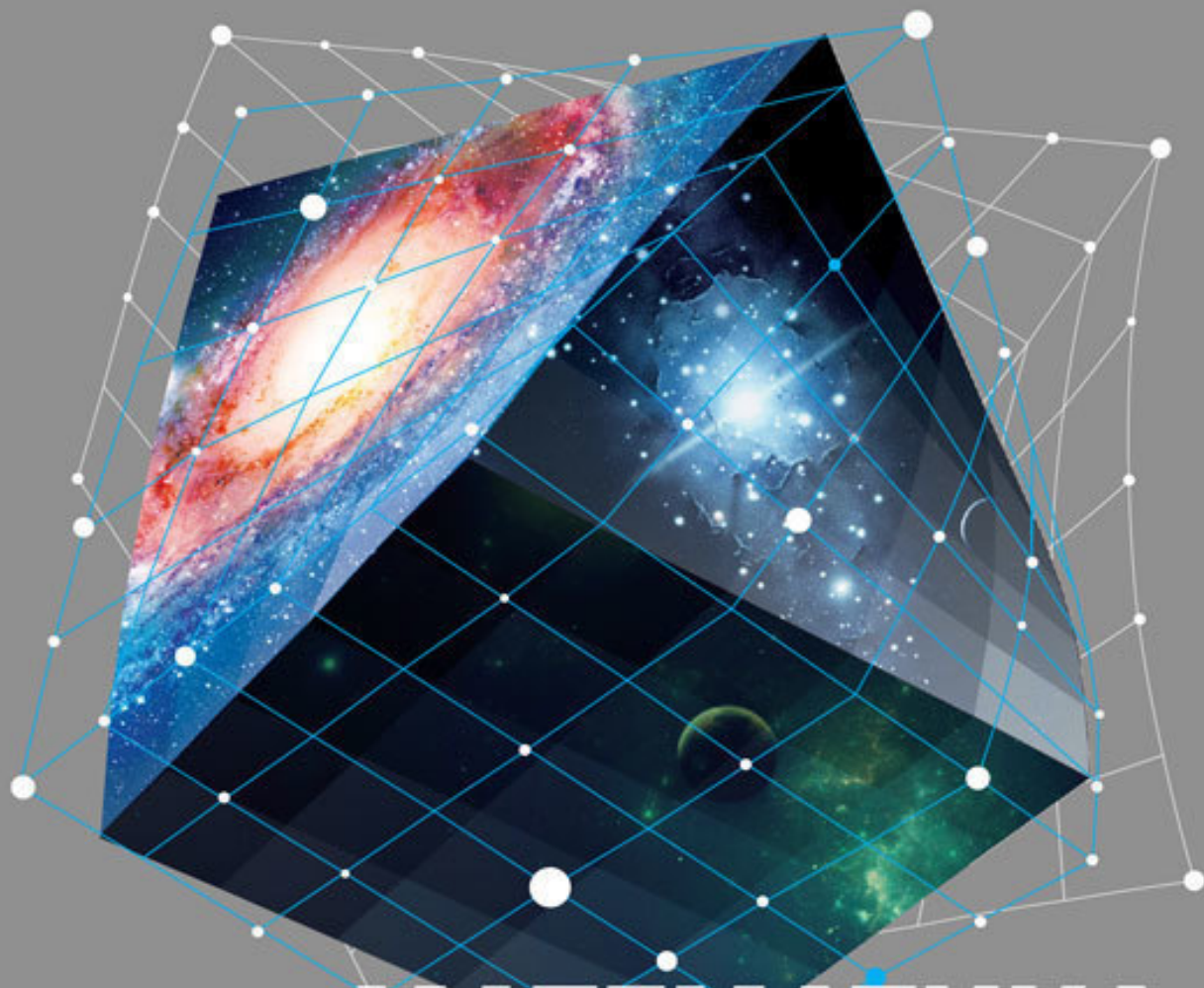


Иэн Стюарт



# МАТЕМАТИКА КОСМОСА

КАК  
СОВРЕМЕННАЯ НАУКА  
РАСШИФРОВЫВАЕТ  
ВСЕЛЕННУЮ

  
ТРАЕКТОРИЯ

  
АНО  
АЛЬФАНУМ КОМ-ФОРМ

Иэн Стюарт

**Математика космоса:  
Как современная наука  
расшифровывает Вселенную**

«Альпина Диджитал»

2016

**Стюарт И.**

Математика космоса: Как современная наука расшифровывает Вселенную / И. Стюарт — «Альпина Диджитал», 2016

ISBN 978-5-9614-5228-0

Как математические модели объясняют космос? Иэн Стюарт, лауреат нескольких премий за популяризацию науки, представляет захватывающее руководство по механике космоса в пределах от нашей Солнечной системы и до всей Вселенной. Он описывает архитектуру пространства и времени, темную материю и темную энергию, рассказывает, как сформировались галактики и почему взрываются звезды, как все началось и чем все это может закончиться. Он обсуждает параллельные вселенные, проблему тонкой настройки космоса, которая позволяет жить в нем, какие формы может принимать внеземная жизнь и с какой вероятностью наша земная может быть сметена ударом астероида. «Математика космоса» – это волнующий и захватывающий математический квест на деталях внутреннего мира астрономии и космологии. Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория».

ISBN 978-5-9614-5228-0

© Стюарт И., 2016  
© Альпина Диджитал, 2016

# Содержание

Пролог	8
1. Притяжение на расстоянии	17
2. Коллапс Солнечной туманности	30
Конец ознакомительного фрагмента.	34

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

ИЭН СТЮАРТ

# МАТЕМАТИКА КОСМОСА

КАК  
СОВРЕМЕННАЯ НАУКА  
РАСШИФРОВЫВАЕТ  
ВСЕЛЕННУЮ



ТРАЕКТОРИЯ



Переводчик *Н. Лисова*  
Научный редактор *А. Засов*  
Редактор *И. Лисов*  
Руководитель проекта *А. Тарасова*  
Дизайнер обложки *С. Хозин*  
Корректоры *Е. Аксенова, И. Панкова*  
Компьютерная верстка *М. Поташкин*

© Joat Enterprises, 2016

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

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



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

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

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

\* \* \*

## Пролог

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

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

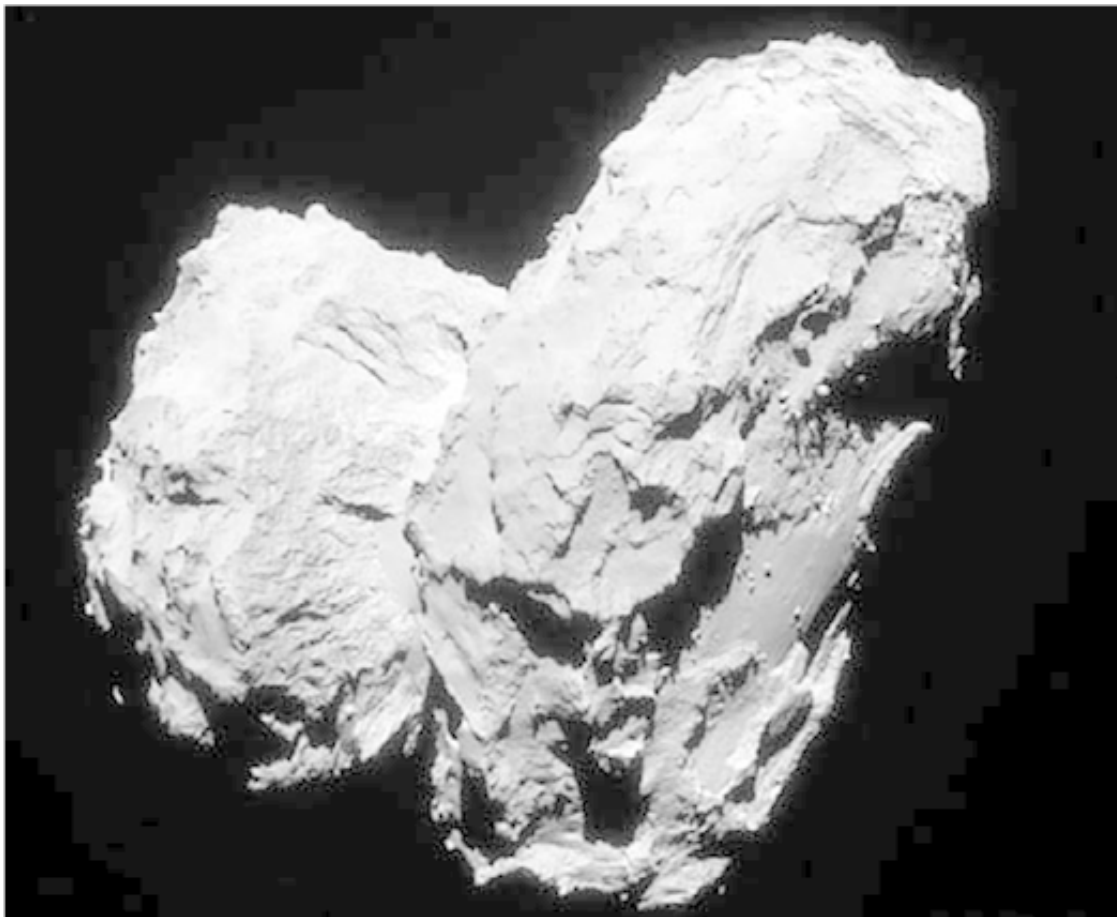
*Прочитовано в книге «Великие математики» Герберта Уэстрена Тернбулла*

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

Инопланетянин, поняв из происходящего, что посадка прошла не по запланированному сценарию, наверное, не слишком бы впечатлился, но на самом деле инженеры, стоявшие за двумя аппаратами, добились беспрецедентного успеха – посадили космический зонд на ядро кометы. Аппарат покрупнее назывался Rosetta, поменьше – Philae, а комета называлась 67P или кометой Чурюмова – Герасименко, по именам первооткрывателей. Эта программа была реализована Европейским космическим агентством, причем только сам полет продолжался более 10 лет. Несмотря на «отскок» при посадке, Philae достиг большей части научных целей и отправил на Землю важнейшие данные. Rosetta продолжала действовать по программе.

Зачем садиться на комету? Кометы очень интересны сами по себе, и все, что нам удастся о них выяснить, станет полезным прибавлением в копилку фундаментальной науки. На более практическом уровне можно отметить, что иногда в своем движении кометы приближаются к Земле, а любое столкновение вызвало бы громадные разрушения, так что было бы разумно выяснить заранее, из чего они сделаны. Орбиту твердого тела можно изменить при помощи ракеты или ядерного заряда, но мягкое губчатое тело при этом может рассыпаться, только усугубив проблему. Однако существует и третья причина. Материал комет восходит ко временам формирования Солнечной системы, так что эти тела могут снабдить нас полезными сведениями о том, как возник окружающий нас мир.

Астрономы считают, что кометные ядра представляют собой «грязные снежки» – лед, покрытый тонким слоем пыли. Philae сумел подтвердить эту гипотезу для кометы 67P, прежде чем его батареи разрядились и аппарат замолчал. Если Земля сформировалась на своем нынешнем месте, на том же расстоянии от Солнца, то воды на ней больше, чем должно было бы быть. Откуда взялась лишняя вода? Одна из привлекательных гипотез связана с бомбардировкой миллионами комет в период формирования Солнечной системы. Принесенный ими лед растаял, и родились океаны. Поразительно, но существует способ проверить эту теорию. Вода состоит из водорода и кислорода. Водород встречается в трех различных атомных формах, известных как изотопы; все они содержат одинаковое число протонов и электронов (по одному того и другого), но различаются по числу нейтронов. В обычном водороде нейтронов нет, в дейтерии он один, в тритии их два. Если океаны Земли обязаны своим возникновением кометам, то соотношение этих изотопов в океанах и в земной коре, породы которой тоже содержат в своем химическом составе большое количество воды, должно соответствовать их соотношению в кометах.



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

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

\* \* \*

Проект Rosetta лишь один пример того, как растут возможности человечества по отправке в космос автоматических аппаратов, предназначенных как для научных исследований, так и для повседневного использования. Эти новые технологии подстегивают наши научные амбиции. На сегодняшний день земные космические зонды посетили – и прислали нам оттуда фотографии – все планеты Солнечной системы и некоторые из менее крупных ее тел.

Процесс в этой области развивался стремительно. Американские астронавты высадились на Луне в 1969 году. Межпланетная станция Pioneer 10, запущенная в 1972-м, посетила Юпитер и продолжила свой путь за пределы Солнечной системы. Pioneer 11 был запущен следом за ним, в 1973 году, и прошел также вблизи Сатурна. В 1977 году Voyager 1 и Voyager 2 отправились исследовать эти миры и еще более отдаленные планеты Уран и Нептун. Другие межпланетные станции, запущенные разными странами или группами стран, посетили Меркурий, Венеру и Марс. Некоторые аппараты даже приземлялись на Венере и Марсе и отправляли домой цен-

ную информацию. В 2015 году, когда я пишу эту книгу, пять орбитальных зондов<sup>1</sup> и два поверхностных аппарата<sup>2</sup> исследуют Марс, Cassini находится на орбите вокруг Сатурна, станция Dawn обращается вокруг Цереры – бывшего астероида, не так давно произведенного в карликовые планеты, а станция New Horizons только что просвистела мимо Плутона и прислала нам поразительные снимки самой знаменитой карликовой планеты Солнечной системы. Данные этого аппарата помогут нам раскрыть тайны этого загадочного небесного тела и его пяти лун. Уже установлено, что Плутон чуть-чуть больше Эриды – самой дальней карликовой планеты, ранее считавшейся наиболее крупной из них. Плутон переквалифицировали в карликовую планету, чтобы не присваивать Эриде статуса полноценной планеты. А теперь мы обнаруживаем, что можно было не беспокоиться.

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

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

---

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

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

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



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

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

---

<sup>4</sup> «Эта глупая идея стрелять в Луну – пример того абсурда, до которого порочная специализация может довести ученых. Чтобы вырваться из земного притяжения, снаряду нужна скорость 7 миль в секунду. Тепловая энергия при такой скорости равна 15 180 калорий [на грамм]. Исходя из этого, такое предприятие представляется фундаментально невозможным» – Александер Бикертон, профессор химии, 1926 год «Я дерзну сказать, что путешествие на Луну силами человека не произойдет никогда, несмотря ни на какие научные достижения» – Ли де Форест, изобретатель электронной лампы, 1957 год. «Нет никакой надежды реализовать фантастическую идею достичь Луны, потому что барьеры, связанные с необходимостью освобождения от притяжения Земли, непреодолимы» – Форест Моултон, астроном, 1932 год.

<sup>5</sup> В редакционной статье 1920 года газета The New York Times писала: «Профессор Годдард... не знает отношения между действием и противодействием и не понимает необходимости иметь что-нибудь получше вакуума, от чего можно было бы оттолкнуться». Третий закон Ньютона гласит, что каждому действию соответствует равное и противоположно направленное противодействие. Противодействие следует из закона сохранения импульса, и никакой среды, от которой нужно было бы отталкиваться, не требуется. Такая среда только затрудняла бы движение, а не способствовала ему. Справедливости ради

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

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

\* \* \*

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

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

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

---

отметим, что в 1969 году, когда астронавты Apollo 11 были уже на пути к Луне, газета принесла извинения за эту ошибку. На каждую публикацию найдется равное и противоположное опровержение.

наоборот. Древние сумели также соединить наблюдения с геометрией с целью оценить размер Земли и расстояния до Луны и до Солнца.

Более глубокие астрономические выводы начали появляться около 1600 года, когда Иоганн Кеплер открыл в орбитах планет три математические закономерности – три «закона». В 1679 году Исаак Ньютон заново интерпретировал законы Кеплера и сформулировал грандиозную теорию, описывающую не только движение планет Солнечной системы, но и движение *любой* системы небесных тел. Это была теория всемирного тяготения Ньютона – одно из центральных открытий, изложенных в его эпохальном трактате «Математические начала натуральной философии» (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*). Закон всемирного тяготения описывает, как каждое тело во Вселенной притягивает любое другое тело.

Совместив теорию тяготения с другими математическими законами о движении тел, исследовать которые начал Галилей столетием раньше, Ньютон смог объяснить и предсказать множество небесных явлений. В более общем плане: он изменил наши представления о природном мире и произвел научную революцию, которая продолжает прокладывать нам путь и сегодня. Ньютон показал, что природные явления (часто) управляются математическими закономерностями и что, разобравшись в этих закономерностях, мы сможем лучше понять природу. Во времена Ньютона математические законы объясняли происходящее в небесах, но не имели сколько-нибудь существенных практических применений, за исключением, пожалуй, навигации.

\* \* \*

Все изменилось, когда в 1957 году СССР запустил на низкую околоземную орбиту первый спутник, дав тем самым стартовый сигнал и положив начало космической гонке. Если вы смотрите футбол по спутниковому телевидению, или оперу, или комедии, или научно-популярные фильмы, то вы пожинаете реальные плоды Ньютонových озарений.

Первоначально успехи Ньютона привели к тому, что ученые начали рассматривать Вселенную как часовой механизм, в котором все тела волшебным образом следуют по путям, проложенным для них на заре творения. Считалось, к примеру, что Солнечная система была создана практически в нынешнем своем состоянии и с самого начала времен те же планеты двигались по тем же почти круговым орбитам. Правда, все немного колебалось; прогресс в измерениях периода по астрономическим наблюдениям говорил об этом совершенно ясно. При этом бытовало мнение, что ничего никогда не менялось сколько-нибудь значительно, не меняется и меняться не будет во веки веков. В европейской религии представлялось немислимим, что самое совершенное творение Бога – Вселенная – в прошлом могло быть иным. Такое механистическое представление о регулярном и предсказуемом космосе господствовало на протяжении трех сотен лет.

Но теперь оно уже ушло в прошлое. Недавние достижения в математике, такие как теория хаоса, в сочетании с мощными современными компьютерами, способными щелкать нужные числа с беспрецедентной скоростью, как орешки, сильно изменили наши представления о космосе. «Часовая» модель Солнечной системы по-прежнему применима на коротких промежутках времени, а в астрономии и миллион лет обычно считается коротким промежутком. Но зато теперь выяснилось, что наше космическое хозяйство – это место, где миры и прежде мигрировали с одной орбиты на другую и впредь будут этим заниматься. Да, встречаются очень долгие периоды спокойного поведения, но время от времени они сменяются взрывами бешеной активности. Непреложные законы, породившие в свое время представление о часовом механизме Вселенной, способны вызывать и внезапные перемены, и в высшей степени эксцентричное поведение небесных тел.

Сценарии, которые сегодня рассматривают астрономы, часто весьма драматичны. В период формирования Солнечной системы, к примеру, целые миры сталкивались между собой с апокалиптическими последствиями. Когда-нибудь, в отдаленном будущем, это, вероятно, произойдет снова: существует небольшой шанс на то, что одна из двух планет – или Меркурий, или Венера – обречена, но мы не знаем, какая именно. Возможно, они обречены обе, а быть может, они могут и нас прихватить с собой. Одно такое столкновение, вероятно, привело к возникновению Луны. Звучит как сюжет из научной фантастики, правда? Так и есть... Но это фантастика наилучшего сорта, «твердая» научная фантастика, где за пределы современной науки, как правило, выходит только фантастическая идея, которая и дает толчок развитию сюжета. Помимо этого, нет никакой фантастической идеи, а есть только неожиданное математическое открытие.

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

Так часовой механизм уступил место фейерверку.

\* \* \*

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

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

Существует еще более крупный масштаб, соответствующий Вселенной как целому. Это владения космологии. Здесь источником рационального вдохновения для человечества служит почти исключительно математика. Мы можем наблюдать некоторые свойства Вселенной, но мы, безусловно, не можем ставить эксперименты со Вселенной как с целым. Математика помогает нам интерпретировать наблюдения и позволяет сравнивать альтернативные теории

по принципу «А что, если...?». Но даже здесь путь начинался ближе к дому. На смену Ньютонской физике пришла общая теория относительности Альберта Эйнштейна, в которой силу гравитационного притяжения заменила кривизна пространства-времени. Древние геометры и философы одобрили бы такой подход: динамику удалось свести к геометрии. Эйнштейн успел увидеть подтверждение своих теорий: в одном случае он обосновал известное, но непонятное ранее изменение орбиты Меркурия, а в другом дал верный прогноз искривления луча света вблизи Солнца, которое удалось пронаблюдать во время солнечного затмения 1919 года. Но он не мог знать, что его теория приведет к открытию самых, наверное, причудливых объектов во всей Вселенной: черных дыр, настолько массивных<sup>6</sup>, что даже свет не может убежать из их гравитационной ловушки.

Он определенно не сумел разглядеть еще одно потенциальное следствие своей теории – Большой взрыв. Это предположение о том, что Вселенная возникла из одной точки в какой-то момент в отдаленном прошлом, около 13,8 миллиарда лет назад, по современным оценкам, в процессе, напоминающем гигантский взрыв. Но взорвалось при этом само пространство-время, а не что-то другое в пространстве-времени. Первым свидетельством в пользу данной теории стало открытие расширения Вселенной Эдвином Хабблом. Обрати все процессы назад во времени – и увидишь, как все схлопнется в точку, а теперь запусти время заново в обычном направлении, чтобы вновь оказаться здесь и сейчас.

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

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

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

\* \* \*

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

---

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

мерностей позволяет нам не только объяснять космос, но и исследовать и осваивать космос, использовать его, а также защищаться от него.

Можно сказать, что величайшим прорывом стало само понимание того, что закономерности *существуют*. После этого вы уже знаете, что нужно искать, и, хотя установить точные ответы может оказаться непросто, решение задач становится делом техники. Для этого часто приходится изобретать совершенно новые математические идеи и концепции – я не утверждаю, что это просто или очевидно. Это долгая игра, она продолжается и сегодня.

Подход, который впервые применил Ньютон, положил начало стандартной процедуре. Как только новейшее открытие вылупляется из своей скорлупы, математики начинают размышлять, нельзя ли при помощи аналогичных идей решать другие задачи. Стремление к обобщению всего и вся имеет глубочайшие корни в математической душе. Бесплезно обвинять в этом Николая Бурбаки<sup>7</sup> и «новую математику»: эта традиция восходит еще к Евклиду и Пифагору. Из этого стремления родилась математическая физика. Современники Ньютона, в основном в континентальной Европе, применили эти принципы, которые дотянулись до космоса, к объяснению природы, тепла, звука, света, упругости, а позже еще электричества и магнетизма. И стало еще более очевидно:

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

Разумеется, все было не так просто.

---

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

## 1. Притяжение на расстоянии

*Макавити, Макавити, таинственный Макавити!*

*Законы наши соблюдать его вы не заставите.*

*Презрел он тяготения всемирного закон.*

*Томас Стернс Элиот «Учебник Старого Опоссума по котоведению» (Перевод С. Я. Маришака)*

### Почему предметы падают вниз?

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

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

Потребовалось озарение гения, чтобы понять, что земные объекты падают на Землю под действием той же самой причины, которая удерживает небесные объекты наверху. Ньютон, как широко известно, сравнил падающее яблоко с Луной и понял, что Луна остается наверху, потому что она, в отличие от яблока, движется еще и *вбок*<sup>8</sup>. На самом деле Луна непрерывно падает, но поверхность Земли уходит от нее с той же скоростью. Так что Луна может падать вечно, но при этом раз за разом огibtь Землю, так никогда на нее и не упав.

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

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

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

---

<sup>8</sup> В 1726 году Ньютон провел вечер в Лондоне за ужином с Уильямом Стакли. В документе, сохранившемся в архивах Королевского общества и изложенном старинным вычурным слогом, Стакли писал: «После обеда, поскольку погода стояла теплая, мы вышли в сад и сели пить чай в тени какой-то яблони; только я и он. В ходе беседы он, помимо прочего, рассказал мне, что ситуация в точности похожа на ту, в которой он был, когда мысль о гравитации впервые пришла ему в голову. Почему яблоко всегда падает перпендикулярно земле, подумал он... Почему не в сторону и не вверх, а всегда стремится к центру Земли? Очевидно, причина состоит в том, что Земля притягивает его. Вещество должно обладать какой-то притягивающей силой. И сумма притягивающей силы вещества Земли должна находиться в центре Земли, а не где-нибудь сбоку. Итак, падает ли яблоко перпендикулярно или по направлению к центру? Если вещество таким образом притягивает вещество, то это должно происходить пропорционально количеству. Следовательно, яблоко притягивает Землю, точно так же, как Земля притягивает яблоко». Другие источники тоже подтверждают, что Ньютон рассказывал эту историю, но все это, разумеется, не доказывает ее истинности. Ньютон мог специально ее придумать, чтобы проще было объяснять его идеи. Говорят, что яблоня, с которой упало пресловутое яблоко, сохранилась до сего дня – это яблоня сорта Flower of Kent в усадьбе Вулсторп-мэнор.

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

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

\* \* \*

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

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

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

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

Аристотель прав.

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

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

интуитивным представлениям, чем Галилеева и Ньютонова физика. В процессе эволюции наш мозг выработал внутреннюю модель движения, в которую уже встроено трение.

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

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

\* \* \*

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

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

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

В большинстве своем люди просто принимали окружающую их действительность такой, какая она есть, точно так же, как принимали существование рек, деревьев и гор и считали

небесные огоньки небесными огоньками. Но некоторые задавали вопросы: что представляют собой эти огоньки? Откуда они на небе? Как и почему они движутся? Почему одни огоньки движутся по правилам, а другие их нарушают?

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

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

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

\* \* \*

Следующую тысячу лет, а то и больше, Европа все свое внимание посвящала вопросам теологическим и философским, а представления о мире природы черпала в основном из трудов Аристотеля, созданных примерно за 350 лет до Рождества Христова. Вселенная считалась геоцентрической, и все в ней вращалось вокруг неподвижной Земли. Факел исследований в астрономии и математике переместился в арабский мир, в Индию и Китай. Однако с зарей итальянского Возрождения этот факел вновь был передан в Европу. После этого ведущие роли в развитии астрономического знания сыграли три гиганта науки: Галилей, Кеплер и Ньютон, а группа поддержки у них была поистине громадной.

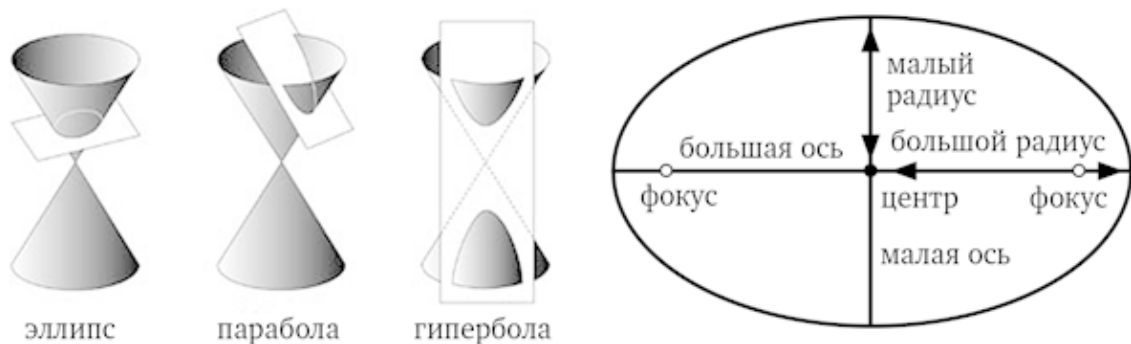
Галилей знаменит тем, что усовершенствовал телескоп и обнаружил с его помощью, что на Солнце есть пятна, у Юпитера есть (по крайней мере) четыре луны, Венера проходит такие же фазы, как Луна, а Сатурн выглядит как-то странно – позже странности его внешнего вида получили объяснения в виде системы колец. Полученные данные заставили его отвергнуть геоцентрическую теорию и принять соперничающую с ней гелиоцентрическую теорию Николая Коперника, в которой планеты и Земля вращаются вокруг Солнца; из-за этого у Галилея возникли проблемы с римско-католической церковью. Но он также сделал на первый взгляд более

скромное, но в конечном итоге более важное открытие: открыл математическую закономерность в движении таких объектов, как пушечные ядра. Здесь, на Земле, свободно движущееся тело либо ускоряется (при падении), либо замедляется (при подъеме) на величину, одинаковую за фиксированный, *небольшой* отрезок времени. Короче говоря, ускорение тела постоянно. Поскольку точных часов в его распоряжении не было, Галилей наблюдал эти эффекты, катая шары по слегка наклонным желобам.

Еще одна ключевая фигура того времени – Кеплер. Его учитель и начальник Тихо Браге в свое время провел очень точные измерения положения Марса. После смерти Тихо Кеплер унаследовал не только его положение придворного астронома при императоре Священной Римской империи Рудольфе II, но и продолжил наблюдения и занялся вычислением точной формы орбиты Марса. После 50 неудачных попыток он рассчитал, что орбита имеет форму эллипса, то есть овала, напоминающего слегка сплюснутую окружность. При этом Солнце находится в особой точке этого эллипса – в его фокусе.

Древнегреческие геометры знали эллипсы и определяли их как сечение конуса плоскостью. В зависимости от наклона плоскости относительно оси конуса «конические сечения» включают в себя окружности, эллипсы, параболы и гиперболы.

Когда планета движется по эллипсу, расстояние от нее до Солнца меняется. Приближаясь к Солнцу, планета ускоряется; удаляясь от Солнца, замедляется. Немного удивительно, что все эти эффекты в сумме умудряются создать орбиту в точности одинаковую по форме с обеих сторон. Кеплер этого не ожидал, и его долгое время преследовала мысль, что эллипс в ответе, должно быть, получился по ошибке.



Слева: конические сечения.

Справа: основные характеристики эллипса

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

ный и тонкий. Эксцентриситет окружности равен нулю, а для фиксированной длины большой полуоси он стремится к единице, по мере того как длина малой полуоси стремится к нулю<sup>9</sup>.

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

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

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

\* \* \*

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

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

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

центра. Эксцентриситет эллипса равен

$$\varepsilon = f/a = \sqrt{1 - b^2/a^2}.$$

значения. Ньютон доказал также обратное утверждение: из «закона обратных квадратов» следуют три закона Кеплера.

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

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

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

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

\* \* \*

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

можете решать уравнения движения при помощи красивых формул. И при помощи некрасивых, кстати говоря, тоже.

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

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

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

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

Откровенно говоря, все не *настолько* просто. Притом что ошибка на каждом шаге (вызванная тем, что мы считаем быстроту изменений постоянной, хотя на самом деле она успевает немного измениться) очень мала, шагов вам придется сделать ужасно много. При многократных операциях с маленькой ошибкой на каждом шагу результирующая ошибка не обязательно получится маленькой, но тщательно продуманные методы позволяют удерживать ошибки под контролем. Именно на это нацелена целая область математики, известная как числен-

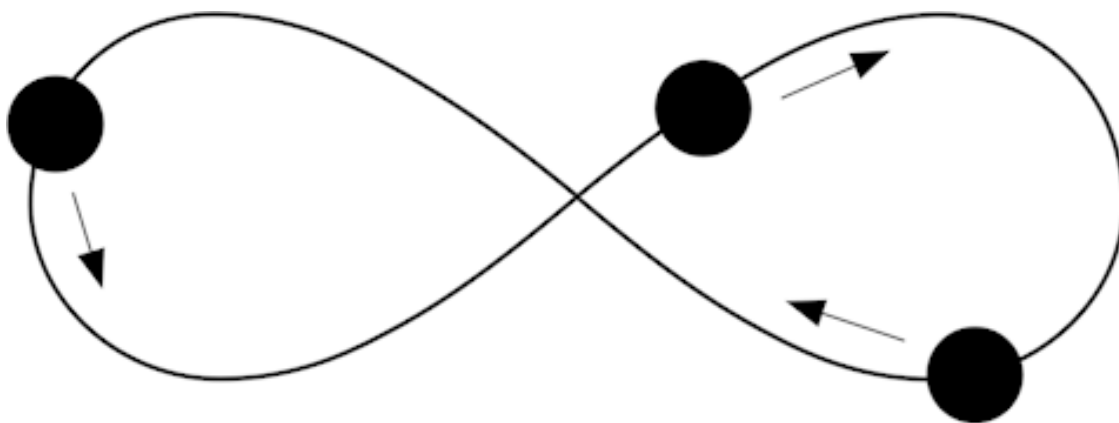
ный анализ. Удобно называть такие методы «моделированием», что отражает принципиальную роль в них компьютера. Важно понимать, что невозможно решить задачу, просто «засунув ее в компьютер». Кто-то должен запрограммировать машину, задать ей математические правила, которые обеспечат близость вычислительных результатов к реальности.

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

\* \* \*

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

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



Орбита для трех тел в форме восьмерки

Все эти орбиты существуют на плоскости, но есть уже и новый трехмерный вариант. В 2015 году Юджин Окс догадался, что необычные орбиты электронов в «ридберговских квази-молекулах», возможно, тоже существуют по законам Ньютоновой гравитации. Он показал, что в системах двойных звезд могут существовать планеты,двигающиеся от одной звезды к другой и обратно по спиральной орбите, обвивающей соединяющую эти звезды линию. В середине

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

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

\* \* \*

Следует отметить, что один из аспектов закона всемирного тяготения немало беспокоил великого автора; по существу, он беспокоил автора закона сильнее, чем большинство его последователей. Как известно, закон описывает силу, с которой одно тело действует на другое, но ничего не говорит о том, *как* эта сила работает. Закон просто постулирует загадочное «дальное действие». Когда Солнце притягивает Землю, Земля каким-то образом должна «знать», как далеко она находится от Солнца. Если бы, к примеру, оба объекта соединяла какая-то эластичная веревочка, то эта веревочка могла бы передавать воздействие; тогда величину силы определяли бы физические характеристики связи. Но между Солнцем и Землей нет никакой материальной связи, одно только пустое пространство. Как же Солнце узнает, с какой силой надо тянуть Землю, и как Земля узнает, с какой силой ее тянут?<sup>10</sup>

С практической точки зрения мы можем применять закон всемирного тяготения, не тревожась о том, посредством какого физического механизма сила передается от одного тела другому. Вообще говоря, все именно этим и занимаются. Однако некоторые ученые обладают отчетливой философской жилкой; самый яркий пример – Альберт Эйнштейн. Его специальная теория относительности, опубликованная в 1905 году, изменила представления физиков о пространстве, времени и веществе. Расширение этой теории в 1915 году до общей теории относительности изменило также их представления о гравитации – и, как бы между прочим, разрешило щекотливый вопрос о том, как сила может действовать на расстоянии. Для этого общая теория относительности, собственно говоря, избавилась от силы.

Эйнштейн вывел специальную теорию относительности из одного-единственного фундаментального принципа: скорость света<sup>11</sup> остается неизменной, даже если наблюдатель сам движется с постоянной скоростью. В Ньютоновой механике, если вы находитесь в открытом автомобиле и бросаете вперед по ходу движения мяч, то скорость мяча, измеренная неподвижным наблюдателем на обочине, будет равна скорости мяча по отношению к автомобилю *плюс* скорость автомобиля. Аналогично, если вы будете светить фонарем вперед по направлению движения, то скорость света, измеренная человеком на обочине, должна, по идее, равняться обычной скорости света *плюс* скорость автомобиля.

Экспериментальные данные и кое-какие мысленные эксперименты убедили Эйнштейна, что со светом все иначе. Наблюдаемая скорость света *одинакова* как для человека, светящего

---

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

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

фонарем вперед, так и для человека на обочине. Логические следствия из этого принципа, который, как мне всегда казалось, следовало бы назвать принципом *безотносительности*, поражают воображение. Ничто не может двигаться быстрее света<sup>12</sup>. По мере того как тело приближается к скорости света, оно сжимается в направлении движения, его масса увеличивается, а время для него течет все более медленно. При скорости, равной скорости света, – если бы такое было возможно – тело стало бы бесконечно тонким и бесконечно тяжелым, а время для него остановилось бы. Масса и энергия связаны между собой: энергия равна массе, умноженной на квадрат скорости света. Наконец, события, которые один наблюдатель видит происходящими одновременно, могут оказаться неодновременными для другого наблюдателя, который движется с постоянной скоростью относительно первого.

В Ньютоновой механике никаких таких странностей нет. Пространство есть пространство, а время есть время, и вместе им не сойтись. В специальной теории относительности пространство и время до некоторой степени взаимозаменяемы, причем степень этой взаимозаменяемости ограничивается скоростью света. Вместе пространство и время образуют единый пространственно-временной континуум. Несмотря на странные предсказания, специальная теория относительности получила признание как наиболее точная теория пространства и времени из всех, какие у нас имеются. Большая часть наиболее парадоксальных эффектов в ней проявляется лишь тогда, когда объекты движутся очень быстро; вот почему мы не замечаем их в повседневной жизни.

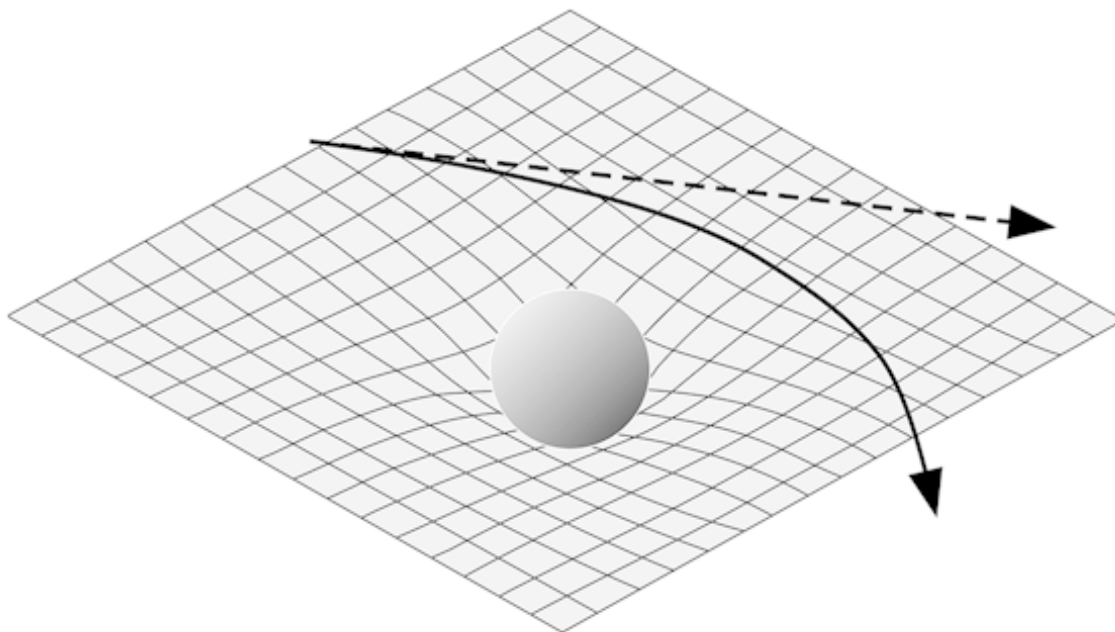
Самый очевидный недостающий ингредиент в этой теории – тяготение. Эйнштейн много лет пытался встроить силу тяготения в теорию относительности; отчасти его подталкивала к этому известная аномалия в орбите Меркурия<sup>13</sup>. Конечным результатом этих попыток стала общая теория относительности, распространившая выводы специальной теории относительности с «плоского» пространственно-временного континуума на «искривленное». Мы можем приблизительно представить себе, о чем идет речь, если сократим пространство до двух измерений вместо трех. При этом пространство станет плоскостью, а специальная теория относительности будет описывать движение частиц на этой плоскости. В отсутствие гравитации они движутся по прямым линиям. Как указывал Евклид, прямая есть кратчайшее расстояние между двумя точками. Чтобы ввести в картину гравитацию, поместим на плоскость звезду. Частицы теперь уже не будут двигаться по прямым линиям; вместо этого они начнут огибать звезду по криволинейным траекториям, таким как эллипсы.

В Ньютоновой физике эти траектории искривлены потому, что некая сила отклоняет частицу с прямого пути. В общей теории относительности аналогичный эффект достигается искривлением пространства-времени. Предположим, что звезда искажает форму плоскости, создавая в ней круглую впадину – «гравитационный колодец» со звездой на дне, и будем считать, что частицы всегда движутся по кратчайшему пути, называемому геодезической линией. Поскольку пространственно-временной континуум искривлен, кратчайшим расстоянием в нем перестает быть прямая. К примеру, частица может угодить во впадину и начать описывать круги по стенке на постоянной высоте, как планета на замкнутой орбите.

---

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

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



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

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

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

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

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

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

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

\* \* \*

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

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

## 2. Коллапс Солнечной туманности

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

*Эдвард Смит. Трипланетие*

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

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

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

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

\* \* \*

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

Рене Декарт известен больше своей философией – «Я мыслю, следовательно, существую» – и математическими достижениями, в первую очередь координатной геометрией, при помощи которой можно перевести геометрию на язык алгебры и наоборот. Но в его время философией называли многие области интеллектуальной деятельности, включая и физику, которая именовалась *натуральной* философией. В книге *Le Monde* («Мир», 1664 год<sup>17</sup>) Декарт разобрал в том числе и вопрос происхождения Солнечной системы. Он утверждал, что перво-

---

<sup>16</sup> Древнейшие минералы, обнаруженные в метеоритах – современных остатках твердого вещества, сформировавшегося в досолнечной туманности, имеют возраст 4,5682 млрд лет.

<sup>17</sup> Книгу эту Декарт написал в 1632–1633 годах, но не спешил публиковать, опасаясь инквизиции. В результате она вышла только после смерти автора.

начально Вселенная была бесформенным скоплением частиц, совершающих круговые движения, подобно водоворотам. Один необычайно крупный вихрь закрутился еще более плотно и в конечном итоге уплотнился, сформировав Солнце, а из более мелких вихрей, окружавших его, сформировались планеты.

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

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

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

Представьте себе движущийся мяч. Его скорость говорит нам, насколько быстро он движется: скажем, 80 километров в час. Механика сосредоточивается на более важной величине – той же скорости, но в векторном варианте; она сообщает нам не только, как быстро движется объект, но и в каком направлении он движется. Если идеально упругий мяч стукнется в стенку под прямым углом и отскочит, то по величине его скорость останется неизменной, а вот направление ее поменяется на обратное. Импульс мяча равен его массе, умноженной на скорость, так что импульс тоже характеристика векторная и имеет величину и направление. Если два тела – легкое и тяжелое – движутся с одинаковой скоростью в одном и том же направлении, то у тяжелого тела импульс больше, чем у легкого. Физически это означает, что, если вы хотите изменить характер движения тела, вам потребуется приложить большую силу. Вы можете без труда отбить мячик для пинг-понга, летящий со скоростью 50 километров в час, но никому в здравом уме не придет в голову попробовать проделать то же с грузовиком.

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

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

вмешательства. Именно так тело может приобрести импульс в самом начале: оно получает толчок откуда-то извне.

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

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

\* \* \*

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

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

Это хорошая новость для теории Солнечной туманности, потому что все планеты Солнечной системы имеют орбиты, лежащие очень близко к одной и той же плоскости – эклиптике, – и обращаются вокруг Солнца в одном направлении. Именно поэтому астрономы в давние времена догадались, что и Солнце, и планеты сконденсировались из газового облака после того, как это облако сжалось с образованием протопланетного диска.

К несчастью, для этой «небулярной гипотезы» есть и плохие новости: 99 % момента импульса Солнечной системы сосредоточено в планетах, тогда как на долю Солнца приходится

---

<sup>18</sup> Строгое определение дается через векторы.

лишь 1 %. Хотя Солнце содержит в себе практически всю массу Солнечной системы, вращается оно довольно медленно, а его частицы располагаются относительно близко к центральной оси. Планеты, хотя уступают Солнцу по массе, находятся гораздо дальше и движутся гораздо быстрее – и потому берут на себя почти весь момент импульса.

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

\* \* \*

Из этой дилеммы был быстро найден один потенциальный выход. Предположим, что Солнце сформировалось первым. Тогда оно действительно поглотило почти весь момент импульса газового облака – ведь оно поглотило и почти весь составлявший его газ. А позже оно могло приобрести и планеты, *захватив*

## **Конец ознакомительного фрагмента.**

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.