



КОГДА У ЗЕМЛИ БЫЛО ДВЕ ЛУНЫ

Планеты-каннибалы,
ледяные гиганты, грязевые кометы
и другие светила ночного неба

ЭРИК АСФОГ

АНО
альпина нон-фикшн


Книжные проекты
Дмитрия Зимина

Посвящается Генри, Галену и Фиби

WHEN THE EARTH HAD TWO MOONS

Cannibal Planets, Icy Giants, Dirty Comets,
Dreadful Orbits, And The Origins Of The
Night Sky

ERIK ASPHAUG

ЭРИК АСФОГ

КОГДА У ЗЕМЛИ БЫЛО ДВЕ ЛУНЫ

Планеты-каннибалы, ледяные гиганты,
грязевые кометы и другие светила ночного неба

Перевод с английского



Книжные проекты
Дмитрия Зимина

АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва, 2021

УДК 524.8

ББК 22.632

A91

Переводчик Виктория Краснянская
Научные редакторы
Владимир Сурдин, канд. физ.-мат. наук,
Михаил Гирфанов, канд. геол.-минерал. наук
Редактор Петр Фаворов

Асфог Э.

A91 Когда у Земли было две Луны: Планеты-каннибалы, ледяные гиганты, грязевые кометы и другие светила ночного неба / Эрик Асфог ; Пер. с англ. — М.: Альпина нон-фикшн, 2021. — 474 с.

ISBN 978-5-00139-262-0

В 1959 г. советская станция «Луна-3» сделала первые фотографии обратной стороны Луны. Даже в плохом разрешении изображения ошеломили ученых: обратная сторона выглядела как огромное пространство горных массивов, а не как обширные лавовые равнины, покрывающие видимую с Земли сторону. Последующие миссии качественными снимками подтвердили это открытие. Почему Луна выглядит именно так и может ли это что-то сказать о нашем месте во Вселенной? Оказывается, может — и довольно много.

В книге «Когда у Земли было две Луны» известный планетолог Эрик Асфог отправляет нас в захватывающее путешествие в самые далекие времена нашей Галактики, чтобы выяснить, почему Луна такая разная. Интересно написанная, с провокационными аргументами, эта книга не только головокружительный астрономический тур, но и глубокое исследование происхождения жизни в миллиардах километрах от нашего дома.

УДК 524.8

ББК 22.632

Все права защищены. Никакая часть этой 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, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу mylib@alpina.ru

© Erik Asphaug, 2019

This edition is published by arrangement with CHASE LITERARY AGENCY and The Van Lear Agency LLC

© Издание на русском языке, перевод, оформление.

ООО «Альпина нон-фикшн», 2021

ISBN 978-5-00139-262-0 (рус.)

ISBN 978-0-06-265792-3 (англ.)



Книжные проекты
Дмитрия Зимина

Эта книга издана в рамках программы
«Книжные проекты Дмитрия Зимина»
и продолжает серию «Библиотека «Династия».

Дмитрий Борисович Зимин — основатель
компании «Вымпелком» (Beeline), фонда
некоммерческих программ «Династия» и фонда
«Московское время».

Программа «Книжные проекты Дмитрия
Зимина» объединяет три проекта, хорошо
знакомые читательской аудитории: издание
научно-популярных переводных книг
«Библиотека «Династия», издательское
направление фонда «Московское время»
и премию в области русскоязычной научно-
популярной литературы «Просветитель».

Подробную информацию о «Книжных проектах
Дмитрия Зимина» вы найдете
на сайте ziminbookprojects.ru.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Краткий список планет и их спутников	9
Введение	17
Глава 1. Древние руины	57
Глава 2. Камни в потоке.....	109
Глава 3. Системы внутри систем.....	151
Глава 4. Странности и мелочи.....	193
Глава 5. Щебень и гигантские столкновения.....	249
Глава 6. Последние выжившие	285
Глава 7. Миллиард земель	345
Заключение	371
Эпилог.....	381
Благодарности	389
Глоссарий.....	391
Примечания.....	399
Предметно-именной указатель	461

КРАТКИЙ СПИСОК ПЛАНЕТ И ИХ СПУТНИКОВ

В Солнечной системе имеется по крайней мере девять планет* (в зависимости от того, кто ведет подсчет) и более 200 их естественных спутников. Ниже перечислены некоторые самые интересные и важные из них¹. Поскольку спутники иногда имеют странную форму, а планеты с коротким периодом вращения представляют собой сплюснутые эллипсоиды, приводятся их средние диаметры. Радиусы орбит планет даны в астрономических единицах (а. е.), где 1 а. е. равна среднему расстоянию от Земли до Солнца — 149,6 млн километров. Радиусы орбит спутников даются в радиусах их планет.

МЕРКУРИЙ

Расстояние от Солнца: 0,39 а. е.

Диаметр: 4878 км

Масса: $3,301 \times 10^{23}$ кг

Орбитальный период: 0,24 года/88 суток

Период вращения: 58,6 суток

* Согласно официальной позиции Международного астрономического союза, в Солнечной системе к категории «планета» относятся восемь тел — Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. — *Прим. науч. ред.*

ВЕНЕРА

Расстояние от Солнца: 0,72 а. е.

Диаметр: 12 104 км

Масса: $4,867 \times 10^{24}$ кг

Орбитальный период: 0,62 года/226 суток

Период вращения: 243 суток (обратное вращение)

ЗЕМЛЯ

Расстояние от Солнца: 1 а. е. (по определению)

Диаметр: 12 742 км

Масса: $5,972 \times 10^{24}$ кг

Орбитальный период: 1 год/365,26 суток

Период вращения: 23,93 часа (сидерические сутки)

Луна

Расстояние от планеты: 60,3 радиуса Земли

Диаметр: 3474 км

Масса: $7,35 \times 10^{22}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Земли: 27,3 суток (сидерический месяц)

МАРС

Расстояние от Солнца: 1,52 а. е.

Диаметр: 6779 км

Масса: $6,417 \times 10^{23}$ кг

Орбитальный период: 1,88 года

Период вращения: 24,6 часа

Фобос

Расстояние от планеты: 2,8 радиуса Марса

Диаметр: 22 км

Масса: $10,8 \times 10^{15}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Марса: 7,7 часа

Деймос

Расстояние от планеты: 7,0 радиуса Марса

Диаметр: 12 км

Масса: $1,48 \times 10^{15}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Марса: 30,3 часа

ЮПИТЕР

Расстояние от Солнца: 5,2 а. е.

Диаметр: 139 882 км

Масса: $1,898 \times 10^{27}$ кг

Орбитальный период: 11,86 года

Период вращения: 9,9 часа

Ио

Расстояние от планеты: 6,03 радиуса Юпитера

Диаметр: 3643 км

Масса: $8,93 \times 10^{22}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Юпитера: 1,8 суток

Европа

Расстояние от планеты: 9,59 радиуса Юпитера

Диаметр: 3130 км

Масса: $4,79 \times 10^{22}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Юпитера: 3,6 суток

Ганимед

Расстояние от планеты: 15,3 радиуса Юпитера

Диаметр: 5268 км

Масса: $1,48 \times 10^{23}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Юпитера: 7,2 суток

Каллисто

Расстояние от планеты: 26,93 радиуса Юпитера

Диаметр: 4806 км

Масса: $1,08 \times 10^{23}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Юпитера: 16,7 суток

САТУРН

Расстояние от Солнца: 9,6 а. е.

Диаметр: 116 464 км

Масса: $5,683 \times 10^{26}$ кг

Орбитальный период: 29,44 года

Период вращения: 10,7 часа

Мимас

Расстояние от планеты: 3,18 радиуса Сатурна

Диаметр: 398 км

Масса: $3,75 \times 10^{19}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 0,942 суток

Энцелад

Расстояние от планеты: 4,09 радиуса Сатурна

Диаметр: 504 км

Масса: $1,08 \times 10^{20}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 1,37 суток

Тетфия

Расстояние от планеты: 5,06 радиуса Сатурна

Диаметр: 1072 км

Масса: $6,17 \times 10^{20}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 1,89 суток

Диона

Расстояние от планеты: 6,48 радиуса Сатурна

Диаметр: 1125 км

Масса: $1,10 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 2,74 суток

Рея

Расстояние от планеты: 9,05 радиуса Сатурна

Диаметр: 1528 км

Масса: $2,31 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 4,52 суток

Титан

Расстояние от планеты: 21 радиус Сатурна

Диаметр: 5150 км

Масса: $1,34 \times 10^{23}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 15,9 суток

Гиперион

Расстояние от планеты: 25,7 радиуса Сатурна

Диаметр: 270 км

Масса: $1,08 \times 10^{19}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 21,3 суток

Япет

Расстояние от планеты: 61,1 радиуса Сатурна

Диаметр: 1469 км

Масса: $1,81 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Сатурна: 79,3 суток

УРАН

Расстояние от Солнца: 19,2 а. е.

Диаметр: 51 260 км

Масса: $8,681 \times 10^{25}$ кг

Орбитальный период: 84,02 года

Период вращения: 17,2 часа (обратное вращение)

Миранда

Расстояние от планеты: 5,08 радиуса Урана

Диаметр: 472 км

Масса: $6,59 \times 10^{19}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Урана: 1,41 суток

Ариэль

Расстояние от планеты: 7,47 радиуса Урана

Диаметр: 1160 км

Масса: $1,3 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Урана: 2,52 суток

Умбриэль

Расстояние от планеты: 10,4 радиуса Урана

Диаметр: 1170 км

Масса: $1,17 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Урана: 4,14 суток

Титания

Расстояние от планеты: 17,1 радиуса Урана

Диаметр: 1577 км

Масса: $3,53 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Урана: 8,71 суток

Оберон

Расстояние от планеты: 22,8 радиуса Урана

Диаметр: 1523 км

Масса: $3,03 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Урана: 13,5 суток

НЕПТУН

Расстояние от Солнца: 30,0 а. е.

Диаметр: 49 244 км

Масса: $1,024 \times 10^{26}$ кг

Орбитальный период: 165 лет

Период вращения: 16,11 часа

Протей

Расстояние от планеты: 3,77 радиуса Нептуна

Диаметр: 420 км

Масса: $4,4 \times 10^{19}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Нептуна: 1,1 суток

Тритон

Расстояние от планеты: 14,4 радиуса Нептуна

Диаметр: 1682 км

Масса: $2,14 \times 10^{22}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Нептуна: 5,9 суток

Нереида

Расстояние от планеты: 22,4 радиуса Нептуна

Диаметр: 340 км

Масса: $3,09 \times 10^{19}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Нептуна: 360 суток

ПЛУТОН

Расстояние от Солнца: 39,5 а. е.

Диаметр: 2377 км

Масса: $1,303 \times 10^{22}$ кг

Орбитальный период: 248 лет

Период вращения: 6,39 суток (обратное вращение)

Харон

Расстояние от планеты: 16,5 радиуса Плутона

Диаметр: 1212 км

Масса: $1,55 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Плутона: 6,39 суток

Никта

Расстояние от барицентра Плутон — Харон: 41 радиус Плутона

Диаметр: 74 км

Масса: $4,5 \times 10^{16}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Плутона — Харона: 24,9 суток

Гидра

Расстояние от барицентра Плутон — Харон: 54,5 радиуса Плутона

Диаметр: 38 км

Масса: $4,8 \times 10^{16}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Плутона — Харона: 38 суток

ХАУМЕА

Расстояние от Солнца: 43 а. е.

Диаметр: 1436 км

Масса: $4,0 \times 10^{21}$ кг

Орбитальный период: 284 года

Период вращения: 3,9 часа

Намака

Расстояние от планеты: 48,2 радиуса Хаумеи

Диаметр: 170 км

Масса: $1,8 \times 10^{18}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Хаумеи: 34,7 суток

Хииака

Расстояние от планеты: 60,7 радиуса Хаумеи

Диаметр: 310 км

Масса: $1,8 \times 10^{19}$ кг

Орбитальный период обращения вокруг Хаумеи: 49,1 суток

ВВЕДЕНИЕ

Время — отец истины. Мать ее — наш разум.

Джордано Бруно

Я родился в октябре в Норвегии, поэтому прошло целых полгода до того, как мне удалось полежать на мягкой траве, глядя в небо после захода солнца. (Никогда не мешайте ребенку смотреть в небо.) Как бы то ни было, иногда той темной холодной зимой я, закутанный с ног до головы, оказывался на улице в катящейся куда-то детской коляске. Конечно, по-настоящему я этого не помню, но почти уверен, что впервые увидел Луну холодным полумесяцем, сияющим на темно-синем небе среди немногочисленных ярких жемчужин. Всю мою последующую жизнь это зрелище заставляет меня забыть любые дела. С тех пор — возможно, именно из-за этого — я интересуюсь планетами.

Более ясно я помню, как в первый раз встретилась с Лунной моя дочь. Она родилась летом в умеренных широтах. Когда ей исполнилось десять дней, мы отнесли девочку на соседний холм, чтобы полюбоваться на лунное противостояние¹, когда ночное светило становится особенно ярким; блеск Луны затмил все, кроме нескольких звезд и, возможно, одной планеты. Стоял тихий прохладный вечер, вокруг нас кружили насекомые. Я никогда не забуду, как выглядело в этом волшебном свете потрясенное маленькое личико

дочери, выглядывающее из складок хлопкового слинга. Она издала новый звук, напоминающий какое-то слово, и потянулась пальчиками к бледно-белому кругу в небе.

С детства мы знакомы с Луной, мы смотрим на нее, она волнует нас и внушает нам благоговение. Астрологи утверждают, что она оказывает огромное влияние на наш характер, наши моральные качества и нашу душу. Бесчисленные поколения выросли под ее вечным благосклонным взглядом, что на временной дистанции порядка миллиона лет привело к возникновению общечеловеческой идеи Луны, выраженной в стихах, историях, мифах, астрологических теориях и религиозных учениях.

Люди воспринимали Луну и с научной, и с донаучной точек зрения. К ней подступались геометры, летописцы, наблюдатели за приливами и предсказатели затмений. Но на ночное светило также смотрели священники и оракулы, архитекторы и градостроители, земледельцы, охотники и рыболовы. Стремясь к научному пониманию Луны, мы не можем поспешно отмахнуться от всего этого. Научный анализ ее происхождения и развития неотделим от остального культурного контекста. Помимо любых геофизических, астрономических или космохимических характеристик, Луна имеет свой особый *смысл*.

Чтобы добиться научного понимания Луны, мы должны проследить весь путь от первых попыток ученых разобраться в устройстве окружающего мира. Это означает обратиться к временам, когда наблюдения касались конкретных, непосредственно видимых фактов, таких как диаметр (в полпальца) и положение в небе, когда натурфилософия была амальгамой идей и мыслительных привычек. В отличие от современного нам конвейера всестороннего анализа, наука в те времена скорее представляла собой брызжащий во все стороны фонтан идей, расширяющийся круг знаний,

связанных с духовными поисками человека. Читая эту книгу, не забывайте, что вы всегда можете перескочить через несколько абзацев или перейти к следующей главе, как только вам этого захочется, ориентируясь на иллюстрации, сопровождающие текст в тех или иных главах. Язык линеен, но расказу совсем не обязательно оставаться таковым.

Наука в нашем понимании существовала всегда, но со временем сфера ее интересов значительно расширилась, а масштаб исследований пропорционально сжался. Философы были и астрофизиками, и теоретиками в области строения вещества. Астрологи — астрономами, теми, кто изучал и применял геометрию, измеряя мир. Химия была алхимией, чьи склянки, фиалы и атаноры обеспечивали материальное и сверхъестественное содержание астрологии. Колесо У-син, катящееся от дерева к огню, земле, металлу и воде, а потом возвращающееся обратно², содержит в себе начальные представления о геологии и химии: благодаря огню дерево превращается в землю; металл приносит воду. Божества Древнего Бенина Маву (Луна) и ее брат Лиза (Солнце), отражая астрофизическую симметрию, порождали потомство во время каждого затмения. Затмения, кометы и другие небесные события изображались художниками каменного века в виде геоглифов, встречающихся в пустынных районах по всему миру и сохраняющих память о системах знаний, почти недоступных нашему пониманию.

В каждой системе мышления соединяется научное и духовное: как объяснять окружающий мир в голове и в сердце. Тем не менее такие объяснения не могут быть *чересчур* духовными. В конце концов, на Луне есть несимметричные отметины, в которых одни видят человека, а другие кролика, хотя они не слишком похожи ни на то, ни на другое. Это повреждение или родимое пятно? А может, как утверждали некоторые, это богиня Селена скачет боком на коне?

В донаучную эпоху воображение могло давать себе волю безо всяких ограничений, потому что тогда никто не видел поверхность Луны своими глазами, какими бы зоркими они ни были. Воздух искажает очертания предметов, а у нас есть ровно столько фоторецепторов, сколько дано нам природой. Кроме того, люди обнаружили, что на Солнце есть свои повреждения, но они появляются и исчезают, — это *солнечные пятна*, описанные китайскими натурфилософами, которые смотрели на дневное светило сквозь дым лесных пожаров. Пожалуйста, никогда не пытайтесь это повторить³.

За фундаментальными каденциями планетного движения — день, месяц, год — скрываются неточности и тонкости, для прояснения которых потребовались тысячи человеческих поколений, а также зарождение астрономии. Для обитающих на Земле животных не имеет никакого значения, что лунный и солнечный циклы не укладываются один в другой⁴, что между окончанием 12-го лунного месяца и началом нового года остается 10 или 11 дней. Но людям, которые хотят записывать информацию и объяснять любые подробности, это очень важно.

Появления и исчезновения планет можно предсказывать. Марс остается тусклым более года, а затем становится ярким и наливается краснотой во время противостояния, когда какое-то время движется бок о бок с Землей по одну сторону от Солнца. Он высоко стоит и ярко светит — наступает пора Ареса, которую часто считали предвестием грядущих войн. То, что сияющий Марс является предзнаменованием трудных времен, стало самоисполняющимся пророчеством. Подобное же могущество было заключено и в предсказании затмений — вспомните легенду о Фалесе Милетском. В некоторые ночи звезды падают с небес, сгорая в атмосфере яркими полосами. Что это предвещает? А как насчет величественных комет, чьи разноцветные хвосты ночи напролет

видны по всему миру? Тогда, как и сейчас, за то, чтобы объяснить все эти вещи, разворачивалось целое состязание. Мое божество или твое? Натурфилософия, магия, нелепые выдумки или современная наука?

Человеческая культура насчитывает сотни тысяч лет, и ее первыми историями вполне могли стать рассказы о куда более зрелищных кометах, чем те, которые когда-либо видели мы. Истории могли складываться и о взрыве соседней звезды, которая несколько недель сияла на небосводе ярче, чем полная луна, а потом превратилась в ведьмин круг, заметный еще многие десятки лет. Что должен был думать об этом пещерный житель каменного века? Каждое человеческое существо во всем мире всматривалось в это кольцо; после такого ничто не могло остаться прежним.

Несмотря на странные и величественные события, нарушающие ход вещей, движение Земли, Луны и планет в целом является гармоничным. Это привело к появлению романтической идеи, что все *истинное* должно быть гармоничным, или, как это выразил юный Джон Китс,

В прекрасном — правда, в правде — красота,
Вот все, что знать вам на земле дано^{*5}.

Лежащая в основе всего гармония, ровно бьющееся сердце Солнечной системы, отражается в нашей литературе, живописи, скульптуре, музыке и архитектуре, а также в нашей науке, которая стремится к своего рода регулярности своей структуры.

Календарь — это наша попытка уловить ритмы Солнечной системы. Среди них важнейшим являются *сутки*, определяющиеся одним оборотом Земли вокруг своей оси,

* Пер. Г. Кружкова.

и для нас, людей, заключающие в себе один цикл бодрствования и сна, который необходим нам так же, как и пища⁶. Каждое название дня недели в английском календаре имеет астрономические ассоциации: Sunday (воскресенье — Sun's day, «день Солнца»), Monday (понедельник — Moon's day, «день Луны»), Tuesday (вторник — Tiu's day, «день Тиу», то есть Марса), Wednesday (среда — Odin's day, «день Одина», то есть Меркурия), Thursday (четверг — Thor's day, «день Тора», то есть Юпитера), Friday (пятница — Freya's day, «день Фрейи», то есть Венеры), Saturday (суббота — Saturn's day, «день Сатурна»)⁷. Четыре недели по семь дней составляют *месяц*, который приблизительно равен орбитальному периоду обращения Луны вокруг Земли⁸. Двенадцать с половиной таких месяцев — это *год*, период обращения Земли вокруг Солнца. Все эти ритмы находятся где-то между биением человеческого сердца (примерно секунда) и сроком жизни (тысяча лет).

Когда-то люди не нуждались в часах и календарях: «зерно созреет через две недели»⁹, «я вернусь к снежной луне», «это было тем летом, когда Марс светил очень ярко». Чтобы указать время, человек использовал Луну и Солнце; тут не оставалось места для разночтений. Каждая яркая звезда была знакома, и ни один новичок на ночном небе не оставался незамеченным. Самый темный небосвод, какой вы только видели, — таким было звездное небо для всех и каждого везде, где стояла ясная погода.

Лунный календарь — это живой организм; когда вы пытаетесь зафиксировать его на письме, он сопротивляется. После 12-й полной луны остается еще примерно 11 дней. После 365 дней остается где-то четверть суток, но не точно, что приводит к появлению високосных лет и прочих сложностей. Справляться с этими дополнительными днями и часами, решать, как собрать все это в единое целое, стало работой

жрецов, чьи первые храмы одновременно являлись и обсерваториями, ориентированными по орбите и направлению вращения Земли, на восток, на запад и на восход в день солнцестояния. Кто-то должен был описать божественный порядок, дать удовлетворительные объяснения смене сезонов, беспорядочным отметинам на Луне, кометам и метеорным дождям. И ни одна из этих религий не возникла в отрыве от предшествующего контекста, от суммы человеческой памяти, накопленной с того начального момента, когда она была разбужена каким-то редким, непостижимым небесным зрелищем.

Специалисты по планетам работают с историями. Некоторые из них являются истиной, а другие «исходят из доступных нам знаний». Есть и такие, к которым мы только примериваемся: это смелые оценки и измышления в духе «а что, если», ограниченные современным состоянием физики, геологии, химии и математики, но отмечающие всякие границы из-за того, что единственный путь к тому, чтобы доказать ложность утверждения, — это решительно заявить, что оно истинно. Таким образом, работа ученого заключается в том, чтобы искать факты и одновременно действовать как провокатор¹⁰. Наша планета появилась в результате мощных столкновений — это факт; Луна — их следствие. Из этого факта можно вывести идеи и образы, уже граничащие с фантастикой: Луна, которая находится в десять раз ближе к Земле, чем сегодня; Луна в десять раз больше; Луна, сияющая в 100 раз ярче¹¹. Ее испещренная кратерами и вулканами поверхность обращена к бешено вращающейся под ней Земле; она вызывает в земных океанах приливы высотой во много километров, заливающие первые континенты, — всего этого мы никогда не видели, но мы можем об этом догадываться. Геология началась. «Да соберется вода, которая под небом, в одно место, и да явится суша»¹².

Теперь представьте себе две Луны, расположенные относительно друг друга у вас над головой как две вытянутые в разные стороны руки: большая размером с ладонь, а маленькая — с кулак. Они обращаются вокруг Земли в кольце других обломков и мелких тел. Над горизонтом восходит одна Луна — и тут же появляется другая, как мать и ее детеныш. Когда-то так оно и было.

*Тот, для кого и камень драгоценность, на каждом шагу
натывается на сокровища.*

ПЕР ЛАГЕРКВИСТ, «КАРЛИК»*

Некоторые дети растут, мечтая о динозаврах, пожарных машинах или растениях; для меня не было ничего интереснее логики, математики и планет. Счастливее всего я был, когда гулял и думал о чем-то своем — как говорила моя мать, витал в облаках. Но, кроме того, меня обуревала страсть к открытию и объяснению вещей, а для этого требовалось выйти из своего мирка, вначале обучая (ведь это единственный способ действительно разобраться в чем-то), а потом учась, чтобы стать ученым, занимающимся происхождением планет и космическими экспедициями — всем тем, что стало темами этой книги.

После университета я преподавал девятиклассникам предмет «Науки о Земле». Хотя я никогда не изучал геологию специально, мне удавалось подготовиться к тому, чтобы учить других, потому что это такая интересная область. Она затягивает, и вскоре ты начинаешь смотреть на мир совсем другими глазами. Учебник, который мы использовали, был прекрасно написан и содержал отличные научные иллюстрации и схемы¹³. Один его экземпляр до сих пор лежит у меня

* Пер. В. Мамоновой.

дома. Я рассматривал топографические и батиметрические карты на переднем и заднем форзаце так же внимательно, как огромный атлас 1960-х гг., который в моем детстве лежал у нас в гостиной и где на схеме подъема сверхзвукового самолета X-15 к границе атмосферы упоминалось, что астронавты проекта «Меркурий» вскоре поднимутся еще выше и выйдут на орбиту. В атласе имелась голубоватая Венера чуть крупнее Земли — ошибка или вольная интерпретация художника, поскольку на самом деле эта планета желтая и немного меньше нашей. Была там и иллюстрация, показывающая, как возникли планеты: 5 млрд лет назад с Солнцем столкнулась другая звезда, в результате чего образовался шлейф газов в форме сигары (тоже синий), из которого, словно бусины, ступились планеты — крупные желтоватые в середине и крошечные коричнево-пурпурные по краям¹⁴. Я уже тогда имел так много знаний, что позже мне пришлось избавляться от многих из них!

Изучение астрономии и законов движения небесных тел отличается от овладения знаниями об инопланетных *ландшафтах*, по которым можно пройти. Хотя наш учебник назывался «Науки о Земле», в конце там имелась обширная глава о внеземной геологии — «странненькой геологии», как называл ее первый студент, писавший у меня курсовую работу, — снабженная фотографиями, сделанными космическими аппаратами нового поколения, которые к тому времени уже совершили посадки на Марс, Луну и Венеру, а также снимками, полученными устройствами серии «Вояджер» во время их дальних путешествий во внешнюю часть Солнечной системы. Это было то, о чем рассказывал Карл Саган в своем сериале «Космос». Сильнее всего меня завораживали широкоугольные панорамы поверхности Венеры, где советские исследователи уже посадили полдюжины космических аппаратов¹⁵, несмотря на то что плотная горячая

атмосфера этой планеты может раздавить корпус подводной лодки (эти устройства выдерживали огромное давление) и растопить свинец. Другой разворот занимал впечатляющий вид на скованную утренним морозом равнину Утопия, запечатленный оснащенным множеством приборов посадочным модулем аппарата «Викинг». Я прибыл на Марс, и ворота оттуда уже не было.

Не забывайте, что все это происходило за пять лет до появления интернета¹⁶, поэтому на изображения нельзя было просто навести мышку. В большинстве библиотек имелись только устаревшие издания, а самым близким аналогом всемирной паутины была коробка с микрофишами, где хранился весь архив какого-нибудь журнала. В те годы свежий учебник обладал непревзойденной ценностью. Также исключительным успехом пользовались складные стереоскопы и альбомы-скоросшиватели с парными фотографиями, которые давали нам возможность «полетать» над поверхностью Земли. (К сожалению, в нашем распоряжении не было таких фотографий других планет.) Еще у нас имелся 20-сантиметровый телескоп Шмидта — Кассегрена, а также несколько зеркальных фотоаппаратов и лабораторных микроскопов из университетских излишков. Один друг школы купил нам фотолабораторию для проявки черно-белых снимков, которую установили в маленьком помещении между классными комнатами. У нас была коллекция минералов, которые можно было рассматривать и ковырять, а также по лупе на каждого ученика. Дети делали зарисовки и записи в рабочих тетрадях. Школа приобрела набор для шлифовки камней, капельницы с кислотой для обнаружения карбонатов, несколько сит и объемную физическую карту юго-востока Аризоны — на тот момент новинку, — которая в конце концов истерлась от прикосновений пальцев, в том числе и моих собственных, пытающихся нащупать путь через горы.



Первое изображение, полученное с другой планеты. В 1975 г. автоматическая межпланетная станция «Венера-9» совершила посадку в апокалиптическом ландшафте Венеры и выполнила ряд исследований, которые позднее будут многократно повторены в рамках советской космической программы 1970–80-х гг.

Ted Stryk, данные предоставлены Российской академией наук

В качестве объекта изучения в нашем распоряжении имелась целая пустыня.

Преподавание геологии пробудило во мне еще одно воспоминание тех времен, когда мне было около двух лет: мой отец обследует засохшее русло реки в холмах к востоку от Лос-Анджелеса, выискивая и переворачивая какие-то камни. Наша машина стоит под платанами; я помню пятна света, пробивающиеся сквозь листву. Мы приехали то ли на семейный пикник, то ли на экскурсию. Отец улыбается и подзывает меня, чтобы я на что-то посмотрел. Я помню его загорелое лицо, прищуренные от солнца глаза, простые брюки, легкую рубашку и точные движения. Я бегу так быстро, как только могу в незнакомом месте, и добираюсь туда, куда он указывает. Русло перегорожено огромной веткой, в которой застряло несколько больших камней, образовавших нечто вроде скульптуры. Думаю, отец показывал мне ядовитого паука, спрятавшегося в тени между прутьями, — чтобы я никогда не касался таких существ. А может, там была ящерица — одно из животных Нового Света, неизменно вызывавших у него восхищение. Но мне запомнились камни!

Не думаю, что мне к тому времени попадалось нечто подобное: разбитые, изъеденные эрозией булыжники больше моих ладоней — зеленые, белые, черные и бледно-красные. В тени они были холодными, на солнце — теплыми. Между самыми большими зияли пустоты, заполненные песком, галькой и листьями.

Это было мое первое полевое геологическое исследование. Я снова вспомню его, когда посадочный модуль «Гюйгенс» пришлет фотографии из полного булыжников русла потока на Титане. Меня всегда притягивали такие места.

Половину имеющихся у меня знаний по геологии я получил, готовясь к своим урокам, поскольку мне нужно было о чем-то говорить. Остальные появились путем осмоса — впитывания идей в ходе общения и взаимодействия с хорошими людьми вроде учителя биологии, который стал моим наставником¹⁷. Я дорос до понимания того, что у каждого собственный стиль преподавания, и научился ценить возможность контакта с юными умами. Именно благодаря такому осмосу я впервые почувствовал *структуру* науки, осознал важность спорных идей вроде гипотезы Геи и гипотезы эволюционного бутылочного горлышка, а также научился читать палеонтологическую летопись далеких времен, усвоив, что такое каменноугольный период, архей или кайнозой.

Также я преподавал физику ученикам двух последних классов. Мы проводили неделю за неделей, делая стробоскопические фотографии и выводя уравнения движения Ньютона с помощью поставленного под углом стола для аэрохоккея¹⁸. Мы вторгались на территорию математического анализа, который лучше всего изучать одновременно с законами движения, потому их можно понять интуитивно (математический анализ в какой-то форме работает в голове

у любого человека, когда он, к примеру, ловит бейсбольный мяч)¹⁹. Ученики все быстрее разгоняли нагруженный кирпичами скейтборд с помощью резиновой ленты, растянутой до определенной длины, чтобы вывести ньютоновский закон о том, что ускорение (на метры в секунду быстрее за каждую секунду) является постоянным, если сила постоянна. Они возились с пожертвованным нам оборудованием: проводили эксперименты с лазерным ретрорефлектором и построили аэродинамическую трубу, используя для визуализации потока воздуха зажженные сигареты (плохая идея). Мы учились фотографировать с помощью камеры-обскуры — причем каждый ученик сделал свою собственную. Помимо знаний в области геометрической оптики, это дало им и представление о работе в лаборатории, поскольку они сами проявляли снимки в темной комнате.

Это была крутая, абсолютно светоизолированная комната для проявления негативов с тусклым красным светом и фотоувеличителем для экспонирования отпечатков, с запасом сменных светофильтров от желтого до пурпурного и ящиком, наполненным масками для изменения яркости отдельных участков изображения. Там же мы держали кюветы с проявителем, который следовало приготовить в нужной концентрации и довести до необходимой температуры. Ты помещаешь туда свой отпечаток на определенное число секунд, а потом промываешь его в закрепителе. Сегодня все существует в виде цифровых данных. Вместо химических опытов в темной комнате или карандашных зарисовок мы пялимся в мониторы и редактируем пиксели. Отчуждение между нами и тем, что мы изучаем, все нарастает.

Однажды вечером, когда я уже работал в университете, мы с другом установили во дворе телескоп, чтобы студенты, посещавшие мой вводный курс по планетологии, могли получить дополнительные баллы, посмотрев на Луну и Венеру.

Молодые люди сменяли друг друга около окуляра, когда мимо, направляясь к автобусной остановке, проходила аспирантка с кафедры астрономии²⁰.

— Ой, а можно мне взглянуть?

— Да, пожалуйста!

— Это Луна?

— Нет, Луна вон там! — показываю на яркий полумесяц несколько левее. — Это Венера.

Аспирантка, подобно Галилею, поразилась, что Венера выглядит совсем как серп Луны, только размытый и ярко-желтый, и воскликнула:

— Никогда еще не смотрела в телескоп!

Непосредственное восприятие фотонов солнечного света, которые доходят до нас, отразившись от верхней поверхности облаков Венеры, создает прямую связь с планетой. Но в использовании теоретических моделей, цифровых данных и компьютеров есть одно неоспоримое преимущество. С помощью опосредованных, но мощных методов мы можем уловить то, что никогда и не надеялись уловить, а потом бесчисленными способами обработать огромные потоки информации. В последнее время компьютеры все чаще упорядочивают, сжимают и даже интерпретируют такие потоки еще до того, как они доходят до нас. Такова реальность современного мира больших данных. Машины соединяют анаглифические стереопары в трехмерные изображения, позволяя нам воспринимать сложные цифровые ландшафты и даже летать над ними. Еще компьютеры обеспечивают нам свободный доступ к огромному количеству астрономической информации и данных об исследованиях планет, делая занятие наукой возможным для каждого, у кого есть интернет. Наберите в поисковой строке браузера слово «Энцелад», и у вас на экране появится прекрасный ледяной мир. Одно нажатие мышью

на ссылку сайта лунных экспедиций — и вы уже садитесь на Луну на «Аполлоне-17». Подключитесь к архиву Системы планетных данных (Planetary Data System) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (National Aeronautics and Space Administration, NASA) — и станьте первым исследователем какого-нибудь марсианского кратера.

Не так уж долго осталось ждать и настоящего телеприсутствия, когда вместо того, чтобы возить пальцем по объемной физической карте, вы будете в реальном времени совершать виртуальные экскурсии: скажем, ваш аватар прогуливается по освещенной тысячами огней лунной лавовой трубе в сотни метров высотой и километр шириной, наблюдая за тем, как еще до прибытия первых астронавтов прямо из лунной почвы печатается новое поселение. Этот опыт можно будет сделать настолько реалистичным, насколько вы пожелаете.

К середине 1980-х запуски космических шаттлов вызывали куда меньше интереса, чем исторические пуски аппаратов серии «Аполлон». Шаттлы не летали на Луну, они поднимались всего на несколько сотен километров на низкую околоземную орбиту, чтобы запускать спутники, проверять оборудование и технологии, а также строить Международную космическую станцию. Все это очень круто, и пуски были чрезвычайно зрелищными, но процесс превращался в рутину — на самом деле NASA *хотело*, чтобы он стал рутинной, отсюда их плакаты «На работу в космос»²¹. Тем не менее в школе, где я работал, мы все пристально следили за десятым стартом «Челленджера», потому что в его экипаже находилась первая учительница-астронавтка²². Тем ясным январским утром каждый шестой американец смотрел

трансляцию этого пуска в прямом эфире. Ракета взорвалась, а все члены экипажа погибли, рухнув в море, как Икары.

После того как прошел период вызванного шоком отрицания²³, катастрофа «Челленджера» заставила пилотируемую программу NASA остановиться на несколько лет²⁴. Шаттлы были единственными аппаратами NASA, которые могли отправлять в космос большое количество научных грузов, так что наука тоже на какое-то время замерла. Автоматическая межпланетная станция «Галилео» стояла следующей в очереди пусков: это была тяжелая, но хрупкая птичка, разработанная для того, чтобы провести годы на орбите вокруг Юпитера. Лаборатория реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL) NASA использовала наиболее современные технологии²⁵, чтобы этот аппарат мог выдержать самые тяжелые испытания. Он был рассчитан на семь лет полета в глубоком космосе, но в итоге провел там четырнадцать²⁶.

Проект «Галилео» и ранее сталкивался с отставаниями от графика, характерными для любой значительной экспедиции, но теперь ему пришлось выносить тяготы складирования в условиях земного притяжения три лишних года, включая тряску в грузовике по пути от JPL до стартовой площадки во Флориде, потом демонтаж, путь обратно в JPL на хранение, а затем, несколько лет спустя, еще одну транспортировку во Флориду. Его радиоизотопный источник энергии был еще в полном порядке, но один из главных механизмов все же отказал. Когда «Галилео» наконец запустили, его похожая на зонтик антенна дальней связи для передачи данных на Землю не смогла раскрыться, поскольку застряли несколько ее спиц. Вся исследовательская программа оказалась зависимой от запасной антенны, способной передавать менее 0,1% данных. (Благодаря изобретению алгоритма сжатия изображений, который мы сегодня называем форматом

JPEG²⁷, большинства целей экспедиции оказалось возможно достичь, если передавать только самую необходимую информацию.) Едва ли тогда я мог предположить, что пять лет спустя стану новоявленным участником этой полной приключений экспедиции.

Вскоре после катастрофы «Челленджера» профессор геологии местного университета повез нас на экскурсию в пустыню к западу от города²⁸, в красивый, богатый резкими контрастами и интересными деталями ландшафт, где я часто бродил и в одиночку, но скорее подражая Уильяму Вордсворту, а не Джеймсу Геттону²⁹. Я со своими подопечными, а также учителя биологии и химии со своими — мы все рано поутру набились в желтый автобус и отправились в небольшое путешествие. К нашему восторгу, до рассвета выпал сантиметр снега, поэтому кактусы стояли в белых шапках — великолепное зрелище! Когда мы заехали на грунтовую парковку, высыпавшие из автобуса дети сразу принялись играть в снежки и валять дурака. Потом мы прошли километр вниз по тропе, следовавшей вдоль старого русла³⁰. Мы обошли его изгиб — по какой-то причине это тоже отпечаталось в моей памяти — и вышли к огромной наклонной плите, сложенной песчаниками и аргиллитами, красными и желтовато-коричневыми, с глубокими следами волновой ряби в несколько пальцев шириной. Когда-то она была частью древнего пляжа, сказал нам профессор, а потом на протяжении миллионов лет то погружалась вглубь, то вновь выходила на поверхность.

Я был заворожен текстурой этой скалы. То, что говорилось на этой и других геологических экскурсиях, начало рассеивать некий туман, понятийный застой в моей голове. Профессор рассказывал, что там, где мы стояли, когда-то — сотни миллионов лет назад — был берег океана. Пыль и наносы, которые откладывались в виде ила, формируя эти

покрытые рябью слои, поступали с востока, преодолевая расстояние в добрую сотню километров. Это был результат эрозии поднимавшихся там в тот момент гор. Осадочный материал перемещался древними реками по давно исчезнувшим долинами и приносился в виде пыли миллионами бурь.

Это то, что я помню. Уверен, какие-то детали я путаю, но это описание *казалось осмысленным*... Реки текут и вызывают эрозию, океаны катят волны на песок, горы поднимаются... Трудно было понять следующую часть — то, что эти борозды в песке и иле были захоронены под слоями нового ила, стали частью дна древнего моря, затвердели под тяжестью более поздних отложений, тоже со временем превратившихся в камень, а миллионы лет спустя были вновь выведены на поверхность, когда *из-под всего этого* поднялись ввысь новые горы. От таких мыслей начинала кружиться голова. Время и пространство расширились.

Солнце палило. Посвятив еще некоторое время серьезным делам, мы принялись по очереди позировать для дурацких фото, притворяясь, что мы занимаемся серфингом на пляже. Но у меня возникло беспокойное чувство, которое в следующие несколько дней превратилось в настоящее откровение. Мне приходилось проходить в этом месте и раньше, я смотрел на холмы, высохшие русла и далекие горы, но никогда *не знал*, что было вокруг меня и под моими ногами. Прежде чем уйти, я снова провел пальцами по песчаной ряби, появившейся 10 млрд дней назад. Реальность оказалась гораздо масштабнее, чем я себе представлял.

Ученые постоянно размышляют на ходу над одним или двумя большими вопросами, из-за чего им случается терять счет времени или наткнуться на ветки. Мой собственный

большой вопрос звучит так: если планеты появились из облаков первичного вещества, обращающегося вокруг Солнца, почему они не оказались более или менее одинаковыми, как дождевые капли, сконденсировавшиеся из тучи, или стога сена на скошенном поле? Две самые большие планеты нашей системы, Юпитер и Сатурн, действительно в чем-то схожи — это двесферы, состоящие по большей части из водорода (H) и гелия (He). Следующие по величине планеты, Нептун и Уран, кажется, схожи еще больше — гигантские сферы, состоящие в основном из H_2O , H и He, хотя, если уж начистоту, мы пока не посылали экспедицию ни к одной из них. Все это гигантские тела, имеющие атмосферу. Если

говорить о среднем размере — о том, что мы можем назвать планетами человеческого масштаба, о телах, по которым мы могли бы гулять, по крайней мере в принципе, — то они так же разнообразны, как государства Европы, особенно если учитывать такие тела, как Плутон и Титан, обладающие всеми геологическими характеристиками планеты.

Наша планета Земля началась с роя ледяных и каменных тел, обращавшихся вокруг Солнца и постепенно выраставших в планеты. Сформировавшиеся первоначально



Фотография поверхности Титана, спутника Сатурна, переданная 14 января 2005 г. посадочным модулем «Гюйгенс» (ESA/NASA).

ESA/NASA/JPL/University of Arizona

планеты сталкивались друг с другом, соединяясь в более крупные тела и их спутники. От них откалывался всякий мусор, смешивавшийся с остатками первоначального роя в хаотичный ансамбль, известный нам теперь как кометы и астероиды. Спустя 100 млн лет суматоха поутихла: столкновения продолжались, пока планеты не стали двигаться по непересекавшимся путям. Все крупные соударения, которые должны были произойти, произошли, и система стала стабильной, как часовой механизм. Ну или почти как часовой механизм.

В этой книге рассказывается об истоках многообразия планет. Чтобы не опережать ход повествования, давайте просто скажем, что почти каждая планета и почти каждый спутник планеты, когда-либо существовавшие в Солнечной системе, были поглощены телом более крупным, чем они сами, и что этот факт невероятно важен. Большинство планет сейчас находятся внутри газовых гигантов (Юпитера и Сатурна) или Солнца, а еще часть — внутри Урана или Нептуна. Считается, что существовало еще два или три гиганта, по массе примерно равных Нептуну, но они были поглощены Солнцем или выброшены из системы скитаться по Галактике. Многообразие — это вопрос того, что у нас осталось: ни одной *обыкновенной* планеты мы не наблюдаем. Почти каждое из когда-либо существовавших тел поглощено более крупными; оставшиеся — это счастливчики, необычные уже тем, что они выжили.

Человеческое любопытство, ведомое наукой и усиленное гигантскими телескопами, обнаружило сотни миллиардов галактик, в каждой из которых есть сотни миллиардов звезд. Звезд во Вселенной намного больше, чем песчинок на Земле, — 100 млрд триллионов, или 10^{23} , — и мы полагаем, что у большинства из них есть планеты. Мы живем на сложно устроенной голубой планете, и это так необыкновенно,

что вопросы встают перед нами практически помимо нашей воли: что такое реальность? Что такое время? Уникальны ли мы во Вселенной? Геологические явления, которые нам предстоит обнаружить по всему космосу, могут заставить Венеру, Энцелад, Ио и Хаумею показаться чем-то заурядным; мы только начинаем догадываться о странностях, которые, возможно, ждут нас там.

Улитка — это геолог, который ощущает неровности камня, его температуру и влажность. То же самое можно сказать о еноте, исследующем отмель в поисках улиток. Геологические исследования приматов более изощрены. Можно ли поцарапать этот камень тем? Пойдет ли он трещинами? Раскрошится ли он или расколется в основном в одном направлении? Какого камень цвета, какая у него поверхность, какой вес? Как он пахнет? Все это *ощутимые факты*, они доступны любому существу, имеющему органы чувств. Из такого опыта можно извлечь непосредственную пользу.

Неощутимое — это то, что нельзя почувствовать, но можно обнаружить с помощью более совершенных технологий. Классические примеры — это телескоп, который расширяет охват наших органов чувств, и микроскоп, который его сужает. В обоих приборах стеклянные линзы используются для того, чтобы изменить и усовершенствовать зрение, причем (в классическом случае) наши глаза воспринимают те самые фотоны, которые отражаются или испускаются звездой, планетой или крылом мотылька.

Современные исследовательские микроскопы занимают целые здания, а зеркала телескопов весят десятки тонн³¹. От совершенствования оптики и усиления увеличения мы перешли к сбору данных *дистанционных измерений* всеми возможными способами по всему спектру электромагнитного

излучения. Космический аппарат на орбите какой-нибудь далекой планеты может собирать потоки информации от лазерных интерферометров, тепловизоров, рентгенофлуоресцентных спектрометров, детекторов нейтронов, подповерхностных радаров и так далее. Современный космический аппарат, хоть он и не способен принимать научные решения, имеет доступ к куда большему числу способов восприятия, чем астронавт, который в лучшем случае может рассматривать мир вокруг через стекло шлема и осязать поверхности сквозь громоздкие перчатки, но в чьем разуме заложена способность *видения* — того рода, которое никак не связано с глазами, — и исследования и чье тело обеспечивает взаимодействие разума с тем, что его окружает.

Самый мелкий масштаб нашего непосредственного восприятия — это то, чем ограничено осязание и зрение, примерно 0,1 миллиметра, тонкий волос или крупная песчинка. В нашем распоряжении есть и множество куда более чувствительных специализированных сенсоров, работающих вплоть до молекулярного уровня. Самые большие значения на той же шкале — размеры человеческого тела, метр или два³². Менее заметная, но столь же фундаментальная характеристика нашего восприятия — примерно шесть сантиметров, в среднем разделяющие человеческие зрачки. За этими разнесенными объективами наши сетчатки создают стереопары, которые направляются в левое и правое полушария мозга. По некоторым оценкам, мы задействуем до половины вычислительных ресурсов бодрствующего мозга, совмещая в зрительной коре левые и правые изображения, чтобы создавать свою трехмерную реальность.

Вследствие этого чуть ли не самыми важными для людей данными, получаемыми в ходе космических исследований, становятся пары фотографий, сделанные в одинаковых условиях освещенности (обычно примерно в одно и то же время),

которые разнесены на угловое расстояние около 7° , чтобы имитировать стереоизображение предмета у нас в руке, если надеть очки с красным и синим стеклами³³. Используя наши биологические возможности по обработке данных, мы можем рассматривать гору Олимп на Марсе, как будто она находится прямо перед нами. С помощью компьютерной мыши мы можем поворачивать невероятно странное по форме ядро кометы, известной как 67P/комета Чурюмова — Герасименко, и накладывать на него любую другую информацию, например данные спектроскопии или сведения о температуре, создавая тем самым многоцветный виртуальный объект, который можно рассмотреть с разных точек зрения или даже прогуляться в его внутреннем пространстве³⁴, расширив тем самым границы того, что мы ощущаем как реальность.

Узнавать более труднодоступные неосязаемые факты можно в базовых лабораториях по всему миру, где самые точные инструменты используются для того, чтобы фиксировать отдельные атомы во фрагментах земных пород, метеоритов и лунных образцов. Занимающие целые комнаты масс-спектрометры могут определить точное содержание химических элементов в частичке, которая в миллион раз меньше песчинки. («В одном мгновенье видеть вечность, огромный мир — в зерне песка...»^{*, 35}) Из такой информации исследователи могут понять условия (состав, температуру, давление, момент времени, присутствие кислорода и водорода), в которых вырос конкретный кристалл, и его атомную структуру. На основе этого мы можем выстраивать целые истории и опровергать или уточнять другие истории — например, о том, как формировались планетезимали и планеты. Такие аналитические лаборатории так же дорого

* Пер. С. Я. Маршака.



Комета 67P/Чурюмова — Герасименко, около 4 км длиной от одного конца до другого, — первая комета, на орбиту вокруг которой вышел космический аппарат. Эта фотография сделана с расстояния 28 км от центра ядра, размер кадра составляет $4,6 \times 4,3$ км.

ESA/Rosetta/NAVCAM (CC BY-SA IGO 3.0)

строить и содержать, как и астрономические обсерватории; отличие лишь в том, что, вместо того чтобы смотреть *вовне*, их сотрудники вглядываются *внутрь* фрагмента породы, совершая открытия в нанодиапазоне, ненамного превышающем размеры самих атомов.

Это кажется волшебством, но вся эта абракадабра тесно связана с математикой, поскольку доводит дедукцию до ее теоретически возможного предела. В науке вы следуете за математикой туда, куда она вас ведет. И очень часто — почти

всегда — вы обнаруживаете, что хвост виляет собакой, иначе говоря, что именно данные о самых мелких или самых отдаленных объектах, которые только можно представить, опрокидывают устоявшиеся теории и порождают новые. Совсем как в детективных рассказах, где случайно найденная мелкая улика меняет все. Для того чтобы делать такие скрупулезные замеры, требуется невероятная техническая точность — например, умение использовать в качестве зонда пучок ионов толщиной в нанометры или улавливать свет из самых далеких уголков Вселенной³⁶.

Легко попасть в ловушку восприятия земной геологии как данности. Вот мы вдыхаем и выдыхаем азот, кислород и некоторое количество аргона, углекислого газа и других газов, заменяя часть O_2 на CO_2 в рамках нашего самого важного биологического процесса — дыхания. Кислород хорошо знаком нам в газообразном состоянии; тем не менее почти все запасы кислорода на Земле находятся в составе горных пород, где бы и оказался весь атмосферный кислород, если бы он постоянно не высвобождался из CO_2 и H_2O занятыми фотосинтезом растениями³⁷.

Половина массы силикатной оболочки Земли — всего, что окружает металлическое ядро, — приходится на кислород. Он содержится в минералах вроде оливина $(Mg, Fe)_2SiO_4$, который состоит из двух атомов магния или железа, а также одного атома кремния и четырех атомов кислорода. (В космохимии горные породы относятся к *оксидам*.) Рассуждая таким образом, мы должны немного углубиться в историю кислорода, но не переживайте, если не сможете чего-то понять — на самом деле ее не понимает никто.

Каждый из этих атомов был создан в ходе термоядерного синтеза в ядрах древних звезд — об этом мы более

подробно поговорим через несколько глав. Тип атома определяется числом протонов в его ядре; например, атом кислорода содержит восемь протонов, вокруг которых обращаются восемь электронов (чтобы атом оставался электрически нейтральным), а также некоторое число нейтронов. В стабильном атоме кислорода может быть восемь, девять или десять нейтронов — так получаются *изотопы* ^{16}O (с огромным отрывом самый распространенный), ^{17}O и ^{18}O , обозначаемые в соответствии с их атомной массой (суммарным количеством нейтронов и протонов). Химически все они ведут себя практически одинаково, хотя ^{17}O и ^{18}O несколько тяжелее и чуть более инертны в ходе реакций.

Относительное содержание изотопов незаметно, если не использовать масс-спектрометр — прибор, который определяет долю отдельных атомов в минерале³⁸. Но, поскольку они имеют разную массу, изотопы кислорода отбираются и сортируются. Испарить молекулу H_2O с изотопом ^{18}O немного труднее, чем такую же молекулу с изотопом ^{16}O . К примеру, в ледниковый период, когда испаряющаяся из океанов вода переносится на сушу и оседает в виде снега на все расширяющийся ледяной щит, получившиеся в результате ледники накапливают более легкий кислород, тогда как океаны оказываются обогащенными тяжелым кислородом. Когда в разгар ледникового периода мелкозернистые осадки и карбонаты оседают на дно такого моря, возникающие в итоге породы, в свою очередь, также обогащены тяжелым кислородом. Применяв масс-спектрометрию к образцам, полученным при глубоководном бурении, любой дипломник может проследить древние климатические процессы, как на элементарном графике.

Сегодня полярные льды тают, поэтому в летописи осадочных пород нашему времени будет соответствовать более легкий кислород. Более легкая вода, попавшая когда-то в ледяную

ловушку, наконец возвращается обратно в океан. Свидетельства того, что происходит на суше, в океане и в воздухе, сохранятся в будущих горных породах. Это одна из причин, по которой нам важно получить образцы ранних осадочных пород с Марса: не только для того, чтобы найти там окаменелости микроорганизмов (если они вообще есть), но и потому, что, если аккуратно отбирать пробы, эти породы могут содержать комплексную информацию об океанах и оледенении Марса в далеком прошлом. Если даже окаменелости живых организмов никогда не будут там обнаружены, характерные признаки жизни можно будет разглядеть в изотопном составе органических компонентов горных пород — аналоге той летописи, которую мы расшифровываем, чтобы узнать о жизни на Земле 4 млрд лет назад.

Земля испещрена метеоритами. Почти все они являются фрагментами околоземных объектов, которые, в свою очередь, по большей части представляют собой осколки астероидов Главного пояса и комет. Но удивительно заметная их доля попала к нам с поверхности Марса. Доказывается это так: метеориты группируются по соотношению изотопов кислорода и других элементов, соответствующему различным астероидам, сформированным в той или другой области вокруг Солнца³⁹. Одна из этих групп любопытна, потому что состоит в основном из базальтовых пород. Кислород можно обнаружить в любой породе, поэтому эта группа метеоритов должна была прибыть с планетоида достаточно крупного, чтобы на нем были вулканы. Марс богат огромными вулканами и находится относительно недалеко от Земли; то же самое относится и к Луне.

Решающим аргументом в изучении того, что мы сегодня называем марсианскими метеоритами, стал точный геохимический анализ содержания *благородных газов* — элементов вроде аргона и ксенона, у которых полностью

заполнена внешняя электронная оболочка, в результате чего они не вступают в реакции. Эти газы не создают молекул, поэтому, когда лава кристаллизуется на планете с атмосферой, а не на спутнике, они захватываются в пустоты и могут быть проанализированы спустя миллиарды лет. Таким образом, нагрев образец такой породы, мы можем получить сведения о составе атмосферы в момент ее образования. Соотношение благородных газов в этих метеоритах совпадало с составом атмосферы Марса по данным, полученным в 1970-е гг. посадочными модулями программы «Викинг».

Выяснилось, что марсианские метеориты достаточно широко распространены. Тех, что хранятся в музеях, хватило бы на целую садовую тачку, а это только находки последних веков. Оглядываясь в прошлое, как и пристало геологам, мы можем предположить, что миллиарды тонн камней, выбитых кометами и астероидами с марсианской поверхности, попали на Землю за примерно 4 млрд лет существования тут жизни. Так зачем лететь на Марс, чтобы собирать образцы, когда метеориты доставляют их нам совершенно бесплатно? Затем, что те камни, которые нам бы хотелось изучить, все еще находятся на Марсе.

Большинство марсианских метеоритов состоят из прочных поверхностных пород магматического происхождения вроде базальтов. У нас нет ни одного образца осадочных пород, которые представляли бы наибольший интерес с точки зрения биологии. Такие породы обычно непрочны и не выдерживают выброса в космос. Если они не разрушаются при первоначальном столкновении, то подвергаются термическому растрескиванию по пути к Земле⁴⁰; если и этого не происходит, они взрываются при входе в земную атмосферу со скоростью 20 км/с. Базальты с большой вероятностью переживут все эти испытания, а вот осадочные породы — едва ли.

Тем не менее осадочные породы могут попасть с Марса на Землю. В целом для этого требуется, чтобы в космос был выброшен более массивный скальный фрагмент, для чего нужно столкновение с астероидом, диаметр которого будет составлять несколько десятков километров, а такого не случилось уже миллиард лет. Но 4 млрд лет назад, в период зарождения жизни на Земле, подобные события происходили постоянно. Нам нужно отправиться на Марс и собрать образцы осадочных пород не только для того, чтобы узнать, есть ли там жизнь (в виде живых организмов или окаменелостей), но и для того, чтобы дополнить наши представления о *панспермии* — возможном процессе распространения жизни по небесным телам Солнечной системы, а может, и разных галактик.

Располагаясь гораздо ближе, Луна посылает на Землю еще больше бесплатных образцов в форме метеоритов. Их сейчас собрано более 300 кг. Такие метеориты находят внутри ледяных щитов и в песчаных пустынях. Объяснить это очень просто: если метеорит приземляется там, где много земных камней, вы едва ли сможете различить его среди прочих. Лунные камни также имеют магматическое происхождение и несут следы ударов, полученных и за время пребывания на Луне, и в момент столкновения, в результате которого они были выброшены в космос. Многие из них повреждены космическими лучами и несут ионы солнечного ветра, из чего можно сделать вывод о целых геологических эрах, проведенных ими на поверхности лишенного атмосферы небесного тела⁴¹. После того как астронавты программы «Аполлон» доставили на Землю сотни килограммов лунных пород, надежная идентификация лунных метеоритов не представляет особых трудностей.

Однако анализ относительного содержания изотопов кислорода не позволяет отличать лунные камни от земных,

как это происходит в случае Марса. В том, что касается изотопного баланса кислорода и других элементов, они *идентичны* с точностью до одной миллионной доли. В самом деле, валовый состав Луны с точки зрения космохимии практически неотличим от сухой мантии Земли. Это открытие подорвало доверие к гипотезе ударного образования Луны, поскольку, согласно классическому ее варианту, Луна состоит в основном из материала столкнувшейся с Землей планеты Тейя, который должен походить на земной не больше марсианского. Пока специалисты по компьютерному моделированию и теоретики продолжают выдвигать новые предположения и варианты, дискуссия о механизме формирования Луны в целом вернулась к позициям XIX в., когда многие полагали, что спутник был вырван из Земли с образованием бассейна Тихого океана. Возможно, эта идея в конечном итоге не так уж плоха? Вся эта неопределенность показывает, как скромны наши знания.

Если вы заблудились, идите назад по своим следам. Вернитесь к исходной точке. Водород, имеющий единственный протон, — самый распространенный элемент во Вселенной, а следующий за ним — это гелий с двумя протонами. Они сформировались в ходе Большого взрыва. Кислород идет третьим: его стало куда больше после того, как взорвались ядра первых гигантских звезд. Таким образом, одно из самых часто встречающихся химических соединений — это вода, H_2O .

Что за удивительная молекула! Еще до того, как появились планеты, вода играла главенствующую роль в определении структуры будущей Солнечной системы. Диск вокруг Солнца, из которого сформировались планеты, первоначально был в основном газообразной *протопланетной туманностью*.

Давление в ней оставалось достаточно низким, чтобы вода существовала там только в виде пара, за исключением тех мест, где она могла кристаллизироваться в твердое вещество. На далеких расстояниях свыше двух или трех астрономических единиц вода могла конденсироваться в иней, и он, возможно, образовал зародыши так называемых *кометезималей*, отдаленных предков комет. Ближе к Солнцу температура была выше, так что там конденсировались в основном силикаты, образуя состоящие из горных пород планетезимали. Эта идея «ледяной линии» получила популярность как основа для понимания того, почему ближе к Солнцу расположены земледоподобные планеты, состоящие из горных пород, а дальше от него — газовые и ледяные гиганты, а также ледяные карлики. Однако строение экзопланетных систем может заставить нас пересмотреть эти воззрения.

Значительные объемы жидкой воды не могли образоваться, пока планетезимали не стали достаточно большими, чтобы обеспечивать силу тяготения, способную удерживать атмосферу, и поверхность, где такая вода могла бы конденсироваться. Так появились первые океаны, которые подогревались или сверху энергией Солнца, если находились достаточно близко к нему, или снизу, благодаря радиоактивному распаду. На этих добиологических кухнях жизни закипела работа. Сегодня мы наслаждаемся существованием на планете, физические условия на поверхности которой позволяют воде находиться в состоянии бесконечного круговорота между жидким, твердым и газообразным состоянием в окрестности так называемой *тройной точки* воды. При давлении и температуре в этом диапазоне вода может снова и снова проливаться дождем, выпадать в виде снега, таять и испаряться, оказывая влияние на самые разные физические и химические процессы и циклы, которые определяют земную геологию и биогеохимию⁴².

Вода, этот универсальный растворитель, вымывает молекулы из мелких зерен минералов в горных породах, образует и переносит осадочные материалы, а также облегчает или делает возможным почти неограниченный спектр химических и физических процессов, начиная с разрушения твердых веществ и их переноса флюидами. Где-то в ходе этих процессов молекулы научились распадаться на части и собираться обратно, воспроизводя самих себя.

Жидкая вода распространена и во внешней части Солнечной системы, где тепло поступает из-под поверхности ледяных спутников и изнутри их объема. Приливы, которые вызывает планета, циклически деформируют очертания спутника, заставляя его ледяную оболочку и горные породы тереться друг о друга, выделяя тепло; к нему добавляется тепло радиоактивного распада, идущего в каменной мантии самых крупных спутников. Благодаря этому на Европе, ледяном спутнике Юпитера размером с Луну, существует подповерхностный океан жидкой воды, по объему равный всем земным океанам вместе взятым и защищенный от экстремальных условий космоса многокилометровым термоизолирующим слоем льда. На Энцеладе, 500-километровом в диаметре спутнике Сатурна, жидкая вода бьет гейзерами, рассеивается в космосе и кристаллизуется ярким плюмажем, который превращается в тусклое кольцо вокруг планеты. На спутнике Юпитера Ганимеде и спутнике Сатурна Титане, двух самых крупных лунах Солнечной системы, также существуют подповерхностные глобальные океаны — такой вывод можно сделать на основании размеров и химического состава этих небесных тел, а также количества тепла, которое предположительно выделяется внутри них. Подповерхностные массивы воды так распространены, что мы можем с большой долей уверенности утверждать, что по всей Галактике существуют

миллиарды покрытых льдом океанов. Неужели ни один из них не породил жизни?

В нашей Солнечной системе только на Земле условия на поверхности находятся около тройной точки воды⁴³. Предположим, что это обязательное требование для образования жизни. (Если мыслить нешаблонно, можно предположить, что вода для жизни вообще не требуется. Тогда биологическая эволюция должна быть основана на каком-то другом растворителе, например на жидком метане; но пока не будем отвлекаться от H_2O .) Это требование не исключает Европы; там просто потребуются наличие под слоем льда газовых карманов. Планета, живые обитатели которой могут эволюционно достичь развитого сознания, иногда называемого разумом⁴⁴, должна удовлетворять и другим требованиям. Возможно, например, что возникновение разума требует наличия чего-то неизмеримо большего, чем само существо, например, звездного неба, или Луны с Солнцем, или гор на горизонте. Тогда нам придется исключить планеты, окутанные вечным смогом, или темные океаны под многокилометровым слоем льда, хотя даже в самых темных слоях земного океана и в самых глубоких земных пещерах киты и летучие мыши используют эхолокацию, чтобы ощутить расстояние и пространство без помощи зрения. Возможно, кора и мантия подходящей для жизни планеты должны быть достаточно активными, чтобы сформировать горы, континенты, бассейны океанов и вулканические острова для обеспечения достаточного числа экологических ниш; только тогда один из всего разнообразия видов сможет подняться до самой вершины эволюционной лестницы. Несомненно, звезда такой планеты должна быть стабильна в течение нескольких миллиардов лет. Может быть, у планеты должен иметься спутник — и не просто какой угодно спутник, но обращающийся достаточно близко, чтобы случались полные солнечные

затмения, которые приведут живых существ в смятение и зажгут в них искру разума. Не исключено, что где-то поблизости должна взорваться сверхновая. Сформулируйте сколь угодно точные требования, а потом задайте себе вопрос: «С какой вероятностью это могло случиться?»

Пятьдесят лет назад мы совершили посадку на Луну «для всего человечества». Это стало первым случаем присутствия людей на другой планете. С тех пор астронавты летают в лабораториях на низкой околоземной орбите, а роботы занимаются исследованиями глубокого космоса. В этом есть смысл, поскольку роботы не дышат, их не нужно возвращать домой, и они стали настоящими мастерами в том, чтобы делать фотографии и собирать прочую информацию о разных далеких уголках, причем все чаще им при этом вообще не нужно участие человека. Первая волна исследований Солнечной системы людьми и роботами завершилась, охватив объекты всех типов: Луну, планеты, спутники, малые спутники, кольца планет, карликовые планеты, ледяные миры, кометы, астероиды и кентавры. Мы видели азотные равнины Плутона, каньоны Марса, гейзеры Энцелада и разноцветные вихри Юпитера. На орбиту выводятся огромные телескопы, а космические аппараты, запущенные с помощью перепрофилированных военных ракет, летят к Плутону и дальше, пересекая гелиопаузу, где давление межзвездного пространства останавливает солнечный ветер — и где начинается по-настоящему глубокий космос.

Следующая волна исследований только начинается. Она не продвинется намного дальше, но задействует более мелкие и более функциональные космические аппараты, которые посетят сотни самых странных и впечатляющих точек, заполняя пробелы в нашей картине миров, окружающих

Солнце: другие спутники, другие астероиды, внешние планеты и, возможно, Планету X. Изучат они и сотни километров лавовых труб под лунной поверхностью. Думаю, следующей волной после этой станет колонизация людьми Луны, Марса и, возможно, Венеры, а также запуск роботов-эмиттеров, наделенных искусственным интеллектом, в «соседние» планетные системы.

Огромные области Луны⁴⁵ уже сфотографированы с разрешением в полметра. Аналогичным образом Марс⁴⁶ в целом отснят в масштабе примерно шесть метров на пиксель⁴⁷, а в определенных районах — треть метра. Все научные данные, собранные NASA, находятся в открытом доступе⁴⁸, и почти все эти изображения еще ждут того, чтобы на них взглянул человеческий глаз. Щелкните на любое из них, увеличьте масштаб, и вы с большой долей вероятности станете первым человеком, который заметил нечто особенное — например, булыжник, расколотый пополам микрометеоритом. А может, вы обнаружите новую пещеру, представляющую огромный интерес для исследователей и будущих колонистов.

Что же касается астрономии, в мире постоянно начинают работать новые телескопы, обладающие возможностями, о которых десять лет назад можно было только мечтать. Большой синоптический обзорный телескоп (Large Synoptic Survey Telescope, LSST) будет выдавать 20 терабайт данных *за одну ночь*, занимаясь представляющим новый этап в астрономии поиском скоротечных событий вроде движения астероидов, прохождений планет и взрывов звезд⁴⁹. Это приводит к фундаментальному гносеологическому переходу, когда объем *больших данных* становится так велик, что для того, чтобы его обработать или даже составить о нем первоначальное представление, нам требуется искусственный интеллект. Мы обучаем компьютеры обучать нас смыслу наших данных.

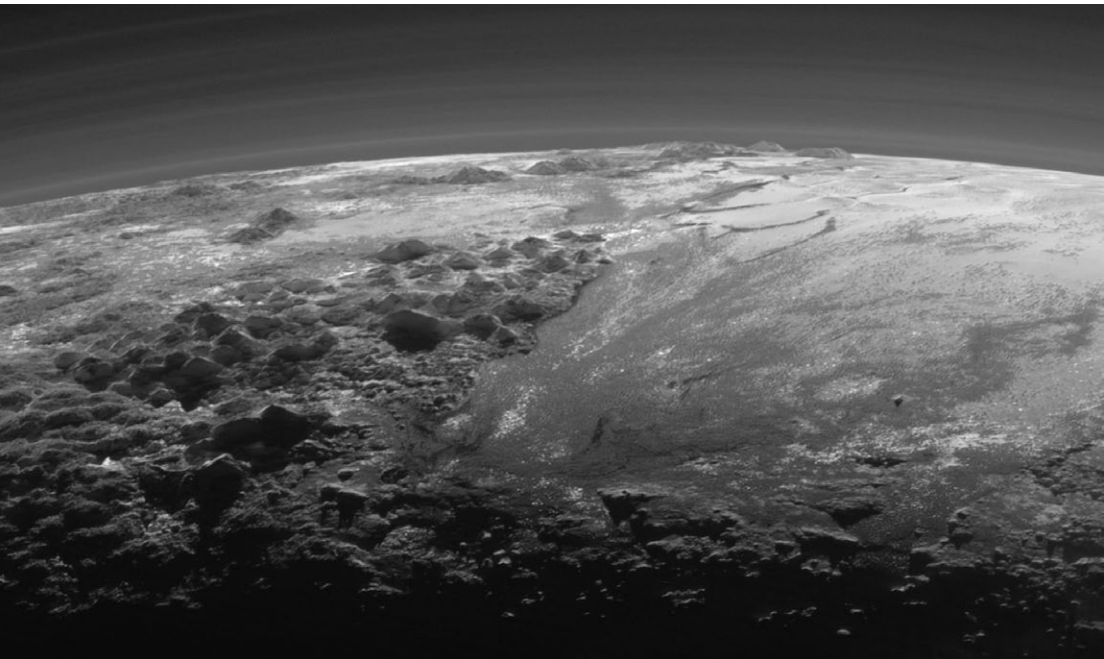
Это возвращает меня к геологии, где все, что вам нужно, — любопытство, благоприятная возможность и справочник. Поднимайте камни и смотрите на них внимательно. Раскалывайте их и изучайте с помощью лупы. Делайте зарисовки и читайте геологические описания своих участков. Посещайте полевые занятия, где вас научат замерять падения и уклоны. Пытайтесь выполнять палеореконструкции ландшафтов. Рассматривайте стены старых каменных зданий. Читайте путеводители или установите на телефон приложение, чтобы отправиться в прошлое во время любой загородной прогулки. В самой глубине Большого каньона Колорадо исследуйте кристаллические сланцы Вишну — возникшие из непримечательного протерозойского ила породы метаморфического основания, — само название которых напоминает об акте творения.

Сколько мы ни искали, мы пока не нашли ничего, что можно было бы назвать второй Землей. У нас есть несколько кандидатов, но пройдут еще десятки лет, прежде чем мы будем знать, так ли это. Что тогда? Если подтвердится существование землеподобных планет, обращающихся вокруг одной из соседних звезд, — скажем, в пределах 30 световых лет, — попытаются ли люди до нее добраться? Если говорить о периоде в тысячи лет, мы, кажется, неизбежно это сделаем: один из наших прапраправнуков⁵⁰ отправится сквозь бесконечную пустоту в путешествие в один конец, которое будет продолжаться веками, на протяжении жизни многих поколений. Мне этот путь видится чрезвычайно опасным и наполненным одиночеством, сюжетом для классического научно-фантастического романа. Задолго до этого мы, на мой взгляд, создадим вторую Землю где-то неподалеку, скажем, освоив биопреципитацию углекислого газа из атмосферы Венеры и создав там экзотический сказочный ландшафт, который можно будет заселить земными

организмами. Мы можем поспорить, этично ли менять геологию других планет, но эта дискуссия уже стала неактуальной с учетом того, как своевольно мы меняем биосферу нашей собственной.

Если исследование — это «ян» науки, то понимание — ее «инь». Одно не может двигаться вперед без другого. Жажда исследований у нас в крови, но мы испытываем сравнимое удовлетворение от понимания того, почему что-то обстоит так, а не иначе, как оно таким стало и как оно функционирует. После пяти лет работы над созданием научных инструментов и уникального по своей скорости и легкости космического аппарата, после всей детальной подготовки к его старту, после еще десяти лет и 4,8 млрд километров космического перелета сотрудники программы «Новые горизонты»⁵¹ стали первыми людьми, увидевшими геологию девятой планеты, которая со времени ее открытия в 1930 г. оставалась просто точкой на фотографической эмульсии. Только в 1990-е космический телескоп «Хаббл» смог разглядеть в ней пару точек — двойную планету, два пятнышка света.

Пролет над Плутоном и Хароном, осуществленный аппаратом «Новые горизонты» в 2015 г., занял всего четверть часа, но стал событием, превратившим их из нескольких загадочных пикселей в волшебную страну с карамельными горами, морями под шоколадной глазурью, выступами трещиноватых и сложенных в складки пород с невиданной нами прежде активной геологией, покрытыми кристаллическим азотом равнинами и сверкающим Сердцем Плутона. Все это — после десятилетий предположений, наблюдений, анализа, принятия решений, затыкания дыр, планирования, подачи заявок, лоббирования, проектирования, тестирования и сборки. И точно так же в лабораториях



Закат над горами Плутона. Через 15 минут после максимального сближения аппарата «Новые горизонты» с планетой 14 июля 2015 г. он развернулся, чтобы сделать этот прощальный снимок. Гладкое пространство справа называется Равниной Спутника, левее расположены горы Тенцинга высотой до 3500 м. Горы Хиллари видны на горизонте. Падающий сзади свет подчеркивает слои дымки в разреженной, но достигающей больших высот атмосфере Плутона. Весь пейзаж достигает почти 400 км в поперечнике.

NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute

и исследовательских центрах по всему миру сейчас исподволь начинаются смелые экспедиции будущего.

Мы изучили только малую долю тел Солнечной системы. У нас пока не было отдельных экспедиций к Нептуну и Урану, мы никогда не садились на Меркурий или Ганимед, крупнейший из известных нам спутников. Каково находится там, где бьют гейзеры Энцелада? На Луне и Марсе есть огромные пещеры, которые остаются абсолютно неисследованными. Все

это места, куда мы можем полететь. Но, как бы то ни было, из всех небесных тел, на которых мы побывали, хорошо известно нам только одно — планета, давшая нам жизнь. *«Почему мир устроен именно таким образом?»* Слишком общий вопрос. *«Почему все эти миры так различны?»* Это уже более точная формулировка. Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны вернуться назад, во времена, когда никаких планет еще не было.

ГЛАВА 1

ДРЕВНИЕ РУИНЫ

*Небесная сеть широка и редка,
Но из нее ничто не ускользает.*

Лао-цзы. Книга о пути жизни*

Изучение планет привело к появлению сотен прославленных философов и забытых мудрецов по всему миру. Как в Большом взрыве, определенного центра расширения тут не было, но несколько выдающихся визионеров возвышаются, как верстовые столбы, на дороге к тому месту, где мы сейчас оказались¹. Самой революционной эпохой в истории астрономии был ее древнегреческий этап, поэтому мы могли бы начать оттуда или даже раньше, с Индии или Китая, — если, конечно, нам вообще стоит начинать. Хм, как будто мы уже не начали! Но ради целостности повествования, и поскольку эта тема знакома буквально всем, давайте перейдем непосредственно к временам Шекспира, когда по Европе распространилось революционное учение Коперника, а Иоганн Кеплер стал преданным сторонником этой наиболее опасной из теорем, *De revolutionibus orbium coelestium*², гласящей, что Земля обращается вокруг Солнца.

* Пер. В. Малявина.

Хотя он и разработал некоторые из самых функциональных телескопов своего времени, исследования Кеплера были основаны на дооптических наблюдениях³ с особым вниманием к астрометрии — точной геометрии передвижения планет по небу. Геометрии, которая измеряла мир. Попытное движение Марса,двигающегося на фоне звезд сначала на запад, затем на восток (с возрастающей яркостью), а потом снова на запад, было объяснено как обусловленное относительным движением Земли и Марса. Это похоже на то, как один наездник смотрит на другого на фоне гряды холмов. Когда обе лошади скачут по кругу, первому кажется, что второй то едет назад, то мчится вперед, а порой закладывает крутой вираж, проходя по внутреннему изгибу. Солнце при этом находится в центре.

Это относительное движение является физическим отражением *параллакса* — геометрического явления, которое древние греки использовали, чтобы измерить расстояние до Солнца. Аристарх Самосский и другие ученые еще в III в. до н. э. выяснили, что планеты обращаются вокруг центрального огня, расположенного во много раз дальше от Земли, чем Луна, и что звезды находятся еще во много раз дальше. Но империи не вечны, и знания греков были почти забыты, а потом снова открыты на Западе при таких обстоятельствах, которые привели к появлению современной физики.

Кеплера тревожили систематические ошибки при определении положения планет. Он показал, что эти огрехи тут же исчезнут, если принять, что планеты обращаются вокруг Солнца не по круговым, а по эллиптическим орбитам и что они двигаются быстрее, когда находятся ближе к светилу. С его стороны было достаточно смело предложить такую непривычную геометрию небес, и Церковь приняла эту мысль далеко не с распростертыми объятиями. Всего каких-то девять лет назад итальянского философа и астронома

Джордано Бруно казнили за то, что еще до изобретения телескопа он утверждал:

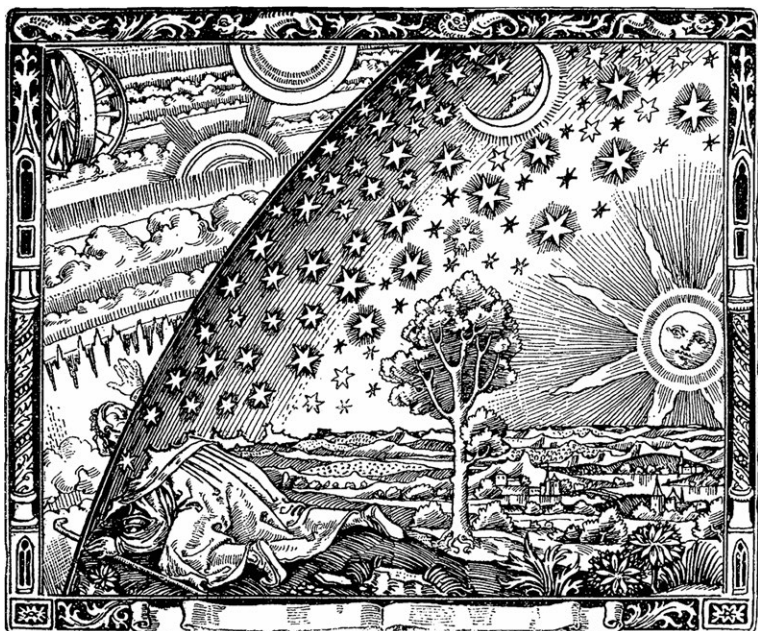
Существуют... неисчислимые солнца, бесчисленные земли, которые кружатся вокруг своих солнц, подобно тому как наши семь планет кружатся вокруг нашего Солнца... На этих мирах обитают живые существа*.

Не имея никаких доказательств своей правоты, кроме тех, что существовали уже в эпоху Фалеса Милетского, Бруно не сдал позиций и был сожжен в 1600 г.⁴

Мать самого Кеплера едва избежала казни на костре как ведьма, так что он хорошо понимал опасность радикальных идей. Его подход к науке был более последовательным и менее эпатажным, чем у Бруно, хотя позднее он написал произведение, которое многие считают первым научно-фантастическим рассказом — «Сон, или Посмертное сочинение о лунной астрономии» (*Somnium Astronomicum*)⁵, где описывается путешествие людей на Луну. В чем важность замеченных Кеплером ошибок? Полученные им уравнения движения планет, которые позднее получили имя законов Кеплера, были введены Исааком Ньютоном в физическую картину мира в виде *гравитации* и *импульса* — так на свет появилась физика.

Чтобы вы не вообразили Кеплера кем-то вроде неггибаемого защитника фактов, следует сказать, что его культура была *донаучной*. (Сегодня наша культура становится ненаучной, а это совсем другая, куда более печальная история.) В начале XVII в. не существовало никакой целостной концепции физики и никакого реального способа развить наши знания на основе обнаруженного количественного

* Пер. Я. Емельянова, Ю. Верховского, А. Эфроса.



Изображающая границу мироздания гравюра неизвестного художника, которая, вероятно, относится к XVII в. Опубликована в книге Камиля Фламариона «Атмосфера: Популярная метеорология» (*L'Atmosphère: Météorologie populaire*, 1888). Внешне персонаж напоминает Джордано Бруно, казнённого в 1600 г.

Camille Flammarion. L'Atmosphère: Météorologie populaire (Paris, 1888), p. 163

закона. Натурфилософия носила характер откровения: вот что я вижу, и это то, что я считаю истинным.

Кеплер обнаружил взаимосвязь между космологией и стереометрией, которая до конца жизни оставалась его излюбленной идеей. Он заметил, что шесть планет обращаются вокруг Солнца с радиусами, которые соответствуют сферам, вписанным в пять платоновых тел: тетраэдр, куб, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр⁶. Эту теорию он опубликовал в сборнике эссе и открытий «Тайна мироздания» (*Mysterium Cosmographicum*, 1596), снабжённом

подзаголовком «Предвестник космографических исследований, содержащий тайну мироздания относительно чудесных пропорций между небесными кругами и истинных причин числа и размеров небесных сфер, а также периодических движений, изложенный с помощью пяти правильных тел».

Во времена Шекспира никто не мог представить существование еще одной планеты⁷, точно так же как не мог вообразить себе восьмой день недели, поэтому Кеплер до конца дней был уверен в своей правоте. Спустя много лет после его смерти этой уверенности пришел конец в связи с открытием первой с античности новой планеты — Урана. В результате от «Тайны мироздания» и других теорий остались одни руины, а нам пришлось задуматься о числе дней недели — но зато законы Ньютона получили новое подтверждение.

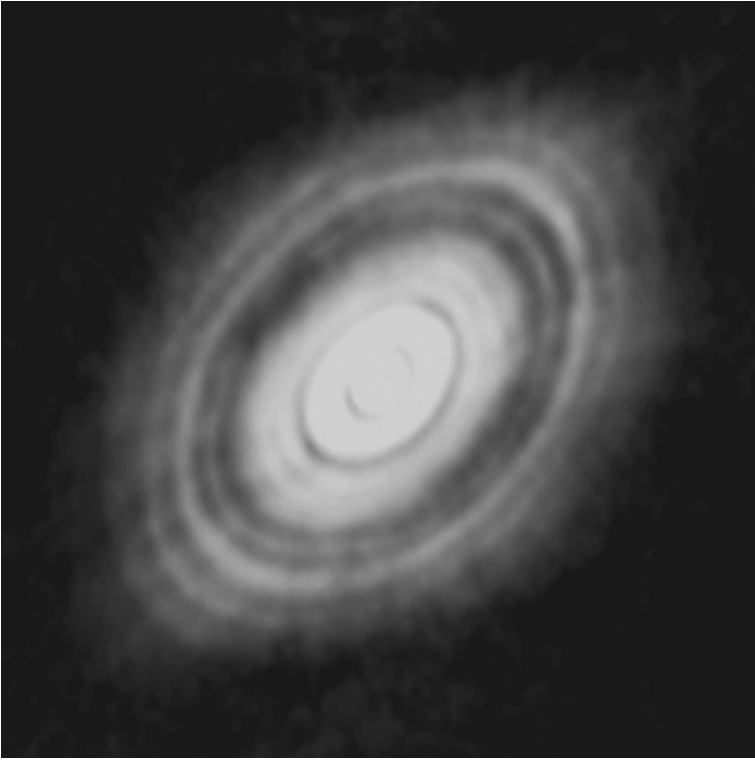
И вот где мы оказались сегодня. Даже в своих самых смелых мечтах Кеплер не представлял носящий его имя телескоп, летающий в космосе вокруг Земли и открывающий тысячи вращающихся по разным орбитам больших и малых планет, часто потенциально пригодных для обитания и даже землеподобных. Он и подумать не мог, что каждая из этих планет будет подчиняться законам, которые он вывел в трактате «Гармония мира» (*Harmonices Mundi*, 1619). Интересно, в которую из своих идей Кеплер верил больше: в неверную из своей любимой «Тайны мироздания» или в ту, что стала основой для законов природы и значительной части современной науки?

Хотя она никогда не считала себя специалисткой по планетам, физик Мария Кюри, француженка польского происхождения, открыла атомную природу радиоактивности

и тем самым запустила процесс, который в конце концов опрокинул все здание геологии XIX в. и привел к революции в представлениях о планетах и звездах. Она доказала, что радиоактивные атомы претерпевают целые цепочки распадов, в результате чего образуются стабильные дочерние элементы. За миллиарды лет два распространенных изотопа урана, ^{235}U и ^{238}U , превращаются в изотопы свинца (^{206}Pb и ^{207}Pb)⁸. Поскольку уран относительно часто встречается в горных породах, его распад с течением времени меняет соотношение изотопов свинца в кристаллах: таким образом, возраст камней можно определять с удивительной точностью.

До открытия свинца радиоактивного происхождения ученые оценивали возраст Земли и Солнца самое большее в десятки миллионов лет, основываясь на согласующихся между собой доказательствах, которые мы разберем чуть позднее. Высказывая позицию меньшинства, шотландский геолог Чарльз Лайель, близкий друг Чарльза Дарвина, разрабатывал количественные методы новой науки седиментологии и настаивал, что возраст Земли гораздо больше. Потребовались бы миллиарды лет, чтобы возникли все те напластования осадочных пород, которые он и его последователи начали интерпретировать как выведенные на поверхность отложения океанических бассейнов. Наука *геохронология* шла вперед благодаря спорам о возрасте Земли и формировании ее поверхности, а также благодаря идеям о биологической эволюции, впервые выдвинутым в монументальном труде Дарвина «О происхождении видов», где была высказана мысль, что для возникновения жизни потребовался гигантский промежуток времени.

Понимание атомной природы радиоактивности и связи урана со свинцом позволили ученым достоверно вычислить возраст Земли. К 1930-м гг. на основании простых графиков распространенности свинца стало известно, что некоторые



Сделанный при помощи Большого атакамского миллиметрового комплекса (Atacama Large Millimeter Array, ALMA) снимок расположенной примерно в 450 световых годах от Земли молодой звезды HL Тельца и ее протопланетного диска. По оценкам, возраст этой звезды составляет всего 100 000 лет, тем не менее образование ее планет, кажется, идет полным ходом: мы видим, как формирующиеся гигантские планеты расчищают свои орбиты от газа и пыли.

ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); C. Brogan, B. Saxton (NRAO/AUI/NSF)

горные породы Земли имеют возраст по крайней мере 2 млрд лет. Глубины геологического *времени* приоткрылись перед нами именно тогда, когда астрономы начали обнаруживать истинную глубину космического *пространства*.

В 1920-е гг. американский астроном Эдвин Хаббл пришел к выводу, которого наука придерживается и сегодня:

мы живем в одной из бесконечного множества галактик, разбросанных по всему космосу. Также он доказал, что галактики отдаляются от нас во всех направлениях, причем чем дальше они находятся, тем быстрее. Из этого Хаббл заключил, что Вселенная расширяется изотропно, как точки на поверхности надуваемого воздушного шарика. Каждая точка считает себя центром расширения, но в действительности ни одна из них не является особенной.

Хаббл оценил возраст Вселенной, вычислив время, которое потребовалось бы галактикам, чтобы занять свое текущее положение, если они отправились в путь из некоей теоретической критической точки, где начались пространство и время (полностью сдутый шарик). Этот промежуток времени (хотя мы и не понимаем, что он означает) также, как оказалось, измеряется миллиардами лет — как и возраст пластов осадочных пород, и отсчет ураново-свинцовых часов в минералах, и длительность биологической эволюции. Очень быстро стало предельно ясно, что сотворение мира произошло гораздо раньше, чем мы когда-либо себе представляли, и что его история простирается гораздо дальше в будущее, чем просуществовал человеческий род.

Исаак Ньютон рос в середине XVII в., уже зная законы Кеплера. Одним из главных достижений великого английского ученого стало обобщение этих законов как зависимостей между массой, временем и пространством. Ньютон вывел закон всемирного тяготения, который гласит, что два объекта притягиваются друг к другу пропорционально их массам, деленным на квадрат расстояния между ними. С момента появления этот закон в целом неизменно доказывал свою справедливость, причем он настолько элегантен, что, кажется, существовал всегда, будучи встроенным в саму

природу и просто дожидаясь, пока его откроют⁹. Но закон всемирного тяготения не *идеально* точен, и поэтому он ничего не дожидаясь, но обязан быть лишь человеческим изобретением, отражающим нашу приверженность к простым теориям. Окончательной не является и общая теория относительности Эйнштейна; это еще одно человеческое изобретение, модификация теории Ньютона, ведущая к более точным предсказаниям и иной реальности, скрывающейся за уравнениями. Точно так же произойдет и когда последующие теории — дальнейшие модификации, новые шаги вперед — потребуются для объяснения свежих данных и более точного знания. Но после Ньютона физические споры шли на языке математики с использованием явно определенных значений массы, времени и расстояния.

Крупнейшие научные достижения рождаются из внимания к мельчайшим несоответствиям. Кеплера беспокоило, что круговые орбиты не совсем соответствуют результатам наблюдения. К концу XIX в. стало ясно, что у орбиты Меркурия слишком большая прецессия. Эта орбита имеет большой эксцентриситет¹⁰, и точка перигелия (в которой планета ближе всего к Солнцу) каждый меркурианский год немного меняет свое расположение. Орбита прецессирует, и планета вычерчивает сложный узор, словно спирограф*. Прецессия по большей части связана с влиянием других планет, но тут что-то не сходилось; должно было иметься еще какое-то значительное возмущение, которое не учитывается законом Ньютона. Может, существует некий материальный «эфир» — вещество, заполняющее все космическое пространство и тормозящее Меркурий? Нет, в таком случае Меркурий упал бы на Солнце по спирали. Может, на орбиту

* Чертежный прибор с зубчатыми дисками для рисования спиральных узоров. — *Прим. науч. ред.*

Меркурия влияет еще не открытая планета Вулкан? Нет, Вулкан давно бы обнаружили.

И тут появляется физик Альберт Эйнштейн, чья сформулированная в 1916 г. теория тяготения, известная как общая теория относительности, предсказала прецессию орбиты Меркурия, объяснив наблюдаемое несоответствие. Астрономы обрадовались и перешли к обсуждению следующего несоответствия. Но для физиков мир навсегда изменился, а к Вселенной добавилось еще одно измерение. Общая теория относительности не отменяет закон Ньютона, но дает ему геометрическое обоснование: изменение кривизны пространства-времени. Гравитация — это не сила, а градиент *потенциального поля*. Для большинства же из нас это различие не существенно: закон всемирного тяготения Ньютона достаточно точен, чтобы описывать и обычное движение планет и спутников, и меня в моем гамаке, и даже ракеты, способные достигать дальнего космоса.

Люди, столь же одаренные, как Ньютон, встречались в каждом поколении начиная с каменного века. Ископаемые останки показывают, что черепная коробка человека за миллион лет увеличилась в размерах вдвое, но мы, возможно, никогда не узнаем, в чем было дело. Люди использовали этот увеличившийся мозг, чтобы производить каменные орудия со все возрастающим мастерством: они становились более ровными, делались из лучших материалов, получали более выраженные режущие кромки и разные варианты исполнения. Инструменты лучшего качества позволили добывать более калорийную пищу, необходимую для работы такого более энергозатратного мозга. Изготовление любого инструмента — это труднейшая задача, как и каждая охота или каждая миграция на новые территории. Люди выучили свойства

горных пород, а также траектории Луны, звезд и того, что мы теперь знаем как планеты.

Просвещение стало периодом общего пробуждения, когда лучшие умы человечества смогли заблестать по-настоящему. Как писал Ньютон в письме к Роберту Гуку, мы «стоим на плечах гигантов». Наука стала возможной благодаря появлению глобально взаимосвязанной культуры, которая позволила ей двигаться вперед, следя за каждым новым и подробным наблюдением близких или далеких явлений — колодца в Асуане, скал в горах Тайханшань, Магеллановых Облаков. Кроме того, ученые эпохи Просвещения рождались в мире, готовом принимать новое, относительно свободном от доктринальных оков¹¹, организованном вокруг системы проверки, обсуждения и передачи коллективного знания и освоившем методики формального рассуждения (особенно математического), которые позволяют им взвесить планеты и измерить заряд электрона.

Гигантский спутник Сатурна Титан открыли в 1655 г., когда Ньютону исполнилось 12 лет. Движение галилеевых спутников Юпитера было описано за полвека до этого, то есть мальчик рос, зная о количественных характеристиках обращения спутников вокруг планет и обращения планет вокруг Солнца. Он заметил, что спутники следуют законам, аналогичным законам Кеплера: чем ближе их орбита к планете, тем короче период обращения, если, конечно, принять во внимание, что Юпитер и Сатурн менее массивны, чем Солнце, и, следовательно, притягивают свои спутники слабее. Материя является причиной гравитации — в этом заключается теория Ньютона. И материя претерпевает *ускорение* под действием гравитации, отчего спутники обращаются вокруг планет.

Приложив свой закон всемирного тяготения к периодам планет и спутников, Ньютон вычислил относительные

массы Юпитера, Сатурна, Земли, Луны и Солнца. Третий закон Кеплера гласит, что период обращения пропорционален радиусу орбиты в степени $3/2$ (по более отдаленным орбитам тело движется гораздо дольше), деленному на квадратный корень из общей массы¹². Измерьте период и расстояние от светила до орбиты, и получите из этого уравнения массу планеты. (Вы можете проверить это по таблице в начале книги.)

Далее из масс планет и спутников, а также из их размеров Ньютон вычислил их *плотности*, таким образом охарактеризовав материалы, из которого они состоят. Поскольку галилеевы спутники обращаются вокруг Юпитера значительно быстрее, чем Титан вокруг Сатурна, принимая во внимание радиус орбиты, Ньютон смог оценить, что Юпитер в полтора раза плотнее Сатурна и, таким образом, состоит из более тяжелого или более сжатого вещества. Также он взвесил Землю, доказав, что она в 3,5 раза плотнее Юпитера и, по всей видимости, состоит из горных пород и металлов. Далее он попытался определить массу Луны, оценивая силу ее притяжения, выражающуюся в океанских приливах на поверхности Земли, но эти расчеты оказались слишком сложными, чтобы с ними можно было справиться на тот момент. Итак, за несколько вдохновенных лет он доказал, что планеты значительно отличаются одна от другой по составу — загадка, которую мы все еще пытаемся разгадать.

Геофизика, другая половина науки о планетах, отстала от Кеплера и Ньютона на целый век. Долгое время мы больше знали о механизмах работы пустынного космоса и траекториях блуждающих звезд, чем о Земле под нашими ногами. Это произошло потому, что небо видно всегда, тогда как основная часть Земли скрыта от глаз. Самые глубокие океанские впадины составляют только 0,2% от радиуса

планеты — это даже не царапина на коже яблока. Мы очень мало знаем о составе и структуре того, что находится внутри.

Одна из улики состоит в том, что при движении вглубь Земли температура постоянно растет — примерно на $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ на километр. В конце XIX в. Уильям Томсон, также известный как лорд Кельвин, пришел к выводу, что этот *геотермический градиент* связан с жаром, идущим изнутри наружу. Показатель этого градиента (то есть $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$) соответствует тому, как долго уже остывает Земля — примерно так же, как если переложить запеченную индейку из духовки в морозилку¹³. Спустя бесконечно долгое время система станет изотермической (с одинаковой температурой), так что температурный градиент будет равняться нулю. Таким образом, он может служить своеобразными часами.

Предположив, что «в начале»¹⁴ Земля была едва затвердевшим шаром, Кельвин оценил, что она затвердела где-то от 20 до 400 млн лет назад. Затем он независимо показал, что возраст Солнца также составляет от 30 до 60 млн лет, исходя из того, сколько энергии оно выделяет (то есть из его светимости) и сколько энергии ему теоретически доступно. Все встало на свои места.

Почему Кельвин так сильно ошибся? В обеих своих теориях он не учел ядерных процессов. При формировании земной коры уран, торий и другие радиоактивные элементы скапливаются в гранитах и иных глубинных породах коры¹⁵. Там они претерпевают спонтанный распад, выделяя тепло. Мы судим об этом по распространенности дочерних элементов, которые возникают в коре благодаря цепочкам распада, к примеру, радона и свинца. Это важный источник тепла, о котором Кельвин не знал. Кроме того, тепло распространяется в недрах Земли благодаря не только теплопроводности, но и конвекции (тектонике), поэтому исходные данные

для этих расчетов были неверными. Что же касается Солнца, на самом деле его тепло производится в термоядерных реакциях атомов водорода, которые могут идти миллиарды лет.

По еще одному совпадению оценки Кельвина хорошо согласовывались с теорией лунных приливов, разработанной в 1870-х гг. Джорджем Дарвином, сыном Чарльза. В отличие от Кельвина, Дарвин был в целом прав в том, что касалось физики этого процесса, но ошибся в расчетах. В своей геологической теории, несомненно максимально смелой для той эпохи, Джордж Дарвин — яблоко от яблони падает недалеко — предположил, что Луна была исторгнута из земной мантии благодаря первоначальному быстрому вращению Земли. Это согласовывалось с полученными при его жизни данными, что плотность Луны примерно совпадает с плотностью земной мантии.

В гипотезе Дарвина, к которой мы будем возвращаться, поскольку она чрезвычайно важна для всего, что мы знаем о Луне, есть две главные составляющие. Во-первых, он предполагает, что когда-то Земля вращалась вокруг своей оси так быстро, что от нее оторвался значительный кусок, который затем каким-то образом вышел на орбиту. Во-вторых, он доказывает, что этот кусок — Луна — должен был вызывать внутри Земли гигантские приливы и что эти приливные вздутия тянули за собой Луну. Луна, уже находящаяся на расстоянии нескольких земных радиусов от Земли, под действием приливных сил удалялась бы все дальше, закручиваясь от вращения планеты и выходя, как лассо, на все более высокие орбиты. Луна, оказавшаяся на расстоянии меньше чем в несколько радиусов, согласно этой теории, упала бы обратно.

Временно отставив эту проблему, Дарвин рассудил, что радиус лунной орбиты содержит информацию о возрасте Луны, если мы высчитаем влияние приливной силы



Луна.

NASA/GSFC/ASU

во времени. Он оценил, что Луне понадобилось бы 56 млн лет, чтобы быть вытянутой на свою сегодняшнюю орбиту высотой в 60 земных радиусов, хотя и оговорил в своей статье, что это скорее догадка, основанная на плохо известных параметрах. Поскольку он переоценил приливную силу, его возраст Луны оказался заниженным в десятки раз и случайно совпал с результатом Кельвина¹⁶. Это потрясающий пример трех согласующихся между собой научных оценок, которые были сделаны на основе совершенно независимых предположений, и все оказались неверными.

Кельвин провел почти весь остаток своей бесспорно блестящей карьеры, отбиваясь от новомодных идей. К 1920-м гг. анализ содержания свинца, который является продуктом распада радиоактивного урана, позволил оценить возраст некоторых горных пород в несколько миллиардов лет. В 1950-х с помощью виртуозных лабораторных опытов геохимик Клэр Паттерсон из Калифорнийского технологического института доказал, что в смысле механизма накопления свинца земные горные породы аналогичны некоторым примитивным метеоритам. Это подразумевает, что возраст основной массы Земли — если не обращать внимания на разнобразные последствия тектоники плит — примерно такой же, как у них. Он определил возраст Земли в 4,55 млрд лет¹⁷, с точностью примерно в 1%. Это значение выдержало проверку временем.

Самые древние горные породы чисто земного происхождения были обнаружены в холмах Джек-Хиллс в Западной Австралии. Они принадлежат к первому геологическому эону — катархею (гадею) — и содержат кристаллы *циркона*, возраст которых можно надежно определить¹⁸ в 4,4 млрд лет. Для сравнения: самые древние материалы в самых древних метеоритах отстоят от нас на 4,5672 млрд лет, хотя четвертый знак после запятой еще вызывает сомнения. Возраст большинства метеоритов находится в пределах нескольких миллионов лет от этого значения, известного как t_0 (нулевой отсчет). Сравнительно небольшие возраста можно определить путем измерения содержания короткоживущих радионуклидов, которые постоянно возникают и распадаются. Например, углерод ^{14}C образуется в верхних слоях атмосферы из-за космической радиации и участвует во всех процессах, где задействован углерод; период его полураспада составляет примерно 6000 лет. Это изотопные часы с одним из самых коротких циклов¹⁹.

Геологические события от архея до раннего протерозоя остаются такими же неясными, как стертые рисунки на песке. Для них почти нет хронометрических методов, которые могли бы служить надежными часами²⁰. Но то, что их история не была записана, не означает, что эти миллиарды лет были скучными. Напротив, происходило очень многое: формировались континенты, началось движение тектонических плит, эволюционировала жизнь, сталкивались кометы и астероиды. Мы просто пока не можем датировать эти события. Все, что происходило тогда, миллиарды лет назад, оказалось поглощено конвейером тектоники плит и субдукции с уцелевшими тут и там фрагментами, собрать которые в мозаику — безнадежная задача. Поскольку во время катархея Земля подвергалась безжалостным бомбардировкам, кое-что из самого древнего земного вещества попало и на Луну, где мы можем его поискать.

Подобно деталям руин древней столицы, рухнувшие монументальные идеи подбираются следующими поколениями и составляют в более устойчивые теории. Идеи никогда не отбрасываются окончательно, для них находят новые задачи, они приспособляются к чему-то, что может работать лучше. Так происходит движение вперед. Обширную коллекцию логических элементов, соотношений и фактов, таких как тепловые модели Кельвина или приливная модель Дарвина, можно сравнить с колоннами, капителями и замковыми камнями, которые пошли на строительство теории: вы используете их снова и снова. Теория, которая связывает их воедино, может развалиться, но составляющие ее элементы останутся верными.

Некоторые монументальные идеи не являются ни правильными, ни неправильными, потому что мы не понимаем,

как их оценить. Одна из таких идей, для оценки которых нам не хватает широты обзора, — это темная материя. Другая, менее глобальная, — это идея о геометрической закономерности расположения планет. Кажется, она имеет под собой реальную основу, но, возможно, дело обстоит не совсем так; не исключено, что у нее есть какая-то физическая подоплека, но кто знает, кто знает...

В «Тайне мироздания» Кеплер писал, что орбиты планет находятся на концентрических сферах, вписанных в правильные многогранники, и причиной этого могла быть только воля Бога. В XVIII в. популярность обрела другая математическая прогрессия, которая имеет более прочное физическое основание; мы называем ее правилом Тициуса — Боден²¹. Если взять ряд чисел 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, где каждое следующее (за исключением первых двух) удваивает предыдущее, прибавить к ним по 4 и поделить на 10, то полученные результаты достаточно точно соответствуют радиусам орбит известных планет. По этому правилу расстояния между Солнцем и планетами от Меркурия до Сатурна должны быть 0,4, 0,7, 1,0, 1,6, 2,8, 5,2 и 10,0 а. е. В действительности они равны 0,4, 0,7, 1,0, 1,5, 5,2 и 9,5.

Если вы очень хотите найти какую-то закономерность, вы ее найдете — в этом люди мастера. Более того, отыскивая эти закономерности, мы склонны не обращать внимания на пробы. Например, чуть выше вы могли не заметить, что предсказанной правилом Тициуса — Боден планеты, отстоящей от Солнца на 2,8 а. е., не существует. В этом смысле «Тайна мироздания» работает лучше: по сфере на каждую планету. Совершенное в 1781 г. открытие Урана, первой новой планеты со времен античности, стало одновременно впечатляющим событием и поворотным моментом. Уран оказался гораздо больше Земли, а радиус его орбиты, оцененный в 19,2 а. е., был близок к предсказанному значению 19,6 а. е.

Правило Тициуса — Боду было подтверждено, но не доказано. Для него по-прежнему не существовало физического объяснения, и с ним имелась еще одна проблема: ряд чисел бесконечен. Наконец, астрономам не хватало планеты на расстоянии в 2,8 а. е. Охота началась.

Члены одного из более формальных объединений астрономов называли себя «Небесной полицией» (*Der Himmels Polizei*). Возглавлял его венгерский барон Франц фон Цах. Они разделили небо на 24 квадрата и скрупулезно обыскивали каждый из них; другие не менее амбициозные группы занимались тем же самым. Но честь совершить открытие выпала священнику, отцу Джузеппе Пиацци, который вовсе не собирался искать какую-то отсутствующую планету, но прилежно трудился над новым звездным каталогом для Палермской обсерватории.

1 января 1801 г. Пиацци сделал в своем рабочем журнале запись об открытии «чего-то получше кометы» — блуждающей звезды, возможно планеты. Он намеревался сохранить это открытие в тайне до тех пор, пока не сможет подтвердить его дальнейшими наблюдениями, но коллеги прознали о случившемся, и Пиацци пришлось поспешить, чтобы первым сообщить о собственном достижении. К февралю он уже оценил радиус орбиты новой планеты — примерно 2,8 а. е.! Но после этого Пиацци потерял находку из виду: она переместилась на дневное небо, поскольку Земля обращается вокруг Солнца быстрее. Нескольких проведенных им наблюдений не хватало для надежного предсказания, где и когда следует искать новую планету. В эпоху до изобретения астрофотографии в качестве доказательства открытия у него были только рабочие заметки.

Это вылилось в настоящий астрономический кризис: предсказанная правилом Тициуса — Боду недостающая планета потерялась! Наступило время, когда она должна была

вернуться на ночное небо, но никто не мог ее найти, поэтому возникли сомнения в самом ее существовании. Происходящее стало вызовом для Карла Фридриха Гаусса, юного гения 20 с небольшим лет, который решил проблему за несколько недель, разработав метод наименьших квадратов для предсказания будущих данных по результатам уже проведенных наблюдений. (Этот случай стал не первым и не последним, когда нужды астрономии стали причиной значительных математических достижений; более свежий пример — повреждения аппарата «Галилео», которые потребовали изобретения графического формата JPEG.)

Метод наименьших квадратов лежит в основе современного анализа данных и даже искусственного интеллекта. Предположим, что у нас есть математическая модель — в данном случае законы Кеплера, — предсказывающая, где Церера окажется в какой-то момент. Если вы точно знаете, где Церера была в прошлом, тогда законы Кеплера точно сообщат, где она найдется в будущем. Но в действительности у вас есть только несколько измерений того, где она была, и эти измерения содержат погрешности. Каким будет ваше лучшее эмпирическое предположение? Гаусс вычислил орбиту Цереры, сведя к минимуму сумму квадратов отклонений (как следует из названия его метода) между предсказанными данными и результатами наблюдений. Он указал астрономам, где искать, и Цереру, как вскоре был назван этот астероид, снова нашли.

После всех этих перипетий новая планета оказалась гораздо меньше Луны²². Вскоре на том же расстоянии от Солнца, предсказанном правилом Тициуса — Боде, обнаружили другие объекты, ни один из которых не был больше Цереры. Гаусс обозвал их «парой комков грязи, которые мы зовем планетами». Главный пояс астероидов, как его в итоге назвали, является расположенной между

Марсом и Юпитером областью скопления малых небесных тел, которые позднее были объявлены остатками некой разрушенной планеты. (Какой-то из вариантов этой идеи может в итоге оказаться верным, хотя, как мы увидим далее, в этой истории замешаны перемещения Юпитера и Сатурна, происхождение Марса и исчезновение сотен существовавших первоначально астероидов размером с Цереру.)

Потом был открыт Нептун, еще одна планета-гигант, на этот раз отстоящая от Солнца на 30 а. е. — неправильный ответ. Правило Тициуса — Боде предсказывало 39 а. е.! Затем обнаружился Плутон с орбитой радиусом 40 а. е. (в среднем она имеет большой эксцентриситет), тогда как должен был оказаться в 77 а. е. от светила. Но даже когда правило Тициуса — Боде рушилось на глазах, все соглашались, что идея о геометрически правильном расположении планет соответствует некой физической реальности. В конце концов, закон всемирного тяготения Ньютона — это геометрический закон; возможно, он каким-то образом заставляет планеты формироваться на определенном расстоянии от Солнца. Если одна планета появляется на расстоянии x , возможно, это влияет на планетообразование по соседству, устанавливая промежуток до следующей планеты. Если каждый такой промежуток должен быть в два раза шире предыдущего, мы получаем ряд, напоминающий правило Тициуса — Боде: x , $2x$, $4x$, $8x$... Вместо того чтобы отбрасывать имеющуюся закономерность, мы можем модифицировать ее или искать ей объяснение, поглубже зарывшись в физику.

По причинам, которые я объясню позже, сейчас мы считаем, что планеты сильно смещаются с той орбиты, где образовались. Таким образом, правило Тициуса — Боде, если оно вообще применимо, описывает не место формирования планеты, но ту орбиту, которую она в конце концов занимает. Кроме того, геометрическая прогрессия должна где-то закончиться:

какая-то планета обязана быть последней. Сегодня передовым краем в изучении правила Тициуса — Боде является поиск геометрических закономерностей в расположении орбит и величине пропусков в других планетных системах²³.

Ночное небо не слишком изменилось за последнюю сотню миллионов лет. Луна была на процент-другой больше и на процент-другой ближе, а месяц — на день короче. Крайтер Тихо только что сформировался, украсив заметными и сегодня лучами изверженной породы всю видимую сторону. Но с того времени, как появились млекопитающие, рисунок небес оставался одним и тем же, за исключением случайных комет и астероидов, циклических изменений наклона земной оси (направления на север), а также появления и исчезновения каких-нибудь сверхновых, красных гигантов или туманностей в нашем звездном окружении. Переведите часы гораздо дальше назад, как это делал Джордж Дарвин, и созвездия станут неузнаваемыми, а Луна приблизится в пять раз. Еще раньше Луна была в десять раз ближе, а до этого — в двадцать раз, и наконец мы доберемся до дня, когда Земля и Луна появились на свет.

Если углубиться в историю еще дальше, мы увидим гигантские столкновения, которые меняли форму участвовавших в них тел. До того были зарождение Солнца, конденсация его материнского облака, которое дало жизнь целой семье звезд, и появление самой нашей галактики. Об этом, по большому счету, должна рассказать любая книга по астрономии, поэтому давайте устроим небольшое путешествие к началу времен, когда Вселенная начала поглощать саму себя. Кварки и электроны за несколько минут объединились в первые атомы, и так началось восхождение материи к узнаваемым для нас формам.

Пока в течение следующих нескольких миллионов лет разгорался космический рассвет, случайные неоднородности приводили к тому, что некоторые регионы становились более плотными, чем другие, и в «местном» масштабе их сила тяготения начинала действовать против энергии расширения, создавая триллионы первоначальных галактик, словно пену на волнах штормового моря. Расширение продолжалось, галактики развивались, а Вселенная успокаивалась. Одна за другой галактики поглощали друг друга — примерно так, как планеты сливались в гигантских столкновениях, — пока к сегодняшнему дню²⁴ их не осталось около 100 млрд²⁵.

Один из первых фактов, который вы узнаете при изучении астрофизики, — это то, что гравитация нестабильна. То, когда и как она нестабильна, определяет структуру, распределение и массы галактик, звезд, планет, спутников, комет и астероидов. Если бы гравитации было слишком много, что эквивалентно слишком большой массе, Вселенная сколлапсировала бы обратно в сингулярность как лопнувший мыльный пузырь. (Возможно, среди сделавших попытку зародиться мультивселенных это случается сплошь и рядом.) Если же гравитации не хватает, результат первоначального взрыва может расширяться непрерывно без какой-либо агрегации. (Возможно, такое тоже происходит очень часто, если вы верите в мультивселенные, а может, и независимо от вашей веры.) Вместо этого Вселенная (по крайней мере, *наша* вселенная) была создана с так точно сбалансированной гравитацией, что коллапсировать начали локально более плотные регионы, но не вся структура в целом, и этот процесс шел в целом каскаде самых различных масштабов, определявшихся напряжением в зарождавшемся мироздании.

Возвращаясь к планетообразованию, представим себе теоретически бесконечное облако молекул водорода и гелия, готовое к формированию звезд и планет. Его собственная

гравитация заставляет его стремиться сколлапсировать, но температура и давление препятствуют этому. Возникает небольшое возмущение: плотность одного региона становится немного больше, чем у других; следовательно, там больше и масса, и гравитация. Это означает, что при остывании облако распадется на сгустки определенного размера, которые будут коллапсировать дальше, чтобы стать звездами²⁶. Мы считаем, что в результате такого процесса появилось и наше Солнце — как часть зародышевого скопления из сотен звезд, которое рассеялось в ходе двух десятков совместных оборотов вокруг галактического центра, каждый из которых длился 250 млн лет²⁷. С тех пор все они перемещались, как изюм в тесте, так что к этой группе могут относиться лишь несколько из ближайших к нам звезд.

Первоначально Вселенная состояла из водорода, гелия и следового количества лития, появившихся в результате слияния барионов сразу после Большого взрыва. Химический состав начал становиться значительно интереснее глубоко в недрах первых звезд. Как будто существовал некий план: немедленно приступить к изготовлению первой порции более тяжелых элементов вроде кислорода, кремния и магния, которые потребовались бы для землеподобных планет и, в конце концов, для зарождения жизни. Все это очень странно.

Первые звезды были огромными с самого своего появления, и в их ядрах в ходе *термоядерного синтеза* формировались более тяжелые элементы. Это те же самые реакции, которые происходят при взрыве водородной бомбы, но внутри звезды их причиной является постоянное воздействие немыслимого давления и температуры, достигающей десятков миллионов градусов. Термоядерный синтез идет и внутри Солнца, превращая в гелий 600 млн тонн водорода в секунду. За эту же самую секунду 4 млн тонн массы *исчезают*,

превращаясь в энергию в соответствии с уравнением Эйнштейна $E = mc^2$, где m — это масса, а c — скорость света. Согласно вызывающим доверие моделям, звезды солнечного типа могут поддерживать термоядерный синтез примерно в течение 10 млрд лет, так что у нас в запасе есть еще пять.

Более массивным звездам первого поколения повезло меньше. Они горели в сотни раз жарче и быстрее, а когда топливо кончалось, их ядра коллапсировали и взрывались. Миллиарды звезд лопались, как воздушная кукуруза, выбрасывая фонтаны звездной пыли, состоящей из углерода, азота, кислорода, кремния, магния, фосфора и железа, которые стали строительными материалами для горных пород, льда, планет, океанов и людей. Это необычайно масштабное, разрушительно радиоактивное событие схлопывания звезды называется *сверхновой*. Именно в расширяющейся оболочке этого гигантского попкорна происходит чудо формирования всех богатств космохимии. Но пока давайте сосредоточимся на звездах солнечного типа, которые могут создавать долгоживущие планетные системы.

Любой коллапсирующий протозвездный сгусток случайным образом движется в каком-то одном направлении быстрее, чем в других. Сжимаясь, он таким образом начинает закручиваться все быстрее по тем же причинам, которые лежат в основе законов Кеплера — сохраняя при уменьшении размеров *момент импульса*. Вещество около центра вращается быстрее всего, заставляя сгусток уплотняться в протопланетный диск, богатый льдом и пылью. Центральная область конденсируется во вращающуюся протозвезду, в которой вскоре начинается термоядерный синтез.

Оставшаяся часть истории касается того, как и когда исчезает туманность и как этот диск рассыпается на планеты под влиянием новорожденной звезды. Представьте в центре реки маленький водоворот, который захватывает

листья, прутики и водяных пауков, то место в потоке, где отдыхают стрекозы. Аккреция планет начинается подобным же образом, в точке динамического равновесия, где момент импульса заставляет объекты разлетаться, а гравитация их удерживает.

Формирование планет — это история отпускания: момента импульса, газа, спутников. Это филигранная, почти магическая механика: Вселенная собирается в сеть галактик, чьи газовые и пылевые рукава агрегируют дальше в миллиарды сгустков, каждый из которых может стать одной или двумя сияющими звездами, дающими свет и тепло целой системе планет. Мы смогли выяснить подробности того, как это происходит, благодаря наблюдению за звездами вокруг нас с помощью телескопов. Многие из этих звезд похожи на Солнце по массе и составу, но находятся на разных стадиях своего развития. Это все равно что зайти в метро и увидеть там младенцев и стариков, праздных посетителей магазинов и спешащих на работу жителей пригородов — жизнь во всех ее проявлениях.

Идеи о вращающихся дисках, разбивающихся на отдельные вихри и подвихри, появились, когда в лучшие телескопы начала XVIII в. удалось разглядеть Млечный Путь как скопление отдельных звезд, которые были либо совсем крошечными по сравнению с другими, либо находились во много раз дальше. Звезды в соседних галактиках различить пока было невозможно, но некоторые астрономы уже высказывали предположения, что несколько неясных пятен в небесах — это отдаленные скопления звезд. Жители Европы никогда до того не видели расположенные в небе Южного полушария Магеллановы Облака²⁸, которые по своей фактуре напоминали Млечный Путь. Туманность Андромеды²⁹

и несколько других туманностей также имели отчасти «молочный» вид и, как казалось, спиральную структуру.

Немецкий философ Иммануил Кант выдвинул гипотезу, что это *островные вселенные* (теперь мы называем их галактиками), и утверждал, что система обращающихся вокруг Солнца планет первоначально сформировалась как одна из таких спиралей, с планетами, которые возникали как уплотнения в *протопланетном диске*³⁰. Хотя детали ему и не дались, Кант был прав в том, что момент импульса сплюсчивает коллапсирующее газовое облако в протопланетный диск. Но идея, что Туманность Андромеды и другие туманности являются системами планет, оказалась слишком простой. Не думаю, что Кант мог даже подозревать, что каждая из них в действительности представляет собой сотни миллиардов планетных систем, каждая со своей пылающей звездой.

Одна из первых проблем с теорией конденсации туманностей состояла в том, что Солнце в конце концов должно было начать вращаться вокруг своей оси с периодом в несколько часов, совсем как сгруппировавшаяся фигуристка. Но у соседних звезд период вращения составляет от одного до десяти дней, а Солнце совершает всего один оборот за 25 дней. У в тысячу раз более легкого Юпитера момент импульса, заключенный в его орбитальном движении, в 20 раз больше. На самом деле, если вы каким-то образом вольете все планеты в состав Солнца, собрав их моменты импульса воедино, масса звезды изменится всего на 0,2%, но она закрутится так, что будет совершать один оборот за день. Каким же образом Солнце потеряло свой момент импульса?

Возможно, ответ связан с мощными магнитными полями молодых звезд, которые вращаются вместе с ними так же, как магнитное поле Земли вращается вместе с нашей планетой. Когда такое магнитное поле звезды вращается, оно

проносится через газово-пылевой протопланетный диск, который ионизирован³¹ (электрически заряжен) под действием звездного излучения. Магнитное поле звезды взаимодействует с заряженными частицами пыли и плазмы, цепляясь за них, как гигантский дисковый тормоз. Это сцепление магнитного поля и заряженной материи приводит к турбулентному нагреву. Вращение внутреннего диска резко ускоряется, отбрасывая вещество прочь от Солнца, открывая внутреннюю щель и становясь причиной как бурного перемешивания, так и самых разных химических процессов. Поскольку каждому действию имеется равное ему противодействие, вращение звезды замедляется.

Еще одно противоречие в первоначальной модели привело к появлению теории *гигантских столкновений*, описывающей формирование не только Луны, но и любых планет³². К началу XX в. ученые уже понимали, что нельзя создать планету, равную по массе Земле, непосредственно из протопланетного диска, потому что воздействие Солнца сделает невозможным аккрецию такого относительно небольшого количества вещества. Те же математические уравнения, которые описывают, как остывающее молекулярное облако распадается на звезды, гласят, что протопланетный диск не может собираться в такие маленькие по массе сгустки, как Земля. На расстоянии 1 а. е. гравитационное воздействие Солнца будет дестабилизировать такие сгустки с той же скоростью, с какой они образуются.

Хотя модель формирования небесных тел из туманностей и пребывала некоторое время в забвении, вытесненная гипотезой звездных столкновений, она снова набрала силу в эпоху после завершения программы «Аполлон». Тогда же она была дополнена рядом все более сложных механизмов, которые очень важны, но не до конца нам понятны: конденсацией первых планетезималей внутри туманности,

рассеиванием газа, слиянием планетезималей в разрастающиеся зародыши, а потом и олигархи (крупные предшественники планет), и, наконец, слиянием олигархов на поздней стадии гигантских столкновений.

XX в. принес в астрономию огромные географические и культурные изменения, а также те самые научные и экономические достижения индустриальной эпохи, которые сделали возможными полеты на Луну. Американский астроном Эдвин Хаббл, имевший неограниченный доступ к первому в мире 2,5-метровому телескопу в обсерватории Маунт-Вилсон неподалеку от Лос-Анджелеса, смог первым рассмотреть самые яркие звезды в тех далеких компактных пятнах, которые позднее стали называть галактиками. Благодаря вышедшей в 1908 г. статье другого американского астронома, Генриетты Ливитт, Хаббл смог оценить расстояние до этих звезд по их яркости.

На самом деле астрономами могли быть только мужчины. Ливитт была одной из ассистенток Гарвардской обсерватории; в ее задачи входило проведение длинных расчетов, а также каталогизация звезд на фотографических пластинах. Занимаясь Магеллановыми Облаками, она заинтересовалась цефеидами — яркими переменными звездами, которые через определенные промежутки времени разгораются то сильнее, то слабее. (Считается, что это происходит из-за слоя ионизированного гелия в их глубине, который становится то более, то менее прозрачным, и потому они то охлаждаются, то нагреваются.) Ливитт обнаружила, что цефеиды, чья яркость меняется с периодом в несколько месяцев, гораздо ярче, чем те, у которых изменения происходят каждую неделю. Она нанесла эту зависимость на график, и с тех пор все, что вам нужно, — это измерить период

пульсации цефеиды. После этого вы будете с определенной точностью знать характерную для нее светимость и, таким образом, то, как далеко она находится. Ливитт открыла первые *объекты стандартной светимости*.

С помощью данных Ливитт и других исследователей объектов стандартной светимости, а также имея неограниченный доступ к новому гигантскому телескопу, Хаббл рассмотрел множество отдельных звезд в звездных туманностях. Хотя он часто принимал скопления за одиночные звезды (отчего они казались гораздо ближе), в 1924 г. Хаббл сумел доказать, что Туманность Андромеды и другие туманности находятся от нас в тысячи раз дальше, чем звезды Млечного Пути. Ливитт умерла до того, как стало ясно истинное значение ее работы.

Эти туманности не просто находятся гораздо дальше: чем отдаленнее галактика, тем краснее ее звезды³³. Это заставило Хаббла предположить, что Вселенная расширяется, что все удаляется от всего³⁴, вызывая «красное смещение» самых отдаленных объектов, которые движутся быстрее всех. Пространство само по себе расширяется, поэтому световые волны вытягиваются в более длинные, то есть более красные волны. Хаббл вычислил, как быстро растёт скорость расширения с расстоянием; современное значение постоянной Хаббла составляет примерно 70 км/с на 1 млн парсеков. (Один парсек равен 3,26 светового года. Световой год — это расстояние, которое свет проходит за один год, то есть 9,5 трлн километров.) Если Вселенная расширяется равномерно, то ее возраст вычислить несложно: это единица, поделенная на это число. Если перевести секунды в годы, вы получите около 14 млрд лет.

Если вернуться на Землю, геологам понравился тот промежуток времени, который подразумевала гипотеза Хаббла³⁵, но их огорчило, что ни одна из видимых туманностей

не была примером формирования планетной системы. Если судить по объектам стандартной светимости, эти туманности находились в миллионы раз дальше и, следовательно, были в миллионы раз больше, чем планетные системы. Это впечатляло, но никак не относилось к делу. Если гипотеза об образовании небесных тел из туманностей верна, разве мы не должны видеть какие-то протопланетные диски?

Одно из возможных объяснений состоит в том, что процесс формирования планет уже повсеместно завершен, совсем как в Книге Бытия. Другой вариант — этот процесс является уникальной особенностью Солнечной системы. Выяснилось, что оба эти предположения неверны. Около соседних звезд есть протопланетные диски, но, в отличие от галактик, их существование скоротечно. Поскольку они состоят из льда, пыли и холодного газа, их видно, только когда они подсвечены звездой, а с ребра они вообще непрозрачны. Нельзя просто направить телескоп на звезду возрастом в миллион лет и увидеть диск формирующихся планет; о его наличии приходится судить по косвенным признакам.

Сегодня мы считаем, что образование планет вокруг звезд солнечного типа завершается за период от нескольких миллионов лет до нескольких сотен миллионов лет³⁶. Этот процесс достаточно распространен, но проходит за относительно короткое время, так что вам должно очень повезти, чтобы вы могли его увидеть где-то по соседству. Это сумрачная эпоха в жизни планетной системы, когда тьму разрывают только вспышки от столкновений растущих планет. Все окутано поглощающей свет пылью, через которую пробивается совсем немного сигналов, заметных наблюдателю с Земли.

В отличие от ярких галактических дисков, протопланетные диски состоят из газа, льда и пыли, а потому не излучают света. Однако они нагреваются излучением своей звезды, и потенциально их температура может быть очень

высокой — это зависит от расстояния и светопоглощающей способности загораживающих звезду пыли и газа. Протопланетные диски по форме обычно напоминают пончик, и их внутренняя, обращенная к звезде поверхность прогревается до температуры в сотни градусов, испуская инфракрасные лучи (также известные как «тепловое излучение»). Хотя такая звезда может выглядеть как любая другая мигающая точка света, вооружившись инфракрасным спектрометром, вы сможете увидеть то, чего не может различить ваш глаз: это тепло в десятках световых лет от вас.

Стеклянная призма доказывает, что солнечный свет состоит из разных цветов. Хотя Ньютон считал, что цветов семь и они смешиваются в различных соотношениях (вполне аргументированная позиция), в действительности цветов бесконечное множество; сплошной их набор, который называют *непрерывным излучением*, связан с определенной температурой, которая для нашей звезды составляет примерно 5500 °C. *Спектр* — это график, где слева — фиолетовый цвет, а справа — красный. На нем вы можете отметить относительную степень интенсивности каждого цвета. Спектр такой звезды, как Солнце, представляет собой колоколообразную кривую, где в центре находится желтый цвет, а по бокам — меньшее количество красных, зеленых и синих волн. У звезд с протопланетными дисками есть вторая, меньшая колоколообразная кривая, которая достигает пика в инфракрасном диапазоне, который мы видеть не можем, но который фиксирует детектор телескопа. Это отдельная полоса непрерывного излучения, которая соответствует чему-то с температурой в сотни градусов. Такой спектр говорит о наличии двух источников энергии: самой звезды с температурой в тысячи градусов и чего-то теплого и обширного вокруг нее — окружающего ее пылевого диска,

который подогревается излучением звезды, мощными столкновениями и распадом радиоактивных элементов.

Наблюдать звезды в инфракрасном диапазоне непросто. Трудность состоит в том, что мы живем внутри атмосферного покрывала Земли, нас затопляет его тепловая энергия и мы должны смотреть через эту пелену. Тогда как основные составляющие атмосферы азот (N_2) и кислород (O_2) по большей части прозрачны для инфракрасного излучения, вода (H_2O) эффективно поглощает такие лучи, как и углекислый газ (CO_2), и метан (CH_4). Более того, земля вокруг телескопа теплая; теплым остается и купол, и сам астроном, и воздух; все это сияет инфракрасным излучением (именно за счет этого работают камеры ночного видения). Сам детектор нужно охладить до температуры жидкого азота, чтобы он стал достаточно темным в инфракрасном диапазоне и смог зафиксировать хоть что-то. Из-за всех этих сложностей, а также из-за того, что надежные инфракрасные астрономические приборы не существовали почти до самого конца прошлого века, мы четко и однозначно обнаружили теплые диски вокруг звезд только в 1980-х гг.³⁷ Это дало основания для осторожного оптимизма, что вскоре будут открыты системы экзопланет.

Высотные обсерватории, такие как Комплекс инфракрасного телескопа NASA (Infrared Telescope Facility, IRTF) на вершине вулкана Мауна-Кеа на Гавайях, позволяют нам выглядывать наружу через *атмосферные окна* в непрерывном излучении — длины волн, где вода и углекислый газ в какой-то мере прозрачны для инфракрасных лучей. Конечно, лучше всего заниматься инфракрасными наблюдениями в космосе, высоко над теплой, поглощающей излучение атмосферой и подальше от крупных излучающих объектов. Для этого был создан космический телескоп «Джеймс Уэбб» стоимостью 10 млрд долларов, который

будет запущен в космос в 2021 г. Это инфракрасный телескоп со складываемым зеркалом диаметром 6,5 м, имеющий чувствительность от видимой области спектра до волн длиной 28,5 микрометра. Чтобы выполнять свою работу, телескоп должен выйти на орбиту в 1,5 млн километров от сияющей теплом Земли.

С теми же затратами можно было построить на Земле телескоп видимого диапазона с зеркалом в пять раз больше, использующий современные технологии адаптивной оптики, чтобы все изображение получалось в фокусе. Разрешение было бы в пять раз лучше, чувствительность в сто раз выше, комплекс было бы куда легче обслуживать, а данные передавались бы по проводам. Но в таком случае все равно не удалось бы увидеть формирующиеся планеты, потому что они заметны только в инфракрасном свете. Отдельные полосы поглощения в инфракрасном диапазоне также расскажут о химии образующейся планеты, то есть, заглядывая вперед, о том, каким будет состав ее почвы и атмосферы. Та же самая чувствительность к поглощению молекулами воды и углекислого газа в земной атмосфере, которая делает инфракрасные наблюдения такими сложными, делает их и очень ценными.

Первоначально заветной мечтой исследователей молодых звезд было сфотографировать планету, находящуюся на стадии формирования. Теперь это уже сделано для нескольких соседних планет, массивных горячих тел в глубине комковатого диска. Большой атакамский миллиметровый комплекс (Atacama Large Millimeter Array, ALMA) состоит из десятков отдельных телескопов с зеркалами диаметром от семи до двенадцати метров (размером с бассейн на заднем дворе). Эти телескопы установлены на мобильных платформах и занимают несколько квадратных километров на пустынном высокогорье в северном Чили³⁸. На снимках ALMA отчетливо видны вложенные одно в другое кольца вокруг

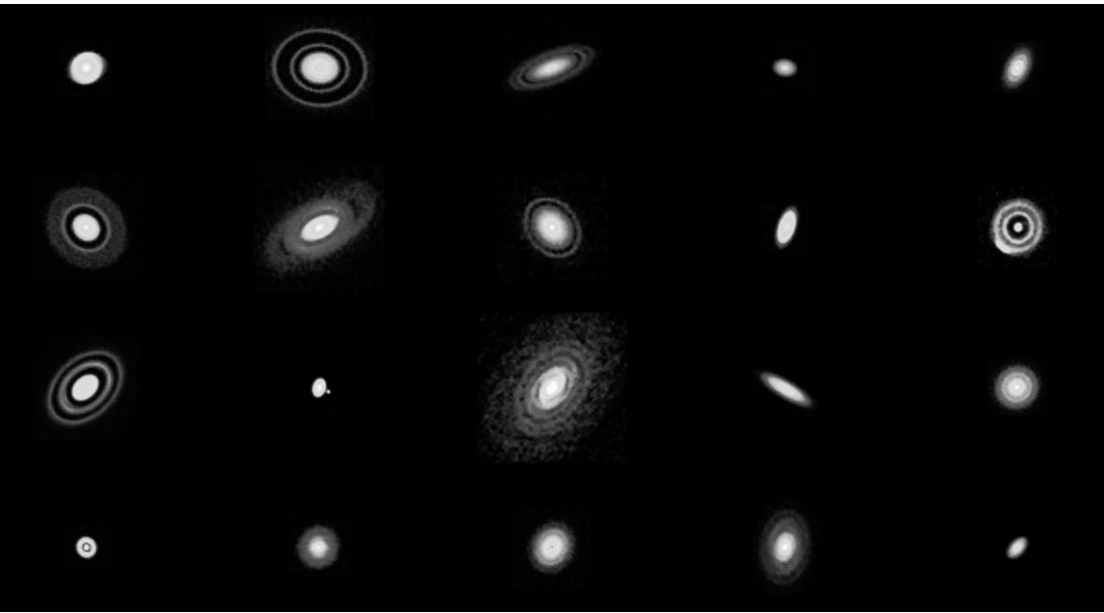
звезд, щели в дисках и другие структуры, которые указывают на присутствие обращающихся вокруг звезды массивных планет, разгоняющих газ и пыль по отдельным полосам. Аналогичный снимок землеподобной планеты — дело отдаленного будущего. Возможно, для этого потребуются еще несколько десятков лет и целая флотилия космических телескопов, расположенных на обширном участке космоса в виде напоминающей ALMA *формации с большими расстояниями между устройствами.*

Доказательства существования экзопланет появились еще в 1990-е и в основном базируются на двух популярных методах. Первый — обнаружение трудноуловимого гравитационного влияния, которое массивная планета оказывает на свою звезду. Любой из очень распространенных «горячих Юпитеров» — небесных тел, равных по массе Юпитеру, но обращающихся по орбите ниже Меркурия, — заставляет свою звезду совершать небольшие круговые движения с частотой в несколько недель или месяцев. Когда звезда обращается вокруг такого «барицентра», она в течение полугода приближается к наблюдателю, а в следующие полгода удаляется (имеется в виду, разумеется, планетный год). В ее излучении появляется небольшое периодическое красное/синее смещение, напоминающее красное смещение галактик, только намного, намного, намного слабее. Иначе говоря, эти вихляния звезды становятся причиной небольшого доплеровского сдвига спектральных линий, который могут зафиксировать только наиболее чувствительные методы измерения³⁹. Это дает нам *лучевую скорость звезды*, потому что мы измеряем скорость ее движения либо к нам, либо от нас и вычитаем из этого значения скорость орбитального движения Земли вокруг Солнца в момент наблюдения.

Другой метод описать проще: это поиск прохождений (или транзитов), когда планета оказывается перед звездой,

делая ее свет более тусклым. Первоначально было трудно доказать, что такие колебания яркости указывают на существование экзопланет, поскольку звездные пятна иногда выглядят почти так же, но теперь наблюдения прохождений обеспечивают основной массив данных для открытия и исследования экзопланет. Астрономия звездных транзитов пережила расцвет в 2010-е гг., во время работы космического телескопа «Кеплер», на протяжении более пяти лет использовавшего 95-мегапиксельную камеру для постоянного наблюдения за 150 000 звезд. Фиксируя моменты, когда их свет тускнел и снова разгорался, «Кеплер» обнаружил многие тысячи затмевающих свои светила планет.

Когда я учился в магистратуре в 1980-е гг., я в основном занимался теорией, но помню, как астрономы целыми ночами пропадали у телескопов в близлежащих горах, а их режим дня был перевернут с ног на голову. Но, несмотря на все это веселье, в науке царил консервативный скептицизм: никто не хотел с уверенностью заявлять, что нам удастся доказать существование экзопланет — ведь ничто не известно заранее. (Нечто подобное происходит и сегодня, когда никто не спешит делать заявления о существовании разумной жизни где-либо еще во Вселенной, хотя многие ученые полагают, что это так.) Косвенных признаков было немало, особенно доказательств наличия газово-пылевых дисков, что согласуется с теоретическими моделями планетообразования. Кажется, все понимали, что момент истины вот-вот наступит. Шли годы. Наконец, в 1995 г. было объявлено о равной по массе Юпитеру планете, обращающейся с периодом в четыре дня вокруг 51 Пегаса, солнцеподобной звезды примерно в 60 световых годах от Земли⁴⁰. Обнаружение вихляния этой звезды стало первым несомненным успехом метода фиксации колебаний лучевой скорости. За следующие пять лет был накоплен достаточный массив данных



Двадцать изображений протопланетных дисков, полученных Большим атакамским миллиметровым комплексом.

ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), S. Andrews et al.; NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello

о наблюдениях, чтобы команды ученых со всего мира смогли обнаружить еще десятки экзопланет. Плотины рухнула.

Сегодня известно до 4000 планет — так много, что мы уже не успеваем подробно изучить каждую из них. Для этого нам просто не хватает телескопов⁴¹. Несколько десятков этих новых планет находятся в *зоне обитаемости* — области, где при удачном составе атмосферы на поверхности планеты может присутствовать жидкая вода и, соответственно, если сложатся все остальные условия, возникнуть жизнь. А если принять во внимание океанические миры, подогреваемые приливными силами и обращающиеся вокруг газовых гигантов (самым известным среди них является Европа), зона

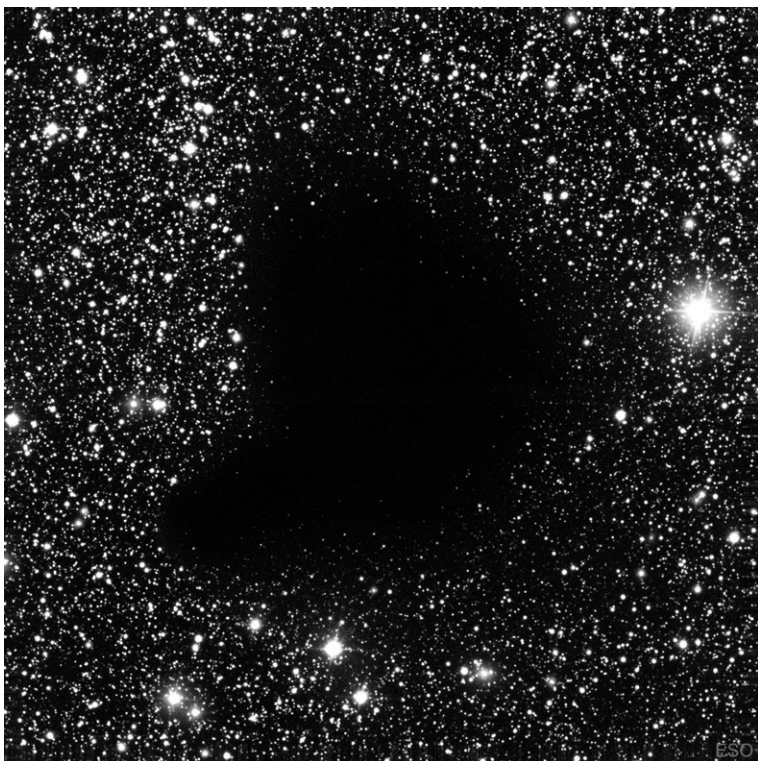
обитаемости может простираться так далеко, как встречаются планеты-гиганты.

Если все пойдет хорошо, космический телескоп «Джеймс Уэбб» охарактеризует десятки пригодных к обитанию планет. Он не сможет получить их детальные изображения, но зафиксирует признаки существования спутников и смены сезонов, ледяные массы, растущие зимой и тающие летом, а также изменчивый облачный покров. Спектроскопические характеристики дадут нам представление о составе атмосферы, к примеру, о наличии в ней молекулярного кислорода, который может быть признаком наличия сложной жизни.

Мы не получим об этих экзопланетах такого же четкого представления, как о Луне, Марсе или Сатурне, пока спустя сотни лет не пошлем к ним роботизированные космические аппараты. Но данные о спектральных характеристиках нескольких десятков наших ближайших соседей в видимом и инфракрасном диапазоне должны появиться у нас довольно скоро. Из этих данных мы узнаем состав их атмосферы, характер погоды и общую картину геологии их поверхности. Покрыты ли они океанами? Есть там континенты или ледовые щиты? Два десятка лет после запуска телескопа «Джеймс Уэбб» будут очень бурными, и новых гипотез будет в избытке. Возможно, к 2050-м гг. размещенная в строгом порядке группировка космических телескопов, действующая как один гигантский телескоп диаметром в десятки километров⁴², позволит нам получить изображения второй Земли, или двух, что будет сравнимо с первыми изображениями Марса в 1880-х гг. или Плутона в 1980-х; быть может, это подтолкнет нас к тому, чтобы послать туда первые непилотируемые экспедиции. У нас впереди долгий путь, но для того, чтобы существенно продвинуться по нему, потребуются уже десятилетия, а не века.

Для создания планет, с разумными существами или без, требуется нечто большее, чем правильные химические элементы. Эти элементы должны присутствовать в правильных пропорциях для синтеза правильных молекул. Поэтому давайте вернемся к широкой панораме молекулярного облака, состоящего из водорода, гелия и других газов, из крошечных частиц льда и пыли, — облака, которое стало зародышевым скоплением множества звезд, в том числе нашего Солнца. От взрывающихся неподалеку сверхновых по пространству расходились ударные волны, которые запускали в молекулярном облаке процесс коллапсирования, а также наполняли его звездной пылью — строительным материалом для будущих планет. Остывая и сжимаясь, облако распалось на сотни сгустков, после чего гравитация стянула каждый сгусток в новую звезду⁴³.

Любые, кроме водорода и гелия, элементы, которые обнаруживаются внутри звезды (или галактики, или молекулярного облака, или чего-то еще), астрономы называют *металлами*. Они говорят о *металличности* звезд — это понятие отражает, как много полезных материалов доступно там для создания землеподобных планет⁴⁴. То, что любой элемент тяжелее водорода и гелия называется металлом, связано с тем, что при спектроскопии Солнца и соседних звезд легко вычислить соотношение содержания железа и водорода. Звезды кажутся голубыми, красными, желтыми или имеющими какие-то промежуточные оттенки, но, если в фокус телескопа поместить спектрометр — то есть по сути очень совершенную призму, — вы увидите целый лес узких темных промежутков, которые называются *спектральными линиями поглощения*. Они были открыты Сесилией Пейн-Гапошкиной и другими астрономами в 1920-е гг. и сообщают нам об обилии внутри звезды тех или иных элементов, поскольку



Компактное, полное пыли молекулярное облако Барнард 68 протяженностью в половину светового года и массой примерно вдвое больше массы Солнца. Оно находится на пороге гравитационного коллапса и через сотню тысяч лет превратится в одну или несколько звезд.

FORS/VLT/ESO

возникают, когда атомы поглощают волны определенной длины из непрерывного спектра фотонов, которые пытаются вырваться из глубоких слоев звезды. Если непрерывный спектр можно сравнить с нотами, издаваемыми тромбоном, то линии поглощения блокируют волны определенной длины, создавая свой тембр для каждого элемента.

Чем четче линии поглощения, тем больше концентрация данного атома в фотосфере. В предположении, что солнечное

вещество хорошо перемешано, в его состав по массе входит 73,9% водорода, 24,7% гелия и 1,4% других элементов, в основном кислорода (1%) и углерода (0,3%). Нам известна концентрация еще десятков элементов, а всего их там обнаружено более 60. Если внести поправку на атомную массу, мы получим, что более 90% атомов Солнца — это атомы водорода; аналогичным образом, соотношение числа атомов С и О составляет 0,55⁴⁵.

Химический состав примитивных метеоритов близок к составу Солнца. Если на одной оси откладывать средние содержания элементов, обнаруженных на Солнце, а на другой — элементов, найденные путем масс-спектрометрического анализа таких примитивных метеоритов, как Альенде и Оргей, то в итоге получится более-менее прямая линия. Если не учитывать газы и другие элементы, которых в метеоритах просто не может быть, то соответствие будет один к одному (то есть состав идентичен) с несколькими резко отличающимися значениями. Каждый такой выпадающий элемент вместе со своими изотопами сообщает нам нечто важное и о происхождении метеоритов, и о том, как звезды обзавелись планетами.

Если водород и гелий (H, He) — строительный материал для звезд, а кремний, магний, железо и кислород (Si, Mg, Fe, O) — основные компоненты каменистых планет, то углерод, водород, кислород, азот (C, H, O, N) и понемногу еще нескольких других элементов составляют любую пригодную для жизни среду. Поэтому теперь мы сосредоточимся на углероде и кислороде, третьем и четвертом по распространенности элементах во Вселенной. Оба являются типичными продуктами идущего внутри звезд термоядерного синтеза, в частности так называемого CNO-цикла. Возможно, что углерод производят все звезды, а кислород — преимущественно взорвавшиеся на первом этапе гиганты; если это

так, то соотношение углерода и кислорода во Вселенной в целом растет. Но сейчас звезды вокруг нас обычно содержат примерно в два раза меньше атомов углерода, чем кислорода. Такое же соотношение характерно и для Солнца.

При таком соотношении, когда гигантское газовое облако остывает, Н и Н становятся H_2 (самая распространенная молекула), С и О превращаются в СО (самое распространенное *соединение*), а затем появляются CO_2 , CH_4 , NH_3 , HCN и все прочие CHON-штуки, которые в конце концов конденсируются во льды. После завершения этих реакций основная часть углерода уже израсходована, но остается много свободного кислорода. Как уже говорилось во введении, кислород создает *характерные для* землеподобных планет *оксиды*. Один из таких оксидов — вода (H_2O), второе по распространенности соединение во Вселенной. Далее идут минералы, которые составляют кору и мантию землеподобных планет, такие как кварц (SiO_2), оливин ($(Mg, Fe)_2SiO_4$) и тому подобное. Мы называем их силикатами, но важнейший элемент в их составе — это кислород, а не кремний (Si), потому что, как это ни странно, образование силикатов ограничено доступностью именно кислорода. Когда кислород кончается, прекращается образование и горных пород, и воды.

Кислород — ключ ко всем этим земным активам. Но что происходит вокруг тех немногих звезд⁴⁶, в которых соотношение С и О гораздо выше? Настоящая катастрофа! В таком случае углерод связывает в молекулы СО и CO_2 *весь* кислород. В условиях изобилия свободного углерода и отсутствия свободного кислорода, необходимого, чтобы появились горные породы и вода, из чего же сделаны их планеты? Планеты-гиганты по-прежнему будут состоять из газообразных водорода и гелия, но под черными графитовыми облаками, из которых льются алмазные дожди.

«Каменистые» планеты выглядят там еще более странно. Вместо силикатов там будут карбиды, карбонаты и твердый углерод, а вместо воды — углеводороды, такие как метан и пропан (CH_4 и C_3H_8). *Карбидная планета* размером с Землю имела бы большое металлическое ядро, а вокруг него — мантию из карбидов кремния вместо оксидов кремния (например, SiC вместо SiO_2). Поверх мантии находилась бы кора из твердого углерода — в форме графита в верхних слоях и сжатого до алмаза на глубине около 10 км.

Потрясающее зрелище: при образовании в плитах такой коры⁴⁷ складок и разломов, на планете вырастали бы сверкающие алмазные горы! Эрозия графита под действием углеводородных дождей создавала бы в мутном свете звезды поразительные композиции из прозрачных кристаллов, разделенных черными полосами. Вы могли бы жить там в наполненной светом пещере, напоминающей Крепость Одиночества из комиксов про Супермена, — нужно было бы только герметизировать ее и наполнить пригодным для дыхания воздухом. Но вне вашей алмазной пещеры планета оставалась бы холодной и ядовитой. Углеводороды, льющиеся дождем с задержанного смогом неба, циркулировали бы там в атмосферно-гидрологическом цикле, как вода на Земле, создавая океаны, озера и могучие реки.

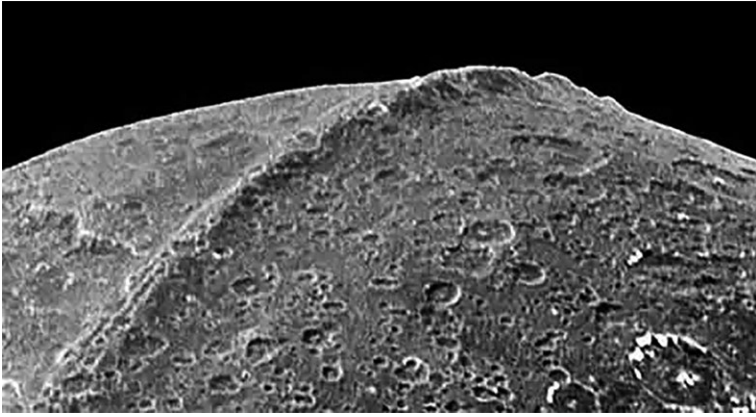
Если бы активная геология расколола алмазную мантию, на такой планете появился бы узор из глубоких углеводородных океанов. Там, возможно, образовались бы рифтовые долины, где могли бы возникнуть невероятные формы жизни, использующие в качестве растворителя вместо воды метан и пропан. А если процесса горообразования, такого как тектоника плит, не начнется, в результате получится полностью покрытая океаном планета, где на глубине в несколько километров будет темнеть мягкое графитовое дно, нежный черный ил, в котором морские скаты и трубчатые

черви заживут припеваючи среди пузырящихся подводных вулканов. Мечты, мечты.

Как бы невероятно это ни звучало, возможно, аналог среды, основанной на углероде, находится на поверхности окутанного смогом спутника Сатурна — знаменитого Титана. Его вполне можно считать планетой в своем праве, поскольку он в десять раз массивнее Плутона. На Титане углеводородные моря лежат поверх коры из водяного льда, формирующей крупные континенты. Но он не является карбидной планетой в полном смысле этого слова. Под метаново-этановыми морями и корой из водяного льда лежит глобальный водный океан, который, как считается, нагревается приливным действием Сатурна из-за эксцентриситета орбиты спутника.

На почти лишенной кислорода поверхности Титана тем не менее идут метановые дожди, которые создают напоминающий живописные послеледниковые ландшафты Земли рельеф, испещренный сотнями озер с изрезанной береговой линией. Некоторые из них тянутся на сотни километров и богаты островами и заливами.

Титан имеет приблизительно тот же диаметр, что и самые крупные спутники Юпитера Ганимед и Каллисто, — около 5000 км, примерно как Меркурий. Если Юпитер и Сатурн — типичные газовые гиганты с типичным соотношением содержания С и О, тогда их крупнейшие спутники рассказывают нам, как может происходить формирование подобных небесных тел по всему космосу. Тем не менее тут явно есть кое-что, чего мы не понимаем. Несмотря на практически тот же размер и объемную плотность, Титан почти по всем геологическим параметрам отличается от Каллисто и Ганимеда. Каллисто — холодный мертвый шар из льда



Геология на что-то намекает. Горный хребет высотой 20 км опоясывает по экватору ледяной спутник Сатурна Япет, имеющий диаметр 1500 км и прозванный «гречким орехом». Все теории о механизме формирования этих гор отдают безумием, но либо одна из них верна, либо все они недостоаточно сумасшедшие.

NASA/JPL

и горных пород, который никогда не прогрелся до такой степени, чтобы пережить гравитационную дифференциацию, тогда как Титан ближе всех известных нам небесных тел подошел к тому, чтобы считаться землеподобной гидросферной системой.

Это только первая из геологических странностей вокруг Сатурна. Ближе, чем Титан, обращаются пять спутников среднего размера с диаметром от 300 до 1400 км; некоторые из них состоят из чистого льда, другие — наполовину из горных пород, а сверху покрыты льдом. Энцелад — один из самых маленьких, но на нем бьют гейзеры, которые указывают на наличие в его глубине океана из богатой аммиаком воды. За Титаном есть еще два спутника — Гиперион и Япет, которые состоят по большей части из льда. Гиперион похож на стершийся шарик пемзы. Пожалуй, больше других мне нравится Япет — вполтину меньше Луны, он

обращается по далекой наклонной орбите и почти целиком состоит из водяного льда. Он опоясан экваториальным горным хребтом высотой в 20 км. Одна половина Япета сияет белизной, а другая — угольно-черная.

Если оставить в стороне их необыкновенную геологию и общую странность, больше всего в этих спутниках среднего размера озадачивает то, что у Юпитера таких нет. У него есть четыре галилеевых спутника, три из которых обращаются в резонансе, и какие-то обломки. Теперь поищем разгадку этого факта.

Как у двигателя внутреннего сгорания, который при холодном запуске иногда дает обратную вспышку, у молодого Солнца первые несколько миллионов лет случались нерегулярные всплески высокой активности. Звезды, проходящие через эту стадию развития, называются звездами типа Т Тельца по названию хорошо изученной активной звезды в соответствующем созвездии. Пройдя этап родовых мук, звезды в конце концов подчиняются правилу, в соответствии с которым самые тяжелые и яркие из них становятся голубыми, огромными и очень горячими, тогда как маленькие — красными, прохладными и тусклыми. Если нанести все известные звезды на график, где слева будут голубые звезды, справа — красные, внизу — тусклые, а сверху — яркие, они в основном выстроятся вдоль линии, идущей из верхнего левого угла в правый нижний. Эта линия называется *главной последовательностью*, и желтое Солнце находится прямо посередине нее. Также у главной последовательности есть множество исключений, а также ответвлений, где пребывают молодые звезды, еще не развившиеся до главной последовательности, и старые звезды, уже покинувшие ее.

Солнце, весьма рядовая звезда, испускает свои тепло и свет практически с неизменной силой на протяжении 4,5 млрд лет. Оно не такое маленькое, как красные карлики, которые горят исключительно экономно. Но и не такое большое, чтобы сгореть за 10 млн лет, как это происходит с голубыми гигантами, которые становятся сверхновыми. Наше Солнце — хорошая звезда, и у нас в баке еще достаточно горючего. Его светимость постепенно увеличивается, поднявшись примерно на четверть с момента зарождения, что слегка сдвинуло его по главной последовательности, но никаких других претензий ему не предъявишь. Разумеется, мы время от времени сталкиваемся с корональными выбросами массы, когда Солнце извергает магнитоэлектрический пузырь и окатывает нашу планету потоками излучения⁴⁸. Но по сравнению с тем, что происходит в других планетных системах, эта активность вполне безобидна.

Но так будет не всегда. Примерно через 5–7 млрд лет для нас начнутся «сумерки богов», последняя смута, в ходе которой планеты сойдут со своих орбит. Покинув главную последовательность, Солнце станет красным гигантом и за несколько миллионов лет поглотит Меркурий, Венеру и, возможно, Землю. Затем оно сожмется, выбросив в пространство половину своей массы. Астрономы с соседних звезд смогут наблюдать в своем небе «новую», расширяющуюся оболочку сверкающего газа, которая исчезнет через несколько тысяч лет. Солнце перестанет удерживать внешнее облако Оорта, тела которого отправятся странствовать по межзвездному пространству как космические призраки. То, что останется от звезды, будет сжиматься, пока она не станет *белым карликом*, чрезвычайно плотным телом, сияющим белым светом благодаря своей гравитационной энергии, — едва живым, но ярким, размером с Землю, но в миллиард раз тяжелее. Мы полагаем, что такова судьба нашей Солнечной

системы, отчасти потому, что Солнце — обычная звезда, и мы наблюдаем множество примеров таких звезд на различных стадиях эволюции, а отчасти, поскольку наше теоретическое понимание таких процессов шагнуло далеко вперед и хорошо согласуется с результатами наблюдений.

После того как расширение красного гиганта закончится и Солнце станет белым карликом, планеты, астероиды и другие остатки внутренней Солнечной системы начнут падать на него по спирали — сначала из-за торможения в газе, а потом из-за действия приливных сил, — пока сверхплотные остатки звезды не разнесут планеты в клочья одну за другой. В конце останется диск из землеподобных материалов, в основном состоящий из сорванных мантий Земли и Венеры, который по спирали будет опускаться на разрушенную звезду. Это не просто фантазия: астрономы видят эту картину в спектроскопических показателях нескольких соседних «загрязненных белых карликов», где формирующие горные породы элементы — магний, железо, кремний, кислород — присутствуют в атмосфере звезды в количествах, соответствующих составу минералов из класса силикатов, таких как оливин. Это последнее напоминание о землеподобных планетах прошлого.

Планеты, которые формируются вокруг куда более крупных по сравнению с Солнцем звезд, ждет не такая интересная судьба. Массивные звезды горят при температуре в сотни миллионов градусов, потребляя водород, гелий, углерод, азот, кислород и кремний в ходе бурного термоядерного синтеза. Продуктами этих реакций становятся все более тяжелые элементы, пока звезда не достигает критического состояния и не взрывается как сверхновая, разбрасывая свои внутренности по округе диаметров в несколько световых

лет и при этом образуя почти все тяжелые элементы. Вопрос о будущем планетной системы, которая могла сформироваться вокруг нее, превращается в риторический.

Сейчас все взоры устремлены на Бетельгейзе — яркую звезду, образующую левое плечо созвездия Ориона. От Земли ее отделяют 600 световых лет, то есть она находится не слишком далеко, но, к счастью, и не среди наших ближайших соседей. Масса Бетельгейзе в восемь раз больше солнечной, а возраст по эволюционным моделям составляет примерно 10 млн лет. В течение пары недель взрыв этой звезды по яркости будет сравним с сиянием Луны, а затем начнет тускнеть; если это не произвело на вас впечатления, то имейте в виду, что с расстояния в 1 а. е. это все равно что наблюдать взрыв водородной бомбы в соседнем дворе. На протяжении геологического времени сверхновые взрывались и гораздо ближе к Земле, облучая нашу планету и иногда приводя к массовым вымираниям на ней, но ни одна из ближайших к нам звезд сейчас взрываться не собирается. «Зона поражения» для этого типа сверхновых — от 25 до 50 световых лет, так что Бетельгейзе не представляет для нас угрозы.

Поскольку она находится относительно недалеко и имеет гигантские размеры, эта звезда — первая, которую нам удалось в деталях разглядеть в телескоп. Хотя качество изображений оставляет желать лучшего, они показывают, что Бетельгейзе представляет собой сфероид странной неправильной формы, напоминающей частично сдутый воздушный шарик, который совершает один оборот вокруг своей оси за 30 лет. Мы видим огромный плюмаж или деформацию⁴⁹, возможно вызванную глобальной тепловой неустойчивостью. Кажется, она в самом деле готова взорваться в любой момент. Но, по правде говоря, для того чтобы кто-либо из нас имел шанс увидеть свет этого события, Бетельгейзе



Первый в истории атомный взрыв, произведенный в 1945 г., был в 1030 раз слабее взрыва сверхновой. Этот снимок был сделан Гарольдом Эджертоном через 1/1000 секунды после детонации с помощью изобретенной им высокоскоростной фотокамеры с выдержкой 0,0000001 секунды. Деревья юбки позволяют оценить масштаб.

MIT Museum, Edgerton Digital Collections

должна была разлететься в клочья еще во времена Кеплера и Шекспира.

Когда взрывается массивная звезда, двери ее химической кухни сносит с петель. Пепел из термоядерного очага разлетается во все стороны, так что гелий, углерод, азот, кислород, кремний, магний, железо, никель и другие продукты синтеза распространяются со скоростью сотен километров в секунду. По ходу движения эти атомные ядра, достигающие максимальной массы в 60 атомных единиц, подвергаются массивной бомбардировке потоком высокоэнергетических нейтронов (частиц, по массе равных протонам,

но без электрического заряда), исходящим из коллапсирующего звездного ядра. Время от времени нейтрон, сталкиваясь с ядром атома, присоединяется к нему; в результате всего этого взрыв сверхновой сопровождается быстрым синтезом более сложных элементов, которые считаются необходимыми для существования жизни, а также многих радиоактивных. У некоторых таких изотопов период полураспада составляет всего лишь секунды, другие, такие как ^{60}Fe и ^{26}Al , распадаются примерно за тот миллион лет, который заняло формирование нашей протопланетной туманности, а третьи, скажем ^{238}U , ждет долгий жизненный путь: они обеспечивают геологический подогрев на протяжении миллиардов лет⁵⁰.

Вот что произойдет, когда Бетельгейзе взорвется. За секунду ее ядро сожмется до размеров нейтронной звезды — объекта настолько плотного, что чайная ложка его вещества весит миллиард тонн, — и, возможно, станет черной дырой. В этот же момент Бетельгейзе извергнет примерно 10^{57} нейтрино, которые уносят энергию так быстро, что ударная волна разорвет звезду на части. Это будет напоминать взрыв атомной бомбы, но в триллионы раз сильнее. Для наблюдателей с Земли яркость Бетельгейзе будет нарастать в течение нескольких дней, пока звезда не зальет светом свой участок неба. В следующие пару недель она будет тускнеть, а затем расплзется в светящуюся туманность газового облака, облучаемого компактным чудовищем в его центре.

Сверхновые бледнеют по сравнению со взрывами *килоновых*, которые случаются, когда две нейтронные звезды попадают в ловушку взаимного притяжения и по спирали приходят к столкновению⁵¹. Эти два тела уже и так немислимо плотны — каждое имеет массу Солнца, утрамбованную в объем 10-километрового астероида, — поэтому их слияние вызывает гравитационные волны, рябь в структуре

пространства и времени. Давно предсказанные гравитационные волны были впервые зафиксированы в 2015 г. с помощью стоящего миллиарды долларов прибора под названием LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, «Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория»)⁵². Позже, в 2017-м, гравитационная волна пришла с разницей в 1,7 секунды со всплеском гамма-излучения, зафиксированным совершенно другим прибором, — как удар грома и вспышка молнии.

Поразительно, что гравитационные и электромагнитные волны (то есть фотоны) шли через пространство и время миллиарды лет, причем вроде бы совершенно независимо друг от друга (гравитация и свет — это разные вещи), но тем не менее прибыли одновременно. Возможно, это тривиальное или предсказуемое явление, но лично для меня такая синхронность гравитации и света наполнила единство Вселенной глубоким смыслом. Взрыв килоновой миллиард лет назад в миллиарде световых лет кажется далеким ударом колокола, отзвук которого заставляет как никогда раньше почувствовать связь с теми, кто может существовать где-то в глубинах космоса. Это как смотреть на Луну, думая о своих любимых и помня, что они тоже ее видят.

ГЛАВА 2

КАМНИ В ПОТОКЕ

— А на чем стоит тигр? — спрашивает скептик.
— Он стоит на спине гигантского слона, — отвечает верующий.

— А на чем же стоит слон?

— Ну как же, он стоит на спине гигантской черепахи.

— Хорошо, а на чем стоит черепаха?

— Не умничайте, молодой человек! Там черепахи до самого низа!

И этот знакомый анекдот, и сама идея о бесконечной прогрессии черепах напоминает погоню за бесконечностью в парадоксе Зенона: стрела никогда не сможет достигнуть цели, потому что для этого ей надо преодолеть половину пути, а чтобы преодолеть половину, ей нужно преодолеть четверть — и так до бесконечности.

Наука выросла из любопытства, желания добраться до сути вещей — не просто узнать, на чем стоит черепаха, но определить, *есть* ли там вообще черепаха, пусть даже метафорическая, или нам нужно полностью переформулировать вопрос. Вот что Аристотель писал по поводу всего этого: «Поскольку любое доказательство должно исходить из уже известных положений и поскольку это обратное

движение должно когда-нибудь закончиться неопосредованными истинами, такие истины обязаны быть недоказуемыми»¹.

Обратное движение должно закончиться неопосредованными истинами. Эти слова емко выражают то, что можно было бы назвать западной верой в существование сути вещей, не нуждающейся в доказательствах, самоочевидной первоосновы, из которой становятся известными или выводятся все факты, — принципов природы, которые просто *есть*. При таком взгляде сверху вниз, роль науки состоит в том, чтобы узнать, на чем стоят черепахи, но иногда вместо черепах до самого низа обнаруживается, что нет никакого низа.

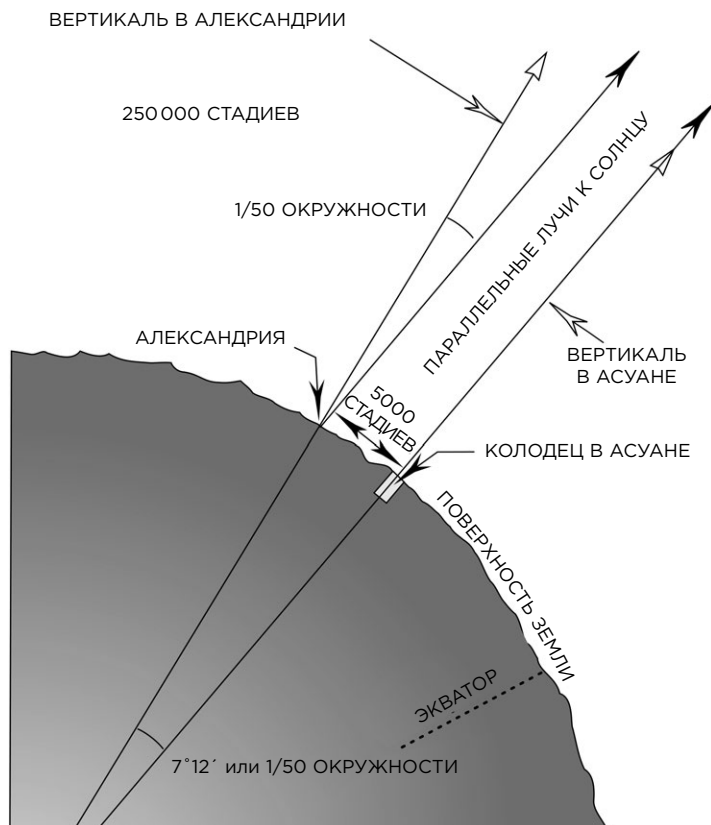
Идея, что Земля парит в пространстве без какой-либо поддержки черепах или тигров, впервые возникла у Анаксимандра, ученика Фалеса, который жил в VI в. до н. э. Более абстрактная или более физическая идея сферической Земли, каждая точка поверхности которой направлена вниз, или, что то же самое, внутрь, появилась позднее в том же веке у Пифагора Самосского, почти мифического титана науки и математики². Пифагор много путешествовал и основывал знаменитую школу, которую посещали ученые из ближних и дальних краев. Традиции глубокого знания сложились в древности и в Китае, Индии и Африке; Конфуций (Кунцзы) тоже имел тысячи учеников, но уделял куда меньше внимания вопросу о том, что же там, под черепахой.

К 350 г. до н. э. представление о шарообразной Земле было распространено достаточно широко, и Аристотель записал несколько доводов в его пользу. Он отметил, что тень Земли во время лунного затмения видна на Луне как часть круга, следовательно, Земля — это сфера или диск, а Луна отстоит от нее на много земных диаметров. Также он заметил,

что южные созвездия стоят в небе немного выше, если смотреть на них из южных стран: этот факт легко объяснить, если человечество обитает на поверхности шара.

Но насколько велик этот шар? Греки были активной нацией, которая обожала все записывать; также у них имелись широкие торговые связи, позволявшие им узнавать о том, что происходит в дальних странах, о чудесах света и прочих поразительных фактах. Одним из таких чудес был глубокий колодец в Асуане, городе в Южном Египте, на дне которого в полдень в день летнего солнцестояния не было тени, то есть Солнце находилось точно над головой³. В тот же самый момент в Александрии, расположенной в дельте Нила в Северном Египте, Солнце не стояло точно над головой: высокая колонна в центре города отбрасывала тень под углом в 7° . Глубокие колодцы должны быть вертикальными до доли градуса, иначе они обрушатся; высокие каменные колонны тоже должны стоять вертикально — иначе они упадут. Так в чем же дело?

Греческий философ Эратосфен, которого иногда называют первым географом, был главным библиотекарем легендарной Александрийской библиотеки⁴. Услышав о колодце, он рассудил, что и колонна, и колодец должны быть вертикальными, но относительно направления «прямо вниз», которое указывает в центр сферической Земли. Из времени, которое уходило у гонцов, чтобы добраться от Александрии до Асуана, он сделал вывод, что два города разделяет расстояние в 5000 стадиев (стадий — древняя мера длины, равная примерно 180–190 м; нам она известна как размер стадиона). Эти 900 км, по рассуждениям Эратосфена, соответствовали дуге в 7° на поверхности круглой Земли. Длина всей окружности соответствует 360° , то есть обхват Земли (число π , помноженное на диаметр) равен $360/7$ расстояния от Александрии до Асуана. (Градус — это, кстати,



Схематическое изображение полностью освещенного вертикального колодца в Асуане в тот же момент, когда высокая колонна в Александрии отбрасывает тень. Рисунок из Технического отчета 80-003 Военно-картографического управления США «Геодезия для неспециалистов».

USAF, 1959

изобретение вавилонян, их завораживала магия чисел 3, 20 и 60.) Эратосфен рассчитал диаметр Земли и получил (в современных единицах) 15 000 км, что достаточно неплохо согласуется с реальным значением в 12 700 км⁵.

В другом блестящем примере применения геометрии подобных треугольников Аристарх Самосский, живший в III в.

до н. э., использовал длительность лунного затмения — события, которое занимает несколько часов, — чтобы высчитать диаметр Луны. Диаметр Земли уже был известен. Таким образом, предположив, что Солнце находится гораздо дальше, он узнал диаметр тени, которую Луна должна пересечь во время затмения. Чтобы пересечь земную тень, Луне требовалось в четыре раза больше времени, чем краю земной тени на пересечение диаметра Луны. Таким образом, диаметр Луны равен четверти диаметра Земли — то есть примерно 3700 км, что практически идеально совпадает с реальным значением.

Угловой размер Луны в небе равен $0,5^\circ$. Также каждый час она проходит $0,5^\circ$ относительно неподвижных звезд, вращаясь вокруг Земли. Соответственно, за час она покрывает расстояние, равное своему диаметру. Из дальнейших простых измерений углов следует, что объект с угловым размером $0,5^\circ$ должен находиться на расстоянии 110 собственных диаметров от наблюдателя, каким бы этот диаметр ни был⁶. Поскольку диаметр Луны известен, мы можем вычислить расстояние от Земли до Луны (радиус лунной орбиты) — это 60 радиусов Земли. Снова потрясающая точность.

Но зачем останавливаться на этом? Греческие и китайские ученые понимали, что Луна не светит сама, как это делает Солнце, но отражает его лучи, обращаясь вокруг Земли. Тогда на каком расстоянии находится Солнце? Очевидно, на гораздо более значительном, чем Луна, но дальнейшие измерения довольно трудны. Аристарх понял, что если Солнце не бесконечно далеко, то первая и третья четверть Луны — два момента, когда она освещена ровно наполовину, — должны наблюдаться на угловом расстоянии чуть меньше 180° . И в самом деле, Луна выглядит в точности как буква D чуть раньше конца первой четверти лунного месяца и чуть позднее начала четвертой, но это едва заметное отклонение,

намного меньше 1° . Аристарх переоценил его, приписав ему значение в 3° , возможно полагая, что меньше оно быть не может; из этого он сделал вывод, что Солнце расположено в 20 раз дальше Луны. В действительности оно в 400 раз дальше.

Также Аристарх рассуждал, что звезды, чем бы они ни были, намного дальше Солнца, поскольку не демонстрируют никакого параллакса (видимого движения по небу) при обращении Земли вокруг Солнца. Если бы определенная звезда находилась от нас всего лишь в несколько сотен раз дальше, чем Солнце, ее видимое положение на небе ощущимо менялось бы при смене времен года, так же как ваза, стоящая на столике неподалеку, сдвигается относительно дальней стены, когда вы закрываете то левый, то правый глаз. Поскольку он не мог заметить параллакса ни одной звезды, он решил, что они, должно быть, в тысячи раз дальше Солнца, и практически дошел до предела возможного.

Наконец, если Солнце, как считал Аристарх, в 20 раз дальше Луны, но Луна тем не менее полностью закрывает его во время затмения, то Солнце должно быть в 20 раз больше Луны. Он был прав по сути, но его оценки подкачали. Солнце на самом деле в 400 раз дальше и, таким образом, в 400 раз больше Луны. Иначе говоря, его диаметр составляет 109 диаметров Земли⁷. Это означает, что висящее далеко над нашей головой Солнце является центром целой системы планет. Луна обращается вокруг Земли, которая обращается вокруг Солнца вместе с Юпитером и всеми остальными планетами, и все это окружено звездами, которые находятся еще в тысячи раз дальше.

Все это было не домыслами, но *реальностью*, поскольку геометрия реальна, а исходные данные достаточно просты, чтобы их могли воспроизвести другие. Открытие, что Земля — гигантский шар, хотя и не слишком большой по сравнению с непостижимо далеким и гигантским

Солнцем, могло бы разрушить картину мира культуры, которая — пусть даже и формально — придерживалась представления о богах, живущих на горе Олимп в нескольких сотнях километрах к северу, и о Гелиосе, который везет Солнце в своей колеснице. Для большинства людей Земля оставалась плоской, небо было сверху, а внизу находился загробный мир пещер, подземных рек и лавы⁸. Солнце и Луна восходили и заходили, Луна меняла форму — и все тут. Как к современным теориям струн и темной материи, к этой новой физической космологии, если о ней вообще было известно, не нужно было немедленно формулировать отношение — за исключением, возможно, тех моментов, когда в небесах появлялась комета или полное солнечное затмение вызывало жуткую тьму. Тогда всем становилось не все равно.

Еще одним средиземноморским корифеем был Архимед из Сиракуз, живший в III в. до н. э., математик, физик и инженер, который много размышлял о бесконечности. Он знаменит изобретением устройства, названным впоследствии «архимедов винт», где огромный штопор вращается внутри цилиндра так, что благодаря его вращению вода поднимается вверх. (Архимед мог заимствовать идею этого приспособления у египтян; подобные устройства широко применялись в аграрных обществах.) Верный себе, он думал не об орошении полей; ученый решал проблему откачки воды из трюма построенного им роскошного военного корабля гигантского размера. Из-за своих не имевших аналогов в прошлом массы и водоизмещения «Сиракузия» дала течь, как только вышла в море.

Возможно на спор, Архимед однажды вызвался доказать, что число песчинок в мире не бесконечно. В восьми-страничном письме царю Сиракуз Гелону⁹ ученый приводит

краткое описание своего более подробного труда, ныне утраченного, в котором он нашел верхнюю границу количества песчинок, доказав, что их точно меньше этого предела. Это часто упоминаемое письмо получило название «Исчисление песчинок в пространстве, равном шару неподвижных звезд». Какой бы большой ни была Земля, она должна помещаться внутри Вселенной. Для определения размера Вселенной Архимед воспользовался работами Аристарха и пришел к выводу, что звезды находятся примерно в 10 млрд стадиев. Теперь он мог установить верхний предел количества песчинок, но существовала одна проблема — система исчисления для таких больших чисел еще не была изобретена!

Самым большим известным числом в те времена была мириада (10 000). В одном ведре песка уже содержится мириада мириад песчинок. Поэтому Архимеду пришлось придумать новый вид счета и изобрести *экспоненциальное представление* чисел, известное также и ученым доведической Древней Индии. Всегда найдется число, которое сколь угодно больше предыдущего: 100, 1000, 10 000... Экспоненциальная запись позволяет нам обозреть бесконечное, ограничить исчисляемое и охарактеризовать бесконечно малое.

Применение этого метода требует высокого уровня абстрактного мышления. Существа, неспособные на абстрактное мышление, воспринимают Вселенную в линейной последовательности — 1, 2, 3, 4, 5... Так мы считаем вещи и перемещаем свои тела сквозь пространство и время. Два километра, три километра. Восемь яблок. Девять яблок. Тиканье часов. (Хотя мы и измеряем время в экспоненциальных величинах — в секундах, минутах и часах, — однако свое движение сквозь него мы ощущаем, как линейное.)

Экспоненциальность порождает последовательности, которые неоднородны в пространстве и времени: два соседних числа в них разделяет постоянное *соотношение*,

а не постоянная разница. В последовательности 1, 10, 100, 1000 каждый член — это десять в степени 0, 1, 2, 3 (количество нулей). Экспоненциальность — это революционное понятие, без которого не могла бы существовать современная количественная наука. Вы можете охватить самое маленькое квантовое расстояние (планковская длина, $1,6 \times 10^{-35}$ м) и диаметр Вселенной (около 100 млрд световых лет, то есть 10^{27} м) всего 62 степенями десяти. Любой может сосчитать до 62.

Вооружившись этим новым способом работы с большими числами, Архимед приступил к своим расчетам. Насколько я могу судить, он возвел в куб свою оценку диаметра Вселенной, чтобы получить ее объем, и разделил его на объем песчинки¹⁰, чтобы получить абсолютный верхний предел количества песчинок — 10^{63} . Заметьте, Архимед не считал песчинки, а просто показал, что они исчислимы. Он признавал, что это не значит, что их можно сосчитать: это совсем другое. Всех песчинок на всех пляжах мира всего лишь несколько квинтиллионов, то есть порядка 10^{18} . В одном году 32 млн секунд, так что, если пересчитывать по 10 песчинок в секунду, потребуется 10 млрд лет. Земля и Солнце к тому времени исчезнут. Вам понадобятся миллиарды высокоскоростных пескосчетных машин, чтобы закончить работу до вашей смерти. Песчинки, как звезды в небе, исчислимы только в принципе, но это не делает их число бесконечным. Является ли это различие чисто философским — или же оно имеет решающее значение?

В духе соображения, что микроскоп — это телескоп, развернутый задом наперед, Архимед обратил свои рассуждения в обратную сторону, чтобы поразмыслить о бесконечно малых. Он решил парадокс Зенона, выяснив, что только то, что среди слагаемых есть бесконечно малые величины, не означает, что их нельзя сложить. Ученый доказал, что

$1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots + 1/2^n + \dots = 1$, поэтому Ахиллес догонит черепаху, а стрела попадет в дерево. Доказательства Архимеда были простыми и подкупали своей геометрической формой¹¹. Разделив квадрат на более маленькие квадраты, он доказал, что $1/4 + 1/16 + 1/64 + \dots + 1/4^n + \dots = 1/3$. Архимед вывел бесконечные ряды, которые дали лучшие на тот момент оценки числа π и кубического корня из 3 — оценки, лежащие в основе великих достижений техники, картографии и естественных наук. Только в эпоху Просвещения будут открыты более глубокие нюансы бесконечности, и в результате появится математический анализ, который значит для современной физики то же, что геометрия — для древних греков.

Геометрическая прогрессия продолжается до бесконечности в обе стороны: ... $1/64, 1/32, 1/16, 1/8, 1/8, 1/2, 1, 2, 4, 8, 16, 32$... Если вы движетесь влево, вы имеете дело со все меньшими числами, которые, однако, никогда не становятся нулем, а если вправо, то со все более огромными, которые никогда не становятся бесконечностью. Этот ряд называется степенями двойки; количество атомов во Вселенной составляет примерно 2^{76} , то есть число в 76 шагах вправо. Поскольку двоичные цифры («биты») могут быть представлены простыми двухпозиционными переключателями и все равно несут огромное количество информации, бинарная арифметика стала основой для современной электроники.

Геологи, пекари, строители и земледельцы также используют двоичные ряды, поскольку для нас естественно увеличивать вещи вдвое и делить их напополам, на четвертинки и так далее. Есть доски 2×4 и фанера 4×8 . Галлон — это четыре кварты, кварта — это две пинты, пинта — это две

полпинты, а полпинты — восемь унций. Чейн* — это четыре рода**; миля — восемь фуллонгов***. Булыжник — это фрагмент горной породы диаметром от 64 до 256 мм, галька — от 4 до 64 мм, а валун — от 256 мм и больше. Диаметр частиц песка — от 4 мм до 1/16 мм, а все что меньше — это пыль.

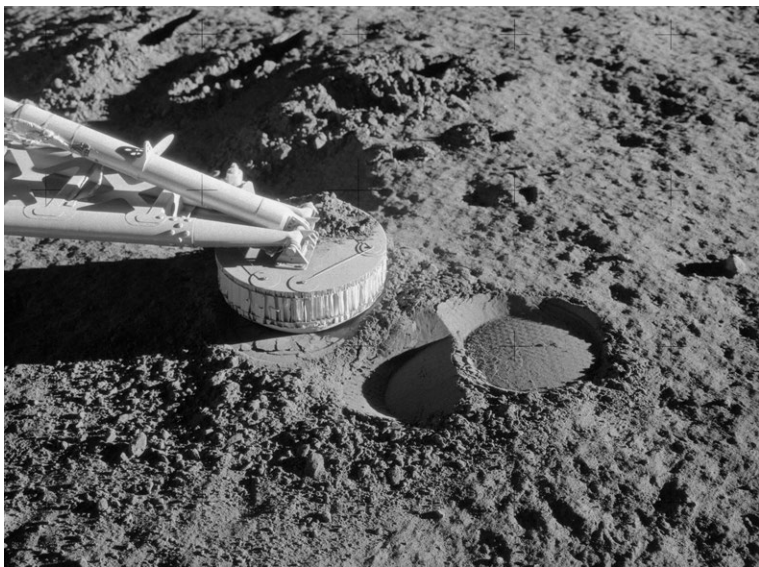
Просеивая песок с пляжа, вы получите немного мелкой гальки, сколько-то крупных и много-много мелких песчинок. До сих пор у нас наблюдается геометрическая прогрессия — но пыли там будет немного. В целом мы имеем постоянное соотношение числа песчинок, гальки и булыжников — скажем, каждое в 100 раз меньше предыдущего, — так почему же прогрессия обрывается? Отклонения от постоянного соотношения рассказывают нам геологическую историю. На пляже частицы самого мелкого песка и пыли уносятся водой, оставляя крупный песок, в который мы так любим закапывать пальцы ног; ил уплывает в море и оседает на самой глубине.

На лунной поверхности песка очень мало (хотя, когда вы просеиваете образцы, чтобы избавиться от всего, кроме частиц размером с песчинку, они оказываются невероятно интересными!) Верхние 10 м составляет вездесущий *реголит* — по большей части это тонкая пудра, магматическая силикатная пыль с диаметром частиц от 20 до 70 микрометров (примерно в десять раз меньше песчинки) плюс небольшая доля более крупных фрагментов и немного гравия. На Луне геометрическая прогрессия продолжается, пока материал не превращается в основном в пыль; в отличие от земного пляжа пыль образуется здесь гораздо быстрее,

* Устаревшая британская и американская единица длины, равная 20,1168 м. — *Прим. пер.*

** Неметрическая единица длины, применяемая в США и Великобритании, равная 5,0292 м. — *Прим. пер.*

*** Британская и американская единица длины, равная 201,168 м. — *Прим. пер.*



Фотография автоматического космического аппарата «Сервейер-3», совершившего посадку в Океане Бурь, сделанная Аланом Бином двумя годами позже. Обратите внимание на оставшийся после отскока отпечаток опоры и особенно на узор, сохранившийся в похожем на мелкую муку материале с высокой липкостью.

NASA/LPI

чем уносится прочь. Это происходит потому, что на Луне нет дождей и океанов, а ветер только солнечный, который и долбит песчинку за песчинкой. Поскольку там нет атмосферы, уничтожающей мелкие, очень многочисленные метеороиды, верхние несколько метров поверхности представляют собой в основном пыль.

Почти все наши знания о лунной поверхности почерпнуты из размеров и особенностей строения частиц грунта. Так как на Луне нет атмосферы, мелкий космический гравий врывается в поверхность на полной скорости, оставляя ямки размером с коробку для обуви; повторите это триллион раз — и вы получите размягченный грунт. И хотя

маловероятно, что такой метеорит попадет в какого-нибудь конкретного астронавта, будущие колонисты явно должны будут учитывать эту беспорядочную стрельбу из космоса.

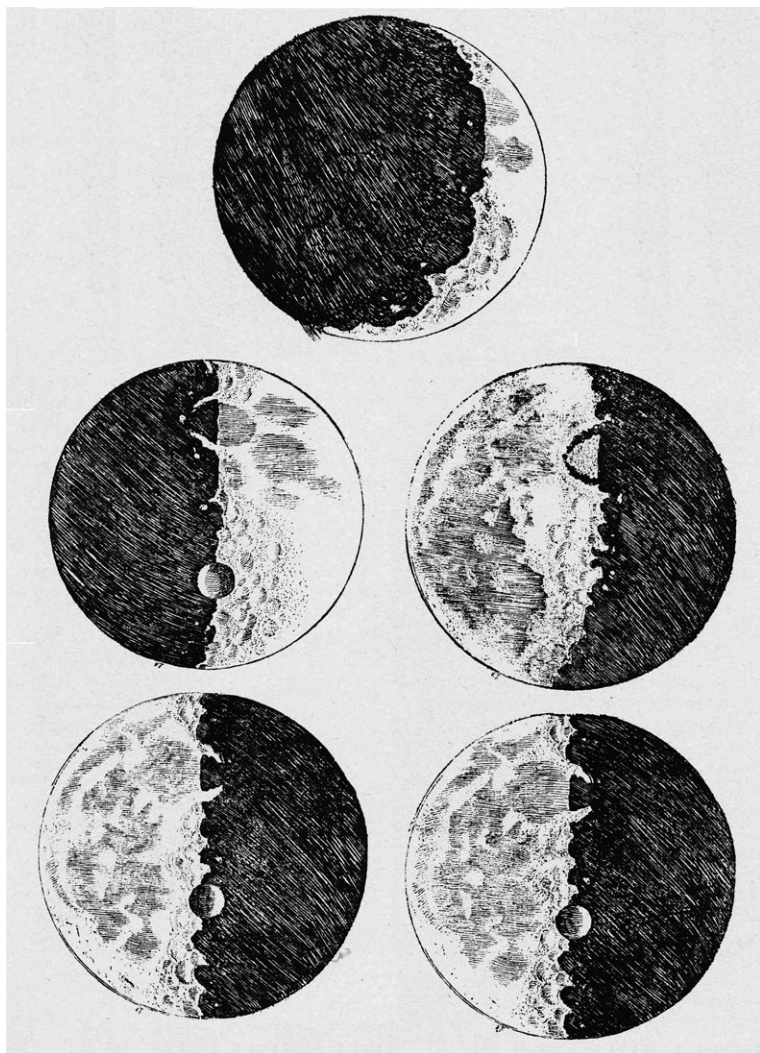
Термическое растрескивание под действием суровой смены дня и ночи также разрушает породу на поверхности Луны. Луна — пустыня, которая получает то же количество солнечного света, что и Земля. В отсутствие атмосферы и при двухнедельной продолжительности дня и ночи температура поверхности в некоторых регионах скачет туда-обратно на 300 °С: грунт то поджаривается, то замерзает. Нагреваясь, камни расширяются, а при охлаждении сжимаются, что вызывает тепловую усталость, из-за которой трескаются целые валуны. Одновременно метеориты размером с пылинку непрерывно дробят все в микроскопическом масштабе, сглаживая любые края и создавая тонкую лунную пудру. А солнечный ветер, в основном состоящий из оторвавшихся от Солнца ядер водорода и гелия, постоянно внедряется в этот порошок, меняя его физические и химические свойства: у ученых даже возникла идея собирать из него в будущем водород для лунных термоядерных реакторов¹².

До появления телескопов, в отсутствие каких-либо доказательств того, что ситуация обстоит иначе, некоторые философы представляли Луну как землеподобную планету с океанами и даже людьми. Темные, покрытые пятнами детали рельефа, едва видимые невооруженным глазом, провозгласили морями (на латинском *mare*) и дали им соответствующие названия, такие как Море Спокойствия или Океан Бурь. К тому времени, когда был изобретен телескоп, стало ясно, что эти моря являются равнинами, а никак не океанами. Это не подразумевало, что равнины должны быть

мертвыми — некоторые наблюдатели продолжали объяснять их темный цвет растительностью.

В 1610 г. Галилей впервые представил географию Луны в своем «Звездном вестнике» (*Sidereus Nuncius*). Но о лунной геологии первым нам рассказал английский ученый Роберт Гук. Каждый должен прочитать его книгу «Микрография» (*Micrographia*, 1665) или по крайней мере пролистать ее и зачитать вслух некоторые абзацы: это ставшая возможной после изобретения микроскопа и телескопа восхитительная чехарда всего, что удалось разглядеть благодаря этим чудесным приспособлениям. Она завораживает не только в том смысле, в каком этого можно ожидать от работы, написанной почти 400 лет назад. Гук описывает изготовление и применение своих самых совершенных на тот момент научных инструментов. Для работы с микроскопом ему требовалось выходящее на юг окно и большой сферический сосуд с водой для фокусирования лучей. Все это могло использоваться только в самые солнечные дни, когда на препараты падало достаточно света. Далее Гук с поистине мальчишеской радостью сообщает, что кончик швейной иглы в действительности довольно тупой! Он прилагает детальный рисунок вроде того, что современный третьеклассник мог бы сделать для выставки естественно-научного кружка. Гук подробно описывает анатомию водомеров и блох, снова сопровождая свои описания великолепными рисунками¹³. Он объясняет, почему уголь черный, и это не то, о чем вы подумали.

«Микрография» в основном посвящена открытиям, сделанным Гуком с помощью микроскопа, например «бесконечному разнообразию любопытных форм снежинок», а также некоторым размышлениям о физике («Эластичные свойства воздуха»). Но на нескольких заключительных страницах он рассказывает о своих недавних наблюдениях Луны с использованием «тридцатишестифутовой зрительной



Некоторые из первых зарисовок Луны, сделанные Галилеем.

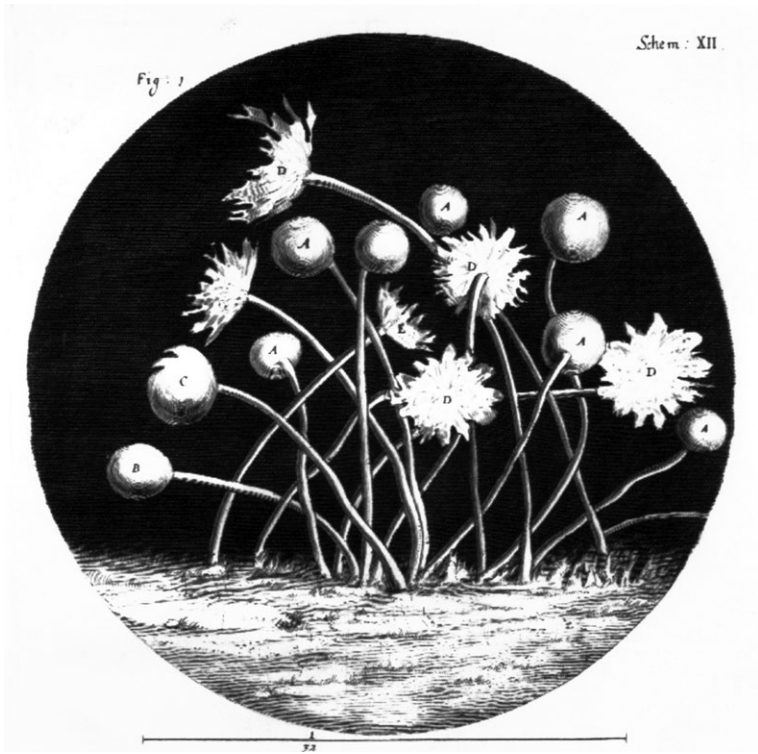
Galileo, Sidereus Nuncius (1610)

трубы, ширина которой составляла где-то три с половиной дюйма», — то есть очень длиннофокусного телескопа с линзовым объективом диаметром с пивную банку. Гук описывает

лунные возвышенности как «скалистые, меловые или каменные горы», вздымающиеся высоко над равнинами. Он отмечает, что эти горы распределены по всей поверхности Луны, подчиняясь собственному определению «низа». Как пишет ученый, создается впечатление, что Луна покрыта незакрепленным материалом, который притягивается к ее центру независимо от того, где находится Земля. Без лишних фанфар Гук сообщает потрясающую новость: «На Луне действует тот же принцип тяготения, что и на Земле» — основополагающее правило, что материя притягивает материю.

Исследовательский подход Гука состоял в том, что разум должен быть дисциплинирован, но открыт всему новому. На Луне он замечает «очень обширную долину», которая «кажется... полностью покрытой каким-то видом растительной субстанции». Это было бы замечательно. Также он видит круглые дыры, «некоторые больше, некоторые меньше, какие-то менее, а какие-то более глубокие... каждая охвачена круглым, поднимающимся вверх валом, как будто вещество в середине выкопали и покидали по краям». Это кратеры.

Кратер — большая чашеобразная впадина, которая может образоваться в результате вулканической деятельности, ударного воздействия или взрыва. Также крупные кратеры возникают при ведении горных работ. Все эти объяснения в разное время предлагались в качестве версий происхождения лунных кратеров. Они долго муссировались, но до программы «Аполлон» вопрос оставался неразрешенным. Гук смог описать кратеры, но проблему их происхождения так и не разрешил — обычная ситуация при исследовании других планет¹⁴. Кратеры, по его мнению, не могли появиться из-за столкновений с кометами, потому что во времена Гука кометы считали объектами размером с планету, достаточно массивными, чтобы уничтожить Землю «словно осиное



Плесневой грибок рода *Mucor*. Рисунок XII из книги Роберта Гука «Микрография, или некоторые физиологические описания мельчайших телец при помощи увеличительных стекол с их наблюдением и обсуждением».

Robert Hooke, Micrographia (London, 1665)

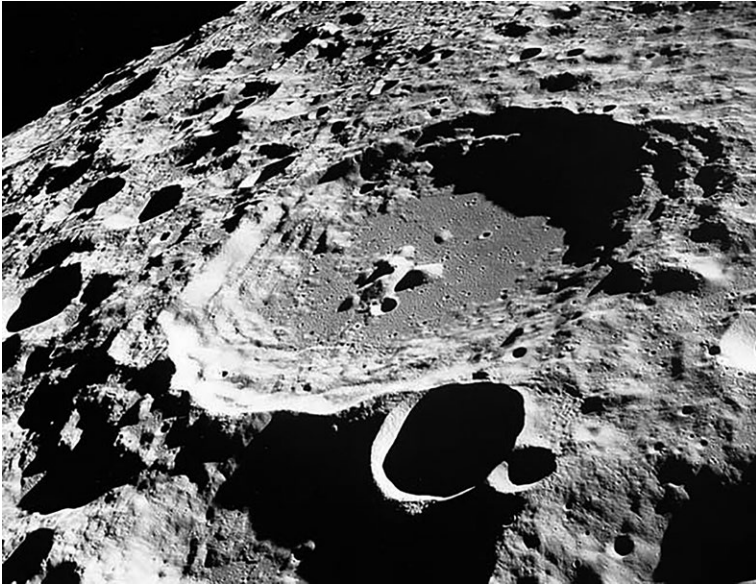
гнездо в костре», как однажды сказал Бенджамин Франклин, описывая возможное развитие событий.

Об астероидах никто и не помышлял, пока первый из них совершенно случайно не открыли в 1801 г. «Трудно представить, откуда такие тела вообще могут взяться», — писал Гук, обсуждая идею лунных столкновений. Тем не менее он посчитал себя обязанным провести ряд экспериментов, чтобы проверить гипотезу, что когда-то (возможно, очень давно)

Луна подвергалась бомбардировкам — и так на ней появились кратеры. Они с другом или помощником под разными углами стреляли из мушкета в толстый пласт белой трубчатой глины, создавая кратеры и изучая результаты. Гук сообщал, что форма и структура таких кратеров, а также расходящиеся от них лучи довольно похожи на то, что наблюдается на Луне: у него получались мелкие или полусферические углубления с приподнятыми краями и лентами изверженной породы. Он был очень близок к верному ответу.

Но мысль о пулях, со свистом проносящихся по космосу, — это было чересчур, и ученый пришел к выводу, что лунные кратеры, вероятнее всего, имеют вулканическое происхождение и образовались при застывании вращающихся воронок расплавленной породы. Какой ему представлялась физика этого процесса, неясно, но он ссылается на то, что «наблюдал в котле с кипящим алебастром» (порошкообразным гипсом), как пар поднимается сквозь порошок, оставляя «маленькие ямки по форме в точности как на Луне, если осветить их свечой в большой темной комнате». Это типичная ошибка наблюдения: когда что-то похоже на то, что вы видели раньше, это оно и есть. Мы все порой этим страдаем. «При различном расположении свечи относительно этой поверхности можно точно воспроизвести все характеристики подобных ям на Луне, когда они освещены Солнцем под большим или меньшим углом».

Вероятно, Гук сочинил страницы «Микрографии» о лунных кратерах после визита на фабрику своего приятеля, где производились курительные трубки. Это захватывающий образец ранней науки, очень живо и подробно изложенный. Но это небольшой фрагмент гораздо более крупного труда, по-новому обзорающего практически всю натурфилософию с помощью микроскопа и телескопа. Тем не менее, если бы Гук в конце концов пришел к выводу, что кратеры



Кратеры на кратерах внутри кратеров — почти что фрактал. Сделанная с «Аполлона-11» фотография 90-километрового кратера Дедал на обратной стороне Луны.

NASA

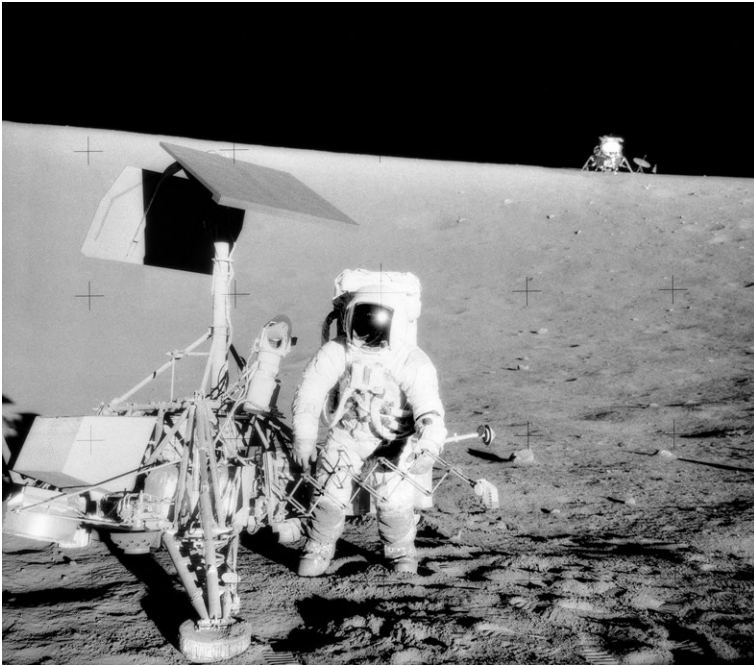
на Луне появились из-за столкновений, а не из-за вулканов, это сэкономило бы нам массу времени.

Предположим, что на один 10-километровый кратер приходится 100 километровых, 10 000 стометровых и так далее. То есть количество кратеров пропорционально единице, деленной на возведенный в квадрат диаметр (степенная зависимость с показателем степени -2). В таком идеальном случае поверхность планеты выглядела бы почти одинаково при любом приближении, как фрактал. Представьте себе, что вы капитан космического корабля, совершающего посадку на такую фрактальную планету, и следите за снижением с помощью направленной вниз камеры. Через какое-то время все поле кадра заполняется кратерами.

По мере снижения становятся видны все более мелкие кратеры, а крупные, наоборот, пропадают, потому что поле кадра меньше, чем они. (Корабль неизбежно окажется внутри какого-нибудь гигантского кратера.) Статистически число кратеров в любом отдельном кадре остается одним и тем же¹⁵, поэтому все фотографии будут выглядеть примерно одинаково на всем протяжении спуска корабля внутрь фрактала, и вам никак не удастся оценить расстояние до поверхности.

На практике, конечно, так не бывает. У кратеров и частиц существуют предпочтительные размеры, и их наличие или отсутствие (пропавшая с пляжа пыль или отсутствие 100-метровых кратеров на астероиде Эрос) рассказывает нам об образовании, эволюции и возрасте поверхности. Крупные кратеры разрушаются, а маленькие подвергаются эрозии из-за солнечного ветра. Валы крошатся от сильных колебаний температуры. Время от времени крупное столкновение вызывает «полную перезагрузку» огромных областей поверхности. Изучая характеристики кратеров, валунов и прочих явлений, которые подчиняются или не подчиняются степенным зависимостям, мы можем формулировать теории об их геологии, истории столкновений и эрозии под действием ветра или воды.

Столетия потребовались для того, чтобы идею об образовании кратеров в результате столкновений с планетой начали воспринимать всерьез. Даже когда современные телескопы уже получали детальные изображения Луны, а геологи изучали недавно образовавшиеся кратеры на Земле, сторонники гипотезы об ударном возникновении лунных кратеров оставались в меньшинстве. Возьмем, к примеру, воронку, которую мы теперь называем Аризонским метеоритным кратером — крупнейшим из молодых ударных кратеров на нашей планете. В начале XX в. все те немногие геологи, которые знали о его существовании, были уверены, что он



Командир «Аполлона-12» Чарльз Конрад стоит около посадочного модуля автоматического космического аппарата «Сервейер-3», в 200 м от того места, где пилот Алан Бин совершил посадку лунного модуля «Интрепид», который виден в отдалении.

NASA/Алан Дж. Бин

имеет вулканическое происхождение. (Его называли конусом Кун-Бьютт; с некоторого расстояния топографический подъем края кратера выглядит как обычная столовая гора. Поскольку кратер находится в зоне активного вулканизма, эту ошибку можно счесть простительной.) Американский горный инженер Дэниел Бэрринджер рассудил, что причиной образования этой километровой в диаметре ямы должны быть железные метеориты, которые так распространены в этой местности, и что под дном кратера должна была бы находиться представляющая экономическую ценность масса

железа. После долгих поисков рудное тело так и не было найдено¹⁶, поэтому споры продолжились дальше.

В 1960 г. американский ученый Юджин Шумейкер в своей кандидатской диссертации доказал, что эта километровая воронка появилась в результате столкновения с метеоритом. В основу доказательства Шумейкера легли крошечные кристаллы кварца, взятые со дна и стен воронки. Он изучил их под микроскопом и обнаружил четкие ударные трещины и кристаллические формы, которые могли появиться только в результате мощнейшей ударной волны, прошедшей через породу. Такие условия не возникают даже при самом свирепом извержении вулкана. Для них требуется гиперзвуковое событие: массивное тело, летящее со скоростью во много километров в секунду, или ядерный взрыв.

Железные фрагменты, которые находят на этой территории, являются обломками того, что получило название «метеорит Каньон-Дьябло» в честь прекратившего свое существование пристанционный городок в 20 км от кратера. Железные метеориты были среди первых объектов, отвердевших в молодой Солнечной системе; в самом деле, обломок метеорита Каньон-Дьябло был одним из пяти метеоритов, использованных Клэром Паттерсоном для уже упомянутого первого точного определения возраста Земли. Наши современники обшарили всю территорию вокруг Аризонского кратера с металлоискателями; в прошлом же тут попадались фрагменты массой до 500 кг. Большие слитки чистого железо-никелевого сплава вызывали священный трепет у людей каменного века, которые отродясь не видали даже мелких кусочков металла.

О том, что Кун-Бьютт, он же Аризонский метеоритный кратер, появился в результате падения метеорита, уже было известно к тому времени, когда началась подготовка к экспедициям «Аполлона», а Шумейкер стал одним

из руководителей геологического направления тренировки астронавтов. Тем не менее его коллеги все еще ожесточенно спорили о происхождении лунных кратеров: возникли они в результате столкновений или из-за извержений вулканов. Самый уважаемый американский геолог XIX в. Гров Карл Джильберт пришел к выводу, что кратеры на Луне имеют ударное происхождение, но сам Аризонский кратер возник в результате извержения вулкана с выбросом пара, подобно расположенным неподалеку кратерам Сьерра-Пинакате на границе штата Аризона с Мексикой¹⁷. Путаница в голове у Джильберта, как и ошибка Гука, в значительной степени сказались на истории этого вопроса, поскольку и тот и другой были величайшими геологами своего времени.

Готовясь к полетам, астронавты программы «Аполлон» проходили подготовку в кратерах пустынного Юго-Запада США; там же досконально проверялись космические скафандры и прочее оборудование. Отрабатывались выходы: на Луне у экипажа имелись считанные часы на то, чтобы выполнить целый ряд трудоемких задач, и поэтому вся деятельность астронавтов должна была быть тщательно отрепетирована. Целью Шумейкера было удостовериться, что астронавты, по основной своей специальности пилоты¹⁸, в достаточной мере знакомы с геологией, чтобы произвести точные, значимые с научной точки зрения наблюдения и принять правильные решения о том, какие образцы доставить на Землю.

Первые высадки на поверхность Луны включали в себя лишь выходы продолжительностью в несколько часов. Программы последующих экспедиций, все в большей степени сосредоточенных на научных задачах, включали «ночной» отдых и захватывающие поездки на лунных вездеходах. К запуску «Аполлона-14» астронавты освоили приемы поисковой геологии. Они размещали сейсмологические станции

и закладывали пиротехнические заряды, которые подрывались с орбиты после того, как спускаемый модуль покинул Луну. Они устанавливали ретрорефлекторы, чтобы ученые с Земли могли замерить время, которое уйдет у лазерного луча на путь туда и обратно, и определить расстояние между Землей и Луной с точностью до миллиметров. Они загоняли в грунт метровые штыри, чтобы определить его несущую способность, и высверливали керны с помощью электробура. Они подбирались на лунных вездеходах к самому краю кратеров, ездили вдоль лунных каньонов и фиксировали все, что видели. Признаки ударного образования кратеров были повсюду, подобно тому, как в русле реки везде есть признаки водной эрозии. Образцы, заслуживавшие доставки на Землю, пришлось тщательно выбирать.

Геология лунных кратеров представляет собой палимпсест: самые старые и крупные из них перекрываются породами, извергнутой из чуть более новых, и так далее, как груда одеял на постели, которую никогда не убирают. Последние крупные кратеры, образовавшиеся поверх всего этого, наиболее заметны. Невооруженным глазом в темную ночь вы видите только Тихо — кратер диаметром 90 км, который выделяется, потому что яркие лучи от него расходятся по всей Луне. Эти лучи — выбросы породы от удара астероида вполовину меньше того, который убил динозавров. «Аполлон-16» совершил посадку внутри одного из таких лучей, и астронавты собрали там образцы импактитов, которые датируются как образовавшиеся 108 млн лет назад — вероятно, это и есть возраст Тихо.

Мелкие кратеры формируются чаще всего, и установленная на искусственный спутник Луны камера высокого разрешения (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera, LROC) смогла зафиксировать появление одного такого кратера диаметром с плавательный бассейн, сделав снимки его района

до и после столкновения. Кратер возник из-за удара космического тела размером с мяч для йоги, обладавшего энергией, эквивалентной одной тонне тротила. Было найдено и несколько более мелких новообразованных кратеров. Кратеры такого размера выглядят из космоса как углубления в центре паутины едва заметных лучей и неровностей поверхности. Выброшенные камни и пыль падают вокруг этих кратеров, как град осколков при взрыве бомбы, разлетаясь на расстояние в сотни диаметров кратера и в свою очередь поднимая мельчайший реголит. Сейсмические толчки расходятся от эпицентра и тоже будоражат поверхностную пыль, вызывая кратковременные оптические изменения, подобно книге, брошенной на пыльное покрывало. Где-нибудь на Луне такое происходит примерно каждый год.

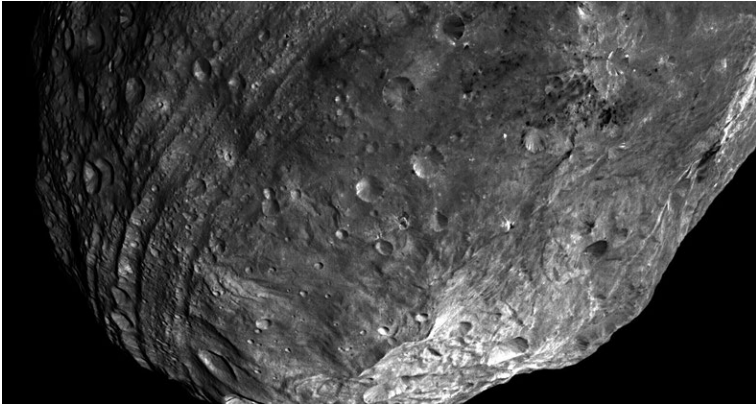
На астероидах тоже есть кратеры, и самые большие из них могут быть размером почти с сам астероид. Необычный пример являет собой примитивный астероид Матильда диаметром в 60 км, у которого отсутствуют по крайней мере пять гигантских кусков (только на той половине, которую сфотографировал наш космический аппарат), причем каждый из них больше 20 км в поперечнике. Выглядит это так, будто астероид был атакован гигантской ложкой для мороженого. Мы пока пролетали только у одного из тысяч примитивных астероидов такого размера, поэтому на самом деле нельзя сказать, является ли он необычным. Возникновение кратеров Матильды в результате наносимых под случайным углом ударов астероидов диаметром в несколько километров (это похоже на ребенка, колотящего палкой по пиньяте) должно было привести к ее довольно быстрому вращению — по крайней мере, это следует из любых осмысленных расчетов. Но вместо этого Матильда практически замерла, совершая один оборот за 18 земных суток! Это один из самых медленно вращающихся объектов в Солнечной системе.

Либо моменты импульса, набранные после каждого удара, каким-то образом погасили друг друга — вероятность этого составляет менее 1%, — либо в процессе образования астероидных кратеров есть еще что-то такое, чего мы не понимаем.

Почему образование полудюжины гигантских кратеров не разрушило Матильду? То же самое в 1970-е гг. спрашивали о спутнике Марса Фобосе — 20-километровом теле с 10-километровым кратером. Согласно всем данным науки того времени, такой удар должен был расколоть Фобос (к которому мы еще вернемся) на части. Матильда тоже должна была развалиться. И тем не менее — вот они.

Учитывая непрерывно идущий процесс образования кратеров, можно подумать, что астероиды должны быть очень прочными, чтобы пережить такие масштабные столкновения, но в действительности дело обстоит как раз наоборот. Представьте, что вы стреляете из пистолета в кучу песка и пыли; получается кратер, и вы можете раскопать песок и найти пулю. Теперь вообразим, что вы смешали этот песок и пыль с водой и получили глину, которая засохла до состояния твердого кирпича. Выстрелите в этот кирпич такой же пулей — и никакого кратера не получится. У вас останется несколько осколков, а пуля разрушится. Это рассуждение, подтвержденное компьютерным моделированием и последующими наблюдениями с автоматических космических аппаратов, привело нас к убеждению, что «выживает слабейший»: для того чтобы не быть подверженным катастрофическому разрушению, астероиды должны быть мягкими и податливыми, состоять из неплотного, зернистого материала, такого как пыль и гравий¹⁹.

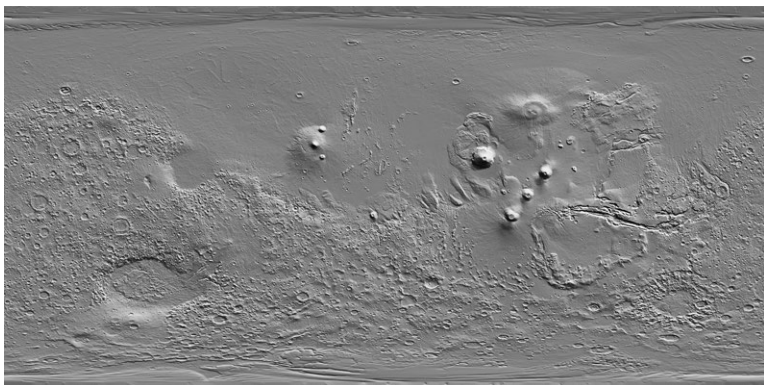
Мегакратеры образуются и на полноразмерных планетах, но, вместо того чтобы принимать форму чашеобразного углубления, они повреждают, истончают и подгребают кору, вызывая сейсмические и долгосрочные



Южный полярный регион астероида Веста. Это очень потрепанный астероид, вся топография которого на самом деле представляет собой совокупность ударных кратеров и их краев, а также показанных тут впадин 10-километровой ширины, опоясывающих астероид вдоль экватора.

NASA/JPL/DLR

геологические колебания, из-за которых в итоге превращаются в обширные плоские пространства. Самые крупные кратеры на планете могут полностью исчезнуть. Мощнейшие столкновения посылают ударные волны глубоко в ядро, запуская глобальные процессы, которые могут идти много дней, лет и даже миллионов лет. Образование огромных кратеров может пробудить внутри планеты тепловые двигатели, ведь если планета уже и так горячая, это словно снять крышку с чайника: внутреннее пространство начинает охлаждаться неравномерно, поскольку тепло быстрее выходит с того бока, где кора тоньше всего. Такое положение может привести к запуску общепланетарной конвекции (теплое поднимается, холодное опускается) как способа восстановить тепловое равновесие. По мере того как планета затвердевает после образования мегакратера, такое неравновесное состояние может оказаться зафиксированным на долгое время.



Марс, маленькая планета с большой геологией. Эта рельефная карта составлена по данным лазерного альтиметра MOLA орбитального зонда «Марс Глобал Сервейор». Северные низменности, также известные как Великая Северная равнина, образуют гигантский бассейн диаметром 2300 км. Заметные справа вершины на экваторе и к северу от него — это вулканы нагорья Фарсида, самые высокие горы вулканического происхождения в Солнечной системе. Тянущийся с востока на запад шрам правее (восточнее) от них — это Долины Маринера, крупнейший каньон в Солнечной системе. 800-километровое углубление слева на юге — Равнина Эллада.

NASA/GSFC

Хотя измерять самые крупные кратеры очень трудно, кажется, первое место среди них принадлежит Северному Полярному бассейну на Марсе. По данным компьютерного моделирования²⁰, кратер такого размера и формы мог образоваться при типичном по скорости и углу атаки столкновении с блуждающей планетой диаметром примерно 2000 км — в три раза меньше Марса, причем большая часть ударяющего тела продолжила свой полет после возникновения кратера. Но, несомненно, все не так просто. Согласно моделям, имитирующим термическую реакцию Марса²¹, его теплая мантия не осталась бы в покое. Она бы отреагировала новым бурным циклом конвекции, который привел бы к возобновлению процесса формирования коры и созданию на ране в теле планеты толстого струпа. Если это так, то занимающая

большую часть бассейна Великая Северная равнина — это молодая поверхность планеты, а находящееся в ее центре Северное плато — вторичная кора, как бы континент, образовавшийся внутри углубления от удара. Это полностью противоположное понимание геологических данных! В планетологии важно сохранять непредвзятое отношение к объектам изучения.

Как правило, чем гуще поверхность планеты покрыта кратерами, тем она старше. Столкновения происходят повсюду, так что ландшафт с редкими кратерами, вероятно, возник недавно или полностью обновил свою поверхность из-за какого-то события — например, истечения лавы или другой местной катастрофы, — или из-за длительного воздействия ветра и воды, или из-за тектоники плит. С помощью кратеров мы можем определять возраст поверхности. Подобно деревянному столу, который покрывается щербинами и следами от сигарет, понемногу становясь антиквариатом, покрытая кратерами поверхность позволяет предположить, сколько прошло времени, и даже сделать количественную оценку. Что касается качественных характеристик, при бомбардировке преимущественно небольшими телами поверхность становится более неровной, утрамбованной и фактурной. Если крупных ударов было больше, начинают выделяться отдельные приметы — как круглый след от горячей сковородки, которую когда-то поставил на стол ваш давно повзрослевший сын, заставляет осознать, как летят годы.

Мы легко можем установить, что лунные нагорья гораздо старше лунных морей с их редкими кратерами — это относительный возраст. Намного трудней определить возраст абсолютный — сколько миллиардов лет назад сформировались моря? Если в околоземном пространстве происходит

разрушение астероида, на планету обрушивается целый град осколков, и поверхность Земли может какое-то время «быстро стареть». В подобных ситуациях поверхности кажутся старше, чем они есть. Еще одна сложность состоит в том, что мы не можем точно сказать, кратер какого размера останется от того или иного астероида, особенно в случае принимающего тела небольшого размера. Ученые попытались разобраться с возрастом поверхности маленького астероида Бенну, 500-метровой цели аппарата NASA «Озирис-Рекс», но, чтобы сделать это, мы должны предположить — поскольку нам это неизвестно, — какого размера кратер оставляет то или иное ударяющее тело и какого размера ударяющие тела способны стереть с поверхности более старые кратеры.

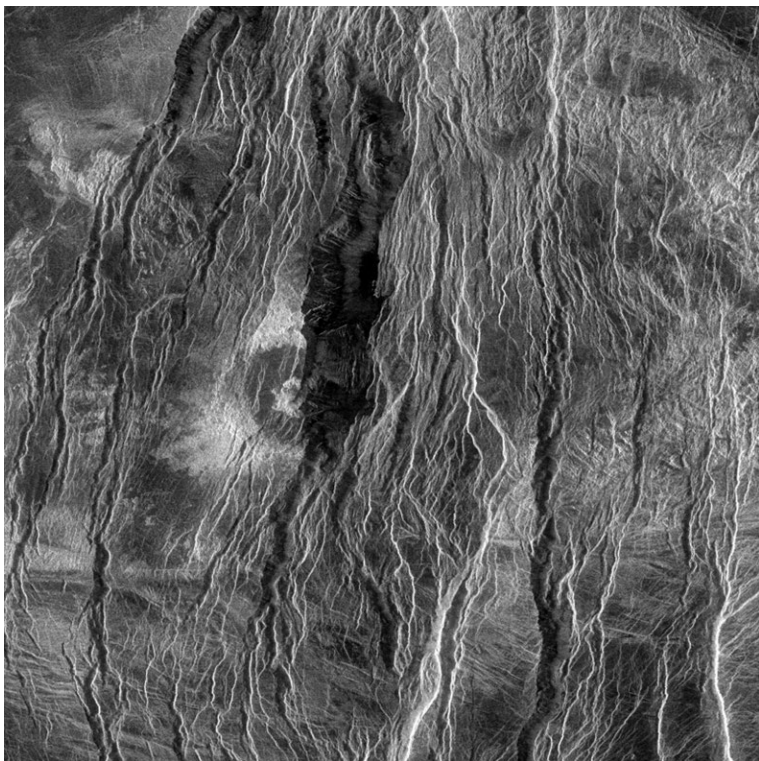
Если мы знаем частоту столкновений и «правило масштабирования», которое дает размер кратера, образовавшегося в результате столкновения с определенными характеристиками, тогда кратеры, которые видны на планетном теле, могут служить часами при условии предварительной калибровки по частоте столкновений. И здесь как нельзя лучше подходит Луна — тело, которое с точки зрения геологии мертво по крайней мере последние 4 млрд лет, за исключением гигантских истечений вулканической лавы, которые на глубину нескольких километров затопили бассейны видимой стороны от 3 до 3,5 млрд лет назад. Возраст лунных морей используется для калибровки статистики кратерообразования, после чего ее можно применять ко всей внутренней Солнечной системе.

Кратеры лунных нагорий начали появляться в течение нескольких миллионов лет после формирования спутника; Земля тогда еще была неоформившимся, безумным местом. Каждый новый кратер на нагорьях разрушал предыдущие; поверхность нагорий *насыщена* кратерами, поэтому после

определенного момента хронологию восстановить трудно. Другая крайность — это поверхности таких планет, как Венера и Земля, достаточно больших, чтобы иметь длительную глобальную геофизическую активность. Венера очень молода в том смысле, что кратеров на ней мало; возраст ее поверхности — полмиллиарда лет. Земля еще моложе: средний возраст ее поверхности около 100 млн лет, но некоторые континенты хранят память о прошлом вопреки активной тектонике плит.

Мы не знаем, какие процессы вызывали или вызывают постоянное обновление поверхности Венеры. Если бы это была тектоника плит или эрозия, тогда многие из ее самых крупных и древних кратеров должны были быть разрушены непрерывной геологической активностью иногда почти до неузнаваемости, как древнейшие кратеры на Земле или Марсе. Вместо этого самые крупные и древние кратеры на Венере хорошо заметны и полностью сохранились. Где же уничтоженные выветриванием, частично подвергшиеся субдукции или еще каким-то образом разрушенные кратеры Венеры?

Получается загадка: высчитываемый по кратерам поверхностный возраст Венеры очень мал, но незаметно никакого процесса, который обновлял бы ее поверхность. Это не может быть погода: воды там нет, а ветров у вялой поверхности, где атмосферное давление столь огромно, очень мало. Не может быть причиной и земледобная тектоника плит, потому что тогда бы сохранялись древние, густо покрытые кратерами континенты. Локальная тектоническая или вулканическая активность оставили бы после себя частично разрушенные или захороненные крупные кратеры и ударные впадины. Вулканическая деятельность предпочтительно стирала бы кратеры в низинах и оставляла бы дуги кратерных краев вокруг затопленных лавой бассейнов, как на Луне. Ничего из этого мы не видим.



Радиолокационный снимок ударного кратера Балч (диаметр 40 км), полученный американской межпланетной станцией «Магеллан». Более светлые части снимка соответствуют участкам с неровностями порядка 10 см (рабочая длина волны радара). Балч — один из немногих крупных кратеров Венеры, которые мы застали в процессе разрушения.

NASA/JPL

Попытки разрешить все эти противоречия на основе наших ограниченных знаний привели к идее «венерианского катаклизма», обновившего сразу всю поверхность планеты полмиллиарда лет назад. Возможно, кора стала слишком толстой, перестала пропускать тепло и обвалилась вся целиком, перевернувшись вверх дном повсюду одновременно. Возможно, точку поставило столкновение

с какой-то внутренней планетой размером с Луну, которое привело к расплавлению всей поверхности; пожалуй, эта версия не так уж надуманна. Возможно, обновление поверхности Венеры связано с не менее странными событиями на Меркурии, который каким-то образом утратил свою мантию. Как бы там ни было, Венера, кажется, начала планетную жизнь с чистого листа, стерев всю свою прошлую историю.

Поверхность Венеры негостеприимна: там так жарко, что плавится свинец, давление, как на морской глубине около 900 м, может раздавить иную подводную лодку, а облака состоят из серной кислоты. Ниже тоже нет ничего хорошего; поверхностная температура уже выше, чем может вынести какой-либо живой организм, а в глубине становится еще жарче. Если когда-то, до того, как случилась некая катастрофа, там и была жизнь, она погибла. Но над облаками, где-то в 50 км выше поверхности, давление и температура не особенно отличаются от атмосферных условий на поверхности Земли. Могло ли что-то живое уцелеть там? Чем бы оно питалось?

Ученые смогли всерьез задаться этими вопросами, когда «Магеллан», важнейшая американская межпланетная экспедиция середины 1980-х гг., обеспечила нам подробные геологические изображения всей Венеры, полученные с помощью радара²², 10-сантиметровые волны которого могли проникать под облака. Десятилетием раньше советские спускаемые аппараты серии «Венера» впервые показали нам поверхность планеты и взяли пробы атмосферы. Остается надежда на еще одну важнейшую межпланетную экспедицию — «Венера-Д» (индекс «Д» означает «долгоживущая»). Ее целью является посадка модуля, который проведет на поверхности планеты двадцать четыре часа, а также вывод на орбиту радара. В качестве возможного вклада NASA рассматриваются аэростатные зонды или другая полезная

нагрузка. Кому обязательно нужно быть долгоживущим, так это специалисту по Венере: старт экспедиции всегда ожидается через десяток лет, а Венера и ее секреты терпеливо ждут своего часа.

С момента своего зарождения Солнце совершило 20 оборотов вокруг центра Млечного Пути — прошло 20 *космических лет*. Примерно равный космическому году отрезок времени — 250 млн лет — требуется горячей отвердевшей мантии Земли, чтобы полностью перевернуться на конвейерной ленте *тектоники плит*, которая обеспечивает планетарный теплообмен и скорее всего крайне важна для появления по-настоящему землеподобных условий на нашей планете. Впервые она была описана немецким геофизиком Альфредом Вегенером²³ как процесс распада суперконтинента под названием Пангея: идея совместить, как кусочки мозаики, очертания и географию континентов, расположенных по разные стороны Атлантики, в итоге оказалась верной, хотя изначально ее высмеивали как идиотскую. Сейчас тектоника плит понимается как повторяющийся глобальный цикл²⁴ заталкивания, перемалывания, погружения и извержения.

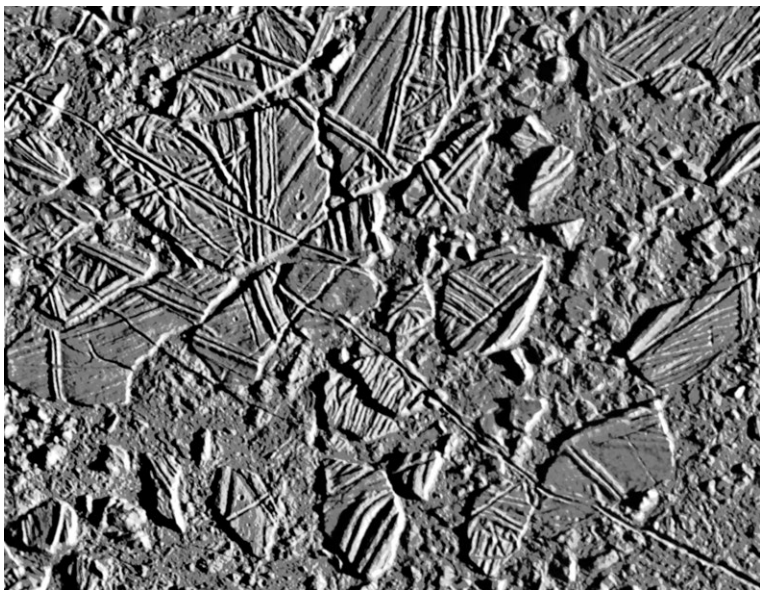
Вот кратко ее механизм. Пластины холодной и жесткой *литосферы*, которые также называют *плитами*, опускаются по своим краям, более холодным и тяжелым. Они погружаются в мантию — более горячую, более примитивную по составу и более податливую — и затягивают за собой океанические желоба. За этими желобами, в подвижных клиньях, где смешиваются материалы погружающейся части плиты (субдуцирующего слэба) и исходной мантии, формируются вулканические дуги, такие как Японский архипелаг или Анды. Там, где сходятся и сталкиваются более мощные или сложно

построенные плиты, возникают горные хребты вроде Сьерра-Невады и Гималаев.

Поскольку общая площадь поверхности Земли не меняется, на замену уходящей вниз образуется новая кора; благодаря конвекции мантии, в Атлантическом и Индийском океанах, а также в восточной части Тихого океана возникают *зоны спрединга* (раздвигания), похожие на швы на бейсбольном мяче. В Африке, над мантийным поднятием прямо сейчас раскрывается новое внутриконтинентальное море. Сегодня краевые части плит, слэбы, опускаются под действием конвекции до середины мантии, где претерпевают изменения и растворяются; раньше, когда мантия была горячее, фрагменты слэбов могли погружаться вплоть до ядра, образуя там «кладбище плит»²⁵. Гигантские магматические капли из этих глубин, возможно, всплывают, поднимаясь сквозь всю мантию, чтобы извергнуться в так называемых горячих точках вроде Гавайских островов.

Зоны спрединга открываются, плиты сталкиваются, и в следующем космическом году континенты Земли будут такими же неузнаваемыми, как Пангея. Но физической основой этого процесса является простой факт: Земля горячая, космос холодный, поэтому тепло уходит наружу. То, *как* оно уходит, и определяет геологию планеты. У крупных планет гораздо больше тепла, которое им предстоит потратить, чем у маленьких, так что, возможно, размеры Земли оптимальны для существования сложной жизни, тогда как тела размером с Марс слишком неактивны, а суперземли, напротив, слишком активны. Но не исключено, что здесь я становлюсь пленником своего человеческого подхода.

Наши представления о земной тектонике плит имеют один пробел: вопрос ее запуска. По мере затвердевания земная кора становилась жесткой и формировала первые литосферные плиты, похожие на кору лунных нагорий. Но с чего



Тектоника плит более примитивного типа. Блоки ледяной коры Европы, сфотографированные межпланетным зондом «Галилео» в 1997 г., демонстрируют признаки появления возвышенностей и низменностей в ходе «дрейфа» блоков по более теплому или жидкому нижнему слою какое-то время назад (это видно по кратерам на некоторых низменностях). Разница высот составляет сотни метров. Размер изображения 35 на 50 км.

NASA/JPL

одна плита вдруг поднырнет под другую и начнет тонуть? Не должна ли кора просто становиться все толще и толще, пока тепло прорывается наружу через вулканы? Особый ответ на этот вопрос вполне приемлем, потому что Земля — единственная известная нам планета с таким постоянным циклом тектоники плит. Возможно, для существующих где-то в космосе землеподобных планет размером с Землю нормально то, что мы видим на Венере.

Выдвигалось предположение, что начало тектонике плит положили крупные столкновения, которые пробили кору и запустили в мантии глобальную конвекцию. Всем нравится

ссылаться на гигантское столкновение. Но и на Венере, как мы полагаем, случались такие же мощные глобальные столкновения. То же самое верно и для Марса, и для Меркурия (пропорционально их размерам). Возможно, тут был нужен правильный удар в правильный момент. Или, быть может, все это Луна и ее беспрестанное приливное воздействие.

Не исключено, что во всем виновата вода. До запуска тектоники плит поверхность Земли могла затвердеть в виде нагорий 10-километровой толщины, рассеченных глубокими желобами — трогами, сформировавшимися, когда литосферные блоки раскалывались и дрейфовали по бушующему океану магмы, напоминая хаотичные регионы Европы. Эти трог, вероятно, заполнялись водой первых океанов²⁶, но их топография должна была быть очень нестабильной. В какой-то момент по какой-либо причине одна из таких литосферных плит могла пододвинуться под другую, создав *зону субдукции*. Субдукция становится как бы трубопроводом, доставляющим насыщенные водой осадочные породы в нижний слой коры и верхний слой мантии; такое вливание воды должно вызывать частичное расплавление образовавшегося клиновидного участка плиты с выплавкой легкой гранитной магмы, которая медленно, но верно поднимается, формируя массивные *плутоны*; наконец, аккреция (слияние) плутонов ведет к формированию первичной континентальной коры. Так мог бы начаться тектонический цикл.

Эффектные горы вроде тех, которые окружают Йосемитскую долину, могут возникать, когда плутоны поднимаются быстрее, чем их разрушает выветривание. Но куда более важные события разворачиваются ниже, в корневых частях горных хребтов, где эти плутоны складываются в континентальные щиты — мощные плиты вроде африканской, канадской и антарктической. Когда океаническая плита сталкивается с континентальным щитом, она уходит под него и образует

еще больше гранитной магмы, добавляющей к континентам новые плутоны. Когда щиты сталкиваются с другими щитами, происходит нагромождение, или скучивание, их материала, в результате чего возникают плато вроде Гималаев. Результатом становится топографическая дихотомия Земли: древние континенты и молодые океанические бассейны.

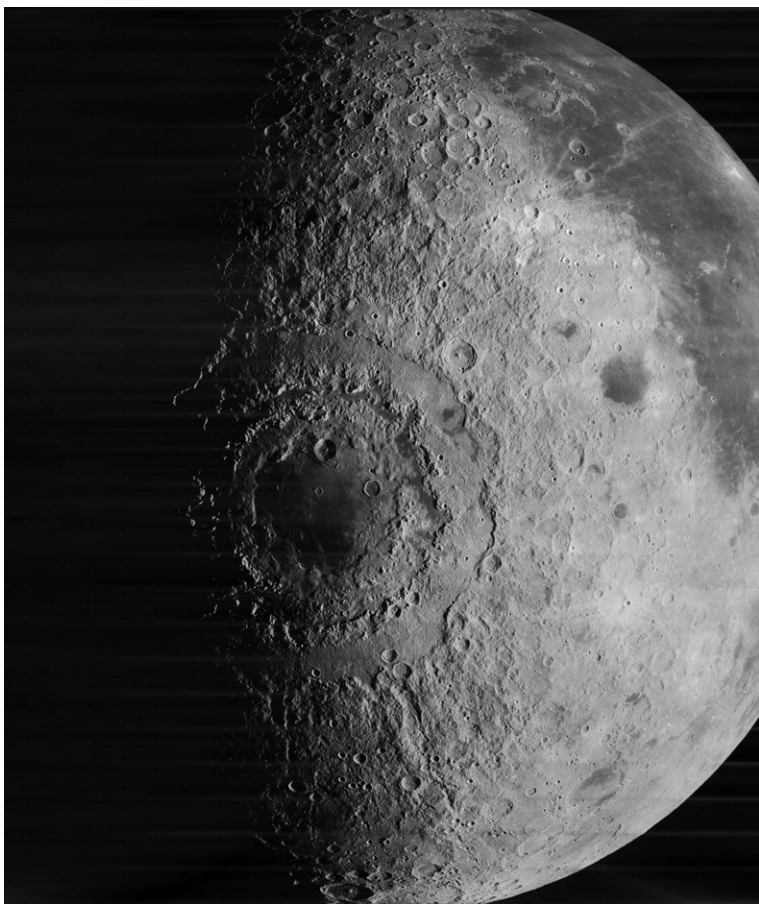
На Венере также есть возвышенности и низменности, но они не так явно выражены, как на Земле, и, кажется, не являются результатом тектоники плит или образования океанов. Высокогорья Земля Иштар и Земля Афродиты иногда называют континентами, но вы не сможете с легкостью обвести их линией по контуру, как делаете это с земными континентами: нет никакой очевидной границы, которая бы определяла их пределы. На Земле такая граница — это уровень моря: континенты находятся явно выше этого уровня, абиссальные области — определенно ниже, а участки, попадающие в зону влияния подъемов и опусканий уровня моря в пределах первых сотен метров, относятся к континентальным окраинам. На Венере и Марсе нет континентальных окраин, только принятое за уровень отсчета давление сухого воздуха (к примеру, один бар или один миллибар давления); нет также значительной геологической дихотомии. Ниже мы исследуем эту взаимосвязь более подробно: наличие океанов делает возможным появление гранитов, а из гранитов складываются континентальные щиты.

Самые древние кратеры на Земле расположены на древних щитах. Самый большой из таких кратеров — Вредефорт в Южной Африке, структура диаметром 300 км. Возраст Вредефорта превышает 2 млрд лет, и он почти стерт выветриванием и эрозией. Самый молодой крупный кратер на Земле — это Чикшулуб, образовавшийся при столкновении Земли с 10-километровым астероидом или кометой. Возможно, это событие привело к вымиранию динозавров

почти 66 млн лет назад²⁷. Выброс веществ при ударе повысил кислотность океанов²⁸, уничтожил известковый (то есть обладающий скелетными образованиями с высоким содержанием кальция) планктон и напрямую или опосредованно стал причиной вымирания трех четвертей видов растений и животных, завершив мезозойскую эру.

До открытия этого 180-километрового кратера, погребенного под километрами осадочных отложений, все, что у нас было, — оставшиеся в летописи осадочных пород следы глобального биологического опустошения, тонкие слои импактных выбросов в разных местах и метровые слои этих выбросов, к примеру, на Гаити²⁹. На поиски кратера ушло более десяти лет, и существовал большой шанс, что он так и не будет найден: он мог располагаться в океане и давно исчезнуть в зоне субдукции, оставив после себя, как улыбку Чеширского Кота, только следы выбросов³⁰. Как выяснилось, астероид ударил в континентальную окраину на восточной оконечности того, что теперь стало полуостровом Юкатан, на границе с мелководным морем. Это объясняет, почему столкновение оказалось таким смертоносным: среди пород в месте удара были богатые сульфатами донные отложения, что привело к глобальному выбросу сульфатных аэрозолей, которые значительно закислили биосферу.

Геологическая история Луны определяется в основном крупными столкновениями и — на видимой стороне — затоплением магмой лунных морей. Геологические периоды Луны связаны с четырьмя архетипическими кратерами. Нектарский период назван в честь Моря Нектара (Mare Nectaris) — одного из старейших опознаваемых морей видимой стороны Луны. Имбрийский связан с Морем Дождей (Mare Imbrium), чьи границы четко очерчены, а выбросы распространяются по значительной части поверхности Луны. Эратосфенский и коперниковский периоды названы в честь



«Мишень» Моря Восточного. Эта эффектная фотография сделана в 1967 г. космическим аппаратом «Лунар орбитер — 4» с высоты 2700 км. Диаметр внешнего кольца гор составляет 930 км. Правее находится Океан Бурь, а далеко справа за границей снимка — Земля.

NASA

кратеров Эратосфен и Коперник, образцы импактных расплавов из которых были взяты астронавтами программы «Аполлон» и получили абсолютные датировки. Каждый период — это выражение общего геологического времени, когда формировались кратеры определенного типа.

Одна из самых ярких лунных достопримечательностей — Море Восточное, расположенное в напоминающем мишень кратере диаметром 930 км в восточной части лимба. Это не просто кратер, но *многокольцевая ударная впадина*, являющаяся самой молодой из крупных структур Луны. При наблюдении с Земли объект наполовину скрыт, и первоначально его считали чем-то вроде застывшего во времени цунами, гигантских волн, прокатившихся по сильно поврежденной коре, наполовину твердой, а наполовину расплавленной. Более свежая идея, которая, кажется, работает лучше, состоит в следующем: то, что мы видим, — это ряд концентрических уступов, которые сформировались в коре, когда податливые глубокие слои мантии выплеснулись, чтобы заполнить глубокую воронку. И само столкновение, и последовавшая за ним отдача должны были вызвать глобальные сейсмические колебания, повлиявшие на топографию всей Луны. Ударное образование Моря Восточного должно было привести к выбросу огромной массы материала, часть которого добралась бы и до Земли.

Земля кажется куда более простой. Если смотреть на запад с тихоокеанского побережья США, видно только безграничное бурное море. Но благодаря столетию развития современной геологии это можно воспринимать и так: огромная каменная плита толщиной в десятки километров и протяженностью в тысячи, покрытая несколькими километрами воды, движется на вас со скоростью роста ногтей — несколько метров за человеческую жизнь, — катясь на спине мантии, в которой происходит конвекция. У берега эта плита подныривает и опускается под вас; когда она оказывается за вашей спиной, содержащаяся в ней вода провоцирует вулканическую активность, в результате чего вверх начинают подниматься гранитные плутоны. Это неостановимое движение сопровождается трением, что становится причиной землетрясений. Люди, посторонитесь!

ГЛАВА 3

СИСТЕМЫ ВНУТРИ СИСТЕМ

*Наш мир начался давным-давно,
Тут как раз ветер и дождь...*

Уильям Шекспир. Двенадцатая ночь*

Самые большие планеты — это не воспламенившиеся звезды, вращающиеся сфероиды, состоящие в основном из водорода и гелия. Из-за огромного внутреннего жара, накопленного в результате аккреции, их атмосферы полны вихрей, размер которых может составлять десятки тысяч километров — больше, чем диаметр Земли. Основная часть материала таких гигантских планет сгустилась непосредственно из туманности газа и пыли, окружавшей центральную звезду, и, таким образом, по своему составу они в целом «подобны звездам». Если говорить о размере, то планета, имеющая пять (или даже десять) масс Юпитера, окажется совсем ненамного больше этого гиганта Солнечной системы, потому что все эти материалы легко подвергаются сжатию: чем больше массы вы добавляете к планете-гиганту,

* Пер. М. Лозинского.

тем сильнее она спрессовывается. Для такого небесного тела существует максимальный теоретически возможный размер — чуть больше Юпитера. При дальнейшей аккреции газа планета не растет, а сжимается. Если газовый гигант накапливает более 17 масс Юпитера, температура и давление в его центре становятся такими огромными, что там начинается термоядерный синтез¹. Планета превращается в звезду.

При формировании планеты-гиганта время решает все. В так называемой модели *аккреции ядра* первый шаг — это скопление большого количества ледяных кометезималей, образующих ядро примерно в десять раз массивнее Земли. Если такое ядро быстро формируется в толще протопланетной туманности, то, как в случае наматывающейся на палочку сахарной ваты, его гравитации хватает, чтобы вокруг него собрались все остатки диска в зоне действия силы притяжения. У первых из подобных ледяных ядер есть все преимущества. В их распоряжении имеется больше газа, который они могут захватить, и чем массивнее они становятся, тем больше гравитация, с помощью которой они притягивают материю. В Солнечной системе таким счастливым оказался Юпитер.

Но, хотя на протяжении примерно 10 000 лет Юпитер рос с впечатляющей скоростью, его гравитационное воздействие имело определенные пределы. Дальше от звезды возник промежуток, пространство для еще одной гигантской планеты, схожим образом росшей вокруг другого ядра из скучившихся кометезималей: это был Сатурн. Еще дальше появились Уран и Нептун, которые в соответствии с этой теорией застряли на стадии ядер — именно поэтому мы называем их ледяными гигантами. (Это несколько неточный термин: они срослись из льда, а внутри состоят в основном из воды и молекулярного водорода, но сейчас температура в их центрах составляет тысячи градусов.)

Если бы протопланетный диск был в 20 раз массивнее, Юпитер стал бы белым карликом, частью двойной системы звезд Солнце А и Солнце В. Хотя, к счастью, он оказался слишком мал для того, чтобы внутри него начался термоядерный синтез, при его аккреции скопилось очень много тепла — той самой энергии гравитационного притяжения, которую Кельвин учитывал в своих расчетах возраста Солнца. (Его вычисления были в принципе верными, но очень неточными, потому что он ничего не знал о термоядерных реакциях.)

Чтобы понять, откуда берется аккреционное тепло, рассмотрим гигантскую планету, формирующуюся из частиц вещества, стягиваемых издалека. Если, к примеру, туфля падает внутрь Юпитера с конечной скоростью 60 км/с, она высвобождает количество энергии, равное тому, которое получается при сжигании полного бака бензина. Повторите это несколько тысяч триллионов триллионов раз (масса Юпитера в туфлях), и в результате аккреции выделяется достаточно тепла, чтобы поднять среднюю температуру планеты до десятков тысяч градусов. По геологическим меркам Юпитер вырос в одно мгновение, но его жар с тех пор постепенно пробивается наружу, преодолевая огромный радиус газовой сферы.

Сегодня Юпитер излучает вдвое больше тепловой энергии, чем получает от Солнца. Раньше он был еще жарче и испарил всю воду на своем самом близком спутнике Ио. В небе Ио Юпитер висит подобно гигантскому блюдцу, так что он действовал там как лампа для обогрева. Дальше, на расстоянии Европы, Юпитер давал достаточно тепла, чтобы там существовало парящее открытое море, по крайней мере на стороне, обращенной к планете. Но в конце концов Юпитер остыл и океан Европы покрылся ледяным панцирем. С тех пор он миллиарды лет подогревается энергией приливов

и радиоактивного распада. Такой цикл формирования ледяных спутников, тепловой инкубации и длительного внутреннего подогрева может наблюдаться везде, где есть внешние планеты-гиганты.

Формирование Солнечной системы начинается с коллапсирования газа, пыли и льда, из которых возникнет звезда и ее протопланетный диск. Образование планет запускается, когда диск сгущается до твердых частиц, летящих сквозь газ, как рой пчел в тумане. Сколько из него получится планет — зависит от многих факторов: плотности диска и его состава, мощности излучения звезды и ее магнитного поля, а также того, что происходит по соседству, например влияния звезд-сестер или взрывов сверхновых. Но для общего случая существует стандартная модель. Там, где в протопланетном диске много частиц изо льда и пыли, планета может продолжать свой рост, как снежный ком, втягивая лед и пыль, и в конце концов собирая газ, как ненасытный Безликий в мультфильме «Унесенные призраками». Все идет в дело.

Но в районе земной орбиты, на отметке в 1 а. е. от звезды, гравитация Солнца велика, а его излучение сдувает газ прочь. Землеподобные планеты должны формироваться не напрямую, не так, как рисовал в своем воображении Иммануил Кант, но иерархично, начиная с *планетезималей*, которые собираются в *эмбрионы*, которые, в свою очередь, вырастают в систему тел размером от Луны до Марса, называемых *олигархами*. До этого момента происходящее представляет собой упорядоченный, саморегулирующийся процесс: олигархи по большей части не задевают друг друга, строго следуя по круговым орбитам и доминируя каждый в своем регионе.

Тем не менее в конце концов один олигарх вступает с другим в конфликт — маленькое гравитационное

возмущение нарастает, приводя к сближению, затем к столкновению и часто к слиянию. Так начинается *поздняя стадия* гигантских столкновений, когда планеты разбиваются о планеты. Такие столкновения продолжались сотню миллионов лет, приведя к образованию Венеры и Земли — двух планет, сорвавших крупный куш, — а также побежденных, но выживших игроков (вроде Меркурия) и осколков (вроде Луны). Абстрактно рассуждать о гигантских столкновениях просто, но их энергии были поразительными, а физическую основу этого процесса мы до сих пор не очень хорошо понимаем.

Нам куда лучше знаком процесс ударного образования кратеров — когда планетезимали сталкиваются с планетами, а не планеты с планетами. Отчасти это потому, что мы можем сделать кратер в земле у себя во дворе или в глине — на принадлежащей другу фабрике по производству курительных трубок. Кроме того, благодаря ньютоновской физике и математике мы можем масштабировать образование кратера обычного для полученного в лабораторных условиях размера до куда более крупного события, проводя эксперимент в центрифуге с силой тяжести в сотню g . Маленькие кратеры, сформированные при более высокой гравитации, эквивалентны крупным кратерам *с точностью до масштаба*. Если вы правильно масштабируете все факторы — линейные размеры, время, центробежную силу, — эти два явления будут одинаковыми с точки зрения математики.

Чтобы понять, как работает масштабирование кратеров², представьте съемку сцены борьбы для фильма про Годзиллу. Вы хотите, чтобы актеры реалистично дрались и бросали друг друга на землю. Это означает, что, поскольку они намного больше, падать они должны медленнее и на взмах рукой или ногой им тоже требуется больше времени. Как выясняется, два дерущихся монстра высотой в 16,5 м математически

подобны двум дерущимся актерам среднего роста (180 см), если вы равномерно замедлите время в три раза (квадратный корень из 16,5/1,8). Снимите эту сцену со скоростью 60 кадров в секунду, продемонстрируйте ее на скорости в 20 кадров, и все будет хорошо.

Моделирование кратеров происходит подобным же образом, но нужно учитывать куда больше деталей. Предположим, мы хотим понять, как происходит образование крупного ударного кратера на Луне. Мы берем результаты скоростной съемки лабораторных экспериментов при большой центробежной силе и замедляем их в тысячи или миллионы раз. Сделав это — взяв крупный план в пространстве и общий план во времени, — вы можете непосредственно наблюдать образование планетных кратеров.

Еще один подход — использовать *гидрокоды*, семейство компьютерных программ видеомоделирования, которые стали важнейшим инструментом изучения столкновений планетарных масштабов. Эти программы создаются на основе данных лабораторных экспериментов и позже проверяются в других таких же экспериментах. С гидрокодом моделирование — это просто вопрос замены единиц времени с микросекунд на минуты, а единиц расстояния с миллиметров на километры. Дальше физика сделает все сама, если только мы задействовали правильную физику. Некоторые физические характеристики масштабировать легко — например, силу тяжести, — тогда как с другими, особенно когда дело касается фрагментации, плавления и текучести горных пород, работать сложнее. Скажем, огромный каменный массив обычно непрочен, поскольку в нем имеется множество дефектов, тогда как маленький камешек разломать трудно. В итоге гидрокоды могут быть довольно сложными: иногда они содержат миллионы строк и все равно не могут охватить все физические процессы.

Аналогия с Годзиллой учит нас, что более крупные кратеры формируются медленнее, чем мелкие, и это логично. Масштабируя по времени, мы видим, что крупному астероиду, движущемуся с обычной для Солнечной системы скоростью около 10 км/с, потребуется несколько секунд, чтобы пронзить лунную кору. По эмпирическому правилу он проникает на глубину, вдвое превышающую его диаметр, а потом останавливается. Энергия летящего с большой скоростью тела переходит в ударные волны, вызывающие взрыв, от которого остается воронка; на самом деле удар астероида почти неотличим от взрыва подземного заряда той же мощности на той же глубине. Интенсивный процесс порожденного соударением взрыва масштабируется иначе, чем физические процессы, определяющие окончательный размер кратера, что приводит к любопытному результату: чем больше кратер, тем больше доля ударного (импактного) расплава в окончательной впадине. Вдобавок самые крупные кратеры пробивают кору до мантии, которая заполняет их пробкой из горячего вещества — этот процесс считается движущей силой гидротермальной активности, первоначально имевшей место на Марсе.

В случае с гигантскими структурами вроде Моря Дождей, целые горные цепи могли опрокинуться вверх дном и оказаться похороненными под массами нижней коры и верхнего слоя мантии. Все, что находилось около поверхности и близко к месту удара, улетает в космос, превращенное в порошок, пар или расплав. Первоначальная воронка, образованная расширяющейся ударной волной, недолговечна, так как прочность коры для этого не достаточна. Она проваливается, и внутрь прорывается мантия. Десятки часов вся Луна сотрясается с огромной силой. Обрушение в середине кратера начинается уже тогда, когда его внешняя часть еще продолжает разрастаться, так что он напоминает скорее волну,

а не кратер, колеблясь, как круги на воде вокруг брошенного в пруд камня.

В случае кратеров с диаметром свыше нескольких сотен километров уже никак нельзя приближенно считать, что Луна плоская. Бассейн Южный полюс — Эйткен и Океан Бурь — гигантские структуры, каждая из которых покрывает четверть площади Луны. Кривизна лунной поверхности имеет тут значение, как и граница между корой и мантией, и тот факт, что направление «вниз» будет очень разным на разных сторонах кратера. Для таких крупных событий масштабирование кратеров становится весьма затруднительным, поэтому нам остается лишь полагаться на моделирование с помощью гидрокода, который учитывает геометрию шарообразной планеты посреди космоса.

Гигантские столкновения — еще более сложный случай. У такого события нет центра, и не существует лаборатории, где мы могли бы воспроизвести его в меньшем масштабе. Тем не менее мы можем сделать некоторые приблизительные расчеты. Гигантские столкновения планет, захваченных взаимной гравитацией, случаются примерно на *скорости убегания* двух соударяющихся тел. Это та скорость (она же — вторая космическая), с которой одно тело падало бы на другое в идеальной ситуации, когда они являются единственными объектами во Вселенной: 11,2 км/с для Земли и 2,4 км/с для Луны. Соответственно, при масштабировании такие столкновения можно считать «самыми медленными»: если летящее тело и его мишень сравнимы по размерам и взаимодействуют примерно со своей скоростью убегания, то только для того, чтобы завершился физический контакт, потребуется целый час. После этого столкновение развивается в течение многих дней, представляя собой гравитационное и механическое взаимодействие двух тел, у которых сливаются

или пытаются слиться ядра. Такие явления мы можем изучать только с помощью трехмерного компьютерного моделирования, которое учитывает взаимное гравитационное взаимодействие всех компонентов системы, а также все остальные физические аспекты ударного кратерообразования. Картина начинает напоминать взаимовлияние галактик, и в самом деле, для этих двух типов моделирования используются одни и те же гидрокоды.

Один аспект физики столкновений достаточно прост. Если вы хотите срастить две планеты в одну, вам нужно объединить и их импульсы — это закон Ньютона. Когда вы стреляете в лежащий на столе деревянный брусок, он поглощает импульс пули и улетает со стола со скоростью, равной скорости пули, деленной на относительную массу бруска. То же самое происходит и с вращательным движением. Представьте, что астронавт парит в безвоздушном пространстве и хватает вращающуюся коробку с инструментами. В итоге он тоже начнет вращаться, но более медленно, пропорционально своему более значительному моменту инерции³. Если коробка вращается слишком быстро или слишком тяжела, астронавт не сможет ее удержать.

Можно провести аналогию между этой неспособностью удержать коробку и двумя планетами, пытающимися вырасти в процессе гигантского столкновения. Из-за момента импульса двум планетам сходного размера трудно сцепиться воедино, и при компьютерном моделировании мы наблюдаем, что гигантские столкновения приводят к слиянию планет только примерно в половине случаев. Все прочие можно назвать «столкновениями с оставлением места происшествия», когда две планеты, ошеломленные и поврежденные, продолжают двигаться своими разными дорогами.



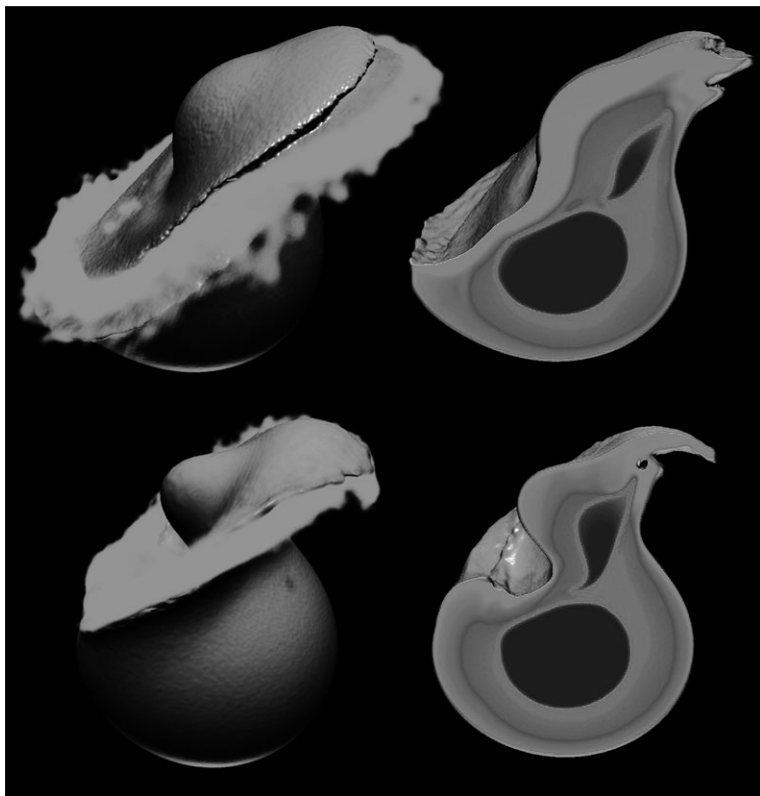
Комета Шумейкеров — Леви 9, которую разорвало приливными силами неподалеку от Юпитера в 1992 г. Фото получено космическим телескопом «Хаббл» в 1994 г., за несколько месяцев до того, как все фрагменты столкнулись с Юпитером на следующем обороте. В ранней Солнечной системе «столкновения с оставлением места происшествия» порождали похожие «бусы» тел планетного масштаба.

NASA/HST

Иногда более маленькая убегающая планета выживает лишь в ограниченном смысле, распадаясь на множество субпланет,двигающихся после столкновения как бусины на нитке, — это механизм формирования целых семей планетных тел, имеющих общий химический состав. Они варились в одной «кастрюле с рагу», но некоторым досталось больше мяса, а другим — одна картошка. И вот они летят в неизведанную синюю даль, полдюжины новых планет, некоторые — богатые горными породами, другие — металлические, а третьи — океанические... И это не просто абстрактные рассуждения: мы сами наблюдали подобное событие в 1992 г., когда Юпитер разорвал на части комету.

Стандартная модель образования Луны в результате гигантского столкновения находится посередине между аккрецией и оставлением места происшествия. В ходе одного из последних крупных событий такого рода олигарх размером с Марс и массой в одну десятую массы Земли, сталкивается с нашей планетой под углом в 45° на скорости, близкой к скорости убегания⁴. Это достаточно типичный случай, если судить по тому, что мы знаем о последнем этапе формирования Солнечной системы. Имея диаметр более чем в два раза меньше земного, Тейя не вошла в плотный контакт с Землей; хотя это и наиболее вероятный угол удара, вероятность аккреции на нем не максимальна. При соударении под углом более 60° (что соответствует четверти всех соударений) практически любое гигантское столкновение проходит с оставлением места происшествия. Чтобы погасить момент импульса, соударение должно быть более-менее лобовым. В момент столкновения Тейя двигалась относительно медленно, так что она потеряла достаточный момент, чтобы попасть в ловушку тяготения Земли и быть разорванной ударом и земным притяжением, действующим как огромная приливная сила. Ее разорванная масса зашла на второе столкновение примерно через десять часов. На этот раз она двигалась еще медленнее, что в результате закончилось аккрецией.

Согласно стандартной модели, ядра слились быстро — примерно за несколько часов. Для любой системы существует характерное время гравитационного взаимодействия $(Gr)^{-1/2}$, где G — это ньютоновская гравитационная постоянная⁵, а ρ — плотность вещества в граммах на кубический сантиметр (для воды она равна 1, для горных пород — 3). Ядра погружаются и сливаются, что придает центральной части тела огромную скорость вращения. Пограничная область между ядром и мантией вовлекается в это движение, и от планеты отрываются огромные капли богатого мантийными



Два примера гигантских столкновений. В результате одного из них появится Луна, а в результате другого — нет. Участвующие в соударении тела показаны через час после начала контакта. Справа — поперечные сечения, где разные оттенки соответствуют разной плотности. В верхнем случае ядра проходят мимо друг друга («столкновение с оставлением места происшествия»), а в нижнем — вот-вот сольются в единое целое.

Alexandre Emsenhuber (U. Arizona)

породами материала — в точности, как это представлял себе Дарвин; на самом деле этот процесс можно воспринимать как расщепление, запущенное в результате столкновения. Ядро Тейи было почти полностью поглощено Землей, поэтому Луна в конце концов сформировалась из протолунного диска, состоящего в основном из горных пород.

Если бы Тейя двигалась всего на 10% быстрее, она бы продолжала существовать как отдельная планета, полностью опустошенная, но избежавшая плена земного тяготения и вновь вышедшая на орбиту вокруг Солнца. Однако столкновение замедлило бы ее, так что она оставалась бы где-то поблизости и с большой вероятностью столкнулась бы с Землей вновь. Такую ситуацию называют *цепочкой столкновений*. Каждое из них замедляет олигарха, так что каждое следующее с большей вероятностью ведет к слиянию — если не это, то следующее станет последним, как у пружинки-слинки, шагающей вниз по покрытым ковролином ступенькам⁶.

Гигантские планеты знамениты своими поразительными атмосферами и внутренними областями, испещренными полосами облаков и клубящимися ураганами. Но, каким бы завораживающим ни был этот вид и до какой бы степени они ни главенствовали в определении динамики движения планет, у планет-гигантов нет *поверхности* в том смысле, в каком ею обладают землеподобные планеты и крупные ледяные тела, такие как Плутон и Европа. Поверхность — это двумерный рубеж между жидкостью и газом (если речь идет об океане), или между воздухом и сушей, или между водой и льдом. Поверхность — это граница между двумя состояниями вещества, которая обеспечивает физический контраст и существование различных экологических ниш. Нас окружает безумный мир, полный жутких неожиданностей, а поверхности дарят нам места, которые можно назвать домом, места, где мы находим убежище, тепло и покой.

На Земле попадают организмы, которые не живут на поверхности или возле нее: это свободно плавающий морской планктон и никогда не спящие акулы. Тем не менее и они в конечном счете зависят от того, что происходит

на поверхности океана: от газообмена O_2 и CO_2 с атмосферой, от последствий воздействия солнечной энергии, от продуктов жизнедеятельности организмов, живущих в верхнем, пропитанном солнечным светом и кислородом слое воды. Существа, никогда не видящие солнечного света, питаются существами, живущими у поверхности (на Земле еженощно наблюдается миграция снизу вверх для поедания этого приповерхностного фитопланктона). Еще глубже, там, куда организмы падают, когда начинают разлагаться, есть донная поверхность, где очень странные существа живут и размножаются среди геотермальных источников и черных курильщиков. Самое большое количество и разнообразие живых существ на Земле можно обнаружить среди плавных градиентов и резких контрастов приливно-отливной зоны, соединяющей сушу, атмосферу и океан благодаря периодически меняющемуся гравитационному воздействию Луны и Солнца. Неровности, поры и зоны проницаемости — лучшие места для химических реакций, которые поддерживают термодинамику жизни и обеспечивают обмен водой и растворенными в ней веществами сквозь мембраны, альвеолы, капилляры и жабры.

Один из неписаных законов изучения планет — всегда следовать за водой. Мы также должны следовать и за нишами. Тут вода опять-таки играет уникальную роль, так как может создавать собственные закоулки благодаря возможности сосуществования различных агрегатных состояний в районе тройной точки, где газ и жидкость становятся твердой фазой (замерзание), твердая фаза превращается в жидкость (таяние или растворение), а твердая фаза и жидкость становятся газом (возгонка или испарение). Кроме того, самые разные молекулы растворяются в воде, где они могут распадаться, собираться заново и выпадать в осадок как новые твердые вещества, а также менять ее физические характеристики (иначе

говоря, плотность) и химические свойства⁷. Большая часть запасов пресной воды на Земле находится в подземных водоносных пластах в верхнем слое коры. На самых высоких широтах, как на севере, так и на юге, пресная вода хранится в ледяных шапках толщиной в несколько километров, и этот слой льда регулирует климат на планете, отражая часть исходящей от Солнца энергии в космос — как солнцезащитные козырьки в вашем автомобиле. Под самыми толстыми ледовыми щитами давление так велико, что геотермальное тепло вызывает там таяние, так что под ними также имеется жидкая вода.

Ледовый покров простирается и на океан, где возникают постоянные и сезонные шельфовые льды — все благодаря тому примечательному факту, что твердая вода плавает в жидкой воде. Пару раз за геологическую историю Земли в периоды «Земли — снежного кома» или «Земли-снежка» шельфовые льды доходили до экватора. В те времена вы бы не узнали нашу планету из космоса. Почти вся она была покрыта ледяным шельфом и напоминала скрытый под криосферой спутник Юпитера Европу. Ледяные шельфы Земли представляют собой лабиринт расщелин и хребтов, террас и пещер. Это рай для амфипод, водорослей и полярной трески. Нижняя сторона ледяного покрова во многом похожа на морское дно, только перевернутое вверх ногами: там возникает богатая экологическими нишами среда, которая может быть обычной для ледяных миров по всей Галактике.

Гидрологический цикл Земли — поразительный вечный двигатель, жемчужина Солнечной системы, невероятное благо для жизни. Обратите внимание на всего один его аспект — сток дождевых вод с континентов. Текущая вода несет в океан растворенные в ней минеральные вещества; ионы этих минералов реагируют с атмосферным углекислым газом, растворенным в нескольких верхних метрах

водной толщи. Как будет описано ниже, растворенный в воде кальций образует карбонаты, которые выводят CO_2 из атмосферы. Если на планете становится слишком жарко (слишком много атмосферного углекислого газа), это повышает количество осадков, что приводит к увеличению стока. В океане появляется больше кальция, что означает дополнительный вывод CO_2 и охлаждение климата.

Кто-то подарил нам великолепную саморегулирующуюся машину. Но мы, как парень с перочинным ножом, пытающийся разобрать швейцарские часы, портим в ней важнейшие обратные связи: потеря отражающего ледяного покрова приведет к уменьшению защиты от Солнца и повышению уровня метана — парникового газа, который может высвобождаться в результате таяния вечной мерзлоты. Планеты дышат размеренно, но иногда чихают.

Лед тает под давлением по той же причине, по какой он плавает в воде: в твердом состоянии вода занимает больший объем (имеет меньшую плотность), чем в жидком. Таким образом, сжимая лед в меньший объем с помощью давления, вы переводите его из твердого состояния в жидкое без изменения температуры. Именно поэтому тонкие лезвия коньков скользят без трения: весь вес конькобежца сконцентрирован на узком поперечном сечении, контактирующем со льдом, то есть все давление приходится на эту полоску, так что твердый лед на мгновение превращается тут в жидкость, снова затвердевая за лезвием конька.

На высоких широтах Марса преобладают скованные льдом грунты, а на полюсах лежат ледяные шапки. Там, в полутора километрах ниже уровня поверхности, радары зафиксировали эхо мелкого водоносного пласта, который некоторые называют «озером». Его присутствие неудивительно,

если учесть, что жидкая вода может существовать на глубине, даже если поверхность скована льдом. Чем глубже вы продвигаетесь, тем выше температура и давление; когда-нибудь вы достигнете зоны, где рассол может скапливаться, не замерзая. Хотя он, вероятно, токсичен для любых живых существ, которых мы знаем и любим, именно там могла развиваться особая марсианская жизнь, когда поверхность планеты стала холодной, суровой и негостеприимной. Есть ли там, внизу, микроорганизмы, адаптировавшиеся к рассолу? Сейчас делается первый шаг в исследовании подземного пространства Марса; когда я пишу эти строки, созданный NASA посадочный модуль «Инсайт» пытается пробурить там пятиметровую скважину, но работа идет непросто. Чтобы пройти в тысячу раз глубже, на Марсе потребуется инфраструктура, о которой мы пока не можем и мечтать.

Далее существует переход из твердого состояния в пар — сублимация, или возгонка. Кубики льда в глубине морозильника исчезают, оставляя после себе мутные кусочки, которые никому не посоветуешь класть в свой бокал. Что же происходит с водой из таких кубиков льда, мумифицированных рыбных палочек или забытой замороженной стручковой фасоли? Она оседает изящным слоем измороси на стенках морозильной камеры и собирается в более крупные, грубые частицы. Такие эксперименты, регулярно проводимые в холодильниках студенческих общежитий, — на самом деле совсем неплохая аналогия для процессов, происходящих на поверхности богатых льдом грунтов Марса, а также на кометах и ледяных спутниках, хотя для того, чтобы сделать все правильно, вам нужно создать в морозильной камере почти полный вакуум, перевести ее в куда более холодный режим и облучать все ультрафиолетом. На свете есть с десяток планетологических лабораторий, где ученые занимаются именно этим⁸.

Каждое агрегатное состояние воды имеет характерную систему расположения молекул Н-О-Н: они могут быть заперты в кристаллических решетках (льды различной структуры⁹) или свободно двигаться (жидкое или газообразное состояние); бывает, что и в твердом состоянии молекулы не упорядочены (аморфное твердое тело). Агрегатных состояний воды на самом деле множество — их открыто уже более десятка (и да, лед-девять существует, хотя он далеко не так интересен, как о нем рассказывает Курт Воннегут¹⁰). Добрая половина этих состояний имеет определенное значение в геологии.

Поскольку вода на планетах никогда не бывает чистой, эти состояния являются лишь идеальными. Добавьте больше соли, и вы получите рассол с высокой плотностью и более низкой температурой замерзания. Именно поэтому зимой тротуары посыпают солью: она понижает температуру замерзания, так что воде труднее превратиться в лед. Планета, состоящая из соленой воды, может иметь очень своеобразную геологию. Одно из таких небесных тел — Тефия, другое — Япет с его хребтом, придающим ему форму грецкого ореха. Некоторые считают, что эти горы возникли, когда спутник треснул от внутренних напряжений, возникших при замерзании воды. (Другие полагают, что это результат конвекции льда и рассола. Есть и мнение, что так получилось из-за спутника второго порядка, который когда-то обращался вокруг Япета, но потом упал на него. Да, Япет действительно странный.)

При большем давлении, характерном для еще больших глубин, особенно если еще подбавить жара, структура силикатных минералов может меняться так, что в нее встраиваются молекулы воды. Получатся гидросиликаты, такие как тальк и серпентин, где вода включена в молекулярную структуру, или же глины. На самых крупных из спутников

(Ганимеде и Титане) гидросиликаты могут преобладать в мантиях, которые перемешивались термальной конвекцией или гигантскими столкновениями во время аккреции. Жидкая вода в тесном контакте с теплыми горными породами и достаточное количество геотермальной энергии, чтобы запустить глобальную конвекцию, — достаточно ли этого для зарождения жизни? Солнечный свет тут бы не помешал, но раз на Земле существуют организмы, обитающие глубоко под землей, он не является обязательным.

Наличие жидкой воды в месте соприкосновения поверхности и атмосферы (то есть открытый океан) действует как ограничительный механизм для температуры на планете. Именно это позволяет удерживать физические условия на Земле в районе тройной точки. Пока существуют океаны, температура на планете не поднимется выше точки кипения, потому что любая избыточная энергия уйдет на превращение воды в пар. (Когда вода испарится полностью, все поменяется: посмотрите на Венеру.) Подобным же образом, до тех пор, пока открытый океан не замерз, в масштабе всей планеты температура не опустится ниже точки замерзания¹¹. Кроме того, колебания температуры ограничивает атмосферная влажность, подобно тому, как наша кожа испаряет влагу в сухой воздух, чтобы охладить тело¹².

Если поверхность раздела жидкости и пара исчезает (то есть океана больше нет), всем ограничениям приходит конец: температура может подниматься и опускаться до любых значений. Когда холодным сырым вечером столбик термометра начинает опускаться, в определенный момент похолодание прекращается (хотя из-за сырости кажется, что очень холодно). Пар из воздуха начинает конденсироваться на мокрых ветках, оседать в виде росы на траву и на одежду. Может даже начать моросить мелкий дождь. Все эти капли и аэрозоли имеют свои поверхности. Температура

перестает снижаться, когда формирование таких поверхностей приводит к равновесному значению величины, называемой энтропией (я не буду даже пытаться объяснять это понятие, потому что сам его не понимаю). В сухой пустыне, где относительная влажность составляет примерно 20%, в теплый солнечный день температура может резко упасть ниже точки замерзания, потому что там нет воды, чтобы конденсироваться. Кроме того, поскольку там меньше молекул H_2O , поглощающих инфракрасное излучение, тепло уходит быстрее, и по ночам очень холодно. Такого не может случиться в тропических джунглях или на богатой углекислым газом болотистой планете.

Приведу еще один знакомый всем пример: поставленная в морозильник банка с водой быстро охлаждается до 0 °C и потом остается при этой температуре, пока вся вода не замерзнет. Только полностью затвердев, лед продолжит охлаждаться дальше. В процессе превращения в твердое тело содержимое банки расширяется на 9%, поэтому, если банка наполнена доверху и закрыта, она лопнет. Расширение льда не только губит банки и заставляет лед плавать по поверхности океанов и озер; также оно является одной из важнейших эрозионных сил на Земле. Вода находит себе путь вглубь горных пород, а затем замерзает, и, расширяясь, крошит их. Именно так в Италии добывают мрамор: зимой заливают воду в щели, которые предварительно высекли в камне. Вода твердеет и расширяется, прикладывая огромную и достаточно ровно распределенную силу. Циклическое замерзание и таяние воды, а также тот факт, что ее молекулы притягиваются друг к другу (поскольку они полярны — то есть несут асимметрично расположенные заряды), являются причиной самых разных геологических процессов: от появления из земли валунов в любом месте, где происходит цикл глубокого промерзания-оттаивания грунта¹³, до прорастания

в арктических регионах бугров пучения, когда массивы льда до сотен метров в диаметре выдавливаются из земли, как прыщи, из-за накопления воды вокруг постоянно замерзшего ядра.

Землю иногда называют планетой Златовласки¹⁴: не слишком горячая, не слишком холодная¹⁵. Она обращается вокруг стабильной звезды в зоне обитаемости и имеет атмосферу с давлением в один бар¹⁶, состоящую в основном из азота (78%), кислорода (21%), почти 1% аргона, 0,041% углекислого газа, а также меняющейся доли водяного пара, которая зависит от температуры, давления и местоположения. На уровне моря она обычно составляет 1%. Без этого атмосферного одеяла средняя температура у поверхности перенесла бы резкие колебания вокруг среднего значения в -18°C . Океаны бы заморзли.

С начала индустриальной эпохи следовое содержание углекислого газа выросло более чем на 40%, так как наши двигатели сжигают при работе ископаемое углеродное топливо (нефть, газ и уголь). CO_2 , основной продукт процесса внутреннего сгорания — газ невидимый (в том смысле, что волны видимого света с ним не взаимодействуют) и в целом весьма инертный. Он не вредит нам, пока не начинает вытеснять кислород, которым мы дышим. Растения в ходе фотосинтеза поглощают углекислый газ и воду, производя атмосферный кислород (O_2), а также органические компоненты биомы и источники энергии (углеводы), необходимые для растительной и животной жизни, основанной на соединениях углерода¹⁷.

CO_2 — это парниковый газ, и в нашей атмосфере его сейчас слишком много. Видимые (желтые) лучи Солнца проходят сквозь него, чтобы согреть поверхность Земли и океана.

Но идущему в обратном направлении инфракрасному излучению согретой поверхности пробиться через него уже сложно. Именно по этой причине небо непрозрачно для астрономических наблюдений в инфракрасной части спектра¹⁸. На самом деле самый мощный парниковый газ — это вода, но ее вклад в потепление вторичен. Когда температура низка, воздух становится суше и таким образом вода не оказывает заметного эффекта. Когда тепло, атмосфера содержит больше водяного пара, что усиливает парниковый эффект.

На Венере, которая сформировалась ближе к Солнцу и имеет атмосферу, почти целиком состоящую из углекислого газа, парниковый эффект превратился в неудержимо нарастающую катастрофу. Чем теплее становилась Венера, тем больше воды испарялось с ее поверхности, что разогревало планету еще больше и заставляло воду покидать атмосферу под действием сильного солнечного ветра. (Солнечная радиация воздействует на Венеру сильнее, чем на Землю, потому что та находится ближе и имеет очень слабое магнитное поле.) Спустя миллиарды лет почти вся имевшаяся там изначально вода исчезла, хотя значительное ее количество могло сохраниться в мантии, ожидая возможности вырваться наружу. Возможно, в этом не было ничего неизбежного. Если бы там только имелся геологический процесс, отводивший углекислый газ, на Венере не стало бы так жарко и до сих пор сохранились бы жидкие океаны. Ирония состоит в том, что если бы океаны имелись на венерианской поверхности, то был бы и геологический процесс, позволяющий избавляться от всего этого CO_2 .

Около поверхности земного океана вода аэрируется благодаря завихрениям волн и образованию пены. Рыбы дышат растворенным кислородом через жабры. Атмосферный углекислый газ тоже растворяется, и часть его реагирует с водой, давая в итоге угольную кислоту¹⁹: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{H}_2\text{CO}_3$

(если упростить длинный ряд реакций). В то же время ионы кальция в результате эрозии континентальных пород попадают в реки, которые несут их в море. Реакция этих ионов с углекислотой высвобождает ионы водорода и приводит к образованию *карбоната кальция* CaCO_3 . Одно из главных местилищ CO_2 является биологическим по своей природе — это экзоскелеты кораллов из минерала под названием арагонит, а также компоненты растений, водорослей и планктона повсюду на залитых солнцем суше и поверхности океана.

Но самый большой резервуар для атмосферного углекислого газа — это его выпадение в осадок, когда вода становится перенасыщенной кальцием и углекислым газом (подобно накипи в вашем чайнике)²⁰. Кристаллы CaCO_3 скапливаются на морском дне²¹, и когда слой этих отложений становится достаточно толстым, он превращается под давлением в такие горные породы, как доломит и известняк. Эоны спустя они могут быть вытолкнуты вверх благодаря выгибанию и разламыванию плит, и тогда образуются фантастические геологические структуры вроде белых скал Дувра или каменного леса в Гуанси.

Это отведение CO_2 в ходе образования карбонатов в мировом океане может функционировать как насос, только если постоянно поддерживать его работу. Здесь на сцену выходит тектоника плит: за периоды порядка сотен миллионов лет морское дно погружается в мантию, как конвейерная лента, унося с собой богатые углеродом осадочные породы. На первом этапе этот процесс вызывал падение содержания CO_2 в атмосфере.

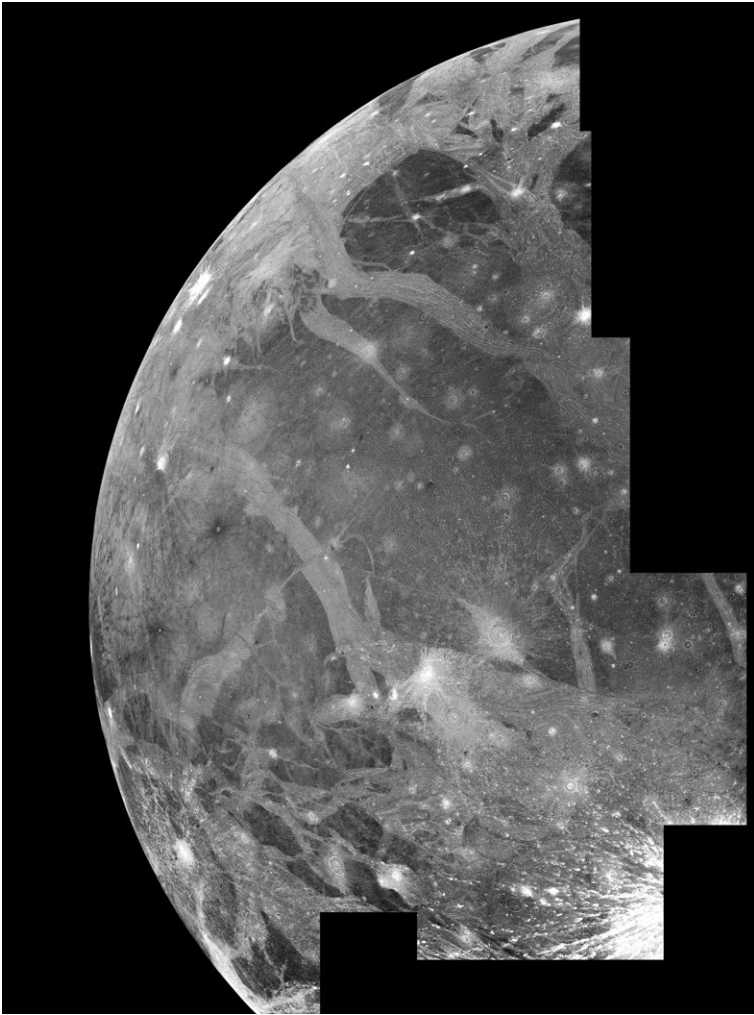
Когда тектоническое движение плит приобретает устойчивый характер, часть погребенного в мантии CO_2 начинает возвращаться в атмосферу через вулканические кратеры. Таким образом на сегодняшний день сложилось равновесие,

когда большая часть CO_2 заключена в коре и мантии. Если вы пересчитаете на углекислый газ белые скалы Дувра, экстраполируете результат на всю территорию земного шара, а также учтете все то, что, как считают ученые, растворено в мантии, у вас получится атмосфера CO_2 с давлением порядка десяти бар, под которой Земля изнемогала бы от жары.

Представим, что мы можем осадить весь углекислый газ из атмосферы Венеры с помощью аналогичного процесса выветривания континентальных пород в глобальные океаны и образования карбонатов. Итогом окажется внешняя карбонатная кора толщиной 800 м^{22} — светлая по оттенку поверхность, которая эффективно отражает в космос солнечные лучи. В итоге Венера может стать планетой, почти пригодной для жизни, с потрясающими, хотя и пугающе суровыми пейзажами. Вам понадобятся хорошие темные очки.

В настоящем и ближайшем будущем, здесь, на Земле, такое «терраформирование», как это ни грустно, уже не относится к области научной фантастики. Мы как вид приняли решение нарушить равновесие биосферной системы фиксации углерода. Последний раз, когда я проверял, бензин стоил меньше 80 центов за литр — такая дешевизна свидетельствует о безрассудном использовании ископаемого углерода, несмотря на общеизвестные теперь факты²³.

Для жизни в том виде, в каком она нам знакома, растворителем служит вода, но разнообразие живых организмов невероятно. Подробности туманны, но мы знаем, что жизнь на Земле началась с *экстремофилов*, которые прекрасно себя чувствовали в условиях позднего катархея. Среди них были галофилы, термофилы и барофилы — организмы, жившие в рассоле, возле гейзеров и на огромной глубине. Они не исчезли и сейчас — просто заняли свои особые ниши



Мозаика из 17 фотографий, сделанных во время пролета Ганимеда космическим зондом NASA «Вояджер-1» в 1979 г. На ней видны заполненные рифты, угловатые массивы, свежие отметины и несколько крупных кратеров, но никаких бассейнов, которые напоминали бы лунные. Под этой испещренной узорами поверхностью, под 100-километровым слоем льда находится жидкий соленый океан, переходящий в подстилающее основание из льда VI, ниже которого лежат гидросиликаты, а еще ниже — каменистая мантия и плотное металлическое ядро.

NASA/JPL

(вспомните наши рассуждения о глубинных, наполненных рассолом карманах на Марсе). Но любому из этих организмов — неважно, к каким экстремальным условиям они приспособлены, — на определенных этапах существования требуется вода. А как может обстоять дело в других местах?

Одно из самых очевидных мест, о которых нам следует подумать в этой связи, — это Ганимед, спутник Юпитера диаметром 5000 км, самое массивное покрытое льдом тело в Солнечной системе. Это самый большой из известных нам спутников, пока мы не обнаружим еще более крупные спутники, обращающиеся вокруг планет у других звезд. Глубоко внутри Ганимеда расположен океан, о котором мы знаем по замерам магнитного поля во время экспедиции космического зонда NASA «Галилео» (о ней мы поговорим ниже) и из того простого факта, что лед тает от тепла и давления. Глубина и протяженность океана на Ганимеде неизвестна. О его химических и минералогических характеристиках можно только строить предположения, а геологические процессы, происходящие под слоем льда, являются предметом одних лишь безосновательных догадок. Мы знаем, что океан покрыт сплошным ледяным панцирем толщиной от 50 до 100 км и что никакого взаимодействия между океаном и поверхностью не было с момента последнего крупного столкновения, которое произошло миллиарды лет назад. Доставить робота в толщу странных морей Ганимеда — куда более трудная задача, чем отправить автоматический зонд к ближайшей звезде, но, пока этого не случилось, ничто не мешает нам смотреть, думать и изучать.

Океан Ганимеда подогревается несколькими разными способами. Во-первых, это гравитационная энергия слияния, оставшаяся с момента образования спутника; ее было достаточно, чтобы полностью растопить это тело во время аккреции. Эта аккреция происходила относительно быстро,

но для выхода наружу внутреннему теплу могут потребоваться сотни миллионов лет. Далее, тепло образуется в результате распада урана и других радиоактивных элементов, содержащихся в горных породах Ганимеда. Распад некоторых атомов происходит быстро, но среди них есть и долгоживущие изотопы калия, тория и урана, которые производят энергию миллиарды лет и вносят основной вклад во внутренний разогрев Ганимеда. Кроме того, существует приливный разогрев, который также играет значительную роль. Для некоторых планетных систем он очень устойчив и, вероятно, способен производить тепло хоть триллион лет.

Чтобы понять, как происходит приливный разогрев, давайте вначале рассмотрим Луну, которая находится в состоянии приливного захвата с Землей и всегда обращена к ней видимой стороной. Если бы орбита нашего спутника была идеально круглой, с любой точки видимой стороны Земля казалась бы неподвижно висящей в небе, тогда как Солнце и звезды всходили бы и заходили каждый месяц, который аналогичен лунным суткам. Но орбита Луны не является идеальной окружностью; это эллипс с эксцентриситетом в 5%. Согласно закону Кеплера, Луна движется немного быстрее, когда находится ближе к Земле, в перигее, и медленнее, когда она дальше от Земли, в апогее. Поскольку вращение Луны вокруг своей оси остается постоянным, в перигее она обращается вокруг Земли быстрее, чем вокруг оси, а в апогее, наоборот, медленнее. Поэтому, если вы отдыхаете на лунной даче около Моря Восточного, на 90° западной долготы, Земля всегда будет находиться на восточном горизонте, каждый месяц немного приподымаясь и потом опускаясь, — очень красивый вид. Двигаясь таким образом, Земля вызывает внутри Луны периодические приливы, которые становятся причиной приливного трения, что приводит

к выработке тепла, примерно так же, как если вы будете постоянно сгибать и разгибать скрепку.

Сейчас Луна представляет собой твердое и эластичное тело, Земля находится далеко, а вызванные эксцентриситетом колебания невелики, поэтому приливное трение создает лишь едва достаточно тепла для того, чтобы поддерживать температуру вероятно существующей полужидкой области, окружающей маленькое железное ядро. Но раньше, когда Луна была гораздо ближе к Земле, приливный разогрев был огромен. Если смотреть на Юпитер с поверхности Ганимеда, он также описывает в небе небольшие круги, но гораздо чаще (каждые семь дней); кроме того, Юпитер создает более мощную приливную силу, что приводит к выделению значительно большего количества тепла. Кашеобразная океаническая мантия спутника сдвигается взад-вперед, и, хотя сейчас тепла было бы недостаточно, чтобы растопить Ганимед, если бы он замерз полностью, его хватает, чтобы не дать затвердеть океану раскола.

Ничто не дается даром, и приливное трение забирает энергию у орбитального движения спутника, снижая со временем эксцентриситет его орбиты²⁴, но в случае с Луной это происходит так медленно, что мы можем заключить, что она — плотное упругое тело²⁵. В отсутствие других факторов приливный разогрев Ганимеда в конце концов прекратился бы, Юпитер светил бы в его небе неподвижно, а приливный бутор стал бы постоянным. Но Ганимед — не единственный спутник Юпитера; он вовлечен в *орбитальный резонанс* с двумя другими галилеевыми спутниками — Ио и Европой. Как мы увидим далее, это означает, что орбита Ганимеда имеет *вынужденный эксцентриситет*, обусловленный взаимными гравитационными взаимодействиями с другими спутниками. Такое положение может поддерживаться многие миллиарды лет, так что приливный разогрев не ослабевает.

Из доступных нам данных об экзопланетах мы знаем о существовании во Вселенной суперземель с открытыми океанами глубиной в десятки километров, площадь которых в пять-десять раз превышает площадь Земли. Можно только вообразить себе их течения, штормы и цунами, возникающие в результате суперземлетрясений. Могут ли горы и вулканы подняться со дна такого водного мира, чтобы стать островами и континентами? Думаю, нет. Горы могут подниматься только до тех пор, пока они не осядут под собственным весом, и это правило действует как на суше, так и в воде, особенно на массивной планете с большой силой тяжести. Более серьезную сложность представляет то, что при высоком давлении вода переходит в твердое состояние под названием лед VI. Океаны Земли недостаточно глубоки, чтобы в них образовывался лед VI, но океаны Ганимеда простираются на глубину в сотни километров и вполне могут затвердеть²⁶. Суперземля с океанами глубиной более 30–40 км будет (если экстраполировать лабораторные данные) иметь морское дно, состоящее из льда VI, пробитого вулканическими извержениями.

Вода не полностью прозрачна для света, поэтому первичная биосфера солнечного водного мира, если она вообще возникает, будет сосредоточена в верхних 10 м, изобилующих планктоном или колонизированных гигантскими микробными матами. На дне такого океана, над корой из льда VI, жизнь может теплиться в полной темноте вокруг обширных вулканических регионов, питаясь тем, что поступает из гидротермальных источников (черных курильщиков), или разлагающимися организмами, опускающимися на дно с поверхности и формирующими при высоком давлении некий специфический илистый слой. Все это, конечно, лишь предположения, но мы живем в мире, полном вопросов «кто знает?». Уже обнаруженные нами водные миры

находятся достаточно близко к своим звездам, скорее всего, окутаны паром и, таким образом, менее интересны с точки зрения наличия жизни. Но более далекие от звезд планеты обнаружить труднее, так что «водные миры Златовласки» вероятно существуют и, возможно, уже открыты. Наконец, находящиеся еще дальше водные миры представляют собой миры ледяные, однако, если они имеют размер суперземель, их криосфера будет геологически активной благодаря значительному количеству внутреннего тепла, которому нужно вырваться наружу: на охлаждение настолько массивной планеты потребуются миллиарды лет²⁷. Попробуйте только вообразить себе геологию такого небесного тела!

Вода на землеподобных планетах содержит минералы, растворенные в ней при взаимодействии с силикатной корой и мантией. Добавьте к воде магний, серу, натрий, хлор и аммиак — все это компоненты солей, — и получится рассол плотнее чистой воды, который остается жидким при температурах, когда чистая вода замерзает. Когда океан такого рассола начинает покрываться льдом, первые кристаллы состоят из пресной воды. Именно они всплывают на поверхность, образуя ледяной шельф. Такое положение дел — устойчивый к замерзанию рассол, покрытый термоизолирующим ледяным панцирем, — рецепт долговременного выживания водяных океанов по всей Галактике.

По мере того как ледяной панцирь утолщается, оставшаяся вода становится все солонее, превращаясь в странную смесь, которая не замерзает при температуре -30°C и даже -60°C , но становится вязкой, как лава. Именно удивительные и неожиданные свойства льдов и рассолов делают Плутон настолько криофантастическим миром. Одно из самых необычайных геологических явлений в Солнечной системе — это криовулканизм, который запускается, когда в соленом водоносном слое или океане замерзает последняя

жидкость. Расширение затвердевающего льда заставляет остатки рассола вырываться наружу под давлением, словно зубная паста через дырочку в тюбике. Это выглядит как извержение, поток или выдавливание вязкой пробки и может вызывать глобальное расширение и региональное растрескивание ледяной коры, признаки чего мы наблюдаем в верхних 100 км объема Ганимеда.

Следующей экспедицией к ледяным спутникам Юпитера станет полет запущенного NASA межпланетного зонда «ЕвропаКлиппер», старт которого запланирован на 2020-е гг. Аппарат совершит многократные облеты Европы, а его радар сконструирован так, чтобы засечь океан под ледяным панцирем. В рамках экспедиции Европейского космического агентства (ESA) JUICE²⁸ на 2030 г. запланированы облеты галилеевых спутников, а закончиться она должна восьмимесячным орбитальным полетом вокруг Ганимеда. Радар аппарата будет способен заглянуть на десятки километров вглубь и, возможно, обнаружит подземные озера, которые могут оказаться схожими по масштабу с цепочками гигантских озер вокруг станции «Восток» в Антарктиде. Но для того, чтобы действительно понять внутреннее строение ледяных спутников, потребуется нечто большее, чем дистанционные наблюдения. Для этого нужен целый ряд распределенных по поверхности спускаемых аппаратов, каждый из которых собирает сейсмические данные, которые можно свести воедино в трехмерную картину. Это дело далекого будущего. Поверхность Ганимеда опасно радиоактивна, а ее кристаллические поля полны трещин, ям и ледяных игл — всего того, из-за чего ответственные за посадку инженеры просыпаются в холодном поту. Сейчас мы можем исследовать подповерхностные океаны только мысленно. Любые наши представления о них основаны на лабораторных экспериментах и опыте изучения разнообразных экстремальных

глубоководных и водоносных сред на Земле: озера Восток, Марианской впадины и затопленных пещер мексиканского штата Кинтана-Роо.

Планеты с поверхностями принадлежат к особой категории. На них мы можем совершить посадку, остановившись на прочном слое льда или камня или же на водах океана. Титан — это одна из самых благодатных для приземления планет, так как у него есть массивная атмосфера, куда можно погрузиться, как это делают астронавты, возвращаясь в земную атмосферу, но только гораздо медленнее. Когда-нибудь Титан станет отличным местом для полетов благодаря своей плотной, стабильной атмосфере и низкой силе тяжести.

Что произойдет с вами во время свободного падения на газовый гигант, скажем на Юпитер или Сатурн? Во-первых, каждую секунду вы будете ускоряться на десятки метров в секунду, а каждую минуту — на километры в секунду. Тихий, но зрелищный полет будет продолжаться, пока вы в конце концов не врежетесь в неплотные верхние слои атмосферы на скорости 60 км/с (в случае Юпитера). Это создаст динамическое давление и турбулентность, порождающую такую вибрацию, какую не может выдержать ни одно позвоночное; будем надеяться, вы не забыли про виброизоляцию. Двигаясь в пять раз быстрее, чем возвращающийся на Землю астронавт, ваша капсула наберет в пять в квадрате, то есть в 25 раз больше кинетической энергии, которая должна будет рассеяться в виде тепла, что потребует наличия абляционной теплозащиты в 25 раз тяжелее, чем на «Аполлоне»²⁹. Предположим, вы выживете и начнете торжественный спуск на парашюте сквозь ясные юпитерианские небеса; под вами раскинется поразительный пейзаж из разноцветных облаков. Тем не менее насладиться этим зрелищем вам

будет непросто, поскольку при юпитерианской силе тяжести вы будете весить примерно четверть тонны.

При подходе к облакам атмосферное давление будет возрастать, и ваша капсула начнет скрипеть и трещать, пока ее корпус приспособляется к этому медленному спуску в глубины планеты после космического вакуума и гиперзвукового входа в атмосферу. Вскоре давление достигнет значения в один бар, как на поверхности Земли. Глубже, при двух барах, атмосфера Юпитера имеет комнатную температуру и, хотя такое давление аквалангист испытывает на глубине 10 м, эти физические условия вполне переносимы. Но люк открывать не стоит: воздух, который устремится внутрь корабля, будет плотной и токсичной смесью водорода, двуокиси серы, аммиака и метана. А если учесть ветра и шквалы, достигающие скорости в сотни узлов, вам точно захочется держать капсулу плотно задренной.

Если эти мощные ветры порвут ваш парашют, вы упадете вниз, как камень. Вначале вы почувствуете кратковременное облегчение — груз гравитации спадет, как только начнется свободное падение. Но заключительная часть этой истории будет короткой: вы пробьете облачный покров, а потом снова замедлитесь, войдя в более плотные слои атмосферы, и в конце концов будете раздавлены в лепешку³⁰. Все наши данные о глубинных слоях атмосферы Юпитера получены от спускаемого зонда, отделившегося от аппарата «Галилео» в 1995 г. и вошедшего в атмосферу планеты-гиганта. Последнее сообщение от зонда было получено с глубины 160 км при давлении в 22 бара и температуре 152 °С. О дальнейшем можно только строить догадки: вскоре после этого парашют зонда расплавился, и в течение часа он опустился в области с давлением выше сверхкритического давления жидкого водорода³¹, где и растворился его титановый корпус.

*Как убедится в дальнейшем читатель,
с этим умозаключением нет никаких проблем.*

Персиваль Лоуэлл, «Марс и его каналы»

(Лоуэлловская обсерватория, 1895)

Кроме поверхности Земли, лучше всего нам знаком планетный ландшафт, который чудаковатый американский астроном Персиваль Лоуэлл провозгласил полным каналов, сооруженных близящейся к упадку расой гигантов, чтобы орошать свои оазисы в марсианской пустыне: «Их мышцы, если учесть их длину, ширину и толщину, в 27 раз эффективнее наших, то есть они в 27 раз сильнее нас» при одной трети земной гравитации. Оставим в стороне физику — слишком неплотную атмосферу и слишком низкую температуру для подобных существ, — но книги Лоуэлла пробудили у публики достойный его эпохи интерес к планетологии.

Карл Саган, более близкий к нам по времени, но настолько же незашоренный энтузиаст поисков инопланетной жизни, изучал химическую эволюцию добиологических соединений на Марсе, Титане, Венере и древней Земле, а также на кометах, астероидах и по всему космосу. Он признавал, что наши планеты — это лишь несколько капель во вселенском океане и что без огромного везения нам не разобраться, где именно искать жизнь; также Саган был горячим сторонником двух величайших научных экспедиций в истории — программ «Вояджер» и «Викинг».

Первые устройства, которые достигли поверхности Марса и успешно выполнили программу исследований, — посадочные модули «Викинг-1» и «Викинг-2» — были запущены в 1975 г. и практически бесперебойно проработали несколько лет. Каждая из этих экспедиций включала в себя пару космических аппаратов — орбитальный модуль для картографирования марсианской поверхности

и крупный посадочный модуль для оценки обитаемости планеты и проведения экспериментов по поиску там жизни. Оба посадочных модуля сели в холодных пустынях — один на равнине Хриса, другой на равнине Утопия — и выдержали многие марсианские ночи и морозные зимы, получая энергию от радиоизотопных термоэлектрических генераторов. Эти экспедиции были поразительными достижениями, но в плане поиска жизни или хотя бы подходящих условий для нее удача им не сопутствовала. Поскольку их посадочные аппараты не были мобильными, не могли они и сменить место работы. Закипели споры о том, те ли они провели эксперименты и в тех ли точках, или же и то и то нужно было делать совсем по-другому.

Наука — ветреная особа, и, поскольку экспедиции «Викингов» не добились успеха в поисках жизни, она повернулась к Марсу спиной. Энергия ученых была направлена в другое русло. Аппараты «Вояджер» и «Галилео» пролетели через внешнюю Солнечную систему, «Магеллан» составил геологическую карту Венеры, а советские ученые приложили значительные усилия, чтобы совершить посадку на спутник Марса Фобос. В 1986 г. Япония, Европа и СССР отправили экспедиции к комете Галлея. Успешных полетов к Марсу, организованных NASA или кем-либо еще, не было до 1997 г. Немыслимо, но к Луне между 1976-м и 1990 г. тоже никто не летал.

Без новых данных споры о наличии на Марсе воды стали беспредметными и ожесточенными. К 1998 г., когда я поступил в магистратуру и впервые столкнулся с этими новейшими воззрениями, ученые делились на тех, кто соглашался, что на Марсе есть хотя бы признаки наличия заметного количества жидкой воды, и тех, кто это отрицал. Были распространены мнения, что каналы и каньоны либо образовались за миллиарды лет воздействия переносимого ветром песка,

либо были пробиты реками насыщенного пылью углекислого газа, высвобожденного из грунта. То есть в ходу были любые версии, кроме влияния жидкой воды, которое считалось невероятным. По прошествии времени можно сказать, что этот характерный для 1980-х гг. скепсис по поводу наличия на Марсе воды был довольно странным, хотя именно скепсис является самым мощным инструментом науки. С тех пор благодаря последующим запускам посадочных и орбитальных модулей с усовершенствованными спектрометрами и радарам доказательства наличия на Марсе жидкой воды стали неопровержимыми. Когда-то она протекала по глубоким расселинам и каньонам, образовывала несколько медленных рек с извилистым руслом и наполняла широкие кратерные озера. Вода заполняла вызывающую такие споры Великую Северную равнину, образовывая Северный океан. Маятник научного интереса качнулся в обратную сторону до такой степени, что теперь на Марс приходится львиная доля бюджета, выделяемого NASA на изучение Солнечной системы.

Самые амбициозные из этих планов — операция по доставке на Землю марсианских образцов. Она начнется с запуска тяжелого марсохода «Марс-2020», который совершит* посадку около дельты предполагаемой реки в кратере Езеро и соберет образцы в несколько контейнеров. Если все пройдет хорошо, следующая экспедиция совершит посадку рядом с контейнерами, подберет их и запустит на орбиту вокруг Марса (в чем-то это похоже на то, как советские автоматические межпланетные станции «Луна» в начале 1970-х гг. брали образцы с поверхности Луны, но теперь для возвращения будет использоваться более тяжелая ракета, чтобы преодолеть более сильное притяжение Марса). На последнем

* Запуск был осуществлен 30 июня 2020 г., посадка на Марс произведена 18 февраля 2021 г. — *Прим. ред.*

этапе еще одна экспедиция заберет образцы с орбиты и доставит их на Землю. Все это выглядит достаточно сложной затеей, и так оно и есть. Три полета в совокупности будут стоить примерно те же 10 млрд долларов, что и космический телескоп «Джеймс Уэбб», так что этот проект должен стать объектом столь же внимательного рассмотрения. (С другой стороны, не забывайте, что 10 млрд — это не такая уж большая сумма.)³² Можете считать меня скептиком, но, по-моему, все яйца тут сложены в одну корзину и риски высоки. Наши ракеты никогда не стартовали с поверхности Марса, мы никогда не возвращали полезную нагрузку с орбиты в глубоком космосе, где задержка связи с Землей составляет от пяти до двадцати минут. И если два первых этапа пройдут хорошо, будет катастрофой провалить последний, так что его цена взлетит до небес. Вместо этого я предлагаю вначале сосредоточиться на активном исследовании Луны с помощью роботов, поднять таким образом уровень готовности технологии, а затем напрямую забрать контейнеры, оставленные «Марсом-2020» в кратере Езеро, и, возможно, даже уложиться в расписание.

Если образцы, привезенные с Марса, дадут однозначные доказательства существования там жизни, стоит ли нам удивляться? *Разумеется*, на Марсе была жизнь — примерно 4 млрд лет назад. Мы можем догадаться об этом с помощью дедукции. Примерно в это время жизнь на Земле цвела в достаточном изобилии, чтобы оставить след в геологической летописи, а материалы с поверхности перемещались туда и обратно между соседними планетами. Это была эпоха *баллистической панспермии*, когда выносливые организмы (например, споры, вирусы и бактерии в анабиозе) путешествовали на выброшенных в космос крупных фрагментах горных пород. На Земле возникали кратеры масштаба Моря Дождей и Моря Восточного; множество фрагментов пород верхнего

слоя коры выходили на траектории, ведущие за пределы земной орбиты. Моделирование этих траекторий с использованием тех же компьютерных программ, которые применяются при планировании экспедиций в глубокий космос, показывает, что такие фрагменты заканчивали свой путь на Луне, Марсе, Венере и Меркурии, иногда добираясь туда всего за несколько лет, хотя чаще путь занимал десятки веков. Так что земная жизнь точно попадала на Марс. Смогла ли она там выжить — это уже другой вопрос.

Юджин Шумейкер предугадал существование такого обмена материалами разных планет в статье под названием «Межпланетная корреляция геологического времени» (Interplanetary Correlation of Geologic Time), вышедшей в 1963 г., вскоре после защиты им кандидатской диссертации об Аризонском кратере. Вместе с коллегами он после серии расчетов пришел к выводу о том, что метеориты с древней Земли и Марса будут найдены на Луне. Отыскать их будет нелегко: в образцах с «Аполлонов» их не заметно, хотя несколько таких пылинок там явно присутствовало, как и, возможно, фрагменты пород, напоминающих гранит. Если на Луне удастся распознать и собрать крупные фрагменты пород верхнего слоя земной коры — или даже осадочных пород, — мы будем иметь настоящие капсулы времени, хранившиеся в идеальных условиях с момента зарождения жизни. Шумейкер и его коллеги писали:

Трудно сказать, удастся ли их распознать. Но вероятность того, что такие фрагменты могли нести на себе органических безбилетников, какой бы малой она ни была, может поставить мучительные вопросы перед теми, кто озабочен проблемой происхождения жизни³³.

Как работает панспермия? Когда зарождалась жизнь и формировались крупнейшие кратеры, осколки Марса

отправлялись в путь на Землю, и наоборот. Направление от Марса к Земле было предпочтительным: тут важен и его меньший размер, и менее мощная атмосфера, благодаря чему фрагменты легче вылетали в космос, и то, что он находится на более высокой орбите и ближе к бомбардирующим поверхность астероидам. Но движение в обратном направлении тоже имело место³⁴. Любой крупный эпизод кратерообразования порождал целую россыпь мелких астероидов диаметром от десяти до нескольких сотен метров. Условия для жизни там должны были быть суровыми, но адаптировавшиеся к непростой жизни у поверхности молодой планеты экстремофилы, отправившиеся в такое путешествие, были готовы ко всему. Выброс в космос, затем десятилетие или больше внутри нескольких десятков кубических метров горной породы. После такого вход в атмосферу или в океан другой планеты — серьезная встряска! — покажется просто пустяком. Если не считать космической радиации (от которой защищают камни), в смысле враждебного хаоса все это может быть не страшнее, чем пребывание на поверхности планеты. Крошечные организмы, притаившиеся в порах осадочных пород, могут быть защищены от повреждений, даже если камень вокруг них взорвется, особенно если они прибывают на планету с атмосферой.

Столкновения с астероидами также способны уничтожать жизнь и становиться причиной миграций на Земле. Соударение, породившее кратер Чикшулуб, не только истребило огромную часть живых организмов, но и перенесло самые выносливые образцы жизни на 10 000 км от места удара, позволив им заселить новые районы планеты. Тараканы от него точно только выиграли. Не так давно ученые обнаружили высоко в Трансантарктических горах окаменелости диатомовых водорослей, залегание которых позволяет предположить³⁵, что они были исторгнуты при столкновении



Озерные и дельтовые отложения на западной стороне кратера Езеро. Этот район скоро станет нам хорошо знаком благодаря работе американского марсохода «Марс-2020», который соберет образцы для последующего возвращения на Землю. Западный край кратера был прорван широким потоком, который выносил ил и песок в древнее озеро, создавая обширную дельту. Постоянные течения чередовались с мощными паводками. Возникшие позднее русла-протоки, которые прорезали эти отложения, а также наличие 600-метрового кратера глубиной более 100 м, делают это место очень интересным с точки зрения поиска окаменелостей.

NASA/JPL/U. Arizona

с Элтанинским метеоритом 2,5 млн лет назад, когда километровой астероид пробил 20-километровую дыру в дне Южного океана. Глубина в месте столкновения составляла 5 км, так что оно разрушило подводные вершины, выбросило тысячи кубических километров воды и разбросало по дну фрагменты астероида, которые находят морские геологи при глубоководном бурении. Дыра в океане схлопнулась примерно

за минуту, сформировав центральный пик, который на одно поразительное мгновение оказался выше Фудзиямы, а потом обрушился, вызвав череду цунами высотой в сотню метров по целому полушарию. С тех пор, возможно, подобные события повторялись три или четыре раза. Большая часть изверженной при падении Элтанина породы приземлилась обратно в океан, но сотни миллионов тонн отправились на орбиту или на дальние берега.

Возможно, у нас никогда не выйдет строго доказать связь выбросов Элтанина с трансантарктическими окаменелостями. Разрешить споры по поводу Марса будет не легче. Тем не менее гипотеза звучит убедительно. Чтобы жизнь попала с Марса или на Марс, требуются более крупные столкновения, чем Элтанин, но таких было множество. Предположим, мы находим на Марсе окаменелые останки микробных матов или древних диатомовых водорослей. Если они имеют знакомую нам химию, возможно, мы действительно смотрим на организмы, попавшие на Марс вместе с веществом, изверженным при образовании крупных земных кратеров. Иначе говоря, это жизнь, возникшая на Земле, что объясняет ее знакомые нам черты.

Однако направление от Марса к Земле является предпочтительным для панспермии. Более того, возможно, Марс был готов к жизни раньше, чем Земля, поскольку он меньше и соответственно быстрее остыл после стадии радиоактивного расплава и последних гигантских столкновений. Если на древнем Марсе в изобилии существовала жизнь, то физика соударений и небесная механика позволяют сделать четкое заключение о ее переносе на Землю. Если марсианский организм выжил в космосе и переправился в количестве, достаточном для того, чтобы закрепиться на Земле, то, возможно, он и является нашим общим предком. Спорно? Конечно. Но на этот раз гипотеза является проверяемой:

ответы, возможно, найдутся в изверженных породах древней Земли, которые были смешаны с самым ранним реголитом Луны.

Но что, если мы обнаружим на Марсе нечто очень необычное и совершенно *незнакомое*: окаменевшую жизненную форму или даже живой организм, про который мы сможем с уверенностью сказать, что он никоим образом не связан с Землей и восходит к иному моменту зарождения жизни, иному «акту творения»? Не знаю, как мы сумеем это строго доказать, но подобная находка будет намекать, что жизнь во Вселенной может возникать повсюду, где есть условия, подобные земным, внутри некоего диапазона между предельными значениями. Но если жизнь зарождается повсюду, то, возможно, с тем же успехом — и даже гораздо легче — мы найдем свидетельства «первого творения» прямо здесь, на Земле, где такие организмы могли быть вытеснены после нашего «второго творения», как *Homo sapiens* вытеснили неандертальцев. На Земле даже могла существовать своя аборигенная жизнь, развитию которой помешала панспермия с Марса; тогда мы с вами являемся марсианскими агрессорами.

ГЛАВА 4

СТРАННОСТИ И МЕЛОЧИ

Чем ближе планетезималь к Солнцу, тем больше ее орбитальная скорость. Это закон Кеплера. Таким образом, если вы болтаетесь на расстоянии 1 а. е. от Солнца — там, где зародилась Земля, — то более близкая к звезде планетезималь будет вас обгонять, а более дальняя — отстанет. Могут ли эти движущиеся с разной скоростью планетезималь нагнать друг друга, чтобы под действием силы притяжения соединиться и создать планету? Да, если их взаимная гравитация достаточно велика. Но если *кеплеровское усилие сдвига* — склонность планетезималей на соседних орбитах обращаться с разными скоростями — больше, то этот регион останется без планеты. Согласно уравнению коагуляции Смолуховского, выведенному путем сравнения гравитации и усилия сдвига, протопланетный диск на расстоянии 1 а. е. от звезды солнечного типа может породить планету в десять раз массивнее Земли, но планета, имеющая одну земную массу, будет разорвана быстрее, чем сможет вырасти.

Однако, прежде чем мы хотя бы приступим к решению этой проблемы, нам еще нужно преодолеть «барьер

метровых размеров». Расчеты показывают, что достигшая размера небольшого автомобиля планетезималь за несколько десятков лет рухнет по спирали на Солнце. Получается замкнутый круг: если вокруг достаточно пыли, чтобы она могла собраться в планетезималь, то хватает и газа, который тащит планетезималь к Солнцу, когда они образуются. (Это та же самая сила сопротивления, которая заставляет вас замедлять шаг, когда ветер дует в лицо, а низкоорбитальные космические аппараты — по спирали приближаться к Земле.) Но если все планетезималь по спирали упали на Солнце, то почему же на свете есть планеты? Нами описаны десятки планетных систем, еще сотни ждут повторных наблюдений, а всего подтверждено существование примерно 4000 планет, так что их образование происходит достаточно часто.

Кажется, решение состоит в том, что, собираясь в рои, планетезималь меняют динамику и газа, и друг друга, что заставляет их сближаться и сливаться воедино. Одна-единственная частица действительно упадет на звезду по спирали, как свидетельствуют теоретические выкладки, но вот в чем загвоздка: такой штуки, как одна-единственная частица, не существует. Вместо этого миллионы частиц взаимодействуют друг с другом, вызывая в газе круговороты и завихрения, в результате чего к ним притягиваются другие частицы, подобно велосипедистам в пелотоне. Скопления, возникающие в результате, — первичные *груды щебня* — рассеивают энергию при столкновениях, окутывая новичков, примерно как кресло-мешок — сажащегося в него человека. Новые частицы гравия, которые ударяются в них, прилипают. Так что вместо того, чтобы мешать аккреции, сопротивление газа помогает планетезимальм расти. Они не просто выживают в условиях такого встречного ветра, но и накапливают все больше и больше материала.

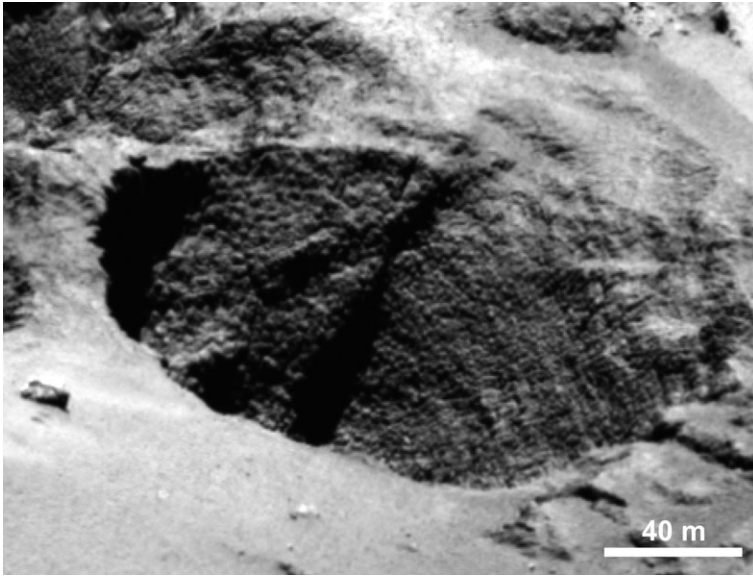
Этот процесс называли «гравийной аккрецией», и, если она действительно существует, тогда (согласно моделям) можно ожидать, что примитивные кометы и астероиды будут состоять из первичных компонентов размером от одного сантиметра до метра. Так что считать таким гравием? Некоторые убеждены, что на эту роль подходят *хондры* — сферы размером с песчинку, которыми полны ранние метеориты. Хондры в основном затвердевали как капли расплавленного силикатного вещества, причем большинство из них сформировалось в период от полумиллиона до двух миллионов лет после появления самых древних твердых тел — то есть по сути немного припозднились. Мне кажется, что с большей вероятностью хондры — это побочный продукт аккреции планетезималей¹, а не то, что послужило им началом. К тому же типичная хондра размером с мелкий бисер слишком мала, чтобы быть предсказанным теорией «гравием». Другие ученые придерживаются мнения, что этот гравий виден на фотографиях, сделанных космическими аппаратами при сближении с кометами и астероидами, такими как комета 67P/Чурюмова — Герасименко², на орбиту которой выходила автоматическая станция ESA «Розетта». На этих снимках видна бугристая фактура стенок свежих выемок и обнажений, напоминающая груды метровых грейпфрутов. Астероид Бенну диаметром 500 м, ставший объектом изучения экспедиции OSIRIS-REx, также имеет поверхность³ с «крупницами» метрового размера, которые, возможно, слабо сцеплены друг с другом; однако пока на Землю не доставлены образцы, мы не можем в точности знать, чем они являются.

Проблема гравия была бы куда проще, если бы у природы не имелось множества способов создавать такие булыжные мостовые. Ударная нагрузка ломает горные породы, но не на куски одинакового размера. Тепловое расширение

и сжатие может дробить камень, и то же самое может делать быстрое выделение газов или переход льда и минералов из одной твердой фазы в другую. Процессы формирования гранул могут быть особенно распространены на кометах и примитивных астероидах, которые вошли во внутреннюю часть Солнечной системы, где их только и можно исследовать с помощью космических аппаратов. Мощное солнечное излучение в новинку кометам, так что бугры размером с мяч для йоги на поверхности 67P могут быть реакцией на разогрев или вакуум и не иметь никакого отношения к аккреции.

В нашем понимании процесса аккреции малых тел есть пробелы, и то же самое можно сказать о нашем понимании процесса аккреции крупных тел. Если бы не экспедиции, доставившие с Луны большое количество разнообразных образцов, у нас бы не было теперь уже неопровержимых геологических доказательств того, что наш спутник сформировался в результате гигантского столкновения на поздней стадии. Это оказалось тем самым ключом, который подошел к замку. Да, аккреция началась с планетезималей, но она длилась до самого слияния отца Земли и матери Тейи.

Существует множество фрагментарных доказательств гипотезы гигантских столкновений, но одно из самых значительных — предсказание лунного океана магмы. Лунная кора двояка во многих отношениях, в том числе по своему составу: там есть возвышенности, состоящие из силикатов кальция и алюминия, известных как полевые шпаты, и низменности видимой стороны, состоящие из базальтов и габброидов. Если наш спутник затвердел из океана магмы, представлявшего собой последствие гигантского столкновения, то возвышенности отлично объясняются как флотационная кора толщиной во много километров — нагромождение



Бугристая структура стенок жерла на комете 67P/Чурюмова — Герасименко позволяет строить предположения, как организован материал внутри ядра. Характерный масштаб этих неровностей — примерно 3 м.

ESA/Rosetta/MPS

кристаллов полевого шпата, которые всплывали на поверхность океана магмы в процессе его затвердевания, как лед плавает на поверхности озера. Кристаллы оливина также затвердевали из остывающей магмы, но они, будучи плотнее, опускались на дно. Если все произошло именно так, посередине между затвердевающей богатой оливином мантией и затвердевающей богатой полевым шпатом корой должен был образоваться остаточный слой, который, согласно геохимическим экспериментам, в конце концов имел бы повышенное содержание калия (K), редкоземельных элементов (rare-earth elements, REE), фосфора (P), урана и тория. Эти элементы относятся к *несовместимым* со структурой порообразующих минералов и с трудом находят себе место

в затвердевающих кристаллах. Свидетельства существования такого слоя, который сокращенно называют KREEP, можно разглядеть во многих районах Луны, но почти исключительно на видимой стороне. Высокая концентрация радиоактивных элементов в этом остаточном слое могла обеспечить поздний разогрев, питавший вулканическое затопление низменностей спустя сотни миллионов лет после того, как остальная Луна затвердела.

Когда она была впервые выдвинута в 1970-е гг., теория гигантского столкновения, как в свое время и идея тектоники плит, была встречена с огромным скептицизмом. Каждый находил в ней что-то, с чем нельзя было согласиться. В основе теории лежало мощное утверждение, что вместо формирования землеподобных планет из отдельных планетезималей при прямой аккреции, вначале образовались десятки олигархов размером от Меркурия до Марса, а потом уже началась битва всех против всех. Сегодня эта мысль о формировании землеподобных планет на *поздней стадии*, когда олигархи поглощают друг друга, — основа всех главных теорий возникновения Луны. Думаю, она имеет глубокую связь с вопросом о происхождении жизни, потому что может максимизировать *разнообразие* землеподобных планет — этот невероятный паноптикум, который невозможно объяснить только аккрецией планетезималей.

Вдобавок к таким идеям об иерархическом слиянии, о планетезималях, поглощающих друг друга, чтобы стать эмбрионами, и далее — во все более жестоких столкновениях — планетами, другим прорывом оказалось предположение, что газовые гиганты после своего формирования то придвигались ближе к Солнцу, то отходили от него, как замечтавшиеся конькобежцы на льду замерзшего пруда. Вследствие этого под влиянием движения внешних планет-гигантов менялась сама структура Солнечной системы.

Мысль, что Юпитер вообще сильно сдвигался, звучит абсурдно: он в сотни раз тяжелее Земли и имеет момент импульса больше, чем у Солнца. Но дела обстоят еще хуже. В модели «великой миграции», описанной ниже, Юпитер перемещается с расстояния в 3 а. е. до 1,5 а. е., а потом, в связке с Сатурном, отодвигается на отметку 5 а. е. То, что планеты-гиганты ведут себя таким образом, может объяснить очень многое, особенно структурный и химический (по составу) зазор в Солнечной системе; остается только проверить, верна ли эта гипотеза в деталях. Тем не менее сейчас никаких сомнений не вызывает следующее: что бы ни делали землеподобные планеты, они делали это под влиянием этих странствующих мастодонтов.

Причина миграции гигантских планет звучит невероятно и должна приводить в восторг популистов: в неравновесное состояние Юпитер и Сатурн привело гравитационное воздействие миллиардов планетезималей. Чтобы понять, как такое могло произойти, давайте взглянем на сами планетезимали: откуда они взялись и через что прошли. Начнем с внешней части Солнечной системы, где зародились планеты-гиганты (по крайней мере, мы так сейчас думаем — хотя мы не должны быть так уж в этом уверены).

Триллионы ледяных тел обращаются вокруг Солнца далеко за орбитой Нептуна. Основную их массу, сосредоточенную на расстоянии от 30 до 50 а. е., называют объектами пояса Койпера. В их число включают и Плутон, девятое по размеру тело, самостоятельно обращающееся вокруг Солнца, и Эриду, не такую большую, но занимающую девятое место по массе. (На случай, если вам интересно, все крупные спутники Сатурна, Юпитера и Нептуна тяжелее Эриды.) Большинство объектов пояса Койпера обращаются

вокруг Солнца примерно в той же орбитальной плоскости, что и планеты. Другие — в частности, Эрида, орбита которой наклонена на 44° и имеет такой эксцентриситет, что ее расстояние до Солнца меняется от 38 до 98 а. е., — являются свидетельствами прошлого, детали которого мы все еще пытаемся уяснить. После нескольких блуждающих плутоидов и предсказанных гигантов пояс Койпера постепенно переходит в рассеянное, но гораздо более многочисленное внутреннее облако Оорта, которое простирается на десятки тысяч астрономических единиц, то есть на значительную долю расстояния до ближайшей звездной системы. Где-то в этой внешней тьме, в сотнях или даже тысячах астрономических единиц от Солнца, может таиться холодный объект тяжелее планеты Земля, но эту историю мы пока отложим.

Мы никогда не наблюдали ни одной кометы непосредственно в самом облаке Оорта, так что судим о его объектах теоретически, только по тем из них, которые ныряют глубоко во внутреннюю Солнечную систему, а потом возвращаются обратно, практически в межзвездное пространство, порой невероятно сияя, как кометы Хейла — Боппа и Хякутакэ. (Высчитать, где находится афелий их орбит, достаточно просто.) Специалисты по космохимии отдали бы все, чтобы заполучить частицу этих исходных конденсатов из предшествовавшего Солнцу молекулярного облака. Во время прохождения такими примитивными кометами перигелия астрономы анализируют сияние напоминающих огненную шевелюру ионизированных газов, сдуваемых с них солнечным ветром.

Один из самых интересных из известных нам объектов пояса Койпера — это быстро вращающаяся вокруг своей оси Хаумеа, рядом с которой уже обнаружены два спутника, Хииака и Намака. Хаумеа движется вокруг Солнца по орбите, напоминающей орбиту Плутона. Она вращается вокруг



Астероид Ультима Туле (официально — Аррокот или 2014 MU69) — самое далекое тело, которое когда-либо посещал наш космический аппарат. Этот первичный объект длиной 31 км, находящийся в 1 млрд километров за орбитой Плутона, — контактно-двойное тело, сформировавшееся в результате наиболее ранней аккреции или, возможно, повторной аккреции после медленного столкновения.

NASA/JHUAPL/SwRI

своей оси так быстро (один оборот за 3,9 часа), что приняла форму вытянутого сфероида с поперечником в почти 2000 км. По скорости вращения она опережает любое тело Солнечной системы диаметром больше 100 км. Длинная ось Хаумеи почти равна диаметру Плутона, но короткая ось в два раза короче. Несмотря на то что площадь ее поверхности гораздо меньше, чем у Плутона или Эриды, Хаумеа — самый яркий транснептуновый объект, поскольку бела, как снег. А если всего этого недостаточно, чтобы разбудить ваше любопытство, она еще и окружена кольцом

обломков. Больше того, она динамически связана с десятком других, более мелких объектов пояса Койпера, которые так же ярки и имеют тот же богатый водяным льдом состав поверхности — судя по всему, это бесспорное доказательство того, что все они возникли в результате некоего гигантского столкновения⁴.

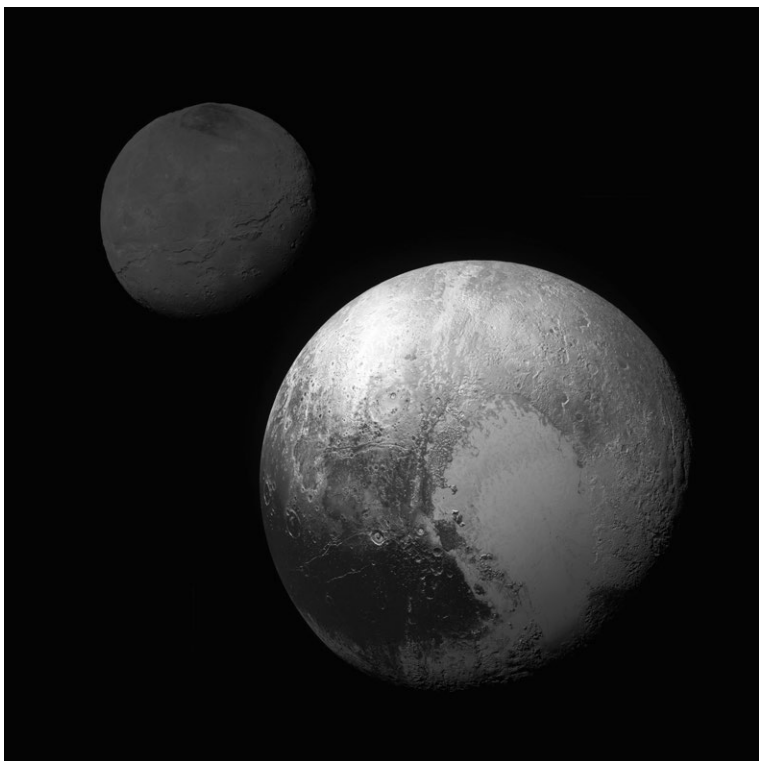
Никакой даже общий разговор о Плутоне невозможен без обсуждения, что такое планета. В 2006 г. Международный астрономический союз (МАС) принял резолюцию следующего содержания (я слегка перефразирую): «Планета — небесное тело, обращающееся по орбите вокруг звезды, достаточно массивное, чтобы преодолеть сопротивление твердого тела деформациям и стать округлым под действием собственной гравитации, а также сумевшее расчистить окрестности своей орбиты». Карликовая планета «отвечает всем вышеперечисленным критериям, но не расчистила окрестности своей орбиты». Вроде звучит достаточно логично, но так ли это? Во-первых, тут нужно внести поправку, чтобы исключить звезды, обращающиеся вокруг других звезд; они планетами не являются. Как другую крайность мы должны исключить пузырь воды, плавающий внутри космического корабля, поскольку карликовой планетой его не назовешь. Достаточно справедливо, но как насчет Плутона? Гравитация сделала его практически сферой, то есть с этим пунктом все хорошо. Также на его поверхности очень мало ударных кратеров, что говорит о высокой геологической активности.

Тут возникает первая проблема. Вы заметили, что в определении МАС ничего не говорится о геологии, тогда как с геологической точки зрения Плутон — это планета⁵. Другим недостатком этого определения является обозначение непланет как «карликовых планет», потому что различия тут никак не связаны с размером космического тела. Плутон относят к карликовым планетам, потому что он

динамически привязан к Нептуну. Если придерживаться определения МАС, то, когда мы обнаружим примерно равную по массе Земле планету, обращающуюся в обитаемой зоне вокруг иной звезды и имеющую на поверхности жидкую воду, но находящуюся под гравитационным влиянием некоего супер-Юпитера, нам придется назвать ее карликовой планетой. Это будет просто глупо.

В конце 1980-х гг. астрономы много интересовались Плутоном из-за как раз завершившейся серии его взаимных затмений со спутником Хароном. (Никаких изображений этого события у нас не было: и Плутон, и Харон оставались лишь точками света.) К этому времени были точно установлены их орбиты и массы, а благодаря затмениям также и диаметры. Появилась возможность высчитать объемную плотность Плутона — $1,9 \text{ г/см}^3$, на полпути между горной породой и льдом, чуть меньше, чем у немного более крупного Тритона, который мы посетили во время пролета «Вояджера-2» мимо спутников Нептуна в 1989 г. Полученные с помощью телескопов данные об этих затмениях были использованы для создания первых грубых геологических карт Плутона и Харона; оглядываясь назад, мы понимаем, что примерно так будут выглядеть первые изображения первой найденной нами землеподобной экзопланеты. Применяв метод наименьших квадратов, астрономы нарисовали что-то вроде цветной карты⁶, которая без сомнений демонстрировала, что Плутон имеет разнообразную геологию, соответствующую долгой и, возможно, продолжающейся до сих пор эволюции поверхности.

Во всем этом есть динамическая загадка. Орбита Плутона имеет настолько большой эксцентриситет, что $1/12$ своего года (который составляет 248 земных лет) он проводит



Область Томбо, названная в честь первооткрывателя Плутона, и прилегающая к ней Равнина Спутника вместе образуют яркое сердце на поверхности Плутона. Харон (сзади слева) темнее, поскольку принял органические углеродсодержащие молекулы из атмосферы более крупной планеты. Составлено из изображений, полученных обзорной фотокамерой аппарата «Новые горизонты».

NASA/JHUAPL/SwRI

внутри орбиты Нептуна. Можно подумать, что планеты с пересекающимися орбитами рано или поздно столкнутся, но в случае с Нептуном и Плутоном имеет место резонанс 3:2, так что Плутон пересекает орбиту соседа, только когда Нептун находится далеко впереди или далеко позади. Почему планета диаметром 2300 км, вокруг которой обращается спутник в два раза меньшего размера, находится на сильно

наклоненной и вытянутой орбите вокруг Солнца в стабильном орбитальном резонансе с Нептуном? Планеты размером с Плутон могут формироваться только в средней плоскости протопланетного диска, потому что именно там находится все вещество, так что Плутон после своего образования был каким-то образом сбит с первоначальной орбиты.

Первой мыслью было объяснить это «гравитационной пращей», в которую попал массивный объект пояса Койпера, близко подошедший к Нептуну. Другая идея состояла в том, что Плутон ушел с орбиты вокруг Нептуна и является родным братом Тритона, который имеет практически ту же массу и обращается вокруг Нептуна в *обратную* сторону, против направления вращения планеты. Определенно, чтобы объяснить необычное попятное движение Тритона, должно было произойти что-то странное⁷. Но оба этих сценария — сбжавший спутник или скользящее сближение с Нептуном — динамически невозможны. Перейти с орбиты, которая приводит к встрече с Нептуном, на ту, которая заведомо исключает сближение с Нептуном, — это все равно что в бильярде сделать удачный дуплет с неправильного конца стола. Если использовать язык динамики, эти орбиты находятся по разные стороны *сепаратрисы*.

В начале 1990-х американский астрофизик Рену Малхотра выдвинула идею, связавшую необычную орбиту Плутона (давнюю проблему) с новой, только зарождавшейся концепцией миграции планет-гигантов из-за рассеяния планетезималей. Согласно ее теории, аккреция Нептуна шла в центре роя ледяных тел, обращающихся вокруг Солнца. Время от времени пролетающая мимо маленькая планетезиималь в силу эффекта пращи огибала планету и уносилась прочь. Таких встреч было много миллиардов, и каждая немного толкала Нептун. Поскольку Нептун очень массивен, каждое воздействие было очень маленьким, но в сумме они давали

некую силу, ведь толчки были асимметричными из-за того, что большинство планетезималей приближались к Нептуну с внешней стороны его орбиты (те, которые обращались ближе к Солнцу, были поглощены или рассеяны при формировании других планет-гигантов). Таким образом равновесие было слегка нарушено, и суммарная сила оказалась направленной вовне, а не внутрь. Для разумного начального количества планетезималей расчеты показали, что Нептун мог плавно сместиться со своего первоначального положения около 20 а. е. от Солнца на 7 а. е. (или больше) наружу, пока все планетезимали не были рассеяны или не стали слишком редкими, чтобы оказывать значительное влияние.

Плутон, сформировавшийся вне первоначальной орбиты Нептуна, оказался на его пути так же, как и множество других крупных тел. Но, прежде чем Нептун смог его достичь, обе планеты попали в ситуацию, когда Нептун обращался вокруг Солнца три раза на каждые два оборота Плутона. В результате возникло мощное гравитационное сопряжение, в котором Нептун оказывал преимущественное влияние на Плутон. По мере расширения орбиты Нептуна он подталкивал Плутон, увеличивая эксцентриситет и наклонение его орбиты: это походит на ситуацию, когда ребенок на качелях начинает болтаться вправо и влево, если вы раскачали его так сильно, как он вас просит.

Многим из крупнейших первоначальных объектов пояса Койпера повезло меньше. Они были поглощены Нептуном или какой-то другой планетой, а то и вовсе выброшены из Солнечной системы. Тем не менее эта ловкая увертка удалась не одному только Плутону: более десятка других «плутино» меньшего размера попались в ту же ловушку резонанса с Нептуном и смогли договориться никогда не сталкиваться с этим мастодонтом в 20 раз массивнее Земли, так что теперь он оберегает их от дальнейшего хаоса.

Правильность этой модели подразумевает, что Юпитер и Сатурн также мигрировали после своего формирования под влиянием такого же взаимодействия с планетезималями и кометами. Зародившись в центральной части Солнечной системы, они не всегда двигались наружу, как Нептун, но иногда смещались и внутрь. Первая версия этой идеи о значительной миграции Юпитера и Сатурна называется «модель Ниццы» в честь обсерватории во Франции, где она обрела целостную форму. В ней учитывается, что орбитальные периоды Юпитера и Сатурна могли синхронизироваться во время этой миграции — как орбитальные периоды Плутона и Нептуна, только в большем масштабе. В зависимости от начальной конфигурации (расположения планет и распределения масс планетезималей, то есть от результатов «игры в Бога», которой занимаются специалисты по компьютерному моделированию) две планеты могут оказаться в чрезвычайно прочном и несимметричном резонансе 2:1, когда Юпитер делает два оборота на каждый оборот Сатурна. В такой ситуации эти два самых массивных тела Солнечной системы периодически выстраивались бы в линию по ту или другую сторону от Солнца, превращая всю систему в гравитационный двигатель с несбалансированным валом. (Если считать Юпитер ротором, тогда в описанном ниже сценарии первоначальная система спутников Сатурна соответствует болтающимся гайками и болтами, которые вот-вот готовы слететь.)

Модель Ниццы хороша для объяснения характера размещения транснептуновых объектов, поскольку она описывает вытеснение объектов из общего диска на наклонные эксцентрические орбиты, где мы и видим многие из них, но оставляет «классический» диск в средней плоскости. Также она может пролить свет на происхождение Урана и Нептуна, поскольку, если эти ледяные гиганты зародились там, где они находятся сегодня, нам трудно понять, как шел процесс

их формирования. Проблема в том, что материал, из которого они появились, на расстоянии 20 или 30 а. е. должен был быть настолько рассеян и обращаться так медленно (с периодом в 100 лет или дольше), что для формирования Нептуна потребовалось бы 10 млрд лет. В оригинальной модели Ниццы эта проблема решена так: Нептун и Уран зародились между Сатурном и Юпитером и были отброшены наружу, когда резонанс 2:1 привел систему в неравновесное состояние. Но, хотя в таком виде модель Ниццы может объяснить существование Нептуна, она делает невозможной изящную теорию о Плутоне, которую я только что изложил. В запутанной научной области динамики образования планет нам нужно постоянно держать в голове сразу много параллельно складывающихся моделей.

Самое знаменитое предсказание модели Ниццы, скорее всего, неверно⁸. Одно из первых наблюдений, сделанных в результате анализа образцов, доставленных «Аполлоном», сводилось к близости их возрастов: сразу многие ударные расплавы образовались примерно 3,9 млрд лет назад. Считалось, что это свидетельствует об огромном всплеске в количестве столкновений, который стал известен как Поздняя тяжелая бомбардировка. Принимая во внимание такую датировку, этот всплеск пришелся на период спустя сотни миллионов лет после окончания формирования планет — и по случайному совпадению как раз на то время, когда геологическая летопись Земли сообщает о начале расцвета земной жизни, что делает эту теорию чрезвычайно важной. На Луне тогда могло сформироваться Море Дождей и пять или шесть сравнимых с ним бассейнов, Землю трепало еще более жестоко, а на Марсе и других планетах шло столь же интенсивное кратерообразование⁹.

Сегодня представление о группировании датировок вокруг отметки 3,9 млрд лет назад является предметом бурных

споров. Для начала, экспедиции программы «Аполлон» доставили образцы из всего лишь шести точек на видимой стороне Луны. Когда мы включаем в рассмотрение постоянно растущую коллекцию метеоритов лунного происхождения, какого-то отдельного всплеска не заметно¹⁰; скорее, мы видим несколько беспорядочно распределенных пиков в промежутке 2,7–4,2 млрд лет назад. Это можно объяснить такими случайными событиями, как разрушение крупных астероидов с образованием метеорного роя. Кроме того, если каждый из доставленных «Аполлоном» образцов анализировать на все более микроскопическом уровне, используя современные «нанометодики», их возраст начинает разниться сильнее. Предположим, у нас есть тысяча красных, зеленых и синих носков, случайным образом перемешанных в кучу. Вытянув из нее несколько отдельных носков (микрообразцов), вы решите: «Ух ты, эти носки (возраста) такие разные!» Если же будете вытягивать сразу по сто носков — эквивалент более ранних измерений, — в каждой охапке окажется примерно по трети носков каждого цвета, и вы скажете: «Ух ты, эти охапки носков выглядят более-менее одинаково!»

Если Поздняя тяжелая бомбардировка все же имела место, то модель Ниццы дает ей объяснение. Идея состоит в том, что резонанс Юпитера и Сатурна произошел примерно через 650 млн лет после образования планет. Ранняя миграция сдвинула их близко к опасной зоне, но им потребовалось еще полмиллиарда лет, чтобы пройти последнюю долю астрономической единицы и достичь страшной точки резонанса 2:1. И только после того, как было достигнуто это грандиозное равнение, Солнечная система, которая, казалось, завершила свое формирование, вошла в последнюю стадию динамической активности и перестановки планет. Хаос продолжался до тех пор, пока Юпитер и Сатурн не вышли

из резонанса, как два гигантских корабля, из созданного ими самими шторма, после чего все вернулось к норме.

Фундаментальная проблема модели Ниццы¹¹ была выявлена сразу после ее опубликования. Если планеты-гиганты сдвигались именно таким образом, в резонанс с ними вовлекались бы и землеподобные планеты. А если бы Юпитер, например, вошел в орбитальный резонанс с Землей, это могло бы привести эксцентриситет ее орбиты к значениям, превышающим сегодняшние в десять раз. Ситуацию с Венерой объяснить еще труднее: ее нынешний эксцентриситет равен почти нулю, тогда как ее орбита должна была бы быть очень вытянутой. Бедный Марс вообще таскали бы за собой как младшего брата в парке аттракционов, и, по некоторым расчетам, орбита этого тела могла бы пересекаться с земной. Во время перигелия (когда планета ближе всего подходит к Солнцу) он бы за два суперлетних месяца каждого года получал в два раза больше тепла, чем сейчас, а потом погружался бы в глубокую заморозку, пару земных лет странствуя по Главному поясу астероидов. Насколько мне известно, никто не моделировал климат такой заблудившейся планеты, но эти экстремальные температурные скачки, как у керамического горшка, который то ставят в морозилку, то разогревают, то снова замораживают, могли запустить процесс катастрофической эволюции рельефа, напоминающий таинственное мегазатопление древнего Марса.

Какие бы выводы мы не делали из этого наблюдения о Марсе, модель, где Земля и Венера оказываются на вытянутых наклонных орбитах, не имеет практического смысла. Либо все происходило не так, либо что-то помешало искажениям. Есть и другие проблемы. Согласно модели Ниццы, Поздняя тяжелая бомбардировка происходила по всей Солнечной системе, но тогда рои вторгнувшихся в чужое

пространство малых тел уничтожили бы внутренние спутники Сатурна, много раз перемолов Энцелад и Мимас.

Несмотря на эти существенные нестыковки, модель Ниццы приобрела некоторую сопротивляемость благодаря своей непрерывной трансформации. В 2010 г. было высказано предположение, что вместо непрерывной миграции газовых гигантов их передвижение происходило рывками под действием трех или четырех толкаемых планетезималями нептунopodobных планет, из которых две уцелели. Эту версию назвали «моделью прыгающего Юпитера». Каждый раз, когда ледяной гигант приближался к Юпитеру или Сатурну, их взаимодействие приводило к «прыжку» (длительностью в несколько тысяч лет) на другую орбиту, как будто рукоятку настройки радиоприемника хорошенько крутанули в сторону. Это позволяет сохранить желательные характеристики исходной модели Ниццы, избежав моментов резонанса газовых гигантов с Землей и Венерой.

Если же никакой Поздней тяжелой бомбардировки не было, тогда вместо возникновения резонанса Юпитера и Сатурна примерно 3,9 млрд лет назад этот динамический взрыв в Солнечной системе мог произойти сразу после образования планет, перемешав их в последней встряске меняющихся орбит и резонансных пар. Такая более долгая история сотворения все равно позволяет отбросить наружу Уран и Нептун, отправить на свои орбиты объекты пояса Койпера и захватить имеющие неправильную форму спутники Юпитера, но все это происходит на ранней стадии. Тем не менее в конечном итоге в основе любой теории, касающейся внешней Солнечной системы, видимо, должна лежать именно связь Нептуна с Плутоном, потому что его плавный сдвиг наружу необходим, чтобы захватить Плутон и другие плутино. Нам еще только предстоит увязать все эти сюжеты между собой.

Орбита Марса ограничивает зону планет-гигантов изнутри, так что Марс служит воротами во внешнюю Солнечную систему. У него есть два очень странных спутника, открытых в 1877 г. Асафом Холлом, который использовал только что построенный 66-сантиметровый телескоп-рефрактор Военно-морской обсерватории США. Холл дал спутникам названия Фобос и Деймос в честь двух преданных и кровавых сыновей бога войны Ареса. С этого начинается одна из самых странных историй в науке о планетах. Полтора столетиями ранее, задолго до того, как эти спутники можно было разглядеть в какой-либо телескоп, Джонатан Свифт упомянул в «Путешествиях Гулливера» две небольшие луны Марса, открытые астрономами летающего острова Лапута, — «две маленькие звезды, или два спутника, обращающихся около Марса»*, которые он далее описал. Свифт не мог ничего обо этом знать, но в «Путешествиях Гулливера» он поместил спутники очень близко к их реальному положению¹². В книге говорится, что внутренний спутник обращается на расстоянии трех марсианских радиусов от центра планеты каждые десять часов. В действительности орбита Фобоса проходит на расстоянии 2,8 радиуса, а его период обращения равен восьми часам. Внешний спутник у Свифта отстоит от Марса на 5 радиусов, тогда как Деймос — на 6,9.

Как одно из объяснений такого совпадения приводился интерес Свифта к сочинениям Кеплера, который скончался столетием раньше. Кеплер внимательно следил за работой Галилея, который в 1610 г. совершал открытия каждую безоблачную ночь. Ученые тех времен так же соперничали друг с другом, как сегодняшние, сталкивались

* Пер. А. А. Франковского.

с такими же проволочками при публикации своих результатов и не меньше боялись быть обставленными конкурентами. Из-за этого они часто прибегали к своеобразному методу зашифрованного опубликования — рассылали коллегам нечитаемую анаграмму текста своего открытия, а сами продолжали работать над измерениями и анализировать информацию. Таким образом, если и когда приоритет этого ученого оспаривался, он мог расшифровать свой ребус в качестве доказательства того, что был первым¹³.

В 1610 г. Галилей послал Кеплеру и другим коллегам следующую абракадабру: *smaismrmilmerpoetaeumibunenugttau iras*. В расшифрованном виде послание выглядело бы так: *Altissimum planetam tergeminum observavi*, то есть «Я наблюдал, что высочайшая планета состоит из трех тел». Галилей заметил «ручки» по бокам Сатурна, которые, как показали более поздние наблюдения, оказались кольцами. Но Кеплер, видимо, ожидал новостей о Марсе. Находясь под огромным влиянием нумерологии, он полагал, что раз у Земли один спутник, а у Юпитера — четыре, то Марс, находящийся между ними, должен иметь два¹⁴. Поэтому анаграмму Галилея он расшифровал иначе, оптимистично заменив одну букву и прибегнув к ходульной латыни: *Salve umbistineum geminatum Martia proles*, или примерно «Приветствую вас, близнецы, Марса порождение». Таким образом Джонатан Свифт, большой поклонник не только научных сочинений Кеплера, но и его посмертно изданного фантастического рассказа *Somnium Astronomicum*, уже упомянутого в первой главе, возможно, знал об идеях ученого и случайно угадал орбитальные расстояния.

Фобос и Деймос стали первыми малыми телами, сфотографированными космическими аппаратами. Под «малыми телами» я имею в виду объекты неправильной формы, не обладающие достаточной силой тяжести, чтобы стать

сфероидом. Фобос и Деймос не являются астероидами в точном смысле слова, хотя не так давно господствовало мнение, что они представляют собой чужаков, захваченных Марсом из Главного пояса. Со всей определенностью, эти темные, красноватые, изрытые кратерами глыбы выглядят как астероиды. Но захват астероида на орбиту вокруг планеты очень маловероятен — это много сложнее, чем забросить теннисный мячик в открытое окно машины, проезжающей за несколько улиц от вас. Если сближение происходит слишком быстро, тело не будет захвачено, а если слишком медленно, оно упадет на планету. И даже если такой захват был бы возможен, астероиды подлетают к Марсу со всех направлений. Было бы ошеломительным совпадением, если бы хоть один из них (не говоря уж об обоих) закончил свой путь на круговой орбите в экваториальной плоскости Марса.

С 1980-х гг. ученые предполагали, что гигантское столкновение стало причиной возникновения на Марсе Северного Полярного бассейна — низменности в северном полушарии, создающей еще одну геологическую дихотомию. Согласно данным компьютерного моделирования, ударное образование бассейна такой величины привело бы к появлению диска осколков, где имелось бы более чем достаточно материала для формирования Фобоса и Деймоса, причем все это вещество обращалось бы в экваториальной плоскости. Но тут возникает новая проблема: появление Северного Полярного бассейна выбросило бы на орбиту в тысячу раз больше материала, которого хватило бы на спутник диаметром в сотни километров, по массе пропорциональный Луне на орбите Земли. Более мелкое ударное событие вообще не привело бы к образованию диска, где мог бы зародиться спутник: изверженная порода либо упала бы обратно, либо улетела в космос. Таким образом, кажется, мы имеем ситуацию «все или ничего»: либо крупный спутник Марса, либо

никаких спутников. Мы вернемся к этому вопросу позднее, а сейчас давайте просто осознаем его как одну из тех восхитительных научных проблем, где на первый взгляд небольшая странность (скажем, Фобос) меняет нашу точку зрения на более крупный объект (скажем, Марс) и тем самым влияет на понимание нами самого процесса планетообразования — хвосты, которые виляют собакой.

Почему Марс вообще так невелик, если у нас есть все основания полагать, что толстый диск вещества первоначально простирался от Венеры до Сатурна? Если плотность диска была неизменной во всем этом диапазоне, то есть в нем не было промежутка, Марс должен был оказаться в пять или шесть раз тяжелее и гораздо более богатым водой — более землеподобным, а не маленьким и сухим. Возьмем другую, еще более странную теорию, основанную на миграции планет-гигантов¹⁵. В соответствии с моделью «великой миграции» Юпитер зародился на расстоянии в 3 а. е. от Солнца, а не в 5 а. е., где он находится сейчас. Его ядро состоит не из льда, а из горных пород. С этой начальной позиции он передвинулся внутрь на орбиту с радиусом 1,5 а. е., туда, где сейчас находится Марс, собрав в себя практически все, что там было. Затем возник Сатурн, который тоже начал двигаться к Солнцу, пока не попал в резонанс 3:2 с Юпитером и не застрял — что-то подобное произошло с Плутоном и Нептуном, но Юпитер и Сатурн более близки по массе. Это создало на орбитах Юпитера и Сатурна огромную центробежную силу, которая со временем привела эти гиганты на их нынешние позиции.

Теперь сделаем большой шаг назад и окинем одним взором общее положение вещей. Миграция планет-гигантов имела место и изменила первоначальную архитектуру Солнечной системы. Ученые предложили много моделей, которые объясняют определенные факты, такие как маленькую массу Марса, или существование рассеянной популяции

объектов пояса Койпера, или резонанс орбит Нептуна и Плутона, или Позднюю тяжелую бомбардировку Луны, если она действительно имела место¹⁶. Но у нас нет никакой определенности по поводу того, как и когда все это случилось, в каком порядке и какие изменения вызвало. Прибавим к этому все растущее число доказательств того, что Солнечная система очень необычна, и от регуляторов на панели управления моделями начинают отлетать ручки.

Несмотря на неопределенность по поводу того, где он появился на свет и какой путь прошел, Юпитер может оказаться образцом того, как происходит образование спутников вокруг газовых гигантов по всей Галактике. Современная точка зрения состоит в том, что галилеевы спутники зародились в конце формирования Юпитера (задолго до того, как начались только что описанные орбитальные перестроения) из массивной протоспутниковой туманности, состоящей из льда и пыли. Первые из этих спутников не дошли до нас или, можно сказать, наоборот, дошли, потому что, как только они сформировались, их затянуло внутрь Юпитера в результате гравитационных взаимодействий с диском¹⁷. (Если спутник достаточно массивен, он вызывает в газовом диске волны плотности, создавая асимметричную силу, подобную приливной.)

Эти крупные спутники диаметром в тысячи километров один за другим по спирали погружались в толщу Юпитера в рамках поздней стадии его аккреции. Но состоящее из металлического водорода ядро Юпитера, быстро вращаясь и взаимодействуя с полем Солнца, создало мощную динамо-машину¹⁸, магнитное поле которой расчистило «дырку от бублика» в окружающем планету газопылевом облаке. После того как вокруг Юпитера (согласно этой теории)

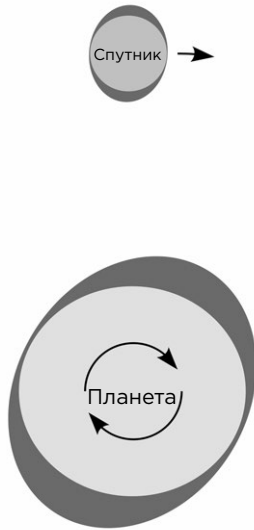
сформировался такой просвет, вызванная взаимодействием с диском миграция недавно образовавшихся спутников внутри планеты стала невозможной, и, когда из пыли и льда появился новый спутник, он остановился на краю этой дыры. Это была Ио.

Начав свое существование как ледяной мир, Ио теперь очутилась прямо рядом с пышущим жаром новорожденным Юпитером. Следующим ледяным телом,двигающимся по такой спирали, стала Европа, чья миграция прекратилась, когда она попала в орбитальный резонанс 2:1 с Ио, как граммофонная игла, угодившая в глубокую борозду на пластинке. Поскольку Европа остановилась дальше от Юпитера и позже Ио, большая часть воды на ней сохранилась. Затем последовал Ганимед, названный в честь молодого пастушка, которого Зевс похитил, чтобы сделать своим виночерпием (все галилеевы спутники получили названия в честь смертных возлюбленных Зевса); его миграция завершилась резонансом 2:1 с Европой.

Эта сплоченная тройца сформировала то, что позднее назвали *резонансом Лапласа* в честь французского энциклопедиста Пьера-Симона Лапласа, который доказал высокую стабильность такого трио. Согласно его теории, четвертый галилеев спутник, очаровательная Каллисто, должна была пройти по этой спирали последней. Но туманности к тому времени уже не было, так что миграция Каллисто закончилась до того, как она попала в резонанс с Ганимедом. Если большинство планет-гигантов во Вселенной формируются по типу Юпитера, мы можем ожидать, что вокруг них, как правило, возникают системы спутников, которые в конце концов оказываются на резонансных орбитах. Это важно, поскольку обеспечивает таким спутникам долговременный источник внутреннего приливного тепла, способный поддерживать жизнь.

Спутники в цепи Лапласа оказываются на эллиптических, а не круговых орбитах. Они испытывают периоды сильного и слабого воздействия приливных сил и соответственно деформируются, то приближаясь к Юпитеру, то отдаляясь от него во время каждого оборота вокруг планеты. Это приводит к приливному рассеянию энергии, которое заставило бы их орбиты расширяться, если бы только каждый спутник мог мигрировать без своих товарищей по резонансу. Итог напоминает хорошо сбалансированный часовой механизм, который может стабильно работать в течение десятков миллиардов лет, дольше, чем просуществует сама Солнечная система. Обусловленный трением приливный разогрев довольно значителен, и он существует не только в теории — просто посмотрите на Ио, спутник размером с Луну, находящийся всего в пяти радиусах от центра Юпитера. Она покрыта вулканами и является самым геологически активным телом в Солнечной системе.

Приливный разогрев резко падает при увеличении расстояния от Юпитера: приливные силы уменьшаются, а период обращения увеличивается, так что частота приливных колебаний снижается. В силу этого приливный разогрев Европы гораздо скромнее, чем поток тепла, обрушивающийся на Ио. Вместе с радиоактивным разогревом его хватает, чтобы обеспечить существование океана жидкой воды под ледяным панцирем. (Поскольку вода, замерзнув, всплывает, она формирует изолирующий панцирь, который сохраняет тепло.) Ганимед также находится в резонансе Лапласа и, хотя он подогревается менее интенсивно, отчасти благодаря мощному радиоактивному разогреву тут тоже имеется океан жидкой воды. На самом деле его впечатляющая летопись геологической активности может восходить как раз к тому моменту, когда Ганимед впервые попал в резонанс Лапласа и отреагировал на шок приливного



Приливный бугор на планете вращается перед подспутниковой точкой. Это вызывает несбалансированную силу притяжения, которая придает спутнику момент импульса, заставляющий его двигаться по спирали вовне (в данном случае). У спутника есть собственный приливный бугор, но после приливного захвата (который происходит быстро) он застывает на одном месте, указывая прямо на планету так, как на рисунке. Однако, если орбита спутника является эксцентрической, его приливный бугор (сильно преувеличенный на рисунке) начинает немного колыхаться туда-сюда. Эти периодические деформации становятся причиной трения, вызывающего исключительную вулканическую активность на Ио и лежащего в основе геологических процессов на других спутниках. Приливный разогрев внутри ранней Луны был достаточно большим, чтобы поддерживать ее в расплавленном состоянии. С тех пор (из-за приливного бугра, вызываемого ею на Земле) она удалась на ширину дюжины страниц (в масштабе рисунка), так что теперь ее приливный разогрев незначителен

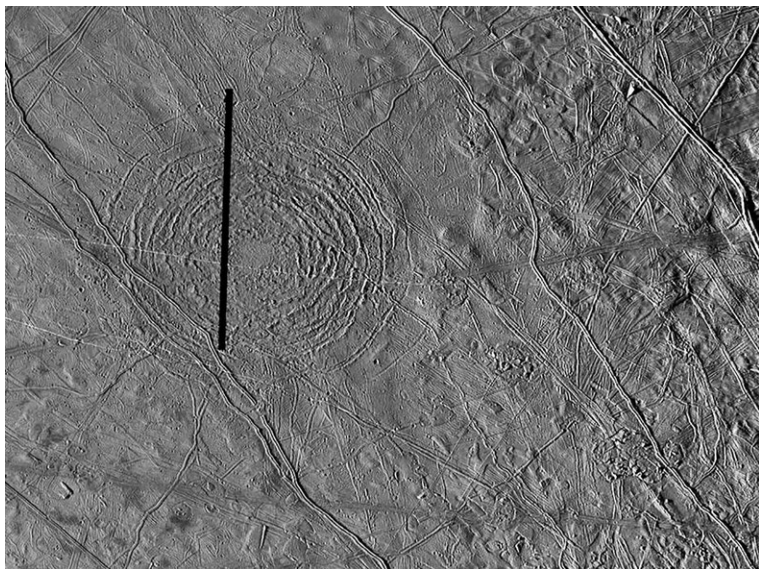
разогрева затоплением поверхности и извержениями вязкого рассола¹⁹.

Точно так же как Луна движется прочь от Земли из-за приливных сил и вращения Земли, галилеевы спутники постепенно удаляются от Юпитера. Однако они делают это в унисон, без столкновений или иных динамических проблем,

а их орбиты всегда остаются эксцентрическими — по расчетам, такая ситуация сохранится и после гибели Солнца; на отметке в 5 а. е. даже стадия красного гиганта не сулит им значительных неприятностей. С точки зрения возникновения и поддержания жизни геологические последствия длительного равномерного притока энергии приливного разогрева означают, что любой газовый гигант, обращающийся вокруг своей звезды за ледяной линией, может иметь спутники, сохраняющие океаническую среду на протяжении миллиардов лет.

Что, если бы твердая H_2O тонула? Все эти океаны во внешней Солнечной системе оказались бы распахнутыми навстречу космосу, за десятки тысяч лет испустили бы вовне все свое тепло и промерзли бы со дна до верху, подставив все, что находится на поверхности, под безжалостное излучение. Они превратились бы в безжизненные, сухие корки. Вместо этого твердая H_2O всплывает, формируя мощный, устойчивый, хорошо сохраняющий тепло щит. Очень холодный лед на самом деле не уступает по прочности граниту, а любая пробоина в нем — например, ударный кратер — быстро замерзает и выравнивается. На поверхности Европы наверняка холодно — примерно $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Под несколькими километрами ледяной коры плещется океан, по объему равный всем океанам и морям Земли.

Поначалу доказательства существования океана на Европе были косвенными: поверхность спутника состоит из льда, а его объемная плотность соответствует плотности тела, покрытого слоем воды толщиной в сотни километров. Мы видим геологические свидетельства происшедшего в недавнем прошлом взаимодействия жидкой воды с ледяной корой на ее поверхности и сразу под ней. Кометы, судя



Состоящее из концентрических колец неровное пятно на поверхности Европы — затянувшийся шрам от столкновения с кометой, названный макулой Тир. По внешнему краю его диаметр составляет 50 км. Черная полоса — это пробел в массиве данных. Возраст макулы Тир насчитывает десятки миллионов лет, она возникла при ударе 5-километровой кометы в ледяной панцирь. Нечто похожее происходит, если бросить камень в замерзший пруд.

NASA/JPL

по всему, врезались в нечто, напоминающее по свойствам жидкую воду. Кроме того, сильный приливный разогрев Европы Юпитером предсказывался как теоретически, так и по аналогии с соседним спутником Ио, который покрыт вулканами. Но, хотя все эти доводы согласуются между собой, они указывают только на прошлое, на то, что океан *когда-то* существовал на Европе. Но как дело обстоит сегодня?

Помимо фотографий, экспедиция «Галилео» собирала данные самого разного типа. Американский физик и планетолог Маргарет Кивельсон показала, что измеренная им мощность магнитного поля совпадает с предсказанной

для спутника с электропроводящим океаном, а именно со слоем рассола определенной солености толщиной 100 км²⁰, движущегося внутри мощного магнитного поля Юпитера в 20 раз сильнее земного²¹. Так прямое измерение проводящего слоя доказало существование первого глобального океана за пределами Земли.

На Европе сила притяжения в десять раз слабее, чем на Земле, а ее океан в десять раз глубже, так что давление в его глубинах сравнимо с давлением в земных океанах. И — что, возможно, удивительно — у основания своей ледяной скорлупы этот океан ненамного холоднее, чем вода под ледяными шельфами на Земле. Его температура — всего пара градусов ниже нуля. Еще немного, и вода стала бы твердой. Что касается солености, по оценкам, сделанным на основе ее электропроводности, вода на Европе может быть от солоноватой (1 грамм соли на литр) до сверхсоленой (100 грамм соли на литр); соленость морской воды на Земле — 30 грамм соли на литр, так что условия могут показаться нам знакомыми. Геофизические характеристики океана (особенности его циркуляции и взаимодействия с панцирем из пресного льда) также зависят от солености, которая определяет температуру замерзания и плотность воды.

Приливный разогрев Европы, как считается, происходит в основном у основания ледяного панциря, где деформации создают наибольшее трение. Сказывается и радиоактивное тепло, исходящее от горных пород мантии. Снаружи океан не получает ни тепла, ни света, и, за исключением возможных вспышек триболюминесценции (свечения при разрушении кристаллических тел) и биолюминесценции (свечения живых существ), в глубинах ледяных спутников царит беспросветный мрак. Сейчас какая-либо связь с поверхностью, кажется, отсутствует, но существует множество доказательств того, что в прошлом вода просачивалась наверх — например,

так называемые хаотические области: встречающиеся повсеместно зоны, которые выглядят как грязь, замерзшая зимой на заднем дворе после того, как в ней порылись собаки.

Хаотические прорывы на Европе, возможно, случаются редко: «Галилео» смог детально заснять только пару таких точек, а с тех пор мы не возвращались. Но более свежие наблюдения с помощью телескопов позволяют предположить, что вода и сейчас может прокладывать себе путь через локальные сдвиговые трещины. Обнаружение следовых количеств кислорода в газовых шлейфах вокруг Европы указывает на некие незначительные, но повторяющиеся события, и недавние или непрерывные извержения богатого водой материала являются тут наилучшим объяснением. Ученые не спускают с Европы глаз в поисках дальнейших доказательств выбросов, которые могут навести нас на идеи для новых экспедиций.

Условия для жизни на поверхности Европы ужасны. Гигантское магнитное поле Юпитера захватывает заряженные частицы, испускаемые Солнцем, и направляет их внутрь себя, создавая обжигающий поток концентрированного излучения, достаточно мощный, чтобы разбивать на части молекулы и ионизировать атомы. Этот поток убьет любое существо, которое отважится появиться на поверхности, и может поджарить даже неприхотливый роботизированный зонд. Именно поэтому мы даже не пытались сесть на Европу: половина массы посадочного аппарата пришлось бы на радиационную защиту. Несмотря на все это, если и когда мы на такое решимся, нам придется быть очень осторожными, чтобы не заразить нашу цель земной жизнью. С самой посадкой все может быть в порядке — заражение внешней поверхности ледяной коры невозможно из-за стерилизующей радиации. Вы можете сесть и произвести какие угодно сейсмические и геохимические измерения, потому что у любого земного

организма (вируса или бактерии), который сумеет безбилетником проскочить на Европу, разорвет на части ДНК. Но многие выступают за то, чтобы пойти дальше — пробурить кору и спуститься в солоноватый океан²². И тут мы должны проявить терпение.

Российские ученые пробурили скважину в озеро Восток, находящееся на Земле под 4 км антарктического льда. Если мы хотим искать свидетельства второго творения в Солнечной системе, это прекрасное место, которое, вероятно, было изолировано от всей остальной земной жизни на протяжении миллионов лет. Увы, желание провести исследования при нашей жизни перевесило тут научную осторожность, и мы вот-вот загрязним эти абсолютно уникальные биомы только потому, что люди нетерпеливы. Это напоминает вторжение археологов начала XIX в. в египетские гробницы, только с еще худшими последствиями. Несколько случайных микробов могут прекрасно прижиться там (в озере Восток, как и в океане Европы), и мы разрушим единственную по-настоящему чуждую нам экосистему, которую только и могли надеяться изучить, в неловкой попытке узнать ее тайны.

Для существ, которые, быть может, кишат в теплых глубинах Европы, ад находится *наверху*, над криосферой. Рай — внизу, под панцирем и около черных курильщиков и подводных вершин, на поверхности контакта воды и горных пород. Но время от времени в этом «саду осьминога»^{*} наступает полный переполох. Насколько часто это происходит, мы можем судить по немногочисленности кратеров Европы. Астрономы неплохо понимают, сколько комет проходит через район Юпитера за миллион лет. Дальше мы

* Отсылка к песне «Octopus's garden» группы The Beatles. — *Прим. ред.*

можем посчитать, сколько кратеров приходится на миллион квадратных километров поверхности Европы. Вместе эти данные свидетельствуют, что возраст этой поверхности не превышает 70 млн лет, причем ни один ее участок не является значительно более древним или молодым, чем другие²³.

Что же произошло? Возможно, в то время Европа пережила глобальную геологическую катастрофу, напоминающую гипотетическое бедствие на Венере, — скажем, столкновение с крупной кометой или с утраченным спутником Юпитера. Другая идея состоит в том, что океан может подвергаться термическому или химическому расслоению, что постепенно увеличивает его гравитационную нестабильность до тех пор, пока он в очередной раз не переворачивается вместе с плавающей на его поверхности ледяной корой. Можно вообразить, что жизнь внутри Европы время от времени угощается дарами космоса. Поверхность захватывает кометы и пыль, материалы которых превращаются в новые соединения под действием солнечного и космического излучения. Возможно, глубоко внутри спутника дремлющая биосфера терпеливо ждет следующего раза, когда ей достанется новая порция вызревшей ледяной коры.

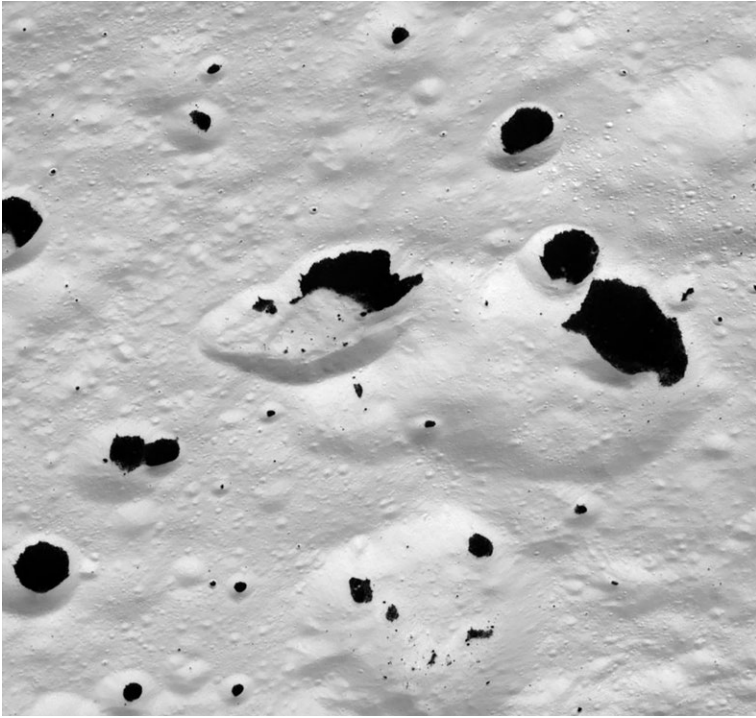
Самые древние крупные кратеры на Европе — их возраст оценивается в десятки миллионов лет — выглядят так, будто они пробивались прямо до жидкого океана, не оставив после себя почти никаких следов в рельефе. С тех пор ледяная кора, видимо, стала толще, так что самый свежий кратер Пуил (диаметр 30 км) выглядит, как будто образовался в твердом льду по меньшей мере 10-километровой толщины. Со временем процесс утолщения панциря замедляется, поскольку теплу все труднее выходить наружу, и лед нарастает нерегулярно. На сегодняшний день толщина ледяной коры Европы судя по всему варьирует: кое-где она составляет пару

километров, где-то еще всего несколько сот метров, тогда как в основном достигает десяти и более километров.

Ученых особенно интересуют места с тонким льдом, где, возможно, имели место самые недавние прорывы льда. Грядущая экспедиция NASA «Клиппер» совершит серию облетов Европы в конце 2020-х гг., собрав комбинированные данные радарной и магнитной разведки электропроводящего рассола под проникаемой для радаров ледяной корой. Участки с тонким льдом рассматриваются как потенциальные места будущих посадок.

Ганимед в три раза тяжелее Европы, и на его поверхности нет никаких признаков существования подледного океана; о наличии там воды мы знаем благодаря теоретическим выкладкам и данным измерений магнитного поля, соответствующим планете со слоем электропроводящего рассола. Судя по деформации кратеров и особенностям трещин, можно сказать, что кора Ганимеда состоит из сплошного льда толщиной по меньшей мере 50–100 км. Не слишком ли это глубоко, чтобы нам было дело до того, что под ней? Ведь это в несколько раз глубже нижней границы биосферы Земли. Чтобы пробиться к океану внутри Ганимеда, потребуется удар такого крупного тела, что его, возможно, не произойдет до тех пор, пока не состарится Солнце. Если на нижней поверхности ледовой коры Ганимеда и есть живые существа, они могут никогда не понять, что верх — это на самом деле низ, а вниз — значит наружу, даже если переживут все другие планеты.

Занявшие свои орбиты вокруг Юпитера галилеевы спутники представляют собой массивные тела в такой стабильной конфигурации, что никакое событие в Солнечной системе, если не считать того, которое их напрямую разрушит, не способно



35-километровая область переходной зоны поверхности Япета, массивного и далекого ледяного спутника Сатурна. Черное на белом или белое на черном?

NASA/JPL

вырвать их из резонанса Лапласа. Они продолжают согласованное обращение вокруг Юпитера с момента своего образования независимо от того, куда и как мигрирует планета. Их движение и приливный разогрев их океанов продолжатся и после гибели Солнца.

Если нас устраивает объяснение того, как Юпитер приобрел цепочку массивных спутников, находящихся в резонансе Лапласа, тогда почему у Сатурна только один крупный спутник, Титан, и множество его мелких собратьев? Одна из версий состоит в том, что Сатурн слишком мал, чтобы

создать мощный магнитоэлектрический генератор, необходимый для расчистки центрального просвета во внутреннем диске. Без такого просвета спутники продолжали один за другим падать на планету по спирали, а Титан, как гласит эта теория, оказался последним в их чередѣ и остановился, когда газа просто не осталось. Но в случае Сатурна нам нужно объяснить существование не только Титана, но и ряда спутников среднего размера — объектов, которых нет в системе Юпитера.

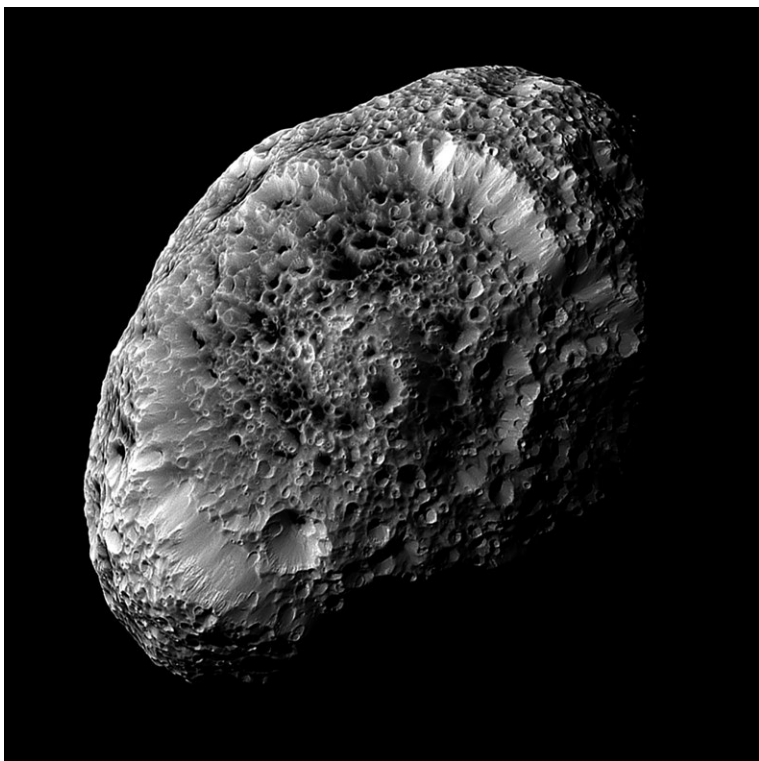
При обсуждении происхождения системы Сатурна самый важный для нас спутник среднего размера — это, видимо, Япет, который в два раза меньше Луны и обращается в три раза дальше Титана по орбите со значительным наклоном. Все это нуждается в объяснении. Плотность Япета немного выше, чем у льда, при этом часть его поверхности ослепительно бела, а другая — черна как смоль. Чтобы передать его странность, скажу, что, после того как с аппарата «Кассини» пришли снимки поверхности Япета в высоком разрешении, ученым экспедиции осталось только чесать затылки и обмениваться электронными письмами, пытаясь придумать, что же сообщить прессе. Несколько из них считали, что черные области, состоящие из органического материала темнее угля, наложены на белоснежную поверхность. Другие придерживались противоположного мнения — это белое лежит на черном. И у каждого лагеря имелаcь теория для подкрепления своей версии.

Каждый из спутников среднего размера, обращающихся вокруг Сатурна, имеет собственную странную геологию, и в том, как именно они отличаются друг от друга, нет никакой системы, что также чрезвычайно озадачивает. Япет — только начало этой кроличьей норы странностей, один из «восьми гномов», которых в этом случае называли в честь греческих гигантов и титанов: Мимас, Энцелад,

Тетия, Диона, Рея, а далее, за Титаном — Гиперион, Япет и Феба²⁴ (последняя, находящаяся на странной орбите и имеющая размер меньше, чем у остальных, возможно, представляет собой захваченный объект пояса Койпера). Спутники Сатурна настолько разнообразны, что, по крайней мере на мой взгляд, они являются лучшей лабораторией для изучения происхождения разнородности планет.

Космический аппарат «Кассини» провел 13 лет, обращаясь вокруг Сатурна, что позволило подвести четкую базу под сотни лет астрономических наблюдений за моментами, когда спутники выглядывали из-за диска планеты. В итоге мы смогли неплохо разобраться, как происходила приливная эволюция орбит спутников. Мы *увидели*, как Сатурн меняет движение своих спутников. Чтобы это происходило с такой скоростью, внутренние области Сатурна должны быть в тысячу раз более диссипативными, чем у Юпитера, то есть в них должно наблюдаться намного большее вязкое трение, так что на орбиты спутников передается в тысячу раз больше энергии и миграция происходит быстро. Хотя мы не понимаем причину этих различий, внутренние области Сатурна значительно отличаются от юпитерианских, и он имеет намного более слабое магнитное поле. В конце концов, как доказал Ньютон еще много столетий назад, объемная плотность Сатурна в два раза меньше, чем у Юпитера, — 0,7 г/см³, меньше, чем у воды.

Вот краткий геологический обзор основных спутников Сатурна в порядке удаления от планеты; судите сами, есть ли тут какая-то логика. Первым идет геологически мертвый Мимас с диаметром 400 км и плотностью водяного льда. Следующий — Энцелад, одно из самых активных тел в Солнечной системе, с диаметром 500 км и объемной плотностью смеси равного объема горных пород и льда. Там постоянно бьют гейзеры богатой аммиаком воды, вырывающейся



Гиперион — самый маленький из спутников среднего размера в системе Сатурна. Он обращается в резонансе 4:3 с Титаном. Его средний диаметр составляет 270 км, а объемная плотность — чуть больше половины плотности льда, как у ядер комет. Гиперион имеет очень высокую пористость. На этом фото различимы структуры размером около километра. Хребты с плоскими стенками обращены к тому, что может быть зоной древнего ударного взаимодействия или глобального структурного коллапса. Маленькие вмятины — это, видимо, ударные кратеры, которые разрослись в сплошные соты при сублимации льда. Нам по-прежнему многое неясно и про сам Гиперион, и про его взаимодействие с Титаном.

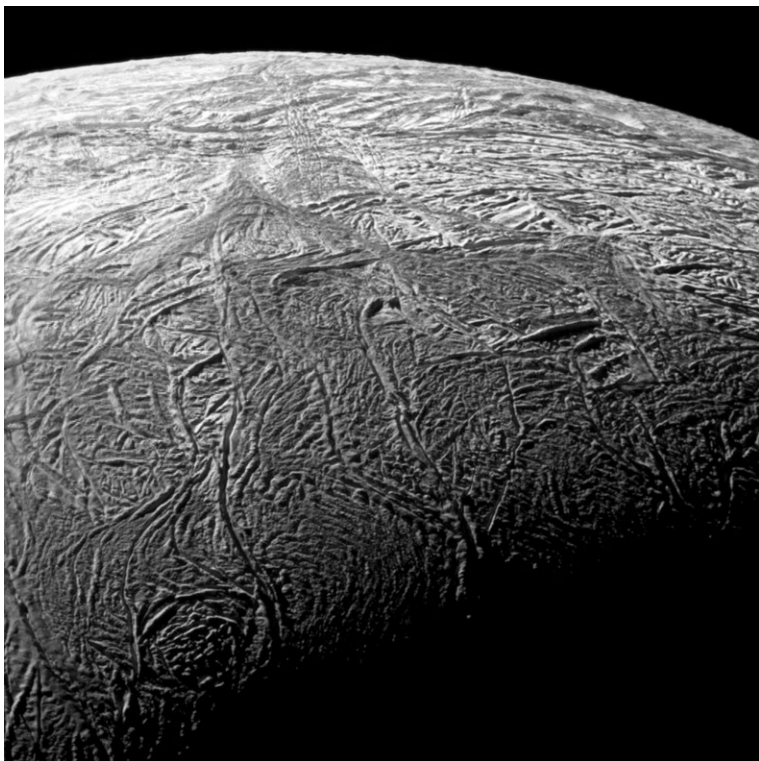
NASA/JPL/SSI

из глобального океана. За ним идет Тефия, которая, как и Мимас, состоит в основном из твердого водяного льда, но в 20 раз тяжелее. Далее находятся самые крупные, наряду с Япетом, из всех спутников среднего размера — Диона и Рея. Обе

примерно наполовину состоят из горных пород, а наполовину из льда; обе странные и сложные, но совершенно непохожие друг на друга. За ними — наш старый знакомец Титан диаметром 5000 км, что заметно больше, чем у планеты Меркурий, и в десять раз тяжелее Плутона. Во многих отношениях он является прекрасным аналогом Земли.

Титан примерно равен по размеру Ганимеду и Каллисто, самым крупным спутникам Юпитера, но контраст между ними огромен. Титан — чрезвычайно активная планета с плотной азотной атмосферой, ледяными континентами и метановыми морями. Там есть большие углеводородные озера протяженностью в сотни километров, лежащие на коре из прочного водяного льда толщиной десятки километров. Ниже подогреваемая изнутри приливным трением и радиоактивным распадом ледяная кора Титана под огромным давлением предположительно переходит в жидкость, как на Европе и Ганимеде. Другими словами, мы считаем, что на Титане есть океаны двух видов: наверху углеводородные моря с сообщающимися с ними болотами, дренажными каналами и водоносными слоями, затем твердая ледяная кора, а под ней — водный океан.

За орбитой Титана и в орбитальном резонансе 4:3 с ним обращается Гиперион, нерегулярное по форме хаотически вращающееся тело, гораздо менее плотное, чем лед, что говорит о его значительной пористости. Наконец, наступает очередь Япета — ложки дегтя сразу во многих теориях, — обращающегося на том же относительном расстоянии от Сатурна, что и Луна от Земли, в 60 радиусах планеты, но с большим наклоном орбиты. За Япетом находится Феба, спутник неправильной формы, который, кажется, относится к бродячим объектам пояса Койпера, а за ней кружатся еще десятки нерегулярных спутников, которые предположительно тоже попали в гравитационную ловушку планеты-гиганта.



Южная полярная область Энцелада, 500-километрового спутника Сатурна. Фото получено аппаратом «Кассини» в 2009 г. На переднем плане — «тигровые полосы», в том числе рывины Багдад, где бьют потрясающие гейзеры. Эти элементы рельефа ярко сияют в инфракрасных лучах.

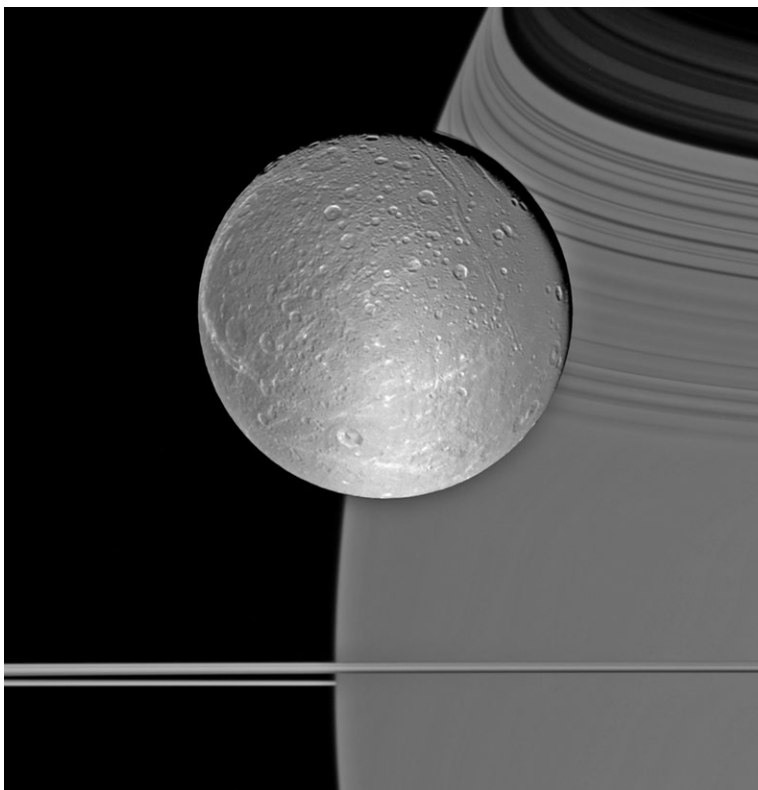
NASA/JPL/SSI

Для характеристик основных спутников Сатурна, будь то расстояние до планеты, диаметр или состав, не просматривается каких-либо конкретных тенденций. Создается впечатление, что Бог наугад создал такой-то спутник среднего размера и поместил его *сюда*, а потом соорудил еще один, на этот раз с ледяной корой потолще и меньшим содержанием горных пород, и поместил его *туда*. Но как бы они ни сформировались, их позиции на самом деле тесно

увязаны: Титан ведет Гиперион в резонансе 4:3, Диона подстегивает Энцелад в резонансе 2:1, Тефия связана с Мимасом в резонансе 2:1 и так далее. Как ни странно, Тефия и Диона имеют по паре собственных коорбитальных спутников (один совсем мелкий, второй чуть массивнее), которые делят с ними их орбиты вокруг Сатурна. Сейчас эти их орбитальные товарищи стабильны; возможно, они представляют собой осколки, захваченные после столкновения — мы еще вернемся к этой идее, когда будем обсуждать нашу собственную Луну.

Мы можем провести примерную аналогию между системой Сатурна и Солнечной системой в целом. Пусть Мимас и Энцелад соответствуют Меркурию, тогда Тефия, Диона и Рея (крупные спутники среднего размера) будут Венерой, Землей и Марсом, Титан — Юпитером и Сатурном, а Япет — Ураном и Нептуном. Разумеется, это изрядная натяжка. Во-первых, настоящие планеты гораздо больше. Во-вторых, среди планет есть только слабые признаки тех взаимосвязанных орбитальных резонансов, которые спутники среднего размера демонстрируют так ярко. Наконец, на спутники действуют приливные силы Сатурна, подогревая их и меняя их орбиты, чего не происходит в случае планет, которые обращаются в десятках и сотнях миллионов километров от своей звезды.

При массе примерно в одну тысячную от массы Луны Энцелад представляет собой чрезвычайно активный маленький спутник. Его тепло, как мы думаем, производится потому, что в десять раз более тяжелая Диона заставляет его двигаться по эксцентрической орбите. Это вызывает приливное трение в основании его ледяной коры, выделяющее примерно 20 гига-ватт энергии²⁵ в области «тигровых полос» около его южного полюса. Но здесь есть проблема: если приливное трение может объяснить впечатляющую геологическую активность



Спутник среднего размера Диона на фоне Сатурна. Полосы на поверхности планеты — это тени, отбрасываемые кольцами, которые видны с ребра внизу снимка.

NASA/JPL/SSI

на Энцеладе, то, рассуждая по аналогии, Мимас должен испытывать еще более сильный приливный разогрев, так как он выведен на эксцентрическую орбиту из-за резонанса 2:1 с Тетфией. Мимас тогда был бы чудом криовулканизма, но вместо этого выглядит как изрытый древними кратерами сфероид возрастом 4 млрд лет, напоминающий из-за циклопического кратера Гершель «Звезду смерти» из «Звездных войн». Еще один замок, к которому не удастся подобрать ключа.

Почему вокруг Сатурна обращается полдюжины спутников среднего размера? Почему у Юпитера их вовсе нет? Возможно, две системы сконструированы под воздействием разных факторов и по различным правилам: Юпитер — как дом на колесах, а Сатурн — как гоночный мотоцикл. Но что-то общее у них есть: масса Титана по сравнению с Сатурном равна массе всех четырех галилеевых спутников в сумме по сравнению с Юпитером. Кроме того, орбитальное расстояние от Титана до Сатурна в радиусах планеты близко к среднему орбитальному расстоянию галилеевых спутников в радиусах Юпитера²⁶. Так что в какой-то мере системы Сатурна и Юпитера похожи, если не считать того, что у Сатурна она сжата в один большой спутник.

Это привело к гипотезе, что с Сатурном что-то не так — или, наоборот, все хорошо, если вам нравится то, что вы видите. Несколько лет назад мы со швейцарским астрофизиком Андреасом Рейфером предположили, что у Сатурна когда-то было семейство крупных спутников, сравнимое с юпитерианским. Но вместо того, чтобы двигаться по своим орбитам в согласованном порядке, они однажды слились в одно крупное тело, создав Титан и горстку отставшей мелочи²⁷. Механизм, который мы предложили, не слишком отличается от того, как Луна гипотетически сформировалась из разлетевшихся фрагментов мантии Тейи при ее слиянии с Протоземлей.

Это теория о происхождении, и она, соответственно, является более умозрительной, чем теория приливной эволюции, которая более прочно укоренена в реальности. На основе приблизительных скоростей приливной миграции специалисты по динамическому моделированию могут прикинуть, какие орбиты были у спутников Сатурна миллионы лет назад, так же как Дарвин экстраполировал в прошлое приливную миграцию Луны, но на основе более точных

данных. Эти экстраполяции свидетельствуют²⁸, что всего сотню миллионов лет назад Тефия, Диона и Рея испытывали мощное взаимовлияние и, вероятно, сталкивались между собой. Если дело обстоит так, внутри орбиты Титана не может быть ничего древнего. Это согласуется с нашими представлениями о кольцах Сатурна, чью небольшую массу микрометеориты должны были разметать за схожий промежуток времени. Получается, что у всей этой красоты должен быть некий постоянный источник.

Что же насчет самого Титана? Одна из загадок тут состоит в том, что его орбита имеет гораздо больший эксцентриситет, чем у любого из галилеевых спутников Юпитера. Как мы уже обсудили, ничто не дается даром: рассеивание энергии орбитального движения в виде тепла давно перевело бы Титан на более круговую орбиту, прекратив приливный разогрев. Чтобы сегодня спутник имел эллиптическую орбиту, несколько миллиардов лет назад ее эксцентриситет должен был быть еще сильнее. Мы с Рейфером установили, что череда гигантских ударных слияний могла стать причиной 10-процентного эксцентриситета орбиты Титана, что с течением времени привело бы к сегодняшним значениям; если говорить о приливном разогреве, это напоминало бы хороший запас дров на долгую холодную зиму.

Более того, перебирая модели столкновений, мы показали, что разнообразие спутников среднего размера можно объяснить: крошечный Энцелад получился из нижних слоев мантий сталкивавшихся тел (отсюда его вулканическая активность — результат разложения образовавшихся при высоком давлении твердых фаз), а богатая водой Тефия — из ледяных внешних оболочек. Так эта история обретает геологический смысл, хотя с динамикой тут пока не все гладко.

Заключительная аккреция в истории Титана произошла вскоре после формирования Сатурна, или позднее, как часть ранней миграции Сатурна по типу «прыгающего Юпитера», или даже еще позже — в ходе приливной миграции спутника. (Для нашего понимания, на мой взгляд, очень важно, что система Юпитера избежала подобной судьбы. Юпитер вдвое массивнее, что сделало его первоначальный набор спутников более стабильным.) Возникновение Титана в результате гигантских ударных слияний оставило Сатурн с одним огромным спутником и множеством спутников среднего размера, совокупность которых не была стабильной: за следующие несколько миллиардов лет им предстояло решить массу хаотических орбитальных проблем, что время от времени пополняло кольца.

Какой же вывод мы можем сделать из всего этого? Нам просто необходимо вернуться на Титан! Во-первых, там может быть жизнь, и если так, то это обязательно второе творение, а не завезенные с древней Земли безбилетные пассажиры. Во-вторых, это идеальный аналог Земли, с помощью которого мы можем понять, как климат влияет на планету со сложной гидросферой и атмосферой. В-третьих, в происхождении Титана есть множество геофизических загадок, способных пролить свет на происхождение Земли. И в-четвертых, прагматичный аргумент: на Титане будет относительно легко совершить посадку и использовать исследовательские аппараты, поскольку там имеется похожее на земное атмосферное давление и похожая на лунную сила притяжения. Но для того, чтобы отправиться так далеко и, возможно, многое узнать, кто-то должен за это заплатить.

В начале 1970-х гг. казалось, что Солнечная система станет ареной для дружеского соревнования сверхдержав, стремящихся превзойти друг друга техническими достижениями, так что вскоре мы будем путешествовать повсюду. Хотя гонка

к Луне и Марсу замерла на сорок лет, кажется, сейчас она вновь начинается: китайский «Чанъэ-4» совершил посадку на обратной стороне Луны, где ранее не садился ни один космический аппарат. Современная программа пилотируемой космонавтики и целенаправленный интерес к исследованию богатых летучими компонентами регионов вокруг южного полюса Луны показывают, что Китай готовится к созданию обитаемой лунной базы с доступом к богатым местным ресурсам.

Тем временем мы наблюдаем частную космическую гонку: Virgin Galactic (Ричард Брэнсон), Blue Origin (Джефф Безос) и SpaceX (Илон Маск) — самые известные ее участники. Упор делается на развитие рынка космического туризма вроде напоминающих программу «Аполлона-8» облетов обратной стороны Луны. Я бы от такого не отказался. В целом, 26 человек контролируют финансовые ресурсы, превышающие накопления половины населения планеты, и они без проблем могут позволить себе слетать на Луну и обратно, если это является их мечтой.

У 50 человек состояние превышает 10 млрд долларов — стоимость космического телескопа «Джеймс Уэбб», который вскоре начнет искать новые экзопланеты. У тысяч денег достаточно, чтобы отправить непилотируемый дирижабль в небеса Венеры, посадить лодку на Титан или доставить на Землю образец газового шлейфа Энцелада. То, что никто из них этого еще не сделал, показывает либо недостаток интереса, либо отсутствие воображения и понимания того, что это достижимо. Предположим последнее и представим, что вы один из сотни самых богатых людей на Земле. Вот вы просыпаетесь неким прекрасным утром в одном из ваших десяти домов, и тут на вас снисходит озарение по поводу того, как избавиться от половины своего состояния. Вы решаете профинансировать передовую экспедицию по исследованию

Солнечной системы, которая войдет в историю наряду с «Вояджерами», «Викингами» и «Кассини». Вы можете это сделать. Так куда полетите?

Если вы питаете слабость к яхтам, выбирайте Титан. Навероятно красивая и геологически сложная, это единственная достижимая планета, где, как на Земле, есть мощная атмосфера и открытые моря. Если не считать того, что он сырой и туманный в своем особом низкотемпературно-органическом роде, Титан гарантирует сравнительно благоприятную обстановку для изобретательной, амбициозной экспедиции. Используя данные, собранные аппаратом «Кассини» и его посадочным зондом «Гюйгенс», ваша команда сможет минимизировать операционные риски и приготовиться к неизвестным чудесам и сюрпризам этой планеты. NASA недавно одобрило полет космического аппарата «Дрегонфлай» с его квадрокоптером размером с холодильник, который совершит посадку в темных дюнах области Шангри-Ла в 2034 г., а затем полетает вокруг в радиусе пары сотен километров²⁹. Он опустится в кратер диаметром 80 км, изучит его геологическое строение и соберет там образцы для определения молекулярного и изотопного состава. Вложив в дело в несколько раз больше денег, вы сможете оказаться на Титане быстрее. Если вы пересечетесь, ваши потоки данных можно будет координировать через Сеть дальней космической связи NASA.

Еще одно преимущество поиска приключений на Титане по сравнению с Марсом (другим впечатляющим аналогом Земли) — это то, что способные пережить космический полет матерые микробные безбилетники, притаившиеся на оборудовании, которое невозможно простерилизовать полностью, не смогут прижиться на низкотемпературной, пропитанной метаном поверхности Титана. В отличие от экспедиции на Марс, где какие-то земные организмы,

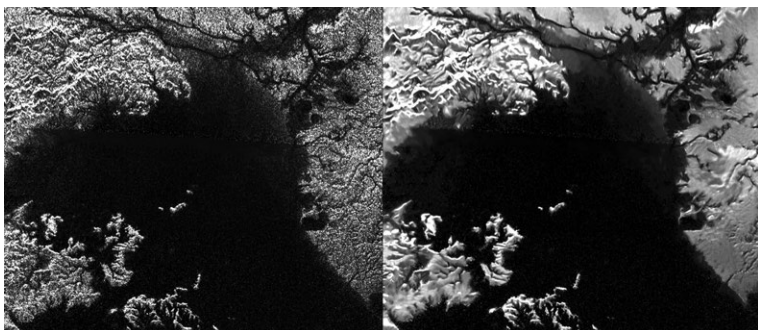
возможно, способны процветать в некоторых нишах, полет на Титан совершенно безопасен с точки зрения *планетарной защиты* — принципа, закреплённого в международном соглашении, которое оберегает возможную инопланетную жизнь от заражения земной до того, как у нас будет шанс ее изучить. Этот здравый, рассчитанный на долгую перспективу подход может сделать экспедиции слишком сложными, неприемлемо дорогими или даже невозможными — именно он при нынешнем уровне технологий не позволяет нам посетить самые интересные с точки зрения геобиологии места на Марсе³⁰. Ни о чем подобном на Титане беспокоиться не стоит.

Но давайте не будем опережать события. Уже в самом начале проекта, вместе с главным инженером, чьему мнению вы доверяете, вам нужно будет принять решение о ракетеносителе, которая потребует, чтобы как можно скорее доставить к Сатурну двухтонный космический аппарат. Это решение определит траекторию полета и весовые характеристики вашей экспедиции. На все про все вам понадобится около пяти лет. Также нужно будет решить вопрос о двигателе космического аппарата: будет ли он химическим (на ракетном топливе) или ионным (на солнечной или ядерной энергии³¹) — в зависимости от этого вы будете сотрудничать с компанией или космическим агентством, которые имеют опыт работы именно с таким оборудованием. Разработку плана полета, запуск и управление аппаратом вы поручите проверенному центру управления полетами в глубоком космосе; выбор невелик, особенно если учесть, что его специалистам нужно быть знакомыми со сверхзвуковым входом в атмосферу. Приготовьтесь выписывать им огромные чеки, но взамен вы получите уверенность в том, что ваш аппарат будет разрабатываться, строиться, управляться и обслуживаться в соответствии с лучшими практиками нашего

времени. К тому же, поскольку Титан получает только 1% от того солнечного света, что достигает Землю, и скрыт туманной атмосферой, источник энергии для аппарата на поверхности должен быть ядерным — то есть радиоизотопным термоэлектрическим генератором (РИТЭГ), который превращает получаемое при распаде плутония тепло в электричество. Поэтому разумно иметь дело с той организацией, которая сможет заодно позаботиться и об этом.

Теперь, когда у вас есть купленный билет, конкретная дата запуска и космический аппарат, который доставит вас на Титан, вы можете сосредоточиться на самих исследованиях — что и как вы будете там делать. Все начинается с формирования основной научной команды. Вам стоит начать с подбора людей, с которыми вы захотите провести следующие десять лет своей жизни, людей, вместе с которыми вам нравится решать проблемы, людей, про которых вы знаете, что они примут здравые, своевременные решения, людей, которые будут относиться к вам как к равному и осаживать, если посчитают, что вы не правы. Недавние экспедиции доказали, что наилучшие научные результаты дают команды, разнообразные по возрасту, расовой принадлежности и полу.

Первая задача команды — это разработка рабочей концепции. Вам нужна мобильность, но будут ли это крылья, ноги, воздушные шары или понтоны? А может, паруса? Частично решение зависит от научной нагрузки: от выбора приборов, камер, химических датчиков, манипуляторов и радаров. Главный инженер будет контролировать полезную нагрузку на предмет соответствия плану полета, уделяв особое внимание тому, как будет происходить посадка на Титан, что аппарат будет делать на поверхности и как он сможет передавать данные на Землю. Его работа, особенно на последнем этапе разработки, — это сообщать вам плохие новости о том, что экспедиция выходит за рамки бюджета



Присланные аппаратом «Кассини» радарные изображения Моря Лигеи на Титане. Левое изображение получено методом синтезированной апертуры: луч радара проникает на десятки метров в глубину метаново-этанового моря, что позволяет фиксировать батиметрические характеристики прибрежной зоны. Справа на том же изображении убран электронный шум. Море Лигеи имеет в ширину около 500 км; здесь показана его южная половина, где каналы Вид (справа вверху) в определенные сезоны связывают его с самым крупным озером — Морем Кракена на юго-востоке.

NASA/JPL-Caltech/ASI

или не укладывается в график, а затем предлагать возможные пути выхода из кризиса.

Вам всегда нравилось ходить под парусом, и вы решаете, что было бы здорово управлять лодкой и на Титане, выполняя радарную и акустическую разведку озер и рек, а также лазерные измерения топографии бухт и пещер. Вы хотите подробно изучить батиметрические характеристики водоемов и поискать там макроскопических живых существ — скажем, низкотемпературных кальмаров и рыб, или даже коралловые рифы. Для этого за лодкой придется тянуть отдельную установку для сейсмических и радарных измерений. Чтобы приобрести опыт, вы с друзьями катаетесь на лодках по Северо-Шотландскому нагорью, чьи озера по глубине и топографии сопоставимы с некоторыми озерами на Титане. Там же вы тестируете окончательные прототипы судна и приборов. Принимается решение сосредоточиться на очень точных,

но простых по сути измерениях — изображениях в видимой области спектра, лазерном сканировании, макрофотографии структуры образцов, микроскопировании и химическом анализе жидкости. Всего этого хватит на два года работы.

Парашют может доставить на поверхность Титана значительную массу в виде снабженной радиоизотопным источником энергии лодки. Общую идею такой экспедиции в 2009 г. впервые выдвинула американская исследовательница Эллен Стофан, чья команда разработала оснащенный измерительной аппаратурой буй, который может дрейфовать под влиянием медленных течений и ветров, дующих со скоростью порядка нескольких метров в секунду. Увеличьте бюджет в три или четыре раза, и ваша лодка превратится в надувной понтон, в киле которого спрятан термоэлектрический генератор, способный более десяти лет давать достаточно энергии для научных приборов, средств связи, а также обогревателей, не позволяющих всему этому оборудованию замерзнуть.

Изучив радарные изображения, инфракрасные и оптические снимки, полученные «Кассини» и «Гюйгенсом», а также прослушав бесчисленные доклады научной команды, вы останавливаетесь на Море Лигеи, где собиралась совершить посадку команда Стофан³². По размеру оно сравнимо с Великими озерами, но гораздо мельче и наполнено углеводородами. Море подпитывается подземными жидкостными пластами и сезонным разливом рек. Каналы Вид тянутся от него на сотни километров по разъеденному эрозией нагорью вдоль пробитых сквозь льды каньонов; вашей целью станет их устье. Вам стоит быть готовым к сильным течениям и, возможно, ветрам. Значит, ваше судно должно быть устойчивым, маневренным и непотопляемым; ему необходима надежная ходовая часть.

По размеру ваш космический аппарат будет примерно с большой автофургон; ему необходима термоизоляция,

чтобы пережить прыжок в атмосферу Титана на скорости 9 км/с. Звучит пугающе, но все срабатывает просто отлично, поскольку район десантирования имеет размер озера Верхнего, а атмосфера плотна и стабильна. Внутри термоизоляционной защиты находится точно подогнанная под условия Титана лодка, при создании которой учтен опыт луноходов и марсоходов. Она использует системы, уже показавшие себя в работе, а главным новшеством там являются понтоны и винты. Что касается управления, то из-за огромного расстояния аппарату придется двигаться автономно: команды будут загружаться раз в два дня. Он будет выполнять целую последовательность команд, а потом сообщать об этом; вы будете получать его отчеты с задержкой в один час.

После того как экспедиция стартует в космос, у вас будет пять свободных лет, когда вы сможете заниматься своим оставшимся состоянием и делать то, что миллиардеры всегда делают на каком-нибудь острове в духе Джеймса Бонда. За время многолетнего полета к Сатурну будет несколько критических для экспедиции событий; это скорее весело, поскольку проблемы на этом этапе случаются редко. (Хороший повод пригласить соседей.) По пути аппарат может совершить пролет какого-нибудь астероида и два или три раза сблизиться с планетами для гравитационных маневров, сделав заодно фотографии. Также вас ждет несколько промежуточных коррекций, когда с помощью небольшой тяги аппарат выводится на оптимальную траекторию приближения к Титану, которая обеспечивает точно рассчитанный вход в атмосферу. Шумиха в СМИ в связи с успехом этих эффектных операций может помочь вам вернуть те миллиарды, которые, по словам ваших друзей, вы спустили на какую-то странную космическую затею. В свое время скряги точно так же ворчали, что программа «Аполлон» обходится в миллиарды, тогда как она стимулировала экономику в стократном размере.

Законы физики вкупе с минимальными погрешностями в расчетах позволяют современным космическим аппаратам добиваться потрясающих успехов. Посадка лодки на спутнике Сатурна кажется отчаянно дерзким предприятием, так что вам хочется ущипнуть себя при приближении самого нервного момента, когда ваш посадочный модуль готовится воткнуться в атмосферу Титана, используя термоизоляционную защиту, чтобы сойти со своей межпланетной траектории. Когда он потеряет большую часть скорости входа, откроется тормозной парашют, который, в свою очередь, вытянет за собой главный. Вся ваша надежда — на заранее введенные в электронную память программы и алгоритмы, на системы механики и контроля. Конечно, многое может тут пойти не так, но на самом деле редко что-то идет *совсем* не так, если экспедиция спланирована правильно. Если у вас действительно хорошая команда, она предусмотрела все и снизила риски благодаря дублированию всех компонентов и изучению каждой детали предыдущих миссий.

По мере того как поступают и расшифровываются телеметрические данные о происходящем на космическом аппарате, люди в центре управления полетом демонстрируют огромное нетерпение и возбуждение. Сообщение о том, что понтоны надулись и посадка уже близка, вызывает громкие аплодисменты. Но есть здесь одна странность: посадка в действительности состоялась почти час назад, в миллиарде километров от вас, которые даже свет не может преодолеть мгновенно. Ваш аппарат либо находится в рабочем состоянии, либо разбросан по поверхности в виде обломков. Кот Шрёдингера либо жив, либо мертв³³, и сделать уже ничего нельзя. Если вы захотите исправить что-то за час до посадки, это невозможно, поскольку относительно нее вы находитесь в прошлом. К тому времени, когда аппарат получит ваше сообщение, он либо будет занят начальной проверкой систем,

либо от него останется несколько фрагментов, болтающихся на дрейфующем к берегу парашюте.

Предположим, вам удалось совершить посадку вблизи от намеченной точки, в 16 км от берега, и ваша лодка включилась без каких-то значительных проблем. Ее самосборный надувной каркас теперь поддерживает платформу с научными приборами, большую антенну для связи с Землей³⁴, а в самом низу — радиоизотопный термоэлектрический генератор. Датчики и камеры распределены вокруг платформы так, чтобы генерировать данные для пакетов создания виртуальной реальности, а радары и сонары всматриваются во всех направлениях, а также вниз. Компактная лаборатория микроскопии и химического анализа вот-вот начнет отбирать и анализировать пробы из углеводородного озера. Бортовые компьютеры преобразуют необработанные потоки данных в тщательно продуманный набор радарограмм, сонограмм, MPEG-файлов и так далее, вместо того чтобы пересылать на Землю всю сырую информацию.

Семь дней спустя суета, связанная с посадкой, позади. Ваша команда завершила первую неделю работы, и теперь лодка уверенно рассекает спокойные воды, направляясь к усыпанному островами побережью. В научном центре управления экспедиции повсюду карты, глобусы и компьютерные экраны во всю стену для показа изображений. Пока что море спокойно, как стекло, а ветер дует со скоростью примерно в один узел. Иногда на Титане достаточно ветрено, чтобы образовывались песчаные дюны, но пока что вокруг холодно, тихо и, как всегда, туманно. После четырех дней постоянного движения понтон останавливается и ждет дальнейших инструкций, передав первые фотографии островов и маленьких изрезанных бухт, которые образуют линию ледяного берега. Вы видите многочисленные пещеры — результат эрозии. В море спускаются отвесные

стенки, чьи слои повествуют о геологической истории планеты.

Еще через несколько дней вы достигнете устья реки — основной цели ваших исследований. Тут лодка начнет выполнять однообразные проходы туда-сюда, проводя радарную и сонарную съемку, которая даст всестороннее и очень подробное изображение каналов, дельт и других элементов подводного рельефа. Весь мир бесконечно восхищается вашей экспедицией, но в научном центре управления вы живете на Титане, и у вас слишком много работы, чтобы замечать всеобщие восторги. К тому же вы только что получили первый пакет данных виртуальной реальности. Вы заходите в звукоизолированную студию в дальнем конце научного центра управления, встаете в середину и нажимаете на кнопку, включающую цилиндрическую стену цветных мониторов, которые освещают вас со всех сторон. Затем вы ставите громкость на максимум и запускаете воспроизведение. На экранах появляются яркие цветные изображения, скомпонованные так, чтобы окружать вас со всех сторон. Вы слышите тихие звуки, которые были записаны с помощью микрофонов вашего аппарата: дробь дождевых капель, ветер, плеск «воды». В комнате установлены маленькие вентиляторы, которые создают потоки воздуха, совпадающие с показаниями датчиков давления и анемометра на Титане; теперь вы даже *чувствуете*, будто вы там. Новые десятиминутные пакеты будут передаваться каждую неделю.

Поток информации хлынул в полную силу, и ваша команда анализирует его во всей полноте, подтверждая или опровергая старые теории и выдвигая все новые. Спустя примерно полгода вы начинаете выкладывать необработанные данные в открытый доступ, а члены вашей команды — отсылать подтвержденную информацию и конечные результаты анализа в архивы NASA и ESA. Выполнив

первоначальную программу экспедиции, вы направляете судно вдоль берега, разыскивая признаки необычной геологической активности и наперекор всему высматривая свидетельства существования жизни в прошлом или настоящем. Если вы действительно найдете жизнь, то эта история приобретет совершенно другой оборот и не закончится уже никогда. В ином случае настанет время для давно задуманных рискованных приключений. В устье каналов Вид, где вы нанесли на карту гравийные мели, лодка причаливает к пляжу и задействует маленький вездеход, который катится по гравию и камням — твердым льдам, влажным от углеводородов и окрашенным в черный цвет органическими соединениями. Наверху он разворачивается, чтобы сделать для всех нас фотографию на память: ваша лодка в бухте за миллиард километров от Земли. Затем он послушно поедет вперед, пока не завязнет, или не застрянет, или пока у него не кончится заряд батареи. Вы же поплывете дальше, направив лодку вверх по реке, как Хамфри Богарт в «Африканской королеве», не оглядываясь назад. Отыщите ли вы жизнь? Ну разумеется — у себя внутри.

ГЛАВА 5

ЩЕБЕНЬ И ГИГАНТСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

*Если комета на своем пути столкнется с Землей, она
может мгновенно разбить ее на части или выбить
из планетной системы... Все споры европейских держав
разрешатся в один миг.*

Бенджамин Франклин.

Альманах бедного Ричарда за 1757 год

Часто приходится слышать, что обращающиеся вокруг Солнца астероиды, а также являющиеся их фрагментами метеориты — это остатки вещества, из которого формировались планеты. Это заблуждение. Если планету уподобить уже законченному дому, а Солнечную систему — строящемуся кварталу, тогда первичное вещество — это доставленные на стройплощадку палеты с досками, листами гипсокартона и кровельным железом, связки арматуры, ящики с гвоздями и шурупами, а также мешки цемента. Астероиды же больше напоминают строительный мусор, который остался на соседнем пустыре после окончания застройки квартала. Конечно,

вы найдете там какие-то исходные материалы, но по большей части вам будут попадаться распиленные и запачканные краской доски, рваные мешки, куски кровли, остатки гипсокартона, обломки сломанных палет и клубки проводки. Изучать астероиды и метеориты — это словно в полной темноте просеивать содержимое мусорных контейнеров, пытаясь понять, как был построен ваш дом.

Астероиды представляют собой таинственную часть Солнечной системы. Если бы первичный протопланетный диск равномерно, без пробела, продолжался за пределами области землеподобных планет, тогда между Землей и Юпитером следовало бы ожидать существования в несколько раз превосходящего по массе Землю небесного тела. Вместо этого на расстоянии 1,5 а. е. от Солнца у нас имеется Марс, за ним — Главный пояс астероидов, а за ним — Юпитер. Этот резкий переход от сходящей на нет области землеподобных планет к внешней Солнечной системе пока необъясним, и именно это в первую очередь заставляет Японское космическое агентство планировать посадку космического аппарата «Марс Мунз Эксплорер» (Mars Moons Explorer, MMX) на Фобосе и доставку на Землю проб его грунта.

Смотреть на Солнце с Юпитера — это словно стоять на краю обрыва или выплыть в море из-за океанского рифа. Перед тобой почти ничего нет — немного астероидов на отметках 2,4–3,5 а. е. общей массой всего в несколько процентов от массы Луны, а потом Марс. Кроме того, в химическом составе горных пород Солнечной системы также существует явный разрыв: геохимик Пол Уоррен из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе доказал, что углестые хондриты возникли относительно поздно и прилетают из внешней Солнечной системы, из чего некоторые делают вывод, что Юпитер сформировался вокруг каменистого ядра и предопределил это грандиозное разделение по составу.

В любом случае наша Солнечная система, кажется, является аномалией, и эти пробелы, физический и химический, могут помочь понять, что же произошло. Большинство планетных систем, которые мы открыли около других звезд, упакованы куда плотнее: планеты размером с Юпитер обращаются там на расстоянии сильно меньше 1 а. е. от светила. Конечно, в большой мере это систематическая ошибка отбора, потому что массивные планеты, расположенные близко к звезде, обнаружить намного проще. Тем не менее, если рассматривать тысячи уже открытых планет, делая поправку на эту систематическую ошибку, создается впечатление, что у большинства планетных систем имеются внутренние планеты-гиганты в сотни раз массивнее Земли. Это так называемые «горячие Юпитеры», коллекция странных чудищ с орбитальными периодами в несколько дней. Только небольшая доля¹ планетных систем имеет внешние планеты-гиганты, сопоставимые с Юпитером или Сатурном.

Большинство уже открытых нами планет — это «супер-земли» и «мини-нептуны», превышающие по массе Землю в три — десять раз. Необычно, что в нашей Солнечной системе планет такого размера нет; нам приходится судить о том, что они собой представляют, только по теоретическим выкладкам и очень ограниченным экспериментальным данным. Хотя некоторые из них, кажется, находятся в зоне обитаемости, многие с поправкой на яркость своих звезд расположены к ним гораздо ближе, чем Меркурий (0,4 а. е.). Что же до планет земной массы, обращающихся примерно на расстоянии 1 а. е. от похожих на Солнце звезд — планет Златовласки, — то это огромное белое пятно на наших диаграммах. Единственные известные нам примеры — это Земля и Венера.

Что-то сделало нашу систему именно такой: событие или период, свидетельством которого, возможно, является

этот пробел между Землей и Юпитером. Есть Марс, который в десятки раз меньше, чем мы могли бы ожидать, и есть астероиды, которых теперь по крайней мере в тысячу раз меньше, чем когда-то. Образцы астероидов Главного пояса мы получаем совершенно бесплатно, когда они входят в околоземное пространство. Резонансное воздействие Юпитера или Сатурна изменяет их орбиты, а возникающий из-за теплового излучения эффект Ярковского заставляет мелкие астероиды менять свою орбиту², подталкивая их, пока они не окажутся в околоземном пространстве. Родственный ЯОРП-эффект (эффект Ярковского — О'Кифа — Радзиевского — Пэд-дэка), также связанный с нагревом, может заставить астероиды диаметром менее километра крутиться все быстрее и быстрее, как вертушки на палочке; если этому вращению ничто не препятствует, такая вертушка может разделиться на две, выбросив спутник — это похоже на то, что представлял себе Дарвин, но в 10 000 раз меньшем масштабе³. И конечно, по астероидам выбивают барабанную дробь более мелкие астероиды, порождая при этом еще более мелкие, так что в конце концов остаются только совсем уж бросовые обломки, которые называют метеоритами.

Современный взгляд на космохимию метеоритов состоит в том, что они по большей части представляют собой образцы астероидов Главного пояса или то, что от них осталось. Но до начала XIX в. метеориты относили к атмосферным явлениям⁴ (древнегреческое слово *Μετεώρος* означает «из воздуха»). На протяжении истории (и предыстории) человечества их почитали как священные объекты, а из железных метеоритов по всему миру делали ножи и топоры. Одной из первых научных идей о происхождении метеоритов была гипотеза, что они извергаются из вулканов и пролетают



На этой гравюре по дереву показан легендарный метеорный поток Леониды 1833 г. — проход Земли через хвост кометы Темпеля — Туттля. Это зрелище тогда напугало всех, но не причинило никакого ущерба и не привело к падению метеоритов. Реальная картина напоминала вид через лобовое стекло автомобиля, движущегося сквозь снежную пургу.

Adolph Vollmy (1889)

сотни или даже тысячи километров, пока не падают вниз. В 1864 г. примитивный черный камень взорвался высоко над городом Оргей в Пиренеях. Пока остатки этого мягкого объекта не исчезли в почве и растительности, став частью грунта, в этом районе находили куски весом до 14 кг. Оргей стал первым метеоритом, который привлек внимание научной общественности. Частично это произошло из-за того, что аналитическая химия была к этому готова, но сыграло свою роль и то, что свежие фрагменты были такими странными и пахли как торф, как органическое вещество. Откуда же все это взялось?

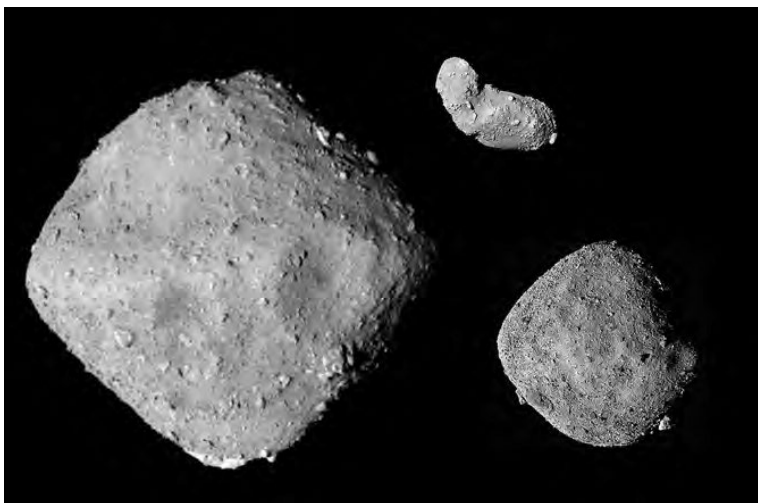
Британский минералог Генри Сорби в 1877 г. утверждал, что хондры — это «капли огненного дождя», который изливается из Солнца в виде протуберанцев⁵. Это хорошо сочеталось с популярной в то время идеей Кельвина⁶, что Солнце представляет собой «раскаленную жидкость, теряющую теперь тепло». По другой версии метеориты прилетают с Луны, из лунных кратеров, считавшихся вулканами. На протяжении следующих ста лет негромко шел спор между теми, кто считал метеориты земным явлением, и теми, кто видел в них камни из космоса⁷. Среди вторых тоже не было согласия: прилетают ли метеориты с Солнца, с Луны (и тогда имеют ли они вулканическое или ударное происхождение) или еще откуда-то — каким бы странным ни казался тогда последний вариант.

Вскоре после падения метеорита в Оргее итальянский ученый Джованни Скиапарелли (который позже гораздо больше прославился как картограф Марса, введший завожившее Лоуэлла понятие *canali*) установил первую четкую динамическую связь между кометами и метеорами. Он доказал, что метеорный поток Персеиды — изумительное шоу, которое случается каждый август, — совпадает с пересечением Землей эксцентрической орбиты кометы

109P/Свифта — Туттля⁸. Кометы, объявил Скиапарелли, распадаются на части и становятся источниками падающих звезд (и он был прав: мы проходим сквозь облако их фрагментов, как машина сквозь рой насекомых, некоторые из которых разбиваются о лобовое стекло). Означает ли это, что кометы являются родоначальниками метеоритов? Если это так, то почему метеориты не падают с неба во время метеорных потоков? Во всем этом по-прежнему оставалось много неясного.

Открыв запечатанный контейнер с фрагментами метеорита Оргей, человек чувствует слабый запах, который лично мне напоминает о раскрошенном яичном желтке и скипидаре. Раздавите такой фрагмент в ступке, и вы ощутите его зернистую, крошащуюся структуру, словно у засохшей глины. Прimitивные метеориты вроде метеорита Оргей относительно широко распространены и называются *углистыми хондритами*. Те из них, которые особенно богаты летучими компонентами (то есть такими соединениями, как вода и углеводороды), очень редки и должны собираться вскоре после падения. Это не означает, что они редки в космосе. Многие околоземные объекты могут напоминать по составу метеорит Оргей, а астероид Бенну — цель американского космического аппарата «Озирис-Рекс» — может оказаться даже еще более древним. Но на Земле такие метеориты попадают редко, потому что из-за своей хрупкости они взрываются высоко в атмосфере. Для того чтобы изучать самые древние материалы, нам придется самим доставлять такие образцы.

Самый крупный углистый хондрит из обнаруженных взорвался над штатом Чиуауа в Северной Мексике в феврале 1969 г., всего за несколько месяцев до того, как люди совершили посадку на Луну. Десятки тонн фрагментов разлетелись по территории площадью 400 км² около деревни



Коллаж фотографий трех околоземных астероидов, каждый из которых является целью своей программы сбора и возвращения образцов. Итокава, самый маленький астероид длиной всего 350 м, был объектом исследовательской экспедиции Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) «Хаябуса-1», которая завершилась (с грехом пополам) в 2010 г. Следующий по размеру — Бенну, диаметром 500 м, самый темный из трех, обладающий по-настоящему таинственной и сложной поверхностью. Возможно, он древнее любого метеорита, который когда-либо падал на Землю. (Сейчас мы выбираем на Бенну подходящее место для забора образцов.) Самый крупный — это Рюгу, куда JAXA отправило оснащенный спускаемыми аппаратами зонд «Хаябуса-2», который также доставит* на Землю образцы грунта.

JAXA/ISAS; NASA/GSFC/U. Arizona

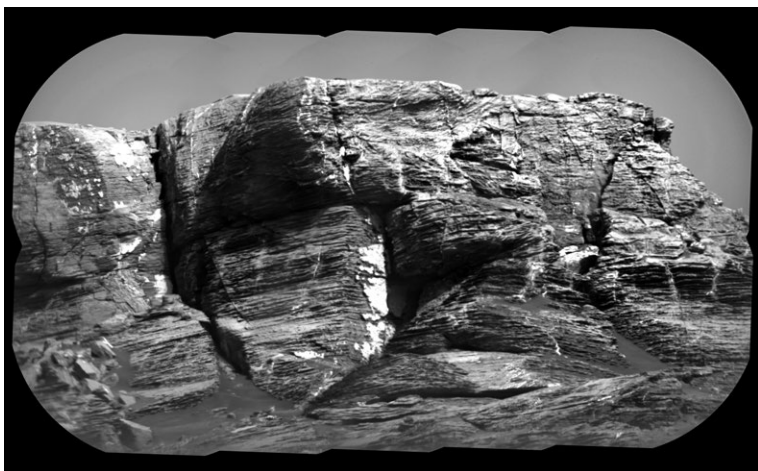
Альенде. Предприимчивые космохимики из американских лабораторий немедленно выехали на место и собрали их в большом количестве. Многие специалисты тогда считали, что углистые хондриты могут происходить с Луны. Отчасти эта точка зрения была связана с тем, что объемная плотность Луны, известная с 1870-х гг., составляет примерно $3,3 \text{ г/см}^3$ и сравнима с объемной плотностью этих метеоритов. Пока лунный модуль «Аполлона-11» не совершил

* Образцы с Рюгу были доставлены на Землю в декабре 2020 г. — *Прим. науч. ред.*

посадку и не доказал обратного, многие известные ученые придерживались мнения, что темные моря Луны покрыты углеродсодержащей пудрой. Высказывались вполне обоснованные опасения, что астронавты утонут в этой пыли. Благодаря ультрасовременному оборудованию, разработанному для анализа образцов, доставленных «Аполлоном», метеорит Альенде стал самым изученным камнем на Земле.

Как нарочно, еще один крупный углистый хондрит упал в Мурчисоне, в Австралии, через несколько месяцев после того, как «Аполлон-11» вернулся с контейнерами пород вулканического происхождения. К восторгу космохимиков, Мурчисонский метеорит оказался более богат сложными органическими молекулами, чем метеорит Альенде. Он был намного интереснее лунных камней с точки зрения того, чему тогда только предстояло стать астробиологией. Было собрано около 100 кг его фрагментов, что позволило провести всесторонний химический анализ его состава и сделало его настоящим эталоном первичного вещества. Главным открытием при изучении Мурчисона стало открытие в его составе десятков аминокислот.

Аминокислоты — это простейшие строительные блоки белков и, таким образом, тесно связаны с появлением органической жизни. По их спектрам поглощения аминокислоты также были обнаружены в пылевых хвостах комет. Мурчисон не просто под завязку набит аминокислотами — более двух третей этих молекул являются «левосторонними», то есть имеют *хиральность*, как у вашей левой руки. Направьте большой палец левой руки на себя, и остальные пальцы свернутся по часовой стрелке — это и есть левосторонняя хиральность, обратная правосторонней. Другим примером хиральности может служить резьба на левой и правой велосипедных педалях, которые выполняют одну и ту же функцию, но не взаимозаменяемы.



До сих пор нам не попадались марсианские метеориты, которые имеют структуру осадочной породы, но мы знаем, что они есть. На этой фотографии хребта Веры Рубин видны те самые горные породы, образцы которых мы хотели бы получить. Названный в честь американской ученой-астрофизика, которая нашла доказательства существования темной материи, хребет был сфотографирован инструментом ChemCam американского марсохода «Кьюриосити». Пласты осадочных пород разбиты продольными и поперечными трещинами, вдоль которых видны минеральные скопления, отложенные когда-то в результате циркуляции подземных флюидов. Показанная тут передняя часть хребта имеет ширину около 5 м.

NASA/JPL-Caltech/CNES/CNRS/LANL/IRAP/IAS/LPGN

У каждого живого организма на Земле левосторонняя хиральность зафиксирована в геноме. Если бы жизнь возникла с правосторонней хиральностью, с точки зрения функциональности мы ничем бы не отличались, но мы не можем использовать молекулы с противоположной ориентацией; правосторонние жиры и белки не приносят нам никакой пользы⁹. Помимо аминокислот, в самых древних углистых метеоритах находят и множество других органических соединений: алифатические и ароматические углеводороды, фуллерены, карбоновые и оксикарбоновые кислоты, пурины и пиримидины, спирты, сульфоновые и фосфоновые

кислоты. Все это заставляет вспомнить этикетку на банке с биологически активными добавками. (Хотя я никому не советую питаться метеоритами, я знаю по крайней мере одного смелого повара, который в малых количествах использует их в готовке.)

Является ли такое совпадение хиральности случайностью или тут есть причинно-следственная связь? Не унаследовали ли мы левосторонность наших аминокислот от комет и астероидов? Если это действительно так, их можно назвать «су-шефами», работавшими на пронизанной излучением космической кухне над приготовлением бульонов, в которых и зародилась жизнь. И в таком случае аналогичные фундаментальные предпосылки для возникновения органической жизни имеются по всей Вселенной!

Когда астероиды или кометы проходят около планеты, она оказывает значительное влияние на их орбиты. (Аналогичным образом, поскольку каждому действию соответствует равное противодействие, такая встреча всегда немного меняет орбиту планеты, что является причиной миграции планет-гигантов.) В конце концов подобные взаимодействия придают орбитам малых тел случайный характер, увеличивая их эксцентриситет и наклонение. Эти тела будут рассеиваться до тех пор, пока одно из них не ударит в Землю — и тут все мы умрем. Если не вдаваться в подробности, именно такую опасность таит в себе планетный хаос. Его самое раннее описание можно найти во втором издании «Оптики» Исаака Ньютона (1706):

Ибо хотя кометы движутся по очень эксцентрическим орбитам [...] слепая судьба никогда не могла бы заставить планеты двигаться по одному и тому же направлению

по концентрическим орбитам, за исключением некоторых незначительных неправильностей, которые могут происходить от взаимных действий комет и планет друг на друга, способных нарастать за время преобразования системы. Столь чудесная однородность планетной системы должна предполагать действие выбора*.

Почему же ни одна из них до сих пор по нам не ударила? «Ибо тот, кто создал их, расположил их в порядке». Другими словами, Бог постоянно вмешивается, заглядывая вперед и предотвращая столкновения. В 1715 г. Готфрид Лейбниц иронизировал в своем письме Сэмюэлу Кларку (последователю Ньютона, которого Лейбниц пытался убедить в своей правоте), что в философии Ньютона «машина Бога [...] так несовершенна, что от времени до времени посредством чрезвычайного вмешательства он должен чистить ее и даже исправлять, как часовщик свою работу»**. То есть Бог — это мастер, создавший небесные часы, но он же и ремонтирует свой механизм, и притом плоховато с этим справляется.

Хаос делает орбиты малых тел непредсказуемыми за время порядка десятилетий или столетий. Когда тела эти попадают под действие притяжения Земли, неправильности «способны нарастать за время преобразования системы». Мысли Ньютона примечательны тем, что в них принимается не только неизбежность хаоса, но и «действие выбора» в передвижении небесных тел к лучшему местоположению. Сегодня такое действие выбора скорее находится в наших руках, чем в руках Господа (хотя и этого нельзя исключать), и когда-нибудь — возможно, через сотни лет — мировые

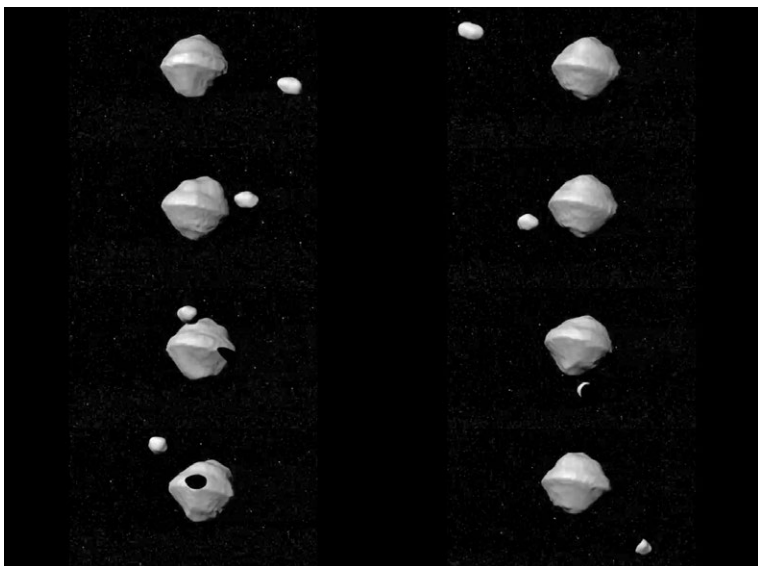
* Пер. С. И. Вавилова.

** Пер. Я. М. Боровского и др.

космические агентства снарядят экспедицию, чтобы отклонить околоземный астероид, чья траектория пересекается с траекторией нашей планеты. Но прежде чем мы научимся что-то делать с такими астероидами, мы должны понять их физические свойства.

Околоземные объекты являются пришельцами из различных частей Солнечной системы, оказавшимися поблизости, и потому представляют собой важные и вполне реалистичные цели для научных экспедиций. Но они также несут в себе угрозу столкновения, которое в ближайшие несколько тысяч лет с существенной вероятностью приведет к глобальным последствиям. К тому моменту, когда мы сможем менять орбиты угрожающих нам комет и астероидов, мы, возможно, уподобимся богам и научимся создавать небесные заправочные станции, водохранилища, шахты для добычи железа и платины, а также платформы для удобной колонизации космоса. Мы сможем перейти от починки часов к улучшению их работы: сдвигать опасные астероиды на лучшие орбиты, отсылать те из них, где имеется много ресурсов, на орбиту вокруг Луны (делая их спутниками нашего спутника) и приспособить парочку, чтобы они постоянно перемещались между Землей и Марсом, используя их реголит как радиационную защиту¹⁰ при межпланетных поездках, которые продлятся год или более.

К удивлению многих, когда в 1990-е гг. мы впервые подробно рассмотрели астероиды, ни один из них не выглядел просто как нагромождение камней. Если бы Роберт Гук когда-нибудь увидел один из них вблизи, он бы отметил, как в случае с Луной, что это тело демонстрирует «тот же принцип тяготения, что и на Земле», — принцип, который удерживает камни вместе и создает бассейны пыли или гравия,



Трехмерная модель астероида 1999 KW4, первой двойной астероидной системы, о которой мы получили четкие данные. Модель создана американским астрономом Стивеном Остро и его коллегами на основе данных радиолокации высокого разрешения, полученных с помощью радиотелескопа обсерватории Аресибо в Пуэрто-Рико. Основное тело Альфа и его спутник Бета показаны в масштабе. Альфа вращается с периодом 2,8 часа, а Бета находится в состоянии приливного захвата. Экваториальный хребет и даже сама Бета, возможно, появились в результате имевшего место в прошлом еще более быстрого вращения Альфы.

JPL Digital Image Animation Laboratory

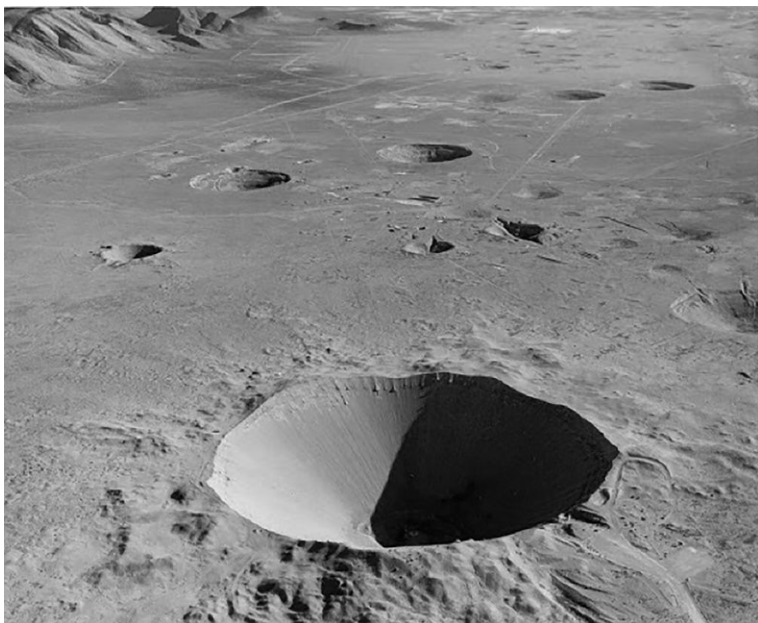
а также слои сцементированных обломочных пород. Гравитация у астероидов слаба — ее едва хватает для того, чтобы стать причиной появления геологических структур, похожих на каньоны, столовые горы и дюны, ударных кратеров с массивными краями и огромных валунов с разбросанными вокруг них осколками.

Ландшафты астероидов кажутся плодом бурного воображения, а их камни балансируют, как в мультфильмах, на неправдоподобно крутых основаниях. Большинство этих тел вращаются гораздо быстрее Земли, и некоторым из-за этого

постоянно грозит катастрофическое разрушение. Многие из них по форме напоминают волчок с экваториальными хребтами, где «низины» (то есть места, в которые будет скатываться мяч) являются вершинами, если иметь в виду расстояние от центра. У некоторых маленьких астероидов при учете центробежного ускорения сила тяжести на экваторе близка к нулю. (Притяжение все равно есть, но вы практически летите по орбите.) Все это безумие делает посадку на астероид — которая кажется простым, тихим занятием, чем-то вроде стыковки с космической станцией — делом потенциально сложным и даже головоломным.

В первый раз люди создали искусственную гравитацию в космосе в 1966 г., когда астронавты с «Джемини-11» соединили 30-метровым тросом свой корабль и аппарат, ранее выведенный на низкую околоземную орбиту для отработки стыковки. Так они готовились к полетам по программе «Аполлон». Используя рулевой двигатель, астронавты осторожно раскрутили всю связку до скорости примерно одного оборота в шесть минут, и этого оказалось достаточно, чтобы создать центробежную силу, равную силе тяжести на астероиде диаметром в 10 км. Это болеро было слишком медленным, чтобы тяготение ощутил кто-то из астронавтов, но они заметили, как фотокамера начала скользить вдоль одной из приборных досок. (В действительности она стремилась сохранить свой импульс, пока космический аппарат тянуло на тросе в другую сторону.)

Теперь представьте, что во время этого медленного вращения астронавты открыли внутри своего корабля пакет с кофейными зернами. Вначале им показалось бы, что зерна просто парят в невесомости. Но, если набраться терпения, зерна опустятся «вниз» так, как это было бы, если бы аппарат находился в состоянии покоя на маленьком астероиде¹¹. Эти движения медленнее, чем у минутной стрелки часов,



Это не Луна. Это кратер Седан и другие кратеры на ядерном полигоне в штате Невада. Если атомную бомбу (в данном случае мощностью 104 кило-тонны) поместить на определенную глубину под землю (в данном случае на 194 м), при ее взрыве образуется кратер, механизм формирования и геологические особенности которого очень похожи на результат столкновения небесных тел с эквивалентной кинетической энергией.

U. S. Department of Energy

и потому трудноуловимы: кофейные зерна, возможно, опустятся только после того, как астронавты поспят пару часов. Тому, кто попал на астероид, пригодится простой совет: не делайте что-либо слишком быстро. Попытавшись выкопать яму, вы, вероятно, вызовете оползень или создадите пылевую атмосферу, которая будет оседать еще несколько дней. Астероид похож на дно тихого прозрачного озера, где так легко поднять муть.

Со своей темной и неуловимой геологией астероиды целиком и полностью соответствуют пассивному, мягкому

началу «инь», но при ударе о планету они могут стать причиной самых резких геологических изменений из всех возможных. Последний крупный воздушный взрыв небесного объекта наблюдался над российским городом Челябинском в 2015 г., когда 20-метровый каменный метеорит разлетелся в небе, выделив энергию, сопоставимую с 30 бомбардировками Хиросимы. Ученым удалось собрать довольно крупные фрагменты. Самый большой научно задокументированный метеор был зафиксирован столетие назад, в 1908 г., когда астероид диаметром 30–50 м взорвался на высоте от 5 до 10 км над рекой Подкаменная Тунгуска в труднодоступном районе Сибири. Эпицентр взрыва никто не обследовал еще почти 20 лет из-за разразившейся Первой мировой войны и прочих бурных событий; первая экспедиция 1927 г. обнаружила более 2000 км² поваленного леса, где уже подрастали новые деревья, собрала образцы грунта и записала устные свидетельства нескольких очевидцев. Но никто так и не нашел каких-либо фрагментов метеорита или не вызывающих сомнений химических следов¹². Это привело к возникновению альтернативных версий, таких как (конечно же!) взорвавшаяся летающая тарелка или маленькая черная дыра.

Более мелкие метеориты падают чаще. Возможно, вы ужаснетесь, узнав, что Земля каждые несколько недель подвергается удару метрового метеороида, мощность взрыва которого равна одной килотонне. (Мощность взрыва в Хиросиме составляла 15 килотонн.) Отслеживание взрывов метеороидов — мелких околоземных объектов — в реальном времени стало доступным астрономам в середине 1990-х гг., когда министерство обороны США озаботилось тем, что с их сверхчувствительными детекторами, установленными на спутниках-шпионах, что-то не так. Они постоянно фиксировали нечто, выглядящее как взрывы бомб, в случайных точках планеты. Это были вспышки метеороидов,

и ученые постепенно получили более широкий доступ к этой сокровищнице данных: благодаря слежению из космоса и с поверхности Земли мы теперь знаем и размер околоземных объектов, и их состав, и высоту взрывов.

Столкновение с небольшим астероидом не так уж отличается от испытания ядерного оружия, и это привело к возникновению еще одного общего интереса у профессионалов холодной войны и астрономов — интереса к физике таких явлений. Некоторые из лучших компьютерных программ для имитации ударов астероидов, как и самые быстрые компьютеры для таких расчетов, можно найти в научных лабораториях, занятых проблемами ядерной обороны, сотрудники которых очень ценят возможность сверить свои модели с реальностью. Также эти лаборатории проявляют все возрастающий интерес к тому, как можно разрушить или отклонить астероид или комету, если когда-нибудь выяснится, что они вот-вот столкнутся с Землей¹³. Один из подходов к этой проблеме — взорвать ядерную боеголовку на расстоянии примерно в один диаметр от астероида так, чтобы рентгеновское излучение разогрело и испарило горные породы с одного его бока. Это создаст импульс, который подтолкнет астероид в противоположном направлении.

Если эта связь между астрономией и ядерным арсеналом кажется вам странной, вспомните, что к созданию законов движения Галилея подтолкнул расчет траектории летящего ядра, а не орбиты Луны. Первые телескопы чаще действовали в морских сражениях, а не для того, чтобы смотреть на маленькие яркие точки возле Юпитера. Ракеты, доставляющие в космос научные приборы и астронавтов, изобрели во время Второй мировой войны и довели до совершенства в годы войны холодной для доставки оружия массового поражения, которое могло разрушать целые города; путешествия на Луну были тут всего лишь побочным результатом.

Американская армия тратит на космические телескопы столько же, сколько и NASA, только эти телескопы нацелены вниз. В современных телескопах используется адаптивная оптика — технология, которая выросла из необходимости делать подробные снимки вражеских спутников, пролетающих в 300 км над головой. Радиоастрономия расцвела благодаря сооружению огромных военных радаров во время Второй мировой войны и после нее. Первые изображения обратной стороны Луны были сделаны лучшими советскими устройствами для шпионской съемки на трофейную американскую фотопленку. Такие вот странные сближенья.

Внешняя Солнечная система (все, что находится за Юпитером), имеет две популяции малых тел: те, с которых все начиналось, — первоначальные ледяные объекты, никогда не принимавшие участия в образовании планет, — и те, которые были извергнуты, когда планеты-гиганты уже сформировались и боролись друг с другом за места поудобнее. Образование гигантских планет сопровождалось выбросом наружу примерно триллиона комет, которые стали облаком Оорта. Сто миллиардов из них с высокой степенью вероятности «слегка переборщили», вовсе уйдя прочь от Солнца, и теперь прокладывают себе путь в межзвездном пространстве. А миллиарды лет спустя, когда Солнце потеряет половину своей массы, оно перестанет удерживать внешнее облако Оорта, и еще триллионы объектов разлетятся по всей Галактике.

Как бы они там ни оказались, мелкие тела внешней Солнечной системы провели миллиарды лет в состоянии глубокой заморозки, что сделало их привлекательными целями для экспедиций межпланетных космических аппаратов, перед которыми стоит задача определить начальные условия

образования планет. У самых отдаленных тел температура на поверхности составляет только десятки градусов выше абсолютного нуля, то есть ниже $-200^{\circ}\text{C}^{14}$. Замерзли ли они в своей глубине, зависит от того, достаточно ли они велики, много ли в их составе горных пород, выделяющих радиоактивное тепло, и не закончили ли они свой путь как крупные спутники в сложных системах со значительным приливным разогревом. Плутон и его крупный спутник Харон, к примеру, видимо, вызывали приливный разогрев друг друга примерно первую сотню миллионов лет, пока не попали в состояние взаимного приливного захвата; сейчас этого источника тепла у них нет¹⁵. Где-то за ними могут таиться гиганты, а исходя из того, что мы знаем, легендарная Планета X может оказаться двойной планетой, по массе равной Земле. Но большинство известных нам кометоподобных объектов слишком малы, чтобы испытывать какой-либо значительный разогрев, радиоактивный или приливный, — и поэтому нам так важно получить образцы этих поистине первичных материалов.

Время от времени какое-либо из этих тел внешней Солнечной системы находит дорогу назад, к Солнцу. Проходя самую дальнюю от Солнца точку своей орбиты в тысячах астрономических единиц, далекая комета из облака Оорта может испытывать воздействие галактических приливных сил. Это заставляет ее траекторию немного изменяться, так что следующий виток будет слегка иным, пока в какой-то момент она не встретится с полем тяготения Нептуна, как муха, запутавшаяся в паутине. Некоторые из таких объектов попадают в плен к Юпитеру, и большинство из них после этого живут недолго. Храбрые *кентавры* — это рассеянные объекты пояса Койпера, которые сейчас пытаются пройти мимо Юпитера. Когда их льды впервые ощущают на себе солнечный свет, эти астероиды проявляют самые разные необычные и непредсказуемые свойства.

Кометы состоят из льда и пыли, а также *сверхлетучих веществ* вроде CO , CO_2 , N_2 , CH_4 и O_2 , молекулы которых испаряются при чрезвычайно низких температурах. Даже при минимальном нагреве кометы начинают активно распадаться, испуская водяной пар и силикатную пыль. Их ядра претерпевают процесс сублимации и деградации, когда скрепляющие их материалы превращаются в пар и улетучиваются. Аморфные твердые компоненты в их глубине — льды, которые сконденсировались непосредственно из туманности 4,6 млрд лет назад и никогда с тех пор не нагревались в достаточной мере, чтобы кристаллизоваться, — превращаются в кристаллический лед в реакции, которая может быть *экзотермической*, выделяя тепло и становясь причиной полного распада кометных ядер.

Некоторые из комет гибнут при попытке протаранить ворота крепостной стены Юпитера. Какие-то из них кончают свой путь внутри гиганта, другие рассеивает его мощное гравитационное поле. Третьи разрушаются из-за интенсивного приливного воздействия планеты-гиганта, превращаясь за один-единственный пролет в десяток маленьких комет (что-то подобное произошло с кометой Шумейкеров — Леви 9 в 1992 г.). Если им удастся пройти мимо Юпитера, они попадают в *кометное семейство Юпитера*. Такие кометы разбросаны по хаотичным орбитам, которые могут привести к столкновению с любой из землеподобных планет или падению дальше вглубь, пока Солнце не разрушит их приливным воздействием и радиоактивным излучением — после чего от них останется только пыль.

Таковы рождение, жизнь и смерть кометы: бурная первая сотня миллионов лет, затем 4,5 млрд лет в морозильнике и — для немногих счастливиц — потрясающие десятки тысяч лет, когда они приближаются к Солнцу и своему великолепному финалу. Орбита кометы может приобрести

огромный эксцентриситет с перигелием гораздо меньше 1 а. е., хотя большую часть своей жизни она будет проводить далеко за Нептуном. Во время каждого перигелия, который поначалу происходит раз в несколько тысяч лет, все более угольно-черная поверхность кометы подставляется Солнцу, разогревающему ее до сотен градусов, как тротуар в жару. Чтобы это тепло проникло внутрь, требуется время, а температура поверхности колеблется от жара до холода, поскольку комета вращается (аналог земных дня и ночи). Приповерхностные вещества поджариваются на этом гриле, превращаясь в скрепленный льдом слой углистой теплоизоляции, под которым скрываются первичные материалы.

Когда-то моя мама любила готовить десерт под названием «Запеченная Аляска». Она на несколько минут клала большой кусок застывшего в морозильнике мороженого в разогретую духовку. Верхний слой карамелизуется, а внутренняя часть остается замороженной. (Это нужно делать на деревянной доске, потому что стеклянная или металлическая посуда хорошо проводит тепло и лакомство растает.) Заветная мечта специалистов по планетарной геохимии — пройти сквозь карамельную корочку этого десерта, чтобы добраться до холодного мороженого, то есть до нетронутого вещества небесного тела, которое всего каких-то несколько тысяч лет назад пребывало в невообразимой дали. Этот древний материал Солнечной системы теперь скрыт под метрами видоизмененной термоизоляции — не поддавшейся возгонке твердой фазы, содержащей органические молекулы, которые и делают комету черной. Как бы то ни было, даже на «старых» кометах семейства Юпитера, переживших десятки проходов через перигелий, скорее всего, имеются участки свежей поверхности, где легко взять нужные образцы — слишком уж геологически активны такие тела. На комете 67P/Чурюмова — Герасименко есть



В 1986 г. космический зонд «Джотто» прошел на расстоянии 600 км от кометы 1P/Галлея, когда она удалялась от Солнца. Этот пролет был рекордным по относительной скорости, которая достигала 68 км/с. Кома кометы на снимке раздувается солнечным ветром в горизонтальном направлении. Космический аппарат получил удар каким-то фрагментом и начал кувыряться, а его камера вышла из строя, но он успел передать это первое в истории геологическое изображение ядра кометы. (Размер ядра — 16 на 8 км.)

Halley Multicolor Camera Team, Giotto Project, ESA

недавно сформировавшиеся хребты и расселины с обнажениями свежего внутреннего вещества, только и ждущего, когда кто-нибудь его соберет. Именно поэтому в рамках программы NASA «Новые горизонты» возник проект экспедиции CAESAR, которая должна была вернуться на 67P и собрать эти сокровища. Но в условиях жесткой конкуренции вместо нее отобрали космический аппарат «Дрегонфлай», стартующий в 2026 г.; если все пойдет хорошо, уже в 2034-м он будет парить над поверхностью Титана.

Так называемые большие кометы появляются редко. Они не должны быть особенно большими по размеру — они всего лишь проходят рядом с Землей, распуская кому и пылевой хвост. Как раз мелкие кометы, доживающие свои последние

дни, могут давать самые незабываемые шоу. Здесь присутствует и элемент удачи — чтобы быть по-настоящему зрелищной, большая комета должна стоять высоко в безлунном небе. Мне посчастливилось увидеть две большие кометы. Ради одной из них, Хякутакэ, мы с моей девушкой разбили лагерь в самом темном уголке пустыни, в 30 км от маленького городка. Мы лежали в спальных мешках и наблюдали, как оживает ночь. Комета появилась, как оперная певица, начинающая свою арию, и к полуночи стояла прямо над головой. Я расфокусировал глаза и попробовал прочувствовать взаимодействие ее ядра с Солнцем — как его поверхность нагревается впервые за все время своего существования, извергая пыль и лед, которые сдуваются солнечным ветром и образуют мерцающий, сильно ионизированный хвост.

Находясь при максимальном сближении всего в 0,1 а. е. от Земли и обладая исключительно длинным хвостом, Хякутакэ с каждым часом ощутимо сдвигалась относительно звезд, так что за этим можно было наблюдать в бинокль. Сверкая всеми оттенками зеленого, голубого и кремово-белого, она казалась живой¹⁶. Это было невероятно трогательное зрелище, так что я не мог понять, спал ли я или бодрствовал, когда много часов спустя очнулся в холодной ночи. Холмы на востоке были кобальтово-синими: приближался рассвет. Я увидел несколько падающих звезд и подумал, что больше никогда в жизни не увижу ничего столь же красивого. Я ненадолго забылся, а когда проснулся, утро уже смывало все эти ощущения, оставляя их только в памяти. Я не знаю, когда следующая большая комета снова заставит Землю притихнуть, так что живу там, где ночью очень темно.

Самая знаменитая комета — это 1P/Галлея (P значит *periodic*, «периодическая», а 1 значит «первая»), тот самый объект, который позволил подтвердить законы Ньютона. В 1705 г. Эдмунд Галлей опубликовал расчеты, показывающие,

что большие кометы 1531-го, 1607-го и 1682-го гг. могут являться одной и той же кометой с афелием (самой дальней от Солнца точкой) сразу за Нептуном, возвращающейся примерно каждые 75 лет. Применив закон всемирного тяготения Ньютона и учтя влияние Солнца, Юпитера и Сатурна, Галлей предсказал, что комета вернется в 1758 г. Ньютон умер в 1727-м, Галлей — в 1742-м. Научный мир терпеливо ждал. В 1758-м, после целого года тревог и ожидания, комета появилась на Рождество, подтвердив обратную пропорциональность гравитации квадрату расстояния и став первым известным нам объектом, который не является планетой, но обращается вокруг Солнца.

Следы появления больших комет можно найти в исторических и доисторических свидетельствах. В древней Азии, и в частности в Китае, таких свидетельств было особенно много, и они уходят вглубь веков на тысячи лет. Мавандуйские тексты на шелке, датируемые II в. до н. э., включают десятки изображений кометоподобных форм, некоторые из которых напоминают петроглифы, и перечисляют катастрофы предыдущих десяти столетий, которые предвещала каждая комета. Появление кометы Галлея впервые было отмечено уже в 12 г. до н. э., хотя о ее периодичности никто не упоминал.

Второй обнаруженной периодической кометой стала 2P/Энке — объект, который приближается к своей гибели и в будущем может представлять угрозу для Земли. Ее опасный танец среди внутренних планет закончится тем, что она либо развалится в космосе, либо испытает приливное разрушение около Солнца, либо столкнется с одной из планет. То, что мы видим сейчас, — это лишь часть значительно более крупного родительского тела. Эксцентрическая орбита носит эту комету от области внутри орбиты Меркурия почти до Юпитера; один ее оборот занимает 3,3 года, так что она



Комета 11/Оумуамуа в представлении художника. Ее изображений у нас нет, но из данных следует, что она является темно-красным, сильно вытянутым объектом, приблизительно 230 м в длину и всего 35 м в ширину. Немного болтаясь, она делает в сутки три оборота вокруг своей оси.

ESO/M. Kornmesser

регулярно сближается со всеми землеподобными планетами. Она теряет большие объемы вещества, так что частицы размером от песчинки до гравия, а также более крупные фрагменты оказываются рассеянными вдоль всей ее орбиты. Когда Земля пересекает этот след из крошек, мы наблюдаем метеорный поток Тауриды.

Вскоре после того, как был введен в эксплуатацию Pan-STARRS, один из обзорных телескопов нового поколения, мы обнаружили первого межзвездного странника. Этот объект назвали 1I/Оумуамуа. «Оумуамуа» — это гавайское слово, означающее «разведчик», или «посланник издалека»; I — от *interstellar*, «межзвездный»; единица сообщает нам, что это первый зафиксированный объект такого рода. Оумуамуа первая зафиксированная комета такого рода приблизилась к Солнцу на четверть астрономической

единицы, имея межзвездную скорость 26 км/с — с избытком слишком высокую для тела, гравитационно связанного с нашей Солнечной системой. Таким образом, она проходит 6 а. е. в год и явилась откуда-то извне. Длинная и тонкая, не похожая по форме ни на какие встречавшиеся нам кометы или астероиды, Оумуамуа покинула свою родную звезду по крайней мере 300 000 лет назад. Столько времени при такой скорости занял бы прямой полет от любой из ближайших звезд в направлении созвездия Лира, до которых около 25 световых лет.

Является ли Оумуамуа объектом естественного происхождения? Думаю, да. Она имеет темно-красный цвет, как у примитивного астероида или кометы. Множество комет выбрасывается из других планетных систем и попадает в нашу. Кометы сами по себе странные тела, а межзвездные кометы могут быть еще более странными. В ходе своей аккреции планеты-гиганты отбрасывают огромную долю тел, проходящих около них. Это создает облако комет вокруг соответствующей звезды — ее пояса Койпера и облака Оорта. Но часть объектов продолжает движение и полностью уходит из зоны притяжения звезды. Такие тела должны исчисляться триллионами. Позднее, когда звезда солнечного типа умирает, становясь белым карликом с половиной первоначальной массы и отдавая почти все свое облако Оорта на волю притяжения галактики, к другим звездам устремляется еще триллион комет. Эти потерянные кометы, несомненно, где-то летают, но космос велик: если 1I — это чисто случайный гость, тогда, по оценкам, на один кубический световой год должно приходиться столько 100-метровых астероидов, что их общая масса равнялась бы массе Марса. Звучит правдоподобно, если учесть, сколько формируется планетных систем и какие потери происходят при этом.

И все же Оумуамуа — настолько странный объект, что даже среди самых уважаемых ученых ходят разговоры, что он может быть потерпевшим крушение космическим крейсером или обломком такового. Как это происходит со многими другими астрономическими телами, наши данные об 1I ограничены результатами *фотометрии* — анализа характеристик единственного слабого пикселя отраженного от нее света. Поэтому мы можем только оценивать размер и форму 1I , основываясь на том, как меняются со временем ее яркость и цвет. Ученые создают модели вращающихся в космосе темных объектов, а потом с помощью метода наименьших квадратов определяют форму, цвет и альбедо¹⁷, которые наилучшим образом соответствовали бы данным фотометрии. У этой задачи всегда есть много решений. Оумуамуа может напоминать по форме летающую тарелку, а может — подводную лодку, как ее обычно и изображают. Однако и то и другое будет совершенно не похоже на все, что мы привыкли видеть.

Инопланетный космический корабль, скажете вы, только что пронзивший складки пространства (отсюда и легкая болтанка при вращении!) и замаскировавшийся под ничем не примечательный астероид, чтобы провести подробную разведку в нашей Солнечной системе? Надо сказать, этот вариант делает ненужными некоторые допущения и может быть признан вполне жизнеспособной гипотезой, если, несмотря на все усилия, мы не обнаружим никаких других межзвездных странников. Если в ближайшие годы не появится 2I^* , нам придется рассмотреть эту версию более серьезно. Но если исходить из того, что нам известно, 1I — это естественное, хотя и странное, имеющее необычную форму

* 30 августа 2019 г. был обнаружен второй межзвездный объект — комета $2\text{I}/\text{Borisov}$, влетевшая в Солнечную систему и открытая сотрудником Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга (МГУ) Геннадием Борисовым. — *Прим. науч. ред.*

кометоподобное тело, и до конца этого года мы, скорее всего, увидим еще одно. Возможно, наше нынешнее нетерпение похожее на то, что испытывал Галлей.

Даже если это всего лишь случайная комета, с точки зрения нашего понимания инопланетной жизни значение Оумуамуа невозможно переоценить. Если от одной планетной системы к другой могут перемещаться такие крупные фрагменты, которые достаточно велики, чтобы на сотни тысяч лет стать убежищем для жизнестойких микробов, вирусов и спор, идея панспермии может подразумевать нечто куда большее, чем перенос жизни с планеты на планету. Она становится идеей *межгалактической панспермии*, гласящей, что живые организмы пересекают пространство и время, используя как транспорт астероиды и потерянные кометы. Если так, жизни достаточно успеха в микроскопической доле случаев, чтобы изменить сразу все.

Гигантские столкновения происходят, когда на пересекающихся орбитах оказываются полноразмерные планеты. Аккреция нескольких десятков олигархов — стандартная модель — требует примерно сотни гигантских столкновений. Мы знаем, что они завершились примерно за 100 млн лет и формирование Луны стало одним из последних. Поскольку для того, чтобы оставшиеся после гигантского соударения крупные осколки покинули внутреннюю Солнечную систему, требуется примерно миллион лет, околоземное пространство постоянно было заполнено бесчисленными объектами, следующими по всевозможным орбитам, многие из которых были крупнее Весты и Цереры. Это были разнообразные фрагменты разрозненных частей планетных тел — иногда мантии, иногда ядра, иногда коры. Они ударяли другие планеты и, в свою очередь, вызывали колоссальные

столкновения, приводящие к обновлению поверхности. *Поздняя стадия* планетообразования, когда олигархи сталкиваются и сливаются, переходит в этап *позднего покрытия* — когда получившиеся тела формируют свой наружный слой.

В активной молодой планетной системе близкое прохождение может перевести две планеты на пересекающиеся орбиты и в конце концов закончиться гигантским столкновением. Новое динамическое состояние — вместо двух тел одно плюс масса осколков — запускает дальнейшие изменения и столкновения. В зависимости от того, насколько хрупким было начальное равновесие, сложная система планет может претерпеть *динамическую катастрофу*, став ареной неуправляемых столкновений до тех пор, пока не найдет новое стабильное состояние. Этот сценарий мы с Андреасом Рейфером и имели в виду, говоря об описанном выше позднем происхождении системы Сатурна.

Также выдвигалось предположение, что землеподобные планеты — это второе поколение планет: до этого, возможно всего на протяжении какого-то миллиона лет, существовала первоначальная система, напоминавшая большинство обнаруженных нами на сегодня планетных систем. В почти всех из них имеются нептуну и суперземли, которые кажутся самыми распространенными из планет, а сами системы выглядят более плотно упакованными, чем наша, и с планетами ближе к звезде. Если первоначальная система внутри орбиты Юпитера была каким-то образом дестабилизирована¹⁸, тогда после первого столкновения случилась либо битва титанов в эпоху гигантов, либо рыскание в колонне большегрузов при сильном ветре. Если соударения происходили там, где еще имелся массивный газовый диск, тогда более крупные планеты должно было затащить вглубь Солнца, что согласуется с относительной пустотой внутри орбиты

Венеры, где есть только странный маленький Меркурий, и больше ничего. Если попробовать оценить длительность этого процесса, то до дестабилизации первоначальной системы могло пройти миллион лет, а еще десять миллионов ушло на то, чтобы ее оставшиеся фрагменты пришли в равновесие, оставив после себя привычную нам Солнечную систему, как из куколки возникает бабочка или как феникс восстает из пепла.

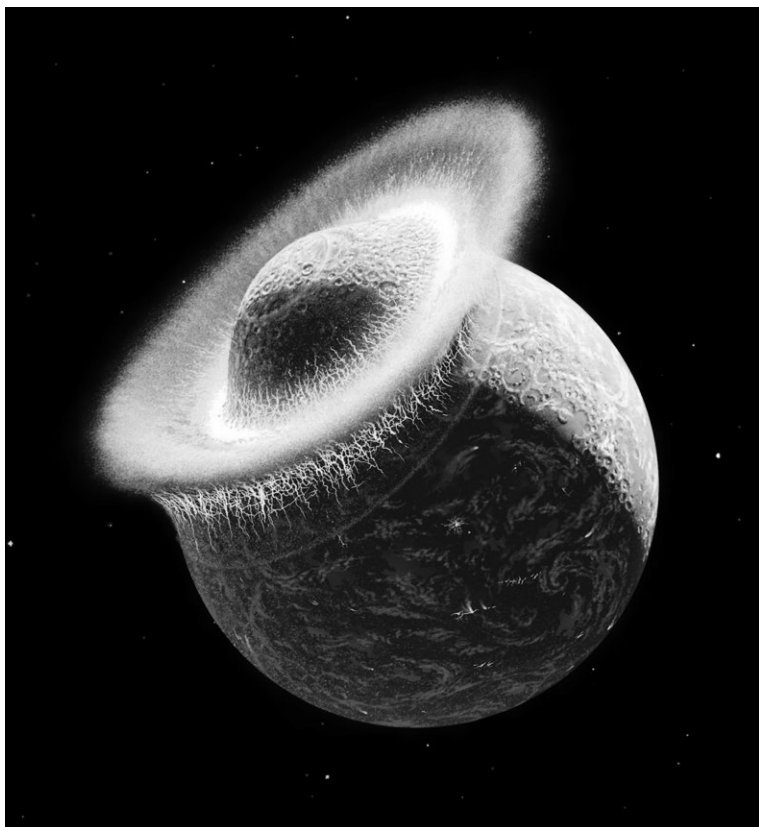
Именно такие размышления, не подкрепленные какими-либо данными и полагающиеся только на модели и предположения, и заставляют нас более внимательно взглянуть на Луну, тело, которое, мы *знаем*, возникло в результате гигантского столкновения и является единственным надежным свидетелем того, что произошло дальше.

Представляя себе гигантское столкновение, вам следует замедлить его в миллион раз. Это не прямое попадание ракеты, а, скорее, катастрофа дирижабля «Гинденбург». Хотя соударение происходит на гиперзвуковой скорости (обычно десять или более километров в секунду), для двух планет диаметром от 3000 до 10 000 км оно все равно занимает больше часа. Гигантское столкновение больше похоже на попытку планет пройти одна сквозь другую; если им это не удастся, их ядра начинают деформироваться в единое целое, а получившийся в результате более крупный объект забирает все что может. Тут возникает такая величина, как «эффективность аккреции»: она равна 1, если тела полностью слились; 0,5, если более крупное тело захватило половину малого; и 0, если произошло «столкновение с оставлением места происшествия», когда никакой массы не прибавляется (хотя может произойти обмен масс). Таким образом, этот параметр описывает исход гигантского столкновения.

Процесс в действительности начинается за несколько часов до того, как планеты стукнутся друг о друга. Они сближаются, за час проходя расстояние, равное нескольким своим диаметрам, пока не начинают выглядеть как двойная планета, как Плутон и Харон. Они попадают под действие взаимного тяготения. За эти последние часы — если вам нужно сравнение, все происходит со скоростью лунного затмения, — меньшая из планет деформируется, так что к моменту гигантского столкновения она напоминает мяч для регби, раскрученный приобретенным моментом импульса. Скорость возрастает до суммы первоначальной относительной скорости и скорости убегания, так что типичный таран землеподобных планет происходит при примерно 1,1–1,2 скорости убегания — как говорится, на полном ходу.

А потом планеты оказываются соединены физически. Этот разрушительный и взрывной процесс напоминает грандиозный оползень, распространившийся на тысячи километров, но включающий вдобавок взаимную деформацию глубоких слоев мантии и горячих ядер двух планет. Он продолжается часы и даже дни. Гигантские столкновения имеют много общего с образованием крупных кратеров, таких как Чикшуб или Море Дождей, но являются глобальными по своему охвату. Физика горных пород играет в них меньшую роль, а астрофизика большую, но, несмотря на это, такие события закладывают фундамент всей последующей геологии.

Существует много вариантов сценария гигантского столкновения, породившего Луну, так что не надо сосредотачиваться только на одном. Тем не менее полезно обратиться к стандартной модели, когда речь идет о теле размером с Марс, которое ударяет в Землю примерно со скоростью убегания (10–12 км/с) под углом 45° к поверхности. Фронт столкновения взрывается бешеной дугой, когда



«Все изменилось, неузнаваемо изменилось: родилась грозная красота»¹⁹. Изображение стандартной модели возникновения Луны через десять минут после первого соприкосновения. Тейя приближалась со стороны верхнего левого угла со скоростью около 15 км/с. Ударная волна, вызывающая нагрев и плавление, видна как два круга: один распространяется сквозь Землю, а другой почти достиг задней точки Тейи. Черно-белый вариант исходного полноцветного изображения.

© Don Davis

Тейя и Земля начинают соединяться со скоростью в десять раз большей, чем скорость выпущенной из винтовки пули. При контакте огромных площадей становится сложно разобраться, где тут Тейя, а где — Земля, где верх, а где низ.

Массы мантии, коры и океана фонтаном разлетаются в космос из области соприкосновения, как поток воды из пожарного брандспойта, создавая странные планетоиды, а также облака пыли и пара.

Разрушение оболочки, мантии, океана и всего, что между ними, продолжается, и смятые поверхности пластами погружаются в общее внутреннее пространство, а затем рвутся, как огромная конфета-тянучка. Ядра, будучи более плотными, тонут в каменной мантии друг друга и попадают в центр столкновения, где оказываются тесно увязанными и поглощают одно другое. Когда через день или два все стихает, глубинные слои мантии лежат поверх ядра, затем идут другие горные породы, гидросиликаты, и далее — океан и атмосфера. Мы видим полностью перестроенную планету с очень неясными свидетельствами того, откуда она взялась.

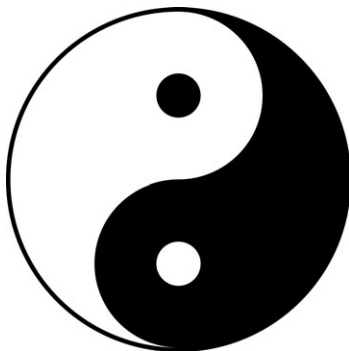
Две сливающиеся планеты имеют общий момент импульса, и соответственно вылетевшие при столкновении материалы закручиваются вокруг них в спиральные рукава по тому же принципу, который заставляет протопланетную туманность становиться уплощенным диском. Более того, возникшая после гигантского столкновения структура может напоминать миниатюрную галактику с утолщением в центре и спиральными рукавами со сгустками. В зависимости от типа гигантского столкновения вокруг сливающейся планеты в результате может возникнуть протолунный диск, состоящий в основном из расплавленных от удара силикатов — «летающий океан магмы», по выражению специалиста по физике планет Дэвида Стивенсона, который первым начал детально изучать термодинамику гигантских столкновений.

Чтобы понять некоторые странные физические явления, имевшие место после столкновения, вернемся днем ранее. В среднем слое мантии Тейи, планеты размером с Марс,

имеется область, содержащая в себе основную часть вещества, которому предстоит стать Луной. Вскоре она будет раздроблена на мелкие фрагменты и превратится в диск вещества вокруг Земли, но пока что находится под чрезвычайно высоким давлением внутри Тейи, подобно любому участку в среднем слое мантии землеподобной планеты. На самом деле, если перед столкновением вы извle-

чете из Тейи килограмм вещества и телепортируете его к себе домой, оно взорвется с той же энергией, что и килограмм тротила, просто потому, что высвободилось из-под давления, как чертик на пружинке, который выскакивает, когда вы открываете крышку коробочки. Когда мантия Тейи разрывается в диск, эта *энтальпия* вносит свой вклад в плавление, испарение и расширение материалов, которые станут Луной.

Возвращаясь к идее предполагаемой первоначальной системы планет, к идее гигантских столкновений суперземель и нептоунов, одно можно сказать с уверенностью: давления и энергии в этих столкновениях были еще более впечатляющими, в пропорции, превышающей квадрат размеров планет. Если мы рассматриваем гигантские столкновения тел, в десятки раз превосходящих по массе Землю, взрывная энергия будет так велика, что все, не собранное гравитацией в тяжелую глыбу — остаточную планету, — просто разлетится на атомы. При этом водород и другие летучие вещества могут быть фактически потеряны, а в результате перегруппировки «металлов» в оксиды могут начать формироваться



Символическое изображение древнекитайской концепции «инь и ян», которое напоминает мне то, как две сливающиеся планеты заглатывают ядра друг друга

Земля и Венера. Скорее всего, от прежних времен ничего не уцелеет; для землеподобных планет это событие станет настоящей нулевой отметкой.

Гипотеза о первоначальной системе планет проходит один тест на правдоподобие: доля суммарной массы землеподобных планет в массе Нептуна примерно равна доле массы Луны в массе Тейи. Другими словами, Земля и Венера содержат приблизительно то количество вещества, которого при самой бесхитростной аналогии можно ожидать от оставшихся на орбите обломков гигантского столкновения позже мигрировавших внутрь Солнца нептоунов. Это экзотическая идея, но в конечном итоге она поддается проверке, поскольку требует, чтобы Венера, Меркурий, Земля и Луна имели один и тот же изотопный состав. (Увы, у нас пока нет образцов с Меркурия и Венеры, что удобно для сторонников этой гипотезы.) Если она верна, то, следовательно, наша система землеподобных планет представляет собой явное исключение из правил. Земля и остальные планеты в такой ситуации возникли в результате крайне специфического процесса отсева, в котором уцелела лишь доля процента первоначального вещества.

ГЛАВА 6

ПОСЛЕДНИЕ ВЫЖИВШИЕ

Астрономия — это не более чем результат догадок.

Шэнь Ко. Беседы с кистью в Мэнси¹

Фокусы с исчезновением — это популярный и увлекательный тип теорий. Сначала вы постулируете существование объекта, который очень важен и может объяснить все. А затем вы заставляете его исчезнуть! Или прячете. Сто лет назад была популярна гипотеза, что блуждающая звезда прошла очень близко от Солнца и вырвала Солнечную систему из его недр². Разумеется, найти эту звезду на просторах Галактики никак не получится.

Иногда виновник находится достаточно близко, чтобы сделать то, что положено, но слишком далеко, чтобы его можно было отыскать прямо сейчас. Такие предсказания могут быть чрезвычайно успешными — а могут и не быть. Как мы уже знаем, существование Цереры было предсказано с помощью геометрической прогрессии, известной как правило Тициуса — Боде. В 1840-х гг. на основании данных о нерегулярности орбиты Урана, которые накопились со времени его открытия в 1781-м, был сделан прогноз

о существовании массивной Планеты X. В 1846 г. были произведены гравитационно-динамические расчеты слабого притяжения гипотетической планеты-гиганта, расположенной дальше от Солнца, на основании чего было предсказано ее местоположение³. В ту же самую ночь, когда астрономы Берлинской обсерватории получили эти данные, они направили свой телескоп в небо и, словно по мановению волшебной палочки, обнаружили Нептун, ледяной гигант, который замыкает внешнюю Солнечную систему.

В других случаях найти виновника так и не удалось. Предположительно скрытая в сиянии Солнца планета Вулкан была изобретена, чтобы объяснить отклоняющуюся от теории Ньютона прецессию орбиты Меркурия, причину которой в конце концов установил Эйнштейн. Сегодня есть еще одна Планета X или, скорее, пара планет, одна из которых предположительно в десять раз больше Земли по массе и находится в сотнях астрономических единиц от Солнца — достаточно близко, чтобы объяснить загадку наклона орбит планет, но достаточно далеко, чтобы быть в тысячу раз тусклее Плутона, так что неудивительно, что мы ее пока не нашли. Если она действительно существует, то будет обнаружена очень скоро, как только Большой синоптический обзорный телескоп⁴ начнет выдавать десятки терабайт снимков неба каждую ночь. Если же нет, мы переключимся на поиски Планеты Y.

Далее, есть гипотеза, что первоначальная система Сатурна скрыта внутри Титана. Откуда нам знать? Или что система суперземель и нептонов исчезла внутри Солнца, оставив позади лишь Меркурий, Венеру и Землю. Чтобы изучить эти сценарии, мы должны обратиться к былому хаосу, но путь туда, возможно, потерян. Мне нравится идея о первоначальной Солнечной системе, но в ее поддержку не существует никаких веских доказательств. Она возникла, когда нам начало

казаться, что в большинстве планетных систем тела располагаются гораздо более плотно и что наша Солнечная система представляет собой аномалию. За следующие десять лет мы подробно изучим достаточно таких систем, чтобы составить более четкое мнение по этому поводу.

В стандартной модели образования Луны Тейя выполняет роль повивальной бабки, которая помогает ребенку появиться на свет и исчезает. Или она все еще где-то здесь? Согласно этой модели, основная часть Тейи покоится внутри Земли — возможно, это могло бы объяснить некоторые значительные неоднородности в составе мантии. Но существенная доля Тейи закончила свой путь в небесах. По результатам компьютерного моделирования гигантского столкновения большая часть вещества Луны восходит к ударяющему телу⁵. Интуитивно это кажется разумным: при аккреции Землей ядра и глубоких слоев мантии Тейи вначале образовался двойной сфероид, который мог отбросить самые отдаленные части незваного гостя — подобно тому, как вы можете потерять сумку, когда запрыгиваете на ходу в отъезжающий автобус⁶.

Но, хотя физически Тейя скрыта и мы каким-то образом представляем себе, что произошло, химически она, кажется, просто исчезла. Кислород составляет почти 30% от массы Земли и 45% — от лунных и земных пород коры. Изотопы кислорода ^{16}O , ^{17}O и ^{18}O , так же как и другие элементы, например титан, цирконий и калий, выполняют роль отдушек, по соотношению которых можно судить о происхождении минералов. Их атомные свойства остаются в целом одинаковыми, но их массы (число нейтронов в их ядрах) отличаются, так что они и служат показателями. Соотношения изотопов кислорода в земных горных

породах одинаковы, как и следовало ожидать, если наша планета возникла из единого или хорошо перемешанного источника вещества. С этой точки зрения земные горные породы отличаются от марсианских, а и те и другие имеют значительные отличия от изотопного состава кислорода на Солнце. Метеориты также сильно различаются по изотопному составу, но путаницу тут вносит то, что мы не знаем причины этих различий, а в данных очень много неопределенности.

Лунный кислород неотличим от земного с точностью до 0,001%. Процентные содержания изотопов титана, элемента, который с химической точки зрения проявляет совсем другие свойства, чем кислород, имеют расхождение в 0,0004%. То же самое верно и для циркония и так далее. Лунные и земные породы с высокой степенью достоверности происходят из одного изотопного источника, но тем не менее между ними есть и различия. Луна бедна изотопом калия ^{39}K в сравнении с ^{41}K , но это согласуется с идеей, что более легкие изотопы, как и вода, быстрее испаряются и теряются в чрезвычайно напряженном состоянии после столкновения. Это особенно ярко проявляется в случае с такими «полутучими» элементами⁷.

К концу 1990-х гг., хотя геохимики и находили не согласующиеся с ней данные, теория гигантского столкновения начала обретать убедительную форму как динамическая модель. Она объясняет отсутствие на Луне металлического железа, большой момент импульса системы Земля — Луна и низкое содержание воды в образцах, доставленных «Аполлоном». Ударный разогрев привел к образованию лунного океана магмы, который является необходимым начальным состоянием для появления лунной коры из анортозита. В довершение всего, эта теория объясняла все эти факты, постулируя событие, которое достаточно скоро было признано

типичным для поздней стадии формирования землеподобных планет, стадии слияния олигархов.

В качестве совершенно иного подхода к проблеме планетообразования ученые в то же время терпеливо измеряли изотопный состав минералов из образцов, доставленных «Аполлоном», и использовали при этом все более впечатляющие методы. Полученные результаты вскоре расшатали первоначальную теорию гигантских столкновений⁸. Самое большое фактическое противоречие — Луна якобы по большей части состоит из вещества Тейи, но явных геохимических свидетельств этого в лунных образцах не нашлось, — привело к очень плодотворным двум десятилетиям, в течение которых идеи о формировании Луны⁹ вели себя подобно планетам, иногда сталкиваясь и поглощая друг друга. Но в остальном наши разнообразные теории напоминают то, как в 1929 г. британский астрогеофизик Гарольд Джеффрис описал свою область знаний: «Полный непроверенных гипотез сарай, где нужно время от времени проводить весеннюю уборку, отправляя на костер все лишнее»¹⁰.

Возможно, Тейя ударила Землю с такой энергией, что они взорвались, стартовав с нуля как гомогенная смесь¹¹. Возможно, Земля и протолунный диск после гигантского столкновения каким-то образом обменялись практически всем кислородом. Возможно, у Луны *на самом деле* другой состав, но ее породы были позже похоронены под толстым слоем вещества земного происхождения. Возможно, имели место несколько гигантских столкновений меньшего масштаба. Возможно, Тейя возникла из того же изотопного источника, что и Земля, — гипотеза, которая разрешила бы все противоречия, но требует выполнения слишком многих условий.

Теория, выдвинутая в 1879 г. Джорджем Дарвином элегантно разрешила бы этот кризис, если бы только в ней сходилась физика. В соответствии с этой теорией, кратко

описанной в первой главе, Земля вращалась так быстро, что Луна была выброшена из мантии — оставив после себя Тихоокеанский бассейн, как позднее говорили некоторые. Дарвин первым разработал теорию приливных сил, чье действие оттягивает Луну от Земли. В прошлом наш спутник был гораздо ближе, и скорость приливной миграции, таким образом, была гораздо выше. Каждое действие (расширение орбиты Луны) имеет равное противодействие (замедление вращения Земли), так что если вернуться к самому началу и предположить, что все вещество сосредоточено в одной планете в центре, то можно говорить о долунной Земле, вращающейся вокруг своей оси с периодом в пять часов.

Планета, вращающаяся так быстро, будет не совсем сферической, как астероид Веста (период обращения 5,3 часа). Но, чтобы исторгнуть спутник, планете нужно вращаться еще более чем в два раза быстрее. Не подозревая о гигантских столкновениях или о блуждающих планетах размером с Марс, Дарвин предположил, что Солнце могло посредством резонанса добавлять энергии к приливному бугру, пока тот не вздыбился и Луна не изверглась наружу, как Афина из головы Зевса¹². Тем не менее, даже если бы этот механизм сработал, лунный сгусток вероятно либо сразу рухнул бы обратно, либо улетел бы в космос; чтобы он вышел на почти круговую орбиту, потребовались бы очень специальные условия. И даже если бы крупный сгусток и вышел на орбиту, он бы обращался вокруг Земли так быстро (один оборот за два часа), что его собственный приливный бугор, немного отставая, вскоре стащил бы его вниз. Дарвиновской Луне понадобился бы сильный дополнительный толчок.

Мы можем сколько душе угодно находить дыры в теории Дарвина, и в этом-то все и дело. Она стала первой полнотью научной и потому опровергаемой моделью происхождения Луны, так что мы постоянно к ней возвращаемся. Тот

факт, что ее первоначальный вариант не мог сработать, тут не важен: приливная модель подготовила почву для всего, что последовало за ней. А конечный вариант с аккрецией в результате гигантского столкновения геофизически и динамически совместим с тем, чего требует теория Дарвина. Он концентрирует в одном месте огромный момент импульса и заставляет Луну выскочить из мантии — но, как выясняется, не из той мантии!

Любая модель происхождения Луны должна создавать спутник, обращающийся по крайней мере в нескольких земных радиусах, потому что иначе его стащит вниз. Это может объяснить то, что у Марса есть только два маленьких спутника — похожие на картофелины Фобос и Деймос, обращающиеся в трех и семи радиусах Марса и имеющие диаметры 22 и 12 км соответственно. Крупных спутников у Марса нет не потому, что он мал, но потому, что он вращается слишком медленно, чтобы удержать такой спутник от падения.

Когда после слияния в результате гигантского столкновения вокруг планеты формируется диск из обломков, в границах *предела Роша*¹³ возникает зона, где приливные силы планеты разрывают спутник на части до того, как его аккреция может завершиться. Для каменистых планет этот предел соответствует орбитальному расстоянию примерно в 2,5 радиуса и орбитальному периоду в восемь часов. Скажем, произошло гигантское столкновение, образовался диск обломков, и сразу за пределом Роша начинает формироваться массивный спутник с орбитальным периодом в десять часов. При периоде обращения древней Земли в пять часов новорожденная Луна, появившаяся на этом расстоянии, будет постепенно подниматься на все более высокие орбиты. За десять миллионов лет она отойдет на десять земных радиусов, то есть будет своим чередом двигаться туда, где находится сейчас.

Конденсация спутника выше предела Роша в случае Земли помещает Луну на спираль, уводящую ее вовне. В случае с Марсом дело обстоит бы не так. Причина, по которой у Марса нет крупного спутника, состоит в том, что его сутки длиной в двадцать пять часов¹⁴ в пять раз дольше суток древней Земли и, возможно, не сильно изменились с тех пор. (У Марса нет крупного спутника, который мог бы его замедлить так, как Луна замедлила Землю.)¹⁵ Выдвигалось предположение, что образование Северного Полярного бассейна создало протолунный диск, который, согласно результатам компьютерного моделирования, сгустился бы сразу за пределом Роша¹⁶, сформировав новый спутник Марса. Проблема в том, что это новое тело находилось бы внутри опасной зоны, обращаясь вокруг Марса быстрее, чем Марс вращается вокруг своей оси. Оно оказалось бы на спирали, ведущей внутрь, а не вовне, и вскоре разбилось бы о марсианскую поверхность — финал, путь к которому занял бы от нескольких лет до нескольких тысячелетий в зависимости от массы спутника, высоты его орбиты, приливного трения, которое он создаст¹⁷, и воздействия атмосферы.

Фобос, находящийся на расстоянии 2,8 радиуса Марса от центра планеты, попадает в эту зону, поэтому он идет по спирали вниз и, по прогнозам, разобьется через 40 млн лет¹⁸. Удивительно, как нам вообще посчастливилось его застать. Его разрушение будет чрезвычайно эффектным зрелищем, после которого в небе появится новый маленький Сатурн. Когда Фобос углубится внутрь предела Роша, он распадется на череду осколков, которая растянется в кольцо и будет опускаться на планету по спирали, поднимая в конце облака пыли и оставив после себя полосу кратеров. Если дальше рассуждать о фокусах с исчезновением, можно вспомнить гипотезу¹⁹, что Марс *на самом деле* все-таки имел крупный спутник в тысячи раз больше Фобоса и Деймоса,



Фотография марсианского спутника Фобос (диаметр 22 км), сделанная зондом «Марс Экспресс» с помощью стереоскопической камеры высокого разрешения.

ESA DLR/FU Berlin

размером с Весту, который сформировался в результате гигантского столкновения, а потом рухнул обратно на Марс. Но его короткая жизнь не прошла впустую. Во время своего смертельного спуска по спирали он гравитационно провзаимодействовал со всеми внешними мелкими спутниками, забросив их на более долгоживущие высокие орбиты. Возможно, имел место даже повторяющийся цикл падающих лун.

Если Фобос и Деймос — это только осколки первоначального, более крупного спутника Марса, тогда он должен был разбиться о марсианскую поверхность со скоростью 3–4 км/с, словно опоясав планету по экватору²⁰. Геологически эта полоса (или слой) была бы хорошо замаскирована как осадочные и пирокластические (перенесенные по воздуху вулканические) отложения с некоторой примесью материалов спутника. Вероятно, это была бы первая запись в геологической летописи Марса после формирования Северного Полярного бассейна. Сейчас она, возможно, неразличима из-за достаточно активных циклов эрозии, отложения осадочных материалов, а также вулканических явлений, которые с тех пор пережил Марс²¹.

Земля и Венера сами по себе являются примером гигантского фокуса с исчезновением. В два раза обогнав Марс по диаметру, они сосредоточили в себе 93% горных пород, сохранившихся между Солнцем и Юпитером. Каждая из них поглотила около десятка эмбрионов размером с Марс, которые, в свою очередь, выросли, поглотив десятки планетезималей размером с Луну, и так далее. Это *пищевая цепочка* планетного роста: большинство тел исчезают в утробе более крупных. На мгновение представьте себе, что Прото-земля и Прото-Венера были двумя самыми крупными акулами в океане внутренней Солнечной системы и съели почти всех более мелких акул. Это стандартная точка зрения, но есть

одна тонкость, связанная с *отсевом*, которую обычно упускают, однако я считаю ее очень важной.

Если Земля и Венера собрали всех более мелких акул, тогда неважно, ели эти мелкие еще более мелких или нет, — свидетельств того, как проходил этот процесс, не останется. Нельзя сказать, имело ли место безумное пиршество маленьких акул, в результате которого остались три или четыре акулы побольше, которых потом проглотили Земля и Венера, или Земля и Венера непосредственно сожрали всю мелочь. Это не принципиально, и мы об этом никогда не узнаем.

Но аккреция планет — процесс отнюдь не со стопроцентной эффективностью; одна из ее главных характеристик — это то, что иногда мелкие акулы ускользают. Что, если на каждые девять более мелких акул Протоземля и ПротоВенера пропускали одну? А что, если эти более мелкие акулы, в свою очередь, пропускали небольшую долю еще более мелких? Так у нас в итоге окажется некоторое количество акул чуть помельче, которых очень трудно поймать, множество более мелких, которых поймать еще труднее, и так далее — плюс Земля и Венера, «победители» соревнований по аккреции.

Рассматривая популяцию небесных тел, оставшихся после окончания планетообразования, вы можете подумать, что эти хитрые, изворотливые, удачливые акулы являются типичными представителями первоначальной популяции — но это будет ошибкой. Это не случайные представители, поскольку они прошли определенный отбор по умению избегать того, чтобы их поймали²². Вот еще один пример того, что мы называем систематической ошибкой, связанной с отсевом участников. Возьмем сотню солдат, отправляющихся на войну: ничем не примечательных, неопытных молодых рекрутов из обычных семей. (Они будут представлять эмбрионы из самых разных частей внутренней Солнечной

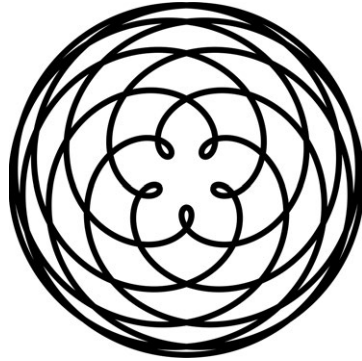
системы, начальные тела планетообразования.) У каждого такого солдата есть собственные уникальные качества, которые вот-вот будут проверены в бою, и собственная степень удачливости. После тяжелой кампании вернулось, скажем, только десять человек, остальные погибли. Те, кто выжил, имеют выдающиеся личные качества и боевые навыки и могут рассказать немало историй о необыкновенном везении. Возможно, один или двое дезертировали, чтобы избежать кровавого пекла. Постепенно земля поглощала все больше солдат (тоже своего рода аккреция), и в результате этого отсева в живых осталась очень разнородная группа покрытых славой ветеранов.

Рождаясь в хаосе и нестабильности, планетные системы в начале своего существования непредсказуемы, как весенняя погода. В течение миллионов лет они развиваются, достигая стабильного состояния, когда планеты и их спутники методом проб и ошибок уже научились избегать друг друга — либо держась подальше от соседей, либо вступая с ними в резонанс, при котором не происходит столкновений. Примерно как люди, не правда ли?

Резонанс галилеевых спутников Юпитера не позволяет им сдвигаться независимо друг от друга, что привело к орбитальной стабильности Ио, Европы и Ганимеда. Подобным же образом Нептун никогда не столкнется с Плутоном, а Тезия никогда не налетит на Калипсо и Телесто, хотя все три обращаются по одной и той же орбите вокруг Сатурна. Другие резонансы менее очевидны. Например, Венера делает почти 13 оборотов на каждые 8 оборотов Земли, выписывая вокруг нее пятиконечный цветочный орнамент. Это указывает на то, что Земля и Венера могли быть каким-то основополагающим образом связаны в момент своего образования.

В конечном итоге Венера и Земля получили одно и то же процентное содержание железа и горных пород, а также выросли до примерно одного размера, так что любая связь и любое различие между ними важны. Венера вращается вокруг своей оси медленнее, чем все остальные планеты (с периодом в 243 земных суток, причем в обратную сторону), и у нее нет спутников, но я бы сказал, что по большому счету ее сходство с Землей перевешивает различия. Согласно гипотезе первоначальной Солнечной системы, Венера и Земля — хитрые акулы, которые не дали себя сожрать суперземлям и нептонам, лавируя в окружающем хаосе. Если это верно, мне кажется, они должны были бы различаться сильнее, примерно как Меркурий и Марс. Вместо этого все выглядит так, будто две самые крупные акулы поделили между собой океан, но выросли немного разными.

Другой парадокс — проблема «теплого, влажного Марса» — может быть списан на хаотичность динамики планет. Спустя полмиллиарда лет после их формирования, когда светимость Солнца составляла только три четверти от сегодняшней, атмосферные и климатические условия на Марсе позволили появиться извилистым каналам, катастрофическим наводнениям и цепочкам кратерных озер.



Если Земля покоится в центре этой «Розы Венеры», то Венера, подобно спирографу, выписывает такой цветочный орнамент, иногда приближаясь, а иногда отдаляясь, пока обе планеты обращаются вокруг Солнца. Кажущееся движение Венеры относительно Земли имеет такую изящную пятиконечную траекторию, потому что Венера совершает вокруг Солнца почти точно 13 оборотов на каждые 8 оборотов Земли. Причины этого нам неизвестны.

Однако в пересчете на квадратный метр Марс получает всего 43% солнечной энергии Земли, и там должно было быть еще холоднее, когда Солнце выдавало всего три четверти нынешнего тепла. Согласно результатам климатического моделирования²³, теплый и влажный Марс должен был иметь атмосферу с давлением углекислого газа в два бара — только так у него был шанс на температуру у поверхности выше точки замерзания воды. Выполнив свою функцию парникового газа, гигатонны CO_2 должны были бы исчезнуть безо всякого следа. Пропавший углерод был бы сразу замечен в стратиграфической летописи так же, как на Земле слои так называемой полосчатой железистой формации возрастом от 2 до 2,5 млрд лет свидетельствуют о внезапном росте содержания кислорода — что вполне достойно небольшого отступления.

Фотосинтез появился на Земле более 3 млрд лет назад, начав производить кислород — а конкретнее O_2 , свободный молекулярный кислород, присутствующий в атмосфере. Большая часть жизни на планете не была приспособлена к этому высокореактивному ядовитому газу, но все было в порядке, так как O_2 удалялся так же быстро, как производился. Он окислял горные породы, делая их красными (вспомните ржавчину, FeO). Но примерно 2,4–2,7 млрд лет назад маты фотосинтезирующих цианобактерий словно с цепи сорвались. Они заполнили собой воду и сушу, вызвав *кислородную катастрофу* — событие, завершившее архей, начавшее протерозой и в конце концов приведшее к возникновению сложной жизни. На Марсе нам бы хотелось отыскать следы подобных крупных событий древности, и исчезновение практически всей атмосферы было бы одним из них.

Если у Марса имелись богатая углекислым газом атмосфера и большое количество воды на поверхности («теплый, влажный» сценарий), тогда CO_2 растворялся бы в воде

и выпадал в осадок в виде карбонатов. Если бы два бара углекислого газа пропали таким образом, весь Марс был бы покрыт многими метрами очень узнаваемых минералов — карбонатов. Но их нет. Хотя мы знаем некоторые их обнажения, по большей части это лишь следовые количества, которые можно объяснить и при нынешних климатических условиях. Еще одна гипотеза состоит в том, что CO_2 был унесен солнечным ветром, поскольку у Марса слабое магнитное поле и низкая скорость убегания. Но, если поток солнечного ветра был таким мощным, чтобы сдувать с Марса два бара углекислого газа, вам не кажется, что не имеющая магнитного поля Венера тоже должна была потерять почти всю свою атмосферу, раз уж воздействие Солнца на нее в пять раз сильнее? Без четкого объяснения теплого и влажного древнего Марса, возможно, нам стоит поискать альтернативную гипотезу — что возвращает нас к планетному хаосу.

Марс существует в динамической тени планет-гигантов. В первоначальной модели Ниццы, где 3,9 млрд лет назад Юпитер и Сатурн мигрировали через точку орбитального резонанса 2:1, землеподобные планеты, особенно Марс, остались на возмущенных орбитах. Это считалось недостатком модели, что привело к появлению описанного выше сценария «прыгающих Юпитеров». Но, с другой стороны, сильно возмущенная орбита Марса может быть прекрасным объяснением для свидетельств наличия там в прошлом потоков жидкой воды даже в отсутствие массивной атмосферы — при том условии, что в итоге планета сместилась на свою нынешнюю, менее возмущенную орбиту.

Сегодня эксцентриситет орбиты Марса равен 0,1; другими словами, в перигелии он приближается к Солнцу на 1,4 а. е., а в афелии отдаляется на 1,7 а. е. В перигелии планета получает на 45% больше тепла, чем в афелии, что вносит вклад в сложный сезонный цикл. Что, если в прошлом Марс

имел значительно больший эксцентриситет, например, 0,3? Тогда бы он ходил от 1,1 а. е., где в течение примерно шести месяцев получал почти столько же тепла, как Земля, до 1,9 а. е. во время долгой, чрезвычайно холодной зимы, длящейся около 15 месяцев. Это чередование замерзания и оттаивания запустило бы мощные гидрологические процессы, которые растопили бы вечную мерзлоту и ледяные шапки, вызвав катастрофические затопления северных низин. Так бы продолжалось до тех пор, пока не кончился весь этот карнавал.

Сумасшедшая идея? Возможно, ведь нам нужно еще объяснить, как Марс снова стал «нормальной» планетой с эксцентриситетом 0,1. Но эта гипотеза ничем не безумнее предположения об атмосфере с давлением в два бара, исчезнувшей безо всякого следа. И такой Марс все же двигался бы немного менее странно, чем его аналог, создавший Луну согласно стандартной модели гигантского столкновения, — так что судите сами, повезло ли Марсу и не повезло ли Тейе.

На сегодняшний день орбиты основных планет стабильны во временном масштабе миллиардов лет. За последние 2 или 3 млрд происходили только относительно небольшие столкновения — например, то, из-за которого вымерли динозавры. Астероиды километрового диаметра ударяют Землю примерно раз в миллион лет, формируя импактные кратеры и океанские впадины. Иногда астероид или комета распадаются во внутренней Солнечной системе, вызывая череду мелких столкновений. Стометровые околоземные объекты врезаются в нашу планету каждые плюс-минус 30 000 лет. Большинство из них оставляют ямы диаметром в несколько километров на океанском дне, а остальные лежат никем не обнаруженные в джунглях или под осадочными породами.

По совершенно понятным причинам нам интересно, где и как возникнет следующий геологически значимый кратер, но на этот вопрос, к сожалению, существует только статистический ответ, потому что на отрезках времени более 300 лет положение любого объекта, регулярно проходящего близко от Земли и Луны, является хаотическим, а в обозримом будущем никаких событий не предвидится. Только вздумайтесь: вероятность того, что любой из известных астероидов врежется в Землю, меньше, чем вероятность того, что какой-либо случайный астероид того же размера поразит нас до этого²⁴. Это примерно все, что мы можем сказать.

Сегодня на то, чтобы исследовать и понимать околоземные объекты, тратится очень много усилий, но еще 50 лет назад ими мало кто занимался или осознавал связанную с ними опасность. Считалось, что ямы на Луне возникли целые зоны назад. Астрономы, многие из которых были любителями, собирали астероиды как марки, как курьезы, которым можно дать имя. Только немногие воспринимали их как основной объект своих исследований. Кометы привлекали больше внимания. Они были экзотическими пришельцами с постоянно меняющейся активностью, позволяющими получать поразительные спектроскопические данные во время своих зрелищных проходов. На Земле тогда было известно всего несколько ударных кратеров, в том числе Аризонский кратер, и немногие крупные образования вроде Попигая в России²⁵. Что еще важнее, до 1990-х гг. мы не видели ни одного изображения астероидов; они были для нас просто точками в небе, под стать своему названию, которое в переводе с латыни значит «подобные звездам».

Интерес к астероидам со стороны большой науки пришел из неожиданной области — из седиментологии, и тут нужно вернуться к меловому периоду. Каждый год Землю поражают 20 000 тонн осадочных пород космического

происхождения, по большей части — в виде метеороидов размером от пылинки до гравия, ударяющих в верхние слои атмосферы. Метеороиды валунной размерности проникают глубже, взрываясь на высоте 50–80 км и распадаясь на пыль и мелкие фрагменты (метеориты). Частицы космической пыли тормозятся до того, как слишком сильно нагреются, так что они снижаются на земную поверхность в относительно неизменном состоянии²⁶ и вносят свой вклад в космическое загрязнение вашей крыши²⁷.

Космическая пыль становится частью осадочных отложений, которые скапливаются на дне моря. По сравнению с земными отложениями, которые приносит мутная речная вода, они составляют лишь крошечную долю. Когда континенты поднимаются и идет много дождей, в моря сбрасывается больше отложений, так что доля космической пыли еще сильнее снижается. С другой стороны, в сухом и холодном климате земных отложений мало, и доля космической пыли увеличивается. Так что, измерив долю космической пыли в донных осадочных породах, можно оценить скорость эрозии на суше и таким образом определить активность в этот период гидрологического цикла, то есть облаков и дождей.

Космическая пыль является примитивным веществом и содержит элементы, которыми сильно обеднена земная кора. Среди тех из них, концентрацию которых достаточно легко измерить, — иридий, металл, составляющий лишь 0,0000002% вещества земной коры. Иридий и другие *сидерофильные элементы* (то есть элементы, которые обладают сродством к железу, такие как золото и вольфрам) исчезли из коры, когда расплавленная Земля делилась на слои: они отправились вместе с железом в ядро. Частицы космической пыли — это по большей части первичный, не подвергавшийся дифференциации материал²⁸, поэтому иридия

там в тысячи раз больше, чем в горных породах земной коры. В итоге, хотя эту пыль не увидеть глазом, избыточный иридий можно распознать с помощью масс-спектрометра. Если на поверхность Земли из года в год выпадает 20 000 тонн космических отложений, тогда количество иридия в слое пропорционально времени, которое ушло на его формирование.

Мел-палеогеновое вымирание, также известное как «событие К / Т»²⁹, оказалось исключением из этого правила. Эта смена крупных геологических периодов, случившаяся 65,5 млн лет назад, выглядит как тонкий слой глины в осадках на морском дне по всему миру и иногда в приповерхностных отложениях³⁰, которые были захоронены еще до того, как подверглись эрозии. В этом граничном слое глины наблюдается значительная аномалия по содержанию иридия, указывающая на обилие космической пыли и означающая, что этот слой формировался в течение долгого времени в период медленной эрозии. Космические отложения должны были бы накапливаться в нем миллионы лет. За это время не только вымерли динозавры, но и произошла глобальная смена самых разных живых форм: от трицератопсов на суше до диатомовых водорослей в морях.

Чтобы возникла такая мощная иридиевая аномалия, реки Земли должны были превратиться в тонкие ручейки. Целый геологический период должен был поместиться внутри этого тонкого слоя — что соответствует замерзшей планете, «Земле-снежку», где континенты и океаны на протяжении миллионов лет покрыты льдом³¹. Или, быть может, Земля стала планетой-пустыней, где миллионы лет не было дождя?³² Все эти объяснения не сообразовывались со здравым смыслом, потому что меловой период был золотой порой динозавров, временем расцвета существ, населявших болота и джунгли, а также богатой океанской флоры; тогда

не было ни ледникового периода, ни похожей на Марс планеты-пустыни, ни даже никаких намеков на то, что нечто подобное может случиться в ближайшее время. Так что в итоге «событие К / Т» так и оставалось необъяснимым, что привело к огромному разнообразию мнений по поводу того, как вымерли динозавры.

Одним из моих первых детских сокровищ стал стереоскоп — популярная в 1960-е гг. игрушка, которую вы не встретите теперь, когда все уткнулись в свои мобильные телефоны. Я получил его во время семейных каникул в штате Юта вместе с полудюжиной дисков с парными изображениями — по одному для каждого глаза. Стереоскоп следовало направить на свет, как обычный бинокль, и сдвигать рычажок так, чтобы одна объемная картинка сменяла другую. Тираннозавр словно выпрыгивал на тебя! То же самое относилось и к стегозавру, чьи тяжелые хвостовые шипы защищали его от голубоватого монстра. Фоном служила немного напоминающая Юту изрезанная каньонами пустыня, где для полноты картины дымились вулканы — что же за страшное было время! Но вокруг попадались и пальмы. В то время окружающий пейзаж не играл для меня особой роли, но теперь-то я знаю: никто и понятия не имел, каким он должен был быть.

Но может, стоило поставить под вопрос саму мысль, что высокое содержание иридия соответствует выпадению космической пыли? В 1980 г. геолог из Беркли Уолтер Альварес, его отец физик Луис Альварес и их коллеги предположили, что никакого накопления пыли в течение миллионов лет не было и что вся она появилась в результате падения одного-единственного огромного «болида» — гигантского метеорита. Их статья стала примером революции того рода, когда люди (в том числе родственники!), являющиеся специалистами в очень несхожих областях, собираются в команду,

чтобы объяснить какой-то неопровержимый факт, не вписывающийся в принятые ранее представления³³. Как по мне, это было открытие сродни коперниковскому.

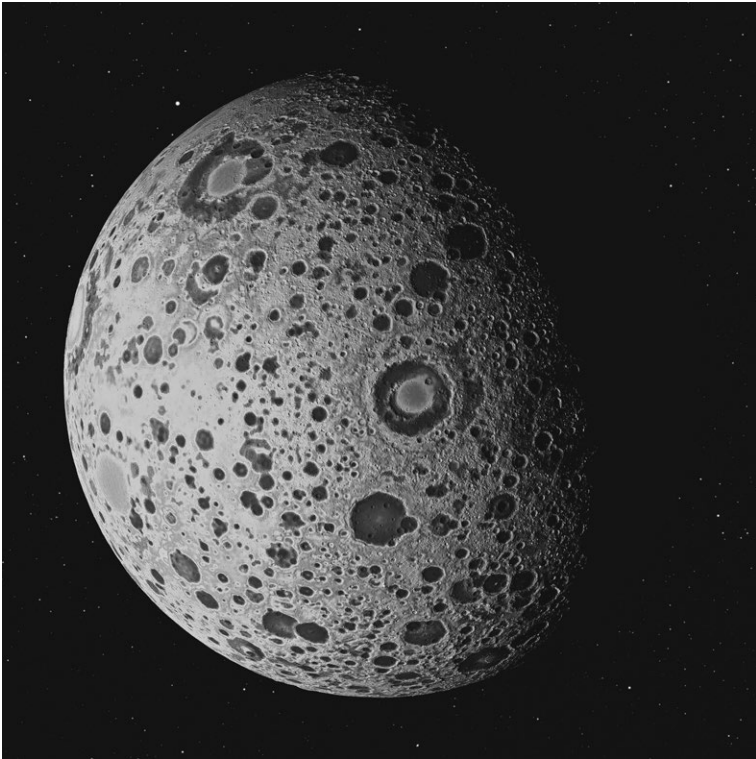
Количество иридия во всем слое К / Т эквивалентно тому, что можно обнаружить на астероиде диаметром 10 км. Таким образом, этот астероид врезался в Землю и, как пушечное ядро, падающее в воду при замедленной съемке, проделал в ней 100-километровую дыру. Разлетевшиеся фрагменты астероида образовали слой метеоритной пыли толщиной в среднем около одного миллиметра, смешавшийся с сантиметрами таких же по размеру частиц изверженной породы и материала, поднятого при приземлении выбросов. Извергаемый материал ударялся о поверхность со скоростью от 5 до 10 км/с — то есть не просто разрушал ландшафт, но превращался в огненные шары, которые могли жарить животных заживо и вызывать лесные пожары³⁴. Океаны закислились, леса сгорели, а небеса на многие недели потемнели от дыма — мало что могло пережить такую катастрофу.

Слои пепла, выживание норных видов животных (наших предков), уничтожение планктона в закислившихся морях, глобальное прекращение фотосинтеза — все эти факты отлично укладывались в новую гипотезу, что слой К / Т не формировался в течение миллионов лет. Он появился за один день и короткий мрачный период сразу после него. По мере того как ученые продолжали исследования, находя все новые фрагменты мозаики (подводные оползни, вызванные столкновением; изменения в содержании изотопов углерода), эта история становилась все богаче. Решающим доводом стало обнаружение в начале 1990-х гг. самого кратера, названного в честь рыбацкой деревушки Чикшулуб, расположенной в районе предполагаемого эпицентра. (Кратер, один из самых больших на Земле, довольно мелкий и полностью

скрыт под третичными отложениями.) Наконец, в составе слоя К /Т нашли фрагменты хондритов — то есть самого метеорита, виновника происшедшего³⁵.

Самые маленькие кратеры — это оспины, возникающие в соответствии с законами растрескивания породы; метеоры такого небольшого размера могут достигать поверхности только тех планет, где нет атмосферы, например Луны. (Такие оспины есть у многих лунных образцов.) Далее идут дыры с крутыми стенками, которые выглядят так, будто их отрыли киркой, а потом ямы размером с открытый карьер или вулкан. Когда планетарные кратеры становятся слишком большими, их дно выполаживается в результате просадок и они начинают напоминать широкие (много километров в поперечнике) круглые долины, разве что не имеющие ни входа, ни выхода. Кратеры больше 2–3 км в диаметре на Земле и больше 10 км на Луне (из-за низкой гравитации) переживают коллапс, образуя подобие неглубоких формочек для печенья со сложной геологией коры. Еще более крупные имеют *центральные пики* там, где после коллапса происходит отскок. Для сложных больших кратеров такой процесс опускания, возвращения и воздымания материала может вызывать последствия регионального масштаба и гигантские сотрясения, иногда даже меняющие природу коры всей планеты.

Представьте, что вы копаете яму, чтобы посадить дерево. Вначале работать легко: вы просто переносите лопатой часть почвы с одного места на другое. Но чем глубже вы забираетесь, тем труднее идет дело — грунт сильнее спрессован, в него сложнее вставить лопату и к тому же каждый раз его приходится поднимать все выше и отводить все дальше. Работа, направленная против давления и гравитации, отнимает больше энергии. Теперь приложим этот принцип в масштабе



Гравитационное поле Луны имеет небольшие вариации, которые были замерыны зондами GRACE (The Gravity Recovery and Interior Laboratory, «Лаборатория по изучению гравитационных возмущений и внутреннего строения Луны») в 2012 г. Эти колебания силы тяготения связывают с масконами (пробками из плотного мантийного вещества, заполняющими крупные кратеры) и недостатком массы (удалением части материала в результате столкновений). Это черно-белый вариант исходного полноцветного изображения, поэтому темные участки соответствуют как повышенной, так и пониженной гравитации, которая характерна для крупных кратеров — долговременных отверстий в лунной коре. В центре — Море Москвы на обратной стороне.

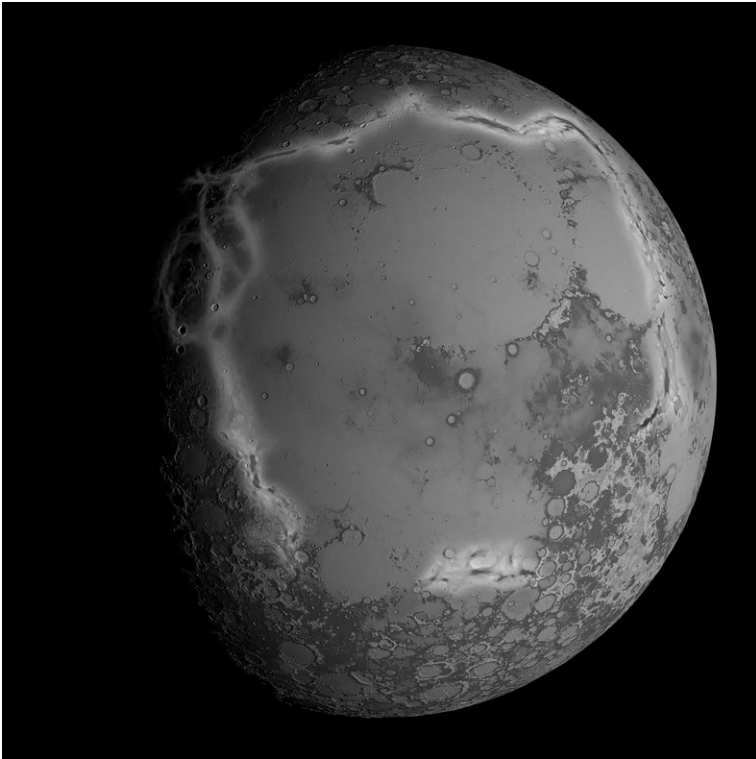
NASA/JPL-Caltech/MIT/GSFC

целой планеты, масштабе километров и сотен километров. В какой-то момент на то, чтобы выбросить породу, требуется так много энергии, что происходит фазовый переход — она плавится из-за интенсивности раскапывания. Чем больше

ударный бассейн, тем больше энергии требуется на каждую «лопату грунта», так что самые крупные кратеры могут расплавить целый регион, где они формируются, и никакого кратера не останется, только намек на то, что он когда-то существовал, — планета с обновленной поверхностью.

Самый большой лунный кратер (если это вообще кратер) — Океан Бурь, который охватывает более чем четверти окружности Луны, имея в диаметре почти 3000 км. Он образует почти все различимое с Земли «лунное лицо» и включает в себя меньшую и более несомненную ударную структуру — Море Дождей (диаметр 1100 км), которое выделяется на гравитационных картах нашего спутника. Хотя для астронавта гравитация на Луне ощущается как постоянная, в действительности она меняется от одного места к другому. В случае с Морем Дождей и другими крупными ударными структурами плотное вещество мантии поднялось, чтобы заполнить дыры, сделанные в более легких породах коры ударными кратерами. У Океана Бурь подобного *маскона* как такового нет: он так велик, что весь регион в целом восстановил гравитационное равновесие. Однако его периметр отмечен градиентами силы тяжести, как некой изгородью для лошадей вокруг большого пастбища. Мы пока не можем объяснить эти резкие (хотя и небольшие) вариации в плотности коры или верхних слоев мантии, которые на взгляд постороннего наблюдателя образуют «лунную пентаграмму», а если искать геофизические аналогии, я бы сказал, напоминают засохшую и растрескавшуюся грязь.

Нам неизвестно, является ли Океан Бурь одной ударной структурой или несколькими перекрывающимися кратерами. (Но какова вероятность такого совпадения?) Также неизвестно, связана ли окружающая его лунная пентаграмма со столкновением или она возникла намного позже как часть глобальных подвижек, своего рода тектонического процесса,



«Лунная пентаграмма» видна, если нанести на топографическую карту районов видимой стороны, прилегающих к Океану Бурь, величину градиента силы тяжести — резкость перепадов локального гравитационного поля, неуловимых для астронавтов, но имеющих определенное геологическое значение³⁶. Перевод изображения в черно-белый вариант делает его неоднозначным; чтобы увидеть все анимированное буйство красок, пройдите по ссылке <https://svs.gsfc.nasa.gov/4014>.

NASA/JPL-Caltech/MIT/GSFC/CSM

который может быть связан со структурной дихотомией лунных полушарий: толстой корой на обратной стороне и тонкой — на видимой с Земли.

Еще один крупный ударный кратер Луны — расположенный на юге обратной стороны бассейн Южный полюс — Эйткен³⁷ диаметром 2500 км. (Южный полюс находится

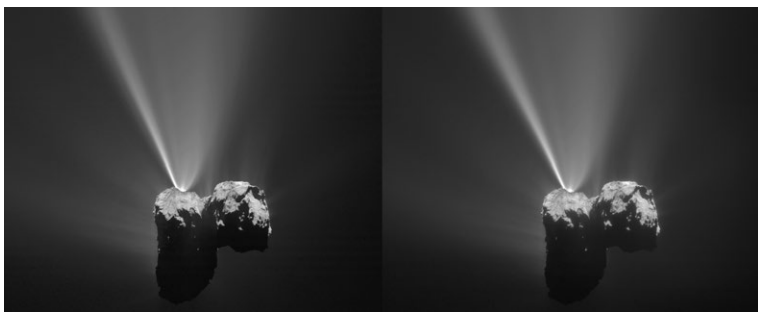
на его южном краю; кратер Эйткен — на севере; отсюда и незамысловатое название объекта.) Он является самым глубоким (13 км) и, возможно, самым древним из сохранившихся лунных кратеров. Этот район постоянно подвергался бомбардировкам и плотно покрыт более поздними кратерами, так что, хотя бассейн Южный полюс — Эйткен известен с 1970-х гг., наши представления о его геологии были туманными, пока космический зонд «Галилео» не пролетел через систему Земля — Луна во время одного из своих гравитационных маневров, который как из пращи направил его к Юпитеру. Аппарат нацелил свои ультрасовременные спектрометры и камеры на обратную сторону Луны, получил первые данные подобного рода и выявил в бассейне Южный полюс — Эйткен отличающийся по составу центральный район — кратер, пробивший насквозь анортозит толстой коры нагорий.

Мы можем оценивать диаметр тела, столкновение с которым создало бассейн Южный полюс — Эйткен (как и гигантские соседние бассейны), только по оценке объема огромной ямы, которая возникла сразу после того, как в Луну ударил астероид или комета. Эта яма немедленно обрушилась, совсем как кратер Элтанг в Тихом океане, но все-таки не полностью. В результате возник мелкий широкий бассейн, и спустя 4 млрд лет дальнейшей эволюции нам остается только гадать, что же стало причиной его появления. Предположительно, и Океан Бурь, и бассейн Южный полюс — Эйткен образовались при соударении с телами в одну десятую от массы Луны — крупными астероидами вроде Психеи или Весты. Хотя эти столкновения и нельзя отнести к гигантским, они приближаются к ним по масштабу.

Физику такого кратерообразования можно оценить исходя из повседневного опыта. Возвращаясь к уже знакомому

нам сравнению: когда пуля ударяется в деревянный брус, она проходит свой диаметр за микросекунду. В процессе образования крупного кратера это взаимодействие замедляется в миллионы раз, пропорционально увеличению масштаба. Астероиду значительного размера требуется секунда или две, чтобы пробить лунную кору (разделите толщину коры на скорость столкновения). Чему-то настолько крупному, чтобы получился Океан Бурь или бассейн Южный полюс — Эйткен, потребуется целых 20 секунд, чтобы похоронить себя внутри Луны. А когда эта фаза «контакта и сжатия» завершена, само раскрытие кратера займет еще 10 минут. Хотя вам не хочется ничего пропустить, пока идет процесс, у вас будет время на чашечку кофе.

Начало идее о том, что у Земли когда-то было две луны, одна из которых превратилась в нагорья на обратной стороне нашего нынешнего спутника, как это часто случается в науке, было положено размышлениями о чем-то совершенно постороннем. Мы с Мартином Ютци из Университета Берна изучали странные формы комет, разрабатывая модели дробления и деформации при столкновении, чтобы понять, как именно происходит их аккреция³⁸ — насколько быстро и каким образом. Кометы, как выяснилось из наблюдений, часто имеют «форму утки» с двумя скрепленными вместе неравными долями, как комета 67P/Чурюмова — Герасименко. Цель зонда «Новые горизонты» астероид Ульtima Туле может служить другим подобным примером. В иных случаях кометы выглядят как слоистые груды — идея, которую защищает астроном Майк Белтон из обсерватории Китт-Пик, первопроходец геофизики комет, который также был руководителем группы визуализации во время экспедиции «Галилео» в систему Юпитера.

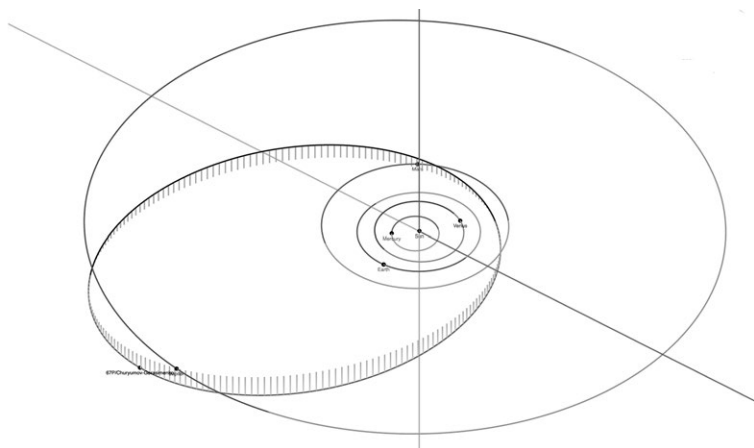


Скосите глаза. Это стереопара изображений имеющей форму утки кометы 67P/Чурюмова — Герасименко и исходящих от нее струй. Если вам удастся совместить изображения, сделанные со сдвигом в $1,2^\circ$, мозг воссоздаст трехмерную картинку. В момент фотографирования 4-километровая комета выбрасывала пыль и газ со скоростью десятков килограмм в секунду.

ESA/Rosetta/MPs

Аккреция ранних объектов внешней Солнечной системы происходила, как считается, посредством «аварий-гармошек из многих автомобилей»³⁹, и Белтон предположил, что составляющее их вещество было мягким и пушистым, как пух в подушках, так что они могли формировать аккреционные структуры, которые он назвал «талпсами» (*talps* — слово *splat*, «нашлепка», прочтенное наоборот). Измеренные объемные плотности комет составляют примерно половину от плотности водяного льда — то есть они в самом деле должны быть пушистыми и легко деформируемыми⁴⁰. Если вы когда-либо строили снежную крепость, вам знаком этот процесс: шлепнуть наверх ком снега с достаточной силой, чтобы он расплющился и стал частью стены, а потом повторить это снова и снова.

Некоторые кометы выглядят как слоистые груды, а другие — как резиновые уточки. После пролета космического аппарата «Дип Импакт»⁴¹ мимо кометы 9P/Темпеля, которая внешне оказалась крайне слоистой, мы с Мартином начали моделировать эти гипотетические столкновения, чтобы



Когда я пишу эти строки, комета 67P — цель космического аппарата «Розетта» — находится в интересной точке своей орбиты. Она слегка позади Юпитера и идет за ним следом, приобретая небольшое ускорение, как скейтер, которого тащат на канате. Комета вновь пройдет неподалеку от нас в 2021 г., потом в 2027-м и так далее. Это орбита типична для комет семейства Юпитера, которым всегда приходится избегать планет.

Erik Asphaug, <http://ssd.jpl.nasa.gov>

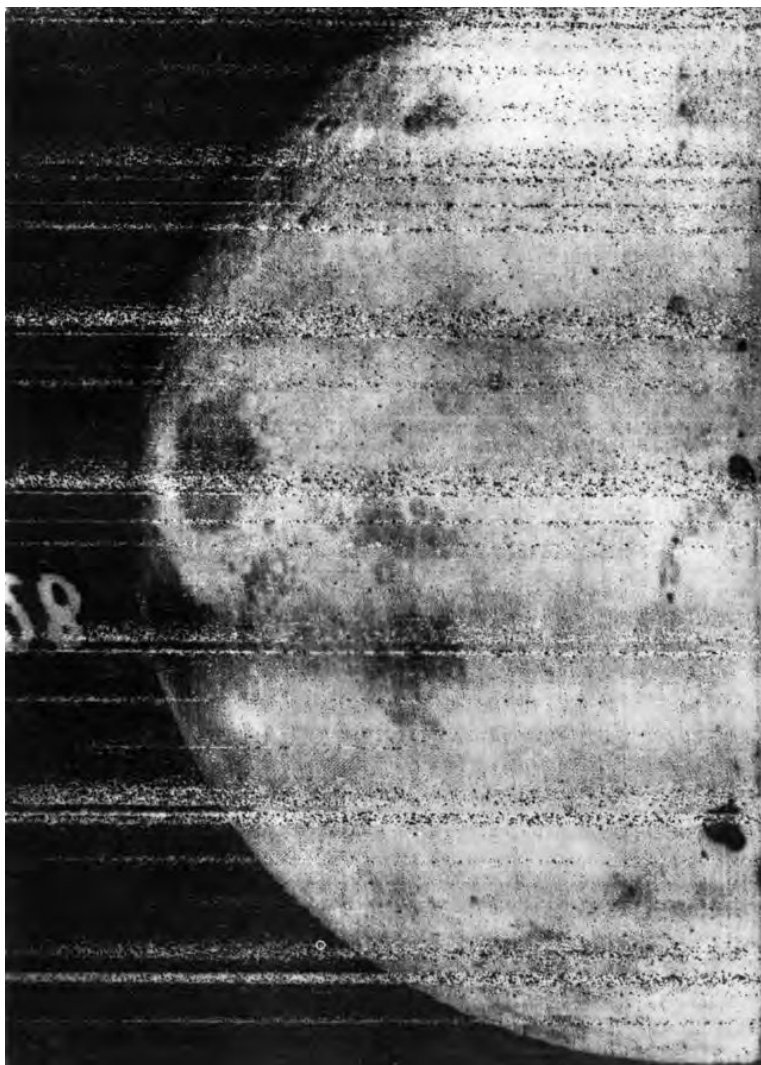
понять, что подразумевает такой удар в смысле физических характеристик, поддающихся замерам. Если кометезимали сливаются попарно со скоростью всего несколько метров в секунду, то их соударение происходит медленно, как пропорционально уменьшенное гигантское столкновение, и занимает часы. Хотя они движутся относительно друг друга лишь со скоростью велосипеда, импульса тут много — на велосипеде едет целая гора, — так что такого рода соударение находится за пределами возможного для любых лабораторных экспериментов и совсем вне нашего ограниченного интуитивного понимания.

Чтобы изучить эти медленные катастрофы, мы улучшали и тестировали наш программный код, включая в него пористость, сминание и трение, а потом моделировали

эксперименты с оползнями, разгрузкой песка через дно и так далее. Выяснилось, что учет дробления, сминания, прочности и трения в большой мере затрудняет расчеты. Это может показаться странным, но для воспроизведения того, как ведет себя грязь, нужны суперкомпьютеры. Мы много обсуждали, как ускорить работу программы⁴²; в конце концов нам понадобился перерыв.

По пятницам моя кафедра устраивает короткий семинар в обеденный перерыв⁴³; в тот раз мы обсуждали форму Луны. Основные факты известны всем: Луна слегка продолговата, вытянута в направлении от Земли и так далее. Но она слишком продолговата, чтобы это можно было списать на сегодняшние приливные силы. Кроме того, согласно гравитационным моделям, лунная кора, состоящая из горных пород, которые имеют плотность на 20% меньшую, чем мантия, должна образовывать слой одинаковой толщины (до 70 км) как на обратной, так и на обращенной к Земле стороне. На семинаре рассматривалась гипотеза⁴⁴, что свою вытянутую форму Луна получила 4,4 млрд лет назад, когда она обращалась гораздо ближе к Земле и намного быстрее вращалась вокруг своей оси. Если не принимать во внимание динамику (эту модель очень трудно, практически невозможно, заставить работать), фактические параметры вздутия на обратной стороне Луны, как выясняется, хорошо согласуются с такими теоретическими предсказаниями. Но я задался вопросом: разве быстрое вращение вблизи от Земли не создало бы одинаковые приливные бугры в обоих полушариях? Что же тогда произошло с видимой стороной?

До 1959 г. у нас не было никаких непосредственных знаний об обратной стороне Луны⁴⁵. Она оставалась царством чистого воображения, пока не состоялся лучший, первый рывок человечества в лунной гонке. Советский Союз начал освоение космического пространства в 1957-м, запустив «Спутник-1»,



В 1959 г. «Луна-3» стала первым космическим аппаратом, сделавшим фотографию обратной стороны Луны. Для этого были использованы технологии шпионской фотосъемки и пленка, добытая из американских разведывательных зондов. Подробнее об этом можно прочитать на <http://www.svengrahn.pp.se>. Несмотря на обилие помех и низкое разрешение, на снимке ясно видно, что рельеф тут радикально отличается от стороны, обращенной к Земле.

Роскосмос/ИКИ РАН

а к 1959 г. советские конструкторы, к ужасу американцев, доказали, что способны послать космический аппарат к Луне. В сентябре 1959 г. автоматическая межпланетная станция «Луна-2» врезалась в ближнюю сторону Луны, став первым созданным человеческими руками объектом, достигшим другой планеты. Тяжелая (почти 300 кг) и имевшая более серьезные научные задачи «Луна-3» была запущена несколько недель спустя. Она представляла собой классический продукт технологий 1950-х и была оснащена фотокамерой, первоначально разработанной для самолетов-шпионов, которая могла делать и широкоугольные, и длиннофокусные снимки. (До эпохи цифровой фотографии оставались еще десятилетия; в следующем году США удастся запустить на орбиту первую телекамеру.) Но у советских ученых не было ключевой технологии: фотопленки, не мутнеющей из-за характерных для открытого космоса жесткой радиации и резких перепадов температуры.

Выяснилось, что такая пленка была создана американскими военными и использовалась для того, чтобы шпионить за Советским Союзом с летящих на большой высоте воздушных шаров. США запускали их в струйное воздушное течение в Европе, ловили на Аляске, проявляли пленку и анализировали снимки и другие данные. Самыми холодными сибирскими утрами шары теряли высоту до того уровня, где их могли сбить советские МиГи, и тогда инженеры получали возможность изучать американские технологии. Среди находок была и устойчивая к радиации и скачкам температуры пленка, по большей части еще не отснятая. Много лет спустя главный инженер фотосистемы «Луны-3» рассказал, что тайно изъяс эту пленку из американского воздушного шара, обрезал ее по размеру и загрузил в камеру лунного аппарата.

Таким образом, первые фотографии обратной стороны Луны были сделаны советской камерой на американскую шпионскую пленку, проявлены с помощью химических

реактивов прямо на борту автоматической станции и поточно сканированы с помощью узкого пучка яркого света, направленного сквозь фотопленку на фотоумножительную трубку. Это превратило их в аналоговые радиосигналы, которые могли быть переданы на Землю в следующие несколько недель. Сами фотографии, оставшиеся на борту автоматической станции, могли бы посоперничать по качеству с современными фотографиями Луны, но из-за процесса сканирования на Землю попали изображения, напоминающие нечеткий факс. Пленочная фотосъемка использовалась в исследованиях космоса еще довольно долго, отчасти из-за военного применения подобных технологий. В пяти экспедициях к Луне аппаратов «Лунар орбитер» в 1966–1967 гг. применялись, однако, куда более совершенные технологии сканирования пленки, позволившие получить некоторые из самых эффектных снимков в истории⁴⁶.

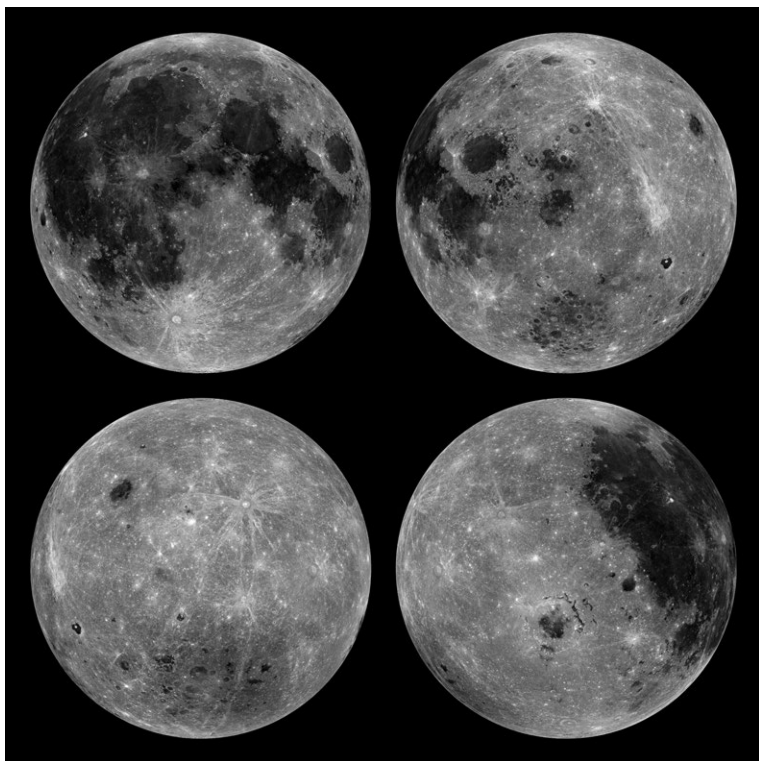
Первое изображение обратной стороны Луны стало шокирующим откровением. Вместо темных морей и дуг горных цепей там обнаружилось гигантское плато, растянувшееся на многие тысячи километров — испещренный кратерами щит. Хотя на Луне нет тектоники плит, которая могла бы создать такой щит (недостаточно тепла, слишком слабая гравитация), группирование морей на видимой стороне и толстая кора на обратной напоминают об относительно недавней (поздний пермский период, 250 млн лет назад) истории Земли, когда суперконтинент Пангея занимал одно полушарие, а океан Панталасса — другое. У Земли тоже бывали такие периоды асимметрии. Так что, возможно, сторону, обращенную к Земле, разорвала конвекция лунной мантии. Возможно, это была бомбардировка из космоса, по чистой случайности срезавшая одно полушарие. Возможно, вinovато приливное воздействие Земли.

А может, тут замешана другая луна.

Семинар шел к концу, и я немного отвлекся. Я думал о том, какое по масштабу столкновение потребовалось бы, чтобы снести ближнюю сторону Луны, но не затронуть дальнюю. Возможно, ударяющее тело имело бы диаметр километров в 500, как астероид Веста. Я прикинул вероятность того, что удар по продолговатой Луне пришелся бы прямоком в один из приливных бугров, и то, как тут была бы задействована Земля, находившаяся от Луны, когда та затвердела, примерно в десяти своих радиусах. Может, огромное количество скопившихся газов по какой-то причине оказалось именно под ближней, а не под дальней стороной. Газы вырвались через вулканы, заставив целое полушарие сдуться, как пробитую шину... Я падал в кроличью нору предположений. Взглянув на Мартина, я ударил ладонью по кулаку, намекая на наши исследования слоистых груд планетезималей. Он слегка пожал плечами, как будто говоря: «Ну да, почему бы нет?»

Мы вернулись в его кабинет, чтобы задать первоначальные условия для моделирования гигантской лунной наплевки. Мы знали, что это должно было быть столкновение на относительно низкой скорости, потому что при скорости в 10 км/с Луна просто разлетелась бы на кусочки. В наших моделях образования комет мы сталкивали тела со скоростью убегания, которая в их случае составляет всего несколько метров в секунду — скорость велосипеда. Не слишком углубляясь в этот вопрос, мы установили скорость столкновения, равную скорости убегания для Луны — 2,4 км/с, понимая, что в таком случае нам потребуется объект очень особого рода.

Что же до тела-мишени при таком столкновении, мы решили начать с сегодняшней Луны с ее маленьким железным ядром, а также мантией и корой из горных пород, вычтя несколько процентов массы для учета ударяющего тела



Луна, как она выглядела бы при полуденном освещении с четырех разных ракурсов. Обратная сторона целиком — внизу слева. Следите за смещением при вращении небольшого Моря Москвы и кратера Циолковский с его необычной формой. Самые темные участки — это вытесненные из глубин лавы, а самые яркие — порода, изверженная из недавно возникших кратеров.

NASA/GSFC/ASU

из таких же пород, но без ядра. По массе мы сделали это тело таким, чтобы при размазывании его по одному из полушарий Луны образовался слой толщиной 30 км. Получился шар диаметром 1300 км — больше, чем Церера. А как насчет угла соударения? Предпочтительнее всего было бы лобовое столкновение, потому что в таком случае ударяющее тело точно шлепнулось бы на поверхность и расплющилось

по ней вокруг точки контакта. Но мы не хотели быть пристрастными, поэтому задали угол в 45° , который является наиболее вероятным. Не расшвыряет ли тогда ударяющее тело вокруг Луны, создав вместо гигантской нашлапки странное толстое кольцо? Мы запустили обсчет модели на университетском компьютере и пошли домой.

Лимб Луны — это граница между ближней и обратной сторонами, предел того, что может видеть наблюдатель с Земли. Сразу за лимбом находится кратер Джордано Бруно — одно из самых таинственных явлений лунной геологии. Бруно, имея всего 22 км в диаметре, заполнен затвердевшей магмой, что неожиданно для кратера такого размера, а во всех направлениях от него расходятся яркие светлые лучи. Был ли это удар маленькой кометы, принесшей летучие вещества и большое дополнительное тепло? Или, напротив, это было нечто крупное и относительно медленное, так что ударный расплав остался в кратере? Лучи кратера Бруно геологически молоды, что привело к рассуждениям о том, что он даже мог образоваться в исторические времена, когда произошло событие, свидетелями которого стали пять монахов в ночь на 18 июня 1178 г.:

В этот год, в воскресенье перед праздником Иоанна Крестителя, после заката Солнца, когда Луна стала видимой, пять или более человек, сидевших обратя свой взор к Луне, стали свидетелями чудесного явления. На небе сиял яркий молодой месяц и, как обычно в этой фазе, его рога были направлены к востоку. Внезапно верхний рог Луны раскололся надвое. Из середины этого разлома забил пылающий факел, разбрызгивая во все стороны на значительное расстояние огонь, раскаленные угли

и искры. Тем временем ниже тело Луны начало изгибаться как в страхе, а, по словам тех, кто видел все это своими глазами и сообщил мне об этом, месяц бился, как раненая змея. Потом он вернулся к своему нормальному состоянию. Это явление повторилось дюжину раз или более: пламя случайным образом принимало различные извивающиеся формы, а затем все приходило в обычный вид. После всех этих трансформаций месяц от рога до рога, то есть по всей своей длине, стал выглядеть темноватым. Тот, кто пишет эти строки, узнал об этом от людей, которые видели случившееся собственными глазами и были готовы поклясться честью в том, что ничего не прибавили и не исказили в своем рассказе.

Эти сведения, записанные хронистом Гervasием Кантерберийским, можно рассматривать как набор данных. Вот пятеро монахов, которые клянутся, что это видели: трудно сомневаться в их искренности, ибо наказание за ложь сурово и на этом свете, и на том. К тому же у них нет никакого мотива, чтобы врать. Описание того, как месяц «бился, как раненая змея», звучит убедительно, а вся гипотеза заслуживает доверия еще и с точки зрения того, каким ярким должно было быть образование кратера Бруно. Кинетическая энергия удара в несколько тысяч раз превышала бы мощность самой крупной когда-либо взорванной атомной бомбы⁴⁷. Поскольку столкновение произошло около лунного лимба, с точки зрения земного наблюдателя столб выбросов в самом деле казался бы уходящим в космос и похожим на «огонь, раскаленные угли и искры». Сообщение, что «это повторилось дюжину раз и более», является тогда вполне понятным преувеличением, как и заявление, что Луна раскололась пополам⁴⁸.

Тем не менее сложно поверить, что подобное событие не нашло бы отражения в каком-либо еще источнике.

Неужели никто больше не смотрел на небо в тот момент?

Поэтому мы вынуждены поставить эти данные под сомнение. Одна проблема с гипотезой про монахов состоит в том, что формирование кратера Бруно в относительно недавнее время очень маловероятно. Статистически 20-километровые кратеры появляются каждые несколько миллионов лет, а это наблюдение происходило всего тысячу лет назад. Шанс, что кратер такого размера сформировался где-либо на Луне в последнее тысячелетие, составляет менее 0,1%. И даже если отвлечься от низкой вероятности, тут есть более критичная проблема: такой взрыв на Луне замусорил бы систему Земля — Луна (окололунное пространство), и последствия этого было бы несложно наблюдать. Такой объем изверженных в космос пород (более миллиарда тонн) нашел бы дорогу на Землю, обеспечив нам сверкающие метеорные потоки на несколько столетий вперед⁴⁹ — они продолжались бы до середины XVIII в. Ничего такого не произошло. Последняя несообразность в этой гипотезе состоит в том, что дно кратера Бруно испещрено мелкими кратерами диаметром в десятки метров. Они образуются с более-менее известной нам скоростью, так что возраст Бруно составляет примерно миллион лет⁵⁰. Он не мог сформироваться в исторические времена.

Если только у монахов не было коллективной галлюцинации, нам нужно как-то объяснить это поразительное, имеющее документальное подтверждение событие. Давайте расширим проблему, привнесем больше фактов. Мы не можем знать априори, что они видели импактное событие на Луне; это их собственная интерпретация. Они видели огонь, горящие угли и искры в небе и решили, что все это происходит на Луне. Но иногда разные объекты просто располагаются на одной линии. Сделаем шаг назад и задумаемся, что в определенные моменты Луна и Солнце

оказываются в одном и том же месте в одно и то же время, и тогда происходит солнечное затмение, хотя на самом деле одно тело в 400 раз ближе, чем другое. И какова вероятность *такого* совпадения?

За миллиарды лет, прошедшие со времени ее образования, видимый размер Луны уменьшался, пока она по спирали удалялась от Земли. Так получилось, что примерно последний миллион лет Луна имеет примерно тот же угловой размер, что и Солнце. Это означает, что раз в несколько лет для наблюдателя с Земли Луна может на короткое время оказаться точно перед Солнцем. Это достаточно редкая ситуация: вокруг планеты обращается спутник точно с тем же кажущимся диаметром, что и ее звезда. Через несколько миллионов лет Луна будет обращаться так далеко, что начнет казаться меньше Солнца, и славная эпоха полных солнечных затмений уйдет в прошлое. Если межпланетный туризм вообще существует, полное солнечное затмение на Земле должно значиться во всех списках главных достопримечательностей⁵¹.

Полные солнечные затмения наблюдаются в узкой (от 100 до 300 км шириной) полосе, в которой зона тени скользит по земной поверхности немного медленнее (1 км/с), чем Луна движется по орбите, поскольку вращающаяся вокруг своей оси Земля пытается за ней угнаться. Путешествие в зону полной тени — это чисто современное приключение, и я решился на него только один раз, 30 лет назад. Оно изменило меня до сих пор не осознанным мною образом, оставив в душе след в виде нового восприятия моего места в пространстве и времени. Я отправился в путь с двумя друзьями, тоже астрономами, и пилотом, знакомым одного из них. Мы полетели на юг на взятом в аренду самолете «Сессна»

1950-х гг., напоминавшем «Фольксваген-жук» с крыльями и обладавшем примерно той же вместимостью. Переночевав где-то посреди Калифорнийского полуострова, в день затмения мы с утра пораньше вылетели к той точке в пространстве и времени, где Солнце, Луна и Земля должны были выстроиться в одну линию.

Во время нашего продвижения по небу Земли я чувствовал себя мышью, карабкающейся внутри гигантского часового механизма, где цепляются друг за друга шестеренки, тикают маятники и вот-вот раздастся бой. Тонкая, как спичка, тень, которую отбрасывают Солнце и Луна, бежала по Земле сквозь пространство, а мы спешили ей навстречу в нашем летающем экипаже, пробиваясь сквозь атмосферные вихри в чудесный ясный день. Справа были горы, внизу — океан. Мои товарищи думали о том же, и моей обязанностью было отслеживать другие гнавшиеся за затмением самолеты — в какой-то момент мы видели их сразу шесть. Час спустя мы приземлились на грунтовой взлетно-посадочной полосе около маленького пляжного отеля, заехали на парковку, где стояло два или три десятка самолетов, прошли через очаровательный, простой внутренний двор и, спустившись по ступенькам, вышли на красивый пляж, где уже собралось около сотни путешественников в пространстве и времени, ожидавших заранее предсказанного чуда.

За следующий час мне предстояло узнать, что полное солнечное затмение невозможно *увидеть*. Глупо делать его фотографии — предоставьте это кому-то другому, кто умеет фотографировать лучше вас и потратил десятки тысяч долларов на необходимое для этого оборудование. Я очень рад, что на свете есть такие мастера, особенно теперь, когда они могут снимать завораживающее движение солнечной короны в высоком разрешении⁵². Но каким бы качественным ни было изображение, оно никогда не передаст и сотой доли

тех эмоций, которые испытываешь, глядя на затмение собственными глазами и ощущая его всем своим телом.

В романе Артура Кларка «2001: Космическая одиссея» есть момент, когда вождь племени питекантропов по имени Смотрящий на Луну пытается схватить Луну большим и указательным пальцами. Стрекогут кузнечики. На следующее утро племя просыпается около черного сверкающего монолита, возвышающегося прямо в центре их лагеря⁵³; они скачут, вопят и трогают его; он сводит их с ума. Полное солнечное затмение воздействует на психику подобным образом, только в наши дни меньше воплей и визгов. Наш просвещенный ум точно знает, что происходит. Мы заблаговременно планируем, что будем переживать именно это. У племени доисторических людей не было ни предуведомлений, ни предшествующего опыта.

Как только Луна начинает наезжать на Солнце, в следующие полчаса вам кажется, что над миром легла какая-то высокая облачная пелена, которая становится все плотнее. Даже часть Солнца сияет слишком ярко, чтобы на него можно было смотреть, так что вы не можете заметить тот кусочек, на который поначалу уменьшается его диск. Ваше зрение адаптируется к происходящему. Но через полчаса вы замечаете, что все выглядит как-то *четче*. Это происходит потому, что Солнце является не точечным источником освещения, но распределенным, размером с ноготь вашего мизинца, отставленного на длину руки. В самом деле, солнечный свет, проходя через булавочное отверстие, не дает пятно в форме этого отверстия, а проецирует перевернутое изображение Солнца. (Можете попробовать.) В результате края теней при дневном освещении всегда немного размыты; это видно и на фотографиях, сделанных с помощью камеры-обскуры, и астронавтам на лишенной атмосферы Луне.



Фотография полного солнечного затмения 21 августа 2017 г., наблюдаемого из окрестностей Джексона, штат Вайоминг. Изображение является комбинацией кадров, снятых с разной экспозицией, чтобы показать одновременно и солнечную корону, и детали поверхности Луны.

Michael S. Adler (CC BY-SA 4.0)

Когда Солнце превращается в тоненький полумесяц, тени становятся более четкими, но только в направлении сужения. На практике это ни на что не влияет, поскольку света по-прежнему достаточно, чтобы вы могли продолжать заниматься своими делами, но зрительная кора головного мозга, приученная обращать внимание на контрасты света и тени, сразу замечает что-то новое. Все вокруг делается немного нереальным. Вы садитесь отдохнуть под деревом и замечаете тысячи маленьких серповидных изображений Солнца, каждое из которых создано естественной камерой-обскурой листвы. Сощурившись и взглянув вверх, вы увидите, что Солнце превратилось в сверкающий белый ятаган. Луна пожирает Солнце!

Пеликаны кружат у берега, поднимаясь по спирали и будто рисуя в небе вопросительные знаки. Пожилой мужчина стоит на камнях, о которые разбиваются тихие волны. Мы лежим на песке в темных очках, а когда наступает полная фаза — с биноклями⁵⁴. Вокруг разливается бурлящая энергия, как будто кто-то добавил в пунш что-то странное. А затем это происходит. «Посмотрите на море!» — кричит мужчина. Мы смотрим туда, куда он указывает, и открытое море раскатывается перед нами, как упругая бесконечность. Облаков по-прежнему нет, но вода неожиданно вспыхивает цветом и преображается. Последний луч солнечного света отражается от вершин лунных гор, создавая узоры, которые бегут по Земле в виде волн и пурпурных полос. А потом эти оптические явления ускоряются, словно догоняя друг друга и...

Я уже не могу описать то, что видел, но помню, что слышал — *звук* гигантского гонга. Затем все стихло. Волны по-прежнему накатывали на песок, птицы попрытались. В этих странных сумерках стали видны планеты и самые яркие звезды. А среди них, полыхая над нашими головами

шесть прекрасных минут, стояло в своей огненной короне черное Солнце, как будто кто-то проделал в небе дыру.

Затмения — это крупные астрономические события, происходящие по всему миру, и время от времени о них упоминают самые ранние тексты. В IV в. до н. э., во времена Аристотеля, Гань Дэ написал несколько (утраченных) трактатов о планетах. Возможно, он заметил Ганимед как яркую звезду около Юпитера. Теперь переместимся в ту эпоху, когда западная наука находилась в своем самом глубоком упадке, за столетие до монахов из Кентерберри. Проводя свои последние годы в безмятежных садах, энциклопедист и государственный деятель Шэнь Ко составил «Беседы с кистью в Мэнси»⁵⁵. Завершенный в 1088 г. труд вместил в себя стройную систему взглядов на музыку, геологию, астрономию, металлургию, ботанику, медицину и даже НЛО. За семь веков до того, как геология стала наукой на Западе, Шэнь Ко понимал природу окаменелостей и их значение для изучения далекого прошлого⁵⁶. Горизонт морских останков высоко в скалах означает повышение уровня суши или отступление моря, писал он, а окаменелый бамбук в обнажении пород посреди пустыни говорит об изменении климата. Также Шэнь Ко знал, что Луна — это шар, освещенный Солнцем: «Если покрыть белилами половину шара и посмотреть на него сбоку, эта часть будет выглядеть как полумесяц». То, почему лунные и солнечные затмения не происходят каждое полнолуние и новолуние, китайский ученый объяснял так: «Эклиптика и путь Луны — как два кольца, лежащие одно над другим, но на небольшом расстоянии»⁵⁷. Приходится подождать, пока их циклы совпадут друг с другом.



Солнце, Луна, ветки и Земля.

Meryl Natchez, <http://www.dactyls-and-drakes.com>

Салют, случившийся на Луне позднее при той же династии Сун, был бы описан во всех подробностях; это было время изобретения пороха и бумажных денег. Так что же увидели озадаченные монахи в ту воскресную ночь перед праздником Иоанна Крестителя? Ну, дело было как раз в сезон метеоритного потока Таурид — события, которое, как мы знаем сегодня, вызвано тем, что Земля ежегодно проходит через полосу орбитального мусора, оставшегося от периодической кометы 2P/Энке. Так что имеется и альтернативная гипотеза, объясняющая рассказ монахов: один объект перед другим, яркий метеор, летящий прямо на них, причем с их точки зрения непосредственно на фоне Луны⁵⁸.

Это звучит невероятно, но на самом деле такое вполне возможно. Я сам однажды видел метеор, который летел прямо на меня. Он, казалось, вихлял, будто пьяный,

поскольку я находился непосредственно на векторе его приближения. За последнюю тысячу лет по всему миру состоялись миллионы посиделок под открытым небом, так что вполне вероятно, что с кем-то такое произошло: яркий метеор, летящий прямо на наблюдателя и в проекции находящийся перед Луной.

Мы существуем в пространстве и времени, и то, что мы видим, определяется нашим восприятием. Иногда мы делаем поспешные выводы, но иногда реальность очевидна с первого взгляда. Инопланетянин с планеты, обращающейся вокруг звезды высоко над Млечным Путем, каждую ночь наблюдал бы огромную спираль нашей галактики и с самого начала *знал* бы, что его мир окружает бескрайняя Вселенная. Но в нашей переполненной звездами средней плоскости Галактики нам потребовались века астрономических наблюдений, чтобы это осознать. Или представьте, как Вселенная могла бы изначально восприниматься с поверхности планеты плотно упакованной солнечной системы вроде TRAPPIST-1, где соседние планеты находятся настолько близко, что видны в небесах друг друга, как полные луны, только не обращающиеся одна вокруг другой. Они описывают петлеобразные траектории вокруг своей звезды и иногда сближаются, догоняя друг друга и убегая вперед (пока вы кружитесь на собственной планете, чьи маленькие спутники обращаются вокруг нее...). Пока дни и недели складываются в планетные годы, такая космическая карусель может порождать чрезвычайно богатую мифологию небес, но затруднять физическое понимание астрономии.

Система Земля — Луна когда-то тоже была похожей безумной каруселью. Если бы мы могли встать где-нибудь на Земле и пустить часы назад с помощью машины времени, то пронаблюдали бы, как Луна приближается все ближе, становясь все больше. Она проходит через все свои

фазы — первая четверть, полная луна, последняя четверть, новолуние, — все быстрее двигаясь по орбите. Дни становятся короче по мере того, как Земля возвращает свой момент импульса. Накатывающие на берег приливы поднимаются все выше, пока не дойдут до той точки, когда захлестнут побережье; древним континентам, должно быть, приходилось нелегко⁵⁹. Дальше, так далеко назад, как мы только можем зайти, Луна окажется на том самом месте, где ее представлял Дарвин, — сразу за пределами зоны в три земных радиуса, внутри которой летящее по орбите тело уходит по спирали вниз, а не вверх.

Если двигаться еще дальше назад, мы доберемся до самого гигантского столкновения, так что давайте ненадолго остановимся и насладимся открывающимся видом. Луна, находящаяся на таком расстоянии, обращается с периодом в шесть часов, немного медленнее, чем Земля в те времена вращалась вокруг своей оси, что и стало причиной того, что наш спутник начал удаляться по спирали. С вашей точки на Земле Луна кажется едва-едва ползущей по небу (она находится на почти *геостационарной* орбите), хотя каждую ночь она несется относительно звездного фона.

Солнечные затмения в те времена случались регулярно. Месяц, период от одного полнолуния до другого, длился поначалу шесть часов, удлиняясь по мере расширения лунной орбиты; день становился дольше, поскольку вращение Земли вокруг своей оси замедлялось из-за приливного захвата. Во время этого раннего танца в обжимку резонансное взаимодействие Земли и Луны друг с другом и с Солнцем должно было влиять на плоскость лунной орбиты и могло поглощать момент импульса системы Земля — Луна⁶⁰.

Если в начале катархей вы, стоя на Земле, взглянули бы вверх, Луна была бы размером с вашу ладонь, такой большой, что на ней можно было разглядеть все геологические

подробности, как это делает астронавт, смотря на планету с орбиты. Темные потрескавшиеся массы отливали красным из-за извержений вулканов и взрывов, их прошивали отверстия от столкновений, а отдельные плиты наезжали друг на друга, образуя полосы серых гор. Вокруг Луны имелась наклоненная на несколько градусов лента колец шириной в несколько диаметров, как кольца Сатурна, но состоящая из горных пород, а не из льда. Под действием земного тяготения эти кольца должны были исчезнуть, но их пополняли обломки все новых столкновений, пока Луна не собрала наконец все вещество на своей орбите⁶¹.

Еще до того, как Луна появилась, вокруг Земли обращался диск с массой, примерно вдвое превышающей лунную, — остатки гигантского столкновения. В те далекие времена присесть на поверхности Земли было негде: кора была расплавлена и томила под силикатной атмосферой. А в этом диске назревали радикальные изменения: он стал гравитационно неустойчивым. Скорее всего, в его составе имелся значительный по размеру железный фрагмент, часть ядра Тейи, если придерживаться стандартной модели, или тело размером с Весту, возникшее в результате аккреции самых тяжелых металлических капель. Эта огромная глыба железа, которое в три раза плотнее горных пород, быстро улавливала вещество из диска и вскоре достигла тысячи километров в диаметре, а потом и двух, и трех тысяч. Ее присутствие должно было сильно поменять гравитационную обстановку в районе Земли. Вдобавок к быстрому сбору вещества она влияла на *потенциальное поле*, создавая возможность появления у Земли троянских спутников.

Возможно, вы сталкивались с аналогией, в которой воздействие гравитации на пространство-время сравнивают с углублением, которое любой предмет образует в натянутом листе эластичного пластика. Солнце — словно тяжелое

ядро в центре такого листа, а планеты обращаются вокруг этого искривления пространства-времени, как монета, скатывающаяся вниз по огромной воронке вроде тех, которые устанавливают в аэропортах для сбора мелочи на благотворительные нужды. Гравитация — это градиент этого потенциального поля. В таком случае Юпитер становится чем-то вроде стального шара, который, обращаясь вокруг Солнца, создает собственное углубление. Теперь у нас есть два углубления, одно из которых обращается вокруг другого.

Далее предположим, что вы хотите следить за движением этих углублений и для простоты всегда помещаете Юпитер с правого края диаграммы. (Это не проблема, пока вы помните, что диаграмма вращается.) Вы можете записать для этой вращающейся системы все физические уравнения, если учтете фактор карусели, так называемые *силы Кориолиса*. Мяч (иначе говоря, планета), который вы бросите прямо в такой системе (то есть на карусели), не полетит по прямой, а начнет сворачивать. Сложив постоянно действующие силы тяготения и силы Кориолиса, в дополнение к двум большим углублениям в эластичном листе вы получите еще два поменьше — на 60° впереди и позади планеты. Они известны как троянские точки L_4 и L_5 . В этой вращающейся системе отсчета есть и еще три точки равновесия, но они являются не углублениями, а скорее плато и перевалами: L_1 , L_2 и L_3 (все пять вместе называются точками Лагранжа).

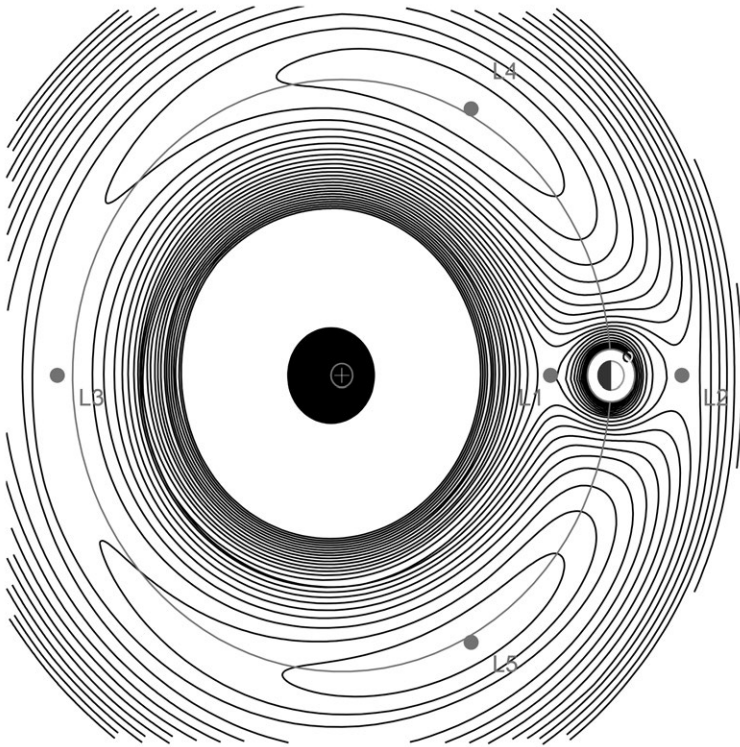
В троянских точках скапливается вещество, хотя это может быть и временным явлением. У Юпитера мы обнаружили уже 7000 троянских астероидов. У Марса есть несколько штук, в основном в точке L_5 . У Нептуна их тоже несколько, в основном впереди планеты, в L_4 . У Земли имеется только один известный троянский астероид диаметром в несколько сотен метров. У Венеры он тоже один, причем находится на сильно петляющей «орбите-головастике»,

возможно нестабильной. Малое количество троянцев у Венеры и Земли свидетельствует... о чем-то.

Троянские точки могут обеспечивать малым телам определенную защиту. Астероиды и кометы, которые оказываются на орбите, отстоящей от Солнца примерно на 5 а. е., скорее всего, врежутся в Юпитер или будут выброшены из системы, если только не окажутся захваченными как троянцы и не поселятся в некоем бермудском треугольнике, ограниченном сильными динамическими потоками. Троянские астероиды Юпитера стали целью предстоящего полета американского космического аппарата «Люси». Главный научный вопрос этой экспедиции — являются ли эти астероиды первоначальными деталями, оставшимися от формирования Юпитера, или они были захвачены гораздо позже. В любом случае они представляют собой кладезь информации о том, как возникли наши планеты⁶².

Это возвращает нас к образованию Луны. Представим себе Землю и эту тяжелую Протолуну, которая сформировалась примерно в трех земных радиусах от нее. Нарисуем для них такую же вращающуюся диаграмму, разместив Землю в центре, а Протолуну — справа (там, где раньше был Юпитер). Протолуна находится очень близко к Земле и составляет одну сотую от ее массы, так что троянские точки L_4 и L_5 , два дополнительных углубления, будут достаточно заметными. Так начинается история о двух лунах.

Формирование Земли уже завершилось, но она представляет собой бурлящий хаос, тогда как Луна быстро собирается из протолунного диска. Маленькие тела попадают в ловушку около троянских точек системы Земля — Луна. Сатурн, будучи единственной планетой, в системе которой на сегодняшний момент есть троянские спутники, дает нам примеры того, что могло происходить. Калипсо и Телесто в два раза различаются по массе и делят свою орбиту с Тетисом.



Спутник, который обращается вокруг планеты, меняет ее гравитационное поле. Изображая спутник справа, вы должны учесть силы Кориолиса. Когда вы это сделаете, силовые линии постоянного потенциала пролягут так, как на рисунке; они выглядят как линии обычного гравитационного поля, за исключением минимумов в троянских точках (L_4 и L_5 , сверху и снизу), где может происходить захват вещества, обращающегося по орбите спутника. Есть и другие точки Лагранжа, например L_1 между двумя телами и L_2 сразу за спутником.

Erik Asphaug, gnuplot

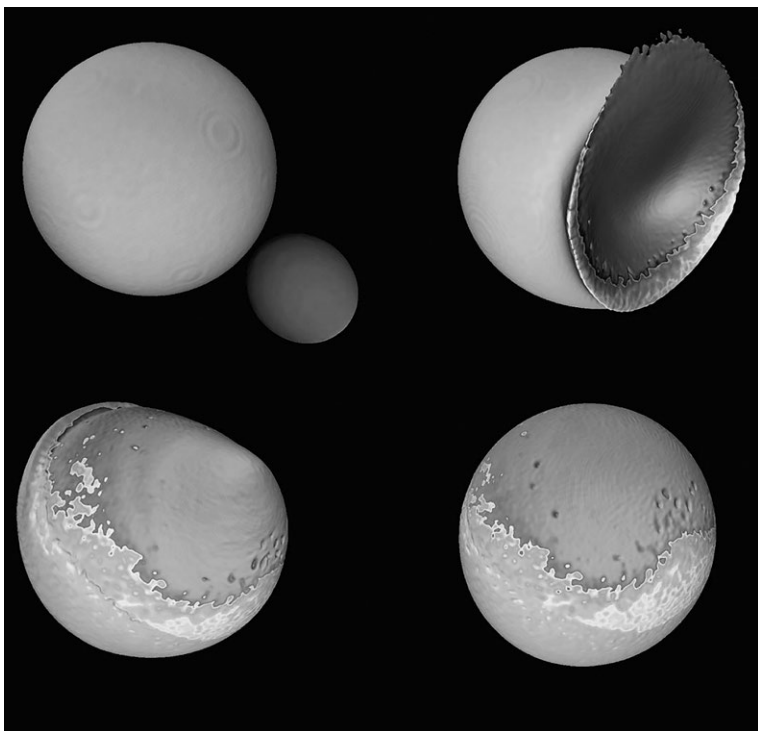
Елена и Полидевк различаются по массе в 2000 раз и делят орбиту с Дионой. Если судить по этим данным, троянские спутники на орбите Луны могли отличаться по массе в 10–100 раз. Что важно, они должны были образоваться из того же материала, что и Луна, но совсем без железа.

Этот сценарий с двумя лунами основан на вполне вероятных исходах гигантских столкновений, но нам все равно нужно было задать некоторые параметры. Диаметр первого троянского спутника должен составлять примерно треть от диаметра Луны (соотношение масс 1 к 30), чтобы соответствовать дополнительному слою коры на обратной стороне, а второй, скорее всего, был во много раз меньше⁶³ и, возможно, оказался уничтожен градом обломков гигантских столкновений, который обрушился на систему Земля — Луна за следующий миллион лет. В любом случае этот спутник имеет гораздо меньшее геологическое значение. Через десяток миллионов лет более крупный спутник на своем месте и уже затвердел. Рука об руку с Луной троянцы мигрируют все дальше от Земли, пока в один прекрасный день не оказываются слишком далеко от нее и не выходят из своего транса.

Несколько дней спустя Мартин получил результаты компьютерного моделирования в низком разрешении и показал мне что-то вроде того, что изображено ниже, если не считать нескольких незначительных изменений. Мы не могли и предположить, что эти данные обретут такую популярность, что они будут опубликованы как в местных газетах наших родных городов, так и в печатных изданиях по всему миру; тогда мы просто в свое удовольствие пытались что-то понять. Рассматривая результат, мы вспоминали наши модели кометных нашествий, в том смысле, что трение, судя по всему, удерживало тела вместе. Но из-за больших масс и значительных скоростей этого лунного столкновения ударяющее тело сплюснулось до состояния блина. Что куда важнее, *оно осталось в своем кратере!* Это напоминало аварию-гармошку из миллиарда автомобилей.

Наша идея теперь превратилась в гипотезу, так что мы могли более тщательно поразмыслить над тем, как ее проверить, как бросить ей вызов. Самое неприятное — это попытаться опубликовать нечто, что в итоге окажется очевидно неверным, так что сначала надо попробовать доказать, что твое утверждение ложно. Наша идея хорошо работала только потому, что мы задали низкую скорость столкновения. Более быстрое соударение привело бы к более глубокому проникновению, в результате чего получилась бы не нашлепка, а ударный бассейн, вроде бассейна Южный Полюс — Эйткен. Это исключало из рассмотрения кометы и астероиды. Ударяющим телом тут мог быть только другой спутник Земли, поскольку что-либо, не принадлежащее системе Земля — Луна, летело бы со скоростью 10–20 км/с⁶⁴. Возможно ли такое? Нам нравилась гипотеза с троянским спутником, потому что его стабильная орбита разрушилась бы, как детонатор у бомбы с часовым механизмом, через 10 млн лет после того, как Луна начала отдаляться от Земли.

Если вы смогли разместить предполагаемые события на шкале времени, вы уже на полпути к успеху в разработке своей гипотезы. Чтобы объяснить геологическую картину, предполагаемое столкновение троянского спутника с Луной должно было произойти после того, как оба тела в достаточной степени затвердели. Согласно моделям охлаждения, на это потребовалось от 1 до 10 млн лет. Тут гипотеза прекрасно работала, потому что, согласно приливной модели, через 10 млн лет лунная орбита должна была расшириться где-то до 20 земных радиусов — именно в этот момент очертания потенциальной «поверхности Лапласа» начинают определяться влиянием Солнца, а не Земли. «Углубления» в эластичном листе становятся менее заметными, и троянские спутники отправляются в свободное плавание.



Четыре стадии ударного события, сформировавшего, по Ютци и Асфогу (Jutzi and Asphaug, 2011), нагорья на обратной стороне Луны: первоначальный контакт, а также ситуация через 0,6, 1,4 и 2,8 часа. Ударяющее тело диаметром 1200 км, разумеется, создает кратер, но затем переполняет его. Самые светлые материалы соответствуют океану жидкой магмы под твердой корой, который выдавливается на видимую сторону Луны, внося свой вклад в аномалию KREEP.

Martin Jutzi, University of Bern, Switzerland

Позже в тот же день Мартин сравнил смоделированную нами топографию с реальной топографией Луны; наши данные соответствовали очертаниям бугра каменистых нагорий так же точно, как и модель застывшего приливного воздействия, но нам не нужно было объяснять отсутствие такого же бугра на видимой стороне Луны. Ого! Оно сработало!

До этого мы не задумывались об астрофизике, геофизике или небесной динамике, но теперь нам пришлось ими заняться⁶⁵.

Это были расчеты совершенно нового типа — медленное столкновение огромных твердых планет с внутренним трением, — так что нам нужно было проверить наши результаты. Мы уже несколько лет тестировали эту программу на предмет соответствия элементарной физике пористости, сдавливания, трения и дробления, поэтому наши модели казались нам достоверными — до определенной степени. Но теперь мы явно вышли за рамки лаборатории. Нам было нужно что-то, с чем это сравнивать, какая-то точка отсчета. У нас были проверенные временем правила масштабирования кратерообразования, которые работают для плоских, полубесконечных планет; если применить их к Луне, тело диаметром 1300 км, ударившее со скоростью 2,4 км/с, должно было вытеснить всего одну пятую своего объема⁶⁶. Это согласуется с нашими результатами: ударяющее тело переполняет собственный кратер.

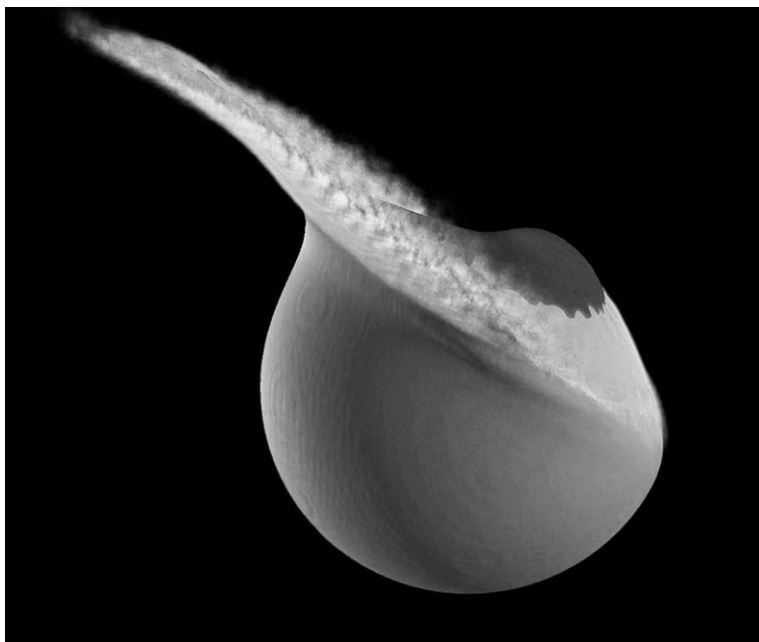
Ободренные таким простейшим подтверждением, мы решили сделать картинку более реалистичной, повысив разрешение в три раза, что потребовало гораздо более долгой работы компьютера. В последний момент, как раз перед тем, как запустить программу, Мартину пришла в голову мысль добавить под твердую кору толщиной 30 км 10-километровый слой густого расплавленного вещества, соответствующий глубокому остаточному океану магмы — слою KREEP. По физическим свойствам он не слишком отличался — те же материалы, только горячее, — но придавал всей истории очень важный поворот. Слой KREEP широко распространен на видимой стороне и почти отсутствует на обратной. Высокая концентрация в нем радиоактивных элементов, в том числе урана и тория, считается причиной относительно

позднего разогрева магмы, заливавшей лунные моря. Меньшую луну мы сделали из того же материала, что и основная масса лунной мантии, только немного менее плотного, поскольку его не так сильно сдавливает гравитация.

Выбор свойств обоих тел и исходных параметров столкновения — очень ответственное решение. Суперкомпьютеры требуют не только времени, которое уходит на то, чтобы дожидаться ответа (от нескольких недель до нескольких месяцев), но и денег (один расчет может стоить десятки тысяч долларов). Уже потратив и деньги, и время, вы можете оказаться пленником своей гипотезы: коготок увяз — всей птичке пропасть. Вдобавок, начав рисовать красивую графику, автор может влюбиться в свое творение и потерять объективность. На обсчет нашей модели в высоком разрешении ушло десять дней. Мы не ожидали, что результат будет значительно отличаться от предварительного, и поэтому, пока компьютер корпел над цифрами, начали готовить черновик статьи и обдумывать динамические аспекты сценария с троянскими спутниками.

Но новые данные моделирования, которые учитывали наличие слоя KREEP, преподнесли неожиданный сюрприз: наша нашлапка выдавила этот слой, как будто вы ударили кулаком по вишневому пирогу, и вся его начинка перетекла в другое полушарие. Поскольку в слое KREEP содержатся источники радиоактивного разогрева, такая его локализация может объяснить, почему крупные вулканические затопления происходили только на видимой стороне Луны с ее районами высокой теплоотдачи и молодыми морями. Что же касается обратной стороны, она с точки зрения геологии стала мертвой, словно вы бросили лопату холодного грунта на тлеющие угли костра.

Наша гипотеза была выдвинута, чтобы объяснить, почему кора на обратной стороне Луны в два раза толще,



Спустя несколько сотен секунд после начала постулированного гипотезой о двух лунах столкновения троянская луна превращается в полушарную нащепку на поверхности Луны.

Martin Jutzi, University of Bern, Switzerland

но заодно объяснила и отсутствие там слоя KREEP, и дихотомию лунной геологической активности. К несчастью, она смогла пройти через проверки, бросающие ей прямой вызов. Одной гравитации оказалось тут недостаточно.

Нагорья на обратной стороне Луны, насколько мы можем судить, состоят практически из того же материала, что и нагорья на видимой стороне. Хотя мы никогда не брали образцы с обратной стороны напрямую⁶⁷, примерно половина (чисто статистически) из сотен имеющихся у нас лунных метеоритов прилетела именно оттуда, но отличить их мы никак не можем. Поскольку троянский спутник сформировался из того же протолунного диска, что и Луна, его

состав никак не поможет нам при проверке — он затвердел из океана магмы, состоящего из аналогичного материала, только под много меньшим внутренним давлением. Итогом стало бы очень похожее на Луну распределение горных пород с относительно плотными, богатыми оливином внутренними областями и богатой плагиоклазом корой — мини-Луна без ядра.

Хотя мы не включили этого в нашу модель, богатые оливином внутренние области спутника диаметром 1300 км в итоге оказались бы расплюснутыми внутри блина и в готовой нашлепке превратились бы в оливиновый слой на глубине примерно 10 км под поверхностью обратной стороны Луны. (Но никакого железа — все оно было бы собрано в ядро самой Луны на начальном этапе аккреции.) На Луне есть множество странных и необъяснимых обнажений оливина — четче всего их картировал японский орбитальный аппарат «Кагуя». Этот факт согласуется с наличием относительно неглубоко залегающего слоя оливина, выходящего на поверхность при столкновениях с небесными телами типа Чикшубского метеорита. Наша модель также предсказывает, что сколько-то обнажений оливина найдется вдоль границы видимой и обратной сторон (то есть в районе лунного лимба), хотя 4,4 млрд лет спустя они будут плохо различимы.

Другой способ проверить нашу гипотезу дает геофизика. Если опираться на результаты лабораторных экспериментов с образцами горных пород, столкновение на скорости 2 км/с происходит слишком медленно, чтобы возникла мощная ударная волна⁶⁸. Но оно достаточно сильно, чтобы вызвать огромные разрушения. Наша модель предсказывает, что там, где исходная поверхность троянского спутника наконец затормозила о поверхность первоначальной Луны, должна была образоваться плоскостная *зона сдвига*. Эта область контакта должна была подвергнуться

интенсивному сдавливанию и деформации, что создало бы десятки или даже сотни метров расплавленных трением пород, погребенных на глубине от 30 до 40 км. Такой слой, если он существует, должен четко фиксироваться по данным сейсморазведки, и я надеюсь, что у нас скоро появится возможность доказать ошибочность нашей идеи!

МИЛЛИАРД ЗЕМЕЛЬ

Ветвящаяся структура планетной аккреции напоминает дерево. Самые маленькие планетезимали — это листья, а более крупные, состоящие из тех, — черенки. Планетные эмбрионы размером с Тейю — это ветви, ведущие к стволу, то есть к планете. Вместо того чтобы рассматривать в деталях конкретные траектории, которые привели нас к нынешнему положению вещей, давайте подумаем о более общих вопросах и прибегнем для этого к дальнейшим аналогиям.

Как бы ни происходила их аккреция, крупные планетные тела менее подвержены катастрофическому разрушению, чем мелкие; это интуитивно понятно. Их гравитация куда выше, и у них куда больше масса, которую нужно отбить. Моделирование последовательности столкновений показывает, что астероиды крупнее примерно 200 км в диаметре, видимо, представляют собой относительно неповрежденные продукты процесса планетообразования: они настолько массивны, что столкновения, энергии которых будет достаточно, чтобы их разрушить, маловероятны. Крупные астероиды, такие как Психея, которую в 2026 г. должен посетить

одноименный космический аппарат NASA, застыли во времени и в этом отношении напоминают Луну — это объекты, на которые в течение миллиардов лет обрушивается град небесных тел, но ни одно из них не велико настолько, чтобы полностью их разрушить.

Согласно расчетам, астероиды диаметром менее 100 км, напротив, с огромной вероятностью подвергаются катастрофическому разрушению в результате столкновения. На раннем этапе их было так много, что столкновения с ними происходили часто, а разрушить такие астероиды поменьше куда проще. Таким образом, тут существует переломный момент, определяемый тем, как далеко тело продвинулось в процессе планетообразования: в зависимости от своего размера оно склонно либо становиться больше, добиваясь дальнейшего успеха, либо становиться меньше, подвергаясь эрозии и разлетаясь на части. В наше время Главный пояс астероидов медленно сходит на нет, столкновение за столкновением, но 4,56 млрд лет назад в этом же районе мелкие тела непрерывно росли, поглощая друг друга.

Что касается астероидов диаметром менее 100 км, они считаются результатом *ударного измельчения* — процесса образования бесчисленных десятиметровых тел, миллиардов стометровых и миллионов километровых в ходе разрушения горных пород. Эту ситуацию можно смоделировать экспериментально, если поместить в дробилку крупные камни и включить ее. Сначала образуется масса пыли — это разрушаются самые мягкие из камней. В конечном итоге пылью станет все, но на промежуточном этапе основная часть материала окажется сосредоточенной в нескольких крупных фрагментах. Сегодня планеты отошли в сторону — «дробилка» работает с куда меньшей мощностью, — и масса Главного пояса сосредоточена в основном в нескольких крупных астероидах, а более мелкие тела медленно разрушают друг друга.

Половина массы сегодняшних астероидов приходится на четыре тела, которые иногда еще называют *карликовыми планетами*. Это Веста, Церера, Паллада и Гигея*, каждая диаметром от 400 до 1000 км. Это не особенно удивительно: скажем, половина суммарной массы землеподобных планет приходится на одно тело — Землю. Как мы уже видели, аккреция создает распределение масс с сильным сдвигом в верхнюю часть диапазона. Веста, Церера и прочие тяжело-весы, как я полагаю, являются первоначальными продуктами аккреции или их непосредственными остатками. Дальше идут десятки астероидов диаметром в несколько сотен километров (некоторые из них могут быть первичными), сотни тел вполтину меньше и так далее. Распределение размеров представляет собой геометрическую прогрессию, где на каждый астероид приходится несколько более мелких, примерно в одну десятую от его массы¹. Это похоже на то, что происходит с глиняной мишенью для стрельбы: при попадании пули она распадается на несколько узнаваемых кусков, которые можно собрать воедино (в нашем случае это соответствует семейству астероидов), десяток осколков, сотни кусочков, тысячи крошек и, наконец, пыль.

Этой иерархии дробления может соответствовать иерархия поверхностных и околоповерхностных зон, меняющихся в результате взаимодействия со всеми этими притягивающимися друг к другу обломками. Выше всего находится оптическая поверхность — наружный микрон толщины, отражающий и преломляющий солнечный свет в объектив камеры. Именно его показывает нам фотография. Но о том, что находится под этим микронным слоем, камера не знает ничего. Далее следует термическая поверхность — зона, в которой

* Из них только Церера относится к группе планет-карликов в понимании Международного астрономического союза. — *Прим. науч. ред.*

ощущается присутствие солнечного тепла. Она простирается вглубь на сантиметр, если брать масштаб дней, и на несколько метров — в масштабе лет. Под годовым термическим слоем мы устраиваем погреба для картошки и винные подвалы, а под дневным термическим слоем вы прячете на пляже пальцы ног, чтобы отдохнуть от раскаленного песка.

Под оптической и термической поверхностями находится подповерхностный слой — зона, которая сообщается с внешней атмосферой или, если таковая отсутствует, с космической радиацией. На планетах с атмосферой в подповерхностном слое происходит адсорбция почвой воды (пара и жидкости) и обмен водой с воздухом. На Земле в нем сосредоточена большая часть биомассы. На безвоздушном теле, таком как комета, подповерхностный слой охватывает те области, где льды из летучих веществ² испускают газ в виде реактивных струй и хвостов. На Марсе этот слой включает метры верхнего реголита, которые вбирают в себя попеременно то H_2O , то CO_2 , а потом испускают их со сменой сезонов. На спутнике Нептуна Тритоне в подповерхностном слое находятся источники азотных гейзеров, которые зафиксировал во время своего пролета космический аппарат «Вояджер».

Изучая первичные продукты начального этапа планетообразования (например, Психею, Весту или Цереру), а также разрушенные фрагменты (более мелкие астероиды и кометы), мы надеемся воссоздать некоторые из первых «глиняных мишеней». Но теперь представьте, что вам дали случайную коробку, где находится только доля одного процента обломков. Какую историю вы сможете угадать? Какая мишень у вас получится? Вероятно, поначалу астероидов всех размеров было в тысячи раз больше, так что почти все нынешние детали относятся к давно исчезнувшим головам.

Для астероидов диаметром менее 100 км разрушение — это творение. Каждый из них возник в процессе распада более крупного родительского тела, так что их образование происходит иерархически: распад тяжеловеса приводит к каскаду фрагментов. Для тел размером более 1000 км, напротив, творение — это аккреция. Столкновения ведут к слияниям, эмбрионы превращаются в олигархи, а затем — в планеты. Этот процесс тоже является иерархическим, но развивается снизу-вверх, как дерево. Как это организовано на деле, нам непонятно, поэтому так важны грядущие экспедиции NASA к астероидам среднего размера, таким как Психея и Патрокл³, которые находятся примерно на грани между этими двумя группами.

Из-за того, что аккреция происходила иерархично, мы не можем определить точное время образования Земли. Можно сказать, сколько время прошло с момента t_0 до отделения земного ядра от мантии⁴, но это нижний предел того, как долго шло формирование Земли, поскольку железо могло отделиться и внутри более мелких эмбрионов, из которых она возникла. А образование Луны, вероятно, произошло примерно через 50 млн лет после *этого*, что согласуется с тем, что это был один из последних актов аккреции олигарха.

С точки зрения геологии после столкновения с Тейей Земля стала совершенно новой, «с иголочки», планетой, результатом вторичной переработки всех своих старых составляющих, хотя в науке по-прежнему кипят споры по поводу того, насколько хорошо все было перемешано и не осталось ли «где-то внизу», в мантии, больших кусков Тейи, сохранивших свой состав. Это зависит от энергетики столкновения и конкретного сценария образования Луны: гигантское столкновение с большой энергией расплавало бы все вокруг, нажав на кнопку геологической перезагрузки, а плавное

слияние могло сохранить остатки Тейи как отдельные слои в глубине Земли.

Как только земная кора затвердела после гигантского столкновения, приведшего к образованию Луны, на планете началась геология. Первое время все менялось слишком быстро, чтобы мы могли это отследить, но затем покрытая корой малоподвижная мантия сгустилась — как овсянка в печи. Крупные тела продолжали сталкиваться с Землей и иногда разрушали эту древнюю кору, так что в ее истории было множество фальстартов. В отличие от массивной Земли, которая оставалась отчасти расплавленной, Луна, согласно данным термального моделирования⁵, полностью затвердела в течение 10 млн лет. Парадоксальным образом чем больше Луна подвергалась бомбардировкам на стадии тонкой коры, тем *быстрее* она остывала; каждый удар частично вскрывал кору, обнажал океан магмы и перемешивал кашу, ускоряя потерю тепла. В таком случае Луна — за исключением слоя KREEP с его радиоактивным разогревом — могла затвердеть всего за миллион лет⁶.

Геологи не работают с линейной шкалой времени, за исключением тех случаев, когда им приходится это делать, — при условии, что они могут разместить события *во* времени. Так, с момента появления прорывных работ Юджина Шумейкера мы работали над тем, чтобы скоординировать геологическое время (число, привязанное к каким-либо событиям) по всей Солнечной системе, выискивая для этого доказательства и улики. Очевидное место, с которого стоит начать установление этих связей, находится у нас на заднем дворе, на «седьмом континенте» Луне. Поскольку Луна так быстро утратила способность к изменяющей все геологии, именно там мы можем найти лучше всего сохранившиеся свидетельства злоключений, через которые Земля проходила вскоре после своего формирования.

Нектарский и раннеимбрийский периоды на Луне, от 3,5 до 4 млрд лет назад, совпали с первым цветением жизни на Земле. Гигантские бомбардировки происходили и там, и, хотя возникшие в результате ударные бассейны исчезали и менялись из-за геологических процессов, при их образовании в космос было выброшено огромное количество материала коры. Точно так же, как на Землю падают метеориты, извергнутые с Луны, наш спутник подвергался бомбардировке земными камнями. Там они смешивались с лунным реголитом — и мелкие обломки пород, и песчинки, и огромные валуны. Они прилетали в то время, когда на Земле зарождалась и расцветала жизнь, и у большинства из них относительная скорость составляла падающие 2–3 км/с, немного выше лунной скорости убегания. Надежды на то, что земные организмы могли прижиться на Луне, мало, но там могли сохраниться следы первоначальной жизни.

Циркон, как вы, возможно, помните, — высокотемпературный силикатный минерал, лабораторный анализ которого позволяет провести радиометрическое датирование и установить давление и температуру в момент его образования. На Земле циркон рассказывает нам о катархее, и в особенности о циклах древнего планетного вулканизма и об условиях того времени, например о концентрации в атмосфере молекулярного кислорода, которая связана с присутствием или отсутствием воды⁷. Цирконы были обнаружены и в лунных образцах, и большинство из них, если судить по их химии, имеют лунное происхождение. Но образец 14321, доставленный «Аполлоном-14», возможно, происходит с Земли. В обломках кварца и полевого шпата из этой породы содержится и циркон, кристаллизовавшийся 4 млрд лет назад при окислительных условиях⁸, температурах и давлениях, очень отличающихся от условий образования других лунных цирконов и более типичных для богатой

жидкостью низкотемпературной среды вроде той, что имела под ранней континентальной корой Земли.

И это только вершина айсберга. Где-то под подошвами астронавтов валялись и более крупные обломки более интересных, лучше сохранившихся катархейских материалов, только и ждущие, пока их найдут — прямо настоящая программа по доставке образцов сквозь пространство и время. Но поиск земных камней на Луне по определению бессистемен. Это задача для робота, который, не ведая скуки, будет годами собирать и сортировать камни. Метеориты могут быть где угодно, как фотографии на антресолях у вашей бабушки⁹, пыльные реликты эпохи, о которой вы ничего не знаете. Но эти коробки нужно начать открывать.

Мы немного отвлеклись от темы разнообразия планет. В связи с ней я люблю цитировать знаменитую фразу Льва Толстого, которой он начинает свой роман «Анна Каренина»: «Все счастливые семьи похожи друг на друга, каждая несчастливая семья несчастлива по-своему». Специалисты по статистике слегка расширили это утверждение, назвав его принципом Анны Карениной: если отсутствие любого из нескольких факторов приводит к провалу, успех требует, чтобы все эти факторы имелись в наличии одновременно. Приложив этот принцип к нашей теме, можно сказать: «Все прошедшие аккрецию планеты похожи друг на друга, но каждая не прошедшая аккрецию планета уникальна в том, как именно она не прошла аккрецию». Что такое не прошедшая аккрецию планета? Реальный пример тут — Меркурий; реальные примерчики — невероятно разные астероиды Главного пояса. Все они представляют собой то, что осталось, когда победители — прошедшие аккрецию планеты — забрали себе практически все.

Согласно принципу Анны Карениной, планетный эмбрион может иметь любое количество встреч самого разного типа с более крупными планетами, при условии, что при каждой встрече он избегает аккреции. Альтернативный вариант — он никогда не встретился с более крупной планетой, которая поглотила бы его, либо потому, что сам является самой крупной планетой в округе, либо потому, что его орбита динамически изолирована. Солнце поглотило более 99,8% массы Солнечной системы, а Юпитер — более 70% того, что осталось, так что в этом смысле каждой из планет повезло. Любому объекту в зоне землеподобных планет понадобилось еще больше удачи, чтобы не быть поглощенным Землей или Венерой, которые собрали 93% того, что там было. Марс, Меркурий, Луна и астероиды составляют только 7% общей массы, так что, когда вы смотрите на эти объекты, вы должны изумляться, как маловероятно то, что они вообще существуют.

В Главном поясе самые крупные астероиды вроде Весты, Цереры и Психеи так не похожи друг на друга, как это только возможно, — каменные миры, ледяные миры, металлические миры. Если они сформировались в одном регионе Солнечной системы и, пожирая планетезимали, доросли до того, что стали самыми большими, не следует ли ожидать, что между ними будет, по крайней мере, что-то общее? Если же каждый из них был просто удачливее других, как несколько уцелевших солдат в аналогии, которую я приводил выше, они будут разными, но тогда подразумевается, что в Главном поясе имела крупная планета, поглотившая *почти* все тела, — почти все, кроме этих последних выживших. А где же эта планета? Она исчезла.

Меркурий, возможно, является самым ярким примером уцелевшего солдата, который избежал аккреции Землей или Венерой. Космический аппарат, изучавший тяготение

Меркурия, определил, что его железное ядро занимает $4/5$ радиуса планеты; силикатная кора и мантия лежат поверх него, словно глазурь на торте. Ядра других землеподобных планет (Земли, Марса и Венеры — Луна является еще одним странным исключением) составляют только половину их радиуса, примерно 30% массы. Как же Меркурий потерял почти всю свою состоящую из горных пород мантию? Можно предположить разрушение Протомеркурия, как это сделал швейцарский астрофизик Вилли Бенц¹⁰, один из зачинателей теории гигантских столкновений, но это приводит к проблеме: Меркурий, обращаясь вокруг Солнца, сгребет почти всю свою мантию в ходе быстрой обратной аккреции. К тому же это лишит его всех летучих компонентов.

Однажды в аспирантуре я осваивал код моделирования Бенца и просто для развлечения задал параметры столкновения двух дифференцированных астероидов размером с Весту, происходящего со скоростью, вдвое превышающую их скорость убегания, — несколько сотен метров в секунду. Соударение проходило по типу «оставления места происшествия». Я запомнил, как это было красиво: две планеты, сначала целые, а потом лишаящиеся своих разлетающихся по спирали мантий. Позднее, когда я вместе с астрофизиком Робин Кэнап работал над проблемой образования Луны, мы имитировали столкновение Тейи с Землей, и я удивлялся, как многие из наших Тей продолжают свой путь, потрепанные, но вполне узнаваемые. Но эти варианты не давали нам массивного протолунного диска, так что мы на них не задерживались¹¹.

Я часто вспоминал обо всех этих утраченных Тейях. Наша наука следует за экспедициями и крупными приборами, так что в 2011 г. планета Меркурий была самой большой загадкой на всех конференциях. Космический аппарат «Мессенджер» слал нам фантастические наборы данных,

превращая едва различимую черно-белую планетку в неправдоподобно богатые красками изображения, которые с высоким разрешением отражали на картах самые разные характеристики в красных, зеленых и синих тонах. (В видимом диапазоне Меркурий кажется человеческому глазу серым.) Самой большой загадкой были явные свидетельства наличия на поверхности и внутри Меркурия летучих компонентов: сложные «пустоты» в коре, где имеются огромные уступы с признаками обратной эрозии, подземные льды в постоянно затененных районах, а также обнаружение в его породах гораздо большей, чем на Луне, концентрации полуметаллического элемента калия. На этой горячей, лишенной воздуха планете, которая, как считалось, возникла на свет в некоем гигантском столкновении, по общему мнению, не должно было быть ничего летучего.

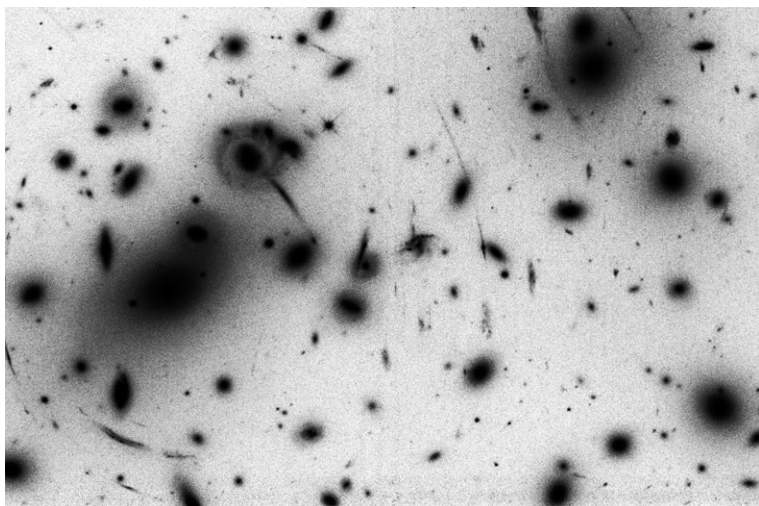
Но что, если Меркурий появился не в результате гигантского удара чего-то, а из-за того, что сам врезался во что-то, как одна из тех Тей, которые продолжили свой путь? Луна — побочный продукт гигантского столкновения, и в итоге на ней очень мало летучих веществ, но при столкновении с оставлением места происшествия все идет по-другому: сила тяготения более крупной планеты помогает удалить мантию менее крупной, так что я заинтересовался этой возможностью. Содрать с планеты половину мантии — дело непростое. Перед столкновением с чем-то крупным породы в глубине Протомеркурия должны находиться под огромным давлением; после столкновения с оставлением места происшествия внутренние области подвергаются декомпрессии и там могут наблюдаться все варианты вулканической геохимии, дегазирования и сверхбыстрого охлаждения.

С этой теорией имелись проблемы. Прежде всего, это на первый взгляд низкая вероятность такого события. Если вы столкнете Протомеркурий с Протоземлей

или Протовенерой (пусть это будет Венера), он, скорее всего, врежется в нее снова. Если бы он в конце концов был поглощен Венерой, что, пожалуй, кажется весьма вероятным, тогда Меркурий исчез бы и мы бы о нем сейчас не говорили. Но если он ударился и продолжил свой путь — столкновение с оставлением места происхождения, — тогда он оказался бы одной из тех акул чуть поменьше, которым снова и снова удавалось убежать. Как бы это ни было маловероятно, Меркурий на месте.

Но на самом деле это не так уж маловероятно — это лишь достаточно неправдоподобно, чтобы объяснить странную геологию Меркурия. Основываясь на наших моделях, столкновения с оставлением места происхождения происходят в половине случаев, когда тело размером с Протомеркурий ударяется о тело размером с Венеру. Так что Меркурию могло повезти раз, два, может быть, даже три, пока он не пришел в себя и не перестал сталкиваться с планетами. (В конце концов, все когда-нибудь стабилизируется.) Это как выбросить решку три раза подряд: вероятность того, что так и будет — $\frac{1}{8}$ ($\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$). Поскольку Протоземля и Протовенера возникли из восьми (или большего числа) других, менее удачливых Протомеркуриев, только одному из них должно было повезти, так что на самом деле существование одной планеты вроде Меркурия *вполне вероятно*.

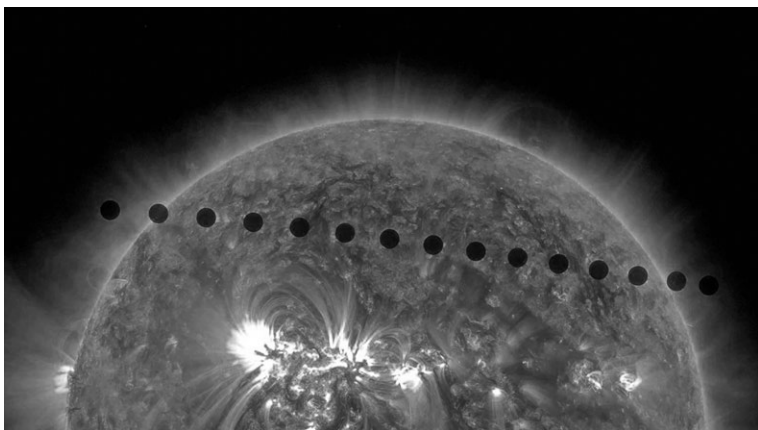
Марс мог выжить другим способом. Вместо оставления места происхождения при повторяющихся столкновениях с более крупной планетой, Марс, возможно, имел опасные сближения, но ни разу не столкнулся с таким тяжеловесом, соударяясь только с телами меньшего размера. Не исключено, что он был динамически изолирован, а может, ему повезло. Тут есть искушение приукрасить эту историю дополнительными деталями — мол, именно поэтому Венера



Скопление галактик Abell 2218 так массивно, что его тяготение искривляет свет от более отдаленных галактик, создавая эффект космического линзирования. (Для черно-белой передачи цветного изображения я использовал старомодный прием перевода в негатив, что позволяет лучше рассмотреть определенные детали.)

NASA/HST/A. Fruchter

так отличается от Земли и так далее. Однако хаос и осторожность учат нас что этого не стоит делать, пока в нашем распоряжении не будет образцов с Венеры. Но эта гипотеза позволяет сделать предсказания, которые в конце концов могут быть проверены: самые крупные планеты в системе должны расти, пока в итоге не будут иметь примерно одинаковый химический состав, тогда как следующие по размеру планеты должны в результате сильно отличаться по составу. Если вы копнете грунт на Венере и на Земле, взяв по пробирке и там и там, вам будет трудно разобраться, где какой образец. Но с Меркурием, Марсом и Луной такой проблемы возникнуть не должно, как и с Вестой, Церерой и Психеей.

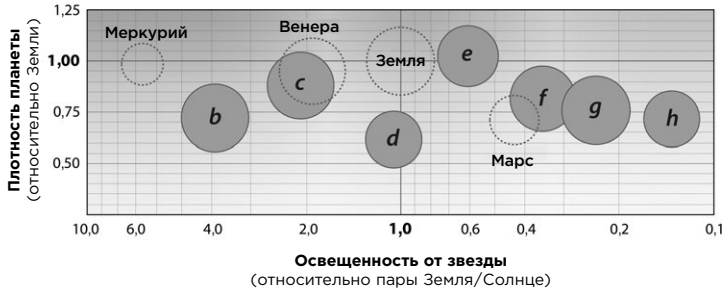


Коллаж фотографий прохождения Венеры, полученных в дальней ультрафиолетовой области спектра космическим аппаратом «Обсерватория солнечной динамики» NASA 5 июня 2012 г. Такие прохождения могут фиксироваться астрономами, живущими на расстоянии нескольких сотен световых лет, при условии, что их телескопы располагаются в плоскости солнечной эклиптики.

NASA/Goddard/SDO

Мы привыкли слышать, что Солнце — средняя звезда. Но это не совсем верно: самые распространенные звезды — красные карлики — гораздо меньше. Они достаточно велики (в десятки раз больше Юпитера по массе), чтобы поддерживать термоядерный синтез в своем ядре, но достаточно малы, чтобы не давать так много света и тепла. Поэтому их и трудно обнаружить. На самом деле вполне вероятно, что ближайшая к нам звезда — это вовсе не Проксима Центавра, а какой-то неизвестный нам пока красный карлик.

Если бы вы были планетой, которая хочет породить жизнь, обращаясь вокруг такой звезды, вам стоило бы находиться поближе к огню, то есть обращаться на расстоянии нескольких сотых астрономической единицы. Это делает красные карлики отличными местами для охоты за обитаемыми планетами: таких звезд много, а пригодные для жизни



Характеристики семи известных экзопланет системы TRAPPIST-1 (обозначенных буквами от *b* до *h*) по сравнению с землеподобными планетами (Меркурием, Венерой, Землей и Марсом). Предполагаемая объемная плотность каждой (то есть ее состав — металлы, горные породы или вода) нанесена на график в зависимости от количества света, которую планета получает от материнской звезды. Относительные размеры планет обозначены радиусом кругов. Массы и плотности планет системы TRAPPIST-1 были оценены по небольшим вариациям в периодичности их обращения при продолжительных наблюдениях с помощью космических телескопов NASA «Спитцер» и «Кеплер» в сочетании с данными, полученными от космического телескопа «Хаббл» и ряда наземных телескопов, с последующим сравнением результатов этих замеров с теоретическими моделями. Оценки предполагают, что планеты с более низкой плотностью могут быть богатыми водой.

NASA/JPL/Spitzer Space Telescope

планеты обращаются к ним так близко, что при правильных геометрических условиях мы можем увидеть, как они то и дело затмевают свет звезды. Все, что нам нужно, — смотреть, смотреть и смотреть на множество таких звезд, потому что нам должно повезти находиться в плоскости эклиптики звездной системы, чтобы зафиксировать на звезде тень, едва уловимое уменьшение силы ее света, когда перед ней пролетает планета. Такое явление мы называем прохождением или транзитом.

Несколько лет назад команда бельгийских и китайских астрономов направила скромный 61-сантиметровый телескоп на несколько близких «ультрахолодных красных карликов» в надежде обнаружить систему планет. Охота была

очень успешной. Первая из их находок, планетная система, которую астрономы назвали TRAPPIST-1¹², — это настоящая сокровищница с семьёю планетами. По количеству света, которое каждая планета задерживает во время прохождения, мы знаем, что по размеру все они сравнимы с Землей. Пять из этих планет примерно земного типа обращаются в пределах вероятной зоны обитаемости своей звезды, то есть на их поверхности может иметься жидкая вода. Таким образом, эта система теперь занимает верхнюю строчку в списке объектов, где нам стоит искать инопланетную жизнь.

Данные, собранные по системе TRAPPIST-1, представляют собой просто набор точек, так что позвольте мне объяснить, что они означают. Мы не можем напрямую наблюдать эти планеты даже в самые мощные телескопы, но их планетная система обращена к нам ребром, так что каждая из планет проходит для нас перед своим солнцем один раз за свой год. Для самой дальней планеты такой год составляет всего 12 земных дней, а для самой ближней к звезде — полтора земных дня, потому что их орбиты расположены очень близко к маленькому светилу. Когда они проходят перед звездой, ее свет на несколько часов тускнеет на несколько процентов. По мере того как эти годы длиной около недели сменяют друг друга, астрономы получают все больше и больше информации, улучшая свои модели благодаря очищению сигнала (того, что реально) от шума, сопровождающего любое наблюдение¹³.

Прохождения — самый мощный исследовательский прием для определения характеристик далеких планет, но мы можем их наблюдать, только если находимся в орбитальной плоскости *той* планетной системы. В ином случае тень ускользает от нас так же, как в случае с Луной, которая отбрасывает тень постоянно, но лишь изредка — на Землю. Обратное тоже верно: инопланетным астрономам необходимо

находиться в одной плоскости с орбитой Земли (в плоскости эклиптики), если они хотят узнать какие-то подробности о нашей планете. Подавляющее большинство инопланетных астрономов, проживающих на планетах, обращающихся вокруг своих звезд к северу и к югу от *нашей* эклиптики, едва ли знают о существовании Земли. Но для астрономов, находящихся на плоскости эклиптики, особенно для тех, кого от нас отделяет не более нескольких сотен световых лет, Земля регулярно проходит перед сияющим сквозь космос Солнцем, и это может дать им достаточно информации, чтобы установить: наша атмосфера на одну пятую состоит из кислорода. Из этого они могут сделать вывод о наличии тут жизни.

Масса звезды системы TRAPPIST-1 выводится из закона Кеплера, примененного к движению ее планет; она в 84 раза тяжелее Юпитера и в восемь раз легче Солнца. По длительностям прохождений мы узнали, что звезда на 50% больше Юпитера — то есть она сжата до средней плотности, в десять раз превышающей плотность железа. Ее плотность так велика, потому что внутренний жар в ней относительно слаб, в результате чего она не раздувается от тепловой энергии, как это происходит с крупными активными звездами. Размеры планет TRAPPIST-1 также известны из данных о прохождении; а их массы, в свою очередь, можно оценить при точной аппроксимации орбит, поскольку звезда и планеты воздействуют друг на друга. Отсюда астрономы могут вычислить их плотность и сделать обоснованные предположения об их составе.

Погрешность этих измерений со временем будет уменьшаться. При некоторой доле удачи когда-нибудь мы узнаем, есть ли на этих планетах океаны. С появлением гигантских космических телескопов мы попробуем вычистить фоновый свет звезды, чтобы выделить только тот свет, который

отражается от поверхности планет, и определить их цвет и состав. Это позволит нам кое-что выяснить об их атмосфере, а также узнать, есть ли там облака, континенты и спутники. Я предполагаю, что это случится через 30 лет, и эта оценка кажется разумной: 30 лет назад мы еще не имели данных об экзопланетах, так что, если начистоту, кто знает, что ждет нас впереди?

Система TRAPPIST-1 имеет геометрическое сходство с галилеевыми спутниками Юпитера. И как и в том случае, похоже, что орбитальный резонанс держит эти планеты в вечном общем порядке, навсегда увязав их судьбы. Двигаясь изнутри наружу, орбитальные периоды планет системы TRAPPIST-1 подчиняются примерно целочисленным соотношениям $8/5$, $5/3$, $3/2$, $3/2$, $4/3$ и $3/2$. Как и у галилеевых спутников, при сдвиге одного тела должна прийти в движение вся цепочка, что придает этой группе огромную динамическую стабильность. Это похоже на связь Плутона с Нептуном, если не учитывать, что именно она стала причиной, по которой Международный астрономический союз больше не считает Плутон планетой. Может, и напоминающие Землю планеты системы TRAPPIST-1 — тоже не планеты?

Ультрахолодный красный карлик горит медленно, как слой тлеющих углей из твердой древесины. Атомная физика предсказывает, что он не потухнет триллионы лет, в сто раз дольше, чем на сегодняшний день существует Вселенная. Динамическая стабильность его планет гарантирована на сотни миллиардов лет; главный риск для них — это появление какого-то чужака извне (бродячей планеты), который прилетит и столкнется с одной из них. Если что-то разбивает состоящую из множества резонансов цепочку Лапласа, то вся система может быстро развалиться, так что такое событие станет катастрофой библейского размаха, но оно вероятно только на временных промежутках в триллионы лет.

Если на одном из этих миров существует жизнь, у нее, судя по всему, есть шанс пройти в тысячу раз больше этапов развития, чем у жизни на Земле. Если она все еще не зародилась, ей некуда торопиться. Может, к моменту гибели Вселенной она достигнет там в некотором роде совершенства. Пять миллиардов лет спустя, подняв головы к *своему* ночному небу, жители этого мира увидят, как наше Солнце превращается в красный гигант, а потом выбрасывает красивую туманность; позже про него забудут, и оно станет еще одной потерянной звездой в их исчезающих созвездиях. Система TRAPPIST-1 и другие системы, обращающиеся вокруг красных карликов, продолжают жить, пока более яркие звезды, такие как Солнце, будут одна за другой вспыхивать ослепительным светом и гаснуть навсегда. Через 100 млрд лет в состарившейся и опустевшей Вселенной, возможно, все еще будет биться пульс жизни — чрезвычайно развитой жизни, обитающей около этих выносливых маленьких звезд.

Цепочка резонансов планет системы TRAPPIST-1 может наделить ее обитателей очень интересным календарем и подарить им немало впечатляющих и никогда не повторяющихся зрелищ. Расстояние между соседними планетами там в несколько раз больше расстояния между Землей и Луной, а сами планеты в несколько раз больше Луны, так что при максимальном сближении они будут видны на небе как полные луны, имеющие разные цвета и отметины. Иногда они будут гоняться по небу друг за другом, иногда — отставать, закладывая повороты на реальных и кажущихся траекториях, пока пары планет движутся вокруг своей звезды. Соединения соседних планет — то есть полных лун — будут происходить каждый планетный год, иначе говоря, каждые несколько земных недель. И конечно, у самих планет тоже будут спутники, а у некоторых могут быть и кольца. Думаю, вполне можно признать, что каким бы впечатляющим

ни было ночное небо на Земле, эту красоту нам просто нечем закрыть.

Но в условиях около ультрахолодных красных карликов есть один существенный недостаток. Более внимательно проанализировав данные прохождений в системе TRAPPIST-1, мы видим у этой звезды не только минимумы яркости, когда планета загораживает ее свет. Есть тут и пики, соответствующие ее мощным вспышкам. Мы фиксируем только видимый свет, но с каждой такой вспышкой, возникающей из-за нестабильности термоядерных реакций внутри еле горящих звезд, будут связаны все виды ионизирующего излучения. Жизнь вокруг звезды TRAPPIST-1 и в других подобных системах, если она существует, могла быть вынуждена укрыться под поверхностью планеты или в океане, чтобы справиться с разрушительным воздействием радиации на живую материю. Жить под землей не так уж плохо, если ты бактерия; считается, что на Марсе, Европе, Титане и даже на Меркурии¹⁴ есть подповерхностные районы, потенциально пригодные для земных организмов. А уж жить в океане совсем нетрудно. В любом случае эти вспышки также могут обеспечить искру, необходимую для зарождения жизни, — потоки ионизирующего излучения, которое может запустить как раз нужные протобиохимические реакции.

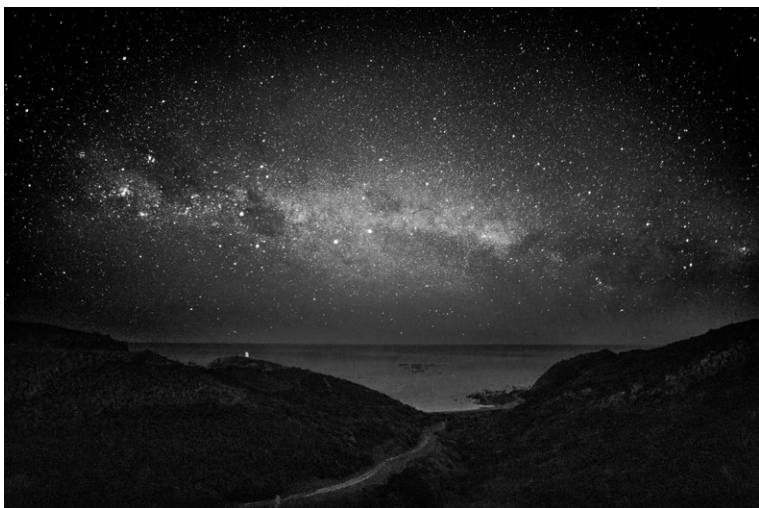
Я не уверен, что мы сможем количественно оценить вероятность существования жизни на других планетах, пока не обнаружим ее где-то еще. Это напоминает мне «правильный метод философии», заявленный австрийским философом Людвигом Витгенштейном: «О чем невозможно говорить, о том следует молчать»^{*15}. Тем не менее инопланетная

* Пер. И. С. Добронравова и Д. Г. Лахути.

жизнь — это то, о чем мы думаем и говорим, и в значительной степени это то, ради чего ведутся исследования других планет. Уверен, нет никакого вреда в том, чтобы постараться сформулировать верный вопрос. Более глубоко оценивая проблему в своей книге «Редкая Земля» (Rare Earth), палеонтолог Питер Уорд и астроном Дон Браунли¹⁶ 20 лет назад пришли к заключению, что сложная жизнь во Вселенной встречается чрезвычайно редко, потому что для ее существования должно совпасть слишком много факторов¹⁷. А в 1950 г. физик Энрико Ферми заметил, что при наличии в Млечном Пути сотен миллиардов звезд инопланетяне уже должны были вступить с нами в контакт, если только сложная жизнь не представляет собой исключительно редкое явление («парадокс Ферми»). Возможно, так оно и есть.

Давайте постулируем, что зарождение жизни является *детерминированным* — то есть, если вы обеспечите верные первоначальные условия, жизнь возникнет. (Если же для этого нужна искра Господня, то я не вижу причин, по которым жизни не может быть и в подземном рассоле на Ганимеде, невзирая на отсутствие тектоники плит, Солнца, Луны и всего остального.) Если жизнь детерминирована, тогда все сводится к тому, насколько конкретны ее требования. Давайте предположим, что для каждого такого условия есть некий конечный разрешенный диапазон (назовем его ϵ — греческая буква ϵ , которая в математике означает «что-то очень маленькое»), так что, если вы создадите планету, попадающую в это ϵ -пространство параметров, жизнь там с большой вероятностью возникнет. Это опасная игра, потому что мы склонны воспринимать наш собственный опыт как нормальный, но давайте все же сыграем.

Для начала сузим ϵ -пространство так, чтобы оно включало только планеты, где есть океаны и тектоника плит — их мы обычно называем «землеподобными». Возможно, это



Наша Галактика, как она выглядела из Веллингтона, Новая Зеландия, 25 октября 2013 г.

Andrew Xu (CC BY-SA 2.0)

одна планета из десятка тысяч (точно мы не знаем). Скажем, что планете необходимо иметь крупный спутник, который управляет приливами древних океанов, обеспечивая сложное взаимодействие суши и моря. Возможно, это одна планета из десяти (в конце концов, нам известны системы Земля — Луна и Плутон — Харон, так что это явление не необычно). Также предположим, что требуется наличие одной или нескольких планет-гигантов на более отдаленных орбитах: они служат фильтром, не допускающим поздних бомбардировок астероидами и кометами, удары которых могут уничтожить жизнь как только она зародится. Это, вероятно, одна планета из десяти тысяч, принимая во внимание то, что наша Солнечная система кажется уникальной среди тысяч известных нам систем. Так что теперь мы имеем одну планету на миллиард. Давайте даже предположим, что нам необходима такая соседняя планета, как Марс, где жизнь может зародиться

раньше, пока обитаемая в долгой перспективе планета (Земля) остывает от своего перегрева. Думаю, это будет одна планета из десяти. Еще допустим, что вокруг должно быть достаточное количество астероидов и комет (но не слишком много!), так, чтобы небольшое космическое тело в конце концов перебросило жизнь с аналога Марса на аналог Земли. Возможно, это снова одна планета из десяти, так что теперь у нас остаются примерно две такие планеты во всем Млечном Пути. Центральная звезда должна быть относительно стабильной и иметь ожидаемую продолжительность жизни в несколько миллиардов лет; может потребоваться, чтобы она была похожа на Солнце, так что, скажем, такая попадается один раз на сотню. Теперь таких планет куда меньше одной во всей Галактике. Также может потребоваться поздняя доставка с других тел системы биогенных молекул, например фосфорных или углеродных соединений, с помощью астероидов. Думаю, выполнение этого условия мы получаем бесплатно в нагрузку к баллистической панспермии, но добавим для полной уверенности еще один порядок. Далее, предположим, что планета должна находиться в правильной части галактики, чтобы жизнь не уничтожили вспышки гамма-лучей и прочая звездная активность. Пусть это будет еще одна из ста. Наконец, чтобы мало не показалось, пусть у нас должно произойти позднее столкновение К /Т-типа, массовое вымирание, которое позволит видам-аутсайдерам (в нашем случае — млекопитающим) выбраться из своих нор и захватить планету. Это еще одна из ста. Теперь у нас остался один шанс на миллиард триллионов. Такая величина ϵ подразумевает, что во Вселенной есть по меньшей мере сотня тысяч очень близких копий Земли — если, конечно, каждый отдельный дротик летит в мишень случайным образом!

Аргументы такого рода — если вы бросите в мишень сто тысяч миллиардов триллионов дротиков, то, скорее всего,

сотню тысяч раз попадете в яблочко, — имеют ограниченную практическую ценность с точки зрения возможности что-либо предсказать, но могут послужить некой основой. Например, что, если каждая из планет не является уникальной, а вместо сотни миллиардов триллионов случайных экспериментов существует по сотне триллионов почти точных копий всего нескольких миллиардов типов планет? Тогда вероятность обнаружить что-либо внутри ϵ -пространства может оказаться близкой к нулю. Если образование планет похоже на создание дождевых капель, то вы можете наделать их бесконечное число, и у каждой из них будут свои отличительные характеристики — соленость, диаметр, температура, — но все они будут дождевыми каплями.

Вышесказанному противоречат свидетельства в пользу значительного планетного разнообразия; полагаю, неэффективная аккреция максимизирует это разнообразие, так что вместо бесчисленных дождевых капель мы получаем ледяные шары, каменные шары, водные миры, металлические миры и любые другие промежуточные варианты. Возможно, какой бы маленькой ни была заданная вами величина ϵ , это разнообразие все равно гарантирует, что где-то, когда-то вы попадете в яблочко и создадите жизнь.

Что, если человечество действительно уникально и является единственной искрой развитого сознания, которое стоит на пороге распространения в космос? Я вспоминаю, как много раз разводил костер, а пламя гасло, стоило только мне отвернуться, после чего я полчаса, дрожа от холода, пытался разжечь его снова, поскольку уже извел все сухие ветки. Не произойдет ли так и с нами? Если мы действительно одиноки в нашей Галактике и если мы не позаботимся о *настоящем* — если мы позволим нашему крепкому дому рухнуть, — все наши лучшие творения, все цивилизации человеческой истории исчезнут навсегда и по сути

окажутся бессмысленными, а Вселенная продолжит существовать, как будто всего этого никогда не было.

Если же сложные разумные организмы вроде нас распространены в Галактике — маленькие уютные костерки тут и там — и мы бездарно позволим нашему огню погаснуть, тогда свидетельства того, что мы тут натворили, смогут стать загадкой, которую предстоит решить будущим инопланетным геологам, скачками на графике распределения изотопов углерода и кислорода, кернами осадочных отложений, которые содержат синтетические молекулы, указывающие на то, что когда-то здесь жили существа с развитой промышленностью. Слой, соответствующий переходу от голоцена к антропоцену, закладывается прямо сейчас: новые осадочные и вулканические породы формируются вокруг мириадов фрагментов пластика, карбонаты и кораллы растворяются в более теплом и кислом океане, а сезонный сток воды нарастает из-за все более сильных штормов. Через миллионы лет Земля, в таком случае, будет ярким, хотя, возможно, и удручающе типичным для нашей Галактики примером творчески одаренной, развитой цивилизации, которая сорвалась вниз как раз в тот момент, когда наконец научилась *видеть*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

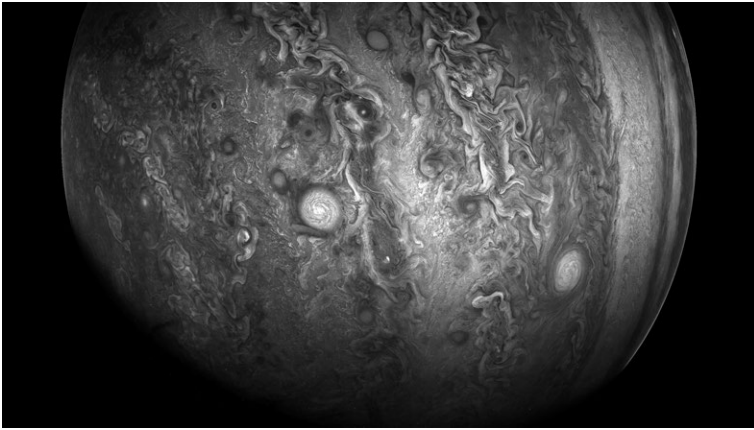
В одном из наиболее безрассудных планетологических предприятий в истории Христофор Колумб опасно рисковал жизнью всей своей команды, поставив не на то, что Земля круглая, а на то, что она *маленькая*. Сухопутная торговля с Индией была налажена, этим путем доставлялись специи и другие ценности; Колумб решил отправиться в морское путешествие, чтобы продемонстрировать лучший, более быстрый и дешевый¹ способ добраться до цели. Королева Изабелла Кастильская была прекрасно знакома с идеей, что Земля круглая; Колумб подкупил ее только своей убежденностью, что диаметр планеты составляет всего 5000 км. Это означало, что, если плыть на запад, Индия окажется всего в 2000 км. Подозреваю, что Колумб отлично знал, что Земля в два с лишним раза больше (эти оценки известны еще с древних времен) и что он намеренно занизил стоимость, сложность и продолжительность экспедиции, чтобы она вообще состоялась. Это не первый и не последний в истории случай, когда исследовательская программа получила финансирование только благодаря безудержному оптимизму ее руководителя.

Если бы не неожиданное появление на его пути части суши, которая позже стала называться Америкой

(а точнее — маленького островка Багамского архипелага), приключение Колумба обернулось бы сущей катастрофой. Он не открыл Америку, он наткнулся на нее вопреки своим планам. (Кроме того, викинги добрались туда за сотни лет до него, хотя им для этого вовсе не требовалось верить в то, что Земля круглая; они просто двигались мелкими перебежками — от Исландии к Гренландии, а затем на Ньюфаундленд.) Америка уже давно была заселена десятками миллионов аборигенов, которые освоили и северную, и южную ее части, перебравшись туда из Азии по сухопутному переходу десятки тысяч лет назад. Может, кто-то из их астрономов тоже дошел до мысли, что Земля круглая: несомненно, они замечали, что Земля отбрасывает на Луну изогнутую тень. Но они точно не ожидали того, что явилось к ним из-за океана.

Первое путешествие Колумба заняло более двух месяцев. Полет на Луну занимает всего три дня; это словно пересечь Ла-Манш в металлической ванне при хорошей погоде. Астронавты NASA летали на Луну несколько раз, и все вернулись в добром здравии. Отправиться на Марс — это как пересечь Атлантический океан с билетом в один конец, причем путешествие займет в сто раз больше времени и можно ожидать встречи с парой штормов; решиться на такое в ванне — верная смерть. Разумеется, мы теперь умеем строить корабли побольше, но непосредственная опасность для астронавтов, отправляющихся на Марс, — это разрушающее лучевое воздействие на их тела потока идущих от Солнца высокоэнергетических частиц (причем за время пути всплеск солнечной активности вполне вероятен), а также космических лучей от циклопических взрывов по всей Галактике.

Высокие дозы радиации смертельны для людей и других организмов: они разрушают ДНК быстрее, чем она успевает восстанавливаться. Радиация также портит компьютеры



Верхушки облаков на древнем Юпитере, отце всех планет, сфотографированные космическим зондом «Юнона». От цветного варианта этого изображения просто захватывает дух. Поскольку камера «Юноны» не являлась научным инструментом как таковым, ее в основном непроанализированные и необработанные данные находятся в свободном доступе с момента начала экспедиции. Творчески одаренные ученые, а также художники (любители и профессионалы) превращают их в великолепные произведения искусства, в том числе в многочисленные видео пролетов, некоторые из которых сопровождаются музыкой (например, Холста или Лигети) и позволяют зрителю почувствовать себя прямо там.

NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS

и их память, а это не такая уж незначительная проблема там, где замена невозможна. При полетах на Луну астронавты мирились с определенным риском. В полете на Марс, который по самой оптимальной траектории займет девять месяцев, радиация — это не риск, а смертный приговор, если только у корабля нет массивной защиты, которая может представлять собой толстый металлический корпус, баки с водой и припасами или даже слой реголита, добытый на удачно подвернувшемся астероиде. В любом случае вы должны все это спроектировать, построить, запустить и направить куда нужно. Несмотря на то что показывают в фильмах, мы еще и близко не подошли к тому, чтобы отправить на Марс человека.

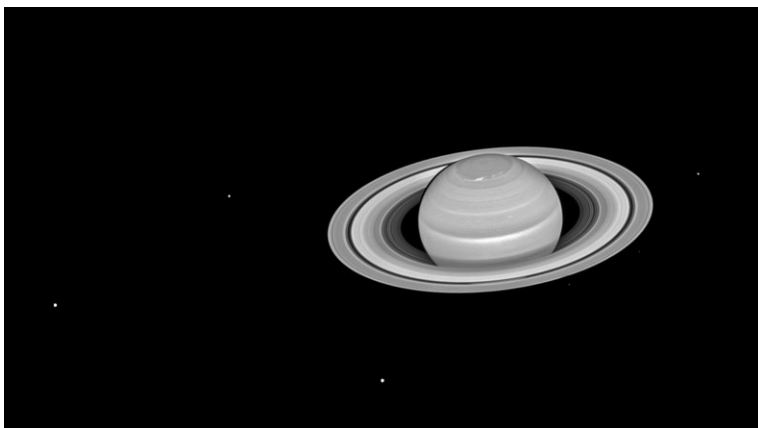
Хотя Марс, видимо, очень привлекателен для футурологов из-за своих впечатляющих видов, наличия небольшой атмосферы и идеи, что там можно существовать на местных ресурсах, нам гораздо проще основать поселение на Луне, по крайней мере в обозримой перспективе. С одной стороны, там достаточно несложно решить проблему с радиацией: после трехдневного путешествия, которое можно подгадать к тому моменту, когда на Солнце не будет вспышек, вы совершаете посадку и отправляетесь в бункер, где спите и прячетесь во время радиационных событий и откуда можно совершать ограниченные по времени вылазки. Единственное неприятное обстоятельство — это отсутствие воды, еды и воздуха, которые вам придется производить своими силами.

Один из кандидатов для строительства лунной базы — высокий край кратера Шеклтон², 20-километрового импактного образования неподалеку от южного полюса Луны. Его самые высокие пики почти всегда освещены Солнцем и почти постоянно видны с Земли, что важно для обеспечения связи. Но в нескольких километрах вниз по стенке кратера находится его непроницаемо черное дно, настолько темное, что за миллиарды лет в нем не было ни одного фотона, идущего напрямую от Солнца. Падать туда никому не захочется. На этой бесплодной пустоши, где холодно, как на Плутоне, молекула за молекулой накапливались массивные слои водяного льда и углеводородов — настоящий драгоценный клад. С чем на Луне проблема, так это с водой, но тут она есть! Солнечную энергию с края кратера можно использовать для ее электролиза: она будет разделяться на водород и кислород, которым вы сможете дышать. Ракетное топливо, химические удобрения, пластмассы — тут можно будет производить самые разные вещи в зависимости от того, что вы обнаружите внизу и в поверхностном реголите. Вы сможете

даже изготовить что-то вроде цемента или строительного раствора, чтобы печатать из него трехмерные структуры и жилые отсеки.

Беспокоюсь ли я по поводу того, что мы можем замусорить Луну? Мысль об этом меня просто подавляет. Это проклятие пустынных мест: люди приходят туда с целью построить завод или со скучным, но совершенно невинным намерением поклоняться вокруг и оставить свои следы — а ландшафт разрушается и становится уродливым. Я активный сторонник наших баз на Луне, и даже добычи полезных ископаемых для сооружения там колоний, и использования Луны как трамплина к другим планетам вроде Марса, но тут нужен разумный подход. Луну невозможно заменить, она занимает совершенно особое место в истории нашего вида. Ребенком я смотрел, как первый человек спускается на нее по трапу, и мне говорили, что его следы останутся там на многие тысячелетия, поскольку в Море Спокойствия не бывает ни дождей, ни ветра. Но переживут ли они космических туристов?

Итак, мы возвращаемся к тому, с чего начали. Луна — это символ в религиозной и любой другой внутренней жизни человека, пример чистой, возвышенной красоты, но одновременно и объект научных исследований, и необыкновенное место, которое можно посетить. Что касается ресурсов, которыми она располагает, мы видим на Земле и катастрофические последствия их разрушающей окружающую среду добычи, и абсолютно бессмысленную потерю последних нетронутых территорий. Мы можем ограничить колонизацию, скажем, видимой стороной Луны. Но противопоставлять одну из этих реальностей другой — большая ошибка, потому что обе они входят в природу человека.



Фотография, сделанная космическим телескопом «Хаббл» почти в момент противостояния 2018 г., когда Солнце, Земля и Сатурн выстроились практически в одну линию. С Земли в этот период кольца Сатурна были видны почти в максимально возможном раскрытии.

NASA, ESA, A. Simon (GSFC) and the OPAL Team, and J. DePasquale (STScI) (CC by 4.0)

Чудесно смотреть на красный закат, зная, что он вызван зависимостью рассеивания света от длины волны. Алмазные сережки становятся еще изящнее, если знать, что эти камни были извержены в кимберлитовых трубках из основания земной коры. Знания о мире природы — на чем я сижу, где нахожусь, что вижу — делают вас ближе к творению. Какой цвет самый лучший? Этого я вам сказать не могу. Есть ли Бог? Об этом не имеет смысла спорить. Но какой минерал тверже? Какова скорость ветра над этими облаками? Столкнется ли Туманность Андромеды с Млечным Путем? На эти вопросы можно дать ответ, и они будят нашу страсть к тому, чтобы добираться до сути вещей — человеческую *любопытность*, свойство нашего духа, облеченное в плоть и кровь благодаря нашим рукам, глазам, ушам и мозгу.

В области «всего того, что имеет место» наука приобретает огромный практический смысл. Если ньютоновский закон всеобщего тяготения или принцип трения твердых тел

когда-нибудь окажутся неверными, вы сможете воспарить над полом, а ваш дом соскользнет в море. Это возможно только в снах, где больше не действуют законы природы, и, хотя никто не может наверняка утверждать, что жизнь — это *не* сон, мир будет делать то, что делает, и являться тем, чем является, независимо от того, существуют ли ученые. Прыгнув с высокой скалы, вы разобьетесь, даже если не верите в гравитацию и инерцию.

В науке полно теорий, которые не имеют непосредственного практического значения. То, что Луна появилась в результате гигантского столкновения, или то, что нагорья на ее обратной стороне возникли как огромная нашлапка, — обо всем этом интересно поразмыслить, но нам не особенно важно, так это или нет. Но вполне возможно, что они имеют значение опосредованно, через законы дедукции. Если А истинно, тогда Б, что заставляет нас изменить вопрос и чему-то научиться на примере вещей, кажущихся малозначительными, странными или не совсем стыкующимися между собой. Если вы оказались в тупике, все, что нужно, — это поменять точку зрения, а для этого порой достаточно дальней прогулки. Экспедиции на Титан или Венеру могут стать лучшим вкладом в решение проблемы изменения земного климата.

Ученый чем-то напоминает человека, приехавшего в чужую страну и увидевшего, как дети на поле играют в какую-то игру. Он никогда не видел такой игры и не знает правил. Можно было бы спросить, но он не владеет местным языком. Ему хочется во всем разобраться и тоже сыграть. Некоторые из правил понятны сразу: две команды пытаются забросить мяч в ворота соперников. Это как закон всемирного тяготения — самое простое правило, которое кажется очевидным из повседневных наблюдений и без которого не будет никакой игры. Другие правила гость не сможет понять, пока

не посмотрит десяток игр: игроки используют ноги и иногда головы, но никогда не касаются мяча рукой, кроме одного игрока в каждой команде. А далее идут повадки и закономерности, которые не подчинены никаким правилам; глупо пытаться их осознать, не начав играть, делать ошибки и учиться прямо на поле.

Приведу другую аналогию: ученые пишут картины и выставляют их на суд публики. Усилиями всего сообщества эти творения классифицируются: некоторые помещаются на всеобщее обозрение, а другие отправляются в подвал. Процесс не всегда справедлив: некоторые из лучших работ спрятаны где-то внизу! Время от времени случается, что какие-то из самых популярных картин приходится уносить в подвал, освобождая место для чего-то, что признается лучшим. В любой момент вы можете спуститься вниз — особенно в нашу компьютерную эпоху полной связности и всеобщего архивирования, — но экспонаты в главном зале, которые проложили себе дорогу на страницы книг и престижных журналов, определяют темы бесед. Иногда что-то из подвала возвращается наверх. А бывает и так, что, как советовал Гарольд Джеффрис, нам приходится проводить весеннюю уборку, отправляя на костер все лишнее.

Если краски и холст — это объективная реальность, то кисть, я думаю, соответствует логике и математике. Нельзя считать случайным совпадением то, что появление астрономии в истории человечества примерно совпало с изобретением геометрии, так же как современная геофизика начинается со сделанного тысячи лет назад утверждения, что Земля является шаром, что Луна находится от нас на расстоянии 30 диаметров Земли и в четыре раза меньше нее. Геометрия, примененная к измерению пространства, приводит к аксиоматическим истинам. Со временем, используя более точные измерения и более тонкие геометрические принципы,

астрономы определили расстояние до более далеких планет, их орбиты и расстояние до звезд, а за последнюю сотню лет — и расстояния до галактик, а также размер Вселенной и скорость ее расширения.

Изобретаем ли мы научную реальность или открываем ее? Что бы вы ни думали о науке и ее роли в жизни современного человека, то, что она *работает*, можно убедительно доказать на нашем общем опыте. Самолеты весом в сотню тонн парят по небу с жующими завтрак пассажирами внутри. Видеозвонок от вашей сестры раздается внутри ваших наручных часов. Многокилометровые мосты и туннели пронизывают мегаполисы, а его стоэтажные здания могут вынести натиск тайфуна безо всякого вреда для себя. Новое лекарство побеждает болезнь. Эти и другие чудеса основаны на научном методе, применяемом для того, чтобы изучать лежащие в основе явлений принципы (индукция), а потом с помощью математики использовать эти принципы при разработке систем, которые работают предсказанным образом (дедукция). И все это делает возможными новые технологии — телескопы, лабораторные лазеры, экспедиции в глубокий космос, — которые делают возможными дальнейшие исследования и анализ на молекулярном уровне, в глубинах Земли или звезд, далеко в космосе и вокруг других планет. Чем больше мы знаем, тем дальше можем зайти и больше узнать.

Мудрецы и жрецы склонной к мистике античности присвоили каждой планете свой символ и, хотя такими символами не слишком удобно пользоваться, так как они не входят в стандартные компьютерные шрифты, астрономы по-прежнему их обожают. В академических журналах вы увидите, как радиус Сатурна обозначают $R_{\text{с}}$, массу Меркурия — $m_{\text{м}}$ и так далее. Наука держится за этот осколок символической

магии — просто *на всякий случай*. Похожим образом мы перечисляем названия планет каждую неделю, которая по-английски представляет собой курьезную смесь разных божеств: сначала идут Солнце (Sunday — Sun's day, «день Солнца») и Луна (Monday — Moon's day, «день Луны»), затем скандинавские аналоги Марса (Tuesday — Tiu's day, «день Тиу»), Меркурия (Wednesday — Odin's day, «день Одина»), Юпитера (Thursday — Thor's day, «день Тора») и Венеры (Friday — Freya's day, «день Фрейи»), и наконец сам Сатурн (Saturday — Saturn's day, «день Сатурна»), правитель благодатного золотого века.

Сатурн приобрел для меня особое значение, когда однажды летом я впервые увидел его в телескоп на заднем дворе у моего друга. Мне было около пяти, и я с трудом дотягивался до окуляра. Телескоп был недорогой, с дрожащим изображением, но мой друг очень им гордился и нашел ящик, чтобы подставить мне под ноги. В маленьком окуляре (только глянь!) обнаружился Сатурн, он был *действительно* там, и совсем не как на картинке! В мои глаза попадал солнечный свет. Он прошел миллиард километров от Солнца до Сатурна, потратив на это целый час, отразился, чтобы вернуться на Землю, — еще час, — и маленькая доля этих фотонов собралась вместе, чтобы создать изображение окруженной кольцами планеты в моем глазу.

Желто-розовый диск с бледными полосами и золотистыми кольцами бежал от правого края в нижний левый угол, поскольку телескоп, закрепленный на вращающейся Земле, скользил вдоль сильно увеличенного изображения. Я попытался вернуть Сатурн в центр, но потерял его, и мой друг потратил еще десять минут, чтобы снова его найти. Это не имело никакого значения. Реальность обрела новую четкость. Бледная звезда в небе над двором больше не была мерцающим огоньком — она стала парящим самоцветом.

ЭПИЛОГ

Пока наука проникает своим взором все дальше и глубже, приближаясь к сути вещей, мы начинаем упираться и в границы нашей планеты. Сегодня люди и их домашний скот составляют 96% биомассы млекопитающих (эпоха гамбургеров). Наше существование обеспечивают мощные, разрушительные в планетарном масштабе технологии и расточительные подходы. Одновременно мы осознали, как велика и сложно организована Вселенная, и чувствуем себя лишними и одинокими, когда вглядываемся в сделанные космическим телескопом «Хаббл» сверхдальние обзоры и видим тысячи галактик, в каждой из которых миллиарды планет. Мы загнали себя в угол, но чувствуем себя потерянными.

Чтобы выбраться из своей небесной раковины — небысвода с нарисованными на нем звездами — и выйти на тот простор, где существуют настоящие объяснения, нам нужна перспектива планетологических исследований, в том числе исследований Земли и нашего места на ней. Поэтому я и написал эту книгу. Думаю, мы должны поднять бюджетные траты на эти задачи до уровня 1960-х гг., чтобы узнать больше о Земле и Луне, Марсе, Венере, Титане, Плутоне — обо всех планетах — и начать проектировать аппараты для полетов

в соседние планетные системы. Начав пораньше, мы, возможно, успеем ко временам наших праправнуков. Конечно, кто-то может сказать, что 1960-е давно закончились, и слава богу, и что теперь мы должны разбираться с изменениями климата, а дальний космос подождет. Но никакого дальнего космоса не существует. Мы все живем в космосе, и наш климат представляет собой его границу.

Если нас интересуют практические решения мировых проблем, мы можем начать с того, что представители вида *Homo sapiens* стремятся объединяться в колонии или «нации», которые соревнуются за статус, доказывая свою боеготовность и техническое превосходство. Это было верно еще задолго до Фалеса и с тех пор все больше зависит от научных возможностей: лучшие катапульты, лучшие военные суда, лучшие лазеры. Но война — это отрасль без образа будущего, контрпродуктивное применение для достижений науки и техники. Однако программу «Аполлон» уж никак не обвинишь в отсутствии образа будущего, хоть она и была привязана к военной отрасли! Как так вышло? Она опиралась на те же самые ракеты, использовала те же заводы и конструкторские бюро, те же системы и тех же специалистов. В самих ракетах нет ничего плохого; важно, что вы с ними делаете.

Программа «Аполлон» была мощной демонстрацией изобретательной предприимчивости сверхдержавы, куда более эффективной, чем выпуск новой линии реактивных истребителей или ядерных подводных лодок, и при этом стоила она гораздо меньше. Прилунение модуля «Игл», полувековой юбилей которого мы отметили прошлым летом, возможно, стало в долгосрочной перспективе самым важным единичным достижением прошлого столетия и, в отличие от войн той эпохи, объединило всех нас как вид разумных существ, пусть и на короткое время. И даже если

отвлечься от сделанных за время ее работы открытий, программа «Аполлон» многократно окупилась, подняв ценность американского капитала и доказав, что деньги сами по себе — это еще не все. Как и с ракетами, важно то, что вы с ними делаете.

Итак, мы находимся на крошечной пылинке внутри фрактала в другом фрактале недоступного нашему пониманию масштаба. Я, вы, наши дети, полярные медведи и коралловые рифы, все, что мы делаем и создаем, — как все это может иметь значение? Иногда нас осеняет интуитивная догадка, которой мы не можем не следовать, и она ведет нас вперед. Для меня такая догадка — это то, что экологический кризис является сигналом к пробуждению, с которым рано или поздно сталкивается любой разумный вид, своеобразным обрядом инициации. Победы становятся слишком легкими, и нам требуется пересмотр целей. Должно измениться само определение успеха: необходимо уйти от старых привычек вторгаться и властвовать, использовать каждый новый инструмент для достижения дополнительных преимуществ. Пора вернуться к ценностям, которые изначально свойственны млекопитающим: к заботе о потомстве и жизни в согласии.

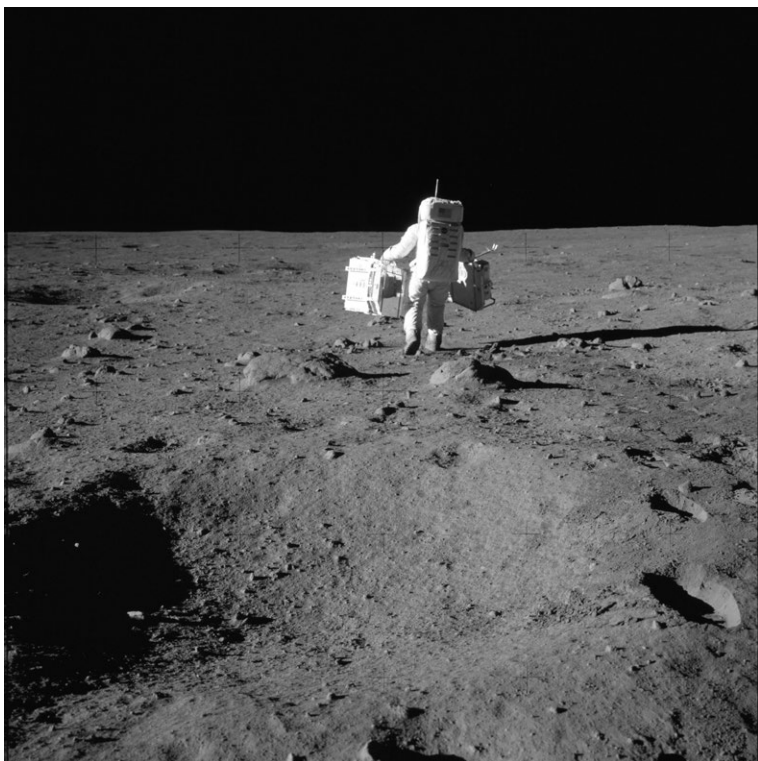
Страны напряженно состязались в лунной гонке, но эта гонка также продемонстрировала базовую склонность людей к сотрудничеству. По пути на соревнования участники олимпийских игр всегда помогут друг другу заменить лопнувшее колесо. Почтенный «Союз», разработанный, чтобы доставить советских космонавтов на Луну, отвез на Международную космическую станцию десятки американских астронавтов, когда после прекращения полетов шаттлов у NASA не осталось других возможностей. Также принято делиться информацией: американские фотографии Луны в самом высоком разрешении, а также многие другие типы научных

данных доступны китайским специалистам при подготовке их собственных пилотируемых посадок, которые случатся скорее, чем вы думаете (и вот это будут новости так новости!) А еще можно вспомнить проект «Союз — Аполлон», который завершил программу «Аполлон» и принес оттепель в разгар холодной войны. Корабли по отдельности взлетели с Байконура и с космодрома Космического центра имени Кеннеди, состыковавшись на низкой околоземной орбите. Их экипажи двое суток провели вместе в слаженной работе, что стало кульминацией нескольких лет беспрецедентного планирования и обмена секретной технической информацией. Как это могло произойти, если всего за десять лет до этого руководители двух стран едва не устроили атомную войну? Пилотируемый космический полет даже на низкую околоземную орбиту требовал огромного взаимного доверия и сотрудничества инженеров, астронавтов и наземных команд, поддерживаемых политическим и военным руководством — реалистами, которым выпало творить будущее; людьми, понимавшими ценность общечеловеческой кооперации в космосе.

Некоторые из нас ждут прилета инопланетян или сошествия богов, которые нас просветят. Ответ в самом деле может прийти из космоса, но, даже если так, скорее всего, он появится в виде астероидов, маленьких блуждающих тел, с которых началось образование планет, вроде того, который 65 млн лет назад смел с лица Земли динозавров, чтобы их место смогли занять млекопитающие. Раньше или позже, если за ними не уследить, один из них снова принесет опустошение, и, по-моему, это хорошая новость. В пятницу 13 апреля 2029 г. 370-метровый астероид Апофис, названный так в честь бога хаоса, врага света (вес — 50 млн тонн) пролетит к Земле ближе, чем геостационарные спутники связи. Это будет то еще представление прямо у нас

во дворе: на ночном небе можно будет невооруженным глазом наблюдать движение объекта, для которого в момент его открытия существовал весомый шанс врезаться в Землю. Теперь столкновение исключено; вместо этого сила притяжения нашей планеты искривит его орбиту и направит его по новой траектории. Какая великая держава снарядит разведывательную экспедицию к Апофису? Не опередит ли ее группа студентов, организовавшая пролет микроспутника? Кто пришлет видео высокого разрешения, на котором объект неправильной формы приближается к Земле, зависает над ней во всей красе примерно на час, а затем удаляется? А может, кому-то удастся сесть на него перед сближением и послушать с помощью сейсмометров, как он трещит под действием приливного поля Земли, подобно корпусу корабля, затертого в морских льдах.

Национальные агентства, университеты и частные фонды, которые занимаются околоземными объектами, скорее всего, станут теми, кто примет участие в строительстве обитаемых баз на Луне и в окололунном пространстве. Что до более дальних задач, планируемый японский космический аппарат «Марс Мунз Эксплорер» может стать первым шагом к международным форпостам на Фобосе и Деймосе, где мы сможем применить технологии, которые были разработаны для исследования околоземных объектов. Что до экономической выгоды от полетов к астероидам, Апофис, обычный представитель класса S, содержит редких металлов на 10 млрд долларов, если бы до них можно было добраться. Еще интереснее будут примитивные углеродистые астероиды, особенно если вы сумеете вывести их на надежную ретроградную орбиту вокруг Луны: помимо силикатов и редких металлов, там есть вода и другие летучие вещества, которые пригодятся в качестве топлива, полезных ископаемых и для создания замкнутых систем жизнеобеспечения



Астронавт несет оборудование для проведения экспериментов, 20 июля 1969 г. Фотография AS11-50-5944 из Атласа изображений программы «Аполлон» (камера Hasselblad, объектив 70 мм).

NASA/LPI

и сельского хозяйства, а также материалы для производства массивных экранирующих структур.

Но ресурсы астероидов для нас словно пряник, тогда как исходящая от них угроза служит кнутом. Человечество тут — упрямый осел. Так пусть опасные астероиды пробудят лучшие стороны нашей натуры. Если один из них спровоцирует космическую гонку для отражения угрозы, она будет согласованным предприятием, как в 1986 г., когда

Европа, СССР и Япония отправили аппараты к комете Галлея, но куда более энергичным. Что же до того, чтобы делать на ресурсах астероидов деньги, это будущее еще не наступило и не наступит, пока мы не разовьем космическую экономику. Но вся эта идея — несшие угрозу астероиды превращаются в международные центры добычи полезных ископаемых, а Земля возвращается в состояние цветущего сада — фантастична теперь куда меньше, чем чтение этой книги с планшета в салоне самолета показалось бы ковбоем середины XIX в.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я очень благодарен за то, что у меня были талантливые учителя; студенты, учить которых было честью; и делившиеся со мной идеями и открытиями коллеги, чьи результаты, надеюсь, я сумел пересказать без искажений. Я выражаю благодарность художникам и фотографам, которые вложили свой талант в иллюстрации этой книги, а также конструкторам космических аппаратов, специалистам по подготовке полетов, астрономам и астронавтам, которые познакомили нас с фотографиями и другими данными с близких и далеких планет. Одно такое изображение может быть итогом десятилетий труда и приключений. Также я благодарен редактору Джеффри Шендлеру, который спас мою рукопись от последствий неуправляемой аккреции, особенно в тех случаях, когда абзацы врезались в Солнце, поглощались другими главами или выбрасывались на периферию системы. И моим дорогим родителям, Гуннару и Тулле, без наставлений которых я, возможно, писал бы книгу о метафорах в творчестве Джона Донна, а не о попытках понять бесконечность. Кроме того, спасибо моей жене и детям, которые были так добры и заботливы, пока я писал свою большую книгу о планетах: я вас люблю.

ГЛОССАРИЙ

KREEP. Англоязычная аббревиатура из символа калия (K), а также слов rare-earth elements (редкоземельные элементы) и phosphorous (фосфор). Слой, являющийся остатком первичного океана магмы, где сконцентрированы несовместимые со структурой породообразующих минералов элементы, в том числе уран и торий. В изобилии присутствует на видимой стороне Луны и редко встречается на обратной.

Аккреция. Процесс роста отдельных небесных тел путем поглощения массы из протопланетного диска.

Анортозит. Кумулятивная порода с преобладанием полевого шпата, из которой состоит кора лунных нагорий.

«Аполлон». Программа пилотируемых космических полетов, в результате которой 12 астронавтов благополучно высадились на поверхности Луны и вернулись обратно. Также группа астероидов (аполлоны), орбиты которых проходят близко к Земле.

Астероид. Маленькое каменистое тело, происходящее из региона землеподобных планет.

Астероиды класса C. Темно-красные астероиды из внешней области Главного пояса; тела, которые служат источником углеродистых метеоритов-хондритов.

Астероиды класса S. Самые распространенные астероиды в околоземном пространстве; тела, которые служат источником обычных метеоритов-хондритов.

Астрономическая единица (а. е.). Среднее расстояние от Земли до Солнца, 149,6 млн километров.

Афелий. Наиболее удаленная от Солнца точка орбиты планеты (ср. *перигелий*).

Ахондрит. Астероид или метеорит, состав которого претерпел изменения или подвергся расплаву.

Базальт. Самая распространенная поверхностная порода земной суши, состоящая из затвердевшей силикатной лавы.

«**Великая миграция**». Теория, в соответствии с которой Юпитер образовался там, где сегодня находится Главный пояс астероидов (примерно 3 а. е. от Солнца), и позже мигрировал на то место, где сейчас находится Марс (1,5 а. е.). Затем, когда образовался Сатурн, гиганты парой сдвинулись туда, где они находятся в наше время (5 и 10 а. е.).

Восстановительные условия. Условия, которые предотвращают образование оксидов, например богатая водородом среда ранней туманности или атмосфера планеты-гиганта.

Вымерший радиоизотоп. Радионуклид вроде ^{26}Al или ^{60}Fe , период полураспада которого короче, чем ранний этап развития Солнечной системы, так что даже если когда-то он и был широко распространен, то теперь полностью исчез.

Геометрическая прогрессия. Численная последовательность, в которой каждый следующий член получается из предыдущего при умножении его на определенное число.

Главный пояс астероидов. Диск обломков между Марсом и Юпитером, где находится большинство астероидов. Его суммарная масса составляет около 5% массы Луны, причем половина этой массы сосредоточена в четырех крупнейших астероидах: Церере, Весте, Палладе и Гигее.

Гравитационный маневр. Маневр, когда космический аппарат использует обращающуюся вокруг звезды планету

или обращающийся вокруг планеты крупный спутник, чтобы ускориться, замедлиться или каким-то иным образом изменить свою орбиту, не расходуя при этом топливо.

Давление солнечных лучей. Плотность импульса электромагнитного поля Солнца, создающая давление, которое может влиять на малые частицы и космические аппараты.

Дифференциация. Процесс формирования ядра, мантии и других слоев планеты, обычно в ходе плавления и гравитационного разделения.

Землеподобная планета. Любое планетное тело или спутник, важнейшие процессы на котором являются близкими аналогами процессов, наблюдаемых на Земле.

Комета. Небольшое, богатое льдом небесное тело, обращающееся вокруг Солнца и сформировавшееся вдали от области землеподобных планет.

Кометезималь. Состоящая в основном из льда планетезималь.

Космическое выветривание. Процесс покраснения и потемнения грунта, который происходит, когда минералы и металлические вкрапления подвергаются высокоэнергетической радиоактивной бомбардировке из космоса.

Криосфера. Внешняя ледяная оболочка богатой водой планеты или спутника.

Груда щебня. Геологическая масса, главной связующей силой которой является собственная гравитация, причем давление в ее центре намного ниже, чем предел прочности породы. Груда щебня не может удерживать свои фрагменты, если быстро вращается вокруг своей оси.

Малое планетное тело. Комета, астероид или небольшой спутник; любое геологическое тело, чье притяжение очень мало.

Маскон. Гравитационная аномалия (концентрация масс) в коре Луны или другой планеты, вызванная тем,

что плотные породы мантии заполнили отверстие крупного ударного кратера.

Масштабирование. Основанное на физических закономерностях математическое преобразование, позволяющее экстраполировать лабораторные результаты на более крупный масштаб или более протяженное время.

Метеорит. Фрагмент межпланетного вещества, упавший на Землю.

Метеороид. Находящаяся в космосе геологическая масса размером менее 50 м (меньше астероида).

Низкая околоземная орбита. Орбита, на которую проще всего выйти, расположенная в нескольких сотнях километров над верхней границей атмосферы Земли. На ней находится Международная космическая станция.

Околоземный объект. Астероид или комета с перигелием орбиты менее 1,3 а. е.

Оливин. Самый распространенный минерал в земной мантии. Имеет состав, варьирующийся от Mg_2SiO_4 до Fe_2SiO_4 .

Олигарх. Любой из завершивших упорядоченный рост планетных эмбрионов в начале позднего этапа гигантских столкновений. Одним из олигархов была Тейя.

Орбитальный резонанс. Случай, когда орбитальные периоды двух тел соотносятся как небольшие целые числа. Вековым резонансом называют синхронное обращение двух тел.

Первичная аккреция. Образование первых макроскопических конденсатов в туманности, от сгустков диаметром в сантиметр до планетезималей километрового масштаба.

Перигелий. Ближайшая к Солнцу точка орбиты планеты. Орбита Земли имеет небольшой эксцентриситет, так что 3 января наша планета на 3% ближе к Солнцу, чем в точке афелия, 3 июля.

Период полураспада. Время, за которое в радиоактивном образце распадается половина атомов данного изотопа.

Планетезималь. Примитивное планетарное тело, достаточно крупное, чтобы быть связанным силой тяготения.

Плотность. Масса вещества на единицу объема. Железо почти в три раза плотнее горной породы, которая в три раза плотнее воды.

Предел Роша. Орбитальное расстояние, внутри которого спутник из-за приливного воздействия планеты испытывает на стадии аккреции напряжение сдвига, способное его разорвать. Поскольку спутники не жидкие, радиус разрушения под действием приливных сил всегда меньше предела Роша.

Приливная эволюция. Изменение орбиты спутника из-за того, что момент импульса вращающейся вокруг своей оси планеты передается спутнику.

Примитивные тела. Тела, близкие по составу первичному веществу Солнечной системы.

Протопланетная туманность. Облако газа и пыли, из которого сформировались Солнце и Солнечная система. Иногда ее называют просто «туманностью», или «диском». Также — любая подобная область формирования планет в космосе.

Разрешение. Минимальный масштаб, на котором вы можете что-то оценить на основании этого набора данных. Обычный кинофильм, например, имеет временное разрешение в 1/30 секунды; линейное разрешение изображения обычно составляет несколько пикселей.

Реголит. Рыхлый сыпучий материал на поверхности лишенных атмосферы космических тел.

Реология. Наука о пластической деформации и текучести вещества в напряженном состоянии или, наоборот, о том, как нарастает напряжение внутри тела при деформации.

Сверхновая. Массивная звезда, внутри которой завершился процесс термоядерного синтеза, после чего происходит гравитационный коллапс ядра, а затем взрыв.

Спектральная линия поглощения. Особенность спектра, вызванная поглощением света определенной длины волны из-за присутствия, к примеру, определенных молекулярных связей или электронных переходов. Интенсивность поглощения указывает на концентрацию соответствующих веществ.

Столкновение с оставлением места происшествия. Распространенный тип планетных столкновений, при котором ударяющее тело и мишень имеют сопоставимые размеры. Они наносят друг другу значительные повреждения (особенно страдает меньший объект), но аккреции не происходит.

Тройная точка. Температура и давление, при которых могут существовать три фазовых состояния чистой воды: жидкость, пар и твердое тело. Благодаря наличию атмосферы природные условия на поверхности Земли находятся вблизи от тройной точки.

Троянские спутники. Тела, которые обращаются по орбите планеты в стабильных точках Лагранжа L_4 или L_5 . Также известны как *коорбитальные спутники*.

Углеводороды. Соединения, состоящие из углерода C и водорода H, например метан (CH_4) и этан (C_2H_6). Существуют при восстановительных условиях.

Углеродный цикл. При тектонике плит круговорот углерода из атмосферы на дно океана, в верхние слои мантии, а затем обратно в атмосферу через жерла вулканов.

Фотосинтез. Образование углеводов и кислорода из углекислого газа и воды в содержащих хлорофилл клетках на свету.

Хондрит. Астероид или метеорит, состав которого не отличается от конденсированных твердых компонентов первичной протопланетной туманности.

Эмбрион. Планетное тело, которое быстро растет и рискует быть поглощенным.

ПРИМЕЧАНИЯ

КРАТКИЙ СПИСОК ПЛАНЕТ И ИХ СПУТНИКОВ

- 1 Данные о планетах и спутниках взяты с сайта <https://ssd.jpl.nasa.gov>. Данные по Луне и орбитам планет — с сайта <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet>. Данные по Хаймее — из D. L. Rabinowitz et al., “Photometric Observations Constraining the Size, Shape, and Albedo of 2003 EL61, a Rapidly Rotating, Pluto-Sized Object in the Kuiper Belt.” *Astrophysical Journal* 639 (2006): 1238–51 и D. Ragozzine and M. E. Brown, “Orbits and Masses of the Satellites of the Dwarf Planet Haumea (2003 EL61),” *Astronomical Journal* 137 (2009): 4766–76.

ВВЕДЕНИЕ

- 1 Противостояние (оппозиция) происходит, когда Солнце и Луна находятся на противоположных сторонах от Земли. В этот момент Луна становится абсолютно полной. Во время большинства противостояний тела не располагаются точно на одной линии, так что Луна находится вне прямой тени Земли; точно в момент противостояния полная Луна становится очень яркой из-за так называемого оппозиционного эффекта, когда свет Солнца отражается от мелкодисперсной поверхности Луны и идет прямо к вам, наподобие того, как свет фар отражается от глаз кошки. Когда противостояние идеально, происходит лунное затмение и Луна на несколько часов оказывается в тени Земли.
- 2 В цикле взаимопорождения дерево порождает огонь, огонь порождает землю, земля порождает металл, металл порождает

воду, вода порождает дерево. В цикле взаимопреодоления дерево побеждает землю, земля побеждает воду, вода побеждает огонь, огонь побеждает металл, металл побеждает дерево. Эти циклы, возможно, соответствуют механизму образования землеподобных планет, если считать, что дерево олицетворяет собой органические вещества.

- 3 Совершенно безопасно смотреть на Солнце в любительский бинокль с солнечными фильтрами — он стоит примерно 40 долларов; возможно, такой есть у вашего преподавателя естественных наук.
- 4 Тем не менее это имеет значение для бухгалтеров. Бизнесмен и пионер фотографии Джордж Истмен, основатель компании Kodak, выступал за 13-месячный Международный фиксированный календарь (каждый месяц в нем состоит из 28 дней), разработанный американским железнодорожным консультантом Мозесом Котсуортом, и в 1920-х гг. рекомендовал его другим бизнесменам. Его компания продолжала пользоваться этим календарем до 1989 г., выделяя 13 периодов оплаты, по 28 дней в каждом, и добавляя к последнему один день. (У моего бывшего работодателя были 20-дневные периоды оплаты, а также бонусный период; отсюда уже не далеко до древних вавилонян.) Котсуорт первоначально предлагал добавить 13-й месяц Сол между июнем и июлем. Конечно, Луна по-прежнему вела бы себя, как ей заблагорассудится, выбиваясь из этого мерного шага, поскольку синодический месяц (от полной луны до полной луны) составляет 29,5 суток.
- 5 Джон Китс, «Ода греческой вазе» (Ode on a Grecian Urn, 1819).
- 6 Один оборот от полудня до полудня.
- 7 В индуистском календаре также используются планеты, но в другом порядке: Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн, Луна, Меркурий, Венера. В китайском календаре цикл планет выглядит так: Солнце, Луна, Марс, Меркурий, Юпитер, Венера и Сатурн. Предполагаю, что в том, как каждая культура распределяет планеты по дням, есть какой-то внутренний смысл.

- 8 День — это один оборот Земли вокруг своей оси, но за каждый такой день Земля проходит $1/365$ часть пути вокруг Солнца, поэтому солнечный день на крошечную долю длиннее. Подобным же образом существуют синодический и сидерический месяцы. Сидерический месяц — период обращения Луны вокруг Земли относительно небесной сферы, а синодический — период между двумя полнолуниями с учетом того, что стрелка, указывающая на Солнце, поворачивается приблизительно на $1/12$ полного оборота за каждый лунный орбитальный период. Поэтому сидерический месяц равен 27,3 суток, а синодический, время между полнолуниями и основа лунного календаря, — 29,5 суток.
- 9 В оригинале автор использовал английское слово *fortnight*, которое буквально значит «четыренадцать ночей». Астрономическое понимание понятия «*fortnight*» — половина лунного цикла, 14,77 суток.
- 10 Важно, чтобы у идей, которые, вероятно, неверны, были свои защитники — в этом смысл бессрочных профессорских позиций. Например, Ави Лоэб, глава кафедры астрономии Гарвардского университета, является сторонником гипотезы, что объект 11/Оумуамуа, прилетевший из-за пределов Солнечной системы, в действительности представляет собой фрагмент межзвездного космического корабля или светового паруса. Очень важно, что он это делает. Теперь кто-то еще может проследить выводы из этого предположения, довести их до абсурда и таким образом отбросить гипотезу. Или не отбросить, и в этом случае она будет становиться надежнее после каждой проверки. Либо так, либо гипотеза превращается в заявление, ложность которого невозможно доказать, как это произошло с теориями Бруно.
- 11 Галилео Галилей, «патриций из Флоренции», как он назвал себя на титульной странице одного из своих самых известных трудов «Звездный вестник» (*Siderius Nuncius*, 1609), ярко описал, как его 30-кратный телескоп сделал Луну ближе: «В высшей степени прекрасно и приятно для зрения тело Луны, удаленное от нас почти на 60 земных полудиаметров,

созерцать в такой близости, как будто оно было удалено всего лишь на две такие единицы измерения, так что диаметр этой Луны как бы увеличился в 30 раз». (Пер. И. Н. Веселовского.)

- 12 Бытие 1:9.
- 13 Edward Tarbuck and Frederick Lutgens, *Earth Science* (Columbus, OH: C. E. Merrill Publishing Company, 1985).
- 14 Как мы увидим далее, эта система воззрений была популярна с конца XIX в. до середины 1920-х гг., и еще в 1960-е она находила отклик в сердцах ученых. В то время она называлась гипотезой планетезималей, чтобы отличаться от гипотезы туманностей Канта — Лапласа. Сегодня под планетезималиями мы понимаем нечто совершенно иное, так что я называю ее гипотезой звездного столкновения.
- 15 В 1970-е и в начале 1980-х гг. в Советском Союзе была осуществлена феноменально успешная серия запусков автоматических межпланетных станций «Венера». В 1970 г. «Венера-7» стала первым космическим аппаратом, совершившим посадку на поверхность другой планеты (помимо Луны). Далее последовало еще полдюжины аппаратов, которые изучали атмосферу и химический состав грунта, а также отправляли на Землю детальные фотографии.
- 16 Это была эпоха первого альбома Мадонны и ротапринтов — небольших печатных машин с цилиндром, которые заправлялись некой летучей жидкостью. Вы вращали ручку, чтобы долго и нудно делать копии с оригинала, на который вы потратили всю предыдущую ночь, стуча одним пальцем по клавишам механической печатной машинки. Чернила должны были равномерно распределиться по 22 листам бумаги. Ручку требовалось крутить в хорошем темпе, один ваш друг в это время ходил пить кофе, другой — в курилку. Все остальные уже сидели в аудитории, потому что вы безнадежно опаздывали.
- 17 Морской биолог Джон Менке любит учить и вдохновил ряд своих студентов на то, чтобы тоже стать преподавателями. В моем случае он подтолкнул учителя к тому, чтобы стать ученым.

- 18 Поскольку это была маленькая школа, я также преподавал английский девятиклассникам. В результате я понял, что учителя английского заслуживают более высокого жалования или более малочисленных классов, поскольку им приходится про-
верять так много работ и так много общаться с учениками.
- 19 Такой математический анализ прост; обозначим скорость как v , тогда ускорение записывается как dv/dt , где t — это время, а d — дифференциал. Так что ускорение — это изменение скорости при изменении времени, метры в секунду за секунду.
- 20 Аспирант — это студент, который сдал все квалификационные экзамены, закончил посещать занятия и теперь работает над тем, чтобы стать экспертом мирового уровня в какой-либо области.
- 21 Старты пилотируемых «Союзов» с космодрома Байконур были еще более рутинными, но их не показывали по телевидению.
- 22 Криста Маколифф, учительница из Нью-Гэмпшира, была выбрана из более чем 11 000 кандидатов, чтобы стать первым учителем в космосе.
- 23 Ожидалось, что провальным будет примерно один запуск на каждые 25, так что катастрофа не была совсем уж ошеломляющей. Участвовавший в расследовании ее причин физик Ричард Фейнман пришел к выводу, что дизайн уплотнительного кольца не соответствовал ожидаемым погодным условиям и это привело к разрыву топливного бака «Челленджера». Ущербным было и общее конструктивное решение, когда носовой конус располагался прямо перед пилотируемым космическим кораблем. Куски теплоизоляции бака, отлетавшие с обтекателя ракеты, повреждали облицовку челнока, что в 2003 г. привело к катастрофе шаттла «Колумбия», который развалился во время входа в атмосферу. Тогда погибли все семь человек, находившиеся на борту.
- 24 Это также создало интересную геополитическую ситуацию, когда нам пришлось полагаться на русских, чтобы доставлять в космос наших астронавтов. Ракета-носитель «Союз», которая продолжает оставаться одним из самых успешных

крупных средств выведения на орбиту, никогда не подвергалась никаким серьезным изменениям в конструкции. Зачем портить хорошую вещь? Соединенным Штатам следовало бы продолжать использовать ракеты «Сатурн-5».

- 25 Технологии, используемые в программе «Галилео», застыли на уровне 1970-х гг. Такая «техническая заморозка» характерна для всех космических экспедиций, поскольку там используются только сертифицированные для космоса компоненты. Так, например, на «Галилео» для хранения информации использовались катушки магнитной пленки. По мере того как некоторые ее сектора портились, инженеры подгружали на борт программный код, позволявший пропускать каждый новый плохой сектор.
- 26 Электроэнергию аппарат получал от радиоактивного распада 25 кг диоксида плутония. Поскольку период его полураспада равен 87 годам, на мощности источника энергии задержки почти не сказались.
- 27 В начале 1980-х гг., когда работа над программным обеспечением для «Галилео» завершилась, такой вещи, как сжатие изображений, еще не существовало. Инженеры, изучавшие новейшие технологии сжатия, основанные на вейвлетах, решили проблему передачи данных с Юпитера и разработали алгоритмы, которые должны были быть подгружены в компьютерную систему космического аппарата и тщательно протестированы на борту. Это был значительный риск для уже и так подвергшейся испытаниям экспедиции, экранированный от радиации компьютер которой равнялся по мощности выпускавшейся в то время машине Apple II.
- 28 Если у вас есть идея, чем можно час (или даже все утро) заниматься с целым классом школьников, сделайте доброе дело и сообщите в вашу местную школу. Учителя будут вам благодарны. А если у вас есть какое-либо качественное оборудование, например микроскопы и телескопы, которое можно пожертвовать маленькой школе, это тоже будет здорово!
- 29 Уильям Вордсворт — английский поэт начала XIX в., чей подход к странствиям на природе мне очень нравится. Джеймс

Геттон — шотландский геолог середины XVIII в., который первоначально был фермером. Он основал седиментологию и привил западной науке представления о глубоком геологическом времени.

- 30 Руслу пустынных потоков могут быть широкими, как река, но вода по ним течет только в период муссонов.
- 31 Главное зеркало Большого обзорного телескопа весит 17 тонн и имеет диаметр 8,5 м; его отлили в огромной вращающейся печи, что позволило центробежным силам придать ему почти параболическую форму. Архимед был бы впечатлен.
- 32 Тело сухопутного млекопитающего имеет размер порядка 1 м, потому что оно должно удерживаться вместе в гравитационном поле планеты, а это требует 10 кг кожи и еще нескольких килограммов расположенных под ней фасций и соединительной ткани, которые вертикально поддерживаются скелетом и длинными сильными мышцами. Более крупные тела требуют гораздо более прочной конструкции, больших расходов энергии и более крупной мускулатуры, которая выполняет больше работы. Это приводит к выделению большего количества тепла, которое нужно выводить из более массивного тела. Так что для более крупных тел самое важное — это строение; мы должны быть достаточно велики, чтобы поддерживать работоспособность большого мозга, но достаточно малы, чтобы перемещать его туда, куда нужно. То есть тот наш размер, возможно, является оптимальным для разумных существ, живущих на поверхности планеты с земной гравитацией.
- 33 Самый простой и недорогой способ создания трехмерных изображений — это анаглиф, где левое изображение стереопары проецируется в красном свете, а правое — в синем. Зритель надевает очки с соответствующими стеклами, которые пропускают в левый глаз только красный свет, а в правый — только синий. Мозг совмещает эти два набора данных как один черно-белый объемный объект.
- 34 Используя трехмерные данные сейсмической разведки с помощью радаров, мы, в принципе, можем получить

для примитивного тела (ядра кометы или маленького объекта пояса Койпера) что-то похожее на КТ или УЗИ в высоком разрешении. Это достаточно простая научная задача. P. Sava and E. Asphaug, "3D Radar Wavefield Tomography of Comet Interiors," *Advances in Space Research* 61, 2018.

- 35 Уильям Блейк, «Прорицания невинности» (*Auguries of Innocence*, 1803).
- 36 Открытие того, что невозможно ощутить, зависит от достижений физики и инженерных наук: например, от фокусировки ионного луча с точностью до нанометров или от запуска в космос гигантского телескопа. Космический телескоп «Джеймс Уэбб» должен будет закрепиться в стабильной точке L_2 системы Земля — Солнце, где его сегменты соединятся, чтобы сформировать зеркало диаметром 6,5 м, в три раза больше, чем у космического телескопа «Хаббл». Поскольку там не будет никакой силы тяжести, ветра или атмосферы, а температура может быть точно отрегулирована с помощью светозащиты, мы сможем забыть о главных проблемах всех гигантских оптических зеркал. Штука только в том, чтобы доставить все оборудование на место. Это может звучать странно, но оптические телескопы диаметром в несколько километров возможны, и даже вероятны. Используя флот маленьких космических аппаратов, несущих зеркала в строго определенном порядке, мы сможем выявить скрытые от нас пока характеристики Вселенной и ее планет. Научный прогресс идет в ногу с технологиями фиксации явлений внешнего мира.
- 37 Основное уравнение фотосинтеза, использующего солнечный свет для производства глюкозы, выглядит так: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$. Эрозия горных пород также связана с углекислым газом, который, растворяясь в воде (например, в океане), создает слабый раствор угольной кислоты H_2CO_3 , разлагающей минералы до глин и карбонатов. Если бы не фотосинтез, весь свободный кислород уходил бы на создание на морском дне грязи из минералов, смываемых в океан течением рек. Так что присутствие кислорода в атмосфере

планеты является указанием на наличие там фотосинтеза, хотя существуют и абиотические пути синтеза свободного кислорода.

- 38 Масс-спектрометр — одно из самых замечательных изобретений в истории. Основная идея состоит в том, что вы ионизируете (изымаете один электрон) атомы, придавая им единичный заряд. Затем пучок этих ионов проходит через магнитное поле и расщепляется. Чем массивнее атом, тем меньше он отклоняется при одном и том же заряде. Так что по сути вы просто взвешиваете атомы и обнаруживаете, что в некоторых из них на один или два нейтрона больше, чем в других. У большинства элементов есть один или два стабильных изотопа, то есть изотопа, которые не подвергаются радиоактивному распаду, превращаясь в другие элементы. Очень интересен элемент ксенон, у которого стабильных изотопов восемь (^{132}Xe , ^{129}Xe , ^{131}Xe , ^{134}Xe , ^{130}Xe , ^{128}Xe , ^{124}Xe , ^{126}Xe). Поскольку ксенон является благородным газом и не вступает в реакции с другими веществами, соотношение этих изотопов остается постоянным на протяжении геологической эволюции планеты и ее атмосферы, за исключением тех случаев, когда присутствует разделение их по массе. Каждый элемент и его изотопы рассказывают свои истории: ксенон говорит об атмосферах, кислород — об оксидах (горных породах и воде), гафний дает информацию о формировании ядра, а свинец — о кристаллизации.
- 39 О том, как возникло разнообразие в изотопном составе кислорода, идут бурные споры. Кислород Солнца на 7% легче (более обогащен ^{16}O) по сравнению с любым метеоритом или с горными породами на Земле, Луне и Марсе. Выходит, что некие процессы в туманности отводили более легкий кислород в значительном количестве. Возможно, это напоминало то, как при замерзании и таянии ледников легкий кислород может вытесняться и накапливаться на Земле. Эти процессы вытеснения шли в разных местах по-разному, создав различные резервуары кислорода на расстояниях орбиты Марса и орбиты Земли. По крайней мере, такова гипотеза.

- 40 Для полноты картины не будем упускать возможность того, что достаточно крупный фрагмент станет околоземным объектом марсианского происхождения, а затем разрушится, бомбардировав Землю марсианскими метеоритами.
- 41 А как насчет метеоритов, выброшенных с Земли и снова вернувшихся на нее тысячи или даже миллионы лет спустя? Горные породы легко выбрасываются с поверхности Луны в ходе образования кратеров достаточно скромного размера, и они с большой вероятностью падают на Землю, если им удастся вырваться из пут лунного тяготения. С Землей все по-другому. Она обладает мощной атмосферой, так что только очень крупный импактный кратер может извергнуть большое количество осколков, которые смогут преодолеть значительную гравитацию Земли. Почти все они в течение миллиона лет либо столкнутся с Землей, либо будут рассеяны, так что, если только крупный кратер не появился на нашей планете достаточно недавно (а такого не было), метеоритов с Земли будет очень мало, если они вообще будут. Как мы обсудим ниже, порода, изверженная из древних крупных кратеров на Земле, с большей вероятностью может сохраниться на геологически неактивной Луне.
- 42 Да, такая наука существует. Это то, что случается, когда геолог не может решить, не биолог ли он, но проводит почти все свое время в химической лаборатории, анализируя образцы.
- 43 «А как же Марс?» — спросите вы. На Марсе так холодно, что его климат определяется не тройной точкой воды, а точкой замерзания углекислого газа. Именно из него состоит марсианская атмосфера, и какая-то часть этого газа затвердевает каждую зиму, образуя новый слой полярной шапки. Вода на Марсе практически всегда пребывает в твердом состоянии, и ее немного.
- 44 На латыни слово *sapiens* означает «разумный», хотя к *Homo sapiens* это не всегда применимо.
- 45 Интерфейс просмотра изображений LROC и его домашняя страница на сайте Университета Аризоны находятся здесь: <http://lroc.sese.asu.edu>.

- 46 Интерфейс просмотра изображений HiRISE Университета Аризона находится здесь: <https://www.uahirise.org>.
- 47 Масштаб говорит нам, сколько метров укладывается в один пиксель изображения. Это не то же самое, что разрешение снимка, которое в два или три раза больше первой цифры и определяется размером самых мелких различимых деталей изображения.
- 48 NASA требует, чтобы все научные данные экспедиций архивировались и выкладывались в открытый доступ обычно не позднее чем через шесть месяцев после окончания полета.
- 49 Примерно тот же объем видеоданных каждый день загружался на YouTube в 2016 г.
- 50 На самом деле тысячелетие соответствует примерно 30-кратному повторению приставки пра-.
- 51 Научный руководитель экспедиции Алан Стерн и его соавтор Дэвид Гринспун пишут об этом в книге *Chasing New Horizons: Inside the Epic First Mission to Pluto* (Picador: New York, 2018). Русский перевод: Стерн А., Гринспун Д. За новыми горизонтами. — М.: Альпина нон-фикшн, 2019.

ГЛАВА 1: ДРЕВНИЕ РУИНЫ

- 1 Поскольку наука была сферой деятельности почти одних мужчин, эти вехи оставлены практически исключительно ими, и так продолжалось до начала XX в. Выдавливанию из научного сообщества амбициозных и творческих ученых-женщин ограничивало возможности науки и тормозило ее развитие. Это сейчас меняется, и последствия таких изменений огромны.
- 2 Николай Коперник избежал суровых последствий, так как его сочинение было опубликовано незадолго до смерти. Трактат «О вращении небесных сфер» (*De revolutionibus orbium coelestium*) вышел в свет в 1543 г. в Нюрнберге.
- 3 В те времена, как и сейчас, данные были важнее всего: когда в 1601 г. умер Тихо Браге, Кеплер унаследовал все записи о наблюдениях, проведенных его наставником. Эти записи и стали той основой, на которой Кеплер выстроил свою теорию движения планет.

- 4 Тридцать лет спустя, когда Галилей подвергся гонениям из-за своего утверждения, что Земля обращается вокруг Солнца, он отрекся от своего учения и обратился к другим сферам деятельности. Труды Галилея были запрещены, и он жил под домашним арестом до самой смерти в 1642 г. Есть мнение, что в частных беседах он продолжал настаивать: «А все-таки она вертится!»
- 5 Normand Falardeau (MA thesis, Creighton University, 1962). Вот отрывок из «Сна», где Кеплер описывает тех, кто может отправиться в путешествие на Луну (Леванию). Он дает представление, почему Джонатан Свифт был так увлечен сочинениями Кеплера и как они вдохновили его на «Путешествия Гулливера»:

Остров Левания лежит в пятидесяти тысячах германских миль над Землей в эфире. Путь с Земли на Леванию или с Левании на Землю редко бывает открытым. Если путь открыт, то мы, духи, преодолеваем его легко. Переносить же по нему людей чрезвычайно трудно и опасно для их жизни. Мы не допускаем в свою компанию людей вялых, тучных или болезненных, но охотно берем с собой тех, кто проводит время, непрестанно упражняясь в верховой езде, или часто совершает плавания в Индии, кто привык питаться сухарями, чесноком, вяленой рыбой и прочей малоаппетитной провизией. (Здесь и ниже — пер. Ю. А. Данилова.)

Должно быть, это были астронавты. И, показывая, что он понимает, что такое ускорение и инерция, ниже автор описывает их ощущения в начале полета:

Всякий раз отправление действует на человека подобно сильнейшему удару, поскольку он ощущает такой толчок, будто им выстрелили из пушки и он летит через горы и моря. Поэтому, прежде чем отправляться в путешествие, человека необходимо усыпить наркотиками и опиумом. Все члены тела надлежит расположить так, чтобы туловище не оторвалось от зада, а голова от туловища и удар распределился по всем членам. Затем возникает новая трудность: сильный холод и затрудненность дыхания. Холод мы умеряем присущей нам от природы силой, а дыхание облегчаем, прикладывая к ноздрям смоченную водой губку.

- 6 Из N тождественных правильных многоугольников можно составить только пять правильных многогранников, или платоновых тел (N в данном случае может быть любым числом). Первый — это тетраэдр, четыре треугольника, три из которых сходятся в каждой вершине. Куб состоит из шести квадратов, сходящихся по три в каждой вершине. Октаэдр — восемь треугольников, по четыре в вершине. Додекаэдр — 12 пятиугольников, по три в вершине. Икосаэдр — 20 треугольников, по пять в вершине. Это все, других нет.
- 7 В древнегреческих и древнекитайских астрономических памятниках есть указания на существование Урана, поскольку его можно разглядеть невооруженным глазом (только иногда и с трудом). Но Кеплер, кажется, об этом не знал.
- 8 Дома, построенные на граните, следует проверять на наличие радона, который является одним из элементов в цепи ядерного распада от урана до свинца. Также, на случай, если вам интересно: символ Pb происходит от латинского *plumbum*, отсюда и английское слово *plumber* (водопроводчик) — человек, который работает со свинцовыми трубами и пайкой.
- 9 Сила притяжения между двумя телами массой m и M , разделенных расстоянием r : $F = GmM/r^2$, где G — это универсальная гравитационная постоянная, число, которое, по всей видимости, является одинаковым для всей Вселенной. Сила, удерживающая вас на стуле, это ваша масса m , умноженная на массу Земли M , деленная на радиус Земли r в квадрате, и все это умножается на постоянную $G = 6,6741 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$. Размерность $\text{м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ — это то, что нужно, чтобы получить силу при умножении постоянной на mM/r^2 , где масса измеряется в килограммах (кг), а радиус Земли — в метрах (м). Если вы весите 100 кг, то сила, удерживающая вас на стуле, составляет 981 кг м/с² или 981 ньютон. Разделите эту силу на вашу массу и получится, что каждый килограмм вашего тела испытывает силу в 9,81 ньютона. Второй закон Ньютона гласит, что сила равна массе, умноженной на ускорение, $F = ma$, иначе говоря, ускорение, которое вы ощущаете на поверхности Земли: $a = F/m$, то есть 9,81 м/с². То есть после

одной секунды свободного падения яблоко ударит вас по голове со скоростью 9,81 м/с.

- 10 Перигелий Меркурия (точка, где планета ближе всего к Солнцу) $a_p = 0,31$ а. е., в то время как афелий (самая дальняя точка от Солнца) $a_a = 0,47$, так что эксцентриситет орбиты $e = (a_a - a_p) / (a_a + a_p) = 0,21$. У идеальной круговой орбиты $e = 0$, а у Земли $e = 0,017$. Вы можете нарисовать идеальный эллипс с помощью двух кнопок, нитки и листа бумаги. Воткните одну кнопку там, где должно быть Солнце, а другую — на некотором расстоянии, которое представляет собой эксцентриситет. Сделайте между кнопками нитяную петлю с некоторой слабину, натягивайте ее карандашом и перемещайте его по бумаге так, чтобы нить оставалась натянутой. В итоге вы начертите эллипс.
- 11 Всю жизнь Ньютон был набожным христианином, доказав, что человек может радикально поменять свой взгляд на мир, не поколебав свою веру.
- 12 Третий закон Кеплера в обозначениях закона всемирного тяготения Ньютона выглядит следующим образом: $P^2 = 4\pi^2 a^3 / G (M + m)$, где P — период (время, за которое тело делает оборот по орбите), a — радиус орбиты, G — гравитационная постоянная $G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}$, M и m — массы, причем массой m можно пренебречь, если M гораздо больше. Чем крупнее планета (то есть больше M), тем короче период (быстрее оборот), наподобие того, как камень в праще вертится быстрее, если вы сильнее тянете за веревку.
- 13 Philip C. England, Peter Molnar, and Frank M. Richter, "Kelvin, Perry, and the Age of the Earth." *American Scientist* 95 (2007): 342–49.
- 14 Кельвин был правоверным христианином, который стремился буквально читать библейские тексты, одновременно доводя физические рассуждения до их логического завершения.
- 15 Радиоактивные элементы концентрируются в породах коры, так как в то время, когда затвердевала земная мантия, радиоактивные атомы оказались *несовместимыми* — то есть они не находили себе места в формирующихся кристаллах. (Более

понятный пример — соленая вода: когда вы замораживаете ее, она становится еще солонее, потому что в кристаллической решетке льда не находится места для атомов соли.) В итоге они по большей части оставались в жидкой фазе. Излияния и внедрения, которые приводили к образованию пород коры, были, таким образом, обогащены этими несовместимыми радиоактивными элементами. Подобным образом в лунной магме создавался слой повышенной концентрации урана и тория (слой KREEP), что мы обсудим ниже.

- 16 Он оценивал приливную диссипацию внутри Земли, опираясь на современное состояние континентов и океанов. Чтобы затащить эти океаны на побережье и возвращать обратно, требуется много энергии, так что диссипация велика, как и скорость расширения орбиты. Но большую часть геологической истории Земли на ней был только один суперконтинент и один суперокеан (или просто океан без каких-либо континентов), так что диссипация была меньше.
- 17 Для этих измерений проблему представляло загрязнение свинцом, ведущее к большим погрешностям в рассчитанном возрасте, так что Паттерсон разработал протокол организации чистой комнаты для определения свинца. В результате он стал ведущим специалистом по повсеместному распространению в окружающей среде промышленного свинца, о котором до этого никто и не подозревал. Это привело к тому, что из бензина, красок и муниципальных систем водоснабжения были устранены токсичные свинцовые примеси.
- 18 Циркон — это силикатный минерал ZrSiO_4 , в состав которого входит элемент цирконий Zr. Циркон формируется при высокой температуре и сохранился в некоторых самых древних горных породах не только на Земле, но и в лунных образцах и древних метеоритах. Когда циркон кристаллизуется, уран встраивается в его решетку в измеримых количествах, но со свинцом этого не происходит. Таким образом, получается великолепный хронометр. (Уран *совместим* с этой кристаллической структурой, замещая Zr и, следовательно, оказываясь в кристаллах. Свинец *несовместим* и не находит себе

в них места; таким образом любой свинец, который вы обнаружите в кристалле циркона, образовался в результате ядерного распада.)

- 19 Еще один подход называется датированием по следам распада. Когда ядра урана внутри силикатного кристалла разрушаются, они испускают частицы, которые повреждают кристаллическую решетку. Следы распада можно увидеть под микроскопом как свидетельства прошедшего времени, миллиардов лет. Также можно поискать следы космического излучения; они могут рассказать, как долго будущий метеорит находился на поверхности астероида, Луны или другого не имеющего атмосферы тела, подвергаясь воздействию быстрых нейтронов и других высокоэнергетических частиц, которые пробивают слой камня на десятки сантиметров вглубь и вызывают радиационные повреждения. Кстати, именно поэтому любому долговременному убежищу для астронавтов нужна защита от излучения, эквивалентная метровому слою камня.
- 20 Тем не менее забавно, что при этом мы способны восстановить последовательность событий, происходивших в маленькой долине в течение двух часов в тот день, когда упал метеорит, вызвавший событие К / Т!
- 21 Правило названо в честь опубликовавшего его физика и математика Иоганна Тициуса из Виттенбергского университета, а также человека, который популяризовал эту теорию, — Иоганна Боде, директора Берлинской обсерватории.
- 22 Когда планеты не разрешены, то есть выглядят просто как точки света, мы можем судить об их размере только по яркости свечения, поскольку чем больше их площадь, тем больше солнечного света они отражают. Но яркость зависит и от их *альбедо* — от того, насколько светлым или темным является их вещество (то есть снег ли это, грунт или уголь). Церера значительно темнее Луны, а ее диаметр в четыре раза меньше.
- 23 Мы не видели большинство планет во многих системах. Поскольку информация не полна, при определенной подгонке (подобно тому, как первый ноль без достаточных оснований соединяется с прогрессией 3, 6, 12, ..., чтобы включить

Меркурий в правило Тициуса — Боде), больших измерительных и других ошибках, а также допуске некоторых исключений (например, астероидов) правило Тициуса — Боде можно применить практически к любой системе. В системе экзопланет, обнаруженной методом прохождений, мы можем и не увидеть планету размером с Нептун, орбита которой наклонена по отношению ко всей системе. В одной статье на основании правила Тициуса — Боде (или его вариантов) были сделаны предсказания положения определенного числа недостающих планет, и в нескольких случаях их там и обнаружили!

- 24 Однажды ночью мне в голову пришел такой вопрос: существует ли такая вещь, как «сегодня», раз с чьей-то точки зрения мы всегда находимся в прошлом?
- 25 Словом *γάλαξίας*, «галаксиас», греки называли Млечный Путь. Оно произошло от греческого слова *γάλα*, «молоко», в честь разлившегося по небу молока Геры.
- 26 В целом любое газовое облако имеет свою скорость звука — например, скорость звука в воздухе на Земле. Она является функцией от температуры и плотности газа. Если газ «густой», со скоростью звука большей, чем скорость коллапсирования, то морщины будут разглаживаться быстрее, чем происходит образование сгустков. Если установить эти параметры равными друг другу (скорость гравитационного коллапса равна скорости звука), это даст характерный линейный масштаб, определяющий массы капель, которым предстоит стать звездами. Именно так работают астрофизика и планетарная геофизика — сравнивая что-то с чем-то и определяя характерные масштабы размеров и времен.
- 27 Космический год, один оборот Галактики вокруг своей оси, составляет от 225 до 250 млн лет. Так что за 4,6 млрд лет мы сделали 18–20 оборотов.
- 28 Магеллановы Облака — наши крупнейшие галактики-спутники. Древние европейские астрономы их не знали. Чтобы их увидеть, до появления астрофотографии приходилось совершать далекое путешествие с дорогостоящим оборудованием.

- 29 Туманность Андромеды, ближайшая к нам независимая галактика, в три раза массивнее нашей, в ней триллион звезд. Хотя Вселенная расширяется, Туманность Андромеды постепенно движется к нам со скоростью 110 км/с. Это означает, что через 4 млрд лет, как раз перед тем, как Солнце превратится в красного гиганта, она столкнется с нашей Галактикой.
- 30 Более математически проработанный вариант этой модели, включающий в себя предсказание масс планет, был предложен прославленным французским математиком Пьером-Симоном де Лапласом в 1790-е гг.
- 31 Ионизированный атом избавлен от одного или более электронов; таким образом он приобретает общий положительный заряд.
- 32 Хол Левинсон (один из авторов модели Ниццы и научный руководитель полета аппарата «Люси») однажды сказал мне: «Дай человеку молоток, и для него все будет выглядеть как гвоздь». На что я ответил: «А все и является гвоздями».
- 33 Как обсуждается ниже, свет от звезды представляет собой не непрерывный спектр. Линии поглощения и излучения соответствуют определенным энергетическим переходам в атомах гелия, водорода, кальция, железа и других элементов. Поэтому, чтобы количественно оценить красное смещение, ученые измеряют сдвиг узнаваемых спектральных линий.
- 34 Согласно современной космологии, пространство со временем расширяется повсюду. Свет не распространяется относительно нас с большей длиной волны, как это происходит, когда вдоль улицы катится вой сирены: ее тон выше, когда машина едет к нам, и ниже, когда от нас. Вместо этого световые волны разрежаются по мере движения, потому что пространство, в котором они движутся, расширяется. Чем дальше они путешествуют сквозь космос, тем сильнее удлиняются. Это и называется красным смещением, которое отличается от эффекта Доплера.
- 35 По иронии судьбы первая оценка Хаббла для этой постоянной переоценила скорость расширения почти в десять раз. Получалось, что возраст Вселенной составляет менее 2 млрд лет. Это

вызывало вопросы, потому что к концу 1920-х гг. радиоизотопное датирование по свинцу уже показало, что самые древние горные породы и метеориты в два раза старше. Другая отрасль астрофизики тоже свидетельствовала, что 2 млрд лет — слишком короткий срок, поскольку по термоядерной модели эволюции звезд самые старые звезды были на десятки миллиардов лет старше! Выяснилось, что Хаббл неверно интерпретировал расстояние до галактик (ошибившись где-то в десять раз), не поняв, что некоторые из объектов в соседних галактиках являются не звездами, а скоплениями из тысяч звезд.

- 36 Радиоизотопное датирование метеоритов и динамическая модель аккреции, описанная позже, дали согласующиеся результаты — от 1 до 3 млн лет для первых планетных тел вроде Марса и Меркурия и от 10 до 100 млн лет для гигантских столкновений, создавших Землю и Венеру. Самые распространенные древние метеориты, хондриты, сформировались в течении первых 0,3–3 млн лет, а самые древние метеориты, среди которых много железных, а также богатые кальцием и алюминием включения внутри первичных хондритов, образовались за первые 0,3 млн лет.
- 37 Конечно, если мы не *видим* их (то есть не получаем разрешенного изображения), тогда мы вынуждены догадываться, что же в действительности означает инфракрасный всплеск. Самый простой ответ — это протопланетный диск. Но для некоторых самых необычных наблюдений выдвигалось даже предположение об «инопланетных мегаструктурах». Тут я настроен скептически. При образовании звезд, как и при образовании планет, возникают кольца вещества, которые подогреваются таким образом, который хорошо согласуется с данными инфракрасных наблюдений. Станные, меняющиеся со временем системы — это вовсе не инопланетные мегаструктуры на разных этапах строительства (хотя, возможно, парочка таких во Вселенной и найдется...), но просто еще одна система в ходе столкновения своих молодых планет.
- 38 Телескопы (тарелки диаметром в 7 или 12 м) размещаются оптимальным образом в зависимости от природы

наблюдений — например, нужна ли вам максимальная чувствительность или максимальное разрешение снимка. Каждый телескоп на самом деле представляет собой точно откалиброванную радиоантенну гигагерцевого диапазона; полученные ими сигналы складываются в изображения.

- 39 Спектральные линии йода и других элементов сдвинуты в свете этих звезд относительно спектральных линий аналогичных веществ на Земле.
- 40 Открыта швейцарскими астрономами Мишелем Майором и Дидье Кело в 1995 г. См.: Michel Mayor and Didier Queloz, "A Jupiter-Mass Companion to a Solar-Type Star," *Nature* 378, no. 6555 (1995): 355–59.
- 41 Область, где огромный вклад внесли астрономы-любители, — это последующие наблюдения предсказанных прохождений. Небольшие вариации во времени прохождений, связанные с гравитационным воздействием других планет системы, могут быть измерены с помощью небольших телескопов.
- 42 Для того чтобы различить 100-километровые структуры на поверхности планеты, обращающейся вокруг звезды в 30 световых годах от Земли, нам понадобится разрешение в 50 миллиардных угловой секунды. Разрешение телескопа обратно пропорционально его диаметру, так что такой массив телескопов должен иметь линейные размеры как минимум в 20 км, причем отдельные устройства должны быть размещены с погрешностью ниже длины волны, то есть менее одной десятитысячной миллиметра. Более того, поскольку планеты в миллиард раз тусклее, чем звезда, вокруг которой они обращаются, каждый телескоп в массиве должен иметь заслонку или какое-то другое приспособление, блокирующее звездный свет. Все это может показаться невозможным, но то, что сегодня стало рутинными астрономическими наблюдениями, 30 лет назад казалось почти чудом.
- 43 Или в двойную (или тройную) звезду. Двойные звезды на самом деле более распространены, чем одиночные, такие как наше Солнце; мы видим на небе всего несколько из них, потому что по большей части одна из звезд во много

- раз тусклее другой или они расположены очень близко друг к другу.
- 44 По-видимому, у звезд с высокой металличностью есть склонность иметь на близких орбитах газовые гиганты. Возможно, это происходит из-за того, что при наличии большого количества таких элементов твердые тела рано конденсируются и собирают водород и гелий до того, как их развеет звездный ветер.
 - 45 Если внешняя фотосфера звезды хорошо перемешана, тогда ее металличность говорит о составе звезды в целом, за исключением продуктов термоядерного синтеза в ядре. Это, в свою очередь, может указывать и на состав и молекулярного облака, из которого возникла звезда, и системы планет, которая сформировалась вокруг нее.
 - 46 По мнению астронома Джонатана Фортни, у примерно 1% солнцеподобных звезд соотношение C:O может быть около 0,8–1,0. См.: “On the Carbon-to-Oxygen Ratio Measurement in Nearby Sunlike Stars: Implications for Planet Formation and the Determination of Stellar Abundances,” *Astrophysical Journal Letters* 747 (2012).
 - 47 В случае с углеродной планетой верхние слои коры могут быть слабее, чем нижние: графит расположился бы там над алмазами. Возможно, эта ситуация аналогична земному ледяному щиту на гранитном основании.
 - 48 По иронии судьбы сегодня к воздействию коронального выброса массы наиболее уязвима наша *искусственная* сеть, потому что связанный с этим событием электромагнитный импульс может нарушать работу больших участков электросети на срок от нескольких недель до двух лет. В 1859 г. самый крупный за всю современную историю выброс коронального вещества вызвал искры в телеграфных отделениях и великолепные северные сияния. В 2013 г. лондонская страховая компания Lloyd's оценила, что ущерб от подобного коронального выброса в современных США составит от 0,6 до 2,6 трлн долларов.
 - 49 Pierre Kervella et al., “The Close Circumstellar Environment of Betelgeuse V. Rotation Velocity and Molecular Envelope Properties from ALMA,” *Astronomy & Astrophysics* 609 (2018).

- 50 Верхний индекс соответствует суммарному количеству протонов и нейтронов в ядре — это называется *атомной массой*.
- 51 Возможно, именно благодаря килоновым в космосе появились более тяжелые элементы, такие как золото и молибден.
- 52 Первая гравитационная волна была зарегистрирована лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерваторией (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) в сентябре 2015 г. Она была вызвана слиянием двух черных дыр на расстоянии 1,3 млрд световых лет от Земли.

ГЛАВА 2: КАМНИ В ПОТОКЕ

- 1 Аристотель, «Вторая аналитика».
- 2 Подобно Конфуцию и другим классикам ранней античности, Пифагора помнят отчасти как человека, а отчасти — как олицетворение периода или школы мысли. Одна из легенд гласит, что Пифагор был смертным сыном Аполлона.
- 3 Мы говорим, что такие города, как Асуан, находятся на Тропике Рака, около 23° к северу от экватора, или на противоположном ему Тропике Козерога к югу, где в полдень в день солнцестояния Солнце стоит в зените.
- 4 В дни своего расцвета в III и II вв. до н. э. Александрийская библиотека насчитывала десятки или сотни тысяч египетских сочинений по математике и естественным наукам, а также тысячи переведенных работ из Вавилона и Африки. Китайские и индийские ученые труды, уходящие вглубь веков на тысячи лет, дошли до нас так же фрагментарно. Вавилоняне, особенно в VIII и VII вв. до н. э., были самым передовым народом своего времени и оставили наиболее подробные астрономические записи: например, они обнаружили, что последовательность лунных затмений имеет периодичность в 223 месяца. Они поставили астрономию на фундамент измерений, введя фиксацию времени и углов. (Когда в 331 г. до н. э. Александр Македонский захватил Вавилон, астронома Кидинну зарубили мечом, видимо за то, что он отказывался переводить астрономические таблицы.) В Западном полушарии до нас дошли только намеки на значительное астрономическое наследие

древних майя, ацтеков и инков; эти и другие американские культуры были стерты с лица земли испанцами, которые намеренно уничтожили все их письменные источники; то, что сохранилось, — это в основном курганы. Подобным же образом в Камбодже и Центральной Африке мы можем только гадать о том, что их древние обитатели думали об астрономии и математике, по намекам, которые находим в развалинах храмов, на резных изображениях и в табличках.

- 5 Оценка Эратосфена основывалась на том, сколько времени требуется пешеходу, чтобы преодолеть определенное расстояние, и, таким образом, была приблизительной. Были возможны и прямые измерения с помощью канатов, но только небольших расстояний. Греческому стадию подобна английская мера длины фурлонг, которая соответствует длине борозды при вспашке — одна восьмая мили или десять чейнов. (Площадь прямоугольника в один чейн на один фурлонг равна одному акру.) Как следует из названия (англ. chain — «цепь»), чейн состоит из 100 линков («звеньев»), которые землемеры носили с собой.
- 6 Естественная единица измерения углов — это *радиан*, который определяется как расстояние по дуге вдоль окружности, деленное на радиус этой окружности. Так что 2π радианов — это одна полная окружность, 360° . Размер Луны, деленный на расстояние до нее, равен угловому диаметру Луны в радианах. Луна занимает $0,5^\circ$, то есть это половина $1/360$ от 2π , примерно $1/110$ радиана. Таким образом, диаметр Луны — это $1/110$ расстояния до нее.
- 7 Если Земля — это баскетбольный мяч под кольцом площадки стандартного размера, то в этом же масштабе Луна — это теннисный мячик на трехочковой линии. Солнце — 25-метровый бассейн в 2,8 км к востоку. Крупные астероиды в околоземном пространстве — это крупинки соли, рассыпанные по баскетбольной площадке. Астероиды Главного пояса находятся в нескольких километрах, некоторые из них размером с виноградину или изюмину, но большинство примерно как зерна риса.

- 8 Владелец ресторанички, где я часто бываю, по словам официанта, непреклонно верит в то, что Земля плоская. Также он полагает, что мир окружен прозрачным куполом, а радуга появляется, когда солнечные лучи преломляются сквозь него. Возможно, он верит, что Солнце везет по небу Гелиос. (Да, это пиццерия.)
- 9 В этом коротком письме пересказывается содержание гораздо более объемного труда, который был утерян.
- 10 Помимо изобретения экспоненциального представления, Архимед придумал, как совершать действия с числами произвольной величины. Деление двух больших чисел состоит в том, чтобы вычесть их степени: $10^a / 10^b = 10^{a-b}$. Их произведение можно получить, сложив степени: $10^a \times 10^b = 10^{a+b}$. (Заметьте, что между значением, к которому пришел Архимед, и числом, которое получил я, используя предполагаемый им размер Вселенной и диаметр песчинки, есть расхождение, но спорить об этом бессмысленно, потому что труд Архимеда утерян.)
- 11 Первое равенство вы можете доказать, записав уравнение $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots = x$, затем удвоив его: $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots = 2x$, а затем следует вычесть уравнения. Вуаля! Все члены сокращаются, и вы получаете $x = 1$. Во втором случае вы начинаете с квадратного листа бумаги, делите его на четыре равных по размеру квадрата, делите их на равные по размеру квадраты и так далее. Посмотрите, получится ли у вас это доказать.
- 12 Когда активность Солнца велика, солнечные протоны высокой энергии представляют опасность для астронавтов, но они очень ценны для ученых, потому что прощупывают то, что находится в верхнем метре реголита, куда могут проникнуть. Там, где в этом верхнем метре присутствует вода в любой форме (то есть в затененных районах или у полюсов), будет происходить ослабленное отражение солнечных протонов, потому что входящий протон с большей вероятностью столкнется с другим протоном, а именно с атомом водорода в составе воды. Это погасит его скорость, не дав ему отскочить. Столкновение с массивным атомом отразит протон. Именно благодаря тому, что солнечные протоны бьются в лунную

- поверхность и многие из них внедряются в нее как водород, мы узнали, что кое-где на Луне много подповерхностной воды.
- 13 Если вы не знакомы с «Микрографией», предлагаю вам почитать ее, а потом вернуться сюда: <http://www.gutenberg.org/ebooks/15491>.
 - 14 Слово «кратер» происходит от греческого *κράτης* — церемониальный сосуд для вина. Вам нужно знать контекст, чтобы разобраться, является ли данная геологическая особенность вулканическим или импактным кратером.
 - 15 Пусть D будет линейным охватом фотоизображения — сколько метров поверхности вы видите. Площадь изображения составит D^2 . Теперь, если количество кратеров размера D на единицу площади планеты пропорционально D^{-2} , количество кратеров на любом снимке будет постоянным, неважно, какое расстояние при этом вас отделяет от планеты. Степени сокращаются, так что этот идеальный пейзаж будет казаться одинаковым при любом увеличении.
 - 16 Теперь из результатов компьютерного моделирования мы знаем, что железное ударяющее тело рассеялось бы при взрыве, так что в кратере мало что можно было бы обнаружить.
 - 17 У меня хранятся несколько старых карт различных регионов Луны, оставшихся от естественно-научного семинара программы «Аполлон», проходившего в новом кампусе Калифорнийского университета в Санта-Крус в 1967 г. На картах имеются карандашные пометки, которые были сделаны в тот же период, — например, что цепочка кратеров, отходящая от 93-километрового кратера Коперник, представляет собой «зарождающиеся вулканы». Сегодня мы знаем, что они являются вторичными импактными кратерами, возникшими при падении фрагментов, изверженных из первичного кратера.
 - 18 Первым и пока единственным геологом, шагнувшим на поверхность Луны, стал доктор Харрисон Шмитт с «Аполлона-17».
 - 19 Идею о выживании слабейших в 1970-е и 1980-е гг. отстаивал Дональд Дэвис, астрогеофизик из обсерватории в Тусоне.

Помимо прочего, он был соавтором идеи об образовании Луны в результате гигантского столкновения. (Не следует путать его с Доном Дэвисом, художником, чьи работы использованы в этой книге.) Реагируя на открытие мегакратеров на астероиде Матильда, Дэвис ссылаясь на деревянные ребра прочности в стенах глинобитных фортов Юго-Восточной Аризоны, как на пример того, как пористый астероид может противостоять фатальным на первый взгляд столкновениям. См.: E. Asphaug, "Survival of the Weakest," *Nature* 402 (November 11, 1999): 127–28.

- 20 Margarita Marinova, Oded Aharonson, and Erik Asphaug, "Geophysical Consequences of Planetary-Scale Impacts into a Mars-Like Planet," *Icarus* 211, no. 2 (2011): 960–85.
- 21 Gregor Golabek et al., "Coupling SPH and Thermochemical Models of Planets: Methodology and Example of a Mars-Sized Body," *Icarus* 301 (2018): 235–46.
- 22 Радиолокатор с синтезированным раскрытием антенны создает волновое поле и использует направление движения космического аппарата, чтобы сконструировать «диафрагму», с помощью которой можно сфокусировать отраженные изображения. Да, это сложно, но это работает.
- 23 Первоначально его идеи высмеивали.
- 24 Цикл образования океанического бассейна, его закрытия и восстановления единства континента называется циклом Вилсона в честь канадского геофизика Джона Вилсона. Временной масштаб тут составляет от 200 до 300 млн лет, и это в несколько раз больше среднего возраста океанической коры.
- 25 Все это смесь теории и догадок, но она подкрепляется данными *сейсмологии*. Визуализация данных о скорости распространения сейсмических волн показывает: теплые (с низкой скоростью) материалы поднимаются под рифтами, подтапливая их вверх, а плотные (с высокой скоростью) мантийные струи погружаются с краями плит. Сейсмология использует данные, полученные во время землетрясений, чтобы создать отображение того, как быстро упругая энергия распространяется внутри различных слоев и регионов Земли.

Через холодные твердые плиты и в твердом внутреннем ядре волны движутся быстрее, чем через частично расплавленную мантию или через жидкое внешнее ядро. В результате обработки огромного количества данных от множества станций получается трехмерная модель скорости распространения сейсмических волн. Так что вы можете «видеть» (хоть и очень нечетко) зоны с низкой скоростью, наполненные горячей кашцей из кристаллов, и быстрые зоны, соответствующие холодными, опускающимися вниз плитами. «Кладбище плит», оставшееся от древней тектоники, как предполагается, находится в низкоскоростной зоне сейсмических отражений на границе ядра и мантии.

- 26 Вариант творческого подхода к геологии катархея можно найти в статье M. Santosh, T. Arai, and S. Maruyama, “Hadean Earth and Primordial Continents: The Cradle of Prebiotic Life,” *Geoscience Frontiers* 8, no. 2 (2017): 309–27.
- 27 Чикшулуб образовался одновременно с Деканскими траппами, расположенными там, где сейчас находится Центральная Индия. Это большая магматическая провинция, которая также должна была очень значительно, но более постепенно изменять атмосферу из-за высвобождения больших объемов газов из мантии. Хотя судя по всему определенные экосистемы уже приходили в упадок, мел-палеогеновое вымирание было вызвано столкновением с астероидом.
- 28 Столкновение оказало особенно значительное влияние на биологию, потому что астероид попал в осадочные отложения, из которых в атмосферу высвободились значительные количества сульфатов в виде аэрозолей и взвеси мелких частиц. Реагируя с водой сульфат-ионы образуют серную кислоту, которая понизила pH океанов до того уровня, при котором растворился известковый планктон в верхней сотне метров океана.
- 29 Мощные толщи известняка отложились поверх кратера Чикшулуб после столкновения. Сегодня здесь можно обнаружить несколько самых замечательных из всех когда-либо исследованных пещер. Знаменитые мексиканские сеноты — окруженные

высокими стенками известняковые озера, которые украшают календари майя в тусонских закусовых, — появились в результате карстовых провалов в третичных известняковых образованиях вокруг Чикшулуба. По мере эрозии верхних слоев километровый слой отложений растягивался, и это приводило к возникновению трещин и лабиринтов пещер. Подозреваю, что подповерхностный океан подверженного приливным силам и испещренного кратерами Ганимеда имеет сеть пещер, протянувшуюся на тысячи километров.

- 30 В конце концов его обнаружили в данных сейсмологической разведки мексиканской государственной нефтегазовой компании *Petróleos Mexicanos* (PEMEX). Эта детективная история сама по себе примечательна начиная с первоначальной находки, сделанной в конце 1970-х гг. геологом-нефтяником Гленом Пенфилдом, и заканчивая «открытием открытия» аспиранта-планетолога (в те времена) Алана Хилдебранда.

ГЛАВА 3: СИСТЕМЫ ВНУТРИ СИСТЕМ

- 1 Атомы водорода, в ходе термоядерного синтеза сливаясь в атомы гелия, каждый раз теряют немного массы, потому что структура ядра становится более прочной; согласно уравнению Эйнштейна $E = mc^2$, при этом высвобождается энергия. Из-за термоядерного синтеза Солнце теряет массу со скоростью 4 млн тонн в секунду, но вырабатывает энергию. Наша Галактика теряет в виде mc^2 примерно одну солнечную массу каждую тысячу лет.
- 2 Время образования ударного кратера тем больше, чем крупнее само событие, — это легко понять. Другие физические характеристики также «масштабируются». Анализ «методом размерностей» основан на том факте, что, какое бы уравнение вы ни вывели, размерности величин должны соответствовать. Если это уравнение скорости чего-то, результат должен быть в метрах в секунду. Все на свете можно представить через фундаментальные единицы или размерности: время (секунды, с), расстояние (метры, м) и масса (килограммы, кг). Другие единицы выводятся из них: скорость (расстояние за единицу

времени, м/с), плотность (масса на единицу объема, кг/м³), ускорение (скорость на единицу времени, м/с²), сила (кг · м/с²) и так далее. Предположим, вам нужно уравнение для диаметра кратера (м), а все, что вы знаете, — это скорость ударяющего тела (обычно 15 000 м/с), ускорение свободного падения (1,6 м/с² для Луны) и плотность (2700 кг/м³ для лунной коры). То, что размерность должна соответствовать, оставляет вам очень узкий набор математических уравнений. Затем вы ставите эксперименты в лаборатории, подгоняете уравнения к данным, и в результате появляются *законы масштабирования*. Именно так ученые используют лабораторные эксперименты и данные, полученные во время испытаний ядерного оружия, чтобы предсказывать физические характеристики ударного кратерообразования с масштабами в сотни и тысячи километров.

- 3 Именно так работает силовой гироскоп, контролирующий положение космического аппарата: мотор раскручивает маховик, так что аппарат крутится в другую сторону, и вы можете направлять его туда и сюда, ориентируя солнечные панели на Солнце.
- 4 С помощью небольших геометрических расчетов вы можете доказать, что вероятность такого столкновения пропорциональна $\sin(2\theta)$, где θ — это угол удара. Пик этой функции приходится на 45°, а вероятность идеального лобового столкновения стремится к нулю, $\sin(0) = 0$, как и столкновения по касательной, $\sin(2 \cdot 90^\circ) = 0$.
- 5 Постоянная Ньютона $G = 6,672 \cdot 10^{-8}$ кубических сантиметров на грамм в секунду в квадрате. Она вводится в законе всемирного тяготения $F = GMm/r^2$, где F — это сила притяжения между двумя телами, одно из которых имеет массу M , а другое — массу m , которые разделены расстоянием r . Мне кажется, что должна быть причина, по которой все это кажется таким простым или почти простым.
- 6 Швейцарский астрофизик Александр Эмзенхубер доказал, что цепочки столкновений более вероятны, чем единичные гигантские столкновения с последующим слиянием,

и что олигархи могут скакать от цели к цели (иначе говоря, от столкновения с оставлением места происхождения с Венерой к удару о Землю) достаточно продолжительное время. Как бы то ни было, цепочка столкновений рано или поздно прерывается окончательным слиянием, которое приводит к формированию протолунного диска, потому что диск раскручивается в основном благодаря моменту импульса сливающихся ядер. Это означает, что стандартная модель образования Луны, видимо, верна, поскольку для аккреции столкновение должно быть медленным и, скорее всего, происходить под углом от 30° до 60° . Но нужно учитывать, что в предыдущих гигантских столкновениях между Прототейей и Протоземлей оба тела уже могли перемешаться; мы говорим об одном таком событии, или даже двух. На самом деле есть вероятность, что Тейя прилетела от Венеры после столкновения с оставлением места происхождения.

- 7 Химические свойства водной среды определяются такими факторами, как pH и соленость. Большая часть поверхности Земли — это открытый соленый океан, который является слабоосновным. Его pH = 8,1, и он понижается, тогда как нейтральный показатель — 7.
- 8 В одних лабораториях изучают физику льдов при низком давлении, а в других — физические и термодинамические свойства воды, льдов, рассолов и других материалов при высоком давлении. Для этого используют ячейки высокого давления с алмазными наковальнями, которые позволяют получать точные температуру и давление, напоминающие условия внутри планет. В таких ячейках применяются алмазы ювелирного качества, которые пропускают лазерные лучи, что позволяет ученым следить за происходящим в ячейке.
- 9 Помимо фазы чистого льда, существуют *клатраты*. Там молекулы воды образуют как бы твердые ячейки, в которые заключены молекулы метана или другого вещества. Метановые клатраты стабильны в глубине холодных океанов. Если поднять кусок такого клатрата наверх, он выглядит как лед, но его можно поджечь!

- 10 Курт Воннегут, «Колыбель для кошки» (Cat's Cradle, 1963). Лед-девять у Воннегута — это фазовое состояние воды, которое в момент соприкосновения с любой другой водой при температуре ниже 45,8 °C (не забывайте, мы говорим о художественном вымысле!) запускает кристаллизацию этой воды в лед-девять. Он был изобретен военными, чтобы солдатам не надо было ползать по грязи. Не буду рассказывать вам, как заканчивается книга, но одна из последних глав называется «Великий А-бумм!» (пер. Р. Райт-Ковалевой).
- 11 Кристаллизация воды высвобождает энергию, удерживая систему у точки замерзания. Подобным же образом тающий лед потребляет энергию без изменения температуры, мешая поднять температуру выше нуля. Если вы опустите термометр в стакан с водой и поставите его в морозилку, через некоторое время (в зависимости от того, сколько у вас было воды, при какой начальной температуре и насколько холодно в морозилке) термометр станет показывать 0 °C. В этот момент начнет кристаллизоваться первый лед. Вода продолжает излучать энергию в морозилку, которая гораздо холоднее, чем она, но температура не падает. Что же это означает — потеря тепловой энергии без понижения температуры? В этом и заключается *энтропия*, в данном случае при фазовом переходе воды в лед: тепловая энергия уходит на затвердевание, а температура не меняется. Вода переходит с более высокого (менее упорядоченного) на более низкий уровень энтропии.
- 12 Ваше тело не может остыть, если вокруг влажно, потому что пот не может испаряться: воздух и так насыщен влагой и не принимает больше молекул воды.
- 13 Некоторые районы знамениты частым вымораживанием валунов из почвы — например, Северо-Восток США, Норвегия, а также юг Чили и Аргентины. Это происходит, когда вода в теплое время года скапливается под валунами, которые являются самыми холодными объектами. Ее тянет туда, потому что почва там еще замерзшая, а значит, там сухо. Вода же любит течь туда, где сухо (принцип равновесия). Затем она там замерзает, расширяясь, и выталкивает камень вверх. Когда замерзшая

вода тает, грязь и маленькие песчинки заполняют пространство, освободившееся при таянии льда. Так столетие за столетием валуны постепенно выдвигаются на поверхность. Как ни удивительно, но создается впечатление, что этот процесс наблюдается и на Марсе, хотя, казалось бы, он требует наличия жидкой воды или приближенных к этому условий, а это существенно выше температуры марсианского реголита на протяжении последних миллиардов лет. Общий термин, которым обозначаются такие процессы, — *криотурбация*. Когда почву взрыхляют животные (например, суслики или муравьи) — это биотурбация, которая, как мы полагаем, на Марсе не наблюдается.

- 14 По имени героини детской сказки о девочке, которая пришла в дом трех медведей и обнаружила, что одна из их кроватей, один из их стульев и одна из их тарелок с кашей ей *в самый раз*. Астрономы позаимствовали эту историю для описания зоны обитаемости.
- 15 Чтобы Марс и Венера стали более землеподобными, их можно просто поменять местами. Передвиньте Венеру, изнывающую под 90 барами атмосферного углекислого газа, в два раза дальше, туда, где она будет получать только четверть нынешнего солнечного излучения. Приблизьте Марс с 1,5 а. е. на расстояние 0,7 а. е., и его льды из воды и углекислого газа растают, дав более массивную атмосферу.
- 16 Один бар примерно равен атмосферному давлению на поверхности Земли, 1 атмосфера = 1,01 бара. В единицах СИ 1 бар = 100 000 Па (паскалей), а, в свою очередь, 1 Па — это 1 ньютон силы, приложенный на один квадратный метр поверхности. В британских единицах измерения нормальное давление на поверхности Земли составляет 14,7 фунта на квадратный дюйм (пси), что соответствует весу 760-миллиметрового столба ртути (Hg) — раньше давление именно так и измеряли, поэтому вы часто получаете информацию о давлении в миллиметрах ртутного столба.
- 17 В упрощенной форме уравнение фотосинтеза выглядит так: $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{энергия света} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$, где самая сложная молекула — это глюкоза.

- 18 Линейная молекула углекислого газа О-С-О имеет характерные частоты колебаний изгиба и растяжения, которые резонируют с частотами тепловых инфракрасных фотонов, излучаемых поверхностью планеты. Поэтому углекислый газ поглощает эти фотоны, атмосфера разогревается. V-образная молекула воды Н-О-Н имеет еще больше характерных частот в инфракрасной части спектра, так что она еще сильнее мешает астрономам, но они могут почти полностью избежать ее влияния, поднявшись на вершины самых высоких гор.
- 19 Повышение концентрации углекислого газа в атмосфере закисляет океаны, что является прямой угрозой коралловым рифам, известковому планктону, а также моллюскам по всему миру.
- 20 Накипь растворяется в уксусе, слабой кислоте.
- 21 Но не слишком глубоко — ниже примерно 4000 м растворимость CaCO_3 резко повышается. Глубже этой *критической глубины карбонатонакопления* карбонаты остаются растворенными в океанской воде.
- 22 Если у Марса когда-то была, но исчезла массивная атмосфера CO_2 — как это предполагают для объяснения «теплого, влажного» климата в древности, — тогда там тоже должны быть карбонаты, которые не обнаружены.
- 23 Эти факты известны более ста лет. Первая работа по углекислому газу и парниковому эффекту была написана шведским химиком Сванте Аррениусом (“On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground,” *Philosophical Magazine and Journal of Science* series 5, 41 (1896): 237–76). Тревожное воздействие промышленных выбросов углекислого газа на климат Земли известно более сорока лет. Почему никто не прислушивается к ученым?
- 24 Круговая орбита соответствует минимуму энергии при данном орбитальном моменте импульса.
- 25 Фундаментальная работа, которую рекомендуют по этой теме студентам старших курсов, — “Q in the Solar System” калифорнийских геофизиков Питера Голдрича и Стивена Сотера.

- 26 Stephen Vance et al., “Ganymede’s Internal Structure Including Thermodynamics of Magnesium Sulfate Oceans in Contact with Ice,” *Planetary and Space Science* 96 (2014).
- 27 Крупные планеты начинают свое существование с гораздо большего количества аккреционного тепла и получают больше энергии радиоактивного распада. Но, что куда важнее, их теплу требуется больше времени, чтобы добраться наружу. Именно поэтому Юпитер до сих пор остывает, в то время как Луна затвердела за несколько миллионов лет. Суперземле может потребоваться миллиард лет, чтобы растерять свое первоначальное тепло, и при этом она будет постоянно производить радиоактивное тепло, которому придется рассеиваться через ее океаны. Планеты — это гигантские тепловые машины.
- 28 С сайта ESA (<http://sci.esa.int/juice/50074-scenario-operations/>):

Космический аппарат JUICE будет запущен в июне 2022 г. ракетой-носителем «Ариан-5» и использует гравитационные маневры у Венеры и Земли, чтобы за 7,6 года добраться до Юпитера. После выхода на орбиту в январе 2030 г. космический аппарат совершит путешествие по системе юпитерианских спутников продолжительностью в 2,5 года. [...] Во время этого тура гравитационные маневры у Каллисто и Ганимеда позволят ему поменять траекторию. Два точно спланированных пролета Европы включают в себя изучение состава материалов, отличных от водного льда, и первое подповерхностное зондирование ледяного спутника. [...] Кульминацией программы станет специально разработанный восьмимесячный орбитальный тур вокруг Ганимеда, во время которого аппарат проведет детальное обследование спутника и его окрестностей, а в конце концов врежется в Ганимед.

- 29 Формула кинетической энергии $E = mv^2/2$, где m — это масса капсулы, а v — скорость. Эта энергия должна либо перейти в тепло, либо быть переданной мишени (в реальности отчасти происходит и то и другое). Чем выше скорость, тем больше кинетическая энергия, пока происходящее не начинает выглядеть в точности как взрыв. Вход аппарата в атмосферу — это

управляемый атмосферный взрыв. Такой эффект достигается тем, что нижняя (передняя) сторона капсулы окружена специальным абляционным материалом такой формы, чтобы отводить тепловую энергию от капсулы. В то время как тепло может быть рассеяно с помощью абляционного слоя достаточной массы, с вибрацией дело обстоит совсем по-другому. Воздух завихряется, и, совсем как в случае с самолетом, идущим на посадку в жаркий полдень, в нем образуются карманы, где торможение происходит медленно (низкое давление), и карманы, где оно идет быстро. В результате наблюдается изменение ускорения в единицу времени (метры в секунду за секунду, иначе говоря, *рывок*), что плохо переносится живыми организмами. Куда лучше оставить такие полеты хорошо защищенным исследовательским роботам и поберечь людей!

- 30 Аэростат с водородом или гелием не будет работать на Юпитере или Сатурне так, как на Земле, потому что атмосфера там — это и есть водород и гелий. Для того чтобы аэростат парил, его нужно наполнить молекулами легче, чем окружающий газ. Сработал бы воздушный шар с горелкой: вы могли бы использовать баллон кислорода, чтобы сжигать в нем местный водород.
- 31 Мы не называем такой водород жидким, потому что, хотя он и является плотным и текучим, четкого перехода от газовой фазы к жидкости там уже нет. Он просто становится все плотнее и плотнее.
- 32 Война в Ираке стоила примерно от 3 до 6 трлн долларов. Согласно отчету генерального инспектора США, только за полгода военной операции в 2003–2004 гг. неизвестно куда пропали 9 млрд. Так что мы вполне можем себе позволить эту экспедицию.
- 33 E. M. Shoemaker, R. J. Hackman, and R. E. Eggleton, "Interplanetary Correlation of Geologic Time," *Advances in the Astronautical Sciences* 8 (1963): 70–89.
- 34 Обмен веществом между другими планетами гораздо менее распространен, но тоже происходит. Чтобы добраться с Земли до Меркурия или наоборот, требуется огромная скорость

выброса. Путь с Венеры на Землю проще, но фрагменту нужно пробить массивную атмосферу, что в последний раз случилось миллиарды лет назад.

- 35 В ходе одной из первых геофизических экспедиций в эту часть океана немецкий геофизик Райнер Герсонде и специалист по метеоритам Фрэнк Кайт из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе нашли гравийные фрагменты мезосидерита — метеорита, в котором есть много металлических включений. Фрагменты были обнаружены в ядрах осадочных отложений, находящихся под слоем ила глубиной 5 км. (Кайт ранее нашел фрагменты, ставшие бесспорным доказательством падения метеорита Чикшуб.) Это был астероид, причем богатый металлами. Сейсмодатчики, буксируемые за судном, показали изобилие возмущений на морском дне. Все это согласуется с гипотезой о взрыве, который образовал яму глубиной 4–5 км, произошедшем при ударе астероида диаметром примерно 1 км, летящего со скоростью 20 км/с. В воздух поднялись сотни миллионов тонн изверженного вещества — в данном случае морской воды.

ГЛАВА 4: СТРАННОСТИ И МЕЛОЧИ

- 1 Эта модель была описана в статье Erik Asphaug, Martin Jutzi, and Naor Movshovitz, “Chondrule Formation During Planetesimal Accretion,” *Earth and Planetary Science Letters* 308, no. 3–4 (2011): 369–79.
- 2 Кометы называют в честь их первооткрывателей. Из-за длинных имен, таких как Чурюмов — Герасименко или Швассман — Вахман, кометы часто называют и по номерам, в данном случае — 67P и 29P.
- 3 Dante Lauretta et al., “The Unexpected Surface of Asteroid (101955) Bennu,” *Nature* 568 (2019): 55–60.
- 4 Zoë Leinhardt, Robert Marcus, and Sarah Stewart, “The Formation of the Collisional Family Around the Dwarf Planet Haumea,” *Astrophysical Journal* 714, no. 2 (2010): 1789–99.
- 5 Сторонники мнения, что Плутон — это планета, никогда не радовались тому, что еще не открытое далекое тело,

по массе в десять раз превышающее Землю и находящееся в тысяче астрономических единиц, называют «Девятой планетой». Поэтому в своей книге я говорю обо всех предсказанных планетах как о «Планете X».

- 6 Точно так же как Гаусс получил наиболее вероятную *орбиту* астероида Церера с помощью изобретенного им метода наименьших квадратов, Элиот Янг и его коллеги получили наиболее вероятные *растровые изображения* Плутона и Харона, приписывая пикселям на своих пустых картах различные возможные яркости и цветовые характеристики. Они сравнивали смоделированные планеты с фактическим положением вещей в разные моменты времени и уточняли значения пикселей, пока не достигли наилучшего соответствия всем данным телескопических наблюдений планеты (обоих тел).
- 7 Неожиданно развернув эту идею, Крейг Агнор и Дуг Гамильтон в 1999 г. показали, что сам Тритон мог в действительности быть захваченным объектом пояса Койпера. Прямой захват не срабатывает по многим из тех причин, по которым Луну невозможно объяснить прямым захватом на орбиту Земли. Фокус в том, чтобы приблизившийся к Нептуну объект пояса Койпера представлял собой пару типа системы Плутон — Харон. Подобный двойной объект изредка должен был подходить к Нептуну достаточно близко, чтобы быть «ионизированным», то есть чтобы планета заставила одно тело пойти в одном направлении, а другое — в другом. И уж совсем-совсем изредка один из таких разделенных компонентов мог быть захвачен Нептуном, тогда как другой, более массивный, смог уйти, возможно, чтобы позднее столкнуться с Нептуном (что объяснило бы его исчезновение). Вероятность такого ионизирующего захвата выше, когда встреча происходит с обратным направлением движения.
- 8 Великая теория может быть и неверной.
- 9 Ранее Позднюю тяжелую бомбардировку называли Поздним лунным катаклизмом. Эта выражение чуть более объективно, потому что не предполагает широкомасштабной бомбардировки всей Солнечной системы.

- 10 См.: Barbara Cohen, Tim Swindle, and David Kring, "Support for the Lunar Cataclysm Hypothesis from Lunar Meteorite Impact Melt Ages," *Science* 290, no. 5497 (December 1, 2000): 1754–56. Несмотря на название («Аргументы в поддержку гипотезы лунного катаклизма на основании результатов датирования импактных расплавов лунных метеоритов»), в итоге в статье делается вывод, что вместо узкого пика мы видим широкий разброс датировок импактных расплавов лунных метеоритов — от 2,7 до 4,2 млрд лет.
- 11 Речь идет об оригинальной модели Ниццы. Как и теория гигантских столкновений, модель Ниццы имеет множество вариантов.
- 12 Из «Путешествий Гулливера»:

...Ближайший к Марсу удален от центра этой планеты на расстояние, равное трем ее диаметрам, а более отдаленный находится от нее на расстоянии пяти таких же диаметров. Первый совершает свое обращение в течение десяти часов, а второй — в течение двадцати одного с половиной часа, так что квадраты времен их обращения почти пропорциональны кубам их расстояний от центра Марса, каковое обстоятельство с очевидностью показывает, что означенные спутники управляются тем же самым законом тяготения, которому подчинены другие небесные тела. (Пер. А. А. Франковского.)

- 13 Более поздняя версия этой стратегии — опубликовать в каком-нибудь заштатном журнальчике статью, которую никто не прочтает, пока не придет время на нее сослаться. В эпоху интернета это стало невозможным. Полагаю, самой точной современной аналогией стал бы зашифрованный документ с изложением теории или открытия, который вы размещаете онлайн, а позже выкладываете ключ для его дешифрования.
- 14 Это классический контрпример для гносеологического спора, является ли знание «истинным и обоснованным мнением». То, что у Марса два спутника, — истинно. И у Кеплера было такое мнение. И это мнение было обосновано. Но знанием оно не было.

- 15 Kevin Walsh et al., “A Low Mass for Mars from Jupiter’s Early Gas-Driven Migration,” *Nature* 475 (July 14, 2011): 206–9.
- 16 На нашем семинаре по разбору научных публикаций в области планетологии мы шутили, что обсуждение любой статьи не закончено, пока кто-нибудь не свяжет ее с моделью Ниццы.
- 17 Тут я суммирую череду великолепных теорий, разработанных Ман Хои Ли, Стэном Пилом, Робин Кэнап, Биллом Уордом и несколькими другими учеными. По поводу деталей они пока не договорились.
- 18 Дэвид Стивенсон из Калифорнийского технологического института много писал о внутренней структуре планет-гигантов и о том, почему Юпитер так отличается от Сатурна.
- 19 Adam Showman and Renu Malhotra, “Tidal Evolution into the Laplace Resonance and the Resurfacing of Ganymede,” *Icarus* 127, no. 1 (1997): 93–111.
- 20 Соленая вода хорошо проводит электричество благодаря ионам, положительно заряженному натрию и отрицательно заряженному хлору. Когда «Галилео» измерил магнитное поле Юпитера, оно оказалось сильно возмущено вокруг Европы — примерно так, как поле обычного магнита, когда вы подносите его к проводнику, например к гвоздю. Если Европа имеет высокую проводимость, но не состоит из металла, значит, проводник — это жидкий соленый океан.
- 21 Магнитное поле Юпитера, если смотреть на планету с Земли, откуда он выглядит как яркая точка, простирается на область размером с кулак вытянутой в этом направлении руки. Орбиты всех его спутников окажутся глубоко внутри кулака.
- 22 Существуют даже проекты исследования Европы с помощью зонда с радиоизотопным термоэлементом. Он протопит себе путь сквозь лед, погрузится вниз, прокладывая коммуникационный кабель и замораживая за собой отверстие. Это еще одна умная, но плохая идея; нам стоит подождать, пока у нас не появятся технологии, которые позволят все сделать правильно.
- 23 Так совпало, что это тот срок, после которого типичный участок океанической коры на Земле перерабатывается тектонической плит.

- 24 Аспиранты запоминают их последовательность с помощью мнемонического правила Met Dr. Thip (Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion, Iapetus, Phoebe).
- 25 Один гигаватт — это примерно половина мощности плотины Гувера.
- 26 Титан обращается в 20 радиусах Сатурна, тогда как Ио, Европа, Ганимед и Каллисто обращаются в 6, 9, 15 и 26 радиусах Юпитера соответственно.
- 27 Erik Asphaug and Andreas Reufer, “Late Origin of the Saturn System,” *Icarus* 223, no. 1 (2013): 544–65.
- 28 Matija Ćuk, Luke Dones, and David Nesvorný, “Dynamical Evidence for a Late Formation of Saturn’s Moons,” *Astrophysical Journal* 820, no. 2 (2016): 97.
- 29 Экспедиция, которую возглавляет ученый-планетолог Элизабет Тартл, описана в *Dragonfly: A Rotorcraft Lander Concept for Scientific Exploration at Titan* (R. Lorenz et al., 2018, Johns Hopkins APL Technical Digest 34) и на сайте dragonfly.jhuapl.edu. Аппарат представляет собой квадрокоптер с четырьмя двойными роторами, энергию которому дают радиоизотопные термо-электрические генераторы.
- 30 На сегодняшний день космический туризм на Марсе — это важнейший вопрос, который никому не хочется обсуждать. Соглашение о планетарной защите — это договор между космическими агентствами. Если частная компания хочет полететь на Марс, соблюдать его нормы она не обязана. Возможно, у нас есть лишь краткий период времени, чтобы отыскать на Марсе местную жизнь, пока мы не занесли туда свою.
- 31 Ионный ракетный двигатель использует электричество, получаемое с помощью солнечных батарей или от маленького ядерного реактора. Оно ионизирует атомы тяжелого нейтрального газа, например ксенона, придавая им заряд. Затем разность потенциалов выбрасывает ионизированные атомы со скоростью в сотни километров в секунду. Большую тягу так не получишь, но постепенно космический аппарат набирает хорошую скорость. Двигатель на химическом топливе работает быстро, а ионный двигатель — эффективно.

- 32 Экспедиция TiME (Titan Mare Explorer) была предложена в 2009 г. Эллен Стофан и ее командой. Аппарат должен совершить посадку на поверхность Моря Лигеи и дрейфовать под действием течений и ветров. Экспедиция вышла в финал грантового конкурса, но ей требовались такие ядерные источники энергии, которые в итоге оказались недоступными.
- 33 Австрийский физик Эрвин Шрёдингер в 1935 г. написал в журнал *Naturwissenschaften* письмо, где выражал свои сомнения по поводу новой «размытой модели» (как он ее называл) представления реальности, которой являлась квантовая механика. Он предложил мысленный эксперимент: поместите кошку в железный ящик и закройте крышку. «В счётчик Гейгера положена крупинка радиоактивного вещества, столь малая, что за час может распасться один из атомов, но с такой же вероятностью может не распасться ни один. Если атом распадается, счётчик через реле приведёт в действие молоточек, который разобьёт колбу с синильной кислотой». (Пер. под ред. Л. С. Полака.) В течение часа, пока мы (наблюдатели, что бы это ни значило) не откроем крышку, кошка существует в обоих состояниях: она одновременно жива и мертва.
- 34 Если у вас имеется отдельный телекоммуникационный аппарат на орбите вокруг Титана, ваше судно будет более изящным, а его парусность будет куда ниже. Вероятно, дешевле и проще включить антенну в конструкцию лодки, однако при порывистом ветре вы можете пожалеть об этом решении.

ГЛАВА 5: ЩЕБЕНЬ И ГИГАНТСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

- 1 Имеющуюся на данный момент информацию по экзопланетам вы можете представлять любым способом на <http://www.exoplanets.org>. Более полные данные на <http://exoplanet.eu>.
- 2 Поверхность астероида горячее всего не в подсолнечной точке, а чуть впереди по ходу вращения, в точке «немного после полудня», как и у нас на Земле. Фотоны более высокой энергии, которые излучаются от горячей послеполуденной поверхности, имеют чуть больший квантово-механического импульс,

так что тепло, идущее от Солнца, в конечном счете ведет себя как очень слабый двигатель с соплами, смотрящими в послеполуденном направлении. Это может ускорять или замедлять орбитальное движение астероида в зависимости от ориентации оси вращения. За миллионы лет этот *эффект Ярковского* способен заставить маленький астероид переместиться даже на несколько астрономических единиц, из-за чего он может либо попасть в разрушительный резонанс с Юпитером или Сатурном, либо перейти из Главного пояса во внутреннюю Солнечную систему, став околоземным объектом. Родственный ЯОРП-эффект определяется теми же физическими явлениями, но еще и тем фактом, что форма астероида всегда имеет некоторую хиральность (они не бывают идеально симметричными, как шары). Если тепловые фотоны отражаются ото всей его поверхности, как крошечные реактивные двигатели, их суммарная тяга придает ему некоторое вращение. Обе эти слабые силы, оказывается, играют огромную роль в долгосрочной динамической эволюции астероидов типичного размера. Эффект Ярковского был предсказан российским железнодорожным инженером Иваном Ярковским в 1901 г.; решение научных задач было его хобби. Однако значение этого эффекта для астероидов не осознавалось до 1990-х гг.

- 3 На случай, если вам интересно, за все время существования Солнечной системы это температурное раскручивание (ЯОРП-эффект, см. предыдущую сноску) может раскрутить только тело диаметром меньше нескольких километров. Так что оно никак не поможет решить проблему Дарвина — как раскрутить Землю до возможного отрыва от нее Луны.
- 4 Отсюда и слово «метеоролог» — человек, рассказывающий о погоде по телевидению.
- 5 Henry Sorby, "On the Structure and Origin of Meteorites," *Nature* 15 (1877): 495–98.
- 6 William Thomson, Lord Kelvin, "On the Age of the Sun's Heat," *Macmillan's Magazine* 5 (1862): 388–93.
- 7 Тут уместно вспомнить знаменитую, хотя, возможно, и выдуманную, цитату из Томаса Джефферсона: «Я скорее поверю

в то, что два профессора-янки солгали, чем в то, что камни могут падать с неба».

- 8 Комета Свифта — Туттля — это 30-километровый монстр, открытый в 1862 г. Комета пересекает орбиту Земли каждые 133 года (перигелий 0,95 а. е.), а большую часть времени проводит за Нептуном и Плутоном (афелий 50 а. е.). Ее следующий близкий подход к Земле (на всего 1 млн километров — 0,01 а. е.) состоится в 3044 г., а когда-нибудь она, видимо, столкнется с Землей. Комета находится в резонансе 1:11 с Юпитером, что с точки зрения планетной инженерии, вероятно, делает ее «эксплуатационно пригодной» для колонизации внешней Солнечной системы, когда мы дойдем до этого этапа.
- 9 Была попытка выпускать диетические картофельные чипсы на правосторонних жирах, но их свойство вызывать неустержимый понос привело к катастрофическому падению спроса на подобные продукты.
- 10 Просеиванием астероидного реголита можно набрать куски размером 10–30 см, из которых соорудить габионную стену метровой толщины — удерживаемую легкими сетками структуру вокруг жилых помещений. Астероида диаметром 50 м (в десять раз меньше Бенну) хватит на метровое покрытие цилиндра длиной 200 м и диаметром 100 м, так что радиационная защита перестает быть проблемой.
- 11 Принцип эквивалентности сил гравитации и инерции гласит, что мы не можем уловить разницу между нахождением в капсуле, которая ускоряется с 0,001 g, и в такой же капсуле в состоянии покоя на поверхности небольшого астероида.
- 12 Метеорит диаметром 30 м, соответствующий тунгусскому взрыву, оставил бы обнаруживаемую аномалию иридия, напоминающую избыток иридия на границе мел-палеогенового вымирания, который, как предположил физик Луис Альварес и его коллеги, стал результатом столкновения с 10-километровым астероидом. Метеорит мог быть ледяным (без иридия) или фрагментом дифференцированной мантии (также без иридия). Кроме того, между огромным взрывом в 1908 г. и первыми исследованиями в 1927 г. в холодной, кишащей

комарами болотистой местности могло пройти слишком много времени.

- 13 В начале 1970-х гг. в своем романе «Свидание с Рамой» Артур Кларк описал Космический патруль, автоматические телескопы которого отслеживают возможность любых событий типа падения Тунгусского метеорита. В конце концов они обнаруживают вторгшийся в нашу часть космоса бездействующий инопланетный корабль. Об этом сюжете вспомнили после того, как телескоп Pan-STARRS, используемый для поиска околоземных объектов, обнаружил межзвездную комету Оумуамуа.
- 14 Средняя температура внутри кометы во внешней Солнечной системе составляет примерно 30–40 К (кельвинов). Абсолютный ноль (0 К) — это минимальная температура, которая может существовать во Вселенной: атомы при ней перестают вибрировать. Она равна -273°C и на практике недостижима. Это нулевая точка для физиков. В шкале Цельсия нулевая точка связана с водой (холоднее 0°C — и вода замерзает, теплее 100°C — закипает). В шкале Фаренгейта нулевая точка связана с человеческим телом (холоднее 0°F или теплее 100°F — и вы долго не проживете).
- 15 Тройная система массивных удаленных тел может находиться в состоянии *вынужденной либрации* многие миллиарды лет, поддерживая жидкое состояние рассола в своих глубинах в отсутствие какого-либо внешнего излучения.
- 16 Блеск кометных хвостов основан на тех же физических процессах, что и северное сияние — сильно ионизированный газ излучает фотоны. Но они не колышутся, потому что гораздо больше по протяженности и не пребывают в хаотичном магнитном поле Земли. В 1986 г. космический аппарат «Улисс» установил, что прошел сквозь хвост кометы Хякутакэ. Отсюда был сделан поразительный вывод: ее хвост имеет длину в 3,8 а. е. — неплохой результат для ядра диаметром 4 км!
- 17 Альbedo кометы составляет всего 3%. Это означает, что из каждых 100 падающих на нее фотонов (определенной частоты) 97 будут поглощены. В видимом свете такие примитивные

тела, как кометы и углеродистые астероиды, имеют альbedo 3–5%, угольно-черный цвет. Альbedo Земли является непостоянной и сложно устроенной (но важной!) характеристикой. В среднем оно составляет около 30%. *Наклон спектра* связан с альbedo: астероид является красным, если его альbedo выше в красном свете, чем в синем.

- 18 В 2015 г. Кэтрин Волк и Бретт Глэдман предположили, что Меркурий является истертым остатком набора массивных планет, обращавшихся внутри орбиты Венеры. В 2016-м Константин Батыгин и Грегори Лафлин выдвинули идею о существовании и последующем разрушении внутренней Солнечной системы. Обе гипотезы включают «великую миграцию» — сдвиг Юпитера и Сатурна внутрь системы, разрушение ими первоначальных планет, а потом возвращение обратно.
- 19 Уильям Йейтс. «Пасха 1916 года» (Easter, 1916).

ГЛАВА 6: ПОСЛЕДНИЕ ВЫЖИВШИЕ

- 1 Nathan Sivin, *Cosmos and Computation in Early Chinese Mathematical Astronomy* (Leiden, Neth.: E. J. Brill, 1969).
- 2 Гипотеза Макдуфа: «Так потерей/Надежду на заклятье! Пусть твой демон,/ Которому служил ты, подтвердит:/ До срока из утробы материнской/ Был вырезан Макдуф, а не рожден». (Уильям Шекспир, «Макбет». Пер. Б. Л. Пастернака).
- 3 Урбен Леверье в Парижской обсерватории и Джон Куч Адамс в Кембриджском университете выполнили одни и те же расчеты и с разницей в несколько дней, придя к по сути одному и тому же выводу о существовании Нептуна. Леверье закончил работу на несколько дней раньше, и когда его коллеги из Берлинской обсерватории получили письмо с предсказанным местоположением, они направили свой огромный телескоп-рефрактор в нужную точку и открыли новую планету в ту же ночь.
- 4 «*Синоптический*» в данном случае значит «тот, кто никогда не закрывает глаза». Телескоп сооружается на горе Серро-Пачон в Чили. С Pan-STARRS на севере и Большим

- синоптическим обзорным телескопом на юге мы добьемся полного покрытия неба с такой чувствительностью и разрешением, что обнаружить массивную Планету X будет несложно.
- 5 Согласно расчетам, которые проделали мы с Робин Кэнап ("Origin of the Moon in a Giant Impact Near the End of the Earth's Formation," *Nature* 412 [2001]: 708–12), на основе результатов первого моделирования гигантского столкновения, выполненного швейцарским астрономом Вилли Бенцом.
 - 6 В предложенном швейцарским астрофизиком Андреасом Рейфером и его коллегами сценарии «гигантского столкновения с оставлением места происшествия» ("A Hit-and-Run Giant Impact Scenario," *Icarus* 221, no. 1 [2012]: 296–99) большая часть Тейи продолжает свой путь после гигантского столкновения. Вернулась ли она, чтобы снова ударить Землю, или оказалась внутри Венеры? Мы с Александром Эмзенхубером из Университета Аризоны работаем над второй частью этой задачи. Если Луну породило «столкновение с оставлением места происшествия и возвращением», тогда первое гигантское столкновение придало Земле сильное вращение, а второе было более медленным и потому закончилось аккрецией, в результате чего возник диск, из которого появилась Луна. Такой двойной удар перемешал бы составы планет и создал бы протолунный диск, сильно наклоненный относительно оси вращения Земли.
 - 7 Это тоже вызывает споры. Одно то, что вы можете испарить воду и другие летучие вещества, не означает, что они будут потеряны из облака пара. Это облако будет удерживаться гравитацией, так что потеря летучих веществ так и остается для Луны нерешенной проблемой.
 - 8 Uwe Wiechert, Alex Halliday et al, "Oxygen Isotopes and the Moon-Forming Giant Impact," *Science* 294, no. 5541 (2001): 345–48.
 - 9 Эти идеи рассматриваются в статье Asphaug, "Impact Origin of the Moon?" *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 42 (2014): 551–78.
 - 10 Он писал о более широкой теме — о формировании Солнечной системы, о двух конкурировавших в то время гипотезах

и их вариантах. Одной из них была модель диска, а другой — гипотеза о планетах, вырванных из мантии Солнца проходящей мимо звездой. Последнюю в то время называли гипотезой планетезималей. Harold Jeffreys, “The Planetesimal Hypothesis,” *Observatory* 52 (1929): 173–78.

- 11 Это гипотеза *синестии*, которую отстаивает специалист по физике планет Сара Стюарт из Калифорнийского университета в Дейвисе. При высокой скорости столкновения может возникнуть мощное возмущенное состояние, сделавшее взрыв намного более интенсивным. В итоге мы имеем гравитационно нестабильное облако из пара и расплава, которое снова конденсируется, формируя планету. Как язвительно заметил мой аспирант, «если ваша синестия длится дольше четырех часов, вызовите доктора».
- 12 Этот миф — действительно неплохая аналогия для стандартной модели гигантского столкновения, ибо Афина вышла из лба Зевса, поскольку он проглотил ее мать Метиду. К несчастью, мы не можем все время переименовывать планеты, чтобы они соответствовали самым подходящим мифам.
- 13 Он назван в честь французского астрофизика Эдуарда Роша, который в 1848 г. выдвинул идею границы приливного разрыва и предположил, что кольца Сатурна появились, когда его маленький спутник был разрушен приливными силами.
- 14 Марсианские сутки длятся 24,6 часа, и ненамного изменились, тогда как сутки на Земле значительно удлинились с пяти часов в период ее формирования. То, что сейчас они имеют почти такую же продолжительность, как на Марсе, — чистая случайность. Наклон оси Марса также практически равен земному, так что времена года там примерно такие же. (Мы списываем все это на совпадения, но правильно ли это?) Иногда для операторов марсоходов «марсианское время» очень близко к их местному времени, но через два месяца оно становится совершенно противоположным. Так что, если вы хотите работать в центре управления марсианскими экспедициями, вам пригодится умение перестраивать свое расписание сна и бодрствования.

- 15 Процесс кратерообразования оказывает не слишком сильное влияние на раскручивание планеты, так что вращение Марса вокруг своей оси, видимо, не особенно изменилось со момента образования Северного Полярного бассейна.
- 16 Поскольку эта задача требует применения более трудоемких численных методов, исследования диска, возникшего вокруг Марса после гигантского столкновения, относительно редки. Среди них Margarita Marinova et al., “Geophysical Consequences of Planetary-Scale Impacts into a Mars-like Planet,” *Icarus* 211, no. 2 (2011): 960–85; Robin Canup and Julien Salmon, “Origin of Phobos and Deimos by the Impact of a Vesta-to-Ceres Sized Body with Mars,” *Science Advances* 4, no. 4 (2018): eaar6887; and Ryuki Hyodo et al., “On the Impact Origin of Phobos and Deimos,” *Astrophysical Journal* 860 (2018).
- 17 Возможное существование на древнем Марсе системы океанов или водоносных пластов, как и переход значительной части коры в расплавленное состояние, значительно увеличили бы приливную диссипацию энергии близко находящегося спутника.
- 18 Сначала приливные силы разрушат его и превратят в кольцо вокруг Марса. Это станет впечатляющим зрелищем для астрономов-любителей, тем более что видимая яркость Марса увеличится в этот период в три раза.
- 19 Что Протофобос размером с Весту мог отбросить другие спутники на более высокие орбиты, когда снижался по спирали, предположил в 2016 г. французский планетолог Паскаль Розенблат. Впоследствии Дэвид Минтон и Эндрю Хессельброк отметили, что точный момент тут не так важен, и выдвинули идею «цикла колец Марса», в ходе которого крупный спутник сходит вниз по спирали, разбивается и выбрасывает несколько 100-километровых (к примеру) мини-спутников на более далекие орбиты. Они тоже сходят по спирали вниз и разбиваются, создавая спутники размером с Фобос, и так далее, так что через 40 млн лет там будут несколько кусков диаметров в километр, а люди снова будут удивляться: «Как это нам так повезло, что мы видим только эти два последних куска?»

- A. Hesselbrock and D. Minton, "An Ongoing Satellite-Ring Cycle of Mars and the Origins of Phobos and Deimos," *Nature Geoscience* 10, no. 4 (2017): 266–69.
- 20 С тех пор у Марса мог измениться и полюс вращения; палеоэкваториальным поясом может быть любой большой круг, опоясывающий сегодняшний Марс и проходящий через Северный Полярный бассейн (если он возник в результате импактного события).
 - 21 Актуальное и подробное изложение этой проблемы приводит специалист по планетарной геологии Эдвин Кайт в статье "Geological Constraints on Early Mars Climate," *Space Science Reviews* 215 (2019).
 - 22 Вот еще один пример систематической ошибки, связанной с отсевом участников. Однажды я пришел домой, а там была, наверное, тысяча мух. Что-то где-то умерло, и вот результат... Я провел два дня, убивая их: всасывая пылесосом с подоконников, прихлопывая, выдувая из дверей вентилятором. В конце концов мух осталось восемь. Маленькие черные демоны, они были умнее остальных, имели огромную выдержку и выработали великолепную стратегию. Когда я пытался засосать их в пылесос, они садились мне на руки — единственное место, откуда я не мог всосать их в шланг. Как они это узнали? На эти восемь последних мух я потратил еще три дня. Возможно, две сбежали, чтобы положить начало популяции супермух.
 - 23 Среди прочих климатические условия при высоком содержании CO_2 моделировала группа Роберта Хаберла в Исследовательском центре Эймса NASA в Калифорнии. Расчеты Джима Кастинга из Университета штата Пенсильвания, однако, испортили весь праздник, показав, что при таком давлении формировались бы углекислые облака, уменьшающие парниковый эффект.
 - 24 Астероид Апофис подойдет к Земле на одну десятую расстояния до Луны в 21:46 по Гринвичу 13 апреля 2029 г. Теперь мы знаем, что столкновения не будет, но встреча с Землей изменит его орбиту сугубо нелинейным образом. Иначе говоря,

крошечное изменение при минимальном сближении выльется в огромное изменение дальнейшей орбиты. Так что пока результат этой встречи не будет измерен, мы не можем узнать, куда Апофис направится дальше, разве что в самом общем плане. Конечно, он может попасть в Землю на следующем витке, но на самом деле вероятность того, что за это время случайный околоземный объект того же или большего размера столкнется с Землей, куда выше, чем риск такого попадания. В целом выходит, что никаких опасностей нам пока не грозит. Но на сегодняшний день открыта только половина астероидов размером с Апофис, хотя этот разрыв постоянно сокращается, в основном благодаря усилиям NASA по выполнению поручения Конгресса США. В конечном итоге единственным неизвестным фактором риска останутся астероиды диаметром меньше нескольких сотен метров, а также кометы. («Кометы как кошки. У них есть хвосты, и они делают, что пожелают», говорил астроном Дэвид Леви, один из первооткрывателей кометы Шумейкеров — Леви 9).

- 25 Среди первых признанных ударных кратеров были те, которые обладали значительным экономическим потенциалом. Аризонский кратер купили ради добычи никеля и железа. В кратере Попигай были обнаружены залежи алмазов. Континентальный шельф у побережья Чикшулуба был распознан как возможная ударная структура геологами из REMEX, и они много лет хранили эту информацию как промышленную тайну.
- 26 Частицы космической пыли подразделяются на несколько типов. Среди них и досолнечные зерна — частицы пыли с полностью чуждым изотопным составом, которые начали свое существование до того, как сформировалось Солнце.
- 27 Примерно шесть тонн космического материала поступает в год на Землю в форме микрометеоритов. Примерно два отчетливых маленьких метеорита приземляются на любой метр поверхности суши за год — это показало организованное в 2017 г. исследование крыш, инициатором которого был джазовый музыкант из Осло Йон Ларсен. M.J. Genge et al.,

“An Urban Collection of Modern-Day Large Micrometeorites: Evidence for Variations in the Extraterrestrial Dust Flux Through the Quaternary,” *Geology* 45, no. 2 (2017): 119–22.

- 28 То, что материал не подвергался дифференциации, не означает, что он ни разу не был расплавлен. При характерной для планетезимали близкой к нулю гравитации внутренние вязкие напряжения на много порядков превышают силу тяжести. Магнитные и термические напряжения тоже больше гравитационных. Так что гравитация просто не стянет ядро, пока тело не разрастется до десятков или более километров в диаметре, даже если оно полностью расплавлено.
- 29 «К» обозначает меловой период (от немецкого слова Kreide — мел), который был последним периодом мезозойской эры, а «Т» — третичный период, первый период кайнозойской эры, если не считать того, что теперь его называют палеогеном. Так что К / Т — это общепринятый анахронизм; более верным термином был бы К / Pg. Вы также можете называть его вымиранием конца мезозоя или конца мелового периода, но выражение «событие К / Т» широко используется в профессиональном жаргоне.
- 30 Формируясь на глубине нескольких километров, отложения на морском дне становятся достоверной летописью того, что происходит на поверхности. Что бы ни случилось на суше, следы этого обычно уничтожаются эрозией, так что улик почти не остается.
- 31 «Земля-снежок» образовывалась по крайней мере несколько раз за геологическое прошлое. Вся планета становилась белой ото льда и снега, за исключением нескольких возвышающихся вулканов. Состояние «Земли-снежка» оставляет четкий след в летописи горных пород: сначала меняется изотопный состав кислорода и углерода, а в конце наблюдается резкий рост отложений карбонатов. Когда океаны снова вскрываются, морская вода вновь начинает растворять углекислый газ и образуется карбонатная покрывка — слои, которые покрывают сверху следы отсутствующих отложений «Земли-снежка». Этих признаков в слое К / Т нет.

- 32 «Арракис так отличался от Каладана, что голова Пауля шла кругом от обилия новых сведений. Арракис — Дюна — Планета Пустыни». Фрэнк Херберт, «Дюна». (Пер. П. Вязникова.)
- 33 В качестве сегодняшнего аналога можно привести «изотопный кризис», когда лунные горные породы оказались неотличимыми от земных.
- 34 Гипотеза о «зажаренных живьем» принадлежит геофизику из Университета Пердью Джею Мелошу.
- 35 Первые установленные фрагменты импактора мел-палеогенового вымирания были обнаружены и подтверждены космохимиком Фрэнком Кайтом из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, который также обнаружил фрагменты метеорита Элтанин, как описано выше. Кажется странным, что фрагменты хоть чего-то могли сохраниться, врезавшись в кору Земли на скорости 20 км/с. Но когда астероид или комета врезаются в планету, какие-то малые доли их объема всегда остаются — небольшие сектора, которые по чистой случайности избежали наиболее сильных воздействий. Ударяющий астероид, как космический аппарат во время литобрейкинга (то есть торможения ударом о поверхность), замедляется путем абляции, защищая какие-то свои внутренние части.
- 36 Экспедиция GRAIL состояла из двух космических аппаратов — «Эбб» и «Флоу» (Ebb и Flow, в переводе «прилив» и «отлив»). Проект возглавляла геофизик из Массачусетского технологического института Мария Зубер. Аппараты следовали друг за другом по практически идентичной орбите, а расстояние между ними то увеличивалось, то сокращалось, потому что гравитационное поле Луны не является идеально сферическим. Очень точно замерив эти изменения расстояния, команда смогла создать подробную гравитационную модель Луны.
- 37 Он простирается от кратера Эйткен, который находится у северного края бассейна, до Южного полюса у южного края. Так что это образование не находится на Южном полюсе и у него нет настоящего названия. Приходится говорить: «Бассейн Южный полюс — Эйткен» (South Pole — Aitken, SPA).

- 38 Martin Jutzi and Erik Asphaug, "The Shape and Structure of Cometary Nuclei as a Result of Low-Velocity Accretion," *Science* 348, no. 6241 (2015): 1355–58.
- 39 Идея об аккреции кометезималей возникла десятью годами ранее в Планетологическом институте, также расположенном в Тусоне, а именно в теоретической работе Стюарта Вайденшиллинга и в физической концепции первоначальных груд щебня, которую отстаивал Пол Вайсман и другие после зрелищного пролета аппаратом «Джотто» вблизи ядра кометы 1P/Галлея в 1986 г.
- 40 Вместо теоретизирования мы можем ответить на эти вопросы напрямую, используя радиолокационную томографию, напоминающую медицинскую процедуру сканирования в высоком разрешении. Майк Белтон предлагал NASA такую идею в 2004 г. (проект «Дип Интериор»), а потом я предлагал ее в 2009-м и 2014 г. как проект CORE (Comet Radar Explorer). Аппарат использовал бы технологию получения объемных изображений, напоминающую сейсморазведку, УЗИ или КТ, чтобы увидеть то, что находится внутри, с высоким разрешением. Мой проект дважды попадал в категорию 2, что означает «может быть выбрано», но, как говорится, добавьте к этому доллар и купите себе чашечку кофе! Изображение трехмерной структуры кометы или другого примитивного тела в высоком разрешении ответит на ряд вопросов, оставшихся без ответа в этой книге.
- 41 Главным событием пролета «Дип Импакт» был выстрел 300-килограммовым медным снарядом в поверхность кометы. Он оказался менее информативным, чем мы надеялись, потому что обзор космического аппарата был нарушен плотным пылевым облаком, который он сам и создал. Образовался подсвеченный Солнцем шлейф, а когда он рассеялся, аппарат уже отошел на тысячу километров от места выстрела.
- 42 Моделирование мелкого гигантского столкновения требует короткого временного шага в компьютерных расчетах; таким образом, нужно намного больше циклов, чтобы программа завершила работу. А теперь, со всеми этими новыми

физическими соображениями, для каждого интервала требовалось вычислить не только давление, гравитацию и температуру, но и степень разрушения, уплотнение и тензор напряжений. Давление — это скаляр (то есть просто число), который соответствует величине тензора напряжений. Тензор напряжений содержит не лежащие на осях показатели, которые позволяют твердым телам сопротивляться деформации. Сопротивление сдвигу — это сопротивление движению в направлении оси y по плоскости, параллельной оси x (сопротивление скольжению). Такое сопротивление сдвигу обозначают как s_{yx} и так далее для других плоскостей. Так что в твердом теле есть девять компонентов напряжения ($s_{xx}, s_{xy}, s_{xz}, s_{yx}, s_{yy}, s_{yz}, s_{zx}, s_{zy}, s_{zz}$). Давление определяется как все напряжение, приложенное на те же грани (то есть все, кроме сдвигающего усилия), поэтому $P = (s_{xx} + s_{yy} + s_{zz})/3$. Далее нам нужно определить реакцию вещества на напряжение и давление — это *реология* и *уравнение состояния*. Вся эта математика относится к элементарной алгебре, но это лишь аппроксимация, и поэтому в коде нарастает вероятность ошибок, а расчеты требуют все больше времени.

- 43 Варварская практика, когда докладчик остается без обеда, зато все его слушатели жуют, пока он рассказывает о своих исследованиях.
- 44 Доклад Изэна Гаррика-Бетеля был посвящен его идее, что древняя Луна затвердела, когда была захвачена в резонанс периодов обращения и вращения 3:2 с высоким эксцентриситетом орбиты, что могло бы объяснить ее отклонение от сферической формы. Проблема в том, что в такой резонанс трудно попасть, а выйти из него еще труднее.
- 45 Некоторые называют обратную сторону Луны «темной», но это верно лишь в том смысле, что она находится вне зоны приема радиоволн с Земли. День и ночь наступают там каждые 29,5 суток, как и в любом другом месте на Луне.
- 46 Фотографии, полученные спутниками «Лунар орбитер», любовно отсканированы и обработаны Геологической службой США и Институтом изучения планет и Луны. Они доступны здесь: <https://www.lpi.usra.edu/resources/lunarorbiter/>.

- 47 Шестидесятимегатонная «Царь-бомба» была взорвана на большой высоте в 1961 г. Одна мегатонна эквивалентна энергии взрыва 1 млн тонн тринитротолуола. Мощность взрыва в Хиросиме составляла 18 килотонн или 0,018 мегатонн. «Царь-бомба» эквивалентна нескольким тысячам взрывов в Хиросиме, а взрыв, приведший к образованию кратера Бруно, эквивалентен нескольким тысячам царь-бомб. Если бы «Царь-бомбу» взорвали под землей, а не на большой высоте, то в результате образовался бы современный близнец Аризонского кратера.
- 48 Коран 54:1: «Приблизился Час, и раскололся месяц» (пер. Э. Кулиева).
- 49 Это доказано в Paul Withers, "Meteor Storm Evidence Against the Recent Formation of Lunar Crater Giordano Bruno," *Meteoritics & Planetary Science* 36, no. 4 (2001): 525–29.
- 50 Тут нужно оговориться, что образование кратера такого размера извергло бы на орбиту вокруг Земли большое количество вещества, фрагменты которого через некоторое время начали бы бомбардировать район кратера уже после завершения его формирования. Они могут казаться случайными астероидами, но в действительности являются обратным сбором вещества и соответственно дают ложное представление о возрасте кратера. Так что Бруно может быть гораздо моложе миллиона лет, хотя все равно не относится к историческим временам.
- 51 Если вам посчастливится попасть в полосу полного солнечного затмения, осмотритесь по сторонам: вдруг рядом окажутся инопланетяне или путешественники во времени. Может, они вынуждены соблюдать Первую директиву, запрещающую Звездному флоту Федерации планет из сериала «Звездный путь» вмешиваться в естественное развитие цивилизаций, которые еще не открыли варп-двигатель. Пожалуй-ста, свяжите их с властями.
- 52 Мое любимое видео затмения в высоком разрешении и реальном времени сделано Джунхо О и Ёнгсам Чхой в индейской резервации Уорм-Спрингс в 2017 г.: <https://vimeo.com/231484786>.

- 53 Этот черный параллелепипед имел пропорции 1:4:9 — соотношение идеальных квадратов. Однажды ночью на заре человечества он появился в пустыне, где ночевало племя Смотрящего на Луну. Волосатые человекообразные поднимались около него на задние конечности и бурно радовались. В фильме 1968 г. Стэнли Кубрик взял шокирующий финал книги и превратил его в экзистенциальную полноцветную гонку к спутнику Юпитера Европе — психоделическую версию чрезвычайно популярной в то время пилотируемой космической программы, отвлекающую внимание зрителей от расовых беспорядков, политических убийств и войны во Вьетнаме.
- 54 Смотреть на Солнце в обычный бинокль можно *только* во время полной фазы затмения. Если вы сделаете это в какое-то другое время, то ослепнете. Вы можете купить специальные фильтры для бинокля или — что я рекомендую — специальный солнечный бинокль, сделанный с одной целью: смотреть на Солнце!
- 55 В предисловии Шэнь Ко писал: «Поскольку я имел только мою кисть для письма и плитку туши, чтобы поболтать, я назвал свое сочинение “Беседы с кистью”».
- 56 В одной из своих многочисленных историй Шэнь Ко писал:

Человек из Цзэчжоу копал колодец в своем саду и выкопал нечто, по форме напоминающее извивающуюся змею или дракона. Он был столь испуган своей находкой, что не решался к ней прикоснуться, но через некоторое время, увидев, что она не движется, осмотрел ее и обнаружил, что она сделана из камня. Невежественные крестьяне разбили эту вещь...

Он описывал этот предмет как один из множества примеров морских существ, чьи скелеты оказались под землей очень давно и стали камнем. Также он упоминал окаменелости бамбука, найденные в районах, где в его времена бамбук не рос из-за климата, и делал вывод, что и климат может меняться. *Science and Civilisation in China, Volume 3, Mathematics and the Sciences of the Heavens and the Earth* (Taipei: Caves Books, 1985).

- 57 *Mathematics and the Sciences of the Heavens and the Earth* (Cambridge: Cambridge University Press, 1959).
- 58 Эта интерпретация предложена Джоном Льюисом в его книге об околоземных объектах John S. Lewis, *Rain of Iron and Ice*, rev. ed. (New York: Basic Books, 1997).
- 59 Хороший научный обзор катархейского ландшафта — если можно вообще говорить о ландшафте в ту эпоху — см. в Kevin Zahnle et al., “Emergence of a Habitable Planet,” *Space Science Reviews* 129 (2007): 35–78.
- 60 Matija Čuk and Sarah Stewart, “Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning,” *Science* 338, no. 611 (2012): 1047–52. Это спорная статья, так как предполагает, что момент импульса необязательно сохраняется, так что древняя Земля могла вращаться со скоростью на грани разрушения. Авторы склоняются к периоду в 2,4 часа — близкому к тому, который требовался Дарвину.
- 61 Английские астрономы Алан Джексон и Марк Уайетт проработали идею, что Земля и Луна подверглись массивированной бомбардировке материалом, который был извержен в результате изначального гигантского столкновения, причем его количество в сумме превышало по массе Луну.
- 62 Аппарат назвали «Люси» в честь скелета *Australopithecus afarensis*, обнаруженного в Эфиопии в 1974 г. и относящегося примерно к тому времени, когда появились самые древние каменные инструменты. Скелет, в свою очередь, получил имя в честь песни The Beatles «Lucy in the Sky with Diamonds» («Люси в небесах с алмазами»), что кажется подходящим и для космического аппарата.
- 63 Два троянских спутника могли быть и более сопоставимыми по размеру, при этом один из них столкнулся с Луной, а другой — с Землей. Динамически это достаточно вероятно, хотя сценарий с двумя не равными по размеру троянскими лунами, одна из которых в 30–100 раз более массивна, чем другая, согласуется с данными о троянских спутниках в системе Сатурна. В любом случае мини-троянец мог не просуществовать

достаточно долго, чтобы оставить след в геологической летописи Луны; если же он сделал это, где-то на Луне может иметься нашлепка поменьше.

- 64 Когда Луна обращалась по орбите ближе к Земле, бомбардирующие ее тела разгонялись в поле тяготения Земли. Все, что ударяло Луну, летело со скоростью, во много раз превышающей ее скорость убегания, так что наш спутник переживал опасные времена, пока под действием приливных сил не отодвинулся от Земли на десяток земных радиусов. Столкновения, однако, продолжались, причем с очень высокими скоростями по сравнению с лунной скоростью убегания (всего 2,4 км/с). Результатом всего этого был бы эффект пескоструйной обработки, вплоть до потери Луной сотен километров своего первоначального радиуса. Этот фактор пока не учтен ни в одной из теорий образования лунной коры.
- 65 Для того чтобы быть опубликованным, научный результат должен пройти через рецензирование работы другими учеными. Это означает, что статье необходимо получить одобрение специалиста в той же области или (для лучших журналов) двух специалистов, а также редактора. Этот механизм является основополагающим для науки, и нет никакой тайны, почему он работает. Научная репутация — это как сдавать квартиру на Airbnb. Ваш пятизвездочный рейтинг (надежность и ценность ваших исследований) означает, что вы получите больше грантов и поучаствуете во всяких развлечениях вроде экспедиций. А как клиент вы будете останавливаться только в тех домах (полагаться на те статьи), у которых хороший рейтинг. Вы публикуете хорошие статьи в хороших журналах и добиваетесь репутации справедливого, но критически настроенного рецензента. Проверка работы коллегами гарантирует не правильность публикации, но исключительно ее научную ценность.
- 66 Область лунной поверхности диаметром в 1300 км уже невозможно считать плоской, поэтому мы используем масштабирование кратера только как первое приближение. Законы масштабирования кратеров разработаны для того, что называют

полупространством — это геометрический объем, который бесконечен во всех направлениях ниже одной плоскости. Для ударных кратеров размером с Тихо и меньше Луна — это фактически полупространство.

- 67 Китайский аппарат «Чанъэ-4» недавно впервые совершил посадку на обратной стороне Луны. Следующий аппарат «Чанъэ-5» должен доставить оттуда первые образцы.
- 68 Ударная волна возникает, когда скорость столкновения нарастает; энергия волны перегоняет себя, как лодка, несущаяся на гребне собственного следа. Сильная ударная волна создается, когда летящее тело сталкивается с мишенью на скорости, превышающей скорость звука: энергия не может отводиться так же быстро, как прибывает. Для земледобных планет — это примерно 5 км/с; для ледяных планет — примерно 3 км/с. Вполне реалистично, что карманы с рассолом, трещины в породах и их слоистость становятся причиной того, что ударная волна возникает и при столкновении на более низкой скорости, что ведет к сдавливанию, разрушению и разогреву от трения. Физика, термодинамика и геология столкновений лучше всего описаны в книге Н. Jay Melosh, *Impact Cratering: A Geologic Process* (New York: Oxford University Press, 1989).

ГЛАВА 7: МИЛЛИАРД ЗЕМЕЛЬ

- 1 Бóльшая часть массы астероидов сосредоточена в самых крупных телах, но бóльшая часть их площади поверхности приходится на самые маленькие тела — на пыль. Именно поэтому мы иногда наблюдаем зодиакальный свет — свечение перемолотой пыли Главного пояса астероидов. Астероиды невооруженным глазом не видны, но иногда видна пыль, хотя ее массой можно пренебречь.
- 2 Это не вполне лды. Считается, что активность комет отчасти связана с аморфными твердыми телами, которые никогда не кристаллизовались в лед. Но они холодны, как лед, и состоят из тех же веществ (например, воды и метана), что и лед, просто не в кристаллической форме.

- 3 Прибытие космического аппарата «Психея» на астероид Психея планируется на 2028 г. Аппарат «Люси» придет к шести троянским спутникам Юпитера между 2025-м и 2033 г.
- 4 Гафний-вольфрамовое датирование — один из самых любопытных методов радиоизотопного определения возраста. Гафний — это элемент, который обладает сродством к веществу мантии (литофильный элемент). Один из изотопов гафния ^{182}Hf является радиоактивным и спонтанно распадается на стабильный вольфрам ^{182}W . Период полураспада составляет 9 млн лет. Когда расплавленная планета разделяется на мантию и ядро, гафний останется в мантии, а вольфрам отправляется в ядро вместе с другими металлами. Если планета претерпевает дифференциацию в течение всего нескольких миллионов лет после формирования, в ее горных породах все еще останется нераспавшийся ^{182}Hf , запертый в кристаллах. Когда эти атомы распадаются, в твердых кристаллах накапливается некоторое количество вольфрама, которое ученые (миллиарды лет спустя) читают, как часы. Гафний-182 называют вымершим радиоизотопом, потому что эти часы давно остановились — весь радиоактивный гафний распался. Тем не менее их стрелка указывает на определенное время.
- 5 Обзор хронологии эволюции мантии и океана см. в статье Linda Elkins-Tanton, “Formation of Early Water Oceans on Rocky Planets,” *Astrophysics and Space Science* 332, no. 2 (April 2011): 359–64.
- 6 Viranga Perera et al., “Effect of Re-impacting Debris on the Solidification of the Lunar Magma Ocean,” *Journal of Geophysical Research* 123 (2018).
- 7 Окислительно-восстановительный потенциал описывает количество свободного водорода или свободного кислорода относительно воды H_2O . Окислительные условия означают, что вокруг есть кислород, ищущий что бы окислить. Поверхность Земли имеет окислительные условия, именно поэтому все ржавеет, но в то же время вы можете дышать. Юпитер имеет ярко выраженную восстановительную атмосферу:

- любой свободный атом кислорода мгновенно нашел бы там водород.
- 8 Jeremy Bellucci et al., “Terrestrial-Like Zircon in a Clast from an Apollo 14 Breccia,” *Earth and Planetary Science Letters* 510 (2019): 173–85.
 - 9 John Armstrong, Llyd Wells, and Guillermo Gonzalez, “Rummaging Through Earth’s Attic for Remains of Ancient Life,” *Icarus* 160, no. 1 (2002): 183–96.
 - 10 Вилли Бенц написал исходную программу для моделирования гигантских столкновений в планетологии, используя метод гидродинамики сглаженных частиц. *Гидрокоды* вроде этого подарили современной физике планет новую численную лабораторию, позволив нам изучать проблемы, которые не воспроизведешь ни в одной другой лаборатории. Программируя, мы включаем в наши модели экспериментальные физические уравнения, начиная с фундаментальных ограничений вроде сохранения массы, импульса и энергии.
 - 11 Canup and Asphaug, “Origin of the Moon”: 708–12.
 - 12 TRAPPIST — сокращение от Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (Малый телескоп для наблюдения за транзитными планетами и планетезималями), отсылающее к названию монашеского ордена траппистов, который знаменит своим пивом. Планетная система была открыта с помощью этого телескопа. Наименования планет, обращающихся вокруг других звезд, пока что не систематизированы в той же мере, как наименования комет и астероидов. Существует, например, «Звезда Табби», названная в честь астронома Табеты Бояджан, которая много лет посвятила наблюдению за этой сумасшедшей системой, вспыхивающей и тускнеющей практически случайным образом: возможно, вокруг нее обращаются динамически нестабильные осколки. Если у звезды есть имя, скажем, 51 Пегаса, тогда первая открытая около нее планета обычно получает буквенный индекс b (индекс a обозначает саму звезду), в данном случае 51 Пегаса b. Это первая планета, обнаруженная около звезды главной последовательности.

- 13 Любители хорошей звуковоспроизводящей аппаратуры называют это соотношением сигнал-шум.
- 14 На Меркурии есть приполярные регионы, где в десятках метров под поверхностью могут присутствовать слои жидкой воды. Если это так, ее там немного, но она стабильна в течение долгого времени.
- 15 Людвиг Витгенштейн, «Логико-философский трактат» (Tractatus Logico-Philosophicus, 1918). “Wovon man nicht sprechen kann, darüber muß man schweigen”.
- 16 Peter Ward and Donald Brownlee, *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe* (New York: Copernicus Books, 2000). Несмотря на то что в космосе существуют «миллиарды и миллиарды» планет, авторы считают, что условия для возникновения сложной жизни встречаются крайне редко, хотя микробная жизнь может быть широко распространена.
- 17 В числе прочего книгу «Редкая Земля» критикуют за то, что авторы смотрят на проблему со слишком земной точки зрения. Нормально утверждать, что такие условия, как на Земле (тектоника плит, спутник, напоминающий Луну, и так далее), встречаются редко. Но отсюда вовсе не следует, что все эти условия необходимы для возникновения сложной жизни. См.: David Darling, *Life Everywhere* (New York: Basic Books, 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Когда-то это было мантрой при разработке небольших аппаратов NASA: «Быстрее, лучше, дешевле». Ответ обычно звучал так: «Выберите два из трех».
- 2 Назван в честь британского исследователя Антарктиды Эрнеста Шеклтона.

ПРЕДМЕТНО- ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

67P/Чурюмова — Герасименко
 комета 39, 40, 195–197,
 311–313, 434
1999 KW₄, астероид 262

А

Агнор, Крейг 435
аккреция 151–153, 161, 169,
 195, 196, 198, 201, 216,
 279, 295, 342, 345, 347,
 349, 352, 353, 368, 394,
 417, 428, 450
Александрийская библиотека
 111, 420
Альварес, Луис и Уолтер 304,
 441
Альенде, метеорит 97, 256,
 257
аминокислоты 257, 258
анаглиф 405
Анаксимандр 110

Андромеды туманность 82,
 83, 86, 376, 416
анортозит 288, 310
Апофис, астероид 384, 385,
 447
Аризонский метеорный
 кратер 130, 188, 448,
 453
Аристарх Самосский 58, 112–
 114, 116
Аристотель 109, 110, 328, 420
Архимед из Сиракуз 115–117,
 405, 422
астероиды 36, 43, 45, 50, 51,
 73, 76, 104, 125, 128,
 133–135, 138, 146, 147,
 157, 184, 190, 195, 196,
 201, 214, 249, 252, 255,
 256, 259, 261, 263, 264,
 266, 268, 275–277, 290,
 300, 301, 305, 310, 318,

- 333, 334, 337, 345, 346,
348, 352–354, 366, 367,
373, 384, 385, 386, 391–
394, 397, 415, 421, 424,
425, 434, 440, 441, 443,
448, 450, 457
- астробиология 257
- астрология 18, 19
- астрометрия 58
- астрономическая единица
(а. е.) 9–11, 14, 15, 75,
199, 251, 299, 392,
394
- атмосферные окна 89, 297
- афелий 200, 273, 299, 394,
412, 441
- Афина 290, 445
- Б**
- базальты 43, 44, 196
- баллистическая панспермия
187, 367
- Балч, кратер 140
- барионы 80
- Барнард 68, пылевое облако
96
- Бассейн Южный полюс —
Эйткен 158, 309
- Батыгин, Константин 443
- Безос, Джефф 238
- Белтон, Майк 311, 312, 451
- белые карлики 103, 104, 153,
275
- белые скалы Дувра 173, 174
- Бенну, астероид 138, 195, 255,
256, 441
- Бенц, Уилли 354, 459
- Бетельгейзе 105, 107
- благородные газы 43
- Боде, Иоганн 75, 77, 78, 285,
414, 415
- Большой атакамский
миллиметровый
комплекс (Atacama
Large Millimeter Array,
ALMA) 63, 93, 419
- Большой взрыв 46, 80
- Большой обзорный телескоп
(Large Synoptic Survey
Telescope, LSST) 51,
286
- Браунли, Дон 365
- Браге, Тихо 409
- Бруно, Джордано 17, 59, 60,
320–322, 401, 452
- Брэнсон, Ричард 238
- Бэрринджер, Дэниел 129
- В**
- Вегенер, Альфред 142
- Великая Северная равнина (на
Марсе) 136
- Венера 9, 10, 22, 25, 27, 29,
30, 37, 51, 52, 103, 104,
139–142, 144–146, 155,
169, 172, 174, 184, 185,
188, 210, 211, 215, 225,
233, 238, 251, 279, 284,
294–297, 299, 333, 353,
356–359, 377, 381, 400,
402, 428, 430, 432, 434,
443, 444

Веста, астероид 135, 290, 310,
318, 347, 353, 392

взрывающиеся звезды 51

Витгенштейн, Людвиг 364

вода 19, 23, 42, 46–49, 89, 90,
93, 98, 99, 101, 111, 115,
119, 122, 134, 137, 139,
145, 149, 152, 153, 158,
161, 163–165, 166–174,
179, 180, 185, 190, 202,
203, 215, 217, 218, 220,
222–224, 226, 229, 246,
247, 255, 261, 282, 288,
298, 299, 305, 348, 351,
359, 360, 373, 374, 385,
393, 395, 396, 400, 405,
406, 408, 410, 413, 422,
425, 428–432, 434, 437,
442, 444, 449, 457, 458

водород 35, 39, 79, 80, 95, 97,
98, 104, 121, 151–153,
173, 183, 283, 374, 392,
396, 416, 419, 422, 426,
433, 458

возраст Вселенной 64, 416

возраст Земли 62, 72

возраст Луны 71

возраст Солнца 69

Волк, Кэтрин 443

Воннегут, Курт 168, 429

Восток, озеро 182

Вредефорт, кратер 146

вулканы 43, 89, 124, 127, 130,
131, 138, 142, 144, 179,
181, 252, 304, 306, 318,
332, 396, 423, 449

выветривание 139, 145, 146,
174, 393

Г

галактики 36, 45, 48, 64, 78,
79, 82, 83, 85–87, 91, 95,
159, 165, 180, 216, 267,
275, 282, 285, 330, 357,
367–369, 372, 379, 381,
415–417

галилеевы спутники *см. также*
отдельные спутники 67,
68, 102, 178, 181, 216,
217, 219, 226, 235, 236,
296, 362

Галилей, Галилео 30, 122, 123,
212, 213, 266, 401, 410

Галлей, Эдмунд 272

Галлея (1P/Halley) комета
185, 271–273, 387, 451

Гамильтон, Дуг 435

Ганимед 11, 54, 100, 169, 175,
176, 178, 179, 181, 217,
218, 226, 231, 296, 328,
365, 426, 432, 438

Гань Дэ 328

Гаусс, Карл Фридрих 76, 435

гелий 35, 46, 79, 80, 85, 95, 97,
98, 104, 106, 121, 151,
416, 419, 426, 433

геология 19, 25, 27, 28, 33,
41, 47, 52, 53, 62, 94,
99, 102, 122, 128, 131,
136–138, 143, 149, 168,
180, 185, 202, 203, 280,
306, 310, 320, 328, 340,

- 349–351, 356, 425, 447, 457
 геометрия 19, 58, 112, 114, 118, 158, 378, 456
 геофизика 311, 339, 378, 415, 424, 431
 Герсонд, Райнер 434
 Геттон, Джеймс 33
 Гигея 347, 392
 гидрокод 156, 158, 159, 459
 гидрологический цикл 99, 165, 302
 гидросиликаты 168, 175, 282
 Гиперион 12, 101, 229–231, 233
 гипотеза Геи 28
 гипотеза туманностей
 Канта — Лапласа 402
 главная последовательность 102, 103, 244, 414
 Главный пояс 43, 76, 214, 250, 252, 346, 352, 353, 391, 392, 440, 457
 Глэдман, Бретт 443
 Годзилла 155, 157
 гравитационная
 неустойчивость 79, 225
 гравитационный коллапс 80, 96, 396, 415
 Гуанси, каменный лес 173
 Гук, Роберт 122, 124–126, 131, 261
- ## Д
- Дарвин, Джордж 62, 70, 73, 78, 162, 235, 252, 289, 290, 331, 440
 Дарвин, Чарльз 62, 70
 датирование по следам распада 351
 Деймос 10, 212–214, 291, 292, 294
 Джексон, Алан 455
 Джеффрис, Гарольд 289, 378
 Джильберт, Гров Карл 131
 Джордано Бруно, кратер 320
 диатомеи 189
 динамическая катастрофа 278
 Диона 12, 229, 230, 233, 234, 236, 335
 Долины Маринера 136
 доплеровская спектроскопия 91, 416
 Дэвис, Дональд 423
- ## Е
- Европа 35, 387
 Европа, спутник Юпитера 11, 48, 49, 57, 93, 144, 145, 153, 163, 165, 178, 181, 185, 217, 220, 222–226, 231, 249, 296, 316, 364, 432, 437, 438, 454
 Езеро, кратер 186, 190
- ## З
- закон обратных квадратов 273
 законы масштабирования 138, 339, 427, 456
 Зевс 217, 290, 445
 Земля 9, 10, 20–26, 32, 35, 36, 41, 43–46, 49, 52,

- 57, 58, 61, 63, 68–70,
73–75, 78, 84, 86, 87,
89, 90, 94, 99, 103, 105,
107, 110, 111, 113, 114,
116, 117, 121, 124, 128,
131, 132, 138, 139, 143,
144, 146, 148, 149, 151,
155, 161, 163–171,
174, 177, 178, 182,
184, 187–193, 203,
208, 210, 214, 219, 222,
224, 237–239, 241,
246, 249–251, 253,
255–259, 262, 265, 268,
273, 280, 281, 283, 284,
286, 288–290, 292,
294–298, 300–302, 305,
306, 309, 310, 314, 315,
317, 318, 322, 324, 327,
329, 330, 331, 334, 336,
337, 347–354, 356, 357,
359, 360, 363–367, 369,
371, 372, 375–378, 380,
381, 385, 387, 391, 393,
394, 401, 406–408, 410,
413, 415, 417, 418, 421,
422, 433–435, 437, 439,
441, 444, 445, 447, 449,
455, 460
- Земля Афродиты,
 возвышенность на
 Венере 146
- Зенона парадокс 109
- Златовласки планеты 171, 180,
 251
- зона субдукции 145, 147
- И**
- иерархическое слияние 198
- Изабелла Кастильская 371
- изотопы кислорода 42, 46, 287
- имбрийский период 147
- импактное
 кратерообразование
 147, 300
- импактное событие 322, 447
- импульс 59, 81–83, 159, 161, 199,
 219, 263, 266, 282, 288,
 291, 313, 331, 393, 395,
 419, 428, 439, 455, 459
- инфракрасная астрономия 89,
 90
- Ио 11, 37, 153, 178, 217–219,
 221, 296, 438
- иридий 302–305, 441
- Истмен, Джордж 400
- Итокава, астероид 256
- К**
- Кайт, Фрэнк 434, 447
- календарь 21, 22, 363, 400, 426
- Калипсо 296, 334
- Каллисто 11, 100, 217, 231,
 432, 438
- каналы 184, 185, 190, 231,
 242, 247, 248
- Кант, Иммануил 83, 154
- Каньон Дьявола, метеорит 52
- карбонат кальция 26, 42, 99, 166,
 173, 299, 369, 431, 449
- карликовые планеты 50, 202,
 347

- катархей 72, 174, 352
 кварц 98, 130, 351
 Кельвин, Уильям Томсон 69,
 70–73, 153, 254, 412
 кентавры 268
 Кеплера законы движения
 планет 59, 76, 81, 177
 Кеплер, Иоганн 57–61, 64–68,
 74, 76, 92, 106, 193, 212,
 213, 359, 361, 409–412,
 436
 Кивельсон, Маргарет 221
 килоновые 420
 кинетическая энергия 182,
 264, 321, 432
 кислород 39, 41–43, 45, 80,
 81, 89, 94, 97, 98, 100,
 104, 106, 164, 171, 223,
 287–289, 298, 351, 361,
 369, 374, 396, 406, 407,
 433, 449, 458
 Китс, Джон 21
 Кларк, Артур 325
 коагуляции уравнение 193
 коллапсирующие звезды 81
 Колумб, Христофор 371, 372
 кометезимали 47, 152, 313,
 450
 кометы 20, 21, 23, 36, 39, 43,
 44, 47, 50, 73, 75, 78,
 79, 115, 124, 146, 160,
 167, 184, 195–197, 200,
 207, 220, 224, 225, 230,
 253, 254, 257, 259, 261,
 266–273, 275, 277, 301,
 310, 311–313, 318, 320,
 329, 334, 337, 348, 366,
 406, 434, 442, 448, 451,
 457, 459
 Комплекс инфракрасного
 телескопа NASA (In-
 frared Telescope Facility,
 IRTF) 89
 конденсации туманностей
 теория 83
 Конрад, Чарльз 129
 Конфуций 110
 коорбитальный *см. также*
 тройные спутники
 233, 396
 Коперник, Николай 57, 148,
 305, 409, 423
 космическая пыль 82, 91,
 119, 134, 154, 225, 269,
 272, 302, 312, 347,
 457
 космический туризм 238
 Котсуорт, Мозес 400
 красное смещение 86, 91, 416
 красные карлики 103, 358
 кривая равновесия воды и
 льда 82, 429
 криовулканизм 180
 криосфера 180
 криотурбация 430
 ксенон 43
 К/Т событие 303–305, 367,
 414, 441, 449
 Кун-Бьютт, кратер на Земле
 129, 130
 Кэнап, Робин 354, 437, 444
 Кюри, Мари 61

Л

Лагерквист, Пер 24
 Лайель, Чарльз 62
 Лапласа резонанс 217
 Лаплас, Пьер-Симон 217, 218,
 227, 337, 362
 Лафлин, Грегори 443
 Леверье, Урбен 443
 Левинсон, Хол 416
 лед-девять 168, 429
 ледниковые шапки 166, 300,
 408
 ледниковый период 42
 Лейбниц, Готфрид 260
 Леониды, великий метеорный
 поток 1833 г. 253
 Ливитт, Генриетта 85, 86
 литий 80
 литосфера 142
 Лоуэлл, Персиваль 184, 254
 Лоэб, Ави 401
 Луна 10, 17–23, 30, 43, 45, 46,
 49, 51, 54, 58, 67, 68,
 70, 71, 76, 78, 84, 101,
 105, 110, 113–115, 119,
 121–124, 126–128, 131,
 133, 138, 139, 145, 147,
 149, 154–158, 161, 162,
 164, 177, 178, 185–188,
 192, 196, 198, 208, 209,
 214, 216, 219, 228, 231,
 233, 235, 238, 244, 250,
 254, 255, 257, 261, 264,
 266, 267, 277, 279–281,
 284, 287–292, 300, 301,
 306–311, 314–332, 334,

335–342, 349–355, 360,
 363, 365, 366, 372–375,
 377, 378, 381, 383, 385,
 391–393, 399–402, 406–
 408, 414, 421, 423, 424,
 427, 428, 432, 435, 440,
 444, 447, 452, 455, 456

лунное затмение 280, 399

лунный календарь 22

М

Магеллановы Облака 67, 82,
 415

магнитное поле звезд 84

Малорта, Рену 205

Марс 9, 10, 20, 22, 25, 26, 31,
 39, 43–46, 50, 51, 54,
 58, 77, 94, 134, 136,
 139, 143, 145, 146, 157,
 166, 167, 176, 184–189,
 191, 192, 198, 208, 210,
 212–215, 233, 238, 239,
 250, 252, 261, 275, 280,
 282, 290–292, 294,
 297–300, 304, 333, 348,
 353, 354, 356, 359, 364,
 366, 372–375, 381, 392,
 400, 407, 408, 417, 430,
 436, 438, 445, 446

Маск, Илон 238

масконы 308

масс-спектрометр 39, 42, 97,
 303, 407

математика 23, 24, 40, 65, 110,
 115, 155, 365, 378, 379,
 420, 452

Матильда, астероид 133, 134, 424
 Международная космическая станция (МКС) 31, 383
 мезозойская эра 147
 меловой период 301, 303, 449
 Менке, Джон 402
 Меркурий 9, 22, 25, 54, 65, 66, 91, 100, 103, 141, 145, 188, 198, 231, 233, 251, 273, 279, 284, 286, 297, 352–357, 359, 379, 400, 412, 414, 433, 443, 459
 метеориты 39, 43–45, 51, 72, 97, 121, 129, 130, 188, 190, 195, 209, 236, 249, 252–258, 265, 288, 302, 304, 306, 341, 351, 352, 391, 394, 397, 407, 408, 413, 417, 436
 метеороиды 120, 265, 302, 394
 метеоры 265, 306, 329
 миграция планет 66, 164, 209, 217, 229, 392
 Мимас 11, 211, 228, 229, 233, 234
 Млечный Путь 82, 86, 142, 330, 376, 415
 Море Восточное 148, 149, 187
 Море Дождей 157, 187, 208, 280, 308
 Море Лиги 242, 243, 439
 Море Нектара 147
 мультивселенные 79
 Мурчисонский метеорит 257

Н

Намака 15, 200
 нектарский период 147
 Нептун 9, 14, 35, 36, 54, 77, 152, 199, 203–207, 211, 216, 233, 268, 270, 284, 286, 296, 333, 348, 415, 435, 443
 Ниццы модель 207–211, 299, 416, 436, 437
 Ньютона законы движения 28, 61, 65, 272
 Ньютон, Исаак 64, 67

О

Облако Оорта 103, 200, 267, 268, 275
 общая теория относительности 65, 66
 Океан Бурь 120, 121, 148, 158, 308–311
 оксиды 41, 98, 99, 283, 392
 оливин 41, 98, 104, 197, 342
 олигархи 85, 154, 161, 198, 277, 289, 349, 428
 орбитальный резонанс 178, 204, 208–210, 216, 217, 362, 394, 440, 452
 Оргей, метеорит 254, 255
 Остро, Стивен 262
 Оумуамуа (11/2017 U1) 274–277, 401

П

Паллада 347, 392
 Пангея 142, 143, 317

панспермия 45, 188, 277
 параллакс 58, 114
 парниковый газ 166, 171, 172, 298, 447
 Паттерсон, Клэр 72, 413
 Пейн-Гапошкина, Сесилия 95
 перигелий 392, 441
 Пиаци, Джузеппе 75
 Пифагор Самосский 110, 420
 Планета X 268, 286
 планетезимали 39, 47, 155, 193, 194, 199, 205, 345
 платоновы тела 60
 плиты тектонические 73
 плутино 206, 211
 Плутон 14, 15, 35, 50, 53, 54, 77, 94, 100, 163, 180, 199, 200–208, 211, 216, 231, 268, 280, 286, 362, 366, 374, 381, 434, 435
 плутоний 241, 404
 полураспад 107, 392, 395, 404, 458
 потенциальное поле 66, 332, 333
 пояс Койпера 199, 200, 205, 206, 211, 216, 229, 231, 268, 275, 406, 435
 приливная эволюция 235
 приливное трение 177, 292
 приливной разогрев 177, 218, 227, 268
 приливные силы 104, 161, 218, 219, 395
 Проксима Центавра 358

протопланетная туманность 46, 107
 протопланетные диски 81, 83, 84, 88, 193, 250, 417
 Психея 310, 345, 348, 349, 353, 357, 457
 Пуйл, кратер 225
 пятна на Солнце 20

Р

Равнина Спутника 54
 радиоактивность 61, 62
 радиоастрономия 267
 расширение Вселенной 379
 реголит 119, 192, 261, 348, 351, 373, 374, 422, 430, 441
 Рейфер, Андреас 235, 236, 278, 444
 реология 452
 Рея 12, 229, 230, 233, 236
 Розенблат, Паскаль 446
 Роша предел 291, 292, 395
 Рош, Эдуард 445
 Рюгу, астероид 256

С

Саган, Карл 25, 184
 Сатурн 9, 11–13, 22, 35, 36, 48, 67, 68, 74, 77, 94, 100, 101, 182, 199, 207–209, 211, 213, 215, 227–237, 240, 245, 251, 252, 273, 278, 286, 292, 296, 299, 332, 334, 376, 379, 380, 392, 400, 433,

- 437, 438, 440, 443, 445,
455
сверхлетучие газы 269
сверхновые 50, 78, 81, 95,
103–107, 154
светимость 69, 86, 103, 297
свинец 26, 62, 69, 72, 141, 411,
413, 414
Свифта — Туттля комета 255
Свифт, Джонатан 212, 213, 410
Северный Полярный бассейн
136, 214, 292, 294, 446,
447
Седан, кратер 264
седиментология 62, 301, 405
сейсмология 131, 424
сепаратриса 205
сидерофильные элементы 302
Сиенский колодец 67, 111, 454
силикаты 47, 98, 99, 195, 196,
351, 385, 413
Скиапарелли, Джованни 254
скорость убегания 158, 161,
280, 318, 351
солнечное затмение 115, 323,
324, 325
Солнце 9–15, 19, 20, 22, 25,
34–36, 43, 46, 47, 49,
51, 57, 58, 60, 62, 65,
67, 68, 70, 74–78, 80,
82–84, 88, 91, 95, 97,
98, 102–104, 107, 111,
113–115, 117, 126, 142,
153, 154, 163–166, 171,
172, 177, 193, 198–200,
205–207, 210, 215, 220,
223, 226, 227, 250, 251,
254, 267–269, 271–273,
275, 278, 284–286, 288,
290, 294, 297, 299, 320,
322–325, 327–329, 331,
332, 334, 337, 353, 354,
358, 359, 361, 363, 365,
367, 372, 374, 376, 380,
389, 392–395, 399–401,
407, 410, 412, 416, 418,
420–422, 426, 427, 440,
445, 448, 454
Сорби, Генри 254
спектр 88, 90, 91, 204, 243,
358, 396, 416, 418
спектральная линия
поглощения 95
спектрометр 38, 88, 95
стандартная светимость 86, 87
Стивенсон, Дэвид 437
Стофан, Эллен 243, 439
Стюарт, Сара 445
сублимация 167
- ## Т
- Тауриды, метеорный поток
274, 329
Тейя 46, 161, 163, 281, 287,
289, 394, 428
Телесто 296, 334
темная материя 74
Темпеля комета 312
Тенцига, горы 54
термоядерные реакции 41, 70,
80, 81, 97, 104, 152, 417,
426

Тeffия 12, 168, 230, 233, 236, 296
 типа Т Тельца звезды 102

Титан, спутник Сатурна 12,
 28, 35, 48, 67, 68, 100,
 101, 169, 182, 184,
 227–229, 231, 233,
 235–247, 271, 286, 364,
 377, 381, 438

титан (элемент) 183, 287, 288

Тихо, кратер 78

Тициуса — Боде правило 74,
 76, 77, 415

Толстой, Лев Николаевич 352

Томбо, область Плутона 204

транзиты 91, 92, 359

транснептуновые объекты
 201, 207

Тритон 14, 203, 205, 348, 435

тройная точка равновесия воды
 47, 49, 164, 169, 396

тройные астероиды

Юпитера 334

тройные точки 333, 334

Тунгусский метеорит 265, 442

тяготение 47, 65–67, 77, 79,
 124, 152, 156, 161, 163,
 261, 263, 268, 273, 280,
 307, 332, 333, 340, 353,
 355, 357, 376, 385, 395,
 408, 412, 436, 455

У

Уайатт, Марк 455

убегающая планета 160

углекислый газ (CO_2) 41, 89,
 90, 98, 165, 170–174,

186, 269, 298, 396, 406,
 408, 430, 431, 449

углеродный цикл 396

углистые хондриты 255, 256

Ультима Туле, астероид 311

Уорд, Питер 365

Уоррен, Пол 250

Уран, планета 9, 13, 35, 36,
 54, 61, 74, 152, 207, 208,
 211, 233, 285, 413

уран (элемент) 62, 69, 72, 177,
 339, 391, 413

У-син 19

Ф

Фалес Милетский 20, 59, 110,
 382

Фарсида, нагорье 136

Феба 229, 231

Фейнман, Ричард 403

Ферми, Энрико 365

философия 18, 21, 126, 260, 364

Фламарион, Камиль 60

Фобос 10, 134, 185, 212–214,
 250, 291–294, 385, 446

Фортни, Джонатан 419

фотометрия 276

фотосинтез 298

Франклин, Бенджамин 125, 249

Х

Хаббла постоянная 86

Хаббл, Эдвин 53, 63, 64, 85,
 86, 160, 359, 376, 381,
 406, 417

Хаос 260

Харон 14, 15, 53, 203, 204,
268, 280, 366, 435
Хаумеа 15, 37, 200
Хейла — Боппа комета 200
Хииака 15, 200
хиральность 257–259, 440
Хиросима 265, 452
Холл, Асаф 212
хондриты 250, 254, 255, 257,
391, 417
хондры 195
Хякутакэ, комета 200, 272, 442

Ц

Цах, Франц Ксавье фон 75
Церера 76, 277, 285, 319, 347,
353, 392, 414, 435
цефеиды 85
цианобактерии 298
циркон 413
цирконий 287, 351

Ч

частицы космической пыли
63, 81, 84, 87, 88, 119,
128, 134, 151, 154, 188,
194, 216, 257, 269, 292,
302–305, 395, 448, 457
Челябинский метеорит 265
Чикшулуб 146, 189, 280, 425,
434

Ш

Шеклтон, кратер 374, 460
Шекспир, Уильям 57, 61, 106, 151
Шрёдингера кот 245

Шрёдингер, Эрвин 439
Шумейкера — Леви комета
160, 269
Шумейкер, Юджин 130, 188

Э

эволюция 62, 104, 128, 203,
210, 310, 440
Эйнштейн, Альберт 65, 66, 81,
286, 426
экзопланеты 47, 89, 91–93,
203, 238, 359, 362, 415
экспоненциальный закон 116
экстремофилы 174, 189
Элатин, столкновение 190,
191
Энке, комета 273, 329
энтропия 170, 429
Энцелад 12, 30, 37, 48, 50,
54, 101, 211, 228, 229,
232–234, 236, 238
Эратосфен 111, 148
эратосфенский период 147
Эрос 128

Ю

Юпитер 9, 11, 22, 32, 35, 36, 48,
50, 67, 68, 77, 83, 91, 92,
100, 102, 114, 151, 152,
153, 160, 176, 178, 181–
183, 199, 203, 207–211,
213, 215–219, 221–227,
229, 231, 233, 235–237,
250–252, 266–270, 273,
278, 294, 296, 299, 310,
311, 313, 328, 333, 334,

353, 358, 361, 362, 373,
380, 392, 400, 404, 432,
433, 437, 438, 440, 441,
443, 457, 458
Юпитера и Сатурна резонанс
209
Ютци, Мартин 311, 312, 318,
336, 338, 339

Я

Япет 12, 101, 168, 228, 231,
233
Ярковского эффект 252, 440

А

Abell NGC 2218, скопление
галактик 357

В

Blue Origin 238

Г

GRAIL, зонд 307

Н

HL Тельца 63

К

KREEP 198, 338–341, 350,
391, 413

Н

NASA *см. также* отдельные
космические аппараты
31, 32, 35, 51, 89, 127,

138, 140, 141, 148, 167,
175, 176, 181, 185, 186,
226, 239, 247, 267, 271,
346, 349, 358, 359, 372,
383, 409, 447, 448, 451,
460

О

OSIRIS-REx, экспедиция 138,
255

Р

Rap-STARRS, телескоп 274,
442, 443

С

S-тип астероидов 385
SpaceX 238

Т

Titan Mare Explorer,
экспедиция 439
TRAPPIST-1, экзопланетная
система 330, 359–363,
364

У

Virgin Galactic 238

Асфог Эрик

КОГДА У ЗЕМЛИ БЫЛО ДВЕ ЛУНЫ

Планеты-каннибалы, ледяные гиганты,
грязевые кометы и другие светила ночного неба

Издатель *П. Подков*

Руководитель проекта *И. Серёгина*

Корректоры *И. Астапкина, О. Петрова*

Компьютерная верстка *А. Фоминов*

Дизайн обложки *Ю. Буга*

Фото на обложке NASA, Shutterstock

*Фото автора на обложке The Arizona Board of Regents,
UAHS, Bio Communications, Kris Hanning*

Подписано в печать 08.06.2021. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.

Объем 30 печ. л. Тираж 3000 экз. Заказ № .

ООО «Альпина нон-фикшн»

123007, г. Москва, ул. 4-я Магистральная, д. 5,

строение 1, офис 13

Тел. +7 (495) 980-5354

www.nonfiction.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика
в АО «Первая Образцовая типография»,
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»
432980, Россия, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

Знак информационной продукции
(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)





Чудовища доктора Эйнштейна О черных дырах, больших и малых

Крис Импи, пер. с англ., 2020, 374 с.

О чем книга

Наши представления о черных дырах чаще всего основываются на популярных мифах и нескольких общеизвестных научных фактах. Описывая историю исследования черных дыр, Крис Импи с легкостью развенчивает наиболее распространенные заблуждения и приоткрывает дверь в загадочный мир далеких звезд и их невидимых, но влиятельных

спутниц. В этой книге история астрофизики предстает как череда потрясающих открытий, сделанных несколькими поколениями увлеченных и талантливейших ученых, сумевших описать прошлое, настоящее и будущее космического пространства, вычислить приблизительное местоположение ближайших черных дыр и предположить, что ждет Вселенную через миллионы лет. Живое, увлекательное повествование и подробные объяснения делают книгу понятной для любого читателя — от ученого-физика до школьника.

Почему книга достойна прочтения

Известный астрофизик Крис Импи знакомит читателя с загадочным миром далеких звезд и их невидимых спутниц — черных дыр. Как ведут себя черные дыры, как они рождаются и умирают и что происходит за их горизонтом событий — можно представить лишь в теории. Однако подобное теоретизирование ученых становится едва ли не увлекательнее приключенческого романа.

Исследование и осмысление черных дыр для автора — это вдохновляющее и непредсказуемое путешествие. Прочтение книги «Чудовища доктора Эйнштейна» можно сравнить с просмотром интересного и хорошо сделанного фантастического фильма.

Кто автор

Крис Импи — почетный профессор астрономии в Университете Аризоны, в прошлом вице-президент Американского астрономического общества. Его научные интересы связаны с изучением строения и эволюции Вселенной с помощью телескопов и других инструментов. Ряд его проектов поддержан крупными грантами NASA и NSF. Автор сотен научных и научно-популярных публикаций и нескольких книг. Удостоен высших наград за учебную и просветительскую работу.



Всё ещё неизвестная Вселенная

Мысли о физике, искусстве и кризисе в науке

Стивен Вайнберг, пер. с англ., 2020, 330 с.

Эту книгу следует прочесть не только ради глубоких и доступных объяснений широкого спектра физических явлений. Она дает шанс проследить ход мыслей блестящего ученого, рассуждающего о самых разных вопросах и проблемах: от физики высоких энергий и устройства Вселенной до поэзии, от истории и философии науки до опасностей, связанных с экономическим неравенством...

Марио Ливιο, Science

О чем книга

Десятки лет один из самых известных ученых нашего времени заставляет общество задуматься о фундаментальных законах природы и неразрывной связи науки и социума. В своей новой книге «Всё ещё неизвестная Вселенная» Стивен Вайнберг освещает широкий круг вопросов: от космологических проблем он переходит к социальным, от астрономии, квантовой механики и теории науки — к ограниченности современного знания, искусству научных открытий и пользе ошибок. Лауреат Нобелевской премии Стивен Вайнберг делится своими взглядами на захватывающие фундаментальные вопросы физики и устройства Вселенной. При этом ему удается не ограничиваться узкими дисциплинарными рамками и не прятаться от политических тем, среди которых нецелесообразность пилотируемых космических полетов, проблемы социального неравенства и важность поддержки большой науки.

Почему книга достойна прочтения

Интереснейший сборник статей Вайнберга, затрагивающий самые разные вопросы, связанные с наукой: о пользе астрономии, об элементарных частицах, об устройстве Вселенной, о бозоне Хиггса, о вреде пилотируемых полетов, о финансировании науки и множество других.

Кто автор

Стивен Вайнберг — лауреат Нобелевской премии по физике за теорию, объединяющую две силы природы, лежащие в основе Стандартной модели элементарных частиц. Удостоен американской Национальной медали за научные достижения, член Национальной академии наук США и Лондонского королевского общества. Автор нескольких книг, ставших мировыми бестселлерами.

Покупая бумажные книги на сайте alpina.ru, вы бесплатно получаете их электронные версии. Подробнее на alpina.ru/free.

Больше о книгах АНФ на сайте nonfiction.ru



Смерть с небес

Наука о конце света

Филип Плейт, пер. с англ., 2020, 404 с.

О чем книга

Поначалу у читателя этой книги может сложиться впечатление, что Вселенная только и ждет своего апокалипсиса. Но стоит ли на самом деле бояться черных дыр, гамма-всплесков и сверхновых?

И если причины для опасений есть, то можем ли мы что-то сделать, чтобы спасти себя? Остроумно и весело известный астрофизик рассказывает

о бесчисленных вариантах конца света, которые способен обрушить на нас космос. Предлагая читателю увлекательные и тревожные сюжеты, словно позаимствованные из научной фантастики, Филип Плейт сопровождает их комментариями о том, как они могут повлиять на жизнь на Земле и на саму Вселенную, если воплотятся в жизнь. Но автор не ставит своей целью поразить читателя сенсационной информацией: анализируя тот или иной вероятный сценарий, он показывает, как его предотвратить. Это безукоризненно научное, но доступное массовому читателю исследование — прекрасный урок астрономии для новичков и подлинное удовольствие для подготовленных любителей науки.

Почему книга достойна прочтения

Чтение этой книги — все равно что удар по физиономии от Карла Сагана. Страшно, но удивительно бодрит.

Дэниел Уилсон, писатель, телеведущий, инженер-робототехник

Фил Плейт пугает читателя до смерти сценариями космических катастроф, одним за другим, вплоть до смерти самой Вселенной. Но все не так плохо. Вы постоянно улыбаетесь, пока он демонстрирует свою особую смесь знаний и остроумия.

Нил Деграсс Тайсон, астрофизик, популяризатор науки

Кто автор

Филип Плейт — известный астрофизик, доктор наук, участник исследовательских проектов, финансируемых NASA. Публикуется в таких изданиях, как *Astronomy*, *Muse*, *Space Illustrated*, *The Boston Globe*. Неоднократно выступал на национальном радио и телевидении, снимался в документальном кино. Его веб-сайт и блог «Плохая астрономия» (www.badastronomy.com) читают миллионы. Удостоен престижных наград за научную журналистику.

Покупая бумажные книги на сайте alpina.ru, вы бесплатно получаете их электронные версии. Подробнее на alpina.ru/free.

Больше о книгах АНФ на сайте nonfiction.ru



Одиноки ли мы во Вселенной? **Ведущие ученые мира о поисках** **инопланетной жизни**

Под редакцией Джима Аль-Халили, пер. с англ., 2018, 284 с.

Мы уже начали исследовать Солнечную систему. К концу столетия у нас будут карты каждой планеты, каждого спутника и астероида. Следующим этапом станет создание масштабных, полностью роботизированных производств, способных строить в космосе огромные объекты.

О чем книга

Если наша планета не уникальна, то вероятность повсеместного существования разумной жизни огромна. Более того, за всю историю человечества у инопланетян было достаточно времени, чтобы дать о себе знать. Так где же они? Какие они? И если мы найдем их, то чем это обернется? Ответы на эти вопросы ищут ученые самых разных профессий — астрономы, физики, космологи, биологи, антропологи, исследуя все аспекты проблемы. Это и поиск планет и спутников, на которых вероятна жизнь, и возможное устройство чужого сознания, и истории с похищениями инопланетянами, и изображение «чужих» в научной фантастике и кино. Для написания книги профессор Джим Аль-Халили собрал команду ученых и мыслителей, мировых лидеров в своих областях, в числе которых такие звезды, как Мартин Рис, Иэн Стюарт, Сет Шостак, Ник Лейн и Адам Резерфорд. Вместе они представляют весь комплекс вопросов и достижений современной науки в этом поиске, и каждый из них вносит свой уникальный вклад.

Почему книга достойна прочтения

Первый сборник, изданный на русском языке, в котором ведущие специалисты в самых разных областях рассматривают все возможные аспекты инопланетной жизни. Книга отличается серьезным научным подходом к исследуемой теме.

Кто авторы

Мартин Рис, Льюис Дартнелл, Даллас Кэмпбелл, Анил Сет, Крис Френч, Крис Маккей, Моника Грейди, Луиза Престон, Иэн Стюарт, Андреа Селла, Ник Лейн, Джонджо Макфадден, Пол К.У. Дэвис, Мэтью Кобб, Адам Резерфорд, Натали Каброл, Сара Сигер, Джованна Тинетти, Сет Шостак.



Все эти миры — ваши **Научные поиски внеземной жизни**

Джон Уиллис, пер. с англ., 2018, 286 с.

О чем эта книга

Где и как искать инопланетян? Идея внеземной жизни завораживала человечество задолго до начала освоения космического пространства. Джон Уиллис, астроном и популяризатор науки, приводит пять наиболее реалистичных сценариев поиска инопланетных живых существ в нашей Галактике. Описывая последние достижения в изучении

космоса — результаты космического телескопа «Кеплер», исследование Марса с помощью марсохода «Кьюриосити», пролет около Плутона зонда «Новые горизонты» и многие другие, — Уиллис предоставляет читателям возможность самим выбрать подходящий способ обнаружения внеземной жизни. Он предлагает нам поразмышлять о ее существовании под марсианским льдом, на спутнике Юпитера Европе и спутниках Сатурна Энцеладе и Титане, причем нынешние условия на Титане автор рассматривает через призму далекого прошлого нашей собственной планеты. Уиллис бросает взгляд и за пределы Солнечной системы, обсуждая шансы найти «вторую Землю» среди миллиардов экзопланет, вероятно, существующих в нашей Галактике, а также вслушивается в далекий космос в надежде услышать инопланетные радиосигналы.

Почему книга достойна прочтения

Книга написана известным ученым и представляет собой фактически введение в астробиологию. Рассматриваются современные исследования планет и их спутников в Солнечной системе и планетных систем других звезд, связанные с поиском внеземной жизни.

Кто автор

Джон Уиллис — активный исследователь, специалист в области космологии и эволюции галактик, профессор астрономии Викторианского университета Британской Колумбии (Канада), где он ведет курс астробиологии.



Люди на Луне Главные ответы

Виталий Егоров, 2020, 432 с.

О чем книга

На фоне технологий XXI века полет человека на Луну в середине прошлого столетия нашим современникам нередко кажется неправдоподобным и вызывает множество вопросов. На главные из них — о лунных подделках, о техническом оснащении полетов, о состоянии астронавтов — ответы

в этой книге. Автором движет не стремление убедить нас в том, что программа Apollo — свершившийся факт, а огромное желание поделиться тщательно проверенными новыми фактами, неизвестными изображениями и интересными деталями о полетах человека на Луну. Разнообразие и увлекательность информации в книге не оставит равнодушным ни одного читателя. Был ли туалет на космическом корабле? Как связаны влажные салфетки и космическая радиация? На сколько метров можно подпрыгнуть на Луне? Почему в наши дни люди не летают на Луну? Что входит в новую программу Artemis и почему она важна для президентских выборов в США? Какие технологии и знания полувековой давности помогут человеку вернуться на Луну? Если вы готовы к этой невероятной лунной экспедиции, тогда: «Пять, четыре, три, два, один... Пуск!»

Почему книга достойна прочтения

В этой замечательной книге доступно и доходчиво даются ответы на многие вопросы и раскрываются самые популярные фейки. Ведь до сих пор один из самых часто задаваемых вопросов космонавтам: «Были ли американцы на Луне?» Всем любознательным, а также всем до сих пор сомневающимся рекомендуется к прочтению.

Сергей Рязанский, российский летчик-космонавт, Герой России

Кто автор

Виталий Егоров — популяризатор космонавтики, специалист по связям с общественностью, лектор, журналист, блогер. Автор множества статей о космосе и космонавтике. Основатель сообществ «Открытый космос» и «Curiosity — марсоход». В 2015 году его блог Zelenyikot.com получил литературную премию имени Александра Беляева, а в 2020-м стал лауреатом премии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «За верность науке» в номинации как «Лучший онлайн-проект о науке».

Покупая бумажные книги на сайте alpina.ru, вы бесплатно получаете их электронные версии. Подробнее на alpina.ru/free.

Больше о книгах АНФ на сайте nonfiction.ru