солнечной системы. Анализ Ласкара показывает, что, возможно, все было не так. Считается, что первоначально Венера вращалась с периодом всего лишь 13 часов. При таком предположении модель показывает, что наклонение оси Венеры первоначально менялось хаотически, а достигнув 90°, могло застabilizироваться и уже из этого состояния медленно измениться до своей нынешней величины.

Для Земли результаты получились другие, весьма интересные. Наклонение оси Земли очень стабильно и варьируется всего на 1°. Причиной тому, судя по всему, служит наша необычно большая Луна. Без нее наклонение оси блуждало бы от 0 до 85°. На такой альтернативной Земле климатические условия были бы совсем не похожи на нынешние. Если сейчас у нас на экваторе тепло, а на полюсах холодно, то в этом случае разные регионы испытывали бы совершенно другие диапазоны температур. Это повлияло бы на погодные закономерности.

Некоторые ученые полагают, что без Луны хаотические изменения климата сделали бы Землю менее благоприятной для развития на ней жизни, особенно сложной жизни. Однако жизнь появилась в океанах, а сушу заселила всего лишь около 500 млн лет назад. Меняющийся климат не слишком затронул бы морскую жизнь. Что же до наземных животных, то климатические изменения, которые возникли бы на Земле при отсутствии Луны, были бы быстрыми по астрономическим меркам, но наземные организмы успевали бы мигрировать вслед за изменениями климата, поскольку по их меркам эти изменения происходили бы медленно. Эволюция, скорее всего, шла бы своим чередом, а может быть, даже ускорила бы из-за более сильного давления и необходимости постоянно адаптироваться.

\*\*\*

Но, пожалуй, интереснее посмотреть, как повлияли на живых существ Земли астрономические события, которые действительно произошли, а не только гипотетически могли произойти. Самое знаменитое из таких событий — астероид, уничтоживший динозавров. Или это была комета? А может, были задействованы и другие факторы, такие как множественные извержения вулканов?

Динозавры появились на Земле около 231 млн лет назад, в триасском периоде, и исчезли 65 млн лет назад, в конце мелового периода. В промежутке между этими датами они были самыми успешными позвоночными на Земле, на суше и в море. Для сравнения скажем, что «современный» человек существует около 2 млн лет. Однако видов динозавров было множество, так что сравнение немного несправедливо. Большинство отдельных видов существовало не более нескольких миллионов лет.

Геологическая летопись Земли показывает, что динозавры вымерли очень быстро по геологическим меркам. Вместе с ними исчезли мозазавры, плезиозавры, аммониты, многие птицы, большинство сумчатых, половина разновидностей планктона, многие рыбы, морские ежи, губки и улитки. Это «мел-палеогеновое вымирание» — одно из пяти или шести крупнейших событий, при которых громадное число биологических видов исчезало с лица Земли буквально за геологическое мгновение. Динозавры еще сумели оставить кое-каких современных потомков: птицы развились из динозавров подотряда тероподов в юрском периоде. К концу периода своего господства динозавры сосуществовали с млекопитающими, в том числе довольно крупными, и

исчезновение динозавров, судя по всему, послужило стимулом для взрывной эволюции млекопитающих — ведь со сцены исчезли главные конкуренты.

Палеонтологи сходятся во мнении, что главной причиной мел-палеогенового вымирания было столкновение с астероидом — или, может быть, кометой, — оставившим неизгладимый след на юкатанском побережье Мексики: кратер Чиксулуб. Было ли это единственной причиной, ученые спорят, отчасти потому, что имеется еще один правдоподобный кандидат на роль виновника — массивные излияния вулканической магмы, сформировавшие траппы плато Декан в Индии, результатом которых должно было стать попадание в атмосферу большого количества вредоносных газов. «Траппы» в переводе со шведского обозначает «ступени». Эти слои базальта при выветривании образуют как бы серию гигантских ступеней. Возможно, в этом участвовали также климатические изменения или изменения уровня моря. Но столкновение по-прежнему остается главным подозреваемым, а несколько попыток доказать обратное ни к чему не привели, поскольку во всех них используются недоказанные утверждения.

Главная проблема теории с деканскими траппами, к примеру, состоит в том, что формировались они на протяжении 800 000 лет, а мел-палеогеновое вымирание прошло намного быстрее. В 2013 году Пол Ренн при помощи метода аргон-аргоновой датировки (анализ содержания в породе разных изотопов газа аргона) установил, что столкновение произошло 66,043 млн лет назад плюс-минус 11 000 лет. Вымирание динозавров, судя по всему, произошло в пределах 33 000 лет от этой даты. Если все это верно, то даты событий сошлись слишком точно для того, чтобы это можно было считать простым совпадением. В то же время, вполне возможно, что экосистему Земли потрясло какое-то совсем другое событие, а столкновение стало лишь последней каплей. Мало того, в 2015 году команда геофизиков под руководством Марка Ричардса обнаружила явные свидетельства того, что вскоре после столкновения поток лавы из деканских трапп удвоился. Это добавляет достоверности более старой теории о том, что ударная волна от столкновения обошла всю Землю и сосредоточилась в области, диаметрально противоположной Чиксулубу, а область эта, оказывается, лежит совсем рядом с траппами Декана.

Астрономы пытаются выяснить, чем было небесное тело, с которым столкнулась Земля, — кометой или астероидом и даже откуда оно прилетело. В 2007 году Уильям Боттке с коллегами опубликовали анализ сходных химических свойств, позволяющий предположить, что прилетевшее к нам тело происходило из группы астероидов, известной как семейство Баптистины, и что астероид, породивший эту группу, распался на куски около 160 млн лет назад. Однако по крайней мере один астероид этой группы имеет другой, отличный от остальных, химический состав, и в 2011 году ученые датировали момент распада как 80 млн лет назад, не очень-то много времени прошло от разрушения до столкновения с Землей.

\*\*\*

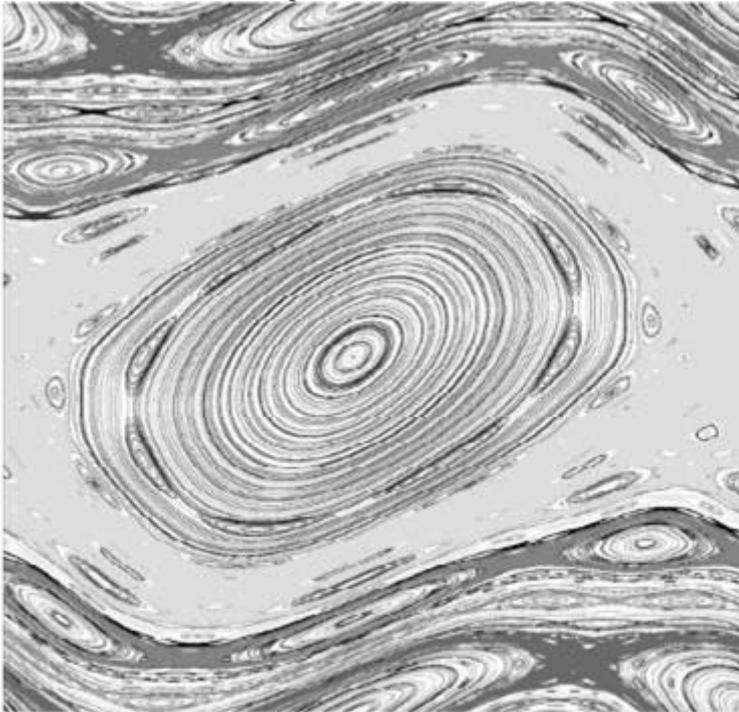
Единственное, что удалось установить, — это наличие хаотического механизма, посредством которого астероид может быть выброшен из пояса и в конце концов столкнуться с Землей. Главным действующим лицом здесь является Юпитер, а Марс ему умело ассистирует.

Вспомним (об этом говорилось в главе 5), что в поясе астероидов имеются «люки» — определенные расстояния от Солнца, где астероидов необычно мало, и что эти щели коррелируют с орбитами, состоящими в резонансе с Юпитером. В 1983 году Уиздом исследовал структуру люка Кирквуда (резонанс 3:1), пытаясь разобраться в математическом механизме, изгоняющем астероиды с такой орбиты. Математики и физики уже установили тесную связь между резонансом и хаосом. Само явление резонанса основано на существовании периодической орбиты, на которой астероид делает целое число оборотов за то время, пока Юпитер совершает другое целое число оборотов по своей орбите. Эти два числа характеризуют резонанс, и в данном случае это 3 и 1. Однако такая орбита будет изменяться под возмущающим влиянием других тел. Вопрос в том, как изменяться.

В середине XX века три математика — Андрей Колмогоров, Владимир Арнольд и Юрген Мозер — получили отдельные фрагменты ответа на этот вопрос, которые вместе образовали теорему Колмогорова — Арнольда — Мозера (теорему КАМ). Она гласит, что орбиты, близкие к периодическим, бывают двух типов. Одни из них квазипериодичны, они «крутятся» вокруг основной орбиты, другие — хаотичны. Более того, эти два типа размещаются в пространстве

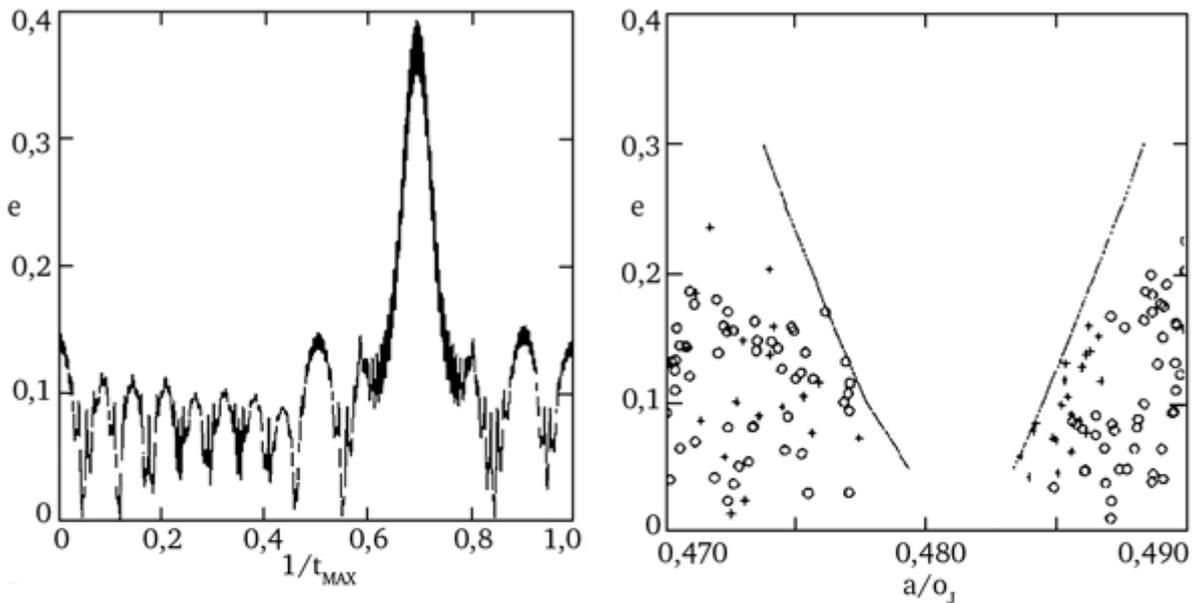
весьма хитроумным способом. Квазипериодические орбиты закручиваются вокруг трубок, окружающих основную периодическую орбиту. Этим трубкам бесконечное множество. Между ними располагаются более сложные трубки, которые закручиваются уже вокруг этих спиральных трубок. Между ними располагаются еще более сложные трубки, которые закручиваются уже вокруг этих, и т.д. (Именно это означает слово «квазипериодические».) Хаотические орбиты заполняют собой сложной формы прорехи между всеми этими простыми и многократно закрученными спиралями и определяются гомоклиническим плетением Пуанкаре.

Чтобы хоть как-то визуализировать эту чрезвычайно сложную структуру, проще всего позаимствовать прием Пуанкаре и посмотреть на нее в поперечном сечении. Основной периодической орбите здесь соответствует центральная точка, квазипериодические трубки в сечении образуют замкнутые кривые, а заштрихованные области между ними — это следы хаотических орбит. Такая орбита проходит через некоторую точку в заштрихованной области, проходит полный круг вблизи оригинальной периодической орбиты и вновь проходит через плоскость сечения в другой точке — отношения которой с первой выглядят случайными. Наблюдатель при этом не увидит, что астероид шатается по орбите, как пьяный; просто орбитальные элементы астероида меняются хаотически от оборота к обороту.



### Численно рассчитанное поперечное сечение орбит вблизи периодической орбиты, согласно теореме КАМ

Чтобы провести конкретные расчеты для люка Кирквуда 3:1, Уиздом придумал новый метод моделирования динамики: формулу, помогающую определить, как последовательные орбиты проходят через плоскость сечения. Вместо того чтобы решать дифференциальные уравнения орбиты, достаточно просто раз за разом применять эту формулу. Результаты подтверждают, что хаотические орбиты существуют, и позволяют подробнее рассмотреть, что они собой представляют. У наиболее интересных орбит эксцентриситет аппроксимирующего эллипса внезапно и резко возрастает. Так, что орбита, достаточно близкая к окружности или, скажем, округлому эллипсу, превращается в эллипс длинный и тонкий. Достаточно длинный, кстати говоря, чтобы пересечь орбиту Марса. Поскольку происходит это неоднократно, существует значительная вероятность, что он сблизится с Марсом и испытает его возмущающее действие — эффект пращи. И этот эффект забросит его... куда угодно. Уиздом предположил, что именно при помощи этого механизма Юпитер расчищает люк Кирквуда 3:1. Для подтверждения этого он нанес орбитальные элементы ближайших к нему астероидов на диаграмму и сравнил их с хаотической зоной своей модели. Совпадение получилось почти идеальным.



*Слева:* По вертикальной оси отложен пик эксцентриситета.  
По горизонтальной оси — время.

*Справа:* внешние края хаотической зоны (сплошные линии) и орбитальные элементы астероидов (точки и крестики).

По вертикальной оси отложен эксцентриситет, по горизонтальной — отношение больших полуосей орбит астероида и Юпитера

По существу, хаос придает любому астероиду, пытающемуся существовать в щели, встряску, и отправляет его к Марсу, который уже непосредственно выпинывает его прочь. Юпитер подает угловой, Марс забивает. И иногда... всего лишь иногда... Марс выпинывает астероид в нашем направлении. И если удар попадает в цель...

Динозавры проигрывают, один — ноль в пользу Марса.



## Межпланетная автострада

Космические путешествия — полная чепуха.

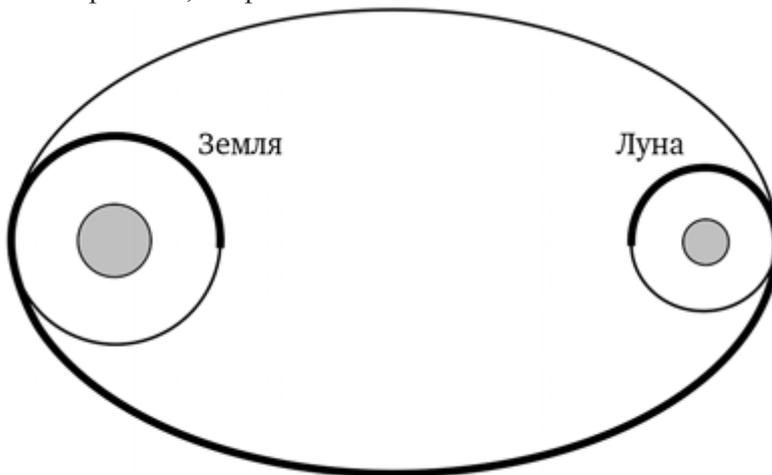
Ричард Вулли, королевский астроном, 1956 год

Когда мечтатели — ученые и инженеры — впервые всерьез задумались о высадке человека на Луну, одной из первых задач, которые им необходимо было решить, стала выработка лучшего маршрута. Слово «лучший» имеет много значений. В данном случае основными требованиями были быстрота перелета (она позволяла минимизировать время, которое уязвимые астронавты проведут в слабой жестянке космического корабля) и минимальное число включений и выключений ракетного двигателя (что снижало вероятность его отказа).

Траектория корабля Apollo 11, двое астронавтов которого впервые высадились на Луну, подчинялась именно этим двум принципам. Сначала космический корабль был выведен на низкую околоземную орбиту, где все можно было проверить и убедиться, что он сохранил работоспособность. Затем один-единственный запуск двигателей разогнал его и направил к Луне. На подлете еще одно включение замедлило полет и перевело корабль на окололунную

орбиту. Затем посадочный модуль опустился на поверхность, а несколько дней спустя его верхняя половинка вновь вернулась на орбиту вместе с экипажем. После этого она была отброшена, а экипаж вернулся на Землю посредством еще одного включения двигателя, которое увело корабль с окололунной орбиты. После баллистического перелета домой началась самая опасная часть всего путешествия: при помощи трения об атмосферу Земли затормозить командный отсек в достаточной мере, чтобы он мог приземлиться на парашютах.

Некоторое время в большинстве космических проектов использовались траектории именно этого типа, известные в простейшей своей форме как эллипс Гоманна. В определенном смысле эллипс Гоманна оптимален. Он быстрее большинства альтернатив при том же расходе ракетного топлива. Но постепенно, по мере того как человечество набиралось опыта в осуществлении космических программ, инженеры поняли, что другие полетные задания выставляют проектировщикам другие требования. В частности, если вы отправляете куда-то автоматический аппарат или припасы, скорость не так важна.



### Эллипс Гоманна (жирной линией показана переходная орбита)

До 1961 года планировщики космических перелетов, убежденные в оптимальности эллипса Гоманна, рассматривали гравитационное поле планеты как препятствие, которое необходимо преодолевать работой двигателя. Затем Майкл Минович при моделировании открыл эффект пращи[49]. Через несколько десятилетий новые идеи, позаимствованные из математики орбит многих тел, привели к открытию: космический аппарат может добраться до места назначения, используя намного меньше топлива, если будет следовать по траектории, совершенно непохожей на ту, что использовалась для высадки на Луну. Расплачиваться придется тем, что полет будет продолжаться намного дольше и потребует, возможно, более сложной последовательности импульсов ракетных двигателей. Однако современные двигатели более надежны и могут запускаться многократно без существенного повышения общей вероятности неудачи.

Вместо того чтобы рассматривать только Землю и конечную цель путешествия, инженеры начали брать в расчет все тела, потенциально способные повлиять на траекторию межпланетного аппарата. Гравитационные поля всех этих тел в совокупности создают своего рода ландшафт энергий — эту метафору мы уже встречали в связи с точками Лагранжа, троянскими и ахейскими астероидами. По существу, космический аппарат движется вдоль горизонталей этого ландшафта. Характерная черта этого процесса — то, что ландшафт меняется по мере движения образующих его тел. Еще одна его особенность — то, что математически это многомерный ландшафт, а не обычный трехмерный, поскольку скорости тел здесь не менее важны, чем их положение в пространстве. Третья особенность — то, что ключевую роль в процессе играет хаос: можно воспользоваться эффектом бабочки и получить серьезный результат от небольшого воздействия.



**Межпланетная автострада в художественном представлении.  
В виде ленты изображена одна из возможных траекторий вдоль  
трубки, а перетяжки на трубке представляют точки Лагранжа**

Эти идеи уже используются в реальных проектах. Они подразумевают также, что в Солнечной системе существует целая сеть невидимых математических трубок, связывающих планеты, — межпланетная система автострад, представляющих собой необычайно эффективные пути между ними. Не исключено, что динамика, управляющая этими трубками, позволит даже объяснить расстояния между орбитами планет и сформулировать какой-то современный вариант закона Тициуса — Боде.

\*\*\*

Проект Rosetta — наглядный пример применения новых методов проектирования траекторий для космических аппаратов. В нем не используется эффект бабочки, но ясно видно, что творческое планирование с использованием естественных особенностей гравитационного ландшафта Солнечной системы помогает получить невозможный на первый взгляд результат. Эта программа представляла собой техническую сложность, не в последнюю очередь из-за расстояния и скорости мишени. Во время посадки комета 67P находилась от Земли на расстоянии 480 миллионов километров и двигалась со скоростью более 50 000 километров в час. Это в 60 раз быстрее, чем летают реактивные пассажирские самолеты. В этой ситуации метод прицеливания в точку, использовавшийся для посадки на Луну, просто не сработал бы из-за ограничений современной ракетной техники.

Уйти с околоземной орбиты с достаточной скоростью сложно и дорого, но возможно. И действительно, аппарат New Horizons при полете к Плутону следовал по наиболее короткому маршруту. Правда, в пути он позаимствовал немного дополнительной скорости у Юпитера, но мог бы обойтись и без этого, просто его путешествие продолжалось бы чуть дольше. Сложность представляло торможение у цели; эту проблему обошли, решив, что не будут тормозить вообще. Покидая Землю, New Horizons — самый быстрый космический аппарат из когда-либо запущенных человеком — использовал очень мощную ракету с пятью твердотопливными

ускорителями и дополнительной верхней ступенью[50]. Разумеется, он избавился от них, как только смог; они слишком тяжелы, чтобы тащить их за собой, и к тому же все равно пусты, топлива в них не осталось. Добравшись до Плутона, аппарат пронесся через его систему на полной скорости — на все основные научные наблюдения у него были приблизительно сутки. Все это время он был слишком занят, чтобы поддерживать связь с Землей, и для ученых и управленцев эти сутки стали периодом нервного ожидания. Никто не мог сказать наверняка, переживет ли аппарат встречу с системой Плутона — столкновение с одной-единственной пылинкой могло оказаться для него фатальным.

Напротив, Rosetta нужно было не только встретиться с 67P, но и оставаться при ней все то время, пока комета будет приближаться к Солнцу, непрерывно проводя наблюдения. Ей нужно было сбросить Philae на поверхность ядра кометы. Для этого аппарат должен был быть практически неподвижен по отношению к нему, но комета-то при этом находилась в 300 миллионов километрах от Земли и двигалась с колоссальной скоростью — 55 000 километров в час. Так что аппарат необходимо было вывести в точности на ту орбиту, по которой следовала комета, и при этом разогнать до точно такой же скорости. Даже найти подходящую траекторию было сложно; сложно было и подобрать подходящую комету.

В конечном итоге траектория космического аппарата получилась очень и очень не прямой — только к Земле, помимо всего прочего, он возвращался трижды. Это как путешествовать из Лондона в Нью-Йорк, слетав для начала несколько раз из Лондона в Москву и обратно. Но города хотя бы стоят неподвижно относительно Земли, а ведь о планетах этого не скажешь, и это существенно меняет дело. Европейский аппарат начал свое эпохальное путешествие в совершенно неправильном, на наивный взгляд непосвященного, направлении. Он двинулся к Солнцу, хотя комета-мишень при этом находилась далеко за орбитой Марса и двигалась от него прочь. (Я не имею в виду прямо к Солнцу: просто расстояние до Солнца некоторое время уменьшалось.) Орбита Rosetta обогнула Солнце и вновь вернулась к Земле, откуда ее швырнуло на встречу с Марсом. Обогнув Марс, аппарат отправился на вторую встречу с Землей, затем обратно и снова за орбиту Марса. К этому моменту комета находилась за Солнцем и ближе к нему, чем Rosetta. Третья встреча с Землей вновь отшвырнула аппарат вовне — в погоню за кометой, которая в этот момент уносилась от Солнца прочь. В конце концов Rosetta встретила с предназначенной ей целью.

Но почему такой сложный маршрут? Почему ЕКА просто не направило свою ракету на комету и не скомандовало старт? Для этого потребовалось бы слишком много топлива, да и к тому моменту, когда аппарат добрался бы до намеченной точки, комета находилась бы совсем в другом месте. Вместо этого Rosetta исполнила тщательно срежиссированный космический танец, в ходе которого ускорила совместными усилиями сил тяготения Солнца, Земли, Марса и других задействованных тел. Ее маршрут, рассчитанный на основании закона всемирного тяготения Ньютона, был нацелен на максимальную экономию топлива. Каждое сближение с Землей и Марсом придавало аппарату бесплатное ускорение за счет энергии планеты. Редкие и кратковременные включения четырех двигателей малой тяги удерживали его на курсе. За экономию топлива пришлось заплатить тем, что до места назначения Rosetta добиралась 10 лет. Однако без этого проект оказался бы слишком дорогим и старта вообще бы не случилось.

Подобные траектории, на которых космические аппараты ходят кругами, туда и сюда, в поисках желанных толчков в нужном направлении от планет и лун, стали обычными для космических проектов в тех случаях, когда спешить нет необходимости. Пролетая на близком расстоянии от планеты, двигающейся по орбите, позади нее, космический аппарат может позаимствовать часть энергии планеты за счет эффекта пращи (официальный термин «гравитационный маневр»). Планета при этом реально замедляется, но снижение скорости настолько мало, что его невозможно уловить даже самыми чувствительными приборами. А вот аппарат получает приращение скорости без всяких затрат ракетного топлива[51].

Дьявол, как обычно, кроется в деталях. Чтобы разработать такую траекторию, инженеры должны уметь предсказывать движение всех задействованных в схеме тел; кроме того, для того чтобы довести аппарат до места назначения, им необходимо состыковать отдельные участки в единую траекторию и согласовать все ее детали в пространстве и времени. Так что разработка маршрута превращается в смесь точных расчетов и черной магии[52]. Все зависит от одной области человеческой деятельности, на роль которой в исследовании космоса редко указывают

хотя бы намеком, но без которой ничего невозможно было бы добиться. Всякий раз, когда средства массовой информации заводят разговор о «компьютерных моделях» или «алгоритмах», можно считать, что на самом деле они имеют в виду «математику», но либо слишком боятся упоминать это слово, либо считают, что оно испугает вас. Существуют достаточно разумные причины не грузить читателя сложными математическими подробностями, но, делая вид, что математики вообще не существует, мы оказываем одному из самых мощных интеллектуальных инструментов человечества очень плохую услугу.

\*\*\*

Главным динамическим фокусом Rosetta были маневры с эффектом пращи. В остальном, в перерывах между повторяющимися встречами, аппарат, по существу, двигался по серии гоманновских эллипсов. Вместо того чтобы пристроиться на орбиту вокруг 67P, он следовал по близлежащему эллипсу вокруг Солнца. Но есть еще один, куда более интригующий фокус, который по-настоящему меняет дело и производит революцию в разработке межпланетных траекторий. Как ни поразительно, он основан на хаосе.

Как я объяснил в главе 9, хаос в математическом смысле — это не просто красивое слово для обозначения любого случайного или непредсказуемого поведения. Это поведение, которое кажется случайным и непредсказуемым, но на самом деле управляется скрытой системой конкретных детерминистских правил. Для небесных тел этими правилами являются законы движения и гравитации. На первый взгляд эти правила не особенно помогают, потому что основной вывод из них сводится к тому, что хаотическое движение непредсказуемо в долгосрочной перспективе. Существует горизонт предсказуемости, за которым любое предсказанное поведение будет затоплено накоплением неизбежных крохотных ошибок в измерении текущего состояния. За горизонтом предсказуемости ничего нельзя гарантировать. Так что хаос в целом представляется нехорошей штукой.

Одним из первых возражений против теории хаоса было то, что, поскольку хаос непредсказуем, он затрудняет человеку познание природы. Какой смысл в теории, которая только все усложняет? Она не просто бесполезна, она хуже! Получается, что те, кто выдвигал это возражение, считали, что природа вследствие этого должна чудесным образом реорганизовать себя, чтобы избежать хаоса и помочь нам выйти из трудной ситуации. Или что если бы мы не заметили, что некоторые системы непредсказуемы, они вместо этого стали бы предсказуемыми.

Мир устроен не так. Он совершенно не стремится угождать человеку. Задача научных теорий состоит в том, чтобы помочь нам понять природу; расширение возможностей по контролю за природой — всего лишь побочный продукт, который часто встречается, но не является главной целью. Мы знаем, к примеру, что ядро Земли состоит из расплавленного железа, так что попасть туда (даже при помощи автономного бурильного аппарата) серьезных шансов у нас нет. Что за глупая теория! Как бессмысленно! Все верно, вот только — простите! — это правда. Хотя на самом деле эта теория полезна: она помогает объяснить магнитное поле Земли, а оно ни много ни мало помогает нам выжить, защищая от излучения.

Точно так же основной смысл теории хаоса заключается в том, что хаос существует в природе. В подходящих широко распространенных обстоятельствах он является точно таким же неизбежным следствием законов природы, как и те чудесные простые закономерности вроде периодических эллиптических орбит, которые дали начальный толчок научной революции. А поскольку хаос имеет место, мы должны научиться использовать его. Даже если единственное, для чего мы могли бы использовать теорию хаоса, — это предупредить людей о возможном непредсказуемом поведении систем, основанных на простых правилах, эту теорию стоило бы изучить. Она избавила бы нас от поиска несуществующих внешних воздействий, которые, как мы по незнанию считали бы, являются причиной наблюдаемых нерегулярностей.

На самом деле у теории хаоса есть и более полезные следствия. Поскольку хаос порождается правилами, мы можем использовать хаос для того, чтобы понять правила, проверить их и сделать из них практические выводы. Природа часто ведет себя хаотически, поэтому нам стоит приложить усилия и разобраться, как действует хаос. Но истина еще более позитивна. Хаос может быть полезен благодаря эффекту бабочки. Небольшие начальные различия могут вызвать значительные изменения. Посмотрим на это с другой стороны. Предположим, вам нужно вызвать ураган. Согласитесь, сложнейшая задача. Но, как указывал Терри Пратчетт в книге «Интересные

времена», все, что вам для этого нужно сделать, это найти подходящую бабочку и... сделать так, чтобы она взмахнула крыльями.

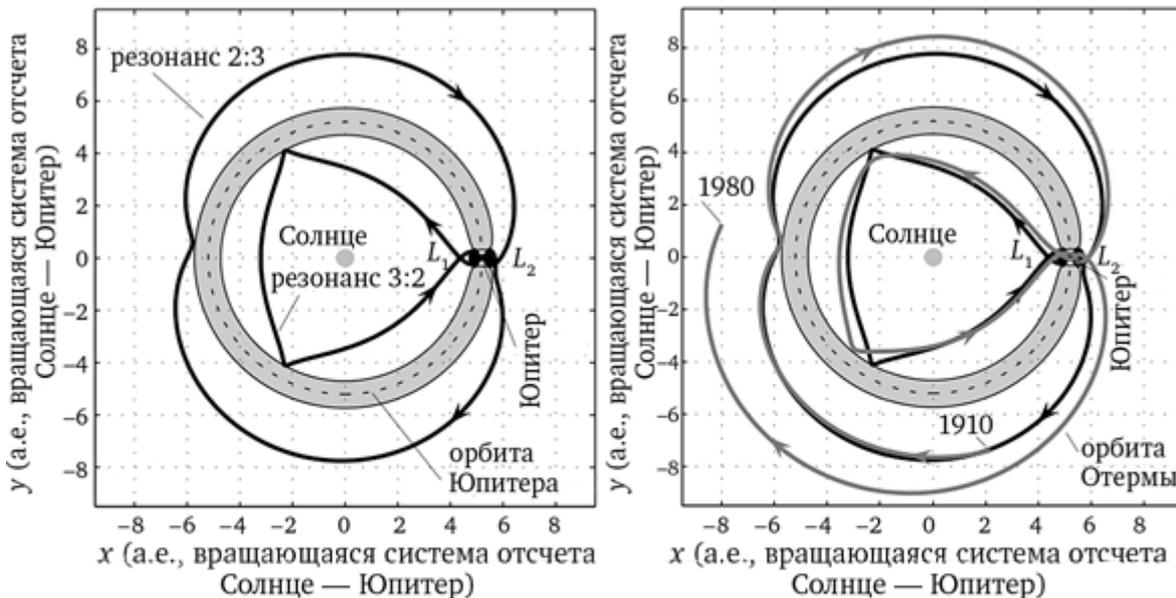
Это и есть хаос — не препятствие, а необычайно эффективная форма управления. Если бы мы могли каким-то образом восстановить и проанализировать по результату эффект бабочки, мы получили бы возможность переводить хаотическую систему в новое состояние при помощи очень небольших усилий. Мы научились бы свергать правительства и начинать войны одним движением пальца. Невероятно? Да, но вспомните Сараево. В подходящих обстоятельствах достаточно одного движения пальца на спусковом крючке пистолета[53].

Задача многих тел в астрономии носит хаотический характер. Использование эффекта бабочки в этом контексте позволяет нам изменить направление движения космического аппарата почти без использования реактивного топлива. Мы могли бы, к примеру, столкнуть почти выработавший свой ресурс лунный зонд с его последней окололунной орбиты и отправить его посмотреть на какую-нибудь комету. Такая перспектива тоже кажется невероятной, но в принципе эффект бабочки должен быть способен и на такое[54].

Где же здесь засада? (Она всегда есть. Бесплатного сыра не существует.)

Отыскать подходящую бабочку.

\*\*\*



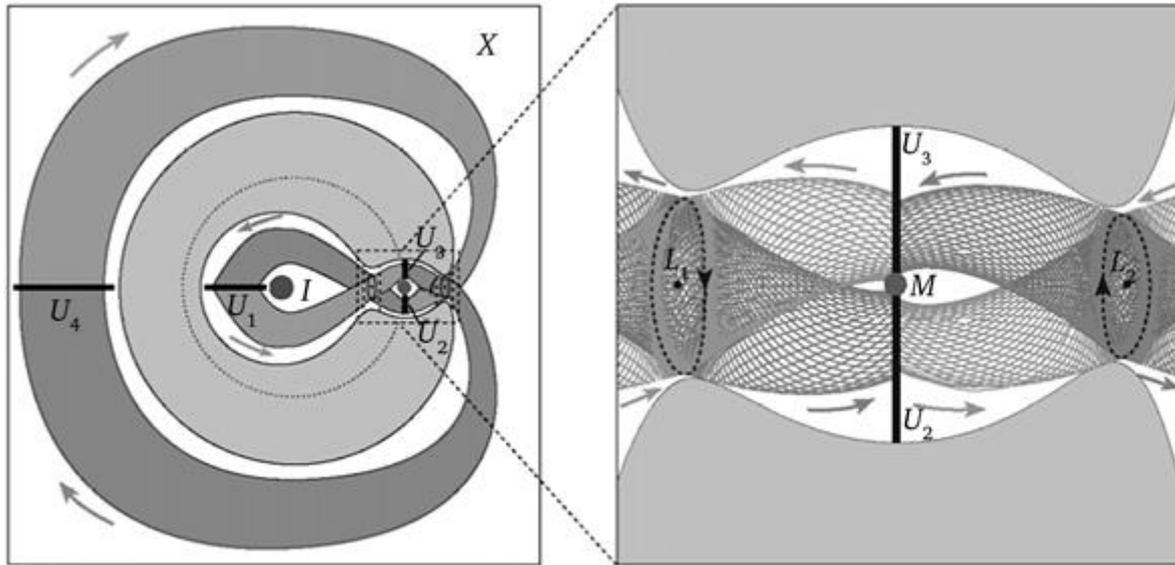
*Слева:* гравитационный ландшафт для орбиты кометы Отерма, на котором показана периодическая орбита в резонансе 3:2

с Юпитером. *Справа:* реальная орбита кометы с 1910 по 1980 год

Орбиту Земли с орбитой вокруг нужного нам мира связывает эллипс Гоманна, и с небольшими доработками он является достаточно хорошим выбором для пилотируемых программ. Если вы перевозите хрупкий и чувствительный груз (людей), вам нужно побыстрее добраться до места назначения. Однако если время в дороге не самое важное для вас, то существуют альтернативные маршруты, на которые уходит больше времени, но меньше топлива. Чтобы воспользоваться эффектом бабочки, нам потребуется источник хаоса. Эллипс Гоманна состоит из трех различных орбит в системах двух тел (один эллипс и две окружности), состыкованных между собой; переход аппарата с орбиты на орбиту происходит при помощи импульсов, выдаваемых ракетным двигателем. Но в задаче двух тел нет хаоса. Где же нам найти орбитальный хаос? В задаче трех тел. Так что нам нужно думать о том, чтобы состыковать между собой участки орбит с участием трех тел. Можно, конечно, добавить и обычные участки для системы двух тел, если они будут полезны, но ограничиваться ими не следует.

В конце 1960-х годов Чарльз Конли и Ричард Макгихи указали, что каждая такая траектория окружена совокупностью трубок, вложенных одна в другую. Каждая трубка соответствует конкретному значению скорости; чем дальше от оптимальной скорости, тем шире трубка. На

поверхности любой конкретной трубки полная энергия постоянна. Из этой простой идеи следует одна замечательная вещь. Чтобы добраться до иного мира эффективным в смысле затрат топлива способом, нужно двигаться по трубке.



Слева: система трубок для Отермы.

Справа: зона переключения в более крупном масштабе

Планеты, луны, астероиды и кометы связывает между собой целая сеть таких трубок. Эти трубки существовали там всегда, но увидеть их можно только математическим глазом, а их стенки — это энергетические уровни. Если бы мы могли визуальнo представить себе изменчивый ландшафт гравитационных полей, управляющих движением планет, то мы увидели бы, как эти трубки кружат вместе с планетами в их медленном величественном гравитационном танце. Но мы сегодня знаем, что этот танец может оказаться непредсказуемым.

Вот, к примеру, Отерма — комета, живущая не по правилам. Сто лет назад орбита кометы Отермы располагалась далеко за пределами орбиты Юпитера. Затем, после сближения с Юпитером, ее орбита переместилась внутрь орбиты планеты. Затем эта комета вновь переключилась на внешнюю орбиту. Отерма и дальше будет каждые несколько десятков лет менять внутреннюю орбиту на внешнюю и обратно — и не потому, что она нарушает законы Ньютона; напротив, она строго подчиняется им. Орбита Отермы лежит внутри двух трубок, которые встречаются возле Юпитера. Одна из трубок внутри орбиты Юпитера, другая — снаружи. Проходя через развилку, комета может переключиться с одной трубки на другую или не переключиться, в зависимости от хаотических эффектов юпитерианского и солнечного тяготения. Однако, попав в одну из трубок, комета оказывается заперта в ней до тех пор, пока вновь не вернется к развилке. Подобно поезду, который должен всегда оставаться на рельсах, но может изменить маршрут и перейти на другой путь, если кто-нибудь переведет стрелку, Отерма пользуется некоторой, хотя и небольшой, свободой выбора маршрута.

\*\*\*

В викторианскую эпоху строители железных дорог понимали, что в их деле необходимо использовать все естественные особенности ландшафта. Они прокладывали стальные пути по долинам и вдоль природных горизонталей; они прокапывали в холмах туннели, чтобы не заставлять поезд взбираться на холм, а затем спускаться с него. Подъем на холм — работа против силы тяжести — требует дополнительных затрат энергии. Эти затраты сказываются в повышенном расходе топлива, которое, в свою очередь, стоит денег. То же самое происходит и в межпланетных путешествиях, только энергетический ландшафт в космосе меняется с движением планет. В нем гораздо больше измерений, чем те два, что характеризуют положение поезда и представляют две конкретных физических величины: положение и скорость. Космический

аппарат перемещается по математическому ландшафту, имеющему не два измерения, а шесть. Трубки и их развилки — особые черты гравитационного ландшафта Солнечной системы.

В природном ландшафте есть холмы и долины. Чтобы забраться на холм, необходимо затратить энергию, но поезд может и набрать энергию, скатившись с холма в долину. Здесь в действие вступают два типа энергии. Высота над уровнем моря определяет потенциальную энергию поезда, посредством которой проявляется сила тяготения. Еще существует кинетическая энергия, которая соответствует скорости. Когда поезд катится с горки и ускоряется, он тем самым обменивает потенциальную энергию на кинетическую. Когда он взбирается на холм и замедляется, происходит обратный обмен. Полная энергия поезда постоянна, так что движение происходит по горизонтали энергетического ландшафта. Однако у поездов имеется третий источник энергии: топливо. Сжигая дизельное топливо или используя электричество, поезд может взобраться на горку или ускориться, уходя при этом от естественной, «свободной» траектории. В любой момент времени полная энергия должна оставаться неизменной, но обо всем остальном можно договориться.

Примерно так же обстоит дело с космическими аппаратами. Гравитационные поля Солнца, планет и других тел обеспечивают потенциальную энергию. Скорость аппарата соответствует его кинетической энергии. А его движитель — это дополнительный источник энергии, который можно произвольно включать и выключать. Энергия здесь играет ту же роль, что высота в земном ландшафте, а траектория космического аппарата представляет собой своего рода горизонталь, вдоль которой его полная энергия остается постоянной. Принципиально важно, что вам необязательно все время находиться на одной горизонтали: вы можете сжечь некоторое количество топлива, чтобы перейти на другую горизонталь, сдвинувшись при этом «вверх по склону» или «вниз по склону».

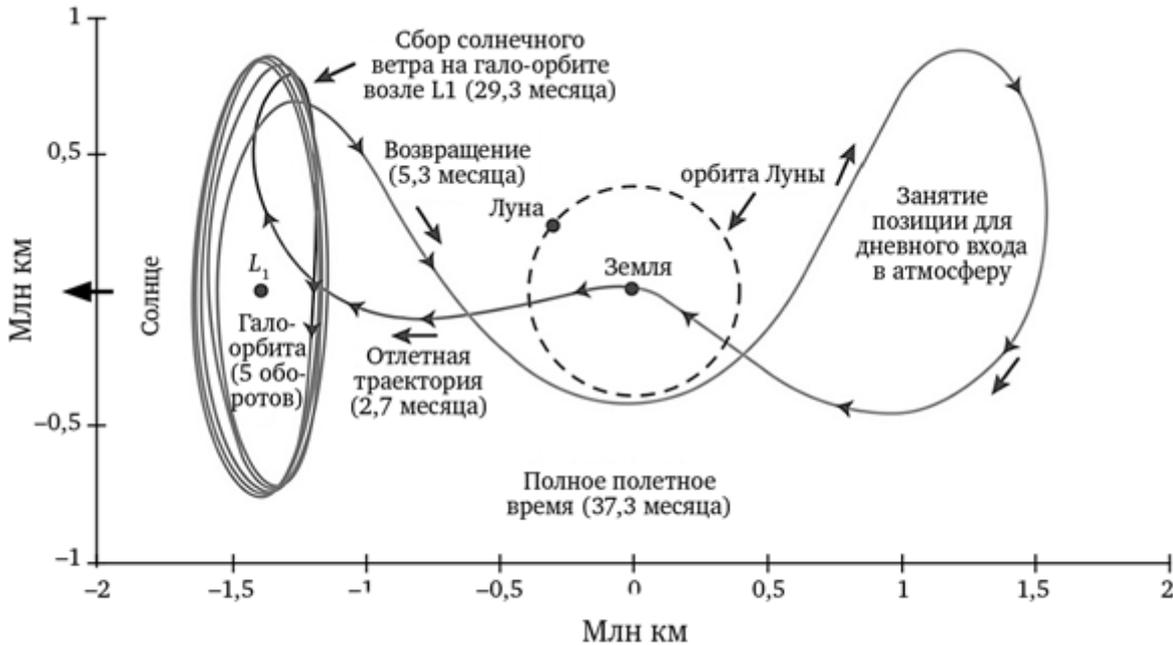
Фокус в том, чтобы сделать это в нужном месте. Инженеры-железнодорожники викторианской эпохи хорошо понимали, что в земном ландшафте есть особые черты — это может быть вершина холма, дно долины, седловидная геометрия горного перевала. Эти черты принципиально важны: они образуют своего рода скелет, основу общей геометрии горизонталей. К примеру, вблизи любой вершины горизонтали представляют собой замкнутые кривые. На вершине потенциальная энергия принимает локально максимальное значение, а на дне долины — локально минимальное. Перевалы сочетают в себе черты того и другого — это максимум для одних направлений и минимум для других — и позволяют преодолевать горы с минимальными усилиями.

Аналогично в энергетическом ландшафте Солнечной системы тоже есть особые детали. Самые очевидные из них — Солнце, планеты и луны, располагающиеся на дне гравитационных колодцев. Не менее важны, хотя и менее заметны на энергетическом ландшафте, холмы, низины и перевалы. Эти черты организуют общую геометрию ландшафта, и именно эта геометрия порождает трубки, о которых мы говорили. Самыми известными деталями энергетического ландшафта, помимо гравитационных колодцев, являются точки Лагранжа.

Около 1985 года Эдвард Белбруно впервые использовал хаотическую динамику при планировании межпланетного перелета, предложив то, что позже получило название теории нечетких границ. Он понял, что трубки в сочетании с хаосом определяют новые энергетически эффективные маршруты между мирами. Маршруты эти строятся из кусочков естественных орбит в системах трех тел, где имеются новые детали, такие, к примеру, как точки Лагранжа. Один из способов найти их состоит в том, чтобы начать с середины, а затем двигаться наружу. Представьте себе космический аппарат в точке L1 системы Земля — Луна, между двумя этими небесными телами. Если этому телу дать совсем небольшой толчок, он покатится «вниз», теряя потенциальную энергию и набирая кинетическую. В некоторых случаях толчок может направить аппарат в сторону Земли, где он со временем выйдет на орбиту вокруг нашей родной планеты. В других случаях толчок направит аппарат в сторону Луны, на лунную орбиту захвата. Взяв маршрут от L1 до Земли в обратном направлении и прицепив к нему подходящий маршрут от L1 до Луны, мы получим весьма эффективную траекторию от Земли к Луне с переходом в точке L1.

Оказывается, точка L1 — отличное место для небольших изменений курса. Естественная динамика космического аппарата возле L1 хаотична, так что очень небольшие изменения положения или скорости очень серьезно меняют траекторию. Воспользовавшись хаосом, мы

можем перенаправить наш космический аппарат в другое место назначения эффективным по топливу, хотя, возможно, и медленным образом.

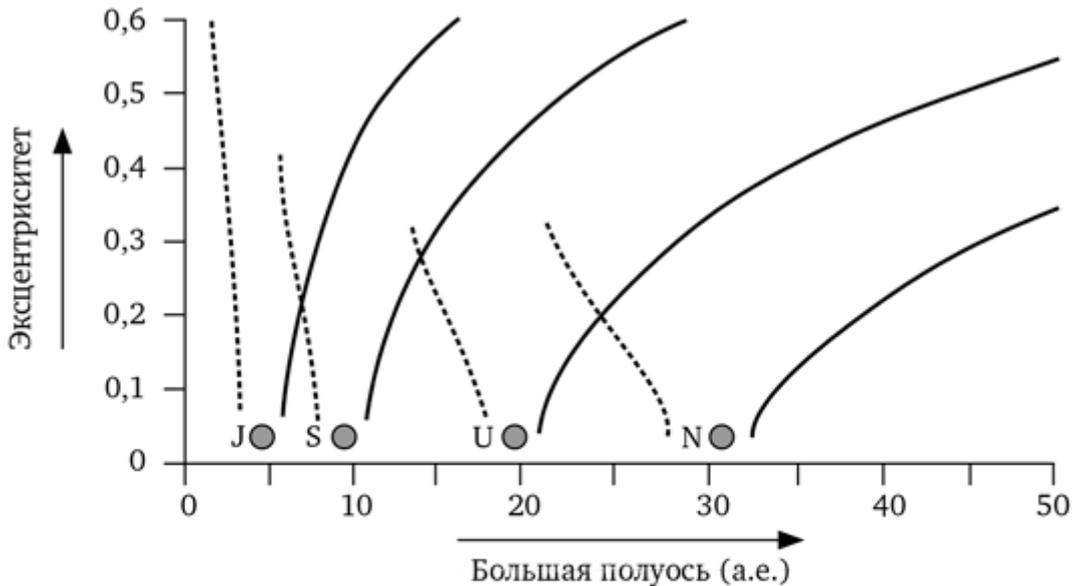


### Траектория КА Genesis

Фокус с трубкой был впервые использован, чтобы перенаправить почти выработавший ресурс аппарат ISEE-3 (расшифровывается как Международный исследователь солнечно-земных связей) на встречу в 1985 году с кометой Джакобини — Циннера. В 1990 году Белбруно связался с Японским космическим агентством по поводу одного из их аппаратов — лунного зонда Hiten, завершившего свою основную программу, но еще имевшего в баках немного топлива. Он представил агентству траекторию, которая должна была временно стабилизировать аппарат на окололунной орбите, а затем перенаправить его в точки L4 и L5 на поиски захваченных пылевых частиц. Тот же фокус был использован вновь, чтобы аппарат проекта Genesis смог доставить на Землю образцы частиц солнечного ветра.

Математики и инженеры, которым захотелось повторить этот трюк и найти другие возможности того же рода, попытались разобраться, на чем основан механизм его действия. Они сосредоточили внимание на особых объектах энергетического ландшафта, аналогичных горным перевалам. В этих местах на маршрутах возникают «бутылочные горлышки», и аппараты, которым необходимо попасть на нужную траекторию, должны преодолевать их очень аккуратно. Существуют отдельные «входящие» и «выходящие» траектории, аналогичные естественным проходам в горах. Чтобы точно пройти по этим входящим и выходящим траекториям, нужно двигаться точно с правильной скоростью. Но даже если ваша скорость будет чуть отличаться от правильной, вы все же сможете держаться вблизи нужных вам траекторий. Чтобы спланировать эффективный план полета, нужно первым делом решить, какие именно трубки могут представлять для вас интерес. Вы направляете аппарат по первой входящей трубке, а когда он достигает точки Лагранжа, короткий импульс двигателей перенаправляет его в определенную выходящую трубку. Со временем она перетекает в другую входящую трубку... и т.д.

В 2000 году Вансан Кунь, Мартин Лоу, Джеррольд Марсен и Шейн Росс использовали трубки для планирования облета лун Юпитера, с гравитационным маневром у Ганимеда и затем перелетом по трубке к Европе. Более сложный маршрут, требующий даже меньше энергии, включает еще и Каллисто. В нем используется динамика пяти тел: Юпитера, трех его лун и самого космического аппарата.



Низкоэнергетические траектории, привязанные к точкам  $L_1$  (пунктирные) и  $L_2$  (сплошные), для четырех внешних планет (Юпитер J, Сатурн S, Уран U, Нептун N). Аналогичные траектории для внутренних планет слишком малы, чтобы их можно было изобразить в таком масштабе. Пересечения, где окружающие их трубки встречаются, представляют собой удобные точки смены направления для низкоэнергетических переходных орбит

В 2002 году Лоу и Росс просчитали естественные пути в энергетическом ландшафте, ведущие в точки  $L_1$  и  $L_2$  планет Солнечной системы и из них, и обнаружили, что они пересекаются друг с другом. Рисунок иллюстрирует эти траектории в одном из сечений Пуанкаре. Пунктирная кривая линия, выходящая из Сатурна (S), пересекает сплошную линию, выходящую из Юпитера (J), задавая тем самым низкоэнергетическую переходную траекторию между двумя этими планетами. То же можно сказать и о других пересечениях. Таким образом, стартовав от Нептуна, космический аппарат может эффективно переместиться к Урану, затем к Сатурну, потом к Юпитеру, переключаясь у каждой планеты между точками  $L_1$  и  $L_2$ . Тот же процесс можно продолжить и дальше, к внутренним планетам Солнечной системы, или, наоборот, вовне, шаг за шагом. Это и есть математическая основа, можно сказать, скелет межпланетных автострад.

В 2005 году Майкл Деллниц, Оливер Юнге, Маркус Пост и Бьянка Тьере использовали трубки, чтобы спланировать энергоэффективное путешествие с Земли к Венере. Основная трубка связывает точку  $L_1$  системы Солнце — Земля с точкой  $L_2$  системы Солнце — Венера. Для сравнения скажем, что этот маршрут требует втрое меньше топлива, чем потребовалось аппарату Venus Express Европейского космического агентства, потому что на нем можно использовать двигатели малой тяги; расплачиваться при этом приходится увеличением продолжительности перелета со 150 до примерно 650 суток.

Влияние трубок может простираться и еще дальше. Деллниц открыл естественную систему трубок, связывающих Юпитер с каждой из внутренних планет. Существование такой системы — намек на то, что Юпитер, доминирующая планета Солнечной системы, играет в ней роль небесной Главной пересадочной станции. Вполне возможно, что именно его трубки организовали процесс формирования всей Солнечной системы и определили орбиты внутренних планет. Это открытие не объясняет закон Тициуса — Бодде и даже не поддерживает его; напротив, оно показывает, что подлинная организация планетарных систем берет начало в тонких закономерностях нелинейной динамики.



## Громадные огненные шары

Мы можем определить форму планет, расстояние до них, их размеры и параметры их движения — но мы никогда не сможем ничего узнать об их химическом составе.

Огюст Конт. «Позитивная философия»

Конечно, теперь, задним числом, легко шутить над бедным Контом, но в 1835 году невозможно было представить себе, что мы когда-нибудь сможем узнать, из чего состоят планеты, не говоря уже о звездах. В приведенной цитате говорится о планетах, но где-то в другом месте философ заявлял, что определить химический состав звезды было бы еще сложнее. Главное, что он хотел сказать, — это что существуют пределы, преодолеть которые наука не в состоянии.

Как часто бывает, когда выдающиеся ученые объявляют что-то невозможным, в более глубоком смысле Конт был прав, но вот пример он выбрал откровенно неудачный. Забавно, но химический состав звезды, даже находящейся от нас на расстоянии тысячи световых лет, — это одна из тех характеристик звезды, наблюдать которые сегодня проще всего. То же можно сказать и о галактиках, расстояния до которых составляют миллионы световых лет (если, конечно, вам не нужны особые подробности). Мало того, мы можем многое узнать об атмосферах планет, сияющих отраженным звездным светом.

Звезды ставят перед учеными множество вопросов и помимо вопроса о том, из чего они состоят. Что они собой представляют, как светят, как развиваются, насколько они далеки от нас? Сочетая наблюдения с математическим моделированием, ученые сумели получить подробные ответы на все эти вопросы, притом что посещение звезд при современной технологии представляется практически невозможным. Не говоря уже о проникновении внутрь звезды.

\*\*\*

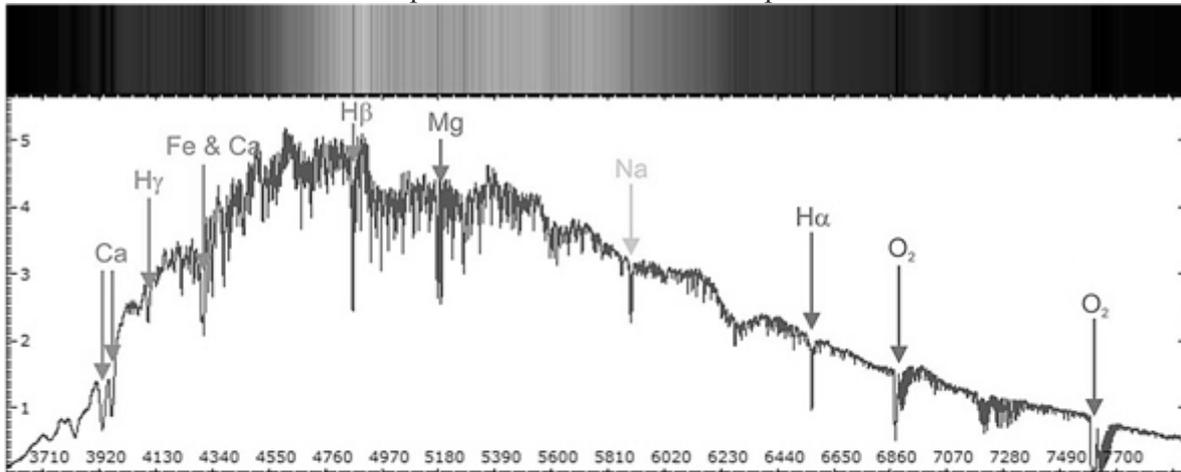
Открытие, вдребезги разбившее приведенный Контом пример, было сделано случайно. Йозеф Фраунгофер начинал учеником стекольщика и едва не погиб, когда обрушилась мастерская, где он работал. Курфюрст Баварии Максимилиан IV Иосиф, узнавший о чудесном спасении молодого человека, заинтересовался его судьбой и профинансировал его образование. Фраунгофер стал мастером по изготовлению стекол для оптических инструментов, а со временем и директором Оптического института в Бенедиктбейерне. Он строил отличные телескопы и микроскопы, но важнейшее его достижение, оказавшее громадное влияние на развитие науки, относится к 1814 году, когда Фраунгофер изобрел новый инструмент — спектроскоп.

Ньютон в свое время занимался не только механикой и тяготением, но и оптикой; он открыл, что призма расщепляет белый свет на составляющие его цвета. Расщепить свет можно также при помощи дифракционной решетки — плоской поверхности с тесно и регулярно расположенными штрихами. Световые волны, отраженные от разных штрихов, интерферируют друг с другом. Вследствие геометрии волн свет определенной длины волны (или частоты, которая вычисляется как скорость света, деленная на длину волны) сильнее всего отражается под определенным углом. В этих местах световые максимумы совпадают и потому усиливаются. Напротив, свет почти не отражается под углом, где волны интерферируют деструктивно, где максимум одной волны попадает на минимум другой. Фраунгофер скомбинировал призму, дифракционную решетку и телескоп и создал из них новый инструмент, способный расщепить свет на компоненты и измерить соответствующие им длины волн с высокой точностью [55].

Одним из его первых открытий стало то, что свет, излучаемый открытым огнем, имеет характерный оранжевый оттенок. Заинтересовавшись, не является ли Солнце в основе своей громадным огненным шаром, Фраунгофер направил спектроскоп на светило, чтобы посмотреть, присутствует ли в нем свет именно этой длины волны. Вместо этого он, как в свое время Ньютон, увидел полный спектр цветов, но его инструмент был настолько точен, что позволил ему увидеть во многих местах этой радужной линейки — то есть на многих длинах волн — какие-то загадочные темные линии. Вообще-то темные линии в солнечном спектре увидел несколько ранее Уильям Волластон, но если он заметил их штук шесть, то Фраунгофер в конце концов насчитал 574 такие линии.

К 1859 году физик Густав Кирхгоф и химик Роберт Бунзен, знаменитый своей горелкой, продемонстрировали, что такие линии возникают в спектре потому, что атомы различных элементов поглощают свет различных, но вполне конкретных длин волн. Бунзеновская горелка была изобретена, именно затем чтобы измерять эти длины волн в лаборатории. Если вы знаете, скажем, свет какой длины волны поглощает калий, и находите соответствующую темную линию на солнечном спектре, вы можете сделать вывод, что в состав Солнца, должно быть, входит калий. Фраунгофер применил этот метод к Сириусу, проведя, таким образом, первое наблюдение спектра звезды. Посмотрев затем на другие звезды, он обратил внимание, что спектры их различаются между собой. От перспектив захватывало дух: мало того, что мы, как оказалось, можем определить, из чего сделаны звезды, но разные звезды сделаны из разных элементов.

Родилась новая область астрономии — звездная спектроскопия.



Спектр звезды. *Наверху*: таким он виден в спектроскоп. *Внизу*: яркость на разных длинах волн. Отмеченные линии поглощения (*слева направо*): кальций, водород (гамма), железо и кальций, водород (бета), магний, натрий, водород (альфа), кислород, кислород\*.

\* Линии молекул кислорода возникают в земной атмосфере. —  
*Прим. ред.*

Существует два основных механизма образования спектральных линий. Атомы могут поглощать светопределенной длины волны — и тогда возникает линия поглощения, или же они могут излучать такой свет — и тогда возникает эмиссионная линия, или линия излучения. Характерный желтоватый оттенок свету натриевых уличных ламп придает эмиссионная линия натрия. Работая то совместно, то по отдельности, Кирхгоф и Бунзен открыли при помощи своего метода два новых химических элемента — цезий и рубидий. Вскоре после этого два астронома — Жюль Жансен и Норман Локьер — получили еще более впечатляющий результат: они открыли элемент, который — в то время — никто никогда не находил на Земле.

\*\*\*

В 1868 году Жансен был в Индии; он отправился туда, чтобы наблюдать солнечное затмение в надежде выяснить химический состав солнечной хромосферы. Это тот слой атмосферы Солнца, что лежит непосредственно над видимым его слоем — фотосферой. Хромосфера светит настолько тускло, что наблюдать ее можно только во время полного солнечного затмения, когда она приобретает красноватый оттенок. Если фотосфера дает в спектре линии поглощения, то в спектре хромосферы мы видим эмиссионные линии. Жансен обнаружил там очень четкую ярко-желтую эмиссионную линию (поскольку линия эмиссионная, ясно, что она исходит из хромосферы) с длиной волны 578,49 нм и решил, что она соответствует натрию. Вскоре после этого Локьер назвал эту линию спектральной линией D3, поскольку у натрия на близких длинах волн уже было две спектральные линии, D1 и D2. Однако у натрия не было линии на длине волны D3, так что эту линию нельзя было считать признаком присутствия натрия.

На самом деле такой линии не было ни у одного известного на тот момент атома! Локьер понял, что они наткнулись на неизвестный химический элемент. Он вместе с химиком Эдуардом Франклендом назвал его гелием, от греческого слова «Гелиос», что означало «Солнце». К 1882 году Луиджи Пальмиери обнаружил линию D3 на Земле в образце вулканической лавы с горы Везувий. Еще через семь лет Уильям Рамзай получил образцы гелия, обработав кислотой минерал под названием «клевеит», содержащий наряду с несколькими редкоземельными элементами уран. Оказалось, что при комнатной температуре гелий — газ.

До сих пор эта история, если оставить в стороне математическую теорию дифракции, имеет отношение в основном к химии. Но далее повествование делает неожиданный поворот — и попадает в немыслимое без математики царство физики элементарных частиц. В 1907 году Эрнест Резерфорд и Томас Ройдс занимались изучением альфа-частиц, излучаемых радиоактивными веществами. Чтобы выяснить, что собой представляют эти частицы, исследователи ловили их в стеклянную трубку, содержащую... пустоту. Вакуум. Частицы проходили через стенку трубки, но далее теряли энергию и выйти уже не могли. В спектре содержимого трубки наблюдалась сильная линия D3. Альфа-частицы оказались ядрами атомов гелия.

Короче говоря, совместные усилия всех этих ученых привели к открытию второго по распространенности после водорода элемента во Вселенной. Но нельзя сказать, что гелий очень уж распространен здесь. Большую часть его мы получаем при перегонке природного газа. Гелий широко применяется в науке и играет важную роль во многих ее областях: без него трудно представить себе метеорологические баллоны, низкотемпературную физику, медицинские аппараты магнитно-резонансного сканирования. Кроме того, потенциально это основное топливо для термоядерного реактора — недорогого и относительно безопасного источника энергии, если кому-то удастся-таки заставить эту штуку работать. Так для чего же мы чаще всего используем это жизненно важное вещество? На надувные шарики для детских праздников.

Большая часть гелия во Вселенной находится в звездах и межзвездных газовых облаках. Дело в том, что гелий первоначально возник на ранних этапах Большого взрыва и, кроме того, является основным результатом термоядерных реакций в недрах звезд. Мы видим его на Солнце не просто потому, что гелий наряду с большим количеством водорода и множеством других элементов (которых там значительно меньше) входит в состав Солнца; Солнце производит его... из водорода.

Атом водорода состоит из одного протона и одного электрона. В атоме гелия два протона, два нейтрона и два электрона; альфа-частица — это тот же гелий, но без электронов. В звезде электроны срываются с ядра и уносятся прочь, и в реакциях участвуют одни только ядра атомов. В ядре Солнца, где температура составляет 14 млн К, сильнейшие гравитационные силы сдавливают четыре ядра водорода — четыре протона, которые сливаются с образованием альфа-частицы, двух позитронов, двух нейтрино и большого количества энергии. Позитроны и нейтрино позволяют двум протонам из четырех превратиться в нейтроны. На более глубоком уровне нам следовало бы рассматривать составляющие их кварки, но здесь такого описания достаточно. Аналогичная реакция заставляет водородную бомбу взрываться со страшной опустошительной силой, благодаря как раз такому выделению энергии, но там задействованы другие изотопы водорода — дейтерий и тритий.

\*\*\*

На ранних этапах развития новая область науки напоминает коллекционирование бабочек: лови все, что можешь, а затем постарайся расположить свои экспонаты разумным образом. Спектроскописты коллекционировали спектры звезд и классифицировали по ним звезды. В 1866 году Анджело Секки распределил звезды по их спектрам на три различных класса, примерно соответствующие преобладающим в них цветам: бело-голубые, желтые, красно-оранжевые. Позже он добавил еще два класса.

Около 1880 года Пикеринг начал составлять обзор звездных спектров, опубликованный в 1890 году. Большую часть дальнейшей классификации провела Вильямина Флеминг, которая воспользовалась для этого усовершенствованной системой Секки, где классы обозначались буквами латинского алфавита от А до Q. После сложной серии переработок появилась нынешняя система классификации Моргана — Кинана, в которой используются буквы O, B, A, F, G, K и M. Звезды типа O имеют самую высокую температуру на поверхности, звезды типа M — самую низкую. Каждый класс подразделяется на более мелкие подклассы, пронумерованные цифрами 0 – 9, причем с увеличением индекса температура снижается. Еще один ключевой параметр — светимость звезды — присущая ей «яркость» на всех длинах волн, измеренная как суммарная энергия излучения, испускаемая звездой за секунду[56]. Звездам также присваивается класс светимости, который записывается обычно римскими цифрами, поэтому всего в данной классификации присутствует два параметра, примерно соответствующие температуре и светимости.

Для звезд класса O, к примеру, характерна поверхностная температура выше 30 000 К и голубой оттенок света; по массе они превосходят Солнце по крайней мере в 16 раз, имеют слабые линии водорода и встречаются очень редко. Звезды класса G характеризуются поверхностной температурой от 5200 до 6000 К, светят бледно-желтым светом, имеют массу от 0,8 до 1,04 массы Солнца, показывают слабые линии водорода и составляют около 8% всех известных звезд. К ним относится и наше Солнце, его тип G2. Звезды класса M характеризуются поверхностной температурой от 2400 до 3700 К и оранжево-красным цветом, имеют массу от 0,08 до 0,45 массы Солнца, показывают очень слабые линии водорода и составляют около 76% всех известных звезд.



Диаграмма Герцшпрунга — Рассела. Абсолютная звездная величина (характеризует видимую яркость звезды, какую она имела бы с расстояния 10 парсек) связана со светимостью, при этом  $-10$  соответствует очень яркой звезде, а  $+20$  — очень тусклой

Светимость звезды коррелирует с ее размером, и в названиях различных классов светимости фигурируют гипергиганты, затем сверхгиганты, гиганты, субгиганты, карлики (или звезды главной последовательности) и субкарлики. Так что конкретная звезда может описываться как голубой гигант, красный карлик и т.д.

Если нанести температуру и светимость звезд на график, получится отнюдь не случайная россыпь точек. Точки на этом графике образуют фигуру, напоминающую перевернутую букву Z. Это диаграмма Герцшпрунга — Рассела, которую предложили около 1910 года Эйнар Герцшпрунг и Генри Рассел. Самые заметные ее черты — скопление ярких сравнительно холодных гигантов и сверхгигантов в правой верхней части, изогнутая диагональная «главная последовательность» от горячих и ярких звезд до более холодных и тусклых, и немногочисленное скопление горячих тусклых белых карликов внизу слева.

Изучение спектров звезд перестало быть коллекционированием бабочек, когда ученые начали использовать результаты спектроскопии, пытаясь разобраться, каким образом звезды производят свет и другое излучение. Они быстро поняли, что звезда — это не просто гигантский костер. Если бы источником энергии в ней были обычные химические реакции, то Солнце давно уже сгорело бы до угольков. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела также подсказывала, что звезды, возможно, эволюционируют, сдвигаясь по перевернутой букве Z из верхнего правого угла в нижний левый. Такое предположение казалось разумным: тогда получалось бы, что звезды рождаются гигантами, к концу жизни съеживаются до карликов, а в промежутке проходят по главной последовательности и становятся субкарликами. Тогда по мере сжатия они превращали бы гравитационную энергию в излучение — этот процесс известен как механизм Кельвина — Гельмгольца. Исходя из этой теории, астрономы 1920-х годов оценили возраст нашего Солнца примерно в 10 млн лет, чем вызвали на себя жесткую критику со стороны геологов и биологов-эволюционистов, убежденных в том, что наше светило намного старше.

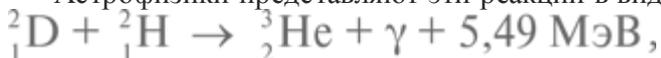
Астрономы сдались только в 1930-х годах, когда стало ясно, что большую часть энергии звезды получают за счет ядерных реакций, а не за счет гравитационного сжатия и что предлагавшаяся ранее эволюционная траектория звезды ошибочна. Родилась новая область науки — астрофизика. При помощи сложных математических моделей она анализирует динамику и эволюцию звезд начиная с момента рождения и до смерти. Главные ингредиенты для своих моделей астрофизика извлекает из ядерной физики и термодинамики.

В главе 1 мы видели, как формируются звезды, когда обширное первичное газовое облако коллапсирует под действием собственной гравитации. Там мы сосредоточились на динамике процесса, но ядерные реакции добавляют к нему новые подробности. Сжатие газового облака высвобождает гравитационную энергию, которая разогревает газ и создает протозвезду — очень горячий вращающийся газовый сфероид, состоящий в основном из водорода. Если температура протозвезды достигает 10 млн К, ядра водорода — протоны — начинают сливаться друг с другом, образуя дейтерий и гелий. Протозвезды с начальной массой менее 0,08 масс Солнца никогда не разогреваются до таких температур, поэтому процесс в них заканчивается пшиком с образованием коричневого карлика. Такие звезды светят тускло, в основном за счет синтеза дейтерия, и быстро гаснут.

Звезды, достаточно горячие, чтобы вспыхнуть, начинают с использования цепной реакции протон — протон. Сначала два протона сливаются, образуя дипротон (легкую форму гелия) и фотон. Затем один из протонов, входящих в состав дипротона, испускает позитрон и нейтрино и становится нейтроном; в результате получается ядро дейтерия. На этом этапе, хотя он и проходит относительно медленно, выделяется небольшое количество энергии. Получившийся позитрон сталкивается с электроном, и они вместе аннигилируют, образуя два фотона и еще немного энергии. Еще примерно через четыре секунды ядро дейтерия сливается еще с одним протоном, образуя гелий-3, один из изотопов гелия; при этом высвобождается гораздо больше энергии.

На этом этапе возможны три варианта. Главный из них предусматривает слияние двух ядер гелия-3 с образованием обычного гелия-4, двух ядер водорода и еще большего количества энергии. На Солнце этот вариант реализуется в 86% случаев. При втором варианте образуется ядро бериллия, который затем превращается в литий, который, в свою очередь, сливается с водородом и образует гелий. При этом также выделяются различные частицы. Этот вариант Солнце выбирает в 14% случаев. В третьем варианте задействованы ядра бериллия и бора, и реализуется он на Солнце в 0,11% случаев. Теоретически возможен и четвертый вариант, при котором гелий-3 сливается с водородом и превращается непосредственно в гелий-4, но он настолько редок, что наблюдать его пока никому не удавалось.

Астрофизики представляют эти реакции в виде примерно таких уравнений:



где D — дейтерий, H — водород, He — гелий, верхний индекс обозначает число нейтронов, нижний — число протонов,  $\gamma$  — это фотон, а МэВ — единица энергии (мегаэлектронвольт). Я упоминаю об этом не потому, что предлагаю вам проследить весь процесс в деталях, а чтобы показать, что его можно проследить в деталях и что он обладает вполне определенной математической структурой.

Ранее я упоминал теорию о том, что звезды эволюционируют и что характеризующая их комбинация температуры и светимости движется по диаграмме Герцшпрунга — Рассела. В этой идее, безусловно, что-то есть, но первоначальные выводы были ошибочны, и разные звезды следуют по разным траекториям — в направлении почти противоположном тому, что предполагалось изначально. При рождении звезда занимает место где-то на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга — Рассела. Конкретное положение зависит от массы звезды, которая определяет ее светимость и температуру. Главные силы, влияющие на динамику звезды, — это гравитация, которая заставляет ее сжиматься, и давление излучения, вызванное водородным синтезом, которое заставляет ее расширяться. Стабилизирующая обратная связь противопоставляет эти силы друг другу, так чтобы они уравновешивались. Если гравитация начинает побеждать, звезда сжимается, разогревается и усиливает уровень излучения, восстанавливая баланс. И наоборот, если побеждать начинает излучение, звезда расширяется, немного остывает — и гравитация вновь сжимает ее до состояния равновесия.

Такое балансирование продолжается до тех пор, пока топливо не подходит к концу. Процесс этот должен занимать сотни миллиардов лет для медленно горящих красных карликов, 10 миллиардов лет или около того для таких звезд, как Солнце, и всего несколько миллионов лет для горячих и массивных звезд типа О. После этого гравитация берет верх, и ядро звезды сжимается. При этом либо ядро разогревается достаточно, чтобы запустить гелиевый синтез, либо оно превращается в вырожденное вещество — возникает своего рода атомный тупик, который останавливает гравитационный коллапс. Что конкретно произойдет, определяет масса звезды. Рассмотрим несколько примеров.

Если масса звезды составляет меньше 1/10 массы Солнца, она может пробыть на главной последовательности 6–12 триллионов лет и со временем должна стать белым карликом [57].

Звезда с массой порядка массы Солнца формирует у себя инертное гелиевое ядро, окруженное оболочкой из горящего в термоядерных реакциях водорода. Это заставляет звезду расширяться, и по мере того как ее внешние слои остывают, она становится красным гигантом. Ядро же сжимается до тех пор, пока его вещество не станет вырожденным. Этот коллапс высвобождает энергию, которая разогревает окружающие ядро слои, в результате чего они начинают передавать тепло путем конвекции, а не просто излучением. В газе возникает турбулентность и потоки вещества от ядра к поверхности и обратно. Через миллиард лет или около того ядро из вырожденного гелия становится настолько горячим, что ядра гелия начинают сливаться с образованием углерода с участием бериллия в роли короткоживущего посредника. В зависимости от других факторов звезда может после этого развиваться далее в гигантскую звезду асимптотической ветви. Некоторые звезды этого типа пульсируют — попеременно то расширяются, то сжимаются; колеблется и их температура. Со временем такая звезда остывает и становится белым карликом.

У Солнца осталось примерно 5 миллиардов лет до того, как оно станет красным гигантом. При этом Меркурий и Венера будут поглощены расширяющимся Солнцем. На этом этапе орбита Земли, вероятно, будет проходить над самой поверхностью Солнца, но приливные силы и трение о хромосферу будут замедлять ее движение. Со временем Землю тоже ждет поглощение. Это не скажется на отдаленном будущем человеческого рода, поскольку средний срок существования биологического вида составляет лишь несколько миллионов лет [58].

Достаточно массивная звезда, намного крупнее Солнца, начинает гелиевый синтез прежде, чем вырождается ее ядро, и взрывается с образованием сверхновой. Звезда, массой более 40 солнечных, выбрасывает значительную часть своего вещества посредством давления излучения, остается очень горячей и проходит целую серию этапов, на каждом из которых преобладающий элемент ее ядра замещается другим, с более высоким номером в Периодической таблице. Ядро разделяется на концентрические слои: железо, кремний, кислород, неон, углерод, гелий, водород. Ядро такой звезды может в конце концов превратиться в белый карлик или черный карлик — тот же белый карлик, который потерял так много энергии, что совсем перестал светить. Достаточно массивное вырожденное ядро может вместо этого образовать нейтронную звезду или, в более экстремальных случаях, черную дыру: см. главу 14.

Опять же, подробности здесь не имеют значения, и я сильно упростил чрезвычайно запутанное ветвистое дерево возможных вариантов эволюции звезды. В математических моделях, которыми пользуются астрофизики, разбираются все возможные варианты, а также порядок и условия их возникновения. Все богатое разнообразие звезд, различающихся по размеру, температуре и цвету, имеет общее происхождение: ядерный синтез, который начинается с водорода и подвергается воздействию конкурирующих сил давления излучения и гравитации.

Через всю астрофизику красной нитью проходит история о том, как ядерный синтез превращает простые ядра водорода в более сложные ядра: гелия, бериллия, лития, бора и т.д.

И это еще одна причина, по которой звезды важны для нас.

\*\*\*

«Мы — звездная пыль», — пела Джони Митчелл. Конечно, это клише, но клише зачастую точно отражает истину. Ранее то же самое сказал Артур Эддингтон в *New York Times Magazine*: «Мы — крохи звездного вещества, которые случайно остыли, частицы неудавшейся звезды». Попробуйте положить этона музыку.

Согласно теории Большого взрыва, единственным элементом (ядром, конечно) в ранней Вселенной был водород. В интервале от 10 секунд до 20 минут после рождения Вселенной процессы ядерного синтеза, запущенные Большим взрывом, посредством вышеописанных реакций создали гелий-4 и по чуть-чуть дейтерия, гелия-3 и лития-7. Короткоживущие радиоактивные тритий и бериллий-7 тоже образовывались, но быстро распадались.

Одного водорода было вполне достаточно для возникновения газовых облаков, которые сжимались с образованием сначала протозвезд, а затем и звезд. В бушевавшем в недрах звезд ядерном урагане рождались новые химические элементы. В 1920 году Эддингтон предположил, что звезды энергетически питаются ядерным синтезом, слиянием ядер водорода в гелий. В 1939 году Ханс Бете исследовал протон-протонную цепочку и другие ядерные реакции в звездах, что придало достоверности теории Эддингтона. В начале 1940-х годов Джордж Гамов доказывал, что почти все химические элементы возникли в ходе Большого взрыва.

В 1946 году Фред Хойл предположил, что источником всех элементов тяжелее водорода был не Большой взрыв как таковой, а последующие ядерные реакции в недрах звезд. Он опубликовал длинный анализ возможных траекторий, по которым ядерные реакции могли привести к возникновению всех элементов вплоть до железа. Чем старше галактика, тем богаче и гуще в ней варево химических элементов. В 1957 году Маргарет и Джеффри Бербидж, Уильям Фаулер и Хойл опубликовали работу «Синтез химических элементов в звездах». Эта знаменитая работа, которую при ссылках часто обозначают просто как B2FH (по первым буквам фамилий авторов), положила начало теории звездного ядерного синтеза — в сущности, это просто перефразированное название статьи; в ней был дан разбор многих важнейших ядерных процессов, протекающих внутри звезд. Вскоре у астрофизиков уже была убедительная теория на этот счет, и они научились предсказывать относительное содержание различных элементов в Галактике; эти предсказания (по большей части) соответствуют наблюдательным данным.

История в то время остановилась на железе, потому что это самое массивное ядро, которое может возникнуть в результате сжигания кремния — цепочки реакций, стартовым пунктом для которой служит кремний. Неоднократное слияние с гелием ведет к образованию кальция, а оттуда дальше через серию нестабильных изотопов титана, хрома и железа до никеля. Этот изотоп, никель-56, служит барьером для дальнейшего продвижения, поскольку следующий шаг — очередное слияние с гелием — должен был бы использовать энергию, а не производить ее. Этот изотоп никеля распадается, превращаясь в радиоактивный кобальт-56, а он, в свою очередь, превращается в стабильное железо-56.

Чтобы пройти дальше железа, Вселенной нужно было изобрести какой-то новый прием.

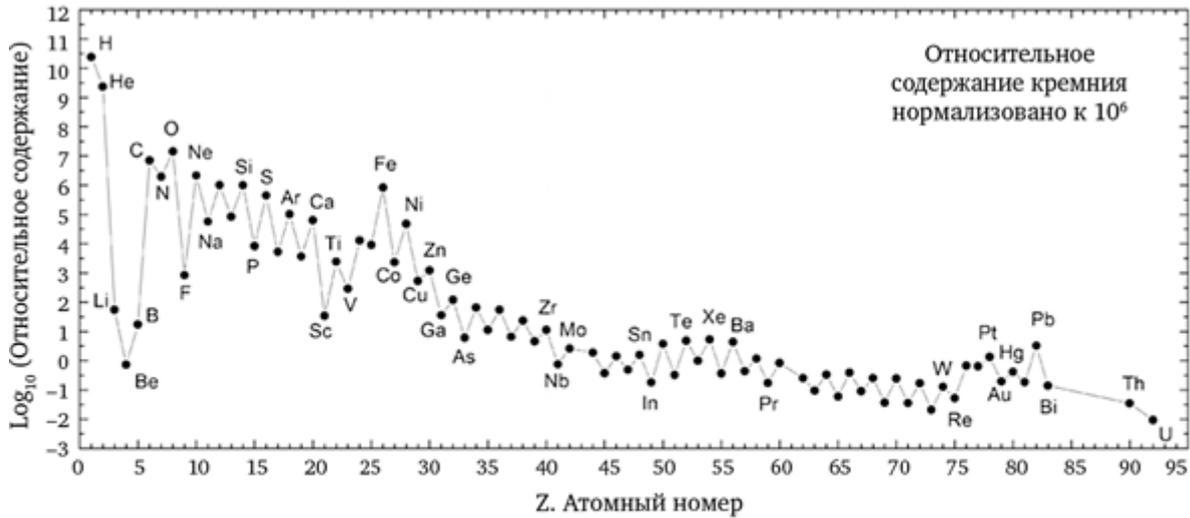
Им стали сверхновые.

Сверхновая — это взрывающаяся звезда. Новая — это менее энергичная форма того же самого, которая может увести нас прочь от заявленной темы. Кеплер наблюдал новую в 1604 году, и это было последнее замеченное нами подобное событие в Галактике, хотя позже были обнаружены остатки еще двух, более близких к нам по времени новых [59]. По существу, сверхновая — это последний вариант ядерной бомбы, и, когда такое происходит, одна звезда может затмить собой целую галактику. Она излучает в пространство столько энергии, сколько Солнце за все время своего существования. Сверхновая может возникнуть в двух случаях. Белый карлик может получить дополнительную порцию вещества, поглотив своего компаньона — вторую звезду в паре; при этом он станет горячее и запустит углеродный синтез; процесс «выходит из-под контроля», и звезда взрывается. Или же ядро очень массивной звезды коллапсирует, и тогда высвободившаяся энергия может послужить запалом к такому взрыву.

Так или иначе, вещество звезды разлетается со скоростью 1/10 скорости света и порождает ударную волну. Волна эта собирает в себя газ и пыль и образует расширяющуюся оболочку — остаток сверхновой. Именно в этом взрыве возникают элементы Периодической таблицы тяжелее железа, и именно так они распространяются на галактические расстояния [60].

Я сказал, что предсказанное соотношение элементов в основном соответствует наблюдаемым данным. Ярчайшее исключение — литий: реальное содержание лития-7 во Вселенной составляет лишь треть от того, что предсказывает теория, тогда как лития-6 примерно в 1000 раз больше, чем должно бы быть. Некоторые ученые считают, что это всего лишь незначительная ошибка, которую, вероятно, можно исправить, найдя новые траектории реакций или новые сценарии

образования лития. Другие видят в этом серьезную проблему, для разрешения которой, вероятно, потребуется новая физика, выходящая за рамки стандартной теории Большого взрыва.



Оценка относительного содержания химических элементов в Солнечной системе. Вертикальная шкала взята в логарифмическом масштабе, так что флуктуации на самом деле значительно больше, чем кажется на первый взгляд

Существует и третья возможность: лития-7 намного больше, чем нам кажется, но находится он где-то там, где мы не можем его регистрировать. В 2006 году Андреас Корн и его сотрудники сообщили, что в шаровом скоплении NGC 6397, где-то в направлении на Большое Магелланово Облако, относительное содержание лития примерно соответствует предсказанию, сделанному на основе просчета ядерного синтеза Большого взрыва. Ученые предполагают, что кажущийся недостаток лития-7 в звездах галактического гало — примерно четвертая часть от предсказанного — может указывать на то, что эти звезды вовсе не потеряли литий-7, как кажется, а просто увели его посредством турбулентной конвекции в более глубокие слои, где его уже невозможно зарегистрировать.

Реакция на литиевую загадку поднимает перед нами потенциальную проблему, связанную с предсказаниями на основе ядерного синтеза Большого взрыва. Представим, что мы вычисляем относительное содержание различных элементов. За значительную часть происходящего во Вселенной, вероятно, отвечают самые обычные, самые распространенные ядерные реакции, и величины, полученные в результате их просчета, в большинстве случаев не сильно отличаются от реальности. А дальше мы начинаем работать над отклонениями. Слишком мало серы? Хм-м, давайте найдем новые траектории, ведущие к образованию серы. Так, нашли, и числа теперь выглядят правильно — с серой разобрались, переходим к цинку. Чего мы при этом не делаем, так это не продолжаем поиски новых путей образования серы. Я не хочу сказать, что кто-то намеренно делает подобные вещи, такой избирательный подход — штука естественная, он случался в науке и прежде. Возможно, литий не единственное несоответствие. Сосредоточившись на случаях, где содержание получается слишком низким, мы, возможно, упускаем те случаи, где более тщательные расчеты сделали бы его слишком высоким.

Еще одна характеристика звезд, которая сильно зависит от математической модели, — это их точная структура. Строение большинства звезд на каком-то конкретном этапе своей эволюции может быть описано как серия концентрических оболочек. Каждая оболочка имеет собственный, вполне конкретный состав и «сгорает» в подходящих ядерных реакциях. Некоторые оболочки прозрачны для электромагнитного излучения и испускают тепло в окружающее пространство. Некоторые непрозрачны, и тепло в них переносится конвекцией. Эти структурные соображения самым тесным образом связаны с эволюцией звезд и способами, посредством которых они синтезируют химические элементы.

\*\*\*

Попытка разобраться в одном из «дефицитов» привела Хойла к знаменитому предсказанию. Когда он просчитал (ожидаемое) относительное содержание углерода, его получилось слишком мало. Однако мы существуем, а углерод служит принципиально важным ингредиентом жизни. Поскольку мы с вами — звездная пыль, то получается, что звезды должны каким-то образом вырабатывать намного больше углерода, чем указывают расчеты Хойла. Исходя из этого, он предсказал существование неизвестного пока резонанса в ядре углерода, который намного упрощал бы его образование. Позже резонанс действительно был зарегистрирован, примерно там, где и предсказал его Хойл. Этот факт часто представляется как триумф антропоцентричного принципа: сам факт нашего существования накладывает серьезные ограничения на Вселенную.

Критический анализ этой истории опирается в какой-то мере на ядерную физику. Естественный путь к образованию углерода — это тройной альфа-процесс или, иначе, тройная гелиевая реакция, проходящая в красных гигантах. Гелий-4 имеет в ядре два протона и два нейтрона. Основным изотопом углерода содержит по шесть штук того и другого. Так что три ядра гелия (или альфа-частицы, как их еще называют) при слиянии могут образовать ядро углерода. Замечательно, но... Два ядра гелия сталкиваются часто, но если мы хотим получить в результате углерод, то третье ядро гелия должно врезаться в первые два ровно в момент столкновения. Тройное столкновение в звезде происходит ужасно редко, так что углерод не может образовываться таким путем. Хорошо, пусть два ядра гелия, сливаясь, образуют бериллий-8, а затем уже третье ядро гелия сливается с ним и образует углерод. К несчастью, бериллий-8 распадается через 10–16 секунд, что очень ограничивает возможности его столкновения с ядром гелия. Такой двухступенчатый процесс не может дать достаточное количество углерода.

Если только не окажется... что энергия углерода очень близка к суммарной энергии бериллия-8 и гелия. Это своего рода ядерный резонанс, именно он заставил Хойла предсказать новое, неизвестное на тот момент состояние углерода с энергией на 7,6 МэВ выше самого низкого энергетического состояния. Через несколько лет действительно было открыто состояние с энергией 7,6549 МэВ. Но суммарная энергия бериллия-8 и гелия составляет 7,3667 МэВ, так что энергия новооткрытого состояния углерода, получается, чуть великовата.

Откуда же берется эта энергия? Ее почти полностью обеспечивает температура красного гиганта.

Это один из любимых примеров пропагандистов так называемой «тонкой настройки» — идеи о том, что Вселенная необычайно точно настроена таким образом, чтобы в ней могла существовать жизнь. Я еще вернусь к этому в главе 19. Основное их утверждение заключается в том, что без углерода нас бы не было. Но существование такого значительного количества углерода требует тонкой настройки звезды и ядерного резонанса, а то и другое опирается на фундаментальные законы физики. Позже Хойл развил эту идею:

«Должно быть, свойства углеродного атома разрабатывал какой-то сверхрасчетливый разум, в противном случае мои шансы найти такой атом через слепые силы природы были бы совершенно ничтожны. Интерпретация фактов при помощи здравого смысла подсказывает, что какой-то сверхразум поиграл с физикой, а также с химией и биологией и что в природе вообще не существует слепых сил, о которых бы следовало говорить».

Звучит замечательно, и, разумеется, это не может быть простым совпадением. Оно и не является таковым, но разум развенчивает теорию тонкой настройки. У каждой звезды имеется собственный термостат — петля отрицательной обратной связи, в которой температура и реакция регулируют друг друга, поддерживая состояние равновесия. «Тонко настроенный» резонанс в тройной гелиевой реакции должен поражать нас не более, чем тот факт, что пламя при сгорании угля характеризуется ровно той температурой, которая и нужна для горения угля. Именно так ведет себя горящий уголь. Мало того, это не более поразительно, чем то, что наши ноги по длине в точности таковы, чтобы доставать до земли. Это тоже петля обратной связи между мышечным усилием и силой тяготения.

Со стороны Хойла было немного неспортивно сформулировать это предсказание в терминах человеческого существования. Ведь главное-то здесь в том, что во Вселенной слишком мало углерода. Конечно, поразительно уже то, что красные гиганты и атомные ядра в принципе существуют, что они производят углерод из водорода и что некоторая часть этого углерода в конечном итоге оказалась у нас внутри. Но это совсем другие вопросы. Вселенная бесконечно

богата и сложна, в ней происходят всяческие чудеса. Но нам не следует путать результаты с причинами и воображать, что цель Вселенной состоит в том, чтобы сотворить род человеческий.

Единственная причина, по которой я упомянул здесь об этом (помимо общей неприязни к преувеличенным заявлениям о «тонкой настройке»), состоит в том, что вся эта история потеряла смысл после открытия нового способа образования углерода в звездах. В 2001 году Эрик Фигельсон с сотрудниками открыл 31 молодую звезду в туманности Ориона. Все они по размеру примерно соответствуют Солнцу, но при этом чрезвычайно активны и производят рентгеновские вспышки, которые раз в сто превосходят по мощности нынешние солнечные вспышки и происходят раз в сто чаще. Протоны в этих вспышках обладают достаточной энергией, чтобы порождать всевозможные тяжелые элементы в окружающем звезду пылевом диске. Так что для получения этих элементов вовсе не нужна сверхновая. Это подсказывает, что нам следует пересмотреть все расчеты, касающиеся происхождения химических элементов, в том числе и углерода. Не исключено, что некоторые эффекты кажутся нам невозможными просто из-за недостатка воображения. Пропорции, которые представляются нам правильными, могут сильно измениться, если присмотреться к ним повнимательнее и подумать как следует.

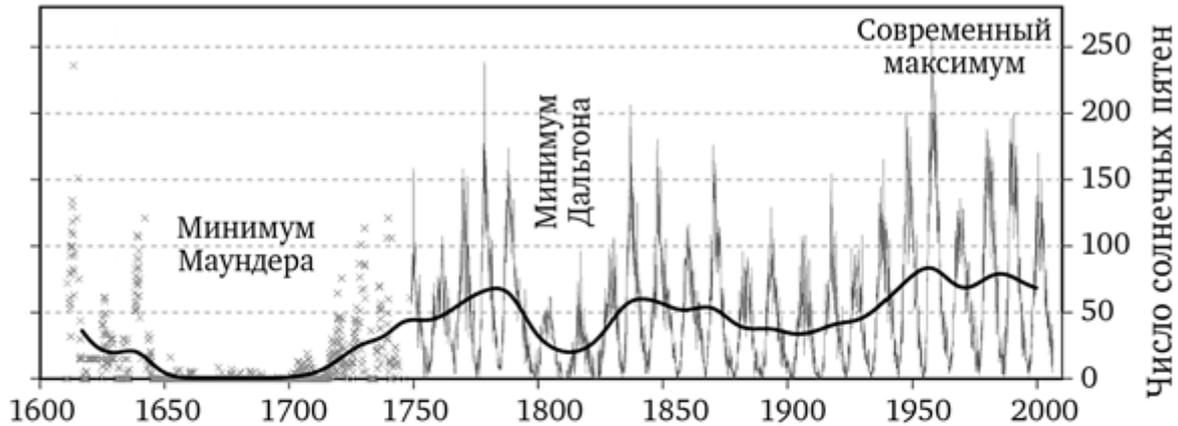
\*\*\*

Для древнегреческих философов Солнце было идеальным воплощением небесной геометрии — безупречной сферой. Но астрономы древнего Китая, глядя на Солнце сквозь дымку, заметили на нем пятна[61]. Кеплер в 1607 году тоже заметил пятно на Солнце, но принял его за Меркурий, проходящий по солнечному диску. В 1611 году Йоханнес Фабрициус опубликовал работу *Maculis in Sole Observatis, et Apparente earum cum Sole Conversione Narratio* («Описание наблюдаемых на Солнце пятен, передвигающихся вместе с Солнцем»), название которой говорит само за себя. В 1612 году Галилей наблюдал на Солнце темные пятна неправильной формы и сделал рисунки, показывающие, что эти пятна движутся; тем самым он подтвердил мнение Фабрициуса о том, что Солнце вращается. Существование пятен на Солнце разрушило давнюю веру в совершенство Солнца и послужило поводом для горячего спора о приоритете.

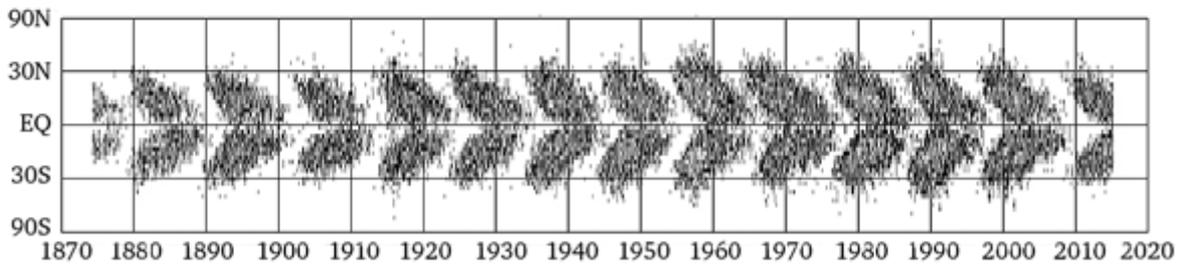
Число солнечных пятен меняется год от года, но существует достаточно регулярная закономерность — 11-летний цикл, на протяжении которого число пятен меняется от практически полного отсутствия до сотни и более в год. В 1645–1715 годах эта закономерность была нарушена, и пятен на Солнце практически не наблюдалось. Этот период называют минимумом Маундера.

Возможно, между пятнообразовательной активностью Солнца и климатом Земли существует какая-то связь, но связь эта, даже если она есть, вероятно, слаба. Маундеровский минимум совпал с серединой Малого ледникового периода — длительного периода необычно низких температур в Европе. То же можно сказать и о следующем периоде низкой солнечной активности — минимуме Дальтона (1790–1830 годы), включающем и знаменитый «год без лета» (1816 год), но низкие температуры того года объясняются гигантским вулканическим взрывом горы Тамбора на острове Сумбава в Индонезии. Малый ледниковый период также мог быть вызван, по крайней мере отчасти, высоким уровнем вулканической активности. Минимум Шпёрера (1460–1550 годы) связан еще с одним периодом похолодания; о минимуме солнечной активности в этот период свидетельствует связанное с ним содержание изотопа углерода-14 в годовых кольцах деревьев. Записи о солнечных пятнах в этот период не велись.

## 400 лет наблюдений солнечных пятен



## Изменения в числе солнечных пятен



## Распределение солнечных пятен по широте

Если нанести на график не только число солнечных пятен, но и их широту, получится забавная картина, напоминающая длинный ряд бабочек. Цикл начинается пятнами возле полюса, но постепенно, по мере приближения их числа к максимуму, пятна начинают появляться ближе к экватору. В 1908 году Джордж Хейл сделал первый шаг к пониманию такого поведения пятен; он связал солнечные пятна с необычайно мощным магнитным полем Солнца. Хорас Бэбкок смоделировал динамику магнитного поля Солнца в самых внешних его слоях и связал цикл солнечных пятен с периодическими изменениями полярности солнечного динамо. В его теории полный цикл длится 22 года, причем две его половины разделяет инверсия магнитных полюсов с южного на северный и наоборот.

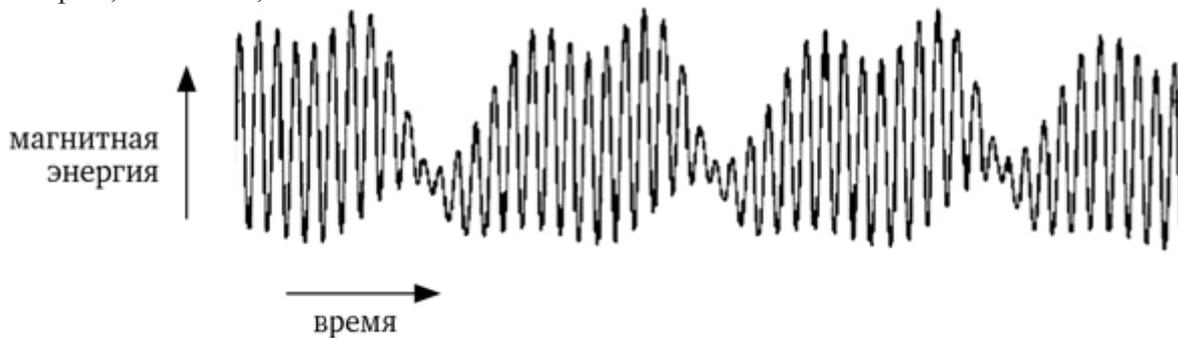
Солнечные пятна кажутся темными только по сравнению с их окружением; их температура составляет около 4000 К, в то время как газы вокруг них имеют температуру 5800 К. Солнечные пятна похожи на магнитные бури в супергорячей солнечной плазме. Их математика управляется магнитной гидродинамикой — чрезвычайно сложной дисциплиной о намагниченной плазме. Представляется, что солнечные пятна — это верхние концы трубок магнитного потока, берущих начало глубоко в недрах Солнца.

Усредненная форма магнитного поля Солнца — диполь, напоминающий собой стержневой магнит; у него есть северный полюс, южный полюс и силовые линии, идущие от одного к другому. Полюса выстроены вдоль оси вращения, и за время нормально протекающих циклов солнечных пятен их полярности меняются местами каждые 11 лет. Так что магнитный полюс в «северном полушарии» Солнца иногда представляет магнитный север, а иногда — магнитный юг. Солнечные пятна, как правило, появляются связанными парами, причем поле между ними напоминает поле стержневого магнита, ориентированного вдоль линии восток — запад. Пятно, которое появляется первым, имеет ту же полярность, что и ближайший полюс основного магнитного поля, а второе пятно, которое появляется следом, — противоположную полярность.

Солнечное динамо, формирующее магнитное поле нашего светила, вызывается к жизни конвективными циклонами во внешнем слое Солнца толщиной 200 000 километров в сочетании с особенностью вращения звезды: на экваторе вращение происходит быстрее, чем вблизи

полюсов. Магнитные поля «захватываются» плазмой и, как правило, движутся вместе с ней, так что силовые линии, первоначально идущие от полюса к полюсу и пересекающие экватор под прямым углом, начинают закручиваться по мере того, как экваториальная область утягивает их вперед по отношению к приполярным областям. Силовые линии перекручиваются, поля противоположных полярностей переплетаются. Солнце продолжает вращаться, линии магнитного поля закручиваются все плотнее, и, когда напряжения достигают критической величины, трубки изгибаются и выходят на поверхность. Линии поля вытягиваются, а связанные с ними солнечные пятна дрейфуют к полюсу. Ведомое пятно достигает полюса первым и, поскольку оно имеет противоположную полярность, вызывает — не за один раз, а после множества аналогичных событий — смену полюсов магнитного поля Солнца. После этого цикл повторяется уже с перевернутым полем.

Одна из теорий минимума Маундера состоит в том, что дипольное поле Солнца дополняется квадрупольным полем — это как два стержневых магнита, уложенные рядом. Если период смены полюсов квадруполя слегка отличается от соответствующего периода диполя, между ними возникают «биения» — как при звучании двух близких, но не совпадающих музыкальных нот. Результатом являются долгопериодические колебания средней величины поля на протяжении цикла, и, когда оно затухает, солнечных пятен почти не возникает. Более того, квадрупольное поле в разных полушариях имеет противоположные полярности и потому усиливает дипольное поле в одном полушарии и в то же время гасит его в другом. Поэтому те немногие пятна, которые все же возникают, все появляются в одном полушарии, что, собственно, и происходило во время минимума Маундера. Аналогичные эффекты косвенно наблюдались и на других звездах, на которых, возможно, тоже бывают пятна.



Сочетание дипольного и квадрупольного полей в простой модели  
солнечного динамо, в которой суммарная энергия колеблется,  
но амплитуда колебаний периодически то сходит на нет,  
то вновь возрастает

Силовые линии поля, выходящие за пределы фотосферы, могут порождать солнечные протуберанцы — громадные петли раскаленного газа. Эти петли могут размыкаться и пересоединяться, позволяя плазме вместе с линиями магнитного поля уноситься прочь с солнечным ветром. Так возникают солнечные вспышки, способные нарушать линии связи и наносить вред электрическим сетям и искусственным спутникам. Часто за ними следуют корональные выбросы массы, когда из короны — разреженной области за пределами фотосферы, видимой глазом во время солнечного затмения, — высвобождаются громадные количества вещества.

\*\*\*

Фундаментальный вопрос: насколько далеки от нас звезды? Так получилось, что единственной причиной, благодаря которой мы знаем ответ для любых тел, расстояния до которых превышают несколько десятков световых лет, мы также обязаны астрофизике, хотя первоначально ключевые наблюдения имели чисто эмпирический характер. Генриетта Ливитт нашла эталонный источник света и тем самым придумала «линейку» для звездных расстояний.

В VI веке до нашей эры древнегреческий философ и математик Фалес оценил высоту египетской пирамиды при помощи геометрии, измерив собственную тень и тень пирамиды на

поверхности земли. Отношение высоты пирамид к длине ее тени равно отношению роста Фалеса к длине его тени. Три из четырех длин в этом уравнении легко можно измерить, так что четвертую величину можно вычислить. Изобретательный метод, примененный Фалесом, — простой пример того, что мы сегодня называем тригонометрией. Тригонометрия, то есть геометрия треугольников, помогает соотнести углы треугольников с их сторонами. Арабские астрономы использовали эту идею для изготовления инструментов, а в средневековой Испании эта идея вновь вернулась на землю в виде топографической съемки. Расстояния на земле трудно измерять, потому что на пути часто встречаются препятствия, но углы всегда доступны и измеряются легко. Чтобы измерить направление на удаленный объект, можно воспользоваться палкой и веревкой — или, еще лучше, визирной оптической трубой. Для начала следует измерить — как можно точнее — известный базовый отрезок, или базис. После этого вы измеряете углы от каждого конца отрезка на какую-то третью точку и вычисляете расстояния до этой точки. Теперь у вас появляется еще два известных расстояния, и вы можете повторить весь процесс, «триангулируя» участок, который хотите нанести на карту, и вычисляя все расстояния на нем на основании одного-единственного точно измеренного отрезка.

Известна история, как Эратосфен измерил при помощи геометрии размер Земли, просто заглянув в колодезь. Он сравнил угол, под которым видно полуденное Солнце в Александрии и Сиене [62] (современный Асуан), и оценил расстояние между ними по времени, за которое караван верблюдов может пройти из одного города в другой. Далее, зная размер Земли, можно пронаблюдать Луну из двух разных точек и вычислить расстояние до нее. Кроме того, этим же методом можно определить расстояние до Солнца.

Каким образом? Около 150 года до нашей эры Гиппарх понял, что, когда Луна находится в первой или последней четверти, то есть освещена ровно наполовину, линия, проведенная от Луны к Солнцу, перпендикулярна линии от Земли к Луне. Значит, достаточно измерить угол между базовой линией Земля — Луна и линией Земля — Солнце, чтобы рассчитать, как далеко от нас находится Солнце. Его оценка этого расстояния — три миллиона километров в пересчете на современные единицы — оказалась слишком скромной: реальное расстояние составляет 150 миллионов километров. Оценка Гиппарха оказалась ошибочной потому, что он считал названный угол равным  $87^\circ$ , тогда как на самом деле он очень близок к прямому. Однако если воспользоваться более качественными инструментами, таким методом можно получить точную оценку.

На пути определения космических расстояний этим методом можно сделать еще один шаг. Мы можем воспользоваться орбитой Земли как базой и определить таким образом расстояние до какой-либо звезды. Земля за полгода проходит половину своей орбиты. Астрономы определяют параллакс звезды как половину угла между двумя лучами зрения на эту звезду, проведенными с противоположных концов орбиты Земли [63]. Расстояние до звезды обратно пропорционально ее параллаксу, причем параллакс в одну угловую секунду соответствует приблизительно 3,26 световым годам. Эта единица расстояния называется парсек (параллакс секунда), и многие астрономы предпочитают ее световому году [64].

Еще в 1729 году Джеймс Брэдли пытался измерить параллакс одной из звезд, но его приборы не обладали для этого достаточной точностью. В 1838 году Фридрих Бессель воспользовался одним из гелиометров Фраунгофера — телескопом новой, весьма продвинутой конструкции появившимся уже после смерти Фраунгофера, — для наблюдения звезды 61 Лебеда. Он измерил ее параллакс, равный 0,31 угловой секунде (это сравнимо с углом, под которым виден теннисный мячик с расстояния 50 километров), и определил расстояние до этой звезды как 10,4 светового года, что очень близко к современному значению. Это расстояние — 100 триллионов километров — наглядно показывает, каким крошечным выглядит наш мир в сравнении с окружающей его Вселенной.

Но уменьшение масштабов человечества на этом не закончилось. Большинство звезд, даже в нашей собственной Галактике, не показывают измеримого параллакса, из чего следует, что они находятся от нас намного дальше, чем 61 Лебеда. Но если параллакс не удастся зарегистрировать и измерить, метод триангуляции перестает работать. Конечно, космические аппараты могли бы обеспечить нам базис и подлиннее, но не на несколько порядков — а именно такая базовая линия потребовалась бы для измерения расстояния до галактик и далеких звезд. Астрономам, чтобы

продолжить подъем по лестнице космических расстояний, необходимо было придумать что-то принципиально новое.

\*\*\*

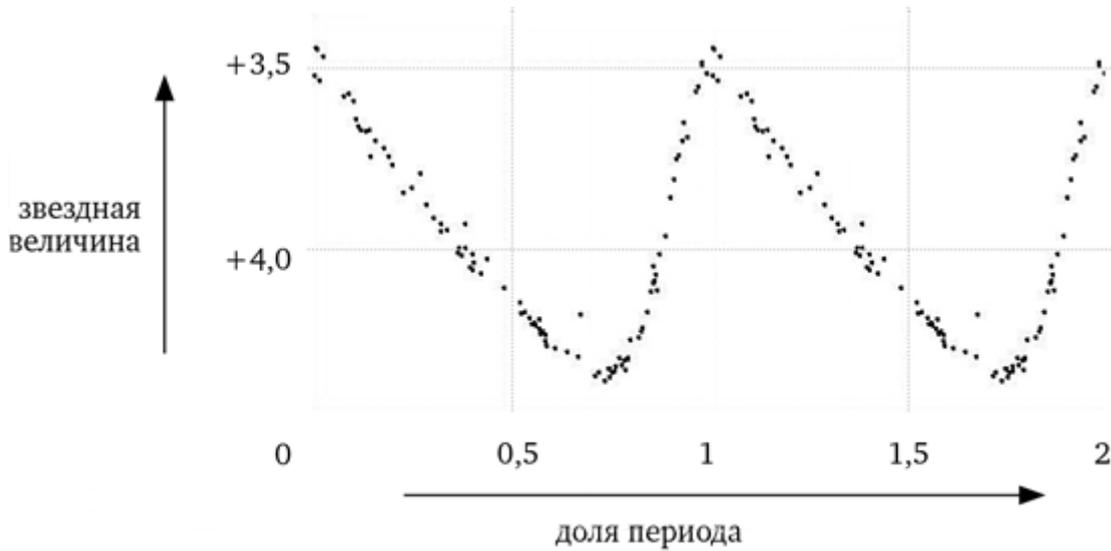
Работать приходится с тем, что есть под рукой. Единственное свойство звезды, которое всегда можно увидеть и измерить, — ее блеск, или видимая яркость. Эта характеристика звезды зависит от двух факторов: от ее реальной яркости — светимости — и от расстояния до нее. Яркость, подобно гравитации, уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Если звезда с той же светимостью, что и  $\beta$  Лебеда, имеет видимую яркость в девять раз ниже, то расстояние до нее должно быть втрое больше.

К несчастью, светимость зависит от типа звезды и ее размера, от того, какие именно в ней идут ядерные реакции. Чтобы метод определения расстояния по видимому блеску работал, нам обязательно нужна «стандартная свеча», или эталонный источник света, — тип звезд, светимость которых известна или может быть определена вне зависимости от расстояния до звезды. Именно эту проблему удалось решить Ливитт. В 1920-е годы она работала у Пикеринга в роли расчетчика — такого человека-компьютера, в скучные обязанности которого входило измерение и каталогизация светимостей звезд в собрании фотопластинок астрономической обсерватории Гарвардского колледжа.

Светимость большинства звезд не меняется во времени, но бывают и переменные звезды, вызывающие к себе, естественно, особый интерес астрономов: их видимая яркость возрастает и падает в правильном периодическом цикле. Ливитт провела специальное исследование переменных звезд. Звезды могут быть переменными по двум основным причинам. Многие звезды являются двойными — два светила обращаются вокруг общего центра масс. Если Земля по случайному совпадению располагается в плоскости их орбит, то эти звезды время от времени — через регулярные промежутки — проходят одна перед другой. Когда это происходит, получается, по существу, затмение: одна звезда заслоняет собой другую и на время блокирует ее свет. Такие «затменные двойные звезды» являются переменными, а распознать их можно по тому, как меняется наблюдаемая яркость: короткие провалы на общем стабильном фоне. Эти звезды не могут служить эталонами светимости.

Однако другой тип переменных звезд выглядит более перспективным в этом смысле. Речь идет об истинно — физически — переменных звездах. Существуют звезды, энергетический выход ядерных реакций в которых меняется периодически, раз за разом повторяя одну и ту же последовательность изменений. Свет, испускаемый ими, тоже меняется периодически, но истинные переменные звезды можно отличить, поскольку у них изменения светимости не имеют характера кратковременных провалов.

Ливитт исследовала один из типов переменных звезд, известный как цефеиды, поскольку первой такой звездой была  $\delta$  Цефея. Применяв хитроумные статистические методы, Ливитт выяснила, что у тусклых цефеид период колебаний светимости меньше, чем у более ярких, причем соотношение светимости и периода ее колебаний подчиняется вполне конкретному математическому правилу. Некоторые цефеиды располагаются достаточно близко к нам, чтобы иметь измеримый параллакс, так что Ливитт смогла вычислить расстояние до них и, соответственно, их светимость. После этого она применила формулу, связывающую период и светимость звезды, и распространила результат на все цефеиды.



### Наблюдаемая кривая светимости $\delta$ Цефея

Цефеиды и стали тем эталонным источником, которого так не хватало астрономам. Вместе с прилагаемой «линейкой» — формулой, описывающей изменение видимой яркости звезды в зависимости от расстояния до нее, — они позволили нам подняться еще на одну ступеньку лестницы космических расстояний. Для преодоления каждой ступеньки этой лестницы требовались и наблюдения, и теоретические изыскания, и математические суждения: теория чисел, геометрия, статистика, оптика, астрофизика. Но заключительный шаг — поистине гигантский — был еще впереди.



## Великая небесная река

Вон там, смотри, Галактика,  
 Что называют Млечный Путь  
 За белизну.  
 Джеффри Чосер. «Дом славы»

В древности никакого уличного освещения не было, за исключением редких факелов и случайных костров, и не заметить в небе самую поразительную его черту было практически невозможно. Сегодня единственный способ увидеть это — пожить или хотя бы погостить где-нибудь, где нет или по крайней мере мало искусственного освещения. Ночное небо в таких местах все усыпано яркими искрами звезд, но при этом через все небо проходит широкая, неправильной формы полоса света, больше похожая на реку, чем на россыпь сияющих точек. С точки зрения древних египтян, это и была река — небесный аналог Нила. Сегодня мы по-прежнему называем эту небесную полосу Млечным Путем, что говорит о том, какие ассоциации она вызывала у наших предков. Астрономы называют космическую структуру, которая видна нам как Млечный Путь, Галактикой; слово это происходит от древнегреческих *galaxias* (молочный) и *kyklos galaktikos* (молочный круг).

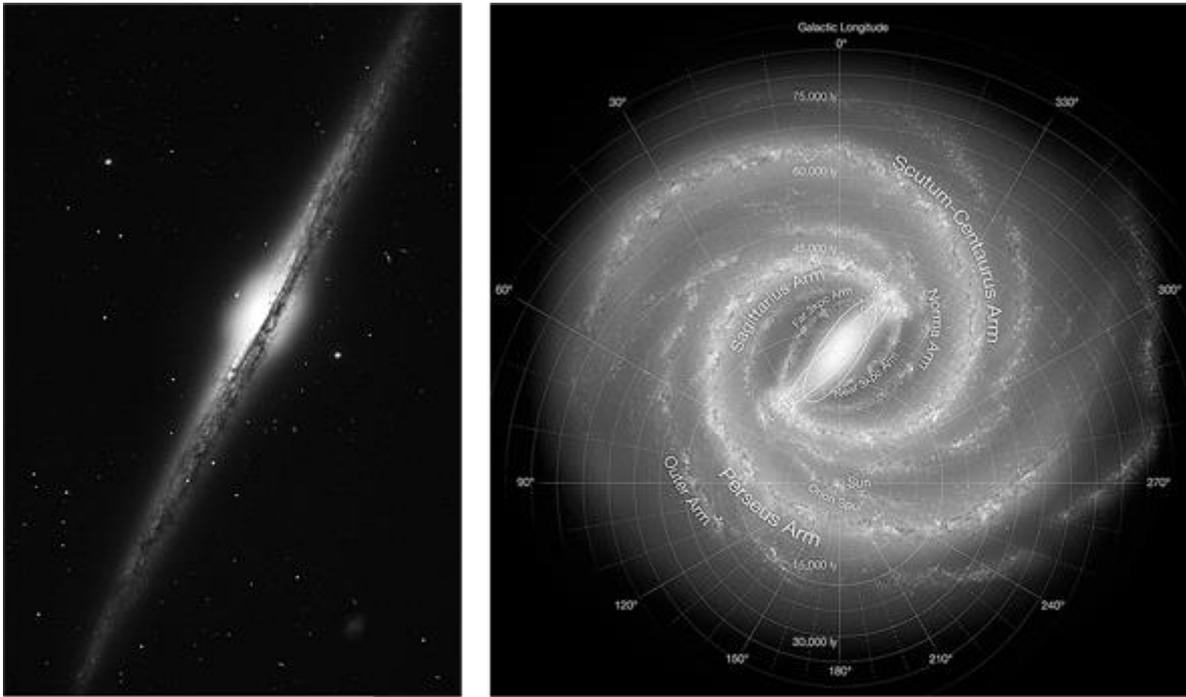
Астрономам понадобилось не одно тысячелетие, чтобы понять, что этот размытый молочный след через все небо представляет собой, каким бы странным это ни казалось, гигантскую полосу звезд, настолько далеких, что глаз не в состоянии разделить их на отдельные точки. Полоса на небе — на самом деле двояковыпуклый диск, видимый с ребра, а мы находимся внутри его.

Изучая небо при помощи все более мощных телескопов, астрономы обратили внимание на другие слабые размытые пятнышки, совсем непохожие на звезды. Некоторые из них видны невооруженным глазом: персидский астроном X века Абдуррахман ас-Суфи описал галактику Андромеды как небольшое облачко, а в 964 году включил Большое Магелланово Облако в свою «Книгу неподвижных звезд». Западные астрономы первоначально называли эти слабые размытые пятнышки туманностями.

Сегодня мы знаем их как галактики. Нашу собственную галактику мы называем Галактикой с большой буквы, или галактикой Млечный Путь. Галактики — самые многочисленные во Вселенной крупные структуры, объединяющие в себе звезды. Многие из них демонстрируют поразительные формы — спиральные рукава, происхождение которых до сих пор считается неясным. Несмотря на многочисленность, многие их особенности мы до конца не понимаем.



Млечный Путь над озером Саммит в Западной Вирджинии



Слева: Галактика, видимая с ребра, с центральным утолщением (балджем). Справа: наша галактика Млечный Путь в представлении художника. Подписаны отдельные рукава, названные по соответствующим созвездиям

\*\*\*

В 1744 году Шарль Мессье составил первый систематический каталог туманностей. В первой его версии было 45 объектов, а в версии 1781 года их число увеличилось до 103. Вскоре после публикации этого варианта Мессье и его ассистент Пьер Мешен открыли еще несколько таких объектов. Мессье обратил внимание на особенно заметную туманность в созвездии Андромеды. Она известна теперь как М31, поскольку значилась под номером 31 в его списке.

Но каталогизация — это одно, а понимание — совершенно другое. Что же такое туманность?

Еще в 400 году до нашей эры греческий философ Демокрит предположил, что Млечный Путь — это совокупность крохотных звезд. Он также высказал идею о том, что вещество состоит из крохотных невидимых атомов. Демокритова теория Млечного Пути пребывала в забвении, пока в 1750 году Томас Райт не опубликовал свою «Оригинальную теорию, или Новую гипотезу Вселенной». Райт возродил предположение о том, что Млечный Путь представляет собой диск из звезд, расположенных слишком далеко от нас, чтобы их можно было различить по отдельности. Ему также пришло в голову, что туманности могут представлять собой нечто подобное. В 1755 году философ Иммануил Кант переименовал туманности в «островные вселенные», признав тем самым, что эти туманные пятнышки составлены из бесчисленных звезд, еще более далеких, чем звезды Млечного Пути.

В период с 1783 по 1802 год Уильям Гершель нашел еще 2500 туманностей. В 1845 году лорд Росс при помощи своего нового телескопа, очень внушительного и большого, разглядел в нескольких туманностях отдельные точечные источники света — первое значимое свидетельство того, что Райт и Кант, возможно, были правы. Но само это предположение оставалось на редкость спорным. Вопрос о том, находятся ли эти светлые пятнышки вне Млечного Пути — и, мало того, представляет ли собой Млечный Путь всю Вселенную, — оставался открытым еще в 1920 году, когда Харлоу Шепли и Хебер Кёртис проводили в Смитсоновском музее жаркие дебаты на эту тему.

Шепли считал, что Млечный Путь — это и есть Вселенная. Он утверждал, что если М31 — это такая же галактика, как Млечный Путь, то ее должны отделять от нас примерно 100 млн световых лет, а такое расстояние считалось слишком большим, чтобы в него можно было

поверить. Вдобавок Адриан ван Маанен утверждал, что наблюдал вращение туманности Вертушка (M101). Если бы она находилась от нас так далеко, как предсказывала теория Кёртиса, то некоторые части ее должны были бы двигаться со сверхсветовой скоростью. Но еще одним гвоздем в крышку гроба стала новая в M31 — одна-единственная взорвавшаяся звезда, которая короткое время излучала больше света, чем вся туманность [65]. Трудно было представить себе, как одна звезда может сиять сильнее, чем миллионы других звезд, вместе взятые.

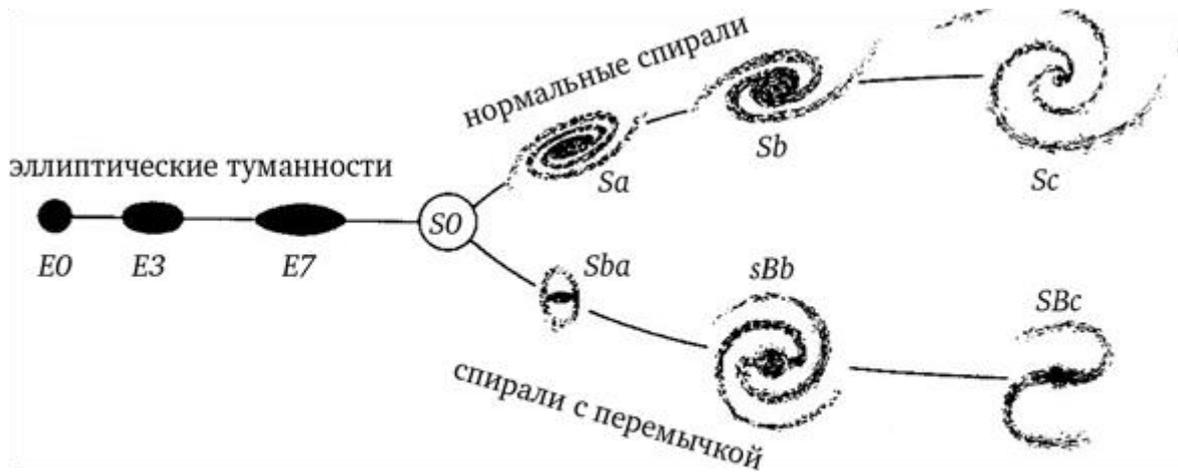
Этот спор разрешил в 1924 году Хаббл при помощи эталонных источников, обнаруженных Ливитт. В 1924 году он воспользовался телескопом Хукера — самым мощным из доступных на тот момент, — чтобы пронаблюдать цефеиды в M31. Связь между периодом и светимостью, найденная Ливитт, помогла ему определить, что расстояние до них составляет 1 млн световых лет. Это сразу поместило M31 далеко за пределами Млечного Пути. Шепли и другие астрономы пытались отговорить Хаббла от публикации таких абсурдных результатов, но тот не стал слушать советов и опубликовал их — сначала в *The New York Times*, а затем и в научной статье. Позже оказалось, что ван Маанен ошибался, а новая Шепли в действительности была сверхновой и на самом деле какое-то время излучала больше света, чем вся галактика, в которой она находилась.

В ходе дальнейших исследований обнаружилось, что история с цефеидами не так проста, как казалось. Вальтер Бааде выделил среди цефеид два разных типа, для каждого из которых характерно свое соотношение периода и светимости, — это классические цефеиды и цефеиды II типа, и показал, что на самом деле M31 находится еще дальше, чем считал Хаббл. Согласно современным оценкам, расстояние до этой галактики составляет 2,5 млн световых лет.

\*\*\*

Хаббла особенно интересовали галактики, и он придумал для них схему классификации, основанную на внешнем виде. Он выделил четыре основных типа галактик: эллиптические, спиральные, спиральные с перемычкой (с баром) и неправильные галактики. Спиральные галактики в особенности поставили перед учеными интереснейшие математические вопросы, поскольку они наглядно демонстрируют нам результат действия закона всемирного тяготения в гигантских масштабах — и закономерности при этом выявляются тоже поистине гигантские. При взгляде на ночное небо кажется, что звезды раскиданы по нему случайным образом, но если звезд достаточно много, то получаются образования загадочно правильной формы.

Хаббл не ответил на эти математические вопросы, но сумел стронуть всю махину с мертвой точки. Одним из несложных, но существенных нововведений стало то, что он систематизировал формы галактик и составил из них диаграмму в форме камертона. Он дал разновидностям галактик символичные обозначения: E1 — E7 для эллиптических галактик, Sa, Sb, Sc — для спиральных, SBa, SBb, SBc — для спиральных с перемычкой. Его классификация была эмпирической, то есть не базировалась на какой бы то ни было законченной теории или системе измерений. Но многие важные области науки — и среди них геология и генетика — начинались как эмпирические классификации. Если у вас есть упорядоченный список, можно начинать разбираться с тем, как разные образцы взаимодействуют и дополняют друг друга.



«Камертон Хаббла» для классификации галактик.

### Неправильные галактики не включены

Некоторое время считалось, что эта диаграмма, возможно, иллюстрирует этапы развития галактик, которые начинают свое существование в виде плотных эллиптических звездных скоплений, а затем расползаются и формируют либо спиральные рукава, либо спиральные рукава и перемычку в зависимости от сочетания параметров — массы, диаметра и скорости вращения. После этого спираль постепенно раскручивается и теряет плотность, пока наконец не утрачивает большую часть структуры и не становится неправильной. Безусловно, идея была привлекательная, ведь аналогичная диаграмма спектральных типов звезд Герцшпрунга — Рассела в какой-то степени отражает звездную эволюцию. Однако в настоящее время считается, что схема Хаббла скорее каталог возможных форм галактик, а сами они не развиваются столь упорядоченно.

\*\*\*

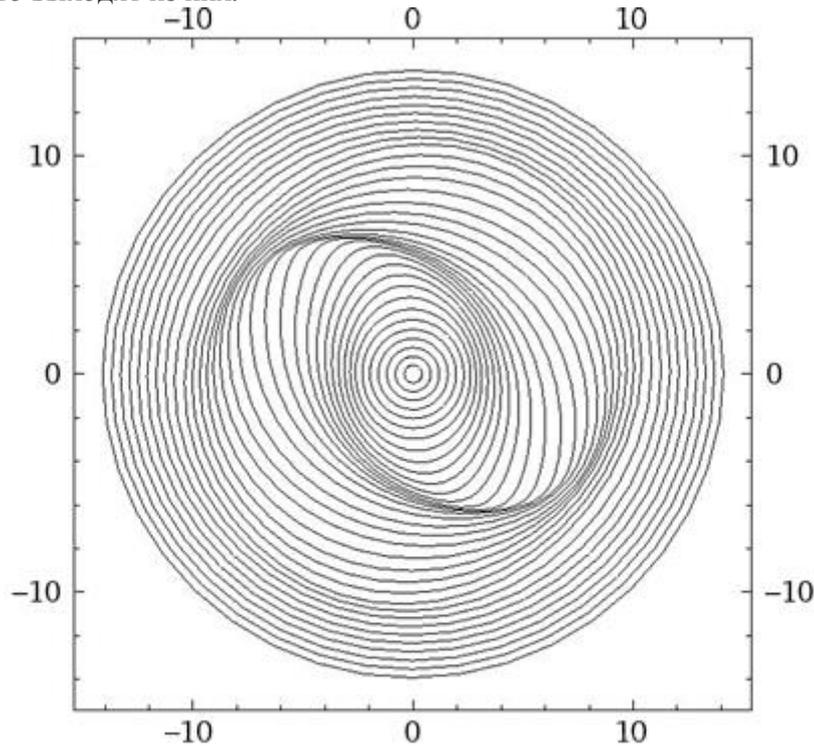
По сравнению с бесформенными пятнами эллиптических галактик математическая правильность спиральных и спиральных с перемычкой смотрится очень эффектно. Почему многие галактики имеют спиральную форму? Откуда примерно у половины из них берется центральная перемычка? Почему у остальных ее нет? Может показаться, что ответить на эти вопросы относительно просто: составить математическую модель, просчитать ее, лучше всего на компьютере, и посмотреть, что получится. Поскольку звезды, составляющие галактику, расположены достаточно свободно и не движутся с околосветовыми скоростями, ньютоновская гравитация должна описывать их поведение достаточно точно.

Было рассмотрено множество подобных теорий. Ни одно из объяснений не получило общего признания и не стало лидером, но есть несколько теорий, которые соответствуют наблюдаемым данным лучше, чем остальные. Всего лишь 50 лет назад большинство астрономов считали, что спирали формируются под действием магнитных полей, но мы сегодня знаем, что поля эти слишком слабы, чтобы объяснить существование спиральных галактик. Сегодня астрономы сходятся во мнении, что спиральная форма формируется в основном под действием гравитационных сил. Другой вопрос, как именно это происходит.

Одну из первых теорий, завоевавших широкое признание, предложил Бертиль Линдبلاد в 1925 году, и основана она на особом типе резонанса. Подобно Пуанкаре, Линдبلاد рассматривал частицу на почти круговой орбите во вращающемся гравитационном ландшафте. В первом приближении эта частица колеблется относительно окружности с конкретной естественной частотой. Резонанс Линдблода возникает, когда отношение этой частоты к частоте, с которой частица встречает последовательные гребни гравитационного ландшафта, представляет собой простую дробь.

Линдبلاد понимал, что рукава спиральных галактик не могут представлять собой перманентные структуры. В принятой модели движения звезд в галактике скорости звезд варьируются в зависимости от радиального расстояния. Если бы в составе рукавов все время были одни и те же звезды, эти рукава свернулись бы еще плотнее, как слишком туго

заведенная часовая пружина. Конечно, мы не можем наблюдать галактику миллионы лет подряд, чтобы увидеть, уплотняется ее спираль или нет, но галактик очень много, и среди них не видно сильно закрученных. Линдبلاد предположил, что звезды раз за разом то входят в спиральные рукава, то выходят из них.



Так звезды на эллиптических орбитах могут порождать спиральную волну плотности — в данном случае спираль с перемычкой

В 1964 году Цзяцзяо Линь и Фрэнк Шу предположили, что спиральные рукава представляют собой волны плотности, в которых звезды сгущаются временно. Волна продолжает движение, захватывая новые звезды и оставляя предыдущие позади, примерно как океанская волна проходит по морю сотни километров, но не несет с собой воды (пока не подойдет к берегу, где вода скапливается, поднимается и обрушивается на берег). Вода просто движется вверх-вниз, когда по ней проходят волны. Бертиль Линдبلاد и Пер Олоф Линдبلاد подхватили и развили эту идею. Оказывается, резонанс Линдблода вполне способен создавать такие волны плотности.

Основная альтернативная теория состоит в том, что спиральные рукава — это скачки уплотнения в межзвездной среде, где накапливается вещество и запускается формирование звезд, когда среда становится достаточно плотной. Вполне возможно и сочетание обоих механизмов.

\*\*\*

Эти теории формирования спиральных рукавов не теряли актуальности более 50 лет. Однако недавние математические достижения позволяют предположить нечто совершенно иное. Ключевой пример здесь — спиральные галактики с перемычкой; в этих галактиках имеются классические спиральные рукава, но есть и прямая перемычка в середине. Типичный пример такой галактики — NGC 1365.

Один из способов хотя бы чуть-чуть разобраться в галактической динамике — создать модель системы  $n$  тел с большими величинами  $n$  и моделировать поведение каждой звезды в ответ на гравитационное воздействие всех остальных. Для реалистичного применения этого метода требуется несколько сотен миллиардов тел, но такие вычисления вряд ли реальны, поэтому на самом деле используются более простые модели. Один из таких подходов дает объяснение регулярной структуре спиральных рукавов. Как ни парадоксально, причиной их возникновения является хаос.



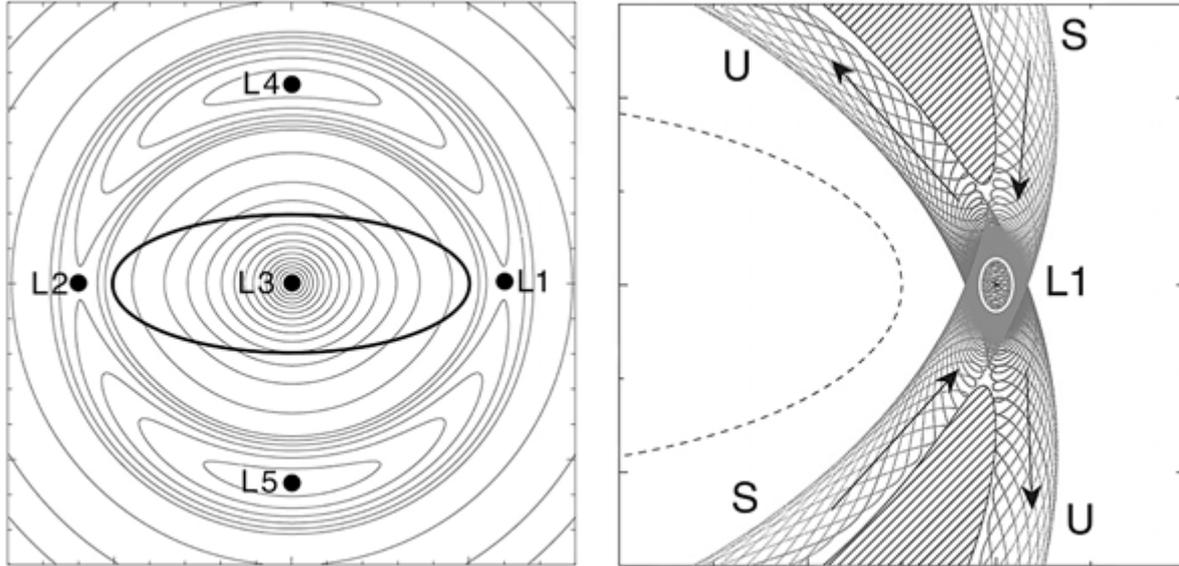
Спиральная галактика с перемычкой NGC 1365,  
скопление галактик в созвездии Печь

Если вы считаете, что «хаос» — это всего лишь красивое слово для обозначения «случайности», вам трудно понять, как регулярная структура может иметь хаотическое объяснение. Все дело в том, что хаос, как мы уже видели, на самом деле не случаен. Он возникает там, где действуют детерминистские правила, и вследствие их работы. В каком-то смысле эти детерминистские правила играют роль скрытых закономерностей, лежащих в основе хаоса. В спиральных галактиках с перемычкой отдельные звезды движутся хаотично, но при их движении галактика сохраняет общую спиральную форму. По мере того как одни звезды уходят из сгущений вдоль спиральных рукавов, их место занимают другие. Возможность существования закономерностей в хаотической динамике — предупреждение тем ученым, кто считает, что регулярный результат должен иметь столь же регулярную причину.

В конце 1970-х годов Джордж Контопулос со своими сотрудниками смоделировали спиральную галактику с перемычкой, взяв за основу жестко вращающуюся центральную перемычку и используя модели  $n$  тел для определения динамики звезд в спиральных рукавах, движимых вращением центральной перемычки. Морфология перемычки в этой модели постулируется, но работа модели показывает, что наблюдаемая форма разумна. В 1996 году Дэвид Кауфман и Контопулос открыли, что внутренние части спиральных рукавов, как будто свисающие с концов перемычки и закручивающиеся вслед за ней, состоят из звезд, которые движутся по хаотическим орбитам. Центральная область галактики, в первую очередь перемычка, вращается как единое целое; это явление называется коротацией [66]. Звезды, образующие внутреннюю область спиральной структуры, относятся к так называемому «горячему населению» галактики, они движутся хаотически и то входят в центральную область, то вновь выходят из нее. Внешние части рукавов составляют звезды, движущиеся по более правильным орбитам.

Вращающаяся перемычка создает гравитационный ландшафт, очень напоминающий ландшафт в задаче Пуанкаре о двух с половиной телах, но геометрия там иная. По-прежнему существует пять точек Лагранжа, где пылинки будут покоиться в системе отсчета, вращающейся вместе с перемычкой, но расположены они иначе, в виде креста. В модели, о которой идет речь, в настоящее время рассматривается около 150 000 пылинок — других звезд — и все они

воздействуют друг на друга, но не на перемычку. Математически это модель системы из 150 000 тел в фиксированном вращающемся гравитационном ландшафте.



*Слева:* точки Лагранжа для вращающейся перемычки.

*Справа:* стабильные (S) и нестабильные (U) совокупности звезд возле  $L_1$

Три из пяти точек Лагранжа —  $L_3$ ,  $L_4$  и  $L_5$  — стабильны. Другие две —  $L_1$  и  $L_2$  — характеризуются как нестабильности типа «седло» и располагаются вблизи концов перемычки, которая изображена в форме вытянутого эллипса. А теперь нам не обойтись без небольшой дозы нелинейной динамики. С равновесиями седловидного типа связаны две особые многомерные поверхности, так называемые стабильная и нестабильная трубки. Это традиционные названия, хотя в некоторых случаях они могут ввести человека в заблуждение. Они не означают, что связанные с ними орбиты стабильны или нестабильны; они указывают лишь направление потока, определяющего эти поверхности. Пылинка, помещенная в стабильную трубку, будет двигаться к седловидной точке как будто под действием силы притяжения; пылинка, помещенная в нестабильную трубку, двинется прочь как будто под действием отталкивающей силы. Частица, помещенная куда-то в иное место, будет следовать по траектории, сочетающей оба типа движения. При рассмотрении именно этих поверхностей Пуанкаре первоначально открыл хаос в задаче двух с половиной тел. На пересечении этих трубок возникает гомоклиническое плетение.

Если бы в этой задаче рассматривалось только положение в пространстве, то стабильная и нестабильная трубки представляли бы собой кривые, пересекающиеся в точке седловины. В горизонталях возле  $L_1$  и  $L_2$  имеется крестообразная прореха, показанная в увеличенном виде на рисунке справа. Эти кривые проходят через середину прорехи. Однако в астрономических орбитах речь идет не только о положении в пространстве, но и о скорости. Вместе эти величины определяют многомерное пространство, известное как фазовое пространство. Здесь два измерения, характеризующие положение в пространстве и непосредственно показанные на рисунке, необходимо дополнить еще двумя измерениями скорости. Фазовое пространство четырехмерно, а стабильные и нестабильные трубки представляют собой двумерные поверхности и показаны на рисунке справа в виде трубок, помеченных стрелками: S — стабильная трубка, U — нестабильная.

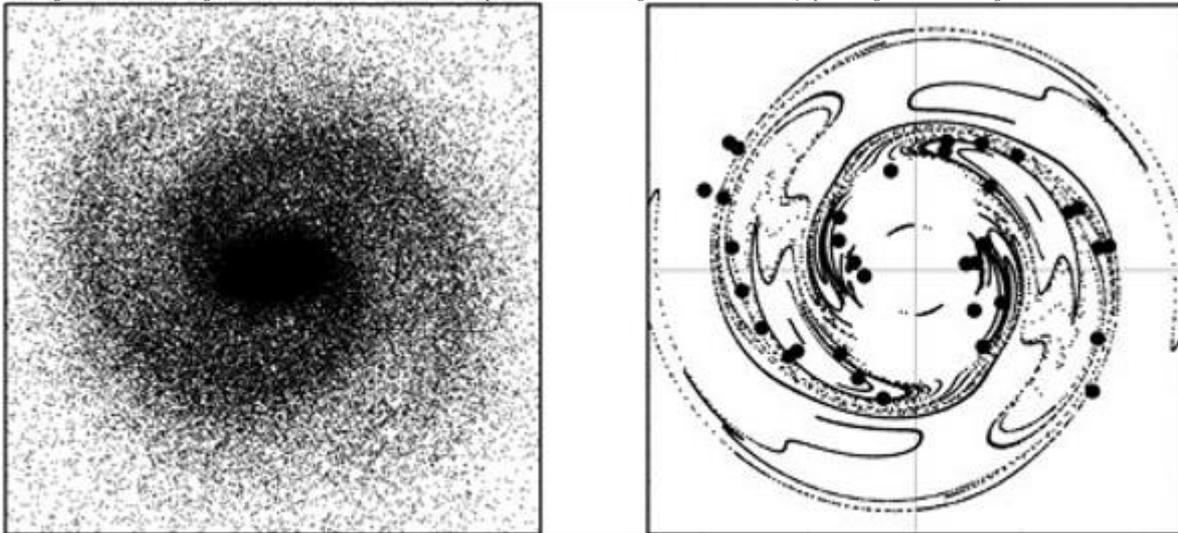
Там, где эти трубки встречаются, они работают как ворота между областью коротации и тем, что в нее не входит, то есть внешней областью. Звезды могут проходить по ним как внутрь этой области, так и наружу, в направлениях, указанных стрелками; кроме того, проходя, при этом они могут хаотически переходить (или не переходить) из одной трубки в другую. Некоторые звезды из внутренней области коротации проходят через эти ворота и уносятся прочь по трубке, помеченной буквой U, внизу справа. И здесь вступает в игру явление, известное как «липкость». Несмотря на то что динамика хаотична, звезды, выходящие через ворота, держатся вблизи нестабильной трубки долгое время — возможно, дольше, чем проживет Вселенная. Обобщая, получим, что звезды вытекают потоком возле  $L_1$ , а затем следуют по направленной наружу ветви

нестабильной трубки, которая здесь поворачивает по часовой стрелке. То же происходит и в  $L_2$ , расположенной напротив  $L_1$ , или на  $180^\circ$  относительно центра галактики от нее.

Со временем многие из этих звезд вновь проникают в область коротации, и все повторяется заново, хотя и не через равные интервалы времени из-за влияния хаоса. Поэтому то, что мы увидим, — это пара спиральных рукавов, выходящих под углом из концов перемишки, в то время как вся структура равномерно вращается как целое. Отдельные звезды не остаются постоянно в рукавах на одних и тех же местах. Скорее они напоминают искры, которые разбрасывает, вращаясь, огненное колесо (вертушка). Вот только искры эти со временем возвращаются к центру, чтобы их разбросало снова, и траектории их меняются хаотически.

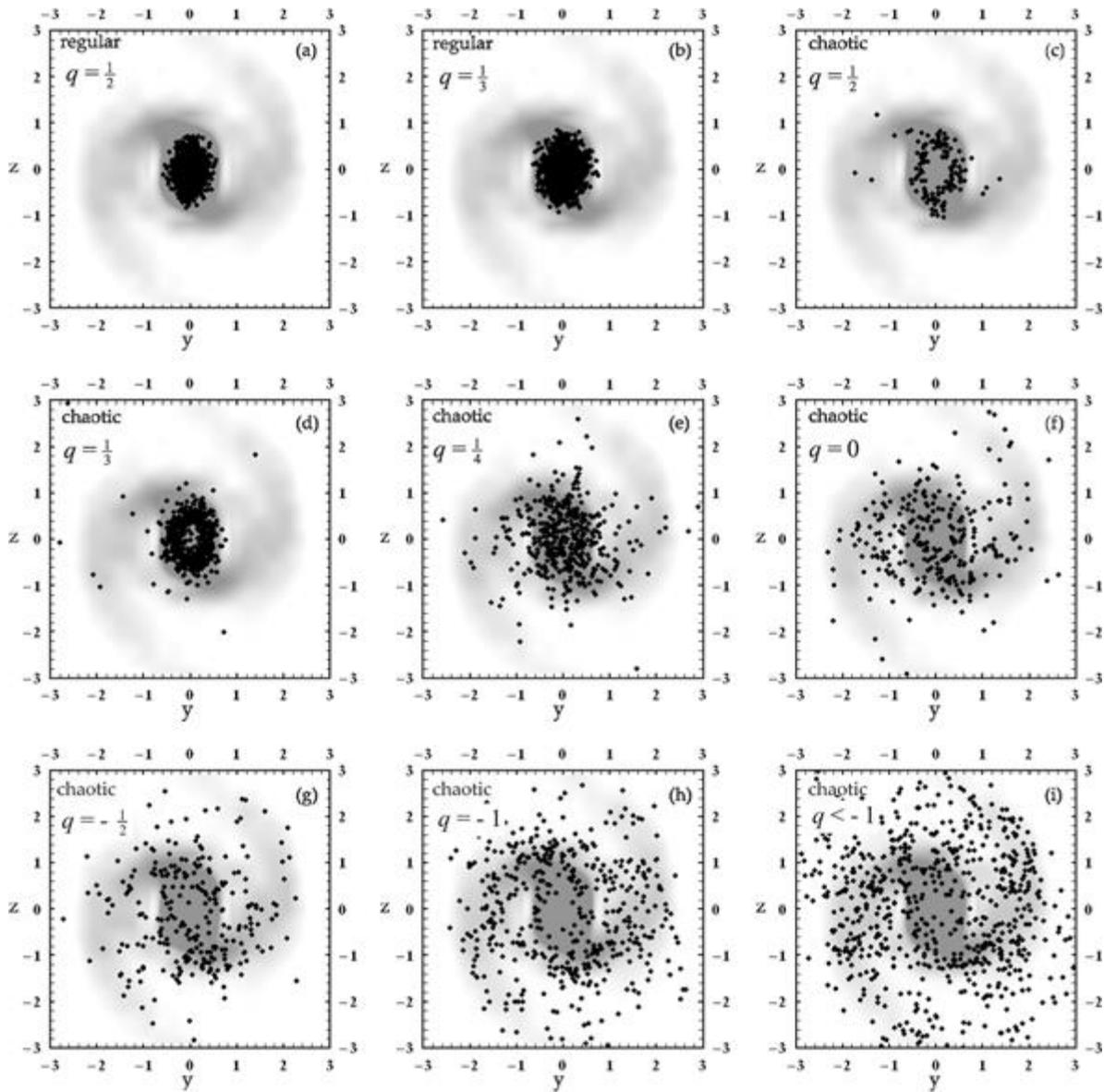
Рисунок слева показывает положение звезд в какой-то произвольный момент времени в модели системы  $n$  тел. Хорошо видны два спиральных рукава и центральная перемишка. Рисунок справа показывает нестабильные трубки, которые соответствуют наиболее плотно населенным областям левого рисунка. На следующем рисунке показано, какие части галактики заняты звездами различных групп с правильными и хаотическими орбитами. Правильные орбиты, как можно ожидать, сосредоточены в коротационной зоне; хаотические там тоже имеются, но они доминируют за ее пределами, там, где находятся спиральные рукава.

Имеет смысл сравнить эту теорию с серией скрученных эллипсов на рисунке ранее. Эллипсы там выстроены по определенной схеме, чтобы в результате получилась нужная нам структура. Однако реальная динамика  $n$  тел не дает эллиптических орбит, поскольку все тела в системе оказывают друг на друга возмущающее действие, так что предложенная схема не имеет реального смысла, если только не является разумной аппроксимацией другой, более реальной схемы. Хаотическая модель действительно встраивает в систему центральную перемишку в качестве предварительного условия, но все остальное вытекает из самой обычной динамики  $n$  тел. В результате мы получаем не только хаос — как и следовало ожидать, — но и спиральную структуру, созданную хаосом. Из этого можно извлечь важный урок: принимайте математику всерьез и закономерности не заставят себя долго ждать. С другой стороны, выдумывая искусственные закономерности на пустом месте, рискуешь получить в ответе чепуху.



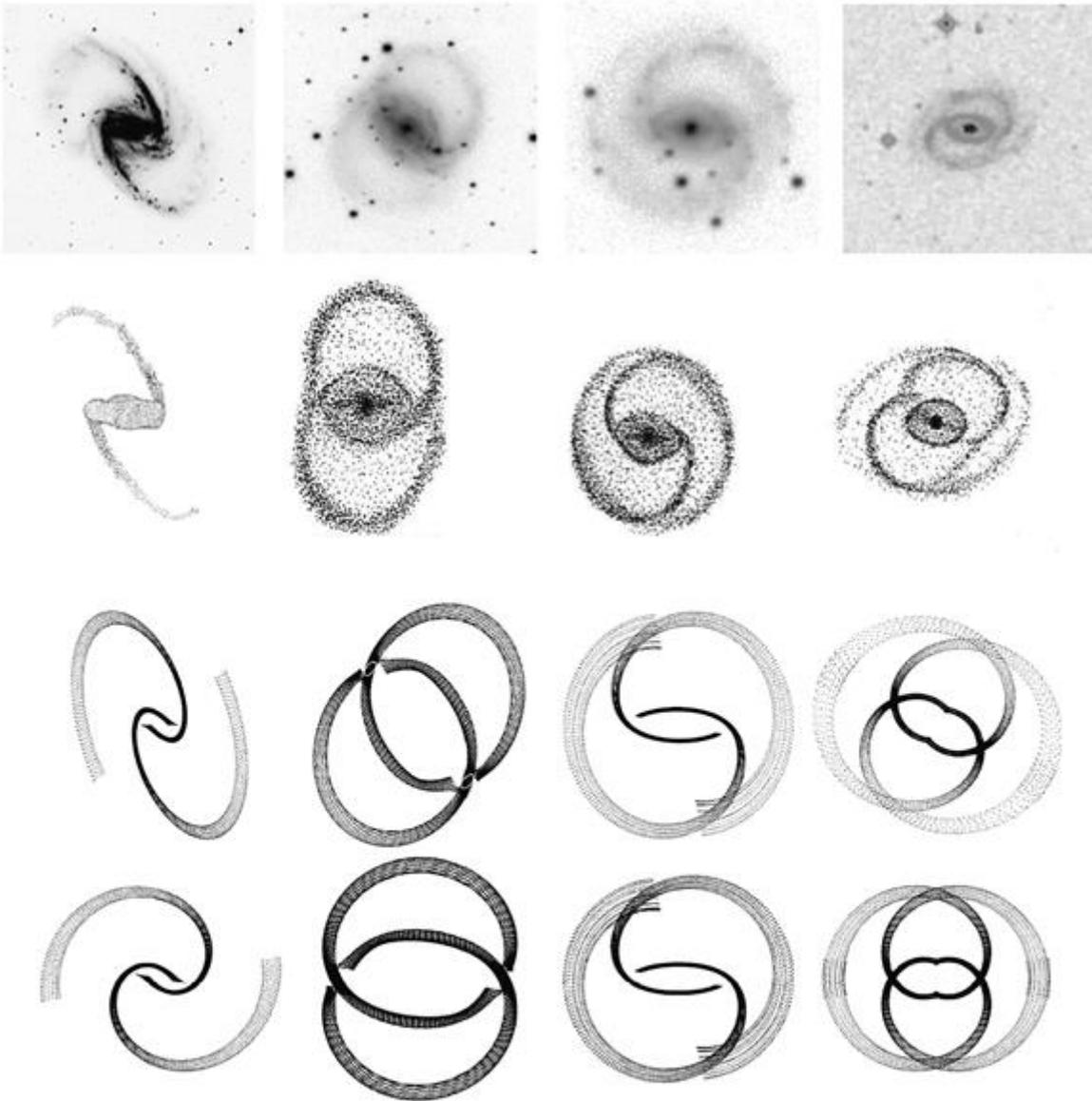
Слева: проекция системы  $n$  тел на галактическую плоскость.

Справа: спиральная структура с нестабильными инвариантными трубками, исходящими из  $L_1$  и  $L_2$



Мгновенные положения частиц, принадлежащих к различным группам правильных и хаотических орбит (черные точки), на фоне общей структуры галактики в плоскости вращения (серый фон)

То, что вездесущий хаос играет роль в формировании спиралей в спиральных галактиках с перемычками, подтверждается и другими данными. К примеру, в таких галактиках часто встречаются звездные кольца очень правильной формы, часто парные, перекрывающиеся между собой. Идея опять же в том, что в таких галактиках вездесущий хаос выстраивает многие звезды вдоль нестабильных трубок точек Лагранжа L1 и L2 на концах перемычки. На этот раз мы рассматриваем также и стабильные трубки, вдоль которых звезды возвращаются к воротам и обратно в центральную часть. Эти трубки тоже обладают «эффектом прилипания».



Морфология колец и спиральных рукавов. *Верхний ряд:* четыре галактики (NGC 1365, NGC 2665, ESO 325–28 и ESO 507–16). *Второй ряд:* примерные схемы этих галактик, помогающие выделить спиральные и кольцевые структуры. *Третий ряд:* примеры расчетов стабильных/нестабильных трубок аналогичной морфологии, взятые приблизительно в той же проекции, что реальные галактики или их схемы. *Четвертый ряд:* те же трубки во фронтальной проекции, перемычка ориентирована вдоль горизонтальной оси

В верхнем ряду на рисунке выше показаны четыре типичных примера галактик с кольцами. Во втором ряду вы можете видеть схематические рисунки, подчеркивающие спиральные и кольцеобразные структуры в них. В третьем ряду представлены аналогичные примеры, полученные при помощи математической модели. В четвертом ряду эти же примеры показаны во фронтальной проекции, а не под углом.

\*\*\*

С помощью спектроскопа[67] можно было оценить, насколько быстро движутся звезды в той или иной галактике. Проведя такую оценку, астрономы получили чрезвычайно загадочный

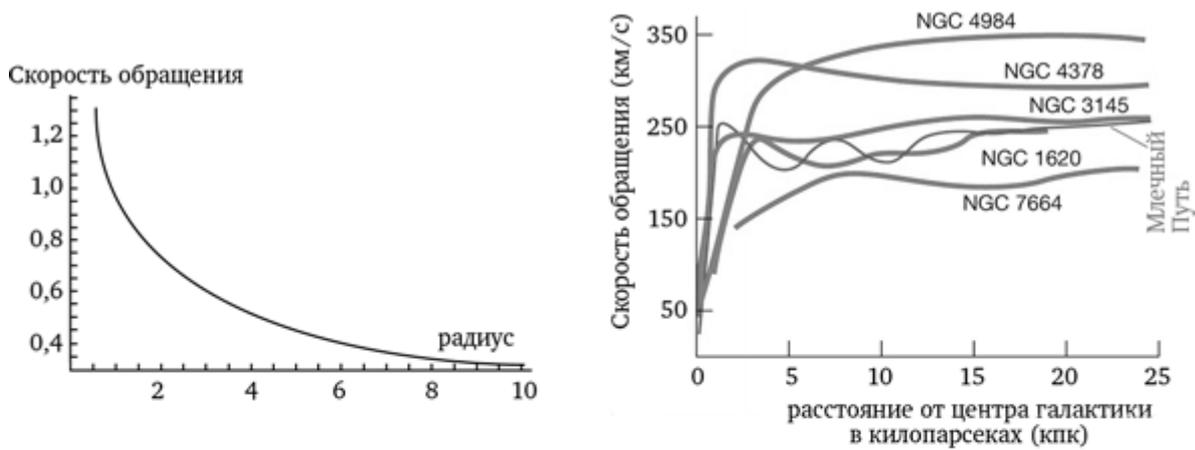
результат. Современное решение этой загадки я оставлю до главы 14, а пока просто расскажу, что получилось.

Астрономы измеряют, насколько быстро вращаются галактики, при помощи эффекта Доплера. Суть этого эффекта такова: если свет какой-то определенной длины волны излучается движущимся источником, то его длина волны изменяется в соответствии со скоростью источника. Такой же эффект наблюдается у звуковых волн; классический пример — то, как меняется звук сирены автомобиля скорой помощи после того, как сам автомобиль проедет мимо. Физик Кристиан Доплер проанализировал этот эффект на основе ньютоновой физики в 1842 году в работе о двойных звездах. Релятивистская версия предсказывает тот же базовый результат, но с количественными отличиями. Конечно, свет содержит в себе множество длин волн, но спектроскопия позволяет запечатлеть конкретные длины волн в виде темных линий в спектре. Если источник света движется, все эти линии сдвигаются в одну сторону, и по величине сдвига несложно рассчитать скорость источника.

В случае галактик для этой цели обычно используется альфа-линия водорода  $H\alpha$ . Для неподвижного источника она располагается в темно-красной зоне видимого спектра, а возникает при переходе электрона в атоме с третьего снизу энергетического уровня на второй снизу. Водород — самый распространенный химический элемент во Вселенной, так что его альфа-линия, как правило, хорошо видна.

Можно даже — для не слишком далеких галактик — последовательно измерить скорость вращения на разных расстояниях от центра галактики. Эти измерения позволяют определить кривую вращения галактики, и оказывается, что скорость вращения зависит только от расстояния до центра. С хорошим приближением галактика ведет себя как серия концентрических колец, каждое из которых вращается жестко, но со скоростью, которая может различаться от кольца к кольцу. Это напоминает предложенную Лапласом модель колец Сатурна (глава 6).

В этой модели законы Ньютона позволяют вывести ключевую математическую закономерность: формулу, которая связывает скорость вращения на заданном радиусе и суммарную массу внутри этого радиуса. (Звезды движутся настолько медленно по сравнению со скоростью света, что в релятивистских поправках, по общему мнению, нет необходимости.) Согласно этой формуле, полная масса галактики в пределах от центра до заданного радиуса равняется этому радиусу, умноженному на квадрат скорости обращения звезд на этом расстоянии и деленному на гравитационную постоянную [68]. Эту формулу можно переписать так, чтобы она выражала скорость обращения звезд в галактике на заданном расстоянии от центра: она равна корню квадратному из полной массы внутри этого радиуса, умноженной на гравитационную постоянную и деленной на радиус. Эта формула в любом варианте называется уравнением Кеплера для кривой вращения, поскольку ее можно вывести также непосредственно из законов Кеплера.



Слева: кривая вращения, предсказанная законами Ньютона\*. Оси размечены в произвольных единицах. Справа: наблюдаемые кривые вращения для шести галактик

\* Кривая вращения слева соответствует случаю, когда вся масса сосредоточена в центральной точке. У галактик таких кривых вращения не бывает, но при отсутствии дополнительной (темной) массы кривая вращения с удалением от центра асимптотически приближалась бы к приведенной на левом рисунке кривой (кривой Кеплера). — Прим. ред.

Распределение массы трудно измерить непосредственно, но в одном аспекте предсказание никак не зависит от подобных соображений: речь идет о поведении кривой вращения на достаточно больших радиусах. С приближением радиуса к наблюдаемому радиусу галактики полная ее масса внутри этого радиуса становится почти константой и равной полной массе галактики. Поэтому при достаточно большом радиусе скорость обращения обратно пропорциональна квадратному корню из радиуса. Рисунок слева представляет собой график этой формулы, значение которой с ростом радиуса спадает до нуля.

Для сравнения: справа приведены наблюдаемые кривые вращения для шести галактик, в том числе нашей. Вместо того чтобы спадать до нуля, скорость обращения звезд растет с расстоянием от центра, а затем остается примерно постоянной.

Упс!



## Чужие миры

Инопланетные астрономы могли бы рассматривать Землю более четырех миллиардов лет и не поймать отсюда никаких радиосигналов, несмотря на то что наш мир образцово пригоден для жизни.

Сет Шостак. «Миры клингонов»

Писатели-фантасты давно и прочно убеждены, что Вселенная буквально усыпана планетами. Прежде эта вера мотивировалась в основном сюжетными требованиями: планеты были необходимы как места, где разворачивались увлекательные истории. Однако с научной точки

зрения это предположение всегда представлялось оправданным. Учитывая количество всевозможного космического мусора всех форм и размеров, болтающегося по Вселенной, логично предположить, что и в планетах в ней недостатка тоже нет.

Давным-давно, еще в XVI веке, Джордано Бруно объявил во всеуслышание, что звезды — это далекие солнца с собственными планетами, возможно, даже населенными. Он стал бельмом на глазу католической церкви и в конце концов был сожжен как еретик. В конце своих «Начал» Ньютон писал: «Если неподвижные звезды являются центрами похожих [на Солнечную] систем, они все будут построены по схожему проекту...»

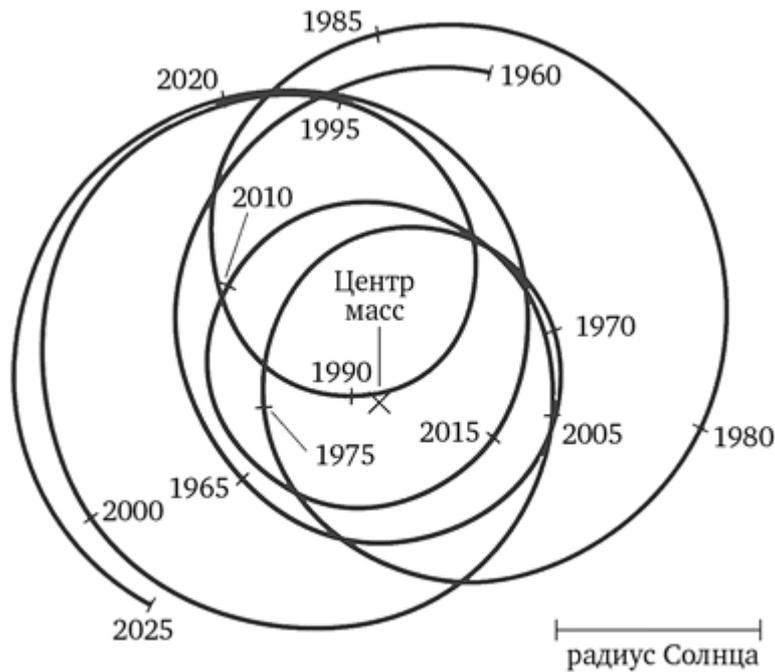
Другие ученые были с ним не согласны, утверждая, что Солнце — единственная звезда во Вселенной, у которой имеются планеты. Но разумные люди всегда ставили на то, что экзопланет (так они называются) во Вселенной без счета. Лучшая на данный момент теория образования планет — это коллапс обширного газового облака, из которого планеты образуются одновременно с центральным светилом, а таких облаков множество. Существует по крайней мере 50 квинтиллионов крупных тел — звезд — и много большее число мелких — пылинок. Было бы странно, если бы существовали какие-то запреты на тела промежуточных размеров, и еще более странно, если бы эти запретные размеры случайно совпали с типичными размерами планет.

\*\*\*

Но косвенные доводы — это здорово, конечно, но слон в комнате замечен прежде всего своим отсутствием. До самого недавнего времени у нас не было никаких наблюдательных данных в пользу того, что еще хотя бы у одной звезды имеются планеты. В 1952 году Отто Струве предложил практический метод регистрации экзопланет, но прошло 40 лет, прежде чем этот метод принес первые плоды. В главе 1 мы говорили о том, что Земля и Луна ведут себя как танцоры разных весовых категорий — толстяк, танцующий с ребенком. Ребенок кружит вокруг партнера, чуть не летает, а толстяк лишь переступает и поворачивается на месте. То же можно сказать и о планете, обращающейся вокруг звезды: легковесная планета движется вокруг по большому эллипсу, тогда как массивная звезда всего лишь чуть покачивается.

Струве предложил использовать спектроскоп для регистрации этих колебаний. Из-за эффекта Доплера любое движение звезды слегка сдвигает ее спектральные линии. Величина сдвига указывает на скорость звезды; вывод о присутствии летающего вокруг ребенка можно сделать, наблюдая за тем, как покачивается толстяк. Этот метод работает даже тогда, когда планет несколько: звезда все равно покачивается, хотя и более сложным образом. На рисунке показано, как покачивается Солнце. Большая часть этого движения вызвана Юпитером, но и остальные планеты вносят свой вклад. Размах колебаний примерно соответствует трем радиусам Солнца.

Предложенная Струве методика доплеровской спектроскопии позволила Александру Вольщану и Дейлу Фрейлу в 1992 году достоверно обнаружить первую в истории экзопланету. Центральное тело относится к интересному типу звездных объектов, известных как пульсары. Эти тела характерны тем, что испускают частые и регулярные радиоимпульсы. В настоящее время мы считаем пульсары быстро вращающимися нейтронными звездами, названными так потому, что основную часть их вещества составляют нейтроны. Вольщан и Фрейл проанализировали методами радиоастрономии крохотные колебания в частоте импульсов, излученных пульсаром PSR 1257+12, и сделали вывод о существовании около него по крайней мере двух планет. Эти планеты слегка изменяют его наблюдаемую скорость вращения и тем самым оказывают влияние на распределение импульсов во времени. Их результат был подтвержден в 1994 году, и тогда же было установлено присутствие в системе третьей планеты.



### Движение Солнца относительно центра масс Солнечной системы, 1960–2025 годы

Пульсары — довольно необычные звезды, и, в сущности, они не сообщают нам ничего существенного об обычных звездах. Но вскоре и обычные звезды начали раскрывать ученым свои секреты. В 1995 году Мишель Майор и Дидье Кело открыли экзопланету у звезды 51 Пегаса — звезды того же спектрального класса (G), что и Солнце. Позже оказалось, что обе группы проиграли гонку — еще в 1988 году Брюс Кэмпбелл, Гордон Уокер и Стивенсон Янг отметили подозрительные колебания звезды  $\gamma$  Цефея. Поскольку результаты были получены на пределе чувствительности приборов, исследователи не стали объявлять об обнаружении планеты, но уже через несколько лет появились новые данные, и астрономы пришли к выводу, что эта группа видела-таки экзопланету. Окончательно ее существование удалось подтвердить в 2003 году.

Сегодня нам известно более 2000 экзопланет — их число (на 1 июня 2016 года) составляет 3422 планеты в 2560 планетных системах, включая 582 системы с двумя и более планетами [69]. Плюс к тому имеются тысячи систем-кандидатов, наличие планет в которых еще предстоит окончательно подтвердить. Иногда, правда, признаки, считавшиеся ранее свидетельством наличия планет, находят иное объяснение и начинают интерпретироваться по-новому, зато кандидаты идут буквально потоком — так что эти цифры могут меняться как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. В 2012 году было объявлено, что одна из звезд в ближайшей к нам системе двойной звезды  $\alpha$  Центавра имеет планету размером с Землю, но намного горячее. На данный момент похоже, что этой планеты — она получила обозначение  $\alpha$ Центавра Bb — на самом деле не существует, что это артефакт анализа данных. Однако за это время в той же системе у той же звезды был обнаружен еще один кандидат в экзопланеты —  $\alpha$  Центавра Bc. У звезды Глизе 1132 — красного карлика в 39 световых годах от нас — определенно есть планета, GJ 1132b, которая вызвала сильное возбуждение в ученом сообществе, ведь по размеру эта планета примерно соответствует Земле (хотя слишком горяча, чтобы на ней была жидкая вода) и находится достаточно близко, чтобы можно было наблюдать ее атмосферу. В пределах нескольких десятков световых лет от нас планет много. В этом смысле мы не одиноки.

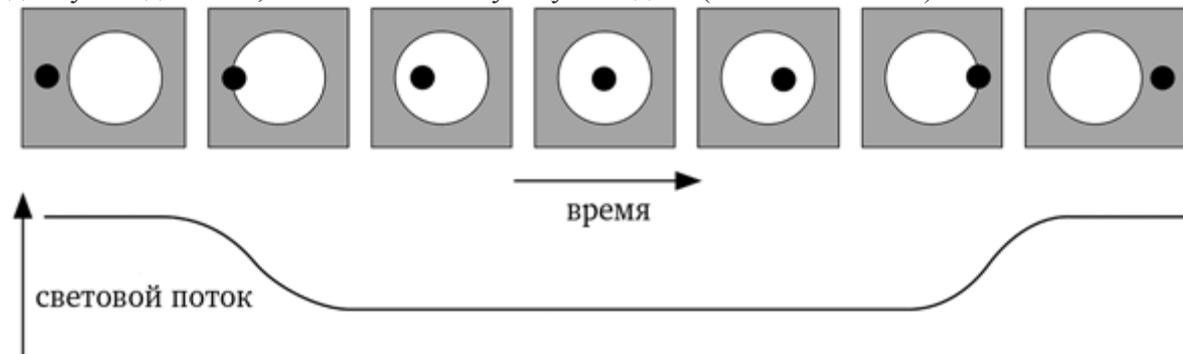
Поначалу единственным, что мы могли наблюдать, были «горячие Юпитеры» — массивные планеты, очень близкие к своим звездам. Конечно, это создавало превратное впечатление о том, какого типа миры мы можем встретить в открытом космосе. Но техника модернизируется, ее чувствительность стремительно растет, и сегодня мы можем регистрировать планеты размером с Землю. Кроме того, при помощи спектроскопии мы начинаем потихоньку выяснять, есть ли на них атмосфера или вода. Статистические данные свидетельствуют, что в нашей Галактике, да и

во Вселенной в целом, планетные системы — дело обычное и землеподобных[70] планет на землеподобных орбитах вокруг солнцеподобных звезд, хотя их доля и невелика, насчитываются миллиарды.

\*\*\*

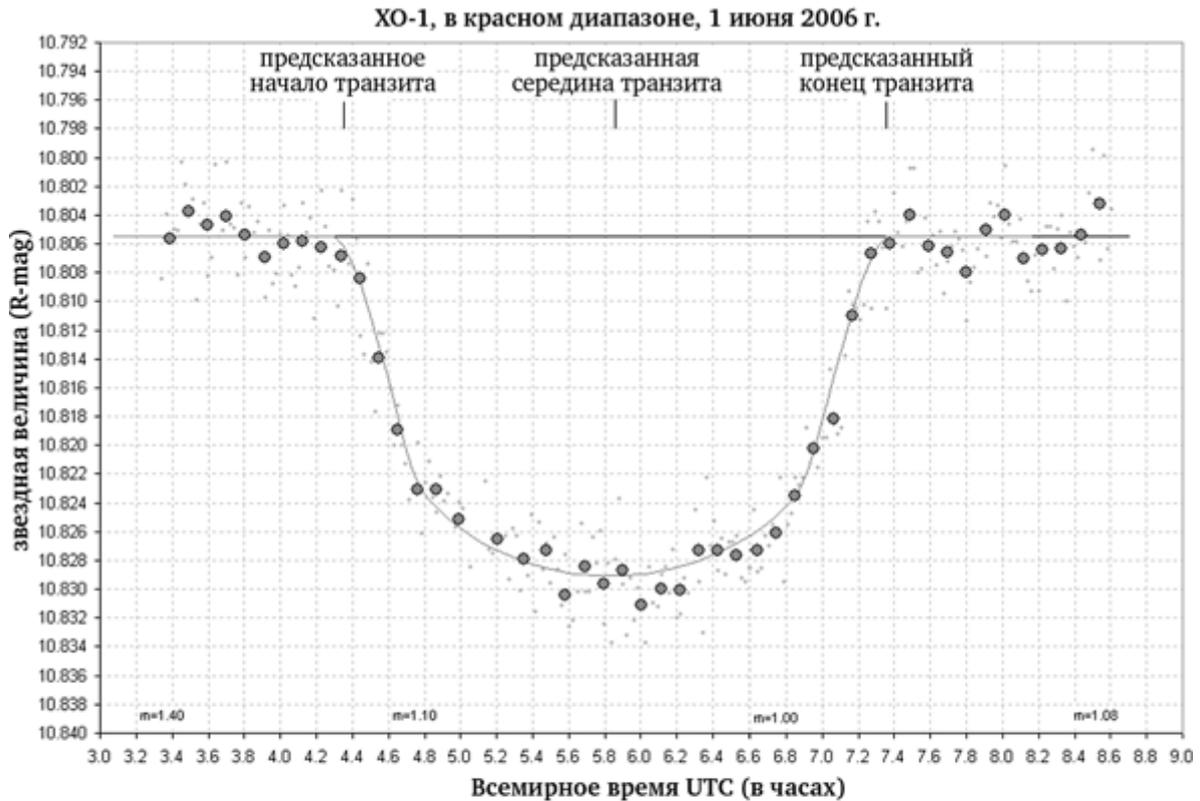
Помимо спектроскопии, существует по крайней мере десяток других методов обнаружения экзопланет. Один из них — непосредственное фотографирование: направляешь очень мощный телескоп на звезду и высматриваешь планету. Это не так просто — все равно как увидеть горящую спичку в свете прожектора, но хитроумные техники маскирования, призванные исключить собственный свет звезды, позволяют иногда это сделать. Самый распространенный способ обнаружить экзопланету — это так называемый транзитный метод. Дело в том, что планета, проходя по диску звезды (с точки зрения земного наблюдателя), блокирует некоторую (небольшую) часть ее собственного света. Прохождение (транзит) планеты создает на кривой блеска звезды характерную ложбинку. Конечно, большинство экзопланет вряд ли ориентировано настолько удобно для нас, но доля тех, которые все же проходят по диску своей звезды, достаточно велика, чтобы такой подход к поиску экзопланет имел смысл.

Рисунок ниже — упрощенная иллюстрация к транзитному методу. Начиная прохождение, планета постепенно блокирует все большую долю излучения звезды. Как только диск планеты целиком оказывается на диске звезды, световой поток стабилизируется и остается примерно постоянным до тех пор, пока планета не подойдет вплотную к другому краю светила. По мере того как планета покидает диск звезды, ее видимый блеск возвращается к прежнему уровню. На практике звезда, как правило, по краям диска кажется менее яркой, а часть света может обогнуть планету, если у нее есть атмосфера. Более детальные модели учитывают эти эффекты и корректируют результат. На рисунке с изображением XO-1 в красном диапазоне можно видеть как реальную кривую блеска (точки) при прохождении экзопланеты XO-1b по диску звезды XO-1, так и соответствующую модель (сплошная линия).



Простая модель показывает, как и почему тускнеет свет звезды при прохождении планеты. Считая, что излучение звезды во всех точках ее поверхности одинаково и что планета блокирует его полностью, получим, что кривая блеска остается плоской все то время, когда планета целиком заслоняет от нас свет. На практике эти предположения не совсем верны, и в работе используются более реалистичные модели

Транзитный метод при тщательном математическом анализе позволяет получить информацию о размере, массе и орбитальном периоде планеты. Иногда он сообщает нам также химический состав ее атмосферы; его можно получить, сравнив спектр звезды со светом, отраженным от планеты.



Кривая блеска при прохождении 1 июня 2006 года экзопланеты  
размером с Юпитер ХО-1b по диску звезды ХО-1 звездной  
величины  $10,8^m$  (в красном свете). Крупные точки — усредненные  
по пяти измерениям (светлые точки) значения блеска. Линия —  
соответствующая им модель

\*\*\*

NASA выбрало для своего телескопа Kepler — фотометра, измеряющего уровень блеска звезд с необычайной точностью, — именно транзитный метод. Kepler, запущенный в 2009 году, отслеживал блеск более чем 145 000 звезд на небольшой площадке на границе созвездий Лебедя, Лиры и Дракона. Наблюдать за ними планировалось по крайней мере три с половиной года, но маховики аппарата, призванные удерживать его ориентацию в пространстве, начали отказывать. В 2013 году программу работы аппарата изменили таким образом, чтобы он, хотя и потеряв часть своих возможностей, по-прежнему мог проводить полезные научные наблюдения.

Первая экзопланета, обнаруженная Kepler в 2010 году, получила название Кеплер-4b. Звезда, вокруг которой обращается эта планета, обозначается Кеплер-4 и находится на расстоянии 1800 световых лет от нас в созвездии Дракона; по характеристикам она аналогична Солнцу, но немного крупнее. Планета размером и массой схожа с Нептуном, но ее орбита проходит намного ближе к звезде. Период обращения этой планеты составляет 3,21 суток, а радиус орбиты — 0,05 а.е., около 1/8 расстояния от Меркурия до Солнца. Орбита заметно вытянута и имеет эксцентриситет около 0,25. На поверхности планеты царит невыносимый жар в 1700 К.

Несмотря на плохо работающие маховики, Kepler обнаружил 1013 планет у 440 звезд плюс 3199 кандидатов в планеты, действительную природу которых еще предстоит установить. Крупные планеты легче заметить, поскольку при прохождении они блокируют больше света, так что среди открытых Kepler экзопланет они, скорее всего, представлены шире, чем в реальной Вселенной. До некоторой степени, правда, этот эффект можно скорректировать. Kepler нашел достаточно экзопланет, чтобы можно было статистически оценить число планет с определенными характеристиками в нашей Галактике. В 2013 году NASA объявило, что Галактика, вероятно, содержит по крайней мере 40 миллиардов экзопланет земного размера на

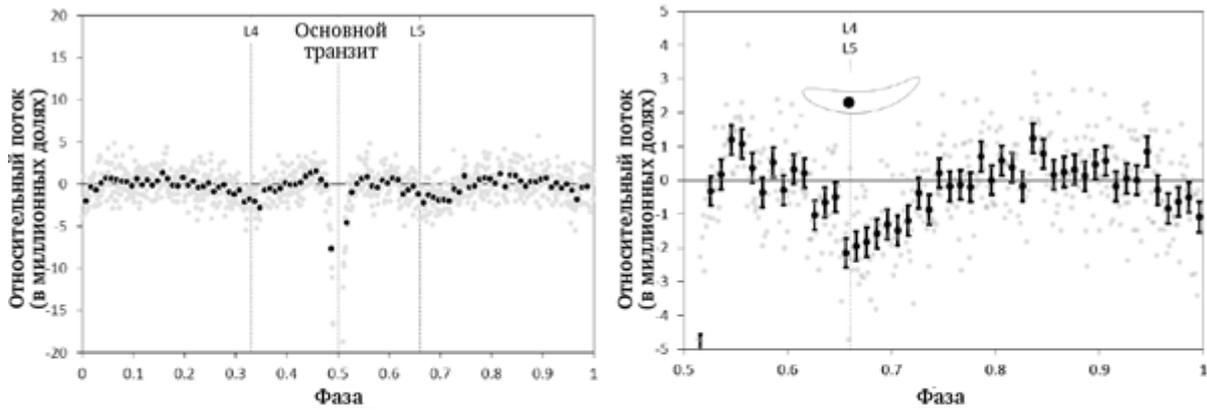
землеподобных орбитах около солнцеподобных звезд и красных карликов. Если это так, то Земля далеко не уникальна.

В каталоге орбит и звездных систем есть данные о множестве систем, совершенно непохожих, на первый взгляд, на нашу Солнечную систему. В них редко действуют простые и аккуратные закономерности вроде закона Тициуса — Боде. Астрономы только начинают разбираться в премудростях сравнительной анатомии звездных систем. В 2008 году Эдвард Томмз, Соко Мацумура и Фредерик Рэйзио построили численную модель аккреции планет в протопланетных дисках. Результаты позволяют предположить, что системы, подобные нашей, встречаются сравнительно редко, поскольку возникают только в тех случаях, когда основные параметры, характеризующие диск, подходят опасно близко к грани, за которой планеты вовсе не формируются. Гигантские планеты встречаются намного чаще. В пространстве параметров протопланетного диска наша система, если можно так сказать, балансирует на грани катастрофы. Однако базовые математические принципы приложимы и к ним тоже: в частности, речь идет о возникновении орбитальных резонансов. К примеру, системы звезд Кеплер-25, Кеплер-27, Кеплер-30, Кеплер-31 и Кеплер-33 имеют по крайней мере по две планеты в резонансе 2:1. Для систем Кеплер-23, Кеплер-24, Кеплер-28 и Кеплер-32 известно по крайней мере по две планеты в резонансе 3:2.

\*\*\*

В настоящее время охотники за планетами приспособливают свои методики к поиску других составляющих звездных систем, в том числе экзолун и экзоастероидов, способных давать крохотные дополнительные впадинки на кривых блеска, причем очень сложным образом. Дэвид Киппинг при помощи суперкомпьютера заново проверяет данные Кеплера по 57 экзопланетным системам, выискивая указания на присутствие экзолун. Рене Элле провел теоретические расчеты, считая, что у экзопланеты размером в несколько раз крупнее Юпитера (что достаточно обычно) могла бы быть луна размером с Марс, и в принципе Кеплер был бы способен заметить это. Ио, спутник Юпитера, вызывает радиовсплески, взаимодействуя с магнитным полем планеты, и подобное может происходить где угодно, поэтому Хоакин Нойола занят поисками экзолунных радиосигналов. Когда в 2019 году будет запущен Космический телескоп имени Джеймса Вебба — преемник Космического телескопа имени Хаббла, — он, возможно, сможет непосредственно увидеть какую-нибудь экзолуну.

Михаэль Хиппке и Даниэль Ангерхаузен охотятся на экзотроянцев. Напомню, что троянский астероид следует за планетой примерно по той же орбите, обгоняя ее на  $60^\circ$  или на столько же отставая, поэтому при прохождении диска звезды он дает собственное крохотное снижение блеска — собственный провальчик на кривой блеска. Вообще-то астрономы давно ищут такие эффекты, но пока ничего не нашли, поскольку они должны быть чрезвычайно слабыми. Вместо этого Хиппке и Ангерхаузен используют статистический подход, — примерно так, как если бы они бродили по заповеднику и считали львиные следы. По следам нельзя сказать, какие именно львы здесь проходили, но можно оценить, как много в этом заповеднике львов. Пытаясь усилить сигналы, связанные с экзотроянцами, исследователи сложили почти миллион кривых блеска. В результате они получили слабые провалы сигнала в троянских точках, но провалы эти статистически незначимы. Лишь если сложить графики пополам, так чтобы позиции впереди планеты и позади нее на равных угловых расстояниях совпали, то на  $60^\circ$  (плюс и минус вместе) получится статистически значимый провал.



*Слева:* комбинация кривых блеска для миллиона транзитов имеет небольшие впадины у троянских точек L4 и L5, но они не являются статистически значимыми.

*Справа:* при искусственном наложении точек L4 и L5 друг на друга впадина становится статистически значимой

\*\*\*

Общепринятое в научной фантастике предположение о том, что у далеких звезд часто имеются планеты, как его ни высмеивали, оказалось абсолютно верным. А как насчет другого связанного с этим типичного сюжета научной фантастики — существования разумных инопланетных[71] форм жизни? Это куда более сложный вопрос, но опять же, было бы странно, если бы Вселенная с квинтиллионами планет умудрилась породить ровно одну планету с разумной жизнью на ней. Слишком много факторов должны сойтись в точности, чтобы сделать наш мир единственным в своем роде.

В 1959 году Джузеппе Коккони и Филип Моррисон опубликовали в журнале Nature провокационную статью «В поисках межзвездных сигналов». Авторы указали, что радиотелескопы уже стали достаточно чувствительными, чтобы принять радиосообщение от инопланетной цивилизации. Они предположили также, что инопланетяне выбрали бы для связи с нами самую заметную частоту: 1420 МГц, линию H<sub>I</sub> в спектре водорода. Это особая частота, потому что водород — самый распространенный химический элемент во Вселенной.

Радиоастроном Фрэнк Дрейк, решив проверить идею Коккони и Моррисона, инициировал проект Ozma, целью которого был поиск таких сигналов с близлежащих звезд ε Эридана и τ Кита. Обнаружить ничего не удалось, но в 1961 году Дрейк организовал конференцию по «поиску внеземного разума» SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence). На той встрече он записал математическое уравнение, в котором число инопланетных цивилизаций в нашей Галактике, способных в настоящий момент поддерживать связь по радио, выражалось в виде произведения семи параметров, таких как средняя скорость формирования звезд, доля планет, на которых развивается жизнь, и среднее время, на протяжении которого типичная цивилизация способна передавать пригодные для обнаружения радиосигналы.

Уравнение Дрейка часто используется для вычисления того, сколько существует способных к контакту инопланетных цивилизаций, но намерение Дрейка состояло вовсе не в этом. Он пытался выделить важнейшие факторы, на которых следует сосредоточиться ученым. У его уравнения есть недостатки, особенно если воспринимать его буквально, но размышления над ним помогают осознать, что инопланетные цивилизации и правда возможны и что мы в принципе могли бы в один прекрасный момент принять их сигналы. На смену проекту Ozma пришел проект SETI, который запустили в 1984 году Томас Пирсон и Джилл Тартер; по их замыслу, этот проект должен был возглавить систематический поиск инопланетных сообщений.

Уравнение Дрейка не слишком практично, поскольку очень чувствительно к ошибкам. Даже слово «планеты» в нем может быть излишне ограничивающим, как мы вскоре увидим. И слово «радио» тоже. Ожидать, что инопланетяне попытаются войти в контакт с нами при помощи вышедшей из моды технологии радиосвязи, столь же бессмысленно, как и ждать от них дымовых

сигналов. Еще более сомнительна идея о том, что мы обязательно распознаем в их сообщениях именно сообщения. С развитием цифровых технологий большая часть наших собственных сигналов, даже передаваемых через мобильные телефоны, подвергается цифровому шифрованию; цель — сжать информацию и устранить ошибки, вызванные внешними помехами. Инопланетяне, по логике вещей, должны поступать аналогично. В 2000 году Майкл Лахманн, Марк Ньюмен и Крис Мур доказали, что эффективно зашифрованные сообщения выглядят в точности так же, как неупорядоченное излучение черного тела. Его спектр аналогичен спектру электромагнитного излучения непрозрачного и неотражающего тела при постоянной температуре. Первоначально их статья называлась «Любое достаточно продвинутое сообщение неотлично от шума».

\*\*\*

Разум целит высоко. Разумная жизнь, даже инопланетная, должна непременно менять правила игры и среду обитания.

Оценивая шансы на существование инопланетной жизни, очень легко попасть в ловушку, решив, что идеальным местом для инопланетян должна быть планета, во всем подобная Земле, — примерно такого же размера, на схожем расстоянии от схожего с нашим светила, с поверхностью, состоящей частично из камня, частично из жидкой воды (как у нас), и кислородом в атмосфере (опять же как у нас). Да, Земля — единственная обитаемая планета, которую мы знаем, но мы ведь только недавно начали поиск. У нас, в Солнечной системе, все остальные миры кажутся пустынными и негостеприимными, хотя, как мы еще увидим, с такими выводами спешить не следует. Так что, кажется, лучше всего искать жизнь за пределами Солнечной системы.

Шансы на то, что жизнь существует еще где-то, сильно повышает фундаментальный биологический принцип: жизнь приспосабливается к преобладающим условиям. Даже на Земле мы видим поразительное разнообразие мест, где обитают живые существа: они есть и в глубинах океана, и высоко в атмосфере, в болотах и пустынях, в кипящих источниках, под антарктическими льдами и даже под землей на трехкилометровой глубине. Представляется разумным предположить, что инопланетные формы жизни могут обитать в еще более широком диапазоне условий. Возможно, мы с вами не смогли бы жить там, но на самом деле человек и на Земле в большинстве обитаемых мест не выжил бы без посторонней помощи. Критерии обитаемости зависят от того, кто именно там должен обитать.

У нас же даже терминология выдает глубоко въевшиеся предубеждения. В последние годы биологи открыли бактерии, способные жить в кипящей воде, и другие бактерии, способные выносить очень низкие температуры. Вместе те и другие называются экстремофилами — существами, которые любят крайности. Их часто описывают как существа, с невероятным трудом выживающие во враждебной среде и постоянно балансирующие на грани вымирания, но в реальности они прекрасно приспособлены к своей среде обитания и, будучи перенесенными в нашу, непременно погибли бы. В сравнении с ними нас можно назвать экстремофилами.

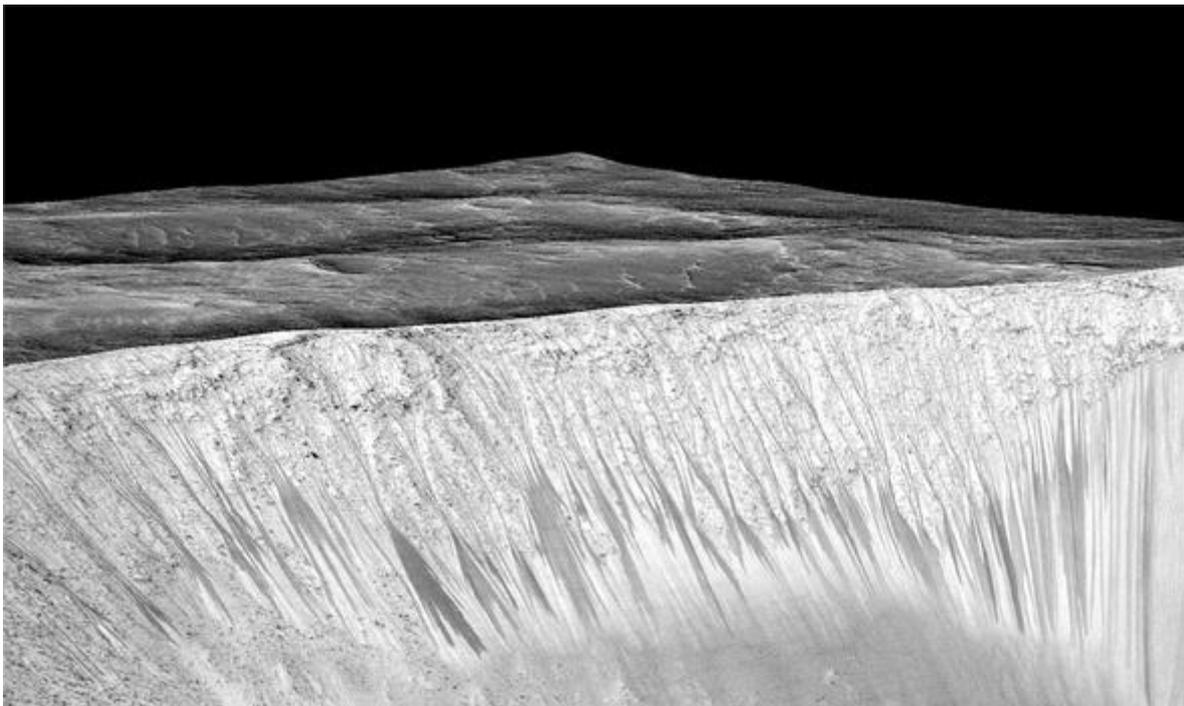
Вся жизнь на Земле взаимосвязана; судя по всему, она вся развилась из единственной первичной биохимической системы. В этом качестве «жизнь на Земле» во всем ее богатейшем разнообразии сводится к единственной экспериментальной точке. Принцип Коперника гласит, что ни в человеческих существах, ни в среде их обитания нет ничего экстремально особенного. Если так, наша планета вряд ли окажется уникальной, но это не означает также, что она обязательно должна оказаться типичной. Биохимики получили немало необычных вариантов молекул, представляющих собой основу земной генетики, — это ДНК, РНК, аминокислоты, белки, — когда попытались выяснить, действительно ли задействованные на Земле молекулы являются единственным работающим вариантом. (Выяснилось, что это не так.) Для решения подобных вопросов часто привлекается, помимо биологии, и математическое моделирование, поскольку мы не можем быть уверены в том, что в других местах биология окажется такой же, как здесь. Она может строиться на принципиально другой химии или вообще обходиться без химии, не имея молекулярной основы.

Сделав такую оговорку, весьма разумно будет начать с единственной доступной нам экспериментальной точки, не забывая, однако, что это лишь первый шаг к более экзотическим

вариантам. Это неизбежно приводит нас к одной из непосредственных целей охотников за планетами — найти землеподобную планету.

В астробиологических кругах много споров происходит вокруг так называемой зоны обитаемости вокруг звезды. Под зоной обитаемости подразумевается вовсе не область, которая реально может оказаться обитаемой. Это просто та область пространства вокруг звезды, в пределах которой на гипотетической планете с достаточным давлением атмосферы могла бы существовать жидкая вода. Стоит подойти к звезде поближе — и вода вскипит и испарится; стоит отодвинуться — и она замерзнет и превратится в лед. В промежутке же температура «в самый раз», и понятно, что эта область получила неофициальное название «зона Златовласки» или «зона жизни».

В Солнечной системе обитаемая зона лежит где-то между 0,73 и 3 а.е. от Солнца — о точных ее границах ученые спорят. Венера слегка касается внутренней границы этой зоны, а внешняя ее граница доходит аж до Цереры, так что и Земля, и Марс свободно попадают внутрь. Так что «в принципе» на поверхности и Венеры, и Марса могла бы присутствовать жидкая вода. На практике, правда, все сложнее. Средняя температура на поверхности Венеры составляет 462 °С — хватит, чтобы расплавить свинец. Дело в том, что на Венере парниковый эффект вышел из-под контроля и ее атмосфера стала настоящей ловушкой для тепла. Найти там жидкую воду, мягко говоря, шансов немного. На Марсе средняя температура составляет минус 63 °С, так что всегда считалось, что вода там существует только в виде льда. Однако в 2015 году выяснилось, что марсианским летом некоторое небольшое количество льда все же тает, просачиваясь вниз по склонам некоторых кратеров. Ученые и раньше подозревали это, поскольку на склонах видны темные полосы, но решающим доказательством является присутствие летом, когда эти полосы удлиняются, гидратированных солей. Вероятно, около 3,8 миллиарда лет назад на поверхности Марса было полно воды, но затем он потерял значительную часть своей атмосферы, которую унесло солнечным ветром после ослабления магнитного поля планеты. После этого вода частично испарилась, частично замерзла. Она и сегодня по большей части пребывает в этом состоянии.



### Темные полосы в кратере Гарни на Марсе оставлены жидкой водой

Таким образом, расстояние от центрального тела не единственный критерий. Концепция зоны обитаемости дает простое и понятное направление поиска, но направления не являются жесткими. Жидкая вода не обязана существовать внутри зоны обитаемости и вполне может существовать за ее пределами. Планета, расположенная близко к звезде, может находиться в слишком горячей зоне, но если она состоит со своей звездой в спин-орбитальном резонансе 1:1, то получается, что она всегда обращена к звезде одной и той же стороной — и тогда на этой

стороне очень жарко, а на другой — чрезвычайно холодно. В промежутке при этом имеется переходная температурная зона под прямым углом к экватору. (На раскаленном Меркурии в полярных кратерах, куда никогда не проникают солнечные лучи, есть лед. И эта планета даже не состоит с Солнцем в резонансе 1:1.) У планеты с покрытой льдом поверхностью может быть какой-то внутренний источник тепла — в конце концов, у Земли же он есть, — который расплавляет часть льда. Толстая атмосфера с большим содержанием углекислого газа или метана тоже способна разогреть планету. Неустойчивая ось вращения может помочь планете остаться теплой вне обитаемой зоны, неравномерно распределив тепло. Планета на вытянутой орбите может запасать энергию вблизи звезды и высвободить ее, отдаляясь, даже если в среднем она и не будет попадать в обитаемую зону. Вблизи красного карлика может находиться планета с толстой облачной атмосферой, помогающей более равномерно распределить тепло.

В 2013 году телескоп Kepler нашел две экзопланеты, похожие на Землю сильнее всех открытых на тот момент. Обе эти планеты обращаются вокруг одной и той же звезды Кеплер-62 в созвездии Лиры и обозначаются Кеплер-62e и Кеплер-62f. Обе они по диаметру примерно на 50% больше Земли и, возможно, представляют так называемые суперземли — каменные тела тяжелее Земли, но не такие массивные, как Нептун. Или, возможно, они состоят из спрессованного льда. Эти планеты уверенно располагаются в зоне жизни звезды Кеплер-62, так что при подходящих условиях (таких как схожая с земной атмосфера) на их поверхности могла бы быть жидкая вода.

В начале 2015 года NASA объявило об открытии двух новых экзопланет, еще больше похожих на Землю. Кеплер 438b на 12% больше Земли и получает на 40% больше энергии от своей звезды, которая находится от нас на расстоянии 479 световых лет. Кеплер 442b на 30% крупнее Земли и получает на 30% меньше энергии; до ее звезды от нас 1292 световых года. Их существование невозможно подтвердить по соответствующим колебаниям блеска звезд. Вместо этого астрономы используют тщательное сравнение результатов измерений и их статистический анализ. Судя по размеру, это, вероятно, каменные планеты, хотя их массы нам неизвестны. Находятся они в зоне обитаемости, так что на них вполне может быть жидкая вода.

Среди других подтвержденных экзопланет, похожих по своим характеристикам на Землю, Глизе 667Cc и 832c, а также Кеплер 62e, 452b и 283c. Пока неподтвержденный кандидат в планеты от Kepler KOI-3010.01 тоже относится к земному классу, если существует. Миров, подобных нашему, много — и недалеко, по космическим меркам, но для техники сегодняшнего дня или представимого будущего они совершенно недостижимы.

Питер Бехрузи и Молли Пиплз пересмотрели и заново интерпретировали статистику экзопланет Kepler в контексте нашего знания о том, как возникают звезды в галактиках; они вывели формулу того, как меняется со временем число планет во Вселенной. Долю землеподобных планет тоже можно вывести из этого числа. Добавив в формулу нынешний возраст Вселенной, исследователи получили оценку: они считают, что в настоящий момент существует примерно 100 квадриллионов землеподобных планет. Это приблизительно по 500 млн планет на галактику, так что в нашей Галактике, вероятно, имеется полмиллиарда планет, очень похожих на нашу.

Фокус внимания астробиологов в настоящее время смещается от буквально землеподобных планет к мирам других типов, в которых можно разумно предположить вероятность жизни. По результатам моделирования, которое провели Димитар Сасселов, Диана Валенсия и Ричард О'Коннелл, суперземли могут оказаться более подходящими для жизни, чем наша собственная планета. Причина — в тектонике литосферных плит. На Земле движение материков помогает стабилизировать климат, осуществляя рециркуляцию углекислого газа через океанское дно, субдукцию и вулканы. При стабильном климате у воды больше шансов сохраниться в жидкой форме, а это, в свою очередь, дает жизни, если она основана на воде, больше времени на развитие. Так что дрейф континентов может повышать пригодность планеты для жизни.

Группа Сасселова обнаружила, что, вопреки ожиданиям, континентальный дрейф, вероятно, представляет собой обычное явление и может происходить в том числе и на более крупных, чем Земля, планетах. Литосферные плиты там должны быть тоньше, чем здесь, и двигаться они должны быстрее. Так что и климат на суперземле, по идее, должен быть еще более стабильным, чем у нас, что облегчило бы развитие сложных форм жизни. Вероятное общее число землеподобных планет довольно велико, но, по сравнению с другими, такие миры встречаются

редко. Однако суперземель во Вселенной должно быть гораздо больше, что сильно улучшает перспективы для землеподобной жизни. Так что хватит говорить о том, что Земля — «редкая планета». Мало того, Земля не слишком подходит для тектоники материковых плит, она едва-едва укладывается в самый нижний сегмент диапазона подходящих размеров.

Вот вам и Златовласка.

\*\*\*

Возможно, жизни вообще не нужна планета.

Не стоит так легко сдаваться, когда речь идет о нашей собственной звездной системе. Подумаем: если жизнь все же существует еще где-то в Солнечной системе, где именно ее можно с наибольшей вероятностью обнаружить? Насколько нам известно, единственная обитаемая планета в обитаемой зоне Солнца — это Земля, так что на первый взгляд ответ на поставленный вопрос должен быть «нигде». На самом же деле места, где с наибольшей вероятностью может существовать жизнь — вероятно, не сложнее бактерий, но все же жизнь, — это Европа, Ганимед, Каллисто, Титан и Энцелад. На крайний случай — Церера и Юпитер.

Карликовая планета Церера находится на внешней границе обитаемой зоны и имеет разреженную атмосферу, содержащую водяной пар. Аппарат Dawn сфотографировал яркие точки на внутренних стенках одного из кратеров, которые ученые сначала приняли за лед; сейчас, однако, известно, что это выход одной из солей магния. Если бы это действительно был лед, то можно было бы утверждать, что Церера обладает одним из ключевых элементов, необходимых для землеподобной жизни, хотя и в замерзшем виде. Лед, вероятно, присутствует на большей глубине.

Карл Саган предположил в 1960-е годы, что бактериальная жизнь, а может быть, и более сложные организмы, похожие на воздушные шары, могли бы плавать в атмосфере Юпитера. Главное препятствие здесь — то, что у Юпитера сильная радиация. Однако некоторые бактерии отлично себя чувствуют в верхних слоях атмосферы Земли, где тоже наблюдается высокий уровень радиации, а крохотные тихоходки выдерживают такие уровни радиации и такие высокие и низкие температуры, которые нас быстро убили бы.

Остальные пять тел, которые я перечислил, не являются планетами, ни обычными, ни карликовыми, а представляют собой спутники планет, или луны, и располагаются далеко за пределами обитаемой зоны. Европа, Ганимед и Каллисто — спутники Юпитера. Как говорилось в главе 7, на них есть подземные океаны, возникшие благодаря тому, что приливное воздействие Юпитера разогревает их и плавит лед. На дне этих океанов вполне могут действовать горячие гидротермальные источники, которые, подобно земным аналогам (такие источники обнаружены, к примеру, вдоль Срединно-Атлантического хребта), представляют собой неплохое место для жизни. Срединно-Атлантический подводный хребет — это место, где расходятся тектонические плиты Земли (их растаскивает в разные стороны геологический конвейер, в то время как их внешние края уходят под континентальные плиты Европы и Америки). Раствор, богатый вулканическими химикатами, и тепло горячих вулканических газов обеспечивают комфортабельные условия существования для трубчатых червей, креветок и других довольно сложных организмов. Некоторые биологи-эволюционисты считают, что жизнь на Земле возникла возле таких подводных источников. Если получается здесь, почему не могло получиться на Европе?

\*\*\*

Следующим в очереди стоит самая загадочная луна из всех — спутник Сатурна Титан. Его диаметр в полтора раза больше диаметра Луны, и, в отличие от всех прочих лун Солнечной системы, на нем имеется плотная атмосфера. Тело Титана представляет собой смесь из камня и водяного льда, а температура на его поверхности составляет около 95 К (минус 180 °С). Аппарат Cassini выяснил, что на нем есть озера и реки из жидкого метана и этана (на Земле при комнатной температуре это газообразные вещества). Основу его атмосферы (98,4%) составляет азот, еще там присутствует метан (1,2%), водород (0,2%) и следы других газов, таких как этан, ацетилен, пропан, синильная кислота, углекислый газ, угарный газ, аргон и гелий.

Многие из этих молекул относятся к числу органических, то есть основаны на углероде, а некоторые к тому же представляют собой углеводороды. Считается, что возникают они, когда ультрафиолетовое излучение Солнца разрушает молекулы метана, порождая густой оранжевый

смог. Это само по себе загадка, потому что всего за 50 млн лет весь метан в атмосфере должен был бы разложиться, а он и ныне там. Должно быть, его запас в атмосфере пополняется за счет чего-то. Либо вулканическая деятельность высвобождает метан из какого-то обширного подземного резервуара, либо дополнительный метан производит какой-то экзотический, вероятно примитивный, организм. Несбалансированный химический состав атмосферы — потенциальный признак жизни; очевидный пример — кислород Земли, который давно исчез бы, если бы не фотосинтез растений.

Если на Титане и правда есть жизнь, она должна быть принципиально отличной от жизни на Земле. Ведь истинный смысл сказки про Златовласку не в том, что ей нужно, чтобы все подходило ей «в самый раз», а в том, что Маме Медведице и Папе Медведю нужно было то, что подходит им, и оно было другое. Именно позиция медведей ставит перед нами самые интересные и важные научные вопросы. На Титане нет жидкой воды, но есть ледяная галька. Нередко априори считается, что жидкая вода необходима для жизни, но астробиологи установили, что в принципе жизнеподобные системы могли бы существовать и без воды. Титанианские организмы могли бы использовать какую-нибудь другую жидкость для доставки важных молекул по всему телу. В качестве возможных вариантов можно рассматривать жидкий этан или жидкий метан: то и другое способно растворять в себе многие другие химические вещества. Гипотетический титанианец мог бы получать энергию из водорода, который реагировал бы с ацетиленом с образованием метана.

Это типичный пример «ксенохимии» — гипотетических цепочек химических превращений, которые могли бы протекать в инопланетных формах жизни, принципиально отличных от земной нормы. Он показывает, что организму, существование которого является правдоподобным, не обязательно полностью походить на организмы нашей планеты, и открывает широкий простор для воображения в отношении инопланетной жизни. Однако химия сама по себе неспособна породить жизнь. Нужны организованные химические процессы, с большой вероятностью протекающие в чем-то, в общих чертах напоминающем клетку. Наши клетки окружены мембраной из фосфолипидов — соединений углерода, водорода, кислорода и фосфора. В 2015 году Джеймс Стивенсон, Джонатан Луин и Полетт Клэнси предложили аналог клеточной мембраны, способный работать в жидком метане и состоящий вместо этого из углерода, водорода и азота.

\*\*\*

Если бы человек возник на Марсе, чем он отличался бы от нас?

Глупый вопрос. Человек не возник на Марсе. Если бы жизнь возникла на Марсе (а насколько нам известно, она могла иметь место в давние времена, и организмы уровня бактерий, возможно, существуют там до сих пор), то развивалась бы собственным эволюционным путем, который прокладывают случай и динамика отбора. Если бы мы взяли земных людей и «пересадили» их на Марс, они бы вымерли гораздо раньше, чем успели приспособиться к тамошним условиям.

Ну хорошо. Предположим, на некоей экзопланете появились бы инопланетяне. Как бы они выглядели? Это чуть более разумный вопрос. Не забывайте, что на Земле в настоящее время обитают миллионы разнообразных видов живых существ. Как они выглядят? У кого-то есть крылья, у кого-то — ноги, у некоторых — то и другое одновременно, кто-то живет в океане на глубине несколько километров, кто-то прекрасно себя чувствует в ледяной пустыне, кто-то — в песчаной... Даже землеподобная жизнь очень разнообразна и обладает иногда очень странными и даже пугающими биологическими особенностями — у дрожжевого грибка двадцать полов, а шпорцевая лягушка *Xenopus* поедает собственных детенышей...

Телевизионные и киношные инопланетяне, как правило, гуманоидны, что позволяет актерам их играть, либо представлены совсем уж компьютерными монстрами, единственная цель которых — напугать зрителя посильнее. Ни то ни другое не может служить надежным ориентиром в вопросе о том, какой на самом деле может оказаться инопланетная жизнь. Жизнь развивается, чтобы как можно лучше соответствовать преобладающим условиям и среде, и она очень разнообразна. Конечно, мы можем порассуждать об этом, но вряд ли где-то во Вселенной отыщется придуманный нами конкретный «тип» инопланетного существа. Причиной тому — фундаментальное различие в ксенонауке, давным-давно отмеченное Джеком Козном, — различие между универсалиями и парохиялями. Универсаль и парохияль здесь —

существительные, представляющие собой сокращенную запись понятия «универсальное/парохиальное свойство». Парохиаль — это конкретное, особое свойство, которое появляется в результате исторической случайности. К примеру, у человека пищевод пересекается с дыхательными путями, в результате чего каждый год немало людей гибнет от попадания орешка в дыхательные пути. Количество смертей слишком мало, чтобы такой недостаток строения исчез в результате эволюции; он восходит еще к нашим отдаленным рыбоподобным предкам, которые жили в море, где эта особенность ничем им не грозила.

Напротив, универсаль — это общая черта, предлагающая очевидные преимущества в вопросе выживания. К примерам можно отнести способность различать звук и свет или способность летать в атмосфере. Один из признаков универсали — то, что эта черта несколько раз независимо появлялась в ходе эволюции на Земле. Так, способность к полету развилась у насекомых, птиц и летучих мышей независимыми путями. Пути эти различаются в парохиальных аспектах; при всех способах полета используются крылья, но устроены они в каждом случае по-разному. Но способы полета прошли отбор, поскольку в основе их лежит одна и та же универсаль.

Тем не менее у такого теста есть серьезный недостаток: он напрямую связывает любую черту с эволюционной историей Земли, а это вряд ли хорошо, если разговор идет об инопланетянах. К примеру, универсален ли разум человеческого (или более высокого) уровня? Разум, к примеру, независимо развился у дельфинов и осьминогов, но не до нашего уровня, поэтому неясно, отвечает ли разум критерию «независимого появления». Однако в принципе разум, безусловно, представляется чертой, которая могла бы развиваться независимо и дает очевидные краткосрочные преимущества в деле выживания, поскольку обеспечивает своему обладателю возможность влиять на окружающую среду. Так что можно предварительно считать разум универсалью.

Это, конечно, не определения, и граница между универсалиями и парохиалиями в лучшем случае довольно размыта. Но она помогает сосредоточиться на том, что носит, скорее всего, общий характер, и на том, что в значительной мере определяется случаем. В частности, если инопланетная жизнь существует, она может разделять с земной жизнью некоторые универсали, а вот наши парохиали мы вряд ли увидим у инопланетных существ. Гуманоидные инопланетяне, как и мы, в процессе независимого развития в другом мире непременно должны были приобрести слишком много парохиалей, чтобы можно было судить об их внешнем виде. К примеру, локти. Но вот наличие у инопланетян конечностей того или иного сорта, которыми он может произвольно двигать, — это уже похоже на универсаль.

В строении любого конкретного инопланетного существа обязательно будет множество парохиалей. Если его строение сложилось разумно, организм может походить на какую-то реальную форму жизни, обитающую где-то в сходной среде. Соответствующие универсали у него будут. Но шансов на то, что все конкретные парохиали обнаружатся у одного реального существа, немного. Придумайте бабочку с красивыми разноцветными крылышками, изящными антеннами, разными пятнышками на теле... А теперь пойдите и найдите настоящую бабочку, которая была бы в точности такой, как вы нарисовали. Как бы не так.

Поскольку мы обсуждаем перспективы инопланетной жизни, представляется разумным спросить себя, что мы готовы считать «жизнью». Дав «жизни» слишком узкое описание, мы рискуем на основании каких-то парохиальных качеств исключить из этой категории какие-то сущности высокой сложности, которые, очевидно, должны считаться живыми. Чтобы избежать такой опасности, нам следует придерживаться универсалей. В частности, землеподобная химия — это, вероятно, парохиаль. Эксперименты показывают, что возможны бесчисленные жизнеспособные варианты знакомой нам системы ДНК/аминокислоты/белки. Если бы мы вдруг повстречали инопланетян, цивилизация которых вышла в космос, но в организме которых нет ДНК, было бы глупо настаивать на том, что они не живые.

Я употребил по отношению к жизни слово «описание», а не «определение», потому что неясно, имеет ли смысл определять жизнь. В этом вопросе слишком много серых зон, и из любой формулировки, вероятно, найдутся исключения. Скажем, пламя обладает многими характеристиками жизни, включая и способность к воспроизведению, но мы же не станем считать пламя живым. А вирусы — живые они или нет? Ошибкой было бы воображать, что существует какая-то штука, которую мы называем жизнью, и нам необходимо лишь разобраться, что это за штука. Жизнь — это концепция, которую наш мозг извлек из сложности окружающего мира и считает важной. А нам предстоит выбрать, что это слово означает.

Сегодняшние биологи в большинстве своем изучали в процессе подготовки молекулярную биологию, и теперь они рефлекторно мыслят в категориях органических (основанных на углероде) молекул. Они приложили массу усилий и необычайную изобретательность, чтобы понять, как работает жизнь на нашей планете, поэтому вряд ли стоит удивляться, если образ инопланетной жизни, сложившийся в их головах, подозрительно похож на жизнь здешнюю. Математики и физики склонны мыслить структурно. С этой позиции главное, что характеризует жизнь, даже на этой планете, — это не то, из чего она сделана. Это как она ведет себя.

Одно из самых общих описаний «жизни» придумал Стюарт Кауфман, один из основателей теории сложности. Он, кстати, использовал другое словосочетание: автономный агент. Это «нечто, способное как воспроизвести себя, так и реализовать по крайней мере один термодинамический рабочий цикл». Как и во всех остальных случаях, это попытка ухватить те ключевые черты, что отличают живые организмы от всего остального. Результат неплох. Главное в нем — поведение, а не ингредиенты. Он избегает определения жизни с упором на ее весьма размытые границы, а скорее пытается отразить ее замечательные отличия от большинства остальных систем.

Если бы мы обнаружили на чужой планете нечто, что вело бы себя как компьютерная программа, мы не стали бы объявлять это нечто формой инопланетной жизни. Мы отправились бы на поиски существа, написавшего эту программу. Но если бы мы нашли там нечто, что удовлетворяло бы условиям Кауфмана, мне кажется, мы, вероятно, сочли бы его живым.

\*\*\*

Конкретный пример.

Некоторое время назад мы с Джеком Коэном разработали для одного музейного проекта четыре варианта инопланетной среды. Моделью для самого экзотического из них — мы назвали его *Nimbus* — в основных чертах стал Титан. Оригинальное описание его содержит гораздо больше подробностей, таких как эволюционная история и социальная структура.

*Nimbus*, каким мы себе его вообразили, — это экзолуна с плотной атмосферой из метана и аммиака. Толстый слой облаков делает поверхность очень хмурой. Жизнь на *Nimbus* основана на кремнеметаллической химии, в которой вкрапления атомов металлов позволяют кремнию образовывать скелетную основу больших, сложных молекул. Металлы появляются при падении метеоритов. Среди ранних форм жизни на такой планете могли бы возникнуть металлоидные пленки из тонких волокон, несущих слабые электрические токи. Они могли бы перемещаться, выпуская вперед длинные усики. Небольшие сети таких усиков могли выполнять простые вычисления и эволюционировали в сторону усложнения. Эти примитивные существа (в нашем примере) вымерли полмиллиарда лет назад, но оставили после себя электронную экосистему, основанную на кремнии.

Сегодня самые поразительные видимые особенности (придуманной нами) планеты — сказочные замки, замысловатые системы примерно концентрических кремнеметаллических стен, удерживающих внутри себя этановые/метановые озера. Эти озера служат благоприятной средой для чешуек — электронных существ, развившихся на базе прежних пленок. Чешуйки представляют собой тонкие плоские осколки кремниевой породы, покрытые кремнеметаллическими электронными схемами. Они участвуют в сложной эволюционной гонке, в которой захватывают схемы других чешуек. Время от времени возникают новые схемы, которые лучше справляются с этой задачей. К настоящему моменту они прекрасно умеют это делать. Основу их размножения составляет матричное копирование. Подвижная чешуйка наносит химический образ своей схемы на чистый камень. Этот образ служит шаблоном для выращивания зеркальной копии схемы. Затем копия отщепляется от камня. Ошибки копирования служат аналогом мутаций; захват схем ведет к рекомбинации элементов и дает некоторым чешуйкам конкурентные преимущества в плане выживания.

Когда люди открыли *Nimbus*, некоторые чешуйки начинали переходить к объемным схемам. Они уже стали «фоннейманами» и воспроизводились новым способом. Около 1950 года математик Джон фон Нейман ввел понятие клеточного автомата (простой тип математической компьютерной игры), чтобы доказать, что самовоспроизводящиеся машины в принципе возможны. Такой автомат включает в себя три компонента: исходные данные, копировщик и строитель. Строитель выполняет зашифрованные в данных инструкции и создает таким образом

новый строитель и новый копировщик. После этого новый копировщик копирует старые данные, и мы получаем вторую их копию. Схема фоннеймана на Нимбусе тоже подразделяется на три участка: данные, копировщик и строитель. Строитель умеет строить схемы, предписанные данными. Копировщик — это просто копировщик. Эта способность у него развилась совместно с репродуктивной системой трех полов. Один родитель наносит на голый камень копию своей схемы-строителя. Позже другой родитель, проходя, замечает на камне схему и добавляет к ней копию своего копировщика. Наконец, третий родитель добавляет ко всему копию своих данных. Все, теперь новый фоннейман может отщепляться от камня.

«Насколько же отличается, насколько сильно все это отличается от частной жизни нашей дорогой королевы» — как сказала однажды, говорят, одна из фрейлин королевы Виктории на представлении «Клеопатры» с Сарой Бернар в главной роли. Ни кислорода, ни воды, ни углерода, ни обитаемой зоны, ни генетики, три пола... Достаточно сложная система, чтобы считать ее формой жизни, хотя и весьма необычной, к тому же способная эволюционировать при помощи естественного отбора. Тем не менее основные ее черты вполне реалистичны с научной точки зрения.

Я не утверждаю, что подобные сущности на самом деле существуют; более того, никакое конкретно предлагаемое устройство инопланетной жизни, скорее всего, не существует, поскольку в нем обязательно будет слишком много парохиаей. Но они иллюстрируют богатое разнообразие новых возможностей, которые могут появиться в мирах, сильно отличающихся от нашего.



## Темные звезды

Холли: Ну, главное в черной дыре, ее главная отличительная черта, это... она черная. А главное в космосе, цвет космоса, основной космический цвет, это... он черный. И как, по-вашему, их можно увидеть?

«Красный карлик», сезон 3, эпизод 2: «Затерянные в снегах»

Человек издавна мечтал полететь на Луну. Сатирические «Правдивые истории» Лукиана Самосатского, датируемые примерно 150 годом, содержат воображаемые путешествия на Луну и Венеру. В 1608 году Кеплер написал научно-фантастический роман *Somnium* («Сон»), в котором демоны переносят мальчика по имени Дуракот из Исландии на Луну. В конце 1620-х годов Фрэнсис Годвин, епископ Херефордский, написал «Человека на Луне» — залихватскую историю, в которой гигантские лебеди-ганзы переносят моряка Доминго Гонсалеса на Луну.

Демоны Кеплера были более достоверны с научной точки зрения, чем лебеди Годвина. Лебедь, каким бы сильным он ни был, не сможет долететь до Луны, потому что космос — это вакуум. Но демон в принципе может дать усыпленному человеку толчок достаточно сильный, чтобы тот улетел с планеты прочь. Насколько сильный нужен толчок? Кинетическая энергия ракеты равняется половине ее массы, умноженной на квадрат ее скорости, и эта энергия должна превзойти потенциальную энергию того гравитационного поля, от которого планируется убежать. Кеплер это знал, хотя и не формулировал таким образом. Чтобы уйти от планеты, ракета должна преодолеть критический порог — «скорость убегания». Швырните что-нибудь в небо с большей скоростью — и это что-то уже не вернется на Землю; если же скорость будет меньше пороговой — вернется. Для Земли скорость убегания составляет 11,2 километра в секунду. При отсутствии каких бы то ни было других тел и сопротивления воздуха это придаст вам достаточно большой импульс, чтобы навсегда уйти от Земли. Вы по-прежнему ощущаете гравитационное притяжение Земли — в конце концов, на всех нас действует закон всемирного тяготения, — но сила притяжения спадает так быстро, что не сможет

вас остановить. Если вокруг есть и другие тела, то их совместное действие также следует принимать во внимание. Если вы стартуете с Земли и хотите выйти из гравитационного колодца Солнца, вам потребуется скорость 42,1 километра в секунду[72].

Существуют способы обойти этот предел. Так, космическое бола — это гипотетическое устройство, которое раскручивает корабль как кабинку на одной из спиц колеса обозрения. Соберите последовательный каскад таких устройств — и вы получите возможность добраться до орбиты посредством серии поворотов на спицах. Или, еще лучше, можно построить космический лифт — это, по существу, крепкая веревка, свисающая вниз со спутника на геостационарной орбите, по которой можно взбираться не торопясь. При этих способах попадания на орбиту скорость убегания не имеет значения, она применима только к свободно движущимся объектам, которым дали сильный толчок и отпустили, оставив лететь самостоятельно. И это приводит к гораздо более глубокому выводу, следующему из скорости убегания, ведь одним из таких объектов является световая частица, фотон.

\*\*\*

Когда Рёмер открыл, что свет имеет конечную скорость, мало кто из ученых осознал одно из следствий: свет не может убежать от достаточно массивного тела. В 1783 году Джон Мичелл представил, что Вселенная, возможно, усыпана громадными телами, превосходящими по размеру звезды, но ничего не излучающими. В 1796 году Лаплас опубликовал ту же идею в своем фундаментальном труде *Exposition du Système du Monde* («Изложение системы мира»):

«Лучи от яркой звезды, имеющей ту же плотность, что и Земля, и диаметр в 250 тысяч раз больше, чем у Солнца, не дошли бы до нас из-за ее гравитационного притяжения; поэтому возможно, что крупнейшие светящиеся тела во Вселенной могут оказаться невидимыми по этой причине».

Начиная с третьего издания, автор исключил этот пассаж из книги, вероятно, потому, что Лаплас испытывал по этому поводу определенные сомнения.

Если так, ему не стоило беспокоиться, хотя потребовалось более двух столетий, чтобы подтвердить существование его «темных звезд». Ньютонова основа расчетов к тому времени сменилась теорией относительности, пролившей на концепцию темной звезды новый свет — или новую тьму. Решения эйнштейновских уравнений поля для пространства-времени, окружающего очень большую плотную массу, предсказывают кое-что даже более дикое, чем темные звезды Мичелла и Лапласа. Такая масса не только захватывает весь испускаемый ею же свет; она вообще исчезает с карты Вселенной; скрываться ей помогает билет в один конец в небытие, известный как горизонт событий. В 1964 году журналистка Энн Эвинг написала статью об этой идее с броским заголовком «Черные дыры в пространстве». Физик Джон Уиллер использовал этот же термин в 1967 году, и часто изобретателем этого термина считают именно его.

Математическое существование черных дыр является прямым следствием общей теории относительности, хотя некоторые ученые задавались вопросом, не свидетельствует ли, напротив, такое следствие из общей теории относительности о ее неполноте, о том, что в ней недостает какого-то дополнительного физического принципа, который исключил бы такое невероятное явление. Наилучший способ решить наконец этот вопрос — пронаблюдать реальную черную дыру. Это, однако, оказалось весьма хитрой задачей, и не только по причинам, которые привел компьютер Холли в британском телесериале «Красный карлик» и которые процитированы в эпиграфе. Даже если бы черная дыра была невидима, ее гравитационное поле оказывало бы на вещество вне ее характерное воздействие. Более того (прости, Холли), из теории относительности следует, что черные дыры на самом деле не черные и к тому же не совсем дыры. Свет не может выйти из них наружу, но вещество, всасываемое внутрь, дает вполне наблюдаемые эффекты.

Сегодня черные дыры не только одна из любимых тем научной фантастики. Большинство астрономов признают их существование. Мало того, создается впечатление, что большинство галактик имеет в центре сверхмассивную черную дыру. Возможно, именно поэтому галактики вообще сформировались.

\*\*\*

Теория черных дыр родилась в результате математической разработки общей теории относительности, где вещество искривляет пространство-время, а искривленное

пространство-время влияет на движение вещества, — и все в соответствии с Эйнштейновыми уравнениями поля. Решение уравнений представляет возможную геометрию пространства-времени либо в ограниченной области Вселенной, либо во Вселенной в целом. К несчастью, уравнения поля очень сложны — намного сложнее уравнений Ньютоновой механики, хотя те и сами достаточно сложны. Пока у нас не появились быстрые компьютеры, найти решения уравнений поля можно было только при помощи карандаша, бумаги и, как говорил Эркюль Пуаро, «маленьких серых клеточек». В подобных обстоятельствах полезным математическим приемом становится симметрия. Если требуемое решение сферически симметрично, то единственной значимой переменной в нем является радиус. Поэтому вместо обычных трех пространственных измерений можно рассматривать всего одно, что гораздо проще.

В 1915 году Карл Шварцшильд воспользовался этой идеей, чтобы решить уравнения Эйнштейна для гравитационного поля массивной сферы, представляющей собой модель большой звезды. Уменьшение числа пространственных переменных до одной упростило уравнения в достаточной мере, чтобы он смог вывести явную формулу для геометрии пространства-времени вокруг такой сферы. В то время он в составе прусской армии сражался с русскими, но сумел все же отправить свое открытие Эйнштейну с просьбой опубликовать его. Эйнштейн был впечатлен, но сам Шварцшильд умер полгода спустя от неизлечимого аутоиммунного заболевания.

Одна из очень приятных особенностей математической физики заключается в том, что уравнения зачастую знают, кажется, больше, чем их создатели. Вы составляете уравнения на основе физических принципов, которые прекрасно понимаете. Затем вы быстренько находите решение, начинаете выяснять, о чем оно вам говорит, — и обнаруживаете, что не понимаете ответа. Точнее говоря, вы понимаете, чему равен ответ и почему он решает ваши уравнения, но не понимаете до конца, почему он ведет себя именно так.

Кстати говоря, уравнения существуют именно для этого. Если бы мы всегда могли угадать ответ заранее, в уравнениях не было бы нужды. Вспомните хотя бы закон всемирного тяготения Ньютона. Можете ли вы посмотреть на его формулу и увидеть эллипс? Я лично не могу.

Так или иначе, но результат Шварцшильда преподнес большой сюрприз: его решение вело себя очень странно на некотором критическом расстоянии, которое сейчас называется радиусом Шварцшильда. Строго говоря, на этом радиусе решение имеет сингулярность: некоторые множители становятся бесконечными. Внутри сферы этого критического радиуса решение не сообщает нам ничего разумного ни о пространстве, ни о времени.

Для Солнца радиус Шварцшильда составляет три километра, а для Земли — всего сантиметр; и там, и там он похоронен в недоступных глубинах, где, с одной стороны, не может вызвать никаких проблем, а с другой — недоступен для наблюдений, что затрудняет как сравнение полученного Шварцшильдом ответа с реальностью, так и выявление его физического смысла. Такое непонятное поведение ставит перед исследователями фундаментальный вопрос: что произошло бы со звездой настолько плотной, что она целиком помещается внутри собственного радиуса Шварцшильда?

\*\*\*

В 1922 году ведущие физики и математики собрались вместе, чтобы обсудить этот вопрос, но не пришли ни к какому конкретному выводу. Общее ощущение было, что такая звезда должна схлопнуться под действием собственного гравитационного притяжения. Что произойдет дальше, зависит от физических тонкостей, и в то время об этом можно было только догадываться. К 1939 году Роберт Оппенгеймер рассчитал, что достаточно массивные звезды в таких обстоятельствах и вправду испытают гравитационный коллапс, но он считал, что радиус Шварцшильда ограничивает область пространства-времени, в которой время полностью останавливается. Отсюда название «застывшая звезда». Однако такая интерпретация была основана на ошибочном предположении об области применимости решения Шварцшильда — а именно на предположении о том, что сингулярность в его решении имеет реальный физический смысл. С точки зрения внешнего наблюдателя, время на радиусе Шварцшильда действительно останавливается. Однако для наблюдателя, упавшего внутрь этого радиуса и прошедшего

сингулярность, все не так. Эта дуальность точек зрения красной нитью проходит сквозь всю теорию черных дыр.

В 1924 году Артур Эддингтон показал, что сингулярность Шварцшильда — не физическое явление, а математический артефакт. Математики представляют искривленные пространства и пространство-время при помощи сетки кривых или поверхностей, помеченных числами и напоминающих линии широты и долготы на карте Земли. Такие сетки называются координатными системами. Эддингтон показал, что сингулярность Шварцшильда — это особенность выбранной им системы координат, подобно тому, как на Северном полюсе Земли меридианы сходятся, а параллели образуют все более мелкие круги. Однако если вы стоите на Северном полюсе, то земная поверхность там геометрически выглядит точно так же, как в других местах. Только снега и льда больше. Внешние странности геометрии возле Северного полюса вызваны тем, что в качестве координат выбраны широта и долгота. Если бы вы воспользовались системой координат с Восточным и Западным полюсами на экваторе, то уже эти точки выглядели бы странно, а Северный и Южный полюса казались совершенно нормальными местами.

Координаты Шварцшильда корректно представляют, как выглядит черная дыра снаружи, но внутри она смотрится совершенно иначе. Эддингтон нашел другую систему координат, при которой сингулярность Шварцшильда исчезает. К несчастью, он не смог исследовать свое открытие до конца, поскольку работал в то время над другими астрономическими вопросами, — и открытие осталось почти незамеченным. Интерес к нему вновь пробудился в 1933 году, когда Жорж Леметр независимо от Эддингтона понял, что сингулярность в решении Шварцшильда — математический артефакт.

Но даже после этого тема лишь теплилась до 1958 года, когда Дэвид Финкельштейн нашел новую более удобную координатную систему, в которой радиус Шварцшильда имеет физический смысл, но смысл этот не в том, что время там замирает. При помощи своих координат Финкельштейн решил уравнения поля не только для внешнего наблюдателя, но и для всего будущего, которое ожидает внутреннего наблюдателя. В этих координатах на радиусе Шварцшильда нет никакой сингулярности, но радиус этот представляет собой горизонт событий: односторонний барьер, для которого внешняя часть может влиять на внутреннюю, но не наоборот. Его решение демонстрирует, что звезда, лежащая полностью внутри своего радиуса Шварцшильда, коллапсирует и образует область, покинуть которую не может ни вещество, ни даже фотоны. Такая область оказывается частично оторванной от остальной Вселенной — в нее можно попасть, но из нее невозможно выйти. Это и есть настоящая черная дыра в современном понимании этого термина.

Как выглядит черная дыра, зависит от наблюдателя. Представьте себе, что некий неудачливый космический корабль — ну, или космический корабль с неудачливым экипажем — падает в черную дыру. Это один из столпов, на которых зиждется научно-фантастическое кино, но мало кому из кинематографистов удастся снять этот процесс хоть сколько-нибудь правдоподобно. В фильме «Интерстеллар» это удалось сделать благодаря тому, что консультантом выступил Кип Торн, но у сюжета этого фильма есть свои недостатки. По данным физики, если мы наблюдаем за падающим кораблем издалека, то он, как нам кажется, падает все медленнее и медленнее, потому что гравитация черной дыры все сильнее притягивает фотоны, идущие от корабля. Те фотоны, что оказываются к черной дыре достаточно близко, не могут уйти вовсе; те, что оказались непосредственно за горизонтом событий с внешней стороны, где сила тяжести в точности компенсирует скорость света, могут уйти, но очень медленно. Мы видим космический корабль благодаря тому, что регистрируем испускаемый им свет, поэтому мы видим, что он ползет все медленнее и в конце концов останавливается, не доходя до горизонта событий. Общая теория относительности гласит, что гравитация замедляет время. На радиусе Шварцшильда время останавливается, но только с точки зрения внешнего наблюдателя. Более того, сама дыра становится все краснее и краснее благодаря эффекту Доплера. Вот почему черные дыры, независимо от штампованного сарказма Холли, на самом деле не черные.

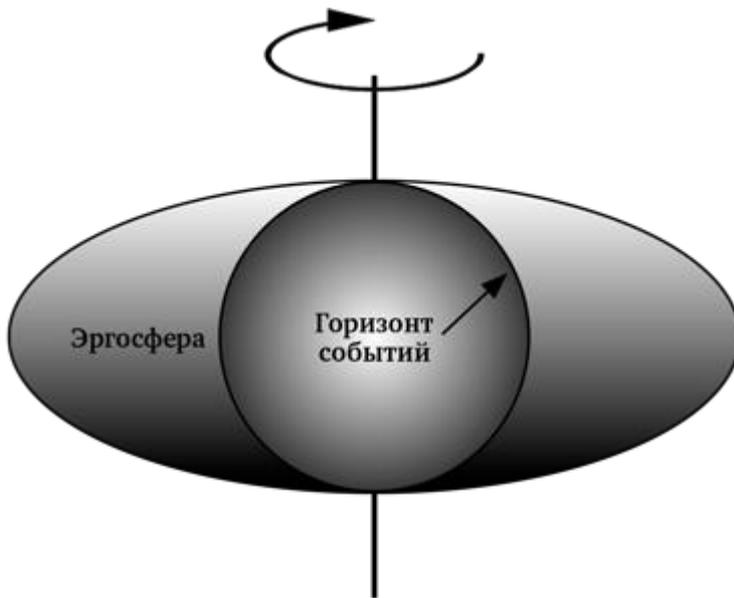
Экипаж космического корабля не испытывает ничего подобного. Астронавты приближаются к черной дыре, их засасывает внутрь через горизонт событий, а затем...

...Они испытывают на себе решение уравнения, с точки зрения наблюдателя, внутри черной дыры. Вероятно. Мы не знаем наверняка, потому что, судя по уравнениям, все вещество в

корабле будет сжато в математическую точку бесконечной плотности и нулевого размера. Это, если так действительно произойдет, и будет настоящая физическая сингулярность, не говоря уже о фатальности такого развития событий.

Специалисты по математической физике не слишком любят говорить о сингулярностях. Как правило, если где-то вдруг объявляется сингулярность, это значит, что математическая модель теряет связь с реальностью. В данном случае мы не можем направить зонд в черную дыру и вывести его потом обратно или хотя бы принять с него радиосигналы (которые путешествуют со скоростью света и тоже не могут оттуда выйти), так что у нас нет никакой возможности выяснить, в чем состоит реальность. Однако представляется вероятным, что любое развитие событий, каким бы оно ни было, окажется неприятно жестким, и экипаж его не переживет. Конечно, если это не кино. По крайней мере некоторым экипажам в некоторых фильмах это по силам.

\*\*\*



### Горизонт событий (сфера) и эргосфера (эллипсоид) для вращающейся черной дыры

Математика черных дыр — дело тонкое, и первоначально единственным типом черной дыры, для которого уравнения поля можно было решить в явном виде, была черная дыра по Финкельштейну, то есть черная дыра, которая не вращается и не имеет электрического поля. Черные дыры такого типа часто называют шварцшильдовскими. Надо сказать, то специалист по математической физике Мартин Крускал нашел аналогичное решение даже раньше, но не опубликовал его. На его основе Крускал и Дьордь Секереш разработали то, что сегодня называется координатами Крускала — Секереша и описывает внутренность черной дыры более детально. Основная геометрия очень проста: сферический горизонт событий с точечной сингулярностью в центре. Все, что падает в черную дыру, достигает точки сингулярности за конечный промежуток времени.

Черная дыра такого рода — особый случай, поскольку в большинстве своем небесные тела вращаются. Когда коллапсирует вращающаяся звезда, получившаяся на ее месте черная дыра тоже будет вращаться по закону сохранения момента импульса. В 1963 году Рой Керр вытащил из шляпы математического кролика, записав метрику пространства-времени для вращающейся черной дыры — метрику Керра. Поскольку уравнения поля нелинейны, наличие точной формулы примечательно само по себе. Она показывает, что вместо единственного сферического горизонта событий там существуют две критические поверхности, на которых физические свойства резко меняются. Внутренняя из этих поверхностей — это сферический горизонт событий; как и в случае статичной черной дыры, он представляет собой барьер, который свет не в состоянии преодолеть. Внешняя поверхность — это уплощенный эллипсоид, на полюсах касающийся горизонта событий.

Область между двумя этими поверхностями называется эргосферой. «Эргон» по-гречески означает «работа», и название объясняется тем, что из черной дыры, используя ее эргосферу, можно извлекать энергию. Если некая частица падает внутрь эргосферы, то релятивистский эффект, известный как увлечение инерциальных систем отсчета, заставляет ее начать вращение вместе с черной дырой, что увеличивает ее энергию. Но поскольку частица при этом по-прежнему находится за пределами горизонта событий, она может — при определенных обстоятельствах — уйти от нее и унести эту энергию с собой. Таким образом, частица извлекает из черной дыры энергию, то есть делает то, что невозможно проделать со статичной черной дырой.

Помимо вращения, черная дыра может обладать электрическим зарядом. Ганс Рейсснер и Гуннар Нордстрём нашли метрику для заряженной черной дыры — метрику Рейсснера — Нордстрёма. В 1965 году Эзра Ньюмен открыл метрику для осесимметричной вращающейся заряженной черной дыры — метрику Керра — Ньюмена. Казалось бы, могут существовать и более сложные типы черных дыр, но физики считают, что это не так, за исключением разве что магнитной дыры. Гипотеза о лысой черной дыре гласит, что после того, как формирование черной дыры завершилось, у нее остается лишь три базовых физические свойства: масса, спин и заряд. Название гипотезы происходит от фразы «У черных дыр нет волос» в книге 1973 года «Гравитация», написанной Чарльзом Мизнером, Кипом Торном и Джоном Уилером и ставшей настоящей библией по этому вопросу. Уилер приписывает эту фразу Якову Бекенштейну.

Это утверждение часто называют теоремой о лысой черной дыре, но на самом деле оно пока не доказано, а именно это, как правило, подразумевает слово «теорема». Опровергнуто оно, естественно, тоже не было. Стивен Хокинг, Брэндон Картер и Дэвид Робинсон сумели доказать некоторые особые случаи. Если, как считают некоторые физики, черная дыра может обладать и магнитным полем тоже, гипотезу придется модифицировать, чтобы она включала в себя и эту возможность.

\*\*\*

Давайте познакомимся немного с геометрией черной дыры и попробуем получить представление о том, насколько странны эти структуры.



Представление релятивистского пространства-времени  
по Минковскому

(Изображенная на рисунке мировая линия в некоторых точках явно отклонена от оси времени больше чем на  $45^\circ$ . — Прим. ред.)

В 1907 году Герман Минковский придумал простую геометрическую картинку релятивистского пространства-времени. Я воспользуюсь упрощенным изображением всего с одним пространственным измерением и обычным измерением времени, но в принципе его

можно распространить и на физически реалистичную картину с тремя пространственными измерениями. В этом представлении изогнутые «мировые линии» отражают движение частиц. По мере изменения временной координаты результирующую пространственную координату можно считать с этой кривой. Линии, проведенные под углом  $45^\circ$  к осям, представляют частицы, движущиеся со скоростью света. Поэтому мировые линии не могут пересекать никакую линию, направленную под  $45^\circ$ . Точка в пространстве-времени, называемая событием, определяет две такие линии; вместе они образуют его световой конус. Он состоит из двух треугольников: прошлого и будущего. Остальная часть пространства-времени недоступна из этой точки: чтобы попасть туда, вам пришлось бы двигаться быстрее света.

В евклидовой геометрии естественными преобразованиями (координат) являются жесткие перемещения, которые сохраняют расстояния между точками. В специальной теории относительности аналогами этих преобразований являются преобразования Лоренца, а сохраняется при этом величина, называемая интервалом. По теореме Пифагора квадрат расстояния от начала координат до точки на плоскости равен сумме квадратов горизонтальной и вертикальной координат. Квадрат интервала равен квадрату пространственной координаты минус квадрат временной координаты [73]. Эта разница равняется нулю вдоль прямых, проведенных под  $45^\circ$ , и положительна внутри светового конуса. Так что интервал между двумя событиями, которые могут быть связаны причинной связью, представляет собой действительное число. В противном случае это мнимое число, отражающее невозможность движения от одного к другому.

В общей теории относительности в картину включается гравитация; для этого плоскости Минковского позволяют изгибаться, имитируя действие гравитационной силы, как на рисунке в 1 главе.

Пересматривая геометрию Минковского в координатах Крускала — Секереша, Роджер Пенроуз разработал элегантно простой способ изображения релятивистской геометрии черных дыр. Формула метрики явно задает эту геометрию, но на эту формулу можно смотреть до посинения, причем без всякого толку. Но поскольку нам нужна геометрия, может быть, стоит немного порисовать? Картинки не должны противоречить метрике, но хорошая картинка стоит тысячи расчетов.

Диаграммы Пенроуза раскрывают тонкие черты физики черных дыр, позволяя сравнивать различные их типы. Кроме того, эти диаграммы наводят нас на некоторые поразительные, хотя и умозрительные, возможности. Пространство опять упрощается до одного измерения (его располагают горизонтально), время рисуют вертикально, а световые лучи идут под углом  $45^\circ$  и образуют световые конусы, которые разделяют прошлое, будущее и каузально недоступные области.



### Диаграмма Пенроуза для черной дыры Шварцшильда

Обычно рисунок Минковского имеет форму квадрата, но в диаграммах Пенроуза вместо этого используется ромб, призванный подчеркнуть особую роль диагональных линий, идущих под  $45^\circ$ . Обе фигуры всего лишь разные способы сжать бесконечную плоскость в конечное

пространство. Это необычные, но удобные и полезные системы координат для пространства-времени.

Для разминки начнем с простейшего объекта — черной дыры Шварцшильда. Диаграмма Пенроуза для нее довольно проста. Ромб представляет вселенную [74], в основном соответствующую модели Минковского. Кривая со стрелкой — это мировая линия космического корабля, падающего в черную дыру сквозь ее горизонт (событий) и попадающего в центральную сингулярность (зубчатая линия). Но теперь здесь есть еще и второй горизонт, подписанный «антигоризонт». Это о чем?

Обсуждая космический корабль, падающий в черную дыру, мы выяснили, что этот процесс выглядит очень по-разному, если вы находитесь внутри этого корабля или наблюдаете происходящее снаружи от черной дыры. Космический корабль следует траектории, похожей на изогнутую стрелку на рисунке, он проходит сквозь горизонт событий и движется к сингулярности. Но поскольку свет уходит от него все медленнее по мере того, как корабль приближается к горизонту, внешний наблюдатель видит его все более красным; он видит, как корабль замедляется и в конце концов как будто просто останавливается. Изменение цвета вызывается гравитационным красным смещением: гравитационные поля замедляют время, меняя частоту электромагнитной волны. Другие объекты, упавшие внутрь черной дыры, тоже останутся видимыми, кто бы и когда бы на них ни посмотрел. Однажды застыв в движении, они всегда после этого будут выглядеть одинаково.

Горизонт на диаграмме Пенроуза — это горизонт событий, каким его видит экипаж космического корабля. Антигоризонт — это там, где корабль выглядит остановившимся, с точки зрения внешнего наблюдателя.



Диаграмма Пенроуза для шварцшильдовской пары черная дыра/белая дыра

Становится возможной любопытная математическая конструкция. Предположим, мы зададимся вопросом: что находится по ту сторону антигоризонта? В системе отсчета экипажа это внутренность черной дыры. Но существует естественное математическое расширение геометрии Шварцшильда, в котором к обычной черной дыре приклеивается ее же копия, повернутая вспять во времени. Математически мы склеиваем две копии метрики, обращая в одной из них время вспять (для этого мы переворачиваем ее изображение на  $180^\circ$ ), чтобы получить полную картину.

Черная дыра, время в которой повернуто вспять, известна как белая дыра; ведет она себя как черная дыра, в которой время течет в обратном направлении. В черной дыре все (свет в том числе) свободно падает внутрь, но не может выйти наружу. В белой дыре все (свет в том числе) свободно вылетает наружу, но не может проникнуть внутрь. «Параллельный горизонт» испускает свет и вещество, но является непроницаемым и для одного, и для другого, если то или другое попытается проникнуть в белую дыру.

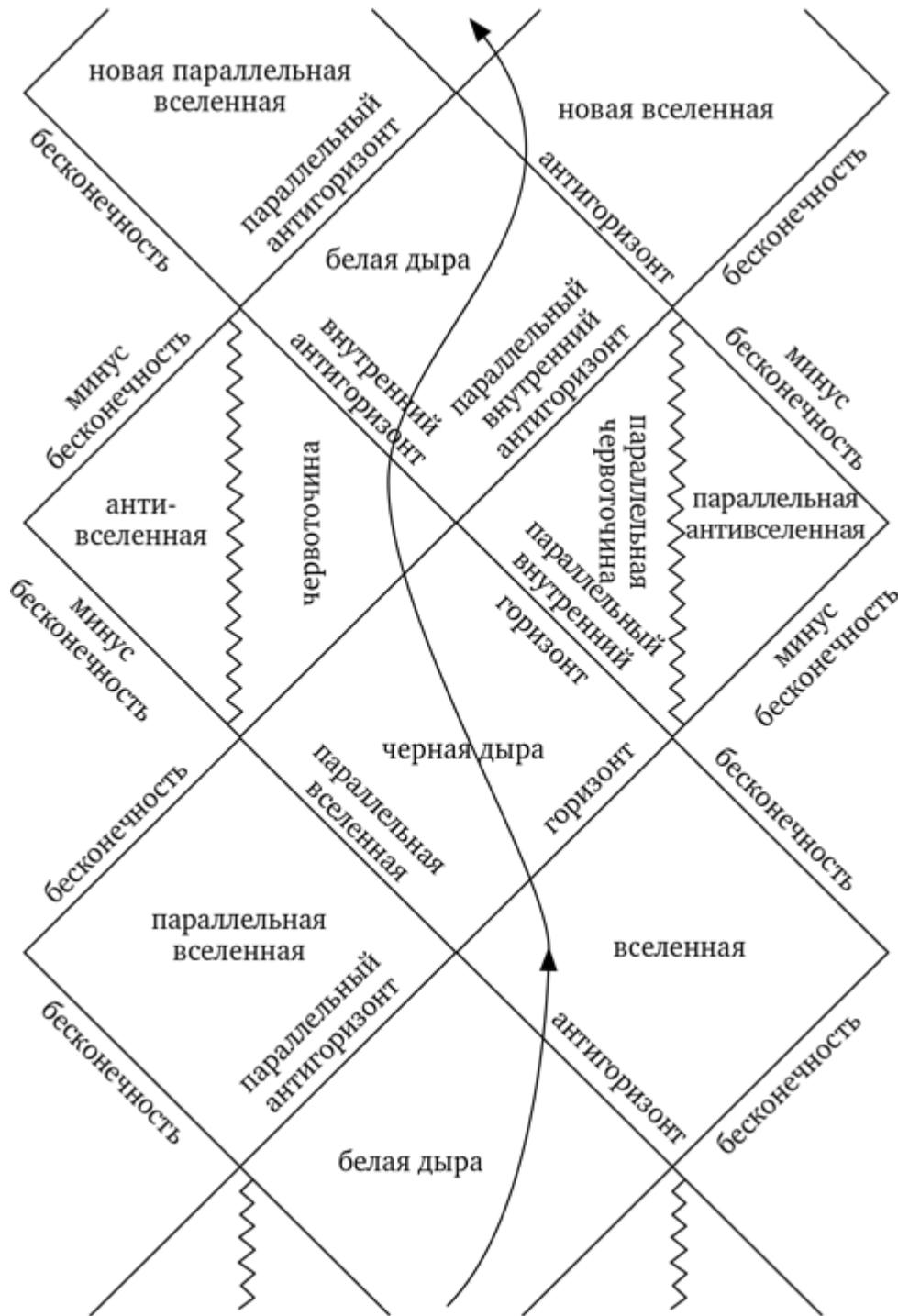
Перевернутое изображение нашей Вселенной также описывает некую вселенную, но вселенная эта не связана с нашей причинно-следственной связью, поскольку обозначенный теорией относительности абсолютный предел скорости (скорость света) подразумевает, что вы не сможете попасть внутрь ее, следуя по траектории, наклоненной под углом, большим  $45^\circ$ . Можно предположить, что второе изображение может представлять совершенно другую вселенную. Если же вступить в царство чистой фантазии, то техника, достаточно продвинутая для того, чтобы обеспечивать путешествие быстрее света, могла бы перемещаться между двумя этими вселенными, избегая при том сингулярностей.

Если белая дыра связана с черной дырой, причем таким образом, который позволяет перемещение света, вещества и причинно-следственных эффектов, мы получаем «кротовую нору», или «червоточину», которую так любят использовать в научно-фантастических книгах и фильмах для преодоления космического ограничения на скорость и доставки героев на чужую планету прежде, чем они умрут от старости. Червоточина — это космический способ «срезать расстояние» между разными вселенными или разными областями одной и той же вселенной. Поскольку все, что проникает в черную дыру, сохраняется в виде застывшего изображения, если смотреть на дыру снаружи, постольку регулярно используемая червоточина будет окружена застывшими и покрасневшими образами всех космических кораблей, вошедших в эти ворота. Ни в одном фантастическом фильме я не видел ничего подобного.

В рассмотренном случае черная и белая дыры не соединены таким образом, но в следующем типе черной дыры — соединены. Речь идет о вращающейся черной дыре, или черной дыре Керра, и штука это диковинная. Начнем со шварцшильдовской пары черная дыра / белая дыра, но без сингулярности. Расширим области и черной, и белой дыр до ромбовидной формы. Между этими ромбами вставим (слева) еще один ромб. Он имеет вертикальную сингулярность (фиксированную в пространстве и сохраняющуюся во времени). По одну сторону (справа на диаграмме Пенроуза) от сингулярности находится область «червоточины», которая связывает черную и белую дыры в обход сингулярности. Пройдя по непростому маршруту через червоточину, можно попасть из нашей вселенной в другую. По другую сторону (слева) от сингулярности находится антивселенная: вселенная из антивещества. Аналогично добавим еще один ромб справа, представляющий параллельную первой червоточину и антивселенную.

Но это только начало. Теперь составим из таких ромбов бесконечную стопку. Эта конструкция «разворачивает» спин черной дыры и порождает бесконечную последовательность червоточин, связывающую бесконечное число разных вселенных.

Геометрически сингулярность черной дыры Керра представляет собой не точку, а круглое кольцо. Проходя в это кольцо, можно путешествовать между вселенной и антивселенной. Хотя это, возможно, было бы неразумно, если учесть, что антивещество делает с веществом.



### Диаграмма Пенроуза для вращающейся черной дыры (Керра)

Диаграмма Пенроуза для заряженной черной дыры (Рейсснера — Нордстрёма) выглядит столь же хитроумно, но интерпретируется немного иначе. Вообще из математики не следует, что все эти странные явления действительно существуют или происходят в реальном мире. Она подразумевает, что все они — естественные следствия математической структуры вращающейся черной дыры, что это структуры пространства-времени, которые логически не противоречат известной физике, а значит, разумно проистекают из нее.

\*\*\*

Итак, мы посмотрели, на что похожи черные дыры геометрически, но как они могут возникать в реальности?

Массивная звезда начинает схлопываться под собственной тяжестью, когда у ядерных реакций, обеспечивавших ее свечение, заканчивается топливо. Если такое происходит, то как ведет себя вещество звезды? Сегодня этот вопрос представляется куда более сложным, чем он

был для Мичелла и Лапласа. Звезды за это время не изменились, изменились наши представления о них. Дело не только в том, что мы должны думать о гравитации (и использовать при этом теорию относительности, а не законы Ньютона); помимо этого, мы должны рассматривать квантовую механику ядерных реакций.

Если большое количество атомов все сильнее сближается под действием силы тяжести, их внешние области, занятые электронами, пытаются смешаться. Один из квантово-теоретических законов — принцип Паули — гласит, что никакие два электрона не могут занимать одно и то же квантовое состояние. Так что по мере роста давления электроны ищут для себя любые незанятые состояния и вскоре укладываются максимально плотно, как апельсины в пирамиде на фруктовом прилавке. Когда же место заканчивается и все квантовые состояния оказываются заняты, электроны превращаются в электронное вырожденное вещество. Именно это происходит в ядрах звезд.

В 1931 году Субраманьян Чандрасекар, воспользовавшись релятивистскими расчетами, предсказал, что достаточно массивное тело, состоящее из электронного вырожденного вещества, должно схлопнуться под действием собственного гравитационного поля и образовать нейтронную звезду, почти целиком состоящую из нейтронов. Типичная нейтронная звезда умудряется втиснуть две массы Солнца в шар радиусом 12 километров. Если масса звезды меньше, чем 1,44 массы Солнца, — это число называют пределом Чандрасекара, из нее получается не нейтронная звезда, а белый карлик. Если ее масса превосходит эту величину, но не достигает предела Толмана — Оппенгеймера — Волкова, равного трем массам Солнца, она коллапсирует и превращается в нейтронную звезду. На этой стадии дальнейшему превращению в черную дыру отчасти мешает давление нейтронного вырождения, и астрофизики нечетко представляют себе, что будет дальше. Однако тело, масса которого превосходит десятикратную массу Солнца, это давление преодолет точно и станет черной дырой. Минимальная когда-либо наблюдавшаяся масса черной дыры составляет примерно пять масс Солнца.

Чисто релятивистская модель показывает, что черная дыра сама по себе не может излучать — это может делать только засасываемое внутрь вещество, пока оно находится вне горизонта событий. Но Хокинг догадался, что из-за квантовых эффектов черная дыра может излучать непосредственно с горизонта событий. Квантовая механика допускает спонтанное возникновение виртуальной пары частица — античастица при условии, что они сразу же уничтожат друг друга, то есть аннигилируют. Или должны, по идее, уничтожить, но если это происходит над самым горизонтом событий, то гравитация черной дыры затягивает одну из частиц под горизонт событий и (по закону сохранения импульса) оставляет вторую снаружи, откуда она может вообще уйти от дыры. Это излучение Хокинга, и благодаря ему небольшие черные дыры очень быстро испаряются. Большие испаряются тоже, но процесс занимает очень длительное время.

\*\*\*

Эйнштейновы уравнения поля имеют решения, соответствующие черным дырам, но это не гарантия того, что они существуют в природе. Может быть, неизвестные нам законы физики не допускают существования черных дыр. Так что прежде чем очень уж увлекаться математикой и астрофизикой, неплохо бы найти хоть какие-то наблюдательные свидетельства того, что черные дыры существуют в реальности. Было бы чертовски интересно пойти дальше и заняться поисками белых дыр, червоточин и альтернативных вселенных, но прямо сейчас даже поиск черных дыр — достаточно амбициозная задача.

Первоначально черные дыры оставались чисто теоретической спекуляцией; считалось, что их невозможно наблюдать непосредственно, поскольку излучают они только слабое хокинговское излучение. Об их присутствии узнают по косвенным данным, в основном по гравитационному взаимодействию с другими близлежащими телами. В 1964 году прибор, запущенный на ракете, зарегистрировал исключительно сильный рентгеновский источник в созвездии Лебедя, получивший название Лебедь X-1. Лебедь, по-латыни *Scygnus*, летит вдоль Млечного Пути, и это существенно, поскольку Лебедь X-1 лежит в самой гуще нашей Галактики и потому виден нам именно на Млечном Пути.

В 1972 году Чарльз Болтон, Луиза Вебстер и Пол Мердин свели воедино наблюдения оптических и радиотелескопов, чтобы показать, что Лебедь X-1 представляет собой двойной объект. Один компонент (тот, что излучает видимый свет) — это голубой сверхгигант HDE

226868. Второй, регистрируемый только по радиоизлучению, примерно в 15 раз массивнее Солнца, но настолько компактен, что не может быть звездой ни одного из обычных типов. По оценкам, его масса превосходит предел Толмана — Оппенгеймера — Волкова, так что нейтронной звездой он тоже не может быть. Приведенные данные сделали этот объект первым серьезным кандидатом на роль черной дыры. Однако голубой сверхгигант в паре так массивен, что сложно точно оценить массу второго компонента. В 1975 году Торн и Хокинг заключили по этому поводу пари: Торн утверждал, что это черная дыра, а Хокинг считал, что нет. После дополнительных наблюдений в 1990 году Хокинг признал поражение и выплатил проигрыш, хотя статус объекта окончательно не подтвержден до сих пор.

Имеются и более многообещающие рентгеновские двойные объекты с менее массивной обычной составляющей. Лучший из них — V404 Лебедя, открытый в 1989 году; сегодня известно, что находится он в 7800 световых годах от нас. Здесь обычный компонент — звезда чуть меньше Солнца, а компактный компонент имеет массу около 12 солнечных, то есть выше предела Толмана — Оппенгеймера — Волкова. В этом случае есть и другие свидетельства, так что сегодня считается общепризнанным, что второй компонент здесь — черная дыра. Два тела обращаются вокруг общего центра масс каждые 6,5 суток. Гравитация черной дыры деформирует звезду и придает ей яйцевидную форму, поглощая одновременно ее вещество, перетекающее в черную дыру устойчивым потоком. В 2015 году V404 начала испускать короткие вспышки света и интенсивного рентгеновского излучения; известно, что такие же явления наблюдались в 1938, 1956 и 1989 годах. Считается, что причиной их является вещество обычной звезды, которое накапливается вокруг черной дыры и всасывается внутрь, когда его масса превышает некую критическую величину.

Рентгеновское излучение помогает находить и другие черные дыры. Выпадающий на черную дыру газ образует тонкий диск, называемый аккреционным диском; затем этот газ нагревается трением по мере того, как момент импульса передается по диску наружу. Газ может разогреться настолько, что начинает излучать рентгеновские лучи высоких энергий, и до 40% его может превратиться в излучение. Нередко энергия уносится прочь в виде громадных струй, направленных под прямым углом к аккреционному диску.

Недавно сделано поразительное открытие: у большинства достаточно крупных галактик в центре располагается гигантская черная дыра массой от 100 000 до миллиардов солнечных. Не исключено, что именно эти сверхмассивные черные дыры организуют вещество в галактики. В нашей Галактике такая дыра имеется — с ней связан радиоисточник Стрелец А\*. В 1971 году Дональд Линден-Белл и Мартин Рис прозорливо предположили, что этот объект может оказаться сверхмассивной черной дырой. В 2005-м выяснилось, что M31 — галактика Андромеды — имеет центральную черную дыру с массой 110–230 миллионов солнечных. В другой близлежащей галактике, M87, тоже имеется черная дыра, масса которой составляет 6,4 миллиарда солнечных. А в отдаленной эллиптической радиогалактике 0402+379 имеются две сверхмассивные черные дыры, которые обращаются вокруг друг друга, подобно звездам в гигантской двойной системе, на расстоянии 24 световых лет. Один оборот у них занимает 150 000 лет.

\*\*\*

Большинство астрономов признают, что подобные наблюдения свидетельствуют о существовании черных дыр в традиционном релятивистском смысле; тем не менее убедительных доказательств того, что принятая интерпретация верна, у нас нет. Все наши доказательства — в лучшем случае косвенные и основаны на современных теориях фундаментальной физики, хотя мы и знаем, что теория относительности и квантовая механика плохо уживаются между собой, особенно когда, как в данном случае, нам необходимо привлекать одновременно то и другое. Отдельные вольнодумцы-космологи начинают сомневаться, действительно ли то, что мы видим, — это черные дыры; может быть, это что-то другое, что выглядит примерно так же. Они задумываются также о том, не пора ли нам заново обдумать теоретические представления о черных дырах.

По мнению Самира Матура, вариант «Интерстеллар» не работает. Невозможно упасть в черную дыру. Мы уже видели, что, вопреки первоначальным представлениям, черные дыры способны излучать по квантовым причинам. Это хокингское излучение, в котором одна частица из неустойчивой виртуальной пары частица/античастица падает в черную дыру, а другая

улетает прочь. Это приводит нас к информационному парадоксу черной дыры: информация, как и энергия, сохраняется и потому не может навсегда уйти из Вселенной. Матур разрешает этот парадокс, предлагая другой взгляд на черную дыру: «пушистый шар», к которому можно прилипнуть, но в который невозможно проникнуть.

В этой теории ваше столкновение с черной дырой не заканчивается падением в нее. Вместо этого ваша информация распределяется тонким слоем по горизонту событий, и вы превращаетесь в голограмму. Идея не новая, но нынешний ее вариант допускает, что голограмма — это несовершенная копия упавшего объекта. Тут есть внутреннее противоречие, отчасти потому, что та же логика, кажется, наглядно показывает, что горизонт событий — весьма энергетически насыщенный барьер, файервол, — и все, что на него попадает, попросту поджарится. «Пушистый шар» или файервол? Вопрос чисто схоластический. Вполне возможно, что и то и другое лишь артефакты неподходяще выбранной системы координат, подобно дискредитированному мнению о том, что горизонт событий останавливает время. С другой стороны, невозможно различить то, что видит внешний наблюдатель, и то, что видит наблюдатель, упавший внутрь, если внутрь ничего упасть не может.

В 2002 году Эмиль Моттола и Павел Мазур подвергли сомнению распространенное представление о коллапсирующих звездах. Они предположили, что такие звезды, вместо того чтобы становиться черными дырами, возможно, превращаются в гравастары — гипотетические странные пузыри очень плотного вещества. Снаружи гравастар, по идее, должен очень походить на традиционную черную дыру. Но то, что мы привыкли называть горизонтом событий, представляет у него холодную плотную оболочку, внутри которой пространство обладает упругостью. Эта гипотеза пока очень спорна, в ней не разрешены кое-какие тонкие вопросы — такие, к примеру, как механизм образования подобных объектов, — но притом необычайно интересна.

Источником данной теории стал пересмотр релятивистского сценария для черной дыры в свете квантовой механики. Обычно на эти эффекты не обращают внимания, но в результате возникают странные аномалии. Информационное содержание черной дыры, к примеру, намного больше, чем информационное содержание коллапсировавшей звезды, но информация-то должна сохраняться. Опять же фотон, падающий в черную дыру, к моменту встречи с центральной сингулярностью должен приобрести бесконечную энергию.

Моттола и Мазур, столкнувшись с этими проблемами, заинтересовались, нельзя ли разрешить их при помощи правильного квантового подхода. Когда коллапсирующая звезда приближается к образованию горизонта событий, она создает мощнейшее гравитационное поле. Это поле искажает квантовые флуктуации пространства-времени и порождает другой тип квантового состояния, схожий с гигантским «суператомом» (специальный термин: конденсат Бозе — Эйнштейна). Это скопление идентичных атомов, находящихся в одном и том же квантовом состоянии, при температуре, близкой к абсолютному нулю. Горизонт событий становится тогда тонкой оболочкой гравитационной энергии, похожей на ударную волну в пространстве-времени. Эта оболочка оказывает отрицательное (то есть направленное наружу) давление, так что вещество, упавшее внутрь ее, развернется и поднимется обратно к оболочке. Однако вещество снаружи будет по-прежнему всасываться внутрь.

С математической точки зрения гравастары имеют смысл: это стабильные решения эйнштейновских уравнений поля. Они помогают обойти информационный парадокс. Физически они заметно отличаются от черных дыр, хотя снаружи и выглядят одинаково: как внешняя метрика Шварцшильда. Предположим, что коллапсирует звезда массой 50 солнечных. В традиционном варианте получается черная дыра 300 километров в поперечнике, которая будет испускать хоккингское излучение. По альтернативной теории получается гравастар того же размера, но его оболочка имеет толщину всего 10–35 метра, температура составляет 10 миллиардных долей кельвина, и он не излучает вообще ничего. (Холли это понравилось бы.)

Гравастары являются возможным объяснением еще одного загадочного явления: гамма-барстеров. Время от времени небо «освещается» вспышкой высокоэнергетических гамма-лучей. Обычная теория состоит в том, что эти объекты представляют собой сталкивающиеся нейтронные звезды или черные дыры, формирующиеся во время взрыва сверхновой. Другая возможность — рождение гравастара.

Еще более гипотетически, внутренность гравастара с масштабом в нашу Вселенную тоже испытывала бы отрицательное давление, которое разгоняло бы вещество в направлении горизонта событий, то есть от центра. Расчет показывает, что этот разгон примерно соответствует ускоренному расширению Вселенной, которое обычно относят на счет темной энергии. Может быть, наша Вселенная на самом деле представляет собой внутренность громадного гравастара?

Среди предсказаний Эйнштейна, сделанных более столетия назад, было существование гравитационных волн, порождающих в пространстве-времени рябь, как на поверхности пруда. Если два массивных тела, таких как черные дыры, стремительно носятся друг вокруг друга, они производят возмущения в космическом пруду и порождают заметную рябь. В феврале 2016 года ученые из программы обсерватории гравитационных волн LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) объявили об обнаружении гравитационных волн, вызванных слиянием двух черных дыр. Инструменты LIGO представляют собой пару четырехкилометровых труб, выставленных под прямым углом в форме буквы L. Лазерные лучи ходят вдоль труб, многократно отражаясь, и интерферируют друг с другом в месте перегиба L. Если проходит гравитационная волна, длины труб чуть меняются, и это влияет на интерференционную картину. Установка может зарегистрировать сдвиг на одну тысячную размера протона.

Сигнал, зарегистрированный LIGO, соответствует релятивистскому предсказанию для спирального сближения и столкновения между двумя черными дырами с массами 29 и 36 масс Солнца. Этот результат открывает новую эру в астрономии: LIGO — первый успешный гравископ, наблюдающий космос посредством гравитации, а не света.

Это замечательное гравитационное открытие не дает никакой информации о наиболее спорных квантовых свойствах, отличающих традиционные черные дыры от их гипотетических альтернатив, таких как «пушистый шар», файервол или гравастар. Зато его потомки, вынесенные в космос, смогут увидеть не только столкновения черных дыр, но и менее яростные слияния нейтронных звезд; по идее, они должны помочь нам разгадать эти загадки. Между тем LIGO выявил новую загадку: короткий всплеск гамма-излучения, связанный, судя по всему, с зарегистрированной им гравитационной волной. Существующие теории слияния черных дыр этого не предсказывают[75].

Мы уже привыкли к существованию черных дыр, но они обитают в царстве, где перекрываются и сталкиваются теория относительности и квантовая теория. Мы попросту не знаем, какой физикой там следует пользоваться, поэтому космологи, как могут, управляют с тем, что есть под рукой. Последнее слово в вопросе черных дыр еще не сказано, и нет причин полагать, что наши нынешние представления о них полны или верны.



## Клубки и войды

Более того, небо должно быть сферой, ибо это единственная форма, достойная его сути, поскольку первейшая в природе.

Аристотель. «О небе»

### КАК ВЫГЛЯДИТ ВСЕЛЕННАЯ? НАСКОЛЬКО ОНА ВЕЛИКА? КАКУЮ ФОРМУ ИМЕЕТ?

Об ответе на первый вопрос нам кое-что известно, и этот ответ совсем не похож на то, чего первоначально ожидали от Вселенной астрономы и физики. На самом крупном из доступных нашему наблюдению масштабов Вселенная похожа на пену в тазике, где развели воду с моющим средством. Пузыри в этой пене — это гигантские пустоты, войды, не содержащие почти

никакого вещества. Мыльные пленки вокруг пузырьков — те места, где скапливаются звезды и галактики.

Как ни печально, но предпочитаемая нами математическая модель пространственной структуры Вселенной предполагает, что вещество в ней распределено равномерно. Космологи утешают себя тем, что на еще более крупных масштабах отдельные пузыри становятся неразличимыми и пена кажется довольно однородной, но мы не знаем, действительно ли вещество во Вселенной ведет себя именно так. До сих пор всякий раз, когда мы начинали рассматривать Вселенную в более крупном масштабе, чем прежде, мы обнаруживали в ней еще большие сгустки и пустоты. Возможно, Вселенная в принципе неоднородна. Возможно, она представляет собой фрактал — объект, имеющий детальную структуру во всех масштабах.

По второму вопросу — о размере Вселенной — у нас тоже есть кое-какие соображения. Звезды — это не точки на полусферической чаше, которая возвышается над Землей, как считали некоторые древние цивилизации и в чем уверяет, кажется, книга «Бытие». Это дверь во Вселенную настолько огромную, что она кажется бесконечной. Более того, она может оказаться бесконечной на самом деле. Многие космологи именно так и думают, но трудно представить себе, каким способом можно было бы научно проверить это утверждение. У нас есть достаточно полное представление о том, насколько велика наблюдаемая Вселенная, но дальше — как можно хотя бы подступиться к этому вопросу?

Третий вопрос — о форме — вызывает еще больше споров и сомнений. В настоящий момент согласия по этому вопросу нет, хотя чаще всего ученые склоняются к самому скучному варианту — сфере. Давно существует тенденция считать Вселенную сферической — внутренней частью громадного шара, состоящего из пространства и вещества. Но в разные моменты недавнего прошлого считалось также, что Вселенная по форме представляет собой спираль, бублик, продолговатый мяч для регби или неевклидову геометрическую фигуру, известную как рог Пикара. Эта фигура может быть как плоской, так и с кривизной. Если так, то ее кривизна может быть положительной или отрицательной, а может меняться от одного места к другому. Фигура вселенной может быть конечной или бесконечной, односвязной или полной отверстий — или вообще несвязной, когда она распадается на отдельные области, в принципе не взаимодействующие между собой.

\*\*\*

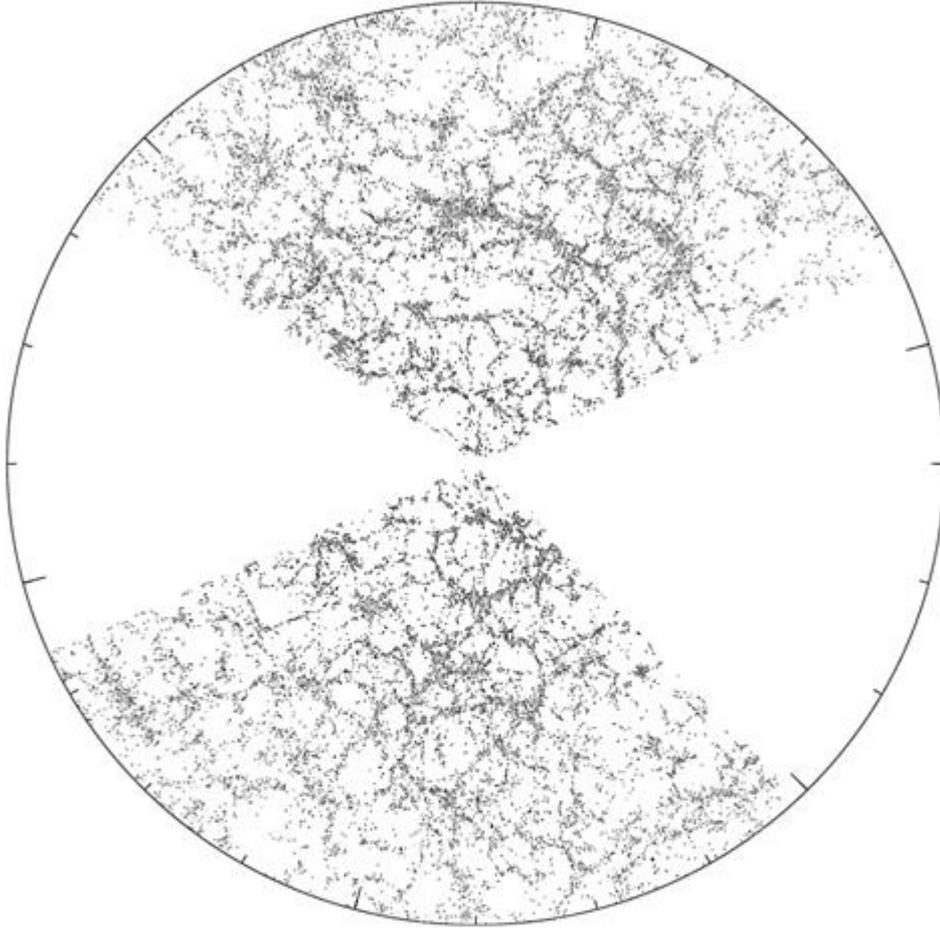
Большую часть Вселенной занимает пустое пространство, но немало в ней также и вещества — это порядка 200 миллиардов галактик с 200–400 миллиардов звезд в каждой [76]. Важно, как распределено это вещество: сколько его содержится в каждой отдельно взятой области, поскольку Эйнштейновы уравнения поля связывают геометрию пространства-времени с распределением вещества.

Вещество во Вселенной совершенно точно не размазано равномерно на тех масштабах, которые мы наблюдаем, но это открытие совершено лишь несколько десятков лет назад. До этого все сходились во мнении, что выше масштаба галактик общее распределение вещества во Вселенной кажется равномерным — примерно как газон выглядит гладким и однородно зеленым, если вы не видите на нем отдельные травинки. Но на самом деле наша Вселенная больше похожа на газон с большими грязными прогалинами и отдельными участками клевера, что порождает новую неоднородную структуру на более крупном масштабе. А если вы пытаетесь сгладить эту неоднородность еще более широким взглядом, газон вообще исчезает и на его месте появляется автостоянка при супермаркете. Или, выражаясь более прозаически, в космическом распределении вещества прослеживается явная тенденция к комковатости на самых разных масштабах.

Если говорить о ближайшей к нам области пространства, то большая часть вещества в Солнечной системе слиплась воедино и образовала звезду — Солнце. Есть, конечно, и более мелкие комки вещества — планеты, и еще более мелкие — луны, астероиды, объекты пояса Койпера... плюс всевозможные камни, камешки, пылинки, молекулы, атомы, протоны. Двинувшись в другом направлении — в сторону более крупных масштабов, мы обнаруживаем другие типы комковатости. Несколько звезд могут быть гравитационно связаны между собой и образовывать двойную или кратную звездную систему. Рассеянные скопления — это группы из тысячи или около того звезд, сформировавшихся примерно в одно время из одного и того же

коллапсирующего молекулярного облака. Рассеянные скопления встречаются в галактиках; в нашей Галактике их известно около 1100. Шаровые скопления состоят из сотен тысяч старых звезд, собранных в громадный шар с нечеткими границами; как правило, такие скопления выглядят как спутники, обращающиеся вокруг галактик и играют роль их спутников. У нашей Галактики известно 152 подобных спутника, а всего их у нее, возможно, около 180.

Галактики представляют собой поразительные примеры клочковатости Вселенной: это кляксы, диски и спирали, содержащие от 1000 до 100 триллионов звезд, с диаметрами от 3000 до 300 000 световых лет. Но галактики распределены в пространстве тоже неравномерно. Как правило, они существуют тесно связанными группами примерно по 50 объектов или более многочисленными (до тысячи или около того) в виде скоплений галактик. Скопления, в свою очередь, собираются в сверхскопления, которые образуют невообразимо огромные полотна и волокна с колоссальными пустотами (войдами) между ними.



Галактики на двух срезах Слоуновского цифрового обзора неба; видны волокна и войды. Земля помещена в центр.

Каждая точка здесь — это галактика, а радиус круга составляет 2 млрд световых лет

Мы, к примеру, живем в Галактике, которая входит в Местную группу галактик вместе с Галактикой Андромеды (M31) и еще 52 галактиками, многие из которых являются карликовыми галактиками вроде Магеллановых Облаков и выступают в роли спутников двух доминантных спиралей: Андромеды и нашей Галактики. Примерно десять карликовых галактик не связаны гравитационно с остальными. Еще одна крупная галактика в нашей местной группе — Галактика Треугольника, которая, возможно, тоже является спутником Андромеды. Вся Местная группа целиком имеет размер в поперечнике около 10 млн световых лет. Сама она входит составной частью в сверхскопление Ланиакея, которое удалось идентифицировать в 2014 году при попытке определить сверхскопления математически, путем анализа скоростей галактик друг

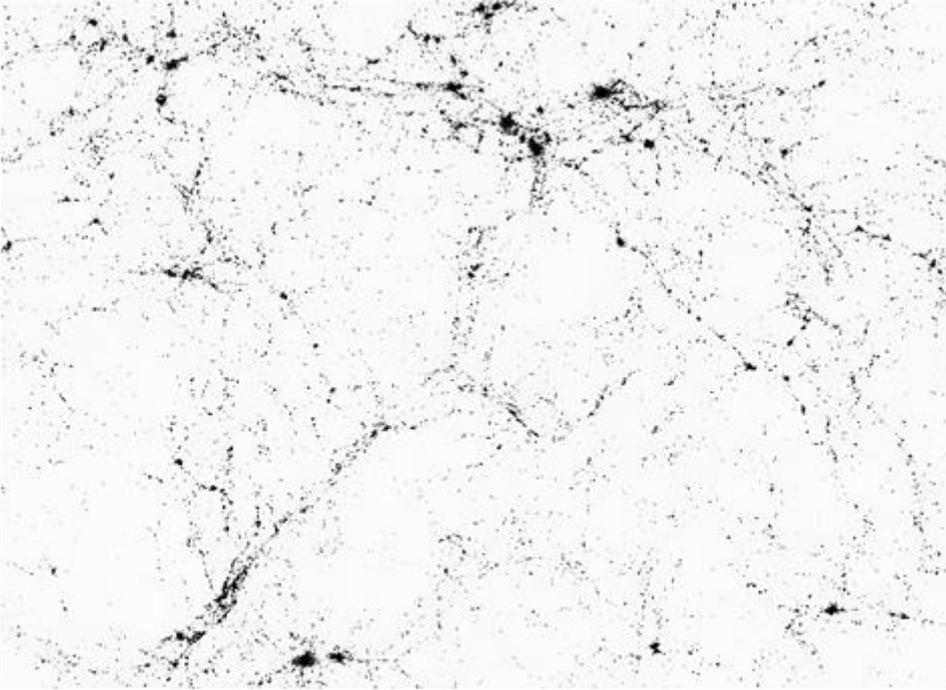
относительно друга. Сверхскопление Ланиакея насчитывает 520 млн световых лет в поперечнике и содержит 100 000 галактик.

По мере того как астрономы обнаруживают новые, все более крупные скопления и пустоты, космологам приходится раз за разом пересматривать масштаб, на котором, по их мнению, Вселенная должна быть однородной. Нынешняя точка зрения состоит в том, что сгустки и войды по размеру не должны превышать одного миллиарда световых лет, а в большинстве своем должны быть меньше. Поэтому некоторые недавние наблюдения внушают беспокойство. Группа под руководством Андраша Ковача обнаружила войд два миллиарда световых лет в поперечнике, а Роджер Клоувз с сотрудниками нашли когерентную космологическую структуру вдвое большего размера — Громадную группу квазаров, содержащую 73 объекта. Эти образования соответственно в два и в четыре раза больше максимального ожидаемого размера для единообразной структуры. Группа Лайоша Баласа наблюдала кольцо гамма-барстеров диаметром 5,6 миллиарда световых лет, что еще больше.

Эти открытия, и в еще больше степени даваемые им объяснения, являются предметом дискуссии. Некоторые оспаривают сам результат наблюдений. Другие утверждают, что несколько необычно крупных структур не означают еще, что Вселенная неоднородна «в среднем». Это верно, но не особенно убедительно, поскольку эти структуры просто не вписываются в стандартную математическую модель множества, однородного не только в среднем, но и всюду — за исключением отклонений размером менее миллиарда световых лет. Все предыдущие утверждения об однородности на меньших масштабах были разбиты в результате проведения новых, более широких исследований. Похоже, история повторяется.

Кстати говоря, распознавать скопления — задача нетривиальная. Что именно считается скоплением или сверхскоплением? Человеческий глаз от природы умеет видеть уплотнения, но составляющие их объекты необязательно связаны значимыми гравитационными силами. При анализе используется математический метод, известный как фильтр Винера — хитроумный тип аппроксимации по методу наименьших квадратов, способный отделить сигнал от шума. В данном случае он модифицирован для разделения скоростей галактик на составляющие, одна из которых обусловлена расширением Вселенной и находится одинаково для всех галактик, а вторая отражает их индивидуальное «собственное движение» относительно этого расширения. Галактики одной и той же общей области, имеющие сходное собственное движение, принадлежат к одному сверхскоплению. Космос подобен жидкости, в которой звезды играют роль атомов, галактики — вихрей, а сверхскопления — более крупномасштабных структур. При помощи фильтра Винера можно выявить картину течения этой жидкости.

Космологи смоделировали, как вещество во Вселенной образует сгустки под действием гравитации. Судя по всему, общая картина тонких волокон и стенок вещества, разделенных гигантскими войдами, представляет естественную структуру большой системы тел, взаимодействующих посредством гравитации. Гораздо труднее сделать так, чтобы статистические данные о волокнах и стенках соответствовали наблюдениям, или получить реалистичное распределение вещества в пределах традиционной временной шкалы в 13,8 миллиарда лет.



**Компьютерная модель области 50 млн световых лет в поперечнике  
для одного из возможных вариантов распределения видимого  
вещества во Вселенной**

Обычный способ обойти эту проблему — постулировать существование таинственных частиц, получивших название скрытой массы или темной материи. По существу, такое допущение усиливает действие гравитации, так что крупные структуры могут развиваться быстрее, но оно не полностью удовлетворяет ученых (см. главу 18). Альтернативой, на которую обычно не обращают внимания, является возможность того, что наша Вселенная намного старше, чем мы привыкли думать. Третий вариант — то, что мы просто не нашли пока верной модели.

\*\*\*

Следующий вопрос — размер Вселенной.

По мере того как астрономы зондировали Вселенную при помощи все более мощных телескопов, они не просто получали возможность видеть дальше; они фактически смотрели назад во времени. Поскольку свет имеет конечную скорость, на путешествие из одного места в другое ему требуется определенное время. Как известно, световой год определяется как расстояние, которое свет проходит за год.

Свет движется очень быстро, поэтому световой год — очень большое расстояние: 9,46 триллиона километров. До ближайшей звезды от нас 4,24 световых года, так что когда кто-нибудь рассматривает эту звезду в телескоп, он видит, как она выглядела четыре с четвертью года назад. В принципе вчера она могла взорваться (это вряд ли, имейте в виду: она находится не на той стадии развития), но если бы она это сделала, мы не узнали бы об этом еще четыре с четвертью года[77].

В настоящее время радиус наблюдаемой Вселенной считается близким к 45,7 миллиарда световых лет. Зная это, мы могли бы наивно вообразить, что имеем возможность заглянуть на 45,7 миллиарда лет в прошлое. Однако это не так — по двум причинам. Во-первых, когда мы говорим о «наблюдаемой Вселенной», то имеем в виду то, что можно было бы увидеть в принципе, а не то, что мы видим на практике. Во-вторых, в настоящее время считается, что возраст Вселенной составляет всего 13,8 млрд лет. Недостающие 31,9 миллиарда лет относят на счет расширения Вселенной, но к этому я еще вернусь в следующей главе.

Это чертовски большая Вселенная, к тому же речь идет только о ее наблюдаемой части. Там, дальше, может быть еще сколько угодно. К этому я тоже еще вернусь. Во всяком случае мы

можем дать информированный ответ на вопрос «Насколько велика Вселенная?», если разумным образом его интерпретируем.

\*\*\*

В противовес предыдущему на вопрос «Какой формы Вселенная?» ответить намного труднее, он вызывает много споров.

Прежде чем Эйнштейн разобрался, как включить гравитацию в его релятивистскую теорию пространства-времени, почти все были уверены, что геометрия пространства должна быть евклидовой. Одной из причин было то, что значительную часть времени между тем, когда Евклид написал свои «Начала», и тем, когда Эйнштейн осуществил радикальный пересмотр физики, евклидова геометрия считалась единственно возможной. Это убеждение было подорвано в XIX веке, когда математики открыли непротиворечивые неевклидовы геометрии, однако, несмотря на то, что внутри математики они нашли себе интересные применения, почти никто не ожидал, что они найдут себе применение и в реальном мире. Исключением из общего правила был Гаусс, который открыл неевклидову геометрию, но не стал ее обнародовать, потому что сомневался, что кто-нибудь ее примет; к тому же он всегда предпочитал избегать невежественной критики. Разумеется, геометрия на поверхности сферы не была секретом: навигаторы и астрономы использовали в своей работе хитроумную теорию сферической тригонометрии. Но в этом не было ничего особенного, поскольку сфера представляла собой всего лишь особую поверхность в обычном евклидовом пространстве. Она не была самим пространством.

Гауссу подумалось, что если геометрия не обязательно должна быть евклидовой, то и реальное окружающее нас пространство тоже не обязано быть евклидовым. Один из способов различить варианты геометрии состоит в том, чтобы сложить углы треугольника. В евклидовой геометрии вы всегда получите  $180^\circ$ . В одном из типов неевклидовой геометрии — в эллиптическом ее варианте — эта сумма всегда превышает  $180^\circ$ ; в геометрии другого типа — гиперболической — она всегда меньше этой величины. Точное значение суммы при этом зависит от площади треугольника. Гаусс попытался выяснить истинную форму пространства, измерив треугольник, образованный тремя горными пиками, но не получил убедительного результата. Учитывая, что сделал с математикой Эйнштейн, опираясь на все эти открытия, можно предположить, что на его измерениях сказалось гравитационное притяжение этих гор Гаусса.

Гаусс начал размышлять о количественной оценке кривизны поверхности: можно ли измерить, насколько сильно она изгибается. До того момента поверхность традиционно рассматривалась как граница объемного объекта в евклидовом пространстве. Все не так, сказал Гаусс. Объемный объект не нужен: поверхность может существовать сама по себе. В окружающем евклидовом пространстве, кстати говоря, тоже нет необходимости. Нужно лишь нечто, что определяло бы поверхность, и на его взгляд это нечто — правило для определения расстояния, метрика. Математически метрика — это формула расстояния между любыми двумя точками, очень близкими одна к другой. Зная метрику, можно определить расстояние между любыми двумя точками. Для этого нужно протянуть между ними цепочку из очень близких соседей, определить при помощи формулы, насколько они близки друг другу, сложить все эти маленькие расстояния, а затем выбрать такую цепочку соседей, при которой результат получится минимально возможным. Эта цепочка образует так называемую геодезическую кривую, которая представляет собой кратчайшее расстояние между этими двумя точками. Эта идея привела Гаусса к элегантной, хотя и сложной, формуле для кривизны. Интересно, но в этой формуле никак не задействуется окружающее пространство. Она имеет дело только с поверхностью. Кривизна евклидова пространства равна нулю: оно плоское.

Это натолкнуло на радикальную идею: пространство может быть изогнутым и при этом не загибаться вокруг чего-то. К примеру, сфера, что очевидно, изогнута вокруг объемного шара, поверхностью которого является. Чтобы получить цилиндр, вы берете лист бумаги и сворачиваете по кругу, так что цилиндрическая поверхность изогнута вокруг объемного цилиндра, который она ограничивает. Но Гаусс отказался от такого устаревшего мышления. Он понял, что можно наблюдать кривизну поверхности, не погружая ее в евклидово пространство.

Ему нравилось объяснять это на примере муравья, живущего на поверхности и не способного покинуть ее ни для того, чтобы проникнуть внутрь, ни для того, чтобы подняться в пространство.

Все, что знает муравей, — это поверхность. Даже свет заперт на поверхности, он движется вдоль геодезических кривых, — и муравей не видит, что его аналог пространства — его мир — изогнут. Однако он может догадаться о его кривизне, если проведет триангуляционную съемку. Крохотные треугольнички расскажут ему о метрике его Вселенной, а затем он сможет применить формулу Гаусса. Поползав немного по своей поверхности и поизмеряв расстояния, он сможет заключить, что его вселенная искривлена.

Такое представление о кривизне отличается в некоторых отношениях от обычного представления о ней. К примеру, скатанная в трубку газета не искривлена, хотя и выглядит как цилиндр. Чтобы понять почему, взгляните на буквы в заголовке. Мы видим, что они искривлены, но, если говорить о них по отношению к бумаге, их форма остается неизменной. Ничто не растягивается, ничто не сдвигается. Муравей не заметил бы никаких отличий на небольших участках газеты. Если говорить о метрике, газета по-прежнему плоская. На небольших участках она обладает той же геометрией, что характерна для плоскости. Так, углы небольшого треугольника дадут в сумме  $180^\circ$ , если вы измерите их в пределах бумаги. Идеальным инструментом для этого может послужить несжимаемый гибкий транспортир.

Плоская метрика имеет смысл — если, конечно, к ней привыкнуть, — потому что именно благодаря ей вы можете скатать газету в цилиндр. Все расстояния и углы, измеренные в пределах бумаги, останутся прежними. Обитающий на газете муравей не в состоянии локально отличить скатанную в цилиндр газету от плоского листа.

Другое дело — глобальная, или общая, форма. У цилиндра не такие геодезические линии, как у плоскости. Все геодезические линии плоскости представляют собой прямые, которые уходят в бесконечность и никогда не замыкаются. На цилиндре некоторые геодезические линии могут быть замкнутыми, они обходят цилиндр вокруг и возвращаются в ту же начальную точку. Представьте себе резинку, которой можно обхватить свернутую в рулон газету. Эта резиновая полоска образует замкнутую геодезическую кривую. Такого рода глобальная разница в форме относится к общей топологии — к тому, как кусочки поверхности складываются вместе. А метрика говорит нам только о кусочках.

Древние цивилизации находились, по существу, в положении того муравья. Люди тогда не могли подняться в воздух на воздушном шаре или аэроплане, чтобы увидеть сверху форму Земли. Но они могли провести измерения и попробовать вывести из них размеры и топологию. У них, в отличие от муравья, были и кое-какие внешние помощники: Солнце, Луна и звезды. Но когда речь заходит о форме всей Вселенной, мы оказываемся в точности в положении муравья. Чтобы определить форму Вселенной изнутри, нам приходится использовать аналогии с геометрическими упражнениями муравья.

С точки зрения муравья, поверхность имеет два измерения. Это значит, что для составления карты любого участка местности достаточно двух координат. Если не брать во внимание небольшие изменения высоты, земным навигаторам достаточно только широты и долготы, чтобы узнать, где они находятся на земной поверхности. У Гаусса был блестящий ученик по имени Бернхард Риман, и он — с подачи наставника — решил обобщить формулу Гаусса для кривизны на «поверхности» с произвольным числом измерений. Поскольку на самом деле это уже не поверхности, для их обозначения Риману потребовался новый термин, и он выбрал немецкое слово *Mannigfaltigkeit*, что переводится как «многообразие» в смысле множества координат.

Другие математики, среди них несколько итальянцев, заразились многомерными поверхностями и создали новую область математики: дифференциальную геометрию. Именно им принадлежит большая часть базовых идей о многомерных поверхностях. Но все эти идеи они рассматривали с чисто математической точки зрения. Никто не подозревал, что дифференциальная геометрия может быть применима к реальному пространству.

\*\*\*

Вдохновленный своим успехом с общей теорией относительности, Эйнштейн обратил внимание на главный ингредиент, которого по-прежнему недоставало, — гравитацию. Он работал над этой проблемой несколько лет, прежде чем до него дошло, что ключ к ней лежит в геометрии Римана. Он приложил немало усилий, чтобы разобраться в этой области математики

(в этом ему помог Марсель Гроссман, математик и друг, ставший также проводником и наставником).

Эйнштейн понял, что ему нужен неортодоксальный вариант Римановой геометрии. Теория относительности допускает некоторое смешение пространства и времени, несмотря на то что эти две концепции играют разные роли. В традиционном Римановом многообразии метрика определяется с использованием квадратного корня из выражения, которое принимает только положительные значения. Как в теореме Пифагора, формула метрики представляет собой (обобщенно и локально) сумму квадратов. В специальной теории относительности, в аналогичной формуле задействовано вычитание квадрата времени. Эйнштейн вынужден был допустить отрицательные слагаемые в метрике; в результате получилось то, что мы сегодня называем псевдоримановым многообразием. Конечным результатом героических усилий Эйнштейна стали уравнения поля, связывающие кривизну пространства-времени с распределением вещества. Вещество искривляет пространство-время; искривленное пространство изменяет геометрию геодезических кривых, по которым движется вещество.

Закон всемирного тяготения Ньютона не описывает движение тел непосредственно. Это уравнение, решения которого позволяют получить это описание. Аналогично уравнения Эйнштейна не описывают форму Вселенной непосредственно. Их для этого необходимо решить. Но это нелинейные уравнения с десятью переменными, так что сделать это непросто.

Римановы многообразия мы в какой-то степени способны понять интуитивно, но псевдоримановы многообразия — это настоящая головоломка, если не работаешь с ними регулярно. Одно полезное упрощение позволяет мне говорить без потери смысла о форме пространства — то есть о Римановом многообразии, а не о более скользкой концепции формы пространства-времени, которая выражается псевдоримановым многообразием.

В теории относительности нет осмысленной концепции одновременности. Разные наблюдатели могут наблюдать, как одни и те же события происходят в разном порядке. Я вижу, как кошка прыгает с подоконника за мгновение до того, как ваза с грохотом разбивается об пол; вы видите, что ваза падает раньше, чем прыгает кошка. Что произошло? Кошка разбила вазу или падающая ваза напугала кошку? (Мы все знаем, какой из этих вариантов более вероятен, но у кошки великолепный адвокат, и зовут его Альберт Эйнштейн.)

Однако, несмотря на то что абсолютная одновременность невозможна, для нее существует замена: сопутствующая система отсчета. Это хитрое название для системы отсчета, или координатной системы, представляющей Вселенную так, как она выглядит с точки зрения какого-то конкретного наблюдателя. Начните в той точке, где я нахожусь сейчас (это будет начало координат) и двигайтесь десять лет со скоростью света к близлежащей звезде. Определите систему отсчета так, чтобы эта звезда находилась в десяти световых годах от начала координат и на десять лет в будущее. Прделайте то же самое для всех направлений и времен: это будет моя сопутствующая система отсчета. Такая система есть у каждого из нас; просто может так получиться, что ваша система окажется несовместима с моей, если кто-то из нас начнет двигаться туда-сюда.

Если ваше положение в моей сопутствующей системе отсчета выглядит стационарным (то есть, попросту говоря, вы в ней не движетесь), то мы с вами — сопутствующие наблюдатели. Для нас пространственная форма Вселенной определяется одной и той же фиксированной пространственной системой координат. Ее форма и размер могут меняться со временем, но существует непротиворечивый способ описывать эти изменения. Физически сопутствующую систему можно отличить от других систем: Вселенная в ней должна выглядеть одинаково во всех направлениях. В системе, которая не является сопутствующей, на одних участках неба может наблюдаться систематическое красное смещение, а на других — синее. Вот почему я могу обоснованно говорить о том, что Вселенная представляет собой, скажем, расширяющуюся сферу. Всякий раз, когда я разделяю таким образом пространство и время, я говорю о сопутствующей системе отсчета.

\*\*\*

Теперь мы немного отвлечемся от нашей истории, чтобы заглянуть в царство мифологии. Физики и математики нашли решения уравнений поля, соответствующие классическим неевклидовым геометриям. Эти геометрии возникают в пространствах постоянной

положительной кривизны (эллиптические), нулевой кривизны (плоское евклидово) и постоянной отрицательной кривизны (гиперболические). Пока все нормально. Но это верное утверждение очень быстро трансформировалось в представление о том, что эти три варианта геометрии — единственные решения с постоянной кривизной для уравнений поля.

Подозреваю, что источник этой ошибки в том, что математики и астрономы слабо общались между собой. Математическая теорема гласит, что для любого фиксированного значения кривизны существует единственная метрика пространства-времени постоянной кривизны; на этом основании очень легко (даже слишком!) решить, что и геометрия тоже должна быть единственной. В конце концов разве метрика не определяет пространство?

Нет.

Гауссов муравей сделал бы ту же ошибку, если бы не знал разницы между плоскостью и цилиндром. Метрика у них одинаковая, а топология — разная. Метрика определяет только локальную, но не глобальную геометрию. Это же различие (и с этими же последствиями) действует и в общей теории относительности.

В качестве исключения и приятного оксюморона можно привести плоский тор. Тор имеет форму бублика с центральным отверстием, и его просто невозможно назвать плоским в обычном смысле этого слова. Тем не менее существует плоское (нулевой кривизны) многообразие с топологией бублика. Возьмем квадрат — он плоский — и концептуально склеим вместе противоположные его стороны. Квадрат для этого не нужно физически сгибать, достаточно объявить тождественными соответствующие точки на противоположных его сторонах, то есть добавить геометрическое правило, согласно которому эти точки представляют собой «одно и то же».

Такого рода отождествление часто используется в компьютерных играх, когда какой-нибудь инопланетный монстр уносится за границу экрана и тут же появляется с другой стороны. Программисты на своем жаргоне называют это «свернуть»: живо и наглядно, но не стоит воспринимать это буквально как указание к действию. Муравей прекрасно понял бы плоский тор: свертывание вертикальных граней превращает экран в цилиндр. Затем вы повторяете эту процедуру и соединяете концы цилиндра, получая при этом поверхность с топологией тора. Его метрика наследуется от квадрата, то есть поверхность остается плоской. У настоящего бублика другая метрика, поскольку его поверхность встроена в евклидово пространство.

Фокус с плоским тором можно проделать и с релятивистским пространством-временем, если воспользоваться упрощенной двумерной версией теории относительности Минковского. И бесконечная плоскость Минковского, и квадрат на этой плоскости с отождествленными противоположными сторонами представляют собой плоские варианты пространства-времени. Но топологически один из них — это плоскость, а другой — тор. Проделав ту же операцию с кубом, можно получить плоский трехмерный тор той же размерности, что и пространство.

Аналогичные конструкции возможны в эллиптических и гиперболических пространствах. Берется кусок пространства подходящей формы, его края склеиваются попарно — и получается многообразие той же метрики, но другой топологии. Многие из этих многообразий компактны, то есть имеют конечный размер, как сфера или тор. К концу XIX века математики открыли несколько конечных пространств постоянной кривизны. В 1900 году Шварцшильд привлек к их работе внимание космологов, определенно ссылаясь на трехмерный тор. Александр Фридман проделал то же самое для пространств отрицательной кривизны в 1924 году. В отличие от евклидова и гиперболического пространства эллиптическое пространство конечно, но тот же фокус можно проделать и там; получатся пространства постоянной положительной кривизны с разными топологиями. Тем не менее на протяжении 60 лет после 1930 года в астрономических текстах повторялся один и тот же миф о том, что существует всего три разновидности пространства постоянной кривизны — классические неевклидовы геометрии. Поэтому астрономы работали с этим ограниченным набором вариантов пространства-времени и были ошибочно уверены, что иных не существует.

Космологи, охотившиеся на более крупную дичь, обратили свои взоры к началу Вселенной, рассмотрели три классические геометрии постоянной кривизны и определили метрику Большого взрыва, рассказ о которой мы продолжим в следующей главе. Это стало таким откровением, что на долгое время форма пространства перестала представлять насущный вопрос. Все «знали», что

это сфера, потому что такова простейшая метрика для Большого взрыва. Однако в пользу такой формы почти нет наблюдательных данных.

Древние цивилизации считали Землю плоской, и, хотя они ошибались, у них были данные в пользу такой гипотезы: на взгляд человека, Земля действительно выглядела плоской. Если сегодня говорить о Вселенной, то мы знаем даже меньше, чем они знали о Земле. Но в воздухе носятся идеи, способные в принципе ослабить наше невежество.

\*\*\*

Если не сфера, то что?

В 2003 году специализированный аппарат NASA для изучения анизотропии микроволнового фона, названный после запуска именем Дэвида Уилкинсона (WMAP, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), занимался тем, что измерял пронизывающее все вокруг радиоизлучение, известное как реликтовое излучение, или космическое микроволновое фоновое излучение; полученные им результаты показаны на первом рисунке следующей главы. Статистический анализ флуктуаций интенсивности излучения, приходящего с разных направлений, помогает понять, как вещество в новорожденной Вселенной собиралось в сгустки. До запуска WMAP большинство космологов считало, что Вселенная бесконечна и, следовательно, должна допускать произвольно большие флуктуации. Но данные WMAP показали, что существует предел размера флуктуаций, что указывает на конечность Вселенной. Как выразился журнал Nature, «в ванне не увидишь прибора».

Американский математик Джеффри Уикс проанализировал статистику этих флуктуаций для многообразий с различными топологиями. Один из возможных вариантов дал результат, очень близкий к реальным данным, — и средства массовой информации поспешили объявить, что Вселенная имеет форму футбольного мяча (обычного, для европейского футбола). Это была неизбежная метафора для фигуры, которая восходила к работам Пуанкаре — пространства в форме додекаэдра. В начале XXI века футбольные мячи сшивались или склеивались из 12 пятиугольников и 20 шестиугольников, образующих то, что математики называют усеченным икосаэдром, то есть икосаэдр со срезанными углами. Икосаэдр — это правильный многогранник с 20 треугольными гранями, сходящимися по пять в каждой вершине. Додекаэдр, у которого имеется 12 пятиугольных граней, появляется на сцене потому, что центры граней икосаэдра образуют додекаэдр, так что оба многогранника обладают одинаковыми симметриями. Конечно, «футбольный мяч» больше нравится средствам массовой информации, хотя технически не является правильным.

Поверхность футбольного мяча — это двумерное многообразие. Пуанкаре был пионером алгебраической топологии, особенно трехмерной, и однажды он обнаружил, что ошибся. Чтобы доказать это (в отличие от политиков, математики делают подобные вещи), он придумал аналогичное трехмерное многообразие. Пуанкаре построил его, склеив вместе два тора, но позже было найдено более элегантное решение с использованием додекаэдра. Речь шла о хитроумном варианте плоского трехмерного тора, который изготавливается посредством концептуального склеивания (отождествления) противоположных граней куба. Если проделать то же самое с додекаэдром и к тому же перед склеиванием повернуть каждую грань, то получится трехмерное многообразие — додекаэдрическое пространство. Подобно плоскому 3-тору, оно не имеет границы: все, что проходит внутрь сквозь грань, тут же появляется из противоположной грани. Оно имеет положительную кривизну и конечный размер.

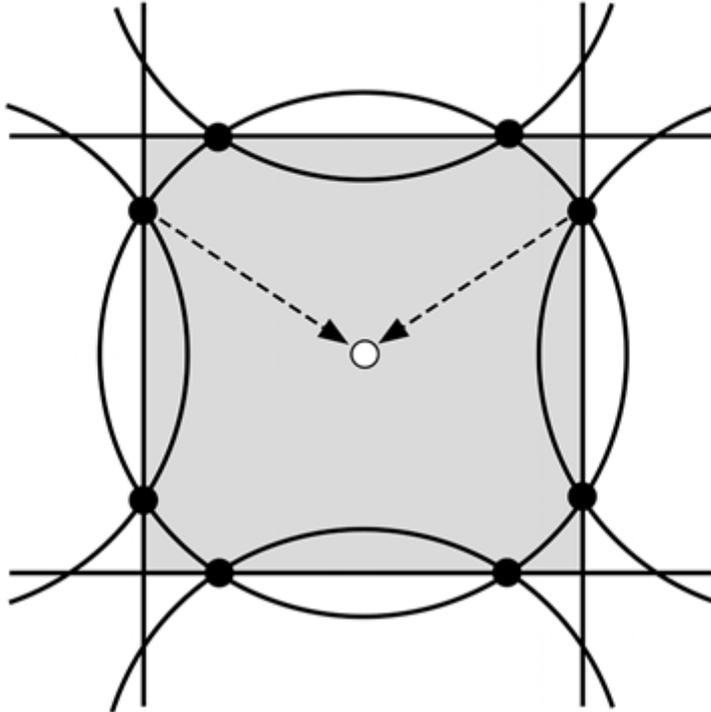
Уикс проработал статистические характеристики флуктуаций реликтового излучения для случая, когда Вселенная представляет собой додекаэдрическое пространство, и обнаружил прекрасное совпадение с данными WMAP. Группа ученых под руководством Жана-Пьера Люмине пришла к выводу, что Вселенная такой формы должна иметь размер около 30 миллиардов световых лет в поперечнике — совсем неплохо. Однако недавние наблюдения, похоже, опровергают эту теорию, внушая разочарование всем поклонникам Платона на планете.

Трудно понять, каким образом мы могли бы доказать бесконечность Вселенной, но если она конечна, не исключено, что мы сможем установить ее форму. В конечной Вселенной [78] должно существовать некоторое количество замкнутых геодезических кривых — кратчайших путей, образующих петли, как образует петлю резинка, надетая на скатанную газету. Световой луч, движущийся вдоль такой геодезической кривой, рано или поздно вернется в начальную точку.

Направьте туда мощный телескоп — и вы увидите собственный затылок. Только учтите, на это может понадобиться некоторое время — ровно столько, сколько требуется свету, чтобы обойти всю Вселенную, так что вам нужно будет постоять спокойно и запастись терпением. Кроме того, ваш затылок, когда вы его увидите, может оказаться перевернут вниз головой или зеркально отражен по отношению к оригиналу.

Серьезный математический анализ, учитывающий конечность скорости света, предсказывает, что в таких обстоятельствах в реликтовом излучении должны наблюдаться повторяющиеся закономерности, когда одни и те же флуктуации располагаются на небе вполне различными кругами. Это происходит потому, что фотоны реликтового излучения, доходящие до Земли сегодня, начинали свой путь примерно с одинаковых расстояний — они имеют начало на сфере, на «поверхности последнего рассеяния». Если Вселенная конечна, а эта сфера больше, чем Вселенная, то она сворачивается и пересекается сама с собой. Пересечением двух сфер является окружность, и каждая точка на такой окружности благодаря свертыванию посылает микроволны к Земле в двух разных направлениях.

Мы можем проиллюстрировать этот эффект для двумерного аналога, где геометрия проще. Если квадрат на рисунке достаточно велик, чтобы содержать круг, никакого пересечения за счет свертывания не возникает. Если же квадрат достаточно мал, чтобы круг обернулся дважды, геометрия пересечений окажется более сложной.



Самопересечения поверхности последнего рассеяния для плоского тора, показанного здесь в виде большой окружности. Остальные дуги окружностей — это ее копии, возникшие в результате свертывания. Тор — это заштрихованный квадрат с тождественными противоположными сторонами, а Земля — белая точка в центре.

Копии окружностей пересекаются в черных точках, которые тождественны в свернутых парах. Пунктирные стрелки показывают микроволны, приходящие к Земле из одной области пространства по двум различным направлениям

Для плоского трехмерного тора квадрат следует заменить на куб, окружности — на сферы, а точки превратятся в окружности на гранях куба, которые опять же следует отождествить попарно. Пунктирные линии становятся конусами. С Земли (в этом случае) мы наблюдаем в небе

пару особых окружностей, которые на самом деле представляют собой одну и ту же отдаленную окружность, видимую с двух этих направлений. Флуктуации реликтового излучения около этих двух окружностей должны быть почти идентичными, и это можно обнаружить при помощи статистических корреляций флуктуаций температуры фона: мы ожидаем увидеть одинаковую последовательность горячих и холодных участков вдоль каждой окружности, где «горячий» и «холодный» означают чуть более высокую или низкую температуру по сравнению со средней.

Из геометрии этих окружностей мы, в принципе, можем вывести топологию Вселенной и определить знак кривизны: положительна она, отрицательна или равна нулю. На практике пока все это не работает, хотя не известно почему — потому ли, что Вселенная не такова, как мы предполагаем, или потому, что она слишком велика, чтобы такие особые окружности возникали и были заметны.

Итак, какую же форму имеет Вселенная на самом деле?

Понятия не имею.



## Космическое яйцо

В самом начале не было ничего, а потом это самое ничто вдрызг взяло и рвануло.

Терри Пратчетт. «Дамы и господа»

При взгляде с нашей удобной, гостеприимной планеты, которая кишит жизнью и богата природными красотами, остальная Вселенная выглядит враждебной, далекой, суровой и, в общем-то, не слишком важной. Однако, если смотреть с окраины Солнечной системы, наша родная планета съезживается до единственного голубого пикселя[79] на цифровой фотографии — знаменитая голубая точка на последнем снимке, который в 1990 году сделал Voyager 1. Этот снимок не входил в научную программу аппарата, но астроном и мечтатель Карл Саган решил, что это была бы хорошая идея. Фотография стала социальным и психологическим символом. Зонд при этом находился от Земли примерно на расстоянии Плутона: по космическим меркам, это еще практически у нас на задворках. Но уже здесь наш чудесный мир съезжился до незначительного пятнышка. С ближайшей звезды даже камере получше всех тех, что у нас есть на данный момент, было бы трудно заметить наш родной мир. Если же смотреть с более далеких звезд, то нас будто и вовсе никогда не существовало — наше существование, а также существование Земли и Солнца никак не влияет на далеких братьев по разуму, и отсутствие нас во Вселенной тоже никак не повлияло бы на них. А если говорить о других галактиках, то даже наша родная Галактика становится крохотной и незначительной по космическим масштабам.

Подобные мысли учат смирению и показывают, насколько хрупка на самом деле наша планета. В то же время они заставляют проникнуться величием Вселенной. И, в более практической плоскости, задуматься о том, что можно там встретить и откуда все это появилось.

Несомненно, такие вопросы возникали и у доисторических людей. Можно с уверенностью сказать, что они возникали более 4000 лет назад у жителей Китая, Месопотамии и Египта, оставивших письменные свидетельства. Их ответы на эти вопросы свидетельствовали о богатом воображении, если считать работой воображения приписывание всего, что не понимаешь, невиданным божествам с самыми причудливыми телами и образом жизни, но в конечном итоге не несли никакой информации.

С течением столетий наука предложила собственные теории происхождения Вселенной. В среднем они были не такими увлекательными, как истории о черепахах, несущие на спинах наш мир, сражениях между богом в облике змеи и волшебной кошкой, вооруженной мечом, или о богах, которых разрезали на дюжину кусков и которые, будучи собранными вновь, оживали. Может оказаться, что современные научные теории не ближе к истине, чем те красивые и

увлекательные истории, ведь научные ответы всегда чем-то обусловлены и отбрасываются, если новые данные им противоречат. Одна из популярнейших практически во все периоды научной эры теорий невыносимо скучна, поскольку, если она верна, то ничего не происходит: Вселенная не имеет никакого происхождения, потому что существовала всегда. Мне, правда, кажется, что такой вариант не позволяет до конца разобраться с вопросом, поскольку необходимо объяснить еще, почему она всегда существовала. Ответ «просто существовала, и все» еще менее удовлетворителен, чем привлечение к этой истории какого-то змеинобога. Но многие думают иначе.

\*\*\*

Сегодня большинство космологов думают, что вся Вселенная — пространство, время и вещество — возникла около 13,8 миллиарда лет назад [80]. Крупинка пространства-времени возникла из ниоткуда и расширилась с необычайной скоростью. Через одну миллиардную долю секунды первоначальное неистовство улеглось достаточно, чтобы возникли фундаментальные частицы, такие как кварки и глюоны; еще через одну миллионную долю секунды эти частицы соединились, чтобы образовать более знакомые нам протоны и нейтроны. Потребовалось несколько минут, чтобы они сошлись вместе и образовали простые атомные ядра. Атомы — это ядра плюс электроны, и должно было пройти еще 380 000 лет, чтобы к уже существующей смеси добавились электроны и возникли атомы простейших элементов: водорода, гелия и дейтерия. Только после этого вещество начало образовывать сгущения под действием гравитации, и со временем появились звезды, планеты и галактики. Космологи рассчитали этот график с большой точностью и необычайными подробностями.

Этот сценарий и есть знаменитый Большой взрыв — такое название, с некоторым оттенком сарказма, пустил в оборот Фред Хойл. Он был убежденным сторонником самой популярной на тот момент теории — теории стационарной Вселенной, название которой говорит само за себя. Однако, невзирая на название, это вовсе не была Вселенная, в которой ничего не происходит. Дело просто в том, что ничто из происходящего в ней не вызывало каких-то фундаментальных перемен. Хойл считал, что Вселенная постепенно расширяется, приобретая новые объемы пространства, по мере того как новые частицы потихоньку появляются из ничего в пустотах между галактиками.

Надо сказать, что Большой взрыв космологи не просто извлекли из воздуха. Хаббл выявил из астрономических наблюдений простую математическую закономерность, благодаря которой подобное начало Вселенной стало казаться почти неизбежным. Это открытие стало неожиданным побочным результатом его работы по измерению расстояний до галактик, но идея восходит еще к Леметру и была высказана на несколько лет раньше. В начале XX века в космологии преобладали очень простые взгляды. Наша Галактика содержит все вещество во Вселенной; вне ее царит бесконечная пустота. Галактика не коллапсирует под собственным весом, потому что вращается, в результате чего вся конструкция стабильна. Когда Эйнштейн в 1915 году опубликовал общую теорию относительности, он быстро понял, что такая модель Вселенной не может быть стабильной. Под действием гравитации стационарная Вселенная непременно сколлапсирует, независимо от того, вращается она или нет. В его расчетах фигурировала сферически симметричная Вселенная, но интуитивно было понятно, что та же проблема ожидает любую стационарную релятивистскую Вселенную.

Эйнштейн искал выход и в 1917 году опубликовал новые результаты. Он добавил в свои уравнения поля дополнительный математический член — метрику, умноженную на постоянную  $\Lambda$  (заглавная греческая буква «лямбда»), позже получившую название космологической постоянной. Это слагаемое заставляет метрику расширяться, и при тщательной подгонке постоянной  $\Lambda$  это расширение в точности компенсирует гравитационный коллапс.

В 1927 году Леметр начал реализацию амбициозного проекта: определить при помощи уравнений Эйнштейна геометрию всей Вселенной. Воспользовавшись все тем же упрощающим предположением, что пространство-время сферически симметрично, он вывел явную формулу для этой гипотетической пространственно-временной геометрии. Разобравшись в смысле полученной формулы, Леметр обнаружил, что она предсказывает нечто весьма примечательное.

Вселенная расширяется [81].

В 1927 году по умолчанию считалось, что Вселенная всегда существовала примерно в нынешнем ее виде. Она просто была, она ничего не делала. В точности как стационарная Вселенная Эйнштейна. Но теперь Леметр утверждал на основании физической теории, которую многие по-прежнему считали несколько умозрительной, что она растет. Более того, она растет с постоянной скоростью: ее диаметр увеличивается пропорционально прошедшему времени. Леметр попытался оценить скорость расширения по данным астрономических наблюдений, но в то время эти данные были слишком рудиментарными, чтобы выглядеть убедительно.

Принять концепцию расширяющейся Вселенной, если прежде ты считал Вселенную вечной и неизменной, было непросто. Оказывается, что всего, что есть во Вселенной, должно каким-то загадочным образом становиться все больше и больше. Но откуда это все должно браться? Такой взгляд казался бессмысленным. Он показался бессмысленным даже Эйнштейну, который, если верить Леметру, сказал примерно следующее: «Ваши расчеты верны, но ваша физика отвратительна». Возможно, на реакции Эйнштейна отрицательно сказалось также то, что Леметр назвал свою теорию «Космическое яйцо, взорвавшееся в момент творения», тем более что сам он был священником и иезуитом. Вообще вся история слегка отдавала Библией. Однако Эйнштейн не отверг теорию Леметра с порога, а предложил тому рассмотреть более общие варианты расширяющегося пространства-времени, не прибегая заранее к сильному постулату сферической симметрии.

\*\*\*

Уже через несколько лет появились данные, подтвердившие гипотезу Леметра. В главе 11 мы видели, как расчетчица Хаббла Ливитт при составлении каталога блеска тысяч звезд заметила математическую закономерность на одном конкретном типе переменных звезд, известных как цефеиды. Оказалось, что собственный блеск, или светимость, таких звезд связан определенными математическими закономерностями с периодом изменения блеска. Это позволяет астрономам использовать цефеиды как эталонные источники света — ведь для такой звезды видимый блеск всегда можно сравнить с истинным блеском и определить таким образом расстояние до нее.

Поначалу применение этого метода ограничивалось лишь звездами нашей Галактики, поскольку телескопы тогда еще не умели различать отдельные звезды в других галактиках, а тем более выделять их спектры, по которым можно определить, не является ли данная звезда цефеидой. Но телескопы совершенствовались, и Хаббл поставил себе серьезную задачу: определить, насколько далеки от нас галактики. Как описывалось в главе 12, в 1924 году он воспользовался полученным Ливитт соотношением расстояние — блеск, чтобы оценить расстояние до Галактики Андромеды М31. Его ответ был 1 млн световых лет; современная оценка составляет 2,5 млн.

Ливитт удалось совершить небольшой шаг для женщины, но огромный скачок вверх по лестнице космических расстояний. Понимание закономерностей переменных звезд помогло связать геометрический метод параллакса с наблюдениями видимого блеска звезд. Теперь Хабблу предстояло сделать еще один скачок и открыть тем самым возможность определения любых космологических расстояний, какими бы большими они ни были.

Эта возможность появилась из неожиданного открытия Весто Слайфера и Мильтона Хьюмаса: спектры многих галактик оказались сдвинуты к красному концу спектрального диапазона. Похоже было, что сдвиг этот вызван эффектом Доплера, и тогда получалось, что эти галактики должны двигаться прочь от нас. Хаббл взял 46 галактик, в которых имелись известные цефеиды, а значит, можно было достоверно судить о расстоянии до них, и нанес полученные результаты на график в координатах расстояние — красное смещение. На графике получилась прямая линия, и это означало, что галактики удаляются от нас со скоростью, пропорциональной расстоянию до них. В 1929 году он опубликовал это соотношение в виде формулы, которую мы теперь называем законом Хаббла. Коэффициент пропорциональности — постоянная Хаббла — составляет около 70 километров в секунду на мегапарсек. Первая оценка Хаббла была в семь раз больше.

На самом деле шведский астроном Кнут Лундмарк высказал ту же идею в 1924 году, за пять лет до Хаббла. Для оценки расстояний до галактик он воспользовался их видимыми размерами, и его оценка «постоянной Хаббла» была куда более точной — от современной она отличалась

меньше чем на 1%. Однако работа Лундмарка не привлекла к себе внимания астрономического сообщества, поскольку его методы не были проверены при помощи независимых измерений.

Сегодня астрономы могут оценить расстояние до любого объекта по его спектру; для этого нужно лишь, чтобы в спектре можно было выделить достаточно спектральных линий, чтобы определить красное смещение[82]. Практически все галактики демонстрируют красное смещение, так что мы вполне можем вычислить, как далеко от нас они находятся. Все они движутся от нас прочь. Так что либо Земля лежит в центре громадной расширяющейся области — что противоречит принципу Коперника, согласно которому мы не представляем собой ничего исключительного, — либо вся Вселенная увеличивается в размерах и инопланетяне в другой галактике видят вокруг себя ту же картину.

Открытие Хаббла стало серьезным аргументом в пользу Леметрова «космического яйца». Если отыграть расширяющуюся Вселенную назад во времени, то все сожмется в точку. Теперь, вновь запуская время в нормальном направлении, мы видим, что Вселенная должна была начаться с точки. Вселенная не появляется из яйца: она и есть яйцо. Яйцо это появляется из ниоткуда и растет. И пространство, и время рождаются из ничего, и, как только они возникают, начинается развитие сегодняшней Вселенной[83].

Когда наблюдения Хаббла убедили Эйнштейна в том, что Леметр с самого начала был прав, он понял, что вполне мог заранее предсказать космическое расширение. Его стационарное решение можно было модифицировать в расширяющееся, и расширение предотвратило бы гравитационный коллапс. Тогда не возникло бы нужды в досадной космологической константе  $\Lambda$ : по существу, ее роль заключалась в том, чтобы служить подпоркой неверной теории. Эйнштейн исключил  $\Lambda$  из своей теории и позже сказал, что ее включение было его самым серьезным заблуждением.

Вершиной всей этой работы стала стандартная модель пространственно-временной геометрии Вселенной — метрика Фридмана — Эйнштейна — Робертсона — Уолкера, окончательно сформулированная в 1930-е годы. На самом деле это целое семейство решений, каждое из которых дает возможный вариант геометрии. Там присутствует и параметр, определяющий кривизну, которая может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Каждая вселенная в этом семействе однородна (однородна, одинакова во всех точках) и изотропна (одинакова во всех направлениях) — это главные условия, принятые при выводе формулы. Пространство-время может расширяться или сжиматься, а его базовая топология может быть простой или сложной. Эта метрика допускает также включение космологической константы.

\*\*\*

Поскольку время родилось с Большим взрывом, нет никакой логической необходимости говорить о том, то происходило «до того». Никакого «до того» не было. Физика была готова к этой радикальной теории, поскольку квантовая механика показывает, что частицы могут возникать спонтанно из ничего[84]. Если это может делать частица, то почему не Вселенная? Если на это способно пространство, то почему не время? Космологи и сегодня считают, что по существу это верно, хотя они уже начинают сомневаться, действительно ли можно «до того» так легко отбросить. Подробные физические расчеты позволяют построить сложную и очень точную хронику, согласно которой Вселенная возникла 13,8 миллиарда лет назад как точка[85] и с тех пор непрерывно расширяется.

Одна из самых загадочных черт Большого взрыва заключается в том, что отдельные галактики и даже гравитационно связанные скопления галактик не расширяются. Мы можем оценить размеры далеких галактик, и статистическое распределение размеров среди них примерно такое же, как и среди близлежащих галактик. Наблюдаются гораздо более странные процессы. Меняется шкала расстояний пространства. Галактики расходятся друг от друга прочь, потому что между ними появляется новое пространство, а не потому, что они разлетаются в противоположных направлениях в каком-то фиксированном пространстве.

Это приводит к некоторым парадоксальным эффектам. Галактики на расстоянии более 14,7 миллиарда световых лет удаляются от нас так быстро, что по отношению к нам они движутся со скоростью, большей скорости света. Тем не менее мы их все еще видим.

В этих утверждениях, кажется, три вещи не могут быть правильными. Поскольку возраст Вселенной составляет всего 13,8 миллиарда лет, а первоначально все ее вещество находилось в

одной точке, то как что бы то ни было может оказаться от нас на расстоянии 14,7 миллиарда световых лет? Это что-то должно было бы все это время двигаться быстрее света, хотя теория относительности это запрещает. По той же причине галактики в настоящее время не могут двигаться быстрее света. Наконец, если бы они это делали, мы бы не могли их видеть.

Чтобы понять, почему эти утверждения все же имеют смысл, мы должны чуть лучше разобраться в теории относительности. Да, она запрещает материи двигаться быстрее света, но этот предел берется по отношению к окружающему пространству. Однако теория относительности не запрещает пространству расширяться быстрее света. Так что некая область пространства вполне могла бы превысить световой предел, тогда как материя внутри этой области сохраняла бы скорость ниже скорости света по отношению к вмещающему ее пространству. Мало того, материя вообще могла покоиться относительно окружающего ее пространства, в то время как само пространство расширялось бы куда-то со скоростью, в 10 раз превосходящей скорость света. В точности как мы можем мирно сидеть, попивать кофе и почитать газету внутри пассажирского самолета, летящего со скоростью 700 километров в час.

Этим же объясняется и тот факт, что упомянутые выше галактики могли оказаться от нас за 14,7 миллиарда световых лет. Им самим не пришлось преодолевать это расстояние. Выросло количество пространства, лежащего между ними и нами.

Наконец, свет, посредством которого мы наблюдаем эти далекие галактики, — это вовсе не тот свет, который они излучают в настоящее время. Это свет, который они испустили в прошлом, когда находились к нам ближе. Вот почему наблюдаемая Вселенная оказывается больше, чем мы могли бы ожидать.

Возможно, за обдумыванием всего этого вам захочется выпить кофе и почитать газету.

А вот еще одно забавное следствие.

Согласно закону Хаббла, у далеких галактик красное смещение больше, так что они должны двигаться быстрее. На первый взгляд это противоречит метрике Фридмана — Леметра — Робертсона — Уолкера, которая предсказывает, что расширение с течением времени должно замедляться. Но, опять же, мы должны думать релятивистски. Чем дальше находится галактика, тем больше времени нужно свету, чтобы дойти до нас. Ее нынешнее красное смещение соответствует ее скорости тогда. Поэтому из закона Хаббла следует, что, чем дальше в прошлое мы заглядываем, тем быстрее пространство тогда расширялось. Иными словами, первоначально расширение было стремительным, но затем замедлилось в соответствии с Фридманом — Леметром — Робертсоном — Уокером.

Это вполне разумно, если считать, что все расширение Вселенной придал начальный Большой взрыв. Когда Вселенная начала расти, ее собственная гравитация начала противодействовать этому процессу и тянуть ее обратно. Наблюдения указывают, что примерно до 5 миллиардов лет назад именно так и происходило. Расчеты основываются на законе Хаббла, который гласит, что скорость расширения растет на 218 километров в час на каждый дополнительный миллион световых лет расстояния. То есть скорость расширения увеличивается на 218 километров в секунду с каждым миллионом лет в прошлое; это значит, что каждый миллион лет после Большого взрыва она снижалась на 218 километров в секунду.

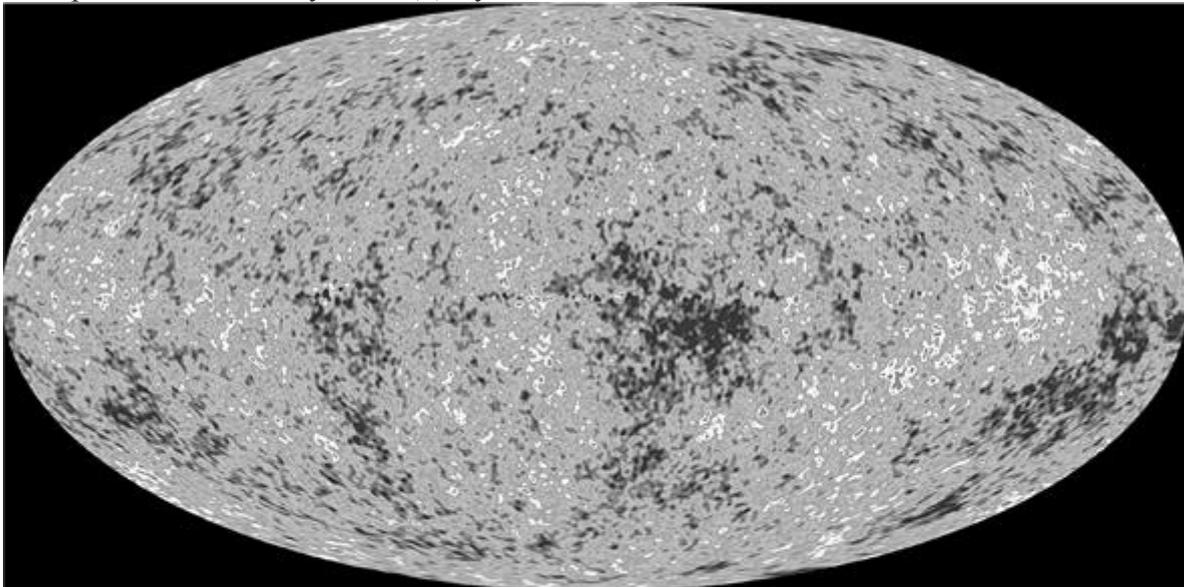
В главе 17 мы увидим, что это замедление расширения Вселенной, судя по всему, уже прекратилось, и теперь расширение вновь ускоряется, но не будем пока углубляться в этот вопрос.

\*\*\*

Следующим шагом было получить независимые свидетельства, подтверждающие Большой взрыв. В 1948 году Ральф Альфер и Роберт Херман [86] предсказали, что Большой взрыв должен был, по идее, оставить отпечаток на уровнях излучения Вселенной в форме однородного космического микроволнового фонового излучения, или реликтового излучения. Согласно их расчетам, температура реликтового излучения — то есть температура источника, способного дать такой уровень излучения, — составляет около 5 К. В 1960-е годы Яков Зельдович и Роберт Дикке независимо друг от друга и заново получили тот же результат. Астрофизики Андрей Дорошкевич и Игорь Новиков поняли в 1964 году, что в принципе реликтовое излучение можно наблюдать и даже использовать для проверки гипотезы Большого взрыва.

В том же году коллеги Дикке Дэвид Уилкинсон и Питер Ролл начали строить радиометр Дикке для измерения реликтового излучения. Радиометр Дикке — это радиоприемник, способный измерять среднюю мощность сигнала в некотором диапазоне частот. Но прежде чем они успели закончить работу, их опередила другая группа. В 1965 году Арно Пензиас и Роберт Уилсон использовали принцип радиометра Дикке при работе с малошумящей рупорно-параболической приемной радиоантенной, созданной компанией Bell Laboratories для работы со спутниками связи Telstar. Пытаясь разобраться с источником назойливого «шума», они поняли, что шум этот имеет космологическое происхождение, а не возникает в результате какой-то недоработки в конструкции их электронных устройств. Шум не имел конкретного источника; вместо этого он был равномерно распределен по всему небу. Его температура равнялась примерно 4,2 К. Так впервые удалось пронаблюдать реликтовое излучение.

Интерпретация реликтового излучения вызывала в 1960-е годы горячие споры, и физики, предпочитавшие теорию стационарной Вселенной, утверждали, что реликтовое излучение — это рассеянный свет звезд далеких галактик. Но к 1970 году большинство ученых сошлось во мнении, что реликтовое излучение — свидетельство в пользу Большого взрыва. Хокинг назвал это наблюдение «последним гвоздем в гроб теории стационарной Вселенной». Решающим фактором послужил спектр этого излучения, очень похожий на излучение абсолютно черного тела, что противоречило теории стационарной Вселенной. Сегодня космическое микроволновое излучение считается реликтом, оставшимся от Вселенной, когда ей было всего 379 000 лет. В то время ее температура упала до 3000 К, в результате чего электроны получили возможность соединиться с протонами и образовывать атомы водорода. Вселенная стала прозрачной для электромагнитного излучения. Да будет свет!



Распределение по небу яркости реликтового излучения, измеренное аппаратом WMAP. Карта показывает температурные флуктуации, датируемые временем вскоре после Большого взрыва, — семена той иррегулярности, которая затем разрослась и породила галактики. Температуры здесь отличаются от средней всего лишь на 200 миллионных долей кельвина

Теория предсказывает, что реликтовое излучение не должно быть в точности одинаковым во всех направлениях. В нем должны быть очень маленькие флуктуации, порядок величины которых оценивается в 0,001–0,01%. В 1992 году аппарат NASA под названием COBE (Cosmic Background Explorer — Исследователь космического фона) измерил эти неоднородности. Более подробно их структуру выявил зонд WMAP. Полученные подробности стали основным средством сравнить реальность с предсказаниями из различных вариантов теории Большого взрыва и других космологических сценариев.

Несколько лет назад, когда мы с семьей путешествовали по Франции, мы обратили внимание на забавную вывеску — Restaurant Univers (ресторан «Вселенная»). В отличие от выдуманного Дугласом Адамсом «Ресторана на краю Вселенной», навечно замершего на самом краю конечной точки пространства и времени, это была совершенно нормальная кафешка при отеле «Вселенная». Который, в свою очередь, был совершенно нормальным отелем в Реймсе и находился в идеально правильной точке пространства и времени для четырех усталых и голодных путешественников.

Научный вопрос, послуживший движущей силой для выдуманного Адамсом ресторана, звучал так: «Как закончится Вселенная?» Вероятно, не рок-концертом космологических масштабов, как считал он. Возможно, человечество и заслужило такой конец, но, может быть, все же не стоило бы навлекать такую страшную кару на другие цивилизации, которые могут оказаться рядом.

Возможно, Вселенная вообще никогда не закончится. Она могла бы расширяться вечно. Но в этом случае все постепенно сойдет на нет, галактики будут отдаляться друг от друга до тех пор, пока свет не потеряет способность преодолевать расстояние между ними, и тогда мы останемся одни в холоде и темноте. Впрочем, по мнению Фримена Дайсона, сложная «жизнь» могла бы продолжить существование, несмотря на так называемую «тепловую смерть» Вселенной. Но это была бы очень медленная жизнь.

В менее печальном для поклонников фантастики варианте Вселенная могла бы коллапсировать, повторив в обратном порядке процесс Большого взрыва и расширения. Она могла бы даже коллапсировать обратно в точку. Или ее конец мог бы оказаться более удручающим — Большим разрывом, при котором материя распадается, по мере того как темная энергия рвет ткань пространства-времени.

Это может оказаться окончательным Концом. Но можно допустить также, что после коллапса Вселенная могла бы возродиться вновь. Это уже теория осциллирующей Вселенной. Джеймс Блиш использовал ее в финале повести «Триумф времени». Возможно, фундаментальные физические константы после сжатия и начала нового цикла окажутся чуть другими; некоторые физики думают именно так. Другие так не считают. Может быть, от нашей Вселенной отпочкуются детки, во всем похожие на свою мать или совершенно иные. А может, и нет.

Математика позволяет нам исследовать все эти возможности, а однажды, может быть, поможет выбрать одну из них. До тех пор мы можем только рассуждать о конце всех вещей — или не всех, как вполне может оказаться.



## Большое раздувание

Если бы я присутствовал при акте творения, я дал бы несколько полезных советов о том, как лучше организовать Вселенную.

Альфонсо Мудрый, король Кастилии (согласно легенде)

Несколько лет назад теория возникновения Вселенной в результате Большого взрыва соответствовала всем существенным наблюдениям. С одной стороны, она предсказала температуру реликтового микроволнового излучения — этот ранний успех внес серьезный вклад в то, что теория была в конечном итоге принята[87]. С другой стороны, наблюдений было мало, а интервалы между ними были большие. По мере того как астрономы, пытаясь понять, что еще предсказывает теория Большого взрыва, получали более подробные измерения и проводили более обширные расчеты, начали появляться нестыковки.

В главе 15 мы видели, что в сегодняшней Вселенной имеется большое количество крупномасштабных структур; длинные волокна и целые обширные «стены» галактик окружают еще более обширные войды. Все вместе сильно напоминает пену в стакане с пивом, причем галактики там располагаются на поверхности пузырьков, а войды соответствуют воздуху внутри их. Расчеты показывают, что современная оценка возраста Вселенной — 13,8 миллиарда лет — не дает веществу достаточно времени, чтобы стать настолько комковатым. Кроме того, возраст Вселенной слишком мал, чтобы объяснить нынешнюю плоскую геометрию пространства. Согласовать то и другое проблематично, потому что, чем более плоским вы сделаете пространство, тем менее комковатым, скорее всего, станет вещество, и наоборот: чем более комковато вещество, тем более искривлено пространство.

Преобладающая космологическая мудрость предлагает постулировать Еще Большой взрыв, иначе известный как инфляция. В критический момент, в самом начале своего существования, нарождающаяся Вселенная расширилась до громадных размеров за необычайно короткое время.

Другие недостатки оригинальной теории Большого взрыва привели к тому, что космологи «прикрыли» к ней еще два априорных допущения: скрытая масса, или темная материя, — некая форма вещества, совершенно отличная от обычного его состояния, и темная энергия — некая форма энергии, заставляющая процесс расширения Вселенной ускоряться. В данной главе я расскажу об инфляции и о темной энергии. Скрытую массу я оставлю до следующей главы, поскольку сказать о ней можно много.

Космологи весьма уверены в истинности нынешней теории, известной как модель  $\Lambda$ CDM (Lambda-Cold Dark Matter) с  $\Lambda$ -членом и холодной темной материей или как стандартная модель космологии. (Напомню, что  $\Lambda$  — это обозначение космологической постоянной Эйнштейна.) Они уверены, потому что такая комбинация классического Большого взрыва, инфляции, скрытой массы и темной энергии согласуется с большинством наблюдений, причем со значительной степенью детализации. Однако с каждым из трех дополнительных компонент имеются значительные проблемы, и не исключено, что кое-что необходимо переосмыслить.

В этой и следующей главах я собираюсь сначала рассказать традиционный вариант теории, с кратким изложением тех наблюдений, которые и дали начало этим трем «подпоркам», и описанием того, как они объясняют эти наблюдения. Затем я взгляну на получившуюся в результате стандартную модель космологии критически и изложу некоторые проблемы, которые не снимаются этими подпорками. Наконец, опишу некоторые из предложенных альтернатив стандартной модели и расскажу, как они, в свою очередь, справляются с проблемами.

\*\*\*

В главе 16 описывалось основное свидетельство в пользу Большого взрыва со всеми добавками: это структура реликтового фонового излучения. Последние измерения, проведенные аппаратом WMAP, показывают, что реликтовое излучение почти однородно и по температуре отклоняется от среднего значения не более чем на 200 миллионных долей кельвина. Небольшие флуктуации — это именно то, что предсказывает теория Большого взрыва, но эти отклонения слишком малы — настолько малы, что, судя по ним, для развития нынешней комковатости у Вселенной просто было недостаточно времени. Это утверждение основано на компьютерном прогоне математических моделей эволюции Вселенной, упомянутых в главе 15.

Один из способов разрешить эту проблему состоит в том, чтобы модифицировать теорию и сказать, что ранняя Вселенная с самого начала была более комковатой [88]. Но эта идея сталкивается с другой сложностью, едва ли не противоположного характера. Хотя материя на сегодняшний день слишком комковата для стандартной теории Большого взрыва, пространство-время, напротив, комковато недостаточно. Оно почти плоское.

Космологов беспокоил также более глубокий вопрос — проблема горизонта, на которую указал Миснер в 1960-е годы. Стандартная теория Большого взрыва предсказывает, что части Вселенной, расположенные слишком далеко друг от друга для того, чтобы между ними были причинно-следственные связи, должны тем не менее иметь схожее распределение вещества и схожую температуру реликтового излучения. Более того, это должно быть очевидным для наблюдателя, потому что космологический горизонт — то, насколько далеко можно видеть, — расширяется со временем. Значит, области, которые прежде не были причинно связанными,

могут позднее сделаться таковыми. Проблема: как эти области могут «знать», какое распределение и какую температуру им положено иметь? Так что дело не только в том, что пространство-время слишком плоское: оно, кроме того, однородно плоское на масштабах, которые слишком велики, чтобы «общаться» друг с другом.

В 1979 году Алан Гут выдвинул остроумную идею, помогающую разобраться с обоими этими вопросами. Новая теория делает пространство-время плоским и в то же время позволяет веществу оставаться комковатым; кроме того, она решает проблему горизонта. Чтобы описать эту идею, нам нужно знать кое-что об энергии вакуума.

В сегодняшней физике вакуум — это не пустое пространство, а бурлящий котел виртуальных квантовых частиц, которые появляются из ничего парами и затем аннигилируют друг с другом раньше, чем кто-либо успеет их увидеть. Это возможно в квантовой механике благодаря принципу неопределенности Гейзенберга, который гласит, что невозможно определить энергию частицы в конкретный момент времени. Либо энергия, либо временной интервал должны сохранять неопределенность. Если «размыто» значение энергии, то она не обязана сохраняться в любой отдельно взятый момент. Частицы могут занимать ее на какое-то время, а потом возвращать, и на этом коротком интервале времени энергия не сохраняется. Если неопределенным оказывается интервал времени, это останется незамеченным.

Этот процесс — или что-то другое, физики не могут сказать точно — порождает пузырящееся поле фоновой энергии, пронизывающее всю Вселенную. Это слабое поле — примерно одна миллиардная доля джоуля на кубический метр. Достаточно, чтобы питать одну секцию электронагревателя на протяжении одной триллионной доли секунды.

Инфляция говорит, что разделенные большим расстоянием области пространства-времени имеют сходное распределение вещества и температуру, потому что в прошлом они могли поддерживать связь друг с другом. Предположим, что далекие теперь области Вселенной когда-то были достаточно близки, чтобы взаимодействовать. Предположим также, что в то время энергия вакуума была больше, чем теперь. В таком состоянии доступный для наблюдения горизонт не увеличивается; он остается постоянным. Если затем Вселенная подвергается стремительному расширению, то близкие наблюдатели быстро оказываются разделены и все становится однородным. Важно, что любые локальные комки [89] и пустоты, существовавшие еще до начала инфляции, внезапно распределяются по поистине гигантскому объему пространства-времени. Это как положить кусочек масла на маленький тост — а затем заставить этот тост внезапно увеличиться до необычайных размеров. Масло расширится вместе с ним, и вы получите тонкий, почти однородный слой.

Не пробуйте проделать это дома.

\*\*\*

И очень раннее начало, и очень быстрое расширение необходимы для того, чтобы инфляционный расчет сошелся с ответом. Но что вызывает этот стремительный рост — взрыв намного более внушительный, чем слабенький Большой взрыв, с которого все началось? Ответ: инфлатонное поле. Это не опечатка: инфлатон — гипотетическая частица. В квантовой теории поля и частицы ходят рука об руку. Частица — это всегда локализованный ступок поля, а поле — непрерывное море частиц.

Гут задался вопросом: что произошло бы, если бы пространство было равномерно заполнено не замеченным нами квантовым полем — гипотетическим инфлатонным полем? Его расчеты показали, что такое поле генерирует отрицательное давление, то есть расталкивающую силу. Брайан Грин предлагает аналогию с углекислым газом в бутылке шампанского. Стоит откупорить бутылку — и газ стремительно расширяется, порождая те самые желанные пузырьки. Стоит откупорить Вселенную — и инфлатонное поле расширяется еще более стремительно. Новость состоит в том, что вам не нужна пробка: вместо этого вся бутылка (Вселенная) может расширяться, очень быстро и очень-очень сильно. Нынешняя теория гласит, что между 10–36 и 10–32 секунды после Большого взрыва объем Вселенной увеличился по крайней мере в 1078 раз.

Хорошая новость состоит в том, что инфляционный сценарий — или, точнее, некоторые из многочисленных вариантов первоначальной идеи, предложенных за это время, — хорошо согласуется со многими наблюдениями. Это не слишком удивительно, поскольку теория изначально была придумана так, чтобы не противоречить некоторым ключевым наблюдениям,

однако она согласуется и со многими другими наблюдениями тоже, что внушает надежду. Так что, дело сделано? Ну, может, и нет, потому что есть еще и плохая новость: никто и никогда не наблюдал ни инфлатона, ни каких бы то ни было следов поля, которое он вроде бы поддерживает. Этот квантовый кролик до сих пор еще не извлечен из космологической шляпы, но это был бы очень симпатичный кролик, если бы удалось уговорить его хоть на мгновение высунуть свой нос над полями шляпы.

Однако в последние несколько лет этот вариант потерял заметную часть своей привлекательности. Когда физики и космологи начали задавать более глубокие вопросы об инфляции, сразу же выявились проблемы. Одна из самых серьезных — вечная инфляция, открытая Александром Виленкиным. Обычное объяснение структуры нашей Вселенной предполагает, что инфлатонное поле включается один раз, в самом начале эволюции Вселенной, и потом всегда остается выключенным. Однако, если инфлатонное поле вообще существует, оно может включиться где угодно и в любой момент. Эта тенденция известна как вечная инфляция. Она подразумевает, что наша область Вселенной представляет собой всего лишь один раздутый пузырь в целой ванне космической пены и новый период инфляции мог бы начаться в вашей гостиной сегодня после обеда, мгновенно увеличив ваш телевизор и вашу кошку[90] в 1078 раз.

Существуют способы исправить эти недочеты при помощи различных вариантов первоначальной идеи Гута, но они требуют необычайных, можно сказать, уникальных начальных условий для нашей Вселенной. Насколько уникальных, можно судить по еще одному любопытному факту: существует еще один вариант особых начальных условий, при которых Вселенная получилась бы в точности как наша, но без инфляции. Оба варианта начальных условий можно назвать уникальными, но не в равной степени. Роджер Пенроуз показал, что начальные условия, порождающие Вселенную, аналогичную нашей, но без инфляции, должны встречаться чаще, чем те, что порождают инфляционный сценарий, в гуголплекс раз (гуголплекс — число, равное 1010100). Так что объяснение нынешнего состояния Вселенной, не содержащее инфляционного этапа, в ошеломляющее число раз более вероятно, чем то, которое этот этап содержит. Пенроуз воспользовался термодинамическим подходом, но я не уверен, что он в данном случае годится. Гэри Гиббонс и Нил Турок использовали другой метод: попытались обратить время и закрутить Вселенную обратно до первоначального состояния. Опять же, почти все варианты этого начального состояния не предусматривали инфляции.

Большинство космологов продолжают считать, что теория инфляции в основе своей верна, поскольку ее предсказания замечательно согласуются с наблюдениями. Было бы преждевременно отказаться от нее из-за упомянутых мной трудностей. Однако эти трудности дают веские основания предполагать, что у нынешней концепции инфляции есть серьезные недостатки. Возможно, она ведет нас в правильном направлении, но ни в коем случае не является окончательным ответом.

\*\*\*

У стандартной модели происхождения Вселенной есть еще две проблемы. Одна из них была сформулирована в главе 12 и состоит в следующем: внешние области галактик вращаются слишком быстро, чтобы Ньютонова (да и Эйнштейнова тоже, по общему мнению) гравитация могла удержать их. Стандартный ответ на этот вопрос — скрытая масса, или темное вещество, о котором будет подробно рассказано в следующей главе.

Вторая проблема — то, как скорость расширения Вселенной меняется со временем. Космологи ожидали, что она либо постоянна — и тогда мы получим «открытую» Вселенную, которая вечно увеличивается в размерах либо замедляется по мере того, как гравитация стягивает расходящиеся галактики обратно, — и тогда Вселенная «замкнута». Но в 1998 году команда проекта поиска сверхновых с большим красным смещением (High-z Supernova Search), исследовавшая красное смещение у сверхновых типа Ia, обнаружила, что расширение ускоряется. Их работа была удостоена Нобелевской премии по физике в 2011 году, и реальный результат у них (в отличие от инфляции и скрытой массы) не слишком противоречив. Противоречиво объяснение этого результата.

Космологи приписывают ускорение расширения Вселенной предполагаемому источнику энергии, которую они называют «темная энергия». Еще одна возможность — Эйнштейнова космологическая постоянная  $\Lambda$ . Положительное значение  $\Lambda$  при подстановке в уравнения дает

наблюдаемую скорость расширения. Если это верно, то крупнейшей ошибкой Эйнштейна было не введение космологической постоянной в уравнения поля, а отказ от нее. Чтобы соответствовать наблюдениям, эта константа должна быть чрезвычайно маленькой: около  $10^{-29}$  г/см<sup>3</sup> (если энергия выражена в единицах массы по знаменитой формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ ).

Возможную физическую причину того, что  $\Lambda$  должна быть больше нуля, можно найти в квантовой механике: это энергия вакуума. Напомню, что это естественный эффект отталкивания, создаваемый виртуальными парами частица/античастица, рождающимися и аннигилирующими настолько быстро, что сами частицы невозможно даже обнаружить. Единственная проблема заключается в том, что, согласно современной квантовой механике, энергия вакуума должна быть в  $10^{120}$  раз больше, чем та величина  $\Lambda$ , которая соответствует характеру ускорения.

Южноафриканский математик Джордж Эллис указал, что присутствие темной энергии выводится из наблюдений при априорном предположении, что Вселенная верно описывается стандартной метрикой Фрийдмана — Леметра — Робертсона — Уолкера, в которой  $\Lambda$  может (путем смены системы координат) быть интерпретирована как темная энергия. Мы видели, что эта метрика выводится из двух простых требований: Вселенная должна быть однородной и изотропной. Эллис показал, что недостаточная однородность может объяснить наблюдения без привлечения какой бы то ни было темной энергии. Вселенная неоднородна на масштабе войдов и кластеров, которые гораздо крупнее галактик. В то же время стандартная космологическая модель предполагает, что на чрезвычайно крупных масштабах эта неоднородность сглаживается, примерно как пена кажется однородной, если не присматриваться к ней так близко, чтобы видеть отдельные пузырьки. Поэтому космологи сравнивают наблюдения High- $z$  с предсказаниями этой сглаженной модели.

Теперь на поверхность выплывает тонкий математический момент, на который до последнего времени, похоже, не обращали внимания: а совпадает ли точное решение сглаженной модели со сглаженным решением точной модели? Первое соответствует существующей теории, последнее — тому, как мы сравниваем наше решение с результатами наблюдений. Неявно предполагается, что два этих математических подхода дают примерно одинаковый результат — вариант модельного допущения, обычного для математической физики и прикладной математики, что малыми слагаемыми в уравнениях можно пренебрегать, и это не сильно скажется на решениях.

Это допущение часто оказывается верным — но верно оно не всегда, и есть указания на то, что в данном случае оно может привести к некорректным результатам. Томас Бухерт показал, что, когда уравнения Эйнштейна для неоднородной мелкомасштабной структуры усредняются для получения гладкого крупномасштабного уравнения, результат получается не тот, как если взять уравнения Эйнштейна для гладкой крупномасштабной модели. В этом уравнении имеется дополнительное слагаемое, отталкивающая «обратная реакция», порождающая эффект, сходный с действием темной энергии.

Наблюдения за далекими космологическими источниками тоже могут оказаться неверно интерпретированными, поскольку гравитационные линзы способны фокусировать свет, и тогда он кажется ярче, чем есть на самом деле. Средний эффект от такого фокусирования по всем отдаленным объектам одинаков для детальных моделей, неоднородных в малых масштабах, и их крупномасштабных усреднений, что на первый взгляд внушает надежду. Однако для отдельных объектов это неверно, а наблюдаем мы именно их. Здесь корректная математическая процедура заключалась бы в усреднении по световым траекториям, а не по обычному пространству. Если этого не сделать, то оценка наблюдаемой яркости объектов может измениться, но насколько именно, сильно зависит от распределения вещества. А его мы не знаем с точностью, достаточной, чтобы с уверенностью судить о том, к чему это приведет. Представляется, таким образом, что свидетельства в пользу того, что расширение Вселенной ускоряется, могут оказаться ненадежными по двум различным, но связанным причинам: обычные допущения о сглаживании могут дать некорректный результат как в отношении теории, так и в отношении наблюдений.

Еще один способ объяснить наблюдения High- $z$  без привлечения темной энергии состоит в том, чтобы поиграть с Эйнштейновыми уравнениями поля. В 2009 году Джоэл Смоллер и Блейк Темпл использовали математику ударных волн, чтобы показать, что слегка модифицированный вариант уравнений поля имеет решение, в котором метрика расширяется со все возрастающей

скоростью. Это объяснило бы наблюдаемое ускорение разбегания галактик без привлечения темной энергии.

В 2011 году в специальном выпуске журнала Королевского общества, посвященном общей теории относительности, Роберт Колдуэлл писал: «Пока представляется совершенно разумным, что эти наблюдения [High-z] могут быть объяснены новыми законами гравитации». Рут Дюррер охарактеризовала свидетельства в пользу темной энергии как слабые: «Наше единственное указание на существование темной энергии исходит от измерения расстояний и их связи с красным смещением». По ее мнению, остальные свидетельства устанавливают лишь тот факт, что расстояние, оцененное по красному смещению, оказывается больше, чем ожидалось исходя из стандартной космологической модели. Наблюдаемый эффект в принципе может означать вовсе не ускорение, и, даже если это все же ускорение, нет никаких убедительных оснований считать его причиной темную энергию.

\*\*\*

Хотя мейнстримная космология по-прежнему сосредоточена на стандартной модели — Большой взрыв, описываемый метрикой  $\Lambda$ CDM, плюс инфляция, скрытая масса и темная энергия, — ропот несогласных постепенно становится все более заметным. На конференции по альтернативам стандартной модели в 2005 году Эрик Лернер заявил: «Предсказания Большого взрыва стабильно не оправдываются, каждый раз ситуацию приходится исправлять задним числом». Риккардо Скарпа сказал примерно то же самое: «Всякий раз, когда базовая модель с Большим взрывом не в состоянии предсказать то, что мы наблюдаем, к ней просто прикручивают что-нибудь новое». Годом раньше оба эти исследователя были среди подписантов открытого письма, предупреждавшего, что исследования альтернативных космологических теорий не финансируются, а научная дискуссия на эту тему попросту подавляется.

Подобные жалобы могли бы показаться просто проявлением зависти, но на самом деле они основаны на некоторых свидетельствах, не укладывающихся в общую канву, — это не просто философские возражения против трех добавлений к теории Большого взрыва. Космический телескоп Spitzer обнаружил галактики с таким большим красным смещением, что возникнуть они должны были меньше чем через миллиард лет после Большого взрыва. Если так, то доминировать в них должны молодые сверхгорячие голубые звезды. Но вместо этого галактики содержат слишком много постаревших холодных красных звезд. Это заставляет предположить, что данные галактики старше, чем предсказывает теория Большого взрыва, а значит, старше и Вселенная. Вдобавок некоторые звезды сегодня кажутся старше Вселенной. Это красные гиганты — настолько долгоживущие, что на сжигание достаточного количества водорода у них должно было уйти намного больше времени, чем 13,8 миллиарда лет — принятый на сегодня возраст Вселенной[91]. Более того, существуют громадные сверхскопления галактик с большим красным смещением — им тоже не должно было хватить времени на образование таких больших структур. По поводу этих интерпретаций ведутся споры, но третий из приведенных наблюдаемых фактов объяснить особенно трудно.

Если Вселенная намного старше, чем считается в настоящее время, то как можно объяснить те наблюдения, которые привели в свое время к созданию теории Большого взрыва? Главные из них — красное смещение и реликтовое микроволновое излучение плюс большое количество более тонких деталей. Может быть, фоновое излучение — не реликт рождения Вселенной; может, это просто звездный свет, который миллиарды лет носится по всей Вселенной, поглощается объектами и излучается вновь. Общая теория относительности сосредоточена на тяготении, тогда как в этом процессе участвуют также электромагнитные поля. Поскольку большую часть вещества во Вселенной составляет плазма, динамика которой управляется электромагнетизмом, странно кажется пренебрегать этими эффектами. Однако космология плазмы потеряла поддержку в 1992 году, когда данные COBE показали, что спектр реликтового излучения соответствует спектру излучения абсолютно черного тела.

А что красное смещение? Безусловно, оно существует и выявляется фактически повсеместно; кроме того, оно меняется с расстоянием. В 1929 году Фриц Цвикки предположил, что свет в движении постепенно теряет энергию, так что, чем большее расстояние он проходит, тем больше становится красное смещение. Говорят, что теория «усталости света» несовместима с эффектами растяжения времени, которые согласуются с космологическим (за счет расширения)

происхождением красного смещения, но аналогичные теории с иными механизмами позволяют обойти эту конкретную проблему.

Далее, гравитация снижает энергию фотонов, что сдвигает весь спектр к красному его концу. Гравитационное красное смещение, вызванное обычными звездами, очень мало, но черные дыры, такие, к примеру, как те, что располагаются в центрах галактик, оказывают более сильное воздействие. Мало того, крупномасштабные флуктуации реликтового излучения (измеренные WMAP) в основном вызваны гравитационным красным смещением. Однако даже этот эффект слишком незначителен. Тем не менее Холтон Арп много лет утверждал, что красное смещение может быть результатом воздействия сильной гравитации на свет; от этой теории, по существу, отмахнулись, не дав никакого убедительного опровержения[92]. На самом же деле эта альтернативная теория даже предсказывает правильную температуру для реликтового излучения. И в ней не нужно считать, что пространство расширяется, а галактики нет, несмотря на то что они представляют собой в основном пустое пространство[93].

Альтернативные Большому взрыву теории продолжают появляться. Одну из последних предложил в 2014 году Саурья Дас и развил затем в соавторстве с Ахмедом Али; эта теория основана на интерпретации квантовой механики Дэвидом Бомом, в которой устранен элемент случайности. Квантовая теория Бома неортодоксальна, но вполне уважаема; отмахиваются от нее потому, что во многих отношениях она эквивалентна стандартному подходу и отличается от него в основном интерпретациями, поэтому доказать ее ошибочность невозможно. Али и Дас оспаривают обычный аргумент в пользу Большого взрыва — когда расширение Вселенной отыгрывают назад до первоначальной сингулярности. Они указывают, что общая теория относительности перестает действовать прежде, чем достигается сингулярность, но космологи продолжают применять ее так, как если бы она по-прежнему работала. Али и Дас вместо этого применяют квантовую механику Бома, в которой траектория частицы имеет смысл и может быть вычислена. Это приводит к появлению небольшого корректирующего свободного члена в Эйнштейновых уравнениях поля, что устраняет сингулярность. Получается, что Вселенная, возможно, существовала всегда, и это никак не противоречит нынешним наблюдениям[94].

Конкурентам Большого взрыва приходится проходить суровые испытания. Если Вселенная была всегда, то большая часть содержавшегося в ней дейтерия должна была бы исчезнуть в процессе ядерного синтеза, но этого не произошло. С другой стороны, если срок жизни Вселенной конечен, но Большого взрыва не было, не появилось бы достаточное количество гелия. Эти возражения, однако, опираются на конкретные допущения об отдаленном прошлом Вселенной и игнорируют другую возможность: ведь могло произойти нечто столь же радикальное, как и Большой взрыв, но другое. Пока не появилось никакого конкретного альтернативного объяснения, которое было бы по-настоящему сильным, но и Большой взрыв тоже не выглядит особенно убедительно. Подозреваю, что лет через пятьдесят космологи будут отстаивать совершенно другие теории происхождения Вселенной.

\*\*\*

В обществе преобладает представление о космологии, согласно которому вопрос происхождения Вселенной решен раз и навсегда теорией Большого взрыва; публика не видит разногласий между специалистами и игнорирует интересное, но непонятное многообразие альтернативных теорий, которые рассматриваются и обсуждаются в их среде. Кроме того, публика всегда склонна преувеличивать значение новейших идей и открытий — не важно, ортодоксальных или нет, — пока никто еще не успел критически их осмыслить. Я потерял счет случаям, когда какая-то группа космологов объявляла о получении неопровержимых доказательств существования инфляции — только для того, чтобы через несколько недель или месяцев ее данные получили иную интерпретацию или в них была обнаружена ошибка. То же, даже в большей степени, можно сказать и о скрытой массе. Темная энергия представляется более надежной, но даже ее существование спорно.

Типичный пример подтверждения, быстро превратившегося в опровержение, — это сделанное в марте 2014 года объявление о том, что эксперимент WISE2 выявил такие особенности излучения, приходящего с больших расстояний, реликтов Большого взрыва, которые доказывают, вне всякого сомнения, верность инфляционной теории Вселенной. И (в

качестве бонуса) подтвердил также существование гравитационных волн, предсказанных теорией относительности, но никогда прежде не наблюдавшихся. ВИСЕР означает «Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization» («Фоновое изображение космической внегалактической поляризации»), а ВИСЕР2 — специальный телескоп, измеряющий реликтовое излучение. В тот момент это сообщение наделало много шума; любое из заявленных открытий практически гарантировало авторам Нобелевскую премию. Но почти сразу другие группы начали думать, не могла ли быть истинным источником отмеченных закономерностей межзвездная пыль. И это не было пустым критиканством: астрономы уже некоторое время до этого обдумывали эту возможность.

К январю 2015 года стало ясно, что по крайней мере половина эффекта, обнаруженного ВИСЕР2, вызвана пылью, а не инфляцией. К настоящему моменту все заявления команды полностью отозваны, поскольку после исключения из сигнала той его составляющей, которую вносит пыль, оставшаяся часть перестает быть статистически значимой. Турок, с самого начала критиковавший результаты ВИСЕР2, указал также, что исправленные данные, вместо того чтобы подтверждать инфляцию, опровергают некоторые простые инфляционные модели.

Эта история поставила команду ВИСЕР2 в неловкое положение и навлекла на нее критику за поспешные заявления. Ян Конрад в Nature отметил, что научное сообщество должно «заботиться о том, чтобы красочные доклады о несостоявшихся открытиях не затмевали более сдержанных рассказов о подлинных научных прорывах». В то же время эти события показывают реальную науку в действии, со всеми ее недостатками. Если никому не будет позволено совершать ошибки, научный прогресс остановится совершенно. Ситуация иллюстрирует также готовность ученых менять свое мнение, когда появляются новые данные или информация о том, что старые данные по каким-то причинам вводили в заблуждение. Данные ВИСЕР2 — это хорошая наука; неверна была только интерпретация. В сегодняшнем мире мгновенной связи невозможно держать под спудом то, что представляется крупным открытием, до окончания полной проверки.

Тем не менее космологи регулярно делают громкие, захватывающие дух заявления на основе очень небольшого количества реальных данных и демонстрируют высшую степень уверенности в идеях, построенных на весьма шатком фундаменте. Высокомерие наказуемо, а возмездия в наши дни не приходится долго ждать. Дух божественного воздаяния, возможно, еще выйдет на сцену и сыграет главную роль.



## Темная сторона

В темноте не было ничего такого, чего не было бы там при включенном свете.

Род Серлинг. «Сумеречная зона», эпизод 81: «В темноте ничего нет»

Глава 12 завершилась словом «упс». Это был комментарий к тому факту, открытому совсем недавно, что скорости вращения галактик лишены обычного смысла. Вблизи центра галактика вращается довольно медленно, но скорость движения звезд возрастает с удалением от центра, а затем выравнивается. Однако и Ньютонова, и Эйнштейнова гравитация требуют, чтобы скорость вращения на окраинах галактики снижалась.

Космологи решили эту загадку при помощи постулата о том, что большинство галактик находится в центре обширного сферического гало[95] из невидимого вещества. Одно время они надеялись, что это просто обычное вещество, не излучающее достаточно света, чтобы мы могли видеть его на межгалактических расстояниях и называли холодным темным веществом. Считалось, что это может быть просто большая масса газа или пыли, светящаяся слишком слабо, чтобы мы могли ее заметить. Но по мере накопления данных стало ясно, что этот простой путь не годится. Согласно нынешним представлениям, темное вещество не похоже ни на что, с чем

мы прежде встречались, даже в ускорителях частиц высоких энергий. Это загадочная штука, и его должно быть очень-очень много.

Вспомним, что в теории относительности масса эквивалентна энергии. Стандартная модель космологии плюс данные с космологического зонда Planck Европейского космического агентства указывают на то, что полная масса/энергия известной Вселенной включает в себя всего лишь 4,9% нормального вещества, но 26,8% темного вещества. Это оставляет нам еще больше — 68,3% — на долю темной энергии. Получается, что темного вещества в пять раз больше, чем обычного, а в областях галактического масштаба масса темного вещества вместе с эффективной массой темной энергии в двадцать раз больше массы обычного вещества.

Аргумент в пользу существования скрытой массы (темного вещества, темной материи) в громадных количествах прост и прямолинеен[96]. Ее существование выводится из сравнения предсказаний уравнений Кеплера с наблюдениями. Эта формула занимала центральное место в главе 12. Она гласит, что полная масса галактики, от центра до заданного радиуса, равняется этому радиусу, умноженному на квадрат скорости вращения звезд на этом расстоянии и деленному на гравитационную постоянную. Рисунки из 12 главы показывают, что результаты наблюдений серьезно расходятся с этим предсказанием. Вблизи галактического ядра наблюдаемая скорость обращения звезд слишком мала; в отдалении от ядра — слишком велика. Мало того, кривые вращения остаются примерно постоянными до гораздо больших расстояний, чем доступное наблюдению вещество; по существу, именно его мы видим по излучаемому им свету.

Если вычислить распределение массы по наблюдаемым скоростям, то выяснится, что чертовски большая часть массы должна лежать за пределами видимого радиуса. Чтобы спасти уравнение Кеплера, вывод которого представляется строгим и бесспорным, астрономы вынуждены были постулировать существование больших количеств недоступного наблюдению темного вещества. С тех пор они и держатся за эту историю.

Аномальное поведение галактических кривых вращения было первым — и до сих пор остается наиболее убедительным — свидетельством в пользу того, что во Вселенной должно существовать очень-очень большое количество невидимого вещества. Дальнейшие наблюдения и другие гравитационные аномалии добавляют веса этой гипотезе и указывают, что скрытая масса — это не просто обычное вещество, почему-то не излучающее света. Это должен быть совершенно новый тип материи, взаимодействующий со всем остальным преимущественно посредством гравитации. Следовательно, это вещество должно состоять из субатомных частиц, совершенно отличных от всего, что мы когда-либо наблюдали в ускорителях частиц.

Скрытая масса — это неизвестный науке тип вещества.

\*\*\*

Нет ничего удивительного в том, что значительная часть вещества Вселенной может оказаться недоступна наблюдению, но истории скрытой массы в настоящее время недостает главного. Решающим доказательством в пользу этой теории могло бы стать создание новых частиц с нужными свойствами в каком-нибудь ускорителе, скажем, в Большом адронном коллайдере. При помощи этого внушительного аппарата ученым не так давно удалось провести эпохальные наблюдения бозона Хиггса — частицы, которая объясняет, почему многие (но не все) частицы имеют массу. Но до сих пор в экспериментах на ускорителях не удалось обнаружить никаких частиц темного вещества. В космических лучах — высокоэнергетических частицах из дальнего космоса, в больших количествах падающих на Землю, — тоже не удалось ничего обнаружить.

Таким образом, хотя во Вселенной полно этой материи, темное вещество встречается в ней куда чаще, чем обычное, — но куда бы мы ни посмотрели, везде мы видим только обычное вещество.

Физики приводят различные примеры. Безумные гипотетические частицы им хорошо знакомы. Классический случай — нейтрино, вывод о существовании которого был сделан на основании применения закона сохранения энергии к определенным типам взаимодействия частиц. Нейтрино выглядело очень странно по сравнению с известными на тот момент частицами: не имело электрического заряда, почти не имело массы, могло почти беспрепятственно пройти Землю насквозь. Все это звучало нелепо, но эксперименты в конце

концов выявили нейтрино. Сегодня делаются первые шаги в направлении нейтринной астрономии: ученые пытаются использовать эти частицы для зондирования далеких областей Вселенной.

В то же время множество гипотетических частиц оказалось плодом разыгравшегося воображения теоретиков.

Некоторое время считалось, что мы, возможно, просто не замечаем большое количество совершенно обычного «холодного темного вещества» — его собирательное имя было «массивные компактные объекты гало» (МАСНО). Этот термин описывает любые тела, которые состоят из обычного вещества, почти не излучают и могли бы существовать в галактических гало, — это коричневые карлики, тусклые красные и белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры... даже планеты. Когда загадка кривых вращения была выявлена впервые, именно такое вещество было очевидным кандидатом на роль скрытой массы. Однако массивных компактных объектов гало, судя по всему, не хватит, чтобы объяснить громадное количество ненаблюдаемого вещества, которое, по мнению космологов, обязательно должно где-то там присутствовать.

Необходим совершенно новый тип частиц. Это должно быть нечто, о чем теоретики уже думают или могут начать думать, и по определению это должно быть нечто, о существовании чего мы пока не знаем. Так что нам ничего не остается, как только с головой погрузиться в рассуждения.

Один из возможных вариантов — ряд гипотетических частиц, известных как слабо взаимодействующие массивные частицы, или вимп-частицы (WIMP). Предположение состоит в том, что эти частицы появились из плотной перегретой плазмы ранней Вселенной и взаимодействуют с обычным веществом только через слабое ядерное взаимодействие. Такая частица подходит под наши требования, если обладает энергией около 100 ГэВ. Теория суперсимметрии — один из ведущих кандидатов на роль объединителя теории относительности и квантовой механики, предсказывает новую частицу именно с такими параметрами. Это совпадение известно как вимп-чудо. Когда начались наблюдения на Большом адронном коллайдере, теоретики надеялись, что он сможет увидеть целую кучу суперсимметричных партнеров известных частиц.

Как бы не так.

Большой адронный коллайдер исследовал широкий диапазон энергий, включая и 100 ГэВ, и не увидел абсолютно ничего, что не укладывалось бы в Стандартную модель элементарных частиц.

Несколько других экспериментов по поиску вимп-частиц тоже не принесли никаких результатов. Никаких следов их не было обнаружено в излучении близлежащих галактик, и в лабораторных экспериментах, нацеленных на обнаружение остатков от их столкновений с ядрами, они тоже блистательно отсутствуют. Итальянский детектор DAMA/LIBRA с завидной регулярностью видит нечто похожее на сигнал вимп-частиц, которые при попадании в кристалл иодида натрия могут давать вспышку света. Эти сигналы возникают регулярно, как по расписанию, каждый июнь[97], что позволяет предположить, что в какой-то конкретной точке своей орбиты Земля проходит через пучок вимп-частиц. Проблема в том, что другие эксперименты тоже должны регистрировать эти частицы, а этого не происходит. DAMA что-то видит, но это, вероятно, не вимп-частицы.

Может ли оказаться, что темное вещество представляет собой значительно более тяжелые частицы, этаким вимпзиллы (WIMPZILLA)? Может. Данные радиотелескопа WISEP2 убедительно свидетельствуют, что ранняя Вселенная обладала достаточной энергией, чтобы породить неуловимый инфлатон, а он затем мог распасться на вимпзиллы. Все очень хорошо, но эти монстры настолько энергичны, что мы не можем их получить искусственно, а сквозь обычное вещество они проходят так, как будто его вообще нет; в результате мы никак не можем их увидеть. Но, может быть, мы сумеем увидеть то, что они порождают при ударе обо что-нибудь: таким поиском занимается эксперимент IceCube возле Северного полюса. Из 137 нейтрино высоких энергий, обнаруженных им в середине 2015 года, три могли бы быть порождением вимпзилл.

С другой стороны, скрытую массу могут обеспечивать аксионы. Их предложили Роберто Печчеи и Хелен Куинн в 1977 году как средство решения досадной проблемы

CP-инвариантности. Дело в том, что некоторые взаимодействия частиц нарушают базовую симметрию природы, в которой совмещены зарядовое сопряжение (conjugation  $C$ , замена частицы на соответствующую античастицу) и четность (parity  $P$ , зеркальное отображение пространства). Оказывается, эта симметрия не соблюдается при некоторых взаимодействиях частиц посредством слабых ядерных сил. А вот в квантовой хромодинамике, где задействовано сильное ядерное взаимодействие, CP-симметрия есть. Вопрос: почему? Печчеи и Куинн разрешили эту проблему введением дополнительной симметрии, которую разрушает новая частица, названная аксионом. Опять же, экспериментаторы искали эти частицы, но ничего убедительного найти пока не удалось.

Если ничто из перечисленного, то что?

Нейтрино — прекрасный пример странных частиц, которые, казалось, почти невозможно зарегистрировать. Солнце излучает нейтрино во множестве, но первые детекторы обнаружили лишь третью часть от ожидаемого числа солнечных нейтрино. Однако нейтрино бывают трех типов, и сегодня установлено, что в пути они превращаются из одного типа в другой. Первые детекторы регистрировали нейтрино только одного типа. После того как детекторы были доработаны и получили возможность регистрировать нейтрино всех трех типов, их число утроилось. Кроме того, мог бы в принципе существовать и четвертый тип нейтрино, получивший название стерильного нейтрино. Все нейтрино стандартной модели левые; стерильные, если они есть, — правые. (Специальный термин: хиральность, отличающая частицы от их зеркальных отражений.) Если стерильные нейтрино действительно существуют, они должны будут привести нейтрино в соответствие со всеми остальными частицами и, кроме того, объяснить массы нейтрино, что было бы замечательно. Они могли бы в принципе оказаться темным излучением, обеспечивающим взаимодействие между темными частицами, если таковые существуют. Было проведено несколько экспериментов, нацеленных на их обнаружение. MiniBooNE лаборатории Fermilab в 2007 году ничего не обнаружил, а спутник Planck ничего не обнаружил в 2013 году. Но во французском эксперименте с нейтрино, излученными ядерным реактором, 3% антинейтрино испарились в неизвестном направлении. Возможно, это были стерильные нейтрино.

Каталог аббревиатур — названий экспериментов, придуманных для охоты на темное вещество или предположительно способных его заметить, напоминает список организованных правительством квазиавтономных неправительственных организаций: ArDM, CDMS, CRESST, DEAP, DMTPC, DRIFT, EDELWEISS, EURECA, LUX, MIMAC, PICASSO, SIMPLE, SNOLAB, WARP, XENON, ZEPLIN... Хотя эти эксперименты принесли ученым ценную информацию и многого достигли, никакого темного вещества они не обнаружили.

Космический гамма-телескоп Fermi в 2010 году все же обнаружил потенциальные признаки темного вещества в самом центре нашей Галактики. Нечто там излучало большое количество гамма-лучей. Это наблюдение рассматривалось как весомое свидетельство в пользу темного вещества, некоторые формы которого могут распадаться на частицы, которые при столкновениях испускают гамма-лучи. Некоторые физики даже считали этот источник своего рода «дымящимся ружьем», подтверждающим существование темного вещества. Однако в настоящее время кажется, что причина кроется в обычном веществе: тысячи не замеченных прежде пульсаров — а их несложно не заметить, учитывая хотя бы огромное количество объектов в забитом до отказа галактическом ядре и трудности, связанные с наблюдением этой области [98]. Более того, если избыток гамма-излучения действительно вызван темным веществом, то другие галактики тоже должны были бы излучать аналогичное количество гамма-лучей. Если верить Кеворку Абадзяну и Райану Кили, они этого не делают. «Дымящееся ружье» не оправдало ожиданий.

В 2015 году Грегори Рухти, Джастин Рид и другие занялись поисками иных доказательств присутствия темного вещества в диске Галактики. За многие эпохи Млечный Путь проглотил десятки меньших по размеру галактик-спутников и должен был бы съесть и их гало из темного вещества тоже. Как и в случае с протопланетным диском, это темное вещество должно, по идее, быть сосредоточено в диске, примерно совпадающем по форме с диском обычного вещества Галактики. Теоретически, его можно обнаружить, поскольку оно затрагивает химию звезд. Звезды-гости должны быть чуть горячее, чем местные обитатели. Однако исследование 4675 звезд-кандидатов в составе диска не обнаружило ничего подобного, хотя на более далеких

расстояниях обнаружилось некоторое количество таких звезд. Представляется, таким образом, что у Галактики нет диска из темного вещества. Это не мешает ей иметь обычное сферическое гало, но немного усиливает тревожное ощущение, что темного вещества, может быть, не существует вовсе.

\*\*\*

Иногда с темным веществом возникают проблемы, потому что его оказывается слишком много. Вспомним, что шаровые скопления — это относительно небольшие сферические скопления звезд, обращающиеся вокруг нашей Галактики и многих других галактик. Темное вещество взаимодействует только посредством гравитации и, соответственно, не может испускать электромагнитное излучение. Поэтому оно не в состоянии избавляться от тепла, что совершенно необходимо при сжатии под действием гравитации, и, следовательно, не может образовывать такие маленькие сгустки, как шаровые скопления. Следовательно, шаровые скопления не могут содержать много темного вещества. Однако Скарпа считает, что звезды  $\omega$  Центавра — крупнейшего шарового скопления нашей Галактики — движутся слишком быстро, чтобы это можно было объяснить влиянием видимого вещества. А поскольку темного вещества там быть не должно, то получается, что за аномалию в принципе может отвечать что-то другое, быть может, даже другой закон тяготения.

Несмотря на большие затраты изобретательности, времени, энергии и денег на бесплодные до сих пор поиски частиц темного вещества, большинство астрономов (и в особенности космологов) считают существование темного вещества практически установленным фактом. На самом же деле эта загадочная субстанция выполняет свою задачу не так хорошо, как обычно утверждается. Сферическое гало из темного вещества — стандартное допущение — не делает объяснение галактической кривой вращения достаточно убедительным. Другие варианты распределения темного вещества работали бы лучше, но тогда вам пришлось бы объяснять, почему вещество, способное взаимодействовать только посредством гравитации, должно быть распределено таким образом. Сложности такого рода, как правило, замалчиваются, а сомнения в существовании темного вещества воспринимаются как своего рода ересь.

Следует признать, что логический вывод о существовании невидимого вещества на основе наблюдаемых аномалий в орбитах звезд или планет — это метод с давней и в основном вполне достойной историей. Он позволил успешно предсказать существование Нептуна. Он удачно сработал с Плутоном, хотя здесь расчеты основывались на предположениях, которые позже оказались ошибочными, но тем не менее объект был обнаружен вблизи предсказанного положения. Он позволил найти у планет-гигантов несколько небольших лун. А еще он подтвердил теорию относительности, объяснив с ее помощью аномалии в прецессии перигелия Меркурия. Более того, многие экзопланеты были открыты именно так: вывод об их существовании сделан на основе того, как под их влиянием колеблется материнская звезда.

С другой стороны, по крайней мере в одном случае этот метод дал куда менее достойный результат: Вулкан. Как мы видели в главе 4, предсказание этого несуществующего мира, будто бы обращающегося вокруг Солнца внутри орбиты Венеры, было попыткой объяснить прецессию перигелия Меркурия, приписав аномалии возмущающему влиянию некоей необнаруженной пока планеты.

В свете этих прецедентов основной вопрос стоит так: темное вещество — это Нептун или Вулкан? Подавляющее астрономическое большинство убеждено, что это Нептун. Но если так, то это Нептун, которому на данный момент недостает одного — самого Нептуна. В противовес ортодоксальному мнению мы должны указать растущее, особенно среди части физиков и математиков, убеждение в том, что это все же Вулкан.

\*\*\*

Поскольку темное вещество проявляет, похоже, феноменальную скромность всякий раз, когда кто-то его всерьез ищет, нам следует рассмотреть также возможность того, что его вовсе нет в природе. Гравитационные эффекты, которые заставили космологов постулировать его существование, представляются бесспорными, так что нам, вероятно, следует поискать для них какое-то другое объяснение. Мы могли бы, к примеру, пойти по стопам Эйнштейна и заняться поисками нового закона гравитации. У него же получилось!

В 1983 году Мордехай Мильгром представил свою модифицированную ньютоновскую динамику (MOND). В Ньютоновой механике ускорение тела в точности пропорционально приложенной силе. Мильгром предположил, что при очень малых ускорениях это соотношение, возможно, нарушается[99]. В контексте кривых вращения это предположение можно интерпретировать также как небольшое изменение Ньютонова закона тяготения. Следствия из этой гипотезы были проработаны достаточно подробно, при этом различные возражения удалось отвести. MOND часто критиковали за то, что она не является релятивистской, но в 2004 году Яаков Бекенштейн сформулировал релятивистское обобщение, TeVeS (тензор — вектор — скалярная гравитация). Вообще неразумно критиковать новое предложение за то, что в нем будто бы чего-то не хватает, если сам не попытался это что-то найти.

Галактические кривые вращения не единственная гравитационная аномалия, обнаруженная астрономами. В частности, в некоторых скоплениях галактики, судя по всему, связаны между собой сильнее, чем может объяснить гравитационное поле видимого вещества. Самый яркий пример такой аномалии (по мнению сторонников темного вещества) имеет место в скоплении Пуля, где происходит столкновение двух галактических скоплений. Центр масс каждого из скоплений смещен по отношению к тому месту, которое можно найти по наиболее плотным областям нормального вещества, и считается, что расхождение не согласуется ни с одним нынешним предложением по модификации Ньютоновой гравитации. Однако это не конец истории, поскольку в 2010 году результаты нового исследования показали, что эти наблюдения не согласуются и с темным веществом в том виде, в каком оно фигурирует в Стандартной космологической модели  $\Lambda$ CDM. А Мильгром по-прежнему утверждает, что MOND способна объяснить наблюдения в скоплении Пуля. Долго считалось, что MOND не объясняет полностью динамику скоплений галактик, но она способна разобраться примерно с половиной расхождения, за которое в альтернативной модели отвечает темное вещество. За вторую половину, считает Мильгром, отвечает недоступное прямому наблюдению обычное вещество.

Это более вероятно, чем склонны признавать энтузиасты темного вещества. В 2011 году Изабель Гренье заинтересовалась тем, что космологические расчеты суммарного количества вещества не сходятся. Даже если забыть про темное вещество и темную энергию, не хватает примерно половины обычного (специальный термин: барионного) вещества. И ее группа нашла, что большое количество этого вещества может находиться в форме областей водорода, настолько холодного, что он не производит никакого излучения, которое мы могли бы регистрировать с Земли. Данные об этом получены из наблюдений излучения, которое рождает молекулы окиси углерода[100], связанные с космическими пылевыми облаками в пространстве между звездами. А где окись углерода, там обычно и водород, но он настолько холодный, что доступна наблюдениям только окись углерода. Расчеты позволяют предположить, что от внимания ученых таким образом ускользает громадное количество водорода.

И не только: из этого открытия следует, что наши нынешние представления сильно занижают количество нормального вещества. Не настолько, чтобы можно было во всех теориях заменить темное вещество на нормальное, имейте в виду, — но достаточно, чтобы требовалось заново осмыслить все расчеты, связанные с темным веществом. В частности те, что касаются скопления Пуля.

В целом MOND способна объяснить большую часть аномальных наблюдений, связанных с гравитацией, — большинство из них в любом случае допускает несколько исключаящих друг друга интерпретаций. Несмотря на это, она не встречает понимания космологов, считающих ее формулировки произвольными. Лично я не вижу, почему они более произвольны, чем постулирование громадных количеств вещества принципиально нового типа, но полагаю, что смысл в том, что так можно сохранить драгоценные уравнения. Если вы меняете уравнения, то нужно подтверждать какими-то данными выбор новых уравнений, а аргумент «они соответствуют наблюдениям» недостаточен, чтобы объяснить необходимость именно таких модификаций. Опять же, меня этот аргумент не убеждает, потому что то же самое можно сказать и про любые новые типы вещества. Особенно с учетом того, что никто никогда его не регистрировал, кроме как косвенно, по предполагаемому влиянию на видимое вещество.

Существует тенденция считать, что вариантов всего два: MOND или темное вещество. Однако наша теория гравитации не священный текст, и модифицировать ее можно громадным числом способов. Если мы не исследуем эту возможность, может оказаться, что мы поставили не

на ту лошадь. И немного нечестно сравнивать первые робкие выводы нескольких пионеров таких теорий и гигантские усилия, которые традиционная космология и физика вкладывают в поиск темного вещества. Мы с Коэном называем это «проблемой роллс-ройса»: ни один автомобиль никогда не будет доведен до ума, если вы будете настаивать, что уже первый его прототип должен быть лучше знаменитой марки.

Существуют и другие способы не привлекать к объяснениям темное вещество. Хосе Рипальда исследует симметрию обращения времени в общей теории относительности и ее связь с существованием отрицательных значений энергии. Обычно считается, что отрицательная энергия исключена, поскольку ее существование заставило бы квантовый вакуум распадаться путем образования пар частица/античастица. Рипальда указывает, что такие расчеты основаны на предположении о том, что этот процесс протекает только в прямом времени. Если принять во внимание и процесс, текущий в обратном времени, при котором пары частиц взаимно аннигилируют, то суммарное действие всего этого на вакуум будет нулевым. Вообще положительность или отрицательность энергии относительна; знак зависит от того, движется наблюдатель в будущее или в прошлое. Отсюда представление о двух типах вещества: вещество, движущееся в будущее, и вещество, движущееся в прошлое. Для описания их взаимодействия требуются две различные метрики вместо обычной одной, различающиеся знаком, так что такой подход может рассматриваться как модификация общей теории относительности.

Согласно этой гипотезе, первоначально однородная статичная Вселенная должна перейти к ускоряющемуся расширению тогда, когда гравитация усилит квантовые флуктуации. Это снимает необходимость в темной энергии. Что касается темного вещества, Рипальда пишет: «Один из наиболее интересных аспектов “темного вещества” — то, что его кажущееся распределение отличается от распределения [обычного] вещества. Как такое может быть, если “темное вещество” взаимодействует гравитационно и следует по тем же геодезическим кривым, как и все вещество и энергия?» [101]» Вместо этого Рипальда использует аналогию с электростатикой и предлагает гипотезу, что предполагаемое сферическое гало из темного вещества, окружающее галактику, на самом деле представляет собой сферический войд во всепроникающем (в остальном пространстве) распределении вещества, направленного в прошлое.

Не исключено, что в принципе можно избавиться от всех трех добавок, а может быть, даже от Большого взрыва. Один из способов добиться этого — теория, разработанная Али и Дасом, которая исключает начальную сингулярность Большого взрыва и даже допускает бесконечно древнюю Вселенную. Другой способ, если верить Роберту Маккею и Колину Рурку, состоит в том, чтобы заменить обычную модель Вселенной, однородную на больших масштабах, моделью, неоднородной на малых масштабах. Такая модель согласуется с современными представлениями о геометрии Вселенной — мало того, согласуется даже лучше, чем стандартное псевдориманово многообразие, — и никакого Большого взрыва не нужно. Распределение вещества во Вселенной может быть статичным, тогда как отдельные структуры, такие как галактики, приходят и уходят в цикле продолжительностью около 10<sup>16</sup> лет. Красное смещение может оказаться геометрическим, вызванным гравитацией, а не космологическим, вызванным расширением пространства.

Даже если эта теория неверна, она наглядно демонстрирует, что изменение нескольких допущений о геометрии пространства-времени дает возможность сохранить стандартную форму Эйнштейновых уравнений поля, отказаться от трех «костылей» — инфляции, темной энергии и темного вещества — и вывести поведение, в разумной степени согласующееся с наблюдениями. Принимая во внимание «проблему роллс-ройса», согласитесь, имело бы смысл рассматривать более интересные, творческие модели, вместо того чтобы бездумно настаивать на радикальной и ничем объективно не подтвержденной физике.

\*\*\*

Должен признаться, что я придерживаю в рукаве козырь — потенциальный способ сохранить привычные законы природы и при этом полностью отказаться от темного вещества. Не потому, что ему есть экзотические альтернативы, но потому, что расчет, доказывающий вроде бы существование темного вещества, может оказаться ошибочным.

Я сказал «может оказаться» потому, что не хочу перехваливать эту идею. Но математики начинают ставить под сомнение допущения, которые входят в уравнение Кеплера, и их результаты, хоть пока и неполные, показывают, что здесь есть о чем поговорить. В 2015 году Дональд Саари проанализировал математические аргументы, при помощи которых космологи оправдывают присутствие темного вещества, и нашел свидетельства того, что законы Ньютона в теории строения галактик и кривых вращения применены неверно.

Если так, то темному веществу, вероятно, уготована судьба Вулкана.

Объектом внимания Саари является исключительно логическая структура стандартной математической модели, которую астрономы используют для вывода уравнения Кеплера. Его расчеты заставляют усомниться в том, что такая модель применима в данном случае. Это радикальная гипотеза, но Саари — специалист в математике задачи  $n$  тел и гравитации в целом, поэтому имеет смысл познакомиться с его рассуждениями. Я избавлю вас от подробных расчетов — если захочется их проверить, загляните в его статью[102].

Все опирается на уравнение Кеплера. Это уравнение следует прямо и однозначно из одного ключевого модельного допущения. Реалистичная модель галактики должна включать сотни миллиардов звезд. Их планетами и другими мелкими телами, вероятно, можно пренебречь, но точная модель представляет собой задачу  $n$  тел, где  $n$  равно 100 миллиардам или больше. Возможно, это число можно уменьшить без особого изменения результатов, но, как мы видели в главе 9, даже при  $n = 3$  (и даже 2,5) задача  $n$  тел решается очень тяжело.

Поэтому астрономы принимают модельное допущение, которое вместе с одной элегантной математической теоремой позволяет упростить галактику до одного-единственного тела. После этого они, чтобы вывести из уравнения Кеплера теоретическую кривую вращения, анализируют движение звездывокруг этого тела. Допущение состоит в том, что на галактических масштабах галактики больше похожи на непрерывную жидкую среду — звездный суп, чем на дискретную систему  $n$  тел. В таких условиях «непрерывной среды» применима чудесная теорема, доказанная Ньютоном. (При помощи этой теоремы он показывал, что сферические планеты можно рассматривать как точечные массы.) Суть теоремы заключается в том, что при условии некоторых разумных допущений касательно симметрии суммарная сила, действующая внутри и на некоторой сферической оболочке, равна нулю, тогда как сила, действующая вовне, в точности соответствует той, какой она была бы, если все вещество внутри оболочки было сосредоточено в центральной точке.

Представьте себе звезду в галактике — назовем ее пробной звездой — и представьте сферическую оболочку с центром в центре галактики, проходящую через эту звезду. Масса внутри этой оболочки — это то, что я чуть раньше называл «масса внутри данного радиуса». Независимо от того, как ведут себя звезды внутри оболочки, мы можем применить теорему Ньютона и сосредоточить их суммарную массу в центре галактики, при этом суммарная сила, приложенная к пробной звезде, никак не изменится. Звезды вне оболочки никакого воздействия на нее не оказывают, потому что пробная звезда лежит на этой самой оболочке. Значит, движение пробной звезды вокруг центра галактики сводится к задаче двух тел: одна звезда обращается вокруг очень тяжелой точечной массы. Уравнение Кеплера непосредственно следует из такой постановки задачи.

Допущение о симметрии, необходимое для того, чтобы можно было применять теорему Ньютона, состоит в том, что все звезды движутся по круговым орбитам и что все звезды на одинаковом расстоянии от центра галактики движутся с одинаковой скоростью, то есть динамика системы обладает вращательной симметрией. В этом случае несложно вывести точные решения уравнений движения для звездного супа. Можно выбрать либо формулу для распределения массы, либо формулу для кривой вращения, и при помощи уравнения Кеплера вывести вторую формулу. Ограничение одно: по мере роста радиуса масса должна увеличиваться.

Таким образом, модель звездного супа непротиворечива, точно согласуется с Ньютоновой гравитацией и подчиняется уравнению Кеплера. Лежащее в ее основе допущение об осевой симметрии тоже, судя по всему, не противоречит наблюдениям. Так что мы получаем освященную временем модель, основанную на умной и верной математике, и к тому же она делает задачу решаемой. Неудивительно, что астрономам она нравится.

К несчастью, в ней есть математический недостаток. Пока не ясно, насколько этот недостаток серьезен, но он определенно небезобиден и может даже оказаться фатальным.

Два аспекта этой модели вызывают вопросы. Один из них — это допущение о круговых орбитах всех звезд. Но самое серьезное — допущение о непрерывной среде (звездный суп). Проблема в том, что сглаживание распределения звезд внутри оболочки игнорирует важный аспект их динамики. А именно — эффект взаимодействия между звездами, близкими к оболочке, и той звездой, скорость обращения которой мы пытаемся вычислить.

В модели с непрерывной средой не имеет значения, вращается вещество внутри оболочки или находится в покое. Важна лишь суммарная масса внутри оболочки. Более того, сила, с которой эта масса действует на пробную звезду, всегда направлена к центру галактики. Уравнение Кеплера зависит от этих фактов.

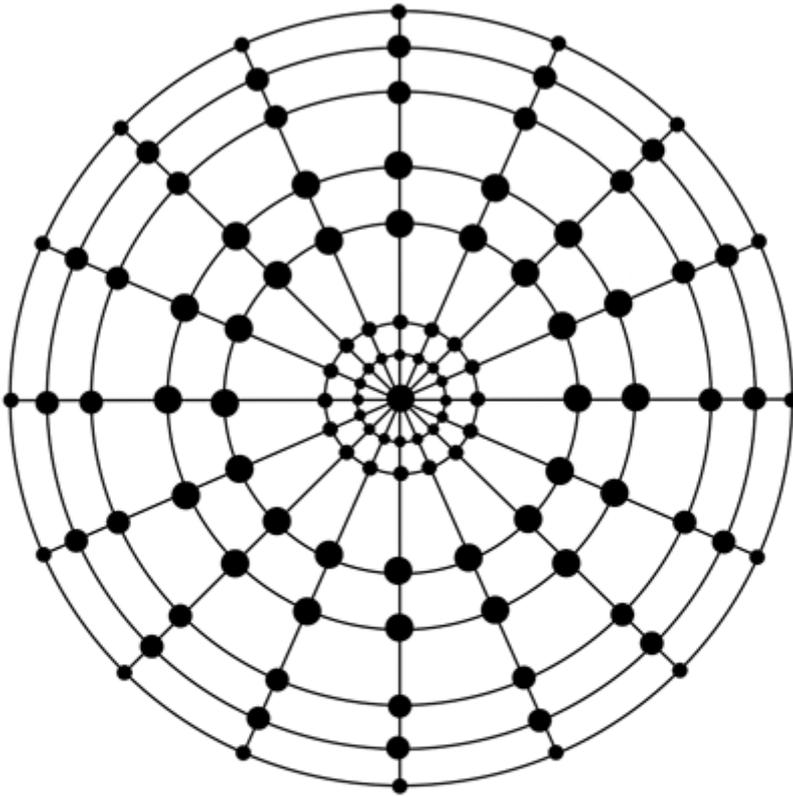
Однако в реальной системе  $n$  тел звезды — дискретные объекты. Если вблизи пробной звезды проходит другая звезда, дискретность подразумевает, что эта проходящая звезда доминирует в местном гравитационном поле и притягивает пробную звезду к себе. Иначе говоря, проходящая звезда «тянет» пробную за собой. Это ускоряет обращение пробной звезды вокруг галактического центра. Конечно, одновременно это замедляет проходящую звезду, но ей на смену быстро приходит другая звезда, идущая непосредственно позади. Такой интуитивный аргумент позволяет предположить, что уравнение Кеплера недооценивает скорости обращения на больших расстояниях от центра. Если так, это помогает объяснить аномалию.

Вот очень упрощенная аналогия. Представьте себе маленький шариковый подшипник, приставленный сверху к вращающемуся прядильному колесу (оба находятся в одной плоскости, а гравитация отсутствует, и ничто не возмущает подшипник). Если колесо представляет собой идеально гладкую окружность, то оно никак не влияет на подшипник и может с тем же успехом покоиться. Дискретная модель  $n$  тел, однако, заменяет колесо на зубчатую шестеренку. Теперь каждый зубчик шестеренки ударяет по подшипнику, давая ему толчок в направлении вращения. С уменьшением зубчиков толчки не исчезнут, хотя и ослабнут, зато зубчиков будет больше. Так что снижение толчка за счет очень маленьких зубчиков — это не то же самое, что толчки от колеса вообще без зубчиков, которые равны нулю.

Данный аргумент нельзя воспринимать просто как неопределенные разглагольствования. Саари проводит расчеты, чтобы доказать, что сглаженный звездный суп не в состоянии адекватно моделировать распределение  $n$  тел для большого  $n$ . В частности, в нем не учитывается эффект «буксировки». Однако в целом этот эффект может оказаться невелик, поскольку реальная динамика  $n$  тел сложнее, чем только что приведенный сценарий. Чтобы оценить важность эффекта буксировки, нам придется использовать точную модель системы  $n$  тел для всех звезд внутри оболочки и найти с ее помощью их суммарное действие на пробную звезду.

Лучший способ сделать это состоит в том, чтобы построить такое состояние системы  $n$  тел, которое сохранит все ключевые свойства, предполагаемые у звездного супа, за исключением непрерывности. Если данное конкретное состояние изменяет уравнение Кеплера, мы можем быть практически уверены, что причина как раз в том, что  $n$  дискретных тел заменены непрерывным звездным супом. Эти ключевые свойства — симметричное распределение масс, при котором каждая звезда движется по окружности, и ее ускорение направлено к центру галактики.

Хотя в общем случае мы не можем записать в явном виде решения задачи  $n$  тел, существует один класс решений, для которых это может быть сделано, известный как центральные конфигурации. В этих особых состояниях концентрические круги звезд, напоминающие паутину, все вращаются с одной и той же угловой скоростью, как если бы конфигурация была жесткой. Эта идея восходит к работе Джеймса Кларка Максвелла 1859 года о стабильности колец Сатурна, упомянутой в главе 6 в качестве доказательства того, что кольца не могут быть сплошными и твердыми. Саари использует аналогичную идею, чтобы показать, что звездный суп не в состоянии правильно моделировать галактическую динамику.



Центральная конфигурация. Возможно любое число спиц и колец.

Массы на каждом из колец равны между собой, но на разных кольцах могут быть разные массы. Радиусы колец могут варьироваться. Для заданной скорости вращения массы могут быть выбраны так, чтобы подходить для заданных радиусов, или наоборот. Также возможны вариации на тему паутины

Центральные конфигурации искусственны в том смысле, что никто не станет ожидать такой правильной формы от реальной галактики. С другой стороны, это разумный выбор для исследования того, как сочетаются непрерывная среда и модель  $n$  тел. Если выбрать в паутине достаточно радиальных линий и достаточно окружностей, мы получим очень плотный звездный суп, который хорошо аппроксимируется непрерывной средой. Паутинная конфигурация тоже удовлетворяет, с очень хорошим приближением, условиям симметричности, использованным при выводе уравнения Кеплера. Так что аппроксимация типа «звездный суп» должна, по идее, работать.

В частности, для вращающейся паутины должно выполняться уравнение Кеплера. Мы можем это проверить, используя тот вариант, в котором распределение массы выражается через скорость на заданном радиусе. Поскольку паутина вращается жестко, скорость пропорциональна радиусу. Таким образом, уравнение Кеплера предсказывает распределение масс, пропорциональное кубу радиуса. Такой результат сохраняется, какими бы ни были на самом деле массы звезд в конфигурации.

Чтобы это проверить, мы проведем точный дискретный расчет  $n$  тел для паутины. Теория центральных конфигураций допускает значительную гибкость в выборе масс звезд. К примеру, если каждая звезда (а следовательно, каждое кольцо) обладает одинаковой массой, центральные конфигурации существуют, и распределение массы вдоль радиуса всегда меньше чем константа, умноженная на радиус. В данном случае, однако, из уравнения Кеплера может следовать, что масса самого далекого внешнего кольца в миллион раз больше массы внутреннего, даже в том случае, когда на самом деле их массы одинаковы. Так что точные расчеты не оправдывают упрощенную модель, из которой получено уравнение Кеплера. Напротив, по мере увеличения

радиуса правильно вычисленная масса растет намного медленнее, чем предсказывает формула Кеплера.

Этот расчет доказывает, что модель в варианте звездного супа может дать результат со значительной ошибкой, даже когда предположения, на которых модель основана, выполняются. Несмотря на популярное выражение, отражающее бытовой, житейский взгляд на вещи, одного исключения достаточно, чтобы опровергнуть любое правило[103].

Расчеты Саари имеют еще одно важное следствие. Если темное вещество, как считают астрономы, существует и образует вокруг галактик обширные, массивные гало, то оно не может на самом деле объяснить аномальную кривую вращения, с которой, собственно, все и началось. Либо закон всемирного тяготения, либо традиционные модельные допущения должны быть неверны.



## За пределами Вселенной

Иногда Создатель Звезд создавал творение, которое, по существу, представляло собой группу из множества связанных вселенных, совершенно отдельных физических систем самых разных типов.

Олаф Стэплдон. «Создатель Звезд»

### ДЛЯ ЧЕГО МЫ ЗДЕСЬ?

Это основной вопрос философии. Сквозь окна своих глаз человек смотрит на мир, который гораздо больше и могущественнее его. Даже если единственный известный вам мир — маленькая деревенька на лесной полянке, существуют еще грозы, львы, а иногда приходится мериться силами и с гиппопотамом — и все это грозные противники. Если, как считают сегодня космологи, ваш мир имеет 91 миллиард световых лет в поперечнике и все время увеличивается, это, откровенно говоря, внушает смирение. Вокруг чертовски много «здесь» и очень мало «нас». Поэтому вопрос «для чего?» приобретает поистине катастрофические размеры.

Однако присущее человечеству чувство собственного величия не может допустить долгого смирения. К счастью, то же действие производит на него чувство чудесного и ненасытное любопытство. Именно поэтому мы осмеливаемся задать себе этот основной вопрос.

Контраргументы, обсуждавшиеся в двух предыдущих главах, не нарушили убеждение космологов в том, что они знают ответ: Большой взрыв и дополнения к нему корректно описывают возникновение Вселенной. Аналогично физики убеждены, что теория относительности и квантовая теория вместе описывают поведение Вселенной. Было бы хорошо объединить эти теории, но они неплохо работают и по отдельности — если получится выбрать ту, что уместна в данном случае.

Биология рассказывает нам еще более убедительную историю о происхождении жизни и ее эволюции в миллионы видов, населяющих сегодня Землю, в том числе и нас. Некоторые адепты некоторых вероучений утверждают, что эволюция требует немисливо маловероятных совпадений, но биологи раз за разом объясняют слабые места этих утверждений. В наших представлениях о жизни на Земле множество пробелов, но постепенно, один за другим, эти пробелы заполняются. Основной сюжет вполне логичен и подтверждается по крайней мере четырьмя независимыми линиями доказательств — данные палеонтологической летописи, ДНК, кладистика (родословное древо организмов) и эксперименты по скрещиванию, искусственному отбору и выведению новых пород и сортов.

Однако, когда дело доходит до космологии, даже космологов и физиков тревожит, что Вселенная, как мы ее понимаем, требует исключительно точных совпадений. Вопрос не в том, чтобы объяснить поведение Вселенной, что представляет собой Вселенная, вопрос в том, почему

верно именно это конкретное объяснение, а не целая куча других, которые на первый взгляд кажутся несколько не менее вероятными. Это космологическая проблема тонкой настройки — а эту проблему и креационисты, и космологи воспринимают очень серьезно.

Необходимость в тонкой настройке возникает потому, что физические законы зависят от нескольких фундаментальных констант, таких как скорость света, постоянная Планка в квантовой теории и постоянная тонкой структуры, определяющая значение электромагнитной силы [104]. Каждая константа имеет вполне конкретное численное значение, измеренное учеными. К примеру, постоянная тонкой структуры равна приблизительно 0,00729735. Ни одна общепринятая физическая теория не предсказывает значения этих констант. Насколько нам известно, постоянная тонкой структуры вполне могла бы равняться 2,67743, или 842 006 444,998, или 42.

Важно ли это? Еще как. Разные значения констант ведут к разной физике. Если постоянная тонкой структуры была бы чуть больше или чуть меньше, атомы имели бы другую структуру и, возможно, вообще потеряли бы стабильность. Так что на свете не было бы ни людей, ни планеты, на которой они могли бы жить, ни атомов, из которых можно было бы составить то и другое.

По мнению многих космологов и физиков, значения констант, при которых существование человека возможно в принципе, не должны отклоняться больше чем на несколько процентов от их значений в этой Вселенной. Шанс на то, что это условие будет выполнено хотя бы для одной константы, примерно соответствует шансу выбросить монетку орлом шесть раз подряд. Поскольку таких констант по крайней мере 26, шанс на то, что все константы нашей Вселенной имеют те значения, которые имеют, и таким образом делают ее пригодной для существования жизни, соответствует шансу выбросить монетку орлом 156 раз подряд. Вероятность этого примерно равна 10–47, или

0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 01.

Таким образом, нас, по идее, существовать не должно.

Тем не менее... вот они мы. И это загадка.

Некоторые религиозные люди видят в этом расчете доказательство существования Бога, который во всемогуществе своем имел возможность выбрать именно те величины для фундаментальных констант, которые делают жизнь возможной. Однако Бог, обладающий подобными возможностями, с той же легкостью мог выбрать совершенно иные фундаментальные константы, а затем совершить чудо — и Вселенная все равно возникла бы, несмотря на неправильные константы. Всемогущему творцу вообще нет нужды использовать какие бы то ни было фундаментальные константы.

Судя по всему, здесь имеется два варианта. Либо все это организовала некая сверхъестественная сила, либо будущие физики сумеют объяснить кажущиеся совпадения и показать, почему существующие фундаментальные константы неизбежны.

Не так давно космологи добавили третью возможность: Вселенная пробует все возможные значения по очереди. Если так, то рано или поздно Вселенная наткнется на значения, пригодные для жизни, и жизнь разовьется. Если разумная жизнь появляется и начинает потихоньку разбираться в космологии, то вопрос о том, почему и для чего она появилась, неизбежно поставит ученых в тупик. Только додумавшись до третьего варианта, разумные живые существа смогут успокоиться и перестать ломать голову над этой проблемой.

Третий вариант называется мультивселенной или мультиверсом. Это свежий, оригинальный взгляд, и из него можно извлечь по-настоящему хитроумную физику. Большую часть данной главы я буду говорить о различных вариантах мультивселенной.

А затем я представлю вам четвертый вариант.

\*\*\*

Современная космология собрала воедино достаточно точное, как она считает, описание того, что мы обыкновенно подразумеваем под «вселенной», так что пришлось изобрести новое слово: «мультивселенная». Оно включает в себя вселенную в обычном смысле плюс произвольное число гипотетических дополнений. Эти «параллельные» или «альтернативные» миры могут

сосуществовать с нашим миром, могут располагаться вне его или быть совершенно от него независимы. Подобные рассуждения часто отбрасываются как ненаучные, поскольку их трудно проверить на реальных данных. Однако некоторые из них все же проверяемы, по крайней мере в принципе, стандартными научными методами: о вещах, которые невозможно увидеть или измерить непосредственно, судят по вещам, которые можно увидеть или измерить. Конт считал невозможным узнать когда-либо химический состав звезды. Спектроскопия перевернула эти представления с ног на голову: зачастую химический состав звезды — это почти все, что мы знаем о ней.

В книге «Скрытая реальность» специалист по математической физике Брайан Грин описывает девять различных типов мультивселенной. Я расскажу о четырех:

- Лоскутная мультивселенная: бесконечное лоскутное одеяло, в котором любая область имеет почти точную свою копию где-то в другом месте.
- Инфляционная мультивселенная: всякий раз, когда не прекращающаяся инфляция разрывает телевизор и кота, появляется пузырь новой вселенной с другими значениями фундаментальных констант.
- Ландшафтная мультивселенная: сеть альтернативных вселенных, связанных квантовым туннелированием, каждая из которых подчиняется своему варианту теории струн.
- Квантовая мультивселенная: суперпозиция параллельных миров, каждый из которых существует отдельно, сам по себе. Вселенская версия знаменитого кота Шрёдингера, живого и мертвого одновременно.

Грин утверждает, что разумно рассматривать все эти альтернативные вселенные, и объясняет, как их существование до некоторой степени подтверждается современной физикой. К тому же различные вопросы, которые мы не понимаем, могут быть разрешены, если думать о них с позиций мультивселенной. Он указывает, что фундаментальная физика раз за разом демонстрирует нам, что наивный взгляд на мир, представляемый нашими чувствами, ошибочен и мы можем ожидать таких же демонстраций и в дальнейшем. Кроме того, он придает некоторый вес одной общей черте всех теорий мультивселенной: все они «предполагают, что наша картина реальности, основанная на здравом смысле, представляет собой лишь часть более величественного целого».

Я не убежден, что наличие множества противоречащих друг другу спекулятивных вариантов делает любой из них более правдоподобным и повышает его шанс оказаться верным. Это как религиозные секты: если вы не принадлежите к адептам одной из них, фундаментальные различия в доктрине в сочетании с общими претензиями на божественное откровение, как правило, дискредитируют в ваших глазах их все. Но давайте посмотрим на несколько мультивселенных, и вы сами сможете все решить для себя. Естественно, я добавлю к описанию и кое-какие собственные мысли.

\*\*\*

Начну с лоскутной мультивселенной. На самом деле это не настоящая мультивселенная, но вселенная настолько большая, что ее обитатели могут наблюдать лишь отдельные ее клочки. Правда, клочки эти частично перекрываются и накладываются друг на друга. Для существования такой мультивселенной необходимо, чтобы пространство было бесконечным или по крайней мере невообразимо огромным — намного больше наблюдаемой вселенной. Когда эта идея сочетается с дискретной природой квантовой механики, у нее возникает одно интересное следствие. Число возможных квантовых состояний для наблюдаемой вселенной хотя и велико, но конечно. Наблюдаемая вселенная может реализовывать конечное число разных вещей.

Для простоты рассмотрим бесконечную вселенную. Мысленно разрежем ее на куски, как лоскутное одеяло, так чтобы каждый кусок был достаточно велик, чтобы вместить всю наблюдаемую вселенную. Лоскуты одинакового размера имеют равное число квантовых состояний; я назову их лоскут-состояниями. Поскольку бесконечная вселенная содержит бесконечное число лоскутов, каждый с одним и тем же конечным числом состояний, по крайней мере одно лоскут-состояние должно существовать бесконечное число раз[105]. Принимая во

внимание случайную природу квантовой механики, бесконечно часто наверняка будет возникать каждое лоскут-состояние.

Число различных лоскут-состояний для лоскутов размером с наблюдаемую вселенную составляет примерно 1010122. Чтобы получить это число, для начала напишите 1 и 122 нуля после нее, что довольно просто; затем начните заново и напишите единицу и за ней это гигантское число нулей (1 со 122 нулями, или 10122 штук). (Не пытайтесь проделать все это дома. Во вселенной слишком мало частиц, не хватит ни на чернила, ни на бумагу, все закончится вскоре после начала работы.) Аналогичным образом можно получить, что ближайшая точная копия вас находится на расстоянии 1010128 световых лет. Для сравнения: у нас край наблюдаемой Вселенной находится менее чем в 1011 световых годах отсюда[106].

Неточные копии организовать проще, и они более интересны. Вполне может существовать лоскут, в котором найдется ваша копия, только с другим цветом волос, или другого пола, или с другим адресом где-нибудь по соседству, или в другой стране. Или, может быть, там вы премьер-министр Марса. Такие неполные совпадения встречаются чаще, чем точные копии, хотя их тоже чрезвычайно мало, и разделяют их большие расстояния.

Мы не можем посещать области, лежащие всего в нескольких световых годах от нас, не говоря уже о расстояниях в 1010128 световых лет, поэтому научно проверить эту теорию не представляется возможным. Определение лоскута исключает причинно-следственные связи между неперекрывающимися лоскутами, поэтому попасть отсюда туда невозможно. Может быть, какое-то теоретическое следствие этой теории можно было бы проверить, но надежда на это слабая; к тому же все будет зависеть от того, на основании какой теории делаются выводы.

\*\*\*

Ландшафтная мультивселенная особенно интересна — ведь она могла бы решить давнюю космологическую головоломку, связанную с тонкой настройкой.

Идея проста. Шансы на то, что произвольная отдельно взятая вселенная будет иметь в точности нужные значения фундаментальных констант, могут быть маленькими, но это не препятствие, если вселенных будет достаточно много. При шансах 10<sup>-47</sup> к одному у вас будет ощутимая вероятность получить хотя бы одну вселенную, пригодную для жизни, если вы сделаете их 10<sup>47</sup>. Сделайте их еще больше, и вероятное число успешных попыток тоже возрастет. В любой такой вселенной — и только в них — жизнь может возникнуть, развиваться, прийти к вопросу «для чего мы здесь?», выяснить, насколько это невероятно, и начать по этому поводу тревожиться.

На первый взгляд это похоже на слабый антропный принцип: очевидно, что единственные вселенные, в которых существа могут задаться вопросом «для чего мы здесь?», — это те вселенные, в которых жизнь возможна. Однако, по общему мнению, один этот факт не в состоянии разрешить проблему. Встает следующий вопрос: если существует лишь одна вселенная, как так получилось, что она сделала такой маловероятный выбор? Однако в контексте ландшафтной вселенной это не вопрос. Если сделать достаточно случайных вселенных, возникновение жизни по крайней мере в одной из них гарантировано. Это немного похоже на лотерею. Шанс на то, что миссис Смит из соседнего дома выиграет в лотерею в одном отдельно взятом выпуске, составляет (точнее, составляла в Великобритании до недавнего изменения правил) около одного шанса из 14 млн. Однако миллионы людей играют в лотерею, так что шанс на то, что кто-нибудь выиграет в лотерею, намного больше и составляет около двух третей. (В трети случаев не выигрывает никто, и приз переходит на следующий розыгрыш и добавляется к общей сумме.)

В ландшафтной мультивселенной жизнь выигрывает космологическую лотерею, купив все билетки.

Технически ландшафтная вселенная — это вариант инфляционной вселенной, предсказанный теорией струн. Теория струн, в свою очередь, попытка объединить теорию относительности с квантовой механикой, заменив точечные частицы на крохотные многомерные «струны». Здесь не место вдаваться в детали, но у этой теории есть серьезная проблема: существует около 10<sup>500</sup> различных способов сформулировать теорию струн. Некоторые ее варианты дают значения фундаментальных констант, близкие к их значениям в нашей Вселенной; большинство не дает таких значений. Если бы существовал какой-то волшебный способ выделить один

конкретный вариант теории струн, мы могли бы предсказать фундаментальные константы, но в настоящий момент нет причин предпочесть какой-то один вариант другому.

Мультивселенная теории струн позволяет исследовать их все последовательно, одну за другой, — в чем-то это напоминает серийную моногамию. Если теоретик достаточно усердно делает пассы руками, квантовая неопределенность может позволить отдельные переходы от одного варианта теории струн к другому, так что наша единственная Вселенная будет брести, как пьяная, сквозь пространство струнно-теоретических вселенных. Константы близки к нашим, значит, жизнь может развиваться. Выясняется, что эти фундаментальные константы могут также порождать очень долгоживущие вселенные, черты которых напоминают черные дыры. Так что последовательно изменяющаяся вселенная склонна держаться вблизи интересных мест — там же, где держатся подобные нам существа.

Это поднимает более тонкий вопрос. Почему получается, что пригодность для жизни и долгое времясуществования связаны? Ли Смолин предложил ответ для инфляционной вселенной: новые вселенные, отпочковавшиеся от старой посредством черных дыр, могут развиваться путем естественного отбора, приходя в конечном итоге к тем сочетаниям фундаментальных констант, которые не только делают жизнь возможной, но и дают ей достаточно времени, чтобы запустить процесс и усложниться в достаточной степени. Чудная идея, но неясно, как две вселенные могут конкурировать между собой, чтобы механизм дарвиновского отбора заработал.

Ландшафтная мультивселенная имеет определенное количество последователей, но, по словам Льюиса Кэрролла, это «максима потрясающая, но банальная». Так можно объяснить что угодно. Металлоидный киберорганизм с семью щупальцами, живущий во вселенной с совершенно иными фундаментальными константами, мог бы выдвинуть в точности этот же аргумент в пользу того, что его вселенная существует и самым точным образом настроена на металлоидную жизнь. Если теория предсказывает все возможные результаты, как можно ее проверить? Можно ли считать ее научной?

Джордж Эллис долгое время был скептически настроен по отношению к мультивселенной. Говоря об инфляционной вселенной, но добавляя при этом, что то же относится и к остальным ее типам, он писал:

«Свидетельства в пользу мультивселенной неубедительны. Основная причина — чрезвычайная гибкость этой гипотезы... так что мы предполагаем существование громадного — возможно, даже бесконечного — числа ненаблюдаемых сущностей для того только, чтобы объяснить всего одну существующую вселенную. Эта гипотеза едва ли отвечает критерию английского философа XIV века Уильяма Оккама о том, что “не следует умножать число сущностей сверх необходимого”».

Закончил он, правда, на более позитивной ноте: «Нет ничего плохого в научно обоснованных философских рассуждениях, которыми и являются гипотезы мультивселенной. Но нам следует называть их тем, чем они являются».

\*\*\*

Квантовая мультивселенная появилась раньше других, и виноват в этом Эрвин Шрёдингер. Кот, помните? Ну, знаете, тот, что одновременно и жив и мертв — до тех пор, пока вы не посмотрите, как он там. В отличие от остальных мультивселенных, разные миры квантовой мультивселенной сосуществуют друг с другом и даже занимают одно и то же пространство и время. Писатели-фантасты обожают этот сюжет.

Независимое сосуществование возможно потому, что квантовые состояния могут перекрываться, то есть складываться друг с другом. В классической физике что-то похожее делают, к примеру, волны на воде: если пути двух групп волн пересекаются, их пики складываются, образуя еще более высокие пики, а при попадании пика на впадину они взаимно ликвидируются. Однако в квантовом царстве этот эффект заходит гораздо дальше. К примеру, частица может вращаться по часовой стрелке или против (здесь я упрощаю, но идею вы поняли). Когда эти состояния накладываются, они не нейтрализуются. Вместо этого вы получаете частицу, которая вращается в обе стороны одновременно.

Если в момент, когда система находится в одном из таких объединенных состояний, вы проводите измерение, происходит нечто замечательное. Вы получаете определенный ответ. У пионеров квантовой теории это вызывало горячие споры; споры эти разрешились на

конференции в Дании, где большинство ученых согласились считать, что акт наблюдения системы каким-то образом заставляет ее состояние «коллапсировать» (схлопываться) в одну или другую из составляющих его компонент. Это толкование называется копенгагенской интерпретацией.

Шрёдингера эта интерпретация до конца не убедила, и он придумал мысленный эксперимент, чтобы объяснить почему. Посадите кота в непроницаемый ящик и туда же поместите какой-нибудь радиоактивный атом, ампулу ядовитого газа и молоток. Устройте так, чтобы в случае, если атом распадется, испустив при этом частицу, молоток разобьет ампулу и газ убьет кота. Закройте ящик и подождите.

Через некоторое время задайте вопрос: кот в ящике жив или мертв?

В классической (то есть некантовой) физике он находится в одном из этих двух состояний, но вы никак не можете определить, в каком именно, пока не откроете ящик. В квантовой физике состояние радиоактивного атома есть суперпозиция состояний «распался» и «не распался», и оно остается таковым, пока вы это состояние не пронаблюдаете, открыв ящик. Тогда состояние атома мгновенно коллапсирует в одно из двух возможных состояний. Шрёдингер указывал, что в этой ситуации те же рассуждения применимы и к коту, которого можно рассматривать как громадную систему взаимодействующих квантовых частиц. Благодаря устройству в ящике кот остается в живых, если атом не распадается, и умирает, если распадается. Поэтому кот должен быть жив и мертв в одно и то же время... до того момента, когда вы откроете ящик, вызвав тем самым коллапс волновой функции кота, и выясните, чем дело кончилось.

В 1957 году Хью Эверетт применил аналогичные рассуждения к Вселенной в целом; он предположил, что это могло бы объяснить, как происходит коллапс волновой функции. Позже Брюс ДеВитт назвал гипотезу Эверетта многомировой интерпретацией квантовой механики. На примере кота, можно сказать, что сама Вселенная представляет собой комбинацию всех ее возможных квантовых состояний. Однако на этот раз не существует способа открыть ящик, поскольку вне Вселенной ничего нет и ничто не может заставить квантовое состояние Вселенной схлопнуться. Любой внутренний наблюдатель — это часть одного из составляющих ее состояний и потому видит лишь соответствующую часть волновой функции Вселенной. Живой кот видит нераспавшийся атом, тогда как параллельный мертвый кот... Хмм, дайте мне еще немного подумать.

Короче говоря, каждый параллельный наблюдатель видит себя живущим лишь в одном из громадного множества параллельных миров, существующих одновременно, но в разных состояниях. Эверетт съездил в Копенгаген к Нильсу Бору, чтобы рассказать ему об этой идее, но Бора возмутило предположение о том, что волновая функция Вселенной не схлопывается и не может схлопнуться. Бор и его единомышленники решили, что Эверетт ничего не понимает в квантовой механике, и сказали ему об этом в весьма некомплементарном тоне. Эверетт говорил, что его визит был «обречен с самого начала».

Сама по себе эта идея очень занятна, хотя ее можно сформулировать и математически строго. Ей отнюдь не помогает то, что о многомировой интерпретации часто рассказывают в терминах исторических событий в напрасной попытке сделать эту гипотезу более понятной. В той компоненте Вселенной, которую наблюдаем мы с вами, Гитлер проиграл Вторую мировую войну. Но существует другая параллельная Вселенная, в которой он (ну, на самом деле совершенно другой Гитлер, хотя никто об этом не говорит) выиграл войну (ну, вообще-то другую войну...), и те варианты вас и меня живут в той компоненте и видят вокруг именно ее. Или, может быть, мы погибли во время войны, или вообще не родились... Кто знает?

Многие физики настаивают, что Вселенная на самом деле такая и что они могут это доказать. После этого они рассказывают вам об экспериментах с электронами. Или, относительно недавно, с молекулами. Но целью Шрёдингера было подчеркнуть, что кот — это не электрон. Кот как квантово-механическая система состоит из поистине гигантского числа квантовых частиц. Эксперименты на одной частице, или на десятке частиц, или даже на миллиарде ничего не расскажут нам про кота. Или про Вселенную.

Кот Шрёдингера приобрел немалую популярность среди физиков и философов и породил огромное число литературных произведений, в которых ставятся всевозможные дополнительные вопросы. Почему не поместить в ящик, помимо всего прочего, камеру и не снять происходящее, а позже не просмотреть запись? Но нет, ничего не получится: пока ящик не открыт, камера будет

в суперпозиции состояний «снят мертвый кот» и «снят живой кот». Может ли кот наблюдать собственное состояние? Да, если он жив, и нет, если мертв, но внешнему наблюдателю все равно придется ждать открытия ящика. Дайте животному мобильный телефон — нет, это уже глупо, к тому же здесь тоже будет суперпозиция. В любом случае ящик-то непроницаемый. Он обязательно должен быть непроницаемым, в противном случае вы сможете узнать о состоянии кота, не заглядывая внутрь.

На самом деле непроницаемых ящиков не существует. Имеет ли смысл мысленный эксперимент, в котором фигурируют невозможные вещи? Предположим, мы заменим этот радиоактивный атом атомной бомбой, которая либо взорвется, либо нет. Согласно уже знакомым рассуждениям, пока мы не откроем ящик, мы не узнаем, сделала она это или нет. Военные все отдали бы за ящичек, способный сохранить прежний вид, когда у него внутри взрывается ядерный боеприпас.

Некоторые идут еще дальше, утверждая, что в наблюдатели годится только человек (или по крайней мере разумное существо) — да, с этим у кошачьих не очень. Некоторые предполагают, что Вселенная потому и породила нас, что мы можем играть роль наблюдателей, заставляя волновые функции схлопываться и порождая таким образом Вселенную. Мы здесь, потому что мы здесь.

\*\*\*

Эта замечательная причинно-следственная цепочка поднимает важность рода человеческого на недостижимую высоту, но игнорирует ту особенность, из-за которой Бор не принял теорию Эверетта: в многомировой интерпретации волновая функция Вселенной не коллапсирует. Она откровенно противоречит принципу Коперника и отдает гордыней. Кроме того, она упускает из виду один момент: загадка Шрёдингера кота относится к наблюдениям, а не к наблюдателям. И дело там не в том, то происходит в момент наблюдения. Дело в том, что такое наблюдение в принципе.

Математический аппарат квантовой механики включает два аспекта. Один из них — уравнение Шрёдингера, которое используется для моделирования квантовых состояний и имеет хорошо известные и вполне определенные математические характеристики. Второй аспект — то, как мы представляем наблюдение. Теоретически, это математическая функция. Вы вводите в эту функцию некую квантовую систему и получаете на выходе ее состояние — результат наблюдения. Так вы вводите число 2 в функцию логарифма и получаете  $\log 2$ . Это все очень понятно и замечательно, но на самом-то деле состояние системы взаимодействует с состоянием измерительного прибора, который представляет собой куда более сложную квантовую систему. Это взаимодействие слишком сложно, чтобы его можно было исследовать математически сколько-нибудь подробно, поэтому считается, что оно сводится к одной-единственной аккуратной функции. Нет, однако, никаких причин полагать, что в реальности дело обстоит именно так, и множество причин подозревать, что все на самом деле совсем не так.

Мы имеем дело с несоответствием между точным, но своенравным квантовым представлением измерительного процесса и ситуативным дополнением — гипотетической функцией. Неудивительно, что в результате возникают странные и конфликтующие между собой интерпретации. Аналогичные вопросы вылезают всюду в квантовой теории и в основном остаются незамеченными. Все внимание обращено на уравнения и методы их решения; никто не думает о «граничных условиях», которые представляют задействованную аппаратуру или наблюдения.

Хорошая иллюстрация — ящик, в котором можно незаметно взорвать ядерную бомбу. Еще один пример — полупрозрачное зеркало, отражающее часть света, а остальное пропускающее насквозь. Квантовые экспериментаторы любят это устройство потому, что оно действует как светоделитель: берет поток фотонов и направляет их случайным образом по двум разным направлениям. Сделав с одним из лучей все, что нужно, экспериментатор вновь соединяет оба луча, чтобы сравнить результат. В квантово-механических уравнениях полупрозрачное зеркало — идеальный объект, не оказывающий никакого действия на фотоны, а только направляющий их в разные стороны с 50%-ной вероятностью. Это как барьер на пути бильярдного шара, который то появляется, и тогда шар идеально упруго отражается от него, то исчезает, и тогда шар свободно пролетает насквозь.

Однако реальное полупрозрачное зеркало — это громадная квантовая система, состоящая из атомов серебра, разбросанных по стеклянному листу. Когда фотон попадает на такое зеркало, он либо отскакивает от элементарной частицы в составе атома серебра, либо проникает глубже. Отскочить он может в любом направлении, под любым углом. Слой атомов серебра тонок, но толще, чем в один атом, так что фотон может столкнуться с атомом серебра глубже, не говоря уже об очень путаной атомной структуре стекла. Чудесным образом после всех взаимодействий фотон либо отражается, либо проходит насквозь неизменным. (Есть и другие возможности, но встречаются они так редко, что мы можем не обращать на них внимания.) Так что реальность отличается от гипотетической ситуации с бильярдным шаром. Скорее можно представить себе, что автомобиль-фотон въезжает в город с севера и взаимодействует по пути с тысячами других машин, после чего чудесным образом выезжает из города либо на юг, либо на восток, выбирая направление случайно. В чистой идеальной модели эта сложная система взаимодействий игнорируется, и остается только нечеткий фотон и четкое, хотя и случайно отражающее, зеркало.

Да, я знаю, что это модель, и она, судя по всему, работает. Но нельзя вводить подобную идеализацию и при этом утверждать, что используется только уравнение Шрёдингера.

\*\*\*

В последнее время физики рассматривают квантовые наблюдения с по-настоящему квантово-механической точки зрения, вместо того чтобы постулировать нереалистичные ограничения классического типа. То, что они обнаружили, представляет все дело в куда более разумном свете.

Во-первых, нельзя не признать, что суперпозиции состояний, как в ситуации с котом, создаются в лабораториях для все более крупных квантовых систем. Среди примеров, более или менее по возрастанью, можно назвать протон, ион бериллия, молекулу бакминстер-фуллерена (60 атомов углерода, организованные в кристаллическую решетку в форме усеченного икосаэдра), и электрический ток (в котором задействованы миллиарды электронов) в сверхпроводящем устройстве квантовой интерференции SQUID. Пьезоэлектрический камертон, состоящий из триллионов атомов, удалось поместить в суперпозицию вибрирующего и невибрирующего состояний. Это еще не коты, но достижения замечательные и контринтуитивные. Подбираясь к живым существам, Ориол Ромеро-Исарт с коллегами предложили в 2009 году создать Шрёдингеров вирус гриппа. Поместите вирус в вакуум, охладите до квантового состояния с минимальной энергией, а затем воздействуйте на него лазером. Вирус гриппа достаточно жизнестоек, чтобы выдержать такое обращение, а в результате он, по идее, должен оказаться в суперпозиции исходного состояния и возбужденного, то есть более высокоэнергетического, состояния.

Этот эксперимент пока не проведен, но даже если кому-то удастся реализовать его, вирус — это не кот. Квантовые состояния крупномасштабных объектов отличаются от квантовых состояний мелкомасштабных объектов, таких как электроны и SQUID, поскольку суперпозиции состояний крупных систем намного более хрупки. Можно поместить электрон в комбинацию состояний с вращением по часовой стрелке и против и держать его там почти неограниченное время, изолировав от окружающего мира. Если попробовать проделать то же с котом, суперпозиция декогерирует: ее тонкая математическая структура быстро распадется. Чем сложнее система, тем быстрее она декогерирует. Суть в том, что даже в квантовой модели кот ведет себя как классический объект, если только вы не смотрите на него невообразимо короткое время. Участь Шрёдингера кота не более загадочна, чем рождественский подарок от тети Веры: развернешь — узнаешь. Да, конечно, она всегда присылает либо носки, либо шарф, но это не значит, что на этот раз ее подарок представляет собой суперпозицию того и другого.

Препарирование квантовой волновой функции Вселенной в суперпозицию человеческих историй — Гитлер победил или не победил — это полная чепуха. Квантовые состояния не рассказывают человеческих историй. Если бы можно было взглянуть на квантовую волновую функцию Вселенной, то мы не нашли бы в ней никакого Гитлера. Даже частицы, из которых он состоял, все время менялись бы по мере того, как у него выпадали бы волосы, а на пиджак садилась пыль. Точно так же по волновой функции кота невозможно сказать, жив он, мертв или только что превратился в кактус.

\*\*\*

Даже в рамках квантовой механики существует математическая проблема, связанная с обычным подходом к парадоксу кота Шрёдингера. В 2014 году Джейков Фоукзон, Александр Потапов и Станислав Подосенов разработали новый дополняющий подход. Их расчеты показывают, что даже если кот действительно находится в состоянии суперпозиции, то его состояние, которое вы увидите, открыв ящик, имеет «определенные и предсказуемые результаты измерений». Исследователи делают вывод: «Вопреки [иным] мнениям, ”взгляд“ на результат ничего не меняет, он лишь информирует наблюдателя о том, что уже произошло». Иными словами, кот определенно либо жив, либо мертв еще до того, как кто-либо откроет ящик, но внешний наблюдатель на этом этапе не знает, в каком именно состоянии тот находится.

В основу их расчета положено тонкое различие. Обычное представление суперпозиции состояний кота выглядит так:

$$|\text{кот}\rangle = |\text{жив}\rangle + |\text{мертв}\rangle.$$

Здесь символы  $|\ \rangle$  — это обозначение, при помощи которого специалисты по квантовой физике записывают конкретные состояния, поэтому читать это можно как «состояние такое-то». Я опустил кое-какие константы (амплитуды вероятностей), на которые эти состояния домножаются.

Однако такая формулировка плохо сочетается с развитием квантовых состояний во времени. Модель Гирарди — Римини — Вебера — математическая методика анализа коллапса волновой функции — требует введения времени в явном виде. Причинность запрещает совмещение состояний, имеющих место в разное время, поэтому мы должны записать состояние как

$$|\text{кот в момент } t\rangle = |\text{живой кот в момент } t \text{ и нераспавшийся атом в момент } t\rangle + |\text{мертвый кот в момент } t \text{ и распавшийся атом в момент } t\rangle.$$

Это запутанное состояние, как говорят специалисты. Оно не является суперпозицией «чистых» состояний, таких как «живой кот» или «нераспавшийся атом». Нет, это суперпозиция смешанных состояний, состояния кота и состояния атома, представляющих сколлапсировавшее состояние спаренной системы кот/атом. Оно сообщает нам, что еще до того, как мы открыли ящик, либо атом уже распался и (совершенно предсказуемо) убил кота, либо не произошло ни того ни другого. В этом нет ничего парадоксального, и именно этого мы ожидали бы от классической модели наблюдаемого процесса.

В 2015 году Игорь Пиковский, Магдалена Зых, Фабио Коста и Часлав Брукнер ввели в обсуждение проблемы новый фактор — выяснили, что гравитация вызывает еще более быструю декогеренцию суперпозиций. Причина — релятивистское замедление времени — эффект, который заставляет время остановиться на горизонте событий черной дыры. Даже крохотное замедление времени, вызванное слабым гравитационным полем, вмешивается в существование квантовых суперпозиций. Так что гравитация почти мгновенно декогерирует шрёдингерова кота до состояния либо «жив», либо «мертв». Разве что вы постулируете, что ящик непроницаем для гравитации, что само по себе сложно, поскольку подобных материалов не существует.

Вероятно, точек зрения на кота Шрёдингера и тесно связанную с ним многомировую интерпретацию квантовой механики на свете существует больше, чем квантовых физиков. Я рассказал всего лишь о нескольких попытках разрешить этот парадокс, но даже они указывают на то, что квантовую мультивселенную ни в коем случае нельзя считать делом решенным. Так что пусть вас не тревожит возможность того, что где-то существует другая вселенная, параллельная этой, и что там ваш двойник живет в мире, где победил Гитлер. Не исключено, что такое возможно, но квантовая механика не дает убедительных причин считать, что это действительно так.

Но для фотона это действительно правда. И это само по себе замечательно.

\*\*\*

К настоящему моменту вы, вероятно, поняли, что я скептически настроен по отношению к мультивселенной. Мне очень нравится связанная с ними математика, и в качестве основы для научно-фантастического сюжета эта гипотеза тоже замечательно подходит, но в ней слишком

много ничем не подтвержденных допущений. Среди различных вариантов мультивселенной, о которых я говорил, выделяется, пожалуй, ландшафтная вселенная, в пользу которой все же имеются некоторые данные. Дело не в том, что у нас есть доказательства ее существования — что бы это ни значило, — но она все же разрешает, кажется, мучительный вопрос исключительно маловероятной тонкой настройки фундаментальных констант.

Что подводит меня наконец к варианту номер четыре.

Ландшафтная мультивселенная — это философское излишество. Эта гипотеза пытается разрешить единственный вопрос, который в настоящее время ставит в тупик несколько незначительных в космическом масштабе человеческих существ тем, что постулирует существование необычайно обширного и сложного объекта, совершенно превосходящего любой человеческий опыт. Это как геоцентрическая космология, в которой вся остальная огромная Вселенная оборачивается каждые сутки вокруг неподвижной Земли, расположенной в центре мироздания. Физик Пол Стейнхардт, работавший над инфляционной гипотезой при ее зарождении, говорил то же самое об инфляционной мультивселенной: «Чтобы объяснить одну простую вселенную, которую мы видим, гипотеза инфляционной вселенной постулирует бесконечное множество вселенных произвольной сложности, которые мы видеть не можем».

Было бы проще признать, что мы не знаем, откуда взялась тонкая настройка. Но вполне возможно, нам даже нет нужды заходить так далеко, потому что существует еще одна возможность. А именно, что проблема тонкой настройки сильно преувеличена и что на самом деле ее попросту не существует. Это и есть четвертый вариант. Если это так, то все мультивселенные лишь поверхностная пена.

Эти рассуждения основаны на более тщательном анализе предполагаемых свидетельств в пользу тонкой настройки и упомянутой вероятности получения комбинации фундаментальных констант, пригодной для жизни и равной 10–47. Расчет этот требует несколько достаточно сильных допущений. Одно из них состоит в том, что единственный способ построить вселенную — выбрать 26 констант, которые следует вставить в наши текущие уравнения. Да, действительно, математически эти константы работают как численные «параметры», которые модифицируют уравнения, не меняя при этом их общей математической формы; насколько мы можем судить, каждая модификация дает жизнеспособный набор уравнений, определяющих некую вселенную. Но на самом деле нам это неизвестно. Мы не имели возможности наблюдать хотя бы одну модифицированную вселенную.

Меня как математика беспокоит существование большого количества и других параметров (а их немало), которые неявно присутствуют в уравнениях, но никогда не записываются, поскольку в нашей Вселенной, так уж получилось, они равны нулю. Почему эти параметры не могут варьироваться тоже? Иными словами, как насчет того, чтобы вставить в уравнения дополнительные слагаемые, помимо тех, что мы записываем в них сейчас? Каждое дополнительное слагаемое такого рода предполагает дополнительную тонкую настройку, которая тоже нуждается в объяснении. Почему состояние Вселенной не зависит от суммарного числа сосисок, проданных на Смитфилдском рынке в Лондоне в 1997 году? Или от третьей производной поля кармабхуми, неизвестного пока науке?

О Господи, еще две константы, значения которых должны быть очень-очень близкими к тем, что наблюдаются в этой Вселенной.

Считать, что единственный способ строить альтернативные вселенные состоит в том, чтобы менять известные фундаментальные константы в модных на данный момент модельных уравнениях, — согласитесь, такой подход говорит о полном отсутствии воображения. Это как если бы обитатели какого-то острова в южных морях в XVI веке считали, что единственный способ развивать земледелие состоит в том, чтобы выращивать кокосовые орехи получше.

Однако давайте примем слова поборников тонкой настройки на веру и согласимся с этим конкретным допущением. Действительно ли, что тогда вероятность 10–47 вступает в игру и требует объяснения? Чтобы ответить на этот вопрос, нам нужно знать о расчете немного больше. В самом общем плане метод состоит в том, чтобы зафиксировать все фундаментальные константы, кроме одной, и выяснить, что происходит при изменении именно этой константы. Для этого вы берете какой-то существенный объект реального мира, к примеру, атом, и смотрите, как повлияет на стандартное описание атома новая величина интересующей нас

константы. И — кто бы мог подумать! — обычная математика атомов разваливается, за исключением разве что тех случаев, когда изменение константы было совсем крохотным.

Теперь сделаем то же самое для какой-нибудь другой фундаментальной константы. Эта константа, возможно, имеет отношение к звездам. Зафиксируем все остальные константы на их нынешних значениях, а эту одну изменим. На этот раз мы обнаружим, что традиционные модели звезд перестают работать, разве что изменение этой константы будет очень-очень маленьким. Соединив все подобные эксперименты, увидим, что изменение любой константы, превышающее какую-то очень маленькую величину, портит какой-то аспект математики Вселенной. Вывод: единственный способ получить вселенную с такими же основными свойствами, как у этой, состоит в том, чтобы использовать почти точно те же константы, что действуют здесь. Остается только посчитать вероятность сохранения всех констант до единой и получить требуемые 10–47.

Звучит убедительно, особенно если посмотреть на внушительную физику и математику, задействованные в расчетах. В книге «Коллапс хаоса» (The Collapse of Chaos) мы с Коэном представили аналогичные рассуждения, в которых концептуальная ошибка более очевидна. Представьте себе автомобиль — пусть это будет Форд Фокус. Представьте себе какую-нибудь деталь, скажем, болты, скрепляющие части двигателя, и спросите себя, что произойдет, если вы измените диаметр болтов, оставив все остальное неизменным. Ну, если болты окажутся слишком толстыми, они не влезут в отверстия; а если они окажутся слишком тонкими, то не будут держаться и выпадут. Вывод: если вы хотите получить рабочий автомобиль, диаметр этих болтов должен быть очень близок к тому, то можно найти в Форд Фокусе. То же можно сказать о колесах (измените их размер, и покрышки не подойдут), покрышках (измените их размер, и не подойдут колеса), свечах, каждой отдельной шестеренке в коробке переключения передач и т.д. Сложите все это вместе, и шанс выбрать детали, из которых в конечном итоге можно собрать автомобиль, окажется меньше 10–47. Вы не сможете сделать даже колеса.

Да, и еще одно: существует только одна возможная марка машины, и это, как несложно догадаться, Форд Фокус.

А теперь встаньте где-нибудь на перекрестке и посмотрите, как мимо проезжают все эти «фольксвагены», «тойоты», «ауди», «ниссаны», «пежо» и «вольво».

Очевидно, что-то здесь не так.

\*\*\*

Ошибка в том, что мы пытаемся менять константы по одной за раз.

Если вы строите автомобиль, вы не начинаете дело с того, что берете готовый работающий проект и начинаете менять, скажем, размеры болтов, оставляя при этом гайки прежними. Или меняете размеры покрышек, оставляя прежними колесные диски. Это чистое безумие. Если поменять спецификацию одного элемента, это автоматически скажется и на остальных. Чтобы получить новый работоспособный проект, нужно внести изменения во множество разных вещей.

Я встречал лишь один ответ на такую критику гипотезы тонкой настройки, и сводится он к следующему: «Да, но ведь проводить расчет намного труднее, если поменять сразу несколько констант». Да, труднее. Но это не оправдывает более простой расчет, если этот расчет неверен. Если бы вы пришли в банк и попросили подвести баланс вашего счета, а служащий банка сказал бы: «Простите, ваш баланс считать слишком сложно, но у миссис Джоунс на счету 142 фунта», — вам бы это понравилось?

Кроме того, при расчете вероятности тонкой настройки, как правило, забывают один очень интересный и важный вопрос: если традиционная физика не работает при изменении некоторых констант, то что происходит в этих случаях? Не исключено, что что-то другое может сыграть аналогичную роль. В 2008 году Фред Адамс проверил эту возможность для главной части проблемы — процесса образования звезд. (Разумеется, звезды — лишь часть процесса, снабжающего вселенную разумными формами жизни. Виктор Стенджер в тщательно аргументированной работе «Ошибка тонкой настройки» (The Fallacy of Fine-Tuning) разбирался еще с несколькими аспектами проблемы. Результат тот же: тонкая настройка — сильное преувеличение.) При формировании звезд значимы только три константы: гравитационная постоянная, постоянная тонкой структуры и постоянная, управляющая скоростью протекания ядерных реакций. Остальные 23 не просто не нуждаются в тонкой настройке; они могут принимать любые значения, не вызывая никаких проблем в этом отношении.

Затем Адамс проверил все возможные комбинации трех значимых констант, чтобы определить, при каких условиях они дают работоспособные «звезды». Нет никаких причин ограничивать определение звезды теми конкретными чертами, которыми обладают звезды нашей Вселенной. Вас ведь не убедит теория тонкой настройки, если окажется, что, согласно ее предсказаниям, звезды существовать не могут, а вот чуть более горячие объекты на 1% крупнее и очень похожие на звезды — могут. Поэтому Адамс определил звезду как любой объект, который сохраняет целостность под действием собственной гравитации, стабилен, существует долгое время и использует ядерные реакции для производства энергии. Его расчеты показывают, что звезды в этом смысле существуют для громадного диапазона значений констант. Если создатель вселенных выбирает константы случайным образом, то с вероятностью 25% мы получим вселенную, способную образовывать звезды[107].

Это уже не тонкая настройка. Но результаты Адамса еще сильнее. Почему не разрешить более экзотическим объектам тоже считаться «звездами»? Их энергетический выход в принципе тоже может поддерживать какие-то формы жизни. Возможно, энергия поступает от квантовых процессов в черных дырах или от скоплений темного вещества, генерирующего энергию при аннигиляции вещества обычного. В этом случае вероятность увеличивается до 50%. В том, что касается звезд, наша Вселенная не должна сражаться за существование, имея один шанс из 10 миллионов триллионов триллионов триллионов. Она просто заказала «орла», и монетка, отвечающая за фундаментальные константы, легла нужной стороной кверху.

## Эпилог

Вселенная — большое место, может быть, самое большое.

Килгор Траут (Филип Хосе Фармер). «Венера на раковине»

Наше математическое путешествие привело нас от поверхности Земли к самым дальним пределам космоса и от начала времен к концу Вселенной. Началось оно в доисторических глубинах, когда древние люди смотрели на небо и гадали, что там, вверху, происходит. Конца ему пока не видно, ибо, чем больше мы узнаем о космосе, тем большего не в состоянии понять.

Математика развивалась вместе с астрономией и другими связанными областями знаний, такими как ядерная физика, астрофизика, квантовая теория, теория относительности и теория струн. Физика задает вопросы, математика пытается ответить на них. Иногда происходит наоборот, и математические открытия предсказывают новые явления. Усилия Ньютона, стремившегося сформулировать законы тяготения и движения, дали толчок развитию теории дифференциальных уравнений и анализу задачи  $n$  тел; те, в свою очередь, вдохновили ученых на расчеты, позволившие предсказать существование Нептуна и хаотическое кувырание Гипериона.

В результате математика и физика — и астрономия в особенности — стали более хитроумными и сложными, поскольку каждая из них постоянно вдохновляет другую на новые идеи. Вавилонские записи о движении планет требовали развитой и точной арифметики. Птолемея модель Солнечной системы была основана на геометрии сфер и окружностей. Для кеплерова варианта потребовались конические сечения греческих геометров. Когда Ньютон сформулировал все это дело заново как универсальный закон, он представил его при помощи сложной геометрии, но размышления его строились на базе интегрального исчисления и дифференциальных уравнений.

Подход, основанный на дифференциальных уравнениях, оказался лучше всего приспособлен к сложностям астрономических явлений. Разобравшись в движении двух взаимно притягивающихся тел, астрономы и математики попытались перейти к системам трех и более тел. Эта попытка была сорвана тем, что мы сегодня называем хаотической динамикой; в самом деле, хаос впервые поднял голову в задаче «двух с половиной» тел. Прогресс тем не менее оказался возможен. Идеи Пуанкаре вдохновили совершенно новую область математики: топологию. Он и сам сыграл видную роль в ее развитии на начальном этапе. Топология — это геометрия в очень гибком смысле.

Простой вопрос «Как светит Солнце?» открыл ящик Пандоры, когда стало окончательно ясно, что при использовании любого из традиционных видов топлива Солнце давно должно было бы выгореть полностью и превратиться в уголек. Появление ядерной физики помогло объяснить,

как звезды производят тепло и свет; кульминацией в этом смысле стали точные предсказания концентрации в Галактике почти всех химических элементов.

Динамика галактик с учетом их поразительных форм вдохновила появление новых моделей и новые озарения, но породила также и новую гигантскую загадку: кривые вращения, которые противоречат закону всемирного тяготения Ньютона, разве только (как утверждают космологи) большая часть вещества во Вселенной кардинально отличается от всего, что мы когда-либо наблюдали или создавали в ускорителях частиц. Или, возможно, как начинают подозревать некоторые математики, проблема здесь кроется не в физике, а в непригодности математической модели.

Когда Эйнштейн осуществил революцию в физике и захотел расширить ее на гравитацию, ему на помощь пришел новый тип геометрии: риманова теория многообразий, основанная на гауссовом радикальном подходе к кривизне. Получившаяся в результате общая теория относительности объясняет аномальную прецессию перигелия Меркурия и искривление света Солнцем. Когда эту теорию применили к массивным звездам, странные математические свойства решений привлекли внимание ученых к тому, что мы сейчас называем черными дырами. Вселенная постепенно приобретала поистине странный вид.

Когда общую теорию относительности применили ко Вселенной в целом, результат получился еще более странный. Открытое Хабблом красное смещение галактик, подразумевавшее, что Вселенная расширяется, привело Леметра к теории взрывающегося космического яйца, она же — теория Большого взрыва. Чтобы разобраться в Большом взрыве, требовались новая физика и новая математика, а также новые мощные вычислительные методы. То, что на первый взгляд казалось исчерпывающим ответом, по мере поступления новых данных начало разваливаться на части и потребовало введения трех дополнительных «костылей»: инфляции, темного вещества и темной энергии. Космологи пропагандируют все это как глубокие открытия, что было бы правдой, если бы их теории выдерживали критический анализ; однако у каждого дополнения имеются собственные проблемы и ни для одного из них не получены независимые подтверждения тех далеко идущих допущений, без которых эти дополнения не работают[108].

Физики постоянно дорабатывают свои представления о космосе, и каждое новое открытие поднимает новые вопросы. В июне 2016 года NASA и ЕКА при помощи Космического телескопа имени Хаббла измерили расстояния до звезд в девятнадцати галактиках. Результаты, полученные командой под руководством Адама Рисса, позволили при помощи высокоточных статистических методов пересмотреть постоянную Хаббла и установить ее значение равным 73,2 километра в секунду на мегапарсек. Это означает, что Вселенная расширяется на 5–9% быстрее, чем считалось ранее. В рамках стандартной космологической модели это значение уже не согласуется с наблюдениями космического микроволнового фона, проводимыми WMAP и аппаратом Planck ЕКА. Этот неожиданный результат может оказаться как новым ключом к природе темного вещества и темной энергии, так и признаком того, что ни первого, ни второго не существует и что наша картина Вселенной нуждается в пересмотре.

Именно так, безусловно, и продвигается вперед настоящая наука. Три шага вперед, два назад. Математикам повезло, они живут в логическом пузыре, где если что-то однажды доказано, то оно уже навсегда останется истиной. Интерпретации и доказательства могут меняться, но теоремы не дорабатываются позднейшими открытиями. Хотя бывает, конечно, что они устаревают или утрачивают связь с нынешними научными интересами. Наука всегда условна и хороша ровно в той степени, в какой хороши текущие данные. В ответ на новые данные ученые оставляют за собой право изменить свое мнение.

Даже когда мы считаем, что понимаем что-то, перед нами нередко возникают неожиданные вопросы. Теоретически всевозможные варианты нашей Вселенной имеют ровно столько же смысла, сколько его имеет сама она. Когда расчеты вроде бы показали, что в большинстве вариантов невозможна была бы не только жизнь, но даже существование атомов, на сцене во всем своем великолепии появилась философская загадка тонкой настройки. Попытки разрешить ее привели к самым впечатляющим, хотя и умозрительным, идеям из всех предложенных когда-либо физиками. Однако все эти идеи не нужны, если проблема, как позволяет предположить внимательный анализ первоначальных рассуждений, высосана из пальца.

Главная идея книги «Математика космоса» — это необходимость в математических рассуждениях, и поразительный успех таковых — в астрономии и космологии. Даже когда я критикую популярные теории, я начинаю с объяснения традиционных взглядов и того, почему многие с ними согласны. Но если имеются, судя по всему, серьезные причины рассмотреть альтернативные варианты (и особенно если эти альтернативы не принимаются всерьез), мне кажется, стоит их представить, даже если они вызывают споры или отвергаются многими космологами. Я не хочу, чтобы вы принимали на веру уверенные заявления о том, что все загадки Вселенной разрешены, тогда как остается еще множество нерешенных вопросов. В то же время я хочу объяснить и традиционные решения тоже: это красивые примеры применения математики; они могут оказаться верными, а если нет, то помогут вымостить дорогу к чему-то более подходящему.

Альтернативы эти часто кажутся радикальными — Большого взрыва не было, темное вещество — химера... Но всего лишь несколько десятилетий назад ни та ни другая теория вообще не имела сторонников. Исследования на дальних рубежах познания всегда сложны, и мы не можем вырастить вселенную в лаборатории, поместить ее под микроскоп, перегнуть, чтобы посмотреть, из чего она сделана, или нагрузить максимально, чтобы посмотреть, что сломается первым. Приходится применять логические рассуждения и воображение. А также критический анализ, почему я и уделил больше внимания, чем принято, тем идеям, которые не отражают общепринятого мнения. Они также являются значимой частью научного процесса.

Мы сталкивались с десятками ошибочных теорий, которые не так давно казались совершенно разумными. Земля — центр Вселенной. Планеты сформировались, когда пролетающая мимо звезда вытянула из Солнца сигарообразную массу. Возле Солнца, внутри орбиты Меркурия, имеется еще одна планета. У Сатурна есть уши. Солнце — единственная звезда, возле которой есть планеты. Наша Галактика покоится в центре Вселенной, окруженная бесконечной пустотой. Галактики распределены равномерно. Вселенная существовала всегда, но в межзвездной пустоте постоянно возникает новое вещество. В свое время эти теории пользовались широкой популярностью и в большинстве своем были основаны на самых современных и достоверных на тот момент данных. Имейте в виду, некоторые из них всегда выглядели немного глупо; у ученых иногда возникают очень странные идеи, подкрепленные скорее стадным инстинктом и квазирелигиозным рвением, нежели реальными данными.

Я не вижу причин, по которым высоко ценимые сегодня теории могли бы рассчитывать на иную судьбу. Может быть, Луна возникла вовсе не при столкновении Земли с телом размером с Марс. Может быть, никакого Большого взрыва не было. Может быть, красное смещение не является доказательством расширения Вселенной. Может быть, черных дыр не существует. Может быть, инфляции никогда не было. Может быть, темное вещество просто ошибка. Может быть, инопланетная жизнь может радикально отличаться от всего, с чем мы когда-либо встречались, а может быть, и от того, что мы в состоянии вообразить.

Может быть.

А может быть, и нет.

Интересно будет это выяснить.

## Единицы измерения и термины

Антивещество — вещество, состоящее из античастиц, имеющих те же массы, что обычные частицы, но противоположные заряды.

Астероид — небольшое каменное или ледяное тело, обращающееся вокруг Солнца, в большинстве случаев между орбитами Марса и Юпитера.

Астрономическая единица (а.е.) — расстояние от Солнца до Земли, равное 149 597 871 км.

Большая полуось — половинка длинной оси эллипса.

Большой взрыв — теория о том, что Вселенная родилась из сингулярности около 13,8 миллиарда лет назад.

Время Ляпунова — временной масштаб, на котором динамическая система хаотична. Время, за которое расстояние между ближайшими траекториями должно увеличиться в  $e$  раз ( $\sim 2,718$ ). Иногда езаменяют на 2 или на 10. Связано с горизонтом предсказуемости, за которым прогнозы становятся ненадежными.

Гамма-барстер — источник внезапных гамма-всплесков; считается, что гамма-барстеры могут быть двух типов: образование нейтронной звезды или черной дыры или слияние пары нейтронных звезд.

Гамма-лучи — тип электромагнитного излучения, состоящего из высокоэнергетических фотонов.

Горизонт событий — граница черной дыры, за пределы которой свет выйти не может.

Гравитационная постоянная  $G$  — коэффициент пропорциональности в законе всемирного тяготения Ньютона. Равна  $6,674080 \times 10^{-11}$  м<sup>3</sup> кг<sup>-1</sup> с<sup>-2</sup>.

Градус (температура). В этой книге используются градусы Цельсия (°C) и кельвины (K). Шкала Цельсия построена от нуля (вода замерзает) до 100° (вода превращается в пар). Температура по Кельвину равна температуре по Цельсию плюс 273,15°, а ноль по Кельвину (-273,15 °C) представляет собой самую низкую возможную температуру, абсолютный ноль.

Градус (углы) — 360° составляют полный круг.

ГэВ (гигаэлектронвольт) — единица энергии, используемая в физике элементарных частиц. Один миллиард электронвольт. См. электронвольт.

Джоуль (Дж) — единица энергии, выделяемая при мощности один ватт на протяжении одной секунды. (Электрический обогреватель, как правило, имеет мощность 1000 Вт.)

Закон всемирного тяготения Ньютона — все тела притягивают друг друга с силой, пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Коэффициент пропорциональности называется гравитационной постоянной.

Закон Дермотта. Период обращения  $n$ -го спутника планеты пропорционален  $n$ -й степени постоянной  $C$ . Постоянные в разных системах спутников могут быть различны.

Закон Тициуса — Боде — расстояние от Солнца до  $n$ -й планеты равно  $0,075 \times 2n + 0,4$  а.е.

Законы движения Ньютона

1. Тело, на которое не действует сила, продолжает двигаться по прямой с постоянной скоростью (или покоиться).

2. Ускорение тела равняется действующей на него силе, деленной на массу тела.

3. Любое действие вызывает равное по величине и противоположное по направлению противодействие.

Законы планетарного движения Кеплера

1. Орбита планеты представляет собой эллипс с Солнцем в одном из его фокусов.

2. Линия, проведенная от Солнца к планете, заметает одинаковую площадь за одинаковые промежутки времени.

3. Квадрат периода обращения пропорционален кубу расстояния.

Занептунные объекты (TNO) — астероиды и другие малые тела, обращающиеся вокруг Солнца на средних расстояниях, больших, чем у Нептуна (30 а.е.).

Звездная величина — логарифмическая мера яркости. Видимая звездная величина — это яркость при наблюдении с Земли, абсолютная звездная величина — яркость при наблюдении с расстояния в 10 парсек (для звезд) или одну астрономическую единицу (для астероидов и планет). Чем ярче объект, тем меньше его звездная величина, она может быть в том числе и отрицательной. Видимая звездная величина Солнца равна -27, полной Луны -13, Венеры около -5, а ярчайшей видимой звезды Сириус -1,5. Изменение звездной величины на 5 единиц в отрицательную сторону соответствует 100-кратному увеличению яркости.

Излучение абсолютно черного тела — спектр электромагнитного излучения непрозрачного неотражающего тела с фиксированной температурой.

Изотоп — разновидность химического элемента, характеризующаяся тем, сколько нейтронов содержится в его атоме.

Кельвин (K) — см. градус.

Кентавр — тело, орбита которого пересекает эклиптику между орбитами Юпитера и Нептуна.

Комета — небольшое ледяное тело, которое при подлете к Солнцу нагревается, демонстрируя видимую атмосферу (кому) и иногда хвост, образованный газом, который увлекается солнечным ветром.

Космическое микроволновое фоновое излучение, реликтовое излучение — почти изотропное излучение с температурой около 3 К, которое считается реликтом Большого взрыва.

Кривая блеска — изменение излучения звезды во времени.

Кривизна — внутренняя мера того, насколько поверхность или многообразие отличается от плоского евклидова пространства.

Малая полуось — половинка короткой оси эллипса.

Минута угловая — 60 минут равны одному градусу.

Параллакс — половина угла между направлениями на звезду с противоположных точек орбиты Земли, если положить, что диаметр орбиты перпендикулярен направлению от Солнца на звезду.

Парсек — расстояние до звезды, параллакс которой равен одной угловой секунде. Составляет 3,26 светового года.

Перигелий — ближайшая к Солнцу точка орбиты.

Период — время, через которое периодические события повторяются. Примеры — период обращения планеты вокруг ее центрального тела (приблизительно 365 суток для Земли) или период вращения (24 часа для Земли).

Планетезимали — малые тела, которые могут объединяться и образовывать планеты; считается, что в ранний период существования Солнечной системы их в ней было много.

Покрытие — событие, когда один небесный объект проходит позади другого, который его закрывает от нас.

Постоянная Планка  $\hbar$  — фундаментальная константа в квантовой механике, определяющая минимальное количество энергии электромагнитной волны (равное  $\hbar$ , умноженной на частоту). Очень мала, равна  $1,054571 \times 10^{-34}$  Дж\*с.

Постоянная тонкой структуры  $\alpha$  — фундаментальная константа, характеризующая силу взаимодействия между заряженными частицами и равная  $7,297352 \times 10^{-3}$ . (Это безразмерная величина, она не зависит от единиц измерения.)

Прецессия — медленное вращение оси эллиптической орбиты.

Пространство-время — четырехмерное многообразие с тремя пространственными и одной временной координатами.

Резонанс — совпадение временных параметров, в результате которого отношение периодов двух повторяющихся явлений представляет собой небольшую простую дробь. См. примечание 20.

Светимость — суммарная энергия, излучаемая звездой за единицу времени. Измеряется в джоулях за секунду (ваттах). Светимость Солнца составляет  $3,846 \times 10^{26}$  ватт.

Световой год — расстояние, которое свет проходит за год, составляющее  $9,460528 \times 10^{15}$  метров, или 9,46 триллионов километров.

Световой конус — область пространства-времени, достижимая, начиная от заданного события по времениподобной кривой или мировой линии.

Секунда (угловая) — 60 секунд составляют одну минуту.

Спектр — описание того, как энергия излучения, исходящего от тела (обычно звезды), изменяется с частотой. Важнейшими характеристиками спектра являются пики (эмиссионные линии) и впадины (линии поглощения).

Спин-орбитальный резонанс — рациональное отношение периода вращения тела вокруг своей оси к периоду обращения вокруг центрального тела.

Спутник (естественный) — меньшее тело на орбите вокруг планеты, «луна».

Спутник (искусственный) — изготовленный человеком аппарат на орбите вокруг Земли или другого тела Солнечной системы.

Тор — математическая поверхность в форме пончика (с дыркой).

Центральное тело — родительское тело, вокруг которого обращается данное тело. Для Земли центральным телом является Солнце, для Луны — Земля.

Черная дыра — область пространства, которую не может покинуть свет, во многих случаях образуется массивной звездой, схлопнувшейся под собственной тяжестью.

Экзолуна — естественный спутник планеты, обращающейся вокруг звезды, отличной от Солнца.

Экзопланета — планета, обращающаяся вокруг звезды, отличной от Солнца.

Эксцентриситет — мера того, насколько сплюснутым является эллипс. См. примечание 9.

Электронвольт (эВ) — единица энергии, используемая в физике элементарных частиц и равная  $1,6 \times 10^{-19}$  Дж. См. Джоуль.

Эллипс — замкнутая овальная кривая, образованная растягиванием окружности равномерно в одном направлении.

## Библиография

### 1. Притяжение на расстоянии

A. Koyré. An unpublished letter of Robert Hooke to Isaac Newton, *Isis* 43 (1952) 312–337.

A. Chenciner and R. Montgomery. A remarkable periodic solution of the three-body problem in the case of equal masses, *Ann. Math.* 152 (2000) 881–901.

Анимированная иллюстрация «Орбита для трех тел»: [http://www.scholarpedia.org/article/N-body\\_choreographies](http://www.scholarpedia.org/article/N-body_choreographies)

C. Simó. New families of solutions in N-body problems, *Proc. European Congr. Math.*, Barcelona, 2000.

E. Oks. Stable conic-helical orbits of planets around binary stars: analytical results, *Astrophys. J.* 804 (2015) 106.

### 2. Коллапс Солнечной туманности

H. Levison, K. Kretke, and M. Duncan. Growing the gas-giant planets by the gradual accumulation of pebbles, *Nature* 524 (2015) 322–324.

I. Stewart. The second law of gravitics and the fourth law of thermodynamics, in *From Complexity to Life* (ed. N.H. Gregsen), Oxford University Press, 2003, pp. 114–150.

K. Batygin and G. Laughlin. On the dynamical stability of the solar system, *Astrophys. J.* 683 (2008) 1207–1216.

J. Laskar and M. Gastineau. Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth, *Nature* 459 (2009) 817–819.

G. Laughlin. Planetary science: The Solar System's extended shelf life, *Nature* 459 (2009) 781–782.

### 3. Непостоянная Луна

R.C. Paniello, J.M.D. Day, and F. Moynier. Zinc isotopic evidence for the origin of the Moon, *Nature* 490 (2012) 376–379.

A.G.W. Cameron and W.R. Ward. The origin of the Moon, *Abstr. Lunar Planet. Sci. Conf.* 7 (1976) 120–122.

W. Benz, W.L. Slattery, and A.G.W. Cameron. The origin of the moon and the single impact hypothesis I, *Icarus* 66 (1986) 515–535.

W. Benz, W.L. Slattery, and A.G.W. Cameron. The origin of the moon and the single impact hypothesis II, *Icarus* 71 (1987) 30–45.

W. Benz, A.G.W. Cameron, and H.J. Melosh. The origin of the moon and the single impact hypothesis III, *Icarus* 81 (1989) 113–131.

R.M. Canup and E. Asphaug. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation, *Nature* 412 (2001) 708–712.

A. Reufer, M.M.M. Meier, and W. Benz. A hit-and-run giant impact scenario, *Icarus* 221 (2012) 296–299.

J. Zhang, N. Dauphas, A.M. Davis, I. Leya, and A. Fedkin. The proto-Earth as a significant source of lunar material, *Nature Geosci.* 5 (2012) 251–255.

R.M. Canup, Simulations of a late lunar-forming impact, *Icarus* 168 (2004) 433–456.

A. Mastrobuono-Battisti, H.B. Perets, and S.N. Raymond. A primordial origin for the compositional similarity between the Earth and the Moon, *Nature* 520 (2015) 212–215.

### 4. Космос как часовой механизм

S.F. Dermott. On the origin of commensurabilities in the solar system II: the orbital period relation, *Mon. Not. RAS* 141 (1968) 363–376.

S.F. Dermott. On the origin of commensurabilities in the solar system III: the resonant structure of the solar system, *Mon. Not. RAS* 142 (1969) 143–149.

F. Graner and B. Dubrulle. Titius-Bode laws in the solar system. Part I: Scale invariance explains everything, *Astron. & Astrophys.* 282 (1994) 262–268.

B. Dubrulle and F. Graner. Titius-Bode laws in the solar system. Part II: Build your own law from disk models, *Astron. & Astrophys.* 282 (1994) 269–276.

A.J. Ste , N.J. Cunningham, A.B. Shinn, and S.A. Stern. A search for Vulcanoids with the STEREO heliospheric imager, *Icarus* 233 (2013) 48–56.

## 5. Небесная полиция

M. Moons and A. Morbidelli. Secular resonances inside mean-motion commensurabilities: the 4/1, 3/1, 5/2 and 7/3 cases, *Icarus* 114 (1995) 33–50.

M. Moons, A. Morbidelli, and F. Migliorini. Dynamical structure of the 2/1 commensurability with Jupiter and the origin of the resonant asteroids, *Icarus* 135 (1998) 458–468.

Анимация, показывающая связь между точками Лагранжа и гравитационным потенциалом [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Lagrangian\\_points\\_equipotential.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Lagrangian_points_equipotential.gif)

См. анимированную иллюстрацию «Астероиды-троянки вокруг Юпитера» <https://www.exploremars.org/trojan-asteroids-around-jupiter-explained>.

F.A. Franklin. Hilda asteroids as possible probes of Jovian migration, *Astron. J.* 128 (2004) 1391–1406.

<http://www.solstation.com/stars/jupiter.htm>

## 6. Планета, поглотившая своих детей

P. Goldreich and S. Tremaine. Towards a theory for the Uranian rings, *Nature* 277 (1979) 97–99.

M. Kenworthy and E. Mamajek. Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of J1407b: sculpting by exomoons? *arXiv:1501.05652* (2015).

F. Braga-Rivas and 63 others. A ring system detected around Centaur (10199) Chariklo, *Nature* 508 (2014) 72–75.

## 7. Звезды Козимо Медичи

E.J. Rivera, G. Laughlin, R.P. Butler, S.S. Vogt, N. Haghighipour, and S. Meschiari. The Lick-Carnegie exoplanet survey: a Uranus-mass fourth planet for GJ 876 in an extrasolar Laplace configuration, *Astrophys. J.* 719 (2010) 890–899.

B.E. Schmidt, D.D. Blankenship, G.W. Patterson, and P.M. Schenk. Active formation of ‘chaos terrain’ over shallow subsurface water on Europa, *Nature* 479 (2011) 502–505.

P.C. Thomas, R. Tajeddine, M.S. Tiscareno, J.A. Burns, J. Joseph, T.J. Lored, P. Helfenstein, and C. Porco. Enceladus’s measured physical libration requires a global subsurface ocean, *Icarus* (2015) in press; doi:10.1016/j.icarus.2015.08.037.

S. Charnoz, J. Salmon, and A. Crida. The recent formation of Saturn’s moonlets from viscous spreading of the main rings, *Nature* 465 (2010) 752–754.

## 8. Верхом на комете

M. Masseroni and 58 others. Two independent and primitive envelopes of the bilobate nucleus of comet 67P, *Nature* 526 (2015) 402–405.

A. Bieler and 33 others. Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko, *Nature* 526 (2015) 678–681.

P. Ward and D. Brownlee. *Rare Earth*, Springer, New York, 2000.

J. Horner and B.W. Jones. Jupiter – friend or foe? I: The asteroids, *Int. J. Astrobiol.* 7 (2008) 251–261.

## 9. Хаос в космосе

См. видео <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2015/24/video/a/>

J.R. Buchler, T. Serre, and Z. Kolláth. A chaotic pulsating star: the case of R Scuti, *Phys. Rev. Lett.* 73 (1995) 842–845.

T. Palmer. The real butter y E ect, *Nonlinearity* 27 (2014) R123–R141.

V. Hoffmann, S.L. Grimm, B. Moore, and J. Stadel. Chaos in terrestrial planet formation, *Mon. Not. RAS* (2015); *arXiv: 1508.00917*.

A. Milani and P. Farinella. The age of the Veritas asteroid family deduced by chaotic chronology, *Nature* 370 (1994) 40–42.

June Barrow-Green. *Poincaré and the Three Body Problem*, American Mathematical Society, Providence, 1997.

M.R. Showalter and D.P. Hamilton. Resonant interactions and chaotic rotation of Pluto's small moons, *Nature* 522 (2015) 45–49.

J. Wisdom, S.J. Peale, and F. Mignard. The chaotic rotation of Hyperion, *Icarus* 58 (1984) 137–152.

M.A. Richards and nine others. Triggering of the largest Deccan eruptions by the Chicxulub impact, *GSA Bull.* (2015), doi: 10.1130/B31167.1.

W.F. Bottke, D. Vokrouhlický, and D. Nesvorný. An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor, *Nature* 449 (2007) 48–53.

## 10. Межпланетная автострада

M. Minovitch. A method for determining interplanetary free-fall reconnaissance trajectories, *JPL Tech. Memo. TM-312-130* (1961) 38–44.

M. Lo and S. Ross. SURFing the solar system: invariant manifolds and the dynamics of the solar system, *JPL IOM 312/97*, 1997.

M. Lo and S. Ross. The Lunar L1 gateway: portal to the stars and beyond, *AIAA Space 2001 Conf.*, Albuquerque, 2001.

[http://sci.esa.int/where\\_is\\_rosetta](http://sci.esa.int/where_is_rosetta) has a dramatic animation of this roundabout path.

W.S. Koon, M.W. Lo, J.E. Marsden, and S.D. Ross. The Genesis trajectory and heteroclinic connections, *Astrodynamics* 103 (1999) 2327–2343.

## 11. Громадные огненные шары

F. Hoyle. Synthesis of the elements from hydrogen, *Mon. Not. RAS* 106 (1946) 343–383.

E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, and F. Hoyle. Synthesis of the elements in stars, *Rev. Mod. Phys.* 29 (1957) 547–650.

A.J. Korn, F. Grundahl, O. Richard, P.S. Barklem, L. Mashonkina, R. Collet, N. Piskunov, and B. Gustafsson. A probable stellar solution to the cosmological lithium discrepancy, *Nature* 442 (2006) 657–659.

F. Hoyle. On nuclear reactions occurring in very hot stars: the synthesis of the elements between carbon and nickel, *Astrophys. J. Suppl.* 1 (1954) 121–146.

F. Hoyle. The universe: past and present reflections, *Eng. & Sci.* (November 1981) 8–12.

G.H. Miller and 12 others. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks, *Geophys. Res. Lett.* 39 (2012) L02708.

H.W. Babcock. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle, *Astrophys. J.* 133 (1961) 572–587.

E. Nesme-Ribes, S.L. Baliunas, and D. Sokoloff. The stellar dynamo, *Scientific American* (August 1996) 30–36. For mathematical details and more recent work with more realistic models, see: M. Proctor. Dynamo action and the Sun, *EAS Publ. Ser.* 21 (2006) 241–273.

## 13. Чужие миры

X. Dumusque and 10 others. An Earth-mass planet orbiting  $\alpha$  Centauri B, *Nature* 491 (2012) 207–211.

V. Rajpaul, S. Aigrain, and S.J. Roberts. Ghost in the time series: no planet for Alpha Cen B, [arXiv:1510.05598](https://arxiv.org/abs/1510.05598); *Mon. Not. RAS*, in press.

Z.K. Berta-Thompson and 20 others. A rocky planet transiting a nearby low-mass star, *Nature* 527 (2015) 204–207.

E. Thommes, S. Matsumura, and F. Rasio. Gas disks to gas giants: Simulating the birth of planetary systems, *Nature* 321 (2008) 814–817.

M. Hippke and D. Angerhausen. A statistical search for a population of exo-Trojans in the Kepler dataset, [ArXiv:1508.00427](https://arxiv.org/abs/1508.00427) (2015).

M. Lachmann, M.E.J. Newman, and C. Moore. The physical limits of communication, Working paper 99-07-054, Santa Fe Institute 2000.

I.N. Stewart. Uninhabitable zone, *Nature* 524 (2015) 26.

P.S. Behroozi and M. Peeples. On the history and future of cosmic planet formation, *Mon. Not. RAS* (2015); [arXiv: 1508.01202](https://arxiv.org/abs/1508.01202).

D. Sasselov and D. Valencia. Planets we could call home, *Scientific American* 303 (August 2010) 38–45.

S.A. Benner, A. Ricardo, and M.A. Carrigan. Is there a common chemical model for life in the universe? *Current Opinion in Chemical Biology* 8 (2004) 676–680.

J. Stevenson, J. Lunine, and P. Clancy. Membrane alternatives in worlds without oxygen: Creation of an azotosome, *Science Advances* 1 (2015) e1400067.

J. Cohen and I. Stewart. *Evolving the Alien*, Ebury Press, London, 2002.

W. Bains. Many chemistries could be used to build living systems, *Astrobiology* 4 (2004) 137–167.

J. von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1966.

#### **14. Темные звезды**

R. Penrose. Conformal treatment of infinity, in *Relativity, Groups and Topology* (ed. C. de Witt and B. de Witt), Gordon and Breach, New York, 1964, pp. 563–584; *Gen. Rel. Grav.* 43 (2011) 901–922.

Animations of what it would look like when passing through these wormholes can be found at <https://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/penrose.html>

B.L. Webster and P. Murdin. Cygnus X-1 – a spectroscopic binary with a heavy companion?, *Nature* 235 (1972) 37–38. H.L. Shipman, Z. Yu, and Y.W. Du. The implausible history of triple star models for Cygnus X-1: Evidence for a black hole, *Astrophys. Lett.* 16 (1975) 9–12.

P. Mazur and E. Mottola. Gravitational condensate stars: An alternative to black holes, *arXiv:gr-qc/0109035* (2001).

#### **15. Клубки и войды**

Colin Stuart. When worlds collide, *New Scientist* (24 October 2015) 30–33.

N.J. Cornish, D.N. Spergel, and G.D. Starkman. Circles in the sky: finding topology with the microwave background radiation, *Classical and Quantum Gravity* 15 (1998) 2657–2670. J.R. Weeks. Reconstructing the global topology of the universe from the cosmic microwave background, *Classical and Quantum Gravity* 15 (1998) 2599–2604.

#### **16. Космическое яйцо**

Planck collaboration (numerous authors). Planck 2013 results XVI: Cosmological parameters, *Astron. & Astrophys.* 571 (2014); *arXiv:1303.5076*.

M. Alcubierre. The warp drive: hyper-fast travel within general relativity, *Classical and Quantum Gravity* 11 (1994). L73–L77. S. Krasnikov. The quantum inequalities do not forbid spacetime shortcuts, *Phys. Rev. D* 67 (2003) 104013.

#### **17. Большое раздувание**

D.J. Fixsen. The temperature of the cosmic microwave background, *Astrophys. J.* 707 (2009) 916–920. Другие цифры, упомянутые в тексте, являются историческими оценками, теперь устаревшими.

Terry Pratchett, Ian Stewart, and Jack Cohen. *The Science of Discworld IV: Judgement Day*, Ebury, London, 2013.

Penrose's work is reported in: Paul Davies. *The Mind of God*, Simon & Schuster, New York, 1992.

G.F.R. Ellis. Patchy solutions, *Nature* 452 (2008) 158–161. G.F.R. Ellis. The universe seen at different scales, *Phys. Lett. A* 347 (2005) 38–46.

T. Buchert. Dark energy from structure: a status report, *T. Gen. Rel. Grav.* 40 (2008) 467–527.

J. Smoller and B. Temple. A one parameter family of expanding wave solutions of the Einstein equations that induces an anomalous acceleration into the standard model of cosmology, *arXiv:0901.1639*.

R.R. Caldwell. A gravitational puzzle, *Phil. Trans. R. Soc. London A* 369 (2011) 4998–5002.

R. Durrer. What do we really know about dark energy? *Phil. Trans. R. Soc. London A* 369 (2011) 5102–5114.

Marcus Chown. End of the beginning, *New Scientist* (2 July 2005) 30–35.

D.J. Fixsen. The temperature of the cosmic microwave background, *Astrophys. J.* 707 (2009) 916–920.

S. Das, Quantum Raychaudhuri equation, *Phys. Rev. D* 89 (2014) 084068. A.F. Ali and S. Das. Cosmology from quantum potential, *Phys. Lett. B* 741 (2015) 276–279.

Jan Conrad. Don't cry wolf, *Nature* 523 (2015) 27–28.

#### **18. Темная сторона**

K.N. Abazajian and E. Keeley. A bright gamma-ray galactic center excess and dark dwarfs: strong tension for dark matter annihilation despite Milky Way halo profile and diffuse emission uncertainties, *arXiv: 1510.06424* (2015).

G. R. Ruchti and 28 others. The Gaia-ESO Survey: a quiescent Milky Way with no significant dark/stellar accreted disc, *Mon. Not. RAS* 450 (2015) 2874–2887.

S. Clark. Mystery of the missing matter, *New Scientist* (23 April 2011) 32–35. G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk. Particle dark matter: evidence, candidates and constraints, *Phys. Rep.* 405 (2005) 279–390.

J.D. Bekenstein, Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm, *Physical Review D* 70 (2004) 083509.

D. Clowe, M. Bradač, A.H. Gonzalez, M. Markevitch, S.W. Randall, C. Jones, and D. Zaritsky. A direct empirical proof of the existence of dark matter, *Astrophys. J. Lett.* 648 (2006) L109.

[http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond/moti\\_bullet.html](http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond/moti_bullet.html)

S. Clark. Mystery of the missing matter, *New Scientist* (23 April 2011) 32–35.

J.M. Ripalda. Time reversal and negative energies in general relativity, arXiv: gr-qc/9906012 (1999).

D.G. Saari. Mathematics and the ‘dark matter’ puzzle, *Am. Math. Mon.* 122 (2015) 407–423.

## 19. За пределами Вселенной

B. Greene. *The Hidden Reality*, Knopf, New York, 2011.

B. Greene. *The Hidden Reality*, Knopf, New York, 2011, p. 154.

L. Carroll. *The Hunting of the Snark*, online free at <https://www.gutenberg.org/les/13/13-h/13-h.htm>

G.F.R. Ellis. Does the multiverse really exist? *Sci. Am.* 305 (August 2011) 38–43.

O. Romero-Isart, M.L. Juan, R. Quidant, and J.I. Cirac. Toward quantum superposition of living organisms, *New J. Phys.* 12 (2010) 033015.

J. Foukzon, A.A. Potapov, and S.A. Podosenov. Schrödinger’s cat paradox resolution using GRW collapse model, *Int. J. Recent Adv. Phys.* 3 (2014) 17–30.

A. Bassi, K. Lochan, S. Satin, T.P. Singh, and H. Ulbricht. Models of wave-function collapse, underlying theories, and experimental tests, *Rev. Mod. Phys.* 85 (2013) 471.

J. Horgan. Physicist slams cosmic theory he helped conceive, *Sci. Am.* (1 December 2014); <http://blogs.scientificamerican.com/cross-check/physicist-slams-cosmic-theory-he-helped-conceive/>

F.C. Adams. Stars in other universes: stellar structure with different fundamental constants, *J. Cosmol. Astroparticle Phys.* 08 (2008) 010.

V. Stenger. *The Fallacy of Fine-Tuning*, Prometheus, Amherst, 2011.

## Эпилог

Adam G. Reiss and 14 others. A determination of the local value of the Hubble constant, <http://hubblesite.org/pubinfo/pdf/2016/17/pdf/pdf>.

## Источники иллюстраций

Atacama Large Millimeter Array, p. 64.

E. Athanassoula, M. Romero-Gómez, A. Bosma & J. J. Masdemont. ‘Rings and spirals in barred galaxies – II. Ring and spiral morphology’, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 400 (2009) 1706–20, p. 314.

[brucegary.net/XO1/x.htm](http://brucegary.net/XO1/x.htm), p. 326.

ESA, p. 9.

M. Harsoula & p. Kalapotharakos. ‘Orbital structure in N-body models of barred-spiral galaxies’, *Mon. Not. RAS* 394 (2009) 1605–19, p. 313.

M. Harsoula, p. Kalapotharakos & G. Contopoulos. ‘Asymptotic orbits in barred spiral galaxies’, *Mon. Not. RAS* 411 (2011) 1111–26, p. 309.

M. Hippke & D. Angerhausen. ‘A statistical search for a population of exo-Trojans in the Kepler dataset’, *ArXiv:1508.00427* (2015), p. 329.

W. S. Koon, M. Lo, S. Ross & J. Marsden, p. 251, 252; p. D. Murray & S. F. Dermott, *Solar System Dynamics* (Cambridge University Press 1999), p. 163; NASA, p. 12, 161, 176, 184, 205, 206, 242, 299 (слева), 307, 336, 425.

M. Proctor. *Dynamo action and the Sun*, EAS Publications Series 21 (2006) 241–73, p. 289; N. Voglis, P. Tsoutsis & p. Efthymiopoulos. ‘Invariant manifolds, phase correlations of chaotic orbits and the spiral structure of galaxies’, *Mon. Not. RAS* 373 (2006) 280–94, p. 312.

Wikimedia commons, p. 141, 257, 264, 269, 279, 286, 299 (справа), 305, 317 (справа).

J. Wisdom, S. J. Peale & F. Mignard. 'The chaotic rotation of Hyperion', *Icarus* 58 (1984) 137–52, p. 237.

[www.forestwander.com/2010/07/milky-way-galaxy-summit-lake-wv/](http://www.forestwander.com/2010/07/milky-way-galaxy-summit-lake-wv/), p. 299 (вверху).

© NASA/JHUAPL/SwRI



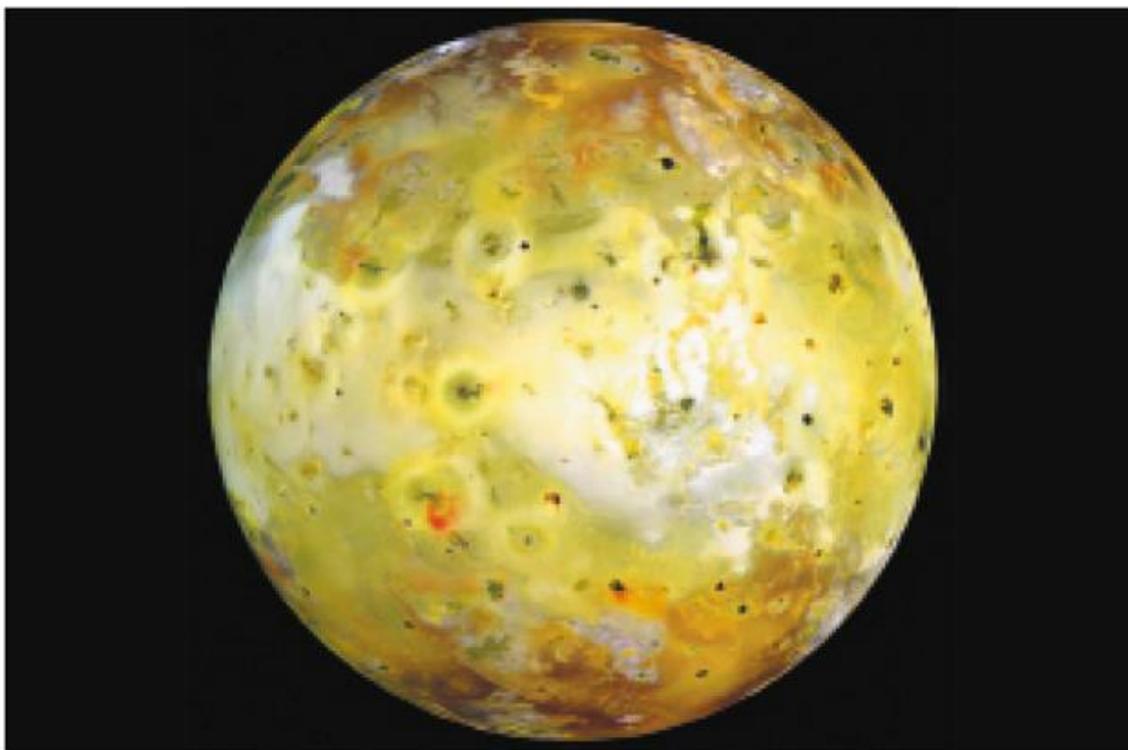
1. Плутон, представленный в искусственных цветах, чтобы подчеркнуть различия в окраске

© NASA/JHUAPL/SwRI



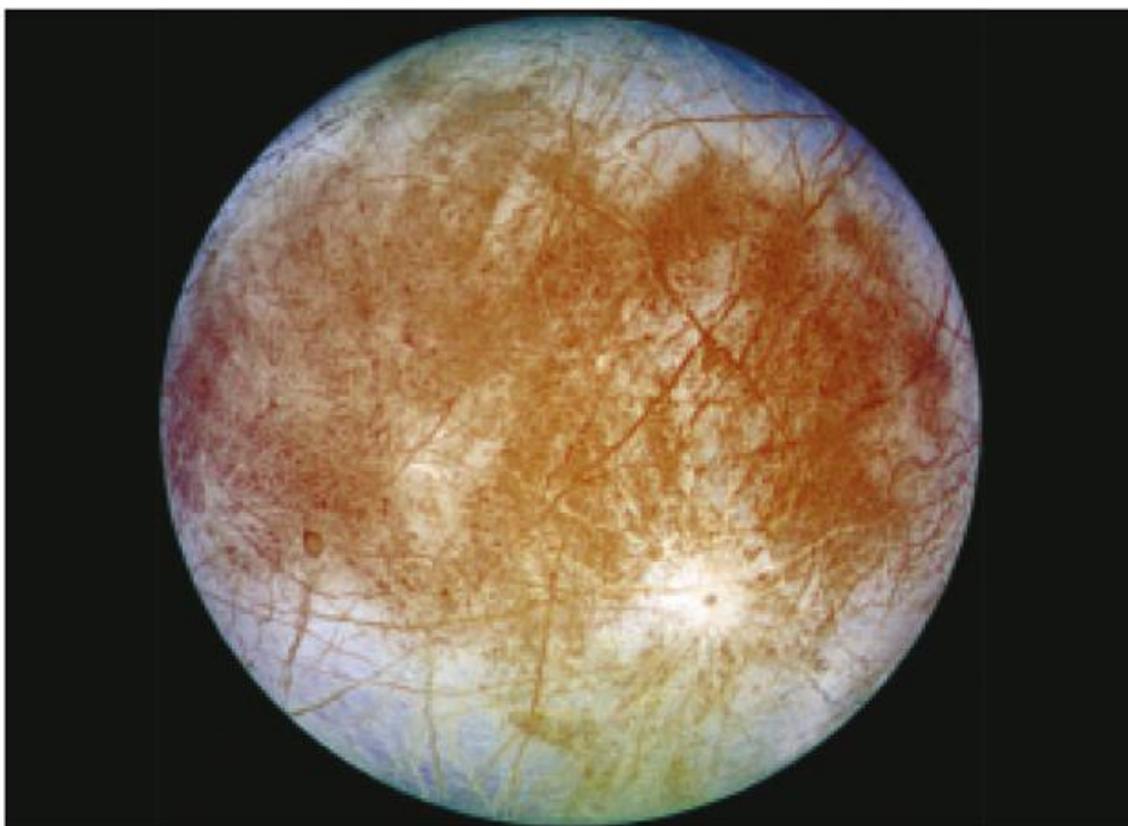
2. Спутник Плутона Харон





© NASA/JPL/University of Arizona

3. Снимок Ио, спутника Юпитера, в естественных цветах, сделанный аппаратом Galileo. Извергающийся вулкан Прометей находится чуть левее центра



© NASA/JPL/DLR

4. Снимок Европы, спутника Юпитера, в естественных цветах, сделанный аппаратом Galileo

© NASA/JPL/Space Science Institute

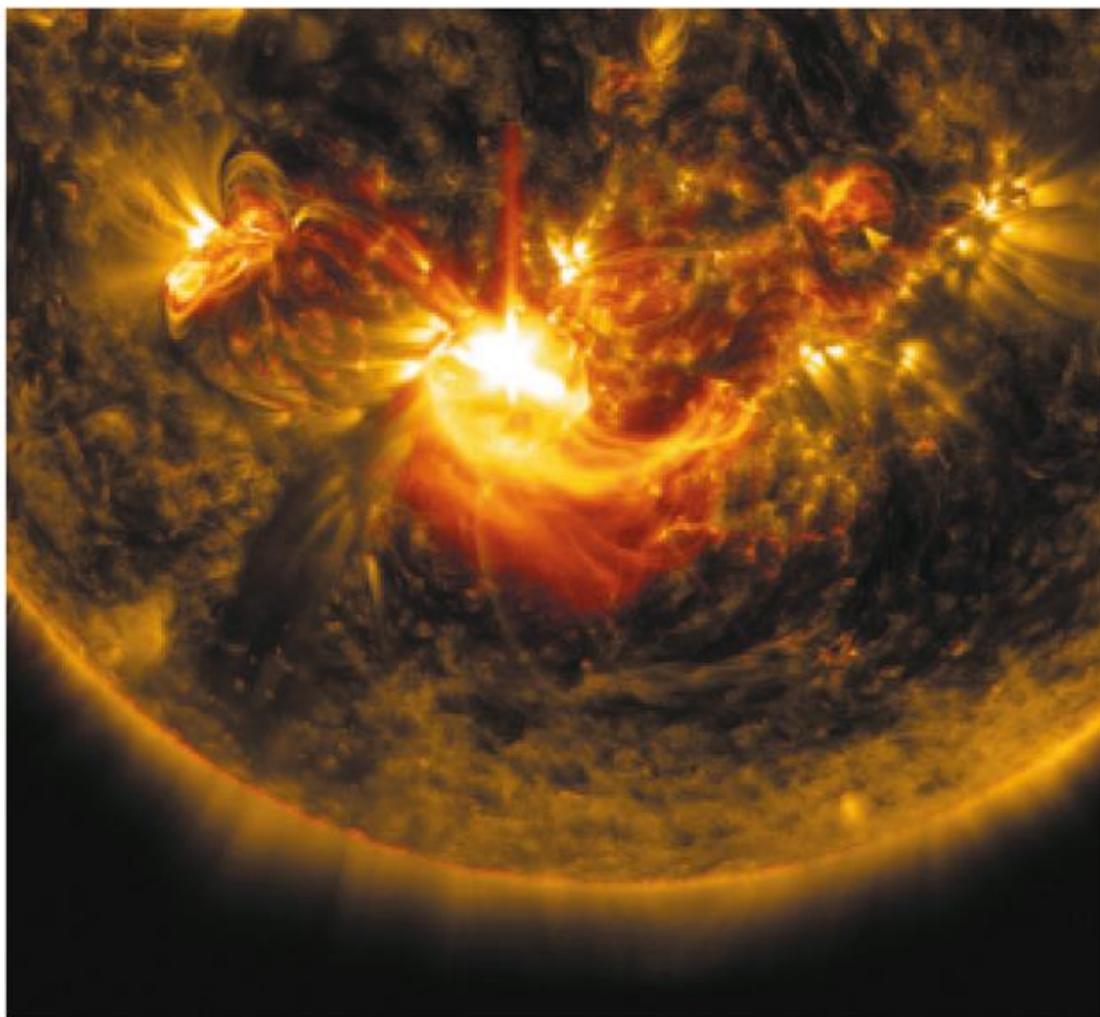


5. Этот снимок Сатурна сделан в 2006 г. аппаратом NASA Cassini в контровом свете, против Солнца. Размытое внешнее кольцо называется кольцом E; оно создано ледяными гейзерами Энцелада, которые извергают в космос ледяные частицы

© NASA

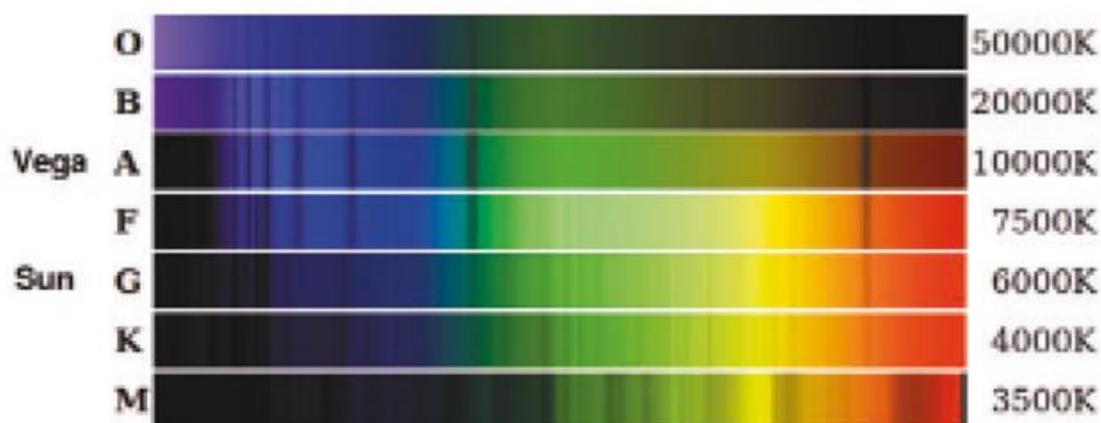


6. Комета Галлея



© NASA/SDO

7. Солнечная вспышка 16 декабря 2014 г.



© M. Lemke and C. S. Jeffery

8. Подборка спектров звезд

© NGC



9. Млечный Путь в направлении галактического центра

© Hubble Heritage Team, ESA, NASA



10. Спиральная галактика с баром NGC 1300



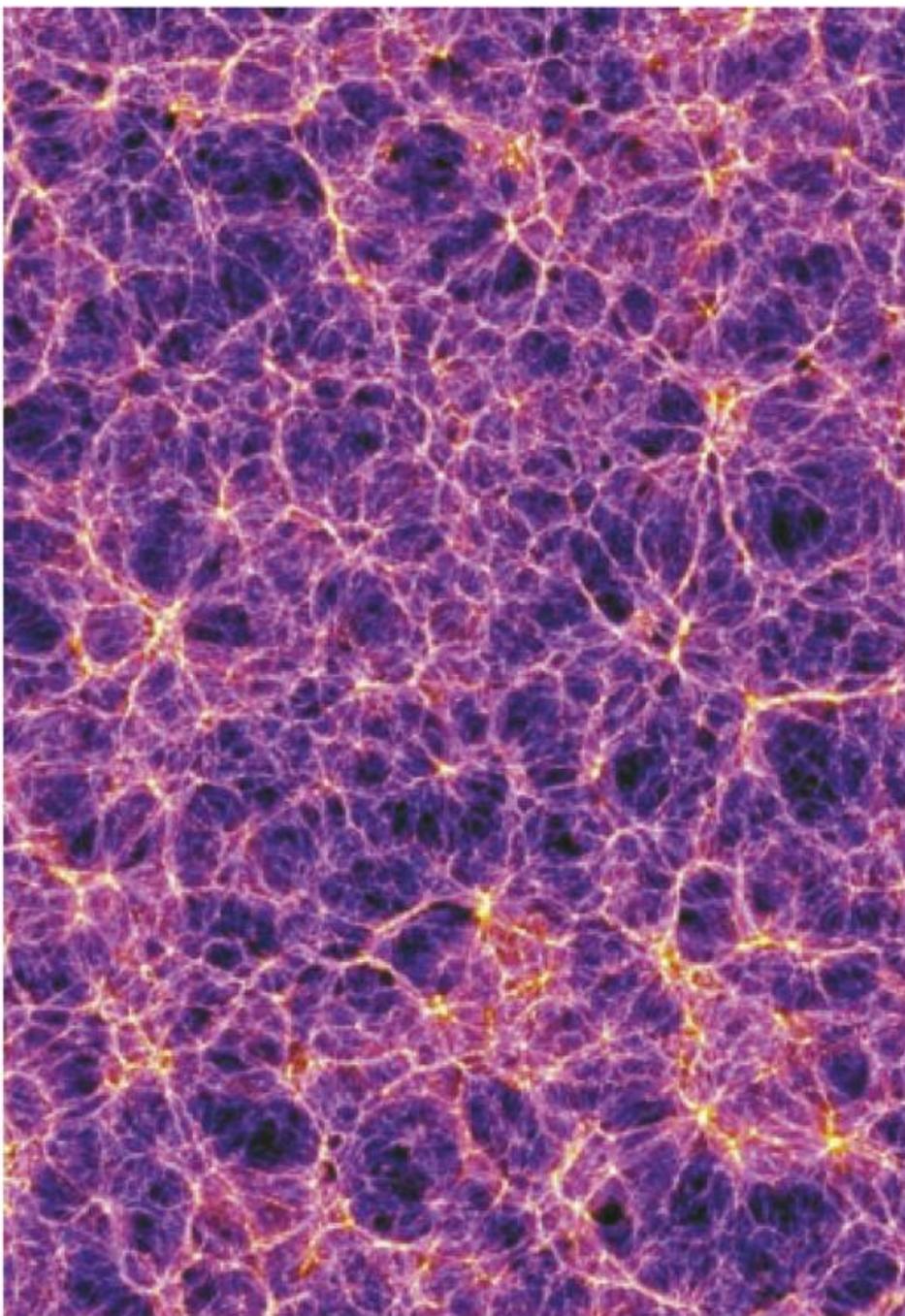
© ESO

11. Спиральная галактика NGC 1232

© Andrew Fruchter (STScI) et al., WFPC2, HST, NASA — NASA



12. Скопление галактик Abell 2218 в 2 млрд световых лет от нас в созвездии Дракона. Гравитационное поле этих галактик действует как линза, превращая изображения более далеких галактик в тонкие дуги



© Springel et al. (2005)

13. Компьютерное моделирование распределения материи во Вселенной в кубе со стороной 2 млрд световых лет показывает пряди вещества, разделенные огромными полостями — войдами



**ТРАЕКТОРИЯ**  
ФОНД ПОДДЕРЖКИ НАУЧНЫХ,  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И КУЛЬТУРНЫХ  
ИНИЦИАТИВ

# НАУЧНЫЕ ГОСТИНЫЕ ФОНДА "ТРАЕКТОРИЯ"

У каждого ребенка есть «свои 100 вопросов» про то, как устроен мир, что нового открывает людям наука, как происходят открытия и чем занимаются современные ученые. Родители и учителя, которым дети задают эти вопросы, не всегда могут дать на них исчерпывающий ответ.

Чтобы дать школьникам, учителям, родителям и всем, кто интересуется наукой, возможность вживую пообщаться с учеными, популяризаторами, общественными деятелями и просто интересными людьми, мы и создали этот проект. Участникам «Научных гостиных» открывается возможность узнать о последних научных открытиях, интересных фактах, связанных с историей развития науки, ознакомиться с информацией, выходящей за рамки школьной программы, получить ответы на вопросы, порой формирующие наше мировоззрение.

Формат «Научной гостиной» органично сочетает элементы как научно-популярных лекций и коротких рассказов о науке, истории науки, интересных фактах, биографиях знаменитых людей, общественных деятелей, так и неформальной дискуссии и диалога молодежной аудитории с приглашенным гостями.

**Свободный вход для всех желающих**  
Узнайте о проекте больше в наших социальных сетях и на сайте: [www.traektoriafdn.ru](http://www.traektoriafdn.ru)

**#фондтраектория**

vk f g+ instagram youtube



- [1] Mars Odyssey, MRO и MAVEN (США), Mars Express (ЕКА), Mars Orbiter Mission (Индия).  
 [2] Роверы NASA Opportunity и Curiosity. Ровер Spirit перестал функционировать в 2011 году.  
 [3] И ее аналогов в России, Европе и Китае. — Прим. ред.

[4] «Эта глупая идея стрелять в Луну — пример того абсурда, до которого порочная специализация может довести ученых. Чтобы вырваться из земного притяжения, снаряду нужна скорость 7 миль в секунду. Тепловая энергия при такой скорости равна 15 180 калорий [на грамм]. Исходя из этого, такое предприятие представляется фундаментально невозможным» — Александр Бикертон, профессор химии, 1926 год

«Я дерзну сказать, что путешествие на Луну силами человека не произойдет никогда, несмотря ни на какие научные достижения» — Ли де Форест, изобретатель электронной лампы, 1957 год.

«Нет никакой надежды реализовать фантастическую идею достичь Луны, потому что барьеры, связанные с необходимостью освобождения от притяжения Земли, непреодолимы» — Форест Моултон, астроном, 1932 год.

[5] В редакционной статье 1920 года газета The New York Times писала: «Профессор Годдард... не знает отношения между действием и противодействием и не понимает необходимости иметь что-нибудь получше вакуума, от чего можно было бы оттолкнуться».

Третий закон Ньютона гласит, что каждому действию соответствует равное и противоположно направленное противодействие. Противодействие следует из закона сохранения импульса, и никакой среды, от которой нужно было бы отталкиваться, не требуется. Такая среда только затрудняла бы движение, а не способствовала ему. Справедливости ради отметим, что в 1969 году, когда астронавты Apollo 11 были уже на пути к Луне, газета принесла извинения за эту ошибку. На каждую публикацию найдется равное и противоположное опровержение.

[6] Имеется в виду — для своего размера. — Прим. ред.

[7] Николая Бурбаки — коллективный псевдоним группы математиков переменного состава (преимущественно французов), образованной в 1935 году и написавшей большую серию книг, в которой авторы попытались заново сформулировать математику на общей и абстрактной основе. Эта работа принесла большую пользу в изучении математики, потому что унифицировала предмет, выделила базовые концепции и привела строгие доказательства. При этом аналогичная философия, получившая название «новая математика» и широко применяющаяся в преподавании школьной математики, не добилась особого успеха и оказалась по меньшей мере противоречивой.

[8] В 1726 году Ньютон провел вечер в Лондоне за ужином с Уильямом Стакли. В документе, сохранившемся в архивах Королевского общества и изложенном старинным вычурным слогом, Стакли писал: «После обеда, поскольку погода стояла теплая, мы вышли в сад и сели пить чай в тени какой-то яблони; только я и он. В ходе беседы он, помимо прочего, рассказал мне, что ситуация в точности похожа на ту, в которой он был, когда мысль о гравитации впервые пришла ему в голову. Почему яблоко всегда падает перпендикулярно земле, подумал он... Почему не в сторону и не вверх, а всегда стремится к центру Земли? Очевидно, причина состоит в том, что Земля притягивает его. Вещество должно обладать какой-то притягивающей силой. И сумма притягивающей силы вещества Земли должна находиться в центре Земли, а не где-нибудь сбоку. Итак, падает ли яблоко перпендикулярно или по направлению к центру? Если вещество таким образом притягивает вещество, то это должно происходить пропорционально количеству. Следовательно, яблоко притягивает Землю, точно так же, как Земля притягивает яблоко».

Другие источники тоже подтверждают, что Ньютон рассказывал эту историю, но все это, разумеется, не доказывает ее истинности. Ньютон мог специально ее придумать, чтобы проще было объяснять его идеи. Говорят, что яблоня, с которой упало пресловутое яблоко, сохранилась до сего дня — это яблоня сорта Flower of Kent в усадьбе Вулсторп-мэнор.

[9] Если большая полуось эллипса равна  $a$ , а малая  $b$ , то его фокус располагается на расстоянии  $f = \sqrt{a^2 - b^2}$  от центра. Эксцентриситет эллипса равен  $\varepsilon = f/a = \sqrt{1 - b^2/a^2}$ .

[10] Вот как писал об этом сам Ньютон в письме к Ричарду Бентли, написанном в 1692 или 1693 году: «Непостижимо, что неодушевленная Материя может, без Посредничества чего-то еще, что не является материальным, оказывать влияние и действовать на другую материю без обоюдного Контакта... То, что одно тело может действовать на другое на расстоянии через Вакуум, вообще без какого бы то ни было Посредничества... для меня настолько Абсурдно, что я убежден: ни один Человек, имеющий в философских Вопросах компетентные Способности мышления, никогда с этим не согласится».

[11] В вакууме. — Прим. ред.

[12] Это некоторое упрощение. Запрещено не движение быстрее света, как таковое, запрещен переход через скорость света. Никакой объект из тех, что в настоящий момент движутся медленнее света, не может ускориться так, чтобы двигаться быстрее света; а если вдруг что-то в настоящий момент движется быстрее света, то это что-то не сможет замедлиться и стать медленнее света. Подобные частицы называются тахионами, и на данный момент их существование носит чисто гипотетический характер.

[13] В письме к своему другу Конраду Хабихту, датированном 1907 годом, Эйнштейн писал, что думает о «релятивистской теории гравитационного закона, при помощи которой я надеюсь объяснить до сих пор необъяснимое вековое изменение движения перигелия Меркурия». Первые серьезные попытки такого рода были начаты им в 1911 году.

[14] В наше время мы соединяем уравнения Эйнштейна в единое тензорное уравнение (из десяти компонент — симметричный четырехмерный тензор), но обычным названием остаются «уравнения поля».

[15] Хуже того, скорость хода «бортовых часов» — ультрастабильного генератора частоты навигационного спутника — преднамеренно смещена относительно идеальной примерно на половину миллиардной доли, чтобы получить идеальную синхронизацию с неподвижными часами на поверхности Земли. — Прим. ред.

[16] Древнейшие минералы, обнаруженные в метеоритах — современных остатках твердого вещества, сформировавшегося в досолнечной туманности, имеют возраст 4,5682 млрд лет.

[17] Книгу эту Декарт написал в 1632–1633 годах, но не спешил публиковать, опасаясь инквизиции. В результате она вышла только после смерти автора.

[18] Строгое определение дается через векторы.

[19] Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М., 1969.

[20] В этой книге запись  $p:q$  для резонанса означает, что первое упомянутое тело успевает совершить  $p$  оборотов за то время, пока второе совершает их  $q$ . Их периоды, следовательно, относятся друг к другу как  $q/p$ . С другой стороны, их частоты (используется также эквивалентный термин «среднее движение») дают отношение  $p/q$ . Некоторые авторы исходят из периодов, а некоторые — из частот; используется также запись «резонанс  $p/q$ ». В любом случае, если поменять порядок перечисления объектов, резонанс  $p:q$  перейдет в резонанс  $q:p$ .

[21] На Венере нет старых кратеров, потому что вулканизм заново сформировал ее поверхность менее 100 млн лет назад. Планеты, начиная от Юпитера и дальше, — это газовые и ледяные гиганты, и мы в состоянии разглядеть только верхние слои их атмосферы. Но на многих их спутниках есть кратеры — и новые, и старые. Аппарат New Horizons выяснил, что на Плутоне и его спутнике Хароне кратеров меньше, чем ожидалось.

[22] Химический состав урановых залежей в Окло (Габон) позволяет предположить, что в докембрии они представляли собой природный ядерный реактор.

[23] А конкретно — среднюю долготу. — Прим. ред.

[24] К концу 2017 года известно уже около 500 000 астероидов всех размеров с хорошо определенными орбитами. — Прим. ред.

[25] При этом никто не обратил внимания на чисто языковую нестыковку: что в английском, что в русском языке карликовая планета (dwarf planet) интуитивно воспринимается как менее значимый объект, нежели малая планета (minor planet). — Прим. ред.

[26] Из примечания к главе 2 можно узнать, почему мы не называем такой резонанс 3:5.

[27] Закон Дермотта — эмпирическая формула для орбитального периода спутников в Солнечной системе — был сформулирован Стенли Дермоттом в 1960-е. Он имеет вид  $T(n) = T(0)Cn$ , где  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ . Здесь  $T(n)$  — орбитальный период  $n$ -го спутника,  $T(0)$  — константа порядка нескольких суток, а  $C$  — константа той системы спутников, о которой идет речь. Приведем конкретные значения. Юпитер:  $T(0) = 0,444$  суток,  $C = 2,0$ . Сатурн:  $T(0) = 0,462$  суток,  $C = 1,59$ . Уран:  $T(0) = 0,488$  суток,  $C = 2,24$ .

[28] Здесь 1992 — год открытия, QB1 — условное обозначение объекта в ряду найденных в указанном году, а 15760 — постоянный номер малой планеты, присвоенный объекту 1992 QB1 после надежного определения его орбиты. — Прим. ред.

[29] Название происходит от побуквенного прочтения символов QV1 и дано в честь первого после Плутона занептунного объекта.

[30] Измерить диаметр Плутона с Земли сложно даже при помощи космического телескопа имени Хаббла. Дело в том, что у Плутона имеется тонкий слой атмосферы, размывающий изображение. У Эриды атмосферы нет.

[31] Утверждения 43–45 из первой книги «Математических начал натуральной философии».

[32] В частности, с помощью камер на двух американских КА Stereo.

[33] Фразу Вигнера часто понимают неверно. Эффективность математики объяснить нетрудно. Значительная часть математики мотивируется реальными задачами, поэтому нет ничего удивительного в том, что она решает эти задачи. Важное слово в высказывании Вигнера — «чрезмерная». Он имел в виду, что математические приемы, придуманные для одной цели, часто оказываются полезными в совершенно иных, неожиданных областях. В качестве простого примера можно вспомнить древнегреческую геометрию конических сечений, объявившихся вдруг две тысячи лет спустя в орбитах планет, или модные в эпоху Возрождения рассуждения о мнимых числах, без которых сегодня не может существовать ни физика, ни инженерное дело. Это широко распространенное в математике явление так просто не объяснишь.

[34] Если астероиду присвоено имя, то год открытия, как правило, не указывается. — Прим. ред.

[35] Предположим, для простоты, что все астероиды лежат в одной плоскости, что для большинства из них не так уж далеко от истины. Пояс астероидов располагается между 2,1 и 3,2 а.е. от Солнца, то есть на расстоянии примерно 320–480 млн км. В проекции на плоскость эклиптики общая плоскость, занимаемая поясом астероидов, равна  $\pi$  (4802 – 3202) триллионов квадратных километров, то есть  $4 \times 10^{17}$  кв. км. Разделив эту площадь между 150 млн камней, получим  $8,2 \times 10^8$  кв. км на один астероид. Такая площадь соответствует площади круга диаметром 58 000 км. Если астероиды распределены в плоскости приблизительно равномерно — а для грубой оценки такое предположение вполне оправданно, — именно таково типичное расстояние между соседними астероидами.

[36] Астрономы предпочитают среднее движение — меру угловой скорости тела, обратной к периоду обращения. — Прим. ред.

[37] Скорее не превышает нескольких десятков метров, за исключением слабых внешних колец, которые значительно толще. — Прим. ред.

[38] На момент подготовки этого текста к печати, в ноябре 2017 года, второй аппарат еще не прошел гелиопаузу. — Прим. ред.

[39] Формально считалось, что их 10, но один из спутников был под большим подозрением, и не зря. — Прим. ред.

[40] Cassini завершил свою работу в сентябре 2017 г. преднамеренным входом в атмосферу Сатурна. — Прим. ред.

[41] Угловой диаметр любой планеты Солнечной системы многократно превышает угловой диаметр звезды, так что она, проходя перед звездой, неминуемо закрывает ее полностью. Но не сразу, и интересен как раз переходный процесс. — Прим. ред.

[42] Название Янус первоначально получил десятый спутник Сатурна, который открыл в 1966 году французский астроном Одуэн Дольфюс. Американский зонд Pioneer 11, проследовавший мимо Сатурна в 1979 году, не обнаружил его на расстоянии, указанном Дольфюсом, зато во время серии проходов Земли через плоскость кольца Сатурна в 1979–1980 годах примерно на этой отметке были найдены два спутника. После кропотливого анализа выяснилось, что Дольфюс видел и измерял положение обоих, но отнес результаты к одному телу, а потому вычисленный им период обращения оказался неправильным. За одним из спутников сохранили название Янус, второй нарекли Эпиметием. — Прим. ред.

[43] Группа астероидов, находящихся между орбитами Юпитера и Нептуна, переходная по свойствам между астероидами Главного пояса и объектами пояса Койпера.

[44] Rosetta по проекту должна была лететь к другой комете — 46P / Виртанена. Однако астрономическое окно пришлось пропустить из-за аварии ракеты из того же семейства, что и носитель Rosetta, и под новую дату старта в марте 2014 года была выбрана новая цель. — Прим. ред.

[45] NASA отчиталось об окончании приема записанной на борту информации 27 октября 2016 года. — Прим. ред.

[46] У честной кости 6 имеет такую же вероятность выпадения, как любая другая грань. В долгосрочной перспективе число шестерок должно сколь угодно близко подходить к  $1/6$  от числа бросков. Но очень поучительно знать, как это происходит. Если на каком-то этапе число выпадений шестерки было, скажем, на 100 больше, чем число выпадений любой другой грани, шестерка от этого не становится более или менее вероятной. Кость продолжает выбрасывать цифру за цифрой. После, скажем, еще сотни миллионов бросков эти 100 лишних шестерок будут смещать долю шестерок всего на одну миллионную долю. Отклонения компенсируются не потому, что кость «знает», что она выбросила слишком много шестерок. Они разбавляются новыми данными, которые выдает не обладающая памятью кость.

[47] С точки зрения динамики игральная кость представляет собой твердый куб, и ее движение хаотично лишь потому, что грани и углы «растягивают» динамику. Но в бросании костей есть еще один источник случайности: начальные условия. То, как вы держите кость в руке и как выпускаете ее, в любом случае делает результат случайным.

[48] Лоренц не говорил ничего такого о бабочке, хотя у него есть близкое по смыслу высказывание о чайке. Бабочку предложил кто-то другой для названия публичной лекции, которую Лоренц прочел в 1972 году. И вообще, Лоренц, вероятно, имел в виду не этот, а более тонкий эффект. Все это не имеет отношения к нашему разговору, и описал я то, что мы называем «эффектом бабочки» сегодня. Он реален и является характеристикой хаоса, но это довольно тонкая материя.

[49] Майкл Минович показал возможность гравитационного маневра теоретически через два года после того, как советский КА «Луна-3» проделал его практически. Эффект «заимствования» пролетающим зондом части энергии планеты был исследован еще Фридрихом Цандером. — Прим. ред.

[50] Atlas V версии 551 был далеко не самой мощной или грузоподъемной ракетой в истории межпланетных проектов. «Вояджеры» отправлялись в 1977 г. в путешествие к Юпитеру и далее на значительно более тяжелой ракете Titan IIIE с дополнительной твердотопливной ступенью. Просто New Horizons за счет достижений в области микроэлектроники и компьютерной техники удалось сделать намного легче, чем были его предшественники тридцатью годами раньше. — Прим. ред.

[51] Не считая, разумеется, небольших затрат на коррекции, которые компенсируют ошибки и возмущения и удерживают аппарат строго на рассчитанной траектории. — Прим. ред.

[52] Козырем в рукаве в планировании подобной траектории является возможность довольно значительного маневра собственными силами в точках, где должны сопрягаться между собой отдельные участки. Но что такое, скажем, маневр на 300 метров в секунду, если суммарная экономия измеряется километрами в секунду? — Прим. ред.

[53] Одной из многих причин начала Первой мировой войны было убийство австрийского эрцгерцога Франца-Фердинанда во время посещения Сараево. Попытка шестерых убийц подорвать эрцгерцога гранатой не удалась. Позже один из них, Гаврила Принцип, застрелил его из пистолета вместе с женой Софи. Первоначально население практически никак не отреагировало на это убийство, но австрийское правительство начало подстрекать людей в Сараево на антисербские бунты, которые постепенно разгорелись.

[54] Практически такой сценарий был реализован в китайском проекте «Чанъэ-2», когда спутник Лунысерией хитроумных маневров был направлен на перехват астероида Тутатис и сфотографировал его с минимальной дистанции. — Прим. ред.

[55] В спектроскопической установке Фраунгофера для получения спектра Солнца сначала использовалась стеклянная призма, затем — самодельные дифракционные решетки. — Прим. ред.

[56] Строго говоря, этот термин относится к полному энергетическому выходу, но последний тесно связан с наблюдаемой яркостью звезды.

[57] При массе меньшей 0,08 массы Солнца выделяемой термоядерной энергии в звезде недостаточно, чтобы остановить ее сжатие. Поэтому звезда не останавливается на главной последовательности и уходит в область белых карликов очень низкой светимости. — Прим. ред.

- [58] О возможной продолжительности существования человечества ничего нельзя сказать, она может быть любой. — Прим. ред.
- [59] Здесь во всех случаях речь идет не о новых, а о сверхновых звездах, имеющих совершенно иную природу, чем новые. — Прим. ред.
- [60] Считается, что наиболее тяжелые элементы, такие как уран, золото, платина, возникают и выбрасываются в пространство при слиянии нейтронных звезд. — Прим. ред.
- [61] Крупные солнечные пятна прекрасно видны без всякой оптики на изображении солнечного диска, получаемом на листе бумаги в темной комнате, куда свет Солнца проникает через маленькую дырочку. — Прим. ред.
- [62] В Сиене, расположенной под  $24^\circ$  широты, вблизи летнего солнцестояния Солнце заглядывало на дно самых глубоких колодцев. — Прим. ред.
- [63] То есть в качестве базиса берут не диаметр земной орбиты, а радиус — астрономическую единицу. — Прим. ред.
- [64] По построению радиус земной орбиты виден под углом в  $1''$  с расстояния 206 265 а.е. Для того чтобы выразить парсек в световых годах, нужно дополнительно знать время, за которое свет проходит от Солнца до Земли. — Прим. ред.
- [65] Здесь автор неточен. В максимуме блеска вспыхнувшая в М31 звезда имела 6-ю звездную величину. Галактика все же ярче. — Прим. ред.
- [66] Такое вращение называется твердотельным. А коротация — это равенство локальных угловых скоростей спирали и невозмущенного диска. — Прим. ред.
- [67] Имеется в виду спектрограф. — Прим. ред.
- [68] То есть  $M(r) = r[v(r)]^2/G$ . Поэтому  $v(r) = \sqrt{GM(r)/r}$ . Здесь  $M(r)$  — масса от центра до радиуса  $r$ ,  $v(r)$  — угловая скорость звезд на радиусе  $r$ , а  $G$  — гравитационная постоянная. Однако эти выражения выполняются строго только для сферически-симметричного распределения масс, поэтому для реальных галактик они приближительны. — Прим. ред.
- [69] К февралю 2018 г. было известно 3728 экзопланет вблизи 2794 звезд. — Прим. ред.
- [70] «Землеподобная» здесь означает каменный (силикатный) мир примерно того же размера и массы, что и Земля, на орбите, допускающей существование жидкой воды без дополнительных особых условий. Позже нам понадобится также кислород.
- [71] В книге «Придумать инопланетянина» мы с Джеком Коэном высказываем предположение, что самое важное — это экстеллект: способность разумных существ объединять свои знания в единый пул, доступный для всех. Интернет — пример такого пула. Строительство звездных кораблей невозможно без экстеллекта.
- [72] Скорость вдали от Земли, измеренная относительно Солнца, на расстоянии 1 а.е. от него. — Прим. ред.
- [73] Если принять систему единиц, в которой скорость света равна 1. Тогда время измеряется, скажем, в годах, а пространство — в световых годах.
- [74] Как известно, принято различать нашу Вселенную и другие возможные вселенные. Здесь и в главе 19 обсуждаются различные теоретические варианты вселенных, которые мы будем писать со строчной буквы, даже если они похожи на нашу или сравниваются с ней. — Прим. ред.
- [75] В октябре 2017 г. пришло сообщение об одновременном детектировании на трех установках всплеска гравитационного излучения, продолжавшегося около 100 с, связанного со слиянием двух нейтронных звезд в одной из галактик. Его также удалось отождествить по оптической и гамма-вспышке, сопровождавшими это событие. — Прим. ред.
- [76] Речь здесь идет о наблюдаемой нами части Вселенной. — Прим. ред.
- [77] Вы можете возразить, что говорить «в настоящее время» бессмысленно, поскольку по теории относительности события не обязательно должны происходить одновременно для всех наблюдателей. Это правда, но когда я говорю «в настоящее время», я подразумеваю свою систему отсчета, где наблюдатель — я. В принципе я могу установить удаленные часы так, чтобы их показания были сдвинуты на один год за один световой год расстояния; с моей точки зрения все они будут синхронизированы. В более общем плане наблюдатели в «сопутствующих» системах воспринимают одновременность так, как этого можно было бы ожидать в классической физике.

[78] Здесь надо различать понятия бесконечности и безграничности. Рассматриваемые модели Вселенной, даже конечные по объему или массе, не имеют пространственных границ, то есть безграничны. — Прим. ред.

[79] Меньше! По данным NASA, это было 12% пикселя.

[80] На основании данных по сверхновым типа Ia, температурным флуктуациям реликтового излучения и корреляционным функциям галактик оценочный возраст Вселенной составляет  $13,798 \pm 0,037$  млрд лет.

[81] Возможные нестационарные модели однородной изотропной Вселенной, основанные на решениях уравнений Эйнштейна, впервые были предложены советским физиком и математиком Александром Фридманом. Его первая статья по релятивистской космологии была опубликована в 1922 г., еще до открытия закона Хаббла. — Прим. ред.

[82] Достаточно одной, если известно, какому элементу она принадлежит. — Прим. ред.

[83] Здесь и далее: «из ничего» — это достаточно условное понятие. Теория не запрещает, чтобы до Большого взрыва было «что-то» (часто говорят о физическом вакууме), но для его описания требуется новая физика. — Прим. ред.

[84] Имеется в виду рождение виртуальных частиц. — Прим. ред.

[85] Конечно, об абстрактной точке в качестве начального состояния можно говорить достаточно условно. «Загнать» всю материю в точку невозможно даже теоретически. Это большое упрощение, иллюстрирующее скорее недостаточность наших физических знаний, и, в частности, игнорирование кванто-механических эффектов, важных при сверхвысокой плотности.

[86] Здесь автор почему-то проигнорировал их учителя, Георгия Гамова. — Прим. ред.

[87] По современным оценкам, эта температура составляет  $2,72548 \pm 0,00057$  К.

[88] То есть была более неоднородной на малых масштабах. — Прим. ред.

[89] То есть области повышенной плотности. — Прим. ред.

[90] Фраза заимствована у Терри Пратчетта.

[91] На самом деле противоречий здесь нет. Теория звездной эволюции пока еще не позволяет оценивать возраст очень старых звезд с необходимой точностью. — Прим. ред.

[92] Эта теория не получила подтверждения. — Прим. ред.

[93] Звезды в галактиках связаны гравитацией; считается, что именно она противодействует расширению.

[94] Это тоже теория Большого взрыва, но без сингулярности. — Прим. ред.

[95] На самом деле гало может иметь более сложную форму. — Прим. ред.

[96] Это не совсем так. Даже в ньютоновской механике галактики не должны вращаться по законам Кеплера, поскольку эти законы справедливы только при вращении вокруг массы, сконцентрированной в центре, а вещество галактик распределено по большому объему, и, варьируя это распределение, можно получить почти любую форму кривой вращения. — Прим. ред.

[97] Частота регистрации выше всего в июне. — Прим. ред.

[98] Речь идет об обнаружении протяженных областей гамма-излучения, простирающихся до расстояний более 20 тысяч световых лет по обе стороны от ядра нашей Галактики перпендикулярно ее плоскости и получивших название «пузыри Ферми». Дальнейшие исследования показали, что их происхождение, по-видимому, связано со всплеском активности ядра Галактики и выбросом горячего газа из него несколько миллионов лет назад. — Прим. ред.

[99] Второй закон движения Ньютона гласит, что  $F = ma$ , где  $F$  — сила,  $m$  — масса,  $a$  — ускорение. MOND заменяет эту формулировку на  $F = \mu(a/a_0)ma$ , где  $a_0$  — новая фундаментальная константа, определяющая ускорение, ниже которого закон Ньютона уже неприменим. Множитель  $\mu(x)$  есть неизвестная функция, которая при больших  $x$  стремится к 1, согласно закону Ньютона, но при малых  $x$  стремится к  $x$ , что дает наблюдаемые кривые вращения галактик.

[100] Угарный газ. — Прим. ред.

[101] На самом деле так и должно быть, если темная материя и барионное вещество обладают разными способностями к охлаждению и сжатию в процессе эволюции. — Прим. ред.

[102] Позднее Кадоваки (Kevin Kadowaki) подверг серьезной критике подход Саари в применении к галактикам, в частности, потому что распределение массы в галактиках далеко от сферической симметрии и не описывается уравнением Кеплера. Заметим также, что кривые

вращения галактических дисков, как правило, определяются по движению динамически холодного газа, к которому не применимы представления о дискретных массивных телах. — Прим. ред.

[103] Фраза «Исключение лишь подтверждает правило» используется очень широко, когда нужно избавиться от неудобных исключений. Я никогда не понимал, почему люди это делают — кроме, конечно, желания победить в споре. Это утверждение бессмысленно. Оно восходит к Древнему Риму, к юридическому принципу «*exceptio probat regulam in casibus non exceptis*» («исключение подтверждает правило в случаях неисключенных»). Это означает, что если у вашего правила есть исключения, то вам нужно другое правило. Это имеет смысл. При современном использовании вторая часть фразы опускается, и получается чепуха.

[104] По-настоящему фундаментальные константы представляют собой различные комбинации этих величин, не зависящие от единиц измерений: «безразмерные константы», которые представляют собой просто числа. Такова, к примеру, постоянная тонкой структуры. Численное значение скорости света зависит от выбранных единиц измерения, но мы знаем, как перевести ее значение из одной системы единиц в другую. Ничто из того, о чем я рассказываю, не зависит от этого различия.

[105] Важно, что существует некоторое фиксированное число, превышающее число состояний любого лоскута. Точного соответствия не требуется.

[106] Числа с громадными показателями экспоненты, как здесь, ведут себя довольно странно. Если вы заглянете в сеть, то увидите, что ближайшая точная ваша копия находится от вас на расстоянии около 1010128 метров. Я заменил метры световыми годами, которые значительно больше. Но на самом деле изменение единиц измерения в показателе степени слабо влияет на число, поскольку 1010128 метров есть 1010128–11 световых лет, а показатель 10128–11 есть 128-значное число, лишь чуть меньшее, чем 10128. Их отношение дает 1,000...00011 со 127 нулями в промежутке.

[107] То есть на логарифмической шкале и при конкретном, но широком диапазоне значений область пространства параметров, при попадании в которую возможно формирование звезд, составляет примерно четверть от всего этого пространства. Это очень грубая оценка, но сравнимая с тем, что делают сторонники теории тонкой настройки. Смысл здесь не в 25%; смысл в том, что любой разумный оценочный расчет вероятности дает значение куда больше, чем 10–47.

[108] Это не совсем так. Были найдены независимые аргументы в пользу существования темной материи и энергии, вытекающие из наблюдений и здесь не упомянутые. Что действительно отсутствует — так это такие убедительные доказательства существования этих сред, которые бы сделали излишними разработку альтернативных подходов. — Прим. ред.

Переводчик Н. Лисова  
 Научный редактор А. Засов  
 Редактор И. Лисов  
 Руководитель проекта А. Тарасова  
 Дизайнер обложки С. Хозин  
 Корректоры Е. Аксенова, И. Панкова  
 Компьютерная верстка М. Поташкин

© Joat Enterprises, 2016

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

© Электронное издание. ООО «Альпина Диджитал», 2018

**Иэн С.**

Математика космоса: Как современная наука расшифровывает Вселенную / Иэн Стюарт; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018.

ISBN 978-5-9614-5228-0

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория»  
(при финансовой поддержке Н.В. Каторжнова).



## ТРАЕКТОРИЯ

Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» ([www.traektoriafdn.ru](http://www.traektoriafdn.ru)) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.